

이변량 프레임워크를 이용한 도시 폭염에 대한 열 탄력성 정량 평가

전윤호* · 송지우** · 윤혜령** · 한석진*** · 이동근*** · 강준석***†

*서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 박사과정, **서울대학교 융합전공 스마트시티 글로벌 융합 박사과정,

***서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수

Quantifying urban thermal resilience to heatwaves in cities using a bivariate framework

Jeon, Yoonho* · Song, Jiwoo** · Yun, Hyeryeong** · Hahn, Seokjin*** · Lee, Dong Kun*** and Kang, Junsuk***†

*Ph.D. Student, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

**Ph.D. Student, Integrated Major in Smart City Global Convergence, Seoul National University, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Climate change-driven increases in mean temperature and heatwave frequency and duration have intensified urban thermal stress and socioeconomic vulnerabilities, creating a need for systematic climate resilience assessments. However, conflicting definitions of resilience have led to inconsistent metrics, such as disturbance impact, recovery rate, and adaptive capacity, limiting cross-system comparisons and underscoring the need for standardized frameworks. This study quantifies district-level urban thermal resilience in Seoul using the bivariate framework proposed by Ingrisich and Bahn (2018) and hourly temperature data from Seoul S-DoT sensors for June, July, and August of 2024 and 2025. District-level disturbance impact and recovery metrics were derived from temperature flux differences between typical days and heatwave days, defined as days within the top 10% of daily maximum temperatures. The results revealed spatial heterogeneity in baseline-normalized impact ($Impact_{base}$: 66 - 100%, mean 83.1%) and recovery rate (R_{base} : 6 - 18% t^{-1} , mean 10.2% t^{-1}), with a statistically significant resistance - recovery pattern ($r = 0.64$, $p < 0.05$) consistent with previously reported trade-offs in ecological systems. A relationship analysis using the urban heat island (UHI) index showed no significant correlation with $Impact_{base}$ ($r = 0.15$, $p = 0.47$), whereas a positive correlation with R_{base} was observed ($r = 0.43$, $p < 0.05$). Districts exhibited distinct disturbance - recovery profiles that were not detected by conventional UHI metrics. These findings support integrated UHI - impact - recovery assessments for tailored adaptation planning and the extension of this approach to future climate scenarios to enhance urban resilience.

Key words : Climate Resilience, Resilience Quantification, S-DoT Sensor, Urban Heat Island

1. 서론

최근 기후변화로 인한 평균 기온 상승과 폭염의 빈도·지속시간 증가는 시민의 열 스트레스와 물리적 피해를 가

중시키고 있으며, 특히 인공 피복과 에너지 소비가 집중된 도시지역에서 그 영향이 두드러지게 나타나고 있다(Ebi et al., 2021; Petkova et al., 2014; Zhang et al., 2025). 도시 열환경의 악화는 열파 동안의 초과 사망과 질병 부담을 증

†Corresponding author : junkang@snu.ac.kr (Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea. Tel. +82-2-880-4872)

ORCID 전윤호 0000-0003-4094-7082
송지우 0009-0002-7625-4704
윤혜령 0009-0008-8641-8294

한석진 0009-0009-3581-2977
이동근 0000-0001-7678-2203
강준석 0000-0003-1131-9060

대시킬 뿐 아니라 냉방 수요 증가, 전력 피크 부하, 대기오염 악화 등을 통해 사회·경제 시스템 전반의 취약성을 높이고 있어, 도시 기후에 대한 체계적인 탄력성(resilience) 평가의 필요성이 증대되고 있다(Santamouris, 2020).

탄력성 개념은 교란 후 평형 상태로의 회복 속도와 시간에 초점을 맞춘 관점인 공학적 탄력성과 대안 상태(alternative state)로의 전환 없이 현재 상태를 유지하는 능력에 중점을 둔 관점인 생태학적 탄력성이 병존하여 정의와 측정 방법론에 대한 혼재와 논쟁을 초래해 왔다(Gunderson, 2000; Holling, 1996). 다양한 연구에서 교란 영향(disturbance impact), 회복률(recovery rate), 회복 시간(recovery time), 또는 적응 역량(adaptive capacity)을 각각 '탄력성' 지표로 채택하였으나, 서로 다른 수식과 정규화 방식이 적용되면서 동일한 회복 궤적에 대해 상반된 정량적 평가가 도출되는 문제가 지적되었다(Hodgson et al., 2015; Quinlan et al., 2016). 이러한 지표의 비일관성은 시스템 간 정량적 비교를 저해하며, 표준화된 탄력성 평가 틀의 개발이 요구되었다(Hodgson et al., 2015; Ingrisch and Bahn, 2018).

Ingrisch and Bahn (2018)은 이러한 지표의 난립을 해결하고 저항성(resistance)과 회복(recovery)을 동시에 고려하는 공통의 계량 틀이 필요하다고 주장하였다. 이들은 교란 영향의 크기($Impact_{base}$)와 회복률(R_{base})을 모두 교란 이전 기준 상태에 대해 정규화하여 이변량(bivariate) 공간에 배치하는 공학적 탄력성 정량화 방안을 제안하였으며, 공간 내 각 점이 고유한 충격·회복 조합과 그에 대응하는 총 교란의 양을 나타내도록 구성함으로써, 상이한 시스템 간 탄력성을 일관되게 비교할 수 있는 틀을 제시하였다. 이러한 접근은 단일 지표로는 분리하기 어려운 저항성과 회복의 상대적 기여를 분해하면서도, 결과를 직관적인 2차원 공간상에서 해석할 수 있다는 점에서 도시 기후 탄력성 평가에도 적용 가능성이 크다.

