

ORIGINAL ARTICLE

대도시 지역의 배출량 저감에 따른 O₃ 농도 변화 분석: 부산광역시 2019년 여름 사례

최현식 · 전원배^{1)*} · 김동진 · 양채영¹⁾ · 문정혁 · 박재형

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 대기환경과학과

Analyzing the Changes in O₃ Concentration due to Reduction in Emissions in a Metropolitan Area : A Case Study of Busan during the Summer of 2019

Hyeonsik Choe, Wonbae Jeon^{1)*}, Dongjin Kim, Chae-Yeong Yang¹⁾, Jeonghyeok Mun, Jaehyeong Park

Division of Earth and Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

¹⁾*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, 46241, Korea*

Abstract

In this study, numerical simulations using community multiscale air quality (CMAQ) were conducted to analyze the change in ozone (O₃) concentration due to the reduction in nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOCs) emissions in Busan. When the NO_x and VOCs emissions were reduced by 40% and 31%, respectively, the average O₃ concentration increased by 4.24 ppb, with the highest O₃ change observed in the central region (4.59 ppb). This was attributed to the decrease in O₃ titration by nitric oxide (NO) due to the reduction of NO_x emissions in Busan, which is classified as a VOCs-limited area. The distribution of O₃ concentration changes was closely related to NO_x emissions per area, and inland emissions were highly correlated with daily maximum concentrations and 8-h average O₃ concentrations. Contrastingly, the effect of emission reduction depended on the wind direction. This suggests that the emission reduction effects may vary depending on the environmental conditions. Further research is needed to comprehensively analyze the emission reduction effects in Busan.

Key words : CMAQ, O₃ concentration, Emissions reduction, WRF

1. 서론

오존(O₃)은 질소산화물(NO_x)과 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compounds ; VOCs) 등의 광화학 반응으로 생성되는 강한 산화성 기체로서, 지표 부근의 고농도 O₃은 천식, 폐렴과 같은 만성 호흡기 질환, 생체면역능력 감소, 심혈관 질환 등을 유발할 수 있

며, 대기질에 부정적인 영향을 미치는 2차 대기오염 물질이다(U.S. EPA, 2006). Jacob and Winner(2009)는 화학수송모델과 전 지구 순환 모델의 결과를 분석하여 미래기후에서의 기온의 상승과 대기 정체의 증가가 중위도의 O₃ 농도를 약 1~10 ppb 상승시킬 것으로 예상하였으며, 국립환경과학원의 2021 대기 환경 연보(NIER, 2022)에 따르면 대한민국의 연평균 O₃ 농도

Received 13 June, 2023; Revised 28 June, 2023;

Accepted 3 July, 2023

*Corresponding author : Wonbae Jeon, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Phone : +82-51-510-2174

E-mail : wbjjeon@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

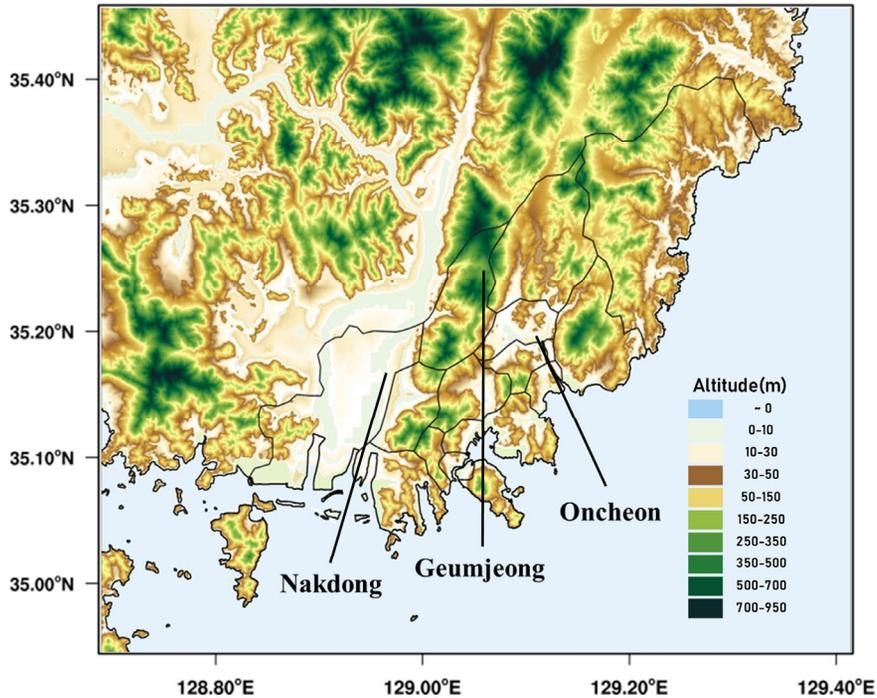


Fig. 1. Topographic distribution of Busan and surround area. “Nakdong”, “Geumjeong”, and “Oncheon” indicate the Nakdong river, the Geumjeong mountain, and the Oncheon stream, respectively.

는 2001년(20 ppb)부터 2011년(23 ppb)까지 연간 0.3 ppb 상승하였으나, 2021년(30 ppb)까지는 연간 0.7 ppb의 상승 폭을 보여 한반도의 O₃ 농도는 점점 더 빠르게 증가하고 있는 상황이다.

특히 한반도 동남쪽에 위치한 부산광역시는 대한민국 7대 광역시 중에서 가장 빠르게 O₃의 평균 농도가 상승하고 있는 지역이며(NIER, 2022), 기후변화로 인해 해륙풍의 영향이 점차 강해짐에 따라 부산지역에서의 O₃ 농도가 증가할 것이라는 연구가 보고된 바 있다(Jeong et al., 2010). 부산보건환경연구원에서 발표한 2021년 부산광역시 대기질 평가 보고서(Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, 2022)에 따르면 O₃이 부산광역시 통합 대기 환경지수 결정률에 미치는 영향은 53.18%로, 미세먼지(12.07%)나 초미세먼지(22.62%)에 비하여 크게 나타났으며 부산지역의 대기질 개선을 위해서는 O₃ 농도의 개선이 중요한 것으로 분석되었다.

하지만, O₃ 농도의 꾸준한 상승으로 인해 O₃이 부산지역의 대기질에 미치는 영향이 증가하고 있음에도 불

구하고 O₃ 생성에 기여하는 전구물질의 배출량에 대한 정보 부족과 생성 메커니즘에 대한 이해 부족으로 O₃ 농도 저감을 위한 대기 환경정책은 상대적으로 미흡한 실정이다(Kang et al., 2019). 부산시에서는 2019년 이후 ‘미세먼지 저감 대책’을 발표하여 미세먼지 30% 감소를 추진하고 있으나(Busan Metropolitan City, 2019), O₃ 농도 저감을 위한 정책은 뚜렷하게 이루어지지 않고 있다. 미세먼지 저감 대책에 의해 감소하는 배출량 중 NO_x와 VOCs는 지표면에서의 광화학반응을 통해 O₃의 생성 및 소멸에 관여하는 O₃의 전구물질이기 때문에, 부산과 같은 대도시 지역의 NO_x와 VOCs 배출량 변화는 O₃ 농도에 밀접한 영향을 미칠 수 있다는 내용이 보고된 바 있다(Sillman, 1995; Vivanco and Andrade, 2006; Jeon et al., 2018).

또한 O₃ 농도 예측 프로그램인 ozone isopleth plotting package for research (OZPIR)을 통해 부산지역에서의 고농도 O₃ 발생 사례에 대해 NO_x 배출량의 영향을 분석한 바 있으나(Do et al., 2007) 배출량 저감이 O₃ 농도 변화에 미치는 영향까지는 살펴보지 않

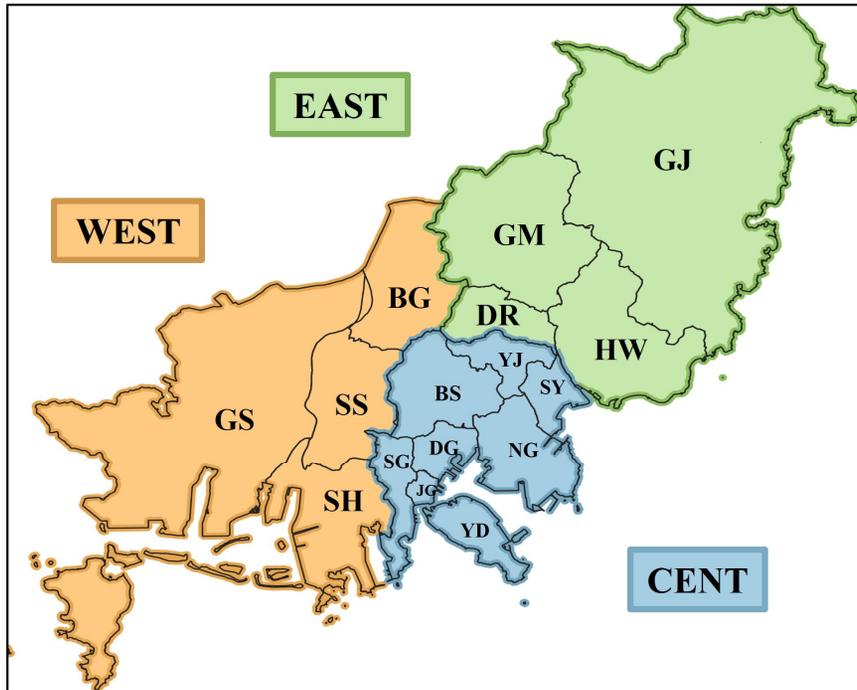


Fig. 2. Administrative division of Busan. The western (WEST) and eastern (EAST) districts were categorized as the border of Geumjeong mountain, and the central (CENT) district is located in the south of Oncheon Stream.

