



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

보건학석사 학위논문  
한국 수도권 지역에서 고온사망에 미치는  
토지특성 및 도시열섬현상의 역할

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

2021년 2월

서울대학교 보건대학원  
보건학과 보건통계학전공  
장 정 주

한국 수도권 지역에서 고온사망에 미치는  
토지특성 및 도시열섬현상의 역할

지도교수 김 호

이 논문을 보건학석사 학위논문으로 제출함  
2020년 11월

서울대학교 대학원  
보건학과 보건통계학전공  
장 정 주

장정주의 석사 학위논문을 인준함  
2020년 12월

위원장	이 승 목	(인)
부위원장	원 성 호	(인)
위원	김 호	(인)

## 초 록

서울대학교 보건대학원  
보건학과 보건통계학 전공  
장정주

**연구배경** : 도시열섬현상은 대도시 지역에서 인간의 건강에 영향을 끼치는 대표적인 요인으로 제시되었다. 그러나 도시열섬현상(urban heat anomaly)으로 인해 여름철 고온사망(heat-related mortality) 위험을 수치적으로 보인 연구는 없었으며, 도시열섬현상에 영향을 미치는 다양한 토지특성(land-use/land-cover; LULC)의 역할에 관한 평가가 이루어지지 않았다.

**연구목적** : 본 연구에서는 여러 토지특성지표들의 잠재적인 역할 및 여름철 도시열섬현상과 고온사망위험 사이의 연관성을 평가하고자 한다. 더 나아가 도시열섬현상을 고려한/고려하지 않은 채 토지특성지표와 고온사망위험 간 관계를 살펴보고자 한다.

**연구방법** : 대한민국 수도권에 해당하는 51개의 지역으로부터 지역별 시계열 자료를 활용하였다. 연관성을 살펴보기 위해 2단계 분석을 적용하였는데 1번째 단계에서는 dlnm(distributed lag non-linear model)을 이용하여 지역별 고온사망위험을 추정하였다. 2번째 단계에서는 전 지역에 걸쳐 추정량들을 풀링(pooling)하고 도시열섬효과/토지특성에 따른 고온사망위험의 연관성을 살펴보기 위해 메타분석을 사용하였다.

**연구결과** : 본 연구에서는 도시열섬효과가 높을수록 낮은 식생 그리고 높은 도시적 표면 지표들과 관계가 있다는 것을 보였고, 도시열섬효과는 고온사망위험과 양의 상관관계가 있음을 확인하였다. 도시열섬효과와 고온사망위험 간의 관계는 65세 미만 및 남성인구에 비해서 65세 이상 및 여성인구에서 두드러지게 나타났다. 또한 토지특성지표는 도시열섬효과를 통해서만 고온사망위험에 영향을 미친다는 결론을 내렸다.

**결론** : 도시지역일수록 도시열섬현상에 의해 고온사망위험에 더 취약함을 암시한다. 또한 본 연구의 결과는 고온사망위험을 낮출 수 있도록 식생의 증가 혹은 도시발달과 관련된 지표의 감소와 같이 도시열섬현상 완화를 위한 정책의 필요성을 시사한다.

**주요어** : 도시열섬현상, 토지특성, 고온사망, 도시개발정책

**학 번** : 2018-29058

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	5
1.1 연구배경 .....	5
1.2 연구목표 .....	7
제 2 장 연구방법 .....	8
2.1 연구대상 .....	8
2.2 연구자료 .....	10
2.2.1 일별 기후 및 사망자료 .....	10
2.2.2 토지특성지표 .....	10
2.2.3 도시열섬효과 .....	11
2.3 통계적 분석방법 .....	12
2.3.1 도시열섬효과 및 토지특성지표 간 상관관계 .....	12
2.3.2 지역별 도시열섬효과와 토지특성지표에 따른 고온사망위험 차이 .....	12
2.3.3 하위군 분석 및 민감도 분석 .....	13
제 3 장 연구결과 .....	15
3.1 buffer 별 연구지역의 기술통계 .....	15
3.2 도시열섬효과, 토지특성지표, 고온사망위험 사이의 관계 .....	18
3.2.1 도시열섬효과와 토지특성지표 사이의 관계 .....	18
3.2.2 도시열섬효과와 고온사망위험 사이의 관계 .....	18
3.2.3 민감도 분석 .....	23
제 4 장 결론 및 고찰 .....	25
참 고 문 헌 .....	31
부 록 .....	37

## 표 목차

표 1. 분석에 사용된 지역특성 변수 요약표 .....	9
표 2. 지역별 일별 사망자 수, 온도, 도시열섬효과, 토지특성지표의 기술통계표 .....	16
표 3. 도시열섬효과와 토지특성지표 사이의 피어슨 상관관계 .....	19
표 4. 풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수 간의 연관성 .....	22
표 5. 40km buffer 지역에서 각 하위군에 따른 풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수들 간의 연관성 .....	24
표 S1. 도시열섬효과를 보정하지 않은 채 고온사망위험과 토지특성지표들의 연관성 ..	37
표 S2. 30km buffer 지역에서 각 하위군에 따른 풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수들 간의 연관성 .....	38
표 S3. 35km buffer 지역에서 각 하위군에 따른 풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수들 간의 연관성 .....	39
표 S4. 민감도 분석(고온사망위험 정의; 50th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일 상대위험비) ..	40
표 S5. 민감도 분석(고온사망위험 정의; 90th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일 상대위험비) ..	41

## 그림 목차

그림 1. 대한민국의 수도권 지역의 지리적 분포 .....	15
그림 2. 각 buffer 별 도시열섬효과의 분포 .....	17
그림 3. 도시열섬효과 수준에 따른 여름철 고온사망위험 .....	20
그림 S1. 각 buffer 별 여름철 온도의 지리적 분포 .....	42
그림 S2. 40km buffer에서 토지특성지표(%)의 지리적 분포 .....	43
그림 S3. 지역별 1단계 분석에서 추정된 여름철 온도와 고온사망위험곡선 .....	44
그림 S4. 도시열섬효과 및 고온사망위험(RR) 사이의 산점도 .....	45

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

도시열섬현상은 도시발달로 인해 발생하며 도시주변을 둘러싸고 있는 교외지역에 비해 대도시지역의 기온이 현저히 따뜻한 현상이다[1]. 이로써 도시열섬현상은 도시지역의 폭염 규모 및 기간을 늘리고[2, 3], 심지어 교외지역 혹은 시골지역에 비해 고온사망위험을 높이는 주요한 요인 중 하나로 제시된다[4, 5, 6]. 전 세계적으로 지속되는 도시화로 미래에 3명 중 2명은 도시지역에 거주할 것이라 예측된다. 따라서, 도시열섬현상이 인류의 건강에 미치는 부정적인 영향을 이해하고 관리하는 것은 기후변화를 관리하고자 현재와 미래의 도시열섬현상 대응 계획을 세우는데 있어 중요한 안건이다[7].

도시열섬현상의 원인으로 몇 가지 요인이 제시되는데 그 중 하나는 증가하는 고층빌딩의 밀도 및 감소하는 녹지 등과 같은 도시토지특성이다. 여러 선행연구에서는 도시토지특성이 토지표면의 복사 특성(반사도, 복사율, 그리고 습도)에 영향을 주고 열 에너지를 흡수하여 토지표면온도를 변화시키는 지배적인 요인에 해당된다고 보고하였다[8, 9, 10, 11, 12]. 더욱이 도시토지특성(즉, 도시지역의 도로와 빌딩을 구성하는 콘크리트 및 아스팔트 등과 같은 불침투성의 토지표면)은 태양열 흡수[1, 11] 및 삼투의 중단으로 인해 표면온도를 높이며[13] 도시열섬현상과 양의 상관관계가 있다고 알려져 있다. 한편, 도시지역에서 녹지비율이 높다면 그늘을 제공해주고 식생으로 강화된 증산작용이 이뤄지기 때문에 도



시열섬현상과 음의 상관관계를 가진다[7, 14, 15]. 고층빌딩, 차량, 산업지대 등에서 발생하는 인위적인 폐열은 토지특성과 관련이 있는데, 이는 도시열섬현상에 부가적으로 영향을 미친다[16, 17].

도시열섬현상에서 토지특성의 다양한 유형에 따른 역할과 고온 관련 건강에 대한 광범위한 연구에도 불구하고, 해당 문제에 관한 현재 연구는 확실한 한계를 지니고 있다. 먼저, 최근 연구들이 도시열섬현상은 고온사망에 영향을 미치는 주요한 요인 중 하나로 언급하고 있지만[18, 19, 20], 고온사망에 미치는 도시열섬현상의 효과를 수치적인 증거로 밝힌 연구는 거의 없다[21]. 둘째, 선행연구들은 다양한 토지특성이 도시열섬현상의 원인이라고 보고하였으나 도시열섬현상과 고온사망 간의 관계[22] 또는 도시녹지 효과를 보정한 채 고온사망위험에 미치는 영향만을 밝혀왔다[7, 23]. 또한 해당 연구들은 빌딩, 도로, 농지 등의 다양한 토지특성을 세분화시킨 채 도시열섬현상을 통해 열 위험에 영향을 줄 수 있다는 분석을 하지 않았다. 셋째, 적절한 자료의 부족으로 인해 고해상도 온도자료 혹은 건강자료를 활용한 연구는 상대적으로 드물다[7, 24, 25]. 몇몇 연구진들은 소규모 도시 내에서 온도의 공간적 변동성과 그에 따른 열 위험도를 밝혀냈다[26, 27, 28, 29]. 이 중 고온 관련 건강상태는 실외 온도에 비해 실내온도에 의해 영향을 받고[30, 31], 특히나 호흡기계 질환, 정신질환, 당뇨병을 가진 사람들에게 더욱 자명하다는 사실이 보고되어 왔다. 게다가 고온 관련 건강상태는 빈곤, 에어컨 사용, 녹지공간과 같이 개인 혹은 소규모지역의 특성과 관련이 있다[32]. 이로써 기존의 대도시 지역 수준의 연구들의 한계에 착안하여 조금 더 세분화된 지역들에서 잠재적인 변동성을 발견할 수 있는 고해상도 연구들의 필요성이 대두된다.

## 1.2 연구목표

본 연구에서는 (1) 고온사망위험에 미치는 도시열섬현상의 효과, (2) 도시열섬효과를 고려한 채로 다양한 토지특성과 고온사망위험의 관계를 밝혀내고자 한다. 특히 토지특성지표들이 도시열섬효과를 매개 (mediator)로만 고온사망위험에 영향을 미쳤는지, 아니라면 토지특성지표들이 고온사망위험에 교란요인(confounder)으로 작용하는지 알아보하고자 한다.

## 제 2 장 연구방법

### 2.1 연구대상

본 연구는 한국의 대도시라 일컬어지는 서울특별시 및 이를 둘러싸고 있는 수도권 등 51개 지역으로부터 얻어진 자료를 기반으로 한 시계열 연구로, 2011년부터 2017년까지 7개년 동안 수집된 자료를 활용하였다.