도시 폭염 탄력성에 관한 기존 연구는 크게 두 가지 차원으로 구분된다. 하나는 사회·경제적 피해 회복 차원으로, 폭염으로 인한 인구의 건강 피해와 사회 시스템 취약성을 평가하고 그 회복 양상을 분석하는 접근이다(Niu et al., 2021; Reid et al., 2009). 도시열섬 강도(Urban Heat Index; UHI)나 기후위기 취약성 평가도구(VESTAP)와 같은 기후변화 취약성 지수는 주로 이러한 차원에서 노출·민감도·적응능력 지표의 가중합을 통해 열 위험을 평가하는 데 활용되어 왔다(Oh et al., 2017). 다른 하나는 도시 기후 시스템 자체의 온도 변동 동학(thermal flux

dynamics) 차원으로, 폭염 시 도시 기온이 평균 상태에서 얼마나 상승하고 얼마나 빠르게 회복되는지를 정량화하는 공학적 탄력성 중심 접근이다. 그러나 후자에 해당하는 연구는 상대적으로 충분히 이루어지지 않았으며, 특히 서울과 같은 도시 내부의 세밀한 자치구 단위 스케일에서 폭염으로 인한 시스템의 충격 크기와 사후 회복 속도를 동시에 정량화하는 표준화된 평가 틀은 미비한 상태이다.

서울시는 한국에서 가장 인구 밀도가 높은 도시로 광범위한 불투수면과 녹지 감소로 도시열섬의 강도가 지속 증가하여 폭염 취약성이 높다(Kwon et al., 2020). 따라서 기후변화와 도시열섬이 중첩되어 열 스트레스가 심화되고 있는 서울에서, 시간 해상도가 높은 온도 변동 자료를 이용해 도시 기후 시스템의 회복 탄력성을 정량화하고, 그 결과를 기존 도시열섬 정도를 평가한 UHI 지표 및 취약성 평가와 연계해 해석하는 연구가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 Ingrisch and Bahn (2018)의 이변량 프레임워크를 서울시의 여름철 폭염에 따른 도시 기후 시스템의 교란과 회복 역학에 적용하여, 다음 두 가지 연구 목표를 탐구하고자 하였다. 먼저, 서울시 및 자치구 단위에서 열 flux에 기반한 도시 기후 탄력성의 정량적 평가 가능성을 탐구하고자 하였으며, 도출된 열 탄력성 지표($Impact_{base}$, R_{base})가 기존 UHI 평가 결과와 어떠한 통계적 연관성을 나타내는지 검증하여 표준화된 비교 프레임워크의 실효성을 입증하고자 하였다. 이러한 접근을 통해 기존 단일 지표의 한계를 넘어 탄력성 개념을 반영한 저항성과 회복성을 동시에 고려하는 표준화된 평가 틀을 제공할 수 있을 것이다.

2. 연구방법

2.1. 연구 대상 및 입력 자료

본 연구는 서울의 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT) 자료를 기반으로 구별 탄력성을 정량화하는 연구로 서울시를 대상으로 수행하기 위하여 서울 열린데이터 광장에서 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT) 환경정보 자료에서 수집된 2024년과 2025년 자료의 시간 단위 평균 온도(avg_temp (°C)) 값을 받아 활용하였다.

분석 기간을 여름으로 한정하기 위해, 병합된 시계열 자료 중 2024년과 2025년의 6, 7, 8월에 해당하는 관측치만을 활용하였다. 이동형 센서가 도시의 구별 열 환경을 지속적으로 측정하지 못하여 각 구의 온도 변화를 대표하

지 못한다는 점을 고려하여, 이동형 센서 시리얼 번호에 해당하는 S-DoT 장비는 모두 분석에서 제외하였다. 분석 대상 공간을 서울시 행정구역 내로 한정하기 위하여, S-DoT 센서망에 포함되어 있으나 실제 설치 위치가 경기도 과천시 서울대공원인 관측소(자치구 변수가 'Seoul_Grand_Park'로 표기된 관측치)는 서울시 자치구 단위 열 환경을 대표하지 못하여 분석에서 제외하였다. 기온 변동 자료의 품질관리를 위해 일간 시간별 평균 기온 중 결측(NA)이거나 0°C 미만인 관측은 모두 제거하여, 비현실적이거나 오류 가능성이 높은 값과 일자가 후속 분석에 영향을 미치지 않도록 하였다. 24개 시각 중 하나라도 결측이 존재하는 일자는 제거하여, 일별 분석에 완전한 시계열이 확보된 여름철 센서 자료만을 연구에 활용하였다(Fig. 1). 폭염일 선정을 위해, 서울시와 각 구의 전체 일 최고기온 분포의 상위 10% (90th percentile)에 해당하는 분위수 기준 온도를 폭염 기준으로 설정하였다(Perkins and Alexander, 2013; Russo et al., 2014). 본 연구에서도 자치구별로 상이한 기후 조건을 반영하기 위하여 자치구 단위 90th percentile 기준을 채택하였으며, 이를 통해 각 자치구의 고유한 기후 맥락에 부합하는 폭염일 식별이 가능하도록 하였다. 이러한 전처리 수행 결과 서울시에서 유효한 9,276개의 시간 단위 일 자료가 활용되었으며, 각

구별 동일한 10% 분위수 평가 방법을 통해 입력 데이터를 확정하였다(Table 1).

2.2. 도시의 열 탄력성 평가 방안

Ingrisch and Bahn (2018)이 제안한 이변량 프레임워크는 저항성(resistance)과 회복력(recovery)을 교란 이전의 기준 상태(baseline state)에 대해 정규화하여 서로 다른 시스템 간 탄력성을 일관되게 비교할 수 있도록 구성되어 있다. 해당 프레임워크에서 Ingrisch and Bahn (2018)은 교란 이전 기준 상태에 대해 정규화된 교란 영향의 크기를 baseline-normalized impact ($Impact_{base}$)로, 교란 이후 기준 상태에 대해 정규화된 회복 기울기를 baseline-normalized recovery-rate (R_{base})로 정의한 바 있다. 본 연구에서는 해당 정의를 준용하여 서울시 도시 열환경에 적합한 형태로 두 지표를 다음과 같이 산정하였다.

