

기후변화에 따른 강원도 침엽수림의 회복탄력성 상실 규명 : EWS 기반 시계열 분석 및 AR(1) 지표를 중심으로



김민석^{1*}, 최희도¹, 임철희^{1†} (1국민대학교 산림환경시스템학과)

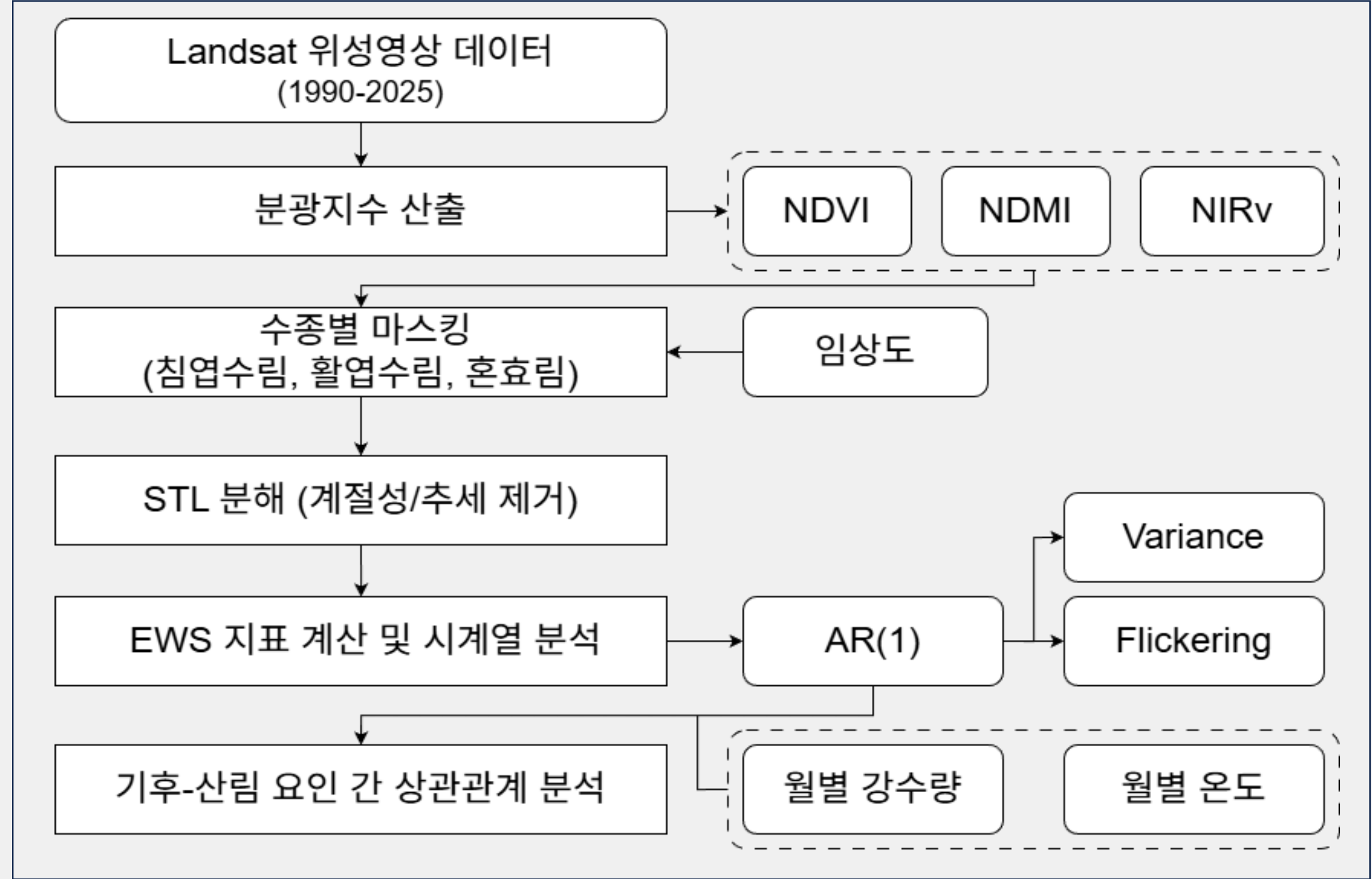
*ms0110ms@kookmin.ac.kr , †clim@kookmin.ac.kr

