

걸어서 10분, 닿지 않는 쉼터

CVI × MCLP 기반 무더위쉼터 최적 입지 분석

실제 도로 거리 분석 · IPCC 국제 표준 · 이중 검증 완료

Zemini | 박태언 배윤찬 이동현 최경환

2026 서울시 빅데이터 활용 경진대회 · 시각화 부문

목차

01

프로젝트 개요

폭염 위기와 무더위쉼터 사각지대
실제 도로 거리 기반 75.0% 커버율

02

방법론

행정 데이터 + 보행 도로망 통합
CVI 4차원 + 실제 도로 거리 분석
후보지 7단계 정제 + 공정성 제약
의사결정 진화

03

결과 및 정책

k=10, 보호 20,396명, +1.0%p 커버
최종 10개소 + Phase 2 효과
정책 4유형 + 시각화 8종

04

Q&A 및 부록

예상 질문 5개
한계 + 향후 개선 / 버전 비교
시각화 산출물 / 참고문헌 11편

01

CHAPTER ONE

프로젝트 개요

- 폭염 위기와 무더위쉼터 4,087개소의 도보 사각지대
- 실제 도로 거리로 보정한 커버율 75.0%
- 위험도 평가 + 입지 최적화 + 공정성 제약으로 10개소 도출

4,087

무더위쉼터 (공공)

75.0%

도로 기반 커버

폭염 위기와 무더위쉼터 사각지대

커버리지 진단

쉼터는 충분, 실제 도보 접근성은 부족



25 자치구 도보 10분 커버 현황



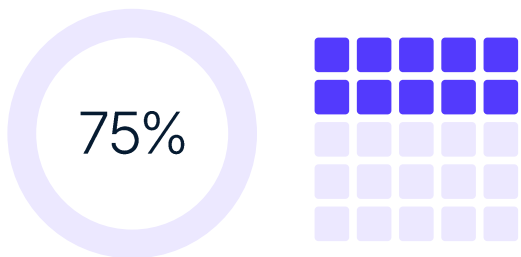
걸어서 10분, 닿지 않는 쉼터

4,087	개소	무더위쉼터 공공시설 (전수)
75.0	%	실제 도로 거리 기반 커버
85.3 → 75.0	%	직선 거리 과대추정 보정
162,274	노드	서울 보행 도로망

도심(종로·중구 등)은 90~100%, 외곽(서남권·동북권)은 60% 이하
→ **평균은 75%지만 도심 쓸림 — 도넛형 불균형**

폭염 위기와 무더위쉼터 사각지대 — 인사이트

이전 슬라이드 데이터 요약



75 % 커버 · 10 / 25 자치구 100% 커버 · 85.3% → 75.0% (직선 거리 보정)

INSIGHTS

데이터가 말하는 4가지 사실

01

도시 평균과 동네 현실의 괴리

전체 평균 커버율 75%지만 외곽 자치구는 60% 이하 — 평균이 사각지대를 가린다

02

직선 거리는 10%p를 부풀린다

한강·산·고속도로 보행 장벽을 무시한 직선 버퍼가 85.3%로 과대추정 — 실제로는 75.0%

03

도심 쏠림 — 도넛형 불균형

종로·중구는 90~100% / 외곽 자치구 일부는 40% 미만 — 중심부에 시설이 집중됨

04

단순 시설 수로는 부족하다

쉼터 절대 수가 아닌 위험도 + 인구 + 접근성 다차원 분석이 필요 → CVI 모델로 진단

02

CHAPTER TWO

방법론

- 행정 데이터 + 위성 자료 + 보행 도로망 통합
- CVI 4차원(IPCC 표준) + 실제 도로 거리 분석
- 후보지 7단계 정제 + 입지 최적화 + 공정성 제약
- v1→v6 의사결정 진화로 차별점 확보

8 종

통합 자료 (행정+위성+도로)