각 자치구 i 와 시각 t 에 대해, 기준 상태 $T_{base,i,t}$ 는 전체 분석기간 동안 해당 시각 t 에 관측된 평균 기온이며, 폭염 상태 $T_{hw,i,t}$ 는 일 최고기온 상위 10%에 해당하는 폭염일들에서의 해당 시각 평균 기온으로, 각각 '기준 상태(baseline state)'와 '교란된 상태(disturbed state)'에 대응한다. 두 상태의 차이는 폭염에 의해 해당 시각 구의 평균

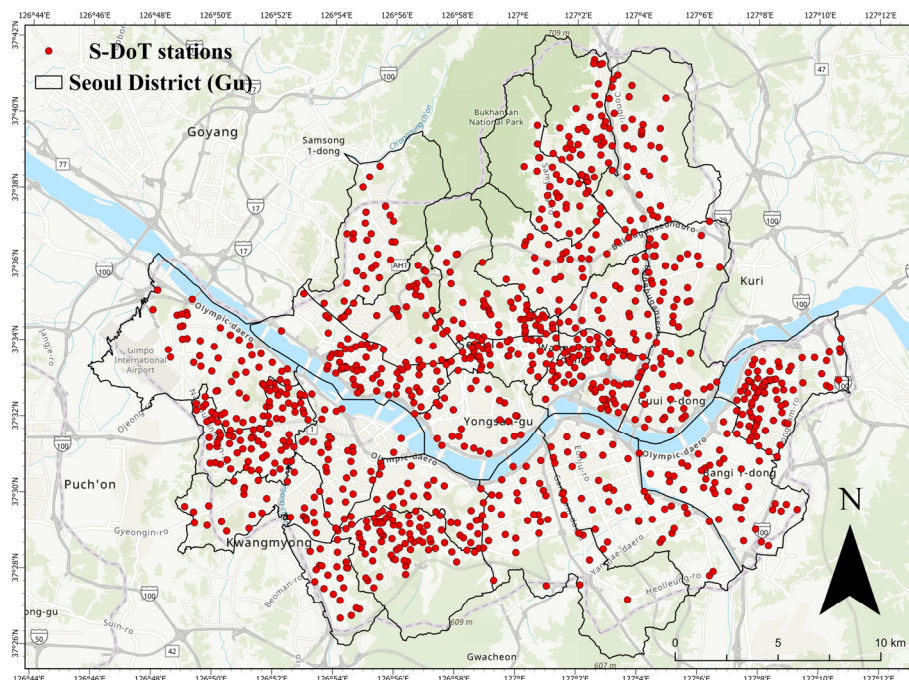


Fig. 1. Spatial distribution of S-DoT stations across the administrative districts of Seoul

Table 1. Heatwave thresholds by district

District Name	Observed Days (days)	Heatwave Days (days)	Threshold Temperature (℃)
Seoul	9,276	952	36.5
Dobong-gu	464	47	36.6
Dongdaemun-gu	228	24	35.9
Dongjak-gu	309	33	36.2
Eunpyeong-gu	383	42	36.1
Gangbuk-gu	315	33	36.4
Gangdong-gu	632	66	36.3
Gangnam-gu	323	34	35.5
Gangseo-gu	458	48	36.6
Geumcheon-gu	229	25	37.1
Guro-gu	227	23	36.3
Gwanak-gu	654	67	36.5
Gwangjin-gu	240	24	36.9
Jongno-gu	705	74	37.0
Jung-gu	359	40	36.4
Jungnang-gu	487	50	36.3
Mapo-gu	329	37	36.6
Nowon-gu	481	52	36.3
Seocho-gu	234	28	36.5
Seodaemun-gu	146	15	36.7
Seongbuk-gu	192	20	36.4
Seongdong-gu	444	48	36.7
Songpa-gu	247	26	36.5
Yangcheon-gu	569	60	36.2
Yeongdeungpo-gu	390	42	36.4
Yongsan-gu	231	24	36.8

기온이 기준 상태에 비해 얼마나 높아졌는지를 나타내는 값으로 열로 인한 시스템 충격의 크기로 해석하였다(Eq. (1)). 탄력성 지표를 양의 범위에서 취급하기 위해, 모든 $\Delta T_{i,t}$ 값 가운데 최소값을 차감한 값을 기반으로 이변량 프레임워크에 사용(Eq. (2))하였다. 이러한 처리를 통해 가장 강한 열 충격을 받은 구의 특정 시점에서 $S_{i,t} = 0$ 으로 설정되도록 하였으며, 연구에서 관측된 $\Delta T_{i,t}$ 의 최소값은 강북구 16:00의 -4.85°C 였다. 이러한 정의에 따라 $S_{i,t}$ 값이 0에 가까울수록 해당 자치구·시각의 폭염일 기온이 평균 일변화에 비해 가장 크게 상승한 상태, 즉 평균 대비 폭염 강도가 가장 높은 상태에 해당하며, $S_{i,t}$ 값이 클수록 폭염일 기온이 평균 일변화 수준에 근접함을 의미한다. 따라서 시간 진행에 따른 $S_{i,t}$ 의 감소는 폭염 충격의 누적을, $S_{i,t}$ 의 증가는 시스템의 회복 과정을 정량적으로

반영하는 지표로 해석된다.