특히 한국의 수도권 서울특별시의 25개 “구”(2차 행정단위지역)를 포함하는데, 서울특별시를 둘러싸고 있는 지역들(서울특별시의 지역들에 비해 덜 도시화된 지역)로부터 도시열섬효과를 평가하기 위해 서울의 중심(centroid)으로부터 떨어진 거리(buffer)를 기반으로 26개의 외곽지역을 포함시켰다. 또한 선택적 편의(selection bias)를 피하기 위해 서울의 중심지에서 반경 30, 35, 40km 거리에 각 지역의 중심지가 포함되는 외곽지역을 연구대상지역으로 지정하였다. 서울특별시 지역들과 근접한 지역들을 선택함으로써 위경도의 차이와 생활환경의 차이로 인한 지역 간 자연환경의 차이를 최소화하고자 하였다. 게다가 서울특별시와 이에 인접해있는 지역들 간 사회경제적 차이를 조절하기 위해 외곽지역을 한국의 지방자치법[33]에서 정의한 도시지역인 “시”로만 제한하였다. 2차 행정단위인 “시”는 9개 시도에서 세분화된 지역으로 인구 5만 명 이상으로 구성된 도시화된 지역이다.

표 1. 분석에 사용된 지역특성 변수 요약표

구분	변수	출처	정의	연도
기상	일 평균 온도	기상청	시군구 단위의 2차 행정지역에서 얻어진 일별 평균온도	2011-2017년
사망	일별 사망자 수	통계청	시군구 단위의 2차 행정지역의 일별 사망자 수	2011-2017년
토지특성	산림(%)	국토교통부	시군구별 면적 중 산림이 차지하는 비율	2017년
	논밭(%)		시군구별 면적 중 논밭이 차지하는 비율	
	빌딩(%)		시군구별 면적 중 빌딩이 차지하는 비율	
	도로(%)	환경부	시군구별 면적 중 도로가 차지하는 비율	2017년
	녹지(%)		시군구별 면적 중 녹지가 차지하는 비율	
	습지(%)		시군구별 면적 중 습지가 차지하는 비율	
	불투수면 지역(%)		시군구별 면적 중 불투수면 지역이 차지하는 비율	
	도시립(%)	질병관리본부	시군구별 도시지역의 면적 중 총 도시립이 차지하는 비율	2011-2016년 평균
도시열섬현상	도시열섬효과	기상청	기상청에서 수집된 일 평균온도를 가공하여 계산 $UHI_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \overline{T_j}) \times I_{(T_{ij} - \overline{T_j} > 0)}$ $T_{ij}$ : i번째 지역의 j번째 날짜의 일 평균 온도 $\overline{T_j}$ : 모든 지역의 j번째 날짜의 일 평균 온도의 평균 n: 2011-2017년 기간 동안의 6-9월의 일 수	2011-2017년 일별

## 2.2 연구자료

본 연구에서는 일별 기후 및 사망, 8개 토지특성 등의 자료를 수집 및 가공하였다(표1).

### 2.2.1 일별 기후 및 사망자료

기온 및 사망자료는 2011년부터 2017년 까지 서울특별시에 포함되거나 근접한 51개의 지역에서 얻어진 시계열 자료로, 각 지역별 일별 총 사망자 수 및 일별 평균 온도가 수집되었다. 수집된 자료는 고온사망 위험을 살펴보고자 여름에 해당하는 6월부터 9월 사이의 기간으로 제한되었다. 사망자료는 통계청에서, 온도자료는 기상청에서 가공된 실시간 자료를 통해 수집되었다. 특히나 온도자료는 2차 행정구역단위인 “시”나 “구”보다 더 세밀한 3차 행정구역단위인 “동” 단위로 매시간 제공되기 때문에 각 “동”의 자료를 “시”와 “구” 단위로 24시간에 걸친 평균온도로 계산하였다. 실시간 모델링 자료에 관해서 부록에 추가적으로 기술하였다.

### 2.2.2 토지특성지표

본 연구에서 사용된 토지특성지표는 다양한 조사를 통해 얻어졌으며 8 종류로 분류되었다. 1) 산림, 2) 논밭, 3) 빌딩, 4) 도로, 5) 녹지, 6) 습지, 7) 불투수면 지역, 8) 도시림 면적(km<sup>2</sup>)

산림, 논밭, 빌딩, 도로의 면적(km<sup>2</sup>)은 국토교통부에서 제공한

2017년 지적통계를 통해 행정적으로 등록된 토지면적에 기반하여 수집되었다[34]. 녹지 및 습지 면적(km<sup>2</sup>)은 2017년 환경부에서 제공한 환경 공간 정보 서비스에서 얻어졌으며[35], 불투수면 지역면적(km<sup>2</sup>)은 2018년 환경 공간 정보 서비스를 통해 얻어졌다[36]. 환경공간정보 서비스를 통해 얻어진 토지특성자료는 위성 및 항공사진을 통해 측정되고 환경부가 시행하는 현장점검을 통해 자료를 검증하고 수정한다. 2011년부터 2016년 까지 얻어진 도시림 면적(km<sup>2</sup>)은 질병관리본부에서 제공하는 지역사회건강조사 및 건강결정요인 데이터베이스를 통해 수집되었다[37]. 도시림 지역지표는 산림청에서 연간 등록되는 행정지역에 의해 결정되며, 해당 지표는 2011년부터 2016년 까지 평균값으로 재계산되었다. 수집된 모든 자료는 각 지역별 전체 지역면적(km<sup>2</sup>) 대비 얼마큼의 비율(%)을 차지하는 지로 가공되었고 본 연구의 모든 분석에서는 토지특성지표의 비율(%)로 사용되었다.

### 2.2.3 도시열섬효과

도시열섬현상을 수치화하기 위해, 다음과 같이 도시열섬효과를 지정하였다.

$$UHI_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_j) \times I_{(T_{ij} - \bar{T}_j > 0)}$$

$T_{ij}$ 는  $i$ 번째 지역에서  $j$ 번째 날의 평균기온을 나타내고,  $\bar{T}_j$ 는  $j$ 번째 날 모든 지역의 평균기온을 나타내며  $n$ 은 2011년부터 2017년까지의 여름에 해당하는 날짜의 수이다. 도시열섬효과는 날짜별 덜 도시화된 지역

들에 비해 도시화된 지역들에서 초과하는 온도를 고려하여 계산되었다. 대체적으로 도시열섬효과의 정도는 도시와 시골지역에서 온도의 차이를 통해 측정하지만, 본 연구에서 계산된 도시열섬효과 값은 시골지역을 포함하지 않고 도시지역에서만 측정하여 산출된 결과이므로 일반적인 도시열섬효과 정도를 의미하지 않으며 유의하여 해석되어야 한다.

## 2.3 통계적 분석방법

### 2.3.1 도시열섬효과 및 토지특성지표 간 상관관계

도시열섬효과와 토지특성지표 사이의 공간적 상관관계는 피어슨 상관계수를 이용하여 살펴보았다.

### 2.3.2 지역별 도시열섬효과와 토지특성지표에 따른 고온사망위험 차이

고온사망위험과 지역별 토지특성과의 연관성을 추정하기 위해 2 단계 분석방법을 활용하였다. 첫번째 단계에서 각 지역별 온도-사망 간의 연관성을 추정하고자 준포아송분포(quasi-Poisson)을 따르는 일반화 선형모형 및 DLNM(Distributed Lag Nonlinear Model)을 이용하였다. 선행 연구를 기반으로 모델의 특정조건을 적용시켰다[38, 39]. 온도의 변화에 따른 사망위험의 변화를 살펴보기 위해 온도를 2차 B-spline으로 적용시킨 채 cross-basis 함수로 모델을 구축했으며, 각 지역의 여름 온도 분포를 순서대로 나열하였을 때 50th와 90th 퍼센타일(percentile)에 해당하는 온도에서 로그 간격으로 동등하게 2개의 값을 지정하였다. 절

편을 포함하는 natural cubic B-spline은 온도에 따른 지연효과를 반영하고자 사용되었다. 10일의 지연기간은 열에 따른 지연효과를 잡아내기 위해 적용되었다[38, 40, 41, 42]. 계절성은 여름에 해당하는 날의 온도에서 동등하게 위치한 값들과 자유도 4인 natural cubic B-spline을 통해 보정되었으며 t번째 날의 요일은 범주형 변수로 보정되었다. 각 지역별 고온사망위험은 각 지역의 여름온도에서 75th 대비 99th 퍼센타일에 해당하는 온도에서의 사망위험을 상대위험(RR; Relative Risk)으로 계산했는데, 이는 지연효과를 고려한 채 누적되어 산출되었다.

두번째 단계에서는, 메타분석을 통해 각 지역별로 추정된 상대위험 값들을 풀링하였다. 게다가, 도시열섬효과와 고온사망위험간의 연관성을 파악하기 위해 메타회귀분석을 적용하였고, 결과값은 도시열섬효과가 0.1°C 올라감에 따라 고온사망위험이 증가하는 퍼센타일 증가분(PI; Percentile Increase)을 사용하여 제시하였다. 또한 토지특성지표들과 고온사망위험 간의 관계를 살펴보기 위해 메타회귀분석을 사용하였으며 각 토지특성지표마다 메타회귀분석이 적용되었다. 토지특성지표들을 설명변수로 놓은 채 진행한 분석은 토지특성이 도시열섬효과에 의해 매개된 채 고온사망위험에 영향을 미치는지/아닌지 혹은 교란인자로서 도시열섬효과와 고온사망위험에 영향을 미치는지/아닌지를 살펴보기 위해서 도시열섬효과를 보정한/하지 않은 채 진행되었다. 고온사망위험과 각 토지특성지표간의 관계는 각 지표의 비율이 1% 증가함에 따라 고온위험의 PI를 추정하였다.

### 2.3.3 하위군 분석 및 민감도 분석

하위군 분석은 앞서 진행된 분석과 동일한 방식으로 성별(남/



여), 연령별(65세 이상/미만)로 각각 나누어 진행되었다. 또한, 민감도 분석의 일환으로 buffer 별 지정하는 지역을 달리하고, 고온사망위험을 나타내는 RR를 각 지역별 여름 온도의 50th 퍼센타일 대비 90th 퍼센타일, 90th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일로 기준을 변경하여 분석을 진행하였다. 모든 통계분석방법은 R 통계분석 소프트웨어를 통해 수행되었다 (version 3.6.1).

## 제 3 장 연구결과

### 3.1 buffer 별 연구지역의 기술통계

[표 2]는 각 buffer 별 기술통계를 서술하고 있다. 모든 buffer에서 일별 평균 사망자 수는 5명(범위: 0-24)으로 나타났다. 지역의 전체 평균 여름기온은 24.1°C이다. 도시열섬효과의 평균치는 0.2 ~ 0.3°C에 해당하였고 최소값은 0°C 였지만 최대값은 0.7°C에 해당하였다. 평균적으로 녹지의 비율은 평균적으로 40% 정도를 차지하였고, 불투수면 지역은 45% 정도 해당하였다. 습지는 평균적으로 0.2 ~ 0.3%로 굉장히 낮은 비율을 차지하고 있다.[그림 1]은 대상지역의 지리적 분포를 나타낸다: 서울(빨간색 사선으로 빗금친 부분)과 각 buffer별 서울을 둘러싸고 있는 지역. 30, 35, 40km buffer 이내에 해당하는 지역의 평균면적은 각각 87.0, 69.4, and 60.6 km<sup>2</sup>에 해당한다.

