

논문

## 폭염기간 수도권 배출저감에 따른 서울지역 오존 2차오염 통합관리 분석

# Analysis of Ozone Secondary Pollution Integrated Management in Seoul due to Emissions Reduction during Heat Wave Episodes

전소현, 채찬병, 박재은<sup>1)</sup>, 선우 영<sup>2)</sup>\*

건국대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>국립재난안전연구원, <sup>2)</sup>건국대학교 사회환경공학부

Sohyun Jeon, Chanbyeong Chae, Jaeun Park<sup>1)</sup>, Young Sunwoo<sup>2)</sup>\*

Department of Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

<sup>1)</sup>National Disaster Management Research Institute, Ulsan, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2021년 7월 20일  
수정일 2021년 8월 10일  
채택일 2021년 8월 10일

Received 20 July 2021  
Revised 10 August 2021  
Accepted 10 August 2021

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-450-3541

E-mail : ysunwoo@konkuk.ac.kr

**Abstract** Korea has designated 'heat waves' as natural disasters since 2018. Ozone is a secondary air pollutant produced by photochemical reactions, so in order to control the ozone concentration, its precursors must be managed with heat wave-related policies and air environmental policies, which naturally include climate change policies. Ozone also acts as an oxidant that accelerates the production of PM<sub>2.5</sub> while having precursors similar to PM<sub>2.5</sub>. Therefore, this study analyzed the effect of improving ozone concentration in Seoul due to reduction of emissions in the Seoul metropolitan area during heat wave periods for integrated ozone management. The scenario periods were selected from periods that satisfied the heat wave definition (33°C or higher) for all the synoptic weather stations in the Seoul metropolitan area, and in contrast, a non-heat wave period that did not meet the heat wave definition was selected and analyzed. In order to consider appropriate emissions reductions in the Seoul metropolitan area, scenarios were designated by applying a 30% reduction in emissions, which is the goal of the Comprehensive Measures for Fine Dust Management ('17.09) to the Seoul metropolitan area. Modeling was performed using Weather Research and Forecasting Model (WRF), Sparse Matrix Operator Kernel Employment (SMOKE), and Community Multiscale Air Quality (CMAQ) for ozone concentration analysis. In addition, Process Analysis IPR (Integrated Process Rate) of CMAQ was utilized to analyze the contribution of ozone generation by physical and chemical processes during the heat waves.

**Key words:** Heat wave, Ozone, CMAQ, Process analysis, Air quality integration policy

### 1. 서 론

2018년 서울에 위치한 서울기상대에서 1907년 관측 이래 39.6°C로 최고 기온과 기록적인 폭염이 관측되면서 이에 부응하여 2018년 9월부터 한국은 폭염을 자연재난으로 분류하였다. 폭염은 생태계 피해를 비롯하여 전력사용 급증 등으로 1~3차 산업에 직접적인 피해를 야기시킨다. 또한 폭염기간 대기정체로 대기확산이 어려워 대기오염농도가 증가되는데 이로

인해 특히 대기 중 오존(O<sub>3</sub>)이 생성되기에 유리한 조건이 형성된다.

대기 중 오존은 다양한 물리·화학적 과정의 결과이며(Russell and Dennis, 2000), 2차 생성 대기오염물질이기 때문에 오존농도를 감소시키기 위해서는 오존 전구물질인 질소산화물(Nitrogen Oxides; NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>)과 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds; VOCs) 관리가 필수적이다. 오존은 이와 같은 오존 전구물질들이 적절한 기상 조건하에 복잡

한 광화학 반응에 의해 형성되며 결과적으로 맑은 날씨에 최고 수준의 고농도 오존이 발생한다(WHO, 2018). 오존이 대류권(Troposphere) 내 지표면에서 발생하게 되면 광화학 스모그의 주요 성분으로 작용하며, 인간을 포함하여 동식물에게 유해한 대기오염물질로 작용하게 된다. 사람에게 고농도 오존에 노출시간이 점차 증가되면 호흡 문제, 천식 유발, 폐 기능 감소 및 폐 질환의 원인이 될 수 있다(WHO, 2018). PM<sub>2.5</sub>와 다르게 오존은 가스상 대기오염물질이므로 외출 시 마스크 착용으로 대응할 수가 없다. 이에 따라 고농도 오존 발생시 실내 활동만을 권장하고 있다(MOE, 2018). 한국에서는 1983년부터 오존 대기환경 기준을 제정하여 오존을 관리하고 있으며, 2020년 기준으로 오존 대기환경기준은 한 시간 평균 100 ppb, 일 최대 8시간 평균 60 ppb이다. 그럼에도 불구하고 수도권지역(그림 1)을 포함한 한국의 오존농도 추세는 꾸준히 악화되고 있다. 2016년부터 전국 오존 유효 측정소에서 오존 한 시간 대기환경기준인 100 ppb를 만족하는 도시대기측정소는 30% 미만이며, 일 최대 8시간 평균기준 60 ppb를 만족하는 도시대기측정소는 1%도 안되는 것으로 나타났다. 이에 따라 고농도 오존 현황을 현저히 개선하지 않으면 앞으로도 원활한 오존 대기환경기준 달성은 어려울 것으로 판단된다.

기후변화 측면에서 오존은 ‘단기체류 기후변화 유발물질(Short Lived Climate Pollutants; SLCPs)’에 해당된다. IPCC (2018)에 따르면 단기체류 기후변화 유발물질은 대기 중 체류시간이 길어야 100년 미만이고 지구온난화지수(Global Warming Potential; GWP)는 CO<sub>2</sub>보다 훨씬 크다는 것을 강조하였다. 동시에 오존 전구물질들이 감축되지 않고 지속적으로 배출되어 대기 중 전구물질의 농도가 높게 유지되더라도, 기후변화 대응대책으로 오존농도가 낮아지면 오존과 관련한 질병 및 사망률이 낮아질 것으로 전망하였다(IPCC, 2018). 이러한 전망은 기후변화 대응대책으로 오존생성이 줄어들어 오존과 관련한 질병 및 사망률이 낮아지는 공편익(co-benefit)이 발생될 것을 뜻한다.

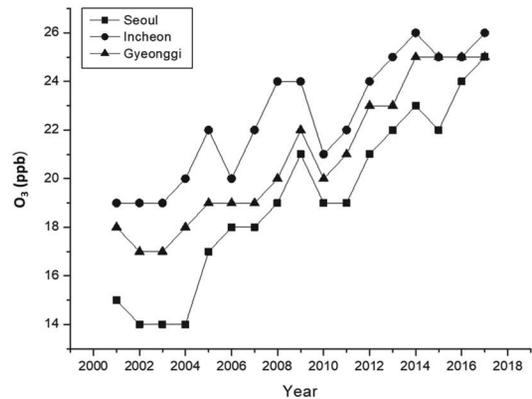


Fig. 1. Annual average concentration of O<sub>3</sub> in the Seoul metropolitan area from 2001 to 2017.

오존은 또한 국내를 포함한 전 세계적으로 종합 관리되고 있는 PM<sub>2.5</sub>와 유사한 전구물질을 가지면서 PM<sub>2.5</sub> 생성을 가속시키는 산화제(oxidant)로 작용한다. 오존은 PM<sub>2.5</sub> 생성반응에서 강한 산화력으로 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 황산화물(SO<sub>x</sub>)을 산화시키고 질산염(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 황산염(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 등의 PM<sub>2.5</sub> 생성에 기여하기도 한다. 정리하자면, 오존 저감정책이 PM<sub>2.5</sub> 생성을 동시에 줄이는 공편익을 동반할 수도 있음을 의미한다.

