

## 부산 도시 열섬과 열대야의 상호작용 분석

정예영<sup>1)</sup> · 문수정<sup>1)</sup> · 양수빈<sup>1)</sup> · 최현석<sup>2)</sup> · 진한결<sup>1),3)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 대기환경과학과, <sup>2)</sup>부산대학교 지구환경시스템학부,  
<sup>3)</sup>부산대학교 미래지구환경연구소

(접수일: 2025년 7월 25일, 수정일: 2025년 9월 15일, 게재확정일: 2025년 9월 24일)

## Interactions between Urban Heat Islands and Tropical Nights in Busan

Ye-Yeong Jeong<sup>1)</sup>, Soo-Jeong Moon<sup>1)</sup>, Su-Bin Yang<sup>1)</sup>, Hyeon-Seok Choi<sup>2)</sup>, and Han-Gyul Jin<sup>1),3)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

<sup>2)</sup>Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

<sup>3)</sup>Institute for Future Earth, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 25 July 2025; revised 15 September 2025; accepted 24 September 2025)

**Abstract** Urban heat islands (UHIs) can intensify during high-temperature weather events such as tropical nights, leading to even greater thermal stress in cities. This study investigates the interactions between UHIs and tropical nights in Busan, South Korea, using 52 years (1973~2024) of observational data. In Busan, the frequency and intensity of tropical nights are 48.8% and 0.19°C higher than in rural areas, respectively, and these differences have become more pronounced as urbanization has progressed. On average, the UHI intensity is higher on tropical nights than on non-tropical nights, as warmer, drier, and less cloudy nighttime conditions on Busan's tropical nights lead to a positive interaction between UHIs and tropical nights. However, the UHI-tropical night interaction shows considerable variability, being either strongly positive or strongly negative. This is caused by contrasting characteristics of tropical nights in Busan, which result from their different mechanisms and synoptic patterns. Specifically, tropical nights that exhibit strong positive interactions with UHI are relatively calm, dry, and hot with clear skies, driven by strong insolation and subsidence under the dominance of a persistent anti-cyclone. In contrast, tropical nights that exhibit strong negative interactions with UHI are much more windy, cloudy, and moist. They are driven by reduced nighttime radiative cooling and warm advection when warm moist air is transported by southwesterlies at the periphery of the western North Pacific subtropical high.

**Key words:** Urban heat island, Tropical night, Busan, Synoptic pattern, Urban climate

## 1. 서 론

지구 온난화가 진행됨에 따라 전 세계적으로 폭염과 열대야의 발생 빈도가 증가하는 추세를 보이고 있

다(Choi and Lee, 2019; Klok et al., 2023). Suarez-Gutierrez et al. (2020)에 따르면, 지구 평균 기온이 1.5°C 상승할 경우 열대야가 나타나지 않았던 지역에 서도 지속적인 열대야가 발생하게 되며, 4°C 상승 시에는 전 세계 대부분의 지역에서 여름철의 25% 이상 기간 동안 극심한 열대야가 지속될 것으로 전망된다.

열대야는 야간 최저기온이 일정 수준 이상으로 유지되는 현상으로, 도시 지역에서는 도시 열섬 현상과 중첩되어 보다 빈번하게 발생한다(Sarker et al., 2020;

\*Corresponding Author: Han-Gyul Jin, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.  
Phone: +82-51-510-2290, Fax: +82-51-515-1689  
E-mail: hgjin@pusan.ac.kr

Park et al., 2022). 도시 열섬은 도시 표면의 특수한 열적 특성과 기하학적 구조 및 낮은 수분 가용성, 그리고 도시의 인공열 배출 등의 영향으로 도시 기온이 주변 지역보다 높게 나타나는 현상이다(Oke, 1982; Santamouris, 2015; Mohajerani et al., 2017). 급속한 도시화는 도시 열섬을 강화시키며, 이로 인해 도시 지역에서 고온 현상의 발생 빈도와 강도가 증가할 수 있다(Ayanlade, 2016; Choi and Lee, 2019). 일반적으로 도시 열섬은 주간에 비해 야간에 장파 복사 간섭과 저장 열 방출에 의해 더 강하게 나타나기 때문에(Oke et al., 2017), 열대야를 강화하는 데 특히 기여할 수 있다.

열대야와 도시 열섬의 관계에 대한 기존 연구들은 주로 도시화 및 도시 열섬이 열대야 발생에 미치는 단방향적인 영향에 초점을 맞추어 왔다(Olcina Cantos et al., 2019; Zheng et al., 2020; Park et al., 2022). Olcina Cantos et al. (2019)는 스페인 지중해 연안에서 열대야의 장기 변화 경향을 조사한 결과, 연구 대상 기간에 도시화가 많이 진행된 지역에서 열대야 빈도가 더 많이 증가하였음을 보였다. Zheng et al. (2020)은 서울에서 고층 건물과 교통량이 많은 지역에서 열대야 발생 빈도가 높음을 보였다. 또한, Park et al. (2022)은 호남 지역에서 도시가 비도시보다 열대야 발생 빈도가 약 2.5배 높으며, 도시 열섬 강도가 증가할수록 열대야 발생 빈도도 증가하는 경향이 있음을 보고하였다.

한편, 열대야가 도시 열섬에 영향을 미치는 것 또한 가능하다. 도시 열섬 강도는 배경기온, 습도 등 배경 기상 조건에 따라 달라질 수 있으며(Gao et al., 2019; Park et al., 2024), 열대야라는 특수한 배경 기상 조건 하에서는 도시 열섬 강도가 평상시에 비해 유의미하게 달라질 수 있기 때문이다. 세계 여러 도시에서 폭염 시 도시 열섬 강도가 비폭염 시에 비해 증가하는 경향이 보고된 바 있으며, 이는 폭염-도시 열섬 시너지 혹은 양의 상호작용이라 불린다(Li and Bou-Zeid, 2013; Founda and Santamouris, 2017; Jiang et al., 2019). 이러한 고온 기상 현상과 도시 열섬 간의 양의 상호작용은 도시에 심각한 열환경을 초래할 수 있기 때문에, 열대야와 도시 열섬 간의 상호작용에 대한 관심 또한 필요하다.

이와 관련된 최근 연구들은 하나의 도시에서도 고온 기상 현상과 도시 열섬 간의 상호작용이 일관적으로 나타나지 않으며, 고온 기상 현상의 유형에 따라 달라질 수 있음에 주목하고 있다(Park et al., 2023; Kim et al., 2024; Zhao et al., 2024). 폭염과 도시 열섬 간 상호작용에 대해 연구한 Park et al. (2023)은 서울에서 양의 상호작용과 음의 상호작용이 모두 나타나는데, 각각 상대적으로 강하고 건조한 폭염과 약

하고 습한 폭염에서 나타난다는 것을 보였으며, 이는 각각 폭염의 서로 다른 종관 기상 유형과 관련됨을 밝혔다. 중국 허페이를 대상으로 한 Zhao et al. (2024)의 연구에서는 맑고 건조한 폭염 동안에 도시 열섬이 증폭되는 양의 상호작용이 나타났으나, 흐리고 습한 폭염 동안에는 증폭 효과가 나타나지 않았다.

