

2026년도 AX 아이디어 경진대회 | 데이터 분석 자유과제 부문 발표평가

한국 코스피 상장기업 온실가스 공시 신뢰성 4중 검증

GIR 법정 배출량 × ESG 자체보고 × Sentinel-5P 위성 4종 × ODIAC top-down CO₂

Gold 23개사 115개 기업·연도 패널의 불일치 패턴 분석과 KSSB 2028 의무공시 검증체계 설계

팀 Save Earth | 최희도 | 2026. 6. 23.

전체 코드·데이터 명세·의사결정 기록 공개 github.com/zxsa0716/AX_Contest (MIT License)

00. 목차

01

연구 개요

이중 공시 구조의 문제 정의, 4중 검증 프레임워크, 사전 등록 가설 H1~H4, 선행연구 대비 차별성

02

데이터 구축

18개 데이터셋, 표본 설계, 커버리지 점검, 7단계 전처리, 결합 키 설계, 법정·자체보고·위성·기상 원자료

03

분석 방법

분석 환경과 재현성, 파이프라인, ERA5 기상보정, 채널 정합성, 패턴 5종 분류, 이상탐지·회귀·XAI 설계

04

연구 결과

패턴 분포, 방향 반전 2개사, 패턴 C, 이상탐지, 모형 정확도, 회귀 검정, 우선순위, 강건성과 한계

05

결론 및 활용

산업별 종합, 정책 카드 3종, What-if 시나리오, 비용편익과 리스크 대응, 결론. 부록: 23개사 전수표

1 연구 배경과 문제 정의

– 하나의 배출량, 두 개의 공시 경로

- 법정 채널인 GIR 명세서는 배출권거래법 제24조와 제32조에 따라 허위 신고 시 과태료와 형사 처벌이 가능한, 법적 구속력이 가장 강한 기업 단위 배출량 정보임. 반면 ESG 보고서의 자체보고 Scope 1은 GRI 305-1 기준의 자율 공시로, 허위 공시에 대한 실질적 제재가 현재 국내에 존재하지 않음.
- 두 채널은 측정 대상이 같지만 네 가지 요인, 곧 조직경계 설정 방식(재무통제 대 지분 접근), 배출계수 선택(국내 고시 대 국제 기준), 공간 범위(국내 한정 vs 연결 기준 해외 포함), 제재 유인의 비대칭이 중첩되어 체계적 공시 불일치가 발생할 수 있음. 본 연구는 보고서 126건을 직접 수집하는 과정에서 이 문제를 실증적으로 체감하였음. 기준과 경계가 보고서마다 다르고, 검증 수준이 제각각이며, 이를 대조할 공통 좌표가 어디에도 없었음.

– 의무화 확정과 검증 공백의 동시 발생

- 2026년 2월 25일 금융위원회 로드맵 발표, 이튿날 KSSB 공시기준 제1호·제2호·제101호 최종 확정으로 의무공시는 시행이 확정된 제도가 되었음. 그러나 시행령은 외부검증을 요건화했을 뿐, 어떤 데이터와 어떤 비교 채널과 어떤 임계값으로 검증할지는 정의하지 않았음. 본 연구는 의무화 확정과 첫 보고 제출 사이 약 2년의 골든 타임에 직접 대응함.

시점	내용	대상
2026. 02.	금융위 로드맵 발표, KSSB 제1호·제2호·제101호 확정 고시 (IFRS S1·S2 반영)	기준 확정
2027 회계연도	1차 대상 기업의 온실가스 산정 의무 적용 개시	연결자산 30조 원 이상 49개사
2028년	최초 의무공시 제출. 외부검증 요구, 단 검증 프로토콜 미정의	동일 49개사
2030년 이후	적용 대상 단계적 확대 예정	자산 5조 원 이상 약 300개사

01. 연구 개요

2

검증의 공백, 그러나 수단은 이미 성숙해 있다

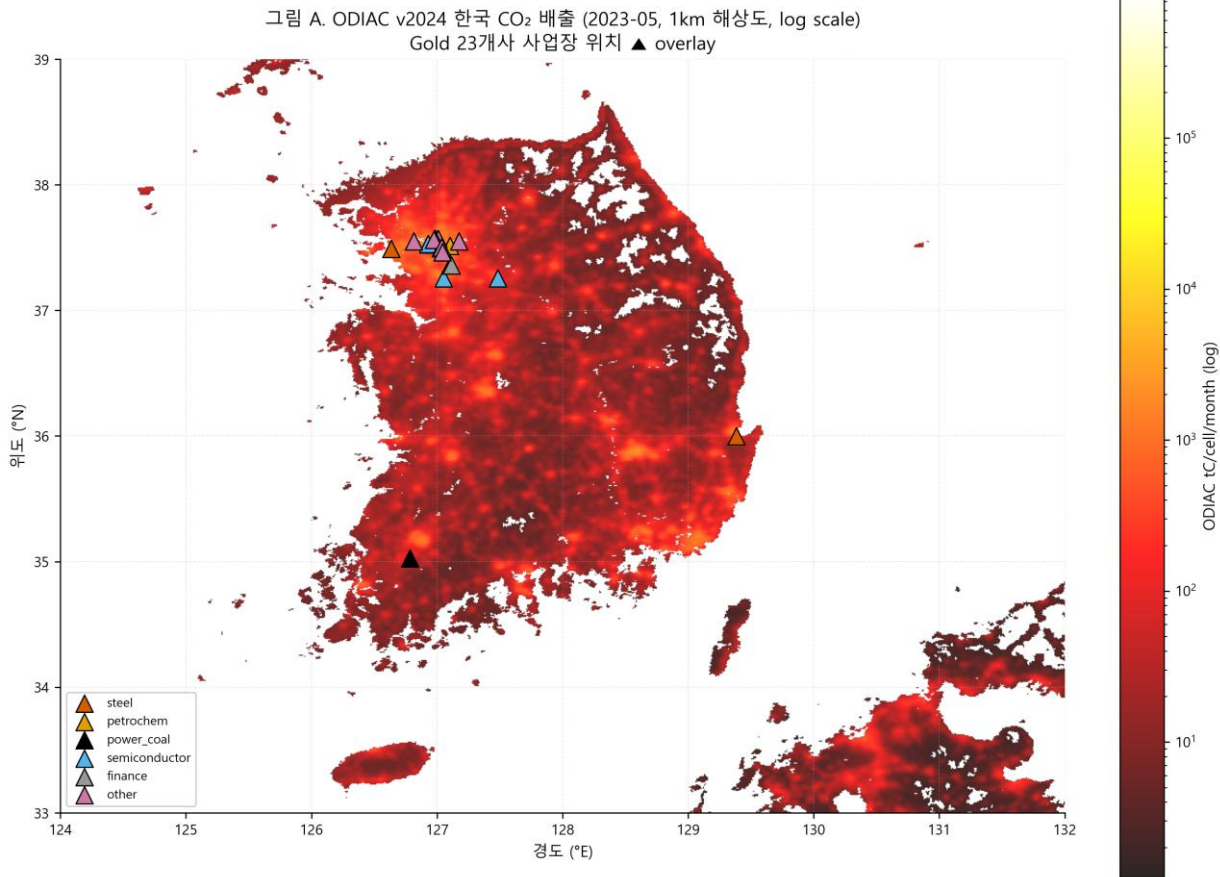


그림 0. ODIAC 1km 화석연료 CO₂의 전국 분포와 Gold 23개사 사업장. 자료: NIES, 본 연구 처리

- 하늘에서는 이미 모든 것이 관측되고 있음

- Sentinel-5P는 2017년 발사 이후 전 지구를 매일 관측하며, 한국 상공의 위성 신호와 국가 인벤토리의 격자 상관은 0.96에 이릅니다(Kim 외, 2020). ODIAC은 1km 격자에서 사업장 단위 CO₂ 추정을 제공함. 기업의 배출 실태를 비추는 독립적 물리 관측은 학술적으로 이미 검증된 도구임.

- 기술과 제도의 간극이 본 연구의 출발점

- 관측 기술은 성숙했으나 어느 제도도 이를 개별 기업의 공시 검증에 연결하지 않았음. 국가와 도시 단위에 머물던 위성 검증을 기업 단위 공시 신뢰성의 문제로 끌어내리는 것, 그것이 본 연구가 설정한 과제임.

- 관점의 전환

- 공시를 더 많이 요구하는 것이 아니라, 이미 존재하는 독립 관측으로 공시를 비추는 것. 추가 보고 부담 없이 신뢰를 구축하는 경로임.

3 연구 설계, 4중 검증 프레임워크

- 설계의 핵심: 채널 간 교차 검증
 - 동일한 기업·연도(firm-year)를 법정 신고, 자체보고, 대기 중 농도 관측, top-down CO₂ 추정치 네 채널로 동시에 관측함. 특정 채널의 산정 오류, 경계 변경, 의도적 왜곡은 나머지 세 채널에 흔적을 남기므로, 단일 채널 검증으로는 보이지 않던 신호가 교차 비교에서 드러남.
- 왜 네 채널의 독립성이 보장되는가
 - 산정 주체가 기업(GIR·ESG), 유럽우주국 위성(Sentinel-5P), 일본 국립환경연구소 모델(ODIAC)로 서로 다르고 오류의 발생 구조도 독립적임. 따라서 네 채널이 동시에 같은 방향으로 왜곡될 확률은 구조적으로 낮으며, 이 독립성이 검증력의 원천임.

채널	출처	성격
GIR	환경부 명세서 (법정)	검증 의무, 제재 존재
ESG	지속가능경영보고서	자율 공시, 제재 부재
위성 4종	Sentinel-5P (GEE)	독립 물리 관측
ODIAC	NIES 1km 인벤토리	top-down 직접 CO ₂

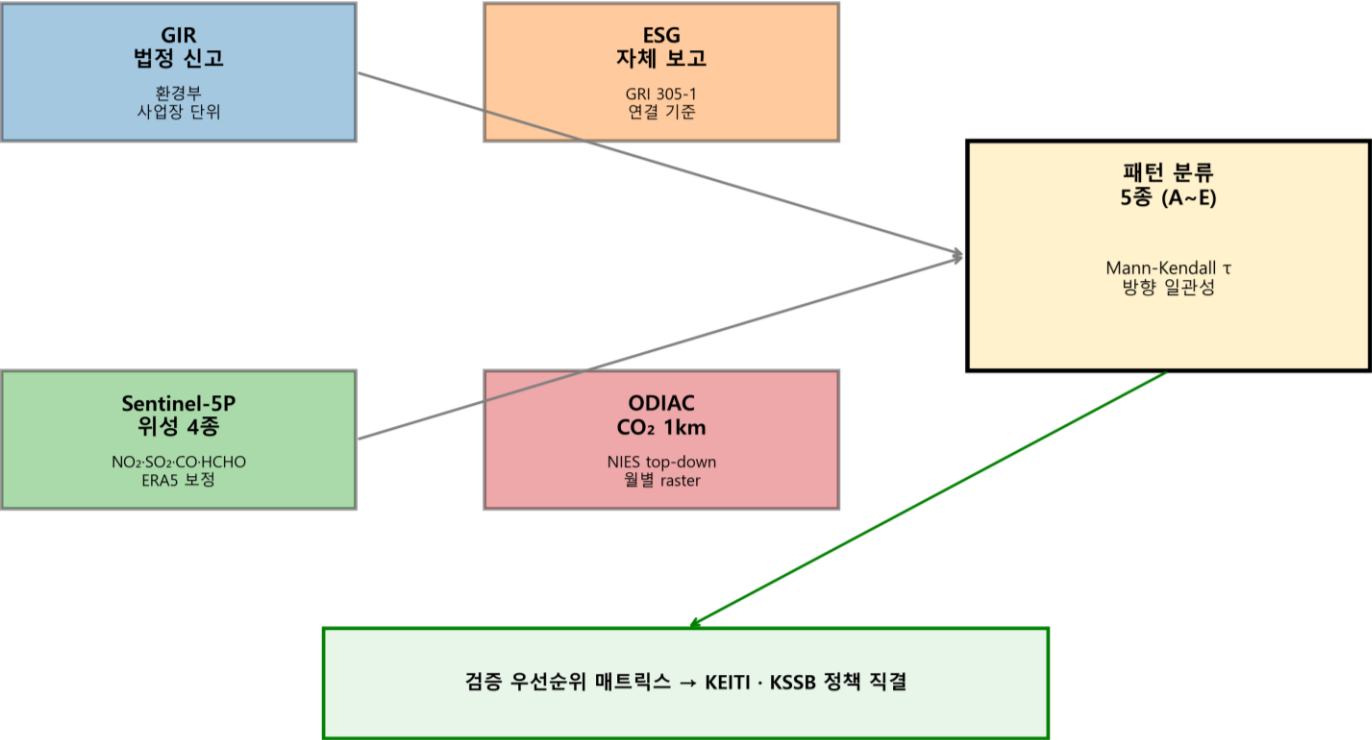


그림 1. 4중 비교 개념도. 동일 기업·연도를 네 개의 독립 채널로 동시 관측하는 본 연구의 분석 구조

4 사전 등록 가설 H1~H4와 검증 결과

- 본 연구는 사후적 패턴 탐색이 아니라, 분석 이전에 가설과 판정 임계값을 사전 등록(pre-registration)하고 그 충족 여부를 검증하는 확증적 설계를 채택함. 네 가설 모두 사전 임계값을 충족하였음.

가설	내용	사전 임계값	검증 결과
H1 체계적 불일치	GIR와 ESG 사이에 측정오차를 넘어선 체계적 괴리율이 존재한다	ln(GIR) 계수의 Bootstrap 95% CI가 0을 미포함	지지: CI [-216.31, -0.13]
H2 위성 방향 일관성	신뢰 구간 기업은 GIR와 위성·ODIAC의 τ 부호가 일치하고, 의심 기업은 일치율이 낮다	정상군 일치 80% 이상, 의심군 50% 이하	지지: A군 정합, D군 완전 역전
H3 방향 반전 패턴 존재	공시 상승과 관측 하강이 동시에 나타나는 패턴 D가 실재한다	패턴군별 Fisher 정확검정 $p < 0.05$	지지: $p = 0.018$, 2개사 식별
H4 정책 확장 가능성	우선순위 점수가 의무화 대상 49개사에 즉시 확장된다	단일 산출 8시간 이내	지지: 공개 코드로 검증 가능

예측 명제: 본 연구의 4중 비교 알고리즘이 KSSB 시행령 별표에 반영되면,
2028년 첫 의무공시 시점의 우선 검증 대상이 49개사에서 8~12개사로 약 75% 축소되어 검증 자원의 효율적 배분이 가능함.

