

온도 지표에 따른 도시와 농촌의 열사망 위험도 격차

강신우* · 오지은** · 이환희*** · 김호****†

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

Difference in Heat-Related Mortality Risk Between Urban and Rural Areas Depending on Temperature Metrics : A Nationwide Time-Series Study in Korea

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

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

**Master 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

Heat impact on human health is a global concern due to climate change which has been accelerating. Recently, previous studies have contended that it is necessary to consider different vulnerabilities to heat by temperature metrics and urbanicity when setting the heat alarming system; however, the current heat alarm system in Korea is based on the maximum temperature solely. Therefore, this study aimed to examine whether the heat-related mortality risks differ by the urban and rural areas with sub-population groups, using two temperature metrics, the daily minimum temperature and the maximum temperature.

We collected 229 nationwide district-level (sigungu) daily time-series data including the minimum temperature, the maximum temperature, and the all-cause mortality during the summer season (June~Sep) of the study period (2011~2017). Using the two-stage time series analysis with a distributed lag non-linear model (DLNM), we estimated heat-mortality risk estimates based on the minimum and maximum temperatures, individually. The risk estimates were pooled with meta-regression by urban and rural area.

The maximum temperature is associated with mortality risk in both urban and rural areas. However, the minimum temperature has a significant impact on mortality only in the urban area. In addition, heat-related mortality risks differed by the sup-population (sex and age group), regions, and temperature metrics.

In conclusion, heat-mortality risk between urban and rural areas differs by temperature metrics and characteristics of sub-populations. The results suggest that more elaborated heat definitions and heat alarming systems should be established to increase the efficiency of the alarming system and address unequal vulnerability to heat.

Key words: Minimum Temperature, Maximum Temperature, Mortality, Urban and Rural Area, Heat Risk, DLNM

1. 서론

전세계적으로 기후변화에 대한 관심이 고조되면서 많

은 연구들로부터 폭염 발생에 따른 사망 위험이나 공중 보건에 부정적인 영향을 초래한다는 사실은 이미 널리 알려져 있다(Gasparrini et al., 2015a; Guo et al., 2011;

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

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

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

Vicedo-Cabrera et al., 2021). 하지만 최근 들어 폭염을 어떻게 정의하고 대응하는지에 따라 사망 등 건강에 대한 영향이 달라질 수 있다는 결과와 함께, 폭염의 기준을 설정할 때 지역별/인구특성별 취약성을 함께 고려해야 할 필요가 있다는 근거들이 제기되고 있다(Kang et al., 2020; Liu et al., 2021).

우리나라 기상청에서는 기본적으로 폭염의 기준으로 일 최고 기온(33℃[주의보]/35℃[경보] 이상 2일 이상 지속)을 사용하여 폭염 특보를 발령한다(KMA, 2022). 하지만 일최고기온만을 폭염의 기준으로 할 경우 실제 지역 간 취약한 온도 지표 특성을 반영하지 못하는 제한점을 가지고 있다. 예를 들어 도시 지역에서 나타나는 도시열섬효과(urban heat island)는 밤에 더 뚜렷한 것으로 알려져 있으며(Peterson, 2003), 이러한 현상은 도시 지역에서는 주로 낮 시간의 최고 값과 관련이 깊은 최고 기온(maximum temperature)보다는 야간의 기온이나 열대야 등과 관련이 깊은 최저 기온(minimum temperature)의 영향에 더 취약할 수 있다는 가능성을 암시한다. 이러한 이유로 한국의 기상청에 해당하는 기관인 미국의 해양대기청에서는 각 주에서 폭염 관련 특보 발령 시 최고 기온과 연관된 최대 열 지수(maximum heat index)와 최저 기온과 연관된 야간 기온(night time temperature)을 동시에 고려할 것을 권고하고 있다(NOAA, 2022).

한편 도시와 농촌의 산업 특성이나 연령, 생활 패턴에 의해 온도 지표에 따른 노출 편향(exposure bias) 또한 존재하여 지역 간 효과가 서로 상이하게 나타날 수 있으며(Hu et al., 2019), 이로 인해 절대적인 하나의 지표만으로 인구 취약성을 설명하는 것은 다소 불충분할 수 있다. 도시의 경우 주로 야외보다는 실내에서 근무하는 직업군이 많으므로 낮 시간 동안에는 냉난방이 가능한 환경에 머무르다 퇴근 이후 운동이나 사회 활동을 하면서 저녁 시간 이후의 기온에 주로 노출되는 반면, 시골의 경우 농림업 등의 비중이 높아 주로 낮에 야외 활동이 많고 밤에는 반대로 노출이 적은 특성을 지닌다. 즉, 지역 간 특성 차이에 의해 각 지역에는 서로 다른 형태의 기온 특성이 관여할 수 있다는 가능성은, 결국 이러한 노출 편향 문제는 일 최고 기온을 중심으로 하는 현재의 폭염 기준이 도시 지역에서는 폭염 사망자 대응 측면에서 충분치 않을 수도 있다는 의문으로부터 보다 면밀한 검토가 필요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 우리나라 전국 시군구를 대상으로 여름철 일별 최저 기온과 최고 기온 등 2가지 온도 지표를

이용하여 도시와 농촌 지역 간 폭염-사망 취약성이 서로 다르게 나타나는지 살펴보았다. 또한 성별과 연령 그룹 등 하위 인구집단에 대해서 양상의 차이를 보이는지 살펴보고, 도농간 또는 인구집단별로 차별화된 폭염 경보 시스템이 필요한지에 대하여 조사하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 연구대상지역

본 연구는 2011년부터 2017년까지 한국의 229개 시군구를 대상으로 하여 여름철 최저, 최고기온과 총 사망과의 연관성을 살펴보았다. 이때 229개 지역은 2차 행정단위지역(2nd level-district)을 기준으로 하여 지역 간 행정단위를 통일하였다. 예를 들어 서울특별시의 2차 행정단위지역은 서울특별시(1차)-마포구(2차)로 각 ‘구’를 하나의 지역으로 하고, 수원시 장안구의 경우 경기도(1차)-수원시(2차)-장안구(3차)이므로 수원시를 하나의 지역 단위로 하였다. 한편 세종특별자치시의 경우 2012년에 출범함에 따라 2012년부터 분석에 포함되었다.