667 m

실제 보행 거리

10/10

두 방법 일치

데이터 통합 — 행정 자료 + 위성 + 보행 도로망

PRIMARY DATA · 6 종

유타 · 인구 · 경계 · 불투수 · 도로망 · 위성

01

무더위쉼터 (서울시 공공 API)
4,087개소 좌표·유형

02

주민등록인구 (연령별·동별)
426동 · 자치구·동명 함께 묶어 정합성 확보

03

행정동 경계 (행정안전부 GeoJSON)
426 동 폴리곤

04

불투수면적 (도시생태현황도)
25 자치구 단위 정규화

05

OpenStreetMap · 보행 도로망
공공시설 6종 카테고리 + 서울 전체 보행망

06

위성 자료 (Google Earth Engine)
지표면 온도·녹지·도시화 지수 / 고해상도 격자

통합 결과

4,087 유타 · 426 행정동 · 약 930만 명 · CVI 4차원 · 후보지 ~1,050개

서울시 행정 데이터를 외부 도로망·위성 자료와 단일 분석 파이프라인으로 통합

ANALYSIS PIPELINE

데이터 → 위험도 → 정제 → 10개소

01

데이터 입력
행정 + 위성 + 도로망

02

위험도 평가 (CVI)
IPCC 4차원 가중 합산

03

후보지 정제
공공시설 6종 → 33종 키워드

04

최적 10개소
이중 검증 + 공정성 제약

CVI 4차원 모델 + IPCC 매핑

CVI EQUATION

$$\text{CVI} = 0.30 \cdot \text{열노출} + 0.35 \cdot \text{인구취약성} + 0.25 \cdot \text{쉼터갭} + 0.10 \cdot \text{불투수}$$

0.30

열노출 (Heat Exposure)

산출: 더위 강도 × 녹지 보정

데이터: 위성 지표면 온도 + 녹지 비율

IPCC: Exposure

0.35

인구취약성 (Pop Sensitivity)

산출: 가중 합산 (고령 우선)

데이터: 고령·저소득·장애인 비율

IPCC: Sensitivity

0.25

쉼터갭 (Shelter Gap)

산출: 동네 미커버 시민 비율 (국제 표준)

데이터: 도보 10분 도달 영역

IPCC: Adaptive Cap. (역)

0.10

불투수 (Impervious)

산출: 자치구별 콘크리트 비율 정규화

데이터: 도시생태현황도

IPCC: Exposure (보조)

강건성 검증 민감도 분석 — 가중치 변경에도 위험 동 우선순위 거의 동일 · 차원 간 독립성 통계 검증 완료

도보 접근성 — 정밀 분석과 직관 시각화의 분리

정밀 분석 : 실제 도로 거리 667 m = 시속 4 km × 10분 • 직관과 시각 화의 분리 : 2SFCA 국제 표준 (Luo & Wang, 2003)

ANALYSIS

분석

그래프 노드 집합 판정

방법	전체 시민 동시 탐색 (단일 패스)
거리	도로 667m
용도	쉼터 갭 산출, 커버 영역 계산
정밀도	노드 집합 판정

VISUALIZATION

시각화

100m 버퍼 + 가독성 단순화

방법	도달 영역 → 100m 버퍼 → 합집합
거리	100m 버퍼 (도로 사이 주거지 포함)
용도	인터랙티브 지도 표현
정밀도	한강·산·고속도로 자연 장벽 구멍 표현

직선 거리 → 실제 도로 전환 효과

기존 커버율	방법	쉼터 갭
85.3 % → 75.0 %	556m 직선 버퍼 → 667m 실제 도로	면적 교차 → 도로망 기반
도로 장벽 반영 → 과대추정 보정	실제 보행 경로	국제 표준 방식