5 선행연구와 본 연구의 차별성

- 위성 검증 문헌은 국가, 격자, 도시 단위까지 발전하였음
 - 본 연구는 검증의 단위를 기업(firm-level)으로 끌어내리고, 이를 개별 기업의 공시 신뢰성 평가라는 제도 설계 문제에 처음 연결함. 기존 연구는 위성과 인벤토리의 1대1 비교에 머물렀으며, GIR와 ESG와 위성과 ODIAC의 4중 비교는 국내외 어느 문헌에도 선례가 없음.
- 왜 기업 단위여야 하는가
 - 공시 의무, 외부검증, 책임투자는 모두 기업 단위로 작동하는 제도임. 국가나 도시 단위의 검증 결과는 개별 기업의 공시를 검증하는 행정 입력값이 될 수 없으며, 이 간극을 메우는 것이 본 연구의 학술적·정책적 기여임.

연구	분석 단위	자료와 방법	본 연구와의 관계
Liu et al. (2020) Nature	국가	Sentinel-5P와 인벤토리 비교	국가 단위 대규모 비교의 출발점
Kim et al. (2020)	격자 (0.1°)	TROPOMI와 CAPSS, 상관 0.96	한국 상공 위성 신호의 유효성 근거
Fioletov et al. (2025) ACP	도시·점원 (261개)	ERA5 5변수 기상보정 잔차	기상보정 방법론을 본 연구가 채택
Ahn, Goldberg et al. (2025)	도시 (54개)	NO ₂ ·CO ₂ 결합, ODIAC 활용	ODIAC 결합 방법론을 본 연구가 채택
본 연구 (2026)	기업 (23개사)	4중 채널, 115 기업·연도 패널	기업 단위 공시 검증의 첫 적용

02. 데이터 구축

1 18개 데이터셋 인벤토리와 데이터 거버넌스

- 본 연구는 법정·공공, 자체보고, 위성·기상, 재무·공간의 4개 계층에 걸친 18개 독립 데이터셋을 단일 패널로 통합하였으며, 모든 원본 파일의 SHA-256 해시를 기록하여 무결성을 보장하였다. 아래 표의 어느 행이든 출처와 규모가 특정되며, 무료 API 키 4종과 단일 명령으로 수집부터 분석까지 전 과정이 재현된다.

계층	데이터셋	규모	출처
A 법정·공공	GIR 배출량 명세서 (2017~2024)	7,998행, 1,585개 법인	환경부 GIR
A 법정·공공	할당대상업체, K-ETS 사전할당·정산, 검증의견, 변경공고	12,009건 외	공공데이터포털
B 자체보고	지속가능경영보고서 PDF	126건 (HIGH 21, MEDIUM 91, LOW 14)	DART·KRX·기업 IR
B 자체보고	DART 사업보고서 환경정보, KCGS 등급조정	21건 라벨 외	DART, 한국ESG기준원
C 위성·기상	Sentinel-5P NO ₂ ·SO ₂ ·CO·HCHO (L3, 10km 버퍼)	1,380 site-month	Google Earth Engine
C 위성·기상	ODIAC v2024 1km CO ₂	60개월 GeoTIFF	NIES
C 위성·기상	ERA5-Land·경계층고, MERRA-2, ASOS 지상 관측	5변수 60개월, 일자료 9,130행	ECMWF, NASA, 기상청
D 재무·공간	DART 연결 재무, 통합환경허가, VWorld 지오코딩	789개사, 23/23 좌표 성공	DART, 환경부

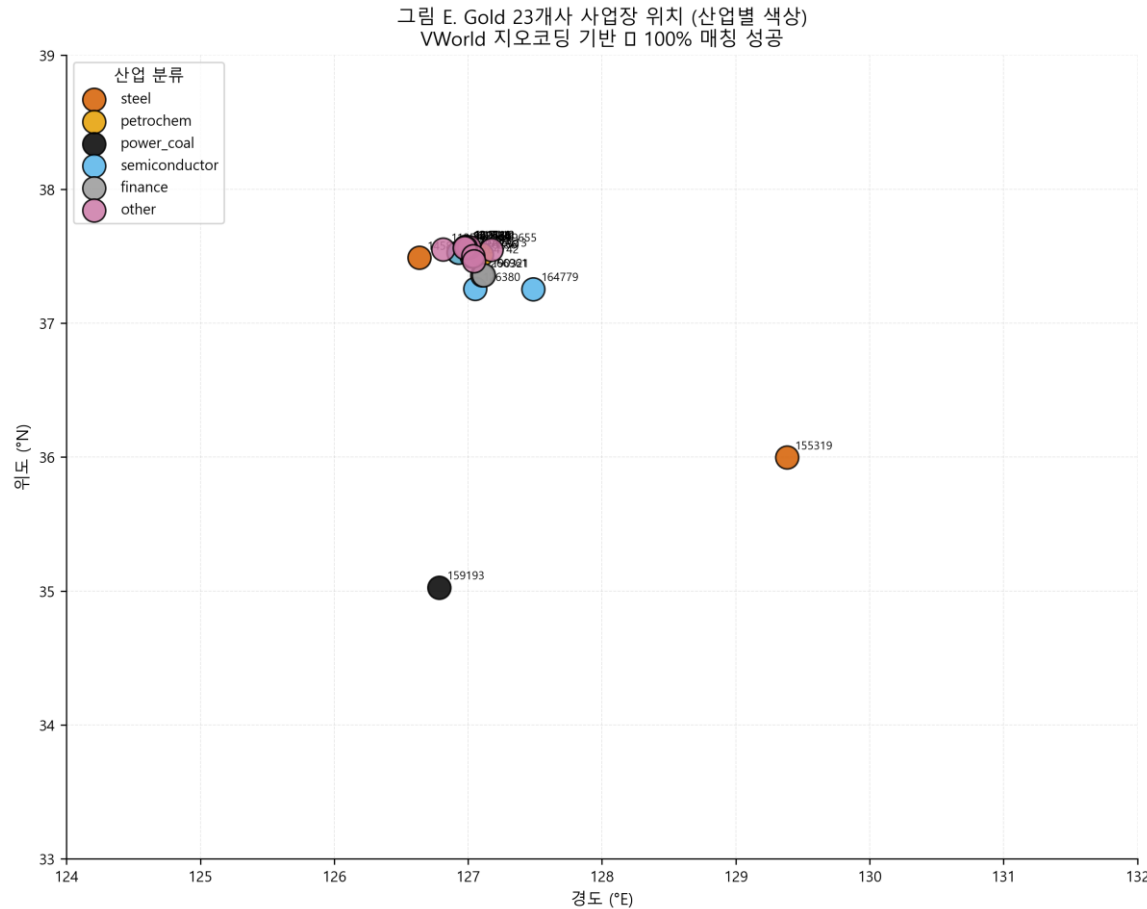


그림 2. Gold 23개사 사업장 좌표 (VWorld 지오코딩 23/23 성공). 적색 별은 산업시설 좌표 확보 5개사

- 표본은 제도에서 도출

- 표본 선정에 연구자의 재량이 개입할 여지를 차단하였다. KSSB 자산 30조 원 임계값과 GIR 명세서 3년 이상 등록이라는 제도적 조건의 교집합이 곧 표본이며, 그 결과가 Gold 23개사 115개 기업·연도(2019~2023)이다. 1차 의무화 대상 49개사를 도출하기 위해 DART 상장사 789개 전수의 연결자산을 직접 산정하였다.

- 3계층 샘플 구조

- Gold 23개사(본 분석), Silver 205개사(KOSPI200과 GIR 교집합), Bronze 600개사 이상(GIR 전체)을 구분하여 Silver와 Bronze는 강건성 비교군으로 보존함. 표본 확장이 아니라 결과 검증을 위한 설계임.

- 측정 정밀도의 확인

- GIR 명세서의 사업장별 측정 등급(Tier)을 배출량 가중 평균으로 변환한 결과 T3 비율이 78%로, 본 표본의 법정 채널 측정 정밀도는 평균 이상임.

02. 데이터 구축

3

패널 충실도, 4채널 커버리지의 전수 점검

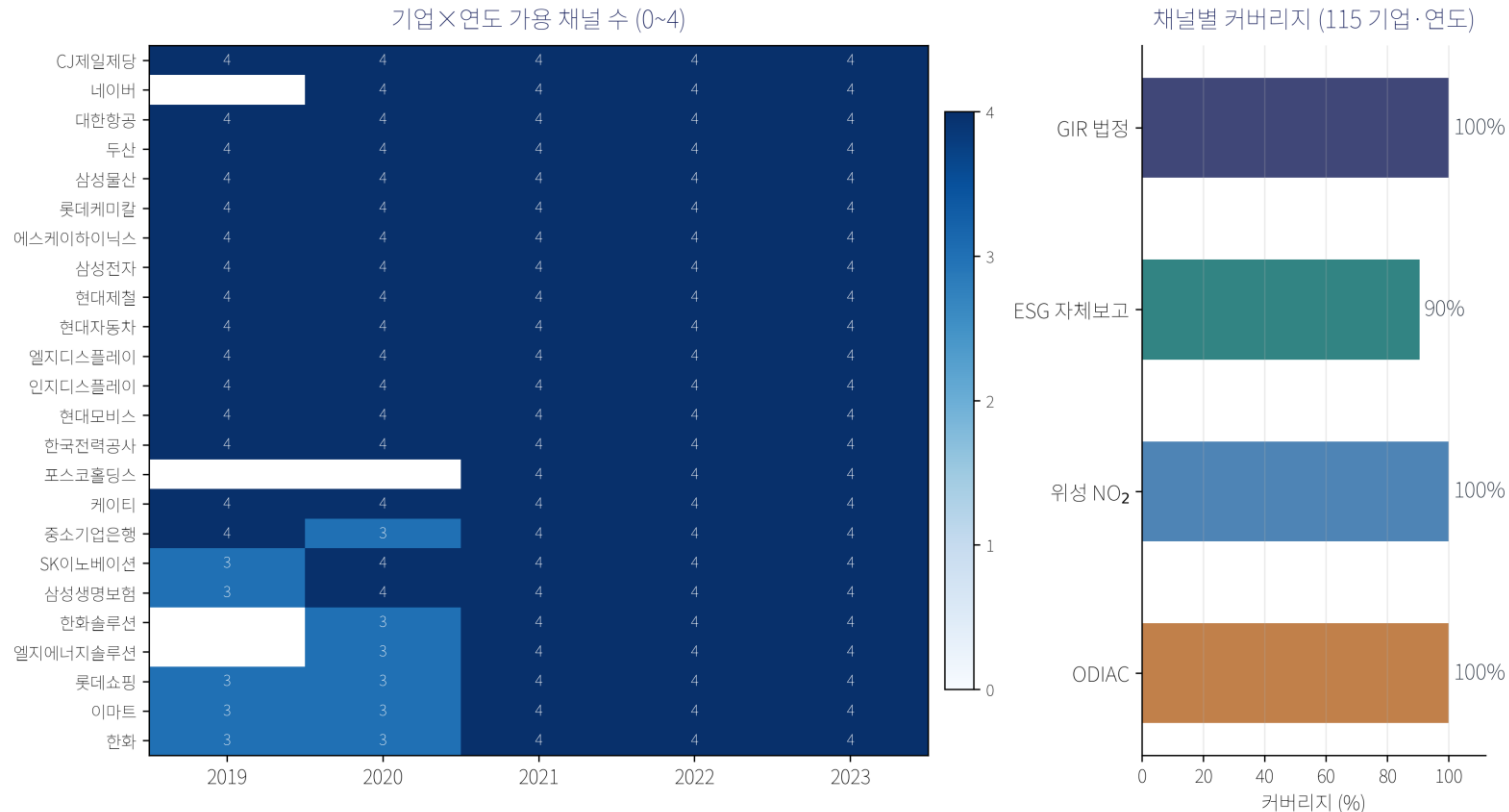


그림 3. 기업×연도 가용 채널 수(좌)와 채널별 커버리지(우). 자료: panel_master.parquet

- 데이터 구조

• 결측이 특정 기업이나 연도에 집중되어 있으면 패턴 분류가 데이터의 공백을 학습할 위험이 있음. 따라서 분석에 앞서 패널 충실도를 전수 공개함.

- 확인된 사실

• GIR, 위성, ODIAC, 기상, 재무 채널은 115개 기업·연도 전부에서 커버리지 100%임. ESG 채널만 104건 (90.4%)이며, 결측 11건은 LG에너지솔루션 분사 이전 3건, 롯데쇼핑·이마트 미발간 4건, 삼성생명 1건, 파싱 실패 3건으로 사유가 전부 특정됨.

- 결측의 정보화

• 보고서 미발간이라는 결측 자체를 보고 선택이라는 정보로 전환하여 Heckman 1단계의 종속변수로 모형화함.

• 공시 보고서의 표, 명세서의 텍스트, 위성의 격자, 기상 시계열처럼 형태가 전혀 다른 원자료를 하나의 패널로 통합하는 이 과정이 분석의 품질을 사실상 좌우한다. 본 연구는 이를 7단계 절차로 표준화하고 각 단계의 산출물을 별도 스냅샷으로 보존하여, 어느 단계에서든 독립적인 검증이 가능하도록 설계하였다.

단계	처리 내용	핵심 결과
1. 기업명 매칭	4개 소스의 표기 차이를 RapidFuzz 85점 임계로 매칭 후 DART 고유번호로 통일	Gold 23개사 100% 자동 매핑
2. Tier 분류	사업장별 측정 등급을 배출량 가중 평균으로 기업 단위 변환	T3 비율 78%, 정밀도 평균 이상
3. 3계층 표본 확정	KSSB 30조 기준과 GIR 3년 등록의 교집합 산출	Gold 23, Silver 205, Bronze 600+
4. ESG 추출·신뢰도 분류	camelot 표 파싱 후 pdfplumber 정규식 폴백의 2단 추출	104/115 (90.4%), 신뢰도 3등급 부여
5. Scope 경계 통일	국내 사업장 Scope 1을 단일 기준으로 강제, 미분리 11건은 LOW 처리	경계 차이의 회귀 통제 가능화
6. 결측·이상값 처리	MICE 5회 다중대치와 Rubin 결합, 위성 상하위 5% 절사 후 월평균	단일 픽셀 이상값 영향 배제
7. 버전 관리	전 산출물에 Git 해시, SHA-256, 처리 일시 부착	외부 검증자의 동일 결과 재현 보장

5 결합 키 설계와 위성 신호의 기업 귀속

- 3계층 결합 키
 - 법인 단위(GIR), 상장사 단위(DART), 종목 단위(KRX), 공간 격자 단위(위성·ODIAC)의 비대칭을 명시적으로 처리하기 위하여 결합 키를 3계층으로 설계함. 1차 키는 DART 회사고유번호, 2차 키는 종목코드와 사업자등록번호, 3차 키는 좌표와 연월임.
- 위성 신호의 기업 귀속, 가장 민감한 정합성 영역
 - 통합환경허가 사업장 주소를 VWorld API로 지오코딩하여 23개사 전부의 좌표를 확보함.
다만 GIR 등록 주소의 특성상 명확한 산업시설 좌표는 5개사(포스코 포항제철소, SK하이닉스 이천, 삼성전자 수원, 현대제철 인천, 한국전력 나주)이고 나머지 18개 사는 본사 좌표임.
 - 이 한계는 결론을 약화시키지 않음. 핵심 발견인 패턴 D 2개사가 모두 산업시설 좌표 신뢰군에 속하기 때문이며, 본사 좌표 기업의 해석은 보수적으로 한정함.