2.2. 연구자료

본 연구에서는 사망자료와 기상자료를 한국 229개 시군구 수준에서 2011년부터 2017년까지 여름철(6월~9월) 동안의 일별 시계열 자료 형태로 수집 및 가공하였다. 사망자료는 통계청 마이크로데이터통합서비스(MDIS)에서 제공하는 사망원인통계 원시자료를 이용하여 총사망 및 성별(남성, 여성), 연령(65세 미만, 65세 이상)별 일별 사망자 시계열자료 형태로 가공하였다. 기상자료의 경우 기상청 기상자료개방포털(KMA)에서 전국 동단위 수준으로 동네예보 구역(5 km 해상도 격자)에 대한 시간별 기상 정보를 제공하는 동네예보 초단기실황 자료를 사용하였다. 이 자료에서 최고 기온과 최저 기온은 각각 일별 24시간 내 최고 온도와 최저 온도를 동별로 산출하고 시군구 단위로 일별 평균하였으며, 습도는 일별 24시간 동안의 평균 습도를 동별로 산출하고 동일하게 시군구 단위로 일별 평균하였다. 마지막으로 본 연구에서 도시와 농촌 지역을 정의하는데 활용된 인구밀도 자료는 질병관리청 지역사회건강조사 건강결정요인 DB (KCHS)에서 시군구 단위로 제공하는 지표들 중 2011년부터 2016년 동안의 인구밀도 값을 평균하여 사용하였다.

2.3. 도시/농촌 정의

본 연구에서는 도시와 농촌을 정의하기 위한 기준으로 인구밀도 지표를 사용하였다. 현재까지 도시화 수준을 나타내는 대안 지표로 여러 요인(예: 인구 규모, 인구 밀도, 개발지역 거주인구 비율, 건물면적 밀도 등)이 제시되었지만 아직 도시화를 측정하는 데 있어 표준으로 사용되는 지표는 없으며, 각국은 도시화 수준 또는 도시와 농촌을 구별하기 서로 다른 지표를 채택하고 있다(UN, 2018). 한국은 OECD 국가 중 인구 밀도가 가장 높은 나라 중 하나이며(OECD, 2020), 인구의 약 45%가 전체 면적의 5%에 불과한 7대 광역시에 살고 있는 특징을 가지고 있다(Kim et al., 2018). 또한, 한국의 경우 특히 고도로 도시화된 지역(한국의 두 대도시인 서울과 부산)에서 가장 높은 인구밀도를 보인다. 한편 행정안전부에서는 인구 규모를 기준으로 ‘대도시형(인구 50만 이상 시 지역)’, ‘중소도시형(인구 50만 이하 시 지역)’, ‘제한도시형(자치구)’, ‘도농형(도농복합시)’, ‘농촌형(군 지역)’ 등으로 구분하고 있으며(Park and Jun, 2020), 이에 따르면 농촌 지역은 229개 시군구 기준 약 36%에 해당하는 82개 지역이 포함된다. 하지만 한국은 전국의 도시화율이 약 80%에 달할 정도로 도시지역 거주인구의 비중이 매우 높아 상당수의 지역이 도시에 해당하는 특징을 지니고 있어(KOSIS, 2017) 실제로는 행정안전부의 기준보다 더 많은 지역이 도시에 해당할 수 있다. 따라서 이러한 특성을 고려하여 한국의 도시화에 따른 폭염-사망 연관성을 살펴본 선행연구에서는 도시와 농촌을 인구밀도를 기준으로 상위 75%를 도시, 하위 25%를 농촌으로 정의한 바 있다(Lee et al., 2022). 따라서 본 연구에서도 인구밀도를 우리나라 지역의 도시화 수준을 가장 잘 나타내는 지표로 판단하고 선행연구와 동일한 기준으로 229개 시군구를 대상으로 하여 인구밀도 상위 75%를 도시(172개 시군구), 하위 25%를 농촌(57개 시군구)으로 정의하여 분석을 진행하였다. 그리고 이러한 분류기준은 본 연구의 도시/농촌 분류와 행정안전부의 인구 규모를 기준으로 한 행정단위 기반 분류 결과와 비교하였을 때, 농촌 지역으로 분류한 지역의 일치도가 약 95%로 매우 유사하였다.

2.4. 통계적 분석방법

본 연구에서는 도시별로 기온과 사망 위험을 산출한 뒤 모든 도시별 결과에 대한 통합 위험(pooled risk)을 산출하

는 방법인 2단계 시계열 분석(two-stage time series analysis) 방법을 이용하였다. 2단계 시계열 분석방법은 극한 기온과 사망 간 연관성 연구에서 광범위하게 활용되고 있는 방법이다(Gasparrini et al., 2015a; Gasparrini et al., 2015b; Guo et al., 2016).

먼저 첫 번째 단계(the first stage)에서는 quasi-poisson 분포를 가정한 일반화선형모형을 이용하여 모형 내에 노출의 지연효과(lag effect)와 비선형효과(non-linear effect)를 모두 고려할 수 있는 DLNM (distributed lag non-linear model) 방법(Gasparrini et al., 2010)을 이용하였으며, 이를 통해 여름철 최저 기온과 최고 기온 각각에 대하여 사망과의 연관성을 229개 도시별로 추정하였다.

$$Y_t \sim \text{quasi-Poisson}(\lambda_t)$$

$$\log(\lambda_t) \sim \beta_0 + s(x_t; l, \beta) + rhum + \text{factor}(DOW_t) + ns(DOY_t, df = 4/\text{years}) \quad (1)$$

여기서 Y_t 는 t 시점에서 관측된 사망자 수, λ_t 는 t 시점의 기대 사망자 수, β_0 은 상수항이다. $s(\cdot)$ 항은 사망에 대하여 여름철 일별 최저(최고) 기온의 효과(β)와 지연 효과(l ; lag effect)를 동시에 고려하는 cross-basis 함수이며, 기온-사망 관계에 대해서는 여름철 최저(최고) 기온 분포의 50분위수와 90분위수에 노트(knot)를 둔 quadratic B-spline 함수, 지연-사망 관계에 대해서는 10일의 지연 기간에 대하여 log scale에서 동일한 간격으로 2개의 노트를 둔 natural cubic B-spline 함수를 적용하였다. $rhum$ 은 상대습도, DOW_t 는 t 시점에 해당하는 요일로 범주형 변수로 모형에서 보정되었으며, $ns(DOY_t)$ 는 시계열 추세를 보정하기 위한 항으로 자유도 4의 동일 간격 노트로 설정한 natural cubic B-spline 함수를 이용하였다. 모형의 cross-basis 함수의 파라미터 조건 및 시계열 추세 보정을 위한 함수 설정 등은 폭염-사망 연관성을 살펴본 선행연구의 설정값을 준용하였다(Gasparrini et al., 2016; Lee et al., 2018; Lee et al., 2021).