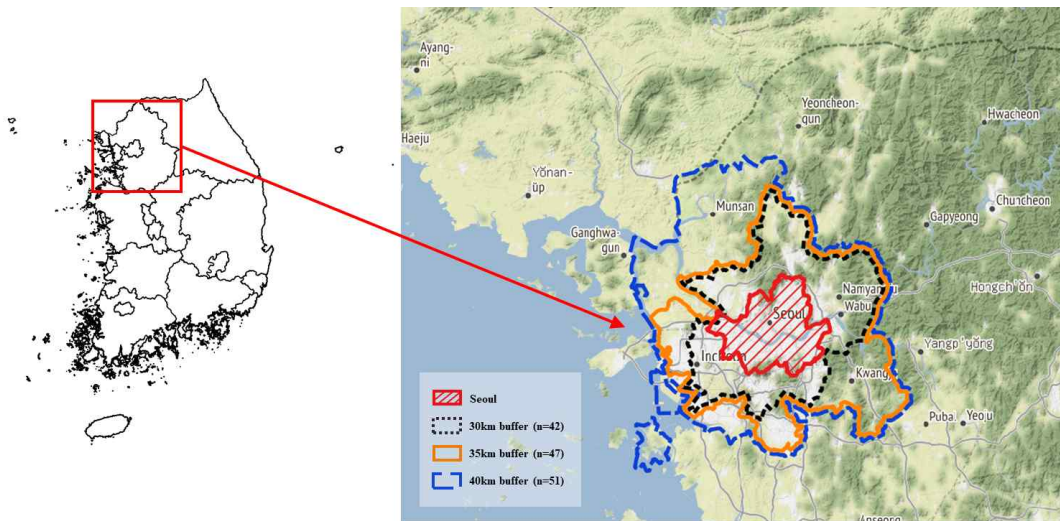


그림 1. 대한민국의 수도권 지역의 지리적 분포

표 2. 지역별 일별 사망자 수, 온도, 도시열섬효과, 토지특성지표의 기술통계표

		평균(최소값, 최대값)		
		30km buffer(n=42)	35km buffer(n=47)	40km buffer(n=51)
일별 사망자 수				
	총 사망자 수	5(0, 24)	5(0, 24)	5(0, 24)
일 평균 온도(°C)				
	여름철 온도	24.1(23.1, 24.9)	24.1(23.1, 24.9)	24.0(23.0, 24.9)
도시열섬현상(°C)				
	도시열섬효과	0.2(0, 0.7)	0.3(0, 0.8)	0.3(0, 0.8)
토지특성지표(%)				
	녹지	40.8(15.9, 74)	40.2(11, 74.7)	40(11, 74.7)
	산림	29.5(0.3, 65.3)	28.9(0.3, 66.3)	28.7(0.3, 66.3)
	도시림	25.6(5.4, 69.1)	24.3(3, 69.1)	24.3(3, 69.1)
	논밭	7.6(0, 32.1)	7.7(0, 32.1)	8.5(0, 32.1)
	습지	0.3(0, 4.9)	0.3(0, 4.9)	0.5(0, 9.1)
	불투수면 지역	44(11.8, 76.5)	44.3(10.5, 83.9)	42.5(9.4, 83.9)
	빌딩	28.7(5.1, 54.6)	28(4.5, 54.6)	26.8(4.5, 54.6)
	도로	12(3.1, 21.5)	12(3.1, 21.5)	11.7(3.1, 21.5)

[그림 2]에서는 각 buffer 별 전체 연구기간동안의 도시열섬효과  
 의 지형분포를 단계 구분도를 통해 제시하였다. 서울지역(검정색 경계선  
 을 기준으로 안쪽에 해당) 중 가운데 위치하는 지역은 대체적으로 모든  
 buffer에서 도시열섬효과가 크다는 것을 확인할 수 있다.[그림 S1]은 평  
 균 여름기온,[그림 S2]는 토지특성지표를 지형적 분포로 각각 제시하고  
 있다.

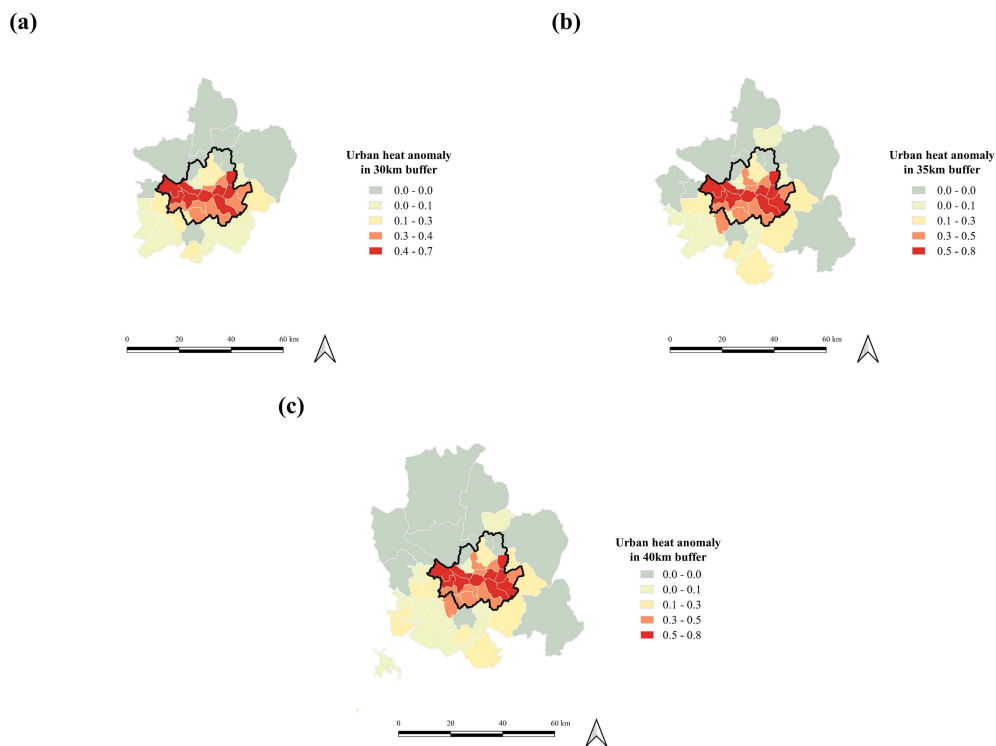


그림 2. 각 buffer 별 도시열섬효과 분포  
 (a) 30km buffer,(b) 35km buffer,(c) 40km buffer

## 3.2 도시열섬효과, 토지특성지표, 고온사망위험 사이의 관계

### 3.2.1 도시열섬효과와 토지특성지표 사이의 관계

[표 3]에서는 도시열섬효과와 토지특성지표들 간 상관성 결과를 보여준다. 식생지표(녹지, 산림, 논밭)의 비율이 낮을수록 높은 도시열섬효과와 유의하게 연관성이 있음을 확인할 수 있다(모든  $p$ -value < 0.05). 반면에 불투수면 지역, 빌딩, 도로의 비율이 높을수록 높은 도시열섬효과와 유의하게 연관성이 있는 것으로 나타났다. 비록 습지지표는 모든 buffer에서 도시열섬효과와 음의 상관관계를 보였지만, 통계적으로 유의하지는 않았다.

### 3.2.2 도시열섬효과와 고온사망위험 사이의 관계

[그림 3]은 도시열섬효과와 고온사망위험의 수준(도시열섬효과와 high/low 수준: 도시열섬효과와 90th/10th 퍼센타일 수준인 경우)에 따라 여름철 온도와 고온사망위험의 관계를 곡선으로 나타내고 있다. 도시열섬효과가 낮은 수준일 때에 비해 높은 수준일 때 전반적으로 고온사망위험이 높은 편인데 특히나 여름철 기온이 높아질수록 고온사망위험이 가파르게 증가하는 모습을 보였다.[그림 S3]은 각 지역별 여름철 온도에 따른 사망위험을 보이는데 고온사망위험의 상대위험비(RR)를 계산할 때, 여름철 기온의 75th 퍼센타일(빨간점)을 baseline 대비 고온으로 인한 위험이 높은 여름철 기온의 99th 퍼센타일(파란점)을 이용하였다.

표 3. 도시열섬효과와 토지특성지표 사이의 피어슨 상관계수.

	30km buffer(n=42)		35km buffer(n=47)		40km buffer(n=51)	
<i>피어슨 상관계수</i>						
<b>토지특성지표(%)</b>						
녹지	-0.69	§	-0.58	§	-0.54	§
산림	-0.72	§	-0.63	§	-0.59	§
도시림	-0.36	‡	-0.25	†	-0.23	
논밭	-0.44	§	-0.43	§	-0.48	§
습지	-0.17		-0.17		-0.25	†
불투수면 지역	0.64	§	0.55	§	0.59	§
빌딩	0.66	§	0.66	§	0.69	§
도로	0.59	§	0.53	§	0.55	§

Note. *p*-value( < 0.01: §, < 0.05: ‡, < 0.1: † )

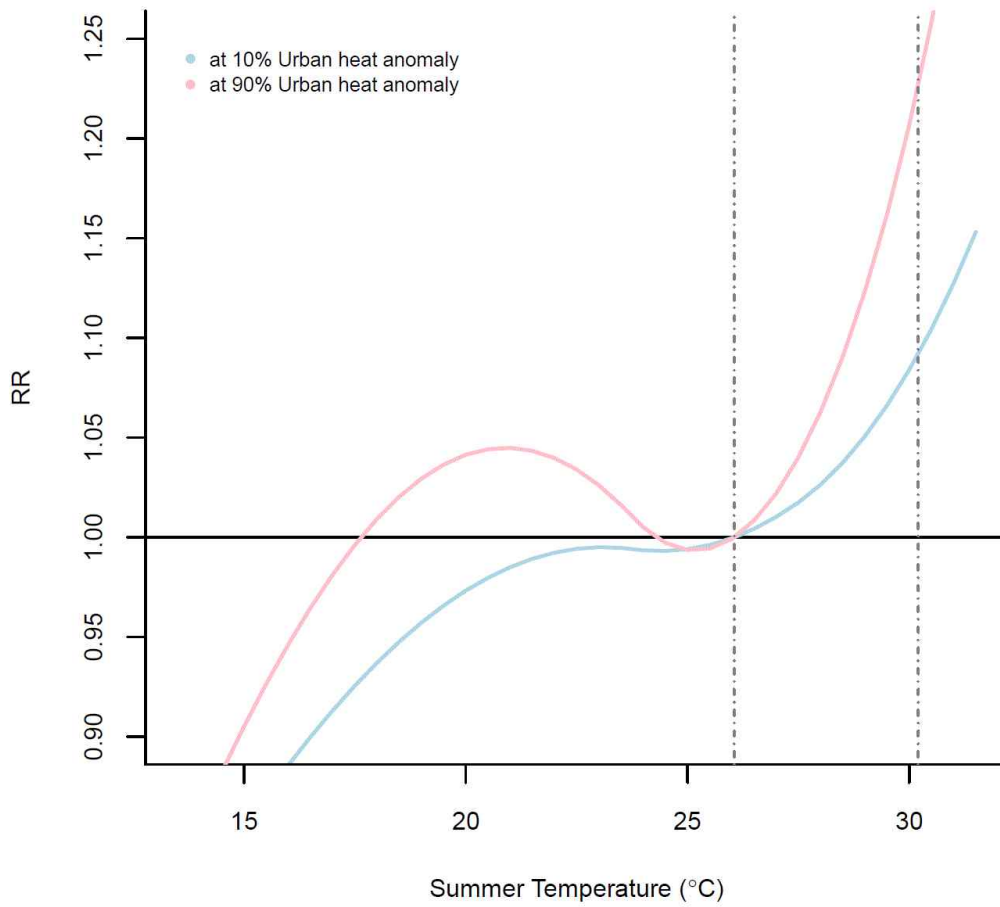


그림 3. 도시열섬효과 수준에 따른 여름철 고온사망위험.

