

ORIGINAL ARTICLE

서울과 부산지역의 기후변화-오존 연관성 연구: 수도권과의 비교연구(V)

지한준¹⁾ · 이효정^{1,2)} · 조현영²⁾ · 김종민¹⁾ · 김철희^{1,2)*}

¹⁾부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학전공, ²⁾부산대학교 환경연구원

Study on the Relation of Climate Change-Ozone in Seoul and Busan : Comparative Study on Busan vs Seoul Metropolitan Area (V)

Han-Jun Ji¹⁾, Hyo-Jung Lee^{1,2)}, Hyun-Young Jo²⁾, Jong-Min Kim¹⁾, Cheol-Hee Kim^{1,2)*}

¹⁾Department of Earth and Environmental Systems, Pusan National University, Busan 46241, Korea

²⁾Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract

To investigate the relationship between climate change and ozone (O₃) concentrations in Seoul and Busan, we analyzed high O₃ episodes during an exceptional heatwave in the summer of 2018, which lasted over 17 days in South Korea. The observed O₃ concentrations during the heatwave period were compared to those from non-heatwave periods. We utilized the online WRF-Chem model to simulate concentrations of ozone, nitrogen dioxide (NO₂), and volatile organic compounds (VOCs) for the study period, examining differences in their correlations with temperature between heatwave and non-heatwave periods. Additionally, we used OMI data from NASA's Aura satellite to derive formaldehyde (HCHO) column densities over Seoul and Busan and analyze the temperature-HCHO relationships. Our findings reveal that during the 2018 heatwave, WRF-Chem modeling demonstrated a notable correlation between HCHO concentrations and temperature (R = 0.66-0.68), with more pronounced diurnal variations and higher peak concentrations during the heatwave period. This is attributed to temperature-sensitive biogenic VOCs, which significantly influence HCHO production through chemical reactions. Furthermore, the increase in HCHO concentrations in both Seoul and Busan was found to be exponential rather than linear with rising temperatures. The OMI satellite measurements also confirmed a strong temperature-HCHO dependency over both regions. The high correlation between HCHO and temperature, which can also be monitored through satellite observations, suggests that HCHO could serve as a major factor for evaluations of climate penalty in the quantifying emissions linked to anthropogenic and biological activities under changing climate conditions, even in the absence of ground measurements of various VOC components over the two areas.

Key words : Climate penalty factor, Heatwave, Ozone, Formaldehyde

1. 서 론

대류권 오존(O₃)은 주로 태양복사량과 질소 산화물

이 존재할 때 메탄(CH₄), 일산화탄소(CO) 및 비메탄 휘발성 유기 화합물(Non-Methane Volatile Organic Compound; NMVOC)이 대기 중 태양 복사에 의한 광

Received 11 September, 2024; Revised 8 November, 2024;

Accepted 19 November, 2024

*Corresponding author : Cheol-Hee Kim, Department of Earth and Environmental Systems, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Phone : chkim2@pusan.ac.kr

E-mail : +82-51-510-3687

© 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.

화학반응을 통해 생성되며, 대류권 상층에서는 성층권 으로부터 유입되기도 한다. 대류권 오존 중에서도 하층 (혹은 지상) 오존은 지표로부터 1~2 km 고도에 존재하는 것으로, 한국을 비롯한 동아시아에서 계속 증가 추세를 보이고 있기에 감소 정책이 지속적으로 요구되고 있다. 지상 오존은 질소 산화물($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$)과 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compound; VOC) 및 대기 중 수산화 라디칼(OH)과 과산화수소 라디칼(HO_2)의 산화 반응이 모두 연관된다. 특히, VOC 성분 중에는 인간 활동에 의해 배출되는 인위적 휘발성 유기화합물(Anthropogenic VOC; AVOC)과 이소프렌(Isoprene, C_5H_8)과 모노테르펜(Monoterpene, $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$) 등 광산화반응을 통해 자연적으로 배출되는 자연적 휘발성유기 화합물(Biogenic VOC; BVOC)이 모두 존재한다. 특히 BVOC는 NMVOC 보다 기온이 증가함에 따라 배출이 높아지고 더 빠르게 광화학 반응에 참여하면서 여름철 지상 오존의 고농도 현상에 큰 역할을 한다(Wei et al., 2007).

지상 오존(이하 오존으로 명칭)의 고농도 현상은 대기 중 광화학적 과정 이외에도 다양한 기상조건과 생물학적 피드백이 복잡하게 연관되어있다. 오존 생성에 관

여하는 기상 변수 중에서는 특히 기온의 영향을 많이 받으므로(Weaver et al., 2009; Jacob and Winner, 2009), 현재까지 연구된 오존과 기온의 연관성은 매우 광범위하게 찾아볼 수 있다. 예를 들어 Vautard et al.(2005) 및 Pusede et al.(2015)은 높은 기온과 고농도 오존 현상의 상관관계는 오존 농도의 변화를 온도의 변화로 나눈 것으로 정의하며 미국 주요 도심의 경우 평균 6.7 ± 2.5 ppb/ $^{\circ}\text{C}$ 로 나타나고 있음을 보고하였고, 기온 증가에 따른 오존 증가의 원인을 질소 산화물과 VOC의 산화반응 속도를 비교하여 기온과 고농도 오존의 발생 관계를 연구하였다(Atkinson, 2000). 그 외에도 기온 증가에 따라 BVOC 농도가 증가하는 현상(Sillman and Samson, 1995) 등 관련 연구는 활발히 진행되어 왔다.

정부 간 협의체(The Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)에서 발간한 IPCC 6차 보고서에 따르면 지구온난화에 따른 오존 농도의 증가 현상 또한 심화될 것임을 보고하였고(IPCC, 2022), 산업화 이전 평균 기온 대비 $1.5 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 이내로 제한하지 못할 경우 폭염의 발생 빈도가 약 5~10배 증가하는 것으로 추정하였으며(Fischer et al., 2015), 시나리오 별 미래

Table 1. Summary of model domain, physical and chemical options used in model simulations in this study

WRF model domain	
Horizontal resolution	27km(D01), 9km(D02), 3km(D03)
Horizontal grid	175 × 127(D01), 97 × 136(D02), 196 × 214(D03)
Vertical layer	29
Running time	2018/06/30 ~ 2018/09/01
WRF option	
Microphysics	Lin et al. scheme
Longwave radiation	RRTM Longwave radiation
Shortwave radiation	Goddard Shortwave Scheme
Planetary boundary layer	YSU(Yonsei University Scheme)
Cumulus parameterization	Grell 3D Ensemble Scheme
Land surface	Revised MM5 scheme
Surface layer	Unified Noah Land Surface Model
Chem option	
Photolysis	Madronich photolysis (TUV)
Gas-phase chemistry	NOAA/ESRL RACM
Aerosols	MADE-VBS
Anthropogenic emissions	KORUSv5 (KORUS-AQ 2016)
Biogenic emissions	MEGAN version 2.04

기온에 대한 예측과 함께 여러 생태계 영향을 기술하였다. 이는 기후변화-오존의 상관성과 그 중요성을 잘 보여주는 결과로 판단된다. 최근에 와서는 미래기후-대기질 영향을 진단하기 위한 정량적 방법인 기후변화 페널티(Climate change penalty) 연구가 수행되고 있다 (Bloomer et al., 2009; Rasmussen et al., 2013). 기후변화 페널티란 기후변화로 인한 기온 상승의 영향을 상쇄하기 위해 소요되는 에너지 비용 상승만큼 비용을 추가로 부과해야 한다는 개념으로, 온실가스 배출권 거래제에 따라 탄소 배출량만큼 배출권을 구매해야 하는 비용을 의미한다. 기후변화-대기질 연구에서의 기후변화 페널티란 배출량 저감과 같은 정책적 활동에 의한 대기질 변화가 아니라 오로지 기후변화로 인해 발생하는 비용을 산출하는 연구이므로, 이를 계산하기 위한 연구로서는 기온에 민감한 오존을 대상으로 한 연구가 활발하였다. 예를 들어 Bloomer et al.(2009)은 대기가 정제되고 폭염과 같은 고온일 때 오존 농도가 증가하며, Jing et al.(2017)은 지역별 오존 저감 정책 방향이 NO₂ 및 VOC의 수준과 영향에 따라 다르게 설정되어야 함을 보고하였다. 나아가 오존 전구물질의 배출량 변화를 통제하는 정책적 연구뿐만 아니라 미래기후에서의 기온 상승에 따른 오존 농도의 상승분을 추가로 더 줄이는 비용이 발생하므로, 이 추가 비용을 반드시 고려해야 함을 기술하였다(Rasmussen et al., 2013).

본 연구는 기후변화-대기질 연구에서 오존의 기후변화 페널티 산출 방법의 기초연구로서 폭염과 열대야가 18일 이상 지속되었던 2018년 여름철 사례를 대상으로, 오존의 기후변화 페널티 계산을 위한 기초 연구를 수행하였다. 2018년 여름철의 경우 전체 계절 평균 기온이 25.4 °C로, 이전 30년 여름 평균치 기록보다 약 2.0 °C 높았으며, 일평균 최고 기온 또한 41 °C의 기록적인 수치가 관측되었다(KMA, 2018). 일 최고 기온이 33 °C를 초과한 날을 '폭염일'로 볼 때 2018년 여름의 전국 평균 폭염일은 31.4 일로서 매우 기록적이었다. 서울과 부산 대도시 지역에서도 2018년 7월 11일부터 8월 15일까지 매우 높은 기온이 지속적으로 관측되었으며, 동일 기간 오존 농도 또한 서울과 부산에서 각각 시간 평균 최고 102 ppb, 125 ppb로서 두 도시 모두 매우 높은 오존 농도를 보였다.