두 번째 단계(the second stage)에서는 첫 번째 단계에서 얻어진 229개의 지연 누적(lag-cumulative) 여름철 최저(최고) 기온-사망 위험 연관성 추정치를 활용하여 메타 분석(meta-analysis)을 통해(Gasparrini et al., 2012) 도시 지역(172개)과 농촌 지역(57개) 대하여 각각 통합(pooled)된 지연 누적 여름철 최저(최고) 기온-사망 위험 연관성 추정치를 산출하였다. 마지막으로 도시와 농촌 각각 산출

된 위 통합 연관성 추정치를 이용하여 여름철 최저(최고) 기온 분포에서의 75분위수 대비 99분위수 온도에 대한 사망 위험도(RR; relative risk)를 도시 지역과 농촌 지역에 대하여 산출하고, 이를 아래 수식과 같이 온도-사망 위험 증감율로 표시하였다.

$$\text{Percentile increase in RR (\%)} = (RR - 1) \times 100 \quad (2)$$

위 모든 분석과정을 총 사망과 함께 하위그룹 분석으로 성별(남, 여), 연령그룹(65세 미만, 65세 이상)별 사망에 대하여 반복하였다. 모든 통계분석은 R 통계분석 소프트웨어(버전 4.1.0)를 사용하였다.

3. 연구결과

2011년부터 2017년까지의 연구기간 동안 사망자는 총 593,228명으로, 그 중 도시 지역의 사망자는 532,171명, 농촌 지역의 사망자는 61,057명이었다. Fig. 1은 연구대상 지역인 한국 229개 시군구에 대한 최저 기온과 최고 기온

의 공간적 분포를 보여준다. 최저 기온은 수도권 지역과 광역시, 남(서)쪽의 해안에 인접하게 위치하는 지역에서 높게 나타나고 내륙 중심부나 북(동)쪽 지역에서는 낮게 나타났다(Fig. 1A). 최고 기온의 경우 대구 광역시와 광주 광역시 부근이 매우 높고 주로 내륙에 위치한 지역들에서 높았으며, 강원 지방에서는 대체로 최고 온도가 낮게 나타나는 특징을 보였다(Fig. 1B).

Table 1은 연구기간 동안 도시와 농촌 지역의 일별 총 사망자 수와 성별, 연령그룹별 사망자 수 및 최저, 최고 온도에 대한 평균값과 범위를 보여준다. 일평균 사망자는 도시지역(3.62; range 0.17-12.80)이 농촌지역(1.25; range 0.44-2.97)보다 높게 나타났으며, 남성과 65세 이상 일별 사망자 수가 도시와 농촌 지역 모두에서 각각 여성과 65세 미만 사망자 수보다 높게 나타났다. 한편 도시 지역의 평균 최저온도(20.23; range 15.37-22.24)는 농촌 지역의 평균 최저온도(18.48; range 16.03-20.79)보다 1.7°C 가량 높게 나타났으나 평균 최고온도의 경우 도시 지역(27.92; range 23.76-29.56)과 농촌 지역(27.36; range 24.57-28.69)이 유사하게 나타났다. 온도의 범위는

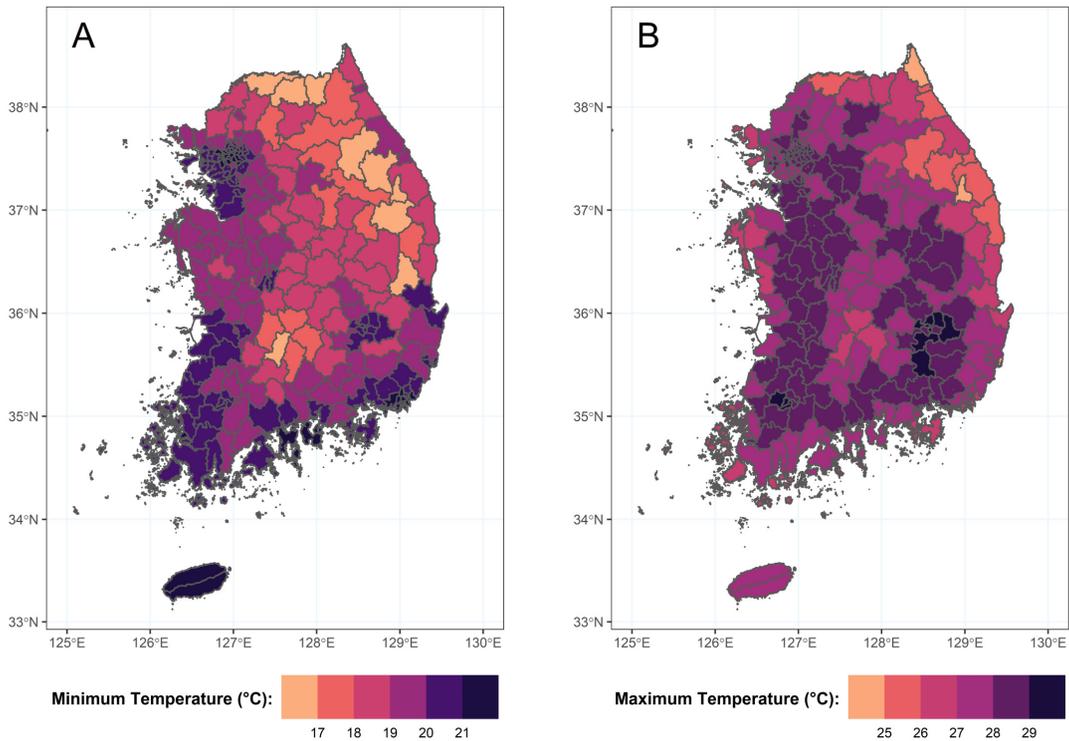


Fig. 1. Geographical distributions of the minimum temperature (A) and the maximum temperature (B) for 299 districts in South Korea during the summer season of 2011 ~ 2017

최저 기온과 최고 기온 모두에서 도시 지역이 더 넓게 나타났다.

