

ORIGINAL ARTICLE

서울특별시 25개 자치구의 열환경과 미세먼지 간 Granger 인과관계

연지민 · 김형규*

홍익대학교 도시계획과

Granger Causality between Thermal Environment and PM₁₀ of Seoul's 25 Districts

Jee Min Youn, Hyungkyoo Kim*

Department of Urban Design and Planning, Hongik University, Seoul 04066, Korea

Abstract

Today's cities require deeper understanding of the thermal environment and PM₁₀ as their management becomes more critical. Based on these circumstances, this study investigated the Granger causality between the thermal environment and PM₁₀ of the 25 districts of Seoul, the most populous and urbanized city in Korea. The results of the Granger causality test on the thermal environment and PM₁₀ were classified into 12 types. Except for type 12, the temperature and urban island heat intensity of the other 11 types operated as a Granger-cause to each other in both directions. Temperature operates as a Granger-cause of urban island heat intensity in type 12. The PM₁₀ level and urban pollution island intensity operated as a Granger-cause to each other in all districts. For types 1 and 2, thermal environment operated as a Granger-cause to PM₁₀ in one direction, and type 3-type 12 confirmed that thermal environment and PM₁₀ operated as a Granger-cause in both directions. Findings reveal the intricate causalities between thermal environment and PM₁₀ at the district level and suggest mitigation strategies that are more location based.

Key words : Urban heat island, Urban pollution island, PM₁₀, Climate change, Granger causality test

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

최근 기후변화에 대한 사회적 관심이 높아짐에 따라 도시 공간의 열환경 악화와 미세먼지에 대한 우려가 나타나고 있다. 열환경 및 미세먼지 문제의 심화는 기후적 재난을 발생시키고 도시민의 건강을 위협하는 등 여러 방면에서 부정적인 결과를 초래하므로, 열환경 및 미세

먼지 완화를 위한 대책이 고려되어야 한다.

세계기상기구(WMO)는 2015년부터 2019년까지의 5년이 역사상 가장 더운 5년으로 기록될 것이라 발표하였으며, 이는 전 지구적으로 온난화가 가속되고 있음을 의미한다. 한반도와 전 지구에 대하여 1912년부터 2014년까지 기간의 평균 기온 증가 추세를 비교했을 때, 한반도의 증가율이 전 지구의 증가율보다 최대 2.6배 더 높은 기온 증가 추세를 보이고 있어 한국 역시 지구온난화의

Received 19 August, 2021; Revised 15 December, 2021;
Accepted 15 December, 2021

*Corresponding author: Hyungkyoo Kim, Department of Urban Design and Planning, Hongik University, Seoul 04066, Korea
Phone : 82-2-320-1635
E-mail : gusailsang@gmail.com

© 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.

영향에서 벗어날 수 없음을 시사한다(Park et al., 2017; Korea Meteorological Administration, 2020). 또한, 한반도 전역에서 기온이 상승하는 경향을 보이나, 특히 수도권과 내륙지역에서 확인한 기온 상승을 보여 해당 지역의 열환경 개선을 위한 대책이 시급한 것으로 판단된다.

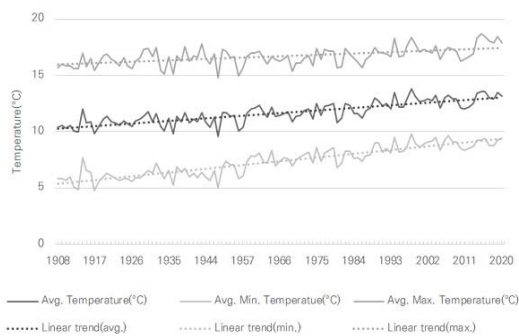


Fig. 1. Annual temperature change trends in Seoul (1908~2020).

Data source: National Climate Data Center

한편 대기오염은 도시화로 인한 자동차 이용의 증가와 산업의 발달 등으로 발생하며, 현대 도시의 문제점으로 꾸준히 논의되었다. 특히 여러 대기오염 물질 중 미세먼지(PM₁₀)의 경우 봄과 겨울에 높은 농도를 보이고 유해물질로 구성되어 다양한 호흡기 질환을 직접 유발하므로 계절에 따른 미세먼지에 대한 우려와 관심이 사회적으로 높아졌다. 서울의 미세먼지 농도는 계속해서 세계

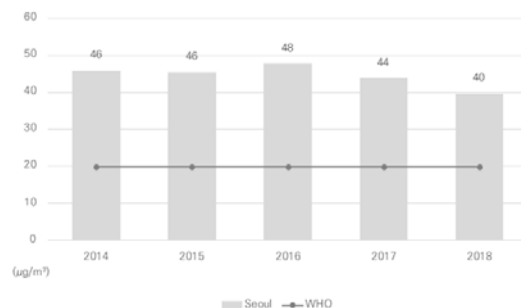


Fig. 2. Trend of PM₁₀ in 5 years in Seoul.

Data source: Air Korea

보건기구(WHO) 기준을 한참 상회하는 상황이며, 해외 주요 도시와 비교했을 때에도 높은 수준을 보이고 있다.

이와 같은 상황 속에서 최근 기온과 미세먼지의 관계성에 대한 연구가 진행되고 있다. 높은 기온이 지속되면 미세먼지 전구물질의 광화학 반응에 의하여 미세먼지 농도가 증가할 수 있으며, 전 지구적 규모에서 지구 온난화로 극지방과 유라시아 대륙의 온도 차가 감소하여 나타나는 대기 정체 현상으로 고농도의 미세먼지 발생 빈도가 증가할 가능성이 있다(Ministry of Environment, 2019). 한편, 미세먼지는 다양한 성분을 함유하고 있으며 그 중 원소탄소(elemental carbon)가 태양 복사열을 흡수하는 특성으로 인해 지구온난화 물질에 속하는 것으로 볼 수 있다(Oh, 2018). 이렇듯 기온과 미세먼지 간의 연관성이 존재하는 것으로 분석되고 있으나, 미세먼지는 오존이나 황화합물, 질소화합물 등의 다른 대기오염물질보다 기온과의 관계에 대한 연구가 다소 부족한 실정이다. 또한 상호적인 관계가 있을 것으로 판단된다는 점에서 구체적인 인과관계에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

도시의 기온이 올라가 도시민의 삶에 부정적인 영향을 미치는 열환경의 악화와 꾸준히 도시 문제로 언급되는 미세먼지는, 유효한 저감 대책을 통해 지속적으로 동시에 관리하여야 한다. 이를 위해서는 두 현상 사이의 인과관계를 확인하는 과정이 진행되어야 하며, 인과관계를 파악하여 선행되는 현상을 우선적으로 저감할 필요성이 있다. 따라서 본 연구는 2015년부터 2019년까지 5년간의 서울시 25개 자치구를 대상으로 열환경과 미세먼지의

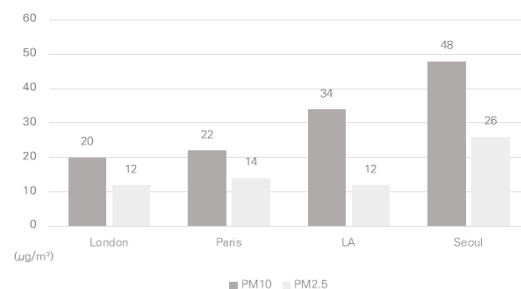


Fig. 3. Comparison of Seoul PM₁₀ and PM_{2.5} with major overseas cities in 2016.