본 연구는 부산과 수도권을 대상으로 환경부 대기질 측정망 자료로부터 고농도 오존이 발생했던 2018년 폭염기간에 측정된 대기오염물질 특성을 자세히 파악하고,

기상청에서 공개하는 기상자료개방포털 자료를 활용하여 폭염 발생일의 기온-오존 두 요인의 상관성을 조사하고자 한다. 아울러, WRF-Chem (Weather research and forecasting - chemical) 모델을 이용하여 오존, NO_x, VOC, 기온의 상관성을 추정하여 지표면 고농도 오존 생성의 원인을 파악하였다. 나아가, 우리나라 두 대표적 대도시인 서울과 부산 두 지역에서의 측정 및 모델링 연구를 통해 VOC, 특히 BVOC를 매개로 한 오존의 기후변화 페널티 계산을 위한 기초 연구를 수행해 보고자 한다.

2. 연구방법 및 자료

2.1 연구 방법

VOC 중에서 AVOC의 배출량은 뚜렷한 계절변화를 보이지만, 기온변화에 따른 AVOC 배출량 자체가 크게 변하지는 않는다. 반면 BVOC의 경우 상황은 매우 다르다. 예를 들어 Isoprene과 Monoterpene과 같은 물질은 식물의 광합성 과정에서 생성되므로, 기온이 증가하여 광합성이 활발해지면 식생으로부터 배출되는 양이 빠르게 증가한다. 특히 Isoprene은 BVOC 배출량의 약 절반을 차지하며, 대기 중 OH과 반응하여 많은 양의 포름알데히드(HCHO)와 라디칼을 형성한다(Calfpietra et al., 2013). 이렇게 생성된 라디칼은 산화력이 오존보다 강하여 질소산화물과 반응하며 이산화질소 혹은 삼산화질소를 생성시키면서 오존의 농도를 높게 된다. 또한 Isoprene은 대기 중 화학 반응을 통해 종류가 다른 AVOC, 예를 들면 HCHO 등을 생성시켜 간접적으로 대기 중 산화 반응에 참여하여 오존의 농도를 높이기도 한다. 결국 Isoprene은 기온이 높아지면 대기 중 질소 산화 반응에 직접 혹은 간접적으로 빠르게 참여하게 되고, 이러한 높은 반응성 때문에 Isoprene의 대기 중 수명은 3시간 이내에 불과하다(Xie et al., 2013). 대기질 측정분야 연구에 있어서도 기온 변화에 따른 BVOC의 직접 측정은 어려운 반면, AVOC, 특히 HCHO는 NASA의 Aura 위성 OMI (Ozone monitoring instrument)와 같은 자료로부터 그 분포와 특성이 규명되므로, HCHO의 활용도는 매우 높다고 할 수 있다. 이러한 수집 가능한 자료를 통해 기온과 오존의 상관성을 찾을 수 있게 된다.

본 연구에서는 2018년 여름 폭염기간에 오존 농도가 상승한 사례를 대상으로 기온과 오존의 상관성을 분석하고 나아가 기후변화-오존의 연관성 연구를 위한

VOC 배출량 변동을 파악하는 데 사용될 수 있는 중요한 인자로서 HCHO를 제안하고 이를 통해 기후변화 페널티를 추정할 수 있는 기반을 마련하고자 한다. 즉, 기온 상승에 민감한 BVOC 중 하나인 Isoprene은 기온 상승에 따라 대기 중의 산화반응에 직접 참여하거나 HCHO를 생성시켜 오존의 농도를 간접적으로 증가시키는 역할을 모델링 결과와 위성자료로부터 통계적으로 분석하고, 이를 통해 기후변화-오존 연관성을 파악할 수 있는 방법을 정립하고자 한다.

2.2 분석영역, 기간 및 자료

본 연구는 폭염 기간의 기온 상승에 따른 오존 증가량을 비폭염 기간의 대기오염 농도 자료와 통계적으로 비교함으로써 기후변화-오존 페널티를 계산하기 위한 기초연구이다. 연구 대상지역은 우리나라 17개 광역지방자치단체 중에서 연평균 오존 농도가 가장 높은 지역인 부산지역과 우리나라 수도인 서울지역을 선정하였다(Fig. 1). 사용된 대기오염자료는 환경부가 운영하는 대기오염자동측정망 자료 중 서울 지역 27개 측정소와 부산 지역 28개 측정소의 시간별 오존과 NO₂의

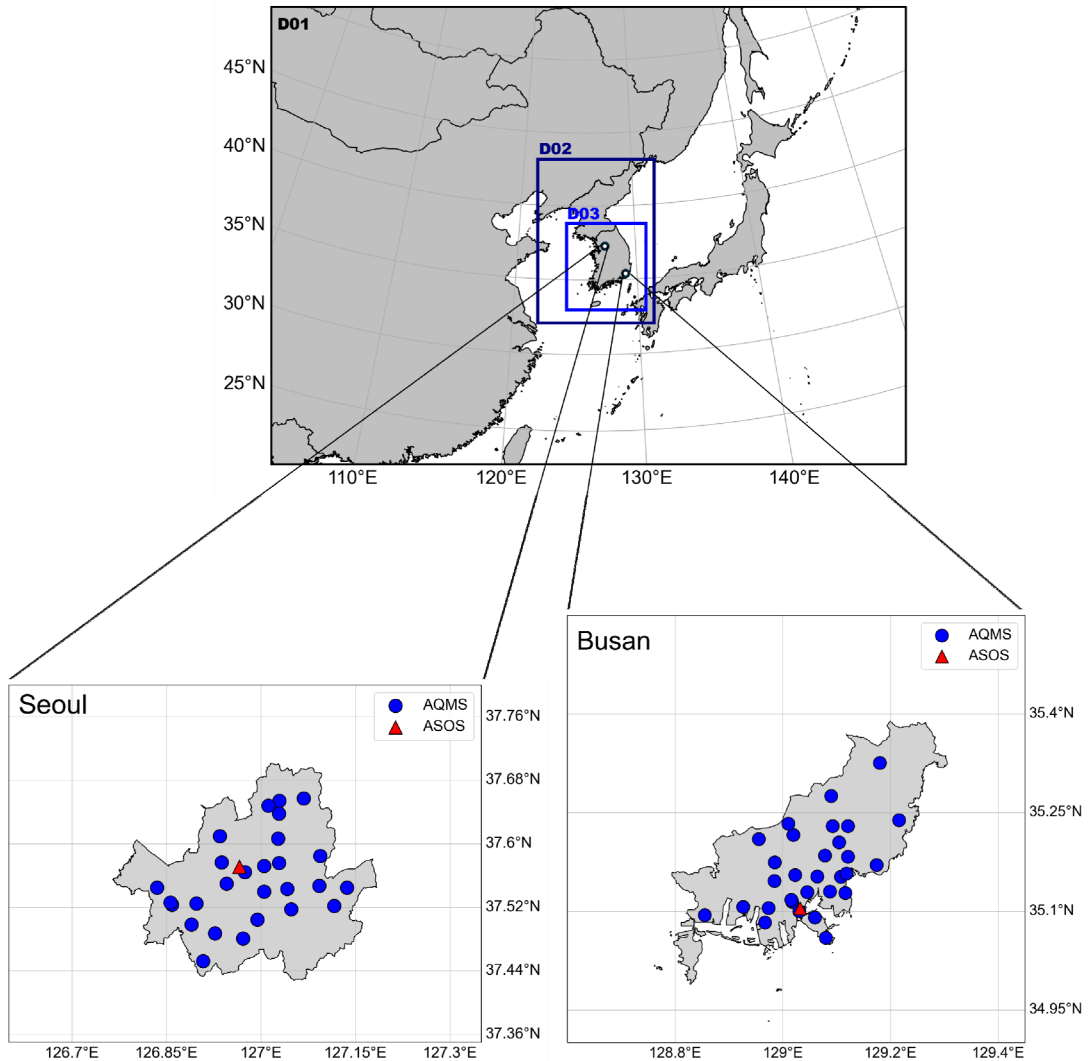


Fig. 1. Model domains and locations of AQMS and ASOS stations in Seoul and Busan used in the study.

농도 자료이며, 기상 분석을 위해 사용한 자료는 서울 지방기상청과 부산지방기상청의 정규 관측소에서 관측된 시간별 기온, 풍속, 강수량 자료이다. 분석 기간은 2018년 폭염기간으로서 특히 폭염 주의보 발령일과 오존 주의보 발령일의 빈도가 가장 많았던 여름철을 선정하였고, 그 중에서도 특히 기온이 높은 7~8월을 집중 분석 기간으로 선정하였다.

