

기후 위기에 어떻게 적응할 것인가?

기후리스크 포럼 2020. 10. 25

이동근 서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수



Contents

기후 위기에 어떻게 적응할 것인가

01. 기후 위기와 적응의 중요성
02. 기후 위기와 산불
03. 연안홍수의 위험과 적응대책
04. 기후변화와 도시열섬이 주는 복합적 리스크
05. 적응경로를 고려한 적응대책
06. 기후변화 적응의 새로운 논의



이

기후 위기와 적응의 중요성



기후변화와 우리들의 모습 : 기후위기 시대의 도래

지구촌 기후위기, 뉴노멀로 자리매김

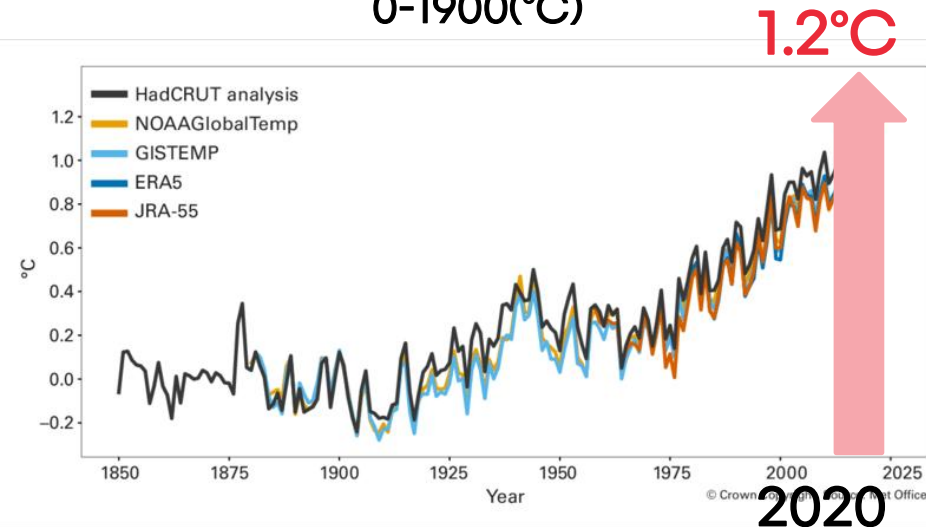
☑ 지구 평균기온 1.5°C 상승 시점 10년 단축
 (IPCC AR6 제1 그룹 보고서, '21)
 지구 평균기온 1.5°C 상승 예상 시점,
 2021 ~ 2040년으로 전망
 * (1.5도 특별보고서, '18) 1.5°C 상승 예상 시점, 2030~2052년 전망

☑ 빈번한 기후재난 현상은 인간의 활동으로 기인
 (IPCC AR6 제1 그룹 보고서, '22)
 한 지역에 폭염과 폭우가 동시·연쇄적으로 발생하는 등 이상기후에 의한 자연재해의 중첩 현상이 증가하는 양상

☑ 기후재난 빈도·강도 증가,
 이로 인한 사회·경제적 피해 심각
 '22년 인도·파키스탄 불철 폭염, 호주의 겨울철 홍수, 서울 115년만의 기록적 폭우
 미국, 프랑스, 스페인의 잇단 산불 등 기상이변 발생
 기후변화로 최근 20년('00~'19년)간 재해 횟수 약 2배 증가, 경제적 피해 1.87배 증가(1,874조원 -> 3,415조원)

☑ 빈번한 기후재난 현상은 인간의 활동으로 기인
 해수면 상승 속도는 1.3mm/yr(1901-1971)에서 3.7mm/yr(2006-2018)로 약 2.8배 증가

Global mean temperature difference from 1850-1900(°C)



출처: WMO(세계기상기수), 2020. 12. 2.



기후변화와 우리들의 모습 : 기후위기 시대의 도래

탄소중립 규제 강화

- 탄소국경세 본격 도입, 국내 수출 기업들에게 부담으로 작용
- 미국 Clean Competition Act, EU의 CBAM(탄소국경 조정메커니즘) '23년 시범도입

EU 2023년 /2030년 탄소국경세

분야	2023년 (30.6USD/tCO ₂ 기준)	2030년 (75USD/tCO ₂ 기준)
철강	141.9	347.7
석유화학	93.8	229.8
전지	7.2	17.8
자동차	5.2	12.7

ESG 경영 강화: 탄소중립 선언 기업 확대

Microsoft 마이크로소프트	2050년까지 '탄소 네거티브' "기존 배출한 탄소도 없애겠다."
Apple 애플	2030년까지 '탄소중립' 산림사업 등 탄소 제거
Google 구글	2030년까지 '탄소중립' 탄소 배출량 추적 플랫폼 개발
amazon 아마존	2040년까지 '탄소중립' 기후 위기 대응 기금 조성
bp 브리타시페트롤리엄(BP)	2050년까지 '탄소중립' 탄소 집약도 50% 감축
Ford 포드	2050년까지 '탄소중립' 전기차 기술 투자
DELTA 델타항공	2030년까지 '탄소중립' 지속가능한 연료 개발

RE100 (Renewable Energy 100%)

- 2050년까지 기업 소비 전력의 100%를 재생전력으로 전환
- 대상 기업 : 전력 다소비 기업(100Wh/년)

- (세계) 애플, 알파벳, 마이크로소프트, 메타, BMW, GM 등 384개 기업이 가입('22.10 기준)

애플, BMW, TSMC, GM 등 RE100 선언한 77개의 글로벌 기업, 공급망 내협력업체에 RE100 동참 요구
-> 국내 반도체, 자동차, 철강 등 주요 업종 수출 차질 우려 -> RE100, 새로운 무역장벽으로 부상

- (국내) SK 그룹 6개사 한국 최초 RE100 가입('20.12) 이후 현재 기준 24개 기업* RE100 가입

*SK(주), SK텔레콤(SK브로드밴드 포함), SK하이닉스, SKC, SK실트론, SK머티리얼즈, 아모레퍼시픽, LG에너지솔루션, 한국수자원공사, KB금융그룹, SK아이테크놀로지, 현대모비스, 현대위아, 기아, KT, 삼성전자 등

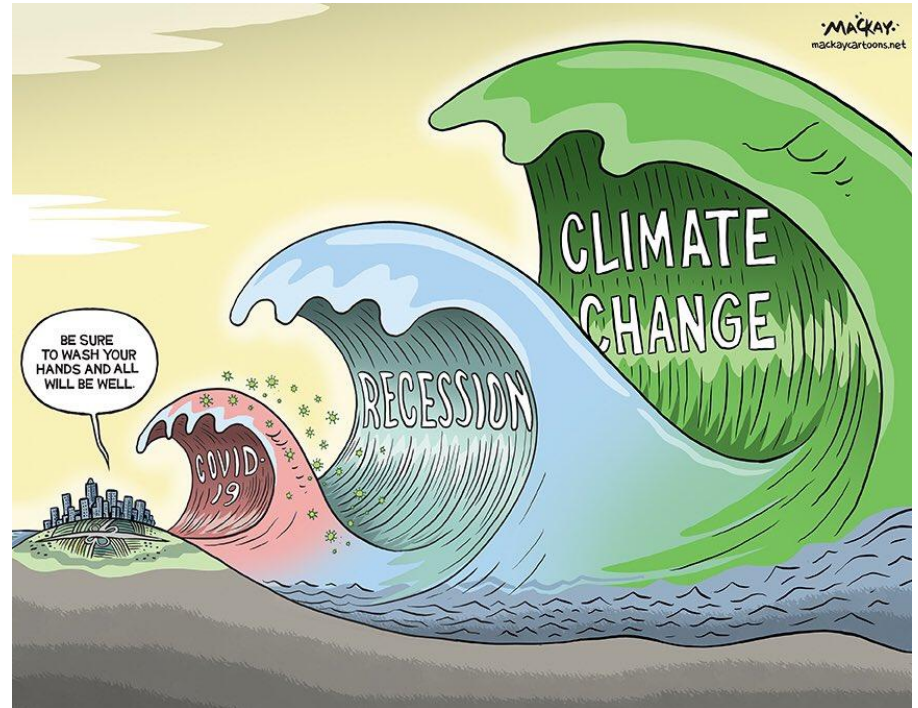
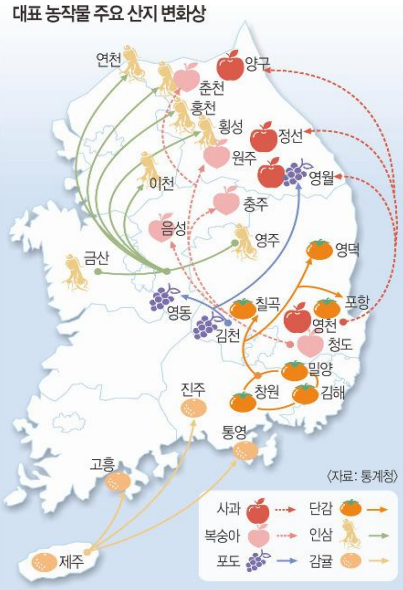
Introduction to RE100

출처: RE100 homepage

기후변화와 우리들의 모습 : 기후위기 시대의 도래

기후리스크 확대

- ☑ **기후변화로 인한 생물다양성 감소 등의 생태계 피해**
 온실가스 감축 없이 현재 생태로 배출될 경우, 극한 기상 발생으로 국내 야생동식물 종의 약 6%, 내륙습지 지역의 경우 약 26%까지 소멸 위험에 노출
- ☑ **기후변화에 의한 감염병 증가**
 동물의 생태계 변화 및 인간과의 접촉 빈도 증가에 의한 인수공통감염병 증가
- ☑ **기후변화 -> 작황부진 -> 식량공급·가격 타격**
 기후변화, 기상이변에 따른 작황부진, 식량안보 중요성 대두 우리나라의 지난 30년간
- ☑ **빈번한 기후재난 현상은 인간의 활동으로 기인**
 인구의 90% 이상이 도시에 거주하는 우리나라는 기후변화로 인한 도시재해에 특히 취약