$$\Delta T_{i,t} = \frac{1}{n_{base}} \sum T_{base,i,t} - \frac{1}{n_{hw}} \sum T_{hw,i,t} \quad (1)$$

$$S_{i,t} = \Delta T_{i,t} - \min(\Delta T) \quad (2)$$

본 연구에서는 Ingrisich and Bahn (2018)의 정의에 따라 도시 시스템이 받는 열 충격량(impact)을 기준선 대비 시스템 상태의 상대적 감소량으로 정의하여 baseline-normalized impact ($Impact_{base}$)로 표현하였으며, 열 회복 속도(recovery rate)는 교란 후 회복 구간에서 기준선 정규화 상태($S_{i,t}$)의 시간에 대한 평균 기울기로 정의하여 baseline normalized recovery rate (R_{base})로 표기하였

다. 분석 시간은 서울시와 구별 $S_{i,t}$ 가 감소하기 시작하는 06:00부터 양천구에서 $S_{i,t}$ 의 감소가 3.16에서 중단된 21:00까지로 설정하였다. 이는 낮 시간 중 $S_{i,t}$ 의 감소와 오후와 저녁 중 시스템의 회복을 포함하는 구간으로 시스템의 상대적 교란과 회복을 일관적으로 반영하기 위하여 해당 시간으로 설정하였다. 해당 개념과 연구 대상 시간을 본 연구에 적용하여, 각 자치구 i 에서 $S_{i,t}$ 가 최대와 최소가 되는 시각을 기준으로 $Impact_{base}$ 를 정의하였다(Eq. (3)). 21:00시에 회복된 시스템의 상태인 $S_{i,recov}$ 와 최대 교란 시점에서의 $S_{i,t}$ 차이를 기준으로 회복 시간 내 평균 기울기로 R_{base} 를 정의하였다(Eq. (4)). 본 연구에서 정의한 시스템 상태($S_{i,t}$)는 폭염일 기온에서 전체 분석기간 동일 시각의 평균 기온을 차감한 값을 기반으로 도출된 지표로, 해가 뜨고 지는 자연적 일변화의 효과는 두 항에 동일하게 반영되어 차분 과정에서 상쇄된다. 따라서 본 연구의 $Impact_{base}$ 와 R_{base} 은 자연적 일변화가 아닌 폭염 특이적 평균 대비 열환경 편차를 정량화하는 지표로 해석된다.

$$Impact_{base} = \frac{\max S_{i,t} - \min S_{i,t}}{\max S_{i,t}} \times 100 \quad (3)$$

$$R_{base} = \frac{S_{i,recov} - \min S_{i,t}}{t(S_{i,recov}) - t(\min S_{i,t})} \quad (4)$$

2.3. Urban Heat Index 기반 탄력성 평가 결과 비교 분석

각 탄력성 지표와의 비교를 위해 UHI를 도시 관측소와 교외(rural) 관측소의 기온 차이로 정의하는 접근법을 적용하여 산정하였다(Yagüe et al., 1991). 해당 방법론은 도시-교외 간 기온 차이를 정량화하는 가장 표준적인 방식으로 도시기후학 분야에서 광범위하게 활용되고 있으며, 서울을 대상으로 한 다수의 선행연구에서도 서울 ASOS와 양평 ASOS의 기온 차이가 UHI 강도 산정의 기준으로 활용되었다(Jeon et al., 2026; Kim and Baik, 2004). 본 연구에서도 서울시 UHI를 산정하기 위해, 기준 외곽지점으로 양평 종관기상관측장비(ASOS)의 시각별 대기온도 자료를 활용하였다. S-DoT 각 센서의 일 최고기온이 나타난 시간의 기온값(T_{urban})에서 양평 ASOS의 동일 시간 대기온도(T_{rural})를 빼서 UHI를 산정하였고(Eq. (5)), 전처리를 수행한 일자를 기준으로 서울시와 자치구별 UHI의 평균

을 산출하였다. 산출된 자치구별 UHI 평균값과 두 탄력성 지표 $Impact_{base}$ 와 R_{base} 사이의 통계적 연관성을 평가하기 위하여, 25개 자치구를 분석 단위로 한 Pearson 상관 분석을 수행하였다. 이를 통해 기존 UHI 지표와 본 연구에서 도출한 두 탄력성 지표가 자치구 단위에서 통계적으로 어떠한 연관성을 보이는지 정량적으로 비교하였다.

$$UHI = T_{urban} - T_{rural} \quad (5)$$

3. 결과 및 토의

3.1. 이변량 프레임워크 기반 탄력성 평가 결과

06~21시 사이 서울시 평균과 25개 자치구의 시간별 $S_{i,t}$ 의 분포가 Fig. 2와 같이 도출되었다. 서울시 평균 폭선은 06:00에 약 4.20℃의 평균 대비 편차로 시작하여 일사가 강해지는 오후 시간대에 점진적으로 감소한 뒤, 16:00 부근에서 약 0.81℃의 최저점에 도달하였으며, 이후 야간 복사냉각이 시작되는 18시 이후 다시 회복되어 21:00에 약 2.97℃에 도달하는 양상을 보였다.

자치구별 분포를 시점별로 살펴보면, 06:00에서는 $S_{i,t}$ 의 자치구별 분포가 약 2.90℃에서 5.05℃ 사이에 위치하여 분포 폭이 약 2.15℃로 나타났다. 최대 교란 시점에서는 자치구별 최저값이 강북구의 0.00℃에서 약 1.70℃ 사이에 분포하였으며, 21:00 시점에는 분포가 1.13℃에서 약 3.99℃에 걸쳐 형성되어 회복 후에도 자치구 간 분포 폭이 유지되었다. 한편 자치구별 최대 교란이 발생한 시각은 14:00~17:00 구간 내에서 자치구마다 상이하게 나타났다. 16:00에 최저점에 도달한 자치구가 9개로 가장 많았고, 14:00에 6개, 15:00과 17:00에 각각 5개의 자치구가 최저점에 도달하였다(Fig. 2). 또한 동일 시각에 최저점을 보인 자치구들 사이에서도 분포의 폭이 약 0.6~1.0℃에 달하여, 동일한 폭염 조건에서도 자치구별 열 응답 특성이 상이하게 작동함을 확인할 수 있다. 모든 자치구가 06:00의 값으로 회복되지 않아 낮 동안 축적된 열이 21:00까지 완전히 해소되지 않는다는 것을 의미하며, 이러한 시공간 패턴은 이후의 이변량 프레임워크($Impact_{base} - R_{base}$) 해석에서 각 구의 위치를 이해하는 중요한 배경을 제공한다.

