

기후·사회 데이터 융합 시공간 모델링을 통한 서울시 읍·면·동 기후변화 취약성 예측

기후변화 시나리오 기반 취약지역 식별 및 정책 의사결정 지원

미션 : 건강한 생활환경

최희도¹, 김태림¹, 김준섭²

¹국민대학교 산림환경시스템학과, ²성균관대학교 수학과

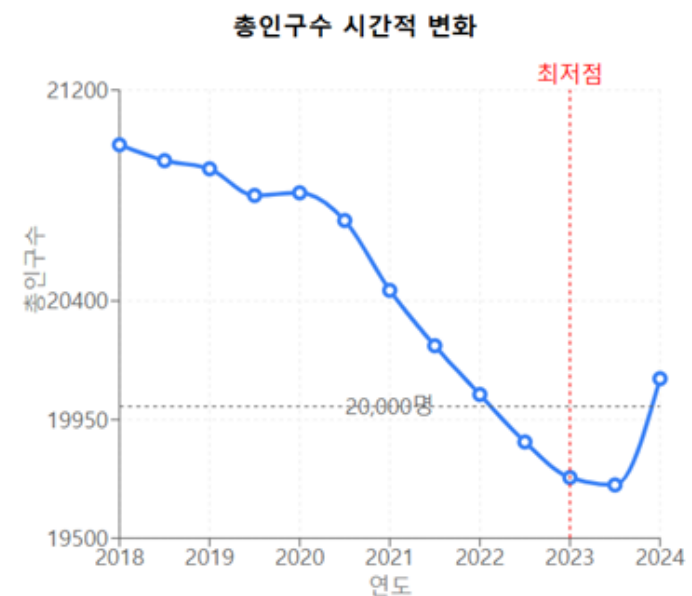
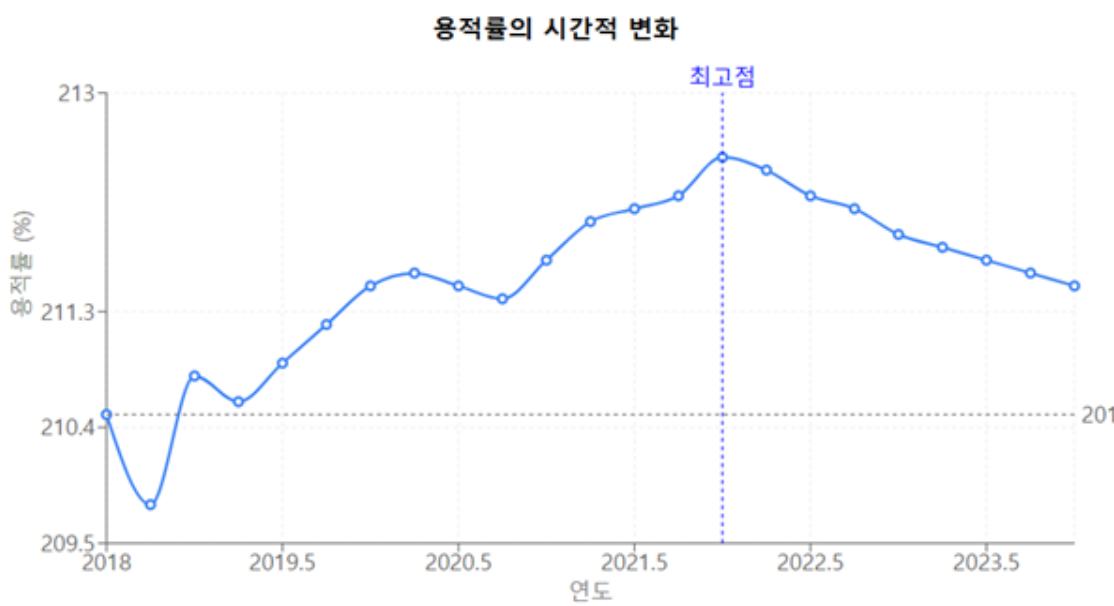
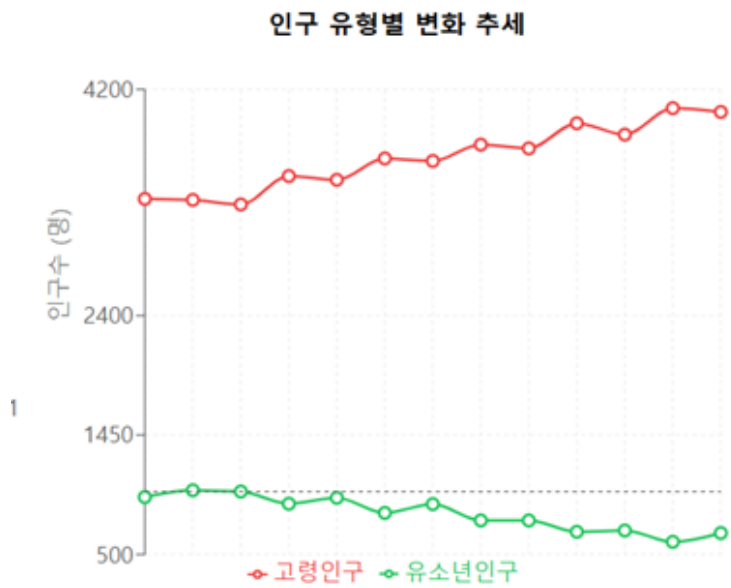
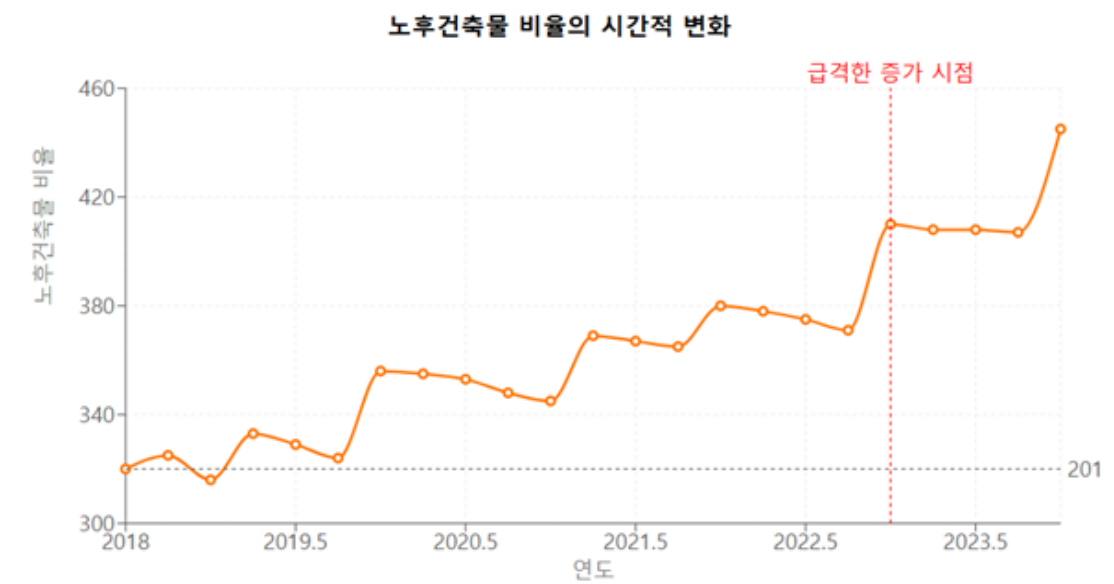
목차

- I 데이터 분석 배경 및 필요성
- II 분석 방법론 및 기술적 접근
- III 모델링 결과 및 검증
- IV 정책 활용방안 및 파급효과
- V 결론 및 향후 과제

1. 데이터 분석 배경 및 필요성

1) 데이터 분석 배경 및 문제 정의

배경



- 기후 불평등 문제 심화
- 폭염 피해 급증
- 극한기후 빈발도시열섬 심화
- 사회 취약성 증가



미래 취약지역 예측

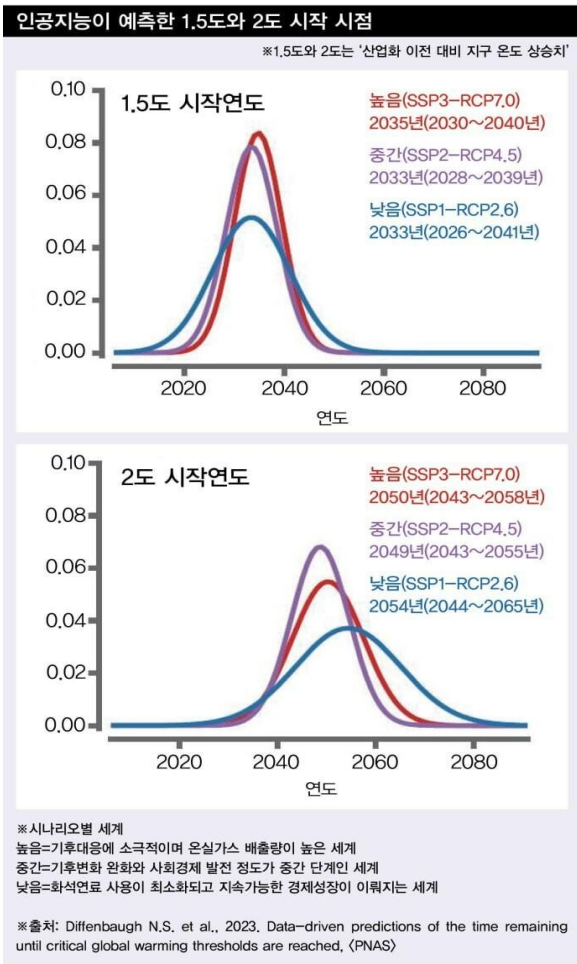
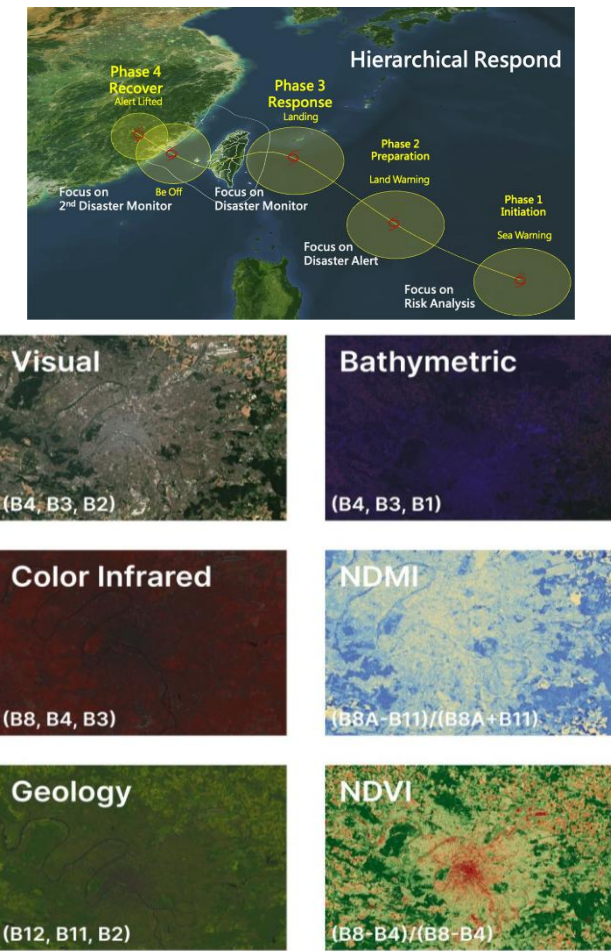
1) 데이터 분석 배경 및 문제 정의

기후변화 영향

취약성 평가 방법론

재난 예방 및 대응

정책 및 대응 전략



2) 선행연구 검토 및 연구 격차 분석

한계 영역	구체적 문제점	구체적 해결책
방법론적 한계	• 정적 평가 (특정 시점만), 선형적 접근, 단편적 분석	• GAT, LSTM 시공간 통합 모델링
데이터 한계	• 단일 분야 데이터, 원격탐사 활용 제한, 단기적 분석	• 다차원 융합 (기후+위성+사회+인구+공간)
공간적 한계	• 구/시 단위 이상, 공간적 이질성 무시, 지역 특성 일반화	• 467개 읍면동 단위 정밀 공간 분석
시간적 한계	• 단기 예측 (5-10년), 장기 추세 무시, 시나리오 연계 부족	• 2100년까지 장기 예측, SSP 시나리오 연계
정책 연계 한계	• 추상적 권고, 법령 근거 부족, 실증 입증 불가	• 11개 법령 기반 활용, 과학적 근거 마련