기후위기와 적응의 중요성

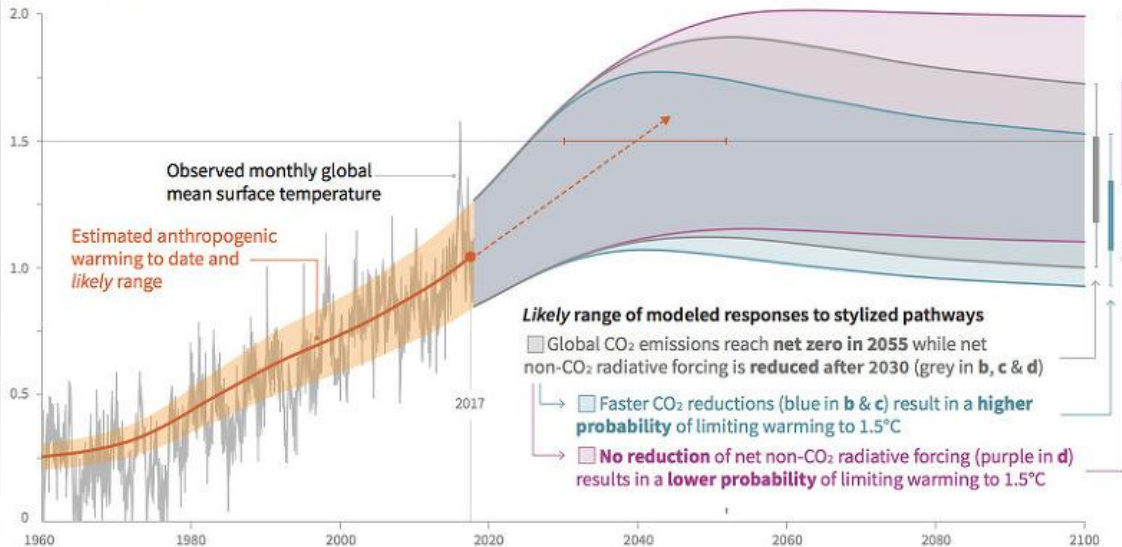


기후위기란?

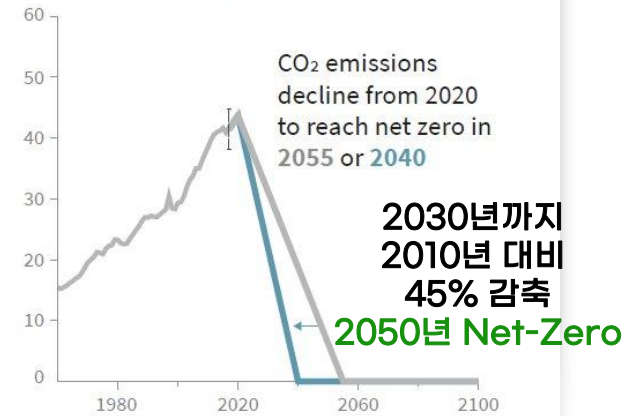
- 2050년까지 섭씨 1.5°C 목표 달성 (현재에 비해 섭씨 약 0.5°C)의 기온상승으로 호우, 열섬, 산불 등 발생
- 탄소 중립과 관계없이 기후 변화 적응 실시
- 전지구적 기후 위기와 이에 따른 생활, 사회, 경제 및 자연·지구환경과 관련된 피해의 영향을 방지하거나 저감
- 기후 위기에 따른 영향에 대한 활용·증진 포함



Global warming relative to 1850-1900 (°C)



b) Stylized net global CO₂ emission pathways
Billion tonnes CO₂ per year (GtCO₂/yr)



Faster immediate CO₂ emission reductions limit cumulative CO₂ emissions shown in panel (c).

기후위기와 적응의 중요성

기후탄력성은 지역과 계층, 분야, 그리고 ‘얼마나 준비되었느냐’에 따라 다름
 2017년 6월 금융 안정 위원회의 ‘기후 변화 관련 재무 정보 공개 협의체’의 권고안 발표
 기후변화영향(물리적 위험과 기회)관련 정보를 연차보고서나 지속가능 경영보고서 등 공개하는 기업 증가



- **지배구조**
지배구조 기후변화 관련 위험과 기회에 대한 조직의 지배구조
- **경영전략**
기후변화 관련 위험 및 기회가 조직의 사업 전략 및 재무 계획에 미치는 실질적 및 잠재적 영향
- **위험관리**
기후변화 관련 위험을 파악, 평가 그리고 관리하기 위해 기관이 사용하는 프로세스
- **지표·목표설정**
해당 기후변화 관련 위험 및 기회를 평가하고 관리하는데 사용되는 지표·감축목표

기후변화 관련 재무정보 공개 주요내용

구분	주요 공개 내용
지배구조	<ul style="list-style-type: none"> • 기후리스크와 기회에 대한 이사회 관리·감독 내용 • 기후리스크와 기회를 평가·관리하기 위한 경영진의 역할
전략	<ul style="list-style-type: none"> • 단기·중기·장기적인 기후변화 관련 리스크와 기회 • 기후리스크와 기회가 영업·전략 및 재무 계획에 미치는 영향 • 지구평균기온 2도 이내 상승 시나리오를 포함한 다양한 기후 관련 시나리오가 영업·전략 및 재무 계획에 미치는 영향
리스크 관리	<ul style="list-style-type: none"> • 기후 리스크 식별, 평가 및 관리 절차 • 기후 리스크 식별, 평가 및 관리의 리스크 관리 체계 통합 방법
지표 및 목표치	<ul style="list-style-type: none"> • 기후리스크와 기회를 평가·관리하기 위해 사용하는 지표 • 온실가스 배출 정보 및 관련 리스크 • 기후리스크와 기회를 관리하기 위해 사용하는 목표치 및 성과

출처: TCFD 권고안에 따른 기후변화 관련 재무정보 공개의 핵심 요소/WWF 보고서 'TCFD가 한국기업에 의미하는 바는 무엇인가'

02

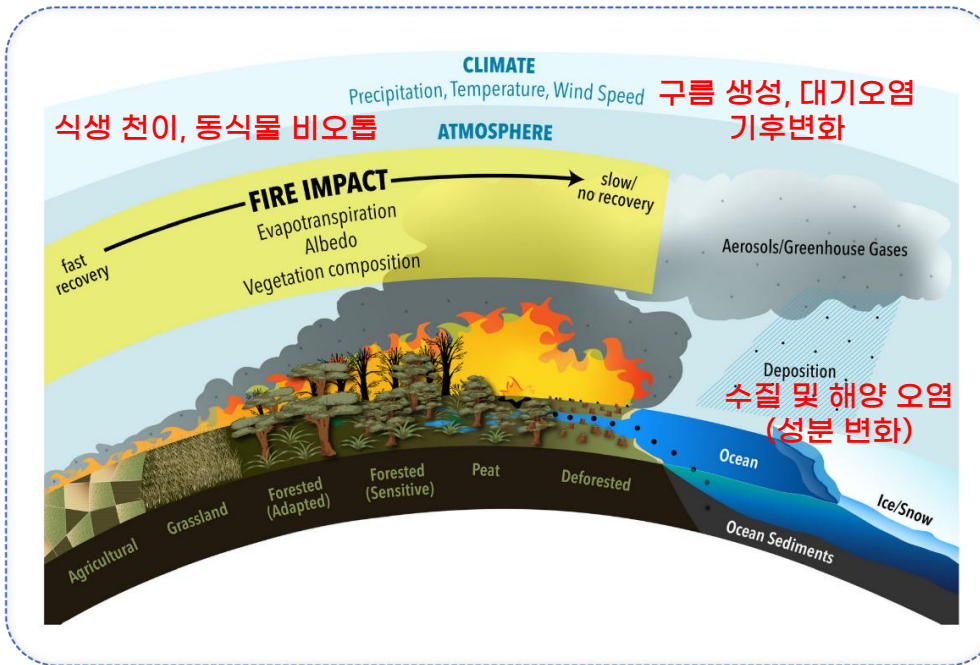
기후위기와 산불



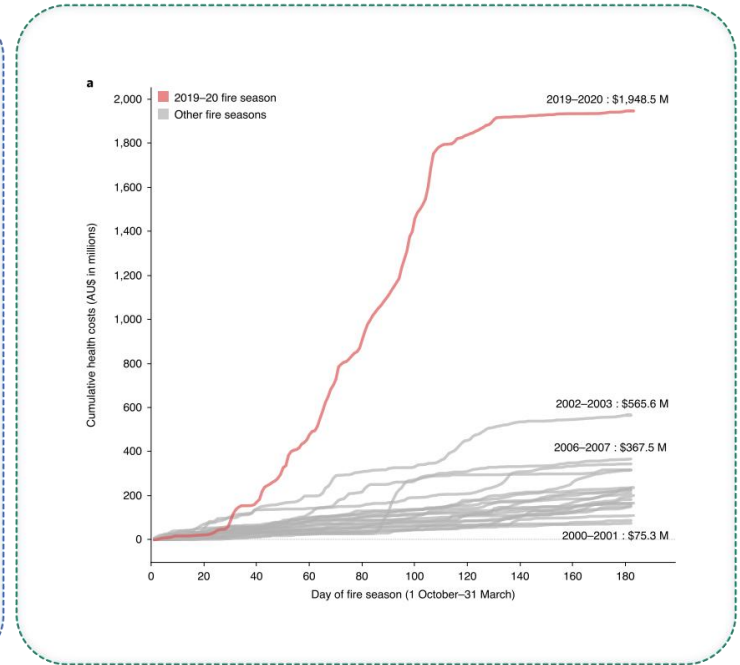
기후위기와 산불

산불이란? 기후 · 식생 · 토양 간의 상호작용으로 인해 발생

- ☑ 대기(aerosol, gases), 식생(disturbance), 토양(nutrition), 해양 등 생태계 전반에 영향을 끼침
- ☑ 생태계 시스템에서 꼭 필요한 부분
- ☑ 그러나, 산불로 인한 PM2.5(미세먼지) 발생은 인간에게 직접적인 피해를 주기도 함



