

IPCC SRES A2와 B1 시나리오에 따른 한반도지역의 여름철 지표 오존의 수치모의

Simulations of Summertime Surface Ozone Over the Korean Peninsula Under IPCC SRES A2 and B1 Scenarios

홍성철 · 최진영 · 송창근 · 홍유덕 · 이석조 · 이재범*

국립환경과학원 기후변화연구과

(2012년 11월 20일 접수, 2013년 1월 17일 수정, 2013년 4월 2일 채택)

Sung-Chul Hong, Jin-Young Choi, Chang-Keun Song, You-Deog Hong,
Suk-Jo Lee and Jae-Bum Lee*

*Climate Change Research Division, Climate and Air Quality Research Department,
National Institute of Environmental Research*

(Received 20 November 2012, revised 17 January 2013, accepted 2 April 2013)

Abstract

The surface ozone concentrations changes were investigated in response to climate change over the Korean peninsula for summertime using the global-regional one way coupled Integrated Climate and Air quality Modeling System (ICAMS). The future simulations were conducted under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emissions Scenarios (SRES) A2 and B1 scenarios. The modeling system was applied for four 10-year simulations: 1996~2005 as a present-day case, 2016~2025, 2046~2055, and 2091~2100 as future cases. The results in this study showed that the mean surface ozone concentrations increased up to 0.5~3.3 ppb under the A2, but decreased by 0.1~10.9 ppb under the B1 for the future, respectively. However, its increases were lower than an increase of the average daily maximum 8-hour (DM8H) surface ozone concentrations which was projected to increase by 2.8~6.5 ppb under the A2. The DM8H surface ozone concentrations seem to be therefore far more affected by the climate and emissions changes than mean values. The probability of exceeding 60 ppb was projected to increase by 6~19% under the A2. In the case of B1, its changes were presented with an increase of 2.9% in the 2020s but no occurrence in the 2100s due to the effect of the reduced emissions. Future projection on surface ozone concentrations was generally shown to have almost the similar trend as the emissions of NO_x and NMVOC.

Key words : Climate change, Air quality, Ozone, ICAMS, SRES

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7306, E-mail : gercljb@korea.kr

1. 서 론

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 4차 보고서에 따르면 온실가스 배출 증가로 인해 21세기 말에는 세계 평균기온이 최대 6.4°C, 해수면이 59cm 상승할 것으로 전망하고 있으며, 이로 인해 보건, 수자원, 농업, 산림, 대기질 등 많은 지구환경분야에 부정적 영향을 미칠 것으로 전망하였다(IPCC, 2007). 특히 기후변화에 따른 대기질 변화는 호흡기 및 심혈관계 질환자 등과 같은 인체에 영향을 미치며(Bell *et al.*, 2007; West *et al.*, 2007), 농작물의 생산량과 경제(Mayeres and Van Regemorter, 2008; Fuhrer and Booker, 2003) 등 여러 분야에 그 피해를 주는 것으로 알려져 있다.

대기오염물질 중 오존은 전구물질의 시공간적인 배출 분포나 바람, 온도, 구름 및 강수와 같은 기상장에 의해서 크게 영향을 받기 때문에 기후변화에 상당히 민감한 것으로 잘 알려져 있다(Jacob and Winner, 2009). Wu *et al.* (2008)은 기후변화에 따른 미국 지역에서의 여름철 지표 오존을 전망한 결과, 2050년에는 전선 통과 횟수가 2000년 보다 감소하는 대기 정체로 인해 오존 농도가 2~5 ppb 증가할 것으로 전망하였다. 또한 미래 기후변화 시나리오에 의해 유럽의 중부와 남부지역에서는 기온상승과 여름철의 구름량의 감소로 인하여 오존농도가 증가할 것으로 전망되었다(Christensen *et al.*, 2007; Meleux *et al.*, 2007).

이렇듯 전 세계적으로 기후변화가 대기질에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구들은 주로 미래 여름철 오존 농도에 대한 전망을 통해 이루어져 왔다. 오존 전망을 위해 모델을 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 그 결과는 미래 기후변화 시나리오에 따라 지역적인 차이를 보이는 것으로 나타났다(Jacob and Winner, 2009; Denman *et al.*, 2007). Hogrefe *et al.* (2004)은 A2 시나리오에 따른 미래 기후변화로 인해 미국 동부지역의 2050년대 여름철 오존 농도가 4.2 ppb 정도 상승할 것으로 전망하였으며, Tao *et al.* (2007)은 2050년의 미국 여름철 지표 오존농도가 A1FI 시나리오에 의해 11~28% 증가하고 B1 시나리오에 의해서는 4~12% 감소하는 것으로 전망하였다. Lin *et al.* (2007)에 의하면 2000년대 대비 2100년대의 A1FI 시나리오에 의한 중국 동부지역의 여름철 지표 오존농도가 12 ppb까지 증가할 것으로 전망하였다.

반면, 한반도에 대한 미래 기후변화 시나리오에 따른 오존 농도를 전망하는 연구는 미흡한 실정이다. 특히 중국과 같이 급격한 경제성장을 보이는 동아시아 지역은 인위적인 배출량이 크게 증가하고 있어(Ohara *et al.*, 2007; Akimoto, 2003), 한반도 대기질에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 한반도 지역을 대상으로 Integrated Climate and Air quality Modeling System (ICAMS)을 이용하여 IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES) A2와 B1 시나리오를 적용하여 미래 여름철 오존 농

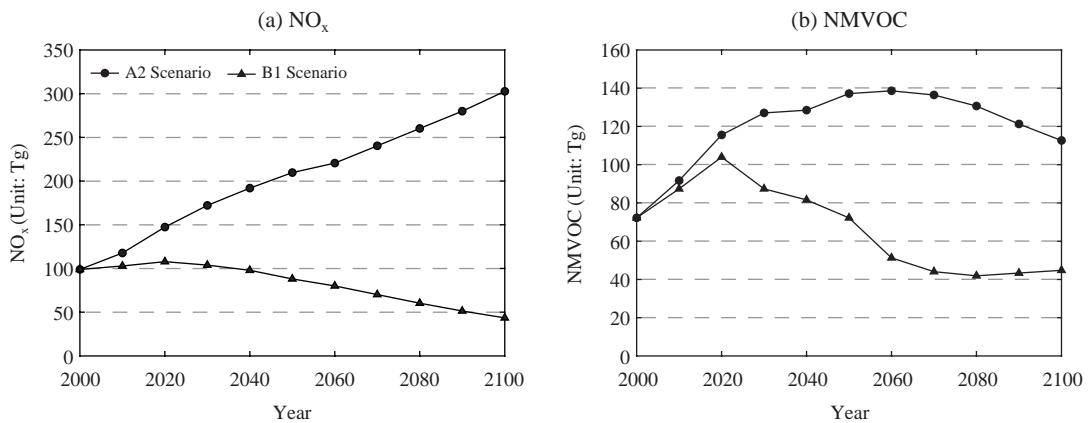


Fig. 1. Variations of annual total global emissions for NO_x (a) and NMVOC (b) under IPCC A2 and B1 scenarios during 2000~2100.