Fig. 3은 Ingrisch and Bahn (2018)이 제안한 이변량 프레임워크를 열에 의한 서울의 도시 시스템 교란과 회복에

적용한 결과로, 각 구가 ‘얼마나 크게 교란을 받는지’와 ‘얼마나 빨리 평균 상태로 회복하는지’를 동시에 보여준다. $Impact_{base}$ 는 구별로 66~100% 범위에 분포하며, 자치구들의 평균은 83.1%로 나타났고, R_{base} 는 약 6~18% t^{-1} 범위에 분포하며 자치구들의 평균은 10.2% t^{-1} 으로 나타

났다. 두 변수 간에는 $r = 0.64$ ($p < 0.01$) 수준의 양의 상관관계가 나타나, 폭염 시 큰 교란을 겪는 자치구일수록 평균적으로 더 높은 회복률을 보이는 통계적 패턴이 관찰되었다. 이는 토양 미생물, 산림 등 일반적인 생태계 연구에서 관찰되는 저항성-회복성 간 trade-off 패턴과 부합하는 양

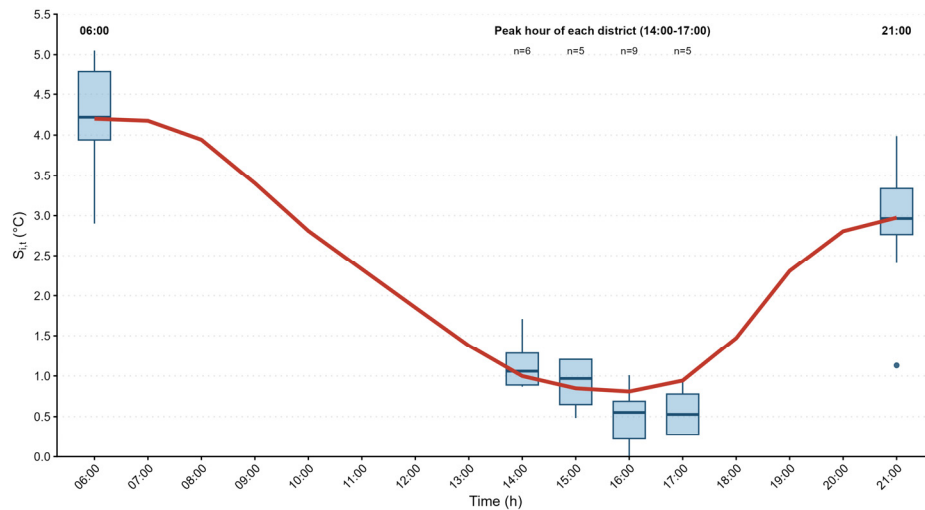


Fig. 2. Hourly variation of urban thermal disturbance and recovery ($S_{i,t}$) averaged across Seoul (red curve) and the corresponding distribution across the 25 administrative districts at three reference time points (boxplots): 06:00, the district-specific peak disturbance hour within 14:00-17:00, and 21:00