폭염기간과 비교 대상인 비폭염기간의 대기질 및 기상자료 또한 필요하기에, 본 연구에 사용된 비폭염기간의 대기오염 자료는 2018년 환경부 대기질 측정망 자료인 지상 오존 측정 자료와 NO₂ 측정 자료를 사용했다. 또한 NO₂ 배출량 변화에 따른 오존 농도의 장기 변화를 해석하기 위하여 환경부에서 제공하는 대기 오염물질 배출 목록(Air pollutants emission inventory)에 근거한 대기 정책 지원 시스템(Clean air policy support system, CAPSS) 자료를 활용하였다. CAPSS는 점·면·이동오염원에서 매년 배출되는 9가지 대기오염물질(TSP, PM_{2.5}, PM₁₀, SO_x, NO_x, VOCs, NH₃, CO, BC)의 연간 배출량을 다양하게 제공하므로, 본 연구에서는 오존 생성에 중요한 영향을 미치는 두 전구물질인 VOC와 NO_x의 5년간 배출량 자료를 수집하여 그 변화 경향을 오존의 장기 변화 경향 분석에 활용하였다.

2.3 WRF-Chem 모델

본 연구에서는 측정이 용이하지 않은 VOC의 각 성분 자료를 해석하기 위하여 모델링 결과를 사용하였다. 사용된 대기질 모델은 지역규모 WRF-Chem 모델(version 3.9.1)로서, 대기 역학 및 중규모 구름물리 등을 시뮬레이션 하는 기상 모델(Weather research and forecasting; WRF)에 대기화학 모듈이 결합된 기상 및 대기질 온라인(on-line) 모델이다. WRF-Chem은 MM5-Chem보다 오존 예측 성능이 뛰어나며, 관측치에 대한 편향 측면에서 모델-측정치 간 차이가 크게 없는 모델로 평가되었다(Grell et al., 2005).

WRF-Chem 모델의 입력 자료인 지형과 초기 및 경계 조건 기상장 자료는 전처리 시스템인 WPS(WRF pre processing system)를 통해 산출된다. 산출한 지형 및 기상 입력 자료와 함께 물리 및 화학 스키를 연구 목적에 맞게 적용하면 ARW(Advanced research WRF) core에서 계산이 이루어지고 시간 및 공간별 대기질을 모의하게 된다(Grell et al., 2005). 본 연구에서 적용한 대기 물리 과정과 화학 모듈은 Table 1에 요약하였다. 사용하

모델의 수평 해상도는 27, 9, 3 km로서 본 연구에서는 도메인 1, 2, 3으로 명명하였고(Fig. 1), 모델 수행기간은 폭염일이 장기간 지속되었던 기간을 포함한 2018년 06월 30일 00:00UTC부터 2018년 09월 01일 00:00UTC이다. 기상 초기입력 자료는 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 제공하는 FNL(Global final analysis) 자료를 사용하였다.

모델 입력 자료인 인위적 배출량 자료는 한국 대기질 현장 조사를 위해 국립환경과학원과 미국항공우주국의 한미 대기질 합동 연구가 수행되었던 KORUS-AQ(Korea-United States air quality) 캠페인 기간에 비행기 관측 등 대기 오염물질 측정을 통해 최종 보완된 배출량 자료인 KORUSv5를 이용하였다. BVOC 배출량은 MEGAN(Model of emissions of gases and aerosols from nature) version 2.04를 사용하여 Isoprene 등의 배출량을 산정하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 폭염과 오존의 현황 분석

Fig. 2a와 Fig. 2c는 최근 51년간(1973~2023년) 서울과 부산의 연간 폭염 발생 일수에 대한 시계열을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 서울의 경우 1994년의 이례적인 사례를 제외하면 전반적으로 일정한 주기의 증감 형태를 보였으며, 2010년 이후에는 폭염 발생 횟수가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 부산 역시 발생횟수가 일정한 증감 주기를 유지하였으며, 2012년 이전까지는 폭염발생 횟수가 최대 10일을 초과하지는 않는 등 상대적으로 적은 발생일수를 보였다. 그러나 2012년 이후부터는 두 지역 모두 증가하는 경향을 보였는데, 특히 2018년에는 서울과 부산 두 지역에서 각각 35회, 18회로 폭염일수가 관측되어 분석 기간 중 가장 많이 발생한 것으로 나타났다. 폭염 발생 빈도를 월별로 파악하기 위해 전체 기간(51년간)을 17개 년씩 세분하여 월별 특징을 분석하였다(Fig. 2b, 2d). 그 결과 월별 폭염이 가장 많이 발생한 빈도는 7월과 8월로 나타났고, 특히 2007~2023년에 이러한 특성을 뚜렷하게 보였다. 따라서 최근으로 올수록 폭염의 발생 횟수가 많아진다는 것은 장기적 관점에서 볼 때 폭염 발생일이 기후변화에 따라 계속 증가할 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 3은 1995~2022년간 서울과 부산지역의 오존

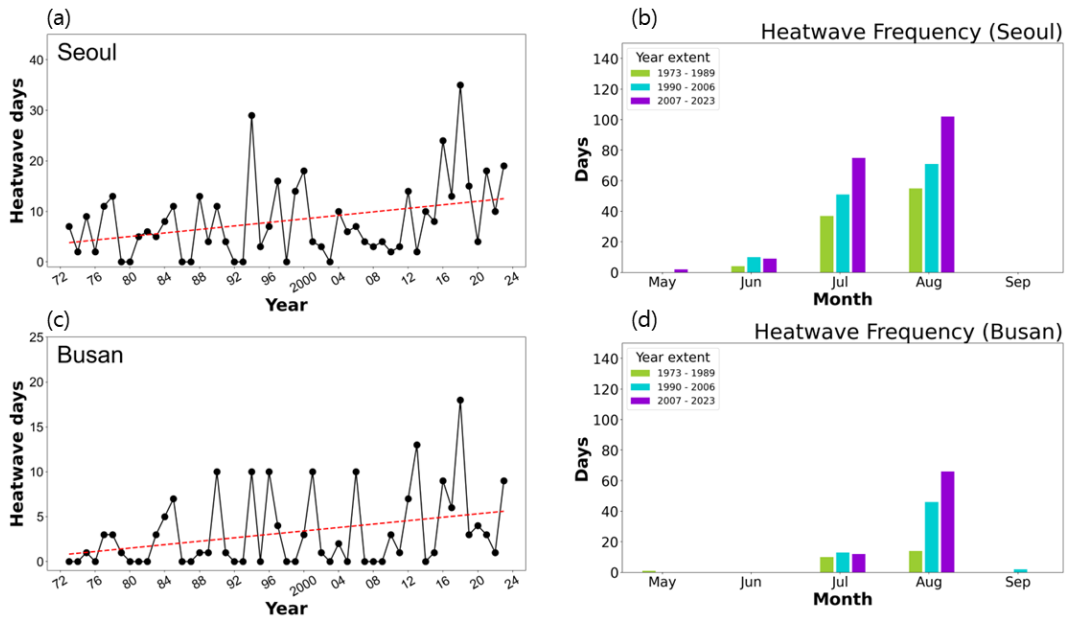


Fig. 2. Annual variations of heatwave day occurrences in (a) Seoul and (c) Busan respectively, and heatwave frequencies in (b) Seoul and (d) Busan during the three monthly based 17-year sub-divided periods over 51 years.

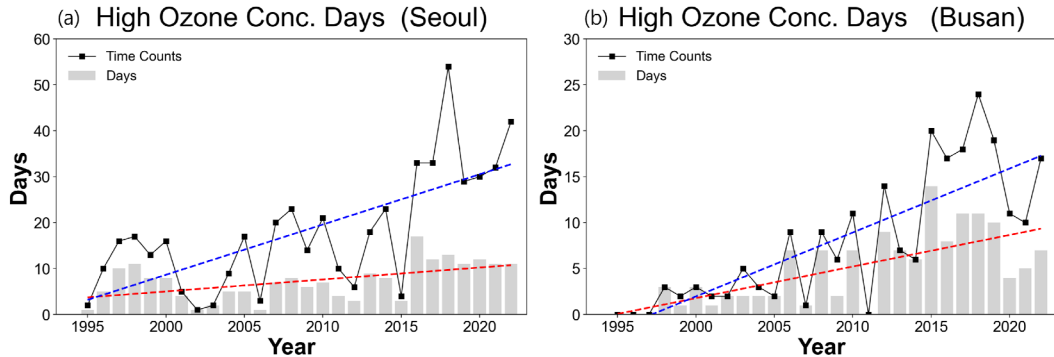


Fig. 3. Annual variations of O₃ advisory days and occurrence frequencies in (a) Seoul and (b) Busan and calculation of O₃ advisory level based on 1-hour average ozone concentration exceeding 0.12ppm.

특보(주의보, 경보) 발령 횟(일)수를 연도별로 나타내었다. 환경부 기준, 오존 주의보는 시간 평균 오존 농도가 120 ppb 이상일 때, 오존 경보는 시간 평균 300 ppb 이상일 때, 오존 중대경보는 시간 평균 500 ppb 이상일 때 발령된다. 따라서 Fig. 3의 오존 특보 발령 기준으로 볼 때, 오존 주의보 발령 일수는 1990년 후반 상대적으로 많았으나 이후 2016년까지 연간 10일 이하로 나타났다. 그러나 2016년 이후부터는 서울의 경우 그 발령

일수가 연 평균 10일을 초과하는 현상이 계속되고 있으며, 장기적인 관점에서 2000년대 발령일 5~6일 대비 그 발령 일수가 10~12일 정도로 증가하였으며, 특히 2016년 이후 크게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3). 부산의 경우 역시 2012년 이후 발령 일수 및 횟수가 꾸준히 증가하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 3).

