

폭염 대응 예산의 사망 감소 효과와 최적 배분

서울시 25개 자치구를 중심으로

최희도¹, 임철희^{2†}

¹국민대학교 기후기술융합학과, ²국민대학교 산림환경시스템학과

Global Climate Change, Innovative Modeling and Monitoring (CLIM) Laboratory
Kookmin University

01. 연구배경

1

연구 배경

폭염은 전 세계적으로 증가하는 **치명적 기후위협**이며, 한국의 도시환경에서 **정책적 대응이 시급**
그러나 예산과 사망 간의 **역인과성**으로 인해, 폭염 대응 예산의 **인과적 효과**는 충분히 규명되지 않음

전지구적 폭염 사망 증가

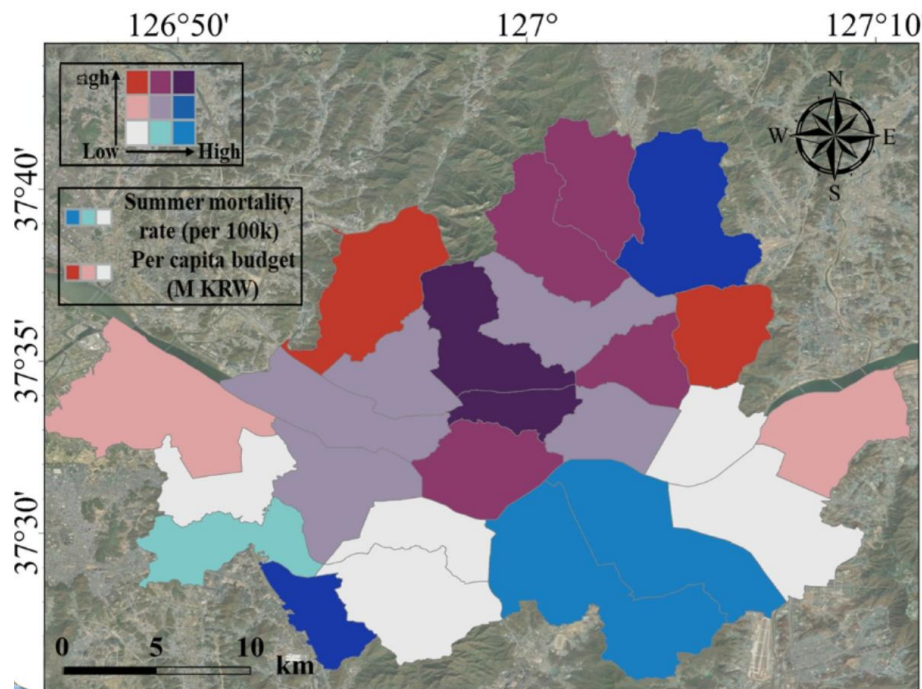
- ✓ 전 세계 폭염 관련 사망 연평균 153,000명
- ✓ 아시아 지역 집중 전체의 약 45%
- ✓ 동아시아만으로도 연 24,000명 (15.73%)

(Zhao et al., 2024)

한국의 기후 구조적 취약성

- ✓ 극한 고온의 빈도·강도 증가 전망
- ✓ 초고령화 사회로의 급격한 진행
- ✓ 기후 적응 자원 수요, 국제 공공 자원의 10~18배

(Gasparrini et al., 2017; Kim et al., 2022; UENP, 2023)



서울시의 역인과성 분포

- 세입 세출 예산 분포
- 폭염 초과 사망 분포

1. 폭염 대응 예산은 사망률을
인과적으로 얼마나 감소시키는가?

2. 운영비와 자본투자의 한계 효과와
시간 구조는 어떻게 다른가?

3. 지역 특성에 따른 정책의
이질적 효과를 반영한 최적 배분은?

내생성을 교정한 인과 추정과 이질성·구성·시간 구조를 통합하여, 정책적 해답을 찾고자 함

폭염은 전 세계적으로 증가하는 **개별 경로에 대한 분절적 증거는 축적되었으나**,
그러나 예산과 사망 간의 **역인과성**으로 인해, 폭염 대응 예산의 **인과적 효과**는 충분히 규명되지 않음

개별 경로 효과에 대한 실증 연구

■ 냉방 인프라 확산

- 냉방기 보급, 전력 접근성 향상
 - 폭염 사망률 감소
- (Barreca et al., 2016; Ibbetson et al., 2021)

■ 도시 녹지

- 녹지 및 수목의 열섬 완화
 - 폭염 사망 저감의 기여
- (Choi et al., 2022; Burkart et al., 2015)

■ 사회, 의료, 복지 개입

- 의료보험, 지역계층 지원
 - 사회적 보호의 완화
- (lungman et al., 2023; Cohen & Dechezleprêtre., 2022)

지방정부 지출의 인과추정 연구

높은 사망 위험
(Y↑)

역인과성

높은 예산 배분
(X↑)

관찰된 양의 상관관계
(Bias ↑)

