

# 한반도 피해가 최소화되는 동아시아 최적화 기후변화 시나리오 개발(I)

Development of the Optimal Climate Change Scenario of East Asia for Minimizing the risk in the Korean Peninsula ( I )

2014

| 기후대기연구부 지구환경연구과 |  
홍성철, 이재범, 마영일, 명지수, 김덕래,  
홍준석, 문경정, 김대곤, 김상균

Sung-Chul Hong, Jae-Bum Lee, Young-Il Ma, Ji-Su Myoung, Deok-Rae Kim,  
Jun-Suk Hong, Kyung Jung Moon, Dai-Gon Kim, Sang-Kyun Kim



국립환경과학원

National Institute of Environmental Research  
인천광역시 서구 환경로 42 (경서동 종합환경연구단지내)  
대표전화 : 032-560-7114  
<http://www.nier.go.kr>



국립환경과학원  
National Institute of Environmental Research

발간 등록번호
11-1480523-002131-01

 환경부  
NIER-RP2014-248

# 한반도 피해가 최소화되는 동아시아 최적화 기후변화 시나리오 개발( I )

기후대기연구부 지구환경연구과

홍성철, 이재범, 마영일, 명지수, 김덕래, 홍준석, 문경정, 김대곤, 김상균

## **Development of the Optimal Climate Change Scenario of East Asia for Minimizing the risk in the Korean Peninsula ( I )**

Sung-Chul Hong, Jae-Bum Lee, Young-Il Ma, Ji-Su Myoung, Deok-Rae Kim,  
Jun-Suk Hong, Kyung Jung Moon, Dai-Gon Kim, Sang-Kyun Kim

Global Environment Research Division  
Climate and Air Quality Research Department  
National Institute of Environmental Research

2014



국립환경과학원  
National Institute of Environmental Research

---

# 목 차

---

목 차 .....	i
표목차 .....	ii
그림목차 .....	iii
Abstract .....	v
<b>I. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
<b>II. 연구내용 및 방법 .....</b>	<b>3</b>
1. 모델 개요 .....	3
2. 배출량과 모델링을 위한 배출 정보 처리 .....	5
3. 미래 대기질 평가를 위한 모델링 조건 설정 .....	9
4. 건강영향 및 경제성 평가 .....	10
<b>III. 연구결과 및 고찰 .....</b>	<b>13</b>
1. 미래 중국 대기오염물질 배출변화 .....	13
가. 시나리오별 중국 대기오염물질 배출총량 변화 .....	13
나. 미래 중국 배출량 변화 공간분포 .....	14
2. 대기질 모델링 결과 검증 .....	18
3. 미래 중국 배출량 변화에 따른 대기질 변화 .....	20
가. 동아시아 및 한반도 지역의 $O_3$ 농도 변화 .....	20
나. 동아시아 및 한반도 지역의 $PM_{2.5}$ 농도 변화 .....	24
4. 대기질 변화에 따른 건강 영향 및 경제적 비용 평가 .....	27
가. 대기질 변화로 인한 건강영향 평가 .....	27
나. 초과 사망에 따른 경제적 비용 평가 .....	29
<b>IV. 결 론 .....</b>	<b>30</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>32</b>

## 표 목 차

<Table 1> Types of representative concentration pathways .....	6
<Table 2> Emissions summaries by countries w.r.t. RCP scenarios .....	8
<Table 3> Experiments design to predict air quality changes according to climate, boundary, and emissions changes .....	10
<Table 4> Concentration-Response function values .....	12
<Table 5> Recent and future air pollutants emissions from China w.r.t. RCP scenarios within modeling domain 1(mother domain) .....	14
<Table 6> Statistical analysis for comparing modeling performance .....	19
<Table 7> Spatial mean values of predicted DM8H averaged O <sub>3</sub> concentrations (from April to August) for East Asia .....	22
<Table 8> Same as table 7, but for the Republic of Korea .....	23
<Table 9> Spatial mean values of predicted annual averaged PM <sub>2.5</sub> concentrations for East Asia .....	25
<Table 10> Same as table 9, but for the Republic of Korea .....	26

## 그 립 목 차

<Figure 1> Structure of this study. ....	3
<Figure 2> Schematic diagram of ICAMS. ....	4
<Figure 3> Model domains and topography(m) for East Asia and the Korean peninsula. ....	5
<Figure 4> Spatial distributions of Chinese NO <sub>x</sub> , VOCs, and PM <sub>2.5</sub> emissions differences between each cases and Base for 2020s. ....	17
<Figure 5> Same as figure 4, but for 2020s. ....	18
<Figure 6> Comparisons between simulations and observations on monthly average ozone concentrations at surface sites. ....	19
<Figure 7> Comparisons of percentiles between simulated and observed DM8H surface O <sub>3</sub> concentrations (ppb) at five sites in the Korean peninsula for 1996 ~ 2005. ....	20
<Figure 8> Spatial distribution of predicted DM8H averaged surface O <sub>3</sub> concentrations (from April to August) changes according to the projected Chinese emissions changes for East Asia. ....	22
<Figure 9> Same as figure 8, but for the Korean peninsula. ....	23
<Figure 10> Spatial distributions of predicted annual averaged surface PM <sub>2.5</sub> concentrations changes according to the projected Chinese emissions changes based on reference years for East Asia. ·	25
<Figure 11> Same as figure 10, but for the Korean peninsula. ....	26
<Figure 12> Spatial distributions of historical (2000) and projected (2050) population in the Republic of Korea. ....	27
<Figure 13> Administrational premature death due to (a) O <sub>3</sub> and (b) PM <sub>2.5</sub> concentration changes for 2050s in the Republic of Korea. (Black to green means premature death for Case 1 to 4, respectively) ....	28
<Figure 14> Socio-economic costs due to premature death related on air	

quality ((a) O<sub>3</sub> and (b) PM<sub>2.5</sub>) changes for 2050s in the Republic of Korea. .... 29

## Abstract

This study is a 3-years-project to develop future emission scenarios of LLCFs and SLCPs including current status and future development plans about national-oriented-specific social-economic characteristics, environmental regulations and climate mitigation programs in East Asia

This is the 1st year of the project, future O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations changes for East Asia and the Republic of Korea w.r.t. future Chinese emissions changes have estimated using RCP emissions scenarios for 2020s and 2050s. The health impacts (premature death) related on the air quality changes and its socio-economic costs also have been estimated. The ICAMS and BenMAP were applied to estimate O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations, health impact, and socio-economic costs changes for 2020s and 2050s compared with 2000s.

In 2020s, O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations were predicted to be increased resulted from increased Chinese emissions. Increase range for East Asia of O<sub>3</sub> is 1.5 ppb (DM8H) under Case 4 to 3.4 ppb under Case 1 and PM<sub>2.5</sub> is 1.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  under Case 2 to 2.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  under Case 4. For the Republic of Korea, increase range of O<sub>3</sub> is 1.2 ppb under Case 4 to 2.8 ppb under Case 1 and PM<sub>2.5</sub> is 0.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  under Case 2 to 1.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  under Case 4.

In 2050s, O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations were estimated to be decreased except for Case 2, O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> will be increased 4.1 ppb and 3.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for East Asia, 3.1 ppb and 2.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for the Republic of Korea compared with 2000s under Case 2, respectively. O<sub>3</sub> for 2050s under Case 1 are almost same as 2000s in East Asia and the Republic of Korea. Under the other cases predicted O<sub>3</sub> concentration are decreased 2.5 ppb and 1.1 ppb under Case 3 and 4 for East Asia and 1.6 ppb under Case 3 and 1.1 ppb under Case 4 for the Republic of Korea. Decrease range of PM<sub>2.5</sub> are 3.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  under Case 1 to 5.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  under Case 3 for East Asia and 2.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  under Case 1 to 3.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  under Case 3 for the Republic of Korea.

Premature deaths were estimated to be decreased except for under Case 2 and its changes more  $PM_{2.5}$  than  $O_3$  for 2050s in the Republic of Korea. Premature deaths will be 81 and 267 resulted from  $O_3$  and  $PM_{2.5}$  concentrations increased under the Case 2. Decreasing range are 6~43 for  $O_3$  and 300 ~ 406 for  $PM_{2.5}$ . Socio-economic costs related on the premature deaths were also estimated based on above results. Under the Case 2, socio-economic costs will be increased 37 billion and 121 billion Korean won resulted from the increased  $O_3$  and  $PM_{2.5}$  concentrations. In the other cases, socio-economic costs were estimated to be decreased compared with the costs for 2000s resulted from the decreased  $O_3$  and  $PM_{2.5}$  concentrations. Estimated socio-economic costs are 3 ~ 19 billion and 135 ~ 183 billion Korean won for  $O_3$  and  $PM_{2.5}$ , respectively. The maximum decreased case is Case 3 that reflect RCP4.5 Chinese emissions for 2050s.

The results in this study present the Case 3 that reflect RCP4.5 Chinese emissions scenario is the best scenario what minimize an adverse effect to the Republic of Korea for 2050s. Therefore, Korean government should to drive that Chinese government should to follow RCP4.5 socio-economic pathway through international cooperation. However, RCP scenarios did not reflect the dramatic changing current socio-economic situation of East Asia and give us a little information about a kind of environmental regulations and climate mitigation measures and its applying time to make the international cooperation system. For that reasons, new emission scenarios that reflect national-oriented-specific social-economic characteristics, environmental regulation and climate mitigation programs in East Asia must be developed. The rest period of this study (2 years), the new scenarios will be developed and future air quality change, health impacts, and its socio-economic costs will be assessed based on the new scenarios. Finally, the best scenario what minimize adverse effect to the Korea peninsula will be presented in this study.

# I. 서 론

최근 승인된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 종합보고서에는 인간의 활동이 기후시스템에 미치는 영향은 분명한 사실이며, 기후변화가 인류와 자연 시스템에 폭넓은 영향을 미치고 있다고 언급되어 있다(IPCC, 2014)<sup>1</sup>. 기후변화는 대기질 변화, 특히 O<sub>3</sub>과 PM의 농도 변화에 영향을 줄 수 있으며(IPCC, 2013; Carvalho et al., 2010; Jacob and Winner, 2009)<sup>2,3,4</sup>, 결과적으로 호흡기 및 심혈관계 질환의 발생 가능성을 높일 수 있는 것으로 알려져 있다(Lacressonniere et al., 2014; Bell et al., 2007; Knowlton et al., 2004)<sup>5,6,7</sup>. 이에 기후변화와 연관된 대기질의 예측과 영향에 관한 다양한 연구들이 수행되고 있으며, 우리나라에서도 국립환경과학원을 중심으로 일부 연구들이 수행된 바 있다(NIER, 2013a; 2013b; 2012a; 2012b; 2011)<sup>8,9,10,11,12</sup>.

동아시아 지역, 특히 중국은 에너지 사용량과 기후변화 유발물질 및 대기오염물질 배출량의 폭발적 증가로 인하여 기후·대기환경 입장에서 매우 중요한 지역으로 인식되고 있다. 전구 배출목록인 EDGAR(Emission Database for Global Atmospheric Research) v4.2에 따르면 2008년 기준 중국의 대기오염물질 배출량은 전 세계 배출량의 14.0 % ~ 31.3 %를 차지하는 것으로 보고되고 있다. 또한 RCP (Representative Concentration Pathways) 6.0 시나리오에 따르면 우리나라와 일본의 미래 배출량은 점진적으로 감소하는 추세를 보이는데 반해, 중국의 배출량은 시나리오에 따라 2050년까지 증가하는 추세를 보여 미래 중국의 배출량 변화가 동아시아 지역의 대기질의 결정인자가 될 것으로 판단된다.

