

## 동북아 지역에서 중국의 미래 배출량 변화가 오존농도와 보건에 미치는 영향

김현국\* · 유영숙\* · 우정현\*\* · 홍성철\*† · 김덕래\* · 서정현\* · 신명환\* · 김상균\*

\*국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과, \*\*건국대학교 신기술융합학과

### Impact of Future Chinese Emissions on Ozone Air Quality and Human Health in Northeast Asia

Kim, Hyeon-Kook\*, Lyu, Youngsook\*, Woo, Jung-Hun\*\*, Hong, Sung-Chul\*†, Kim, Deok-Rae\*, Seo, Jeonghyeon\*, Shin, Myunghwan\* and Kim, Sang-Kyun\*

\*Global Environment Research Division, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

\*\*Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University, Seoul, Korea

#### ABSTRACT

We explore the impact of Chinese future air pollutant emissions on ozone air quality in Northeast Asia (NEA) and health in South-Korea using an assessment framework including ICAMS (The Integrated Climate and Air Quality Modeling System) and BenMAP (The Environmental Benefits Mapping and Analysis Program). The emissions data sets from the climate change scenarios, the Representative Concentration Pathways (RCPs) (emission scenarios, EMSO), are used to simulate ozone air quality in NEA in the current (1996~2005, 2000s), the near future (2016~2025, 2020s) and the distant future (2046~2055, 2050s). Furthermore, the simulated ozone changes in the 2050s are used to analyze ozone-related premature mortality and economic cost in South-Korea. While different EMSOs are applied to the China region, fixed EMSO are used for other country regions to isolate the impacts of the Chinese emissions. Predicted ozone changes in NEA are distinctively affected by large changes in NO<sub>x</sub> emission over most of China region. Comparing the 2020s with the 2000s situation, the largest increase in mean ozone concentrations in NEA is simulated under RCP 8.5 and similarly small increases are under other RCPs. In the 2050s in NEA, the largest increase in mean ozone concentrations is simulated under RCP 6.0 and leads to the occurrence of the highest premature mortalities and economic costs in South-Korea. Whereas, the largest decrease is simulated under RCP 4.5 leads to the highest avoided premature mortality numbers and economic costs. Our results suggest that continuous reduction of NO<sub>x</sub> emissions across the China region under an assertive climate change mitigation scenario like RCP 4.5 leads to improved future ozone air quality and health benefits in the NEA countries including South-Korea.

**Key words:** Climate Change Scenario, Representative Concentration Pathways, Chinese Emissions, Ozone, Health Benefit

## 1. 서 론

최근 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 보고서에서는 복사 강제력에 기반한 기후변화 유발물질의 미래변화를 설정하는 대표농도경로(Representative Concentration Pathway; RCP) 시나리오를 개발하였다. 이러한 시나리오 자료는 미래 기후변화가 미칠 결과의 범위를 탐색하는 기초 자료로 활용될 수 있다(Kim *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2015; van

Vuuren *et al.*, 2011).

기후변화를 일으키는 요인으로 인간 활동에 의한 온실가스 배출의 증가뿐만 아니라, 오존, 에어로졸, 검댕(black carbon)과 같은 대기화학물질의 배출증가 또한 중요하게 작용하고 있다. 이런 기후변화 유발물질의 지표 배출 조건들은 기후뿐만 아니라, 오존(O<sub>3</sub>), 미세먼지(Fine Particulate Matter; FPM)와 같은 대기오염 물질들의 농도변화에도 영향을 미친다(IPCC, 2014; Jacob and Winner, 2009). 또한 대기오염 물질의 농도변화는

† Corresponding author: [schong@korea.kr](mailto:schong@korea.kr)

Received September 6, 2016 / Revised October 24, 2016(1st), November 7, 2016(2nd) / Accepted November 11, 2016

호흡기와 심혈관계 질환을 일으켜 조기사망의 위험까지 높일 수 있는 것으로 알려져 있다(Knowlton *et al.*, 2004). 하지만 이러한 기후변화-대기질-보건분야 위험성 간의 관계를 통합적으로 이해하는 연구의 필요성(NIER, 2013a; NIER, 2013b)이 지속적으로 대두되어왔음에도 불구하고, 동북아시아(동북아) 지역에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

동북아 지역은 기후변화물질뿐만 아니라, 대기오염 물질 배출이 빠르게 증가해 온 곳으로 기후, 대기오염, 보건영향의 관점에서 매우 중요한 연구 대상지로 인식되고 있다(Li *et al.*, 2014; Carmichael *et al.*, 2002). 동북아 지역의 배출 증가세에 가장 큰 기여를 하는 곳은 중국지역으로서 배출된 오염물질들은 그 지역 외에도 인근 국가들과 원거리에 위치한 국가들까지 이동해 대기질을 악화시키는 것으로 보고되고 있다(Li *et al.*, 2014; Kajino *et al.*, 2013).

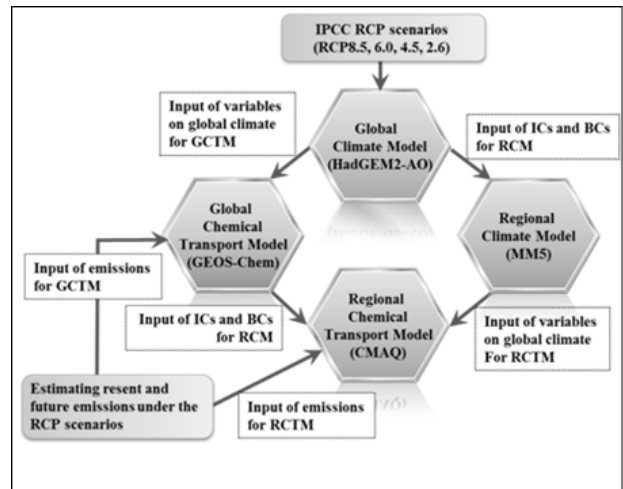
동북아에서 최대 배출원인 중국의 미래 배출환경 변화는 한국, 일본과 같은 인근 국가들의 미래 기후 및 대기질 변화 뿐만 아니라, 국민보건에 큰 위험요소로 작용할 수 있다. 따라서 기후변화 시나리오에 따른 중국 배출량을 이해하고, 그 영향을 정량적으로 이해하는 연구들이 수행될 필요가 있다.

본 연구에서는 RCP 시나리오를 기반으로 하여 중국의 미래 배출량 변화에 따른 동북아시아 지역 지표 오존농도 변화를 전망하고, 그 영향을 보건과 경제 피해 관점에서 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 결과들은 기후변화에 따른 한국의 미래 대기질 관리를 위한 국제대응과 보건 위험을 줄일 수 있는 방향모색에 근거자료로 활용될 것이다.

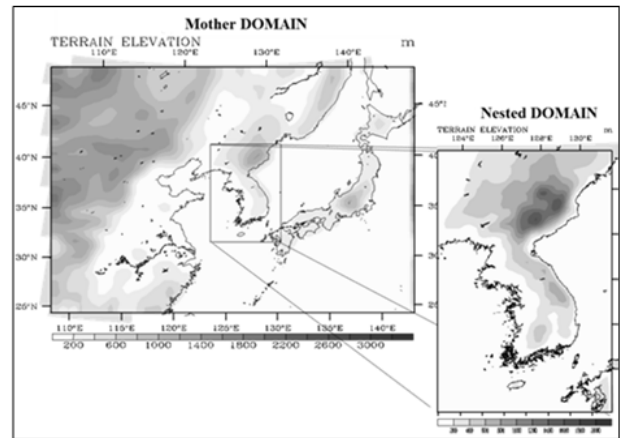
## 2. 연구자료 및 방법

### 2.1 모델 개요

미래 대기질 예측을 위해 국립환경과학원과 서울대학교가 공동 개발한 기후·대기환경 통합시스템(Integrated Climate and Air quality Modeling System; ICAMS)을 활용했다(Lee *et al.*, 2015). ICAMS의 구조와 중국의 미래 배출변화에 따른 오존농도 예측을 수행한 모델 도메인을 Fig. 1에 나타내었다. ICAMS는 전구 및 지역규모를 대상으로 하는 기후와 대기화학모델들로 구성되어 있다. 동북아시아 지역 기후 모델링 초기장과 경계장으로 기상청에서 기후예측을 목적으로 사용하고 있는 HadGEM2-AO의 전구규모 RCP 전망자료를 이용하였다. 전구규모 결과를 지역규모 기후모델에 반영하기 위해서 역학적 Down-scaling 방법을 적용했는데, 기온, 바람, 기압 등의 전구규모 예측 기상 자료를 내·외삽을 통해 지역규모 기후모델인 MM5(Grell *et al.*, 1995)의 격자체계에 맞추고, 6시간 간격의 초기장과 경계



(a) Framework of ICAMS



(b) Study domain

Fig. 1. A schematic diagram for ICAMS and study domain.

자료인 입력자료를 제공할 수 있도록 one-way mode로 coupling 하였다(Choi *et al.*, 2012). 기후모델의 미세물리과정에는 Reissner mixed-phase 방법(Reissner *et al.*, 1993, 1998), 적운 모수화는 Kain-Fritsch 방법(Kain and Fritsch, 1993), 행성경계층 모수화에는 Medium-Range Forecast(MRF) 방법(Hong and Pan, 1996)을 각각 적용했다. 그리고 대기복사 과정에는 Rapid Radiative Transfer Model(RRTM) (Mlawer *et al.*, 1997)을 적용했다. 전구규모 대기화학모델 GEOS-Chem으로 예측한 3시간 간격 대기질 자료를 지역규모 대기화학모델 CMAQ의 경계장으로 활용하여 동북아 미래 오존농도 예측을 수행했다. 지역규모 모델들(MM5와 CMAQ)의 구동은 일방향 동지격자기법(one-way nested simulation)을 적용해 동북아 도메인에서 한반도 도메인

으로 이어서 수행했다. 동북아 도메인은 58(동서)×46(남북)×23(연직)개, 한반도는 36×66×23개의 격자로 구성하였다. 수평 격자 체계로 Arakawa-B를 사용하여 동북아 도메인 격자 크기는 54 km × 54 km, 한반도는 18 km × 18 km로 정의했다. 연직으로는 지형을 따라가는 시그마 좌표계( $\sigma$ -coordinate)를 사용했다.

CMAQ 모델의 구동은 2000년대(1996~2005년, 2000s), 2020년대(2016~2025년, 2020s)와 2050년대(2046~2055년, 2050s)의 세 연대기(각 10년)로 나누어 수행했다. 2000년대를 기준으로 2020년대와 2050년대를 단기미래와 장기미래로 구분하여 분석하였다. CMAQ 모델링의 대기화학반응 메커니즘과 에어로졸 모듈로 CB-IV(Carbon-Bond chemical mechanism version IV)와 AERO-3을 적용했다. MM5와 CMAQ 모델을 이용해 2000년대, 2020년대, 2050년대를 대상으로 각각 10년간씩 장기적분을 수행했다. 아울러 모델의 초기조건 생성을 위해서 1개월 spin-up을 수행했다.

## 2.2 RCP 배출자료 처리

RCP는 유사한 복사 강제력과 배출 특성을 가지는 다수의 시나리오들을 대표해 선택된 4개의 대표 농도 시나리오로 구성되며, 2100년까지 야기될 복사강제력을 기준으로 명명하고 있다(Table 1). 가령, RCP8.5는 2100년에 복사강제력이 8.5 W/m<sup>2</sup>를 초과하는 온실가스 고농도 시나리오로 새로운 기후 변화대응 정책 시행 없이 온실가스 배출이 현재 추이를 따라 미래 2100년까지 계속되는 경우를 가정한다. RCP2.6은 2100년 전에 복사강제력이 3.0 W/m<sup>2</sup>에서 정점을 보인 후 2.6 W/m<sup>2</sup> 이하로 감소하는 시나리오로 기후변화 대응정책 시행이 성공을 이루는 이상적인 미래를 가정한다. 대기오염 물질의 배

출에 관해서 모든 RCP는 근본적으로 두 가지의 가정을 담고 있다(van Vuuren *et al.*, 2011). 첫째, 소득 수준이 높아짐에 따라 대기오염이 더욱 엄격하게 관리된다는 것이다. 둘째, 기후변화 대응정책이 엄격해질수록(온실가스 고배출(high emissions) 기술들에서 탈피하는 방식으로) 에너지시스템의 구조변화가 생기며, 대기오염 물질 배출도 감소된다는 것이다. 이러한 RCP의 기후변화와 대기오염에 대한 가정들이 네 개의 연구그룹 각각의 통합영향 평가모형(Integrated Assessment Model; IAM)에 적용되어 미래 배출량(이하, RCP 배출량)이 산정되었다(Table 1). 비록 시나리오의 기본적인 가정은 같지만, 대기오염 물질배출의 미래변화 경향이 복사강제력 변화(온실가스배출) 경향과 일치하지 않는다는 점을 미리 밝혀둔다(3.3장 참조). 이 불일치는 두 물질 군들의 배출 시나리오에 적용한 관리기법들의 종류와 연관성 차이로 인해 발생되었을 것으로 사료된다.

RCP 배출량은 2100년까지 10년 단위로 산정되었고, IIASA(International Institute for Applied Systems Analysis)의 RCP database에서 0.5°×0.5° 격자 단위의 자료로 제공한다(<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/int/RcpDb>). RCP 배출량 자료를 동북아 지역에 대한 대기화학모델 입력 자료로 활용하기 위해서 배출처리 작업을 수행했고, 이를 위해 배출처리 시스템 KU-EPS와 SMOKE-Asia(Woo *et al.*, 2012)를 활용하였다. 먼저 0.5°×0.5° 격자화된 RCP 배출값 원자료들은 배출부문별 배출량 세분화(sector subdivision)와 보간(temporal interpolation), 공간 할당처리와 포맷 변환(The Inventory Data Analyzer, IDA 형식으로 변환) 과정을 거쳐 SMOKE-Asia 입력자료 형태로 만들었다. RCP에서 산정하지 않는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>에 대한 배출값들은 RCP의 입자상 물질(BC와 OC) 배출 값들에 INTEX-B

Table 1. Characteristics of RCPs and used integrated assessment models (IAMs) for the development of the socioeconomic and greenhouse gas emissions scenarios

Type	Description	Used model	Reference
RCP8.5	Rising radiative forcing pathway leading to 8.5 W/m <sup>2</sup> (~1,370 ppm CO <sub>2</sub> -eq <sup>a</sup> ) by 2100	MESSAGE	Riahi <i>et al.</i> , 2007
RCP6.0	Stabilization without overshoot pathway to 6 W/m <sup>2</sup> (~850 ppm CO <sub>2</sub> -eq) at stabilization after 2100	AIM	Fujino <i>et al.</i> 2006; Hijioka <i>et al.</i> , 2008
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	GCAM	Clarke <i>et al.</i> , 2007; Smith and Wigley 2006; Wise <i>et al.</i> , 2009
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)	IMAGE	van Vurren <i>et al.</i> , 2006; van Vurren <i>et al.</i> , 2007

a 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 (forcing/5.325). Source: van Vuuren *et al.* (2011)

(Zhang *et al.*, 2009)에 따른 배출원과 지역 단위 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, BC, OC 배출 값들 간의 비율정보를 적용해 산정했다. 이후 SMOKE-Asia를 이용하여 배출량의 공간할당, 시간할당, 화학 종분화 작업을 순차적으로 수행하고, 대기화학모델 입력자료 형식으로 변환하였다.

이상의 처리작업으로 동북아 및 한반도 지역의 2000년대(2000s), 2020년대(2020s), 2050년대(2050s)에 대해서 생산한 RCP별 모델링 배출목록 값들을 대기화학모델의 입력 자료로 사용하였다.

### 2.3 실험 설계

중국의 미래 배출변화에 따른 동북아 오존농도 변화를 예측하기 위해 모델 도메인 내 중국지역 미래 배출시나리오만 변화시키는 방식으로 모델링 시나리오를 설계하였다(Table 2). 현재기간에 대한 모델링 시나리오는 'Base'로 명명하고, 어떤 저감 대책도 포함되지 않아 Base scenario라고도 불리는 RCP-8.5(Riahi *et al.*, 2011)의 2000년대 배출량을 중국지역에 적용했다. RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6의 미래 배출량들을 중국지역에 적용하는 시나리오들은 각각 'Case 1', 'Case 2', 'Case 3', 'Case 4'로 명명했다. 모든 시나리오에서 중국 이외의 국가들에는 RCP8.5 시나리오의 2000년대 배출량을 적용하고, 기후 및 경계조건으로는 RCP8.5 시나리오의 2020년대와 2050년대 자료를 활용했다.

### 2.4 보건영향 및 경제비용 평가

중국 대기오염 물질 미래배출에 따른 한반도 지역 오존농

Table 2. A simulation design to investigate the impacts of future Chinese emission changes on ozone air quality in Northeast Asia (NEA) and Korea based on RCP climate and emission fields. BC stands for boundary condition

Case	Emissions		Climate field and BC
	China	Other countries	
Base	RCP8.5 (2000s)		
Case 1	RCP8.5 (2020s and 2050s)		
Case 2	RCP6.0 (2020s and 2050s)	RCP8.5 (2000s)	RCP8.5 (2020s and 2050s)
Case 3	RCP4.5 (2020s and 2050s)		
Case 4	RCP2.6 (2020s and 2050s)		

도 변화 영향을 보건관점에서 평가하고자 BenMAP(Abt Associates Inc, 2012)를 사용하였다. BenMAP는 대기질 변화에 따른 보건 및 경제적 영향을 평가하는 도구로 US EPA에서 개발하여 현재 미국의 국가 대기질 관리 정책개발에 활용되고 있다. 한반도 미래 오존농도 변화에 따른 보건영향은 조기사망자수를 계산하여 평가했다. BenMAP이 채택하고 있는 보건영향 평가함 수식은 식 (1)과 같다:

$$H = \left(1 - \frac{1}{\exp^{(\beta \times \Delta C)}}\right) \times I \times P_{exp} \tag{1}$$

- H : 미래 조기 사망자 수
- β : 농도-반응 계수
- ΔC : 시나리오에 따른 오존 농도 변화
- I : 기준 년대 사망률
- P<sub>exp</sub> : 오존농도에 노출되는 인구수

오존 농도변화 값(ΔC)은 시나리오별 한반도 미래(2050년대) 오존농도에서 기준연대(2000년대) 오존농도를 차감하여 산출했다. 이때 오존 기준치(ozone metric)로는 일 최고 8시간 평균 오존 농도(DM8HO<sub>3</sub>)를 사용했다. 농도-반응계수(β)로는 NIER(2013b)의 것과 동일한 값을 적용했다(Table 3). 기준연대 사망률(I)은 국가통계포털 제공 요인별 사망통계 값들을 수집·활용했고, 기간은 2000~2005년으로 한정했다. 사망률 계산 시 사고에 의한 사망(death by accidental cause)은 빼고 질병에 의한 사망자 수만을 고려했다. 노출 인구입력 자료(P<sub>exp</sub>)는 통계청 제공 2000년 지역별·연령대별 인구수와 2050년 전국 추계 연령대별 인구수를 토대로 작성했다. 통계청의 2050년 추계 인구자료는 지역별 구분이 없었다. 그래서 근접한 2040년 지역별·연령대별 추계 인구자료에서 도출한 지역별 인구비율을 2050년 전국 인구자료에 적용하여 2050년 지역별 인구수를 산출했다. 산출한 2050년 인구자료에 따르면 2050년 총인구는 약 4,812만 명으로 2000년 대비 5%(약 210만 명) 증가에 그친 대신, 65세 이상 고령인구는 약 434% 증가해 약 1,790만 명에 이를 것으로 추산되었다(Fig. 2).

Table 3. Used concentration-response factor (β) for the health impact assessment (NIER, 2013b)

Pollutant	Endpoint	β	Age
Ozone	All-cause mortality	6.350×10 <sup>-4</sup>	All
		1.065×10 <sup>-3</sup>	Above 65

BenMAP으로 산정한 보건영향을 경제적 비용으로 환산하는 작업에서는 통계적 인간생명 가치(Value of a Statistical Life; VSL)를 적용했다. 국내에서 그간 대기환경변화에 따른 보건영향에 VSL을 적용하기 위해 각종 경제지표를 활용하여 보정하는 연구들이 진행되었다(NIER, 2013b; NIER, 2012). 본 연구에서는 NIER(2012)의 VSL(환화 451,360,000원)을 적용해 미래 지표 오존농도 변화에 따라 한반도에서 발생할 수 있는 조기사망영향의 사회경제적 비용을 평가했다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 대기질 예측력 검증

Base 시나리오(2000s)를 적용하여 예측한 월평균 지표 오존 농도 값들을 우리나라의 임실과 제주 측정소 그리고 중국

의 태산 측정소에서 관측된 값들과 비교하였다(Fig 3). 본 비교는 대기화학모델이 기준연대의 오존 예측 정확도 수준에서 미래(2020s과 2050s) 오존농도도 예측할 수 있을 것이라는 가정을 전제로 한다. 측정값들의 월평균에 비해 전반적으로 모델이 과대모의하는 경향이 있었지만, 임실과 제주 측정소의 오존관측 값들과는 약 35% 이내 태산 측정소 오존관측 값들과는 약 1% 이내에서 일치하였다(Normalized Mean Bias=(A-B)×100/B 기준). 예측자료와 관측자료 간의 일치 정도를 제시하는 일치도 지수 (Index of Agreement; IOA)는 우리나라와 중국의 측정소에서 약 0.9와 0.8로 각각 계산되었다. 그리고 예측자료와 관측자료 간의 산점도를 검토한 결과, 그 상관계수(r)가 우리나라 측정소는 약 0.9, 중국 측정소는 약 0.8이었다.

또한, 인구 고밀도 지역의 오존예측 값들의 검증을 위해 5개 대도시(서울, 부산, 광주, 대전, 울산) 지역 19개 지점을 대

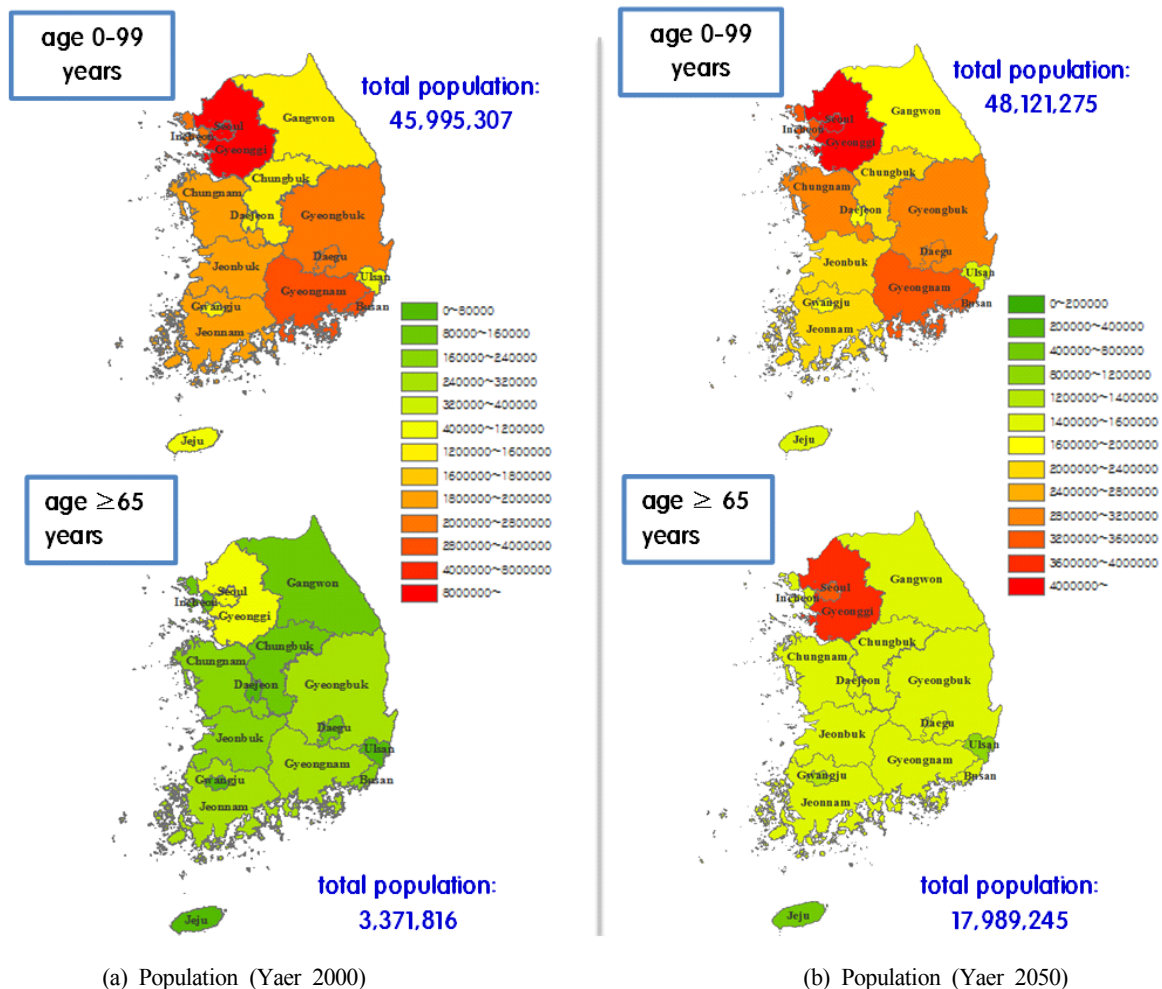


Fig. 2. Spatial distributions of the baseline (2000s) and the projected (2050s) population in South-Korea.

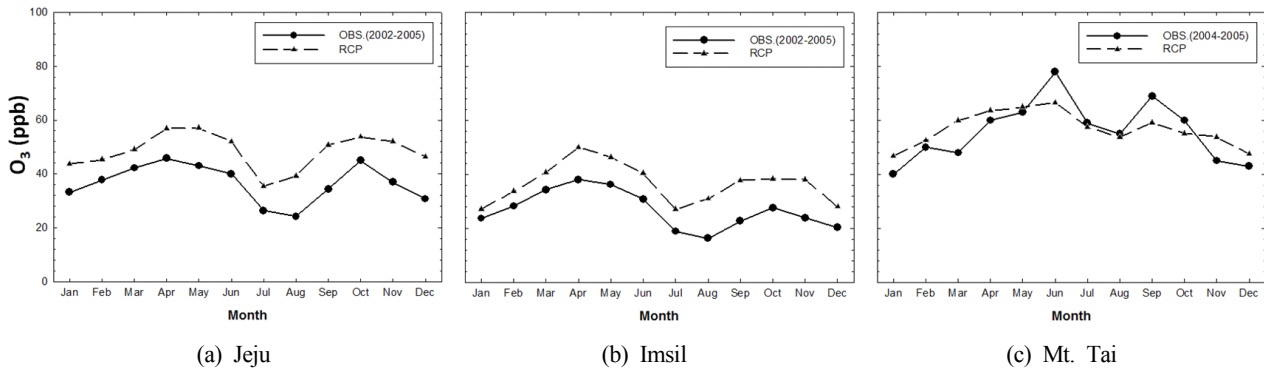


Fig. 3. Monthly averaged ozone at surface monitoring sites in Korea (Jeju and Imsil) and China (Mt. Tai) for 2000s. For the model performance evaluation purpose, monthly average values of the simulated  $O_3$  by Base scenario were compared with these of the observed  $O_3$  during 2002~2005.

상으로 과거 10년(1996~2005)동안의 관측자료에서 산출한 여름철 DM8H 오존농도 값들과 비교하였다(Fig. 4). 월 평균 농도에 대한 분석 결과와 마찬가지로 모델이 전반적으로 과대 모의하는 것으로 나타났다. 특히 DM8H 오존의 저 농도에 대한 모의가 관측에 비해 상당히 높아지는 것으로 분석되었다. 미래 대기질 오존전망 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 대기오염 물질 관측치와 모델결과의 편의 보정법(McKeen *et al.*, 2005)을 적용하였다.

### 3.2 동북아 2000년대 오존생성 환경

오존생성에 있어서  $NO_x$ 와 VOC는 중요 전구물질들이며,

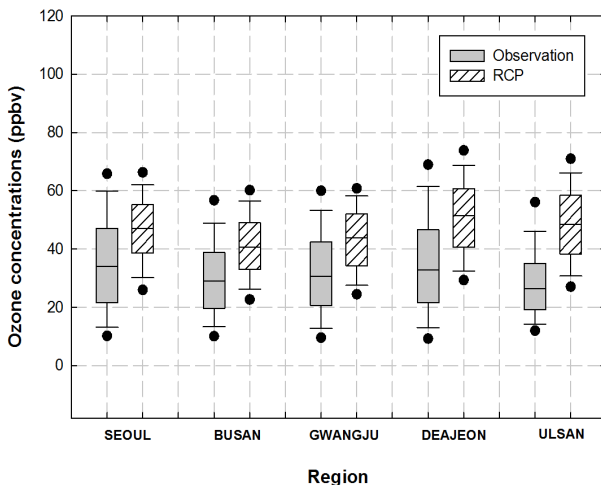


Fig. 4. Comparisons of percentiles between modeled and observed daily maximum 8-hour averaged surface ozone concentrations (ppb) at five sites in the Korean peninsula for 1996~2005.

이 두 물질 간의 균형(balance) 관계를 통해 오존생성 환경을 비교적 쉽게 설명할 수 있다(Kim *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2010; Seinfeld and Pandis, 1998). 본 장에서는 현재(2000년대)의 동북아, 특히 중국지역의 오존생성 환경을  $NO_x$ 와 VOC의 균형 관계를 바탕으로 살펴보았다.

Liu *et al.*(2010)에 따르면 지역 개발이 덜 진행된 중국 중부와 서부는 오존생성에 있어서 연중  $NO_x$ -limited 환경인 반면, 개발이 상당히 이루어져 산업시설 등의 인위적 배출원이 대거 분포한 중국 동부지역은 겨울은 VOC-limited, 여름은  $NO_x$ -limited, 봄·가을은 두 가지 특성이 혼재된 환경이다. 한편, 자동차와 같은  $NO_x$  배출원들이 밀집한 대도시들(베이징, 톈진, 상하이 등)은 연중 VOC-limited 환경이다. 중국 대도시들과 마찬가지로 우리나라, 일본, 대만의 대도시들도 높은  $NO_x$  배출량 때문에, 오존생성이 VOC-limited 환경에서 일어나는 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2010; Park and Kim, 2002). 이러한 고농도  $NO_x$ (VOC-limited) 지역은 대기화학적으로 지표오존 생성과정에 필요한 과산화 리디칼( $HO_x$  및  $RO_x$ )의 순환기작(예:  $NO + HO_2$ )이 순조롭지 않거나, 중단(예:  $NO_2 + OH$ )되어 광화학 오존 생성이 활발하지 않은 특성을 가진다. 그러나 이 지역에 VOC 배출이 증가할 경우, 중요 라디칼들의 생성(예:  $VOC + OH \rightarrow H_2O + HO_2$ )과  $NO_2$  생성(예:  $NO + HO_2 \rightarrow NO_2 + OH$ )이 활발해져 광화학 오존 생성이 촉진되는 환경으로 전환된다. 역으로 고농도 VOC 지역( $NO_x$ -limited)은  $NO_x$  배출이 증가할 때 앞의 경우처럼  $NO_2$  농도 증가와 함께 오존 생성이 촉진되게 된다(Kim *et al.*, 2014; Seinfeld and Pandis, 1998).

Fig. 5는 본 연구에서 2000년대를 대상으로 구한 VOC와  $NO_x$  비(VOC/ $NO_x$ )의 공간 분포지도로  $NO_x$ 와 VOC 균형 관점에서 중국, 한국, 일본에 대해 기존연구들이 보고한 오존생

성 특성을 유사하게 재현하고 있다(대도시들은 VOC-limited, 중국 중서부는 NOx-limited, 동부는 두 조건의 혼재). 이러한 오존 생성조건에서 중국 동부지역 오존생성은 NOx나 VOC 배출 증가 또는 NOx와 VOC 배출의 동시 증가가 있을 경우 더욱 활발해지며, 중서부지역 오존생성은 NOx 배출증가가 있을 경우 탄력을 받는다. 역으로 중서부지역의 VOC 배출감소와 대도시지역들의 NOx 배출감소는 그 지역들 오존농도를 더욱 증가시킬 수 있다. Liu *et al.*(2010)의 NOx와 VOC 배출에 대한 오존민감도 실험결과는 이 추정을 뒷받침한다.

3.3 시나리오별 중국의 미래 대기오염 배출

Table 4는 연구도메인 내 중국지역의 기준연대와 미래연대 NOx와 VOC 총 배출량을 요약하여 보여준다. Fig. 6은 그 값들의 기준연대 대비 미래연대 변화율을 공간적으로 보여준다.

중국지역 미래 배출총량 변화를 살펴보면(Table 4), 2020년대에는 모든 시나리오에서 NOx와 VOC 배출이 증가하는 가운데 Case 1(RCP8.6)에서 NOx 배출이 약 154%, VOC 배출이 약 48%로 가장 크게 증가하고, Case 3(RCP4.5)에서 NOx 배출 약 11.5%, Case 2(RCP6.0)에서 VOC 배출 약 17.7%로 가장 작게 증가한다. 그러나 2050년대 NOx와 VOC 배출은 다른 양상을 보인다. NOx 배출의 경우, Case 1(RCP8.6)에서는 변동이 없고, Case 2(RCP6.0)에서는 128%로 가장 크게 증가한다. 그리고 Case 3(RCP4.5)와 Case 4(RCP2.6)에서는 NOx

Table 4. Summary of the recent and future Chinese emissions in each modeling scenario for important O<sub>3</sub> precursors (i.e., NOx and VOC)

Scenario	NOx (Tg/yr)			VOC (Tg/yr)		
	2000s	2020s	2050s	2000s	2020s	2050s
Base	7.4			15.8		
Case 1		18.8	7.4		23.3	18.8
Case 2		11.6	16.9		17.7	26.5
Case 3		11.5	3.9		20.7	9.6
Case 4		12.1	5.2		18.9	8.0

배출이 각각 47%와 30% 감소한다. VOC 배출은 Case 1(RCP 8.6)과 Case 2(RCP6.0)에서 19%와 68% 각각 증가하고, Case 3(RCP4.5)과 Case 4(RCP2.6)에서는 각각 39%와 49% 감소한다. 기술한 시나리오별 NOx와 VOC의 배출변화는 기후변화 대응 정책이 엄격해질수록(=복사강제력이 낮아질수록) 대기오염 물질 배출 또한 감소된다는 RCP의 가정(van Vuuren *et al.*, 2011)을 완전히 따르지는 않는다. 그 가정에 따르면 Case 1에서 Case 4의 순서로 NOx와 VOC 배출 증가폭이 커져야 하는데 그렇지 않았다. RCP 시나리오에서 고려했던 정책들에 대한 구체적인 자료 확보가 어려워 정확한 원인은 알 수 없지만, RCP 시나리오별 작성기관의 차이와 시나리오 작성단계에서 기후변화 대응과 대기오염 물질 관리 분야 간 상호 연계성이 낮은 정책들이 적용되었을 가능성이 큰 것으로 판단된다.

시나리오별 중국지역 미래 배출변화를 공간적으로 살펴본다(Fig. 6). 모든 시나리오의 NOx와 VOC 배출이 2000년대에 비해 2020년대에 증가하는 양상을 보인다(Case 2의 VOC 배출 예외: 증가와 감소 혼재). 반면, 2050년대에는 그러한 일관된 증가가 없었다. 미래 배출의 증가라는 관점에서 볼 때, Case 1과 Case 2 시나리오 적용에 따른 NOx와 VOC 배출의 공간분포 변화가 가장 뚜렷하다. Case1의 NOx 배출은 2020년대에 연중 NOx-limited 환경인 중부 지역(허난성, 후베이성 등)에서 약 100% 이상, 동북부 지역(허베이성, 랴오닝성, 지린성, 헤이룽장성)에서 약 50% 이상 증가한다. 오존생성에서 VOC-limited와 NOx-limited 환경이 혼재하는 동부 연안지역들(산둥성, 장수성, 안휘성 등)과 VOC-limited 환경을 가지는 대도시들(북경, 톈진, 상하이 등)도 약 100% 이상 NOx 배출이 증가한다. VOC 배출은 중국 전역에서 약 10~100% 범위에서 증가한다. 이후 2050년대 NOx와 VOC 배출은 절반 이하로 둔화된 증가세를 보이거나, 중국 동부 연안지역들에서는

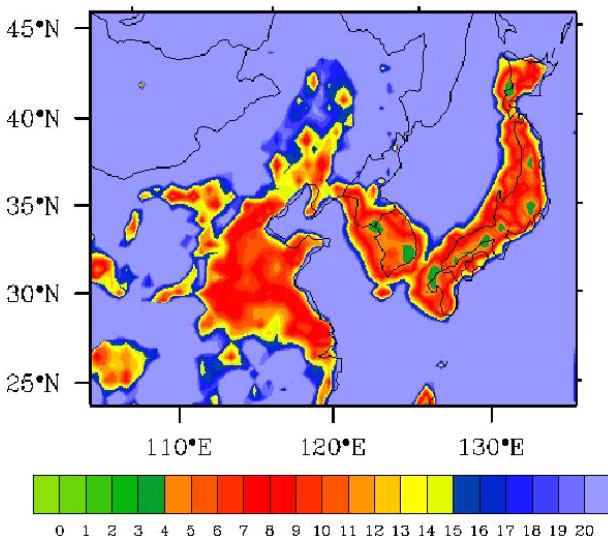


Fig. 5. Spatial distribution of the simulated VOC to NOx ratio based on the Base scenario (i.e., RCP8.5 for 2000s) in NEA.

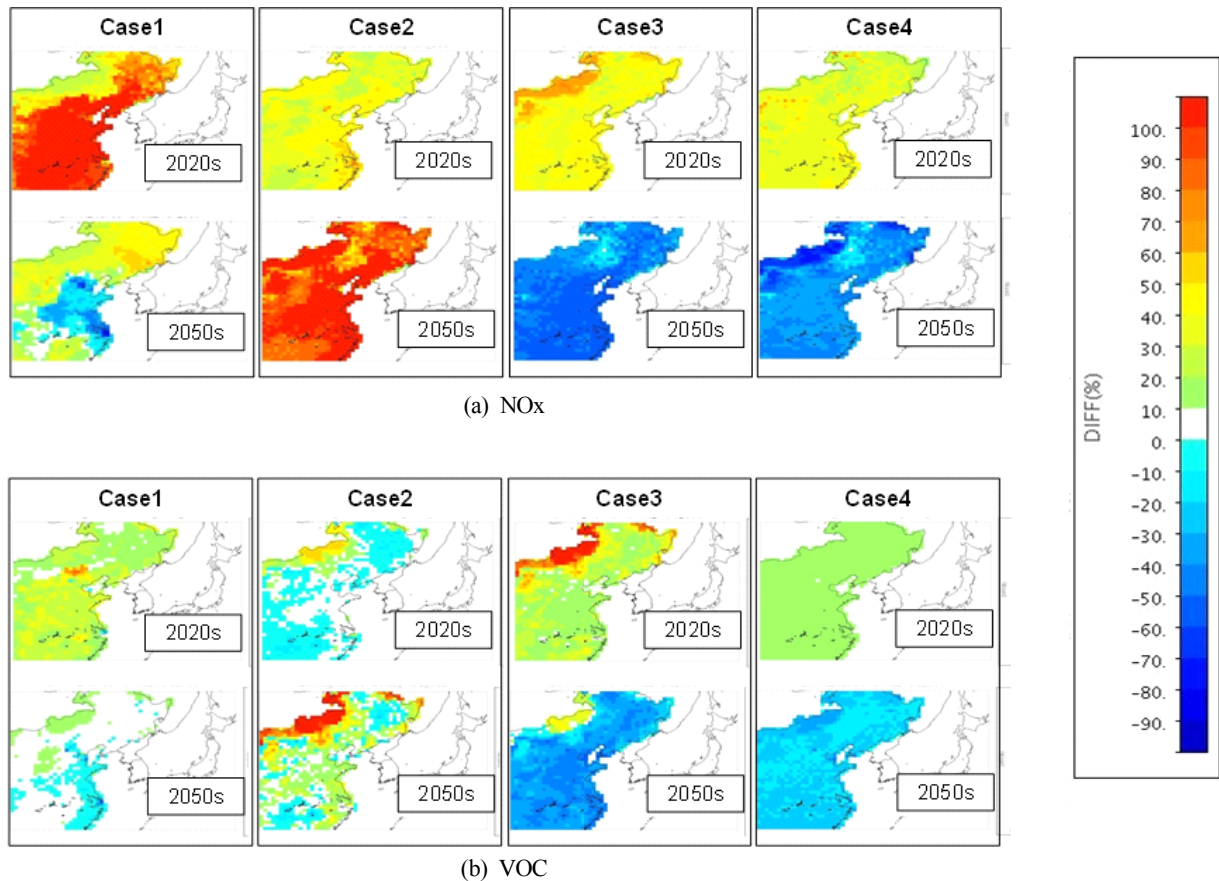


Fig. 6. Percent change of future (2020s and 2050s) emissions in each modeling scenario from the baseline (2000s) emissions in China for important O<sub>3</sub> precursors (i.e., NO<sub>x</sub> and VOC).

오히려 감소하는 양상이다. 반면, Case 2의 NO<sub>x</sub> 배출은 2020년대 중국 전역에서 약 50% 증가한 뒤에 2050년대에는 약 100% 이상 가파르게 증가한다. Case 2의 VOC 배출은 내몽골 지역에서만 NO<sub>x</sub>와 비슷한 증가 양상을 보인다. 내몽골 이외의 지역들에서 VOC 배출은 2020년대에 변화가 거의 없거나, 10% 이하 수준에서 미미하게 감소하다가 2050년대에는 10% 이하 수준에서 감소하거나 약 10~40% 증가한다. 미래 배출의 감소라는 관점에서는 Case 3과 Case 4의 2050년대 NO<sub>x</sub> 배출의 공간분포 변화가 두드러진다. 특히, Case 3의 경우, VOC-limited 환경을 가지는 대도시들(북경, 톈진, 상하이 등)과, VOC-limited와 NO<sub>x</sub>-limited 환경이 혼재하는 동부 연안지역들에서 NO<sub>x</sub> 배출량이 2000년대 대비 약 60~70% 가량 감소하고, VOC 배출 또한 약 30~60% 감소하는 양상이다. 나머지 지역들은 약 60% 이하 수준에서 NO<sub>x</sub> 배출이 감소하고, 약 30% 이하 수준에서 VOC 배출이 감소(내몽골 지역 제외: 10~50% VOC 배출 증가)하는 양상을 보인다.

### 3.4 시나리오별 미래 오존농도 변화

Fig. 7은 Base 시나리오 오존예측 값 대비 각 시나리오별 오존 예측 값의 증가와 감소를 공간적으로 보여 주며, 이를 통해 중국의 미래 배출변화에 따른 동북아 지역 오존농도 변화를 직관적으로 알 수 있다. Table 5에는 그 농도 값들을 요약 정리하였다.

Fig. 6과 연계하여 볼 때 2020년대는 각 사례별로 VOC 농도의 증감이 있음에도 불구하고, 모든 시나리오의 NO<sub>x</sub> 배출 증가 전망으로 오존농도 또한 모든 시나리오에서 증가할 것으로 보인다. 2020년대 사례들 중에서 Case 1이 동북아 평균 오존농도 3.4 ppb 증가로 가장 큰 폭의 오존농도 증가를 전망했다(나머지 시나리오들은 약 1.6 ppb의 오존농도 증가)(Fig. 7). Case 1의 2020년대에는 중국 동부와 중부지역(현재 VOC-limited와 NO<sub>x</sub>-limited 조건 혼재 지역)에 걸쳐 NO<sub>x</sub> 배출의 가파른 증가(100% 이상)와 VOC 배출의 고른 증가(20~70%)가 전망되었다. 이에 따라 대기 중 광화학 오존 생성과정에



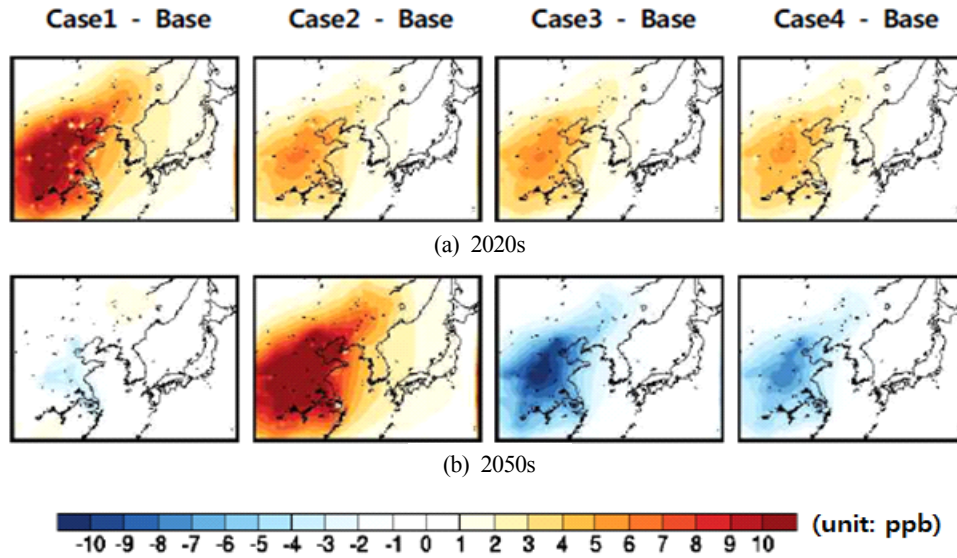


Fig. 7. Spatial distribution of the predicted change in daily maximum 8-h O<sub>3</sub> (DM8HO<sub>3</sub>) concentrations over the NEA region due to the impact of the projected change in Chinese future emissions (period: April-August in 2020s and 2050s).

Table 5. Averaged daily maximum 8 hour O<sub>3</sub> concentrations (from April to August) in NEA and South-Korea base on different model scenarios: future versus present

	NEA		South-Korea	
	Average (ppb)	Difference from Base (ppb)	Average (ppb)	Difference from Base (ppb)
2020s				
Base	49.15	0.00	49.47	0.00
Case 1	52.56	3.41	52.27	2.80
Case 2	50.82	1.67	50.82	1.35
Case 3	50.78	1.63	50.70	1.23
Case 4	50.68	1.53	50.69	1.22
2050s				
Base	46.42	0.00	47.30	0.00
Case 1	46.37	-0.05	47.25	-0.05
Case 2	50.52	4.10	50.40	3.10
Case 3	43.89	-2.53	45.74	-1.56
Case 4	44.64	-1.78	46.22	-1.08

중대한 라디칼 물질들과 NO<sub>2</sub> 생성기작들(예: VOC + OH와 NO + HO<sub>2</sub>)이 더욱 활발해져 고농도 오존이 모사된 것으로 해석된다.

2050년대에는 Case 2에서만 동북아 평균 오존농도 4.1 ppb 로 큰 폭의 농도 증가를 전망했고, 나머지 시나리오들은 동북아 평균 0.1~2.5 ppb 가량의 오존농도 감소를 전망했다(Fig. 7). Case 2의 2050년대에는 현재 NO<sub>x</sub>-limited 환경을 가지는 동북부지역과 중부 지역들에서 NO<sub>x</sub> 배출이 100% 이상 증가할 뿐만 아니라, 나머지 중국지역에서도 40~80% 범위에서 크게 증가하게 된다(Fig. 5 및 Fig. 6). 반면, 2050년대 VOC의 경우, 중부와 동북부 등 NO<sub>x</sub>-limited 지역(역으로 VOC 풍부 지역)에서 감소하게 된다. 이에 따라 다른 시나리오에 비해서 Case 2의 2050년대는 더욱 넓은 지역에 걸쳐 대기 중 광화학 오존 생성에 필수인 NO<sub>2</sub> 생성기작(예: NO + HO<sub>2</sub>)이 촉진되어 고농도 오존이 모사된 것으로 보인다. 한편, 2050년대 가장 큰 폭의 오존농도 감소는 Case 3에서 전망되었다(Fig. 7). 이는 VOC-limited 환경을 가지는 대도시들과 VOC-limited와 NO<sub>x</sub>-limited 환경이 혼재하는 동부 연안지역에서 NO<sub>x</sub>와 VOC 배출이 동시에 대폭 감소하게 되면서 발생될 것으로 해석된다.

한반도 오존농도의 증감은 각 시나리오별로 중국지역의 그것과 유사한 양상이며(Fig. 7, Fig. 8 및 Table 5), 중국(특히 동부지역)지역의 오존은 미래 한반도 지역의 대기질 오존에 지속적으로 큰 영향을 미치게 될 것으로 보인다. Case 1의 2020년대와 Case 2의 2050년대를 볼 때 중국지역에서 증가한 오존 농도로 한반도 전체에서 2020년대에는 약 2.8 ppb, 2050년대에는 약 3.1 ppb의 평균 오존 농도 증가가 예상된다. 마찬가지로 영향으로 한반도 서해연안 및 중부 내륙지역 대기 중 오

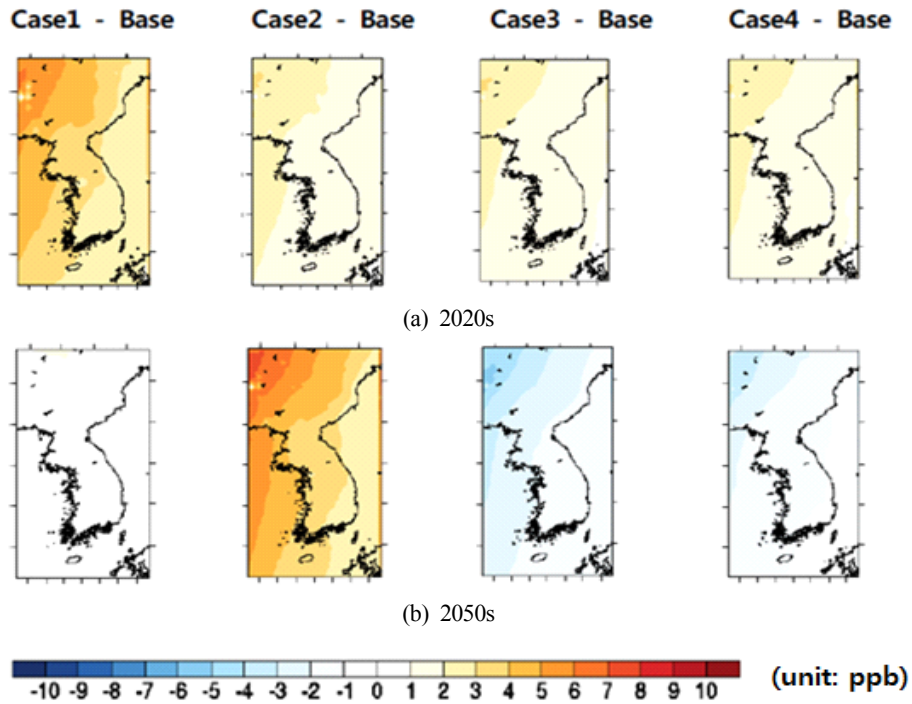


Fig. 8. Spatial distribution of the predicted change in daily maximum 8-h O<sub>3</sub> (DM8HO<sub>3</sub>) concentrations over the Korean Peninsula due to the impact of the projected change in Chinese future emissions (period: April-August in 2020s and 2050s).

존농도는 평균 3~5 ppb, 영·호남과 남해 및 동해 지역 오존농도는 평균 2~3 ppb 증가할 것으로 보인다(Fig. 8). 반면, Case 3의 2050년대 감소하는 중국의 오존농도 영향으로 한반도의 평균 오존 농도가 1.56 ppb 가량 낮아질 수 있을 것으로 보인다(Table 5).

### 3.5 오존농도 변화에 따른 보건영향과 사회경제학적 비용 평가

BenMAP을 활용하여 중국 미래 배출변화에 따른 오존농도 변화로 발생할 수 있는 조기 사망자 수를 2050년대 한반도 지역에 대해서 추정하였다(Fig. 9(a)). 추정된 조기사망자의 공간분포는 서울과 경기도의 수도권 조기사망자 비중이 타 지역에 비해 월등히 높고, 제주도, 울산의 초과사망자의 비중이 타 지역에 비해 낮은 등 2050년 추정 인구분포(Fig. 2)와 유사한 경향을 보였다.

조기사망자 추정수를 시나리오별로 살펴볼 때, 중국지역에서 오존 전구물질 배출 증가폭이 가장 큰 Case 2의 2050년대에 우리나라에서는 약 81명의 조기사망자가 발생할 수 있는 것으로 추정되었다. 반면, 오존 전구물질 배출 감소폭이 가장

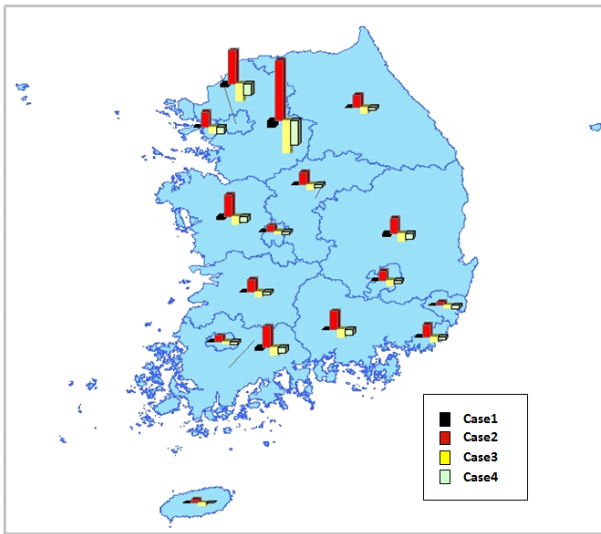
컸던 Case 3의 경우에 가장 큰 오존농도 감소세를 보여 조기 사망자가 43명 감소할 것으로 추정되었다.

2050년대 한반도 오존농도 증가로 인한 조기사망자 수에 VSL을 적용하여 사회경제적 비용을 산정하였다(Fig. 9(b)). 2050년대에 오존농도가 높아지는 Case 2의 경우, 조기사망 발생에 따른 경제적 손실이 연간 약 370억 원으로 추정되었다. 이중 65세 이상 고령인구의 조기사망에 따른 비용이 63%를 차지했다. 반면, 나머지 경우들(Case 1, Case 3, Case 4)은 오존농도의 감소로 인해 각각 약 30억 원(Case 1), 140억 원(Case 4), 190억 원(Case 3)의 편익을 볼 수 있는 것으로 나타났다.

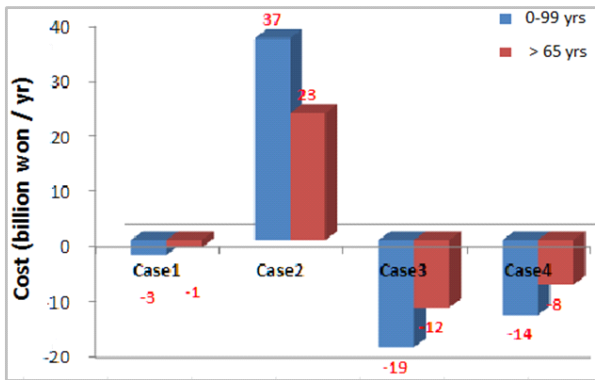
## 4. 결 론

본 연구에서는 RCP 시나리오의 중국 미래 배출량 변화로 인한 동북아 지역 미래 오존 대기질 변화를 전망하고, 그 변화의 영향을 보건 및 경제피해 관점에서 살펴보고자 하였다. 미래 오존 대기질은 2020년대와 2050년대를 대상으로 전망했고, 보건영향과 경제비용은 2050년대에 대해서만 추정하였다.

시나리오별 동북아 미래 오존 농도변화는 오존생성 전구물질인 NO<sub>x</sub>와 VOC의 중국지역 배출변화로 설명할 수 있었다.



(a) Premature death



(b) Economic costs

Fig. 9. Estimated ozone premature death and related socio-economic costs in South-Korea due to the impact of the future 2050s' emission changes in China.

특히 NOx 배출의 증감이 중국지역 미래 오존생성 변화에 주로 영향을 줄 것으로 파악되었다. 2020년대에는 RCP8.5하에서 가장 큰 폭의 오존농도 증가(평균 3.4 ppb)가 전망되었고, 나머지 시나리오들에서는 소폭의 증가(평균 1.6 ppb)가 전망되었다. 2050년대에는 RCP6.0에서만 오존농도가 대폭 증가(평균 약 4.1 ppb)하고, 나머지 시나리오에서는 감소(평균 0.1~2.5 ppb)할 것으로 전망되었다. RCP4.5의 2050년대에서 가장 큰 폭으로 오존농도가 감소할 것으로 전망되었다.

RCP별 중국지역 미래 배출변화로 인한 동북아 오존 대기질의 변화는 한반도에 동일한 양상으로 파악되어 영향을 미칠 것으로 전망되었다. RCP8.5와 RCP6.0에 따르면 한반도 일

최고 8시간 평균 오존 농도가 2020년대에는 약 2.8 ppb, 2050년대에는 약 3.1 ppb 증가하게 된다. 반면, RCP4.5에 따르면 2050년대 중국의 오존 대기질 개선의 영향으로 한반도 평균 오존 농도가 약 1.56 ppb 감소되게 된다. RCP6.0 시나리오 하의 2050년대에서는 더욱 악화될 중국의 오존 대기질 영향으로 한반도지역 오존농도는 증가하여 전국적으로 81명의 조기 사망자가 발생되며, 그 경제적 손실은 연간 약 370억 원에 이를 것으로 추정되었다. 반면, RCP 4.5하의 2050년대 중국지역 대기질 오존 개선은 한반도지역 오존농도 감소에 기여해 전국적으로 약 43명의 조기사망자 감소와 더불어 연간 약 190억 원의 비용 절감효과를 줄 수 있을 것으로 추정되었다. 즉, 중국의 미래 사회경제구조와 정책흐름이 RCP4.5의 전망을 수용할 경우, 자국뿐만 아니라, 우리나라를 위시한 주변 국가들의 오존 대기질 저하를 막고, 보건과 경제 손실을 줄이는데 기여하게 될 것으로 사료된다.

본 연구결과는 RCP 기후변화 시나리오의 작성기관이 상이함에 따른 배출자료의 불확실성을 포함하고 있다. 특히 RCP는 지구규모에서 기후 및 환경을 평가하기 위한 시나리오이기 때문에 지역규모의 오염물질 배출 특성을 반영하는데 한계가 있다. 향후에는 시나리오 작성단계의 배출자료 신뢰성을 확보하기 위한 노력과 기후효과(기상장 변화) 등을 영향변수로 추가하여 살펴보는 연구들이 활발히 진행되어야 할 것이다. 이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 RCP 시나리오 하에서 변화하는 중국지역 미래 대기오염물질 배출이 동북아 대기질 오존과 한반도 지역의 보건 및 경제 분야에 미칠 수 있는 영향의 상한과 하한을 제시했다는 데 중요한 의의를 가진다. 이러한 결과들은 우리나라를 비롯한 동북아 국가들이 기후변화로 인해 초래될 수 있는 대기오염과 보건피해를 최소화하고, 상호공동 발전할 수 있는 정책 개발과 실현 방향을 설정하는데 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 사 사

본 논문연구는 2016년도 국립환경과학원 박사후연수과정 지원사업에 의해 이루어졌습니다.

## REFERENCES

Abt Associates Inc. 2012. BenMAP. User's manual. Prepared for office of air quality planning and standards. US EPA, Research Triangle Park, North Carolina.  
Carmichael GR, Calori G, Hayami H, Uno I, Cho SY, En-

- gardt M, Kim SB, Ichikawa Y, Ikeda Y, Woo J-H, Ueda H, Amann M. 2002. The MICS-Asia study: Model inter-comparison of long-range transport and sulfur deposition in East Asia. *Atmospheric Environment* 36:175-199.
- Choi JY, Song CG, Lee JB, Hong SC, Bang CH. 2011. Development of a dynamic downscaling method using a General Circulation Model (CCSM3) of the Regional Climate Model (MM5). *Climate Change Research* 2(2): 79-91 (In Korean with English abstract).
- Clarke L, Edmonds J, Jacoby H, Pitcher H, Reilly J, Richels R. 2007. Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. Sub-report 2.1: A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, DC.
- Fujino J, Nair R, Kainuma M, Masui T, Matsuoka Y. 2006. Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *The Energy Journal* 3:343-353.
- Grell GA, Dudhia J, Stauffer DR. 1995. A description of the fifth-generation penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR technical note. NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, p 122.
- Hijioka Y, Matsuoka Y, Nishimoto H, Masui T, Kainuma M. 2008. Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environment Engineering* 13:97-108.
- Hong SY, Pan HL. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Monthly Weather Review* 124:2322-2339.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: IPCC fifth assessment synthesis report. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jacob DJ, Winner DA. 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment* 43:51-63.
- Kajino M, Sato K, Inomata Y, Ueda H. 2013. Source-receptor relationships of nitrate in Northeast Asia and influence of sea salt on the long-range transport of nitrate. *Atmospheric Environment* 79:67-78.
- Kim HK, Woo JH, Park RS, Song CH, Kim JH, Ban SJ, Park JH. 2014. Impacts of different plant functional types on ambient ozone predictions in the Seoul Metropolitan Areas (SMAs), Korea. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14: 7461-7484.
- Kim MJ, Park RJ, Ho CH, Woo JH, Choi KC, Song CK, Lee JB. 2015. Future ozone and oxidants change under the RCP scenarios. *Atmospheric Environment* 101:103-115.
- Knowlton K, Rosenthal JE, Hogrefe C, Lynn B, Gaffin S, Goldberg R, Rosenzweig C, Civerolo K, Ku JY, Kinney PL. 2004. Assessing ozone-related health impacts under a changing climate. *Environmental Health Perspectives* 112(15):1557-1563.
- Lee JB, Cha JS, Hong SC, Choi JY, Myoung JS, Park RJ, Woo JH, Ho C, Han JS, Song C-K. 2015. Projections of summertime ozone concentration over East Asia under multiple IPCC SRES emission scenarios. *Atmospheric Environment* 106:335-346.
- Li J, Yang W, Wang Z, Chen H, Hu B, Li J, Sun Y, Huang Y. 2014. A modeling study of source-receptor relationships in atmospheric particulate matter over Northeast Asia. *Atmospheric Environment* 91:40-51.
- Liu XH, Zhang Y, Xing J, Zhang Q, Wang K, Streets DG, Jang C, Wang WX, Hao JM. 2010. Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part II. Process analysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions. *Atmospheric Environment* 44(30):3719-3727.
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research* 102:16663-16682.
- NIER. 2012. A study for climate change vulnerability on atmospheric environment: Environmental benefits analysis of climate change on local-level air pollutants changes in Korea. (In Korean with English abstract).
- NIER. 2013a. A study on the climate and air quality changes of the Korean peninsula in the future(III)-Focus on the stabilization scenarios. (In Korean with English abstract).
- NIER. 2013b. A study for climate change vulnerability on atmospheric environment: Environmental benefits analysis of climate change on local-level air pollutants changes in Korea. (In Korean with English abstract).
- Park JY, Kim YP. 2002. On the optimum ozone control strategy in Seoul: case studies using OZIPR. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 18(5):427-

- 433 (In Korean with English abstract).
- Reisner J, Brintjes RT, Rasmussen RJ. 1993. Preliminary comparisons between MM5 NCAR/Penn State model generated icing forecasts and observations. The 5th International Conference on Aviation Weather Systems, Vienna, pp 65-69.
- Reisner J, Rasmussen R, Brintjes R. 1998. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 124:1071-1107.
- Riahi K, Grübler A, Nakicenovic N. 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74(7):887-935.
- Seinfeld JH, Pandis SN. 1998. *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, New York.
- Smith SJ, Wigley TML. 2006. Multi-gas forcing stabilization with Minicam. *The Energy Journal* 27:373-391.
- van Vuuren DP, Eickhout B, Lucas PL, den Elzen MGJ. 2006. Long-term multi-gas scenarios to stabilise radiative forcing-exploring costs and benefits within an integrated assessment framework. *The Energy Journal* 27:201-233.
- van Vuuren DP, den Elzen MJG, Lucas PL, Eickhout B, Strengers BJ, van Ruijven B, Wonink S, van Houdt, R. 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: An assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change* 81(2):119-159.
- van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque J-F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ, Rose, SK. 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change* 109(1):5-31.
- Wise M, Calvin K, Thomson A, Clarke L, Bond LB, Sands R, Smith SJ, Janetos A, Edmonds J. 2009. Implications of limiting CO<sub>2</sub> concentrations for land use and energy. *Science* 324(5931):1183-1186.
- Woo JH, Choi KC, Kim HK, Baek BH, Jang M, Eum JH, Song CH, Ma YI, Sunwoo Y, Chang LS, Yoo SH. 2012. Development of an anthropogenic emissions processing system for Asia using SMOKE. *Atmospheric Environment* 58:5-13.
- Zhang Q, Streets DG, Carmichael GR, He KB, Huo H, Kannari A, Klimont Z, Park IS, Reddy S, Fu JS, Chen D, Duan L, Lei Y, Wang LT, Yao ZL. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9(14):5131-5153.