- 사망 위험이 높은 지역에 예산 집중
- 단순 상관/OLS 추정은 과소추정될 가능성
- 적절한 식별 전략의 연구는 매우 제한적

구성-시간 구조 및 이질성 관련 연구

■ 시간 지연 효과 구조

- 인프라 투자의 효과
 - 가동 준비 기간 이후의 발현
- (Aschauer, 1989; Almon, 1965)

■ 도시 녹지

- 운영비와 자본투자의 효과 차이
- (Devarajan et al., 1996)

■ 이질적 효과 및 최적 배분

- 지역 특성 기반의 이질적 효과
- (Muccione et al., 2024; Jay et al., 2021)

01. 연구배경

3 연구 목적 및 접근법

도구변수(Instrumental Variable)

예산은 체계적으로 움직이되(관련성),
사망에는 오직 예산을 통해서만 작용하는(배제성) 외생 변수
→ 사망 위험과 무관한 '예산의 외생적 변동분'만 분리하여,
역인과·교란이 제거된 인과효과 β 를 식별

핵심 식별전략 : IV-2SLS 모형

1단계(도구변수 회귀)

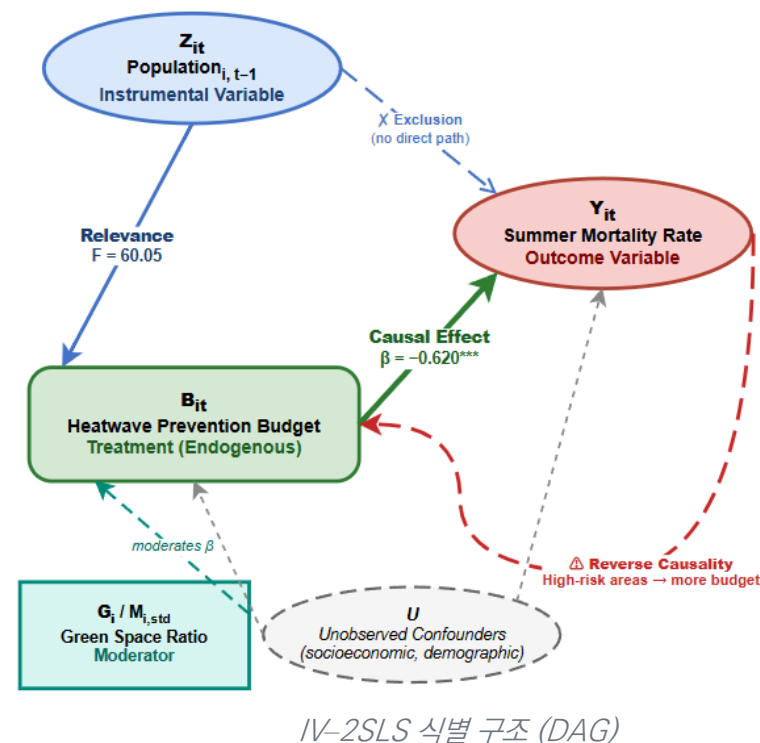
$$\log(\text{Budget}_{it}) = \pi_0 + \pi_1 \cdot Z_{it} + \delta' X_{it} + \mu_i + \lambda_t + u_{it}; Z_{it} = \text{Population}_{i,t-1}$$

- 내생 변수인 예산을 외생 도구변수(전년도 구별 인구)에 회귀하는 자치구·연도 이원고정효과 2SLS의 1단계
- 전년도 구별 인구(Z_{it})를 도구변수로 당해 예산을 회귀, 예산의 외생 변동 성분만을 예측값 $\log(\text{Budget})$ 로 추출
- 관련성(Relevance): 인구 규모가 지방교부세·행정수요 산정을 통해 예산을 체계적으로 결정($F = 60.05$)