Introduction

- 기후변화는 전 지구적 산림 생태계의 구조와 기능에 근본적인 변화를 야기하고 있으며, 특히 중위도 온대림 지역에서 복원력 감소 현상이 가속화되고 있음
- 이러한 산림 생태계 복원력 감소 현상에 대응하기 위해 위성영상을 활용한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, NDVI와 같은 식생 지수를 통해 식생들의 복원력과 건강성을 평가하는 연구들이 주를 이루고 있음
- 하지만, 일부 선행연구에서 위성영상 관측상 수종이 녹화를 보임에도 불구하고 Critical Slowing Down (CSD) 신호가 뚜렷하게 나타나는 현상을 보고함
- 따라서 본 연구는 강원도 산림을 대상으로 Landsat 시계열 데이터와 EWS 지표, 기후데이터 등을 통해 산림의 쇠퇴 현상을 검증하고 수종별 산림 복원력 변화를 정량화하여, 기후변화와의 상관관계를 분석하고자 함

Data & Method

데이터명	데이터 유형	공간해상도	데이터 출처
Landsat 위성영상 (5/7/8/9)	Raster	30m	Google Earth Engine
임상도	Polygon	-	산림청
월별 기상데이터 (기온, 강수량)	csv	-	기상청



[방법론]

1.STL (Seasonal-Trend decomposition using Loess) 분해

- 각 시계열 데이터를 추세(Trend), 계절성(Seasonal), 잔차(Residual)로 분해
- 잔차(Residual): 외부 요인(추세, 계절성)을 제거한 생태계 내부 신호
 - EWS 분석의 입력 데이터로 사용

2.EWS (Early Warning System) 계산

- EWS 지표 3종(AR(1), Variance, Flickering)을 계산
 - AR(1): 시스템이 교란에서 회복하는 속도의 역수
 - 값이 1에 가까워질수록 회복이 느려져 Critical Slowing Down을 의미
 - Variance: 평형 상태에서 이탈하는 진폭
 - AR(1) 증가와 함께 감소하면 시스템이 한 상태에 고착되었음을 의미
 - Flickering: 두 안정 상태 사이의 빠른 전환 빈도

