

ORIGINAL ARTICLE

2023년 여름철 폭염 집중관측을 통한 서울 도심환경 조건에 따른 기온 및 노면 온도의 변화 특성

나성준 · 한상대 · 김제원 · 박문수¹⁾ · 김백조^{2)*}

주식회사 동넵, ¹⁾세종대학교 기상환경융합과, ²⁾국립기상과학원 관측연구부

Characteristics of Changes in Air and Road Temperatures Induced by Environmental Conditions in the Urban Region of Seoul Through an Intensive Observing Period (IOP) of Heatwaves in the Summer of 2023

Sung-Joon Na, Sang-Dae Han, Je-Won Kim, Moon-Su Park¹⁾, Baek-Jo Kim^{2)*}

The East Co., Ltd, Gyeonggi 12248, Korea

¹⁾*Department of Climate and Environment, Sejong University, Seoul 05006, Korea*

²⁾*Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea*

Abstract

An intensive observing period (IOP) of heatwaves in the urban region of Seoul in the summer of 2023 was carried out to understand the changes in air temperature and road temperature induced by environmental conditions. The temperature observed at eight points with different urban environmental conditions was compared with the temperature by the KMA/AWS to analyze the characteristics of change in air temperature by height and the change in road temperature according to environmental conditions and road sprinkler. The comparison of the average temperature observed in different urban environmental conditions with the temperature observed at KMA/AWS showed that the air temperature in asphalt and open space sites was 0.7 to 2.3°C higher and that the one in bus stops was 0.9 to 2.3°C higher. In terms of temperature deviations depending on residential type, the temperature in highly populated areas was about 0.1 to 0.8°C higher than that of apartment complexes. In addition, regardless of the size of a park, the temperature in the park was lower than the temperature in dense housing areas and apartment complexes. In asphalt and residential areas, the road temperature was higher than the temperature at a height of 150 cm. Conversely, road temperature was lower than air temperature in a shaded shelter and large park. In addition, after spraying a surface road, the road temperature immediately dropped by about 3 to 4°C; however, after about 20 minutes, it rose again to the previous road temperature. This change in road temperature appeared only for the temperature of 30 cm height.

Key words: Intensive observing period (IOP), Heatwave, Environmental conditions, Road sprinkler

Received 2 January, 2024; Revised 17 January, 2024;

Accepted 19 January, 2024

*Corresponding author : Baek-Jo Kim, Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea
Phone : +82-64-780-6591
E-mail : swanykim@korea.kr

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

1. 서론

최근 지구온난화로 인해 전 지구적으로 폭염의 빈도가 증가하면서 이로 인한 사회·경제적 피해가 늘어나는 추세이다. 특히 우리나라의 대도시 중에 하나인 서울시의 기온은 도시화의 영향으로 다른 지역에 비해 큰 폭으로 상승할 뿐만 아니라 폭염과 열대야 일수도 증가하고 있다. 이러한 폭염으로 인한 온열질환 사망자수는 태풍이나 집중호우보다 많은 것으로 보고되고 있다(KMA, 2012). 또한 도시 폭염 피해를 줄이기 위해 지자체에서는 더위 쉼터 확보, 살수차 운영, 그늘막 설치 등 다양한 정책을 시행하고 있다. 이처럼 도시 폭염의 특성을 고려한 완화 및 적응 정책을 수립하기 위해서는 도시 내부의 환경변화(토지 피복 등)에 따른 기온과 노면 온도 변화 특성을 이해하여야 한다.

여름철 도시 폭염과 관련하여 대구지방기상청과 대구광역시 보건환경연구원에서 관측된 기상자료를 이용하여 대구시의 기온 분포와 열 환경 변화 특성을 분석한 연구가 수행된 바 있다(Kim and Kim, 2017; Choo et al., 2021). 2013년 3월부터 2015년 2월까지 2년간 서울 강남의 도심에 있는 선정릉 지역을 중심으로 복합센서 관측망을 활용하여 도심과 녹지의 기온 차이는 야간에 뚜렷하고 비습의 차이는 여름에 1.5 g/kg 로 크게 나타남을 밝혔다(Kim et al., 2016). Landsat 8 위성 자료를 이용한 서울 선정릉(도심녹지)의 냉각효과를 분석한 연구에서 주거지역의 경우 평균 2.3°C의 냉각효과는 100~200 m범위에서 나타나고, 상업지역에서 냉각효과 범위는 0~200 m이었으며 평균적으로 약 0.3°C의 효과가 있음을 보였다(Kim et al., 2018). 이처럼 대도시인 대구의 기온 변화와 서울 선정릉과 같은 녹지로 인한 냉각효과에 관한 연구는 수행된 바 있으나 도심의 주거 형태(주택밀집지역, 대단위 아파트 단지)와 공원 규모(호수 공원, 소규모 공원)에 따른 열적 환경을 조사한 연구는 여전히 부족하다.

서울시 도심 고층 빌딩지역에서 기온 및 노면 온도 변화 특성을 파악하기 위해서 Park et al.(2017)은 서울 도심의 수요자 맞춤형 기상정보 서비스를 위해서 기존의 지상기상관측망에 지표면 에너지평형시스템, 3차원 기상관측시스템, 응용기상관측시스템을 추가하여 3차원 고해상도 도시관측망을 구축 및 운영하였다. 이후 2019년 서울 도심 도로에서 실시된 BBMEX (Building block 3-dimensional urban meteorological experiment)

Campaign을 통해 기온과 노면 온도의 최대값의 시간 지연이 약 1시간 정도임을 밝혔다(Kim et al., 2020). BBMEX Campaign 관측망은 통합기상센서(기온, 상대습도, 바람 관측) 뿐만 아니라 복사 및 난류관측시스템, 이동형 기상관측시스템, 이동형 기상관측차량, 열화상 카메라, 3차원 풍향·풍속계 등으로 구성되었다(Park et al., 2020). 하지만 여름철 도시 폭염이 발생할 때 IoT (Internet of things) 기상관측센서를 이용한 도심 환경에 대한 높이별 기온과 노면 온도 관측이 가능한 관측시스템을 설계하여 기온 및 노면 온도 변화 특성을 조사한 연구가 수행된 바가 없다.