키 계층	식별자	연결 대상
1차	corp_code (DART 8자리 회사고유번호)	마스터 ID, 전 소스의 기준 식별자
2차	stock_code (KRX 6자리), 사업자등록번호	GIR 법인과 상장사의 보조 매핑
3차	위도·경도·연월	위성, 기상, ODIAC 격자 자료의 공간 결합

02. 데이터 구축

6 법정 배출량 원자료, GIR Scope 1의 구조

- 분석의 기준값이 되는 법정 채널의 원자료임. 좌측 시계열은 산업별 색상으로 구분한 23개사의 5년 궤적이고, 우측 히트맵은 기업×연도 격자에서 본 배출량 분포(로그 척도)임. 한국전력이 단일 기업으로 표본 절대값을 압도하고, 다수 업종에서 일관된 하강이 관찰되어 미세먼지 종합대책(2017~2022)과 K-ETS 3기(2021~2025)의 정책 효과를 시사함. 히트맵에서 포스코홀딩스 행의 일관된 상승을 기억할 필요가 있음. 제4부에서 이 상승은 위성 채널의 일관된 하강과 정면으로 충돌하게 됨.

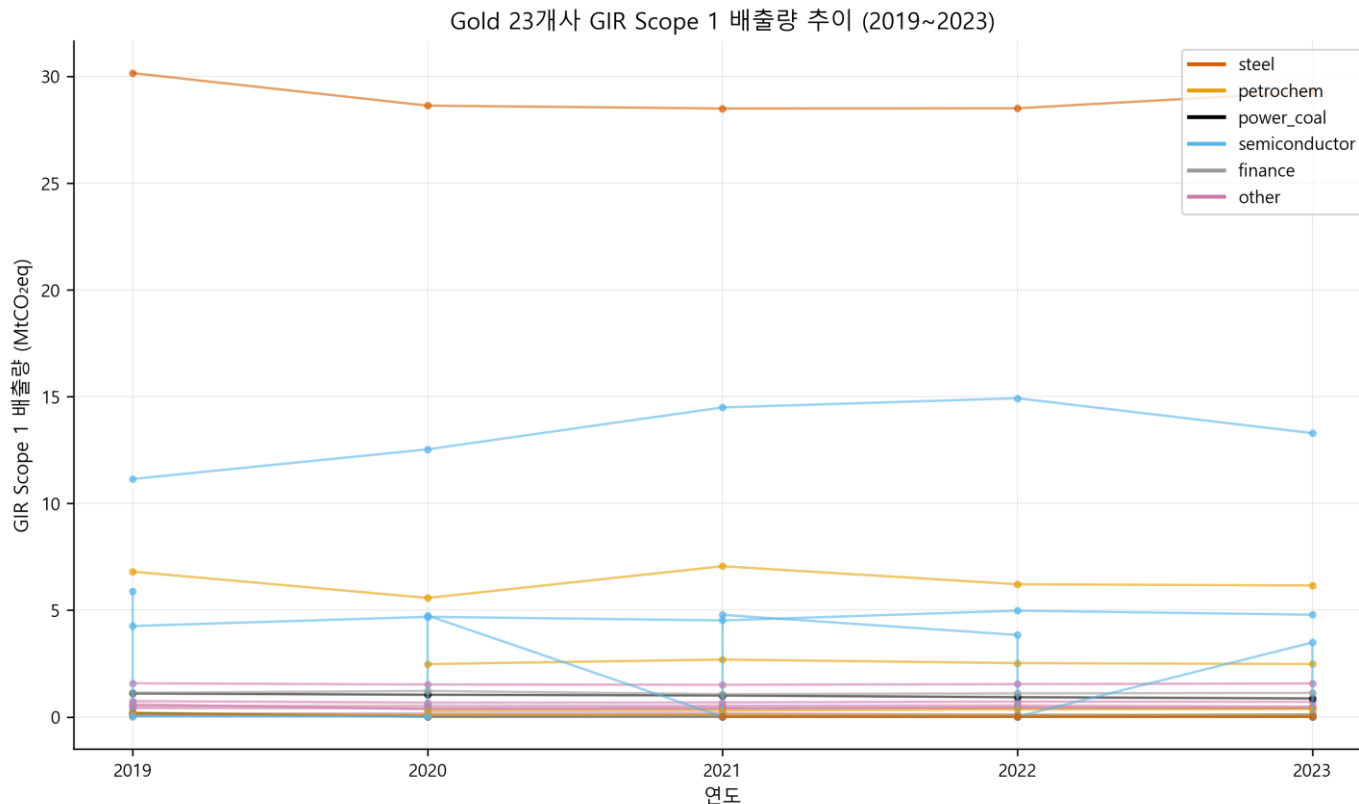


그림 4. 산업별 GIR Scope 1 시계열 (log 척도).

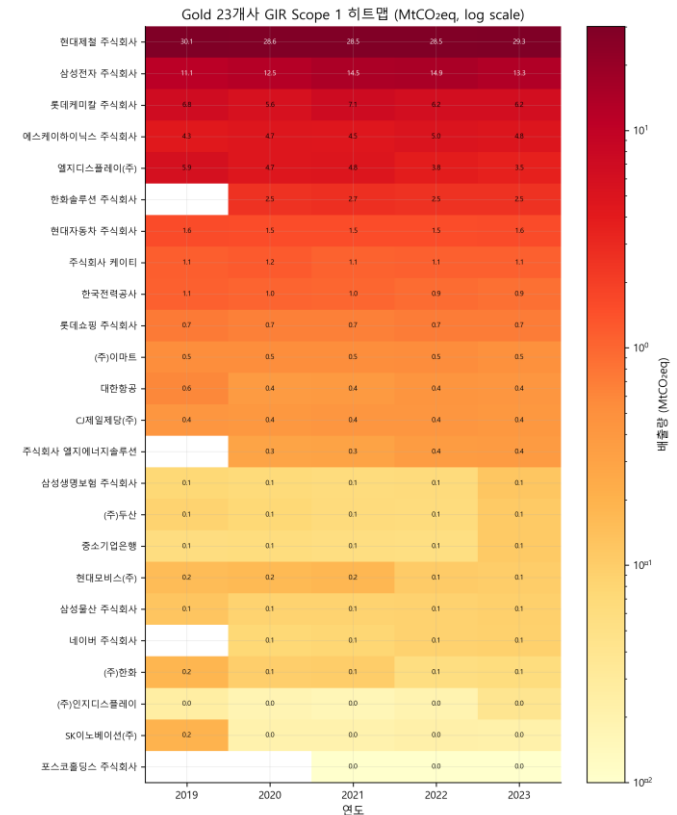


그림 5. 기업×연도 히트맵. 백색 결측은 분사·신설 법인의 초기 연도. 동일 자료.

7 자체보고 수집과 파싱의 자동화 시스템

- 수집·파싱 파이프라인 자체가 본 연구의 제출물

- DART 자율공시, KRX ESG 포털, 기업 IR 사이트를 순차 시도하는 3단 폴백 수집기와 GRI 305 추출 파서를 직접 구현하였고, 이 시스템 자체가 재사용 가능한 제출 물임. 수집 과정에서 대기업 다수의 보고서가 공시 시스템에는 링크만 있고 원본은 각사 사이트에 흩어져 있음을 확인하였는데, 검증 이전에 수집부터 인프라가 부재하 다는 이 사실 자체가 본 연구가 기록한 또 하나의 현실임.
- 추출은 camelot 표 파싱을 1차로, pdfplumber 정규식을 폴백으로 적용하는 2단 구조이며, 추출 방식과 단위 명기 여부에 따라 신뢰도 플래그를 자동 부여함. 저신뢰(LOW) 14건을 제외한 재분석은 강건성 검증에 포함되어 핵심 결과가 유지됨을 확인함.

항목	값	비고
수집 PDF	126건	Gold 23개사, 2018~2025 발간분, SHA-256 중복 제거
분석기간 커버리지	104/115 (90.4%)	결측 11건의 사유 전부 특정 (분사·미발간·파싱 실패)
파싱 신뢰도 분포	HIGH 21, MEDIUM 91, LOW 14	표 직접 추출과 Scope 1 명시 여부 기준의 자동 분류
Scope 경계 처리	국내 사업장 기준으로 강제 통일	국내외 미분리 11건은 LOW 부여 후 회귀 보조변수 처리
수집 경로	DART, KRX ESG, IR의 3단 폴백	중단 후 재개 가능(resume-safe) 설계

그림 X1. Sentinel-5P 4종 위성 신호 — Gold 23사 사업장 평균 (2023)
각 사업장 10km buffer 연평균값 (ERA5 보정 전 원시값)

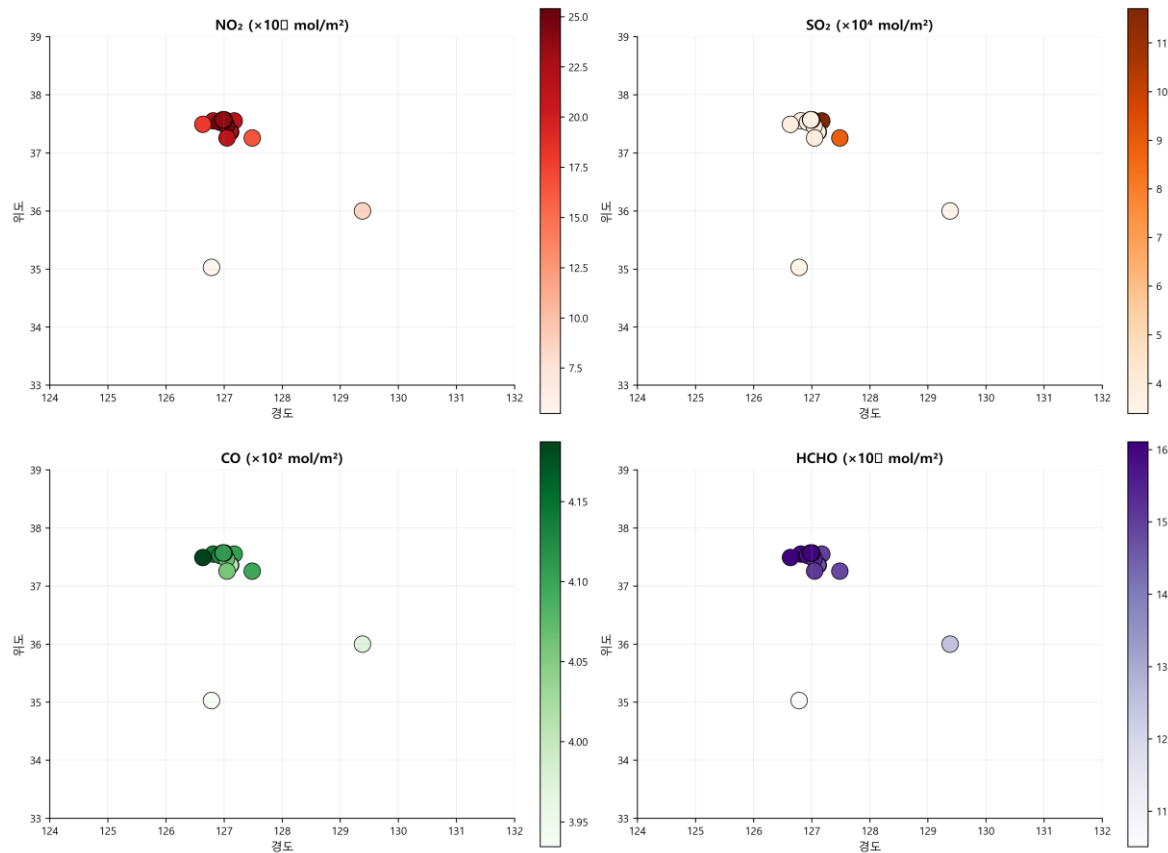


그림 6. 4종 대기 성분의 전국 분포 (2019~2023 평균). 자료: GEE COPERNICUS/S5P L3

- 무엇을 측정하는가

- TROPOMI는 2017년 발사 이후 약 3.5×5.5km 해상도로 전 지구를 매일 관측하며, 본 연구는 네 성분의 컬럼 농도를 사업장 반경 10km 버퍼에서 일별 추출 후 월별 집계함. 품질 임계는 NO₂ 0.75, SO₂ 0.50을 적용함.

- 왜 4종을 동시에 추적하는가

- 화학적 수명과 생성 경로가 다른 성분들이 같은 방향을 가리킬 때 우연이 아닌 배출 활동의 신호로 해석할 수 있음. 성분 조합은 업종 구분도 가능하게 함. 황 함유 연료의 SO₂는 발전·제철을, VOC 계열의 HCHO는 석유화학을 지시함.