위와 같이 폭염과 도시 열섬 간 상호작용에 대한 연구는 여러 도시에서 비교적 상세히 이루어진 반면, 열대야와 도시 열섬 간 상호작용에 대한 연구는 상당히 부족한 실정이다. 우리나라에서 폭염과 열대야는 시공간적 특성 및 발생 기작이 상당히 다르기 때문에(Hong et al., 2018; Choi and Lee, 2019), 도시 열섬과 열대야의 상호작용은 폭염과의 상호작용과는 일부 다른 양상을 보일 수 있으며, 이에 대한 독립적인 연구가 필요하다. 본 연구의 대상 지역인 부산은 높은 습도와 운량 때문에 열대야 발생 빈도가 상대적으로 높은 해안 지역(Choi and Lee, 2019)에 위치한 대도시로, 도시 열섬과 열대야 간 상호작용을 연구하기에 매우 적합하다. 이에 본 연구에서는 부산에서 도시 열섬이 열대야에 미치는 영향, 열대야가 도시 열섬에 미치는 영향을 비롯한 도시 열섬과 열대야 간 상호작용 전반에 대해 분석하고, 이러한 상호작용이 배경 기상 조건과 종관 기상 패턴에 따라 어떻게 달라지는지 밝히고자 한다.

본 연구는 다음과 같은 구성으로 이루어진다. 2장에서는 연구 자료 및 방법을 소개하고, 3장에서는 3단계의 분석을 통해 도시 열섬과 열대야의 상호작용에 대해 규명한다. 3.1절에서는 도시-비도시 간 열대야 발생 특성 비교 및 열대야-비열대야 간 도시 열섬 강도 비교를 통해 부산의 도시 열섬과 열대야 간 상호작용이 나타남을 보이고, 이러한 상호작용이 큰 변동성을 가짐을 확인한다. 3.2절에서는 도시 열섬과 열대야 간 상호작용이 나타나는 원인을 파악하기 위해 열대야와 비열대야의 배경 기상 조건을 비교하고, 도시 열섬 강도와의 관계를 분석한다. 3.3절에서는 도시 열섬 강도에 따라 열대야 사례를 구분하여 그 특성을 비교하고, 부산에서 도시 열섬-열대야 간 상호작용의 변동성이 큰 원인을 밝힌다. 4장에서는 요약 및 결론을 제시한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 연구 대상 및 자료

부산 지역에서 도시화가 열대야 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해, 비도시 지역을 선정하여 비교하였다. 비도시 지역으로는 해안 지역 중 부산 중심으로부터 80 km 이내에 위치하여 부산과 유사한 지리적, 기후적 특성을 가지고 있으며, 도시화 정도가 낮

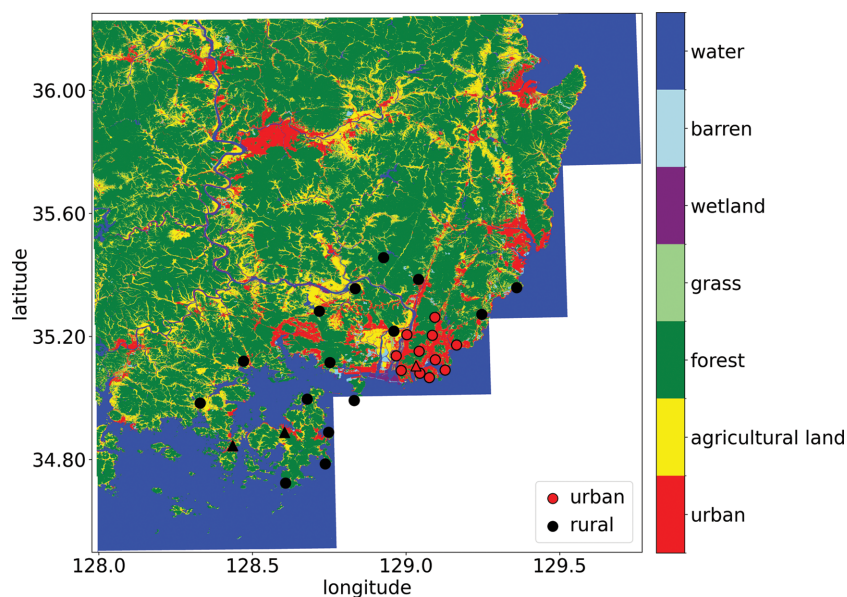


Fig. 1. Land cover map with the locations of ASOSs (triangles) and AWSs (circles) in Busan and nearby areas.

고 50년 이상의 장기 관측 자료를 보유한 지역인 거제와 통영을 선정하였다. 환경부에서 제공하는 2019년 토지피복지도(<https://egis.me.go.kr/map/map.do>; Fig. 1)에 의하면 거제와 통영의 ‘시가화·건조지역(urban)’ 면적 비율은 각각 4.18%, 3.30%로 부산(20.13%)에 비해 매우 낮다. 이는 Martin-Vide et al. (2015)가 제시한 비도시 지역 선정 기준인 시가화 면적 10% 미만을 충족한다. 또한, 2023년 KOSIS 국가통계포털(<https://kosis.kr/index/index.do>) 자료에 따르면, 부산의 인구밀도는 4,343명  $\text{km}^{-2}$ 인 반면, 거제와 통영은 각각 521.7명  $\text{km}^{-2}$ , 608.6명  $\text{km}^{-2}$ 로 큰 차이를 보인다.

본 연구에서는 52년간(1973~2024년) 부산, 통영, 거제의 기상청 종관기상관측소(automated synoptic observing system; ASOS)에서 관측된 기온, 풍향, 풍속, 상대습도, 전운량 자료를 이용하였다. 분석 대상 기간은 열대야가 주로 발생하는 7월과 8월로 정하였으며, 당일 18시부터 익일 09시까지의 시간별 자료를 사용하였다. 단, 열대야 발생 빈도와 강도 공간 분포 및 바람장 분석 시에는 ASOS 지점의 수가 제한적이므로 상세한 분석을 위해 방재기상관측(automatic weather station; AWS) 자료를 추가로 활용하였으며, 위 분석의 대상 기간은 AWS 운영 기간을 고려하여 1997~2024년으로 하였다. AWS 지점은 도시 지역으로는 부산 내의 11개 지점을 선정하였고, 비도시 지역으로는 거제, 통영을 비롯해 부산과 부산 주변의 도시화 정도가 낮은 지역의 15개 지점을 선정하였다(Fig. 1). 열대야 발생 시의 도시 열섬 효과와 종관 기상 패턴 간 관계 분석에는

European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) fifth-generation reanalysis (ERA5) (Hersbach et al., 2020)의 200 hPa, 500 hPa, 850 hPa 지위고도 (geopotential height; GPH) 및 수평바람, 850 hPa 비습, 2 m 온도, 장파복사(outgoing longwave radiation; OLR) 자료를 사용하였다.

## 2.2 연구 방법 및 절차

열대야는 기상청 정의를 참고하여 밤 시간(당일 오후 18시부터 익일 오전 9시까지)동안 최저기온이 25°C 이상인 날로 정의하였다. 열대야 발생일과 비발생일 분류 시, 세 지점(부산, 거제, 통영)의 밤 시간대 최저기온 평균값을 활용하였다. 총 분석 기간 3,224일 중 열대야 사례는 725일(22.5%), 비열대야 사례는 2,499일(77.5%)로 나타났다. 단, 도시와 비도시 간의 열대야 발생 특성을 비교·분석할 때에는(3.1절) 각 지점별 밤 시간대 최저기온을 기준으로 열대야 발생 여부를 판별하였다. 열대야 발생 빈도는 밤 시간대 최저기온이 25°C 이상인 날의 수이며, 열대야 강도는 열대야 발생일의 최저기온 값으로 산정하였다.