후보지 7단계 정제 + 캠퍼스 영역 제외 + 사후 검증

FILTER PIPELINE

공공시설 6종 카테고리 → 7단계 정제

- A 33종 시설명 키워드 검사
- B 운영자 정보 (대학·학교 운영 시설 제외)
- C 출입 권한 (사적·고객·허가 제한 제외)
- 1 50m 중복 제거 (우선순위 유지)
- 2 비거주지역 (수역·공항·군사)
- 3 공원 내부 + 3.5: 대학 캠퍼스 영역 + 100m 주변
- 4 인구 0 행정동 제외

33종 시설명 키워드

정부·사법, 대학·교육, 학과도서관, 의료, 종교, 사립

정부·사법

11종

대학·교육

9종

학과도서관

12종

의료·종교·사립·영문

제외

캠퍼스 영역 + 100m 주변

연세대 중앙도서관("24시간 열람실") 처리

대학 캠퍼스 영역 전체와 100m 주변을 통째로 제외 — 키워드로 잡히지 않는 부속 시설까지 공간적으로 차단

OSM 좌표 기반 사후 검증

비현실적 시설 0 / 10 · 대학·종교·의료·사립 시설 0 확인 · 모든 후보지 좌표 검증 완료

입지 최적화 + 공정성 제약 + 이중 검증

STEP 1

최적 입지

최대 커버 입지 결정

위험도 가중 시민 수요 최대화
후보지 ~1,050개 (정제 후)

~1,050

최종 후보지

667 m

도보 반경

휴리스틱

빠른 해법

정수계획

정확한 해법

→ 휴리스틱 + 정수계획법 이중 검증

STEP 2

공정성

국제 학술지 기준

동당 1개 이하 · 자치구당 2개 이하
공정성 제약을 모델에 명시 반영

≤ 1

동당 상한

≤ 2

자치구당 상한

탈락 3

Phase 2 효과

신규 3

Phase 2 효과

→ 자치구 7→10 분산 (Phase 2)

STEP 3

검증

통계적 elbow + 민감도

통계적 elbow 탐지로 최적 k 결정
반경 민감도 5개 시나리오

k = 10

통계적 elbow

10 / 10

두 방법 일치

5

민감도 시나리오

0.00%p

GAP

→ 휴리스틱 = 정수계획 10/10 일치

후보지 정제 → 공정성 제약 → 최적 k = 10 → 두 방법 10/10 일치

의사결정 진화 — 차별점과 개선 노력

ITERATION JOURNEY · 6 VERSIONS



KEY DIFFERENTIATORS

9 → 0

비현실 시설 (현장 검증 + OSM 역조회)

직선 → 실제 도로

국제 표준 방식 도입 (Luo & Wang 2003)

11 → 33 + 캠퍼스

키워드·영역 이중 차단

03

CHAPTER THREE

결과 및 정책

- $k=10$ · 보호 20,396명 · +1.0%p 커버율 개선
- 최종 10개소 · 자치구 7개 분산 · Phase 2 효과
- 정책 4유형 (A·B·C·D) + 시각화 9종 산출물

10

최종 신설 (통계적 elbow)