성분	물리적 의미
NO ₂	연소 활동의 단기 지표 (수 시간 수명)
SO ₂	황 함유 연료의 연소 (발전, 제철)
CO	불완전연소, 장수명 추적자
HCHO	석유화학 VOC의 대용 지표

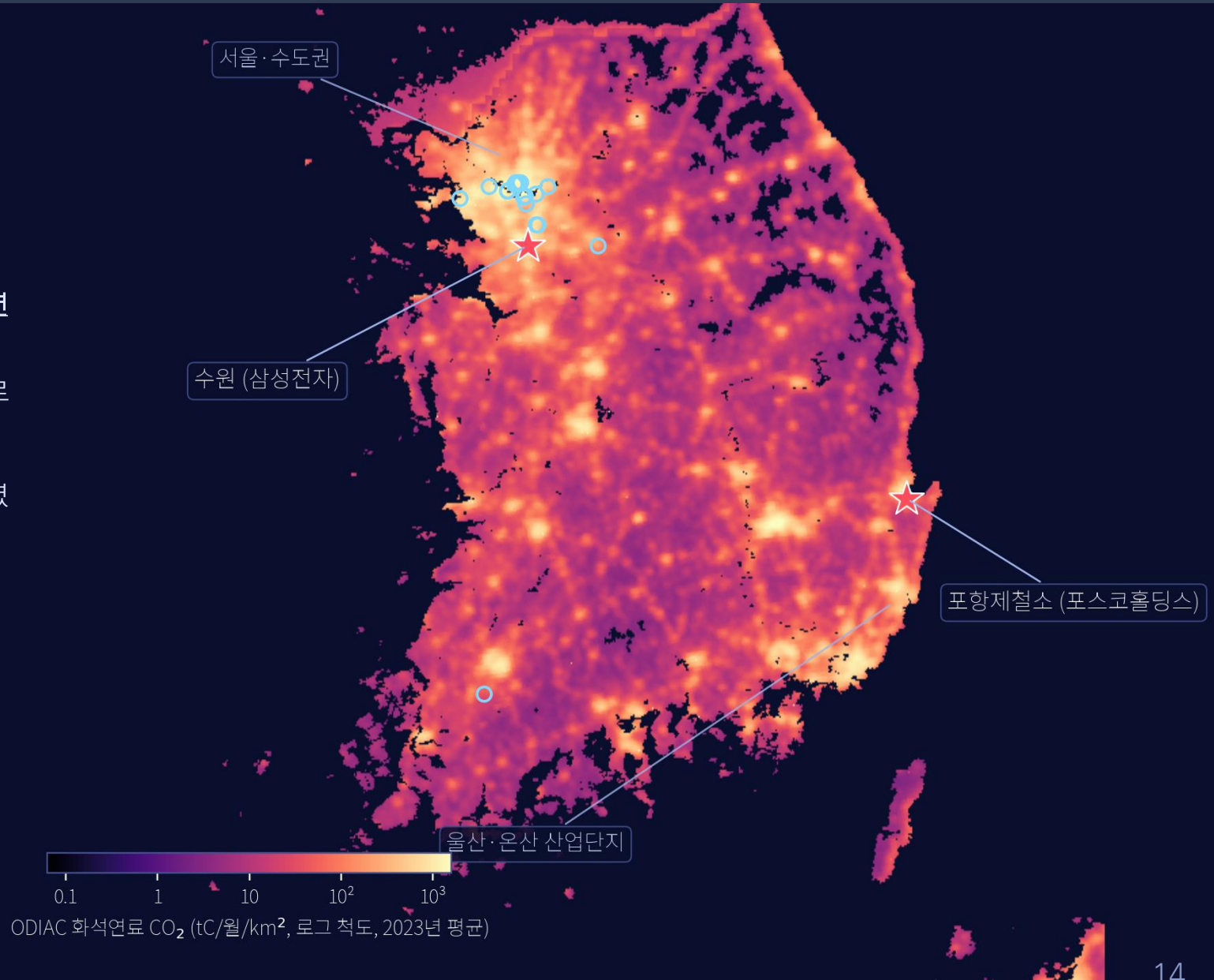
02. 데이터 구축

직접 CO₂ 채널

ODIAC 1km 인벤토리

위성 4종은 연소 활동의 대용 지표라는 한계를 가집니다. 본 연구는 야간광과 발전소 배출목록을 융합해 1km 격자에서 화석연료 CO₂를 추정하는 ODIAC v2024를 제4의 채널로 도입하여, 이산화질소는 이산화탄소가 아니라는 방법론적 비판에 데이터로 응답하였습니다.

원자료 60개를 한국 영역으로 절단하고 사업장 버퍼에 결합하였으며, 분석 단계에서 탄소 환산계수 3.67을 적용해 CO₂ 단위로 통일합니다. 배경 영상은 본 연구가 직접 처리한 2023년 평균 분포이고, 별 표식은 핵심 발견 2개사의 생산시설입니다.



02. 데이터 구축

9

관측 영상으로 본 포항제철소 일대

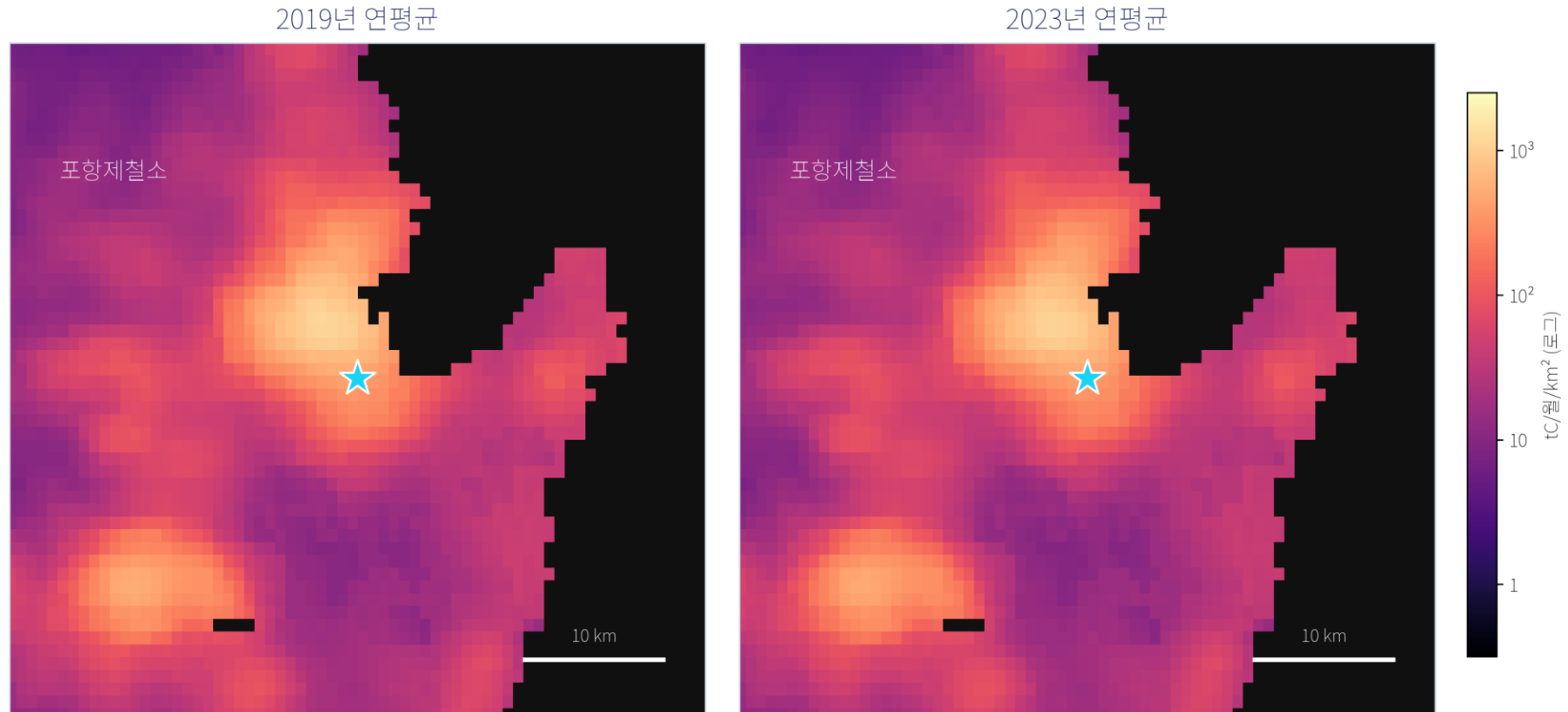


그림 7. ODIAC 2019년(좌)과 2023년(우) 연평균, 1km 해상도. 자료: NIES ODIAC v2024, 본 연구 직접 처리

- 1km 해상도에서 포항제철소 일대는 국지 최대 배출원으로 명확히 식별됨. 반경 10km 평균 강도는 247에서 233 tC/월/km²로 약 6% 하락한 반면 같은 기간 법정 공시는 상승하였음. 방향 반전은 통계에 앞서 영상에서 먼저 확인되는 사실임.

최첨단 위성 기반 사업장별 CO₂ 배출 검증 — ODIAC 1km 해상도, 2019년 대비 2023년

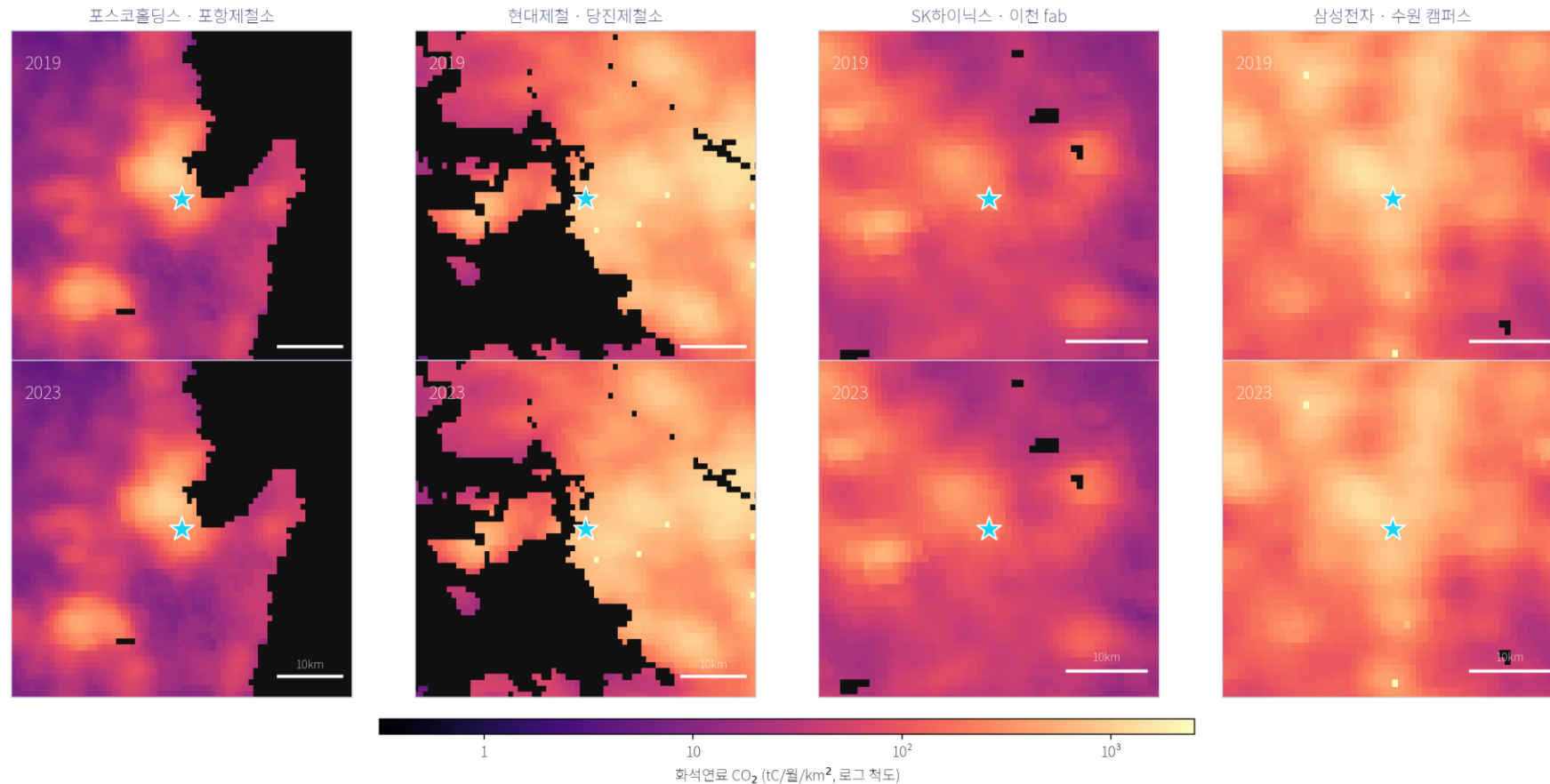


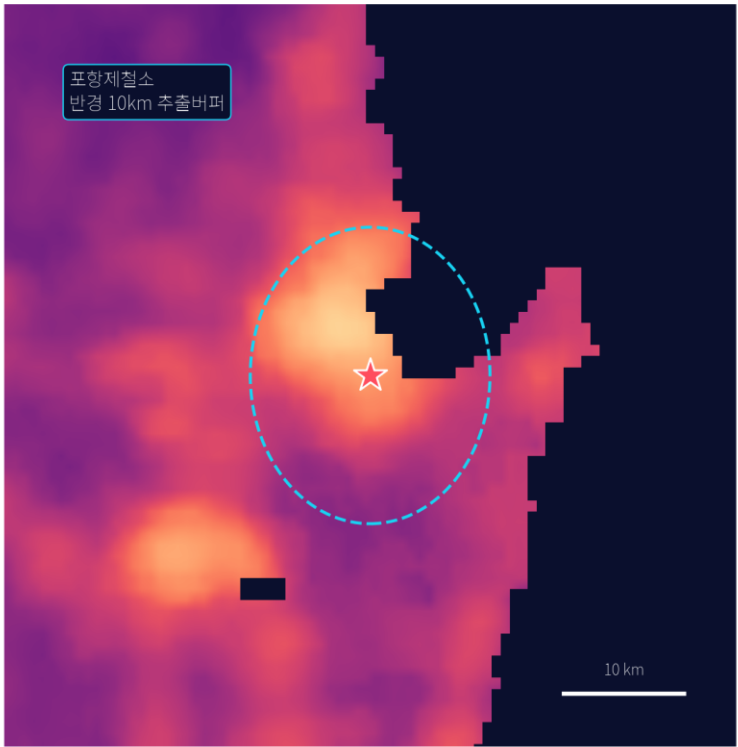
그림 7-1. 4개 산업시설의 위성 기반 CO₂ 분포 비교 (2019 vs 2023). 자료: NIES ODIAC v2024, 본 연구 직접 처리

- 포항 한 곳에 그치지 않음. 포스코홀딩스, 현대제철, SK하이닉스, 삼성전자 네 개 핵심 사업장을 ODIAC 1km 해상도에서 2019년과 2023년을 비교 산업시설마다 국지 배출원이 또렷이 식별되고 연도 간 변화가 눈으로 확인되어, 위성 영상이 개별 기업 단위의 공시 검증에 실제로 작동함을 보여줌. 16

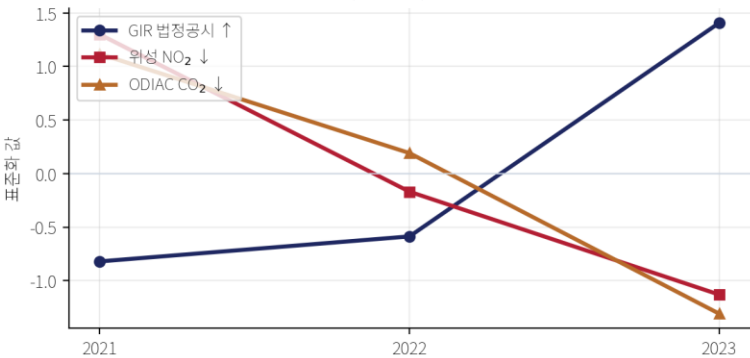
11 위성 궤도에서 공시 검증 판정까지

위성 궤도에서 공시 검증 판정까지 — 포스코홀딩스 검증 파이프라인

① 궤도: Sentinel-5P · ODIAC 1km 위성 관측 (2023)



② 추출: 동일 사업장 4채널 추세 (z-score)



③ 판정: 공시-물리 방향 반전 (패턴 D)

GIR 법정공시	$\tau = +1.00$	상승
ESG 자체보고	$\tau = +0.67$	상승
위성 NO ₂	$\tau = -1.00$	하강
ODIAC CO ₂	$\tau = -1.00$	하강

공시는 상승, 독립 관측은 하강 → 최우선 검증 신호

그림 7-2. 포스코홀딩스 검증 파이프라인: 궤도 → 추출 → 판정. 자료: 본 연구 종합

• 궤도의 위성 관측에서 사업장 반경 10km 버퍼로 신호를 추출하고, 4채널 추세를 비교하여, 공시와 물리의 방향 반전이라는 판정에 이르는 전 과정임. 위성을 단순히 보여주는 것이 아니라 행정 판정으로 번역하는 파이프라인의 시각적 요약임.