도 변화에 대한 전망을 통해, 기후변화에 따른 오존 농도 변화를 살펴보았다.

2. 모델 및 실험방법

2.1 기후변화 시나리오

본 연구에서 사용된 기후변화 시나리오는 인구, 기술, 경제성장 등의 다양한 특성이 고려된 IPCC SRES의 A2와 B1 시나리오이다(IPCC, 2000). A2 시나리오는 높은 인구증가에 비해 에너지 효율 개선이 느리며 지역적으로 편향된 경제성장을 반영하고 있어 2100년까지 CO₂ 배출량의 증가가 가장 클 것으로 전망하는 최악의 시나리오이다. 반면 B1 시나리오는 전 지구적으로 공평한 경제성장, 깨끗한 환경, 최상의 에너지 효율향상을 반영하는 가장 이상적인 시나리오이다. 그림 1은 기후변화 시나리오에 따른 전구의 NO_x와 NMVOC 배출량에 대하여 2000년부터 2100년까지의 변화 경향을 나타낸 것이다. 배출량 변화를 살펴보면, 현재 대비 2100년에 A2 시나리오는 NO_x와 NMVOC 각각 206%와 55%의 증가를 보였다. 반면, B1 시나리오는 각각 56%, 38% 감소하는 경향을 보였다.

2.2 모델개요

본 연구에서는 한반도 지역에 대한 기후변화에 따

른 대기환경 전망을 위하여 전구 및 지역규모 기후 모델(Global Climate Model, GCM/Regional Climate Model, RCM)과 전구 대기화학모델(Cheical Transport Model, CTM), 그리고 Community Multi-scale Air Quality(CMAQ) 모델로 구성되어 있는 ICAMS를 이용하였다. 모델링 시스템은 전구규모의 결과를 지역 규모 기후 및 대기화학모델에 반영하기 위해서 역학적 Downscaling 방법을 적용하였다. 기후모델들은 전구규모인 미국 National Center for Atmospheric Research(NCAR)에서 개발된 Community Climate System Model version 3(CCSM3)와 지역규모인 Mesoscale Model version 5(MM5)(Grell *et al.*, 1995)로 구성되며, CCSM3의 기온, 바람, 기압 등과 같은 기상자료를 내·외삽 과정을 통하여 MM5의 격자체계에 맞춰줌으로써 6시간 간격의 초기장과 경계자료인 입력자료를 제공할 수 있도록 one-way mode로 coupling 하였다(Choi *et al.*, 2012). 대기화학모델들은 전구규모인 Goddard Earth Observing System-Chemistry model(GEOS-Chem)(Bey *et al.*, 2001)과 지역규모인 CMAQ 모델(Byun and Schere, 2006; Byun and Ching, 1999)로 구성되며, CMAQ을 이용한 대기질 모의에 있어서 모델 영역의 경계지역에서 유입되는 오염 물질을 고려하고자 GEOS-Chem의 결과로부터 3시간 간격의 경계자료를 생산하여 제공되도록 구성되어 있다(Hong *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2008; In *et al.*, 2007).

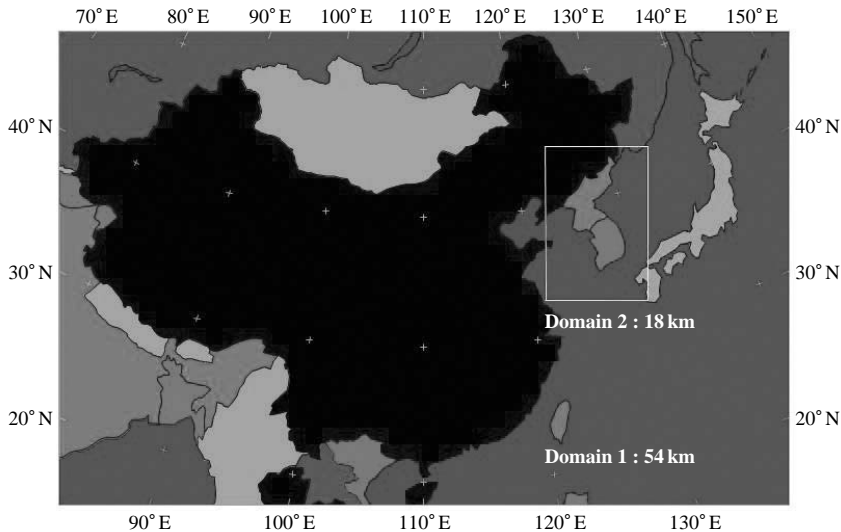


Fig. 2. Model domains for CMAQ and MM5 simulations used in this study.

그림 2는 본 연구에 사용된 지역규모 모델(MM5, CMAQ)의 도메인 영역을 나타낸 것이다. 첫 번째 도메인 영역(Domain 1)은 동아시아 지역에 대하여 105(동서)×65(남북)×23(연직)개 격자로 구성되어 있으며 수평격자의 크기는 54 km이다. 분석 도메인 영역(Domain 2)은 Nesting된 한반도 지역에 대해서 45(동서)×69(남북)×23(연직)개 격자이며, 수평격자의 크기는 18 km이다.

MM5의 경우, 수평으로는 Arakawa-B 격자체계를 사용하며, 연직으로는 지형을 따라가는 시그마 좌표계(σ -coordinate)를 사용하였다. 사용된 물리과정으로는 미세물리과정은 Reisner mixed-phase 방안, 적운 모수화 방법은 Kain-Fritsch(KF) 방안, 행성경계층 모수화 방법으로는 Medium-Range Forecast(MRF) 방안, 그리고 대기복사 과정으로 Rapid Radiative Transfer Model(RRTM)을 사용하였다.

CMAQ의 경우, 사용된 화학반응 메커니즘으로 기체상과 입자상 반응을 모두 고려하였다. 기체상 반응으로는 Carbon-Bond Chemical Mechanism Version IV(CB-4) 메커니즘을(Grey *et al.*, 1989), 입자상 반응으로는 AERO3 모듈을 적용하였다.

2.3 배출량 산정 및 처리

대기화학모델의 구동을 위해서는 대기 중 온실가스 뿐만 아니라 인위적인 대기오염 배출량에 대한 입력자료가 요구된다. 특히 IPCC에서 언급한 기후변화 시나리오는 전 지구에 초점을 맞춘 미래 배출시나리오이므로 지역규모 대기화학모델을 수행하기 위해서는 모델링 영역에 맞는 추가적인 배출량 산정이 필요하다. 본 연구에 사용된 배출량 자료는 Intercontinental Chemical Transport Experiment Phase B(INTEX-B)(Zhang *et al.*, 2007)와 Transport and Chemical Evolution over the Pacific(TRACE-P) inventory(Streets *et al.*, 2003)를 이용하였다. 그리고 미래에 대한 배출량자료는 Integrated Model to Assess the Global Environment version 2.2(IMAGE v2.2)(Olivier *et al.*, 2001) 모델결과의 연도변환 계수를 적용하고 Regional Emission inventory in ASia(REAS)(Ohara *et al.*, 2007) 배출목록의 연도별, 국가별, 물질별 배출량을 이용하였다. 또한 작성된 배출량 자료를 모델에 입력하기 위한 전처리 과정은 Sparse Matrix Operator Kernel for Emissions version 2.1(SMOKE v2.1)을 이

Table 1. Annual total anthropogenic emissions^a over the Korean peninsula under IPCC A2 and B1 scenarios for 2000, 2020, 2050, and 2100 (Tg yr⁻¹).