도시 열섬 효과를 정량적으로 평가하기 위해 도시 열섬 강도(urban heat island intensity; UHII)를 사용하였다. 도시 열섬 강도는 도시 지점(부산)의 밤 시간대 최저기온과 비도시 지점(거제·통영의 평균값)의 밤 시간대 최저기온의 차이로 정의하였다. 또한, 배경 기상 조건에 따른 도시 열섬 강도의 변화를 조사하기 위해 도시 열섬 강도와 배경 기상 요소 간 상관 분석을 수

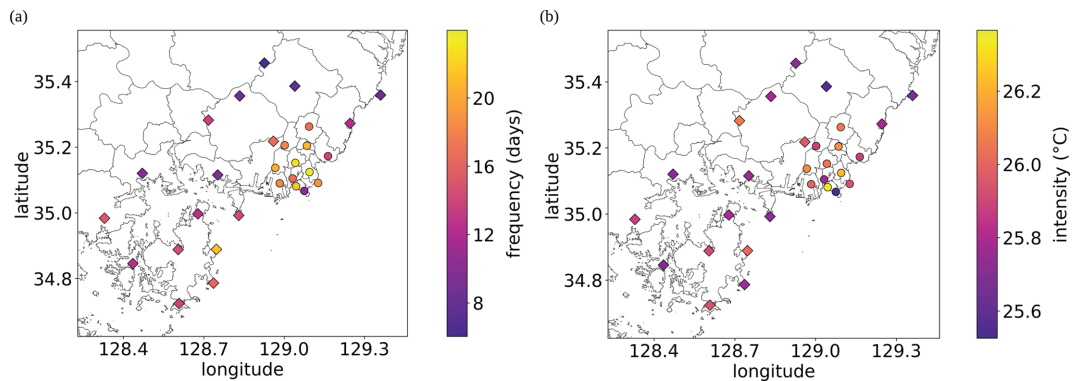
행하였으며, 이때 사용한 배경 기상 요소도 세 지점(부산, 거제, 통영)의 야간(당일 18시~익일 09시) 평균값을 사용하였다.

도시 열섬 강도가 강한 날과 약한 날의 기상 조건의 차이를 분석하기 위해 열대야 발생 사례 중 도시 열섬 강도 값이 상위 10% 이내인 사례를 S-UHI (Strong UHI), 하위 10% 이내인 사례를 W-UHI (Weak UHI)로 정의하였다. 이를 통해 도시 열섬 강도가 강한 열대야와 약한 열대야가 각각 어떤 배경 기상 조건 및 종관 기상 패턴과 연관되어 있는지 분석하였다.

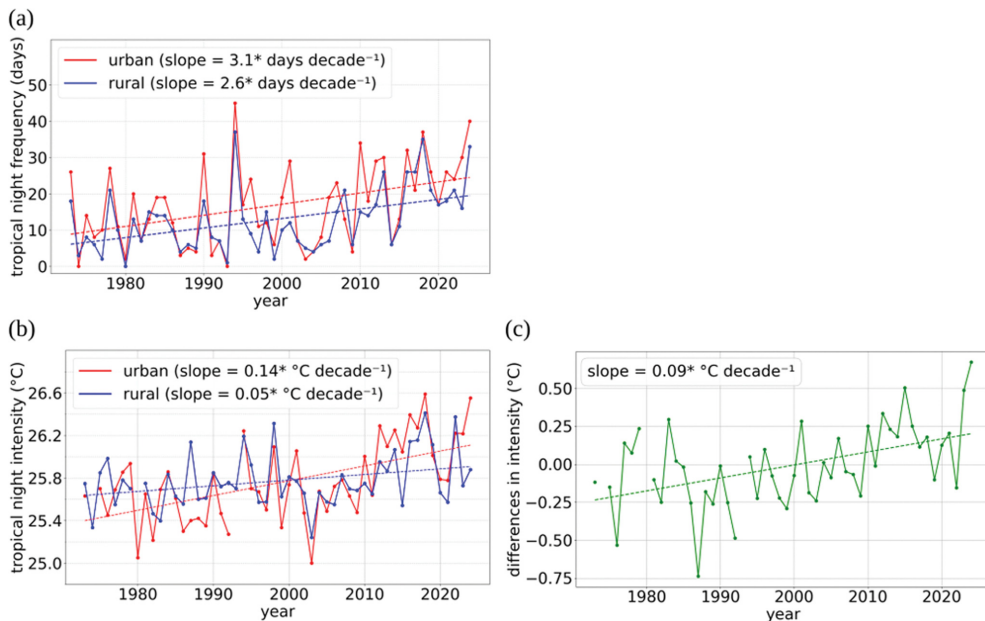
### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 열대야 발생 특성 및 도시 열섬 강도 비교

Figure 2는 연구에 사용한 ASOS와 AWS 지점별 열대야 발생 빈도 및 강도를 나타낸 것이다. 도시 지점의 평균 열대야 발생 일수는 연 18.5일, 비도시 지점의 평균 열대야 발생 일수는 연 12.4일로, 도시에서 열대야 발생 빈도가 48.8% 더 높게 나타났다(Fig. 2a). 또한, 도시 지점의 평균 열대야 강도는 25.99°C, 비도시 지점의 평균 열대야 강도는 25.80°C로 도시에서



**Fig. 2.** Spatial distributions of (a) the mean annual frequency and (b) the mean intensity of tropical nights. Urban and rural stations are indicated by circles and diamonds, respectively.



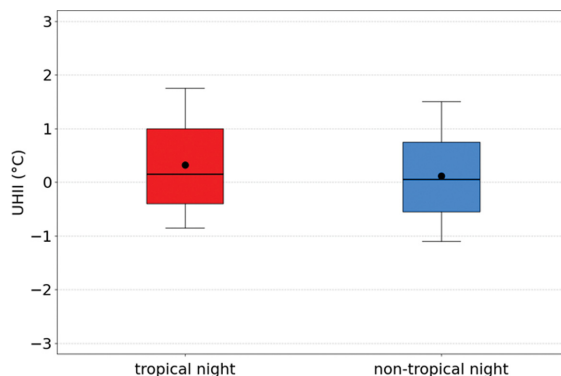
**Fig. 3.** Time series of (a) the annual frequency of tropical nights and (b) the annual mean intensity of tropical nights. (c) Time series of the difference in tropical night intensity between urban and rural stations. The dashed lines indicate the linear trends. The asterisk (\*) indicates that the regression slope is statistically significant at the 0.05 significance level.

0.19°C 높게 나타났다(Fig. 2b). 위 차이는 모두 유의 수준 0.05에서 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다.

이러한 차이가 시간이 지남에 따라 어떻게 변화했는지 분석하기 위해, Fig. 3에서는 52년간(1973~2024년) 열대야 발생 빈도 및 강도의 경년 변화를 나타내었다. 열대야 발생 빈도는 도시에서 10년에 3.1일, 비도시에서 10년에 2.6일씩 증가하는 추세를 보이며, 도시에서 증가율이 더 크다(Fig. 3a). 다만, 도시와 비도시 간 열대야 발생 빈도의 차이가 시간이 지남에 따라 유의미하게 증가하는 경향은 나타나지 않았다. 열대야 강도 또한 도시에서 10년에 0.14°C, 비도시에서 10년에 0.05°C씩 증가하는 추세를 보여 도시에서 더 빠르게 증가하고 있다(Fig. 3b). 도시와 비도시 간 열대야 강도 차이는 통계적으로 유의미한 증가 추세를 보이며, 10년에 0.09°C씩 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3c). 이는 열대야 강도에 대한 도시 열섬 효과가 시간이 지남에 따라 더 강해지고 있음을 시사한다.

