

## 도시 열섬 강도 분석을 위한 도시데이터 센서와 국가기상관측 간 기온 및 공간해상도 비교 연구

### Comparison of Temperatures and Spatial Resolutions between Urban Sensors and National Weather Observations (ASOS, AWS) for Urban Heat Island Intensity Analysis

박해경\*

Park, Haekyung\*

#### Abstract

Urban temperatures have become more important because the frequency and intensity of heatwaves will increase with the worsening urban heat island effects due to climate change. Recently, urban sensors are emerging as a new means of heat island analysis, and urban sensor data including temperatures were opened to the public in Seoul in 2020. However, there are insufficient cases of analysis and the differences from national weather observation are unknown. Accordingly, this study introduces the S·DoT (Smart Seoul Data of Things), an urban sensor in Seoul, and compared S·DoT temperatures with national weather observation (such as ASOS and AWS) temperature in order to facilitate heat island analysis using urban sensors. The result shows the S·DoT temperature is about 1-1.15 °C higher than ASOS·AWS during May to August 2020, which is due to differences in the height and installation environment, not in the performance of the equipment. S·DoT is installed in the urban environments at the height of approximately 3 m and measures the actual living temperature, whereas ASOS measures temperature in the controlled environment and AWS measures temperature from the higher position due to being installed on the top of a building. Therefore, we suggest that when using S·DoT together with rural AWS temperature to analyze the intensity of heat islands, calibration should be considered taking into account the difference between the two observations, and a better method is to calculate the heat island intensity only using S·DoT temperature in urbanized and non-urbanized areas without using rural temperature.

**Key words** : Urban Sensor, Urban Heat Island, Temperature, Sdot, AWS

#### 요 지

도시 기온은 점점 중요해 지고 있다. 기후변화로 인하여 폭염 빈도와 강도는 증가하고 도시 열섬효과는 도시열을 더욱 악화시켜 점차 더 큰 위험이 될 것이기 때문이다. 최근에는 도시 센서가 열섬분석을 위한 새로운 수단으로 떠오르고 있는데 우리나라에서도 서울시가 2020년부터 도시 센서자료를 공공에 배포하기 시작했다. 그러나 아직 활용 사례가 많지 않고 가장 공신력있는 기상자료인 국가기상관측 기온과의 차이에 대해서도 아직 알려진 바가 없다. 이에 본 연구에서는 서울시 도시 센서인 S·DoT (Smart Seoul Data of Things)을 소개하고 국가기상관측 기온과 비교함으로써 도시 센서 기온 자료로 열섬 분석 시 고려해야 할 사항에 대해 고찰하였다. 분석 결과에 의하면 S·DoT 기온은 국가기상관측(ASOS, AWS) 기온 대비 5월과 8월 기준 약 1~1.15 °C 더 높았는데 이는 관측장비의 성능 차이가 아닌 설치 주변환경과 높이 차이에 의한 것으로 추정된다. 이는 ASOS 설치환경이 전국 동일하게 표준화 되어 있고 AWS는 건물 옥상에 설치되어 높은 위치에서 기온을 측정하는 반면, S·DoT는 지상 3 m 내외에 설치되어 실제 도시환경 속 생활기온을 측정하기 때문이다. 따라서 도시 센서인 S·DoT 기온과 서울 외곽 지역 AWS 기온차를 이용해 지역 간 열섬 강도를 분석할 때에는 두 관측 간 편차를 고려해 보정을 시행해야 하며, 더 나은 방법으로는 S·DoT 기온만 이용하여 서울 내 비도시화 지역과 도시화 지역의 기온차로 나타내는 지역 내 열섬 강도를 분석하는 것을 제안한다.

**핵심용어** : 도시 센서, 열섬, 기온, Sdot, AWS

\*교신저자, 정회원, 서울연구원 도시정보실 초빙연구원(Tel: +82-2-880-4885, Fax: +82-2-875-2276, E-mail: mariels@daum.net)  
Corresponding Author, Member, Ph.D. in Engineering, Department of Urban Data and Information, Seoul Institute

## 1. 서론

도시의 기온은 점점 중요해 지고 있다. 기후변화로 인하여 폭염의 빈도와 강도는 증가하고 도시 열섬효과는 이러한 현상을 더욱 악화시키므로 도시민의 건강에 위협이 될 것이기 때문이다(Tan et al., 2010). 또한 전 세계 인구의 반 이상(55%)이 도시에 거주하고 있고(2018년 기준) 2050년에는 65%가 될 것으로 추정되어(Departemen of Economic and Social Affairs United Nation, 2018) 앞으로는 점점 더 많은 사람들이 열재해(熱災) 위험에 노출될 것으로 전망된다. 이러한 이유로 지금까지 다양한 방법들과 자료들로 도시 열섬이 분석되어 왔다.

열섬 분석을 위한 기온자료 취득 방법은 3가지로 위성영상으로 기온을 추정하는 방법, 개인 이동수단으로 측정하는 방법, 그리고 고정된 기상관측장비 자료를 이용하는 방법이 있는데(Sun et al., 2019) 이 중 가장 보편적인 방법은 위성영상을 사용하는 것이다(Jin, 2012; Kim and An, 2017). 그러나 위성영상으로부터 기온자료를 취득하는 방법에는 두 가지 문제점이 있다. 첫째는 인공위성의 공전주기 및 구름으로 인해 자료 취득이 어렵다는 점이다. 도시 스케일의 분석에 적합한 중간 해상도급인 Landsat은 공전주기가 16일(U.S. Geological Survey, 2018)이기 때문에 자료의 연속성이 낮고 열섬 분석이 중요한 시기인 여름에 운량 비율이 높아(장마의 영향) 사용이 불가한 경우가 많기 때문이다. 둘째는 측정값이 아닌 지표 복사에너지를 이용한 추정값이기때문에 실제 기온과 다소 차이가 있다는 점이다(Kim and An, 2017).

이러한 제약사항에도 불구하고 여전히 열섬 분석에 위성영상이 가장 보편적으로 이용되는 것은 AWS와 같은 기상관측장비 기온자료는 공간보간(spatial interpolation) 시 두 지점간 거리가 멀어 추정된 사잇값들이 실제 기온과 크게 다를 수 있기 때문이다(Kim and An, 2017). 또한 이동수단으로 직접 기온자료를 취득하는 경우에는 넓은 지역에 대한 자료 구축이 어려워 도시 전체의 경향성을 파악할 수 없는 단점이 있다.

