

기후변화에 대응하는 국가 환경안보 체제 구축

경제·인문사회연구회 기획 협동연구총서(연구역량국제화사업) 14-45-01



기후환경정책연구
2014
08

지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

한국환경정책·평가연구원 김연주 외



경제·인문사회연구회

NATIONAL RESEARCH COUNCIL FOR ECONOMICS, HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES



한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

연구진

연구책임자 김연주 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
참여연구원 김익재 (한국환경정책·평가연구원 연구위원, The World Bank)
안중호 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
한대호 (한국환경정책·평가연구원 전문연구원)
공인혜 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
협력연구원 Marcus Wijnen (The World Bank)

산학연정 연구자문위원

강부식 (단국대학교 공과대학 토목환경공학과 교수)
윤동근 (울산과학기술대학교 도시환경공학부 교수)
임 업 (연세대학교 공과대학 도시공학과 교수)
황석태 (환경부 수도정책과 과장)
김동현 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
김중호 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
이병국 (한국환경정책·평가연구원 부원장)
문현주 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)

© 2014 한국환경정책·평가연구원

발행인	박광국
발행처	한국환경정책·평가연구원 세종특별자치시 시청대로 370 (우편번호) 339-007 전화 044) 415-7777 팩스 044) 415-7799 http://www.kei.re.kr
인쇄	2014년 12월 26일
발행	2014년 12월 31일
출판등록	제17-254호
ISBN	978-89-8464-902-6 93530

값 13,000원

경제·인문사회연구회 협동연구총서
 (연구역량 국제화사업)
 “지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구(I)”

1. 협동연구총서 시리즈

협동연구총서 일련번호	연구보고서명	연구기관
14-45-01	지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)	한국환경정책·평가연구원

2. 참여연구진

연구기관		연구책임자	참여연구진
주관 연구 기관	한국환경정책 · 평가연구원	김연주 부연구위원 (총괄책임자)	김익재 연구위원 (The World Bank 파견) 안종호 연구위원 한대호 전문연구원 공인혜 연구원
협력 연구 기관	The World Bank	Marcus Wijnen	Charles Vörösmarty (City College of New York) Pamela Green (City College of New York)



제 출 문

경제·인문사회연구회 이사장 귀하

본 보고서를 “지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)” 의 최종보고서로 제출합니다.

2014년 12월
한국환경정책·평가연구원
원장 박광국

서 언

물은 지구에서 생명체를 태동하게 한 물질이자, 인간의 생존과 생태계의 유지를 위한 필수적인 자원임은 자명한 사실입니다. 하지만 최근 전 세계적인 인구 증가와 기후변화로 인해 수자원이 미래 세대까지 지속적으로 사용가능한가에 대한 의문이 꾸준히 제기되고 있습니다. 사실 미래 뿐 아니라 현재에도 전 지구적으로 물로 인한 환경 분쟁은 꾸준히 보고되고 있으며 이로 인한 물 안보(water security)를 확보하는 것은 앞으로 더욱 중요해질 것입니다.

지속가능한 물이용에는 물의 수요와 공급뿐 아니라 적정 수질 유지, 건전한 유역환경 보전, 사회경제적 대응능력 등 수많은 요인들이 복잡하게 얽혀 있어, 정책결정을 위한 평가를 수행하기 위해서는 복잡한 요인을 대표할 수 있는 핵심 지표를 선정·평가하는 연구가 필요합니다. 본 연구는 우리나라를 대상으로 지속가능한 물이용을 저해는 지표와 이를 보완하는 지표를 선정하여 평가함으로써 물이용의 지속가능성을 평가하고 진단하고자 합니다. 본 연구를 통해 우리나라의 수자원 이용현황의 위협요인과 가능성을 모색하는 기회가 되기를 바랍니다.

본 연구를 맡아 수행한 한국환경정책·평가연구원의 김연주 박사, 안종호 박사, 한대호 전문연구원, 공인혜 연구원, 그리고 세계은행 파견 중에도 연구발전에 기여해주신 김익재 연구위원께 감사를 표합니다. 아울러 바쁜 와중에도 자문과 조언을 통해 연구에 도움을 주신 연세대학교 임업교수와 단국대학교 강부식 교수, 울산과학기술대학교 윤동근 교수, 환경부 황석태 과장께 깊은 감사를 표합니다. 또한 내부지문위원으로 수고한 김종호, 김동현, 이병국, 문현주 박사께도 고마움을 전합니다.

2014년 12월

한국환경정책·평가연구원

원장 박 광 국



국문 요약

물은 인간이 살아가는 데 가장 중요하고 필수적인 조건이다. 따라서 사람들은 원활한 물이용을 목적으로 수자원 가용성을 늘리기 위해, 다양한 형태로 수자원 인프라를 개발해 왔다. 하지만 이는 필연적으로 유역환경 및 생태계의 질적 저하를 초래하였고 유역환경의 파괴는 유역의 수자원 재생능력을 저하시켰다. 게다가 최근에는 기후변화로 인해 예측이 어려운 기상환경과 맞닥뜨리면서, 지속적인 물이용 가능성이 위협받고 있다. 이처럼 최근 물이용 환경과 관련된 다양한 위기를 경험하면서, 지속가능한 물 관리를 향한 정책적 개선이 요구되고 있다.

지속가능한 물이용이란, 지금까지 물의 이용이나 물 환경에 대한 투자가 인간의 물이용을 위한 인프라 개발에 초점이 맞춰져 있었던 점에서, 인프라를 통한 수자원 가용량이나 수질 개선뿐 아니라 생태계를 포함한 유역환경의 자정작용을 극대화할 수 있는 자연적 관리, 효율적인 물환경 관리를 위한 사회적 형평성 달성 및 참여 증진 등을 수반하는 개념이다.

본 연구에서는 지속가능한 물이용 지표를 개발하여, 우리나라 물이용 현황을 진단·평가하고 이의 미래 전망을 제시하며 지표 개발 결과의 정책적 활용방안을 찾고자 한다. 총 2차년 연구로 올해 1차년도에는 지표의 개발에 초점을 맞추고자 하였다. 이에 지속가능한 물이용의 개념 및 지표 연구에 대한 집중적인 검토를 수행하는 한편, 지속가능한 물이용 목적을 달성하기 위한 평가로서 수자원의 양질뿐 아니라 유역환경 및 경제·사회적 역량 현황을 포함하는 30개의 지표를 이용하여 우리나라 117개 중권역을 대상으로 평가를 수행하였다. 지표는 각각 지속가능한 수자원을 위협하는 압력(Pressure) 요인과 지속적인 수자원을 보장할 수 있는 반응(Response) 요인으로 양분되어 구성되었으며, 각 지표를 효과적으로 나타낼 수 있는 자료 및 방법을 이용하여 정량화를 수행한 뒤 표준화(normalization)를 거쳐 일관된 범위를 통해 나타내었다. 이후 지표는 압력지수와 반응지수로 통합하는 관계식을 통해 최종 지속가능성 지수를 도출하였다. 이후 지표 및 지수

결과의 신뢰성을 검증하고자, 다양한 형태의 민감도 분석을 포함하는 시험검증을 실시하였으며, 이를 바탕으로 향후 본 검증을 수행하고자 한다. 이를 바탕으로 지표의 보완 및 수정을 통해 지표 견고성을 보완할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 최종적으로 중권역 및 대권역을 대상으로 지속가능한 물이용 지표 및 지수 결과에 대해 논의함으로써 각 유역 관리 측면의 정책적 제언을 위한 자료로서의 활용가능성을 제안하고자 하였다.

각 중권역별 압력지수는 우리나라 서해안에 위치한 중권역을 중심으로 높게 나타났고, 고지대 등지에서 낮게 나타났다. 반응지수는 강의 상류지역의 유역 및 대도시가 위치한 유역을 중심으로 높게 나타났다. 이를 통합한 지속가능한 물이용 지수는 수자원 압력과 원활한 물이용을 위한 대처 역량 사이의 상호관계를 고려한 평가로서, 서해안 하류 유역 및 도서지역에서 낮은 지수값을, 강원도 산간지역을 중심으로 높은 지수값을 나타내었다.

또한 본 연구에서 구축한 자료를 활용하여 세계은행(World Bank)과 공동으로 국제협동연구를 진행하였다. 전 지구 지속가능 물이용 지표 개발의 기초 결과물에 대해 우리나라를 대상으로 검증을 수행하였다. 이는 전 지구 기반 지표 자료 및 지수를 우리나라 범위에서 구축한 고해상도 자료와 비교하는 것에 초점을 맞추고 있다. 이를 통해 전 지구적 자료를 활용하는 지표 연구의 유용성 및 문제점을 확인함으로써 전 지구 지표 개발의 개선방안 및 향후 진행방향을 모색할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 지속가능성, 유역관리, 지표연구, 중권역 평가, 물 안보

차례



제1장. 서론	1
1. 연구의 배경	2
2. 연구의 목적	4
제2장. 지속가능한 물이용과 지표의 개념	7
1. 지속가능한 물이용	8
가. 지속가능성	8
나. 지속가능한 물이용	10
2. 지속가능한 물이용 지표	18
가. 지표연구의 정의 및 구성	18
나. 지표 국외 연구 사례	22
다. 지표 국내 연구 사례	40
제3장. 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안	53
1. 지표 구성	54
2. 압력 지표	59
가. 인간 물 요구량	61
나. 수생태계 건강성	63
다. 수질 요구량	66
라. 수자원 재생능력	69
마. 물관리 형평성	71
3. 반응 지표	72
가. 인간 물 요구량	73
나. 수생태계 건강성	74

다. 수질 요구량	75
라. 수자원 재생능력	76
마. 물관리 형평성	77
4. 통합 지수 산정	79
가. 지표 표준화	79
나. 가중치 산정	81
다. 지표 통합	81

제4장. 지속가능한 물이용을 위한 지표 자료 구축83

1. 지속가능한 물이용의 압력 지표	84
가. 인간 물 요구량	88
나. 수생태계 건강성	94
다. 수질 요구량	105
라. 수자원 재생능력	115
마. 물관리 형평성	123
2. 지속가능한 물이용의 반응 지표	125
가. 인간 물 요구량	125
나. 수생태계 건강성	131
다. 수질 요구량	135
라. 수자원 재생능력	137
마. 물관리 형평성	141

제5장. 지속가능한 물이용의 평가 및 시험검증147

1. 가중치 산정	148
가. 압력 지표 가중치	148
나. 반응 지표 가중치	153
2. 물이용의 지속가능성 지수 평가	157

가. 중권역별 압력지수	157
나. 중권역별 반응지수	168
다. 중권역별 지속가능한 물이용 지수	168
라. 대권역별 지속가능한 물이용 지수	171
3. 결과의 시험 검증	181
가. 지표 자료의 질 검토	182
나. 가중치 적용에 따른 민감도 분석	185
다. 지표의 통계적 일관성 분석	190
라. 기존 지수와의 비교 방안	194
4. 소결	197
가. 지표 결과 해석의 한계점	197
나. 향후 검증 및 보완 방향	198

제6장. 전 지구 물 지표의 우리나라 대상 평가 및 검증199

1. 연구배경 및 목적	200
2. 연구 방법	201
가. 자료 검토	201
나. 평가방법	205
다. 민감도 분석	207
3. 평가 결과	208
가. 지표별 비교	208
나. 지수별 비교	227
4. 소결	235

제7장. 결론 및 향후 과제237

1. 결론	238
2. 향후 과제	243

참고문헌	245
부록	255
부록1. 가중치 설정을 위한 설문조사 양식 및 결과	255
부록2. Vörösmarty et al.(2010)의 구조 및 지표구성	274
부록3. 유역별 오염원과 오염부하량 산정	290
부록4. 영산·섬진강 권역의 유출량 및 오염부하량 시험검증	306
부록5. KEI/NRCS-World Bank 국제공동워크숍	339
Abstract	343



표 차례

표 2-1. 물이용의 지속가능성 평가를 위한 카테고리	16
표 2-2. 기후변동성지수의 구성요소 및 변수	24
표 2-3. ESI(Environmental Sustainability Index)의 지표 및 변수 중 수자원 관련 항목	25
표 2-4. Falkenmark(1989)의 물스트레스 지수	29
표 2-5. 세계 물 평가를 위한 프레임워크	31
표 2-6. 영국 수자원산업 정책 의사결정을 위한 지속가능성 평가지표	34
표 2-7. Vörösmarty et al.(2010)의 지표항목	36
표 2-8. 유역 지속가능성 지표(Watershed Sustainability Index) 구성요소	38
표 2-9. 국가지속가능발전지표 내 물이용 관련 변수	40
표 2-10. 홍수 위험도	42
표 2-11. 하천환경 평가지표	43
표 2-12. 물 안보를 평가하기 위한 지표	43
표 2-13. 지속가능한 수자원 개발과 관리 평가를 위한 지표	44
표 2-14. 수자원 지속성 지수	46
표 2-15. 이수분야 수자원 정책지표	47
표 2-16. 국가 수자원 관리와 관련된 지표들의 분류	48
표 2-17. 통합수자원평가를 위한 지수 개발	50
표 2-18. 이수 관련 기후변화 취약성 산정을 위한 대응변수	51
표 3-1. 본 연구의 압력 지표	59
표 3-2. 본 연구의 반응지표	72
표 3-3. 지표별 표준화 방법	80
표 4-1. 압력 지표 및 자료 출처	85
표 4-2. 반응 지표 및 자료 출처	87
표 4-3. 강물나이 계산법(River water aging)	94

표 4-4. 주요 가축의 몸집 계수	119
표 5-1. 압력 지표의 삼각퍼지수	149
표 5-2. 반응 지표의 가중치	153
표 5-3. 인간 물 요구량 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역	157
표 5-4. 수생태계 건강성 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역	159
표 5-5. 수질 요구량 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역	161
표 5-6. 수자원 재생능력 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역	164
표 5-7. 물관리 형평성 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역	166
표 5-9. 지표 간 상관성 분석	192
표 5-10. 지표의 항목지수 기여도 분석	193
표 5-11. 항목지수 간 상관성 분석	193
표 5-12. 항목지수와 지속가능한 물이용 지수 간의 상관성 분석	194
표 5-13. 대분류(주제)별 검증 지수 예시	196
표 6-1. Vörösmarty et al.(2010)의 자료 및 평가방법	201
표 6-2. 국제협력연구를 위한 주요 데이터 비교	204
표 6-3. 비교연구를 위한 가중치 재조정 결과	205



그림 차례

그림 1-1. 연구의 흐름(1,2차년도)	5
그림 1-2. 1차년도 연구진행 체계	6
그림 2-1. EPI(Environmental Performance Index) 지표	28
그림 2-2. Vörösmarty et al.(2010)의 연구 체계	35
그림 3-1. 본 연구의 지표 구조	54
그림 3-2. 대분류 카테고리의 구성	56
그림 3-3. 스트레스와 반응지표의 대분류 카테고리	58
그림 4-1. 대권역 및 중권역 단위	84
그림 4-2. 소모성 물 사용량(원단위 및 표준화)	89
그림 4-3. 인간 물 스트레스(원자료 및 표준화)	91
그림 4-4. 농업 물 스트레스(원자료 및 표준화)	93
그림 4-5. 댐 저수량(원자료 및 표준화)	95
그림 4-6. 댐 밀도(원자료 및 표준화)	97
그림 4-7. 하천의 연속성 단절(원자료 및 표준화)	99
그림 4-8. 외래어종 수(원자료 및 표준화)	101
그림 4-9. 외래어종 비율(원자료 및 표준화)	102
그림 4-10. 어획 및 양식압력(원자료 및 표준화)	104
그림 4-11. 질소 부하(원자료 및 표준화)	106
그림 4-12. 인 부하(원자료 및 표준화)	108
그림 4-13. 농약 오염(원자료 및 표준화)	110
그림 4-14. 토사 유출량(원자료 및 표준화)	112
그림 4-15. 유기물 부하(원자료 및 표준화)	114
그림 4-16. 경작지 개발지역(원자료 및 표준화)	116
그림 4-17. 불투수층 개발지역(원자료 및 표준화)	118

그림 4-18. 가축 밀도(원자료 및 표준화)	120
그림 4-19. 습지 개간율(원자료 및 표준화)	122
그림 4-20. 소득 스트레스(원자료 및 표준화)	124
그림 4-21. 물이용 인프라(원자료 및 표준화)	126
그림 4-22. 적정 물이용 수준(원자료 및 표준화)	128
그림 4-23. 하천 접근성(원자료 및 표준화)	130
그림 4-24. 수생태 보호지역(원자료 및 표준화)	132
그림 4-25. 육상생태 보호지역(원자료 및 표준화)	134
그림 4-26. 위생시설(원자료 및 표준화)	136
그림 4-27. 물 재이용량(원자료 및 표준화)	138
그림 4-28. 대체수원 잠재량(원자료 및 표준화)	140
그림 4-29. 수도 접근성(원자료 및 표준화)	142
그림 4-30. 수자원 투자비용(원자료 및 표준화)	144
그림 4-31. 수자원 거버넌스(원자료 및 표준화)	146
그림 5-1. 압력 부문 대분류 카테고리의 삼각퍼지수	150
그림 5-2. 수생태계 건강성 하위 압력지표의 삼각퍼지수	150
그림 5-3. 인간 물 요구량 하위 압력지표의 삼각퍼지수	151
그림 5-4. 수질 요구량 하위 압력지표의 삼각퍼지수	152
그림 5-5. 수자원 재생능력 하위 압력지표의 삼각퍼지수	152
그림 5-6. 반응 부문 대분류 카테고리의 삼각퍼지수	154
그림 5-7. 인간 물 요구량 하위 반응지표의 삼각퍼지수	154
그림 5-8. 수생태계 건강성 하위 반응지표의 삼각퍼지수	155
그림 5-9. 수자원재생능력 하위 반응지표의 삼각퍼지수	155
그림 5-10. 물관리형평성 하위 반응지표의 삼각퍼지수	156
그림 5-11. 인간 물 요구량 압력지수	158
그림 5-12. 수생태계 건강성 압력지수	160

그림 5-13. 수질 요구량 압력지수	162
그림 5-14. 수자원 재생능력 압력지수	163
그림 5-15. 물관리 형평성 압력지수	165
그림 5-16. 지속가능한 물이용 압력지수	167
그림 5-17. 지속가능한 물이용 반응지수	169
그림 5-18. 최종 지속가능한 물이용 지수	170
그림 5-19. 대권역별 인간 물 요구량	171
그림 5-20. 대권역별 수생태계 건강성	172
그림 5-21. 대권역별 수질 요구량	173
그림 5-22. 대권역별 수자원 재생능력	174
그림 5-23. 대권역별 물관리 형평성	175
그림 5-24. 한강 대권역 압력 및 반응 지수	176
그림 5-25. 낙동강 대권역 압력 및 반응 지수	177
그림 5-26. 금강 대권역 압력 및 반응 지수	178
그림 5-27. 섬진강 대권역 압력 및 반응 지수	179
그림 5-28. 영산강 대권역 압력 및 반응 지수	179
그림 5-29. 대권역별 지속가능한 물이용 지수	180
그림 5-30. 섬진강, 영산강 중권역 내 차수에 따른 유출량 비교	185
그림 5-31. 인간 물 요구량 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포	186
그림 5-32. 수생태계 건강성 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포	187
그림 5-33. 수질 요구량 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포	187
그림 5-34. 수자원 재생능력 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포	188
그림 5-35. 물관리 형평성 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포	188
그림 5-36. 압력 지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포	189
그림 5-37. 반응 지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포	189
그림 5-38. 지속가능한 물이용 지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포	190

그림 6-1 국제협동연구 추진체계	200
그림 6-2. 농경지 지표의 비교연구 결과	210
그림 6-3. 가축밀도 지표의 비교연구 결과	212
그림 6-4. 습지단절 지표의 비교연구 결과	213
그림 6-5. 질소 부하량 지표의 비교연구 결과	214
그림 6-6. 인 부하량 지표의 비교연구 결과	215
그림 6-7. 농약 부하량 지표의 비교연구 결과	216
그림 6-8. 토사 부하량 지표의 비교연구 결과	217
그림 6-9. 유기물 부하량 지표의 비교연구 결과	218
그림 6-10. 댐 밀도 지표의 비교연구 결과	219
그림 6-11. 하천의 연속성 단절 지표의 비교연구 결과	220
그림 6-12. 소모적 물 손실 지표의 비교연구 결과	221
그림 6-13. 인간 물 스트레스 지표의 비교연구 결과	222
그림 6-14. 농업 물 스트레스 지표의 비교연구 결과	223
그림 6-15. 물흐름 변형 지표의 비교연구 결과	224
그림 6-16. 외래어종 비율 지표의 비교연구 결과	225
그림 6-17. 양식업 압력 지표의 비교연구 결과	226
그림 6-18. 유역교란(catchment disturbance) 지수의 비교연구 결과	228
그림 6-19. 수질 오염(pollution) 지수의 비교연구 결과	229
그림 6-20. 수자원 개발(water resource development) 지수의 비교연구 결과	231
그림 6-21. 생물 요인(biotic factor) 지수의 비교연구 결과	232
그림 6-22. 최종 인간 물 안보(human water security) 지수의 비교연구 결과	234
그림 7-1. 2차년도 과제 계획안	243



제1장

서론

1. 연구의 배경

물은 자연자원 가운데서도 인간을 비롯한 생물계의 생존에 가장 주요하고 필수적인 자원이다(UNESCO, 2009). 하지만 증가하는 인구, 유역을 구성하는 토지피복의 변화, 도시 팽창, 광범위하고 집중적인 담수자원 이용은 지구상의 수자원을 위협하고 있으며, 인간 활동으로 인한 탄소배출에 기인한 기후변화 또한 수자원 위협을 가중하는 원인이 되고 있다(Hoff, 2009; Vörösmarty et al., 2010). 따라서 현재 세계의 수자원 시스템은 지속가능하지 않은 상태라고 할 수 있다(Oki and Kanae, 2006).

지속가능성은 1972년 로마클럽에 의해 발간된 성장의 한계(The Limits to Growth)라는 보고서에서 처음 언급된 이후 지속가능한 발전(Sustainable Development)이라는 개념으로 이어지면서, 1987년 브룬트랜드 보고서 우리공동의 미래(Our Common Future), 1992년 브라질 리우데자네이루에서 열린 리우회의 및 어젠다21(Agenda 21) 등 국제적인 공동의 목표 수립에 핵심적인 정책이념으로 자리잡게 된다. 특히 국제사회는 어젠다21에서 언급한 목표들을 실천에 옮기기 위해 ‘지속가능한 발전을 위한 지표’를 만들 것을 합의했고, 이 이후로 여러 가지 분야에서의 지속가능성을 평가하기 위한 지표 연구가 대중화되어 많은 정부와 기관, 연구자 등이 지표 개발과 테스트를 수행하였다(Bell and Morse, 2008). 여기서 지표(Indicator)는 지적측정·결정하기 위한 것이라는 뜻을 가진 라틴어 ‘indicare’에서 어원을 찾을 수 있는데, 어떤 현상이나 변화를 대표적으로 나타낼 수 있는 요소로서 전체를 파악하는 데 도움을 줄 수 있는 요약된 정보를 말한다. 또한 Bell and Morse(2008)는 수많은 지표 가운데서도 ‘지속가능성 지표’는 학계나 전문가의 개념보다도 대중의 활용도에 초점을 맞춰야 한다고 주장하였다.

지속가능한 물이용(또는 수자원이용)이라는 개념 및 관련 지표 연구는 여러 연구자에 의해 다양하게 진행되어왔다. 가장 대표적으로 국제사회의 지속가능성 개념의 목표를 명시한 새천년개발목표(Millennium Development Goals, MDGs), 지속가능개발목표(Sustainable Development Goals, SDGs) 이하, 국제적 지속가능성 평가 지표는 1992년 리우회의, 2002년 요하네스버그회의 등 대규모 국제회의에서 지속가능성을 평가할 지표의 필요성을 주장하게 되면서 만들어진 환경지속

성지수(Environmental Sustainability Index, ESI) 및 환경성과지수(Environmental Performance Index, EPI) 등이 있다. 환경지속성지수에서 광범위한 항목을 포함하여 지표를 구축한 반면, 이후에 등장한 환경성과지수에서는 기본적으로 핵심적인 소수의 지표만을 구성하여 국제적 환경의 성과를 평가하며, 그 중 물이용의 지속가능성을 평가하는 데 식수(clean drinking water)와 위생시설(sanitation)에 필요한 물의 수요와 공급을 이용한다. Vörösmarty et al.(2000a) 또한 물이용의 지속가능성을 정량적으로 평가하는 개념으로 '물 사용량 대비 물 공급량'의 기본적인 지표를 구성하여 전 세계를 대상으로 평가하였다.

또한 물이용 관리에 수요와 공급뿐 아니라, 인간의 수자원 이용을 위한 지표수 및 지하수 등 수자원의 난개발, 무리한 관개시설 확충 등을 통해 야기된 강 및 하천의 분절화, 물흐름 변형, 유역환경 변화, 생물다양성 저하 등의 문제를 해결하기 위해 유역환경 관리 및 생물다양성을 고려한 생태계를 포함하는 물 관리의 개념이 다루어지기 시작했으며 학계에서도 지속가능한 물이용 평가에 수환경과 생태성을 적용하기 위한 노력을 지속해왔다. 즉, 담수생태계는 많은 물질과 서비스를 인간에게 공급하지만 인간은 담수의 흐름을 변형하여 사용하고 있기 때문에 생태적으로 지속가능한 인간의 물이용을 위해서는 생태성 보전을 위해 필요한 물의 양과 인간의 물수요가 공존할 수 있는 방법이 필요하다고 제안하였다(Ritcher et al., 2003).

수자원의 수요와 공급, 그리고 생물다양성을 포함하는 유역생태계 관리에서 더 나아가 지속가능한 수자원관리란, 한 유역 내에서 기술적, 정치적, 법적, 기관적 요소를 포함하는 총체적인 개념이라는 정의가 등장하게 된다(Loukas, Mylopoulos, and Vasiliades., 2007). 이는 기존에 수자원관리를 평가할 때 이용되었던 물 가용성과 물공급 관리, 물수요 관리, 물 배분 등을 수자원관리의 기술적인 부분이라고 정의하고, 추가적으로 거버넌스, 의사결정지원 등 행정적 영역까지 기술적인 영역에 포함하여야 한다는 개념이다(Loukas, Mylopoulos, and Vasiliades., 2007).

즉, 물이용의 지속가능성을 평가하기 위해서는 수자원의 수요와 공급, 생태계, 거버넌스 등 다양한 측면을 고려해야 하며, 이를 위해서는 복잡한 현상을 설명하기 위한 대표 지표를 활용하는 지표기반 접근이 유용하다. 특히 주요 지표의 공간적 분포, 시간적 변화 등은 지속가능한 물이용을

위한 정책적 방향성을 제시하는 기능을 할 수 있다. 이에 물이용 지속가능성 지표 등의 개발, 적용 및 검증, 활용 등에 대한 심도 있는 연구가 요구된다.

이에 본 연구는 심도 있는 선행연구 검토를 통해 지속가능한 물이용을 평가할 수 있는 지표 및 변수를 구축하고자 하며, 기존의 많은 물이용 평가에서 관념적으로 사용한 물의 수요와 공급뿐 아니라 수질, 유역환경, 거버넌스를 포함하여 지속가능성 개념을 구현할 수 있는 지표 및 최종 지수체계를 구성하여 평가하고자 한다.

2. 연구의 목적

본 연구는 우리나라의 지속가능한 물이용 지표를 개발하고 이를 활용하여 현재의 물이용 상태를 평가·진단하고 미래 전망을 제시하며, 또한 지표의 정책적 활용 방안에 대한 제언을 도출하고자 한다(그림 1-1 참고). 당해연도 연구는 총 2차년 연구 중 1년차 연구로, 우리나라의 물이용의 진단·평가, 시험검증에 초점을 맞추고 있으며, 우리나라 물이용의 평가를 수행하고자 한다.

우선 본 연구를 통해 물이용 지표를 개발하여 우리나라 중권역 단위의 평가 및 시험검증을 진행하고자 한다. 뿐만 아니라 세계은행(The World Bank, WB)과의 국제협력을 통한 기존의 전 지구 대상 물 지표(Vörösmarty et al., 2010)¹⁾를 활용하여 우리나라 대상으로 평가 및 검증을 수행한다.

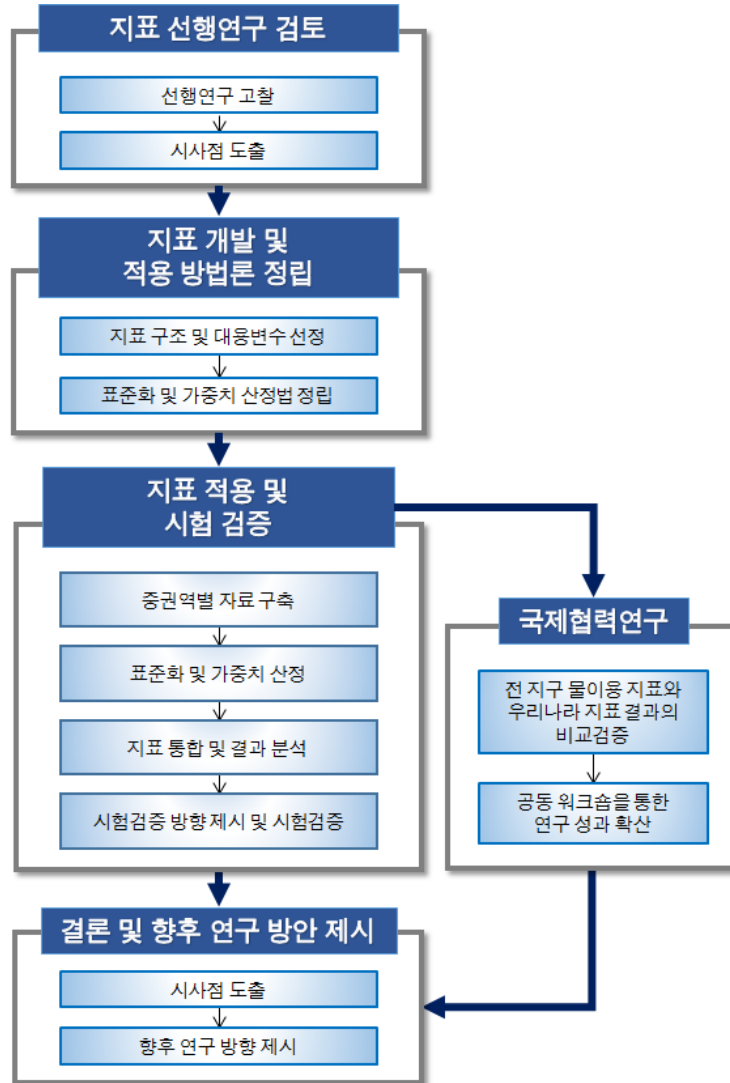
1) Vörösmarty et al.(2010)의 주요내용은 부록 2를 참고.



자료: 필자 작성.

■ 그림 1-1. 연구의 흐름(1, 2차년도)

당해연도 연구의 구체적 내용은 다음과 같다. 우선 지속가능한 물이용 지표 연구를 수행하기에 필수적인 지속가능성, 지표연구 등 기본 개념에 대한 선행연구를 고찰함으로써 본 연구의 개념을 정립하고 국내외 관련 선행연구를 검토하여 시사점을 도출하였다. 이후 지표 구조를 확립하고 지표 평가를 위한 대응변수를 선정한 뒤, 각각의 지표를 적용할 수 있는 방법, 지표 표준화 및 가중치 산정법을 정립하였다. 이후 수집된 자료를 가공하여 우리나라 중권역을 대상으로 지표 평가를 수행하였으며, 지표 통합을 위해 표준화를 수행하였고, 국가 연구원, 관련 공무원, 업계 등의 전문가 다수를 대상으로 설문조사를 통해 가중치를 도출하여 최종 지수를 도출하고 민감도 분석 등의 시험 검증을 수행하였다. 또한 국제협동연구를 통해 전 세계를 대상으로 우리나라 자료를 활용하여 지표를 검증하였고, 또한 세계은행과의 공동 워크숍을 통해 본 연구의 성과 확산에 기여하고자 하였다(그림 1-2 참고).



자료: 필자 작성.

그림 1-2. 1차년도 연구진행 체계



제2장

지속가능한 물이용과
지표의 개념

1. 지속가능한 물이용

가. 지속가능성

지속가능성(Sustainability)이라는 용어는 1972년 로마클럽에 의해 발간된 성장의 한계(The Limits to Growth)라는 보고서에서 언급된 이후 지금까지 국제회의, 국제연합 보고서 등에서 꾸준히 인용되고 있다. 자연 생태계에서의 지속가능성이란, 기후변화나 자연재해 등과 같은 외부 사건에 의해 조정되는 자연적 입력과 출력이 동적인 평형 상태를 유지하는 것으로 받아들여지고 있으며(Fresco and Kroonenberg, 1992), 일반적으로는 이를 생태계뿐 아니라 광의의 인간생활과 사회 전반으로 확장시킨 개념을 이용한다.

국제회의 및 국제연합보고서에서 언급되던 지속가능성의 개념은 이후 지속가능한 발전(Sustainable Development)이라는 개념으로 이어지게 되는데, 1987년 세계환경개발위원회(World Commission on Environment and Development, WCED)가 발간한 브룬트랜드 보고서 우리공동의 미래(Our Common Future)에서 지속가능한 발전이라는 용어에 대해 언급하면서 이 개념이 널리 알려지게 되었다. 위 보고서에서는 “인류(Humanity)는 발전을 지속가능한 방향으로 이끌 수 있는 능력을 가졌으며, (지속가능발전이란) 미래세대의 가능성을 제약하지 않으면서, 현 세대의 필요와 미래 세대의 필요를 충족하는 것”이라고 언급하였다(WCED, 1987). 즉, 지속가능성이란, 절대적인 개념이 아니라 현재의 사회구조와 기술, 환경자원을 고려한 상대적인 개념으로서, 발전의 한계에 대한 인식을 바탕으로 인간 활동에 의한 부정적인 영향이 자연적으로 충분히 흡수되어 생물권에 악영향을 미치지 않는 범위를 의미한다(WCED, 1987). 따라서 지속가능한 발전은 인구 수와 인구 성장이 생태계 내에서 변화하는 생산 잠재성과 조화를 이루는 범위 내에서 추구될 때 달성할 수 있다(WCED, 1987).

이후 지속가능성이라는 개념은 꾸준히 회자되었으며, 이를 더욱 널리 이용되도록 촉진시킨 계기는 1992년 브라질 리우데자네이루에서 열린 리우회의(지구 정상회의, Earth Summit) 또는 유엔환경개발회의(UNCED)로 알려져 있는데, 리우회의에서는 세계의 지속가능한 개발의 필요성

에 대해 강조하였고 유엔지속가능발전위원회(The United Nations Commission on Sustainable Development, UNCSD) 창설을 합의하는 계기가 되었다. 리우회의에서는, 지속가능성에 기반을 둔 지속가능발전을 달성하기 위한 국제사회의 비전으로 '어젠다21(Agenda 21)'을 채택하게였으며, 이 보고서에서는 사회경제, 자연자원의 보전과 관리, 각 그룹의 역할, 구체적 이행방안으로 분야를 나누어 각 주제별로 지속가능성을 위한 목표를 제시하였고, 이는 국제사회가 추구해야 할 정책적 이념으로 확립되었다(UNCED, 1992). 이후 몇몇 연구자에 의해 지속가능성 개념의 대중적인 인기의 원인, 개념의 모호성에 대한 의문이 제기됨에도 불구하고, 2000년대에 접어들어 지속가능성 또는 지속가능한 발전이라는 단어의 이용은 매우 보편적인 현상이 되었다(Bell and Morse, 2008).

2002년 요하네스버그회의(지속가능발전 세계정상회의(World Summit on Sustainable Development, WSSD)에서는 앞선 리우회의에서 언급된 사항들을 재강조하고, 지속가능한 발전에 대한 개념을 확대하려 했다. 선언문에서는 “지속가능한 발전은 장기적 관점으로 내다보고 이루어져야 하며, 정책형성, 의사결정 및 이행에 있어 다양한 수준에서의 광역적 참여가 요구된다”고 언급하기도 했다(WSSD, 2002).

20년 후 2012년에 열린 유엔지속가능발전위원회(UNCSD) Rio+20에서는 절대빈곤 퇴치, 진보적인 사회평등보장, 환경보호 등 앞으로 지구에서 지속가능한 삶을 영위할 수 있는 가능성에 대해 언급하며 지속가능한 개발을 위한 녹색경제 구축, 지속가능 개발을 위한 국제협력 강화에 대해 논의하게 된다. Rio+20의 주된 결과물로서 지속가능개발목표(Sustainable Development Goals, SDGs)가 있는데 이는 2000년에 계획된 새천년개발목표(Millennium Development Goals, MDGs)의 목표시기가 2015년 종료되므로, 2015년 이후의 전 세계의 목표 구축을 포함하는 것이다.

2012년 발간된 UN 전 지구 지속가능성을 위한 고위패널 보고서에서 언급한 바로는 ‘지속가능한 개발’은 ‘환경보호’와 동의어가 아니며, 대신 경제, 사회, 자연환경 사이의 상호연결성에 대해 인식하고 이해하고 행동하는 것이라고 정의하고 있다(UNGSP, 2012). 동시에 UNDP(2011)

의 인간개발보고서(Human Development Report)에서는 지속가능성이란 공정함, 사회정의, 더 나은 삶으로의 이행 등을 의미하는 ‘공평함(equity)’에 대한 기본적인 질문과 깊게 연관되어 있다고 언급한다. 즉 “불안정한 체제, 사회, 한쪽으로 치우친 소비행태 등은 지속가능하지 않으며 이러한 불공정성과 편파성이 해소되고 조화를 이룰 때 지속가능하다”고 표현한다고 정의하고 있다.

지금까지 국제적으로 인용된 지속가능성 개념에 대해 요약하면, 현재의 자원 활용의 개념에서 미래세대를 고려한 자원 활용 계획에서 지속가능성의 인식, 정책 및 의사결정에 다원적 참여를 통한 자원 활용의 지속가능성 포함, 그리고 경제, 형평성 등 기존에 지속가능성을 고려하지 않았던 부분을 포함함으로써 지속가능성의 문제가 비단 환경 분야만의 문제가 아님을 강조하였고, 지속가능성 달성 이행의 효율을 위한 국내 및 국가 간 행정협력 등 국제협력으로 영역이 확대됨으로서 달성할 수 있는 것으로 확산되었다.

나. 지속가능한 물이용

1992년 리우회의에서는 어젠다21에서 언급한 목표들을 실천에 옮기기 위해 ‘지속가능한 발전을 위한 지표’를 만들 것을 합의했고, 이 이후로 여러 가지 분야에서의 지속가능성을 평가하기 위한 지표 연구가 대중화되어 많은 정부와 기관, 연구자 등이 지표 개발과 검증을 수행하였다(Bell and Morse, 2008). 이 중 지속가능한 물이용(또는 수자원이용)이라는 개념이 여러 연구자와 다양한 시작에서 발전되었다.

1) 물 수요와 공급으로서의 지속가능성

가장 대표적인 국제적 지속가능성 평가 지표는 1992년 리우회의, 2002년 요하네스버그회의 등 대규모 국제회의에서 지속가능성을 평가할 지표의 필요성을 주장하게 되면서 만들어지게 된 환경지속성지수(Environment Sustainability Index, ESI, 2005) 및 환경성과지수(Environment

Performance Index, EPI, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014)이다. 환경지속성지수(ESI)는 광범위한 항목을 포함하여 지표를 구축한 반면 이후에 등장한 환경성과지수(EPI)에서는 기본적인 핵심적인 소수의 지표만을 구성하여 국제적 환경의 성과를 평가하며, 그 중 물이용의 지속가능성을 평가하는 데 식수(clean drinking water)와 위생시설(sanitation)에 필요한 물의 수요와 공급을 이용한다.

또 다른 국제적 성과를 판단하는 지표에는 유엔지속가능발전위원회(UNCSD)가 2007년 제안한 지속가능발전을 위한 지표(Sustainable Development Indicators, SDI)가 있는데, 이 보고서에서는 빈곤, 거버넌스, 건강, 교육, 인구, 자연재해, 대기, 토지, 해양, 담수, 생물다양성, 경제발전, 국제경제파트너십, 생산소비패턴으로 14가지 주제를 구성하여 50가지 지표를 제안하였다. 위 지표에서 수자원 관련 지표로 빈곤주제 내에서 위생시설(sanitation)을 공급받는 인구비율, 개선된 수자원시설을 통해 식수를 공급받는 인구비율, 담수주제 내에서는 사용하는 수자원량(quantity), 수자원 내 대장균 검출여부(quality) 등을 포함하고 있다(UNCSD, 2007).

학계에서는 물이용의 지속가능성을 정량적으로 평가하는 개념의 초기단계에서 ‘물 사용량/물 공급량’으로 기본적인 지표를 구성하여 전 세계를 대상으로 평가하였다(Vörösmarty et al., 2000a). Vörösmarty et al.(2000a)은 가정, 공업, 관개농업 용수 등 인간이 이용하는 물의 양을 ‘물 사용량’으로 간주하고 향후 인구변화로 인한 미래 요구량을 산정하기 위해 인구변화를 고려하였다. 그리고 물 공급량으로는 “지표수와 얇은 대수층의 유출수가 강으로 모이는 연 평균 유출량”(Postel, Daily, and Ehrlich, 1996)으로 정의하고 기후변화로 인한 물 공급량의 변화를 통해 미래의 물 공급량을 추정하고자 하였다. 단 수자원의 지속가능한 이용을 고려하기 위해 지하수 등 지속적인 이용이 불가능한 항목은 물 공급량으로 산정하지 않았다. ‘물 사용량/물 공급량’의 비가 임계값 0.4를 초과하는 경우는 물이용 스트레스가 극심한 지역으로, 중국 북부, 인도 서부, 미국 서부 등으로 나타났다(Vörösmarty et al., 2000a).

위 방법과 유사하게 Döll, Kasper, and Lehner(2003), Milly, Dunne, and Veccia(2005), Sun et al.(2008)은 미래의 지속가능한 물 가용성을 산정하기 위해 전체 가용한 유출량에 인위적 소모량

을 제하여 평가하였다. Döll, Kasper, and Lehner(2003)은 지표유출량, 지하수함양, 하천유량을 고려하여 전체 유출량을 산정하였으며, 인간의 물 소비로 인한 하천 유량의 감소를 모델링하여 물이용의 지속가능성을 평가하였다. Milly, Dunne, and Veccia(2005)에서는 해당 유역의 면적당 하천유량(streamflow)을 전체 유출량으로 간주하고, 인간의 물이용에 가장 큰 부분을 차지하는 관개용수를 소모량으로 둔 후 미래 기후변화 시나리오를 이용하여 전 지구적인 물 가용성을 계산하였다. 이후 Sun et al.(2008)의 연구에서는 미래의 물이용 지속가능성을 위한 평가 항목을 다양화·세분화하였는데, 미국 남부 지역을 대상으로 과거부터 2020년까지의 시간적 범위에서 수자원의 수요와 공급을 평가하여 수자원 지속가능성을 ‘스트레스지수’로 평가하였다. 물 공급 평가에 이용된 지표로는 강수량에서 증발산량을 제한 뒤 지하수 공급량과 물 환원량(return flow)을 더하여 산정하였고, 물 수요는 상업, 가정, 산업, 관개, 축산, 광업, 열발전에 이용되는 수량으로 산정하였다. 스트레스 인덱스를 평가하는 공간적 단위는 13개 주 내의 수문단위코드(Hydrologic Unit Code, HUC) 유역으로 선정하였다. 구성된 지표를 바탕으로 두 가지 기후순환모델(Global Climate Model, GCM)을 이용하여 기후변화를 모델링하였고, 토지피복모델, 인구변화모델을 각각 수행하여 조합하였다.

2) 수환경과 생태성을 고려한 지속가능성

앞서 물이용의 지속가능성을 평가하기 위해 물 수요와 공급을 중심으로 지표를 구성하여 이를 세분화하고 미래 기후변화를 고려한 변화를 추정할 흐름에서 더 나아가, 물이용 관리에 수요와 공급뿐 아니라 유역환경 관리 및 생물다양성을 고려한 생태계를 포함하는 물 관리의 개념이 다루어지기 시작하였다.

실제로 물이용을 위한 수자원인프라 개발은 여러 국가의 유역에 걸쳐 분포하는 하천의 특성상, 이해관계, 정치관계, 외교관계 등이 얽히기도 하므로 이로 인해 유역과피, 생태계과피 등 국제적으로 우려되는 많은 갈등이 빈번히 발생하고 있다. 이에 따라 국제사회에서는 환경적인 측면을 통합한 유역단위의 수자원 이용의 관점에 따라 수자원인프라 개발 시 ‘통합적인 수자원 관리

(Integrated Water Resource Management, IWRM)'를 적용할 것을 권장하고 있다. IWRM은 수자원, 토지 및 관련 자원을 상호고려를 통해 개발하고 관리하는 것으로, 핵심적인 생태계의 지속성을 저해하지 않는 형평성 있는 방법으로 경제 및 사회적 복지를 추구하는 것이다. 즉 유역, 지역, 국제적 범위에서 모든 사람들이 수자원의 지속가능한 이용과 평등한 접근을 가능하게 하면서, 수환경의 특성을 유지하도록 관리하는 것이다. IWRM은 자연과 인간 시스템의 상호작용의 이해, 담수생태계와 해안 지역의 통합 관리, 토지와 수자원의 통합 관리, 하천과 대수층을 흐르는 블루워터(blue water)뿐만 아니라 증발산을 통해 이동하는 그린워터(green water)의 통합적 이해, 지표수와 지하수의 통합 관리, 수자원의 수질과 수량의 통합 관리, 하천 내 상류와 하류의 상호관계 이해 등을 주축으로 하고 있다(GWP, 2000). IWRM의 개념은 생태환경과 물이용 관리를 통합한 대표적인 개념으로 널리 적용되고 있다. 대표적으로 UNESCO(2009)는 유역기반 통합 유역 물 관리(IWRM)의 가이드라인을 제안함으로써, 적절하고 지속가능한 물 관리를 강의 유역단위로 접근하여 평가하고자 시도한 국제적인 움직임을 반영한 보고서이다. 위 보고서에서는 유역 기반의 통합 유역 물 관리(IWRM)를 적용하는 것이 토지이용 및 경제, 인구 등 다양한 요인에 의한 영향을 받을 수 있으며, 통합수자원관리에 영향을 미치는 요인들에는 거버넌스, 인구, 토지이용, 사회적 조건, 경제, 기후변화의 다양성, 기술이 있음을 서술하고 있다.

학계에서도 지속가능한 물이용 평가에 수환경과 생태성을 적용하기 위한 노력을 지속해왔다. Richter et al.(2003)는 물이용 환경의 회복을 위해 유역의 생태성 회복을 통한 지속가능성을 고찰하였는데, 전 세계적으로 인구가 늘어나면서 물에 대한 수요가 증가함에 따라 강 변형, 댐 이용으로 인한 물흐름 변화 등의 문제를 야기하고 있으며, 인간의 수요에 맞게 물을 공급하려는 노력은 담수생태계와 종을 무시하고 있다는 점을 지적하였다. 즉, 담수생태계는 많은 물질과 서비스를 인간에게 공급하지만 인간은 담수의 흐름을 변형하여 사용하고 있기 때문에 생태적으로 지속가능한 인간의 물이용을 위해서는 생태성 보전을 위해 필요한 물의 양과 인간의 물수요가 공존할 수 있는 방법이 필요하다고 제안하였으며 이를 달성하기 위한 프레임워크를 아래와 같이 제안하였다(Richter et al., 2003).

- 고유종과 자연생태계 기능을 지속하기 위해 필요한 강의 유량 요구량 산정
- 인간에 의해 변형된 강 영역에서 현재와 미래에 인간이 이용하는 물의 양을 수문학적 시뮬레이션을 통해 산정
- 시공간적 특성에 따른 인간과 생태계의 물이용의 불호환성 평가
- 불호환성을 해결하기 위한 협력적 해결책 모색
- 인간과 생태계의 수요를 통합하려는 노력을 좌절시키는 주요한 원인인 불확실성을 해결하기 위한 수자원 관리 실험 수행
- 장기적 관점에서 생태적으로 지속가능한 수자원 관리를 실행하기 위한 적응관리프로그램 구축 및 적용

인간의 물이용 건강성에 유역의 생태적 환경을 포함하는 관점은 Vörösmarty et al.(2010)의 연구에서 더욱 구체화되었는데, 이 연구에서는 전 세계를 대상으로 수자원 이용과 관련된 인간의 물 안보뿐 아니라, 수환경의 생태적 건강성과 생물다양성을 동시에 고려하는 통합적인 접근법을 이용하고 있다. 또한 실제 하천의 흐름과 연결성을 간소화한 하천 네트워크를 반영하여 전 세계의 유역 상태를 대표하는 지표를 구성하여 통합적인 평가를 수행한 연구로서 의미가 있다. 위 연구에서는 전 세계 인구의 80% 정도가 물 안보에 매우 위험한 수준으로 노출되어 있다고 평가하였으며, 전 세계 수환경과 관련된 생태계 서식처의 65%가 중간에서 높은 수준의 위협에 노출된 것으로 평가하였다(Vörösmarty et al., 2010). 즉, 지금까지 물이용을 위한 투자 또는 연구가 활발하게 진행된 반면 생물다양성을 위한 투자나 연구는 선진국에서도 상대적으로 적었음을 지적하며, 지금까지 물 안보의 위협은 생물다양성의 위협보다 대중에게 매우 위험하게 인식되어온 결과, 댐 등 물이용을 위한 인프라에 집중적으로 개발·투자되어 수환경의 생물다양성 등 생태성은 현저히 저하되었음을 지적하였다(Vörösmarty et al., 2010). 그렇지만 생물다양성은 전 지구적인 빈곤층이 생존을 위해 주로 의존하고 있는 자원이자, 생물다양성의 파괴로 인해 사회적 또는 군사적 충돌이 발생한 사례(Brown and Crawford, 2009)로 보아, 앞으로는 지속가능한 수자원

이용에 있어 물론 아니라 유역환경 및 생태계를 고려한 계획이 필요함을 주장하였다(Vörösmarty et al., 2010).

인간의 과도한 물이용은 생태계와 생물다양성에 부정적인 영향을 미칠 뿐 아니라 파괴된 생태계는 역으로 건전한 물 순환을 방해할 수 있다. 유역 내 산림 및 습지의 파괴는 수자원의 순환을 방해하고 생태계 고유의 자정작용을 저하시켜 수질을 악화시킬 수 있다. 따라서 산림 및 습지를 포함하는 유역을 보호하는 것은 수환경을 보전하는 방법일 뿐 아니라, 생태계 복원을 통해 수자원의 지속가능한 이용 가능성을 증진시킬 수 있다. UNEP(2010)의 보고서에서는 국가들이 습지, 강과 호수를 포함한 유역, 유역 내 산림 등을 복원했을 때 얻는 막대한 경제적인 효과에 대해서술하고 있다. 특히 전 세계적으로 이용 가능한 담수공급량의 75%는 산림지대를 포함하는 수문 유역을 거치는 것으로 알려져 있어, 물이용에서 생태계 고려 및 복원정책이 중요함을 시사하고 있다(UNEP, 2010).

위와 같이 수자원의 이용과 수환경의 생태성을 통합적으로 고려하는 지속가능한 수자원 개념의 프레임워크가 꾸준히 제안됨에 따라 생태수문학(Ecohydrology), 수문생태(Hydro-ecology) 등 기존의 수문학을 생태학과 연결하는 융합 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 생태수문학 Ecohydrology란 생태학(Ecology)과 수문학(Hydrology)의 합성어로, 생태계의 거동을 추적하여 생태계의 구조를 설명하는 생태학과 물의 순환과정을 이해하여 물수지를 분석하여 이수 및 치수관리를 제시하는 수문학을 동시에 고려하고자 하는 다학제적 융합학문이다(김양수, 우효섭, 2004). 더 나아가 생태수문학은 수자원 확대, 생물다양성의 보전과 복원, 사회를 위한 생태계서비스 제공, 기후변화와 인간의 영향에서 회복할 수 있는 탄력성 구축을 달성하기 위한 과학적인 지식과 배경을 제공하는 것이라고 정의되었다(Zalewski, 2012).

3) 거버넌스를 고려한 지속가능성

수자원의 수요와 공급, 그리고 생물다양성을 포함하는 유역생태계 관리에서 더 나아가 지속가능한 수자원관리에는, 한 유역 내에서 기술적, 정치적, 법적, 기관적 요소를 포함하는 총체적인

개념이라는 정의가 있다(Loukas, Mylopoulos, and Vasiliades, 2007). 이는 기존에 수자원관리를 평가할 때 이용되었던 물 가용성과 물공급 관리, 물수요 관리, 물 배분 등을 수자원관리의 기술적인 부분이라고 정의하고, 추가적으로 거버넌스, 의사결정지원 등 행정적 영역까지 기술적인 영역에 포함하여야 한다고 주장하는 것이다(Loukas, Mylopoulos, and Vasiliades, 2007).

이는 물이용의 지속가능성 개념이 태동하기 시작한 1990년대 후반부터 몇몇 연구자에 의해 개념적으로 제안되어왔다. Gleick(1998)는 인간의 과도한 수자원 이용과 부적절한 관리로 인해 인간뿐 아니라 생태계의 물이용이 위협받는 점을 지적하며 인구 증가가 예상되는 21세기의 물 위기에 대해 경고하였다. 따라서 앞으로의 지속가능한 물이용을 위해서는 지속가능성(sustainability)과 형평성(equity)의 원칙을 포함한 매우 광범위하고 장기적인 물 계획과 관리가 필요함을 지적하였으며, 지속가능성을 평가하기 위해 일곱 가지 카테고리의 판단기준 지표를 이용하여 장기적인 수자원 계획과 관리를 통한 물이용 지속가능성을 관념적으로 평가하고자 하였다(표 2-1 참고).

■ 표 2-1. 물이용의 지속가능성 평가를 위한 카테고리

판단지표	설명
1. 기본적인 인간의 물 요구량	모든 인간이 보건환경을 유지할 수 있도록 기본적인 물 공급이 충족되어야 함
2. 기본적인 환경의 물 요구량	생태계가 건강성을 유지할 수 있도록 기본적인 물 요구량이 충족되어야 함
3. 표준 수질	수질은 특정 최소 기준 이상을 유지해야 하며, 이 수준은 지역적 특성이나 물의 용도에 따라 달리 지정될 수 있음
4. 수자원 충전가능성	인간 활동은 장기적으로 수자원의 저장량과 흐름에 영향을 미치지 않아야 함
5. 자료 수집 및 가용성	수자원 가용성, 이용, 수질 등의 자료는 수집된 후 모든 사람에게 공개해야 함
6. 연구 및 행정기관 운영	물 관련 갈등을 예방하고 해결하기 위한 기관의 매커니즘이 운영되어야 함
7. 갈등해결 관리	수자원계획과 의사결정은 영향 받는 모든 사람들의 입장을 대변해야 하고 민주적이며, 이해관계에 놓인 사람들의 직접적인 참여를 장려해야 함

자료: Gleick(1998)에서 재작성.

더 나아가 수자원 분야의 개발노력, 물이용량을 줄이려는 변화나 물이용 효율을 증가시키려는 노력 등의 개념이 거버넌스 등 사회·행정영역을 포함하는 물이용 시나리오에 구성되어 물이용 지속가능성을 평가하고자 제안되었다. 그리고 이러한 개념은 통합 집수지 관리(Integrated Catchment Management, ICM)의 방식으로, 기존 수자원 관리가 대규모의 유역 단위에서 이루어진 것을 마을 커뮤니티, 주민참여 등의 시민행정 참여 등을 통해 소규모 단위로 활발하게 이루어질 수 있도록 장려하는 형태로 제안되기도 하였다(Holzkomper et al., 2012). 즉, 수자원과 유역에 관련된 토지이용 등을 통합적으로 관리하는 일은 해당 지역에 거주하는 주민이나 사업자, 공무원 등 다양한 사람의 관계가 얽혀 있기 때문에, 이해당사자뿐 아니라 관련 전문가의 참여를 통해 지식을 교환하고 관리방법 및 문제점에 대한 의견 교환, 관리를 위한 다양한 시나리오 제안 등이 장려되는 것이다(Holzkomper et al., 2012).

지금까지 수자원 개발이나 수자원 정책의 주된 핵심 목표는 경제발전의 수준 향상, 그리고 사람들의 요구량에 부응하기 위해 깨끗한 물의 가용성을 증가시키는 것이었다. 이러한 목표들이 기본적인 인간의 욕구를 충족하기 위한 것이었다면, 앞으로의 수자원 관리 및 정책은 인간의 요구량뿐 아니라 생태계를 위해 필요한 수자원요구량 또한 충족하는, 그리고 미래 세대를 위한 커뮤니티와 거버넌스를 포함하는 방향을 지향해야 할 것임을 시사하고 있다.

2. 지속가능한 물이용 지표

가. 지표연구의 정의 및 구성

1) 지표연구의 정의

지표(Indicator)라는 단어의 어원은 지적·측정·결정하기 위한 것이라는 뜻을 가진 라틴어 ‘indicare’에서 찾을 수 있다. 지표는 어떤 현상이나 변화를 대표적으로 나타낼 수 있는 요소로서, 전체를 파악하는 데 도움을 줄 수 있는 요약된 정보를 말한다. 지표의 가장 중요한 특징은 직접적으로 내포하고 있는 속성 이상의 의미를 포괄하고 있다는 점인데, 이 때문에 지표는 여러 부분의 관측값 중에서 현상을 가장 잘 설명할 수 있는 대표 값을 기준에 따라 선정해야 한다(최시중, 이동률, 2005). Chaves and Alipaz(2007)가 제안한 유용한 지표 선정을 위한 조건은 아래와 같다.

- 접근성(Available): 지표는 쉽게 이용할 수 있어야 하며 모든 사람에게 접근이 용이해야 한다
- 이해가능성(Understandable): 비전문가 등 다양한 사람들이 쉽게 이해할 수 있어야 한다
- 신뢰성(Credible): 지표들은 유효하고 신뢰할 수 있는 정보를 통해 구축되어야 하며 과학적으로 설명 가능한 방법으로 해석되어야 한다
- 연관성(Relevant): 지표들은 관련 분야의 관리방향 및 방법의 변화를 반영할 수 있어야 하며, 시간이 지남에 따라서도 측정 가능하게 구성되어야 한다
- 통합성(Integrative): 지속가능성의 측면에서 지표를 구성할 때에는 환경, 사회, 경제적 측면의 연결성을 서술해야 한다

지표 구축은 전략을 세우기 위한 시작단계로서 매우 중요한 역할을 하며, 전략 적용을 위한 베이스라인 평가와 모니터링의 기초를 제공하는 역할을 함으로써 복잡한 시스템의 전반적인 평가에서 핵심적인 단계라고 할 수 있다(GWP, 2006). 뿐만 아니라, 모니터링 및 평가의 단계에서, 지표는 현재 우리가 어느 단계에 있는지, 어디로 가고자 하는지, 목적을 달성하기 위한 올바른 방향을 선택하였는지, 목표에 도달하였는지 등 전략의 여러 단계에서 부딪치는 핵심 질문에 답변할 수 있게 돕는다(GWP, 2006). 따라서 지표 구축을 통한 정책 제안은 단순히 평가를 수행하는 것 뿐만 아니라 정책 형성, 정책 지원, 자원 관리를 위한 적절한 법제도와 연구기관을 통합하는 목적을 달성하는 데 핵심적인 역할을 수행할 수 있다(Chaves and Alipaz, 2007). Weiland et al.(2011)이 요약한 지표 구축의 목적은 다음과 같다.

- 현 상황의 이해: 현재 관련된 이슈들을 밝히고 분석할 뿐 아니라 미래를 전망하는 데 도움을 준다
- 우선순위 선정: 목적과 목표 설정에 필요한 기본적인 정보를 제공할 뿐 아니라 그 중에서 우선적으로 해결해야 할 문제를 제시한다
- 직접활용성: 평가, 활용 등에 이용될 수 있는 모니터링과 평가의 의사결정과 계획에 직접적으로 연관성을 가진다
- 이해관계자 포함 및 역량강화: 담당공무원과 시민 사이의 의사소통을 돕거나, 토론이나 현재 상태의 인식을 돕는 바탕이 될 수 있다
- 갈등해결: 다양한 가치를 가지는 사람들 사이의 갈등에 최소한의 정보 매개체로 이용할 수 있다

또한 Bell and Morse(2008)는 수많은 지표 가운데서도 ‘지속가능성 지표’는 학계나 전문가의 개념보다도 대중의 활용도에 초점을 맞춰야 한다고 주장하였다. 왜냐하면 지속가능성에 대해 평가하는 것은 가시적이지 않으며, 단일한 주제가 아니기 때문에 지속가능성을 평가하는 것은 복잡성을 심하게 단순화해버리는 결과를 낳기도 하며, 복잡한 개념이기에 다양하게 해석될 수 있기 때문이다(Bell, 2012). 따라서 지속가능성을 평가하는 것은 절대적인 관념이 있다기보다, 해당 문제와 맞닿아있는 논의들에 따라 유동적으로 초점을 맞추어야 하며, 본래의 목적인 문제해결을 위한 평가목적을 수행하는 것에 집중해야 한다.

2) 지표 구성 방법

어떤 시스템을 평가하는 지표를 구성할 때에는 지표의 성격과 연구자의 목적에 따라 지표 구성 방법을 선택해야 한다. 대표적인 지표 구성 방법으로는 주제 접근방법(Theme framework)과 인과관계적 접근방법(Cause-Effect Chain framework)이 있다.

가) 주제 접근방법(Theme framework)

과약하고자 하는 현상을 크게 분야별로 구분한 후, 분야별 정책목표에 따라 하위분야로 세분화하고 이에 따라 관련지표를 선정하는 방식이다.

우선 대상을 평가하는 지표들을 세부기준이나 대상을 구성하는 요소들로 그룹화한다. 지표는 단일측정치를 사용하는 경우도 있고, 몇 개의 변수를 사용하여 측정하는 형태도 있다. 물빈곤지수(Water Poverty Index, WPI), 사회적 물스트레스지수(Social Water Stress/Scarcity Index, SWSI), 환경지속성지수(ESI) 등이 대표적이다.

나) 인과관계적 접근방법(Cause-Effect Chain framework)

인과관계적 접근방법은 어떤 시스템에서 현상이 발생하게 되는 영향요인, 상태, 반응결과를 고려하는 방법으로 시스템 내에 인과관계가 성립하는 구조를 가진다고 가정한다. 즉, 측정하고자 하는 현상(State), 이러한 결과를 나타나게 하는 요인(Pressure), 이러한 현상을 완화 또는 강화하기 위한 노력(Response) 간의 상관성을 파악하여 지표를 도출하는 구조이다. 이러한 접근방법의 대표적인 프레임워크는 1993년 OECD에서 발표한 압력-상태-반응(Pressure - State - Response, PSR) 구조로, 국제기구나 각국의 지표 설정에 널리 이용되고 있다(Hsu, Johnson, and Lloyd, 2013). PSR 구조는 OECD(1993)가 제안한 인과관계 접근 방식의 대표적인 구성체계로, 인간사회의 기반활동과 자연적 요인이 수자원 관련 피해 및 위험성 증가에 압력으로 작용하고, 이로 인해 경제·물리적 현상변화가 초래되며, 이에 따라 사회는 변화에 따라 대응한다는 프레임을 가지고 있다. PSR 구조는 현 문제를 인과관계로 명확히 분석할 수 있어 효용성 측면에서 활용도가 매우 크며 사회, 경제 및 여타 쟁점사항 간의 상호 연관된 관점에서 파악이 가능하다.

- 압력 변수: 인간 활동 등 환경에 압력을 주는 측면으로, 문제의 원인을 내포하고 있다. 문제는 현재 존재하고 있는 요소일 수도 있고, 새로운 활동이나 사업 등으로 인해 새롭게 만들어질 수 있는 잠재적 요소를 포함할 수도 있다. 잠재적 압력의 예로, 수입 증가, 무역패턴이나 활동의 변화, 에너지사용량 변화, 인구증가 등이 있다.
- 상태 변수: 압력변수로 인해 발생한 환경의 특성을 정량화할 수 있도록 보여주는 것이다. 상태 변수의 예시로, 수질이나 수량, 산림과편화, 대기오염 등이 있다.
- 반응 변수: 환경의 상태나 변화에 대응하는 정책 등을 의미하며, 주로 문제를 해결하기 위한 활동, 투자 등이 있다. 환경문제에 반응하는 것은 상태변수에 직간접적인 영향을 미칠 수 있다. 예로 물의 가격책정, 대안작물 사용, 조림 사업 등이 있다.

하지만 인과관계적 접근방법은 복잡한 현상의 원인과 결과를 몇 가지 지표와 인과구조로 단순화시켜 설명하려고 하기 때문에 설명하지 못하는 변수를 반영하기 위해 인과구조의 추가적인 개발이 진행되었다. 1999년 유럽환경청(European Environmental Agency, EEA; Smeets and Weterings, 1999)은 PSR 구조를 보완하여 ‘추진력 - 압력 - 상태 - 영향 - 반응(Driving force - Pressure - State - Impact - Response, DPSIR)’형태의 모델을 개발하여 통합적인 사회·경제·환경 시스템을 평가하기 위해 사용하였다. 이는 이후 환경, 경제, 사회 등 다양한 분야에서 활용되어 오고 있다. 이 밖에도 취약점-대응책(Vulnerability-Countermeasure, VC)등의 지표평가 구조가 개발되어 있다.

나. 지표 국외 연구 사례

1) 국외 연구사례

가) 물빈곤지수(Water Poverty Index, WPI)

영국 생태수문센터(Center for Ecology & Hydrology, CEH)에서 개발한 물빈곤지수(WPI)는 개별 가정이나 커뮤니티 수준에서 물 스트레스를 진단하여 국가, 중앙정부, 커뮤니티, 기부자 등의 의사결정자에게 수자원 분야의 우선순위를 결정하는 데 사용하기 위해 개발된 통합적인 지표이며 주로 빈곤국가의 지속가능한 물이용을 위한 목적으로 개발되었다(Sullivan, 2002, Sullivan et al., 2003). 물빈곤지수(WPI)는 수자원의 이용에 관한 평가를 위해 수문뿐 아니라 사회 및 경제, 환경지표를 통합한 형태이며, 수자원의 양(resource), 수자원 공급률(access), 수자원 관리능력(capacity), 수자원이용 효율성(use), 생태에 대한 물의 할당(environment)의 다섯 가지 구성요소를 고려하였으며, 이는 가용 수자원량, 수자원 접근률뿐 아니라 사회경제요소 및 환경적 측면을 통합하여 평가한 사례라고 할 수 있다. 물빈곤지수(WPI)는 전 세계를 대상으로 최종 지수를 산정하여 전 세계 국가에 대한 상대적인 순위로 표현하였다. 다섯 가지 지표에 대한 구체적인 설명은 아래와 같다(Sullivan et al., 2003).

- 접근성: 사람들이 수자원에 접근할 수 있는 정도를 구하는 데는 단순히 수자원과 마을 사이의 거리로 계산을 하기에는 많은 변수가 존재하기 때문에 위 연구에서는 물을 구하는 데 걸리는 시간으로 접근성을 계산한다.
- 수자원(수질과 변동성): 많은 지표에서 개선된(improved) 물이용 정도의 지표를 사용하는데, 수질이 개선되었다고 해도 불소증이나 비소중독 등을 경험하는 지역이 있기 때문에 개선된 지수 뿐 아니라 비개선 지수도 평가해야 한다. 또한 물의 변동성도 고려되어야 하는데, 지역에 따라 강우나 유량이 건기일 때 부족한 경우가 생기기 때문이며, 부족한 수자원 및 수자원인프라는 저개발국가의 도시지역에 심각한 문제가 되고 있다.
- 물이용: 경작이나 산업활동에 사용되는 물은 가정에서 사용되는 물의 양보다 훨씬 많기 때문에 수량 측면에서 고려해야 한다.
- 수자원관리능력: 커뮤니티 단계에서는 교육수준이나 소득수준, 물을 이용하는 소비자나 단체의 물이용 효율성으로 관리능력을 평가할 수 있다. 이 밖에 광역적으로는 중앙 및 지방정부의 정책에 대응할 수 있는 기관의 적절한 관리능력을 평가해야 한다.
- 환경: 지속가능성은 물환경 시스템의 발전이 환경적인 영향을 끼치지 않을 때 이루어질 수 있으므로 이를 고려해야 한다.

나) 기후변동성지수(Climatic Variability Index, CVI)

기후변동성지수(CVI)는 수자원의 변화에 따른 인간의 취약성을 다각도로 평가하는 총체적인 평가로, 사회, 환경, 경제적 정보를 포함하고 있다. 기후변동성지수(CVI)는 물빈곤지수(WPI)와 유사하게 빈곤계층의 수자원 취약성에 초점을 맞추어 개발되어 적용되고 있다(Sullivan and Meigh, 2005). 또한 단순한 자료를 활용했던 물빈곤지수(WPI)를 심화시켜 다섯 가지 구성요소 내 다양한 변수를 활용함으로써 기후변동성에 따른 물이용에 미치는 다양한 분야를 고려하고자 하였다.

■ 표 2-2. 기후변동성지수의 구성요소 및 변수

CVI 구성요소	변수
자원 (R)	<ul style="list-style-type: none"> - 지표수 및 지하수 가용성 - 물 저장능력 및 자원의 확실성 - 수질 및 외부유입 수자원 의존도
접근성 (A)	<ul style="list-style-type: none"> - 깨끗한 물과 위생시설에의 접근성 - 기후특성에 맞춘 관개시설 접근성
관리능력 (C)	<ul style="list-style-type: none"> - 내구성 상품을 위한 지출 - GNP 대비 GDP, 총 고정자본투자액 대비 물관련 투자액 - 주민의 교육수준, 5세미만 영아치사율 - 재해 조기경보 시스템 유무, 지방자치단체 능력 - 비공식적인 거주지에서 생활하는 인구 비율 - 홍수 등 재난 발생 시 대피처 접근성
사용 (U)	<ul style="list-style-type: none"> - 국가기준 대비 가정용수 사용률 - GDP 기여수준 대비 농업 및 공업용수 사용률
환경 (E)	<ul style="list-style-type: none"> - 가축 및 인구밀도 - 서식처 파괴 - 홍수 빈도
지리공간 (G)	<ul style="list-style-type: none"> - 해수면상승, 조수간만의 차 등에 영향 받는 지역 범위 - 수자원 또는 식량으로부터 고립 정도 - 산림파괴, 사막화, 토양부식물 - 자연식생이 다른 토지이용으로 변경된 정도 - 퇴빙(deglaciation), 빙하호(glacial lake)의 급격한 증가위험

자료: Sullivan and Meigh(2005)에서 재작성.

다) 환경지속성지수 (Environmental Sustainability Index, ESI)

환경지속성지수는 세계경제포럼(The World Economic Forum, WEF)의 후원으로 미국 예일대, 컬럼비아대학이 연구·개발하여 1999~2005년 중 4회 발표되었으며 마지막으로 2005년 다보스포럼에서 발표(Esty et al., 2005)를 마지막으로 더 이상 개발되지 않으며 EPI로 대체된다. 사회, 경제, 환경조건을 바탕으로 지속가능한 성장의 역량을 국가별로 평가하는 대표적인 국제 평가지수로 이용되었으며, 환경의 질, 환경오염 부하량, 환경 취약성, 사회·제도적 대응역량, 국제적 책임 공유 분야에서 21개의 지표가 선정되었고 76개의 변수로 구성하여 전체 국가에 대한 개별 국가의 상대적 순위를 표현하였다(Esty et al., 2005).

■ 표 2-3. ESI(Environmental Sustainability Index)의 지표 및 변수 중 수자원 관련 항목

부문		지표	변수	
환경 시스템	2	생물다양성	5	국가 내 위협받는 생태지역 비율
			6	위협받는 조류종 비율
			7	위협받는 포유류종 비율
			8	위협받는 양서류종 비율
			9	국가 생물다양성 지수
	3	토지	10	인간 이용이 없는 토지 비율
			11	인간 이용이 집중적으로 이루어지는 토지 비율
	4	수질	12	용존산소농도(DOC)
			13	전류전도도(EC)
			14	인(Phosphorus) 농도
			15	부유물질(Suspended Solids)
	5	수량	16	1인당 가용한 담수자원
			17	1인당 가용한 지하수량

표 2-3. ESI(Environmental Sustainability Index)의 지표 및 변수 중 수자원 관련 항목 (계속)

부문	지표	변수
환경스트레스 저감	7 생태계 스트레스 저감	23 1990~2000년의 평균 산림피복 변화율
		24 인위적 황 오염으로 인한 초과산성화
	8 인구압력 저감	25 2004~2050년의 예상인구
		26 총 출생률
	9 오염물질 및 소비압력 저감	27 1인당 생태적 발자국
		28 폐기물 재활용률
		29 유해폐기물 생산
	10 수자원압력 저감	30 산업활동으로 인한 유기오염물질 배출량
		31 농업지역 단위면적당 비료 사용량
		32 농업지역 단위면적당 살충제 사용량
		33 국가 내 심각한 물부족을 겪는 면적비
	11 자연자원 관리	34 과도한 어획량
		35 전체 농업지역 중 관개로 인한 염류화지역 면적
		36 전체 산림지역 중 지속가능한 관리에 대한 자격을 획득한 면적
37 보조금 관련 세계경제포럼 설문결과		
38 농업부문 보조금		
인간 취약성	12 환경관련 보건	39 장내 감염질병으로 인한 치사율
	13 기본적 생존조건	43 시설을 통한 음용수 접근이 가능한 인구 비율
	14 자연재해	44 홍수, 태풍으로 인한 사망
45 자연재해 노출지수		
사회·기관 능력	15 환경 거버넌스	46 보호지역으로 설정된 면적비
		49 환경관련 과학, 기술, 정책에 대한 지식수준
		50 인구 백만명 당 세계자연보전연맹(IUCN) 가입자 수
		51 인구 백만명 당 지역사회 어젠다21 수
		52 부패정도
		53 법적 규제
		54 시민사회 및 정치적 자유
		55 환경 거버넌스에 대한 세계경제포럼 설문결과
		56 정부 효율성
57 민주화정도		
전 지구적 관리책임	19 국제적 협력참여	70 환경관련 범국가적 단체 활동인
		71 환경 및 개발 관련 사업 후원
		72 국제적 환경협정 참여

자료: Esty et al.(2005)에서 재작성.

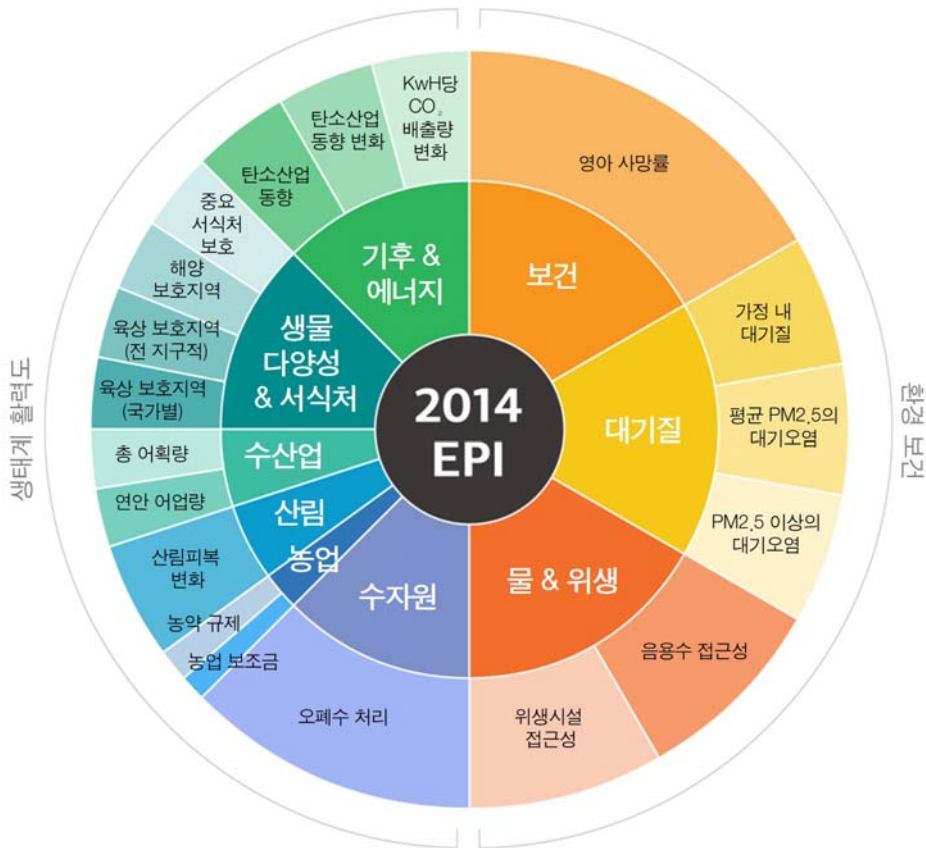
하지만 ESI는 매우 광범위한 범위의 많은 수의 지표를 이용하고 있어 평가나 이후 정책지침에 반영하기 어려운 점이 지적됨에 따라 이후는 EPI 형태로 간략화된 지수로 개발된다.

라) 환경성과지수 (Environmental Performance Index, EPI)

환경성과지수(EPI)는 예일대 환경 법·정책센터(Yale Center for Environmental Law and Policy, YCELP)와 컬럼비아대 국제 지구과학정보 네트워크센터 (Center for International Earth Science Information Network, CIESIN)가 공동으로 연구하여 전 세계 국가를 대상으로 국가별 환경 분야의 성과를 통합하여 순위를 발표하는 지표이다(Hsu, Johnson, and Lloyd, 2013). 환경성과지수(EPI)의 개발목적 중 하나는 새천년개발목표(MDGs)를 보완하고 국가별로 목표를 구체화하기 위한 상대적인 순위를 책정하는 것이며, 지표의 초점을 ①환경보건(environmental health)을 악화시키는 환경적 스트레스 저감, ②생태계활력도(ecosystem vitality)를 증진시킴으로써 효율적인 자연자원 관리 달성에 초점을 맞추고 있다(Hsu, Johnson, and Lloyd, 2013). 환경성과지수(EPI)에서는 환경지속성지수(ESI)에서 수많은 변수를 반영하고자 함에 따라 정책적 제안을 제시하는 데 어려움을 겪었던 한계점을 보완하여 25개의 지표만을 이용하여 평가하며 모델링으로 예측된 데이터보다는 직접 측정된 변수를 활용하고 있다. 이는 전 세계적으로 환경분야에서 핵심적인 요소만을 추려 평가함으로써 지표 구축에 이용되는 데이터 접근성을 늘리고, 국가별 취약점과 강점을 시각적으로 분명하게 전달할 수 있으며 시간에 흐름에 따른 재평가가 가능해 지속적인 개선유무를 추적할 수 있다.

그 중 물환경 지표와 관련해서, 환경보건 분야의 물환경(water and sanitation) 분야는 음용수접근성(access to drinking water), 위생시설접근성(access to sanitation)의 두 가지 지표만으로 평가하며, 생태계건강성 분야 내 수자원(water resources) 분야에서는 폐수 처리(wastewater treatment)로 평가한다. 또한 수생태계 및 생물다양성과 관련하여 생태계건강성 분야에서 수산업(fisheries)과 생물다양성과 서식처(biodiversity and habitat)로 분류되며, 수산업에서는 연안 어업량(coastal shelf fishing pressure), 초과어획량(fish stock)으로, 생물다양성과 서식처에서는 육상

보호지역(terrestrial protected areas), 해양보호지역(marine protected areas), 중요서식처보호지역(critical habitat protection)의 비율로 평가한다.



자료: EPI(<http://epi.yale.edu>)에서 재작성 [2014.12.23 최종확인].

그림 2-1. EPI(Environmental Performance Index) 지표

마) 물스트레스지수(Water Stress Index, WSI)

물스트레스지수(WSI)는 Falkenmark(1989)가 개발한 물 부족 지수로서, Falkenmark Indicator로 불리기도 한다. 물 스트레스를 측정하는 가장 기본적이고 널리 이용하는 방법으로, 연간 총 지표유출수량 중 인간이 이용할 수 있는 양으로 정의한다. 단위는 일 년간 재생가능한 물(지표유출

수) 백만 m^3 를 사용할 수 있는 100명 단위의 인구수이며, 지표 값에 따른 스트레스지수를 제시하고 있다. 이는 기후로 인한 자연적인 물 부족과 인간에 의한 물 부족(인구과다)을 동시에 고려할 수 있는 방법이다(Vörösmarty et al., 2005). 하지만 계산에 이용되는 수원(水原)이 지표 및 지하수로 한정되어 있고, 국가단위로 평가하기 때문에, 생활방식, 기후 특성 등이 개별적으로 고려되지 않을 뿐 아니라 수질 수준을 포함하고 있지 않기 때문에 실제로 사람이 이용할 수 있는 수량을 반영하지 못한다는 한계점이 있다.

■ 표 2-4. Falkenmark(1989)의 물스트레스 지수

물스트레스 지수 (1인당 m^3)	지수 해석
> 1,700	물스트레스 없음 (간헐적, 국지적인 물 부족)
1,000 ~ 1,700	물 스트레스
500 ~ 1,000	물 부족 (경제개발 및 보건을 저해하는 수준)
< 500	심각한 물 부족 (일상생활을 영위하는 데 불편함을 겪는 수준)

자료: Falkenmark(1989)에서 재작성.

바) 물부족지수(Water Scarcity Index, WSI)

Gleick(1996)는 생존을 위한 식수, 위생(hygiene)을 위한 물, 위생시설(sanitation)에 필요한 물, 음식에 필요한 물 등 인간의 기본적인 생활에 필요한 물요구량(Basic Water Requirements, BWR)을 충족하기 위한 평가방안을 마련하기 위해 물부족지수(WSI)를 개발했다. 물부족지수에서 제안하고 있는 기본적인 물 요구 항목은 다음과 같다.

- 최소한의 식수 요구량: 온화한 기후대에 사는 사람이 일반적인 활동을 할 때 필요로 하는 음용수는 1인당 하루 5리터로, National Research Council of the National Academy of Sciences의 데이터를 활용했다.

-위생시설(sanitation)을 위한 최소 요구량: 하수 및 쓰레기를 처리하는 위생의 기술은 지역마다 다르지만 물이 필요하다는 기본적인 조건을 동일하게 두고, 하루에 1인당 최소 20리터가 필요하다고 제안하였다.

-목욕을 위한 최소요구량: 적절한 목욕을 하기 위해 필요한 물의 최소요구량은 1인당 15리터이다(Gleick, 1993).

-요리를 위한 물 요구량: 저개발국가와 기개발국가를 고려하여, 1인당 하루 10리터의 물이 필요하다고 정하였다.

이에 따라 Gleick(1996)는 기본적인 인간의 최소 물 요구량은 일일 50리터로 규정하였다. 또한 Falkenmark and Widstrand(1992)는 생존을 위해 필요한 물이 1인당 하루에 100리터라고 제안하였으며, 농업, 산업, 에너지생산 등의 추가적인 활동을 수반하는 경우 인구 1인당 필요한 최소한의 물의 양은 이보다 5~20배가량 더 요구된다고 주장하였다. 이는 Vörösmarty et al.(2010)에서 전 세계의 물부족(water scarcity)을 평가할 때 유출량과 인구의 비율로 추정하는 근거가 되었다.

사) 사회적 물부족 지표(Social Water Stress Index, SWSI)

담수자원의 이용에는 기후나 인구뿐 아니라, 사회의 경제적, 기술적 요인 그리고 각 지역에서 자원을 이용할 수 있는 능력 등 사회 전반에 걸친 요인들이 개입한다. Ohlsson(2000)은 부의 분배상태, 교육기회, 정치참여 등 여러 사회적인 요인들의 “적응능력”을 포함시킬 것을 제안했다. 사회적 물부족 지표(Social Water Stress Index, SWSI)는 Ohlsson이 제안한 수자원의 사회적 관리능력을 표현하기 위해 물스트레스지수(Water Stress Index, WSI)를 UNDP의 인간개발지수(HDI)로 나누어 표현하였다. UNDP의 인간개발지수(Human Development Index, HDI)는 사회적인 변수를 포함하고 있는 대표적인 지수이며 현재에도 널리 이용하고 있는 지표이다.

아) 수자원취약성지수(Water Resource Vulnerability Index, WRVI)

Shiklomanov(1993)는 지역에 따른 물이용을 가정, 공업, 농업 수자원이용(Domestic,

Industrial, Agricultural, DIA)으로 정의하여 분류하였고 Raskin et al.(1997)은 이를 적용하여 이용가능한 물(Q, discharge)과 Shiklomanov의 물소비량 사이의 비율로 수자원취약성지수 (Water Resource Vulnerability Index, WTA)를 제안하였다.

$$WTA\ ratio = \frac{DIA_n}{Q_n}$$

만약 WTA가 20~40%라면 물이 부족하다(water scarce)고 정의하고, 40%를 초과할 경우 심각하게 물이 부족한 상태(severely scarce)로 정의하고 있다.

자) UN WATER(2006)

세계 물 평가 프로그램(World Water Assessment Programme)에서 구축된 프레임워크에 UN-Water의 데이터베이스를 이용하여 지표를 구성하였다. 이 중 일부는 지표평가가 완료되었고, 일부는 개발 중이거나 제안된 상태이다.

■ 표 2-5. 세계 물 평가를 위한 프레임워크

모니터링 분류	
목표 모니터링	
지속가능한 개발	인간개발지수(HDI)와 연계한 물 개발 지표
	충전가능한 수자원 대비 지하, 지표수로부터 관개하는 물의 연간 비
	생물화학적 산소요구량(BOD)
새천년개발목표	담수 내 배설물대장균 농도
	선진 식수공급 시스템을 이용할 수 있는 인구 비율
	선진 위생시설을 이용할 수 있는 인구 비율
IWRM과 수자원 거버넌스	IWRM의 계획단계 상황
	IWRM상의 재정적 단계 상황
	국가물정책의 포트폴리오

표 2-5. 세계 물 평가를 위한 프레임워크 (계속)

모니터링 분류	
시스템 모니터링	
자원	연 강수량
	연 강우 일수
	연 눈이나 얼음으로 충전가능한 수자원
	연 지하수 생산량
	연 탈염수 생산량
	연 오폐수정화를 통해 재이용하는 수량
저장과 이용	총 지하수량
	총 재충전가능한 수량(지표 및 지하수)
	지표수 수준
	물 스트레스 지표(1인당 충전가능한 수자원량)
	습지
	물 저장량(실제사용능력)
	물 저장량(잠재능력 대비 실제량)
	물 저장량(1인당 물저장능력)
기타 지속가능성	국가 물 부족 지표
	지역 외부 수원 의존성
	물 배분 및 분배효율
	강우 계절성 지표
	기후 습윤 지수
조기경보	재해방지 및 대응 지표
	추정강수 예보
생산과 이용	물 생산: 분배 시스템에 공급되는 물의 양
	연간 총 물이용(취수량)
	연간 총 물 소비(취수량-회귀량)
	분야별 물이용
	농업 물이용 강도(농업관개량/작물가격)
	공업 물이용 강도(공업수이용량/경제활동)
	가정 물이용 강도(가정수이용량/주거클러스터)
	연 생태계 물흐름 요구량
보건과 사회	콜레라 사망률
	5세 미만 영아의 설사병 감염
	가뭄으로 인해 죽거나 피해 받은 사람의 수
	홍수로 인해 죽거나 피해 받은 사람의 수
	여성이 물을 길어오는 데 소모되는 시간
	여학생이 물을 길어오느라 학교에 참석하지 못한 일수
	식수 및 위생설비를 위한 개발원조

■ 표 2-5. 세계 물 평가를 위한 프레임워크 (계속)

모니터링 분류	
시스템 모니터링	
경제	관개 용지
	전체 경작면적 중 관개용지
	관개로 인해 염류화가 이루어지는 면적
	관개에 지하수를 이용하는 면적
	농작물생산물 중 관개를 이용하는 생산물량
	수력발전 가능발전량
	개발중인 수력발전소
	1리터의 물 가격
	1인당 수입 대비 1리터의 물 가격 비
	환경을 포함한 물분야의 연 투자비용
	국제은행 차관을 통한 연 물분야 투자비용
	전체 정부 예산 중 물분야 투자율
	전체 국외 원조 중 물분야 투자율
	연 GDP 대비 가뭄의 영향
	연 GDP 대비 홍수의 영향
연 GDP 대비 물관련 사고의 영향	
수질	질소 농도
	화학적 산소요구량(COD) 농도
	연간 환경적 수량 요구량
	연간 수생태계 유지를 위한 수량 요구량
	대형 댐과 저수지에 의한 토사유실량 저감
	담수 서식처 보호 현황
	Living Planet Freshwater 지표(담수종)
	국가 단위 생물다양성 지표
	강수의 동위원소 구성
	특정 지점에서의 수질

자료: UN WATER(2006)에서 제작성.

차) 영국 수자원산업 정책평가를 위한 지속가능성 지표

Foxon et al.(2002)는 도시 차원에서 통합적으로 수자원 관리 평가를 함으로써 지속가능성을 담보할 수 있는 의사결정을 지원하기 위해 도시의 수자원 지속가능성 평가 지표를 구축하였다. 수자원 관리의 지속가능성을 평가하는 데 환경뿐 아니라 경제, 사회, 기술적 주제에 대해 형평성을 조절하여 지표를 선정하여 평가하고 있으며 환경 주제 내의 자원 활용 항목에 포함되는 지표를 제외하고 모두 0~5의 정성적 변수를 활용하여 평가하였다.

표 2-6. 영국 수자원산업 정책 의사결정을 위한 지속가능성 평가지표

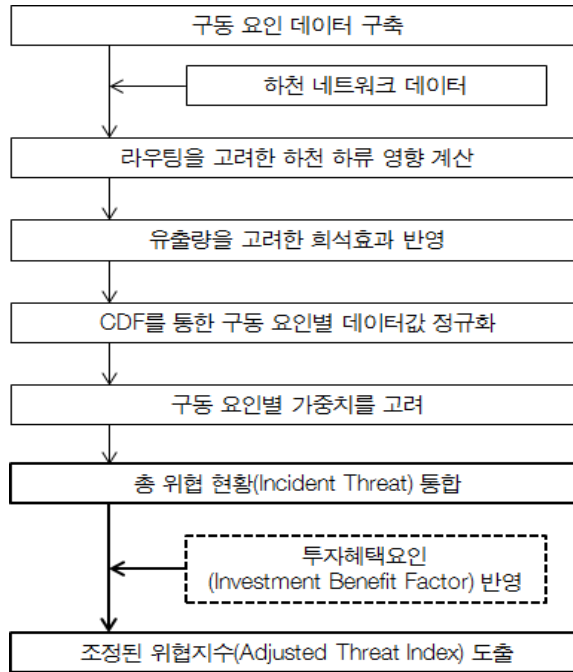
주제	기준		지표 예시
환경	자원 활용	물이용량	연간 담수 관개량, 적정한 수준의 수질을 가진 하천 비율, 영양물질 기준 초과 하천 비율
		에너지 사용량	물 공급, 하수처리에 필요한 에너지량
		화학약품 사용	제초제 사용량
		토지이용	인간에 의해 이용되고 있는 토지 면적
	서비스 제공	가정용 물 소모량, 비가정 물 소모량, 누수율, 물 재이용량, 하수발생량	
	환경적 영향	BOD, P, N 농도, 슬러지 발생량, 중금속 농도, 오염에 영향 받는 주요 종	
경제	인프라 생애주기비용	자본, 운영, 유지비용	
	지불의사금액	상품, 환경적 혜택, 안전, 건강 등	
	구매능력	저소득계층의 수입	
	경제적 리스크 노출	투자자와 관련된 손실 리스크	
사회	건강 리스크	깨끗한 물을 이용할 수 있는 인구 비율, 독성물질로 영향 받은 인구 비율	
	수용가능성	불평신고 접수건수, 물관련 재해에 우려하는 시민 비율, 긍정적 환경영향을 인지하는 시민 비율	
	참여, 책임감	이니셔티브에 참여하는 인구 비율, 지역 어젠다21 개최 건수, 의식 및 행동변화를 원하는 시민 수	
	공공인식	지역 커뮤니티 내 인식 정도	
	사회적 포용력	정보접근권한이 있는 시민 비율, 자원봉사활동에 참여하는 시민 비율	
기술	처리능력	연중 수질기준 준수 비율, 수질관련 민원건수, 오피수 수질	
	신뢰성	기준미달용수 제공인구, 급수제한 경험인구, 급수제한 등의 민원건수	
	내구성	인프라시스템의 내구연도	
	유연성, 적응성	미래 변화에 따라 조절할 수 있는 정도, 시설을 증축하거나 없애는 데 필요한 금액	

자료: Foxon et al.(2002)에서 제작성.

카) 인간 물 안보와 하천생물다양성의 지표 평가

Vörösmarty et al.(2010)은 Nature지 논문에서, 전 세계를 대상으로 인간 물 안보와 하천 생물다양성을 함께 고려하는 지표를 구축하여 평가하였다. 기존까지 인간 물 안보는 하천의 생물 환경과 대치되는 독립적인 관계로 평가되었기 때문에 서로의 상호작용을 고려한 통합적 평가 사례가 거의 없었다. 또한 위 연구에서는 전 세계를 대상으로 동일한 크기의 격자로 구성된 뒤 상류에서 하류로의 하천의 흐름을 고려하여 평가하였는데, 이는 기존의 많은 국제적 환경 평가지표 연구들이 국가경계를 대상으로 상태를 평가하거나 물의 흐름을 고려하지 않았던 개념에서 진보한 것이라고 평가할 수 있다. 또한 댐, 저수지 등의 인간 물이용을 위한 시설물에 대해 하천 생물다양성에 부정적인 평가로서 스트레스지표로 삼는 동시에, 인간물이용을 위한 긍정적인 평가로서 스트레스저감지표로 삼음으로써 인프라가 가지는 이중적 측면을 각각 평가하고자 하였다. 위 지표들은 인간 물 안보와 하천 생물다양성과 영향관계에 있다고 판단되는 주제를 4가지로 선정하여, 스트레스지표와 스트레스저감지표로 나뉘어 구축하였다 (표 2-7 참고). 이후 전문가 의견을 통해 도출한 각 지표 사이의 가중치를 반영하여 최종적으로 ‘조정된 스트레스지표(adjusted stress index)’를 도출하였다.

Vörösmarty et al.(2010)은 국제협동연구에서 활용되었을 뿐 아니라, 본 보고서의 지속가능한 물이용 지표 개발에 기반이 되는 연구이기도 하다. <그림 2-2>는 Vörösmarty et al.(2010)의 연구 체계를 나타내고 있으며, 각 지표를 도출하기 위해 사용된 지표 및 가공과정은 <부록 2>에 나타나 있다.



자료: Vörösmarty et al.(2010)에서 제작성.