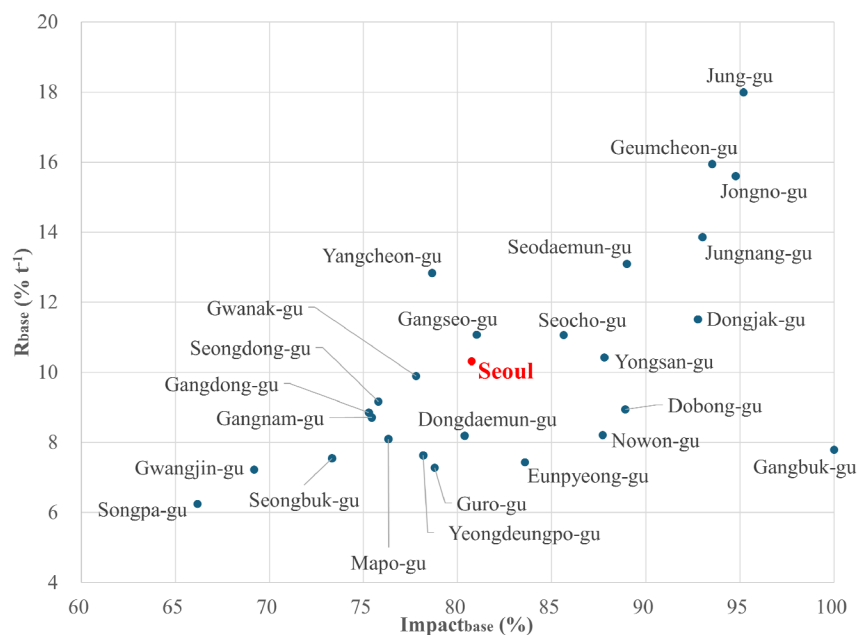


Fig. 3. Scatterplot of bivariate framework

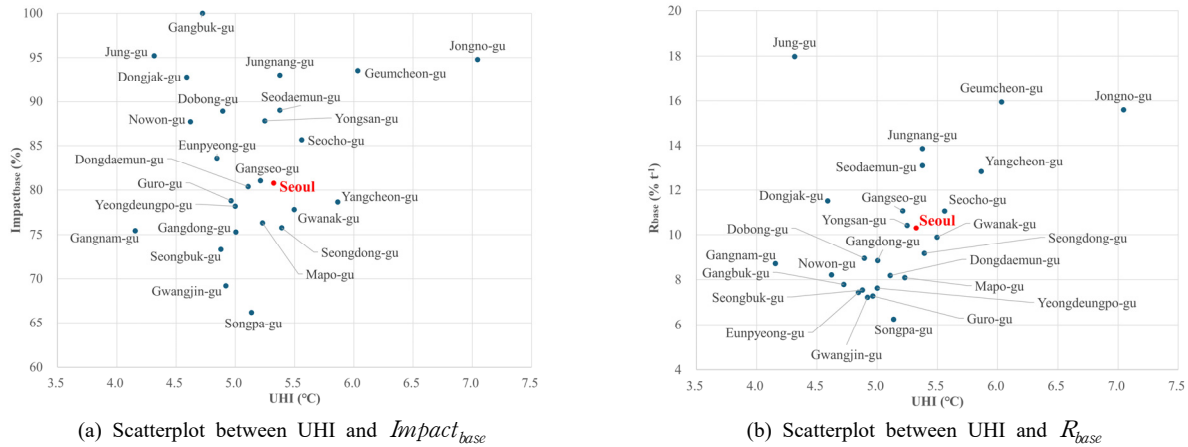


Fig. 4. Scatterplot of Seoul(red) and 25 autonomous district's UHI and two resilience indices

상으로, 본 연구의 도시 기후 시스템에서도 동일한 통계적 패턴이 관찰되었음을 시사한다(Orwin and Wardle, 2004; Patrick et al., 2022). 낮은 온도 변화 저항성을 가진 도시 지역이 폭염 중에는 평균 대비 큰 온도 편차를 보이지만, 일사량이 감소하면 상대적으로 빠르게 평균 온도로 되돌아가는 특성을 가짐을 의미한다.

고 $Impact_{base}$ -고 R_{base} 구역에는 중구, 금천구, 종로구, 중랑구 등이 위치하여, 해당 구들은 폭염 시 열 충격이 크지만, 회복 또한 빠른 고충격-고회복 열탄력성 특성을 나타내었다. 반대로 강북구, 도봉구, 노원구 등은 85% 이상의 높은 $Impact_{base}$ 를 보이면서도 R_{base} 값이 다른 구에 비해 상대적으로 낮아, 열 저항성과 회복력 모두 취약한 고충격-저회복 특성을 보였다. 송파구, 광진구, 성북구 등은 $Impact_{base}$ 가 약 70% 수준으로 비교적 낮지만 R_{base} 역시 6-8% t^{-1} 에 머무르는 저충격-저회복 구역으로, 장기적인 관점에서 열 스트레스 완화 효과가 제한적일 수 있음을 시사한다. 서울시 평균은 $Impact_{base}=80.7\%$, $R_{base}=10.3\% t^{-1}$ 로 전체 분포의 중앙부에 위치하였다.

이변량 프레임워크 관점에서 “더 회복력이 높다”가 곧 바로 “더 탄력적이다”를 뜻하지는 않는다. 같은 R_{base} 를 가지더라도 $Impact_{base}$ 가 작은 구가 더 작은 총 교란(perturbation)인 누적된 평균 대비 편차를 가지므로, 전체적인 열 스트레스는 도심보다 작을 수 있다. 반대로, 높은 $Impact_{base}$ 와 높은 R_{base} 를 동시에 보이는 구는 단기적인 회복 능력은 크지만, 폭염 피크 시 시스템에 주어지는 절대적인 열 부담, 즉 총 교란이 크다는 점에서 관리 우선순위가 높다고 해석할 수 있다. 정책적으로는, $Impact_{base}$ 와

R_{base} 중 어떤 요소를 줄일 것인가에 따라 구별로 상이한 열섬현상 완화와 기후적응 전략이 필요함을 시사한다.

3.2. Urban Heat Index와의 비교

기존 도시의 열섬 영향에 대한 지표로 활용되는 UHI 지표와 $Impact_{base}$ 와 R_{base} 가 서울시와 서울의 자치구별로 통계적으로 상이한 결과를 보이는지 평가하고자 하였다(Fig. 4). UHI와 $Impact_{base}$ 간 상관관계는 $r=0.15$ ($p=0.47$)로 나타났으며, UHI와 R_{base} 간 상관관계는 $r=0.43$ ($p<0.05$) 수준의 양의 상관을 보였다. UHI가 큰 구일수록 대체로 높은 회복률을 보였지만, $Impact_{base}$ 의 크기와 유의한 상관관계를 확인할 수 없었다.

UHI와 $Impact_{base}$ 간 산점도를 통해 기존 활용된 UHI 지표와 ‘폭염일이 평균에 비해 얼마나 더 뜨거운가($Impact_{base}$)’ 사이 관계가 단순하게 정의될 수 없음을 보여준다(Fig. 4(a)). UHI는 평균적인 도시-교외 온도 차이를 반영하지만, $Impact_{base}$ 는 해당 지역의 정상 상태에 대한 편차의 지표이다. 덥고 UHI가 강한 도심이라도, 폭염일의 절대 온도 증가는 평균적인 더위에 비해 상대적으로 크지 않을 수 있다. 반면, 비교적 열섬현상이 약한 자치구에서 갑작스럽게 극한 열파가 발생하면, 평균 대비 편차는 크게 나타날 수 있다. 또한 $Impact_{base}$ 는 도시 형태, 고도, 바람 조건, 주변 녹지·수변 등 다양한 요인의 영향을 함께 받을 수 있으므로 해당 결과는 UHI 단독으로 폭염의 탄력성 평가에 대한 설명력이 제한적임을 시사한다. 이는 폭염 영향 저감을 위해서는 기존 UHI 지표뿐 아니라, 평균 상태와의 상대적인 차이를 반영하는 탄력성 기반 지표

를 병행해 볼 필요가 있다는 점을 뒷받침한다.