따라서 오존은 그 자체로도 기후변화 유발물질인 동시에 한국을 포함한 세계 각국에서 규정한 관리대상 대기오염물질이다. 또한 PM<sub>2.5</sub>와 유사한 전구물질을 가지며 PM<sub>2.5</sub> 생성을 가속시키는 산화제로서 작용한다. 따라서 현존하는 PM<sub>2.5</sub>와 기후변화 정책을 고려하여 각 정책 간의 연계 가능성을 검토하고, 효과적이고 통합적인 오존정책 수립이 필요하다. 한국에서 PM<sub>2.5</sub> 정책으로 시행한 ‘미세먼지 관리 종합대책(’17.09)’은 ’22년까지 국내 배출량을 30% 감축하고 서울을 기준으로 PM<sub>2.5</sub> 농도를 26 μg/m<sup>3</sup>에서 18 μg/m<sup>3</sup>로 낮추는 것을 목표로 한다(Korean government, 2017). 이를 위해 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, VOCs를 중점적으로 관리한다. 이후 ‘미세먼지 관리 종합계획(’19.11)’에서는 ’24년까지 연평균 초미세먼지 농도 개선 목표 달성을 위해 ’24년까지 PM<sub>2.5</sub>(직접배출) 19%, SO<sub>x</sub> 42%, NO<sub>x</sub> 64%, VOCs 32%, NH<sub>3</sub> 25% 이상 감축을 목표로

한다(Korean government, 2019).

이에 따라 본 연구에서는 폭염기간 한국에서 시행되고 있는 ‘미세먼지 관리 종합대책(‘17.09)’과 ‘미세먼지 관리 종합계획(‘19.11)’의 결과로 예측되는 오존 개선농도를 분석하여 오존 통합대책 및 기후변화 정책 도입 시 기초자료로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 시나리오

#### 2.1.1 시나리오 기간 선정

본 연구는 오존과 PM<sub>2.5</sub> 및 기후변화의 통합관리를 위해 폭염발생시 수도권지역 배출저감 대책으로 인한 서울지역 오존농도를 분석하고자 한다. 따라서 시나리오 수행 기간은 수도권지역 폭염발생일로 선정하였다. 폭염일은 일 최고기온이 33°C 이상인 날로 지정한다(KMA, 2019). 또한 기후통계지침(‘19)을 적용하여 수도권지역 위치하는 서울기상대(N 37.57142, E 126.965), 수원기상대(N 37.25746, E 126.983), 인천기상대(N 37.47772, E 126.6249), 강화기상대(N 37.70739, E 126.44634) 총 4개 지역의 종관기상대 자료를 이용하였다.

표 1은 서울, 인천, 수원, 강화 각각의 기상대의 관측 시작일과 상위 5회 연 최고기온과 이의 관측날짜를 나타낸 것이다. 서울과 수원은 2018년도에 관측 이래 최고기온이 기록되었고, 강화는 2018년도가 상위 5번째에 최고기온이 기록되었다. 인천은 1949년에 최고기온을 기록하였고, 인천 기상대에서는 2018년 연 최고기온 35.9°C가 상위 9번째로 기록되었다. 이러한 현상을 종합적으로 검토하여 이 연구의 모델 구동기간은 서울 기상대 기준으로 1907년 관측 이래 111년 만에 최고 기온이 기록되고, 서울, 인천, 수원, 강화 각각의 기상대 모두가 동시에 폭염기준을 만족한 기간으로 선정하였다. 동시에 모델 결과의 정합도 향상을 위해 폭염기간이 5일 이상 지속된 날짜로 선

**Table 1.** Top 5 heat wave records at synoptic weather observation stations in the Seoul Metropolitan Area.

Location	Observation start date	Annual highest temperatures (°C)	Observation dates
Seoul	1907. 10. 01	39.6	2018. 08. 01
		38.4	1994. 07. 24
		38.2	1939. 08. 10
		38.2	1943. 08. 24
		37.7	1949. 08. 15
Incheon	1961. 07. 01	38.9	1949. 08. 16
		37.7	1943. 08. 21
		37.4	1939. 07. 31
		37.2	1994. 07. 26
		37.0	2002. 07. 28
Suwon	1964. 01. 01	39.3	2018. 08. 01
		37.4	2012. 08. 05
		37.3	1994. 07. 23
		36.9	2017. 08. 05
		36.5	2016. 08. 21
Ganghwa	1972. 01. 11	35.8	2014. 08. 02
		35.7	2005. 08. 06
		35.5	1994. 07. 23
		35.4	1978. 07. 29
		35.4	2018. 08. 15

Source: Korea Meteorological Administration, 2019

정하였다. 따라서 수도권지역 종관기상관측소 전체가 폭염기준을 만족하고, 폭염기간이 6일 동안 지속된 2018년 7월 29일부터 8월 3일까지를 사례기간으로 선정하였다.

또한 폭염기간의 모델 결과와 폭염기준을 만족하지 않을 때 결과를 비교하기 위해, 수도권 지역 종관기상관측소 전체가 폭염기간이 6일 동안 지속되지 않는 대조기간을 선정하였다. 기후는 30년간 평균으로(1971년~2000년, 1981년~2010년, 1991년~2020년, 2001년~2030년, 2011년~2040년) 산정한다(WMO, 2017). 따라서 본 연구의 시나리오 기간인 2018년과 유의성을 가지기 위해 2011년 이후에 수도권 지역 종관기상관측소 전체가 6일 동안 폭염이 지속되지 않는 조건을 충족하는 2014년 7월 12일부터 7월 17일까지를 본 연구와 대비되는 비폭염기간으로 선정하였다.

### 2.1.2 배출량 시나리오 선정

오존은 전구물질인 질소산화물과 휘발성유기화합물이 오존 생성 기상 조건하에서 복잡한 광화학 반응을 거치며 생성된다(Finlayson-Pitts and Pitts Jr, 1999; Haagen-Smit, 1952). 따라서 대기 중 오존농도를 줄이기 위하여 오존 전구물질들의 관리가 필요하다. 물론 오존은 전구물질들과 비선형(nonlinear)적인 관계를 가지고 있어 전구물질 삭감만으로 오존농도가 선형적으로 감소하지 않는다는 점을 고려해야 한다.

실효성 있는 대기오염 개선을 위해서 대기오염대책에서는 목표 농도를 달성할 수 있는 삭감 배출량이 확보되어야 한다(Kwon *et al.*, 2016). 대기질 개선계획 수립 시 초기단계에서 전반적인 검토를 위해 반복적인 모사를 적용하는 것이 바람직하며, 시나리오가 확정된 경우 농도 변화가 예상처럼 도출되는지 확인이 반드시 수행되어야 한다고 보고되었다(Kim *et al.*, 2017). 이에 따라 본 연구에서는 오존 통합관리를 위해 폭염기간 ‘미세먼지 관리 종합대책(‘17.09)’과 ‘미세먼지 관리 종합계획(‘19.11)’을 통해 오존의 농도변화를 분석하고자 한다. 분석을 위해 Base scenario는 국가 대기오염물질 배출량 인벤토리인 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2014 자료를 사용하였다. ‘미세먼지 관리 종합대책(‘17.09)’은 2022년까지 NO<sub>x</sub> 36.9%, VOCs 11.9% 저감을 목표로 하며 (Korean government, 2017), ‘미세먼지 관리 종합계획(‘19.11)’은 2024년까지 NO<sub>x</sub> 64%, VOCs 32% 이상 저감을 목표로 한다(Korean government, 2019). 따라서 폭염기간 수도권지역 배출량 저감에 따른 오존농도 분석을 위해 다음 표 2와 같은 시나리오를 적용하였다. 배출량 시나리오는 수도권지역 오존의 주요 전구물질인 NO<sub>x</sub>, VOCs가 각각 30%씩 저감 될 경우와 NO<sub>x</sub> 및 VOCs가 동시에 30%씩 저감 될 경우, 마지막으로 ‘미세먼지 관리 종합대책(‘17.09)’의 목표처럼 PM<sub>2.5</sub>가 30% 저감될 경우 총 5가지 시나리오를 적용하였다.