대기 · 수질 · 해양 오염

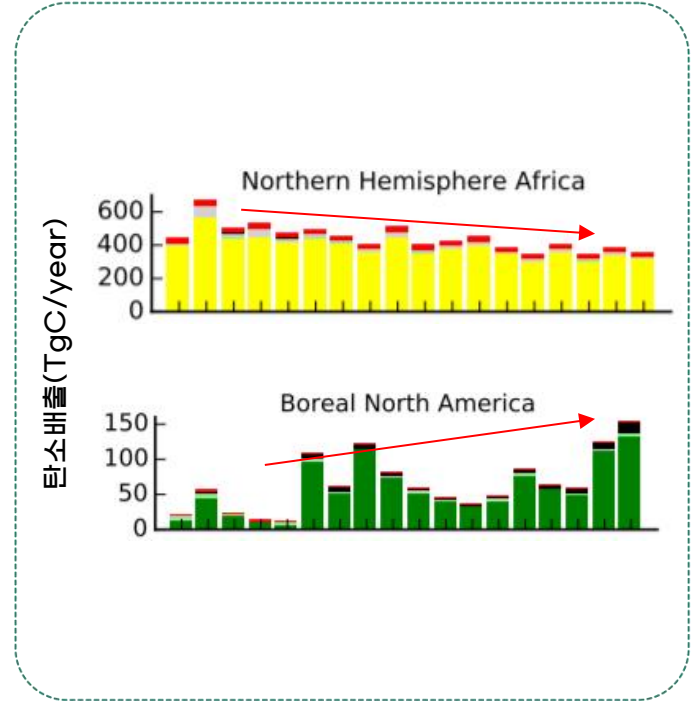
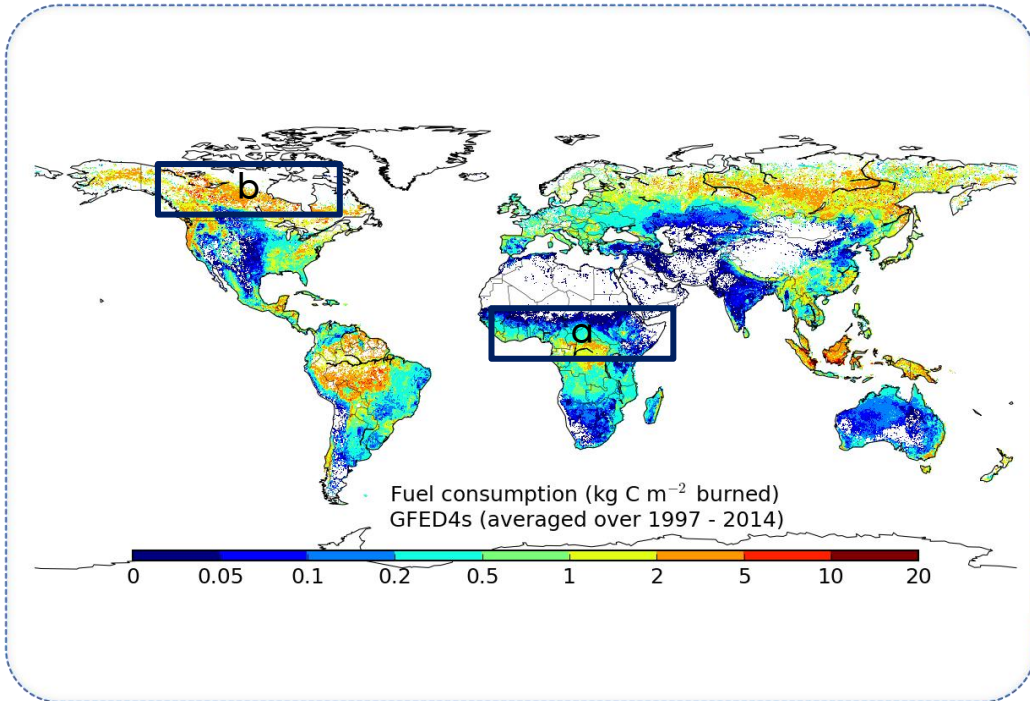


2019-2020 호주에서 발생한 산불로 인한 건강 피해 금액 (기존의 피해금액보다 상당히 증가함)

출처: Lasslop et al. (2019) 10.1007/s40641-019-00128-9, Johnston et al. (2021) 10.1038/s41893-020-00610-5

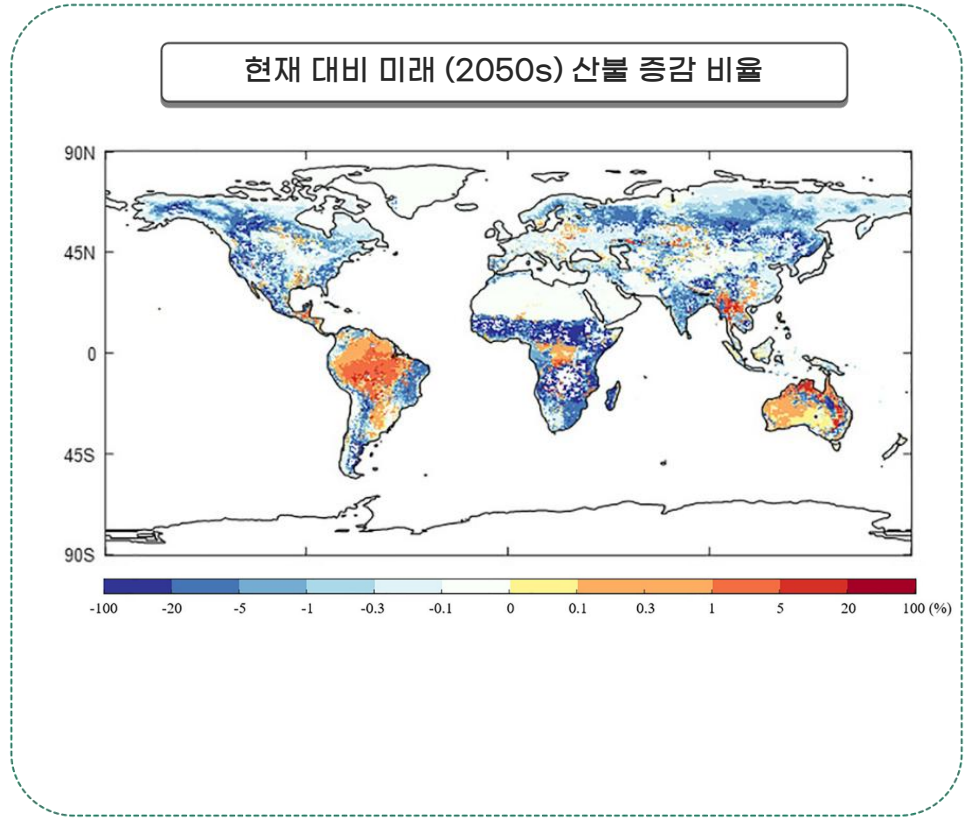
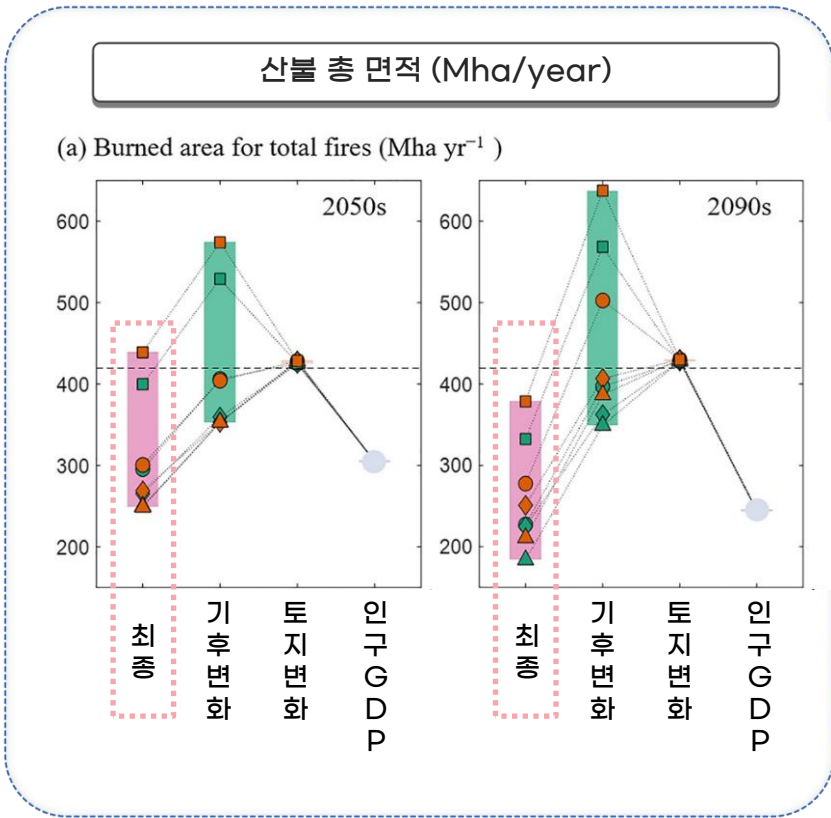
기후위기와 산불