한편, 우리나라의 대표적인 폭염 도시인 대구의 도시 열 환경 개선을 위한 정책을 개발하기 위해 도로 상에서 기상 요소와 노면 온도를 관측한 연구(Kim et al., 2015; Jung et al., 2016)에서 한밤에서 새벽까지 시간대를 제외하면 50%이상의 사람들이 무더위로 인한 불편함을 느끼는 심각한 수준에 도달함을 밝혔다. 1998년 이래 가장 심각한 폭염이 발생한 2018년에 기상관측차량을 이용하여 강릉시내에서 살수 차량 이동 후 기온과 노면 온도를 관측한 결과, 기온은 큰 변화가 없으나 살수 이전 노면 온도(50~60°C)에 비해 약 15~20°C 정도 냉각효과가 나타났으며 살수 이후 약 30분 경과 후 wet(젖음) 또는 moist(습윤) 상태를 보이다가 dry(건조) 상태로 변화함을 보였다(Kim et al., 2018). 최근에 통합모형을 활용한 이류와 도시 비율이 서울 수도권 지역의 도시열섬강도에 미치는 영향을 분석한 연구도 있었다(Hong et al., 2019). 도시 폭염 피해 저감 및 도시 열섬 완화를 위한 지자체에서 다양한 정책을 시행하고 있으나 이에 대해 체계적인 기상 관측망을 통한 정책 효과에 관한 조사는 이루어진 바가 없었다. 특히 서울시에 폭염이 발생한 경우 도로 노면 살수 전후의 냉각효과를 분석한 연구는 시급히 추진되어야 할 과제이기도 하다.

따라서 본 연구에서는 2023년 여름철 폭염이 발생한 사례와 장마 기간 동안 기온이 30°C 내외까지 상승한 사례에 대해 IoT 기상관측센서, 열화상 카메라, 열화상 온도계를 이용하여 서울시의 대표적인 도심지역인 송파구를 대상으로 다양한 도심 환경에 대해 집중관측을 실시하였다. 이를 토대로 도심 환경에 따른 기온 및 노면 온도 변화 특성을 알아보고 도로 상에 살수 전후 노면 온도 변화를 분석하였다. 이러한 연구 결과를 기반으로 국가와 지자체의 도시 폭염 대책에 도움이 되고자 한다.

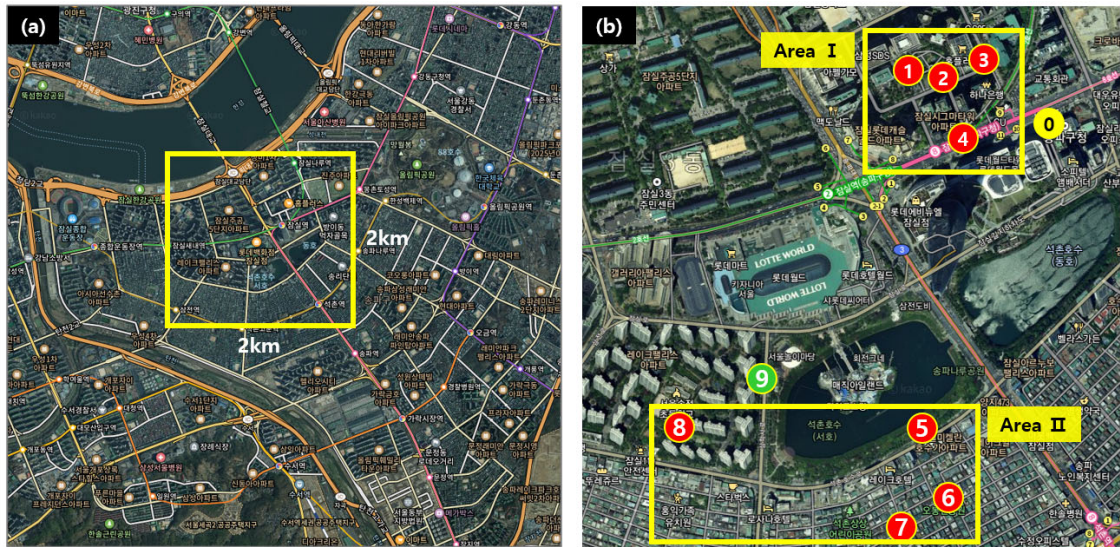


Fig. 1. Target area and observation sites for intensive observing period (IOP) of heatwaves in the urban region of Seoul in the summer of 2023, called as HiSeoul-2023.

2. 재료 및 방법




2.1. 서울도심 폭염 집중관측

Fig. 1은 2023년 서울도심 폭염 집중관측 (Intensive Observing Period (IOP) of heatwaves in urban region of Seoul in the summer of 2023, HiSeoul-2023)이 수행된 송파구 잠실역 주변 2 km×2 km 권역과 관측 지점을 나타낸 것이다. 이 지역은 롯데월드타워를 비롯한 대형빌딩, 왕복 8~10차로의 대로, 285,757 m²의 호수를 품은 석촌호수공원이 있다. 주거 형태별로는 잠실주공단지, 리센츠아파트,레이크팰리스아파트 등 대형 아파트 단지와 빌라가 집중된 주택밀집지역으로 구분할 수 있다. 이처럼 집중관측 지역은 빌딩, 대로, 공원, 아파트, 주택 등 다양한 도심환경을 포함하고 있다. 이들 지역에서 지표환경, 주거환경, 공원규모 등의 특성을 고려하고 다중 이용 시설물을 포함하여 관측 지점을 선정하였다. 관측 지점은 송파구청 옥상, 어린이교통안전교육장(아스팔트, 대지), 그늘쉼터, 버스정류소, 석촌호수공원, 오봉산공원, 주택밀집지역, 대단위 아파트 내 쉼터, 아파트 인근 차로 변으로 총 9개 지점이다. 송파구청 옥상(관측 지점: 0)은 열화상 카메라를 이용한 표면온도의 공간분포를 파악하고자 선택하였다. 어린이교통안전교육장의 아스팔트(관측 지점: 1)와 대지(놀이

터)(관측 지점: 2), 소규모 도심공원인 오봉산 공원(관측 지점: 6), 바닥이 블록으로 만들어진 주택밀집지역(관측 지점: 7)과 대단위 아파트 단지(관측 지점: 8)는 지표면 환경에 따른 열적 변화를 분석하고자 선정하였다. 폭염이 발생하였을 때 그늘막의 효과를 보기 위하여 그늘쉼터(관측 지점: 3), 일정 공간이 폐쇄된 곳에서 폭염 취약성을 분석하고자 버스정류소(관측 지점: 4) 그리고 대규모 호수공원에 따른 도심 열환경의 저감 효과를 조사하기 위해 석촌호수공원(관측 지점: 5)에서 관측하였다. 마지막으로 아파트 단지 옆 차로 변(관측 지점: 9)은 폭염 저감 대책의 일환으로 노면 살수 전후의 온도 차이를 알아보려 하였다. 권역 I는 관측 지점 1~4가 위치한 영역으로 정하고 권역 II는 관측 지점 5~8으로 지정하였다. 서울도심 폭염 집중관측은 기상관측장비의 운용 안정성 확보와 관측자료의 오류 최소화를 위하여 지점별 현장 관측자 2인을 통해 관측이 수행되도록 하였다. 또한 관측지점에서 기상관측장비 운용에 필요한 전원의 안정적 공급을 위해 배터리만 운영될 수 있도록 관측 체계를 구성하였다.