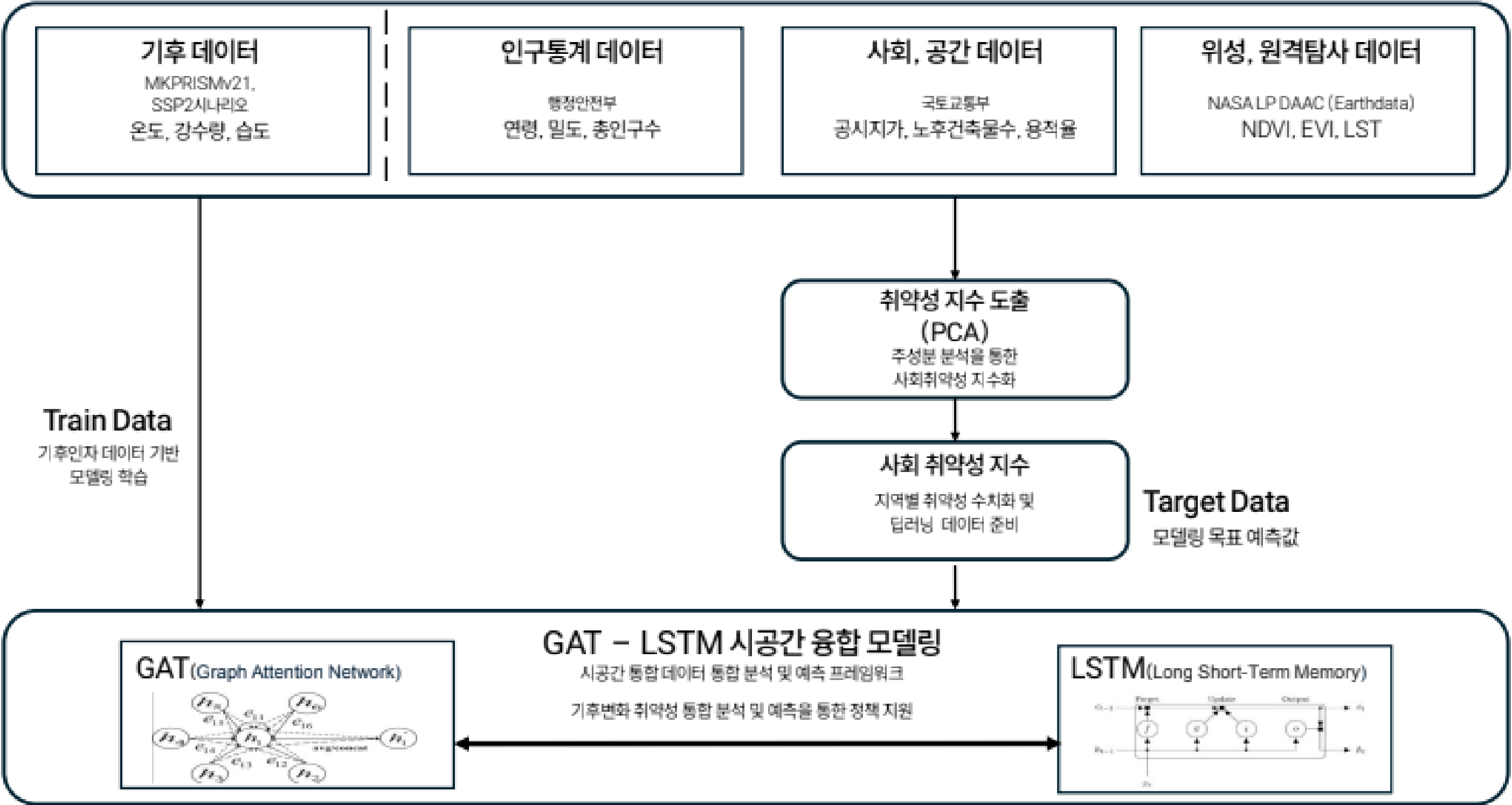
단편적인 접근에서 벗어나 시공간 통합 모델링과 고해상도 분석을 통해
직접 활용 가능한 과학적 의사결정 지원 체계를 구축

3) 모델링 목적

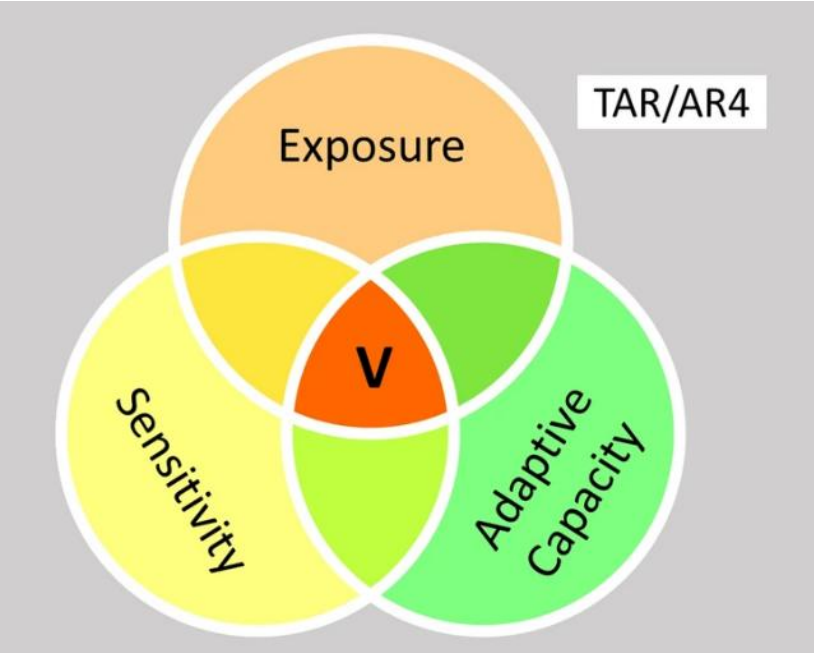
1. 다차원 환경·사회 데이터 융합을 통한 복합 취약성 모델링
2. 미래 시나리오 기반 높은 정확도의 장기 취약성 예측
3. 기후정의 관점의 취약계층 보호
4. 읍면동 단위 취약성 예측 결과의 정책적 활용방안 도출
5. 기후정의 실현을 위한 과학적 근거

2. 분석 방법론 및 기술적 접근

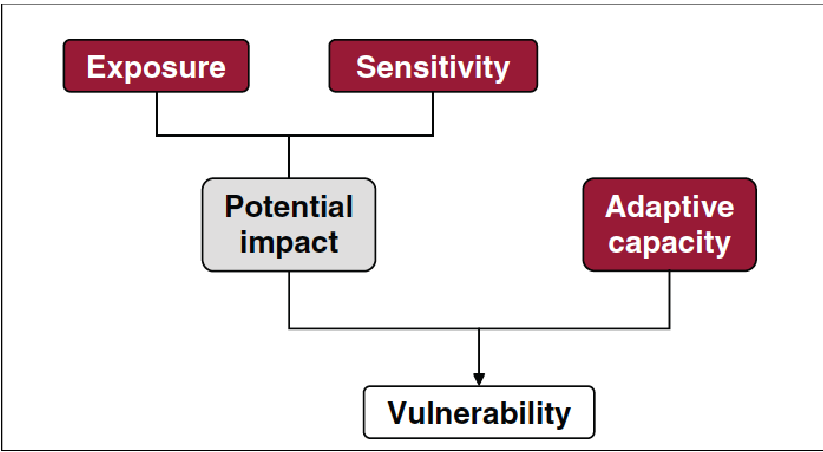
1) 연구 설계 및 방법론 개요



2) 데이터 수집 및 통합체계



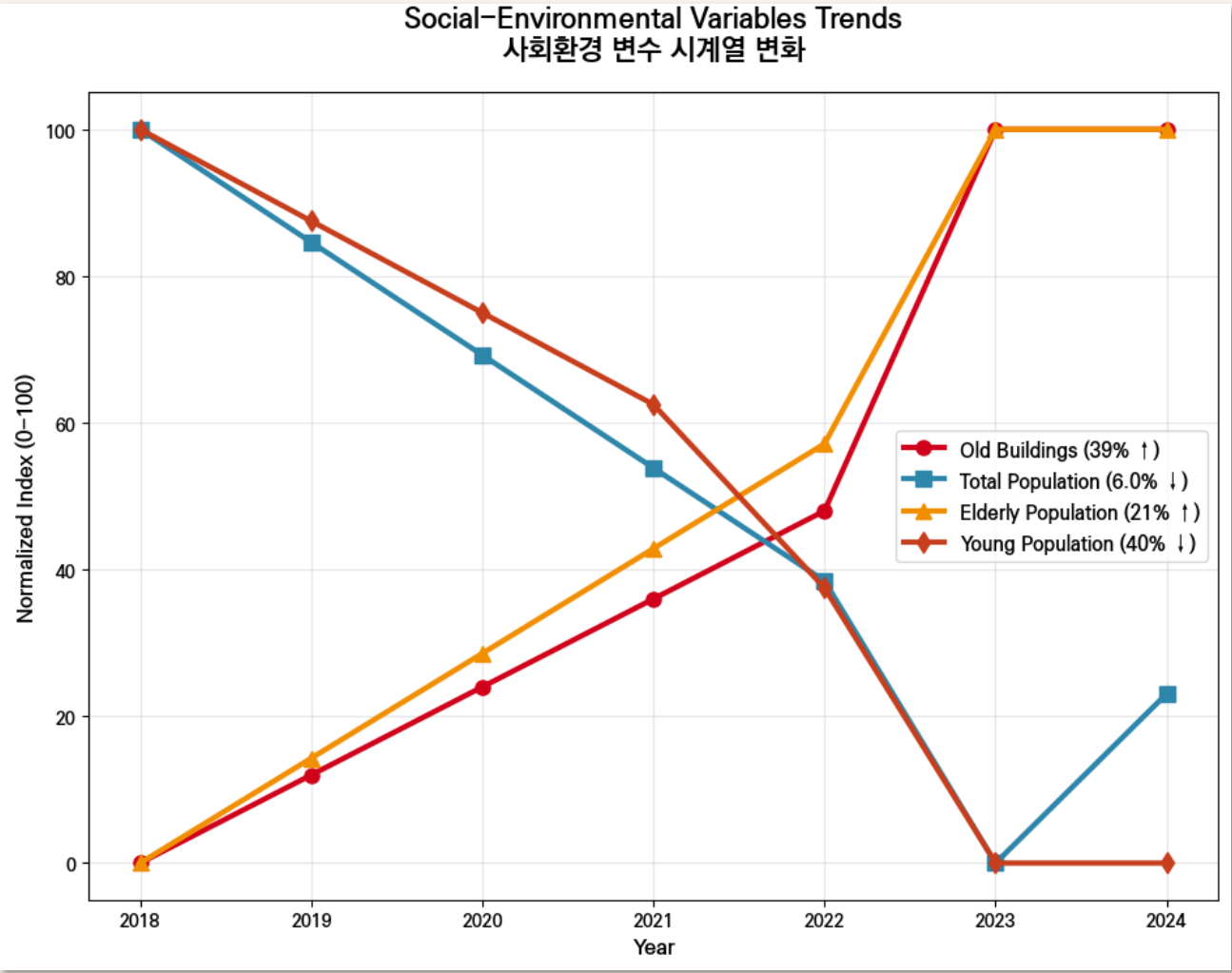
<IPCC TAR/AR4 취약성 프레임워크>



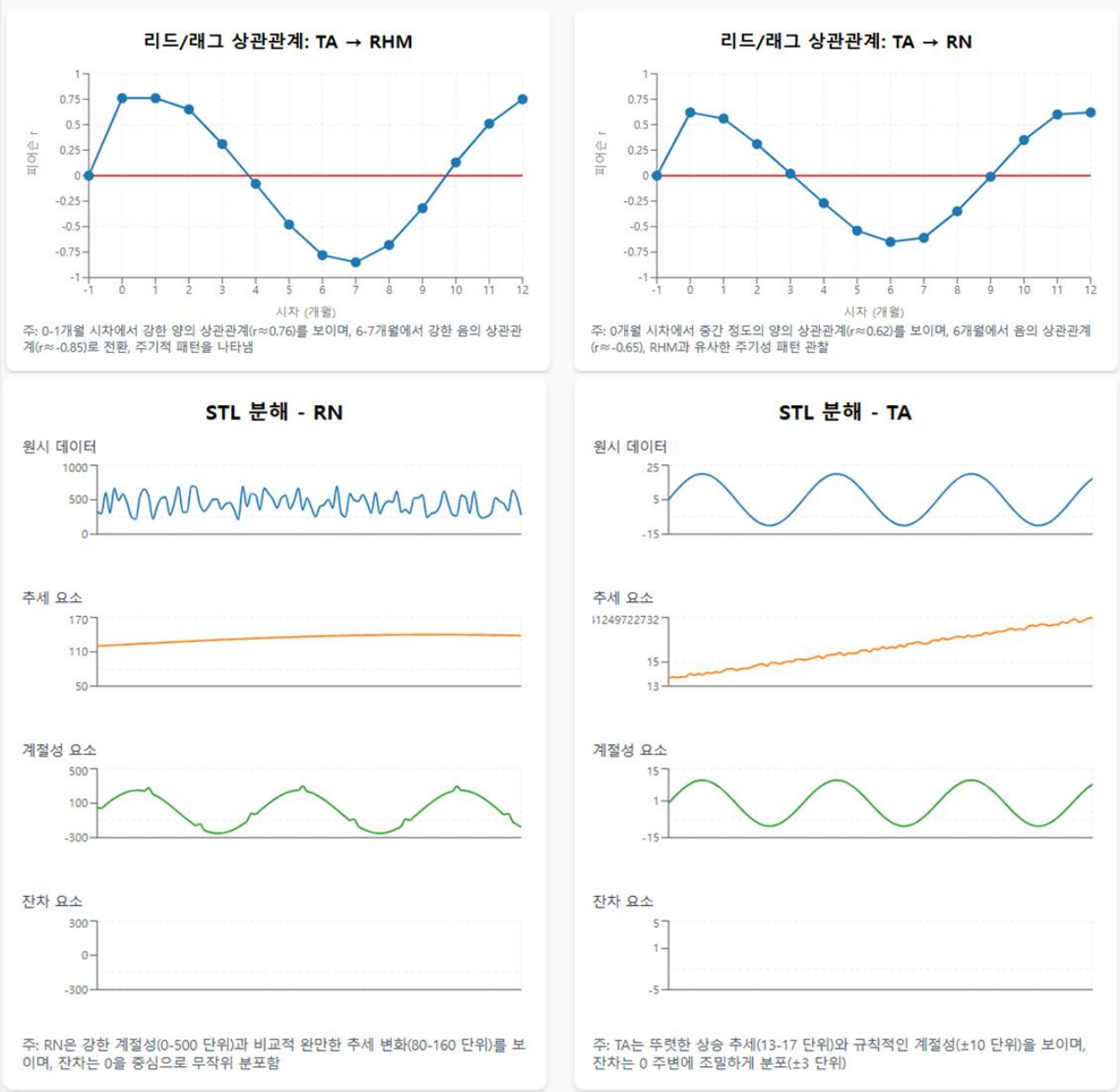
IPCC AR4 취약성 영향 경로도

취약성 요소	데이터 차원	변수	의미
노출, 위험	기후	월평균 기온(TA)	기후변화로 인한 열적 스트레스
	기후	상대습도(RHM)	열쾌적성에 영향 미치는 요인
	기후	평균최고기온(TAMAX)	극한기후 현상 강도 지표
	원격탐사	지표면온도(LST)	도시 열섬 현상을 반영한 체감 온도
민감도	인구사회	고령인구비율	고령인구의 열환경 취약성
	인구사회	유아인구비율	유아인구의 환경오염 민감성
	인구사회	인구밀도	인구집중으로 인한 재난 취약성
적응능력	건축환경	노후건축물비율	건축물 내구성, 에너지효율과 관련
	건축환경	용적률	도시밀집도 및 개발 강도
	원격탐사	NDVI, EVI	녹지공간의 쾌적성, 열완화 효과