Fig. 2는 도시와 농촌 지역에서 여름철 최저 기온과 최고 기온의 온도 분포에 따른 사망 위험 곡선을 보여준다.

온도-사망 RR 곡선에서 여름철 최저 기온의 경우 온도가 높아질수록 도시지역에서는 사망위험의 증가가 관찰되나, 반면 농촌 지역에서는 도시 지역과 다르게 위험이 오히려 감소하는 패턴을 보여 서로 상반된 양상을 나타냈다

Table 1. Descriptive statistics of the daily mortality and mean temperature in the urban, and rural areas during the summer season of 2011 ~ 2017. Data are daily averages of mean (range) across the urban and rural areas

	Urban area (n=172) ^a	Rural area (n=57) ^a
Daily mortality		
Total	3.62 (0.17, 12.80)	1.25 (0.44, 2.97)
Sex		
Male	2.01 (0.11, 7.05)	0.70 (0.25, 1.63)
Female	1.61 (0.07, 5.75)	0.56 (0.19, 1.34)
Age group		
Aged 0-64 y	1.04 (0.05, 4.02)	0.23 (0.09, 0.50)
Aged 65 y+	2.58 (0.13, 8.77)	1.02 (0.33, 2.47)
Temperature (°C)		
Min temperature	20.23 (15.37, 22.24)	18.48 (16.03, 20.79)
Max temperature	27.92 (23.76, 29.56)	27.36 (24.57, 28.69)

a. Urban area includes districts with 0th to below 75th percentile of the population density (dense population), and rural area includes districts with 75th to 100th of the population density (sparse population)

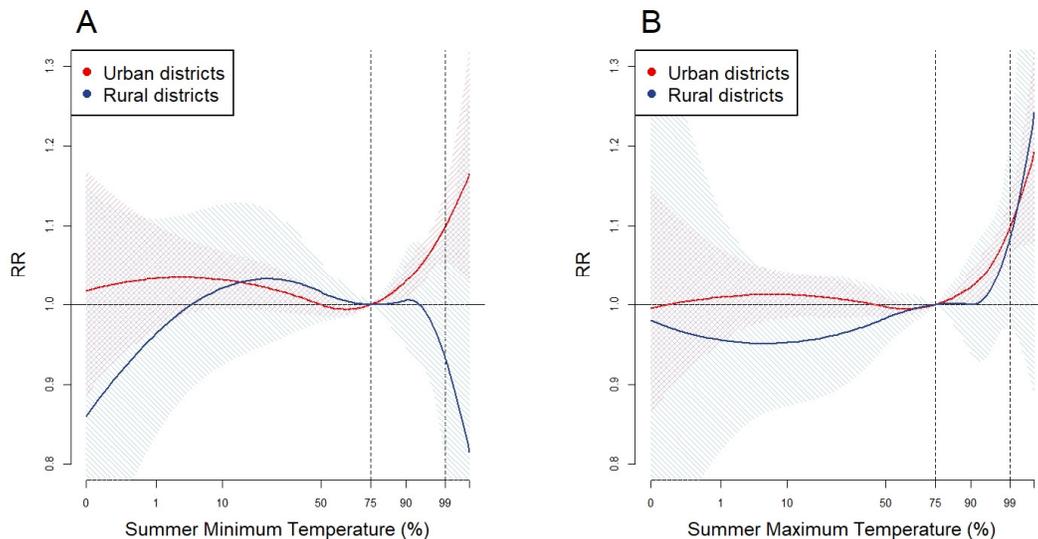


Fig. 2. Effect of the minimum and maximum temperature on the all-cause mortality (RR) by urban and rural areas during the summer season of 2011 ~ 2017; dashed vertical lines are the 75th percentile and 99th percentile of summer temperature distribution of each minimum and maximum temperature

(Fig. 2A). 한편 여름철 최고 기온의 경우 도시와 농촌 모두 온도가 높아질수록 위험이 증가하는 패턴이 관찰되었다(Fig. 2B).

Fig. 3은 남성과 여성 성별 그룹에 대하여 각각 도시와 농촌 지역에서의 여름철 최저 기온과 최고 기온의 온도 분포에 따른 사망 위험 곡선을 보여준다. 여름철 최저 기온과 최고 기온 모두에 대해서 사망 위험은 남성보다 여성에서 더 높게 나타났고, 남성과 여성 모두 도시 지역에서 취약한 것으로 관찰되었다(Fig. 3A, 3B, 3C, 3D). 주로 도시 지역에서 온도-사망 위험이 더 높은 경향을 보였다

나(Fig. 3A, 3B, 3C), 여성 그룹에서는 농촌 지역의 최고 온도 증가에 따른 사망 위험이 도시 지역의 사망 위험을 추월하는 결과를 보였다(Fig. 3D).