최근에는 이러한 기존의 기온자료 이외에 도시 센서(Urban sensor)로 측정한 기온을 이용한 열섬 분석이 새롭게 시도되고 있다. 도시 센서는 기존의 기온 자료 구축 방법의 한계를 최소화한 것임에도 불구하고 활용 사례가 적은 것은 이를 도입한 도시가 아직 많지 않기 때문이다. 도시 센서를 이용한 열섬 분석에 대하여 Smoliak et al. (2015)은 고밀도의 센서에 의한 열섬 분석은 열섬 완화를 위한 노력의 구현과 평가에 매우 유용하다고 하였으며, Muller et al. (2013)은 이질적이고 다양한 특징을 가지는 도시의 문제를 해결하기 위해 고밀도의 도시 센서가 필요하다고 하였다. 도시 센서를 이용한 열섬 분석으로는 2015년 Smoliak et al. (2015)와 Schatz and Kucharik (2015)의 연구 등이 있다.

우리나라에서는 서울시가 최초로 도시 센서를 설치해

(2019년 12월) 기온을 포함한 10가지 측정 자료를 공공에 배포하고 있다. 그러나 설치·운영 기간이 짧아 이를 활용한 연구가 거의 없고 우리나라 국가기상관측 시스템인 AWS (Automatic Weather System)나 ASOS (Automated Synoptic Observing System) 기온과의 차이에 대해서도 아직 확인된 바가 없다.

이에 본 연구에서는 도시 센서를 이용한 열섬 연구의 기반을 마련하고자 서울시 도시 센서를 소개하고 도시센서 기온과 국가기상관측(ASOS, AWS) 기온과의 차이를 분석하고 원인을 고찰함으로써 도시 센서 기온자료로 도시 열섬 분석시 고려해야할 사항을 제안하는 것을 목적으로 하였다. 이 연구의 참신성은 처음으로 도시센서와 국가기상관측 간 기온의 차이점을 밝히고 두 기온의 관측밀도에 따른 정보력의 차이를 공간해상도 비교를 통해 규명하였다는 점이다.

연구 목적의 달성을 위한 본 연구의 순서는 다음과 같다. 먼저 서울시 도시 센서를 소개하고 이것과 비교 분석할 서울시 소재 ASOS와 AWS를 각각 선정하였다. 그 다음 도시 센서 기온 자료가 안정적으로 배포되기 시작했던 2020년 5월부터 하절기까지 일평균 기온이 최저·최고였던 날을 기준으로 도시센서-국가기상관측지점(ASOS, AWS) 간 기온차이를 분석하였다. 마지막으로 2020년 폭염이 있던 날의 도시 센서와 국가기상관측망 기온을 각각 이용하여 열섬 강도를 추정하고 이를 이용해 열섬 지도를 작성하여 도시 열섬의 공간분포 재현 수준을 비교하였다.

## 2. 서울시 도시데이터 센서

### 2.1 개요

서울시 도시 센서의 정식 명칭은 ‘스마트서울 도시데이터 센서’이며 약칭은 S·DoT (Smart Seoul Data of Things)으로 ‘데이터 점들이 모여 스마트 서울이 된다’는 의미를 가지고 있다. S·DoT은 도시 현상이나 시민 행동에 대한 원천데이터를 수집, 제공, 유통을 목적으로 설치되었고 도시방재, 과학적 행정을 통한 스마트시티 구현을 최종 목표로 하고 있다(Seoul Smart City Project, 2019). S·DoT은 Fig. 1과 같이 서울시 전역에 850개가 설치되어 있으며 서울시 소재 국가기상관측(28개) 대비 약 30배 수준이다.

### 2.2 측정항목 및 데이터 특징

850개 S·DoT은 2분마다 9개 환경정보(미세먼지, 온도, 습도, 조도, 자외선, 소음, 진동, 풍향, 풍속)와 10분마다 유동인구를 측정, 총 10개 항목에 대해 모니터링을 하고 있으며(Table 1) 주로 전기공급 및 유지관리가 용이한 CCTV 지주나 주민센터에 설치되어 있다. 850개 중 448개는 행정동에 균등설치되어 있고 나머지 402개는 미세먼지 측정, 바람길 분석 등 다양한 목적에 따라 필요 지역에 설치되어 있다.

S·DoT 데이터는 csv, json, Open API 형태로 서울시

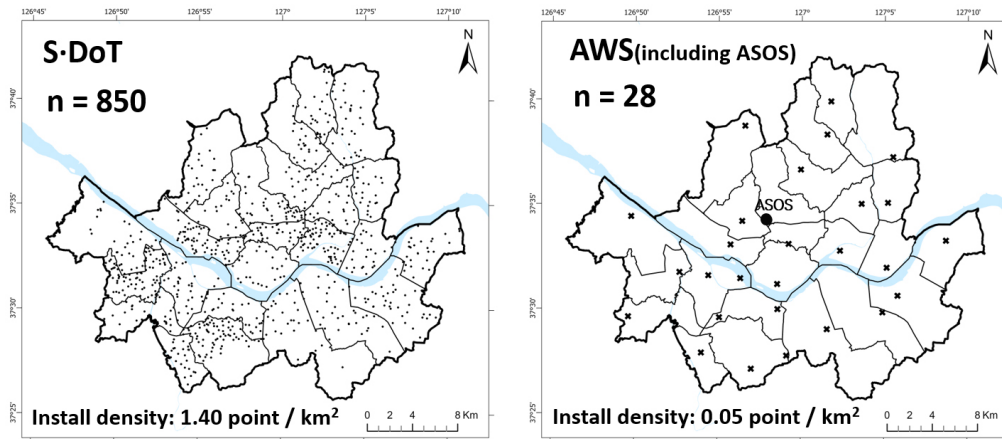


Fig. 1. Comparison Installation Density between S · DoT and National Observation Weather System in Seoul

Table 1. S · DoT Sensor Type, Measurement Target, Cycle and Total Count

Item	Sensor type	Target	Cycle	Total
Environmental information	Basic (8)	Fine dust ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Ultra-fine dust ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), Relative humidity (%), Illumination (lux), Ultra-violet (UVI), Noise (dB), vibration (g)	2 minutes	850
	Specialized (2)	globe thermometer ( $^{\circ}\text{C}$ )		30
		Wind direction ( $^{\circ}$ ), Wind speed (m/s)		12
Visitor	Specialized (1)	Visitor count (within 150 m)	10 minutes	50

열린 데이터광장(<http://data.seoul.go.kr>)에서 제공되고 있으며 데이터 시작 시점은 2020년 4월 1일부터이다. 환경측정 데이터는 원자료가 아닌 산술평균한 60분 자료를 제공중이며, 관계기관 사용자에게 한하여 서울시 IoT 도시데이터 플랫폼(<https://iothub.eseoul.go.kr>)에서 2분, 10분, 60분, 일단위 자료를 제공한다(2020년 12월 기준).

