

한국 수도권 지역 열대야 현상의 온도 기준과 사망 위험

오지은* · 강신우** · 이환희*** · 김호****†

*서울대학교 보건대학원 석사과정학생, **서울대학교 보건대학원 박사과정학생,
부산대학교 정보의생명공학대학 의생명융합공학부 조교수, *서울대학교 보건대학원 교수

Cut-off Point Temperature of Hot Night and Heat-related Mortality Risk in the Capital Area of South Korea

Oh, Jieun* · Kang, Cino** · Lee, Whanhee*** and Kim, Ho****†

*Master Student, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

**Ph.D. Student, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

***Assistant Professor, School of Biomedical Convergence Engineering, College of Information and Biomedical Engineering, Pusan National University, Yangsan, Korea

****Professor, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

The effects of extreme climate events associated with global warming on health have become a major public health concern. Previous studies on the mortality risk of high night-time temperatures, called “hot nights”, demonstrated that the current hot-night warning system in South Korea may not be sufficient because the warning system does not report the risks of night-time temperatures lower than 25°C (the current cut-off point for hot nights) and the threshold points were heterogeneous among subpopulations. Therefore, this study aimed to investigate the mortality risk of hot nights using various cut-off points and subpopulation analysis to suggest effective health risk-based warning systems.

We collected time-series data on daily mortality and minimum temperature for 66 districts (si-gun-gu) in the capital area (Seoul, Gyeonggi, and Incheon) of South Korea during the summer period (Jun. ~ Sep.) from 2011 to 2017. Cut-off point temperatures were set from 20°C to 25°C, and the days with a daily minimum temperature above the cut-off point were defined as hot nights. Through two-stage time-series analysis with a distributed lag model, the association between hot nights and mortality was estimated for each district. We then calculated the pooled risk estimates using a meta-regression model.

In the capital areas as a whole, positive mortality risk was detected around at 22°C, and the risk was highest at 25°C. In general, across all cut-off temperatures, Seoul showed higher risk compared to Gyeonggi and Incheon, and the cut-off value at which the risk was significant was the lowest (22°C). In addition, risk disparities between subpopulations (sex, age, education status, and marital status) were prominent at the highest cut-off point (25°C).

In conclusion, this study provides evidence for health-risk-based hot night warning systems, which should be expanded to lower night-time temperatures and should account for regions and subpopulations.

Key words: Hot Night, Night Warming, Mortality Risk, Minimum Temperature, DLM

1. 서론

지구 온난화와 관련된 극한기후현상의 영향은 공중보

건에서 중요한 문제이다. 고온 현상이 사망위험과 질병에 대한 부담을 증가시킬 수 있다는 것은 널리 알려져 있다 (Gasparrini et al., 2015b; Guo et al., 2017).

†Corresponding author : hokim@snu.ac.kr (1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea. Tel. +82-2-880-2702)

ORCID 오지은 0000-0002-3934-5829
강신우 0000-0002-6230-7257

이환희 0000-0001-5723-9061
김 호 0000-0001-7472-3752

Received: October 6, 2022 / Revised: October 24, 2022 / Accepted: November 14, 2022

최근에는 ‘열대야(Hot night 또는 Tropical night)’로 불리는 야간 고온 현상이 주간 고온 현상만큼 건강에 부정적인 영향을 미친다는 점이 연구되고 있다(He et al., 2022; Murage et al., 2017; Royé, 2017; Royé et al., 2021). 열대야 현상은 일차적으로 수면의 정상적인 생리를 방해하며(Nastos and Matzarakis, 2008), 그에 따른 수면 부족은 심혈관 질환, 당뇨병 등 질환의 이환과 사망 위험으로 이어질 수 있다(Ayas et al., 2003; Gottlieb et al., 2005). 일본, 한국, 중국 대상 연구와 남부 유럽 대상 연구는 야간 고온 현상이 사망률 위험 증가와 유의하게 연관되어 있다는 점을 밝혔으며(He et al., 2022), 런던 대상 연구는 일부 원인의 경우(e.g., 뇌졸중 및 만성 허혈성 질환) 높은 야간 기온으로 인한 사망 위험이 높은 주간 기온으로 인한 위험보다 더 클 수 있다는 것을 보여주었다(Murage et al., 2017).

한국에서 열대야일은 일 최저 기온이 25°C 이상인 날로 정의된다(National Institute of Meteorological Sciences, 2012). 이러한 열대야의 기준은 기상청에서 정의하였는데, 25°C는 1973년부터 2017년까지의 기간 동안 7월과 8월의 한국의 모든 기상 관측소의 일일 최저 기온 분포에서 약 99번째 백분위수에 해당한다(Choi and Lee, 2019). 하지만 폭염의 사망위험을 다룬 연구들에서는 온도의 99번째 백분위수를 최대 건강 위험이 발생할 수 있는 수준으로 보고 있으며(Gasparrini et al., 2015a; Kang et al., 2020), 열대야 현상과 사망위험을 다룬 연구들에서는 열대야의 기준을 25°C보다 낮은 20°C, 23°C 등으로 설정하고 있다(Royé, 2017; Royé et al., 2021). 이러한 사실은 일 최저 기온 25°C를 열대야의 기준으로 설정하는 것이 열대야가 건강에 미치는 영향을 파악하는 데 충분치 않을 수 있음을 암시한다.

특히, 열대야를 포함한 극한기후현상의 영향은 더 도시화된 지역일수록 더욱 크게 나타날 수 있다(Fischer et al., 2012; Lee et al., 2021). 대도시 지역은 타 지역에 비해 건물 밀도가 높고 식생 밀도가 낮기 때문에 여름철 야간 최저 기온이 높게 나타나며(Kardinal Jusuf et al., 2007), 이러한 도시 열 이상 현상은 이환율 및 사망률과 연관된다(Jang et al., 2020).

또한, 폭염 및 열대야의 영향은 개인적 특성에 따른 하위 집단 간에 불평등하게 나타날 수 있다. 저소득과 낮은 교육 수준 등 사회경제적 지위가 낮은 집단이 열 관련 사망에 더 취약하다는 점이 연구되었다(Hsu et al., 2021; O'Neill et al., 2003). 성별에 따른 차이를 살펴본 연구들에서는 남성보

다 여성에서 폭염 및 열대야로 인한 사망위험이 더 크다고 제시하였으나(Son et al., 2012; Wang et al., 2019), 일부 연구에서는 성별 간 차이가 발견되지 않기도 하였다(Basu and Ostro, 2008). 연령과 관련하여서는 주로 노년층이 열 관련 사망에 더 취약하다고 알려져 있으나(Kenny et al., 2010), 야간의 고온에 노출되는 것이 젊은 연령층의 사망 위험에 중요한 기여를 한다는 점 또한 밝혀졌다(Murage et al., 2017).