3) EDA를 통한 주요 패턴 발견

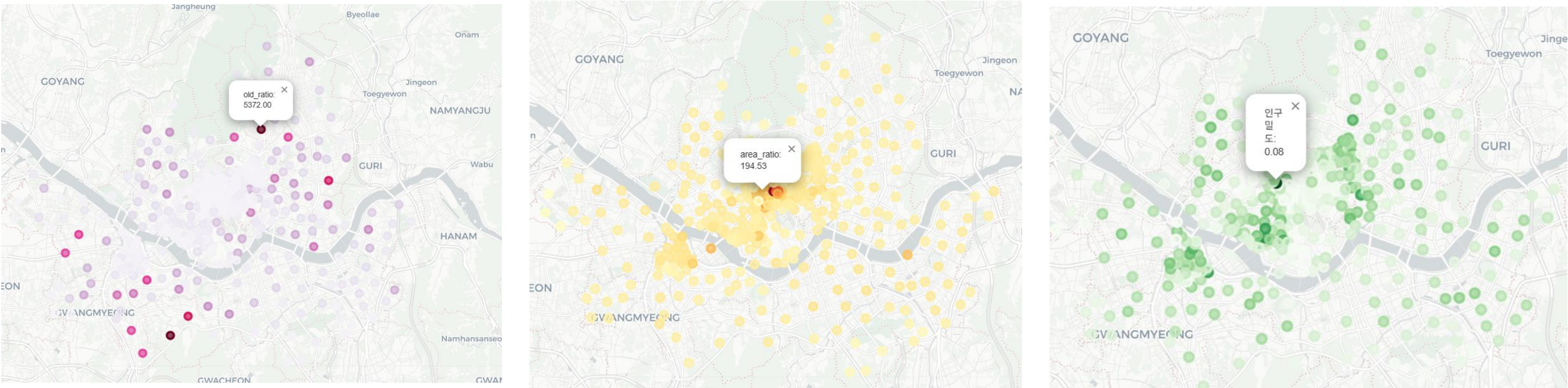


- 사회 민감도 변수 변화 패턴 발견
- '이중적 노후화' 도출
- 물리적 환경, 인구 구조 통합적 고려 필요



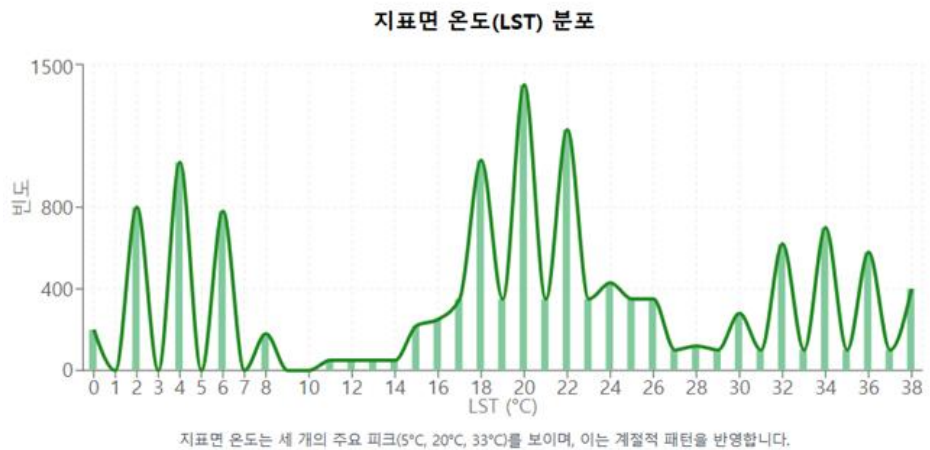
- 기후변화 패턴 발견

3) EDA를 통한 주요 패턴 발견



〈사회 데이터 분석 결과〉

- 구도심(용산·종로·중구)에서는 노후건축물 비율과 NDMI 저하가 통계적으로 파악.
- 강남권(강남·서초·송파)은 노후·고령 지표가 모두 유의하게 낮아 취약이 상대적으로 완화.
- 도시 외곽(북한산·관악산)은 높은 NDMI와 LST 저감 효과($p < 0.001$)를 보였지만, 고령화(22-25%)로 인한 사회적 취약성이 상존.
- 변수 간 공간역학은 사회지표가 거시적으로 군집되는 반면,
- 기후 지표는 미시적 도시구조에 따라 세분화되어, 다차원적 대응 전략 수립이 필요



〈위성 원격 탐사 데이터 분석 결과〉

4) PCA를 이용한 통합지수

PCA를 이용한 종합지수 추출

가중치 부여를 통한 종합지수

UNDP

- Asset Index
- Flood Vulnerability Index
- Multidimensional Poverty Index

OECD

- Technology Achievement Index (TAI)

Varmax 회전을 통한 종합지수 추출

Varmax 회전 – 성분해석 명확
UNDP – Digital Social Vulnerability Index (2024)



PCA + Varmax 회전을 이용한
취약성지수 개발

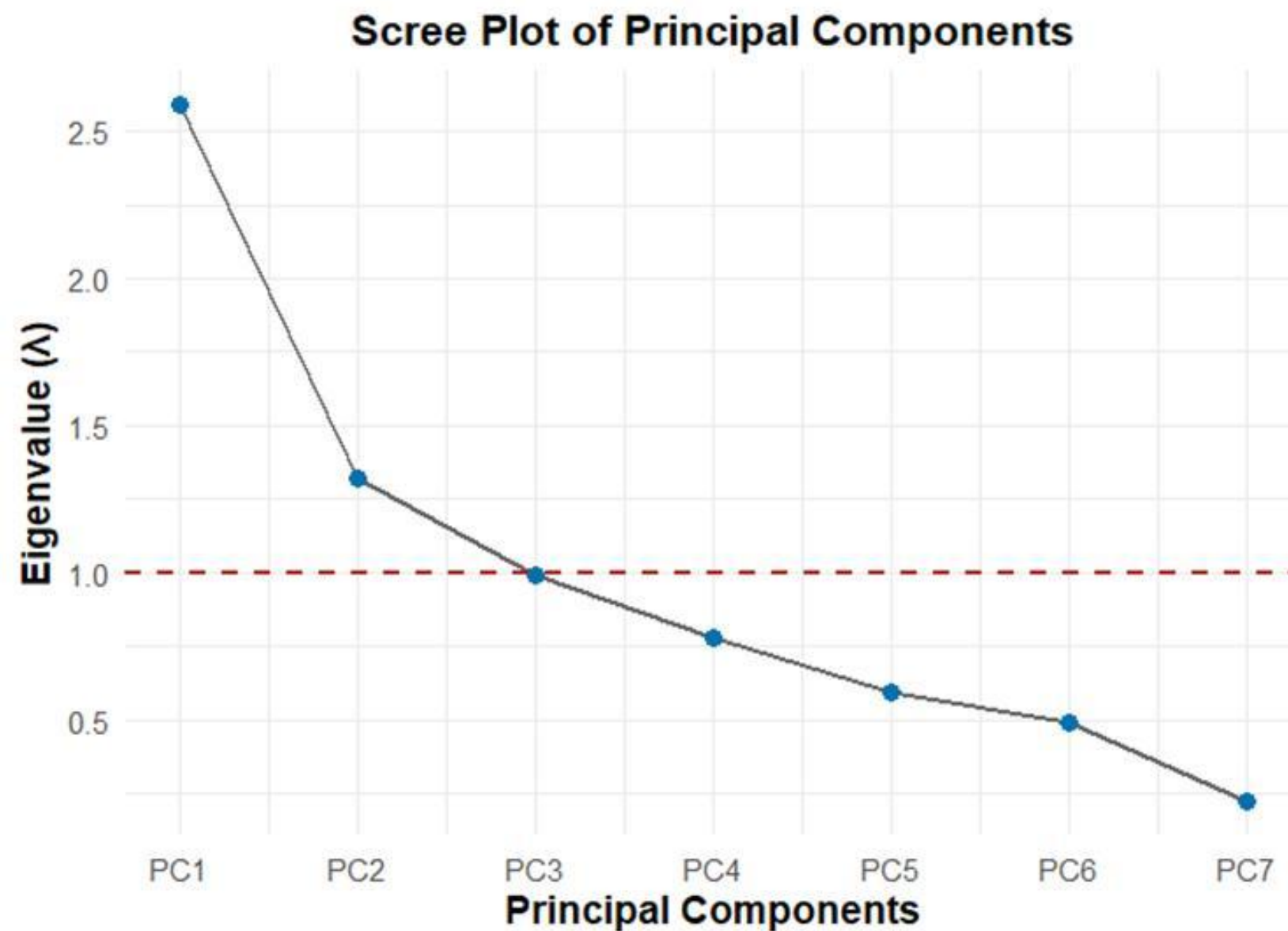
4) PCA를 이용한 통합지수

방법론 소개

1. 데이터 정규화
2. PCA 주성분 수 결정
3. Varmax 회전을 활용한 변수별 가중치 계산
4. 최종 복합지수 산출

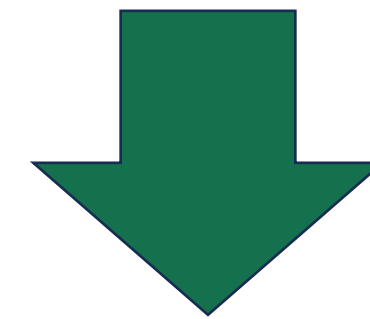
5) 취약성 지수 산출 과정

Nonfix PCA 주성분 개수 결정



설정 조건

- Kaiser's criterion
 - Cumulative explained variance threshold
- eigenvalue(주성분이 설명하는 분산의 양)값이 1 이상
누적 설명력이 60%를 만족하도록 설정



PC1($\lambda_1=1.89$), PC2($\lambda_2=1.82$), PC3($\lambda_3=1.20$)
누적 설명력 70% 만족

5) 취약성 지수 산출 과정

Fix PCA 주성분 개수 결정

컴포넌트	고유값	설명 분산(%)	누적 분산(%)	전체 기여도
PC1	1.89	27%	27%	38%
PC2	1.82	26%	53%	37%
PC3	1.20	17%	70%	25%

5) 취약성 지수 산출 과정

Varimax 회전을 활용한 변수별 가중치 계산

Varimax 회전을 이용한 가중치 공식

$$PC_k = \sum_{i=1}^p w_{ik} \cdot x_i$$

PC_k : k번째 주성분 점수 x_i : 정규화된 i번째 변수값

w_{ik} : 변수 i가 주성분 k에 기여하는 가중치

계산 과정

- 총 7개의 사회환경 변수를 바탕으로 주성분분석(PCA)을 수행
- 주성분 간 변수에 Varimax 회전을 적용
- 로딩값의 제곱을 해당 주성분 내에서 정규화하여 변수별 기여도를 가중치로 산출
- 정규화된 변수값에 해당 가중치를 적용하여 주성분 지수(PC score)를 계산

5) 취약성 지수 산출 과정

최종 복합지수 산출

최종 복합지수 공식

$$index = \sum_{k=1}^m \lambda_i \cdot PC_k$$

PC_k : k번째 주성분 점수

λ_i : 주성분 k의 설명력 비율

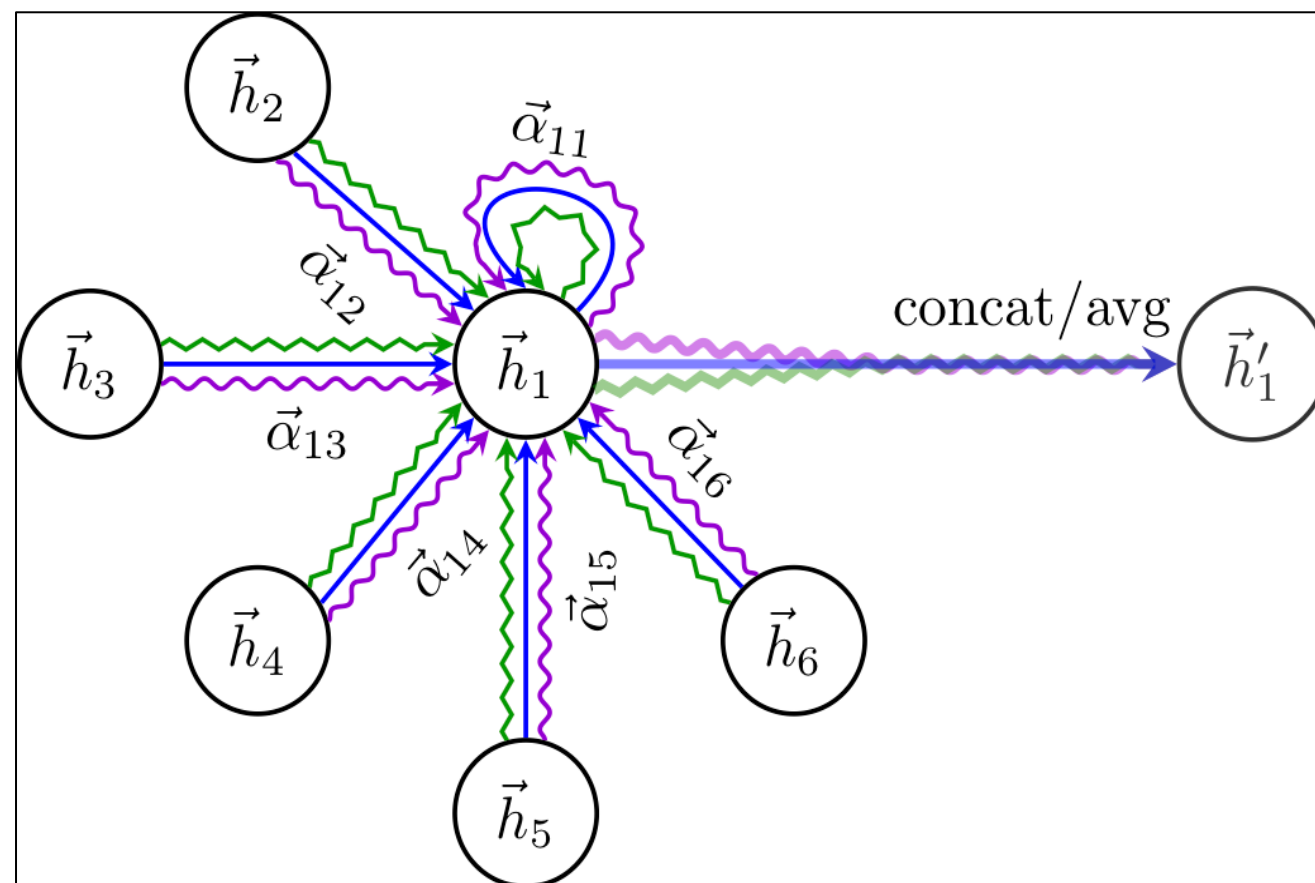
PCA 분류에 따른 지수 유형

- fix PCA
PC1=인구인자(인구밀도, 고령인구비율, 유아인구비율)
PC2=경제인자(공시지가)
PC3=사회인자(용적률, EVI, 노후건축물비율)
- nonfix PCA: 분산에 따른 PCA 분리