S · DoT 기온은 Table 1과 같이 850개 기본 센서에서 측정된 것과 30개 특화 센서에서 측정된 흑구 온도가 있는데, 본 연구에서는 기본 센서 기온자료를 이용하였다.

### 3. 연구 방법

#### 3.1 기온비교를 위한 측정 지점 및 날짜 선정

2020년 기준 기상청에서 운영 중인 서울 소재 28개 자동기상관측 지점 중 서울(108) 지점은 ASOS로 구분되는 서울에 단 1개 존재하는 중관기상관측지점으로 이 지점에서 측정된 기온이 서울의 대표기온이 되며 전국의 다른 ASOS과 동일한 표준화된 환경에서 기온을 측정한다. 나머지 27개는 AWS이며 주로 빌딩 옥상에 설치되어 국지적인 기상현상을 파악하는 방재기상관측망이다. 이와 같이 국가기상관측망 간에도 설치 목적에 따라 주변환경이 다소 다르기 때문에 ASOS와 AWS를 모두 포함하여 비교하였다. 다만 AWS는 총 27개가 존재하므로 선정 기준을 통해 최종 선정된 1개 지점에 대해서만

분석을 시행하였다. 선정 기준은 700 m 버퍼존(Buffer zone) 이내에 S · DoT이 충분히(최소 5개 이상) 존재하는 AWS 중 서울(108)지점과 가장 가까운 곳을 선택하였으며 중랑(409) 지점이 이에 충족되어 최종 선정되었다(Fig. 2).

전체 S · DoT 중 비교 분석에 사용될 것들은 분석 대상이 되는 ASOS와 AWS 700 m 각각의 버퍼에 속한 모든 S · DoT 들이며(Fig. 2), 이에 대한 위치와 설치 환경에 대한 정보는 Table 2와 같다. Fig. 2와 Table 2에 기재된 S · DoT의 ID는 분석을 위해 부여한 것으로 ASOS와 AWS로부터 각각 가까운 순으로 명명하였다.

기온 비교를 위한 날짜 선정은 서울 대표기온 기준 5~8월 사이 최저 · 최고 일평균 기온을 기록한 날로 하였으며 이에 해당하는 날짜는 2020년 5월 19일(일평균기온 13  $^{\circ}\text{C}$ )과 8월 26일(일평균기온 30.2  $^{\circ}\text{C}$ )이었다. 참고로 8월 26일은 일최고 기온 33  $^{\circ}\text{C}$  이상으로 폭염 기준에 부합하는 날이기도 하다. 열섬분석이 궁극적으로 열재해 방재를 위한 연구임을 감안할 때 가을 · 겨울은 연구의 범위를 벗어나므로, 본 연구에서는 여름을 충분히 포함하는 5월과 8월로 분석기간을 한정하였다. 또한 일평균 기온 최저 · 최고의 날을 모두 분석한 것은 하절기 내에서도 기온이 높은날과 낮은 날 간의 편차까지도 확인하기 위함이다. 분석을 위한 측정지점의 위치정보 및 기온자료의 취득은 S · DoT의 경우 IoT 도시데이터 플랫폼에서, 국가기상관측망(ASOS, AWS)은 기상자

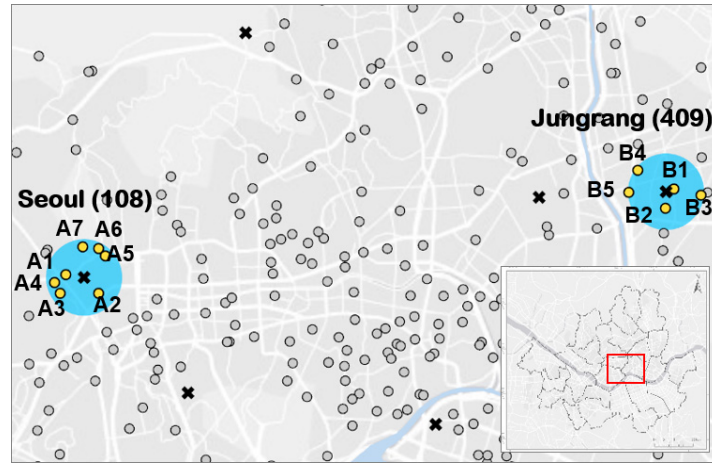


Fig. 2. Location of ASOS, AWS and S · DoTs

Table 2. S-DoT Information of Installation and Distance to Each ASOS and AWS

Near	ID	Distance (m)	Serial	Longitude	Latitude	Installation Environment	Height (m)
Seoul (108) ASOS	A1	342	V02Q1940695	126.9619818	37.57192	On the Equipment at the Community Center	3.3
	A2	394	V02Q1940808	126.9687649	37.56875	CCTV pole at the museum entrance	4.0
	A3	523	V02Q1940551	126.9608834	37.56877	CCTV pole near the building	3.2
	A4	549	V02Q1940592	126.9596730	37.57056	CCTV pole near the daycare center	3.7
	A5	559	V02Q1940499	126.9702723	37.57496	CCTV pole near the apartment	3.7
	A6	562	V02Q1940883	126.9655363	37.57646	Stair at the senior community center	1.2
	A7	594	V02Q1940649	126.9688622	37.57617	Community Center Entrance Wall	2.7
Jungrang (409) AWS	B1	150	V02Q1940225	127.0883832	37.58598	CCTV pole the building	3.9
	B2	304	V02Q1940255	127.0867010	37.58277	CCTV pole near the mart	3.8
	B3	642	V02Q1940882	127.0940258	37.58490	Rooftop of Family Support Center	1.0
	B4	654	V02Q1940250	127.0808924	37.58905	CCTV pole near the mart	3.8
	B5	687	V02Q1940191	127.0790205	37.58541	CCTV pole the building	3.8

료개방포털(Open MET Data Portal, 2015)에서 직접 다운로드하였다(<https://data.kma.go.kr>).

### 3.2 열섬강도 및 공간해상도 비교

도시 열섬에 대한 정의는 방법과 대상에 따라 차이가 있지만 공통적으로는 도시와 비도시 사이의 기온차이를 주요하게 다룬다(Kim and An, 2017). 본 연구에서는 도시 외곽지역의 평균기온을 비교 대상으로 하는 ‘지역 간 열섬 강도’와, 비교 대상을 도시 내 비도시화 지역의 평균기온으로 하는 ‘지역 내 열섬 강도’에 대해서 S · DoT과 국가기상관측망 기온을 이용하여 각각 계산하였으며 열섬 강도는 Urban Heat Island Intensity의 약자인 UHII로 표시하였다.