Data source: e-National Index

Granger 인과검정을 실시하여 지역별로 선행되는 현상을 확인하고자 한다.

1.2. 선행연구 검토

분석에 앞서 열환경과 대기오염의 관계를 분석한 선행연구를 검토하였다. 전반적으로 열환경과 대기오염 사이의 상관관계가 존재함을 밝힌 연구와 열환경이 대기오염에 영향을 미치거나 대기오염이 열환경에 영향을 미침을 확인한 연구가 존재하였다.

Choi et al.(2012)는 부산시를 대상으로 기온과 대기오염의 분포를 비교하여 O_3 농도와 CO 농도가 높은 지역에서 기온이 높은 경향을 보임을 확인하였다. Ngarambe et al.(2021)은 CO, NO_2 , SO_2 , PM은 도시열섬강도(Urban Heat Island Intensity, 이하 UHII)와 양의 상관관계가 있고 O_3 는 UHII와 음의 상관관계가 있음을 확인하였으며, UHII와 대기오염 간에 계절적인 효과가 있음을 밝혔다. 또한 Feizizadeh et al.(2013)은 도시열섬과 미세먼지 농도가 높은 지역 간에 강한 상관관계가 있음을 확인하였다.

Shin et al.(1992)은 서울 광화문을 대상으로 대기오염과 기온 및 일사량, 풍향, 풍속, 상대습도 등의 기상인자와의 관련성이 존재함을 파악하였으며, 특히 일사량과 기온 변동에 의한 광화학 반응에 의해 대기오염이 심화됨을 밝혔다. Jang and Kim(1991)은 열섬효과가 클 때의 SO_2 평균농도가 열섬효과가 작을 때의 평균농도보다 높게 나왔으며 대기오염도는 풍속에 의하여 지배적인 영향을 받으나 열섬효과 영향도 상당히 크다 판단하였다. Jang(2005)은 여름철 아파트 단지는 역전현상에 의해 아파트 저층부에 오염물질이 정체되며, 열확산 속도의 저하로 도시열섬이 나타나면서 대기오염물질은 확산되지 않고 저층부분에 장시간 체류함을 확인하였다. Yamamoto(2006)는 겨울철 밤에 복사 냉각에 의한 역전층이 발생하고, 도시열섬 지역의 상승기류가 역전층 하부에 갇혀 대기오염을 악화시키는 혼합층을 형성한다 하였다.

Yamamoto(2006)는 도시열섬이 대기오염에 영향을 미치는 한편, 도시 대기 미세먼지에 의한 온실효과로 도시열섬 형성에 영향을 미치는 것으로도 판단하였다. Cao et al.(2016)은 중국 전역의 야간 지표면도시열섬(Surface Urban Heat Island, 이하 SUHI)에 영향을 미

치는 요인이 대기오염 수준의 차이임을 확인하여 대기오염의 완화가 도시 주민의 열환경 개선에 도움이 되는 것으로 보았다.

한편, 도시열섬과 유사한 도시오염섬(urban pollution island) 개념이 Crutzen(2004)에 의해 제기된 바 있다. 즉, 도시지역의 대기오염 물질 농도가 교외지역에 비해 높게 나타난다는 것을 의미한다. 도시오염섬은 도시열섬 범위에 존재하는 높은 밀도의 오염물질이 향후 전 세계적으로 대기 화학 및 기후 측면에서 영향을 미칠 가능성이 있으므로, 도시열섬과 함께 도시오염섬의 고려가 필요하다라는 시각으로부터 나타난 개념이다(Crutzen, 2004). 이에 따라 최근 도시열섬과 관련된 다수의 연구에서 도시오염섬을 함께 보는 시도가 확산되고 있다.

Li et al.(2018)은 베를린에서 SUHI와 대기도시오염섬(atmospheric urban pollution island)의 공간 구성 사이에는 양의 상관관계를 보이나, 근접지표도시오염섬(near-surface urban pollution island)의 강도는 야간 대기도시열섬(atmospheric urban heat island)의 강도와 부의 상관관계를 나타냄을 확인하여 도시열섬과 도시오염섬 완화 전략을 위한 기반을 제시하였다. Zheng et al.(2018)은 $PM_{2.5}$ UPII와 UHII 사이의 상관관계를 분석하였으며, $PM_{2.5}$ 도시오염섬강도(Urban Pollution Island Intensity, 이하 UPII)가 도시열섬에 Granger 인과함을 확인하였다. Hwang and Kang(2020)은 부산의 도시열섬과 PM_{10} 도시오염섬이 동시에 발생하는 지역에 취약 주거지역과 공업지역이 다수 포함됨을 확인하였다.

선행연구 검토 결과, 열환경과 대기오염의 관계를 다룬 다양한 연구가 진행되었음을 확인할 수 있었다. 그러나 연구에 따라 열환경이 대기오염의 원인 변수로 분석되는 한편, 반대로 대기오염이 열환경의 원인이 되는 결과를 보였다. 또한 열환경과 대기오염의 상관관계는 밝혔으나 둘 사이의 명확한 인과관계를 밝힌 연구는 부족한 실정으로 보인다. 변수로 사용한 대기오염물질 또한 다양하게 나타났으나, 미세먼지 농도를 이용한 사례는 상대적으로 적게 나타났다. 한편, 열환경과 대기오염은 지역에 따라 편차가 존재하므로 가능한 작은 규모의 지역별로 분석할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 소수의 연구에서 상호 간의 인과관계를 분석하기도 하였으나, 공간적 범위가 제한되어 도시 차원에서의 열환경과 대기오염 간의 인과관계를 이해하기에는 한계가 존재한다.