이번 서울도심 폭염 집중관측에 사용된 관측 장비는 크게 IoT 기상관측센서, 열화상 카메라, 열화상 온도계이다(Table 1). IoT 기상관측센서와 열화상 온도계는 관측 지점 1~9에, 열화상 카메라는 관측 지점 0에 각각

Table 1. Observation equipment used in for intensive observing period (IOP) of heatwaves in the urban region of Seoul in the summer of 2023 (HiSeoul-2023).

Observation equipment	IoT device	Thermal sensor-based camera	Thermal sensor-based thermometer
Observation elements	Temperature, Relative humidity, Pressure	Surface temperature (Area)	Surface road temperature (Point)
Equipment image			
Observation interval	5 min.	1 min.	1 hr.

설치하였다. 지점별 기상관측센서는 지면으로부터 높이 30, 100, 150 cm에 각각의 센서(기온, 습도, 기압)가 설치되어 실시간 관측(관측 간격: 5분)하여 저장되도록 하였다. 높이 150 cm는 기상청의 표준기상 관측고도이면서 일반 성인이 폭염을 체감할 수 있는 높이이고 100 cm는 어린이의 평균적인 얼굴 높이에 해당한다. 높이 30 cm는 지표면 가열이 기온에 미치는 영향을 분석하기 위하여 추가적으로 설치하였다. 열화상 온도계는 실시간 관측되는 장비가 아니므로 현장 관측자가 매 정시에 지면 온도를 측정하여 기록하도록 하였으며 지면 온도 관측 방법에 대해서는 사전에 교육이나 설명을 통하여 관측 오류를 최소화하였다. 열화상 카메라는 해상도가 320×240으로 측정범위가 -20~1500℃이고 정확도는 ±2℃이다. 표면온도는 Fixel 단위로 측정되어 1분 간격으로 자료가 처리되도록 하였다.

IoT 기상관측센서를 통한 서울도심 폭염 집중관측은 권역 I에서 23년 7월 7일, 8월 1일, 8월 3일로, 권역 II에서 7월 20일, 7월 31일, 8월 4일로 각각 3일간 수행되었다. 열화상 카메라는 권역 I와 II에서 실시된 집중관측 날짜를 포함하여 7월은 5일간(7일, 20일, 21일, 28일, 31일), 8월은 4일간(1일, 2일, 3일, 4일)로 관측하였다. 폭염 발생 때 도로 살수 효과를 알아보기 위한 집중관측은 관측 지점 9에서 8월 2일과 8월 3일 양일간 수행하였다. 도로 살수효과 분석을 위한 기상관측(1차: 8월 2일 09:20~16:00 LST, 2차: 8월 3일

11:45~16:45 LST)를 제외하면 IoT 기상관측센서와 열화상 카메라를 이용한 집중관측은 하루 중 08:30~17:30 LST사이에 이루어졌다. 2023년 폭염 집중관측 날짜로 선정된 7월 7일과 7월 20일은 서울을 포함한 중부지방에 장마가 시작된 6월 25일 이후 장마 기간 중 기온이 각각 29.3℃와 31.3℃로 다소 높았던 날이었다. 일최고기온이 33℃ 이상인 날이 2일 이상 지속될 때로 정의한 기상청 폭염주의보 기준 보다도 낮은 최고기온으로 두 사례는 폭염이 발생하였다고 말하기에는 다소 무리가 따른다. 하지만 Fischer and Knutti(2013)은 남아시아와 같은 적도 습윤 지역에서 고온으로 인한 열 스트레스가 인체 건강에 미치는 영향이 과소 평가되었다고 지적하면서 습윤한 환경에서 고온 일이 연속적으로 발생하는 경우 폭염 사망자가 늘어날 수 있음을 언급하였다. 이처럼 장마와 같은 습윤 기간임에도 불구하고 30℃ 부근의 고온 일에 대한 도심 환경별 기온 변화 특성을 파악하는 것은 폭염-건강 연구에 있어서 중요할 것으로 판단되어 본 연구의 폭염사례에 포함하였다. 장마는 중부지방에서 7월 26일에, 남부지방에서 7월 24일에 각각 종료되었다. 서울도심 폭염 집중관측은 장마가 종료된 이후인 7월 31일, 8월 1일, 8월 3~4일에 실시하였다.

한편, 2023년 서울도심 폭염 집중관측을 실시한 날의 종관기상상태를 알아보는 것은 도심 환경에 따른 기온의 시공간 분포를 이해하는 데 무엇보다 중요하다. 기

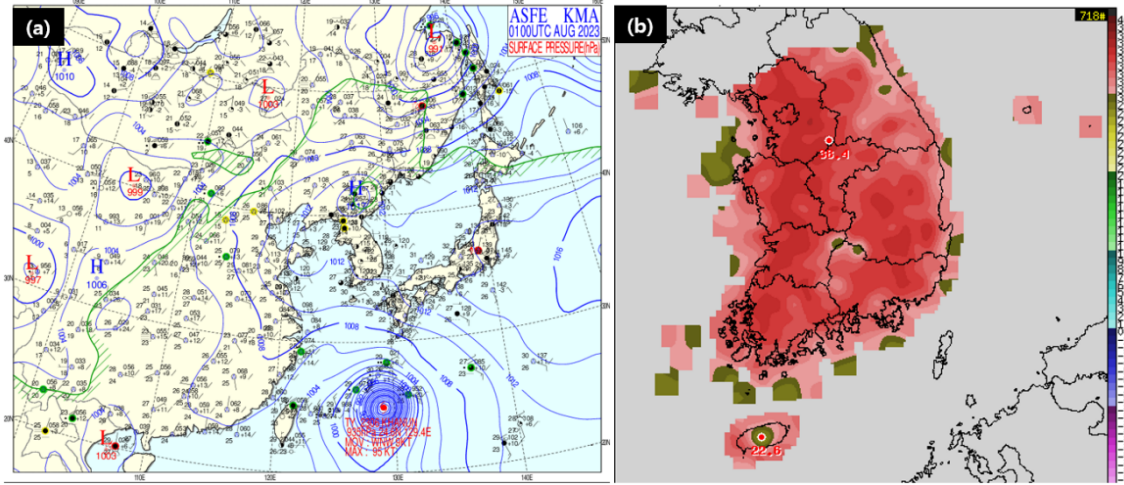


Fig. 2. Surface weather chart at 09 LST (a) and maximum temperature distribution (b) at 01 LST August 2023, representative date of HiSeoul-2023.