따라서 본 연구에서는 주로 도시지역인 수도권에서 열대야 현상이 사망에 미치는 영향을 살펴보고, 열대야 현상을 정의하는 기준점을 다르게 설정하여 결과를 비교하고자 한다. 아울러 하위 집단에 따라 열대야로 인한 사망 위험에 차이가 있는지도 확인하고자 한다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 연구자료

본 연구에서는 도시지역의 열대야 현상과 사망위험 간 연관성을 분석하기 위해 한국 수도권(서울, 경기, 인천) 66개 시군구의 2011년부터 2017년까지의 일별 사망자료와 기상 자료를 수집하였다. 사망자료 수집을 위해 마이크로데이터 통합서비스(MDIS)의 사망원인통계를 이용하였다(Statistics Korea, <https://mdis.kostat.go.kr/index.do>). 개인 단위로 제공되는 사망자료를 가공하여 국제질병사인분류코드(ICD-10) A00-Y89에 해당하는 전체 사망원인에 대한 시군구별 일 사망자 수를 산출하였으며 함께 제공되는 사망자 정보(성별, 연령, 교육수준, 혼인상태 등)를 활용하여 개인적 특성에 따른 사망자 수를 산출하였다. 기상자료 수집을 위해 기상자료개방포털에서 읍면동 단위로 분석값을 제공하는 동네예보 초단기실황 파일셋을 이용하였다(Korea Meteorological Administration, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>). 시간 단위로 제공되는 온도 및 습도 자료를 가공하여 일 최저 기온과 일 평균 상대 습도를 구한 후 시군구별로 평균값을 산출하였다. 열대야 현상은 여름철 야간의 고온현상을 지칭하기 때문에 모든 자료는 여름철, 즉 6월부터 9월까지의 기간으로 제한되었다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 열대야 현상 정의 및 기준점 설정

기상청에 따르면 열대야일은 일 최저 기온이 25°C 이

상인 날로 정의되며(National Institute of Meteorological Sciences, 2012), 이처럼 열대야 현상을 일 최저 기온을 기준으로 정의하는 방식은 선행연구에서 널리 사용되어 왔다(Chen and Lu, 2014; Park et al., 2012). 따라서 본 연구에서도 기상청의 방식을 준용하여 일 최저 기온을 기준으로 열대야 현상을 정의하였으며, 기준점(cut-off point)에 따른 열대야 현상과 사망위험 간의 연관성을 살펴보기 위하여 열대야 현상의 기준점을 기존의 25°C 부터 20°C까지 1°C씩 낮추어가며 다음과 같이 정의하였다:

$$HN_j = \begin{cases} 0 & \text{if } t_{\min(j)} < T_{\text{cut-off}j} \\ 1 & \text{if } t_{\min(j)} \geq T_{\text{cut-off}j} \end{cases} \quad (1)$$

$t_{\min(j)}$ 는 j 번째 날의 일 최저 기온을 의미하고, $T_{\text{cut-off}j}$ 는 기준점이 되는 기온을 의미하며, 일 최저 기온이 기준점 이상인 경우를 열대야 현상이 발생하는 것으로 보았다.

2.2.2. 열대야 현상과 사망위험 간 연관성 분석

본 연구에서는 열대야 현상과 일 사망위험 간 연관성을 추정하기 위해 2단계 시계열 분석방법(two-stage time-series analysis)을 사용하였다.

1단계에서는 66개 시군구별로 시계열 분석을 수행하였다. 열대야 현상과 사망위험 간 연관성을 시군구 단위에서 추정하기 위해 노출-반응 관계와 시간적 구조를 동시에 나타낼 수 있는 분산 지연 모델(distributed lag model)을 사용하였다(Gasparrini et al., 2010). 그리고 모형의 과대산포(overdispersion) 문제를 고려하기 위하여 준-포아송 분포(quasi-Poisson distribution)를 따르는 일반화 선형 모델(generalized linear model)을 적합하였다. 본 연구에서 사용된 모델 방정식은 다음과 같다. :

$$Y_j \sim \text{poisson}(\mu_j) \\ \log(\mu_j) = \beta_0 + s(HN_j, \text{lag} = 10) \\ + ns(DOY_j, df = 4/\text{years}) \\ + \text{factor}(DOW_j) + RH_j \quad (2)$$

Y_j 는 j 번째 날의 사망자수이고, μ_j 는 j 번째 날의 기대 사망자수이며, β_0 는 상수항이다. 노출변수로서 열대야 현상에 대한 이분형 변수(HN_j)를 분산 지연 모델에 적용하여 적합시켰다. 이 때 열대야 현상의 선형 지연 효과를 고려하기 위해 basis 함수($s(\cdot)$)를 사용하였으며, 상수

항을 포함하고 2개의 노트(internal knots)가 로그 스케일에서 동일한 간격으로 배치된 자연 3차 스플라인(natural cubic spline)을 통해 최대 10일 동안의 분포 지연 효과를 파악하였다. 사망자수의 계절성과 장기적인 추세를 보정하기 위해 1년 내 여름 기간의 역일(calender day; DOY_j)에 대한 자유도 4의 자연 3차 B-스플라인(natural cubic B-spline; ns)을 사용하였다. j 번째 날의 요일에 대한 범주형 변수(DOW_j)와 상대 습도(RH_j)도 보정하였다. 이러한 모델의 구성은 이전 연구에서 참조되었다(Gasparrini et al., 2015a; Kang et al., 2020; Lee et al., 2021). 1단계 분석을 통해 시군구 수준에서 누적 지연 노출-반응 관계(lag-cumulative exposure-response association), 즉 상대 위험도(relative risks; RRs)를 추정하였다.

2단계 분석에서는 1단계에서 얻은 시군구 수준에서의 추정치를 통합(pooling)하기 위해 지역간 이질성(heterogeneity)을 반영할 수 있는 임의 효과 메타 분석(random-effects meta-analysis)을 사용하였다. 다만, 본 연구에서는 지역간 이질성은 관찰되지 않았다(기준점 25°C 모형 Cochran Q p-value: 0.6, I^2 : 1.0%). 모든 분석은 전체 인구 집단과 하위 지역(서울, 경기, 인천)별로 수행되었으며, 각 기준점마다 반복되었다.

