

기후변화에 따른 생물다양성 리스크와 대응

최혜영
서울대학교 산림환경학전공
hy.choe@snu.ac.kr



차례

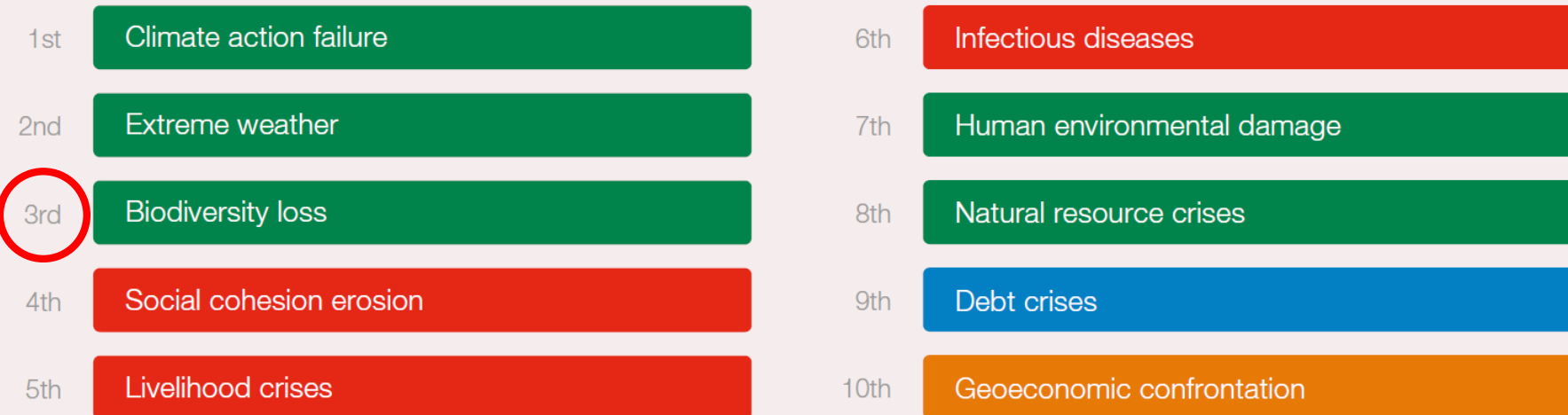
1. 생물다양성 손실과 비즈니스
2. 보호지역의 생물다양성 보전
3. 기후변화 취약종그룹을 위한 기후 메타코리더 제안
4. 기후변화와 토지이용 변화를 고려한 생물다양성 보전 전략
5. 기후변화로 인한 산불 발생증가와 적응정책의 효과

생물다양성 손실

- ☑ 세계경제포럼(WEF): 앞으로 10년간 전 세계가 당면할 10대 리스크 (The Global Risks Report 2022)

“Identify the most severe risks on a global scale over the next 10 years”

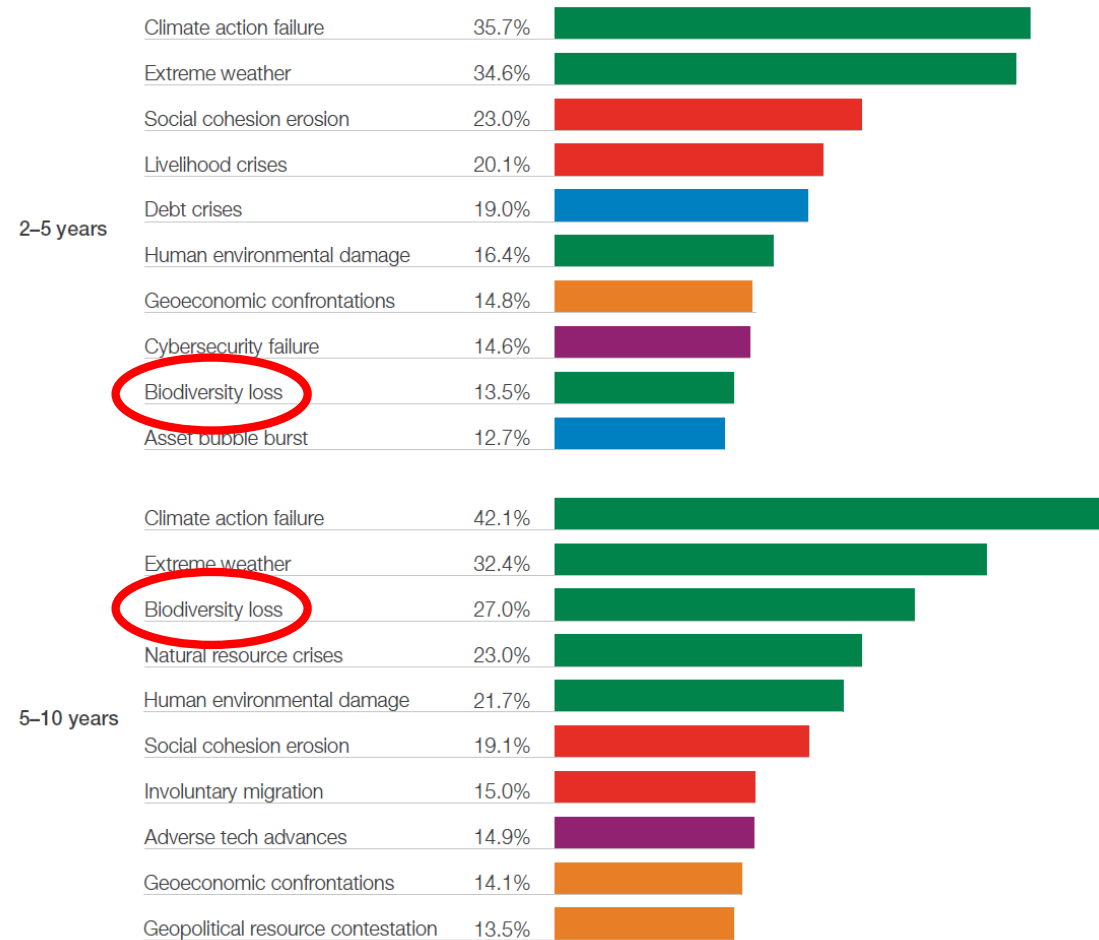
■ Economic ■ Environmental ■ Geopolitical ■ Societal ■ Technological



Source: World Economic Forum Global Risks Perception Survey 2021-2022

생물다양성 손실

☑ 각 리스크가 세계에 중대한 위협이 될 시기 (The Global Risks Report 2022)



■ 생물다양성

- ✓ 유전자, 개체군, 종, 군집, 생물군계를 포함한 지구상 생명체의 다양성은 인간 활동의 결과로 지구 전역에서 극적으로 변화하고 있음.
- ✓ 생물다양성 손실은 환경, 인류, 경제 활동에 돌이킬 수 없는 결과를 의미하며, 종 멸종 감소의 결과로 천연자원 등 자연자본을 영구히 파괴시킴
- ✓ 생물다양성에 위협이 되는 주요 요인
 - ✓ 인간의 활동과 서식지 손실. 열대우림은 토지이용 변화로 위협을 받고 있음.
 - ✓ 산림 벌채로 세계 각지에서 산림 생태계가 소실되면서 퇴화
 - ✓ 사막화 과정. 기후변화에 의해 악화될 수 있음

■ Biodiversity Crisis Is a Business Crisis 생물다양성 위기는 비즈니스 위기

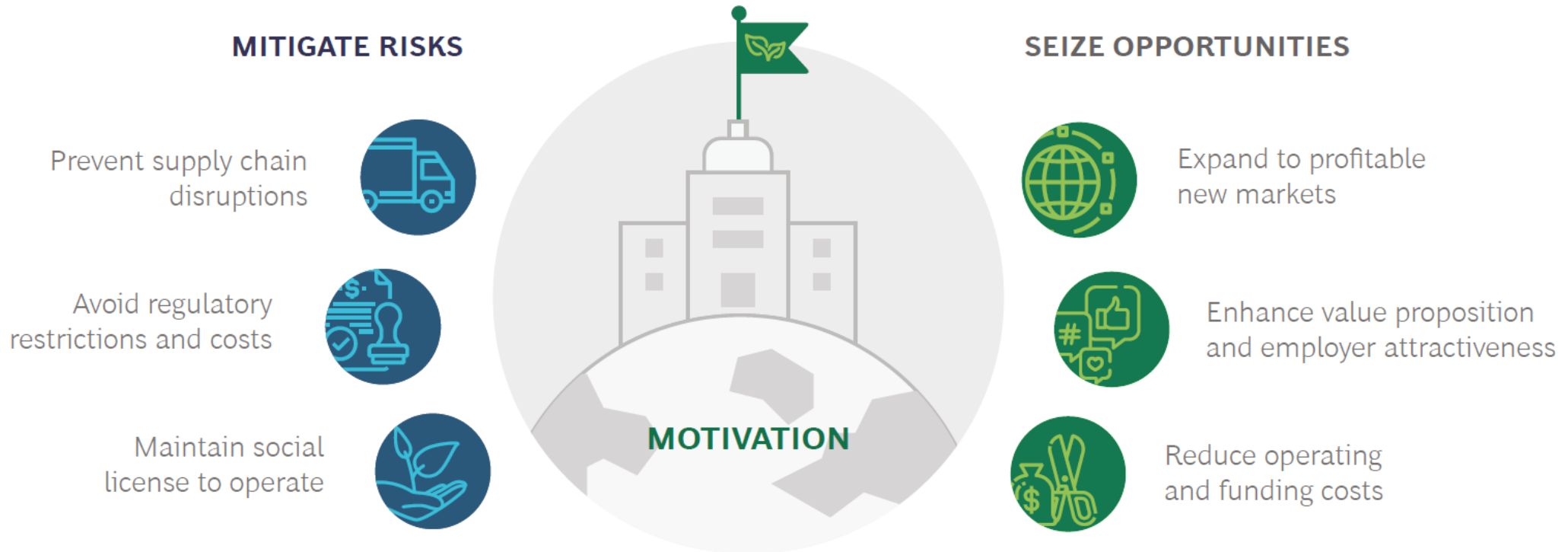
- ✓ 생물다양성 손실은 비즈니스에 큰 영향을 미침 (Boston Consulting Group 2021)
- ✓ 생물다양성은 식량 공급, 탄소 저장, 물 및 공기 여과와 같은 생태계서비스의 형태로 상당한 **경제적 가치를 창출**하며, 이는 연간 150조 달러 이상(세계 GDP의 약 2배)에 해당
- ✓ 토지이용 변화, 천연자원의 직접적인 과잉 개발, 기후변화, 오염, 침입종의 확산 등 5가지 주요 압력이 급격한 생물다양성 손실을 초래하고 있음. 이미 생태계 기능의 감소는 생태계서비스 손실의 형태로 세계 경제에 연간 5조 달러 이상의 비용 초래
- ✓ 자원 추출 및 재배와 관련된 많은 비즈니스 활동들은 생물다양성 손실을 유발. 식품, 에너지, 기반시설, 패션 등의 운영은 현재 인간이 생물다양성에 미치는 압력의 90% 이상을 주도하고 있음
- ✓ 생태계가 쇠퇴함에 따라 기업은 **높은 원자재 비용**과 **소비자 및 투자자의 반발**을 포함하여 상당한 위험에 직면하게 됨. 그러나 위기는 기회를 만들기도 함. 생물다양성을 지원하는 회사는 강력한 새 제품과 비즈니스 모델을 개발하고 기존 제품의 매력을 높이며 운영 비용을 낮출 수 있음.

THE ECONOMIC VALUE OF BIODIVERSITY: 생태계서비스의 경제적 가치

- ✓ Regulating (조절): 자연 생태계는 환경의 안정을 위해 필수적인 다양한 서비스 제공. 기후 조절, 물 저장 및 여과, 대기 정화, 질병 제어 등
- ✓ Cultural (문화): 다양한 영적, 유산, 교육 및 레크리에이션 기능을 제공
- ✓ Habitat (서식지 및 지원): 생태계는 식물, 동물, 미생물이 살고, 이동하고, 번식할 수 있는 공간을 제공하며, 식물과 다른 유기체의 생존과 식량 생산에 필수적인 비옥한 토양의 형성을 지원
- ✓ Provisioning (공급): 생태계 내에서 생성되는 식품, 목재 및 의약품과 같은 자연 기반 제품의 가치
- ✓ 네 가지 생태계서비스의 연간 가치를 합하면 150조 달러 이상으로 세계 GDP의 두 배

Biodiversity-related risks and opportunities motivate companies to act

- ✓ 미래 지향적인 기업은 지속적인 생물다양성 손실이 비즈니스에 심각한 위험을 초래한다는 점을 이해하고 있으며, 새로운 비즈니스 기회와 고객 및 투자자와의 관계 개선을 통해 이익을 얻을 수 있다는 점을 이해하고 있음



Risks

- ✓ 세계 GDP의 절반 이상이 **자연 생태계에 크게 의존한다**는 점을 감안할 때 자연 생태계의 쇠퇴는 많은 중요한 **공급망**을 위협하게 함: 예) 식품 생산자는 자연 수분 매개체(벌)가 사라지면서 더 높은 비용이 필요.
- ✓ **생물다양성과 관련된 정부 규제**로 인해 비즈니스에 대한 압력이 증가하고 있으며 향후 상당한 추가 비용을 부과할 수 있음
- ✓ 생물다양성에 미치는 부정적인 영향을 해결하지 못하는 기업은 고객 및 기타 이해관계자의 신뢰를 얻지 못할 것이며 결과적으로 운영을 위한 사회적 허가의 위험 → ESG

뉴스 ONESHOT

최근 '70억마리 꿀벌' 증발...이는 "4년내 인류 멸종" 경고다? [뉴스원샷]

중앙일보 | 입력 2022.03.20 05:00

최경호 기자

구독

뉴스 ONESHOT >

구독

최경호 내셔널팀장의 픽: 겨울잠 자던 꿀벌들의 실종



Fifteen Key Biodiversity Objectives for Business



BUILD THE FOUNDATION FOR SUCCESS

- ✓ 기업은 기존의 지속가능성 역량을 강화하고 개선하기 위해 세 가지 단계를 수행해야 함:
 - ✓ 직원과 비즈니스 파트너에게 생물다양성의 중요성에 대해 교육하고 생물다양성에 대한 고려를 의사 결정에 통합하도록 교육
 - ✓ 생물다양성 목표를 기존 거버넌스 메커니즘과 통합하여 해당 목표가 재무 KPI(Key Performance Indicator, 핵심 성과 지표)와 동일한 관심을 받을 수 있도록 함
 - ✓ 파트너십을 추구하고 지식을 공유하여 역량을 강화하고 비용 및 기술 장벽을 극복