다만 지역 간 UHII분석을 위해서는 S · DoT UHII과 AWS UHII 모두 공통적으로 AWS 11개 지점(파주금촌, 의정부, 고양, 남양주, 경기광주, 시흥, 구리, 성남, 능곡, 과천, 광릉)들의 평균기온을 사용하였다. 왜냐하면 S · DoT은 서울에만

설치되어 서울 외곽에 대한 자료가 없기 때문이다. 그리고 지역 내 UHII를 분석하기 위한 비 도시화 지역의 평균기온은 환경공간정보(EGIS, 2018)에서 제공하는 토지피복도 중 시가화/건조지역에 해당하지 않는 지역에 속한 S · DoT들의 기온을 평균한 값이다.

UHII는 열재해와 관련이 없는 2020년 5월 19일은 제외하고, 폭염이 있었던 8월 26일에 대해서만 계산하였으며, UHII에 대한 계산식은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$UHII = T_x - T_{mean} \quad (1)$$

Eq. (1)에서  $T_x$ 는 해당 센서의 기온 관측값이고  $T_{mean}$ 은 지역 간 UHII의 경우 교외 지역 평균기온이며, 지역 내 UHII의 경우 도시 내 비도시화 지역의 평균 기온이다.

이와 같이 850개의 S · DoT과 28개의 AWS (1개의 ASOS 포함)의 모든 관측지점에 대해 계산된 UHII를 공간보간법을

이용해 지점 간 UHII를 추정함으로써 열섬 강도 지도(UHII map)를 작성하였다. 각각의 관측자료로 작성된 UHII map의 비교를 통해 관측 지점 밀도차에 의한 공간해상도(Spatial resolution)와 이로 인한 도시 열섬에 대한 정보력의 차이를 확인하였다.

공간보간은 기상 공간보간에 가장 적합한 크리깅(Kriging) 기법을 이용하였고(Anderson, 2002), 특히 AWS의 UHII 경우에는 측정 지점 개수가 적은 경우에 보다 자연스러운 지도작성이 가능한 코크리깅(co-kriging) 기법으로 공간보간하였다.

다. 분석을 위한 격자의 크기는 90 m × 90 m로 하였으며 작성된 UHII map은 각각에 대해 등간격 단계구분도(10단계)로 작성하여 열섬 강도의 분포 패턴을 비교하였다.

## 4. 분석 결과

### 4.1 S · DoT-ASOS, S · DoT-AWS 기온 비교

Fig. 3은 2개의 국가기상관측지점(ASOS, AWS)과 주변 S · DoT들에 대한 24시간의 기온을 비교 관찰한 것으로

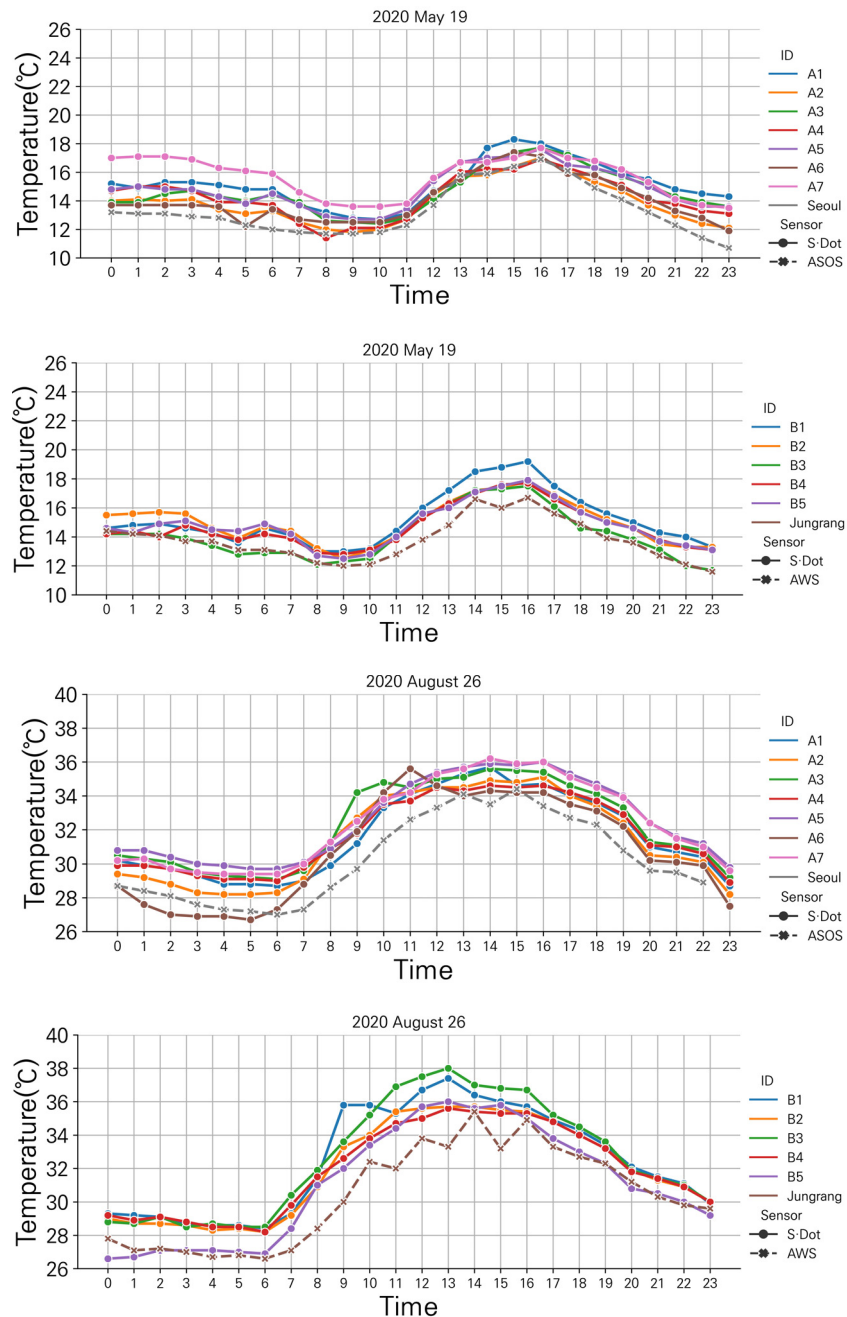


Fig. 3. Comparison of Temperature Between National Observation Weather system (ASOS · AWS) and S · DoTs

S·DoT 기온은 국가기상관측 기온보다 일평균 기온 기준 1~1.5 °C가량 높았다. 시간대별로 보면 기온이 낮은 야간 시간대(19-6시) 보다 상대적으로 기온이 더 높은 주간시간대(7-18시)에 기온 편차가 더 컸다.

