

지역별 폭염 기후탄력성 확보 기술의 경제성 분석

배동욱* · 신윤철* · 안휘권* · 황정하** · 안동환*** · 김관수****†

*서울대학교 농경제사회학부 석사과정, **미국 퍼듀대학교 농업경제학과 박사과정, ***서울대학교 농경제사회학부 교수

A regional benefit-cost analysis of heatwave climate resilience technologies in Korea

Bae, Dong Uk* · Shin, Yun Cheol* · Ahn, Hwui Kwon* · Hwang, Jeongha** · An, Dong Hwan*** and Kim, Kwansoo****†

*Master's Student, Dept. of Agricultural & Resource Economics, Seoul National University, Seoul, Korea

**Ph.D. Student, Dept. of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN, U.S.A.

***Professor, Dept. of Agricultural & Resource Economics, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Climate resilience is crucial for reducing heatwave damages, leading the Korean government to deploy various response technologies such as rooftop/wall greening, cool roofs, cooling fogs, and pergolas. However, few studies have comprehensively evaluated the economic benefits and costs of these technologies. To fill this gap, this paper utilizes a panel dataset including weather data (daily temperature, relative humidity), wages, industry-specific worker counts, and regional installations of heat mitigation technologies to estimate labor productivity losses due to heatwaves. A two-step regression analysis is then implemented (i) to assess the impact of these technologies on the Heatwave Resilience Index (HWRI) and (ii) to examine how the HWRI is associated with heatwave damages, measured as the sum of labor productivity losses and heat-related medical expenditures. Finally, a benefit-cost ratio (BCR) analysis evaluates the economic benefits of such climate resilience processes. The results show that the loss of labor productivity in Korea due to heatwaves from 2016 to 2022 is about KRW 265.1 billion, or 0.18% of total wage payments. The BCR for cooling fogs is 0.80, that for cool roofs is 1.66, that for rooftop/wall greening is 2.60, and that for pergolas is 0.86. The contributions of this paper are summarized as follows: (i) construction of an original panel dataset we constructed and (ii) a two-step estimation strategy that incorporates both the climate resilience index and mitigation technologies for estimating their reduction in damage costs related to heatwaves. Our analysis is expected to provide useful information to policymakers to establish cost-effective heatwave response technologies.

Key words : Climate Resilience, Heatwave Damages, Labor Productivity Loss, Heatwave Response Technologies, Benefit-Cost Analysis

1. 서론

폭염과 같은 이상기후 현상은 기후변화의 중요한 양상 중 하나이다. 2018년은 우리나라 역대 최악의 폭염을 기록한 해로 4월부터 대구, 경주, 울산 등 남부지방의 최고 기온이 30℃를 기록하였으며, 8월 1일에는 서울이 39.6℃,

홍천이 41.0℃를 기록하였다. 또한, 6년 후인 2024년에는 강릉에서 17일 연속으로 열대야가 나타나 역대 최장 기록을 세웠으며, 서울은 기상관측 이래 최초로 6월 평균 최고 기온이 30℃를 넘기기도 하였다. 여기서 주목할 점은 이전에 비해 폭염의 강도와 빈도, 지속도가 강해졌을 뿐만 아니라 기록적인 폭염의 주기가 점점 짧아지고 있다는 것

†Corresponding author : kimk@snu.ac.kr (1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea. Tel. +82-2-880-4711)

ORCID 배동욱 0009-0008-5980-5475
신윤철 0009-0006-9729-3461
안휘권 0009-0001-6911-7173

황정하 0000-0003-4005-8410
안동환 0000-0003-0037-7919
김관수 0000-0003-2164-5724

이다.¹⁾

더욱 강하고 잦아진 폭염은 도시지역에 상대적으로 큰 피해를 유발한다. 이는 도시의 인구 및 인프라 집중이 기후변화에 대한 취약성과 위협성을 동시에 증가시키기 때문이다(Kim et al., 2020). 특히, 한국의 경우, 인구의 92.1%가 도시에 집중되어 있고(LX, 2024), 각종 인프라 시설 역시 도시에 집중되어 있다. 도시에서의 폭염에 따른 경제적·사회적 피해는 다양한 경로를 통해 나타난다. 폭염으로 인하여 노동자의 집중력 저하 및 피로 누적으로 인한 노동 효율 저하, 그리고 도로 포장재, 철도, 건물 등의 변형 등 인프라 손상, 열사병·탈수증·심혈관 질환 등과 같은 온열질환이 유발될 수 있다(Korean Ministry of Environment, 2022).

폭염으로 인한 피해를 방지하기 위해 정부와 지자체에서는 다양한 정책과 지침을 시행하고 있다. 실제로 고용노동부에서는 폭염주의보 발령 시, 무더위 시간대인 14~17시 동안의 옥외 작업의 단축 또는 작업 시간 변경을 권고하고 있으며, 폭염경보 발령 시에는 불가피한 경우를 제외하고 옥외 작업 중단을 권고하고 있다(Korean Ministry of Employment and Labor, 2024). 한편, 지자체에서는 시민들이 더위를 효과적으로 식힐 수 있도록 공공 냉방 쉼터를 마련하고, 도심 내 녹지 공간과 그늘 확충 등의 환경 개선 사업을 추진하고 있다(Park, 2022). 또한, 폭염피해를 줄이기 위한 환경 개선 사업의 일환으로 옥상녹화 및 벽면녹화 사업, 도로변 쿨링포그(cooling fog) 설치, 공공기관 쿨루프(cool roof) 설치 및 민간 쿨루프 설치 지원사업, 횡단보도 그늘막 설치 등 다양한 폭염 대응 기술들이 적용되고 있다(Lee and Cho, 2024; Pyon, 2022).

이러한 폭염 대응 기술들은 기후탄력성(Climate Resilience)의 개념과도 연결될 수 있다. 기후탄력성이란 폭염·폭우 등 기후변화에 따라 더욱 빈번하게 발생할 수 있는 재난에 대비하여 그 이전의 상태로 되돌아갈 수 있는 능력을 의미하며, 인간을 비롯한 생물과 물리적 시스템이 반응하는 정도와 취약성, 경제·인프라 등을 비롯한 사회 전반의 시스템이 충격에 대응하는 적응 능력을 포괄하는 개념이다(Baik et al., 2024; Yoon et al., 2016).

기후변화가 심화됨에 따라 폭염의 빈도 및 강도가 증가할 것이라는 전망이 보편적으로 받아들여지고 있는 만큼, 폭염과 같은 이상기후현상에 대한 기후탄력성 확보는 지역의 취약성을 감소시키고 적응능력을 제고할 수 있다는

점에서 중요한 의미를 가진다. 폭염 대응 기술이 폭염 기후탄력성을 확보할 수 있는 방안이라는 점에서, 관련 기술들의 적절한 보급과 설치에 이상기후현상에 대한 적응력을 강화하고 기후변화에 효과적으로 대응할 수 있는 지역 기반 구축에 기여할 수 있다(Korean Ministry of Environment, 2022).

폭염 대응 기술의 효과성 분석에 대한 기존 연구는 (i) 기술의 직접적인 효과를 중심으로 한 분석과 (ii) 특정 지역을 대상으로 한 미시적 연구로 이루어졌다는 점에서 포괄성과 확장성 측면에서 한계점이 존재한다. 구체적으로 기존 연구는 주요 기술의 온도 저감효과와 같은 직접적인 효과에 분석의 초점을 맞추었다. Yang and Yoon (2020)은 청주시를 대상으로 시나리오 분석을 통해 쿨링포그와 쿨링로드, 옥상녹화와 쿨루프의 기온 저감효과를 도출하였으며, Seong and Lee (2023)에서는 대구광역시를 대상으로 폭염 취약지역을 도출하고, 온도 저감 시설의 적정 위치를 규명하였다. Kim and Kang (2022)에서는 대구광역시를 중심으로 쿨링포그의 배치 간격 및 안개 분사 방향의 시나리오별 최대 체적평균온도 감소분을 통해 효율성을 평가하였다.

또한, 폭염 대응 기술의 경제적 편익과 비용의 추정에 있어서 공간적 제한성을 극복한 기존 연구는 상대적으로 부족하다. Kim and Yoon (2011)에서는 서울시의 옥상녹화의 적용 유형별로 전열량을 통한 건물에너지 절감 정도를 계측하고 생애주기비용(Life Cycle Cost) 평가를 통해 비용 관점에서의 경제성을 평가하였고, Lee et al. (2020)에서는 서울시 마포구, 성북구, 송파구 내 특정 지역을 대상으로 쿨루프와 옥상녹화의 편익·비용비를 각 대상지별로 추정함으로써 경제성을 분석하였다. 이들 연구는 모두 서울의 특정 지역을 대상으로 진행한 연구라는 점에서 전국 지자체/시도 단위로의 확장성 측면에서 분석결과의 시사점 도출에 제한적이라는 한계가 존재한다.

기술의 직접적인 효과(예, 주변 온도 저감 효과, 건물에너지 절감 효과 등)만으로는 해당 기술의 사회적·경제적 가치를 충분히 파악하기에는 어려움이 있다. 폭염 대응 기술의 적용에 따른 포괄적인 경제적 편익과 기술 도입 및 유지보수 비용을 추정함으로써 정교한 편익·비용 분석을 시도할 필요가 있다. 제한된 예산 내에서 최적의 효과를 얻을 수 있도록 효율적이고 지속가능한 폭염 대응 전략 수립을 위해서는 폭염 대응 기술의 정교한 경제성 분

1) 1994년의 역대 최고 폭염 기록이 경신되기까지는 24년이라는 시간이 걸렸으나, 2018년의 기록이 경신되기까지는 6년이라는 시간만이 소요되었다(Bae, 2018).

석이 필요하기 때문이다. 또한, 전국 지자체/시도 단위에서의 폭염 기술 설치 데이터를 활용하여 편익-비용 분석을 시도함으로써 지역별 특성을 제어할 수 있는 객관적이고 체계적인 지역 맞춤형 기후변화 적응 정책이 수립될 필요가 있다.