2.2.3 하위집단 분석

하위집단 분석을 위하여 성별, 연령(65세 미만, 65세 이상), 교육수준(중학교 졸업 이하, 고등학교 졸업 이상), 혼인 상태(기혼, 미혼·이혼·사별)에 따라 위 분석 과정을 반복하였다.

3. 연구결과

3.1. 열대야 현상의 발생빈도의 공간 분포

기준점을 25°C로 설정하였을 때 시군구별 열대야 현상의 연평균 발생빈도의 공간 분포는 Fig. 1과 같다. 수도권 내 66개 시군구 중 서울 동부에 위치한 광진구(17.6일)와 성동구(17.1일)에서 열대야 현상의 발생빈도가 높았으며, 경기 동북부에 위치한 가평군(0.4일)과 포천시(0.6일)에서 빈도가 낮았다. 서울 내에서는 동부 외에도 남서부의 양천구(17.0일)와 강서구(16.1일)에서 열대야 현상의 빈도가 높았으며, 북동부의 도봉구(6.6일)와 노원구(7.1일)에서 빈도가 낮았다. 경기 내에서는 부천시(14.3일)와 광명시

(14.1일)에서 열대야 현상의 빈도가 가장 높았으며, 가평군과 포천시 외에도 연천군(0.86일)과 양평군(1.0일)에서 빈도가 낮았다. 인천 내에서는 부평구(11.7일)와 동구(11.3일)에서 열대야 현상의 빈도가 높았으며, 옹진군(3.7일)과 강화군(4.1일)에서 빈도가 낮았다.

3.2. 열대야 현상의 발생빈도와 사망자수

일 평균 기온, 최저 기온, 최고 기온과 기준점 설정에 따른 열대야 현상의 연평균 발생빈도를 정리한 결과는 Table 1과 같으며, 모든 값은 시군구별 평균값으로 계산되었다. 수도권 지역의 일 평균 기온은 23.8°C, 일 최저 기온은

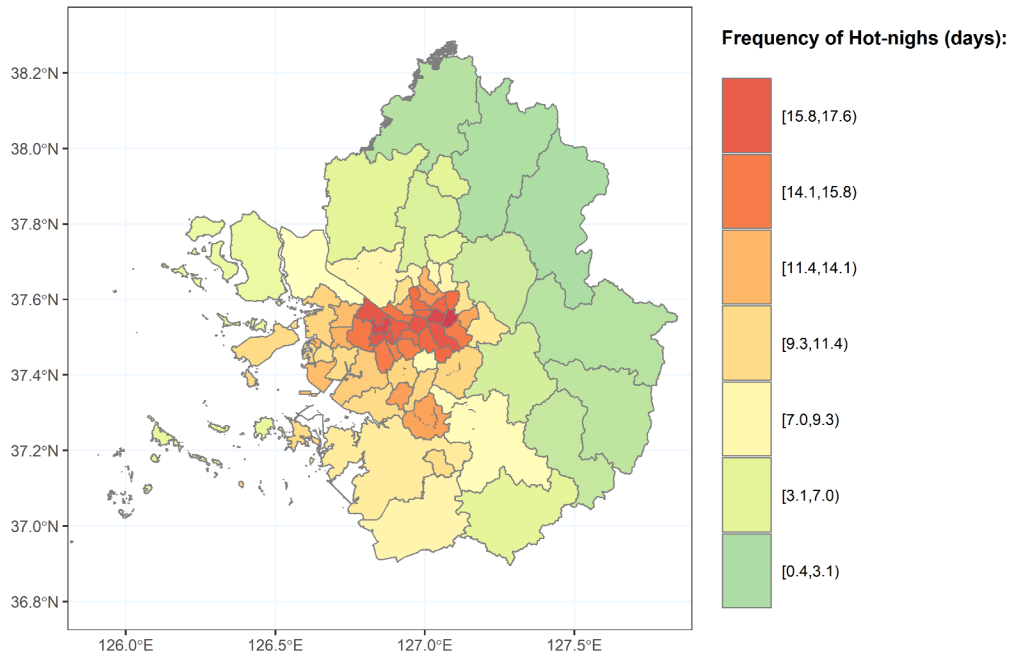


Fig. 1. Geographical distribution of the frequency of hot nights in the capital area of South Korea in the summer season of 2011 ~ 2017

Table 1. Descriptive statistics of mean, minimum and maximum temperature and annual frequency of hot-nights by each cut-off point in the capital area of South Korea, including Seoul, Gyeonggi and Incheon during the summer of 2011 ~ 2017. Data are averages of mean (range) across areas

	Total study areas	Seoul	Gyeonggi	Incheon
Temperature (°C)				
Mean temperature	23.8 (22.3, 24.9)	24.4 (23.6, 24.9)	23.5 (22.3, 24.3)	23.5 (22.5, 24.0)
Minimum temperature	20.3 (18.0, 21.6)	21.1 (20.0, 21.6)	19.7 (18.0, 21.1)	20.3 (19.4, 20.8)
Maximum temperature	28.1 (25.7, 28.7)	28.3 (27.9, 28.7)	28.1 (27.6, 28.6)	27.4 (25.7, 28.2)
Annual frequency of hot-nights (days)				
Cut-off point 20°C	67.4 (43.6, 84.0)	77.2 (61.9, 84.0)	60.3 (43.6, 77.7)	65.0 (51.6, 74.1)
Cut-off point 21°C	54.2 (33.0, 69.6)	62.4 (50.0, 69.6)	48.4 (33.0, 61.9)	51.5 (42.1, 58.3)
Cut-off point 22°C	42.4 (22.3, 55.6)	49.6 (39.1, 55.6)	37.5 (22.3, 50.0)	39.8 (30.1, 45.0)
Cut-off point 23°C	30.6 (9.4, 42.7)	37.6 (27.1, 42.7)	25.8 (9.4, 36.7)	27.7 (19.6, 32.1)
Cut-off point 24°C	18.4 (2.3, 29.0)	24.3 (15.1, 29.0)	14.1 (2.3, 25.1)	17.0 (9.7, 20.6)
Cut-off point 25°C	9.6 (0.4, 17.6)	13.9 (6.6, 17.6)	6.3 (0.4, 14.3)	9.0 (3.7, 11.7)

20.3°C, 일 최고 기온은 28.1°C인 것으로 나타났다. 하위 지역 중 서울의 일 평균, 최저, 최고 기온이 가장 높았다 (24.4°C, 21.1°C, 28.3°C). 기준점을 25°C로 설정하였을 때 전체 수도권 지역에서 열대야 현상은 연 평균 9.6일 발생하는 것으로 나타났다. 서울에서 열대야 현상의 빈도가 가장 높고(13.9일) 인천에서 가장 낮았으며(9.0일), 다른 기준점으로 설정하였을 때에도 동일한 결과가 나타났다.