대기화학 모델을 활용한 배출원-수용지 관계 분석 연구 결과들에 따르면 한반도 지역의 황 및 총 질산염의 침적량 중 중국의 기여도는 약 20 % ~ 70 %에 이르며, PM<sub>10</sub> 농도 중 약 50 % 이상이 중국의 영향이라고 보고되고 있다(Li et al., 2014; Kajino et al., 2013, 2011; Carmichael et al., 2002; Holloway et al., 2002; Lin et al., 2002)<sup>13,14,15,16,17,18</sup>. 효과적인 대기질 개선을 위해서는 이러한 외부 요인을 정량적으로 평가할 필요가 있으며, 그 결과에 근거하여 국제 협력 사업을 통해 개선해 나가는 방법이 필요하다. 이를 위해서는 동아시아를 대상으

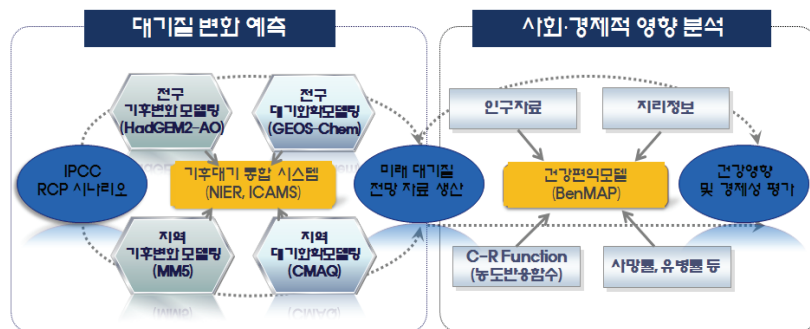
로 미래 발생가능한 대기질 변화의 전망과 분석이 반드시 요구된다.

미래 동아시아 및 한반도 대기질 변화 예측 연구 수행을 위해 현재 활용될 수 있는 가장 최선(state-of-art)의 방법론은 RCP 시나리오를 활용하는 것이다. 하지만 RCP 시나리오들은 급변하는 동아시아의 특성을 반영하는데 한계가 있는 것으로 판단되고 있어 신뢰도에 일부 한계가 있을 수 있다. 그리고 RCP 시나리오를 통해서는 동아시아 권역 내 국가들이 ‘어느 시점에’, ‘어떠한 저감정책을’ 수립하는지에 대한 구체적인 정보를 확인하는데 한계가 있어 미래 발생 가능한 대기질 변화를 전망하는 것은 가능하나, 부정적 영향이 최소화될 수 있는 국제 협력 방안을 도출하는데는 한계가 있을 수밖에 없다.

이에 본 연구는 RCP 시나리오가 가지는 한계점의 극복과 한반도에 악영향을 최소화 시킬 수 있는 미래상을 제시하는 것을 목적으로 설정하였다. 그리고 목적의 달성을 위해 총 3년 동안 단계적으로 한·중·일 중심의 미래 사회·경제 전망과 현재 진행 중이거나 계획된 기후 및 대기오염 저감정책을 반영하여 동아시아에 최적화된 기후변화 시나리오를 작성하고 시나리오별 배출목록을 작성한 후, 이를 활용하여 미래 대기질과 건강에 미치는 영향을 평가하고, 한반도 지역에 부정적 영향이 최소화되는 시나리오를 도출하고자 한다. 당해 연도는 1차년도로 시나리오의 본격적인 개발에 앞서 기존 RCP 시나리오 자료를 활용하여 미래 중국의 배출량 변화에 따른 동아시아 및 한반도 지역(대한민국)의 대기질 변화를 예측하고, 그에 따른 건강 영향 및 사회적 비용을 산정하여 현재 RCP 시나리오 체제 안에서 한반도에 피해가 가장 최소화 되는 시나리오를 도출하고자 한다.

## II. 연구내용 및 방법

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 동아시아 국가들의 실정을 반영한 시나리오를 개발하기에 앞서 비교적 최근에 개발되고 폭넓은 연구에서 활용되고 있는 RCP 시나리오(IPCC, 2007)를 적용하고 국립환경과학원과 서울대학교가 공동 개발한 기후·대기환경 통합시스템(ICAMS : Integrated Climate and Air quality Modeling System)을 활용하여 각 시나리오별 미래 중국의 배출량 변화에 따른 동아시아 및 한반도 대기질(O<sub>3</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중심) 변화를 정량적으로 평가하였다. 그리고 미래 대기질 변화가 건강에 미치는 영향과 그에 따른 경제적 비용을 US EPA에서 개발된 BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program)<sup>21</sup>을 활용하여 한반도(대한민국)를 중심으로 정량적으로 평가하였다. 이러한 연구의 흐름을 간단히 도식화하면 아래 그림 1과 같다.

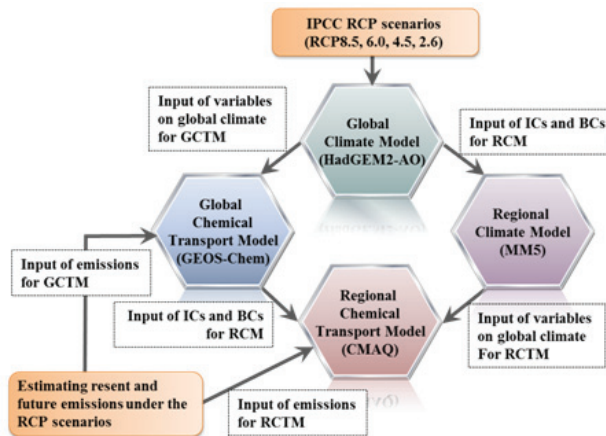


<Figure 1> Structure of this study.

### 1. 모델 개요

미래 중국의 배출량 변화에 따른 동아시아 및 한반도의 대기질 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 본 연구에서 활용된 ICAMS는 전구 및 지역규모 기후 모델과 전구 및 지역규모 대기화학모델로 이루어져 있다. 대기화학모델 구동을

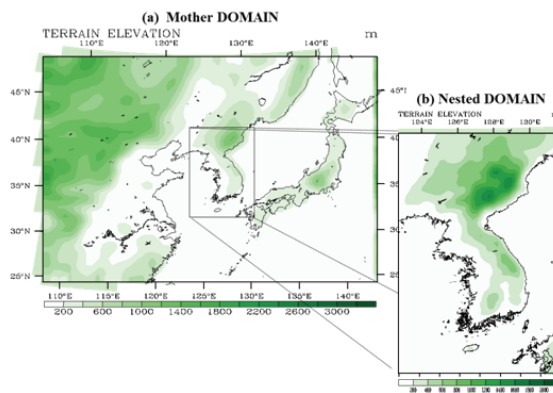
위해 요구되는 기상 및 기후자료의 생산을 위해 본 연구에서는 기상연구소에서 안정화 시나리오에 따른 기후 예측 전망 결과 생산에 사용하고 있는 HadGEM2-AO의 RCP 시나리오 전망 자료를 사용하였다. 전구규모 결과를 지역 규모 기후모델에 반영하기 위하여 역학적 down-scaling 방법을 적용하였으며, 예측된 기온, 바람, 기압 등과 같은 기상자료를 내·외삽 과정을 통하여 지역 규모 기후·기상 모델인 MM5의 격자체계에 맞춰줌으로써 6시간 간격의 초기장과 경계 자료를 제공할 수 있도록 one-way mode로 coupling 하였다. 대기화학 모델들은 전구규모인 GEOS-Chem과 지역규모인 CMAQ으로 구성되며, CMAQ의 경계조건을 생성하기 위하여 GEOS-Chem은 3시간 간격의 자료가 생산 및 제공되도록 구성되어 있다(그림 2 참조).



<Figure 2> Schematic diagram of ICAMS.

그림 3은 모델링 영역을 나타낸 것으로 동아시아 지역은 58(동서) × 46(남북) × 23(연직)개의 격자로 구성되어 있으며, nest-down된 한반도 지역은 36(동서) × 66(남북) × 23(연직)개의 격자로 구성되어 있다. 수평 격자는 동아시아 지역에 대해 54km, 한반도 지역에 대해 18km의 크기를 갖는 Arakawa-B 격자체계를 사용하였으며, 연직으로는 지형을 따라가는 시그마 좌표계( $\sigma$ -coordinate)를 사용하였다. 화학반응 메커니즘은 CB-IV (Carbon-Bond

chemical mechanism version IV)를 적용하였고, 에어로졸 모듈은 AERO-3를 적용하여 모델링을 수행하였다. 기준연대인 2000년대에 대한 수치실험은 1996년부터 2005년까지 10년간 장기적분을 수행하였으며, 미래인 2020년대와 2050년대는 2016년부터 2025년까지, 2046년부터 2055년까지 각각 10년간 장기적분을 수행하였다. 아울러 모델의 초기조건 생성을 위한 spin-up 기간은 1개월을 설정 및 적용하여 수치실험을 수행하였다.



<Figure 3> Model domains and topography (m) for East Asia and the Korean peninsula.

## 2. 배출량과 모델링을 위한 배출 정보 처리

RCP 시나리오는 최근 발간된 IPCC 5차 평가보고서를 작성하기 위해 활용된 기후변화 시나리오로 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있는 시나리오이다. RCP 시나리오는 안정화 시나리오로써 기존 SRES(Special Report on Emission Scenarios)(IPCC, 2001)<sup>22</sup>와는 다르게 배출량을 예측하는데 있어 기후변화를 안정화시키기 위한 각종 저감·완화 정책을 단계별로 적용하고 있으며, 수많은 시나리오들 중에서 유사한 복사 강제력과 배출 특성을 가지는 시나리오들을 중심으로 선택된 4개의 대표적인 시나리오이다. 각 RCP 시나리오들은 2100년까지 각종 온실기체에 의한 기후변화 복사강제력을 기준으로 구분되며, 각 시나리오들이 갖는 의미와 특성은 표 1에 제시된 바와 같다.

<Table 1> Types of representative concentration pathways

Scenarios	Description <sup>a</sup>	Publication - IA Model
RCP8.5	Rising radiative forcing pathway leading to 8.5 W/m <sup>2</sup> (~1370 ppm CO <sub>2</sub> -eq <sup>b</sup> ) by 2100	(Riahi et al. 2007 <sup>24</sup> ) - MESSAGE
RCP6.0	Stabilization without overshoot pathway to 6 W/m <sup>2</sup> (~850 ppm CO <sub>2</sub> -eq) at stabilization after 2100	(Fujino et al. 2006 <sup>25</sup> ; Hijioka et al. 2008 <sup>26</sup> ) - AIM
RCP4.5	Stabilization without overshoot pathway to 4.5 W/m <sup>2</sup> (~650 ppm CO <sub>2</sub> -eq) at stabilization after 2100	(Clarke et al. 2007 <sup>27</sup> ; Smith and Wigley 2006 <sup>28</sup> ; Wise et al. 2009 <sup>29</sup> ) - GCAM
RCP2.6	Peak in radiative forcing at ~3 W/m <sup>2</sup> (~490 ppm CO <sub>2</sub> -eq) before 2100 and then decline (the selected pathway declines to 2.6 W/m <sup>2</sup> by 2100)	(Van Vurren et al. 2006 <sup>30</sup> ; Van Vurren et al. 2007 <sup>31</sup> ) - IMAGE

a Approximate radiative forcing levels were defined as ±5% of the stated level in W/m<sup>2</sup> relative to pre-industrial radiative forcing values include the net effect of all anthropogenic GHGs and other forcing agents.

b Approximate CO<sub>2</sub> equivalent (CO<sub>2</sub>-eq) concentrations. The CO<sub>2</sub>-eq concentrations were calculated with the simple formula  $Conc = 278 * \exp(\text{forcing}/5.325)$ . Note that the best estimate of CO<sub>2</sub>-eq concentration in 2005 for long-lived GHGs only is about 455 ppm, while the corresponding value including the net effect of all anthropogenic forcing agents (consistent with the table) would be 375 ppm CO<sub>2</sub>-eq.

Source : Van Vuuren et al. (2011)

본 연구에서는 위 RCP 시나리오들을 기반으로 하는 동아시아 및 한반도 지역에 대해 1996년부터 2005년까지의 기준연대 배출량을 산출하였으며 미래 배출량은 2020년대(2016년 ~ 2025년) 및 2050년대(2046년 ~ 2055년)에 해당하는 자료를 산출하여 활용하였다.

RCP 시나리오별 배출량은 IIASA(International Institute for Applied Systems Analysis)의 RCP database에서 제공이 되고 있다. 또한 해당 자료는 배출원 형태 및 배출물질 종류별로 0.5° × 0.5° 의 격자자료로 NetCDF(Network Common Data Format) 형태로 제공이 되고 있으며, 10년 단위로 배출량이 제공되고 있

다. 따라서 본 연구의 목적과 내용에 부합되게 활용하기 위해서는 별도의 처리 과정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 건국대학교에서 개발된 ArcGIS 및 Python 기반의 KU-EPS와 SMOKE-Asia(Woo et al., 2011)<sup>32</sup>를 활용하여 대기화학모델의 입력자료로 사용이 가능한 배출량 자료를 생성하였다.