01

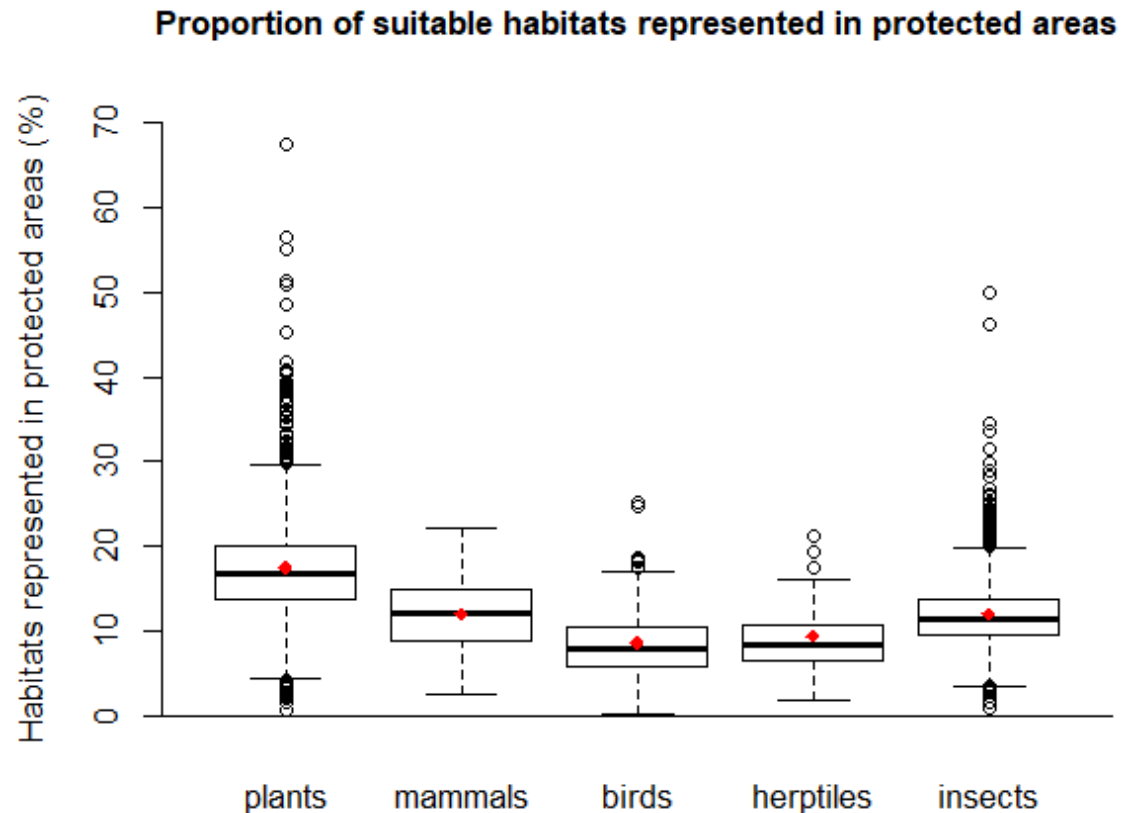
보호지역과 생물다양성 보전

■ 보호지역 지정

- ✓ 보호지역은 보통 국가의 보전 계획에서 가장 중요한 생물다양성 보전지역으로 여겨짐.
- ✓ 그러나 과거 보호지역 지정은 사회 및 경제적 가치 등이 우선적으로 고려되었기 때문에 보호지역이 국가규모의 생물다양성을 대표하지 않는 경우가 많음.
- ✓ 보호지역 확대 노력 이전에 현재 보호지역이 생물다양성을 제대로 반영하고 있는지 등 평가가 선행되어야 함
→ 이에 맞는 목표 설정

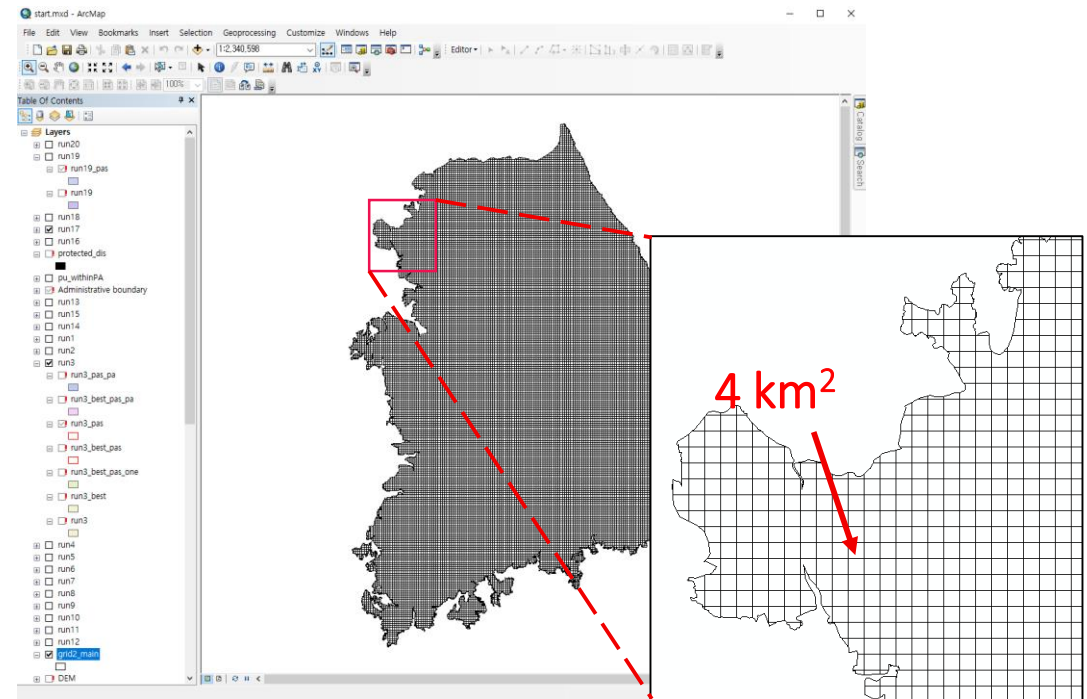
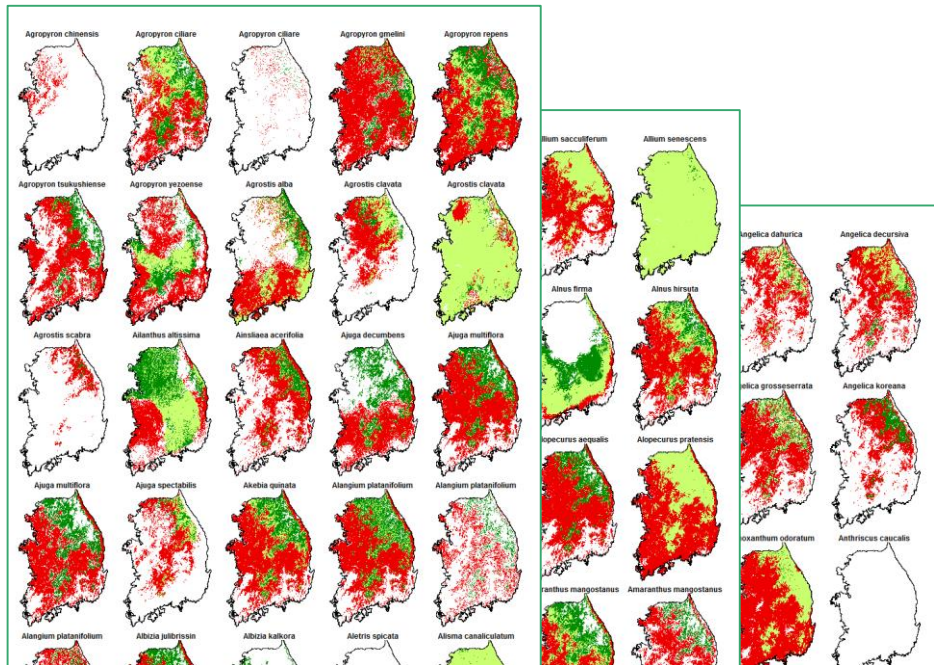
1. 다양한 분류군에 대한 생물다양성 반영 평가

- ✓ 생물종의 서식적합지역이 보호지역에 반영되고 있는 정도를 평가하여 분류군별 보전 현황을 파악
- ✓ 식물 1,545종, 포유류 35종, 조류 132종, 양서파충류 35종, 육상곤충 1,898종에 대해 **종분포모형**을 이용하여 우리나라의 서식적합지역을 파악하고 **현재 보호지역과의 중첩 비율 분석**



2. 보호지역 평가와 추가적 보호지역 분석

- ✓ **MARS 종분포모형**을 이용 : 2,297 식물종의 **현재 분포 지역 예측**
- ✓ 우리나라 전체 지역을 각 4km² planning unit으로 나누어 2,297 종의 분포 정도 입력
- ✓ Marxan (보전 계획을 위한 의사 결정 지원 소프트웨어)을 이용하여 **대안의 보호지역 모델링**