3.통계 검증

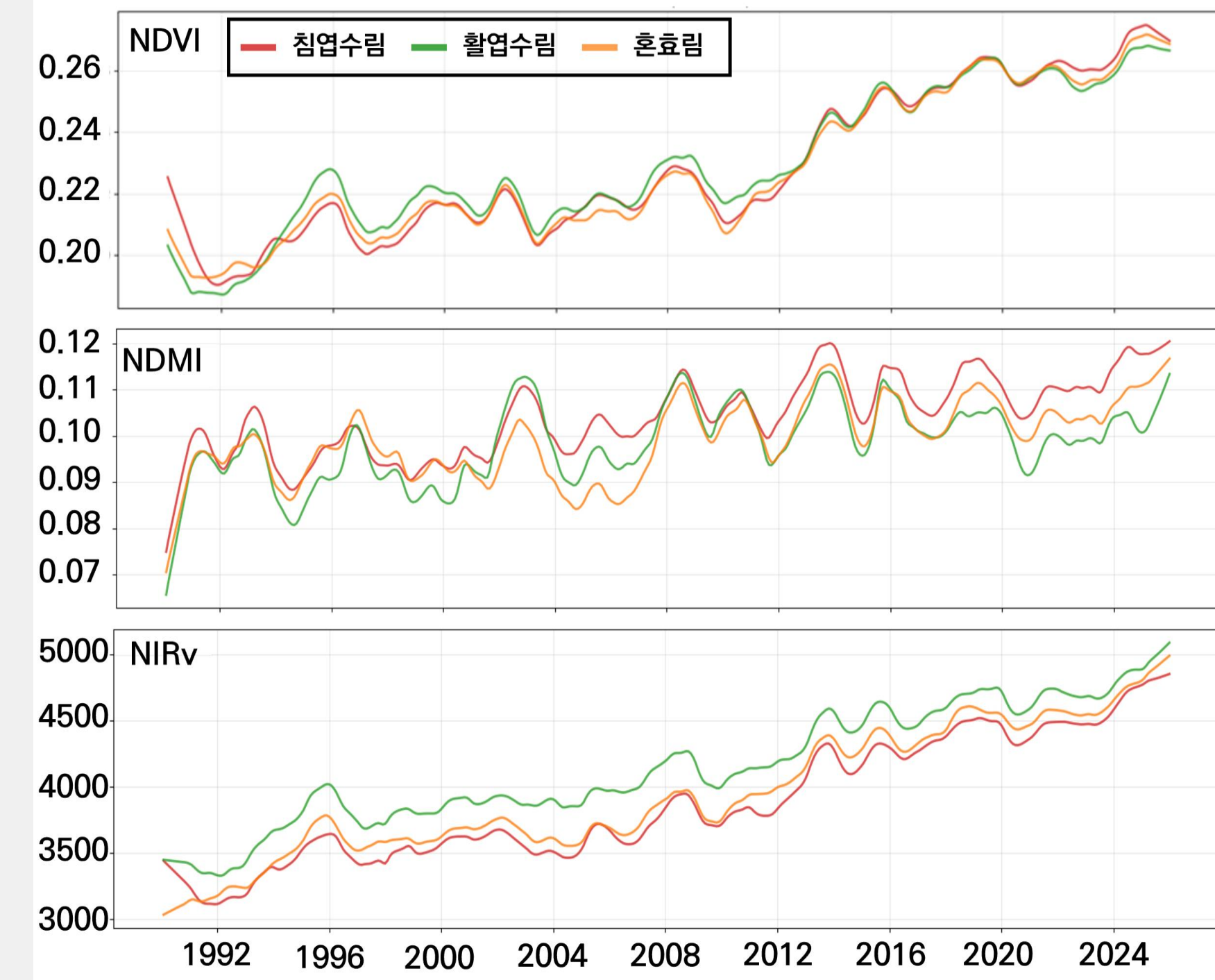
- Kendall's Tau 검정으로 EWS 지표의 시간적 추세를 분석
- Pearson 상관분석으로 기온, 강수량과 AR(1) 간 상관관계를 정량화

Discussion

- 1990-2025년 시계열 분석을 통해 강원도 침엽수림의 잔차에서 AR(1)의 유의한 상승이 확인됨
- 침엽수림은 일반적 이론과 달리 분산의 감소 NIRv의 Flickering이 동시 관측돼 생태계가 낮은 활력도 상태로 고착화 상태
- 기존의 단순 식생 지수 모니터링이 아닌 STL 분해와 EWS이론을 활용해 회복력 상실 과정을 시각화하고 정량화함
- 바이오매스 데이터는 대부분 글로벌 단위의 해상도를 가지고 있어 우리나라에 적합하지 못 해 분석에 한계점 존재
- 향후 고해상도(Sentinel-2, 드론 등) 데이터 및 바이오매스 데이터와 결합하여 고도화 예정