본 연구의 집중 분석 기간인 2018년의 경우 폭염주의보 발생 경향(Fig. 2)과 유사하게 오존 특보 발령 횟

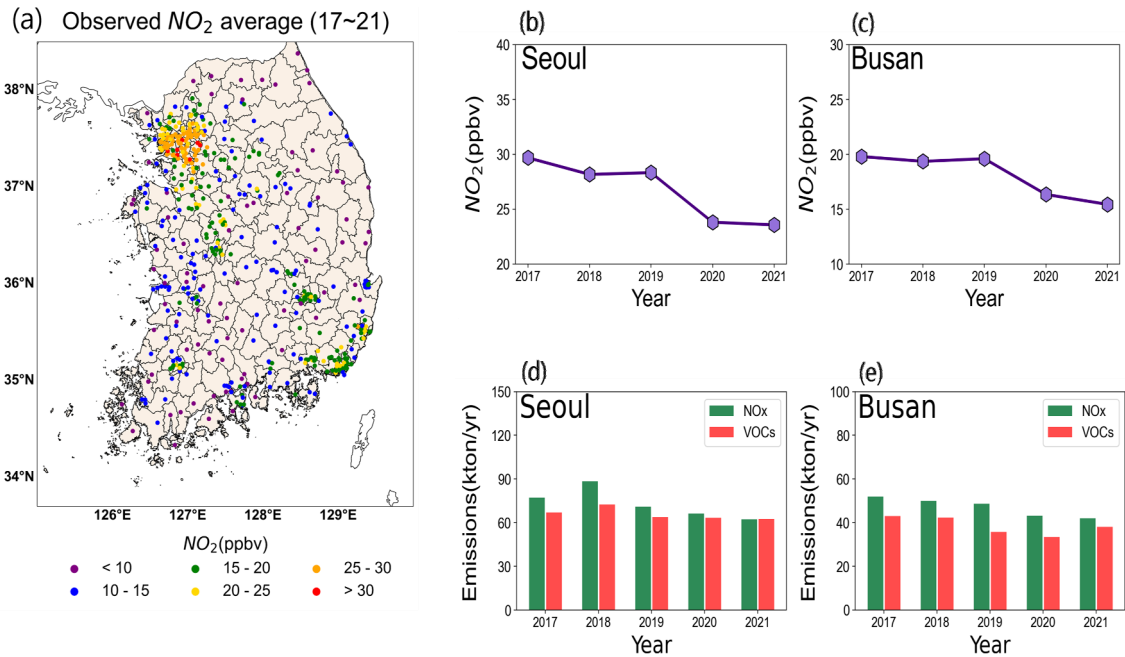


Fig. 4. Five-year (2017-2021) averages of (a) NO₂ observed at nationwide monitoring stations, and changes in NO₂ concentrations and NO_x, VOCs emissions from 2017 to 2021 in (b),(d) Seoul and (c),(e) Busan.

(일)수 또한 매우 높게 나타났다(Fig. 3). 서울의 경우 오존 주의보 발령 횟수 54회 (발령 일수는 13일), 부산의 경우 오존 주의보 발령 횟수 24회 (발령 일수는 11일)로 분석 기간 중 가장 많은 오존 특보 발령 횟수를 보였고, 지속 시간 또한 가장 장기간 지속된 것으로 분석되었다.

3.2 배출량 및 시계열 분석

2018년 오존 특보 발령 횟수의 증가 원인을 배출량과 연관시켜 살펴보기 위하여 오존 전구물질인 NO_x의 배출량 및 NO₂ 측정 자료에서 나타난 대기화학적 특징을 살펴보았다. Fig. 4에 5년간 (2017년~2021년) 전국 지상 관측소에서 측정된 NO₂의 5년간 평균 농도 분포(Fig. 4a)와, 서울과 부산 두 지역의 NO₂의 연평균 농도 변화(Fig. 4b, 4c), NO_x와 VOC의 연간 배출량 변화(Fig. 4d, 4e)를 나타내었다. 그림을 통해 해당 결과를 분석해 볼 때, 측정된 NO₂의 5년 평균 농도는, 대도시에서 주로 높게 나타났으며(Fig. 4a), 서울과 부산의 농도 또한 높게 나타났고,

특히 서울지역이 부산지역보다 약 10 ppbv 더 높게 나타났다. 2017~2019년간 서울의 연 평균 NO₂ 농도

는 3년간 약 29±0.7 ppbv, 부산에서는 약 19±0.3 ppbv를 보였으며, 두 지역 모두 연간 증감 변동이 크지 않았으며, 3년간 거의 동일한 수준으로 확인되었다.

관측적 변동과는 달리 두 지역의 5년간의 NO_x와 VOC 배출량은 소폭 감소하는 추세를 보였다(Fig. 4d, 4e). 폭염 발생이 집중되었던 2018년의 경우 서울의 연간 NO_x 배출량은 2017년 대비 일시적으로 약 11,000 (ton/yr) 증가하였으나, 2019년에는 전년 대비 약 17,000 (ton/yr)이 감소하는 것으로 나타났다. 연간 VOC 배출량의 경우 2018년에는 2017년 대비 약 5,500 (ton/yr) 증가하였으나, 2019년에는 9,000 (ton/yr) 가량 감소하였고, 2019년 이후 VOC 배출량은 지속적으로 감소하는 것으로 조사되었다(MOE, 2023). 부산의 경우 NO_x는 2017년 51,000 (ton/yr), 2018년 49,000 (ton/yr), 2019년 48,000 (ton/yr) 등으로 꾸준히 감소하는 추세이며, VOCs 배출량 또한 2017년과 2018년 42,000 (ton/yr), 2019년 35,000 (ton/yr)으로서 지속적인 감소 추세를 보였다. 이상의 연간 배출량을 종합해 볼 때, 오존 생성에 중요한 두 전구물질인 NO_x와 VOC의 배출량은 서울과 부산지역 모두 꾸준히

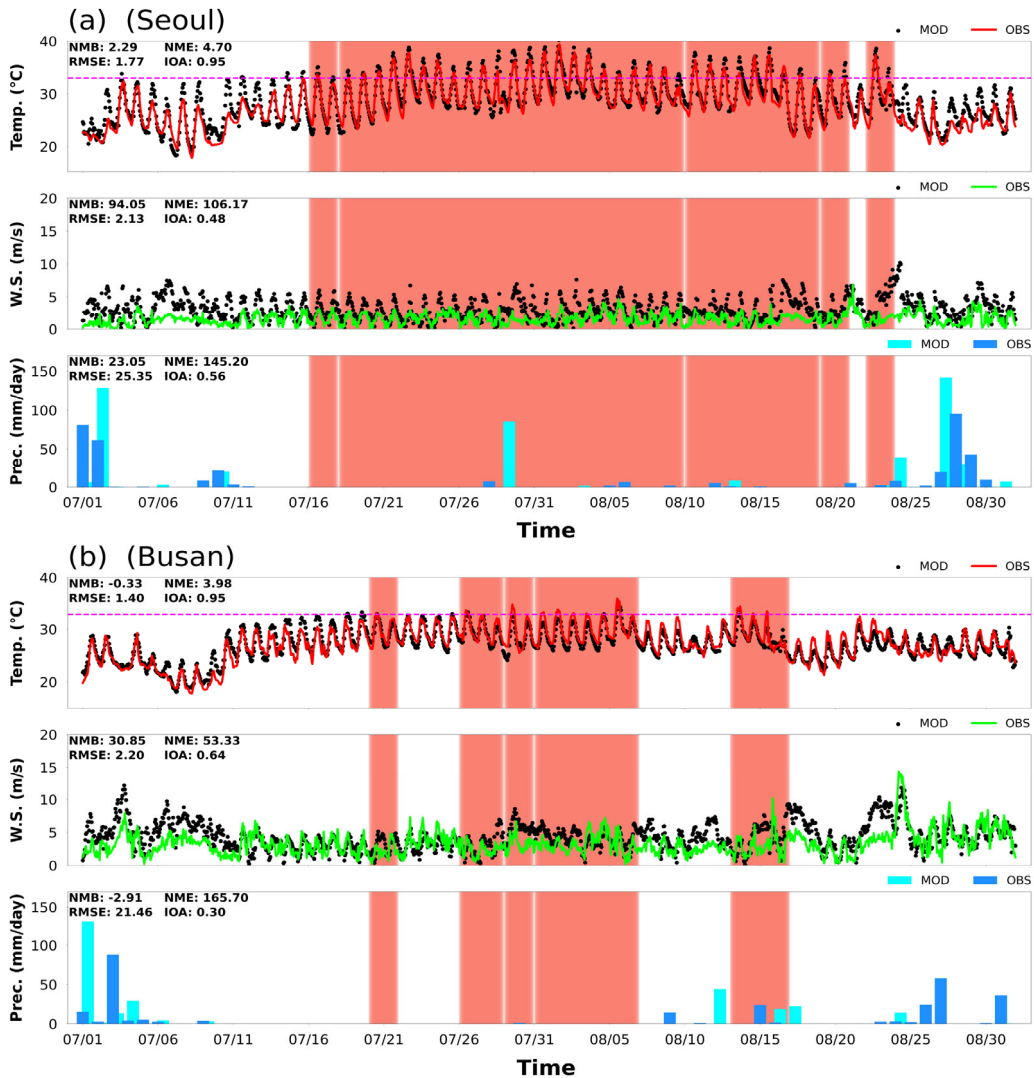


Fig. 5. Observed and simulated temperature, wind speed, and precipitation in (a) Seoul and (b) Busan. Heatwave days with a max temperature exceeding 33 °C, indicated in red areas.