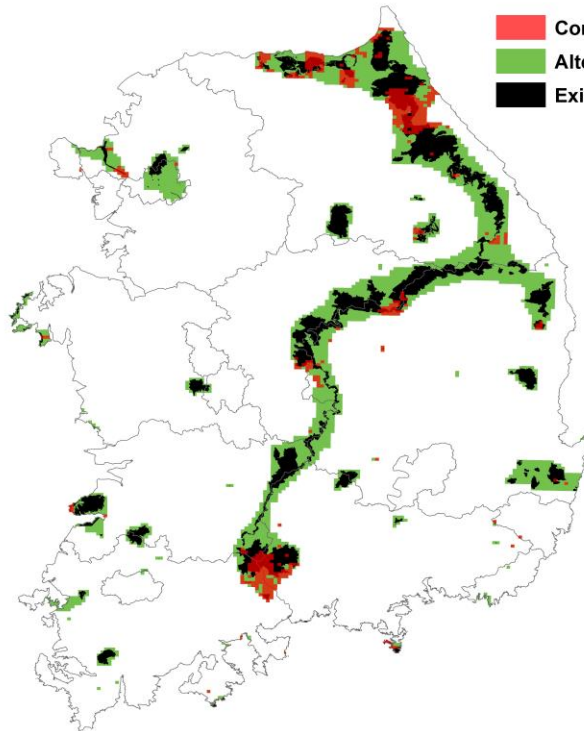


2. 보호지역 평가와 추가적 보호지역 분석

결과

- ✓ 현재 보호지역: 각 식물종 분포 면적의 6.3%가 반영
- ✓ 모든 종의 분포면적의 15%가 반영되도록 목표한 보호지역 대안 선정

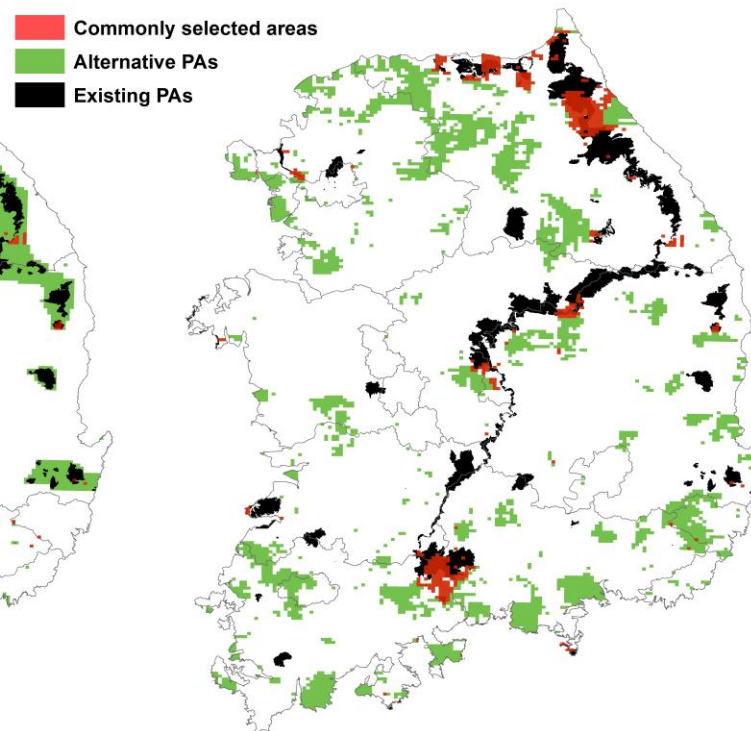
▼ (a) 기존 보호지역 포함



국토 면적
15.3%

각 식물종
분포면적
16.8%

(b) 기존 보호지역 고려하지 않음



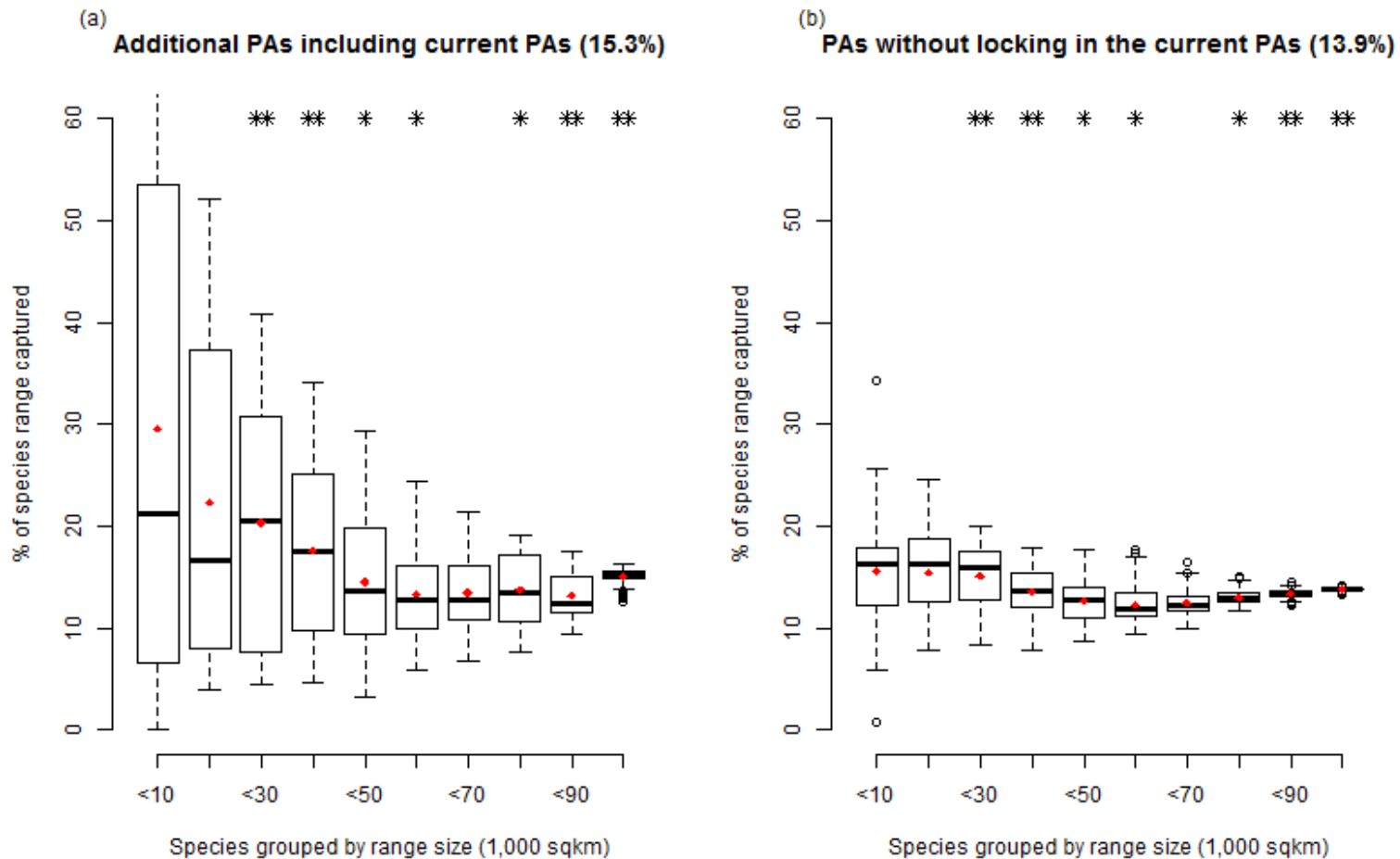
국토 면적
13.9%

각 식물종
분포면적
13.5%

2. 보호지역 평가와 추가적 보호지역 분석

결과

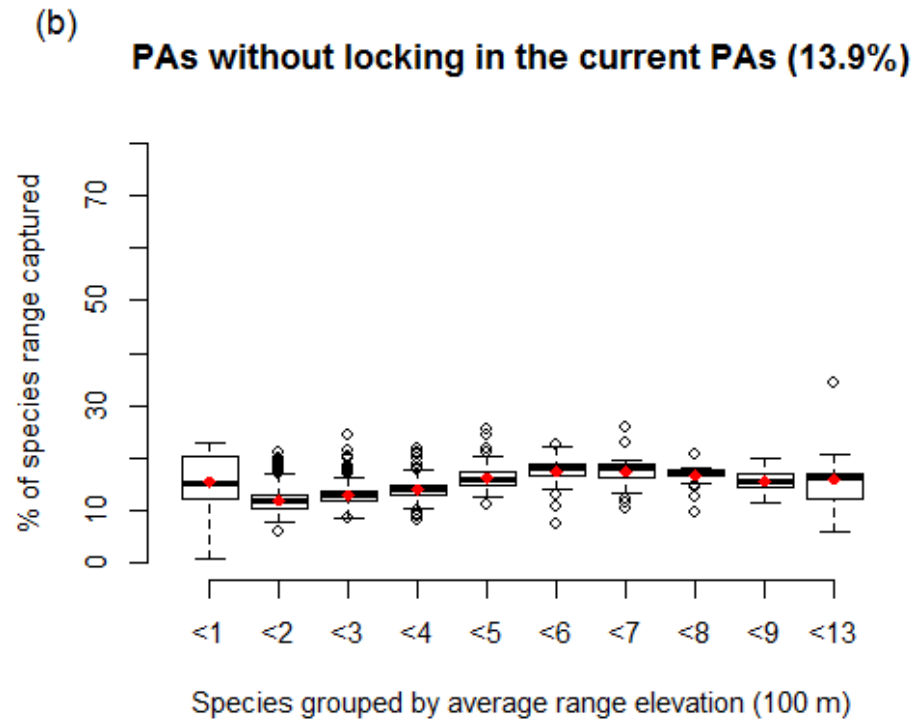
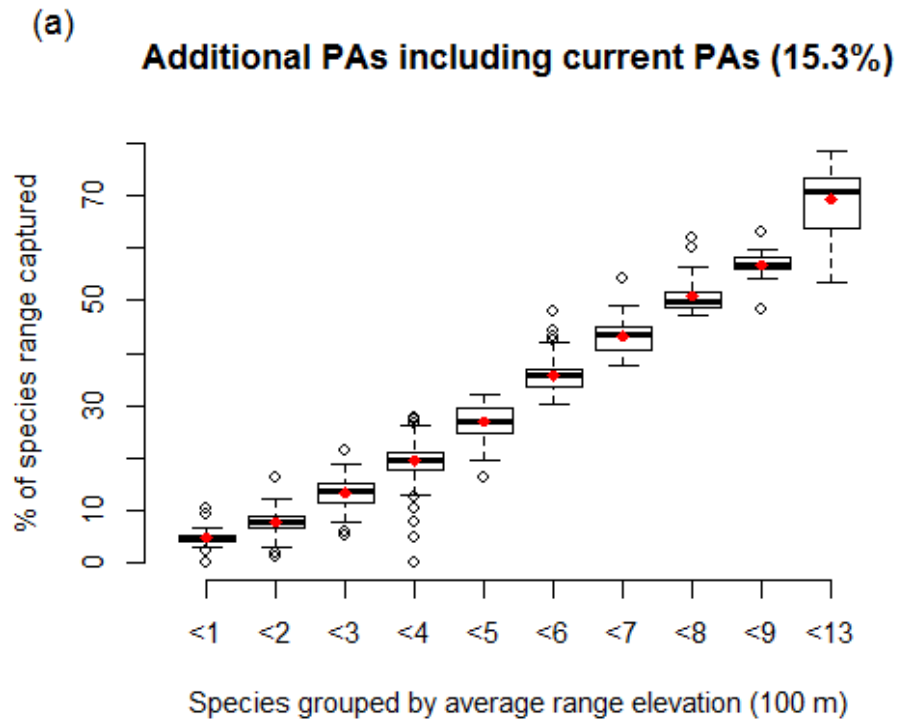
- ✓ 기존의 보호지역은 **분포면적이 좁은 종 위주로 보호**하는 경향



2. 보호지역 평가와 추가적 보호지역 분석

결과

- ✓ 기존의 보호지역은 **고지대에 분포하는 종 위주로 보호**하는 경향



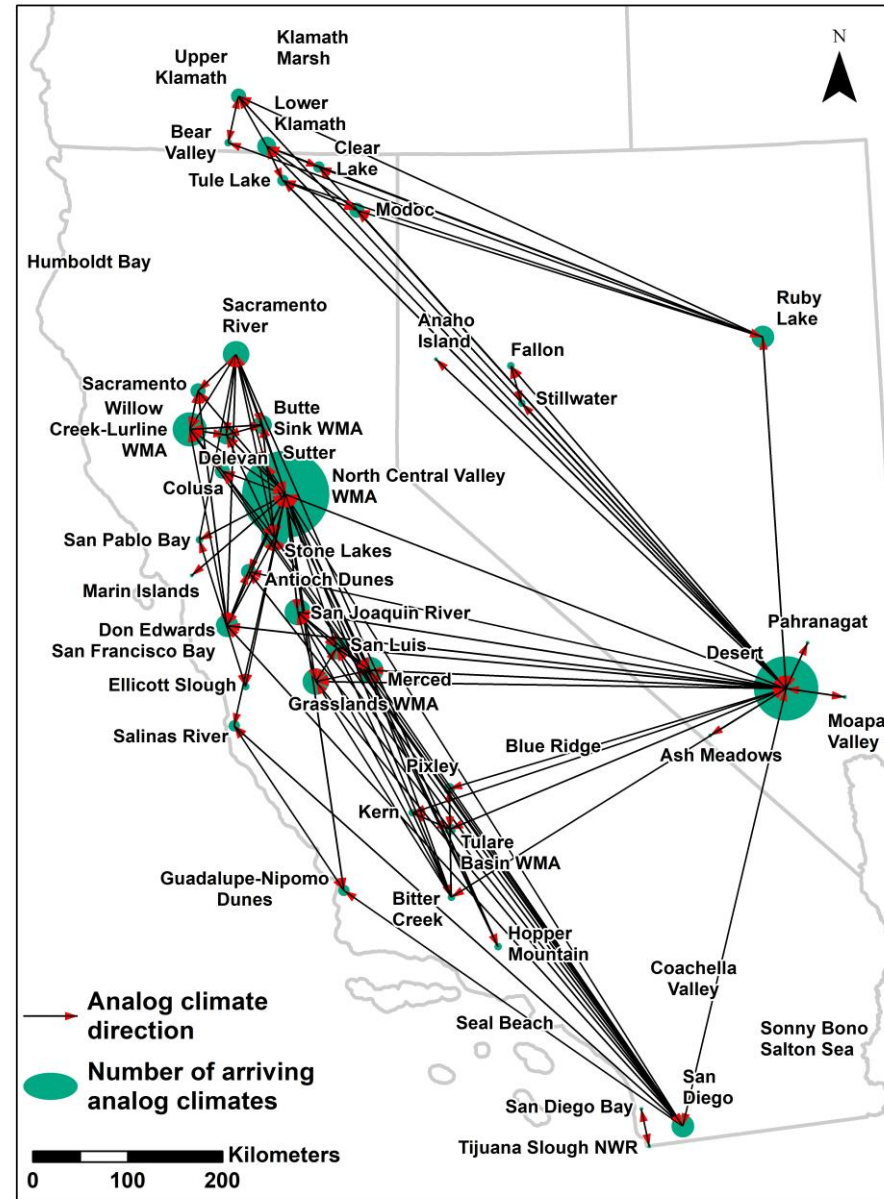
3. 기후변화에 따른 보호지역 관리방안

기후변화와 보호지역

- ✓ 기후변화에 따라 **상당수의 보호지역이 서식처로서의 기능을 상실**할 수 있으며 **일부 지역은 많은 종의 서식처로 더 적합**하도록 기능이 변할 수 있음.
- ✓ 생물종의 이동이 필요한 지역과 도달할 지역의 파악을 위해 보호지역네트워크 전반에 걸쳐 **아날로그 기후 분석** 적용
- ✓ 보호지역 네트워크에서 **기후변화의 영향에 따라 각 지역을 구분하는 것**은 관리에 유용한 아이디어를 제공할 수 있음.
- ✓ **연구목표**
 1. 미국 서부 48개 야생동물보호구역에 대해 **현재와 미래의 기후 연결 평가**
 2. 효율적인 관리를 위해 **기후 연결 정도에 따른 야생동물보호구역 그룹화**

3. 기후변화에 따른 보호지역 관리방안

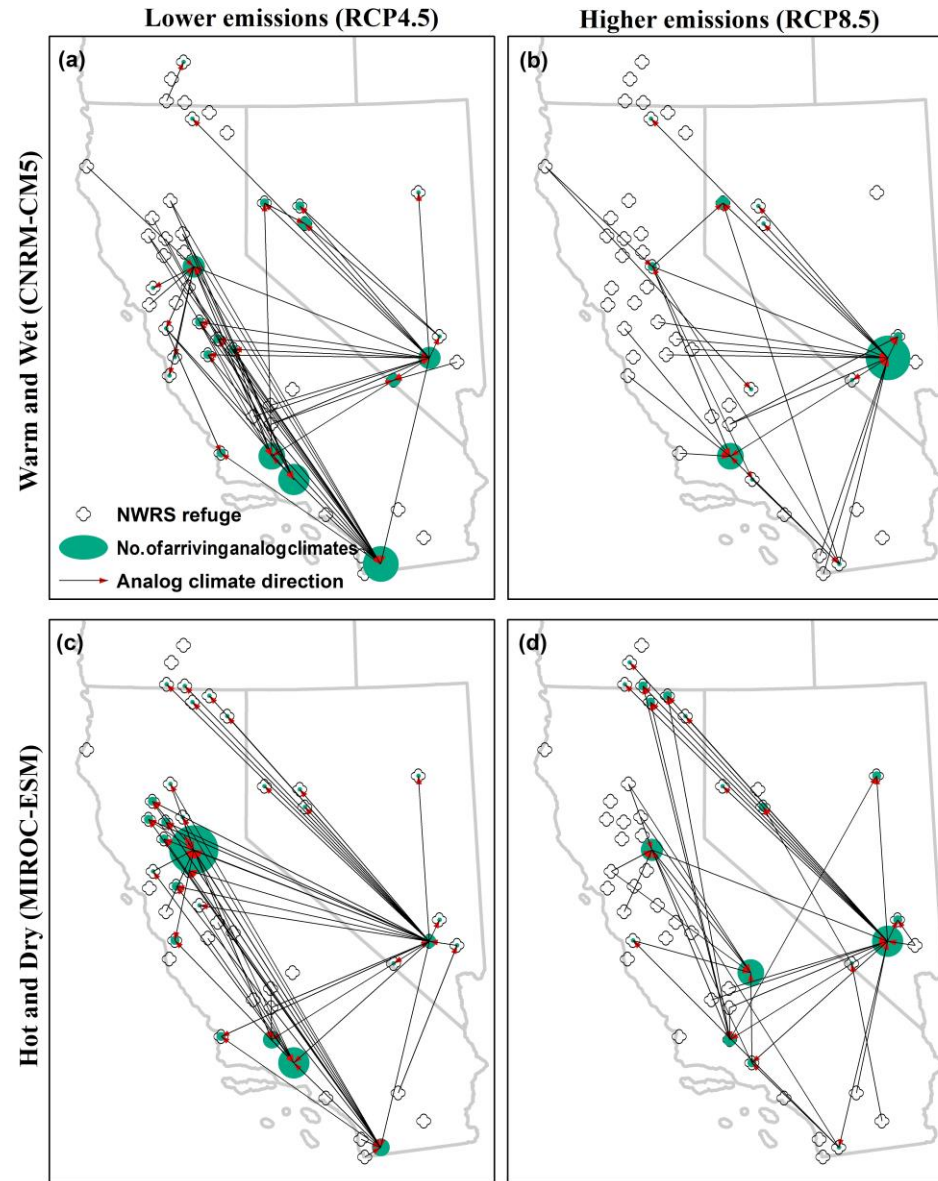
현재 기후 연결정도



(Choe et al. 2020)