연구 기간(2011년부터 2017년의 여름기간) 동안의 사망자수 합계를 정리한 결과는 Table 2과 같으며, 모든 값은 시군구별 평균값으로 계산되었다. 연구 기간 동안 전체 수도권 지역의 평균 사망자수는 3608.3명이었다. 하위지역별로 확인하였을 때 서울(3725.4명)에서 평균 사망자수가 가장 많았으며 인천(2979.0)에서 가장 적었

다. 하위집단별로 확인하였을 때 평균 사망자수는 여성(1586.2명)보다 남성(2022.1명)에서, 65세 미만(1090.9명)보다 65세 이상(2516.9명)에서, 고등학교 졸업 이상(1348.5명)보다 중학교 졸업 이하(2146.8명)에서, 기혼(1733.5명)보다 미혼·이혼·사별(1864.2명)에서 많았다.

3.3. 기준점 설정에 따른 열대야 현상의 사망위험

3.3.1. 전체 수도권 지역 및 하위지역별 열대야 현상의 사망위험

기준점 설정에 따른 열대야 현상의 사망위험을 비교한 결과는 Fig. 2와 같다. 전체 수도권 지역에서는 기준점이 22°C일 때부터 열대야 현상에 따른 유의한 사망위험이 발

Table 2. Descriptive statistics of mortality in the capital area of South Korea, including Seoul, Gyeonggi and Incheon during the summer of 2011 ~ 2017. Data are averages of mean (range) across areas

	Total study areas	Seoul	Gyeonggi	Incheon
Total	3608.3 (361, 9797)	3725.4 (1442, 5882)	3716.7 (564, 9797)	2979.0 (361, 5687)
Sex				
Male	2022.1 (203, 5344)	2102.8 (874, 3210)	2071.3 (283, 5344)	1667.7 (203, 3168)
Female	1586.2 (158, 4453)	1622.6 (568, 2672)	1645.5 (281, 4453)	1311.3 (158, 2519)
Age group				
Aged 0-64 y	1090.9 (95, 3160)	1097.1 (420, 1697)	1132.4 (152, 3160)	946.9 (95, 1859)
Age 65 y and more	2516.9 (264, 6749)	2627.7 (1021, 4184)	2584.1 (412, 6749)	2031.4 (264, 3827)
Education level				
Middle school or lower	2146.8 (260, 5875)	2070.6 (827, 3469)	2285.5 (260, 5875)	1907.5 (268, 3564)
High school or over	1348.5 (76, 3926)	1526 (556, 2296)	1325.8 (184, 3926)	975.5 (76, 1931)
Marital status				
Married	1733.5 (168, 4422)	1822.3 (634, 2856)	1774.1 (276, 4422)	1385.9 (168, 2620)
Unmarried/Divorced/Bereaved	1864.2 (191, 5341)	1887.7 (780, 3021)	1935.9 (287, 5341)	1583 (191, 3052)

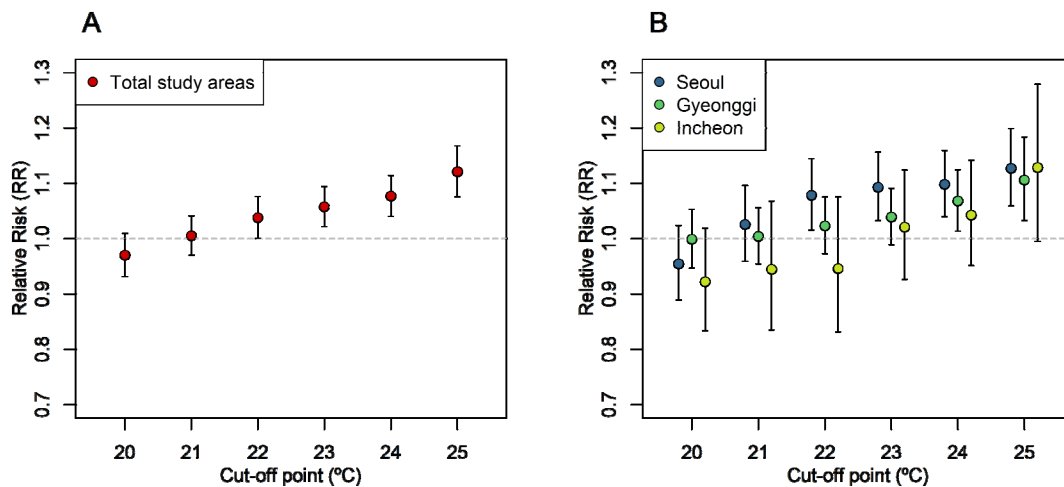


Fig. 2. Mortality risks (RRs) at each hot night cut-off point in total capital areas of South Korea (A) and by regions (B)

생하였으며(RR: 1.04, 95% CI: 1.00-1.08), 기준점이 높아질수록 위험이 증가하다 기준점이 25°C일 때 가장 높은 값을 보였다(RR: 1.13, 95% CI: 1.08-1.17)(Fig. 2A). 서울에서도 기준점 22°C에서부터 유의한 사망위험이 발생하였으며(RR: 1.08, 95% CI: 1.02-1.14) 기준점 25°C에서 가장 높은 위험이 나타났다(RR: 1.13, 95% CI: 1.06-1.20)(Fig. 2B). 또한, 기준점이 22°C 이상으로 설정될 때 서울의 사망위험은 경기와 인천의 사망위험에 비해 높은 것으로 나타났다.

