

메타회귀분석 및 인공위성-재분석 자료를 이용한 전국 고해상도 고온-사망 위험도 소지역 추정

오지은* · 민하린** · 안서영*** · 김아영* · 박진아* · 김호****† · 이환희*****†

*서울대학교 보건대학원 박사과정학생, **부산대학교 데이터사이언스전문대학원 석사과정학생, ***부산대학교 정보융합공학과 석사과정학생, ****서울대학교 보건대학원 교수, *****부산대학교 의생명융합공학부 조교수

Small-area analysis of nationwide heat-related mortality risk using meta-regression and satellite reanalysis data

Oh, Jieun* · Min, Harin** · Ahn, Seoyeong*** · Kim, Ayoung* · Park, Jinah* · Kim, Ho****† and Lee Whanhee*****†

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

**Master Student, Graduate School of Data Science, Pusan National University, Pusan, Korea

***Master Student, Department of Information Convergence Engineering, Pusan National University, Yangsan, Korea

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

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

ABSTRACT

Due to climate change, extreme heat events are becoming more frequent and intense, and their impacts on health are an increasing major concern in public health. For more effective interventions, it is crucial to identify precisely high-risk areas considering regional characteristics. Therefore, this study aimed to assess the impact of high temperatures on mortality in South Korea at a small geographic scale using high-resolution data. We collected mortality and temperature data during the summer season (June-September) from 2015 to 2019 across 247 districts in inland South Korea. Also, we used satellite datasets to gather regional variables at a 1 km grid level. Through a three-stage analysis, we 1) calculated the heat-related mortality risk for each district, 2) estimated a pooled risk at the national level and derived more stable predictions for each district, and 3) estimated the risk at a 1 km grid resolution using regional variables and fitted a meta-regression model. The small-area estimates showed variations in risk across grids, even within the same district. Additionally, the heat-related mortality risk was higher for cardiovascular mortality than all-cause mortality. Among the regional variables, the proportion of the elderly population, urban cover fraction, and distance to emergency medical facilities were positively associated with the heat-related mortality risk. In conclusion, this study suggests the need to identify areas vulnerable to heat-related mortality risk at high resolution. Since the risk can vary depending on regional characteristics, it is crucial to develop response strategies considering these factors.

Key words : Climate Change, Heat, Mortality, Small-Area Assessment, Meta-Analysis

Lead authors : Oh, Jieun and Min, Harin

†**Corresponding author :** hokim@snu.ac.kr (1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, 08826, Seoul, Korea. Tel. +82-2-880-2702)

†**Corresponding author :** whanhee.lee@pusan.ac.kr (49, Busandaehak-ro, Mulgeum-eup, Yangsan-si, Gyeongsangnam-do, Korea. Tel. +82-51-510-8599)

ORCID 오지은 0000-0002-3934-5829

민하린 0009-0005-7715-1557

안서영 0009-0002-7696-5354

김아영 0009-0006-9478-6076

박진아 0000-0003-0669-3816

김 호 0000-0001-7472-3752

이환희 0000-0001-5723-9061

Received: November 19, 2024 / Revised: December 03, 2024 / Accepted: December 16, 2024

1. 서론

기후변화로 인해 극한 기후 현상의 발생이 더욱 빈번해지고 강도가 세지고 있으며, 이에 따른 건강영향이 중요한 공중보건문제로 대두되고 있다. 이전 연구들에 따르면, 폭염이나 고온에 노출될 경우 열 스트레스로 인해 온열질환 등 급성 병리학적 상태가 발생하거나 (Meade et al., 2020), 심혈관계에 부담을 줌으로써 질환 발생 및 악화로 이어질 수 있으며(Hong et al., 2017), 이로 인해 전체 및 심혈관계 사망 위험이 증가할 수 있다(Woo et al., 2019).

이러한 지구 온난화의 위협 속에서 고온 현상으로 인한 건강영향을 대비하기 위해서는 취약성 관련 요인을 파악하는 것이 중요하다. 고온과 사망 간 연관성은 성별, 연령, 소득 수준 등 개인적 요인뿐만 아니라 거주 환경, 도시적 특징 등 지역적 특성으로 인해 달라질 수 있는 것으로 알려져 있다(Benmarhnia et al., 2015). 일반적으로 65세 이상 고령층의 경우 고온 관련 사망 위험에 더욱 취약한 것으로 알려져 있으며(Bunker et al., 2016), Sera et al. (2019)의 연구에 따르면 인구 밀도와 대기 오염 농도가 높고 의료 서비스가 부족한 도시 지역에서 고온에 대한 취약성이 더 높은 것으로 나타났다.