Fig. 4(b)를 통해 UHI가 강한 지역일수록, 폭염 피크 이후 회복이 상대적으로 빠르게 회복되는 경향을 확인할 수 있었다. UHI가 강한 도심은 건물·포장재의 열용량과 복사 특성이 커서 낮 동안 많은 열을 저장하지만(Kleerekoper et al., 2012), 냉각 시 절대적 교란의 크기는 높더라도, ‘평균 상태와의 차이(MeanT-HWT)’는 빠르게 줄어들 수 있다. 특히, 중구를 제외하면 $r = 0.72$ ($p < 0.01$)로 강한 양의 상관관계를 확인할 수 있어, UHI가 강한 도심 자치구 일수록 폭염일 기온의 평균 상태로의 회복률이 높게 나타나는 통계적 경향이 보다 명확하게 확인되었다.

본 연구 결과는 열섬 관련 적응 대책 설계 시 기존 UHI 저감 중심 접근 대신, UHI-Impact-Recovery의 3요소를 통합적으로 고려하는 접근이 필요함을 시사한다. 자치구별 차별화된 적응 전략의 구체적 설계는 도시 형태·피복·바람장 등 물리적 인자와의 통합 분석을 통해 후속 연구에서 검토될 필요가 있다. 높은 UHI를 가진 종로구는 $Impact_{base}$ 도 높지만, R_{base} 역시 높아 “크게 달아오르지만 빨리 식는” 시스템의 특성을 보인다. UHI가 비교적 낮은 강남구는 $Impact_{base}$ 가 낮고 R_{base} 도 낮은 경우로, 폭염일에 평균 대비 발생한 편차가 저녁까지 비교적 오래 유지되는 양상을 보였다. 이에 반해, 중구는 4.32°C의 낮은 UHI 값을 보였지만 $Impact_{base}$ 와 R_{base} 가 각각 95.2%, 17.99% t^{-1} 로 강한 충격을 받는 자치구였다. 은평구와 강북구 역시 낮은 UHI 보였지만, 큰 $Impact_{base}$ 값과 낮은 R_{base} 값(각, 7.43% t^{-1} , 7.78% t^{-1})을 갖는 자치구로 분류되어, 일중 회복률이 상대적으로 낮은 특성을 보였다. 이러한 자치구는 현재 기후조건에서는 낮은 UHI로 인해 열 관련 우선순위가 상대적으로 낮게 평가될 수 있으나, 폭염 충격에 대한 회복 속도가 낮은 특성을 함께 고려한 선제적 적응 대응이 필요할 수 있음을 시사한다.

3.3. 연구의 한계 및 향후 연구 방향

본 연구는 Ingrisch and Bahn (2018)의 이변량 프레임워크를 도시 열환경에 적용한 시범적 시도로서, 자료의 공간적 대표성, 자치구별 폭염 기준의 상이성, 그리고 회복률 산정의 선형 가정 측면에서 다음과 같은 방법론적 한계를 지닌다. 첫째, S-DoT 센서는 시민 생활공간에 인접하여 설치된 특성상 지면 피복, 건폐율, Local Climate Zone 분류 등 자치구별 설치 환경의 동질성이 완전히 확보되지 않을 수 있으며, 이로 인해 본 연구의 자치구별 결

과가 기상청 AWS 기반 평균 기온 분포와 일부 상이하게 나타날 수 있다. 다만 이러한 특성은 AWS가 포착하지 못하는 도시민 생활공간의 열환경을 반영한다는 S-DoT 본연의 학술적 가치이기도 하므로, 본 연구의 결과는 AWS 기반 평균 기온 분포와 상호 보완적 관점에서 해석될 필요가 있다. 둘째, $Impact_{base}$ 와 R_{base} 는 각 자치구의 기준 상태에 대해 정규화된 상대적 지표이나, 자치구별 폭염 기준 온도가 상이하여 절대 기온 수준의 영향이 부분적으로 잔존할 가능성을 완전히 배제하기 어렵다. 셋째, R_{base} 는 평균 기온기로 정의된 선형 지표로 회복 과정의 열역학적 비선형성을 완전히 반영하지 못하며, 초기 냉각 속도가 물리적 기온 차에 의해 자연스럽게 결정될 가능성이 $Impact_{base}$ - R_{base} trade-off 해석에 영향을 미칠 수 있다.

이러한 한계를 보완하기 위하여 향후 연구에서는 (1) 자치구별 S-DoT 센서 설치 환경의 이질성 분석 및 도시 형태·피복·바람장 등 물리적 조건과의 통합 분석, (2) 비선형 회복 모델 기반 회복률 산정 방식의 도입을 통해 도시 열 탄력성 평가의 정밀도를 제고할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 서울시 S-DoT 센서의 높은 시간 해상도로 구축된 평균 기온 자료를 활용하여, 이변량 프레임워크를 도시의 열 맥락에 적용하고 서울과 서울의 자치구 단위의 열 탄력성을 정량적으로 평가하였다. 분석 결과 baseline-normalized impact와 baseline-normalized recovery rate는 구별로 뚜렷한 공간적 이질성을 보였으며, 자치구별 다른 충격-회복 특성을 나타내어 동일한 폭염 조건에서도 도시 시스템의 교란과 회복 역학이 상이하게 작동함을 확인하였다. 특히, 강한 폭염 충격을 받는 구일수록 평균적으로 더 빠른 회복률을 보이는 저항성-회복성 간 trade-off가 관찰되어, 기존 도시 열 평가가 포착하지 못하던 상보적 특성이 평가되었다. 이는 폭염 적응전략 수립 시, 절대 온도 수준뿐 아니라 기존 상태로부터의 상대적 편차와 회복 경로를 함께 고려하는 정교한 평가가 필요함을 시사한다.