그림 2-2. Vörösmarty et al.(2010)의 연구 체계

표 2-7 Vörösmarty et al.(2010)의 지표항목

S/R	주제(Theme)	구동변수(Driver)	설명
스트레스	유역 교란 (Catchment ² Disturbance)	경작지 (Cropland)	자연 토지에서 경작지로 변환된 지역
		불투수지역 (Impervious Surfaces)	자연 토지에서 불투수지로 변환된 지역
		가축 밀도 (Livestock Density)	가축을 통한 물리적 변형(답압)
		습지 단절 (Wetland Disconnectivity)	습지용도 변형으로 인해 습지기능이 손실된 지역

표 2-7 Vörösmarty et al.(2010)의 지표항목 (계속)

S/R	주제(Theme)	구동변수(Driver)	설명
스트레스	오염 물질 (Pollution)	토양염류화 (Soil Salinisation)	유역 내 토양의 염류화정도를 반영하기 위해, EC(Electrical Conductivity) 0.2dS/m 이상인 지역
		질소 부하량 (Nitrogen Loading)	질소의 과잉공급은 부영양화를 유발
		인 부하량 (Phosphorus Loading)	인의 과잉공급은 부영양화를 유발
		수은 오염 (Mercury Deposition)	유독한 오염물질로 신경독성을 유발하며 먹이사슬을 통해 체내에 축적됨
		농약 부하량 (Pesticide Loading)	급성·만성적인 독성으로 인해 생태계 전반에 직간접적인 영향을 미침
		토사 부하량 (Sediment Loading)	자연적으로 물의 흐름도 토사유출을 유발하지만 인간의 토지이용은 이를 더욱 가속화하여 토사유출을 증가시킴
		유기물질 부하량 (Organic Loading)	불쾌한 맛이나 질병을 유발하는 위생적 문제 및 유독한 화학성분이나 영양성분 포함 가능성
		잠재적 산성화 (Potential Acidification)	산성도에 민감한 특정 생물분류군에 간접적인 영향
		열적 변형 (Thermal Alteration)	부영양화 민감성을 증가시키고 용존산소량을 감소
	수자원개발 (Water Resources Development)	댐 밀도 (Dam Density)	하천생태계를 수몰시키며 물의 자연적인 흐름을 방해
		하천의 연속성 단절 (River Fragmentation)	수중 생물군의 개체수나 유전적 교류를 감소시키며 동물군의 이주를 제한
		소모적 물 손실 (Consumptive Water Loss)	농업, 산업 등에 이용되는 물은 인간과 다른 동식물의 생존에 필요한 수자원가용성을 위태롭게 함
인간 물 스트레스 (Human Water Stress)		인간이 특정 수준 이상의 삶을 영위하기 위해 필요한 최소한의 물의 양을 충족하는지 여부	
농업 물 스트레스 (Agricultural Water Stress)		경작지 관개를 위해 필요한 물의 양	
흐름 변형 (Flow Disruption)		흐르는 물의 시간을 지체하여 물의 나이를 많게 하며, 이는 영양분, 유기물, 미세입자를 가두어 자연적인 흐름을 방해함	
생물요인 (Biotic Factors)	외래어종 비율 (Non-Native Fishes (%))	먹잇감을 두고 자생종과 경쟁하거나 생태계 구조 및 기능의 교란을 유발하는 외래어종의 개체 비율	
	외래어종 수 (Non-Native Fishes (#))	먹잇감을 두고 자생종과 경쟁하거나 생태계 구조 및 기능의 교란을 유발하는 외래어종의 개체 수	
	어업 압력 (Fishing Pressure)	군집구조와 영양계단(trophic cascade)을 변화시킴	
	수경재배 압력 (Aquaculture Pressure)	집중적인 화학적 오염(유기물질, 영양물질, 항생제 및 살진균제)으로 인한 수질오염	

■ 표 2-7 Vörösmarty et al.(2010)의 지표항목 (계속)

S/R	주제(Theme)	구동변수(Driver)	설명
반응	댐 밀도 (Dam Density)	댐 밀도 (Dam Density)	홍수방지, 건조기의 수자원공급, 수력발전, 관개 등을 가능하게 하는 중소규모의 댐 인프라를 고려
	댐 저수량 (Flow Disruption)	댐 저수량 (Flow Disruption)	대규모 댐 인프라의 수자원 저장능력
	적정 물이용 수준 (Moderate Water Use)	적정 물이용 수준 (Moderate Water Use)	물 사용량/유출량의 값이 0.1 이전까지는 값이 커질수록 사회적 혜택이 증가하지만 0.1을 넘어서면 혜택을 잃으므로, 이 임계값을 기준으로 유출량 대비 인간의 물 사용량이 적정한지를 고려
	하천 코리도 접근성 (River Corridor Access)	하천 코리도 접근성 (River Corridor Access)	둑 다짐, 호안공사, 습지개선 등이 이루어진 지역. 습지단절성(Wetland Disconnectivity)
	깨끗한 식수 접근성 (Access to Clean Water)	깨끗한 식수 접근성 (Access to Clean Water)	인간이 이용하는 가장 기본적이고 중요한 물이용의 목적인 식수를 공급받고 있는 인구의 비율

자료: Vörösmarty et al.(2010)에서 재작성.

타) 유역지속가능성지수(Watershed Sustainability Index)

Chaves and Alipaz(2007)에서는 브라질의 한 유역을 대상으로 IWRM의 개념과 PSR구조를 통해 유역지속가능성지수(Watershed Sustainability Index)를 구축하여 수자원의 지속가능한 이용을 위한 유역의 지속가능성을 평가하였다. 즉, 지금까지 환경적 물부족 지표에 대해 많은 선행연구가 진행되었지만, 대부분 유역단위로 이루어지지 않거나 통합수자원관리측면에서 유역의 지속가능성에 대해 다루고 있지 못했음을 지적하였다. 따라서 위 연구에서는 UNESCO의 국제수문프로그램(International Hydrologic Program, IHP)에서 수문(Hydrology), 환경(Environment), 생활(Life), 정책(Policy) 이슈를 포괄하는 HELP 프레임워크를 도입하여, 유역경계별로 물이용의 지속가능성을 평가하였다.

$$WSI = \frac{H + E + L + P}{4}$$

2) 일반적으로 'catchment'는 집수구, 'basin'은 유역으로 이해되며, 집수구보다 유역이 더 큰 공간적 범위를 나타내지만, Vörösmarty et al.(2010)의 연구 내용상 위 용어의 정의는 집수구역보다 유역에 가깝다고 판단하여 본 연구에서는 '유역' 교란으로 사용하였음.

■ 표 2-8. 유역 지속가능성 지표(Watershed Sustainability Index) 구성요소

	압력(Pressure)	상태(State)	반응(Response)
수문(Hydrology)	1인당 물 가용성 변화	1인당 물 가용성(장기평균)	물이용 효율 개선(하수처리)
환경(Environment)	EPI(환경성과지수)	BOD5(장기평균) 유역 내 자연식생 비율	유역보전활동(보호지역 비율) 증감
생활(Life)	1인당 소득의 변화	지역인구로 가중치를 계산한 HDI	HDI 개선정도
정책(Policy)	HDI-교육수준의 변화	IWRM에서 제시한 기관 능력 지수	IWRM의 지출액 증감

자료: Chaves and Alipaz(2007)에서 제작성.

2) 국외 연구 사례 소결

국외 연구 사례를 검토한 결과, 국제적 지표 평가에 사용되는 지표는 매우 명확하고 분명한 지표와 자료를 사용하고 있으나, 정보의 한계 등으로 인해 한정적인 지표를 사용하는 것으로 확인할 수 있었다. 동시에 물이용의 지속가능성을 평가함에 있어 미래 기후전망 및 인구변화를 동시에 고려하는 복합적 모형을 사용하는 것도 일부 확인할 수 있었다. 하지만 이 역시 기본적으로 물의 수요와 공급 개념을 중심으로 평가되고 있음을 알 수 있다.

일부 지속가능한 물이용 평가에서는 물의 수요와 공급뿐 아니라 유역환경, 생물다양성 등 환경적 요인과 거버넌스, 시민참여 등 사회적 요인을 고려하여 다수의 지표를 통해 평가하는 연구를 확인할 수 있었으며, 이를 본 연구에서 활용하여 지표를 구성하고자 하였다.

다. 지표 국내 연구 사례

1) 연구 사례

가) 국가지속가능발전지표(환경부, 2001)

환경부(2001)는 지속가능성의 개념이 대두함에 따라 우리나라의 지속가능한 발전을 평가하기 위해 국가지속가능발전지표 개발 및 활용방안에 대한 연구를 수행하였다. 위 연구는 UNCSO의 지속가능발전지표(Sustainable Development Indicator)와 OECD의 PSR (Pressure - State - Response)모형을 바탕으로 한 지속가능발전지표 등을 검토한 뒤 우리나라에 맞는 지속가능발전지표를 구축하였다. 우리나라의 지속가능발전지표는 사회지표 21개, 환경지표 19개, 경제지표 18개, 제도지표 6개로 구성되었으며, 이 중 수자원과 관련된 지표를 정리하면 아래와 같다.

■ 표 2-9. 국가지속가능발전지표 내 물이용 관련 변수

분야	하위분야	지표	물이용 관련 변수	
사회	형평성	빈곤	-	
		남녀평등	-	
	건강	영양상태	-	
		사망률	-	
		공중위생	하수처리항유 인구	
		식수	안전한 식수 접근 인구	
		건강관리	사회보장 및 복지예산	
	교육	교육수준	-	
	주택	생활환경	-	
	안전	범죄	-	
	인구	인구변화		인구증가율
				인구밀도

표 2-9. 국가지속가능발전지표 내 물이용 관련 변수 (계속)

분야	하위분야	지표	물이용 관련 변수
환경	대기	기후변화	-
		오존층	-
		대기질	-
	토지	토지이용	토지이용변화
		농업	경작에 적합하고 영구적인 경작지
			비료 사용
			농약 사용
	산림	토지지역 중 산림지역 비율	
	도시화	도시화	도시 내 거주면적
		연안지역	-
	해양/연안	어업	주요 종의 연간 어획량
		담수	수량
	수질		BOD
생물다양성	생태계	주요 보호지역	
	종	멸종위기종 비율	
경제	경제 구조	경제 이행	1인당 GDP
		무역	-
		재정상태	GDP 대비 환경보호 지출
	소비/생산	물질소비	-
		에너지 사용	-
		폐기물 관리	폐기물 재활용 및 재이용
		운송	-
제도	제도 형태	국제 협력	-
	제도 용량	정보 접근	-
		정보 인프라	-
		과학과 기술	-
	재해 준비와 반응	자연재해로 인한 인명피해 및 경제적 손실 재해도수율, 재해강도율, 재해사망률	

자료: 환경부(2001)에서 제작성.

나) 수자원장기종합계획

최근 수자원 이용과 관련해서는 수자원장기종합계획의 물이용종합계획 기본방향(국토교통부, 2011)을 통해 전 국토에 대한 수자원 계획을 구축하고 있으며, 물이용뿐 아니라 하천환경의 생태성, 기후변화 대응, 공유하천의 물 안보 등에 대해 폭넓게 다루고 있다. 구체적으로 ①수요관리를

통한 물이용 체계 강화, ②하천유량 복원을 통한 하천생태계 및 수질 보전, ③지역적 물이용 형평성 및 안정성 확보, ④지역특성과 경제효율성에 적합한 수자원 개발, ⑤이상가뭄 대비 위기대처 능력 향상, ⑥지하수의 효율적 활용과 보전, ⑦남북공유하천 수자원협력 추진의 어젠다를 표방하고 있다. 국제적으로 지속가능한 물이용의 개념의 변화에 비추어 볼 때, 우리나라의 지속가능한 물이용을 위한 정책은 기후변화를 고려한 물공급과 물이용뿐 아니라 하천생태계 복원, 위기대처능력 향상 등 생태계, 수질, 유역관리와 거버넌스를 고려하고자 하는 목표를 살펴볼 수 있다.

수자원장기종합계획 내에서는 수자원 이용에 부정적인 영향을 미치는 홍수의 영향을 평가하기 위한 지표인 홍수위험도와, 하천환경의 질적 평가를 수행하기 위한 지표인 하천환경평가지표를 개발하여 일부 유역을 대상으로 수행하였다.

홍수 위험도는 기상, 수문지형, 사회경제, 홍수방어 인프라를 반영하여 통합적인 위험도를 평가함으로써 지역별로 홍수피해의 특성을 평가하여 지역별 치수대책을 차별하여 적용하고자 한다. 기상, 수문지형, 사회경제, 홍수방어 취약성으로 구성된 지표를 기준으로 아래 표와 같은 평가항목을 구축하고 있다.

■ 표 2-10. 홍수 위험도

지표	평가항목
기상	극한강우사상 빈도, 일강수사상 빈도
수문지형	홍수위험지역, 홍수피해규모지표, 불투수율, 유역경사도
사회경제	인구밀도, 재정자립도, 의존인구비율
홍수방어 취약성	제방정비율, 배수펌프장 개소수

자료: 국토교통부(2011), 수자원장기종합계획에서 재작성.

하천환경 평가지표는 하천의 자연도, 수질, 서식환경, 친수성을 종합적으로 고려하여 평가할 수 있도록 함으로써 하천환경 현황 파악 및 관리·개선의 목표를 수립하기 위해 구축되었다. 하천환경 평가지표는 하천자연도, 생물서식처, 친수성, 수질로 구성된 지표를 기준으로, 각 지표 내의 평가항목을 구축하여 합산한 뒤 점수화하여 5등급으로 구분하게 된다. 하지만 이는 기초자료의 미비, 자료취득의 한계 등으로 5대강 본류 일부 및 하천환경에 대표성을 띠는 하천 일부를

대상으로 평가하였다.

■ 표 2-11. 하천환경 평가지표

지표	평가항목
하천자연도	하천형상, 구조물설치, 저수호안, 제방, 토지이용
생물서식처	서식처 안전성, 하상구조, 유속/수심, 유사퇴적영향, 하도흐름, 습지출현빈도 및 형태, 여울출현빈도, 저수호안 안정성, 식생피복도, 하반림
친수성	역사성, 지역문화성, 하천경관과 친수시설, 친수활동
수질	pH, BOD, COD, TP, SS, DO, 대장균

자료: 국토교통부(2011), 수자원장기종합계획에서 재작성.

다) 물 안보지수

물 안보지수에서는 지속가능한 물이용을 물 안보 측면에서 DPSIR 구조에 따라 지표를 구성하였으며, 가중치를 계산하여 통합한 뒤 물 안보지수를 평가하였다(홍일표 외, 2011). 위 연구에서는 수자원이용의 세부 분야로, 물관련 재해 경감, 물분쟁, 안정적 물공급을 위한 지역격차 해소, 친수환경조성, 물재이용을 검토한 뒤 이를 반영하여 물 안보지표를 구성하였다.

■ 표 2-18. 물 안보를 평가하기 위한 지표

	요인	압력	상태	영향	반응
사회	-출생률 -기대수명	-인구 -인구밀도			
경제		-전체 에너지 사 용량 중 수력발전 및 재이용가능한 에너지 생산비율			-1인당 GDP
환경		-식량생산지수	-1인당 물이용 가 용량	-하수도시설 설 치비율 -해수면 1m 상승 으로 영향받는 인 구	-수원 공급처 증 가비율 -과학공학논문 수

자료: 홍일표 외(2011)에서 재작성.

라) 지속가능한 수자원 개발과 관리를 평가하기 위한 지표

최시중, 이동률(2005)은 PSR구조에 따라 큰 지표를 구성한 뒤 각각에 세부주제와 세부지표를 구성하여 방대한 범위에서 우리나라의 수자원현황을 평가하였다.

표 2-13. 지속가능한 수자원 개발과 관리 평가를 위한 지표

PSR	주제	지표
압력지표	사회적 요인	인구밀도
		교통밀도
	수자원의 이용 및 기상현상	생활용수사용량
		지하수사용량
		강우량
		상수도누수율
	토지이용변화	도로율
		산림면적 변화율
		하천면적 변화율
		경지면적 변화율
	환경부하	생활하수 처리량
		비료 소비량
		토양오염 유발시설수
		수질오염 배출시설 현황
	경제	실업률

표 2-13. 지속가능한 수자원 개발과 관리 평가를 위한 지표 (계속)

PSR	주제	지표
상태지표	수자원현황	1인당 사용가능량
		지하수개발의 정도
		광역상수도 공급현황
		1인당 1일 물 소비량
		풍수해 피해현황
		하천면적
	토지구조	산림면적
		농지면적
	경제	지역 내 GDP
		식량작물 생산현황
		수산물 어획고 현황
		경제활동 참가율
	환경부하	하수처리 시설용량
		주요 하천의 수질 현황
지하수의 수질 현황		
공중위생 관계업소 현황		
토양 중금속 농도		
수질측정망 현황		
대응지표	수질향상	하수처리율
		하수도 요금현황
		수질오염 배출시설 단속 및 행정조치 현황
		수질관련 배출부과금 징수현황
		상수원 보호구역 지정 현황
		하수도관련 공사비지출 현황
	수자원	하수처리능력
		상수도 관련 세출 현황
		상수도 요금현황
		풍수해 복구 현황
	인간활동	수자원관련 공무원수
		학교 현황
		의료 기관 현황
	환경	지역 내 총 세출현황
		환경오염 배출시설 단속 및 행정조치 현황
	자연	환경분쟁조정현황
		조수보호구역 지정현황
		공원 현황

자료: 최시중, 이동률(2005)에서 재작성.

마) 수자원지속성지수(Water Resources Sustainability Index, WRSI)

강민구, 이광만(2006)은 수계의 수자원 이용 및 관리의 지속가능성을 평가하였다. 지표의 선정은 일반국민 1,000명과 전문가 106명을 대상으로 수자원 이용의 문제점 및 개선점에 대해 설문조사를 실시하였다. 이를 바탕으로, 수자원 이용의 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경 보전성, 유지관리능력으로 대분류를 구성하여 지표를 구축하였다. 또한 각 세부지표별 중요도를 평가하기 위해 공사, 연구원, 교수, 공무원 등 전문가 127명에 대해 AHP 설문조사를 통해 가중치를 도출하였다. 하지만 지표 및 가중치의 결과만을 제시하여 다양한 분야의 기여도를 반영하고 중요도를 확인하였으나 이 자료를 실제 유역 권역에 적용하여 평가하지는 않고 있다.

■ 표 2-14. 수자원 지속성 지수

대분류	지표 항목	
경제적 효율성	- 생산액당 수자원 취수량 - 보조 수자원 이용량	- 생산액당 목표수질 달성률 - 수자원의 경제적 편익
사회적 공평성	- 상수도 보급률 - 하수도 보급률	- 공업용수이용률 - 관개답률 - 하천유지유량 달성률
환경 보전성	- 하천수 수질생태	- 지하수 수질생태 - 생태계 보전정도
유지관리능력	- 단위면적당 고졸인구수 - 1인당 교육 및 문화분야 투입액	- 단위면적당 수자원분야 투입액 - 1인당 절수량

자료: 강민구, 이광만(2006)에서 제작성.

바) 이수분야 수자원 정책지표

최동진, 박두호, 김상문(2009)은 이수분야 수자원 정책의 목표를 구축하고 달성하기 위한 기준을 설정하기 위해, 안정성, 효율성, 형평성, 지속가능성으로 수자원 정책의 패러다임으로 정리하여 핵심 지표를 선정하였다.

표 2-22. 이수분야 수자원 정책지표

영역	정책 목표 및 방향	지표 (최종 핵심지표)
안정성	강수, 기후변화, 인구, 경제, 사회 등 장래 환경이 불확실한 상황에서도 안정적으로 물 부족에 대응할 수 있는 능력이 확보되는 것을 의미	- 물압박 지표 - 사회적 물부족 지수 - 가뭄시 물 부족량 - 물부족 지역 비율 - 국가 물 자급률 - 상수원 안정성 - 물공급 안정성
효율성	물의 사용량과 누수율을 줄이고, 생산성과 재이용률을 제고, 물 관리의 건전한 재정을 확보하기 위해 비용회수체계를 개선	- 1인당 가정용수 사용량 - 누수율 - 하수처리수 재이용률 - 물관리 재정 건전성 - 물비용 회수율 - 요금 현실화율
형평성	도시와 농촌, 지역간 물이용의 격차, 요금의 격차, 지역 간 물 자급률의 격차 등을 개선하여 사회적 약자나 소외계층의 물이용 능력을 높이는 것	- 상수도 보급률 - 가계지출 중 요금부담 - 물관련 공공투자 비율 - 요금 수준 - 물이용 공평성
지속가능성	하천환경의 기능을 훼손하지 않는 범위 내에서 수자원을 이용하고 환경개선, 생태계 보존, 친수활동 등에 대한 물 수요에 대응하는 것	- 물빈곤지수 - 상수도 신도도 - 환경유량 확보율 - 취수율

자료: 최동진, 박두호, 김상문(2009)에서 제작성.

사) 국가 수자원 관리 지표 분류

강민구, 박두호(2010)는 국외의 대표적인 수자원 지표를 검토한 뒤 우리나라의 수자원 관리를 위한 지표를 DPSIR 구조에 따라 이수관리, 홍수관리(치수관리), 하천환경관리로 나누어 구축하였다. 하지만 지표 통합 및 유역에 따른 평가는 수행하지 않았고, 국가 수자원 관리를 위한 정책적 제언을 담고 있다.

표 2-23. 국가 수자원 관리와 관련된 지표들의 분류

	추진력	압력	상태	영향	반응
이수관리	<ul style="list-style-type: none"> - 인구(인구밀도) - 교육수준 - GRDP - 실업률 	<ul style="list-style-type: none"> - 연 강수량 - 도시화율 - 지하수 취수량 - 농지면적률 	<ul style="list-style-type: none"> - 상수도보급률 - 하천유지유량 달성률 - 관개답률 - 인구당 수자원량 - 농지당 수자원량 	<ul style="list-style-type: none"> - 제한급수피해 면적 및 인구수 - 하천유지유량 달성 미달 일수 	<ul style="list-style-type: none"> - 보조수자원량 - 절수기 보급률 - 가뭄우려지역 면적률 - 국토개발보전 분야 세출액 - 상수도 누수율 - 국가하천 비율 - 절수기기 보급률 - 상수도 요금 현실화율 - 수자원분야 공무원수 - 1일 1인당 물소비량
홍수관리	<ul style="list-style-type: none"> - 인구(인구밀도) - GRDP - 자산가치 - 실업률 	<ul style="list-style-type: none"> - 일 최대 강우량 - 산림면적 - 도시화율 - 표고 및 유역경사 	<ul style="list-style-type: none"> - 홍수발생빈도 - 100년빈도 확률홍수량 	<ul style="list-style-type: none"> - 침수면적 밀도 - 재산 피해액 밀도 	<ul style="list-style-type: none"> - 재해위험지구 면적 - 국토개발보전 분야 세출액 - 홍수방어시설용량 - 하천개수율 - 국가하천비율 - 수자원분야 공무원 수
하천환경관리	<ul style="list-style-type: none"> - 인구(인구밀도) - 교육수준 - GRDP - 개인당 차량 보유대수 - 실업률 	<ul style="list-style-type: none"> - 배출부하량 - 불투수면적률 - 산림면적률 - 생태자연도1등급 면적 - 농지면적률 - 비료사용량 	<ul style="list-style-type: none"> - BOD 목표 달성률 - 하천수 수질 - 지하수 수질 	<ul style="list-style-type: none"> - 목표수질 미달 성일수 - 수질사고 발생 횟수 	<ul style="list-style-type: none"> - 법적규제 면적 - 국토개발보전 분야 세출액 - 하수처리율 - 국가하천비율 - 수질오염배출시설 단속실적 - 수자원분야 공무원 수

자료: 강민구, 박두호(2010)에서 재작성.

아) 통합수자원평가지수

이동률 외(2013)는 통합수자원평가지수를 개발하여 국가의 수자원 정책목표 수립, 우선순위 선정 및 사업이행결과 평가 등에 사용할 수 있도록 구성하였다. 물이용, 홍수 및 하천환경의 3개 수자원 정책 부문의 사업성과를 지역별로 평가하는 통합수자원평가지수(Integrated Water Resources Evaluation Index, IWREI)는 물이용취약지수, 홍수취약성지수, 하천환경취약지수를 통합하여 산정하였고, 각각의 지수는 압력, 상태, 반응의 PSR 구조를 가진다. 각각의 지수 및 최종 통합수자원평가지수는 우리나라 115개 중권역을 대상으로 적용하였고, 1990년대와 2000년대를 평가하여 비교함으로써 수자원 정책의 사업효과를 평가하고 향후 정책 목표 및 사업이행 우선지역을 제안하고 있다.

물이용취약지수, 홍수취약성지수, 하천환경취약지수는 총 26개 지표로 구성되며, 세 가지 지수를 통합하여 최종 통합수자원평가지수를 도출했다. 세가지 지수 및 최종 지수는 Low부터 High까지 다섯 단계로 평가하였다.

표 2-17. 통합수자원평가를 위한 지표 개발

지수(Index)	프레임워크	지표 (Indicator)
물이용 취약성	압력	가정용수 이용
		산업용수 이용
		농업용수 이용
		가뭄발생확률일수
		하천수 취수율
	상태	급수제한으로 영향받는 인구
		물부족 전망
	반응	수자원시설 저장용량
		광역 물 공급
		산업용수 공급
물 관련 투자액		
물 관련 인식		
홍수 취약성	압력	1일 80mm 이상의 강수 발생
		도시화율
		논 비율
		인구 밀도
	상태	홍수 피해액
		침수지역면적
		침수로 영향받는 인구
	반응	홍수통제능력
		하천 개수율
		홍수통제 투자액
복원 지출액		
하천환경 취약성	압력	오염물질 부하
	상태	수질
	반응	하수도 공급량

자료: 이동률 외(2013)에서 재작성.

자) 이수 관련 기후변화 취약성 산정을 위한 대응 변수

국립환경과학원(2013)은 다양한 분야에서 기후변화로 인한 취약성을 산정하고 평가하기 위해 각의 분야에서 대응변수를 구축하였다. 그 중 이수와 관련된 기후변화 취약성을 평가하기 위해 구축한 대응변수는 <표 2-18>와 같다.

표 2-18. 이수 관련 기후변화 취약성 산정을 위한 대응변수

대응변수	변수목록
기후노출	연속적 무강수일수의 최대값(일)
	겨울(12~2월) 강수량(mm)
	봄(3~5월) 강수량(mm)
	겨울(12~2월) 증발산량(mm)
	봄(3~5월) 증발산량(mm)
민감도	지하유출(mm)
	인구밀도(명/km ²)
	총인구(명)
	상수도 1인 1일 급수량(Liter)
	면적당 곡물 생산(ton/km ²)
	면적당 축산물 생산(마리/km ²)
	지하수 이용량(m ³ /년)
	하천수 이용량(m ³ /년)
	생활용수 사용량(천m ³ /년)
	공업용수 사용량(천m ³ /년)
농업용수 사용량(천m ³ /년)	
적응능력	재정 자립도(%)
	인구당 공무원수(명/만명)
	지역내 총생산(GRDP)(백만원)
	면적당 물관리공무원수(명)
	상수도 보급률(%)
	지하수 가용량(천m ³ /년)
	단위면적당 용수공급용저수지 저수용량(천m ³)
	단위면적당 물 재이용량(천m ³ /년)

자료: 국립환경과학원(2013)에서 재작성.

2) 국내 연구사례 소결

현재 확인된 국내 연구사례를 살펴보면, 국내 수자원이용 관련 지표연구의 대부분은 OECD에서 개발한 PSR 구조를 기반으로 하고 있었다. 지표 내용을 살펴보면 최시중, 이동률(2005)의 지속가능한 수자원개발과 관리를 평가하기 위한 연구에서 가장 많은 지표를 통해 평가하고 있었는데, 각종 물 관련 지표뿐 아니라 경제적·사회적 요인들을 포함하여 기존 물이용 평가 지표에서 고려하지 못했던 거버넌스, 예산투자 등을 다각도로 반영하려는 점을 확인할 수 있었다. 하지만 빗물이나 하수처리수 재이용 등 지속가능한 대체수원을 포함하지 않았고, 수질 및 수생태계에 대한 평가가 미흡한 것으로 확인되었다. 그리고 댐, 저수지 등 인간이 설치한 인프라의 긍정적·부정적 평가를 직접적으로 이용하는 지표를 포함하고 있지 않았다.

유사하게 이동률 외(2013)의 통합수자원평가를 위한 지수 개발 연구에서는 가뭄·홍수 등 치수 항목에서의 지표가 과거발생 및 미래전망을 포괄하며 상세히 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. 또한 댐, 저수지 등 물이용을 위한 인프라를 지표에 수자원시설 시설용량 변수를 통해 포함시켰다. 하지만 해당 시설이 하천의 수생태계나 유역에 미치는 부정적인 영향에 대해 다루고 있지는 않았다. 하지만 지표 및 가중치 구성 결과를 우리나라 전국 중권역을 대상으로 적용함으로써 통합적인 평가의 활용을 이행하고 있음을 확인할 수 있었다.

여러 국내 연구결과를 통합해보았을 때, 많은 논의에도 불구하고 현재 우리나라에서 수생태계 및 유역환경을 고려하는 연구는 연구별로 파편화되어 있으며, 이를 통합적으로 고려하는 수자원이용 지표연구는 매우 부족한 실정이라고 할 수 있다.



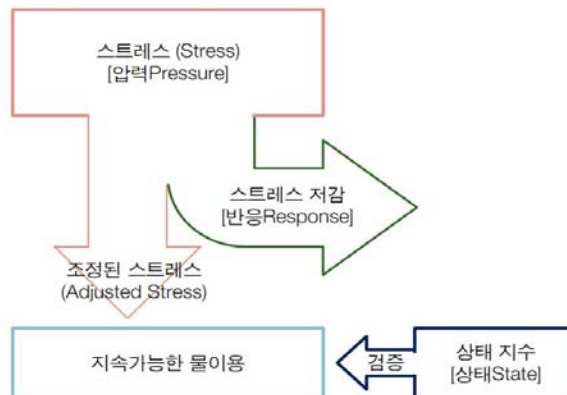
제3장

지속가능한 물이용을 위한
지표 개발 및 적용 방안

1. 지표 구성

지속가능한 물이용을 평가하기 위해 본 연구에서는 Vörösmarty et al.(2010)에서 구성한 지표 구조를 반영하여 ①압력(스트레스)과 ②반응(스트레스저감 또는 스트레스조정) 지표로 구성하였다. 예를 들어, 댐의 존재는 지속가능한 생태계 및 유역관리 측면에서 압력 요인으로 작용할 수 있지만, 지속가능한 인간의 물이용을 가능케 하는 점을 감안한다면 반응 지표로도 이용할 수 있는 점을 고려하고자 하기 때문이다. 즉, 압력 지표는 해당 항목의 지속가능성을 위협하는 지표들로, 반응 지표는 해당 항목의 지속가능성을 가능케 하는 지표들로 구성하였다.

이 구조는 많은 지표연구에서 활용한 PSR 구조를 변형한 것인데, P(압력)와 R(반응)에 중점을 두고, P(압력)를 스트레스로, R(반응)을 스트레스저감 요인으로 간주한 것이다. 여기서 S(상태) 요소는 이 지표 구조를 검정할 수 있는 구성요소로 활용하게 되며, 기존 많은 지표연구가 PSR을 병렬적으로 구성하는 방식이었던 점을 수정하여, 본 연구에서는 S지표를 통해 P, R지표에 대한 검정을 시도할 수 있도록 제안하였다.



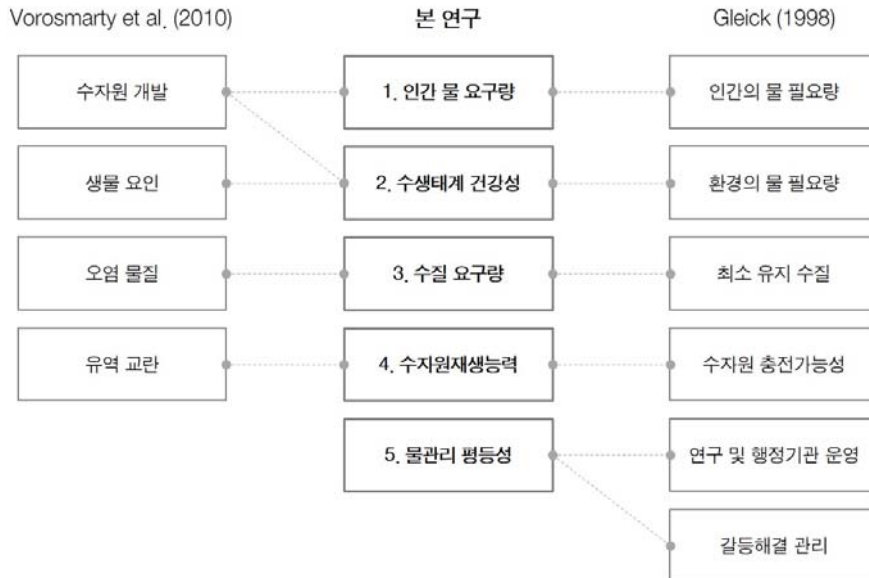
자료: 필자 작성.

■ 그림 3-1. 본 연구의 지표 구조

수자원 시스템의 지속가능성 평가지표 개발을 수행할 때에는, ①환경, 경제, 사회적 요소를 포함해야 하며, ②시간적 공간적 확장을 고려해야 하고, ③세대 간 형평성(equity) 포함, ④다학제적 고려가 필요하다(Foxon et al., 2002).

지표 구성과 관련하여 주요 물이용의 지속가능성 평가 연구를 살펴보면, 상위 카테고리를 구성함에 있어 환경·경제·기술·사회(Foxon et al., 2002), 환경·경제·공학·기술·사회(Sahely et al., 2005), 자연자원·경제·인프라·사회(Naumann et al., 2014) 등의 대분류를 이용하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Hajkowicz and Collins(2007)에 따르면, 수자원의 계획 및 관리방안에 대한 정책을 수립하기 위해서는 유역관리·지하수 관리·인프라 선택·과업 평가·물 배분·수자원 정책·수질 관리·수환경 보호지역 관리의 8가지 분야에서의 지표 구성이 필요하다고 제안하였다.

Gleick(1998)는 인간의 물 요구량, 자연의 물 요구량, 수질, 수자원 충전가능성, 행정기관과 갈등해결로 구분하여 수자원 이용의 지속가능성을 평가하였으며, Vörösmarty et al.(2010)에서는 더욱 수자원 이용과 환경오염에 집중하여 수자원개발, 오염물질, 유역환경, 생물요인으로 구성하였다. 본 연구에서는 Gleick(1998), Vörösmarty et al.(2010)을 주로 참고하여 다섯 가지 카테고리를 구성하였으며, 위 다른 선행연구에서 제시하고 있는 카테고리 및 하위 지표를 수용할 수 있도록 스트레스 지표와 스트레스저감 지표는 세부지표를 구성하였다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 3-2. 대분류 카테고리의 구성

○ 인간 물 요구량

인간 물 요구량에서는 물이용의 지속가능성을 평가하는 가장 기본적인 접근방법인 물의 수요와 공급적 측면을 다루고자 한다. 인간이 삶을 영위하는 데 필요한 서비스를 얻고 쾌적하고 건강한 생활환경을 유지하기 위해서는 기본적인 물 공급이 충족되어야 한다(Gleick, 1998). 따라서 본 분류에서는 인간의 물이용을 저해하는 스트레스 요인과 충분한 물 공급을 가능케 하는 반응요인을 포함하여 구성하였다.

○ 수생태계 건강성

수생태계 및 생물다양성 분야는 이전의 수자원 관련 연구에서 가장 적게 다루어지거나 거의 다루어지지 않았던 부분이다. Gleick(1998)은 인간뿐 아니라 환경도 같은 위계에서 현재의 기능을 유지하기 위해 적정 수준의 수자원이 필요함을 강조함으로써 ‘환경의 물 요구량’을 주장하였고, Vörösmarty et al.(2010)도 인간의 물 안보와 수생태환경의 생물다양성을 동시에 평가함으로써 지속가능한 물이용에 생태적 부분이 포함되어야 함을 강조하였다. 하지만 우리나라에서 지금까지 시행되어온 물환경 종합대책은 물공급, 수질관리, 건강보건관리를 중심으로 이루어져 수생태계와 그 안에 서식하는 생물·생태학적 시스템에 노력을 덜 기울여 왔다(경기개발연구원, 2008). 본 연구에서의 수생태계 건강성 부분에서는 하천 및 수생태계의 건강성을 위협하는 요인을 스트레스 지표로, 수생태계 건강성에 도움이 되는 지표들을 반응지표로 구성하였다.

○ 수질 요구량

많은 선행연구를 검토한 결과, 수질은 지속가능한 수자원을 평가하는 데 BOD, N농도 등 매우 한정적인 지표로만 다루어지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구에서는 수질 요구량 분류에서 수질을 나타낼 수 있는 가능한 많은 지표를 다루고자 하였으며, 수질이 악화되었다고 설명할 수 있는 지표들로 스트레스지표를, 수질을 개선할 수 있는 항목을 스트레스저감지표로 구성하였다.

○ 수자원 재생능력

수자원재생능력 부분에서는 유역전반을 변형·교란시키는 요인들을 스트레스 지표로, 유역의 건전한 물순환을 돕는 요인들을 스트레스저감지표로 구성하였다.

○ 물관리 형평성

마지막으로 사회·경제적 측면 등은 물관리형평성 카테고리에서 물관리와 관련되는 비과학적

인 영향요인들을 포함하고자 하였으며, 유역내의 낮은 평균소득을 스트레스로, 인프라투자 및 거버넌스 활용성 등을 스트레스저감요인으로 선정하였다.

위와 같이 구성한 대분류 카테고리는 각각 스트레스를 나타내는 압력지표와 스트레스저감을 나타내는 반응지표로 나누어 병렬적인 구조를 가지게 된다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 3-3. 스트레스와 반응지표의 대분류 카테고리

위에서 구성한 대분류 카테고리를 바탕으로, 각 대분류 항목을 위협하는 요인을 스트레스 지표로, 스트레스를 저감하는 지표를 반응지표로 구성하고자 하였다. 단, 각 지표는 해당 주제를 잘 설명할 수 있는 대표적인 요인으로서, 해당 주제를 완전히 설명하기보다 대용물(proxy)로서 이해해야 한다(Sahely, 2005). 본 연구에서는 Vörösmarty et al.(2010)의 연구를 기반으로 주요 지표를 추출하였다.

2. 압력 지표

본 연구에서 구성한 대분류와 압력 지표는 <표 3-1>과 같다.

표 3-1. 본 연구의 압력 지표

대분류	지표	변수
인간 물 요구량	소모성 물 사용량	다시 유출되지 않고 완전 소모되는 물의 양으로 각종 용수 이용량에서 회귀율을 제한 값으로, 강우 유출수 및 지하수 등 모든 수원을 통해 소모되는 용수이용량을 고려함
	인간 물 스트레스	가정 및 공업 용도로 직접적인 인간의 이용에 필요한 물의 잠재부족량
	농업 물 스트레스	농업용수로 이용되는 물의 잠재 부족량
수생태계 건강성	댐 저수량	물의 나이. 물을 가두는 시설물의 유효수량이 많을수록 물의 나이가 많아지게 되며, 이는 수온상승, 수질오염 등을 유발할 수 있음
	댐 밀도	대형 댐이 많을수록 수몰지역 등으로 생태계의 환경적 변형 및 교란이 심화되었다고 가정하며 각종 대형 변화를 초래했다고 판단
	하천의 연속성 단절	하천을 통한 어류 등 수생태계 개체가 이동이 가능한 구역으로, 하천을 가로막는 각종 시설이 많을수록 이동 가능한 구역이 줄어들음
	외래어종 수	생태계의 교란을 일으키는 외래어종의 절대적 개체 수
	외래어종 비율	전체 어류 개체 중 생태계의 교란을 일으키는 외래어종의 비율
	어획 및 양식압력	하천, 담수를 이용한 내수면어업을 통한 어패류 생산량과 해당 지역에서 이용가능한 물의 양을 비교함으로써 내수면 어업의 스트레스 산정

표 3-1. 본 연구의 입력 지표 (계속)

대분류	지표	변수
수질 요구량	질소 부하	부영양화를 유발하는 대표적인 성분
	인 부하	부영양화를 유발하는 대표적인 성분
	농약 오염	독성을 띄는 물질을 포함할 수 있으며 수질 및 수생태계의 화학적 축적을 유발
	토사 유출량	수질을 탁하게 하며, 각종 시설물의 수명을 단축
	유기물 부하	BOD 및 COD를 증가시키며 부영양화의 원인이 됨
수자원 재생능력	경작지 개발지역	해당 구역 내 경작지(논, 밭, 과수원 등)의 면적. 경작지가 구역 변형에 미치는 잠재영향을 고려함
	불투수층 개발지역	해당 구역 내 시가화지역 등 불투수층의 면적. 불투수층이 구역 물순환 변형에 미치는 잠재영향을 고려함
	가축밀도	해당 구역 내 가축두수와 가축의 평균몸집계수를 곱해, 답압 등 물리적인 구역 환경 변화를 산정
	습지개간율	과거 습지였던 지역 중 경작지 또는 시가화 지역으로 토지피복이 변경된 지역으로 습지의 본래 기능을 잃은 지역을 도출
물관리 형평성	소득 스트레스	지역 내 소득총액은 해당 지역의 재정 자립도를 뒷받침함으로써 행정전반 및 시설투자에 영향을 미친다고 가정

자료: 필자 작성.

가. 인간 물 요구량

1) 소모성 물 사용량

가) 정의

가정, 공업, 농업용수 등 인간의 물이용량에서 회귀유량(return flow)을 제외한 물의 양으로서, 하천 등으로 회귀되지 않고 각 이용지점에서 완전 손실되는 물의 양을 의미한다.

나) 근거

인간의 물 요구량을 채우기 위한 과도한 수자원 취수는 생물이 이용 가능한 서식처의 양을 변화시킬 뿐 아니라, 갈수기 등 수량이 변형되는 경우 수온과 화학적 구성요소를 변화시켜 수생태계를 변화시키게 된다(Poff et al., 1997; Palmer et al., 2009). 특히 가정, 공업, 농업용수 등 인간이 이용하는 물은 다른 동식물 생태계의 생존에 필요한 수자원 가용성을 위협하는 경쟁적인 관계에 놓인 물이용 주체로 작용한다. 뿐만 아니라 인간이 이용하는 물 내에서도 경쟁이 일어날 수 있는데, 예를 들어 상류에서 소모성 물 사용량이 많아질수록 하류에서 식수, 관개, 산업용수 등에 필요한 유량이 부족할 수 있다. 또한 용수공급을 통해 이용된 물은 하수 및 오폐수 처리를 통해 하천 등으로 일부 되돌아가지만, 특히 농경지에서 이용되는 농업용수는 증발산 등으로 인해 완전 손실되는 양이 있으므로 회귀유량을 고려해야 한다.

2) 인간 물 스트레스

가) 정의

한 지역 내에 공급될 수 있는 물의 양과 인구의 비를 통해 인구 한 명당 사용할 수 있는 물의 최대량을 의미하며, 이를 통해 인간의 이용에 필요한 물의 잠재 부족량을 나타낸다.

나) 근거

인간이 삶을 영위하기 위해서는 특정 수준 이상의 물 소비가 필수적이며, 이를 충족하지 못할

때 삶의 질이 저하되거나 정상적인 삶을 지속하기가 어려워지게 된다. 이러한 물 부족으로 인한 스트레스의 개념은 Falkenmark(1990)가 인간이 최소한의 삶을 유지하기 위해 필요한 물의 최소량을 제안하면서 인간의 물 스트레스를 측정하는 일반적인 방법으로 자리 잡았다. 인간 물 스트레스는 인간의 물이용을 제한할 뿐 아니라, 물이 부족하여 물이용이 경쟁적으로 일어나는 지역에서 생태계가 이용할 수 있는 물의 양이 감소하게 될 가능성이 높아짐을 의미하며, 수생태계에 의한 자연적인 희석능력 저하, 생물서식처 감소 등을 유발할 수 있다.

3) 농업 물 스트레스

가) 정의

한 지역 내에 공급될 수 있는 물의 양과 경작지면적의 비를 통해 단위면적의 경작지당 사용할 수 있는 물의 최대량을 의미한다.

나) 근거

인간 물 스트레스가 인간의 생활용수 이용으로 인한 물부족 위험을 진단할 수 있다면, 농업 물 스트레스는 농경지에서 이용하는 농업용수의 잠재적 스트레스를 진단할 수 있다. 농업용수 이용량은 일반적인 가정 및 공업용수보다 많을 뿐 아니라 증발산으로 인해 회귀율이 낮은 특징이 있다. 따라서 농업 물 스트레스 평가를 통해 단위면적의 경작지당 사용할 수 있는 물이 적다면 농업용수가 생활용수 및 공업용수 등 다른 분야와 물이용을 두고 경쟁해야 함을 의미하며, 이는 생활용수와 같이 인간 이용에 직접적으로 영향을 미치는 용수공급에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 또한 농업 물 스트레스가 높을수록, 생태계가 이용할 수 있는 물의 양이 감소하게 될 가능성이 높아지면서, 수생태계에 의한 자연적인 희석능력 저하, 생물서식처 감소 등을 유발할 수 있다.

나. 수생태계 건강성

1) 댐 저수량

가) 정의

물의 흐름을 변형하는 댐 등 유효수량을 가진 구조물의 저수량의 총합을 의미한다.

나) 근거

인간의 물 수요가 증가함에 따라, 물 공급량을 만족시키기 위해 건설되는 대형 댐과 저류시설은 하천 생태계의 건강에 스트레스로 작용하고 있다. 하천에 위치하는 댐 등 대형 구조물은 자연적인 하천의 흐름을 방해하게 되는데, 저수량이 크거나 구조물이 많을수록 하천을 흐르는 물이 저수에 의해 지체되어 물의 나이가 많아지게 된다. 또한 댐은 자연의 물흐름을 조작하여 흐름의 지체시간(물의 나이)을 증가시켜 수온을 상승시키고, 수질 악화 등 화학적 변형을 유발하며(Ahearn, Sheibley, and Dahlgren, 2005), 토사물질 이동을 지체시킨다(Vörösmarty et al., 2003). 또한 영양유기물, 미세입자 등을 가두어 하류로의 유입을 차단하며, 고인 물에 서식하는 개체의 증가, 증발로 인한 물 손실량 증가 등을 유발할 수 있다.

2) 댐 밀도

가) 정의

한 중권역의 면적 대비 중권역 내 위치하는 대형 댐의 개소수를 의미한다.

나) 근거

댐은 식수, 관개, 여가, 발전 등 인간이 사용하는 담수자원을 안정적으로 제공하고, 홍수방어의 기능을 수행한다. 하지만 동시에 하천에 위치하는 대형 댐은 저수를 통해 자연적인 하천의 흐름을 방해하며 파편화시키며, 수위의 동적인 움직임을 제어하고, 수물지역을 형성하여 기존의 생태계에 변형을 가져온다. 또한 자연적인 물의 흐름으로 인한 수로가 생기는 것을 막고 하류에서 습지,

범람원, 삼각주의 발달을 저해함으로써 하천의 자연적인 작용을 방해한다(Nilsson et al., 2005).

3) 하천의 연속성 단절

가) 정의

대형 댐 등은 연속된 하천의 흐름을 끊는 벽으로 작용하기 때문에, 구조물로 인해 하천 표면수가 단절된 비율을 의미한다.

나) 근거

댐은 상류에서 하류로 이동하는 자연적인 물의 흐름뿐 아니라 수생태계를 이루는 유기생물체의 이동을 저지하는 벽으로 작용하여 생태계의 자연적인 흐름을 방해한다(Nilsson et al., 2005; Palmer et al., 2009). 즉, 하천 구조물은 하천의 벽처럼 작용하여 물뿐 아니라 미생물, 어류, 저서성무척추동물 등의 이동을 방해하게 된다. 댐 등 하천에 위치하는 구조물은 연속적인 강의 분절화를 유발하며, 이는 수중생물군의 개체 수, 유전자 흐름 등을 방해하며 동물군의 이주를 제한하게 된다.

4) 외래어종 수

가) 정의

유역 내에서 확인되는 외래어종 개체의 절대적인 수를 의미한다.

나) 근거

전 지구적인 담수 생태계의 생물다양성을 위협하는 요인으로 Dudgeon et al.(2006)은 외래종 침입, 서식처 파괴, 과도한 어획, 물흐름 변형, 수질오염을 지적하였다. 이 중 외래어종이 담수생태계에 미치는 악영향들은 균형 잡힌 생태계의 먹이사슬 및 구조를 변화시키거나 고유종을 멸종시키는 등 매우 다양하며 복잡적이다. 따라서 유역 내에서 확인되는 외래어종의 절대적인 개체수를

고려하고자 하였다.

내륙의 담수 생태계는 외래종 침입 등으로 인해 위협받고 있는데, 이는 수생태계의 많은 생태 군집의 생물위계(niche)를 망가뜨려 멸종에 이르게 하는 등 종 다양성까지 영향을 미친다(Brönmark and Hansson, 2002). 또한 외래어종 침입으로 인한 수생태계의 종 다양성 교란 및 악화는 담수생태계의 일차생산량 감소, 잔여물질 분해 작용 감퇴, 영양물질 순환장애 등 부정적인 피드백을 유발하게 된다.

5) 외래어종 비율(%)

가) 정의

유역 내 표본으로 확인되는 전체 어종 개체 수 대비 외래어종 개체 수의 비율을 의미한다.

나) 근거

절대적인 외래어종의 개체 수 뿐 아니라 전체 유역 내에서 확인되는 외래어종 개체의 비율의 중요성을 고려하고자 하였다. 외래어종의 침입은 상당부분 인간의 이용에 의해 교란되거나 질적 저하가 이루어진 수생태계에서 발생한다고 알려져 있기 때문에(Dudgeon et al., 2006), 수생태계 내 외래어종의 비율은 인간에 의한 수생태계의 질적 저하의 간접지표로 이해할 수 있다. 따라서 담수생태계의 생물다양성 위협은 인간의 물이용이 얼마나 불완전하고 지속가능하지 못한지를 보여주는 지표가 될 수 있다(Dudgeon et al., 2006).

6) 어획 및 양식 압력

가) 정의

담수생태계에서 어획한 수생물과, 담수를 이용하여 양식한 수생물의 생산량으로, 어획·양식량이 많을수록 수환경의 생물적 영향이 큰 것으로 정의한다.

나) 근거

전 지구적인 담수 생태계의 생물다양성을 위협하는 요인으로 Dudgeon et al.(2006)은 외래종 침입, 서식처 파괴, 과도한 어획, 물흐름 변형, 수질오염을 지적하였다. 다른 위협요인들이 수생태계 내 미생물이나 동물상(fauna)의 변화와 관련된 결과인데 반해 과도한 어획은 어류뿐 아니라 척추동물, 파충류, 양서류 등 수생태계 내 생물종 전반의 구성 변화에 직접적인 영향을 미침으로서 생물다양성에 영향을 미친다(Dudgeon et al., 2006).

과도한 어획량은 한 생물의 지속성을 위협하거나 멸종에 이르게 할 수 있으며 먹이사슬의 관계로 인해 다른 종의 생존을 연쇄적으로 위협할 수 있다. 또한 담수를 이용한 양식 활동은 유기물질, 영양물질, 항생제 및 살진균제 등 집중적인 화학 오염을 유발할 수 있다.

다. 수질 요구량

1) 질소 부하

가) 정의

단위면적당 질소 오염 부하량을 의미한다.

나) 근거

인간에 의한 질소 배출량은 산업혁명을 기점으로 두 배 이상 증가하였으며 (Vörösmarty et al., 2010), 과도한 질소 배출은 전 지구적으로 인간에 의한 생태계 변화요인으로 작용하고 있으며, 부영양화를 유발하고 연안 생태계 및 수질의 저하를 일으킨다. 이러한 질소(N) 유출의 배출원은 주로 상류 유역의 농경지로 알려져 있다(Alexander et al., 2008).

우리나라와 같이 향후 강수량이 감소하는 것으로 전망되는 경우(국토교통부, 2010), 하천유출량이 감소함으로써 하천수위가 감소하여, 같은 양의 오염물질이 유입되더라도 수질오염정도가 심해질 수 있고 부영양화로 인한 용존산소량 감소, 암모니아 생성, 박테리아 농도 증가 등을 유발함으로써 수생태계의 생물의 생존을 위협할 수 있으며 수질악화로 인한 사망 등 보건문제를 유발할

수 있다(Smith, 2003). 또한 물의 투명도가 낮아져 탁해지거나 맛, 냄새 등으로 인해 식수 등으로 이용하기 위한 처리과정을 추가할 필요성이 생길 수 있다(Smith, 2003).

2) 인 부하

가) 정의

단위면적당 인 오염 부하량을 의미한다.

나) 근거

물에 용해되어 유출되는 인(P)의 배출원은 주로 가축의 배설물과 목초지에 뿌린 거름으로, 강수 등 물의 흐름에 의해 배설물과 거름의 인 성분이 용해되어 비점오염원으로 유출된다(Alexander et al., 2008).

인(P)은 다량영양소(macronutrient)로 담수생태계의 일차생산량을 제한하며 그 결과 호수, 저수지뿐 아니라 흐르는 하천에서도 부영양화를 일으키는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 인의 배출은 하수와 같은 점오염원 뿐 아니라 비료, 풍화 등 자연적·인위적 비점오염원을 포함한다. 또한 대기 중의 인 농도 증가가 수질로 영향을 미치기도 한다.

3) 농약 오염

가) 정의

농업 등의 분야에서 살충, 제초 등의 목적으로 살포되는 농약량을 의미한다.

나) 근거

농업, 골프장 등에 사용되는 살충제, 살균제, 제초제 등의 농약은 대표적인 비점오염계 오염물질로서 수질오염에 영향을 미칠 수 있으며, 유해한 농약성분이 생태계에 유출될 경우 먹이사슬로 인한 생물체 내 축적, 기형종, 개체수 감소 등을 유발할 수 있다. 또한 농약성분의 지속성이나

회발성에 따라 화학적 성분의 영향이 광역적으로 미칠 수 있어 인간에게도 유해할 수 있다(Tilman et al., 2001).

4) 토사 유출량

가) 정의

인간 활동에 의해 인위적으로 표토가 침식되어 유출될 수 있는 토사 유실 잠재량을 의미한다.

나) 근거

토사 유실은 자연적으로 발생하기도 하지만 경작, 건설 등 인간의 활동은 자연적인 토사 유실보다 많은 양을 유발한다. 토사 유실은 수질을 혼탁하게 할 뿐 아니라 수생태계의 질적 저하를 초래할 수 있다. 또한 댐, 저수지 등의 하상에 집적되어 구조시설물의 수명을 단축시킬 수 있다.

우리나라의 미래 강수량상은 기후변화에 의해 강우간격이 짧아지고, 강우빈도가 증가하고, 강우강도가 세지는 것으로 예측되고 있는데, 이에 따라 침투유출량이 증가하면 토사유실량이 증가할 것으로 전망되었다(한국환경정책·평가연구원, 2009). 한강유역을 대상으로 미래 토사유출 발생 취약성을 분석한 결과에 따르면, 2050년까지 83%의 유역, 2090년까지 96%의 유역에서 토사유출 취약성이 증가할 것으로 나타났다(한국환경정책·평가연구원, 2009).

5) 유기물 부하

가) 정의

단위면적당 생물학적 산소요구량(BOD)을 의미한다.

나) 근거

지표수에 존재하는 불안정한 유기탄소는 수질오염에서 매우 중요하게 다루어지고 있는 부분이다. 이 불안정한 유기탄소는 생물학적 산소요구량(Biological Oxygen Demand, BOD)으로 표현

할 수 있다. 유기탄소는 불쾌한 맛을 낼 뿐 아니라 수인성질병의 매개체가 되기도 하며 보전에 영향을 미치는 독성화학작용 등을 유발할 수 있다. 또한 수생태계에는 산소결핍을 가져오게 되어 수생태계 내 개체들을 위협하게 된다.

라. 수자원 재생능력

1) 경작지 개발지역

가) 정의

대상 권역 내 전체 면적 중 경작지로 이용되는 면적의 비율을 의미한다.

나) 근거

인간에 의한 토지피복 및 이용의 변화는 물의 흐름과 그로 인한 경관과의 상호작용 등을 통해 다양한 물질과 물의 흐름을 흡수하고 정화하는 자연적 회복능력 등의 서비스를 제공하는 하천유역 내 생태계의 기능을 변화시킨다(Palmer et al., 2009). 경작행위는 과도한 토사 유출, 비료와 살충제 사용으로 인한 비점오염원으로 작용하여 담수생태계에 오염을 유발한다(Walsh et al., 2005). 또한 경작지는 지표수유출, 지하수충전 등 지역수문에 영향을 미치며, 또한 강가 서식처의 질 저하 및 분절화를 유발하기도 한다.

2) 불투수지 개발지역

가) 정의

대상 권역 내 전체 면적 중 시가화 지역으로 개발된 면적의 비율을 의미한다.

나) 근거

유역 내 불투수층을 비롯한 도시개발 또한 강과 하천 생태계에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 유역 내 불투수층으로 이루어진 시가화지역이 증가할수록 지표면의 수분 함유를

막아 강우유출량의 증가, 침투유출량 증가, 토사유출량 증가로 이어지며, 지하수 충전을 가로막는 요인이 된다(Walsh et al., 2005). 또한 하천 부근의 하천 수로화, 제방건설 등으로 인해 조성된 불투수면은 범람원의 서식처 질을 저해하며, 유량 변동폭을 증가시키며 화학적 오염의 원인으로 작용하기도 하여 무척추동물과 어류 종다양성 감소 등으로 이어지게 된다(Walsh et al., 2005).

3) 가축밀도

가) 정의

한 지역 내 가축 사육으로 인한 물리적인 유역환경 변화 정도를 의미한다.

나) 근거

축산업 등으로 이용되는 토지에서 가축 사육은 토양과 둅의 다짐(compaction) 등으로 물리적인 유역의 변형을 가져올 수 있다. 이는 대형가축(소 등)일 때, 그리고 특정한 가축을 대량으로 사육할 때(돼지, 닭 등) 영향이 크다고 할 수 있다. 실제로는 가축의 물리적 변형뿐 아니라 분뇨로 인한 생물학적, 화학적 오염이 더 잘 알려져 있으나, 이는 수질오염에서 다루기로 하며, 본 지표에서는 물리적인 유역의 변형에 초점을 맞추고자 하였다.

4) 습지개간율

가) 정의

과거 자연 습지지역으로 평가된 지역이 현재 변형, 파괴된 정도를 의미한다.

나) 근거

습지는 시가화 지역 개발 또는 농경지전환 등으로 개간됨에 따라 파괴되고 분절되고 있다. 습지는 물을 저장함으로써 지역 내 홍수를 방어하고, 자연적인 물 정화 기능을 하는 것으로 알려져 있다. 하지만 습지가 파괴됨에 따라 습지의 다양한 생태계서비스가 저하되고 있으며, 생물의

서식처 감소, 저류작용 감소, 물의 흐름변화 등을 초래하고 있다.

마. 물관리 형평성

1) 소득 스트레스

가) 정의

유역 내 거주하는 사람들의 소득 총량.

나) 근거

지역 내 총 소득이 낮을수록 지방자치단체에서 이용할 수 있는 자치적인 세수가 적다고 간주함으로써, 해당 유역에 위치하는 지방자치단체의 재정 상태를 나타낼 수 있다. 재정상황이 좋을수록 해당 주민, 또는 물이용 관련 사업을 위한 정책을 원활하게 이행할 수 있다고 판단하였다.

3. 반응 지표

반응 지표는 각 대분류 항목을 지원하는 요인으로 선정하였으며, <표 3-2>와 같이 정리되었다.

■ 표 3-2. 본 연구의 반응 지표

대분류	지표	변수
인간 물 요구량	물이용 인프라	댐, 저수지, 보 등 물 공급을 조절하는 인프라
	적정 물이용 수준	지속적으로 사용할 수 있는 물(충전 가능한 수원, 또는 강우유출량) 대비 인간이 사용하는 물의 비율
	하천 접근성	하천정비 등을 통해 인간의 수자원 이용을 원활히 할 수 있게 만들어진 지역의 비율
수생태계 건강성	수생태 보호지역	수량 및 수질, 수생태계의 보전을 목적으로 지정된 보호지역
	육상생태 보호지역	유역 내 육상 생태계의 보전을 목적으로 지정된 보호지역으로, 강우로 인해 지표유출수가 발생하는 경우 유역 육상부를 통해 모이는 점을 고려하여 선정함
수질 요구량	위생시설	하수처리장 등 하수, 오폐수 등을 처리하는 시설의 최대 용량
수자원 재생능력	물 재이용량	처리를 거친 물을 다시 이용하는 정도로 하수처리수 이용, 중수 이용 등 처리를 거친 물을 다시 이용하는 양(처리후 실제 이용량)
	대체수원 잠재량	강우로 인한 수원 이외에 보완적으로 사용할 수 있는 수원의 양으로, 빗물이용 잠재량(빗물시설용량)
물관리 형평성	수도 접근성	최소한의 생활을 보장하는 수도시설로서 식수를 공급하는 상수도 및 오수를 이동시키는 하수도 시설의 보급률
	수자원 투자비용	지역 내 수자원 관련 정책 및 사업에 투자하는 예산
	수자원 거버넌스	수자원 관련 정책 결정을 할 때, 해당 지역주민의 의견을 수렴하고 참여를 유도하는 수준

자료: 필자 작성.

가. 인간 물 요구량

1) 물이용 인프라

가) 정의

댐, 저수지, 보 등 수자원 인프라로 인해 물을 원활히 공급받을 수 있는 능력을 의미한다.

나) 근거

댐, 저수지, 보 등은 인간의 원활한 물이용을 위해 설치한 시설물로, 인간의 물 수요를 만족시키고 경제적 발전을 가능케 하는 필수 시설이다(World Commission on Dams, 2000). 이러한 수자원 저류 및 공급시설의 수가 많을수록 안정적인 물 공급, 홍수방어 등 인간의 물이용에 긍정적인 역할을 할 수 있다.

2) 적정 물이용 수준

가) 정의

지속적으로 사용할 수 있는 물 대비 인간이 사용하는 물의 비율을 의미한다.

나) 근거

인간이 사용하는 물에 비해 지속적으로 충전되어 반영구적으로 사용할 수 있는 물의 양이 많다면, 물이용 수준이 지속가능한 수준이라고 판단할 수 있다. OECD(2009)는 수자원 부족을 막기 위해서, 수질을 개선하는 것 이외에 수요를 감소시키는 것도 중요하다고 지적하고 있는데, 수자원의 위기를 개선하기 위한 수질개선 및 수자원요구량 감소는, 사람들의 인식 전환 및 행동변화가 수반되어야 효과를 거둘 수 있다. 적정 물이용 수준을 지역별로 비교하는 것은 각 지역별로 유출량 대비 사용량을 확인함으로써 물이 부족한 지역에서의 물이용 인식 개선을 통해 지속가능한 물이용 목표를 달성할 수도 있다.

3) 하천 접근성

가) 정의

하천 주변이 정비된 정도를 표현하며, 정비가 잘 되어 있을수록 치수 뿐 아니라 이수 목적의 하천이용을 원활히 할 수 있음을 의미한다.

나) 근거

폭우 등으로 하천이 범람할 경우 하천뿐 아니라 하천 주변 환경에 영향을 미쳐 물이용을 어렵게 할 수 있다. 따라서 사람이 물이용을 위해 하천에 직간접적으로 접근할 수 있는 정도를 표현하기 위해 둑 정비, 호안공사, 범람원 정비 등을 사용할 수 있다.

나. 수생태계 건강성

1) 수생태 보호지역

가) 정의

수량 및 수질, 수생태계의 보전을 목적으로 지정된 보호지역을 의미한다.

나) 근거

전 세계 어류종의 약 40%인 10,000종 이상이 담수에서만 서식하고 있으며, 전 세계 척추동물의 1/4, 양서류, 수생파충류, 포유류의 1/3가량이 담수생태계에서 서식한다. 하지만 지표담수 서식처는 전 지구상의 수환경 피복에서 0.01%가량을 차지할 뿐이기 때문에 담수생태계의 서식처와 이 서식처를 이용하는 생물들이 구성하는 생물다양성은 인간활동과 환경변화에 매우 취약하다 (Gleick, 1996). 북미에서 관찰한 결과에 따르면, 수생태계의 생물 멸종률은 육상동물 멸종률의 다섯 배에 이르렀다(Ricciardi and Rasmussen, 1999). 따라서 수생태계를 보호하기 위해 수환경 내부를 보호하는 것은 매우 중요하다. 또한 수생태 보호지역은 해당 지역의 수량과 수질을 유지함으로써 수생태계뿐 아니라 인간에게 공급하는 물을 양질로 보호할 수 있다.

또한 유역 스케일을 기반으로 물환경과 수표면 뿐 아니라 하천에 인접한 육상생태계를 통합적으로 관리하는 것은 수생태계의 수량과 수질을 유지하는 데 매우 중요하다.

2) 육상생태 보호지역

가) 정의

유역 내 육상 생태계의 보전을 목적으로 지정된 보호지역을 의미한다.

나) 근거

소하천으로 이어진 유역은 다양한 토지피복을 거쳐 하천차수를 높여가며 모이게 된다. 따라서 물의 흐름이 자유롭고, 자연보호지역의 비율이 높은 유역에서는 기온, 수온과 하천수 흐름의 변화에 대한 완충효과가 높기 때문에, 하천생태계의 지속가능성뿐 아니라 향후 기후변화로 인한 영향에 대응능력이 높다(Nelson et al., 2009). 또한 다른 토지피복에 비해 질이 높은 자연 토지피복에서 식생 및 토양에 의한 수자원 정화기능이 높은 것으로 알려져 있으며, 이는 생태계가 제공하는 다양한 생태계서비스(ecosystem services) 중 하나라고 할 수 있다(Daily et al., 2000; Foley et al., 2005).

다. 수질 요구량

1) 위생시설

가) 정의

하수처리장 등 하수, 오폐수 등을 처리하는 시설의 최대용량의 합을 의미한다.

나) 근거

기본적인 위생시설을 갖추고 깨끗한 식수를 공급하는 것은 공중보건 개선의 매우 중요한 의제 중 하나이다(Nilsson et al., 2005). 위생시설은 인위적 오염에 의한 수질을 개선하는 데 기여하는

요소로서 위생시설을 변수로 삼을 수 있으며, 인위적 오염으로 대표되는 하수, 오폐수 등을 정화하여 배출하는 시설의 용량으로 대변할 수 있다.

라. 수자원 재생능력

1) 물 재이용량

가) 정의

강수 유출로 발생하는 기존의 수자원 이용에 보완적으로 사용할 수 있는 수원 중 정화를 통해 재이용할 수 있는 수자원을 의미한다.

나) 근거

일반적으로 수자원 이용을 위해 취수하는 수원으로는 댐 용수, 하천 표류수, 지하수 등이 이용되지만, 기후변화와 지하수 고갈 등으로 인해 수자원 변동성이 매우 커질 것으로 전망된다. 따라서 물을 이용하는 데 있어 한정적 자원을 가장 효율적으로 활용하는 효율성, 경제성을 중요한 가치로 포함해야 한다. 유사하게 수자원의 순환적 성격을 강조하여 물의 재이용도 중요한 지속가능성의 개념으로 포함될 수 있다. 이에 따라 우리나라에서는 오폐수 정화를 통한 물 재이용 비율을 늘리거나, 빗물 등 대체수원을 확보하기 위한 노력을 진행하고 있다.

2) 대체수원 잠재량

가) 정의

대체수원으로서 빗물집수시설용량을 의미한다.

나) 근거

강우를 통해 흐르는 일반적 수원 이외에 현재 우리나라에서 사용할 수 있는 대체수원은 해수담수시설, 빗물집수시설, 지하수 등이 있다. 하지만 해수담수시설은 에너지 소모가 크고 지하수는

충전주기가 매우 길기 때문에 지속가능한 수자원으로 보기 어렵다. 이에 대체수원으로서 활발하게 연구되는 분야로서 빗물집수(rain harvest)를 통한 이용이 확대되고 있다. 빗물집수는 수자원 공급을 향상시킬 수 있는 현실적인 기술적 대안으로 여겨지고 있으며, 실제로 선진국뿐 아니라 저개발국가에서도 상대적으로 적은 비용과 기술로 적용 가능한 점, 다른 수자원에 비해 수량 및 수질적 안전성 때문에 적극적으로 장려되고 있다(Baguma, Loiskan, and Jung, 2010). 또한 Pandey(2001)는 기후변화에 개별 가정이 적극적으로 적응하는 방법으로 빗물집수를 통한 물이용 충당을 제안하고 있다.

마. 물관리 형평성

1) 수도 접근성

가) 정의

식수를 공급하는 상수도 및 오수를 이동시키는 하수도 시설의 보급률을 의미한다.

나) 근거

상하수도 인프라는 인간이 최소한의 생활을 영위하는 데 필요한 물을 공급하는 기본적인 국가인프라이지만 지역의 인구에 따라 투자·개발에 우선순위를 매겨 공급해왔다. 그러나 여전히 우리나라 내에서 지역에 따라 상하수도 인프라 공급을 받는 인구의 비율이 다르며 이는 특히 물이용에 취약한 도서, 연안, 산간 농어촌지역을 중심으로 낮게 분포한다. 지속가능한 물이용 및 물관리를 위해 사회적 차원에서는 현존하는 수자원을 공평하게 이용하는 형평성이 중요한 가치로 고려되어야 한다. 이는 세대 간, 인간과 생태계 간, 지역 간 형평성 등 다양한 집단 사이에서 나타날 수 있다.

2) 수자원 투자비용

가) 정의

해당 지역 내에서, 수자원 관련 정책 및 사업에 투자하는 예산을 의미한다.

나) 근거

경제적인 관점에서의 수자원 이용은 수자원을 통한 기본적인 생활 영위 및 부가가치 창출을 가능케 한다는 것이다. 따라서 수자원의 부족 및 과잉으로 인한 원활하지 못한 이용은 직접적인 경제적 피해뿐 아니라 막대한 간접적 피해를 유발할 수 있다. 따라서 잠재적인 손실을 대비하기 위해 물이용 인프라, 수질개선시설, 생태하천조성 등 다양한 물 관련 사업이 진행되고 있다. 따라서 관련 정책이나 사업에 투자하는 비용이 많을수록 지속적인 수자원이용을 위한 관리에 대한 관심, 재정능력, 관리능력이 높을 것으로 판단할 수 있다.

3) 수자원 거버넌스

가) 정의

수자원 관련 정책 결정을 할 때, 해당 지역주민의 의견을 수렴하고 참여를 유도하는 수준.

나) 근거

UNCED 의제21에서 언급한 지속가능한 개발의 개념을 실현하기 위한 수자원분야의 목표에서는 수자원 관련 인프라의 공급 및 개발 뿐 아니라 주민의 의식고취 및 교육 증진을 통한 대중참여를 명시하고 있다. 유사하게 Bogardi et al.(2012)에서도 지속가능한 물이용의 목표를 달성할 수 있는 통합유역관리의 하위 항목으로서 지역주민의 관련지식, 기관, 전문가의 역량, 기금 마련, 관련 법령 제정 등을 포함하는 거버넌스 역량이 중요하다고 지적하고 있다. 좋은 수자원 거버넌스는 다중심거버넌스(polycentric governance), 효과적인 법적 체계, 불평등 해소, 정보에 대한 접근성 강화, 관련자의 적극적 참여 등을 통해 이루어질 수 있다(Bogardi et al., 2012). 국내에서도 지금까지의 중앙집권적 물관리체계에 민간참여를 활성화하여 지방자치단체의 협력과 유역 내 주민의 참여를 강조하는 체계로 나아갈 필요성을 강조하기도 했다(최동진, 2008). 지자체의 수자

원 관련 정책 수행 등에 전문성을 띤 공무원이 많을수록, 정책결정에 시민의 참여빈도가 높을수록, 많은 시민의 의견이 반영될수록 지속가능성이 높다고 판단할 수 있다.

4. 통합 지수 산정

압력과 반응으로 나누어 각각 구축한 30개의 지표는 지속가능한 물이용을 저해하는 압력지수와 물이용을 보완하는 반응지수로 취합한 뒤 최종 지속가능한 물이용 지수로 통합하여 결과를 도출하게 된다. 여러 가지 대안 및 요소들 사이에서 가장 최선의 방법 또는 가장 중요한 요소를 선택하기 위한 의사결정방법으로 다기준 분석기법을 통한 의사결정방법(Multi-Criteria Decision Making)을 이용할 수 있으며, 본 연구에서는 가중합계모형을 이용하여 지표별 가중치와 분류별 가중치를 고려하여 통합하여 지수를 산정하였다. 또한 각각의 지표는 단위가 다르기 때문에 표준화를 거쳐 활용하였으며, 가중치는 계층화분석과정(AHP)을 활용하여 산정하였다.

가. 지표 표준화

각 지표에 사용된 변수는 각기 단위가 다르고 최댓값이 다르기 때문에 통합하기 위해서 표준화 과정을 거쳐야 한다. 일반적으로 지표 연구에 자주 사용되는 표준화 방법은 최대-최소값, 순위매기기(Ranking), Z-Score, 스케일 재조정(Rescaling) 등이 있다(Nardoo et al., 2005).

본 연구에서는 스트레스 지표 19가지, 반응 지표 11가지의 총 30가지 지표의 원 데이터 분포를 확인하여 일반적인 정규분포라고 판단할 수 있는 데이터는 원 데이터를 그대로 이용하여 최소-최댓값 표준화를, 왜곡된(skewed) 분포를 보이는 자료는 원 데이터에 로그함수를 취하여 최소-최댓값 표준화를 수행하였다(수식 1). E 라는 지표의 변수 안에 속하는 속성값 e 의 표준화된 값은 속성값 e 에서 E 안에서의 최솟값 E_{\min} 을 뺀 값을 E 에 속하는 속성값의 최댓값 E_{\max} 에서 최솟값 E_{\min} 을 뺀 값을 나누어 계산한다. 또한 스트레스 지표 중 일부(인간 물 스트레스, 농업 물 스트레스, 소득 스트레스)는 높은 변수값이 낮은 스트레스를 나타내기 때문에, 속성값의 방향을 일치시키기

위해 아래와 같은 표준화 방법을 이용하였다(수식 2).

$$Normalized(e) = \frac{e - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$$

■ 수식 1

$$Normalized(e) = \frac{E_{\max} - e}{E_{\max} - E_{\min}}$$

■ 수식 2

■ 표 3-3. 지표별 표준화 방법

	대분류	지표	표준화 방법	
			로그 적용	표준화 수식
스트레스	인간 물 요구량	소모성 물 사용량	×	1
		인간 물 스트레스	×	2
		농업 물 스트레스	×	2
	수생태계 건강성	댐 저수량	○	1
		댐 밀도	○	1
		하천의 연속성 단절	○	1
		외래어종 수	○	1
		외래어종 비율	○	1
		어획 및 양식압력	×	1
	수질 요구량	질소 부하	○	1
		인 부하	○	1
		농약 오염	×	1
		토사 유출량	×	1
		유기물 부하	×	1
	수자원 재생능력	경작지 개발지역	×	1
		불투수층 개발지역	○	1
		가축밀도	×	1
		습지개간율	×	1
	물관리 형평성	소득 스트레스	○	2
	반응	인간 물 요구량	물이용 인프라	○
적정 물이용 수준			×	1
하천 접근성			×	1
수생태계 건강성		수생태 보호지역	○	1
		육상생태 보호지역	×	1
수질 요구량		위생시설	○	1
수자원 재생능력		물 재이용량	○	1
		대체수원 잠재량	○	1
물관리 형평성		수도 접근성	×	1
		수자원 투자비용	○	1
		수자원 거버넌스	○	1

자료: 필자 작성.

나. 가중치 산정

위 카테고리과 지표들을 통합하기 전에, 다섯 카테고리뿐 아니라 하위 지표들 사이에도 지속가능한 물이용에 기여하는 상대적인 중요도가 다르므로 지표 간의 상대적인 가중치를 고려하고자 하였다. 본 연구에서는 지표 간 비교우위를 정량화하여 표현함으로써 가중치를 도출할 수 있는 계층화분석과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 이용하고자 한다. 또한 척도에 반영되는 점수를 퍼지함수를 통해 선호도를 분포시켜 불확실성을 고려하는 퍼지-AHP 분석방법을 이용하고자 하였다.

우선, 계층화분석과정(AHP)은 1980년 T.L.Saaty가 제안한 의사결정방법론으로, 목표를 설정하고 대안을 서로 비교할 수 있는 지표를 선정하여 계층화한 뒤, 쌍대비교(pair-wise comparison)를 통해 가중치를 도출한다. AHP는 정량적 요소뿐 아니라 정성적인 요소 사이의 분석도 가능하며, 서로 상이한 척도를 가진 요소들의 비교가 가능하다는 장점이 있다. 분석과정상 전문가의 선호에 따른 평가를 수행하기 때문에 사람에 의한 주관성을 배제할 수는 없지만, 마지막으로 전체 논리의 일관성을 평가하는 작업(일관성비율, Consistency Ratio, CR)을 통해 최종 신뢰성을 정량화할 수 있다.

다. 지표 통합

1) 퍼지가중합계모형(Fuzzy Weighted Sum Model, FWSM)

스트레스 지표의 산정은 아래 식과 같다.

$$Stress = \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^{S_j} W_j \times w_{k,j} \times S_{k,j}$$

W_j 는 각 카테고리(j)별 가중치, $w_{k,j}$ 는 j 카테고리 내 압력지표 k의 가중치, $S_{k,j}$ 는 j 카테고리 내 압력지표 k의 표준화된 변수값을 의미하며, 마찬가지로, 반응지표의 산정은 아래 식과 같다.

$$Response = \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^{R_j} W_j \times w_{k,j} \times R_{k,j}$$

W_j 는 각 카테고리(j)별 가중치, $w_{k,j}$ 는 j 카테고리 내 압력지표 k의 가중치, $R_{k,j}$ 는 j 카테고리 내 반응지표 k의 표준화된 변수값을 의미한다.

마지막으로, 압력과 반응을 고려한 최종 지속가능한 물이용(Sustainable Water Use) 지수의 산정은, 아래 식을 통해 계산하였다. 아래 식의 변수는 각각 압력(Stress), 반응(Response)을 의미한다.

$$Sustainable\ Water\ Use = (1 - Stress) \times (Response)$$

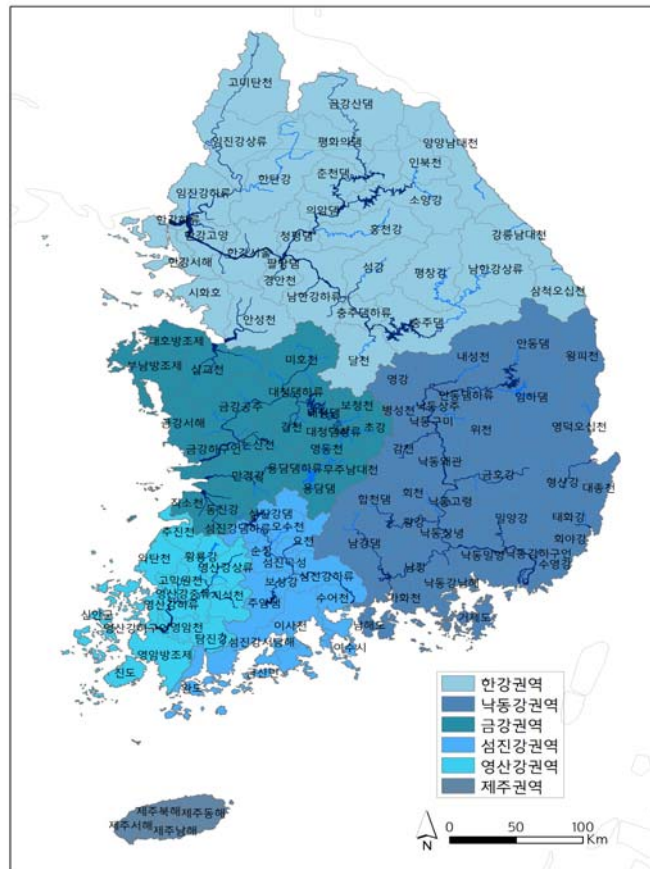


제4장

지속가능한 물이용을 위한
지표 자료 구축

1. 지속가능한 물이용의 압력 지표

압력 및 반응 지표는 환경부 기준 중권역으로 집계하여 산정하였으며, 모든 지표의 기준 단위로 이용하였다. 단, 유역의 대부분이 북한지역인 금강산댐 중권역, 평화의댐 중권역, 고미탄천 중권역, 임진강상류 중권역 그리고 유출량이 모의되지 않은 제주권역은 표준화 및 최종지표 도출에서 제외하였다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 4-1. 대권역 및 중권역 단위

표 4-1. 압력 지표 및 자료 출처

지표	변수	자료 이름	시점	공간해상도	자료 출처
소모성 물 사용량	생활/공업/농업용수 이용량*(1-회귀율)	WAMIS 생공농수 이용량	2010	중권역별 수치데이터	WAMIS
인간 물 스트레스	유출량/인구	WAMIS 인구	2011	중권역별 수치데이터	WAMIS
		유출량 TANK 모의결과	1994~2003	중권역별 수치데이터	한국건설기술연구원
농업 물 스트레스	유출량/농경지	중분류 토지피복	2009	벡터(*.Shp)	환경부 egis
댐 저수량	댐유효수량/유출량	댐 유효수량	2012	(수치데이터)	WAMIS, 한국대담회, 농어촌공사
댐 밀도	댐 개수	댐 개수	2012	(위치데이터)	WAMIS, 한국대담회, 농어촌공사
하천의 연속성 단절	댐이 없는 하천면적/전체하천면적	댐 위치	2012	(위치데이터)	WAMIS, 한국대담회, 농어촌공사
외래어종 수	외래어종 수	수생태계건강성 평가 보고서 중 외래어종 수	2011	중권역별 수치데이터	수생태계건강성 보고서
외래어종 비율	외래어종 비	수생태계건강성 평가 보고서 중 외래어종 비	2011	중권역별 수치데이터	수생태계건강성 보고서
어획 및 양식압력	내수면어업 생산량/유출량	통계청 어업별 품종별 내수면어업 통계	2013	행정구역별 수치데이터	통계청

표 4-1. 입력 지표 및 자료 출처 (계속)

지표	변수	자료 이름	시점	공간해상도	자료 출처
질소 부하	질소 부하량	국립환경과학원 전국오염원자료	2009 -2011	중권역별 수치데이터	국립환경과학원 및 오염부하량 위탁과제 ³⁾
인 부하	인 부하량	국립환경과학원 전국오염원자료	2009 -2011	중권역별 수치데이터	국립환경과학원 및 오염부하량 위탁과제
농약 오염	농약 사용 실물량	국립환경과학원 토양지하수정보 시스템	2012	(수치데이터)	국립환경과학원 토양지하수정보시스템
토사 유출량	잠재 토사 유출량	강수	2004 이전	(수치데이터)	Jung et al(2004)에서 추출한 R
		토양	2012	30m	토양도
		지형	2012	30m	DEM
		토지이용	2009	벡터(*.Shp)	환경부 egis 중분류 토지피복
유기물 부하	유기물 부하량	국립환경과학원 전국오염원자료	2009 ~2011	중권역별 수치데이터	국립환경과학원 및 오염부하량 위탁과제
경작지 개발지역	토지피복 중 경작지	중분류 토지피복	2009	벡터(*.Shp)	환경부 egis
불투수층 개발지역	토지피복 중 시가화 지역	중분류 토지피복	2009	벡터(*.Shp)	환경부 egis
가축밀도	가축두수*몸집 계수	WAMIS 가축사육두수	2011	중권역별 수치데이터	WAMIS, 국립축산과학원 가축분뇨정보시스템
습지 개간율	습지 중 현재 시가화, 농경지로 바뀐지역	중분류 토지피복	1975, 2009 비교	60m+벡터	환경부 egis
소득 스트레스	소득	GRDP	2012	행정구역별 수치데이터	통계청

자료: 필자 작성.

표 4-2. 반응 지표 및 자료 출처

지표	변수	자료 이름	시점	공간해상도	자료 출처
물이용 인프라	댐, 저수지 등의 유효수량의 총합	댐, 저수지 유효수량	2012	(수치데이터)	WAMIS, 한국대댐회, 농어촌공사
적정 물이용 수준	이용량 대비 유출량	유출량 TANK 모의결과	1994 ~2003	중권역별 수치데이터	한국건설기술연구원
		WAMIS 생공농수 이용량	2010	중권역별 수치데이터	WAMIS
하천 접근성	하천 개수율	하천 개수율	2009	중권역별 수치데이터	WAMIS
수생태 보호지역	상수원 보호구역	상수원 보호구역	-	벡터(*.Shp)	WAMIS
육상생태 보호지역	국토자연성평가 1등급	국토자연성 평가	2010	벡터(*.Shp)	환경부 egis
위생시설	공공하수처리, 분뇨처리량	하수도 통계	2012	행정구역별 수치데이터	하수도 통계
물 재이용량	오페수 재이용량	하수도 통계	2012	행정구역별 수치데이터	하수도 통계
대체수원 잠재량	빗물집수시설 저장용량	하수도 통계	2012	행정구역별 수치데이터	하수도 통계
수도 접근성	상하수도 보급률	상하수도 통계	2012	행정구역별 수치데이터	하수도 통계
수자원 투자비용	단위면적당 수자원사업 투자비	중권역 이행평가 보고서	2008 ~2013	중권역별 수치데이터	중권역 이행평가 보고서
수자원 거버넌스	수자원 관련 공무원 수	공무원 수	2012	행정구역별 수치데이터	국립환경과학원 CCGIS

자료: 필자 작성.

3) 위 연구는 전국을 대상으로 오염부하량을 구축한 위탁연구로서, 부록 3에서 자세히 다루고 있음

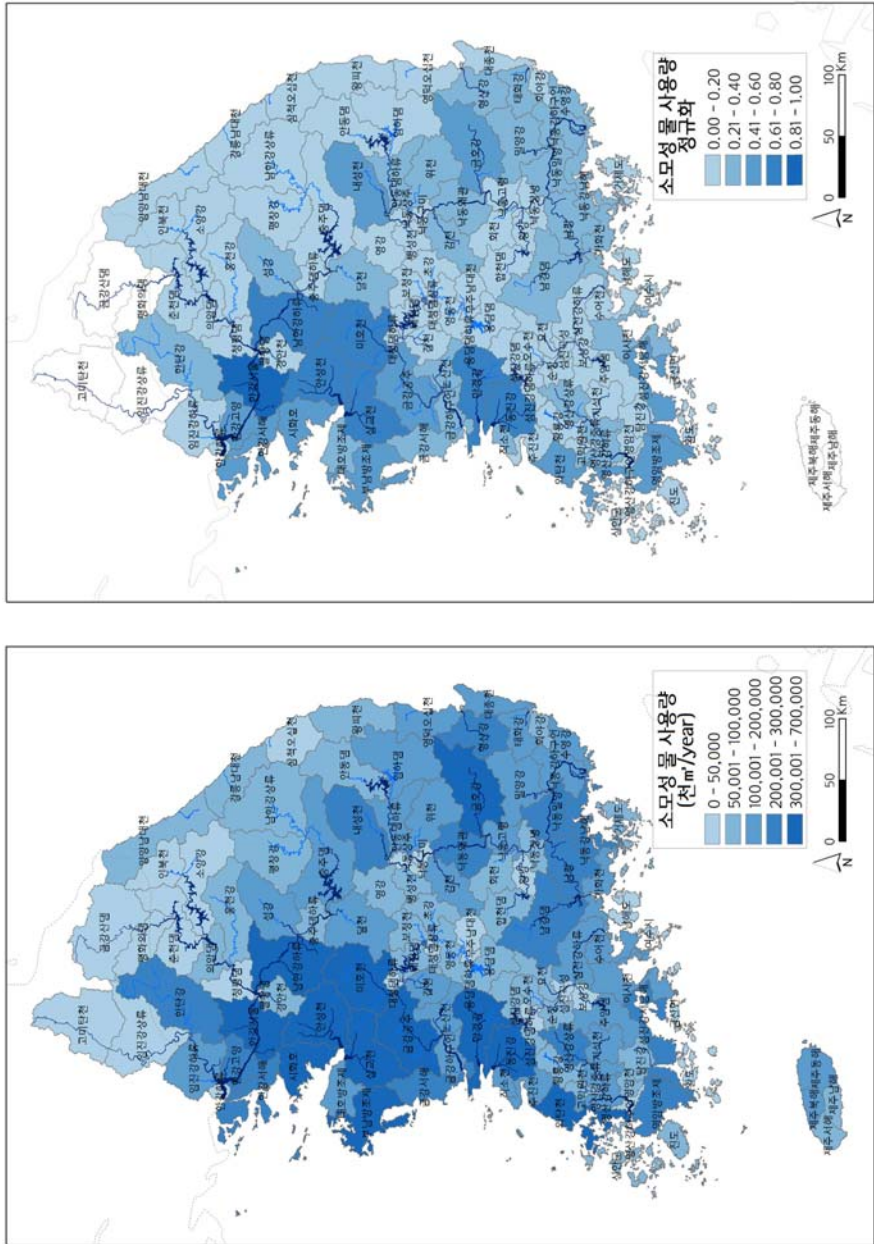
가. 인간 물 요구량

1) 소모성 물 사용량

소모성 물 사용량에서는 회귀되지 않고 완전히 소모되는 물의 양을 반영하며, 가정용수, 농업용수, 공업용수를 모두 반영하였다. WAMIS에서 각 중권역별 가정, 공업, 농업용수 이용량(2010)을 이용하여 물 공급량을 확인하였고, 제4차 국가수자원장기종합계획(2011~2020)에서 고시된 각 용수용도별 회귀율은 가정용수 65%, 공업용수 65%, 농업용수 35%에 따라 각각의 용수이용량에 35%, 35%, 65%를 적용하여 손실되는 수량을 도출하였다.

가장 많은 양의 물을 소모하는 중권역은 한강서울(중랑천)로 2010년 한해 약 649,459천 m^3 의 물을 소모한 것으로 나타났다. 이어 안성천(513,725천 m^3), 삼교천(489,039천 m^3), 만경강(450,014 m^3), 남한강하류(414,423천 m^3), 미호천(409,845천 m^3), 시화호(315,721천 m^3) 등 수도권 및 농업용수자원 이용이 높은 서해안 저지대 농업지역을 중심으로 높은 소모성 물 사용량이 나타났다.

높은 소모성 물 사용량을 보인 중권역은 각각 지역별 특성에 따라 용수를 이용하는 용도가 달랐는데, 한강서울(중랑천)은 높은 생활용수이용량으로, 시화호는 높은 공업용수이용량, 나머지는 대부분 높은 농업용수이용량으로 인한 높은 소모성 물 사용량을 나타냈다. 소모성 물 사용량이 높을수록 관개를 통한 물 요구량이 높음을 의미하며, 강우로 인한 지표유출 등 기존에 사용하던 수원에서의 물 공급이 부족한 때 심각한 물 부족을 겪을 가능성이 높아지는 것을 의미한다.



자료: 필자 작성.

그림 4-2. 소모성 물 사용량(원단위 및 표준화)

2) 인간 물 스트레스

1994~2003년 평균 중권역별 유출량을 각 권역별로 사용할 수 있는 물(가용량)으로 간주하였고, 사람이 최소한의 삶 유지를 위해 필요한 연간 수량을 1인당 100m³로 반영하여, 이를 인구에 곱한 후 유출량과의 비를 계산하였다. 본 지표의 변수값은 값이 클수록 스트레스가 적음을 의미한다. 제주도 권역은 모의된 유출량 데이터가 없어 표현에서 제외하였으며, 고미탄천, 금강산댐 권역은 거주인구가 없는 것으로 집계되어 표현되지 않았다.

한강서울, 한강고양, 한강서해, 수영강 권역은 유출량이 적지는 않으나 높은 인구밀도로 인해 높은 물스트레스를 보였고(한강서울 1.0, 한강고양 2.4, 한강서해 5.0, 수영강 2.0), 인구밀도가 낮은 강원지역 등지에서 스트레스가 낮음을 보였다. 낙동상주, 낙동구미, 용담댐하류, 대청댐상류 등은 연 유출량이 적은 편에 속했으나 인구밀도도 많지 않아 물 스트레스가 높게 나타나지는 않았다. 마찬가지로 임진강상류, 평화의댐 권역은 거주인구가 거의 없어 인간 물 스트레스가 매우 낮은 것으로 표현되었다. 즉, 우리나라는 지역에 따라 강우에 따른 유출량 차이가 크지 않기 때문에 주로 인구밀도에 따라 인간 물 스트레스가 결정되는 경향이 보이는 것으로 나타났다. 물 스트레스가 높다는 것은 관개 등을 통해 다른 지역에서 물을 공급받아야 하거나 계절적인 건조기 또는 가뭄이 발생했을 시 인간의 물이용에 어려움을 겪을 가능성이 높은 것을 의미한다.

이를 표준화 과정에서는 값이 클수록 스트레스가 높음을 표현할 수 있도록 역으로 표준화를 수행하였다.

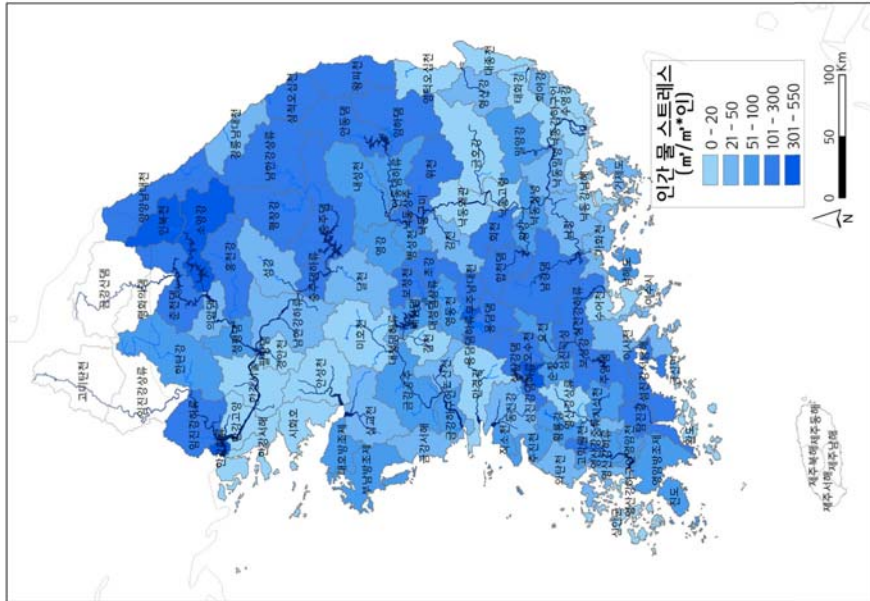
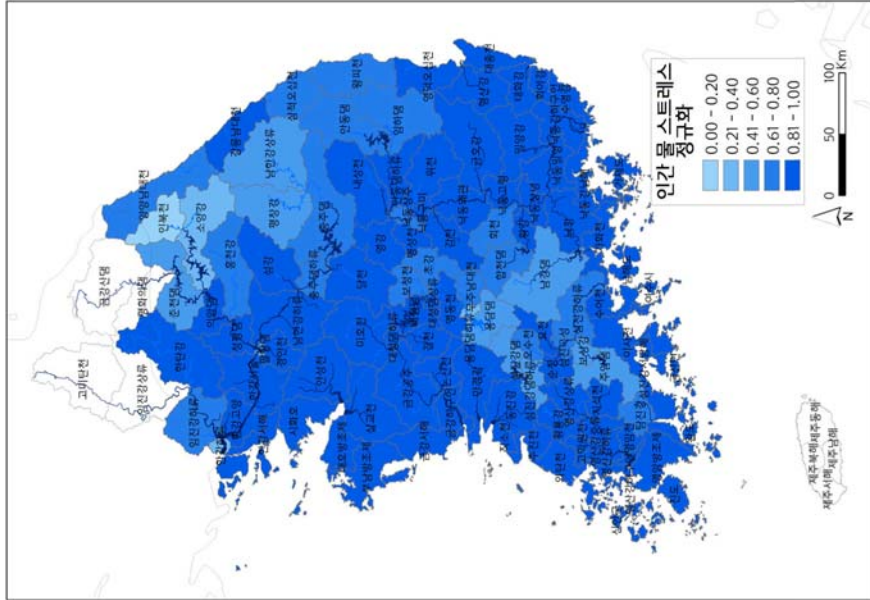


그림 4-3. 인간 물 스트레스원자료 및 표준화

자료: 필자 작성.