도시 지역에서 열대야 발생 빈도와 강도가 더 뚜렷한 증가 경향을 보인 것은 이 기간동안 도시 지역에서 도시화가 더 빠르게 진행된 것과 관련되었을 수 있다. 1987~1989년과 2018~2019년 기준 시가지-건조지역 면적은 부산의 경우 45.66 km<sup>2</sup> 증가하여, 거제(19.21 km<sup>2</sup>)와 통영(14.29 km<sup>2</sup>)보다 각각 2.4배, 3.2배 많이 확대되었다. 또한, 부산의 인구는 1992~2019년 동안 421,014명 증가하여 거제(76,461명)와 통영(46,832명)보다 큰 폭으로 증가했다. 도시화가 진행될수록 도시 열섬 효과가 강화되어 야간 기온이 상승하고, 그 결과 열대야 발생 빈도와 강도가 증가할 수 있다. 또한 Oke et al. (2017)에 따르면, 도시는 비도시에 비해 기후 변화에 더 민감하게 반응할 가능성이 있으며, 도시 열섬 효과와 기후 변화가 함께 작용할 경우 열대야 발생이 더욱 심화될 수 있다.

열대야 시에는 평상시에 비해 기온 등 배경 기상 조건이 다르기 때문에, 열대야가 도시 열섬 강도에 영향을 미치는 것 또한 가능하다. Figure 4를 통해 열대야 시와 비열대야 시의 도시 열섬 강도를 비교한 결과, 열대야 시 도시 열섬 강도의 중앙값(0.15°C)과 평균값(0.32°C)이 비열대야 시 중앙값(0.05°C)과 평균값(0.12°C)보다 유의미하게 높았다. 이를 통해 열대야 시 도시 열섬 강도가 더 강화된다는 것을 알 수 있다. 한편, 열대야 시 도시 열섬 강도의 25번째 백분위수(-0.40°C)가 비열대야 시 평균값(0.12°C)보다 낮게 나타났다. 이는 열대야 시 도시 열섬 강도가 평균적으로 더 높기는 하지만, 어떤 조건에서는 오히려 비열대야 시보다 도시 열섬 강도가 더 낮아질 수 있음을 의미한다. 이러한 결과는 Park et al. (2023)의 연구에서도 나타나는데, 서울에서 폭염이 발생하지 않은 날의 평균 도시 열섬 강도에 비해 폭염이 발생한 날의



**Fig. 4.** Box plot of UHII on tropical nights and non-tropical nights. The upper and lower edges of the box represent the third and first quartiles, respectively. The horizontal line inside the box indicates the median. The whiskers above and below the box represent the 90th and 10th percentiles, respectively, and the black dot indicates the mean.

평균 도시 열섬 강도는 높은 반면 10번째 백분위수는 낮게 나타나, 도시 열섬과 폭염 간 양의 상호작용과 음의 상호작용이 모두 나타났다.

본 연구에서는 부산의 도시 열섬과 열대야 또한 양의 상호작용과 음의 상호작용을 모두 보일 수 있음을 확인하였다. 이는 도시 열섬과 열대야 간 상호작용이 항상 일관되게 나타나지 않을 수 있으며, 그 강도와 특성이 배경 기상 조건에 따라 달라질 수 있음을 시사한다. 이에 따라, 배경 기상 조건에 따른 열대야와 도시 열섬 강도의 관계에 대한 분석이 필요하다.

### 3.2 열대야 및 비열대야의 배경 기상 조건과 도시 열섬 강도 간의 관계

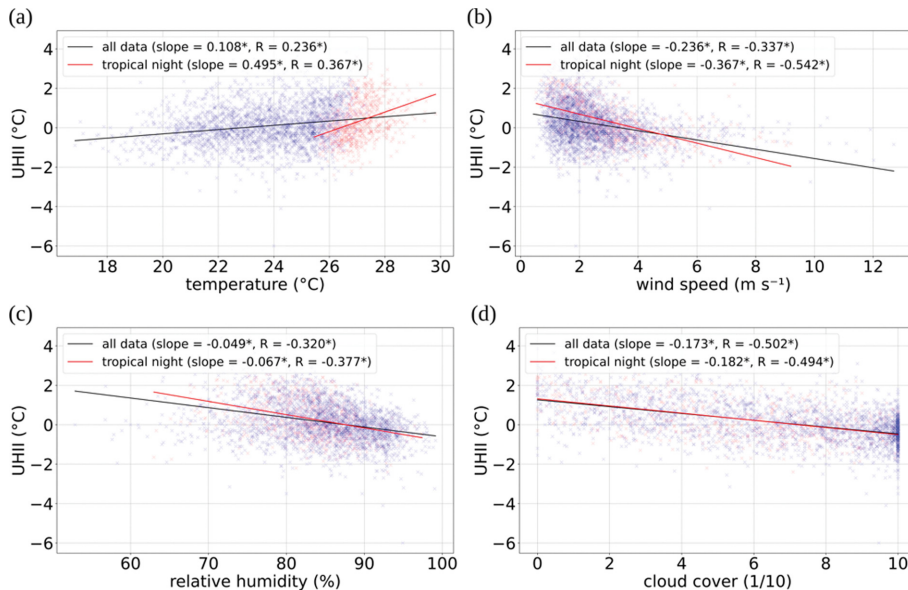
열대야 및 비열대야 시 도시 열섬 강도를 비교한 결과, 열대야 시 도시 열섬 강도가 평균적으로 더 높다는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 이는 열대야 발생 시 배경 기상 조건이 도시 열섬을 강화하는 방향으로 작용했을 가능성을 보여준다. 본 절에서는 열대야와 비열대야 시의 배경 기상 조건 차이를 분석하고, 이러한 차이가 도시 열섬 강도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

Table 1은 열대야와 비열대야 간 도시 열섬 강도와 배경 기상 요소(야간 기온, 풍속, 상대습도, 전운량)의 평균값을 비교한 결과를 보여준다. 열대야 시 기온은 27.05°C로 비열대야 시보다 3.40°C 더 높았으며, 풍속은 3.00 m s<sup>-1</sup>로 비열대야 시보다 0.44 m s<sup>-1</sup> 더 강하게 나타났다. 상대습도와 전운량은 열대야 시에 비열대야 시보다 각각 1.81 퍼센트포인트, 1.07/10 낮았다. 이는 열대야 시에 상대적으로 더 따뜻하고 바람이 강



**Table 1.** Nighttime mean UHII, temperature, wind speed, relative humidity, and cloud cover on tropical nights and non-tropical nights, and their differences (tropical nights minus non-tropical nights).

|                                 | Tropical nights | Non-tropical nights | Difference |
|---------------------------------|-----------------|---------------------|------------|
| UHII (°C)                       | 0.32            | 0.12                | 0.20       |
| Temperature (°C)                | 27.05           | 23.65               | 3.40       |
| Wind speed (m s <sup>-1</sup> ) | 3.00            | 2.56                | 0.44       |
| Relative humidity (%)           | 82.82           | 84.63               | -1.81      |
| Cloud cover (1/10)              | 5.50            | 6.57                | -1.07      |

**Fig. 5.** Scatter plots of UHII versus nighttime (a) temperature, (b) wind speed, (c) relative humidity, and (d) cloud cover on tropical nights (red) and non-tropical nights (blue). The red and black lines represent the linear regression lines for tropical nights and all data (tropical nights and non-tropical nights), respectively.  $R$  denotes the correlation coefficient, and the asterisk (\*) indicates statistical significance at the 0.05 significance level.