또한, 이러한 취약성 요인에 따라 지역 내에서도 고온으로 인한 사망 위험이 공간적으로 다르게 분포할 수 있다. 따라서 지역적 특성과 그에 따른 고온과 사망 간 연관성의 공간적 변동성을 고려하여 높은 해상도에서 고위험지역을 식별하고 이를 바탕으로 국가 및 지역 개입 전략을 설계할 필요가 있다(Gasparrini et al., 2022; Zhang et al., 2023). 그러나 대부분의 이전 연구들은 데이터 가용성과 설계의 제한으로 인하여 주로 국가 또는 대도시 단위에서 고온 관련 사망 위험을 추정하였으며 세밀한 지역 단위에서의 공간적 분포를 확인하는 데는 한계가 있었다(Jung et al., 2014; Lee et al., 2016; Woo et al., 2019).

따라서 본 연구에서는 우리나라 전국 시군구를 대상으로 여름철 고온이 사망에 미치는 영향을 살펴보고, 이를 설명할 수 있는 지역적 특성을 파악한 후, 고해상도 데이터를 활용하여 소규모 지역 단위에서 고온 관련 사망 위험도를 평가하는 것을 목표로 하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 연구대상지역

본 연구에서는 2015년부터 2019년까지 한국의 여름철 고온과 사망 간 연관성을 살펴보고 메타회귀분석을 활용한 소지역 추정을 수행하고자 하였다. 이때 데이터의 가용성을 고려하여 250개 시군구 중 도서지역(경상북도 울릉군, 제주특별자치도 제주시, 제주특별자치도 서귀포시)을 제외한 내륙 전역 247개 시군구를 연구대상지역으로 하였다.

2.2. 연구자료

본 연구에서는 고온 관련 사망 위험을 추정하기 위하여 한국 내륙 전역 247개 시군구의 2015년부터 2019년까지 여름철(6월~9월) 동안의 사망자료와 온도 자료를 수집하였다. 사망자료는 개인 단위로 제공되는 마이크로데이터 통합서비스(MDIS)의 사망원인통계를 이용하였다(Statistics Korea, [date unknown]). 일 평균 온도는 구글 어스 엔진(Google Earth Engine)을 통해 인공위성 재분석 자료인 ERA-5 Land로부터 추출하였으며(Muñoz Sabater, 2019). 사망 일자 및 시군구 단위의 주소지 정보를 바탕으로 개인 단위 사망자료와 연계하였다.

메타회귀분석을 통한 소지역 추정을 수행하기 위하여 각 지역의 기후적 특성(평균 온도, 비습), 인구학적 특성(고령 인구비율), 도시계획적 특성(PM_{2.5} 농도, O₃ 농도, 도시비율, 응급 의료시설까지의 거리, 생활권 공원까지의 거리)을 나타낼 수 있는 변수들을 추가로 수집하였다. 구글 어스 엔진을 통해 인공위성 자료인 NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2)와 Copernicus Global Land Cover Layers-Collection 2로부터 6시간 단위 비습(specific humidity)과 연별 도시 비율(urban cover fraction)을 추출하였으며(Buchhorn et al., 2020; Saha et al., 2011), 국토정보플랫폼을 통해 연별 고령 인구비율, 응급 의료시설까지의 거리, 생활권 공원까지의 거리 자료를 수집하였다(NGII, [date unknown]). 또한, AiMS-CREATE 팀이 개발한 머신러닝 기반 앙상블 모델로부터 일별 평균 PM_{2.5} 농도와 최대 8시간 평균 O₃ 농도에 대한 1 km 해상도의 예측값을 수집하였다(AiMS-CREATE, [date unknown]). 지역 변수 중 비습은 시군구 단위로 수집되었으며 그 외 모든 지역 변수들은 1 km 격자 단위로 수집되었고, 2015년부터 2019년까지 여름철(6~9월) 동안의 평균값으로 산

출되었다. 또한, 시군구 단위의 값을 산출하기 위하여 시군구 경계를 기준으로 포함되는 격자들의 평균값을 계산하였다. 모든 지역 변수들은 평균 0, 표준편차 1로 표준화되었다.

2.3. 통계적 분석방법

본 연구에서는 다음과 같은 3단계 분석방법을 활용하였다: 1) 시군구별로 고온 관련 사망 위험을 산출한 뒤 2) 메타회귀분석을 통해 전국 단위의 통합 위험(pooled risk)을 산출한 뒤 다시 시군구별로 보다 안정화된 예측값을 구하고 3) 지역 변수를 활용하여 1 km 격자 단위로 고온 관련 사망 위험을 추정하였다.

첫번째 단계에서는 시간-층화 사례-교차연구 설계를 이용한 조건부 로지스틱 회귀 분석을 수행하여 시군구별 여름철 고온 관련 사망 위험을 추정하였다. 시간-층화 사례-교차연구 설계는 사망이 발생한 날의 일 평균 온도와 대조 기간의 일 평균 온도에 대한 노출을 개인 수준에서 비교하는 방법이다. 구체적으로, 사망이 발생한 날과 동일한 연도와 월, 그리고 같은 요일에 해당하는 일자들이 대조 기간으로 설정되며 각 사례는 3~4개의 대조군을 갖게 된다. 이러한 설계 방법은 장기적 추세, 계절성, 요일효과 등 시변(time-varying) 교란변수(confounder)와 한 달 안에 변하지 않는 성별, 연령, 경제적 수준, 생활양식 등 시간 불변(time-invariant) 교란변수를 통제하는 데 효과적이다 (Tobias et al., 2024).