## 2.2 Model setup and input

모델링에서 도메인은 모사되는 지역의 지형적 경계이다. 일반적으로 도메인의 외부적인 요인으로 인

**Table 2.** Emission scenarios.

Classification	Scenario content
Base scenario	Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2014 data
NO <sub>x</sub> scenario	Reducing NO <sub>x</sub> emissions by 30% in the SMA
VOCs scenario	Reducing VOCs emissions by 30% in the SMA
NO <sub>x</sub> + VOCs scenario	Reducing NO <sub>x</sub> & VOCs emissions by 30% in the SMA
PM <sub>2.5</sub> scenario	Reducing PM <sub>2.5</sub> emissions by 30% in the SMA

SMA: Seoul Metropolitan Area

한 불확실성을 줄이기 위해 연구 대상지역 도메인은 보다 넓은 영역에서 모델을 구동 후 점차 축소하는 동지화(Nesting) 기법을 이용한다. 동지화 기법을 사용하면 보다 정확하고 효율적인 대기질 모사가 가능하다. 본 연구에서는 수도권 도메인 설정을 위해 국립환경과학원(2013)에서 제공한 대기질 모델링 가이드라인을 이용하였다. 도메인 설정은 그림 2와 같다. 동아시아 영역을 대기질 모델의 경계조건으로 설정하였으며, 도메인1은 27 km × 27 km, 도메인2는 한반도 9 km × 9 km, 도메인3는 수도권 3 km × 3 km를 해상도로 설정하였다.

WRF (Weather Research and Forecasting)의 입력 자료(input data)로 미국 해양 관리청의 국립환경예측센터 (National Centers for Environmental Prediction; NCEP)에서 제공하는 NCEP FNL을 사용하였다. 보다 신뢰도 높은 기상 결과 도출을 위해 OBSGRID (Objective Analysis) Code를 사용하였다. 또한 기상 물리 옵션(option)에 따라 기상 모델의 결과가 발생하므로 본 연구에서 사용한 기상 물리 옵션을 표 3에 기입하였다. 추가적으로 WRF의 결과 자료를 MCIP (Meteorology Chemistry Interface Processor) Version 3.4.1을 이용하여 형식을 변환하여 CMAQ (Community Multiscale Air Quality)의 입력 자료로 사용하였다.

대기질 모델 구동을 위해 배출량 입력 자료로 시·공간적, 화학 종별 배출량 할당 등 부가적인 자료가 필요하며 이를 배출량처리 모델에 적용하여 배출량 입력 자료를 생성한다. 본 연구에서는 배출량 처리를

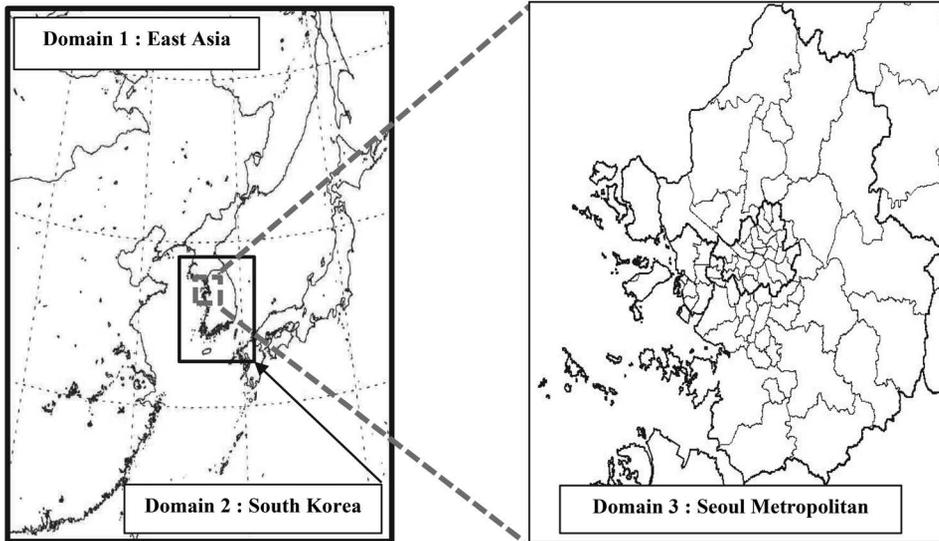


Fig. 2. Modeling domain and district.

위해 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emission)를 이용하였으며, 배출량처리 모델 수행을 위한 영역은 기상 모델과 동일하게 Lambert Conformal 격자 투영법을 활용하였다. 도메인 1에 해당되는 동아시아 지역의 대기오염물질 배출량은 INTEX (Intercontinental Chemical Transport Experiment)-B Project의 자료를 사용하였다. 도메인 2, 3에 해당되는 한반도와 수도권지역에서의 배출량은 국립환경과학원에서 제공하는 2014년 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 배출량을 사용하였다. 자연적 배출원 배출량 산정은 BEIS (Biogenic emission inventory system)를 이용하여 환경부에서 제공하는 식생분포 자료를 국내 실정에 맞게 자연적 배출원 배출량을 산정하였다. 광화학 모델은 대기 중 물리·화학적 과정에 대한 메커니즘과 대기오염 정책 개발을 위해 전 세계적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) Version 5.0.2을 이용하여 대기질을 분석하였다. 휘발성유기화합물 등 다양한 화합물에 대한 화학종을 구분하기 위해 CB05보다 상대적으로 세부적인 유기화학 정보를 가지며 (Luecken *et al.*, 2008), 수도권지역 고농도 오존에 대

Table 3. WRF options.

Classification	Option
Microphysics	WSM6 (Hong <i>et al.</i> , 2004)
Shortwave radiation	Dudhia (Dudhia, 1989)
Longwave radiation	RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (Kain, 2004)
PBL scheme	Yonsei University (Hong <i>et al.</i> , 2006)
Land-Surface	Noah (Chen and Duhia, 2001)
Initial data	NCEP FNL (Final) Operational Global Analysis data

해 과소모의를 줄이기 위해 더 적합하다고 연구된 (Kang *et al.*, 2016) SAPRC-99을 이용하였다.

### 2.3 Process Analysis

수용점 (receptor)에서의 오존농도는 이류확산 과정을 거친 풍상의 오존 및 풍상의 전구물질이 장·단거리 이동 중 만든 부분을 포함하고, 수용점 부근에서 배출된 전구물질이 반응하여 국지적으로 생성된 오존과 더해져 결정된다 (Kim *et al.*, 2019). CMAQ에 내장되어 있는 PA (Process Analysis)는 3차원 이류확산 방정식을 수치적으로 계산할 때 단계별로 추가적인 물리·화학적 기여도와 화학적인 특징을 규명하는

**Table 4.** Statistical evaluation of the WRF and CMAQ model simulations at the sites available in Seoul. The values refer to 1-h concentrations.

Classification		Obs	Model	MB	RMSE	IOA	r
Heat wave	Temperature (°C)	32.6	30.63	-2.0	2.7	0.86	0.87
	Wind speed (m/s)	1.49	3.59	2.1	2.7	0.33	0.38
	O <sub>3</sub> (ppb)	41.3	17.1	-0.02	0.03	0.62	0.61
Non Heat wave	Temperature (°C)	26.06	25.73	-0.3	1.0	0.96	0.93
	Wind speed (m/s)	2.96	2.56	-0.4	1.1	0.77	0.62
	O <sub>3</sub> (ppb)	48.8	17.9	-0.03	0.03	0.56	0.65

데 사용하기 때문에 오존과 같이 대기 중 광화학 반응의 비선형적 관계의 결과를 예측하는데 유용하다 (NIER, 2010). 따라서 특정 수용점에서 수평 및 수직 이류(horizontal and vertical advection), 건식 및 습식 침적(dry and wet deposition) 등에 의해 대기오염물질 농도가 어떻게 산정되었는지 상대적인 기여도를 종합적으로 분석하기 위해 PA를 본 연구에서 사용하였다.