후변화로 인한 폭염 일수가 매년 증가하는 가운데 2023년에도 평년보다 강한 폭염이 나타났다. 기상청은 2023년 여름철 전국 평균기온이 24.7°C로 전국 단위 기상관측을 시작한 이래 역대 네 번째로 높았다고 발표하였다(KMA, 2023). 도시지역의 폭염은 더욱 심각한 상황으로 열대야 일수는 전국 평균 8.1일로 평년의 6.4일보다 1.7일 많았고, 특히 서울은 평년 12.5일보다 무려 두 배나 많은 25일을 기록하였다. 2023년 여름철에 지속적으로 강한 폭염이 나타난 7월 31일~8월 4일 사이에 대표적인 폭염 일로 8월 1일을 선정하였으며 이와 관련된 지상일기도와 최고기온 분포는 Fig. 2에 제시하였다. 북태평양 고기압이 확장하여 우리나라 전역을 감싸고 있으며, 전국 대부분 지역의 낮최고기온은 35°C 안팎까지 올라가는 폭염이 나타났다. 특히, 북태평양고기압이 가장자리를 따라 고온 다습한 바람이 자주 불어 습하면서 더운 양상을 보였다.

2.2. 분석 방법

먼저 2023년 여름철 폭염 집중관측을 통해 8개 지점에서 관측된 기상자료는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 표준에 근거하여 결측 자료 검사, 물리 한계 검사, 단계 검사 등 품질관리를 수행하였다(WMO, 2004). 이러한 품질관리 과정을 거친 기온 값과 기상청에서 운용하고 있는

송파 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)에서 관측된 기온 값을 관측 시간을 고려하여 각각 일평균을 한 후 두 요소 간의 평균값과 최대값의 차이를 분석하였다.

$$Deviation = (y_i - x_i) \quad (1)$$

$$Average\ deviation = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i) \quad (2)$$

여기서, y_i 는 집중관측을 통해 관측된 기온 값을, x_i 는 기상청 송파 AWS에서 관측된 기온 값을 각각 나타낸다. N 은 집중관측과 기상청 AWS에서 08:30~17:30 LST까지 생산된 관측자료의 수이다. IoT 기상관측센서에서 관측된 150 cm 높이의 기온과 노면 온도 간의 비교를 통해 노면 온도가 기온보다 높은 경우와 낮은 경우로 구분하여 권역별 도심환경에 따른 높이별 기온변화 특성을 알아보았다. 도로 상의 살수에 따른 노면 온도 변화 특성을 조사하기 위하여 살수 5분 전 1회와 살수 20분 후 4회의 높이별 기온과 살수 시점의 노면 온도를 비교·분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 도심 환경에 따른 기온 변화

Table 2. Deviations(Dev.) between averaged temperature observed by KMA/AWS and temperature observed at 1.5 m height by each environment conditions(asphalt, open space, bus stop) on the three days (July 7, Aug. 1 and Aug. 3).

Avg. temp. & dev.(°C)	July 7 th				Aug. 1 st				Aug. 3 rd			
	KMA AWS	Asphalt	Open space	Bus stop	KMA AWS	Asphalt	Open space	Bus stop	KMA AWS	Asphalt	Open space	Bus stop
Avg. temp.	29.3	30.5	31.6	31.6	33.4	34.3	34.3	34.3	32.6	33.3	33.5	33.5
Avg. dev.	.-	+1.2	+2.3	+2.3	-	+0.9	+0.9	+0.9	-	+0.7	+0.9	+0.9
Max. dev.	.-	+2.5	+3.5	+3.5	-	+2.6	+2.6	+2.9	-	+2.1	+1.9	+1.9

Table 3. Deviations(Dev.) between temperature observed by KMA/AWS and temperature observed at 1.5 m height by each house type(high density residential area, apartment complex) and park size(large, small) on the three days (July 20 July 31 and Aug. 4).

Avg. temp. & dev.. (°C)	July 20 th					July 31 th					Aug. 4 th				
	KMA AWS	House type		Park size		KMA AWS	House type		Park size		KMA AWS	House type		Park size	
		Residential area	Apartment	Large	Small		Residential area	Apartment	Large	Small		Residential area	Apartment	Large	Small
Avg. temp.	31.3	32.9	32.4	30.0	31.3	31.7	33.4	32.6	30.5	31.6	33.0	34.3	34.2	31.8	33.4
Avg. dev.	.-	+1.6	+1.1	-1.3	0.0	-	+1.7	+0.9	-1.2	+0.3	-	+1.3	+1.2	-1.2	+0.4
Max. dev.	.-	+3.6	+2.6	-2.9	-1.1	-	+5.1	+3.6	-2.6	-1.4	-	+4.0	+3.6	-2.4	-1.4

일반적으로 지면의 환경조건에 따른 기온의 시·공간 변화는 매우 다르게 나타난다. 2023년 서울도심 폭염 집중관측 지역(송파구 일대)의 북서쪽에 위치한 권역 I에서 지면(아스팔트, 대지, 버스정류소)에서 관측한 1.5 m 높이의 기온을 기상청(KMA) 자동기상관측장비(AWS)와 비교하였다. 아스팔트와 대지의 관측 지점은 송파구에 위치한 KMA/AWS와 각각 대략 660 m와 720 m 정도 떨어진 곳에 위치하였다. 버스정류소의 관측 지점은 KMA/AWS와 약 650 m 떨어진 곳에 위치하고 있으며 정류소의 구조물과는 약 40 cm 떨어진 지점에서 관측을 수행하였다. 버스정류소는 반 폐쇄형 공간으로서 남쪽 면과 천정에 구조물에 의해 차폐되어 있고, 북쪽 면과 개방된 형태이다. KMA/AWS에서 관측된 기온은 7월 7일에 29.3°C에서 8월 1일에 33.4°C의 범위였으며 이는 아스팔트, 대지(open space), 버스정류소에서 관측된 기온 보다는 낮은 값이다(Table 2). 도심 환경이 아스팔트에서 기온은 대지와 버스정류소 보다 낮거나 동일하였다. 특히 아스팔트 및 대지 기온은 KMA/AWS와 비교할 때 평균적으로 0.7~2.3°C 높았으며, 최대 3.5°C까지 높게 나타났다. 8월 1일의 기온 변화를 살펴보면 아스팔트의 기온은 관측기간 동안