Fig. 4는 65세 미만과 65세 이상 연령 그룹에 대하여 각각 도시와 농촌 지역에서의 여름철 최저 기온과 최고 기온의 온도 분포에 따른 사망 위험 곡선을 보여준다. 도시 지역에 거주하는 65세 미만의 비고령 인구집단에서는 최고 기온 증가에 따른 사망 위험과 비교하여 최저 기온 증가에 따른 사망 위험이 더욱 두드러졌다(Fig. 4A, 4B). 65세 이상 고령 인구집단에 대해서는 최고 기온 증가에 따

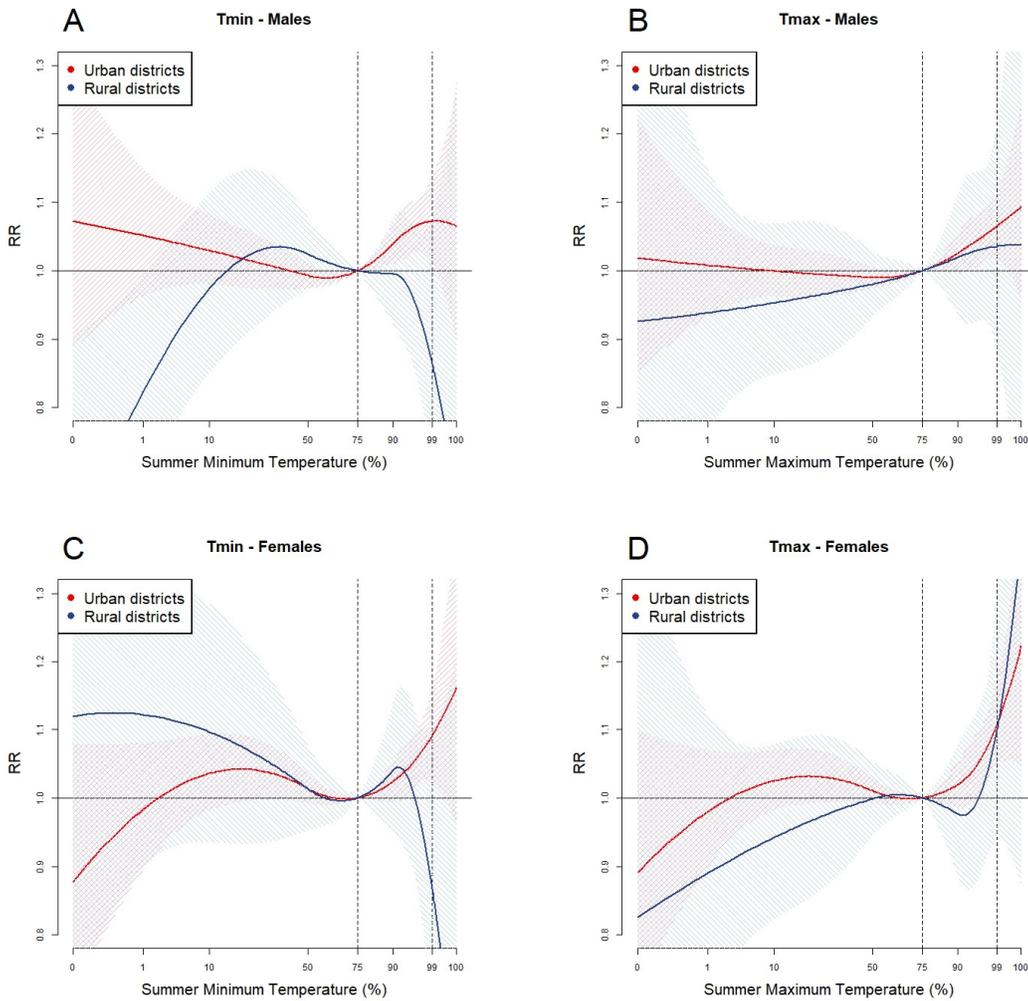


Fig. 3. Effect of the minimum and maximum temperature on the all-cause mortality (RR) by regions (urban and rural areas) and sex (males and females) during the summer season of 2011 ~ 2017; dashed vertical lines are the 75th percentile and 99th percentile of summer temperature distribution of each minimum (Tmin) and maximum temperature (Tmax)

른 사망 위험이 도시와 농촌 지역 모두에서 발견되었으며, 최고 기온의 사망 위험이 최저 기온에 따른 사망 위험보다 조금 더 높게 나타났다(Fig. 4C, 4D).

Table 2는 도시와 농촌에 대하여 구해진 여름철 최저/최고 온도-사망 곡선(RR 그래프)에서 2011~2017년 동안 여름철 최저 온도와 최고 온도 각각의 온도 분포 상 75분위수 온도의 위험 대비 99분위수 온도의 사망 위험 증감율(percentile increase; PI)을 총 사망과 성별, 연령 그룹별로 제시하였다. 전체 인구집단 결과에서, 최고 온도에 대한 사망 위험은 도시와 농촌 지역 모두에서 관찰되

나(도시 PI 9.8, 95% CI [6.2, 13.5]; 농촌 PI 8.3, 95% CI [-2.7, 13.5]), 최저 온도의 사망 위험은 농촌에서는 발견되지 않았으며 도시에서만 유의하게 관찰되었다(PI 9.8, 95% CI [5.4, 14.4]). 또한 여성 인구집단에서 주로 남성보다 높은 온도-사망 위험을 보였으며, 농촌 지역에서는 최저 기온에 따른 사망 위험은 드러나지 않았으나 최고 온도에 대해서 여성 인구집단이 반응하는 결과를 보였다(PI 9.8, 95% CI [-5.8, 27.9]). 한편 65세 미만의 비고령 인구집단은 다른 온도 지표에는 반응하지 않았으나, 유일하게 도시 지역의 65세 미만 인구집단은 최저 기온에 따