하며 건조하고 구름이 적은 기상 조건이 나타남을 의미한다. 국내 내륙 및 해안 14개 지점에서의 열대야 발생 특성을 분석한 Park and Suh (2011)는 열대야가 풍속이 약한 날 주로 발생한다고 보고하였는데, 이는 부산에 대해서만 분석한 본 연구에서 열대야 시 평균 풍속이 비열대야에 비해 더 강하게 나타난 것과 대비된다. Hong et al. (2018)은 우리나라 열대야 중 폭염이 아닌 상황에서 발생하는 열대야는 남서풍에 의해 동중국해의 고온다습한 공기가 이루어져 온실 효과가 강화되는 기작으로 발생한다고 제시한 바 있다. 남해안에 위치한 부산의 경우 이와 같은 기작의 열대야가 내륙 지역에 비해 빈번하게 발생할 것으로 추정되며, 열대야 시 나타나는 상대적으로 강한 평균 풍속은 이를 일부 반영하는 것으로 보인다.

각 배경 기상 요소가 도시 열섬 강도에 미치는 영

향을 분석하기 위해, 각 기상 요소별로 선형 회귀 분석을 수행하였다(Fig. 5). 열대야와 비열대야를 모두 포함하는 전체 데이터에 대해 분석한 결과, 기온은 도시 열섬 강도와 유의미한 양의 상관관계를 보였으며, 풍속, 상대습도, 전운량은 유의미한 음의 상관관계를 나타냈다. 이를 통해 부산의 열대야가 제공하는 상대적으로 따뜻하고 건조하며 구름이 적은 배경 기상 조건이 도시 열섬 강도를 강화하는 배경으로 작용하여 도시 열섬과 열대야 간 양의 상호작용이 나타나는 데 기여했고, 열대야 시에 나타난 평균적으로 강한 풍속은 이러한 도시 열섬 강도의 증가를 완화하는 역할을 했음을 알 수 있다.

한편, 열대야 시에는 기온, 풍속, 상대습도, 전운량 모두에서 회귀선 기울기의 절댓값과 상관계수가 전체 데이터에 비해 크게 나타났다. 이는 열대야 시에는 도

시 열섬 강도가 배경 기상 조건과 더욱 밀접한 관계를 가지며, 그 변화에 더 민감하게 반응한다는 것을 의미한다. 이러한 배경 기상 조건에 대한 높은 민감성은 열대야 시 도시 열섬 강도의 분포를 넓히고, 도시 열섬과 열대야 간 상호작용을 다양화하는 데 기여한 것으로 보인다.

### 3.3 도시 열섬 강도에 따른 열대야의 배경 기상 조건 및 종관 기상 패턴

앞서 열대야 및 비열대야의 배경 기상 조건을 비교하고 도시 열섬 강도와 관계 분석한 결과, 열대야의 배경 기상 조건에 따라 도시 열섬 강도가 강화되는 양의 상호작용이 나타날 수 있음을 확인하였다. 다만, 열대야와 도시 열섬 사이에는 음의 상호작용을 보이는 사례도 존재하며(Fig. 4), 이에 따라 도시 열섬 강도가 강한 열대야와 약한 열대야의 배경 기상 조건 및 종관 기상 패턴의 차이를 분석하고자 한다.

Table 2는 S-UHI 시와 W-UHI 시 도시 열섬 강도와 배경 기상 요소의 평균값을 비교한 것이다. S-UHI 시 도시 열섬 강도는 비열대야 평균( $0.12^{\circ}\text{C}$ )에 비해 훨씬 강한  $2.24^{\circ}\text{C}$ 로, 도시 열섬과 열대야 간 강한 양의 상호작용을 보였다. 반면 W-UHI 시에는 도시 열섬 강도가  $-1.63^{\circ}\text{C}$ 로 비열대야 평균에 비해 매우 작아 강한 음의 상호작용을 나타냈다.

S-UHI 시 배경 기온은  $27.48^{\circ}\text{C}$ 로, W-UHI 시보다  $0.91^{\circ}\text{C}$  높게 나타났다. 한편, S-UHI 시 풍속, 상대습도, 전운량은 W-UHI 시보다 각각  $2.61\text{ m s}^{-1}$ , 10.87 퍼센트포인트, 4.55/10 낮게 나타나, 서로 극명히 다른 기상 조건을 나타냈다. 이에 더해, 열대야 발생 전 나타나는 일최고기온에서도 S-UHI 시에 W-UHI 시보다  $2.46^{\circ}\text{C}$  높게 나타나는 큰 차이를 보였다. 이는 두 유형의 열대야의 발생 기작이 서로 다르다는 것을 암시하며, 이는 후술할 종관 기상 패턴 분석을 통해 확인하였다(Figs. 7, 8). 결국 부산에서 도시 열섬과 열대야의 강한 양의 상호작용은 기온이 상대적으로 높고 건조하며 풍속이 약하고 구름이 적은 열대야가 발생할 때 나타난다. 그러나 부산에서는 이보다 훨씬 풍속이 강하고 구름이 많으며 습한 조건에서도 열대야

가 발생하며, 이 경우 도시 열섬과 열대야 간 강한 음의 상호작용이 나타남을 확인하였다. 이는 앞선 선형 회귀 분석(Fig. 5)을 통해 얻은 각 배경 기상 요소와 도시 열섬 강도 간의 관계와도 일관적이다.

열대야 시 도시 열섬 강도와 여러 배경 기상 요소 간의 관계를 정량적으로 분석하기 위해 다중 선형 회귀 분석을 수행하였다. 기온, 풍속, 상대습도, 전운량을 통해 열대야 시 도시 열섬 강도의 변동을 39.9% 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 모든 독립 변수의 회귀 계수는 통계적으로 유의미하게 나타났으며, 풍속( $-0.38$ ), 전운량( $-0.23$ ), 기온( $0.13$ ), 상대습도( $-0.08$ ) 순으로 기상 요소가 도시 열섬 강도의 변동에 큰 영향을 미친다. 부산 열대야 시 도시 열섬 강도의 변동에 풍속이 가장 큰 영향을 미치고 상대습도가 가장 작은 영향을 미치는 것으로 나타난 것은 서울 지역의 폭염에 대한 Park et al. (2023)의 연구에서 도시 열섬 강도의 변동에 상대습도, 풍속, 체적 토양 수분 함량, 전운량 순으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타난 결과와 대비된다.

부산 열대야 시 도시 열섬 강도에 가장 큰 영향을 미치는 풍속의 역할에 대해 보다 자세히 살펴보기 위해, S-UHI 시와 W-UHI 시 부산 및 주변 지역 야간 바람장 분포를 비교하였다(Fig. 6). S-UHI 시에는 전반적으로 풍속이 약하고, 풍향 또한 일관되지 않은 흐름이 나타난다(Fig. 6a). 이로 인해 고온의 공기가 외부로 빠져나가지 못하고 도시 내에 축적되면서 도시 열섬 강도가 강화되는 경향을 보인다. 반면, W-UHI 시에는 훨씬 높은 풍속과 함께 도시에서 내륙을 향하는 흐름이 나타난다(Fig. 6b). 이러한 강한 풍속은 도시 열섬 효과를 도시 밖으로 이류시켜 도시 열섬 강도를 약화시키는 역할을 한다. 이렇듯 풍속이 강한 열대야와 약한 열대야는 도시 열섬 강도의 변화에 영향을 미치며, 이는 열대야의 특성에 따라 도시 열섬과 열대야 간의 상호작용이 달라질 수 있음을 시사한다.