3. 기후변화에 따른 보호지역 관리방안

2070-2099 기후 연결 변화



3. 기후변화에 따른 보호지역 관리방안

보호지역의 기후 성격에 따라 다른 관리 전략 필요

✓ Climate hub

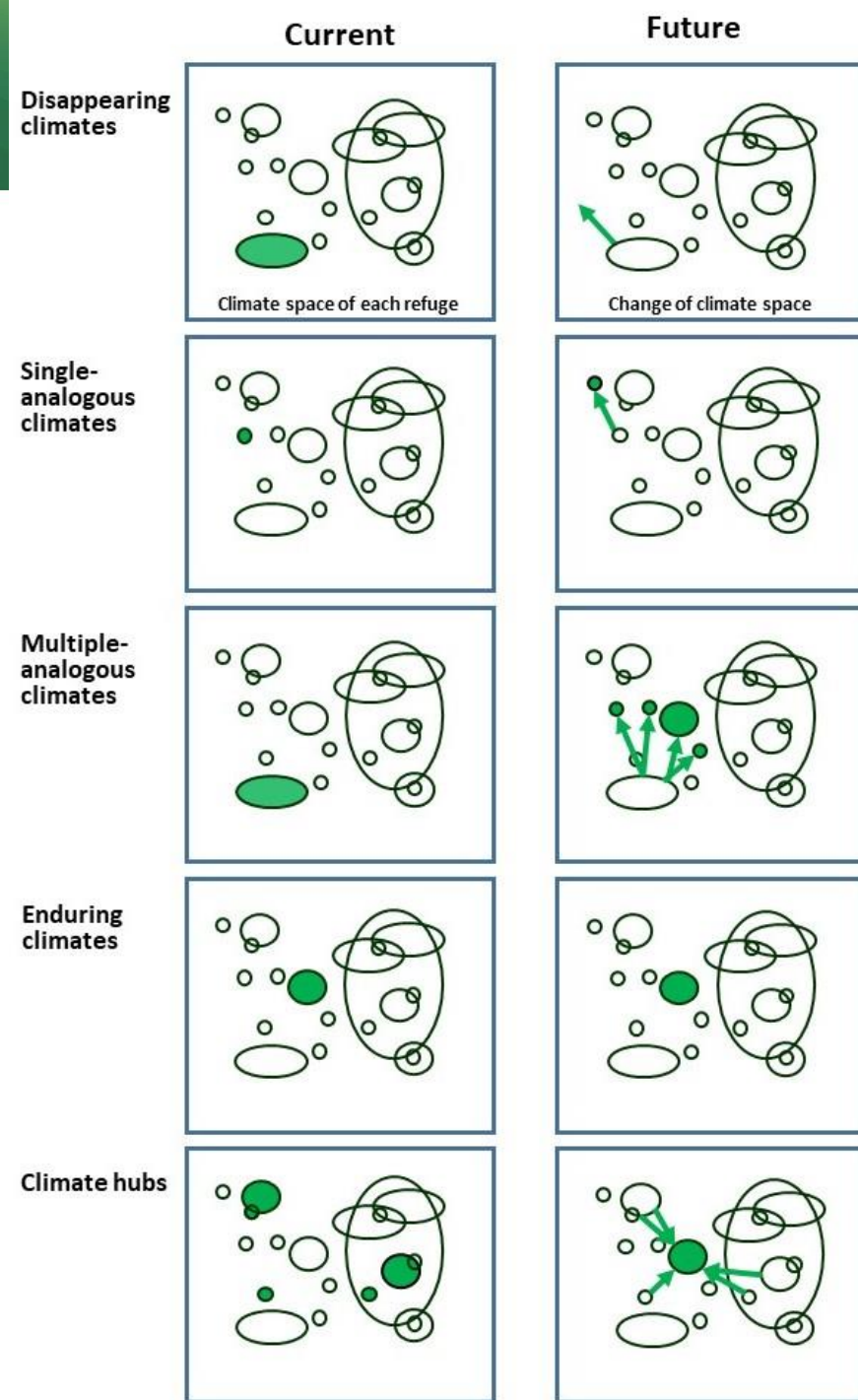
많은 보호구역의 현재 기후조건이 나타남. **managed relocation**을 위한 후보지.

✓ Enduring climates

침입종, 서식처 파편화와 같은 외부 위협 관리, 생태계 기능 유지

✓ Disappearing climates

현재 생물종의 회복탄력성과 기후 취약성에 대한 추가적 연구 수행.
보호지역 추가 설정.



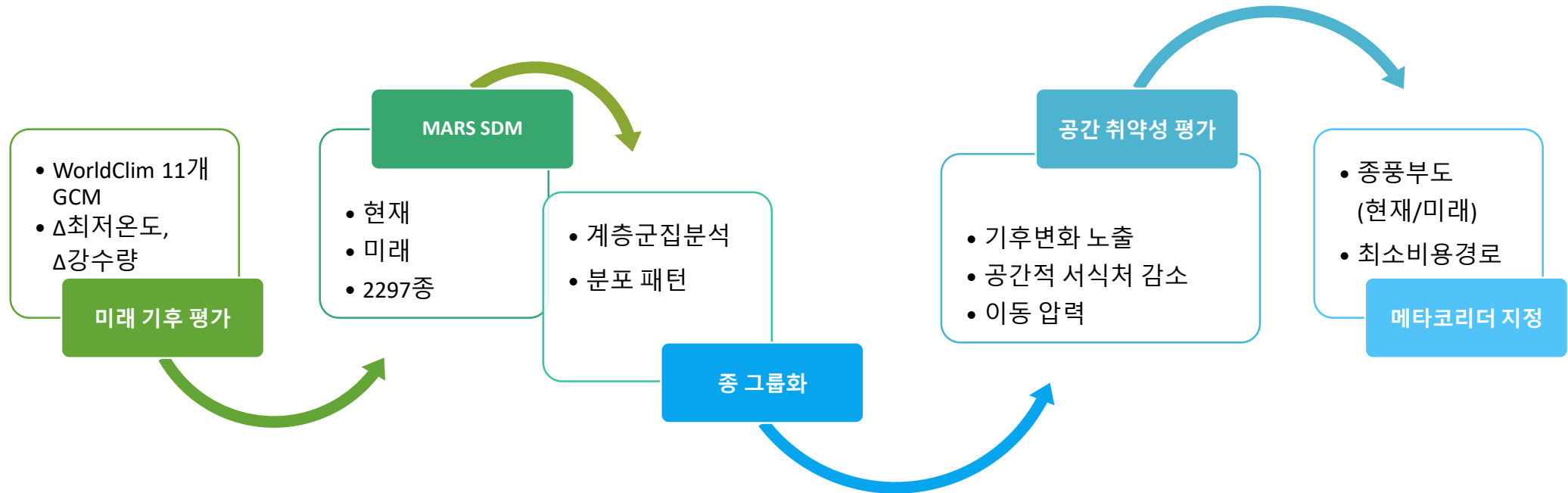
02

기후변화 취약종그룹을 위한 기후 메타코리더 제안

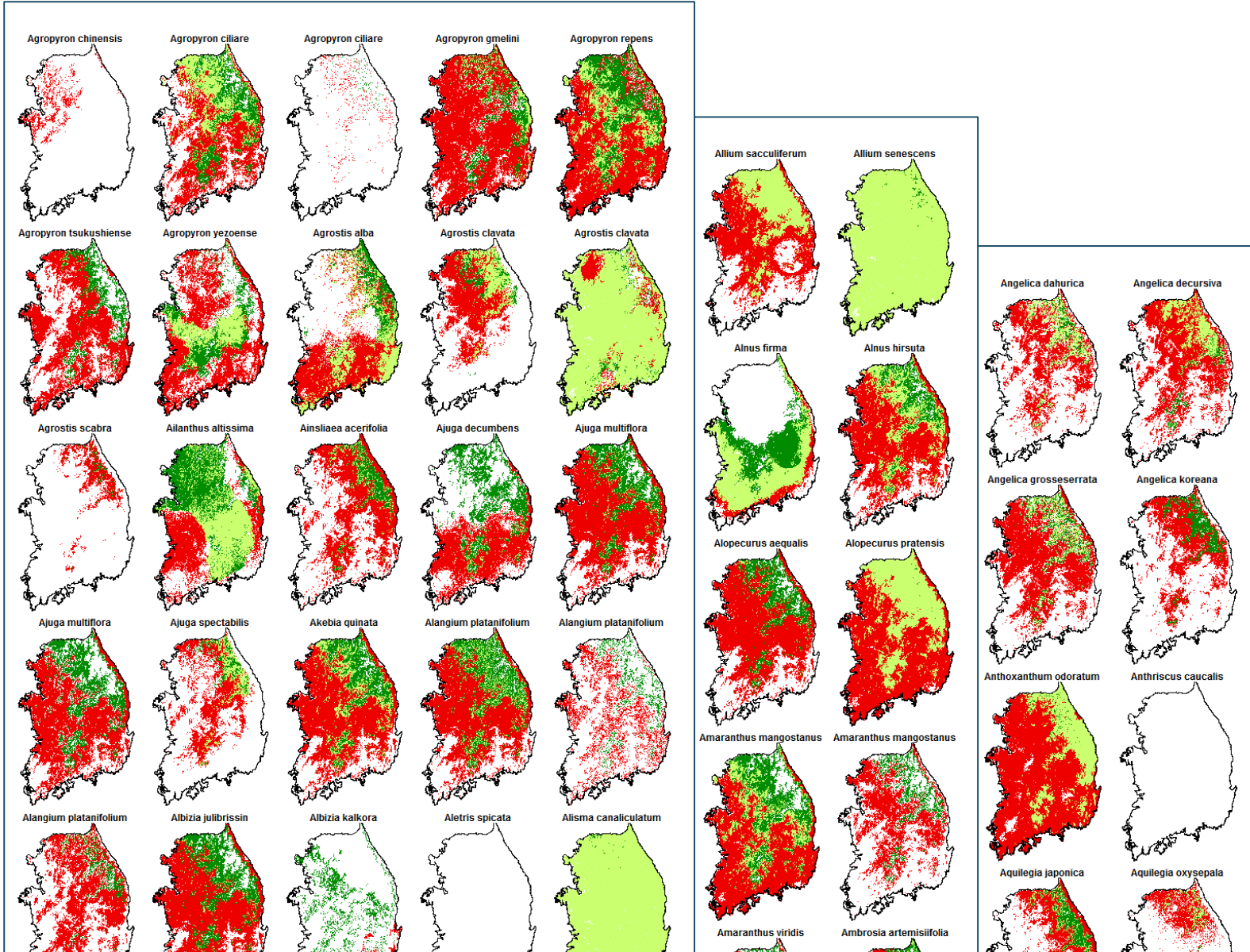
서론

- ✓ **기후변화**로 인해 서식처의 환경적 상태가 변화하면서 종들은 적합한 서식처를 찾아 **이동**할 필요가 있음
- ✓ 기존의 기후변화 평가
 - 실용적인 적용이 불가능한 **특정 종 중심**의 접근
 - **일반적이고 비공간적인 대안 제시**
- ✓ **자료 부족**으로 인한 특정 종 중심 접근의 **한계**
- ✓ 어떠한 두 종도 서로 같지 않음. (No two species are mutually interchangeable or replaceable.)
- ✓ **연구목표: 다양한 종의 이동 경로가 될 수 있는 기후 메타코리더 설정**

- ☑ 공간적 취약성 평가를 통해 종의 현재와 미래의 분포 패턴에 따라 기후변화취약종그룹 평가
- ☑ 메타코리더 지정을 통한 우선 보전 지역 평가