3) 농업 물 스트레스

농업에 이용되는 물은 관개로 공급되는 농업용수뿐만 아니라 강수, 토양수분 등으로부터 공급받기도 하지만, 본 연구에서는 농업용수 공급에 가장 큰 수원으로 강수를 통한 물 공급으로 가정하였다. 1994~2003 평균 중권역별 유출량을 가용수자원으로 간주하였고, 환경부 중분류토지피복 중 농업지역(200번대; 논, 밭, 하우스재배지, 과수원, 기타재배지)을 추출하였다. 각 농업지역의 단위면적당 가용한 최대 수량을 산정하기 위해 유출량을 농업지역 면적으로 나누어 계산하였다.

농경지비율이 높은 서해안 지역(금강하구언 $1.67\text{m}^3/\text{m}^2$, 대호방조제 $1.97\text{m}^3/\text{m}^2$, 부남방조제 $1.87\text{m}^3/\text{m}^2$, 동진강 $1.44\text{m}^3/\text{m}^2$, 직소천 $1.59\text{m}^3/\text{m}^2$, 영산강하류 $1.46\text{m}^3/\text{m}^2$, 영암천 $1.44\text{m}^3/\text{m}^2$)과 내륙농촌지역(낙동상주 $1.89\text{m}^3/\text{m}^2$)에서 높은 농업 물 스트레스를 나타냈으며, 유출량이 농경지 면적에 비해 적은 도서·연안지역(여수시 $1.80\text{m}^3/\text{m}^2$, 와탄천 $1.34\text{m}^3/\text{m}^2$, 신안군중권역 $0.17\text{m}^3/\text{m}^2$, 완도중권역 $0.85\text{m}^3/\text{m}^2$)에서 높은 농업 물 스트레스가 확인되었다.

제주도 권역은 모의된 유출량 데이터가 없어 표현에서 제외하였으며, 금강산댐, 고미탄천은 경작지로 집계되는 면적이 없어 표현되지 않았고, 평화의댐은 중권역 내 표현되는 경작지 면적이 전체 중권역을 반영하고 있지 않아(면적의 절반 이상이 북한지역) 수치가 매우 높게 도출되는 극단치(outlier)로 나타나 표준화 과정에는 포함하지 않고 나타내었다.

역 표준화를 통해 스트레스가 높을수록 표준화 값이 높게 나타나도록 조정하였으며, 그 결과 서해안 및 낙동강 유역의 농경지대에서 높은 농업 물 스트레스를 확인할 수 있었다. 인간 물 스트레스와 유사하게, 본 지표 역시 우리나라 내에서의 강수량 차이보다는 중권역 내 농경지 면적에 비례하여 압력 변수가 표현되었다.

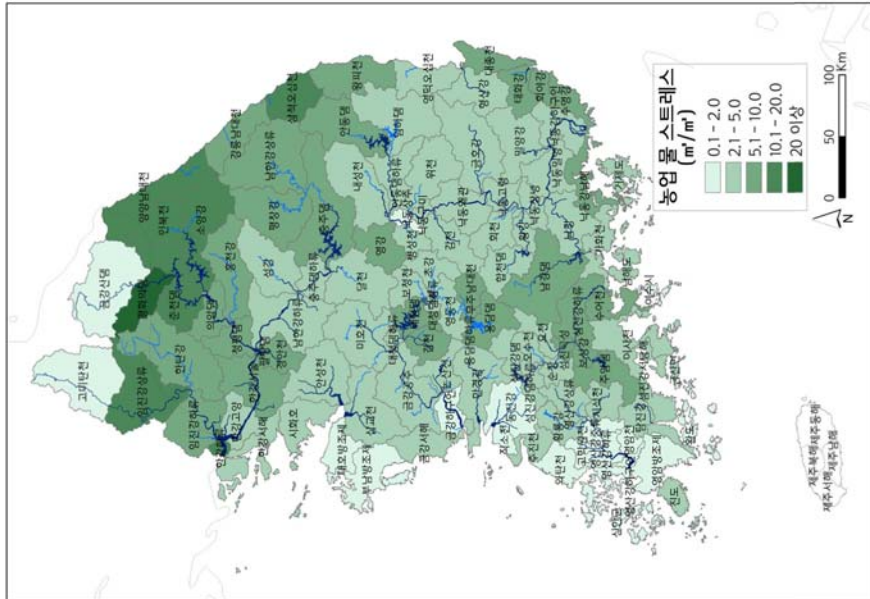
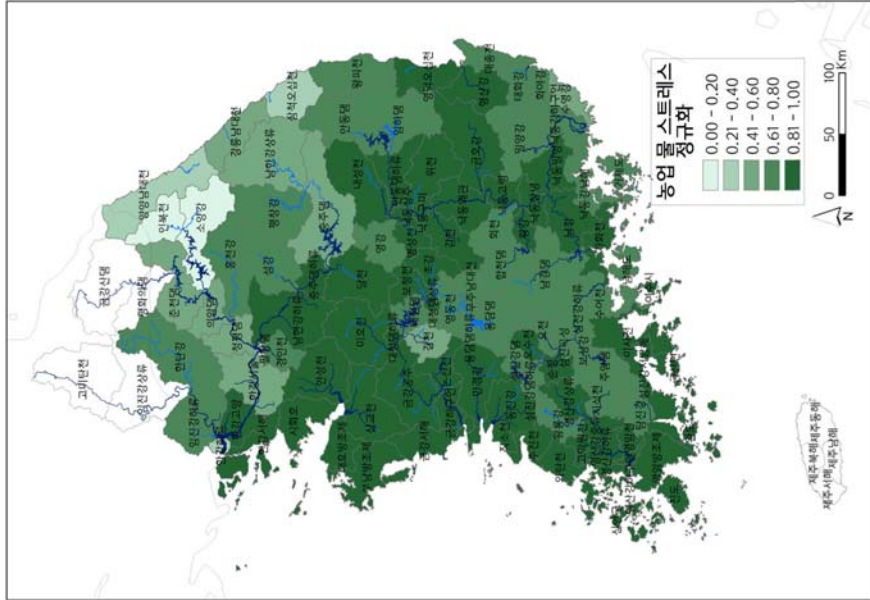


그림 4-4. 농업 물 스트레스원자료 및 표준화

자료: 필자 작성.

나. 수생태계 건강성

1) 댐 저수량

대형 구조물로 인한 하천 흐름의 단절을 평가하기 위해서, Vörösmarty et al.(1997)에서 사용한 강물나이 계산법(River water aging)을 이용하였으며, 이는 댐 등 큰 유효수량을 가진 구조물이 많을수록 강의 흐름이 지체되어 강물의 나이가 많아진다는 가정을 이용하는 것이다. 또한 강의 흐름을 고려한 계산을 위해, 국가하천 및 지방1급하천 자료를 통해, 대권역의 가장 상류에 위치하는 중권역부터 차례로 하류로 이동하면서 중권역의 강물 나이를 계산해 더하였다. 나이값이 클수록 스트레스가 큼을 의미한다.

■ 표 4-3. 강물나이 계산법(River water aging)

$\Delta\tau_{Ri} = \frac{V_{Ri}}{Q_i}$	$\Delta\tau_{Ri}$ = i번째 셀에서의 저수지로 인한 물 나이 (year) V_{Ri} = i번째 셀의 저수지의 총 유효 저수량 (km) Q_i = i번째 셀에서 빠져나가는 유출량 (km/year)
$\Delta\tau_{Si} = \frac{\sum_1^n \Delta\tau_{Sj} Q_j}{\max(\sum_1^n Q_j, Q_i)} + \Delta\tau_{Ri}$	$\Delta\tau_{Si}$ = i번째 셀에서 하천의 물 나이 (year) $\Delta\tau_{Sj}$ = 상류 셀 j에서의 하천의 물 나이 (year) Q_j = 상류 셀 j에서 i셀로 흘러들어가는 유출량 (km/year) n = 상류의 인접한 셀 개수

자료: Vörösmarty et al.(1997)에서 재작성.

저수량으로 인해 물의 나이가 가장 많은 것으로 나타난 곳은 황강(1.96) 중권역으로 나타났으며, 영산강하구연(1.75), 섬진강댐하류(1.47), 대청댐(1.39) 등 순으로 나타났다. 대부분의 대형 저수량을 보유한 대댐은 강의 상류에 위치하고, 하류로 갈수록 유량이 많아져 $\Delta\tau_{Si}$ 가 작아지기 때문에, 강의 상류를 중심으로 물의 나이가 많은 것으로 나타났다.

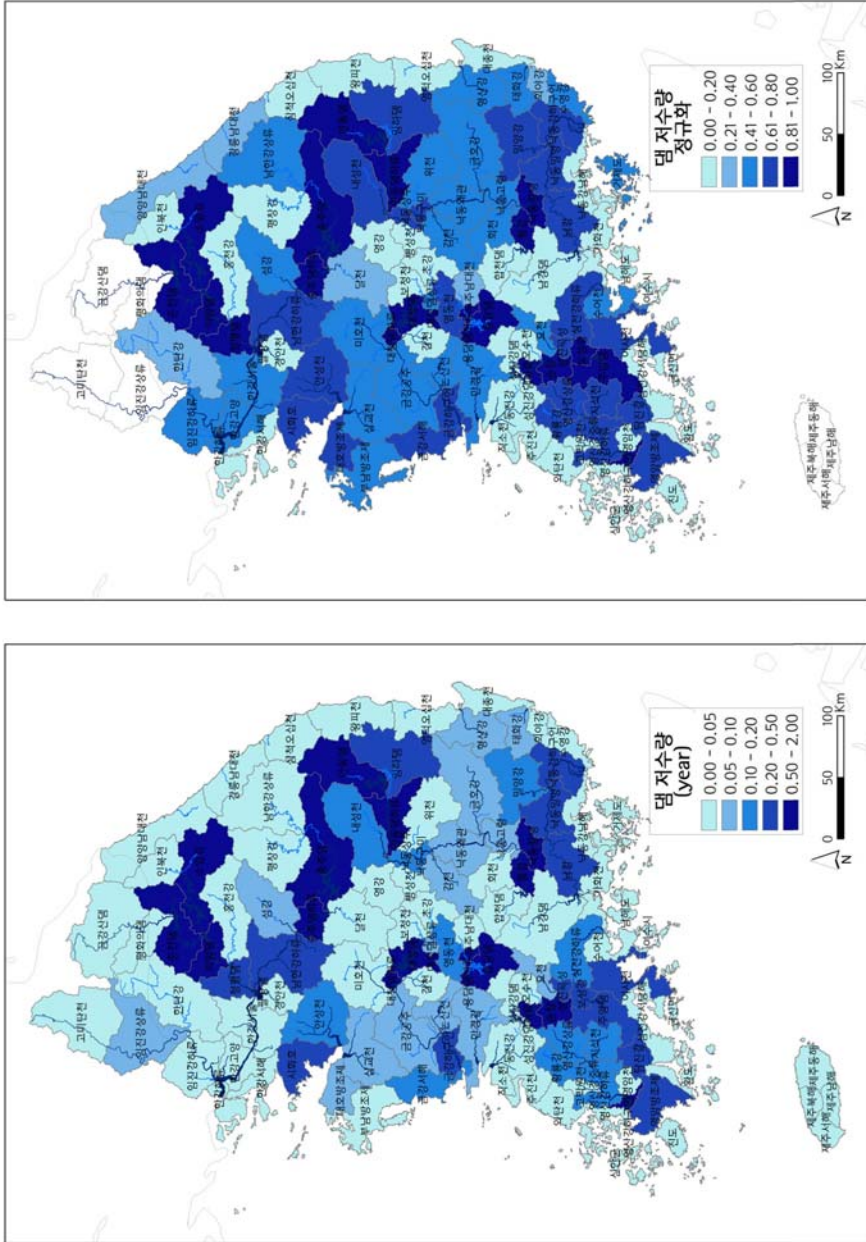


그림 4-5. 담 저수량(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

2) 댐 밀도

한국수자원공사(2005)에 의하면 우리나라에서 일반적으로 정의하는 댐은 ‘대댐’으로, ①높이 15.0m 이상, ②높이 10~15m로서 길이가 2,000m 이상, ③저수용량이 300만 m^3 이상 중 하나의 조건을 만족하는 댐을 의미한다. WAMIS, 한국수자원공사, 한국대댐회, 농어촌공사에서 제공하는 댐의 정보 중 대댐의 조건을 만족하는 댐 109개의 위치를 각 중권역별로 확인하였다. 109개 댐은 농업전용댐(대형저수지 포함) 41개소, 다목적댐 21개소, 생공전용댐 18개소, 발전용댐 13개소, 방조제 8개소, 조정지댐 6개소, 홍수전용댐 1개소, 기타(건천댐) 1개소로 구성되었다. 각 중권역별 댐의 개소수를 중권역 면적으로 나누어 유역의 단위면적당 대형댐 개수를 통해 권역별 대형댐의 밀도를 도출하였다. 값이 클수록 스트레스가 큼을 의미한다.

주요 강의 상류를 중심으로 직소천 0.012 등의 높은 값을 확인할 수 있었는데, 이는 우리나라의 주요 대형댐이 각 하천의 상류부분에 집중적으로 위치하고 있었기 때문이다. 또한 농경지가 많이 분포하는 서해 연안 지역에서는 하천의 하류부분에 방조제를 설치하여 농업용수로 이용하고 있기 때문에 영산강하구연 0.007 등 서해 하구연 지역에서 높은 댐 밀도값을 나타냈다. 이 밖에 댐이 있다고 확인된 중권역에서는 평균 0.001의 값을 나타냈다. 하지만 가장 높은 댐 밀도를 나타내는 중권역은 팔당댐 중권역으로 1km당 0.023, 그리고 회야강 및 태화강 중권역에서 0.006, 0.005로 높게 나타났는데, 이는 다른 중권역에 비해 위 중권역들이 매우 작은 총면적을 지녔기 때문인 것으로 나타났다. 이 밖에 61개의 중권역(북한 및 제주도 포함)대에서는 댐이 없는 것으로 확인되어 0으로 표현하였다.

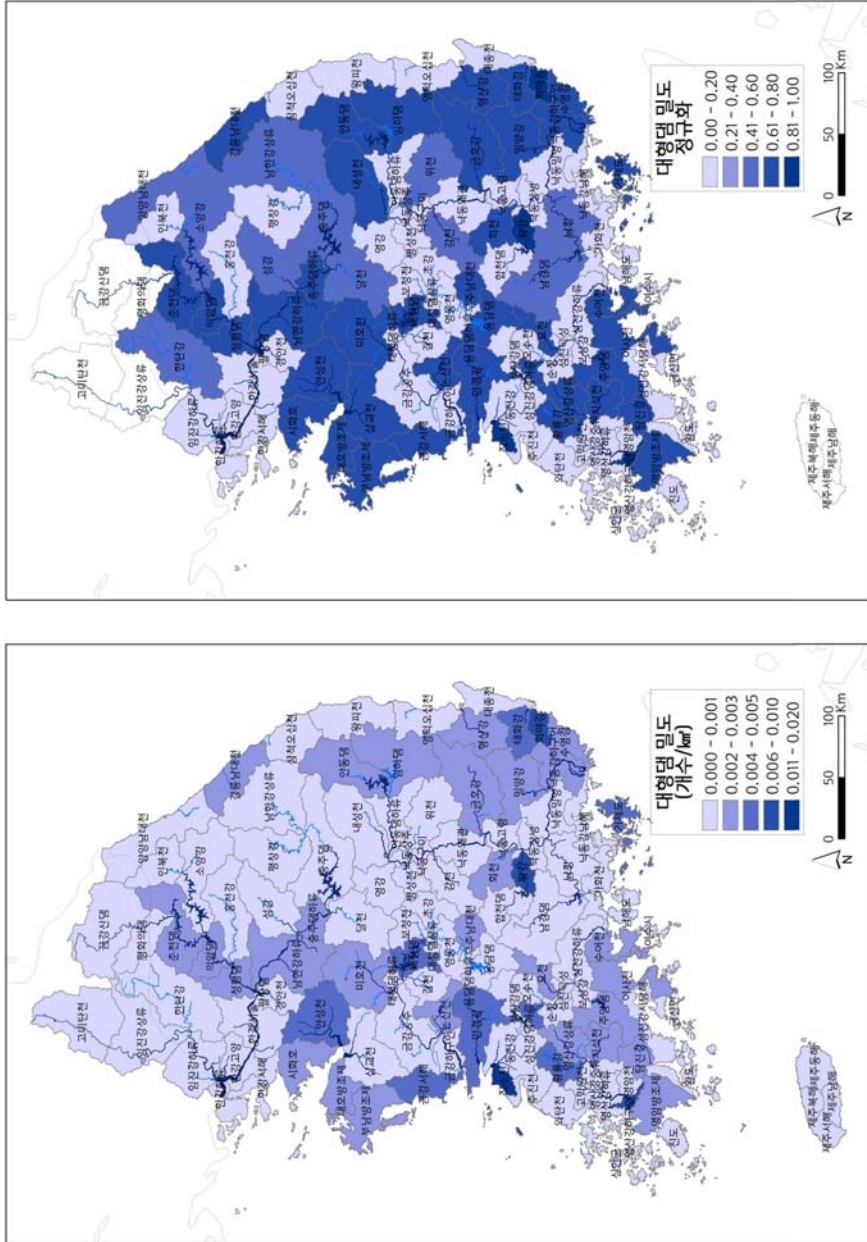


그림 4-6. 댐 밀도(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

3) 하천의 연속성 단절

대형 댐으로 인해 발생하는 하천의 연속성 단절(River Fragmentation)은 잠재적으로 생물의 이동이나 물의 자연적인 흐름 등을 방해한다고 알려져 있어, 이를 정량화하고자 하는 연구가 진행되어 여러 방법이 제안되고 있으나, 가장 널리 알려진 방법은 주요 물길에서 댐 등 구조물로 인해 방해받지 않는 가장 크고 긴 물길의 비를 이용하는 것이다(Nilsson et al., 2005). 이에 따라 본 연구에서는 각 중권역별로 국가하천과 지방1급하천을 대상으로, 댐의 영향이 없는 가장 긴 물길의 수표면적을 전체 국가하천과 지방1급하천의 수표면적으로 나누어 도출하였다. 유역의 중간지점에 구조물이 존재하는 경우 유역 내의 연속성이 가장 크게 단절된다고 판단하여, 하천의 연속성 단절의 최댓값은 50%(0.5)가 될 수 있다. 이는 중권역 내에서의 집수 및 생태적 연결 작용의 건전성을 매우 떨어뜨릴 가능성이 높은 위치에 구조물이 위치하고 있다고 판단할 수 있다.

전반적으로 하천의 연속성 단절 지표는 우리나라 중권역 내에서 특징적인 지역적 분포는 보이지 않는 것으로 나타났다. 우리나라 중권역 내 가장 하천 연속성이 떨어지는 곳은 논산천(0.494)으로 나타났으며, 의암댐(0.487), 지석천(0.481) 등으로 나타났다. 이 밖에도 춘천댐, 밀양강, 황룡강 중권역 등에서 0.4 이상의 높은 단절지수를 보였다.

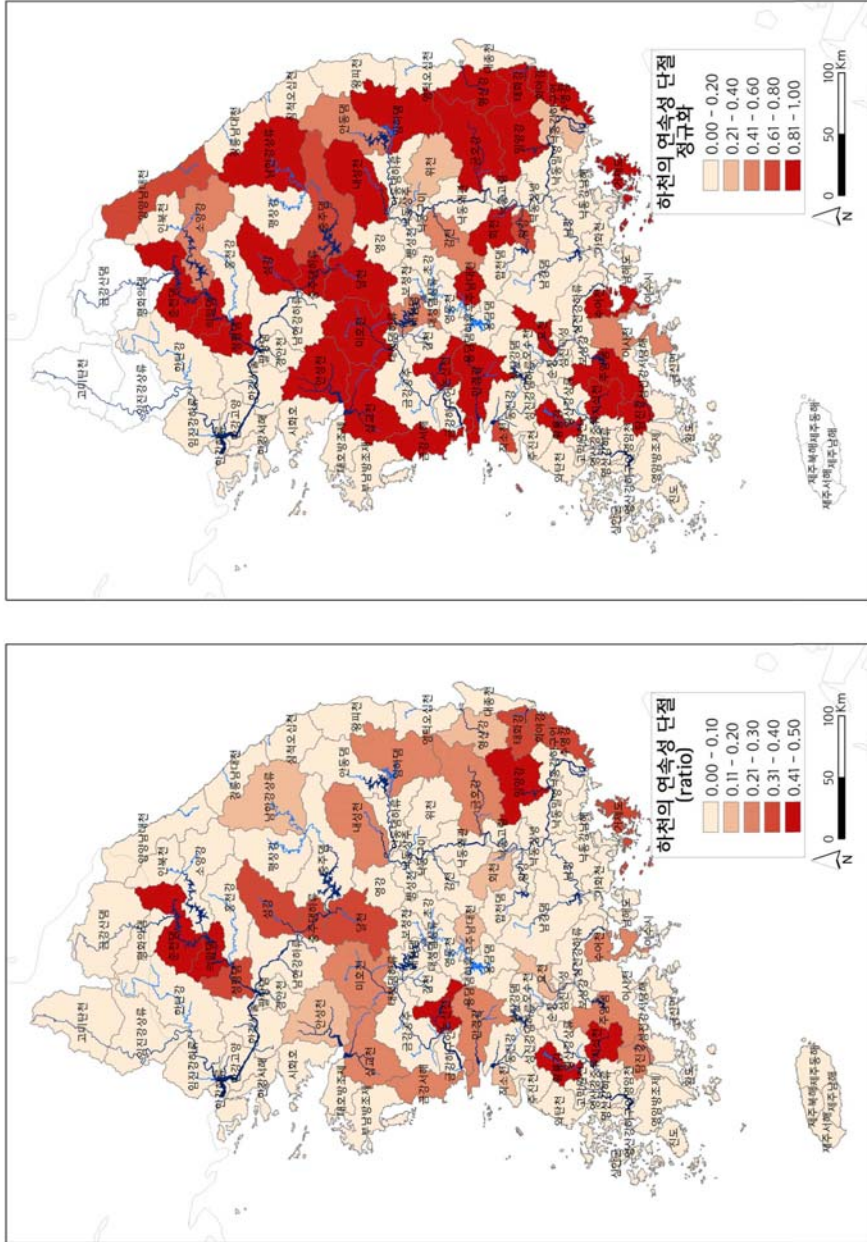


그림 4-7. 하천의 연속성 단절(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

4) 외래어종 수

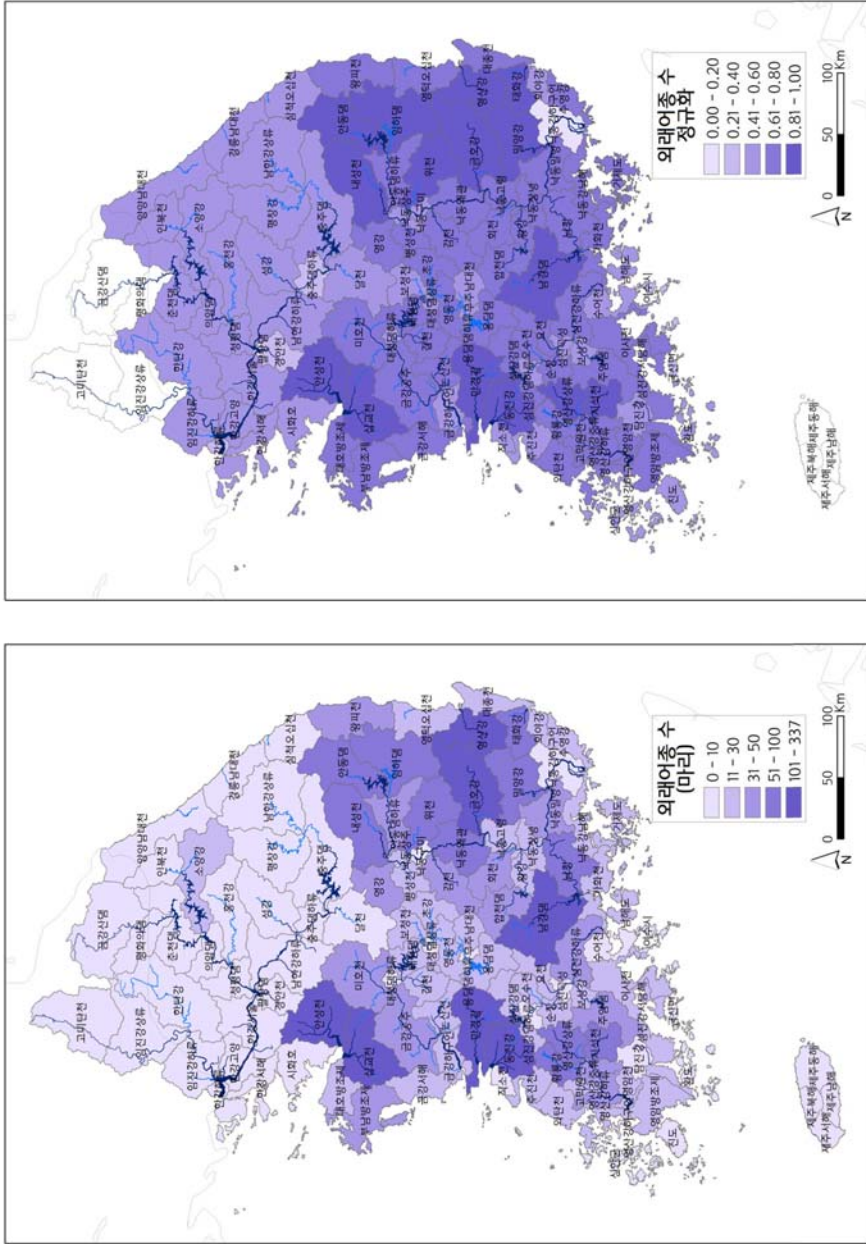
수생태계 건강성 평가(환경부, 2011)에서 각 중권역 본류 및 지류를 대상으로 수집한 외래어종의 수를 수집하였다. 수생태계의 생물다양성을 평가하는 데 가장 보편적으로 지정해온 생물군은 저서성무척추동물과 어류이며, 그 중 어류는 하천 먹이사슬의 최상위 소비자로서 수질의 상태와 함께 생태계의 건강성을 평가하는 데 적합하다고 여겨져 오래전부터 수생태계의 평가종으로 이용되어왔다(경기개발연구원, 2008).

수생태계 건강성 평가(환경부, 2011)에서 확인된 우리나라의 외래어종은 나일틸라피아, 떡붕어, 배스, 블루길, 이스라엘잉어로 총 5종이 확인되었다. 생태계 교란 야생어종인 배스는 모든 권역에서 출현하였고, 아열대성 어류인 나일틸라피아는 한강, 금강, 낙동강 유역에서 출현하였다. 외래어종의 수를 살펴보면, 안성천 중권역에서 33마리로 가장 많은 수의 외래어종이 확인되었고, 형산강 20마리, 삼교천과 만경강이 각각 182, 181마리로 높게 나타났다. 이 밖에도 낙동강 유역 전반과 동진강에서 높은 수의 외래어종 개체가 확인되는 등 중부지역보다는 남부지역 유역을 중심으로 높은 외래어종 수가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 한강유역에서는 전반적으로 외래어종이 거의 없는 것으로 나타났다.

5) 외래어종 비율

수생태계 건강성 평가(환경부, 2011)에서 각 중권역 본류 및 지류를 대상으로 수집한 외래어종의 비율 자료를 수집하였다. 전체 관찰된 어류 개체수 중 외래어종의 수를 통해 유역 내에서 확인되는 외래어종의 비율을 확인하고자 하였다.

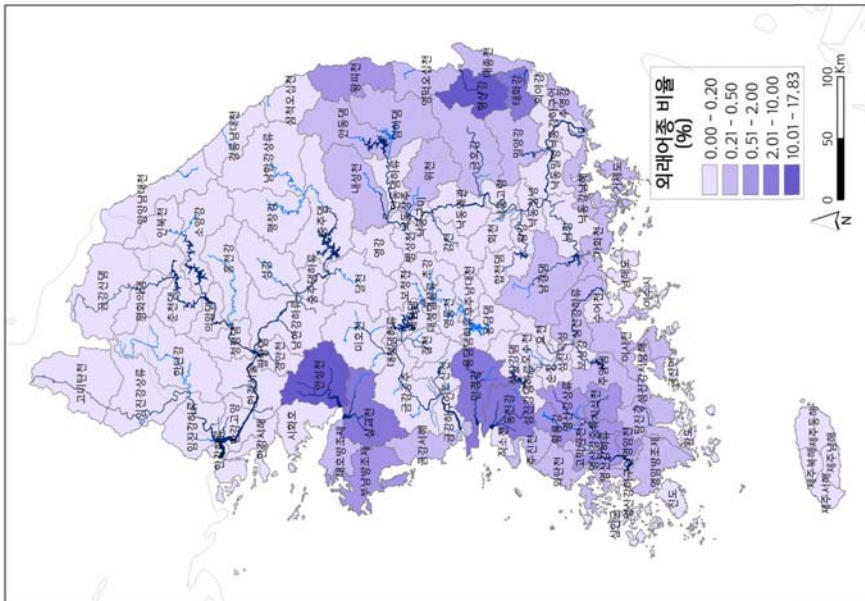
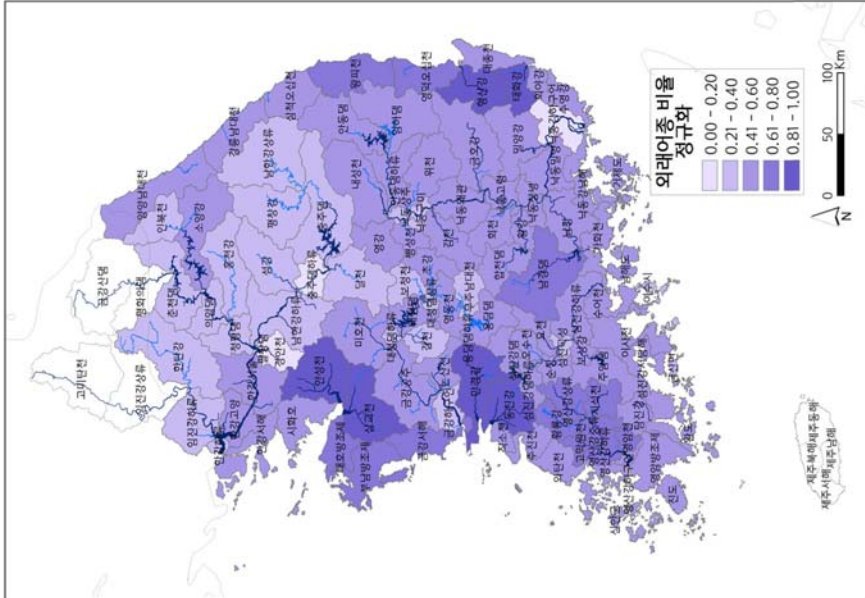
중권역별로 확인된 외래어종 비율 중 가장 높은 값은 안성천 중권역에서 17.8%로 나타났고, 형산강 12.1%, 만경강 7.7%, 동진강 6.4%, 태화강 6.3%, 삼교천 5.6%로 강의 하류지역에서 높게 나타났다.



자료: 필자 작성.

그림 4-8. 외래어종 수원지로 및 표준화

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-9. 외래어종 비율(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

6) 어획 및 양식압력

내수면 환경에서 민물어업 등을 통한 생산량이 많을수록 내수면 환경 교란 및 생물다양성에 부정적인 영향을 미칠 것으로 보고, 통계청에서 제공하는 내수면 어업량을 고려하고자 하였다. 통계청에서는 광역행정구역별로 활어, 선어, 냉동 생산량을 포함하는 내수면어업 업종별 생산량 (Metric Ton) 자료를 제공하고 있었으며, 본 연구에서는 가장 최근의 2013년 자료를 이용하였다. 중권역별로 평가가 이루어지는 본 연구의 특성에 맞게, 행정구역 면적비에 따른 중권역별 내수면 어업량을 재조정하여 계산함으로써 우리나라의 담수 환경에서 중권역별로 생산되는 어업 압력을 나타내고자 하였다.

내수면어업 양식량은 만경강 907.6톤/년, 남강댐 799.3톤/년, 동진강 659.5톤/년 등으로 높게 나타났고, 이어 충주댐, 남한강하류, 용담댐, 금강공주 유역에서 연간 약 500톤 가량의 내수면어업 생산량이 확인되었다. 반면 낙동강 상류지역에서는 내수면 어업이 거의 이루어지지 않는 것으로 나타나 매우 낮은 표준화 값을 보였다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

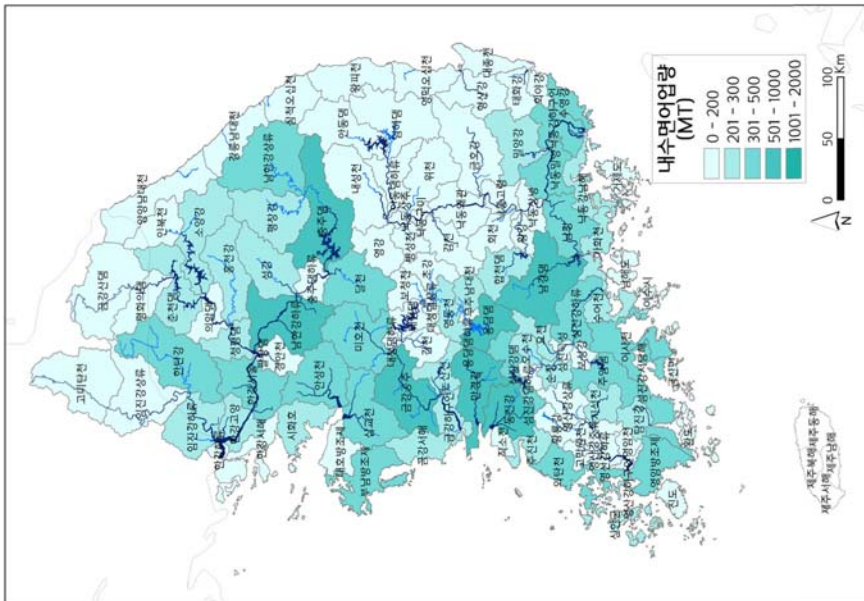
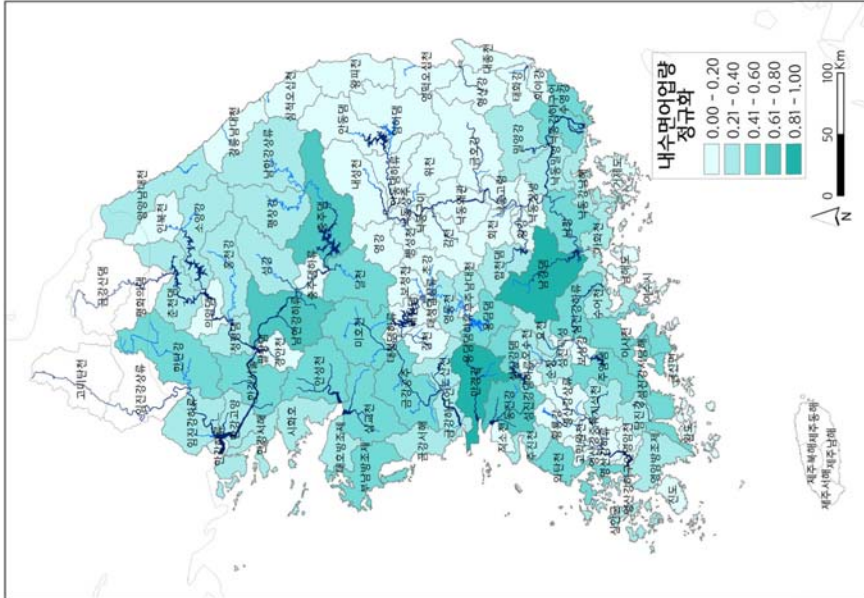


그림 4-10. 어획 및 양식업(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

다. 수질 요구량

1) 질소 부하

현재 우리나라에서 조사하고 있는 전국오염원조사자료를 활용하여 생활, 축산, 산업, 토지 분야에서 배출되는 총질소부하량(Total Nitrogen Loading)을 고려하였고 2009, 2010, 2011년의 3년 자료를 평균하여 값을 도출하였다. 발생부하량은 “한강수계오염총량관리계획수립지침” 및 “제2단계 수계오염총량관리기술지침”에 제시된 방법과 원단위를 인용하여 계산하였으며, 배출부하량은 개별배출부하량, 관거배출부하량, 방류부하량을 더한 후 직접정화량을 빼서 도출하였다. 따라서 이 결과는 총 발생량이 아니라 실제 배출되는 배출부하량의 총량을 고려하고 있으며, 이를 단위면적당 값으로 중권역별 산정하였다.

단위면적당 총 질소 배출부하량은 한강고양 86.2kg/km²/일, 한강서울 51.0kg/km²/일, 수영강 60.7kg/km²/일, 회야강 34.2kg/km²/일로 높게 나타났으며 안성천 26.2kg/km²/일, 한강서해 23.9kg/km²/일, 시화호 21.6kg/km²/일 등 인구가 밀집되어 있는 대도시 지역을 중심으로 질소배출부하량이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 또한 연간 질소 배출부하량 변화를 확인하였을 때 대부분의 중권역에서 해마다 증가하는 것으로 나타나 질소배출부하가 향후에도 수질에 지속적으로 문제가 될 것으로 나타났다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

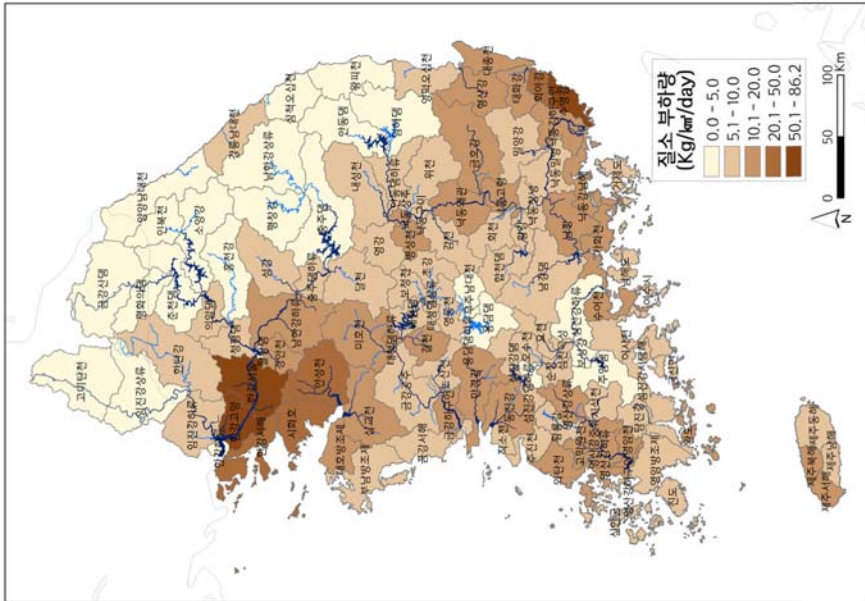
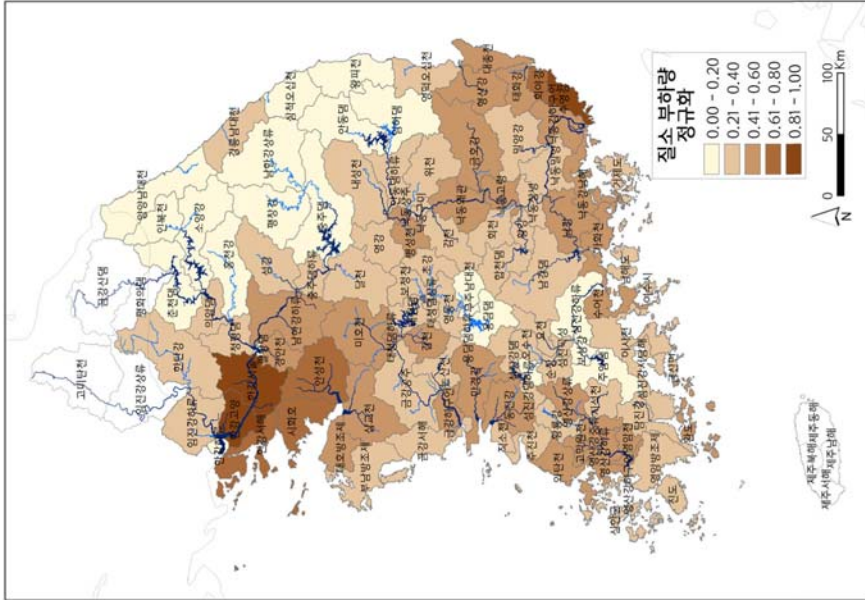


그림 4-11. 질소 부하(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

2) 인 부하

현재 우리나라에서 조사하고 있는 오염원으로 제공되는 자료를 활용하여 생활, 축산, 산업, 토지, 기타 분야에서 배출되는 총 인부하량(Total Phosphorus Loading)을 고려하였고 2009, 2010, 2011년의 3년 자료를 평균하여 값을 도출하였다. 배출부하량은 개별배출부하량, 관거배출부하량, 방류부하량을 더한 후 직접정화량을 제함으로써 발생량이 아니라 실제 하천으로 배출되는 양을 반영하고자 하였으며, 중권역의 단위면적으로 나누어 계산하였다.

단위면적당 총 인 배출부하량은 한강고양 7.9kg/km²/일, 한강서울 4.50kg/km²/일, 수영강 5.3kg/km²/일, 회야강 2.7kg/km²/일, 안성천 2.7kg/km²/일, 한강서해 및 시화호 2.2kg/km²/일로 질소 부하량과 유사한 지역적 분포로 대도시가 위치하는 중권역을 중심으로 높게 나타났다. 다만 특이점으로 완도 중권역에서 3.70kg/km²/일로 다른 중권역에 비해서 매우 높은 인 부하량이 확인되어, 농경 활동에 따른 인 부하가 위생시설로 처리되지 않고 배출되는 가능성을 확인할 수 있었다. 이 밖에도 서해안 연안 저지대의 중권역 및 낙동강 상류 중권역 등 인구 밀집 지역 및 집중적으로 농업지역의 면적비율이 높은 지역을 중심으로 높은 인 부하량을 확인할 수 있었고, 산간지역 등 농경면적이 작고 인구가 적은 지역에서는 매우 낮은 수준의 부하량을 나타내는 것으로 나타났다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

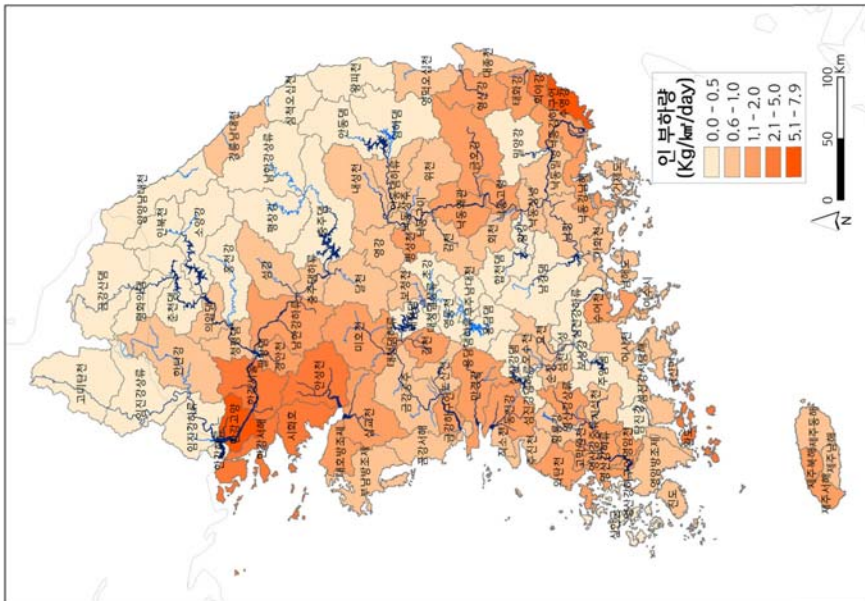
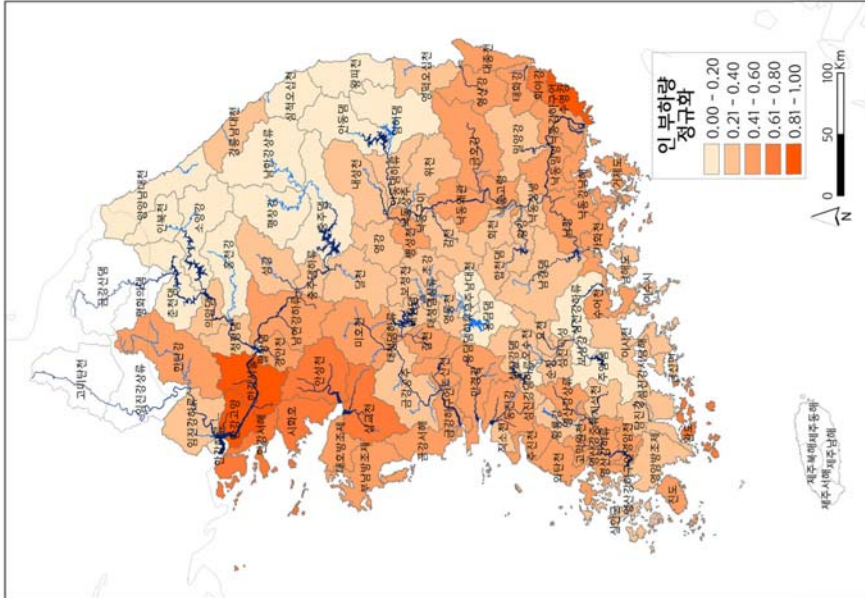


그림 4-12. 인 부하(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

3) 농약 오염

농약은 제초제 및 살충제의 형태로 논, 밭, 과수원 등의 농작물 관리뿐 아니라 골프장에서 잔디 관리를 위해 사용되고 있지만 본 연구에서는 농작물 관리에 이용되는 농약 살포량만을 반영하고자 하였다.

현재 우리나라에서 농경지 농약 사용량은 국가단위로만 공개되고 있어, 각 행정구역 및 중권역별로 농약 사용량을 추정하기 어려워, 이를 간접적으로 반영하고자 각 중권역별 농경지 면적에 전국 기준 단위면적당 농약 사용량을 곱하여 중권역별 총 농약 사용량을 추정하였다. 일정한 값을 중권역 내 농경지 면적으로 곱함으로써 도출되는 본 지표는 경작지 개발지 지표와 중복될 가능성이 있을 가능성이 논의되었으나, 농경지역 지표는 중권역 내 농경지역의 비율을 나타내는데 초점을 맞추고 있고, 본 지표에서는 중권역 내 농경지 면적의 절대적인 값을 반영하기 때문에 완전한 상관관계를 나타내지는 않을 것으로 판단하였다.

나라지표(www.index.go.kr)에 따르면 2013년 기준 우리나라의 농약 사용량은 10.9kg/ha⁴⁾이다. 이를 토대로 연간 가장 많은 농약이 사용되고 있는 중권역은 삼교천(799,722kg/년)으로 나타났다. 남한강하류(792,434kg/년), 동진강(753,854kg/년), 만경강(736,912kg/년) 등으로 나타났다.

4) e-나라지표 (http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2422) [2014.12.23 최종확인]

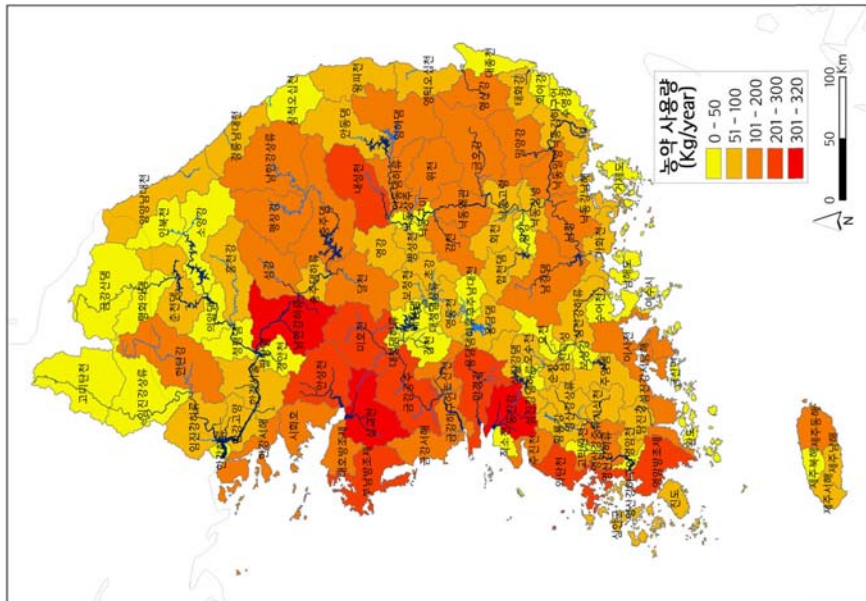
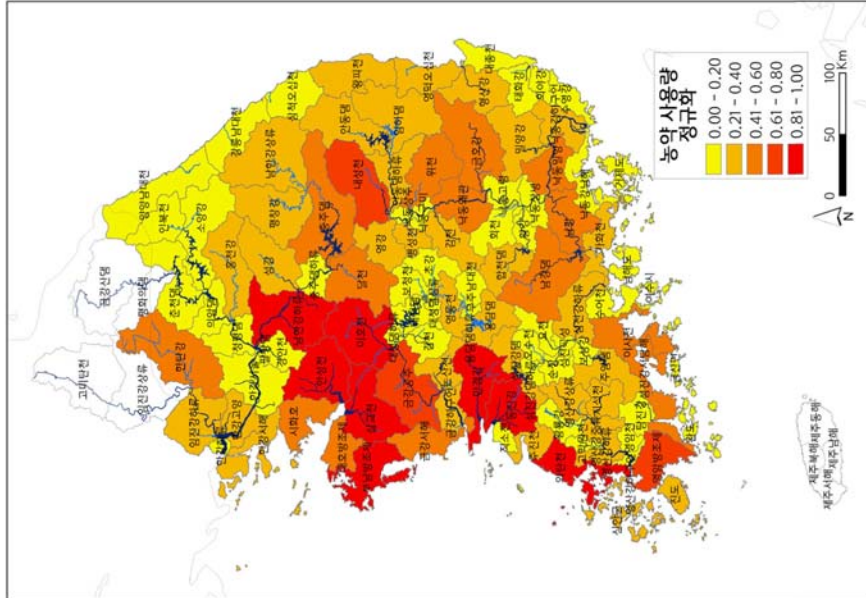


그림 4-13. 농약 오염(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

4) 토사 유출량

자연적인 토사 유출과 인간활동으로 인한 인위적인 토사 유출을 분리하기는 어렵기 때문에 일부 선행연구에서 인위적인 토사 유출을 고려하기 위한 대응변수로 인구밀도자료를 사용하여 인위적인 개발활동에 따른 토사유출을 추정하는 것을 확인하였다(Reich et al., 2001; Vörösmarty et al., 2010). 하지만 본 연구에서는 환경부고시 제2012-124호 표토의 침식 현황 조사에 관한 고시에서 명시한 범용토양유실예측모형(Universal Soil Loss Equation, USLE) 및 속성값을 이용하여 잠재적 토사 유출량의 직접적인 대응값을 구하고자 하였다.

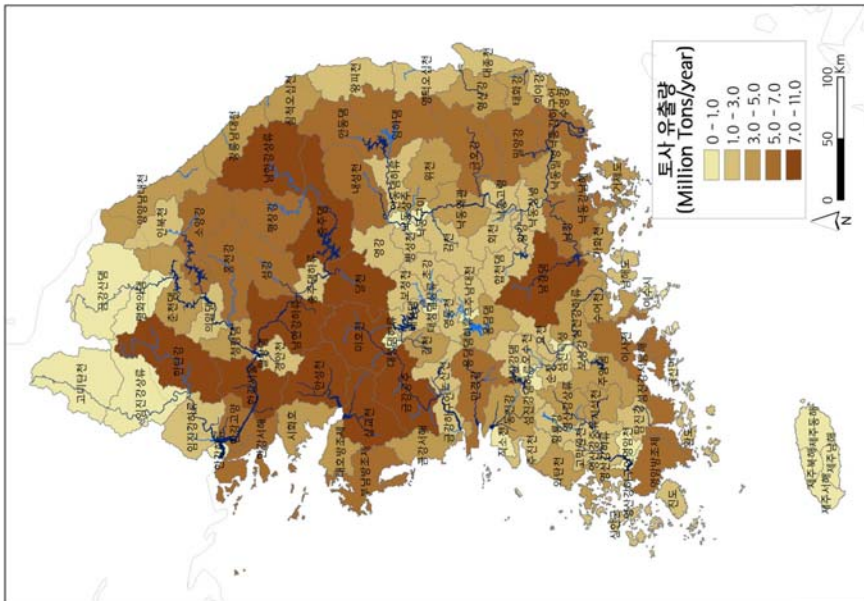
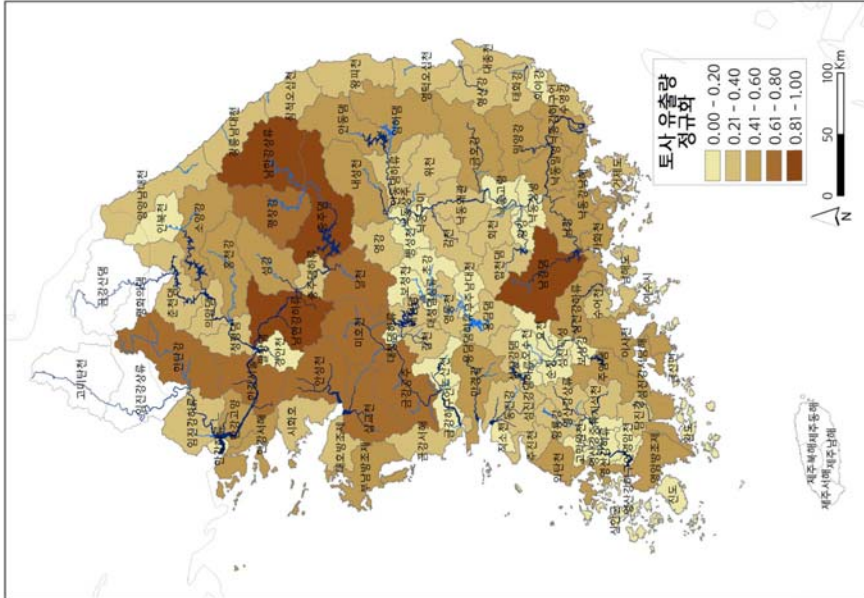
강우인자(R)은 위 고시에서 각 행정구역별로 도출한 R값을 이용하였고, 토양침식성인자(K)는 농촌진흥청 흙토람⁵⁾에서 제공하는 토양통별 K값을 이용하였다. 경사인자(LS)는 고시한 경사도(%)에 따른 경사상황변수값을 입력하였고, 식생피복인자(C)와 보전관리인자(P)는 각각의 토지이용에 따른 값을 입력하였다. 이후 잠재적토양유실량을 구하기 위해 R, K, LS, C, P값을 공간상에서 곱하여 GIS를 통해 맵핑하였다.

USLE 공식을 이용하여 전국 중권역의 잠재토사유출량 모의결과는 아래 그림과 같다. 잠재토사 유출량은 남한강상류에서 연 10,693,345Mg, 충주댐 9,980,950Mg, 남한강하류 9,246,663Mg으로 한강상류 및 중상류 지역에서 높게 나타났으며, 남강댐중권역에서 9,296,105Mg으로 낙동강 하류에서도 높은 잠재토사유출이 확인되었다.

단 모의한 토사 유출량은 강우인자(R)가 행정구역단위로 제공된 점 및 토양부식인자(K)가 제주도를 제외한 한반도에 위치한 점으로 인해, 북한으로 행정경계가 편입되는 유역(고미탄천, 금강산댐 중권역) 및 제주도 지역에 대한 값은 평가되지 않았다. 또한 북한의 행정경계가 일부 포함되는 임진강상류, 평화의 댐 중권역 등은 실제 전체 중권역에 대해 평가되지 않았기 때문에 잠재토사유출량이 실제보다 낮게 평가되었을 가능성이 있다.

5) 흙토람 홈페이지(<http://soil.rda.go.kr>) [2014.12.23 최종확인]

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-14. 토사 유출량(원자료 및 표준화)

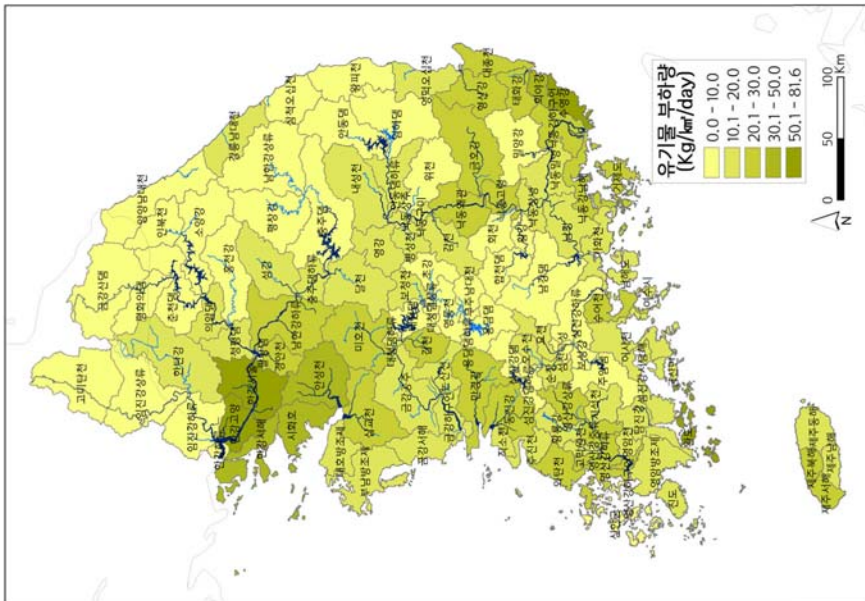
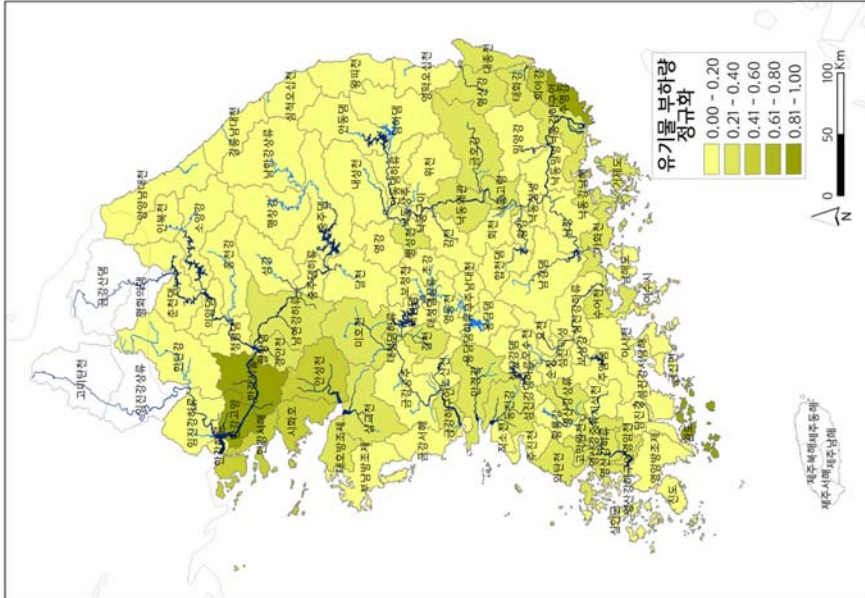
자료: 필자 작성.

5) 유기물 부하

현재 우리나라에서 조사하고 있는 오염원으로 제공되는 자료를 활용하여 생활, 축산, 산업, 토지, 기타 분야에서 배출되는 총유기물부하량을 생물학적산소요구량(BOD)을 고려하였고 2009, 2010, 2011년의 3년 자료를 평균하여 값을 도출하였다. 배출부하량은 개별배출부하량, 관거배출부하량, 방류부하량을 더한 후 직접정화량을 제함으로써 발생량이 아니라 실제 하천으로 배출되는 양을 반영하고자 하였으며, 중권역의 단위면적으로 나누어 계산하였다.

단위면적당 배출부하 BOD량은 한강고양 81.6kg/km²/일, 한강서울 77.4kg/km²/일, 수영강 77.7kg/km²/일, 안성천 45.2kg/km²/일, 한강서해 39.0kg/km²/일 등으로 한강하류지역과 서해안지역, 부산연안을 중심으로 높게 나타나 대도시를 중심으로 높은 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 반면 완도 중권역에서 72.0kg/km²/일에서 높은 유기물 부하량을 보였다. 반면 강원 산간지역, 남부 내륙지역에 위치하는 중권역에서는 낮은 수치의 유기물 부하량이 나타나 낮은 스트레스 값을 보였다. 이는 인 부하량과 유사한 지역적 분포를 보이는 것으로 나타났다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-15. 유기물 부하(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

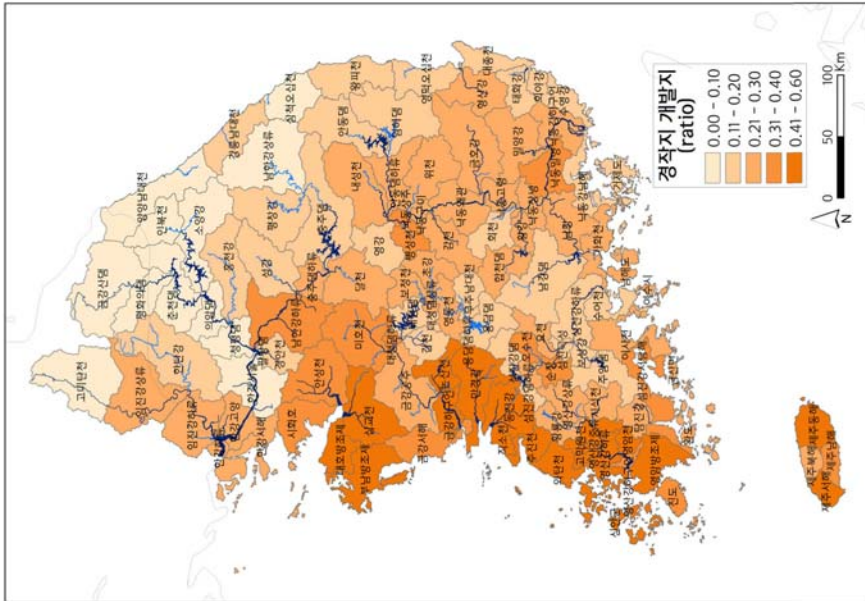
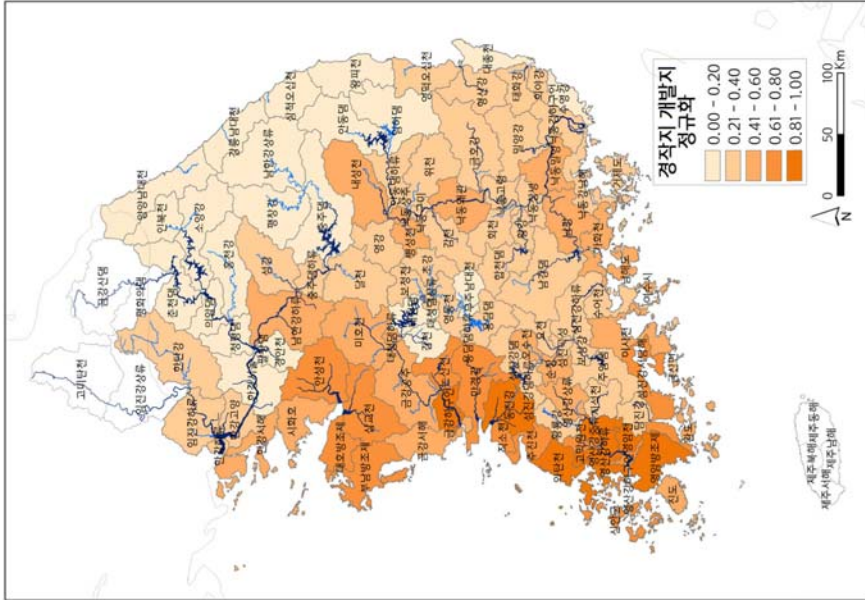
라. 수자원 재생능력

1) 경작지 개발지역

우리나라에서 제작·배포된 2009년 기준 환경부 중분류 토지피복을 이용하여 각 중권역별로 분류한 뒤, 각 중권역별 전체 토지피복 중 논, 밭, 과수원 등을 포함하는 경작지(200번대)의 면적비를 도출하였다. 값이 클수록 스트레스가 큼을 의미한다.

농경지는 서해안지역 전반에서 매우 집중적으로 높은 값이 확인되었고 이 외에도 한강중류, 낙동강상류지역에서 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 금강서해지역에서 동진강 중권역의 경작지면적 비율은 60%로 가장 높게 나타났고, 주변지역도 금강하구언 51%, 대호방조제 48%, 부남방조제 48%, 직소천 47%로 높게 나타났다. 영산강하류를 비롯한 영산강서해안지역도 영산강 중류 56%, 영암천 56%, 영산강하류 54%로 절반가량이 경작지로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 반면 강원도 전역에 걸쳐 매우 낮은 경작지 면적 비율을 보였고 이는 표준화 결과에서도 보다 명확히 드러나는 것으로 나타났다. 반면 북한지역에 위치하는 금강산댐, 고미단천 중권역의 경작지면적은 환경부 토지피복지도에 포함되어 있지 않아 0으로 계산되었고 평화의 댐은 0.26%로 나타났으나 모두 전 중권역 내에서의 비율을 반영하지 않았으므로 표준화 과정에서는 제외되었다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-16. 경작지 개발지역(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

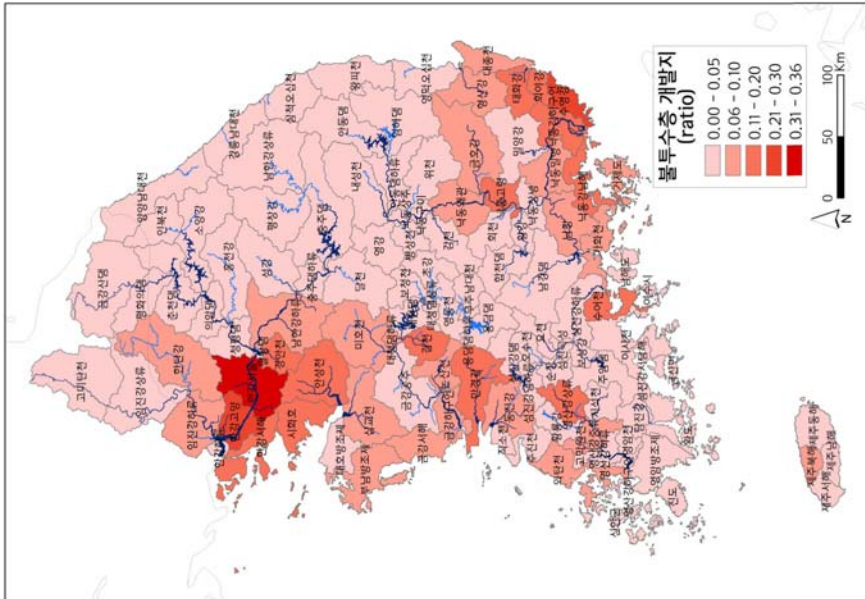
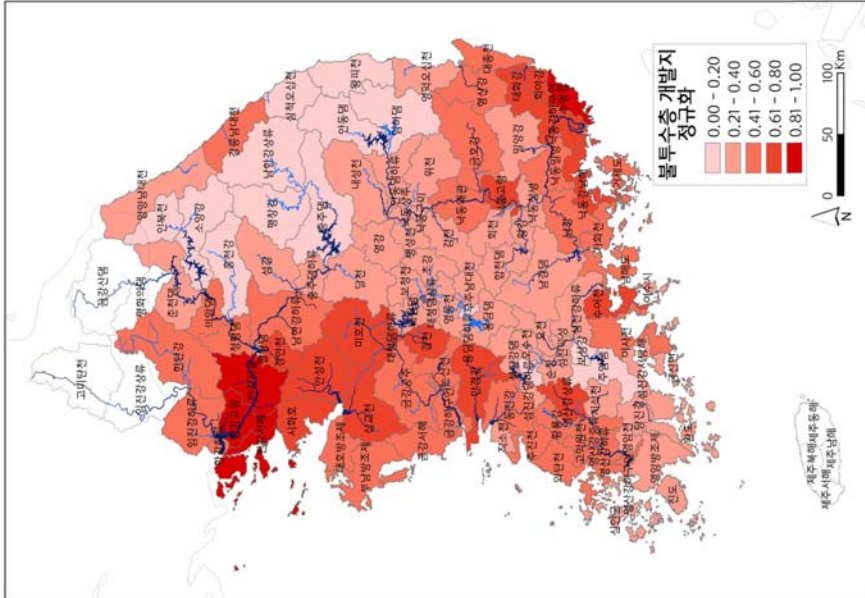
2) 불투수층 개발지역

불투수층은 시가화건조지역으로, 도로, 주거지, 상업지역 등 빗물 등의 자연투수 및 침투가 불가능한 지역으로 정의되었다. 따라서 불투수층의 면적 비율이 높을수록 해당 중권역 내의 자연적 수순환 가능성 및 생태성이 낮은 것으로 판단하여 스트레스를 계산하였다.

우리나라에서 제작·배포된 2009년 기준 중분류 토지피복을 이용하여 각 중권역별로 분류한 뒤, 각 중권역별 전체 토지피복 중 주거, 공업, 상업지역 및 교통지역을 포함하는 시가화지역(100년대)의 면적비를 도출하였다. 값이 클수록 스트레스가 큼을 의미한다.

수도 서울이 위치한 한강서울(중랑천) 중권역에서 36%로 전국 중권역단위 중 가장 높은 불투수층비율을 나타냈고, 한강고양 28%, 부산 및 울산이 위치하는 수영강과 회야강 중권역에서 각각 26%와 17%, 인천이 위치한 한강서해 중권역 20%, 수원 평택 등 경기도권 주요 도시가 분포하는 안성천, 시화호 중권역에서 각각 18%, 17%를 보였다. 수도권, 서해안, 동남해안권 지역에서 높은 불투수층 개발지 비율을 확인할 수 있으며, 강원 산간지역을 중심으로 낮은 비율이 나타났다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-17. 불투수층 개발지역(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

3) 가축밀도

Green et al.(2004) 및 Vörösmarty et al.(2010)에서 적용한 방법론에 따라, 각 가축의 몸집이 클수록 유역에 미치는 물리적인 영향이 크다고 판단하여 각 가축의 몸집계수를 구하여 이를 가축의 두수에 곱하여 계산하였다. 우선 선행연구에서 각 가축의 분뇨배출량(질소)으로 몸집을 추정된 것과 달리, 현재 우리나라 국립축산과학원 가축분뇨정보시스템에서는 우리나라에서 사육하는 주요 가축별 평균체중을 제공하고 있다. 이에 따라 각 중권역별로 수집한 젖소, 한우, 돼지, 닭의 두수(마리수)에 각 가축의 평균체중을 젖소의 몸집 계수(Body Weight, 1.0)를 기준으로 환산하여 곱해주었다. 선행연구에서 닭의 계수를 적용하지 않은 것과 달리, 우리나라에서는 닭의 수가 월등히 많아 본 연구에서는 포함하여 계산하였다. 최종 지수의 값이 클수록 스트레스가 큼을 의미한다.

■ 표 4-4. 주요 가축의 몸집 계수(본 연구 및 Vörösmarty et al., 2010))

	평균체중 (kg)	본 연구에서의 몸집계수(=value/젖소)	Vörösmarty et al.(2010)의 몸집계수(=value/젖소)
젖소	450	1.000	1.00
한우	350	0.778	0.70
돼지	60	0.133	0.19
닭	1.5	0.003	-

자료: Vörösmarty et al.(2010)에서 재작성.

우리나라의 주요 가축인 (한)육우, 젖소, 돼지, 닭을 대상으로, 중권역별 두수를 집계하여 각각의 몸집계수를 반영한 결과는 아래 그림과 같다. 분포는 주로 주요 대도시 주변지역을 한강유역에서는 남한강하류, 안성천, 한탄강 중권역의 지수가 각각 232977, 170700, 131285로 매우 높게 나타났고, 금강대권역 주변에서는 삼교천 208214, 미호천 152376, 동진강 143585로 높게 나타났다. 특히 남한강하류, 안성천, 삼교천, 미호천 중권역은 모든 가축 중의 두수가 높아 높은 가축밀도지수를 보였다. 동진강 유역은 높은 한육우 수, 한탄강 유역은 높은 젖소 수로 인해 지수가 높았다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

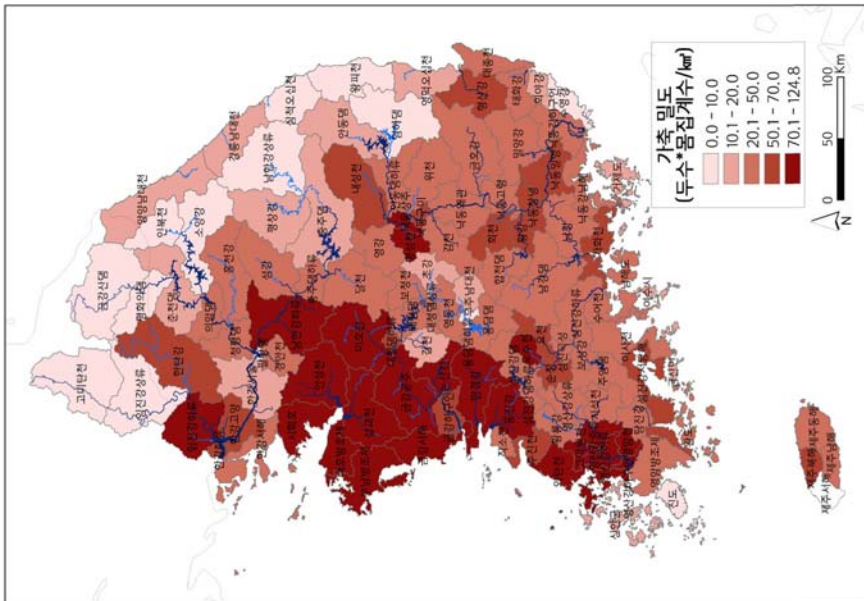
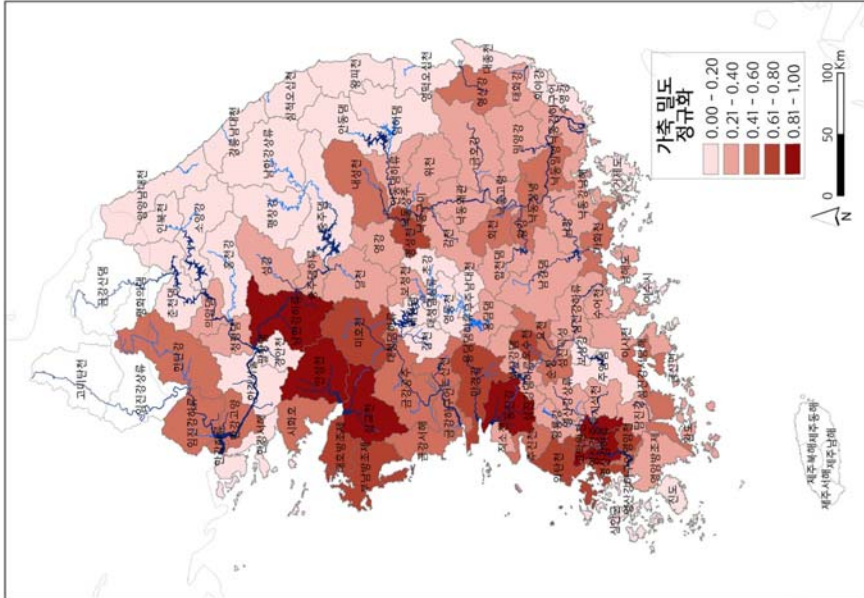


그림 4-18. 기축 밀도원자료 및 표준화

자료: 필자 작성.

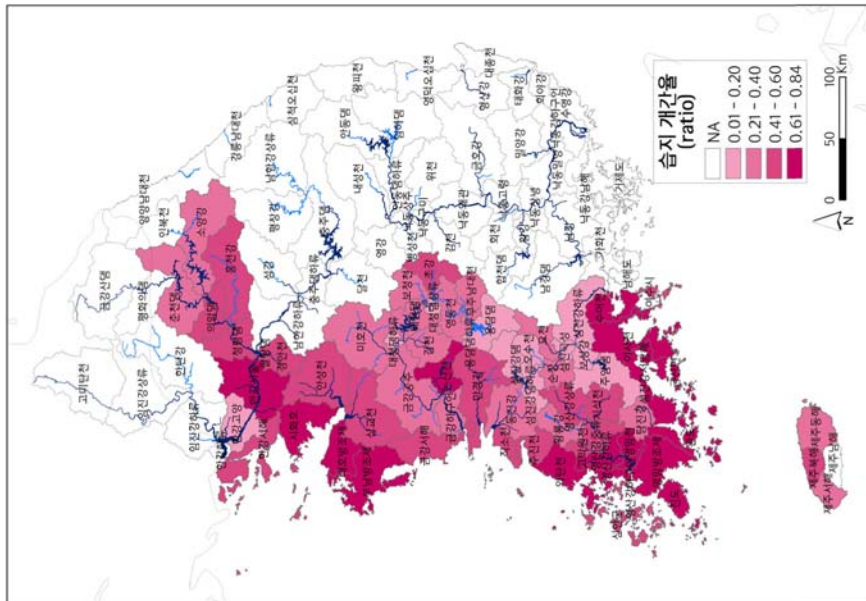
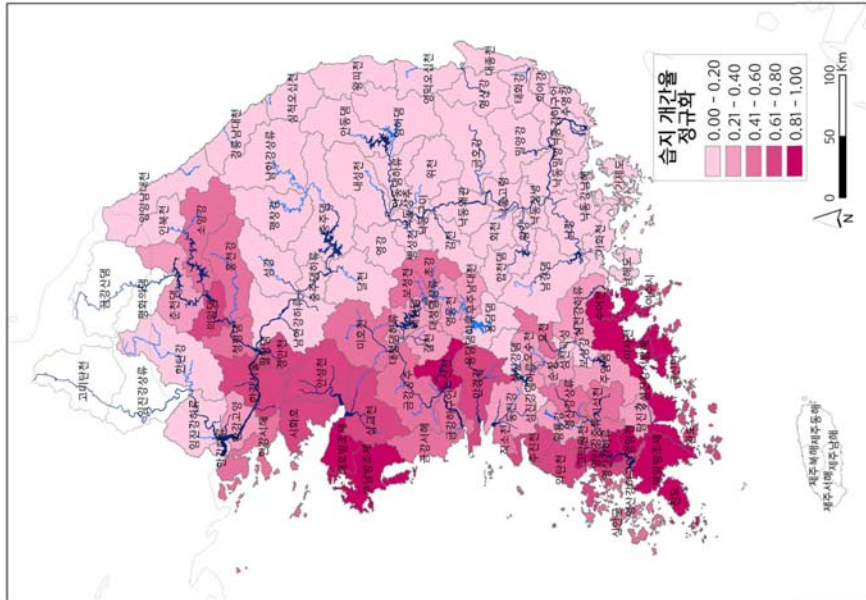
4) 습지 개간율

습지의 파괴정도를 도출하기 위해 Vörösmarty et al.(2010)에서는 세계 호수습지 데이터(Global Lakes and Wetland Database, GLWD)를 이용하여 습지로 분류된 지역 중 현재 토지피복이 바뀐 곳을 추출하였다. 하지만 GLWD 데이터에서 우리나라의 습지는 거의 등록되어 있지 않아, 본 연구에서는 획득 가능한 가장 과거의 토지피복(1975년)에서 습지로 분류된 지역을 추출하여 이용하였다. 과거의 습지 데이터를 바탕으로, 2009년 기준 중분류 토지피복에서 시가화지역(100번대)과 농경지(200번대)로 전환된 지역을 중첩하여 각 중권역별로 비율을 산정하였다. 값이 클수록 스트레스가 큼을 의미한다.

1975년 토지피복 지도를 이용하여 우리나라의 당시 습지 현황 분포를 살펴본 결과, 국토 전체를 기준으로 서해안지역과 남해안지역을 중심으로 습지가 분포하고 있었고, 가장 동쪽으로는 한강대권역 내 소양강 중권역까지 습지가 확인되었다. 임진강하류, 남한강하류, 남강댐, 왕피천 중권역은 중권역 경계에 습지 토지피복이 미미하게 나타나 제외하였다. 나머지 유역은 습지로 분류된 지역이 없는 것으로 나타났다.

한강대권역 내에서는 한강서울(중랑천) 중권역에서 1975년 습지 중 66.3%가 시가화지역 및 농경지로 개간된 것으로 확인되었고, 시화호 64.7%, 안성천 56.8%, 경안천 57.7%, 의암댐 51.8%, 홍천강 50.3%로 절반 이상이 개간되었음을 확인하였다. 금강 본류 대권역 내에서는 논산천에서 68.4%, 초강 44.9%의 개간율이 확인되었고, 금강 지류에서는 대호방조제 83.5%, 부남방조제 75.8%, 삼교천 54.4%, 만경강 56.9% 등으로 높게 나타나 서해안지대의 습지(갯벌)가 간척활동 등으로 개간되었음이 확인되었다. 마찬가지로 섬진강유역에서도, 섬진강 본류보다는 섬진강 지류 및 영산강을 중심으로 섬진강서남해 80.7%, 영암천 80.5%, 이사천 76.7%, 영산강하류 73.9%로 높은 개간율이 확인되었다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-19. 습지 개간율(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

마. 물관리 형평성

1) 소득 스트레스

한 지역 내에서 총 소득이 높을수록 재정 수입과 재정자주도가 높을 것으로 판단하여 지역 내 총생산액(GRDP) 데이터를 이용하였다. 지역 내 1인당 GRDP를 사용하는 경우 개인에게 제공되는 공공 서비스를 잠재적으로 반영할 수 있으나, 본 지표에서는 총 GRDP를 사용함으로써 지방정부에서 확보할 수 있는 총 수입의 대리변수로 이용하고자 하였으며 이는 자주적으로 재정을 운영할 수 있는 수입 능력을 나타낼 수 있다.

통계청⁶⁾에서는 각 시별(특별시는 구별)로 지역내총생산(GRDP) 자료를 제공하고 있었으며, 지표 적용을 위해 자료를 각 중권역 면적으로 재분배하여 중권역별 GRDP를 도출하였다. 본 지표는 값이 클수록 스트레스가 적음을 의미하므로 값을 로그로 표준화한 뒤 역으로 변환하여 표준화하였다.

전국 지역의 지역내총생산(GRDP)를 통해 중권역별 소득스트레스를 평가한 결과, 경제활동이 거의 없는 금강산담을 제외하고 낙동강 대청댐상류 중권역에서 연 219억원으로 가장 적은 소득을 나타내어 높은 스트레스를 기록하였다. 이어 낙동강 용담댐하류 1,068억원, 보청천 1,501억원, 섬진강남해 금산면중권역에서 1,549억원, 섬진강 섬진곡성 2,978억원, 낙동강 낙동상주 2,934억원, 황강 3,404억원, 한강대권역 임진강상류 3,869억원, 영산강남해 진도중권역에서 4,708억원 등으로 낮게 나타나 높은 소득스트레스가 확인되었다. 반면 한강서울(중랑천) 중권역에서는 2,901,405억원을 기록하여 다른 중권역에 비해 월등히 낮은 소득스트레스를 나타냈다.

6) 통계청 (www.kostat.go.kr) [2014.12.23 최종확인]

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

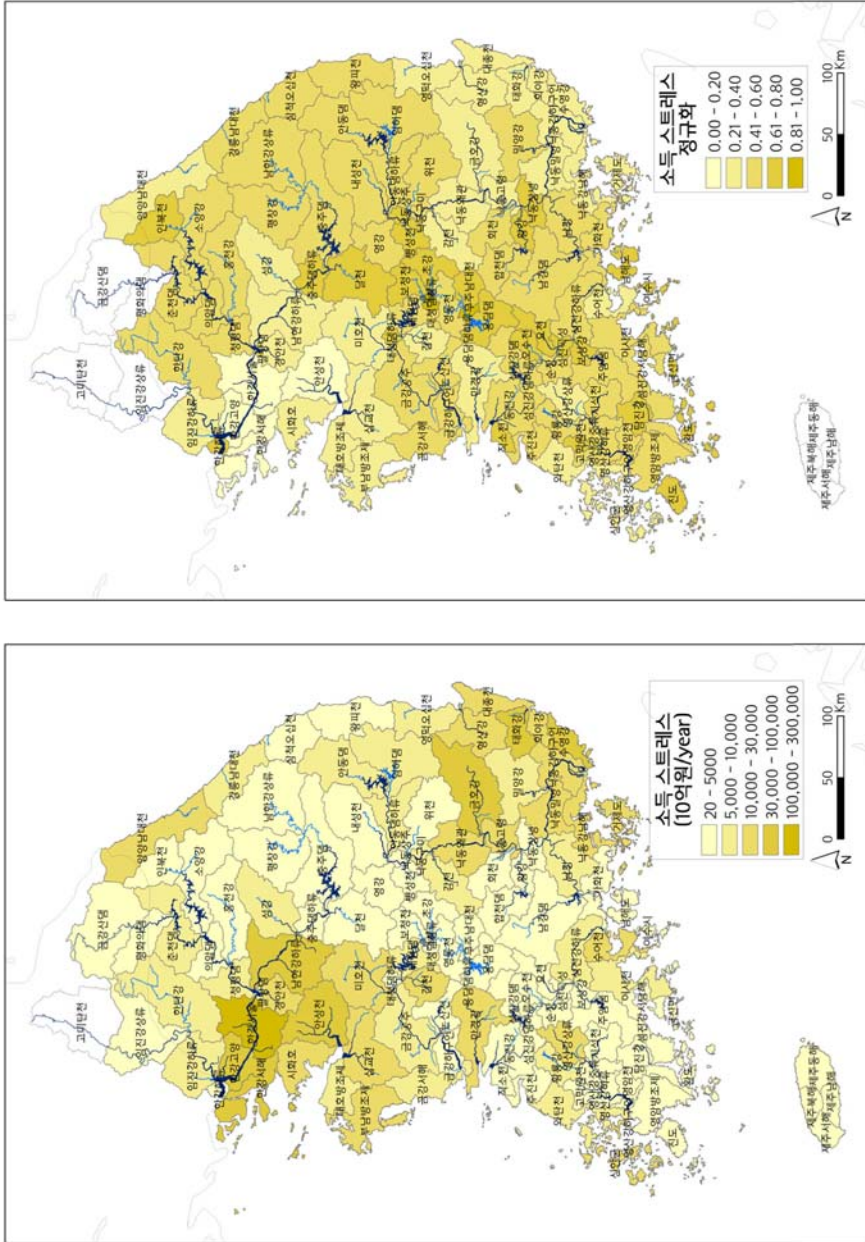


그림 4-20. 소독 스트레스원자료 및 표준화

자료: 필자 작성.

2. 지속가능한 물이용의 반응 지표

가. 인간 물 요구량

1) 물이용 인프라

우리나라는 계절에 따른 강우 변동폭이 크고 대부분의 수자원을 강우 유출수에 의존하고 있기 때문에 연중 수자원 요구량을 충족하기 위해서 댐, 저수지 등의 저수 시설물을 통해 물을 저장할 수 있어야 한다. 따라서 한 유역 내 물을 가뭄될 수 있는 인프라의 유효 저수량의 합이 많을수록 강우빈도가 적은 시기에도 충분한 수자원을 공급할 수 있는 능력이 크다.

각 중권역별로 WAMIS, 한국수자원공사, 한국대담회, 농어촌공사에서 제공하는 대형 댐 정보, 농어촌공사에서 제공하는 저수지 및 보 정보를 수집하였다. 이를 이용하여 각 중권역별 모든 시설물의 총 유효수량을 산정하였다. 단 하구둑에 위치하는 댐이나 다목적 댐의 경우는 댐 자료와 저수지 자료에 중복으로 기재된 경우가 많아 공간정보상 위치를 기반으로 중복데이터를 제거하였다. 취합된 포인트 자료는 각 중권역 경계로 합하여 권역별 총 유효수량을 계산하였다.

117개 중권역 중 107개 중권역에서 인프라를 확인하였으며 10개 중권역(금강산댐, 평화의댐, 인북천, 고미탄천, 한강하류, 대청댐하류, 금산면, 여수시, 제주남해, 제주동해 중권역)에서는 대형 댐 및 저수지가 확인되지 않았다. 유효수량의 합이 가장 큰 유역으로 소양강댐 중권역이 1,901.3백만³을 보유할 수 있는 것으로 나타났고, 이어 충주댐 1,793.9백만³, 안동댐 1,004.8백만³, 춘천댐 811.9백만³ 순으로 나타났다. 반면 제주서해(0.3백만³)와 제주북해 중권역(0.7백만³) 그리고 낙동상주(0.4백만³), 용담댐하류(0.6백만³), 한강고양(0.6백만³)은 유역 내 저장할 수 있는 수량이 전국 대비 매우 낮은 것으로 나타났다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

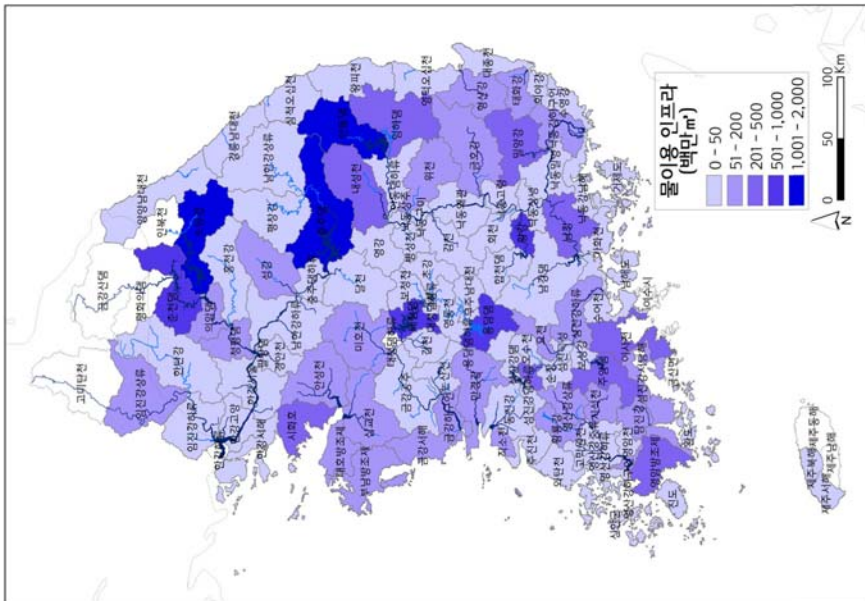
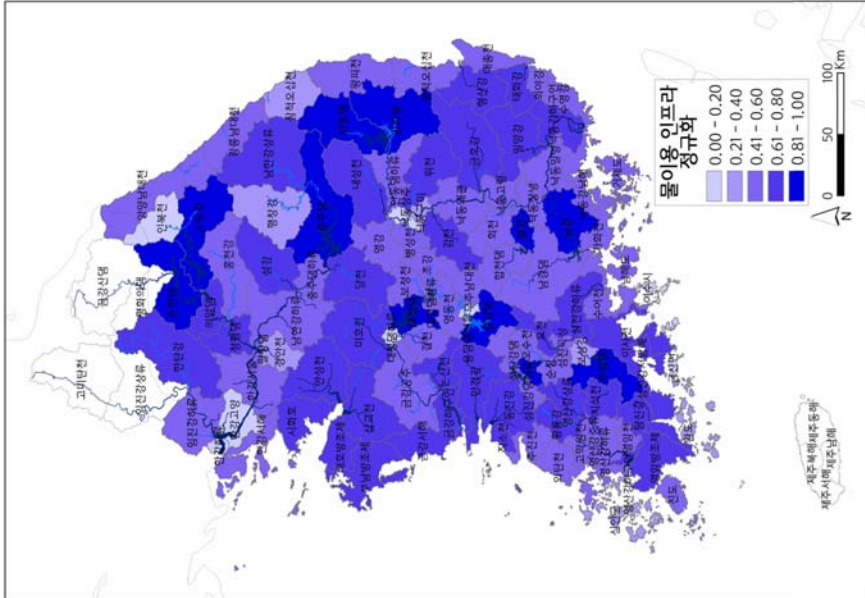


그림 4-21. 물이용 인프라(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

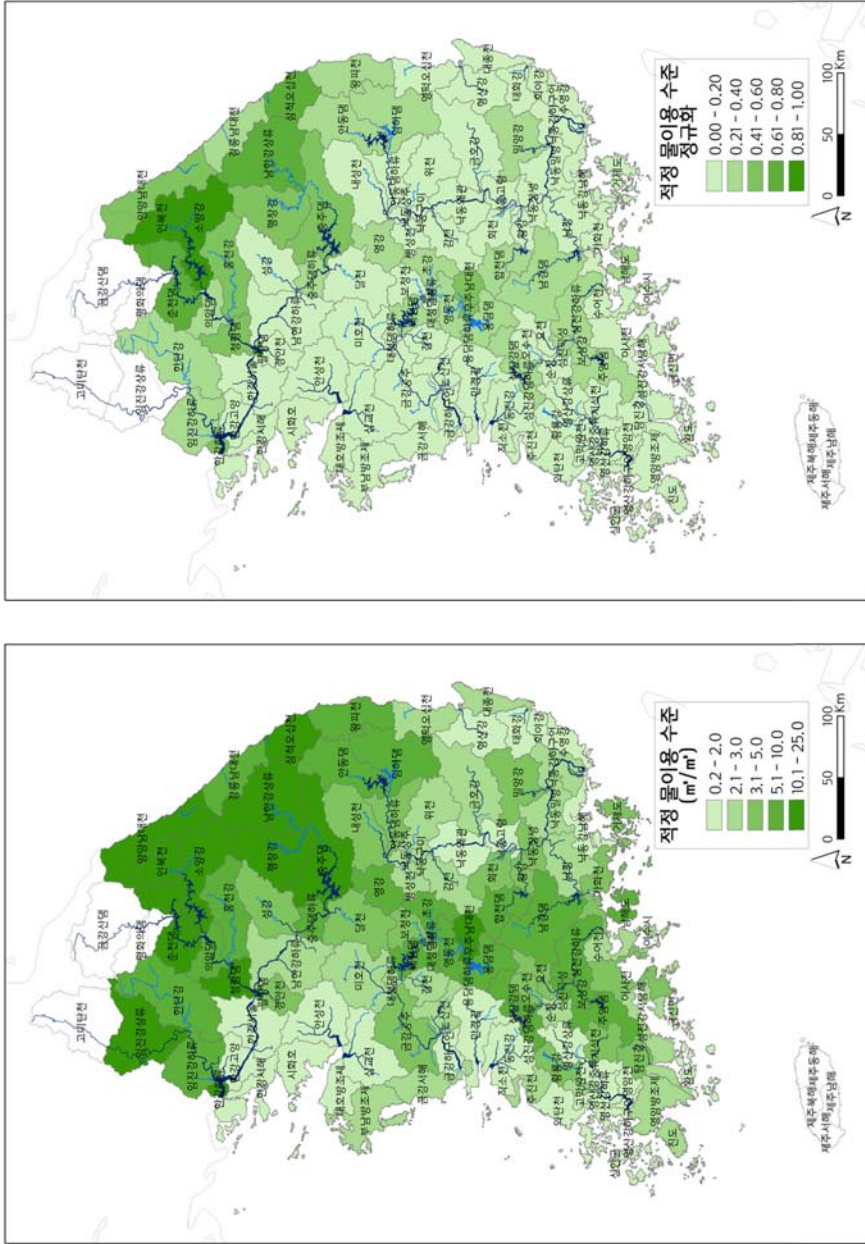
2) 적정 물이용 수준

UNWATER(2006)에서는 충전가능한 수자원 공급 대비 인간의 물이용의 비가 특정 임계점이 될 때까지 물이용의 사회적 혜택이 증가한다는 가정 아래, 수량(water quantity)의 지속가능성을 평가하기 위한 지표로 수자원 사용량 / 충전 가능한 수자원량으로 계산하였다. Vörösmarty et al.(2010)에서도 위의 개념을 도입하여, 공급량 대비 사용량의 비가 10%가 될 때까지 사회적 혜택이 지속적으로 증가하며, 이를 초과할 경우 혜택이 없는 것으로 설정하고 물 공급량을 유역 내 유출량으로, 물 사용량을 유역 내 인간으로 인한 물이용으로 설정한 뒤 두 값을 나누어 계산하였다.