6) GAT-LSTM 모델

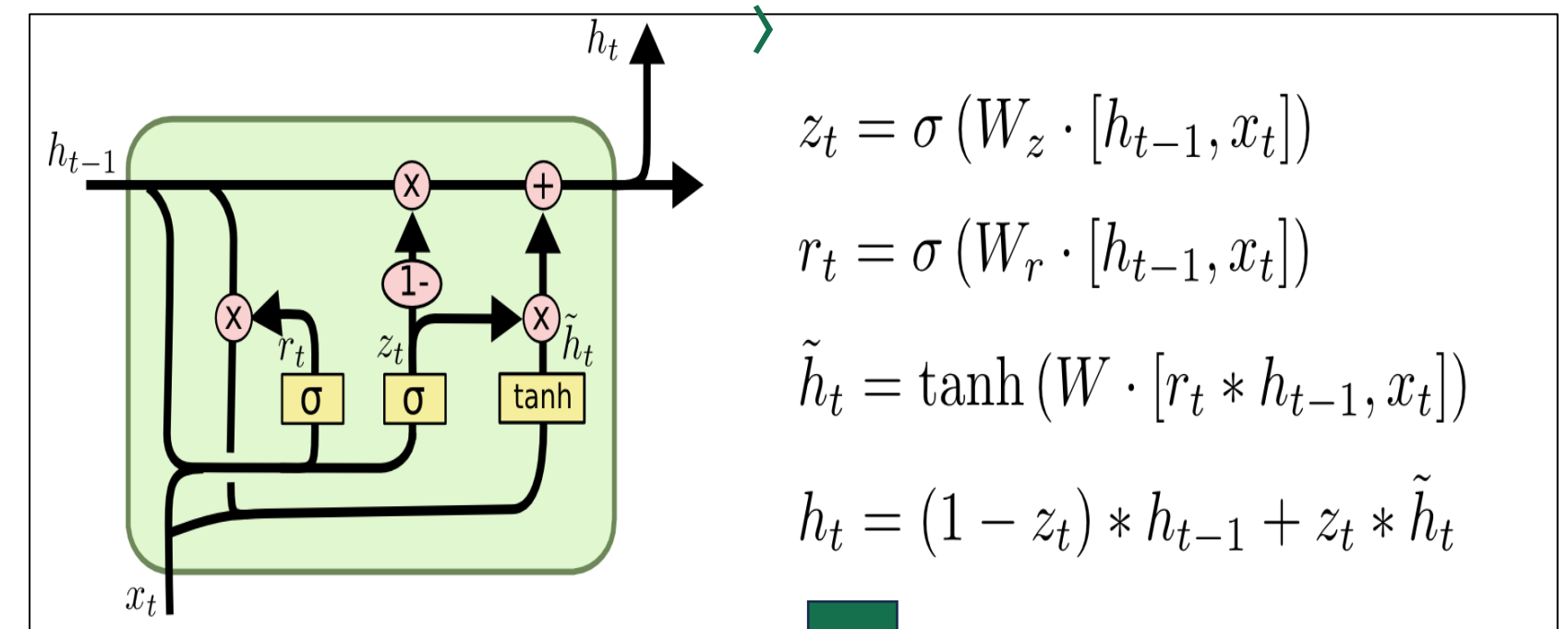
GAT (Graph Attention Network)

〈그래프를 통한 지역 간 공간 관계 학습〉



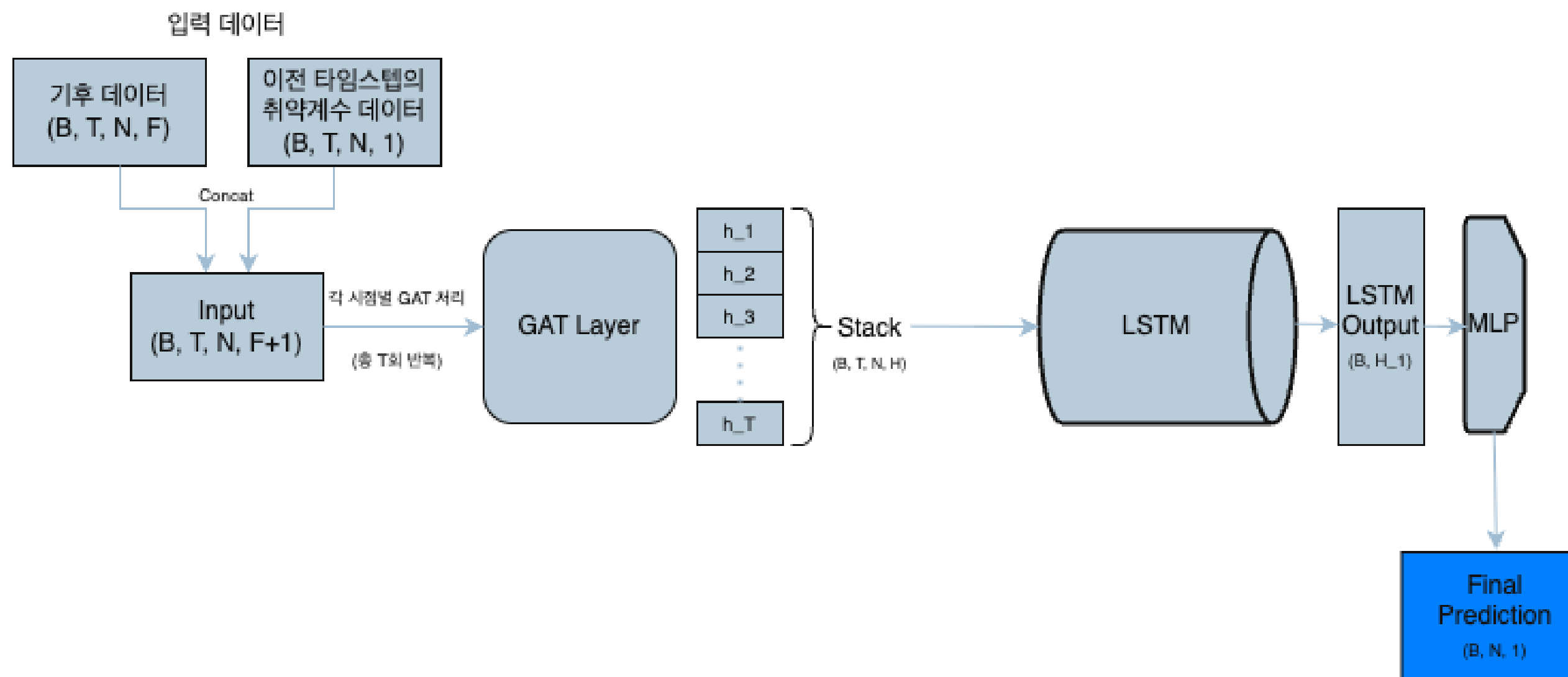
LSTM (Long Short-Term Memory)

〈시계열 패턴 학습을 통한 계절성, 장기 의존성 포착〉



공간 + 시간 정보를 통합한 시공간 예측 모델

6) GAT-LSTM 모델



〈GAT-LSTM 모델 아키텍처〉

7) 모델 학습 및 평가 과정

Train

입력

- 각 지역(읍면동)의 기후 변수 시계열 (온도, 강수량 등)
- 해당 지역의 과거 취약계수($t-10:t$ 시점의 취약계수)

공간적 패턴

→ 지역 간 상호작용(인접성 + 유사성)을 통해 영향관계 학습

시간적 패턴

→ 계절성, 장기 추세 등 시계열 상의 구조적 흐름 학습

Prediction

예측 대상:

- 다음 시점($t+1$)의 지역별 기후 취약계수 ($[N, 1]$)

예측 단위:

467개 읍면동 각각에 대한 연속형 값
(취약성 스코어 형태)

7) 모델 학습 및 평가 과정

기술적 구현 사항 및 하이퍼파라미터

항목	설정 내용
Optimizer	Adam
Loss Function	MSELoss
Batch Size	32
GAT Hidden Dim	32
LSTM Hidden Dim	64
Dropout	0.1
Early Stopping	Patience = 5

8) 모델링 결과

데이터 별 모델 학습 결과

분류	Epoch 수	Train Loss	Val Loss
위경도 X, fix PCA	290	10.1114	19.3161
위경도 X, nonfix PCA	500	16.5228	24.7924
위경도 O, fix PCA	481	10.1649	19.2470
위경도 O, nonfix PCA	287	15.9701	24.3474

8) 모델링 결과

시계열 모델 성능 비교

모델 분류	Epoch 수	Train Loss	Val Loss
GAT-LSTM	290	10.1114	19.3161
LSTM	275	10.3720	23.5747
RNN	133	10.0080	20.8041

8) 모델링 결과

모델링 결과 해석

1.

가장 안정적인 조합

GAT-LSTM + 위경도 포함 입력 + Fix PCA 타겟

2.

공간 정보의 보조 효과

위경도 추가는 공간 관계 보강에 기여하나 효과는 제한적

GAT 구조 자체의 공간 학습력이 더 핵심적

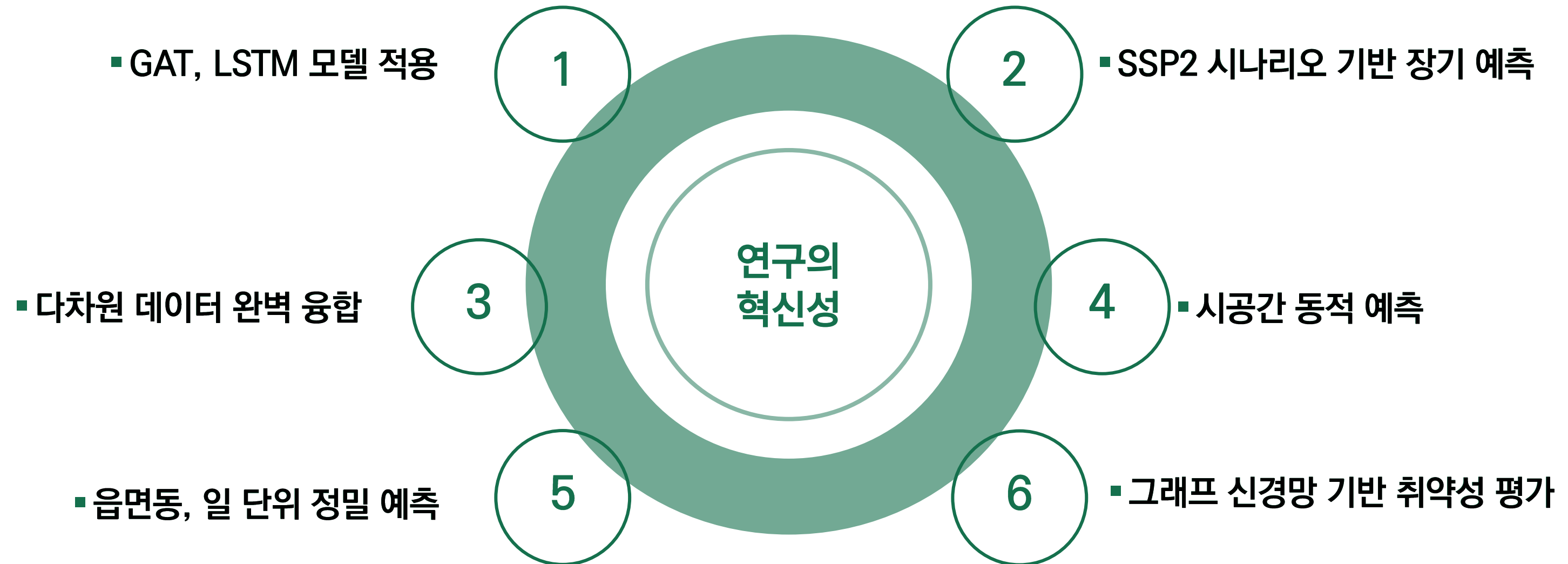
3.

GAT-LSTM의 강점

공간 관계와 시계열 흐름을 통합적으로 반영하는 구조로

복합적인 기후-지역 데이터에 최적화된 예측 성능 제공

9) 연구의 혁신성



10) 연구의 기술적 완성도

1.