- ☑ 인간의 영향이 자연적인 산불 시스템에 영향을 주고 있음
- ☑ 직접적인 인간의 영향: **토지이용변화**가 가져오는 산불 (아마존, 아프리카 등)
- ☑ 간접적인 인간의 영향: **기후변화**로 인한 폭염, 가뭄(건조) 증가 + 산림에 축적된 바이오매스 증가 (한대지역)
- ☑ 최근에는 토지이용으로 인한 산불은 감소추세지만 기후변화로 인한 산불이 증가



기후위기와 산불

- ✓ 미래의 산불 예측: 현재보다 약간 증가하거나 감소할 것으로 예상
- ✓ 감소: 인구와 GDP가 증가하면서 산불 활용이 감소됨
증가: 기후변화로 인한 바이오매스 증가, 토양과 대기가 건조해지기 때문
- ✓ 증가 시, 아마존, 인도차이나, 호주 등에서 산불이 증가할 것 -> 적응 대책이 필요
- ✓ 적응대책: 화재 방지 교육, 토지이용 규제, 실시간 분석을 통한 예측과 모니터링



03

연안홍수의 위험과 적응대책



연안홍수의 위험과 적응대책

세계적 위험성

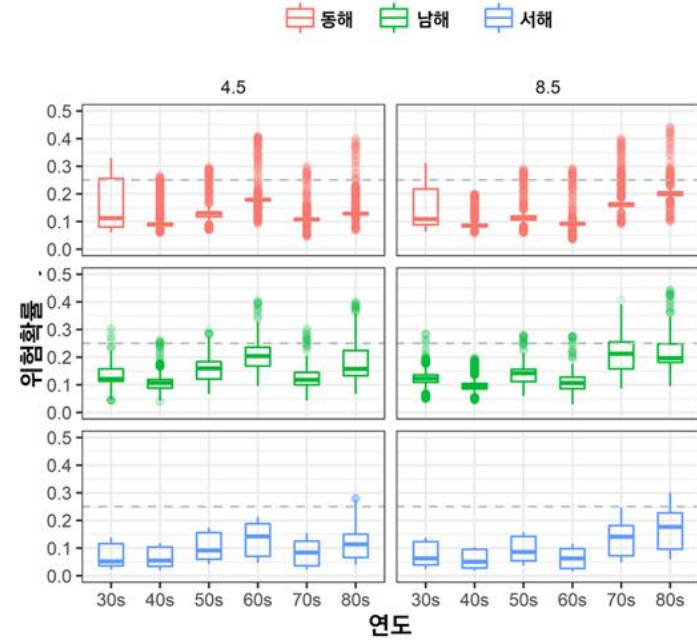
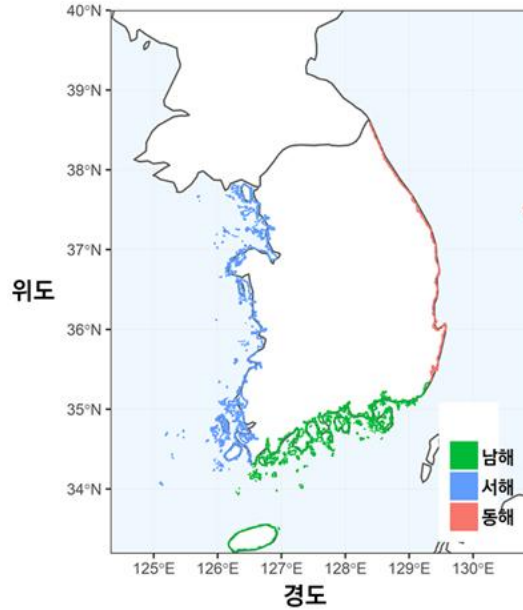
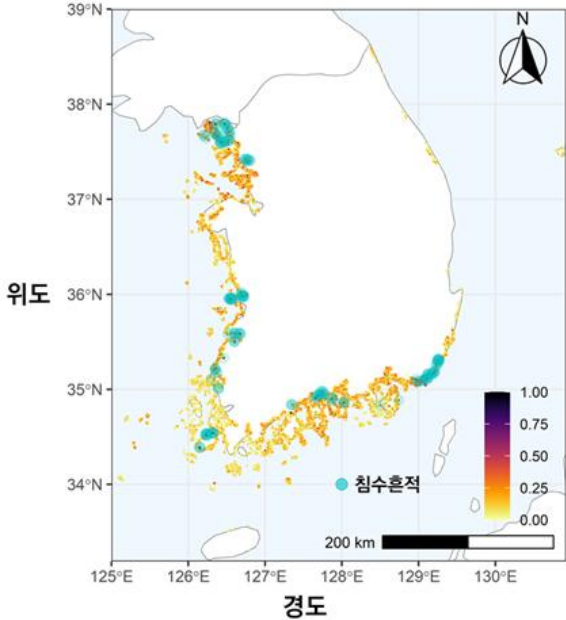
- ☑ 해안선과 인접한 연안 지역은 홍수, 침식, 해일 및 폭풍과 같은 위험에 노출
- ☑ 미래에는 해수면 상승이나 극한 기상 현상으로 인해 더욱 취약
- ☑ 전 세계 연안 지역 거주 인구수 2080년대까지 18억 명에서 52억 명으로 증가 예상

한국의 위험현황

- ☑ 최근 10년간 재해로 인한 총 피해는 주로 태풍(49%)과 호우(40%)로 인해 발생
- ☑ 3면이 바다와 접하고 있으며, 연안을 따라 전체 인구의 27.5%가 연안 지역에 거주
- ☑ 해수면 상승 또는 폭우로 인한 홍수와 같이 다양한 재난에 대한 피해 증가 가능성

연안홍수의 위험과 적응대책

☑ 우리나라 연안 침수 위험 정도, 3면의 차이 그리고 미래예측



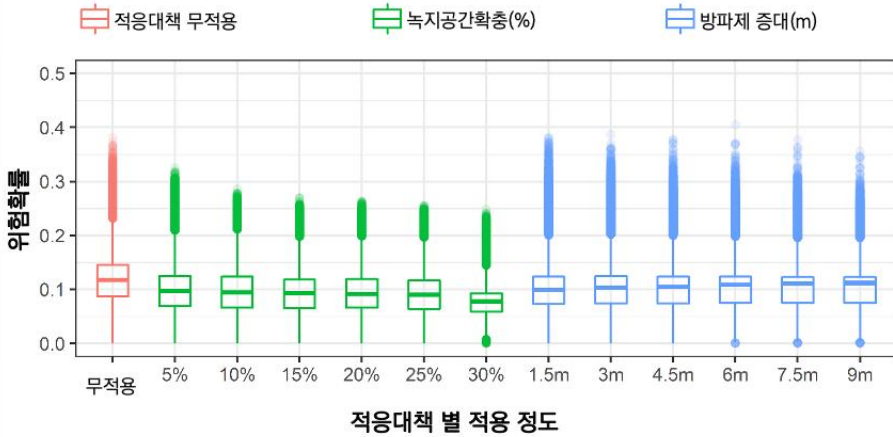
1에 가까울수록
해수면 상승 및 폭우와 같은 복합
적인 영향으로 인한
연안 홍수 위험 발생 가능성 증가

남해안이 조금 더 취약 :
동해안 지역보다 저지대가 많고, 서해안 지역보다 해수면 상승률이 상대적으로 높은
이유
2050년대부터는 어떤 시나리오든 위험 확률 점진적으로 증가

☑ 우리나라는 3면의 바다가 다른 지리 환경적 특징이 있어 지역 특성에 맞는 장·단기적 위험 관리 대응책 필요

연안홍수의 위험과 적응대책

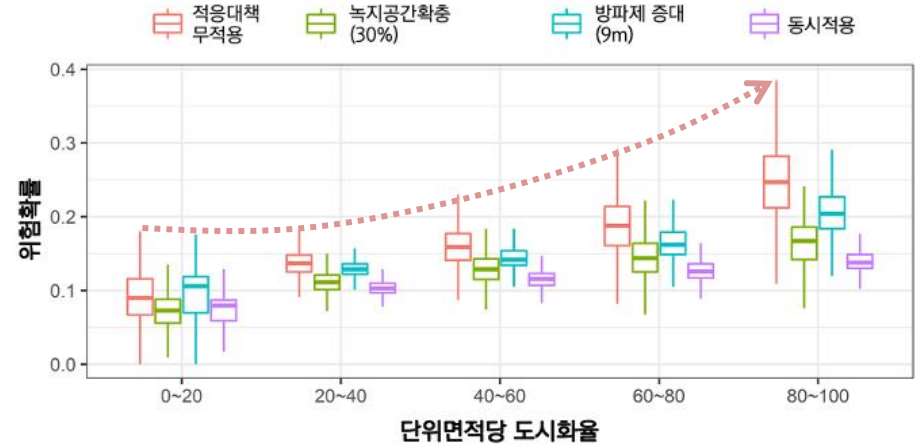
- ☑ 우리나라 연안 침수 위험 저감을 위한 적응대책의 잠재적 성능 평가
- 대표적인 구조적 저감옵션으로 논의되는 녹지공간과 방파제의 저감효과 비교



적용대책 별 적용 정도



두 적응대책(녹지공간 확충, 방파제 높이 증대)중 **녹지공간**을 확충하는 것이 **침수위험을 저감하는 효과가** 조금 더 높게 나타남
(RCP 8.5 시나리오, 2050년)