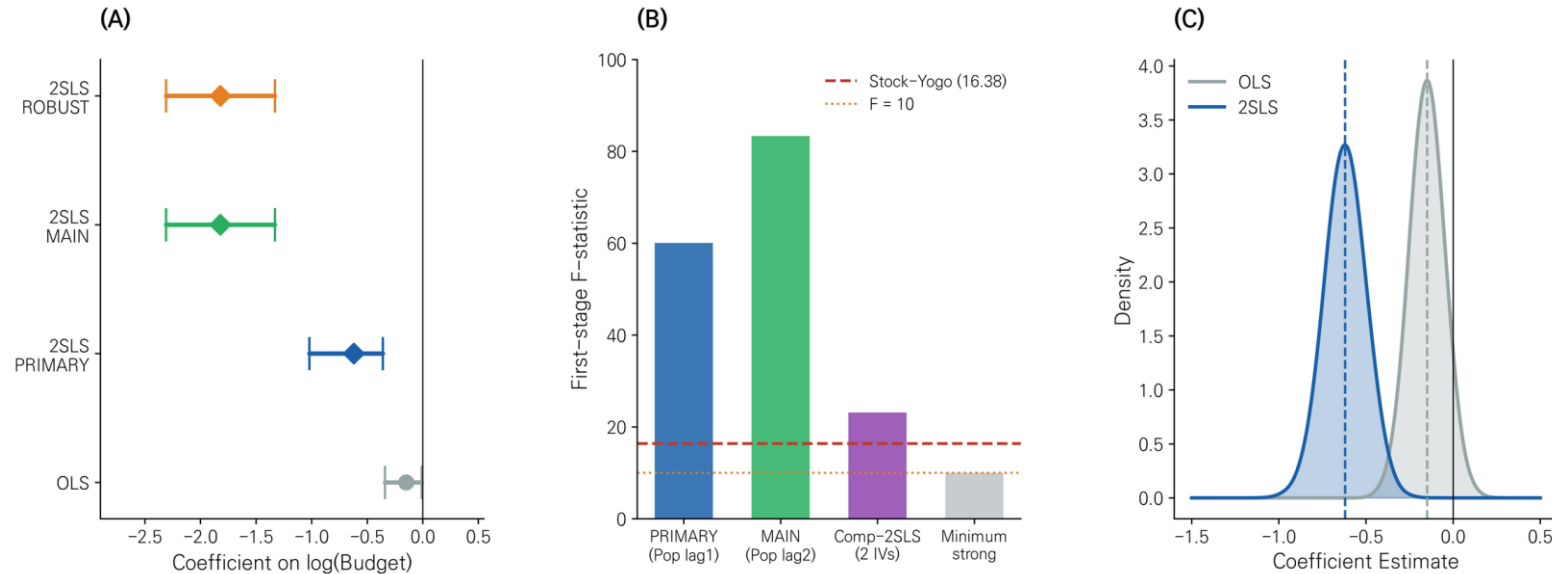
2단계(구조방정식)

$$Y_{it} = \alpha + \beta \cdot \log(\widehat{\text{Budget}}_{it}) + \delta' X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

- 1단계의 외생 예측 예산만으로 사망률을 추정, 역인과성·누락변수 편의가 제거된 인과효과 β 를 식별
- 인구 변화에 반응한 예산 변동 구간의 국소평균처치효과(LATE)로 해석
- 추정 계수 β : 예산 1 log 증가 시 사망률이 변화하는 인과효과



도구변수(Instrumental Variable) 타당성 검증



도구변수 타당성 진단 — (A) OLS vs 2SLS 계수 · (B) 1단계 F-통계량 · (C) 계수 분포

조건	검정 (Test)	통계량 · 결과
관련성	1단계 F-통계량	$F = 60.05$ ($\gg 16.38$ Stock-Yogo · 10 Staiger-Stock)
외생성	Granger 인과성 검정	인구→예산 유의 ($p=.007$) · 예산→인구 비유의 ($p=.336$)
배제성	Sargan-Hansen 과식별	$J = 10.336$ ($p=.001$) → population_lag1 단독 1차 도구 확정
	겨울 사망 위약 검정	$\beta = -0.127$ ($p=.443$) → 폭염 특이적 (겨울엔 비유의)
강건 추론	Durbin-Wu-Hausman 내생성	$t = 4.639$ ($p<.001$) → 2SLS 사용 정당화
	Anderson-Rubin 95% CI	$[-1.020, -0.360]$ (약도구 강건, 0 미포함)
	Specification curve (1,788 명세)	$\beta < 0$ 100% · $p < .05$ 100%

Notes: HC1 이분산 강건 표준오차, 자치구·연도 이원고정효과, $N = 225$. Anderson-Rubin은 약도구에 강건한 신뢰구간.

02. 연구 방법론

1 데이터 및 연구 프레임워크

1) 데이터 개요

N = 225

서울 25개 자치구 × 9개 연도 균형 패널

기간 2011-2019년 (9개 연도)

공간 서울특별시 25개 자치구

결과 여름철(6-9월) 사망률

- ✓ 2010년 — 초기 자본 스톡 구성에만 사용 (분석 제외)
- ✓ 2020년~ — 코로나19 구조적 충격으로 제외

2) 주요 변수 구성

구분	변수	정의	단위
결과변수 (Y)	여름철 사망률	6-9월 인구 1만명당 월평균 사망률	명/만명
처치변수 (D)	1인당 폭염 대응 예산	폭염 총지출 ÷ 주민등록인구	백만원
지출 구성	운영비 (Op)	즉각적 서비스 (쉼터·돌봄·특보·냉방)	백만원
	자본투자 (Cap)	인프라·장비 (자본 스톡 축적)	백만원
조절변수	녹지면적	공원·녹지 면적 (2010년 기준, 시간불변)	km ²
통제변수 (X)	14개 변수	기후 6 · 인구사회경제 5 · 환경 3	—

자료원: 통계청 · 서울시 열린재정 · 기상청 ASOS · 서울 열린데이터광장

3) 예산 구성 현황 (2011-2019 평균)



자본투자 32.8%

운영비 67.2%

세부: 시설투자 32.8 · 기타 48.4 · 복지지원 14.0 · 재난예비 4.8 (%)

5) 연구 프레임워크

- 1 인과추정
ATE · IV-2SLS
- 2 이질적 처치효과
HTE · 녹지 조절
- 3 구성·시간 구조
Op vs Cap · DLM
- 4 최적 배분
공간·구성 최적화
- 5 편익-비용 분석
BCA · 20년 동태