높은 도시열섬효과(핑크색)/ 낮은 도시열섬효과(파란색): 각각 도시열섬 효과 분포의 90th/10th 퍼센타일에 해당함.

[표 4]에서는 각 buffer 별 고온사망위험과 지역별 도시열섬효과 및 고온사망위험 간의 관계를 풀링된 PI로 나타냈다. 고온사망위험의 풀링된 PI는 30, 35, 40km buffer에서 각각 13.74%, 13.49%, 12.78%의 결과로 제시되었다. 특히 40km buffer에서 도시열섬효과가 높을수록 고온사망위험도 유의하게 높아지는 관계를 갖는 것으로 나타났고 ( $p$ -value=0.04), 그 외 두 buffer에서는 거의 유의한 관련성을 갖는 것으로 나타났다( $p$ -values=0.06). 40km buffer에서 지역별 추정된 상대위험비(RR)의 역분산으로 가중치를 부여하여 핑크색 원으로 나타낸 채 그려진 도시열섬효과와 고온사망위험의 관계를 나타내는 산점도는[그림 S4]로 제시되었다. 또한 그림에서 나타난 검정선은 메타회귀분석을 통해 도시열섬효과와 고온사망위험 간의 추정된 연관성이다. 모든 buffer에서 모든 토지특성지표와 고온사망위험 간 유의한 연관성을 갖지 않았다. 도시열섬효과를 보정하지 않은 상태로 나타난 토지특성지표와 고온사망위험간의 관계는 유의하지 않았지만(표 S1), 도시열섬효과를 보정한 채 진행한 분석(표 4)에 비해  $p$ -value는 낮은 것으로 나타났다.



표 4. 풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수들 간의 연관성.

모든 결과는 퍼센타일 증가분(PI)로 표현되었으며 괄호 안에는 95% 신뢰구간이 기재되었다. 고온사망위험의 상대위험비는 여름철 기온의 75th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일에서의 사망률의 상대위험으로 정의되었다.

	30km buffer(n=42)		35km buffer(n=47)		40km buffer(n=51)	
<i>퍼센타일 증가분(PI)(95% 신뢰구간)</i>						
<b>고온사망위험(%)</b>						
풀링된 사망위험비	13.74(7.77, 20.05)	§	13.49(7.94, 19.32)	§	12.78(7.49, 18.34)	§
<b>고온사망위험과 도시열섬효과와의 관계(per 0.1°C)</b>						
도시열섬효과	2.65(-0.13, 5.51)	†	2.35(-0.11, 4.87)	†	2.31(0.11, 4.54)	‡
<b>토지특성지표와 고온사망위험과의 관계(per a percent; 도시열섬효과 보정함)</b>						
녹지	0.03(-0.44, 0.51)		0(-0.38, 0.39)		0.02(-0.35, 0.39)	
산림	0.09(-0.32, 0.51)		0.04(-0.3, 0.39)		0.05(-0.28, 0.38)	
도시림	-0.02(-0.51, 0.47)		-0.03(-0.47, 0.42)		-0.02(-0.4, 0.36)	
논밭	-0.5(-1.24, 0.23)		-0.41(-1.1, 0.29)		-0.4(-1.03, 0.23)	
습지	-1.35(-6.14, 3.69)		-1.39(-6.12, 3.58)		-1.5(-4.9, 2.03)	
불투수면 지역	0.04(-0.41, 0.5)		0.02(-0.35, 0.39)		0.04(-0.31, 0.39)	
빌딩	0.2(-0.37, 0.78)		0.11(-0.41, 0.63)		0.12(-0.38, 0.62)	
도로	-0.8(-2.5, 0.93)		-0.64(-2.06, 0.8)		-0.49(-1.84, 0.87)	

Note. *p*-value( < 0.01: §, < 0.05: ‡, < 0.1: † )

### 3.2.3 민감도 분석

[표 5]는 40km buffer에 해당하는 지역의 하위군분석 결과로 65세 이상(폴링된 PI: 17.28%), 여성(폴링된 PI: 14.56%), 남성(폴링된 PI: 9.65%)인 경우 고온사망위험이 유의하게 증가하는 양상을 보였고 특히나 65세 이상, 여성인구가 65세 미만(폴링된 PI: 0.08%), 남성인구에 비해 높은 고온사망위험을 보였다. 게다가 도시열섬효과와 고온사망위험의 양의 상관성은 65세 미만, 남성에 비해 65세 이상, 여성일 때 더욱 뚜렷이 나타나는 것으로 확인되었다. 하지만 하위군분석을 통해서도 도시열섬효과를 보정한 채 토지특성지표와 고온사망위험간의 관계에서는 유의성을 보이지 못했다.

민감도 분석을 통해서도 본 연구의 결과가 일관성 있음을 보였다. buffer를 각각 30km, 35km로 변경하였을 때도 폴링된 고온사망위험이 동일하게 65세 이상, 여성, 남성인구에서 유의하게 증가함을 보였고, 65세 이상인구인 경우 고온사망위험과 도시열섬효과는 유의하게 양의 관계를 가짐을 확인할 수 있었다(표 S2, 표 S3). 고온사망위험의 정의를 각각 여름철 기온의 50th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일, 90th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일에서의 사망률의 상대위험으로 변경하더라도(표 S4, 표 S5) 도시열섬효과가 고온사망위험과 양의 상관관계를 갖는다는 유사한 결과가 나타났다.

표 5. 40km buffer 지역에서 각 하위군에 따른 풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지 특성지표 변수들 간의 연관성.

모든 결과는 퍼센타일 증가분(PI)로 표현되었으며 괄호 안에는 95% 신뢰구간이 기재되었다. 고온사망위험의 상대위험비는 여름철 기온의 75th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일에서의 사망률의 상대위험으로 정의되었다.

40km buffer(n=51)	65세 미만	65세 이상	성별	
	퍼센타일 증가분(PI)(95% 신뢰구간)			
<b>고온사망위험(%)</b>				
풀링된 사망위험비	0.08(-8.7, 9.71)	17.28(10.69, 24.27)	§ 9.65(2.82, 16.94)	§ 14.56(6.55, 23.18)
<b>고온사망위험과 도시열섬효과의 관계(per 0.1°C)</b>				
도시열섬효과	0.92(-3.23, 5.24)	2.8(0.17, 5.5)	‡ 1.89(-1.03, 4.9)	† 2.87(-0.46, 6.31)
<b>토지특성지표와 고온사망위험과의 관계(per a percent; 도시열섬효과 보정함)</b>				
녹지	0.1(-0.61, 0.82)	0.01(-0.43, 0.46)	0.12(-0.38, 0.61)	-0.1(-0.66, 0.46)
산림	0.2(-0.44, 0.84)	0.03(-0.37, 0.43)	0.06(-0.38, 0.51)	0.04(-0.47, 0.54)
도시림	0.08(-0.67, 0.83)	-0.03(-0.48, 0.43)	0.11(-0.4, 0.62)	-0.18(-0.75, 0.4)
논밭	-0.77(-1.98, 0.46)	-0.28(-1.04, 0.48)	-0.37(-1.2, 0.48)	-0.47(-1.4, 0.48)
습지	-4.17(-10.7, 2.83)	-0.71(-4.79, 3.55)	-2.41(-6.92, 2.32)	0.36(-4.72, 5.7)
불투수면 지역	0.1(-0.59, 0.8)	0.01(-0.41, 0.43)	0.08(-0.39, 0.55)	-0.02(-0.56, 0.52)
빌딩	0.56(-0.42, 1.55)	-0.07(-0.67, 0.53)	0.11(-0.56, 0.78)	0.15(-0.61, 0.92)
도로	-0.11(-2.7, 2.55)	-0.65(-2.26, 0.98)	-0.71(-2.49, 1.11)	-0.3(-2.36, 1.81)

Note. *p*-value( < 0.01: §, < 0.05: ‡, < 0.1: † )

## 제 4 장 결론 및 고찰

본 연구는 대한민국의 주요 도심지역 중 51개의 시군구 단위에 해당하는 지역에서 고온사망위험에 도시열섬효과와 토지특성지표의 영향에 관하여 연구하였다. 도시지역의 특성을 띄는 토지특성지표는 도시열섬효과와 양의 상관관계를 가진 반면, 도심 속 녹지는 음의 상관관계를 보였다. 게다가 도시열섬효과가 높을수록 전체 인구에서 고온사망위험은 더 높아지는 연관성을 보였고, 이러한 연관성은 65세 이상 및 여성 인구에서 확연하게 나타났다. 또한 토지특성지표는 도시열섬효과를 통해서만 고온사망위험에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

지역별 토지특성은 도시열섬효과와 수준에 따라 완전히 연관성이 있었고 이는 선행연구에서 발견한 결과와 동일하였다[1, 11, 13, 14, 43]. 먼저, 도시의 식생지수(녹지, 산림, 도시림, 논밭)가 많은 비율을 차지할수록 낮은 도시열섬효과를 보였으며 식생이 식물로부터 그늘과 증발산을 통해 기온이 높아지는 것을 완화시킨다는 연구의 결과와 동일하다[7, 11]. 그와 반대로 빌딩과 도로와 같이 도시지역의 특성을 띄는 토지특성의 비율이 클수록 높은 도시열섬효과와 관련이 있다는 것을 확인하였는데 이는 빌딩이나 도로를 건설할 때 사용되는 콘크리트, 아스팔트, 벽돌 및 그 외 유사한 물질들이 낮동안 태양열을 흡수한 후 저녁에 흡수된 태양열을 방출하여 도시열섬효과를 증폭시키기 때문이다[1, 11]. 한편 습지와 도시열섬효과는 음의 방향으로 연관성을 보였지만 유의하지 않았다. 과거의 연구에서는 물과 증발로 인해 기온을 낮출 수 있는 효과를 보고했지만[11, 13], 본 연구에서 습지와 도시열섬효과의 관계가 유의하지 않았던 이유는 공기 중 기온에 영향을 줄만큼 습지의 비율(0.3-0.5%)이 완전히 낮았기 때문인 것으로 보인다. 반면에 높은 습지의 비율과 관

런던 수증기 혹은 높은 습도는 장파 복사열이 아래로 향하는 걸 증진시켜 오히려 밤의 기온을 높일 수 있다[44]. 따라서 낮 시간 동안 습지로 인한 cooling 효과가 상쇄된다.

본 연구에서는 도시열섬효과가 높을수록 높은 고온사망위험과 유의하게 연관성이 있다는 것을 발견하였고 여름 기온이 낮은 지역에 비해 높은 지역이 더 높은 고온사망위험을 갖는다는 것을 보였다. 해당 결과는 런던에서의 한 연구에서 도시열섬효과가 얼마나 고온사망위험을 조정하는지 정량적으로 추정된 연구와 일치하였다[22]. 또한 이는 도시열섬효과가 시골지역에 비해 도시지역에서 고온사망위험을 높이는 주요한 요인이라고 주장하는 선행연구 결과의 증거로 확인할 수 있었다[3, 4, 5, 6, 45]. 그러나 본 연구의 결과는 도시 및 시골지역 간 고온사망위험의 차이를 설명하는데 유의하며 사용되어야 하는데 그 이유는 중구에서 수행된 연구에서 도시지역에 비해 시골지역에서의 고온사망위험이 높다고 보고했기 때문이다[28, 46]. 해당 연구들은 평균 여름기온이 도시지역에서 더 높다는 것을 보였지만 연령, 에어컨 사용의 비율 등과 같은 기후와 관계없는 요인들이 도시지역에 비해 시골지역에서 더 취약하기 때문에 영향을 줄 것이라 암시된다[28, 46]. 그러므로 기후와 관계없는 요인들이 상대적으로 유사한 도시화된 지역 중 덜 도시화된 지역들에 비해 더 도시화된 지역들에서 고온사망위험이 더 높은 것은 본 연구를 해석할 때 고려되어야 하는 점이다.

흥미롭게도 토지특성지표는 도시열섬효과를 통해서만 고온사망위험에 영향을 준다는 잠재적인 증거를 발견하였는데 토지특성지표와 도시열섬효과(표 3) 및 도시열섬효과와 고온사망위험(표 4) 사이에 타당한 관계( $p$ -values가 0.1에 가깝거나 작음)가 있었다. 그러나 메타회귀분석에서는 도시열섬효과를 보정한 후에도 토지특성지표와 고온사망위험 사이

의 타당한 관계를 발견할 수는 없었다(표 4, 표 S1). 이는 토지특성지표와 고온사망위험이 직접적으로 연관성을 갖지 않는다는 것을 보여준다. 따라서 토지특성지표는 고온사망위험이 높아질 때만 고온사망위험과 관련이 있다고 결론을 내렸다. 그러나 식생과 빌딩 유형에 따른 토지특성지표는 사람들의 건강에 직접적으로 영향을 끼칠 수 있다는 몇몇 증거가 있다. 어떤 선행연구에서는 동네의 녹지 혹은 식생이 많을수록 신체적 및 사회적 활동을 촉진시킬 뿐 아니라 스트레스, 대기오염, 소음을 완화시키기 때문에 인류의 건강에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 밝혔다 [47, 48]. 덧붙여 아파트에 사는 것은 사회적 고립을 증가시키고, 이러한 고립은 건강에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다[49, 50, 51].

그럼에도 토지특성지표와 고온사망위험 간에 연관성을 찾을 수는 없었고 이는 다음에 서술되는 사유들로 기인할 것으로 보인다. 먼저 본 연구자료에서 토지특성지표는 고온사망위험과 직접적으로 연관성이 없다. 논밭과 빌딩의 비율은 고온사망위험과 약하게 연관 있지만 ( $p$ -value < 0.1) 그 외의 지표는 의미 있는 관계를 보이지는 못했다. 이로써 토지특성은 고온사망위험에 제한적인 직접 영향을 미칠 수 있고, 대부분의 토지특성 영향은 도시열섬효과를 통해서만 드러났음을 암시한다. 둘째로, 지역별 토지특성의 평균적인 수준은 독거노인 혹은 경제적 취약층과 같이 고온에 취약한 인구들이 거주하는 토지특성 수준을 나타내고 있지 않을 수 있다[52]. 일부 연구들은 고온 노출은 거주 환경, 사회경제적 상태에 따라 상이할 수 있다는 것을 보였다[27, 53]. 서울 및 외곽지역에서는 저소득 거주지역은 높은 고도(즉, 언덕 혹은 경사)이거나 공동주택이 빽빽하게 밀집된 특징을 갖지만 중위 혹은 고소득 거주지역은 보통 공원, 계곡, 강에 가깝게 위치해있다. 더욱이 본 연구의 지표들은 하위군 간 불균등에 관하여 살펴봤지만, 토지특성 또한 지역 내에서

도 동일하지 않을 수 있다. 이러한 사안은 더 구체적이고 다양한 토지특성지표를 이용하여 추가적으로 연구할 필요가 있다. 도시열섬효과와 고온사망위험 사이의 양의 연관성은 하위군에 따라서 다르게 나타났다. 이는 청장년층 및 남성에 비해 노인층 및 여성에게서 더욱 두드러지게 나타났다(표 5), 이러한 결과는 이전에 행해진 연구들과 일치하는 결과를 보였다[54, 55, 56]. 해당 결과는 고온사망위험에 도시열섬효과가 미치는 영향이 경제적 참여가 낮아 소득이 낮기 때문에 에어컨의 사용이 낮은 노인층 및 여성층과 관련이 있다는 것을 암시한다. 하지만 본 연구에서는 자료가 부족하기 때문에 해당가설을 증명할 수 없으므로 추후 연구를 통해 평가가 필요하다.

본 연구는 몇 가지 제한점이 존재한다. 첫째, 토지특성지표 자료가 수집된 기간은 자료의 부족으로 인해 연구기간(2011-2017년)을 완전히 포함하지 못했다. 특히 2011-2016년까지 해마다 수집된 도시림을 제외하고 모든 토지특성지표는 오직 한 해(2017년 혹은 2018년)만 수집된 자료였지만 7년이라는 다소 짧은 기간동안 토지특성지표가 완전히 변하지 않았을 거라 예상된다. 그러나 연구기간동안 도시화의 변화가 있을 거라는 예상과 도시열섬효과와 고온사망위험에 토지특성지표가 미치는 정확한 영향을 추정하는데 잠재적인 편향이 존재할 수 있다. 또한 선행연구는 연관성은 시간이 지남에 따라 다양하게 변화할 수 있다고 보고하지만 [39, 57], 본 연구는 상대적으로 짧은 연구기간이기 때문에 고온사망위험에서 시간의 변화를 고려하지 않았다. 장기간 수집된 자료를 사용한 추후 연구에서는 토지특성의 시간이 흐름에 따른 변화와 고온사망위험과의 연관성을 연구해야만 한다. 둘째로, 이전에 언급했듯이, 토지특성지표와 도시열섬효과는 지역 내에서 잠재적인 변동성을 고려하지 않았다. 특히 토지특성지표는 각 지역에서 차지하는 면적의 비율로 산출되었지만, 서

울은 각 지역별 건물의 수직적인 차이도 있기에 추후 연구에서는 건물의 높이도 고려해야한다. 게다가 기상청의 모델링 시스템을 통해 얻어진 실시간 기온 자료는 반사도, 빌딩의 비율, 그리고/또는 식생과 같은 도시표면의 특성을 명확히 고려하는데 한계가 있다. 고해상도로 기온을 분석할 수 있는 고급화된 도시 표면모델[58]은 추후 연구에서 고려되어야만 한다. 그러나 본 연구의 대상지역은 다지역(multi-region)에서 진행된 열과 사망의 연관성 연구에 비해 상대적으로 더 고해상도에 해당되므로[42, 59], 본 연구를 통해 도출된 결과는 선행연구들에 비해 더욱 정교하다. 그럼에도 불구하고 향후 연구에서는 개인 수준 혹은 고해상도 고온노출 및 건강자료를 활용해야 한다. 셋째, 자료의 부족으로 인해 고온사망에 영향을 주는 에어컨 사용[32]과 도시열섬효과에 영향을 주는 주요한 요인인 에너지 소비를 나타내는 지역별 지표를 연구에서 고려하지 못했다. 이에 따라 도시열섬효과와 고온사망위험 간의 관계를 파악하는데 에어컨의 효과와 에너지 소비지표 또한 추후 연구에서 고려되어야 한다. 또한 도시열섬효과와 고온사망위험의 연관성을 살펴볼 때 도시열섬효과의 간차효과가 완전히 설명되지 않을 수 있기에 고온사망위험에 영향을 줄 수 있는 추가적인 요인이 반영되어야 한다..

이러한 제한점에도 불구하고, 본 연구는 대한민국에서 고온위험에 관련 있는 토지특성지표와 도시열섬효과의 고온사망위험으로 미치는 영향을 연구한 최초의 연구로, 2차 행정구역단위 자료를 활용하여 도시열섬효과가 높을수록 고온사망위험에 더욱 위험하다는 것을 밝혔다. 그리고 도시열섬효과와 고온사망위험간의 연관성은 노인층과 여성인구에서 더욱 자명했으며, 이로 인해 특정인구를 대상으로 기후변화에 따른 건강 영향을 대응하는 도시정책을 세우는데 역학적 증거를 제시할 수 있다. 또한 토지특성이 고온사망위험에 영향을 미치는 매커니즘을 보임으로써



고온이 건강에 미치는 영향을 효과적으로 관리하는 도시정책을 수립하는데 본 연구가 근거자료로 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

## 참 고 문 헌

1. Oke, T. R., 1982. *The energetic basis of the urban heat island*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 108, 1–24.
2. Buechley, R. W., et al., 1972. *Heat island= death island?* Environmental research. 5, 85–92.
3. Patz, J. A., et al., 2005. *Impact of regional climate change on human health*. Nature. 438, 310–317.
4. Burkart, K., et al., 2011. *The effect of atmospheric thermal conditions and urban thermal pollution on all-cause and cardiovascular mortality in Bangladesh*. Environmental Pollution. 159, 2035–2043.
5. Hajat, S., et al., 2007. *Heat-related and cold-related deaths in England and Wales: who is at risk?* Occupational and environmental medicine. 64, 93–100.
6. Hajat, S., et al., 2010. *Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection*. The Lancet. 375, 856–863.
7. Son, J.-Y., et al., 2016. *Urban vegetation and heat-related mortality in Seoul, Korea*. Environmental research. 151, 728–733.
8. Jusuf, S. K., et al., 2007. *The influence of land use on the urban heat island in Singapore*. Habitat international. 31, 232–242.
9. Li, Y.-y., et al., 2012. *Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing Shanghai metropolis, China: Using time-series of Landsat TM/ETM+ data*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 19, 127–138.
10. Milojevic, A., et al., 2016. *Methods to estimate acclimatization to urban heat island effects on heat-and cold-related mortality*. Environmental health perspectives. 124, 1016–1022.
11. Solecki, W. D., et al., 2005. *Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey*. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards. 6, 39–49.

12. Takahashi, K., et al., 2004. *Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation*. Energy and Buildings. 36, 771–779.
13. U.S. Environmental Protection Agency, "Cool Pavements." *In: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies* U.S. Environmental Protection Agency, 2012.
14. Akbari, H., et al., 2001. *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas*. Solar energy. 70, 295–310.
15. Susca, T., et al., 2011. *Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs*. Environmental pollution. 159, 2119–2126.
16. Chen, F., et al., 2011. *The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems*. International Journal of Climatology. 31, 273–288.
17. Sailor, D. J., 2011. *A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment*. International journal of climatology. 31, 189–199.
18. Sera, F., et al., 2019. *How urban characteristics affect vulnerability to heat and cold: a multi-country analysis*. International journal of epidemiology. 48, 1101–1112.
19. Son, J.-Y., et al., 2019. *Temperature-related mortality: a systematic review and investigation of effect modifiers*. 14, 073004.
20. Stewart, I. D., 2011. *A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature*. International Journal of Climatology. 31, 200–217.
21. Taylor, J., et al., 2015. *Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London*. Urban Climate. 14, 517–528.
22. Milojevic, A., et al., 2016. *Methods to estimate acclimatization to urban heat island effects on heat-and cold-related mortality*. Environmental health perspectives. 124, 1016–1022.
23. Dang, T. N., et al., 2018. *Green space and deaths attributable to the urban heat island effect in Ho Chi Minh City*. American journal

- of public health. 108, S137–S143.
24. Goggins, W. B., et al., 2013. *Effect modification of the association between meteorological variables and mortality by urban climatic conditions in the tropical city of Kaohsiung, Taiwan*. *Geospatial health*. 37–44.
  25. Heaviside, C., et al., 2016. *Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK*. *Environmental health*. 15, S27.
  26. Bennett, J. E., et al., 2014. *Vulnerability to the mortality effects of warm temperature in the districts of England and Wales*. *Nature Climate Change*. 4, 269.
  27. Buyantuyev, A., Wu, J., 2010. *Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land–cover and socioeconomic patterns*. *Landscape ecology*. 25, 17–33.
  28. Chen, K., et al., 2016. *Urbanization level and vulnerability to heat-related mortality in Jiangsu Province, China*. *Environmental health perspectives*. 124, 1863–1869.
  29. Knowlton, K., et al., 2008. *The 2006 California heat wave: impacts on hospitalizations and emergency department visits*. *Environmental health perspectives*. 117, 61–67.
  30. Tamerius, J., et al., 2013. *Socioeconomic and outdoor meteorological determinants of indoor temperature and humidity in New York City dwellings*. *Weather, Climate, and Society*. 5, 168–179.
  31. Tham, S., et al., 2020. *Indoor temperature and health: a global systematic review*. *Public Health*. 179, 9–17.
  32. Zanobetti, A., et al., 2013. *Susceptibility to mortality in weather extremes: effect modification by personal and small area characteristics in a multi-city case-only analysis*. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*. 24, 809.
  33. *Ministry of Interior and Safety, Local Autonomy Acts*. In: L. A. Division, (Ed.). Ministry of Interior and Safety, Korea Ministry of Government Legislation, 2017.

34. *The Korean Ministry of Land, I. a. T., Cadastral Statistics.* The Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017.
35. *The Korean Ministry of Environment, Environmental Geographic Information Service.* The Korean Ministry of Environment, 2017.
36. *The Korean Ministry of Environment, Environmental Geographic Information Service.* The Korean Ministry of Environment 2018.
37. 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, 979–983.
38. Gasparrini, A., et al., 2015a. *Temporal variation in heat-mortality associations: a multicountry study.* Environmental health perspectives. 123, 1200.
39. Lee, W., et al., 2018a. *Temporal changes in mortality attributed to heat extremes for 57 cities in Northeast Asia.* Science of The Total Environment. 616, 703–709.
40. Gasparrini, A., et al., 2015b. *Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study.* The Lancet. 386, 369–375.
41. Gasparrini, A., et al., 2016. *Changes in susceptibility to heat during the summer: a multicountry analysis.* American journal of epidemiology. 183, 1027–1036.
42. Guo, Y., et al., 2014. *Global variation in the effects of ambient temperature on mortality: a systematic evaluation.* Epidemiology (Cambridge, Mass.). 25, 781.
43. Ferguson, B., et al., 2008. *Reducing urban heat islands: compendium of strategies—cool pavements.*
44. Ruckstuhl, C., et al., 2007. *Observed relationship between surface specific humidity, integrated water vapor, and longwave downward radiation at different altitudes.* 112.
45. Anderson, B. G., Bell, M. L., 2009. *Weather-related mortality: how heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States.* Epidemiology (Cambridge, Mass.). 20, 205.

46. Hu, K., et al., 2019. *Evidence for urban - rural disparity in temperature - mortality relationships in Zhejiang Province, China*. Environmental health perspectives. 127, 037001.
47. Fong, K. C., et al., 2018. *A review of epidemiologic studies on greenness and health: Updated literature through 2017*. Current environmental health reports. 5, 77–87.
48. James, P., et al., 2015. *A review of the health benefits of greenness*. Current epidemiology reports. 2, 131–142.
49. Cacioppo, J. T., Hawkley, L. C., 2003. *Social isolation and health, with an emphasis on underlying mechanisms*. Perspectives in biology and medicine. 46, S39–S52.
50. Kawachi, I., et al., 1996. *A prospective study of social networks in relation to total mortality and cardiovascular disease in men in the USA*. Journal of Epidemiology & Community Health. 50, 245–251.
51. Kegler, S. R., et al., 2017. *Trends in suicide by level of urbanization—United States, 1999–2015*. MMWR. Morbidity and mortality weekly report. 66, 270.
52. Semenza, J. C., et al., 1996. *Heat-Related Deaths during the July 1995 Heat Wave in Chicago*. New England Journal of Medicine. 335, 84–90.
53. Gaffin, S., et al., 2008. *Variations in New York city’s urban heat island strength over time and space*. Theoretical and applied climatology. 94, 1–11.
54. Chung, Y., et al., 2015. *Mortality related to extreme temperature for 15 cities in northeast Asia*. Epidemiology. 26, 255–262.
55. Medina-Ramón, M., et al., 2006. *Extreme temperatures and mortality: assessing effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a multi-city case-only analysis*. Environmental health perspectives. 114, 1331–1336.
56. O’neill, M. S., et al., 2003. *Modifiers of the temperature and mortality association in seven US cities*. American journal of epidemiology. 157, 1074–1082.
57. Chung, Y., et al., 2018. *Changing Susceptibility to Non-Optimum*

*Temperatures in Japan, 1972-2012: The Role of Climate, Demographic, and Socioeconomic Factors.* Environmental health perspectives. 126, 057002-1-057002-8.

58. Best, M., Grimmond, C., 2015. *Key conclusions of the first international urban land surface model comparison project.* Bulletin of the American Meteorological Society. 96, 805-819.
59. Lee, W., et al., 2018b. *Temporal changes in mortality impacts of heat wave and cold spell in Korea and Japan.* Environment international. 116, 136-146.
60. Jang, J., Lee, W., 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, p.106-127.

## 부 록

표 S1. 도시열섬효과를 보정하지 않은 채 고온사망위험과 토지특성지표들의 연관성.

모든 결과는 퍼센타일 증가분(PI)로 표현되었으며 괄호 안에는 95% 신뢰구간이 기재되었다.

	30km buffer(n=42)	35km buffer(n=47)	40km buffer(n=51)	
<i>퍼센타일 증가분(PI)(95% 신뢰구간)</i>				
<b>토지특성지표와 고온사망위험과의 관계(per a percent; 도시열섬효과 보정하지 않음)</b>				
녹지	-0.21(-0.56, 0.14)	-0.17(-0.49, 0.15)	-0.16(-0.47, 0.15)	
산림	-0.15(-0.44, 0.14)	-0.13(-0.41, 0.14)	-0.13(-0.4, 0.13)	
도시림	-0.17(-0.62, 0.29)	-0.12(-0.56, 0.31)	-0.11(-0.48, 0.26)	
논밭	-0.67(-1.36, 0.01) †	-0.57(-1.22, 0.07) †	-0.58(-1.15, -0.01) †	
습지	-2.28(-6.92, 2.58)	-2.27(-6.86, 2.55)	-2.29(-5.56, 1.09)	
불투수면 지역	0.24(-0.11, 0.59)	0.18(-0.13, 0.48)	0.2(-0.08, 0.48)	
빌딩	0.39(-0.04, 0.82) †	0.31(-0.09, 0.71)	0.33(-0.04, 0.7)	†
도로	0.25(-1.15, 1.67)	0.11(-1.13, 1.37)	0.29(-0.87, 1.45)	

**Note.** *p*-value( < 0.01: §, < 0.05: ‡, < 0.1: † )



표 S2. 30km buffer 지역에서 각 하위군에 따른 풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수들 간의 연관성.

모든 결과는 퍼센타일 증가분(PI)로 표현되었으며 괄호 안에는 95% 신뢰구간이 기재되었다. 고온사망위험의 상대위험비는 여름철 기온의 75th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일에서의 사망률의 상대위험으로 정의되었다.

30km buffer(n=42)	퍼센타일 증가분(PI)(95% 신뢰구간)			
	65세 미만	65세 이상	남성	여성
<b>고온사망위험(%)</b>				
풀링된 사망위험비	-2.78(-12.22, 7.67)	20.37(12.82, 28.42)	§ 11.29(3.53, 19.64)	§ 14.54(5.57, 24.27)
<b>고온사망위험과 도시열섬효과의 관계(per 0.1°C)</b>				
도시열섬효과	1.55(-3.71, 7.1)	2.89(-0.44, 6.33)	† 2.23(-1.48, 6.09)	† 3.31(-0.91, 7.7)
<b>토지특성지표와 고온사망위험과의 관계(per a percent; 도시열섬효과 보정함)</b>				
녹지	0.16(-0.76, 1.08)	-0.01(-0.57, 0.56)	-0.02(-0.66, 0.61)	0.11(-0.61, 0.83)
산림	0.42(-0.35, 1.2)	-0.01(-0.5, 0.49)	-0.06(-0.61, 0.5)	0.28(-0.35, 0.92)
도시림	0.11(-0.86, 1.09)	-0.02(-0.6, 0.56)	-0.08(-0.73, 0.58)	0.06(-0.68, 0.79)
논밭	-1.31(-2.62, 0.03)	† -0.15(-1.03, 0.75)	-0.4(-1.37, 0.59)	-0.75(-1.84, 0.35)
습지	-4.98(-14.5, 5.56)	-0.41(-6.11, 5.63)	-0.13(-6.53, 6.71)	-2.3(-9.26, 5.19)
불투수면 지역	0.38(-0.51, 1.29)	-0.1(-0.64, 0.45)	0.12(-0.49, 0.73)	-0.01(-0.7, 0.69)
빌딩	1.02(-0.08, 2.14)	† -0.17(-0.85, 0.52)	0.33(-0.44, 1.11)	0.11(-0.76, 0.99)
도로	0.16(-3.12, 3.56)	-1.23(-3.26, 0.85)	-0.56(-2.83, 1.76)	-1.11(-3.72, 1.57)

Note. p-value( < 0.01: §, < 0.05: ‡, < 0.1: † )

표 S3. 35km buffer 지역에서 각 하위군에 따른 풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수들 간의 연관성.

모든 결과는 퍼센타일 증가분(PI)로 표현되었으며 괄호 안에는 95% 신뢰구간이 기재되었다. 고온사망위험의 상대위험비는 여름철 기온의 75th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일에서의 사망률의 상대위험으로 정의되었다.

35km buffer(n=47)	퍼센타일 증가분(PI)(95% 신뢰구간)			
	65세 미만	65세 이상	남성	여성
<b>고온사망위험(%)</b>				
풀링된 사망위험비	-1.4(-10.55, 8.69)	19.03(12.08, 26.4)	§ 10.14(2.99, 17.79)	§ 15.31(6.92, 24.37)
<b>고온사망위험과 도시열섬효과와의 관계(per 0.1°C)</b>				
도시열섬효과	1.62(-3.12, 6.59)	2.51(-0.43, 5.55)	† 2.03(-1.26, 5.42)	2.92(-0.82, 6.8)
<b>토지특성지표와 고온사망위험과의 관계(per a percent; 도시열섬효과 보정함)</b>				
녹지	0.07(-0.7, 0.84)	0.01(-0.45, 0.47)	-0.01(-0.53, 0.51)	0.03(-0.56, 0.63)
산림	0.23(-0.44, 0.9)	0.01(-0.41, 0.42)	-0.02(-0.49, 0.44)	0.14(-0.39, 0.67)
도시림	0.02(-0.89, 0.93)	0.01(-0.52, 0.54)	-0.06(-0.66, 0.55)	0.04(-0.64, 0.72)
논밭	-0.97(-2.31, 0.38)	-0.18(-1.02, 0.66)	-0.42(-1.34, 0.51)	-0.48(-1.51, 0.56)
습지	-4.73(-14.3, 5.93)	-0.46(-6.08, 5.5)	-0.11(-6.43, 6.64)	-2.42(-9.22, 4.88)
불투수면 지역	0.23(-0.51, 0.98)	-0.07(-0.51, 0.36)	0.1(-0.4, 0.59)	-0.07(-0.63, 0.5)
빌딩	0.77(-0.26, 1.81)	-0.18(-0.8, 0.44)	0.18(-0.51, 0.88)	0.06(-0.74, 0.86)
도로	0.09(-2.69, 2.95)	-0.97(-2.66, 0.75)	-0.59(-2.48, 1.33)	-0.73(-2.91, 1.49)

Note. p-value( < 0.01: §, < 0.05: ‡, < 0.1: † )

표 S4. 민감도 분석(고온사망위험 정의; 50th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일 상대위험비).

풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수들 간의 연관성. 모든 결과는 퍼센타일 증가분(PI)로 표현되었으며 괄호 안에는 95% 신뢰구간이 기재되었다. 고온사망위험의 상대위험비는 여름철 기온의 50th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일에서의 사망률의 상대위험으로 정의되었다.

	30km buffer(n=42)		35km buffer(n=47)		40km buffer(n=51)	
<i>퍼센타일 증가분(PI)(95% 신뢰구간)</i>						
<b>고온사망위험(%)</b>						
풀링된 사망위험비	13.76(7.74, 20.11)	§	12.83(7.26, 18.69)	§	12.45(7.11, 18.05)	§
<b>고온사망위험과 도시열섬효과의 관계(per 0.1°C)</b>						
도시열섬효과	2.21(-0.57, 5.06)		2.09(-0.38, 4.62)	†	2(-0.19, 4.24)	†
<b>토지특성지표와 고온사망위험과의 관계(per a percent; 도시열섬효과 보정함)</b>						
녹지	0.09(-0.39, 0.57)		0.09(-0.3, 0.49)		0.09(-0.28, 0.47)	
산림	0.14(-0.27, 0.56)		0.13(-0.22, 0.49)		0.13(-0.21, 0.46)	
도시림	-0.18(-0.67, 0.31)		-0.14(-0.59, 0.31)		-0.16(-0.54, 0.22)	
논밭	-0.52(-1.26, 0.23)		-0.48(-1.19, 0.23)		-0.46(-1.1, 0.18)	
습지	-2.48(-7.28, 2.56)		-2.27(-7.02, 2.73)		-2.01(-5.44, 1.54)	
불투수면 지역	0.03(-0.43, 0.49)		0.01(-0.37, 0.38)		0.03(-0.33, 0.38)	
빌딩	0.18(-0.4, 0.76)		0.1(-0.43, 0.63)		0.09(-0.42, 0.6)	
도로	-0.66(-2.38, 1.08)		-0.63(-2.07, 0.83)		-0.47(-1.84, 0.92)	

Note. p-value( < 0.01: §, < 0.05: ‡, < 0.1: † )

표 S5. 민감도 분석(고온사망위험 정의; 90th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일 상대위험비).

풀링된 고온사망위험 및 고온사망위험, 도시열섬효과, 토지특성지표 변수들 간의 연관성. 모든 결과는 퍼센타일 증가분(PI)로 표현되었으며 괄호 안에는 95% 신뢰구간이 기재되었다. 고온사망위험의 상대위험비는 여름철 기온의 90th 퍼센타일 대비 99th 퍼센타일에서의 사망률의 상대위험으로 정의되었다.

	30km buffer(n=42)		35km buffer(n=47)		40km buffer(n=51)	
<i>퍼센타일 증가분(PI)(95% 신뢰구간)</i>						
<b>고온사망위험(%)</b>						
풀링된 사망위험비	10.17(4.5, 16.15)	§	9.95(4.74, 15.41)	§	9.25(4.29, 14.45)	§
<b>고온사망위험과 도시열섬효과와의 관계(per 0.1°C)</b>						
도시열섬효과	2.03(-0.73, 4.87)		1.79(-0.65, 4.28)		1.81(-0.35, 4.03)	†
<b>토지특성지표와 고온사망위험과의 관계(per a percent; 도시열섬효과 보정함)</b>						
녹지	0.03(-0.44, 0.51)		0.02(-0.35, 0.39)		0.04(-0.31, 0.4)	
산림	0.03(-0.38, 0.44)		0(-0.33, 0.34)		0.02(-0.3, 0.34)	
도시림	0.22(-0.25, 0.7)		0.2(-0.24, 0.63)		0.18(-0.19, 0.55)	
논밭	-0.7(-1.4, 0.01)	†	-0.53(-1.18, 0.13)		-0.51(-1.12, 0.1)	†
습지	-2.23(-6.92, 2.69)		-2.27(-6.88, 2.58)		-2.29(-5.78, 1.32)	
불투수면 지역	0.14(-0.31, 0.6)		0.05(-0.3, 0.4)		0.07(-0.26, 0.4)	
빌딩	0.26(-0.33, 0.85)		0.12(-0.39, 0.63)		0.13(-0.35, 0.62)	
도로	-0.19(-1.93, 1.58)		-0.27(-1.65, 1.13)		-0.17(-1.48, 1.15)	

Note. p-value( < 0.01: §, < 0.05: ‡, < 0.1: † )

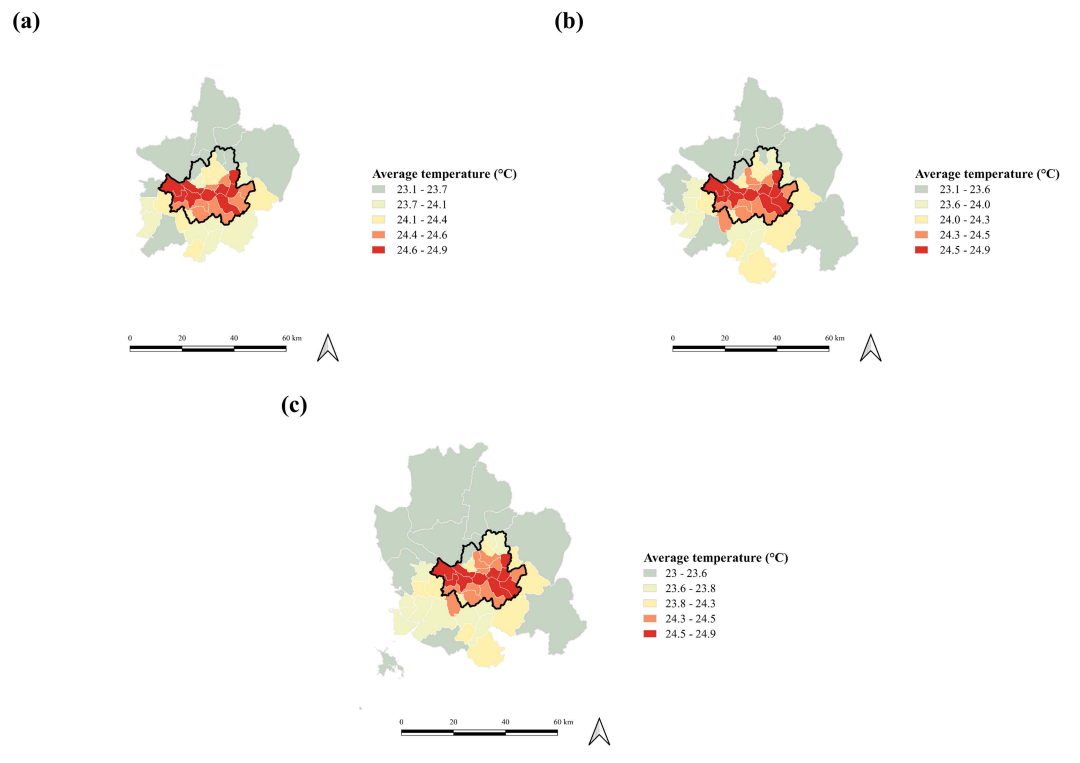


그림 S1. 각 buffer 별 여름철 온도의 지리적 분포.

(a) 30km buffer, (b) 35km buffer, (c) 40km buffer.