3.3.2. 하위집단별 열대야 현상의 사망위험

기준점 설정에 따른 열대야 현상의 사망위험을 하위집단별로 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. 성별 집단에서는 남

성과 여성 모두 25°C보다 낮은 기준점에서부터 유의한 사망위험이 발생하였으며, 25°C에서 가장 높은 위험이 나타났다(Fig. 3A). 유의한 사망위험이 발생하기 시작한 기준점은 여성에서보다 남성에서 다소 낮기는 하였으나, 전반적인 점 추정치에 따르면 여성이 남성보다 열대야 현상에 따른 사망위험에 취약한 것으로 나타났다. 연령별 집단에서는 65세 미만과 65세 이상 모두 25°C보다 낮은 기준점에서부터 유의한 사망위험이 발생하였다(Fig. 3B). 그러나 65세 미만에서는 기준점 23°C에서 가장 높은 위험이 나타난 후 그 이상의 기준점에서는 감소한 반면, 65세 이상에서는 기준점이 높아짐에 따라 사망위험이 점차 증가하다가 기준점 25°C에서 가장 높은 위험이 나타났다. 다시

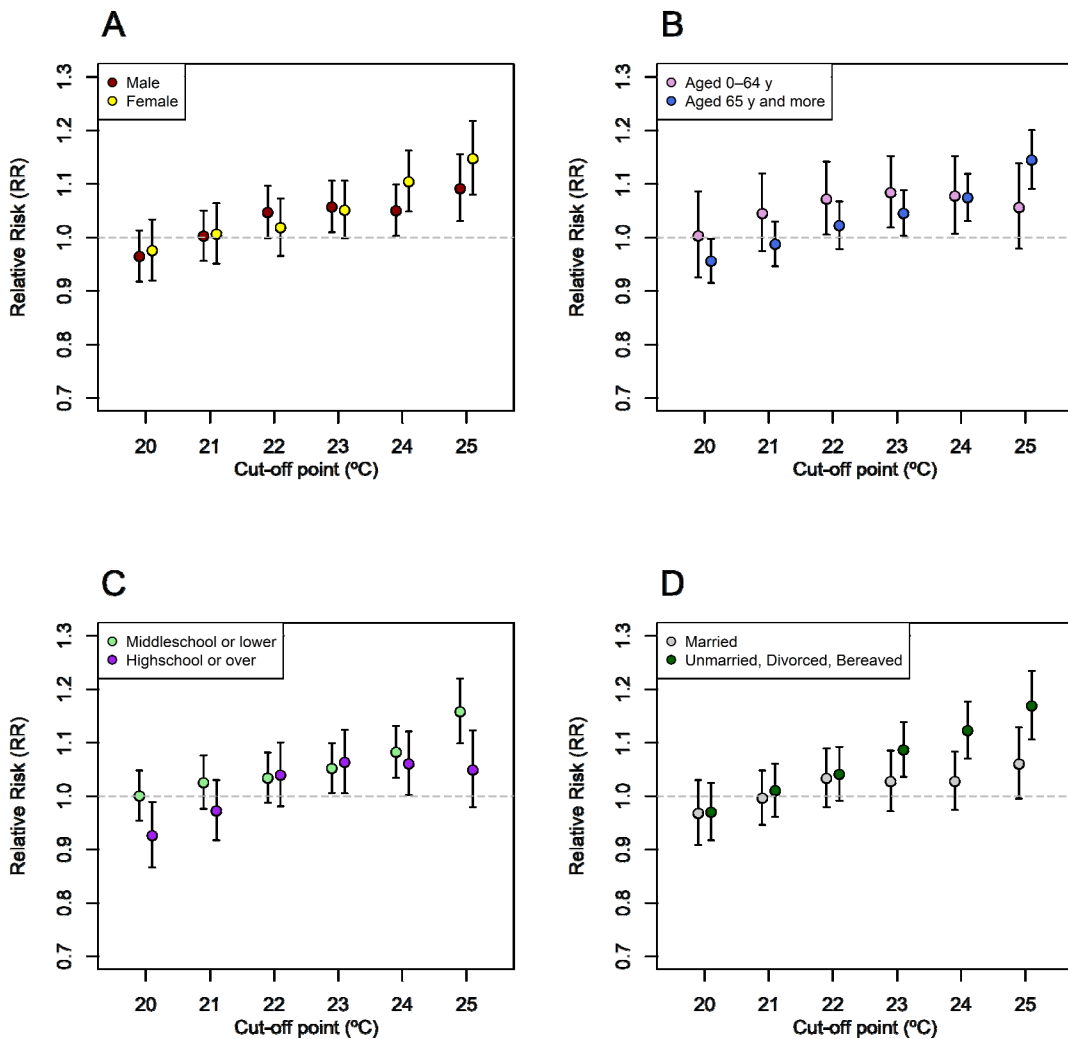


Fig. 3. Mortality risks (RRs) at each hot night cut-off point in the capital area of South Korea by sex (A), age group (B), educational status (C) and marital status (D)

말해, 기준점이 25°C 미만으로 설정될 경우에는 65세 미만인 65세 이상보다 열대야 현상에 따른 사망위험에 취약한 것으로 나타났으나, 기준점 25°C에서는 65세 이상이 65세 미만보다 취약한 것으로 나타났다.

교육수준과 관련하여 중학교 졸업 이하인 경우와 고등학교 졸업 이상인 경우 모두 25°C 미만의 기준점에서부터 유의한 사망위험이 발생하였다(Fig. 3C). 그러나 중학교 졸업 이하의 경우 기준점이 높아짐에 따라 그 사망위험이 높아지며 기준점 25°C에서 가장 높은 위험이 나타난 반면, 고등학교 졸업 이상인 경우 유의한 위험이 발생한 기준점 이후 점차 위험이 감소하는 경향을 보였다. 전반적으로는 중학교 졸업 이하가 고등학교 졸업 이상보다 사망 위험에 더 취약한 것으로 나타났다. 혼인 상태와 관련하여 기혼의 경우 모든 기준점에서 사망위험이 유의하지 않은 것으로 나타났다(Fig. 3D). 그러나 미혼·이혼·사별의 경우 25°C보다 낮은 기준점에서부터 유의한 사망위험이 발생하였으며 기준점이 높아질수록 위험이 높아진다 기준점 25°C에서 가장 높은 위험이 발견되었다. 또한, 모든 기준점에서 미혼·이혼·사별이 기혼보다 열대야 현상에 따른 사망위험에 더 취약한 것으로 나타났다.