02. 데이터 구축

12

ODIAC의 시공간 변동과 총량 정합성

- 분기별 분포(좌)에서 동절기 난방 수요에 따른 뚜렷한 계절 변동이 확인되며, 이 계절성은 월 더미 변수로 통제하여 연 단위 추세에 혼입되지 않도록 처리함. 2019년 대비 2023년의 차분(우)에서는 전국 다수 산업 지역의 감소가 관찰되는데, 이는 국가 인벤토리(NIR) 총량의 감소 추세와 정확히 정합함. 1km 격자의 미시 데이터가 국가 단위의 거시 통계와 맞아떨어진다는 것, 이것이 ODIAC 채널을 신뢰할 수 있는 또 하나의 근거임.

그림 B. ODIAC 한국 CO₂ 배출 4계절 비교 (2023, 1km, log scale)

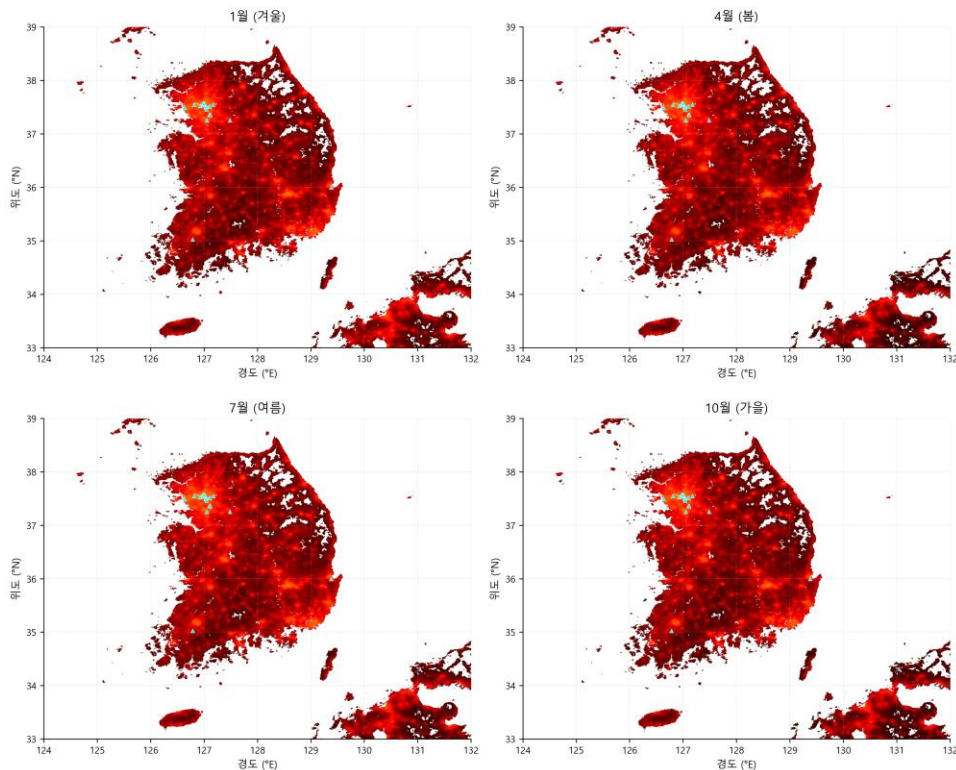


그림 8. 분기별 ODIAC 분포 (2023). 자료: NIES ODIAC v2024

그림 X2. ODIAC CO₂ 2019 vs 2023 변화 (7월 기준)

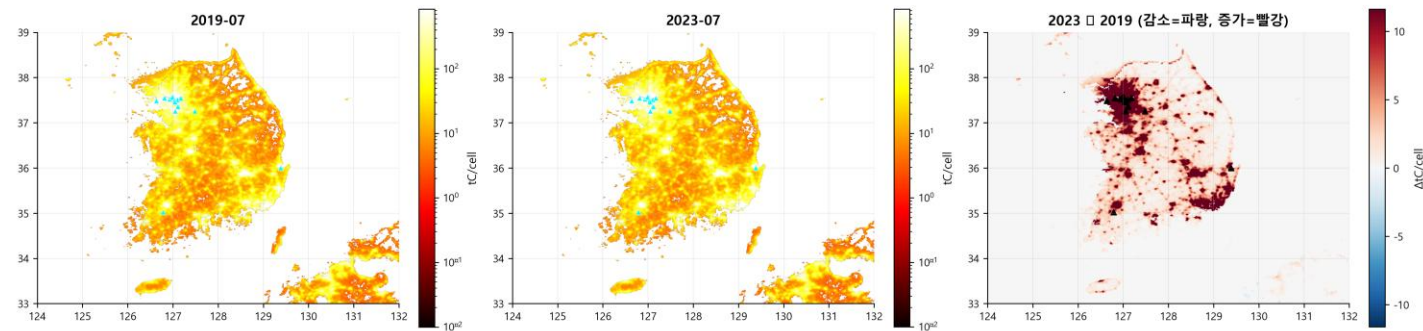


그림 9. 2019 대비 2023 공간 변화. 동일 자료.

위성 관측의 시간 해상도 — ODIAC 월별 CO₂ 맥동 (2023), 동절기 난방 수요의 계절성

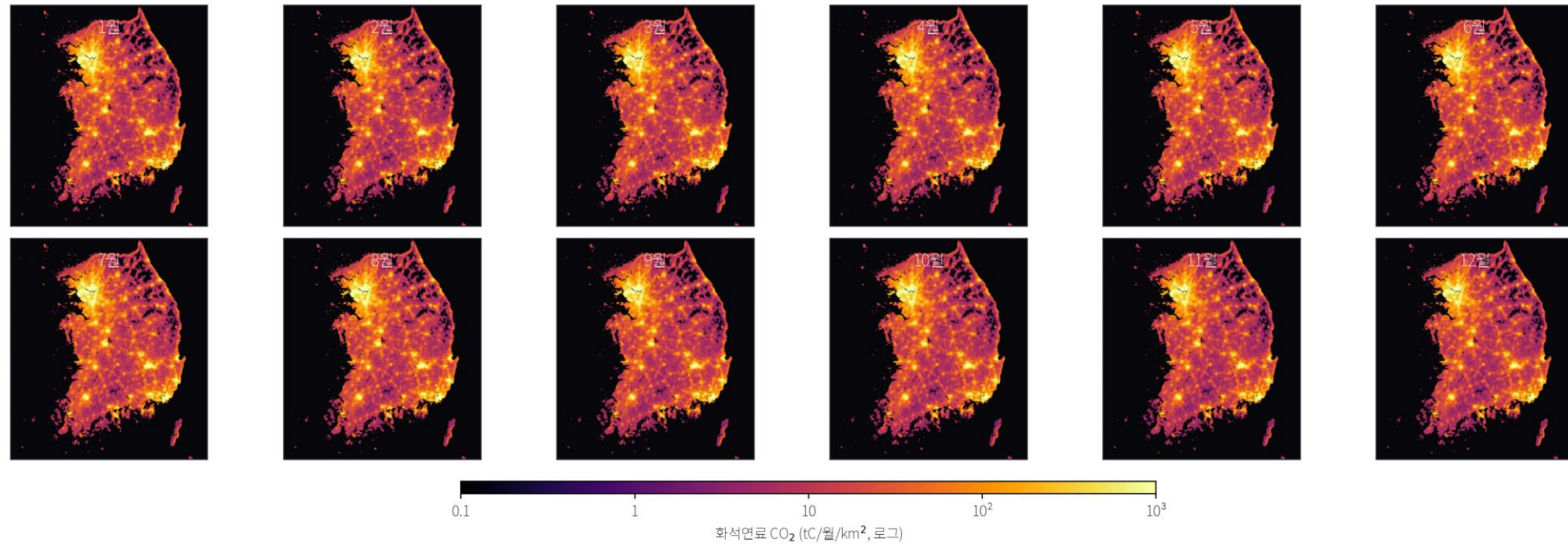


그림 8-1. ODIAC 월별 CO₂ 분포 (2023년 1~12월). 자료: NIES ODIAC v2024, 본 연구 직접 처리

- 위성 인벤토리는 연 단위가 아니라 월 단위로 배출의 호흡을 포착함. 2023년 12개월 분포에서 동절기 난방 수요에 따른 배출의 맥동이 선명하게 드러남. 이 시간 해상도가 있기에 계절성을 월 더미로 통제한 뒤 순수한 연 단위 추세만을 분리할 수 있으며, 향후 분기 단위 모니터링으로의 확장 근거가 됨.

13 기상 입력 자료의 독립 검증 체계

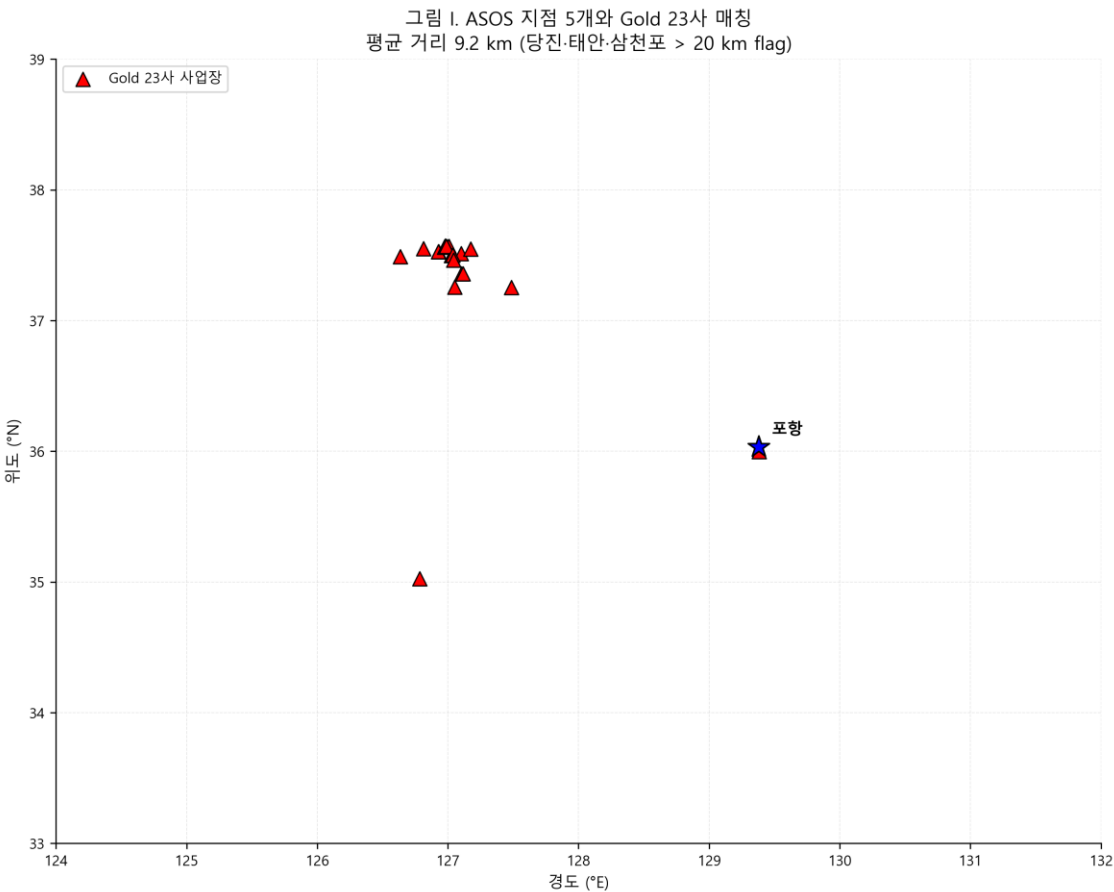


그림 10. ASOS 관측 지점과 사업장 매칭. 자료: 기상청, asos_panel.csv

- 왜 기상 자료를 따로 검증하는가
 - 기상보정이 결과를 만들어내는 절차가 아니라 교란을 제거하는 절차임을 보 이려면, 보정의 입력인 재분석 자료 자체의 신뢰성이 독립적으로 입증되어야 함 .
- 검증 체계
 - 첫째, ERA5 재분석을 기상청 ASOS 지상 관측 일자료 9,130행과 대조하여 정합성을 확인함. 둘째, NASA MERRA-2를 독립 대체 입력으로 두어 모델 교 체 시에도 결과가 유지됨을 확인함.

위성 변수	ERA5 R ²	MERRA-2 R ²
HCHO	0.94	0.91
SO ₂	0.79	0.76
NO ₂	0.76	0.74
CO	0.67	0.64

표. 기상보정 결정계수의 모델 간 비교. 순위와 패턴 D 식별이 모두 유지됨.

03. 분석 방법

1

입력에서 정책 산출까지, 8단계 분석 절차

1 수집

18개 데이터셋, SHA-256 고정, 자동 수집기

2 전처리

7단계: 매칭, Tier, 표본, 파싱, 경계, MICE, 버전

3 기상 잔차화

ERA5 5변수 회귀 잔차 (R^2 0.67~0.94)

4 지표 추세 분석

절대·상대·방향의 3개 축 (기업·연도)

5 이상탐지

IF+LOF, MK, 외부 라벨의 3층 앙상블

6 패턴 분류

4채널 Mann-Kendall τ , 5종 패턴

7 회귀 검정

Heckman 2단계, FE 패널, Bootstrap

8 XAI·우선순위

SHAP 분해, priority score 산출

- 순서가 곧 방법론

- 기상 교란을 제거하는 3단계가 모든 비교에 선행하도록 설계함. 잔차화 이전의 어떤 비교도 바람의 변화를 배출의 변화로 오인할 수 있기 때문임. 중간 산출물 30종과 최종 분석 테이블 9종이 단계별로 보존되어 모든 수치는 원자료까지 계보 추적이 가능함.