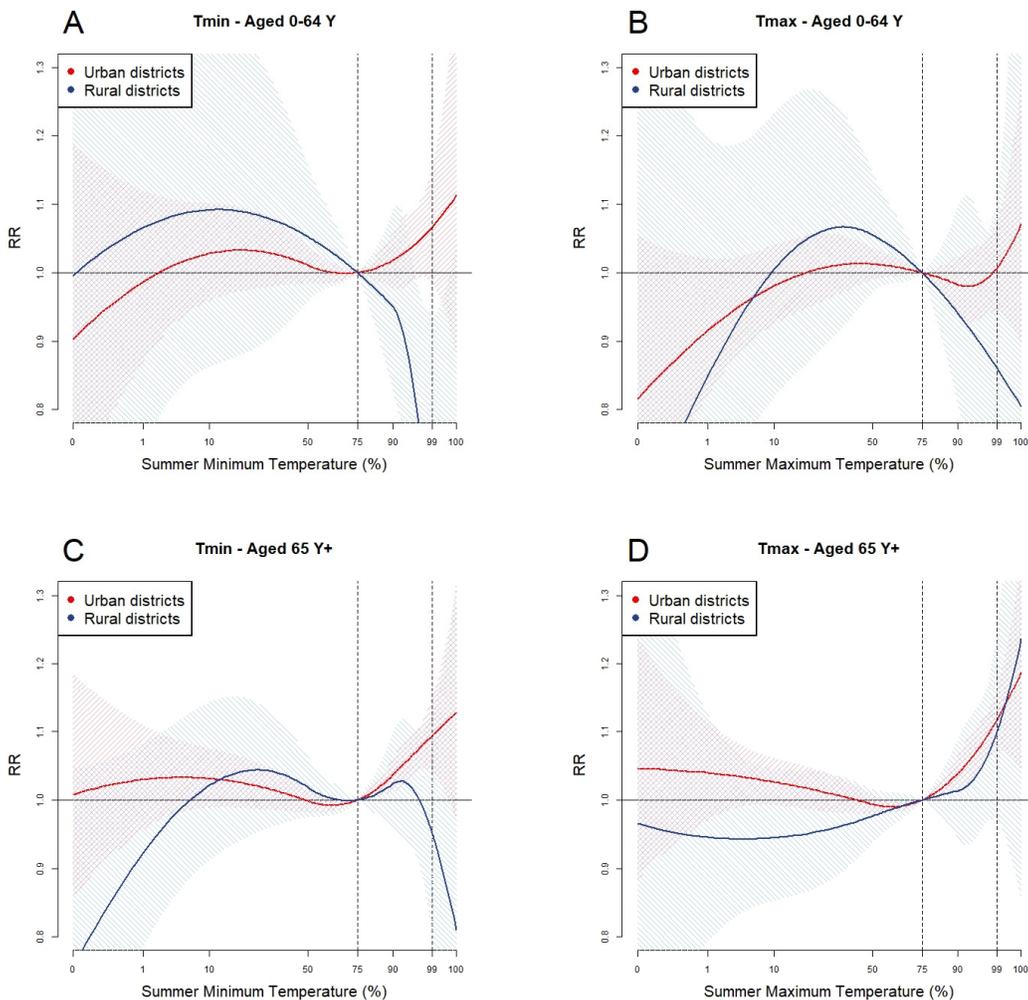


Fig. 4. Effect of the minimum and maximum temperature on the all-cause mortality (RR) by regions (urban and rural areas) and age group (aged 0–64 y and aged 65 y+) during the summer season of 2011 ~ 2017; dashed vertical lines are the 75th percentile and 99th percentile of summer temperature distribution of each minimum (Tmin) and maximum temperature (Tmax)

Table 2. Percentile increase in pooled heat-related mortality risk (RR) at 99th percentile versus 75th percentile of summer temperature distribution of minimum and maximum temperatures by urban and rural areas, with subgroup results by sex and age group

	Percentile increase in heat-related mortality risk (%)			
	Minimum temperature		Maximum temperature	
	Urban areas	Rural areas	Urban areas	Rural areas
Total	9.8 (5.4, 14.4)	-6.6 (-19.6, 8.5)	9.8 (6.2, 13.5)	8.3 (-2.7, 20.5)
Sex				
Male	7.3 (1.4, 13.5)	-13.5 (-30.4, 7.6)	6.5 (1.9, 11.4)	3.6 (-11.2, 20.8)
Female	9.1 (2.6, 16.0)	-13.1 (-31.3, 9.9)	10.6 (4.8, 16.8)	9.8 (-5.8, 27.9)
Age group				
Aged 0-64 y	6.6 (-1.3, 15.2)	-38.4 (-59.4, -6.4)	0.6 (-5.5, 7.2)	-13.9 (-32.7, 10.2)
Aged 65 y+	9.4 (4.2, 14.8)	-4.8 (-19.4, 12.5)	11.6 (7.2, 16.2)	9.8 (-2.8, 24.1)

른 사망 위험이 부분적으로 확인되었다(PI 6.6, 95% CI [-1.3, 15.2]). 65세 이상 고령 인구집단은 최저 기온의 사망 영향은 도시 지역에서만 관찰되고, 최고 기온에 대해서는 도시와 농촌에 관계없이 최고 기온 증가에 따른 사망 영향이 모두 관찰되었다.

4. 고찰 및 결론

본 연구는 2가지 온도 지표, 즉 여름철 최저 기온과 최고 기온의 증가에 따른 사망 영향이 도시와 농촌 지역에서 서로 다르게 나타나는지 확인하고, 성별과 연령 하위그룹에 대해서도 각 온도 지표별, 도시/농촌별 온도-사망 연관성을 세부적으로 살펴보았다. 분석 결과 농촌 지역과 달리 도시 지역에서는 여름철 최저 기온의 증가에 의해 사망 위험이 유의미하게 증가하는 결과가 관찰되었으며, 여름철 최고 기온은 도시와 농촌 모두에서 사망 위험의 증가와 연관이 있었다. 온도에 따른 사망 위험은 주로 여성에서 높게 나타났으며, 농촌 지역에서는 여성 인구집단이 최저 기온보다 최고 기온에 훨씬 더 민감하게 반응하였다. 한편 65세 이상 인구집단이 65세 미만의 비고령 인구집단보다 온도-사망 위험이 전반적으로 높게 나타났고, 특히 도시 지역에서는 65세 미만의 비고령 인구집단에서 최고 기온에 따른 사망 위험은 관찰되지 않은 반면 최저 기온에 따른 사망 위험은 두드러지게 나타나 차이를 보였다.

현재까지 폭염-건강 간 연관성을 조사한 기존 연구는 주로 일 최고 온도나 일 평균 온도의 영향에 초점을 맞추어 왔으며(Gao et al., 2015; Metzger et al., 2010; Tobias

et al., 2014), 연구 결과에서 건강 영향은 일 최고 온도와 일 평균 온도 사이에서 큰 차이가 없는 것으로 발표하였다(Gao et al., 2015). 하지만 본 연구에서는 도시, 농촌 등 지역간 특성에 따라 최저 기온과 최고 기온과 같은 온도 지표에 따른 사망 위험이 달라질 수 있음을 보여주었다.