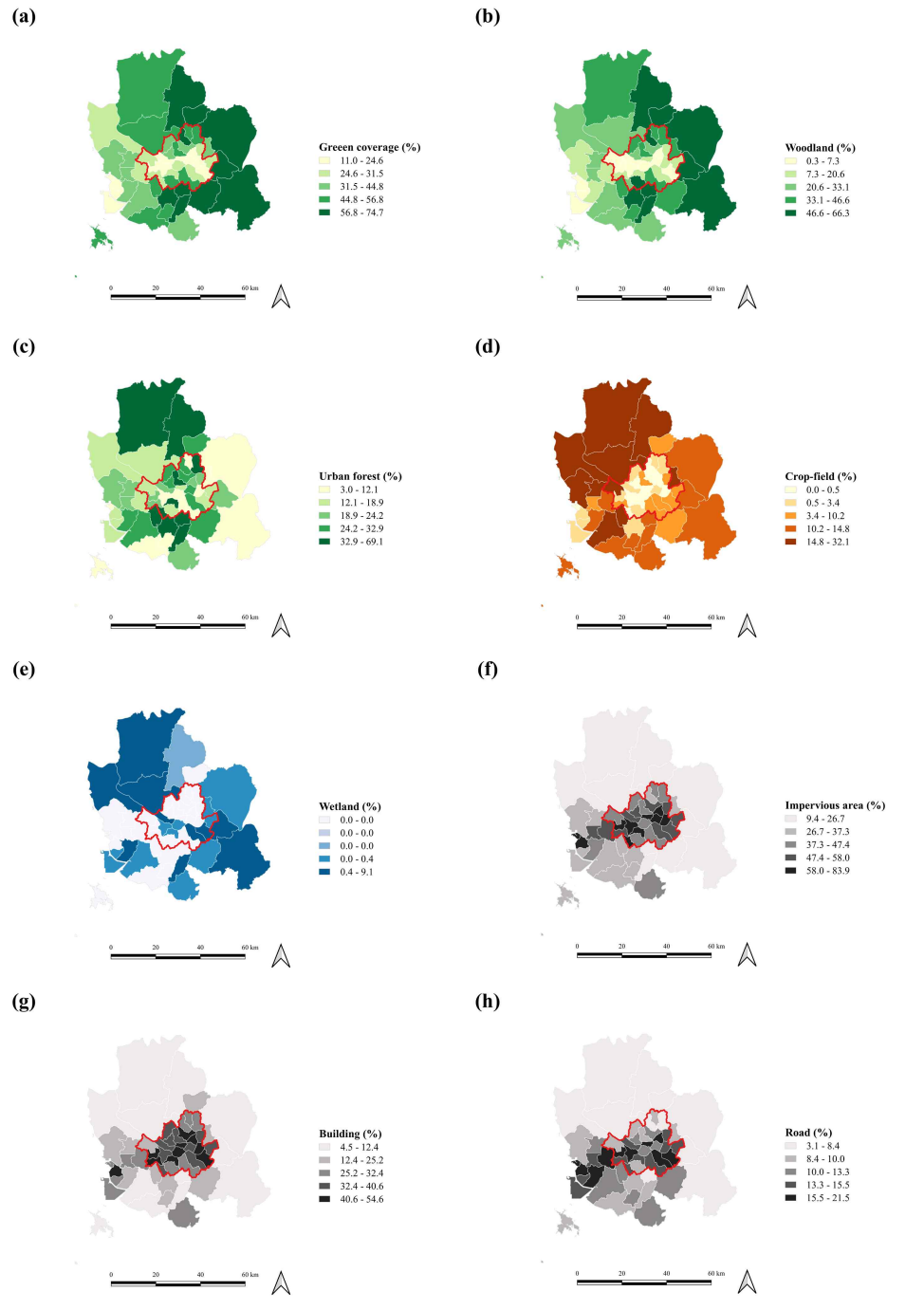


그림 S2. 40km buffer에서 토지특성지표(%)의 지리적 분포.

(a) 녹지, (b) 산림, (c) 도시림, (d) 논밭, (e) 습지, (f) 불투수면 지역, (g) 빌딩, (h) 길.

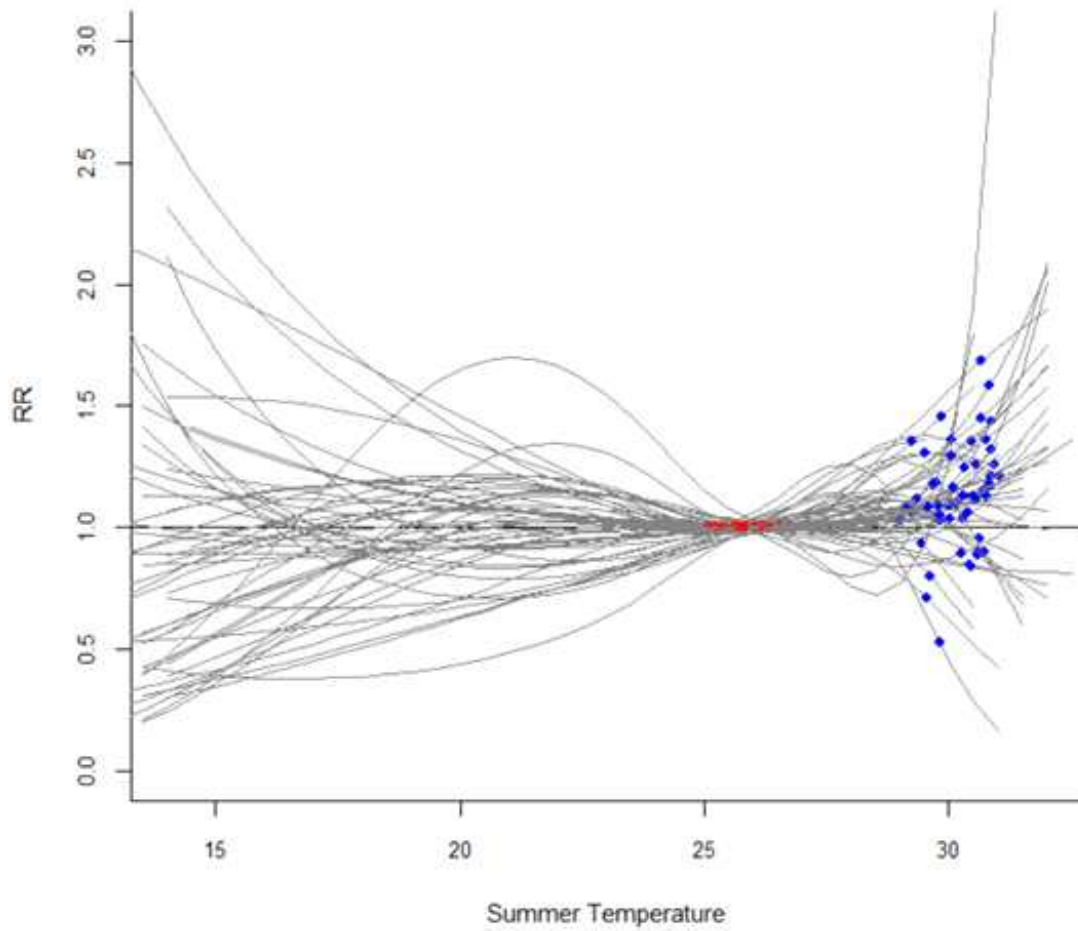


그림 S3. 지역별 1단계 분석에서 추정된 여름철 온도와 고온사망위험 곡선.

빨간/파란점: 여름철 온도의 75th 퍼센타일(baseline; 상대위험도(Relative Risk; RR) = 1)/여름철 온도의 99th 퍼센타일.

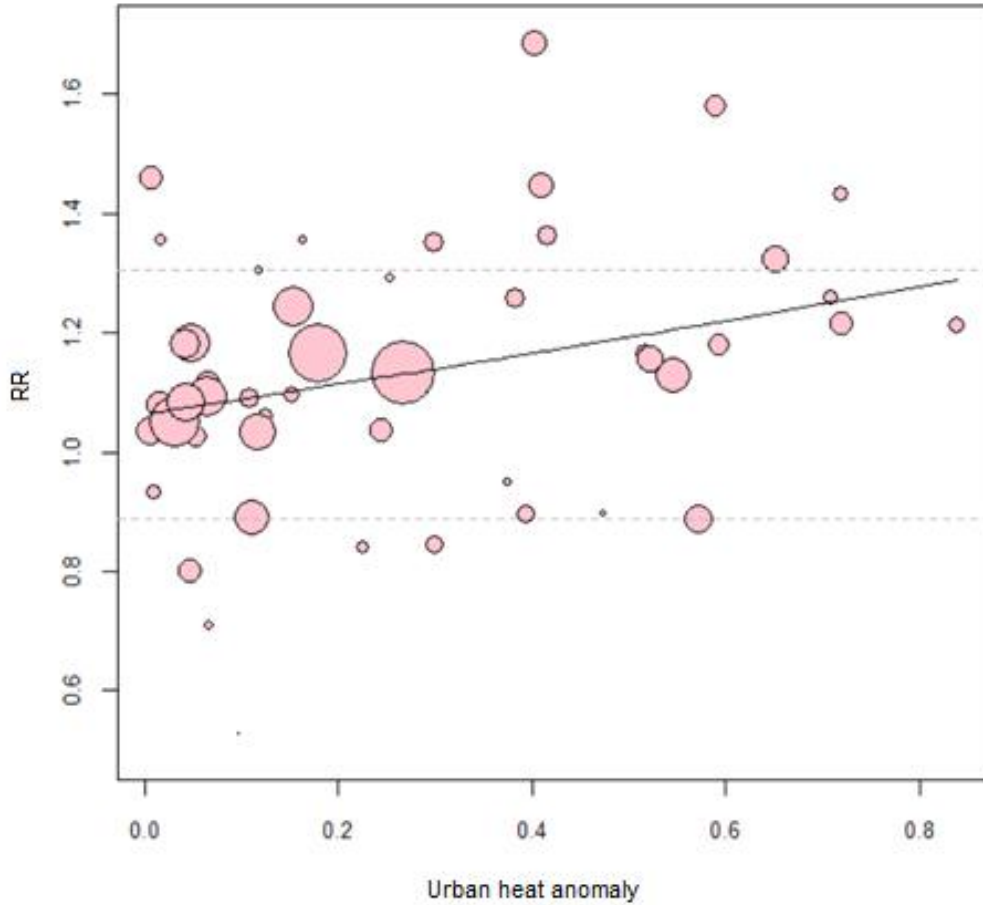


그림 S4. 도시열섬효과 및 고온사망위험(RR) 사이의 산점도.

핑크색 원은 지역별 고온사망위험을 나타내고 원의 크기는 고온사망위험 추정량의 역분산을 나타낸다. 검정색 실선은 메타회귀분석을 통해서 얻어진 도시열섬효과와 고온사망위험 간의 관계를 보인다. 회색 점선은 아웃라이어 탐색하고자 사분위수범위( $Q1 - IQR * 1.5 \sim Q3 + IQR * 1.5$ )를 나타낸다. 해당 결과는 40km buffer 지역으로부터 얻어진 추정량을 기반으로 한다.



## Abstract

# **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**

Jeongju Jang

Department of Biostatistics and Epidemiology

The Graduate School of Public Health

Seoul National University

**Background:** The urban heat anomaly has been suggested as a representative risk factor for human health in metropolitan areas, but few studies have measured a quantitative increase in risk due to the urban heat anomaly on heat-related mortality in

the summer season or assessed the role of various types of land-use/land-cover(LULC), which may contribute to the urban heat anomaly.

**Objectives** : In this study, we evaluated the association between the urban heat anomaly and heat-related mortality risk in the summer and the potential roles of multiple types of LULC indicators.

**Methods** : We used district-level time-series and cadastral data from 51 urban districts in the national capital region of South Korea. We applied a two-stage analysis. In the first stage, we estimated the district-specific heat-related mortality risk by using a distributed lag non-linear model. In the second stage, we used a meta-analysis to pool the estimates across all districts and calculate the association between the urban heat anomaly/LULC indicators and heat-related mortality risk.

**Results** : We found that the higher urban heat anomaly was related to lower vegetation and higher urban surface indicators, and the urban heat anomaly was positively associated with the heat-related mortality risk. The association between the urban heat anomaly and the heat-related mortality risk was more pronounced in the elderly(age  $\geq$  65 years) and female population than in the non-elderly and male population. We also found that the LULC indicators affected the heat-related mortality only through the urban heat anomaly.

**Conclusion :** Our findings indicate that urban areas may be more vulnerable to heat-related mortality risk as determined by the urban heat anomaly. These results suggest a need for urban heat mitigation strategies such as increased vegetation or surface albedo to help reduce heat-related mortality risk.

**Keywords :** Urban heat anomaly, Land-use/land-cover(LULC), Urban development policy, Heat-mortality risk

**Student Number :** 2018-29058