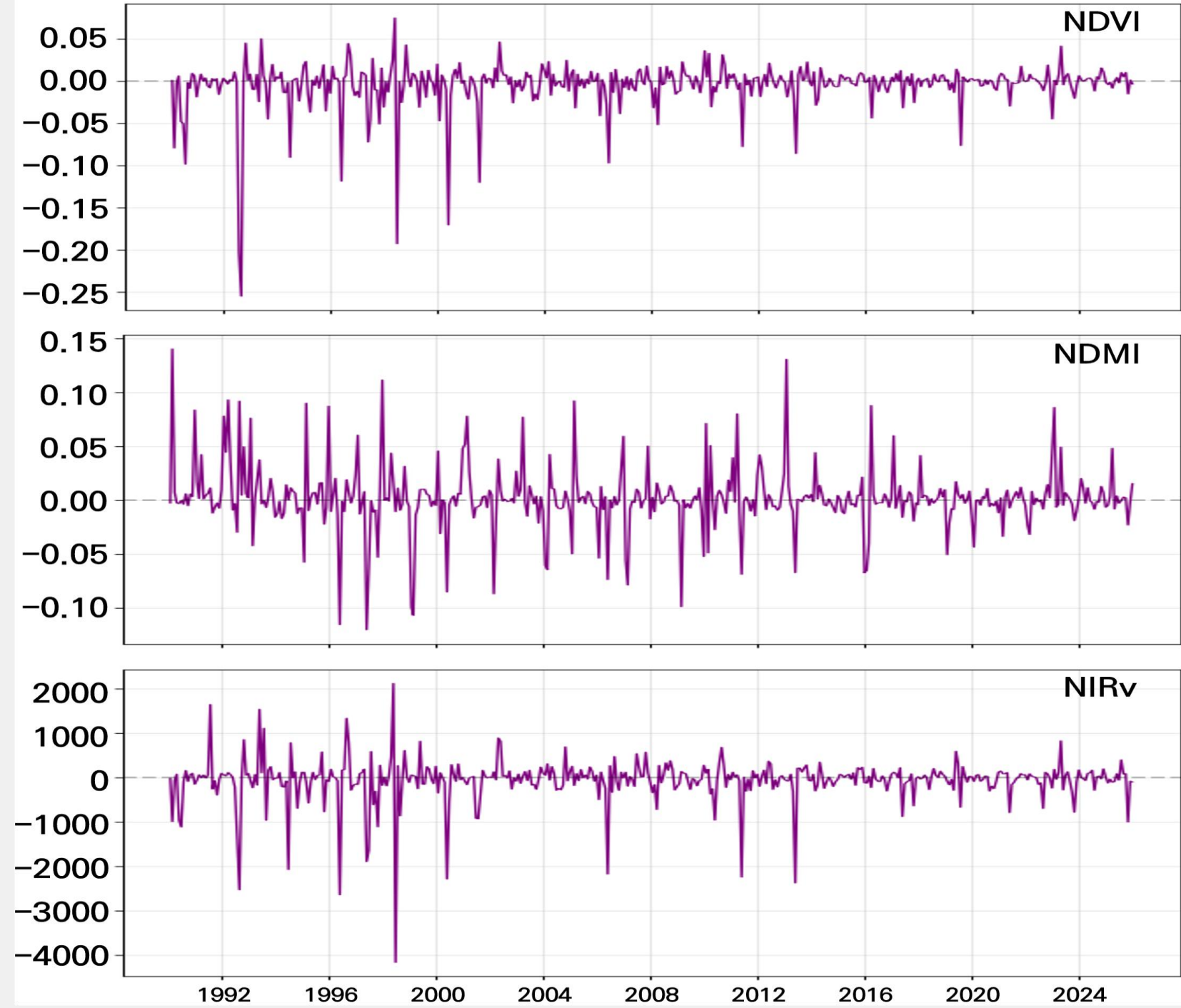
Results

1. 전체 산림 유형 및 식생 지수별 STL 분해



[산림 유형별 STL 시계열 분해]