단위면적당 도시화율



단위면적당 도시화율에 변화에 따라 두 적응대책(녹지공간, 방파제)의 연안침수 위험확률 저감효과 비교 결과, **도시화율이 높을수록 침수위험확률이 증가**하고, 그 만큼 적응대책의 위험 저감 효과도 크게 나타남

- ☑ 연안지역에서도 사회·경제 활동이 높은 **도시지역**에서의 **침수위험**이 더욱 커짐
- ☑ 이에 대한 중장기적 대책으로 **녹지공간**과 같은 **자연기반해법(Natural-based Solution)**의 **중요성** 강조

04

기후변화와 도시열섬이 주는 복합적인 리스크



기후변화와 도시열섬이 주는 복합적인 리스크

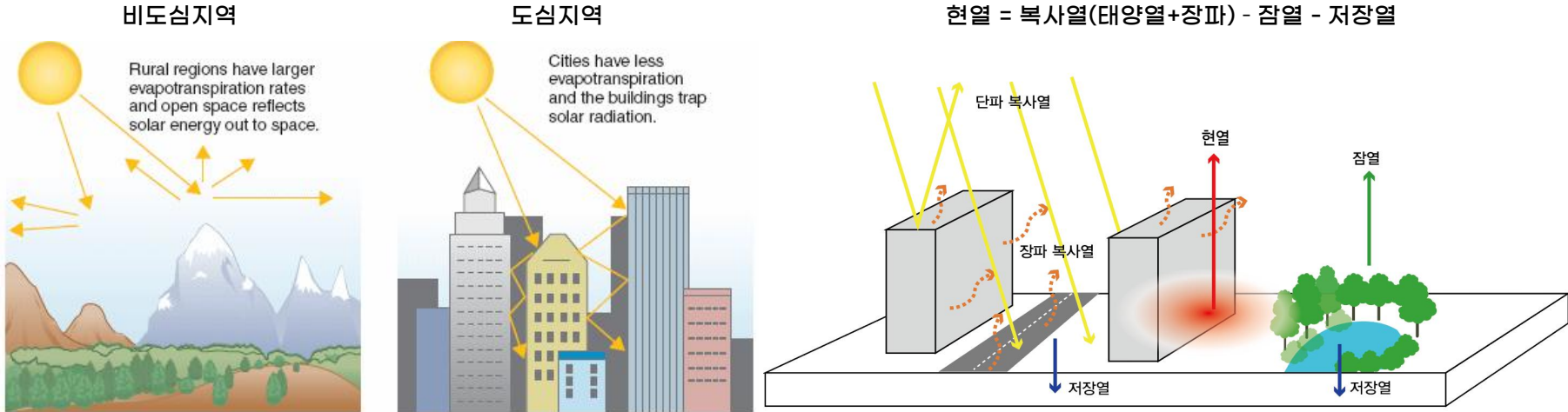
도시열섬

- 도심 지역이 주변 비도심 지역에 비해 온도가 높은 현상

원인

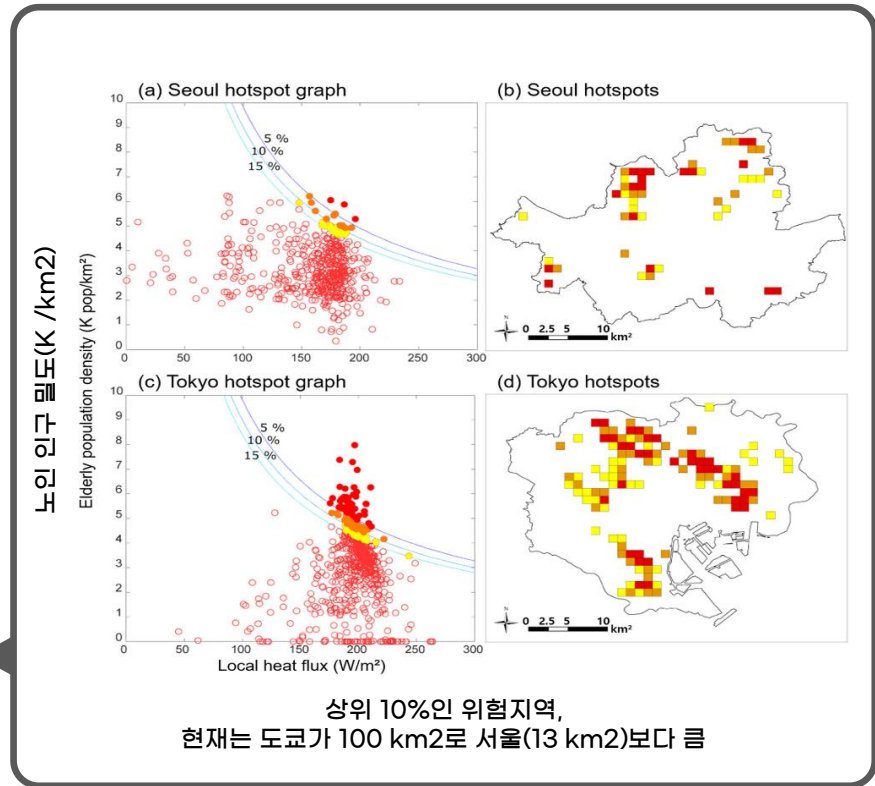
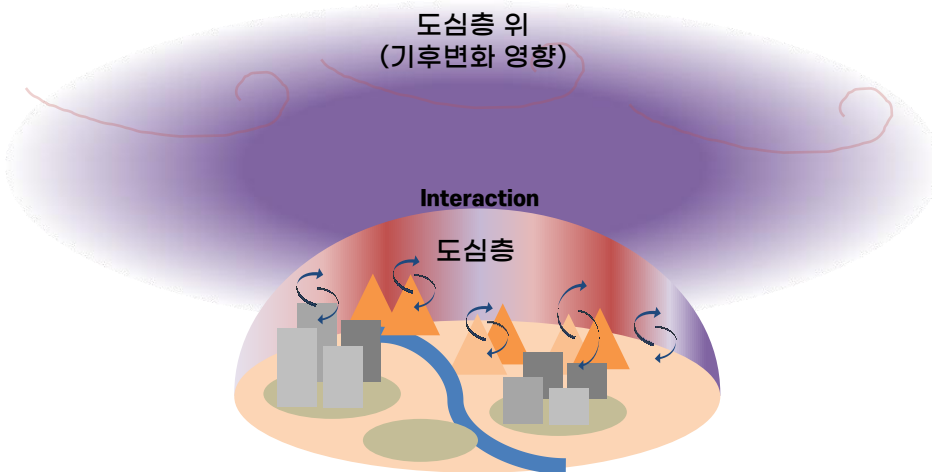
- 높은 건물로 인해 태양열이 빠져나가지 못함, 아스팔트/시멘트가 많은 열을 흡수, 저녁에 방출
- 자연 피복(나무, 연못 등)에서 일어나는 증발산(evapotranspiration) 감소 (=잠열의 감소)

결과적으로 많은 양의 현열이 존재하게 됨 -> 온도 증가 야기



기후변화와 도시열섬이 주는 복합적인 리스크

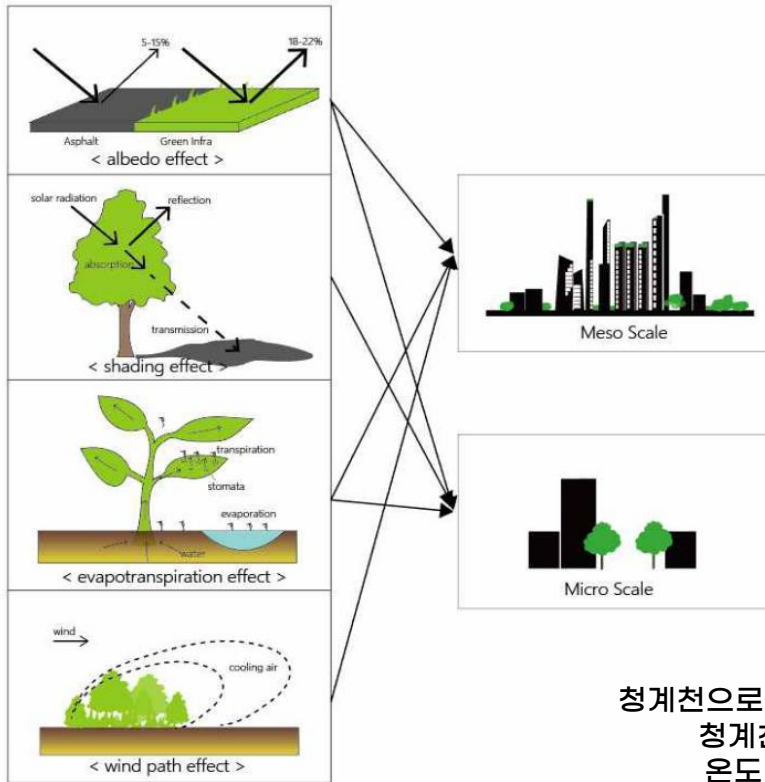
- 기후변화가 도심 층 위의 온도, 습도에 변화를 줌 -> 도심층의 피복, 건물 등의 요인과 결합
- 서울과 도쿄의 현재 열 위험지역을 파악
 - (1) 공간적 열 분포가 높은 곳
 - (2) 취약계층인 노인인구밀도가 높은 곳
- 2040년 서울 열 위험지역 = 기후변화(RCP8.5시나리오)가 올 경우 약 3배 증가, 미래 노인인구가 증가할 경우 약 12배 증가, 기후변화+인구변화가 함께 올 경우 약 15배 증가