이에 따라 본 연구는 서울시의 25개 자치구를 대상으로 열환경과 대기오염 간의 인과관계 분석을 통해 각 변수 간 관계를 규명하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 변수 설정

서울특별시 25개 자치구별로 열환경과 미세먼지의 인과관계를 분석하기 위하여 기온 및 미세먼지 농도의 일평균 측정치를 사용하였다. 열환경 변수인 기온과 UHII는 기상자료개방포털의 방재 및 종관기상관측 자료를 이용하였으며, 대기오염 변수인 미세먼지 농도와 UPII는 에어코리아의 측정 정보를 통해 수집하였다. 해당 자료를 활용하여 각 자치구별로 열환경 변수와 대기오염 변수에 대한 시계열 자료를 구축하였다. 자료 중 일부 결측치가 존재하였으며, 보편적으로 결측치는 보간법을 이용하여 보완할 수 있다. 본 연구의 경우 기온과 미세먼지 농도의 결측치가 자치구별로 0개에서 55개까지 확인되어 약 3% 이내로 나타났다. 결측치가 차지하는 비율이 높지 않으므로, 간단하고 빠르게 예측할 수 있는 보간법을 이용하는 것이 적절하다 판단하였다. 이에 따라 자치구별로 확인된 결측치는 전후 수치를 활용하여 값을 예측하는 선형보간을 통해 보충하였다.

본 연구에서는 도시열섬과 도시오염섬을 변수로 사용하므로 그 크기의 척도를 산출하여야 한다. 도시열섬의 경우 일반적으로 UHII를 구하여 수치적으로 사용할 수 있으며, UHII는 명확하게 규정된 측정 방식은 없으나 일반적으로 도시지역과 교외지역의 온도차이로 정의된다(Kim and An, 2017). 같은 맥락에서 도시오염섬의 크기를 UPII로 나타낼 수 있고, UPII 역시 도시지역과 교외지역의 대기오염물질 농도 차이로 구할 수 있다. UHII와 UPII를 산출하기 위해 서울시와 비교할 교외지역이 필요하나, 현재 교외지역 선정 방법이 공식적으로 마련되지 않았으므로 기존 도시열섬 관련 선행연구를 참고하여 교외지역을 선정하였다. 본 연구와 같이 자동기상관측소 자료를 활용할 경우, 연구의 목적에 적합한 하나의 교외지역을 선정하는 방식이 일반적이다(Kim et al., 2011; Kim et al., 2011; Lee et al., 2017; Zheng et al., 2018, Hong et al., 2019, Ngarambe et al., 2021). 서울시를 공간적 범위로 한 도시열섬 관련 선행연구를 참고한 결

과, 높은 빈도로 사용된 교외지역은 이천시, 동두천시, 양평군으로 확인되어 해당 지역들을 후보군으로 선택하였다(Kim and Baik., 2002; Kim et al., 2011; Kim and Choi, 2012; Lee et al., 2017). 특히 양평군의 경우 기상관측소의 위치(37°29'N, 49 m)가 서울시 기상관측소의 위도와 해발고도(37°34'N, 86 m)와 유사하여 다수의 선행연구에서 교외지역으로 선정된 바 있다(Kim and Baik, 2002; Kim et al., 2011; Lee et al., 2017). 또한 본 연구는 도시열섬 위주로 진행된 선행연구와 달리 열환경과 미세먼지를 동시에 고려해야 하므로, 기온과 미세먼지 농도 측정소의 위치가 가능한 가까울 필요성이 있다 판단하였다. 따라서 앞선 후보군 중 서울시 기상관측소의 위치와 매우 유사하고, 기상관측소와 미세먼지 농도 측정소 위치가 가장 인접한 지점인 양평군을 UHII와 UPII 산출을 위한 교외지역으로 선정하였다. UHII는 각 자치구의 일평균 기온과 양평군의 일평균 기온의 차로 설정하였다. UPII 역시 도시오염섬 개념이 도시열섬으로부터 파생된 개념임을 고려하여 UHII 계산 방법을 활용해 각 자치구의 일평균 미세먼지 농도와 양평군의 일평균 미세먼지 농도의 차로 설정하였다.

2.2. 연구 범위

본 연구에서는 도시화가 많이 진행되었으며 측정소 밀도가 높아 자료의 확보와 구축이 용이한 서울특별시를 연구의 공간적 범위로 선정하였다. 또한, 기온과 미세먼지 농도 자료를 자치구 단위에서 구축할 수 있고, 일반적으로 도시계획적 정책이 자치구 별로 행해지므로 25개 자치구에 대하여 분석을 실시하였다.

본 연구의 시간적 범위는 2015년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지의 5개년(1,826일)으로 설정하였다. COVID-19 확산의 영향으로 2019년 이후의 자료는 특수성을 나타낼 가능성이 있을 것으로 판단하여 배제하였다.

2.3. 분석 방법

시계열 자료를 이용하여 계량분석을 수행하는 경우, 사용하는 자료가 안정적 시계열(stationary time series)이라는 가정 하에 실시하지만, 실제로는 불안정적 시계열(non-stationary time series)을 나타내는 경우가 일반적이다. 불안정적 시계열이란 시간의 흐름에 따라 평균 혹은 분산이 변화하는 것으로, 이러한 경우 단위근이



Fig. 4. Locations of meteorological stations(ASOS, AWS) and PM₁₀ measurement stations in Seoul and suburb.
Data source: KMA National Climate Data Center and Air Korea

존재한다(Hur et al., 2008). 불안정적 시계열은 하나 또는 그 이상의 시계열 변수에 회귀할 경우 종종 상식에 어긋나거나 허구적(spurious)인 결과를 초래할 수 있다(Hong and Yim, 2010). 본 연구에서 사용된 자료는 계절성을 보이므로 안정성을 위하여 계절차분하여 활용하였으며, 단위근 존재여부 확인은 ADF 검정을 이용하였다. 일반적으로 AIC 정보기준은 SBIC 정보기준보다 정보를 과대식별하는 경향이 있다고 알려져 있으므로, ADF 검정과 Granger 인과검정을 실시하기 위해 필요한 시차는 SBIC 정보기준을 통해 선정하였다. 지역과 변수에 따라 SBIC 검정 결과가 상이하게 나타났으나, 5 또는 6에서 적정 시차가 선정되었다.