SMOKE-Asia 적용 전 단계까지의 배출량 자료의 처리과정, 즉 KU-EPS의 처리과정은 몇 단계로 구분될 수 있는데, 먼저 RCP database에서 제공하고 있는 원 자료를 처리시스템으로 불러들인 후  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  격자체계에서 각 격자점에 대한 배출량을 산정하기 위해 미리 작성한 전 지구  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  면적정보 자료와 결합하여 각 세부 배출부문별, 물질별로 배출량 자료를 생산한다. 또한 10년 간격의 이들 자료들을 Ohara 등(2007)<sup>33</sup>이 REAS(Regional Emission Inventory in Asia) 배출목록을 구축하는데 활용한 선형 내삽법을 이용하여 모델링 대상 기간 전체에 대한 격자 배출량을 생산한다. 두 번째 단계로 생산된 자료들을 다시 각 격자별 위치정보를 기반으로 아시아 각 국가별 또는 상위단계의 행정구역별로 공간할당과정을 통해 상위 단계의 지역별(province level) 배출목록 자료를 구성한다. 그리고 RCP 시나리오에서 제시되어 있지 않은  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  배출량을 산출하기 위하여 RCP 시나리오에서 제공되고 있는 BC, OC 배출량 자료와 INTEX-B 배출목록(Zhang et al., 2009)<sup>34</sup>에서 제공하는 각 부문별·지역별  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , BC, OC 정보를 기반으로  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 지역별 배출목록 자료를 구축한다. 세 번째 단계로 보다 세분화된 배출원 분류를 위하여 EDGAR에서 정의된 32개의 상세 배출원 분류로 재분류를 수행하는데, 발전부분의 경우 LPSs(Large Point Sources) 배출량을 추출하고, 각 위치 및 각종 배출 정보를 생성한다. 이렇게 생성된 자료들은 상위단계의 지역별 배출정보를 GIS 자료들을 활용하여 공간할당 과정을 통해 상세 지역별(county level)의 배출목록을 생산한다. 마지막 단계로 이렇게 생산된 배출목록을 SMOKE-Asia의 입력 자료 형태인 IDA 포맷으로 전환하여 대기화학모델의 입력자료를 생산하기 위한 SMOKE-Asia에 적용할 준비를 완료한다. 표 2는 KU-EPS를 통해 도출된 RCP 시나리오별 오염물질의 총량을 연대별로 평균하여 정리한 것이다.

<Table 2> Emissions summaries by countries w.r.t. RCP scenarios

Scenario	Pollutant	Year	10 years average emissions (Gg/yr)			
			S.Korea	China	Japan	OEAsia
RCP8.5	NO <sub>x</sub>	2000s	1,374.4	11,730.2	2,345.4	884.3
		2020s	1,102.5	27,605.3	901.8	987.1
		2050s	645.4	11,619.4	553.0	427.3
	VOC	2000s	1,531.6	23,403.1	2,127.5	1,665.0
		2020s	1,770.1	34,460.6	1,184.4	2,027.5
		2050s	755.7	27,922.3	597.0	1,453.5
	PM <sub>2.5</sub>	2000s	546.3	10,117.4	510.8	333.5
		2020s	437.2	11,340.0	133.1	344.5
		2050s	183.4	5,134.9	48.9	163.1
RCP6.0	NO <sub>x</sub>	2000s	1,374.4	11,730.7	2,345.3	883.7
		2020s	1,441.9	17,562.6	1,429.2	780.3
		2050s	763.6	25,723.0	422.8	400.9
	VOC	2000s	1,531.6	23,404.2	2,127.5	1,663.5
		2020s	1,694.8	25,736.9	1,496.8	1,799.1
		2050s	1,209.8	39,649.8	733.4	1,482.2
	PM <sub>2.5</sub>	2000s	561.7	10,159.6	530.6	364.6
		2020s	514.6	10,552.1	343.7	305.8
		2050s	261.6	14,661.4	121.9	134.2
RCP4.5	NO <sub>x</sub>	2000s	1,374.3	11,729.9	2,345.2	883.6
		2020s	490.0	17,967.1	786.5	1,420.5
		2050s	208.6	5,725.7	459.9	445.2
	VOC	2000s	1,531.5	23,402.6	2,127.4	1,663.3
		2020s	620.9	32,425.1	1,038.7	2,983.8
		2050s	299.4	14,422.8	717.7	1,714.1
	PM <sub>2.5</sub>	2000s	561.6	10,158.9	530.6	364.6
		2020s	228.3	11,859.2	245.1	505.0
		2050s	134.6	3,147.9	158.4	191.9
RCP2.6	NO <sub>x</sub>	2000s	1,372.9	11,720.2	2,338.6	883.2
		2020s	1,184.7	18,417.4	1,298.9	1,010.1
		2050s	270.1	7,622.3	571.7	348.8
	VOC	2000s	1,527.9	23,387.0	2,124.6	1,658.2
		2020s	1,355.1	29,246.6	2,042.6	1,512.0
		2050s	499.1	11,963.3	1,129.9	565.3
	PM <sub>2.5</sub>	2000s	560.8	10,154.2	530.0	363.9
		2020s	539.1	13,872.6	398.2	431.7
		2050s	113.9	4,349.8	87.9	104.7

OEAsia : Other East Asia (Mongolia, Taiwan, and N. Korea)

### 3. 미래 대기질 평가를 위한 모델링 조건 설정

미래 중국의 배출량 변화에 따른 대기질의 변화를 정량적으로 평가하기 위한 수치 실험 설계 조건을 표 3에 정리하여 나타내었다.

현재의 기후 및 대기질 상황을 가장 잘 반영하고 있는 것은 RCP8.5 시나리오로 알려져 있으며, 기후변화 저감을 위한 어떤 대책도 포함하고 있지 않으므로 지표 시나리오(baseline scenario)로 불려진다(Riahi et al., 2011)<sup>35</sup>. 이에 본 연구는 기준연대(1996년 ~ 2005년)에 대한 수치실험을 진행하기 위하여 모델링 대상 전 지역에 기준연대의 RCP8.5 시나리오의 배출량을 적용하고, RCP8.5 시나리오의 기후 및 경계 조건장을 활용하여 모델링을 진행하였고 이를 ‘Reference’ 라고 명명하였다.

미래 대기질을 전망하는데 있어 영향을 주는 요소로는 배출량의 변화와 기후 및 경계조건장의 변화가 있다. 따라서 배출량만의 변화에 따른 대기질의 변화를 정량적으로 평가하기 위해서는 기후 및 경계조건장의 변화에 따른 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 미래(2020년대 및 2050년대)에 대한 수치실험을 진행하는데 기후 및 경계조건장은 RCP8.5 시나리오의 2020년대 및 2050년대 자료를 활용하였고, 배출량은 ‘Reference’ 실험과 동일하게 적용을 하여 모델링을 수행하였으며 이를 ‘Base’ 로 명명하였다. 여기서 도출된 결과들을 ‘Reference’ 결과들과 비교하여 기후 및 경계조건에 대한 영향을 정량적으로 평가하였다.

본 연구에서 목표로 하고 있는 미래 중국의 배출량 변화에 따른 동아시아 및 한반도의 대기질 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 기후 및 경계조건 장은 ‘Base’ 실험과 동일하게 적용하고, 모델링 도메인 내 중국을 제외한 다른 국가들의 배출량은 ‘Reference’ 및 ‘Base’ 실험들과 동일하게 RCP8.5 시나리오의 기준년도 배출량을 적용하고 중국의 배출량은 각 RCP 시나리오의 2020년대 배출량과 2050년대 배출량을 적용하여 모델링을 진행하였다. RCP8.5의 미래 배출량을 적용한 것을 ‘Case1’ 으로 명명하였고, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6의 미래 배출량을 적용한 것을 각각 ‘Case2’, ‘Case3’, ‘Case4’ 로 명명하였다. 각 ‘Case’ 실험에서 도출된 결과들과 ‘Base’ 실험 결과들과의 비교·분석을 통해 중국의 배출량 변화에 따른 동아시아 및 한반도의 대기질 변

화를 정량적으로 평가하였다.

<Table 3> Experiments design to predict air quality changes according to climate, boundary, and emissions changes

Case name	Emissions		Climate fields and boundary conditions
	China	Other countries	
Reference	RCP8.5 (2000s)		RCP 8.5 (2000s)
Base	RCP8.5 (2000s)		
Case 1	RCP8.5 (2020s, 2050s)	RCP8.5 (2000s)	
Case 2	RCP6.0 (2020s, 2050s)		RCP8.5 (2020s, 2050s)
Case 3	RCP4.5 (2020s, 2050s)		
Case 4	RCP2.6 (2020s, 2050s)		

본 연구에서 적용한 모델링 시스템과 조건에 대한 신뢰도를 평가하기 위하여 본 연구에서 적용된 모델링 시스템의 최종결과물로서 CMAQ 모사결과인 O<sub>3</sub> 농도와 관측 자료를 비교·검증하였다. 검증을 위한 관측자료는 EANET(Acid Deposition Monitoring Network in East Asia)의 월 평균 오존농도 자료를 활용하였으며, 고농도 오존에 대한 검증은 국가대기오염정보 관리시스템(NAMIS : National Ambient Air Monitoring Information System) 자료 중 5개 대도시(서울특별시, 부산광역시, 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시) 지역의 19개 지점별 자료에 대해 본연구의 기준연대인 1996년부터 2005년까지의 여름철 일최고 8시간평균(DM8H) O<sub>3</sub>농도를 이용하였다. PM<sub>2.5</sub>의 경우 모델링 검증에 적절한 관측자료가 존재하지 않아 해당물질의 검증은 진행할 수 없었다.

#### 4. 건강영향 및 경제성 평가

수치실험을 통해 도출된 미래 중국의 대기오염물질 배출량 변화로 인한 한반도 대기질 변화에 따른 건강영향 및 경제성 평가는 US EPA의 BenMAP을 활용하였다. BenMAP은 미국의 국가적 차원의 대기질 관련 환경법과 규제 등 정책 수립의 근거를 제공하기 위해 활용되었으며, 최근에는 이동 및 고정 오염원 관리를 위한 정책에 개발되고 있다. BenMAP은 연구대상지역의 인구정보, 지리정보, 대상 인구집단의 기준 사망률 자료를 이용하여 건강 피해 정도를 추정하며 대기오염물질 농도 변화에 따른 건강영향 평가 식은 아래 식 1과 같다(Bae et al., 2009; Park and Bae 2006; Wong et al., 2004)<sup>36,37,38</sup>.

$$H = \left(1 - \frac{1}{\exp(\beta \times \Delta Q)}\right) \times I \times P_{\text{exp}} \quad \text{식 1}$$

여기서

H : 건강영향

$\beta$  : 대기오염물질 농도 변화에 따른 건강영향의 농도-반응 계수

$\Delta Q$  : 대기오염물질 농도 변화

I : 기준 사망률

$P_{\text{exp}}$  : 대기오염물질에 노출되는 인구

건강영향 평가를 위한 인구자료는 통계청에서 제공하고 있는 2000년 지역별·연령대별 인구자료와 2050년 추계 전국 연령대별 인구자료를 활용하였다. 현재 통계청에 제시된 2050년 추계 인구자료는 지역별로 구분되어 있지 않아 가장 근접한 시기인 2040년 추계 지역별·연령대별 인구자료를 활용하여 지역별 비를 구하고 이를 활용하여 지역별 추계인구를 산출하였다. 사망률 자료는 국가통계포털에서 제공하고 있는 자료들을 수집 및 활용하였으며, 대상기간은 2000년 ~ 2005년으로 하였다. 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여, 즉 대기오염에 의한 건강영향의 신뢰도를 높이기 위하여 질병이외의 사고사와 같은 사망요인은 배제하였다(환경부, 2007)<sup>39</sup>. 대기오염물질의 농도 변화는 본 연구의 결과물

인 미래 중국의 배출량 변화에 따른 일최고 8시간평균 O<sub>3</sub> 농도 및 일평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화(각 Case 실험의 결과와 Base 실험 결과의 농도 차)를 활용하였으며, 농도-반응계수는 NIER(2013b)<sup>9</sup>에서 적용한 것과 동일한 값을 적용하였다(표 4 참조).