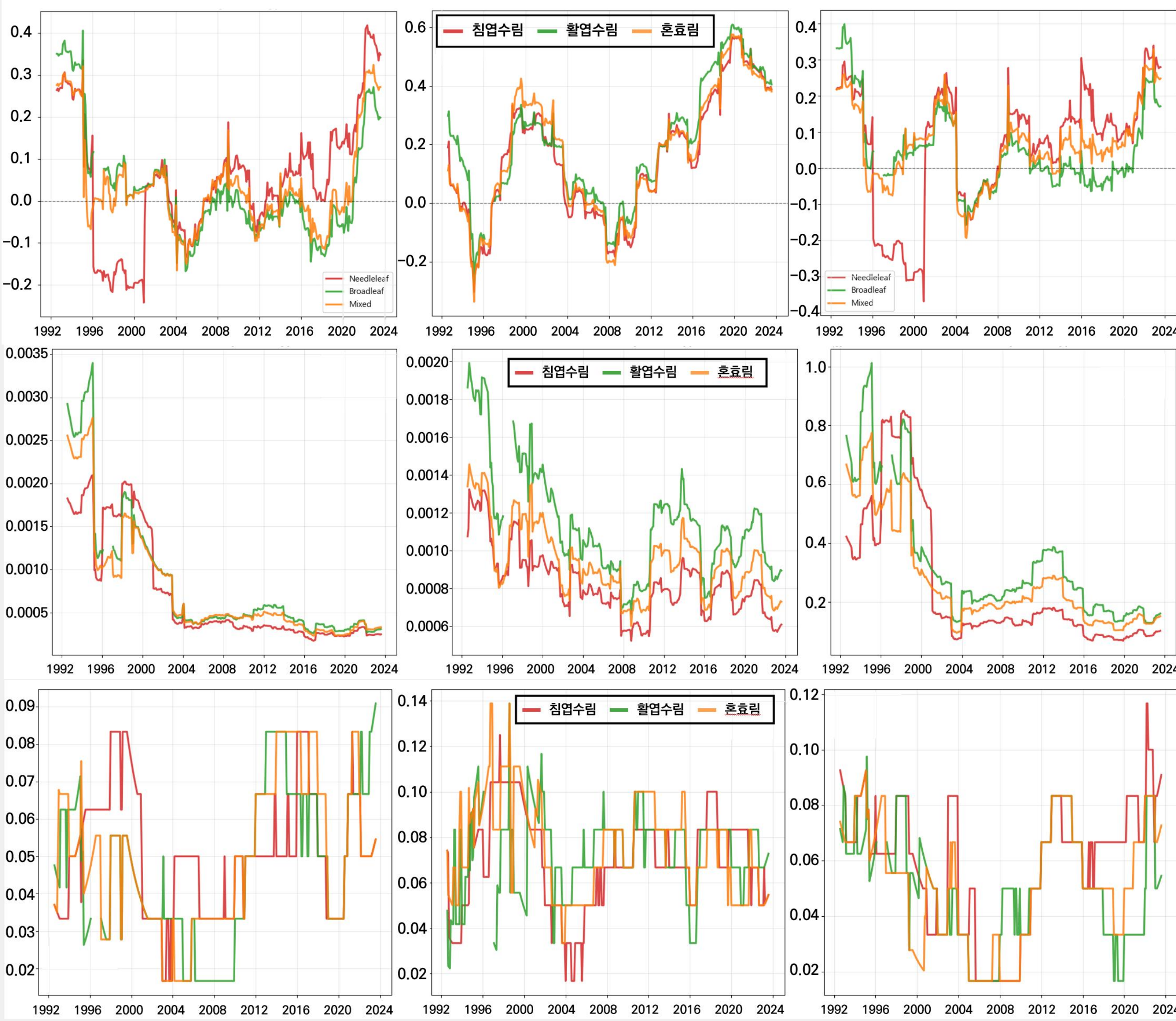
- 추세 변화 (1990년대 대비 2020년대)
 - NDVI: 침엽수 +2.3%, 활엽수 +3.1%, 혼효림 +2.8% 증가
 - NDMI: 침엽수 -1.2%, 활엽수 -0.8%, 혼효림 -1.0% 감소
 - NIRv: 침엽수 +1.8%, 활엽수 +2.5%, 혼효림 +2.2% 증가
- NDVI와 NIRv는 증가 추세를 보여 표면적 녹화를 나타냄
- NDMI의 감소 추세를 통해 수분 스트레스가 증가하는 것을 확인함



[침엽수림 STL 잔차]