데이터 처리 완성도

- 기상청 NetCDF, NASA MODIS Tif, 통계청 Shapefile 등 서로 다른 포맷의 5개 차원 데이터를 완벽하게 통합
- 시공간 좌표계 통일, 결측치 보간, 이상치 탐지
- 467개 읍면동과 72개월의 데이터를 완벽하게 학습
- SSP2-4.5 시나리오를 통한 2100년까지의 기후 데이터 학습

2.

모델링 기법 완성도

- 다중공선성 문제를 해결하기 위해 Varimax 회전을 적용한 주성분분석으로 7개 변수를 3개 독립 주성분으로 압축
- Graph Attention Network로 467개 지역 간 공간적 의존성을 학습
- LSTM으로 시간적 패턴을 포착하고, 학습.

3.

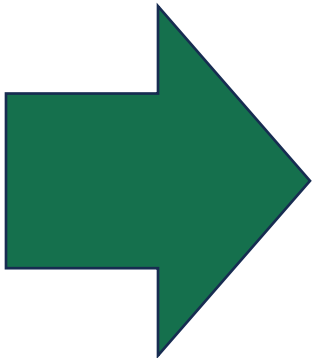
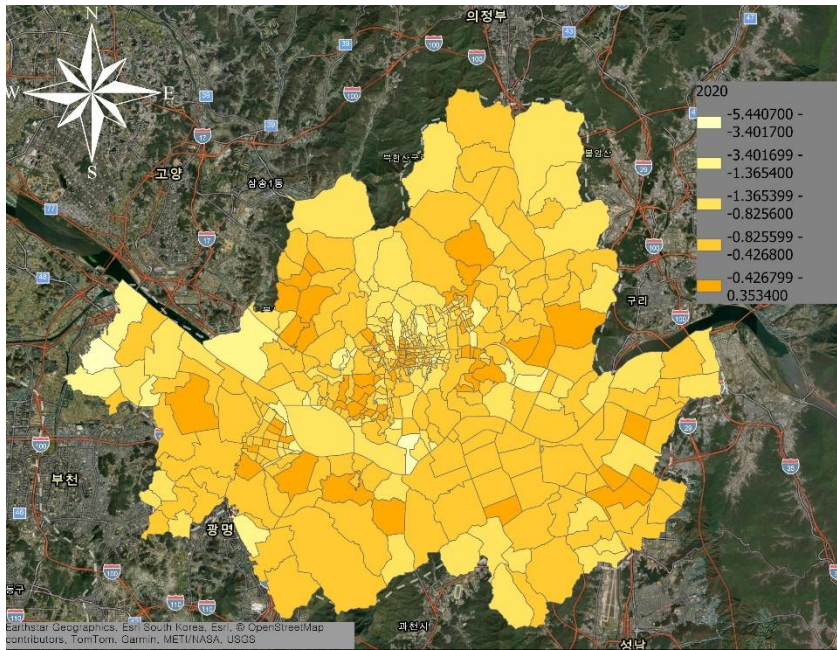
성능 검증 완성도

- 동일한 데이터와 조건에서 LSTM, RNN과의 직접 비교 실험을 수행
- 위경도 정보 포함 여부, fix PCA vs nonfix PCA 등 4가지 실험 조건을 체계적으로 비교하여 최적 하이퍼파라미터 조합을 확정
- 안정적으로 수렴하는 학습 곡선을 획득

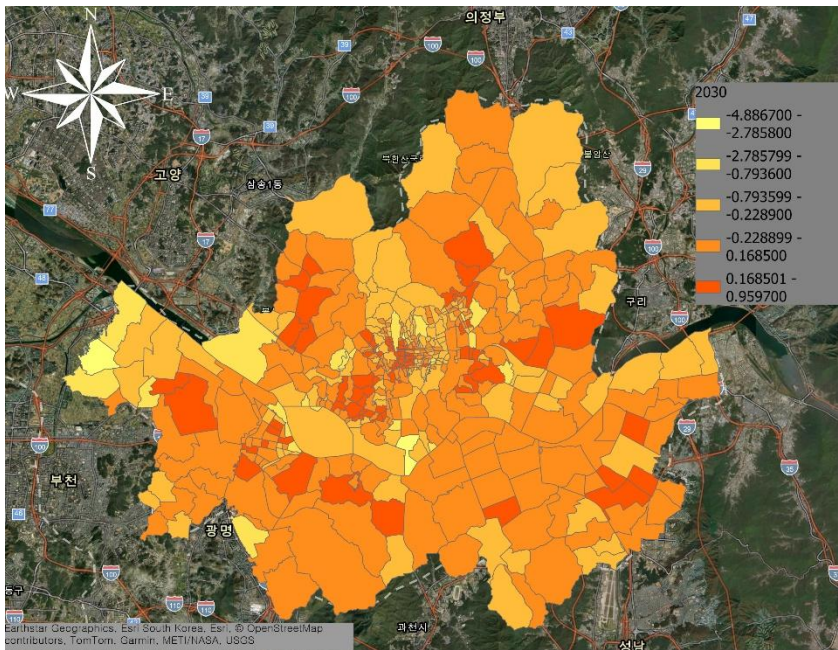
3. 모델링 결과 및 검증

1) 서울시 기후변화 취약성 시공간 예측 결과

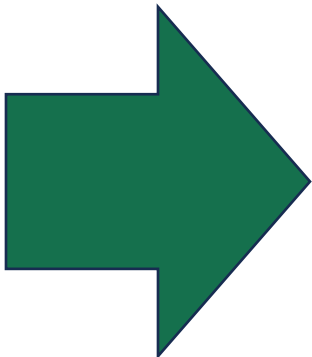
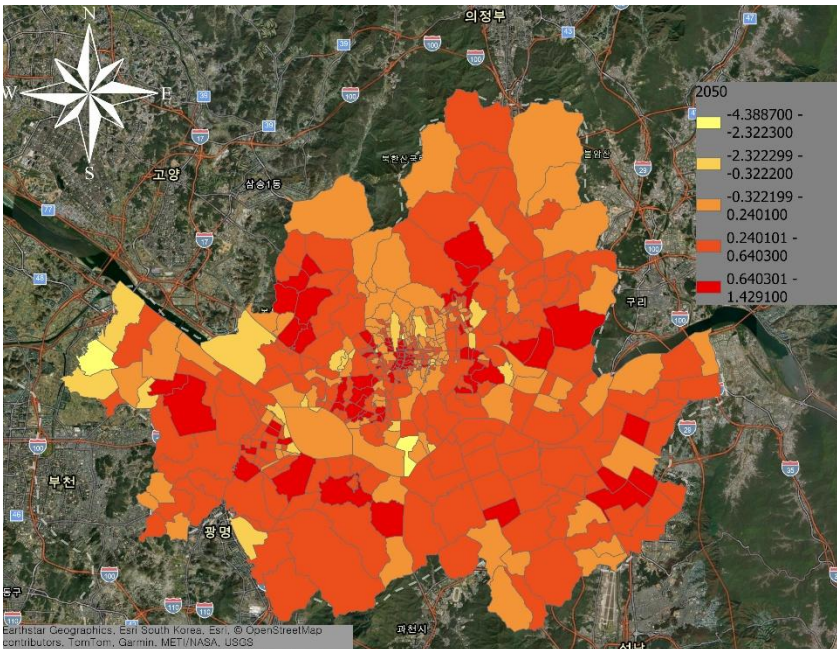
〈2020년대 취약성〉



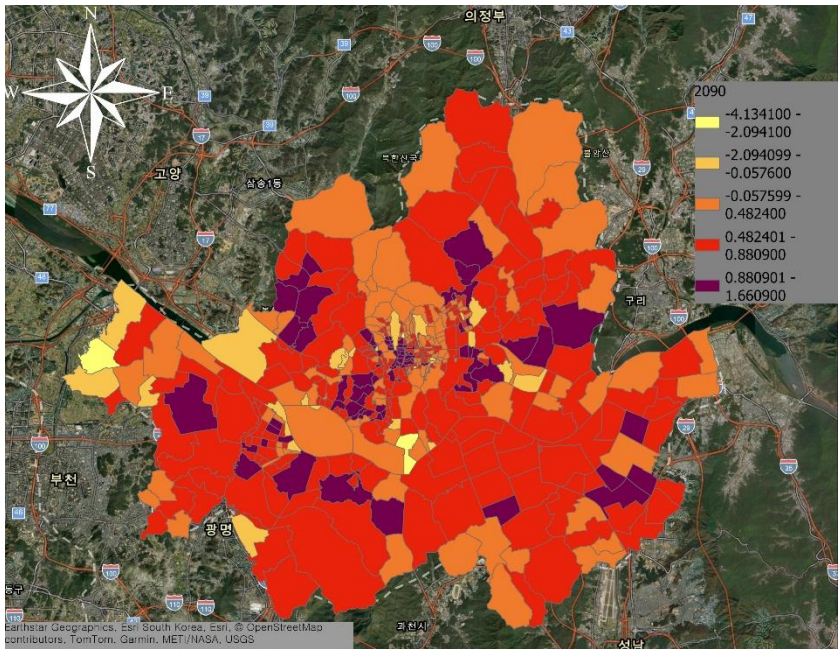
〈2030년대 취약성〉



〈2050년대 취약성〉

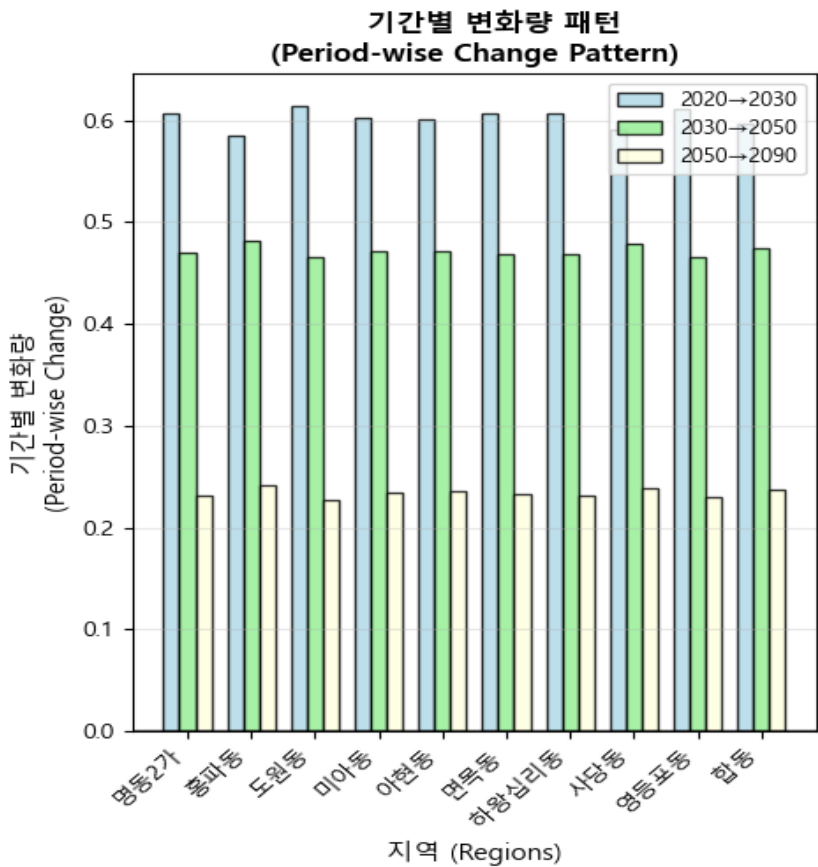
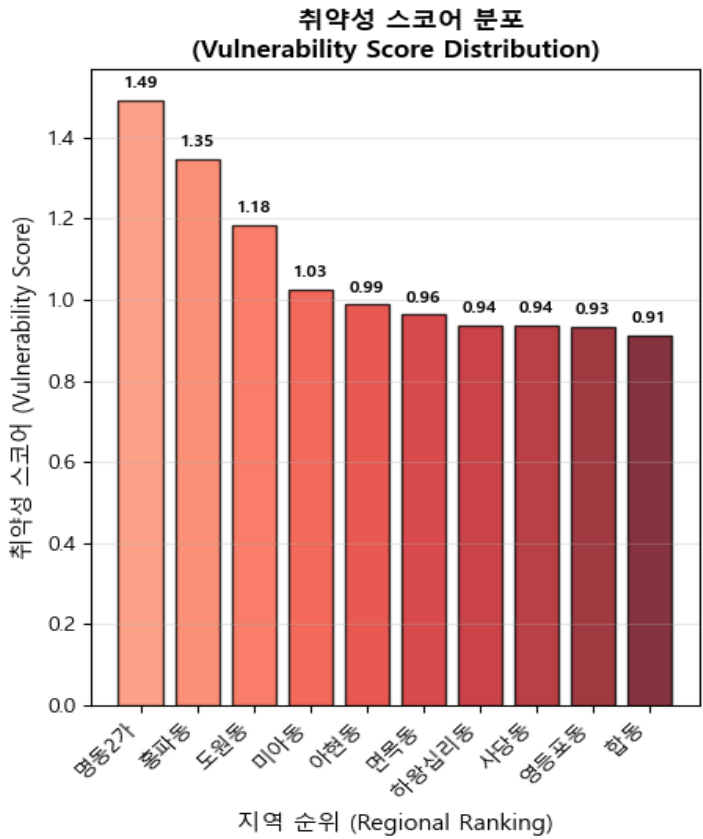
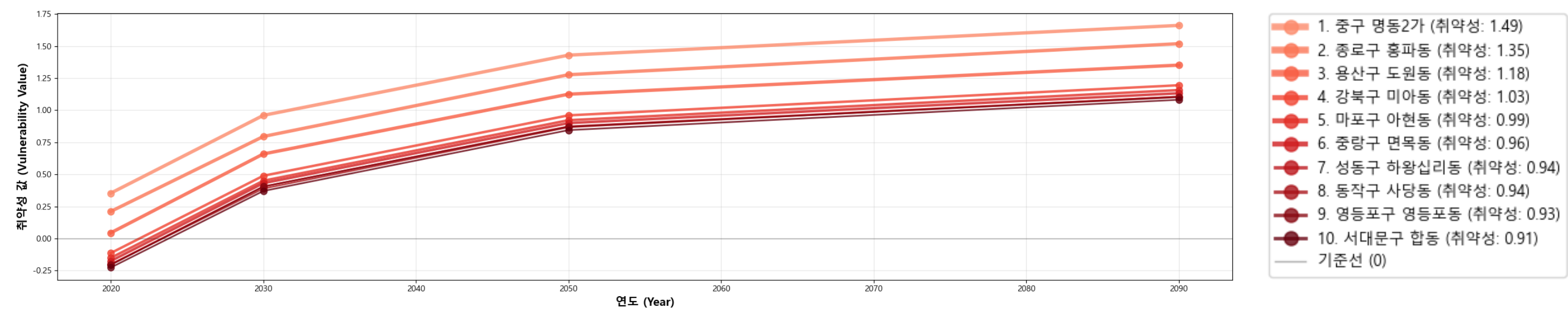