3.3.3. 열대야 현상에 따른 사망위험의 기준점 간 차이

기준점 설정에 따른 열대야 현상의 사망위험의 차이를 살펴보기 위해 전체 수도권 지역에서 유의한 사망위험이 발생하기 시작한 기준점 22°C와 가장 높은 사망위험이 관찰된 기준점 25°C 간의 사망위험 점추정치(비(Ratio of relative risks between cut-off points))를 계산하여 Table 2에 제시하였다. 전체 수도권 지역에서 기준점 25°C에서의 사망위험은 기준점 22°C에서의 사망위험의 1.08배인 것으로 나타났다. 하위지역을 살펴보았을 때 기준점 25°C에서 기준점 22°C에 비해 서울은 1.05배, 경기도는 1.09배, 인천은 1.19배 만큼의 차이가 나타났다. 하위집단을 살펴보았을 때 기준점 간 사망위험의 차이는 남성(1.04)보다 여성(1.13)에서, 65세 미만(0.99)보다 65세 이상(1.12)에서, 고등학교 졸업 이상(1.01)보다 중학교 졸업 이상(1.13)에서, 기혼(1.03)보다 미혼·이혼·사별(1.13)에서 크게 나타났다. 다시 말해, 취약한 것으로 여겨지는 하위 집단에서 기준점 간 사망위험의 차이가 더 컸으며, 이는 기준점 25°C에서 취약한 집단의 사망위험이 가파르게 증가하고 하위집단 간 격차가 크게 나타나는 것으로 설명될 수 있다.

Table 3. Mortality risks (RRs) at the hot night cut-off point of 22°C and 25°C by regions and individual characteristics across capital areas in South Korea

	Cut-off point 22°C	Cut-off point 25°C	Ratio of relative risks between cut-off points
Total	1.04 (1.00, 1.08)	1.12 (1.08, 1.17)	1.08
Region			
Seoul	1.08 (1.02, 1.14)	1.13 (1.06, 1.20)	1.05
Gyeonggi	1.02 (0.97, 1.08)	1.11 (1.03, 1.18)	1.09
Incheon	0.95 (0.83, 1.08)	1.13 (1.00, 1.28)	1.19
Sex			
Male	1.05 (1.00, 1.10)	1.09 (1.03, 1.16)	1.04
Female	1.02 (0.97, 1.07)	1.15 (1.08, 1.22)	1.13
Age group			
Aged 0-64 y	1.07 (1.01, 1.14)	1.06 (0.98, 1.14)	0.99
Aged 65 y and more	1.02 (0.98, 1.07)	1.14 (1.09, 1.20)	1.12
Education level			
Middle school or lower	1.03 (0.99, 1.08)	1.16 (1.10, 1.22)	1.13
High school or over	1.04 (0.98, 1.10)	1.05 (0.98, 1.12)	1.01
Marital status			
Married	1.03 (0.98, 1.09)	1.06 (1.00, 1.13)	1.03
Unmarried, Divorced, Bereaved	1.04 (0.99, 1.09)	1.17 (1.11, 1.24)	1.13

4. 고찰

본 연구에서는 2011년부터 2017년까지 여름 기간(6월 ~ 9월) 동안 한국 수도권 지역에서의 열대야 현상이 사망에 미치는 영향을 분석하고 열대야 현상을 정의하는 기준점에 따라 그 결과가 다르게 나타나는지 확인하였다. 이를 위해 2단계 시계열 분석 방법을 사용하여 전체 인구집단, 하위지역(서울, 경기, 인천), 하위집단(성별, 연령, 교육수준, 혼인상태)에 대하여 각 기준점(20°C ~ 25°C)에 따른 열대야 현상의 사망위험을 추정하였다. 그 결과 전체 수도권 지역에서 기준점 22°C에서부터 유의한 사망위험이 발견되었으며 기준점 25°C에서 위험이 가장 높은 것으로 나타났다. 하위 지역 중 서울은 모든 기준점에서 사망위험이 경기와 인천에 비해 높은 것을 확인하였다. 하위 집단 분석에서는 집단 간 사망위험의 격차가 발생함을 확인했고 그 격차는 기준점 25°C에서 가장 두드러졌다.

본 연구의 주요한 발견은 열대야 현상이 일 최저 기온이 25°C 이상인 날로 정의될 때 사망위험이 가장 크게 나타나지만, 25°C보다 낮은 기준점으로 정의되어도 열대야로 인한 사망위험이 유의하게 발견된다는 점이며, 이는 이전의 연구들의 결과와 일치한다(Alexander et al., 2006; He et al., 2022; Royé, 2017; Royé et al., 2021). 기후 변화 지수를 분석한 다국가 연구에서는 열대야 현상을 일 최저 기온이 20°C 이상인 경우로 정의하였고(Alexander et al., 2006), 이를 근거로 기준점을 20°C로 설정한 다른 연구에서는 열대야 현상이 사망 위험을 높인다는 점을 밝혔다(Royé et al., 2021). 한편 열대야 현상의 기준점은 폭염의 정의 방식을 참고하여 지역별 일 최저 기온의 95번째 백분위수로 설정되기도 하는데(He et al., 2022), 이 방식에 따라 기준점이 23°C로 설정된 연구에서도 열대야 현상이 사망에 유의한 영향을 미친다는 점을 제시하였다(Royé, 2017). 이러한 선행 연구의 결과들에 더하여 본 연구 결과는 열대야가 건강에 미치는 영향을 면밀히 파악하기 위해서는 25°C보다 낮은 기준점을 적용할 필요가 있다는 점을 시사한다.

한국 기상청에서는 현재 일 최고 기온만을 기준으로 폭염 관련 특보를 발령하고 있다. 하지만 폭염 특보제도를 평가한 이전 연구에서는 일 최고 기온 뿐만 아니라 일 최저 기온을 함께 고려한 새로운 기준이 필요하다고 제안하였으며(Jung et al., 2009), 이러한 접근은 열대야 현상이 건강에 미치는 부정적 영향을 반영할 수 있다는 점에서 맥락을 같이 한다. 그리고 본 연구에서 보여주었듯이 열

대야 현상을 정의하기 위한 기준점을 우선적으로 검토할 필요가 있을 것이다.

본 연구에서는 수도권 지역 중 서울에서 열대야의 사망 위험이 두드러지게 나타나는 것을 확인하였다. 한국의 도시열섬효과에 대한 선행 연구들에 따르면 7대 광역시 중 서울에서 도시열섬효과 강도가 가장 큰 것으로 나타났으며(Kim and Baik, 2004), 나아가 도시 열 이상현상(urban heat anomaly)은 열 관련 사망률과 관련이 있는 것으로 나타났다(Jang et al., 2020). 이러한 맥락에 비추어 보았을 때 도시열섬현상이 심화된 서울에서 열대야의 효과가 더욱 크게 나타난 것으로 짐작해볼 수 있다. 한편 본 연구에서는 경기와 인천의 경우 서울에 비해 그 효과가 두드러지게 나타나지 않았다. 인천의 경우 해안 도시는 내륙 도시보다 도시열섬현상이 약하게 나타난다는 연구 결과로 일부 설명될 수 있을 것이며(Kim and Baik, 2004), 경기는 서울을 넓게 둘러싸는 도넛 형태로 서로 다른 기후 및 거주 환경을 가지는 지역들로 이루어져 있어 이로 인한 지역 간 이질적인 특성이 영향을 미쳤을 것으로 짐작된다(Jang et al., 2020). 따라서 향후 연구에서는 이러한 이질적인 특성을 반영하여 지역 간 차이를 살펴볼 필요가 있을 것이다.