KMA/AWS의 기온보다 높았지만 대지의 경우 10 LST와 12 LST에서 일시적으로 KMA/AWS보다 낮았다. 또한 아스팔트와 대지의 기온은 14~15 LST 경 가장 큰 차이를 보였다. 아스팔트(공간 면적: 20 m×20 m)의 관측 지점은 주변 장애물(시설물이나 나무)이 없어 원활한 공기의 흐름이 가능하여 기온이 크게 상승하지 않은 것으로 사료된다. 버스정류소의 기온은 KMA/AWS보다 평균적으로 0.9~2.3°C 높았으며, 최대 차이는 3.5°C 정도였는데, 이는 남쪽 구조물에 의해 관측 장비에 햇빛은 차폐되지만 가열된 공기가 천정구조물에 의해 순환이 원활하지 않아서 나타난 것으로 판단된다. 또한 버스정류소의 기온은 14 LST경에 최대값을 보인 반면 KMA/AWS에서는 이 시각 보다 1시간 정도 늦은 15 LST에 최대값을 보였다. 이와 더불어 버스정류소와 KMA/AWS 간의 하루 중 기온 차이는 12~14 LST에 가장 컸다(그림 미제시).

한편, 주택 형태와 공원 규모에 따른 기온 변화를 알아보기 위해 권역 II에서 주택밀집지역, 대단위 아파트 단지 그리고 규모가 다른 공원(2곳)을 관측 지점으로 선정하였다(Table 3). 주택밀집지역 관측 지점은 KMA/AWS와 약 860 m 떨어진 위치에 있으며,

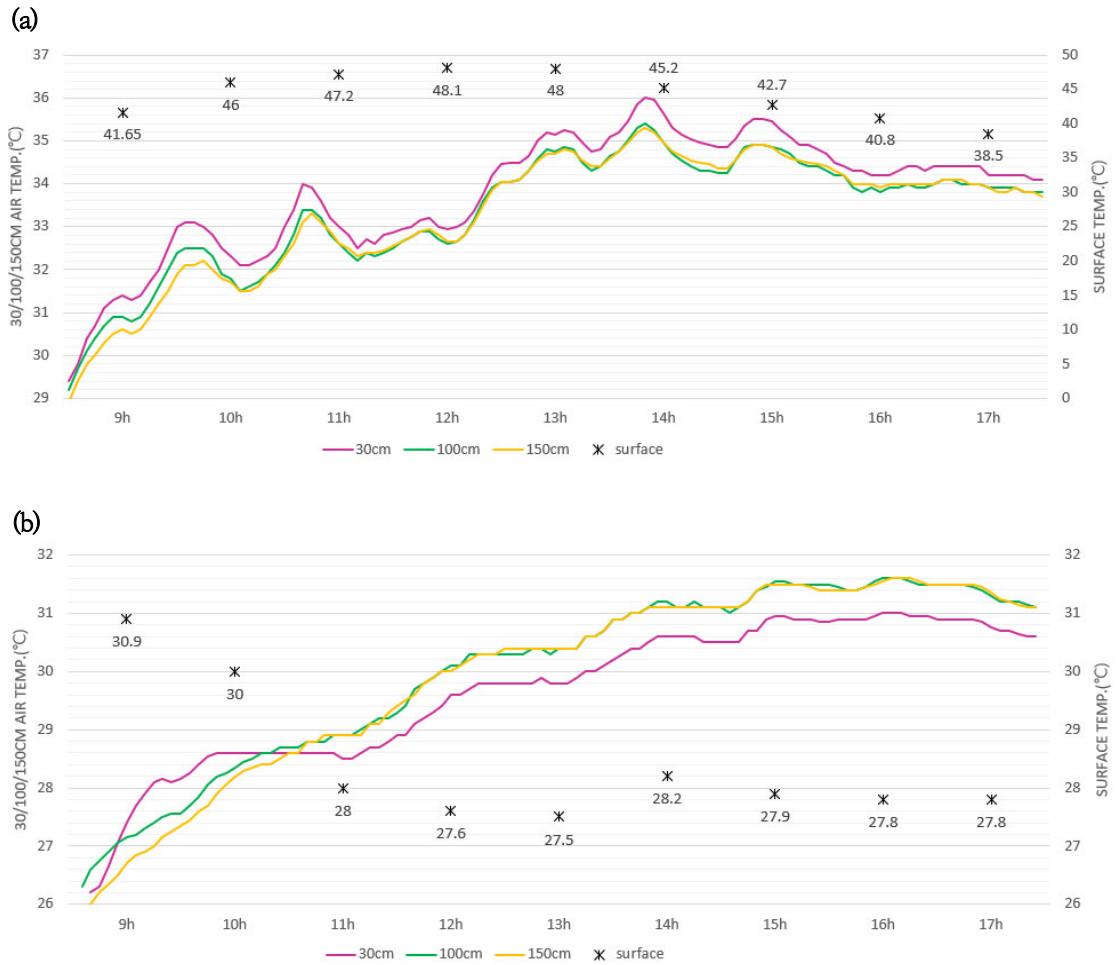


Fig. 3. Time variations of temperature from 0830 LST to 1730 LST at surface and heights of 30 cm, 100 cm and 150 cm under environmental conditions: (a) asphalt and (b) large park sites. Symbol(x) indicates road temperature.