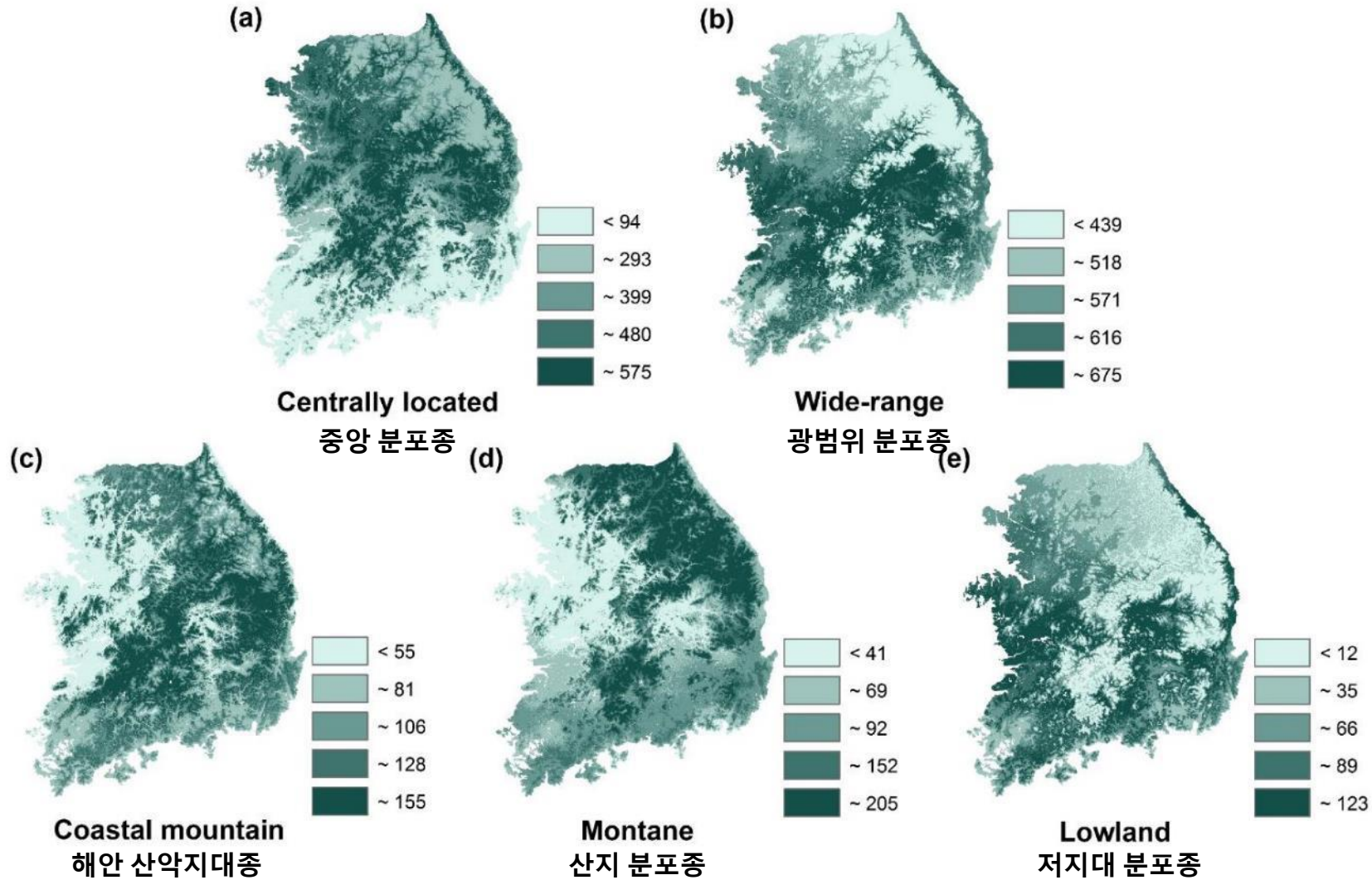


결과 : 종분포 현재/미래 예측 결과



- 2,297 식물종의 현재와 2050년 분포 예측
- 축소 / 안정 / 확장
- 생물기후 변수 이용

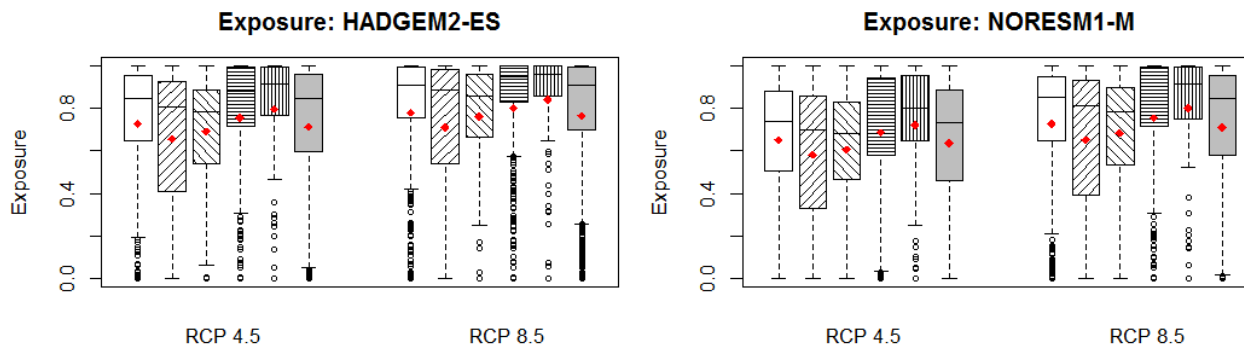
결과 : 종 그룹화



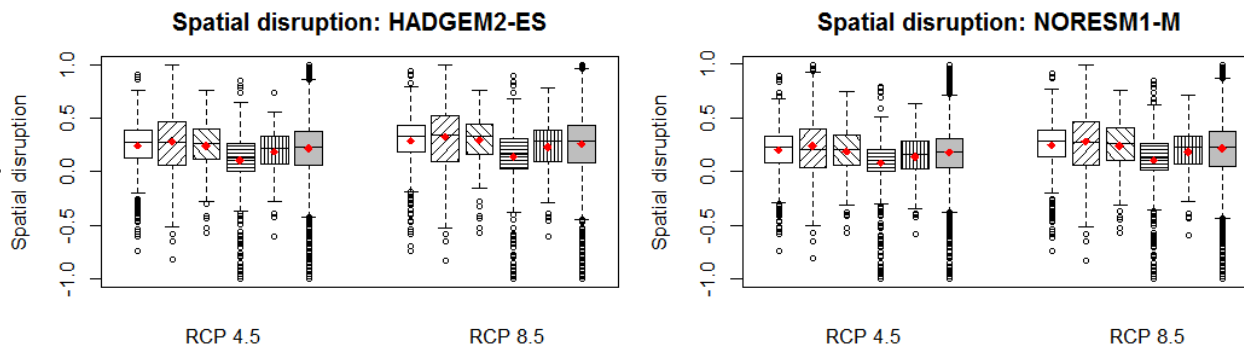
▲ 각 종그룹에 속하는 종들의 종풍부도

결과 : 공간적 취약성 평가

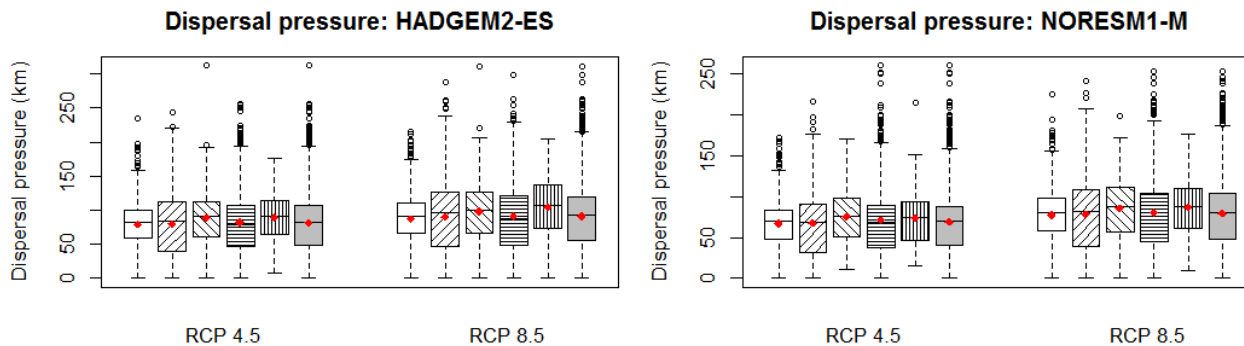
기후변화 노출



공간적 서식처 감소

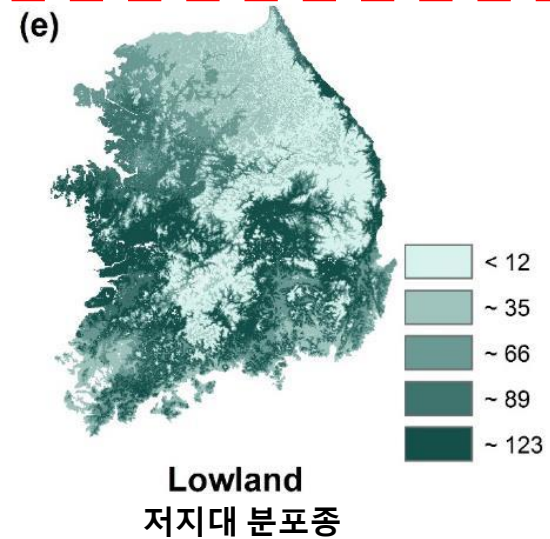
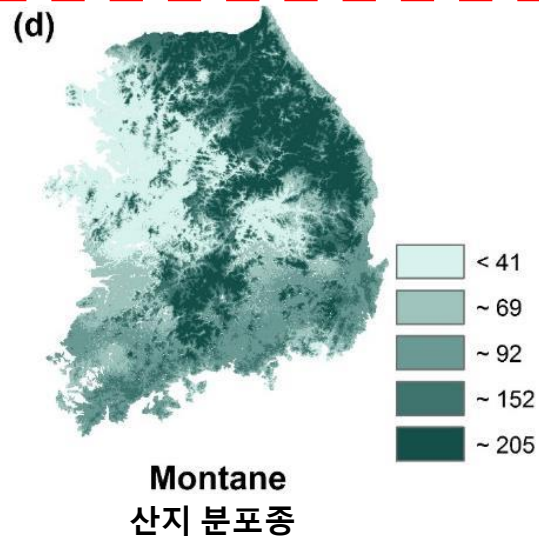
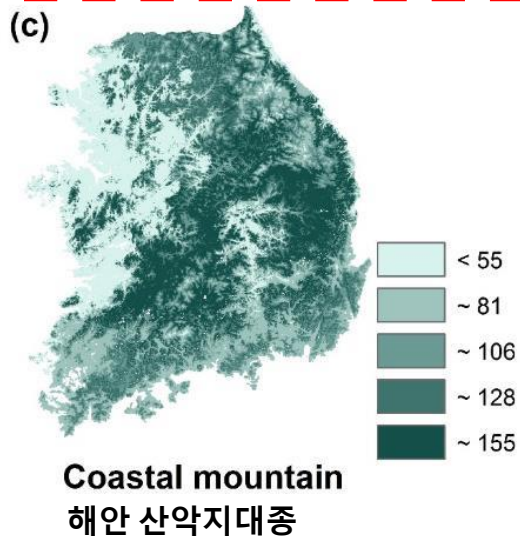
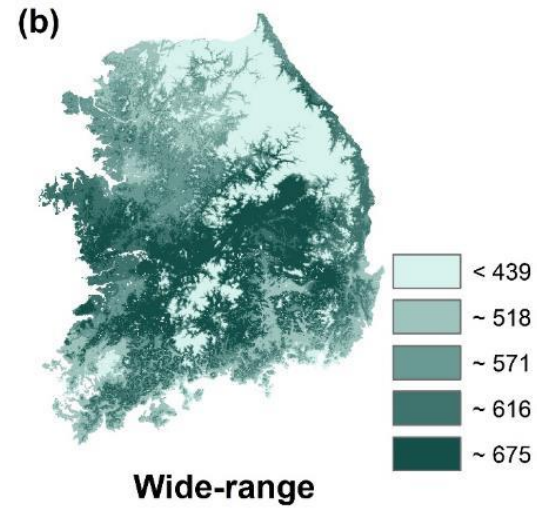
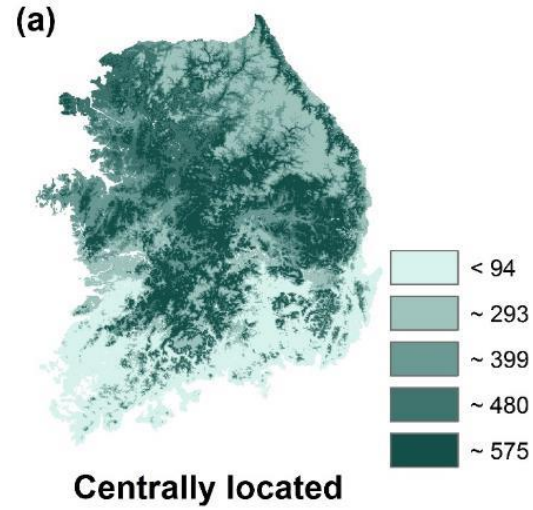


이동 압력



□ Central ▨ Wide-range ▩ Coastal Mt. ≡ Montane ▤ Lowland ▒ All

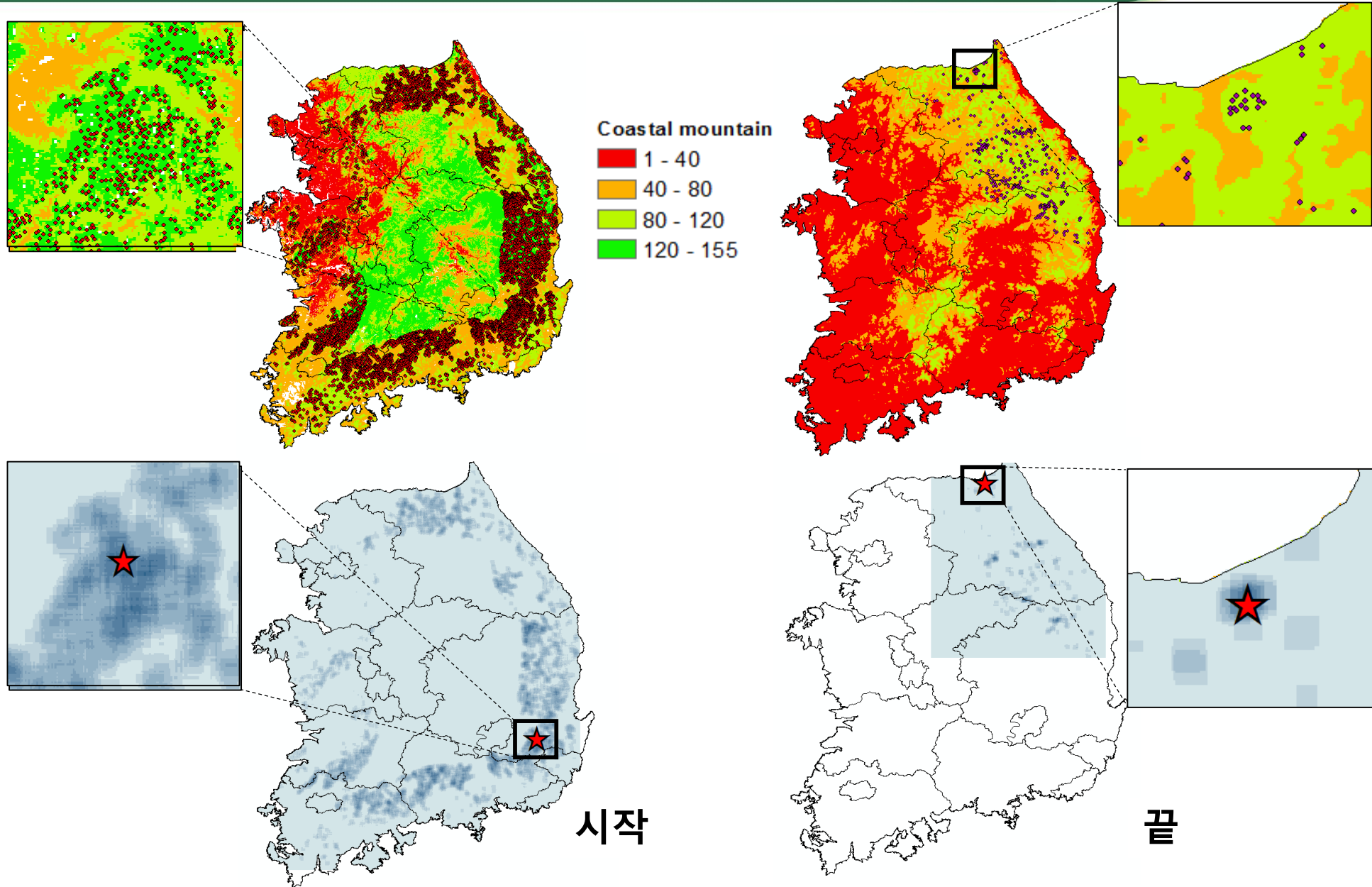
결과 : 공간적 취약성 평가



기후변화 취약 종그룹

결과 : 시작/끝 지점을 위한 밀도 평가

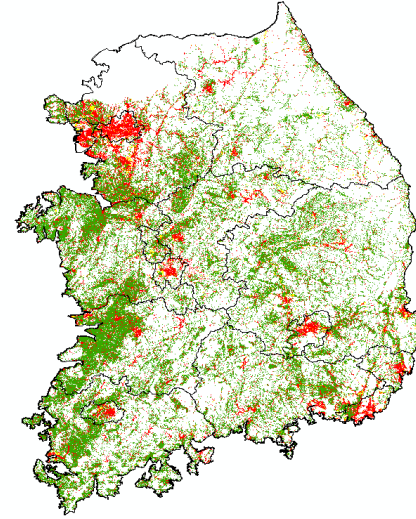
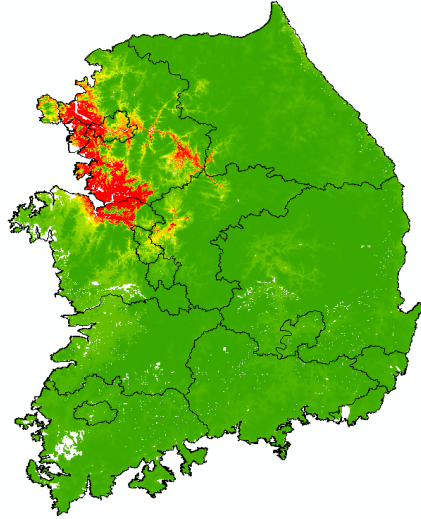
ex) 해안 산악지대종



