

논문

최근 20년간 서울지역 도시열섬과 대기오염물질의 장기변화 및 상관성 분석

Long-Term Variations and Relationships between Urban Heat Island and Air Pollutants in Seoul over the Past 20 Years

김진승¹⁾, 송상근^{1),2),*}, 이성빈¹⁾, 조성빈¹⁾

¹⁾제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공, ²⁾제주대학교 지구해양과학과

Jin-Seung Kim¹⁾, Sang-Keun Song^{1),2),*}, Sung-Bin Lee¹⁾, Seong-Bin Cho¹⁾

¹⁾Faculty of Earth and Marine Convergence/Earth and Marine Science Major, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

²⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

접수일 2023년 12월 31일
수정일 2024년 3월 2일
채택일 2024년 3월 11일

Received 31 December 2023
Revised 2 March 2024
Accepted 11 March 2024

*Corresponding author
Tel: +82-(0)64-754-3431
E-mail: songsk@jejunu.ac.kr

Abstract In this study, the long-term variations of urban heat island (UHI) and air pollutants were analyzed using air temperature and air quality data observed in urban and suburban areas of Seoul over the past 20 years (2001~2020). In addition, we investigated the relationships between UHI intensities and air pollutant concentrations during the study period. The UHI intensities, which were estimated using the mean and maximum temperature, showed a weak increasing trend (+0.006 and +0.067°C yr⁻¹, respectively) during the study period. In contrast, the UHI intensity estimated using the minimum temperature showed a decreasing trend (-0.124°C yr⁻¹) because the increase in minimum temperature was larger in suburban areas than in urban areas. The UHI intensity showed a continuously decreasing pattern when wind speed increased from 0 m s⁻¹ to 4 m s⁻¹, but little change was observed when wind speed exceeded 4 m s⁻¹. Moreover, the long-term decreasing trend in primary air pollutants (e.g., CO, NO₂, SO₂, and PM₁₀) was observed for 2001~2020, whereas the increasing trend in O₃ concentrations. In correlation analysis, we found that most air pollutants (except for O₃) showed positive correlations with UHI intensity during the study period (CO: +0.354, NO₂: +0.415, SO₂: +0.088, PM₁₀: +0.118). At the same time, O₃ was negatively correlated with UHI intensity (r=-0.450). For most air pollutants (except for O₃), we also found stronger correlations at night than during the day. In addition, the concentrations of primary air pollutants tended to increase with increasing UHI intensities (i.e., increasing UHI levels), while O₃ concentrations tended to decrease with increasing UHI levels, suggesting a potential interaction between UHI and air pollution.

Key words: Long-term variation, Urban heat island intensity, Air pollutants, Correlation analysis, Seoul megacity

1. 서론

일반적으로 도시화는 인구의 도시집중에 따라 지역적 및 사회적 특성(생활양식 및 문화 등)이 변화하는 것을 의미하며, 과거부터 현재까지 꾸준히 진행되고 있다. 도시화에 따라 농업지역이 도시지역으로, 도시지역은 더욱 도시지역으로 확장해가면서 토지피복

또한 초지나 농경지에서 시가지화되어가고 차량의 수도 점점 증가하고 있다. 1980년대 말부터 2019년까지 남한의 전국 토지 이용 비율이 농경지와 산림은 각각 약 2.8% 감소하였으며, 시가지·건조 지역은 약 3.5% 증가하였다(NGII, 2020). 이렇게 개발된 도시는 특유의 기후가 형성될 수 있으며, 도시화로 인해 주변 지역보다 기온이 상승하여 뚜렷한 도시열섬

(Urban heat island, UHI) 현상이 나타나기도 한다 (Jang and Kim, 1991). 또한 도시화에 따른 UHI 현상은 도시지역의 기온 증가와 강수량의 변동을 초래할 수도 있다. 서울의 계절적 평균기온은 도심지로 갈수록 높게 나타나는 현상을 보였으며 (The Seoul Research Data Service, 2013), 강수량의 경우 비도시화 지역에 비해 도시화 지역의 여름철 강수량이 약 9% 더 높게 나타났다 (Oh *et al.*, 2005). 이에 대한 원인으로 도시화 효과에 의한 UHI나 지표면 거칠기 길이의 변화가 크게 영향을 주었다는 연구 결과들이 있다 (Han and Baik, 2008; Diem and Mote, 2005; Oh *et al.*, 2005; Rozoff *et al.*, 2003).

도시화와 관련하여 과거 오래전부터 관측자료 및 모델링을 통해 도시지역의 기온과 UHI에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 주로 토지피복 변화에 따른 UHI의 변화 및 특성에 초점을 두고 있거나, 기상요소 (운량, 강수량, 풍속 등)의 변화에 따른 UHI 강도 (intensity)의 변화를 중심으로 수행되었다 (Hwang and Kang, 2020; Kim *et al.*, 2014; Kim and Choi, 2012). 또한 UHI와 대기오염물질 사이의 상관성을 분석하는 연구도 수행된 바 있지만, 한 두 가지 특정오염물질을 이용하여 이들의 상관관계를 밝히는 연구가 대부분이었다 (Ngarambe *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2016; Jang and Kim, 1991). 예를 들어, Jang and Kim (1991)은 서울지역을 대상으로 이산화황 (SO₂) 오염도와 도시열섬 사이의 상관성을 분석하였으며, 그 결과 상관계수가 0.35~0.58 정도로 다소 높음을 밝힌 바 있다. Ngarambe *et al.* (2021)에서는 UHI 강도를 11 구간으로 나누어 구간별 대기오염물질과의 상관성을 분석한 결과, 오존 (O₃)을 제외한 나머지 대기환경기준물질 (CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5})에서 양의 상관성이 나타났다. 이 외에도 수십 년 이상의 장기간 자료를 이용하여 다각적인 측면에서 도시지역의 기후 특성을 분석한 연구가 수행되어 왔지만, 장기간 동안 UHI 강도와 여러 종류의 대기오염물질과의 상관성 분석연구는 흔하지 않다. 이와 같은 장기간 연구는 도시 및 교외지역의 도시화 정도와 특성

을 파악할 수 있으며, 아울러 UHI에 의해 야기되는 국지순환에 의한 대기오염의 영향을 평가함에 있어 매우 중요하다.

본 연구에서는 우리나라에서 가장 큰 대도시인 서울을 중심으로 최근 20년간 (2001~2020년)의 UHI 강도와 대기오염물질의 장기변화 추세를 살펴보았다. 연구대상지역인 서울은 2020년 기준 전국 인구의 약 19%에 해당하는 인구 집중지역이고 (약 천만 명에 달함), 다른 여러 도시에 비해 도시화 및 산업화가 가장 많이 진행된 지역이다. 또한 본 연구에서는 대상지역을 중심으로 장기간의 UHI 강도와 대기오염물질과의 상관성을 분석하였다. 이 외에도 연구기간 동안 대기조건 (풍속, 운량)에 따른 UHI 강도의 변화를 비교분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구방법 및 자료

연구대상지역인 서울은 우리나라의 수도이며, 경제, 문화, 정치의 중심지이다 (Park, 2019). 이러한 사회환경적 및 지역적 요인으로 서울은 과거 오래전부터 꾸준히 도시가 성장하고 발전해 왔으며, 이것은 인구 및 차량 집중과 함께 토지피복의 큰 변화를 가져왔다. 예를 들어, 2020년 서울의 자동차 등록대수가 2002년 대비 약 60만 대 증가하였고 (MOLIT, 2021, 2002), 2000년에서 2010년간 서울의 초지와 산림은 약 40 km²가 줄어들었다 (EGIS, 2018, <https://egis.me.go.kr/>). 이러한 변화는 서울 대도시의 기후변화, 즉 기온과 강수량에 큰 영향을 주었다. 서울연구 데이터서비스 (The Seoul Research Data Service, 2013)에 따르면, 1910년 대비 2012년의 기온은 약 2°C, 강수량은 약 600 mm 증가하였다. 또한 우리나라 기상청의 한국기후표 (KMA, 2022a)에 의하면, 2001년 대비 최근 2020년의 기온과 강수량은 각각 0.4°C와 300 mm 정도 증가한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 최근 20년간 (2001~2020년) 서울지

역의 UHI 강도와 대기오염물질의 장기변화 추세 및 이들의 상관관계를 분석하기 위해, 해당 연구기간 동안의 기온자료와 5가지 대기환경기준물질(SO₂, CO, O₃, NO₂, PM₁₀)의 농도 자료를 이용하였다. UHI 강도 계산을 위해 이용된 기온자료는 기상청의 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에서 제공하는 방재기상관측소(Automatic Weather Station, AWS) 자료이다. 여기서 UHI 강도를 산출하는 방법은 2.2절에 자세히 제시하였다. 대기환경기준물질의 농도 자료는 환경부 산하 한국환경공단 ‘에어코리아’에서 제공하는 시도별 최종확정자료이다(<https://www.airkorea.or.kr>). PM_{2.5}의 경우 연구기간에 해당하는 자료의 수가 부족하여 분석에서 제외하였다. 여기서, 최근 20년의 장기변화 분석을 위하여 기온 및 대기오염물질의 연평균 및 월평균 자료를 이용하였고, 상관성 분석을 위해서는 일평균 및 매 시간별 자료를 이용하였다.