았다. 따라서 본 연구에서는 부산시의 미세먼지 저감 대책으로 인한 배출량의 감소가 부산지역의 O₃ 농도에 어떠한 영향을 미치는지 중규모 기상 모델인 weather research and forecasting (WRF)와 대기질 모델인 community multiscale air quality model (CMAQ)을 이용해 수치 모의하였으며 부산지역의 O₃ 농도 증가에 대한 정량적 분석을 수행하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상 지역

부산은 한반도 동남쪽에 위치한 해양도시이며, 낙동강을 기준으로 동서에 다른 형태의 지형을 가진다. 낙동강 서쪽 지역은 퇴적으로 생긴 낮고 편평한 평지 지형이며, 낙동강 동쪽 지역은 남북으로 길게 뻗은 해발고도 500~700 m의 금정산 줄기와 구룡성 산지 사이에 좁은 평지가 형성된 복잡한 구조를 가진다(Fig. 1). 이러한 지형적 조건에 의해 지역별로 산업 및 주거 지역으로의 특징이 뚜렷하게 나타나며 항구가 위치한 해안 지역에

서는 선박에 의한 배출량이, 구룡성 산지 사이에 위치한 주거 및 상업 지역에서는 도로이동오염원에 의한 배출량이 지배적으로 나타난다(NAIR, 2022).

본 연구에서는 지역별 배출특성의 차이가 배출량 저감 시 대상 지역에 미치는 영향을 알아보기 위해 부산시를 3개의 권역으로 분류하였다. 부산광역시의 생활권 구분 방식(Busan Metropolitan City, 2023)을 이용해 권역을 분류하였으며 금정산 서쪽의 강서구(GS), 북구(BG), 사상구(SS), 사하구(SH) 4개의 구를 서부권(WEST), 온천천 북쪽의 금정구(GM), 기장군(GJ), 동래구(DR), 해운대구(HW) 4개의 구를 동부권(EAST), 금정산과 온천천 사이에 위치한 남구(NG), 동구(DG), 부산진구(BS), 서구(SG), 수영구(SY), 연제구(YJ), 중구(JG), 영도구(YD) 8개의 구를 중부권(CENT)으로 분류하였다(Fig. 2). 각 권역 중에서 가장 인구가 많은 지역은 중부권으로 권역의 면적대비 인구밀도가 가장 높게 나타나 주로 사람들이 주거하고 있는 지역으로 파악되었으며 동부권과 서부권의 경우 산악지형과 농업 및 산업단지가 다수 위치하여 넓은 면적에도 불구하고 중부

Table 1. Area, population, and density of each district in Busan

Region	City	Area (km ²)	Population (10 ⁴)	Density
Total	Busan	770.17	332.23	4,314 /km ²
Western	GS, BG, SS, SH	298.75	92.96	3,112 /km ²
Eastern	GM, GJ, DR, HW	351.77	106.22	3,020 /km ²
Central	NG, DG, BS, SG, SY, YJ, JG, YD	119.66	133.05	11,119 /km ²

Table 2. NO_x and VOCs emissions of Busan classified by SCC_CD in CAPSS 2019 inventory

SCC_CD	Emissions (tons/year)			
	NO _x		VOCs	
Combustion in energy industries	1,249	2.57%	230	0.64%
Non-industrial combustion	4,848	9.98%	171	0.48%
Combustion in manufacturing	1,720	3.54%	72	0.20%
Production process	425	0.87%	238	0.67%
Storage and distribution of fuels	0	0.00%	609	1.71%
Solvent use	0	0.00%	26,346	73.76%
Road transport	14,105	29.05%	2,103	5.89%
Other mobile sources and machinery	6,655	13.71%	762	2.13%
Ship transport	19,258	39.66%	2,615	7.32%
Waste treatment and disposal	267	0.55%	2,341	6.55%
Agriculture	0	0.00%	1	0.00%
Other sources and sinks	11	0.02%	46	0.13%
Fugitive dust	0	0.00%	3	0.01%
Biomass burning	16	0.03%	180	0.50%
Total	48,553	100.00%	35,719	100.00%

권보다 적은 인구가 거주하는 것으로 나타났다(KOSIS, 2023)(Table 1).

2.2. 배출량 자료

환경부가 매년 발표하고 있는 clean air policy support system (CAPSS)는 대기오염물질 배출원 분류 체계(SCC_CD)에 의하여 점, 면, 이동 오염원에서 배출되는 9가지 대기오염물질(Total suspended particles, PM_{2.5}, PM₁₀, SO_x, NO_x, VOCs, NH₃, CO, Black carbon) 배출량을 위, 경도와 TM_X, TM_Y 격자에 따라 나타낸 국가 대기오염물질 자료이다(NAIR, 2022). 2019년 CAPSS 자료에 의하면 부산광역시의 연간 NO_x 배출량은 4.86×10^5 tons, VOCs 배출량은 3.57×10^5 tons로 산정되었으며 NO_x 배출량이 VOCs

배출량에 비해 36% 많은 것으로 나타났다(Table 2).

2.3. 모델 설정

부산지역의 배출량 감소에 의한 O₃ 농도 변화를 보기 위해 기상과 대기질 수치 모의를 수행하였으며, 경계장에 의한 영향을 줄이기 위해 Fig 3와 같이 총 3개의 domain을 설정하였다(Jeong et al., 2012). 중위도 편서풍 지대에 위치한 한반도의 지리적 특성에 기인해 중국 동부와 일본이 포함된 동북아시아 지역(Domain 01)과 한반도 영역(Domain 02)을 각각 27 km와 9 km의 해상도로 수치 모의하였으며, Domain 03은 부산지역의 기상 및 지형을 잘 반영할 수 있도록 1 km 해상도로 수치 모의(Choi et al., 2012 ; Muñoz-Esparza et al., 2018 ; Pinto et al., 2021)하여 해당

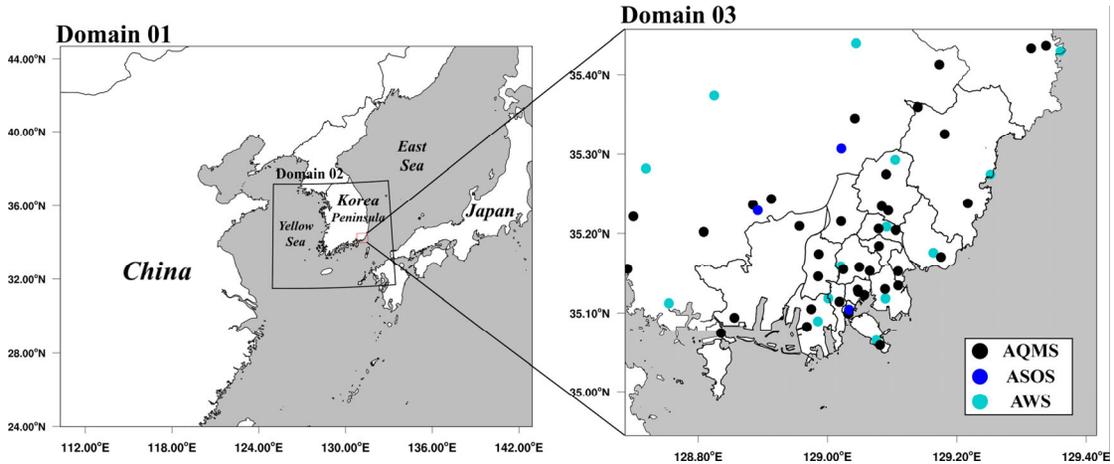


Fig. 3. The domains of WRF and CMAQ numerical simulations, and distribution of air quality monitoring station (AQMS), automated synoptic observing system (ASOS) and automatic weather station (AWS) in Domain 03.

결과를 분석에 이용하였다.

기상 수치 모의를 위해 중규모 기상 모델인 WRF v4.1.1 (Skamarock et al., 2019)를 활용하였으며, WRF 수치 모의를 위한 입력 자료로는 european centre for medium-range weather forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ECMWF re-analysis (ERA) v5 (Hersbach et al., 2020) 재분석 자료를 이용하였다. Barna and Lamb(2000)에 따르면 관측넛징 (Observation nudging) 적용 시 WRF 모델의 기온 및 풍속 모의 정확도 향상이 확인되었고, 그 결과 대기질 모델에서 일 최고 O₃ 농도의 모의 정확도가 20~40% 향상됨이 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 수치 모의과정에서 모델의 모의 정확도를 높이기 위하여 그리드넛징(Domain 01-03)과 관측넛징(Domain 03)을 적용하였으며(Bowden et al., 2012; Jeon et al., 2015; Kim et al., 2016), 관측넛징을 위하여 기상청에서 제공하는 AWS와 ASOS 기상관측자료를 이용하였다.

WRF에서 모의된 기상입력자료를 이용하여 3차원 광화학 모델인 CMAQ v5.3.2 (Byun and Schere 2006; Appel et al., 2021)의 대기질 수치 모의를 수행하였다. 인위적 배출량 자료인 emissions database for global atmospheric research (EDGAR) v6.1 (Crippa et al., 2022)을 이용하여 Domain 01의 배출량을 산정하였으며 Domain 02와 Domain 03의 배출

량은 한반도의 인위적 배출량 자료인 CAPSS 2019와 자연에서 배출되는 배출량 자료인 model of emissions of gases and aerosols from nature (MEGAN) v2.1 (Guenther et al., 2012)을 이용하였다. 수치 모의에 사용된 가스상 물질과 입자상물질의 화학적 메커니즘은 CB06r3와 AERO7을 적용하였으며, WRF와 CMAQ 수치 모의에 사용된 세부 옵션은 Table 3에 나타났다.