또한, 기존 열섬현상의 지표로 활용된 UHI와 두 탄력성 지표 간의 상관성 분석 결과, UHI는 R_{base} 과는 유의한 양의 상관관계를 보였으나, 폭염 시 교란의 양과는 뚜렷한 관계를 보이지 않아 평균적 도시-교외 온도차만으로 열 탄력성의 공간 패턴을 충분히 설명할 수 없음을 보여주었

다. 이는 열 환경 관리와 기후적응 정책이 기존의 UHI 저감 중심 접근을 넘어, UHI-Impact-Recovery를 통합적으로 고려하는 다차원적 전략으로 확장되어야 함을 의미한다. 본 연구에서 제시한 자료 기반 열 탄력성 정량화 접근은 3.3절에서 논의된 방법론적 한계를 보완하기 위한 후속 연구와 함께, 향후 기후변화 시나리오, 건강·에너지 수요 지표와의 연계를 통해 도시의 기후탄력성 제고와 자연기반해법 적용을 위한 과학적 근거로 확장될 수 있을 것이다.

사사

본 논문은 환경부 한국환경산업기술원의 생태계 기반 탄소흡수원 조성·관리 기술개발사업(RS-2023-00218245)의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

- Ebi KL, Capon A, Berry P, Broderick C, de Dear R, Havenith G, Honda Y, Kovats RS, Ma W, Malik A, et al. 2021. Hot weather and heat extremes: Health risks. *Lancet* 398(10301): 698-708. doi: 10.1016/S0140-6736(21)01208-3
- Gunderson LH. 2000. Ecological resilience—In theory and application. *Annu Rev Ecol Syst* 31(1): 425-439. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425
- Hodgson D, McDonald JL, Hosken DJ. 2015. What do you mean, ‘resilient’? *Trends Ecol Evol* 30(9): 503-506. doi: 10.1016/j.tree.2015.06.010
- Holling CS. 1996. Engineering resilience versus ecological resilience. In: Schulze P (ed). *Engineering within ecological constraints*. Washington, DC: National Academy Press. p. 31-44.
- Ingrisch J, Bahn M. 2018. Towards a comparable quantification of resilience. *Trends Ecol Evol* 33(4): 251-259. doi: 10.1016/j.tree.2018.01.013
- Jeon M, Park K, Moon W, Kim JJ, Baik JJ. 2026. Exploring urban heat islands with a simple thermodynamic model. *Nonlin Processes Geophys* 33(1): 17-32. doi: 10.5194/npg-33-17-2026
- Kim YH, Baik JJ. 2004. Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Theor Appl Climatol* 79(3): 151-164. doi: 10.1007/s00704-004-0070-7
- Kleerekoper L, van Esch M, Salcedo TB. 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resour Conserv Recycl* 64: 30-38. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.06.004
- Kwon YJ, Lee DK, Kwon YH. 2020. Is sensible heat flux useful for the assessment of thermal vulnerability in Seoul (Korea)? *Int J Environ Res Public Health* 17(3): 963. doi: 10.3390/ijerph17030963
- Niu Y, Li Z, Gao Y, Liu X, Xu L, Vardoulakis S, Yue Y, Wang J, Liu Q. 2021. A systematic review of the development and validation of the heat vulnerability index: Major factors, methods, and spatial units. *Curr Clim Change Rep* 7(3): 87-97. doi: 10.1007/s40641-021-00173-3
- Oh KY, Lee MJ, Jeon SW. 2017. Development of the Korean climate change vulnerability assessment tool (vestap)—Centered on health vulnerability to heat waves. *Sustainability* 9(7): 1103. doi: 10.3390/su9071103
- Orwin KH, Wardle DA. 2004. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances. *Soil Biol Biochem* 36(11): 1907-1912. doi: 10.1016/j.soilbio.2004.04.036
- Patrick CJ, Kominoski JS, McDowell WH, Branoff B, Lagomasino D, Leon M, Hensel E, Hensel MJS, Strickland BA, Aide TM, et al. 2022. A general pattern of trade-offs between ecosystem resistance and resilience to tropical cyclones. *Sci Adv* 8(9): eabl9155. doi: 10.1126/sciadv.abl9155
- Perkins SE, Alexander LV. 2013. On the measurement of heat waves. *J Clim* 26(13): 4500-4517. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00383.1
- Petkova EP, Morita H, Kinney PL. 2014. Health impacts of heat in a changing climate: How can emerging science inform urban adaptation planning? *Curr Epidemiol Rep* 1(2): 67-74. doi: 10.1007/s40471-014-0009-1
- Quinlan AE, Berbés-Blázquez M, Haider LJ, Peterson GD. 2016. Measuring and assessing resilience: Broadening

- understanding through multiple disciplinary perspectives. *J Appl Ecol* 53(3): 677-687. doi: 10.1111/1365-2664.12550
- Reid CE, O'Neill MS, Gronlund CJ, Brines SJ, Brown DG, Diez-Roux AV, Schwartz J. 2009. Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environ Health Perspect* 117(11): 1730-1736. doi: 10.1289/ehp.0900683
- Russo S, Dosio A, Graversen RG, Sillmann J, Carrao H, Dunbar MB, Singleton A, Montagna P, Barbola P, Vogt JV. 2014. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *J Geophys Res: Atmos* 119(22): 12500-12512. doi: 10.1002/2014JD022098
- Santamouris M. 2020. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy Build* 207: 109482. doi: 10.1016/j.enbuid.2019.109482
- Yagüe C, Zurita E, Martinez A. 1991. Statistical analysis of the madrid urban heat island. *Atmos Environ Part B Urban Atmos* 25(3): 327-332. doi: 10.1016/0957-1272(91)90004-X
- Zhang J, Wang P, Jin A. 2025. Multidimensional characteristics of urban green space and its impact in mitigating urban heat island effects: A case study of guangzhou. *Sci Rep* 15(1): 39959. doi: 10.1038/s41598-025-23773-7