내생성을 교정한 인과효과를 기반으로, 지역 이질성과 예산 구성·시간 구조를 통합하여 공간·구성 최적화 및 20년 동태 편익-비용 분석을 수행

본 연구는 인과추정 · 이질성 · 구성·시간 구조 · 최적화 · 편익-비용 분석을 통합한 프레임워크로, 각 단계의 추정치가 다음 단계의 직접 입력이 되어 정책적 가치를 도출



03. 연구 결과

1

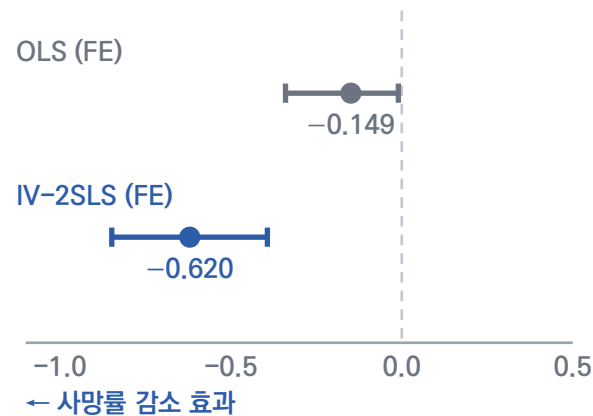
ATE

IV-2SLS 추정 결과, 1인당 폭염 대응 예산이 1 log-unit 증가할 때 여름철 사망률(인구 1만명당)은 **0.620명 감소**하며,
OLS 단순 상관은 역인과성으로 효과를 **4.2배 과소추정**

주요 결과 (사망률, 1만명당)

모형	OLS (FE)	IV-2SLS (FE)	차이
1인당 예산 (log)	-0.149	-0.620***	4.2배
95% 신뢰구간	[-0.340, -0.010]	[-0.848, -0.393]	-
관측치 (N)	225	225	-
도구변수 (전년도 인구)	-	✓	-
구·연도 고정효과	✓	✓	-
통제변수	14개	14개	-

계수 추정치 비교 (95% CI)



강건성 검정

검정 항목	결과	판정
약도구 강건 CI (AR)	[-1.020, -0.360]	0 미포함
내생성 (DWH)	t = 4.639	p < .001
과식별 (Sargan J)	10.336	lag1 확정
위약 (겨울 사망률)	$\beta = -0.127$	p = .443
명세곡선 (1,788)	음수·유의	100%

핵심 결과

- ✓ 예산 log 1단위 ↑ → 여름철 사망률(1만명당) **0.620 감소** (SE 0.116, p < 0.001) · 1단계 F = 60.05
- ✓ 단순 상관(OLS -0.149) 대비 **4.2배 과소추정** : 역인과 교정의 결정적 차이
- ✓ Anderson-Rubin · DWH · Sargan · 겨울 위약 · 명세곡선 1,788개 전반에서 음수·유의 유지

역인과성을 교정한 인과추정 결과, 폭염 대응 예산은 여름철 사망률을 유의하게 감소시키며, 이는 정책적 투자 확대의 근거가 된다.

03. 연구 결과

2

HTE + TE 도출

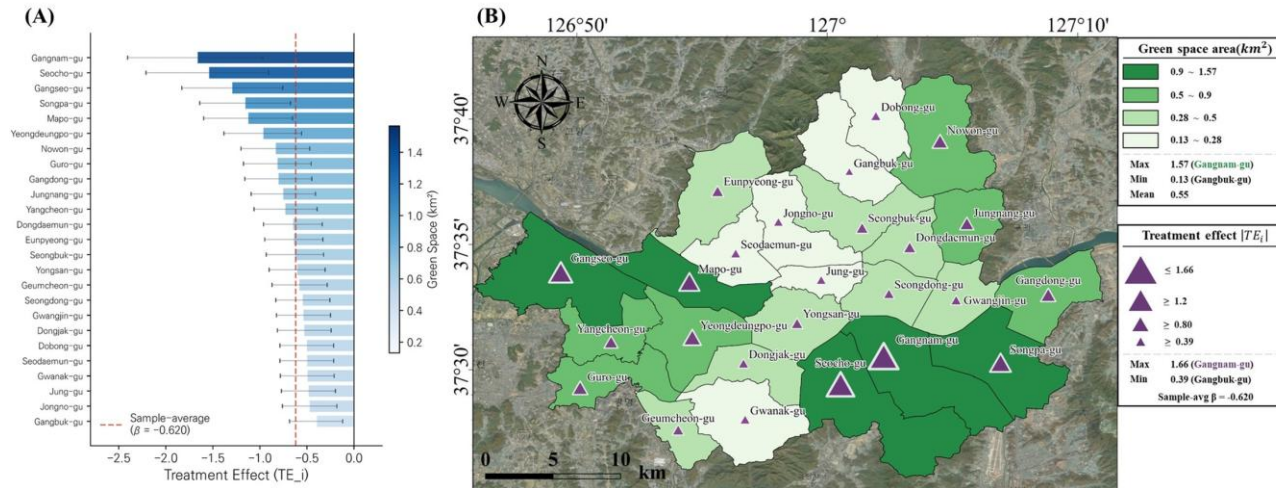
녹지면적이 넓을수록 동일 예산의 사망 감소 효과가 유의하게 커지며 ($\beta_2 = -0.315, p < 0.001$),
자치구별 처치효과는 **최대 4.22배**의 격차를 지님