2.4. 수치 모의 실험설계

부산지역에서의 배출량 감소에 의한 O₃ 농도 변화를 알아보기 위하여 수치 모의실험을 구성하였다. 광화학 반응을 통해 생성되는 지표 O₃은 기상요소와 밀접한 연관을 가지며, 특히 일 최고기온 및 일사량과 양의 상관관계를 나타내는 것으로 알려져 있다(Cox and Chu, 1996). 본 연구에서는 최고 O₃ 농도가 높게 나타나며, 이에 따른 O₃ 주의보가 가장 빈번하게 발령되었던 여름철(Kleczeck et al., 2014, Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, 2023)을 대상으로 부산지역의 O₃ 농도 변화를 수치 모의하고자 하였으며, 이를 위해 spin-up time을 포함하여 2019년 5월 26일 09 LST부터 2019년 09월 03일 09 LST까지를 수치 모의기간으로 설정하였다.

수치 모의실험은 기존 CAPSS 2019 배출량을 기반으로 한 Base case와 배출량을 감소시킨 Reduce

Table 3. Model configurations for the WRF and CMAQ simulation

WRF v4.1.1	Domain 01	Domain 02	Domain 03
Horizontal resolution	27 km	9 km	1 km
Number of grids	120 x 100	91 x 82	78 x 69
Time step	180 sec	60 sec	6 sec
Nudging option		grid	grid observation
Vertical layers		37 layers	
Initial data		ERA v5	
Time period		2019. 05. 26. 09 LST ~ 2019. 09. 03. 09 LST	
CMAQ v5.3.2	Domain 01	Domain 02	Domain 03
Horizontal resolution	27 km	9 km	1 km
Number of grids	107 x 87	78 x 69	66 x 57
Vertical layers		37 layers	
Emission data	EDGAR v6.1		CAPSS 2019 MEGAN v2.1
Chemical mechanism		CB06r3	
Aerosol Option		AERO7	
Time period		2019. 05. 27. 09 LST ~ 2019. 09. 02. 09 LST	

Table 4. Total amount of emissions in Busan from CAPSS 2019 inventory and reduced amount of emissions applied for the sensitivity simulation (Reduce case)

Emissions amounts	Pollutants(tons/yr)							
	CO	NO _x	SO _x	TSP	PM ₁₀	VOCs	NH ₃	PM _{2.5}
Total	44,239	74,831	24,368	24,023	9,665	74,964	13,105	4,039
Reduction	16,811 (38%)	29,932 (40%)	7,067 (8%)	-	2,803 (29%)	23,239 (31%)	-	1,171 (29%)

case, 두 실험을 수행하였다. 2015년 발표한 부산광역시 미세먼지 발생원별 저감 대책(Jeong et al., 2015)에서 부산시의 총 미세먼지 배출량을 30% 감소시키기 위해서 CAPSS 배출량에 제시되어있는 배출원 분류체계와 일대일 대응 관계를 가지는 삭감대책을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 해당 보고서를 토대로 부산지역의 미세먼지 저감을 위한 배출량 저감이 이루어졌음을 가정하고 Domain 03영역의 각 물질별 배출량을 보고서에서 제시된 비율에 따라 감소시켜 수치 모의하였다. 주요 배출물질 중 O₃의 전구물질인 NO_x와 VOCs의 배출량은 기존의 배출량 대비 각각 40%, 31% 감소하였으

며, 감소 된 배출 총량은 29,932 tons/yr (NO_x), 23,239 tons/yr (VOCs)로 NO_x 배출량의 감소량이 VOCs 대비 1.3배 큰 것으로 분석되었다(Table 4).

3. 결 과

3.1. 부산지역의 NO_x, VOCs 배출량 분포 특성

수치 모의결과와 분석에 앞서 O₃의 주요 전구물질인 NO_x와 VOCs 배출량의 분포 특성을 살펴보았다. Fig. 4는 부산지역의 CAPSS 2019 NO_x 배출량을 SCC_CD에 따라 분류하여 권역별로 나타낸 것이다. 3개의 권역 중

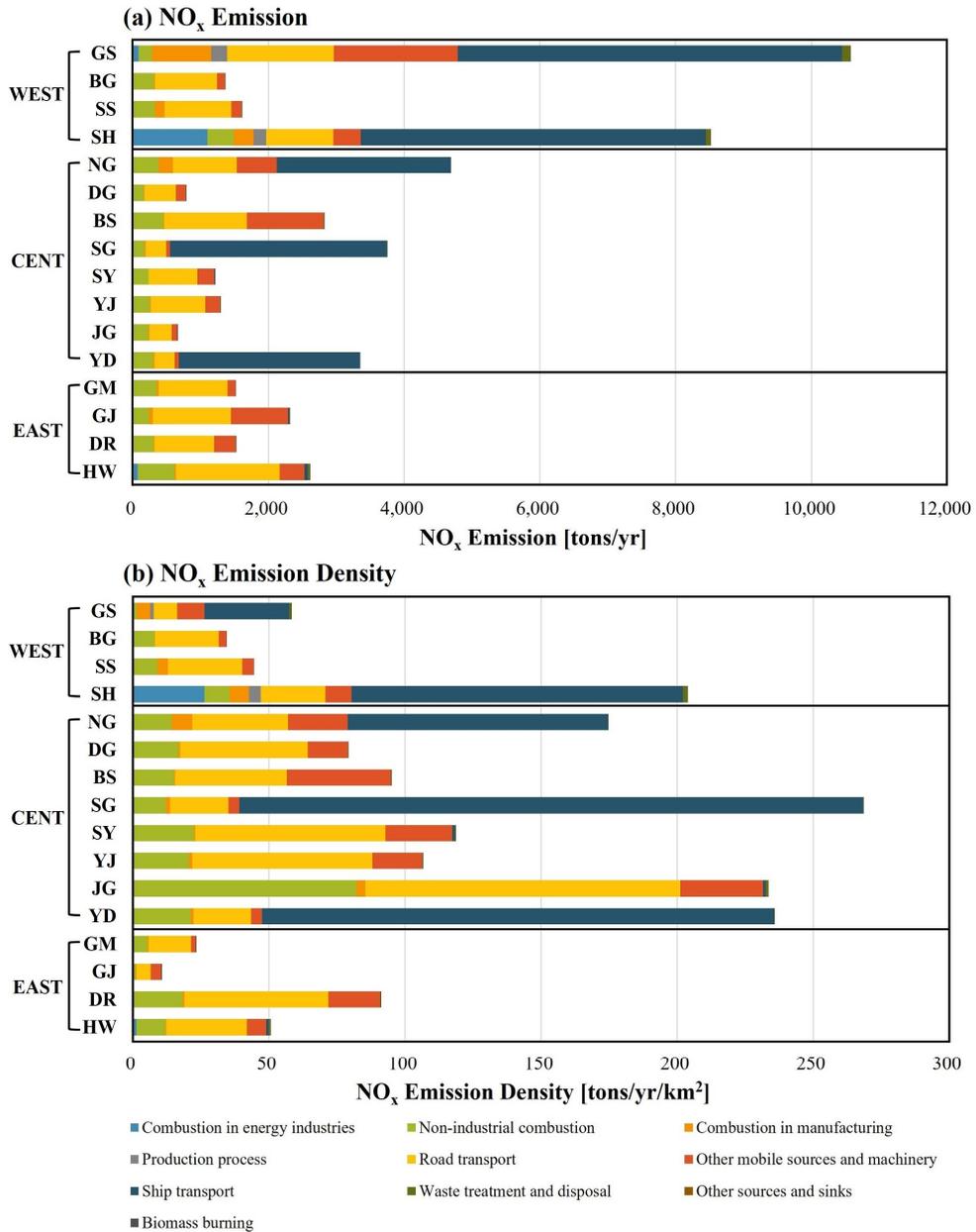


Fig. 4. Amounts of NO_x emission (a) and NO_x emission density (b) with respect to the administrative divisions of Busan.

에서 NO_x 배출량이 가장 많은 권역은 서부권(22,050 tons/yr)으로 선박에 의한 배출량이 가장 많은 비율(48.76%)을 차지하였으며, NO_x 배출량이 가장 적은 권역은 동부권(7,962 tons/yr)으로 나타났다. 부산지역의

NO_x 배출량은 주로 선박(Ship transport, 39.66%)과 도로이동오염원(Road transport, 29.05%)에서 배출되었으며, 서부권(39.50%)은 다른 권역(중부권: 44.28%, 동부권: 57.86%)에 비하여 NO_x 배출량 중 도로이동오