<Table 4> Concentration-Response function values

Pollutants	Endpoint	C-R coefficient	Age	Reference
PM <sub>2.5</sub>	Mortality, All Causes	$5.927 \times 10^{-3}$	above 30	Pope et al., 2002 <sup>27</sup>
O <sub>3</sub>		$6.350 \times 10^{-4}$ $1.065 \times 10^{-3}$	all above 65	NIER, 2012 <sup>28</sup>

대기환경 변화에 따른 건강영향의 경제적 비용 산정을 위해 국내 통계적 인간생명 가치(VSL : Value of a Statistical Life)에 관해서는 기존에 다양한 연구들이 수행되었는데, NIER(2013b, 2012b)<sup>9,11</sup>은 해당 연구결과들을 종합하고, 연구결과들의 시간차를 각종 경제지표를 활용하여 보정하였다. 본 연구에서는 기준 연대를 고려하여 2000년의 VSL을 제시한 NIER(2012b)<sup>11</sup>과 동일한 값을 적용하였으며, 그 값은 4억 5,136만원이다.

## III. 연구결과 및 고찰

### 1. 미래 중국 대기오염물질 배출변화

미래 중국 배출량의 변화를 확인하기 위하여 대기화학 모델의 입력자료, 즉 SMOKE 시스템의 처리 결과를 분석하여 모델링 도메인 내 미래 시나리오별 중국 배출량의 변화를 총량을 중심으로 평가하고, 시나리오 및 지역별 배출량 변화를 파악하기 위하여 배출 변화율의 공간분포를 분석하였으며, 그 결과를 아래에 서술하였다.

#### 가. 시나리오별 중국 대기오염물질 배출총량 변화

표 5는 모델링 도메인 내의 중국 배출량 변화를 나타낸 것으로 2000년대 배출량 대비 배출량 변화를 정리하여 나타낸 것이다. 2020년대에는 모든 시나리오에서 배출량이 증가하는 것으로 나타났는데, 증가폭이 가장 큰 것은 NO<sub>x</sub>이며, 그 뒤를 이어 SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, VOCs, CO, PM<sub>2.5</sub>의 순으로 증가폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. NO<sub>x</sub>의 경우 RCP8.5에서 153 %의 증가율을 보여 RCP 시나리오 중 가장 높은 배출량 증가율을 나타낸 반면, RCP4.5 시나리오에서 63 %의 증가율을 보여 가장 낮은 배출량 증가율을 보였다. VOCs 역시 RCP8.5 시나리오에서 가장 높은 증가율인 47 %가 나타났으나, RCP6.0에서 가장 낮은 증가율인 12 %가 나타났다. PM<sub>2.5</sub>는 저농도 시나리오라고 알려져 있는 RCP2.6에서 30 %가 증가하여 가장 높은 증가율을 나타내고 있으며, 그 뒤를 이어 RCP8.5와 RCP4.5가 10 %로 유사한 증가율을 보이고 있으며, RCP6.0에서 가장 낮은 증가율을 보였다.

2050년대에는 NH<sub>3</sub>를 제외한 대부분의 물질들이 RCP6.0을 제외하고 대부분 감소하는 경향을 나타냈으며, RCP6.0에서는 모든 물질의 배출량이 증가하는 경향이 나타남을 확인할 수 있었다. NO<sub>x</sub>의 경우 RCP4.5에서 48 %가 감소하여 가장 큰 폭의 배출량 감소가 나타났으며 RCP2.6에서 29 %의 감소율을 보였다. 반면, RCP8.5에서는 2000년대 배출량의 수준으로 회귀한 경향을 나타냈으며, RCP6.0

에서는 128 %가 증가된 것을 확인할 수 있었다. VOCs는 RCP2.6에서 약 50 %가 감소하였으며, RCP4.5에서 39 %가 감소한 것을 확인할 수 있었던 반면, RCP8.5에서는 19 %, RCP6.0에서는 67 %의 배출량이 증가된 것을 확인할 수 있었다. PM<sub>2.5</sub>는 RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5에서 각각 57 %, 68 %, 54 %의 배출량 감소가 나타난 반면, RCP6.0에서는 33 %의 배출량 증가를 확인할 수 있었다.

<Table 5> Recent and future air pollutants emissions from China w.r.t. RCP scenarios within modeling domain 1(mother domain)

Pollutants	Periods	10 years average emissions (Tg/yr)			
		RCP8.5	RCP6.0	RCP4.5	RCP2.6
CO	2000s*			81.5	
	2020s	104.5	112.5	108.0	83.0
	2050s	64.6	176.0	40.8	40.2
NOx	2000s*			7.4	
	2020s	18.8	11.6	11.5	12.1
	2050s	7.4	16.9	3.9	5.2
SO <sub>2</sub>	2000s*			11.2	
	2020s	19.4	16.7	19.7	16.3
	2050s	3.8	18.4	2.9	2.0
VOCs	2000s*			15.8	
	2020s	23.3	17.7	20.7	18.9
	2050s	18.8	26.5	9.6	8.0
NH <sub>3</sub>	2000s*			3.8	
	2020s	4.6	4.9	4.9	5.1
	2050s	5.1	6.2	5.4	6.8
PM <sub>2.5</sub>	2000s*			6.9	
	2020s	7.6	7.3	7.6	9.0
	2050s	3.2	9.2	2.2	3.0

\* RCP 8.5 emissions in 2000s (1996 ~ 2005)

#### 나. 미래 중국 배출량 변화 공간분포

그림 4와 그림 5는 2020년대 및 2050년대 시나리오별 중국의 NOx, VOCs, PM<sub>2.5</sub> 배출량 변화율의 공간분포를 나타낸 것이다. 이들을 살펴보면 2020년대의 경우 Case 2(RCP6.0 중국 배출량 반영)의 VOCs 및 PM<sub>2.5</sub> 배출량 변화율을 제외

하고 중국 모든 지역에서 배출량의 증가가 있는 것을 확인할 수 있었으며, 2050 년대의 경우 Case 1(RCP8.5 중국 배출량 반영)과 Case 2의 NO<sub>x</sub> 및 VOCs, Case 2의 PM<sub>2.5</sub>을 제외하고 중국 대부분의 지역에서 배출량의 감소가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

중국의 미래 NO<sub>x</sub> 배출 변화율의 공간분포를 살펴보면 2020년대의 경우 다른 시나리오들에 비해 Case 1의 배출 증가율이 월등히 높은 것을 확인할 수 있었으며, 내몽골 지역을 제외한 거의 모든 지역에서 70 % 이상의 증가율이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 나머지 시나리오들에서는 배출변화율의 공간분포가 비교적 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었는데, 현재 배출량이 많은 지역인 만주, 북경 지역을 비롯하여 해안지역을 중심으로 배출 증가가 뚜렷한 것을 확인할 수 있었다. 거의 대부분의 지역에서 30 % ~ 50 %의 증가율이 나타나는 것을 확인할 수 있었는데, Case 3(RCP4.5 중국 배출량 반영)의 경우 다른 시나리오 들과는 다르게 다른 지역들보다 내몽골 지역의 증가율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 2050년대의 경우 Case 2는 중국의 모든 지역에서 배출량이 증가하였고, 증가율도 내몽골 일부지역을 제외한 나머지 지역에서 80 % 이상의 수준을 보여 배출 증가율이 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. Case 1의 경우 현재 배출량이 많은 북경 및 하북성, 상해, 하남성, 호북성 등은 배출량이 감소하는 경향을 나타 낸 것에 반해, 그 외 지역들의 경우 약 50 % 이하의 범위에서 배출량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Case 3과 Case 4(RCP2.6 중국 배출량 반영)에서는 모든 대상지역에서 배출량의 감소가 확인되었으며, 감소폭은 내몽골을 제외한 모든 지역에서 Case 3이 Case 4에 비해 높은 것을 확인할 수 있었다.

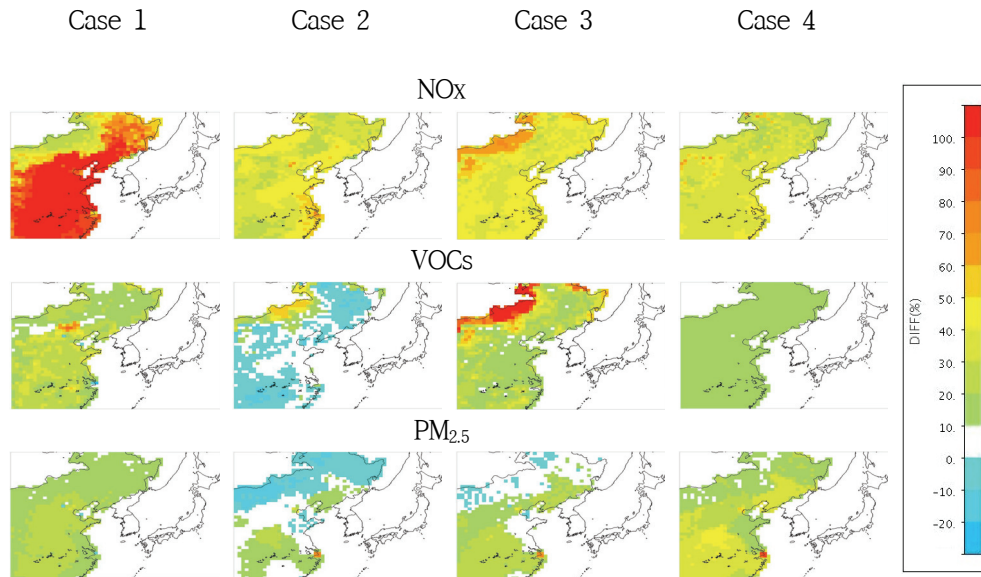
중국의 2020년대 VOCs 배출 변화율의 공간분포를 살펴보면 Case 2와 Case 3 에서 내몽골 지역의 배출 증가율이 다른 지역들에 비해 높은 것을 확인할 수 있었다. 다만 Case 2에서는 다른 시나리오들과는 다르게 북만주, 중서부 및 남부지역을 중심으로 배출량이 감소하는 지역이 폭넓게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Case 1의 경우 하북성 일대에 50 % ~ 80 %의 증가율이, 그 외 지역에서 20 % ~ 40 %의 증가율이 나타났는데, 중부 내륙지역인 산서성과 호북성, 중국 남부 지역인 강서성이 다른 지역보다 상대적으로 증가율이 큰 것을 확인할 수 있었다. Case 3의 경우 내륙지역의 배출 증가율의 경향이 Case 1보다 비교적 균일한

것을 확인할 수 있었다. 반면 내몽골 지역과 하북성 일대의 증가폭이 70 % 이상 (최대 150 %)으로 나타나 이 지역에서 배출 증가가 집중된 것을 확인할 수 있었다. Case 4의 경우 모든 지역에서 20 % 이하의 증가율을 확인할 수 있었다. 시나리오별 중국의 2050년대 VOCs 배출 변화율은 Case 2의 경우 많은 지역에서 배출 증가를 확인할 수 있었고, 특히 내몽골지역의 배출 증가가 두드러지는 것을 확인할 수 있었다. Case 1의 경우 하북성부터 광둥성에 이르는 황해 연안지역들과 하남성과 같은 일부 내륙지역에서 배출량이 감소하며 그 수준은 대부분 2000년대 대비 20 % 이내의 수준으로 감소하지만 극히 일부 지역의 경우 감소율이 더 큰 것을 확인할 수 있었으며, 그 외 많은 지역들은 2000년대 수준을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. Case 3과 Case 4의 경우 NOx의 경우와 마찬가지로 거의 대부분의 지역에서 배출량이 감소하고, Case 3이 Case 4에 비해 감소폭이 큰 경향을 보였지만, Case 3의 경우 내몽골 일부 지역에서 배출량이 40 % 이내의 범위에서 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