대단위 아파트단지의 관측 지점은 이에 비해 대략 360 m 가량 가까이 위치하였다. 주택밀집지역의 관측 지점 인근에 위치한 두 공원에서도 동시에 집중관측을 수행하였다. 석촌 호수를 품은 대형 공원(285,757 m²)과 놀이터 규모의 소형 공원(1,250 m²)은 주택밀집지역과 각각 약 300 m와 140 m 정도의 거리를 두고 있다. KMA/AWS의 기온은 7월 20일 31.3°C, 7월 31일 31.7°C 그리고 8월 4일 33°C로 집중관측 동안 30°C 이상이었으며 시간이 지남에 따라 점차 높았다. 주택 형태에 따른 기온 차이를 살펴보면 주택밀집지역의 기온이 대단위 아파트 단지보다 0.1~0.8°C 정도 높았다. 도시 기온을 상승시키는 원

인으로 도시의 지표면이 인공 구조물로 포장되는 것이 가장 크다고 알려져 있다. 대단위 아파트 단지는 지표면 면적의 상당한 부분이 아파트라는 콘크리트로 덮혀져 있지만 아파트 사이의 녹지 공간도 확보되어 있어 주택밀집지역 보다 기온이 높지 않을 가능성에 기인된다. 또한 공원의 규모와 관계없이 공원의 기온은 주택밀집지역과 대단위 아파트단지에서 기온 보다 낮았다. 공원의 규모가 큰 경우가 작은 경우보다 기온이 0.9~1.6°C 정도 낮으므로 도심 대공원, 특히 호수를 포함한 공원은 폭염 발생시 녹지로 인한 냉각효과가 뚜렷함을 알 수 있었다. 주택밀집지역과 대단위 아파트 단지의 기온은 KMA/AWS에 비하여 평균적으로

Table 4. Temperature change before and after the passage of sprinkler truck on August 3rd, 2023.

Time(LST)		Before the passage			After the passage			
		14:25	14:29	14:30	14:32	14:35	14:40	15:00
Temperature (°C)	surface		48.6	45.5	45.3	46.6	47.2	49.1
	30 cm	33.7		33.7		33.3	33	33.4
	100 cm	33.1		33.1		33.1	33.1	33.4
	150 cm	33.4		33.4		33.3	33.3	33.6

0.9~1.7℃ 높았으며, 최대 5.0℃까지 나타났다. 주택 밀집지역과 대단위 아파트 단지에서 8월 4일의 기온 변화에서 10 LST 이전에 KMA/AWS와 큰 차이를 보이지 않다가 태양 고도가 높아짐에 따라 그 차이가 뚜렷해졌다. 대단위 아파트 단지의 경우, 기온이 11 LST에 1차 최대값(peak) 후 다소 낮아지다가 15 LST에 2차 최대값을 보였다(그림 미제시). 햇빛이 11 LST 이전에 아파트 벽면에 직접적으로 영향을 미치다가 정오 무렵에는 아파트 사이 공간을 비추면서 그 영향이 줄어들었다가 다시 아파트의 다른 벽면에 영향을 주면서 기온이 상승한 것으로 해석할 수 있다. 이에 대한 명확한 원인 분석을 위해서는 향후 대단위 아파트 단지를 대상으로 열화상 카메라 등을 포함한 고해상도 3차원 기상 관측망을 통한 추가적인 연구가 있어야 한다. 주택밀집지역과 대단위 아파트 단지에서 기온을 KMA/AWS의 기온과 하루 중 변화를 볼 때 14~15 LST에 가장 큰 차이를 보였다. 주택밀집지역 관측 지점은 주변에 도심 빌라 단지 골목의 가장자리로 하루 종일 햇빛이 잘 들고 지면은 아스팔트와 보도 블록이 혼재해 있는 환경이었다. 이번 서울도심 폭염 집중관측에서 KMA/AWS와 기온 값의 차이가 가장 크게 나타나 도심 밀집지역의 폭염 강도가 강하였음을 알 수 있었다. 이는 아스팔트, 보도블록으로 구성된 바다 환경 뿐 아니라 주변에 밀집한 빌라 건물들에 의해서 가열된 공기가 복잡하고 밀집한 환경으로 순환도 원활치 않아 폭염이 심화되는 것으로 추정된다. 대단위 아파트단지 관측 환경도 하루 종일 햇빛이 잘 드는 지역으로 아파트 단지내 남향으로 개방된 쉼터로서 지면은 적색 블록으로 이루어진 환경으로 낮 동안 블록이 가열되면서 주변보다 기온이 높았다. 주택밀집지역의 기온과 비교할 때 대형 공원은 평균 2.5~3.3℃, 최대 4.8℃ 낮았으며, 소형 공원도 평균 0.9~2.1℃, 최대 3.5℃까지 낮게 나타났다. 이는 대형 공원 뿐 아니라 주택지역 내 위치한 소규모 공원도 폭

염이 발생할 때 더위쉼터로서의 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 확인되었다.

3.2. 도심 환경에 따른 기온과 노면 온도 변화

폭염 집중관측에서 다양한 도심환경에서 노면 온도와 높이 30, 100, 150 cm의 기온을 관측하였다. 기온과 노면 온도의 분포를 통한 기온의 연직 구조 변화는 열적 대류를 통한 혼합 과정과 인체 부위별 체감온도 특성을 이해하는데 매우 중요하다. 도심폭염 집중관측 사례 일에 노면 온도가 기온(150 cm)보다 높은 지점은 아스팔트와 주택밀집지역(아스팔트와 보도블록으로 구성)이었으며 반면 그늘 쉼터와 석촌호수공원의 경우는 노면 온도가 오히려 기온보다 낮았다. 전자를 Case 1와 후자를 Case 2로 구분하여 기온변화 특성을 분석하였다. Fig. 3은 Case 1의 사례 중 아스팔트 환경과 Case 2의 사례 중 대형 공원인 석촌호수공원에서 관측된 높이에 따른 기온의 변화를 나타낸 것이다. 아스팔트의 노면 온도는 주택밀집지역보다 5℃ 정도 높았으며 높이에 따른 기온 감소폭은 작았다. 아스팔트는 평균적으로 10.9℃, 최대는 15.5℃까지 높게 나타났다.

이번 도심폭염 집중관측 사례 일에서 그늘쉼터에서 노면 온도는 29.8℃로 대형 공원(28.4℃)보다 조금 높았다. 그늘쉼터에서 높이에 따른 기온 상승률(2.1℃/150 cm)도 대형 공원(1.6℃/150 cm)보다 높았다. 그늘쉼터와 대형 공원에서 기온은 관측 기간 동안 지면 온도보다 1.6~2.1℃ 범위에서 낮았으며 그 차이의 최대값은 3.8℃였다. 이 같은 차이는 대형 공원은 나무그늘에 의해 거의 하루 종일 직사광선의 영향이 없었기 때문으로 해석된다. 또한 흥미로운 것은 대형 공원의 경우 지면 온도는 30 cm 높이의 기온까지는 영향을 주는 것이 확인되지만 100 cm와 150 cm의 기온은 모든 사례에서 비슷하게 나타났다.