이러한 점을 반영하여 본 논문에서는 전국의 17개 시도를 대상으로 기후탄력성 측면에서의 폭염 대응 기술별²⁾ 편익-비용 분석(Benefit-Cost Analysis)을 통해 적응 기술의 효율성을 평가하고자 한다. 본 논문에서는 폭염이 직접적으로 시민들의 건강에 미치는 영향과 간접적으로 노동생산성에 미치는 영향을 피해액으로 설정하고, 폭염 대응 기술이 피해액을 저감시킨 정도를 편익으로 정의함으로써 폭염의 직·간접적인 영향에 대한 포괄적인 분석을 시도하였다. 특히 기술이 적용된 건물이나 인근 지역의 미시적 차원에서의 에너지 절감에 따른 편익을 분석하거나 에너지 저감에 따른 탄소 저감 편익·온열질환 진료비용 감소·주변 주민의 쾌적성 향상 효과 등의 편익을 단편적으로 계측한 기존 연구들과 달리, 본 논문에서는 폭염 대응 기술의 사회적·경제적 가치를 시도 수준에서 종합적으로 계측함으로써 보다 의미있는 시사점을 도출하고자 하였다. 본 논문의 분석 결과는 폭염 대응 기술의 도입을 위한 의사결정의 지원 도구로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

제2장에서는 분석자료에 대한 설명과 분석 방법을 기술하였으며, 제3장에서는 연구 결과를 17개 시도별 노동생산성 손실액 추정 결과, 각 시도별 기술의 한계편익 및 BCR 분석 결과로 나누어 제시한다. 제4장에서는 요약 및 결론과 연구의 한계점을 서술하였다.

2. 분석자료 및 분석방법

2.1. 분석자료

종속변수인 폭염 피해액은 온열질환자 진료비와 폭염으로 인한 노동생산성 손실액의 합으로 구성된다. 온열질환자 진료비 자료는 건강보험심사평가원 청구자료³⁾를 통

해 수집되었다. 자료가 포함하고 있는 기간은 분석기간과 동일한 2016년~2022년이며, 상병코드 T67(열 및 빛의 영향)에 대한 기초지자체별 요양급여비용총액을 온열질환 진료비용으로 활용하였다.

폭염으로 인한 노동생산성 손실액의 추정을 위한 습구흑구온도⁴⁾(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) 계측에는 각 지자체의 기온 및 습도 자료가 활용되었다. 2016년~2022년 여름철(5월~9월) 기상자료 수집을 위하여 기상청의 기상자료개방포털에서 제공하는 종관관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)과 방재관측시스템(Automatic Weather System, AWS) 자료를 활용하여 일별 평균기온, 최고기온, 상대습도 자료를 수집하였다. 본 논문에서는 시군구별로 가장 가까운 기상관측소를 매칭한 후, 해당 관측소의 일별 기온자료 및 상대습도 자료를 각 시군구의 기상정보로 사용하였다. 이때, 매칭된 기상관측소가 각 기초지자체의 기후를 적절히 대표하지 못한다고 판단되는 경우에는 그 다음으로 가까운 기상관측소의 자료를 활용하였다. 기상자료개방포털에서 제공하는 일별 기온 자료는 회귀식 추정 시에 고려된 기상변수인 폭염빈도, 폭염일수, 폭염강도, 최대폭염일수, 최대폭염강도 등의 변수 구축에도 활용되었다.

WBGT를 활용하여 노동생산성 손실 비중을 추정한 후, 노동생산성 손실액을 금액단위로 환산하기 위하여 필요한 시도별 산업별 종사자 수와 평균 시간당 임금 자료는 고용노동부의 사업체노동력조사(행정구역별/산업별(대분류) 고용) 자료를 활용하였다. 평균 시간당 임금의 경우 소비자물가지수(CPI)를 반영한 실질임금으로 측정하였다. 폭염 기술 설치자료의 경우, 설치자료가 통합되지 않고 각 지자체별로 관리되고 있어 정보공개청구포털을 통해 연구진이 자체적으로 각 기초지자체 단위로 문의하여 수집한 자료를 활용하였다.

HWRI 추정을 위해서 활용된 자료는 KOSIS 통계 포털, 한국도시통계, 국토정보포털, 상수도통계, 지역별고용조사 등을 통해 수집되었으며, 변수별 출처는 Table 2에 나타나 있다.

마지막으로 폭염 대응 기술 설치 비용 자료의 경우 클

2) 본 연구에서의 분석대상인 폭염 대응 기술은 쿨링포그, 쿨루프, 옥상/벽면녹화, 그리고 그늘막 기술로 선정되었다.

3) 건강보험심사평가원 청구자료의 경우 의료급여 환자의 진료 내역이 누락된 경우가 다수 존재하며 비급여 진료는 포함하지 않기 때문에 온열질환자 진료비가 과소 평가되었을 가능성이 존재한다는 한계점과 진료 당시 상병 정보와 최종 확정된 상병 정보가 다를 수 있다는 한계점이 존재한다.

4) Yaglou와 Minard에 의해 미군의 훈련 시 온열질환에 의한 피해를 감소시키기 위해 개발되었으며(Yaglou and Minard, 1957), 태양 복사열과 대기 습도를 모두 고려한 열스트레스 지수의 일종이다. 현재 미국연방 직업안전보건국(OSHA), 미국 군사훈련소, 일본·호주·홍콩 등 기상청에서 이용하고 있으며, 한국 기상청에서도 2018년부터 WBGT 추정값이 제공되고 있다(Lee et al., 2019).

Table 1. Input data list and source

Data	Sources	Items
Cost of care for febrile illnesses	HIRA Claim data	City and district (Si-gun-gu), inpatient/outpatient classification, number of patients, claims, and total cost of care for T67 (heat and light effects)
Weather variables	KMA Open MET Data Portal	Average temperature, maximum temperature, relative humidity
Wages, number of workers by city	MOEL Business labor force survey	Number of workers and wage by industry & city
Heatwave response technology installations	Open information portal of Korea	Heatwave response technologies installations by year

Note: All collection periods range from 2016 to 2022

Table 2. Indicator configuration variables by sector

Sector	Sub sector	Source	Variables
Economy	Economic power	KOSIS Regional Income	Amount of local tax per capita, Financial independence rate, GRDP
	Industry development	Survey of R&D in Korea	R&D expenditures per capita, Number of researchers
		KOSIS Economically Active Population Survey	Unemployment rate
Social	Medical response capability	Emergency Medical Services Statistics	Numer of Ambulances
		Korean Urban Statistics	Number of Hospitals·Health centers·Medical personnel·Emrgency medical center, Health insurance subscribers
		KOSIS e-Regional Indicators	Unmet healthcare ratio, Number of hospital bed per 1,000 people
	Social infrastructure	Korean Water Supply Statistics	Daily water consumption per capita, Water supply rate, Number of people under unmet water supply, revenue water ratio
	Energy	Korean Urban Statistics	Energy use of buildings
Physical Infra	Vulnerable facilities	Geospatial Information Platform	Number of old buildings (20~24y·25~29y·30~34y·over 35y), Road area, Railroad area
	Shelters of extreme heat	Korean Urban Statistics	Number of Welfare facilities for the aged, the homeless, the disabled, and children
	Green Infra	Korean Urban Statistics	Park area, Unexecuted park area, Orchar area, Green area, Paddy area, Greenhouse area, Forest area, Stream area
	Density of buildings	Geospatial Information Platform	Number of buildings, Average height of buildings, Average building coverage ratio, Average building volume ratio
Governance	Budget	Local Finance Integrated Open System	Amount of welfare budget,
		KOSIS	Natural disasters management fund
	Response personnel	Korean Urban Statistics	Population per 1 fire-fighting officer, Number of Officers (si-do)
Human	Vulnerable populations	KOSIS Population Statistics Based on Resident egristration	Population under 5-year-old, Population of over 65-year-old, Number of the disabled
		Korean Urban Statistics	Number of Beneficiary of national basic livelihood
		Local Area Labour Force Survey	Number of construction workers, Number of skilled agricultural, forest, and fishery workers, Number of grunt workers·temporary workers
	Underlying disease	Medical Service Usage Statistics by Region	Number of people in hypertension, Number of people in diabetes
	Population density	KOSIS	Population density

링포그와 관련한 연구자료 및 공개정보가 존재하지 않아 제조업체 인터뷰를 통해 수집하였으며, 쿨루프 및 옥상/벽면녹화, 그늘막 설치 비용의 경우 각각 Manso et al. (2021), William et al. (2016) Jungrang District Council (2021)에 제시된 수치를 활용하였다.

2.2. 분석방법

폭염 대응 기술의 경제성 분석은 각 시군구별로 연도별 설치자료의 확보가 용이한 쿨링포그, 쿨루프, 옥상/벽면녹화, 그늘막을 대상으로 진행되었다. 본 연구에서는 해당 기술 설치에 의해 폭염 피해액이 저감된 정도를 폭염 대응 기술의 편익으로 정의한다. 폭염 피해액은 온열질환 진료비용과 노동생산성 감소에 의한 사회적 손실액(이하 노동생산성 손실액)의 합으로 구성된다. 노동생산성 손실액은 시군구별로 WBGT를 추정하고 이를 활용하여 지역별 노동생산성 손실 비율을 추정한 후, 산업별 총 임금지불액을 바탕으로 노동손실액을 도출한다.

다음으로 폭염 피해액의 절감액은 아래의 2단계 접근법으로 추정된다. 첫 번째 단계에서는 폭염 대응 기술이 폭염 기후탄력성 종합지수(Heat Wave Resilience Index, HWRI)에 미치는 영향을 추정한다. 폭염 대응 기술은 온열질환으로부터 시민과 노동자 보호, 도시 열섬 효과 완화, 에너지 소비 절감 등의 영향을 미칠 수 있다. 폭염 대응 기술의 이러한 효과는 먼저 폭염 기후탄력성 종합지수(Heat Wave Resilience Index, HWRI)를 구성하는 하위 부문 중 폭염과 관련하여 지역의 인프라가 반영된 물리적 부문의 회복력에 대한 영향으로 계측될 수 있다. HWRI는 경제, 사회, 물리, 거버넌스, 인구 부문의 회복력 점수가 모두 합산된 형태로 나타나므로, 폭염 대응 기술은 물리적 부문 회복력에 영향을 미침으로써 HWRI에 영향을 미치게 되기 때문이다. 두 번째 단계에서는 폭염 대응 기술로 인해 변화한 HWRI가 폭염 피해액에 미치는 효과를 추정함으로써, HWRI로 계측된 기후탄력성의 증가가 경제적 손실을 얼마나 효과적으로 감소시키는지를 정량화하는 것이다. 이를 통해 각 기술의 피해 감소 효과를 계량적으로 측정하고, 최종적으로는 산출된 편익을 해당 기술의 도입 및 운영비용과 비교하여 BCR을 도출한다.