한편 본 연구에서는 하위 집단별로 열대야 현상이 건강에 영향을 미치기 시작하는 기준점이 다를 수 있으며 같은 기준점 내에서도 더욱 취약한 집단이 존재한다는 점을 밝혔다. 남성이 여성보다 조금 더 낮은 기준점에서 유의한 위험이 나타났으나, 전반적으로 여성의 사망위험이 남성보다 높은 경향이 있었다. 열 관련 사망에 대한 이전 연구들에서도 남성보다 여성에서 더 강한 연관성을 추정하였는데, 이는 열 스트레스에 대한 체온 조절 능력과 같은 생리학적 차이나 소득 수준 등 사회경제적 지위로 설명될 수 있다(D'Ippoliti et al., 2010; Sardon, 2007). 또한 특히 기준점 25°C에서 65세 이상 인구집단의 사망위험이 높게 나타났는데, 이는 노인들이 생리적 및 사회경제적 특성으로 인해 열 스트레스에 취약하다는 점이 반영된 결과로 보인다(Kenny et al., 2010). 다만 기준점이 25°C보다 낮게 설정되었을 때는 65세 미만 인구집단이 더 취약한 것으로 나타났는데, 이는 젊은 인구집단의 사회경제적 위험 요소와 위험 감수 행동 등이 복합적으로 작용한 것으로 짐작된다; 예를 들어 젊은 인구집단은 노령층에 비해 교대 근무와 같은 불규칙한 근무 환경에 노출되거나, 여름철에 음주와 같은 위험 행동을 할 가능성이 있다(Murage et al., 2017).

인구집단의 사회경제적 특성과 관련하여, 교육수준이 낮은 인구집단(중학교 졸업 이하)이 교육수준이 높은 집단(고등학교 졸업 이상)에 비해 열대야 현상으로 인한 사망위험에 취약하다는 점을 발견하였다. 교육은 흔히 사회경제적 상태를 나타내는 지표로 사용되며, 낮은 교육 수준은 열악한 기본 건강 상태, 낮은 의료 접근성, 에어컨 및 선풍기의 사용 제한 등과 관련되어 열 관련 사망위험을 높이는 것으로 알려져 있다(McGeehin and Mirabelli, 2001; O'Neill et al., 2003). 그리고 미혼·이혼·사별 집단이 기혼 집단에 비해 취약하다는 점을 확인하였다. 결혼은 일반적으로 건강에 대한 '보호 효과'를 제공하는 것으로 알려져 있으며, 결혼은 건강한 생활 방식을 장려하고 위험감수 행동을 억제할 수 있다(Ellena et al., 2020). 그리고 이러한 보호 효과를 누리지 못한 미혼·이혼·사별 집단에서 열 관련 사망위험이 높은 것으로 알려져 있다(Son et al., 2011).

본 연구의 제한점은 다음과 같다. 먼저, 본 연구에서는 기상특보 시스템 구축을 위한 구체적 근거를 제시하기 위하여 기상청의 방식에 따라 최저 기온만을 이용하여 열대야 현상을 정의하였다. 또한, 열대야 현상이 사망위험에 미치는 효과를 파악하는 과정에서 낮 시간대 온도와 밤 시간대 온도의 영향을 명확하게 구분하기 어렵다고 판단하여 분석 모델에서 낮 온도의 영향을 보정할 수 있는 지표를 고려하지 못하였다. 그러나 보다 더 정확하게 열대야 현상이 사망위험에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 추후 연구에서 열대야 현상을 정교하게 설정하거나 낮 시간대 동안의 온도 노출로 인한 교란 효과를 통제하는 접근이 필요할 것으로 생각된다. 다음으로, 본 연구는 대표적인 도시 지역인 수도권 지역(서울, 경기, 인천)을 대상으로 진행되었기 때문에 연구 결과를 한국 전체에 대해 일반화하기 어려울 수 있다. 또한, 자료 가용성의 제한으로 인해 열대야 현상에 따른 사망위험과 관련될 수 있는 다른 설명요인들을 분석에 포함하지 못하였다.

이러한 한계에도 불구하고 본 연구는 시군구 수준의 높은 공간 해상도 자료를 기반으로 온도 관련 사망 위험 추정 시 표준적으로 사용되는 2단계 시계열 분석 방법을 적용하여 수도권의 열대야 현상에 따른 사망 위험을 분석한 최초의 국내 연구라는 점에서 의미가 있다. 또한 건강과 관련된 관점에서 열대야 현상을 정의하기 위한 기준점을 탐색하였으며 성별, 연령, 교육수준, 혼인상태 등 다양한 하위 집단 간 비교를 통해 열대야 현상이 사망에 미치는 영향의 불균형한 분포를 밝혀냈다. 이에 본 연구는 향후

폭염과 열대야를 함께 고려한 기상특보 시스템 구축을 위한 구체적인 근거로 활용될 수 있을 것이다.

결론적으로, 본 연구는 열대야 현상이 건강에 미치는 부정적인 영향을 예방하기 위해서는 기존의 기준보다 낮은 기준에서 열대야 현상을 정의하고 대응할 필요가 있다는 것을 보여준다. 특히 개인적 특성에 따라 그 위험이 달라질 수 있기 때문에 기상특보 등 열대야 현상과 관련 공중 보건 정책 수립 시에는 인구 집단의 특성을 고려할 필요성이 있음을 강조한다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 "환경보건디지털 조사기반 구축기술개발사업"의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 2021003330004).