하지만 우리나라의 경우 대부분의 유역에서 사용량/공급량이 0.1을 초과하는 것으로 확인되었다. 따라서 위 지표에서 의도한 바를 고려하고자 수식을 변형하였는데, 수자원의 사용량에 비해 유출량이 충분한 경우 물이용 수준이 적정하다는 점을 고려하여 연간 유출량을 연간 용수이용량으로 나누어 자료를 계산하였다. 이 계산방법은 지표값이 클수록 반응(스트레스 저감) 능력이 커지는 점을 반영할 수 있으므로 앞선 UNWATER(2006), Vörösmarty et al.(2010) 등에서 의도한 연구결과와 값의 범위는 달라지나 본래 의도를 반영하고 있다.

제주 및 북한권역 일부(금강산댐, 고미탄천)은 유출량 자료가 미비하여 본 결과에서 나타나지 않고 평화의댐 중권역은 유출량 대비 사용량이 매우 적어 168.0 수준의 이상치(outlier)로 나타나 결과에서 제외하였다. 주로 한강 상류 유역에서 임진강상류 23.1, 인북천 22.3, 소양강 21.6, 팔당댐 21.1 등으로 높은 값을 보였는데, 인구가 적고 논 경작지의 면적이 넓지 않아 유출량에 비해 수자원 사용량이 적기 때문이라고 판단된다. 가장 적은 값은 영산강서해의 신안군 중권역이 0.23으로 나타났으며 이 이외에도 1 미만의 값으로 직소천(0.69)과 한강서울(0.73)이 포함되었다. 1 미만의 값은 해당 유역 내 자연적 유출량에 비해 사용량이 더 많다는 것을 의미하며, 이는 인접 유역에서의 관개, 하수처리수 재사용, 대체수원 개발 등의 대안이 부족할 경우 유역 내 물 부족을 야기할 수 있다는 것을 의미한다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-22. 적정 물이용 수준(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

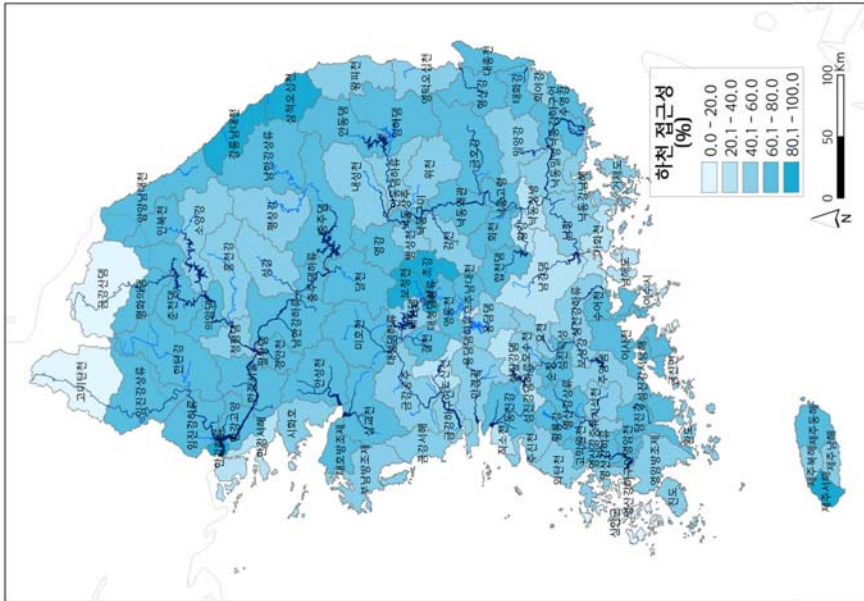
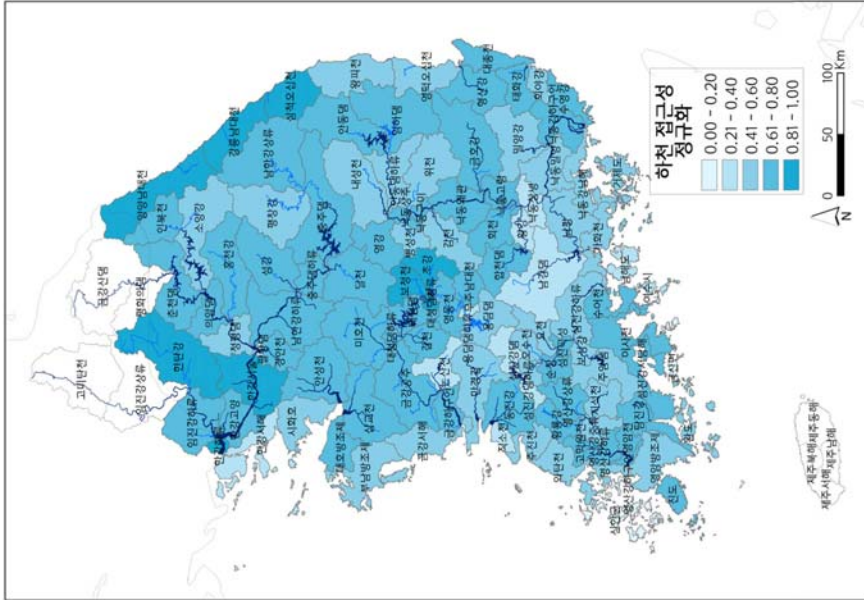
3) 하천 접근성

우리나라는 여름과 겨울철의 유량 차이가 심해 계절에 따른 유량 차이를 나타내는 하상계수가 다른 나라의 하천에 비해 매우 높은 편에 속한다. 따라서 과거 우리나라의 이수 및 치수사업은 하천정비에 집중하였으며 이는 하천 제방의 개수율로 표현하고 있다.

각 중권역별 하천의 정비 정도를 표현하기 위해 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 2009년 현황 기준 한국하천일람 자료를 기반으로 중권역별로 제공되는 완성제방기준 개수율(%) 자료를 수집하였다. WAMIS에서 정의하고 있는 완성제방 개수율은 요개수(제방설치가 필요한 구간)의 연장길이) 대비 완성제방(계획홍수량에 따른 구조안정성이 완전히 확보된 제방)의 비율로 나타내고 있다.

한강하류 중권역이 95.9%로 가장 높은 개수율을 나타냈고 이어 초강 86.9%, 제주서해 82.6% 그리고 한강동해 지역의 양양남대천, 강릉남대천, 삼척오십천 중권역이 80%가량의 높은 개수율을 나타냈고, 한강서울 중권역은 79.1%를 나타냈다. 반면 섬진강남해에 위치한 금산면 중권역과 영산강서해에 위치한 신안군 중권역은 0.0%의 개수율을 보였으며, 마찬가지로 연안지역인 남해도 21.1%, 여수시 27.1%에서 낮은 개수율을 나타냈다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-23. 하천 접근성(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

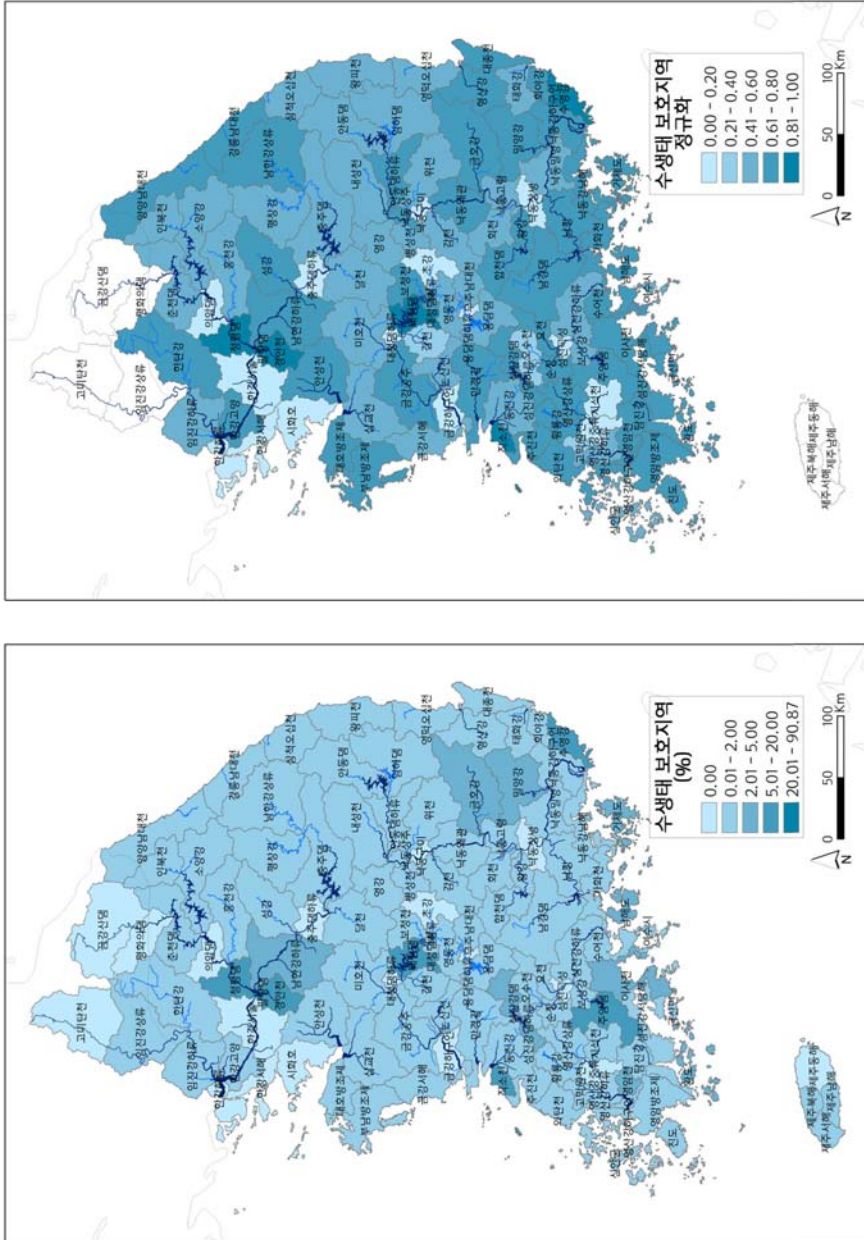
나. 수생태계 건강성

1) 수생태 보호지역

현재 우리나라에서 수생태계만을 위한 보호구역의 지정은 확인되지 않았으며, 다만 일부 중(수달 등)의 출현지역을 중심으로 보호구역이 설정되어 있다. 하지만 중 출현지역 기반 보호구역은 매우 산발적이고, 전국적으로 일관적인 데이터 수집이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 수생태 보호지역의 대리지표로 수질 보전을 목적으로 주요 취수원의 중심으로 상수원보호구역을 선정하였다. 상수원보호구역 지정의 목적은 물 공급을 위한 취수지역 보호이지만, 전국적으로 다소 고르게 분포하고 있으며, 보호지역으로 설정되어 오염원으로서의 행위규제가 지정되어 있으므로 상수원 보호구역이 수생태적으로 보호되는 지역으로 판단하였다. 하지만 실제로 수생태적으로 보호 목적을 가지거나 보호의 필요성을 띠는 지역은 포함할 수 없다. 따라서 상수원보호구역으로 수생태 보호지역의 대리지표를 설정한 것은 충분조건은 다소 만족하나 필요조건은 만족하지 못하는 불완전한 지표라고 판단하였고, 추후 연구에서 보다 적합한 지표로 대체할 필요는 있을 것으로 보인다. 본 연구에서는 각 중권역별로 상수원보호구역의 면적비율을 계산하였다.

북한지역을 포함하는 총 117개의 중권역 중 상수원보호구역을 포함하는 곳은 99개 권역으로 확인되었다. 면적으로는 수영강 중권역에서 105.0km²으로 가장 큰 면적을 보유하고 있었고 대청댐 104.3km², 금호강 88.2km², 밀양강 53.0km² 순으로 넓은 지역이 상수원보호구역으로 지정되어 있었다. 중권역 내 면적비율로 계산하면, 한강수계의 팔당댐 중권역에서 전체 중권역의 90.9%가 상수원보호구역으로 지정되어 가장 큰 비율을 나타냈다. 이어 수영강 19.4%, 대청댐 15.6%, 경안천 6.9%, 청평댐 6.4%, 직소천 6.3%, 주암댐 5.6%로 나타났고 나머지 중권역은 모두 5% 미만을 나타냈다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-24. 수생태 보호지역(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

2) 육상생태 보호지역

현재 우리나라에서 육상 보호지역의 종류는 매우 다양하다. 2010년에 갱신되어 배포된 국토환경성평가지도는 우리나라 국토를 대상으로 하는 다양한 환경정보의 주제도를 종합적으로 평가하여, 토지가 지닌 물리적, 환경적 가치를 중점적으로 환경·생태적 건강성과 쾌적성 등을 도모하고자 하였다. 또한 보전이 요구되는 토지의 환경적 가치를 판단하여 개발로부터 보전목적을 달성하거나 개발로부터의 영향을 판단할 수 있는 기초자료로 이용하려는 목적을 띠고 있다.

국토환경성평가지도는 우리나라 법령상의 보전용도지역 57개 법제적 평가항목과 자연자산의 개념을 포함하는 환경·생태적 가치평가항목으로 구성되어 있으며, 법제적 평가항목은 자연환경, 수질환경, 기타 3개 부문 57개 항목으로 구성하였고, 환경·생태적 평가항목은 다양성, 자연성, 희귀성, 허약성, 안정성, 연계성, 잠재적 가치 8개 항목으로 구성하였다. 따라서 이 지도는 유역의 종 다양성, 자연성, 생태경관보전지역 등 전국토의 생태 현황을 일괄적으로 평가할 수 있는 정보를 가진다고 판단할 수 있어, 본 지표의 자료로 활용하고자 하였다. 지도는 보전지역과 개발가능지역을 구분하며, 환경성에 따라 1~5등급으로 분류하며 1등급은 최우선 보전지역으로서 원칙적으로 일체의 개발을 불허하고, 환경·생태적으로 핵심 보전지역이며, 녹지거점지역으로서 환경을 영속적으로 보전해야 할 지역으로 분류되고 있으며 5등급은 기개발지역으로 분류하고 있다. 따라서 본 연구에서는 각 중권역별로 국토환경성평가지도 중 1등급 지역의 면적비율을 계산하였다.

육상생태보호지역 비율이 가장 높은 곳은 팔당댐 중권역으로, 전체 유역 면적의 90.6%가 1등급 지역으로 나타났다. 이는 국토환경성평가지도가 육상의 보호지역뿐 아니라 법령상 수질환경 보전 지역까지 포함하고 있어, 유역 대부분이 상수원보호지역으로 지정된 팔당댐 중권역에서 높게 나타났다고 확인된다. 이어 소양강 88.0%, 인북천 84.7%, 남한강상류 78.0% 등으로 강원도지역을 중심으로 높은 보호지역 비율을 확인할 수 있었다. 반면 신안군 8.9%, 진도 18.0%, 영암방조제 18.1% 등 서해안지역은 낮은 값을 나타냈다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

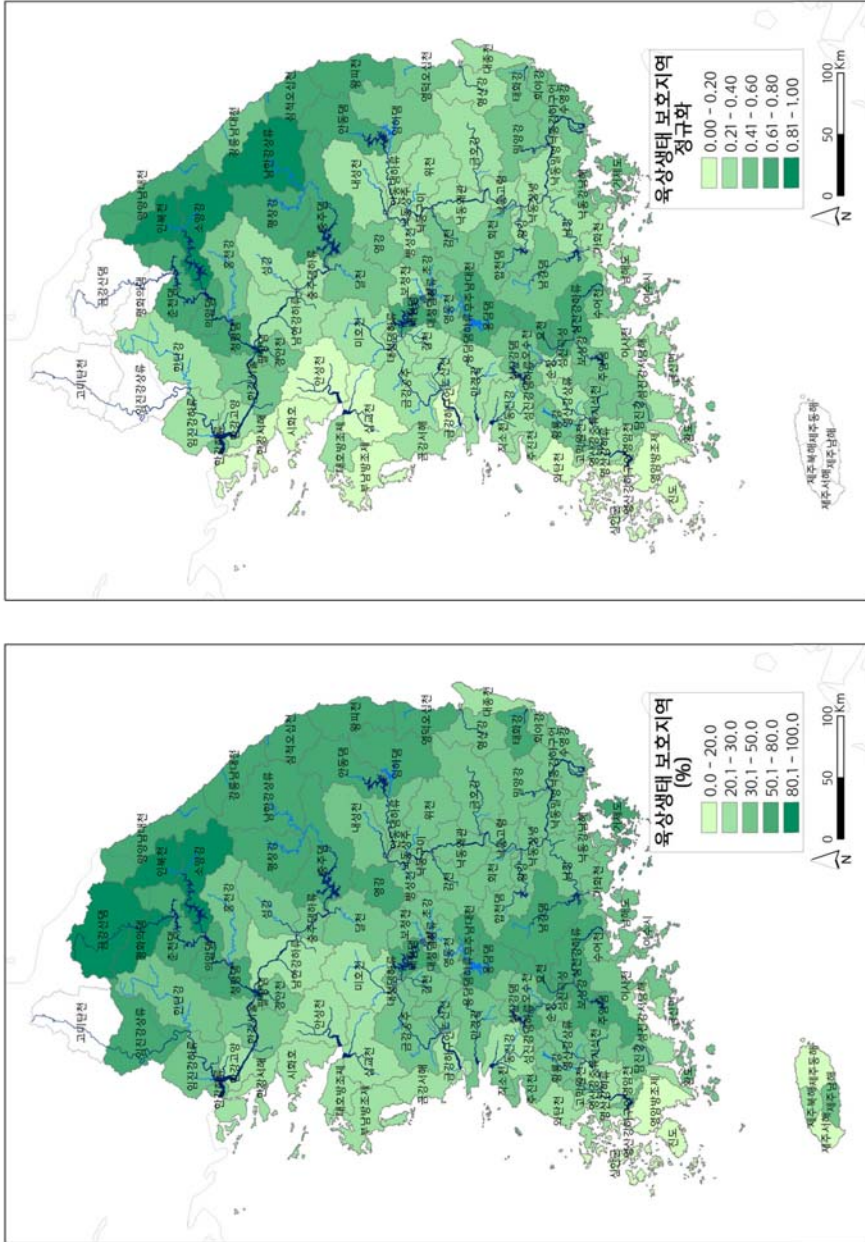


그림 4-25. 육상생태 보호지역(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

다. 수질 요구량

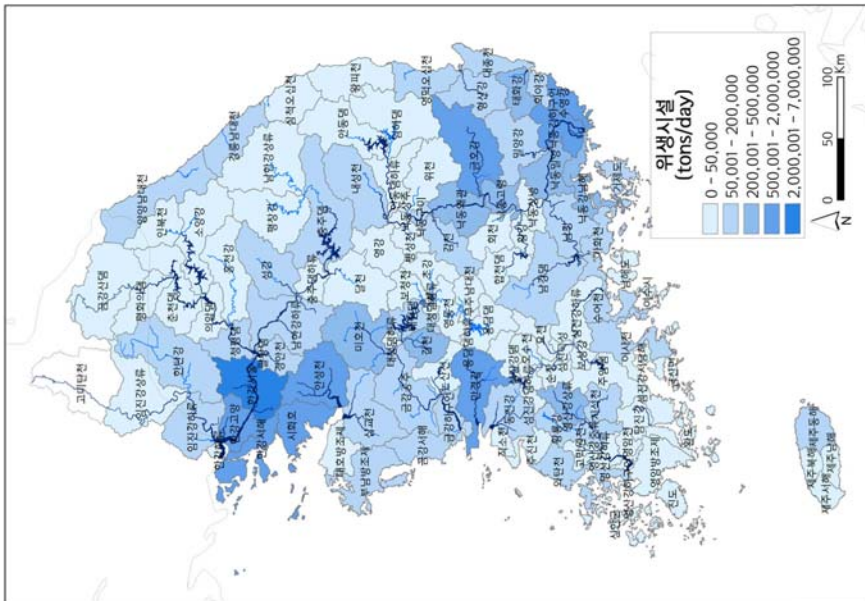
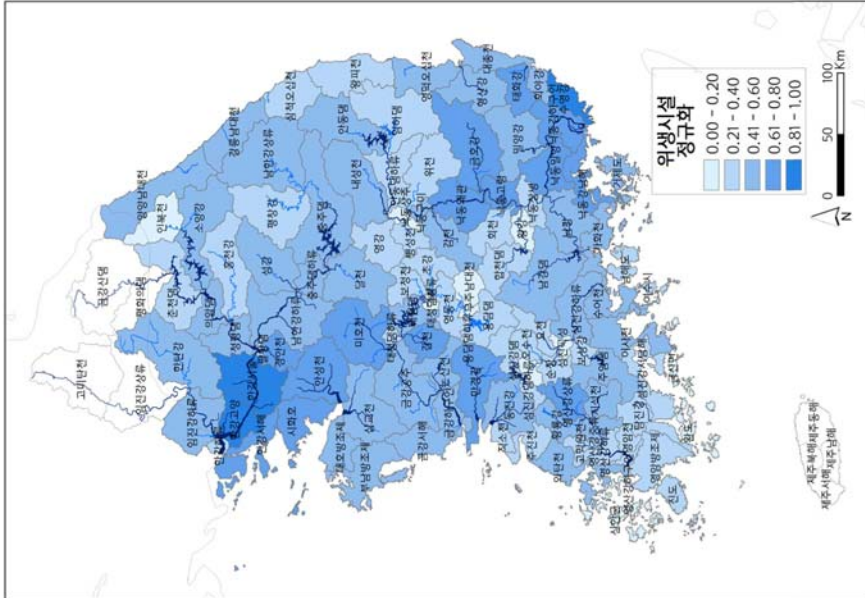
1) 위생시설

위생시설은 인간의 활동으로 인해 오염된 물을 정화하여 다시 하천으로 돌려보냄으로써 하천의 수질개선에 기여하는 주요한 시설이다. 따라서 수질오염 부하를 저감하는 잠재력을 반영하기 위해 위생시설 지표를 포함하였다.

본 지표에서는 공공하수처리시설의 일일처리량 및 분뇨처리시설의 일일처리량 자료를 포함하고 있다. 위 처리시설은 하수, 오폐수 등의 유입량에 따라 실제 일일 처리량이 달라지며, 시설용량보다 실제 일일처리량이 수질오염 저감에 기여한다고 판단하여, 본 연구에서는 수질오염을 최대한 제거하기 위해 기여한 정도를 산정하기 위해 해당 지역 내에 위치하는 실제 처리량 자료를 반영하고자 하였다. 하수도통계(2012)에서 우리나라의 공공하수처리시설, 분뇨처리시설의 2012년 실제 처리량을 수집하여 면적비에 따라 중권역으로 분배하였다.

2012년 기준 하수 및 분뇨 처리의 일일 처리량이 가장 높은 지역은 한강서울 중권역으로 일 5,417,873톤을 정화한 것으로 나타났다. 이어 한강고양 중권역에서 1,531,148톤/일, 수영강 중권역에서 984,025톤/일로 나타나 대도시를 중심으로 높은 처리량을 보였다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-26. 위생시설(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

라. 수자원 재생능력

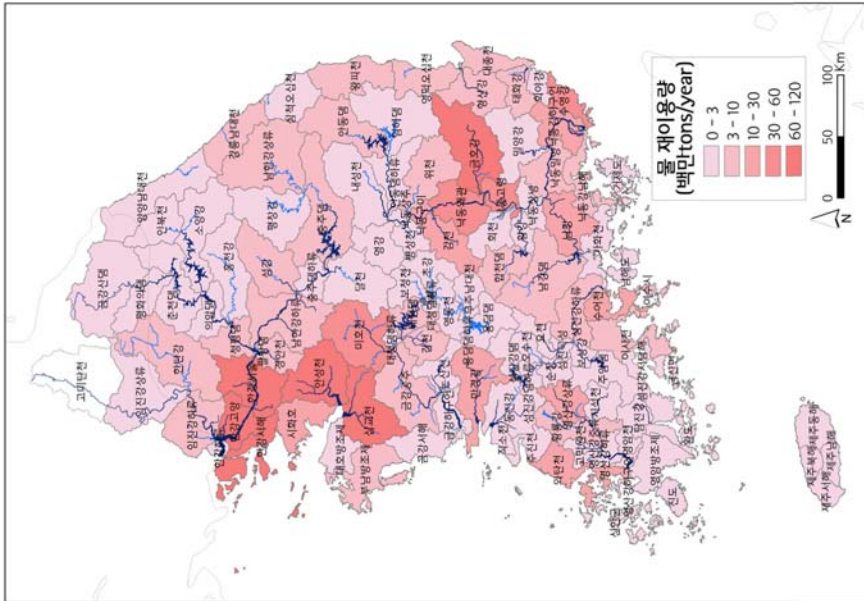
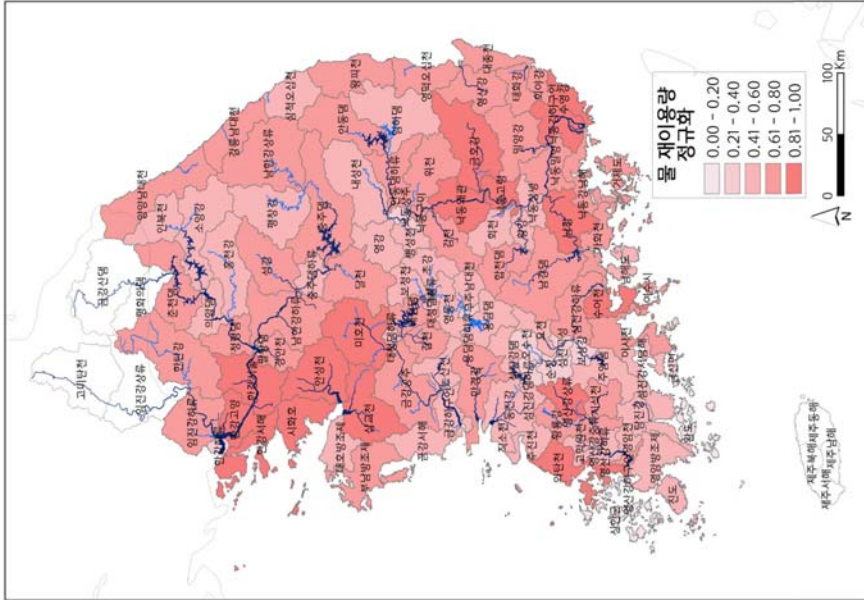
1) 물 재이용량

가정, 공업용으로 사용한 물은 농업용수에 비해 이용 중 증발산, 누수 등으로 손실되는 수량이 적으며, 오·폐수의 형태로 하수도, 오·폐수처리시설 등으로 재집수된다. 재집수된 오·폐수는 처리를 거쳐 하천에 방류되나, 처리를 거친 물의 일부는 다시 가정 및 공업용수로 공급될 수 있다. 따라서 강우에 의한 지표 유출수로부터 공급되는 대표적이고 획일화된 물 공급의 부담을 덜 수 있는 시설의 개념으로서 지역별 물 재이용량 가능성을 고려하고자 하였다.

지표에서 고려하고자 하는 데이터는 하수처리수 재이용량과 중수도시설 이용량을 선정하였고, 시설용량보다 실제 지표수로부터 공급되는 상수도 공급의 부담을 줄이는 데 기여하는 정도를 확인하기 위해 연간 실제 재이용량을 고려하여 두 변수를 합하여 도출하였다. 하수도통계(2012) 자료에서 하수처리수 재이용량(ton/year)과 중수도이용량(m³/day*365)를 이용하였고 처리된 물은 깨끗한 물로서 1m³의 물이 1톤임을 가정하여 연간 물 재이용량 산정한 뒤 중권역으로 분배하였다.

가장 많은 물을 재이용하고 있는 곳은 한강서울 중권역으로 2012년 한 해 동안 115백만 톤의 물을 재이용한 것으로 나타났다. 이어 한강대권역 내에서 안성천 77백만 톤, 한강고양 76백만 톤, 한강서해 62백만 톤 등으로 나타났고 낙동강 대권역의 금호강 중권역에서 78백만 톤을 재이용하는 것으로 나타났다. 북한권역을 제외하고 신안군 4천 톤, 완도 2만 톤, 섬진강담하류 3만5천 톤등으로 낮은 지역도 나타났다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



■ 그림 4-27. 물 재이용원자료 및 표준화

자료: 필자 작성.

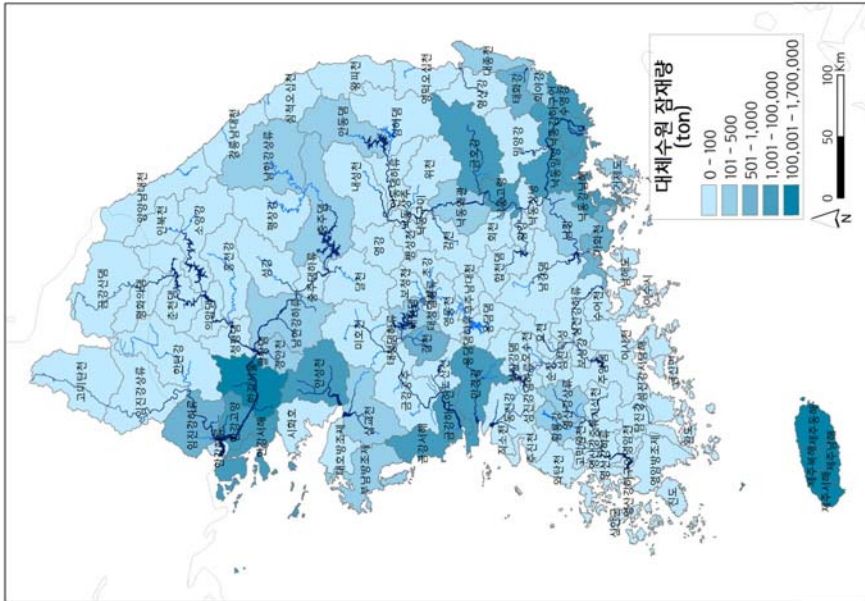
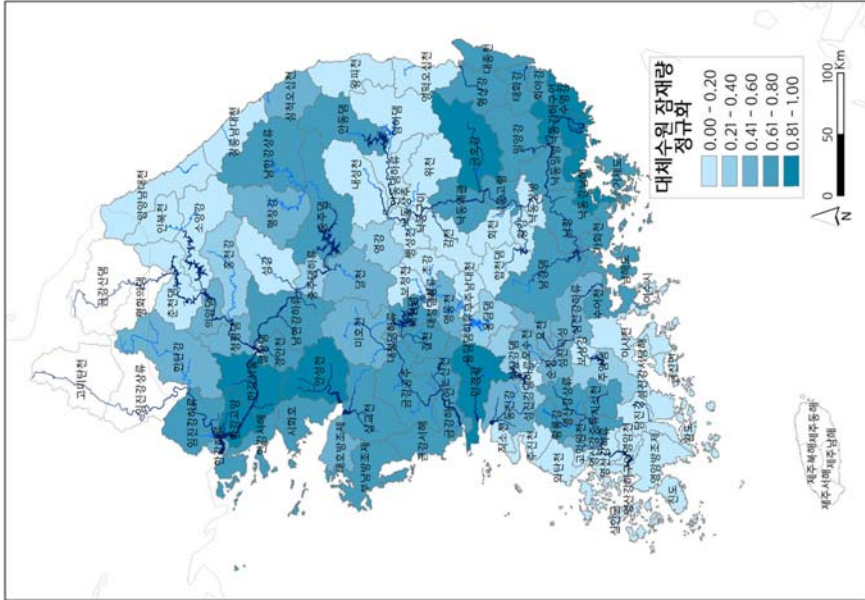
2) 대체수원 잠재량

현재 우리나라에서 대부분의 수원으로 이용되는 강우 유출수는 강수에 의한 변동이 심하고, 미래 기후변화에 따라 강수량 변화가 예측되는 가운데 대체수원에 대한 관심이 증가하고 있다. 대체 수원으로 사용될 수 있는 시설에는 빗물집수시설, 해수담수화시설 등이 대표적이다.

보완적인 수원으로서 대체수원의 잠재력을 평가하기 위해 위 지표에서는 다양한 대체수원 시설 중 현재 국내에서 보편적으로 이용하고 있는 빗물저장시설의 시설용량을 이용하였다. 빗물저장시설은 강수량, 강수빈도 또는 사용처에 따라 연간 사용량이 달라질 수 있는 점을 고려하여 실 사용량이 아니라 지역 내 시설용량으로 변수를 구성하였다. 하수도통계(2012)에서 제공하는 행정 구역 내 개별 빗물저장시설용량 자료를 수집하여 중권역별로 분배하였다.

전국 117개 중권역 중 73개 중권역(62%)에서만 빗물저장시설이 확인되었으며, 제주동해 중권역에서 가장 높은 시설저장량(1,639,386톤)이 확인되었고, 제주 서해, 제주 북해, 제주 남해 중권역도 각각 70만 톤 이상의 빗물 집수·저장시설이 설치되어 있는 것으로 나타났다. 이어 한강서울(중랑천) 중권역은 104,533톤, 안성천 39,774톤, 수영강 4,271톤으로 대도시가 위치한 중권역에서 높게 나타났다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



자료: 필자 작성.

■ 그림 4-28. 대체수원 잠재량원자료 및 표준화

마. 물관리 형평성

1) 수도 접근성

지속가능한 물이용을 위한 사회적 지표로 현존하는 수자원을 공평하게 이용하는 형평성이 보장되어야 하는데, 이는 물이용이 소득, 지역 등에 차별받지 않고 모든 이용자가 공평하게 자원을 이용할 수 있는 기반이 마련되어야 한다. 하지만 농촌, 도서, 산간지역은 일반적으로 수도권 등 도시지역보다 투자비용 대비 실질 혜택인구가 적어 상수도 및 하수도 보급률이 낮은 편이다. 따라서 전국 중권역을 중심으로 상수도 및 하수도 보급률을 살펴봄으로써, 농촌지역과 도시지역 사이의 상하수도 보급률의 형평성을 검토할 뿐 아니라, 유역의 대부분이 농촌지역인 여러 유역 사이에서의 보급 형평성을 살펴보고자 하였다.

각 광역시, 시, 군 단위로 제공되는 상수도통계(2012) 및 하수도통계(2012)를 이용하여 급수인구 및 미급수인구계를 수집하여 중권역별로 인구를 나누어 분배하였다. 모든 유역이 북한지역인 고미단천은 본 자료값을 나타내지 않는다. 자료를 살펴본 결과, 상수도 급수인구 비율이 높은 지역에서는 하수도 보급인구 비율도 같이 높은 경향을 보였기 때문에, 상수도 급수인구비율과 하수도 보급인구비율을 평균하여 자료를 도출하였다.

제주권역은 상수도 급수인구비율이 100%으로 나타났고 대부분의 대도시 권역에서 90% 이상으로 나타났다. 황강 중권역은 40.2%로 전국에서 가장 낮은 상수도 급수인구비율을 보였으며 도서지역을 중심으로 50~60%의 상수도 급수인구비율을 나타냈다. 하수도 보급인구 비율은 서울, 부산권역을 중심으로 90% 이상을 나타냈고, 신안군 중권역이 31.6%, 위천 43.8%, 황강 45.3% 등으로 도서·농촌지역에서 낮은 보급률을 나타냈다. 상하수도 접근 인구를 평균한 결과는 한강서울(중랑천) 중권역이 99.6%로 가장 높게 나타났으며, 수영강 중권역 99.5%, 낙동고령 98.4%, 한강서해 97.2% 등을 나타냈다. 반면 황강 중권역은 42.8%로 가장 낮은 수도 접근성을 나타냈고, 영암방조제 50.1%, 금산면 52.7%, 섬진강서남해 54.1% 등으로 도서지역에서 낮은 값을 보였다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)

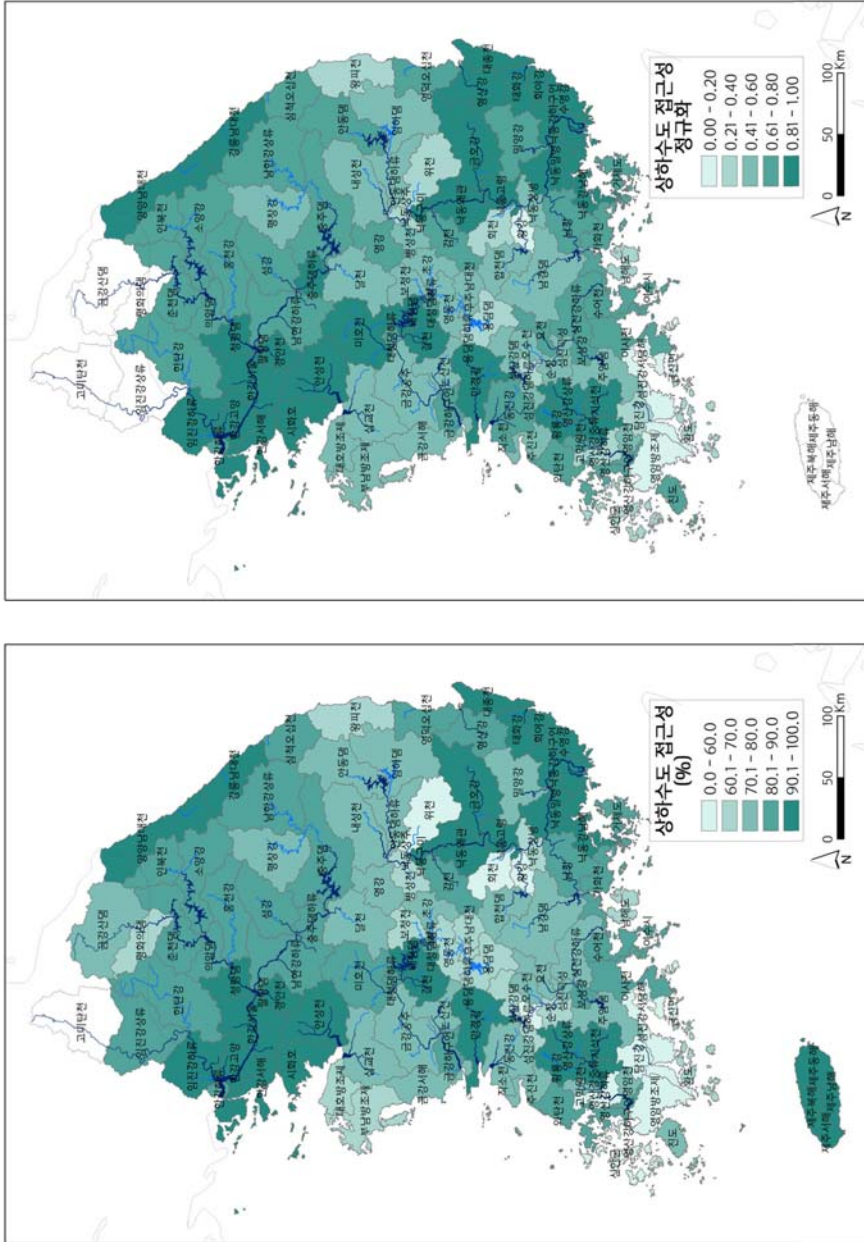


그림 4-29. 수도 접근성(원자료 및 표준화)

자료: 필자 작성.

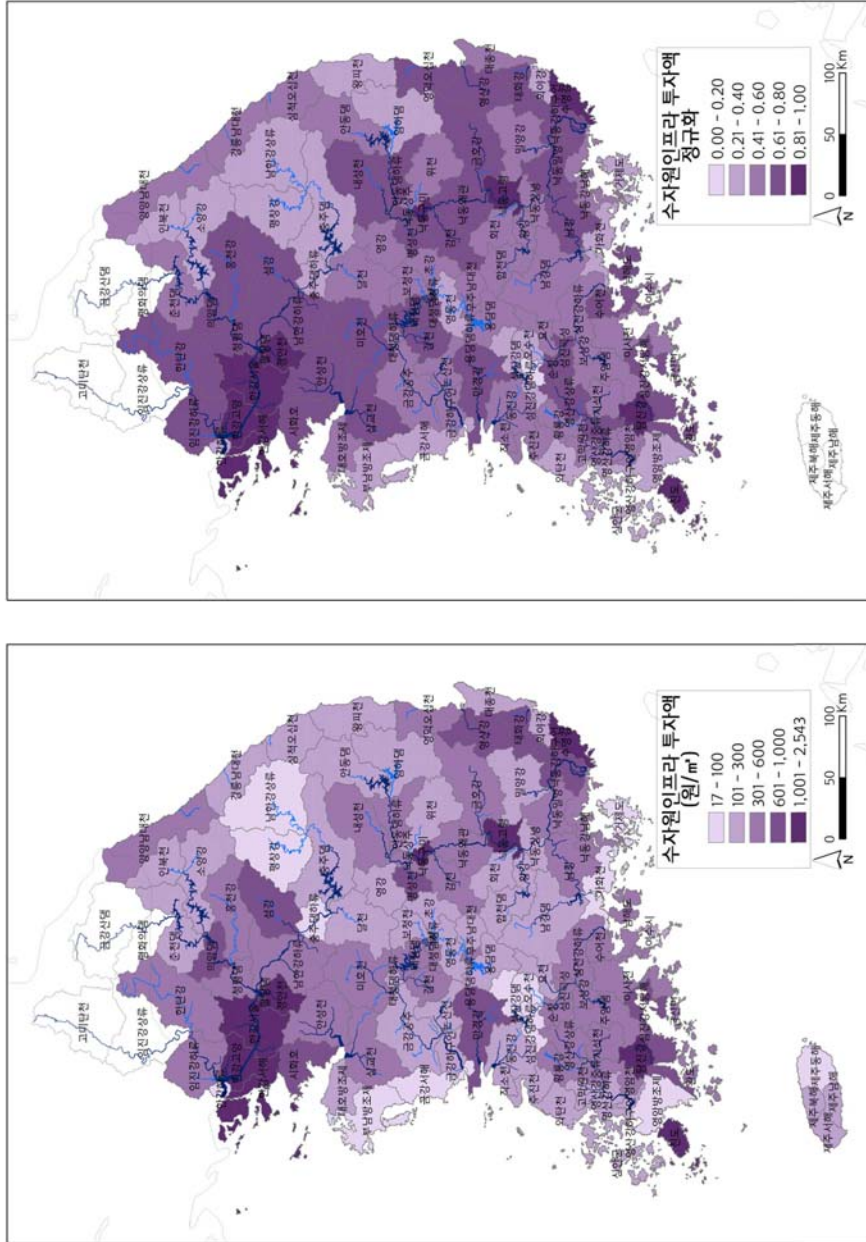
2) 수자원 투자비용

전국 중권역에서 수자원 관련 항목에 투자된 금액을 통해 각 지역의 수자원 관련 분야에 대한 관심, 투자 및 개선의지를 반영하고자 하였다.

원주지방환경청, 한강유역환경청, 대구지방환경청, 낙동강유역환경청, 영산강유역환경청, 전주지방환경청, 금강유역환경청에서 발간된 「중권역물환경 관리계획 보고서」에서는 111개 중권역을 대상으로 평가하고자 하였으며, 위 보고서에는 제주권역 및 일부 북한지역(임진강상류 중권역)이 포함되어 있다. 각 중권역별로 수생태계복원, 위해성분관리시설, 축산폐수관리시설, 환경기초시설확충에 분류된 사업비를 수집하였다. 하지만 「중권역물환경 관리계획 보고서」 수집 시, 117개 중권역에 따라 발간 년도가 상이한 경우가 있어, 일부 예산 사업비의 기간이 상이한 경우도 있으나, 대부분 2015년까지의 집행완료 및 집행 계획된 예산을 중심으로 수집하였고 불가피한 경우 가장 최근, 최장의 집행완료 및 집행계획 예산을 수집하였다. 또한 중권역별 예산은 중권역 크기가 작은 경우 예산 총액이 적을 가능성을 최대한 완화하기 위해 총 예산액을 면적으로 나누어 단위면적 당 투자액으로 계산하였다.

가장 많은 금액이 투자된 중권역은 한강서울 중권역 3,295,902백만원으로 나타났다. 하지만 면적 대비 가장 많은 금액이 투자된 곳은 낙동구미 중권역으로, 총 투자액은 455,577백만원이지만 면적당 투자액은 2542.7원/m²으로 한강서울 2144.1원/m²보다 높게 나타났다. 가장 적은 면적당 투자액을 나타낸 곳은 섬진강담하류 중권역으로 17.3원/m²으로 나타났다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



자료: 필자 작성.

그림 4-30. 수자원 투자비용원자료 및 표준화

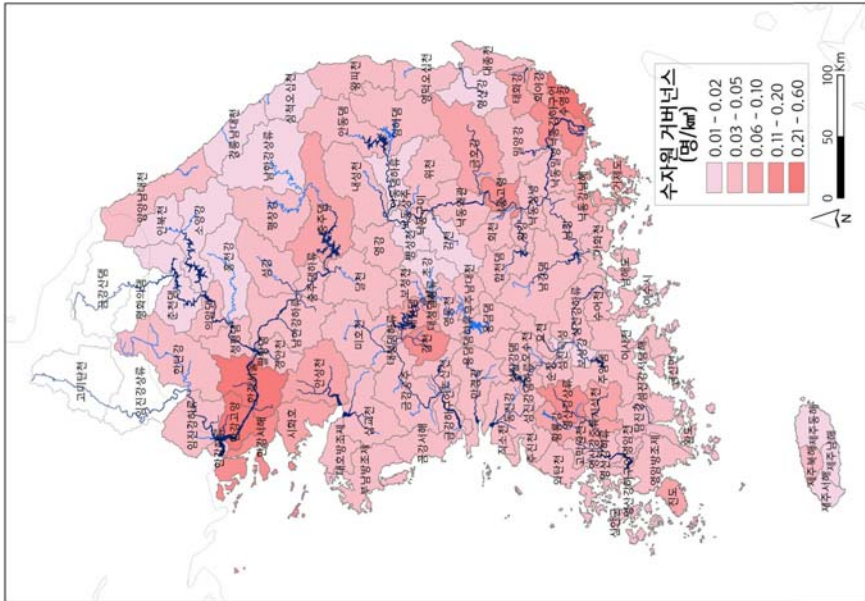
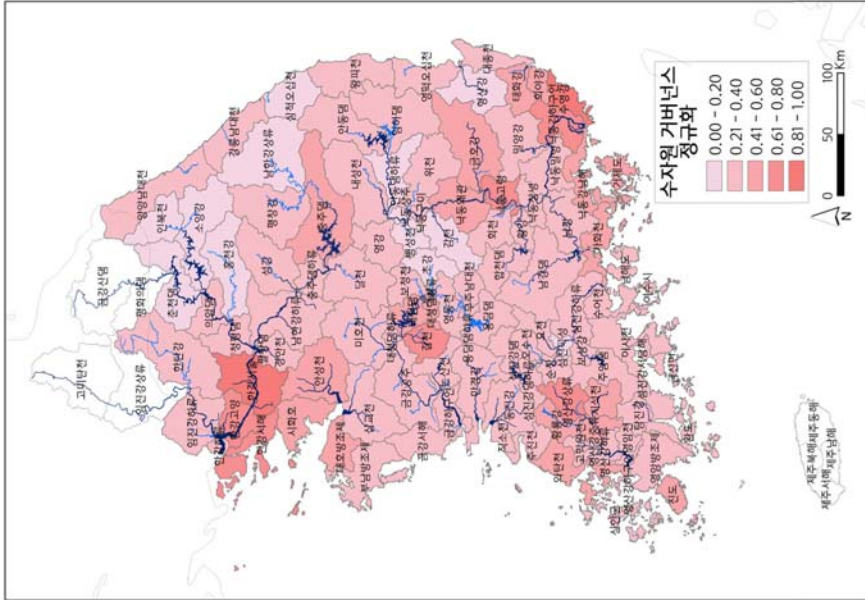
3) 수자원 거버넌스

일반적으로 거버넌스는 정량적으로 측정하기 어려운 개념이며, 기후변화적응, 지자체 능력평가 등 거버넌스를 정량적으로 평가하는 것에 대한 수요가 증가하면서 거버넌스 지표가 일부 연구되고 있다(고재경, 황원실, 2008). 국제적 지속가능성 평가지표에서는 거버넌스의 평가지표로 부패(뇌물 수수를 경험한 인구비율), 범죄(인구대비 국제살인) 등을 지표로 삼고 있으나, 이는 우리나라에서는 적용하기 어려운 개념이며 국가보다 작은 단위에서의 데이터 접근이 거의 불가능하다. 국내에서 적용 가능한 거버넌스 지표를 연구한 사례로, 고재경, 황원실(2008)은 지방자치단체의 환경 거버넌스를 평가하기 위해 다양한 지표를 제안한 뒤 AHP 분석을 통해 가중치를 부과해 국내 전문가 집단에서 거버넌스 평가에 유의미한 결과를 가지는 10가지 지표를 선정하였다. 하지만 대부분의 지표가 정성적 지표이며, 일부 정량적 지표(지역 내 환경관련 비정부기구 수, 민원·분쟁 해결 수 등)에 대해서도 자료수집이 까다로운 경향이 확인되었다.

본 지표에서는 기후변화취약성 평가의 적응능력 항목으로 유역 내 단위면적당 공무원 수를 지표로 이용하였는데, 해당 지역의 공무원 수가 많을수록 거버넌스를 위한 잠재력이 크다고 판단한 사례(국립환경과학원, 2012; 변정연 등, 2012)를 통해 수자원 거버넌스 평가 지표로 공무원 수가 적절하다고 판단하였다. 이에 따라 국립환경과학원(2012)이 개발·배포한 CCGIS 데이터를 이용하여, 각 행정구역별 수자원 관련 공무원 수를 수집하여 면적비로 중권역으로 분배하였다. 또한 이 자료는 유역 전반에 미치는 영향임을 고려하여, 같은 수의 공무원이 서로 다른 면적의 중권역을 관할했을 때의 영향의 형평성을 고려하여 중권역별 공무원 수를 유역 면적으로 나누어 단위면적당 공무원 수를 거버넌스 지표로 산출하였다.

한강서울 중권역은 중권역 내 공무원 수 925명 및 거버넌스 지표 0.60명/km²으로 가장 높은 수치를 나타냈다. 춘천댐은 공무원 수 12명을 보였으나 면적대비로 계산한 결과 0.008명/km²로 가장 낮은 거버넌스 지표를 나타냈다.

- 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I)



자료: 필자 작성.

■ 그림 4-31. 수자원 가버니스원자료 및 표준화



제5장

지속가능한 물이용의 평가 및 시험검증

1. 가중치 산정

앞 장에서 구축한 지표자료를 퍼지가중합계법(FWSM)을 이용하여 통합함으로써, 지역의 물이용 지속가능성을 평가하였다. 통합을 위한 가중치는 지속가능성 지수를 구성하는 다섯 가지 항목 및 각 항목 내 세부지표에 대해 대학, 정부출연 연구기관, 민간 연구기관 등에 종사하는 국내 전문가를 대상으로 계층화분석과정(AHP) 기반 설문조사⁷⁾를 통해 산정하였다. 가중치 결과는 항목별, 세부지표별 삼각퍼지수(TFN)의 형태의 가중치값으로 도출하였다.

가. 압력 지표 가중치

압력 항목의 카테고리 및 지표의 상대적 가중치는 <표 5-1> 및 <그림 5-1>과 같다. 지속가능한 물이용을 구성하는 다섯 가지 항목 중에서 지속가능한 물이용 항목의 압력 요인으로 작용하는 인간 물 요구량에 대한 가중치 설문 평균은 0.40으로 나머지 항목보다 중요도가 높은 것으로 인식되고 있었다. 수생태계 건강성, 수질 요구량, 수자원재생능력은 비슷한 우위를 보였고, 물관리 형평성 항목은 다소 낮은 중요도로 인식되고 있었다.

인간 물 요구량 항목 내에서는 인간 물 스트레스가 가장 큰 압력요인으로 작용하는 것으로 나타나 인간의 물이용 관점에서 지속가능성에 가장 직접적인 영향관계에 있는 것으로 나타났다(그림 5-2). 농업 물 스트레스는 다른 두 지표에 비해 상대적으로 인간 물 요구량에 기여하는 중요도가 낮은 것으로 인식되었다.

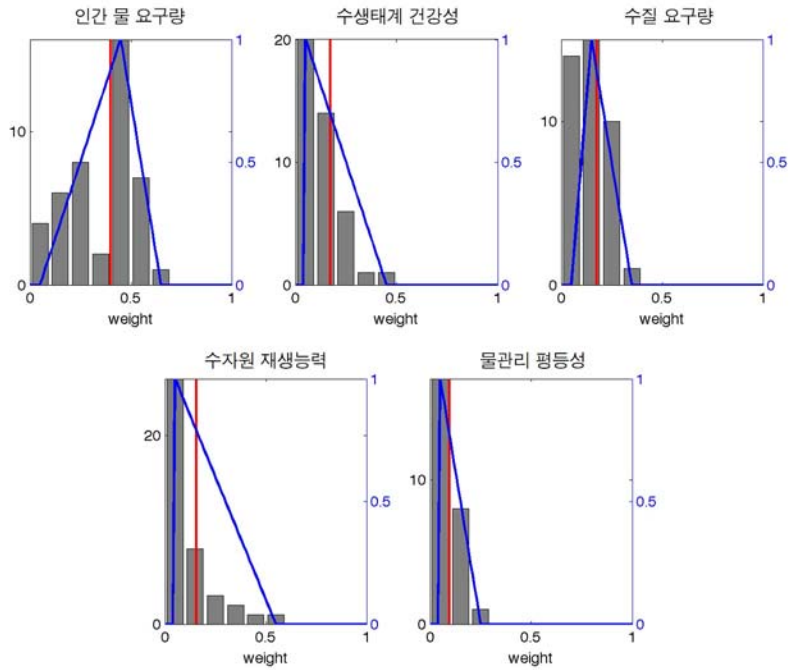
수생태계 건강성 항목 내에서는 넓은 범위에서 생태계 및 서식처에 악영향을 미친다고 알려진 댐 저수량, 댐 밀도 등의 저수 인프라를 중심으로 높은 가중치가 확인되었다. 반면 외래어종 등 직접적인 생물계의 지표에서는 상대적으로 낮은 중요도로 나타났다(그림 5-3).

7) 전문가 설문조사는 대학, 정부출연 연구기관, 민간연구기관 등에 종사하는 총 219명의 전문가에게 의뢰하여 총 45명으로부터 설문 응답을 수집하였으며, 2014년 6월 17일부터 20일까지 이메일을 통해 설문지를 배포하였고, 문의를 이메일 및 전화로 응대하였다. 설문조사지 및 응답자 특성에 대한 내용은 <부록1>에 수록하였다.

표 5-1. 압력 지표의 삼각퍼지수

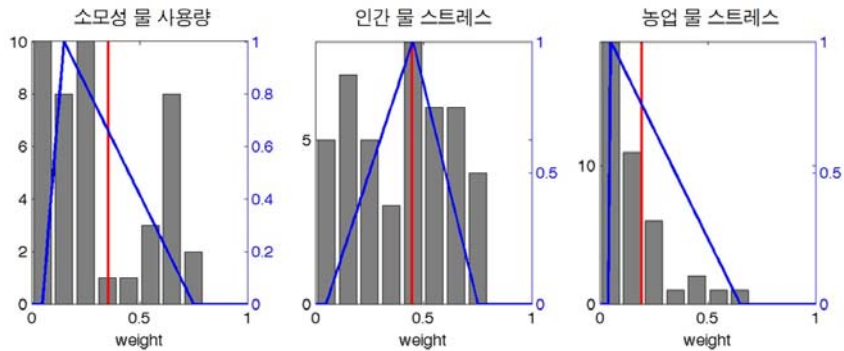
	압력 가중치			
	삼각퍼지수			평균
	Min	Median	Max	
인간 물 요구량	0.05	0.45	0.65	0.40
소모성 물 사용량	0.05	0.15	0.75	0.36
인간 물 스트레스	0.05	0.45	0.75	0.45
농업 물 스트레스	0.05	0.05	0.65	0.20
수생태계 건강성	0.05	0.05	0.45	0.17
댐 저수량	0.05	0.25	0.55	0.29
댐 밀도	0.05	0.25	0.45	0.25
하천의 연속성 단절	0.05	0.10	0.45	0.20
외래어종 (마리)	0.05	0.05	0.25	0.07
외래어종 (비율)	0.05	0.05	0.35	0.09
어획 및 양식 압력	0.05	0.05	0.35	0.09
수질 요구량	0.05	0.15	0.35	0.18
질소 부하	0.05	0.05	0.45	0.18
인 부하	0.05	0.05	0.55	0.22
농약 오염	0.05	0.15	0.55	0.29
토사 유출	0.05	0.05	0.45	0.13
유기물 부하	0.05	0.05	0.55	0.18
수자원 재생능력	0.05	0.05	0.55	0.16
경작지 개발지역	0.05	0.05	0.65	0.19
불투수층 개발지역	0.05	0.30	0.65	0.35
가축 밀도(물리적)	0.05	0.05	0.65	0.21
습지 개간율	0.05	0.05	0.65	0.25
물관리 형평성	0.05	0.05	0.25	0.10
소득 스트레스	1.00	1.00	1.00	1.00

자료: 필자 작성.



자료: 필자 작성.

그림 5-1. 압력 부문 대분류 카테고리의 삼각퍼지수

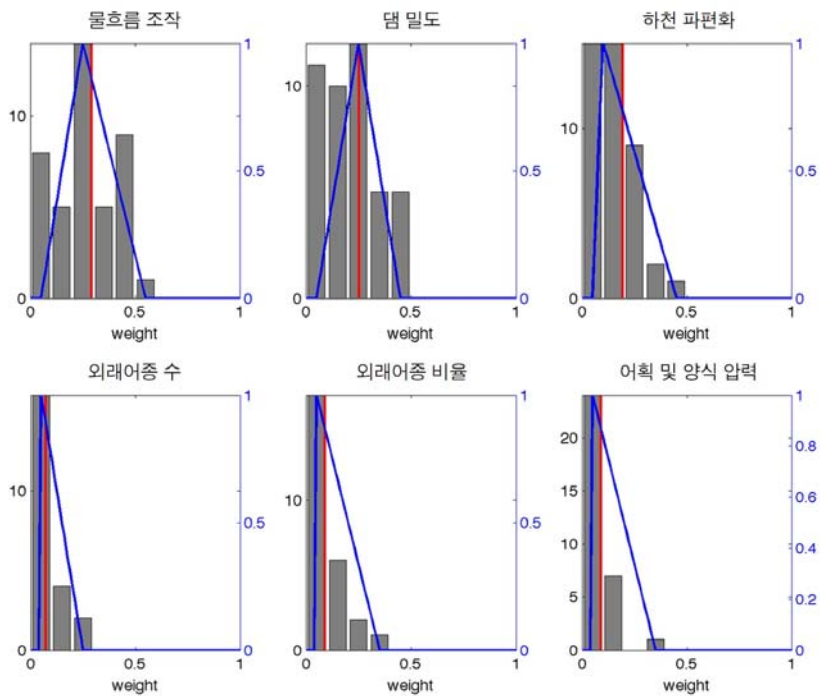


자료: 필자 작성.

그림 5-2. 인간 물 요구량 하위 압력지표의 삼각퍼지수

수질 요구량 항목 내에서는 농약 사용량이 가장 수질환경에 스트레스요인으로 작용하는 것으로 나타났으며 이는 부영양화 등으로 인한 수질의 2차 오염보다, 농약으로 인한 유독성 물질의 직접적인 수질 영향을 가장 심각하게 여기는 것으로 나타났다. 이어 유기물, 인, 질소 등 대표적인 부영양화 물질이 압력요인으로 나타났고 토사유출량은 다른 요인과 비교했을 때 수질 악화에 덜 심각하게 인식되는 것으로 나타났다(그림 5-4).

수자원재생능력 항목에서는 도시화 등으로 인한 불투수층 개발이 유역 내 물 순환을 가장 방해하는 압력요인으로 인식되는 것으로 나타났으며, 습지개간율도 높은 우선순위를 확보하여 주요 압력요인으로 나타났다(그림 5-5).



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-3. 수생태계 건강성 하위 압력지표의 삼각퍼지수

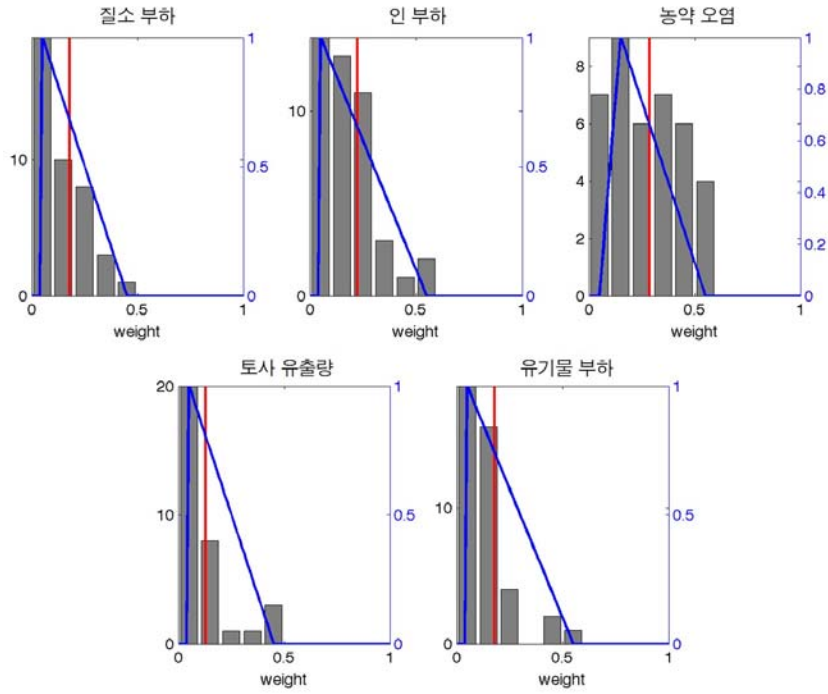
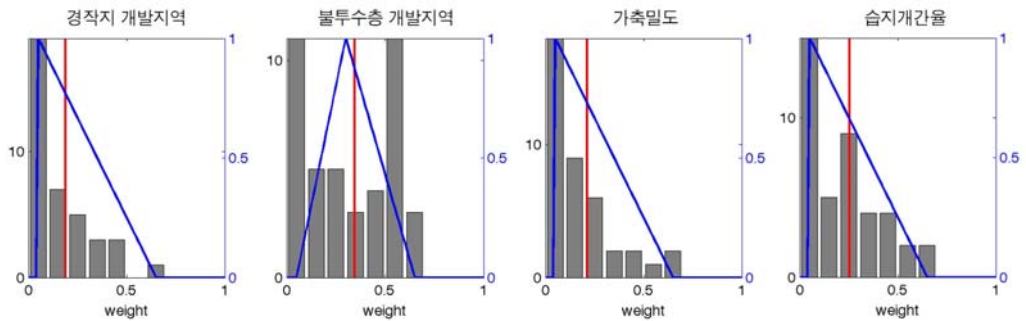


그림 5-4. 수질 요구량 하위 압력지표의 삼각퍼지수



자료: 필자 작성.

그림 5-5. 수자원 재생능력 하위 압력지표의 삼각퍼지수

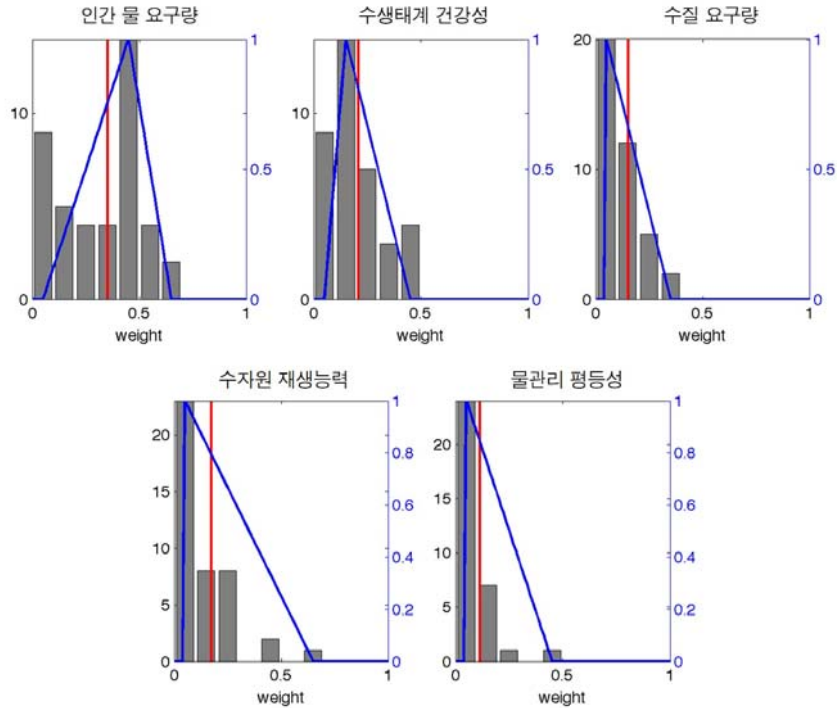
나. 반응 지표 가중치

반응 항목의 카테고리 및 지표의 상대적 가중치는 아래 <표 5-2>와 같다. 지속가능한 물이용을 구성하는 다섯 가지 항목 중에서 지속가능한 물이용 항목의 반응 요인으로 작용하는 인간 물 요구량의 가중치 평균은 0.35로 나머지 항목보다 중요도가 높은 것으로 인식되고 있었다. 이어 수생태계 건강성, 수자원 재생능력, 수질 요구량 순으로 비슷한 우위를 보였고, 물관리 형평성 항목은 다소 낮은 중요도로 인식되고 있었다.

■ 표 5-2. 반응 지표의 가중치

	반응 가중치			평균
	삼각피지수			
	Min	Median	Max	
인간 물요구량	0.05	0.45	0.65	0.35
물이용 인프라	0.05	0.55	0.75	0.51
적정 물이용 수준	0.05	0.25	0.75	0.34
하천 접근성	0.05	0.05	0.55	0.15
수생태계 건강성	0.05	0.15	0.45	0.21
수생태 보호지역	0.05	0.75	0.85	0.67
육상생태 보호지역	0.05	0.15	0.85	0.33
수질 요구량	0.05	0.05	0.35	0.15
위생시설	1.00	1.00	1.00	1.00
수자원 재생능력	0.05	0.05	0.65	0.17
물 재이용량	0.05	0.75	0.85	0.59
대체수원 잠재량	0.05	0.15	0.85	0.41
물관리 형평성	0.05	0.05	0.45	0.11
수도 접근성	0.05	0.65	0.75	0.43
수자원 투자비용	0.05	0.15	0.65	0.30
수자원 거버넌스	0.05	0.05	0.75	0.27

자료: 필자 작성.

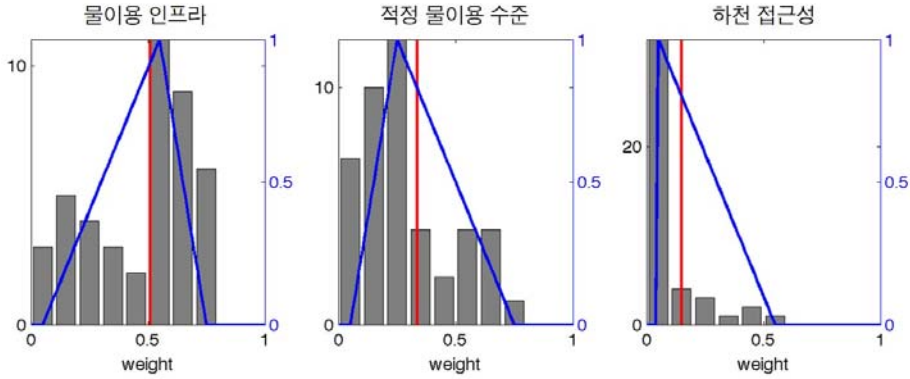


자료: 필자 작성.

■ 그림 5-6. 반응 부문 대분류 카테고리의 삼각퍼지수

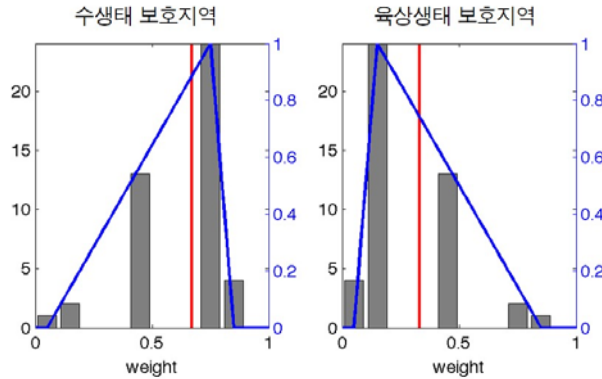
인간 물 요구량 항목 내에서는 물이용 인프라 지표가 가장 큰 반응요인으로 나타나 인간 물 요구량에 작용하는 압력 요인을 상쇄할 수 있는 반응 역할로서 중요도가 높은 것으로 나타났다(그림 5-7).

수생태계 건강성 항목 내에서는 수생태 보호지역 지표가 육상생태 보호지역 지표보다 우위를 가짐으로써 유역환경보다는 직접적인 수환경이 수생태계의 반응지표로 적합하다는 결과를 확인할 수 있었다(그림 5-8).



자료: 필자 작성.

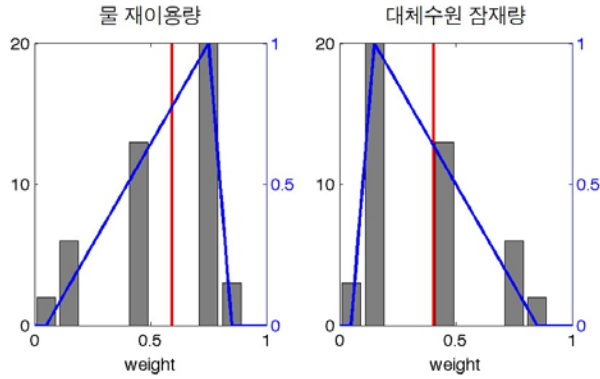
■ 그림 5-7. 인간 물 요구량 하위 반응지표의 삼각퍼지수



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-8. 수생태계 건강성 하위 반응지표의 삼각퍼지수

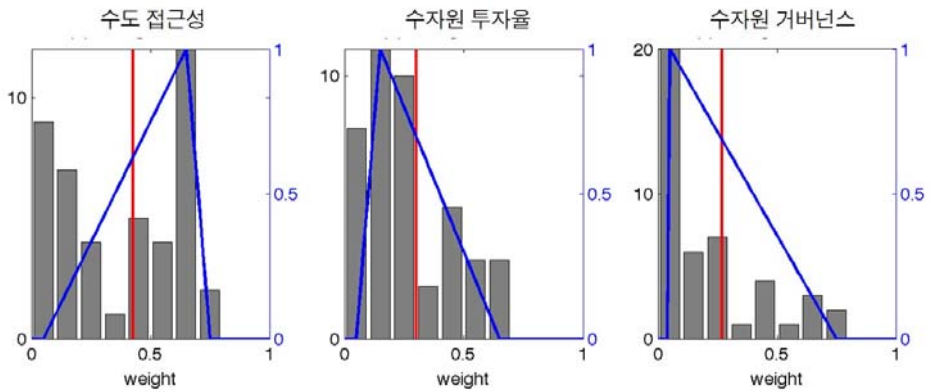
수자원재생능력 항목 내에서는 물 재이용량 지표가 대체수원 잠재량 지표보다 우위를 가짐으로써 대체수원 확보보다는 현재 정화되고 있는 물을 얼마나 재활용하고 있는지를 수자원재생능력의 반응능력으로 인식하고 있음을 알 수 있다(그림 5-9).



자료: 필자 작성.

그림 5-9. 수자원재생능력 하위 반응지표의 삼각퍼지수

물관리 형평성 항목에서는 인프라 형평성으로 대표되는 수도 접근성 지표가 경제적(수자원 투자비용) 또는 사회적(수자원 거버넌스) 지표보다 우위를 가짐으로써 지역에 따른 인프라 형평성에 우위를 두고 있음을 확인할 수 있다(그림 5-10).



자료: 필자 작성.

그림 5-10. 물관리형평성 하위 반응지표의 삼각퍼지수

2. 물이용의 지속가능성 지수 평가

본 절에서는 앞서 구축한 지표 자료와 앞 절에서 설문조사를 통해 산정한 가중치를 활용하여, 우리나라 중권역별 항목별(즉, 인간 물 요구량, 수생태계 건강성, 수질 요구량, 수자원 재생능력, 물관리 형평성) 물이용 스트레스 지수, 통합 스트레스 지수, 통합 반응지수 및 최종 물이용 지속가능성 지수를 산정하고 분석한다.

가. 중권역별 압력지수

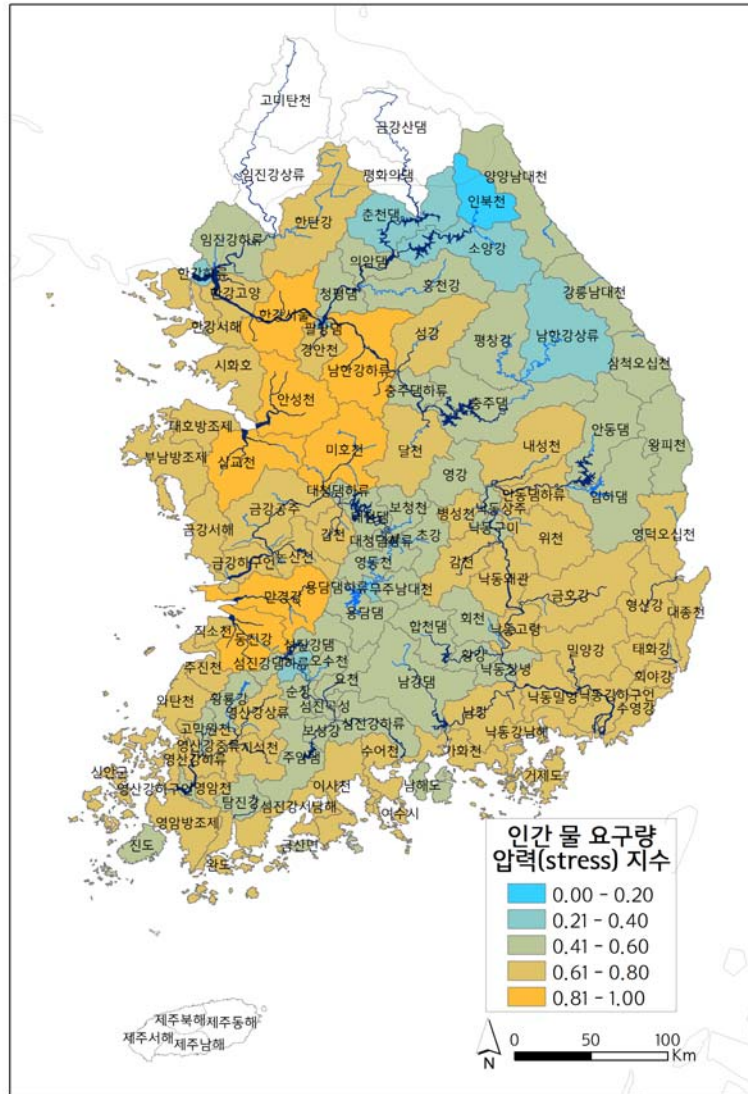
1) 인간 물 요구량

소모성 물 사용량, 인간 물 스트레스, 농업 물 스트레스로 산정한 인간 물 요구량 항목의 압력지수는 <그림 5-11>과 같다. 인북천 중권역이 가장 낮은 인간 물 요구량의 스트레스(0.01)를 나타냈으며 춘천댐(0.35), 소양강(0.21), 남한강상류(0.37) 중권역 등 강원 산간지방의 유역에서 전반적으로 낮은 스트레스를 확인할 수 있었다. 가장 높은 인간 물 요구량 스트레스는 한강서울 중권역(0.90)과 안성천(0.90)이었으며, 이 밖에도 수도권 유역 및 서해 연안 중권역을 중심으로 높은 스트레스를 나타내고 있었다.

■ 표 5-3. 인간 물 요구량 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역

순위	압력 지수	
1	한강서울	0.90
2	안성천	0.90
3	삽교천	0.87
4	만경강	0.86
5	미호천	0.83
105	용담댐하류	0.30
106	팔당댐	0.27
107	한강하류	0.22
108	소양강	0.21
109	인북천	0.01

자료: 필자 작성.



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-11. 인간 물 요구량 압력지수

2) 수생태계 건강성

댐 저수량, 댐 밀도, 하천의 연속성 단절, 외래어종 수, 외래어종 비율, 어획 및 양식압력으로 산정한 수생태계 건강성 항목의 압력지수는 <그림 5-12>과 같다. 가장 수생태계 건강성이 위협받고 있는 지역은 만경강 중권역(0.77)으로 나타났고, 가장 수생태계 스트레스가 적은 유역은 경안천(0.05)으로 나타났다.

■ 표 5-4. 수생태계 건강성 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역

순위	압력 지수	
1	만경강	0.77
2	안성천	0.74
3	주암댐	0.74
4	황강	0.73
5	황룡강	0.73
105	평창강	0.09
106	인북천	0.08
107	여수시	0.07
108	금산면	0.06
109	경안천	0.05

자료: 필자 작성.



자료: 필자 작성.

그림 5-12. 수생태계 건강성 압력지수

3) 수질 요구량

질소 부하량, 인 부하량, 농약 사용량, 토사 유출량, 유기물 부하량으로 산정한 수질 요구량의 압력지수는 <그림 5-13>과 같다. 남한강하류(0.68), 한강서울(0.65), 한강고양(0.73)으로 이어지는 한강 중·하류에서 높은 수질 스트레스를 나타냈고, 안성천(0.73), 삽교천(0.66) 유역에서도 높은 수질 스트레스를 보였다. 반면 인북천(0.04), 소양강(0.12), 춘천댐(0.14) 등의 북한강 상류 유역에서 매우 낮은 수질 스트레스를 나타냈다.

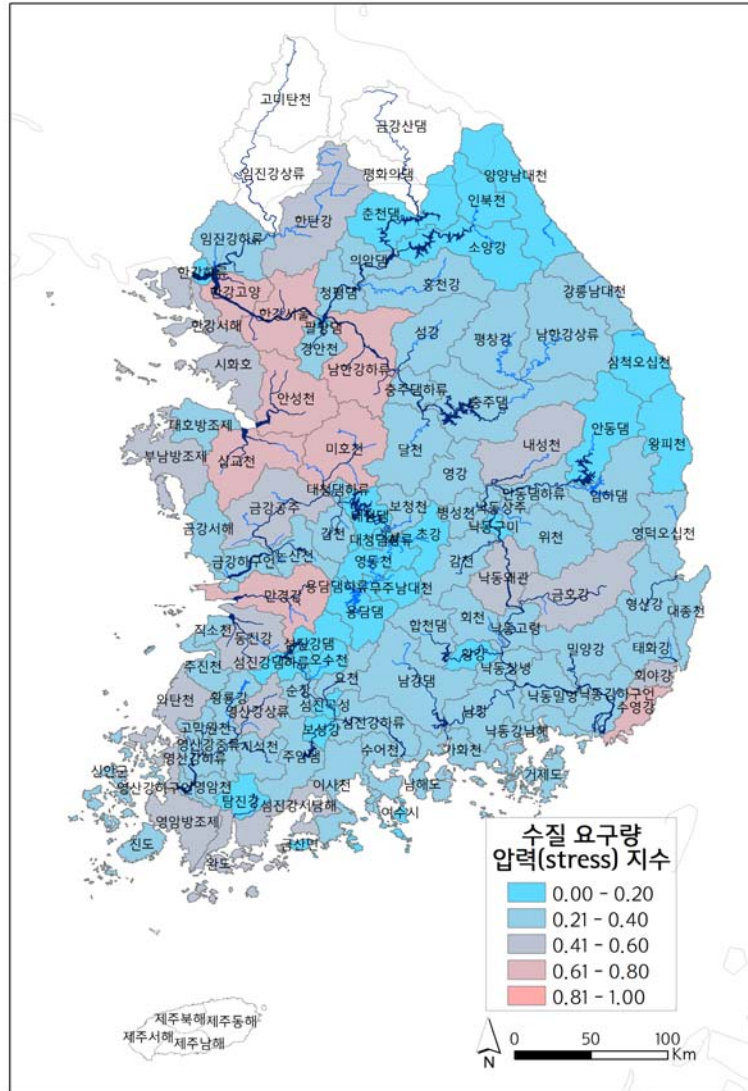
■ 표 5-5. 수질 요구량 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역

순위	압력 지수	
1	한강고양	0.73
2	안성천	0.73
3	남한강하류	0.68
4	삽교천	0.66
5	한강서울	0.65
105	무주남대천	0.09
106	용담댐하류	0.06
107	팔당댐	0.05
108	인북천	0.04
109	한강하류	0.01

자료: 필자 작성.

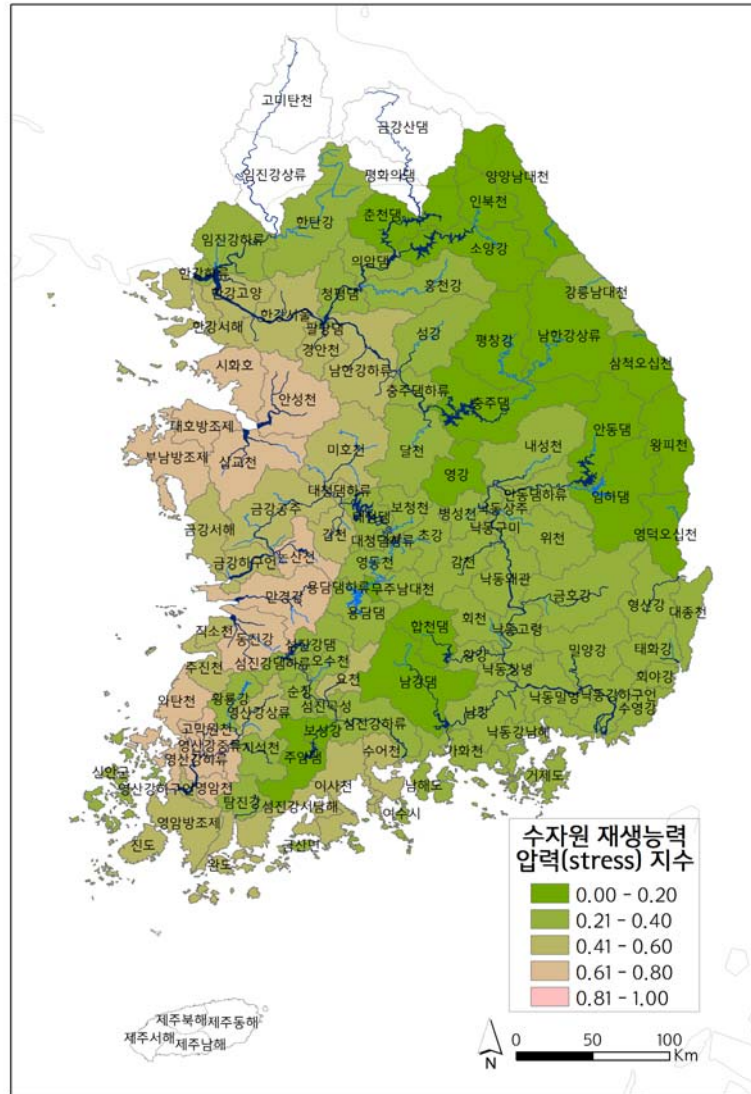
4) 수자원 재생능력

경작지 개발지, 불투수층 개발지, 가축밀도, 습지개간율 지표를 통해 표현한 수자원 재생능력의 압력지수는 <그림 5-14>과 같다. 영산강하류(0.75)와 영암천(0.71)의 영산강권역, 안성천(0.74), 삽교천(0.72), 시화호(0.70)의 시화호 일대권역에서 매우 높은 스트레스를 나타냈다. 반면 남한강 상류(0.03), 인북천(0.03) 등 강원산간 일대 유역에서는 낮은 스트레스를 보여 유역의 건강한 물 순환을 통한 유역의 수자원 재생능력이 높은 것으로 나타났다.



자료: 필자 작성.

그림 5-13. 수질 요구량 압력지수



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-14. 수자원 재생능력 압력지수

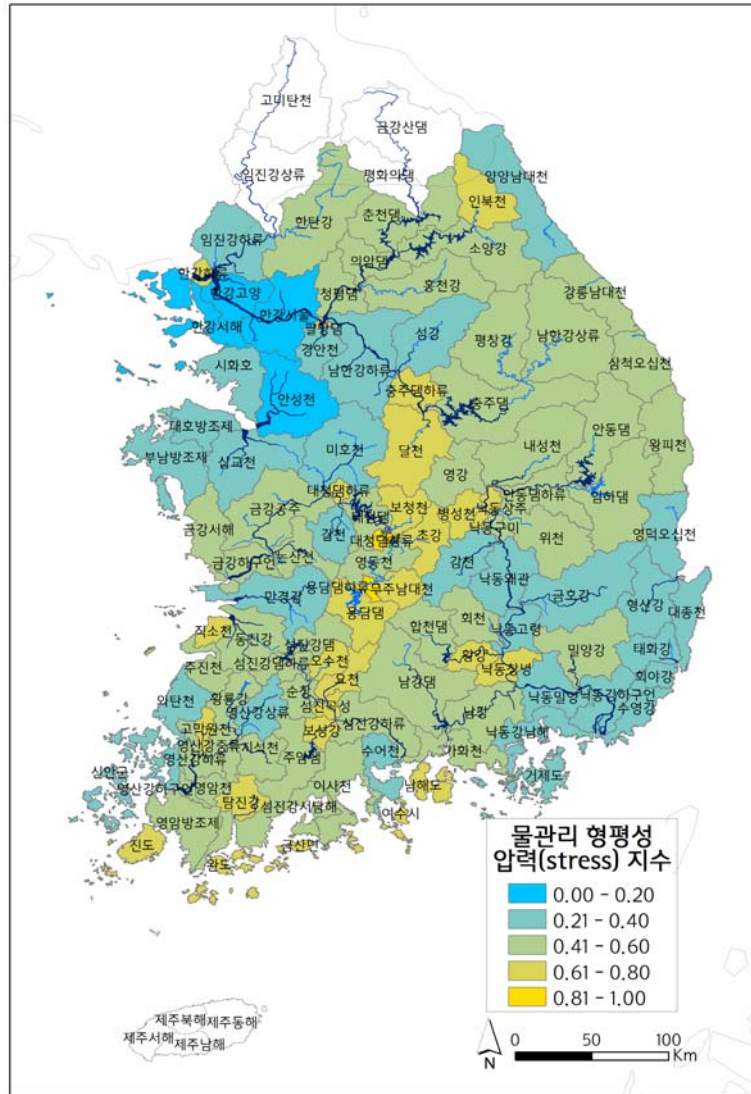
표 5-6. 수자원 재생능력 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역

순위	압력 지수	
1	영산강하류	0.75
2	안성천	0.74
3	삼교천	0.72
4	영암천	0.71
5	시화호	0.70
105	왕피천	0.07
106	안동댐	0.07
107	삼척오십천	0.06
108	인북천	0.03
109	남한강상류	0.03

자료: 필자 작성.

5) 물관리 형평성

소득 스트레스를 통해 나타난 물관리 형평성의 압력지수는 <그림 5-15>와 같다. 대청댐상류(1.00), 용담댐하류(0.83), 보청천(0.80) 등 금강상류 유역에서 물관리 형평성을 위한 소득 압력이 큰 것으로 나타났다. 반면 한강서울(0.00), 한강고양(0.17), 한강서해(0.18), 안성천(0.19) 등 수도권과 수영강(0.20) 등 대도시를 중심으로 낮은 스트레스를 보였다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-15. 물관리 형평성 압력지수

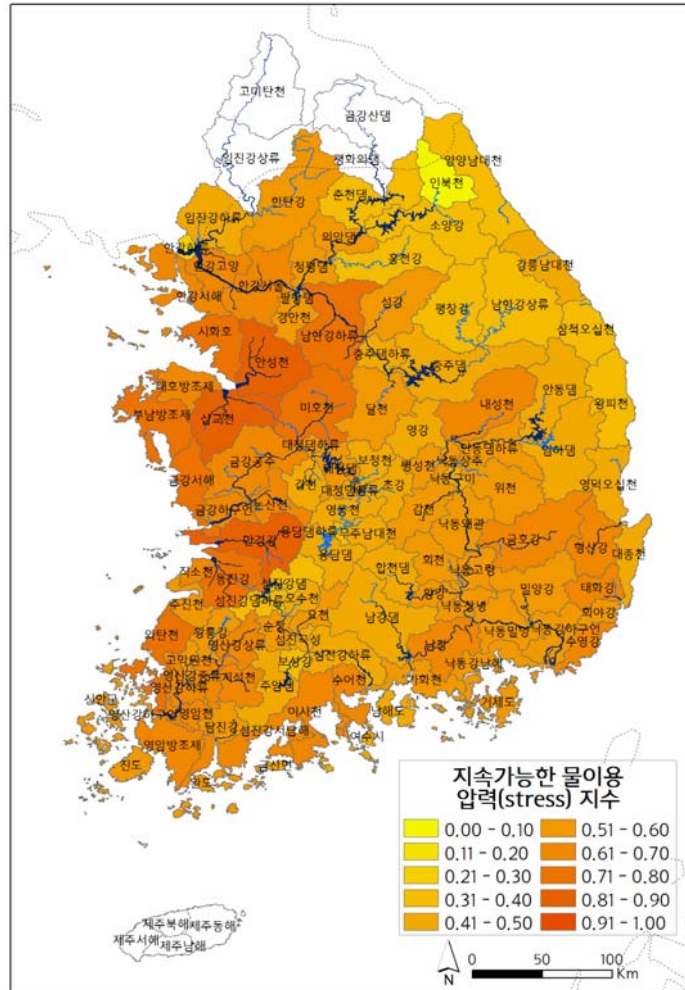
■ 표 5-7.물관리 형평성 항목의 압력 지수의 상하위 5개 중권역

순위	압력 지수	
1	대청댐상류	1.00
2	용담댐하류	0.83
3	보청천	0.80
4	금산면	0.79
5	섬진곡성	0.73
105	수영강	0.20
106	안성천	0.19
107	한강서해	0.18
108	한강고양	0.17
109	한강서울	0.00

자료: 필자 작성.