이와 같은 맥락으로 S·DoT과 국가기상관측지점 간 편차는 일평균기온이 낮은 날 보다 높은 날 더 컸다. 이러한 사실은 2개의 국가기상관측지점과 각각의 인접 S·DoT 기온들에 대한 기초통계량을 통해서도 알 수 있었는데(Table 3), 일평균기온 최저일에는 S·DoT이 평균 1.15 °C, 8월 26일에는 S·DoT이 평균 1.55 °C 국가기상관측 기온보다 더 높았다. 이러한 기온 편차는 S·DoT 센서간에서도 확인할 수 있었는데 5월 19일보다 폭염이 있던 8월 26일에 센서들 간에서도 기온 편차가 더 컸다.

서울(108) ASOS 그리고 중랑(409) AWS와 가장 유사한 기온을 나타낸 S·DoT은 5월 19일의 경우 각각 A2, B3였고, 8월 26일의 경우 각각 A6, B5였다. 즉, 국가기상관측지점과 가장 유사한 기온을 나타낸 S·DoT은 ASOS 및 AWS와 가장 가까운 지점은 아니었다.

#### 4.2 S·DoT UHII와 AWS UHII map 비교

Table 4는 폭염이 있었던 2020년 8월 26일의 UHII에 대한 기초통계량으로 UHII 산정 시 비교가 되는 기준( $T_{mean}$ )을 지역 내 비도시화 지역(Non-urban area)의 평균기온으로 한 지역 내 UHII와 교외지역(rural)의 AWS 평균기온으로 한 지역 간 UHII에 대해 S·DoT과 AWS를 각각 이용하여 계산한 후 통계적으로 비교한 것이다. Table 4를 보면 S·DoT 기온과 교외지역의 차로 계산된 UHII가 다소 과대추정되는 경향이 있었다.

Fig. 4는 850개 S·DoT에 대해 계산된 UHII와 28개(1개 ASOS 포함) AWS의 UHII를 각각 공간보간하여 만든 지역 내 UHII map이다. 지역 간 UHII map은 지역 내 UHII map과 공간패턴은 동일하고 최대 최소값만 변경되므로 따로 제시하지 않았다. Fig. 4를 보면 S·DoT UHII map은 AWS UHII map보다 고해상도로 구현되어 Fig. 4에 점선으로 표시된 지역과 같이 AWS 자료로는 알 수 없던 열섬 우심지역에 대한 위치정보를 취득할 수 있었다. 또한 AWS UHII map은 관측 지점의 넓은 간극으로 인하여 서울의 지역적 기온

**Table 3.** Temperature Statistics of Seoul (108) ASOS, Jungrang (409) AWS, and nearby S·DoTs (unit: °C)

Date	Basic statistics	S·DoT (A1-A7)	ASOS Seoul (108)	S·DoT (B1-B5)	AWS Jungrang (409)
2020. 5.19.	Mean	14.6	13.3	14.8	13.8
	SD.	1.6	1.8	1.6	1.4
	Min.	11.4	10.7	11.7	11.6
	25%	13.6	12.0	13.6	12.8
	50%	14.5	13.0	14.5	13.7
	75%	15.9	14.3	15.7	14.5
	Max.	18.3	16.9	19.2	16.7
2020. 8.26.	Mean	31.8	30.3	32.0	30.4
	SD.	2.6	2.5	3.1	2.9
	Min.	26.7	27.0	26.6	26.6
	25%	29.7	28.3	29.1	27.2
	50%	31.2	29.6	31.7	30.2
	75%	34.2	32.7	35.1	32.8
	Max.	36.2	34.4	38.0	35.4

**Table 4.** S·Dot and AWS UHII Using the Temperature of the Internal (Non-Urban Area) and External (Rural) City (unit: °C)

Data	S·DoT UHII		AWS UHII	
	Non-urban area	rural	Non-urban area	rural
$T_{mean}$				
Mean	0.10	2.71	0.53	0.96
SD.	0.41	0.41	0.51	0.51
Min.	-1.04	1.58	-0.95	-0.53
Max.	1.09	3.71	1.85	2.27

차이의 대략적 추세만 보여주는 반면, S·DoT UHII map은 국지적인 기온 차이를 비교적 상세하게 나타내주었다. 특히 AWS UHII map에서는 종로구, 마포구, 구로구 일대의 UHII가 낮게 나타났으나, S·DoT UHII map에서는 높은 측정 밀도로 인해 실제적으로는 이 지역의 UHII가 높다는 점을 알 수 있었다.

S·DoT과 AWS UHII map에 대해 각 셀별로(cell by cell) 두 도면 간 상관분석(correlation)을 수행하였더니 상관계수는 0.57로 나타났다(Fig. 5).

## 5. 토 의

### 5.1 S·DoT과 국가기상관측 간 기온차 원인에 대한 고찰

기온은 미세먼지처럼 기기에 따라 측정값이 상이하지 않게 비교적 안정적으로 수집되는 자료 중 하나이다. 그럼에도 불구하고 S·DoT 기온은 5~8월 기준 국가기상관측보다 약 1~1.15 °C 높게 나타났다. 본 연구에서는 이와 같은 차이의 원인을 크게 두 가지로 보고 있는데 첫번째 원인은 S·DoT과 국가기상관측망의 설치 환경에 의한 차이 때문인 것으로 추정하고 있다. Fig. 6과 같이 ASOS는 잔디가 있는 전국 동일한 표준화된 환경에서 동시에 기온을 관측하고, AWS 역시 주변이 통제되어 인적이 드문 빌딩 옥상에 설치된 반면, S·DoT은 주로 도로의 CCTV 지주에 설치되어 인접