2.2.1. 노동생산성 감소에 의한 사회적 손실액 추정과 폭염 피해액 추정

본 논문에서는 폭염이 경제·사회적으로 미치는 피해의

다양한 경로를 반영하고, 그 손실을 정량화하기 위해 폭염 피해변수로 온열질환 진료비용과 노동생산성 손실액의 합계를 활용한다. 국제노동기구(ILO)는 기후변화로 인한 노동생산성 감소를 경제적 손실로 평가하고 있으며(ILO, 2019), 미국 질병통제예방센터(CDC)와 EU 환경청에서는 온열질환 비용을 폭염 피해의 중요 요소로 포함하고 있다.

온열질환 진료비용의 경우에는 별도의 추정 없이 건강보험심사평가원 자료에 제시된 수치를 활용하였으며, 노동생산성 손실액은 WBGT를 추정한 후, 이를 활용하여 계산된 산업별 시간당 노동생산성 손실 비중(Loss Fraction)을 통해 추정된다. 이때 WBGT와 노동생산성 손실 비중은 모두 시군구 단위로 추정된다.

[WBGT의 추정] Yaglou and Minard (1957)에 의해 최초로 제시된 WBGT 모델은 다음과 같다.

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (1)$$

식 (1)에서 T_w , T_g , T_a 는 각각 습구온도, 흑구온도, 건구온도를 의미하며, WBGT는 이 온도들의 가중평균합수임을 알 수 있다. 하지만 흑구온도는 ASOS 및 AWS 관측소에서 직접적으로 관측되는 정규관측요소가 아니기 때문에 기상청에서 제공하는 자료로는 WBGT를 산출할 수 없다는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 기상청에서 제공하는 기온과 상대습도만을 활용하여 WBGT를 추정할 수 있는 KMA2016 모델을 활용한다(KMA, 2016)(식 (2)).

$$WBGT_{KMA2016} = -0.2442 + 0.55399T_w + 0.45535T_a - 0.0022T_w^2 + 0.00278T_wT_a \quad (2)$$

이때, 습구온도 T_w 역시 정규관측요소가 아니므로 본 논문에서는 한국 기상청에서 활용하는 Stull (2011)의 기온(T_a) 및 상대습도(RH)와 습구온도 간 경험식을 이용하여 습구온도를 추정하며, 식 (3)과 같다.

$$T_w = T_a \arctan \left[0.151977 \sqrt{(RH + 8.313659)} \right] + \arctan \left[\frac{T_a + RH}{RH - 1.67633} \right] - \arctan \left[RH - 1.67633 \right] + 0.00391838 RH^{\frac{3}{2}} \arctan \left[0.023101 RH \right] - 4.686035 \quad (3)$$

[노동생산성 손실액 추정] WBGT 값의 분포에 대해 정규분포를 가정하는 경우, 아래와 같이 시간당 WBGT 값을 기준으로 노동생산성의 손실 비율(Loss Fraction)을 계산할 수 있다(Cai et al., 2022; Parsons et al., 2021).

$$Loss\ Fraction = \frac{1}{2} \times [1 + ERF(\frac{WBGT - Prod_{mean}}{Prod_{sd} \times \sqrt{2}})]. \tag{4}$$

식 (4)에서 $ERF(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 함수는 기온과 습도가 노동생산성에 미치는 비선형적인 영향을 수치화하여 표시하며, 이 식을 활용하면 기후변화로 인한 열스트레스 증가가 노동자의 생산성을 어떻게 감소시키는지 평가할 수 있다. $Prod_{mean}$ 과 $Prod_{sd}$ 는 시간당 필요 노동강도별로 견딜 수 있는 WBGT 값의 평균과 표준편차를 의미하며, Cai et al. (2022)에서 제시된 고정된 파라미터를 활용한다. 필요 노동강도는 업종별로 상이하게 나타나, 농업·임업·광업, 운수업 등은 시간당 400W, 숙박업, 교육업, 보건업 등은 시간당 200W의 노동강도가 요구되는 업종으로 구분된다(Table 3 참조).

이를 통해 시군구별로 시간당 노동생산성 손실 비중을 계산할 수 있으며, 이를 활용하여 식 (5)와 같이 폭염으로 인한 시군구별 노동생산성 손실액($Loss\ Amount_i$)을 추정할 수 있다.

$$Loss\ Amount_i = \sum_j Loss\ Fraction_{i,j} \times L_{i,j} \times w_{i,j} \times T \times \frac{hwdays_i}{153} \tag{5}$$

식 (5)에서 $Loss\ Fraction_{i,j}$ 는 지역 i 에서 산업군 j 의 시간당 노동생산성 손실 비중을 의미한다. $L_{i,j}$ 와 $w_{i,j}$ 는 지역 i 의 산업군 j 의 종사자 수와 시간당 평균 임금을 나타내며, 평균임금의 경우 소비자물가지수(CPI)를 반영한 실질임금을 의미한다. T 는 폭염영향시간으로, 한국 기상청에서 정한 무더위 시간대(14~17시)인 3시간을 의미한다. $\frac{hwdays_i}{153}$ 는 본 논문의 분석기간인 5월~9월의 총 일수(153일) 대비 지역별 폭염일수의 비중으로, 온습도에 의한 총 노동생산성 손실액 중 폭염일의 손실액만을 고려하기 위하여 포함된 항이다.

2.2.2. 폭염 기후탄력성 확보기술 편익 추정 및 BCR 분석

본 논문에서는 2016년~2022년 7개년간 전국 17개 시도에 대해 폭염 기후탄력성 확보 기술의 단위당 편익을 추정하기 위해 폭염 기후탄력성 종합지수(HWRI)에 대한 개별 단위기술의 한계효과를 추정 후(1단계), 확률적 피해함수를 활용하여 폭염 기후탄력성 종합지수의 한계효과를 추정하였다(2단계). 폭염 대응 기술이 피해액에 미치는 영향을 직접적으로 추정하는 경우에는 지역마다 상이한 경제·사회 인프라, 행정·재정 역량, 인구 구조 등의 회복력 요인들이 피해액 감소에 기여하는 정도를 계측하기 어렵다. 반면, 이와 같은 2단계 접근법은 HWRI를 통해 지역이 보유한 경제적 자원, 사회적·물리 인프라, 거버넌스 체계, 인구 특성 등 해당 지역의 현존하는 취약성과 적응 능력 측면에서의 기저효과를 고려하므로, 기술 도입의 효과를 보다 정교하게 계측할 수 있다는 장점이 있다. 1단계와 2단계 추정은 229개 시군구 단위 자료를 활용하여 이루어졌으며, 각 시도에 소속된 시군구의 평균값을 활용

Table 3. Mean and standard deviation of WBGT by labor intensity

Labor Intensity Per Hour	Sectors	$Prod_{mean}$	$Prod_{sd}$
400W	Agriculture·forestry·fishing, Mining and quarrying, Manufacturing, Electricity, gas steam and air conditioning supply, Water supply; sewage, waste management, materials recovery, Construction, Wholesale and retail trade, Transportation and storage	35.53	3.94
200W	Accommodation and food service, Information and communication, Financial and insurance, Real estate, Professional, scientific and technical, Business facilities management and business support services, Public administration and defence, Education, Human health and social work, Arts, sports and recreation related services, Membership organizations, repair and other personal services	32.47	4.16

Source: Cai et al. (2022)

하여 시도 단위의 편익으로 집계(agggregation)하였다. 시도 단위 편익으로 집계할 경우, 각 시군구의 행정 규모와 특성이 상이하고, 일부 소규모 지자체에서는 관측 자료가 미비하여 시도(광역지자체) 단위로 집계함으로써 경제성 분석 결과 비교의 용이성을 높일 수 있다. 또한 기후변화 대응 정책의 설립 주체가 시도 등 광역지자체라는 점을 반영하여 시도 단위로 집계하였다.

우선 2단계 분석에 앞서 HWRI는 취약성(Vulnerability)과 적응능력(Adaptive Capability)을 반영하여 특정 지역이 폭염이라는 교란에 얼마나 잘 대처할 수 있는지를 나타내는 지표이다(Baik et al., 2024; Hwang, 2024; Korean Ministry of Environment, 2022). HWRI는 크게 경제, 사회, 물리, 거버넌스, 인구 등 5개 부문으로 구성되며, 해당 5개 부문별 지표값을 합한 것으로 표현된다(식 (6)).

$$HWRI = Econ + Social + Physical Dimension + Governance + Human \quad (6)$$

하위 부문(sub-sector)별 지표값은 다음과 같이 결정된다. 우선 폭염 피해액과 각 변수들의 상관관계를 피어슨 상관관계 분석을 통해 확인한 후, 종속변수와 유의한 상관관계가 존재하는 각 변수값을 정규화하여 동일한 척도로 조정하고 엔트로피 기법을 적용하여 각 변수의 상대적 중요도를 나타내는 가중치를 산출한다(Baik et al., 2024; Hwang, 2024). 계산된 가중치를 정규화된 변수값에 적용하고, 이를 더한 값이 각 하위 부문의 지표값이 된다. 각 부문(Sector)의 하위 부문 지표값을 더하면 해당 부문의 지표값이 되고, 다시 각 부문의 지표값을 더하면 해당 지역의 HWRI가 된다.