6) 중권역별 압력지수

지속가능한 물이용을 저해하는 압력 지수를 취합한 결과는 <그림 5-16>과 같다. 안성천 중권역 (0.744), 삼교천(0.722), 만경강(0.707) 순으로 높은 스트레스 값이 나타났으며, 이 주변 지역에서도 다른 중권역에 비해 높은 압력 지수를 보이는 것으로 나타났다. 반면 인북천(0.088)에서 가장 낮은 스트레스를 보임으로써 지속가능한 물이용을 저해하는 압력요소가 적은 것으로 나타났다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-16. 지속가능한 물이용 압력지수

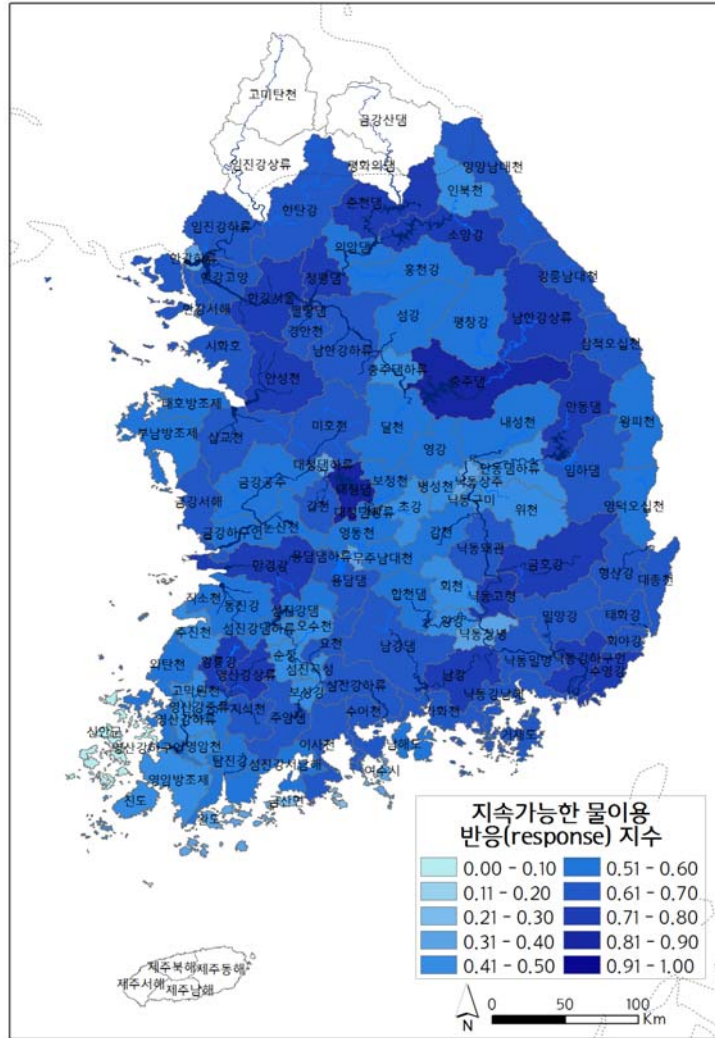
나. 중권역별 반응지수

지속가능한 물이용의 압력조건을 완화함으로써 지속가능성을 보완·향상시키는 반응 지수를 취합한 결과는 <그림 5-17>와 같다. 대청댐(0.677), 수영강(0.672), 금호강(0.670), 충주댐(0.668) 순으로 높은 값을 보였으며, 신안군(0.194), 금산면(0.206) 등의 도서지역, 용담댐하류(0.252), 낙동창녕(0.271) 등의 내륙지역에서 낮은 값을 보여 인간 물 요구량에 대응할 수 있는 능력이 낮은 것으로 나타났다.

다. 중권역별 지속가능한 물이용 지수

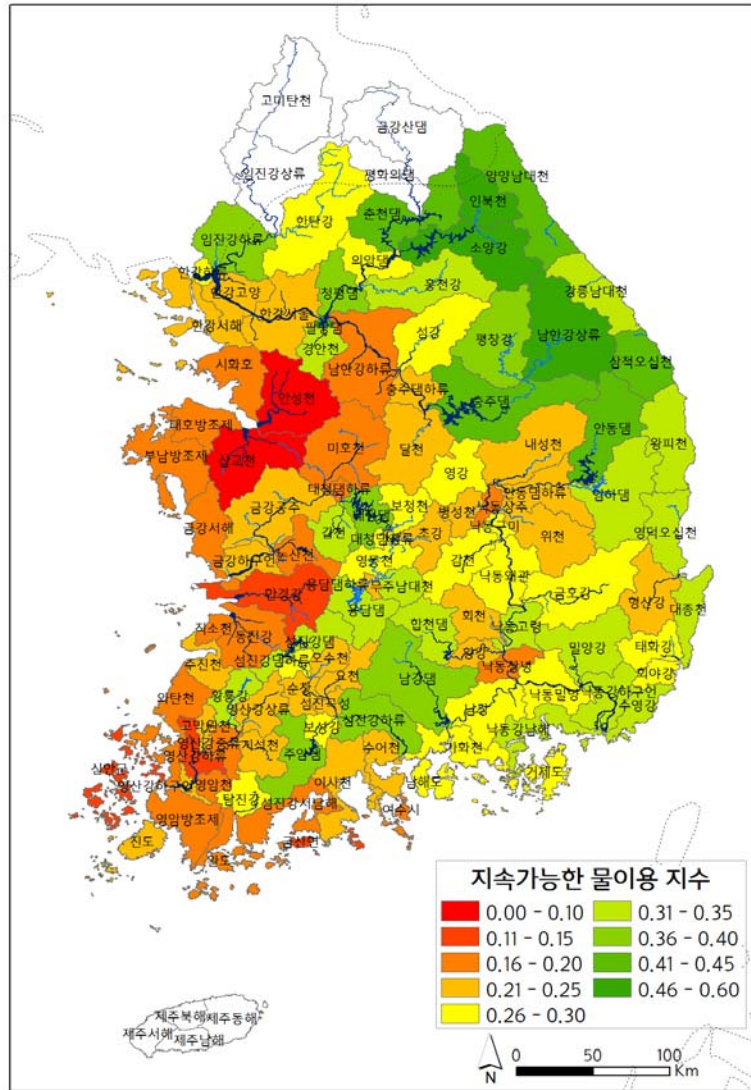
중권역별 압력 지수와 반응 지수를 통합하여 도출한 지속가능한 물이용의 최종 지수는 <그림 5-18>과 같다. 우리나라 중권역 기준, 가장 지속가능한 물이용 수준을 나타내는 곳은 소양강(0.55)으로 나타났다. 이어 팔당댐(0.48), 남한강상류(0.47), 인북천(0.45), 춘천댐(0.44) 등으로 한강 상류지역에서 주로 높은 지속가능성 지수를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

반면 안성천(0.09), 삼교천(0.10), 만경강(0.12), 신안군(0.12), 금산면(0.12) 등의 중권역에서 매우 낮은 지속가능성 지수를 나타냄으로써 다른 지역에 비해 인간 및 생태계의 원활한 수자원 이용에 어려움을 겪을 가능성이 높은 것으로 나타났다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-17. 지속가능한 물이용 반응지수



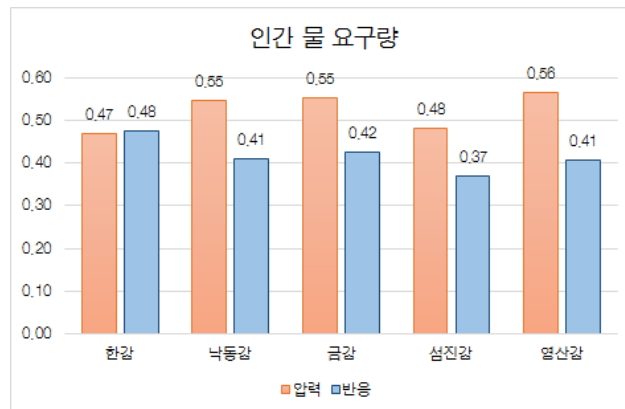
자료: 필자 작성.

■ 그림 5-18. 최종 지속가능한 물이용 지수

라. 대권역별 지속가능한 물이용 지수

1) 인간 물 요구량

한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강의 5대강 대권역별로 인간 물 요구량의 스트레스와 반응 지표를 비교한 결과는 <그림 5-19>와 같다. 한강 대권역이 가장 낮은 수준의 인간 물 요구량 스트레스를 나타냈고 영산강 유역이 가장 높은 스트레스를 보였다. 인간 물 요구량 반응은 한강 대권역에서 가장 높게, 섬진강 대권역에서 가장 낮게 나타났다. 스트레스와 반응 지수의 차이는 한강 대권역에서 가장 낮게 나타났고 영산강 대권역에서 가장 높게 나타났다. 한강 대권역을 제외한 모든 대권역에서 반응지수보다 높은 압력지수를 나타냄으로써 인간 물 요구량에 대응할 수 있는 능력이 부족하여 국토 전반에 걸쳐 인간 물 요구량의 압력을 줄이거나 반응능력을 보완할 수 있는 노력이 필요한 것으로 나타났다.

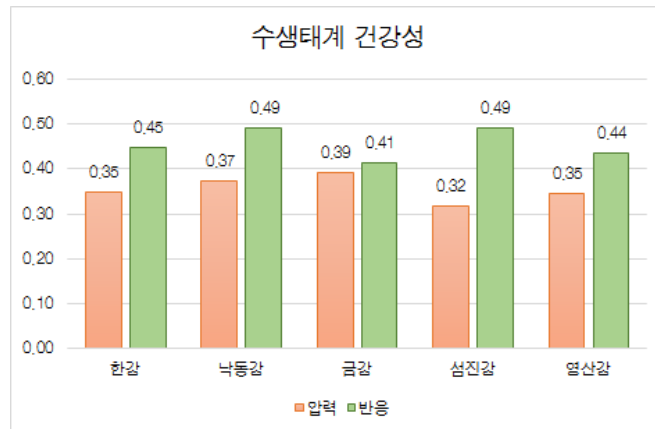


자료: 필자 작성.

그림 5-19. 대권역별 인간 물 요구량

2) 수생태계 건강성

대권역별로 수생태계 건강성의 스트레스와 반응 지표를 비교한 결과는 <그림 5-20>와 같다. 금강 대권역에서 가장 높은 스트레스지수를 보였고, 낙동강과 섬진강 대권역에서 가장 높은 반응 지수를 나타냈다. 지수의 차이는 섬진강 대권역에서 반응지수가 높은 형태로 가장 높게 나타나면서 지속가능한 물이용 목표를 달성함에 있어 다섯 대권역 중 가장 건강한 수생태 및 유역 현황을 보이는 것으로 나타났다.



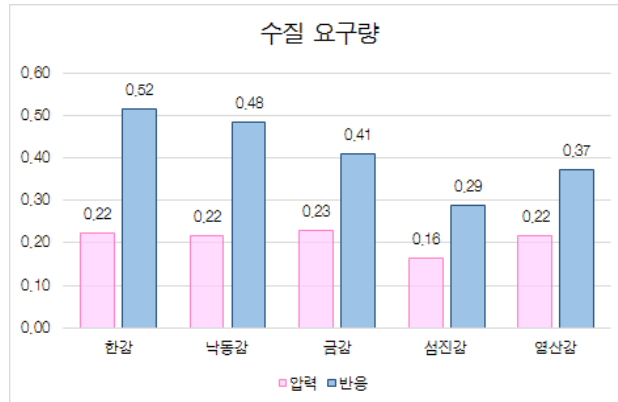
자료: 필자 작성.

■ 그림 5-20. 대권역별 수생태계 건강성

3) 수질 요구량

대권역별 수질 요구량은 <그림 5-21>과 같다. 전 권역에서 수질 부문의 스트레스는 높지 않은 것으로 나타났는데 이는 주로 수질 압력이 높은 대도시 및 하류의 값과 상대적으로 수질압력이 낮은 상류의 값을 대권역 경계로 평균화해서 하향평균된 것으로 보인다. 반응 지수는 한강 대권역에서 가장 높은 값으로 나타났다. 지수의 차이는 한강 대권역에서 반응지수가 높은 형태로 가장

높게 나타나면서 깨끗한 수질을 보장할 수 있는 능력이 높은 것으로 나타났다.

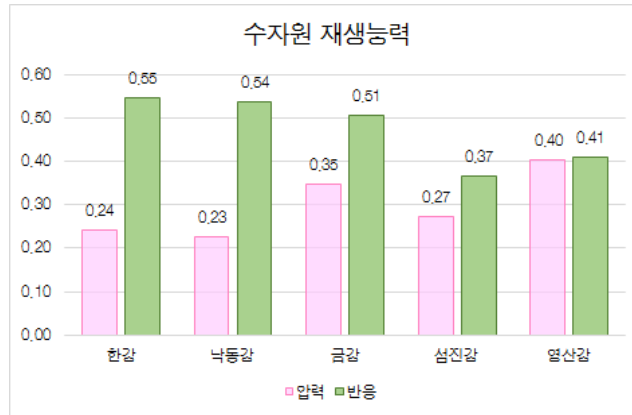


자료: 필자 작성.

■ 그림 5-21. 대권역별 수질 요구량

4) 수자원 재생능력

대권역별 수자원 재생능력의 비교는 <그림 5-22>의 결과와 같다. 영산강 대권역에서 가장 높은 스트레스지수를 나타냈고, 한강 대권역에서 가장 높은 반응지수를 나타냈다. 지수의 차이는 낙동강 대권역에서 반응지수가 높은 형태로 가장 높게 나타나면서 건강한 수자원 순환을 보장할 수 있는 능력이 높은 것으로 나타났다. 반면 영산강 대권역에서는 압력지수값이 반응지수보다 높게 나타남으로써 건강한 수자원 순환 능력이 다른 대권역에 비해 매우 낮은 것으로 나타났다.

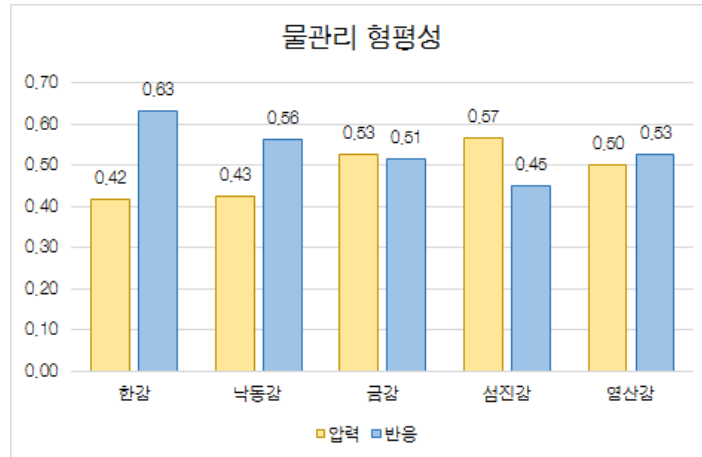


자료: 필자 작성.

■ 그림 5-22. 대권역별 수자원 재생능력

5) 물관리 형평성

대권역별 물관리 형평성 항목의 비교는 <그림 5-23>의 결과와 같다. 섬진강 대권역에서 가장 높은 스트레스지수를 나타냈고, 한강 대권역에서 가장 높은 반응지수를 나타냈다. 지수의 차이는 한강 대권역에서 반응지수가 높은 형태로 가장 높게 나타나면서 유역 내 물관리 정도가 상대적으로 균등하게 이루어지고 있음을 나타내고 있다. 반면 금강, 섬진강 대권역에서는 압력지수값이 반응지수보다 높게 나타남으로써 대권역 내에서 건전한 물이용을 위한 형평성 수준이 낮은 것으로 나타났다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-23. 대권역별 물관리 형평성

6) 대권역별 지수

대권역별로 산정한 다섯 항목의 지표를 바탕으로, 각 대권역별 압력 및 반응 지수를 살펴보았다. 우선 한강 대권역은 모든 항목에서 높은 반응지수를 나타냄으로써 현재 다른 지역과 비교했을 때 압력지수에 대응할 수 있는 반응 역량이 높은 것으로 나타났다. 하지만 인간 물 요구량 항목을 개선하기 위해서 물 절약 또는 충분한 인프라 확보 등의 추가적인 노력이 꾸준히 필요할 것으로 나타났다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-24. 한강 대권역 압력 및 반응 지수



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-25. 낙동강 대권역 압력 및 반응 지수

낙동강 대권역에서는 높은 인간 물 요구량 압력에 비해 대응지수가 부족해 앞으로 인간의 생활에 필요한 용수공급이 부족할 리스크가 높은 것으로 나타났다. 반면 나머지 항목에서 높은 반응지수를 나타냄으로서 반응 역량이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

금강 대권역에서는 낙동강 대권역과 마찬가지로 높은 인간 물 요구량 압력에 비해 낮은 대응지수를 나타냈다. 게다가 수생태계 건강성 및 물관리 형평성 항목에서 압력 지수와 근소한 차이의 반응 지수를 나타냄으로써 금강 대권역에서의 물이용 지속가능성을 위해서 수환경·유역환경 관리, 인프라·경제·사회적 형평성 관리가 필요한 것으로 나타났다.

섬진강 대권역에서는 인간 물 요구량 뿐 아니라 물관리 형평성 항목에서도 반응지수보다 높은 압력지수를 보임으로써 물 수요 관리 뿐 아니라 인프라 확장 및 인프라·경제·사회적 형평성 관리를 보완해야 함을 시사하고 있다.

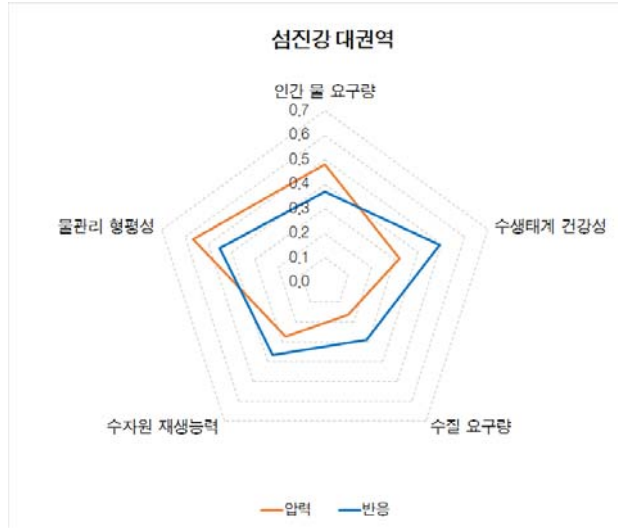
영산강 대권역에서는 인간 물 요구량이 높은 압력 요인으로 나타났고, 물관리 형평성 및 수자원 재생능력에서 반응지수 대비 높은 압력지수를 나타냈다. 이를 통해 영산강 대권역에서는 물관리를 위한 형평성 능력 함양이 요구되며, 수자원 재생능력 항목의 지수 향상을 위해 토지이용 관리 및 물이용 효율을 높이기 위한 방안을 마련해야 할 것으로 나타났다.

각 대권역별 압력 및 반응지수를 통합함으로써 나타낸 지속가능한 물이용 지수는 <그림 5-29>와 같다. 한강 대권역이 0.33으로 가장 높은 지속가능성지수를 나타내고 있고, 낙동강 대권역이 0.28, 섬진강 대권역이 0.24로 나타났고, 금강과 영산강 대권역은 각각 0.22, 0.20으로 대권역 중 낮은 지속가능성지수를 나타냈다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-26. 금강 대권역 압력 및 반응 지수



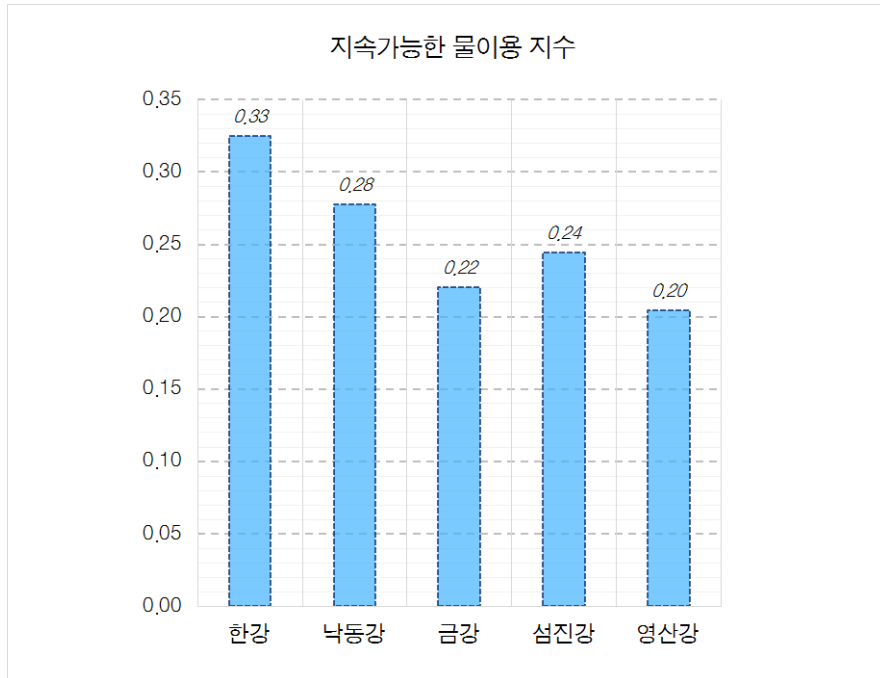
자료: 필자 작성.

■ 그림 5-27. 섬진강 대권역 압력 및 반응 지수



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-28. 영산강 대권역 압력 및 반응 지수



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-29. 대권역별 지속가능한 물이용 지수

3. 결과의 시험 검증

지속가능한 물이용 평가를 위해 구축된 자료를 통합하여 지수를 도출하고, 결과 분석을 기 수행하였고, 최종적으로 도출된 지수의 타당성을 검증하기 위해서는 추가적으로 지수를 계산하는 과정상의 방법이나 자료의 오류 등을 검토함으로써 지수의 견고성(robustness)을 평가하고, 또한 최종 지수와 관련 지수와의 연관성 등을 검토할 필요가 있다. 1장에서 밝혔듯이, 총 2차년도 연구 중에서 당해연도에는 지속가능성 지표 및 지수의 개발, 자료 구축, 우리나라의 물이용 지속가능성의 평가 등에 초점을 맞추고 이의 시험 검증을 수행한다. 본 절은 차년도에 계획된 검증 방법론 체계적 정립을 위한 사전 연구라고 할 수 있다.

앞서 2장에서 분석되었듯이 다양한 물이용 관련 지표, 지수가 개발되고 있으나, 개발된 지표의 신뢰성 확보, 활용성 제고를 위해서는 다양한 측면의 검증이 필요하다. EPI(2014)에서는 최종 환경성과지수의 불확실성을 분석하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 지표평가의 구조 및 데이터의 통계적 유의미성을 확인하기 위해 데이터의 신뢰성 및 가용성을 확인한 뒤, 특정 지표가 최종 지수에 크게 영향을 미쳤는지를 파악하는 변수 기반의 민감도 분석을 수행하였다. 이후 최종지수를 통합하는 계산과정상의 가정이 최종 결과에 미치는 영향을 판단하기 위해, 지표별 가중치가 미치는 영향을 파악하고 가중치를 변수에 반영하여 취합하는 과정상의 불확실성이 국가순위에 미치는 범위를 평가함으로써 통합과정에서의 불확실성을 확인하였다. Vörösmarty et al.(2010)에서도 연구결과를 통해 도출한 최종 지수의 불확실성을 검증하고 데이터상의 민감성을 확인하고자 민감도분석을 수행하였다. 우선 ①구동요인을 표준화하는 과정에서 사용한 방법의 민감도 분석, ②지표의 가중치가 최종 지수에 미친 영향 분석 등을 수행하였다. 또한 ③각 지표 사이의 독립성을 확인하기 위해 지표 간 상관관계 분석, ④잭나이프 방법(Jack-knifing procedure)을 활용한 특정 지표의 값이 지수에 대한 기여도 분석을 수행하였다. 마지막으로 ⑤전 세계의 유역을 대상으로 평가된 유사 지표와의 비교를 통해 현 지수의 신뢰성을 평가하고자 하였다.

위에서 살펴본바와 같이, 지표 및 지수의 검증을 위해 다양한 방법이 활용될 수 있다면, 본 연구에서 시험검증을 위해 수행한 분석은 아래와 같다.

- 지표 자료의 질에 대한 정성·정량적 검토
- 지표 계산 방법에 따른 지수의 민감도 분석
- 지표·지수 간의 일관성 분석
- 기존 지수와의 비교 방안 검토

가. 지표 자료의 질(quality) 검토

1) 지표 자료 질 개선을 위한 제안

본 연구에서 현재 우리나라 중권역 단위의 상태를 평가하기 위해 구축한 압력 및 반응 항목의 지표는 각 지표별 수집된 데이터 및 평가방법에 따라 다른 결과를 나타낼 수 있다. 본 연구에서 대부분의 지표 및 자료는 선행연구 검토를 통해 지표 및 구축방법을 체계화하고 세분화하였으나, 일부 지표 및 자료에 대해서는 향후 수정을 통해 개선될 수 있는 가능성을 확인하였다. 따라서 현재 각 지표의 평가에 사용된 자료 및 평가방법을 바탕으로, 향후 연구를 통해 개선할 수 있는 방향을 상세히 제시하고자 한다.

압력 및 반응 항목의 각 지표에 따라 현재 지표평가방법 및 향후 개선방향은 다음과 같다. 우선 소모성 물 사용량, 인간 물 스트레스, 농업 물 스트레스 등의 지표에 이용한 유출량 자료의 경우 1994~2003년의 일일 유출량을 바탕으로 평균 연간 유출량을 산정하였기 때문에 다른 자료에 비해 자료가 시기적으로 뒤떨어져 있으므로, 향후 이를 최신 유출량 자료로 대체할 필요성은 있다. 또한 하천의 연속성 단절 지표의 경우 상류 유역의 배출구에 댐이 위치하는 경우의 파편화 정도를 산정하는 방법을 재검토할 필요가 있다. 이와 같은 경우, 유역 내에서의 파편화 정도는 0에 가깝지만 실제로는 고립되어 있는 유역이므로 생태적으로 고립성이 1에 가깝다고 판단할 수 있는 가능성을 배제하기 어렵기 때문이다. 외래어종 수 지표의 경우 Vörösmarty et al.(2010)에서는 외래어종의 종 수를 고려하였으나 우리나라에서는 각 중권역별 3~4종의 외래어종이 집중적으로 나타나 종 수를 적용할 수 없었고 외래종의 총 개체수를 사용하였으므로, 종 수가 유역의

수생태계에 미치는 영향에 대한 논의를 검토할 필요성이 있는 것으로 나타났다. 어획 및 양식압력 지표의 경우 Vörösmarty et al.(2010)에서는 강에서 일어나는 어업(Fishing)과 양식업(Aquaculture)을 구분하여 산정하였으나, 우리나라에서 담수의 어업은 미미하다고 판단하여 내수 면어업으로 통합하였으며, 담수에서의 어업 및 양식에 대한 국내 현황 및 문제점 검토가 필요하다고 생각된다. 농약 사용량 지표의 경우 현재는 토지피복분류상 농경지에 해당하는 면적에 단위면적당 농약살포량을 곱하여 산정하였으나, 지역적·농업작물별 부하량 차별화를 위해 실제 농업용지에 사용되는 농약 사용량을 검토할 필요성이 있고, 골프장 등의 비 농경지 지역에서 사용하는 농약 사용량을 고려할 필요성에 대한 검토가 추가적으로 필요할 것이다. 토사 유출량 지표는 Vörösmarty et al.(2010)의 경우 인구와 토사유실계수의 곱을 통해, 본 연구에서는 환경부 고시 USLE 공식을 통해 유추하였으나, 위 자료의 실제 측정데이터를 바탕으로 토사유출량을 추정할 수 있는 방법을 검토하거나 현 USLE 공식을 이용한 방법을 실측 데이터로 검증하는 과정을 병행할 수 있을 것으로 사료된다.

반응 지표의 수생태계 건강성 지표에 대해서는 현재 상수원보호구역을 적용하고 있는데, 이 지역에서는 상수원 보호구역 지정으로 인해 수생태계가 보호될 수는 있으나 초기 목적이 인간의 식수이용이므로, 수생태를 대표하는 보호구역의 유무 및 대체할 수 있는 간접지표를 검토할 필요성이 있다. 대체수원 잠재량 지표의 경우 현재 연구에서는 빗물 저장시설을 통한 대체수원을 검토하였으나 해수담수화 및 기타 대체수원으로 사용하고 있는 현황을 면밀히 검토하여 포함시킬 수 있을 것으로 보인다. 수자원 거버넌스 지표의 경우 현재 중권역 면적 대비 공무원 수를 사용하였으나 보다는 기관 및 사회의 정책 개선 및 반영 의지, 민원 수리 비율 등 효율적으로 거버넌스를 나타낼 수 있는 지표를 검토 후 수정 또는 추가할 수 있는 방안을 모색해야 할 것이다.

2) 지표 자료의 정량적 검토

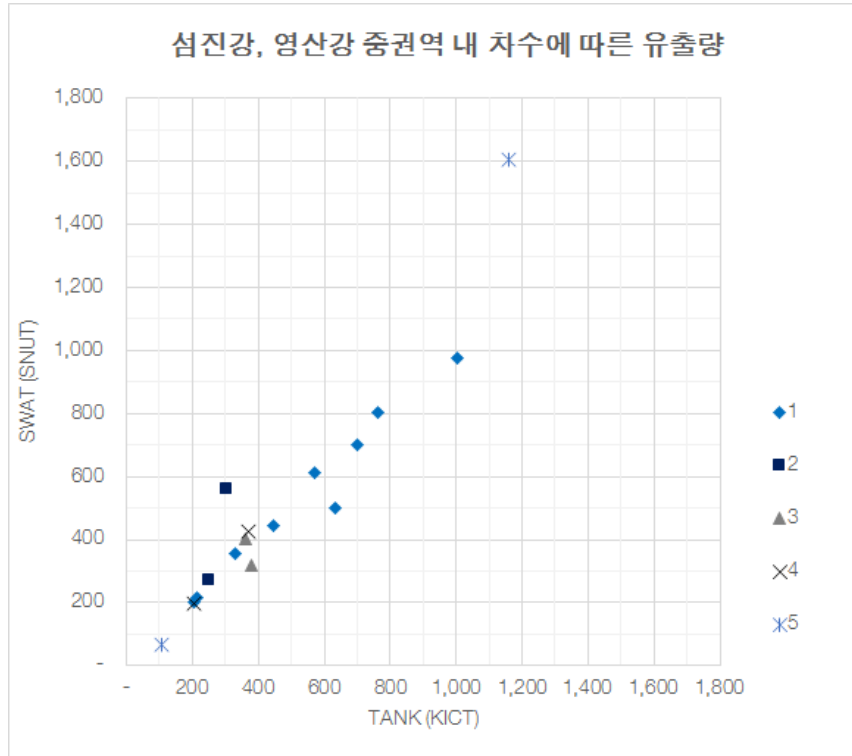
앞서 서술한 바와 같이 본 연구의 지표 계산에서 이용한 유출량 데이터는 TANK 모형을 통해 도출한 1994~2003년의 일 유출량 자료를 연평균으로 계산한 값이었기 때문에 시기상 다른 지표에 비해 오래된 자료를 이용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 지표 자료의 정량적 검토의 시험검정

과정으로, 최신의 입력 자료를 이용한 SWAT 모델링을 영산강·섬진강 유역을 시험대상지로 적용함으로써 유출량을 모의한 후 본 연구에서 이용한 유출량 결과와 비교하고자 하였다.⁸⁾

시험 검증 과정으로서 유출량 모의에 이용한 모델은 SWAT-CUP SUFI-2 기법을 이용하였고, 지형입력자료 구축을 위해 NGIS의 30m×30m 수치지형자료, 환경부의 1:25,000 중분류 토지이용 지도, 1:25,000의 정밀토양도를 활용하였다. 기상관련 인자들은 국토교통부의 2008~2012년의 강우 자료를 통해 일 강우(mm), 최고, 최저 기온(℃), 일사량(MJ/m³day), 풍속(m/s), 습도(%)를 취득하였고, 최고, 최저 기온, 일사량, 풍속, 습도는 기상청 자료를 이용하였다. 이를 통해 2008~2012년의 5년의 월별 유출량을 모의하였다.

위 SWAT 모델링을 통해 도출한 연 유출량과 본 연구에서 사용한 TANK 모형 기반 유출량을 섬진강 내 9개의 중권역, 영산강 내 8개의 중권역을 대상으로 비교한 결과는 <그림 5-30>과 같다. 일반적으로 유출량 모의는 하류 권역으로 이동할수록 유출량이 누적되어 커지지만, 본 연구에서는 한 중권역 내에서 생산될 수 있는 유량의 개념을 적용하였기 때문에 하천 차수를 활용하여 누적 영향을 제거함으로써 한 중권역 내 생산되는 수량으로 비교를 수행하였다. 대부분의 중권역에서 SWAT 모의결과는 TANK 모형 기준 ±15%의 결과를 나타냈으며, 지식천(1차 하천) -21%, 영산강하구연(5차 하천) -42%, 보성강(2차 하천) +85%, 섬진강하류(5차 하천) +38%로, 일부 하천에서는 기존 유출량 대비 큰 차이를 보였으나 전체 중권역 유출량 값에 전반적인 증가 또는 감소 현상은 보이지 않았다. 두 유출량 결과값의 분포의 신뢰도는 $R^2=0.895$ 로 나타났다.

8) 영산강, 섬진강 중권역의 유출량 자료 구축에 대한 상세 설명은 <부록 4>에 포함.



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-30. 섬진강, 영산강 중권역 내 차수에 따른 유출량 비교

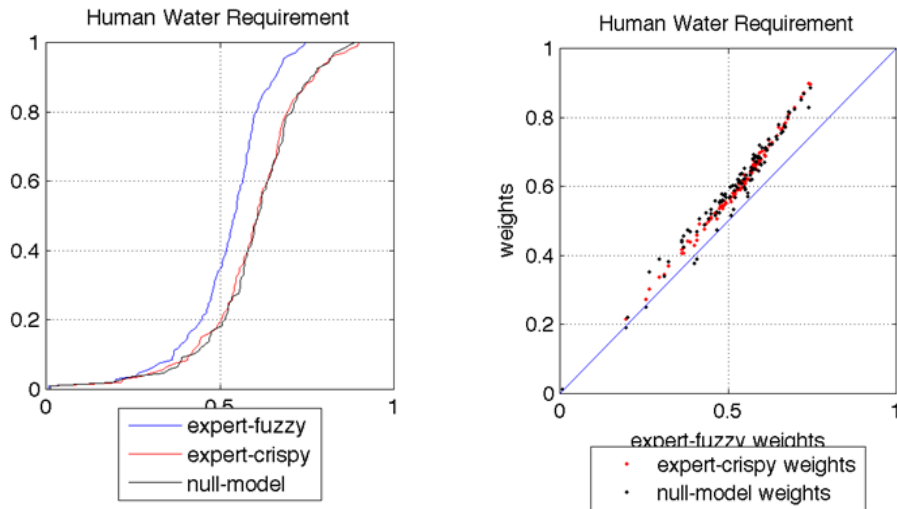
나. 가중치 적용에 따른 민감도 분석

본 연구에서는 AHP 설문조사를 통해 가중치를 도출하여 각 지표 및 지수별 통합 시 가중치를 적용하였다. 하지만 항목 내 여러 지표를 통합할 때 가중치를 적용하는 것이 논리적으로는 타당하나, 한정된 전문가 풀에서 도출한 주관적 가중치의 적용이 최종 결과에 얼마나 영향을 미치는지를 검토할 필요성이 있다. 가중치 적용에 따른 민감도 분석을 각 항목 및 지수별로 가중치 미적용(null-model), 전문가 설문을 통해 도출한 단일 가중치(expert-crispy), 전문가 설문을 통해 도출한 퍼지 가중치(expert-fuzzy)를 적용함에 따라 변수값의 분포를 확인하는 과정을 수행하였다. 또한

가중치 미적용에 따른 결과와 퍼지 가중치 적용 결과를 비교하여 변수를 산점도로 나타냄으로써 가중치 적용에 따른 값의 분포를 확인하고자 하였다.

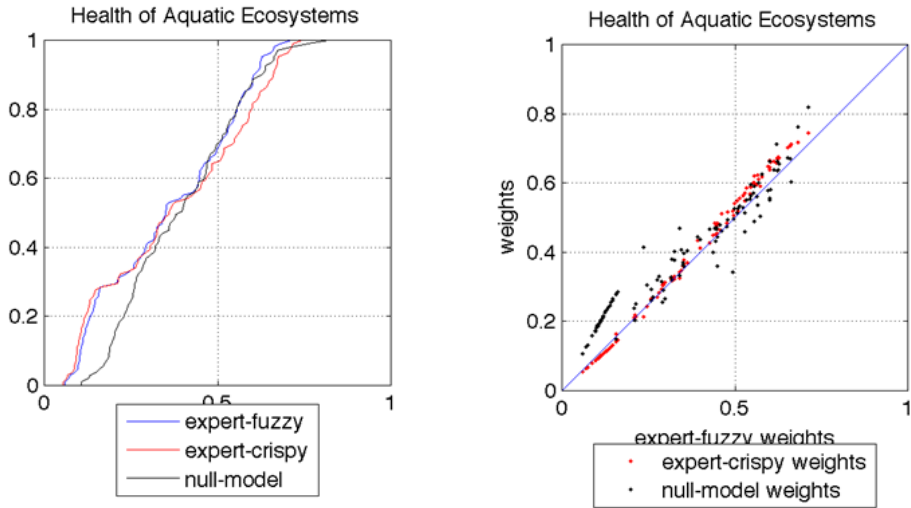
다섯 가지의 항목의 압력지수 및 총 압력·반응 지수, 지속가능한 물이용 지수의 민감도 분석 결과를 제시하고자 하였는데, 왼쪽 그래프는 각각의 지수를 산출할 때 ①가중치 미적용(null-model), ②단일 가중치 적용(expert-crispy), ③퍼지 가중치 적용(expert-fuzzy)한 결과를 나타낸 것이다.

〈그림 5-31〉~〈그림 5-35〉는 인간 물 요구량의 압력지수를 도출할 때의 가중치 적용 결과이며, 가중치 미적용과 단일 가중치 적용 결과는 유사하게 도출되었으나, 퍼지 가중치를 적용한 결과 분포의 치우침이 완화되어 고른 분포양상을 나타냈다.



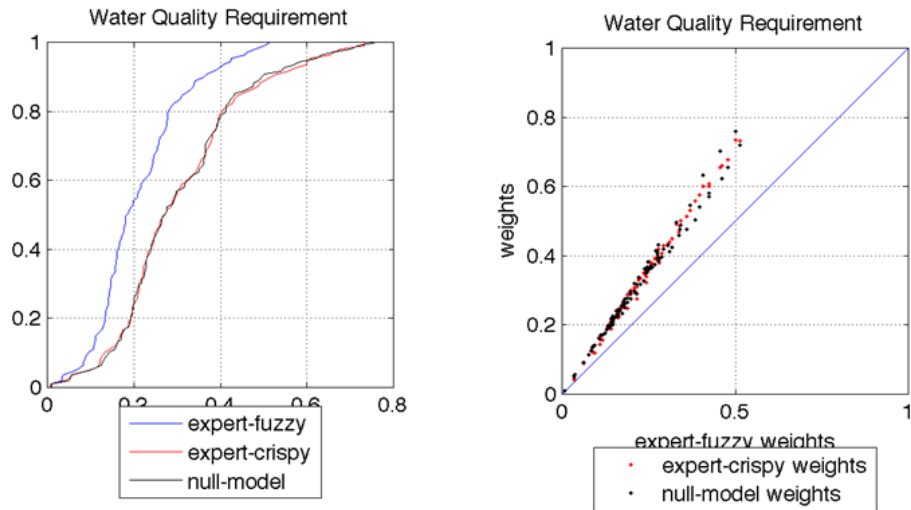
자료: 필자 작성.

■ 그림 5-31. 인간 물 요구량 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포



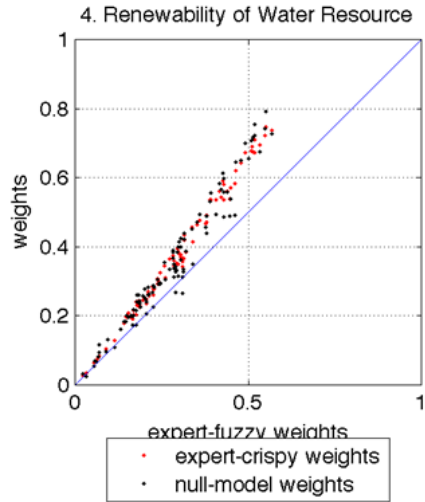
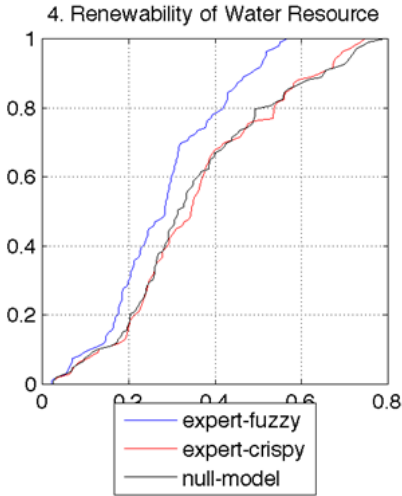
자료: 필자 작성.

■ 그림 5-32. 수생태계 건강성 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포



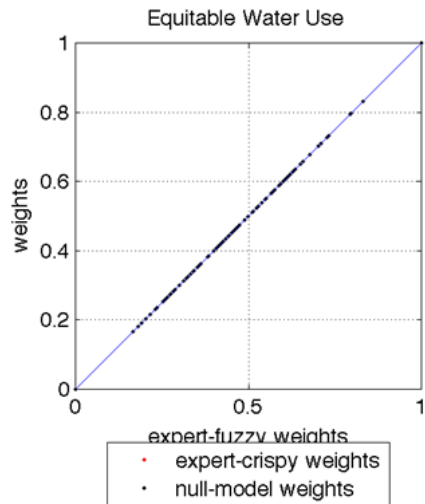
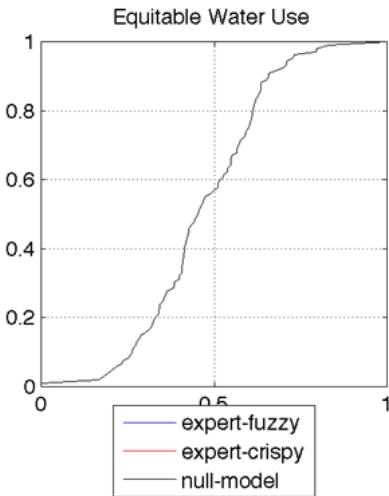
자료: 필자 작성.

■ 그림 5-33. 수질 요구량 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포



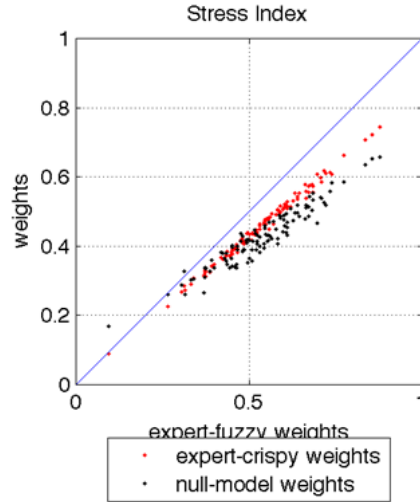
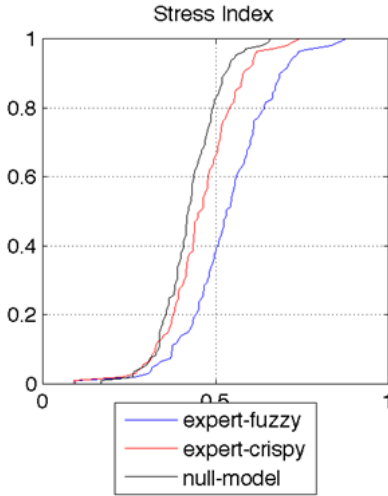
자료: 필자 작성.

■ 그림 5-34. 수자원 재생능력 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포



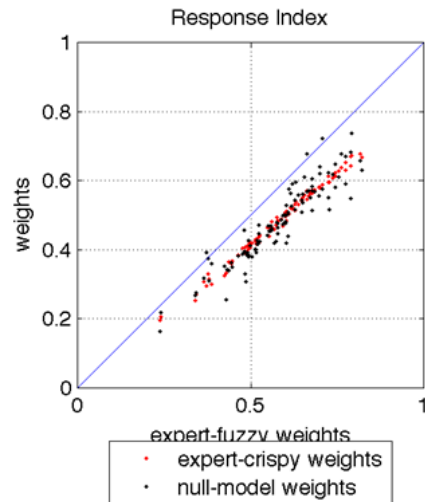
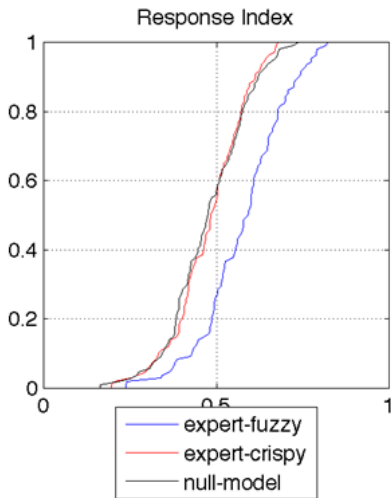
자료: 필자 작성.

■ 그림 5-35. 물관리 형평성 압력지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포



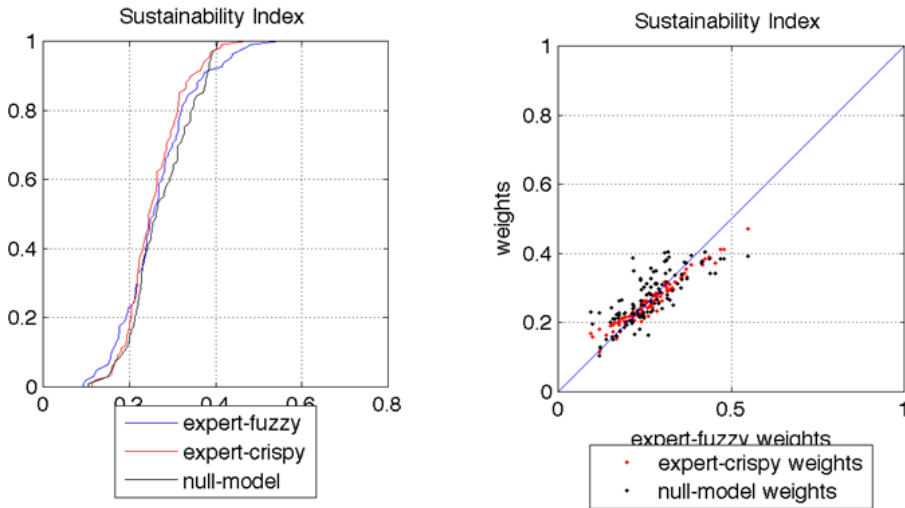
자료: 필자 작성.

그림 5-36. 압력 지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포



자료: 필자 작성.

그림 5-37. 반응 지수의 가중치 적용에 따른 변수 분포



자료: 필자 작성.

■ 그림 5-38. 지속가능한 물이용 지수의 기중치 적용에 따른 변수 분포

다. 지표의 통계적 일관성 분석

본 연구에서는 지속가능한 물이용 지수를 구성하는 다섯 가지 항목과 각 항목별로 지표를 구성하였다. 각각의 지표는 상위 항목의 성격과 평가 목적에 맞게 분류되었으나 실제 데이터를 이용한 분석 결과가 상위 항목의 결과와 부합하는지 확인하기 위해, 각 지표와 상위항목 간의 상관관계(correlation)를 확인함으로써 일관성 분석(coherent analysis)을 수행하여야 한다. Vörösmarty et al.(2010)에서는 특정 지표가 상위 주제의 최종 값에 독립적인 영향을 미쳤는지를 확인하기 위해 각 지표가 상위 주제에 미치는 기여도 분석을 수행하였고, 2014 EPI에서는 각각의 지표가 상위 주제의 최종값과 상관성이 나타나는지를 확인하기 위해 일관성분석을 수행하였다. 본 연구에서는 2014 EPI와 마찬가지로, 각각의 지표와 상위 항목간의 상관관계로 일관성을 분석함으로써 지표 선정의 타당성을 확인하고자 한다. 상관관계 분석은 pearson correlation을 이용하여

지표 간 상관성 분석(표 5-9), 각 지표의 항목지수 기여도 분석(표 5-10), 항목지수 간 상관성 분석(표 5-11), 항목지수와 최종 지속가능한 물이용 지수와와의 상관성 분석(표 5-12)을 수행하였다.

지표 간 상관성 분석 결과, 대부분의 지표는 독립적인 관계를 유지했으나, 농경지 및 불투수층의 토지이용 지표와 오염부하량 지표 사이에서 높은 상관관계를 나타내는 것을 보였다. 이는 농경지 및 도시지역에서 특히 높은 오염부하가 발생하기 때문이며, 이는 Vörösmarty et al.(2010)에서도 유사한 결과를 얻었음을 확인할 수 있어, 지표 선정의 중복으로 이해하는 것보다 매커니즘에 의한 관련이 높은 것으로 간주하였다.

항목지수 간 상관성 분석, 그리고 항목지수와 최종 지속가능한 물이용 지수의 상관성 분석을 통해 확인할 수 있었던 결과는 물관리 형평성 지수가 다른 항목지수 뿐 아니라 최종 지속가능성 지수와 음의 상관관계를 가진다는 것이다. 이는 물관리 형평성의 압력 및 반응 지수를 구성하는 지표가 대도시를 중심으로 높은 변수값을 나타냈는데, 이러한 지역은 유역 환경이 자연적이지 않고 오염 부하량이 높은 지역인 것으로 보인다. 따라서 이러한 음의 상관관계는 위 항목 및 지표가 역기능을 하는 것이 아니라, 대도시가 물환경의 지속가능성을 나타낼 수 있는 경제·사회적 역량을 고려할 수 있는 항목으로 간주하여야 한다.

표 5-9. 지표 간 상관성 분석

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1.00	0.46	0.30	0.00	0.15	0.09	0.40	0.50	0.61	0.60	0.59	0.82	0.65	0.50	0.38	0.58	0.47	0.24	-0.64
2		1.00	0.58	-0.08	0.07	0.10	0.21	0.34	0.06	0.72	0.74	0.30	0.13	0.54	0.37	0.71	0.32	0.20	-0.48
3			1.00	-0.04	-0.07	-0.11	0.32	0.34	0.08	0.38	0.46	0.39	-0.07	0.18	0.75	0.24	0.55	0.28	0.02
4				1.00	0.50	0.34	0.05	-0.08	0.03	-0.11	-0.12	0.03	0.04	-0.12	-0.08	-0.05	0.07	-0.09	-0.05
5					1.00	0.70	0.09	0.17	0.14	0.02	0.02	0.15	0.19	-0.02	-0.09	0.09	-0.02	0.06	-0.20
6						1.00	0.18	0.19	0.13	-0.01	-0.02	0.11	0.26	-0.02	-0.21	0.04	-0.10	-0.07	-0.19
7							1.00	0.85	0.26	0.14	0.14	0.46	0.23	0.03	0.26	0.04	0.32	-0.04	-0.27
8								1.00	0.28	0.29	0.30	0.48	0.21	0.19	0.41	0.23	0.37	0.21	-0.35
9									1.00	0.13	0.14	0.70	0.72	0.10	0.18	0.12	0.26	0.15	-0.31
10										1.00	0.98	0.27	0.15	0.91	0.36	0.90	0.37	0.25	-0.58
11											1.00	0.30	0.13	0.90	0.41	0.88	0.42	0.29	-0.54
12												1.00	0.70	0.12	0.49	0.22	0.55	0.18	-0.40
13													1.00	0.13	-0.11	0.13	0.06	-0.07	-0.51
14														1.00	0.16	0.79	0.17	0.20	-0.53
15															1.00	0.26	0.76	0.52	0.02
16																1.00	0.32	0.22	-0.64
17																	1.00	0.24	-0.12
18																		1.00	0.01
19																			1.00

주: 0.70 이상의 상관성을 나타내는 값은 굵은 글씨로 처리함
자료: 필자 작성.

표 5-10. 지표의 항목지수 기여도 분석

	지표1	지표2	지표3	지표4	지표5	지표6
인간 물 요구량	0.72	0.93	0.70	-	-	-
수생태계 건강성	0.76	0.87	0.78	0.29	0.26	0.25
수질 요구량	0.79	0.80	0.76	0.65	0.70	-
수자원 재생능력	0.79	0.73	0.72	0.67	-	-
물관리 형평성	1.00	-	-	-	-	-

주: 0.70 이상의 상관성을 나타내는 값은 굵은 글씨로 처리함
자료: 필자 작성.

표 5-11. 항목지수 간 상관성 분석

	인간 물 요구량	수생태계 건강성	수질 요구량	수자원 재생능력	물관리 형평성
인간 물 요구량	1.00	0.12	0.79	0.72	-0.53
수생태계 건강성		1.00	0.17	0.03	-0.24
수질 요구량			1.00	0.65	-0.67
수자원 재생능력				1.00	-0.34
물관리 형평성					1.00

주: 0.70 이상의 상관성을 나타내는 값은 굵은 글씨로 처리함
자료: 필자 작성.

표 5-12. 항목지수와 지속가능한 물이용 지수 간의 상관성 분석

	인간 물 요구량	수생태계 건강성	수질 요구량	수자원 재생능력	물관리 형평성
지속가능성 지수	0.90	0.38	0.82	0.84	-0.46

주: 0.70 이상의 상관성을 나타내는 값은 굵은 글씨로 처리함
자료: 필자 작성.

라. 기존 지수와 비교 방안

1) 통합 지수

이동률 외(2013)는 우리나라 115개 중권역을 대상으로 물이용 취약성, 홍수 취약성, 하천환경 취약성 항목 아래 26개 지표를 고려하여 평가한 통합수자원평가지수를 개발하였다. 통합수자원평가지수는 인간의 물이용과 관련된 항목을 물이용 취약성 지수로 표현할 뿐 아니라, 물이용과 밀접한 관계에 있는 인프라, 토지이용, 투자비용 등을 반영한 홍수취약성 지수, 그리고 수질을 고려하는 하천환경취약성 지수를 포함함으로써 광범위하고 체계적인 수자원 이용 현황을 평가하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 통합수자원평가지수를 이용하여 본 연구결과의 최종 지수와 비교함으로써 본 연구결과의 신뢰성을 검증할 수 있다.

또 다른 지수로, 국립환경과학원(2013)에서 우리나라의 시·군·구 행정구역별 기후변화의 취약성을 평가한 항목 중 이수분야의 취약성 산정을 위한 평가를 지수 검증에 이용할 수 있다. 본 연구는 앞으로의 지속가능한 물이용의 잠재능력을 현재의 압력(Stress)과 대응능력(Response)을 평가함으로써 산정하고 있는데, 국립환경과학원(2013)의 취약성 평가지수에서는 IPCC에서 이용하고 있는 기후노출(Climate Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응능력(Adaptive Capacity) 구조를 이용하여 우리나라의 이수분야에 대한 지수 평가를 수행하였다. 평가 단위가 행정적 유용성을 위해 행정구역단위로 평가되어 있어 본 연구에서 평가한 중권역 단위로 변환해서 비교해야 한다는 단점이 있으나, 본 연구에서 직접적으로 반영하지 못한 기후 조건을 포함하고 있고, 본 연구에서 평가하고 있는 변수와 유사한 자료가 확인되어 최종 지수를 비교하는 데 시사점을 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

2) 대분류(주제)별 지수

최종적으로 도출된 종합 지수 이외에도 본 연구에서 구축한 다섯 가지 대분류(주제)별 지수 검증을 시도할 수 있다. 현재 대분류(주제)별 검증을 시도할 수 있는 국내 지수는 아래 표와 같다. 수자원장기종합계획 출처의 지수 중 홍수위험도는 강우사상을 바탕으로 한 기상지수, 불투수지역 및 홍수위험지역을 바탕으로 한 수문지형지수, 인구밀도 및 재정자립도를 바탕으로 한 사회경제지수, 제방정비율 및 배수펌프장 수를 바탕으로 한 홍수방어취약성지수를 통합한 형태로 구성되어 있다. 또한 전국 840개 표준단위유역을 대상으로 1994~2007년의 평가가 수행되어있어 본 연구의 중권역 평가와 비교가 가능할 것으로 보인다.

수자원장기종합계획의 또 다른 지표로, 하천환경평가지표가 구축되어 있는데, 하천 및 하천주변의 환경의 자연성을 평가한 하천자연도지수, 하천 및 하천주변환경의 서식처로서의 적합성을 평가한 생물서식처지수, 지역 내 친수문화성 및 친수활동을 반영한 친수성지수, pH 및 BOD 등을 활용하여 평가한 수질지수로 구성되어있다. 하지만 우리나라 5대강 본류 23개 구간과 하천 29개 구간을 대상으로만 평가되어있기 때문에 하천환경평가지표와 관련하여 전 권역에 걸친 검증을 위해서는 추가적인 자료 수집 및 대안 지수 수집이 필요할 것으로 보인다.

또 다른 대표적인 검증지표에는 수생태계건강성평가 보고서에서 평가하고 있는 항목들이 있는데, 이는 한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강을 대상으로 수질, 부착조류, 저서성 대형무척추동물, 어류, 서식 및 수변환경의 다섯 가지 항목을 고려하여 각 대권역 및 중권역별로 지수 및 등급을 도출하고 있다. 이 보고서에서 이용된 자료는 간접 지표가 아니라 광범위한 현장 조사를 바탕으로 작성되었기 때문에 실제 중권역별 현황을 나타내고 있어 본 연구에서 수행한 간접지표와 비교함으로써 타당성을 검증하기에 적절하다. 위의 각 지수를 본 연구에서 구축한 결과와 비교하여 검증 가능할 것으로 판단되는 항목은 <표 5-13>과 같다.

표 5-13. 대분류(주제)별 검증 지수 예시

주제	압력
인간 물 요구량	홍수 위험도 중 기상지수 (수자원장기종합계획)
	홍수 위험도 중 홍수방어취약성 지수 (수자원장기종합계획)
수생태계 건강성	하천환경평가지표 중 하천자연도 (수자원장기종합계획)
	서식 및 수변환경 (수생태계건강성평가)
	하천환경평가지표 중 생물서식처 (수자원장기종합계획)
수질 요구량	좋은 물 등급 (환경백서)
	수질, 부착조류, 저서성 대형무척추동물, 어류 (수생태계건강성평가)
	하천환경평가지표 중 수질 (수자원장기종합계획)
수자원 재생능력	홍수위험도 중 수문지형지수 (수자원장기종합계획)
물관리 형평성	홍수위험도 중 사회경제지수 (수자원장기종합계획)
	하천환경평가지표 중 친수성 (수자원장기종합계획)

자료: 국토교통부(2011), 「수자원장기종합계획」; 환경부(2011), 「수생태계건강성평가」; 환경부(2012), 「환경백서(2011)」에서 제작성.

4. 소결

가. 지표 결과 해석의 한계점

본 연구의 평가단위는 표준 중권역이며, 연구 결과의 활용을 위해서는 평가단위가 가지는 유용성과 한계점을 이해하는 것이 중요하다. 우선 중권역 단위의 평가는 하천의 흐름에 따른 집수지역을 반영하고 있어 하천 흐름에 따른 유출량, 오염물질 부하량 등을 모의하기에 적절하다. 따라서 본 연구의 기본 단위는 유역으로 설정되었고, 행정구역 단위로 집계되고 있는 일부 자료를 이용하기 위해서는 중권역 내 행정구역 면적비를 통해 재계산함으로써 중권역 범위로 반영하였다. 하지만 현재 우리나라의 인프라 운영, 정책 적용 등은 현재 행정단위로 이루어지고 있어 본 연구 결과를 바탕으로 하는 직접적인 정책 반영에는 부분적 제약으로 작용할 수 있다. 또한 분석 단위가 중권역이기 때문에 이보다 작은 공간적 단위인 지역(regional)이나 국지적(local) 범위에서는 인프라 위치나 기술, 인구밀집 정도에 따라 사람들의 수자원 접근성이나 위협요소 등의 실제 영향은 달라질 수 있다. 따라서 현재 수준에서 물환경을 고려하는 구체적인 결론을 위해서는 단위유역 수준으로의 평가를 고려할 수도 있을 것이다.

또한 본 연구에서는 지표 통합을 위해 모든 지표가 표준화 과정을 거쳐 0~1의 같은 범위를 가지도록 표현하였다. 하지만 이는 지표 내에서의 상대적인 값이기 때문에, 가중치를 반영한 압력지수와 반응지수를 서로 비교하는 것으로 한 중권역 내에서 스트레스가 높고 역량이 낮다는 등의 결론을 내리기는 쉽지 않다. 즉, 한 중권역 내에서 압력지수(또는 지표)보다 반응지수(또는 지표)가 높다고 해서 물이용이 안전하다는 결론을 내리기는 어렵다. 한 예로, 중권역 내 수질 압력지수가 0.3, 반응지수가 0.4라고 했을 때, 이는 전체 중권역 중에서 해당 중권역의 압력수준과 반응수준을 표현할 뿐, 중권역이 수질항목에서 안전한 수준을 나타내지는 않는다. 우리나라에서 수질을 정화하는 반응지수가 전반적으로 낮은 경우에는 오히려 정화되지 못한 채 공급되거나 배출되는 경우도 있음을 견지해야 한다. 따라서 본 지수는 전체 중권역 중에서 상대적인 위치를 표현하고 있으며, 따라서 전체 중권역 중 내에서 해당 중권역이 가지는 상대적인 역량으로 이해해

야 할 것이다.

나. 향후 검증 및 보완 방향

향후 지표 평가 및 통합 과정상의 다양한 검증을 통해 개선방안을 도출함으로써 개선방향을 설정하고 시도할 수 있을 것이다. EPI도 2006년부터 꾸준히 지표 평가하고 있지만 해에 걸쳐 데이터 업데이트 뿐 아니라 일부 지표 및 통합과정상의 민감도 분석을 수행하여 가중치 및 통합방법을 개선함으로써 환경성과지수의 신뢰성을 높이고자 노력하고 있다. 따라서 향후 과제로서 원 데이터 신규화, 데이터 처리방법 개선 등을 통해 지표의 변수 데이터를 개선하거나 항목 내 단일지표로 구성되어 있는 경우 지표 추가, 지표의 상관성 분석을 통한 지표 교체 등의 방법도 본 과제의 결과에 대한 신뢰도를 개선할 수 있는 방안이 될 수 있다. 또한 전문가 설문을 통한 주관적 가중치 도출방법 이외에 엔트로피 개념을 이용한 객관적 가중치 도출 등 최종 지수 도출까지의 과정에 기여하는 인자에 다양한 방법을 시도함으로써 최적의 방법을 선택함으로써 최종 지수의 향상된 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.



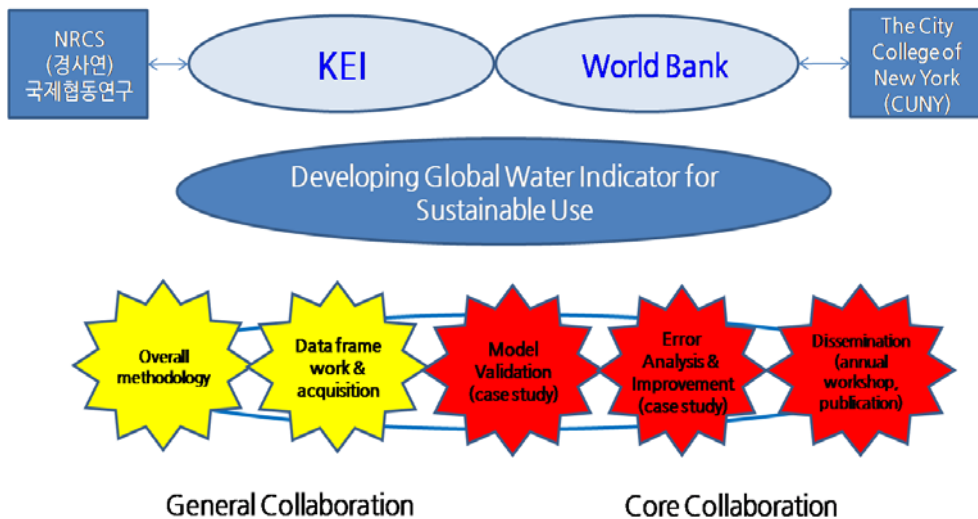
제6장

전 지구 물 지표의 우리나라 대상 평가 및 검증⁹⁾

9) 본 장의 내용은 경제인문사회연구회 연구역량국제화사업을 통해 수행된 국제협력연구로, 한국환경정책·평가연구원 책임 이하, 세계은행(World Bank)이 협력연구기관으로 참여하였으며 Marcus Wijnen(World Bank), Ik-Jae Kim(World Bank 파견근무), Charles Vörösmarty(뉴욕시립대), Pamela Green(뉴욕시립대)이 참여연구진으로 포함되었다.

1. 연구배경 및 목적

우리나라 물이용의 지속가능성을 평가하기 위해 본 연구에서 자체개발한 중권역별 물이용 지속가능성 지수를 활용할 뿐 아니라 세계은행(WB)과 국제협력을 통해 전 지구 대상 관련 지표, 지수를 활용하고자 한다. 현재 세계은행과 공동으로 전 지구 물 지표 개발 사업을 진행 중이며, 지표의 개발은 기존의 Vörösmarty et al.(2010) 자료(이하 V2010)를 기반으로 진행되고 있으며 뉴욕시립대(City College of New York)의 Vörösmarty 교수가 참여하고 있다. 특히 한국환경정책·평가연구원은 전 지구 물 지표의 우리나라 적용·검증을 통해 물 지표 개발에 기여하고 있다(그림 6-1).



자료: 필자 작성.

■ 그림 6-1 국제협동연구 추진체계

V2010¹⁰⁾은 전 지구를 대상으로 인간 물 안보 및 생물다양성을 위협하는 요인을 지표 구축을 통해 평가하였다. 이는 기존의 수자원 관리를 인간의 물이용이라는 측면뿐 아니라 생물다양성이라

는 관점에서 생태계를 유지하기 위한 물이용의 관점을 환기시킨 대표적인 연구라고 할 수 있다. 또한 인간이 수자원을 이용하기 위해 설치한 댐, 저수지, 관개시설 등 다양한 인프라가 기존에 알려진 생태계의 부정적인 영향뿐 아니라 인간의 물이용을 원활히 도울 수 있는 측면을 강조함으로써 수자원 인프라의 긍정적인 혜택 효과를 재조명하였다. 본 국제협동연구에서는 V2010에서 전 지구 기반으로 구축한 지표 자료 및 통합 지표를 우리나라 범위에서 검증하고자 한다. 우리나라를 대상으로 구축한 상세 자료를 활용하여, 전 지구 기반 지표를 우리나라 범위에서 검증하기 위해 구축된 자료의 비교, 세부 지표를 활용하여 산정된 통합지표의 비교 등의 분석을 수행하고자 한다.

2. 연구 방법

가. 자료 검토

V2010의 연구에서는 전 지구를 대상으로 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 균일한 격자를 구축하여 동일면적상의 영향을 계량화하고자 하였다. 하지만 본 연구는 수문 영향을 중점적으로 판단하고자 중권역을 기본 단위로 평가하였다. 따라서 본 연구의 중권역 대상 평가결과를 0.5° 의 격자(그리드) 자료로 변환하여 비교를 수행하였다.

또한 V2010의 연구에서는 지표 평가를 위해 사용한 데이터가 시기상 동일한 전 지구적인 자료여야 했기 때문에, 시간적으로 오래된 자료를 사용하고 있음을 일부 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구와의 비교를 통해 한반도를 중심으로 구축된 최근의 자료를 통해 최신의 평가결과와 비교할 수 있도록 구축하였다.

10) 해당 연구의 체계 및 지표는 <부록 1> 참고

표 6-1. Vörösmarty et al.(2010)의 자료 및 평가방법

주제	#	구동요인	데이터	시기	평가 방법
유역교란	1	경작지 (Cropland)	농경지	2000	그리드 셀당 농경지 비율
	2	불투수지역 (Impervious Surfaces)	불투수층	2004	그리드 셀당 불투수층 비율
	3	가축 밀도 (Livestock Density)	전 세계 가축 분포	1984	몸집 가중치를 가축 분포와 곱하여 도출
			질소 배설물로 도출한 가축 9종의 몸집가중치	1994	
4	습지 단절 (Wetland Disconnectivity)	습지	2001	과거 습지였던 곳 중 농경지 및 불투수층으로 토지이용이 바뀐 곳의 비율	
		농경지	2000		
		불투수층	2004		
수질오염	5	토양염류화 (Soil Salinisation)	토양의 전기전도도(EC)	2005	농경지가 25% 이상인 그리드 셀 중 EC 4dS/m를 초과하는 토양
	6	질소 부하량 (Nitrogen Loading)	질소 부하	1994	Strahler 5차 이상의 하천에서 과거 및 현재 질소농도 비교를 통해 인간으로 인한 질소부하
	7	인 부하량 (Phosphorus Loading)	점, 비점, 인위적 인 부하	1995, 2007	점, 비점, 인위적 인 부하량
	8	수은 오염 (Mercury Deposition)	수은 오염	2000	산업혁명 이후의 이온 및 입자상태의 수은 오염
	9	농약 부하량 (Pesticide Loading)	국가별 평균 농약 사용량	2005	농경지에 사용한 농약 살포량
	10	토사 부하량 (Sediment Loading)	인구	2000	총 부유 유사량의 간접지표로 인구영향을 이용
			인구당 토사유출 간접지수	1960~1973	
	11	유기물질 부하량 (Organic Loading)	CN 비	-	물 속의 불안정한 유기탄소를 계산하기 위해 N부하량과 CN비를 이용
			질소 부하	1994	
12	잠재적 산성화 (Potential Acidification)	토양 pH	2006	SOx와 NOx의 영향으로 인한 pH	
13	열적 변형 (Thermal Alteration)	발전소에서 사용하는 물이용량	2005	발전소에서 사용하고 내보낸 물의 양이 열적 변형을 가져왔다고 보고, 관개량에서 소모량을 빼 산정	

표 6-1. Vörösmarty et al.(2010)의 자료 및 평가방법 (계속)

주 제	#	구동요인	데이터	시기	평가 방법
수 자 원 개 발	14	댐 밀도 (Dam Density)	물 소비량	2000	유출량을 일반 및 산업용수 이용량으로 나눔
			유출량	2000	
	15	하천의 연속성 단절 (River Fragmentation)	인구	2000	유출량을 인구*100m ³ 로 나눔
			유출량	2000	
	16	소모적 물 손실 (Consumptive Water Loss)	농경지	2000	유출량을 농경지면적으로 나눔
			유출량	2000	
	17	인간 물 스트레스 (Human Water Stress)	대형 댐	2007	Vörösmarty et al.(1997)에 따라 하천네트워크에 따른 강 유량 나이 계산
			하천 네트워크	2000	
			유출량	2000	
18	농업 물 스트레스 (Agricultural Water Stress)	대형 댐	2007	그리드 셀별 댐 개소수	
		중소형 댐	-		
19	흐름 변형 (Flow Disruption)	대형 댐	2000	댐으로 인해 파편화된 강 면적비	
생 물 요 인	20	외래어종 비율 (Non-Native Fishes (%))	외래어종 비율(%)	2008	그리드 셀별 외래어종 비율을 5, 25, 95%의 3단계로 표현
	21	외래어종 수 (Non-Native Fishes (#))	외래어종 수(#)	2008	그리드 셀별 외래어종의 종수를 5, 20, 70의 3단계로 표현
	22	어업 압력 (Fishing Pressure)	어업 생산량	1997 -2006	생산력 대비 어업량. 생산력은 육상 NPP로 간접 산정함
			MODIS NPP	2000	
	23	수경재배 압력 (Aquaculture Pressure)	수경재배 생산량	1997 -2006	유출량 대비 수경재배 생산량
유출량			2000		

자료: Vörösmarty et al.(2010)에서 재작성.

본 연구 및 국제협력연구에서 구축한 지표의 주요 데이터와 시기상 차이를 비교한 내용은 <표 6-2>와 같다.

표 6-2. 국제협력연구를 위한 주요 데이터 비교

변수	Vörösmarty et al.		KEI	
	시기	자료 타입	시기	자료 타입
유출량	2000	55km GRID	1994~2003	중권역
물이용량	2000(일반) 1995(산업용)	55km GRID	2010	중권역
인구	2000	1km GRID	2011	중권역
농경지	2000	10km GRID	2009	30m GRID
불투수층	2004	1km GRID	2009	30m GRID
댐 위치 및 유효수량	2007	point	2012	point
하천 네트워크	2000	55km-based LINE	-	polygon
질소 부하	1994	55km GRID	2009~2011	중권역
인 부하	1995(비점), 2007(인위방출)	55km GRID, 200km GRID	2009~2011	중권역
농약 사용	2005	국가단위	2011	국가단위
유기물 부하	1994	55km GRID	2009~2011	중권역
가축 분포	1984	111km GRID	2011	중권역
과거 습지	2001	polygon	1975	60m GRID
외래어종	2008	55km GRID	2011	중권역
내수면 어업량			2013	행정구역

자료: 필자 작성.

나. 평가방법

국제협력연구를 위해 대부분의 지표는 V2010의 보완자료를 통해 평가방법론을 확인하여 평가하였으나, 일부 지표의 경우 방법론을 국내에 그대로 적용하기 어려운 점이 있어 원래 평가방법과 크게 달라지지 않는 판단범위 내에서 국내에서 평가하기 적합하도록 수정하여 사용하거나 삭제하였다.

V2010에서 토사 부하량 지표의 계산은 인간의 개발행위를 통한 토사 유출량을 모의하고자 인구밀도에 토양 부식성 값을 곱하는 간접적인 방법을 사용하였으나, 본 연구에서는 표토침식기준 환경부고시 자료를 활용하여 USLE 공식을 적용하여 계량화된 방법으로 도출하였다. 또한 V2010에서는 소모성 물 손실량을 계산하기 위해 가정, 농업용 용수는 전체 사용량을 적용하고, 공업용 물이용에 한정하여 회귀량을 적용하고 있으나, 본 연구에서는 가정, 공업, 농업용수 이용량에 세 부분의 일반회귀율(35%, 35%, 65%)을 적용하여 도출하였다.

또한 토양염류화, 수은 오염 지표는 우리나라 내에서 영향이 크지 않은 것으로 확인되어 제외하였고, 잠재적 산성화, 열적 변형, 어업 압력의 지표는 국내 자료 접근이 용이하지 않아 반영하지 않았다. 또한 외래어종 수 지표는 V2010에서는 종 수를, 우리나라에서는 외래어종 개체 수 개념을 적용함에 따라 차이가 있어 데이터를 구축하기 어려워 제외되었다. 이로써 V2010의 원 23개의 지표 중 우리나라를 대상으로 평가 가능한 지표는 17개로 추려졌으며, V2010에서 사용한 가중치를 그대로 사용할 수 없기 때문에, 원 가중치 중에서 삭제되고 남은 지표로 가중치를 재조정(rescale)하였다.

■ 표 6-3. 비교연구를 위한 가중치 재조정 결과

주제(Theme)	구동변수(Driver)	V2010 가중치	비교연구를 위한 가중치 재조정
유역 교란 (Catchment Disturbance)	경작지 (Cropland)	0.38	0.38
	불투수지역 (Impervious Surfaces)	0.28	0.28
	가축 밀도 (Livestock Density)	0.20	0.20
	습지 단절 (Wetland Disconnectivity)	0.14	0.14

■ 표 6-3. 비교연구를 위한 가중치 재조정 결과 (계속)

주제(Theme)	구동변수(Driver)	V2010 가중치	비교연구를 위한 가중치 재조정
오염 물질 (Pollution)	토양염류화 (Soil Salinisation)	0.13	(삭제)
	질소 부하량 (Nitrogen Loading)	0.14	0.21
	인 부하량 (Phosphorus Loading)	0.13	0.19
	수은 오염 (Mercury Deposition)	0.13	(삭제)
	농약 부하량 (Pesticide Loading)	0.15	0.22
	토사 부하량 (Sediment Loading)	0.07	0.10
	유기물질 부하량 (Organic Loading)	0.18	0.27
	잠재적 산성화 (Potential Acidification)	0.05	(삭제)
	열적 변형 (Thermal Alteration)	0.02	(삭제)
수자원 개발 (Water Resources Development)	댐 밀도 (Dam Density)	0.09	0.09
	하천의 연속성 단절 (River Fragmentation)	0.03	0.03
	소모적 물 손실 (Consumptive Water Loss)	0.34	0.34
	인간 물 스트레스 (Human Water Stress)	0.26	0.26
	농업 물 스트레스 (Agricultural Water Stress)	0.19	0.19
	흐름 변형 (Flow Disruption)	0.09	0.09
생물요인 (Biotic Factors)	외래어종 비율 (Non-Native Fishes (%))	0.13	0.22
	외래어종 수 (Non-Native Fishes (#))	0.14	(삭제)
	어업 압력 (Fishing Pressure)	0.27	(삭제)
	수경재배 압력 (Aquaculture Pressure)	0.46	0.78

자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

다. 민감도 분석

V2010의 연구를 본 연구에서의 결과와 비교하기 위해서 일부 변수 및 지표평가방법이 조정되었고, 이에 따라 적용할 수 있는 가중치가 변형된다. 이러한 일련의 과정에서 나타날 수 있는 결과물의 변동폭의 민감도를 분석하기 위해 본 연구에서는 지표 및 지수의 결과물로 민감도 분석을 수행하였다.

우선 지표별 분석에서는 V2010의 원자료(step 2)와 본 연구의 원자료를 1:1로 비교함으로써 원자료의 분포를 확인하기 위해 산점도를 도출하였다. 또한 한반도를 중심으로 도출한 본 연구의 연구결과를 V2010의 원 자료에 덧입힌 뒤 표준화한 자료를 V2010의 표준화 자료와 비교함으로써, 본 연구에서 수행한 결과를 전 세계적인 지표값 수준에서 비교하여 이를 산점도로 나타내었다.

또한 주제별 및 최종 지수의 변동폭을 확인하고자 하였다. 이에 앞서, 비교 연구에서는 V2010의 23개 지표가 모두 이용되지 않았기 때문에 삭제된 6개 지표를 제외한 나머지 17개 지표에 대한 가중치를 재조정하여야 했다. 이에 따라 재조정된 가중치를 V2010의 지표값에 적용함으로써 원래 가중치로 23개 지표에 대한 평가결과와 재조정된 가중치로 17개 지표에 대한 평가결과를 비교함으로써 가중치의 민감도 분석을 수행하고자 이를 산점도로 표현하였다. 조정된 가중치는 V2010 중 17개 지표와 본 연구의 17개 지표를 대상으로 각 주제 및 최종지수별로 통합 계산하였으며, 각각 분포의 상관성을 확인하고자 산점도로 나타내었다.

3. 평가 결과

가. 지표별 비교

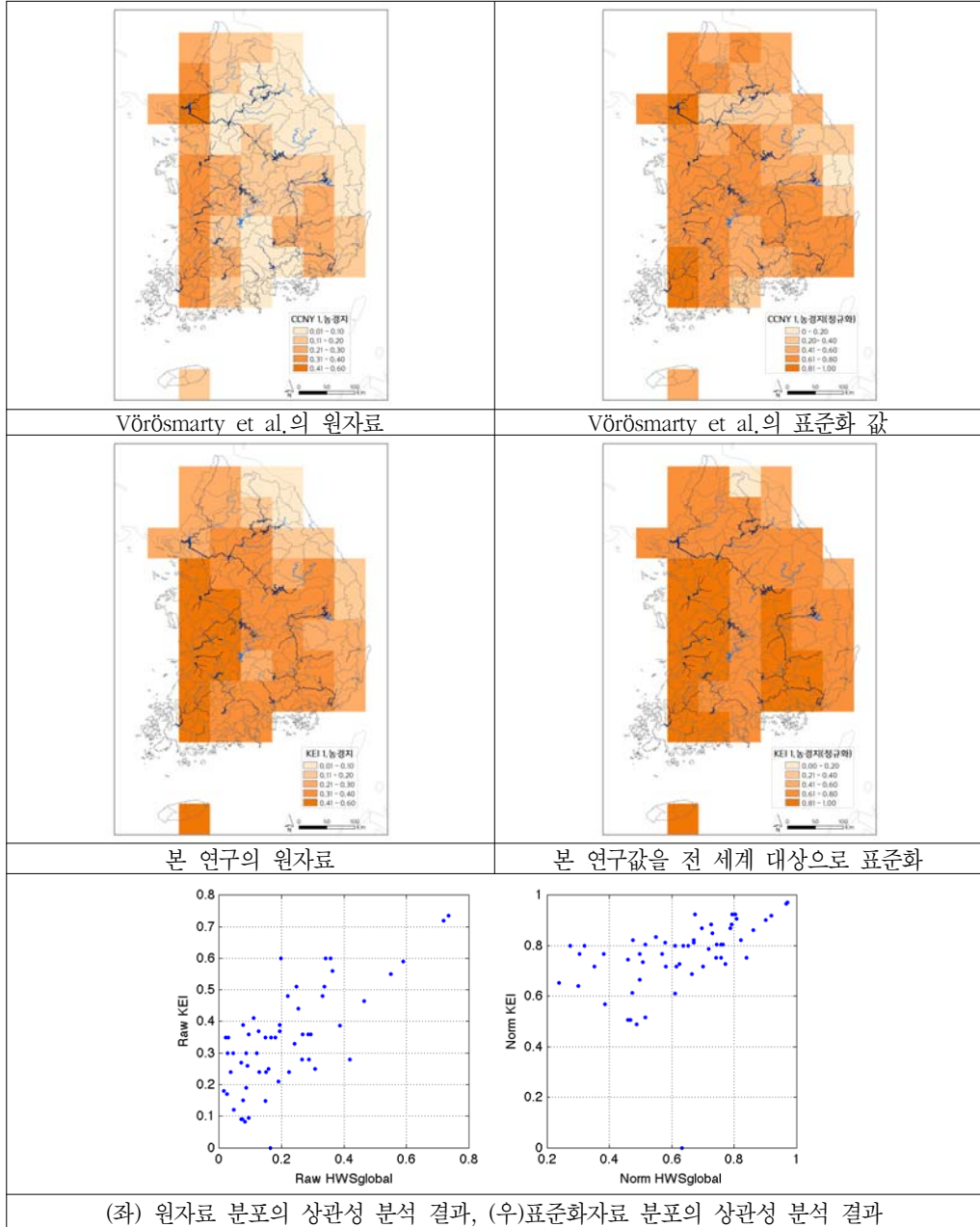
V2010에서는 수질오염 주제 구동요인에 대해 하천의 흐름에 따른 영향효과를 고려하는 작업을 추가하였기 때문에, 원자료와 하천흐름을 반영한 자료를 함께 수록하였고 본 연구에서도 수질오염 주제의 지표에 한정하여 원 부하량 데이터를 유출량(백만m)으로 나누어 단위의 통일성을 맞추었다. 비교자료로서 본 연구의 결과는 우리나라 중권역을 대상으로 수행한 지표평가를 동일한 해상도의 그리드로 변경하여 수록하였다.

〈그림 6-2〉부터 〈그림 6-17〉에 수록한 비교연구의 결과를 살펴보면, V2010의 자료 및 본 연구결과의 차이점을 다음과 같이 유형화할 수 있었다. 우선 V2010에서 사용한 데이터가 시기상 오래되고 낮은 해상도로부터 도출한 자료를 이용함으로써 본 연구 결과가 최신의 경향을 반영하는 지표가 확인되었다. 예를 들어 농경지 및 불투수층 지표, 소모적 물 손실 지표, 물흐름 변형 지표는 원자료의 상세화 및 시간적 흐름에 따른 개발로 인해 한반도상의 원자료 및 표준화 자료 결과가 V2010에 비해 높아졌음을 확인할 수 있었다. 또한 불투수층 지표, 가축밀도 지표의 경우, V2010에서도 한반도가 어느 정도 높은 수준의 값을 보였으나 본 연구 결과를 적용한 뒤에는 전 세계적으로 더욱 높은 수준의 값을 보임으로써 불투수층 개발 및 가축밀도상의 영향이 매우 심화되었다고 할 수 있다. 물흐름 변형 지표의 경우 V2010에서는 한반도 일부 지역에서만 세계적으로 높은 수준의 값이 확인되었으나, 본 연구결과를 적용한 뒤에는 한강하류지역을 제외하고 거의 모든 지역에서 5분위 수준의 높은 압력값을 나타냈다. 반대의 경우도 확인할 수 있었는데, 질소 부하, 인 부하, 유기물 부하 지표의 경우에는 본 연구의 결과에서 V2010보다 오히려 낮은 농도의 부하량을 나타내고 있었다. 하지만 오염원 지표의 경우, 한반도 상에서 위생시설의 확충으로 인한 실제 개선을 반영하는 것인지, V2010의 자료가 낮은 해상도로 인해 초과산정 되었는지를 검토할 필요는 있을 것으로 보인다.

또 다른 유형으로는 V2010에서 사용한 자료의 공간적 한계로 인해 실제 현상을 온전히 반영하지

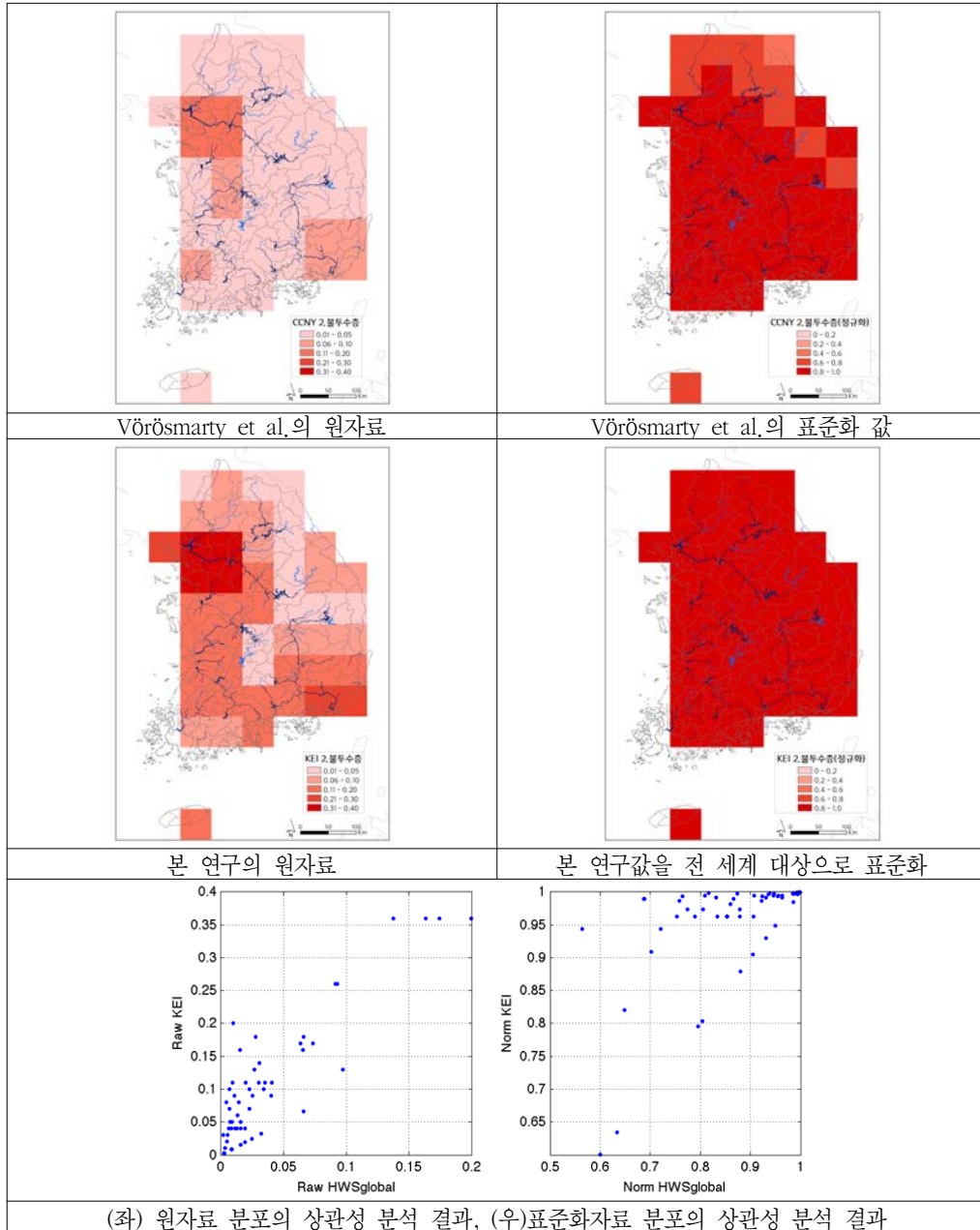
못하였으나, 본 연구에서 개선한 경우이다. 습지단절 지표의 경우, V2010에서는 한반도상의 일부 습지를 대상으로 습지변형을 분석하였으나, 본 연구에서는 서남해안의 토지피복상 모든 습지 중 변형지역을 도출하였기 때문에 서남해안을 중심으로 높은 습지단절값이 나타나, 자료의 개선으로 인한 영향을 확인할 수 있었다. 그리고 인간 물 스트레스, 농업 물 스트레스 지표의 경우 V2010보다 본 연구결과에서 낮은 스트레스값을 보였는데, 이를 확인한 결과 V2010에서 사용한 유출량이 본 연구에서 사용한 유출량보다 적어 상대적으로 V2010에서의 스트레스값이 높게 나타난 것으로 확인할 수 있었다.

반면 지표의 개념상 정의는 같았으나 사용한 데이터가 달라서 변수의 분포가 완전히 변화한 경우가 있다. 외래어종 비율 지표의 경우 V2010에서는 우리나라의 대형 댐 상류지역을 중심으로 높은 외래어종이 분포한다고 나타났으나, 본 연구 결과 서해안 유역 및 동남해안 유역 등 하류지역 중심으로 높은 외래어종 비율이 나타나 완전히 다른 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.



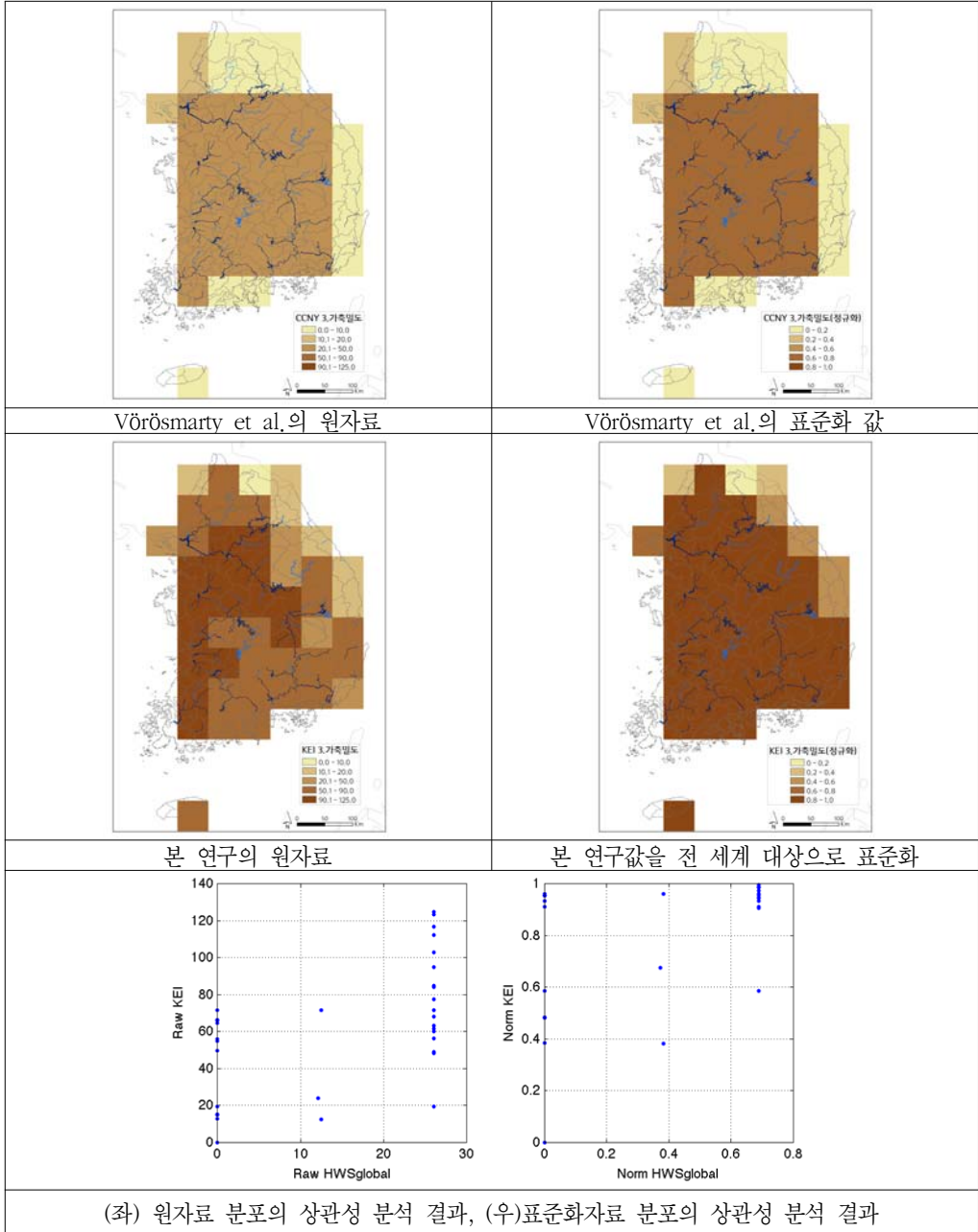
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-2. 농경지 지표의 비교연구 결과



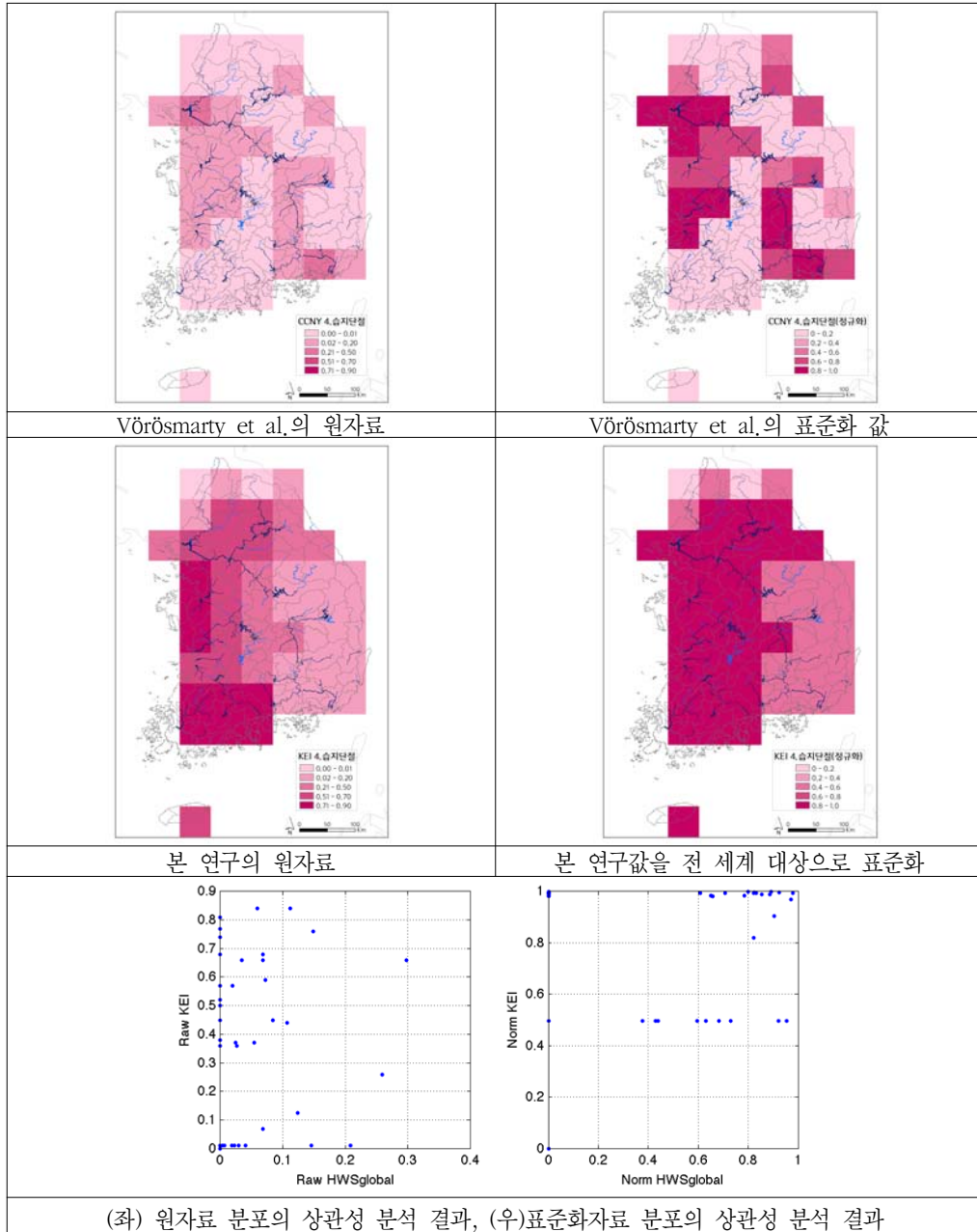
자료: Vörösmarty et al. (2010) 및 필자 작성.