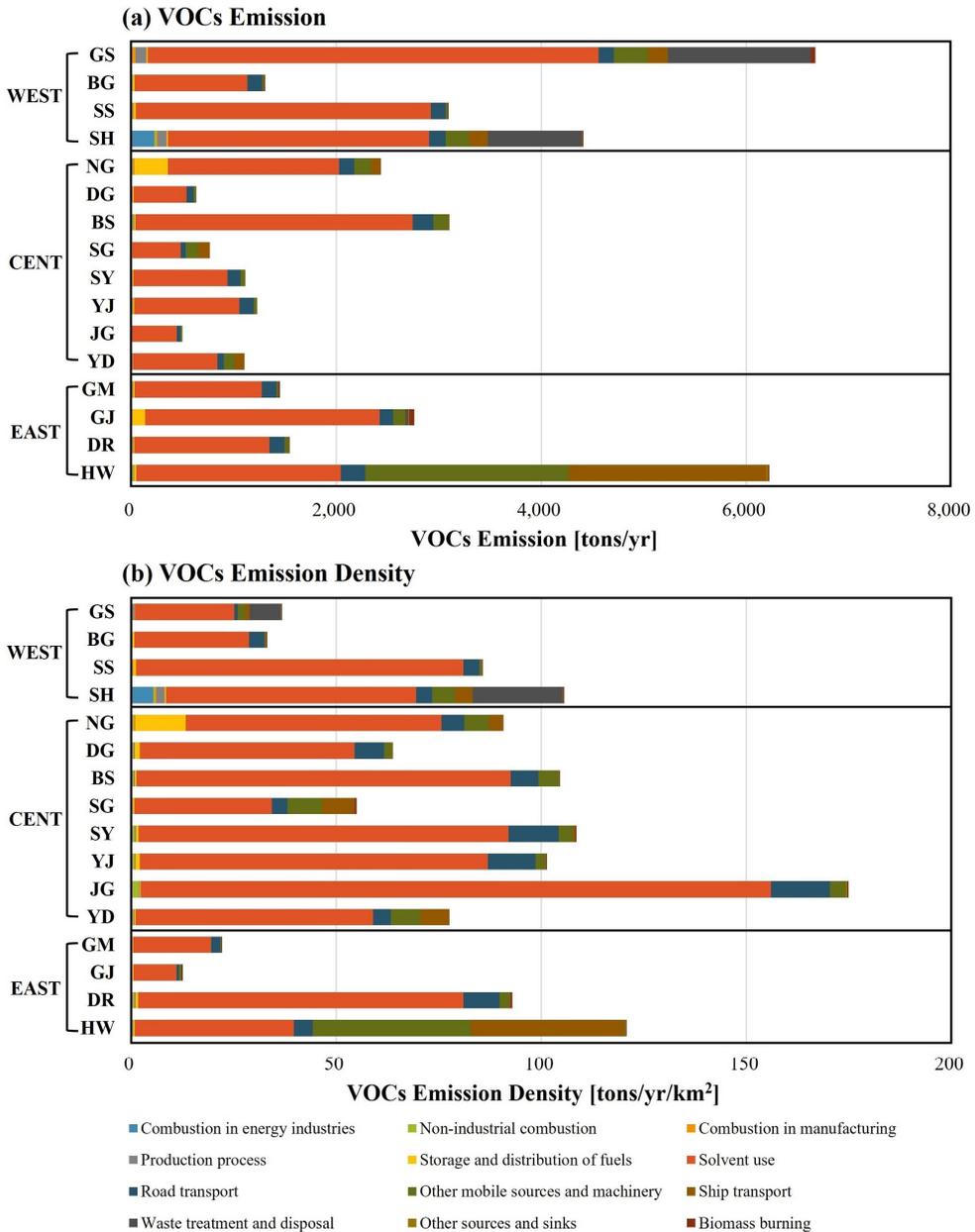


Fig. 5. Amounts of VOCs emission (a) and VOCs emission density (b) with respect to the administrative divisions of Busan.

염원에 의한 배출량의 비율이 낮게 나타났다. 한편 중부권의 NO_x 배출량은 18,541 tons/yr로 서부권에 비해 16% 적게 나타났지만, 서부권에 비해 작은 면적에 배출원이 밀집해 있어 중부권에서의 면적당 NO_x 배출량의

경우 서부권 (73.81 tons/yr/km²)에 비해 약 2.11배 (155.80 tons/yr/km²) 많은 것으로 분석되었다.

부산지역의 CAPSS 2019 VOCs 배출량 또한 서부권 (15,484 tons/yr)에서 가장 많은 VOCs 배출량을 보였

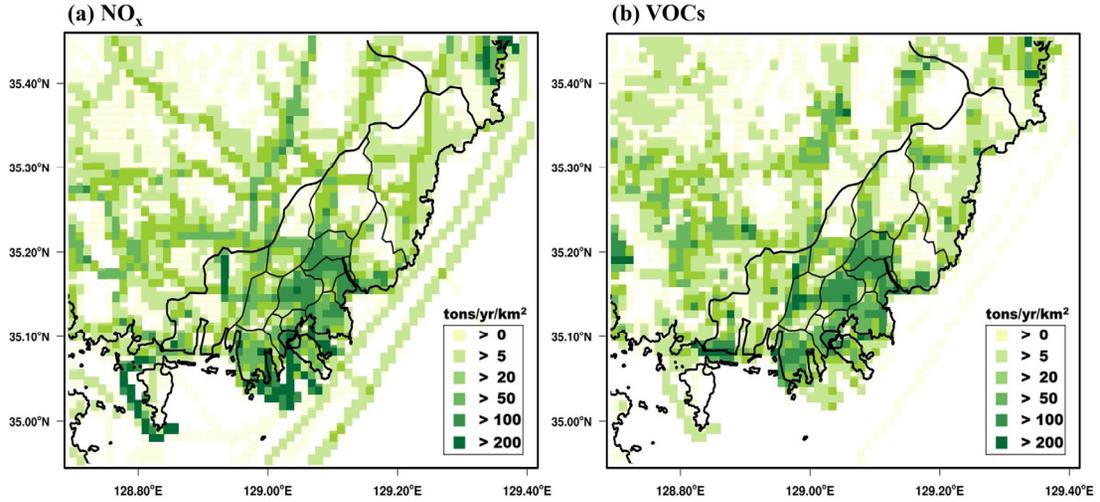


Fig. 6. Spatial distribution of NO_x (a) and VOCs (b) emissions in Busan obtained from the CAPSS 2019 inventory.

으며, VOCs 배출량이 가장 적은 권역은 중부권(10,868 tons/yr)으로 나타났다(Fig. 5). NO_x 배출량과 달리 동부권(11,980 tons/yr)에서도 다른 권역과 비슷한 양의 VOCs 배출량을 보였으며, 특히 해운대구에서 비도로이동오염원(Other mobile source and machinery, 1,981 tons/yr)과 선박에 의한 배출량(1,933 tons/yr)에 의한 배출량이 다른 지역에 비해서 많은 것으로 나타났다. 해운대구를 제외한 모든 지역에서 주로 유기용제 사용과정(Solvent use, 73.76%)에 의해 VOCs 배출이 일어나는 것으로 분석되었으며, 상대적으로 선박(7.32%)과 도로이동오염원(5.89%)에 의한 배출량은 작은 비율로 나타났다. NO_x 배출량과 마찬가지로 면적당 VOCs 배출량은 중부권(90.84 tons/yr/km²)에서 가장 높았지만, NO_x 배출량에 비해 권역별 편차는 작게 나타났다(동부권: 34.06 tons/yr/km², 서부권: 51.83 tons/yr/km²). 부산지역 NO_x와 VOCs 배출량의 수평적 분포를 나타낸 Fig. 6을 보면 부산지역 NO_x 배출원과 VOCs 배출원은 대부분 중부권에 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있다. 부산지역 내에서는 NO_x 배출량이 VOCs 배출량에 비해 상대적으로 크게 나타났으며, 해상을 제외한 동부권과 Domain 03의 외곽지역에서는 VOCs 배출량이 크게 나타나 Domain 03영역에서의 총 VOCs 배출량(74,964 tons/yr)과 NO_x 배출량(74,831 tons/yr)은 비슷한 수준으로 산정되었다.

3.2. 수치 모의 결과검증

수치 모의결과의 신뢰성 검증을 위해 Base case의 수치 모의결과를 바탕으로 2019년 06월 01일 00 LST부터 2019년 08월 31일 23 LST까지의 관측자료와 모델 결과를 비교하여 검증하였다. Do and Jung(2015)의 연구에서 부산지역의 O₃ 농도는 기온, 풍속과 같은 기상요소의 영향을 받는 것으로 나타났으며, NO₂는 O₃의 전구물질이므로 두 물질의 농도는 강한 상관관계를 가지는 것으로 알려져 있다(Mehdipour and Memarianfard, 2017; Zoran et al., 2020). 따라서 수치 모의검증을 위해 ASOS의 기온, 풍속 관측자료와 AQMS의 O₃, NO₂ 농도 관측자료를 활용하였으며, 모델 결과는 기상 및 대기질 관측장비가 위치한 지점에 해당하는 격자의 수치 모의결과를 이용하였으며, Domain 03의 각 측정소에서 관측한 시간별 관측결과와 모델 결과를 서로 비교하여 수치 모의 결과검증을 진행하였다. 모의 결과검증을 위한 통계치로는 root mean squared error (RMSE)(식 1), mean bias error (MBE)(식 2), index of agreement (IOA)(식 3)를 이용하였으며, 모델값은 M, 관측값은 O로 나타내었다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (M - O)^2} \tag{1}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_1^n (M - O) \tag{2}$$