Species	2000 ^b	A2 scenario			B1 scenario		
		2020	2050	2100	2020	2050	2100
CO	0.7	1.0	1.2	1.2	0.9	0.2	0.1
NO _x	0.9	1.4	1.6	2.0	1.1	0.5	0.2
NMVOC	0.5	0.8	1.0	1.3	0.6	0.3	0.2
NH ₃	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
SO ₂	0.5	0.6	0.7	0.4	0.4	0.2	0.0
PM ₁₀	0.4	0.4	0.7	1.4	0.4	0.3	0.1
PM _{2.5}	0.3	0.3	0.5	1.0	0.2	0.2	0.1

^aBased on the IPCC[2000] A2, B1 emission scenarios.

^bINTEX-B and TRACE-P emission inventories.

용하였으며, 현재 및 미래에 대한 격자별, 시간별 배출량자료를 산출하였다.

표 1은 2000년 대비 미래 기후변화 시나리오에 따른 한반도의 인위적인 배출량 변화를 보인 것으로, 산출된 배출목록은 대기오염 물질별(CO, NO_x, NMVOC, NH₃, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5})로 구분하였다. A2 시나리오의 경우는 2000년부터 2100년까지 꾸준한 증가 경향을 보였으며, 특히 화석연료를 사용하는 도로교통 부문과 발전 부문의 배출량이 대부분을 차지하는 NO_x는 2000년 대비 2100년에 122%가 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 B1 시나리오에서 NO_x의 경우는 2020년까지 다소 증가하는 경향을 보인 후 지속적인 감소 경향을 보였으며, 특히 2000년 대비 2100년에 78%가 감소하는 것으로 나타났다.

2.4 수치실험

모델링 시스템에서 지역기후를 모의하는 MM5의 초기장과 경계조건은 현재부터 기후변화 시나리오(A2, B1)에 따른 미래 2100년까지 연속적인 실험을 수행한 CCSM3의 결과를 활용하였다. 지역규모 대기화학 모델인 CMAQ의 경우, 동아시아 도메인 영역의 화학적 측면 경계조건은 GEOS-Chem의 결과를 활용하여 처방하여 주었다. 또한, 결과에 대한 분석을 위하여 31일의 spin-up 기간과 2100년까지 연속으로 적분하는 대신에 각 해당연도를 대표하는 10년에 대하여 time slice run을 수행하였다.

표 2는 한반도 지표 오존농도를 전망하기 위하여 사용된 기후변화 시나리오(A2, B1)와 해당년도에 따라 구분한 7개의 수치실험을 나타낸 것이다. 각 수치

실험은 2000년대 기상과 배출량을 고려한 CTRL (1996~2005년) 실험, A2와 B1 시나리오에 대한 2020년대 (2016~2025년) 수치실험 (A2_2020s, B1_2020s) 과 2050년대 (2046~2055년) 수치실험 (A2_2050s, B1_2050s), 그리고 2100년대 (2091~2100년) 기상과 배출량에 따른 수치실험 (A2_2100s, B1_2100s)으로 구분하였다.

3. 결 과

3.1 모델 검증

CCSM/MM5의 모의결과에 대한 검증을 위해 기상청의 자동기상관측망(AWS) 76개 지점(남한지역)별

Table 2. Designated model inputs for the seven attribution cases. The "CTRL" indicates input data of the 2000s (1996~2005), while "2020s, 2050s, and 2100s" indicates input data of the 2020s (2016~2025), 2050s (2046~2055), and 2100s (2091~2100).

Simulation name	Scenarios	Year of meteorology	Year of anthropogenic emissions
CTRL		1996~2005	1996~2005
A2_2020s	A2	2016~2025	2016~2025
A2_2050s		2046~2055	2046~2055
A2_2100s		2091~2100	2091~2100
B1_2020s	B1	2016~2025	2016~2025
B1_2050s		2046~2055	2046~2055
B1_2100s		2091~2100	2091~2100

자료를 이용하여 통계 분석을 수행하였다(표 3). 과거 10년(1996~2005년)에 대한 분석결과 기온과 강수량의 절대값 뿐만 아니라 표준편차(SD), Normalized Mean Difference (NMD)에 대해 유의한 수준을 보였다. 특히 모델의 예측성을 평가한 Agreement index (AI)에서는 기온의 경우 0.9 이상의 매우 좋은 평가를 보였다. 하지만 강수의 경우에는 0.55로 기온에 비해 모델 예측력이 다소 낮은 것으로 평가 되었다.

CMAQ 모델의 한반도 모의에 대한 검증을 위하여 오존에 대하여 CTRL 실험결과와 지점별 관측자료를 비교 분석하였다. 관측자료는 2002년부터 2005년까지의 Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) 자료인 Imsil (35.36° N, 127.11° E), Jeju (33.18° N, 126.10° E), 그리고 Kanghwa (37.42° N, 126.17° E)에 대한 월 평균자료를 사용하였다. 그림 3은 사례기간 동안의 지점별 월평균 관측자료와 모델 결과를 비교한 그림이다. Imsil과 Jeju의 경우 모델결

Table 3. Statistical analysis of MM5 using CCMS3 on AWS 76 stations.

Analysis	Temperature (°C)		Precipitation (mm/month)	
	OBS	CCSM/MM5	OBS	CCSM/MM5
MEAN	12.7	12.1	121.2	110.6
SD	9.4	9.1	132.2	97.8
NMD		0.06		0.08
Correlation (r)		0.89		0.32
AI		0.93		0.55
RMSE		4.4		139.7

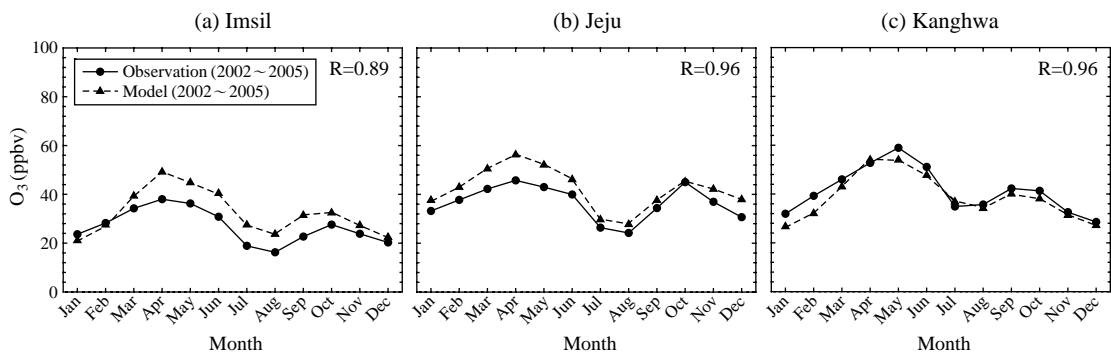


Fig. 3. Comparison between model and observations on monthly averaged O₃ concentrations at surface sites (Imsil (a), Jeju (b), and Kanghwa (c)) in the Korean peninsula for 2002~2005.

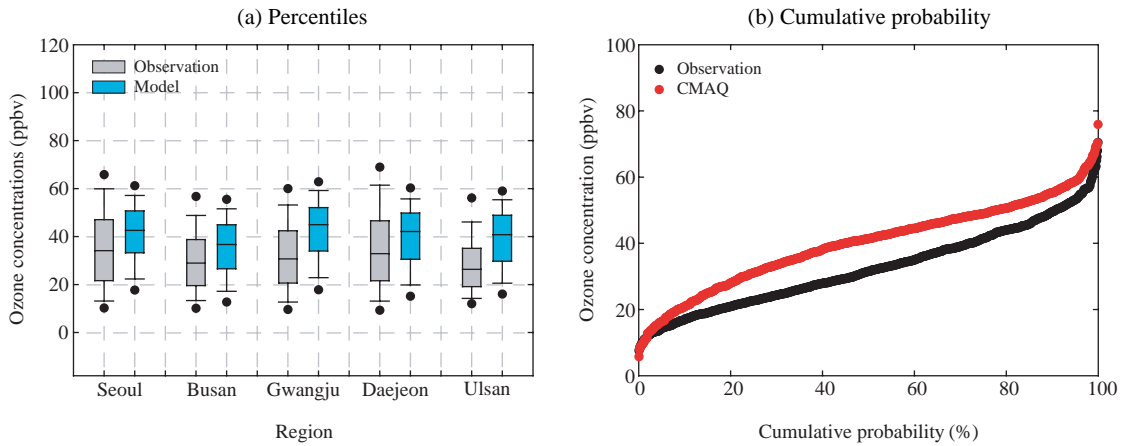


Fig. 4. Comparisons of (a) percentiles and (b) cumulative probability between modeled and observed daily maximum 8-hour averaged surface ozone concentrations (ppb) at five sites in the Korean peninsula for 1996~2005.

과가 과대 모의하는 것으로 분석되었으며, 특히 봄철에 약 5~11 ppb 정도로 모델이 관측보다 높게 모의하는 경향을 보였다. 한편, Kanghwa에서는 전체적으로 약 1~7 ppb 정도 과소 모의하는 것으로 나타났다. 하지만 모델예측과 관측자료에 대한 통계분석결과, 상관계수의 범위는 0.89 (Imsil)에서 0.96 (Jeju, Kanghwa)으로 높은 상관성을 보였으며, 관측의 월 변화경향을 모델이 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 국가대기오염정보관리시스템 (National Ambient air Monitoring Information System, 이하 NAMIS) 자료 중 5개 대도시(서울, 부산, 광주, 대전, 울산) 지역의 19개 지점별 자료에 대하여 과거 10년간(1996~2005) 여름철 DM8H 오존농도를 산출하여 검증을 수행하였다(그림 4). 그 결과, 월 평균 농도에 대한 분석결과와 마찬가지로 모델이 전반적으로 관측보다 7.5 ppb 과대 모의하는 것으로 나타났다. 특히 DM8H 평균 오존농도의 경우에는 12~27%로 모델이 과대 모의하는 것으로 분석되었다. 한편, 대기환경기준치인 8시간 평균 오존농도 60 ppb를 초과할 확률에 대해서는 모델이 2% 정도로 과대 모의하는 것으로 나타났다.

3.2 미래 기후 전망

표 4는 한반도 지역의 현재대비 미래에 대한 여름철 기후 자료 분석을 나타낸 것이다. 그 결과 2000년대 대비 2100년대까지 기온은 A2와 B1 시나리오 각

Table 4. Changes of mean surface air temperature and precipitation relative to reference experiment CTRL (2000s) under IPCC A2 and B1 scenarios over the Korean peninsula during summer season.

CASES	A2		B1	
	T (°C)	Pr (%)	T (°C)	Pr (%)
2020s	0.8	-13.6	0.8	-7.7
2050s	1.8	0.9	1.2	0.9
2100s	4.0	20.8	1.7	9.1

각 4.0°C, 1.7°C의 지속적인 증가를 보였다. 강수의 경우는 2020년대에는 두 시나리오 모두 13.6%, 7.7%의 감소를 보였으나, 2100년대에 20.8%, 9.1%로 크게 증가하는 경향을 보였다.

그림 5는 한반도 지역의 미래 기후변화 시나리오에 따른 여름철 일 최고 온도의 변화 분포를 나타낸 것이다. 표 4에 보인 바와 같이 기온의 경우 두 시나리오 모두 미래로 갈수록 한반도 전역에 걸쳐 뚜렷한 증가를 보이는 것으로 나타났다.

3.3 여름철 지표 오존 농도 전망

표 5와 그림 6은 한반도 지역에 대한 현재와 미래 기후변화 시나리오에 따른 여름철 평균 지표 오존 농도값과 그 분포를 나타낸 것이다. A2 시나리오의 경우, 현재 대비 미래의 오존농도가 0.5~3.3 ppb 증가하는 것으로 나타났으며, 2050년대에 가장 큰 증가를 보인 후 2100년대에는 강수의 큰 증가로 인해 다소

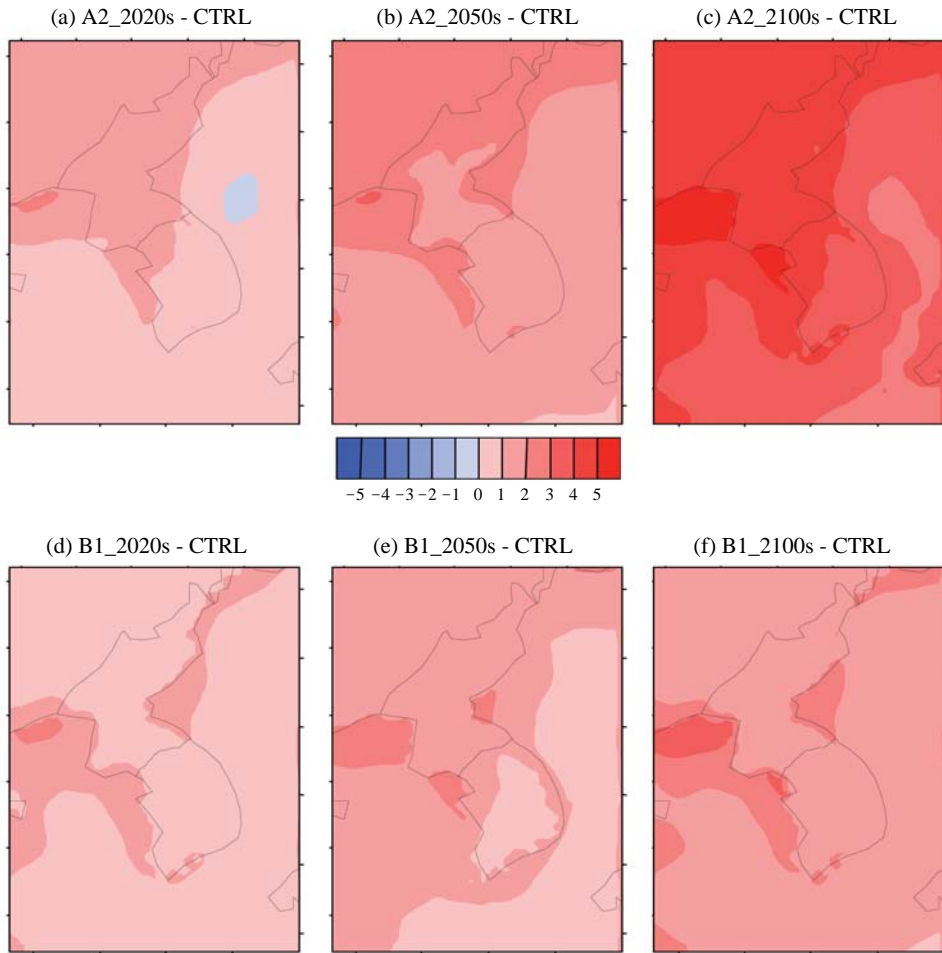


Fig. 5. Changes in June~August average daily maximum mean surface temperature (°C) between CTRL (1996~2005) and 2100s (2091~2100) over the Korea peninsula under IPCC SRES A2 (upper, (a)~(c)) and B1 (low, (d)~(f)).

감소하는 경향을 보였다. B1 시나리오의 경우, 2020년대에는 현재와 유사한 수준을 보였으나, 이후 2100년대까지 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. A2 시나리오의 경우에는 기온과 배출량의 증가로 인해 북한을 포함한 서해상과 북부지역에서 오존 농도가 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 B1 시나리오에서는 기온의 증가에도 불구하고 2020년대 이후 지속적으로 감소하는 분포를 보였다. 이는 표 1에 나타낸 바와 같이 오존 생성에 기여하는 NO_x와 VOC의 배출량 감소에 기인한 것으로 판단된다.

그림 7은 동아시아지역에서 한반도지역으로 유입되는 오존의 영향을 분석하기 위하여 두 시나리오에

Table 5. Monthly averaged surface ozone concentrations during summer season over the Korean peninsula (Unit: ppb).

Scenarios	2000s	2020s	2050s	2100s
A2	38.2	38.7	41.5	39.9
B1	38.1	38.1	31.1	27.3

대한 현재대비 2050년대의 Domain 2에 대한 측면 경계조건의 차이를 각각 나타낸 것이다. 그 결과, A2 시나리오의 경우는 전반적으로 오존농도가 각 경계에서 1~18 ppb의 증가를 보였으며, B1 시나리오의 경우는 1~10 ppb의 감소를 보였다. 하지만 두 시나

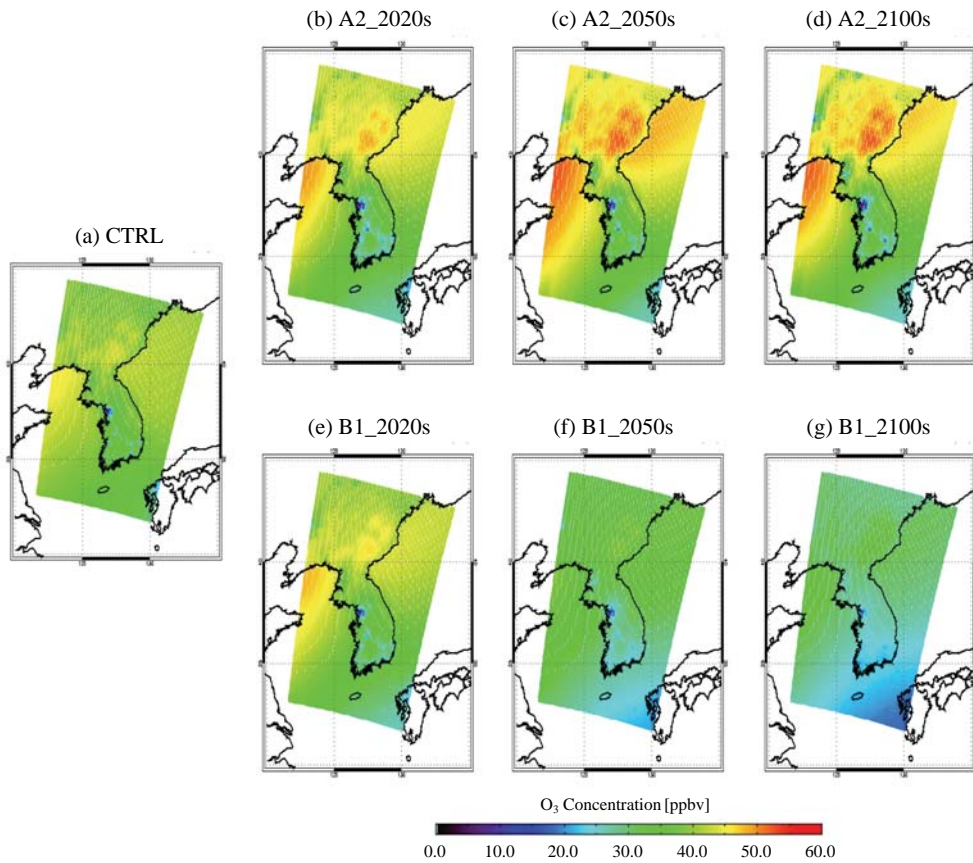


Fig. 6. Distributions of monthly averaged surface ozone concentrations (ppbv) for CTRL (a), A2 (b, c, and d), and B1 (e, f, and g) during summer season in the present-day and future periods (2020s, 2050s, and 2100s).

리오 모두 남쪽과 동쪽의 대류권 하층지역의 경계에서 1~6 ppbv의 오존농도 감소가 나타났다. 이로 인해 그림 5에서 나타난 남해안 일대의 오존 농도의 감소는 측면 경계조건의 영향에 기인한 것으로 판단된다.

3. 4 여름철 고농도 오존 농도의 변화

여름철 기온의 증가는 오존의 생성 가능성을 높일 수 있는 것으로 잘 알려져 있다(Lin *et al.*, 2001). 본 연구에서도 A2 시나리오의 경우 뚜렷한 기온 증가와 인위적 배출량 증가로 인하여 2050년대에 여름철 평균 오존농도가 큰 폭으로 증가하는 것으로 분석되었다(표 5). 이에 본 절에서는 환경기준을 초과하는 고농도 오존의 발생확률이 높은 여름철(June~August)에 대하여 분석하였다. 시나리오별 여름철 오존농도

의 변화에 대하여 정량적으로 평가하기 위해서 미국 EPA에서 기준 지수로 사용되는 누적 확률 분포를 이용하였다(Wu *et al.*, 2008). 이 방법은 일 중 최대 8시간 평균 오존농도 자료를 이용하여 평가하는 방법으로 한반도 여름철의 2000년대 및 미래 대기 환경에서 고농도 오존 발생의 빈도를 평가할 수 있다. 우리나라 대기환경기준치를 고려하여 고농도 오존의 기준은 8시간 평균 60 ppbv 이상으로 설정하였다.