또한, 본 연구는 비선형적인 노출-반응 관계와 시간적 구조를 동시에 나타내기 위하여 조건부 로지스틱 회귀 모델 내에 분산 지연 비선형 모델(distributed lag nonlinear model)을 사용하였다(Gasparrini et al., 2010). 온도-사망 관계에 대해서는 자유도 4의 natural cubic spline 함수를 적용하였으며, 지연(lag)-사망 관계에 대해서는 10일의 지연 기간에 대하여 log scale에서 동일한 간격으로 2개의 노트(knot)를 둔 natural cubic B-spline 함수를 적용하였다. 모델의 파라미터 조건 및 함수 설정 등은 선행연구의 설정값을 참조하였다(Lee et al., 2021; Park et al., 2024). 1단계 분석을 통해 시군구 수준에서 여름철 평균 온도 분포의 75분위수 대비 99분위수 온도에 대한 누적 지연(lag-cumulative) 사망 위험도(relative risk; RR)를 추정하였다.

두 번째 단계에서는 1단계에서 얻은 시군구별 여름철 고온 관련 사망 위험 추정치를 기반으로 다변량 메타회귀

분석(multivariate meta-regression analysis)을 수행하여 한국 내륙 전역에 대하여 통합된(pooled) 추정치를 산출하였다. 그리고 247개 시군구 각각에 대해 최적 선형 불편 예측(best linear unbiased prediction; BLUP)을 산출하여 지역 간 변동성을 보다 안정화한 예측값을 얻었다(Gasparrini et al., 2012).

고온 관련 사망 위험을 추정하는 선행연구에서는 대부분 위의 2단계로 구성된 분석방법을 채택하였으나(Gasparrini et al., 2012; Kang et al., 2022; Oh et al., 2022), 본 연구에서는 소지역 추정을 수행하기 위하여 추가적인 한 단계를 포함한 3단계 분석방법을 채택하였다. 세 번째 단계에서는 두 번째 단계와 마찬가지로 첫 번째 단계에서 얻은

Table 1. Descriptive statistics of mortality, temperature, and meta-predictors from June to September of 2015–2019 in inland of South Korea. Data represent the mean (range) of averages across areas

	Mean (range)	Time resolution
Deaths		
Total	2.95 (0.43, 9.63)	Daily
Circulatory-related	0.60 (0.07, 1.81)	Daily
Temperature		
Mean temperature (°C)	22.91 (19.36, 23.88)	Daily
Meta-predictors		
Specific humidity	0.013 (0.012, 0.015)	Daily
PM _{2.5} (μg/m ³)	18.25 (13.91, 22.03)	Daily
O ₃ (ppm)	0.05 (0.04, 0.06)	Daily
Urban cover fraction (%)	27.82 (1.28, 97.99)	Yearly
Proportion of the elderly population (%)	15.23 (3.40, 39.22)	Yearly
Distance to emergency medical facilities (km)	11.53 (0.92, 45.54)	Yearly
Distance to neighborhood parks (km)	6.42 (0.43, 36.23)	Yearly

시군구별 추정치를 활용하되, 시군구 단위로 집계된 지역 변수들(비습, 도시 비율, 고령 인구비율, 응급 의료시설까지의 거리, 생활권 공원까지의 거리, PM_{2.5} 농도, O₃ 농도)을 예측변수로 포함하는 메타회귀분석을 수행하여 각 지역의 특성을 고려하여 고온 관련 사망 위험을 예측할 수 있는 모델을 구축하였다. 그리고 적합한 메타회귀모델에 1 km 격자 단위로 집계된 지역 변수들을 다시 예측변수로 활용하여 고온 관련 사망 위험을 1 km 단위 격자별로 예측하였다(Gasparrini et al., 2022).

하위 집단 분석으로 위 모든 분석 과정을 총 사망과 함께 심혈관계 질환으로 인한 사망에 대하여 반복하였다. 모든 통계분석은 R 소프트웨어(버전 4.1.1)를 사용하였다.

3. 연구결과

2015년부터 2019년까지 여름철(6~9월) 동안의 일별 사망자 수, 일 평균 온도, 그리고 지역 변수에 대한 기술 통계량은 Table 1과 제시되어 있으며, 모든 값은 시군구별 평균값으로 계산되었다. 시군구별 일일 평균 사망자 수는 2.95명으로 나타났으며, 이 중 심혈관계 사망자 수는 0.60명이었다. 연구기간 동안 일 평균 온도는 22.91°C였으며, 시군구별로 최소 19.36°C부터 최대 23.88°C까지 분포하

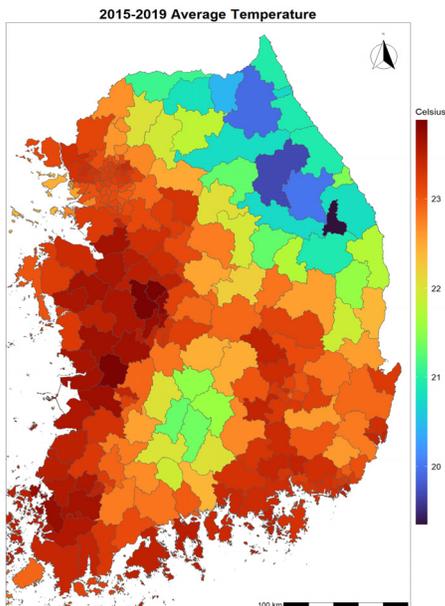


Fig. 1. Geographical distributions of the mean temperature from June to September of 2015-2019 in inland of South Korea

였다. Fig. 1은 연구대상지역인 한국 내륙 전역 247개 시군구의 일 평균 온도의 공간적 분포를 나타내며, 일 평균 온도는 수도권 지역, 광역시, 서·남해안 지역에서 높고, 내륙 혹은 북동쪽 지역에서 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 2는 3단계 분석 과정별로 산출된 여름철 고온 관련 사망 위험도를 나타낸 지도이며, 왼쪽부터 순서대로 첫 번째 단계에서 시군구별로 산출된 추정치, 두 번째 단계에서 메타회귀분석 후 추정된 시군구별 BLUP 값, 세 번째 단계에서 지역 변수들을 포함한 메타회귀모델을 통해 예측된 1 km 격자 단위 추정치이다. 총 사망의 경우, 시군구 단위로 추정된 결과에서는 수도권 지역을 비롯하여 충청도 북부지역, 전라도 북부 및 서해안 지역, 경상도 및 강원도 동해안 지역 등에서 고온 관련 위험도가 높게 나타났으며, 1 km 격자 단위 추정 결과에 따르면 그중에

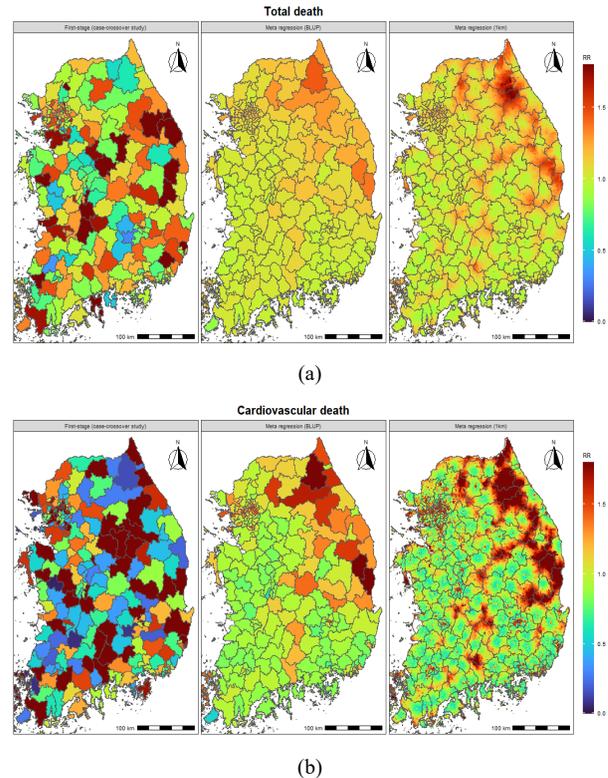


Fig. 2. Heat-related mortality risk for (a) total deaths and (b) circulatory-related deaths from June to September of 2015-2019 in inland of South Korea. Sequentially, district-specific estimates from the first stage, district-specific BLUPs from the second stage, and 1 km grid-level estimates from the third stage

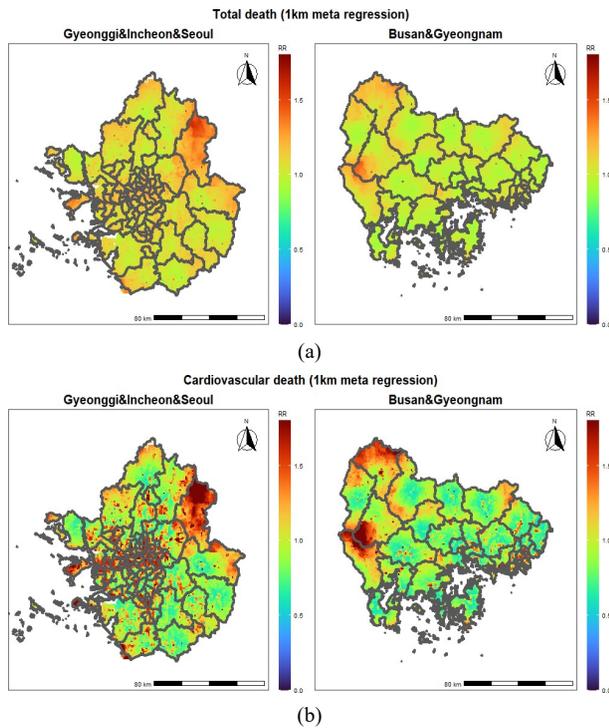


Fig. 3. Heat-related mortality risk estimated on a 1 km grid for (a) total deaths and (b) circulatory-related deaths from June to September of 2015–2019 in capital areas, Busan, and Gyeongnam area

서도 일부 동해안 지역에서 위험도가 특히 높은 것으로 나타났다(Fig. 2a). 또한, 심혈관계 사망에 대한 고온 관련 위험은 총 사망에 비해 높은 것으로 나타났으며, 지리적 분포는 총 사망과 비슷하였으나 특히 중부 일부 내륙 지역에서 더욱 두드러졌고 1 km 격자 단위 추정 결과 또한 마찬가지였다(Fig. 2b).

Fig. 3은 1 km 격자 단위로 추정된 고온 관련 사망 위험을 수도권 지역과 부산·경상남도 지역에 대하여 확대하여 나타낸 그림이다. 수도권 지역 중에서는 서울, 인천, 경기도 동부지역에서, 부산·경상남도 지역 중에서는 서부지역에서 고온 관련 총 사망 및 심혈관계 사망 위험이 높은 것으로 나타났다. 특히, 1 km 격자 단위로 추정할 시 같은 시군구 내에서도 위험도가 더 높은 지역과 낮은 지역이 존재하는 등 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

Table 2는 세 번째 단계에서 지역 변수들을 예측변수로 포함하여 적합한 메타회귀모델을 정리한 내용이다. 총 사망의 경우, 응급 의료시설까지의 거리와 고온 관련 사망 위험 간에 양의 연관성이 관찰되었으며, 이는 약한 유의성 수준(p -value < 0.20)을 보였다. 심혈관계 사망의 경우, 지역 변수 중 도시 비율과 고온 관련 사망 위험 간에 양의 연관성이 통계적으로 유의하게 나타났으며(p -value < 0.05), 고령 인구비율과 응급 의료시설까지의 거리 또한 양의 연관성을 가지며 약한 유의성(p -value < 0.20)을 보였다. 추가로, 메타 예측변수들 중 일부는 전체 사망과 심혈관계

Table 2. Summary of meta-analysis on the association between district-level heat-related mortality risk and standardized meta-predictors. Results are expressed as change in log RR for standard deviation increase of the meta-predictors

	Total deaths			Circulatory-related deaths		
	Estimate	95% CI	p-value	Estimate	95% CI	p-value
Mean temperature	0.030	(-1.149, 1.210)	0.960	-0.509	(-3.149, 2.130)	0.705
Specific humidity	-0.157	(-1.185, 0.872)	0.765	0.191	(-2.100, 2.482)	0.870
PM _{2.5}	-0.001	(-0.025, 0.024)	0.965	-0.007	(-0.061, 0.047)	0.799
O ₃	-15.218	(-49.055, 18.619)	0.378	1.109	(-74.866, 77.084)	0.977
Urban cover fraction	0.032	(-0.033, 0.097)	0.331	0.195	(0.051, 0.339)	0.008
Proportion of the elderly population	0.015	(-0.018, 0.048)	0.369	0.053	(-0.019, 0.126)	0.148
Distance to emergency medical facilities	0.113	(-0.043, 0.270)	0.157	0.330	(-0.031, 0.691)	0.073
Distance to neighborhood parks	-0.006	(-0.176, 0.163)	0.941	0.044	(-0.343, 0.431)	0.825

사망에 따라 방향성이 다르게 나타났으나(평균기온, 비습 등), 통계적으로 유의하지 않은 수준인 것으로 나타났다.

4. 고찰 및 결론

본 연구는 한국 내륙 전역 247개 시군구의 2015년부터 2019년까지 여름철(6월~9월) 동안의 고온 관련 사망 위험을 살펴보고, 메타회귀분석과 지역 변수를 활용한 3단계 분석방법을 통해 1 km 격자 단위로 소지역 추정을 수행하였다. 분석 결과, 동일 시군구 내에서도 격자별로 위험도의 격차가 존재하는 것을 확인하였다. 또한, 총 사망에 비하여 심혈관계 사망의 고온 관련 위험이 높은 것으로 나타났으며, 지역 변수 중에서는 고령 인구비율, 도시 비율, 응급 의료시설까지의 거리가 고온 관련 사망 위험과 양의 연관성을 보였다.

본 연구에서는 고온에 대한 노출과 사망 간 유의한 연관성을 발견하였으며, 이는 국내에서 수행되었던 이전 연구결과와 일치한다(Jung et al., 2014; Lee et al., 2016; Woo et al., 2019). 그러나 이전 연구들은 보다 광범위한 지역 단위(전국, 시도, 시군구)에 대하여 고온 관련 사망 위험 추정치를 제시하였고, 그중 다수는 수도권이나 특정 광역시 등 일부 지역만을 대상으로 하였으며, 이로 인해 온도와 그에 따른 건강영향의 공간적 분포와 변동성을 충분히 반영하지 못했을 가능성이 있다(Jung et al., 2014; Kang et al., 2022; Lee et al., 2016; Oh et al., 2022; Woo et al., 2019). 본 연구는 전국 1 km 격자 단위의 고해상도 공간 자료를 활용하여 고온 관련 총 사망 및 심혈관계 사

망 위험을 추정함으로써, 기존 연구의 증거를 보완한다는 점에서 의의가 있다.