최고 온도의 영향으로 사망 위험이 증가한다는 사실은 이미 널리 알려져 있다(Gao et al., 2015; Metzger et al., 2010; Tobias et al., 2014). 하지만 도시 지역에서 여름철 최저 기온에 취약하다는 결과는 아직까지 널리 알려진 바가 없으며, 도시 지역이 최저 기온에 반응하는 것은 도시 열섬효과(urban heat island)로 인해 야간의 기온이 상승함과 더불어(Peterson, 2003), 농촌과 비교하여 도시 인구는 주간보다 저녁시간 및 야간에 사회활동이나 경제활동 등으로 활동량이 많아(Mellander et al., 2015) 야간 시간대의 기온과 연관이 있는 최저 기온에서의 노출이 더 두드러지게 나타나기 때문으로 짐작된다. 반면 농촌 지역은 최고 기온에 더 예민하게 반응했는데, 그 이유는 농촌 인구의 경우 활동하는 시간이 농업 등 산업적 특성 등의 이유로 주로 최고 기온과 관계있는 낮 시간대에 집중되기 때문으로 보인다.

온도-사망 취약성은 남성보다 여성에서 더 높게 나타났으며, 이러한 결과는 선행연구의 결과와 일치한다(Tong et al., 2014; van Steen et al., 2019). 또한 본 연구에서는 농촌 여성 인구에서 최고 기온에 따른 취약성이 높게 나타나는 것을 확인하였는데, 그 이유는 농촌 지역의 고령 인구 비율이 2021년 기준 46.8%에 이를 정도로 매우 높고(KOSIS, 2021) 고령으로 갈수록 여성 비율이 높다는

(KOSIS, 2020) 점과 함께 농촌 지역의 농림어업 활동 등으로 최고 기온에 대한 노출량이 많을 수 있기 때문으로 짐작된다.

65세 이상 인구집단은 최고 기온에서의 취약성이 조금 더 크게 나타나기는 했으나 최저 기온과 최고 기온이 서로 비슷한 수준의 사망 위험을 나타냈다. 이는 65세 이상 인구집단은 주로 낮에 야외에서 활동하는 경우가 많고, 기본적인 생활 및 활동들이 낮과 밤 사이에 차이가 크지 않아(Karimi et al., 2012) 주간과 야간의 취약성이 비슷하게 나타날 수 있기 때문으로 보인다. 한편 도시지역의 65세 미만 비고령 인구집단은 최저 기온에 주로 취약하고, 최저 기온과 최고 기온에 따른 사망 위험의 차이(difference) 또한 더 두드러졌다. 이는 젊은 인구집단의 경우 경제활동을 활발히 하는 인구집단이므로 주로 주간에는 회사에서 폭염의 영향을 줄일 수 있는 에어컨 등을 사용하며 취약성이 낮은 실내 환경에 머무르다 퇴근 이후 실외 활동을 하면서 주로 야간의 기온에 노출되는 시간이 더 많기 때문에(Karimi et al., 2012) 야간 시간대와 연관된 최저 기온에의 취약성이 드러난 것으로 보인다.

한편 한국 기상청에서는 최근까지 폭염 주의보와 폭염 경보의 기준을 일 최고 기온 조건만을 활용하여 일 최고 기온이 33℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때, 그리고 일 최고 기온이 35℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때로 각각 정의해왔다(KMA, 2022). 최근 들어 2020년 5월 15일부터는 체감온도 기반 폭염특보 시스템을 시범운영 함에 따라 폭염 특보의 발령 기준을 일 최고 기온 대신 일 최고 체감온도를 활용하고 있지만(KMA, 2022), 이러한 일 최고 체감온도 또한 결국 최고 온도가 특보 발령 기준이 되고있는 것이 사실이다. 현재 미국 해양대기청에서는 고온 주의보와 고온 경보 단계에서 최대 열 지수가 최소 2일 동안 화씨 100° (고온 경보시 화씨 105°) 이상이면 최저 야간 기온이 화씨 75°로 예상될 때 지역별 특보를 발령하도록 권고하고 있다(NOAA, 2022). 따라서 본 연구의 결과로 미루어 볼 때 도시지역에서는 최고 온도를 기준으로 설정한 폭염 특보 시스템과 더불어 최저 온도 또한 폭염 특보 시스템과 연동되어 활용될 필요가 있으며, 이를 통해 폭염 노출에 지역 특성별로 차등적으로 대응하는 것이 가능해지고 결과적으로 폭염에 따른 사망을 조기 예방할 수 있을 것이다.

본 연구의 제한점은 먼저 시계열 자료를 활용한 연구이므로 생태학적 연구(ecological study)의 제한점을 공유하며, 따라서 인과적 연관성을 보여주는 데에는 한계가 있

다. 그리고 자료가 시군구 단위로 구축됨에 따라 지역 간 면적이 상이한 문제 등 노출 할당에 대한 제한점이 존재한다. 또한 사망자료에서 활용할 수 있는 정보의 제약으로 인해 다양한 사회경제적 특성에 따른 온도-사망 취약성을 살펴보기 못하였다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 한국 전 지역을 아우르는 시군구 수준의 공간 고해상도 시계열 자료를 기반으로 전 세계적으로도 가장 표준의 온도-사망 위험 분석 기법(Gasparrini et al., 2010)을 활용하여 고온 관련 취약성을 평가하였다. 그리고 이를 통해 전국 229개 시군구 지역에 대하여 온도 지표(최저 기온, 최고 기온)별 사망 위험의 특성 차이를 살펴본 우리나라 최초의 연구이다.

결론적으로, 도시 지역에서는 여름철 최고 기온과 더불어 여름철 최저 기온의 상승 또한 사망 발생에 중요한 영향을 미치므로 폭염 정책 수립 시 최저 기온 또한 고려해 볼 필요가 있다. 또한 성별이나 연령 등 인구집단의 특성별로 서로 다른 강도의 온도-사망 위험이 관찰되므로 향후 인구 특성별 차등적 폭염 대응 매뉴얼 수립이나 도시 지역의 젊은 인구집단에 대한 특별 경보 등 세분화된 경보·안내 시스템 구축 또한 고려해 볼 필요가 있을 것이다.