시계열 자료의 안정성을 확인하고 적정 시차를 선택한 후, 열환경과 미세먼지의 인과관계를 분석하기 위하여 경제학자 Granger(1969)가 고안한 Granger 인과검정을 실시하였다. Granger 인과검정은 고안된 후 초기에

는 통화와 물가, 임금과 물가, 환율과 통화 공급, 통화와 수입의 관계 등 경제 분야에서 다양한 관계를 검정하기 위하여 사용되었다. 그러나 최근에는 경제 분야뿐만 아니라 도시계획과 기후 분야를 포함한 다양한 분야에서 인과관계를 분석하기 위하여 활용되고 있다(Al-Mulali et al., 2013; Jiang and Bai, 2018; Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2021). Al-Mulai et al.(2013)은 중동 및 북아프리카 국가의 도시화, 에너지 소비, 이산화탄소 배출 사이의 관계를 Granger 인과검정을 통해 분석하고자 하였다. Jiang and Bai(2018)은 대기오염이 심각한 베이징을 대상으로 Granger 인과관계 검정을 적용하여 한 도시의 대기오염이 인접 지역에 의해 영향을 받는지 여부를 조사하였다. Zheng et al.(2018)은 PM_{2.5} UPII와 UHII의 인과관계를 분석하여 PM_{2.5} UPII가 도시열섬에 Granger 인과함을 확인하였다. Zhu et al.(2021)은 타이베이의 기상 요인과 대기질 지수의 동적 관계를 분석하고

Table 1. Data description

Variables		Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Thermal environment	Temperature (°C)	45650	13.5	10.5	-17.3	34.4
	UHII (°C)	45650	0.9	1.4	-9.2	9.8
Air pollution	PM ₁₀ (μg/m ³)	45650	45.4	27.7	3	634
	UPII (μg/m ³)	45650	1.8	11.8	-83	129.5

자 Granger 인과검정을 사용하였다.

Granger 인과검정은 한 시계열 X가 다른 시계열 Y를 예측하는 데 유용한지 여부를 결정하는 통계 가설이다. Y의 과거 값을 사용하여 Y의 현재 값을 예측하는 것보다 X의 과거 시차 값을 고려하여 Y의 해석을 개선할 수 있을 때, 변수 X는 Y에 인과적 관계를 갖는 것으로 볼 수 있다. 이런 경우를 “변수 X는 변수 Y에 Granger 인과한다”고 한다(Kim et al., 2009; Zheng et al., 2018). Granger 인과검정을 실시하기 위하여 다음과 같은 두 다중회귀방정식을 구성한다.

$$y_t = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{t-i} + \sum_{i=1}^n \beta_i y_{t-i} + u_{1t} \quad (1)$$

$$x_t = \sum_{i=1}^p \gamma_i x_{t-i} + \sum_{i=1}^q \delta_i y_{t-i} + u_{2t} \quad (2)$$

그러나 Granger 인과검정은 해석 시 유의해야 할 사항이 존재한다. 검정 결과 Granger 인과관계가 존재한다 하더라도, 이는 한 변수의 과거 값이 다른 변수의 이를 두 변수 간에 진정한 원인과 결과의 관계가 있는 것을 의미하지는 않는다(Kim, 2006; Lee and Lim, 2018). “변수 X가 변수 Y에 Granger 인과한다”는 것은 과거 X값이 현재 Y값에 유의한 영향을 미친다는 의미로, 실질적인 원인-결과의 인과관계라기보다 선행-후행의 관계로 판단하는 것이 적절하다(Kim, 2006; Lee and Lim, 2018).

검정 결과는 각 자치구 별로 기온-UHII, 미세먼지 농도-UPII, 기온-미세먼지 농도, 기온-UPII, 미세먼지 농도-UHII, UHII-UPII의 여섯 종류의 변수 구성에 대하여 제시한다. 본 연구는 열환경과 미세먼지 사이의 인과관계를 파악하는 것을 목표로 한다. 그러나 열환경 변수인 기온과 UHII, 미세먼지 변수인 미세먼지 농도와 UPII

사이 또한 인과관계가 존재할 것으로 판단되어 열환경 변수와 미세먼지 변수 간 인과관계에 대하여 검정하였다. 검정 결과는 χ^2 검정 통계량의 유의수준이 0.05보다 작을 경우 귀무가설을 기각하여 유의한 인과관계가 존재함을 확인한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기술통계 분석

본격적인 인과검정 실시 전, 서울특별시 열환경 및 미세먼지 변수의 기술통계를 확인하였다(Table 1 참조). 열환경 변수인 기온의 평균은 13.5°C로 나타났다. 관악구에서 최솟값인 -17.3°C를 보였으며, 중랑구에서 최댓값인 34.4°C를 보였다. UHII는 평균 0.9°C로 비교대상인 양평군에 비해 서울시 평균 기온이 높은 것으로 확인되었으며 은평구에서 최솟값인 -9.2°C를 보였다. UHII의 최댓값은 9.8°C로, 기온과 같이 중랑구에서 나타났다. 미세먼지 농도는 평균 45.4 μg/m³이며, 강북구, 구로구, 서대문구, 송파구, 양천구, 은평구, 중랑구의 7개 구에서 3.0 μg/m³으로 최솟값을 보였다. 최댓값의 경우 종로구에서 634.0 μg/m³을 보였다. UPII는 평균 농도 1.8 μg/m³로 양평군보다 서울시의 평균 미세먼지 농도가 높은 것으로 나타났다. 최솟값은 양천구에서 -83 μg/m³, 최댓값은 종로구에서 129.5 μg/m³을 보였다.

3.2. Granger 인과검정 결과

앞서 제시한 열환경 및 미세먼지 변수에 대하여 각 자치구별로 Granger 인과검정을 실시하였다. 검정 결과의 양이 매우 방대하므로, 원활한 논의를 위해 각 인과검정에서 통계적으로 유의하게 나타난 결과만 정리하였다(Table 2~7).