방법론 · 모형

평균효과 식 : $Mortality_{it} = \alpha + \beta \ln(\widehat{Spending})_{it} + \delta' Controls_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \rightarrow \beta$ 를 녹지의 함수로 확장 : $\beta = \beta_1 + \beta_2 \cdot Green$

이질성 식 : $Mortality_{it} = \alpha + \beta_1 \ln(\widehat{Spending})_{it} + \beta_2 (\ln(\widehat{Spending}) \times GreenSpace)_{it} + \beta_3 GreenSpace_i + \delta' Controls_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$

도출 : $\frac{\partial Mortality_{it}}{\partial \ln(\widehat{Spending})} \rightarrow TE_i = \beta_1 + \beta_2 \times GreenSpace_i$ · 이중 도구변수 2SLS + Wild Cluster Bootstrap



자치구별 이질적 처치효과 (A) 녹지면적 순 구별 TE_i · (B) 공간 분포 (녹지 choropleth + $|TE_i|$)

핵심 결과

✓ $\beta_1 = -0.738$ (평균 녹지에서 예산효과) $\beta_2 = -0.315$ (SE 0.078, WCB 95% CI [-0.499, -0.163]) · 1단계 F = 30.76

→ 녹지 1SD ↑ 자치구에서 예산 효과 0.315 더 큼

✓ 구별 처치효과 TE_i : 강남구 -1.661 ~ 강북구 -0.394 → 최대 **4.22배** 격차 (공간·구성 공동 최적화 핵심 입력)

✓ 도구변수 2종 × 통제 2세트(4조합) 전부 $\beta_2 < 0$ ·유의 → 녹지비율 대신 절대면적이 안정적 조절변수

녹지는 인공 냉각의 '대체재'가 아닌 '보완재'이며, 예산의 생명구제 효과는 이질적이고, 자치구 특성을 반영한 차별화된 투자전략이 정책 효율성을 극대화한다. 9

03. 연구 결과

3 자본 vs 운영

같은 예산도 자본투자가 운영비의 1.504배 효과적이며, 그 효과는 2년 시차에서 발현 : '무엇에 · 언제' 쓰느냐가 효과를 좌우

방법론 · 모형

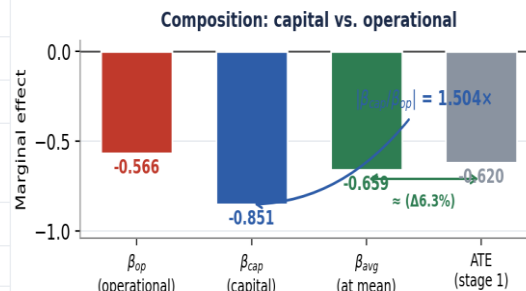
구성효과: $Mortality_{it} = \alpha + \beta_{base} \cdot \ln(Spending)_{it} + \beta_{diff} \cdot [\ln(Spending) \times CapitalShare_t]_{it} + \delta' Controls_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$

분산시차: $Mortality_{it} = \alpha + \sum_{k=0}^K \beta_k^{cap} \cdot Capital_{i,t-k} + \beta^{op} \cdot Operational_{it} + \delta' Controls_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$

자본탄력성: $\ln(Mortality)_{it} = \alpha - \gamma \cdot \ln(CapitalStock)_{it} + \delta' Controls_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$ $\beta_{cap} = \beta_{base} + \beta_{diff}$

Panel A · 구성효과 (운영 vs 자본)

모수	의미	추정치 (SE)
β_{base}	운영비 효과	-0.566*** (0.111)
β_{diff}	자본 차등효과	-0.285** (0.108)
β_{cap}	자본 통합효과	-0.851
$\frac{\beta_{cap}}{\beta_{base}}$	자본/운영 배율	1.504x
$\beta_{avg} (\bar{\alpha} = .328)$	내부일관성	-0.659
ATE	평균효과 대조	-0.620***
$SW - F_1 / F_2$	1단계 강도	15.46 / 59.59
N	표본	225



Panel B · 분산시차 (시간구조)

Lag K	β_0	β_1	β_2	$\Sigma \beta$	AIC
K=0	-0.109	—	—	-0.109	38.4
K=1	+1.736	-3.751***	—	-2.015	399.8
K=2 ▶	+0.549	+0.200	-2.367***	-1.618	255.2
K=3	+1.192	-0.652	-2.954***	-2.406	331.3

K=2 채택 (β_3 p=.981 탈락) · 누적 $\Sigma \beta$ WCB 95% CI [-3.900, -0.863]

핵심 결과

구성: 자본 통합효과 $\beta_{cap} = -0.851$ 이 운영비 $\beta_{op} = -0.566$ 의 1.504배 · 내부일관성 $\beta_{avg} = -0.659 \approx ATE -0.620$ (편차 6.3%)

시차: 자본 효과는 2년 시차에서 발현 ($\beta_2 = -2.367***$) · 탄력성 $\hat{\gamma} = 0.25 \rightarrow$ 4단계 동태 최적화 입력

➡ 예산은 '무엇에(운영 vs 자본) · 언제(2년 시차)' 쓰느냐가 효과를 좌우한다

운영비 증액과 초기 투자·자본 확충을 통합 최적화한 결과, 제한된 예산에서 구조적 투자 확대가 연간 +14.5%(58.1명)의 추가 생명구제, 이득은 총량이 아닌 '구성 효율화'에서도 창출 가능

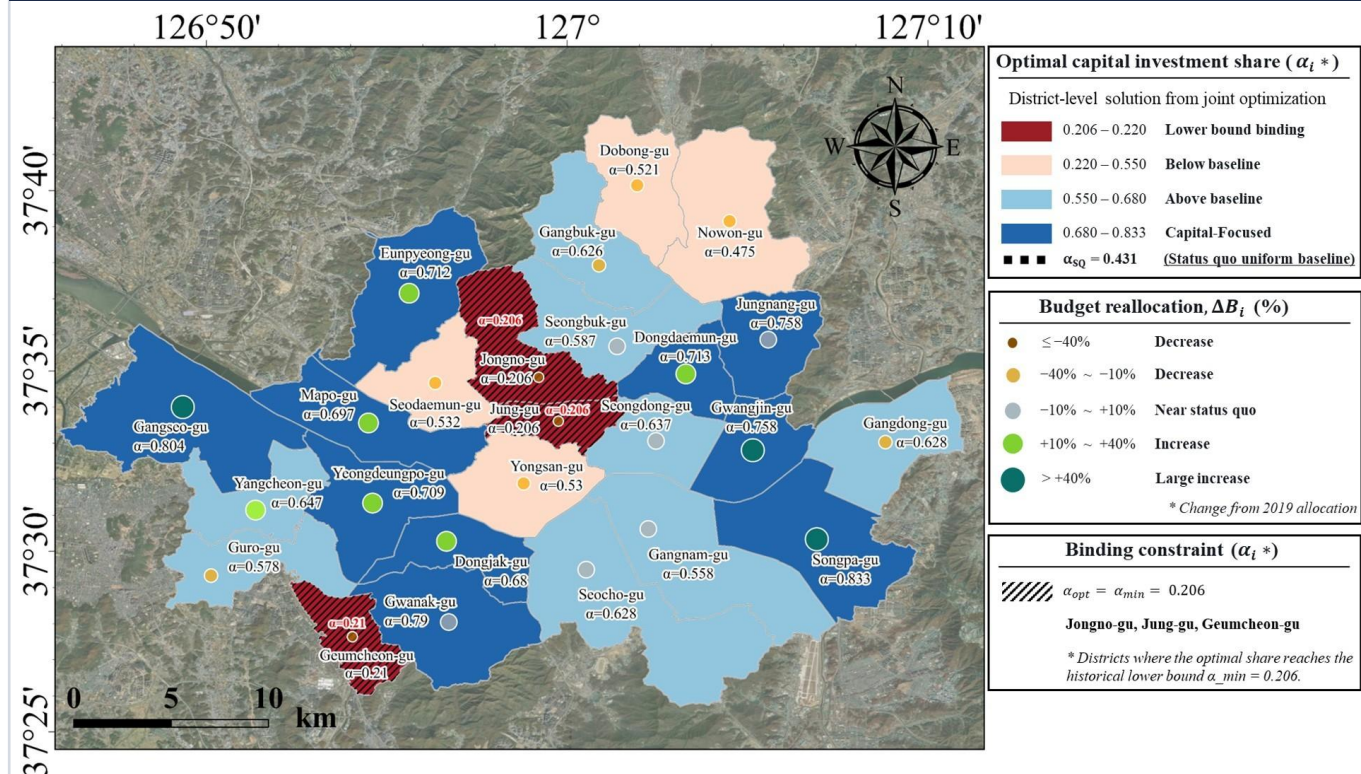
방법론 · 모형

통합 처치효과 : $TE_i(\alpha_i) = \beta_{base} + \alpha_i \beta_{diff} + \beta_2 \cdot GreenSpace_{i,std}$ (구성효과 + 이질성 결합)

목적함수 : $\min_{B_i, \alpha_i} \sum_{i=1}^{25} TE_i(\alpha_i) \cdot B_i^Y \text{ s.t. } \sum_{i=1}^{25} B_i = B, B_i \geq B_i^{min}, \alpha_{min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{max,i}$

$TE_i < 0$ 이므로 최소화 = 생명 최대화 · 50개 결정변수(예산·자본비율 각 25개) · Block Coordinate Descent (예산단계 ↔ 자본단계 교차 반복)

① 최적 자본투자 배분 (구별 최적비율)



운영비 증액과 초기 투자·자본 확충을 통합 최적화한 결과, 제한된 예산에서 **구조적 투자 확대가 연간 +14.5%(58.1명)의 추가 생명구제**, 이득은 **총량이 아닌 '구성 효율화'**에서도 창출 가능

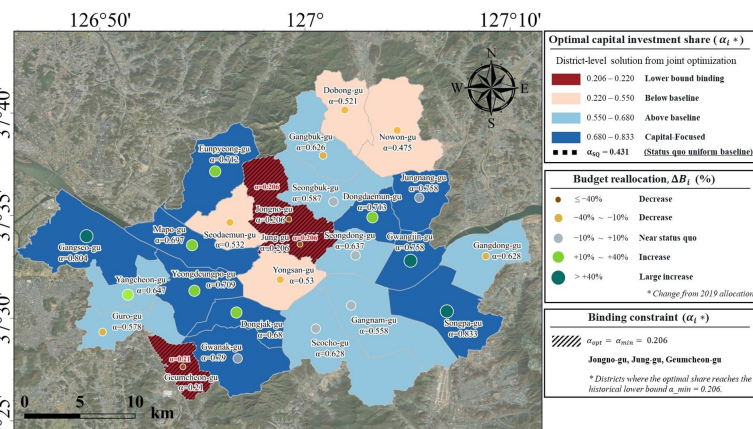
방법론 · 모형

통합 처치효과 : $TE_i(\alpha_i) = \beta_{base} + \alpha_i \beta_{diff} + \beta_2 \cdot GreenSpace_{i,std}$ (구성효과 + 이질성 결합)

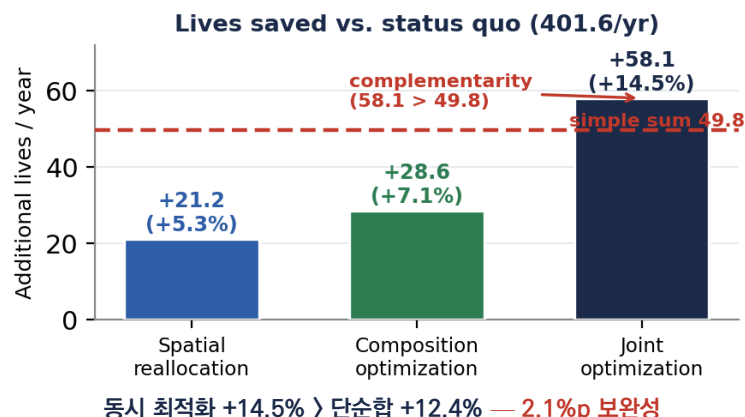
목적함수 : $\min_{B_i, \alpha_i} \sum_{i=1}^{25} TE_i(\alpha_i) \cdot B_i^Y \text{ s.t. } \sum_{i=1}^{25} B_i = B, B_i \geq B_i^{min}, \alpha_{min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{max,i}$

$TE_i < 0$ 이므로 최소화 = 생명 최대화 · 50개 결정변수(예산·자본비율 각 25개) · Block Coordinate Descent (예산단계 ↔ 자본단계 교차 반복)

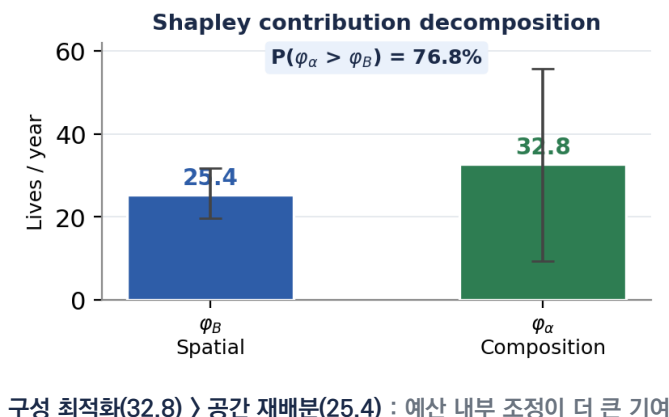
① 최적 자본투자 배분 (구별 최적비율)



② 시나리오별 추가 구제 (연간)



③ Shapley 기여 분해



핵심 결과

- ✓ 공간·구성 동시 최적화로 **연간 58.1명(+14.5%) 추가 구제** — 예산 총량 확대 없이 두 수단의 보완성(단순합)에서 창출
- ✓ Shapley 분해: 구성 최적화 기여(32.8) > 공간 재배분(25.4) (우위 확률 76.8%) : '총량'보다 '구성', 자치구 간 이해충돌 없이 즉시 실행 가능

폭염 대응은 구조적 투자(자본)와 지속적 운영의 균형, 통합 최적화가 제한된 예산에서 생명구제를 극대화하는 실행 가능한 처방이다.