사사

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

References

- Gao J, Sun Y, Liu Q, Zhou M, Lu Y, Li L. 2015. Impact of extreme high temperature on mortality and regional level definition of heat wave: A multi-city study in china. *Science of the Total Environment* 505: 535-544.
- Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. 2010. Distributed lag non-linear models. *Statistics in medicine* 29(21):2224-2234.
- Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. 2012. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations. *Statistics in medicine* 31(29):3821-3839.

- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Zanobetti A, Schwartz J, Tobias A, Tong S, Rocklöv J, Forsberg B. 2015a. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *The lancet* 386(9991):369-375.
- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Kinney PL, Petkova EP, Lavigne E, Zanobetti A, Schwartz JD, Tobias A, Leone M. 2015b. Temporal variation in heat-mortality associations: A multicountry study. *Environmental health perspectives* 123(11):1200-1207.
- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Tobias A, Zanobetti A, Schwartz JD, Leone M, Michelozzi P, Kan H. 2016. Changes in susceptibility to heat during the summer: A multicountry analysis. *American journal of epidemiology* 183(11):1027-1036.
- Guo Y, Barnett AG, Pan X, Yu W, Tong S. 2011. The impact of temperature on mortality in tianjin, china: A case-crossover design with a distributed lag nonlinear model. *Environmental health perspectives* 119(12):1719-1725.
- Guo Y, Gasparrini A, Armstrong BG, Tawatsupa B, Tobias A, Lavigne E, Coelho MdSZS, Pan X, Kim H, Hashizume M. 2016. Temperature variability and mortality: A multi-country study. *Environmental health perspectives* 124(10):1554-1559.
- Hu K, Guo Y, Hochrainer-Stigler S, Liu W, See L, Yang X, Zhong J, Fei F, Chen F, Zhang Y. 2019. Evidence for urban-rural disparity in temperature-mortality relationships in zhejiang province, china. *Environmental health perspectives* 127(3):037001.
- 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.
- Karimi B, Rashidi TH, Mohammadian A, Sturm K. 2012. Young-old elderly and baby boomers: Explanatory analysis of activity duration, time-of-day choice, and planning time horizons. *Transportation research record* 2322(1):51-59.
- KCHS. (Korea Community Health Survey) Community Health Determinants DB (<https://chs.kdca.go.kr/>), accessed 2022/9/7.
- Kim D, Jeong J, Ko Y, Kwon Y, Kim Y. 2018. The construction of database of community health outcomes and health determinants in the republic of korea. *Public Health Weekly Report, KCDC* 11(30):979-983.
- KMA. (Korea Meteorological Administration) Weather data open portal (<https://data.kma.go.kr/cmnm/main.Do>), accessed 2022/9/2.
- KMA. (Korea Meteorological Administration). 2022. Weather alarming announcement standard (<https://www.Weather.Go.Kr/w/weather/warning/standard.Do>), accessed 2022/9/20.
- KOSIS. (Korea Statistical Information Service). 2017. Urbanization rate (https://kosis.kr/stathtml/stathtml.Do?Orgid=101&tblid=dt_2kaa204), accessed 2022/9/23.
- KOSIS. (Korea Statistical Information Service). 2020. 2020 「census of population」.
- KOSIS. (Korea Statistical Information Service). 2021. 2021 「agriculture, forestry and fisheries survey」.
- Lee W, Choi HM, Kim D, Honda Y, Guo Y-LL, Kim H. 2018. Temporal changes in mortality attributed to heat extremes for 57 cities in northeast asia. *Science of the total environment* 616:703-709.
- 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. *International Journal of Epidemiology* 50(2):602-612.
- Lee W, Choi M, Bell ML, Kang C, Jang J, Song I, Kim Y-O, Ebi K, Kim H. 2022. Effects of urbanization on vulnerability to heat-related mortality in urban and rural areas in south korea: A nationwide district-level time-series study. *International Journal of Epidemiology* 51(1):111-121.
- Liu J-M, Ai S-Q, Qi J-L, Wang L-J, Zhou M-G, Wang C-J, Yin P, Lin H-L. 2021. Defining region-specific heatwave in china based on a novel concept of

- “avoidable mortality for each temperature unit decrease”. *Advances in Climate Change Research* 12(5):611-618.
- MDIS. (MicroData Integrated Service) Data download web page (<https://mdis.kostat.go.kr/index.do>), accessed 2022/9/7.
- Mellander C, Lobo J, Stolarick K, Matheson Z. 2015. Night-time light data: A good proxy measure for economic activity? *PloS one*. 10(10):e0139779.
- Metzger KB, Ito K, Matte TD. 2010. Summer heat and mortality in new york city: How hot is too hot? *Environmental health perspectives* 118(1):80-86.
- NOAA. (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2022. Heat Watch vs. Warning (<https://www.weather.gov/safety/heat-ww>), accessed 2022/10/29.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). 2020. OECD Economic Surveys: Korea 2020.
- Park K, Jun H. 2020. Population Size and Fertility: A Comparative Study between Large Cities, Medium and Small-Sized Cities, and Rural Areas. *Journal of the Korean Regional Development Association* 32(4): 67-99.
- Peterson TC. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous united states: No difference found. *Journal of Climate* 16(18): 2941-2959.
- Tobías A, Armstrong B, Gasparrini A, Diaz J. 2014. Effects of high summer temperatures on mortality in 50 spanish cities. *Environmental Health* 13(1):1-6.
- Tong S, Wang XY, Yu W, Chen D, Wang X. 2014. The impact of heatwaves on mortality in australia: A multicity study. *BMJ open* 4(2):e003579.
- UN (United Nations). 2018. World urbanization prospects: The 2018 revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- van Steen Y, Ntarladima A-M, Grobbee R, Karssenbergh D, Vaartjes I. 2019. Sex differences in mortality after heat waves: Are elderly women at higher risk? *International archives of occupational and environmental health* 92(1):37-48.
- Vicedo-Cabrera AM, Scovronick N, Sera F, Royé D, Schneider R, Tobias A, Astrom C, Guo Y, Honda Y, Hondula D. 2021. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature climate change* 11(6):492-500.