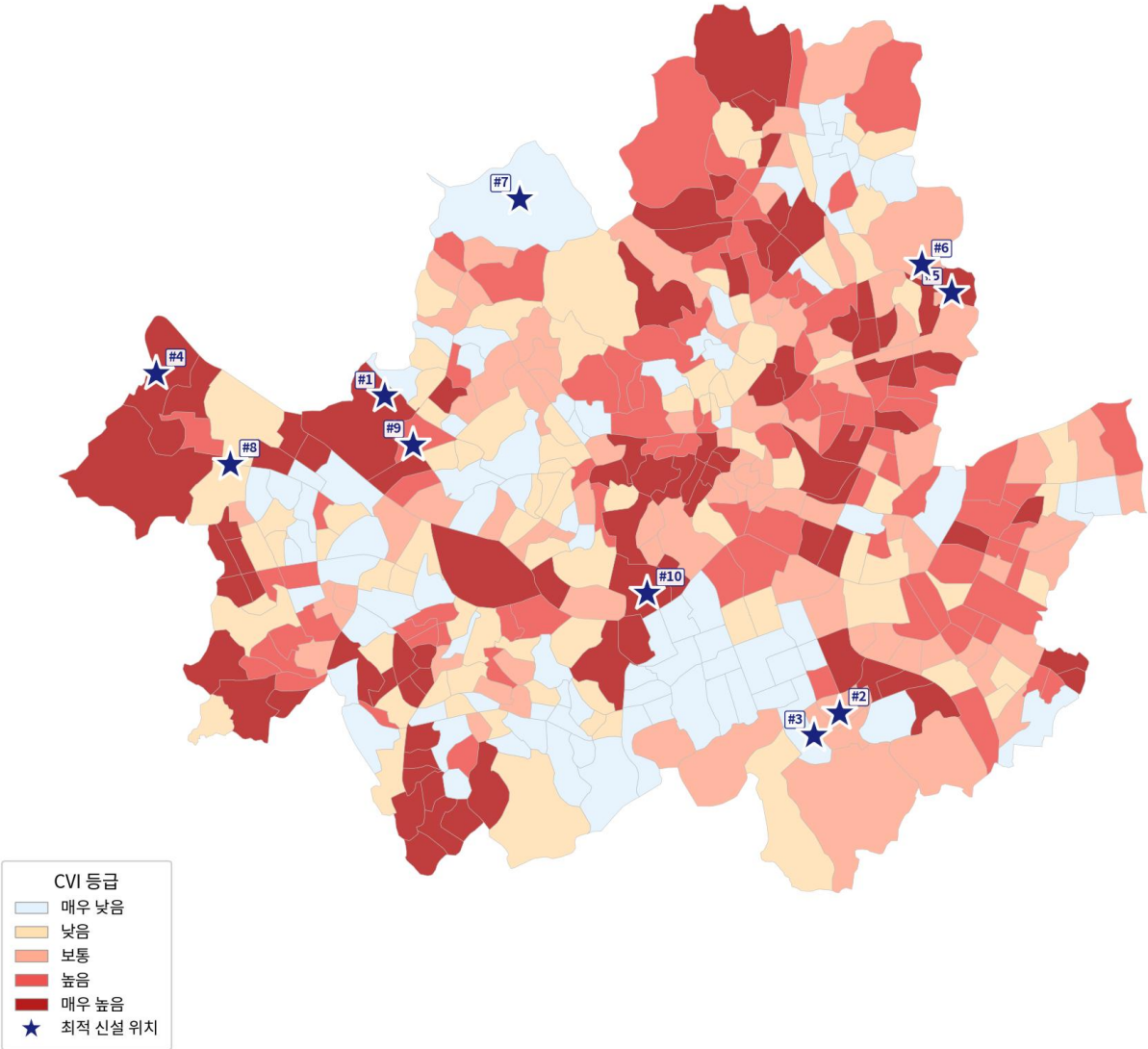
20,396

보호 취약인구

+1.0%p

커버율 개선

서울시 기후취약도 (CVI) + 최적 쉼터 10개소

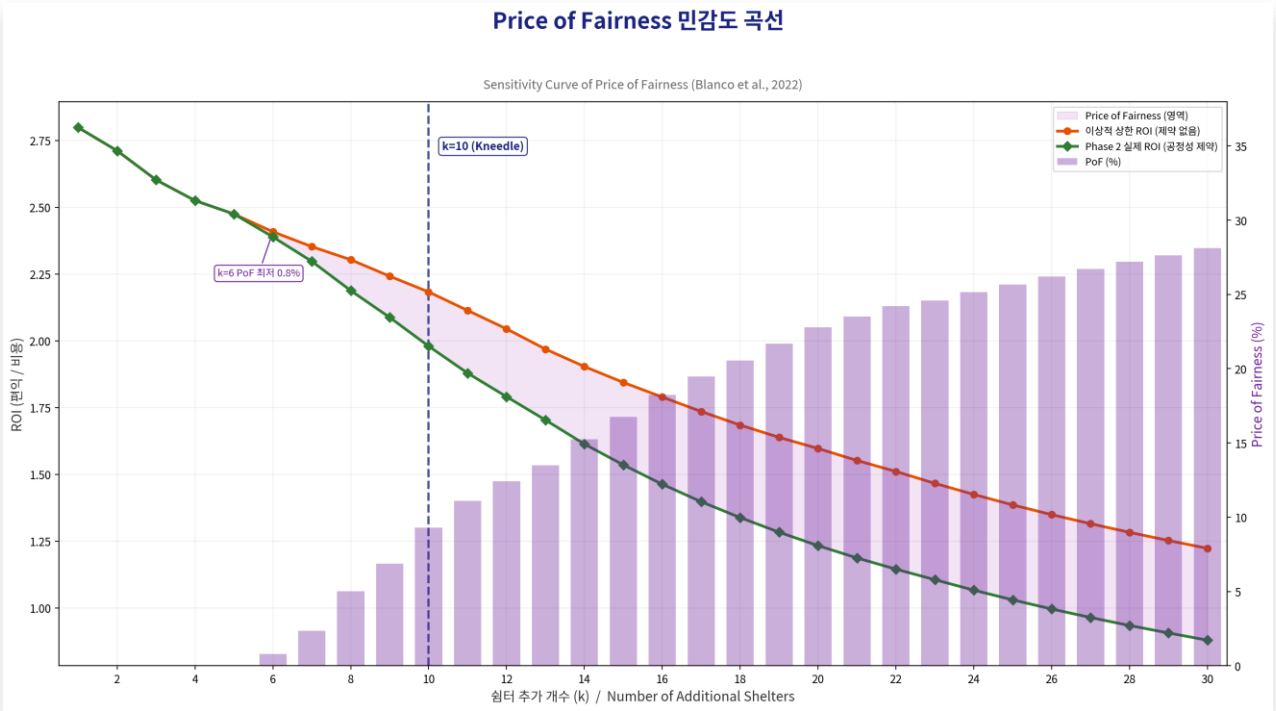


최적 시설 수(k) 민감도 분석 · Price of Fairness 민감도 곡선

Kneedle 알고리즘으로 도출된 10개소를 우선 배치하면 효율성과 정책 실행 가능성의 균형을 확보할 수 있음
공정성 제약(동당 1개·구당 2개)을 적용하면 ROI가 13.2% 감소하지만, 쉼터가 10개 자치구로 분산되어 효율과 형평의 균형점을 달성할 수 있음을 보임

k=1~30 커버리지 향상 상세

k	커버율	향상	가중커버율	한계 노드	한계 가중	비고
1	75.10%	+0.09%p	79.76%	99	23.4	
2	75.21%	+0.20%p	79.87%	134	21.9	
3	75.30%	+0.29%p	79.97%	99	19.9	
4	75.40%	+0.39%p	80.06%	122	19.2	
5	75.48%	+0.47%p	80.15%	90	19.0	
6	75.54%	+0.53%p	80.24%	66	17.3	
7	75.61%	+0.59%p	80.32%	78	16.9	
8	75.70%	+0.69%p	80.40%	114	16.4	
9	75.85%	+0.84%p	80.47%	172	14.6	
10	75.97%	+0.96%p	80.54%	137	13.8	◀ elbow (Kneedle)
11	76.02%	+1.00%p	80.60%	52	11.9	
12	76.06%	+1.04%p	80.65%	47	10.7	
13	76.11%	+1.09%p	80.69%	58	8.9	
14	76.16%	+1.15%p	80.74%	58	8.8	
15	76.19%	+1.18%p	80.78%	35	8.5	
16	76.21%	+1.20%p	80.82%	29	8.1	
17	76.26%	+1.25%p	80.85%	55	7.3	
18	76.28%	+1.27%p	80.89%	30	6.8	
19	76.34%	+1.33%p	80.92%	66	6.8	
20	76.38%	+1.37%p	80.95%	49	6.7	