첫째, 기온과 UHII에 대한 Granger 인과검정 결과,

Table 2. Granger causality test results of Temperature and UHII

District	H ₀ : Tem \nRightarrow UHII	H ₀ : Tem \Leftarrow UHII
Gangnam	88.008***	107.1***
Gangdong	99.279***	105.6***
Gangbuk	106.89***	115.87***
Gangseo	88.26***	17.048**
Gwanak	82.853***	33.236***
Gwangjin	94.715***	104.05***
Guro	87.597***	58.479***
Geumcheon	81.065***	73.02***
Nowon	41.358***	25.353***
Dobong	96.915***	68.582***
Dongdaemun	94.68***	121.47***
Dongjak	110.53***	45.903***
Mapo	91.687***	73.281***
Seodaemun	100.61***	69.943***
Seocho	101.49***	86.658***
Seongdong	111.6***	110.94***
Seongbuk	85.126***	97.699***
Songpa	106.77***	121.75***
Yangcheon	94.99***	81.147***
Yeongdeungpo	83.67***	85.782***
Yongsan	79.787***	83.881***
Eunpyeong	35.205***	10.805
Jongno	96.569***	102.39***
Jung	87.518***	91.097***
Jungnang	78.183***	114.23***

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

“기온은 UHII에 Granger 인과하지 않는다.”는 귀무가설에 대하여 전체 25개 구에서 기각하여 기온이 UHII에 Granger 인과함을 확인하였다. 한편, “UHII는 기온에 Granger 인과하지 않는다.”는 귀무가설을 은평구를 제외한 24개 구에서 기각하여 UHII가 기온에 Granger 인과 원인 변수로 나타났다. 따라서 은평구의 경우 기온이 UHII에 편방향으로 Granger 인과하며, 은평구를 제외한 24개 구에서 기온과 UHII는 양방향으로 Granger 인과한다(Table 2).

둘째, 미세먼지 농도와 UPII 간의 Granger 인과검정에서는 모든 자치구에서 유의성을 확인하였다. “미세먼

Table 3. Granger causality test results of PM₁₀ and UPII

District	H ₀ : PM10 \nRightarrow UPII	H ₀ : PM10 \Leftarrow UPII
Gangnam	37.563***	67.334***
Gangdong	43.302***	58.15***
Gangbuk	68.752***	61.114***
Gangseo	25.13***	51.894***
Gwanak	55.41***	66.74***
Gwangjin	50.616***	50.857***
Guro	42.355***	60.106***
Geumcheon	96.954***	59.293***
Nowon	30.332***	52.086***
Dobong	46.778***	54.926***
Dongdaemun	53.082***	80.225***
Dongjak	48.955***	58.427***
Mapo	40.888***	61.009***
Seodaemun	65.699***	77.948***
Seocho	44.565***	32.921***
Seongdong	59.608***	71.646***
Seongbuk	48.804***	56.387***
Songpa	95.204***	62.781***
Yangcheon	45.908***	55.287***
Yeongdeungpo	29.768***	59.574***
Yongsan	67.606***	64.298***
Eunpyeong	79.051***	62.192***
Jongno	86.934***	94.985***
Jung	81.111***	65.221***
Jungnang	75.393***	77.423***

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

지 농도는 UPII에 Granger 인과하지 않는다.”는 귀무가설과, 반대 귀무가설인 “UPII는 미세먼지 농도에 Granger 인과하지 않는다.”는 귀무가설 모두 유의확률 0.1% 내에서 기각하였다. 이에 따라 미세먼지 농도와 UPII는 양방향으로 Granger 인과하며, 서울시 전역에서 미세먼지 농도와 UPII를 함께 관리할 필요성이 강조된다(Table 3).

셋째, 기온과 미세먼지 농도의 Granger 인과검정 결과, “기온은 미세먼지 농도에 Granger 인과하지 않는다.”의 귀무가설을 전체 구에서 기각하여 기온이 미세먼지 농도에 Granger 원인 변수로 작용하였다. 반대 귀무

Table 4. Granger causality test results of Temperature and PM₁₀

District	H0: Tem \nRightarrow PM ₁₀	H0: Tem \Leftarrow PM ₁₀
Gangnam	21.831**	7.6903
Gangdong	23.579**	11.097
Gangbuk	15.717**	9.2615
Gangseo	27.268***	16.201**
Gwanak	29.126***	13.249*
Gwangjin	27.984***	9.1628
Guro	31.106***	12.635*
Geumcheon	28.61***	9.398
Nowon	33.256***	21.092**
Dobong	12.341*	15.085**
Dongdaemun	24.603***	7.6645
Dongjak	29.509***	12.884*
Mapo	27.33***	11.495
Seodaemun	23.466**	9.9006
Seocho	24.037**	9.5209
Seongdong	28.668***	8.3924
Seongbuk	22.736**	11.084
Songpa	13.313*	7.4775
Yangcheon	30.191***	7.8173
Yeongdeungpo	28.869***	10.831
Yongsan	22.492**	8.1592
Eunpyeong	36.295***	7.1581
Jongno	13.036*	8.2524
Jung	21.159**	5.1252
Jungnang	17.742**	6.6927

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

가설의 경우, 관악구, 강서구, 도봉구, 노원구, 동작구, 구로구의 6개 구에서 기각되어 해당 지역에서 미세먼지 농도가 기온에 Granger 인과하였다. 이러한 결과는 앞선 6개 구에서 기온과 미세먼지 농도가 양방향으로 인과하므로 해당 지역은 기온과 미세먼지 농도를 동시에 관리할 필요성을 나타낸다. 그 외의 19개 구의 경우 기온이 미세먼지 농도에 편방향으로 인과관계를 보이므로 기온을 우선적으로 고려해야 할 것으로 판단된다(Table 4).

넷째, 기온과 UPII의 Granger 인과관계는 강남구, 광진구, 성동구, 노원구, 동작구, 구로구, 서대문구, 서초구, 종로구, 금천구, 마포구, 양천구, 영등포구, 은평구의 14

Table 5. Granger causality test results of Temperature and UPII

District	H0: Tem \nRightarrow UPII	H0: Tem \Leftarrow UPII
Gangnam	13.573*	10.603
Gwangjin	16.267*	7.9077
Guro	16.554*	14.845*
Geumcheon	14.25*	13.487*
Nowon	12.521	13.704*
Dongjak	14.393*	6.3088
Mapo	19.389**	14.407*
Seodaemun	10.424	18.683**
Seocho	10.063	12.712*
Seongdong	17.917**	6.8461
Yangcheon	14.606*	15.362*
Yeongdeungpo	22.464**	12.795*
Eunpyeong	9.1888	20.958**
Jongno	6.0144	15.156*

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

개 구에서 존재하였다. “기온은 UPII에 Granger 인과하지 않는다.”는 귀무가설은 강남구, 광진구, 성동구, 동작구, 구로구, 금천구, 마포구, 양천구, 영등포구의 9개 구에서 기각되어 해당 지역에서 기온이 UPII의 Granger 인과 원인 변수로 작용하였다. 반대 귀무가설의 경우 노원구, 구로구, 서대문구, 서초구, 종로구, 금천구, 마포구, 양천구, 영등포구, 은평구의 10개 구에서 기각되어 UPII가 기온에 Granger 인과하였다. 언급된 자치구 외의 11개 구에서는 기온과 UPII에 대한 양측 귀무가설을 유의수준 내에서 기각하지 못하므로, 인과관계 없이 서로 독립적임을 확인하였다. 이에 따라 기온과 UPII의 인과관계가 양방향인 구로구, 금천구, 마포구, 양천구, 영등포구에서는 기온과 UPII를 함께 고려해야 할 것이다. 한편, 기온이 UPII에 편방향으로 인과하는 강남구, 광진구, 성동구, 동작구의 경우 과거 기온의 변화가 UPII의 원인이 될 수 있으므로 기온을 우선적으로 관리해야 하며, UPII가 기온에 편방향 인과하는 노원구, 서대문구, 서초구, 종로구, 은평구는 UPII를 우선적으로 관리할 필요성이 있다(Table 5).