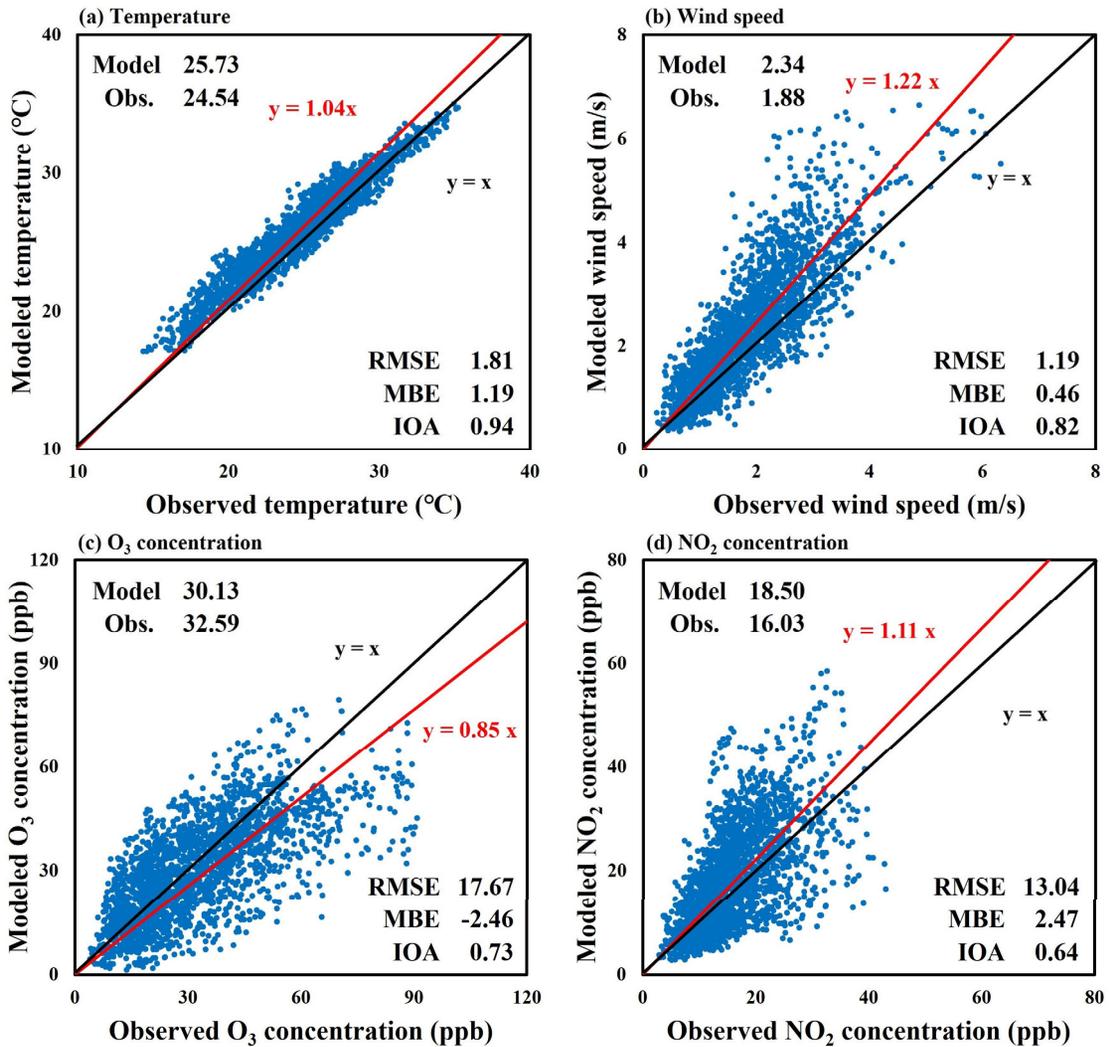


Fig. 7. Comparison of WRF and CMAQ simulation results with corresponding observations for temperature (a), wind speed (b), O₃ (c), and NO₂ (d) during the simulation period.

$$IOA = 1 - \left[\frac{\sum_1^n (O - M)^2}{\sum_1^n (|M - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2} \right] \quad (3)$$

기온과 풍속의 경우 IOA 값이 각각 0.94, 0.82로 나타나 기상 모델의 수치 모의결과가 관측의 경향을 잘 모의하고 있는 것으로 판단되었으며, O₃와 NO₂의 경우

RMSE 값이 17.67 ppb, 13.04 ppb, MBE 값이 각각 -2.46 ppb, 2.47 ppb로 나타나 다소 과소, 과대 모의하는 경향이 확인되었다. 하지만 선행연구에서 WRF 모델의 풍속 과대모의에 의해 O₃ 농도가 과소 모의되는 경향이 보고된 바 있고(Jeon et al., 2011), O₃와 NO₂의 검증 결과가 Kim et al.(2020)에서 제시한 기준치를 만족하는 것으로 나타났으므로 모델이 관측값의 변동을 충분히 설명한다고 판단하였다(Fig. 7).

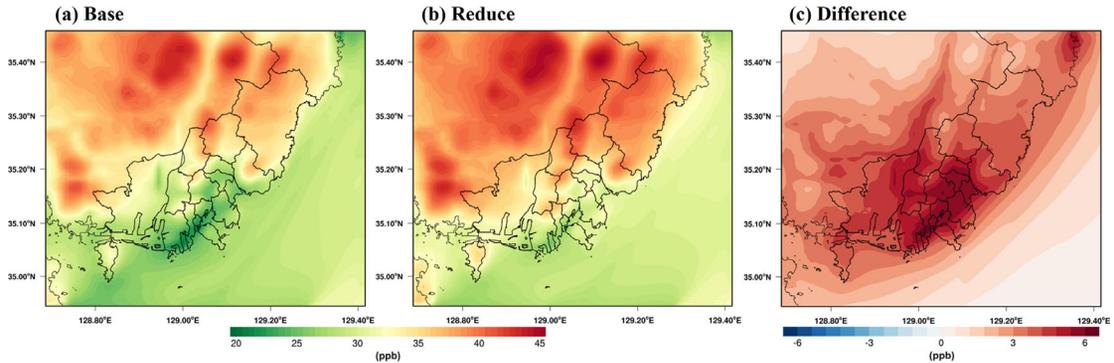


Fig. 8. Spatial distributions of O₃ concentration in Domain 03 of Base case (a), Reduce case (b), and their difference (c).

Table 5. Differences between the reduction case and the base case in simulated O₃ concentration, daily maximum O₃ concentration, and 8-hour average O₃ concentration by region.

Region	O ₃ concentration (ppb)		
	Mean	1-hour	8-hour
Total	4.24	3.65	4.12
Western	4.17	3.62	3.99
Eastern	3.69	2.83	3.29
Central	4.59	4.07	4.60

3.3. CMAQ 수치 모의결과

3.3.1. 배출량 저감에 따른 부산지역 O₃ 농도 변화

부산지역의 배출량 감소로 인한 O₃ 농도 변화분포를 분석하기 위하여 2019년 여름철의 평균 O₃ 농도 모의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 배출량의 저감에 의해 부산지역의 평균 O₃ 농도는 28.32 ppb(Base case)에서 32.57 ppb(Reduce case)로 4.24 ppb 증가하는 것으로 나타났다. 평균 O₃ 농도가 가장 작게 상승한 지역은 중부권의 영도구로 나타났으며(Base: 27.60 ppb, Reduce: 29.63 ppb) 가장 크게 상승한 지역은 중부권의 부산진구로 나타났다(Base: 25.66 ppb, Reduce: 31.24 ppb). 부산지역의 평균 O₃ 농도상승은 O₃ 관리 대책에 의해 주로 관리되고 있는 일 최대 O₃ 농도와 8시간 평균 O₃ 농도의 상승으로 이어졌으며, 부산지역 평균 일 최대 O₃ 농도는 3.62 ppb(Base: 47.51 ppb, Reduce: 51.13 ppb), 8시간 평균 O₃ 농도는 4.12 ppb(Base: 40.03 ppb, Reduce: 44.15 ppb) 상승하였다. 두 항목 모두 가장 크게 상승한 권역은 중부권으

로 나타났는데, 일 최대 O₃ 농도의 경우 중부권의 중구에서 4.84 ppb 상승하였으며(Base: 39.58 ppb, Reduce: 44.43 ppb), 8시간 평균 O₃ 농도는 중부권의 부산진구에서 5.51 ppb 상승하였다(Base: 38.36 ppb, Reduce: 43.88 ppb)(Table 5).

지표에서의 O₃ 농도는 각 배출량의 변화에 의해 단순히 증가하거나 감소하는 것이 아니라 대기 중의 다양한 전구물질 간의 비율에 따라 결정된다(Sillman and He, 2002; Duncan et al., 2010; Yang et al., 2019). 배출량 변화에 의한 지표 O₃ 농도 변화 추정을 위해서는 NO_x와 VOCs의 상대적 농도 비율에 따라 해당 지역을 NO_x-limited 또는 VOCs-limited 지역으로 구분하며, 일반적으로 VOCs/NO_x의 비율이 8:1 미만일 때 해당 지역을 VOCs-limited 지역으로 분류한다(Seinfeld, 1989; F. Geng et al., 2008). 선행연구에서 부산지역은 VOCs-limited 지역으로 분류된 바 있으며(Do et al., 2007; Jeon, 2014), 본 연구의 수치 모의 결과(Base case)에서도 부산지역은 평균 VOCs/NO_x 농도 비율이 8:1보다 낮은 1.03:1로 나타

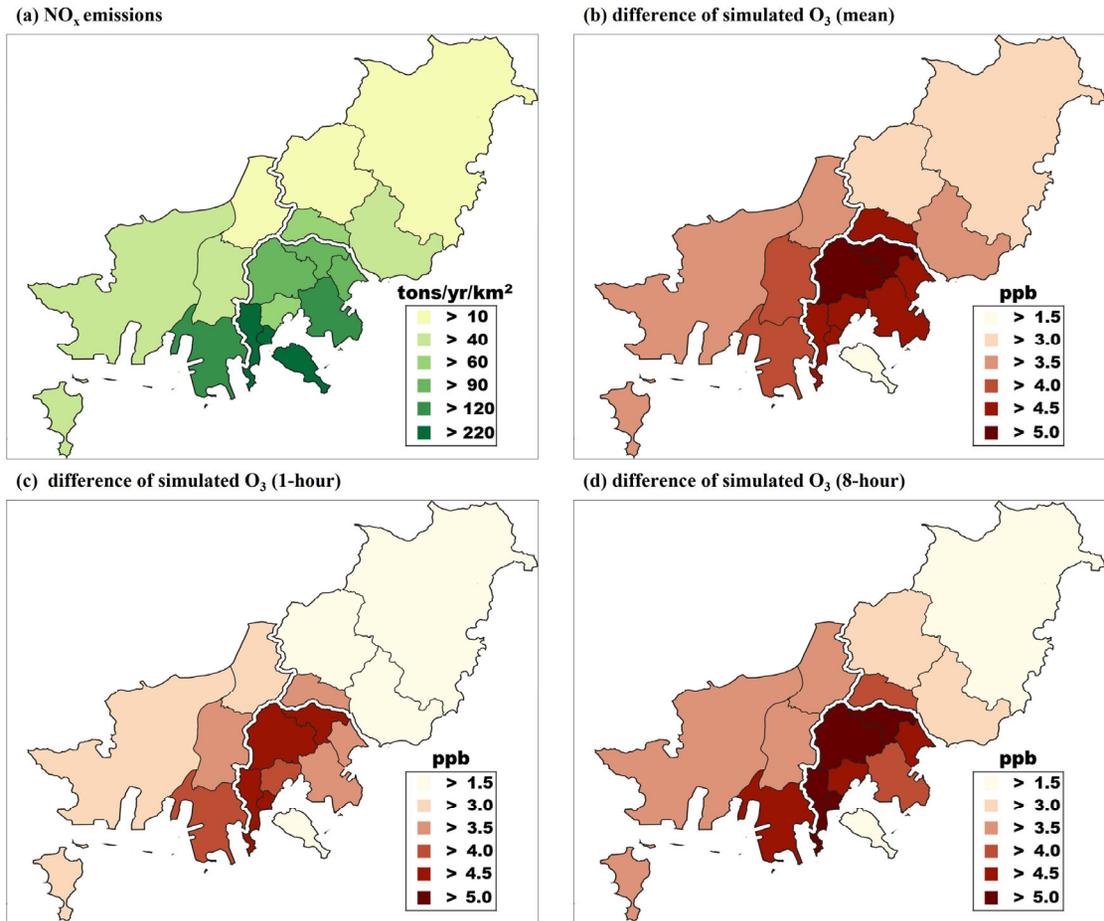


Fig. 9. Distributions of NO_x Emission per area from CAPSS 2019 inventory (a) and differences in regional mean O_3 concentration (b), daily maximum O_3 concentration (c), and 8-hour average O_3 concentration (d) between the Reduce case and the Base case.

나 VOCs-limited 지역의 특징을 보이는 것으로 확인되었다.

VOCs-limited 지역에서는 일반적으로 VOCs 배출량의 감소에 의해 O_3 농도가 감소하지만, NO_x 배출량의 감소는 오히려 O_3 농도를 증가시킬 수도 있는 것으로 알려져 있다(Seinfeld and Pandis, 2016). NO_x 배출량 감소에 의한 O_3 농도의 증가는 주로 NO 농도의 감소에 의한 O_3 적정($\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$) 감소에 의한 것으로 설명된다. 본 연구에서는 미세먼지 저감 대책의 적용에 따라 부산시의 NO_x 와 VOCs 배출량이 모두 감소하였으나 O_3 의 농

도는 전 지역에서 상승하는 모습이 나타났는데, 이는 NO_x 배출량 감소에 의한 O_3 증가량이 VOCs 배출량 감소에 의한 O_3 감소량보다 상대적으로 더 많았기 때문인 것으로 분석된다. 이러한 결과는 VOCs-limited 지역에서 NO_x 배출량 감소가 VOCs 배출량 감소에 비해 클 때 O_3 의 농도가 상승함을 보인 Yin et al.(2021)의 연구결과와 일치한다. 본 연구에서 VOCs 배출량(23,239 tons/yr)은 NO_x 배출량(29,932 tons/yr)보다 29% 적게 감소하였으며 이러한 배출량 감소의 차이에 의해 VOCs 배출량의 감소에 의한 영향보다 NO_x 배출량 감소의 영향이 더

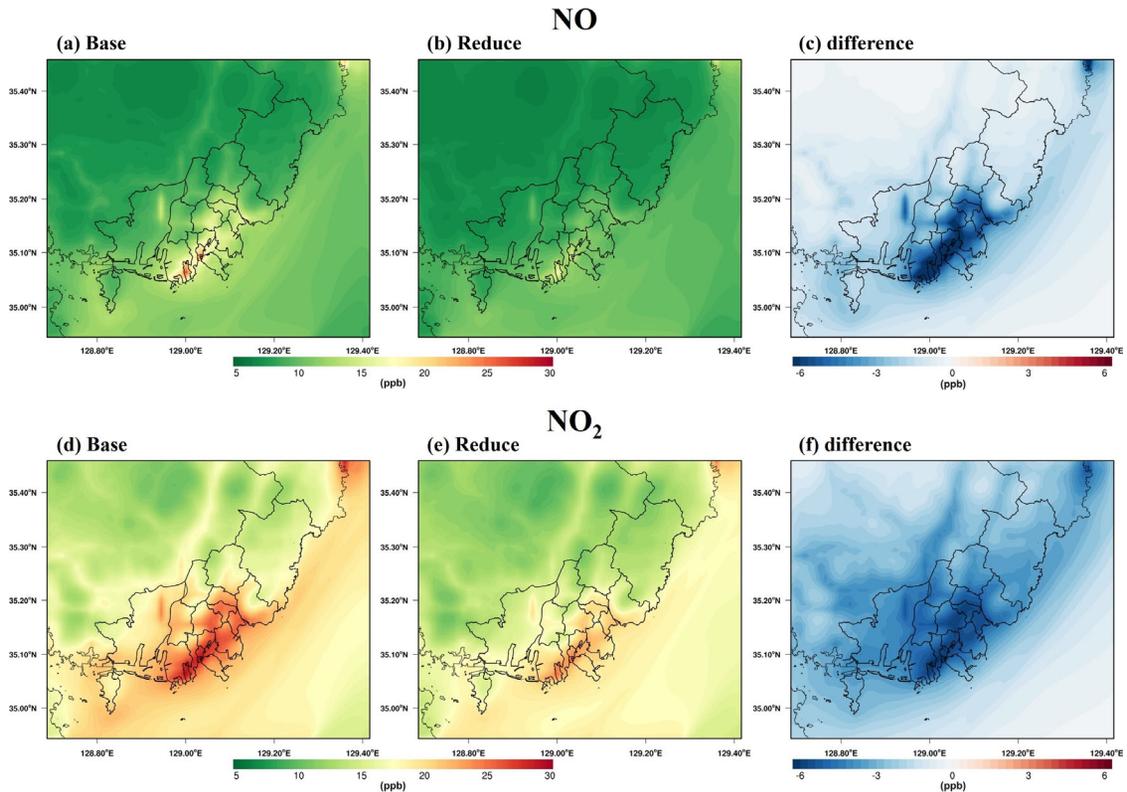


Fig. 10. Spatial distributions of NO (a,b,c) and NO₂ (d,e,f) concentrations in Domain 03 of Base case, Reduce case, and their differences.

크게 나타나 결과적으로는 O₃ 농도의 증가를 야기하게 된 것으로 해석된다.

한편 NO의 적정 효과감소에 의한 O₃ 농도의 상승은 일반적으로 광화학 반응에 의한 O₃의 생성이 제한되는 야간에 뚜렷하게 일어나는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에서는 야간(19 LST-07 LST)뿐만 아니라 주간(07 LST-19 LST)에도 O₃ 농도의 증가가 뚜렷하게 나타남이 확인되었다. 이는 주간 시간에 NO의 적정 감소에 의한 O₃ 농도증가가 배출량 감소에 의한 광화학 O₃ 생성량 감소에 비해 컸기 때문에 나타난 결과로 해석된다. 이러한 결과들은 부산지역의 배출량 저감에 의한 O₃ 농도증가가 VOCs 배출량에 비해 상대적으로 감소 폭이 컸던 NO_x 배출량에 의해 지배적으로 영향을 받았음을 잘 설명해 준다. 따라서 부산지역의 현실적인 O₃ 농도 저감을 위해서는 NO_x 배출량 감소에 상응하는 VOCs 배출량 감소정책이 수반되어야 할 것으로 사료된다.

3.3.2. O₃ 농도 변화에 대한 NO_x 배출량의 영향

앞서 살펴본 바와 같이 배출량 저감에 의해 부산지역의 O₃ 농도는 오히려 증가하였고, 이러한 O₃ 농도의 증가는 주로 NO_x 배출량의 감소에 따른 것으로 분석되었다. 이러한 배출량의 감소에 의한 O₃ 농도증가는 중부권에서 가장 크게 나타났으며 CAPSS 2019 배출량 자료에 따르면 중부권은 가장 높은 면적당 NO_x 배출량을 보인 권역으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 면적당 NO_x 배출량의 분포와 배출량 저감에 의한 O₃ 농도 변화분포의 상관성에 대해 추가적으로 분석하였다.

Fig. 9는 부산지역의 면적당 NO_x 배출량과 NO_x 배출량 감소로 인한 O₃ 농도 변화를 권역별로 구분하여 나타낸 것이다. 면적당 NO_x 배출량이 낮은 동부권(22.45 tons/yr/km²)과 서부권(37.82 tons/yr/km²)에서는 O₃의 농도 변화(동부권: 3.69 ppb, 서부권: 4.17 ppb)가 작게 나타났으며, 면적당 NO_x 배출량이 다른

Table 6. Correlation between NO_x Emission per area from CAPSS 2019 inventory and differences of simulated O₃ concentration, daily maximum O₃ concentration and 8-hour average O₃ concentration between the Reduce case and the Base case.

Emis	Correlation		
	Mean	1-hour	8-hours
Total	0.16	0.37	0.31
Land	0.54	0.65	0.61

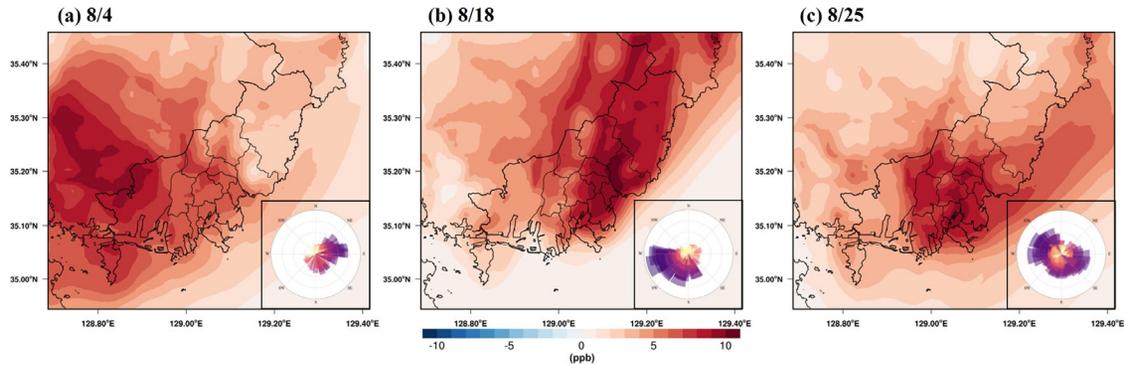


Fig. 11. Differences of simulated O₃ (Reduce case - Base case) in Domain O₃ and frequencies of wind direction in Busan during the three days (8/4, 8/18, 8/25) (a,b,c).

권역에 비하여 높은 중부권(84.40 tons/yr/km²)에서는 상대적으로 큰 O₃ 농도 변화(4.59 ppb)를 보였다(Fig. 9-b). 일 최대 O₃ 농도, 8시간 평균 O₃ 농도 변화분포 또한 이와 비슷하게 나타났으며, 중부권에서의 일 최대 O₃ 농도는 4.07 ppb, 8시간 평균 O₃ 농도는 4.60 ppb 상승하여 각각 3.62 ppb, 3.99 ppb 상승한 서부권과 2.83 ppb, 3.29 ppb 상승한 동부권에 비해 배출량 저감에 따른 영향이 크게 나타났다.

이러한 경향은 O₃ 농도뿐만 아니라 전구물질인 NO와 NO₂의 농도에서도 유사하게 나타났다. Base case와 Reduce case의 NO와 NO₂ 농도를 나타낸 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 중부권의 NO와 NO₂ 농도는 각각 5.75 ppb, 5.08 ppb 감소하였으며, 중부권을 중심으로 한 NO와 NO₂의 농도 감소 패턴은 Fig. 8-c에 나타낸 O₃의 농도증가 패턴과 매우 유사하였다. 이는 부산 지역의 배출량 저감에 의한 O₃ 농도 변화가 면적당 NO_x 배출량의 분포와 밀접한 연관을 가진다는 것을 의미하는 결과이다.

한편, 중부권에 위치한 영도구의 경우 다른 중부권

지역(144.08 tons/yr/km²)보다 63% 높은 면적당 NO_x 배출량(235.74 tons/yr/km²)을 나타냈지만, O₃ 농도는 중부권 내의 다른 지역들(4.96 ppb)에 비해 59% 낮게 증가하여 부산 내에서 가장 작은 O₃ 농도 변화(2.03 ppb)를 보였다. 이 결과는 영도구에 위치한 AQMS 지점의 위치가 영도구 외곽지역에 위치해 영도구에서 배출되는 NO_x 배출량의 영향을 작게 받았고(Fig. 3), 영도구의 NO_x 배출량 대부분이 선박 배출량(79.8%)인 것에서 기인한다. 선박에 의한 NO_x의 배출은 항구 및 해안에 집중되어 도심 대기에 미치는 영향이 작은 반면 도로이동오염원에 의한 NO_x 배출은 주로 주거 지역에서 나타나기 때문에 도심 대기에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다(Tiwari et al., 2015; Chlebowska et al., 2019). 본 연구에서 선박에 의한 배출량을 포함한 Total 배출량과 내륙에서의 배출량만 산정한 Land 배출량의 지역별 배출밀도와 O₃ 농도 변화분포의 상관관계를 분석한 결과, 평균 O₃ 농도 변화(상관계수: 0.54), 일 최대 O₃ 농도 변화(상관계수: 0.65), 8시간 평균 O₃ 농도 변화(상관계수: 0.61) 모두 Land 배출량과 더 높

은 상관관계를 나타냈다(Table 6). 이러한 결과는 NO_x 저감 대책 마련 시 전체 NO_x 배출량에 대한 획일적인 저감보다는 권역별 배출특성을 고려한 항목별 차등 저감이 효율적일 수 있음을 의미한다.

3.3.3. 배출량 저감에 따른 O₃ 농도 변화의 사례 일별 차이

본 연구에서는 2019년 여름철의 수치 모의결과를 이용하여 부산지역의 배출량 저감에 따른 O₃ 농도 변화의 평균적인 분포를 분석하였다. 하지만 Jeon et al.(2014)의 연구에서 O₃ 농도에 대한 NO_x와 VOCs 배출량의 영향은 풍계에 따라 달라질 수 있음이 보고된 바 있으며, 특히 부산지역은 복잡한 지형적 특성으로 인해 계절에 따른 기상 조건 및 풍계의 변화가 뚜렷하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Jung et al., 2007). 본 연구에서는 2019년 여름철을 대상으로 배출량 저감에 의한 평균적인 영향을 살펴보았으나 해당 결과는 풍계에 따라 달라질 수 있으므로 일반화된 해석에는 한계가 있을 수 있다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 부산지역의 배출량 저감에 따른 O₃ 농도 변화분포는 풍계에 따라 유의미한 차이를 보였다. 동풍계열의 바람이 지속해서 나타났던 2019년 8월 4일에는 서부권(7.40 ppb)의 O₃ 농도 변화가 다른 권역(5.76 ppb)에 비해 1.64 ppb 높았고, 2019년 8월 18일의 경우 남서-북동 방향으로의 종관풍이 지배적으로 나타나 동부권(10.28 ppb)에서의 O₃ 농도 변화가 다른 권역(7.11 ppb)에 비해 뚜렷하게 나타났다. 2019년 8월 25일에는 뚜렷한 종관풍이 나타나지 않고 다양한 풍향의 국지풍이 복잡하게 나타나 면적당 NO_x 배출량이 높은 중부권에서의 O₃ 농도증가(8.39 ppb)가 타 권역(7.00 ppb)에 비해 뚜렷했다.

이러한 결과는 부산지역의 배출량 저감에 따른 O₃ 농도 변화 패턴이 계절 및 기상 조건에 따라 달라질 수 있음을 잘 보여주며, 본 연구에서 제시된 분석 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 다른 사례에 대한 추가적인 분석이 필요함을 시사한다. 실제로 부산지역의 O₃ 농도 상승은 기온의 상승 및 기후의 변화로 인하여 여름뿐만 아니라 봄, 가을에도 진행되고 있으며(Kang et al., 2019), 계절에 따라 기상 조건 및 풍계가 다르게 나타날 수 있다. 따라서 부산지역의 배출량 저감에 따른 O₃ 농도 변화에 관한 일반화 된 결론 도출을 위해서는 다양한 사례에 대한 충분한 후속 연구가 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 NO_x 배출량의 감소에 따른 부산지역의 O₃ 농도 변화분석을 위해 중규모 기상 모델인 WRF와 대기질 모델인 CMAQ을 이용하여 부산지역 여름의 대기질 수치 모의실험을 수행하였다. 2019년 CAPSS 배출량을 이용한 Base case와 미세먼지 저감 대책에 따라 배출량을 감소시킨 Reduce case를 각각 수치 모의하였으며, Reduce case에서 평균적으로 4.24 ppb 높은 O₃ 농도가 나타나 부산지역의 배출량 저감이 O₃ 농도의 전반적인 상승을 유발하는 것으로 확인되었다.

배출량 저감 시 부산지역에서 전반적으로 O₃ 농도가 상승하는 것은 부산지역이 VOCs-limited 지역이기 때문으로 분석되었다. VOCs 배출량에 비해 NO_x 배출량이 과다한 부산지역에서 배출량 저감에 의한 O₃ 농도의 변화는 지역의 면적당 NO_x 배출량이 많을수록 크게 나타났으며, 선박에서 배출되는 배출량을 제외한 내륙의 배출량과 더 밀접한 상관관계를 가져 다른 권역 대비 중부권에서 더 큰 O₃ 농도상승이 나타났다.

본 연구에서는 2019년의 CAPSS 배출량과 EDGAR v6.1의 배출량 정보를 이용하여 부산지역의 대기질을 모의하였기 때문에 다른 배출량 정보를 이용하였을 때 대기질 수치 모의결과의 차이가 발생할 수 있다. 또한, 풍계 등 기상 조건에 따라서 농도 변화 패턴은 다르게 나타날 수 있으므로 정확한 배출량 자료를 기반으로 한 다양한 사례에 대한 수치 실험이 수행되어야만 부산지역의 배출량 저감에 따른 O₃ 농도 변화를 좀 더 객관성 있게 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03044834)

REFERENCES

Appel, K. W., Bash, J. O., Fahey, K. M., Foley, K. M., Gilliam, R. C., Hogrefe, C., Hutzell, W. T., Kang, D., Mathur, R., Murphy, B. N., 2021, The community multiscale air quality (CMAQ) model versions 5.3 and 5.3. 1: system updates and evaluation, Geosci. Model

- Dev., 14, 2867-2897.
- Barna, M., Lamb, B., 2000, Improving ozone modeling in regions of complex terrain using observational nudging in a prognostic meteorological model, *Atmos. Environ.*, 34, 4889-4906.
- Bowden, J. H., Otte, T. L., Nolte, C. G., Otte, M. J., 2012, Examining interior grid nudging techniques using two-way nesting in the WRF model for regional climate modeling, *J. Clim.*, 25, 2805-2823.
- Busan Metropolitan City, 2019, Guidelines for Reducing particle matter, <https://www.busan.go.kr/depart/cleanair02>.
- Busan Metropolitan City, 2023, 2040 Busan City Basic Plan, <https://book.busan.go.kr/Viewer/8TM2BNFK821V>.
- Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, 2022, The Annual Report of Busan Metropolitan City 2021, <https://book.busan.go.kr/Viewer/L4KZJRQNC2YF>.
- Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, 2023, The Annual Report of Busan Metropolitan City 2022, <https://book.busan.go.kr/Viewer/F52FLJ7LE9F8>.
- Byun, D., Schere, K. L., 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.
- Chlebowska-Styś, A., Kobus, D., Zathey, M., Sówka, I., 2019, The impact of road transport on air quality in selected Polish cities, *Ecol. Chem. Eng. A*, 26, 19-36.
- Choi, H. J., Lee, H. W., Jeon, W. B., Lee, S. H., 2012, The numerical modeling the sensitivity of coastal wind and ozone concentration to different SST forcing, *Atmos. Environ.*, 46, 554-567.
- Cox, W. M., Chu, S. H., 1996, Assessment of interannual ozone variation in urban areas from a climatological perspective, *Atmos. Environ.*, 30, 2615-2625.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., Pagani, F., Solazzo, E., 2022, EDGAR v6.1 global air pollutant emissions.
- Do, W. G., Jung, W. S., 2015, A Study on the characteristics of antecedent meteorologic conditions on high ozone days in Busan, *J. Environ. Sci. Int.*, 24, 993-1001.
- Do, W. G., Lee, H. W., Jung, W. S., 2007, A Numerical simulation of high ozone episode using OZIPR in Busan, *J. Environ. Sci. Int.*, 16, 985-994.
- Duncan, B. N., Yoshida, Y., Olson, J. R., Sillman, S., Martin, R. V., Lamsal, L., Hu, Y., Pickering, K. E., Retscher, C., Allen, D. J., 2010, Application of OMI observations to a space-based indicator of NO_x and VOC controls on surface ozone formation, *Atmos. Environ.*, 44, 2213-2223.
- Geng, F., Tie, X., Xu, J., Zhou, G., Peng, L., Gao, W., Tang, X., Zhao, C., 2008, Characterizations of ozone, NO_x, and VOCs measured in Shanghai, China., *Atmos. Environ.*, 42, 6873-6883.
- Guenther, A., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L., Wang, X., 2012, The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1471-1492.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., 2020, The ERA5 global reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146, 1999-2049.
- Jacob, D. J., Winner, D. A., 2009, Effect of climate change on air quality, *Atmos. Environ.*, 43, 51-63.
- Jeon, B. I., 2014, Characteristics of ozone concentration weekend effect in Busan area, *J. Environ. Sci. Int.*, 23, 861-871.
- Jeon, W., Choi, Y., Lee, H. W., Lee, S. H., Yoo, J. W., Park, J., Lee, H. J., 2015, A Quantitative analysis of grid nudging effect on each process of PM_{2.5} production in the Korean Peninsula, *Atmos. Environ.*, 122, 763-774.
- Jeon, W., Choi, Y., Souri, A. H., Roy, A., Diao, L., Pan, S., Lee, H. W., Lee, S. H., 2018, Identification of chemical fingerprints in long-range transport of burning induced upper tropospheric ozone from Colorado to the North Atlantic Ocean, *Sci. Total Environ.*, 613, 820-828.
- Jeon, W. B., Lee, H. W., Lee, S. H., Choi, H. J., Kim, D. H., Park, S. Y., 2011, Numerical study on the impact of meteorological input data on air quality modeling on high ozone episode at coastal region, *J. Korean Soc. Atmos.*, 27, 30-40.
- Jeon, W. B., Lee, S. H., Lee, H., Park, C., Kim, D. H., Park, S. Y., 2014, A Study on high ozone formation mechanism associated with change of NO_x/VOCs ratio at a rural area in the Korean Peninsula, *Atmos. Environ.*, 89, 10-21.
- Jeong, J. P., Yi, S. M., Jung, S. H., Kim, M. J., Heo, J. B., 2015, Reduction plan by source of particle matters in Busan Metropolitan City.
- Jeong, Y. M., Lee, H. W., Lee, S. H., Choi, H. J., Jeon, W. B., 2010, Numerical study on the impact of regional warming on the meteorological field and ozone concentration over the South-Eastern part of the Korean peninsula, *J. Environ. Sci. Int.*, 19, 1431-1445.
- Jeong, Y. M., Lee, S. H., Lee, H. W., Jeon, W. B., 2012, Numerical study on the process analysis of ozone production due to emissions reduction over the Seoul metropolitan area, *J. Environ. Sci. Int.*, 21, 339-349.
- Jung, W. S., Lee, H. W., Park, J. K., 2007, Analysis of local

- wind in Busan metropolitan area according to wind sector division-part III: Division of local wind sector over Busan, *J. Environ. Sci. Int.*, 16, 311-321.
- Kang, Y. H., Kim, Y. K., Hwang, M. K., Jeong, J. H., Kim, H., Kang, M. S., 2019, Spatial-temporal variations in surface ozone concentrations in Busan metropolitan area, *J. Environ. Sci. Int.*, 28, 169-182.
- Kim, C. H., Lee, S. H., Jang, M., Chun, S., Kang, S., Ko, K. K., Lee, J. J., Lee, H. J., 2020, A Study on statistical parameters for the evaluation of regional air quality modeling results-Focused on fine dust modeling, *J. Environ. Impact Assess.*, 29, 272-285.
- Kim, T., Jeong, J. H., Kim, Y. K., 2016, Sensitivity analysis of the WRF model according to the impact of nudging for improvement of ozone prediction, *J. Environ. Sci. Int.*, 25, 683-694.
- Kleczek, M. A., Steeneveld, G. J., Holtslag, A. A., 2014, Evaluation of the weather research and forecasting mesoscale model for GABLS3: impact of boundary-layer schemes, boundary conditions and spin-up, *Bound.-Layer Meteor.*, 152, 213-243.
- Korean Statistical Information Serviced (KOSIS), Busan Metropolitan City e-Local Index, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1YL0000&vw_cd=MT_GTITLE02&list_id=21&obj_var_id=A&itm_id=21&seqNo=&conn_path=MT_GTITLE02&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do.
- Mehdipour, V., Memarianfard, M., 2017, Application of support vector machine and gene expression programming on tropospheric ozone prognosticating for Tehran metropolitan, *Civ. Eng. J.*, 3, 557-567.
- Muñoz-Esparza, D., Kosović, B., 2018, Generation of inflow turbulence in large-eddy simulations of nonneutral atmospheric boundary layers with the cell perturbation method, *Mon. Weather Rev.*, 146, 1889-1909.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2022, 2021 NIER Annual Report, <https://eng.nier.go.kr/NIER/cop/bbs/selectNoLoginBoardArticle.do>.
- National Air Emission Inventroy and Research Center (NAIR), 2022, 2019 National Air Pollutant Emissions Inventory, <https://www.air.go.kr/eng/capss/emission/year.do?menuId=190>.
- Pinto, J. O., Jensen, A. A., Jiménez, P. A., Hertneky, T., Muñoz-Esparza, D., Dumont, A., Steiner, M., 2021, Real-time WRF large-eddy simulations to support uncrewed aircraft system (UAS) flight planning and operations during 2018 LAPSE-RATE, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 697-711.
- Seinfeld, J. H., 1989, Urban air pollution: state of the science, *Science*, 243, 745-752.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2016, Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, John Wiley & Sons, Inc., 1326.
- Sillman, S., 1995, The use of NO_y, H₂O₂, and HNO₃ as indicators for ozone-NO_x-hydrocarbon sensitivity in urban locations, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 100, 14175-14188.
- Sillman, S., He, D., 2002, Some theoretical results concerning O₃-NO_x-VOC chemistry and NO_x-VOC indicators, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 107, ACH 26-21-ACH 26-15.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., 2019, A Description of the advanced research WRF model version 4, National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA.
- Tiwari, S., Dahiya, A., Kumar, N., 2015, Investigation into relationships among NO, NO₂, NO_x, O₃, and CO at an urban background site in Delhi, India, *Atmos. Res.*, 157, 119-126.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2006, Air quality criteria for ozone and related photochemical oxidants, Office, NC f. EA-R., Ed. US EPA: Research Triangle Park, 2, https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/aqmguides/collection/cp2/20060228_ord_epa-600_r-05-004bf_oz_oz_criteria_document_vol-2.pdf.
- Vivanco, M. G., de Fátima Andrade, M., 2006, Validation of the emission inventory in the Sao Paulo Metropolitan Area of Brazil, based on ambient concentrations ratios of CO, NMOG and NO_x and on a photochemical model, *Atmos. Environ.*, 40, 1189-1198.
- Yang, Y., Liu, X., Zheng, J., Tan, Q., Feng, M., Qu, Y., An, J., Cheng, N., 2019, Characteristics of one-year observation of VOCs, NO_x, and O₃ at an urban site in Wuhan, China., *J. Environ. Sci.*, 79, 297-310.
- Yin, H., Liu, C., Hu, Q., Liu, T., Wang, S., Gao, M., Xu, S., Zhang, C., Su, W., 2021, Opposite impact of emission reduction during the COVID-19 lockdown period on the surface concentrations of PM_{2.5} and O₃ in Wuhan, China., *Environ. Pollut.*, 289, 117899.
- Zoran, M. A., Savastru, R. S., Savastru, D. M., Tautan, M. N., 2020, Assessing the relationship between ground levels of ozone (O₃) and nitrogen dioxide (NO₂) with coronavirus (COVID-19) in Milan, Italy, *Sci. Total Environ.*, 740, 140005.

-
- Master's course. Hyeon-Sik Choe
Division of Earth and Atmospheric Sciences, Pusan National University
lobert5125@pusan.ac.kr
 - Professor. Won-Bae Jeon
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
wbjeon@pusan.ac.kr
 - Doctor's course. Dong-Jin Kim
Division of Earth and Atmospheric Sciences, Pusan National University
ehdws146@pusan.ac.kr

-
- Undergraduate. Chae-Yeong Yang
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
ycyeong@pusan.ac.kr
 - Doctor's course. Jeong-Hyeok Mun
Division of Earth and Atmospheric Sciences, Pusan National University
moonworking@pusan.ac.kr
 - Doctor's course. Jae-Hyeong Park
Division of Earth and Atmospheric Sciences, Pusan National University
jaehyeong@pusan.ac.kr