5 동태 편익-비용 분석 (Dynamic BCA)

생명구제 효과를 화폐가치로 환산해 비용과 비교한 결과, 20년 $BCR = 10.46$, $NPV = 12.7$ 조원
1원의 투자가 **10.46원의 사회적 편익**으로 작용

방법론 · 모형

편익 : $Benefit_t = VSL \cdot (1 + g_{GDP})^t \cdot \Delta L_t$ 비용-편익비(식 15): $BCR = \frac{\sum_{t=1}^{20} Benefit_t / (1+r)^t}{\sum_{t=1}^{20} Cost_t / (1+r)^t}$
모수(국제표준): VSL 79억원/명(OECD 2025, USD 7.1M→KRW 7.915십억)
사회적 할인율 $r=3.95\%$ (KDI) · GDP성장 $g=2.0\%$ · T=20년 · 유지보수=예산증분 3% · 탄력성 = 0.25

① 동태 BCA 핵심 결과

20년 편익-비용비 (BCR)

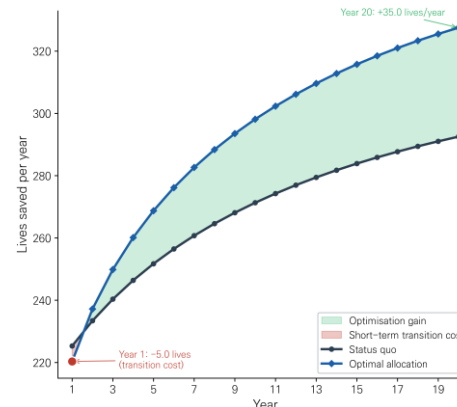
10.46

20년 순현재가치 (NPV)

12.7조원

1원 투자 → 10.46원 사회적 편익

② 20년의 경로



1년차 -5명(자본 전환비용) → 2년차 양(+)전환 → 20년말 연 +35명

③ 강건성 (불확실성 검정)

검정 항목	결과
Monte Carlo 95% CI (N=10,000)	[6.25, 15.07]
$P(BCR > 1)$	100.0%
할인율 $r = 2\% / 15\%$	10.57 / 9.93
VSL 대안 5종	5/5 모두 >1
모든 시나리오에서 $BCR > 1$ — 결론 강건	

핵심 결과

- ✓ 20년 BCR 10.46 · NPV 12.7조원 : 1원 투자가 10.46원의 사회적 편익으로 환원되는 고수익 정책
- ✓ Monte Carlo·할인율·VSL 전 시나리오에서 $BCR > 1$ (P=100%) : 현행 적응 투자는 명백한 과소투자 상태

➔ 동태 BCA는 폭염 대응이 단기적 지출이 아니라 장기적 사회적 편익을 창출하는 정책이다.

- ✓ 도시 기후 적응 예산의 인과효과 식별·과소추정 보정
- ✓ 구성·시차·공간 구조가 생명구제의 정도를 결정함을 규명
- ✓ 예산 효과의 이질적·구성적·동태적 구조 규명

01

역인과성 교정과 인과 증거의 확장

지방정부가 고위험 자치구에 예산을 선별 집중하는 관행은 고예산·고사망의 공간적 중첩을 강화해 관찰 자료에서 예산 효과를 약화·역전시킨다. 단순 상관(OLS)이 참 효과를 4.2배 과소추정해왔음을 실증하고 인과적 증거 기반을 도시 기후 적응 예산으로 확장한다.

02

자본 축적 중심의 장기 구조 전략

자본투자의 통합 효과는 운영비의 1.504배로, 자본비율 상승이 당해 운영비 축소를 수반함에도 이를 체계적으로 상회한다. 이는 폭염 사망 감소의 주 경로가 사후적 서비스가 아니라 열 노출 자체를 차단하는 자본 스톡 축적임을 뜻하며, 그 효과는 시설이 실제 가동되는 2년 시차에 발현되어 투자의 '시기'가 총량 못지않은 결정 요인임을 함의한다.

03

녹지-인공냉각의 보완성과 차별화된 설계

녹지는 인공 냉각의 대체재가 아니라 예산 효과를 강화하는 보완재이며, 자연 냉각 용량이 낮은 도심 자치구일수록 인공 자본의 한계 수익도 함께 낮아진다. 적응 인프라가 자치구의 생태적 토대와 인구 구성에 따라 차별 설계되어야 함을 시사한다.

04

정책적 실행가능성과 분석틀의 확장

구성 최적화의 기여(연 32.8명)가 공간 재배분(연 25.4명)을 상회하며, 내부 비율 조정은 정치적 마찰이 작아 총예산 증액 없이 연 14.5%의 추가 생명 구제를 즉시 실현한다. 인과·이질성·최적화를 결합한 본 분석틀은 메가시티 적응정책의 공통 언어가 된다.

감사합니다

국민대학교 기후기술융합학과 석사과정생 최희도*
(zxsa0716@kookmin.ac.kr)

국민대학교 산림환경시스템학과 임철희†
(clim@kookmin.ac.kr)

본 연구(논문)는 과학기술정보통신부 재원의 한국연구재단 이공분야기초연구사업(우수신진연구)
(과제번호: 2022R1C1C1008489) 및 정부(기후에너지환경부)의 재원으로
국립생물자원관 '생물기후 연구 전문인력 양성' 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: NIBRE202602).