그림 6-2. 불투수층 지표의 비교연구 결과



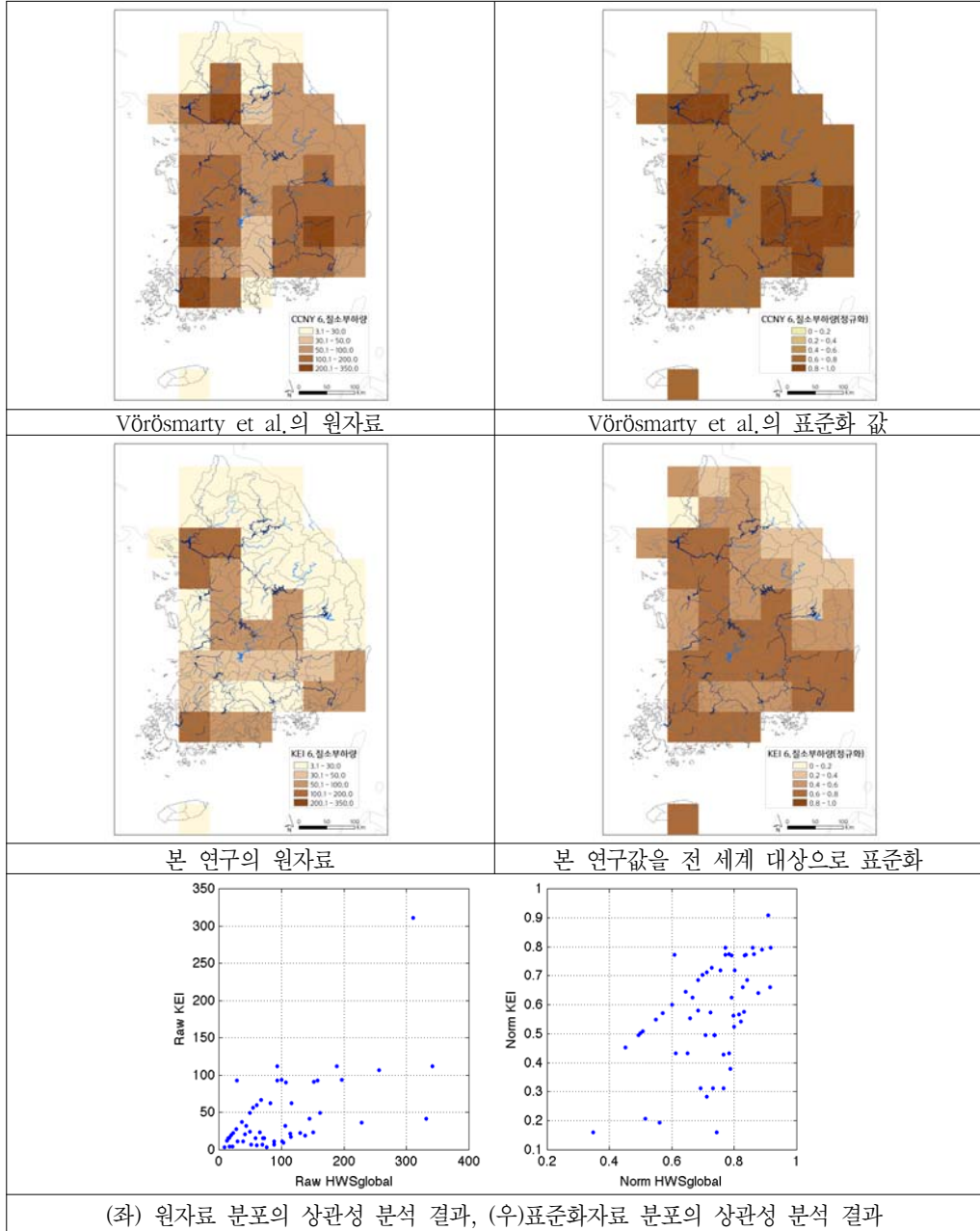
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-3. 가축밀도 지표의 비교연구 결과



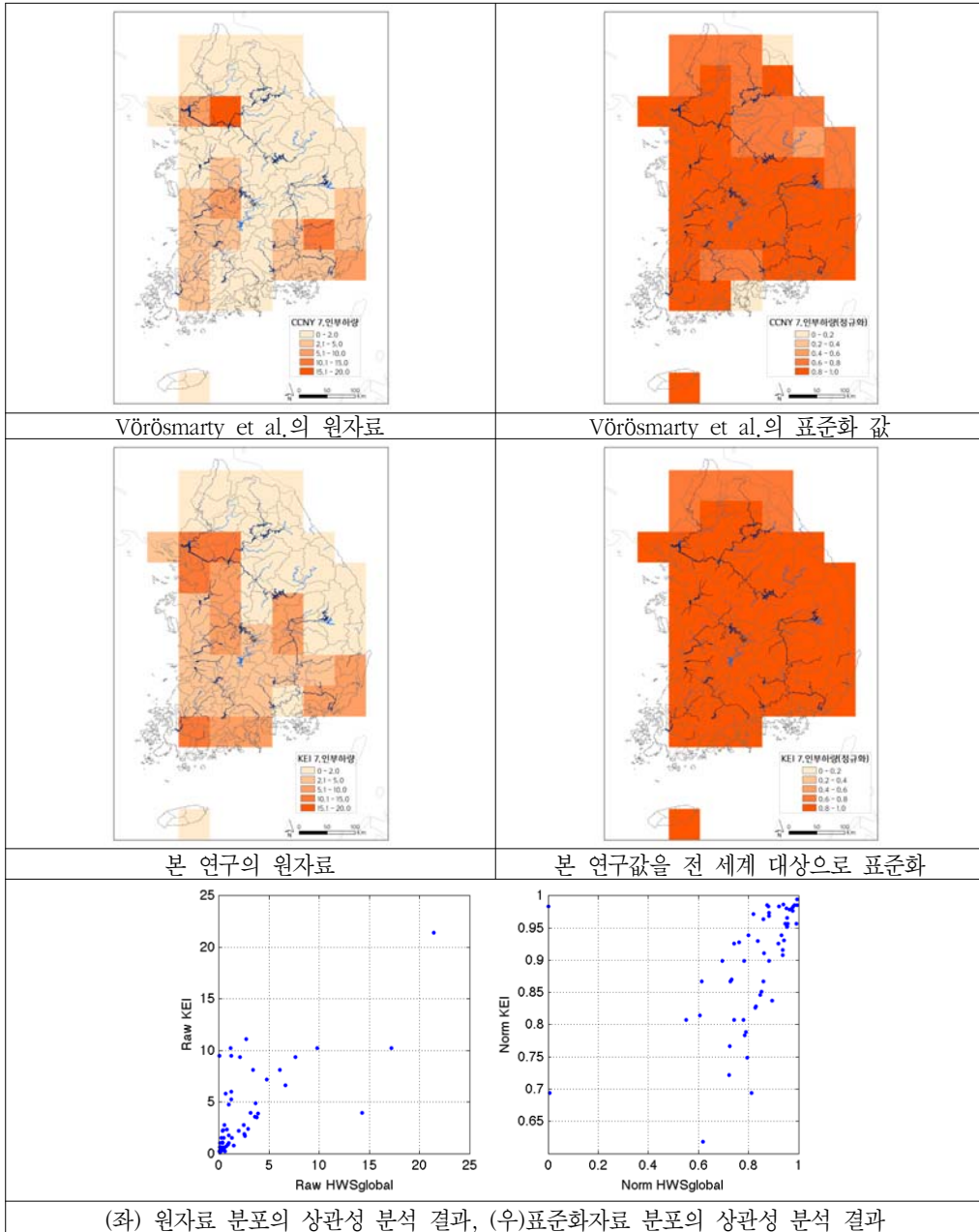
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-4. 습지단절 지표의 비교연구 결과



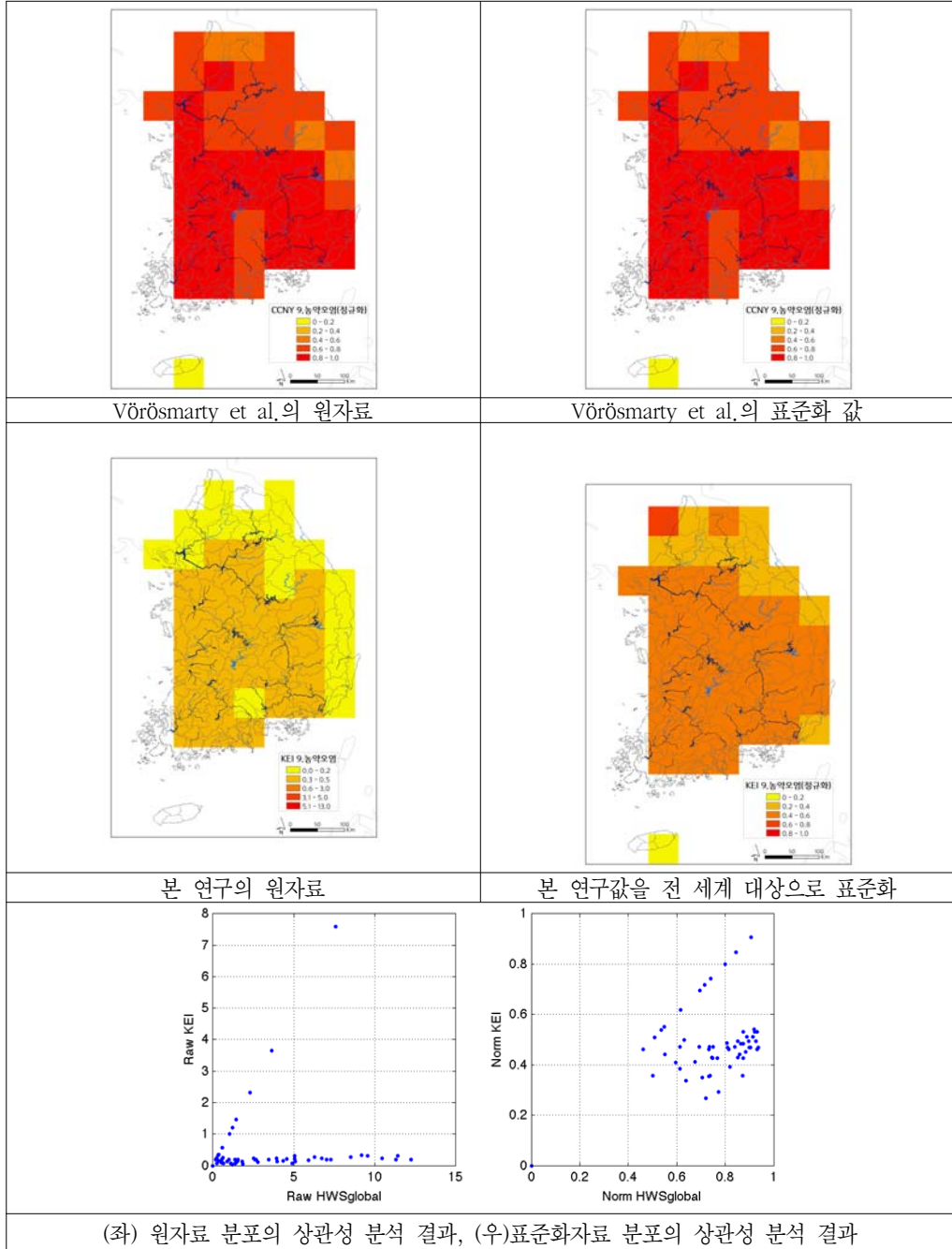
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-5. 질소 부하량 지표의 비교연구 결과



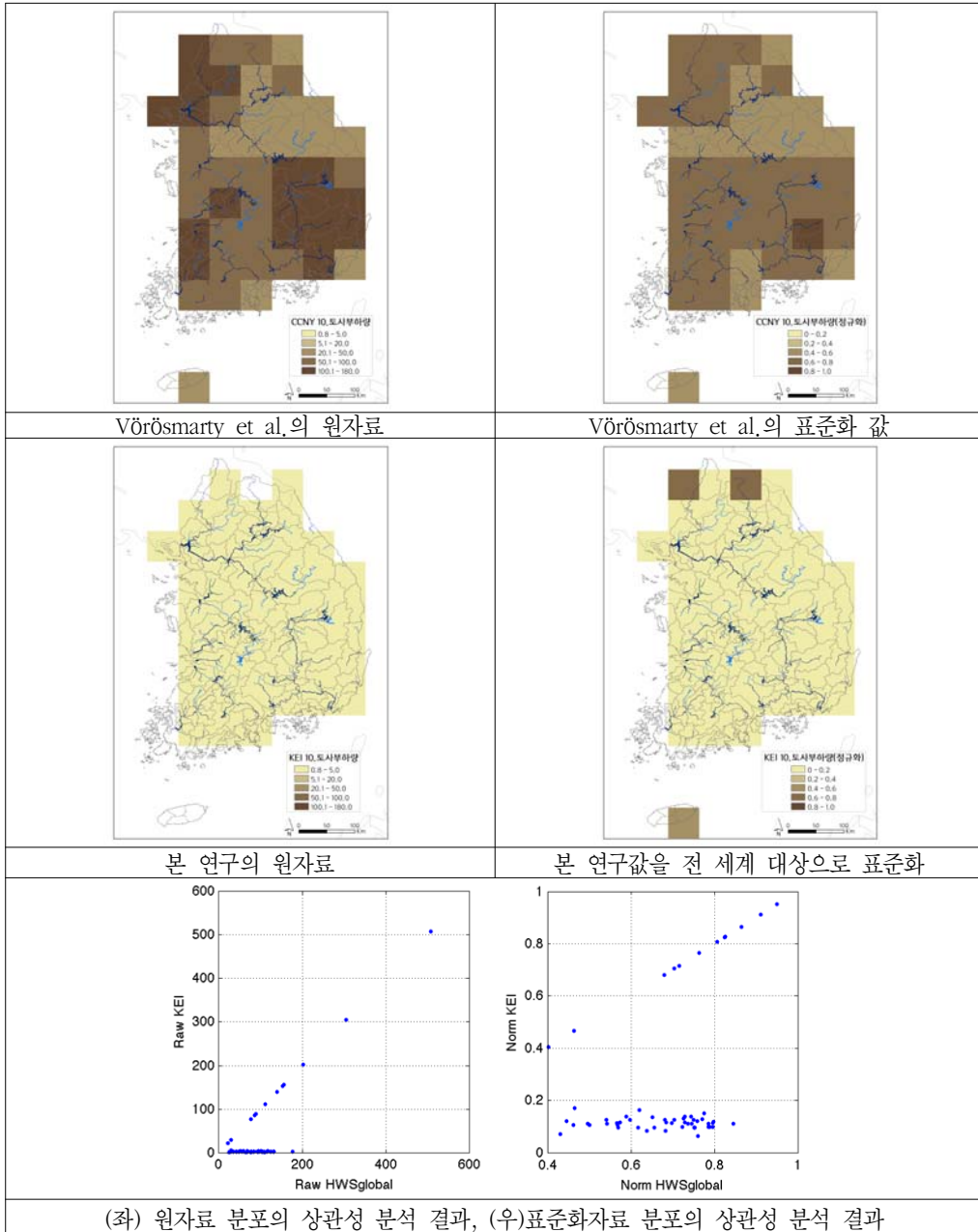
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-6. 인 부하량 지표의 비교연구 결과



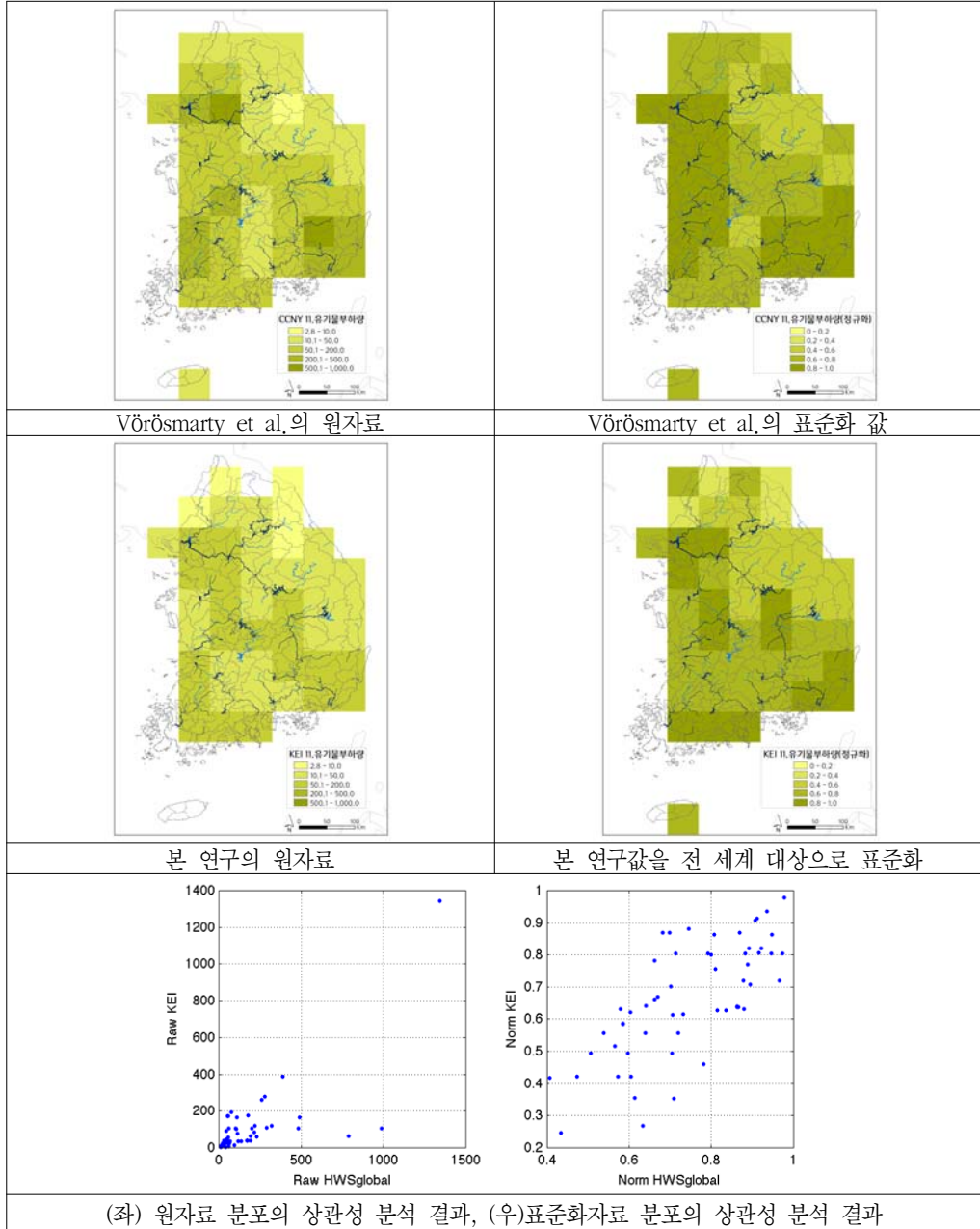
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-7. 농약 부하량 지표의 비교연구 결과



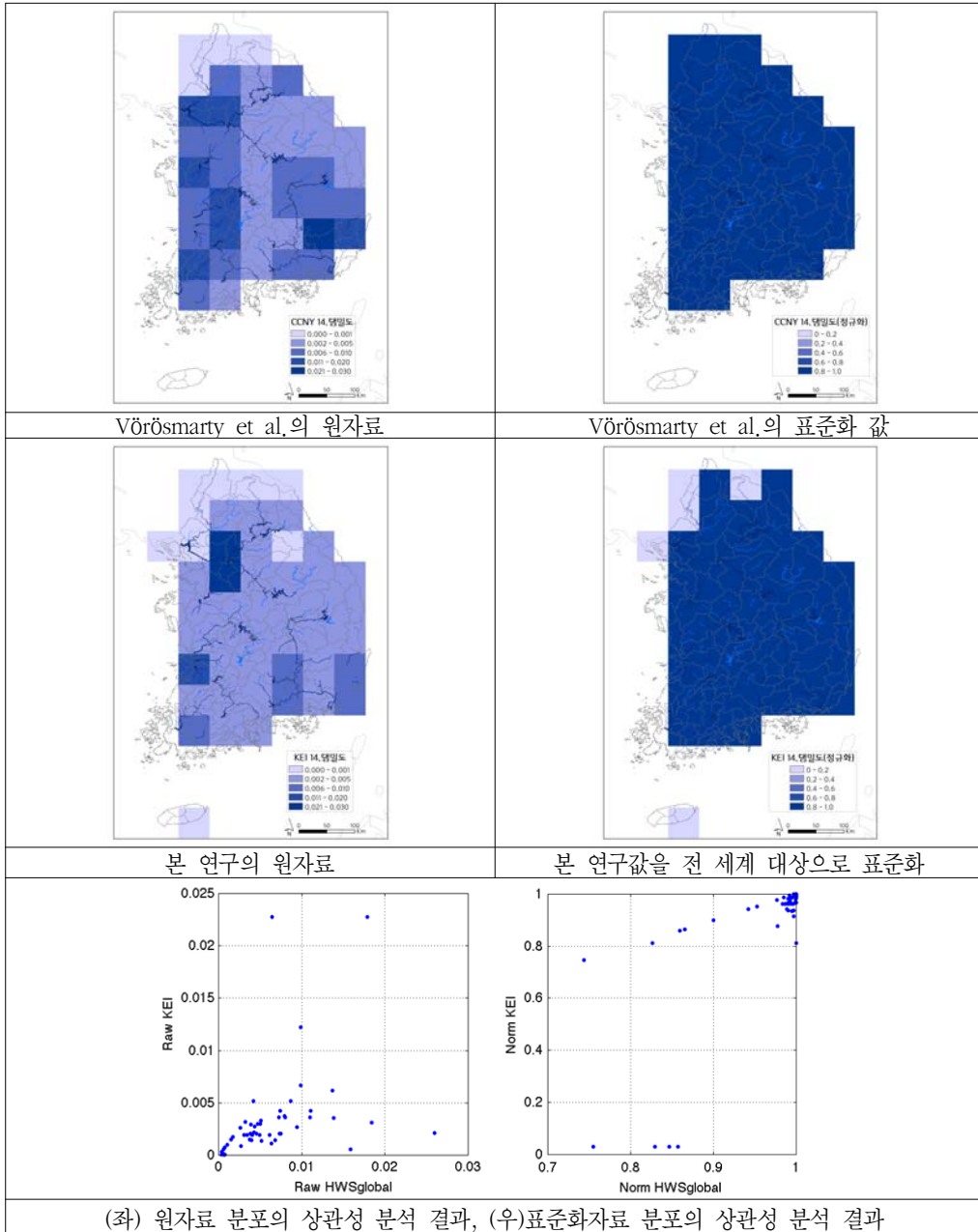
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-8. 토사 부하량 지표의 비교연구 결과



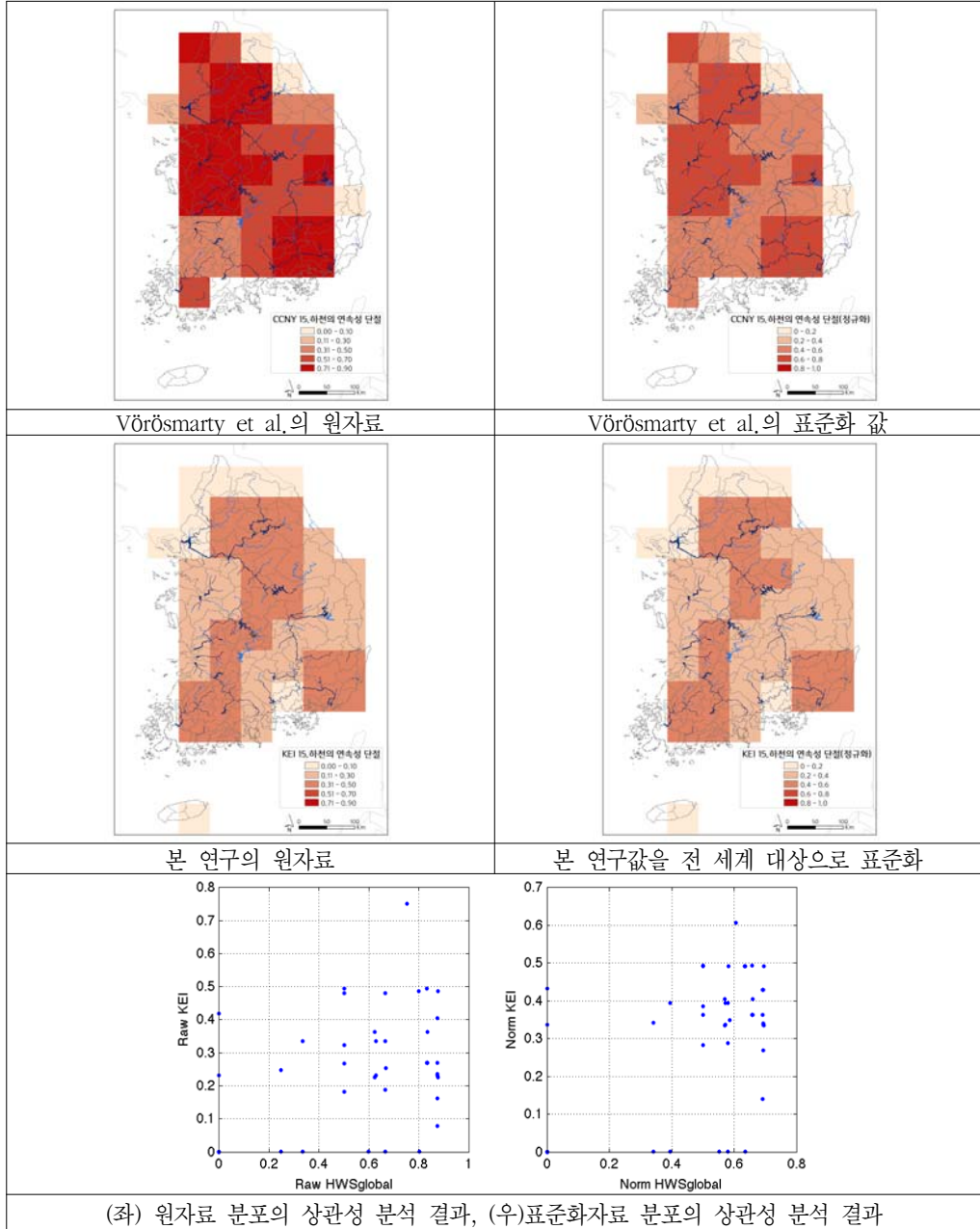
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-9. 유기물 부하량 지표의 비교연구 결과



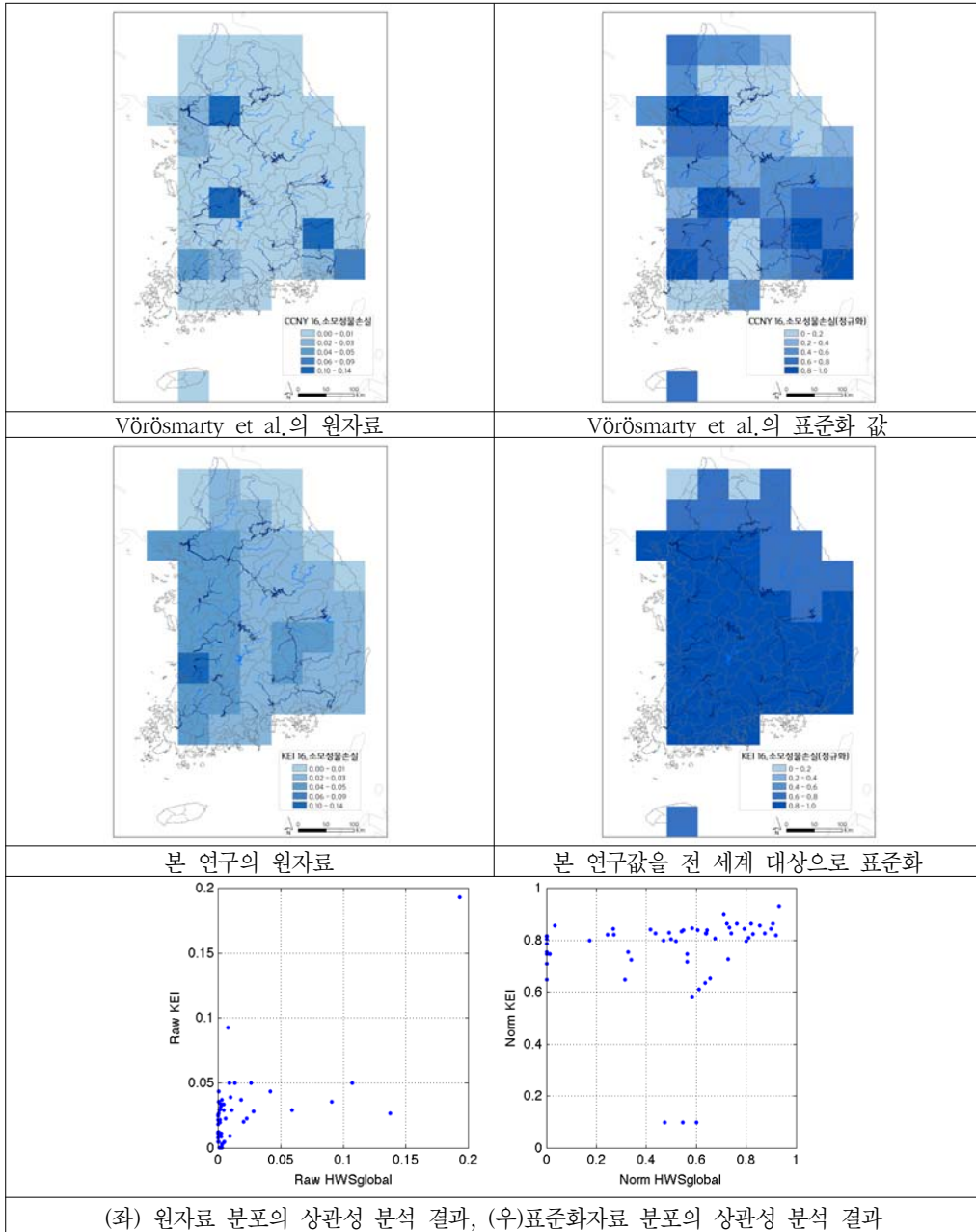
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-10. 댐 밀도 지표의 비교연구 결과



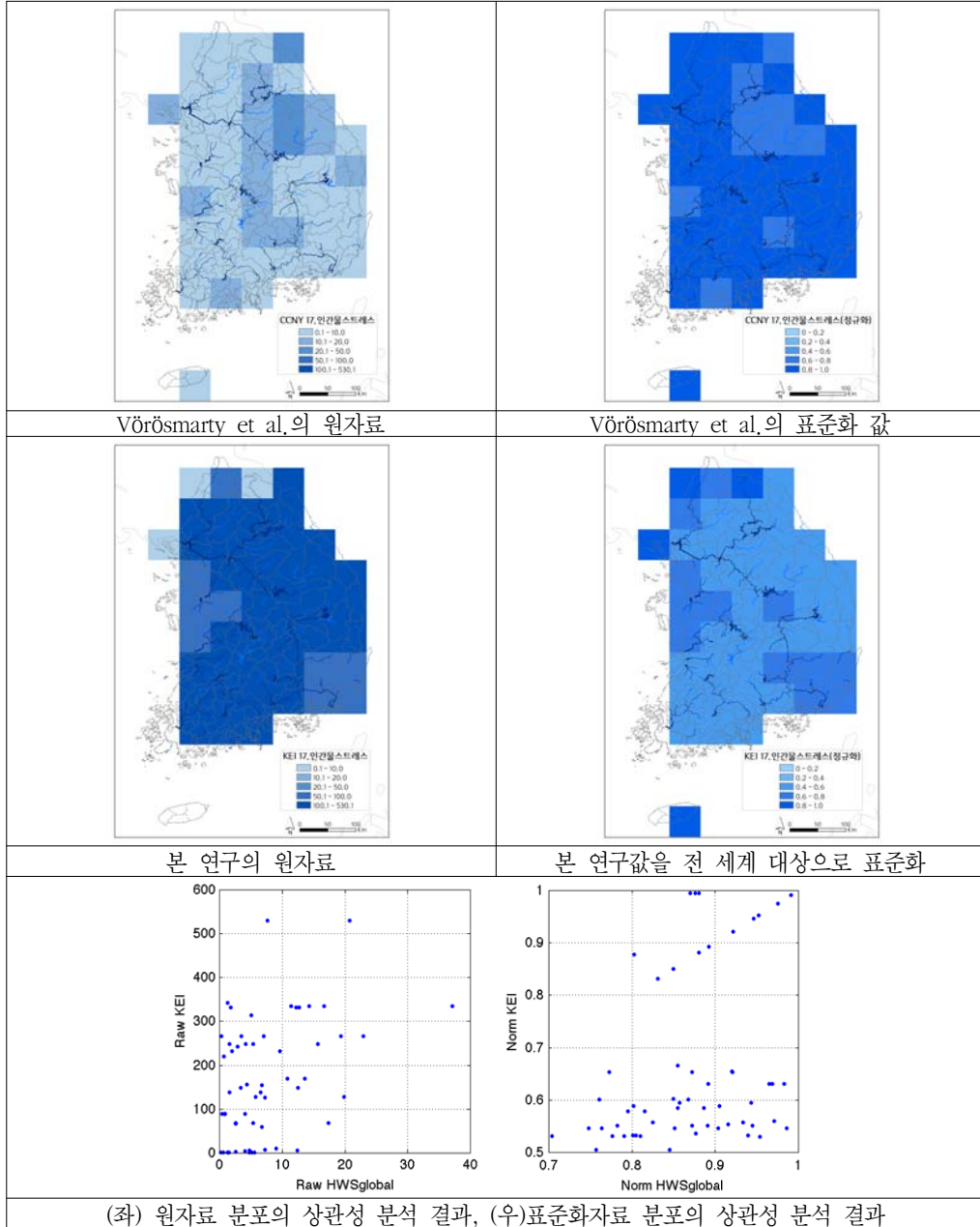
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-11. 하천의 연속성 단절 지표의 비교연구 결과



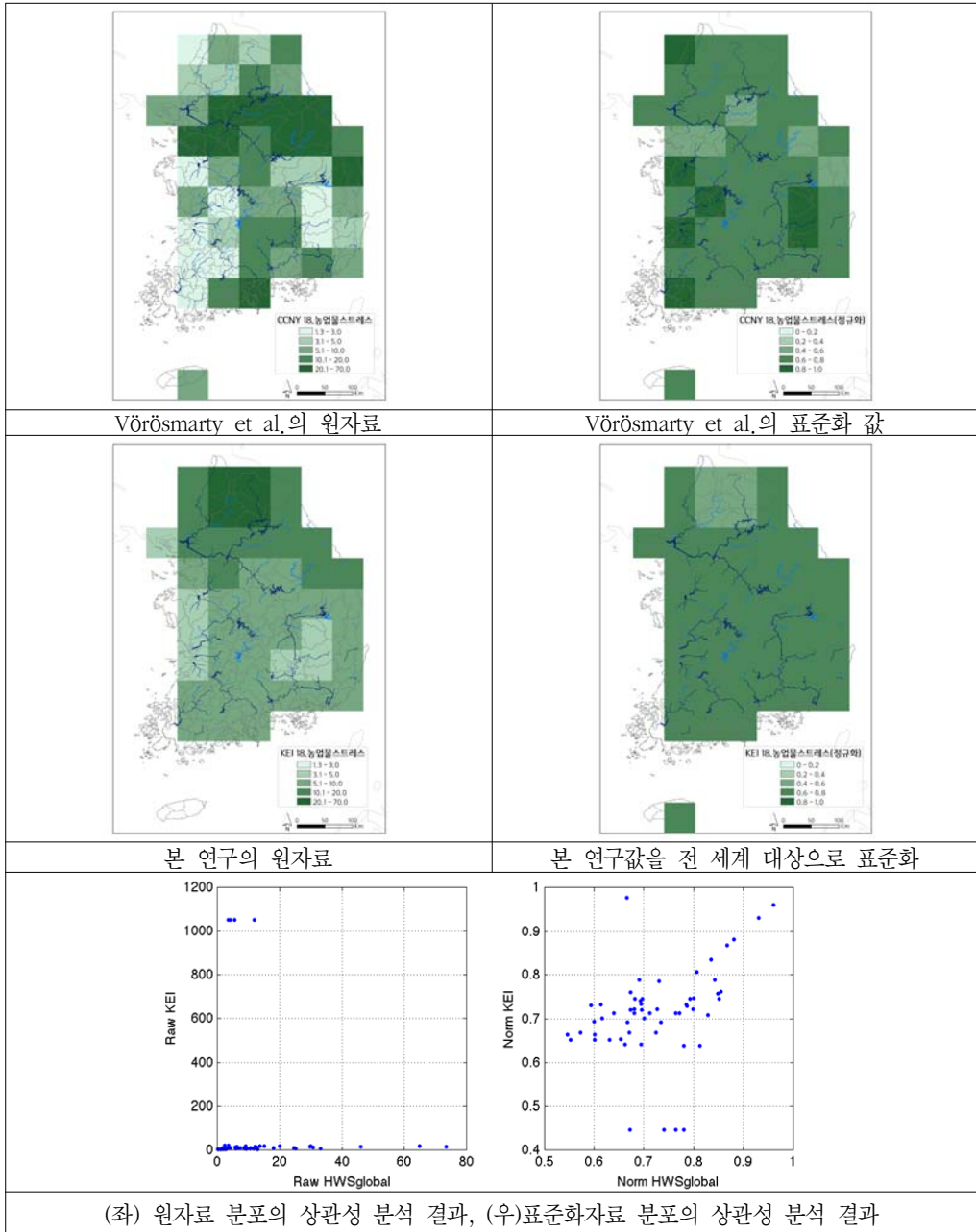
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-12. 소모적 물 손실 지표의 비교연구 결과



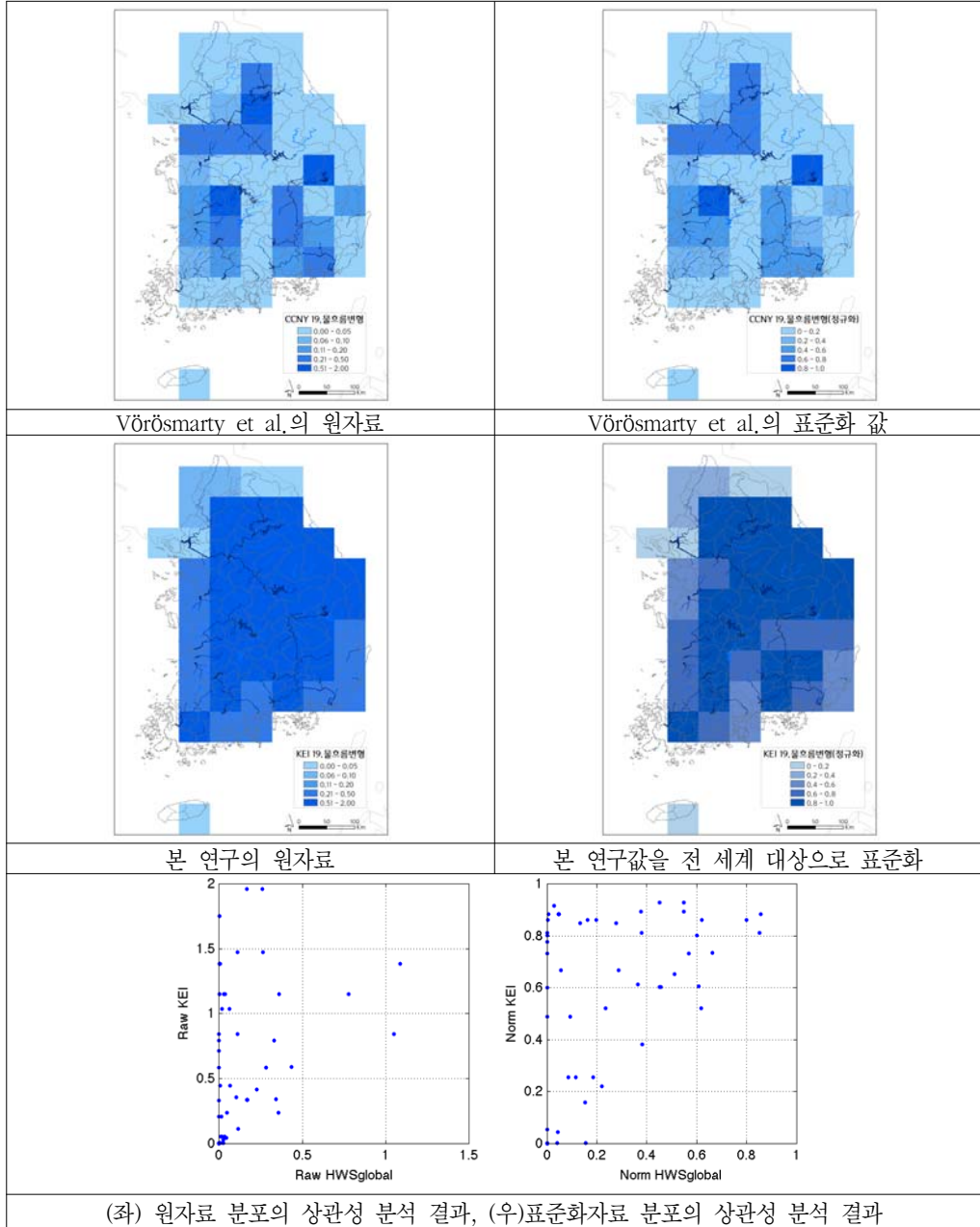
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-13. 인간 물 스트레스 지표의 비교연구 결과



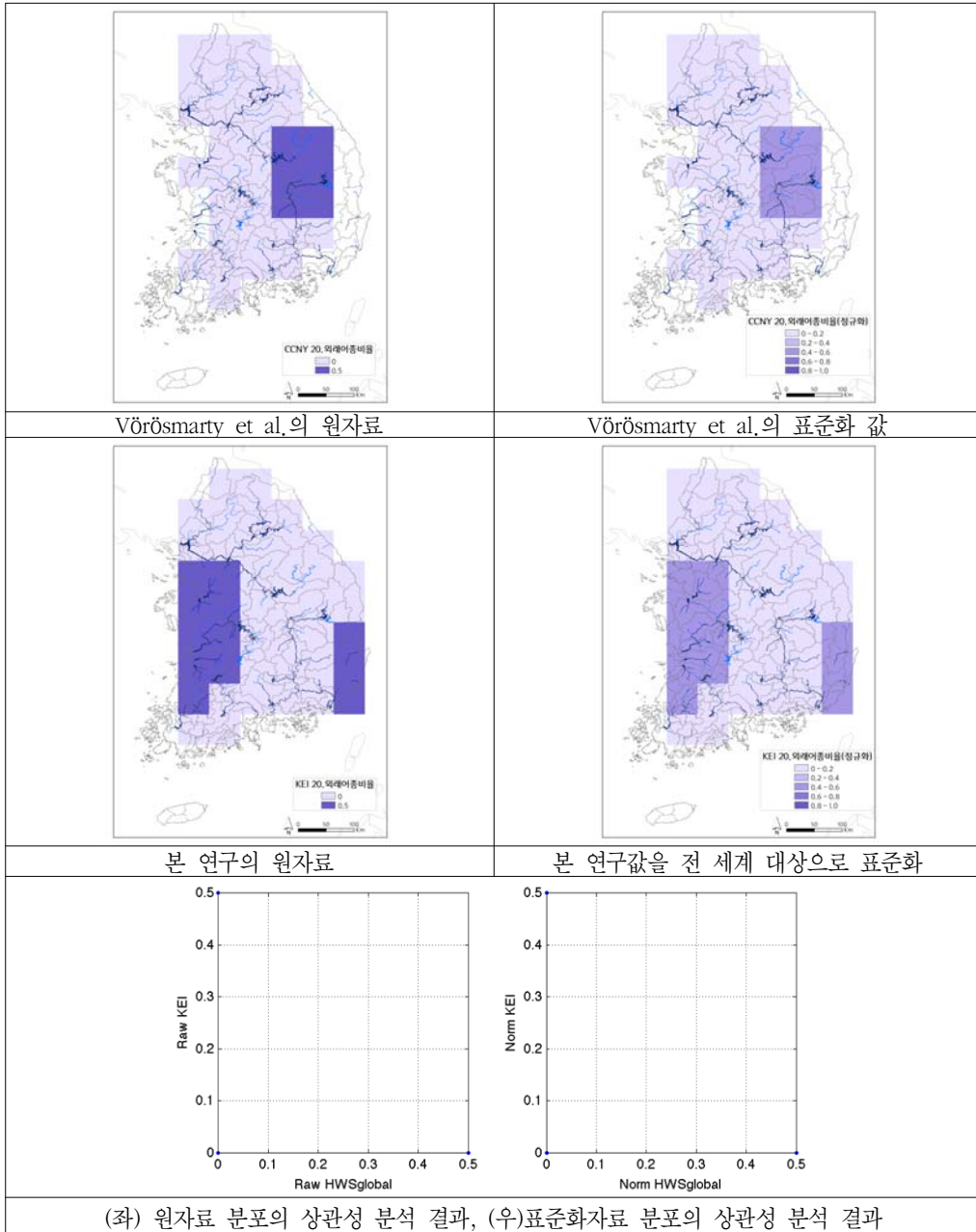
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-14. 농업 물 스트레스 지표의 비교연구 결과



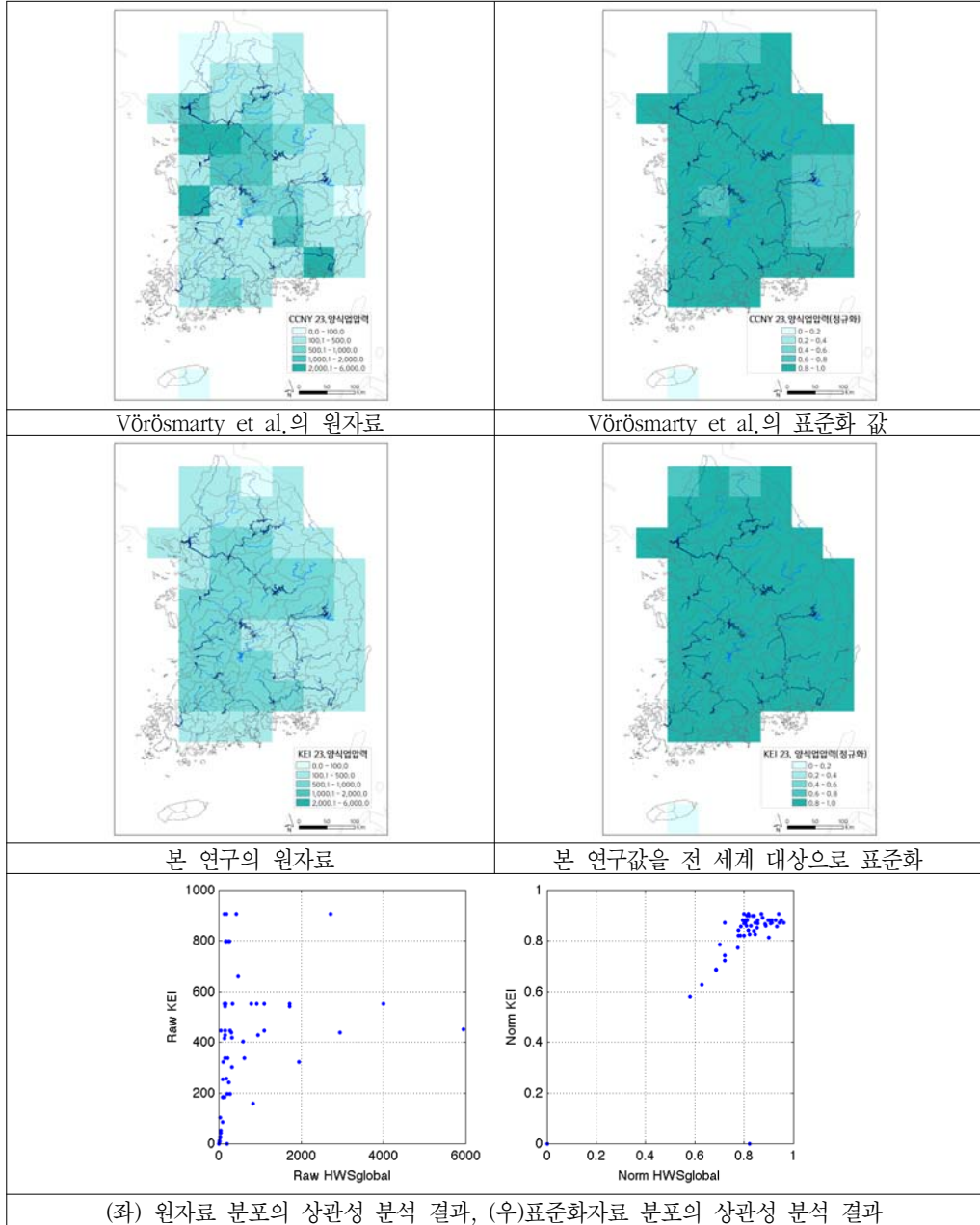
자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-15. 물흐름 변형 지표의 비교연구 결과



자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-16. 외래어종 비율 지표의 비교연구 결과



자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

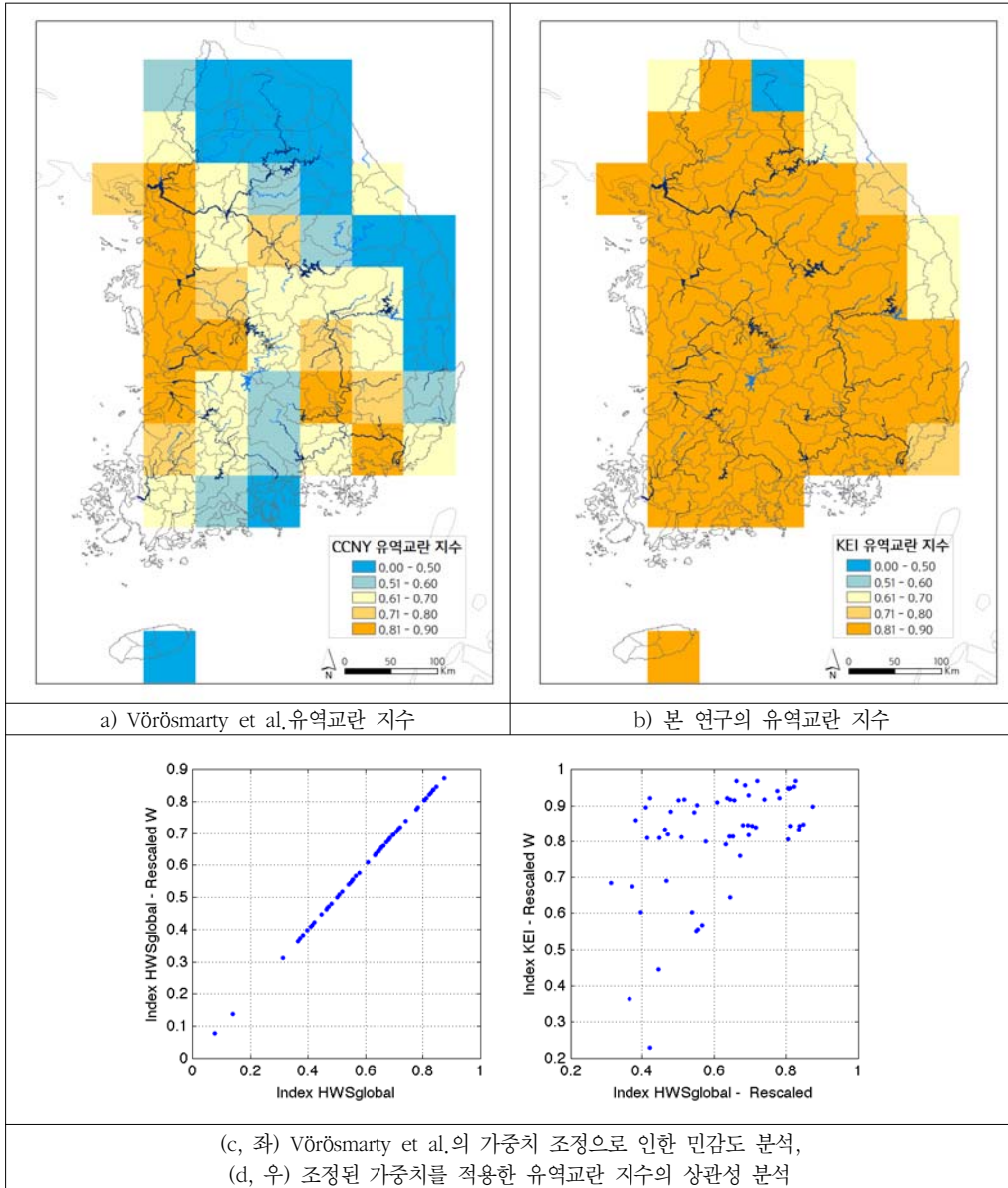
그림 6-17. 양식업 압력 지표의 비교연구 결과

나. 지수별 비교

V2010의 4가지 주제(유역 교란, 수질 오염, 수자원 개발, 생물 요인)별 지수값과 본 연구에서의 지표를 바탕으로 4가지 주제에 맞게 재구성하여 도출한 주제별 지수값을 비교하였다. 또한 4가지 주제별 가중치를 반영하여 도출한 최종 지속가능성 지수를 평가하였다.

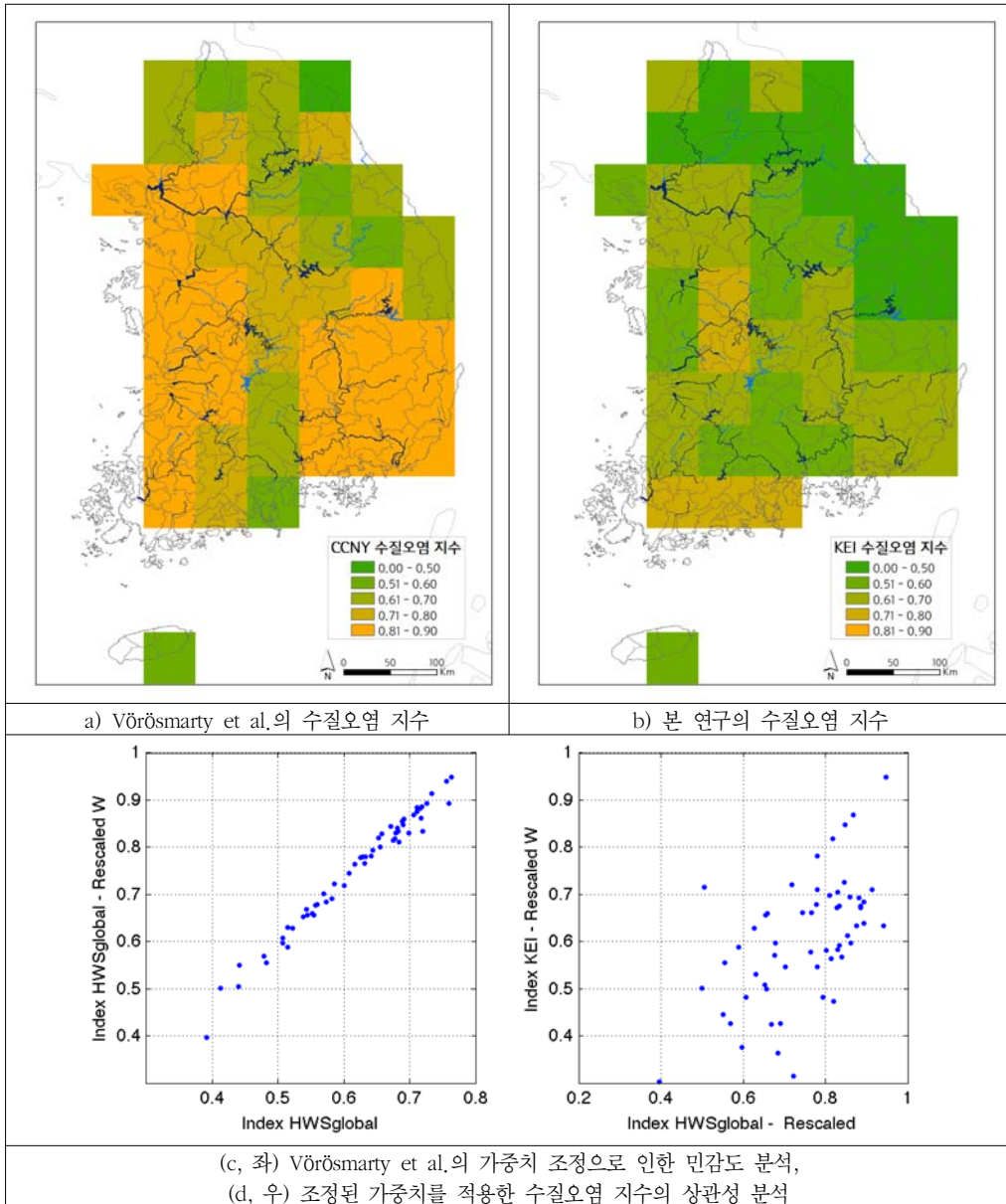
V2010의 유역교란지수는 농경지, 불투수층, 가축밀도, 습지분질성 지표로 평가하고 있다. 본 연구에서는 위의 네 가지 지표를 모두 사용하여 평가하였으므로 가중치 조정으로 인한 변동폭은 없는 것으로 확인되었다(그림 6-18 c). 유역교란 지수는 V2010에서 우리나라 서해안을 중심으로 높고, 동해안 지역을 중심으로 낮은 값을 나타내고 있으나(그림 6-18 a), 본 연구를 통해 살펴본 유역교란지수는 우리나라 전반에 걸쳐 매우 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다(그림 6-18 b). 두 결과값의 분포는 $y \geq x$ 를 보임으로써 본 연구에서의 결과가 거의 모든 그리드 셀에서 더 높게 나타나고 있었다.

V2010의 수질오염지수는 토양염류화, 질소 부하, 인 부하, 수온 오염, 농약오염, 토사부하, 유기물 부하, 잠재적 산성화, 수온 변화의 9가지 지표로 평가하고 있으나 5가지 지표만을 이용하여 평가하였다. 지표 삭제로 인한 가중치 재조정은 기존 가중치보다 0.1가량 상향조정되었다(그림 6-19 c). 수질오염 지수는 V2010에서 우리나라 서해안 및 낙동강 유역을 중심으로 높고, 강원도 지역을 중심으로 낮은 값을 나타내고 있고(그림 6-19 a), 본 연구에서도 다소 경향의 유사성은 나타나나 수질오염 압력이 크게 낮게 평가되었음을 알 수 있다(그림 6-19 b). 두 결과값의 분포는 대부분 $y \leq x$ 를 보임으로써 본 연구에서의 결과가 거의 모든 그리드 셀에서 더 낮게 나타나고 있었다.



자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-18. 유역교란(catchment disturbance) 지수의 비교연구 결과

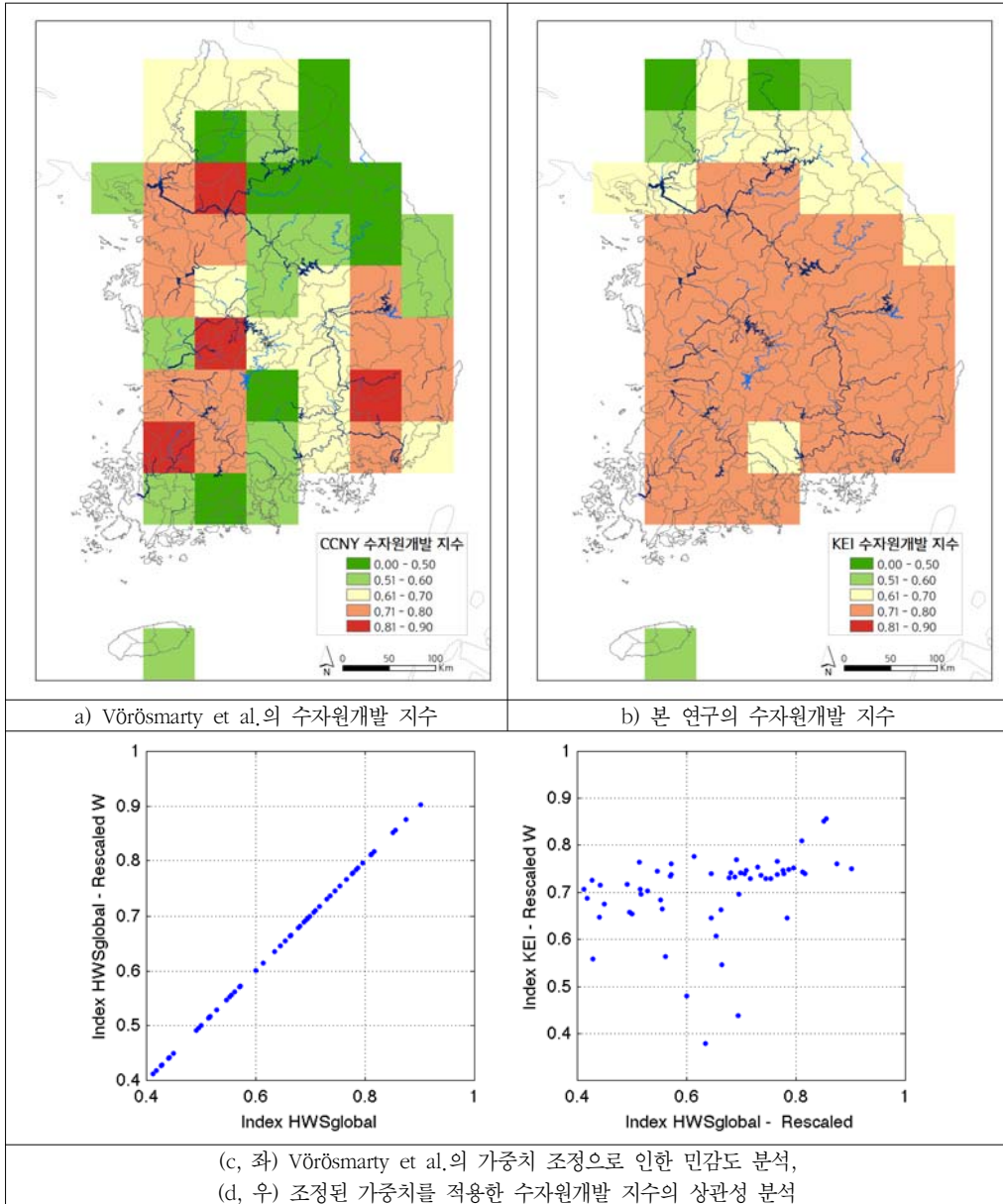


자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-19. 수질 오염(pollution) 지수의 비교연구 결과

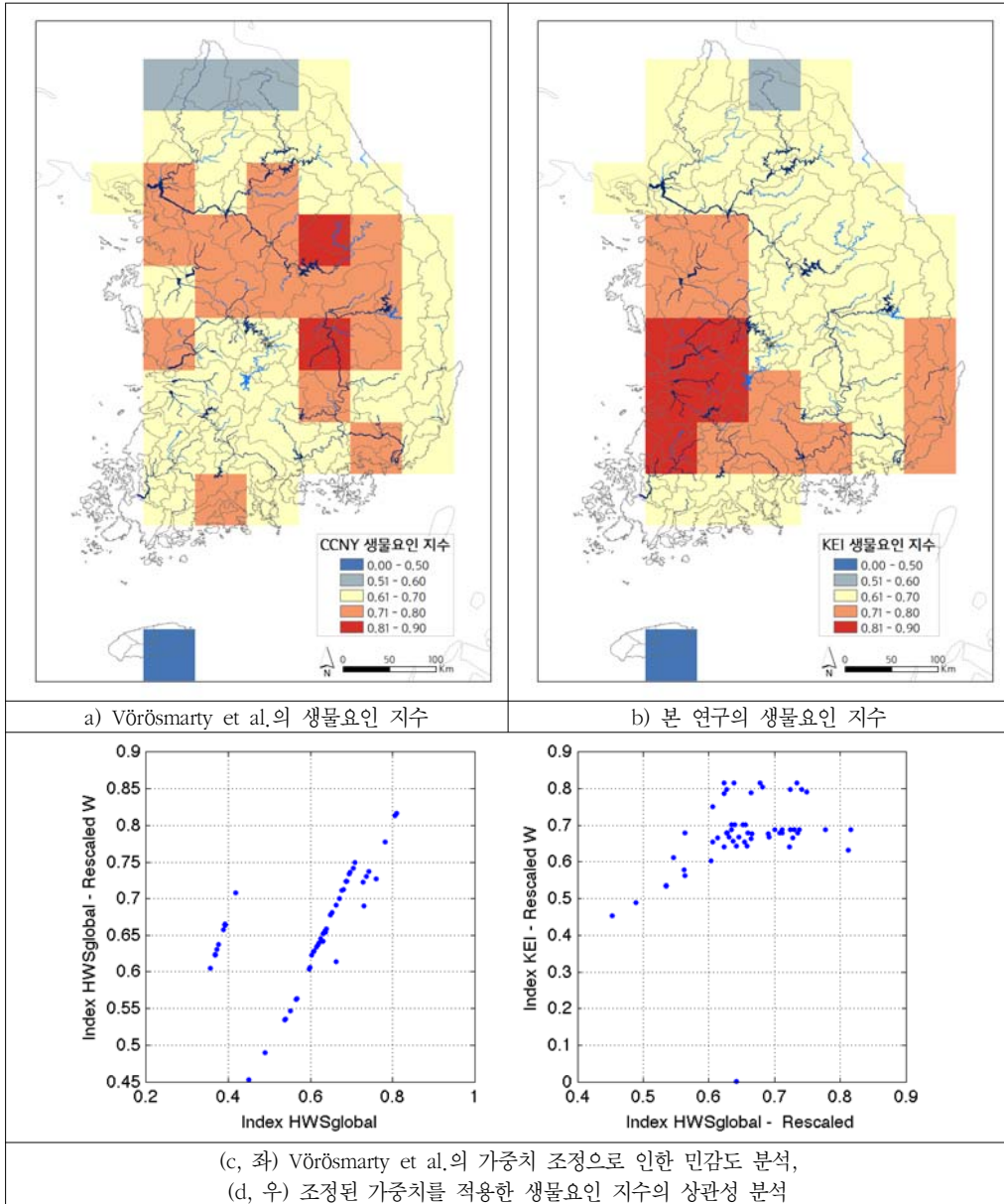
V2010의 수자원개발 지수는 댐 밀도, 하천 파편화, 소모성 물이용, 인간 물 스트레스, 농업 물 스트레스, 댐저수량의 여섯 가지 지표로 평가하고 있고 본 연구에서도 모든 지표를 반영하여 평가함으로써 가중치 재조정 상관계수는 $y=x$ 상에서 나타나고 있다(그림 6-20 c). 수자원개발 지수는 V2010에서 우리나라 서해연안 및 일부 내륙지방에서 높은 스트레스를 보이고, 강원도 지역을 중심으로 낮은 값을 나타내고 있으나(그림 6-20 a), 본 연구에서는 대부분의 국토에서 0.7~0.8가량의 세계적으로 높은 수준의 압력을 보이는 것으로 나타났다(그림 6-20 b). 두 결과값의 분포를 살펴보면, V2010에서 0.4~0.9의 다양한 분포를 가지는 값을 나타내는 반면 본 연구 결과에서는 0.6~0.8의 높은 스트레스 수준을 보임으로써 더 심각한 수준으로 나타나고 있다.

V2010의 생물요인 지수는 외래어종의 수와 비율, 어업압력, 양식업 압력의 네가지 지표로 평가하고 있고, 본 연구에서는 외래어종 수 및 어업 지표를 제외하고 두 가지 지표로 평가하였다. 이로 인한 가중치 재조정은 다수 $y=x$ 상에서 나타나고 있지만 일부 값의 경우 가중치가 크게 재조정되었다(그림 6-21 c). 생물요인 지수는 V2010에서 우리나라의 남한강 유역 및 낙동강 상류 유역을 중심으로 높은 스트레스를 보이고 있으나(그림 6-21 a), 본 연구에서는 금강하류, 만경강, 동진강 유역에서 매우 높은 스트레스를 나타냈다(그림 6-21 b). 두 결과값의 분포를 살펴보면, V2010보다도 본 연구 결과에서 확연히 상향평준화된 높은 스트레스 수준을 보임으로써 더 심각한 수준으로 나타나고 있었다.



자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

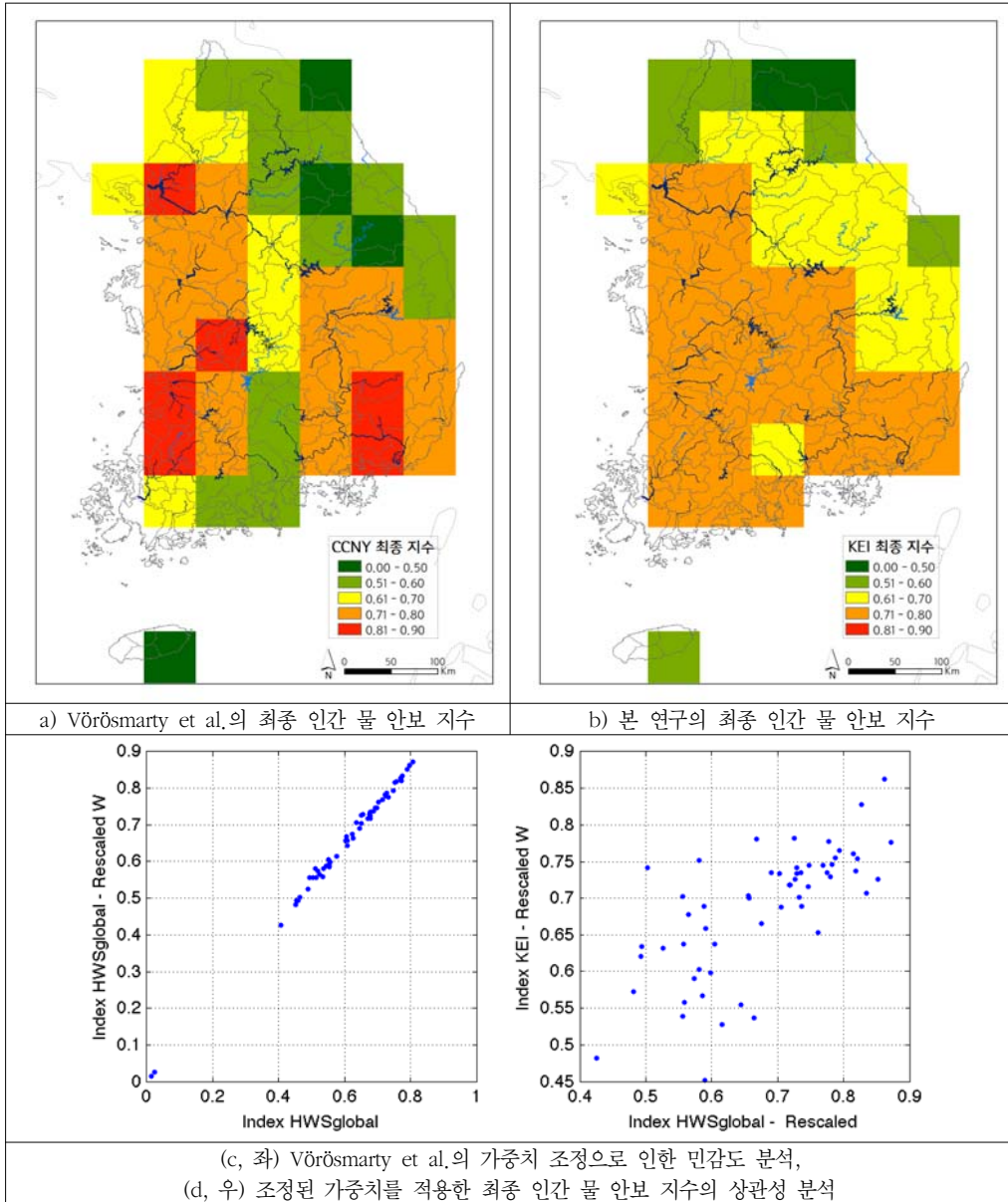
그림 6-20. 수자원 개발(water resource development) 지수의 비교연구 결과



자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-21. 생물 요인(biotic factor) 지수의 비교연구 결과

V2010의 개념으로 평가하는 최종 인간 물 안보 지수의 결과는 <그림 6-22 a,b>에 나타나 있다. 우선 조정된 가중치는 원 가중치보다 약간 높아진 것으로 나타났으나 큰 변화는 없는 것으로 확인되었다(그림 6-22 c). V2010의 결과에서는 금강 하류, 낙동강 하류, 한강 하류 등에서 매우 높은 스트레스를, 한강 상류 유역에서 낮은 스트레스를 나타내고 있었다. 반면 본 연구 결과에서는 대부분의 강원도 지역에서 전 세계 기준 0.6~0.7 수준의 압력을, 연안 및 내륙 지방을 중심으로 0.7~0.8 수준의 높은 스트레스를 확인할 수 있었다. 산점도를 통한 상관관계를 확인해보면, 0.7수준 이하의 값 범위에서 원래 지수 값에 비해 낮아지거나 높아진 값이 많아진 것을 확인할 수 있었고 0.7 이상의 값 범위에서는 하향조정된 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 다운스케일된 데이터 및 최신의 데이터를 반영한 본 연구결과는 기존 전 세계를 대상으로 평가된 인간 물 안보 지수 수준과 비교하여, 심각한 스트레스 수준을 보이던 지역은 개선되었으나 기존에 건강한 물이용 수준으로 평가받았던 지역이 하향 조정되었다.



자료: Vörösmarty et al.(2010) 및 필자 작성.

그림 6-22. 최종 인간 물 안보(human water security) 지수의 비교연구 결과

4. 소결

본 연구에서는 세계은행과의 국제협력연구의 일환으로, V2010의 연구결과를 본 연구와 비교하는 평가를 수행하였다. 이에 본 연구결과와 V2010의 연구결과를 각각 원자료, 표준화 자료 비교를 통해 평가를 수행하였으며, 이를 통해 전 지구적 자료를 활용하는 연구의 유용성 및 문제점 등을 확인하고자 하였다.

각 지표의 1:1 비교를 통해서 본 연구를 통한 자료의 시기적, 공간적 개선을 통해 지표의 상향 및 하향조정 결과를 확인할 수 있었다. 또한 지표에 가중치를 적용하여 주제별 지수 및 최종 지수를 도출한 결과에서는 유역교란지수 악화, 수질오염지수 개선, 수자원개발지수 하향평준, 생물요인지수 지역적 변화 등의 결과를 도출할 수 있었고, 최종 물 안보 지수는 특별히 높거나 낮은 지수가 없어지고 전반적으로 하향평준화된 것으로 나타났다.

따라서 1차년도 국제협력 연구에서는 각 지표 및 지수별 비교를 통해 자료의 개선을 통한 결과의 영향을 확인함으로써 자료개선의 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 지속적인 협력연구를 통해서 기여도가 특히 높은 주요 지표 선정 및 고해상도 지표 구축, 미래 시나리오를 반영한 인간 물 안보 지수의 변화 추적 등의 연구를 계획 중이며, 국내 연구의 국제적 공유 및 홍보효과 등의 효과를 달성할 수 있을 것으로 기대된다.



제7장

결론 및 향후 과제

1. 결론

본 연구는 우리나라의 물이용의 지속가능성을 지표기반으로 평가하기 위한 방법론 개발, 평가, 검증, 활용을 목적으로 2차년 연구로 계획되었다. 1차년도에 수행한 연구내용은 아래와 같다.

첫째, 선행연구를 통해 지속가능성에 대한 개념 및 지속가능한 수자원 관리의 개념을 검토하였고, 이를 지표 평가를 통해 수행한 국내외 자료를 집중적으로 검토하였다. 둘째로, 지표평가에서 널리 이용되는 인과관계적 접근법 및 주제접근법을 혼용하여 압력(Pressure)과 반응역량(Response)으로 평가항목 및 지표를 구축하였다. 또한 각 지표는 기존의 수자원 수요와 공급, 수질 측면뿐 아니라 수생태계, 유역환경 그리고 사회·경제적 대처역량 부분을 반영하는 다섯 가지 주제를 바탕으로 구성하였다. 이후 각 지표를 적절히 나타낼 수 있는 자료를 대용변수(proxy)로 삼아 중권역별로 평가함으로써 주제항목별로 통합하여 지속가능성 지수를 도출하였다. 셋째, 본 지표연구의 결과 검증을 통해 타당성을 확보할 수 있는 방안을 모색하고자, 1차년도 과업에서는 시험 검증방안을 제안하여 향후 2차년도 연구에서 연구결과의 타당성을 검증하고 보완할 수 있는 방안을 찾고자 하였다. 마지막으로 국제협력연구를 통해 본 연구에서 수집된 자료를 활용하여 전 세계를 대상으로 기 평가된 물이용 지표(Vörösmarty et al., 2010)와 다각도로 비교·분석함으로써 우리나라를 대상으로 물이용 지표평가의 검증 및 적용가능성을 확인하고자 하였다.

지표 개발 및 적용은 정책의 목표수립, 우선순위 선정 등에 활용할 수 있다. 즉, 지표결과는 현재의 물이용의 지속가능성이 낮은 지역을 판단하고, 어느 분야에 대한 정책적 관심이 필요한지 등에 대한 방향성을 제시할 수 있다. 또한 주요 지표의 미래 변화에 따른 물이용 지속가능성의 변화 예측 또한 기후 및 환경변화에 능동적으로 대응하는 정책 개발에 기여할 수 있다.

지속가능한 물이용에 대한 지표 평가를 수행한 본 연구가 가지는 기존 연구와의 차별점은, 기존 수자원 지표평가에서 사용되어 온 물이용량, 인프라 유효수량 및 보급률, 그리고 유출량 대비 지역별로 사람들이 이용하고 있는 수량의 수준을 나타내는 지표 등의 기술적인 수자원 지표 뿐 아니라, 현재 대부분의 용수공급을 담당하고 있는 하천유출량으로부터의 의존율을 낮추기 위한 빗물집수와 같은 대체수원, 물 재이용 등을 통한 효율적 물이용의 가능성까지 검토하고

있다는 점이다. 뿐만 아니라 유역의 수자원 재생가능성을 판단할 수 있는 토지이용 및 유역 내의 자연 생태성 지표를 포함함으로써 자연 유역의 건강성 평가를 통해 유역의 지속가능성을 나타내교자 하였으며, 지역사회의 수자원 관심 및 개선의지를 반영할 수 있는 유역 내 총 생산액 및 단위면적당 수자원관련사업 투자비용, 지역 간 사회적 형평성을 고려할 수 있는 상하수도 보급률 및 단위면적당 수자원관련 공무원 수 등의 지표를 구성함으로써 경제·사회적 요인을 함께 반영할 수 있는 지속가능성 평가를 수행함으로써 다학제간 지속가능성을 평가하고자 하는 국제적인 흐름을 반영하고자 하였다.

지속가능한 물이용을 위한 우리나라 권역별 평가 결과, 사람들이 사용하는 물 수요 충족기준과 관련된 인간 물 요구량 압력지수에서는 수도권지역 및 지방 광역시 등의 인구밀집지역과 서해안연안 및 낙동강 하류 등 주요 농경지에서 높은 물 수요로 인해 높은 압력을 나타내는 것으로 나타났다. 주제와 지표의 상관성 분석 결과, 인구 1인당 가용한 수량으로 나타낸 인간 물 스트레스가 인간 물 요구량 주제의 지수값과 가장 상관성이 높은 것으로 나타나 대표지표로 사용할 수 있는 가능성을 나타냈다. 대권역 수준에서는 한강대권역을 제외한 나머지 4개 대권역에서 반응역량보다 높은 수자원 수요압력을 보임으로써 향후 지속가능성을 높이기 위해서는 물 절약을 통한 수요량 저감 또는 인프라 강화를 통한 공급·저장량 확대 등의 정책보완이 필요할 것으로 나타났다.

댐 등 수자원 인프라로 인한 수환경 영향을 나타내는 수생태계 건강성 압력지수에서는 한강 및 낙동강 상류 등 대형 댐이 위치한 주요 강의 상류지역과 아산만에 인접한 서해안 연안 유역을 중심으로 높은 압력을 보이는 것으로 나타났는데 이는 상류지역에서는 대형 댐으로 인한 하천영향이 매우 크고, 서해안 연안에서는 외래어종으로 인한 수생태계 파괴로 인한 결과로 보인다. 수생태계 건강성 지수와 이를 구성하는 6가지 지표와의 상관성 분석 결과, 유역면적당 대형 댐 개소수로 나타낸 댐 밀도 지표가 가장 높은 상관성을 보여 수생태계 영향에 핵심적인 지표로 나타났다. 대권역 수준에서 압력과 반응 지수를 반영한 지속가능성 지수에서는 금강 대권역이 가장 취약한 것으로 나타나 수생태계의 지속가능성을 확보하기 위해서는 외래어종 관리, 수생태 및 육상생태 보호지역 확대 등의 대책이 필요한 것으로 나타났다.

다양한 수질 오염원을 바탕으로 수질 압력 평가를 수행한 수질 요구량 압력지수는 수도권 주변 지역에서 집중적으로 높은 값을 보였으며, 지수-지표 상관성 분석 결과 인 및 질소부하 지표와 가장 상관성이 높았다. 대권역 수준으로 압력과 반응 역량을 취합한 결과, 수질 부분의 압력 수준은 전국적으로 비슷하게 나타났으나, 섬진강대권역에서 특히 반응역량이 매우 낮은 것으로 나타나 섬진강 대권역이 우리나라 평균 수준의 수질을 지속하기 위해서는 위생시설 확보, 오염원 관리 등이 필요한 것으로 나타났다.

유역의 물리적 변형으로 인한 유역의 수순환 스트레스를 나타내는 수자원 재생능력 압력지수는 아산만에 인접한 유역 및 만경·동진강 유역, 영산강하류 등에서 매우 높은 압력값을 나타냈으며, 지표-지수의 상관성 분석에서도 경작지 개발지역 지표와 가장 상관성이 높게 나타나 수자원 재생 능력에 큰 영향을 미치는 요인으로 지목되었다. 대권역 수준으로 압력영향 및 반응역량을 종합한 결과에서는 영산강 대권역에서 다른 대권역 평균에 비해 지속가능성이 매우 낮은 것으로 나타나 유역의 자연성 회복을 위한 육상 물순환체계 복원 및 물이용 효율 증가 등의 유역 회복 정책 지원이 필요한 것으로 나타났다.

유역 내 전반적인 소득수준을 통해 표현한 물관리 형평성 압력지수에서는 강원도 고지대 및 소백산맥 일대의 중권역에서 높은 압력값을 나타냄으로써 낮은 소득수준으로 인해 해당 지역에서의 지역적인 물이용 혜택으로부터 소외되어 있으며, 전국적 형평성을 유지할 수 있는 물관리의 어려움을 나타냈다. 대권역 수준으로 압력과 반응 역량을 종합한 결과, 섬진강 대권역에서 가장 지속가능성이 낮은 것으로 나타나 형평성 증진을 위한 집중적인 인프라 및 유역환경 투자가 이루어져야 하는 것으로 나타났다.

각 지표 및 지수의 가중치를 고려하여 취합한 총 압력지수는 아산만 주변의 안성천, 삽교천과 만경강 중권역 등의 서해 연안의 중권역에서 높게 나타났으며, 같은 방법으로 도출한 총 반응지수는 충주댐, 대청댐 등의 대형 댐이 위치한 지역과 강원도 산간지방, 그리고 수도권 및 광주, 부산, 대구 등 지방 광역시 등의 지역으로 나타나, 반응역량이 유효수량으로 인한 물 가용성 외에도 지자체의 사회적 관심 및 경제적 투자능력이 반영된 결과인 것으로 나타났다.

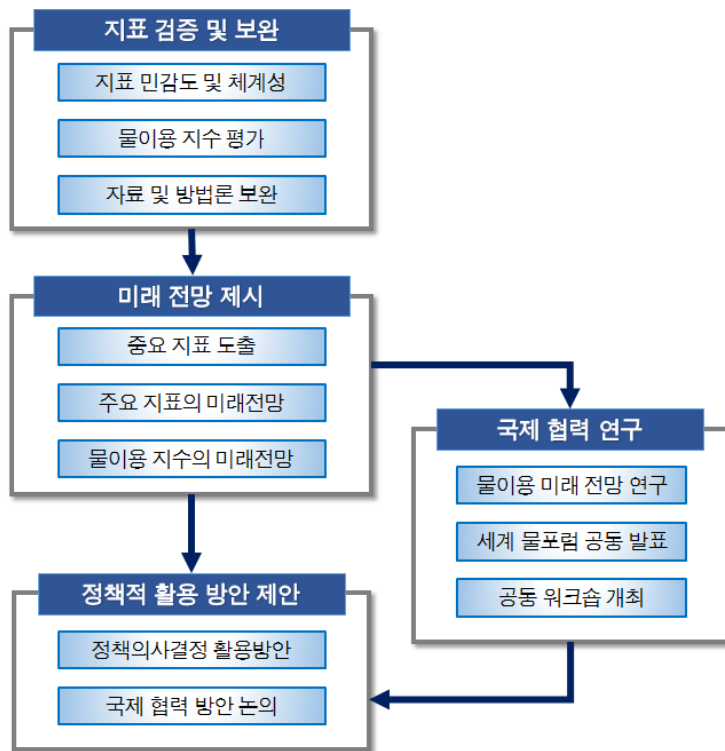
총 압력 및 반응 지수를 고려한 최종 지속가능한 물이용 지수 평가 결과, 강원 산간지역 및 5대강의 상류지역에서는 매우 높은 수준의 물이용 지속가능성을 보였다. 이는 위 지역에서는 인구밀도가 낮고 집중적인 개발수준이 낮아 유역의 자연성이 높을 뿐 아니라 물의 수요량이 적은 편이며, 하류로 수자원을 공급할 대형댐이 주로 위치하고 있어 수자원 보유력이 높게 나타난 것이라고 할 수 있다. 인구 및 인프라가 밀집한 대도시 및 수도권에서는 대부분의 압력이 매우 높은 수준임에도 불구하고, 반응 역량이 높아 최종 물이용 지속가능성 지수에서는 전국 대비 중간 정도의 값을 보이며 지속가능성을 유지해 나갈 수 있는 것으로 나타났다. 반면, 아산만에 인접한 안성천, 삽교천 중권역, 만경강, 영산강하류 중권역 등 서해안에 인접한 대부분의 유역에서 매우 낮은 수준의 지속가능성을 보이며 향후 지속가능한 물이용에 어려움을 겪을 것으로 나타났다. 이는 위 지역에서 높은 경작지 밀도로 인한 유역의 자연성 저하, 경작을 위한 높은 물 수요량, 낮은 소득 및 인프라 수준 등으로 인해 높은 압력지수와 낮은 반응지수의 결과라고 보인다. 따라서 최종 지속가능한 물이용 지수 평가 결과, 지금까지 인구가 밀집한 도시지역에서 물이용이 취약할 것이라는 통념상의 결과와 달리, 인구와 자본이 풍부한 도시지역에서는 반응역량이 높아 지속가능성 수준이 낮지 않은 것으로 나타났고, 오히려 서해안 연안 농업·공업지역이 취약할 것으로 평가되었다. 이에 따라 위 지역에서는 압력을 저감하고 반응역량을 강화할 수 있는 맞춤형 정책을 적용함으로써 지속가능한 물이용 목표를 달성할 수 있을 것이다.

또한 본 연구에서 수집한 자료를 바탕으로 세계은행과의 협력연구를 진행하였는데, 이는 전 세계를 대상으로 물안보 및 생물다양성을 평가한 Vörösmarty et al.(2010)의 지표 및 지수를 한반도를 대상으로 적용하여 재평가한 뒤 비교한 것이다. Vörösmarty et al.(2010)가 이용한 23개 지표 중 한반도에서 적용 가능한 17개 지표를 선정하여 본 연구에서 수집한 2010년대 자료를 이용하여 비교한 결과, 한반도상에서의 지표평가 결과는 ①2000년대 자료 및 저해상도 자료를 이용하여 평가한 Vörösmarty et al.(2010)의 결과와 분포는 비슷하지만 심화된 형태, 또는 ②다른 형태의 자료(원격탐사 또는 현장측정)를 사용함으로써 분포가 다르게 나타나는 형태 등을 확인할 수 있었다.

국제적인 물이용 환경 수준과 비교할 때 우리나라는 전 세계적인 수준 대비 농경지 및 도시화 비율이 매우 높아, 국제적으로도 매우 높은 수준의 수자원 압력을 가지는 반면, 원활한 물공급을 위한 인프라 시설이 집중적으로 개발되어 있어 압력에 대처할 수 있는 반응 역량도 큰 것으로 나타났다. 하지만 통합적인 관점에서 지속가능한 물이용의 목표를 달성하기 위해서는 유역 및 수생태계의 환경성 복원, 대체수원 개발, 물이용 효율 증대 등을 집중적으로 개선할 필요가 있는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 2차년도 연구에서는 지속적인 연구협력을 통해 지속가능한 물안보를 평가할 수 있는 대표지표 선정 및 지표를 통한 물안보 미래전망 연구를 수행하고자 한다.

2. 향후 과제

본 과제의 2차년도 연구계획을 아래 <그림 7-1>에 제시하였다. 당해연도에 기 개발된 지표의 검증 및 보완, 물이용 지표의 미래 전망 도출, 정책적 활용 방안 제시를 위한 연구를 수행하고자 한다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 7-1. 2차년도 과제 계획안

우선 지표의 검증 및 보완을 수행하고자 한다. 본 과업의 시험검증 부분에서 밝혔듯이 유출량 등의 자료 개선뿐 아니라 지표 항목의 수정보완을 수행하고자 한다. 1차년도 결과를 바탕으로 분야별 전문가 워크숍 등을 통한 충분한 의견수렴을 통해 기 구축된 지표 구성의 개선방안을

모색하고자 한다. 또한 물이용 지표의 지역별 민감도 등에 대한 분석을 통해 지표의 신뢰성을 향상시키고자 한다. 둘째로, 주요 지표의 미래 자료 수집을 통해 물이용 지속가능성의 미래 전망을 살펴보고자 한다. 미래 전망이 가능할 것으로 보이는 주요 자료는 인구, 유출량, 오염원 등을 포함하며, 이들의 미래 전망(2020, 2030 등) 자료를 바탕으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 마지막으로 기 구축된 지표의 정책적 활용을 위한 방안을 모색하고자 한다. 지표평가는 자료 개선을 통해 1년, 2년 단위 등의 주기적 갱신이 가능하며 이를 통해 국가 정책 방향을 제안할 수 있는 기반을 구축하고자 한다.

참고문헌



<국문 자료>

- 강민구, 박두호. 2010. "통합지표를 이용한 국가 수자원 평가 기법 제안". 「대한토목학회지」 58(9): 110-118.
- 강민구, 이광만. 2006. "수자원의 지속가능성 평가 지수 개발과 구성요소의 중요도 평가". 「한국수자원학회논문집」 39(1): 59-68.
- 경기개발연구원. 2008. 「하천의 자연도 및 생태건강성 평가를 통한 경기도 하천복원 전략」.
- 고재경, 황원실. 2008. "지방자치단체의 환경거버넌스 평가지표에 관한 연구". 「한국사회와 행정연구」 19(1): 113-140.
- 국립환경과학원. 2012. 「지자체 기후변화 적응 세부시행 계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도- 이수 분야」.
- 국토교통부. 2010. 「기후변화 대응 미래 수자원 전략」.
- _____. 2011. 「수자원장기종합계획(2011-2020)」.
- 김양수, 우효섭. 2004. "생태수문학의 소개". 「한국수자원학회논문집」 37(5): 78-81.
- 이동률 외. 2013. "통합수자원평가지수의 개발". 「한국수자원학회논문집」 46(10): 1017-1028.
- 이은형, 서동일. 2011. "SWAT-CUP을 이용한 대청호 유역 장기 유출 유량 보정 및 검증". 「한국수자원학회논문집」 44(9): 711-720.
- 최동진. 2008. "물 관리에서 중앙과 지방의 역할 및 기능 재정립". 「한국수자원학회논문집」 41(3):17-22.
- 최동진, 박두호, 김상문. 2009. "이수분야 수자원 정책지표 개발". 「한국습지학회논문집」 11(3): 153-160.
- 최시중, 이동률. 2005. "지속가능한 수자원 개발과 관리를 평가하기 위한 지표". 「한국수자원학회논문집」 38(9): 779-790.
- 변정연 외. 2012. "시공간 정보기반 산림 생태계의 기후변화 취약성 평가". 「대한원격탐사학회논문집」 28(1): 159-169.
- 한국환경정책·평가연구원. 2009. 「기후변화 대응을 위한 물환경 관리전략 및 정책방향(I)」.
- 홍일표, 정은성, 김영규, 전상목. 2011. 「물 안보 확보를 위한 전 지구적 전략과 사례 및 우리나라의 대응체계」.
- _____. 국제수문개발계획(IHP) 제7단계 제4차년도 연구 보고서. 2011.12, 국토해양부.
- 한국환경정책·평가연구원. 2001. 「국가 지속가능발전지표 개발 및 활용방안 연구」.

환경부. 2001. 「국가 지속가능발전지표 개발 및 활용방안 연구」.

_____. 2011. 「수생태계 건강성 조사 및 평가: 총괄요약」.

_____. 2011. 「수생태계 건강성 조사 및 평가: 한강」.

_____. 2011. 「수생태계 건강성 조사 및 평가: 낙동강」.

_____. 2011. 「수생태계 건강성 조사 및 평가: 금강」.

_____. 2011. 「수생태계 건강성 조사 및 평가: 영산·섬진」.

_____. 2012. 「환경백서(2011)」.

_____. 2013. 「상수도 통계」.

_____. 2013. 「하수도 통계」.

환경부 토양지하수과 고시 제2012-124호. 「표토의 침식 현황 조사에 관한 고시」 (2012.7.18 제정).