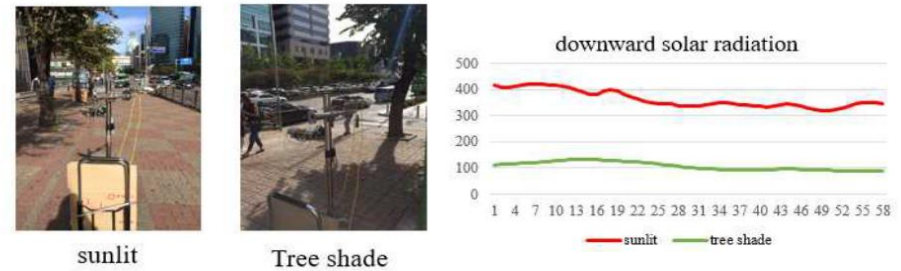
기후변화와 도시열섬이 주는 복합적인 리스크

- 적응대책 필요: **피복의 변화(태양열 반사), 수목그림자 형성, 증발산 형성(잠열 생성), 바람길 생성** 등 스케일에 맞는(보행자를 위한 것인지, 도시 전체의 열을 낮추기 위함인지) 대책이 필요

[도시 그린인프라 전략]

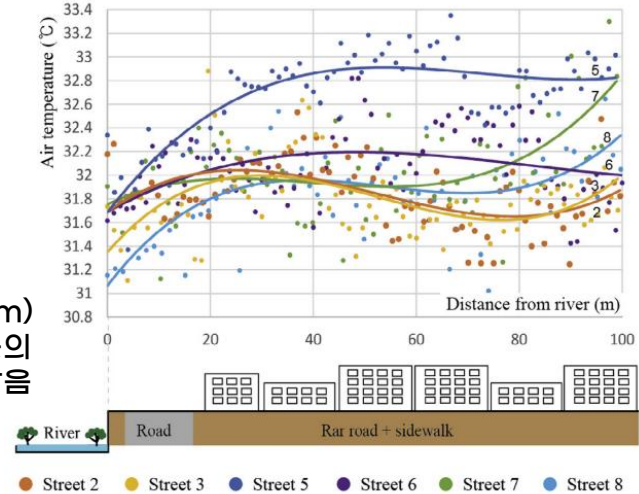


[수목 그림자의 태양열 저감 효과]



[청계천 주변의 온도 변화]

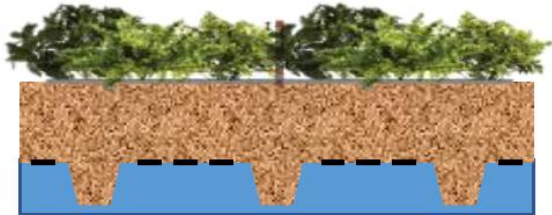
청계천으로부터의 거리 (m)
청계천과 가까운 곳의
온도가 0.2-1°C 낮음



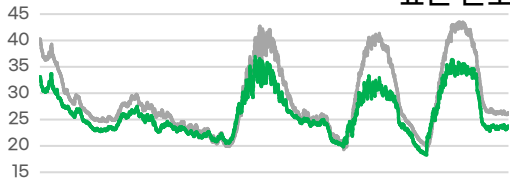
기후변화와 도시열섬이 주는 복합적인 리스크

- 적응대책 필요: 관수, 저류를 통해 잠열을 극대화하는 녹지(가로수, 옥상 녹화, 벽면 녹화) 기술 개발 및 관리

[저류 옥상 녹화]



표면 온도

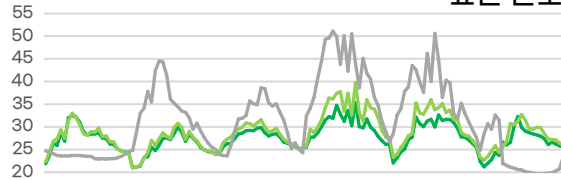


— 비녹화 — 녹화+저류

[관수 벽면 녹화]



표면 온도

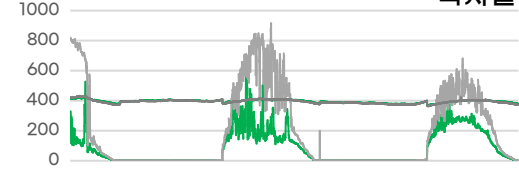


— 관수 녹화 — 녹화 — 벽면

[저류 가로 녹화]



복사열



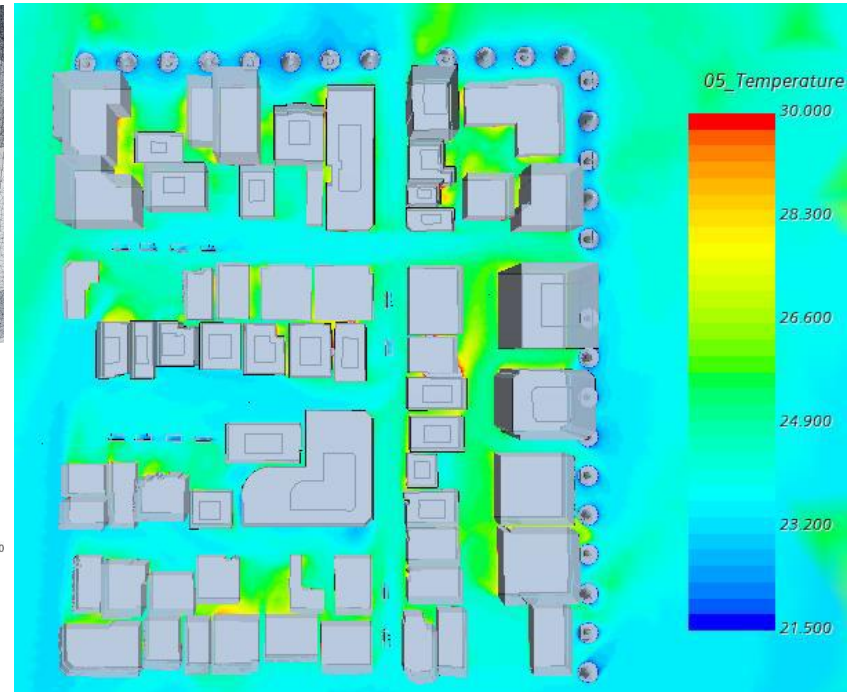
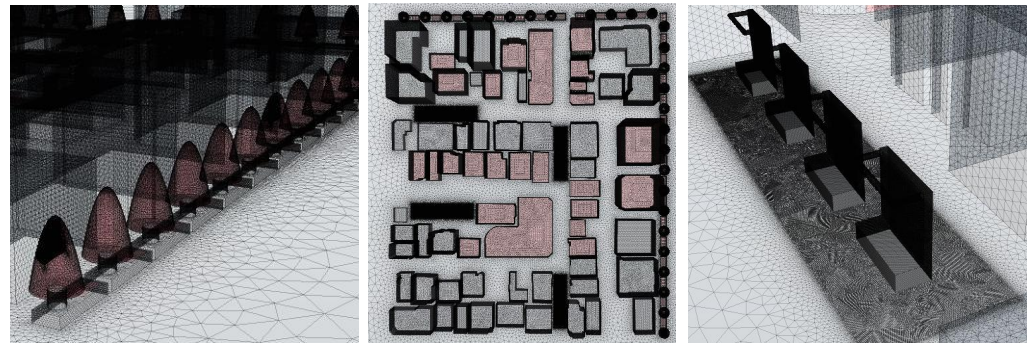
— 수목_단파 — 수목_장파
— 대조군_단파 — 대조군_장파

기후변화와 도시열섬이 주는 복합적인 리스크

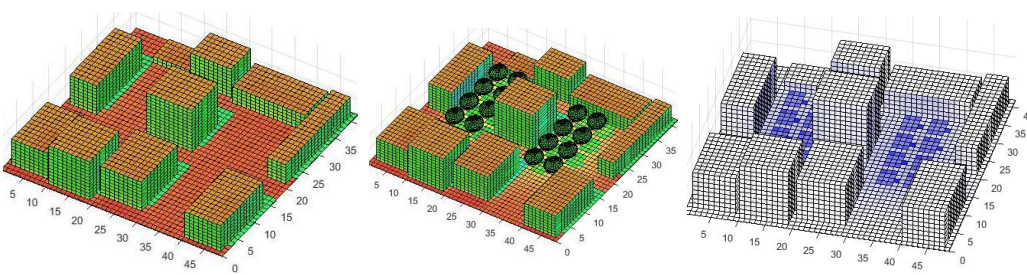
- 적응대책 필요: 녹지 계획으로 인한 열/온도 시뮬레이션을 통해 냉각 효과를 예측할 수 있는 모델링 및 효율적인 녹지 계획 수립 필요

[도시 열 모델링]

[녹지의 온도 저감 효과]



[도시 수목의 열 저감 효과]