종합적으로, 풍속이 약하고 구름이 적으며 기온이 높고 건조한 열대야일수록 도시 열섬과의 양의 상호작용이 나타나며, 풍속이 강하고 구름이 많으며 기온이 낮고 습한 열대야일수록 도시 열섬과의 음의 상호

**Table 2.** Nighttime mean UHII, temperature, wind speed, relative humidity, and cloud cover and daily maximum temperature on the S-UHI and W-UHI tropical nights, and their differences (S-UHI minus W-UHI).

|                                                  | S-UHI | W-UHI | Difference |
|--------------------------------------------------|-------|-------|------------|
| UHII ( $^{\circ}\text{C}$ )                      | 2.24  | -1.63 | 3.86       |
| Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )               | 27.48 | 26.57 | 0.91       |
| Wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ )                 | 1.72  | 4.33  | -2.61      |
| Relative humidity (%)                            | 78.82 | 89.69 | -10.87     |
| Cloud cover (1/10)                               | 2.70  | 7.25  | -4.55      |
| Daily maximum temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 31.91 | 29.45 | 2.46       |

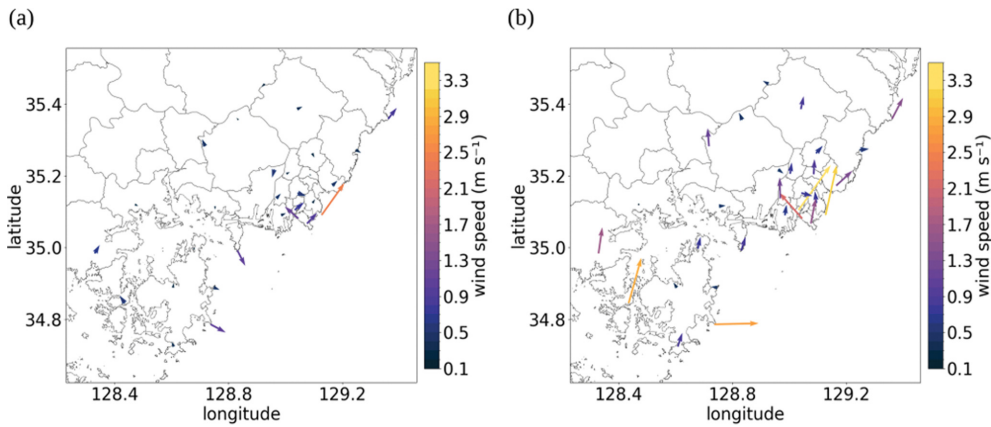


Fig. 6. Composite fields of wind vector during nighttime for the (a) S-UHI and (b) W-UHI tropical nights.

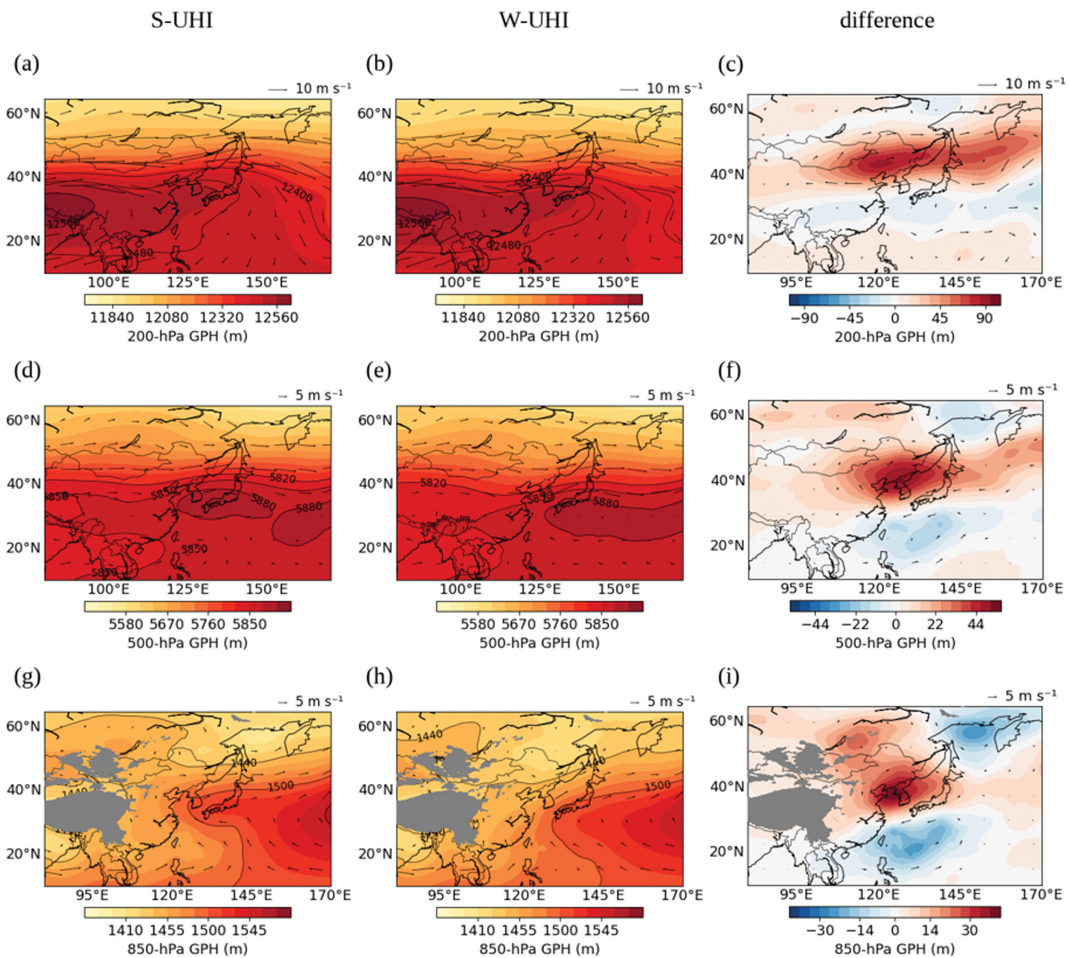


Fig. 7. Composite fields of 200-hPa (top row), 500-hPa (middle row), and 850-hPa (bottom row) geopotential height (GPH) with horizontal wind vector during nighttime for the S-UHI (leftmost column) and W-UHI (middle column) tropical nights, and their respective differences (S-UHI minus W-UHI) (rightmost column).