〈2100년대 취약성〉



2) 취약성 증가 패턴 및 정책적 임계점

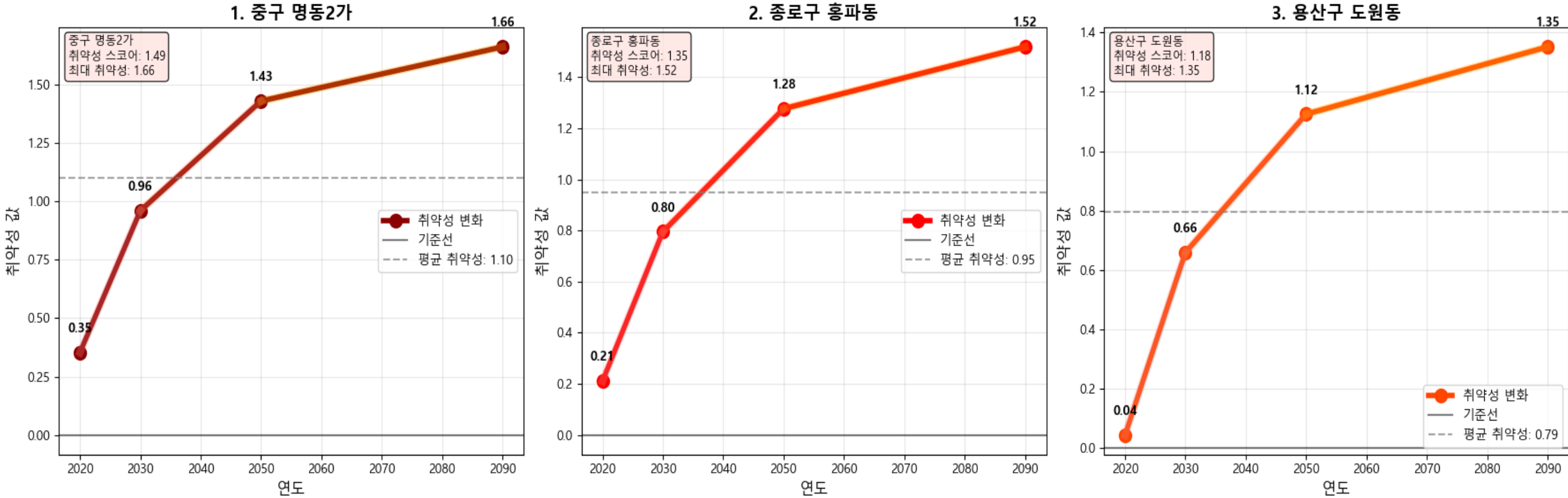
<상위 10개 고위험 지역의 시공간적 취약성 패턴 분석>



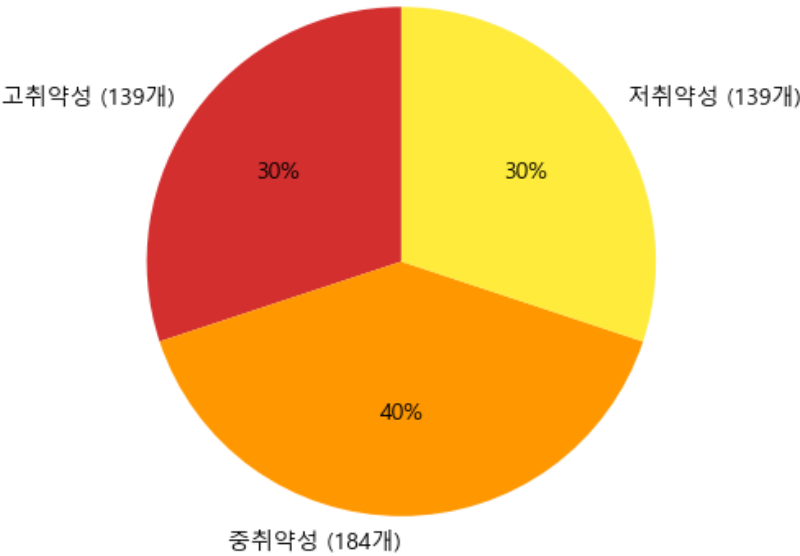
지역별 상세 정보 (Detailed Regional Information)				
순위	지역명	취약성 스코어	최대 취약성	최종 취약성
1	중구 명동2가	1.49	1.66	1.66
2	종로구 홍파동	1.35	1.52	1.52
3	용산구 도원동	1.18	1.35	1.35
4	강북구 미아동	1.03	1.19	1.19
5	마포구 아현동	0.99	1.16	1.16
6	중랑구 면목동	0.96	1.13	1.13
7	성동구 하왕십리	0.94	1.11	1.11
8	동작구 사당동	0.94	1.11	1.11
9	영등포구 영등포	0.93	1.10	1.10
10	서대문구 합동	0.91	1.08	1.08

2) 취약성 증가 패턴 및 정책적 임계점

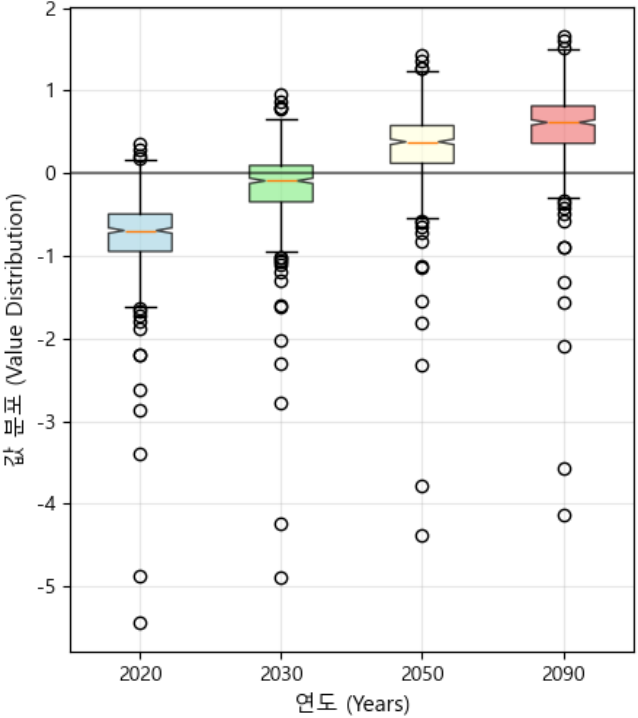
서울시 상위 3개 고취약성 지역 상세 분석
(Top 3 High-Vulnerability Regions - Detailed Analysis)



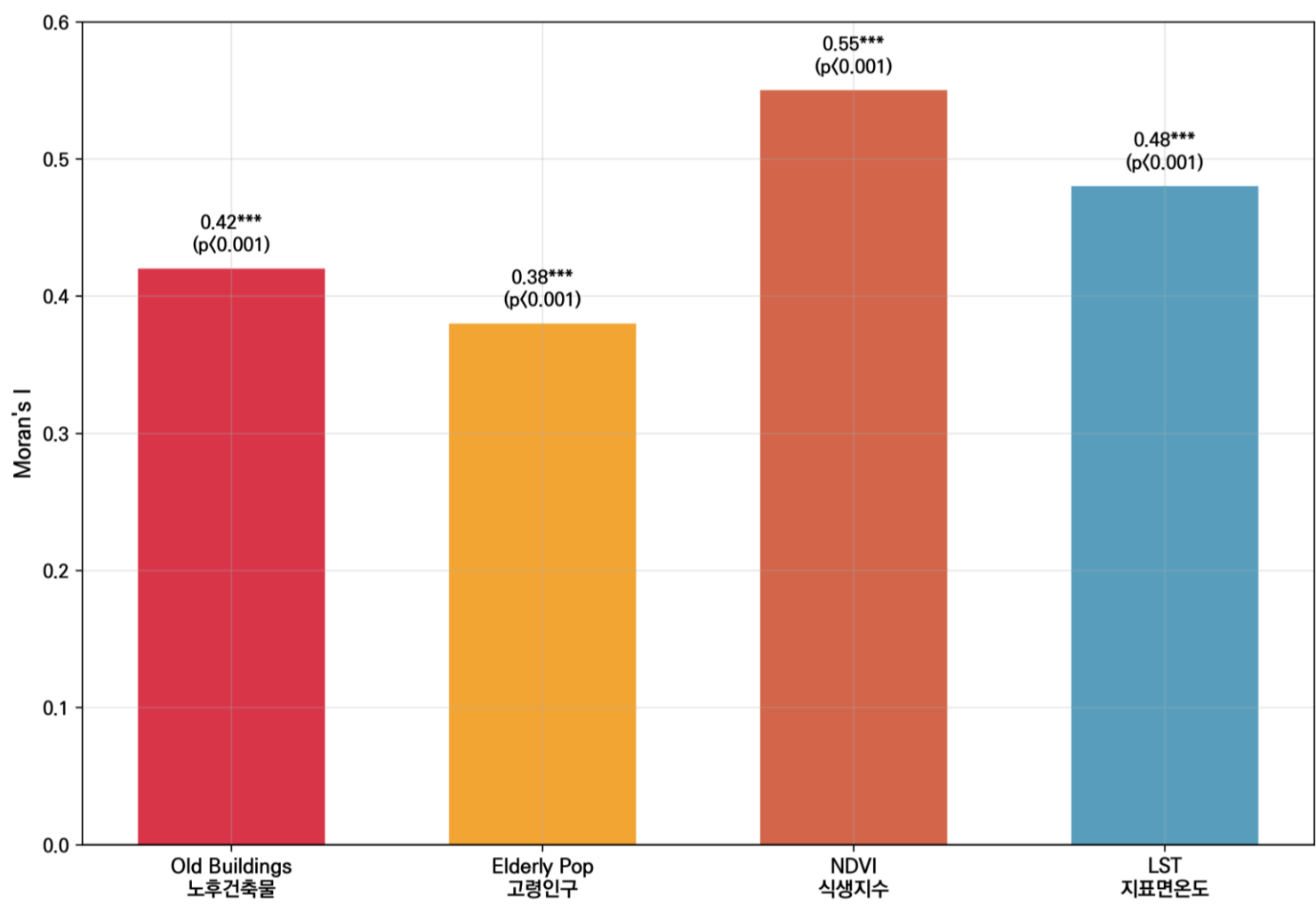
취약성 수준 분포 (전체)
(Vulnerability Level Distribution)



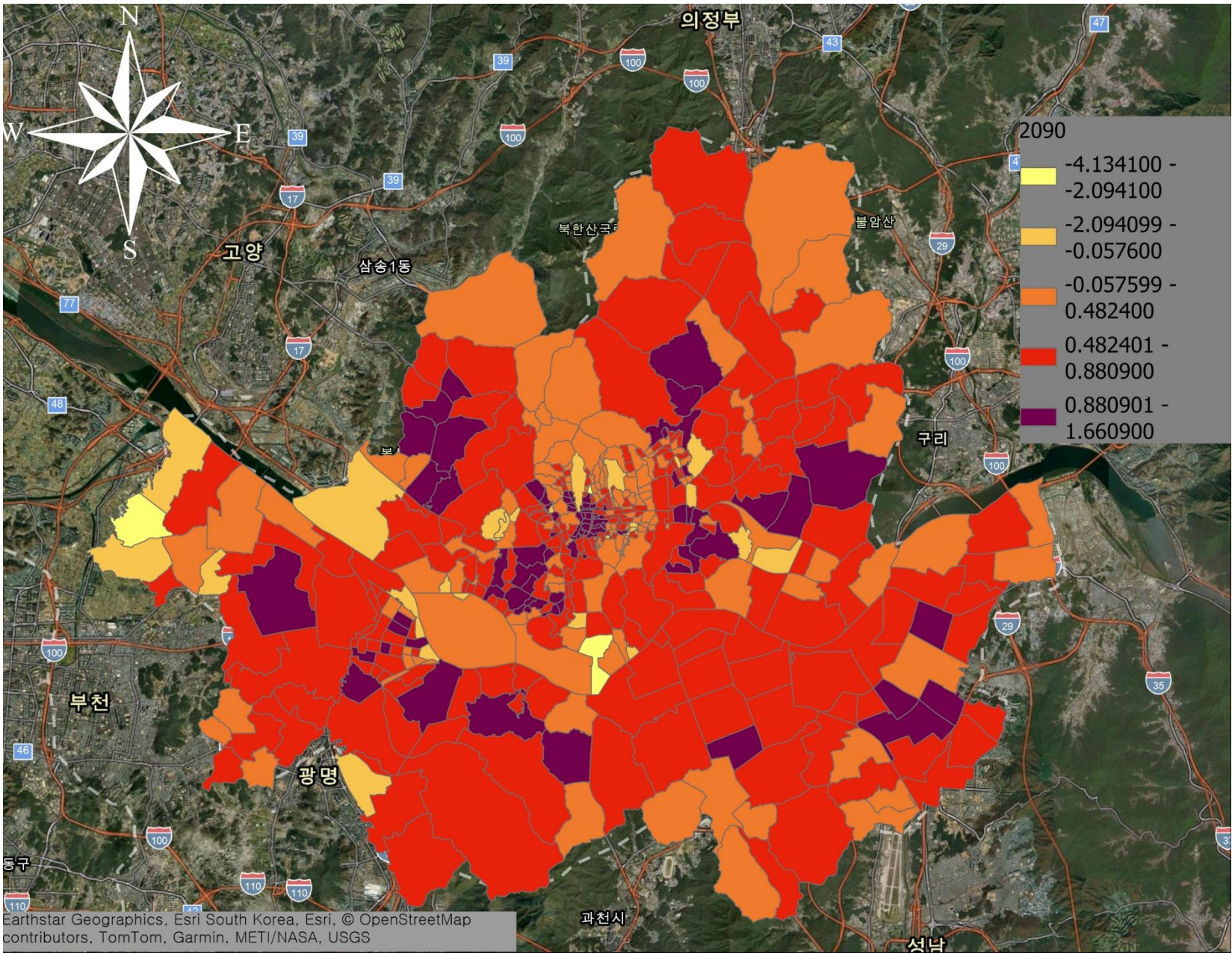
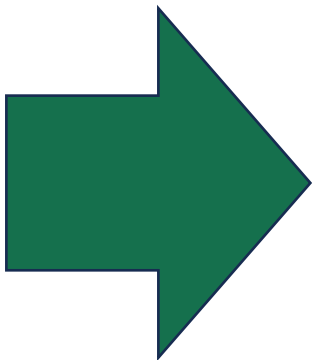
연도별 값 분포 (전체 지역)
(Yearly Value Distribution)