그림 F. 4대 산업시설 NO₂ 시계열 (2019-2023, ERA5 보정 전후)
회색=원시 신호, 컬러=기상보정 잔차 (배출 활동 신호)

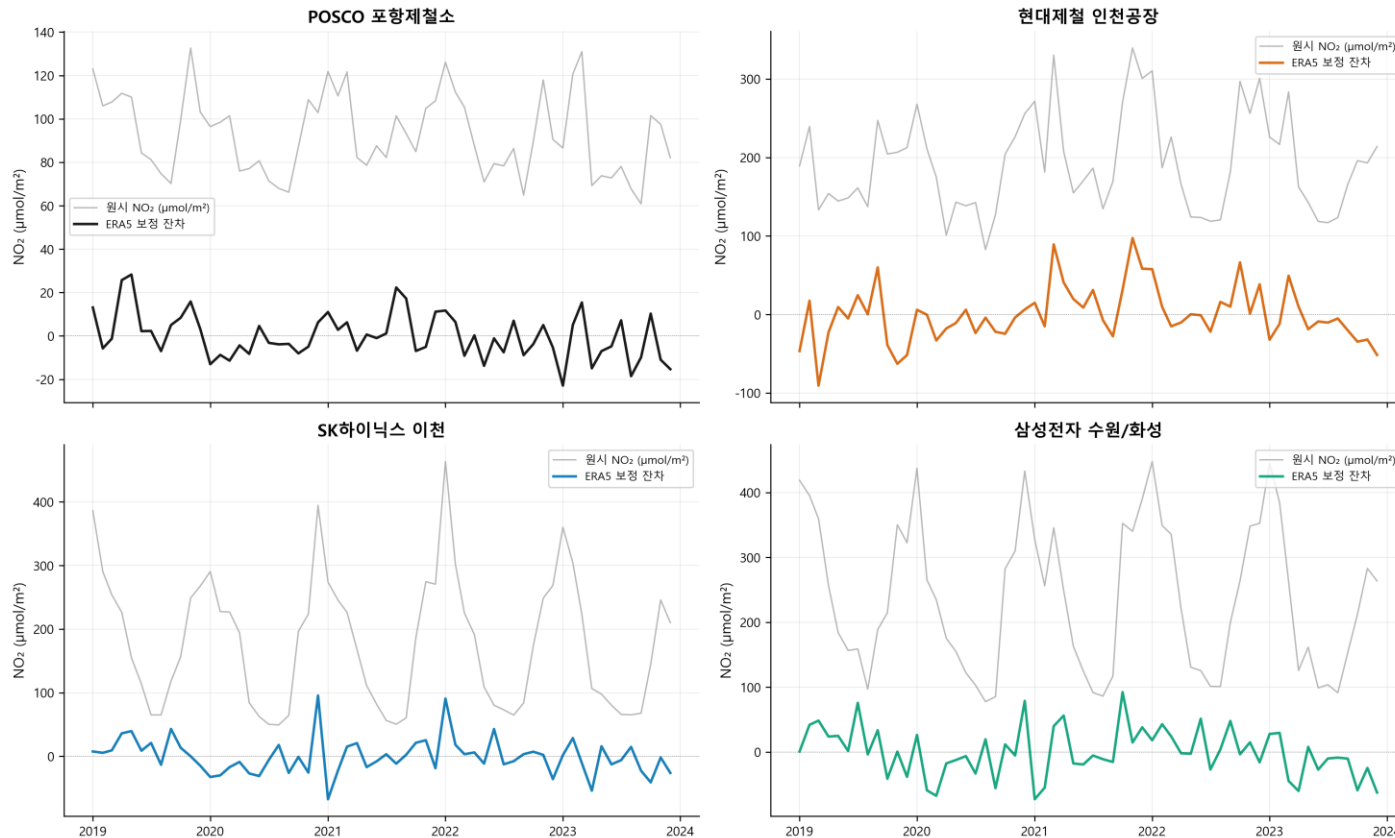


그림 11. 산업시설 4개소 NO₂의 보정 전(회색)과 후(청색) 시계열. 자료: era5_correction_stats.csv

- 무엇을 하는 절차인가

- 위성 컬럼 농도는 풍속, 기온, 강수, 대기경계층고에 좌우됨 . 사업장별로 동서·남북 풍속, 2m 기온, 강수, 경계층고의 5개 기상 변수와 월 더미를 설명변수로 하는 회귀를 적합하고, 그 잔차만을 기상 외 요인, 곧 배출 신호로 사용함.

- 결과와 신뢰성

- 결정계수는 HCHO 0.94부터 CO 0.67까지로 Fioletov 외 (2025)의 261개 도시 결과와 정확히 일치하는 범위임. 그림에서 보정 후 시계열(청색)은 계절 진폭이 제거되어 장기 추세가 드러나며, 보정 전후 모두에서 패턴 D의 분류는 변하지 않았음.

03. 분석 방법

4

채널 간 횡단면 정합성의 사전 확인

- 방향 비교에 앞서, 위성 4종(좌)과 ODIAC(우)이 법정 배출량의 규모를 실제로 반영하는지 횡단면에서 확인함. 전 성분에서 양의 상관관계가 관찰되어 위성 채널이 배출 규모의 유효한 대용 지표라는 전제가 성립함. 대다수 기업에서 성립하는 이 정합이 특정 기업에서만 깨질 때, 그 이탈이 통계적으로 의미 있는 신호가 된다는 것이 본 검증 체계의 논리 구조임.

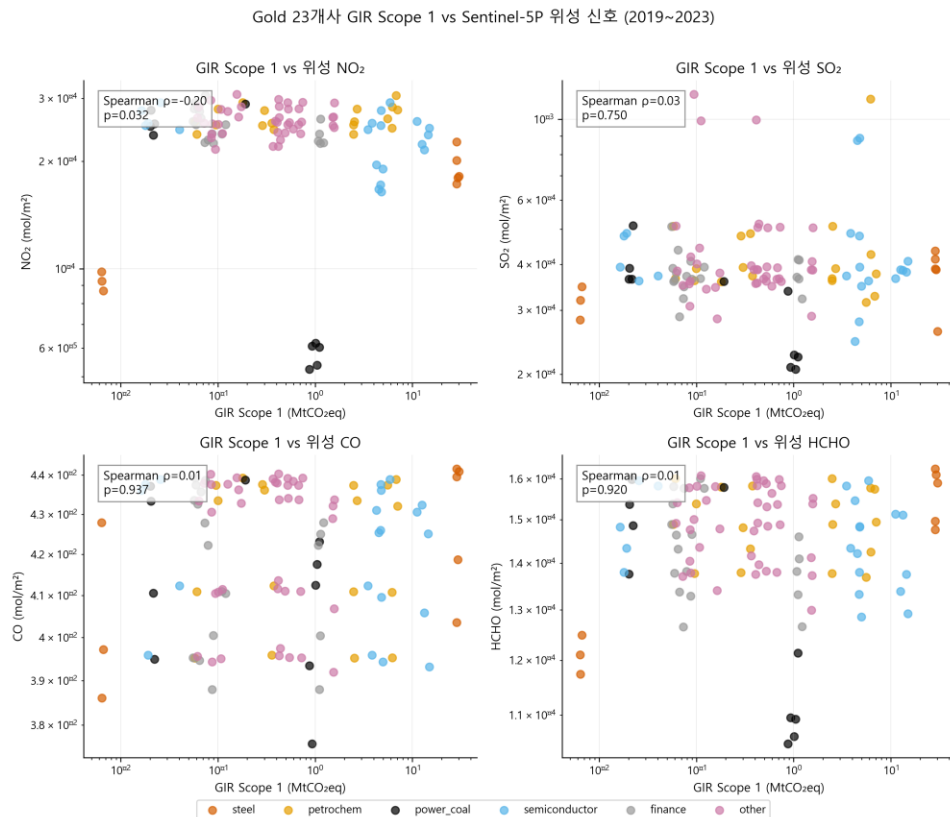


그림 12. 위성 4종과 GIR의 산점.

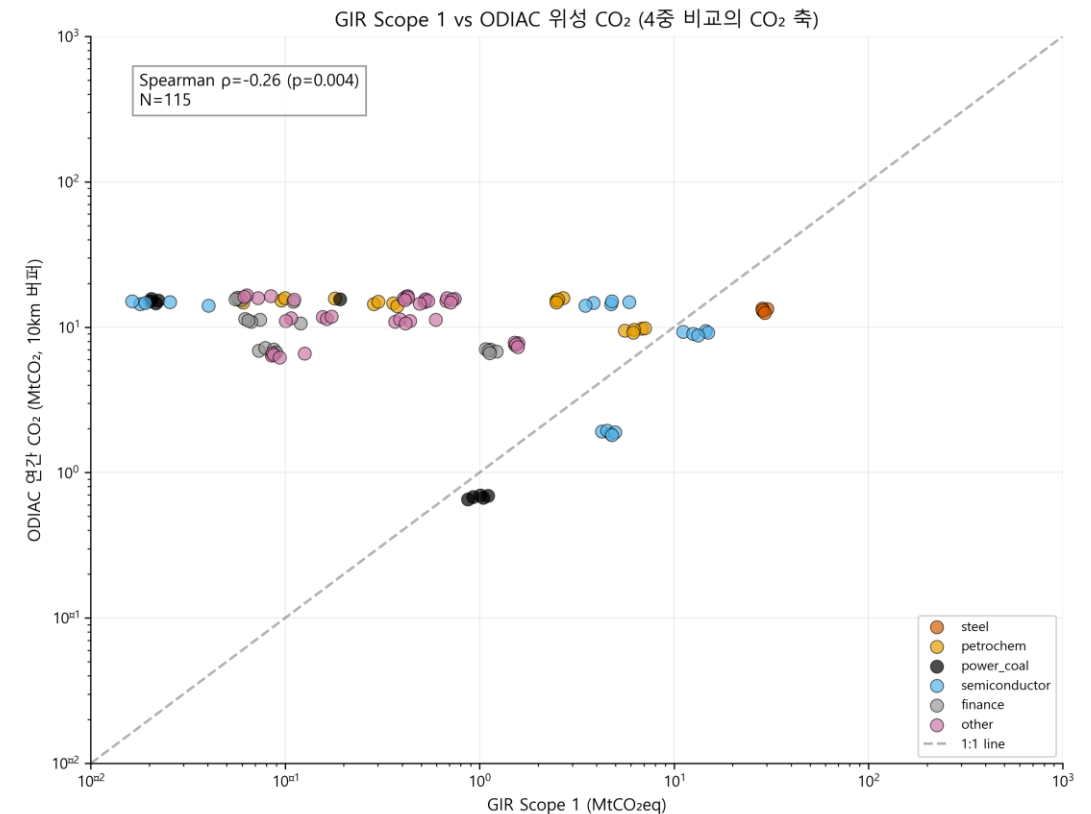


그림 13. ODIAC과 GIR의 산점. 동일 자료.

03. 분석 방법

5

방법론의 핵심, 왜 절대값이 아니라 추세인가

방법론적 선택: 왜 절대값이 아니라 추세(방향)를 비교하는가

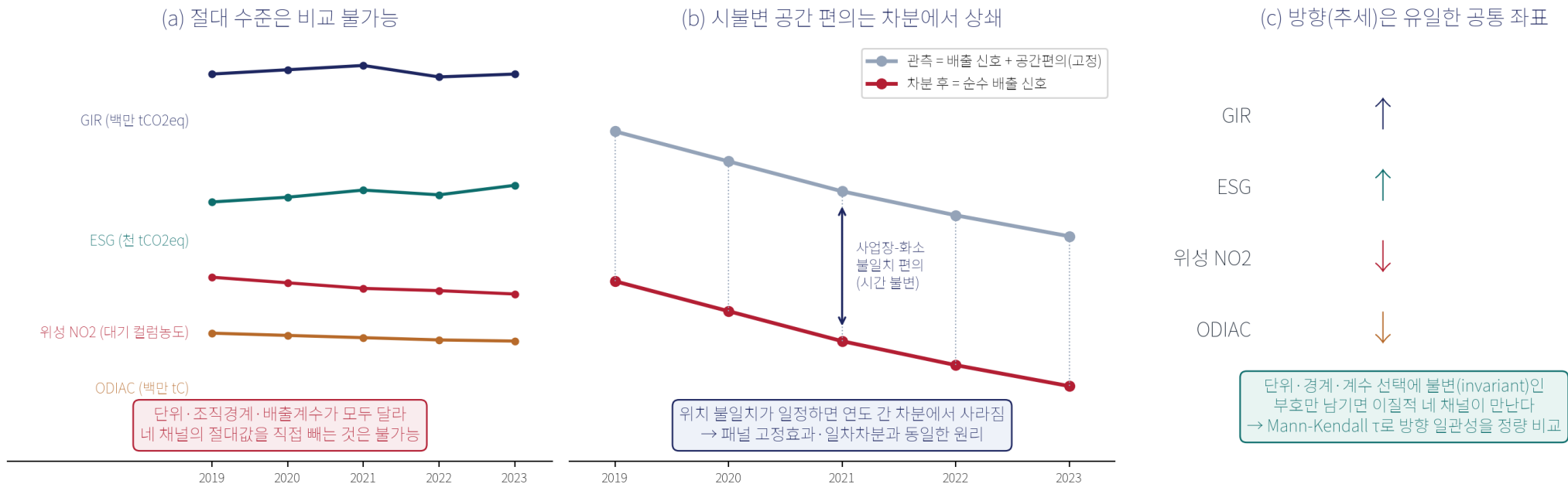


그림 11-1. 추세 비교를 채택한 세 가지 근거

- 세 가지 근거가 추세 비교로 수렴함

- 첫째, 네 채널은 단위와 조직경계와 배출계수가 모두 달라 절대값을 직접 뺄 수 없음. 둘째, 사업장 위치와 위성 화소의 공간적 불일치가 측정에 편의를 유발하나, 그 편의가 시간에 대해 일정하다면 연도 간 차분에서 상쇄됨. 이는 패널 계량경제학의 고정효과·일차차분이 시불변 개체효과를 제거하는 원리와 동일함. 셋째, 따라서 단위와 척도에 불변(invariant)인 방향이 이질적 네 채널이 만날 수 있는 유일한 공통 좌표가 됨.