- 1990년대 초반 침엽수림만 NIRv하락
- 타 수종에 비해 회복과 상실의 과도한 반복과 큰폭
- NDMI에서 2000년대 이후 잔차의 변동성이 증가함
 - 특히, 2015년 이후 급격한 변동의 빈도가 증가하였음
- 이는 기후 극한 현상의 빈도 증가와 관련된 것으로 보임

2. EWS 지표 시계열 분석



[산림 유형별 AR(1)]

- 2016년 이후 모든 산림 유형과 지표에서 AR(1)값이 증가하는 것을 확인함
 - 외부 충격으로부터의 회복 속도가 현저히 느려졌음을 뜻함 ~ Critical Slowing Down(CSD) 구간 진입
- 침엽수림 (고위험): AR(1)수치 35년간 +320% 급증
- 활엽수림 (안정): AR(1)수치 -29% 감소

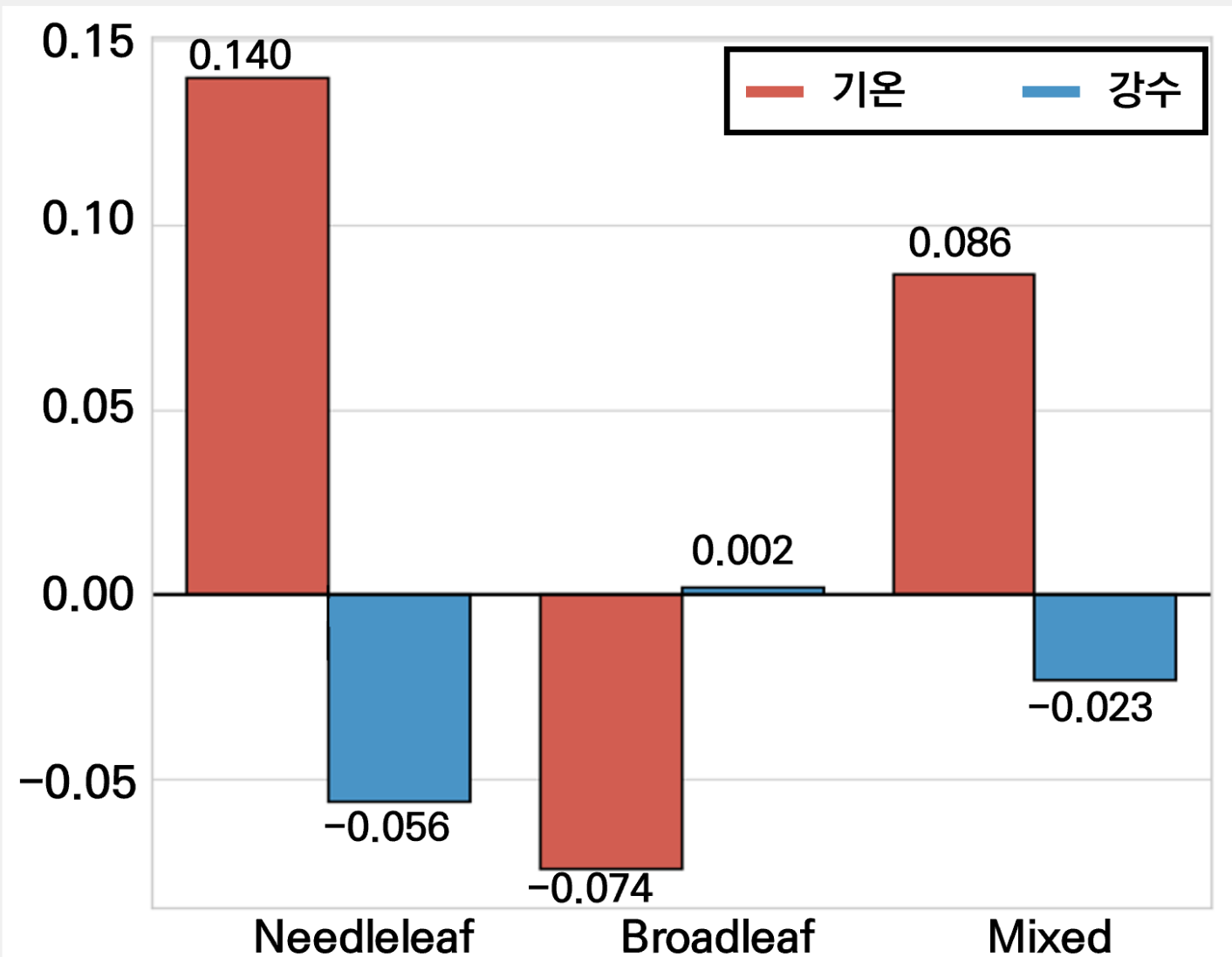
[산림 유형별 Variance]

- 모든 수종에서 공통적으로 분산이 유의미하게 감소하는 추세를 보임
 - 분산이 줄어들면서 동시에 AR(1)이 증가하는 현상 발견
- 시스템이 특정 상태에 고착되어 유연성을 잃어버리는 현상

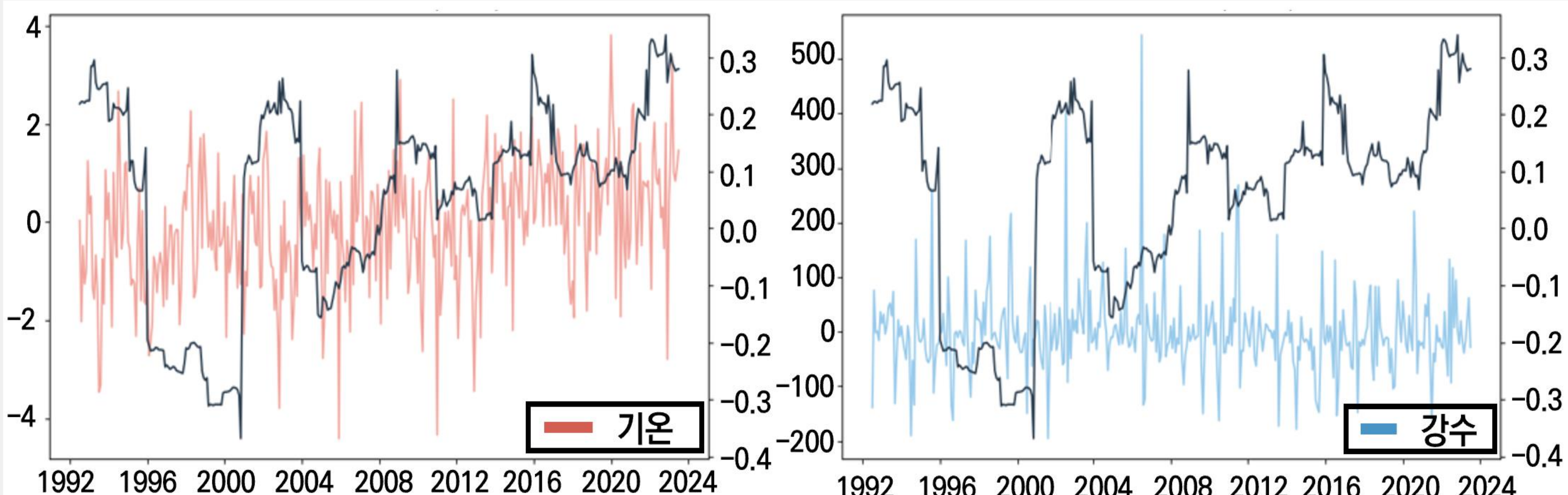
[산림 유형별 Flickering]

- 활엽수 및 혼효림은 Flickering 지수가 유의미하게 증가함
 - 서로 다른 상태 사이를 불안정하게 오가기 시작함
- 장기적으로 생태계의 구조적 전환을 알림

3. 기후요인과 산림의 인과관계 분석



[수종별 기후요인 민감도]



[기후요인과 침엽수림의 AR(1) 상관관계]