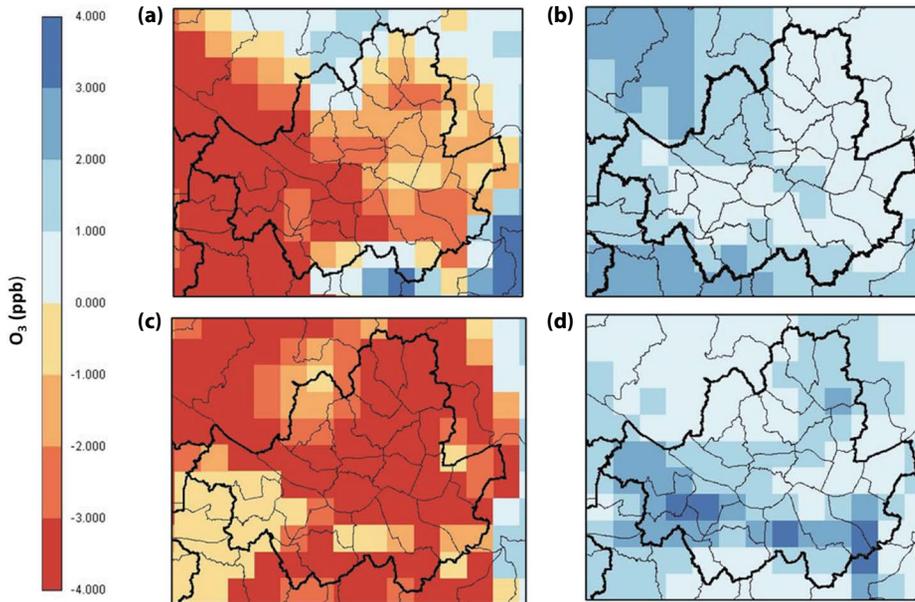
PA는 IRR (Integrated Reaction Rates)와 IPR (Integrated Process Rates)가 내장되어 있다. IRR은 가스상 전구체 및 오존 화학적 체계에 가장 큰 영향을 미치는 반응을 결정할 수 있는 통합 반응물이며 (Liu *et al.*, 2010), 화학 경로를 명확하게 파악하고 주요 화학적인 특징을 규명하는데 사용된다. IPR은 대기오염물질의 다양한 화학종에 대한 여러 물리적 및 화학적 공정의 기여를 식별하고 정량화하는데 사용된다 (Zhang *et al.*, 2019). 또한 IPR은 물리과정, 화학반응, 에어로졸 생성 및 수용성 화학(aqueous chemistry) 등에 의해 야기되고 각각 종들의 농도 변화를 계산하여 모델 모사를 통해 얻을 수 있다(NIER, 2010). 따라서 폭염발생시 오존의 IPR 분석을 수행하여 오존생성의 물리·화학적 공정기여도도 분석하였다.

### 3. 모델 검증

모델링 정확도 평가는 관측 값과 모델 결과값의 비교를 통해 모델 결과의 신뢰성을 확립하고, 이를 이

용하여 정밀한 연구 분석을 하는데 중요하다(Dennis *et al.*, 2010). 서울지역 내의 각 구별로 도시대기측정소가 존재하며, 이 도시대기측정소의 대기오염물질 농도 값이 해당하는 구의 대기오염물질 농도로 대표된다. 본 연구에서 폭염과 비폭염으로 선정한 기간 동안 기상 및 대기질 통계검증을 위해 각각 서울지역의 기상청 종관기상관측 자료와 국립환경과학원 도시대기측정소 자료를 활용하여, MB (Mean Bias), RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index of Agreement)와 R (Correlation Coefficient)의 척도를 이용하여 관측 값과 모델 값의 통계분석을 수행하였다(표 4).

폭염기간 기상 모델에서 시간평균 풍속의 경우 측정값과 모델값이 0.33의 IOA와 0.38의 r값을 나타내어 비교적 낮은 수치를 나타냄과 동시에 약 2.1의 MB 값을 나타내어 관측값보다 과대모의 하는 것으로 나타났다. 하지만 기온은 0.86의 IOA값과 0.87의 r값을 보이며 관측값과 높은 상관성을 나타냄과 동시에 -2.0의 MB값을 나타내며 관측값보다 기온을 과소모사하는 것으로 나타났다. 비폭염기간 기상 모델에서 기온의 경우 0.96의 IOA와 0.93의 r값을 나타내어 높은 상관성 보이며 -0.3의 MB로 과소모의 하는 것으로 나타났다. 시간 평균 풍속의 경우 0.77의 IOA와 0.62의 r값을 나타내고, -0.4의 MB로 과소모의 하는 것으로 나타났다. 폭염기간과 비폭염기간 기상모델에서 기온은 관측값과 모델값이 높은 상관성을 나타내었으며, 비폭염기간에 비해 폭염기간 시간평균 풍속은 낮은 상관성이 나타났다. 이는 기상 모델이 폭



**Fig. 3.** Effect of Ozone concentration improvement for (a)  $\text{NO}_x$  scenario, (b) VOCs scenario, (c)  $\text{NO}_x + \text{VOCs}$  scenario, (d)  $\text{PM}_{2.5}$  scenario, during heat wave episode.

염기간 동안 지리적 영향을 충분히 반영하지 못하여 지형적 영향이 크게 미치는 풍속의 통계값이 낮게 나온 것으로 판단된다.

폭염기간과 비폭염기간 대기질 모델에서 오존은 각각 0.62, 0.56의 IOA, 0.61, 0.65의 r값이 나타났다. 대기 중 오존농도는 일반적으로 일사량, 기온에 비례하여 증가하고 상대습도와 풍속에 반비례하여 감소하는데(MOE, 2016) 폭염기간 기상모델에서 기온 등이 과소모의 되고, 풍속 등이 과대모의 되어 오존이 과소모의 한 것으로 판단된다. 그러나 모두 허용 가능한 편향으로 농도를 예측하였으므로 모델 결과값이 유의하다고 판단된다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 폭염기간 서울지역 오존농도 개선효과 분석

폭염기간 수도권지역 배출 저감에 따른 서울지역의 오존농도 분석을 수행하였다. 폭염기간 동안 평균

오존농도 개선효과는 VOCs scenario,  $\text{PM}_{2.5}$  scenario,  $\text{NO}_x + \text{VOCs}$  scenario,  $\text{NO}_x$  scenario 순으로 나타났다. 폭염기간 Base scenario 대비 각 시나리오의 오존 평균농도 개선 정도를 나타냈다(그림 3). 파란색으로 갈수록 오존농도가 개선된 것을 뜻하며 VOCs scenario와  $\text{PM}_{2.5}$  scenario에서 서울지역 폭염기간 동안 오존농도가 개선된 것을 확인할 수 있다.  $\text{NO}_x$  scenario와  $\text{NO}_x + \text{VOCs}$  scenario의 결과에서는 수도권 지역에서  $\text{NO}_x$ 만 30% 저감하였을 때와  $\text{NO}_x$ , VOCs를 각각 30% 저감했을 때 폭염기간 동안 오히려 서울 지역 오존농도가 증가하는 것으로 나타났다.