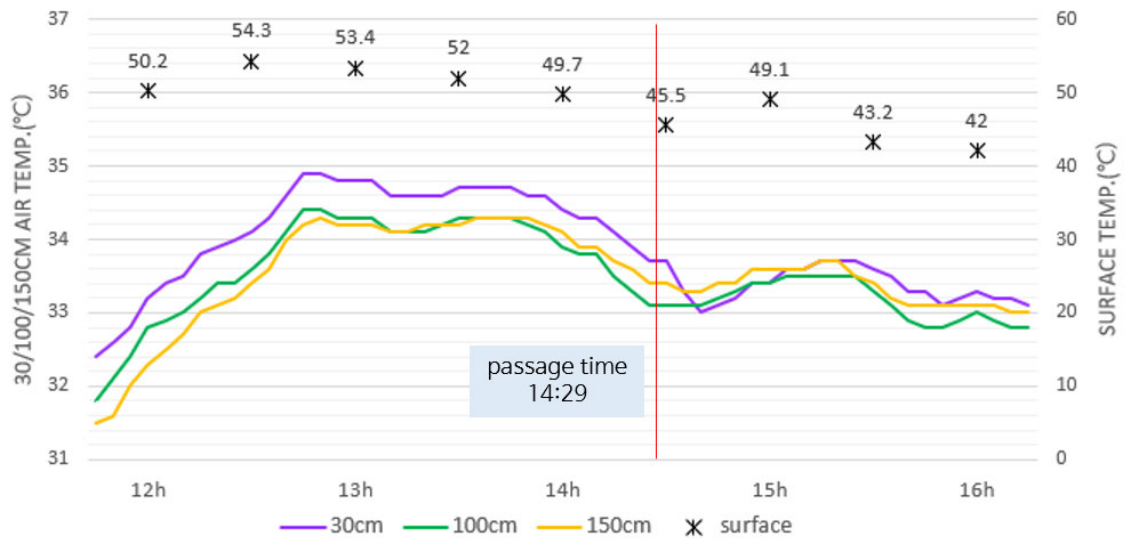


Fig. 4. Time variations of temperature before and after the passage of sprinkler truck on August 3rd, 2023.

3.3. 도로 노면 살수 전후의 지면 온도 변화

여름철 폭염에 대응하기 위한 지자체의 대표적인 정책으로 폭염 발생 때 도로에 살수를 통해서 지면 온도를 저감하는 노력을 하고 있다. 2023년 여름철 폭염 집중관측 기간 중에 송파구청에서는 관내 주요 도로에 대해서 일 2회(오전과 오후 각 1회) 살수차를 운영하였으며, 살수차는 최대 12,400리터의 물을 적재할 수 있다. 살수차에 의한 물 분사 전후 지면 온도 변화를 알아보기 위하여 살수차가 통과한 대로변에 높이 30, 100, 150 cm 기온을 측정할 수 있는 IoT 기상관측센서를 설치하여 관측하였다. Table 4와 Fig. 4는 살수차 통과 전후의 기온 및 노면 온도 변화를 나타낸 것이다. 지면 온도의 경우는 살수차 통과 직후 3~4℃ 정도 낮아졌지만, 20분 정도 이후에는 이전 지면 온도로 다시 상승하였다. 기온의 경우에는 살수차 통과 5~10분 이후 30 cm 기온은 0.7℃ 정도 뚜렷하게 하강하는 효과가 나타났지만, 100 cm와 150 cm 높이의 기온은 거의 변화가 없었다. 이는 폭염 발생 때 살수로 인한 노면 온도의 저감 효과는 살수 후 20~30분 정도 도로 면과 이와 가까운 공기 층의 기온을 저감하는 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이는 여름철 한낮에 도로에 살수를 하면 높은 일사량의 영향으로 단시간에 도로가 건조하고 도로의 온도가 원상회복하게 된다. 반면에 폭염 발생 때 도로 살수의 부정적 영향도 고려되어야 한다. 한낮에 도

로에 살수된 물의 증발로 인해 보도를 지나는 사람의 불쾌지수를 높이거나 살수된 물로 인해 차량 급정거 시에 도로의 마찰력을 줄여 교통사고위험을 가중시킬 수 있다(Kim et al., 2015; Jung et al., 2016).

또한 열화상 카메라로 살수차 통과 전후의 노면 온도의 변화를 알 수 있는데 살수차가 통과한 후 직선 형태로 뚜렷하게 온도 감소 부분을 확인할 수 있다(그림 미제시). 열화상 카메라에서 측정된 Fixel 단위의 데이터를 1분 간격으로 추출하여 시간대별 온도변화를 분석한 결과에서도 IoT 기상관측센서에서와 마찬가지로 살수차 통과 직후의 3~4℃ 내외 노면 온도의 하강과 20~30분 내외의 지속 효과가 확인되었다.

이처럼 도심 폭염이 발생할 때 그 피해를 저감하기 위한 여름철 도로면 살수는 일시적인 노면 온도의 냉각 효과는 분명히 나타나지만 도시 규모로 나타나는 폭염의 완화나 피해를 줄이기 위한 정책으로 고려하기에는 한계점이 있는 것도 사실이다. 이번 폭염 집중관측을 통해 도심에 소형 또는 대형 공원을 조성하는 경우 기온 감소가 뚜렷하였으며 특히, 호수가 있는 공원의 경우 기온의 냉각효과가 잘 나타났다. 이러한 사실을 토대로 호수를 포함한 공원 조성이 어려운 상황이라면 도심 소형 공원 조성을 늘이는 것은 대도시 폭염 영향을 줄이는 대책으로 우수함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 도심환경 조건의 변화에 따른 기온과 노면 온도의 변화를 분석하기 위하여 2023년 여름철 서울도심(송파구 일대)에서 폭염 발생 사례 일과 장마 기간 내 기온이 급격히 상승하는 사례 일을 대상으로 집중관측을 실시하였다. 이번 집중 관측은 IoT 기상관측센서(30, 100, 150 cm), 열화상 카메라와 열화상 온도계를 이용하였다. 아스팔트, 대지, 버스정류소, 공원, 그늘막, 주택밀집지역, 대단위 아파트 단지 등 8개 지점에서 관측된 기온 값과 기상청 송파 AWS의 기온 값을 하루 중 관측시간(08:30~17:30 LST) 동안 일 평균하여 그 특성을 비교하였다. 또한 도심환경 조건과 도로 노면 살수에 따른 지면 온도와 높이별 기온의 변화 특성을 분석하였다.