<중권역별 물환경관리계획 보고서>

대권역	중권역	발간년도	발간처	중권역	발간년도	발간처
한강	남한강상류	2012	원주지방환경청	의암댐	2009	한강유역환경청
	평창강	2008	원주지방환경청	홍천강	2009	원주지방환경청
	충주댐	2008	원주지방환경청	청평댐	2009	한강유역환경청
	달천	2012	원주지방환경청	경안천	2011	한강유역환경청
	충주댐하류	2008	원주지방환경청	팔당댐	2007	한강유역환경청
	섬강	2008	원주지방환경청	증평천(한강서울)	2008	한강유역환경청
	남한강하류	2009	한강유역환경청	한강고양	2008	한강유역환경청
	금강산댐	2009	원주지방환경청	고미단천	-	-
	평화의댐	2009	원주지방환경청	임진강상류	2009	한강유역환경청
	춘천댐	2009	원주지방환경청	한탄강	2009	한강유역환경청
	인북천	2010	원주지방환경청	임진강하류	2009	한강유역환경청
소양강	2010	원주지방환경청	한강하류	2008	한강유역환경청	
안성천	안성천	2009	한강유역환경청			
한강서해	한강서해	2009	한강유역환경청	시화호	2009	한강유역환경청
한강 동해	양양남대천	2009	원주지방환경청	삼척오십천	2009	원주지방환경청
	강릉남대천	2012	원주지방환경청			
낙동강	안동댐	2013	대구지방환경청	금호강	2012	대구지방환경청
	임하댐	2013	대구지방환경청	회천	2013	대구지방환경청
	안동댐하류	2013	대구지방환경청	낙동고령	2013	대구지방환경청
	내성천	2013	대구지방환경청	합천댐	2009	낙동강유역환경청
	영강	2013	대구지방환경청	황강	2009	낙동강유역환경청
	병성천	2013	대구지방환경청	낙동창령	2009	낙동강유역환경청

대권역	중권역	발간년도	발간처	중권역	발간년도	발간처
	낙동상주	2013	대구지방환경청	낙동상주	2008	낙동강유역환경청
	위천	2013	대구지방환경청	낙동상주	2008	낙동강유역환경청
	낙동구미	2013	대구지방환경청	낙동밀양	2008	낙동강유역환경청
	감천	2013	대구지방환경청	밀양강	2008	낙동강유역환경청
	낙동왜관	2013	대구지방환경청	낙동강하구언	2010	낙동강유역환경청
형산강	형산강	2012	대구지방환경청			
태화강	태화강	2010	낙동강유역환경청			
회야수영	회야강	2010	낙동강유역환경청	수영강	2010	낙동강유역환경청
낙동강 동해	왕피천	2013	대구지방환경청	대종천	2013	대구지방환경청
	영덕오십천	2013	대구지방환경청			
낙동강 남해	가화천	2010	낙동강유역환경청	거제도	2010	낙동강유역환경청
	남해도	2009	영산강유역환경청	낙동강남해	2010	낙동강유역환경청
금강	용담댐	2007	전주지방환경청	대청댐	2007	금강유역환경청
	용담댐하류	2007	전주지방환경청	갑천	2011	금강물환경연구소
	무주남대천	2007	전주지방환경청	대청댐하류	2009	금강물환경연구소
	영동천	2011	금강물환경연구소	미호천	2011	금강물환경연구소
	초강	2011	금강물환경연구소	금강공주	2011	금강물환경연구소
	대청댐상류	2007	금강유역환경청	논산천	2009	금강물환경연구소
	보청천	2011	금강물환경연구소	금강하구언	2009	금강물환경연구소
삼교천	삼교천	2011	금강물환경연구소			
금강 서해	대호방조제	2009	금강물환경연구소	금강서해	2009	금강물환경연구소
	부남방조제	2009	금강물환경연구소			
만경. 동진	만경강	2008	전주지방환경청	직소천	2010	전주지방환경청
	동진강	2008	전주지방환경청			
섬진강	섬진강댐	2010	전주지방환경청	섬진곡성	2009	영산강유역환경청
	섬진강댐하류	2010	전주지방환경청	주암댐	2008	영산강유역환경청
	오수천	2010	전주지방환경청	보성강	2008	영산강유역환경청
	순창	2010	전주지방환경청	섬진강하류	2009	영산강유역환경청
	요천	2010	전주지방환경청			
섬진강 남해	섬진강서남해	2010	영산강유역환경청	이사천	2008	영산강유역환경청
	완도	2010	영산강유역환경청	수어천	2009	영산강유역환경청
	금산면	2008	영산강유역환경청	여수시	2009	영산강유역환경청
영산강	영산강상류	2007	영산강유역환경청	고막원천	2010	영산강유역환경청
	황룡강	2007	영산강유역환경청	영산강하류	2011	영산강유역환경청
	지석천	2008	영산강유역환경청	영암천	2012	영산강유역환경청
	영산강중류	2009	영산강유역환경청	영산강하구언	2013	영산강유역환경청
탐진강	탐진강	2010	영산강유역환경청			
영산강 남해	진도	2010	영산강유역환경청	영암방조제	2013	영산강유역환경청

대권역	중권역	발간년도	발간처	중권역	발간년도	발간처
영산강 서해	주진천	2008	전주지방환경청	신안군	2010	영산강유역환경청
	와탄천	2010	영산강유역환경청			
제주도	제주서해	2009	영산강유역환경청	제주남해	2009	영산강유역환경청
	제주북해	2013	영산강유역환경청	제주동해	2009	영산강유역환경청

<영문 자료>

- Ahearn, D. S., R. W. Sheibley, and R. A. Dahlgren. 2005. "Effects of river regulation on water quality in the lower Mokelumne River, California". *River Research and Applications*, 21: 651-670.
- Alexander, R.B. et al. 2008. "Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi river basin". *Environmental Science Technology*, 42(3): 822-830.
- Baguma, D., W. Loiskandl, and H. Jung. 2010. "Water management, rainwater harvesting and predictive variables in rural households". *Water Resource Management*, 24: 3333-3348.
- Bell, S. 2012. "DPSIR: a problem structuring method? an exploration from the "Imagine" approach". *European Journal of Operational Research*, 222: 350-360.
- Bell, S. and S. Morse. 2008. *Sustainability Indicators: Measuring the Immeasurable?* Earthscan: 3-5.
- Bogardi, J. J. et al. 2012. "Water security for a planet under pressure: interconnected challenges of a changing world call for sustainable solutions". *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4: 35-43.
- Brönmark, C. and L. A. Hansson. 2002. "Environmental issues in lakes and ponds: current state and perspectives". *Environmental Conservation*, 29: 290-306.
- Brown, O. and A. Crawford. 2009. *Rising Temperatures, Rising Tensions: climate change and the risk of violent conflict in the Middle East*. International Institute for Sustainable Development(IISD), Manitoba Canada.
- Chapes, H. M. L. and S. Alipaz. "An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index." *Water Resource Management* 21: 883-895.
- Daily, G.C. et al. 2000. "The value of nature and the nature of value". *Science*, 289: 395-396.
- Döll, P., F. Kaspar, and B. Lehner. 2003. "A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation". *Journal of Hydrology*, 270: 105-134.
- Dudgeon, D. et al. 2006. "Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges".

- Biological Reservation*, 81: 163-182.
- Esty, D. C. et al. 2005. *2005 Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship*. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy.
- Falkenmark, M. 1989. "The massive water scarcity threatening Africa-why isn't it being addressed". *Ambio* 18(2): 112-118.
- _____. 1990. "Rapid population growth and water scarcity: the predicament of tomorrow's Africa". *Population and Development Review*, 16: 81-94.
- Falkenmark, M. and C. Widstrand. 1992. *Population and Water Resources: A Delicate Balance*. Population Bulletin. Population Reference Bureau, Washington, D.C.
- Foley, J. A. et al. 2005. "Global consequences of land use". *Science*, 309(5734): 570-4.
- Foxon, T. J. et al. 2002. "Sustainability criteria for decision support in the UK water industry". *Journal of Environmental Planning and Management*, 45(2): 285-301.
- Fresco, L. O. and S. B. Kroonenberg. 1992. "Time and spatial scales in ecological sustainability". *Land Use Policy*, 9(3): 155-68.
- Gleick, P. H. 1996. "Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs". *Water International (IWRA)*, 21: 83-92.
- _____. 1998. "Water in crisis: paths to sustainable water use". *Ecological Applications*, 8(3): 571-579.
- GWP (Global Water Partnership). 2000. *Integrated Water Resources Management*. Technical Advisory Committee Background Paper No. 4.
- _____. 2006. *Monitoring and evaluation indicators for IWRM strategies and plans*. Technical Brief 3.
- Green, P. A., C. J. Vorosmarty, M. Meybeck, J. N. Galloway, B. J. Peterson, and E. W. Boyer. 2004. "Pre-industrial and contemporary fluxes of nitrogen through rivers: a global assessment based on typology". *Biogeochemistry*, 68: 71-105.
- Hajkowicz, S. and L. Collins. 2007. "A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management". *Water Resource Management*, 21: 1553-1566.
- Hoff, H. 2009. "Global water resources and their management". *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1: 141-147.
- Holzkamper, A. et al. 2012. "Bringing diverse knowledge sources together - a meta-model for supporting

- integrated catchment management". *Journal of Environmental Management*, 96: 116-127.
- Hsu, A., L. A. Johnson, and A. Lloyd. 2013. *Measuring Progress: A Practical Guide From the Developers of the Environmental Performance Index (EPI)*. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy.
- Kwong, C. and H. Bai. 2002. "A fuzzy AHP approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13: 367-377.
- Loukas, A., N. Mylopoulos, and L. Vasilades. 2007. "A modeling system for the evaluation of water resources management strategies in Thesaly, Greece". *Water Resource Management*, 21: 1673-1702.
- Milly, P. C. D., K. A. Dunne, and A. V. Vecchia. 2005. "Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate". *Nature*, 438: 347-350.
- Naiman, R. J. and D. Dudgeon. 2011. "Global alteration of freshwaters: influences on human and environmental well-being". *Ecological Restoration*, 26: 865-873.
- Nardoo, M. et al. 2005. *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. OECD Statistics Working Paper.
- Naumann, G. et al. 2014. "Exploring drought vulnerability in Africa: an indicator based analysis to be used in early warning systems". *Hydrology and Earth System Sciences*, 18: 1591-1604.
- Nelson, K. et al. 2009. "Forecasting the combined effects of urbanization and climate change on stream ecosystems: from impacts to management options". *Journal of Applied Ecology*, 46: 154-163.
- Nilsson, C. et al. 2005. "Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems". *Science*, 308: 405-408.
- OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development). 2009. *Managing Water for All: An OECD perspective on pricing and financing*.
- Ohlsson, L. 2000. "Water Conflicts and Social Resource Scarcity". *Physics and Chemistry of the Earth*, 25: 213-220.
- Oki, T. and S. Kanae. 2006. "Global hydrological cycles and world water resources". *Science*, 313(5790): 1068-72.
- Palmer, M. et al. 2009. "Climate change and river ecosystems: protection and adaptation options". *Environmental Management*, 44(6): 1053-68.

- Pandey, D. N. 2001. "A bountiful harvest of rainwater". *Science*, 293: 1763.
- Poff, N. L. et al. 1997. "The natural flow regime: a new paradigm for riverine conservation and restoration". *BioScience*, 47: 769-784.
- Postel, S. L., G. C. Daily, and P. R. Ehrlich. 1996. "Human appropriation of renewable fresh water". *Science*, 271: 785-788.
- Raskin, P. et al. 1997. *Assessment of long-range Patterns and Problems Perspectives*. Background Document of the Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Stockholm: Stockholm Environment Institute/United Nations.
- Ricciardi, A. and J. B. Rasmussen. 1999. "Extinction rates of north American freshwater fauna". *Conservational Biology*, 13: 220-222.
- Ritcher, B. D. et al. 2003. "Ecological sustainable water management: managing river flows for ecological integrity". *Ecological Applications*, 13(1): 206-224.
- Reich, P., H. Eswaran, and F. Beinroth. 2001. *Global dimensions of vulnerability to wind and water erosion*. 10th International Soil Conservation Organization Meeting, Sustaining Global Farm, 838-846 (peer-reviewed).
- Sahely, H. R. et al. 2005. "Developing sustainability criteria for urban infrastructure systems". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32: 72-85.
- Shiklomanov, I. A. 1993. "World freshwater resources". In P. H. Gleick ed. *Water in Crisis: A Guide to the World's Freshwater Resources*. New York: Oxford University Press.
- Smeets, E. and R. Weterings. 1999. *Environmental Indicators: Typology and overview*. Copenhagen: European Environment Agency.
- Smith, V. H. 2003. "Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem". *Environmental Science and Pollution Research*, 10(2): 126-139.
- Sullivan, C. A. 2002. "Calculating a Water Poverty Index". *World Development*, 30(7): 1195-1210.
- Sullivan, C. A. et al. 2003. "The Water Poverty Index: Development and application at the community scale". *Natural Resources Forum* 27: 189-199.
- Sullivan, C. A. and J. Meigh. 2005. "Targeting attention on local vulnerabilities using an integrated index approach: the example of the Climate Vulnerability Index". *Water Science and Technology*, 51(5):

69-78.

- Sun, G. et al. 2008. "Impacts of Climate Change, Population Growth, Land Use Change, and Groundwater Availability on Water Supply and Demand Across the Conterminous U.S." *Journal of the American Water Resources Association*, 44(6): 1441-1457.
- Saaty, T. L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill.
- Tilman, D. et al. 2001. "Forecasting agriculturally driven global environmental change". *Science*, 292: 81-284.
- UNCSO (United Nations Commission on Sustainable Development). 2007. *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies 3rd edition*, United Nations: New York.
- UNCED (United Nations Conference on Environment and Development). 1992. *Agenda 21*.
- UNDP (United Nations Development Programme). 2011. *Human Development Report 2011: Sustainability and Equity*, New York: Palgrave Macmillan.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2010. *Dead Planet, Living Planet – Biodiversity and Ecosystem Restoration for Sustainable Development*, A Rapid Response Assessment, United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 2009. *IWRM Guidelines at River Basin Level*, SC.2009/WS/9 UNESCO Nairobi.
- UUNGSP (United Nations Secretary-General's high-level panel on Global Sustainability). 2012. *Resilient People, Resilient Planet: A Future Worth Choosing*, New York: United Nations.
- UN WATER, 2006. *Mapping existing global systems and initiatives*, FAO.
- Vörösmarty, C. J. et al. 2000a. "Global water resources: vulnerability from climate change and population growth". *Science*, 289: 284-288.
- _____. 2000b. "Geomorphometric attributes of the global system of rivers at 30-minute spatial resolution". *Journal of Hydrology*, 237: 17-39.
- _____. 2003. "Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments". *Global and Planetary Change*, 39: 169-190.
- _____. 2005. "Geospatial indicators of emerging water stress: an application to Africa," *Ambio (Royal Swedish Academy of Sciences)*, 34(3): 230-236.
- _____. 2010. "Global threats to human water security and river biodiversity". *Nature*, 467: 555-561.

- Walsh, C. J. et al. 2005. "The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure". *Journal of the North American Benthological Society*, 24: 706-723.
- Weiland, U. et al. 2011. "Indicators for sustainable land use management in Santiago de Chile". *Ecological Indicators*, 11(5): 1074-1083.
- WCD (World Commission on Dams). 2000. *Dams and development: a new framework for decisions-making*. Earthscan Publications Ltd, London and Sterling, Virginia, p.404.
- WCED (World Commission on Environment and Development). 1987. *Our common future*.
- WSSD (World Summit on Sustainable Development). 2002. *Johannesburg Declaration*. UN New York.
- Zalewski, M. 2012. "Ecohydrology - process oriented thinking for sustainability of river basins". *Ecohydrology and Hydrobiology*, 12(2): 89-92.

〈온라인 자료〉

e-나라지표. http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2422

환경성과지수. <http://epi.yale.edu>

흙토람 홈페이지. <http://soil.rda.go.kr>



부록 1. 가중치 설정을 위한 설문조사 양식 및 결과

지속가능한 물이용 평가 지표의 상대적 중요도 산정을 위한 전문가 설문조사

안녕하십니까?

한국환경정책·평가연구원에서는 우리나라의 지속가능한 물이용을 평가하기 위해 <지속가능한 물이용을 위한 지표개발 및 적용방안 연구(I)> 과제를 수행하고 있습니다. 이는 우리나라 유역 중 중권역을 대상으로 지속가능한 물이용을 평가할 수 있는 지표를 선정하여 가중치를 고려해 통합 평가하고자 하는 연구입니다.

이와 관련하여, 지속가능한 물이용 지표별 중요도에 대한 전문가분들의 의견을 반영하고자 다음과 같이 설문조사를 실시하고자 합니다.

설문에 소요되는 시간은 약 20분으로 예상되며, 설문조사에 응해주신 분에 소정의 사례비를 지급할 예정입니다. 바쁘시더라도 잠시 시간을 내시어 설문에 응해 주시면 대단히 감사하겠습니다.

답변하여 주신 자료는 본 연구에 소중하게 사용될 것이며, 작성하신 설문내용은 팩스, 이메일 등 희망하시는 방법으로 회신하여 주시기 바랍니다. 본 조사에 문의사항이 있으신 분은 연락주시면 성실히 답변드리겠습니다.

본 조사는 통계법 제8조에 따라 기밀로 관리되며, 설문지를 통해서 수집된 자료는 통계법 제13조 및 제14조에 의거하여 순수한 학문적 연구 목적으로만 사용됩니다.

감사합니다.

제출일 마감: 2014.6.15(일)

제출처: 한국환경정책·평가연구원 정책연구본부 물환경연구실

담당자: 김연주 부연구위원 (02-380-7624, yjkim@kei.re.kr)

공인혜 연구원 (02-6922-7820, ihkong@kei.re.kr)

〈설문조사 작성 안내〉

본 설문지는 우리나라의 지속가능한 물이용을 평가하고자 하는 다섯 가지 카테고리 및 하위 지표의 상대적 가중치를 산정하고자 하는 것입니다.

본 설문에 활용할 방법은 계층화 의사결정방법(AHP: Analytic Hierarchy Process)으로, 두 지표 사이의 상대적 중요도를 판단하여 최종적으로 한 지표의 중요도를 결정하는 의사결정기법입니다.

아래 설문작성방법을 참고하셔서 설문 문항에 응답해주시기 바랍니다.

—설문방식—

두 지표를 일대일로 비교하여 상대적인 중요도를 판단하셔서 ‘○’를 표시하시면 됩니다.

(예)

질소	중요				동등				중요	토사
부하	5	4	3	2	1	2	3	4	5	유출
			○							

〈지표 개요〉

지속가능한 물이용을 평가하기 위해 본 연구에서는 1) 스트레스와 2) 스트레스저감(조정) 지표를 분리하여 구성하였습니다. 예를 들어, 댐의 존재는 지속가능한 생태계 및 유역관리 측면에서 스트레스 요인으로 작용할 수 있지만, 지속가능한 인간의 물이용을 가능케 하는 점을 감안한다면 스트레스저감지표로도 이용할 수 있습니다. 즉, 스트레스지표는 해당 항목의 지속가능성을 위협하는 지표들로, 스트레스저감지표는 해당 항목의 지속가능성을 가능케 하는 지표들로 이루어져 있습니다.

본 연구에서 스트레스 지표와 스트레스저감지표는 각각 다섯 가지 카테고리로 분류하였습니다.

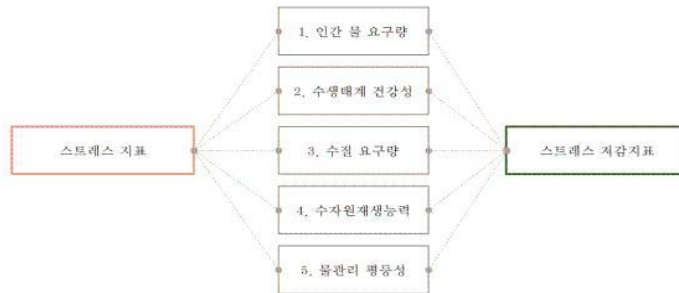
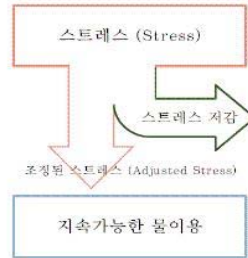


표 1 스트레스 및 스트레스 저감 지표 대분류

1	인간 물 요구량	Human water requirements	지속가능한 인간의 물이용을 위협하는 또는 가능케 하는 지표
2	수생태계 건강성	Health of Aquatic Ecosystems	하천 및 수생태계 내의 건전성을 위협하거나 가능케 하는 지표
3	수질 요구량	Water quality requirements	수질이 악화되었다고 설명할 수 있는 지표들로 스트레스지표를, 수질을 개선할 수 있는 지표들을 스트레스저감지표
4	수자원 재생 능력	Renewability of water resources	유역전반을 변형·교란시키는 요인들을 스트레스 지표로, 유역의 건전한 물순환을 돕는 요인들을 스트레스저감지표로 구성
5	물관리 평등성	Equitable water management	행정, 투자, 참여 등 물이용에 영향을 미치는 경제·사회적 영향요인을 포함하는 지표

표 2. 스트레스 지표 하위항목

항목	지표	변수
인간 물 요구량	소모성 물 사용량	다시 유희되지 않고 완전 소모되는 물의 양으로 각종 용수 이용량에서 회귀율을 제한 값으로, 강우유희수 및 지하수 등 모든 수원을 통해 소모되는 용수이용량을 고려함 ○가정, 농업, 공업용수*(1-회귀비율)
	인간 물 스트레스	가정 및 공업 용도로 직접적인 인간의 이용에 필요한 물의 잠재부족량, ○각 권역별로 사용할 수 있는 수량(유희량)/인구
	농업 물 스트레스	농업용수로 이용되는 물의 잠재 부족량, ○각 권역별로 사용할 수 있는 수량(유희량)/농경지
수생태계 건강성	물흐름 조작	물의 나이, 물을 가두는 시설물의 유효수량이 많을수록 물의 나이가 많아지게 되며, 이는 수온상승, 수질오염 등을 유발할 수 있음 ○유역 내 대형댐의 유효수량
	댐 밀도	대형 댐이 많을수록 수몰지역 등으로 생태계의 환경적 변형 및 교란이 심화되었다고 가정하며 각종 대형 변화를 초래했다고 가정 ○유역 내 대형댐의 개소수
	하천 파면화	하천을 통한 어류 등 수생태계 개체가 이동이 가능한 구역으로, 하천을 가로막는 각종 시설이 많을수록 이동가능한 구역이 줄어들음 ○유역 내 가장 수표면적이 넓은 지역/전체수표면적
	외래어종(마리)	외래 침입종은 생태계의 교란을 일으킴. 절대적 개체수
	외래어종(비율)	외래 침입종은 생태계의 교란을 일으킴. 조사된 전체 어류 개체 중 외래어종 개체 비율
	어획 및 양식압력	하천, 담수를 이용한 내수면어업을 통한 어패류 생산량과 해당 지역에서 이용가능한 물의 양을 비교함으로써 내수면어업의 스트레스 선정 ○내수면어업생산량/유희량
수질 요구량	질소 부하	부영양화를 유발하는 대표적인 성분
	인 부하	부영양화를 유발하는 대표적인 성분
	농약 오염	독성을 띠는 물질을 포함할 수 있음
	토사 유희량	수질을 탁하게 하며, 각종 시설물의 수명을 단축시키기도 함
	유기물 부하	BOD 및 COD를 증가시키며 부영양화의 원인이 됨

수자원 재생능력	경작지 개발지역	해당 구역 내 경작지(논, 밭, 과수원 등)의 면적, 경작지가 구역 변형에 미치는 잠재영향을 고려함 ○경작지면적/전체토지피복
	불투수층 개발지역	해당 구역 내 시가지지역 등 불투수층의 면적, 불투수층이 구역 물순환 변형에 미치는 잠재영향을 고려함 ○불투수층면적/전체토지피복
	가축밀도	해당 구역 내 가축두수와 가축의 평균몸집계수를 곱해, 담압 등 물리적인 구역 환경 변화를 산정. ○가축두수*몸집계수
	습지 개간율	과거 습지였던 지역 중 경작지 또는 시가지지역으로 토지피복이 변경된 지역으로 습지의 본래 기능을 잃은 지역을 도출 ○과거습지지역 중 현재 경작, 시가지지역으로 변화한 면적
물관리 평등성	소득 스트레스	지역 내 총 소득은 해당 지역의 재정자주도를 뒷받침함으로써 행정전반 및 시설투자에 영향을 미친다고 가정 ○GRDP(지역총생산량)

표 3. 스트레스저감지표 하위항목

항목	지표	변수
인간 물 요구량	물이용 인프라	댐, 저수지, 보 등 물 공급을 조절하는 인프라 ○인프라 개소수
	적정 물이용 수준	지속적으로 사용할 수 있는 물(충전 가능한 수원, 또는 강우유출량) 대비 인간이 사용하는 물의 비율이 임계점 10%에 달할때까지는 원활한 물이용을 통해 사회적 혜택benefit이 증가한다고 보고, 0-10% 사이에서의 비율로 평가. 10%를 초과할 경우 물이용의 건전성이 없는 것(value=0)으로 판단. ○물수사용량/유출량
	하천 접근성	하천정비 등을 통해 인간의 수자원 이용을 원활히 할 수 있게 만들어진 지역의 비율 ○완전제방기준 개소율
수생태계 건강성	수생태 보호지역	수생태계의 보전을 목적으로 지정된 보호지역 ○상수원보호구역
	육상생태 보호지역	유역 내 육상 생태계의 보전을 목적으로 지정된 보호지역으로, 강우로 인해 지표유출수가 발생하는 경우 유역 육상부를 통해 모이는 점을 고려하여 선정함 ○국토환경성평가 1등급지역
수질 요구량	위생시설	하수처리장 등 하수, 오폐수 등을 처리하는 시설의 최대용량 ○하수 및 분뇨처리장 처리용량
수자원 재생능력	물 재이용량	하수처리수 이용, 중수 이용 등 처리를 거친 물을 다시 이용하는 양(처리후 실제 이용량). ○하수처리수 및 중수 재이용량
	대체수원 잠재량	강우로 인한 수원 이외에 보완적으로 사용할 수 있는 수원의 양으로, 빗물이용 잠재량(빗물시설용량). ○빗물저장시설용량
물관리 평등성	수도 접근성	식수를 공급하는 상수도 및 오수를 이동시키는 하수도 시설의 보급률 ○상하수도보급률
	수자원 투자비용	수자원 관련 정책 및 사업에 투자하는 예산 ○중권역별 수자원 관련 시설투자비용
	수자원 거버넌스	수자원 관련 정책 결정을 할 때, 해당 지역주민의 의견을 수렴하고 참여를 유도하는 수준 ○물관련 공무원 수

〈스트레스 지표〉

1. 스트레스 지표의 대분류 카테고리의 상대적 중요도

1	인간 물 요구량	Human water requirements	인간의 이용을 위해 필요한 물
2	수생태계 건강성	Health of aquatic ecosystems	하천 및 수생태계 내의 건강성을 평가
3	수질 요구량	Water quality requirements	인간과 생태계가 이용하는 수질 요구량
4	수자원 재생 능력	Renewability of water resources	물을 이용하기 위한 전반적인 조건의 건강성 (유역환경, 대체수원량 등)
5	물관리 평등성	Equitable water management	물이용을 관리하는 행정기반, 투자 등

항목	중요					중요			항목	
	5	4	3	2	1	2	3	4		5
1.인간 물 요구량										2.수생태계 건강성
1.인간 물 요구량										3.수질 요구량
1.인간 물 요구량										4.수자원 재생 능력
1.인간 물 요구량										5.물관리 평등성
2.수생태계 건강성										3.수질 요구량
2.수생태계 건강성										4.수자원 재생 능력
2.수생태계 건강성										5.물관리 평등성
3.수질 요구량										4.수자원 재생 능력
3.수질 요구량										5.물관리 평등성
4.수자원 재생 능력										5.물관리 평등성

2. 스트레스 지표 대분류 내 지표의 상대적 중요도

2.1 인간 물 요구량 내 스트레스 지표의 상대적 중요도

〈항목〉

1.1	소모성 물 사용량	각종 용수 이용량에서 회귀율을 제한 값으로, 다시 유희되지 않고 소모되는 물의 양 ○가정, 농업, 공업용수*(1-회귀비율)
1.2	인간 물 스트레스	가정 및 공업 용도로 직접적인 인간의 이용에 필요한 물의 잠재부족량. ○각 권역별로 사용할 수 있는 수량(유희량)/인구
1.3	농업 물 스트레스	농업용수로 이용되는 물의 잠재 부족량. ○각 권역별로 사용할 수 있는 수량(유희량)/농경지

항목	중요					동등					항목
	5	4	3	2	1	2	3	4	5		
1.소모성 물 사용량											2.인간 물 스트레스
1.소모성 물 사용량											3.농업 물 스트레스
2.인간 물 스트레스											3.농업 물 스트레스

2.2 수생태계 건강성 내 스트레스 지표의 상대적 중요도

2.1	물흐름 조작	물의 나이, 물을 가두는 시설물의 유효수량이 많을수록 물의 나이가 많아지게 되며, 이는 수질오염 등을 유발할 수 있음 ○유역 내 대형댐의 유효수량
2.2	대형 댐 개수	대형 댐이 많을수록 수몰지역 등으로 생태계의 환경적 변형 및 교란이 심화되었다고 가정하며 각종 대형 변화를 초래했다고 가정 ○유역 내 대형댐의 개소수
2.3	하천 파편화	하천을 통한 어종 및 유전자원이 이동이 가능한 구역으로, 하천을 가로막는 각종 시설이 많을수록 이동가능한 구역이 줄어듦 ○유역 내 가장 수표면적이 넓은 지역/전체수표면적
2.4	외래어종 (마리)	외래 침입종은 생태계의 교란을 일으킴, 절대적인 개체 수.
2.5	외래어종 (비율)	외래 침입종은 생태계의 교란을 일으킴, 조사면 전체 어류 개체 중 외래어종 개체 비율
2.6	내수면어업 입력	하천, 담수를 이용한 내수면어업을 통한 어패류 생산량과 해당 지역에서 이용가능한 물의 양을 비교함으로써 내수면어업의 스트레스 산정 ○내수면어업생산량/유효량

항목	중요					중요				항목
	5	4	3	2	1	2	3	4	5	
1.물흐름 조작										2.대형댐 개수
1.물흐름 조작										3.하천 파편화
1.물흐름 조작										4.외래어종(마리)
1.물흐름 조작										5.외래어종(비율)
1.물흐름 조작										6.내수면어업 입력
2.대형댐 개수										3.하천 파편화
2.대형댐 개수										4.외래어종(마리)
2.대형댐 개수										5.외래어종(비율)
2.대형댐 개수										6.내수면어업 입력
3.하천 파편화										4.외래어종(마리)

3.하천 피편화										5.외 레어종(비율)
3.하천 피편화										6.내수면어업 입력
4.외레어종(마리)										5.외 레어종(비율)
4.외레어종(마리)										6.내수면어업 입력
5.외레어종(비율)										6.내수면어업 입력

2.3 수질 요구량 내 스트레스 지표의 상대적 중요도

3.1	질소 부하	부영양화를 유발하는 대표적인 성분
3.2	인 부하	부영양화를 유발하는 대표적인 성분
3.3	농약 사용량	독성을 띠는 물질을 포함할 수 있음
3.4	토사 유출	수질을 탁하게 하며, 각종 시설물의 수명을 단축시키기도 함
3.5	유기물 부하	BOD 및 COD를 증가시키며 부영양화의 원인이 됨

항목	중요					통등				항목	
	5	4	3	2	1	2	3	4	5		
1.질소 부하											2.인 부하
1.질소 부하											3.농약 사용량
1.질소 부하											4.토사 유출
1.질소 부하											5.유기물 부하
2.인 부하											3.농약 사용량
2.인 부하											4.토사 유출
2.인 부하											5.유기물 부하
3.농약 사용량											4.토사 유출
3.농약 사용량											5.유기물 부하
4.토사 유출											5.유기물 부하

2.4 수자원 재생능력 내 스트레스 지표의 상대적 중요도

4.1	경작지 개발	해당 구역 내 경작지의 면적, 경작지가 구역 변형에 미치는 잠재영향을 고려함 ○경작지면적/전체토지피복
4.2	불투수층 개발	해당 구역 내 시가지지역 등 불투수층의 면적, 불투수층이 구역 물순환 변형에 미치는 잠재영향을 고려함 ○불투수층면적/전체토지피복
4.3	가축 밀도(물리적)	해당 구역 내 가축두수와 가축의 평균움집계수를 곱해, 담압 등 물리적인 구역 환경 변화를 산정. ○가축두수*움집계수
4.4	습지 개간율	과거 습지였던 지역 중 경작지 또는 시가지지역으로 토지피복이 변경된 지역으로 습지의 본래 기능을 잃은 지역을 도출 ○과거습지지역 중 현재 경작, 시가지지역으로 변화한 면적

항목	중요					중요				항목
	5	4	3	2	1	2	3	4	5	
1.경작지 개발										2.불투수층 개발
1.경작지 개발										3.가축밀도 (물리적)
1.경작지 개발										4.습지 개간율
2.불투수층 개발										3.가축밀도 (물리적)
2.불투수층 개발										4.습지 개간율
3.가축밀도 (물리적)										4.습지 개간율

2.5 물관리 평등성 내 스트레스 지표의 상대적 중요도

5.1	소득 스트레스	지역 내 총 소득은 해당 지역의 재정자주도를 뒷받침함으로써 행정전반 및 시설투자에 영향을 미친다고 가정 ○GRDP(지역총생산량)
-----	---------	--

〈스트레스 저감 지표〉

3. 스트레스 저감 지표의 대분류 카테고리의 상대적 중요도

1	인간 물 요구량	Human water requirements	인간의 이용을 위해 필요한 물
2	수생태계 건강성	Health of Aquatic Ecosystems	하천 및 수생태계 내의 건강성을 평가
3	수질 요구량	Water quality requirements	인간과 생태계가 이용하는 물의 수질에 대한 평가
4	수자원 재생 능력	Renewability of water resources	물을 이용하기 위한 전반적인 조건의 건강성 (유역환경, 대체수원 등)
5	물관리 평등성	Equitable water management	물이용을 관리하는 행정기반, 투자 등

항목	중요					중요				항목
	5	4	3	2	1	2	3	4	5	
1.인간 물 요구량										2.수생태계 건강성
1.인간 물 요구량										3.수질 요구량
1.인간 물 요구량										4.수자원 재생 능력
1.인간 물 요구량										5.물관리 평등성
2.수생태계 건강성										3.수질 요구량
2.수생태계 건강성										4.수자원 재생 능력
2.수생태계 건강성										5.물관리 평등성
3.수질 요구량										4.수자원 재생 능력
3.수질 요구량										5.물관리 평등성
4.수자원 재생 능력										5.물관리 평등성

4. 스트레스 저감 지표 대분류 내 지표의 상대적 중요도

*) 지속가능한 물이용에 긍정적인 영향 관계에 있는 지표

인간 물 이용	물이용 인프라	댐, 저수지, 보 등 물 공급을 조절하는 인프라 ○인프라 개소수
	적정 물이용 수준 (물이용 건전성)	지속적으로 사용할 수 있는 물(충진 가능한 수원, 또는 강우유출량) 대비 인간이 사용하는 물의 비율이 임계점 10%에 달할때까지는 원활한 물이용을 통해 사회적 혜택benefit이 증가한다고 보고, 0-10% 사이에서의 비율로 평가, 10%를 초과할 경우 물이용의 건전성이 없는 것(value=0)으로 판단. ○용수사용량/유출량
	하천 접근성	하천정비 등을 통해 인간의 수자원 이용을 원활히 할 수 있게 만들어진 지역의 비율 ○완전제방기준 개수율
수생태계 건강성	수생태 보호지역	수량 및 수질, 수생태계의 보전을 목적으로 지정된 보호지역 ○상수원보호구역
	육상생태 보호지역	유역 내 육상 생태계의 보전을 목적으로 지정된 보호지역으로, 강우로 인해 지표유출수가 발생하는 경우 유역 육상부를 통해 모이는 점을 고려하여 선정함 ○국토환경성평가 1등급지역
수질 요구량	위생시설	하수처리장 등 하수, 오폐수 등을 처리하는 시설의 최대용량 ○하수 및 분뇨처리장 처리용량
수자원 재생 능력	물 재이용량	하수처리수 이용, 중수 이용 등 처리를 거친 물을 다시 이용하는 양(처리후 실제 이용량). ○하수처리수 및 중수 재이용량
	대체수원 잠재량	강우로 인한 수원 이외에 보완적으로 사용할 수 있는 수원의 양, 빗물이용 잠재량(빗물시설용량). ○빗물저장시설용량
물관리 평등성	수도 접근성	식수를 공급하는 상수도 및 오수를 이동시키는 하수도 시설의 보급률 ○상하수도보급률
	수자원 투자율	수자원 관련 정책 및 사업에 투자하는 예산 ○중권역별 수자원 관련 시설투자비용
	수자원 거버넌스	수자원 관련 정책 결정을 할 때, 해당 지역주민의 의견을 수렴하고 참여를 유도하는 수준 ○물관련 공무원 수

항목	중요				중등				중요	항목
	5	4	3	2	1	2	3	4	5	

1. 인간 물 이용

1. 물이용 인프라										2. 적정물이용 수준
1. 물이용 인프라										3. 하천 접근성
2. 적정물이용 수준										3. 하천 접근성

2. 수생태계 건강성

1. 수생태 보호지역										2. 육상생태 보호지역
-------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--------------

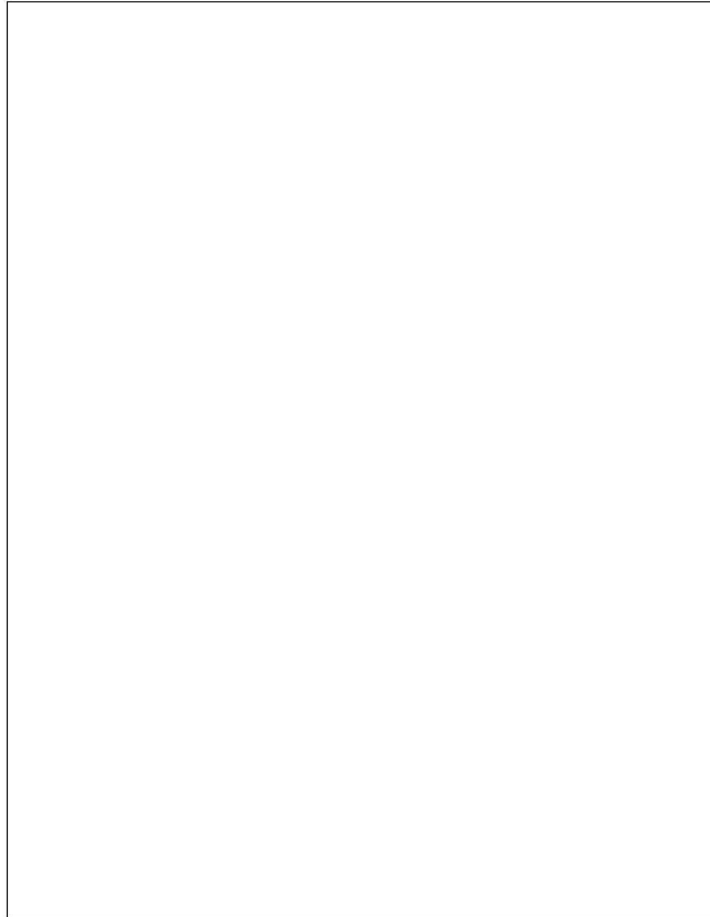
4. 수자원 재생능력

1. 물 재이용량										2. 대체수원 잠재량
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-------------

5. 물관리 평등성

1. 수도 접근성										2. 수자원 투자율
1. 수도 접근성										3. 수자원 거버넌스
2. 수자원 투자율										3. 수자원 거버넌스

※이상 지표구분 및 내용에 대한 의견을 자유롭게 서술해주시기 바랍니다.



설문에 응해주셔서 대단히 감사합니다.

※다음은 응답자의 일반적인 사항에 관한 문항입니다.

(1) 귀하의 연령을 선택해주시시오

- ① 만 20대 이하 ② 만 30대 ③ 만 40대 ④ 만 50대 ⑤ 만 60대 이상

(2) 최종학위를 선택해주시시오

- ① 고졸 이하 ② 초대졸 ③ 대졸 ④ 석사 ⑤ 박사 이상

(3) 귀하의 전공은 무엇입니까?

- ① 물 관련 ② 생태 관련 ③ 국토계획 관련 ④ 그 외 ()

(3-1) 전공 관련 경력기간을 선택해주시시오.

- ① 1년 미만 ② 1년~2년 ③ 2년~5년 ④ 5년~10년 ⑤ 10년 이상

(4) 물이용 관련 지표 및 정책 관련 연구 혹은 실무 경험이 있습니까?

- ① 있다 ② 없다

표 A1-1. 설문조사 응답자의 속성

응답자의 특성		응답자 수	비고사항
연령	30대	9	
	40대	22	
	50대	11	
	60대 이상	3	
학위	석사	4	
	박사 이상	41	
분야	물 관련	35	소형하천관리 전공 포함
	생태 관련	5	
	국토계획 관련	3	
	기타	2	환경경제, 하천지리 전공 포함
소속	대학	25	
	정부출연연구기관	20	



부록 2. Vörösmarty et al.(2010)의 구조 및 지표구성

Vörösmarty et al.(2010)은 전 세계의 하천 시스템을 대상으로 하천 시스템에 미치는 인간 물 안보(Human Water Security, HWS) 위협과 생물다양성(Biodiversity, BD) 위협을 평가하였다. 우선 전 세계의 하천 시스템을 대상으로 하천 시스템에 미치는 인간 물 안보(Human Water Security, HWS) 위협과 생물다양성(Biodiversity, BD) 위협을 평가하기 위해 네가지 주제(Theme)의 23가지 구동요인(Driver)을 선정하였다. 각 구동요인은 전 지구적인 범위를 갖추고 있으면서 적정 수준 이상의 해상도를 갖는 것으로 한정하였다. 이후 23가지 구동요인은 원데이터의 공간적 해상도에 관계 없이 모두 0.5°의 그리드 셀 형태의 데이터로 가공하였고, 이를 물의 흐름에 따른 위협요인의 이동을 고려하기 위해 전 지구적 디지털 하천 네트워크(Global River Network, STN-30 grid)를 이용하여 하류로 향할수록 누적되는 영향을 계산한 뒤, 일부 지표의 경우 유출량에 따라 위협요인이 희석되는 영향을 반영하기 위해 변수값을 유출량으로 나누어 새로운 구동요인 값을 도출하였다. 이후 지표 통합을 염두에 두고 모든 구동요인의 단위 일치를 위해 로그함수를 적용하여 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 통해 0에서 1의 값으로 표준화하였다.

표준화를 거친 지표들은 각 주제 내에서 각 구동요인이 기여하는 중요도를 바탕으로 설정한 가중치를 이용하여 인간 물 안보(HWS)와 생물다양성(BD)의 위협현황(Incident Threat)으로 도출하였다. 각각의 가중치는 다양한 연구 분야와 연구대상지역을 경험한 저자 8명이 전문가로 참여하여 토론을 거친 후 개별적으로 점수를 부여한 뒤 이를 평균하여 도출하였다. 위협현황(Incident Threat) 지수는 각 지표 및 주제의 가중치를 표준화된 변수값과 곱한 뒤 합하여 도출하였다.

하지만 인간은 기술·공학을 이용하여 물을 안정적으로 공급할 수 있는 시설을 설치함으로써 인간 물 안보 위협을 완화할 수 있었다. 따라서 위 연구에서는 위협을 개선할 수 있는 인프라와 관리현황을 고려할 수 있는 투자혜택요인(Investment Benefit Factor)을 위협현황(Incident

Threat)에 고려함으로써 조정된 위협(Adjusted Threat) 지수를 도출하고자 하였다. 투자혜택요인 I_i 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I_i = (0.16 \cdot V_1 + 0.17 \cdot V_2 + 0.16 \cdot V_3 + 0.06 \cdot V_4 + 0.45 \cdot V_5)$$

V 는 투자혜택요인에 고려된 다섯 가지 구동요인으로, 상수는 각 V 값의 가중치를 의미한다. V_1 은 댐 밀도(Dam Density)로 홍수방지, 건조기의 수자원공급, 수력발전, 관개 등을 가능하게 하는 중소규모의 댐 인프라를 고려하기 위한 것이다. V_2 는 댐 저수량(하천 흐름 변형, Flow disruption)으로 대규모 댐 인프라의 수자원 저장능력을 고려하기 위해 포함되었다. V_3 은 적정 물이용 수준(Moderate Water Use)으로, 물 사용량/유출량의 값이 0.1 이전까지는 값이 커질수록 사회적 혜택이 증가하지만 0.1을 넘어서면 혜택을 잃는다는 점에 착안하여 이 임계값을 기준으로 유출량 대비 인간의 물 사용량이 적정한지를 고려하고자 하였다. V_4 는 하천 코리도 접근성(River Corridor Access)으로, 둑 다짐, 호안공사, 습지개선 등이 이루어진 지역을 의미하며, 습지단절성(Wetland Disconnectivity)을 도입하여 계산하고 있다. V_5 는 깨끗한 식수 접근성으로 인간이 이용하는 가장 기본적이고 중요한 물이용의 목적인 식수를 공급받고 있는 인구의 비율을 고려하고 있다. 5가지 항목은 표준화된 값을 이용하였고 최종 I_i 도 0-1로 표준화 하였다.

최종적으로 인간 물 안보 항목에 대한 조정된 위협 지수(Adjusted HWS Index, A_i)는 다음과 같이 표현된다.

$$A_i = T_i \cdot (1 - I_i)$$

조정된 위협지수(A_i)는 1에서 투자혜택요인(I_i)을 제한 값에 위협현황(T_i)을 곱하여 나타내며, 이 또한 0~1로 표준화하였다. 즉, 한 공간에서 투자가 활발해 인프라 공급이 원활하다면 같은 값의 위협요인이 있다고 해도 조정된 위협지수는 낮을 수 있다. 따라서 A_i 와 T_i 의 결과를 비교하는 것은 실제 해당 지역에서 투자를 통한 위협요인의 경감을 보여줄 수 있다.

■ 구동요인 1. 경작지

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 경작지는 지표수 유출이나 지하수 충전과 같은 지역수문에 영향을 미치며, 화학성분 배출이나 토양오염의 원인이 됨.

- 생물다양성: 강가 서식처의 질 저하 및 분절화를 유발.

□ 지표측정 방법: 전체 토지면적 중 작물생산에 이용되는 토지(경작지, 목초지)의 비율. 보스턴대의 MODIS를 이용한 GLC2000와 Ramankutty et al.(2008)의 토지피복자료를 이용. 목초지는 토지피복분류상 분류되어 있지않아 “경작 가능한 땅과 영구경작지”를 포함하는 경작지(cropland)만 이용함.

■ 구동요인 2. 불투수 지표

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 지표면의 수분함유를 막아 호우유출량을 증가시킴. 화학적 오염의 원인으로도 작용.

- 생물다양성: 하천부근과 범람원의 서식처 질 저하, 하천 수로화 및 제방건설로 인해 유량변동이 증가, 화학적 오염의 원인으로 작용.

□ 지표측정 방법: 전체 토지면적 중 불투수 표면으로 이루어진 토지의 비율. 보스턴대의 MODIS를 이용한 GLC2000의 토지피복자료 중 시가화 지역을 참고하였으며, Eldridge et al.(2007)에서 제안한 불투수표면면적의 밀도를 활용. 이는 건물, 도로, 주차장 및 기타 불투수지역을 포함하며 1km²의 해상도로 제작됨.

■ 구동요인 3. 가축 밀도

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 축산업은 상류지의 토양다짐(soil compaction), 독 답압 등으로 물의 흐름에

변형을 가져오며(물리적 피해), 가축 배설물로 인한 대장균감염위험 등 지역 내 생물학적 오염을 야기한다.

- 생물다양성: 토지이용변화, 답압, 식생제거 등으로 인해 하천부근과 범람원에 위치하는 서식처의 질 저하, 물의 흐름 패턴의 변화.

- 지표측정 방법: 각 동물별 몸집의 크기를 구하기 위해 배설물의 질소량을 추정(Green et al., 2004)하여 계수를 주었고(젓소:1.0, 염소:0.15, 양:0.15, 돼지:0.19, 버팔로:0.67, 소:0.70, 낙타:0.70, 순록:0.71, 말:0.79), 이를 Lerner et al.(1988)의 전 세계 가축분포지도(1 degree grid)를 이용하여, 가축밀도를 구함. 단, 이 지표에서는 물리적, 생물학적 오염에 대해서만 다루며, 화학적 부하에 대해서는 다른 카테고리에서 다루고 있음.

■ 구동요인 4. 습지 단절

- 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 지역 내 홍수 방어능력, 물 저장능력, 자연적인 물 정화기능을 저하시킴. 물 흐름 패턴을 바꿈.

- 생물다양성: 서식처 감소, 영양물질 분해 및 저류작용 감소, 물의 흐름 변화

- 지표측정 방법: 인간 활동이 수로channel나 범람원에 물리적·생물적 영향을 미친다는 가정 하에, 집중적인 경작지나 시가화지역으로 변한 습지를 추출. Global Lakes and Wetland Database (GLWD)(Lehner and Döll, 2004)의 3-10번에 해당하는 분류로서 호수와 저수지인 1,2번은 제외함. 이 지도를 위 구동요인 1,2에서 구한 경작지와 시가화지역에 중첩하여 본래 습지였다가 변형된 지역을 추출.

■ 구동요인 5. 토양 염류화

- 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 토양염류화는 전 세계 100여 개 국가 10⁷km²에 이르는 지역(10%)에 영향을

미침. 토양염류화는 지표상의 물을 경작지 등 특정 용도에 사용하기 적합하지 않게 만들며, 토지이용을 변환할 때 처리비용을 증가시킴.

- 생물다양성: 삼투나 이온 관련 스트레스를 일으켜 만성적으로 치사량에 가까운 영향을 받거나 죽음에 이르게 됨.

- 지표측정 방법: ISRIC-WISE(Batjes et al., 2005)의 토양특성자료에서 전기전도도(Electrical conductivity)를 이용하여 토양염류화의 지표로 삼음. 보통 EC값이 4dS/m를 초과하면 토양이 염류화되었다고 하는데, 본 연구에서는 저지대에 위치하는 저염지대에서도 자연녹지대가 경작지로 바뀌면 토양이 염류화될 수 있다고 판단하였으므로, 경작지가 25% 이상이고 EC가 0.2dS/m를 초과하는 지역을 추출.

■ 구동요인 6. 질소 부하

- 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 질소(N)의 과잉공급은 산업혁명 이전의 수치의 두배를 넘어섬. 식수 및 다른 용도로의 지표수 사용이 제한됨. 식수 내 농도가 높은 경우 영아에게 치명적인 영향을 미침

- 생물다양성: 담수의 부영양화 및 산소고갈 유발, 농도가 높은 경우 암모니아를 형성해 독성을 띰.

- 지표측정 방법: Green et al.(2004)이 추정한 산업혁명 이전과 최근의 N loading을 이용. 이는 인간이 유발하는 질소 유출에 대한 추정값으로 사용됨. 하지만 유입되는 질소의 양뿐 아니라 강에서의 탈질소작용이나, 강의 면적이 큰 경우에는 질소유입효과가 상쇄될 수 있음. 따라서 본 연구에서는 Order 5 이상의 강을 선별하여 통제하였음.

■ 구동요인 7. 인 부하

- 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 인(P)은 다량영양소로서, 담수에서의 일차생산성을 제한하는 주요 요소이기

때문에 과잉공급될 경우 일반적으로 부영양화를 유발함. N-고정 시아노박테리아 번식으로 인해 식수공급 제한.

- 생물다양성: 담수의 부영양화 및 산소고갈 유발, N-고정 시아노박테리아 번식으로 인해 수생물에 유독한 영향을 미침

□ 지표측정 방법: (1)점오염원(하수), (2)비점오염원(비료, 거름) (Harrison et al.,2005), (3)인위적인 대기방출(Mahowald et al., 2008)을 통합.

■ 구동요인 8. 수은 오염

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 수은(Hg)은 매우 유독한 환경오염물질. 인체성장을 교란하고 신경독성을 유발.

- 생물다양성: 섭취하였을 경우 신경독성을 유발, 먹이사슬로 인해 상위 포식자일수록 체내축적이 심함

□ 지표측정 방법: Selin et al.(2008), Selin and Jacob(2008)에서 인간에 의한 수은 침적 데이터를 이용하였으며 이는 Hg(II)와 수은 입자를 포함.

■ 구동요인 9. 농약 부하

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 살충제는 원래 목적이 의도치 않았던 다른 종에게도 영향을 미침. 급성·만성적인 독성을 가짐

- 생물다양성: 급성·만성적인 독성으로 인해 생태계 전반에 직간접적인 영향을 미침.

□ 지표측정 방법: 경작지에서 사용되는 살충제 살포를 국가단위 데이터(ESI 2005)를 통해 활용. 이 자료에서는 독성이나 살충제의 특성, 지속성, 대기이동 등과 같은 특성은 고려되지 않음. 경작지 데이터는 Ramankutty et al.(2008) 데이터를 활용.

■ 구동요인 10. 토사 부하

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 자연적으로 물의 흐름은 토사 등 침전물을 이동시키지만 인간의 토지이용변화는 이를 더욱 가속화하여 TSS(Total Suspended Solids)가 크게 늘어남. 살충제나 중금속 등의 독성물질을 이동, 식수로 이용하기 위한 정화비용 증가, 저수지 수명 단축.

- 생물다양성: 물의 혼탁도 증가, 하상의 공극을 매워 물리적 구조 변형, 혼합대 교환률 감소, 수생물의 호흡, 산란, 시야 방해.

□ 지표측정 방법: TSS의 대체지표로서 연간 물침식률(water erosion rate)을 이용. 연간 침식률은 인구밀도, 침식률에 대한 취약정도, Reich et al.(2001)에서 정리한 침식률을 활용. 인구밀도는 CIESIN Global Rural-Urban Mapping Project (GRUMP)를 이용. 하지만 저수지나 퇴적지에서 가라앉아 줄어드는 침전물 양은 고려되지 않았음.

■ 구동요인 11. 유기물 부하

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 식수공급을 할 때 불쾌한 맛이나 질병을 유발하는 위생적 문제를 유발, 건강에 문제될 수 있는 유독한 화학성분이나 영양성분이 포함될 수 있음.

- 생물다양성: 강의 영양 상태에 변화를 유발, 산소결핍으로 인한 생태계에 스트레스, 잠재적으로 유독한 화학성분이나 영양성분 배출.

□ 지표측정 방법: 물속의 불안정한 탄소는 Biological Oxygen Demand(BOD)로 표현되며 Green et al.(2004)의 질소량에서 유추하여 이용됨. 하수처리시설에 따라 C:N계수가 다르다는 점을 이용하여 하수처리가 없는 경우 BOD:N은 6:1, 1차처리의 경우 4:1, 2차처리의 경우 1:1로 계산함.

■ 구동요인 12. 잠재적 산성화

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 수자원인프라 내 부식작용으로 비용을 증가시킴. 여가용도의 사용이 부적절해짐.

- 생물다양성: 특정 독성 화학물질(알루미늄)의 용해성을 증가시킴, 산성도에 민감한 특정 생물분류군에 간접적인 영향을 미침.

□ 지표측정 방법: 표층수 산성화는 NO_x , SO_x 로 인해 발생. SO_x 와 NO_x 의 공간적 분포에 대해서는 Dentener et al.(2006)가 $31.25 \text{ H}^+(\text{SO}_x) + 21.74 \text{ H}^+(\text{NO}_x)$ 로 계산한 총 수산화이온(H^+)의 양으로 사용. 여기에 토양의 pH가 5.6 이상인 곳은 산성화에 민감하지 않은 것으로 보고, Atlas of the Biosphere(IGBP-DIS, 1998) 자료에서 지표의 pH가 5.6 이상인 곳은 마스킹하여 추정에서 제외함.

■ 구동요인 13. 수온 변화

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 물 추출, 물 가두기, 발전소냉각 등을 포함하는 다양한 인간 활동은 하천과 강의 온도환경 변화를 유발. 이는 부영양화 민감성을 증가시키고 용존산소량을 감소시킴.

- 생물다양성: 서식처 조건을 변화시켜 원래 서식하던 종이 살기 어려운 조건으로 바꿈. 다른 종의 침입을 유도, 부영양화와 산소고갈을 일으킴.

□ 지표측정 방법: 본 지표에서는 열전기발전과 제조업에서 이용되는 물만을 고려. 잠재적 열영향은 Vassolo and Döll.(2005)에서 제안한 열 발전소에서 끌어오는 물의 양과 사용하는 물의 양(1995년 자료)을 사용. 배출되는 물의 양은 끌어오는 물에서 사용된 물의 양의 차이로 계산하였으며, 이를 물환경에 미치는 열영향의 간접지표로 간주하고 사용함.

■ 구동요인 14. 댐 밀도

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 댐 설치의 목적은 인간이 사용할 수 있는 담수자원을 적절히 제공하고, 홍수방어기능을 띠고 있는 등 자연적인 수문시스템을 제어하면서 이용할 수 있도록 함. 하지만 부정적인 영향으로 말라리아 등의 감염성 질병을 전파하고, 강변에 거주하는 주민의 이주를 수반하며, 관개수를 과도하게 사용함으로써 토양염류화를 촉진.

- 생물다양성: 하천생태계를 수몰시키며, 물이 차고 빠지는 작용을 없앴. 고인물에 서식하는 생물군의 침입이 이루어지며, 동물의 활동 및 이동을 제한. 강하류나 범람원의 생산성에 기여하는 영양분이나 토양의 흐름을 막음.

□ 지표측정 방법: 대형 댐으로 알려진 전세계 댐의 크기와 분포를 GWSP-GRAND(Global Reservoir and Dam Database of 6,879 dams)를 이용하여 수집하였으며, 이보다 작은 댐의 경우에는 ICOLD(International Commission of Large Dams of 28,096)를 이용해 수집했다. ICOLD의 경우에는 좌표정보가 없어 5개 변수로 구성된 선형식으로 배치하였다. 이 정보를 바탕으로 한 그리드 셀당 댐의 개수를 계산하여 댐밀도를 계산하였다.

■ 구동요인 15. 하천의 분절성

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 연속적인 강의 분절화.

- 생물다양성: 수중 생물군의 개체 수나 유전자 흐름을 감소시키며 동물군의 이주를 제한시킴.

□ 지표측정 방법: 이 지표에서는 수중생물이 이동할 수 있는 구간 개념을 이용하여, 한 그리드 셀에서 가장 가까운 댐까지의 구간이 길수록 개체 수 감소, 유전적 고립, 지역적 멸종 등의 위험이 적다고 판단함. GWSP-GRAND자료(댐 위치포인트가 포함된 그리드셀)를 이용하여, 배수유역이 주어진 그리드 셀까지 도달할 수 있는 비율을 계산.

■ 구동요인 16. 소모적 물 손실

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 농업, 산업 등에 이용되는 물은 인간과 다른 동식물의 생존에 필요한 수자원이 용성을 위태롭게 함. 오염물질 희석가능성을 감소시킴. 하류에서 식수, 관개, 산업, 항해, 쓰레기 처리에 이용되는 물공급이 적어질 수 있음. 건조지대를 통과하는 강의 경우 물의 양이 모자라 문제를 일으킬 수 있음.

- 생물다양성: 오염물질 희석가능성을 감소시킴, 생물서식처 지역을 감소시킴. 물의 흐름을 변형시킴

□ 지표측정 방법: (1)관개: 관개에 사용되는 물소비량은 Wisser et al.(2008)에서 총 소모량에서 다시 흘러나오는 물(return flow)의 양을 뺀 것으로 계산을 한 2000년 자료를 이용. (2)산업: 열전기 및 제조산업의 물소비량은 Vassolo and Döll(2005)에서 계산한 1995년 자료를 이용. (3)소비량 대 가용량: 위 두가지 물소비량의 합을 동시대 방류량(Fekete et al., 2010)으로 나누어 물 소비량과 가용량 사이의 비율을 계산.

■ 구동요인 17. 인간 물 스트레스

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 인간이 특정 수준 이상의 삶을 영위하기 위해 필요한 최소한의 물의 양을 충족하는 것은 매우 중요함.

- 생물다양성: 오염물질 희석가능성을 감소시킴, 생물서식처지역을 감소시킴, 물의 흐름을 변형시킴

□ 지표측정 방법: 유출량/인구로 계산을 함으로서 높은 인구밀도를 가진 지역이나 본래 유출량이 적은 지역에서 나타날 수 있는 부정적인 문제점을 개선하고자 함. 인구밀도는 CIESIN Global Rural-Urban Mapping Project(2004)에서 2000년에 구축한 자료를 이용하였고, 유출량은 Fekete et al.(2010), Wisser et al.(2008)의 자료를 이용하여 1인당 연간 유출량을 m³로 나타냄. 이 값이 낮을수록 물스트레스가 높다는 것을 의미하므로 다른 지표들과 값의 방향성을 일치시키

기 위해 '1-원래 값'을 이용하여 표준화함.

■ 구동요인 18. 농업 물 스트레스

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 경작지에서 사용가능한 물이 적을수록 농업 외 다른 분야와 물이용을 두고 경쟁해야 함을 의미하며 이는 삶의 질 저하로 작용할 수 있음.

- 생물다양성: 오염물질 희석가능성을 감소시킴. 생물서식처지역을 감소시킴, 물의 흐름을 변형시킴

□ 지표측정 방법: 직접적으로는 관개량을 통해 이용되는 물의 양을 계산하며, 이에 간접적으로 강수량, 토양수분량이 포함되었다고 가정. 방류량 대 경작지면적 비율로 계산하며, 유출량은 Fekete et al.(2010), Wisser et al.(2008)에서 도입하였고, 경작지로 변환된 토지자료는 Ramankutty et al.(2008)에서 활용하여 연간 백만 m^3/km^2 로 계산. 인간 물 스트레스와 마찬가지로, 다른 지표들과 값의 방향성을 일치시키기 위해 '1-원래값'을 이용하여 표준화함.

■ 구동요인 19. 하천 흐름 변형

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 유량의 시간적, 빈도적, 정체시간, 강도의 변화는 담수생태계에 주요한 영향을 미침. 그 중 물의 정체시간은 하상의 열환경에 주요한 변화를 가져옴. 독성을 띤 미생물의 증식과 전염성 질병의 발생을 증가시키고 증발로 인한 물의 손실을 증가시킴.

- 생물다양성: 영양분, 유기물, 미세입자를 가두어 하류에 닿는 주요 물질을 차단시킴, 수문의 열환경을 변화시켜 하류의 생물상에 변화를 가져옴. 증발로 인한 물의 손실량 증가. 고인 물에서 서식하는 개체의 침입.

□ 지표측정 방법: 전 세계적으로 구축된 데이터 중 건기 지속시거나 계절성에 대한 자료가 전무하였기 때문에, 이 지표에서는 대형 저수지에서 물이 고여 있는 시간(water aging)으로

물흐름 단절의 강도를 계산. 구체적인 계산법은 Vörösmarty et al.(1997)에 상세히 설명. 이 방법을 적용하여 GWSP-GRAND에서 댐정보를, Vörösmarty et al.(2000a, b)에서 강흐름의 네트 워크를, Fekete et al.(2010)에서 강 유출량을 이용하여 구함.

■ 구동요인 20. 외래어종 비율(%)

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 수질에 악영향을 미칠 가능성.
- 생물다양성: 먹잇감을 두고 자생종과 경쟁, 생태계 구조 및 기능의 교란, 수질저하 가능성.

□ 지표측정 방법: 다른 개체군에 대한 정보가 전무하였으므로 어종에 대한 자료를 이용. 유입어종(외래어종)에 대한 자료는 LePrieur et al.(2008)에서 전 세계 중 80%를 포함하는 지역을 대상으로, 유입어종비율을 0~5%, 5~25%, 25~95%로 나누어 그룹화한 것을 토대로, 본 연구에서 각각 0, 0.5, 1.0의 값을 주어 표준화함. 나머지 20%지역에 대해서는 구동요인 22와 23에 따라 재분류하기로 함.

■ 구동요인 21. 외래어종 수(#)

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 수질에 악영향을 미칠 가능성.
- 생물다양성: 먹잇감을 두고 자생종과 경쟁, 생태계 구조 및 기능의 교란, 수질저하 가능성.

□ 지표측정 방법: 구동요인 20에서 다른 유입어종의 비율뿐 아니라 절대적인 유입어종의 개체 수 또한 중요하다고 판단함. 유입어종의 수는 LePrieur et al.(2008)에서 전 세계 중 80%를 포함하는 지역을 대상으로, 유입어종 개체수를 0~5, 5~20, 20~70로 나누어 그룹화한 것을 토대로, 본 연구에서 각각 0, 0.5, 1.0의 값을 주어 표준화함.

■ 구동요인 22. 어업 압력

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 어선이나 사람의 접근으로 인한 수질저하
- 생물다양성: 군집구조와 영양계단(trophic cascade)을 변화시킴, 진화과정에 행동학적 변화를 가져와 생물다양성에 영향을 미침. 수질저하에 영향.

□ 지표측정 방법: 어류남획은 강 생태계 전반에 널리 만연해 있는 스트레스요인. 본 연구에서는 절대적인 어획량보다는 어획압력을 지표로 삼고자 하였는데, 이는 강 생태계가 받는 영향은, 강에서 생산되는 생물량 대비 수산물 어획량의 상대적인 값에 따라 변하기 때문이라고 판단하였기 때문임. 우선 FAO의 Fish-Stat Plus Database에서 모든 국가에서의 내륙수 수산물, 강과 바닷물이 접하는 지역에서 잡힌 수산물 1997~2006 데이터를 계산. 강물에서의 수산물만을 계산하기 위해 대형 호수로 분류되는 곳의 데이터(Baikal, Michigan, Erie, Superior, Ontario, Huron, Tanga-nyika, Malawi and Victoria)와 다른국가에서 어획을 하는 일본의 자료는 제외. 이 데이터를 각 국가 내의 그리드 셀에 분배하기 위해 어획량과 유출량 사이의 경험적 멱함수 비례관계식을 세우고($R^2 > 0.80$; $n=40$), 이 관계식을 이용하여 Fekete et al.(2010)과 Wissler et al.(2008)의 유출량 자료를 이용해 각각의 국가경계 내의 그리드셀에 분배. 이는 (10년간의 자료를 토대로) 연 어획량을 도출하기 위해 계산된 것. 다음으로 어획압력을 계산하기 위해 생물량을 계산하고자 하였으며, 생물량은 상류의 육상생태계에서의 NPP(Net Primary Productivity)로 로그함수를 취함. NPP는 수산물 생산량을 대표할 수 있는, 전 세계를 포괄하는 유일한 자료이자 적당한 해상도를 가진 자료로, 육상부의 생산량이 직접적으로 담수생태계와 수산물의 생산성에 긍정적인 영향을 미칠 것이라고 봄. 하지만 이는 정교한 지표는 아님.

■ 구동요인 23. 양식업 압력

□ 지표선정의 타당성

- 인간 물 안보: 집중적인 화학적 오염(유기물질, 영양물질, 항생제 및 살진균제)으로 인한 수질오염.

- 생물다양성: 강 생태계 변화에 급격하게 영향을 미치는 요인으로 작용. 화학성분으로 인한 수질오염, 생태계구조 교란, 유입어종의 침입 가능성 확대.

□ 지표측정 방법: 우선 FAO의 Fish-Stat Plus Database에서 모든 국가에서의 내륙수 수산물, 강과 바닷물이 접하는 지역에서 양식/수경재배를 통해 획득한 수산물의 1997-2006 데이터를 계산. 그리고 국가별로 Fekete et al.(2010)과 Wisser et al.(2008)의 유출량 자료를 이용해 각각의 국가경계 내의 그리드셀에 분배. 이는 잠재적으로 양식/수경재배가 물(=유출량)이 더 많은 곳에서 이루어질 것이라는 가정 하에 추정됨. 실제 현장에서 양식이 이루어지는 조건에 대해서는 더 많은 변수가 존재하겠지만 이 재배지에 대한 명확한 위치 및 수산물량 데이터가 부족하여 이 자료로 CFD-standardization을 이용.

〈부록2의 참고문헌〉

- Dentener, F. et al. 2006. "Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation". *Global Biogeochemical Cycles*, 20(4): GB4003.
- Eldridge, C. D. et al. 2007. "Global distribution and density of constructed impervious surfaces" *Sensors*, 7: 1962-197.
- Fekete, B. M. et al. 2010. "Millennium Ecosystem Assessment Scenario drivers (1970-2050): Climate and hydrological alterations". *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4): GB0A12.
- Green, P. A., et al. 2004. "Pre-industrial and contemporary fluxes of nitrogen through rivers: a global assessment based on typology". *Biogeochemistry*, 68: 71-105.
- Harrison, J. A. et al. 2005. "Dissolved inorganic phosphorus export to the coastal zone: results from a spatially explicit, global model (NEWS-DIP)". *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4): 1-15.
- Lehner, B. and Döll, P. 2004. "Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands". *Journal of Hydrology*, 296(1-4): 1-22.
- LePrieur, F. et al. 2008. "Fish invasions in the world's river systems: when natural processes are blurred by human activities". *PLoS Biology*, 6(12): e322.
- Lerner, J., E. Matthews and I. Fung. 1988. "Methane emissions from animals: A global high-resolution data

- base". *Global Biogeochemical Cycles*, 2(2): 139-156.
- Mahowald, N. et al. 2008. "The global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates and anthropogenic impacts". *Global Biogeochemical Cycles*, 22(4): GB4026.
- Selin, N. E. et al. 2008. "Global 3-D land-ocean-atmosphere model for mercury: present-day vs pre-industrial cycles and anthropogenic enrichment factors for deposition". *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2): GB2011.
- Ramankutty, N. et al. 2008. "Farming the planet: geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000". *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1): GB1003.
- Reich, P., H. Eswaran, and F. Beinroth. 2001. "Global dimensions of vulnerability to wind and water erosion". USDA Natural Resources Conservation Service and the University of Puerto Rico.
- Selin, N. E. and D. J. Jacob. 2008. "Seasonal and spatial patterns of mercury wet deposition in the United States: constraints on the contribution from North American anthropogenic sources". *Atmospheric Environment*, 42(21): 5193-5204.
- Vassolo, S. and P. Döll. 2005 "Global-scale gridded estimates of thermoelectric power and manufacturing water use". *Water Resource Research*, 41(4): W04010.
- Vörösmarty, C. J. et al. 1997. "The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world". *Ambio*, 26(4): 210-219.
- _____. 2000b. "Geomorphic attributes of the global system of rivers at 30-minute spatial resolution". *Journal of Hydrology*, 237:17-39 .
- _____. 2000a. "Global system of rivers: Its role in organizing continental land mass and defining land-to-ocean linkages". *Global Biogeochemical Cycles*, 14: 599-621.
- Wisser, D. et al. 2008. "Global irrigation water demand: variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets". *Geophysical Research Letter*, 35(24): L24408.

〈부록2의 데이터〉

- Batjes, N. H. 2005. ISRIC-WISE global data set of derived soil properties on a 0.5 by 0.5 degree grid (Version 3.0). ISRIC - World Soil Information Report.
- CIESEN (Center for International Earth Science Information Network) of Columbia University,

IFPRI(International Food Policy Research Institute), The World Bank, and CIAT(Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2004. Global Rural-Urban Mapping Project (GRUMP), Alpha Version: Population Grids. Palisades, NY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University.

FAO Fish-Stat Plus Database.

GWSP-GRAND (Global Reservoir and Dam Database).

ICOLD (International Commission on Large Dams). World Register of Dams. Paris, France (1998).

IGBP-DIS. Soil Data(V.0) A program for creating global soil-property data-bases, IGBP Global Soils Data Task, France (1998).



부록 3. 유역별 오염원과 오염부하량 산정¹¹⁾

1. 연구 배경 및 목적

최근 오염원, 오염부하량 등의 자료가 파편화되어 있고 체계적으로 정리되지 못해 물 환경 변화 관계 등을 분석적으로 추적하지 못하고 있는 실정이며, 이에 따라 물환경 관리를 위한 오염원 및 오염부하 분석이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국립환경과학원에서 제공하는 최근 3개년(2009~2011)의 오염원과 오염부하량을 취합·산정하여 유역별, 오염원별 특성을 분석한 후 이를 바탕으로 물환경 지표를 설정하는 근거로 활용할 수 있는 자료를 제공하고자 한다. 본 연구의 연구범위는 전국 단위로 117개 중권역 및 840개 표준유역이며, 이 중 북한 지역을 제외한 지역으로 한정하였다.

2. 연구 방법

1. 오염원 구축

국립환경과학원의 전국오염원 조사 자료를 이용하되 각종 환경부 통계자료, 통계청 통계자료 등 비교·검토 하여 오염원을 구축하고자 하였으며 자료 구축 범위는 전국으로 설정하였다. 상세 자료로, 오염원은 국립환경과학원의 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011), 환경부 통계자료(상수도통계, 하수도통계), 통계청 통계자료(총인구, 토지이용) 등 자료를 최대한 활용하여 2009년, 2010년, 2011년을 기준으로 오염원을 조사하였으며, 오염원별 배출형태, 배출구조 등을 검토하여 오염원을 구축하였다.

오염원은 행정구역별 자료를 유역에 포함되는 면적점유율에 따라 배분하였으며, 이에 각 유역별

11) 본 부록은 본 과제에서 위탁 연구로 수행된 “유역별 오염원과 오염부하량 산정(KE컨설팅)” 보고서를 기반으로 작성되었으며, 위탁연구 결과는 본 지표 연구 내 질소 부하량, 인 부하량 및 유기물 부하량의 데이터로 사용되었다.

로 생활계, 산업계, 축산계, 토지계, 환경기초시설 현황 등으로 구분하여 오염원 및 오염부하량을 조사하였다. 생활계는 하수처리, 하수미처리, 오수처리, 단독처리, 무처리로 구분하고, 축산계는 축종별 마리수, 분뇨처리방법(자원화, 폐수처리, 위탁, 무처리)로 구분, 산업계는 폐수발생량, 폐수 배출량, 발생수질, 배출수질, 폐수배출허용적용지역, 처리유형, 방류선 등으로 구분, 토지계는 28개 지목을 오염원단위 적용을 위한 5개 지목으로 구분하여 적용하였다.

2. 오염원별 발생 및 배출량 산정

발생부하량은 “수계오염총량관리기술지침”에 의한 오염원에 발생원단위를 적용하여 발생부하량을 산정하였으며, 연도별, 오염원별(생활계, 산업계, 축산계, 토지계 등)로 발생부하량을 산정하였다. 배출부하량은 “수계오염총량관리기술지침”에 의해 산정된 발생부하량에 오염원별 배출형태에 따른 삭감량을 적용하여 배출부하량을 산정하였으며, 연도별, 오염원별(생활계, 산업계, 축산계, 토지계 등)로 배출부하량을 산정하였다. 오염부하량은 행정구역별 자료를 유역에 포함되는 면적점유율에 따라 배분하여 유역별 생활계, 산업계, 축산계, 토지계, 환경기초시설 현황 등으로 구분하여 산정하였다.



자료: 필자 작성.

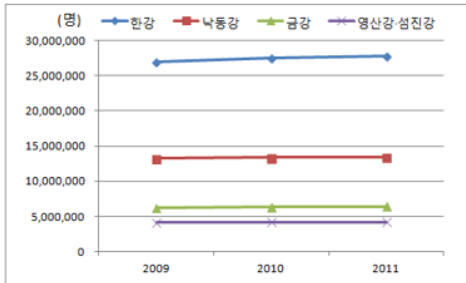
■ 그림 A3-1. 오염원 및 오염 부하량 산정 방법

3. 오염원 현황

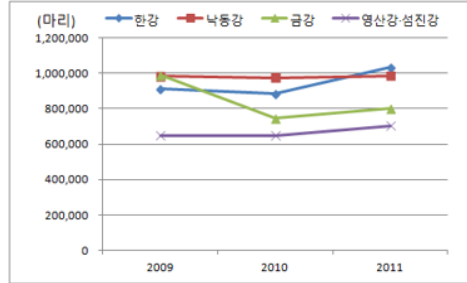
1. 전국

전국의 2009~2011년의 평균 주요 오염원은 총 인구 51,264,090명, 축산계(소) 오염원 3,438,040마리, 산업계(폐수배출량) 오염원 3,358,350m³/일, 토지계(대지면적) 오염원 7,215km² (7.22%)으로 조사되었다.

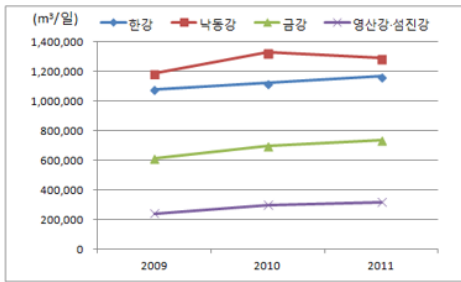
생활계 오염원 총 인구는 한강 54%, 낙동강 26%, 금강 12%, 영산강·섬진강 8%를 차지하며, 축산계(소) 오염원은 낙동강 29%, 한강 27%, 금강 25%, 영산강·섬진강 19%, 산업계(폐수배출량) 오염원은 낙동강 38%, 한강 33%, 금강 20%, 영산강·섬진강 9%, 토지계(대지면적) 오염원은 한강 34%, 낙동강 28%, 금강 20%, 영산강·섬진강 17% 차지하였으며, 전반적으로 시간의 흐름에 따라 인구, 폐수배출량, 축산(소), 대지면적은 대부분 증가하는 경향을 나타냈다.



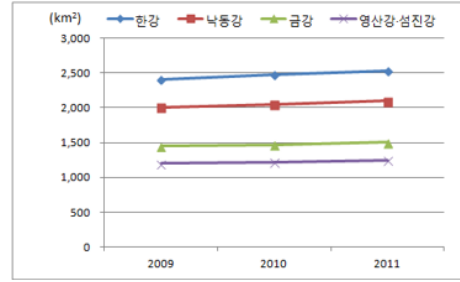
생활계 오염원



축산계 오염원(소)



산업계 오염원(폐수배출량)



토지계 오염원(대지비율)

자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

■ 그림 A3-2. 연도별 오염원 현황 (전국)

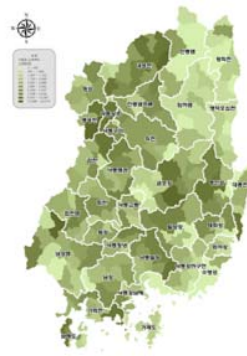
3. 낙동강 대권역

낙동강 대권역의 2009~2011년의 평균 주요 오염원은 총 인구 13,335,992명, 축산계(소) 오염원 981,015마리, 산업계(폐수배출량) 오염원 1,267,857m³/일, 토지계(대지면적) 오염원 2,052km² (6.4%)으로 조사되었다.

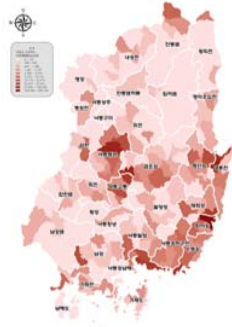
생활계 오염원은 대도시가 집중되어 있는 부산광역시, 대구광역시가 위치한 수영강·금호강·낙동강하구연 등 중권역에 집중되어 있으며, 축산계 오염원은 내성천·형산강·금호강 중권역, 산업계 오염원은 회야강·낙동왜관 중권역, 토지계(대지면적) 오염원은 금호강·수영강 중권역에 가장 많은 오염원이 분포하는 것으로 조사되었다.



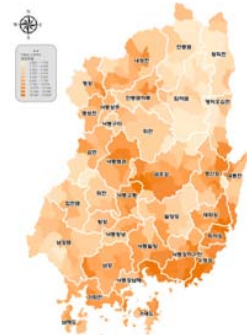
생활계 오염원



축산계 오염원(소)



산업계 오염원(폐수배출량)



토지계 오염원(대지면적)

자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

■ 그림 A3-4. 낙동강 대권역 오염원 현황

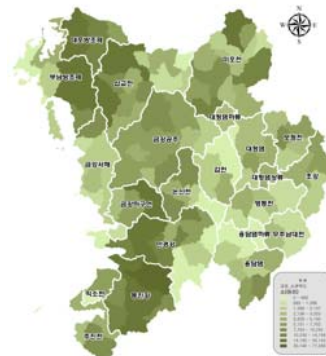
4. 금강 대권역

금강 대권역의 2009~2011년의 평균 주요 오염원은 총 인구 6,317,579명, 축산계(소) 오염원 846,073마리, 산업계(폐수배출량) 오염원 (681,767m³/일, 토지계(대지면적) 오염원 1,472km² (8.1%)으로 조사되었다.

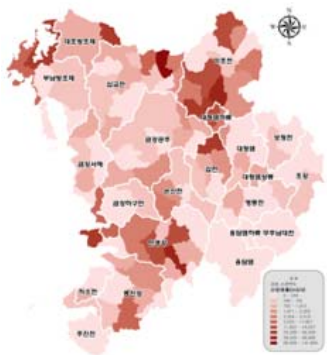
생활계 오염원은 대도시가 집중되어 있는 대전광역시, 전주시가 위치한 갑천·만경강·미호천 등 중권역에 집중되어 있으며, 축산계 오염원은 동진강·삼교천 중권역, 산업계 오염원은 미호천·삼교천 중권역, 토지계(대지면적) 오염원은 미호천·만경강·갑천 중권역에 가장 많은 오염원이 분포하는 것으로 조사되었다.



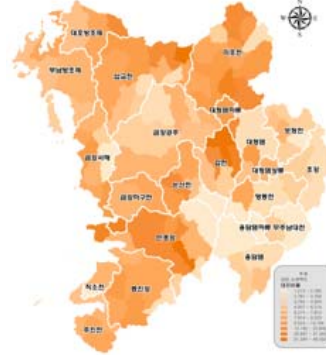
생활계 오염원



축산계 오염원(소)



산업계 오염원(폐수배출량)



토지계 오염원(대지면적)

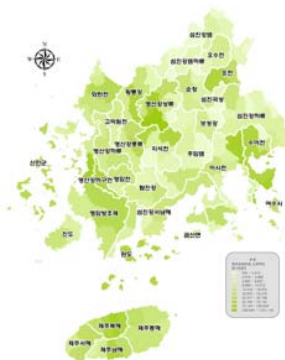
자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

그림 A3-5. 금강 대권역 오염원 현황

5. 영산강·섬진강 대권역

영산강·섬진강 대권역의 2009~2011년의 평균 주요 오염원은 총 인구 4,175,204명, 축산계(소) 오염원 666,922마리, 산업계(폐수배출량) 오염원 286,233m³/일, 토지계(대지면적) 오염원 1,223km²(7.1%)으로 조사되었다.

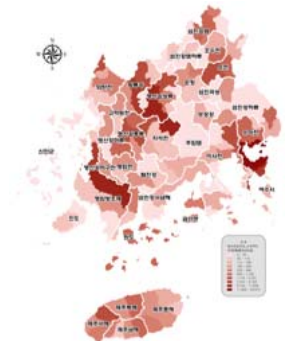
생활계 오염원은 대도시가 집중되어 있는 광주광역시와 위치한 영산강상류·수어천 등 중권역에 집중되어 있으며, 축산계 오염원은 와탄천·영산강하류 중권역, 산업계 오염원은 수어천·영산강상류 중권역, 토지계(대지면적) 오염원은 영산강상류·수어천 중권역에 가장 많은 오염원이 분포하는 것으로 조사되었다.



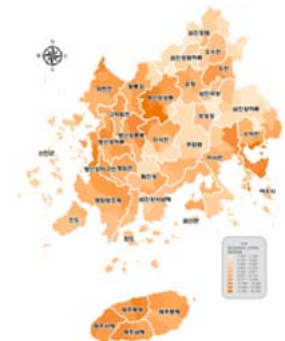
생활계 오염원



축산계 오염원(소)



산업계 오염원(폐수배출량)



토지계 오염원(대지면적)

자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

그림 A3-6. 영산강·섬진강 대권역 오염원 현황

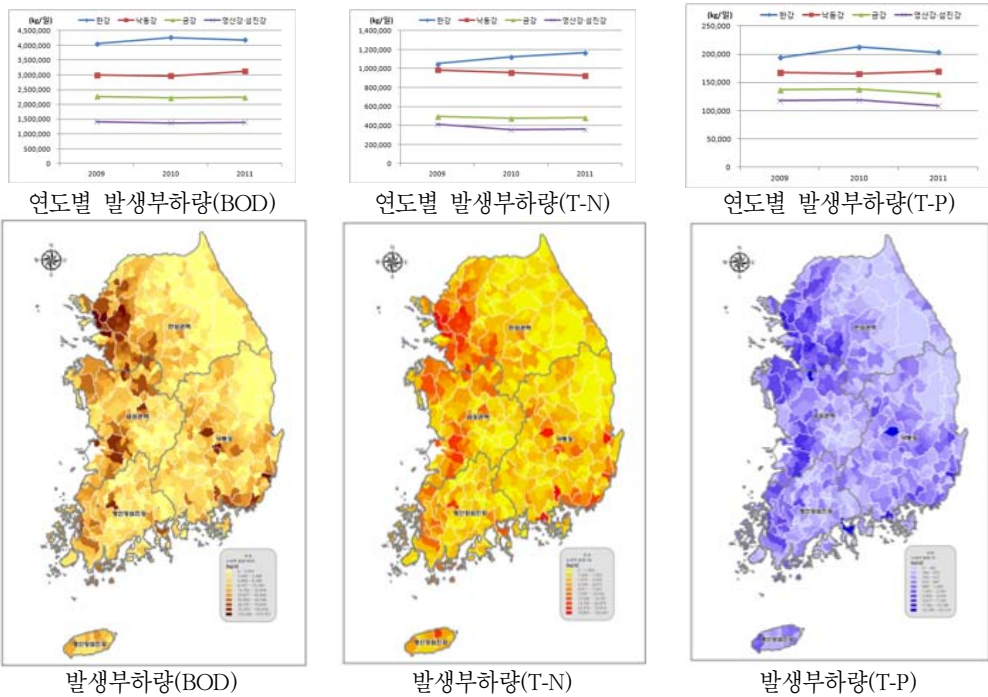
4. 오염부하량 현황

1. 발생부하량

전국의 2009~2011년의 평균 총 발생부하량은 BOD 10,840,967kg/일, T-N 2,933,517kg/일, T-P 621,687kg/일로 나타났다.

총 발생부하량의 BOD는 한강 38%, 낙동강 28%, 금강 21%, 영산강·섬진강 13%를 차지하며, T-N는 한강 38%, 낙동강 33%, 금강 16%, 영산강·섬진강 13%, T-P는 한강 33%, 낙동강 27%, 금강 22%, 영산강·섬진강 18% 차지하는 것으로 나타났다.

2009년 대비 2011년의 발생부하량은 BOD 1.9% 증가, T-N과 T-P는 각각 0.2%, 0.7% 감소하며, 한강 및 낙동강 대권역에서 증가하고, 금강 및 영산강·섬진강 대권역에서 감소하는 경향이 나타났다.



자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

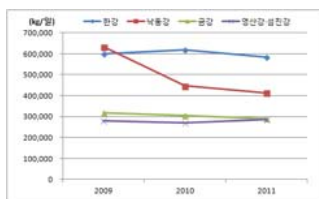
그림 A3-7. 전국 발생부하량 현황

2. 배출부하량

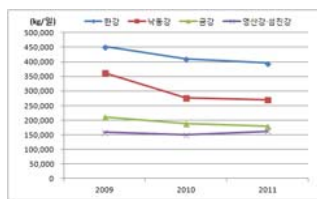
전국의 2009~2011년의 평균 총 배출부하량은 BOD 1,679,901kg/일, T-N 1,073,516kg/일, T-P 103,217kg/일로 나타났다.

총 배출부하량의 BOD는 한강 36%, 낙동강 30%, 금강 18%, 영산강·섬진강 17%를 차지하며, T-N는 한강 39%, 낙동강 28%, 금강 18%, 영산강·섬진강 15%, T-P는 한강 38%, 낙동강 28%, 금강 19%, 영산강·섬진강 15% 차지하는 것으로 나타났다.

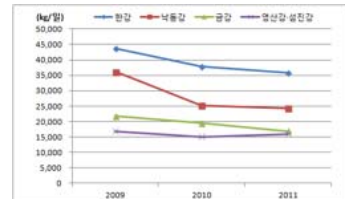
2009년 대비 2011년의 배출부하량은 삭감시설에 의해 BOD, T-N, T-P는 각각 14.3%, 15.2%, 21.7% 감소하며, 모든 대권역에서 감소하는 경향이 나타났다.



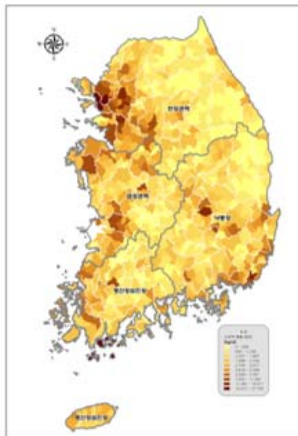
연도별 배출부하량(BOD)



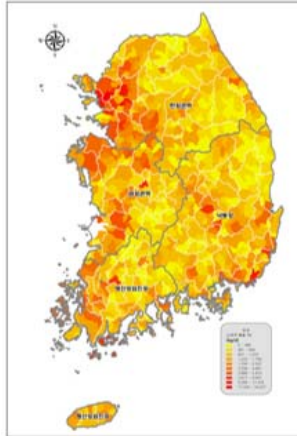
연도별 배출부하량(T-N)



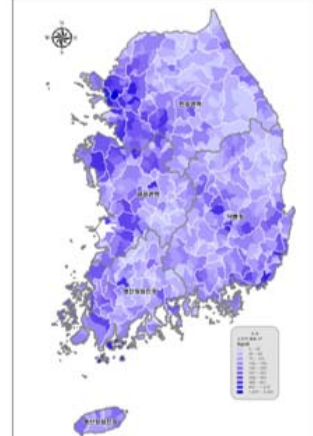
연도별 배출부하량(T-P)



배출부하량(BOD)



배출부하량(T-N)



배출부하량(T-P)

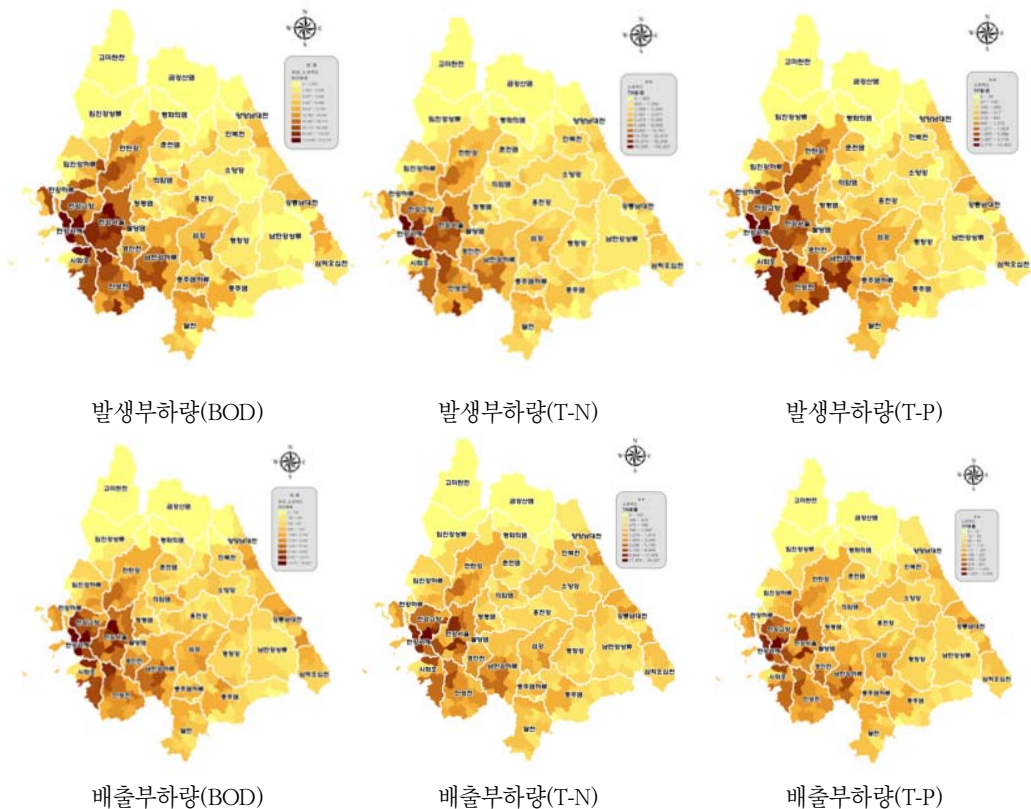
자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성

그림 A3-8. 전국 배출부하량 현황

3. 한강 대권역

한강 대권역의 2009~2011년의 평균 총 발생부하량은 BOD 4,167,804kg/일, T-N 1,113,914kg/일, T-P 203,352kg/일이며, 배출부하량은 BOD 600,154kg/일, T-N 420,038kg/일, T-P 39,236kg/일로 나타났다.

한강 대권역의 발생부하량은 생활계와 축산계 부하량이 전체의 약 65%이상을 차지하고 있으며, 배출부하량은 생활계와 토지계 부하량이 전체의 약 75%이상을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 대도시가 집중되어 있는 한강서울·안성천 중권역에서 가장 많은 오염부하량이 발생 및 배출되고 있었다.