결과 : 최소 비용 경로 분석

ex) 해안 산악지대종

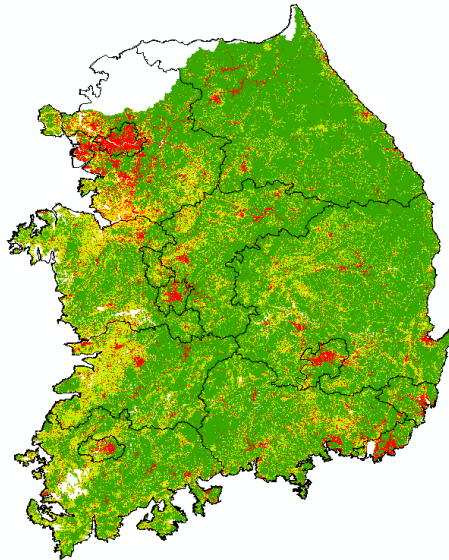
현재
종풍부도
반대
(inversed)



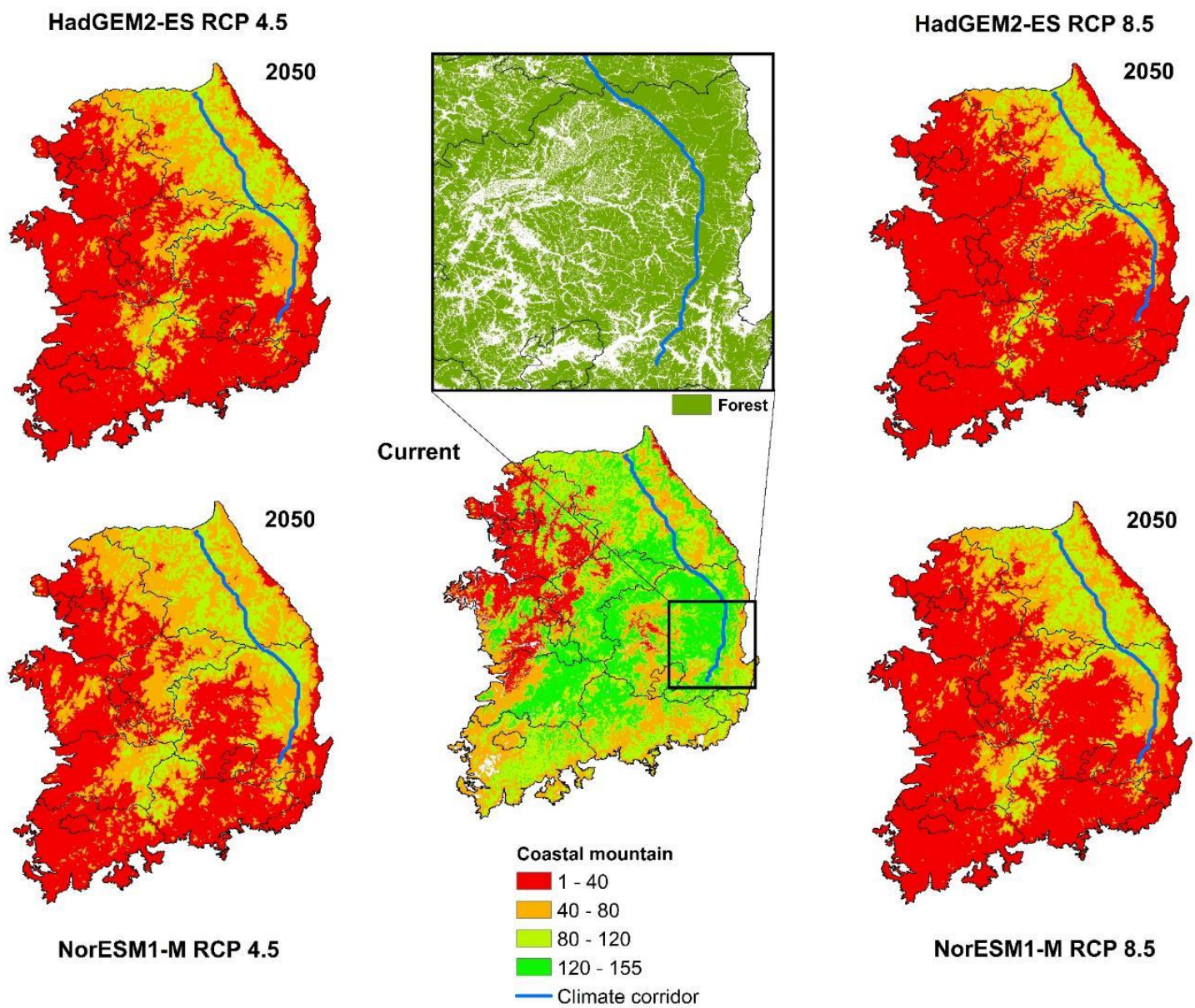
토지이용



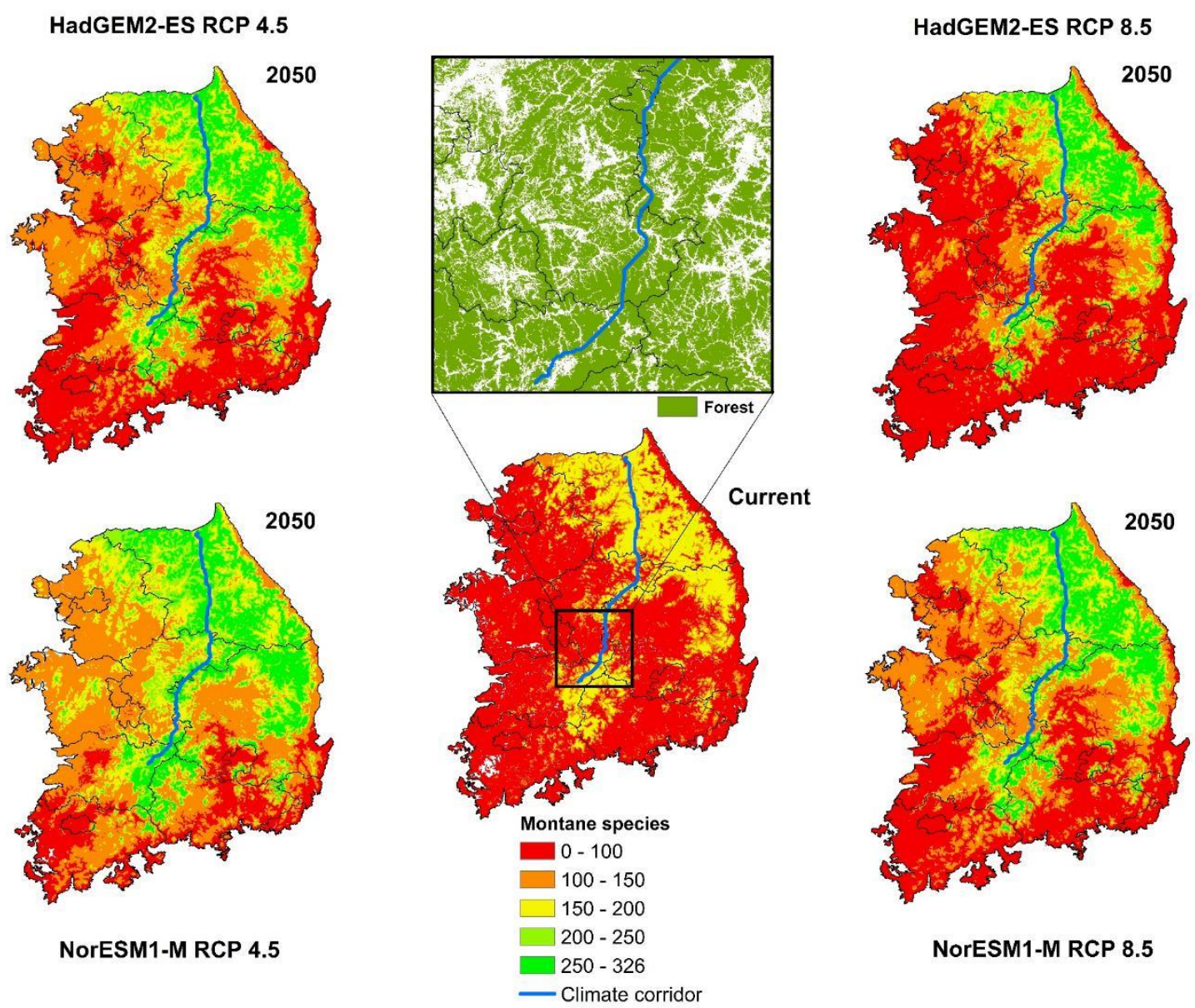
비용
layer



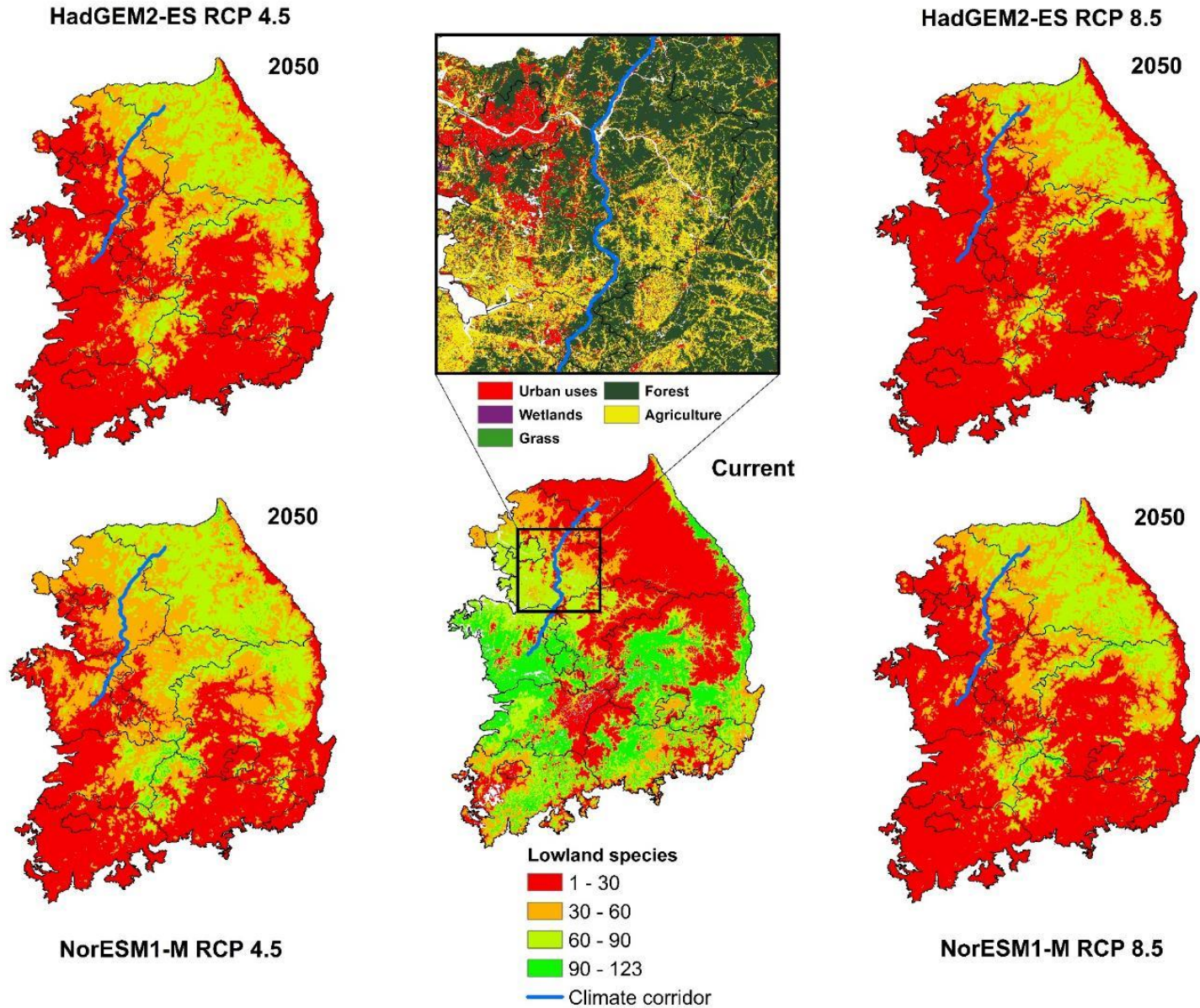
결과: 해안 산악지대중 기후 코리더



결과: 산지 분포종 기후 코리더



결과: 저지대 분포종 기후 코리더



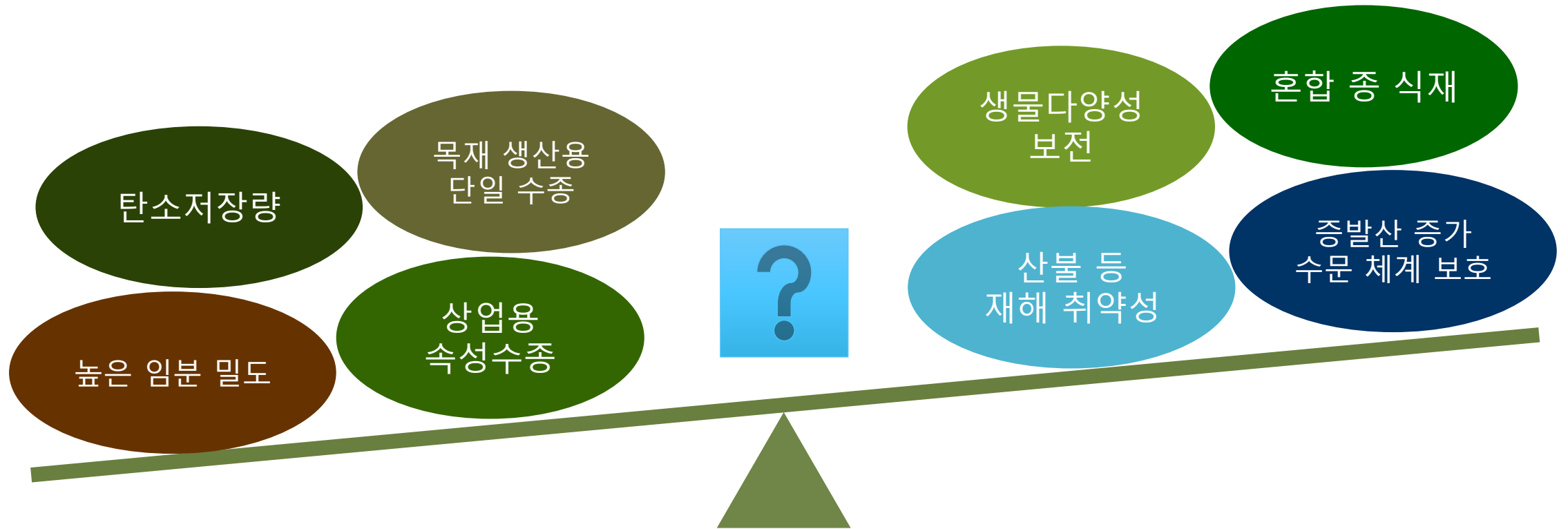
03

기후변화와 토지이용 변화를 고려한 생물다양성 보전 전략

탄소중립과 생물다양성 보전

생태계서비스 전략의 트레이드오프

- ✓ 상승효과를 달성하기 위해 다양한 기능의 통합과 이들의 트레이드오프에 대한 고려가 필요
- ✓ 생물지리적 및 사회생태적으로 시너지와 트레이드오프를 신중하게 평가해야 함