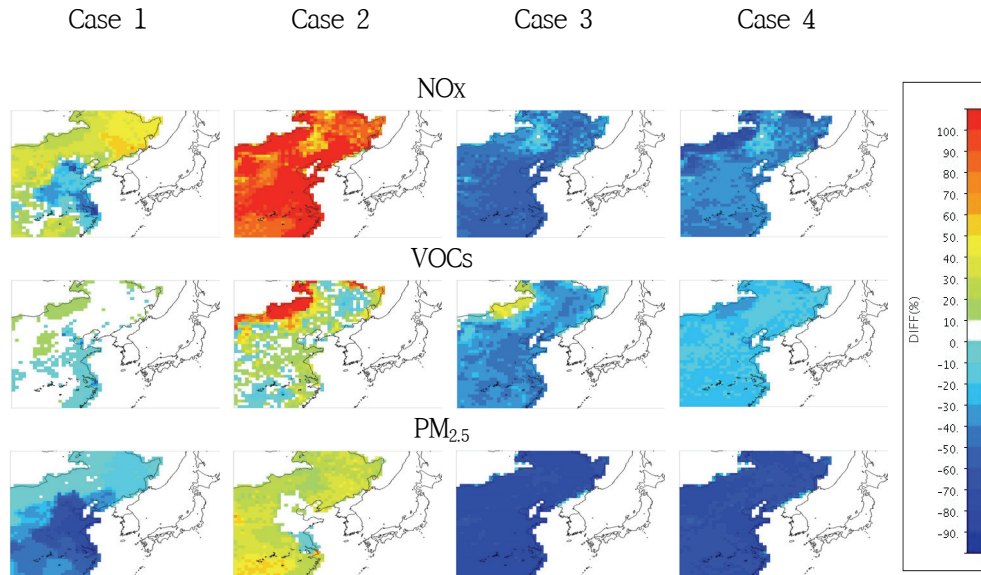
2020년대 중국의 PM<sub>2.5</sub> 배출 변화율 공간분포는 위에서 열거한 두 물질들과는 다른 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있는데, 모든 시나리오에서 공통적으로 증가하는 경향을 보였던 내몽골지역의 PM<sub>2.5</sub> 배출량이 Case 2와 Case 3에서는 감소하는 경향을 보이고 있었다. PM<sub>2.5</sub> 배출 증가율이 가장 높은 시나리오는 Case 4이며 요동 및 화남지방의 배출 증가율이 다른 지방들에 비해 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있었고, 특히 상해 주변 지역의 배출 증가율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 요동 및 화남지방의 배출 증가율이 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 경향은 나머지 시나리오에서도 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 2050년대에는 Case 2의 경우 NOx 및 VOCs와 마찬가지로 배출량의 증가가 나타나는 것을 확인할 수 있었는데, 다른 두 물질의 경우와는 다르게 하북성, 산서성, 산둥성 지역의 배출량은 2000년대와 유사한 수준을 나타냈으며, 강소성 지역의 배출량은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 나머지 시나리오들은 모두 중국 전 지역에서 PM<sub>2.5</sub> 배출량이 2000년대에 비해 감소하는 것으로 나타났으며, case 1과 Case 4는 절대 배출량의 저감율이 유사하나 분포에 차이가 나타나 Case 1에서는 내몽골지역은 상대적으로 배출 저감율이 낮고, 2000년대 배출량이 높은 것으로 알려진 산둥반도 주변으로부터 황해 연안 및 일부 내륙지역에 배출 저감율

이 높은 반면, Case 4는 배출 저감 수준의 분포가 비교적 균일한 것으로 나타남을 확인할 수 있었다.

이상에서 살펴본 각 Case 별 중국의 미래 배출량 변화를 종합해보면, Case 2를 제외한 모든 경우에서 2020년대에는 각 시나리오 내 최대 배출량을 보이고, 2050년대는 2000년대 수준을 보이거나 그보다 감소하는 것을 확인할 수 있다. Case 2는 다른 시나리오들과는 다르게 2050년대에도 배출량이 계속 증가하는 추세를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 더불어 현재 절대 배출량이 많으며, 미래 배출량의 변화폭이 큰 요동 및 산둥반도에서 주강삼각주(Pearl River Delta)에 이르는 황해 연안지역들과 중·남부 일부 내륙지역들의 경우 최근 수행된 배출원-수용지 관계 분석 연구에서 우리나라 대기질에 적지 않은 영향을 끼치는 지역으로 언급하고 있어(Kajino et al., 2013; Kajino et al., 2011; Lin et al., 2008)<sup>14,15,18</sup> 해당지역의 배출량 변화에 지속적인 관심을 가질 필요가 있을 것으로 판단된다.



<Figure 4> Spatial distributions of Chinese NO<sub>x</sub>, VOCs, and PM<sub>2.5</sub> emissions differences between each Cases and Base for 2020s.



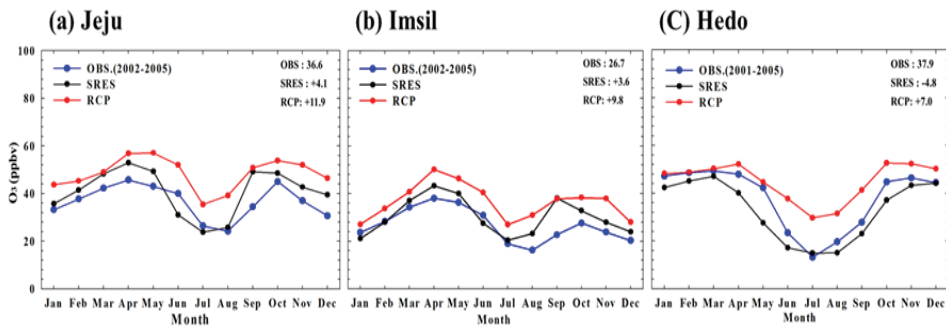
<Figure 5> Same as figure 4, but for 2020s.

## 2. 대기질 모델링 결과 검증

기준연대를 대상으로 수행한 모델링 결과의 검증을 위하여 EANET 관측 자료 중 우리나라의 제주, 임실, 일본의 헤도(Hedo) 월평균  $O_3$  농도와 모델링 결과로부터 도출된 해당 측정지점이 포함된 격자의 월평균  $O_3$  농도를 비교하였다. 그리고 본 연구에서 적용한 배출량 자료의 특성을 확인하기 위하여 과거 동일 지역 및 동일 기간에 대해 SRES 시나리오의 배출량 자료를 적용한 연구결과와 비교하였다. 비교결과는 그림 6에 나타낸 바와 같다. 이들을 살펴보면 과거 SRES 배출량 자료를 적용한 연구들은 비교적 관측치와 유사한 농도수준을 보이는 반면, 본 연구 결과는 관측치에 비해 월평균  $O_3$  농도를 전반적으로 과대모의 하는 것을 확인할 수 있다. 과거 적용된 SRES 배출량 자료는 아시아 지역에 대한 배출량의 신뢰도를 개선시키기 위해 기존의 SRES 시나리오(IPCC, 2001)<sup>22</sup>의 배출량 중 2006년 배출량을 비교적 신뢰도가 높은 INTEX-B 배출목록(Zhang et al., 2009)<sup>34</sup>의 배출량으로 치환한 뒤, 이를 다시 IMAGE(Integrated Model to Assess the Global Environment) 2.2 배출량 자료를 활용하여 지역별 과거·미래 배출량

으로 산정한 것으로 기존의 SRES 시나리오 별 배출량과는 차이가 있다(국립환경과학원, 2008; 2009; 2010). 이를 통해 RCP가 과거 SRES 보다 많은 부분 불확실성을 줄였다고 평가되고 있지만, 동아시아 지역에 대해서는 아직까지 많은 부분 불확실성이 있는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다. 그림 6을 통해 본 연구 결과가 농도의 수준은 과대 모의를 하고 있지만 월별 변화의 경향성은 과거 SRES보다 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한 이를 정량적으로 판단할 수 있는 통계지표인 상관관계수(r)와 일치도 지수(IOA)가 제주 및 임실에서 SRES를 적용한 연구결과보다 본 연구결과에서 모두 증가한 것을 확인할 수 있었다(표 6 참조).

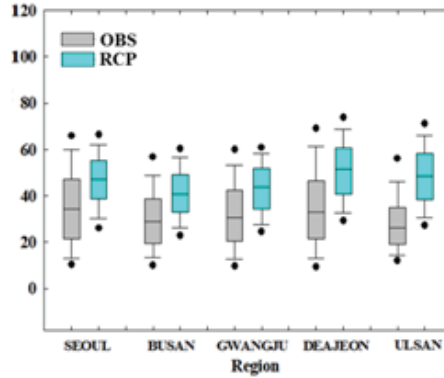
O<sub>3</sub>의 고농도 사례에 대한 검증을 위한 NAMIS 자료 중 5개 대도시 지역의 19개 측정 지점별 DM8H O<sub>3</sub> 농도 자료와 모델링 결과를 비교한 것을 그림 7에 나타내었다. 월평균 농도와 마찬가지로 모델링 결과가 관측치에 비해 다소 높은 것을 확인 할 수 있었다.



<Figure 6> Comparisons between simulations and observations on monthly average ozone concentrations at surface sites.

<Table 6> Statistical analysis for comparing modeling performance

	SRES		RCP	
	r	IOA	r	IOA
Jeju	0.81	0.68	0.88	0.86
Imsil	0.79	0.74	0.81	0.88



<Figure 7> Comparisons of percentiles between simulated and observed DM8H surface O<sub>3</sub> concentrations (ppb) at five sites in the Korean peninsula for 1996 ~ 2005.

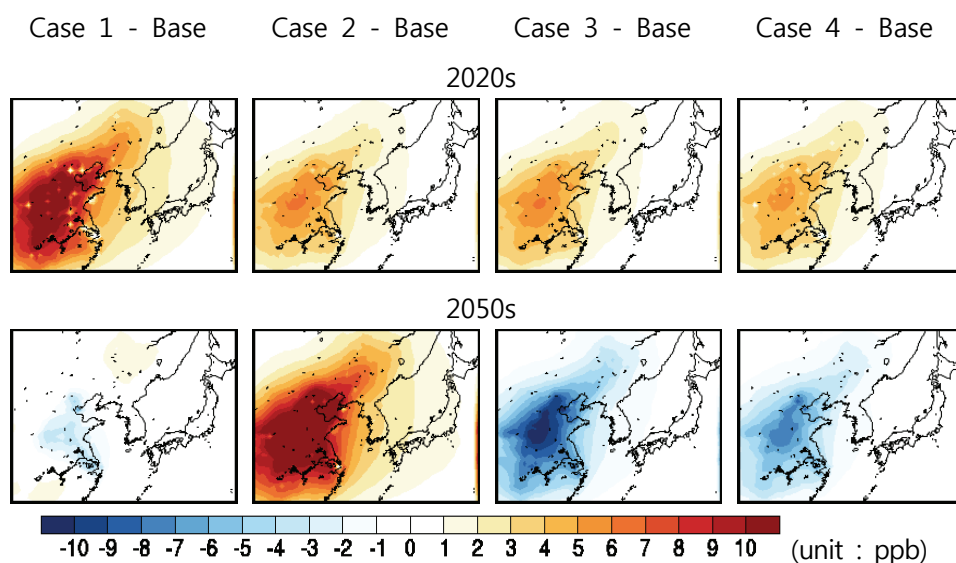
### 3. 미래 중국 배출량 변화에 따른 대기질 변화

#### 가. 동아시아 및 한반도 지역의 O<sub>3</sub> 농도 변화

미래 중국의 배출량 변화에 따른 동아시아에 대한 DM8H O<sub>3</sub> 농도의 변화(각 Case 실험결과와 Base 실험결과의 차)를 그림 8과 표 7에 나타내었다. 그림 8에서 나타낸 동아시아의 DM8H O<sub>3</sub> 농도 변화를 살펴보면 2020년대에는 모든 사례에서 DM8H O<sub>3</sub> 농도가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 또한 그 정도는 중국에 대해 RCP8.5 시나리오의 2020년대 배출량을 적용한 Case 1에서 평균 3.41 ppb로 가장 높았으며, 그 뒤를 이어 중국에 대해 RCP6.0 배출량을 적용한 Case 2(평균 1.67 ppb), RCP4.5를 적용한 Case3(평균 1.63 ppb), RCP2.6을 적용한 Case4(평균 1.53 ppb)의 순으로 농도의 변화가 큰 것을 확인할 수 있었다. 그리고 DM8H O<sub>3</sub> 농도 변화 크기의 공간분포를 살펴보면 본 장의 1절에서 제시한 O<sub>3</sub> 전구물질인 NO<sub>x</sub> 및 VOCs의 배출량 변화 크기의 공간분포와 유사한 것을 확인할 수 있었다. Case 1의 경우 기준연대의 배출량이 많으며 변화 폭이 큰 북경 및 하북성, 상해, 하남성, 호북성 주변 지역을 중심으로 DM8H O<sub>3</sub> 농도 변화가 7 ppb 이상 증가하

는 것으로 나타나 다른 지역에 비해 농도의 증가폭이 매우 높은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 편서풍의 영향을 받아 동쪽으로 폭넓게 DM8H O<sub>3</sub> 농도 증가를 유발하는 것을 확인 할 수 있었으며, 중국으로부터 동쪽으로 멀어질수록 그 영향이 약해지는 것을 확인할 수 있었다. 2050년대의 경우 기준연대에 비해 전구 물질의 배출량이 증가한 Case 2는 DM8H O<sub>3</sub> 농도가 평균 4.10 ppb가 증가하여 2020년대 보다 DM8H O<sub>3</sub> 농도가 더 증가한 것을 확인할 수 있었다. Case 3과 Case 4는 각각 평균 2.53 ppb 및 1.78 ppb가 감소한 반면, Case 1의 경우 중국의 VOCs 배출량이 증가했지만 DM8H O<sub>3</sub> 농도 변화는 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.