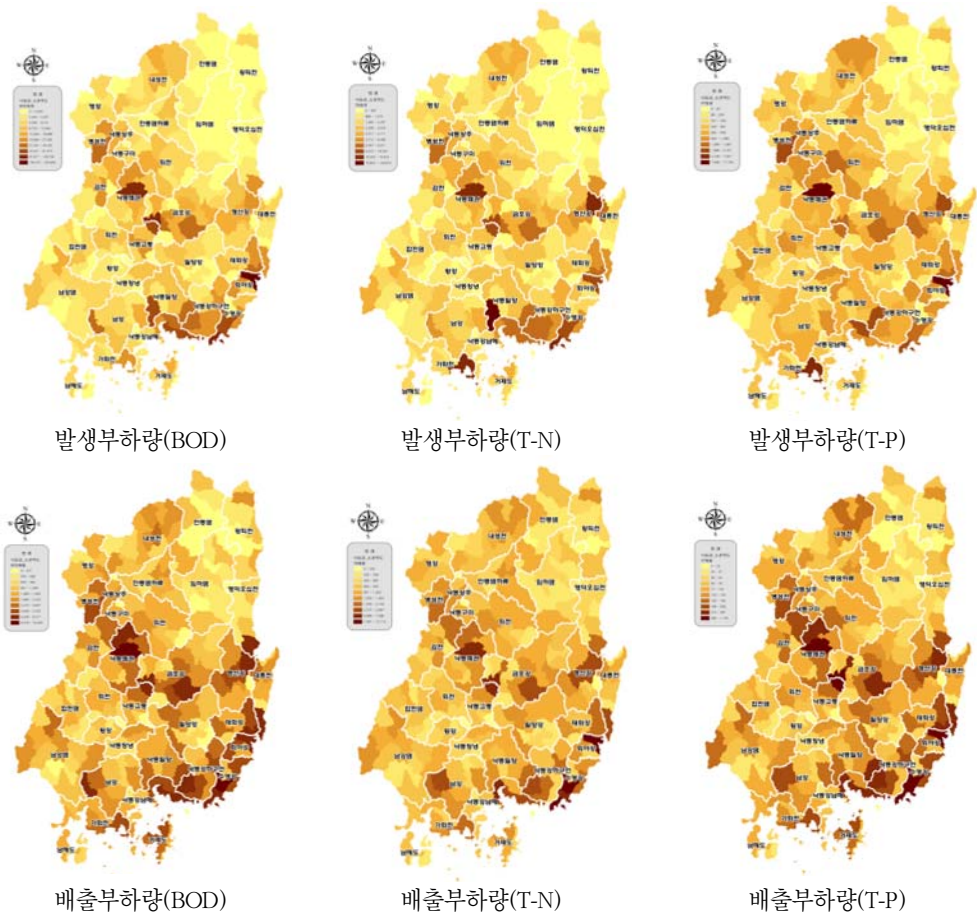
자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

그림 A3-9. 한강 대권역 발생 및 배출부하량 현황

4. 낙동강 대권역

낙동강 대권역의 2009~2011년의 평균 총 발생부하량은 BOD 3,030,675kg/일, T-N 956,664kg/일, T-P 167,863kg/일이며, 배출부하량은 BOD 498,183kg/일, T-N 303,180kg/일, T-P 28,551kg/일로 나타났다.

낙동강 대권역의 발생부하량은 BOD(생활계·축산계), T-N와 T-P(축산계·산업계) 부하량이 전체의 약 63% 이상을 차지하고 있으며, 배출부하량은 생활계와 토지계 부하량이 전체의 약 74% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타났고, 대도시가 집중되어 있는 금호강·수영강 중권역에서 가장 많은 오염부하량이 발생 및 배출되고 있는 것으로 나타났다.

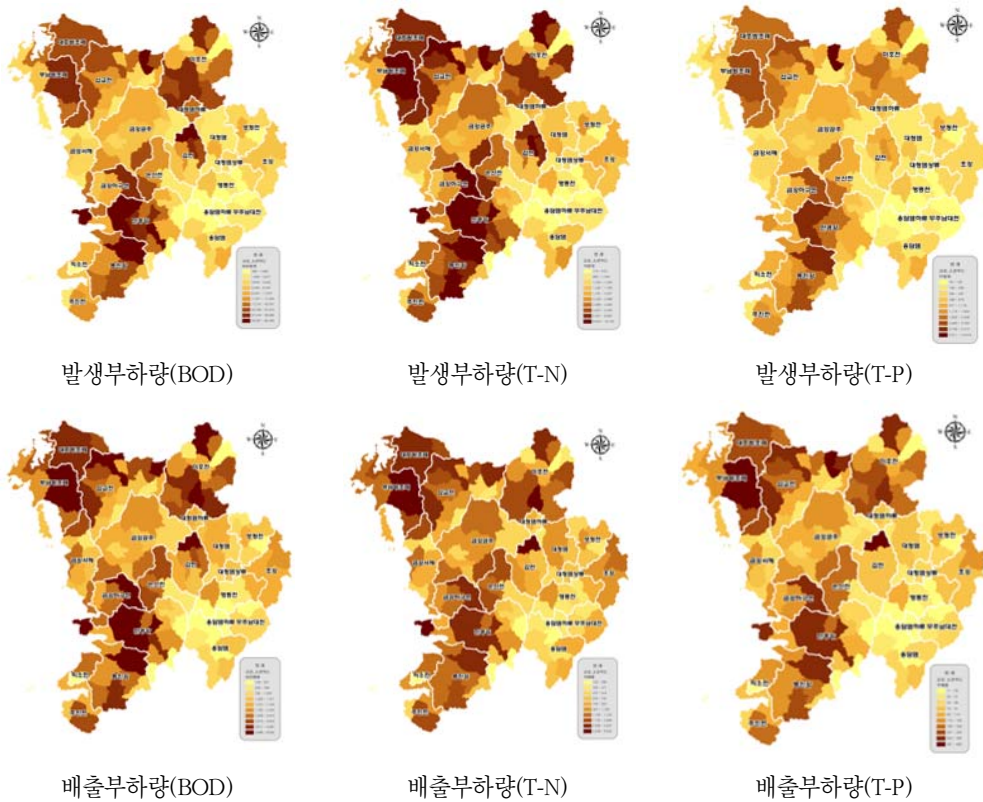


자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.
그림 A3-10. 낙동강 발생 및 배출부하량 현황

5. 금강 대권역

금강 대권역의 2009~2011년의 평균 총 발생부하량은 BOD 2,248,000kg/일, T-N 485,329kg/일, T-P 134,975kg/일이며, 배출부하량은 BOD 303,515kg/일, T-N 193,440kg/일, T-P 19,448kg/일로 나타났다.

금강 대권역의 발생부하량은 BOD와 T-P(축산계·산업계), T-N(생활계·축산계) 부하량이 전체의 약 73% 이상을 차지하고 있으며, 배출부하량은 축산계와 토지계 부하량이 전체의 약 74% 이상을 차지하고 있었다. 대도시가 집중되어 있는 만경강·미호천 중권역에서 가장 많은 오염부하량이 발생 및 배출되고 있는 것으로 나타났다.



자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

그림 A3-11. 금강 발생 및 배출부하량 현황

6. 영산강·섬진강 대권역

영산강·섬진강 대권역의 2009~2011년의 평균 총 발생부하량은 BOD 1,394,488kg/일, T-N 377,610kg/일, T-P 115,496kg/일이며, 배출부하량은 BOD 278,049kg/일, T-N 156,858kg/일, T-P 15,983kg/일로 나타났다.

영산강·섬진강 대권역의 발생부하량은 BOD(생활계·축산계), T-N(축산계·토지계), T-P(축산계·산업계) 부하량이 전체의 약 68% 이상을 차지하고 있으며, 배출부하량은 축산계와 토지계 부하량이 전체의 약 68% 이상을 차지하고 있었다. 대도시가 집중되어 있는 와탄천·영산강상류 중권역에서 가장 많은 오염부하량이 발생 및 배출되고 있는 것으로 나타났다.



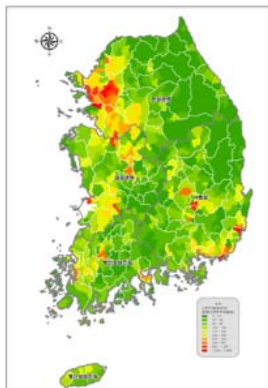
자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

■ 그림 A3-12. 영산강·섬진강 발생 및 배출부하량 현황

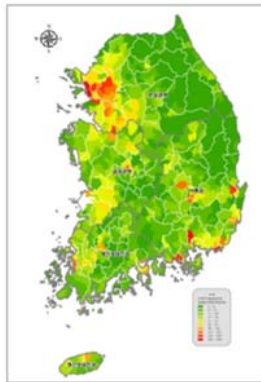
7. 단위면적당 부하량

전국의 2009~2011년의 평균 총 단위 면적당 발생부하량은 BOD $103.8\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, T-N $28.1\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, T-P $6.0\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$ 이며, 배출부하량은 BOD $16.1\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, T-N $10.3\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, T-P $1.0\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$ 로 나타났다.

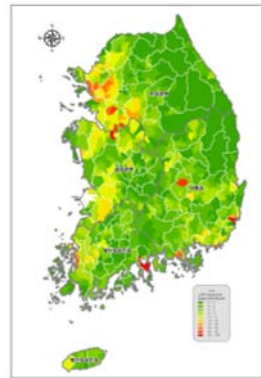
단위면적당 발생부하량 BOD는 금강 대권역에서 $124.6\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, T-N는 낙동강 대권역에서 $30.1\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, T-P는 금강 대권역에서 $7.5\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$ 로 높게 나타났으며, 단위면적당 배출부하량 BOD는 금강과 한강 대권역에서 각각 $16.8\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, $16.1\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, T-N는 한강과 금강 대권역에서 각각 $11.2\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, $10.7\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, T-P는 금강과 한강 대권역에서 각각 $1.1\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$, $1.0\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{일}$ 로 높게 나타났다.



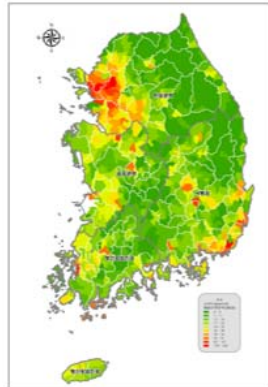
단위면적당 발생부하량(BOD)



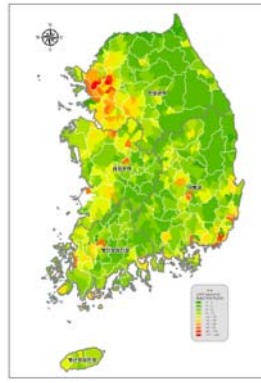
단위면적당 발생부하량(T-N)



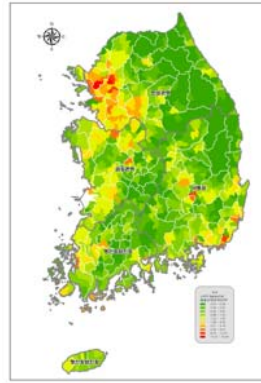
단위면적당 발생부하량(T-P)



단위면적당 배출부하량(BOD)



단위면적당 배출부하량(T-N)



단위면적당 배출부하량(T-P)

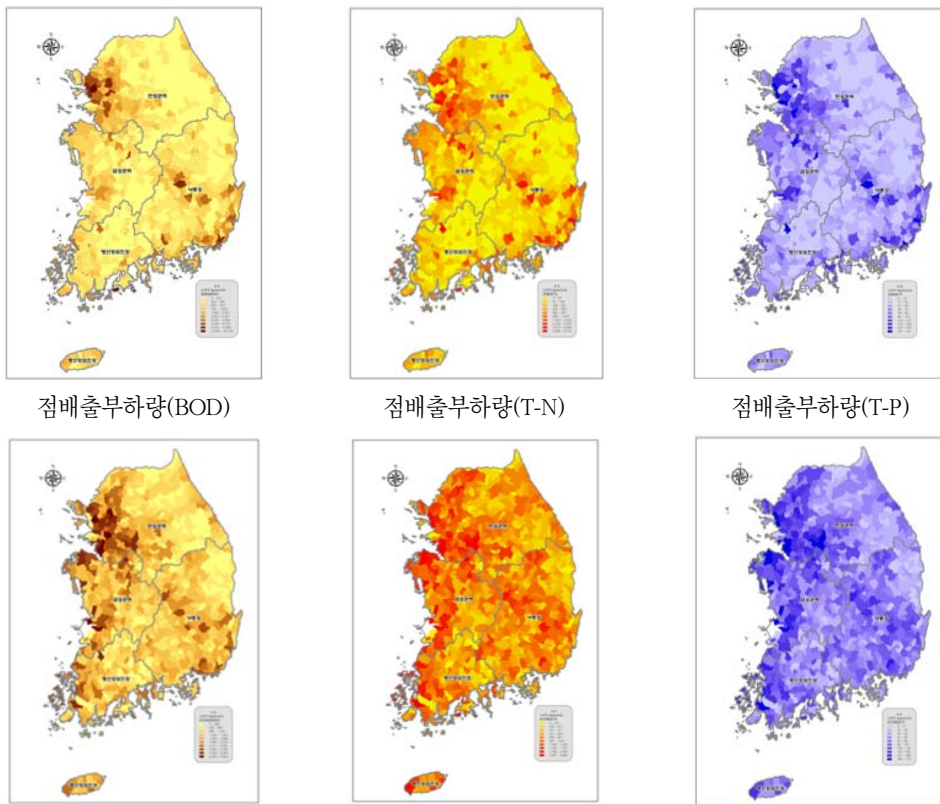
자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

그림 A3-13. 전국 단위면적당 발생 및 배출부하량 현황

8. 점·비점 배출부하량

전국의 2009~2011년의 평균 총 점배출부하량은 BOD 566,784kg/일, T-N 455,620kg/일, T-P 44,295kg/일이며, 비점배출부하량은 BOD 1,113,117kg/일, T-N 617,896kg/일, T-P 58,923kg/일로 나타났다.

점배출부하량의 총 비중은 BOD 34%, T-N 42%, T-P 43%이며, 대권역별 점배출부하량 비중의 경우, BOD는 낙동강 대권역 41%, T-N, T-P는 한강 대권역 각각 52%, 50%로 높게 나타났으며, 비점배출부하량의 총 비중은 BOD 66%, T-N 58%, T-P 57%이며, 대권역별 비점배출부하량 비중의 경우, BOD, T-P는 금강 대권역 각각 77%, 67%, T-N은 영산강·섬진강 대권역 73%로 높게 나타났다.



비점배출부하량(BOD) 비점배출부하량(T-N) 비점배출부하량(T-P)
 자료: 전국오염원조사자료(2009, 2010, 2011)에서 필자 작성.

■ 그림 A3-14. 전국 점·비점 배출부하량 현황



부록 4. 영산·섬진강 권역의 유출량 및 오염부하량 시험검증¹²⁾

1. 연구 필요성 및 목적

최근 기후변화로 인한 영향은 우리 삶에 다양한 영향을 미치고 있으며, 특히 수자원 측면에서 기후변화는 강수 또는 기온의 비정상성과 그로 인한 수문순환의 변화가 대표되는 흐름으로 받아들여지고 있다. 기후변화와 수문순환의 변화에 대비하기 위해서는 우선 현재의 수문상황을 명확하게 이해하고 진단하는 것이다. 이에 대비하여 전 세계 및 우리나라에서는 강수와 기온 등의 기후자료 이용한 수문모형 모의를 통해 유량과 수질 자료를 예측하고 있는데, 우리나라에서 특히 수문모의를 수행할 수밖에 없는 이유는 수문 관측의 역사가 짧고, 관측 자료의 불확실성으로 인하여 적절한 수문모형의 선택과 수문모형의 관측 재생력에 의존해야 하는 경향이 크기 때문이다.

일반적으로 장기 유량, 수질 예측에 가장 많이 쓰이고 있는 수문모형은 입력자료와 지형자료를 구축하고 주요 매개변수를 선택하여, 매개변수를 변화시키면서 관측자료에 가장 가까운 결과를 가져오는 상태를 구성하게 된다. 이때 가장 흔히 쓰이는 방법은 매개변수 최적화이며, 최적화에 가장 일반적인 방법은 시행착오법이다. 즉, 모형 운용자의 경험에 따라 매개변수를 조작해가며 관측에 가장 가까운 매개변수 군(群)을 찾는 과정으로 유역에 대한 현실감이 무엇보다도 중요하다.

하지만 다중 공간을 대상으로 장기간의 데이터를 산출하는데 중점을 두고 있는 현재의 수문모의는 장기간의 불확실한 정보에서 모형 운용자가 유역에 대한 현실감을 갖고 최적의 모형을 찾기가 쉽지 않다. 따라서 이를 보완하기 위해 객관적인 검보정 과정이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 유량 및 비점오염원 추정에 가장 많이 활용되고 있는 SWAT 모형을 이용하여 유출 및 수질 모형 구축 후, SWAT-CUP 모형을 이용하여 매개변수를 객관적으로 최적화(검·보정)하는 과정을 통해 신뢰도를 높인 수문모형을 구축하였다. 본 연구의 대상지는 전국 12대 수계 중 3개 수계에 해당되

12) 위 부록내용은 본 과제에서 위탁연구로 수행한 “영산강, 섬진강 권역의 유출량 및 수질 모의(서울과학기술대학교 정은성)”의 보고서를 바탕으로 작성하였으며, 위탁연구 결과는 본 연구에서 이용한 유출량 데이터의 시험검증에 사용하였다.

며, 최신의 고해상도 지형자료를 반영한 수량 및 수질 모의를 수행하고자 하였다.

2. 선행연구 검토

SWAT 모형 매개변수 최적화에서 지금까지 사용된 대표적인 방법론은 시행착오법이다. 이는 사용자의 경험에 따라 모형의 매개변수를 바꿔가며 관측에 가장 가까운 모형 매개변수를 결정하게 되는데, 이 방법은 사용자가 유역에 대한 포괄적인 이해를 갖춰야만 논리적인 타당한 매개변수를 결정할 수 있다는 특징을 갖고 있다. 즉 경험이 많은 사용자에게 상당히 간단하고 쉽게 모형을 제어할 수 있다는 장점이 있지만 그렇지 못한 사용자는 물리 현상에 근거한 모형 최적화를 수행하기 어렵다. 따라서 최근에는 이를 보완하기 위해 여러 선행 연구에서 매개변수를 객관적으로 최적화하는 방법에 대해 다뤄지고 있다.

가. SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형

SWAT 모형은 장기-강우 유출 모형으로 미국 농무성 농업연구소(USDA ARS, United States Department of Agricultural Research Service)에 의해 개발되었다. 장기간에 걸친 다양한 토양의 특징과 토지이용에 따라 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출 및 수질을 추정하기 위해 개발된 유역모델이다. SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 장기-강우유출모의 모형으로서 네가지의 부모형으로 구성되어 있다. 즉, 수문, 영양물질, 토양유실, 하도추적 부모형으로 구분할 수 있다. 이 중에서 수문 부모형은 연속방정식에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며, 그 구성으로는 수로손실, 유출, 지하수 흐름, 증발산, 지표면, 차단, 침투 등이다.

SWAT 모형에서의 수문순환의 구성은 수로손실, 지하수 흐름, 증발산, 지표유출, 침투 등이다. 이를 통해 각 수문응답단위(HRU, Hydrological Response Unit) 별로 독립적으로 유출량이 계산되며 하도추적을 통해 해당 유역의 출구지점에서의 유출량이 계산한다. SWAT 모형에서 수문

부모형은 다음 <식 A4-1>과 같은 물수지 방정식에 근거를 두고 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_{surf} - ET_i - W_{seep} - Q_{gw})$$

■ 식 A4-1. 수문 부모형 식

여기서, SW_t 는 t일의 토양수분함량 (mm), t는 시간으로써 일 단위이며, R_i 는 i일의 강우량 (mm), Q_{surf} 는 i일의 유출량 (mm), ET_i 는 i일의 증발산량 (mm), W_{seep} 은 i일의 침투량 (mm), Q_{gw} 는 i일의 환원유출(mm)이다.

SWAT에서 모의되는 질소와 인 계열의 NH_4 , NO_3 , NO_2 , $ORG-N$, PO_4 , $ORG-P$ 등의 항목은 모두 동일한 기작으로 모의되기 때문에 다음과 같이 NO_3 를 대표항목으로 기술하였다. 질산염인 NO_3 는 <식 A4-2>와 <식 A4-3>과 같은 과정에 의해 하도내에서 이동 및 배출되고 있다. 지표면으로부터 유출되는 질산염은 다음과 같이 계산된다.

$$NO_{3, surf} = \beta_{NO_3} \times conc_{NO_{3, mobile}} \times Q_{surf}$$

■ 식 A4-2. 지표면 유출 질산염 산정

여기서, $NO_{3, surf}$ 는 표면유출로 이송되는 질산염(kg N/ha), β_{NO_3} 는 질산 침투계수, $conc_{NO_{3, mobile}}$ 는 토양층의 상부 10 mm에서 이송되는 수분에 대한 질산염 농도(kg N/mm H₂O), Q_{surf} 는 표면유출 (mm H₂O)이다. 하도로 유입된 질산염의 하천 내 추정과정은 <식 A4-3>과 같다.

$$\Delta NO_{3, str} = (\beta_{N_2} \times NO_{2, str} - (1 - fr_{NH_4}) \times \alpha_1 \times \mu_a \times algae) \times TT$$

■ 식 A4-3. 하천 내 질산염 산정

여기서, $\Delta NO_{3, str}$ 은 질산염 농도의 변화 (mgN/L), β_{N_2} 는 질산염의 생물학적 산화를 위한 비율상수 (day-1), $NO_{2, str}$ 는 시점에서 아질산염의 농도 (mgN/L), fr_{NH_4} 는 조류에 의해 섭취되는 암모늄

비율, α_1 은 조류 생체량 중 질소 비율 (mgN/mgalg biomass), μ_a 는 조류성장률 (day-1), algae는 시점에서 조류의 생체량 농도 (mg alg/L), TT는 하도에서의 유하시간 (day)이다.

나. SWAT-CUP 모형

SWAT 모형의 매개변수 최적화를 위해 개발된 SWAT-CUP은 SUFI-2(Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol(Parameter Solution), PSO(Particle Swarm Optimization), MCMC(Markov Chain Monte Carlo)기법으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 SUFI-2기법을 이용하여 유량 및 수질 관련 매개변수 최적화 작업을 실시하였다.

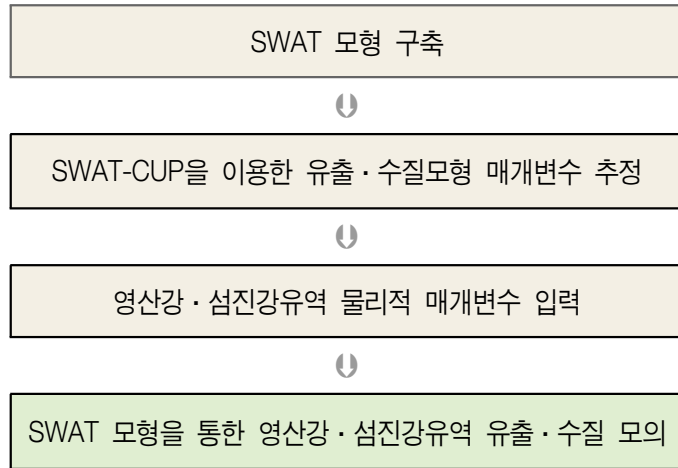
SUFI-2 알고리즘은 다양한 불확실한 매개변수로 이루어져 있다. 모든 불확실성의 정도는 95% 예측의 불확실성(95PPU)의 비율로 측정되는 P-factor로 나타낼 수 있다. 이는 모든 과정과 기상 데이터와 같은 모델의 입력 자료의 정확성은 모델 예측의 불확실성을 증가시킬 수 있다. 그러므로 불확실성에 의해 선택된 자료의 비율은 불확실성의 정도를 평가하는 좋은 기준이 될 수 있다. 다음으로 오류를 추정하는 방법으로는 95PPU가 있다. 95PPU는 Latin hypercube sampling을 통해 얻은 출력변수의 누적 분포 2.5%와 97.5% 수준에서 계산되며, 심한 오류가 5%에 불과한 추정이다.

SUFI-2 알고리즘은 측정값과 가장 작은 d-factor를 갖는 브래킷을 찾으며, 95PPU에 속하는 매개변수를 가정하고, P-factor와 R-factor를 기준으로 불확실성을 감소시킨다.

3. 연구 내용 및 방법

본 연구는 <그림 A4-1>과 같이 수행되었다. 해당 구역의 분할 및 구역의 물리적 특성을 추출하기 위해 영산강·섬진강 구역의 SWAT 모형을 구축한다. SWAT-CUP 모형을 통해 SWAT 모형의 매개변수를 최적화하고, 최적화된 구역별 유출 및 수질의 물리적 특성을 나타내는 물리적 매개변

수를 입력하여 유출 및 수질모의를 진행한다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-1. 연구 방법론

가. 기본 자료구축

지형입력자료 구축을 위해 NGIS의 수치지도로부터 격자크기가 30 m X 30 m인 DEM(Digital Elevation Model), 토지이용도는 환경부의 1:25,000 중분류로 구축하였고 1:25,000의 정밀토양도를 이용하였다. 2008~2012년의 최근 5년간의 기상자료를 이용하였다. SWAT모형에서 사용되는 기상관련 인자들은 2008~2012년의 일강우(mm), 최고, 최저 기온(℃), 일사량(MJ/m³day), 풍속(m/s), 습도(%)인데, 일강우는 국토교통부의 자료를 사용하였고 최고, 최저 기온, 일사량, 풍속, 습도는 기상청 자료를 이용하였다. 수질(TN, TP)의 경우 환경부 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr/>)에서 제공하는 8일 간격 수질오염총량제 자료를 사용하였다. 이와 같은 자료는 유량을 토대로 제공되는 일 부하량 자료이므로 <식 A4-4>를 이용하여 계산하였다.

$$\text{Load (kg/day)} = \text{Flow (m}^3/\text{s)} \times \text{Quality (mg/L)} \times 86.4$$

■ 식 A4-4. 일 부하량 산정

여기서, Quality는 TN, TP이다.

나. 대상유역 현황 및 자료

본 연구의 대상유역은 영산강, 섬진강, 탐진강 유역으로 <그림 A4-2>와 같다. 우리나라 5대강 중 하나인 영산강 유역은 한반도 남서부에 위치해 있으며, 유역경계는 동경 126°26' 12" ~ 127° 06' 07", 북위 34° 40' 16" ~ 35° 29' 01" 이다. 행정구역상 광주광역시, 전라남도(나주시, 담양군, 목포시, 무안군, 영광군, 장성군, 함평군 등)에 걸쳐있다. 영산강의 유역의 물리학적 특징으로는 유역면적은 3,468 km², 유로연장은 129.5km, 평균폭은 26.7km, 평균고도는 EL 118.9 m, 형상계수는 0.206이며 유역형태는 직사각형 형태의 수지상이다.

한반도의 남해안 중서부에 위치한 섬진강의 유역경계는 동경 126° 51' 50" ~ 127° 53' 05", 북위 34° 40' 26" ~ 35° 50' 0" 이다. 섬진강 유역의 경계 유역으로는 동쪽으로는 낙동강 유역, 서쪽으로는 영산강 유역과 동진강 유역, 북쪽으로는 금강 유역 및 만경강 유역이 위치해있다. 섬진강의 유역면적은 4,911.89 km², 유로연장은 223.8km, 유역 평균 폭은 21.9km, 형상계수는 0.1, 평균고도는 EL. 301.60 m 이고, 유역형태는 수지상이다.

유역면적은 505.5 km², 본류 유로연장은 약 27.3km이다. 또한, 탐진강 내 장흥댐 하류 28km에서 남해안의 강진만으로 유입하며 유역의 동쪽에는 섬진강 유역, 북쪽 및 서쪽에는 영산강 유역과 접하고 있으며, 영산강 및 섬진강 유역에 비하며 규모도 작고 흐름도 짧지만 동서의 전이지대적인 성격을 보인다.

따라서, 영산강 유역의 특징인 평야도 형성하고 있으며, 섬진강 유역의 특징인 분지와 산지를 함께 갖고 있기 때문에 탐진강은 영산강과 섬진강의 특징을 고루 갖춘 중간 형태의 하천이라 볼 수 있다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-2. 연구 대상 유역

1) 영산강

대상 유역 중 하나인 영산강 유역(영산강 상류, 영산강 중류, 영산강 하류, 황룡강, 지석천, 고막원천, 영산강 하구연, 영암천)으로 SWAT 구축을 위한 유역분할 및 SWAT 구축을 위한 자료(수치고도, 토지이용도, 토양도, 관측소 현황)는 <그림 A4-3>과 같다.

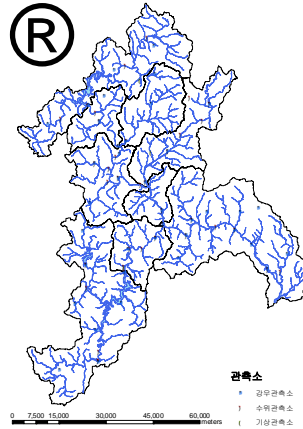
본 연구에서는 영산강 유역 모의를 위한 강우자료는 국토교통부 관할 강우 관측소의 일 강우자료를 사용하였다. 각 유역별 강우관측소는 영산강 상류 5개, 황룡강 2개, 지석천 5개, 영산강

중류 2개, 고막원천 2개, 영산강 하류 1개, 영산강 하구언 1개, 영암천 1개로 구성되어 있다. 또한, 기상자료 구축을 위해 광주 관측소의 일 자료를 사용하였다. 각 강우 및 기상관측소의 현황은 <표 A4-1>과 같다.

표 A4-1. 영산강 강우 및 기상 관측소 현황

관리기관	유역	관측소명	위도	경도	해발고 (m)
국토 교통부	영산강상류	광주	35.144	126.905	56.47
		광주댐	35.200	126.989	83.70
		담양댐	35.373	127.014	100.00
		무등산	35.115	126.997	907.64
		삼지	35.271	126.936	38.69
	황룡강	북이	35.447	126.775	205.45
		장성댐	35.354	126.820	240.00
	지석천	나주댐	34.964	126.844	78.87
		능주	35.003	126.896	32.61
		동면	35.031	127.041	92.59
		이장	35.086	126.866	40.86
		청풍	34.875	126.971	96.48
	영산강중류	동곡	35.098	126.773	16.99
		봉황	34.958	126.789	31.20
	고막원천	나산	35.111	126.612	24.14
		삼서	35.226	126.646	56.26
	영산강하류	함평	35.068	126.518	32.88
	영산강 하구언	하구언	34.786	126.449	11.23
	영암천	도포	34.850	126.644	22.64
기상청		광주	35.173	126.892	72.38

자료: 필자 작성.



(마) 관측소

자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-4. 섬진강 유역분할 및 구축자료

섬진강 유역 모의를 위한 강우자료는 국토교통부 관할 강우 관측소의 일 강우수는 섬진강댐 3개, 섬진강댐하류 3개, 이수천 3개, 순창 4개, 요천 3개, 섬진곡성 1개, 주안댐 4개, 보성강 2개, 섬진강하류 11개로 총 34곳의 강우자료를 사용하였으며, 기상 관측소는 임실과 남원 관측소의 자료를 사용하여 기상데이터를 구축하였다. 각 강우 및 기상관측소의 현황은 <표 A4-2>와 같다.

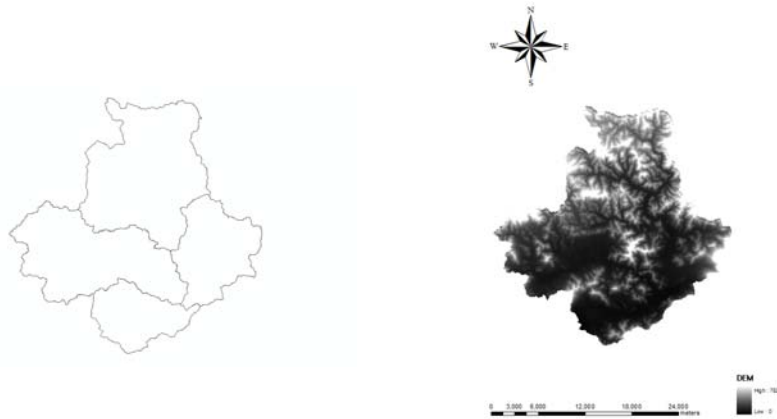
표 A4-2. 섬진강 강우 및 기상 관측소 현황

관리기관	유역	관측소명	위도	경도	해발고(m)
국토 교통부	섬진강댐	쌍치	35.485	126.939	350
		신평	35.641	127.207	265
		성수	35.708	127.347	420
	섬진강댐 하류	덕치	35.496	127.150	129.27
		백련산	35.568	127.019	756.65
		제2섬진	35.423	127.216	89.95
	오수천	둔남	35.545	127.333	126.2
		오수	35.439	127.245	95.54
		임실	35.630	127.348	206.5
	순창	오산	35.261	127.117	103.63
		순창2	35.375	127.133	95.57
		적성	35.393	127.209	89.45
		대강	35.331	127.217	74.18
	요천	남원	35.409	127.391	106.17
		변암2	35.546	127.539	330.06
		송동	35.319	127.311	64.48
	섬진곡성	오곡	35.295	127.329	59.56
	주안댐	동북댐	35.081	127.104	174
		복내	35.893	127.137	112.3
		우산	35.971	127.223	127.5
		주암댐	35.058	127.239	115
	보성강	죽곡	35.160	127.347	53.07
		석곡	35.127	127.250	74.85
	섬진강하류	진주암	35.243	127.709	691.72
		구례2	35.166	127.454	40
		노고단	35.232	127.528	328.84
		쌍계	35.234	127.645	173.83
		하동2	35.067	127.741	13.8
		황천	35.111	127.808	33.57
		압록	35.199	127.374	49.06
화개		35.182	127.626	21.54	
다압		35.137	127.683	18.42	
황전		35.102	127.429	76.05	
서시	35.211	127.475	35.55		
기상청	임실	35.612	127.286	247.870	
	남원	35.402	127.397	127.480	

자료: 필자 작성.

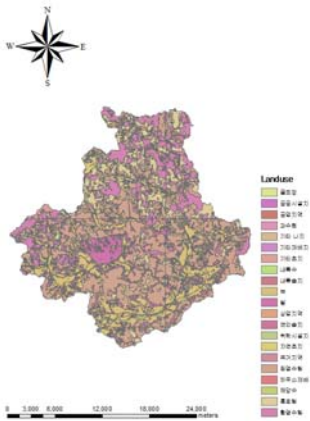
3) 탐진강

대상 유역 중 하나인 탐진강 유역으로 SWAT 구축을 위한 유역분할 및 SWAT 구축을 위한 자료(수치고도, 토지이용도, 토양도, 관측소 현황)는 <그림 A4-5>와 같다.

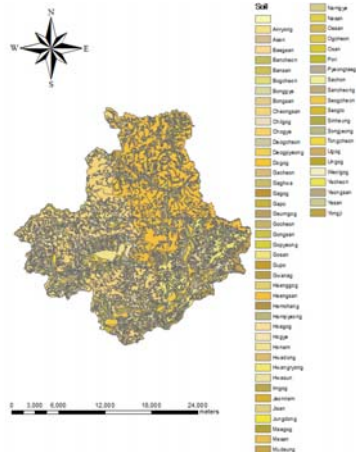


(가) 유역분할

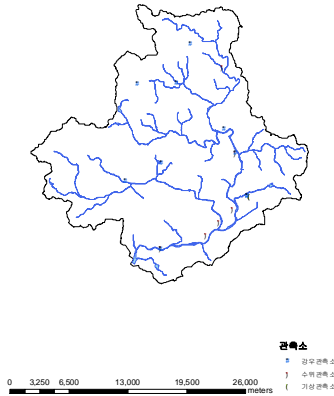
(나) 수치고도



(다) 토지이용도



(라) 토양도



(마) 관측소

자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-5. 탐진강 구축자료

탐진강 유역의 국토교통부 관할 강우관측소는 총 6곳의 강우데이터를 구축하였으며, 기상 관측소는 임실과 남원 관측소의 자료를 사용하여 기상데이터를 구축하였으며 각 관측소의 현황은 <표 A4-3>과 같다.

■ 표 A4-3. 탐진강 강우 및 기상 관측소 현황

관리기관	유역	관측소명	위도	경도	해발고(m)
국토 교통부	탐진강	병영	34,720	126,810	41,640
		유치	34,800	126,830	91,270
		작천	34,700	126,770	39,080
		군동	34,640	126,820	13,160
		유양	34,730	126,910	41,830
		장흥댐	34,750	126,890	58,000
기상청		장흥	35,612	127,286	247,870

자료: 필자 작성.

4. 연구 결과

가. SWAT-CUP 모의 결과

연구대상 지역의 SWAT-CUP 모형을 통해 유량 매개변수 최적화 결과는 <표 A4-4>와 같다. 매개변수 최적화한 유역은 영산강 유역의 황룡강, 지석천, 고막원천, 영산강상류와 섬진강유역의 오수천, 요천, 탐진강 유역이다. 수질(TN, TP) 또한 매개변수 최적화 작업을 수행하였다. 그 결과는 <표 A4-5>, <표 A4-6>과 같다. 수질의 경우 영산강 유역의 황룡강, 지석천과 탐진강 유역을 수행하였다. 탐진강의 경우, 영산강 유역의 특징인 평야도 형성하고 섬진강 유역의 특징인 분지와 산지를 함께 갖고 있다. 즉, 영산강과 섬진강의 특징을 고루 갖춘 중간 형태의 하천이기 때문에 섬진강의 경우 영산강, 탐진강 유역의 최적 매개변수를 이용하였다. 다음은 황룡강의 유량 및 수질 매개변수 최적화 결과를 보여준다.

표 A4-4. 유량 SWAT-CUP 모의 결과

유역	Calibration		Validation	
	Event		Event	
	NSE	R ²	NSE	R ²
황룡강	2008/01/01 ~ 2011/12/31		2012/01/01 ~ 2012/12/31	
	0.75	0.88	0.80	0.91
지석천	2008/01/01 ~ 2010/12/31		2011/01/01 ~ 2011/12/31	
	0.88	0.94	0.64	0.82
고막원천	2008/01/01 ~ 2010/12/31		2011/01/01 ~ 2011/12/31	
	0.78	0.90	0.66	0.82
영산강상류	2008/01/01 ~ 2010/12/31		2011/01/01 ~ 2011/12/31	
	0.89	0.94	0.82	0.93
오수천	2008/01/01 ~ 2010/12/31		2011/01/01 ~ 2011/12/31	
	0.74	0.87	0.82	0.93
요천	2009/01 ~ 2009/12		2010/01 ~ 2010/12	
	0.52	0.82	0.94	0.98
탐진강	2009/01 ~ 2011/12		2012/01 ~ 2012/12	
	0.64	0.78	0.53	0.78

자료: 필자 작성.

표 A4-5. TN SWAT-CUP 모의 결과

유역	Calibration		Validation	
	Event		Event	
	NSE	R ²	NSE	R ²
황룡강	2008/01 ~ 2008/12		2009/01 ~ 2009/12	
	0.80	0.90	0.84	0.97
지석천	2008/01 ~ 2008/12		2009/01 ~ 2009/12	
	0.93	0.98	0.77	0.94
탐진강	2008/01 ~ 2008/12		2009/01 ~ 2009/12	
	0.63	0.99	0.53	0.84

자료: 필자 작성.

표 A4-6. TP SWAT-CUP 모의 결과

유역	Calibration		Validation	
	Event		Event	
	NSE	R ²	NSE	R ²
황룡강	2008/01 ~ 2008/12		2009/01 ~ 2009/12	
	0.93	0.98	0.91	0.98
지석천	2008/01 ~ 2008/12		2009/01 ~ 2009/12	
	0.74	0.95	0.53	0.84
탐진강	2008/01 ~ 2008/12		2009/01 ~ 2009/12	
	0.77	0.99	0.53	0.96

자료: 필자 작성.

1. 유량 검·보정 - 매개변수 최적화 및 민감도 분석

본 연구에서는 유출량 검, 보정을 위해 SUFI-2 알고리즘을 사용하였다. 표 7과 같이 18개의 매개변수를 이용하였다. 여기서 최적매개변수를 찾아가는 방법으로 SWAT-CUP모형 내에는 3가지의 방법이 있다. 본 연구에서는 replace 방법과 respective 방법을 사용하여 최적매개변수를 찾았다. Replace 방법은 해당 매개변수 범위 내에 있는 값들을 바꿔주면서 최적의 매개변수 값을 찾아주는 방법이며, respective 방법은 해당 매개변수에 1+주어진 값을 곱하면서 최적의 매개변수를 찾아주는 방법이다. Replace 방법을 사용하여 ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN,

GW_REVAP, REVAPMN, RCHRG_DP, ESCO, OV_N, SLSUBBSN, CH_N2, CH_K2, ALHPA_BNK, SMFMX, SMTMP, SFTMP를 최적화하였으며, respective 방법을 사용하여 CN2, SOL_K, SOL_AWC를 최적화하였다. 매개변수 최적화를 위한 범위는 SWAT-CUP 내에 있는 Absolute_SWAT_Values에서 제시하는 최대, 최소값을 사용하였다.

SWAT-CUP내에는 t-test와 P-value 값을 통해 목적함수 값에 따른 민감도 분석을 실시한다. t-test의 경우 절대값이 클수록, P-value 값이 0에 가까울수록 민감함을 나타낸다.

표 A4-7. 유출량 검·보정을 위한 매개변수 정의 및 범위

Parameter	Definition	Parameter range	
		Min	Max
r_CN2,mgt	SCS runoff curve number f	0	98
v_ALPHA_BF,gw	Baseflow alpha factor (days)	0	1
v_GW_DELAY,gw	Groundwater delay (days)	0	500
v_GWQMN,gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0	5000
v_GW_REVAP,gw	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2
v_REVAPMN,gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	0	500
v_RCHRG_DP,gw	Deep aquifer percolation fraction	0	1
v_ESCO,hru	Soil evaporation compensation factor	0	1
v_OV_N,hru	Manning's "n" value for overland flow	0.01	30
v_SLSUBBSN,hru	Average slope length	10	150
r_SOL_K,sol	Saturated hydraulic conductivity	0	2000
r_SOL_AWC,sol	Available water capacity of the soil layer	0	1
v_CH_N2,rte	Manning's "n" value for the main channel	-0.01	0.3
v_CH_K2,rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.01	500
v_ALHPA_BNK,rte	Baseflow alpha factor for bank storage	0	1
v_SMFMX,bsn	Maximum melt rate for snow during year (occurs on summer solstice)	0	20
v_SMTMP,bsn	Snow melt base temperature	-20	20
v_SFTMP,bsn	Snowfall temperature	-20	20

자료: Abbaspour, 2008

SWAT-CUP 모형을 이용한 황룡강 유역의 유출 매개변수 최적화 결과 최적매개변수는 <표 A4-8>과 같다. 각 매개변수별 최적값은 CN2는 34.10, ALPHA_BF는 0.56, GW_DELAY는

321.72, GWQMN는 2141.71, GW_REVAP는 0.14, REVAPMN는 29.31, RCHRG_DP는 0.47, ESCO는 0.69, OV_N는 7.63, SLSUBBSN는 -22.54, SOL_K는 1169.32, SOL_AWC는 0.62, CH_N2는 0.35, CH_K2는 82.03, ALHPA_BNK는 1.09, SMFMX는 22.45, SMTMP는 16.41, SFTMP는 -25.23으로 나타났다.

해당 매개변수별 민감도 분석 결과 <표 A4-8>과 같다. 각 매개변수별 상대적 민감도 값을 나타내며 황룡강 유역의 민감도 분석 결과 t-test와 P-value 값이 22.25, 0.00을 보이는 OV_N이 가장 민감하게 나타났다.

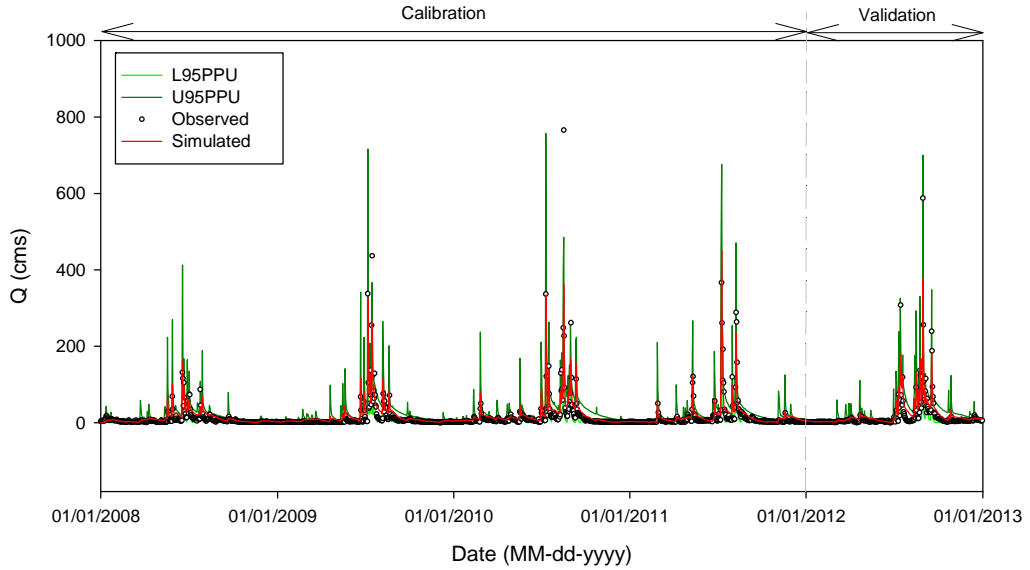
표 A4-8. 황룡강 유출 매개변수 최적화 및 민감도 분석결과

Parameter	Fitted value	t-test	P-Value
r_CN2_mgt	34.10	-0.69	0.49
v_ALPHA_BF_gw	0.56	0.69	0.49
v_GW_DELAY_gw	321.72	0.13	0.90
v_GWQMN_gw	2141.71	1.56	0.12
v_GW_REVAP_gw	0.14	-1.84	0.07
v_ESCO_hru	0.69	1.09	0.28
v_CH_N2_rte	0.35	5.62	0.00
r_SOL_K(.).sol	1169.32	-0.81	0.42
r_SOL_AWC(.).sol	0.62	-0.51	0.61
v_CH_K2_rte	82.03	13.71	0.00
v_REVAPMN_gw	29.31	0.41	0.68
v_RCHRG_DP_gw	0.47	-0.34	0.73
v_OV_N_hru	7.63	22.25	0.00
v_SLSUBBSN_hru	-22.54	-0.95	0.34
v_SMFMX_bsn	22.45	1.63	0.10
v_SMTMP_bsn	16.41	0.40	0.69
v_ALPHA_BNK_rte	1.09	3.00	0.00
v_SFTMP_bsn	-25.23	0.09	0.93

자료: 필자 작성.

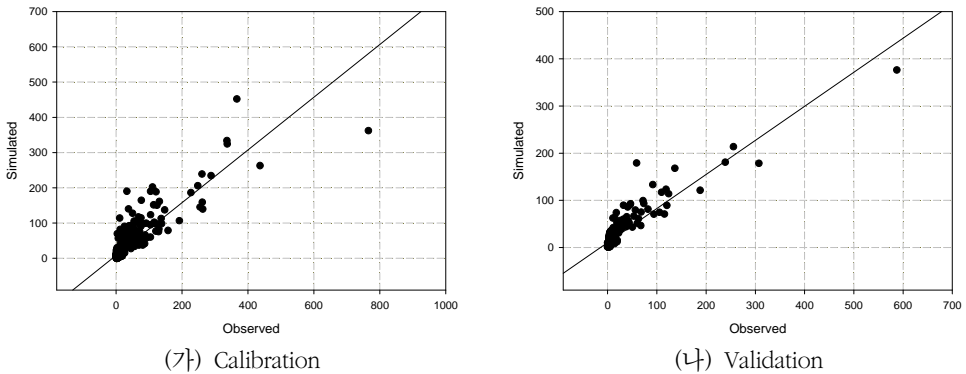
SUFI-2 알고리즘을 통해 산정된 최적매개변수로 나타난 모의유량과 관측유량을 비교하였다(그림 A4-6과 그림 A4-7). 비교결과, 1에 가까울수록 최적의 값을 나타내는 NSE(Nash and Sutcliffe, 1970)는 0.75 상관계수 R^2 는 0.88로 전반적으로 관측의 패턴을 잘 따르고 있음을 확인하였다. 또한 산정된 최적매개변수를 이용하여 검증한 결과 NSE는 0.80, 상관계수 R^2 는 0.91로 관측의

패턴을 잘 따르고 있음을 알 수 있었다.



자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-6. 황룡강 모의 및 관측유량 시계열도



자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-7. 황룡강 모의 및 관측유량 상관정도 결과

2. TN 검·보정 - 매개변수 최적화 및 민감도 분석

TN을 검, 보정하기 위한 매개변수로는 <표 A49>와 같다. 수질의 경우 유량을 토대로 제공되는 일 부하량 자료이기 때문에 유출량 검, 보정을 위한 매개변수에 TN의 검, 보정을 위한 매개변수 10개를 추가하여 총 28개의 매개변수를 고려하였다. Replace 방법을 사용하여 ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, RCHRG_DP, ESCO, OV_N, SLSUBBSN, CH_N2, CH_K2, ALHPA_BNK, SMFMX, SMTMP, SFTMP, SURLAG, RSDCO, RCN, NPERCO, CMN, RSDIN, ERORGN, SHALLST_N, CH_ONCO, USLE_P를 최적화하였으며, respective 방법을 사용하여 CN2, SOL_K, SOL_AWC를 최적화하였다. 매개변수의 범위는 유량과 마찬가지로 SWAT-CUP 내에 있는 Absolute_SWAT_Values에서 제시하는 최대, 최소값을 사용하였다.

표 A4-9. TN 검·보정을 위한 매개변수 정의 및 범위

Parameter	Definition	Parameter range	
		Min	Max
r_CN2,mgt	SCS runoff curve number f	0	98
v_ALPHA_BF,gw	Baseflow alpha factor (days)	0	1
v_GW_DELAY,gw	Groundwater delay (days)	0	500
v_GWQMN,gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0	5000
v_GW_REVAP,gw	Groundwater "revap" coefficient	0,02	0,2
v_REVAPMN,gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	0	500
v_RCHRG_DP,gw	Deep aquifer percolation fraction	0	1
v_ESCO,hru	Soil evaporation compensation factor	0	1
v_OV_N,hru	Manning's "n" value for overland flow	0,01	30
v_SLSUBBSN,hru	Average slope length	10	150
r_SOL_K,sol	Saturated hydraulic conductivity	0	2000
r_SOL_AWC,sol	Available water capacity of the soil layer	0	1
v_CH_N2,rte	Manning's "n" value for the main channel	-0,01	0,3
v_CH_K2,rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0,01	500
v_ALHPA_BNK,rte	Baseflow alpha factor for bank storage	0	1
v_SMFMX,bsn	Maximum melt rate for snow during year (occurs on summer solstice)	0	20
v_SMTMP,bsn	Snow melt base temperature	-20	20
v_SFTMP,bsn	Snowfall temperature	-20	20
v_SURLAG,bsn	Surface runoff lag time	0,05	24
v_RSDCO,bsn	Residue decomposition coefficient	0,02	0,1
v_RCN,bsn	Concentration of nitrogen in rainfall	0	15
v_NPERCO,bsn	Nitrogen percolation coefficient	0	1
v_CMN,bsn	Rate factor for humus mineralization of active organic nitrogen	0,001	0,003
v_RSDIN,hru	Initial residue cover (kg/ha)	0	10000
v_ERORGN,hru	Organic N enrichment ratio	0	5
v_SHALLST_N,gw	Concentration of nitrate in groundwater contribution to streamflow from subbasin (mg N/l)	0	1000
v_CH_ONCO,rte	Organic nitrogen concentration in the channel (ppm)	0	100
v_USLE_P,mgt	USLE equation support pra	0	1

자료: Abbaspour (2008).

황룡강 유역의 수질 매개변수 최적화 결과 최적 매개변수 및 범위는 <표 A4-10>과 같다. 각 매개변수별 최적값은 ALPHA_BF는 0.65, GW_DELAY는 372.12, GWQMN는 2302.62, GW_REVAP는 0.06, REVAPMN는 12.50, RCHRG_DP는 0.56, ESCO는 0.40, OV_N는 2.58, SLSUBBSN는 161.83, CH_N2는 0.17, CH_K2는 155.74, ALHPA_BNK는 0.00, SMFMX는 14.51,

SMTMP는 -7.05, SFTMP는 -28.28, SURLAG는 5.07, RSDCO는 0.12, RCN는 -0.47, NPERCO는 0.63, CMN는 0.00, RSDIN는 5216.35, ERORGN는 1.62, SHALLST_N는 429.76, CH_ONCO는 26.33, USLE_P는 0.67, CN2는 -42.13, SOL_K는 86.64, SOL_AWC는 0.25로 나타났다.

해당 매개변수별 민감도 분석 결과 <표 A4-10>과 같다. 황룡강 유역의 민감도 분석 결과 t-test와 P-value 값이 25.95, 0.00을 보이는 ALPHA_BNK가 가장 민감하게 나타났다.

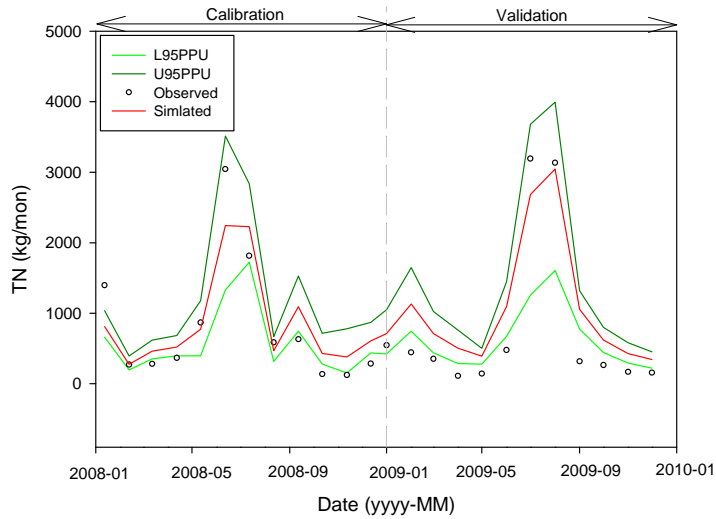
표 A4-10. 황룡강 TN 매개변수 최적화 및 민감도 분석 결과

Parameter	Fitted value	t-test	P-Value
r_CN2,mgt	-42.13	-0.25	0.80
v_ALPHA_BF,gw	0.65	0.08	0.93
v_GW_DELAY,gw	372.12	0.77	0.44
v_GWQMN,gw	2302.62	0.25	0.80
v_GW_REVAP,gw	0.06	2.15	0.03
v_ESCO,hru	0.40	-0.69	0.49
v_CH_N2,rte	0.17	-0.96	0.34
r_SOL_K(),sol	85.64	-0.79	0.43
v_CH_K2,rte	155.74	-0.88	0.38
r_SOL_AWC(),sol	0.25	-0.93	0.35
v_REVAPMN,gw	12.50	0.35	0.72
v_RCHRG_DP,gw	0.56	0.22	0.83
v_OV_N,hru	2.58	0.98	0.33
v_SLSUBBSN,hru	161.83	1.08	0.28
v_SMFMX,bsn	14.51	0.89	0.37
v_SMTMP,bsn	-7.05	0.45	0.66
v_ALPHA_BNK,rte	0.00	25.95	0.00
v_SFTMP,bsn	-28.28	-0.98	0.33
v_SURLAG,bsn	5.07	-0.23	0.82
v_RSDCO,bsn	0.12	0.37	0.71
v_RCN,bsn	-0.47	-2.21	0.03
v_NPERCO,bsn	0.63	-0.29	0.77
v_CMN,bsn	0.00	1.27	0.21
v_RSDIN,hru	5216.35	0.20	0.84
v_ERORGN,hru	1.62	0.61	0.54
v_SHALLST_N,gw	429.76	1.02	0.31
v_CH_ONCO,rte	26.33	-0.54	0.59
v_USLE_P,mgt	0.67	0.44	0.66

자료: 필자 작성.

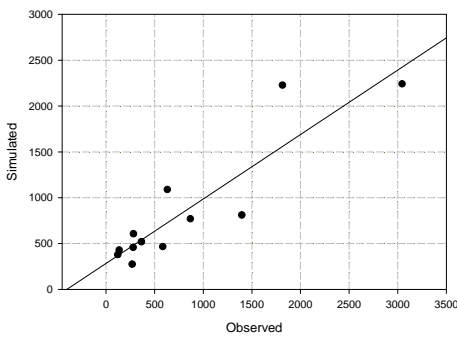
SUFI-2 알고리즘을 통해 산정된 최적매개변수로 나타난 모의 TN과 관측 TN을 비교하였다(그림

A4-8과 그림 A4-9). 비교결과, NSE는 0.80, 상관계수 R^2 는 0.90으로 관측의 패턴을 잘 따르고 있음을 확인하였다. 또한 산정된 최적매개변수를 이용하여 검증한 결과 NSE는 0.84, 상관계수 R^2 는 0.97로 관측의 패턴을 잘 따르고 있음을 알 수 있었다.

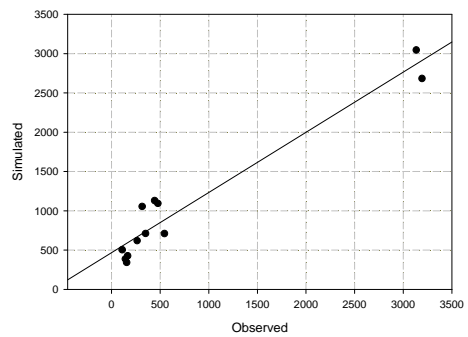


자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-8. 황룡강 모의 및 관측 TN 시계열도



(가) Calibration



(나) Validation

자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-9. 황룡강 모의 및 관측 TN 상관정도 결과

3. TP 검 · 보정 - 매개변수 최적화 및 민감도 분석

TP을 검, 보정하기 위한 매개변수로는 <표 A4-11>과 같다. 유출량 검, 보정을 위한 매개변수에 TP의 검, 보정을 위한 매개변수 11개를 추가하여 총 29개의 매개변수를 고려하였다. Replace 방법을 사용하여 ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, RCHRG_DP, ESCO, OV_N, SLSUBBSN, CH_N2, CH_K2, ALHPA_BNK, SMFMX, SMTMP, SFTMP, PERCOP, PSP, PPERCO, SURLAG, RSDCO, BC4, RS2, RS5, ERORGP, USLE_P, CH_OPKO를 최적화하였으며, respective 방법을 사용하여 CN2, SOL_K, SOL_AWC를 최적화하였다. 매개변수의 범위는 유량과 마찬가지로 SWAT-CUP 내에 있는 Absolute_SWAT_Values에서 제시하는 최대, 최소값을 사용하였다.

표 A4-11. TP 검·보정을 위한 매개변수 정의 및 범위

Parameter	Definition	Parameter range	
		Min	Max
r_CN2,mgt	SCS runoff curve number f	0	98
v_ALPHA_BF,gw	Baseflow alpha factor (days)	0	1
v_GW_DELAY,gw	Groundwater delay (days)	0	500
v_GWQMN,gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0	5000
v_GW_REVAP,gw	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2
v_REVAPMN,gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	0	500
v_RCHRG_DP,gw	Deep aquifer percolation fraction	0	1
v_ESCO,hru	Soil evaporation compensation factor	0	1
v_OV_N,hru	Manning's "n" value for overland flow	0.01	30
v_SLSUBBSN,hru	Average slope length	10	150
r_SOL_K,sol	Saturated hydraulic conductivity	0	2000
r_SOL_AWC,sol	Available water capacity of the soil layer	0	1
v_CH_N2,rte	Manning's "n" value for the main channel	-0.01	0.3
v_CH_K2,rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.01	500
v_ALHPA_BNK,rte	Baseflow alpha factor for bank storage	0	1
v_SMFMX,bsn	Maximum melt rate for snow during year (occurs on summer solstice)	0	20
v_SMTMP,bsn	Snow melt base temperature	-20	20
v_SFTMP,bsn	Snowfall temperature	-20	20
v_PERCOP,bsn	Pesticide percolation coefficient	0	1
v_PSP,bsn	Phosphorus sorption coefficient	0.01	0.69
v_PPERCO,bsn	Phosphorus percolation coefficient	0	0.69
v_SURLAG,bsn	Surface runoff lag time	1	24
v_RSDCO,bsn	Residue decomposition coefficient	0.02	0.1
v_BC4,swq	Rate constant for mineralization of organic P to dissolved P in the reach at 20 °C[1/day]	0.02	0.1
v_RS2,swq	Benthic (sediment) source rate for dissolved phosphorus in the reach at 20 °C[mg/(m3,dayy)]	0.01	0.7
v_RS5,swq	Organic phosphorus settling rate in the reach at 20 °C[1/dayy]	0.01	0.1
v_ERORGP,hru	Organic P enrichment ratio	0	5
v_USLE_P,mgt	USLE equation support pra	0	1
v_CH_OPKO,rte	Organic phosphorus concentration in the channel (ppm)	0	100

자료: Abbaspour (2008).

황룡강 유역의 수질 매개변수 최적화 결과 최적 매개변수 및 범위는 <표 A4-12>와 같다. 각 매개변수별 최적값은 ALPHA_BF는 0.80, GW_DELAY는 377.68, GWQMN는 208.82, GW_REVAP는 0.03, REVAPMN는 622.53, RCHRG_DP는 0.35, ESCO는 -0.07, OV_N는 31.00,

SLSUBBSN는 46.58, CH_N2는 -0.07, CH_K2는 622.53, ALHPA_BNK는 0.01, SMFMX는 6.06, SMTMP는 -10.44, SFTMP는 -0.09, PERCOP는 0.77, PSP는 0.42, PPERCO는 0.68, SURLAG는 10.91, RSDCO는 0.07, BC4는 0.15, RS2는 0.35, RS5는 0.10, ERORGP는 3.43, USLE_P는 0.37, CH_OPCO는 115.89, CN2는 -43.30, SOL_K는 -239.19, SOL_AWC는 1.29로 나타났다.

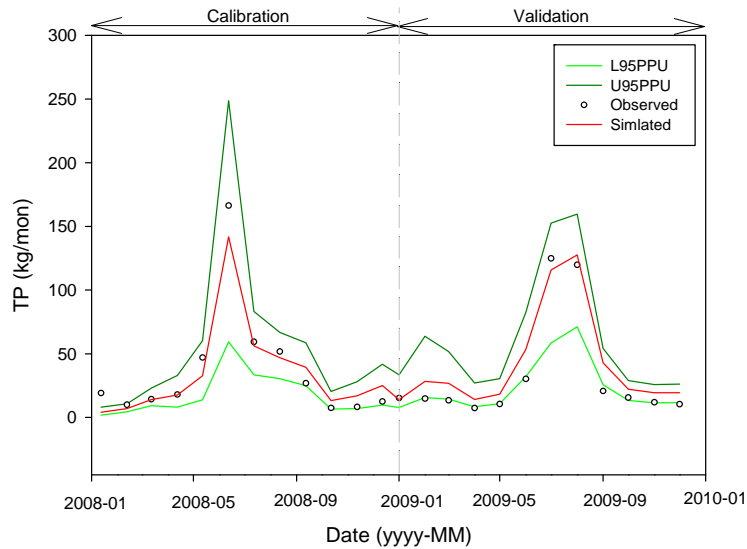
해당 매개변수별 민감도 분석 결과 <표 A4-12>와 같다. 황룡강 유역의 민감도 분석 결과 t-test와 P-value 값이 21.48, 0.00을 보이는 ALHPA_BNK가 가장 민감하게 나타났다.

표 A4-12. 황룡강 TP 매개변수 최적화 결과

Parameter	Fitted value	t-test	P-Value
v PERCOP,bsn	0,77	0,49	0,62
v PSP,bsn	0,42	1,09	0,27
v PPERCO,bsn	0,68	-3,13	0,00
v SURLAG,bsn	10,91	0,89	0,38
v RSDCO,bsn	0,07	-1,11	0,27
v BC4,swq	0,15	-0,58	0,56
v RS2,swq	0,35	-2,70	0,01
v RS5,swq	0,10	-0,96	0,34
v ERORGP,hru	3,43	-1,49	0,14
v USLE_P,mgt	0,37	-1,16	0,25
v CH_OPCO,rte	115,89	0,22	0,83
r CN2,mgt	-43,30	-0,24	0,81
v ALPHA_BF,gw	0,80	-1,56	0,12
v GW_DELAY,gw	377,68	-0,17	0,86
v GWQMN,gw	208,82	-1,52	0,13
v GW_REVAP,gw	0,03	-1,93	0,05
v ESCO,hru	-0,07	1,97	0,05
v CH_N2,rte	0,10	-0,90	0,37
r SOL_K(,),sol	-239,19	0,14	0,89
r SOL_AWC(,),sol	1,29	0,53	0,60
v CH_K2,rte	622,53	-0,67	0,50
v REVAPMN,gw	449,94	1,33	0,18
v RCHRG_DP,gw	0,35	-0,89	0,37
v OV_N,hru	31,00	-1,38	0,17
v SLSUBBSN,hru	46,58	1,41	0,16
v SMFMX,bsn	6,06	0,22	0,83
v SMTMP,bsn	-10,44	0,82	0,41
v ALPHA_BNK,rte	0,01	21,48	0,00
v SFTMP,bsn	-0,09	-1,39	0,16

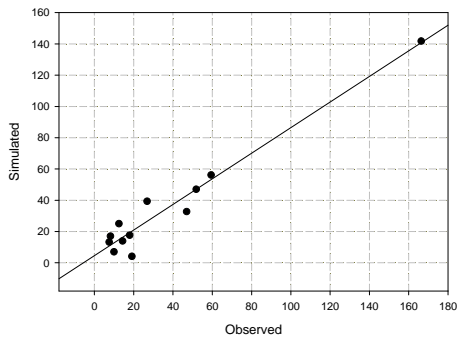
자료: 필자 작성.

SUFI-2 알고리즘을 통해 산정된 최적매개변수로 나타난 모의 TP와 관측 TP을 비교하였다(그림 A4-10과 그림 A4-11). 비교결과, NSE는 0.93, 상관계수 R^2 는 0.98로 관측의 패턴을 잘 따르고 있음을 확인하였다. 또한 산정된 최적매개변수를 이용하여 검증한 결과 NSE는 0.91, 상관계수 R^2 는 0.98로 관측의 패턴을 잘 따르고 있음을 알 수 있었다.

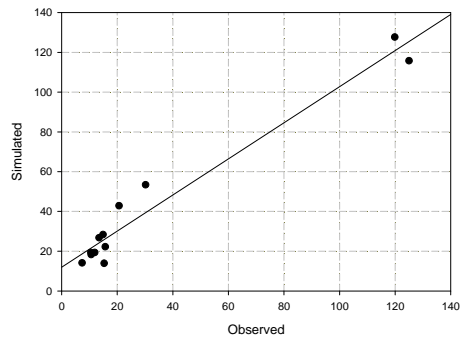


자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-10. 황룡강 모의 및 관측 TP 시계열도



(가) Calibration



(나) Validation

자료: 필자 작성.

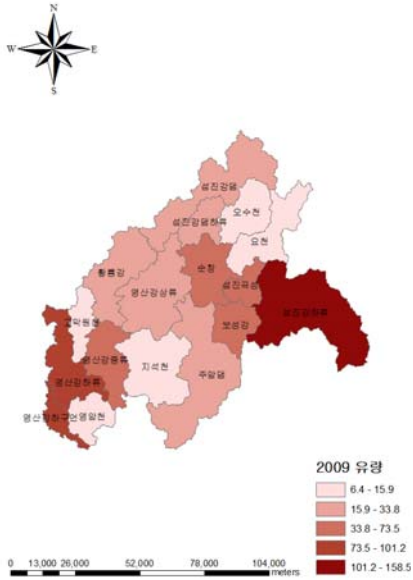
■ 그림 A4-11. 황룡강 모의 및 관측 TP 상관정도 결과

나. SWAT 모의 결과

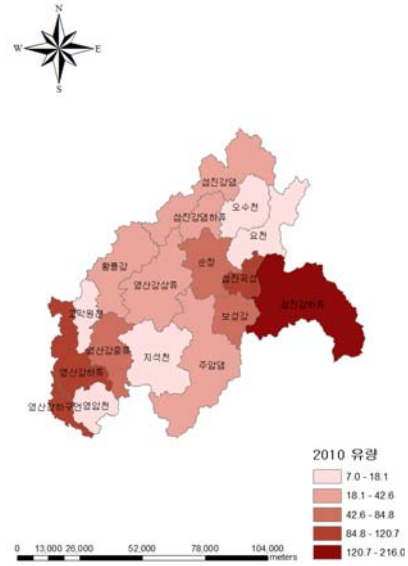
연도별 영산강, 섬진강 유역의 유량 및 수질을 <그림 A-12>, <그림 A4-13>, <그림 A4-14>와 같이 크기 별로 도식화 해보았다. 연도별 월 평균 유량 및 수질 크기 비교 결과 유량은 영산강 유역 중 영산강하구언이 2009년 101 m³/s, 2010년 121 m³/s, 2011년 90 m³/s, 평균(2009~2011) 104 m³/s으로 가장 크게 모의되었으며, 섬진강 유역 중에서는 섬진강하류가 2009년 158 m³/s, 2010년 216 m³/s, 2011년 212 m³/s, 평균(2009~2011) 195 m³/s로 가장 크게 모의되었다. 전체적으로 섬진강 유역이 영산강 유역에 비해 유량의 크기가 큼을 알 수 있었다.

수질의 경우 유량과 반대로 영산강 유역이 섬진강 유역에 비해 농도가 높음을 알 수 있었다. 영산강하구언 TN의 경우 2009년 673,436 kg/yr, 2010년 595,673 kg/yr, 2011년 465,474 kg/yr, 평균(2009~2011) 578,194 kg/yr, TP의 경우 2009년 90,014 kg/yr, 2010년 73,723 kg/yr, 2011년 54,401 kg/yr, 평균(2009~2011) 72,713 kg/yr으로 영산강, 섬진강 유역 중에서 가장 농도가 높게 모의되었다. 그 다음 크기를 나타내는 영산강하류는 TN의 경우 2009년 627,075 kg/yr, 2010년 569,658 kg/yr, 2011년 440,673 kg/yr, 평균(2009~2011) 545,802 kg/yr, TP의 경우 2009년 83,715 kg/yr, 2010년 70,058 kg/yr, 2011년 50,699 kg/yr, 평균(2009~2011) 68,157 kg/yr으로 나타났다.

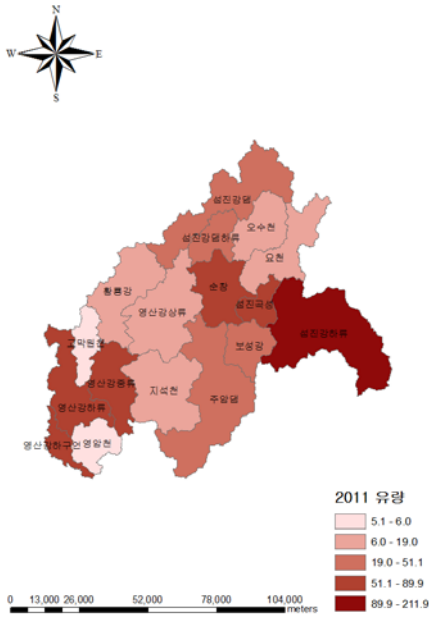
섬진강하류는 TN의 경우 2009년 233,619 kg/yr, 2010년 209,415 kg/yr, 2011년 186,172 kg/yr, 평균(2009~2011) 209,735 kg/yr, TP의 경우 2009년 26,608 kg/yr, 2010년 25,098 kg/yr, 2011년 22,973 kg/yr, 평균(2009~2011) 25,893 kg/yr으로 섬진강 유역 중에서 높은 농도를 보였지만 영산강하구언, 영산강하류, 영산강중류보다는 낮은 농도임을 알 수 있었다. 위와 같은 결과를 통해 치수적인 측면의 경우 섬진강 유역에 이수 및 수질 측면의 경우 영산강 유역에 많은 관심을 가져야 될 것으로 사료된다.



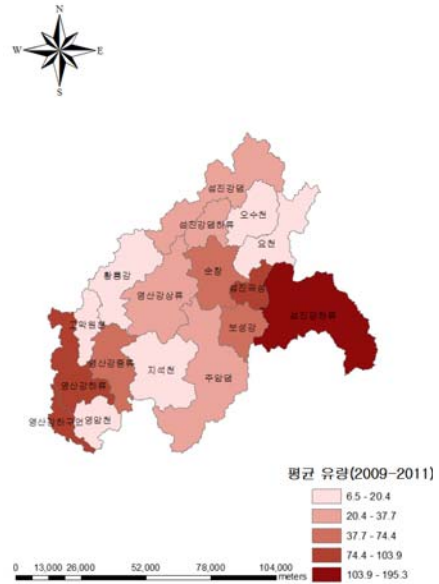
(가) 2009 유량



(나) 2010 유량



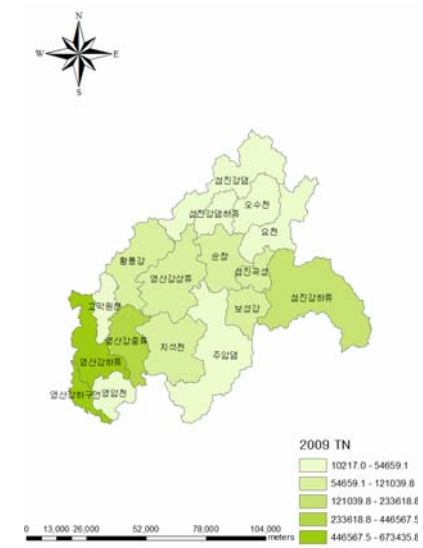
(다) 2011 유량



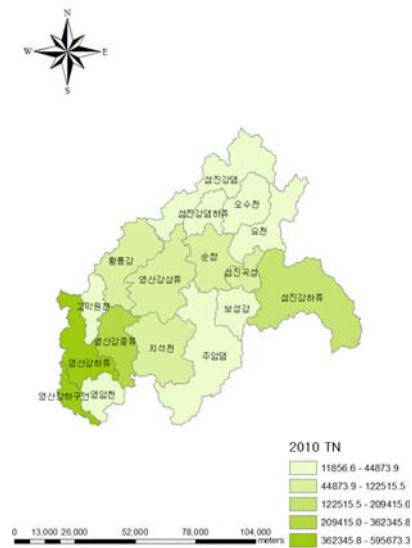
(라) 평균(2009~2011) 유량

자료: 필자 작성.

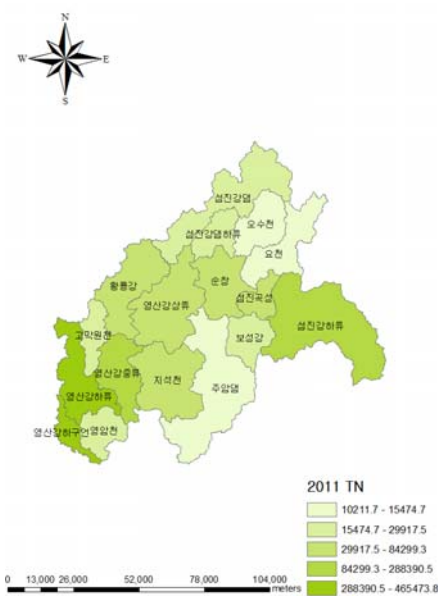
그림 A4-12. 연도별 유량 비교 (단위: m^3/s)



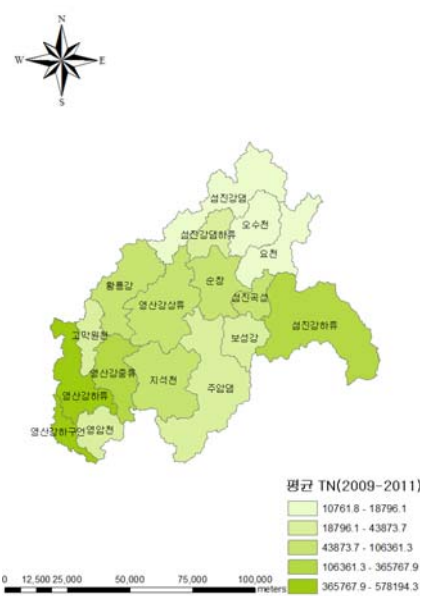
(가) 2009 TN



(나) 2010 TN



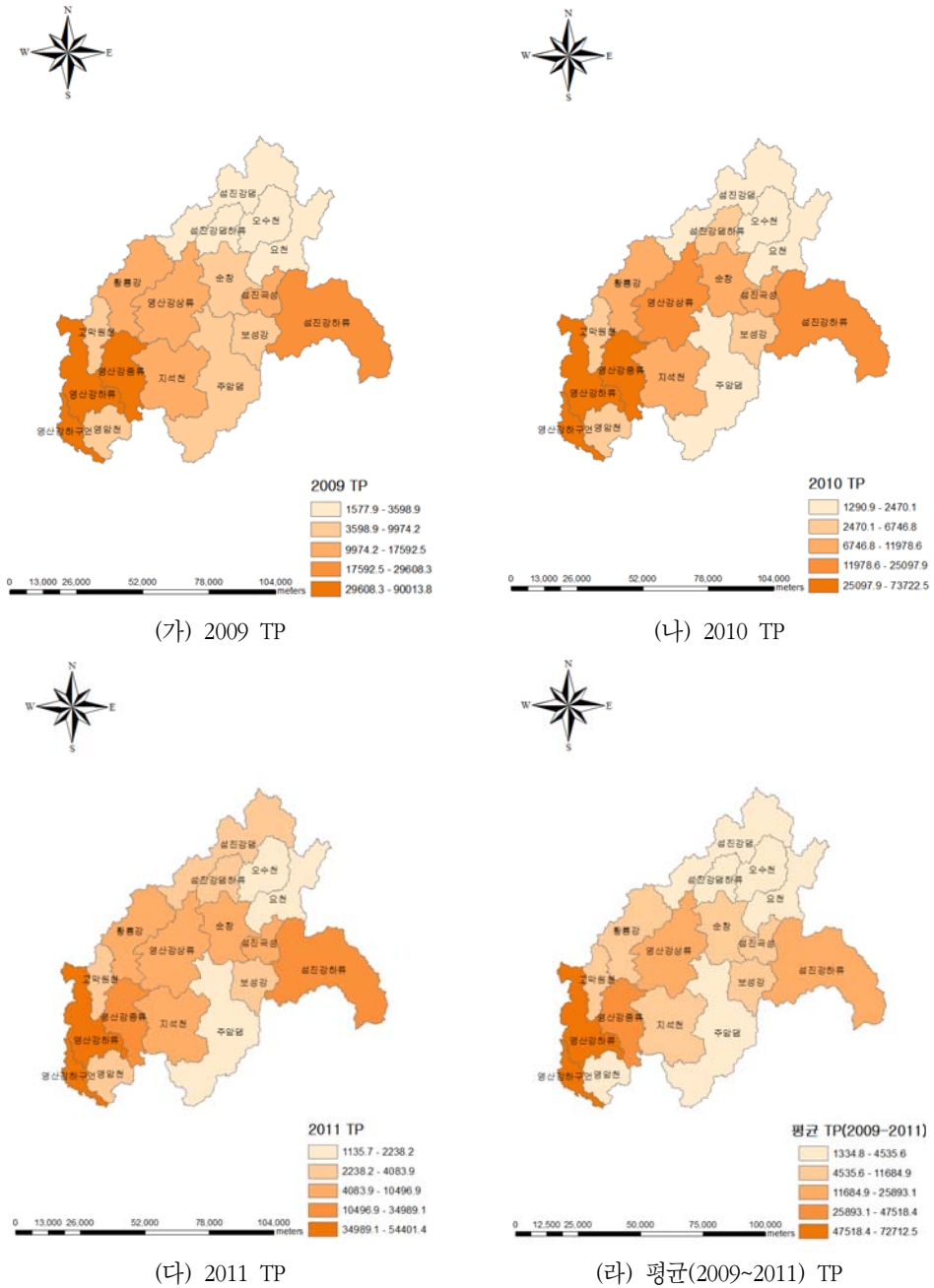
(다) 2011 TN



(라) 평균(2009~2011) TN

자료: 필자 작성.

■ 그림 A4-13. 연도별 TN 비교 (단위: kg/yr)



자료: 필자 작성.

그림 A4-14. 연도별 TP 비교 (단위: kg/yr)

4. 결론 및 시사점

본 연구는 기후변화에 따른 취약성 평가 지표 활용을 위한 유출 및 수질을 모의를 진행하였다. SWAT-CUP 모형을 이용하여 매개변수 검·보정 작업 후 SWAT을 통해 영산강 유역의 유량 및 수질을 모의하였다.

SWAT-CUP 모형을 이용하여 유출 및 수질 매개변수 관련 검·보정 결과는 다음과 같다. 황룡강의 경우 유량 관련 매개변수 보정 결과 NSE는 0.75, 상관계수 R^2 은 0.88로 나타났으며, 산정된 최적매개변수를 이용하여 검증한 결과 NSE는 0.80, 상관계수 R^2 은 0.91을 보였다. TN 관련 매개변수 보정 결과 NSE는 0.80, 상관계수 R^2 은 0.90로 나타났으며, 산정된 최적매개변수를 이용하여 검증한 결과 NSE는 0.84, 상관계수 R^2 은 0.97을 보였다. TP 관련 매개변수 보정 결과 NSE는 0.93, 상관계수 R^2 은 0.98로 나타났으며, 산정된 최적매개변수를 이용하여 검증한 결과 NSE는 0.91, 상관계수 R^2 은 0.98을 보였다.

SWAT 모의 결과, 연도별 월 평균 유량 및 수질 크기 비교 결과 유량은 영산강 유역 중 영산강하구언이 2009년 101 m^3/s , 2010년 121 m^3/s , 2011년 90 m^3/s , 평균(2009~2011) 104 m^3/s 로 가장 크게 모의되었으며, 섬진강 유역 중에서는 섬진강하류가 2009년 158 m^3/s , 2010년 216 m^3/s , 2011년 212 m^3/s , 평균(2009~2011) 195 m^3/s 로 가장 크게 모의되었다. 전체적으로 섬진강 유역이 영산강 유역에 비해 유량의 크기가 큼을 알 수 있었다. 수질의 경우 반대로 영산강 유역이 섬진강 유역에 비해 농도가 높음을 알 수 있었다. 영산강하구언 TN의 경우 2009년 673,436 kg/year, 2010년 595,673 kg/year, 2011년 465,474 kg/year, 평균(2009~2011) 578,194 kg/year, TP의 경우 2009년 90,014 kg/year, 2010년 73,723 kg/year, 2011년 54,401 kg/year, 평균(2009~2011) 72,713 kg/year으로 영산강, 섬진강 유역 중에서 가장 농도가 높게 모의되었다. 그 다음 크기를 나타내는 영산강하류는 TN의 경우 2009년 627,075 kg/year, 2010년 569,658 kg/year, 2011년 440,673 kg/year, 평균(2009~2011) 545,802 kg/year, TP의 경우 2009년 83,715 kg/year, 2010년 70,058 kg/year, 2011년 50,699 kg/year, 평균(2009~2011) 68,157 kg/year으로 나타났다. 섬진강하류는 TN의 경우 2009년 233,619 kg/year, 2010년 209,415 kg/year, 2011년

186,172 kg/year, 평균(2009~2011) 209,735 kg/year, TP의 경우 2009년 26,608 kg/year, 2010년 25,098 kg/year, 2011년 22,973 kg/year, 평균(2009~2011) 25,893 kg/year으로 섬진강 유역 중에서 높은 농도를 보였지만 영산강하구연, 영산강하류, 영산강중류보다는 낮은 농도임을 알 수 있었다.

SWAT 모형을 이용하여 유출 및 수질 모형 구축 후, SWAT-CUP 모형을 이용한 물리적 특성을 나타내는 매개변수의 검·보정을 통해 미래 기후변화 물순환 모의를 위한 수문모형 구축을 하였다. 향후 기후변화 취약성 평가를 위한 지표 개발에 이용될 예정이다.

SWAT 모형을 이용하여 유출 및 수질 모형 구축 후, SWAT-CUP 모형을 이용한 물리적 특성을 나타내는 매개변수의 검·보정을 통해 미래 기후변화 물순환 모의를 위한 수문모형 구축을 하였다. 향후 기후변화 취약성 평가를 위한 지표 개발에 이용될 예정이다.



부록 5. KEI/NRCS–World Bank 국제공동워크숍

2014년 11월 17일 한국환경정책·평가연구원(KEI), 경제인문사회연구회(NRCS) 및 세계은행(World Bank)의 공동 주최로 미 워싱턴 DC의 세계은행본부에서 국제공동워크숍을 진행하였다. 본 워크숍은 국가단위에서의 지속가능한 물이용을 평가하기 위한 지표 개발의 가능성을 탐색하고자 국가 단위에서의 의미 있는 지표 도출방법, 해당 지표의 핵심 내용 선정, 이용 가능한 데이터 확인 등을 통해 달성하고자 하는 목적과 현재 상황 사이의 간극을 확인하고자 하였다. 또한 국제협동연구의 결과물을 공유하고 차년도 연구목표로서 핵심지표개발 및 미래전망에 대한 논의를 진행하는 것으로, 각 연구기관이 관련 내용을 발표하고 내부 및 외부 전문가의 심층토론으로 진행되었다.



WORLD BANK GROUP
Water



KEI Korea
Environment
Institute



**NATIONAL RESEARCH COUNCIL FOR
ECONOMICS, HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES**

Workshop Agenda: Monday 17 November 2014

08:30 – 09:00 *Continental breakfast*

09:00 – 09:10 Welcome and opening remarks by Diego Rodriguez, Water Global Practice

09:10 – 09:30 Workshop overview and objectives by Marcus Wijnen, Water Global Practice

09:30 – 10:15 **Presentation** by Charles Vorosmarty/Pamela Green/Ben Koster, City University of New York: methodology followed, initial outcomes

10:15 – 10:25 **Presentation** by Jong Ho Ahn, Korea Environment Institute: introduction of KEI

10:25 – 10:55 **Presentation** by Yeonjoo Kim, Korea Environment Institute: country case study overview, results, challenges

10:55 – 11:10 *Coffee break*

11:10 – 12:30 **Discussion Session 1:** “How” will the indicator measure sustainable water use?

12:30 – 13:30 *Lunch break*

13:30 – 13:50 **Presentation** by Betsy Otto, WRI: Aqueduct Global Water Risk Mapping Tool

13:50 – 15:15 **Discussion Session 2:** “What” data will feed into the indicator?

15:15 – 15:30 *Coffee break*

15:30 – 15:45 **Presentation** by Jos Verbeek, Advisor, WB Office of the President’s Special Envoy: Overview of the SDG process

15:45 – 15:55 **Presentation** by Rick Lawford: WHO-HABITAT-UNEP project to monitor indicators associated with the OWG Water SDG

15:55 – 16:45 **Discussion Session 3:** “Why” do we need a WB indicator?
SDGs

16:45 – 17:00 Concluding remarks

17:00 – 19:00 *Reception – Private Dining Room AB (floor C1)*

■ 그림A5-1. 국제공동워크숍 진행일정



Workshop on Global Indicator for Sustainable Water Use

Hosted by the World Bank Water Global Practice and the Korea Environment Institute, with the support of the National Research Council of Economics, Humanities and Social Sciences of Korea

November 17, 2014 | World Bank Headquarters – 1818 H Street NW, Washington, DC 20433 | Room MC7-100

Context

Population growth, increasing food and energy demand and rising living standards in many countries are among the factors contributing to a growing pressure on global water resources. Climate change may add additional pressure to water resources already under stress. At present a large number of countries and regions, both rich and poor, already face water stress – seasonally or permanently – with total demand for water exceeding the available renewable resource base. Balancing the competing demands of various sectors, including critical environmental water needs, and preserving the quality of available resources are the rationale behind water resources management.

Measuring progress of countries towards a sustainable development path is critical to the World Bank's mission. There is also increasing demand for measuring sustainability from donors (IDA17 replenishment) and the international community (post-2015 and SDG Consultations). Water being vital to life on earth but also an indispensable source for most economic sectors, sustainable water use and healthy aquatic ecosystems are an essential condition for sustainable growth. Water resources management is underpinned by sound, continuous monitoring providing data trusted by all stakeholders. However, many Bank client countries encounter situations where there is a paucity of reliable data on the quantity and quality of available water resources and on the amounts of water used by various sectors. Poor monitoring contributes to poor regulation and mismanagement of water resources often resulting in overuse of available fresh water resources, inequitable access mostly harming the poor and vulnerable, exposure to natural hazards like floods and droughts and environmental damage and pollution.

Within this context the World Bank is committed to developing an indicator for Sustainable Water Use. Such an indicator could serve as an important tool to measure countries' progress towards a more sustainable development path. At the same time, the indicator could help in identifying existing hot-spots where water resources are particularly under pressure and guide long-term investment plans in water resource infrastructures or in other water dependent economic sectors.

Workshop Objective

In 2013 the World Bank began exploring the feasibility of producing an indicator measuring sustainable water use at the country level, together with a team of experts from the Environmental Crossroads City

■ 그림A5-2. 국제공동워크숍 브로슈어



University of New York and the Korea Environment Institute supported by the National Research Council of Economics, Humanities and Social Sciences of Korea. This initial work has focused on building a methodology for a meaningful indicator at country level, identifying the core components of such an indicator, evaluating available data sets that could contribute and mapping the key challenges and gaps.

At the conceptual level it was decided that the indicator should measure sustainability considering both quantitative and qualitative aspects. A number of core building blocks have been identified and on some blocks substantial progress has been made whereas on others key challenges remain. Given the absence of adequate and reliable monitoring data in many World Bank client countries the indicator will have to rely heavily on data obtained from a variety of remote sensing platforms, global data sets and modeling techniques.

To validate initial results and to assess the challenges posed by using global data sets versus data available at country level a country case study has been including, focusing on South Korea. Data with high quality and resolution on the country have been utilized to evaluate sets of indicators – both individual and composite – that have been initially suggested to measure sustainability. This work will help us to identify the challenges and opportunities in using global data.

During the one-day workshop methodology, initial results and country case study will be presented. These preliminary results will form the basis for targeted discussions among a selected audience of experts from a range of global and national scientific institutions, development agencies and non-governmental organizations.

Working sessions will focus on the proposed methodology and the data used – additional options to explore as well as the possible final shape of the sustainable water use indicator. The outcome of the workshop will help define the next steps in the development of a sustainable water use indicator. The workshop will also look into possible synergies with Water Sector SDGs.

Contacts:

Marcus Wijnen
Senior Water Resources Management Specialist
World Bank – Water Global Practice
mwijnen@worldbank.org

Dr. Yeonjoo Kim
Research Fellow
Korea Environment Institute
yjkim@kei.re.kr

Dr. Ik-Jae Kim
Senior Research Fellow
Korea Environment Institute
Economist
World Bank – Water Global Practice
ijkim@worldbank.org



Abstract

Development and Application of Sustainable Water Use Indicators

With increased concerns of sustainable development, sustainable water resource management is considered as one of the most significant issues for human-beings to meet their needs to preserve their lives now and in the future. Though water is a circulative resource on earth that is constantly rechargeable, some regions are still suffering from lack of available water from time to time, due to the seasonal rainfall variances and inappropriate water resource management. In addition, it is projected that increasing human activities and climate change impact would reduce the availability of water resources in the future. To deal with impending water crisis, it is currently required to take a broad view of integrating additional water-related circumstances that affect human's water use. In other words, it is getting more important to foster healthy ecological socio-economic environments as well as increasing the water availability by stabilizing the balance between water supply and demand.

However, sustainable water use has not yet been thoroughly discussed in terms of the water management in Korea. Previous national water programs in Korea have been focusing on increasing the water availability and preventing flood disasters, and current water use policy is still focused on constructing and maintaining water infrastructures.

Therefore, it is needed to assess the sustainability of water use in Korea to achieve safe and continual water use. To improve the sustainability of water use and ensure human water security, locating the most vulnerable areas is a primary condition. Several previously conducted water availability researches tend to adopt

indicator-based approaches to figure out the current state of water uses, because it is easy for the public to understand and directly applicable to decision making for the policy makers.

In this study, we aimed to develop sustainable water use indicators in South Korea. To accommodate a sustainability term as a whole, we included 5 categories representing various aspects that have effects on water uses, including terrestrial watershed environments and social-economic status as well as water supply and demand. According to the categories, we built up 30 indicators in terms of both pressure and response on water use. Considering the relative weights in indicators and the categories deducted from the analytic hierarchy process (AHP) from 45 water-related experts, we integrated sustainable water use index depicted upon 117 mid-basins in South Korea. Furthermore, we added a series of preliminary sensitivity tests on indicators and indices to assess the robustness of our results. They cover several correlation analyses between indicators, categories and final index as well as sensitivity tests on weight application in every indicator and index.

According to the study, we could figure out some of the significant features with mid-basin scales. First, water use pressure was high in western low-land basins where large agricultural plain is located and several insular areas where available water is highly limited. Second, a response index was high in upstream basins where available water is plentiful and large cities where socio-economic capability is well-organized. In summary, sustainable water use index showed low sustainability in western low-land areas, the coastal and insular areas, and high sustainability on water use was exhibited in highland basins. Highly populated large cities showed fair index values due to the trade-off between pressure and response.

According to the preliminary sensitivity test, we found that most indicators showed independency in correlation analysis. However, some cases of the relationships between land use and pollution loading showed high correlation which was shown in the Vörösmarty et al.(2010) correlation result as well, because anthropogenic land use are meant to be a source of water pollution. Four out of five categories showed directional concordance with a finalized sustainable water use index. Equitable water management category was the only exception that showed the opposite tendency in sustainable water use index. But we consider it meaningful as a result of including socio-economic factor that might represent

trade-offing drivers that have not been considered before. The differences due to adopting weights were barely recognized in both indicators and indices.

Aside from assessing the sustainability of water use in Korea, we additionally conducted a collaborative project with the World Bank and City College of New York (CCNY) on applying water security indicator in South Korea. By adjusting our results with recent and high-resolution data and comparing them to the previously developed water security indicator by CCNY, we intended to analyze the temporal differences between the results and verify the availability of down-scaled indicator application in a global scale. The results from comparative water security index showed that newly developed index by KEI indicates improved water security values in western lowland areas and degraded values in highland areas, resulting in general water security degradation in South Korea compared to the previously assessed result. It implies that applying recent and detailed data to reflect more specific status in Korea has led to deteriorated results in this study.

In the next year, we expect to validate indicators and index extensively to back up the limited preliminary sensitivity test from this year. In addition, we can extract some cardinal indicators representing each category and apply several future scenarios to them to assume the water sustainability in the future.

Keyword : sustainability, river basin management, indicator assessment, water security



저자 약력

김연주

미국 University of Connecticut, 환경공학 박사

한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)

E-mail : yjkim@kei.re.kr

주요 논문 및 보고서

「가뭄 유형별 기후변화 적응정책 연구」 (2013, 한국환경정책·평가연구원)

「새만금 수질개선 방안 연구 - 용담댐 방류량을 중심으로」 (2013, 한국환경정책·평가연구원)

김익재

미국 캔사스 주립대학교 환경공학 박사

한국환경정책·평가연구원 연구위원, The World Bank 파견(현)

E-mail : ijkim@kei.re.kr

안종호

미국 캘리포니아 주립대학교 환경공학 박사

한국환경정책·평가연구원 연구위원(현)

E-mail : ahnjh@kei.re.kr

한대호

서울시립대학교 환경공학 박사

한국환경정책·평가연구원 전문연구원(현)

E-mail : dhhan@kei.re.kr

공인혜

서울대학교 생태조경학전공 석사

한국환경정책·평가연구원 위촉연구원(현)

E-mail : ihkong@kei.re.kr