다섯째, 미세먼지 농도와 UHII에 대한 Granger 인과검정 결과, 대부분의 자치구에서 유의성을 확인하였다.

Table 6. Granger causality test results of PM₁₀ and UHII

District	H0: PM10 \nRightarrow UHII	H0: PM10 \nLeftarrow UHII
Gangnam	7.9743	35.918***
Gangdong	6.3949	34.032***
Gangbuk	4.9701	32.701***
Gangseo	7.4538	13.849*
Gwangjin	8.1598	36.288***
Geumcheon	7.4975	13.037*
Dobong	5.6186	16.13**
Dongdaemun	6.9074	38.797***
Mapo	9.1437	20.616**
Seodaemun	8.5835	15.009*
Seocho	11.008	18.45**
Seongdong	9.6295	24.13***
Seongbuk	9.6122	18.942**
Songpa	5.3868	15.492**
Yangcheon	8.9242	20.153**
Yeongdeungpo	10.024	18.994**
Yongsan	6.8992	20.797**
Jongno	5.0249	19.412**
Jung	4.021	31.833***
Jungnang	5.2076	22.893***

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

“UHII는 미세먼지 농도에 Granger 인과하지 않는다.”는 귀무가설에 대하여 Table 6에서 언급된 총 20개 구에서 기각되므로, UHII가 미세먼지 농도에 Granger 인과한다. 그러나 반대 귀무가설인 “미세먼지 농도는 UHII에 Granger 인과하지 않는다.”는 유의수준 내에서 기각하는 지역이 없으므로, 서울시 전 지역에서 미세먼지 농도는 UHII의 Granger 인과 원인 변수로 작용하지 않는다. 따라서 유의한 검정 결과를 보인 20개 구는 모두 UHII가 미세먼지 농도에 Granger 인과하는 편방향 관계를 갖는다. 이러한 결과를 통해 해당 지역들은 UHII를 우선적으로 관리할 필요성이 강조된다. 한편, 제시되지 않은 관악구, 노원구, 동작구, 구로구, 은평구의 5개 구에서는 미세먼지 농도와 UHII에 대한 양측 귀무가설을 모두 기각하지 못하므로, 상호 간에 인과관계 없이 독립적인 것으로 확인된다(Table 6).

마지막으로 UHII와 UPII Granger 인과검정 결과는

Table 7. Granger causality test results of UHII and UPII

District	H0: UHII \nRightarrow UPII	H0: UHII \nLeftarrow UPII
Gangnam	38.273***	7.3278
Gangdong	38.899***	7.9074
Gangbuk	35.17***	12.682*
Gangseo	17.048**	5.201
Gwanak	13.784**	2.9797
Gwangjin	32.207***	12.273
Guro	16.247**	8.5263
Geumcheon	20.021**	7.7232
Nowon	16.341*	6.1507
Dobong	12.639*	6.0668
Dongdaemun	44.503***	12.788***
Dongjak	17.386**	5.8614
Mapo	31.171***	6.564
Seodaemun	14.445*	8.0905
Seocho	27.478***	7.3686
Seongdong	34.68***	4.9348
Seongbuk	30.854***	17.183**
Songpa	18.35**	2.5565
Yangcheon	29.573***	12.446
Yeongdeungpo	33.116***	12.533
Yongsan	31.187***	11.566
Eunpyeong	14.831*	7.9075
Jongno	29.905***	21.792**
Jung	25.207***	12.987*
Jungnang	21.357**	9.5798

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

다음과 같다. “UHII는 UPII에 Granger 인과하지 않는다.”는 귀무가설을 전체 구에서 기각하였으며, 반대 귀무가설인 “UPII는 UHII에 Granger 인과하지 않는다.”의 경우 강북구, 동대문구, 성북구, 중구, 종로구의 5개 구에서 기각하였다. 즉, 앞서 언급된 5개 구는 UHII와 UPII가 양방향으로 Granger 인과하며, 그 외의 20개 구는 UHII가 UPII에 편방향으로 Granger 인과한다. 이는 강북구, 동대문구, 성북구, 중구, 종로구에서 도시열섬과 도시오염점 관리가 동시에 실행되어야 할 필요성을 보여주며, 그 외의 지역은 도시열섬 관리를 우선하여 중점으로 두어야 할 것으로 판단된다(Table 7).

Table 8. Types of Granger causality test results

Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Gangdong · Songpa · Yongsan · Jungnang	Gangnam · Gwangjin · Seongdong	Gwanak	Gangbuk · Dongdaemun · Seongbuk · Jung
Type 5	Type 6	Type 7	Type 8
Gangseo · Dobong	Nowon	Dongjak	Guro
Type 9	Type 10	Type 11	Type 12
Seodaemun · Seocho	Jongno	Geumcheon · Mapo · Yangcheon · Yeongdeungpo	Eunpyeong

3.3. 유형별 Granger 인과관계

3.2.절에서 분석된 Granger 인과검정 결과, 열환경과 미세먼지 간의 인과관계를 유형별로 나타낼 수 있었으며, 동일한 인과관계 유형에 따라 총 12개 유형으로 구분하였다(Table 8). 유형별로 변수 간의 다양한 Granger 인과관계가 나타났으나, 미세먼지와 UPII는 모든 유형에서 양방향으로 Granger 인과하였다. 기온과 UHII의 경우 은평구를 제외한 24개 구에서는 양방향 인과관계를 보였으며, 은평구에서 기온이 UHII에 Granger 인과하는 편방향 관계를 보였다.

<유형1>에 해당하는 강동구, 송파구, 용산구, 중랑구의 경우 UHII가 미세먼지 농도와 UPII에 모두 인과하는 것과 달리, 기온은 미세먼지 농도에만 인과하고 UPII에는 직접적으로 Granger 인과하지 않았다.