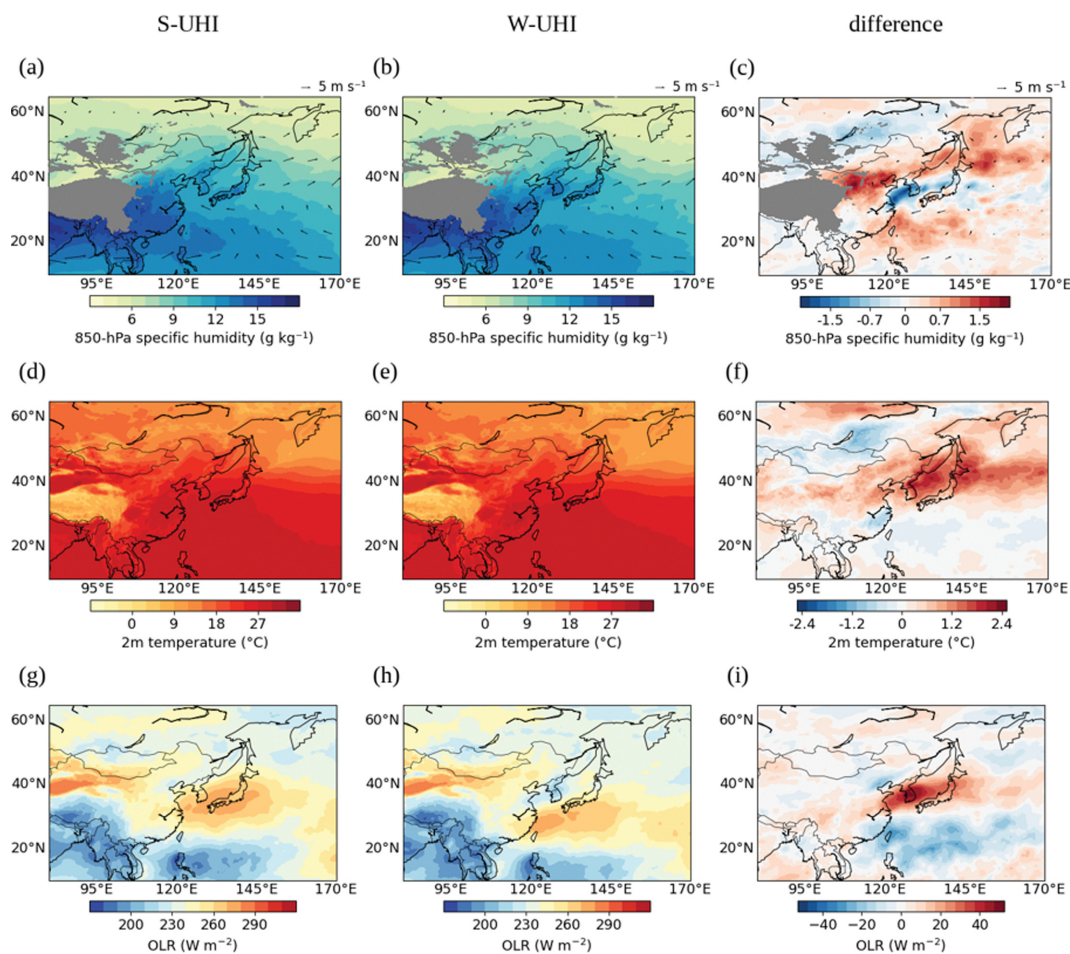


작용이 나타난다. 이러한 열대야의 특성 차이는 열대야의 발생 기작의 차이로부터 비롯되며, 이는 종관 기상 분석을 통해 확인할 수 있다.

Figure 7은 S-UHI 시와 W-UHI 시의 종관 기상 패턴과 그 차이를 보여준다. 상층에서는 두 경우 모두 부산이 티베트 고기압(200 hPa 지위고도의 12,480 m 등고선) 영향 하에 있으며, 이 고기압은 S-UHI 시에 북쪽으로 약간 더 확장된 모습이다(Figs. 7a-c). 한편, 중층 및 하층에서는 S-UHI와 W-UHI 간 종관 패턴의 차이가 뚜렷하게 나타난다. S-UHI 시에는 부산이 중층과 하층 고기압 내부에 위치하는 반면(Figs. 7d, g), W-UHI 시에는 고기압의 가장자리에 위치하여 강한 남서풍의 영향을 받는다(Figs. 7e, h). 특히 S-UHI 시에는 하층에서 우리나라와 일본에 고기압성 순환이 위치하고 동중국해에는 저기압성 순환이 위치하는 남

북 쌍극자 패턴을 형성한다(Fig. 7g). 태평양-일본 패턴이라 불리는 이 남북 쌍극자 패턴은 우리나라 폭염을 유도하는 대표적인 종관 기상 패턴 중 하나로, 특히 더 고온건조한 기상을 유도한다고 알려져 있다(Lee and Lee, 2016; Noh et al., 2021; Park et al., 2023). 반면, W-UHI 시에는 이러한 남북 쌍극자 패턴이 뚜렷하게 나타나지 않는다.

850 hPa 비습 및 바람, 2 m 기온, OLR을 그린 Fig. 8을 보면, S-UHI 시에는 부산이 상대적으로 낮은 비습과 약한 바람, 높은 지상 기온, 맑은 하늘을 보이는 것을 알 수 있다(Figs. 8a, d, g). 따라서 S-UHI 시의 열대야는 고기압 영향 하에서 강한 주간 일사와 단열 승온에 의한 고온이 야간에 다 해소되지 못하는 기작으로 발생한 것으로 보이며, 태평양-일본 패턴에 의한 고온건조한 폭염 상황에 발생하는 것으로 보인다. 반



**Fig. 8.** Composite fields of 850-hPa specific humidity with horizontal wind vector (top row), 2-m temperature (middle row), and outgoing longwave radiation (OLR) (bottom row) during nighttime for the S-UHI (leftmost column) and W-UHI (middle column) tropical nights, and their respective differences (S-UHI minus W-UHI) (rightmost column).

면, W-UHI 시에는 부산에 상대적으로 높은 비습과 강한 바람, 많은 구름이 나타나는 것을 볼 수 있다 (Figs. 8b, e, h). 따라서 W-UHI 시의 열대야는 부산이 북태평양 고기압의 가장자리에 위치하여 강한 남서풍을 따라 고온다습한 공기가 이루어지는 상황에서, 높은 습도와 운량에 의한 야간 복사 냉각 감소와 야간 온난이류에 의해 발생하는 것으로 보인다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 부산 및 주변 지역의 52년간 관측 자료를 이용하여 부산 도시 열섬과 열대야의 상호작용에 대해 분석하였다. 부산에서는 주변에 비해 열대야의 평균 빈도와 강도가 높으며, 이들의 시간에 따른 증가 경향이 더 뚜렷하게 나타났다. 이는 부산의 열대야를 악화하는데 도시 열섬이 유의미한 영향을 미치며, 도시화에 따라 그 영향이 더 증가했음을 의미한다. 또한, 부산에서는 비열대야 시에 비해 열대야 시 평균적으로 도시 열섬 강도가  $0.20^{\circ}\text{C}$  높은 도시 열섬-열대야 간 양의 상호작용이 나타나며, 이는 열대야 시의 상대적으로 따뜻하고 건조하며 구름이 적은 기상 조건이 도시 열섬 강도를 강화하는 배경으로 작용하였기 때문이다.

한편 열대야 시의 도시 열섬 강도는 변동성이 매우 커서, 도시 열섬과 열대야 간 강한 양의 상호작용을 보이는 경우도, 강한 음의 상호작용을 보이는 경우도 있었다. 이는 이 두 유형의 열대야에서 서로 극명히 다른 배경 기상 조건이 나타나기 때문이며, 이는 열대야의 발생 기작과 종관 기상 패턴의 차이에 기인한다. 부산에서 도시 열섬과 강한 양의 상호작용을 보이는 열대야는 상대적으로 바람이 약하고 구름이 적으며 기온이 높고 건조한 특성을 보이는데, 이러한 열대야는 태평양-일본 패턴과 같은 종관 기상 패턴에 의해 부산이 고기압의 지배 하에 있을 때 강한 일사에 의한 높은 주간 기온과 침강에 의한 단열 승온에 의해 발생한다. 이에 비해, 도시 열섬과 강한 음의 상호작용을 보이는 열대야는 훨씬 강한 바람과 높은 운량, 높은 습도를 보이는데, 이러한 열대야는 부산이 북태평양 고기압의 가장자리에 위치할 때 강한 남서풍을 따라 고온다습한 공기가 이루어짐에 따라 야간 복사 냉각 감소와 온난이류에 의해 발생한다.