도심 환경조건에 따른 기온 변화를 송파구에 위치한 KMA/AWS에서 관측된 기온과 평균값을 비교해 보면, 아스팔트 및 대지에서 0.7~2.3℃ 높았고 버스정류소의 경우 0.9~2.3℃ 높게 나타났다. 또한 공원의 규모와 관계없이 공원에서 기온은 주택밀집지역과 대단위 아파트단지에서 기온 보다 낮게 관측되었다. 모든 집중관측 사례 일에서 지면 온도가 기온(150 cm)보다 높은 지점은 아스팔트와 주택밀집지역이었으며 반면 그늘 쉼터와 석촌호수공원의 경우는 지면 온도가 오히려 기온보다 낮았다. 도로 노면에 살수 직후 노면 온도는 3~4℃ 정도 낮아졌지만, 20분 정도 이후에는 이전 지면 온도로 다시 상승하였다. 기온의 경우에는 살수차 통과 5~10분 이후 30 cm 기온은 0.7℃ 정도 뚜렷하게 하강하는 효과가 나타났지만, 100 cm와 150 cm 높이의 기온은 거의 변화가 없었다.

본 연구에서 서울시 폭염 발생 일에 대한 도심의 다양한 환경 조건과 살수 전후에서 따른 기온과 노면 온도 변화를 분석하였다. 2003년으로 여름철 폭염 집중관측이 08:30~17:30 LST으로 낮 동안에만 수행되어 야간의 기온과 노면 온도 변화 특성을 파악할 수가 없었다. 그리고 동일한 환경 조건이라 하더라도 공간의 넓이, 형태, 밀폐 정도, 주변 건물 등에 영향을 받을 뿐 아니라 폭염 당시의 일사, 운량, 바람, 습도 등 다양한 기상 환경에 의해서도 폭염의 형태가 달라질 수가 있다. 따라서 향후 여름철 도심 폭염 집중관측을 보다 다양한 환경에서 1일 24시간 및 장기간 관측 데이터 수집이 가능한 관측 체계를 구축하여 도시 폭염에 따른 기온 및 노면 온도 변화 특성을 이해하는 연구가 수행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 기상청 스마트시티 기상기후솔루션 서비스 구현 사업 중 ‘스마트시티 실증지역 폭염·한파 상세 기온 관측 및 분석 연구’ 사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Choo, S. H., An, E. J., Kim, H. D., 2021, Comparison of thermal environment between inland and coastal cities in Gyeongbuk during the heat wave of 2018-comparison between Daegu and Pohang-, J. Environ. Sci. Int., 30, 621-628.
- Fischer, E. Knutti, R., 2013, Robust projections of combined humidity and temperature extremes, Nature Climate Change 3, 126-130.
- Hong, S. O., Kim, D. H., Byon, J. Y., Park, H. S., Ha, J. C., 2019, Analysis of the effects of advection and urban fraction on urban heat island intensity using unified model for Seoul metropolitan area, Korea, Atmosphere, 9, 381-390.
- Jung, E. H., Rho, P. H., Kim, H. D., 2016, Managerial plan of extended operation of the clean-road system for the improvement of the urban thermal environment in Daegu, J. Environ. Sci. Int., 25, 1589-1595.
- Kim, B. J., Kim, Y. J., Kim, G. T., Kim, S. J., Shin, Y. S., Kim, H. W., 2018, Characteristics of air and road temperatures change during heatwave days in the summer of 2018, Proceedings of the annual meeting of Korea Meteorological Society, Korea Meteorological Society, Jeju, 93.
- Kim, G. H., Lee, Y. G., Lee, D. G., Kim, B. J., 2016, Analyzing the cooling effect of urban green areas by using the multiple observation network in the Seonjeongneung region of Seoul, Korea, South Korea, J. Environ. Sci. Int., 25, 1475-1484.
- Kim, G. H., Lee, Y. G., Kim, J. H., Choi, H. W., Kim, B. J., 2018, Analysis of the cooling effects in urban green areas using the Landsat 8 satellite data, Kor. J. Remote Sensing, 34, 167-178.
- Kim, J. H., Kim, H. D., 2017, Spatial distribution of air temperature during an extreme heat period in Daegu metropolitan area in 2016, South Korea. J. Environ. Sci. Int, 26, 1023-1029.
- Kim, S. R., Jung, E. H., Kim, H. D., 2015, Observational study to investigate thermal environment and effect of clean- road system over a broad way of Daegu in summer, J. Environ. Sci. Int., 24, 1171-1180.

- Kim, Y. J., Jee, J. B., Kim, G. T., Nam, H. G., Lee, J. S., Kim, B. J., 2020, Diurnal variations of surface and air temperatures on the urban streets in Seoul, Korea: an observational analysis during BBMEX campaign, *Atmosphere*, 11, 60.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2012, <http://www.kma.go.kr>.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2023, <http://www.kma.go.kr>.
- Park, M. S., Byon, J. Y., Kim, B. J., Choi, W., Myung, K. M., Lee, S. H., Cho, T. I., Chae, J. H., Min, J. S., Kang, M., Jee, J. B., Kim, S. H., Cho, C. R., 2020, A Building block urban meteorological observation experiment (BBMEX) campaign in central commercial area in Seoul, *Atmosphere*, 11, 299.
- Park, M. S., Park, S. H., Chae, J. H., Choi, M. H., Song, Y., Kang, M., Rho, J. W., 2017, High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul metropolitan area, South Korea, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 1575-1594.
- WMO (World Meteorological Organization), 2004, Guidelines on quality control procedures for data from automatic weather stations, CIMO/OPAG SURFACE/ET ST&MT-1/DOC, 6.1(2), 10.
-
- CEO. Sung-Joon Na
The East Co., Ltd
na@theeast.co.kr
 - General manager. Researcher. Sang-Dae Han
The East Co., Ltd
hsd@theeast.co.kr
 - Assistant manager. Je-Won Kim
The East Co., Ltd
kjm@theeast.co.kr
 - Professor. Moon-Su Park
Department of Climate and Environment, Sejong University
moonsoo@sejong.ac.kr
 - Senior Research Scientist, Baek-Jo Kim
Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences
swanykim@korea.kr