<유형2>에 해당하는 강남구, 광진구, 성동구는 기온과 UHII가 각각 미세먼지 농도와 UPII에 모두 Granger 인과함을 확인하였다. 반면 반대의 경우는 유의한 관계

를 확인하지 못하여 <유형1>과 마찬가지로 열환경과 미세먼지가 편방향으로 Granger 인과하는 것으로 파악할 수 있다.

<유형3>에 속하는 관악구는 기온과 미세먼지 농도 간에 유의한 Granger 인과관계가 양방향으로 나타나며, UHII가 UPII에 Granger 인과하였다. <유형3>은 모든 유형 중 유일하게 기온 및 미세먼지 농도와 강도 변수 간에 관계를 보이지 않은 유형이다.

<유형4>에 해당되는 강북구, 동대문구, 성북구, 중구는 기온과 UHII가 미세먼지 농도에 Granger 인과하며, UHII와 UPII가 양방향으로 Granger 인과하였다.

<유형5>의 경우 강서구와 도봉구가 해당되며, 기온과 미세먼지 농도가 서로 Granger 인과하였고 UHII는 미세먼지 농도와 UPII에 편방향으로 Granger 인과하였다.

<유형6>에 속하는 노원구, <유형7>인 동작구, <유형8>인 구로구는 기온과 미세먼지 농도가 양쪽으로 Granger 인과하였고 UHII가 UPII에 편방향 관계를

보였다. 또한 <유형6>은 UPII가 기온에 Granger 인과하는 반면, <유형7>은 기온이 UPII에 인과하였다. <유형8>의 경우 기온과 UPII가 양방향으로 Granger 인과관계를 보였다.

<유형9>는 서대문구와 서초구가 해당되며, 기온이 미세먼지 농도에 Granger 인과하였다. UHII는 미세먼지 농도와 UPII에 각각 Granger 원인이 되었으며, UPII는 기온에 인과하는 것으로 나타났다.

<유형10>에 해당되는 종로구는 기온이 미세먼지 농도에 Granger 편방향으로 인과하고, UHII와 UPII 간에 양방향으로 Granger 인과함을 확인하였다. 또한 UHII는 미세먼지 농도에, UPII는 기온에 인과하였다.

<유형11>은 금천구, 마포구, 양천구, 영등포구가 포함되며, 기온이 미세먼지 농도에 Granger 인과하였다. UHII는 UPII와 미세먼지 농도에 Granger 인과하였고, 기온과 UPII는 양방향 인과관계를 보였다.

<유형12>에 해당되는 은평구는 기온이 미세먼지 농도에 Granger 인과하였으며, UHII는 UPII에, UPII는 기온에 인과하였다.

4. 결 론

본 연구는 기존 연구에서 다소 파편적으로 분석되어 온 열환경과 미세먼지 간의 인과관계를 분석하고자 하였다. 이를 위해 서울시의 25개 자치구를 대상으로 기온과 UHII, 미세먼지 농도와 UPII, 기온과 미세먼지 농도, 기온과 UPII, UHII와 미세먼지 농도, UHII와 UPII 등의 여섯 가지 쌍으로 구분하여 각각에 대해 Granger 인과검정을 수행하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 은평구를 제외한 24개 구의 경우 기온과 UHII가 양방향으로 Granger 인과하였다. 은평구의 경우 다른 지역과 다르게 과거 시차의 기온이 현재 혹은 미래 UHII에 편방향으로 Granger 인과하였다. 한편, 미세먼지 농도와 UPII의 경우 서울시 전역에서 양방향으로 Granger 인과하였다.

둘째, Granger 인과검정 결과를 같은 유형별로 분류하였을 때 유형1과 유형2에 해당하는 7개 자치구는 열환경이 미세먼지에 편방향으로 Granger 인과함을 확인하였다.

셋째, 유형3에서 유형12까지의 10가지 유형에 속하는 18개 자치구는 열환경과 미세먼지가 양방향으로

Granger 인과하는 관계를 보이고 있었다.

이러한 결과에 따라 다음의 시사점을 도출할 수 있다. 첫째, 서울시 대부분의 지역은 기온과 UHII를 동시에 고려해야 기온과 도시열섬의 관리가 효과적일 것으로 보인다. 이와 달리 은평구는 열환경 관리에 있어 기온에 대한 우선적인 대책의 마련이 요구된다. 또한 서울시 미세먼지를 효과적으로 저감하기 위해서는 미세먼지 농도만을 고려한 저감 대책을 넘어서 도시오염까지 공동으로 관리할 방안을 적극적으로 강구해야 할 필요가 있다.

둘째, 유형1과 유형2에 속한 자치구의 경우 열환경이 미세먼지 문제를 악화시키지 않도록 열환경에 대한 우선적인 조치가 이루어져야 한다. 또한 열환경의 영향력이 큰 만큼 해당 변수에 대하여 지속적인 모니터링을 실시할 필요성이 존재한다.

셋째, 서울시 내 다수의 자치구에서 열환경과 미세먼지가 상호적으로 영향을 미치고 있으며, 따라서 열환경과 미세먼지를 구분하여 관리하기보다 유형에 따라 기온, UHII, 미세먼지 농도, UPII의 관계를 함께 고려한 종합적인 관리 대책의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 도시열섬은 현실에서 면적 범위로 분포하지만, 자료 구득성과 수행을 위해 본 연구에서는 자치구별 측정소에서의 측정치를 바탕으로 인과검정을 수행하였다. 보다 조밀하게 설치되고 있는 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT) 환경정보 및 시설 측정소 데이터 등을 이용해 데이터를 구축하여 보다 세밀한 공간적 범위에 대한 대책을 향후에 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 또한 UHII 및 UPII를 산출하기 위한 기온 및 미세먼지 농도 측정치 비교군인 교외지역이 공식적으로 규정되어 있지 않으므로, 선정하여 사용된 교외지역 자료에 따라 강도 차이가 존재할 수 있다는 점이다. 현재 지속적으로 기후변화가 진행되어 도시열섬 및 도시오염에 대하여 지속적인 연구가 실행될 것으로 판단되므로, 향후 UHII와 UPII를 명확히 하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

마지막으로 본 연구는 서울시의 각 자치구별 열환경과 미세먼지의 인과관계를 확인하였으나, 상호간 상관관계와 구체적으로 어떠한 도시 구성 요소가 영향을 미치는가에 대한 분석을 진행하지 못한 한계가 있다. 이에 따라 각 변수 간 상관관계와 더불어 열환경과 미세먼지

문제를 악화시키는 도시 공간 변수를 포함한 후속 연구가 필요하다. 이를 통해 보다 정확한 원인 규명이 가능할 것으로 보인다.