03. 분석 방법

6

Mann-Kendall τ 의 작동 원리와 추세의 강건성

Mann-Kendall τ 의 작동 원리: 연도쌍 부호의 일관성

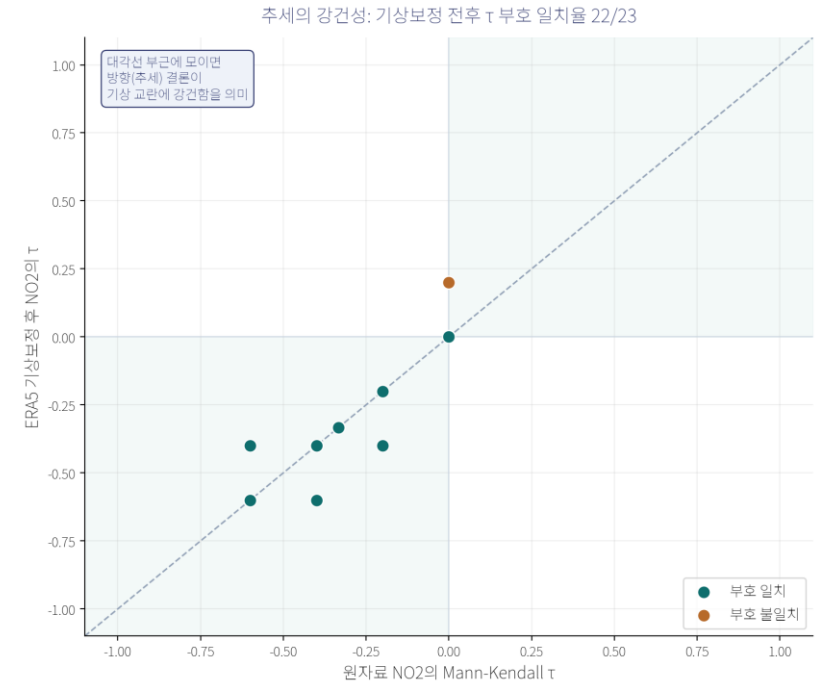
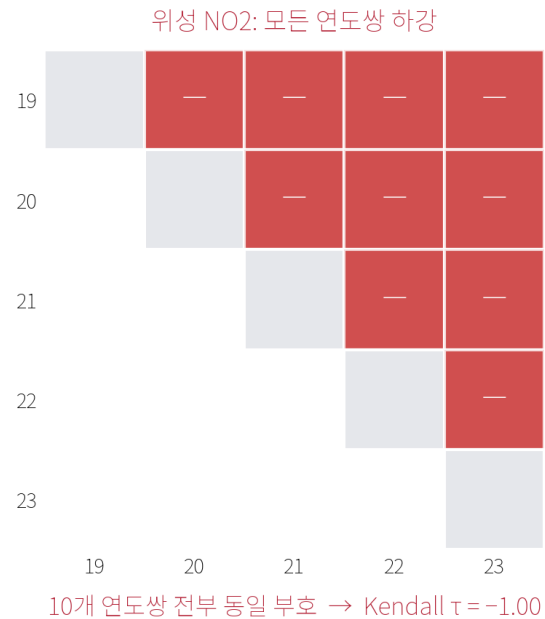
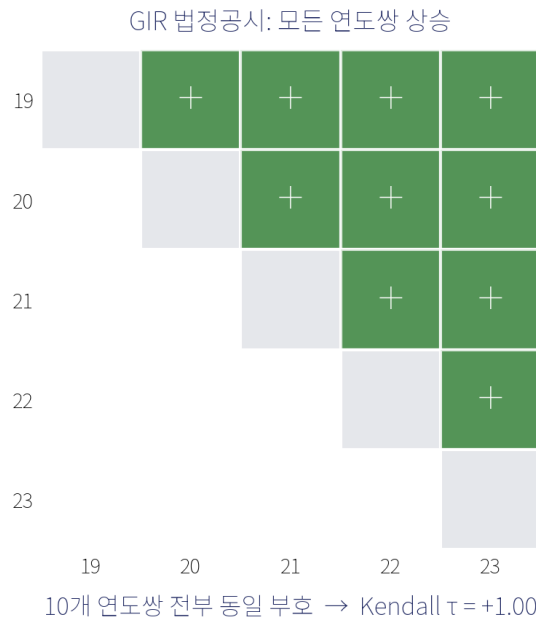


그림 11-3. 기상보정 전후 τ 부호 일치 22/23.

그림 11-2. τ 의 연도쌍 부호 일관성 (개념 도해). 자료: 본 연구 작성

- Mann-Kendall은 절대값이 아니라 모든 연도쌍의 순위 부호만을 사용하므로, 앞 슬라이드의 단위·척도 불변성을 그대로 구현함. 5개년의 10개 쌍이 모두 같은 부호이면 완전 단조($\tau \pm 1.00$)이며, 정규성 가정 없이 소표본에 적용 가능함. 실증적으로도 기상보정 전후의 NO2 추세 부호가 23개사 중 22개사에서 일치하여, 방향 비교가 기상 교란에 강건함을 확인함.

7 4중 패턴 분류 체계, Mann-Kendall 방향 일관성

- 부호 조합으로 정의되는 다섯 패턴

- 각 채널의 추세 방향을 $|\tau|$ 0.40 기준으로 상승·하강·무추세로 판정한 뒤, 네 채널의 부호 조합으로 다음 다섯 패턴을 정의한다. 임계값 0.40은 Hipel과 McLeod(1994)의 추세 판정 권고와 본 표본의 검정력을 함께 고려해 사전 등록한 값이며, 추세의 크기는 Sen 기울기로 병행 추정하였다.

패턴	정의 ($ \tau $ 0.40 기준)	해석
A ↓ 일관 하강	4채널 모두 하강	미세먼지 대책과 K-ETS의 정책 효과를 반영하는 정상 사례
A ↑ 일관 상승	4채널 모두 상승	사업 확장에 따른 정직한 보고 사례 (예: 데이터센터)
B ESG 이탈	GIR·위성·ODIAC 일치, ESG만 반대	자체보고의 경계 변경 또는 산정 오류 신호
C GIR 의심	ESG·위성·ODIAC 일치, GIR만 반대	법정 신고의 산정 정확성에 대한 역방향 검증 신호
D 방향 반전	GIR·ESG 상승, 위성·ODIAC 하강	공시와 물리 관측의 정면 충돌, 단일 채널로 식별 불가능한 최우선 신호
mixed 혼합	부호 혼재	판정 보류, 모니터링 유지

다섯 패턴은 네 채널 부호의 조합 공간을 행정적 의미에 따라 분할한 본 연구 고유의 분류 체계이다. 특히 패턴 D와 C는 의심의 대상이 정반대여서, D는 법정과 자체보고를 함께 점검하고 C는 자체보고의 보고경계를 점검한다. 즉 패턴 분류가 단순한 라벨에 그치지 않고 검증 자원의 배분 규칙으로 기능한다.

8 이상탐지, 선택편향 통제, 설명가능성의 설계

- 이상탐지 3층 앙상블, 단일 알고리즘 의존의 회피
 - 1층은 Isolation Forest와 LOF의 합집합(contamination 0.05~0.20 격자 탐색), 2층은 Mann-Kendall 기반 공시·위성 방향 불일치, 3층은 KCGS 등급조정 21건과 검증기관 변경 등 외부 라벨임. 분류 규칙은 1층과 2층의 교집합을 구조적, 2층만을 추세적, 1층만을 일시적으로 정의함.
- Heckman 2단계, 보고 선택편향의 통제
 - ESG 발간은 자발적 선택이므로 발간 기업과 미발간 기업 간 자기선택 편향이 존재함(Kim과 Lyon, 2015). 1단계 프로빗으로 발간 확률을 자산 규모, K-ETS 할당량, 배출권 가격으로 추정해 역밀스비를 도출하고, 2단계에서 괴리율을 종속변수로 산업·연도·기업 고정효과와 함께 회귀함. 신뢰구간은 기업 블록 Bootstrap으로 산출함.
- SHAP, 판단 근거의 의무적 설명
 - 행정 절차에 쓰려면 모든 판정이 설명 가능해야 함. 개입적(interventional) TreeExplainer로 각 기업·연도가 지목된 이유를 변수 단위로 분해하여 현장 검증 인력의 의사결정 보조 도구로 제공함.

구성	방법	핵심 설정	성능 지표
탐지 1층 단면	Isolation Forest + LOF	contamination 0.05~0.20	5-fold 교차검증 AUC 0.86
탐지 2층 시계열	Mann-Kendall 방향 불일치	$ \tau $ 0.40, 유의수준 0.1	패턴 분류와 독립 교차
탐지 3층 외부 라벨	KCGS 분기 등급조정 외	21건 부분지도 라벨	정밀도 0.71 (c=0.10)

04. 연구 결과

1

패턴 분포, 23개사 전수 분류의 결과

- 23개사를 4채널 τ 부호로 분류한 결과, 일관 하강 12개사가 다수를 이루어 감축 정책이 작동한다는 거시적 증거를 제공함. 그 정합의 배경 위에서 공시와 관측이 정면으로 어긋난 방향 반전 2개사가 통계적으로 뚜렷하게 구분되며, D·C·혼합을 합한 약 39%는 단일 채널 검증으로는 식별이 불가능했던 신호임.

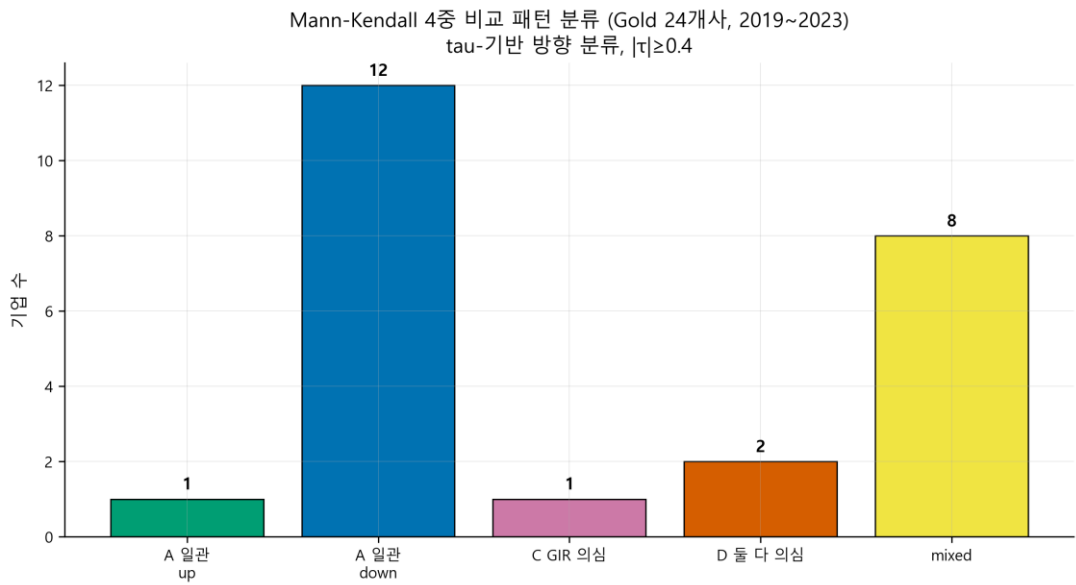


그림 14. 패턴 분포 막대그래프.

패턴	기업 수	비율	대표 기업
A ↓ 일관 하강	12	52.2%	한국전력, 현대자동차, 롯데케미칼 외
mixed 혼합	7	30.4%	SK하이닉스, 현대제철, 대한항공 외
D 방향 반전	2	8.7%	포스코홀딩스, 삼성전자
C GIR 의심	1	4.3%	현대모비스
A ↑ 일관 상승	1	4.3%	네이버 (데이터센터 전력 수요)

이 분포 자체가 하나의 제도 평가임. 다수의 정합(A ↓)은 현행 법정 검증 체계가 작동하고 있음을, 소수의 역전(D)은 그 체계의 사각지대를 각각 보여줌. 패턴 B(자체보고만 이탈)가 관측되지 않았다는 사실은, 실제 위험이 자체보고 단독의 오류가 아니라 두 공시가 함께 관측과 어긋나는 구조임을 시사함.

04. 연구 결과

2

채널별 추세의 전수 비교와 공간 분포

- 좌측은 23개사 전수의 채널별 Mann-Kendall τ 를 한 화면에 병렬한 forest plot으로, 행 단위로 GIR, 위성, ODIAC의 부호를 직접 대조할 수 있음. 공시 채널과 관측 채널의 부호가 정면으로 어긋나는 행은 정확히 두 개임. 우측 공간 분포에서 그 두 기업은 포항과 수원이며, 모두 도시 배경의 영향이 통제되는 실제 생산시설 좌표를 사용하였음.

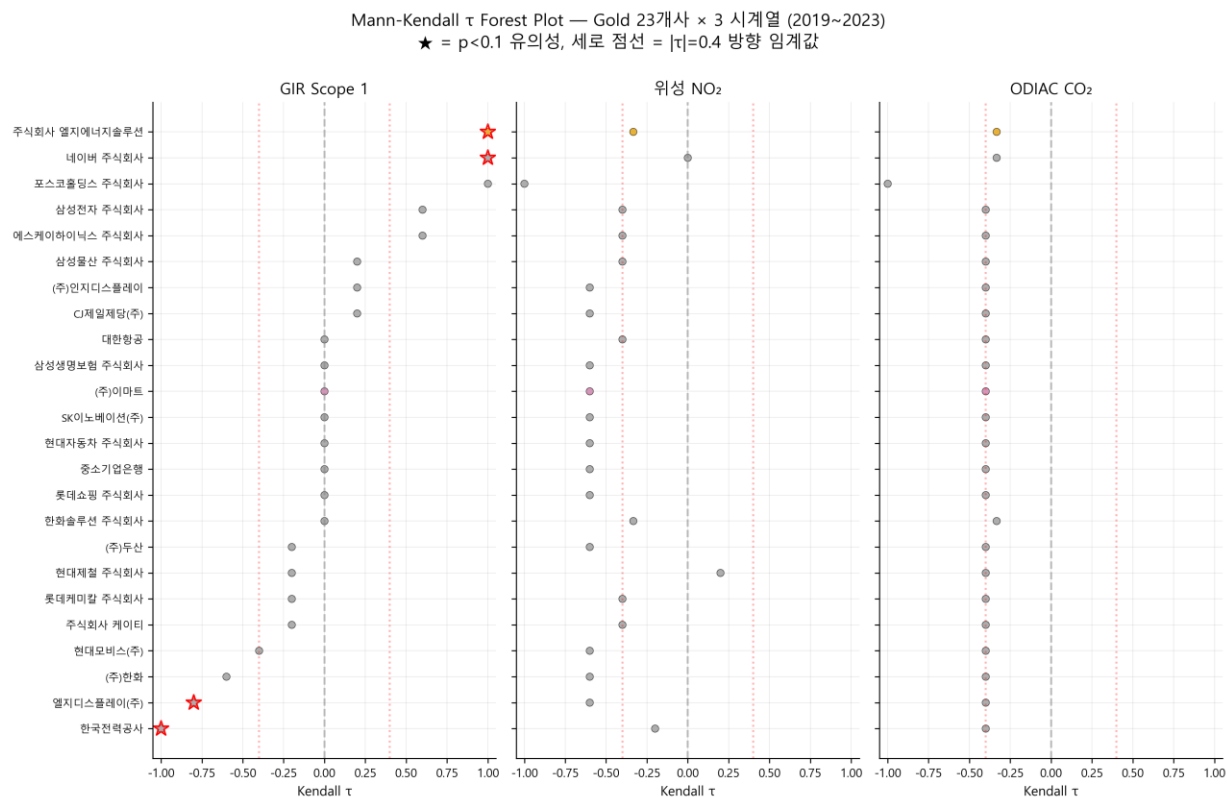


그림 15. 기업×채널 τ forest plot.