Table 4. Indicator configuration variables by sector

Sector	sub sector	Variables
Economy	Economic Power	Amount of local tax per capita, Financial independence rate, GRDP
	Industry Development	R&D expenditures per capita, Unemployment rate, Number of researchers
Social	Medical Response Capability	Numer of Ambulances, Hospitals·Health centers·Medical personnel·Emrgency medical center, Health insurance subscribers, Unmet healthcare ratio, Number of hospital bed per 1,000 people
	Social infrastructure	Daily water consumption per capita, Water supply rate, Number of people under unmet water supply, revenue water ratio
	Energy	Energy use of buildings
Physical Infra	Vulnerable facilities	Number of old buildings (20 ~ 24y·25 ~ 29y·30 ~ 34y·over 35y), Road area, Railroad area
	Shelters of extreme heat	Number of Welfare facilities for the aged, the homeless, the disabled, and children
	Green Infra	Park area, Unexecuted park area, Orchar area, Green area, Paddy area, Greenhouse area, Forest area, Stream area
	Density of buildings	Number of buildings, Average height of buildings, Average building coverage ratio , Average building volume ratio
Governance	Budget	Amount of welfare budget, Natural disasters management fund
	Response personnel	Population per 1 fire-fighting officer, Number of Officers (si-do)
Human	Vulnerable populations	Population under 5-year-old, Population of over 65-year-old, Number of the disabled, Number of Beneficiary of national basic livelihood, Number of construction workers, Number of skilled agricultural, forest, and fishery workers, Number of grunt workers·temporary workers
	Underlying disease	Number of people in hypertension, Number of people in diabetes
	Population density	Population density

5) 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」제11조는 광역지자체의 장이 탄소중립 및 기후변화와 관련된 대응 정책을 수립하도록 명시하고 있으며, 「재난 및 안전관리 기본법」제10조에 따르면 각 시군구의 재난 및 안전관리 사업에 대한 예산 현황은 시도지사를 거쳐 제출되도록 하고 있다.

• **1단계: 단위 기술이 기후탄력성 지수에 미치는 영향**
 폭염 기후탄력성 종합지수(HWRI)에 대한 개별 단위기술의 한계효과를 추정하기 위하여 아래와 같은 회귀식을 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{Physical Dimension}_{i,t} = & \delta_0 + \delta_1 \text{dfog}_{i,t} + \delta_2 \text{clroof}_{i,t} \\ & + \delta_3 \text{grroof}_{i,t} + \delta_4 \text{pergola}_{i,t} + e_{i,t} \end{aligned} \quad (7)$$

이 식에서 $\text{Physical Dimension}_{i,t}$ 은 i 지역(시군구)의 t 년의 물리 부문의 회복력 지표 값을 의미한다. $\text{dfog}_{i,t}$ 는 i 지역의 t 기에 설치된 쿨링포그 개소 수, $\text{clroof}_{i,t}$ 는 쿨루프 면적, $\text{grroof}_{i,t}$ 는 옥상녹화 및 벽면녹화 면적, $\text{pergola}_{i,t}$ 는 그늘막 개소 수, $e_{i,t}$ 는 0의 평균과 일정한 분산을 갖는 오차항을 의미한다. 분석대상 기술은 물리 부문을 구성하는 녹지면적, 무더위쉼터, 건축물 수 등에 영향을 미친다. 따라서 각 기술의 HWRI에 대한 회귀식이 아닌 물리 부문 점수에 미치는 영향을 나타낸 회귀식을 설정하였다.

1단계 회귀식에서 추정된 계수와 단위기술 설치 현황자료를 활용하여 i 지역 t 시기의 물리 부문 회복력 $\widehat{\text{Physical Dimension}}_{i,t}$ 의 예측값(predicted value)을 산출할 수 있다. 이를 다시 HWRI 계산 식에 대입함으로써 i 지역의 t 년도의 HWRI 예측값 $\widehat{\text{HWRI}}_{i,t}$ 을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{\text{HWRI}}_{i,t} = & \text{Econ}_{i,t} + \text{Social}_{i,t} + \widehat{\text{Physical Dimension}}_{i,t} \\ & + \text{Governance}_{i,t} + \text{Human}_{i,t} \end{aligned} \quad (8)$$

• **2단계: 기후탄력성이 폭염 피해액에 미치는 영향**
 극한 기온현상은 무작위적인 사건이므로 폭염은 일종의 확률변수(Random Variable)로 여겨질 수 있다. 따라서 확률변수인 폭염 피해액 변수를 종속변수로 설정하고, HWRI와 기상변수를 독립변수로 도입할 경우, HWRI와 기상변수가 폭염 피해액에 미치는 평균효과와 분산효과에 대한 분석을 시도할 수 있다. 본 논문에서는 Just and Pope (1978, 1979)의 확률적 생산함수(Stochastic Production Function)을 응용하여 HWRI가 폭염 피해액에 미치는 평균효과에 주목한다.

Just-Pope의 확률적 피해함수의 기본 회귀식은 다음과 같은 형태로 표시된다.

$$y_{i,t}(x_{i,t}, z_{i,t}, \beta, \gamma, e_{i,t}) = f(x_{i,t}, \beta) + e_{i,t}[h(z_{i,t}, \gamma)] \quad (9)$$

여기서, $y_{i,t}$ 는 t 기에 발생한 i 지역의 폭염 피해액, $x_{i,t}$ 는 폭염 피해액의 평균에 영향을 미치는 설명변수 벡터, $z_{i,t}$ 는 폭염 피해액의 분산에 영향을 미치는 설명변수 벡터를 의미한다. β 와 γ 는 각각 평균과 분산 방정식에서 추정되는 설명변수의 계수를 나타내며, 오차항 $e_{i,t}$ 는 평균이 0이고 일정한 분산을 가진 확률변수이다. $h(z_{i,t}, \gamma)$ 은 계수의 일치추정량을 얻기 위해 고려해야 하는 이분산적 분산의 구조적인 변동을 포착한다.

$y_{i,t}$ 에 대한 평균 함수와 분산 함수는 각각 $E(y_{i,t}) = f(x_{i,t}, \beta)$ 와 $\text{Var}(y_{i,t}) = h(z_{i,t}, \gamma)^2 \text{Var}(e_{i,t})$ 로 나타나며, 이들 함수에 대하여 각각 설명변수를 설정하고 각 함수식을 추정할 수 있다. 이와 같은 확률적 피해함수는 HWRI 및 기상변수에 따라 변화하는 폭염 피해의 분포를 실증적으로 분석할 수 있는 유용한 정보를 제공하게 된다. 본 연구에서는 분산 함수 추정 결과, 분산 함수의 오른쪽 변수인 HWRI 및 기상변수의 회귀계수가 통계적으로 유의하게 추정되었다.⁶⁾ 이는 오차항의 분산이 독립변수들에 의해 체계적으로 영향을 받는다는 것을 의미하는데, 폭염 피해액의 분산이 무작위적(random)으로 분포하지 않고 독립변수 값에 따라 종속변수의 분산이 변화하는 이분산성이 존재한다는 것으로 해석될 수 있다. 이분산이 존재하는 경우 OLS (Ordinary Least Square) 추정량의 효율성이 확보되지 못한다는 문제가 발생하므로, 연구에서는 평균 함수 추정 시 추정량의 효율성을 확보할 수 있는 GLS (General Least Square) 추정기법을 활용하였다. GLS 기법은 분산 함수 $h(z_{i,t}, \gamma)^2$ 를 추정한 후, $h(z_{i,t}, \gamma)^2$ 의 역수의 제곱근을 가중치로서 각 관측치에 곱해주는 방식으로 오차항의 이분산성을 제거한 후 OLS 회귀를 다시 수행하는 방식으로 진행된다.

먼저, 폭염 피해액 평균 함수를 아래와 같이 고려한다. 평균 함수의 설명변수로 $\widehat{\text{HWRI}}_{i,t}$ 를 고려함으로써 HWRI의 추정치가 한 단위 증가할 때 폭염 피해액의 평균에 미치는 효과(한계효과)를 계측할 수 있다.

6) $h(z_{i,t}, \gamma)^2 = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 \widehat{\text{HWRI}}_{i,t} + \gamma_2 \widehat{\text{HWRI}}_{i,t}^2 + \gamma_3 \text{HF}_{i,t} + \gamma_4 \text{HD}_{i,t} + \gamma_5 \text{HI}_{i,t} + \gamma_6 \text{PHD}_{i,t} + \gamma_7 \text{PHI}_{i,t})$ 와 같이 설정되었으며, $\text{PHI}_{i,t}$ 에 대한 회귀계수를 제외하고 모두 유의하게 추정되었다.

$$f(x_{i,t}, \beta) = \beta_0 + \beta_1 \widehat{HWRI}_{i,t} + \beta_2 \widehat{HWRI}_{i,t}^2 + \beta_3 HF_{i,t} + \beta_4 HD_{i,t} + \beta_5 HI_{i,t} + \beta_6 PHD_{i,t} + \beta_7 PHI_{i,t} \quad (10)$$

위 식에서 $\widehat{HWRI}_{i,t}$ 는 기후탄력성과 평균 폭염피해액 사이의 잠재적인 비선형 관계를 설명하기 위해 도입되었다. $HF_{i,t}$ 는 폭염빈도, $HD_{i,t}$ 는 폭염지속일수, $HI_{i,t}$ 는 폭염강도, $PHD_{i,t}$ 는 최대폭염일수, $PHI_{i,t}$ 는 최대폭염강도 등의 기상변수를 의미한다. 위와 같이 폭염에 대한 공통된 정의나 측정 기준이 명확히 제시된 바는 없으나, 강도, 빈도, 지속정도 등 폭염의 다양한 특성들을 함께 고려할 수 있는 기상변수들을 고려하였다(Perkins-Kirkpatrick and Gibson, 2017). 본 논문에서는 일 최고기온이 30℃를 초과할 때 온열질환자 수가 급증했다는 보고(Park et al., 2023)를 참고하여 기상청 기준인 33℃ 대신 30℃를 폭염 기준온도로 설정하였다. 이를 기준으로 폭염빈도($HF_{i,t}$)는 개별 폭염 발생횟수로 설정하였으며, 폭염지속일수($HD_{i,t}$)는 연속 2일 이상 폭염 지속일수, 폭염강도($HI_{i,t}$)는 폭염 발생일의 평균 일최고기온, 최대폭염일수($PHD_{i,t}$)는 연중 가장 길게 발생한 폭염지속일수, 최대폭염강도($PHI_{i,t}$)는 연중 가장 길게 발생한 폭염기간 중 일 최고기온의 최댓값으로 계산하였다.