References

- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 111(D5).
- Ayas NT, White DP, Manson JE, Stampfer MJ, Speizer FE, Malhotra A, Hu FB. 2003. A prospective study of sleep duration and coronary heart disease in women. *Archives of Internal Medicine* 163(2): 205-209.
- Basu R, Ostro BD. 2008. A multicounty analysis identifying the populations vulnerable to mortality associated with high ambient temperature in california. *American Journal of Epidemiology* 168(6): 632-637.
- Chen R, Lu R. 2014. Large-scale circulation anomalies associated with 'tropical night' weather in beijing, china. *International Journal of Climatology* 34(6): 1980-1989.
- Choi N, Lee M-I. 2019. Spatial variability and long-term trend in the occurrence frequency of heatwave and tropical night in korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 55(1): 101-114.
- D'Ippoliti D, Michelozzi P, Marino C, de'Donato F,

- Menne B, Katsouyanni K, Kirchmayer U, Analitis A, Medina-Ramón M, Paldy A et al. 2010. The impact of heat waves on mortality in 9 european cities: Results from the euroheat project. *Environmental Health* 9(1): 37.
- Ellena M, Ballester J, Mercogliano P, Ferracin E, Barbato G, Costa G, Ingole V. 2020. Social inequalities in heat-attributable mortality in the city of turin, northwest of italy: A time series analysis from 1982 to 2018. *Environmental Health* 19(1): 116.
- Fischer EM, Oleson KW, Lawrence DM. 2012. Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. *Geophysical Research Letters* 39(3).
- Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. 2010. Distributed lag non-linear models. *Stat Med.* 29(21): 2224-2234.
- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Kinney PL, Petkova EP, Lavigne E, Zanobetti A, Schwartz JD, Tobias A, Leone M. 2015a. Temporal variation in heat-mortality associations: A multicountry study. *Environmental health perspectives* 123(11): 1200-1207.
- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Zanobetti A, Schwartz J, Tobias A, Tong S, Rocklöv J, Forsberg B et al. 2015b. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *The Lancet* 386(9991): 369-375.
- Gottlieb DJ, Punjabi NM, Newman AB, Resnick HE, Redline S, Baldwin CM, Nieto FJ. 2005. Association of sleep time with diabetes mellitus and impaired glucose tolerance. *Archives of Internal Medicine* 165(8): 863-867.
- Guo Y, Gasparrini A, Armstrong BG, Tawatsupa B, Tobias A, Lavigne E, Coelho MdSZS, Pan X, Kim H, Hashizume M et al. 2017. Heat wave and mortality: A multicountry, multicomunity study. *Environmental Health Perspectives* 125(8): 087006.
- He C, Kim H, Hashizume M, Lee W, Honda Y, Kim SE, Kinney PL, Schneider A, Zhang Y, Zhu Y et al. 2022. The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios: A modelling study. *The Lancet Planetary Health* 6(8): e648-e657.
- Hsu A, Sheriff G, Chakraborty T, Manya D. 2021. Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major us cities. *Nature Communications* 12(1): 2721.
- Jang J, Lee W, Choi M, Kang C, Kim H. 2020. Roles of urban heat anomaly and land-use/land-cover on the heat-related mortality in the national capital region of south korea: A multi-districts time-series study. *Environment International* 145: 106127.
- Jung WS, Park JK, Kim EB, Song JH. 2009. Study on the Establishment of Threshold Criteria for Heat Health Watch Warning System in Korea; Part II: Improvement of Criteria. *Journal of Environmental Science International* 18(7): 781-796. (in Korean with English abstract)
- Kang C, Park C, Lee W, Pehlivan N, Choi M, Jang J, Kim H. 2020. Heatwave-related mortality risk and the risk-based definition of heat wave in south korea: A nationwide time-series study for 2011-2017. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(16): 5720.
- Kardinal Jusuf S, Wong NH, Hagen E, Anggoro R, Hong Y. 2007. The influence of land use on the urban heat island in singapore. *Habitat International* 31(2): 232-242.
- Kenny GP, Yardley J, Brown C, Sigal RJ, Jay O. 2010. Heat stress in older individuals and patients with common chronic diseases. *Canadian Medical Association Journal* 182(10): 1053.
- Kim YH, Baik JJ. 2004. Daily maximum urban heat island intensity in large cities of korea. *Theoretical and Applied Climatology* 79(3): 151-164.
- Korea Meteorological Administration. <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>
- Lee W, Ebi KL, Kim Y, Hashizume M, Honda Y, Hideki H, Choi HM, Choi M, Kim H. 2021. Heat-mortality risk and the population concentration of metropolitan areas in japan: A nationwide time-series study. *Int J Epidemiol.* 50(2): 602-612.

- McGeehin MA, Mirabelli M. 2001. The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the united states. *Environmental Health Perspectives* 109(suppl 2): 185-189.
- Murage P, Hajat S, Kovats RS. 2017. Effect of night-time temperatures on cause and age-specific mortality in london. *Environ Epidemiol.* 1(2): e005.
- National Institute of Meteorological Sciences. 2012. Global Climate Change Prospect Report 2012.
- Nastos PT, Matzarakis A. 2008. Human-biometeorological effects on sleep disturbances in athens, greece: A preliminary evaluation. *Indoor and Built Environment* 17(6): 535-542.
- O'Neill MS, Zanobetti A, Schwartz J. 2003. Modifiers of the temperature and mortality association in seven us cities. *American Journal of Epidemiology* 157(12): 1074-1082.
- Park J-K, Lu R, Li C, Kim EB. 2012. Interannual variation of tropical night frequency in beijing and associated large-scale circulation background. *Advances in Atmospheric Sciences* 29(2): 295-306.
- Royé D. 2017. The effects of hot nights on mortality in barcelona, spain. *International Journal of Biometeorology* 61(12): 2127-2140.
- Royé D, Sera F, Tobías A, Lowe R, Gasparrini A, Pascal M, de'Donato F, Nunes B, Teixeira JP. 2021. Effects of hot nights on mortality in southern europe. *Epidemiology* 32(4).
- Sardon J-P. 2007. The 2003 heat wave. *Eurosurveillance* 12(3): 11-12.
- Son JY, Lee JT, Anderson GB, Bell ML. 2012. The impact of heat waves on mortality in seven major cities in korea. *Environmental Health Perspectives* 120(4): 566-571.
- Son JY, Lee JT, Anderson GB, Bell ML. 2011. Vulnerability to temperature-related mortality in seoul, korea. *Environ Res Lett.* 6(3).
- Statistics Korea. <https://mdis.kostat.go.kr/index.do>
- Wang D, Lau KK-L, Ren C, Goggins WB, III, Shi Y, Ho HC, Lee T-C, Lee L-S, Woo J, Ng E. 2019. The impact of extremely hot weather events on all-cause mortality in a highly urbanized and densely populated subtropical city: A 10-year time-series study (2006-2015). *Science of The Total Environment* 690: 923-931.