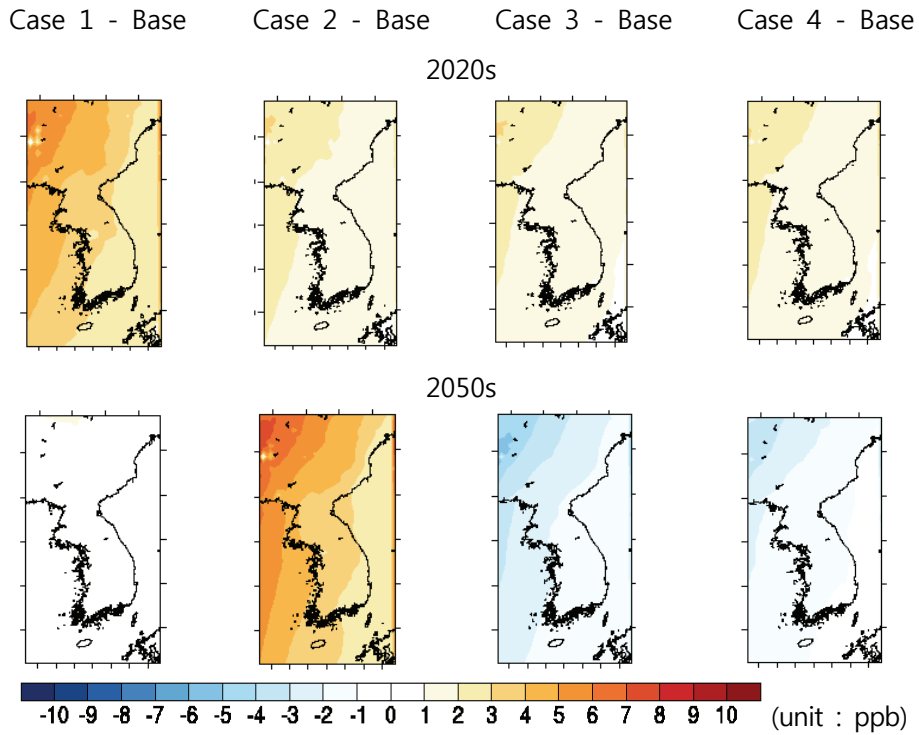
중국 배출량 변화가 한반도(대한민국)의 DM8H O<sub>3</sub> 농도 변화에 미치는 영향을 그림 9와 표 8에 나타내었다. 각 사례별 DM8H O<sub>3</sub> 농도 변화 패턴은 동아시아의 경우와 동일한 것을 확인 할 수 있었다. 변화의 정도는 2020년대의 경우 Case 1부터 Case 4까지 각각 평균 2.80 ppb, 1.35 ppb, 1.23 ppb, 1.22 ppb가 증가한 것을 확인할 수 있었고, 2050년대의 경우 Case 1은 거의 변화가 없고, Case 2는 평균 3.10 ppb가 증가하였으며, Case 3과 Case 4는 각각 평균 1.56 ppb, 1.08 ppb가 감소한 것을 확인할 수 있었다. DM8H O<sub>3</sub> 농도 변화의 분포, 즉 중국의 배출량 변화에 따른 영향 역시 동아시아의 분포에서 나타난 서고동저 패턴이 나타남을 확인할 수 있었다. 2020년대 Case 1의 경우 서해상에서 약 평균 4 ppb ~ 5 ppb의 DM8H O<sub>3</sub> 농도 증가가 나타남을 확인할 수 있었고, 서해연안 및 중부 내륙지역의 경우 평균 3 ppb ~ 4 ppb, 영·호남 지역과 남해 및 동해는 평균 2 ppb ~ 3 ppb의 DM8H O<sub>3</sub> 농도 증가가 있음을 확인할 수 있었다.



<Figure 8> Spatial distribution of predicted DM8H averaged surface O<sub>3</sub> concentrations (from April to August) changes according to the projected Chinese emissions changes for East Asia.

<Table 7> Spatial mean values of predicted DM8H averaged O<sub>3</sub> concentrations (from April to August) for East Asia

		Averaged concentration (ppb)	Difference with Base (ppb)
2020s	Base	49.15	0.00
	Case 1	52.56	3.41
	Case 2	50.82	1.67
	Case 3	50.78	1.63
	Case 4	50.68	1.53
2050s	Base	46.42	0.00
	Case 1	46.37	-0.05
	Case 2	50.52	4.10
	Case 3	43.89	-2.53
	Case 4	44.64	-1.78



<Figure 9> Same as figure 8, but for the Korean peninsula.

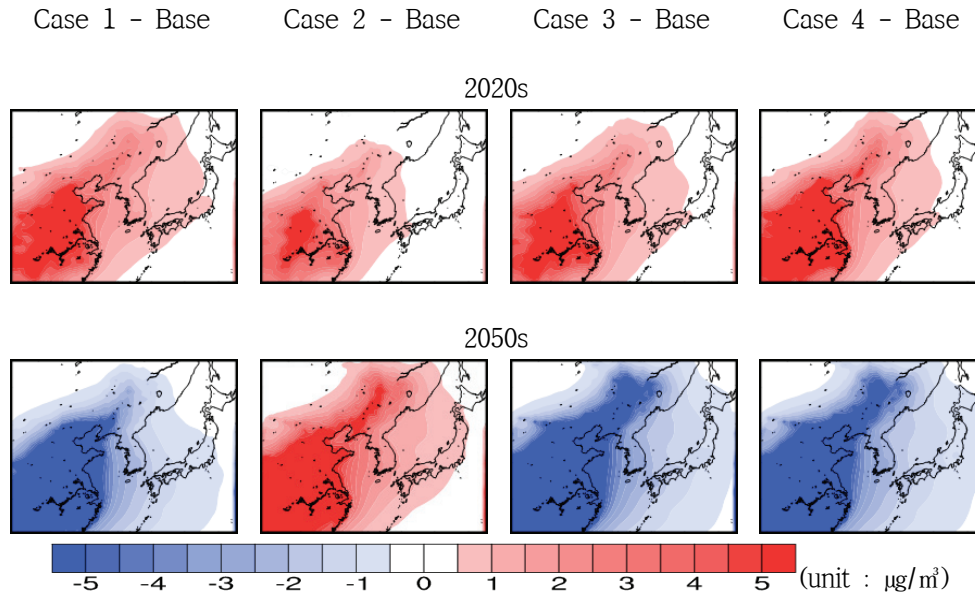
<Table 8> Same as table 7, but for the Republic of Korea

		Averaged concentration	Difference with Base
		(ppb)	(ppb)
2020s	Base	49.47	0.00
	Case 1	52.27	2.80
	Case 2	50.82	1.35
	Case 3	50.70	1.23
	Case 4	50.69	1.22
2050s	Base	47.30	0.00
	Case 1	47.25	-0.05
	Case 2	50.40	3.10
	Case 3	45.74	-1.56
	Case 4	46.22	-1.08

나. 동아시아 및 한반도 지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화

미래 중국의 배출량 변화에 따른 동아시아에 대한 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변화 (각 Case 실험결과와 Base 실험결과의 차)를 그림 10과 표 9에 나타내었다. O<sub>3</sub>의 경우와 마찬가지로 2020년대에는 모든 사례에서 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 증가한 반면, 농도의 변화가 큰 순서는 다른 것을 확인 할 수 있었다. 이는 표 5에서 언급한 것과 같이 시나리오별 PM<sub>2.5</sub>의 배출량 변화의 경향이 O<sub>3</sub> 전구물질들의 변화 경향과 다르기 때문이다. PM<sub>2.5</sub>의 농도가 가장 증가한 사례는 Case 4로 평균 2.3 µg/m<sup>3</sup>가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 그 뒤를 이어 Case 1, Case 3, Case 2의 순서로 농도가 증가하였으며, 각각 평균 1.8 µg/m<sup>3</sup>, 1.6 µg/m<sup>3</sup>, 1.1 µg/m<sup>3</sup>가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 2050년대 역시 O<sub>3</sub>의 경우와 유사하게 Case 2를 제외하고 모두 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Case 2의 경우 배출량의 증가로 인해 3.1 µg/m<sup>3</sup>이 증가하는 것으로 나타나 동일한 사례의 2020년보다도 증가폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. 나머지 사례들은 Case 3, Case 4, Case 1의 순으로 농도가 감소하는 것으로 나타났으며, 각각 평균 5.0 µg/m<sup>3</sup>, 4.3 µg/m<sup>3</sup>, 3.8 µg/m<sup>3</sup>가 감소한 것을 확인할 수 있었다. PM<sub>2.5</sub>의 농도 변화 분포 역시 O<sub>3</sub>의 사례와 유사하게 나타났는데, 배출량이 비교적 높고, 그 변화율이 큰 요동 및 화남지방을 중심으로 PM<sub>2.5</sub>의 농도 변화가 큰 것을 확인할 수 있었고, 중국으로부터 동쪽으로 멀어질 수록 그 영향이 약해지는 것을 확인할 수 있었다.

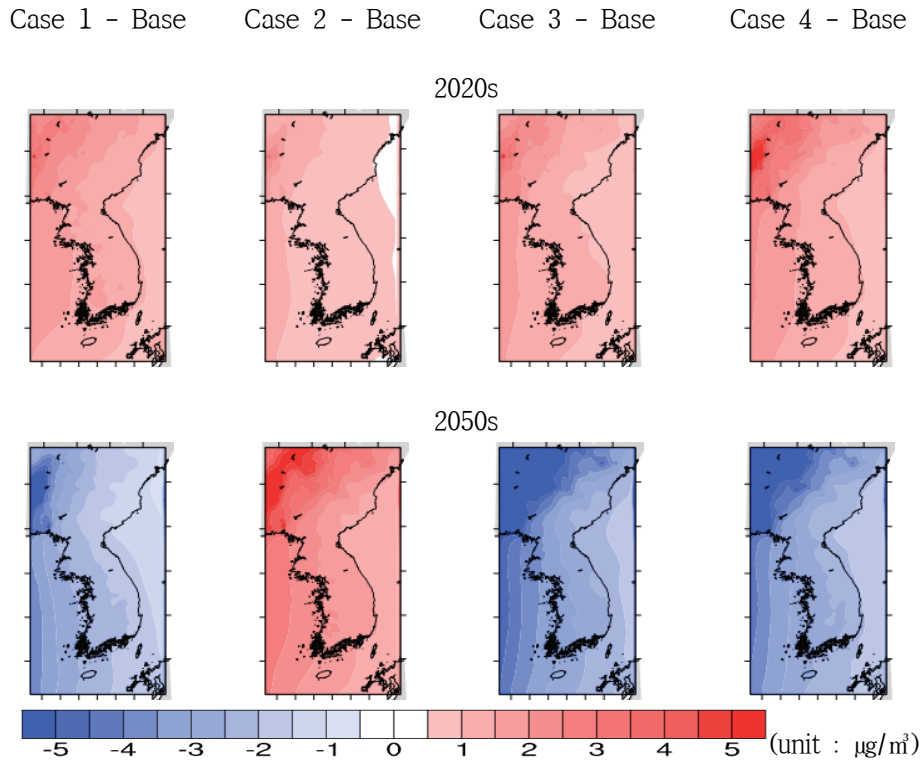
중국의 배출량 변화가 한반도(대한민국)의 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 영향을 그림 11과 표 10에 나타내었다. PM<sub>2.5</sub>의 농도 변화 패턴은 동아시아의 경우와 동일한 것을 확인할 수 있었으며, 2020년대 농도의 변화폭은 사례에 따라 평균 0.8 µg/m<sup>3</sup> ~ 1.6 µg/m<sup>3</sup>가 증가하였다. 2050년대의 농도 변화는 Case 2에서 평균 2.3 µg/m<sup>3</sup>가 증가하였고 나머지 경우에서 평균 2.3 µg/m<sup>3</sup> ~ 3.1 µg/m<sup>3</sup> 감소하는 것을 확인할 수 있었다.