단위기술의 한계편익($Benefit_{i,j,t}$)은 식 (11)에서처럼 1단계에서 추정된 HWRI에 대한 한계효과와 2단계에서 추정된 HWRI의 폭염 피해액 감소에 대한 한계효과를 곱함으로써 계산될 수 있다.

$$Benefit_{i,j,t} = \delta_j \times (\widehat{HWRI}_{i,t} \text{의 한계효과})_{i,t} = \delta_j \times (\beta_1 + 2\beta_2 \widehat{HWRI}_{i,t}) \quad (11)$$

위에서 δ_j 는 1단계 회귀식에서 추정된 기술 j 가 한 단위 증가할 때 HWRI를 증가시키는 정도를 의미하며, $(\widehat{HWRI}_{i,t} \text{의 한계효과})_{i,t}$ 는 2단계 회귀식을 통해 추정된 HWRI가 폭염 피해액을 감소시키는 정도를 의미한다. 이 두 개의 값을 곱함으로써 단위기술 j 가 한 단위 증가할 때 폭염 피해액이 감소하는 정도를 단위기술 적용의 한계편익으로 추정할 수 있다. 이때, \widehat{HWRI} 와 폭염 피해액 간에는 비선형 관계가 존재한다면 $(\widehat{HWRI}_{i,t} \text{의 한계효과})_{i,t}$ 는 $\widehat{HWRI}_{i,t}$ 값에 따라 변화하게 되고, 이는 모형 설정상 식

(10)을 $\widehat{HWRI}_{i,t}$ 로 편미분한 $(\beta_1 + 2\beta_2 \widehat{HWRI}_{i,t})$ 가 된다. $(\widehat{HWRI}_{i,t} \text{의 한계효과})_{i,t}$ 가 $\widehat{HWRI}_{i,t}$ 에 의존한다는 점은 각 연도별·시군구별로 단위기술 적용의 한계편익이 다르게 나타날 수 있음을 시사한다.

시군구별 편익 추정치의 시도별 평균을 계산하여 시도별 편익을 도출하고, 이와 함께 각 기술의 비용을 고려함으로써 편익-비용비(BCR)를 통해 폭염 대응 기술의 경제성을 평가할 수 있다. 순현재가치(Net Present Value, NPV)법은 초기 투입비용 및 운영비용이 큰 기술일수록 편익이 높게 도출되므로 기술별 경제성을 비교하는 데에는 한계가 존재하며, 내부수익률(Internal Rate of Return, IRR)법은 미래 투자안 간 비교에 주로 사용되어 과거 자료를 기반으로 현재 상태의 폭염 대응 기술의 경제성을 평가하는 데에는 적합하지 않은 것으로 판단하여 각 기술별 경제성의 상대적 비교가 용이한 BCR을 경제성 분석 지표로 활용하였다. 이때 비용은 각 기술별 설치단위당 비용을 의미하며, 초기 투자비용인 설치비용과 단위기술의 운영에 따라 매년 발생하는 운영·유지비용이 포함된다. 이에 따라 기술의 연간 비용은 초기 투자비용을 내용연수로 나눈 값과 연간 운영비를 더함으로써 계산되었다.

3. 분석결과

3.1. 노동생산성 감소에 의한 사회적 손실액 추정과 폭염 피해액 추정

[WBGT의 추정] 분석 기간(2016년~2022년) 동안 5월~9월 기초지자체 WBGT의 최소값은 약 15.84℃(2017년)에서 16.44℃(2022년)로 계산되어 대체로 15℃ 중반에서 16℃ 중반 사이에 분포하는 것으로 계산되었다. 가장 낮은 WBGT 최소값이 관측된 2017년(15.84)은 상대적으로 덜 더운 기온·습도 조건을 보인 것으로 해석될 수 있다. 반면, 2022년(16.44)은 최소값이 다른 연도보다 높아 전국적으로 기온과 습도 등 열환경 전반이 상승했음을 시사한다.

[노동생산성 손실액 추정] 전국 WBGT 평균값은 대체로 20.78℃(2020년)에서 21.37℃(2016년) 범위에 걸쳐 변동하였다(Table 5). 2016년(21.37℃)은 분석 기간 중 가장 높은 평균값을 보인 해로, 중국 북부 기온 상승으로 인해 한반도의 여름철 기온이 상대적으로 높게 나타난 해였다. 반대로 2020년(20.78℃)은 분석 기간 중 평균값이 가장 낮은 것으로 계측되었다. 한편, WBGT 최댓값은 2018년(23.25℃)에 가장 높게 나타났다. 이는 당시 전국적으로

Table 5. Basic statistics of average WBGT by si-gun-gu from May to September

Year	Min	Avg	Max
2016	16.36	21.37	23.10
2017	15.84	20.82	22.73
2018	16.08	21.25	23.25
2019	15.92	20.79	22.50
2020	16.20	20.78	22.23
2021	16.17	20.94	22.74
2022	16.44	21.09	22.94

대폭 증가한 폭염일수의 영향이 반영된 것으로, 극심한 폭염 상황이 통계적으로도 뚜렷하게 드러난 것으로 해석될 수 있다.

추정된 WBGT를 바탕으로 전국의 노동생산성 손실액을 추정한 결과, 분석기간 동안 폭염에 의해 연평균 2,651억 원의 노동생산성 손실이 발생하는 것으로 나타났다(Table 5). 이는 전체 임금 지불액 1,510,385억 원 중 0.18%에 해당하는 수치이다. 폭염에 의해 노동생산성 감소가 가장 크게 나타난 해는 2018년, 가장 작게 나타난 해는 2020년으로 나타났다. 2018년의 노동생산성 손실액은 7,616억 원을 기록하였으며, 이는 전체 임금 지불액 중 0.48%에 해당하는 수치로 손실액 비중 역시 가장 큰 것으로 나타났다. 2018년은 기온이 평년 대비 크게 상승하였으며 기록적인 폭염으로 인한 생산성 저하가 다른 해보다

두드러진 것으로 해석될 수 있다. 2020년의 노동생산성 손실액은 636억 원으로, 손실액 비중 역시 0.04%로 최저치를 기록하였으며, 이는 이 시기의 WBGT 값이 분석기간 중 가장 낮게 나타난 것과 일관성을 보인다.

온열질환자 진료 비용은 연평균 27억 원으로 나타났으며, 이는 연평균 폭염 피해액 2,678억 원 중 약 1.0%의 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 온열질환자 진료 비용 역시 평균 기온이 높았던 해에 상대적으로 높게 나타났다.

분석기간 동안 각 시도별 연평균 노동생산성 손실액은 156억 원으로 분석되었다(Table 6). 시도별로 손실액 비중이 가장 높은 지역은 대구광역시로, 노동생산성 손실액(168억 원)이 서울·경기 등에 비해 크지는 않으나, 상대적으로 적은 임금지불액(60,977억 원)에 의해 손실 비중이 높게 나타났다. 이는 WBGT가 기온과 습도에 의존하므로 분지지형이라는 환경적 요인에 따라 타 시도 대비 평균기온과 평균습도가 높은 대구광역시의 연평균 손실 비중이 높게 나타난 것으로 해석될 수 있다. 경남, 경북, 전북 등 상대적으로 평균기온이 높은 남부 지방에서 손실 비중이 높은 것으로 나타났다. 이들 지역은 높은 기온과 습도 등 기상 요인 외에도 농업, 광업, 제조업 등, 필요 노동 요구량이 400 W로 높은 산업의 종사자 비중이 53.8%로 전국 평균인 46.0% 대비 높기 때문에 손실액이 더욱 크게 도출된 것으로 사료된다.

서울과 경기는 노동생산성 손실액이 각각 601억 원, 585억 원으로 절대적인 규모는 큰 편이나, 총 임금지불액이 타 광역지자체 대비 높아 손실액 비중은 상대적으로

Table 6. National total heatwave damage by year

(Unit: Billion KRW, %)

Year	Total heatwave damage	Cost of care for febrile illnesses	Labor productivity loss	Total wages paid	Loss fraction
2016	339.0	2.3 (0.7)	336.7 (99.3)	138,190.8	0.24
2017	168.0	2.0 (1.2)	166.0 (98.8)	132,741.5	0.13
2018	766.1	4.5 (0.6)	761.6 (99.4)	158,889.3	0.48
2019	199.3	2.7 (1.4)	196.6 (98.6)	168,885.8	0.12
2020	65.6	2.0 (3.0)	63.6 (97.0)	142,592.7	0.04
2021	175.4	2.7 (1.5)	172.7 (98.5)	153,745.8	0.11
2022	161.3	2.9 (1.8)	158.5 (98.2)	162,223.4	0.10
Avg.	267.8	2.7 (1.0)	265.1 (99.0)	151,038.5	0.18

Note: 1) Heatwave damages are adjusted to 2024 real values.

2) The number in the parentheses indicates the proportion compared to the total heatwave damage.

Table 7. Average heatwave damage by si-do (2016 ~ 2022)

(Unit: Billion KRW, %)

Si-do	Total heatwave damage	Cost of care for febrile illnesses	Labor productivity loss	Total wages paid	Loss fraction
Daegu	16.9	0.10 (0.6)	16.8 (99.4)	6,097.7	0.27
Gyeongnam	21.7	0.22 (1.0)	21.5 (99.0)	9,034.9	0.24
Gyeongbuk	16.5	0.17 (1.0)	16.4 (99.0)	7,087.7	0.23
Jeonbuk	9.2	0.12 (1.4)	9.1 (98.6)	4,323.7	0.21
Chungnam	13.0	0.12 (1.0)	12.9 (99.0)	6,252.4	0.21
Busan	19.3	0.14 (0.7)	19.1 (99.3)	9,550.2	0.20
Jeonnam	8.3	0.20 (2.4)	8.1 (97.6)	4,519.4	0.18
Daejeon	7.3	0.09 (1.2)	7.2 (98.8)	4,116.3	0.18
Gwangju	7.2	0.09 (1.2)	7.1 (98.8)	4,096.1	0.17
Sejong	1.2	0.00 (0)	1.2 (100)	685.7	0.17
Incheon	12.3	0.15 (1.2)	12.2 (98.8)	7,257.7	0.17
Gyeonggi	59.0	0.53 (0.9)	58.5 (99.1)	36,519.8	0.16
Seoul	60.6	0.47 (0.8)	60.1 (99.2)	37,710.8	0.16
Ulsan	5.6	0.04 (0.8)	5.5 (99.2)	3,569.7	0.15
Chungbuk	6.7	0.10 (1.4)	6.6 (98.6)	4,740.1	0.14
Gangwon	2.2	0.07 (3.0)	2.1 (97.0)	3,785.4	0.06
Jeju	0.8	0.14 (17.2)	0.7 (82.8)	1,690.9	0.04
Avg.	15.8	0.16 (2.1)	15.6 (97.9)	8,884.6	0.18

Note: 1) Heatwave damages are adjusted to 2024 real values.