그림 8은 여름철 일 최고 오존 농도가 나타나는 8시간 평균자료에 대한 2000년대 분포와 A2와 B1 미래 시나리오에 따른 분포의 변화를 살펴보기 위하여 그 차이를 나타낸 것이다. 또한 각 실험결과의 평균 값을 표 6에 제시하였다. 분포와 평균값의 변화를 살펴보면 A2 시나리오의 경우, 2020년대에서 2100년대

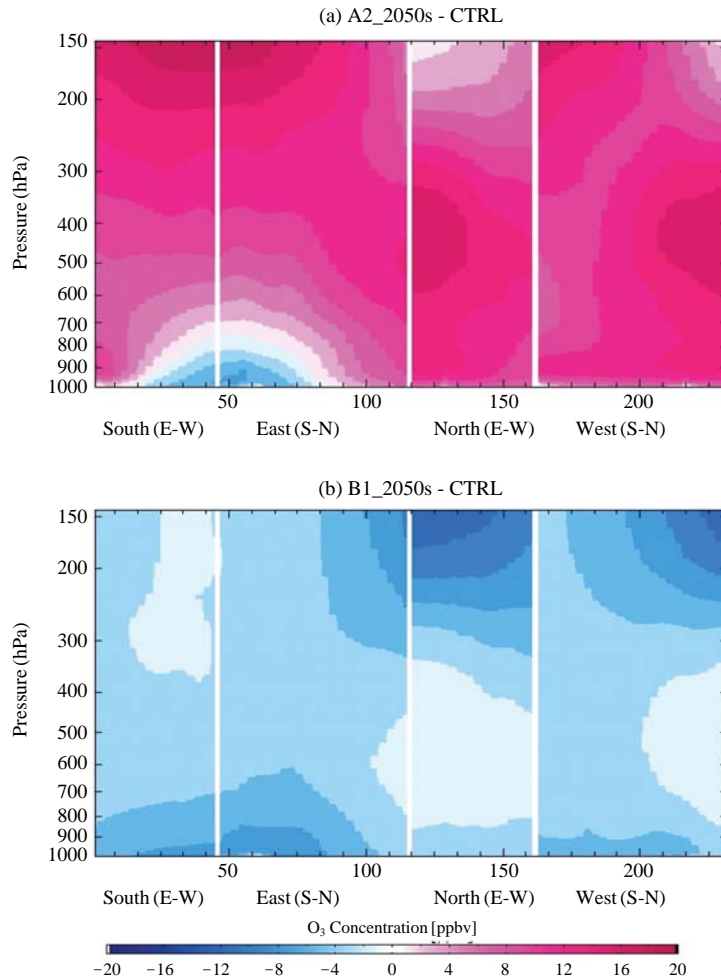


Fig. 7. Vertical distributions of monthly averaged ozone concentrations at the lateral boundary of CMAQ on A2_2050s - CTRL (a) and B1_2050s - CTRL (b).

까지 증가하는 추세를 보였으며, 북만주 지역에서 한반도 중부지역까지 뚜렷한 증가를 보였다. 하지만 남부지방 오존 농도의 감소는 외부로부터 유입되는 측면 경제조건의 오존 농도 감소에 의한 영향에 기인하는 것으로 분석되었다. 특히 현재대비 2050년대에 6.5 ppb로 가장 큰 증가를 보였다. B1 시나리오에서는 2020년대에 다소 증가를 보인 후 2100년대까지 크게 감소하는 추세를 보였으며, 현재대비 2100년대에 11.5 ppb로 가장 큰 감소를 보였다. 이는 앞서 언급한 결과와 마찬가지로 B1 시나리오의 경우 2100년대까지 1.7°C로 꾸준한 기온 상승을 보임에도 불구하고

하고 오존생성에 기여하는 인위적인 배출량(NO_x와 VOC)이 2020년까지 증가를 보인 후 지속적으로 감소하는 경향 때문인 것으로 판단된다.

표 6은 한반도지역에서의 고농도 오존 발생의 빈도를 평가하기 위하여 각 실험의 10년간 여름철(920일)에 대한 8시간 평균 오존농도가 60 ppb를 초과한 일수와 그 확률에 대하여 제시하였으며, 그림 9는 2000년대와 두 시나리오에 대하여 누적 확률 분포를 나타낸 것이다. 초과일수의 경우, A2 시나리오에서는 현재 대비 크게 증가하는 것으로 전망되었으며, 특히 2050년대에 현재대비(36일) 약 6배(211일)로 가장 큰 증

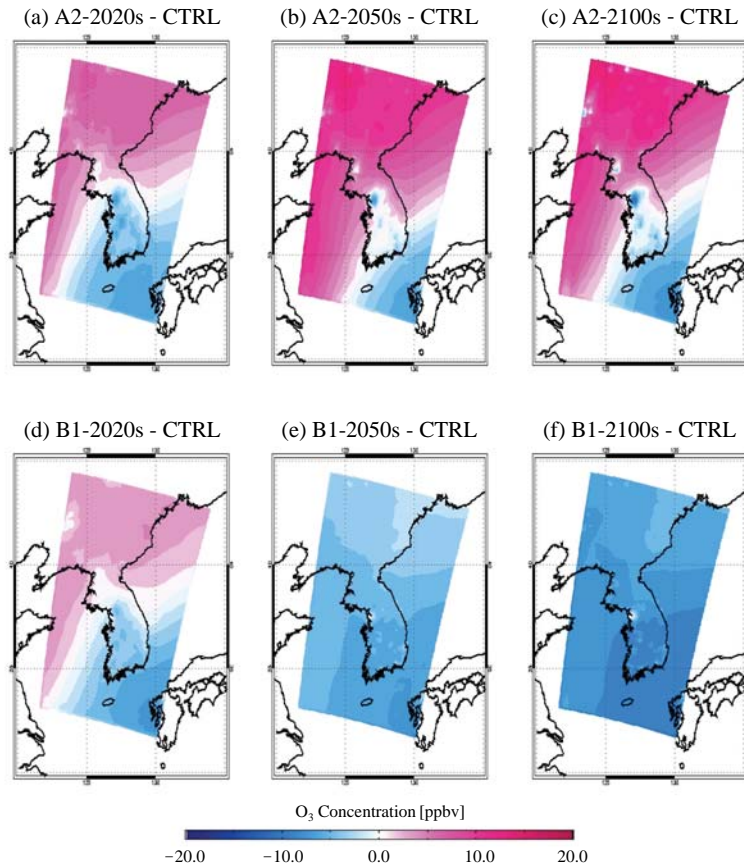


Fig. 8. The changes of simulated mean daily maximum 8-hour averaged surface ozone concentrations (ppb) during summer season (June ~ August) under A2 (A2-2020s (a), A2-2050s (b) and A2-2100s (c)) and B1 (B1-2020s (d), B1-2050s (e) and B1-2100s (f)) simulations compared with CTRL.