<Figure 10> Spatial distributions of predicted annual averaged surface  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations changes according to the projected Chinese emissions changes based on reference years for East Asia.

<Table 9> Spatial mean values of predicted annual averaged  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations for East Asia

		Averaged concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Difference with Base ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
2020s	Base	9.9	0.0
	Case 1	11.7	1.8
	Case 2	11.0	1.1
	Case 3	11.5	1.6
	Case 4	12.2	2.3
2050s	Base	9.0	0.0
	Case 1	5.2	-3.8
	Case 2	12.1	3.1
	Case 3	4.0	-5.0
	Case 4	4.7	-4.3



<Figure 11> Same as figure 10, but for the Korean peninsula.

<Table 10> Same as table 9, but for the Republic of Korea

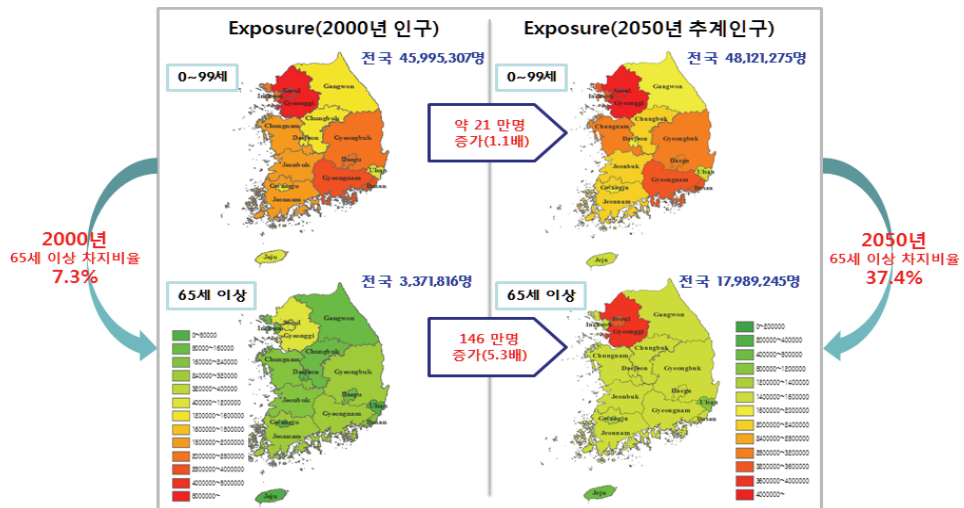
		Averaged concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Difference with Base ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
2020s	Base	10.5	0.0
	Case 1	12.0	1.5
	Case 2	11.3	0.8
	Case 3	11.8	1.3
	Case 4	12.1	1.6
2050s	Base	9.7	0.0
	Case 1	7.4	-2.3
	Case 2	12.0	2.3
	Case 3	6.2	-3.5
	Case 4	6.6	-3.1

#### 4. 대기질 변화에 따른 건강 영향 및 경제적 비용 평가

##### 가. 대기질 변화로 인한 건강영향 평가

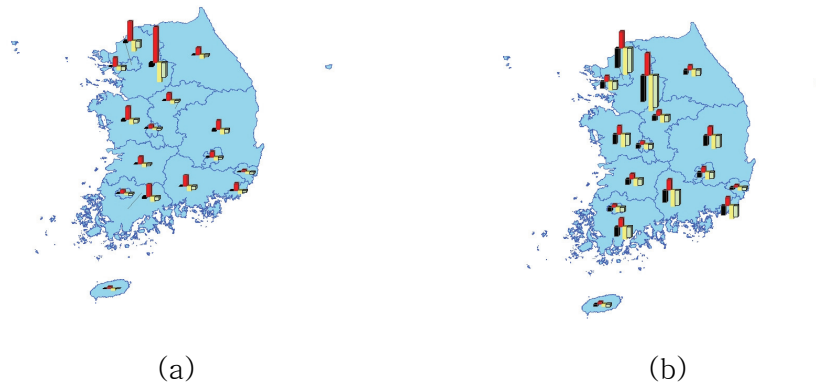
미래 중국의 배출량 변화에 따른 대기질 변화는 심혈관 및 호흡기 질환을 야기하며, 이는 결국 기대수명을 채우지 못하고 조기 사망을 하게 되는 원인이 될 수 있다. 이에 본 연구는 BenMAP을 활용하여 미래 우리나라의 대기질 변화에 따른 인간의 건강에 대한 부정적 영향, 즉 초과 사망자의 변화를 산출하였다.

그림 12는 우리나라의 지역별 인구를 나타낸 것으로 기준연대를 대표할 수 있는 2000년대와 2050년대를 대표할 수 있는 2050년에 대한 총인구와 고령인구(65세 이상)으로 구분하여 나타내었다. 그림을 통해 알 수 있듯이 우리나라의 2050년 추계인구는 약 4,812만 명으로 2000년 기준 총 인구보다 약 21만 명이 증가될 것으로 예측되었다. 그리고 고령인구의 수는 2000년 기준 약 337만 명이었던 것에 비해 2050년에는 약 1,790만 명에 이를 것으로 예측되어 우리나라는 고령화 사회에서 초고령화 사회로 전환될 것으로 보고있다.



<Figure 12> Spatial distributions of historical (2000) and projected (2050) population in the Republic of Korea.

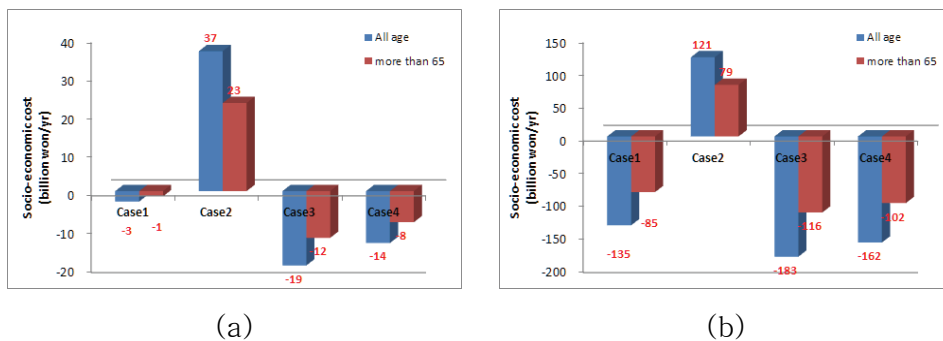
시·도별 인구와 중국의 배출량 변화에 따른 2050년대 시도별  $O_3$ ,  $PM_{2.5}$  농도 변화 자료 등을 활용하여 BenMAP을 구동한 결과 각 사례별로 지역별 초과사망자 수를 도출할 수 있었고, 그 결과를 그림 13에 나타내었다.  $O_3$  농도(DM8H)의 변화에 따른 초과사망자 수를 살펴보면 기준연대에 비해 중국의 배출량이 증가했던 Case 2의 경우 전국적으로 81명의 초과사망자가 발생할 것으로 예측이 되었고, 농도의 감소폭이 가장 컸던 Case 3에서 43명의 초과 사망자가 감소할 것으로 예측이 되는 것을 확인할 수 있었다.  $PM_{2.5}$  농도의 변화에 따른 초과사망자 수를 살펴보면 Case 2의 경우 267명의 초과사망자가 발생할 것으로 예측되었고, Case 3에서 406명의 초과사망자가 감소할 것으로 예측되었다. 초과사망자에 대한 지역분포는 지역별 인구 분포와 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 사례별 전국 초과사망자 중 경기도 및 서울특별시의 초과사망자의 비중이 타 지역에 비해 월등히 높은 것을 확인할 수 있었으며, 울산광역시와 제주도의 초과사망자의 비중이 타 지역에 비해 낮은 것을 확인할 수 있었다.



<Figure 13> Administrational premature death due to (a)  $O_3$  and (b)  $PM_{2.5}$  concentration changes for 2050s in the Republic of Korea. (Black to green means premature death for Case 1 to 4, respectively)

나. 초과 사망에 따른 경제적 비용 평가

이상에서 살펴본 사례별 초과사망자 수와 본 연구에서 설정한 2000년 VSL 4억 5,136만원을 적용하여 2050년대 초과사망자에 대한 경제적 비용을 산정하였고, 그 결과를 그림 14에 나타내었다. 이를 살펴보면 2050년대에 O<sub>3</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 높아지는 것으로 예측된 Case 2의 경우 초과사망자의 증가로 인해 경제적 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 전 연령대의 인구를 대상으로 평가한 결과를 살펴보면 O<sub>3</sub> 농도 증가로 인한 비용 손실이 약 연간 370억원에 이르며, PM<sub>2.5</sub>농도의 변화로 인한 비용 손실이 약 연간 1,210억원에 이르는 것을 확인할 수 있었으며, 이중 고령인구의 초과사망에 대한 경제적 비용은 전체의 63 % 및 65 %를 차지하고 있었다. O<sub>3</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 감소한 나머지 경우들에 대한 사회적 비용을 살펴보면 O<sub>3</sub> 농도의 감소로 얻을 수 있는 비용 편익은 약 30억원 (Case 1) ~ 190억원(Case 3)에 이르는 것을 확인할 수 있었으며, 이 때 고령인구에 대한 편익은 약 10억원 ~ 120억원에 이르는 것으로 나타났다. PM<sub>2.5</sub> 농도 감소로 얻을 수 있는 비용 편익은 약 1,350억원 ~ 1,830억원에 이르는 것을 확인할 수 있었으며, 이 때 고령인구에 대한 편익은 약 850억원 ~ 1,160억원에 이르는 것으로 나타났다.



<Figure 14> Socio-economic costs due to premature death related on air quality ((a) O<sub>3</sub> and (b) PM<sub>2.5</sub>) changes for 2050s in the Republic of Korea.

## IV. 결 론

본 연구는 동아시아의 특성이 반영된 기후·대기 시나리오를 구축하고, 이를 활용하여 한반도 피해 최소화 시나리오 도출을 최종목표로 총 3년에 걸쳐 단계적으로 진행하는 연구이다. 당해연도는 1차년도로 시나리오의 개발에 앞서 RCP 배출 시나리오를 활용하여 미래 중국 배출량의 변화에 따른 동아시아 및 한반도(대한민국)의 대기질 변화를 전망한 후, 그에 따른 건강 영향과 경제적 비용을 평가하였으며 주요 연구결과는 아래와 같다.