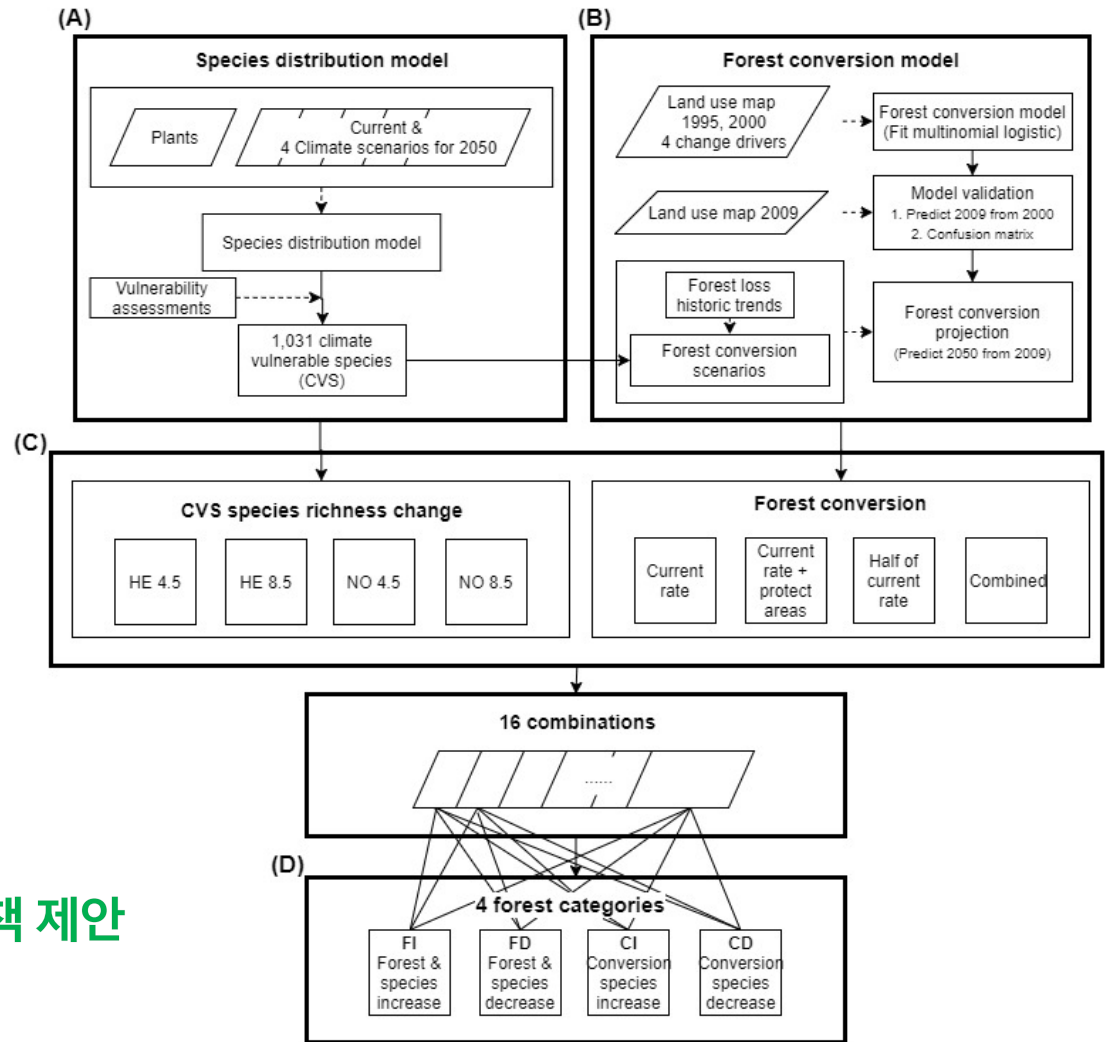


(Amato et al. 2013; Brancalion and Chazdon 2017; Dybala et al. 2019; O'Driscoll 2018)

탄소중립과 생물다양성 보전

산지 전용 시나리오와 기후변화 모델 결합

1. 네 가지 **기후변화 시나리오**를 이용
→ 기후변화 취약 식물종의 2050년 종풍부도 평가
2. 다중 로지스틱 회귀분석을 이용하여
행정단위별 과거 산림 손실 평가
3. 네 가지 **산지 전용 시나리오**를 이용
→ 2050년 산림지역 변화 예측
4. 두 가지 모델 결과를 독립적으로 결합하여
현재 산림 지역을 네 가지로 구분하고 각각에 대한 **산림관리정책 제안**



▲ 연구 흐름도

탄소중립과 생물다양성 보전

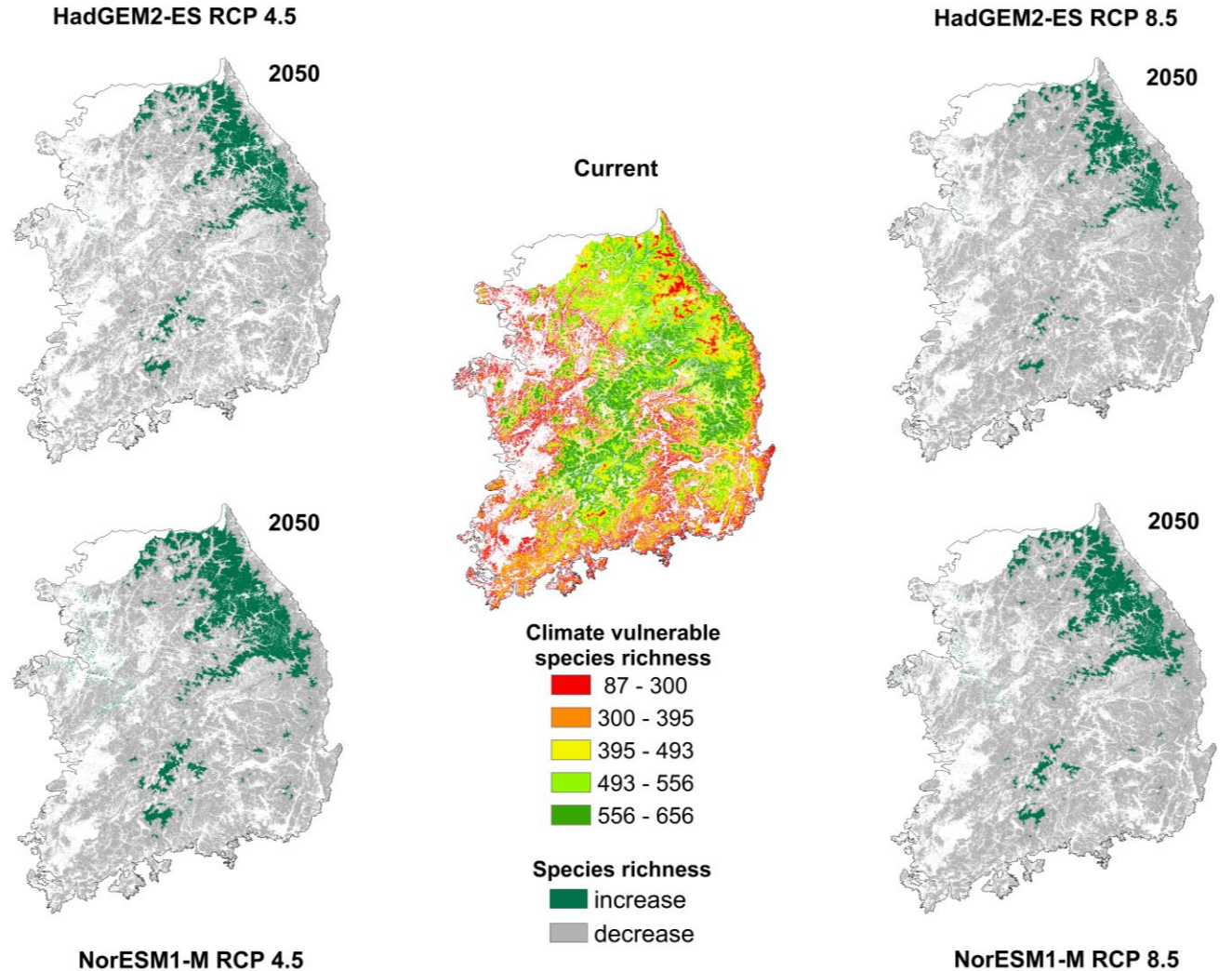
2050년 종풍부도 변화

☑ 기후변화시나리오

기온 상승에 따라서 식 적합 기후가 북쪽으로 이동

☑ 산지 전용 시나리오

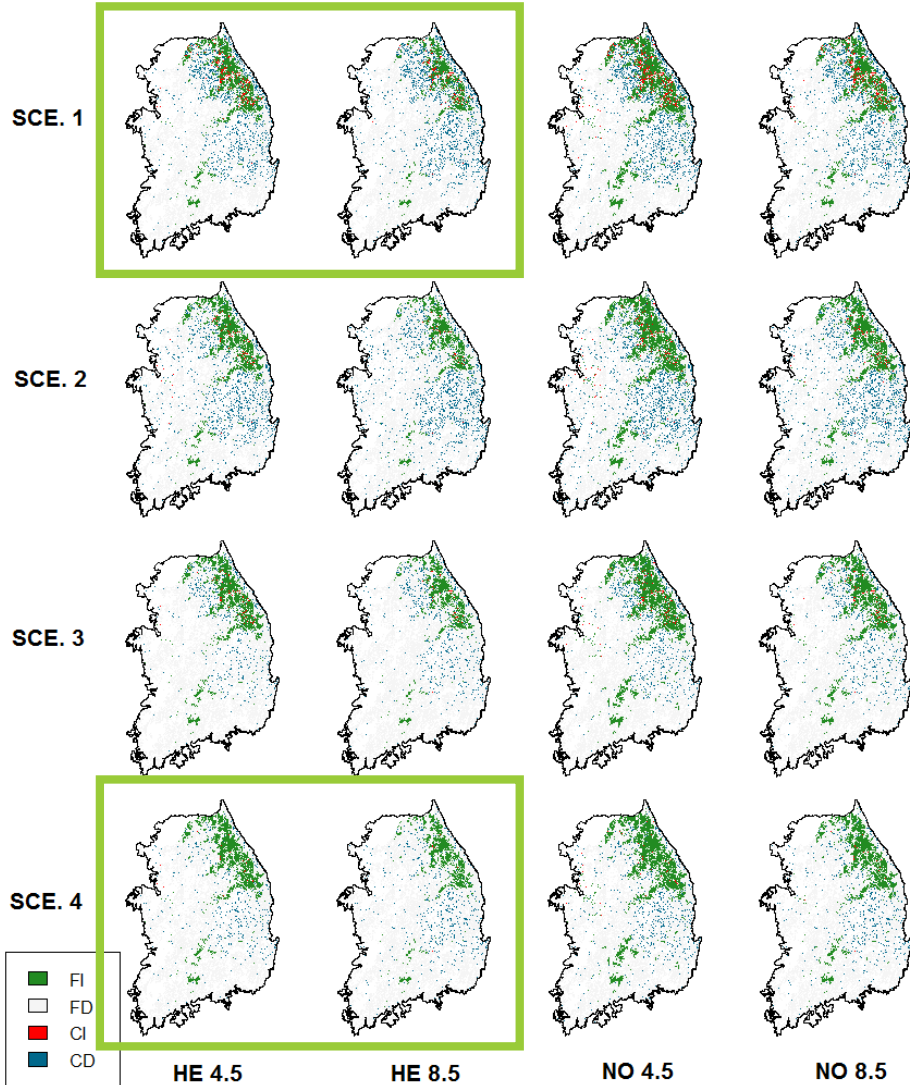
1. 현재 산지 전용 추세 시나리오
2. 강원도 지역의 산림 보호 시나리오
3. 산지 전용 추세량의 50% 감소 시나리오
4. 2와 3 시나리오의 결합