가로수 그림자&잠열 냉각 효과로 인해 지표면 온도 5°C 저감 효과

(1m 기준) 가로수 2.32°C, 벽면 녹화 1.02°C, 옥상 녹화 2.3°C 온도 저감 효과

05

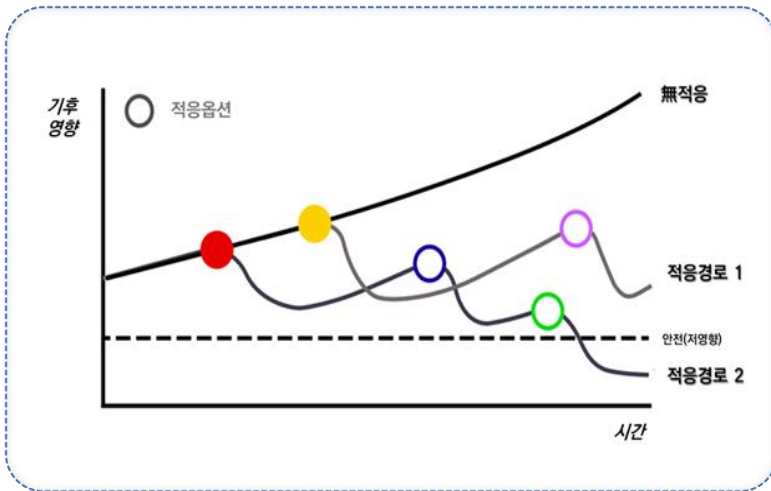
적응경로를 고려한 적응대책



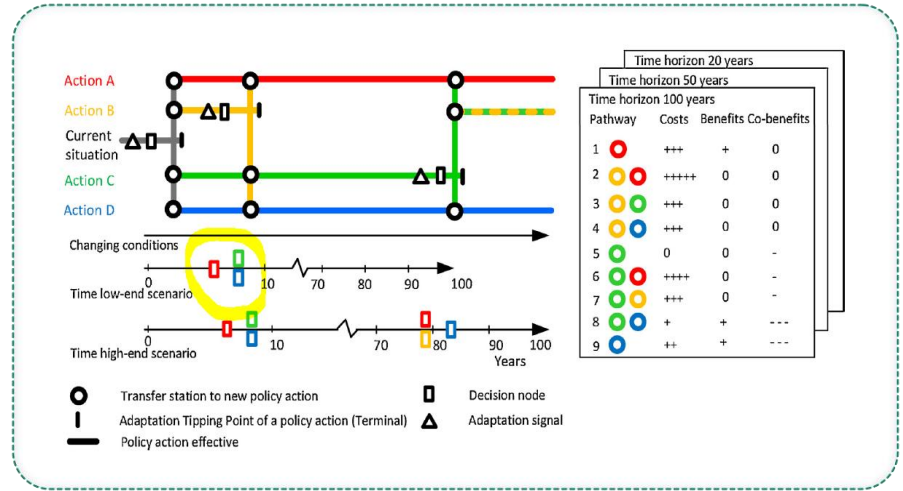
적응경로를 고려한 적응대책

적응 경로 : 적응기술을 오랜기간에 대해 동적으로, 순차적으로 배열

- ✓ 각 경로는 하나의 대안(계획)을 나타냄
- ✓ 순차적 접근법은 장기 관점으로 단기 제약을 현실적으로 고려할 수 있음
- ✓ 연안지역 홍수, 수자원 관리, 식량 안보, 등 여러 응용 연구에서 기계학습 알고리즘으로 적응 경로 탐색



적응 경로의 개념도
 x축은 시간, y축은 기후변화 영향
 하나의 부문 혹은 여러 부문으로 인한 영향
 (현정희 외, 2019)

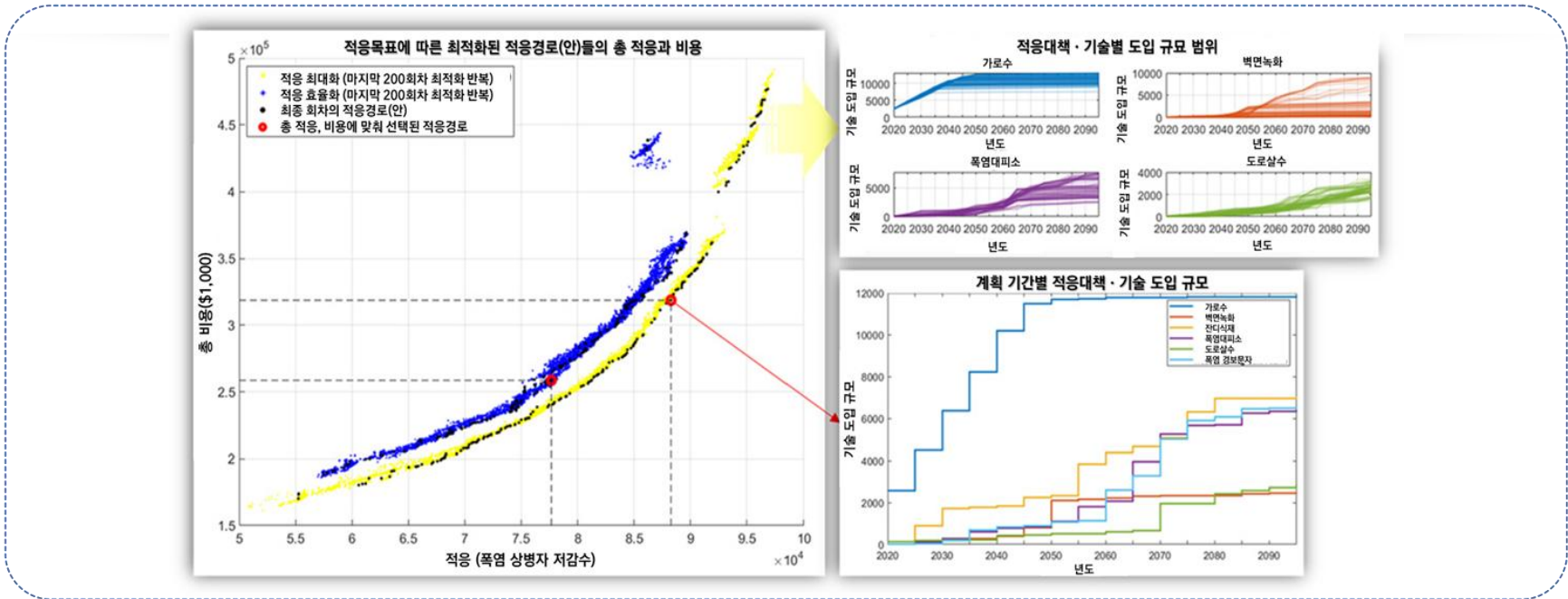


적응경로의 예시 :
 경로는 변곡점, 적응기술의 비용효과와 같은
 의사결정 정보로 '환승점'을 그리며
 시간에 따라 계획이 바뀐다(Haasnoot et al., 2019)

적응경로를 고려한 적응대책

우리나라의 적응 경로 적용 예시

- Hyun et al. (2021)에서는 2100년까지의 기후변화 영향에 대응하는 무수한 조합의 적응 경로를 생성하고, 의사결정자 선호에 따라 적응 경로를 식별하는 모델 개발
- 서울시를 예시로, 폭염 관련 상병자 감소를 위해 6개 적응대책을 적용 및 RCP4.5-8.5 시나리오에서 최적 적응계획 탐색



최적화된 적응경로 파레토에서 하나의 경로 선택 후 계획안 검토 예시(Hyun et al., 2021)
 좌) 두 가지 적응목표에서 식별된 최적의 적응 경로(안)
 우측상단) 전체 계획 기간에 걸쳐 각 적응 옵션별 도입 규모 범위는 총 적응과 비용에 따라 다양한 대안이 가능한 것을 보여줌
 우측하단) 각 적응 옵션별 시간에 따른 도입 규모가 다른 색의 선으로 표시되는 적응 경로의 예시

06

기후변화 적응의 새로운 논의



기후탄력성 정의 (Climate resilience)



기후탄력성이란?

리스크나 교란을 극복할 수 있는 시스템 역량. 시스템의 본질적 구조와 기능은 유지하면서 적응, 학습 및 시스템 전환을 위한 의사결정 과정을 통해 기후탄력성을 높일 수 있음