감소하는 추세이며, 본 연구의 집중 분석기간인 2018년 역시 NO_x 와 VOC의 연간 배출량 변화는 해당기간 오존 변동에는 무시할 수 있을 것으로 판단하였다. 결론적으로 서울과 부산 두 지역에서의 오존 전구물질의 배출량은 전반적으로 소폭 감소하면서 동시에 그 농도 또한 감소하는 추세이므로, 본 연구에서는 집중분석 기간인 2018년 여름의 경우 배출량 변화에 의한 오존 증가 현상이 아닌 기온 급증에 의한 영향으로 해석하였다.

WRF-Chem 모델로부터 모의되는 대기화학변수와

기상변수를 분석하기 위하여 분석기간 모델의 성능을 먼저 검증하기 위하여 관측된 변수와 통계적으로 비교 분석하였다. 사용된 검증 지표는, 미국 EPA에서 제시하는 중요 통계지표로서 NMB(Normalized mean bias), NME(Normalized mean error), RMSE(Root mean square error), IOA(Index of agreement) 지수를 이용하였다 (US EPA, 2020).

Fig. 5는 폭염과 오존 주의보 발령이 가장 빈번했던 2018년 여름철 7월~8월의 서울(Fig. 5a)과 부산(Fig.

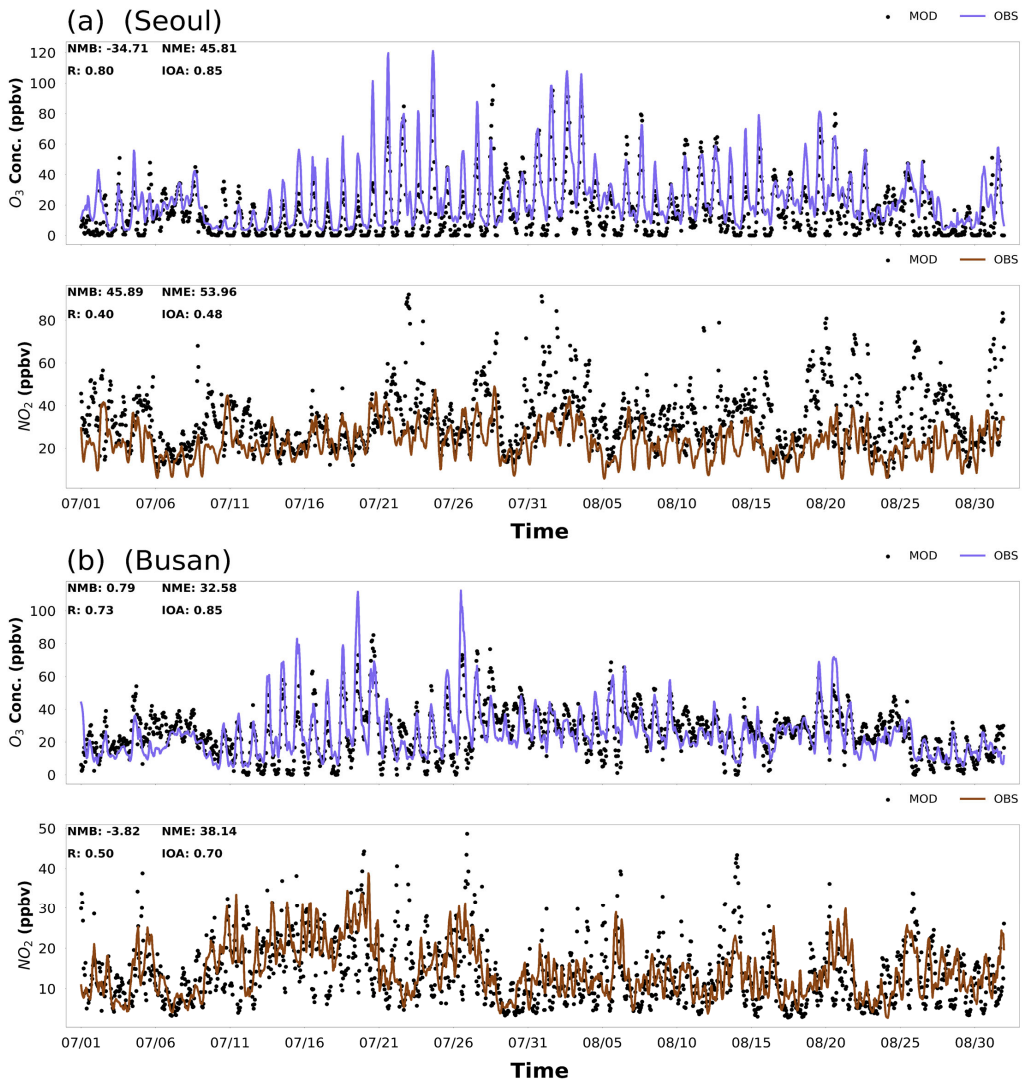


Fig. 6. Observed and WRF-Chem simulated NO_2 and O_3 in (a) Seoul and (b) Busan.

5b)의 관측된 기온, 풍속, 강수량의 관측 자료와 WRF-Chem모델에서 모의된 값을 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 기상청의 폭염 일(일 최고기온 33°C) 기준으로 오존의 고농도 현상을 중점적으로 해석하였고, 풍속과 강수(Jeong et al., 2020)에 대해서도 통계적으로 비교·분석하였다. 그 결과 서울과 부산의 기온은 각각 NMB 2.29%, -0.33%와 NME 4.70%, 3.98%의 값을 계산하였다. 특히 IOA의 경우 그 값이 0.95로서 기온의 경우 두 지역 모두 잘 모의되었음을 확인하였다. 풍속의 경

우 RMSE 값이 2.13 m/s, 2.20 m/s의 편차를 보였으며, 강수의 경우 폭염기간에는 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. 강수량의 경우 편향성이 존재하지만, 강수 기간이 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구 기간인 폭염 기간의 경우 특히 강수 발생이 적어서 오존 농도의 강수로 인한 습성침적(Wet deposition)효과는 서울과 부산 두 지역 모두 크지 않은 것으로 해석할 수 있었다.

Fig. 6은 WRF-Chem모델의 모의 값과 AQMS에서 관측한 지상 오존과 NO_2 농도를 비교 분석한 그림이다.

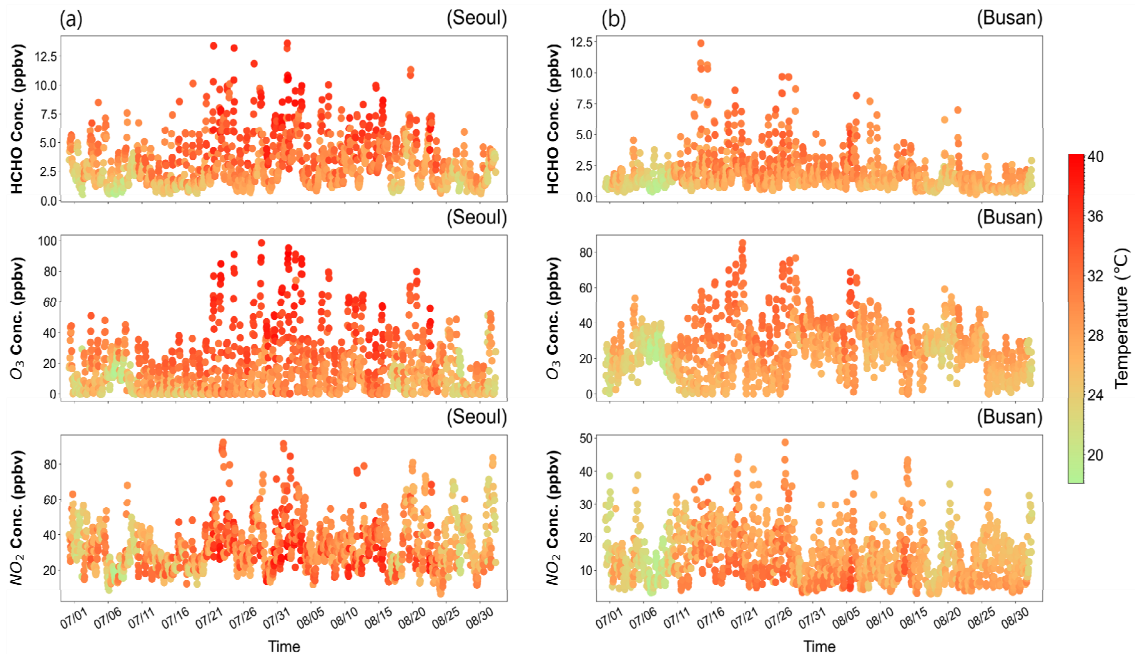


Fig. 7. Variations in HCHO, O₃ and NO₂ concentrations simulated by WRF-Chem, with different colors representing the corresponding temperatures at the time of simulations.

관측-모델 비교 결과 서울의 오존과 NO₂의 통계 값은 NMB -34.71%, 45.89%와 NME 45.81%, 53.96%로 나타났고, R은 각각 0.8, 0.4로 계산되었다. 부산의 경우 O₃과 NO₂의 NMB는 0.79%, -3.82%, NME는 32.58%, 38.14%로 계산되었고, R은 0.73, 0.5로 나타났다. 통계 검증 결과 두 지역 모두 Emery et al.(2017)에서 제시하는 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 2018년 7~8월 서울과 부산의 오존, NO₂, HCHO의 WRF-Chem 모의 결과를 나타낸 그림이다 (Fig. 7a, 7b). 기온에 따른 대기오염물질은 대체로 폭염 기간에 HCHO의 고농도 현상이 잘 모의되는 것으로 확인하였다. 오존 또한 폭염 기간에 고농도가 잘 모의되었으며, 특히 HCHO의 고농도 현상이 나타나는 기간은 오존 고농도 기간과 대부분 일치하였다. 서울의 경우 폭염 기간인 7월 22일, 7월 30일, 8월 1일에 80 ppbv 이상의 고농도 오존이 발생하였고, HCHO 또한 같은 기간 10 ppbv 이상의 고농도 분포를 보였다. 부산의 경우에도 폭염 기간인 7월 18일, 7월 26일, 8월 5일에 60 ppbv를 상회하는 오존 농도가 모의되었고, HCHO 또한 7.5 ppbv를 상회하는 농도가 모의되었다. 반면,

NO₂의 경우 서울과 부산 모두 두 기간(폭염 및 비폭염 기간) 구분 없이 고농도가 모의되었으나, 고농도 오존이 나타나는 시기와는 일치하지 않았고, 그 연관성 또한 크지 않았다. 이는 Back et al.(2023)의 연구 결과에도 볼 수 있는데, 오존 대비 NO₂의 정량적 연관성은 서울지역에서 VOC-limited regime에 있는 반면, 부산지역의 오존생성 regime은 서울보다는 상대적으로 중립적 경향을 보인 것에서 그 맥락을 찾아볼 수 있다. 즉, 부산 지역은 아침시간 측정된 NO₂-오존 농도를 상호 비교해 본 결과 넓은 산포도를 보이긴 하였으나 NO₂가 주간 광화학 생성된 오존 생성에 일부 기여하는 것으로 해석할 수 있음을 확인할 수 있다(Baek et al., 2023).

HCHO의 경우, 관측 결과는 위성자료로부터 수집이 가능하다. 예를 들어 전 지구적 규모로 관측되는 Aura 위성의 OMI (Ozone monitoring instrument) 위성 자료는 HCHO에 대하여 13 km × 24 km의 공간해상도의 관측 값을 제공한다. 따라서 본 연구에서는 지상 측정이 용이하지 않은 VOC 농도를 대체하여 사용할 수 있는 위성자료인 HCHO 자료를 활용하였다. Fig. 8에 2015~2018년 여름철 7~8월 OMI 자료의 Level 2

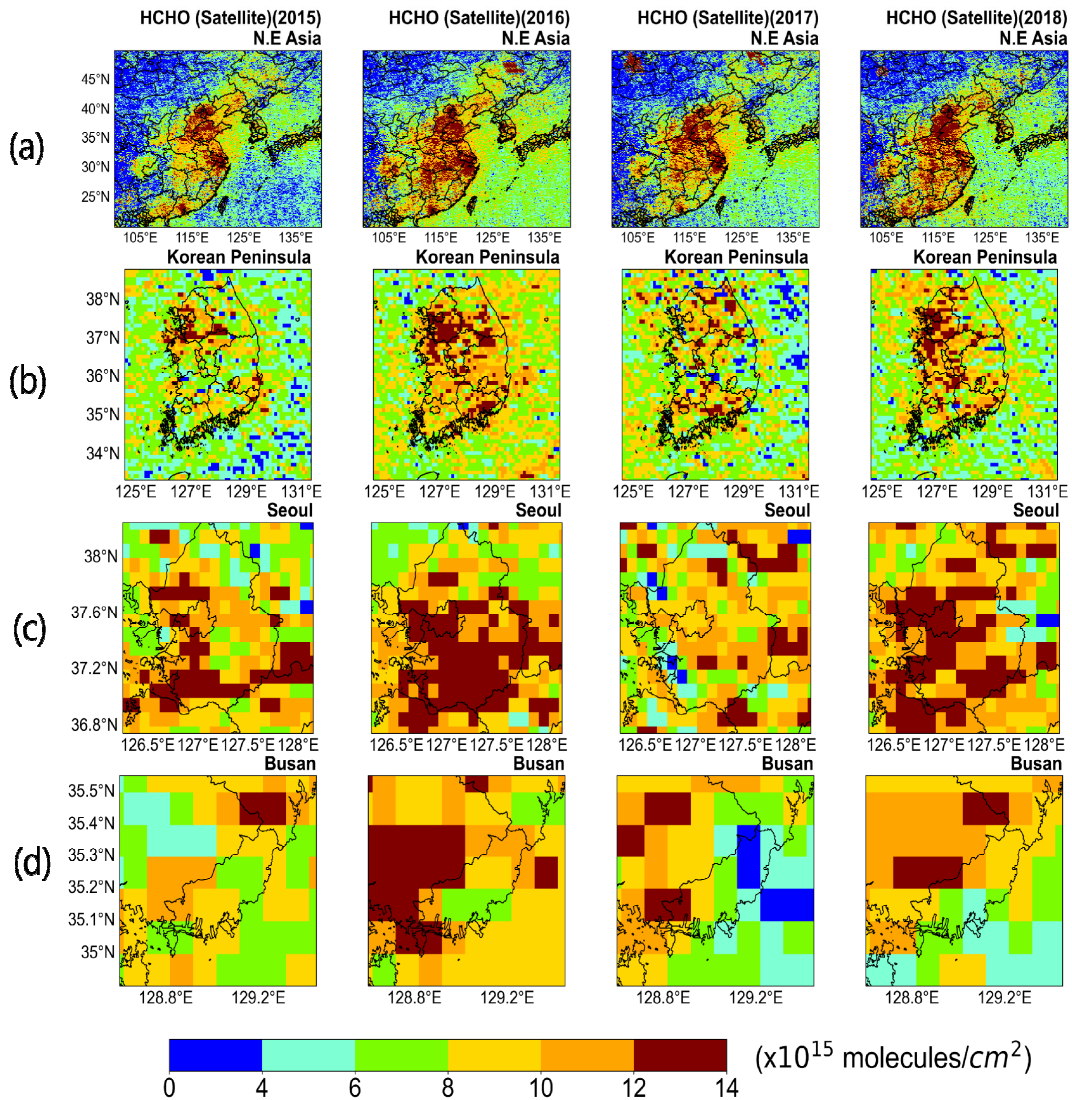


Fig. 8. Spatial distributions of averaged HCHO concentrations during the summer of July and August over the four years(2015-2018) in (a) Northeast Asia, (b) Korean Peninsula, (c) Seoul, and (d) Busan.

product(Duncan et al., 2010)에서 수집한 HCHO의 연직 컬럼 농도 (Vertical column density; VCD)를 동북아시아(Fig. 8a), 한반도(Fig. 8b), 수도권(Fig. 8c), 남동권(Fig. 8d)으로 각각 세분하여 그 공간분포의 7~8월 두 달 평균 분포의 연 변화 경향을 나타내었다. 나타난 결과에서 알 수 있듯이 서울 지역 HCHO의 VCD 농도(unit = $\times 10^{15}$ mol/cm²) 변화는 평균 11.94 VCD에서 ± 2 VCD정도로 나타났다. 2017년 7~8월

HCHO의 평균 농도는 9.35 VCD이고, 이후 2018년에는 약 4 VCD가 오른 13.36 VCD농도를 보였다. 부산의 평균 HCHO는 8.21 VCD에서 ± 0.8 VCD이고, 이후 2018년에는 약 0.4 VCD가 오른 8.69 VCD농도를 보였다. 2017년 부산의 HCHO는 6.71 VCD이고 2018년에는 약 1.9 VCD 증가한 8.6 VCD의 농도가 나타났다. 따라서 폭염기간이 길었던 2018년의 HCHO 농도는 2017년에 비해 서울과 부산에서 각각 약 43%

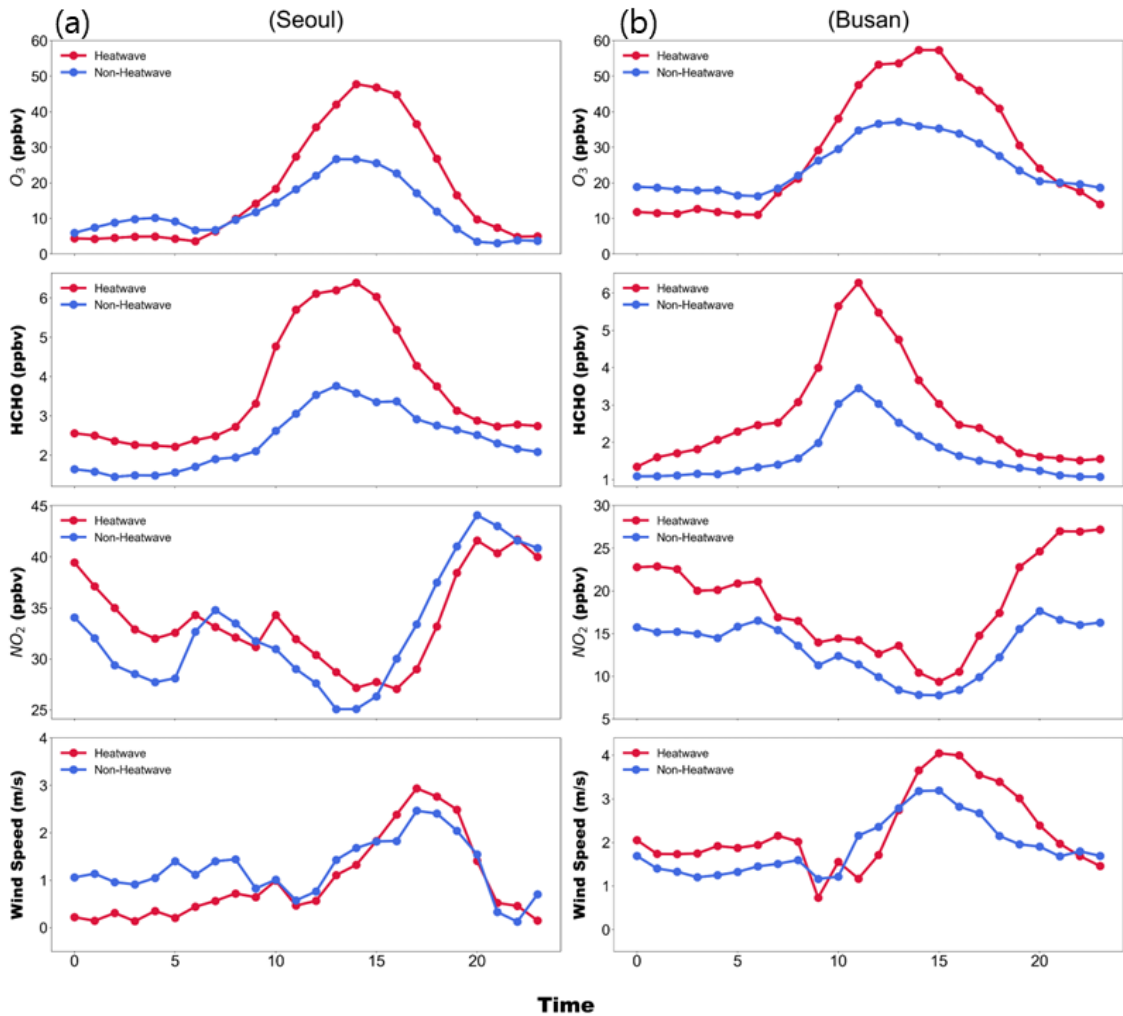


Fig. 9. Diurnal variations of simulated O_3 , HCHO, NO_2 and wind speed over heatwave and non-heatwave periods in (a) Seoul and (b) Busan, respectively.

와 28%높게 나타난 것으로 분석되었다. 이로부터 폭염 기간이 존재하는 2018년 HCHO의 VCD농도와 기온과의 비례 관계를 명확히 확인할 수 있다.

서울과 부산의 해당 기간 폭염 기간과 비폭염에 대한 오존 농도를 풍속, HCHO, NO_2 에 대해 일변화를 평균하여 Fig. 9에 나타내었다. 그 결과 두 기간의 일변화 양상은 오존 농도는 야간에 낮은 수치를 보이는 등 유사하였으나, 예상대로 폭염기간의 경우 광화학 반응이 활발한 14시경에 각각 46.83 ppbv(서울), 57.34 ppbv(부산)의 최고 농도를 보인 반면, 비폭염 기간의 경우 두 지

역 각각 28.5 ppbv(서울), 36.7 ppbv(부산)의 최고 농도를 보여(Fig. 9), 두 기간 최고 농도의 차이는 약 19 ppbv를, 부산지역에서는 약 20 ppbv로서 뚜렷한 차이를 보였다. 반면 NO_2 는 오존 생성이 활발한 시간대(14시경)에 가장 낮은 농도를 보였으나, 폭염 기간과 비폭염 기간의 차이는 두 지역 모두 의외로 약 0.1~0.2 ppbv로서 크지 않았다. 반면 HCHO의 경우 그 차이는 서울지역에서는 약 2.6 ppbv를, 부산지역의 경우 약 2.8 ppbv의 차이를 보여서 폭염 기간의 증가 농도는 비폭염 기간 대비 서울 42.5%, 부산 52.3%로서 상대적으

로 훨씬 더 높게 나타났다. 그러나 분석기간 지표면 오존의 고농도에 영향을 끼치는 풍속은 두 기간에서의 차이는 크지 않았으며, 오히려 폭염 기간에 풍속이 소폭 더 강하게 모의된 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 기온에 따라 가장 민감하게 반응하는 변수는 HCHO로서 오존-기온 연관성 연구에 중요한 매개변수로 활용할 수 있음을 암시해 준다.

3.3. 포름알데히드를 매개로 한 오존의 기후변화 페널티 연구

오존은 광화학 반응의 산물로서 그 전구물질인 NO_x와 VOC가 복잡하게 연관된다. 따라서 기후변화-오존 연관성을 정량적으로 연구하기 위해서는 기온 상승함에 따라 전구물질의 광화학 반응에 참여하는 양과 속도를 파악하여야 한다. 기후변화는 입사하는 태양 에너지와 같은 단파 복사량의 변화가 아니라 온실 기체에 의한 장파 복사의 차이에 의해 기온 상승이 유도되므로, 기온과 연관이 있는 광화학 반응식을 수식적으로 해석하거나 상자 모델 등을 통해서 기온 변화에 따른 민감도 실험을 통해 최종 모의되는 오존 농도의 변화 특성을 분석하여야 한다. 이러한 연구들은 기온에 따른 오존 전구물질의 배출량은 변하지 않는다고 가정하고 광화학반응식 분석 차원에서 이루어진다. 이러한 가정은 CAPSS와 같이 국내 에너지 사용량에 기반을 둔 국내 상향식

(bottom-up) 배출량 산정 연구의 개념에도 적용되었으며, 이는 폭염과 같은 특이 기상상태가 지속된 시기의 추가적인 에너지 사용량에 의해 NO_x와 AVOC의 배출량의 변화가 이미 고려되었다고 할 수 있다.

오존에 대한 기후변화 페널티 연구를 수행하기 위하여, 오존의 기온에 따른 변화량을 파악하여야 한다. 그러나 폭염과 같은 극한 기상상태를 포함한 장기간의 대기오염 측정 자료로부터 정량적으로 이를 도출하는 것은 쉽지 않다. 그 이유는 장기적 관점에서 볼 때 오존 농도는 기온 변동성과 아울러 성층권 유입량, 배경 오존농도의 장기 변화, 지역규모의 장거리 이동 변화 영향 등 다양한 영향을 동시에 받기 때문이다. 그러나 BVOC의 경우 기온이 증가함에 따라 배출과 반응성이 높아지면서 오존의 농도를 조절하게 되는데, 특히 여름철 대도시의 경우 평균 ~10 ppb/°C 가량 나타날 수 있다고 알려져 있다. 이러한 경향은 기후변화가 진행됨에 따라 광화학 반응 속도는 선형적인 증가 속도보다 더 빠르게 증가할 수 있음을 암시한다(Atkinson, 2000). 기온 증가에 따른 BVOC 농도의 증가(Sillman and Samson, 1995)는 단순 BVOC 증가뿐만 아니라 복잡한 화학과정을 통해 AVOC를 생성 시켜 오존 생성 반응을 더욱 가속시킬 수 있다. 이러한 차원에서 BVOC는 기후변화-오존의 연관성 연구로부터 기후변화 페널티를 계산하기 위한 활용도가 높다고 할 수 있다.

Fig. 10는 관측기간 WRF-Chem 모델링을 통해 도

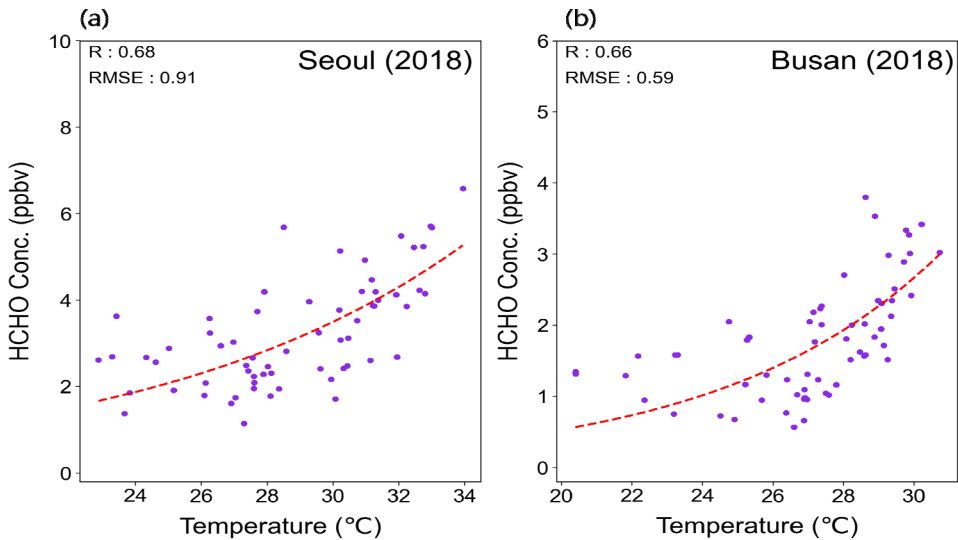


Fig. 10. Modeled relationships of HCHO versus temperature in summer 2018 over (a) Seoul and (b) Busan. Exponentially optimized regression functions are also indicated with red dashed lines.

출한 HCHO와 기온간 상관성을 나타내었다. 일차 선형 회귀분석을 통해 분석한 서울과 부산의 기온과 HCHO와의 관계는 그 상관 계수(R)가 각각 0.63, 0.58 RMSE는 0.96, 0.64로 나타났다. 아울러 지수함수로 회귀분석을 수행해 본 결과 R값이 각각 0.68, 0.66, RMSE는 0.91, 0.59로 설명력이 더 높아졌다. 이 수치는 본 연구의 관점에서 장기적인 오존 측정 자료로부터 통계적으로 분석되는 산포도 결과보다 상대적으로 훨씬 정밀한 통계결과로 분석된다. 참고로 동 기간, 오존-기온 간 관련성 결과는 서울의 R 값은 0.65, 부산 0.52로 확인되었다. 특히 오존의 경우 산포도가 특정 구간(예를 들어 저농도 또는 초고농도 오존 구간)에서 크게 나타나거나 집중될 수 있는 것을 고려하면 오존-기온 관계 보다는 Fig. 10의 HCHO-기온의 지수함수 회귀분석이 기후변화의 변동성을 더 정밀하게 설명할 수 있음을 의미한다. 바꾸어 말하면, 오존의 기후변화 페널티를 정량적으로 계산하기 위해서는 기온이 높은 사례로부터 HCHO의 변화량을 통해 간접적으로 기후변화 페널티를 계산할 수 있다는 의미로 해석할 수 있다.

결론적으로 기후변화-대기질 연관성 연구를 위한 기초 단계로서 오존에 대한 기후변화 페널티 계산을 위해 여름철 극한 기온 상승에 따른 오존 농도 변화를 반영할 수 있는 BVOC는 유용한 매개변수가 될 수 있으나, 측정의 어려움으로 그 활용성이 제한되는 반면, HCHO는 대기질 예보 등 모델링 정확도 향상에도 사용되지만 본 연구와 같은 기후변화 페널티 연구에 적극 활용할 수 있다. 본 연구에서는 HCHO의 위성자료로서 OMI의 Level 2 product를 사용하였으나, 정지궤도 위성(Geostationary environment monitoring spectrometer, GEMS)에서 관측되는 1시간 해상도자료는 기후변화 페널티 분석에 매우 유용하게 활용할 수 있다. 특히 서울과 부산지역의 지상 측정이 용이하지 않은 VOC 성분별 장기 측정값이 없는 상황에서, 위성자료가 기후변화-대기질 연구 뿐만 아니라 오존에 대한 지역별 기후변화 페널티 연구에 적용 가능하다는 측면에서 그 활용도가 높다고 할 수 있다.

4. 결론

오존 생성에는 광화학 과정이 중요하지만, 고농도 현상과 연관되는 기상요소 또한 중요한 인자 중의 하나이다. 최근 NO₂와 VOC의 저감 정책에도 불구하고 오존

고농도 현상이 자주 발생하는 원인 중 하나로 기후변화를 고려하지 않을 수 없다. 본 연구는 기후변화-오존 연관성을 연구할 수 있는 기반을 구축하기 위하여 폭염 기간을 선정하고, 해당 기간 고농도 오존 농도의 특성을 분석하여 기온과의 상관관계를 해석하였다.

특히 폭염 발생일과 고농도 오존 발생 일수가 가장 많았던 2018년 여름의 사례의 대기오염물질과 기상 특성을 분석하고 이를 비폭염 사례와 비교 분석하여 기온 증가에 따른 오존의 변화 경향을 도출하였다. 연구 수행을 위해 환경부 에어코리아의 대기오염 측정망 연보 자료와 ASOS의 기상 데이터 관측 자료 및 WRF-Chem 모델링 자료를 활용하였으며, 이를 바탕으로 서울과 부산 지역의 기온 및 오존의 최근 경향을 분석하였고, 나아가 기후변화 페널티 계산에 필요한 기온에 민감한 HCHO의 활용도를 검증하였다.

그 결과 기온과 오존의 연관성은 뚜렷하게 나타났고 특히 폭염 기간 오존 주의보와 경보의 발령 횟수의 차이는 비폭염 기간에 비해 월등히 높았다. 전체 분석 기간의 그 일변화 또한 두 기간의 차이를 확실히 알 수 있었고, 폭염 기간 분석을 통해 기후변화 효과를 분석할 수 있는 사례 연구가 될 가능성을 확인하였다. 서울에 비해 부산 지역의 오존 농도가 더 높게 증가하는 양상이 나타났는데 이는 지역적 특성 차이에 기인한 것으로 확인하였다. 특히 오존 생성에 크게 기여하는 VOC 물질 중 하나인 HCHO의 농도 변화를 WRF-Chem 모델링과 OMI 위성자료 결과로부터 도출해 본 결과, 비폭염 기간에 비해 폭염 기간의 HCHO의 고농도 현상이 나타나는 것을 확인하였고, 같은 시기에 고농도 오존이 나타남을 확인하였다. WRF-Chem 모델링을 통해 도출한 HCHO와 기온 사이의 상관성은 지수함수로 표현하였을 때 서울과 부산의 R 값이 0.66~0.68로서 오존과 비교하여 훨씬 정밀하게 나타났다. 따라서 오존의 기후변화 과정에서 VOC 배출량 변화 요인에 의한 기후변화 페널티를 정량적으로 계산하기 위해서는 폭염기간과 같이 기온이 높은 사례로부터 HCHO의 변화량을 통해 정량적으로 계산할 수 있는 매개변수로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 여름철 극한 기온 변화를 반영하는 BVOC의 대응 변수로서 HCHO가 유용한 매개변수가 될 수 있을 뿐만 아니라 동북아시아를 상시 관측하는 정지궤도 위성인 GEMS의 관측 성분이기도 하여, 향후 기후변화-대기질 연관성 분석 및 기후변화 페널티 계산에 매우 유용하게 활용될 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (과제번호: RS-2024-00400632)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Atkinson, R., 2000, Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 2063-2101.
- Baek, S. H., Lee, H. J., Kim, C. H., 2023, Analysis of photochemical ozone formation regime in Busan - Comparative study on Busan vs. Seoul metropolitan area(IV), *Journal of Environmental Science International*, 32(5), 285-301.
- Bloomer, B. J., Stehr, J. W., Piety, C. A., Salawitch, R. J., Dickerson, R. R., 2009, Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions, *Geophysical Research Letters*, 36(9), 2009GL037308.
- Calfapietra, C., Fares, S., Manes, F., Morani, A., Sgrigna, G., Loreto, F., 2013, Role of biogenic volatile organic compounds (Bvoc) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A Review, *Environmental Pollution*, 183, 71-80.
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A. G., Odman, M. T., Yarwood, G., Kumar, N., (2017), Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(5), 582-598.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., Eder, B., 2005, Fully coupled "online" chemistry within the WRF model, *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957-6975.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, Climate change 2022: Mitigation of climate change, Contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Jacob, D. J., Winner, D. A., 2009, Effect of climate change on air quality, *Atmospheric Environment*, 43(1), 51-63.
- Jeong, Y., Lee, H. W., Jeon, W., 2020, Regional differences of primary meteorological factors impacting O₃ variability in South Korea, *Atmosphere*, 11(1), 74.
- Jing, P., Lu, Z., Steiner, A. L., 2017, The ozone-climate penalty in the Midwestern U.S., *Atmospheric Environment*, 170, 130-142.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2018, <http://www.kma.go.kr/kma>.
- Pusede, S. E., Steiner, A. L., Cohen, R. C., 2015, Temperature and recent trends in the chemistry of continental surface ozone, *Chemical Reviews*, 115(10), 3898-3918.
- Rasmussen, D. J., Hu, J., Mahmud, A., Kleeman, M. J., 2013, The ozone-climate penalty: Past, present, and future, *Environmental Science & Technology*, 47(24), 14258-14266.
- Sillman, S., Samson, P. J., 1995, Impact of temperature on oxidant photochemistry in urban, polluted rural and remote environments, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D6), 11497-11508.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2020, <http://www.epa.gov>.
- Wei, X. L., Li, Y. S., Lam, K. S., Wang, A. Y., Wang, T. J., 2007, Impact of biogenic VOC emissions on a tropical cyclone-related ozone episode in the Pearl River Delta region, China, *Atmospheric Environment*, 41(36), 7851-7864.
- Xie, Y., Paulot, F., Carter, W. P. L., Nolte, C. G., Luecken, D. J., Hutzell, W. T., Wennberg, P. O., Cohen, R. C., Pinder, R. W., 2013, Understanding the impact of recent advances in isoprene photooxidation on simulations of regional air quality, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16), 8439-8455.
- MOE (Ministry of Environment), 2023, 2021 National air pollutant emissions, 46-50.
-
- Master's course. Han-Jun Ji
Department of Earth and Environmental Systems, Pusan National University
freerun0105@pusan.ac.kr
 - Professor. Hyo-Jung Lee
Department of Earth and Environmental Systems, Pusan National University
hyojung@pusan.ac.kr
 - Doctor. Hyun-Young Jo
Institute of Environmental Studies, Pusan National University
lovejhy777@hanmail.net
-
- Doctor's course. Jong-Min Kim
Department of Earth and Environmental Systems, Pusan National University
jm6449@naver.com
 - Professor. Cheol-Hee Kim
Department of Earth and Environmental Systems, Pusan National University
chkim2@pusan.ac.kr