폭염기간과 비폭염기간 동안 Base scenario 대비 시나리오별 오존농도 평균변화량을 나타냈다(그림 4). 폭염기간과 대조적으로 비폭염기간에는  $\text{NO}_x$  scenario,  $\text{NO}_x + \text{VOCs}$  scenario에서 오존농도가 감소되는 것으로 나타났다. 동일한 배출량 시나리오에 기상 조건만 달라졌을 뿐인데 오존농도가 다른 결과를 나타냈다. 폭염기간 평균기온은  $32.7^\circ\text{C}$ , 최고기온은  $37.8^\circ\text{C}$ 로 비폭염기간에 비해 각각  $6.6^\circ\text{C}$ ,  $7.3^\circ\text{C}$ 가 더

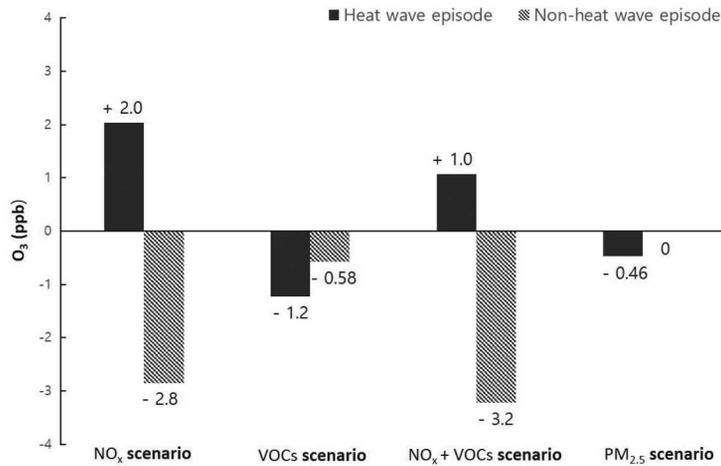


Fig. 4. Mean change in ozone concentration relative to base case for each scenario during heat wave episode and non-heat wave episode.

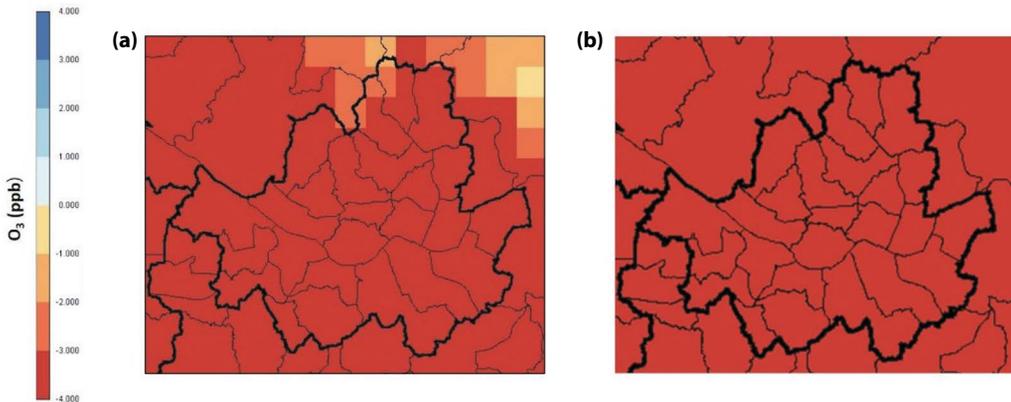
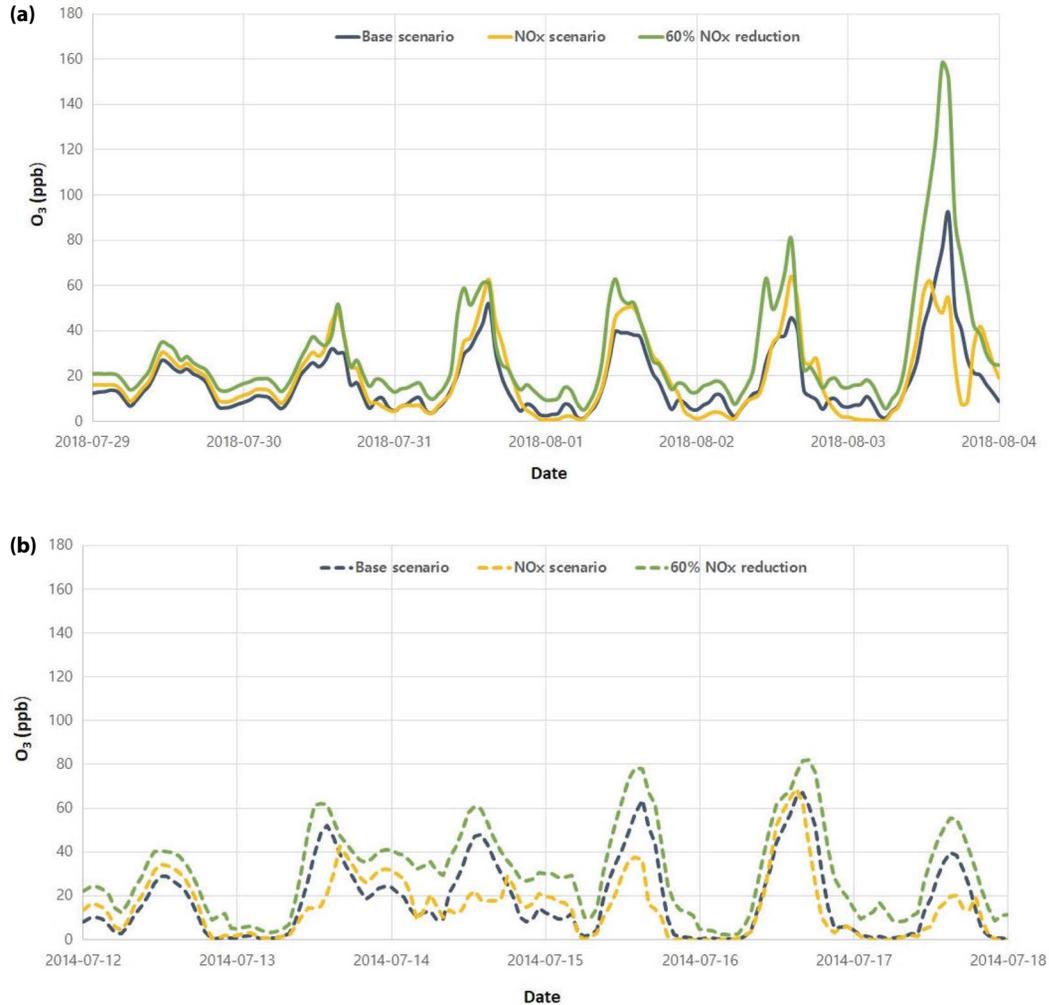


Fig. 5. Effect of Ozone concentration improvement for 60% reduction of NO<sub>x</sub> during (a) heat wave episode, (b) non-heat wave episode.