도시시스템
역량

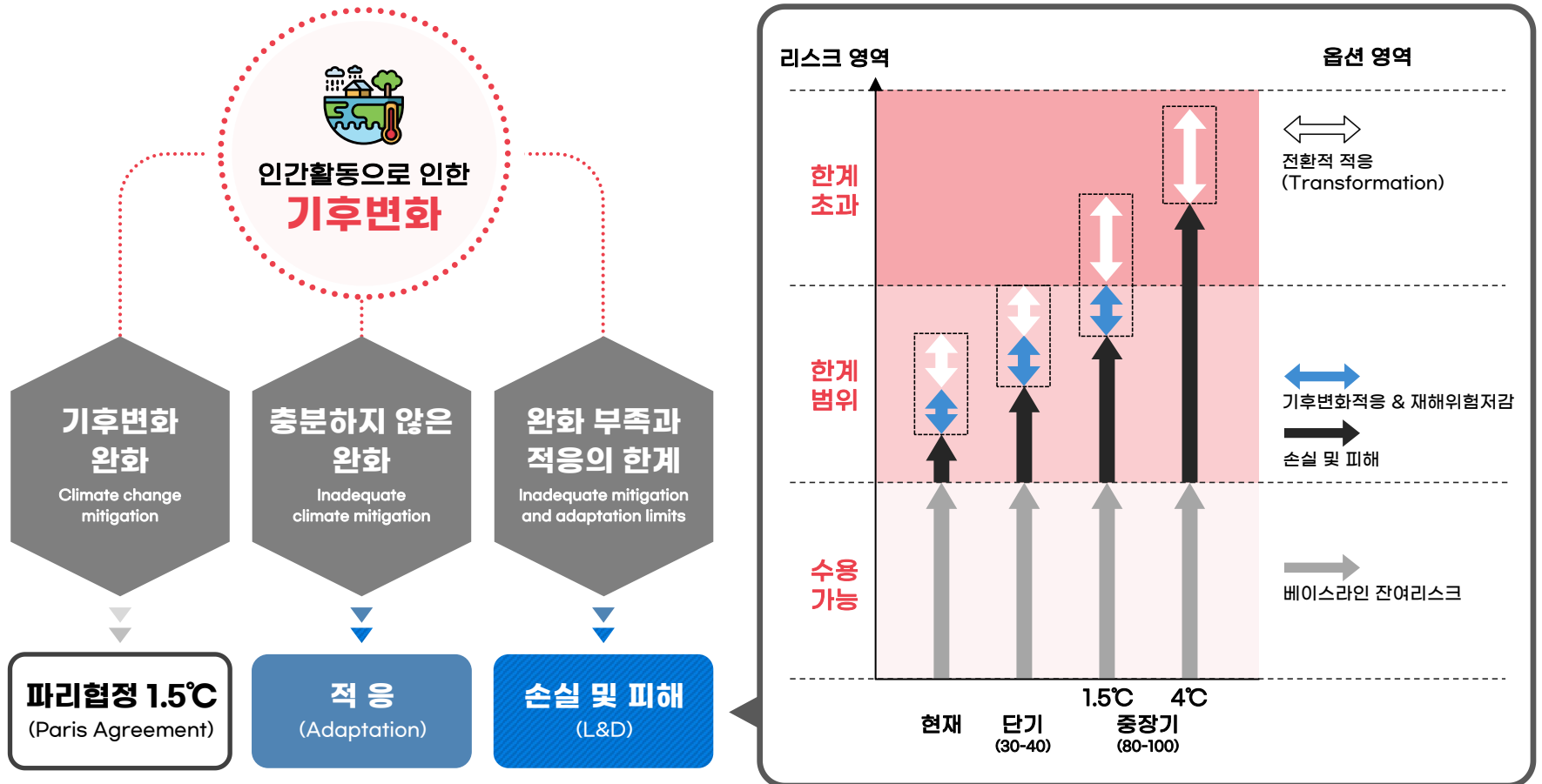


도시시스템
기후탄력성



기후리스크로 인한 기후탄력성 붕괴

장기적인 불확실성을 고려하여 앞으로의 도시가 나아가야 할 방향을 제시 - 기후변화 대응의 갈래

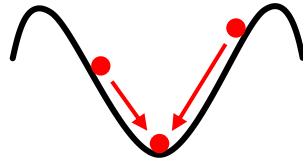


출처: Schinko et al.(2019) The Risk and Policy Space for Loss and Damage: Integrating Notions of Distributive and Compensatory Justice with Comprehensive Climate Risk Management. Springer, Cham.

기후탄력성 확보를 위한 전환적 적응 (Transformation)

시스템 내 변화, 단계적 조정

(Change within a system, Incremental adjustment)



[평형상태 유지/회복]

시스템 자체의 변화, 전환적 적응

(Change of the system, Transformation)



[현재 평형상태의 변화] [새로운 평형상태로의 변화]

시스템



Top-down

2 단계

- 예시 : 이전 버전에 기능을 더해가는 방법
- 일반적 이용방법 : 모델, 스트레스 시험
- 단기간 복구 요구를 위한 gray infra 솔루션 등
- 사회, 경제 및 물리적 요소, 다양한 위험을 다루는 포괄적인 관리 전략이 아님

3 단계

- 예시 : 적응 및 변환, 탄력적 계획 및 설계, 적응 관리
- 일반적 이용방법 : 계획 도구, 평가도구, 설계 연구, 시나리오
- 장기적이고 예측가능한 재난이 발생하기 전 규모를 조정하는 관점에서 위험의 사회적, 문화적, 경제적 근본 원인을 다룸



시민과 공동체



Bottom-up

1 단계

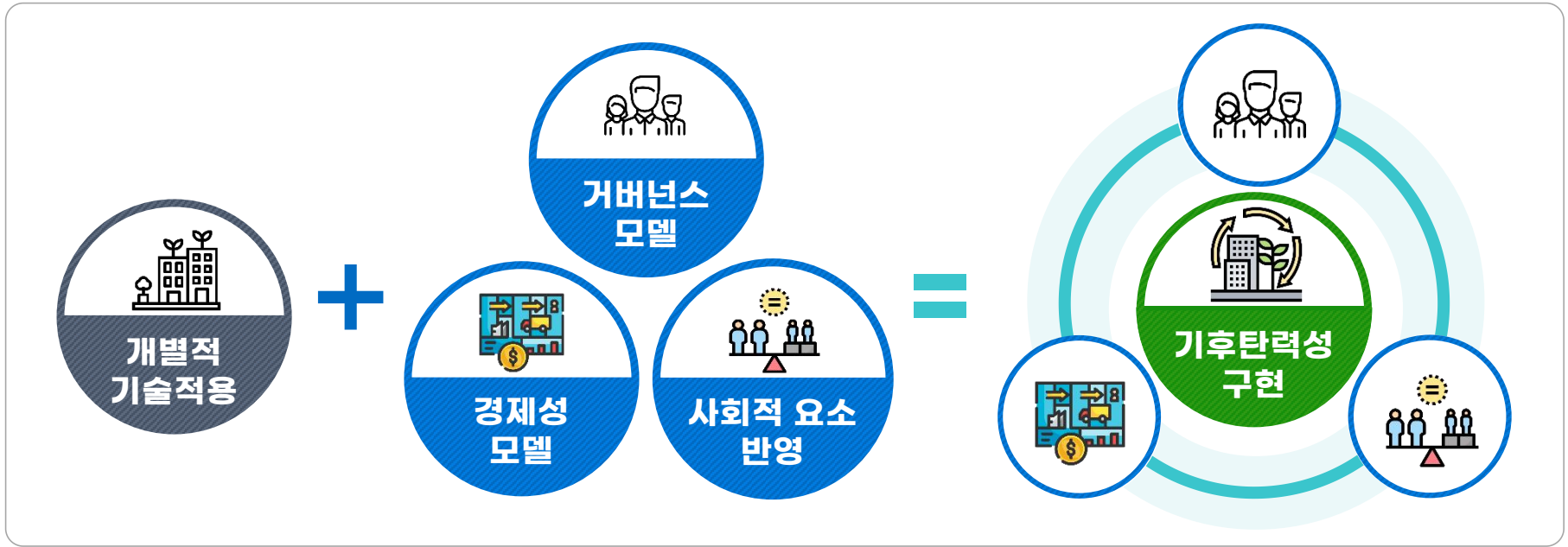
- 예시 : 재해 대응 계획의 사회적 부분
- 일반적 이용방법 : 지표, 설문, 인터뷰, 사례연구

2 단계

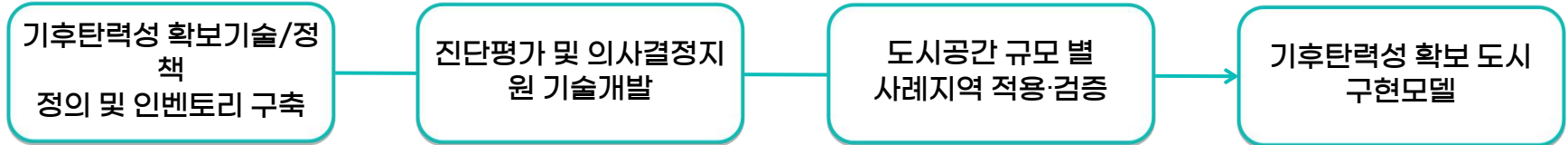
- 예시 : 사회 혁신, 사회 정의, 풀뿌리 운동, bottom-up 거버넌스
- 일반적 이용방법 : 일부 사례 연구, 시민과학

기후탄력성 확보 사회

개별적 기술의 적용·평가 뿐만 아니라 비구조적, 사회적 요소를 포괄한
기후탄력성 확보 의사결정 구현모델 제시 (Define the best implementation model)



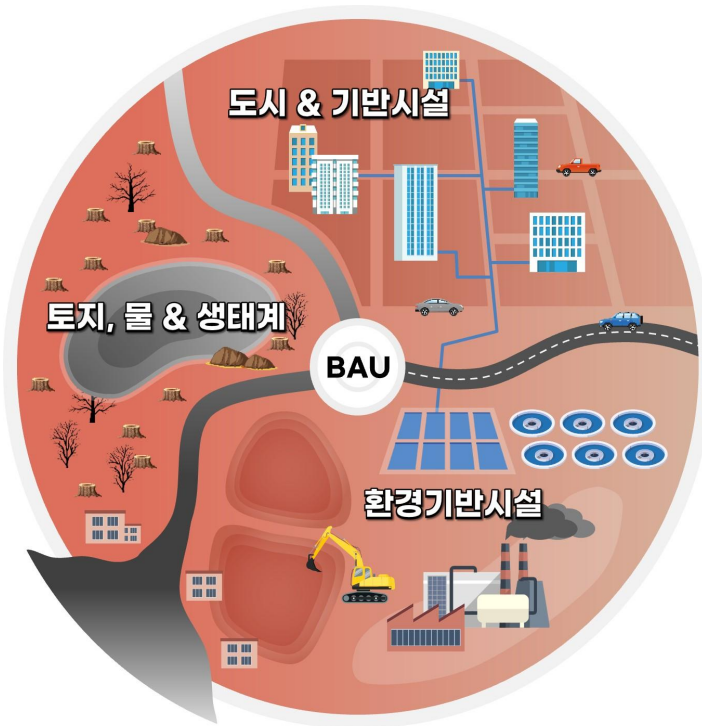
Process



기후탄력성 확보 사회

지속가능한 도시 시스템으로 전환하기 위해 ...

→ 공간규모별 기술(GI 등), 사회적 요소(형평성, 경제성), 거버넌스(시민 등) 고려한 학습된 대응-복구



파편화된 기후행동
(도시/환경기반시설)

지속가능한 기후행동
(SDGs 연계, 통합접근)

감사합니다.



서울대학교
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY