

1. Introduction

- 산불 소실면적(burned area)**은 기후와 인간 활동이 함께 좌우하는 대표적인 지표
 - 기존에 기온·강수·토지이용변화 같은 기후변수 및 사회변수로 산불을 설명하는 회귀·민감도 분석은 활발히 이루어져왔으며, 기후가 산불의 '규모'에 미치는 영향은 비교적 잘 알려져 있으나 **기후변화 및 인간의 영향이 산불의 장기 '추세' 자체를 얼마나 끌어올렸는지 혹은 낮았는지는 거의 다뤄지지 않았음**
 - 인도차이나 반도는 산불 빈도가 매우 높은 지역이며**, 실제로 동남아시아에서 산불 재발 빈도가 가장 높은 4개국이 라오스, 캄보디아, 태국, 미얀마임
 - 또한 20세기 후반 **농경지가 빠르게 확장된 지역**으로 기후변화와 토지이용 변화가 모두 강하게 작용하여 두 요인의 몫을 분리하기에 적합함
- 핵심 질문: 인도차이나 산불 추세에 '기후변화'와 '인간 토지이용 변화'는 각각 얼마나 기여했는가?
- 세밀한 공간 단위: 156개 행정구역으로 지역 내 차이 분석
 - 분석 관점 전환: 산불 '규모(Level)' → 산불 '추세(Trend)'

2. Materials & Methods

데이터 & 방법론

주 분석 데이터: ISIMIP3a 산불 시뮬레이션. 동일 기상강제력(GSWP3-W5E5)으로 구성된 7개 과정기반 산불모델의 Factual-Counterfactual 시나리오, 월별 1901-2019

7개 모델: CLASSIC · JULES-INFERNO · LPJ-GUESS-SPITFIRE · LPJ-GUESS-SIMFIRE-BLAZE · ORCHIDEE-MICT-SPITFIRE · SSiB4/TRIFFID-Fire · VISIT

검증-가중: FireCCI5.1 · GFED5 (2003-2019) | 토지이용: LUH2 | 행정구역: GADM4.1

- 기후 기여 분리: **Factual vs Counterfactual**, 토지이용 양쪽 동일 고정 → 순수 기후 효과
- 토지이용 기여 분리: **histsoc vs 2015soc**, 기후 양쪽 동일 고정 → 순수 토지이용 효과
- 관측 데이터는 ISIMIP3a 7개 모델 성능 평가가중치 산출에만 사용 (NME 기반)
- 핵심 지표: $\Delta\beta = \beta_{Factual} - \beta_{Counterfactual}$ (β = 연간 상대이상 RA의 Theil-Sen 기울기, 1000회 부트스트랩으로 유의성 판정)

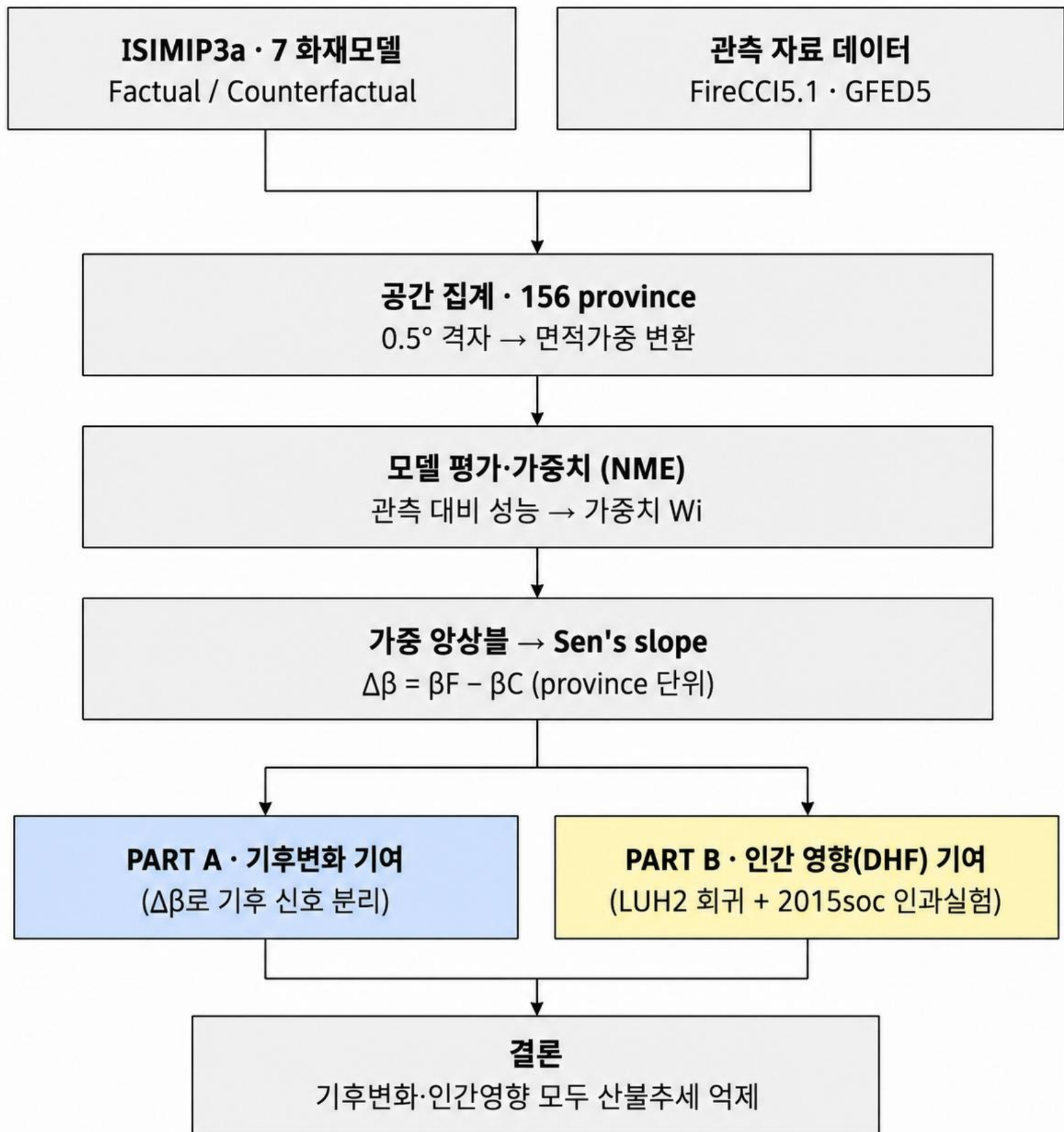


Figure 1. 연구 흐름도.

모델 평가 & 가중치 산출 (전처리)

- 모델 간 산불 절대량의 규모 차이가 클 → 절댓값으로 양상불하면 규모가 큰 모델이 결과를 지배 → 상대이상치(RA) 기반 가중-양상불로 규모 차이 제거
- 가중치는 관측(FireCCI5.1-GFED5) 대비 NME (SSiB4 평균오차)로 산출 - 산불의 양이 아니라 시·공간 '패턴'을 얼마나 잘 재현하는가를 평가 (SSiB4 모델이 30.5%로 최상위)
- 가중치는 구역마다 다름 → 지역별 우세 모델로 공간 차별화 가중(Figure 2)

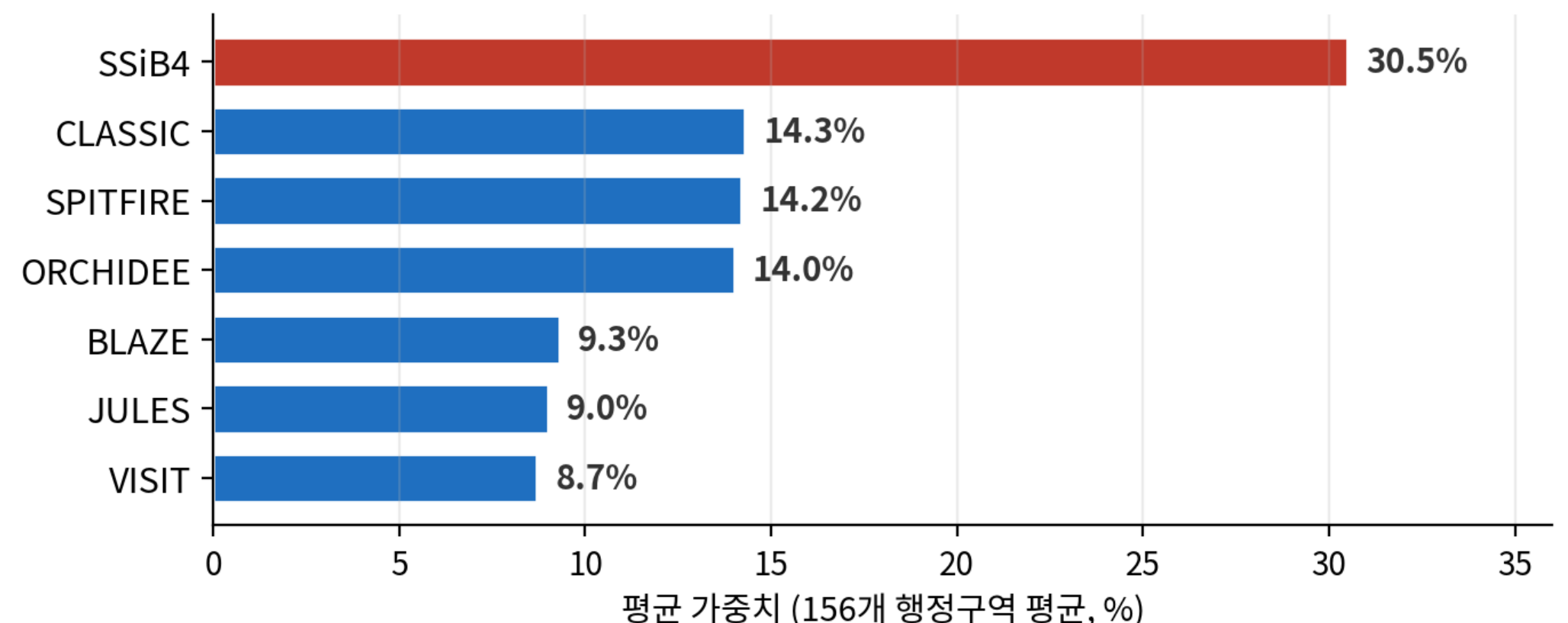


Figure 2. 7개 모델의 양상불 가중치(156 행정구역 평균). 실제 분석은 구역별 가중치 사용.

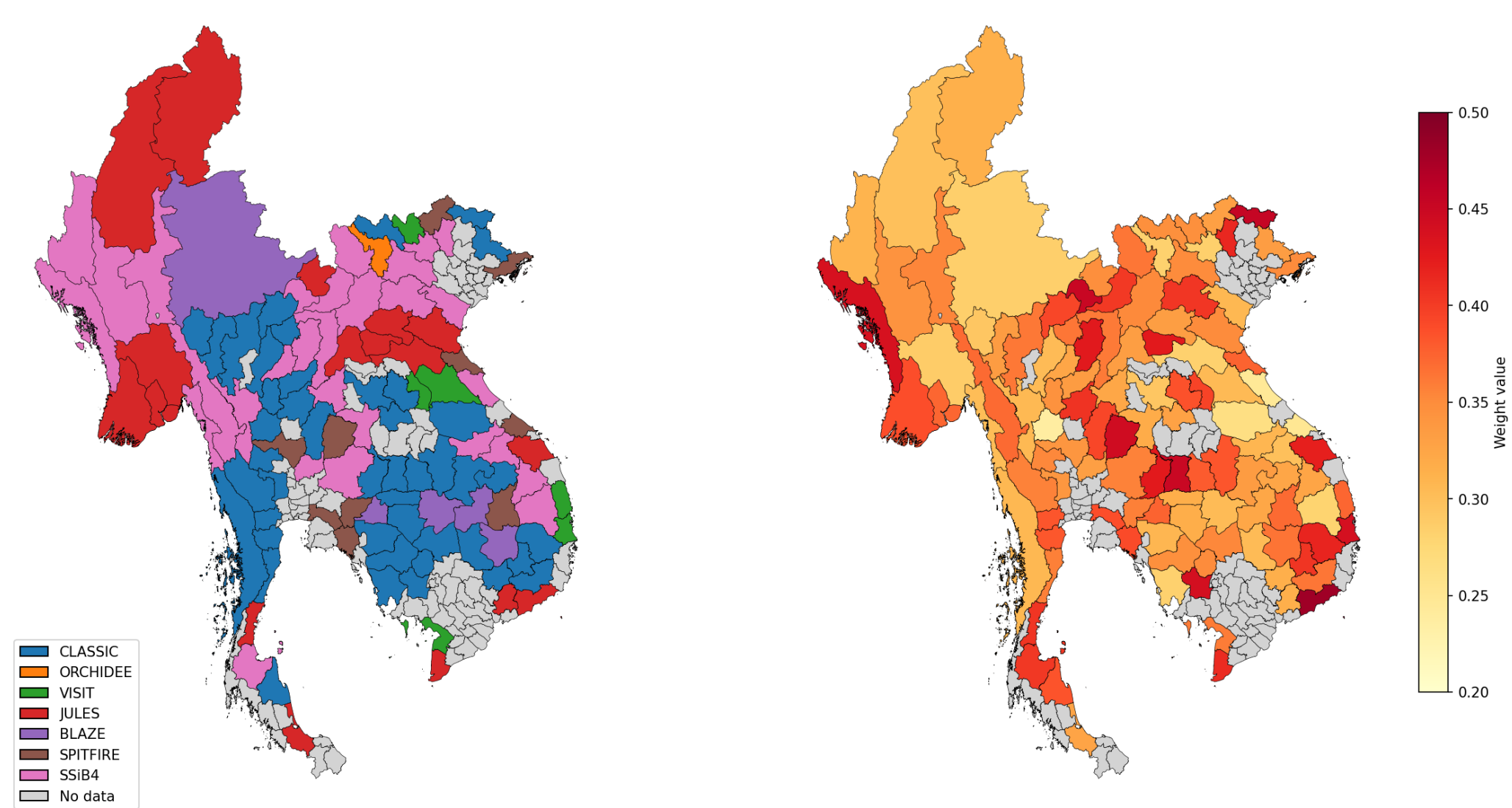


Figure 3. 행정구역별 최상위 가중 모델(왼쪽)과 그 가중치 크기(오른쪽).

3. Result & Discussion (PART A · 기후변화의 기여)

기후변화의 산불 추세 억제/증폭 영향 분석

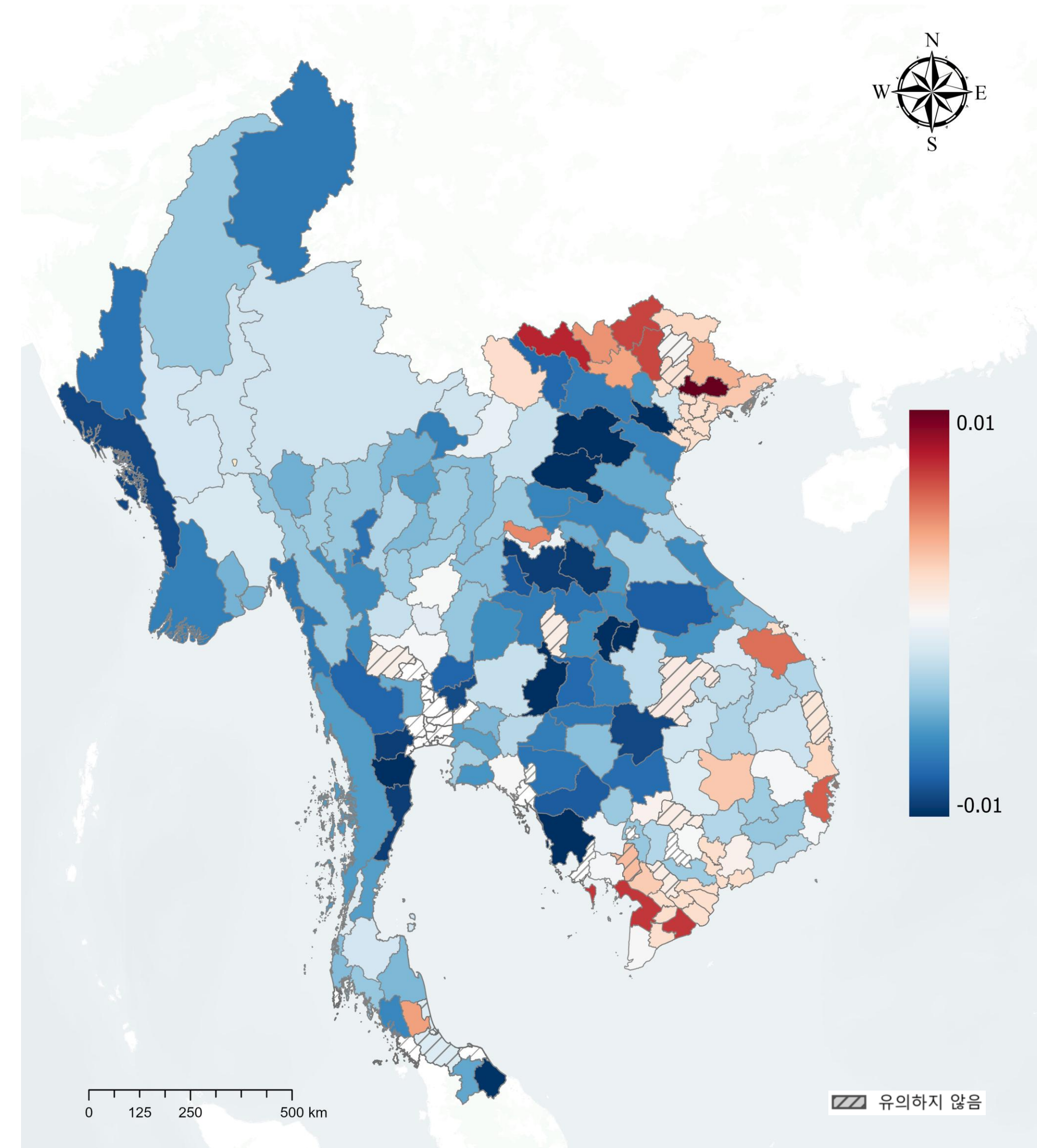


Figure 4. 행정구역별 $\Delta\beta$ 지도(1980-2019). 파랑=억제, 빨강=증폭.

- 중앙값 $\Delta\beta = -0.0043/\text{yr}$, 그중 **94%가 통계적으로 유의**
 - 유의 구역의 **81%가 억제**(파란색, 음수) - 기후변화가 산불 추세를 Counterfactual(기후변화 없는 세계) 대비 억눌러 왔음
 - 미얀마-태국라오스-캄보디아 전역 대부분 일관되게 억제, 베트남 북부만 예외(증폭)
- ✳ '억제'는 산불을 줄였다는 것이 아닌, 기후변화 없었을 세계보다 추세가 덜 가파르게 늘었다는 의미

행정구역별 산불 추세 분석

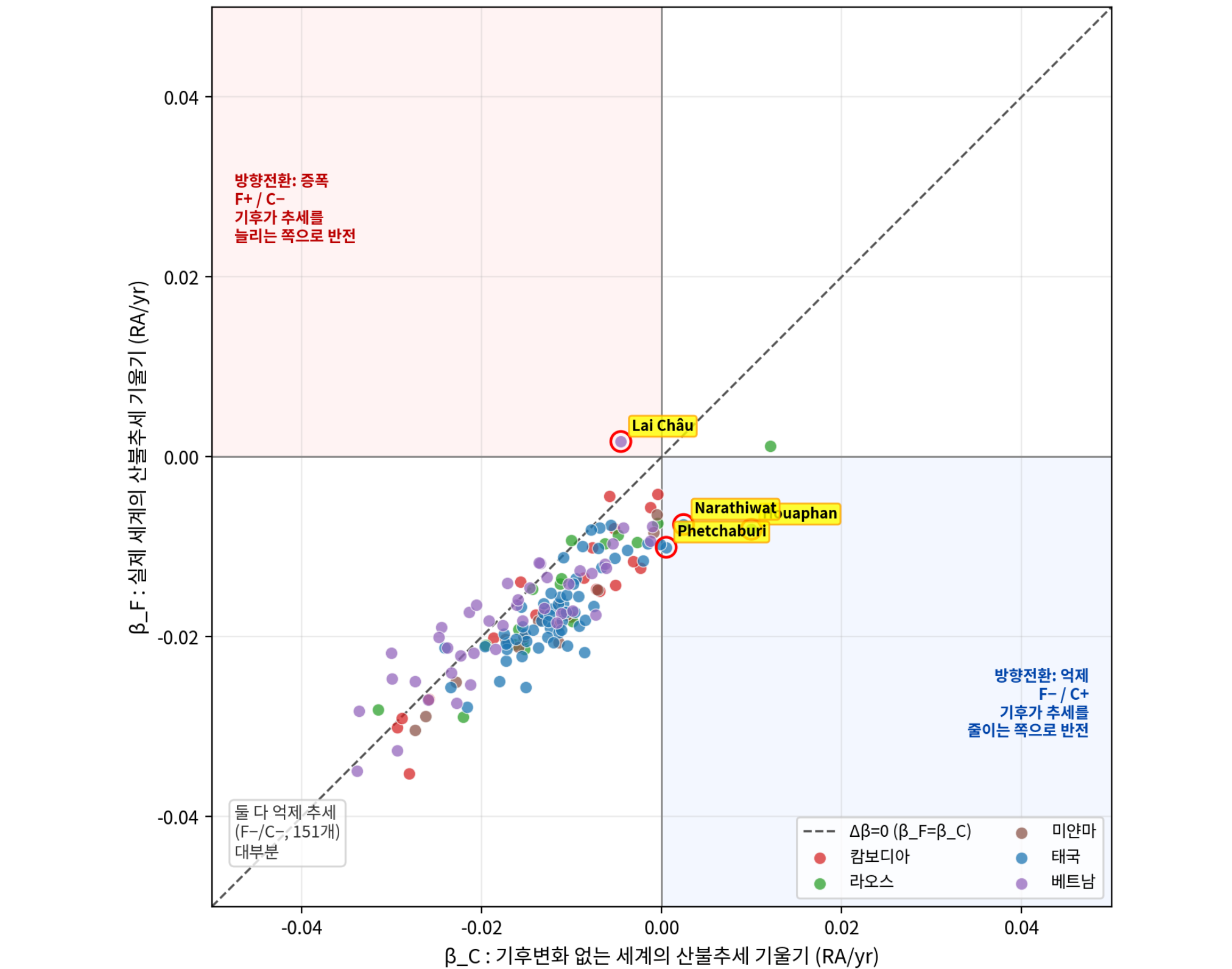


Figure 5. 실제 산불 추세(β_F) vs 기후변화 없는 산불 추세(β_C), 156 행정구역, (1980-2019).

- 대각선 아래 = 산불 추세 억제(151), 대각선 위 = 산불 추세 증폭(5)
 - 156구역 중 151개가 대각선 아래(억제)에 밀집
 - 극소수는 기후가 추세 부호를 통째로 뒤집음:
 - 증폭 반전(F+/C-)**: 베트남 Lai Châu
 - 억제 반전(F-/C+)**: 라오스 Houaphan, 태국 Narathiwat-Phetchabur
- ✳ 기후의 영향이 일부 구역에선 추세 방향까지 바꿀 만큼 강함

시대별 기후변화의 산불 추세 영향

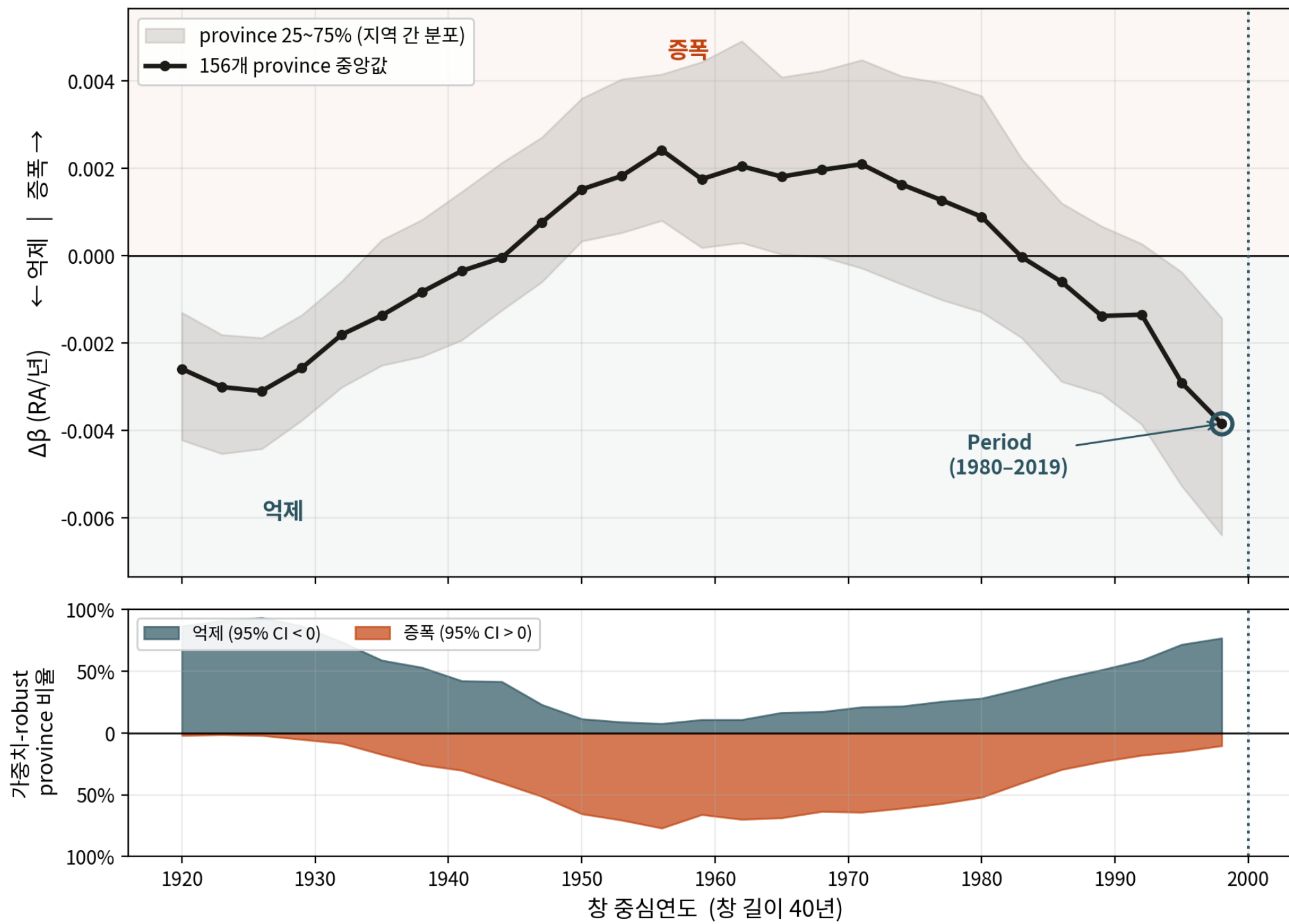


Figure 6. 시대별 기후변화의 산불 추세 영향 (40년 슬라이딩 윈도우)

- 3국면**: 20세기 초 억제 → 중기 증폭 → 현대 억제. 부호가 시대마다 바뀜
 - 이는 측정되는 **불안정성이 아니라**, 시스템이 시기마다 다르게 반응하는 **비정상성(실제 현상)**
- ✳ 기후변화의 산불 추세 영향은 정적이지 않고 **시대에 따라 억제<=>증폭으로 전환**. 단일 기간만 보았을 때는 드러나지 않는 특징.

주 분석기간(1980-2019)의 정당화

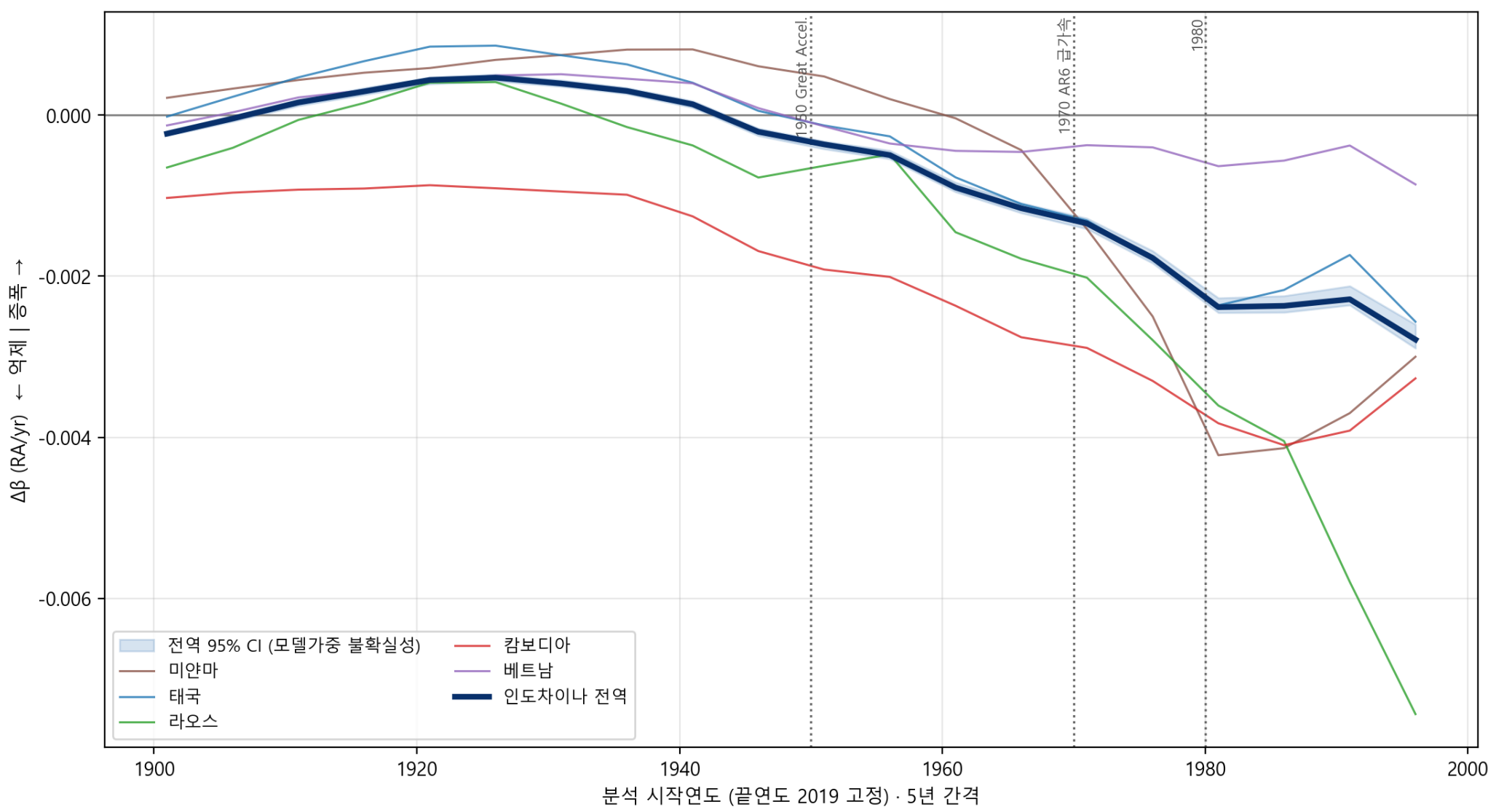


Figure 7. 시작연도별 $\Delta\beta$ (붙연도 2019 고정).

- 분석 시작연도를 **1901→2000으로 옮겨가며** $\Delta\beta$ 를 반복 계산(붙연도 2019 고정)
- 시작연도가 늦을수록(=최근 기간일수록) 억제**가 강해지며, 시작연도=1980 이후 구간에서 일관되게 강한 억제를 보임
- 따라서 주 분석기간 (1980-2019)은 억제 신호가 강한 구간에 위치
- 더불어 (1980-2019)은 **IPCC AR6**에서 정의한 전 지구 온난화 가속기와 시기적으로 부합

3. Result & Discussion (PART B · 토지이용(DHF)의 기여)

회귀 분석 (농경지 확장 ↔ 산불 감소)

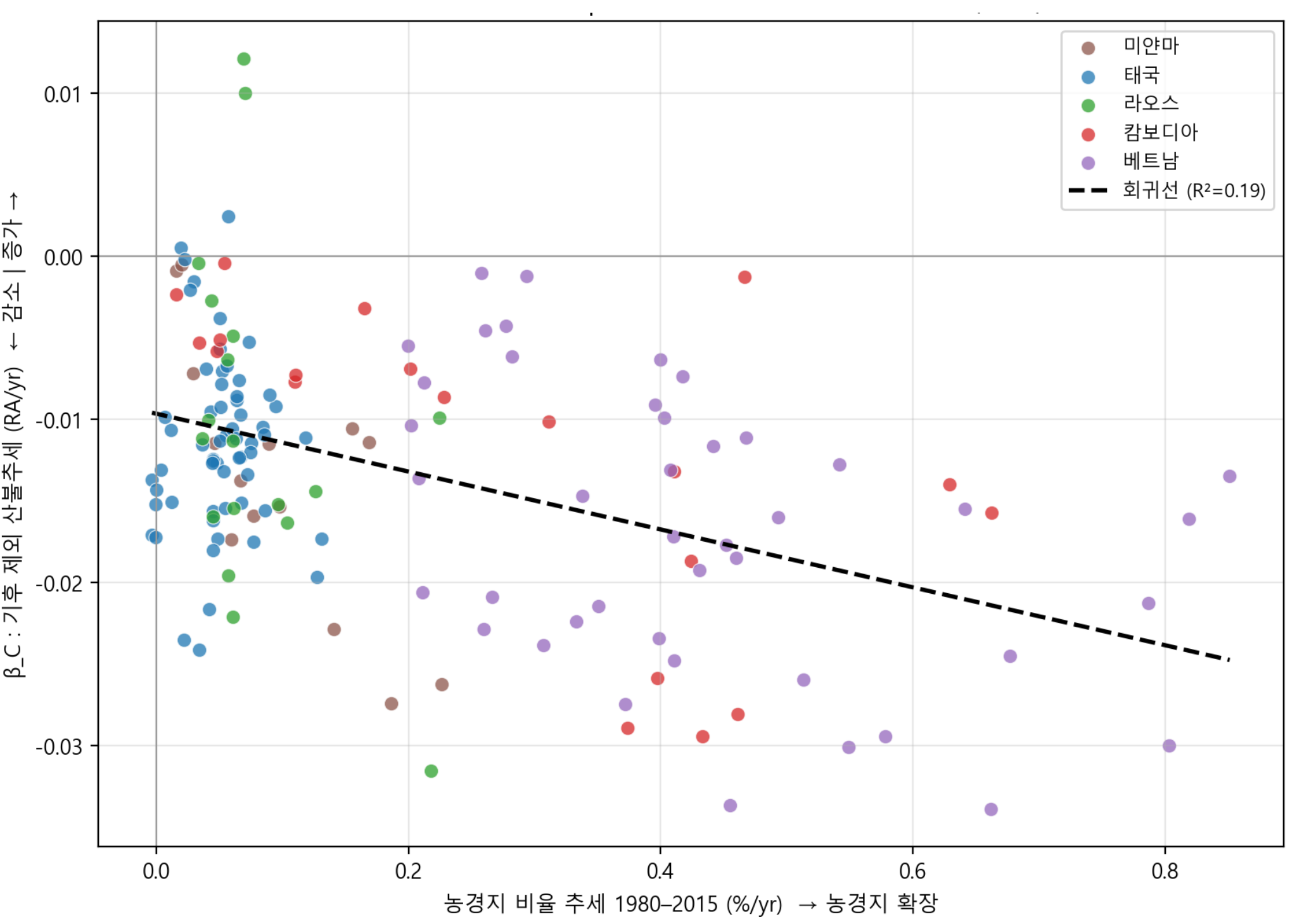


Figure 8. 농경지 추세 vs 기후 제외 산불추세(β_C), 156 행정구역.

- 기후변화를 제외한 산불 추세(β_C)를 토지이용 변화로 회귀 → '인간 영향'만 남은 추세를 설명
- 농경지가 빠르게 확장된 구역일수록 산불 추세가 더 감소(회귀계수 -0.019 , $p < 0.0001$)
- 도시화는 농경지를 통제하면 비유의($p = 0.28$) → **핵심 인자는 농경지** ($R^2 = 0.20$)
- 이 연관은 다음의 인과실험(DHF)과도 같은 방향 → 독립적 뒷받침

토지이용의 인과 효과 (counterfactual)

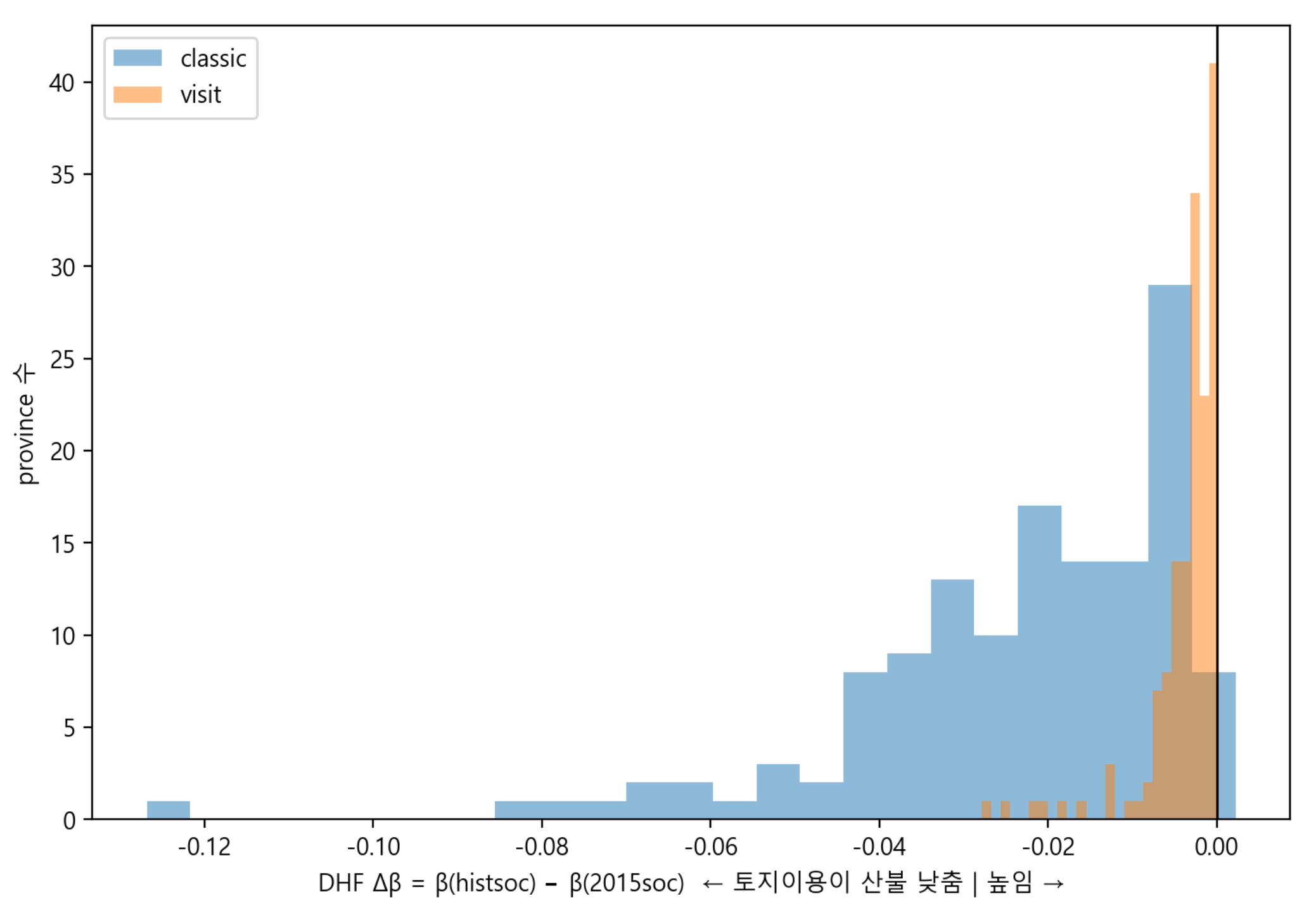


Figure 9. DHF의 $\Delta\beta$ 분포. histsoc(변화) vs 2015soc(고정). CLASSIC-VISIT.

- 기후를 고정하고 토지이용 시나리오만 전환(histsoc 변화 vs 2015soc 고정) → 순수 토지이용의 **인과 효과**
- 99% 구역에서 음수(억제)**: 토지이용 변화가 산불 추세를 낮추는 방향으로 작용
- 농경지 추세와 DHF 억제효과와의 상관 $\rho = -0.48(p < 0.0001)$, 농경지가 빠르게 늘어난 구역일수록 억제가 강함
- 관찰(회귀)과 실험(DHF)이 **독립적으로 같은 결론** - "농경지 확장 → 산불 추세 억제" 뒷받침

4. Conclusion

- 기후변화는 인도차이나 지역의 산불 추세를 억제(기후변화가 없었을 세계 대비)했으나, 그 영향은 시대·지역에 따라 다름(비정상성, 베트남 예외)
- 농경지 확장도 산불 추세를 낮췄으며, 이는 관찰(회귀)와 인과실험(DHF)이 독립적으로 뒷받침
- 해석: 농지화 → 자연 식생(연료) 파편화-감소 → 대규모 산불 전파 억제
- 본 연구의 기여**: 산불 추세에 있어서, 기후변화-토지이용 두 요인의 몫을 행정구역 단위로 분리·정량화한 최초의 시도

한계: DHF 인과검증 2개 모델(방향성 위주) · 토지이용 자료 2015년까지(LUH2)