높다. 대기오염물질 중 오존을 비롯하여 VOCs 농도도 온도에 의해 영향을 크게 받는데 (Song *et al.*, 2019) 서울에서 VOCs가 오존 생성 인자로 작용하여 (KORUS-AQ, 2016) 비폭염기간 대비 폭염기간 VOCs 확산이 활발해져 오존생성에 영향을 미친 것으로 판단된다. 한반도의 최저기온과 최고기온이 +1.7~7.1°C 상승하는 것으로 전망하고 있어 (NIMS, 2020), 이런 현상으로 미루어 봐서 기후변화가 지속되어 폭염이 더 잦아지면 일종의 climate penalty로

인해 PM<sub>2.5</sub> 2차생성 대기오염정책이 무색해질 수도 있다는 점을 시사한다. 이는 ‘미세먼지 관리 종합대책(17.09)’ 및 ‘미세먼지 관리 종합계획(19.11)’을 시행하여 배출량을 감축하더라도 기상조건하에 특히 폭염기간 동안 서울지역 오존농도는 개선되는 것이 아니라 오히려 증가할 수 있음을 의미한다. 더불어 기후변화 대책 중 폭염정책 도입 시 2차 생성 대기오염물질인 오존은 전구물질을 저감하더라도 오존농도가 선형적으로 감소하지 않을 수 있다는 점을 고려해



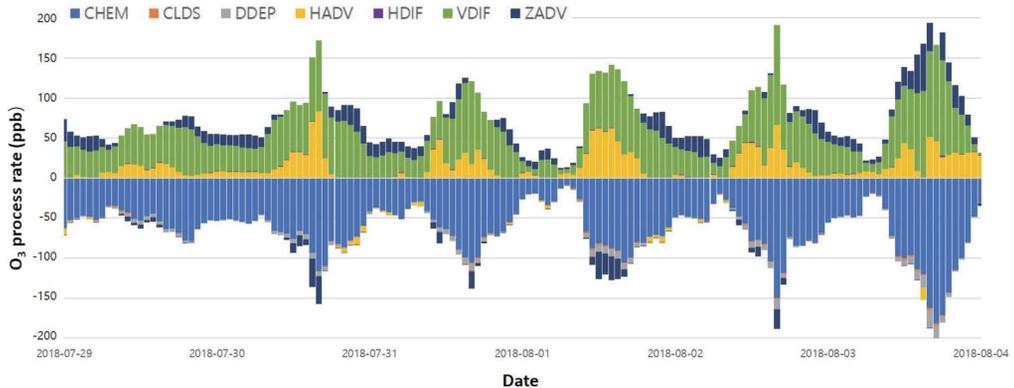
**Fig. 6.** Time series plot of ozone concentration for Base scenario, NO<sub>x</sub> scenario and 60% NO<sub>x</sub> reduction during (a) heat wave episode, (b) non-heat wave episode.

야 할 결과로 판단된다.

앞서 폭염기간 NO<sub>x</sub> scenario와 NO<sub>x</sub> + VOCs scenario에서 오히려 오존농도가 증가되는 것으로 나타났고, '미세먼지 관리 종합계획('19.11)'에서는 NO<sub>x</sub>를 64%까지 감축하는 것을 목표로 하고 있기 때문에 NO<sub>x</sub>의 저감 영향을 더 분석하기 위해 추가로 동일한 조건에서 NO<sub>x</sub>를 60% 감축하였다. 폭염 및 비폭염기간 동안 각각 Base scenario에서 NO<sub>x</sub>를 60% 감축하여 오존농도 개선효과를 평균하여 나타냈다(그림 5).

폭염 및 비폭염기간 동안 NO<sub>x</sub>를 60% 감축한 결과 서울 모든 지역의 오존농도가 증가되는 것으로 나타났다. 비폭염기간 동안 NO<sub>x</sub> scenario에서 오존농도가 감소되었는데 NO<sub>x</sub>를 60% 감축한 후 오존농도가 증가되는 것으로 나타났다. 더욱 면밀한 분석을 위해 폭염 및 비폭염기간 동안 각각 Base scenario, NO<sub>x</sub> scenario와 NO<sub>x</sub>를 60% 감축한 오존농도를 시계열로 나타냈다(그림 6).

폭염기간 동안 NO<sub>x</sub>를 감축할수록 오존농도는 일



**Fig. 7.** Time series plot of process analysis of ozone for CMAQ simulation during heat wave episode. CHEM (Chemistry, blue), CLDS (Cloud processes and aqueous chemistry, orange), DDEP (Dry deposition, grey), HADV (Horizontal advection, yellow), HDIF (Horizontal diffusion, purple), VDIF (Vertical diffusion, green), ZADV (Vertical advection, dark blue).

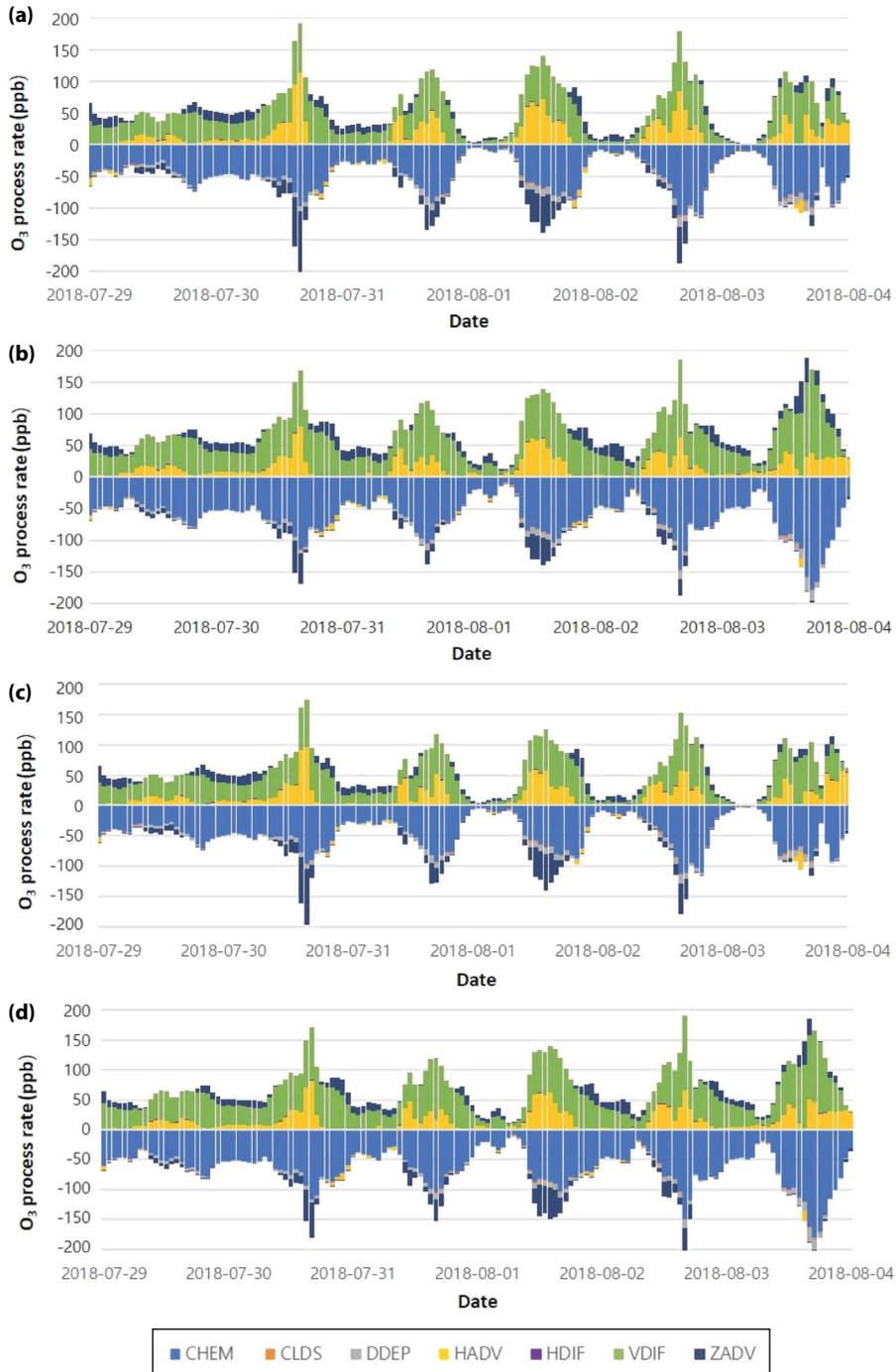
반적으로 증가하였으며, 비폭염기간 동안 오존농도는 NO<sub>x</sub> scenario에서는 줄어들었다가 NO<sub>x</sub> 60% 감축으로 평균 13.3 (±0.1) ppb 증가하였다. 서울지역은 VOCs-limited 지역으로 VOCs 농도가 오존농도 제한인자로서 작용한다(KORUS-AQ, 2016). 이는 질소산화물 배출량이 많아지더라도 고농도 오존이 발생되지 않을 수 있다는 것이다. 그리고 비폭염기간 대부분 날들과 폭염기간 마지막 날처럼 지역 또는 조건에 따라 NO<sub>x</sub> 농도에 의한 오존농도 증감이 어느 임계점을 기준으로 양상이 달라지는 것을 볼 수 있다. 또한 폭염기간 NO<sub>x</sub> scenario에서는 오히려 오존농도가 증가하며, VOCs scenario에서는 오존농도가 개선되었다. 따라서 이러한 연구 결과를 바탕으로 추가적인 VOCs 감축정책이 요구된다는 것을 추정해 볼 수 있다.

NO<sub>x</sub>는 본 모사기간 동안뿐 아니라 일반적으로 수도권권을 포함한 매우 광범위한 지역에 걸쳐 포화 상태를 보이고 있으므로(KORUS-AQ, 2016) 수도권 및 주변지역에서 장기적으로 오존농도를 제한할 수 있는 방법은 NO<sub>x</sub> 배출량을 감축하는 것이라고 판단된다. 하지만 단기적으로는 NO<sub>x</sub> 배출량 감축이 오존농도 증가로 이어질 수 있다는 것을 감안해야 할 것이다.

#### 4. 2 폭염기간 서울지역 오존 PA (process analysis) 분석

폭염발생시 Base scenario에서 오존 PA IPR의 분석을 수행하여 물리·화학적 오존생성 기여도를 분석하였다(그림 7). 서울지역 폭염기간 시간평균 64.6 ppb의 화학반응(Chemistry; CHEM), 0.4 ppb의 구름과정(Cloud processes and aqueous chemistry; CLDS), 3.2 ppb의 건식침적(Dry deposition; DDEP)이 오존생성의 기여도를 보였으며, 14.5 ppb의 수평이류(Total horizontal advection; HADV = XADV + YADV), 0.1 ppb의 수평확산(Horizontal diffusion; HDIF), 48.9 ppb의 수직확산(Vertical diffusion; VDIF), 8.4 ppb의 수직이류(Vertical advection; ZADV)가 양의 기여도를 보였다. 폭염기간 오존생성 기여도는 화학반응이 가장 큰 음의 기여도가 나타났으며, 수직확산이 가장 큰 양의 기여도를 나타냈다.

폭염기간 각 시나리오별 PA IPR을 분석하기 위해 시계열로 나타냈다(그림 8). 오존농도가 감축된 PM<sub>2.5</sub> scenario, VOCs scenario는 오존농도가 증가한 NO<sub>x</sub> scenario, NO<sub>x</sub> + VOCs scenario보다 평균 약 12.4 ppb의 수직확산, 3.0 ppb의 수직이류가 양의 기여도가 더 큼에도 평균 약 17.0 ppb인 화학반응으로 인한 음의 기여도가 크게 작용하여 오존농도가 감소



**Fig. 8.** Time series plot of process analysis of ozone for CMAQ that simulates (a) NO<sub>x</sub> scenario, (b) VOCs scenario, (c) NO<sub>x</sub> + VOCs scenario, (d) PM<sub>2.5</sub> scenario, during heat wave episode. CHEM (Chemistry, blue), CLDS (Cloud processes and aqueous chemistry, orange), DDEP (Dry deposition, grey), HADV (Horizontal advection, yellow), HDIF (Horizontal diffusion, purple), VDIF (Vertical diffusion, green), ZADV (Vertical advection, dark blue).

로 이어진 것으로 분석된다. 동일한 기상시나리오에서 배출량 삭감으로 인한 배출량 변화가 지표 오존생성 물리·화학적 과정 변화로 이어졌고 이는 결과적으로 오존농도가 달라지는 결과를 나타냈다. 또한 수평이류와 수직확산으로 인해 오존생성 기여도가 높은 것은 서울지역 상층에서 오존농도가 높게 형성되어서 지표로 하강되는 것으로 판단되는데 서울지역 상층에서 오존이 생성되는 것인지 혹은 서울지역 외에서 오존이 생성되어 유입된 것인지 정밀 분석을 위해 지표관측을 비롯한 상층관측도 수반되어야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

2018년 한국은 폭염을 자연재난으로 분류하고, 폭염을 포함한 기후변화에 대한 정책들이 입안되어 실행되고 있다. 본 연구에서는 대기오염정책을 기반한 폭염기간 오존농도변화 분석을 위해 대기오염물질 감축 시나리오를 구성하여 연구를 진행하였다.

먼저 폭염기간 시나리오에 따른 오존농도 개선효과를 VOCs scenario, PM<sub>2.5</sub> scenario, NO<sub>x</sub>+VOCs scenario, NO<sub>x</sub> scenario 순으로 나타냈으며, 수도권지역에 NO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>+VOCs를 각각 30% 저감했을 때 서울지역에서 오히려 오존농도가 증가되는 것으로 분석되었다. 이는 2차 생성 대기오염물질인 오존은 전구물질이 감소하더라도 오존농도는 선형(linear)적으로 감소되지 않는다는 결과를 뜻하며, 질소산화물 배출량이 많아지더라도 고농도 오존이 발생되지 않을 수 있다는 결과를 나타낸다. 그러나 NO<sub>x</sub>는 본 모사기간을 비롯하여 일반적으로 수도권을 포함한 매우 광범위한 지역에 걸쳐 포화 상태를 보이므로(KORUS-AQ, 2016) 수도권 및 주변지역에서 장기적으로 오존농도를 제한할 수 있는 방법은 NO<sub>x</sub> 배출량을 감축하는 것이라고 판단된다. 하지만 단기적으로는 NO<sub>x</sub> 배출량 감축이 오존농도 증가로 이어질 수 있다는 것을 감안해야 하며, 추가적인 VOCs 감축정책이 요구된다. 또한 폭염기간 NO<sub>x</sub> scenario, NO<sub>x</sub>+VOCs sce-

nario에서 오존농도가 증가되는 현상으로 미루어 봐서 기후변화가 지속되어 폭염이 더 잦아지면 일종의 climate penalty로 인해 PM<sub>2.5</sub> 2차생성대기오염정책이 무색해질 수도 있다는 점을 시사한다. 이는 ‘미세먼지 관리 종합대책(‘17.09)’ 및 ‘미세먼지 관리 종합계획(‘19.11)’을 시행하여 배출량을 감축하더라도 기상조건하에, 특히 폭염기간 동안 서울지역 오존농도가 개선되는 것이 아니라 오히려 증가될 수 있음을 의미한다. 따라서 2차 생성 대기오염물질 저감 대책 도입 시 종합적이고 정밀한 분석이 요구된다.

마지막으로 폭염기간 오존생성 물리·화학적 공정의 기여도 분석을 위해 CMAQ의 process analysis 중 IPR 분석을 수행하였다. 폭염발생시 Base scenario의 IPR 결과로 화학반응, 구름과정, 건식침적외 오존생성 음의 기여도를 보이며, 수평확산, 수직이류, 수평이류, 수직확산이 양의 기여도를 보였다. 각 시나리오별 IPR 결과 오존농도가 증가된 시나리오인 NO<sub>x</sub> scenario, NO<sub>x</sub>+VOCs scenario보다 오존농도가 감축된 PM<sub>2.5</sub> scenario, VOCs scenario에서 수직확산, 수직이류가 각각 차지하는 양의 기여도가 크에도 화학반응으로 인한 음의 기여도가 오존농도가 감소로 이어진 것으로 분석된다. 동일한 기상시나리오에서 배출량 삭감으로 인한 배출량 변화가 지표 오존생성 물리·화학적 과정 변화로 이어졌고 이는 결과적으로 오존농도가 달라지는 결과로 나타났으며, 정밀 분석을 위해 지표관측을 비롯한 상층관측이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 2019학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었습니다.