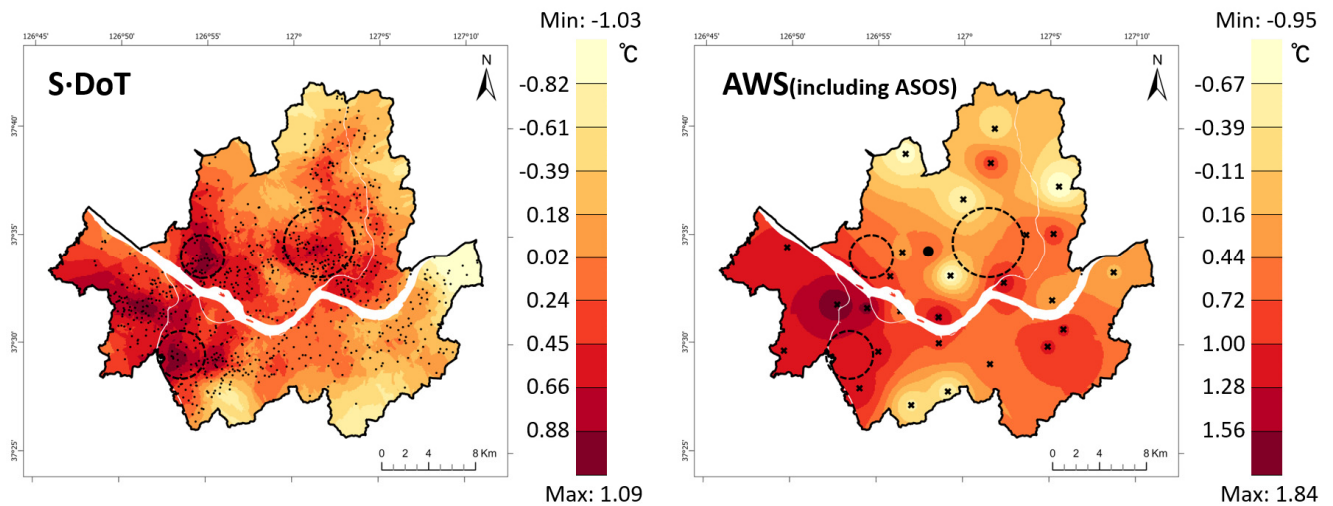


Fig. 4. S·DoT UHII and AWS UHII Map

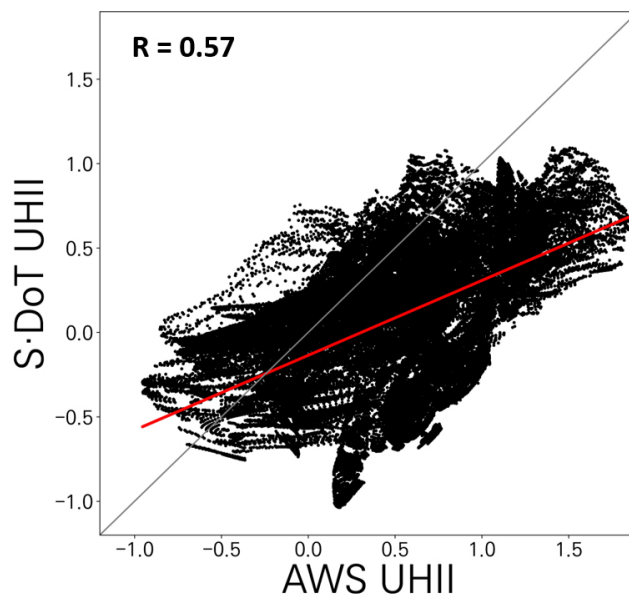


Fig. 5. Correlation between S·Dot and AWS UHII Map

건물, 도로, 에어컨 실외기와 같은 도시 환경의 영향권에서 기온을 측정한다. 두번째 원인은 기온 관측지점의 높이 차이 때문인 것으로 생각된다. S·DoT는 대개 3 m 내외에 설치되어 있지만 건물 옥상에 설치된 AWS는 층고과 층수를 최소로 하는 3층짜리 건물에 설치 되어있다 가정하더라도 설치 높이의 차이는 최소 2배 이상이 된다.

본 연구에서는 측정 기기의 주변 환경과 높이에 따른 측정 기온의 차이를 확인하기 위하여 Fig. 7과 같이 토지이용에 따른 기온 변화(Fig. 7(a))와 고도에 따른 기온 변화(Fig. 7(b))를 추가로 분석하였다. 이 추가 분석은 다른 기상활동의

개입을 최대한 배제하고 토지이용-기온, 고도-기온과의 관계를 살펴보기 위하여 평균기온이 30 °C 이상이면서 바람과 구름이 적은 비교적 맑은 날(2020년 8월 18일)의 기온을 이용하였다. Fig. 7(a)는 S·DoT의 속성정보를 이용하여 S·DoT이 설치된 곳에 대하여 토지이용별로 평균낸 기온을 시간대별로 나타낸 것이다. Fig. 7(a) 그래프를 보면 도시요소나 사람이 많은 상업공간의 기온이 가장 높았고 공원이나 광장 등의 개방공간이나 산지공간에서는 기온이 상대적으로 낮았다. 즉 센서가 설치된 곳의 토지이용에 따라 기온의 차이가 발생하였다. 추가분석 이외에도 이러한 생각을 뒷받

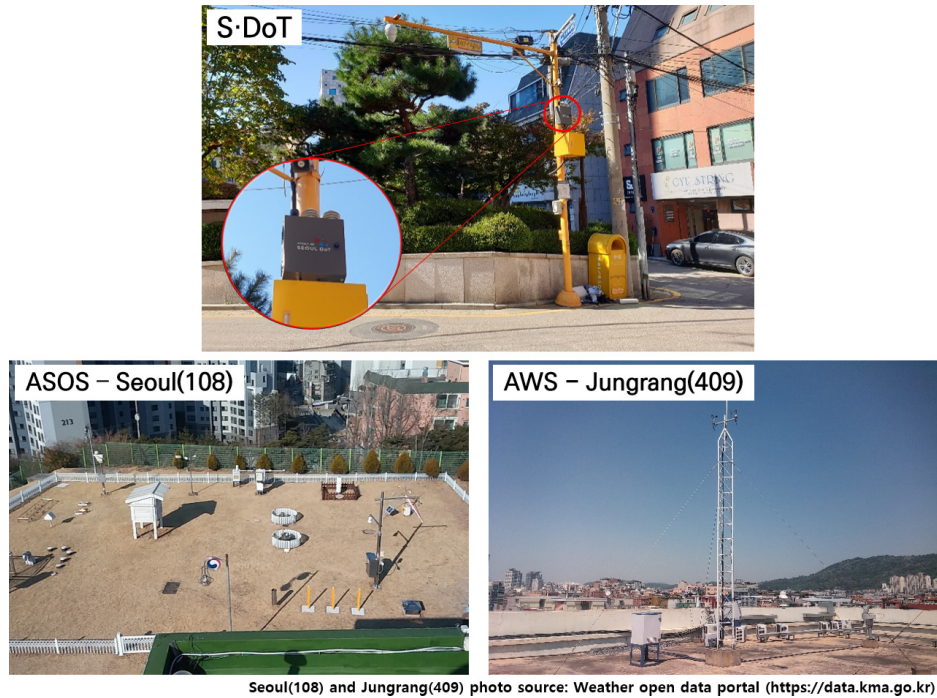
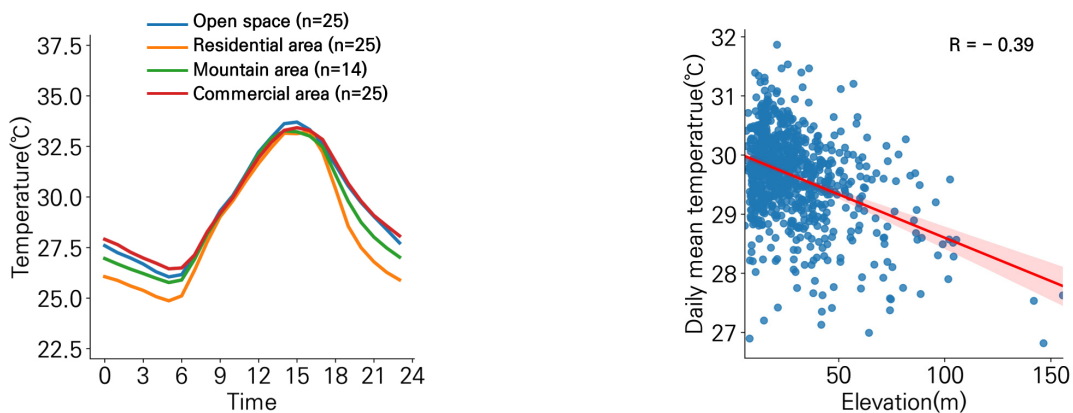