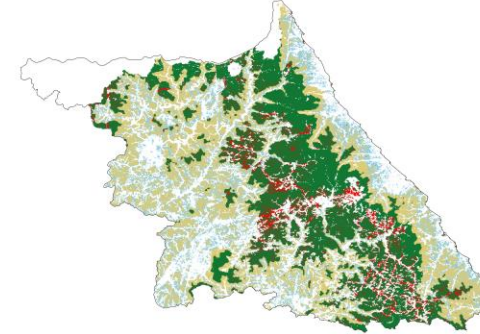
▲ 네 가지 기후변화 시나리오에서 기후변화 취약종의 종풍부도 변화

탄소중립과 생물다양성 보전

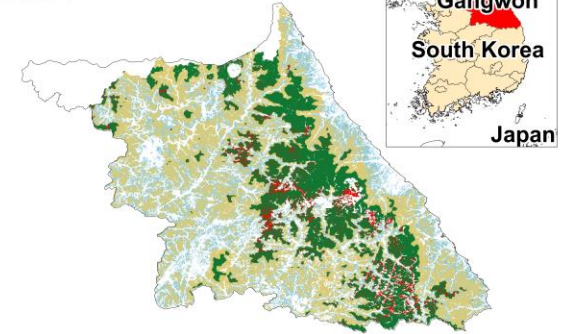
결과



(a) HadGEM2-ES RCP 4.5
Sce. 1



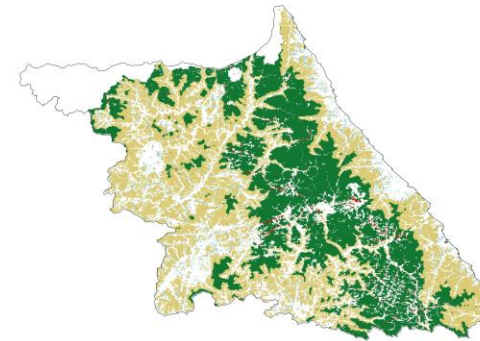
(b) HadGEM2-ES RCP 8.5
Sce. 1



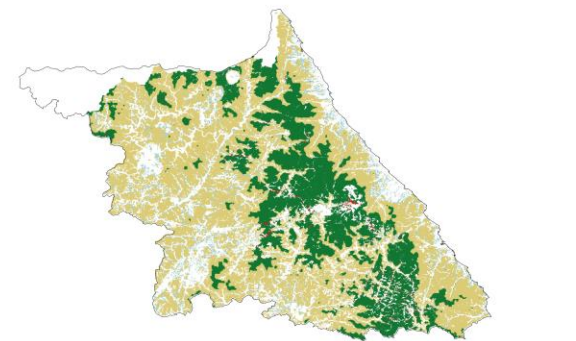
Forest categories

- FI (forest preserved and species richness increase)
- FD (forest preserved and species richness decrease)
- CI (converted and species richness increase)
- CD (converted and species richness decrease)

(c) HadGEM2-ES RCP 4.5
Sce. 4



(d) HadGEM2-ES RCP 8.5
Sce. 4



탄소중립과 생물다양성 보전

결론 및 고찰

- ✓ 산지 전용 수준은 높지만 강원도 지역 산림을 보전(시나리오 2)할 때,
산지 전용 추세량이 50% 감소(시나리오 3)하는 것과 거의 동일하게 FI 지역 보전 가능
- ✓ 기후변화 취약종들의 서식 적합한 산림 지역을 보존하는 시나리오에서 산지 전용으로 인한 생물다양성 손실을 크게 줄일 수 있음을 확인
- ✓ **산림 정책에 생물지리학적 기후변화의 영향을 포함**하는 것이 중요

탄소중립과 생물다양성 보전

각 산림유형에 대해 다른 산림 보전 전략 필요

FI (산림보존, 종풍부도 증가)

- 잠정적 기후 레퓨지아.
- 장기적인 모니터링과 추가적인 보호지역 지정 필요.
- 보조적인 서식지 이전(assisted migration)을 위한 후보지.

FD (산림보존, 종풍부도 감소)

- 장기적인 모니터링 필요.
- 종들의 이동을 위해 주변의 FI 지역으로 서식지 연결성 유지.
- 기후변화 완화를 위한 탄소흡수 단일종 식재.

CI (산지 전용, 종풍부도 증가)

- 잠재적인 산림 벌채 위협 요소 확인.
- 추가적인 보호지역 지정 필요.

CD (산지 전용, 종풍부도 감소)

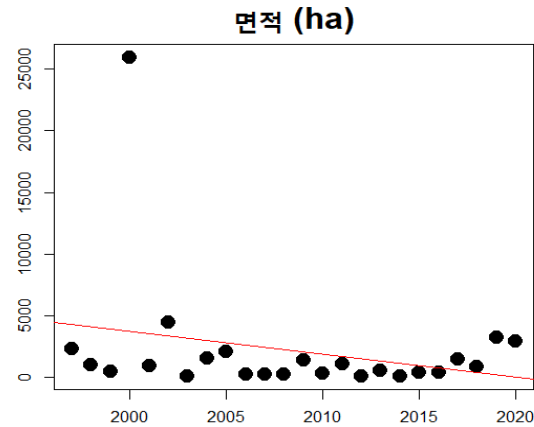
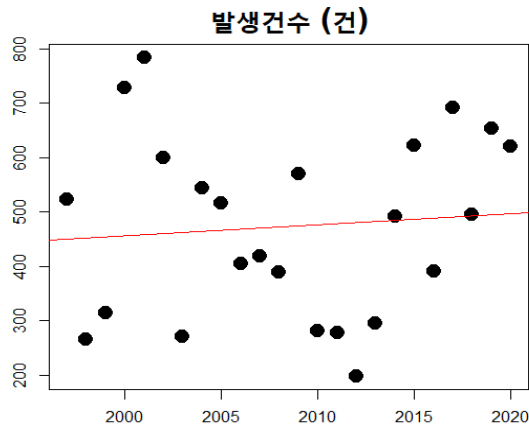
- 지속적인 모니터링.
- 주변 지역으로 서식지 연결.

04

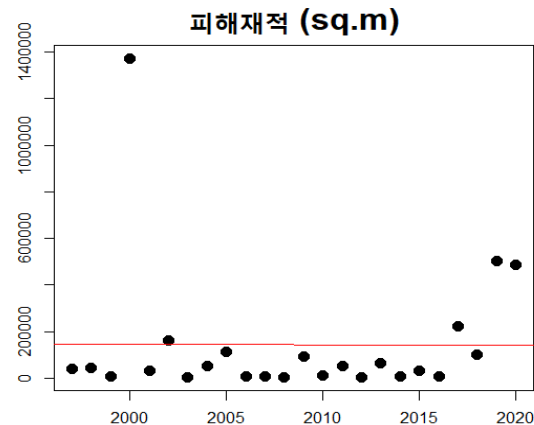
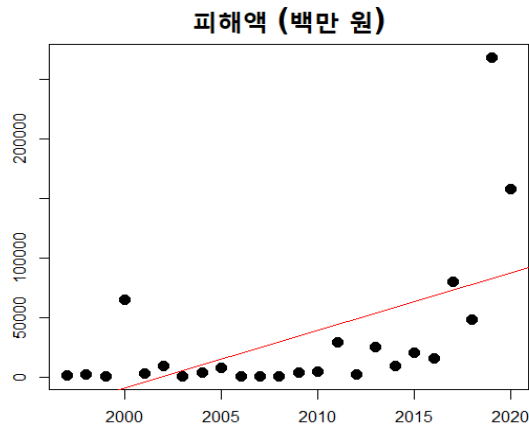
기후변화로 인한 산불 발생증가와 적응정책의 효과

1. 산불 발생 증가 및 대형화

- 전국의 산불 발생건수는 최근 20년간 증가 추세, 특히 최근 5년간 대형 산불 발생 증가
 - 아래 자료에 포함되지 않은 2022년 동해안 산불은 2000년 동해안 산불 이후 최대 규모



- 기후변화 영향 등으로 인한 산불위험 요인 증가 및 발생예측의 어려움 (산림청, 2021)
- 연구에는 1997~2020년의 자료를 이용



1. 산불 발생 증가 및 대형화

▪ 다중회귀분석을 통한 연관성 분석

- 리스크 진단 지표 (종속변수): 산불 발생건수, 피해면적, 피해액, 피해재적
- 기후 지표 : 온도, 강수량, 상대습도, 실효습도 건조일수, 풍속의 연간 통계량 및 봄철(3~5월) 통계량
- 정책 지표 : 항공진화능력
 - ✓ 국내 산불은 항공기에 의한 진화율이 90% 이상(이시영과 배택훈, 2009)
 - ✓ 연도별 산림항공기 보유 대수에 대해 기종별 물 운반 능력의 가중치를 부여

발생건수
피해면적
피해액
피해재적

~

온도, 강수량, 상대습도,
실효습도 건조일수(≤35%), 풍속,
항공진화능력*

*매년 전국 산림항공기에 대해
1회 출동시 담수량x체공시간x최대속도 합을 계산하여
수치화

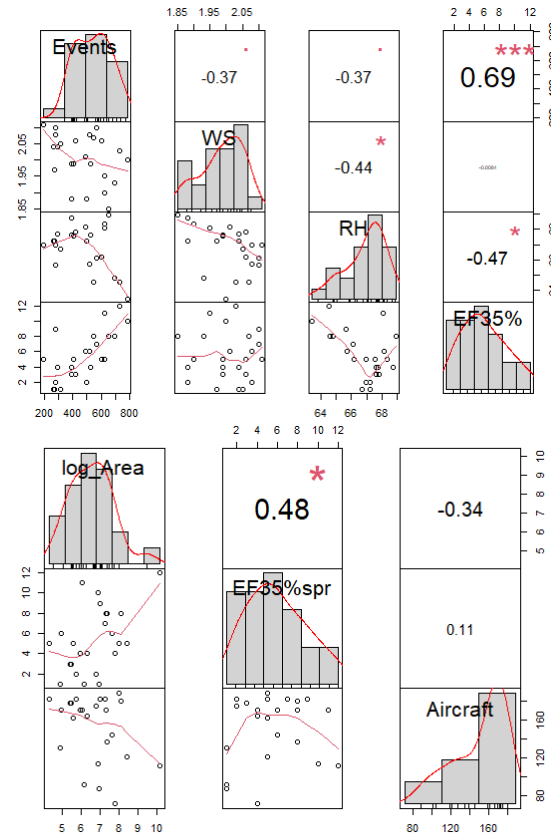
1. 산불 발생 증가 및 대형화

다중회귀분석을 통한 연관성 분석

- (산불 발생건수) = β_1 (연평균풍속) + β_2 (연평균상대습도) + β_3 (실효습도 건조일수) + ϵ
- $\log(\text{산불 피해면적}) = \beta_1(\text{봄철 실효습도 건조일수}) + \beta_2(\text{항공진화능력}) + \epsilon$

Wildfire_events			
Predictors	Estimates	CI	p
(Intercept)	5418.66	1882.76 – 8954.55	0.005
avg wind speed	-1155.57	-1814.41 – -496.73	0.002
avg relative humidity	-41.50	-80.92 – -2.08	0.040
day effective humidity below 35%	27.06	10.98 – 43.14	0.002
Observations	24		
R ² / R ² adjusted	0.689 / 0.642		

Wildfire_areas_log			
Predictors	Estimates	CI	p
(Intercept)	7.78	5.60 – 9.95	<0.001
day in spring effective humidity below 35%	0.22	0.07 – 0.37	0.006
firefighting aircraft	-0.02	-0.03 – -0.00	0.030
Observations	24		
R ² / R ² adjusted	0.392 / 0.334		



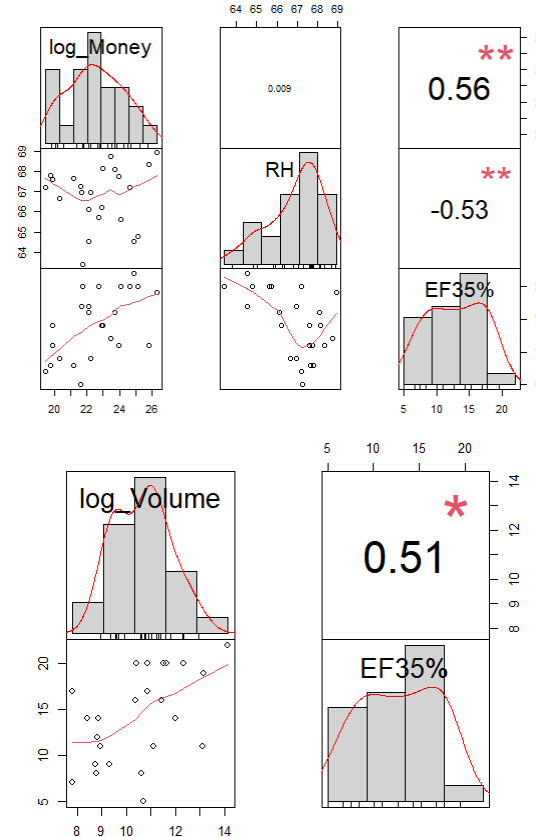
1. 산불 발생 증가 및 대형화

▪ 다중회귀분석을 통한 연관성 분석

- $\log(\text{산불 피해액}) = \beta_1(\text{연평균상대습도}) + \beta_2(\text{실효습도 건조일수}) + \varepsilon$
- $\log(\text{산불 피해재적}) = \beta_1(\text{실효습도 건조일수}) + \varepsilon$

Wildfire_money_log			
Predictors	Estimates	CI	p
(Intercept)	-21.07	-58.54 - 16.40	0.255
avg relative humidity	0.59	0.05 - 1.13	0.035
day effective humidity below 35%	0.31	0.16 - 0.47	<0.001
Observations	24		
R ² / R ² adjusted	0.451 / 0.398		

Wildfire_volume_log			
Predictors	Estimates	CI	p
(Intercept)	7.98	5.98 - 9.97	<0.001
day effective humidity below 35%	0.18	0.04 - 0.31	0.011
Observations	24		
R ² / R ² adjusted	0.257 / 0.224		



■ 다중회귀분석을 통한 연관성 분석

- AIC 최솟값을 갖는 모형 선택을 통해 산식 도출
- 정책지표인 항공진화능력은 산림피해면적에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있음

$$\text{산불 피해면적 (ha)} = e^{7.78+0.22(\text{봄철 실효습도 건조일수(day)})-0.02(\text{항공진화능력(no unit)})}$$

- 산불 발생 증가는 기후 지표의 영향이 큰 부분이므로 기후변화의 경향에 따라 증가할 우려가 있음
- 항공진화능력은 기종별 담수량, 체공시간, 최대속도 등을 고려하여 아래와 같이 가중치 설정
- 산불 피해면적은 헬기 대수 증가에 따라 소형헬기 1대당 0.97~0.98배, 중형헬기 1대당 0.92~0.96배, 대형헬기 1대당 0.92배, 초대형헬기 1대당 0.83배로 감소하는 경향이 나타남

구분	항공기	담수량(l)	체공시간(분)	최대속도(km/h)	항공진화능력 가중치(1대 당)
소형	BELL206-L3	600	200	240	1
	AS350-B2	800	200	287	1.5
중형	BELL412	1400	150	203	2
	KUH-1FS	2000	180	287	4
대형	KA-32T	3000	190	230	4
초대형	S64E	8000	150	213	9

감사합니다

• 최혜영 hy.choe@snu.ac.kr •