그림 1은 UHI 강도 및 대기오염물질의 장기변화와 상관성을 분석하기 위한 기상(AWS 9지점) 및 대기오염물질(6지점)의 관측지점 위치를 나타낸다. 9개의 기상관측지점은 서울의 동대문(DDM), 성동(SD), 기상청(KMA), 양천(YC), 중랑(JN), 금천(GC) 지점과 경기도의 용인(YI), 고양(GY), 청평(CP) 지점이다. 6개의 도시대기질 관측지점은 서울의 동대문구(A-DD), 성동구(A-SD), 관악구(A-GA), 영등포구(A-YD), 중랑구(A-JN), 금천구(A-GC) 지점이다. UHI 강도와 대기오염물질의 상관관계를 보다 정확하게 해석하기 위해 도시대기질 관측지점은 각 기상관측지점과 가장 가까운 지점으로 선정하였다.

본 연구에서 기상관측지점을 도시지역과 교외지역으로 구분한 기준은 관측소 주변의 시가지화된 토지피복의 비율을 토대로 하였으며, 또한 기온의 경우 고도에 따른 영향(기온감률)을 받기 때문에 관측소의 해발고도가 100 m 이하인 지점으로 선정하였다. 즉, 도시지역에 해당하는 기상관측지점은 관측소를 중심으로 영향 범위인 반경 2.8 km (Kim *et al.*, 2016) 내의 면적 중 시가지화 비율이 50% 이상인 지점으로,

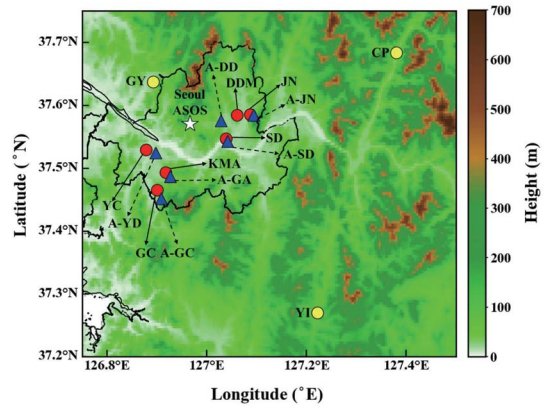


Fig. 1. Geographical locations of six sites for urban air temperature (red circles), three sites for suburban air temperature (yellow circles), six sites for air quality (blue triangle), and the Automated Synoptic Observing System (ASOS) for three meteorological variables (star), such as insolation, amount of clouds, and sunshine. The abbreviations in the figure stand for the following: KMA: Korea Meteorological Administration; JN: Jung Nang; GC: Geum Cheon; YC: Yang Cheon; DDM: Dong Dae Mun; SD: Seong Dong; GY: Go Yang; CP: Cheong Pyeong; and YI: Yong In. The air quality monitoring sites are located close to the meteorological monitoring sites, respectively.

교외지역은 시가지화 비율(30% 미만)이 낮고 주로 산림으로 둘러싸인 지점으로 선정하였다(그림 2). 선행연구에 따르면(Hong *et al.*, 2007), 시가지화 비율이 50% 이상이 되면 도시의 기온 상승이 뚜렷하게 나타난다는 연구 결과가 있다. 최종적으로, 도시지역에 해당하는 관측지점은 서울 6개 지점(동대문(DDM), 성동(SD), 기상청(KMA), 양천(YC), 중랑(JN), 금천(GC)), 교외지역에 해당하는 관측지점은 나머지 3개 지점(용인(YI), 고양(GY), 청평(CP))으로 선정하였다. 여기서 시가지화 비율을 계산하기 위해 환경부 중분류 토지피복 자료를 이용하였으며(<https://egis.me.go.kr>), 중분류 토지피복 유형 중 6가지 즉, 주거, 공업, 상업, 문화·체육·휴양, 교통, 공공시설의 면적을 합하였다(ArcGIS 프로그램 활용). 도시지역 6개 관측지점의 전체 면적 대비 ‘주거’ 유형이 차지하는 비율은 59%로 가장 크고, 다음으로 ‘상업’ 21%, ‘교통’ 10%, 나머지 3개 유형은 합쳐서 10% 정도를 차지하

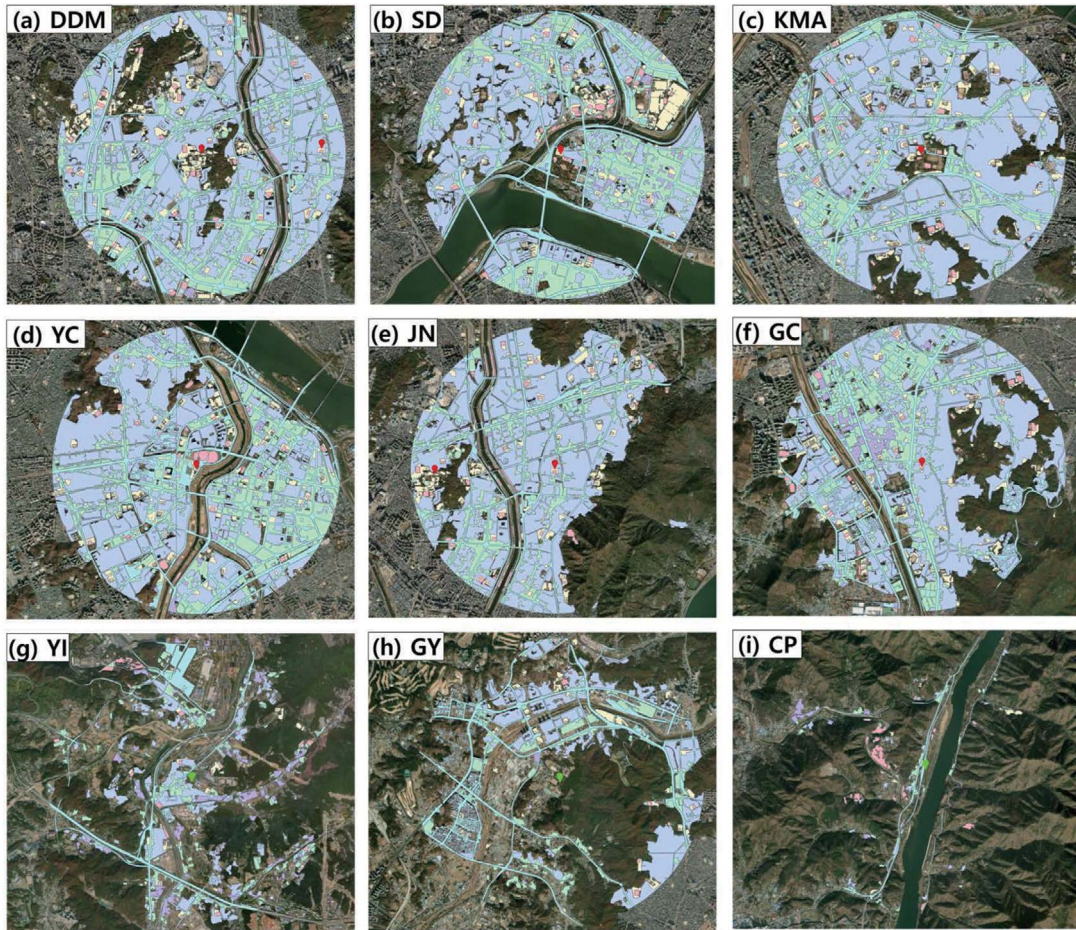


Fig. 2. Influence areas and land cover categories(residential, commercial, transportation, public facility, cultural, and industrial) within a 2.8 km radius from the center of each meteorological monitoring site ((a)~(f): urban site and (g)~(i): suburban site, as seen in Fig. 1).

였다. 또한 6개 관측지점 중에서 이러한 ‘주거’ 유형의 비율이 가장 큰 지점은 기상청(KMA, 약 63%)이고 가장 작은 지점은 성동(SD, 약 44%)으로 나타났다(표 1). 관측지점별 반경 2.8km 내에서 나머지 토지 피복 유형의 비율에 관한 정보는 표 1에 제시하였다. 본 연구에서는 토지피복 유형과 관련하여 UHI 강도 및 대기오염물질 농도와의 상관성을 분석하였다.

일반적으로, UHI 강도가 기상요소(풍속, 운량, 강수량 등)의 변화에 민감하게 바뀐다는 사실이 여러 선행연구를 통해 확인된 바 있다(Hwang and Kang,

2020; Kim *et al.*, 2014; Kim and Choi, 2012). 이에 본 연구에서는 풍속 및 운량 구간별 UHI 강도의 변화를 분석하였다. 풍속은 총 6개 구간($0\sim 1\text{ m s}^{-1}$, $1\sim 2\text{ m s}^{-1}$, $2\sim 3\text{ m s}^{-1}$, $3\sim 4\text{ m s}^{-1}$, $4\sim 5\text{ m s}^{-1}$, $> 5\text{ m s}^{-1}$)으로 구분하였으며, 보다 정확한 분석을 위해 풍속 자료 중 0.5 m s^{-1} 미만인 무풍(calm) 상태에 해당하는 자료(약 4.7%)를 제외하였다. 운량도 풍속과 마찬가지로 총 6개 구간(0~1 octa, 2~3 octa, 4~5 octa, 6~7 octa, 8~9 octa, 10 octa)으로 구분하여 분석하였다. 풍속은 기상청의 기상자료개방포털에서 제공하는 AWS 자

Table 1. The area ratio (%) of land use categories within a 2.8 km radius from the center of each meteorological monitoring site in an urban area.

Land use category	Site ^a					
	KMA	JN	GC	YC	DDM	SD
Residential area	62.6	61.8	61.3	55.0	54.5	44.1
Commercial area	15.4	14.4	23.8	25.6	18.6	23.8
Transportation area	15.5	16.0	4.0	11.6	18.1	21.2
Public facility area	5.2	5.9	5.8	5.4	6.9	7.8
Cultural area	1.2	1.9	1.5	1.7	1.8	1.9
Industrial area	0.1	0.05	3.6	0.8	0.1	1.3

^aKMA: Korea Meteorological Administration; JN: Jung Nang; GC: Geum Cheon; YC: Yang Cheon; DDM: Dong Dae Mun; and SD: Seong Dong.

료를 이용하였고, 운량은 대상지역 내 자료 이용의 한계 때문에 대표지점인 서울 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 자료를 이용하였다. 추가적으로, UHI 강도와 대기오염물질과의 상관관계를 보다 면밀히 살펴보기 위해, UHI 강도를 1°C 간격으로 총 11개 구간(Level 1~Level 11)으로 구분하여 각 구간별 대기오염물질의 농도 변화를 분석하였다.

2.2 도시열섬(UHI) 강도 산정 및 상관성 분석

UHI는 관측방법 및 형태에 따라 지표열섬(surface UHI)과 대기 열섬(atmospheric UHI)으로 구분된다(Kim and An, 2017; Basics, 2011). Basics (2011)에 의하면, 지표열섬은 지표면의 온도 차이로 계산되며 주로 열화상 이미지나 수치모의, 위성자료를 이용하여 관찰할 수 있고, 대기의 열섬은 기온 차이로 계산하며 주로 등온선이나 온도 시계열로 관찰할 수 있다고 한다. Oke (1997)에 따르면, 대기의 열섬강도가 주간보다 야간에 더 강하게 나타났으며, 100만 명 이상의 대도시에서는 연평균 기온이 주변 교외지역보다 1~3°C 정도 더 높은 수준이었다. 또한 Voogt and Oke (2003)와 Oke (1982)에 의하면, 일반적으로 지표열섬 강도에서 도시와 교외지역의 지표온도 차이는 주간에 10~15°C 야간에 5~10°C이며, 여름철에 가장 강한 열섬강도가 나타났다.

본 연구에서는 대상지역인 서울 대기의 열섬현상에 대해 집중적으로 살펴보았다. 대기 열섬강도는 일반적으로 도시지역과 교외지역의 평균기온, 최고기온, 최저기온을 이용하여 계산할 수 있으며, 아래 식(1)과 같이 나타낸다. 즉, UHI 강도는 앞 절에서 선정한 도시지역 6개 지점의 기온(T_{urban}) 평균과 교외지역 3개 지점의 기온($T_{suburban}$) 평균과의 차이를 이용하여 계산하였다(그림 1에 제시된 관측지점). 여기서, UHI 강도의 장기변화 추세를 분석하기 위해 두 지역(도시 및 교외)의 각 기상관측지점에서의 평균기온의 차이, 그리고 최고 및 최저기온의 차이를 이용하여 UHI 강도를 계산하였다.

$$UHI\ intensity = T_{urban} - T_{suburban} \quad (1)$$

연구기간(2001~2020년) 동안 UHI 강도와 대기오염물질과의 상관관계를 분석하기 위해 SPSS 24 (Statistical Package for Social Science) 통계프로그램을 활용하였다. 상관분석에 이용된 대기오염물질 자료는 6개의 도시대기질 관측지점(그림 1)에서 측정된 대기환경기준물질(SO_2 , CO , O_3 , NO_2 , PM_{10})의 일평균 및 매 시간별 농도 자료이다.

3. 결과 및 토의

3.1 UHI 강도와 대기오염물질의 장기변화 추세

3.1.1 연변화 추세

본 연구에서는 서울지역의 최근 20년간(2001~2020년) UHI 강도의 장기변화를 파악하기 위해, 연도별 평균, 최고, 최저기온의 연변화 추세와 UHI 강도의 연변화를 비교 분석하였다(그림 3). 먼저 평균기온의 연변화를 보면(그림 3(a)), 전반적으로 도시와 교외지역 모두 기온이 상승하는 경향을 보이며, 추세 기울기는 도시의 경우 $+0.019^\circ C\ yr^{-1}$, 교외의 경우 $+0.013^\circ C\ yr^{-1}$ 로 나타났다. 또한 2001년 대비 2020년에 도시지역은 $+0.45^\circ C$, 교외지역은

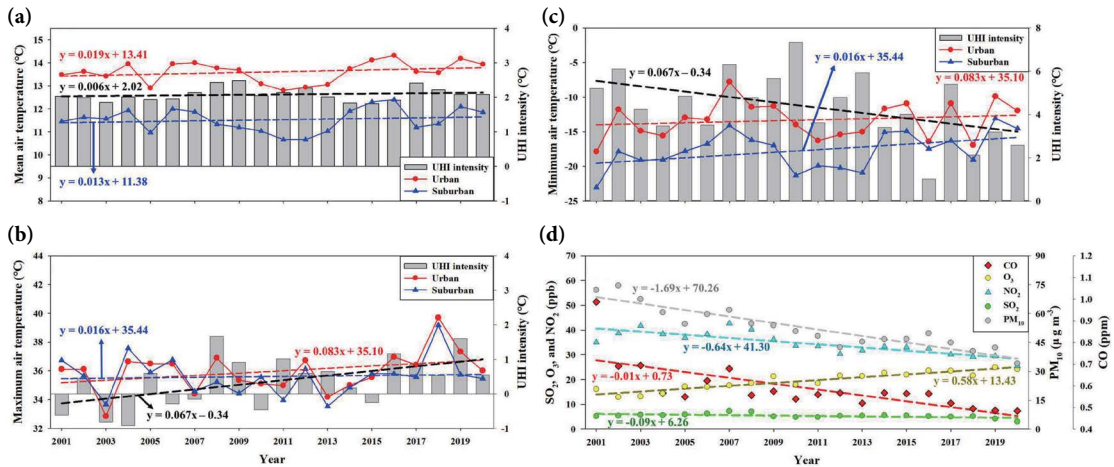


Fig. 3. Yearly variations in (a) mean air temperature and its UHI intensity, (b) maximum air temperature and its UHI intensity, (c) minimum air temperature and its UHI intensity, and (d) urban air pollutants (CO, O₃, NO₂, SO₂, and PM₁₀) in Seoul during the study period (2001~2020). The dashed lines in each panel represent the linear trend lines of air temperature (mean, maximum, and minimum), UHI intensity, and air pollutants during the study period.

+0.40°C 정도 상승하였다. 두 지역 모두 2016년에 평균기온이 가장 높았으며(도시: 14.3°C, 교외: 12.5°C), 2011년에 가장 낮게 나타났다(도시: 12.8°C, 교외: 10.7°C). 한편, 평균기온을 이용하여 계산한 연간 UHI 강도는 20년 동안 약 1.8~2.5°C 범위였으며, 미세하게 증가하는 추세를 보였다(기울기 +0.006°C yr⁻¹). 이러한 UHI 강도의 연변화 증가추세는 평균기온의 연변화 증가추세에 비해 완만한 기울기였는데, 이것은 도시와 교외지역의 평균기온이 서로 비슷한 추세(경향)로 증가하였기 때문으로 사료된다.

최고 및 최저기온의 연변화에서는(그림 3(b)와 3(c)), 평균기온과 마찬가지로 도시 및 교외지역 모두 증가하는 경향을 보였다. 예를 들면, 최고기온의 경우 도시와 교외지역에서의 추세 기울기는 +0.083°C yr⁻¹과 +0.016°C yr⁻¹, 최저기온의 경우 기울기는 각각 +0.073°C yr⁻¹과 +0.197°C yr⁻¹로 산출되었다. 이외에도 2001년 대비 2020년에 도시와 교외지역의 최고기온은 큰 차이가 아니었지만(도시: -0.1°C, 교외: -1.3°C), 최저기온은 각각 +5.9°C, +8.5°C만큼 차이가 나 상대적으로 평균 및 최고기온에 비해 높은 기온 상승 폭을 보였다. 이에 따라 최저기온을 이용하여 계

산한 UHI 강도의 연변화는 평균 및 최고기온의 UHI 강도 연변화와는 다른 양상이었다. 즉, 최저기온의 UHI 강도는 약 1.0~7.3°C의 범위에서 감소 추세를 보인 반면(기울기: -0.124°C yr⁻¹), 최고기온의 UHI 강도는 약 -0.8~1.5°C 범위였으며 평균기온과 마찬가지로 증가 추세가 나타났다(기울기: +0.067°C yr⁻¹). 여기서, 최저기온의 UHI 강도가 감소하는 경향은 지난 20년간 도시지역에 비해 교외지역에서 최저기온의 증가 추세가 더 큰 폭으로 나타났기 때문이다(도시: +0.073°C yr⁻¹, 시골: +0.197°C yr⁻¹).

대기오염물질 농도의 연변화 추세를 보면(그림 3(d)), 지난 20년간 1차 오염물질(CO, NO₂, SO₂, PM₁₀)은 전반적으로 감소하고, 2차 오염물질인 O₃은 증가하는 경향이 나타났다. 예를 들어, CO, NO₂, SO₂, PM₁₀ 농도의 감소 추세 기울기는 각각 -0.01 ppm yr⁻¹, -0.64 ppb yr⁻¹, -0.09 ppb yr⁻¹, -1.69 µg m⁻³ yr⁻¹이며, O₃의 증가 추세의 기울기는 +0.57 ppb yr⁻¹로 산출되었다. 2001년 대비 2020년의 CO 농도는 -0.5 ppm, NO₂는 -9.6 ppb, SO₂는 -2.2 ppb, PM₁₀은 -38.2 µg m⁻³ 정도 감소하였으나, O₃은 1차 오염물질과 달리 약 +9.2 ppb의 농도 증가가 나타났다. 또한 O₃은

2001년부터 꾸준히 증가 경향을 보이다가 2019년에 가장 높은 연평균(약 30 ppb)을 기록하였다. 한편, 2019년에 비해 2020년에 모든 대기오염물질의 연평균 농도가 감소한 것을 알 수 있다(CO: -0.002 ppm, O₃: -0.8 ppb, NO₂: -4.0 ppb, SO₂: -1.2 ppb, PM₁₀: -8.2 $\mu\text{g m}^{-3}$). 특히, PM₁₀과 NO₂의 농도는 전체 연구 기간 동안의 감소 추세에 비해 더 급격히 감소하였으며, O₃의 경우는 전체 연구기간 동안의 증가 추세와 달리 약간 감소한 것으로 나타났다. 이것은 여러 선행연구에서 밝혀진 바와 같이 2020년에 발생한 COVID-19이 일부 영향을 준 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020; Seo *et al.*, 2020). 이 외에도 본 연구에서는 일평균 자료를 이용하여 기온, UHI 강도, 그리고 대기오염물질의 연변화를 추가로 분석하였다(그림 제외). 전반적으로, 일평균 자료를 이용한 결과는 연평균 자료를 이용한 결과(그림 3)와 마찬가지로 각 요소에 대해 같은 증가 추세(예, UHI 강도, O₃) 및 감소 추세(1차 오염물질)를 보였으며, 연간 추세의 기울기도 서로 유사하게 나타났다(UHI 강도: $+0.003^{\circ}\text{C yr}^{-1}$, CO: -0.01 ppm yr^{-1} , NO₂: -0.66 ppb yr^{-1} , SO₂: -0.11 ppb yr^{-1} , PM₁₀: -2.01 $\mu\text{g m}^{-3}$ yr^{-1} , O₃: $+0.58$ ppb yr^{-1}).

본 연구에서 산정한 UHI 강도(최저기온 UHI 강도 제외)의 연변화 추세는 대부분 대기오염물질의 연변화 추세와 상반되는 현상이 나타났다. 즉, 평균 및 최고 기온을 이용하여 산출한 UHI 강도는 미세한 증가 추세였으나, 대부분 오염물질(O₃ 제외)은 미세하게 감소하는 경향이였다. 우리나라는 과거부터 최근에 이르기까지 대기오염물질의 배출량 허용기준 및 대기환경기준치 강화 등 다양한 대기환경 개선 정책을 시행해 왔으며(Kim *et al.*, 2023; Kim and Lee, 2018), 이러한 전략적 정책으로 인해 1차 대기오염물질은 최근으로 올수록 감소 추세가 나타난 것으로 사료된다. 반면, O₃의 장기변화는 지난 20년간의 UHI 강도(도시 기온 상승)와 비슷하게 증가하는 추세가 나타났다. Seo *et al.* (2014)에 따르면, 과거 12년간(1999~2010년) 남한 전역에서 O₃ 농도, 일 최고기온, 일사의

연변화는 모두 증가 추세를 보였다(기울기는 각각 $+0.26$ ppbv yr^{-1} , $+0.09^{\circ}\text{C yr}^{-1}$, $+1.47$ W m^{-2} yr^{-1}). 이와 유사하게, 본 연구의 서울지역에서도 모두 증가하는 추세($+0.58$ ppb yr^{-1} , $+0.06^{\circ}\text{C yr}^{-1}$, $+0.51$ W m^{-2} yr^{-1})가 나타나(그림 제외), O₃ 생성은 일사, 기온 등의 기상조건에 의해 영향을 받는 것으로 사료된다. 그러나 O₃은 2차 오염물질로서 질소산화물(NO_x)과 휘발성유기화합물(VOCs)이 햇빛의 자외선에 의한 광화학반응을 거치면서 생성되므로, 일사 및 기온 증가 등의 기상조건뿐만 아니라 전구물질의 특성(예, NO_x/VOCs 배출 비율)에 의해 크게 좌우된다(Seinfeld and Pandis, 2016; Kang *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2012; Song and Shon, 2008). 따라서 O₃ 농도 및 UHI 강도의 연변화를 단순 비교하는 것은 한계가 있으며, 또한 많은 관련 자료(배출량 등)의 부족으로 인해 해석하는데 어려움이 있다.

3.1.2 월/계절 변화 분석

그림 4는 최근 20년간(2001~2020년) 도시 및 교외지역의 기온(평균, 최고, 최저)과 UHI 강도의 월변화를 나타낸다. 전반적으로 두 지역에서의 기온(평균, 최고, 최저)은 7~8월 여름철에 높고, 1월과 12월 겨울철에 가장 낮았다. 한편, 평균기온을 이용하여 계산한 UHI 강도(도시와 교외의 기온 차)는 10~12월과 1월에 가장 강하고(특히, 10월에 $+2.8^{\circ}\text{C}$, 1월에 $+2.5^{\circ}\text{C}$), 6~7월에 가장 약하게(7월에 $+1.3^{\circ}\text{C}$) 나타났다(그림 4(a)). 본 연구와 유사하게 Do and Jung (2012)의 연구에서도 2006~2010년간 부산지역의 UHI 강도는 대체로 10~11월에 강하고 7월에 가장 약하게 나타났다. 또한 이러한 UHI 강도의 특성은 1999~2002년간 서울지역의 월/계절별 UHI 강도 변화와도 비슷한 패턴이었다(Lee and Baik, 2010). 일반적으로, UHI 강도는 날씨가 맑고 바람이 약할 때 더 강해지는데, 도시 및 교외지역의 풍속 차이가 약해지게 되면 온도 불균형을 해소시키는 바람의 이동이 제한되면서 도시의 기온을 증가시키기 때문이다(Kim and Choi, 2012). 본 연구에서 도시 및 교외지역의 계

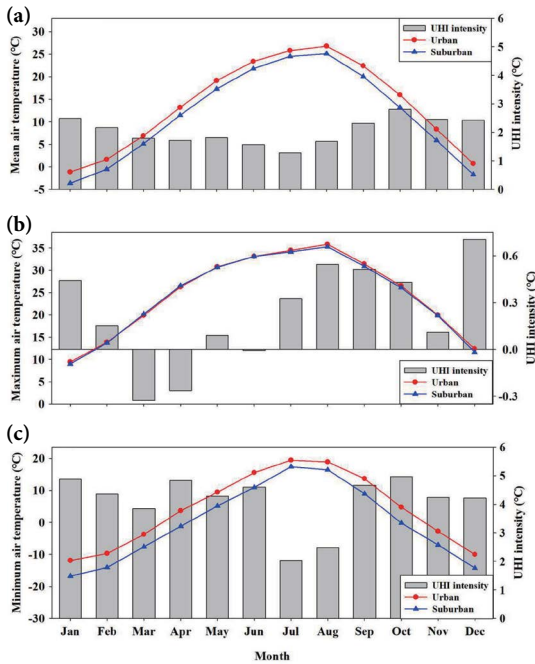


Fig. 4. Monthly variations in (a) mean air temperature and its UHI intensity, (b) maximum air temperature and its UHI intensity, and (c) minimum air temperature and its UHI intensity in Seoul during the study period (2001~2020).

절별 풍속을 보면(그림 제외), 늦가을~겨울에 도시와 교외지역의 풍속 차이는 0.49 m s^{-1} 로 가장 작고 여름에 0.74 m s^{-1} 로 가장 크게 나타났다(봄: 0.53 m s^{-1}). 따라서 늦가을~겨울의 작은 풍속 차이로 인해 도시의 열이 교외로 덜 이루어져 도시의 기온이 증가하게 되고 결국 UHI 강도가 강해진 것으로 사료된다. 풍속과 UHI 강도와의 상관성도 대체로 음의 상관을 보였으며(그림 제외), 특히 늦가을~겨울에 상관성이 가장 높고($-0.586 \leq r \leq -0.637$, P-value: < 0.0001), 여름에 가장 낮았다($-0.361 \leq r \leq -0.516$, P-value: < 0.0001). 또한 겨울에는 여름에 비해 난방 사용이 급증하고 특히 인구가 많은 도심에서 더 높은 기온이 나타날 수 있는데, 이로 인해 도시와 교외지역의 기온 차이는 여름보다 겨울에 더 뚜렷하게 드러난다(Zhang *et al.*, 2010; Lee and Hong, 2006).

최고 및 최저기온을 이용하여 산출한 UHI 강도의

월변화는 평균기온의 UHI 강도와 약간 다른 양상을 보였으며(그림 4(b)와 4(c)), 특히 최저기온의 UHI 강도는 상대적으로 매우 강하게 산출되었다. 예를 들면, 최고기온의 UHI 강도는 12월(겨울)에 $+0.7^\circ\text{C}$ 로 가장 강하고 3월(봄)에 -0.3°C 로 가장 약했으며, 최저기온의 경우 10월(가을)과 1월(겨울)에 $+5.0^\circ\text{C}$ 로 가장 강하고 7월(여름)에 $+2.0^\circ\text{C}$ 로 가장 약했다. Lee and Heo (2011)는 도시화가 진행되면 될수록 최고기온보다 최저기온에 더 영향을 주게 되며, 도시화로 인해 도시의 야간 최저기온이 주변지역(교외, 시골 등) 보다 상대적으로 높아(야간 복사냉각 저해) 두 지역의 최저기온 차이가 커진다고 언급하였다.

연구기간 동안 UHI 강도 및 대기오염물질의 월변화를 보면(그림 5), 전반적으로 PM_{10} 과 O_3 을 제외한 대기오염물질의 월변화는 1~2월(주로 겨울)에 높고 7~8월(여름)에 낮게 나타나 UHI의 월변화와 유사한 패턴이었다. 먼저, CO , SO_2 , NO_2 모두 1월에 가장 높은 농도(CO : 0.82 ppm , SO_2 : 7.3 ppb , NO_2 : 40.8 ppb), 8월에 가장 낮은 농도(0.42 ppm , 4.1 ppb , 24.1 ppb)가 나타났다. 반면, PM_{10} 은 황사의 영향을 가장 많이 받는 3월에 가장 높은 농도를 보였으며($69.2 \mu\text{g m}^{-3}$), 8월에 가장 낮았다($33.0 \mu\text{g m}^{-3}$). 추가로 일평균 자료를 이용하여 분석한 기온, UHI 강도, 대기오염물질의 월변화(그림 제외)는 월평균 자료를 이용한 결과(그림 4와 5)와 거의 동일하게 나타났다. 그림 5를 보면, 연구기간 동안 UHI 강도와 대부분의 1차 오염물질 농도는 대체로 겨울에 높고 여름에 상대적으로 낮은 수치가 나타났다. 겨울에 높은 이유는 도시 및 교외 지역의 기상조건(예, 작은 풍속 차이, 도시 기온 상승)과 인위적 활동(예, 도시화로 인한 난방 및 차량 등 화석연료 사용 증가)의 복합적 영향에 의한 것이며, 여름에는 많은 강수로 인해 기온 및 농도가 감소한 것으로 사료된다(Ngarambe *et al.*, 2021). 종관규모 측면에서, 우리나라의 겨울철에는 찬 대륙성 시베리아 고기압의 영향으로 대기오염물질의 축적이 이루어지고, 주로 북서풍/서풍 계열의 바람을 따라 오염물질이 외부에서 장거리 수송되어 농도가 증가한 사

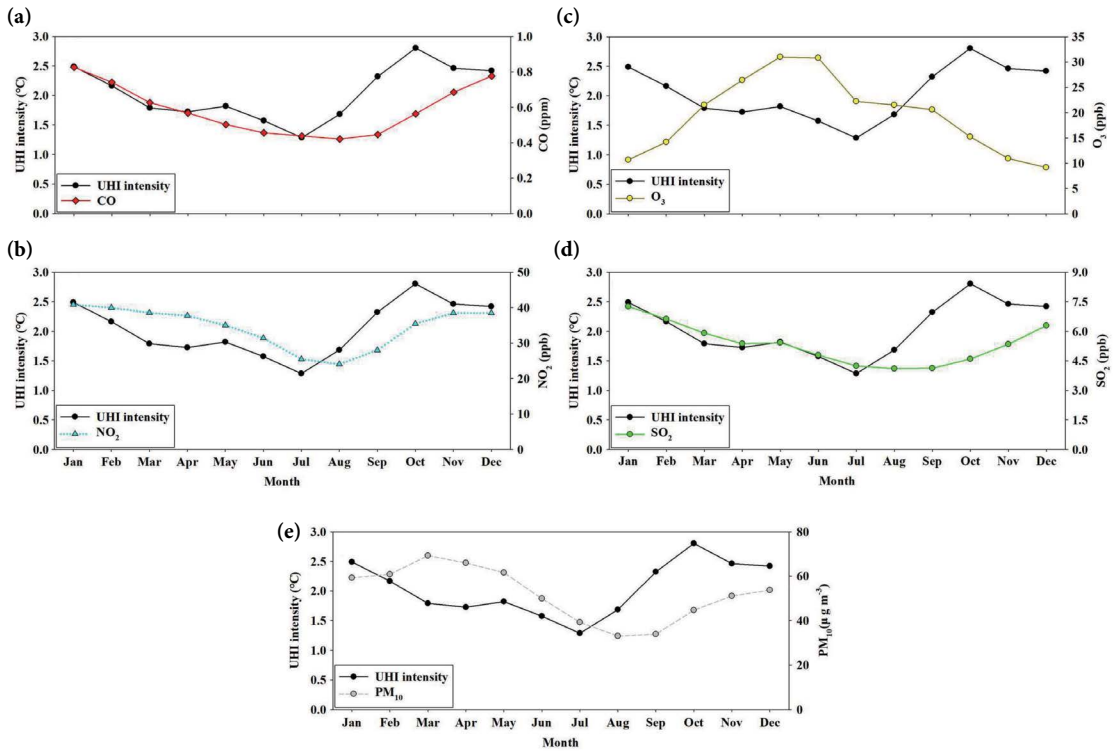


Fig. 5. Monthly variations between UHI intensities(as seen in Fig. 4(a)) and urban air pollutants ((a) CO, (b) NO₂, (c) O₃, (d) SO₂, and (e) PM₁₀) during the study period (2001~2020).

레가 있다(Nam *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2018). 또한 Seo *et al.* (2018, 2017)은 종관규모의 고기압 시스템 하에서 중국으로부터의 전구물질 수송에 의해 1차 및 2차 에어로졸의 축적이 나타남을 밝힌 바 있다. 이 외에도 Nam *et al.* (2019)은 여름철 북태평양 고기압의 영향으로 우리나라에 남풍 계열의 깨끗한 공기가 유입되어 미세먼지 농도가 감소한다는 연구 결과를 발표하였다. 따라서 UHI 및 대기오염의 계절적 변화는 도시 규모뿐만 아니라 종관규모 측면과 병행하여 복합적 분석이 필요하다고 사료된다.

그림 5에서 알 수 있듯이, 2차 오염물질인 O₃는 광화학반응이 활발한 여름(6월: 30 ppb, 7~8월: 22 ppb)보다 오히려 5월(봄)에 가장 높고(31 ppb), 12월(겨울)에 가장 낮은 농도가 나타났다(9.2 ppb). 즉, O₃ 농도와 UHI 강도의 월변화 패턴은 다소 차이를 보였

다. 여름(특히, 7~8월)에 봄보다 낮은 농도가 나타나는 이유는 앞서 언급하였듯이 많은 강수의 세정효과가 주요 원인으로 사료되며, 봄철 고농도는 도시지역의 높은 일사량이 일부 영향을 준 것으로 사료된다(Boleti *et al.*, 2019; An, 2012). 한국기후표에 따르면(KMA, 2022a), 최근 30년(1991~2020년) 동안 서울지역의 평균 일사량은 다른 월에 비해 5월과 6월에 각각 545 MJ m⁻³, 497 MJ m⁻³로 높은 수치를 기록하였다. 또한 Seo *et al.* (2018)은 O₃과 같은 2차 오염물질의 경우 O₃ 생성에 영향을 주는 강한 일사와 기온 등에 의해 늦은 봄~여름철에 O₃ 농도가 증가하였음을 밝힌 바 있다. 이 외에도 봄철 고농도는 중국 등 외부로부터의 장거리 수송 또는 낮은 빈도이지만 성층권 오존의 하향수송도 영향을 줄 수 있다는 연구 결과가 있다(Itahashi, *et al.*, 2020; Song and Shon, 2008; Stohl

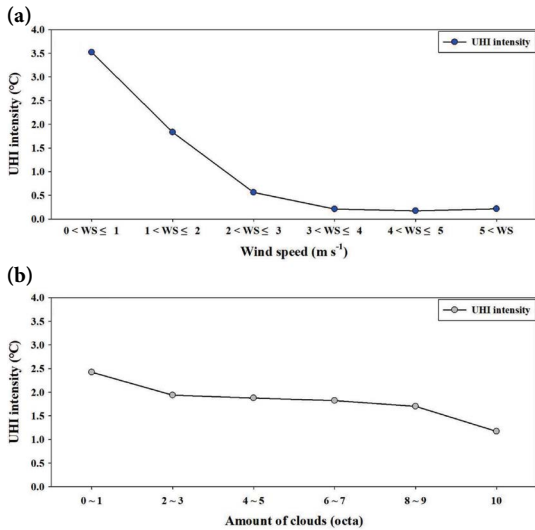


Fig. 6. Mean UHI intensities for six categories of (a) wind speed (WS) and (b) amount of clouds during the study period (2001~2020).

et al., 1999). 하지만 연변화에서 언급한 것과 마찬가지로, O₃ 농도와 UHI 강도를 단순히 비교하여 설명하는 데는 한계가 있으며, 보다 정확한 해석을 위해서는 대상지역 고유의 기상조건(기온, 바람, 기압 등)과 O₃ 전구물질의 배출특성을 함께 분석해 볼 필요가 있다.

3.2 UHI 강도와 대기오염물질의 상관성 분석

3.1절에서 UHI 강도는 도시 및 교외지역의 풍속 변화(차이)와 연관되어 있는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 UHI 강도와 대기오염물질 농도와 상관관계를 분석하기 앞서, 풍속을 구간별로 나눠서 이에 따른 UHI 강도의 변화를 살펴보았다(그림 6). 또한 운량이 증가함에 따라 UHI 강도가 약해진다는 여러 선행연구의 결과를 토대로(Huang *et al.*, 2020; Kim and Choi, 2012), 운량 구간에 따른 UHI 강도 변화도 함께 분석하였다. 전반적으로, UHI 강도는 풍속과 운량이 증가함에 따라 감소하는 패턴을 보였다. 풍속의 경우, 1 m s⁻¹ 이하일 때 UHI 강도가 가장 강하게(3.5°C) 나타났으며, 4 m s⁻¹를 초과하는 구간부터는 UHI 강도의 변화가 거의 나타나지 않았다.

Huang *et al.* (2020)에 따르면, 1979~2013년에 중국 상하이 지역의 UHI 강도는 풍속 0 m s⁻¹에서 4.5 m s⁻¹로 증가할 때까지 꾸준히 감소하는 패턴으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 풍속 4 m s⁻¹ 이내에 해당하는 자료에 대해 UHI 강도를 산출하여 대기오염물질과의 상관성을 분석하였다. 또한 대기오염물질 중 PM₁₀의 상관성 분석에서는 중국 등 외부 장거리 수송 영향이 큰 황사(166일, 20년간 전체 일수의 약 2.3%)와 고농도 연무가 발생한 날(1,744일, 약 24%)을 제외하였다(KMA, 2022b).

일반적으로, UHI 강도는 야간에 강하고 주간에 약한 일중 변화를 보이는데(Do and Jung, 2012; Basara *et al.*, 2008), 본 연구에서도 하루 중 새벽 1시에 UHI 강도(도시 및 교외지역의 평균기온 이용)가 가장 강하고(3.3°C) 오후 3시에 가장 약하게(0.2°C) 나타났다(그림 제외). 따라서 UHI 강도와 대기오염물질 간의 상관성 분석을 전체 시간대, 주간, 야간으로 구분하여 살펴보았다(표 2). 여기서 주간과 야간은 서울 ASOS의 일조 및 일사 자료를 이용하여 나누었다. 전반적으로, 전체 시간대에 대한 UHI 강도와 대부분의 오염물질(O₃ 제외)과의 상관성은 양의 상관관계(CO: +0.354, NO₂: +0.415, SO₂: +0.088, PM₁₀: +0.118)가 나타난 반면, O₃은 음의 상관관계($r = -0.450$)를 보였다. 한편, 주야간의 상관성(음 또는 양의 상관)은 전체 시간대에 비해 크기는 조금 다르지만 패턴은 거의 유사하였다. 또한 대부분 오염물질과 UHI 강도와의 상관성은 야간(+0.201 ≤ r ≤ +0.491)이 주간보다(+0.043 ≤ r ≤ +0.357) 더 높게 나타났으며, 특히 SO₂와 PM₁₀은 주간(각각 +0.056, +0.043)보다 야간(각각 +0.235, +0.201)에 높아진 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 SO₂와 PM₁₀의 주야간 상관계수의 차이가 다른 오염물질(CO, NO₂, O₃)보다 훨씬 크게 나타나므로(주간의 상관계수가 매우 낮아서), 이들 사이의 전체(주간+야간) 상관성이 낮아진 것으로 사료된다. 그러나 여전히 SO₂와 PM₁₀에 대한 상관계수가 낮은 이유를 명확하게 설명하기에는 한계가 있다. 한편 O₃의 경우, 다른 오염물

질과 달리 야간 ($r = -0.303$)보다 주간 ($r = -0.411$)에 더 강한 음의 상관을 보였다. 결론적으로, 대부분 1차 오염물질은 주간보다 야간의 도시 기온 상승(야간에 강한 UHI 강도)과 더 밀접한 관련이 있으며, O₃의 경우는 반대로 주간의 UHI 강도와 더 관련이 있는 것으로 추정된다.

본 연구에서는 시간별 자료를 이용하여 구한 상관성 분석과 비교하기 위해, 일평균 자료를 이용하여 UHI 강도와 대기오염물질 사이의 상관성을 추가로 분석하였다. 전체적으로 모든 대기오염물질에 대해

일평균과 시간별 자료를 이용하여 구한 상관성 패턴(양의 상관, 음의 상관)은 서로 일치하였다. 하지만, 일평균 자료를 이용하여 구한 1차 오염물질의 양의 상관계수(CO: +0.399, NO₂: +0.517, SO₂: +0.338, PM₁₀: +0.175)는 시간별 자료를 이용한 양의 상관계수(CO: +0.354, NO₂: +0.415, SO₂: +0.088, PM₁₀: +0.118)보다 약간 크게 나타났으며, O₃의 경우 음의 상관계수가 다소 작게 나타났다(일평균: $r = -0.245$, 시간별 자료: $r = -0.450$). 이는 O₃의 일중(주간) 농도가 다른 오염물질보다 뚜렷한 변화를 보이므로 시간별 자료를 이용하여 구한 상관관계가 상대적으로 더 강하게 나타난 것으로 사료된다.

표 2의 상관성 분석과 비슷하게 도시지역의 6개 관측지점에서도 대부분 오염물질은 양의 상관, O₃은 음의 상관을 확인할 수 있었다(표 3). 먼저, 시간별 자료를 이용하여 구한 상관성 분석에서 CO와 NO₂ 물질은 토지피복 유형 중 ‘주거’ 유형의 비율이 큰 기상청(KMA) 지점에서 강한 양의 상관을 보였으며, O₃은 ‘주거’와 ‘상업’ 유형의 비율이 모두 큰 금천(GC) 지점에서 가장 강한 음의 상관이 나타났다. 또한 NO₂는 기상청(KMA) 지점뿐만 아니라 ‘교통’ 유형의 비율이 큰 동대문(DDM) 지점에서도 강한 양의 상관을

Table 2. Pearson correlations between UHI intensities and air pollutants calculated using hourly data over the past 20 years (2001~2020).

UHI intensity	Air pollutant				
	CO (ppm)	O ₃ (ppb)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	PM ₁₀ (μg m ⁻³)
All (Day + Night)	0.354**	-0.450**	0.415**	0.088**	0.118**
Daytime	0.332**	-0.411**	0.357**	0.056**	0.043**
Nighttime	0.342**	-0.303**	0.491**	0.235**	0.201**
Daily mean ^a	0.399**	-0.245**	0.517**	0.338**	0.175**

** Correlation is significant at 0.01 level.
^aValues represent correlation coefficients calculated using daily mean data of air temperature and air pollutants.

Table 3. Pearson correlations between UHI intensities and air pollutants calculated using hourly data at six urban meteorological sites during the study period (2001~2020).

Air pollutant	Site ^a					
	KMA	JN	GC	YC	DDM	SD
CO (ppm)	0.407** (0.474**) ^b	0.211** (0.193**)	0.352** (0.403**)	0.176** (0.116**)	0.312** (0.399**)	0.231** (0.267**)
O ₃ (ppb)	-0.411** (-0.290**)	-0.306** (0.000)	-0.490** (-0.346**)	-0.381** (-0.146**)	-0.380** (-0.164**)	-0.379** (-0.246**)
NO ₂ (ppb)	0.436** (0.520**)	0.287** (0.341**)	0.376** (0.437**)	0.265** (0.324**)	0.410** (0.506**)	0.289** (0.372**)
SO ₂ (ppb)	0.112** (0.286**)	0.056** (0.248**)	0.005* (0.147**)	0.046** (0.196**)	0.138** (0.394**)	0.042** (0.246**)
PM ₁₀ (μg m ⁻³)	0.095** (0.120**)	0.074** (0.118**)	0.039** (0.034*)	0.043** (0.036*)	0.148** (0.288**)	0.098** (0.130**)

*** Correlation is significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively.
^aKMA: Korea Meteorological Administration; JN: Jung Nang; GC: Geum Cheon; YC: Yang Cheon; DDM: Dong Dae Mun; and SD: Seong Dong.
^bValues represent correlation coefficients calculated using daily mean data of air temperature and air pollutants.

Table 4. Changes in mean air pollutant concentrations under different UHI intensity conditions during the study period (2001~2020).

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6	Level 7	Level 8	Level 9	Level 10	Level 11
	UHI < -3°C	-3°C ≤ UHI < -2°C	-2°C ≤ UHI < -1°C	-1°C ≤ UHI < 0°C	0°C ≤ UHI < 1°C	1°C ≤ UHI < 2°C	2°C ≤ UHI < 3°C	3°C ≤ UHI < 4°C	4°C ≤ UHI < 5°C	5°C ≤ UHI < 6°C	6°C ≤ UHI
CO (ppm)	0.46 ± 0.12 ^a	0.53 ± 0.15	0.52 ± 0.22	0.49 ± 0.20	0.49 ± 0.21	0.53 ± 0.24	0.61 ± 0.30	0.69 ± 0.35	0.76 ± 0.37	0.79 ± 0.37	0.80 ± 0.39
O ₃ (ppb)	41.0 ± 14.8	35.1 ± 20.1	38.1 ± 19.7	33.0 ± 18.5	25.9 ± 17.3	19.2 ± 14.8	14.8 ± 12.7	12.3 ± 11.6	10.2 ± 10.5	9.2 ± 9.6	9.5 ± 9.9
NO ₂ (ppb)	34.0 ± 6.7	33.0 ± 9.7	29.2 ± 13.4	28.5 ± 12.9	28.9 ± 12.8	31.0 ± 14.2	35.5 ± 15.5	39.9 ± 16.1	44.9 ± 16.4	48.3 ± 16.8	49.8 ± 18.9
SO ₂ (ppb)	4.8 ± 1.1	5.1 ± 1.6	5.7 ± 2.3	5.5 ± 2.4	5.1 ± 2.5	5.0 ± 2.3	5.3 ± 2.4	5.6 ± 2.4	5.8 ± 2.4	5.9 ± 2.5	6.1 ± 2.6
PM ₁₀ (µg m ⁻³)	54.9 ± 19.5	58.5 ± 29.7	54.8 ± 31.1	47.0 ± 28.1	40.9 ± 27.9	41.5 ± 29.3	47.5 ± 32.4	50.2 ± 32.4	51.8 ± 30.6	50.7 ± 25.9	48.1 ± 23.0

^aMean ± Standard deviation.

보였다. SO₂와 PM₁₀의 경우, 이들의 상관성은 상대적으로 다른 오염물질에 비해 상관관계가 약한 편이나, NO₂와 비슷하게 동대문(DDM) 및 기상청(KMA) 지점에서 상대적으로 강한 양의 상관을 보였다. 따라서 대부분 오염물질의 농도 변화는 주로 인구밀집(주거 및 상업) 및 많은 교통량이 분포하는 지역 등 오염물질의 배출원과 크게 관련이 있는 것으로 해석할 수 있다. 이 외에도 일평균을 이용한 상관성 분석 결과, 시간별 자료를 이용하여 구한 상관성 패턴(양의 상관, 음의 상관)과 일치하였으며, 상관계수의 크기도 전 지점의 결과(표 2)와 마찬가지로 1차 오염물질의 양의 상관계수는 대체로 시간별 자료를 이용한 것보다 약간 크게, O₃은 약간 작게 나타났다.

UHI 강도와 대기오염물질과의 상관성을 보다 면밀히 살펴보기 위해, 총 11개의 UHI 강도 구간에 대한 대기오염물질의 평균 농도를 분석하였다(표 4). 대부분의 오염물질(O₃ 제외) 농도는 UHI 강도 Level이 증가함에 따라 점차 증가하는 패턴이었다. 이러한 결과는 도시 상공의 기온이 증가할수록(또는 UHI 강도 Level이 상승할수록) 도시의 열섬 중심부로 기류의 수렴이 발생하게 되고, 이로 인해 주로 1차 오염물질의 농도가 증가한다는 여러 선행연구 결과와 일치하였다(Ngarambe *et al.*, 2021; Fallmann *et al.*, 2016; Lai and Cheng, 2009). 따라서 표 2와 같이 UHI 강도와 대기오염물질(주로 1차) 농도 사이에 양의 상관관계가 있다고 볼 수 있다. 그러나 O₃은 UHI 강도 Level이 증가할수록 농도가 감소하는 경향이 나타났다. UHI 강도가 약한 주간(평균 1.1°C)에는 O₃ 전구물질(예, NO_x와 VOCs)이 햇빛(자외선)의 영향을 받아 광화학반응을 일으켜 O₃을 생성하게 된다(Seinfeld and Pandis, 2016; Song *et al.*, 2012). 이와 같이 주간의 O₃ 생성에 영향을 주는 기상요소(일 최고기온, 일사)와의 상관관계 또한 양의 상관(각각 $r = +0.468$, $r = +0.531$)을 보여 서로 밀접한 관련이 있음을 의미한다. 또한 수도권 지역을 대상으로 수행한 선행연구에서도 O₃은 일 최고기온 및 일사와의 상관관계가 강한 양의 상관(각각 $r = +0.60$, $r = +0.77$)을 보였다

(Seo *et al.*, 2014). 반면, UHI 강도가 강한 야간(평균 3.2°C)에는 햇빛(일사)이 없어 NO와 O₃의 적정 반응에 의해 대부분 소멸하게 된다(Seinfeld and Pandis, 2016; Song *et al.*, 2012). 이러한 주야간의 생성 및 소멸과정과 관련하여 O₃ 농도는 UHI 강도와 음의 상관성이 나타난 것으로 추정된다(Ngarambe *et al.*, 2021).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 20년간(2001~2020) 서울지역의 UHI 강도와 대기오염물질의 장기변화 추세 및 이들의 상관관계를 분석하였다. 지난 20년간 대상지역의 UHI 강도(평균 및 최고기온 이용하여 산출)는 점차 증가하는 추세를 보였으나, 최저기온에 대한 UHI 강도는 감소 추세가 나타났다. 최저기온의 이러한 감소 추세는 지난 20년간 도시에 비해 교외지역의 최저기온이 더 큰 폭으로 증가하였기 때문으로 사료된다. 또한 1차 오염물질은 미세하게 감소 추세인 반면, 2차 오염물질인 O₃ 농도는 증가 추세를 보였다. 1차 오염물질의 감소 추세는 오랜 기간 국가적 차원에서 시행되어 온 대기환경 개선 정책이 주요 원인으로 사료되며, O₃의 경우는 그 원인을 정확하게 파악하기 어려워 대상지역의 기상조건 및 배출량 특성 등 다각적인 분석이 필요하다. 한편, 대부분 오염물질(PM₁₀, O₃ 제외)과 UHI 강도의 월/계절 변화는 둘 다 늦가을 또는 겨울에 높고 여름에 낮은 수준이었다. 겨울에는 대상지역의 기상조건과 인위적 활동 등 복합적 영향이 주요 원인이고, 여름에는 많은 강수로 인해 기온이 하강하고 농도가 감소한 것으로 사료된다. 또한 PM₁₀ 농도는 황사의 영향을 많이 받는 3월에 가장 높고, O₃ 농도는 높은 일사량 및 외부 수송(장거리 및 하향 수송) 등의 영향으로 인해 5월에 가장 높게 나타난 것으로 추정된다.

UHI 강도와 대기오염물질과의 상관성 분석 결과, 대부분 오염물질(O₃ 제외)은 양의 상관, O₃은 음의 상관성이 나타났으며, 대체로 주간보다 야간에 더 높은 상관성을 보였다. 또한 도시지역의 6개 관측지점에서

도 대부분 오염물질은 양의 상관, O₃은 음의 상관을 확인할 수 있었다. 대부분 오염물질은 토지피복 유형 중 ‘주거’ 유형의 비율이 큰 지점과 ‘상업’ 또는 ‘교통’ 유형의 비율이 큰 지점에서 강한 상관관계가 나타나, 이들의 농도 변화는 주로 인구밀집 및 많은 교통량이 분포하는 지역 등 오염물질의 배출원과 크게 관련이 있는 것으로 사료된다. 이 외에도 UHI 강도가 강해질수록(UHI 강도 Level 증가) 1차 오염물질의 농도는 증가하고 2차 오염물질인 O₃ 농도는 감소하는 경향이 나타나, 이들의 상관성 분석 결과를 잘 뒷받침해 주는 것으로 사료된다.

본 연구는 우리나라에서 가장 큰 도시인 서울지역을 대상으로 UHI 강도와 대기오염물질의 장기변화 추세와 이들의 상관관계를 살펴보았다. 이러한 분석에 있어 UHI 강도와 대기오염물질과의 상관성을 다각적인 측면에서 좀 더 객관적인 결과를 도출하려고 하였으나, 기상관측지점의 제한 및 오염물질 관련 자료(배출량 등)의 부재 등으로 인해 서울지역 전역에 대한 상관관계를 이해하는 데 한계가 있었다. 일반적으로 대기오염물질의 농도 변화는 지리·지형적 특성, 국지기상(기온, 일사, 바람 등), 종관기상학적 특성(기압배치 등), 배출환경에 의해 좌우된다. 그러나 본 연구에서는 도시 및 교외지역의 기온 차이를 이용한 UHI 강도와 대기오염과의 관계를 살펴보는 데 목표를 두어, 이들의 관계를 대기 상하층간 입체적으로 해석하는데 어려움이 있었다. 향후 이러한 한계점을 보완하고 3차원 수치모의를 통한 연구가 병행된다면, 대상지역의 UHI 및 대기오염의 공간분포 특성과 UHI 강도와 오염물질 농도와의 상호작용 등 보다 정확한 분석연구가 이루어질 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R1A2C2011081).

References

- An, J.H. (2012) Correlation Analysis of Solar Radiation and Meteorological Parameters on High Ozone Concentration, Korea Institute of Ecological Architecture and Environment Journal, 12(6), 93-98, (in Korean with English abstract).
- Basara, J.B., Hall Jr, P.K., Schroeder, A.J., Illston, B.G., Nemunaitis, K.L. (2008) Diurnal Cycle of the Oklahoma City Urban Heat Island, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D20). <https://doi.org/10.1029/2008JD010311>
- Basics, U.H.I. (2011) Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, US EPA, Available online: <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm> (accessed on 14 January 2011).
- Boleti, E., Hueglin, C., Takahama, S. (2019) Trends of Surface Maximum Ozone Concentrations in Switzerland Based on Meteorological Adjustment for the Period 1990-2014. Atmospheric Environment, 213, 326-336. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.018>
- Diem, J.E., Mote, T.L. (2005) Interepothal Changes in Summer Precipitation in the Southeastern United States: Evidence of Possible Urban Effects near Atlanta, Georgia, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 44(5), 717-730. <https://doi.org/10.1175/JAM2221.1>
- Do, W.G., Jung, W.S. (2012) An Analysis on the Variation Trend of Urban Heat Island in Busan Area (2006-2010), Journal of Environmental Science International, 21(8), 953-963, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2012.21.8.953>
- Environmental Geographic Information Service (EGIS) (2018) Land Cover Map 2000-2010. <https://egis.me.go.kr/atlas/view.do>
- Fallmann, J., Forkel, R., Emeis, S. (2016) Secondary Effects of Urban Heat Island Mitigation Measures on Air Quality, Atmospheric Environment, 125, 199-211. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.094>
- Han, J.Y., Baik, J.J. (2008) A Theoretical and Numerical Study of Urban Heat Island-Induced Circulation and Convection, Journal of the Atmospheric Sciences, 65(6), 1859-1877. <https://doi.org/10.1175/2007JAS2326.1>
- Hong, W.H., Lee, K.G., Suh, W.D. (2007) Characteristics of Urban Temperature and Thermal Environment Simulation According to Land Usage, Architectural Institute of Korea, 23(9), 139-146, (in Korean with English abstract).
- Huang, Q., Li, L., Lu, Y., Yang, Y., Li, M. (2020) The Roles of Meteorological Parameters in Shanghai's Nocturnal Urban Heat Island from 1979 to 2013. Theoretical and Applied Climatology, 141, 285-297. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03214-3>
- Hwang, H.S., Kang, J.E. (2020) Spatial Distribution of Urban Heat and Pollution Islands using Remote Sensing and Private Automated Meteorological Observation System Data-Focused on Busan Metropolitan City, Korea, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 23(3), 100-119, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11108/kagis.2020.23.3.100>
- Itahashi, S., Mathur, R., Hogrefe, C., Zhang, Y. (2020) Modeling Stratospheric Intrusion and Trans-Pacific Transport on Tropospheric Ozone Using Hemispheric CMAQ During April 2010 - Part 1: Model Evaluation and Air Mass Characterization for Stratosphere-Troposphere Transport, Atmospheric Chemistry and Physics, 20(6), 3373-3396. <https://doi.org/10.5194/acp-20-3373-2020>
- Jang, Y.K., Kim, J.W. (1991) A Study on the Relation of Urban Heat Island and Air Pollution in Seoul Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 7(1), 49-53, (in Korean with English abstract).
- Kang, J.E., Song, S.K., Lee, H.W., Kim, Y.K. (2012) The Influence of Meteorological Conditions and Complex Topography on Ozone Concentrations in a Valley Area near Coastal Metropolitan Cities, Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 23(1), 25-38.
- Kim, H.M., Park, C., Jung, S.H. (2016) Analysis on Effective Range of Temperature Observation Network for Evaluating Urban Thermal Environment, Korea Institute of Ecological Architecture and Environment Journal, 16(6), 69-75, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.12813/kieae.2016.16.6.069>
- Kim, H.S., Seok, H.B., Kim, Y.K. (2014) A Study on the Change of the Urban Heat Island Structure in Busan Metropolitan Area, Korea, Journal of Environmental Science International, 23(11), 1807-1820, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2014.23.11.1807>
- Kim, J., Park, J., Hu, H., Crippa, M., Guizzardi, D., Chatani, S., Kurokawa, J., Morikawa, T., Yeo, S., Jin, H., Woo, J.H. (2023) Long-term Historical Trends in Air Pollutant Emissions in South Korea (2000~2018), Asian Journal of Atmospheric Environment, 17(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s44273-023-00013-w>

- Kim, K., An, Y. (2017) An Empirical Study on the Definition and Classification Methodology of Urban Heat Island Areas, *Journal of the Korean Regional Science Association*, 33(2), 47-59. <https://doi.org/10.22669/krsa.2017.33.2.047>
- Kim, Y.J., Choi, Y.E. (2012) A Study on the Intensity of Urban Heat Islands in the Seoul Metropolitan Area by Weather Condition, *The Geographical Journal of Korea*, 46, 1-9, (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-K., Cho, J.-H., Kim, H.-S. (2021) Analysis of Concentration Variations of Long-Range Transport PM₁₀, NO₂, and O₃ due to COVID-19 Shutdown in East Asia in 2020, *Journal of The Korean Earth Science Society*, 42(3), 278-295, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5467/JKESS.2021.42.3.278>
- Kim, Y.P., Lee, G. (2018) Trend of Air Quality in Seoul: Policy and Science, *Aerosol and Air Quality Research*, 18(9), 2141-2156. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0081>
- Kim, Y., Seo, J., Kim, J.Y., Lee, J.Y., Kim, H., Kim, B.M. (2018) Characterization of PM_{2.5} and Identification of Transported Secondary and Biomass Burning Contribution in Seoul, Korea, *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 4330-4343. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0772-x>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022a) Climatological Normals of Korea 1991~2020. <https://data.kma.go.kr/normals/index.do>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022b) Guidelines for Ground Weather Observation. KMA, South Korea, p. 116.
- Lai, L.-W., Cheng, W.-L. (2009) Air Quality Influenced by Urban Heat Island Coupled with Synoptic Weather Patterns, *Science of The Total Environment*, 407, 2724-2733. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.002>
- Lee, K.G., Hong, W.H. (2006) A Spatial and Temporal Trait Analysis of Urban Energy Consumption, *Journal of The Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 22(9), 291-298, (in Korean with English abstract).
- Lee, S.H., Baik, J.J. (2010) Statistical and Dynamical Characteristics of the Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Theoretical and Applied Climatology*, 100, 227-237. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0247-1>
- Lee, S.H., Heo, I.H. (2011) The Impacts of Urbanization on Changes of Extreme Events of Air Temperature in South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 46(3), 257-276, (in Korean with English abstract).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2002) The Statistics Yearbook 2002, <https://stat.molit.go.kr/>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2021) 2020 Statistical Yearbook of Ministry of Land, Infrastructure and Transport, <https://stat.molit.go.kr/>
- Nam, K.P., Lee, D.G., Jang, L.S. (2019) Analysis of PM_{2.5} Concentration and Contribution Characteristics in South Korea according to Seasonal Weather Patterns in East Asia: Focusing on the Intensive Measurement Periods in 2015, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(3), 183-200, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14249/eia.2019.28.3.183>
- National Geographic Information Institute (NGII) (2020) The National Atlas of Korea II 2020: Land Cover Change, http://nationalatlas.ngii.go.kr/pages/page_2408.php (accessed on 20 August 2021).
- Ngarambe, J., Joen, S.J., Han, C.H., Yun, G.Y. (2021) Exploring the Relationship between Particulate Matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and Urban Heat Island in Seoul, Korea, *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123615. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123615>
- Oh, T.S., Ahn, J.H., Moon, Y.I., Kim, J.S. (2005) A Study of the Urbanization Effect on the Precipitation Pattern in Urban Areas, *Journal of Korea Water Resources Association*, 38(10), 885-894, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2005.38.10.885>
- Oke, T.R. (1982) The Energetic Basis of the Urban Heat Island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Oke, T.R. (1997) Urban Climate and Global Environmental Change, *Applied Climatology*, 273-287.
- Park, S.H. (2019) Seoul, *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies*, 1-4.
- Park, Y.H., Song, S.K., Lee, S.J., Kim, S.W., Han, S.B. (2016) An Analysis of Long-Term Variation of PM₁₀ Levels and Local Meteorology in Relation to Their Concentration Changes in Jeju, *Journal of Environmental Science International*, 25(1), 107-125, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2016.25.1.107>
- Rozoff, C.M., Cotton, W.R., Adegoke, J.O. (2003) Simulation of St. Louis, Missouri, Land Use Impacts on Thunderstorms, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 42(6), 716-738. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0716:SOSLML>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0716:SOSLML>2.0.CO;2)
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, John Wiley & Sons.
- Seo, J.H., Jeon, H.W., Sung, U.J., Sohn, J.R. (2020) Impact of the COVID-19 Outbreak on Air Quality in Korea, Atmo-

- sphere, 11(10), 1137. <https://doi.org/10.3390/atmos11101137>
- Seo, J., Kim, J.Y., Youn, D., Lee, J.Y., Kim, H., Lim, Y.B., Kim, Y., Jin, H.C. (2017) On the Multiday Haze in The Asian Continental Outflow: The Important Role of Synoptic Conditions Combined with Regional and Local Sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(15), 9311-9332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9311-2017>
- Seo, J., Park, D.S.R., Kim, J.Y., Youn, D., Lim, Y.B., Kim, Y. (2018) Effects of Meteorology and Emissions on Urban Air Quality: a Quantitative Statistical Approach to Long-term Records (1999-2016) in Seoul, South Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(21), 16121-16137. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16121-2018>
- Seo, J., Youn, D., Kim, J.Y., Lee, H. (2014) Extensive Spatiotemporal Analyses of Surface Ozone and Related Meteorological Variables in South Korea for the period 1999-2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(12), 6395-6415. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6395-2014>
- Song, S.-K., Shon, Z.-H. (2008) Analysis of Chemical and Meteorological Effects on the Concentration Difference of Photochemical Air Pollutants between Coastal and Inland Regions in Busan, *Journal of Environmental Sciences*, 17(10), 1169-1182, (in Korean with English abstract).
- Song, S.-K., Kim, Y.-K., Shon, Z.-H., Ryu, J.-Y. (2012) Photochemical Analyses of Ozone and Related Compounds under Various Environmental Conditions, *Atmospheric Environment*, 47, 446-458. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.026>
- Stohl, A., Spichtinger-Rakowsky, N., Bonasoni, P., Feldmann, H., Memmesheimer, M., Scheel, H.E., Trickl, T., Hubener, S., Ringer, W., Mandl, M. (1999) The Influence of Stratospheric Intrusions on Alpine Ozone Concentrations, *Atmospheric Environment*, 34, 1323-1354.
- The Seoul Research Data Service (2013) Geographical Atlas of Seoul 2013, <http://data.si.re.kr/map-seoul-2013#> (accessed on Dec. 27, 2023).
- Voogt, J.A., Oke, T.R. (2003) Thermal Remote Sensing of Urban Climates, *Remote sensing of environment*, 86(3), 370-384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wang, L., Li, M., Yu, S., Chen, X., Li, Z., Zhang, Y., Jiang, L., Xia, Y., Li, J., Liu, W., Li, P., Lichtfouse, E., Rosenfeld, D., Seinfeld, J.H. (2020) Unexpected Rise of Ozone in Urban and Rural Areas, and Sulfur Dioxide in Rural Areas during the Coronavirus City Lockdown in Hangzhou, China: Implications for Air Quality, *Environmental Chemistry Letters*, 18, 1713-1723. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01028-3>
- Zhang, K., Wang, R., Shen, C., Da, L. (2010) Temporal and Spatial Characteristics of the Urban Heat Island during Rapid Urbanization in Shanghai, China, *Environmental monitoring and assessment*, 169, 101-112. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1154-8>

Authors Information

김진승 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석사과정)
(jins1503@jejunu.ac.kr)

송상근 (제주대학교 지구해양과학과 교수)
(songsk@jejunu.ac.kr)

이성빈 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 박사과정)
(lhsbin@jejunu.ac.kr)

조성빈 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석박사통합과정)
(cho2285@jejunu.ac.kr)