3) 공간 패턴 분석 결과



〈사회 취약성의 공간적 군집 현상〉



〈기후 변화 취약성의 공간적 군집 현상〉

4) 주요 발견 및 과학적 기여

기후변화 취약성 평가 방법론의 시공간적 확장

- 기존 정적 취약성 평가의 한계를 극복
- 공간적 의존성(GAT)과 시간적 연속성(LSTM)을 모델링하는 방법론적 기반을 마련

취약성 시간적 변화 패턴의 정량적 발견

- 모든 지역의 취약성 궤적을 정량화
- 기후변화 적응 정책의 시간적 우선순위 설정에 수학적 근거를 제공

구도심 집중형 취약성 공간 구조 규명

- 물리적 환경 쇠퇴와 인구 고령화의 공간적 중첩 메커니즘을 실증
- 도시 재생 정책과 기후 적응 정책의 통합적 접근 필요성을 과학적으로 입증

계절간 연쇄반응 메커니즘과 임계점 기반 조기경보 체계

- 계절간 연쇄반응의 물리적 메커니즘을 규명
- 장기간 미래 시나리오에 따른 상호작용 분석은 기존 단일 시점 평가를 넘어선 동적 조기경보 시스템의 과학적 기반을 구축

다차원 데이터 융합을 통한 환경-사회 복합취약성 개발

- 5개 차원의 이질적 데이터를 완전 시공간 정합
- IPCC 프레임워크 기반 노출-민감도-적응능력 변수를 체계적으로 통합
- 환경과학과 사회과학의 융합 방법론을 제시, 기후변화 영향 평가의 다학제적 접근법을 제안

5) 모델링 결과의 신뢰성

1.

이론적 신뢰성

- IPCC 취약성 평가 프레임워크를 완전히 준용하여 노출-민감도-적응능력의 이론적 구조 설계
- 기존 선행연구과의 방법론 비교를 통해 일관성을 확보
- 타 모델 대비 높은 학습 안정성과 적은 학습 손실 확보

2.

실증적 신뢰성

- 서울시 25개 자치구 전체에서 일관된 불평등한 공간적 패턴을 확인
- 2018-2023년 6년간의 관측 데이터와 모델 예측 간 높은 일치도
- 하이퍼파라미터 조합, 교차검증에서 모두 안정적 성능을 보여 모델의 성능을 입증

3.

한계 인식

- 서울시에 국한된 분석으로 다른 도시에 대한 일반화 검증이 필요
- 6년 관측 데이터, 80년의 시나리오 데이터 기반으로 더 장기적인 기후변화 패턴 검증이 요구
- 정책 개입 효과를 모델에 충분히 반영하지 못한 점, 향후 연구에서 정책 시뮬레이션 기능을 추가

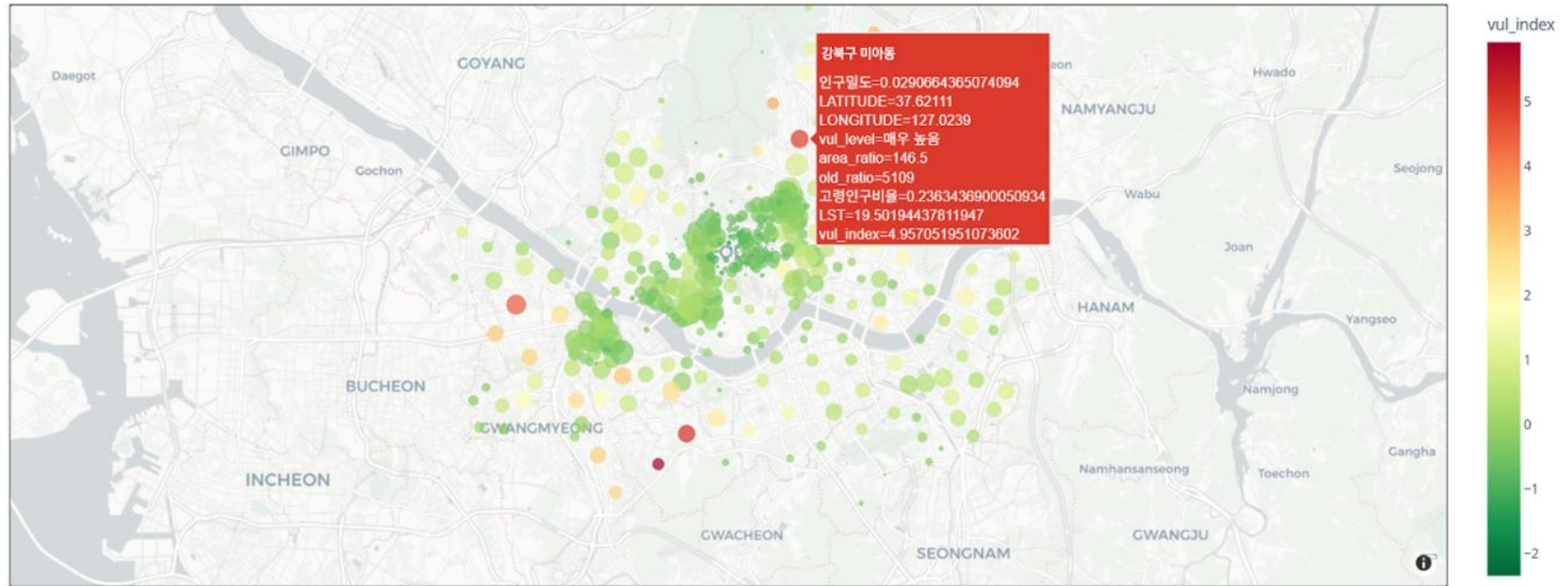
4. 정책 활용방안 및 파급효과

1) 현행 법령체계 내 정책 도구로서의 활용방안

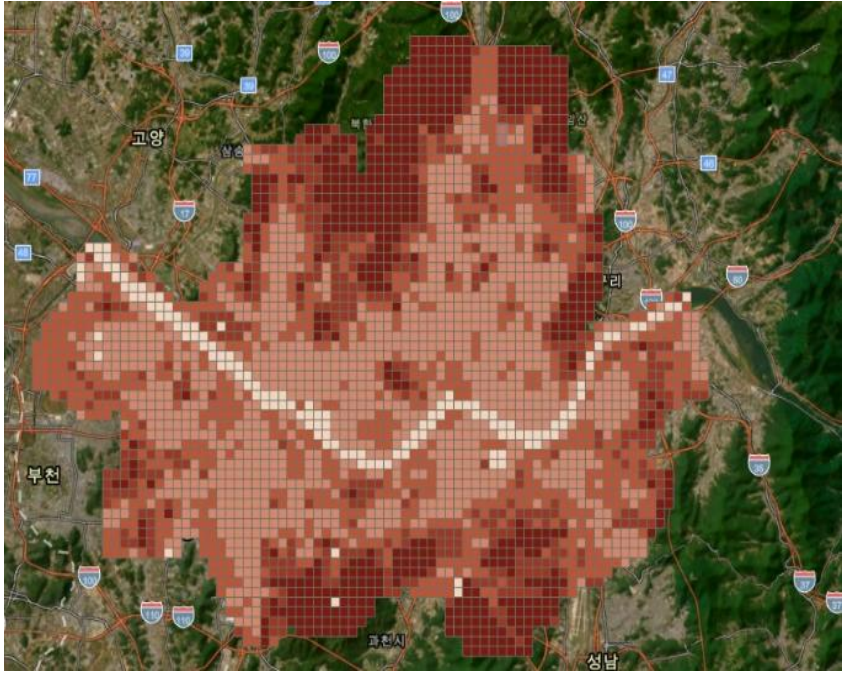
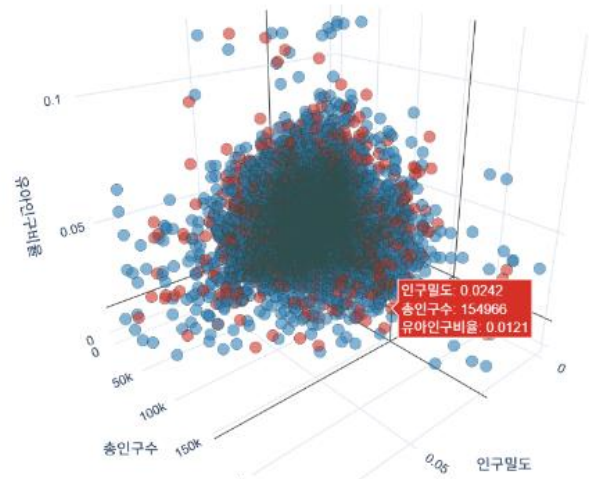


〈지자체 인터랙티브 시각화 활용 방안〉

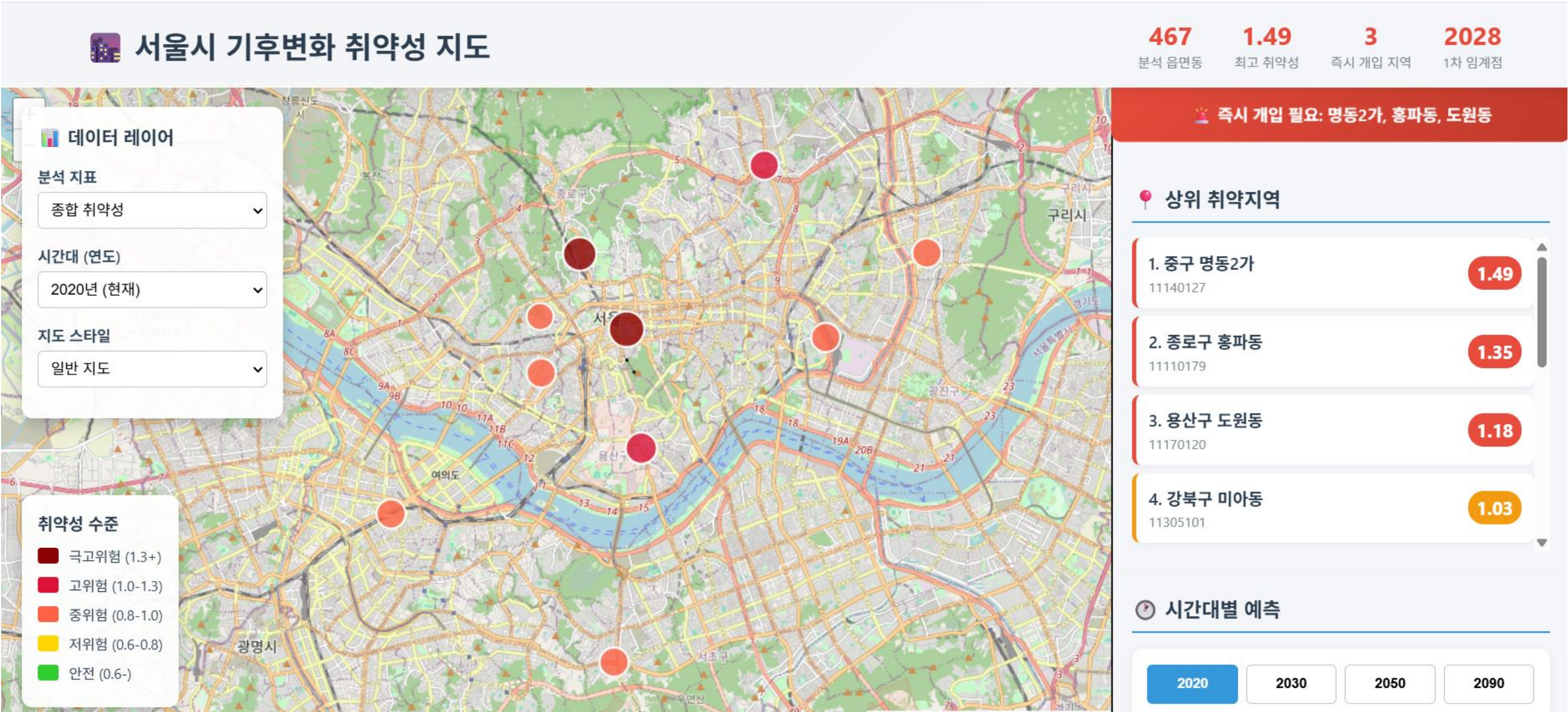
취약성 지수 공간 분포



인구통계 데이터 3D 시각화



1) 현행 법령체계 내 정책 도구로서의 활용방안



〈실제 HTML 기반 플랫폼 구성안〉

https://zxsa0716.github.io/vulnerability_seoul/seoul_vulnerability_dashboard.html

1) 현행 법령체계 내 정책 도구로서의 활용방안



공공부문 AI 활용현황
실태조사,
(SPRi 소프트웨어정책
연구소,2023)

〈현실 정책적 장애요소〉

- 256개 기관을 대상으로 AI 내부개발을 하지 않는 이유에 대해 조사한 결과, **전문인력 부족** 80.9%
 - 인공지능 도입의 장애요인에 대해 136개 기관 ‘예산 부족’ (46.1%) , ‘기존 직원의 역량 부족’ (30.5%), ‘내부 가용 데이터 부족’ (24.4%)
- > 예산, 역량, 데이터 부족 문제 해결 가능



서울특별시 기후변화 대응에 관한 조례

〈현실 정책적 장애요소〉

- 예측시스템 구축·운영에 대한 구체적 근거가 부족
 - 예측 결과의 법적 책임 문제가 모호
- >서울시 조례 개정을 통한 단기 대응과 중앙정부 법령 개정 건의를 병행

1) 현행 법령체계 내 정책 도구로서의 활용방안

현실 정책적 극복 요소

제3차 국가 기후변화 적응대책

| 2021 - 2025 |

제3차 국가 기후변화 적응대책

- 첫번째 목표 - 과학적 기후 감사 예측 및 적응기반 고도화
- 네번째 목표- 모든 주체가 함께하는 기후적응 추진으로써 기후위기 취약계층 등에 대한 국가적 보호 강화, 기후재난 대비 대응역량 제고

→ 국민과 함께하는 적응 거버넌스 구현하는데 이바지할 수 있음.