본 연구결과에 따르면, 고온에 노출될 경우 사망, 특히 심혈관계 관련 사망의 위험이 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 연관성에 대한 몇 가지 생물학적 기전이 밝혀진 바 있다. 열 스트레스에 대한 대표적인 생리적 반응은 피부 혈관을 확장시키고 혈류를 피부 표면으로 재분배하여 체열을 발산하는 것인데, 이 과정에서 심박수와 심박출량이 과도하게 증가할 경우 심장에 과부하를 일으킬 수 있다(Crandall and Wilson, 2015). 게다가, 고온에 노출될 경우 과도한 발한과 탈수 증상이 발생할 수 있으며 이는 혈액 농축을 초래하고 혈전 생성을 촉진할 수 있다(Bouchama and Knochel, 2002). 그 밖에도, 고온에 노출되면 염증성 사이토카인의 증가로 면역 반응이 과도하게 활성화되고 이로 인해 염증 관련 손상이나 면역 억제 상태가 발생할 수 있다(Bouchama and Knochel, 2002).

본 연구의 또 다른 주요한 발견 중 하나는 고령 인구비율과 도시 비율이 높고 응급 의료시설까지의 거리가 멀수록 고온 관련 사망 위험이 증가한다는 것이다. 우선, 노인 인구는 고온에 대한 노출과 열 스트레스에 가장 취약한 계층으로 알려져 있다(Bunker et al., 2016). 노화로 인해 열 스트레스에 대한 생리적 적응 능력이 떨어지거나 행동 반응이 느릴 수 있으며, 여러 기저 질환을 앓고 있는 경우 고온의 영향을 더 많이 받을 수 있다(Basu et al., 2005). 또한, 도시 인구가 고온에 더 취약하다는 점은 여러 연구에서 보고되었으며, 이는 도시열섬현상으로 설명될 수 있다(Cleland et al., 2023; Jang et al., 2020). 도시화

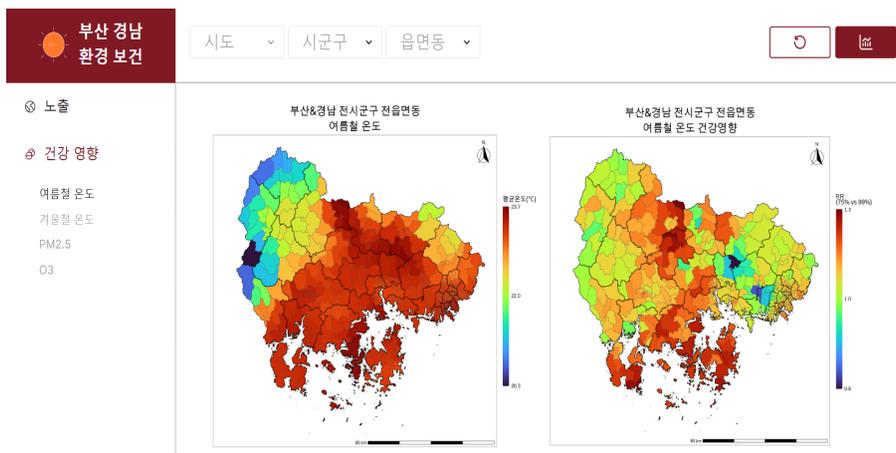


Fig. 4. A website developed as part of DIRECTION project, displaying the health impacts of climate change-related factors (available in Korean only)

가 진행될수록 녹지가 감소하고 건물과 도로의 면적이 늘어나면서 낮 동안 더 많은 열이 축적되고 밤에 열이 충분히 방출되지 않아 고온 관련 건강 위험이 증가할 수 있다. 그리고 응급 의료시설까지의 거리가 멀수록, 즉 응급 의료 서비스에 대한 접근성이 떨어질수록, 단기적으로는 고온으로 인한 응급 상황 발생 시 즉각적인 대응과 치료가 어려울 수 있다. 장기적으로는 만성 질환을 비롯한 건강 상태에 대한 지속적인 관리가 어려워져 고온으로 인한 사망 위험이 증가할 수 있다. 이처럼 본 연구결과에 따르면 여러 지역적 특성 중 주로 인구학적 특성과 도시계획적 특성과 관련된 변수들이 고온 관련 사망 위험에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 이는 추후 고온 관련 사망 위험에 취약한 지역 식별 시 고려해야 할 주요 요인으로 볼 수 있을 것이다.

한편, 본 연구와 같이 환경 스트레스 요인의 건강영향을 평가하는 연구는 궁극적으로는 관련 개입 전략을 수립하기 위한 역학적 근거를 제시하는 것을 목표로 하며, 따라서 연구결과를 효과적으로 전달하기 위한 방안을 함께 고려할 필요가 있다. DIRECTION 프로젝트의 건강 부문에서는 여름철 온도, 겨울철 온도, PM_{2.5}, O₃ 등 기후 관련 환경 노출 요인으로 인한 건강영향을 추정하고, 그 결과를 시각화하여 기후변화 적응 대책 관련 정책 입안자와 대중들이 이해하기 쉽게 전달할 수 있는 웹사이트를 개발하고 있다(Fig. 4). 본 연구에서의 1 km 격자 단위 소지역 추정 결과도 추후 수록할 계획이며 고위험지역을 보다 정밀하게 찾아내기 위한 근거자료로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 고해상도 고온-사망 위험 추정 결과는 하향식(top-down) 접근 방식을 통해 광역 지역 및 전국 단위의 정책 수립 과정에서 전체적인 공간적 패턴을 이해하고 고위험 지역을 식별하는 데 활용될 수 있으며, 동시에 상향식(bottom-up) 접근 방식을 통해 지자체 단위에서의 세부적인 개입 전략을 개발하는 데 중요한 근거 자료를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구의 제한점은 다음과 같다. 먼저, 본 연구에서는 시간-총화 사례-교차연구 설계를 통해 시간 불변 교란변수를 통제할 수 있었지만, 한 달 내에 변화할 수 있는 교란변수(매일의 신체 상태 등)가 여전히 존재할 수 있다. 또한, 본 연구는 생태학적 연구(ecological study)이며 인과적 연관성을 보여주는 데에는 한계가 있다. 그리고 본 연구에서는 표본 크기의 한계로 인해 심혈관계 사망 내에서 구체적인 원인별 결과를 살펴볼 수 없었다. 또한, 본 연구에서는 고온-사망 위험도와 관련된 지역 변수를 최대한

포함하고자 하였으나 소지역 추정 방법에 필요한 고해상도의 자료(1 km 격자 단위)를 확보하는 데 한계가 있었으며, 이에 후속 연구에서는 고해상도 데이터의 확보 및 활용방안을 고민할 필요가 있다. 마지막으로, 메타회귀분석에 사용된 지역 변수들은 서로 관련되어 있을 수 있으며 이러한 연관성이 고온 사망 위험에 영향을 미쳤을 수 있음에도 불구하고 본 연구에서는 표본 수의 한계로 예측 변수 간 교호작용 효과를 포함하지 못하였으며 후속 연구에서는 충분한 표본 수를 확보하고 더욱 발전된 방법론을 활용하여 이를 검토할 필요가 있다.

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 한국 내륙 전 지역을 아우르는 자료를 기반으로 메타회귀분석과 1 km 격자 수준의 고해상도 지역 변수들을 활용하여 고온 관련 사망 위험에 대한 소지역 추정을 수행한 첫 번째 연구라는 점에서 의미가 있다. 또한, 다양한 지역 변수를 활용하여 고온 관련 사망 위험에 영향을 미칠 수 있는 지역적 특성을 밝혀냈다. 이에 본 연구는 향후 고온의 노출에 취약한 지역을 식별함으로써 기후변화 대응 전략을 마련하기 위한 구체적인 근거로 활용될 수 있을 것이다.

결론적으로, 본 연구는 높은 해상도에서 고온 관련 사망 위험에 취약한 지역을 식별할 필요가 있음을 보여준다. 특히 지역적 특성에 따라 고온 관련 사망 위험이 달라질 수 있으므로 이를 고려한 대응 전략의 수립이 필요할 것이다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002235). 본 연구는 부산광역시 “부산 빅데이터 혁신센터 운영사업” 지원으로 수행되었습니다.

References

- AiMS-CREATE. [date unknown]. <https://www.datascience4health.com>
- Basu R, Dominici F, Samet JM. 2005. Temperature and mortality among the elderly in the united states: A comparison of epidemiologic methods. *Epidemiology* 16(1): 58-66. doi: 10.1097/01.ede.0000147117.88386.fe

- Benmarhnia T, Deguen S, Kaufman JS, Smargiassi A. 2015. Vulnerability to heat-related mortality: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression analysis. *Epidemiology* 26(6): 781-793. doi: 10.1097/EDE.0000000000000375
- Bouchama A, Knochel JP. 2002. Heat stroke. *N Engl J Med* 346(25): 1978-1988. doi: 10.1056/NEJMra011089
- Buchhorn M, Lesiv M, Tsendbazar N-E, Herold M, Bertels L, Smets B. 2020. Copernicus global land cover layers—Collection 2. *Remote Sens* 12(6): 1044. doi: 10.3390/rs12061044
- Bunker A, Wildenhain J, Vandenberg A, Henschke N, Rocklöv J, Hajat S, Sauerborn R. 2016. Effects of air temperature on climate-sensitive mortality and morbidity outcomes in the elderly; A systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. *EBioMedicine* 6: 258-268. doi: 10.1016/j.ebiom.2016.02.034
- Cleland SE, Steinhardt W, Neas LM, West JJ, Rappold AG. 2023. Urban heat island impacts on heat-related cardiovascular morbidity: A time series analysis of older adults in us metropolitan areas. *Environ Int* 178: 108005. doi: 10.1016/j.envint.2023.108005
- Crandall CG, Wilson TE. 2015. Human cardiovascular responses to passive heat stress. *Compr Physiol* 5(1): 17. doi: 10.1002/cphy.c140015
- Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. 2010. Distributed lag non-linear models. *Stat Med* 29(21): 2224-2234. doi: 10.1002/sim.3940
- Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. 2012. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations. *Stat Med* 31(29): 3821-3839. doi: 10.1002/sim.5471
- Gasparrini A, Masselot P, Scortichini M, Schneider R, Mistry MN, Sera F, Macintyre HL, Phalkey R, Vicedo-Cabrera AM. 2022. Small-area assessment of temperature-related mortality risks in England and Wales: A case time series analysis. *Lancet Planet Health* 6(7): E557-E564. doi: 10.1016/S2542-5196(22)00138-3
- Hong YC, Kim H, Lee CW, Lim YR, Lee KS, Lim YH, Han CW. 2017. Estimation of acute-chronic diseases and mortality in extreme weather(heat-cold) in Korea. Cheongju, Korea: Korea Disease Control and Prevention Agency.
- 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. *Environ Int* 145: 106127. doi: 10.1016/j.envint.2020.106127
- Jung J, Kim I-G, Lee D-G, Shin J, Kim B-J. 2014. Study on the vulnerability regarding high temperature related mortality in Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Geogr Soc* 49(2): 245-263.
- Kang C, Oh J, Lee W, Kim H. 2022. Difference in heat-related mortality risk between urban and rural areas depending on temperature metrics: A nationwide time-series study in Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 13(6): 729-739. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.6.729
- 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. doi: 10.1093/ije/dyaa245
- Lee WK, Lee HA, Lim YH, Park H. 2016. Added effect of heat wave on mortality in Seoul, Korea. *Int J Biometeorol* 60(5): 719-726. doi: 10.1007/s00484-015-1067-x
- Meade RD, Akerman AP, Notley SR, McGinn R, Poirier P, Gosselin P, Kenny GP. 2020. Physiological factors characterizing heat-vulnerable older adults: A narrative review. *Environ Int* 144: 105909. doi: 10.1016/j.envint.2020.105909
- Muñoz Sabater J. 2019. ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi: 10.24381/cds.68d2bb30
- NGII (National Geographic Information Institute). [date unknown]. <https://map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do>

- Oh J, Kang C, Lee W, Kim H. 2022. Cut-off point temperature of hot night and heat-related mortality risk in the capital area of South Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 13(6): 781-791. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.6.781
- Park J, Kim A, Kim Y, Choi M, Yoon TH, Kang C, Kang HJ, Oh J, Bell ML, Kim H, et al. 2024. Association between heat and hospital admissions in people with disabilities in South Korea: A nationwide, case-crossover study. *Lancet Planet Health* 8(4): E217-E224. doi: 10.1016/S2542-5196(24)00027-5
- Saha S, Moorthi S, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Behringer D, Hou Y-T, Chuang H, Iredell M. 2011. NCEP Climate Forecast System version 2 (CFSv2) selected hourly time-series products [dataset]. University Corporation for Atmospheric Research. doi: 10.5065/D6N877VB
- Sera F, Armstrong B, Tobias A, Vicedo-Cabrera AM, Åström C, Bell ML, Chen B-Y, Coelho MSZS, Matus Correa P, Cruz JC, et al. 2019. How urban characteristics affect vulnerability to heat and cold: A multi-country analysis. *Int J Epidemiol* 48(4): 1101-1112. doi: 10.1093/ije/dyz008
- Statistics Korea. [date unknown]. MicroData Integrated Service. <https://mdis.kostat.go.kr/index.do>
- Tobias A, Kim Y, Madaniyazi L. 2024. Time-stratified case-crossover studies for aggregated data in environmental epidemiology: A tutorial. *Int J Epidemiol* 53(2): dyae020. doi: 10.1093/ije/dyae020
- Woo K-S, Kim DE, Chae SM. 2019. High temperature-related mortality in Korea: A meta-analysis of the empirical evidence (in Korean with English abstract). *Health Soc Welf Rev* 39(2): 10-36. doi: 10.15709/hswr.2019.39.2.10
- Zhang S, Breitner S, Rai M, Nikolaou N, Stafoggia M, de'Donato F, Samoli E, Zafeiratou S, Katsouyanni K, Rao S, et al. 2023. Assessment of short-term heat effects on cardiovascular mortality and vulnerability factors using small area data in Europe. *Environ Int* 179: 108154. doi: 10.1016/j.envint.2023.108154