한편, 본 연구는 도시화가 크게 진행된 서울시의 각 자치구를 대상으로 열환경과 미세먼지라는 도시 문제에 대하여 인과관계를 밝힌 데에 의의가 있다. 확인된 인과관계 결과에 따라 지역별로 적절한 열환경 완화 및 미세먼지 저감 대책을 마련하는 기반으로서의 역할을 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2020R1F1A1077087)을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Air Korea, https://www.airkorea.or.kr/web/pmRelay?itemCode=10007&pMENU_NO=108.
- Al-Mulali, U., Fereidouni, H. G., Lee, J. Y., Sab, C. N. B. C., 2013, Exploring the relationship between urbanization, energy consumption, and CO2 emission in MENA countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 107-112.
- Cao, C., Lee, X., Liu, S., Schultz, N., Xiao, W., Zhang, M., Zhao, L., 2016, Urban heat islands in China enhanced by haze pollution, *Nature communications*, 7(1), 1-7.
- Choi, J. H., Kang, I. J., Han, K. B., 2012, Comparison of temperature and air pollution using GIS, *Proceedings of the Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography Conferences*, Gangneung, 403-406.
- Crutzen, P. J., 2004, New directions: the growing urban heat and pollution "island" effect-impact on chemistry and climate, *Atmospheric environment*, 38(21), 3539-3540.
- Feizizadeh, B., Blaschke, T., 2013, Examining urban heat island relations to land use and air pollution: Multiple endmember spectral mixture analysis for thermal remote sensing, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3), 1749-1756.
- Hong, J. W., Hong, J., Kwon, E. E., Yoon, D., 2019, Temporal dynamics of urban heat island correlated with the socio-economic development over the past half-century in Seoul, Korea, *Environmental Pollution*, 254, 112934.
- Hong, M. Y., Yim, E. S., 2010, The number of travel agency: A Newly introduced factor on the airline outbound tourism demand through the Granger causality test, *Korean Journal of Hospitality & Tourism*, 19(2), 135-152.
- Hur, Y. K., Jang, K. S., Kim, S. J., Kim, H. M., 2008, The Granger causality analysis between prices and trading volume in the housing market -Focused on apartment property markets in Seoul, *Housing Studies Review*, 16(4), 49-70.
- 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.
- Jang, E. S., A Numerical simulation of heat flow field for heat island effect analysis to air pollutants dispersion in apartment complex, *J. Environ. Sci. Int.*, 14(6), 577-582.
- 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.
- Jiang, L., Bai, L., 2018, Spatio-temporal characteristics of urban air pollutions and their causal relationships: Evidence from Beijing and its neighboring cities, *Scientific reports*, 8(1), 1-12.
- Kim, B. C., Kim, J. J., Ryu, K. K., 2009, Power of a word in media politics : An Analysis of Pojugi, the most generous aid to North Korea, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, 53(1), 412-438.
- Kim, J. Y., 2006, Influence of newspaper articles on real estate market, *Housing Studies Review*, 14(2), 39-63.
- Kim, K. J., An, Y. S., 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.
- Kim, Y., Choi, Y., 2012, A Study on the intensity of urban heat islands in the Seoul metropolitan area by weather conditions, *The Geographical Journal of Korea*, 46(1), 1-19.
- Kim, Y. H., Baik, J. J., 2002, Maximum urban heat island intensity in Seoul, *Journal of applied meteorology*, 41(6),

- 651-659.
- Kim, Y. H., Choi, D. Y., Chang, D. E., 2011, Characteristics of Urban Meteorology in Seoul Metropolitan Area of Korea, *Atmosphere*, 21(3), 257-271.
- Kim, Y. J., Kang, D. H., Ahn, K. H., 2011, Characteristics of urban heat-island phenomena caused by climate changes in Seoul, and alternative urban design approaches for their improvements, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 12(3), 5-14.
- Korea Meteorological Administration, 2020, Korean climate change assessment report 2020, Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration National Climate Data Center, <https://data.kma.go.kr>.
- Lee, C. J., Lim, J., 2018, Effects of the online cultural resonance of news frames on public opinion in terms of text mining and Granger causality analysis of news stories and comments about the “Kim Young-ran Act”, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, 62(4), 82-121.
- Lee, K. I., Ryu, J., Jeon, S. W., Jung, H. C., Kang, J. Y., 2017, Analysis of the effect of heat island on the administrative district unit in Seoul using LANDSAT image, *Korean Journal of Remote Sensing*, 33(5-3), 821-834.
- Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M., Sodoudi, S., 2018, Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin, *Science of the Total Environment*, 636, 818-828.
- Ministry of Environment, 2019, Ask anything about particulate matter, Sejong, Korea.
- 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.
- Oh, S. N., 2018, Effect of particulate matter in the atmosphere on climate change, KONETIC Report, Korea Environmental Industry & Technology Institute, Seoul, Korea.
- Park, B. J., Kim, Y. H., Min, S. K., Kim, M. K., Choi, Y., Boo, K. O., Shim, S., 2017, Long term warming trends in Korea and contribution of urbanization: an updated assessment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 10-637.
- Shin, C. K., Han, J. S., Kim, Y. S., 1992, A Study on the relationship of air pollution and meteorological factors : Focusing at Kwanghwamun in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 8(4), 213-220.
- Yamamoto, Y., 2006, Measures to mitigate urban heat islands. NISTEP Science & Technology Foresight Center.
- Zheng, Z., Ren, G., Wang, H., Dou, J., Gao, Z., Duan, C., Li, Y., Ngarukiyimana, J. P., Zhao, C., Cao, C., Jiang, M., Yang, Y., 2018, Relationship between fine-particle pollution and the urban heat island in Beijing, China: Observational evidence, *Boundary-Layer Meteorology*, 169(1), 93-113.
- Zhu, Z., Qiao, Y., Liu, Q., Lin, C., Dang, E., Fu, W., Wang, G., Dong, J., 2021, The impact of meteorological conditions on Air Quality Index under different urbanization gradients: a case from Taipei, *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), 3994-4010.

-
- Graduate student. Jee-Min Yoon
Department of Urban Design and Planning, Hongik University
jennie928@hanmail.net
 - Assistant professor. Hyung-Kyoo Kim
Department of Urban Design and Planning, Hongik University
gusailsang@gmail.com