Fig. 6. Comparison of Installation Environment between S·DoT, ASOS and AWS



(a) 24 Hours Temperature Fluctuation Depends on Landuse Types

(b) Correlation between Elevation and Temperature

Fig. 7. Differences in Observed Temperature by Installation Environment and Height



침 할 수 있는 연구가 있었는데, Kumari et al. (2020)은 건물의 냉방과 같은 에너지 소비가 해당 지역의 기온을 상승시키는데 큰 역할을 한다고 언급하고 있다.

특히 Fig. 7(a)를 보면 토지이용별 기온의 차이는 주간보다 야간에 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 기온이 낮은 날 보다 높은 날에 국가기상관측지점(ASOS, AWS)과 S·DoT의 기온 편차가 더 컸던 것, 그리고 기온이 높은 날엔 S·DoT 센서간에도 기온 편차가 더 크게 발생했던 것에 대한 설명이 된다. 종합정리하면, 토지이용별로 기온차가 발생하는데 기온이 높은 날에는 이러한 현상이 더욱 심화되므로, S·DoT과 국가기상관측 기온간 편차는 설치 환경의 차이에 의한 것이며 이 차이는 더욱수록 더 크게 발생할 수 있다는 것이다.

Fig. 7(b)는 서울시 수치고도자료를 이용해 전체 S·DoT의 설치 고도와 기온과의 관계를 산점도로 나타낸 것으로, 센서의 설치 고도는 기온과 부(-)의 상관관계에 있어 수십미터의 건물 옥상에 설치된 AWS가 S·DoT보다 기온이 낮게 측정되는 것은 이러한 이치로 설명이 된다.

## 5.2 S·DoT과 AWS 공간해상도에 대한 고찰

S·DoT 기온자료의 가장 큰 장점은 높은 관측 밀도이다 (Fig. 1). S·DoT과 국가기상관측 기온 간 편차 문제를 논의로 하더라도, S·DoT의 고해상도 기온 자료의 장점은 분명한 사실이다. S·DoT은 참조 모델이 되었던 미국 시카고의 도시 센서인 AoT(Array of Things, 2016)보다도 설치 개수가 약 5배(AoT는 150개임) 많은 수준으로 2020년 기준 현존하는 도시 센서 중 가장 관측 밀도가 높다. 이러한 장점은 고밀도 도시 공간에서 발생하는 세밀한 차이를 감지할 수 있게 해준다. 따라서 S·DoT 자료를 이용하면 서울 도심이 교외지역 보다 기온이 높다는 이미 잘 알려진 사실에서 더 나아가, 같은 서울 내에서도 열재해가 더 심각한 국지 지역에 대한 파악이 가능해진다. 이것은 연구 결과인 Fig. 4를 통해서도 확인할 수 있는데 특별한 기술이 없이 단지 고해상도 자료를 이용하는 것만으로도 폭염 날 종료(종로구)와 홍대(마포구), 구로 디지털단지(구로구) 일대가 타 지역보다 상대적으로 기온이 높다는 새로운 사실을 알 수 있었고 이것은 기존의 AWS 기온 자료로는 식별 불가능했다. 따라서 도시방재를 위한 열섬 분석 시 고해상도의 S·DoT을 이용하면 도시계획적으로 도시의 열재해 개선을 위한 도보 및 생활환경의 개선이 요구되는 상세지역을 파악하고 이를 위한 구체적인 정책을 수립하는데에도 유용할 것으로 판단 된다.

## 5.3 열섬 분석을 위한 S·DoT 기온 사용에 대한 제언

EPA (United States Environmental Protection Agency)에서는 열섬을 평가함에 있어 가장 중요한 것은 지상에서 빌딩 사이의 측정 기온을 사용하는 것이라고 언급하고 있다

(EPA, 2019). 따라서 도시 열섬 분석은 지상 가장 가까이에서 실제 체감기온과 더 가까운 생활기온을 측정하는 S·DoT 자료를 사용할 때에 더 효과적일 수 있다. 이러한 맥락에서 서울(108) ASOS에서 관측되어 기상청에서 발표하는 서울의 대표기온보다 실제로 사람들은 더 높은 기온환경 속에서 생활하고 있다고도 할 수 있다.

다만 국가기상관측 기온은 표준화된 환경속에서 기온을 측정함으로써 지역 간 기온 차이를 확인하기 위해 설치된, 자료의 관리와 검증을 통해 공신력있는 자료로 수십년간 누적된 자료를 통해 과거부터 현재까지의 기온 변화에 대한 분석이 가능한 반면, S·DoT은 도시 현상의 변화를 감지하기 위한 목적으로 생활환경에 설치되어 고해상도의 자료를 제공하고는 있지만 검증이나 보완없이 단순 수집되어 저장되는 자료이므로 연구자가 스스로 판단하여 이상치와 결측치를 제거하고 사용해야 하는 단점이 있다. 또한 자료 축적 기간이 짧아 활용할 수 있는 분석에 제약이 많다는 점도 S·DoT 기온자료의 한계라고 할 수 있다. 이와 같이 두 관측 간 설치 환경과 관측 목적 그리고 자료의 장단점이 이 각기 다르기 때문에 열섬 분석 시 어느 자료를 사용하는 것이 옳은지 단언할 수는 없다. 다만 S·DoT 기온 자료를 이용하여 열섬을 분석하고 해석하기 위해서는 두 자료의 차이점을 분명하게 숙지해야 하며, 본 연구에서 분석한 결과를 토대로 S·DoT을 이용하여 열섬 분석 시 고려사항에 대해 제안하는 바는 다음과 같다.