1. 중국의 O<sub>3</sub> 전구물질 및 PM<sub>2.5</sub> 배출량은 2020년대의 모든 경우에서 증가하였으며, 2050년대에는 RCP6.0의 중국 배출량이 반영된 경우를 제외한 모든 경우에서 감소하였다. 배출량의 변화폭은 동북, 화북, 화동지역 등을 중심으로 크게 나타났으며, 해당 지역들 내 일부 지역은 현재 배출량도 매우 높아 이들 지역에 대한 지속적인 관심이 필요한 것을 확인할 수 있었다.
2. 2020년대 중국 배출량 변화에 따라 모든 경우에서 우리나라 O<sub>3</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 농도가 증가하였다. O<sub>3</sub>은 1.2 ppb ~ 2.8 ppb(DM8H)가 증가하였으며, PM<sub>2.5</sub>는 0.8 µg/m<sup>3</sup> ~ 1.6µg/m<sup>3</sup>(연평균)가 증가하였다. 가장 높은(/낮은) 농도 증가를 유발하는 사례들이 물질마다 동일하지 않아, 단기미래에는 관리대상 우선순위에 따라 최선의 시나리오가 달라질 수 있음이 시사되었다.
3. 2050년대 중국 배출량 변화에 따른 우리나라 O<sub>3</sub> 농도의 변화는 Case 2에서 3.1 ppb가 증가하였고 Case 1은 2000년대와 차이가 거의 없는 것으로 나타난 반면, Case 4에서는 1.1 ppb, Case 3에서는 1.6 ppb가 감소하였다. PM<sub>2.5</sub>는 Case 2에서 2.3 µg/m<sup>3</sup>가 상승한 반면, 나머지 경우에는 2.3 µg/m<sup>3</sup> (Case 1) ~ 3.5 µg/m<sup>3</sup> (Case 3)가 감소하였다. 중기미래에는 단기미래와는 다르게 가장 높은(/낮은) 농도 증가를 유발하는 사례가 동일한 것을 확인할 수 있었으며, 두 물질의 동시 관리가 가능할 것이라 판단되었다.
4. 예측된 2050년대 우리나라 O<sub>3</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에 따른 건강영향 평가 결과, Case 1, 3, 4의 경우 대기오염물질의 농도가 현재대비 2050년대에 감

소하는 영향으로 O<sub>3</sub>은 6명 ~ 43명, PM<sub>2.5</sub>은 300명 ~ 406명의 초과사망자가 향후 감소할 것으로 평가되었다. 반면 Case 2의 경우 O<sub>3</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가로 81명 및 267명의 초과사망자가 증가될 것으로 평가되었다. 초과사망자 중 노령인구(65세 이상)의 비율은 53 % ~ 63 %를 차지하는 것으로 나타나 향후 취약계층에 대한 대책의 필요성을 확인할 수 있었다.

5. 초과사망자 수의 변화에 따른 경제적 비용 평가 결과 Case 2의 경우 O<sub>3</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가로 인해 각각 약 370억원 및 1,210억원의 비용손실이 발생하는 것으로 평가되었다. 그 밖의 경우 O<sub>3</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소로 인해 각각 약 30억원 ~ 190억원, 약 1,350억원 ~ 1,830억원의 편익이 발생하는 것으로 평가되었다.
6. 이상의 결과들을 종합한 결과 우리나라에 미치는 악영향을 최소화 시킬 수 있는 사례는 중국이 RCP4.5 시나리오를 따라가는 경우이며, 이는 효과적인 대기질 개선을 위한 국제협력을 통해 중국이 해당 시나리오를 따르도록 유도해야 할 필요성을 시사한다. 그러나 동아시아 지역에 대한 RCP 시나리오의 한계들로 인하여 국제협력 유도에는 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 잔여 연구기간 동안 한·중·일의 사회·경제적 특성과 개발 및 규제 계획을 반영한 동아시아에 최적화된 기후·대기 시나리오를 구축하고 이를 기반으로 한반도에 미치는 악영향이 최소화 될 수 있는 시나리오를 도출할 것이다.

본 연구에서 도출될 최종결과들은 동아시아 및 한반도 지역(대한민국)의 기후변화적응대책 및 대기관리정책 수립에 필요한 과학적 기반과 기후변화에 대한 취약성 평가 수준 향상에 기여할 수 있을 것이라고 기대된다. 또한 본 연구를 통해 구축될 기후변화 시나리오들은 앞으로 진행되는 IPCC 제 6차 기후변화 평가 보고서 작성의 기초자료로 활용될 수 있어 국제 사회 기후변화 대응에 기여함은 물론, 전 세계의 다양한 연구자들에게 제공될 수 있어 그 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. IPCC, IPCC Fifth Assessment Synthesis Report, **2014**, 116pp.
2. IPCC, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change **2013**, The Physical Science Basis, Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment.
3. Carvalho, A., Monteiro, A., Solman, S., Miranda, A.I., Borrego, C., Climate-driven changes in air quality over Europe by the end of the 21st century, with special reference to Portugal. *Environ. Sci. & Pol.*, **2010**, 13, 445-458.
4. Jacob, D.J., Winner, D.A., Effect of climate change on air quality. *Atmos. Environ.*, **2009**, 43, 51-63.
5. Lacressonniere, G., Peuch, V.H., Vautard, R., Arteta, J., Deque, M., Joly, M., Josse, B., Marecal, V., Saint-Martin, D., European air quality in the 2030s and 2050s: Impacts of global and regional emission trends and of climate change. *Atmos. Environ.*, **2014**, 92, 348-358.
6. Bell, M.L., R.D. Peng, and F. Dominici, The exposure-response curve for ozone and risk of mortality and the adequacy of current ozone regulations. *Environ. Health Persp.*, **2006**, 114, 532-536.
7. Knowlton K., J. E. Rosenthal, C. Hogrefe, B. Lynn, S. Gaffin, R. Foldberg, C. Rosenzweig, K. Civerolo, J.-Y. Ku, P. L. Kinney, Assessing Ozone-Related Health Impacts under a Changing Climate, *Environmental Health Perspectives*, **2004**, 112(14), 1557-1563
8. NIER, A study on the climate and air quality changes of the Korean peninsula in the future(Ⅲ)-Focus on the stabilization scenarios-, **2013a**, 39pp (Korean with English abstract)
9. NIER, A Study for Climate Change Vulnerability on Atmospheric Environment: Environmental benefits analysis of climate change on local-level air pollutants changes in Korea, **2013b**, 36pp (Korean with

- English abstract)
10. NIER, A study on the climate and air quality changes of the Korean peninsula in the future(Ⅱ)-Focus on the stabilization scenarios-, **2012a**, 32pp (Korean with English abstract)
  11. NIER, A Study for Climate Change Vulnerability on Atmospheric Environment: Environmental benefits analysis of climate change on local-level air pollutants changes in Korea, **2012b**, 38pp (Korean with English abstract)
  12. NIER, A study on the climate and air quality changes of the Korean peninsula in the future(Ⅰ)-Focus on the stabilization scenarios-, **2011a**, 41pp (Korean with English abstract)
  13. Li j., Z. Wang, H. Chn, B. Hu, J. Li, Y. Sun, Y. Huang, A modeling study of source-receptor relationships in atmospheric particulate matter over Northeast Asia, *Atmos. Environ.*, **2014**, 91, 40-51.
  14. Kajino Mizuo, Keiich Sato, Yayoi Inomata, Hiromasa Ueda, Source-receptor relationships of nitrate in Northeast Asia and influence of sea salt on the long-range transport of nitrate, *Atmos. Environ.*, **2013**, 79, 67-78
  15. Kajino M., H. Ueda, K. Sato, T. Sakurai, Spatial distribution of the source-receptor relationship of sulfur in Northeast Asia, *Atmos. Chem. Phys.*, **2011**, 11, 6475-6491
  16. Carmichael G. R., G. Calori, H. Hayami, I. Uno, S. Y. Cho, M. Engardt, S. -B. Kim, Y. Ichikawa, Y. Ikeda, J. -H. Woo, H. Ueda, M. Amann, The MICS-Asia study: model intercomparison of long-range transport and sulfur deposition in East Asia, *Atmos. Environ.*, **2002**, 36, 175-199
  17. Holloway T., H. L. II, G. R. Carmichael, Transfer of reactive nitrogen in Asia: development and evaluation of source-receptor model, *Atmos. Environ.*, **2002**, 36, 4251-4264
  18. Lin M., T. Oki, M. Bentsson, S. Kanae, T. Holloway. D. G. Streets,

- Long-range transport of acidifying substances in East Asia-Part II Source-Receptor relationship, *Atmos. Environ.*, **2008**, 42, 5956-5967
19. IPCC, Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies, IPCC Expert Meeting Report, 19-21 Sep. **2007**, 132pp.
  20. IPCC, Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies, IPCC Expert Meeting Report, 19-21 Sep. **2007**, 132pp.
  21. US EPA, BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program) User's Manual, **2012**, 272pp.
  22. IPCC, Special Report on Emission Scenarios, 2001
  23. D.P. Van Vuuren, J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith, and S. K. Rose, The representative concentration pathways : an overview, *Climatic Change*, **2011**, 109, 5-31.
  24. K. Riahi, A. Grüber, and N. Nakicenovic, Scenarios of long-time socio-economic and environmental development under climate stabilization, **2007**, 74, 887-935.
  25. J. Fujino, R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka, Multigas mitigation analysis on stabilization scenarios using aim global model, *The Energy Journal Special issue*, **2006**, 3, 343-354
  26. Y. Hijioja, Y. Matsuoka, H. Nishimoto, T. Masui, and M. Kainuma, Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets, *J Glob Environ Eng*, **2008**, 13, 97-108.
  27. L.E. Clarke, J.A. Edmonds, H.D. Jacoby, H. Pitcher, J.M. Reilly, and R. Richels, Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations, Sub-report 2.1a of Synthesis and Assessment Product 2.1. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global

- Change Research, Washington DC, 2007.
28. S.J. Smith and T.M.L. Wigley, MultiGas forcing stavbilization with minicam, 2006, 3, 373-392.
  29. M. Wise, K. Calvin, A. Thomson, L. Clarke, B. Bond-Lamberty, R. Sands, S.J. Smith, A. Janetos, and J. Edmonds, Implications of limiting CO<sub>2</sub> concentrations for land use and energy, 2009, 324, 1183-1186.
  30. D.P. Van Vuuren, B. Eickhout, P.L. Lucas, and M.G.J. den Elzen : Long-term multi-gas scenarios to stabilize radiative forcing-exploring costs and benefits within an integrated assessment framework, 2006, 27, 201-233.
  31. D.P. Van Vuuren, M.G.J. Den Elzen, P.L. Lucas, B. Eickhout, B.J. Strengers, B. Van Ruijven, S. Wonink, and R. Van Houdt, Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs, 2007, 81, 119-159.
  32. J.-H. Woo, K.-C. Choi, H.K. Kim, B.H. Baek, M. Jang, J. Eum, C.H. Song, Y.-I. Ma, Y. Sunwoo, L.-S. Chang, S.H. Yoo, Development of an anthropogenic emissions processing system for Asia using SMOKE, Atmos. Environ., 2012, 58, 5-13
  33. T. Ohara, H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yamaji, X. Yan, and T. Hayasaka, An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, Atmos. Chem. and Phys., 2007, 7, 4419-4444
  34. Q. Zhang, D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Kimont, I.S. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao, Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, Atmos. Chem. and Phys., 2009, 9, 5131-5153
  35. K. Riahi, S. Rao, V. Krey, C. Cho, V. Chirkov, G. Fischer, G. Kindermann, N. Nakicnovic, P. Rafaj, RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, Climatic Change, 2011, 109, 33-57

- 36 Bae, H.J., M.-H. Kim, A.K. Lee, and J. Park, Acute effects of PM10 on asthma hospitalization among children and benefit analysis at four major cities in Korea. *Korean J. of Environ. Health*, **2009**, 35(1), 1-10 (in Korean with English abstract).
37. Park, J., and H.J. Bae, Assessing the health benefits of the Seoul air quality management plan using BenMAP. *Korean J. of Environ. Health*, **2006**, 32(6), 571-577.
38. Wong, E.Y., J. Gohlke, W.C. Griffith, S. Farrow, and E.M. Faustman, Assessing the health benefits of air pollution reduction for children. *Environ. Health Perspect.*, **2004**, 112(2), 226-232.
39. 환경부, 환경오염 저감정책의 건강편익산정 모형확립 및 적용, **2007**, 72pp.
40. 국립환경과학원, 전구 대기화학 모델링 연구(Ⅲ), **2010**, 349pp.
41. 국립환경과학원, 전구 대기화학 모델링 연구(Ⅱ), **2009**, 316pp.
42. 국립환경과학원, 전구 대기화학 모델링 연구(Ⅰ), **2008**, 265pp.