## References

Chen, F., Dudhia, J. (2001) Coupling an Advanced Land Sur-

- face-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity, *Monthly Weather Review*, 129(4), 569-585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129%3C0569:CAALSH%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129%3C0569:CAALSH%3E2.0.CO;2)
- Dennis, R., Fox, T., Fuentes, M., Gilliland, A., Hanna, S., Hogrefe, C., Irwin, J., Rao, S.-T., Scheffe, R., Schere, K., Steyn, D., Venkatram, A. (2010) A framework for evaluating regional-scale numerical photochemical modeling systems, *Environmental Fluid Mechanics*, 10, 471-489. <https://doi.org/10.1007/s10652-009-9163-2>
- Dudhia, J. (1989) Numerical Study Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20) 3077-3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046%3C3077:NSOCOD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046%3C3077:NSOCOD%3E2.0.CO;2)
- Haagen-Smit, A.J. (1952) Chemistry and physiology of Los Angeles smog, *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(6), 1342-1346. <https://doi.org/10.1021/ie50510a045>
- Hong, S.-Y., Dudhia, J., Chen, S.-H. (2004) A Revised Approach to Ice Microphysical Process for Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *American Meteorological Society*, 132(1), 103-120. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132%3C0103:ARATIM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132%3C0103:ARATIM%3E2.0.CO;2)
- Hong, S.-Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes, *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018) Global warming of 1.5°C.
- Kain, J.-S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update, *Journal of Applied Meteorology*, 43(1) 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043%3C0170:TKCPAU%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043%3C0170:TKCPAU%3E2.0.CO;2)
- Kang, Y.-H., Oh, I.-B., Jeong, J.-H., Bang, J.-H., Kim, Y.-K., Kim, S.-T., Kim, E.-H., Hong, J.-H., Lee, D.-G. (2016) Comparison of CMAQ Ozone Simulations with Two Chemical Mechanisms (SAPRC99 and CB05) in the Seoul Metropolitan Region, *Journal of Environmental Science International*, 25(1), 85-97. <https://doi.org/10.5322/JESI.2016.25.1.85>
- Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S.-T. (2019) Review on Ozone Management in US and Recommendations for Domestic Ozone Control, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 370-394. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.370>
- Kim, S.-T., Bae, C.-H., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Moon, N.-K. (2017) PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM<sub>2.5</sub> Conversion Rates for Each Source Category, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 377-392. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.4.377>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2019) Guideline of climatological statistics, <http://book.kma.go.kr/viewer/MediaViewer.ax?cid=33349&rid=5&moi=5240> (accessed on Jun. 30, 2019).
- Korean government (2017) Comprehensive measures for fine dust management, file:///C:/Users/mjkjjh/Downloads/(170926)%20%EB%AF%B8%EC%84%B8%EB%A8%BC%EC%A7%80%20%EA%B4%80%EB%A6%AC%20%EC%A2%85%ED%95%A9%EB%8C%80%EC%B1%85.pdf (accessed on Jun. 30, 2020).
- Korean government (2019) Comprehensive plan for fine dust management, file:///C:/Users/user/Downloads/%EB%AF%B8%EC%84%B8%EB%A8%BC%EC%A7%80%20%EA%B4%80%EB%A6%AC%20%EC%A2%85%ED%95%A9%EA%B3%84%ED%9A%8D(%EC%A0%84%EC%B2%B4%EB%B3%B8)(%EC%B5%9C%EC%A2%85).pdf (accessed on Jun. 30, 2020).
- KORUS-AQ (2016) Introduction to the KORUS-AQ Rapid Science Synthesis Report. <https://espo.nasa.gov/sites/default/files/documents/KORUS-AQ-ENG.pdf> (accessed on Jun. 30, 2020).
- Kwon, H.-Y., Jung, C.-H., Kim, Y.-P. (2016) The Impact of Local Government's Expenditure on Air Quality in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(6), 583-592. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.6.583>
- Liu, X.-H., Zhang, Y., Xing, J., Zhang, Q., Wang, K., Streets, D.-G., Jang, C., Wang, W.-X., Hao, J.-M. (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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.036>
- Luecken, D.-J., Phillips, S., Garwar, G., Jang, C. (2008) Effects of using the CB05 vs. SAPRC99 vs. CB4 chemical mechanism on model predictions: ozone and gas-phase photochemical precursor concentrations, *Atmospheric Environment*, 42(23), 5805-5820. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.056>
- Ministry of Environment (MOE) (2016) Ozone, Be prepared after you know the right way to go, file:///C:/Users/

- user/Downloads/%EC%98%A4%EC%A1%B4,%20%EC%A0%9C%EB%8C%80%EB%A1%9C%20%EC%95%8C%EA%B3%A0%20%EB%8C%80%EB%B9%84%ED%95%B4%EC%9A%94 (2016.12).pdf (accessed on Jun. 30, 2020).
- Ministry of Environment (MOE) (2018) How to respond to high concentrations of ozone, <http://www.jihe.go.kr/isn/board/download.php?bid=environment&cno=283> (accessed on Jun. 30, 2020).
- Mlawer, E.-J., Taubman, S.-J., Brown, P.-D., Iacono, M.-J., Clough, S.-A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research*, 102, 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2010) A Study on the Guidelines for Air Quality Modeling, <http://www.ndsl.kr/ndsl/commons/util/ndslOriginalView.do?dbt=TRKO&cn=TRKO201300007331&rn=&url=&pageCode=PG18> (accessed on Jun. 30, 2020).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Air Quality Modeling Guidelines for Establishing and Evaluating National Atmospheric Policy (Version 1.1), <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5568384> (accessed on Jun. 30, 2020).
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2020) Climate Change Forecast Report on the Korean Peninsula, <file:///C:/Users/user/Downloads/%ED%95%9C%EB%B0%98%EB%8F%84%EA%B8%B0%ED%9B%84%EB%B3%80%ED%99%94%EC%A0%84%EB%A7%9D%EB%B3%B4%EA%B3%A0%EC%84%9C2020.pdf> (accessed on Jan. 30, 2021).
- Russell, A., Dennis, R. (2000) NARSTO critical review of photochemical models and modeling, *Atmospheric environment*, 34(12), 2283-2324. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00468-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00468-9)
- Song, C., Liu, B., Dai, Q., Li, H., Mao, H. (2019) Temperature dependence and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) at an urban site on the north China plain, *Atmospheric Environment*, 207(2018), 167-181. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.03.030>
- World Health Organization (WHO) (2018) Air pollution, [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed on Jun. 30, 2020).
- World Meteorological Organization (WMO) (2017) WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals, [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4166](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166) (accessed on Jun. 30, 2020).
- Zhang, Q., Xue, D., Liu, X.-H., Gong, X., Gao, H.-Q. (2019) Process analysis of PM<sub>2.5</sub> pollution events in a coastal city of China using CMAQ, *Journal of Environmental Sciences*, 79, 225-238. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.09.007>

### Authors Information

전소현 (건국대학교 환경공학과 박사과정)  
 채찬병 (건국대학교 환경공학과 박사과정)  
 박재은 (국립재난안전연구원 공업연구사)  
 선우 영 (건국대학교 사회환경공학부 교수)