2) listed in order of highest percentage of losses

3) The number in the parentheses indicates the proportion compared to the total heatwave damage.

낮게 나타났다. 서울·경기에 우리나라 인구의 대부분이 집중되어 있기 때문에 상대적으로 큰 경제 규모에 의해 노동생산성 손실액과 임금지불액이 높게 나타난다. 하지만 서울의 경우에는 서비스업 등 필요 노동 요구량이 200 W 인 부문의 종사자 비중이 68.5%로 전국에서 가장 높기 때문에 노동생산성 손실액 비중이 상대적으로 낮게 나타난 것으로 해석될 수 있다. 또한 경기의 경우, WBGT가 전국 평균인 21.09보다 낮은 20.78로 나타나 상대적으로 노동생산성 손실액이 작게 도출된 것으로 보인다.

강원(0.06%), 제주(0.04%)는 노동생산성 손실액 비중이 0.1% 미만으로 타 지역 대비 매우 낮은 것으로 산출되었다. 이들 지역에서는 해양성 기후 등의 특성상 기온이 상대적으로 낮아 폭염의 영향이 적게 나타난 것으로 해석될 수 있다.

한편, 시도별 온열질환 진료비용은 연평균 약 1.6억 원

이 발생하였으며, 이는 시도별 연평균 158억 원의 폭염 피해액 중 2.1%에 해당하는 금액이다. 특히 강원과 제주 등 노동생산성 손실액이 작은 시도일수록 전체 폭염 피해액 중 온열질환 진료비용의 비중은 높게 나타났다.

3.2. 폭염 기후탄력성 확보기술 편익 추정 및 BCR 분석

2016년부터 2022년까지의 시도별 \widehat{HWRI} 분석 결과에 따르면, 대도시일수록 전반적으로 높은 지수를 보이는 것으로 나타났다. 경기도는 7개년 평균 43.35로 전국 최고 수준을 보였으며, 서울(38.80), 부산(31.46), 인천(29.57) 등 주요 대도시들 역시 상대적으로 높은 수치를 기록했다. 이는 경제력, 인프라, 의료 접근성, 행정 대응 체계 등 폭염 대응에 유리한 조건이 대도시에 집중되어 있기 때문으로 해석된다. 반면 강원도(26.18), 전북(25.31), 제주

Table 8. \widehat{HWRI} by si-do and year

Si-do	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Avg.
Seoul	37.67	37.51	42.70	37.61	37.24	38.88	40.01	38.80
Busan	30.87	31.01	36.96	30.33	30.66	29.89	30.50	31.46
Daegu	29.64	29.11	33.59	28.63	28.32	28.76	30.61	29.81
Incheon	29.84	28.37	33.58	28.74	28.22	28.12	30.08	29.57
Gwangju	28.73	27.19	33.61	27.45	27.38	27.40	28.75	28.64
Daejun	29.62	29.27	33.42	29.25	29.23	28.13	29.55	29.78
Ulsan	27.93	26.59	32.58	27.18	26.34	26.39	28.79	27.97
Sejong	23.65	23.84	30.31	25.30	24.86	23.42	24.84	25.17
Gyeonggi	43.82	42.67	46.32	42.36	42.86	41.55	43.88	43.35
Gangwon	25.06	24.06	31.36	24.85	24.78	25.17	27.94	26.18
Chungbuk	27.40	25.55	31.31	25.22	25.25	24.49	25.72	26.42
Chungnam	27.58	25.83	31.36	25.98	26.65	25.18	27.39	27.14
Jeonbuk	24.59	24.22	31.63	23.85	23.84	23.44	25.61	25.31
Jeonnam	26.47	25.66	31.97	24.69	24.12	23.89	26.02	26.12
Gyeongbuk	27.78	26.64	32.56	27.07	26.94	26.52	27.63	27.88
Gyeongnam	27.87	26.84	34.29	28.84	27.79	28.15	29.00	28.97
Jeju	22.09	21.22	25.51	20.82	21.29	22.31	21.48	22.10
Avg.	30.84	29.94	35.68	30.02	29.91	29.68	31.37	-

(22.10) 등 비수도권 지역은 전반적으로 낮은 수준을 나타냈다.

연도별 추이를 살펴보면, 2018년 HWRI가 35.68로 가장 높았으며, 이후 다소 감소하여 2020년과 2021년에는 각각 29.91, 29.68을 기록했다가 2022년에 다시 31.37로 반등하는 양상을 보였다. 이러한 변화는 해마다 지역별 대응 수준과 폭염 대응 설치 기술의 보유량이 변동하는 등의 요인에 따라 해당 지수가 변동됨을 보여준다.

Table 9는 물리 부문 폭염 기후탄력성 점수의 폭염 대응 기술에 대한 회귀식의 추정 결과를 제시한 표이다. 현재 수준에서 쿨링포그와 쿨루프, 옥상/벽면녹화, 그늘막의 도입은 모두 물리 부문 폭염 기후탄력성 지표의 상승에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 먼저, 쿨링포그의 경우 1개소 당 물리 부문 지표를 0.0167 상승시키는 것으로 추정되었으며, 이는 1% 유의수준에서 유의한 것으로 나타났다. 쿨루프의 경우에는 1 m²당 물리 부문 지표를 0.000069 상승시키는 것으로 나타났으며, 옥상/벽면녹화의 경우 1 m²당 0.000236 가량 상승시키는 것으로 나타났

다. 그늘막의 경우에는 물리 부문 기후탄력성 지표를 0.000806 상승시키는 것으로 추정되었고, 이는 5% 유의수준에서 유의한 것으로 나타났다. 이러한 분석결과는 지자체가 실시 중인 폭염 대응 기술 설치 사업이 폭염에 대한 기후 회복탄력성을 높인다는 점을 실증적으로 뒷받침하는 것으로 볼 수 있다.

다음으로 2단계 회귀식 추정 결과, 폭염 피해액 규모는 HWRI의 예측치에 대해 통계적으로 유의미한 비선형의 관계를 갖는 것으로 나타났다(Table 8). \widehat{HWRI} 가 49.23 미만인 구간에서는 폭염 피해액에 대한 한계효과가 음으로 나타나, \widehat{HWRI} 가 49.23일 때 폭염 피해액이 최소이고, 이 값을 기준으로 \widehat{HWRI} 가 작을 때에는 \widehat{HWRI} 가 증가할수록 폭염 피해액은 감소하며, \widehat{HWRI} 가 49.23보다 클 때에는 폭염 피해액이 증가하는 것으로 추정되었다. 이는 2016년~2022년 229개 시군구의 \widehat{HWRI} 값 평균이 31.0, 제95백분위수가 43.86이라는 점에 비추어, 대부분의 지자체에서는 \widehat{HWRI} 값을 높임으로써 폭염에 대한 피해액을

Table 9. Step 1 regression estimation results (Dependent Variable: *Physical Dimension*)

Variables	Parameters	Estimates (Std. errors)
$clfog_{i,t}$	δ_1	0.0166578*** (0.0051166)
$clroof_{i,t}$	δ_2	0.0000692*** (0.0000259)
$grroof_{i,t}$	δ_3	0.0002358*** (0.0000552)
$pergola_{i,t}$	δ_4	0.0008064** (0.0004253)

Note: ***, **, and * indicate significant at 1%, 5%, and 10% significance levels, respectively.

Table 10. Step 2 regression estimation results (Dependent variable: Amount of heatwave damage (1,000 KRW))

Variables		Parameters	Estimates (Std. errors)
HWRI	\widehat{HWRI}	β_1	-1,325,978.1*** (258,348.5)
	\widehat{HWRI}^2	β_2	13,510.3*** (2,700.5)
Weather variables	HF	β_3	34,011.2 (23,515.2)
	HD	β_4	13,785.4** (4,255.1)
	HI	β_5	1,131,187.3*** (152,488.1)
	PHD	β_6	29,314.4*** (8,550.2)
	PHI	β_7	-57,079.3 (34,145.0)
Intercept		β_0	-3,166,219.2 (6,382,526.7)

Note: 1) result for the mean equation

2) ***, **, and * indicate significant at 1%, 5%, and 10% significance levels, respectively.

감소시킬 수 있음을 시사한다.

한편, 기상변수의 경우 폭염지속일수(HD), 폭염강도(HI), 최대폭염일수(PHD)가 통계적으로 유의하게 폭염 피해액을 증가시키는 것으로 추정되었다. 이들 기상변수는 폭염의 지속정도와 강도를 반영한 것으로, 폭염이 오

래 지속될수록, 그리고 폭염 발생 시 온도가 높을수록 폭염 피해가 크게 나타나는 것으로 나타났다.

1단계와 2단계 회귀식을 통해 추정된 계수를 활용하여 각 시군구별 폭염 대응 기술의 한계편익을 추정할 수 있다(Table 9). 각 시군구의 \widehat{HWRI} 값은 상이하하며, 식 (11)

Table 11. Marginal benefits of installing heatwave response technologies by si-do

(Unit: KRW)

Si-do	\widehat{HWRI}	Cooling fog (/1 location)	Cool roof (/m ²)	Rooftop and Wall Greening (/m ²)	Pergola (/1 location)
Seoul	38.80	4,548,684	18,896	64,389	220,201
Busan	31.46	7,853,711	32,626	111,173	380,196
Daegu	29.81	8,597,203	35,715	121,698	416,188
Incheon	29.57	8,706,374	36,168	123,243	421,473
Gwangju	28.64	9,121,484	37,893	129,119	441,569
Daejun	29.78	8,609,147	35,764	121,867	416,767
Ulsan	27.97	9,423,745	39,148	133,398	456,201
Sejong	25.17	10,682,928	44,379	151,223	517,158
Gyeonggi	43.35	2,501,369	10,391	35,408	121,091
Gangwon	26.18	10,231,828	42,505	144,837	495,320
Chungbuk	26.42	10,120,895	42,044	143,267	489,950
Chungnam	27.14	9,798,611	40,705	138,705	474,348
Jeonbuk	25.31	10,621,274	44,123	150,350	514,173
Jeonnam	26.12	10,258,245	42,615	145,211	496,599
Gyeongbuk	27.88	9,466,299	39,325	134,000	458,261
Gyeongnam	28.97	8,975,004	37,284	127,046	434,478
Jeju	22.10	12,065,920	50,124	170,799	584,108
Avg.	29.10	8,916,631	37,042	126,220	431,652

Note: Benefits are adjusted to 2024 real values.

Table 12. Installation cost per unit of heatwave response technologies

Technologies	Installation cost	Persisting period (year)	Annual maintenance costs	Annual total cost	Conversion to KRW
Cooling fog	₩100,000,000	25	₩7,200,000	₩11,200,000	-
Cool roof	\$129	10	\$2.58	\$15.48	₩22,446
Rooftop and Wall Greening	\$223	40	\$28	\$33.73	₩48,908
Pergola	₩2,000,000	10 ⁸⁾	₩300,000	₩500,000	-

Note: Costs are adjusted to 2024 real values.

Source: Author's calculations based on manufacturer interviews, Manso et al. (2021), William et al. (2016), and Jungrang District Council (2021)

에 의해 폭염 대응 기술의 편익은 \widehat{HWRI} 에 의존하므로 폭염 대응 기술의 한계편익 역시 시군구별로 상이하게 나타난다.

해당 기술의 시군구별 한계편익 추정치의 각 시도별 평균 한계편익을 분석한 결과, 현재 상태에서 각 기술 1단위를 추가 설치할 때, 쿨링포그는 개소 당 891.7만 원의 폭염 피해액 감소 효과가 있는 것으로 추정되었으며, 쿨루프는 1㎡당 3.7만 원의 폭염 피해액 감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 옥상/벽면녹화의 경우에는 평균적으로 1㎡당 12.6만 원의 폭염 피해액 감소 효과가 있는 것으로 추정되었다. 마지막으로 그늘막은 1개소 당 43.2만 원의 폭염 피해액 감소 효과가 있는 것으로 추정되었다.

한편, 각 지역별로 서울·경기, 부산 등에서는 폭염 대응 기술의 한계편익이 상대적으로 낮게 나타났다. Table 8의 추정 결과에 의해 \widehat{HWRI} 가 높아질수록 폭염 피해액의 감소 효과는 작아진다. 즉, 폭염 피해액 감소효과는 \widehat{HWRI}

에 대해 체감하므로 상대적으로 \widehat{HWRI} 이 높은 서울·경기, 부산 등의 지역의 한계편익이 작게 나타난다. 이는 \widehat{HWRI} 은 물리 부문 외에도 경제, 사회, 거버넌스, 인구 등의 다른 부문의 지표에 의해서도 영향을 받기 때문에, 타 지역에 비해 \widehat{HWRI} 가 충분히 높은 대도시와 같은 지역에서는 다른 부문에 의해 폭염 피해액이 상당 부분 감소하고 있으며, 이에 따라 폭염 대응 기술 설치의 편익이 크게 나타나지 않을 수 있기 때문이다.

쿨링포그의 설치비용은 통일된 설치비용 및 내구연수에 관한 선행연구 및 자료의 부재로 제조사와의 인터뷰를 통해 추산되었다. 쿨링포그는 1개소 평균 10개 내외의 쿨링포그 장치가 설치되며, 1개소 당 약 1억 원의 설치비용이 소요된다. 연간 운영·유지비는 약 720만 원 수준으로 나타났으며, 이 비용에는 필수품의 교체비용이 운영 환경에 따라 가변적임을 감안하여 전기세와 수도세만 포함되었다. 설치비와 운영비를 모두 고려한 쿨링포그의 연간

Table 13. BCR analysis of heatwave response technologies by si-do

Si-do	Cooling fog (/1 location)	Cool roof (㎡)	Rooftop and Wall Greening (㎡)	Pergola (/1 location)
Seoul	0.41	0.85	1.32	0.44
Busan	0.70	1.46	2.29	0.76
Daegu	0.77	1.60	2.50	0.83
Incheon	0.78	1.62	2.54	0.84
Gwangju	0.81	1.70	2.66	0.88
Daejun	0.77	1.60	2.51	0.83
Ulsan	0.84	1.75	2.74	0.91
Sejong	0.95	1.99	3.11	1.03
Gyeonggi	0.22	0.47	0.73	0.24
Gangwon	0.91	1.91	2.98	0.99
Chungbuk	0.90	1.88	2.95	0.98
Chungnam	0.87	1.82	2.85	0.95
Jeonbuk	0.95	1.98	3.09	1.03
Jeonnam	0.92	1.91	2.99	0.99
Gyeongbuk	0.85	1.76	2.76	0.92
Gyeongnam	0.80	1.67	2.61	0.87
Jeju	1.08	2.25	3.51	1.17
Avg.	0.80	1.66	2.60	0.86

총 비용은 1,120만 원 수준으로 도출되었다. 쿨루프의 경우, 설치비용은 면적당 129 달러이며, 연간 유지관리비는 내구연한 동안 설치비용의 2% 수준으로 보고되었다(William et al., 2016). 옥상/벽면녹화의 설치비용은 한국에서는 옥상녹화가 대부분이라는 점을 고려하여 옥상녹화 비용자료를 활용하여 산정되었으며, 저관리 경량형(Extensive green roof), 혼합형(Semi-intensive system), 관리 중량형(Intensive Roof)의 설치비용 및 유지비용 평균치를 활용한 결과 m^2 당 연간 총비용은 33.73달러가 소요되는 것으로 나타났다. 이를 원화로 환산 시⁷⁾, m^2 당 쿨루프는 22,446원, 옥상/벽면녹화는 48,908원의 비용이 발생하는 것으로 나타났다. 그늘막의 경우에는 설치비용과 운영·유지비를 고려하였을 때 연간 50만 원의 비용이 소요되는 것으로 나타났다(Table 12).

앞서 추정된 편익과 비용을 바탕으로 각 폭염 대응 기술의 기술 1단위당 편익·비용비(BCR)을 도출한 결과는 Table 13에 제시되어 있다. 쿨루프와 옥상/벽면녹화의 전국 평균 BCR이 각각 1.66, 2.60으로 도출되어 투입한 비용 대비 경제성이 있는 것으로 나타났다. 연간 편익의 경우 비용 산정 시 고려한 각 기술의 내용연수 동안 매년 발생하는 것으로 가정하였으며, 규모에 대한 수익 불변 가정을 통해 매년 같은 크기의 편익이 발생하는 것으로 가정하였다.

지역별로는 제주의 경우 각 폭염 대응 기술의 한계편익이 타지역에 비해 높아 BCR 역시 상대적으로 높게 나타났다. 모든 기술이 투입 비용 대비 경제성이 있는 것으로 분석되었다. 제주의 경우 타 지역에 비해 기술 설치 수준이 낮다는 점과 높은 기온 특성을 고려하였을 때 폭염 대응 기술의 설치를 통해 효과적으로 폭염 피해를 감소시킬 수 있을 것으로 보인다. 강원, 세종, 전북, 전남에서는 쿨루프, 옥상/벽면녹화, 그늘막의 BCR이 1 이상으로 도출되어 경제성이 있는 것으로 나타났다. 특히 세종과 전북에서는 쿨루프와 옥상/벽면녹화 모두 BCR이 2 이상으로 도출되었다. 반면, 서울과 경기에서는 상대적으로 폭염 대응 기술의 편익이 낮아 BCR 역시 낮게 도출되었다. 서울에서는 옥상/벽면녹화만이 경제성이 있는 것으로 나타났으며, 경기에서는 모든 폭염 대응 기술이 투입 비용 대비 편익이 작은 것으로 분석되었다. 서울과 경기는 상대적으로 지역의 소득 수준이 높고, 냉방기기 보급률이 높아

HWRI가 상대적으로 높은 상태이기 때문에 기술 도입에 따른 한계편익이 다른 지역에 비해 낮게 평가되었을 가능성이 존재한다. 즉 기존 인프라가 이미 일정 수준 이상 구축된 대도시권에서는 폭염 대응 기술 도입에 따른 추가적 편익이 상대적으로 낮을 수 있음을 시사한다. 서울과 경기 뿐만 아니라 부산, 대구, 인천 등 주요 광역시의 기술별 BCR 값이 전국 평균에 비해 낮게 나타난 것 역시 이러한 점이 반영된 것으로 볼 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 폭염의 심화로 인해 각 지역에서 발생하는 경제적·사회적 손실을 줄이기 위해 설치된 쿨링포그·쿨루프·옥상/벽면녹화·그늘막 등 4개의 폭염 대응 기술의 경제성을 분석하였다. 분석은 전국 17개 시도를 대상으로 2016년부터 2022년까지의 데이터를 활용하여 수행되었으며, 폭염 피해액은 온열질환 진료비와 노동생산성 손실액의 합으로 정의되었다. 노동생산성 손실액은 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)를 기반으로 시간당 노동생산성 감소 비중을 추정하여 그 비율과 매년 5월~9월의 총 임금 지불액을 곱함으로써 산출되었다. 최종적으로 각 기술의 적용으로 인한 폭염 피해액의 감소분을 해당 기술의 편익으로 정의하였다.

분석은 2단계 회귀분석 접근법을 통해 수행되었다. 1단계 회귀분석에서는 각 폭염 대응 기술의 한 단위 설치가 설치 지역의 물리부문 기후탄력성 지표에 미치는 한계효과를 추정하였다. 분석 결과, 쿨링포그, 쿨루프, 옥상/벽면녹화, 그늘막 모두 각 기술의 도입이 물리부문 기후탄력성 지표를 통계적으로 유의하게 상승시키는 것으로 나타났다. 2단계 회귀분석에서는 폭염 피해액과 기후탄력성 지표(HWRI) 및 기상변수(폭염 빈도, 지속일수, 강도 등) 간의 관계를 분석하여, HWRI가 한 단위 변화할 때 폭염 피해액에 미치는 한계효과를 추정하였다. 추정결과, HWRI의 증가는 대다수의 지자체에서 폭염 피해액 감소에 기여하는 반면, 폭염 지속일수, 폭염 강도, 최대폭염일수 등의 기상변수는 피해액을 유의하게 증가시키는 것으로 분석되었다.

편익 추정 결과, 평균적으로 쿨링포그는 1개소당 약 891.7만 원, 쿨루프는 $1m^2$ 당 약 3.7만 원, 옥상/벽면녹화

7) 2024년 12월 최고 원·달러환율인 1,443원/달러를 활용하였음.

8) 행정안전부의 그늘막 설치·관리 지침에 따른 최소 내구연한을 적용함.

는 1 m²당 약 12.6만 원, 그늘막은 1개소당 약 43.2만 원의 폭염 피해액 감소 효과가 추정되었다. 각 기술의 설치 비용 및 운영비용을 고려한 편익-비용비(BCR) 분석 결과, 쿨링포그 0.80, 그늘막 0.86로 도출되었으며, 쿨루프와 옥상/벽면녹화의 전국 평균 BCR이 각각 1.66와 2.60로 나타나 경제적 타당성이 확보된 것으로 분석되었다.

한편, 시도별 폭염 대응 기술 설치의 편익은 폭염 기후탄력성 수준에 따라 상이한 것으로 나타났다. 이는 폭염 피해액 감소효과는 \widehat{HWR}_i 에 대해 체감하고, \widehat{HWR}_i 는 물리 부문 외의 경제·사회·거버넌스·인구 등 다른 부문의 지표의 영향 역시 받기 때문인 것으로 해석될 수 있다. 예를 들어, 물리 부문 이외 부문의 지표가 충분히 높은 서울·경기 등의 도시에서는 폭염 대응 기술 설치의 한계편익이 작아 각 기술의 경제성이 타 지역 대비 상대적으로 낮은 것으로 도출되었으며, 강원·제주 등 폭염 기후탄력성 지수가 낮은 지역에서는 기술 설치의 한계편익이 크게 나타나 각 기술의 경제성이 높은 것으로 분석되었다.

이러한 BCR 분석 결과는 폭염 대응 기술이 기후탄력성을 강화하고 폭염으로 인한 경제적 손실을 실질적으로 감소시킬 수 있음을 보여준다. 특히 쿨루프와 옥상/벽면녹화의 높은 BCR은 이들 기술이 상대적으로 낮은 비용으로 큰 효과를 발휘할 수 있음을 시사하며, 기후변화에 따른 이상기후 대응 정책에 있어 중요한 역할을 할 수 있음을 의미한다. 또한 지역별 기후 특성과 인프라 수준에 따른 기술 도입 효과가 상이하다는 사실은 지역 특성과 그로 인한 편익 차이를 고려한 맞춤형 정책 수립이 필요하다는 시사점을 제시한다.

본 논문은 각 지자체별로 각각 관리하던 폭염 대응 기술 설치자료를 모두 취합하여 전국 17개 시도를 대상으로 분석을 시도하였다는 점, 2단계 회귀분석을 활용하여 특정 지역이 보유한 경제, 사회 행정 체계의 취약성과 적응 능력 측면의 기저효과를 고려한 기술별 경제성을 계측하였다는 점에서 차별성이 있으며, 폭염 피해액으로 전국의 온열질환 진료비용과 노동생산성 손실액을 모두 고려함으로써 폭염으로 인한 직·간접적인 피해를 함께 계측하였다는 의의가 있다.

본 논문에서 제시된 기술별 경제성 분석 결과는 향후 폭염 대응 기술 보급 정책 수립 및 재정 지원 방안 마련 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 지속적인 데이터 수집 및 모니터링을 통해 기술의 장기적 편익을 계측하고, 본 논문에서 분석되지 못한 폭염 대응 기술에 대한 추가적인 분석을 통해 각 기술 간의 상호보

완적 효과와 지역별 특성을 반영한 최적의 기술 조합, 통합적 대응 체계 구축에 관한 심층적 분석이 이루어진다면 폭염으로 인한 경제·사회적 피해를 최소화하는 포괄적 대응 전략 수립 시 유용한 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 본 논문에서는 각 기술의 설치량 증가에 따라 나타나는 규모의 경제 효과 및 서로 다른 기술이 함께 적용되었을 때 나타나는 기술간 시너지 효과는 고려되지 못하였다는 한계가 존재한다. 따라서 후속 연구에서는 편익 산출 시 이를 반영할 수 있는 방안이 고려되어야 할 필요가 있다.

마지막으로 본 논문에서 편익은 지역별로 추정되었으나 비용은 지역별로 동일한 자료를 사용했다는 점도 한계로 남는다. 편익-비용비 분석을 통해 엄밀한 지역별 경제성 분석을 위해서는 비용 역시 지역별로 추정되어야 하나, 자료의 한계로 각 지역별로 동일한 비용을 적용하였다. 후속 연구에서는 각 지역의 특성을 반영한 비용 산정 모형을 개발함으로써 보다 정교한 지역별 경제성 분석을 수행할 필요가 있다.

사사

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(RS-2022-KE002102).

Reference

- Bae MK. 2018. Hongcheon 41°C, ‘official Korean Peninsula record’ broken after 76 years...Seoul 39.6 degrees, hottest in 111 years; [accessed 2025 Feb 10]. <https://www.khan.co.kr/article/201808011123001>
- Baik YS, Kim KS, An DH. 2024. Spatial distribution analysis of climate resilience index in heavy rainfall: The case of Seoul (in Korean with English abstract). *Korea Spatial Plann Rev* 122: 119-138. doi: 10.15793/kspr.2024.122..007
- Cai W, Zhang C, Zhang SH, Bai YQ, Callaghan M, Chang N. 2022. The 2022 China report of the Lancet Countdown on health and climate change: Leveraging climate actions for healthy ageing. *Lancet Public*

- Health 7(12): 1073-1090. doi: 10.1016/S2468-2667(22)00224-9
- Hwang JH. 2024. An economic evaluation of resilience to climate-related extreme events: Evidence from extreme rainfall in South Korea [thesis]. Seoul National University.
- ILO. 2019. Working on a warmer planet: The effect of heat stress on productivity and decent work.
- Jungrang District Council. 2021. 4th Welfare Construction Committee Meeting, 252th Seoul Jungrang District Council Meeting, Welfare Construction Committee Meeting Minutes.
- Just RE, Pope RD. 1978. Stochastic specification of production functions and economic implications. *J Econom* 7(1): 67-86. doi: 10.1016/0304-4076(78)90006-4
- Just RE, Pope RD. 1979. Production function estimation and related risk considerations. *American J Agric Econ* 61(2): 276-284. doi: 10.2307/1239732
- Kim JH, Yoon YH. 2011. Economic analysis and energy reduction by the types of the green roof (in Korean with English abstract). *Seoul Stud* 12(2): 125-140. doi: 10.23129/seouls.12.2.201106.125
- Kim JK, Kang JS. 2022. Evaluating the efficiency of fog cooling for climate change adaptation in vulnerable groups: A case study of Daegu Metropolitan City. *Build Environ* 217: 109120. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109120.
- Kim JY, Park JH, Cho BH, Lee SS. 2020. A comparative analysis of disaster vulnerability factors between declining areas and urban areas. *J Digital Contents Soc* 21(11): 2021-2032. doi: 10.9728/dcs.2020.21.11.2021
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2016. Development of information for life-weather and improvement of its service in 2016.
- Korean Ministry of Employment and Labor. 2024. Urgent review of heat illness prevention guides as heatwave warnigs; [accessed 2025 Feb 10]. https://www.moel.go.kr/news/enews/report/enewsView.do?news_seq=16651
- Korean Ministry of Environment. 2022. 2nd year report of evaluation of technology on securing climate resilience in urban space and the development of the decision-making support system.
- Lee GE, Cho HN. 2024. Analysis and improvement of regional heatwave policy through in-depth interviews with public officials (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 15(6): 1051-1062. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.6.1051
- Lee HK, Lee MK, Ju JH, KIM HB. 2020. A cost-benefit analysis for urban heat island mitigation policy: Focused on the installation of green and cool roofs in Seoul (in Korean with English abstract). *J Korean Plann Assoc* 55(5): 97-108. doi: 10.17208/jkpa.2020.10.55.5.97
- Lee JS, Kim KR, Cho CB, Kang MS, Ha JC, Kim DS. 2019. Evaluating the accuracies of the WBGT estimation models and their onsite applicability in Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitigation* 19(4): 53-63. doi: 10.9798/KOSHAM.2019.19.4.53
- LX. 2024. 2023. Urban planning statistics; [accessed 2025 Jan 2]. <https://www.lx.or.kr/kor/publication/city/list.do>
- Manso M, Teotnio I, Silva CM, Cruz OC. 2021. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable Sustainable Energy Rev* 135: 110111. doi: 10.1016/j.rser.2020.110111
- Park JH. 2022. Current status and implications of local governments' heat wave measures. *KRIHS. WP*: 22-32.
- Park SW, Hwang JY, Kim HE, Lee YJ, Kim JH, Ahn YJ. 2023. Results of the 2022 heat-related illness surveillance. *Public Health Wkly Rep* 16(9): 241-252. doi: 10.56786/PHWR.2023.16.9.1
- Parsons LA, Shindell D, Tigchelaar M, Zhang YQ, Spector JT. 2021. Increased labor losses and decreased adaptation potential in a warmer world. *Nat Commun* 12, 7286. doi: 10.1038/s41467-021-27328-y
- Perkins-Kirkpatrick SE & Gibson PB. 2017. Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature. *Sci Rep* 7: 12256. doi: 10.1038/s41598-017-12520-2
- Pyon HS. 2022. Policy proposal for the effectiveness and

- promotion of rooftop greening. Chungbuk Research Institute. Chungbuk Focus: 207.
- Seong JH, Lee KR. 2023. A study on the establishment of heat-vulnerable areas and temperature reduction facilities: Case study of Daegu Metropolitan City. *J Korean Soc Geospatial Inf Sci* 31(3): 69-78. doi: 10.7319/kogsis.2023.31.3.069
- Stull R. 2011. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *J Appl Meteorol Climatol* 50: 2267-2269. doi: 10.1175/JAMC-D-11-0143.1
- William R, Goodwell A, Richardson M, Le PVV, Kumar P, Stillwell AS. 2016. An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. *Ecol Eng* 95: 1-9. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.091
- Yaglou CP, Minard D. 1957. Control of heat casualties at military training centers. *Arch Ind Health* 16(4): 302-316.
- Yang HJ, Yoon HY. 2020. Evaluating the effectiveness of heat-wave adaptation policies against climate risk: Application of local-level health impact assessment (in Korean with English abstract). *J Korean Plann Assoc* 55(2): 101-110. doi: 10.17208/jkpa.2020.04.55.2.101
- Yoon EJ, Lee DK, Kim H, Choi KL. 2016. Vulnerable homogeneous hotspot areas of the industrial sector for the climate change - Focused on mitigation and adaptation perspective - (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 7(1): 69-75. doi: 10.15531/ksccr.2016.7.1.69