핵심 수치 — k 효율성 · Gini · PoF · 보호 인구

최적의 K

10

통계적 elbow 탐지

두 방법 일치

10 / 10

MCLP의 휴리스틱 결과와 정수계획법 결과 동일

GINI 개선

-8.6%

G₂ 0.84 → 0.77

커버율 개선

+1.0%p

75.0% → 76.0% 도시 평균

PoF

13.2%

국제 학술지 5~20% 범위

보호 취약인구

20,396명

고령·아동·저소득 합산

k별 상대 효율성 — Kneedle elbow 분석

k = 5

절반 효율

커버 × 0.5 비용 × 0.5

k = 10

★ Kneedle 최적

커버 20,396명

k = 20

한계 효율 감소

커버 × 1.5 비용 × 1.7

k=5 대비 2배 커버 · k=20 대비 60% 비용 — k=10이 한계 효율 elbow (추가 시설은 효과 감소)

핵심 수치의 의미 — 4가지 함의

앞 슬라이드 핵심 수치 요약

k = 10 최적 신설	10 / 10 두 방법 일치	-8.6% Gini 개선	+1.0%p 커버율 개선	13.2% PoF 손실	20,396 보호 시민
------------------------	---------------------------	-------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------

INSIGHTS

이 숫자들이 정책에 의미하는 것

01

k = 10 — 한계 효율의 elbow

k=5 대비 2배 커버, k=20 대비 60% 비용.
시설을 더 추가해도 한계 효율이 빠르게 감소하는 지점에서 결정

Kneedle elbow 탐지 — k별 상대 비교

02

공공시설 활용 — 추가 건축 W0

기존 도서관·마을회관·복지관 10개소를 폭염쉼터로 지정.
신규 건축 비용 없이 즉시 가동 가능

건축비 W0

03

두 방법 10/10 일치 — 분석의 정확성

휴리스틱과 정수계획법이 동일한 10개소를 도출.
후보지 사이 커버 영역 중복이 낮은 이상적 데이터 조건

GAP 0.00%p

04

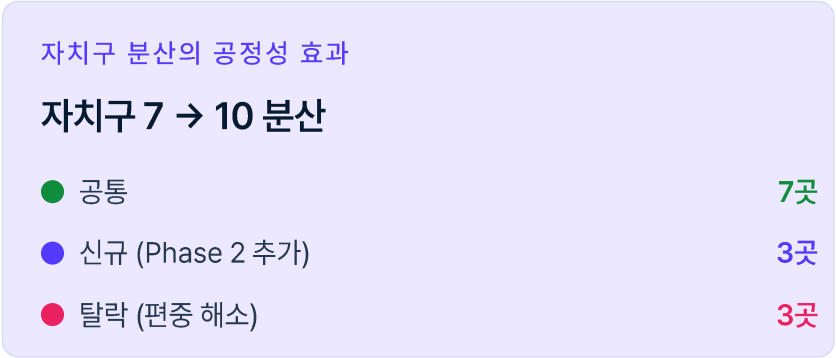
자치구 7→10 분산 — 단순 효율에서 공정성으로

공정성 제약을 명시적으로 모델에 넣어 PoF 13.2% 손실을 감수하고 자치구 분산을 확보

Phase 2 효과 = 신규 3 + 탈락 3

최종 10개소 — 자치구 분산과 그 효과

#	자치구	행정동	시설명	태그
1	마포구	상암동	한국영상자료원	library
2	강남구	개포2동	강남힐링센터 개포	community_centre
3	강남구	개포4동	개포래미안포레스트노인정	social_facility
4	강서구	방화2동	상사마을회관	community_centre
5	종량구	신내1동	동사무소	townhall
6	노원구	공릉2동	도서관	library
7	은평구	진관동	은평한옥마을 마을회관	civic
8	강서구	발산1동	강서점자도서관	library
9	마포구	성산2동	성산종합사회복지관	social_facility
10	용산구	서빙고동	용산구 장애인커뮤니티센터	community_centre