일반적으로, 건조한 열대야와 습한 열대야 중 더 높은 열적 불쾌감을 야기할 것으로 기대되는 것은 습한 열대야이다. 그러나 부산에서 나타나는 위 두 유형의 열대야 중 상대적으로 건조한 열대야 시에는 도시 열섬과의 강한 양의 상호작용이 나타나 도시에서 열적 불쾌감을 보다 증가시킬 수 있기 때문에, 이에 대한 주목이 필요하다.

이렇듯 본 연구에서는 도시 열섬이 열대야에 미치는 단방향적인 영향에만 주목하지 않고, 두 현상 간의 상호작용과 그 원인에 대해 다방면으로 살펴보았다. 이를 통해 열대야의 특성과 발생 기작에 따라 도시 열섬과의 상호작용이 달라질 수 있음을 보였으며, 추후 관련된 연구에서는 이러한 변동성에 대한 고려가 필요하다.

남해안에 위치한 도시인 부산의 특성 상, 남풍 계열 바람에 의한 고온다습한 공기의 이류와 관련된 열대야의 빈도가 높을 것으로 기대되고, 이는 열대야 시 부산의 도시 열섬 강도를 평균적으로 낮추는 데 기여했을 것이다. 이러한 분석에 기반하여 추후에는 내륙 도시 등 다른 국내 여러 도시에서 나타나는 열대야의 특성과 도시 열섬과의 상호작용에 대해 연구를 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- Ayanlade, A., 2016: Seasonality in the daytime and nighttime intensity of land surface temperature in a tropical city area. *Sci. Total Environ.*, **557**, 415-424, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.03.027
- Choi, N., and M.-I. Lee, 2019: Spatial variability and long-term trend in the occurrence frequency of heatwave and tropical night in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 101-114, doi:10.1007/s13143-018-00101-w.
- Founda, D., and M. Santamouris, 2017: Synergies between urban heat island and heat waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Sci. Rep.*, **7**, 10973, doi:10.1038/s41598-017-11407-6.
- Gao, Z., Y. Hou, and W. Chen, 2019. Enhanced sensitivity of the urban heat island effect to summer temperatures induced by urban expansion. *Environ. Res. Lett.*, **14**, 094005, doi:10.1088/1748-9326/ab2740.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Hong, J.-S., S.-W. Yeh, and K.-H. Seo, 2018: Diagnosing physical mechanisms leading to pure heat waves versus pure tropical nights over the Korean Peninsula. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 7149-7160, doi:10.1029/2018JD028360.
- Jiang, S., X. Lee, J. Wang, and K. Wang, 2019: Amplified urban heat islands during heat wave periods. *J. Geo-*

- phys. Res. Atmos.*, **124**, 7797-7812, doi:10.1029/2018JD030230.
- Kim, D.-H., K. Park, J.-J. Baik, H.-G. Jin, and B.-S. Han, 2024: Contrasting interactions of urban heat islands with dry and moist heat waves and their implications for urban heat stress. *Urban Clim.*, **56**, 102050, doi:10.1016/j.uclim.2024.102050.
- Klok, S., A. Kornus, O. Danylchenko, and O. Skyba, 2023: Tropical nights (1976-2019) as an indicator of climate change in Ukraine. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **1126**, 012023, doi:10.1088/1755-1315/1126/1/012023.
- Li, D., and E. Bou-Zeid, 2013: Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: the impact in cities is larger than the sum of its parts. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 2051-2064, doi:10.1175/JAMC-D-13-02.1.
- Lee, W.-S., and M.-I. Lee, 2016: Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *Int. J. Climatol.*, **36**, 4815-4830, doi:10.1002/joc.4671.
- Martin-Vide, J., P. Sarricolea, and M. C. Moreno-García, 2015: On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference. *Front. Earth Sci.*, **3**, 24, doi:10.3389/feart.2015.00024.
- Mohajerani, A., J. Bakaric, and T. Jeffrey-Bailey, 2017: The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *J. Environ. Manage.*, **197**, 522-538, doi:10.2139/ssrn.3207224.
- Noh, E., J. Kim, S.-Y. Jun, D.-H. Cha, M.-S. Park, J.-H. Kim, and H.-G. Kim, 2021: The role of the Pacific-Japan pattern in extreme heatwaves over Korea and Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL093990, doi:10.1029/2021GL093990.
- Olcina Cantos, J., R. Serrano-Notivol, J. Miró, and O. Meseguer-Ruiz, 2019: Tropical nights on the Spanish Mediterranean coast, 1950-2014. *Clim. Res.*, **78**, 225-236, doi:10.3354/cr01569.
- Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 1-24, doi:10.1002/qj.49710845502.
- \_\_\_\_\_, G. Mills, A. Christen, and J. A. Voogt, 2017: *Urban Climates*. Cambridge University Press, 360-384, doi:10.1017/9781139016476.
- Park, K., H.-G. Jin, and J.-J. Baik, 2023: Contrasting interactions between urban heat islands and heat waves in Seoul, South Korea, and their associations with synoptic patterns. *Urban Clim.*, **49**, 101524, doi:10.1016/j.uclim.2023.101524.
- \_\_\_\_\_, J.-J. Baik, H.-G. Jin, and A. Tabassum, 2024: Changes in urban heat island intensity with background temperature and humidity and their associations with near-surface thermodynamic processes. *Urban Clim.*, **58**, 102191, doi:10.1016/j.uclim.2024.102191.
- Park, W.-S., and M.-S. Suh, 2011: Characteristics and trends of tropical night occurrence in South Korea for recent 50 years (1958-2007). *Atmosphere*, **21**, 361-371.
- Park, T.-W., C.-G. Lee, M. Chang, and D.-S. R. Park., 2022: Regional characteristics of hot days and tropical nights in the Honam area, South Korea. *Atmos. Sci. Lett.*, **23**, e1086, doi:10.1002/asl.1086.
- Sarker, T., J. R. Huh, and K. J. Bhang, 2020: Evaluating tropical night by comparing trends of land cover and land surface temperature in Seoul, Korea. *J. Korean Soc. Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, **38**, 123-130.
- Santamouris, M., 2015: Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Sci. Total Environ.*, **512-513**, 582-598, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.01.060.
- Suarez-Gutierrez, L., W. A. Müller, and J. Marotzke, 2020: Hotspots of extreme heat under global warming. *Clim. Dyn.*, **55**, 429-447, doi:10.1007/s00382-020-05263-w.
- Zhao, Y., L. Zhong, K. Zhou, B. Liu, and W. Shu, 2024: Responses of the urban atmospheric thermal environment to two distinct heat waves and their changes with future urban expansion in a Chinese megacity. *Geophys. Res. Lett.*, **51**, e2024GL109018, doi:10.1029/2024GL109018.
- Zheng, H., J. Yu, J. Lim, and K.-S. Lee, 2020: Spatial and temporal characteristics of tropical nights in Seoul. *Environ. Monit. Assess.*, **192**, 1-12, doi:10.1007/s10661-020-08608-4.