가를 보였다. B1 시나리오에서는 2020년대까지 증가를 보인 후 급격히 감소하여 2100년대에는 초과하는 날이 없는 것으로 분석되었다.

여름철 고농도 오존이 발생할 확률은 2020년대에 A2와 B1 시나리오 각각 9.8%, 6.8%로 2000년대 (3.9%)보다 증가하는 것으로 전망되었다. 특히, A2 시나리오에서는 2050년대와 2100년대에 각각 22.9%, 20.7%로 2000년대보다 약 17% 이상 증가하여 고농도 오존이 발생이 빈번해질 것으로 전망되었다. 한편, B1 시나리오의 경우는 2050년대에 0.8%로 고농도 오존이 나타날 확률이 크게 감소하였으며, 2100년대에는 60 ppb를 초과하는 경우가 없어 고농도 오존이 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 즉, 여름철 고농도 오존 발생 확률과 관련하여, A2 시나리오에 의해서는

Table 6. Mean, probability, and days of high events exceeding 60 ppb of summer (JJA) daily maximum 8-hour averaged surface ozone concentrations over the Korean peninsula.

Simulation name	Korean peninsula		
	Mean (ppb)	Probability (%)	Days
CTRL	42.1	3.9	36
A2-2020s	44.9	9.8	90
A2-2050s	48.6	22.9	211
A2-2100s	47.6	20.7	190
B1-2020s	43.7	6.8	63
B1-2050s	35.3	0.8	7
B1-2100s	30.6	0.0	0

2000년대 대비 2020년대에는 약 2.5배, 2050년대 이후 2100년대까지 약 5배 이상 증가하여 오존 대기질

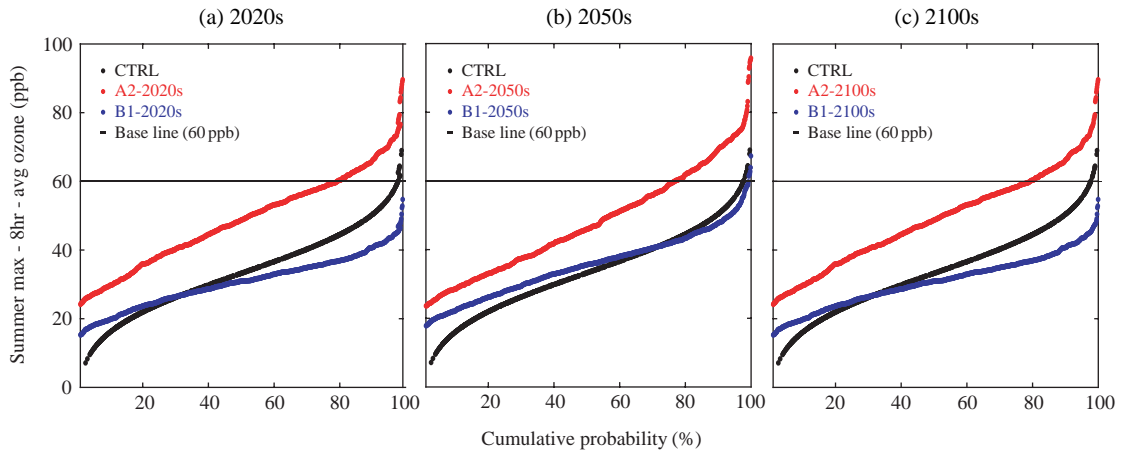


Fig. 9. Simulated cumulative probability distributions of summer daily maximum 8-hour averaged surface ozone concentrations over the Korean peninsula for (a) 2020s, (b) 2050s and (c) 2100s included in 2000s.

을 더 악화 시키는 것으로 나타났다. 반면, B1 시나리오의 2000년대 대비 2020년대에는 약 1.7배 증가하였으나, 이후 지속적인 감소로 2100년대에는 발생하지 않는 것으로 전망되어 오존의 대기질 개선에 효과적인 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 ICAMS를 이용하여 미래 기후변화 시나리오에 따른 한반도의 여름철 오존을 전망하고자 하였다. 이를 위해 IPCC에서 제시한 A2와 B1 시나리오를 고려한 실험을 수행하였으며, 모델 시스템의 검증은 EANET의 한국의 지점별 오존 자료와 NAMIS 5개 도시의 여름철 DM8H 오존 자료에 대해 비교 분석을 통하여 이루어졌다. 그 결과 지역별로 차이는 있으나 전반적으로 여름철 오존농도를 모델이 과대 모의하는 경향을 보였다. 하지만 상관계수의 범위는 0.89 (Imsil)에서 0.96 (Jeju, Kanghwa)로 높은 수준을 보였다. 또한, 여름철 DM8H 오존의 경우에는 평균농도의 경우 12~27% 모델이 과대모의 하는 것으로 분석되었으나, 대기환경기준치인 60 ppb를 초과할 확률의 경우는 모델이 관측보다 2% 정도 과대모의 하는 것으로 나타났다.

여름철 지표 오존농도에 대한 전망결과, A2 시나리오의 2100년대까지 증가를 보였으며 B1 시나리오의

2020년대에 유사한 수준을 보인 후 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히 A2 시나리오의 경우 2050년대에 3.3 ppb로 가장 큰 증가를 보였으며, B1 시나리오의 경우 2100년대에 10.9 ppb로 가장 큰 감소를 보이는 것으로 전망되었다.

또한, 인체와 식생에 영향을 미칠 것으로 예상되는 고농도 오존의 발생이 빈번한 여름철에 대하여 일 최대 8시간 평균 오존의 확률분포와 60 ppb 초과일수에 대하여 분석하였다. 그 결과 A2 시나리오에 의해서는 2000년대 대비 2020년대에 약 2.5배, 2050년대 이후 2100년대까지는 약 5배 이상 증가하는 것으로 전망되었다. B1 시나리오에서는 2000년대 대비 2020년대에는 약 1.7배 증가를 보인 후 급격히 감소하여 2100년대에는 초과하는 날이 없는 것으로 전망되었다. 즉, 인구와 배출량 증가가 가장 큰 A2 시나리오의 경우는 미래로 갈수록 오존 대기질이 악화되며, 특히 2050년 여름철 고농도 발생 빈도가 22.9%로 가장 빈번해질 것으로 분석되었다. 한편, 환경과 에너지 효율 향상을 반영하고 있는 B1 시나리오의 경우 2020년대까지 배출량의 증가로 오존 대기질이 악화됨을 보이다가 이후 지속적인 감소를 보여 2100년대에는 여름철 고농도 오존이 발생하지 않는 것으로 전망되었다.

본 연구는 미래 기후변화 시나리오에 따른 한반도 지역에 대한 여름철 오존 전망을 처음으로 시도한 연구로서 그 의의를 찾을 수 있다. 다만 연구 결과에

영향을 주는 것이 기후변화에 기인하는지, 또는 인위적 배출변화에 의한 것인지는 본 실험을 통해 파악하는 데는 한계를 지니고 있다. 하지만 미래 기후와 인위적 배출변화가 모두 고려된 수치실험을 통하여 대기질에 미치는 영향이 적지 않음을 알 수 있었다. 특히, 여름철 지표 오존의 경우에는 평균농도 보다는 DM8H 농도가 기후변화에 더 민감한 것으로 나타났으며, 외부로부터 한반도로 유입되는 측면 경계조건의 영향 또한 큰 것으로 분석되었다. 또한, 두 시나리오 모두 2020년대의 DM8H 농도가 현재보다 증가하는 것으로 나타나, 가까운 미래의 대기질 개선을 위한 노력이 더욱 중요할 것으로 판단된다. 이와 더불어 현재 IPCC에서는 5차보고서를 위해 온실가스 및 대기오염물질에 대한 감축정책들이 반영된 Representative Concentration Pathway (RCP) 시나리오를 선정하여 활발한 연구가 수행되고 있다. 따라서 감축정책에 따른 한반도 지역의 미래 대기질 변화에 관한 연구가 추가적으로 수행될 필요가 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Akimoto, H. (2003) Global air quality and pollution, *Science*, 302, 1716-1719.
- Bell, M.L., R. Goldberg, C. Hogrefe, P.L. Kinney, K. Knowlton, B. Lynn, J. Rosenthal, C. Rosenzweig, and J.A. Patz (2007) Climate change, ambient ozone, and health in 50 US cities, *Climatic Change*, 82, 61-76.
- Bey, I., D.J. Jacob, R.M. Yantosca, J.A. Logan, B.D. Field, A.M. Fiore, Q. Li, H.Y. Liu, L.J. Mickley, and M.G. Schultz (2001) Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation, *J. Geophys. Res.*, 106 (D19), 23073-23095.
- Byun, D. and J.K.S. Ching (1999) Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, United States Environmental Protection Agency Rep., EPA-600/R-99/030, 727pp.
- Byun, D.W. and K.L. Schere (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, *Appl. Mech. Rev.*, 59, 51-77.
- Choi, J.Y., S.Y., Kim, S.C., Hong, J.B., Lee, C.K., Song, H.J., Lee, and S.J., Lee (2012) Evaluation of temperature and precipitation on Inegrated Climate and Air Quality Modeling System (ICAMS) for air quality prediction, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 615-631. (in Korean with English abstract)
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magata Rueda, L. Mearns, C.G. Menendez, J. Rvisvnen, A. Rinke, A. Sarr, and P. Whetton (2007) Regional Climate Projections, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, U.S.A., 847-940.
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciaia, P.M. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy, and X. Zhang (2007) Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, U.S.A., 499-587.
- Fuhrer, J. and F. Booker (2003) Ecological issues related to ozone: agricultural issues, *Environ. Inter.*, 29, 141-154.
- Gery, M.W., G.Z. Whitten, J.P. Killus, and M.C. Dodge (1989) A photochemical kinetic mechanism for urban and regional scale computer modeling, *J. Geophys. Res.*, 94, 12925-12956.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (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, 122pp.
- Hogrefe, C., B. Lynn, K. Civerolo, J.-Y. Ku, J. Rosenthal, C. Rosenzweig, R. Goldberg, S. Gaffin, K. Knowlton, and P.L. Kinney (2004) Simulating changes in regio-

- nal air pollution over the eastern United States due to changes in global and regional climate and emissions, *J. Geophys. Res.*, 109, D22301.
- Hong, S.C., J.B. Lee, J.Y. Choi, K.J. Moon, H.J. Lee, Y.D. Hong, S.J. Lee and C.K. Song (2012) The effect of the chemical lateral boundary conditions on CMAQ simulations of tropospheric ozone for East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(5), 581-594. (in Korean with English abstract)
- In, H.-J., D.W. Byun, R.J. Park, N.-K. Moon, S. Kim, and S. Zhong (2007) Impact of trans-boundary transport of carbonaceous aerosols on the regional air quality in the United States: A case study of the South American wildland fire of May 1998, *J. Geophys. Res.*, 112, D07201, doi:10.1029/2006JD007544.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000) Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK, 570pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, U.S.A., 996pp.
- Jacob, D.J. and D.A. Winner (2009) Effect of climate change on air quality, *Atmos. Environ.*, 43, 51-63.
- Lin, C.-Y.C., D.J. Jacob, and A.M. Fiore (2001) Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States, 1980-1998, *Atmos. Environ.* 35, 3217-3228.
- Lin, J.T., K.O. Patten, K. Hayhoe, X.Z. Liang, and D.J. Wuebbles (2007) Effects of future climate and biogenic emissions changes on surface ozone over the United States and China, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 1888-1909.
- Mayeres I. and D. Van Regemorter (2008) Modelling the health related benefits of environmental policies and their feedback effects: A CGE analysis for the EU countries with GEM-E3, *Energy J.* 29, 135-150.
- Meleux, F., F. Solmon, and F. Giorgi (2007) Increase in European summer ozone amounts due to climate change, *Atmos. Environ.*, 41, 7577-7587.
- Ohara, T., H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yamaji, X. Yan, and T. Hayasaka (2007) An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4419-4444.
- Olivier, J.G.J., J.J.M. Berdowski, J.A.H.W. Peters, J. Bakker, A.J.H. Visschedijk, and J.P.J. Bloos (2001) Applications of EDGAR. Including a description of EDGAR 3.0: reference database with trend data for 1970~1995, RIVM, Bilthoven. RIVM report no. 773301 001/NOP report no. 410200 051.
- Streets, D.G., T.C. Bond, G.R. Carmichael, S.D. Fernans, Q. Fu, D. He, Z. Klimont, S.M. Nelson, N.Y. Tsai, M.Q. Wang, J.-H. Woo, and K.F. Yarber (2003), An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *J. Geophys. Res.*, 108(D21), 8809, doi:10.1029/2002JD003093.
- Song, C.K., D.W. Byun, R.B. Pierce, J.A. Alsaadi, T.K. Schack, and F. Vukovich (2008) Downscale linkage of global model output for regional chemical transport modeling: Method and general performance, *J. Geophys. Res.*, 113, D08308, doi:10.1029/2007JD008951.
- Tao, Z., A. Williams, H.-C. Huang, M. Caughey, and X.-Z. Liang (2007) Sensitivity of U.S. surface ozone to future emissions and climate changes, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L08811.
- West, J.J., S. Szopa, and D.A. Hauglustaine (2007) Human mortality effects of future concentrations of tropospheric ozone, *C. R. Geosci.* 339, 775-783.
- Wu, S., L.J. Mickley, E.M. Leibensperger, D.J. Jacob, D., Rind, D.G. Streets (2008) Effects of 2000-2050 global change on ozone air quality in the United States, *J. Geophys. Res.*, 113, D06302, doi:10.1029/2007JD008917.
- Zhang, Q., D.G. Streets, K. He, Y.X. Wang, A. Richter, J.P. Burrows, I. Uno, C.J. Jang, D. Chen, Z. Yao, and Y. Lei (2007) NO_x emission trends for China, 1995~2004: The view from the ground and the view from space, *J. Geophys. Res.*, 112, D22306, doi:10.1029/2007JD008684.