1) 현행 법령체계 내 정책 도구로서의 활용방안

- 서울시는 전국 최초 기후예산제와 4조 5,610억원 규모의 기후예산, 그리고 6S 기반 스마트도시 인프라라는 강력한 기반을 보유
- 78개 지자체 중 가장 앞선 디지털 거버넌스 경험 과 C40, ICLEI 등 국제 네트워크에서의 리더십을 갖추고 있음
- 데이터 관련 문제는 서울행정정보시스템과 6S 플랫폼 간 연계성을 통해 해결 가능
- API 표준화와 모델링 표준화로 단계적 통합을 추진 하면 됨



2) 기대효과

사회적 효과

- 재난 취약계층 생명 보호 강화
- 재난 사망자 및 피해자 감소
- 건강 불평등 악화
- 기후정의 구현



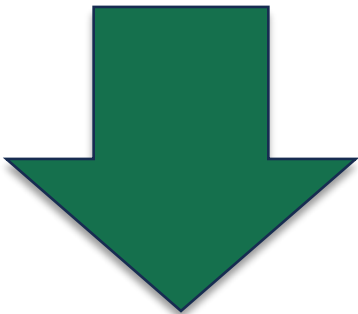
경제적 효과

- 직접적 재난피해 절감
- 조기경보시스템 비용 편익
- 부가가치 창출
- 연관 산업 활성화



행정적 효과

- 데이터 기반 의사결정
- 정책 수립 집행 간소화
- 재난경보 정확도 제고
- 생활밀착형 안전 및 건강



종합 효과 : 과학적 근거에 기반한 선제적 기후위기 대응 및 취약계층 보호

재난피해 감소 + 경제적 손실 절감 + 행정 효율화 + 국민 신뢰도 증가

기후위기 대응 , 취약계층 보호, 지속가능한 발전, 국민 안전 확보

3) 경제성 분석

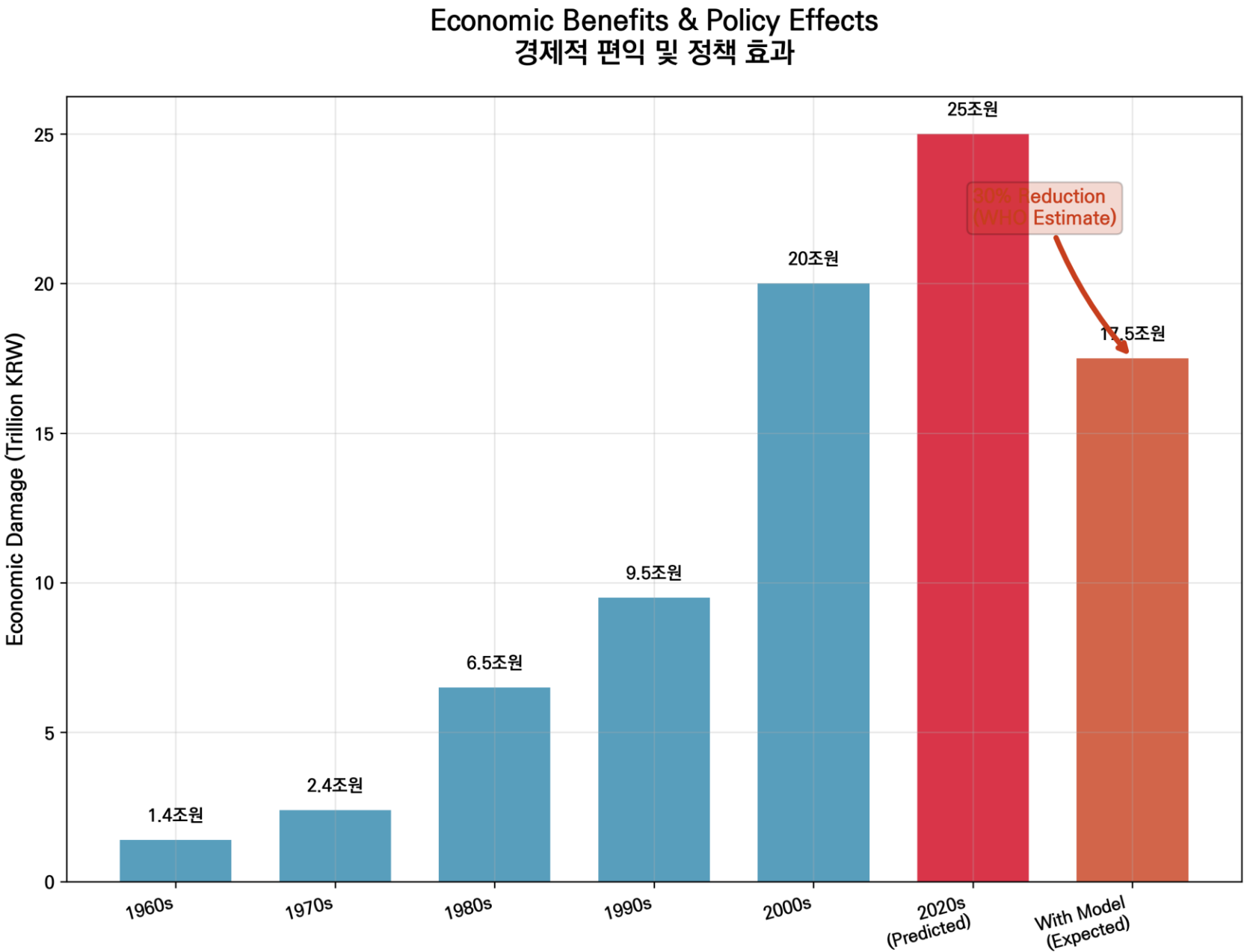
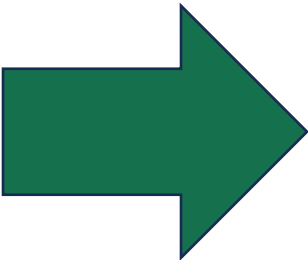
〈재난피해로 인한 피해액 표〉

기간	재산피해액 합계
1960년대	1조 4,320억 원
1970년대	2조 4,102억 원
1980년대	6조 4,712억 원
1990년대	9조 4,526억 원
2000년대	20조 원 이상

〈국가통계포털(KOSIS) 재산피해액 추이〉

〈국제 사례 기반 투자 효과 분석〉

구분	투자 효과	근거 기관
조기경보 효과	30% 피해감소	WHO/WMO
예측시스템 편익	투자비 10배 이상	UNDRR
유럽 기상정보	연 4,627억 유로	세계은행
개도국 홍수경보	20-70배 편익비	World Bank
국제조기경보시스템	260백만 ~ 1,200백만 유로	Swiss Re



- 1. 연간 3천억원 사회적 비용 절감
- 2. 투자 대비 10배 이상 편익 창출
- 3. 정책 지원으로 행정 효율성 향상 – 데이터 기반 의사결정

5. 결론 및 향후 과제

1) 연구 결론 및 학술적·정책적 기여

1. 방법론적 혁신과 전환

비선형적인 관계를 포함한 시공간 모델링

2. 기후정의와 사회적 안전 강화

취약지역 선제 식별 및 집중 지원 기여

3. 효율적 자원 배분과 경제적 효과

취약지역에 효율적 자원 배분 가능

4. 지속가능한 미래 대응 기반 구축

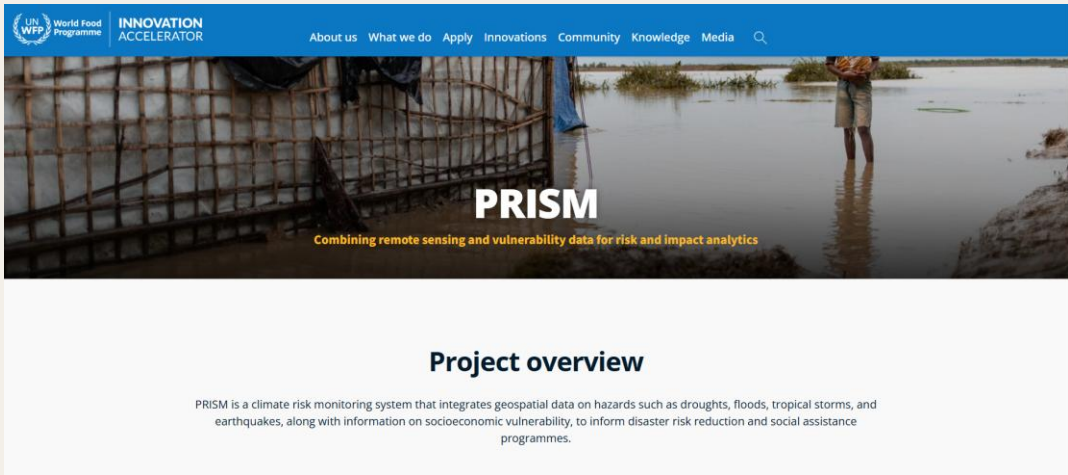
장기 시나리오를 통한 지속가능한 적응 역량 강화

기후변화 취약성 예측 모델의 정책 활용을 통해 과학에 기반한 선제적 기후위기 대응과
포용적 기후정의 구현이라는 국가적 목표에 기여할 수 있습니다.

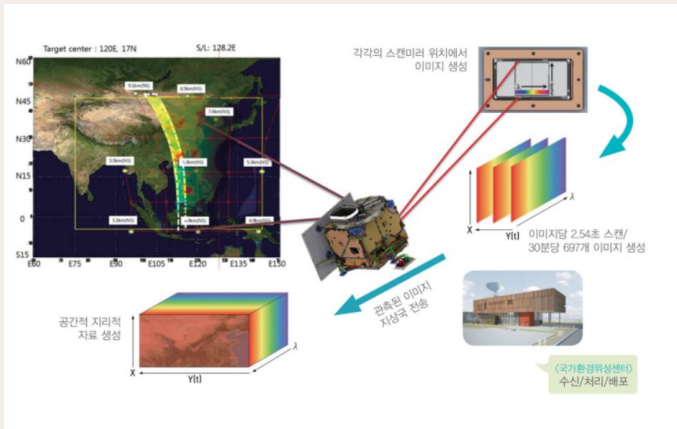
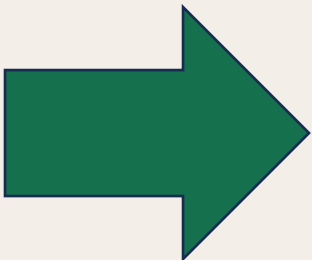
2) 향후 연구과제 및 발전방향

Real-time Modeling

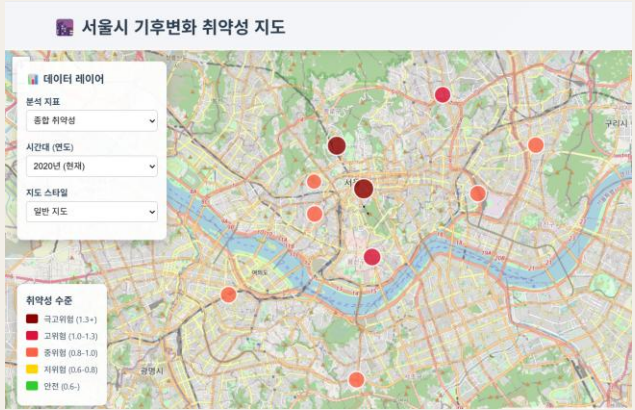
- 목표: 실시간으로 기후취약성을 예측해주는 모델



〈UN WFP PRISM〉



위성을 이용한
실시간 기후데이터



연간 업데이트
데이터

연간 데이터 분석을 이용한 수동적 모델링이 아닌 실시간으로 변화하는 기후 상황에 맞춘 취약성 평가가 가능한 모델

2) 향후 연구과제 및 발전방향

■ 최종 목표: 기후정의 실현을 위한 전국 단위 기후변화 취약성 예측·대응 체계

공간적 확장

- 타 광역시 전이학습 적용
- 지역 맞춤화
- 전국 시군구 단위 확대
- 한파, 홍수 등 다중재해 요소 학습

기술적 고도화

- 인과추론 모델
- 정책 시뮬레이션
- 불확실성 정량화 방법론 개발
- 설명가능 AI 기술 도입

글로벌 확산

- 아시아 도시 적용
- UN-Habitat 데이터 활용
- 개도국 기술이전 근거 확보
- 기후적응 표준 지표 확보

예측에서 예방으로, 대응에서 적응으로 기후변화 시대의
공정하고 지속가능한 사회를 과학으로 실현합니다.

감사합니다.