도시 센서인 S·DoT 기온과 서울 외곽 지역 AWS 기온차를 이용해 지역 간 UHI를 분석하는 경우에는 1~1.5 °C에 해당하는 두 관측 간 편차를 고려해 보정을 시행해야 하며, 더 나은 방법은 S·DoT 기온만 단독으로 이용하여 지역 내 UHI를 분석하는 것이다. 그래야만 Table 4처럼 국가기상관측과의 기온 차이로 인하여 과대 추정된 도시 간 UHI와 같은 오류를 방지할 수 있다.

본 연구의 한계점은 2020년 봄·여름 자료만을 이용해 분석했기 때문에 동절기의 S·DoT과 국가기상관측 간 기온차는 알 수 없으며 1년 이상의 자료로 분석할 경우 결과는 다소 상이할 수 있다는 점이다. 따라서 향후 S·DoT 데이터의 축적에 따라 다년간의 기온 비교를 통한 후속 연구가 필요하다. 그러나 본 연구의 목적이 도시방재를 위한 여름철 열재해 분석 자료로써 새롭게 사용될 도시센서 측정 기온이 기존의 국가기상관측 기온과 어떤 차이가 있는지를 확인하는 것이므로, 기온이 낮은 동절기에 대한 비교는 사실상 본 연구의 고려 대상이 아니다. 따라서 본 연구의 결과는 향후 도시 센서를 이용해 도시 열재해 및 열섬 분석을 하고자 하는 연구자들에게 충분한 지침이 될 것으로 생각된다.

## 6. 결론

본 연구의 결과에 의하면 도시 센서인 S·DoT은 국가기상

관측 기온보다 5-8월 사이 약 1~1.5 °C 높게 관측되는 특징이 있었는데 이는 관측 주변 환경과 설치 높이의 차이에 의한 것으로, S·DoT은 생활환경에 가까이 설치되어 주변 건물 및 도로와 같은 도시 환경의 직접적인 영향권에서 기온을 측정하는 반면 국가기상관측은 ASOS와 같이 표준화되고 통제된 환경이나 AWS 같이 건물 옥상과 같이 높은 곳에 설치되어 S·DoT보다 다소 낮게 기온이 관측되는 것으로 판단된다. 또한 S·DoT 기온자료는 고해상도의 관측밀도를 가지고 있어 공간보간하는 경우 국가기상관측에 비하여 더 많은 정보를 얻을 수 있었다. 본 연구 결과는 S·DoT 기온 자료를 이용해 열섬 강도 분석 시 결과의 해석이나 혹은 AWS 기온 자료와 함께 사용할 수 있는지에 대해 중요한 판단의 근거가 될 수 있다.

향후 S·DoT 기온자료가 더 많은 기간 누적됨에 따라 이를 다양하게 활용한다면 도시 열해의 지속적인 관찰을 통해 서울시 열섬의 특징 뿐만 아니라 기존에는 알 수 없던 서울시 고유 기온의 특징을 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

S·DoT 관련 자료를 협조해주신 서울시 스마트도시담당관 정기화 주무관님께 감사를 드리며, 본 논문은 서울연구원 빅데이터 분석 전문 발간물인 ‘데이터 인사이트 리포트’를 발전시킨 것으로 서울연구데이터서비스(<https://data.si.re.kr/insight-report>)에서 확인 가능합니다. 또한 본 연구에 기재된 S·DoT에 대한 정보는 2020년 12월 말을 기준으로 작성되었으므로, 추후 S·DoT의 증설계획에 따라 센서 개수 및 상세 스펙은 변경될 수 있으며 2021년 5월 말 기준으로 1,100개로 증설되었습니다.

## References

Anderson, S. (2002). *An evaluation of spatial interpolation methods on air temperature in Phoenix, AZ*. Department of Geography, Arizona State University.

Array of Things. (2016). *Node Location Map*. Retrieved November 14, 2020, from <https://arrayofthings.github.io>

Departemen of Economic and Social Affairs United Nation. (2018). *World Urbanization Prospects*. Retrieved November 1, 2020, from <https://population.un.org/wup>

Environmental Geographic Information Service (EGIS). (2018). *Land Use Map*. Retrieved January 12, 2021, from <https://egis.me.go.kr>

Jin, M.S. (2012). Developing an index to measure urban heat island effect using satellite land skin temperature and land cover observations. *Journal of Climate*, Vol.

25, No. 18, pp. 6193-6201.

Kim, K., and An, Y. (2017). An empirical study on the Definition and Classification Methodology of Urban Heat Island Areas. *Journal of the Korean Regional Science Association*, Vol. 33, No. 2, pp. 47-59.

Kumari, P., Kapur, S., Garg, V., and Kumar, K. (2020). Effect of surface temperature on energy consumption in a calibrated building: A case study of Delhi. *Climate*, Vol. 8, No. 6, pp. 1-16.

Muller, C.L., Chapman, L., Grimmond, C.S.B., Young, D.T., and Cai, X. (2013). Sensors and the city: A review of urban meteorological networks. *International Journal of Climatology*, Vol. 33, No. 7, pp. 1585-1600.

Open MET Data Portal. (2015). *Meteorological data*. Retrieved November 1, 2020, from <https://data.kma.go.kr>

Schatz, J., and Kucharik, C.J. (2015). Urban climate effects on extreme temperatures in Madison, Wisconsin, USA. *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 9, pp. 94024.

Seoul Smart City Project. (2019). *Introduction of Project*. Retrieved November 14, 2020, from <http://damoa.io>

Smoliak, B.V., Snyder, P.K., Twine, T.E., Mykleby, P.M., and Hertel, W.F. (2015). Dense network observations of the Twin Cities Canopy-Layer urban heat island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 54, No. 9, pp. 1899-1917.

Sun, C.Y., Kato, S., and Gou, Z. (2019). Application of low-cost sensors for urban heat island assessment: A case study in Taiwan. *Sustainability*, Vol. 11, No. 10, pp. 2759.

Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., et al. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, Vol. 54, No. 1, pp. 75-84.

U.S. Geological Survey. (2018). *Landsat 8 Data Users Handbook*.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2019). *Measuring Heat Islands*. Retrieved November 7, 2020, from <https://www.epa.gov/heatislands/measuring-heat-islands>

Received	November 17, 2020
Revised	November 19, 2020
Accepted	May 25, 2021