→ 7개 자치구 분산 (강남2 · 강서2 · 마포2 · 종량1 · 노원1 · 은평1 · 용산1) · 자치구 커버 10/25 · 비현실 시설 0/10

정책 우선순위 4유형 — 10개소를 시간순으로 분류

A 즉시 가동형 도서관 3개소 Day 1 - 한국영상자료원 (마포 상암) - 도서관 (노원 공릉2) - 강서점자도서관 (강서 발산1) 액션 폭염쉼터 지정 공문 → 운영시간 안내 비용 거의 없음	B 시간 확장형 마을회관 3개소 1-3 개월 - 강남힐링센터 (강남 개포2) - 상사마을회관 (강서 방화2) - 은평한옥마을회관 (은평 진관) 액션 운영시간 18시 → 22시 연장 + 냉방 강화 비용 인건비 + 전력비
C 시설 보강형 사회복지관 2개소 3-6 개월 - 사회복지시설 (강남 개포4) - 성산종합사회복지관 (마포 성산2) 액션 전용 공간 확보 + 냉방기·대기실 보강 비용 시설 개선 ~수천만원	D 협의 진행형 행정시설 2개소 6 개월+ - 신내1동 동사무소 (중랑) - 용산구 장애인커뮤니티센터 (용산 서빙고) 액션 자치구 협의 + 공간 활용 협의 비용 협의 결과 따라 결정

총 정책 비용 · 보호 시민 20,396명 · 자치구 7→10 분산 — 10개소 = 4단계 액션 플랜으로 즉시 실행 가능

예상 질문 — 핵심 5개

Q

왜 $k = 10$ 인가?

A. 통계적 elbow 탐지 기법으로 커버율 곡선의 변곡점을 찾음. $k=10$ 이후 추가되는 효과가 급격히 감소.

Q

왜 직선 거리에서 실제 도로 거리로?

A. 직선 버퍼는 한강·산·고속도로 같은 보행 장벽을 무시해 커버율을 과대추정함 (85.3% → 75.0%). 국제 표준 방법 2SFCA(Luo & Wang 2003)을 따름.

Q

효율성 손실(PoF) 13.2%가 적정한가?

A. 국제 학술지(Blanco 2022)가 제시한 적정 범위 5~20% 안에 위치. 자치구 7→10 분산을 위한 합리적 비용.

Q

두 방법(휴리스틱·정수계획법)이 10/10 일치한 이유?

A. 후보지 사이 커버 영역 중복이 낮아 — 빠른 해법과 정확한 해법 결과가 일치하는 이상적 조건. 분석의 정확성 입증.

Q

비현실 시설 0/10 검증 방식?

A. 33종 시설명 키워드 + 운영자·출입권한 정보 + 대학 캠퍼스 영역 제외 + OSM 좌표 기반 사후 검증.

3대 핵심 숫자

$k = 10$

최적 신설 · 통계적 elbow

20,396

보호 시민 · 취약 인구 도달

$G_2 - 8.6\%$

공간 공정성 개선 · Phase 2 효과

“공공시설 10개소를 7개 자치구에 분산 지정하면, 취약인구 20,396명을 연 0.5억원으로 보호하면서 공간 공정성을 8.6% 개선합니다.”

감사합니다

한계 + 향후 개선

한계	영향 / 가중치	향후 개선
01 비용-편익 절대 수치	발생률 가정 0.5% 의존	→ 서울시 온열질환 감시체계 연계
02 불투수면적 구 단위	가중치 0.10 (제한적)	→ GEE NDBI로 동 단위 산출
03 단일 시점 위성	35개 동 누락	→ 7~8월 다중 시점 합성
04 쉼터 수용 인원 미반영	—	→ 용량 제약 ILP
05 CVI 가중치 전문가 판단	—	→ PCA / AHP
06 독거 노인 미포함	—	→ 1인가구 데이터 결합
07 수요 가중치 인구밀도 미반영	CVI에 간접 포함	→ log(pop_density) 추가

본 분석은 Phase 0~4 / v1→v6 의사결정 이력 전반에 걸쳐 한계를 명시적으로 식별하고 향후 개선 방향을 명문화함.

버전 비교표 — v1 → v6

지표	v1	v2	v3	v4	v5	v6 (최종)
OPTIMAL_K	13	8	16	13	12	10
POI 후보지	2,721	1,153	1,148	1,148	~1,100	~1,050
커버리지 방식	Euclid	Euclid	Euclid	Network	Network	Network
키워드 필터	0	0	11종	11종	33종	33종+캠퍼스
기존 커버율	—	85.3%	85.3%	75.0%	75.0%	75.0%
자치구 커버	10/25	6/25	13/25	11/25	10/25	10/25
ROI (시나리오)*	3.67	3.79	1.95	2.27	1.96	2.04
PoF	11.2%	0.3%	15.7%	6.2%	11.3%	13.2%
G ₂ 개선	-15.6%	-5.9%	-27.0%	-21.3%	-13.9%	-8.6%
Greedy = PuLP	13/13	8/8	16/16	13/13	12/12	10/10
비현실 시설	9/13	0/8	0/16	0/13	0/12	0/10
총인구 정합성	×	×	✓	✓	✓	✓

v6 최종(보라색 강조열): k=10, Network Dijkstra, 33종 키워드+캠퍼스 폴리곤, Greedy=PuLP 10/10, 비현실 시설 0/10, 총인구 정합성 통과.

* ROI (시나리오): 발생률 가정 0.5%에 의존한 시나리오 분석 — 절대 수치는 서울시 온열질환 감시체계 데이터 연계 시 정밀화. 본 분석은 k별 상대 비교에 의의.

시각화 8종 산출물

01

CVI + MCLP 인터랙티브 지도

Folium 5레이어 HTML



02

최종 제안 k=10 발표지도

Folium HTML



03

PoF 민감도 곡선

Plotly HTML



04

Phase 1 vs Phase 2 비교

Folium HTML



05

자치구 분포 Before/After

Plotly HTML



06

CVI 발표용 지도 (k=10)

Folium HTML



08

방법론 플로우차트 (표준+상세)

HTML



09

Lorenz 곡선 + Gini 계수

Plotly HTML



총 8종

HTML 인터랙티브 8종

참고문헌 — 11편

01	Blanco, V., et al. (2022) Fairness in Maximal Covering Location Problems arXiv:2204.06446 · 공정성	07	Luo, W. & Wang, F. (2003) Measures of spatial accessibility (2SFCA) Environment & Planning B, 30(6), 865-884 · ★ 2SFCA
02	Fraser, A. M., et al. (2018) Household accessibility to heat refuges Environment & Planning B, 45(6) · 쉼터	08	Pickard, B. R., et al. (2022) Dasymetric mapping ESSD, 14(6) · 공간분석
03	Jang, S., et al. (2023) Spatial accessibility of community healthcare Frontiers in Public Health · 접근성	09	Satopaa, V., et al. (2011) Finding a 'Kneedle' in a Haystack 31st ICDCS · ★ Kneedle
04	Kar, A., et al. (2025) Where to cool off: Identifying potential cooling centers IJDE, 18(1) · 쉼터	10	Woo, S. Y., et al. (2021) Optimal cooling shelter assignment during heat waves Urban Climate, 38, 100874 · 쉼터·공정성
05	Lee, J. S. & Han, A. T. (2024) Heat vulnerability and spatial equity of cooling center Urban Climate, 55, 101869 · 쉼터·공정성	11	Yao, X., et al. (2025) Urban medical resource distribution: equity & efficiency TGIS, 70089 · 공정성
06	Liu, J., et al. (2025) Spatial optimization of healthcare resource distribution Frontiers in Public Health · 최적화		