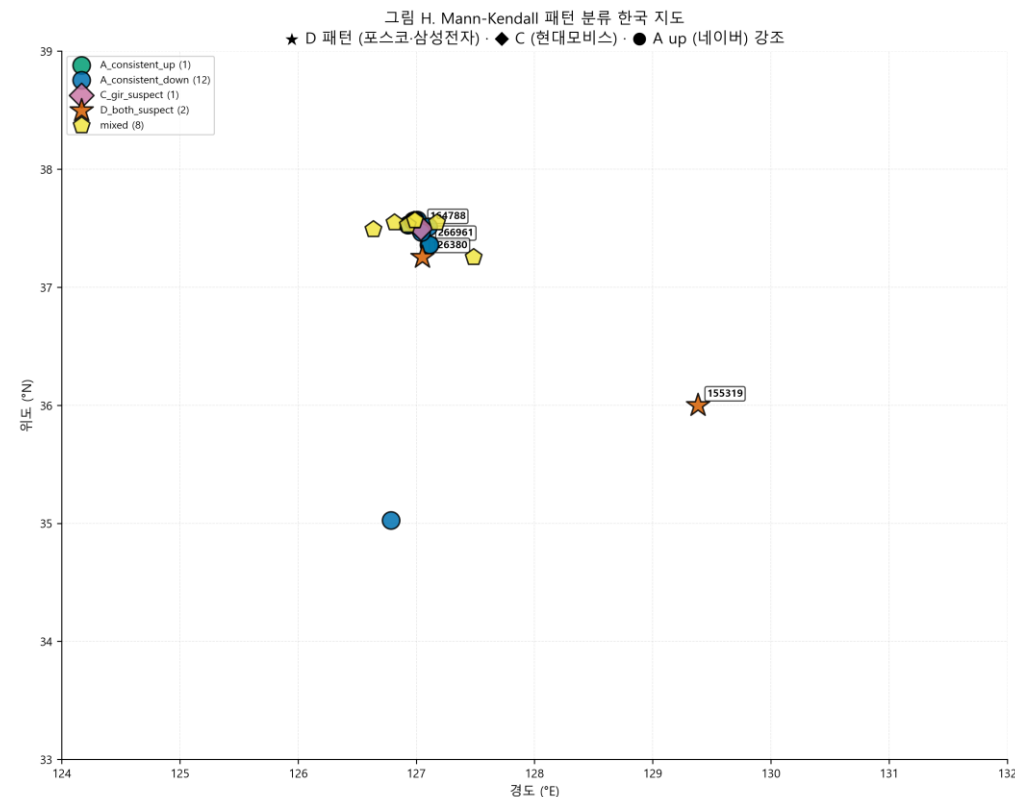


그림 16. 패턴 분류의 공간 분포. 동일 자료.

3 핵심 발견, 포스코홀딩스의 완전 방향 반전

그림 X5. 포스코홀딩스 4종 비교 디테일 (D 패턴 대표 사례)
GIR-ESG ↑↑ vs 위성-ODIAC ↓↓ — 공시-물리측정 방향 완벽 반대

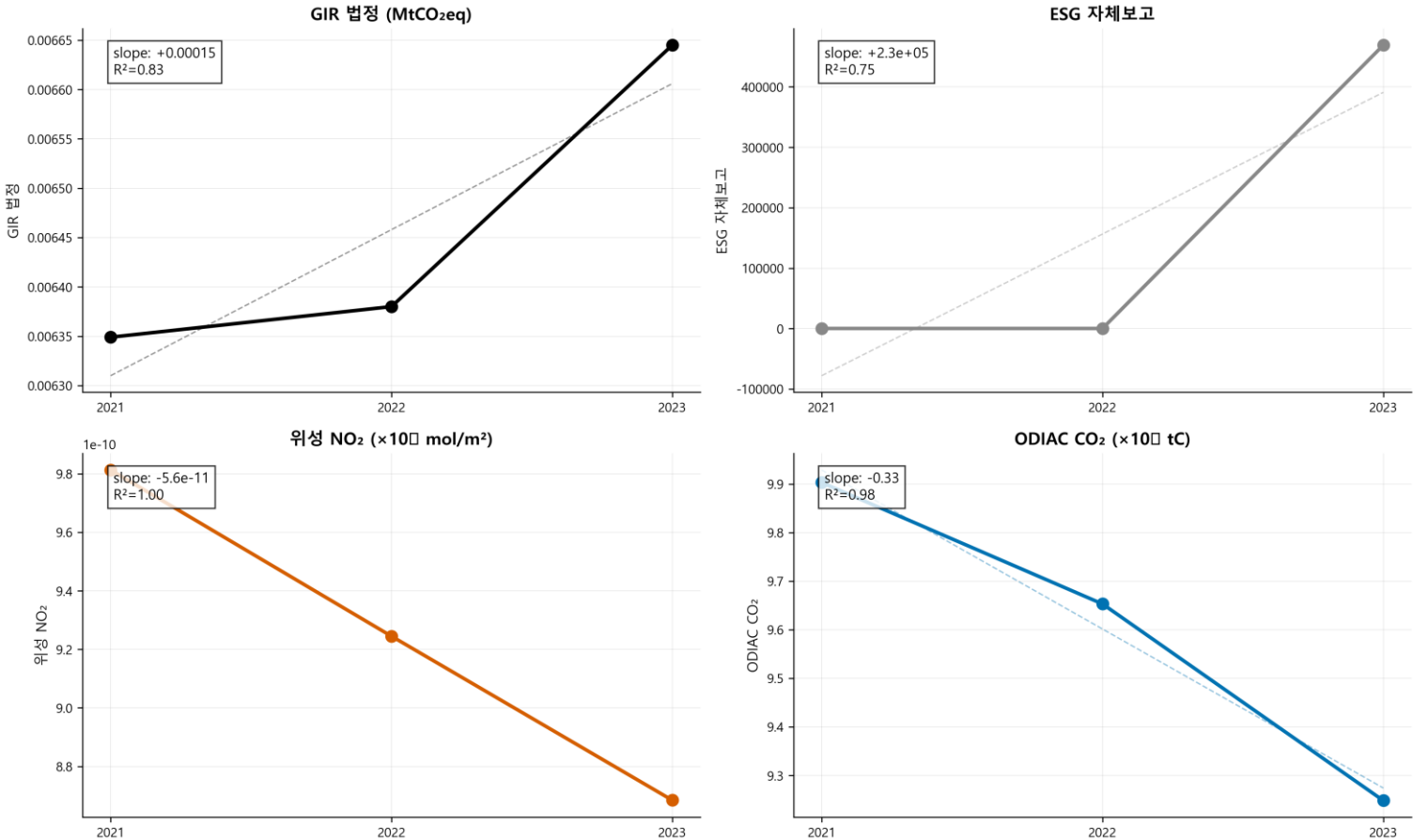


그림 17. 포스코홀딩스 4채널 상세 시계열. 공시 채널(상승)과 관측 채널(하강)의 5년 일관 반전.

채널	τ	방향
GIR 법정	+1.00	완전 상승
ESG 자체	+0.67	상승
위성 NO ₂	-1.00	완전 하강
ODIAC	-1.00	완전 하강

2019~2023년의 모든 인접 연도 쌍에서 법정 공시는 상승하고, 포항제철소 반경 10km의 위성 잔차와 ODIAC은 하강함. 완전 단조($\tau \pm 1.00$)의 정면 충돌이며, 기상보정 전후와 MERRA-2 대체 검증에서 동일하게 유지됨.

이 발견의 의의는 특정 기업의 고발이 아니라, 대조표 없는 공시 체계가 5년간 누구도 눈치채지 못한 역전을 허용해 왔다는 구조의 증명에 있음.

- 가설 1. 보고경계 확장

- 2022년 3월 지주회사 신설로 해외 자회사가 연결 범위에 편입되어 보고 수치가 상승하였을 가능성. 이 경우 국내 사업장의 위성 신호는 영향을 받지 않으므로 방향 반전이 자연스럽게 설명됨. 다만 이것이 사실이라면 경계 변경의 공시가 불충분했다는 문제가 남음.

- 가설 2. Scope 재분류

- 자가발전을 Scope 1에서 매입전력의 Scope 2로 이전하는 등 산정 경계의 재분류가 채널 간 비대칭을 유발하였을 가능성. 대조표가 없는 현행 공시 체계에서는 외부에서 이를 구분할 방법이 없음.

- 가설 3. 실감축의 선반영

- 공정 효율화와 CCUS 도입으로 실제 배출이 감소하였으나 보고에 시차가 존재하는 경우. 위성이 먼저 하강을 포착하고 공시가 늦게 따라오는 시나리오로, 기업에 가장 유리한 해석임.

본 분석만으로는 세 가설 간 인과를 특정할 수 없으며, 따라서 본 연구는 그린워싱을 단정하지 않음. **패턴 D는 행정 처분의 근거가 아니라 최우선 현장 검증이 필요하다는 신호**이며, 보고경계 변경 등 정당한 사유를 공시에 기재하면 우선순위에서 제외되는 자체 시정 경로(self-cure pathway)를 함께 설계함.

04. 연구 결과

5 두 번째 사례, 삼성전자

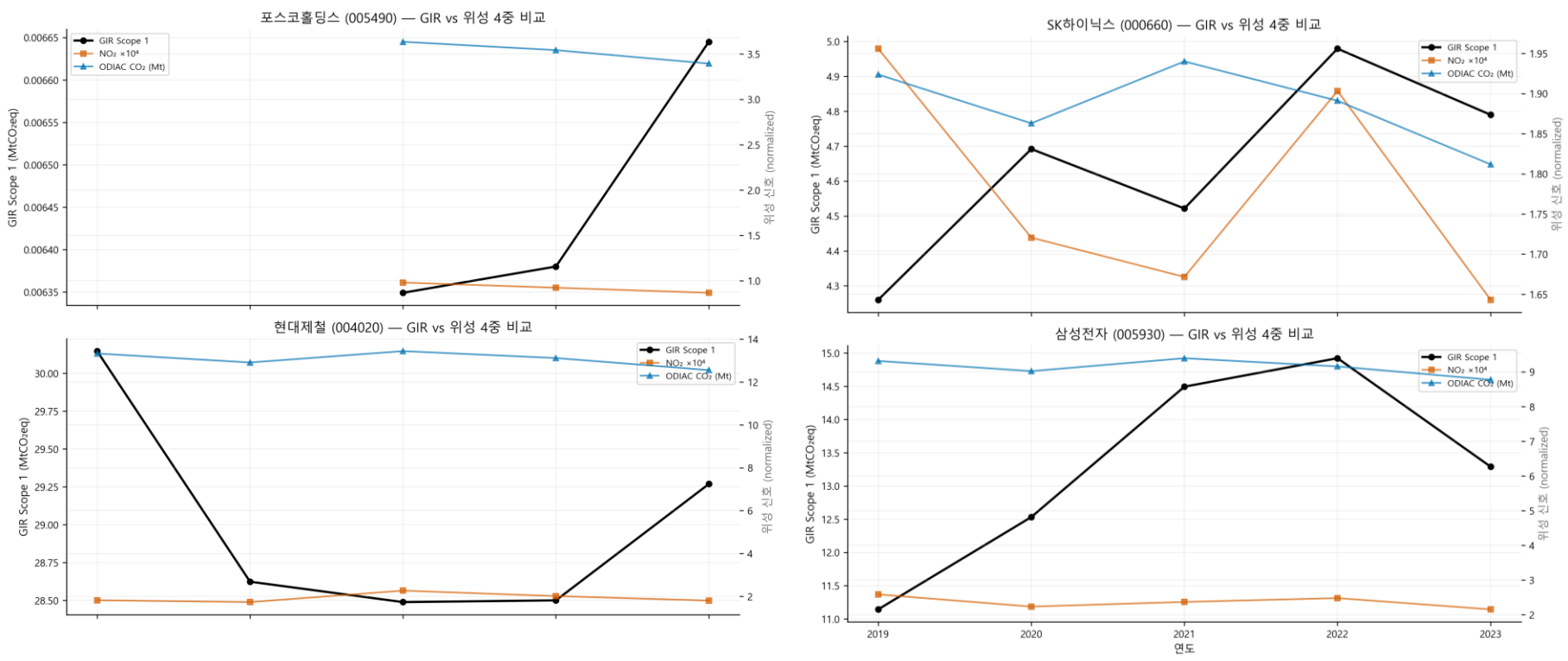


그림 18. 주요 4개사 사례 비교 (포스코홀딩스, 현대제철, SK하이닉스, 삼성전자).

채널	τ	방향
GIR 법정	+0.60	상승
ESG 자체	+1.00	최대 상승
위성 NO ₂	-0.40	하강
ODIAC	-0.40	하강

자체보고 $\tau +1.00$ 은 23개사 중 가장 강한 상승 서사임. 수원 사업장은 지오코딩으로 확보한 산업시설 좌표이나 도시 배경의 영향이 일부 존재할 수 있음. 그럼에도 5년간 일관된 방향 차이는 무시하기 어려우며, 반도체 시설 증설에 따른 보고 증가와 수도권 NO_x 정책에 따른 관측 하강의 다중 스케일 혼재 가능성을 명시함.

- 두 공시 채널이 서로 반대를 가리킨 단일 사례

- 현대모비스는 법정 채널이 하강(τ -0.40)하는 반면 자체보고는 상승(τ +0.40)하여, 같은 기업의 두 공시가 정반대 방향을 보고한 유일한 사례임. 위성 NO₂(τ -0.60)와 ODIAC(τ -0.20)은 법정 채널의 손을 들어줌.

- 가장 유력한 가설

- ESG 보고서의 조직 경계 확대, 곧 해외 자회사의 추가 통합에 따른 절대값 증가임. 이 경우 국내 사업장 기준의 법정 신고와 관측 채널은 하강하고 연결 기준의 자체보고만 상승하는 현재의 구조가 정확히 재현됨

- 행정적 합의

- 패턴 C는 D와 달리 법정 채널이 아닌 자체보고의 범위 점검을 요구함. 패턴 분류가 검증의 방향까지 지정한다는 본 분류 체계의 효용을 보여주는 사례이며, 의무공시 시행 시 보고 범위 변경 이력의 점검이 권고됨.

채널	τ	방향
GIR 법정	-0.40	하강
ESG 자체	+0.40	상승
위성 NO ₂	-0.60	하강
ODIAC	-0.20	약한 하강

관측 채널이 어느 공시의 손을 들어주는지가 검증의 방향을 결정함. 본 사례에서는 위성과 ODIAC이 법정 신고를 지지하므로, 점검 대상은 자체보고의 경계 변경 이력임.

23개사 전수 공개와 상위 배출원 상세

- 유리한 사례의 선별 제시가 아님을 보이기 위하여, 전 채널을 평균 0과 표준편차 1로 표준화한 z-score 시계열을 23개사 전부 공개함(좌). 패턴 D 기업에서 공시(적색)와 관측(청색)이 그리는 X자 교차가 시각적으로 확인됨. 절대 배출 상위 6개사의 상세(우)에서는 같은 철강 산업 안에서도 포스코홀딩스와 현대제철의 궤적이 갈라져, 다수의 정합 위에서만 소수의 역전이 의미를 갖는다는 공개의 원리를 뒷받침함.

그림 X4. Gold 23사 4채널 정규화 시계열 (2019=100, GIR 배출 내림자순)
원형=GIR·회색=ESG·주황=위성NO₂·파랑=ODIAC

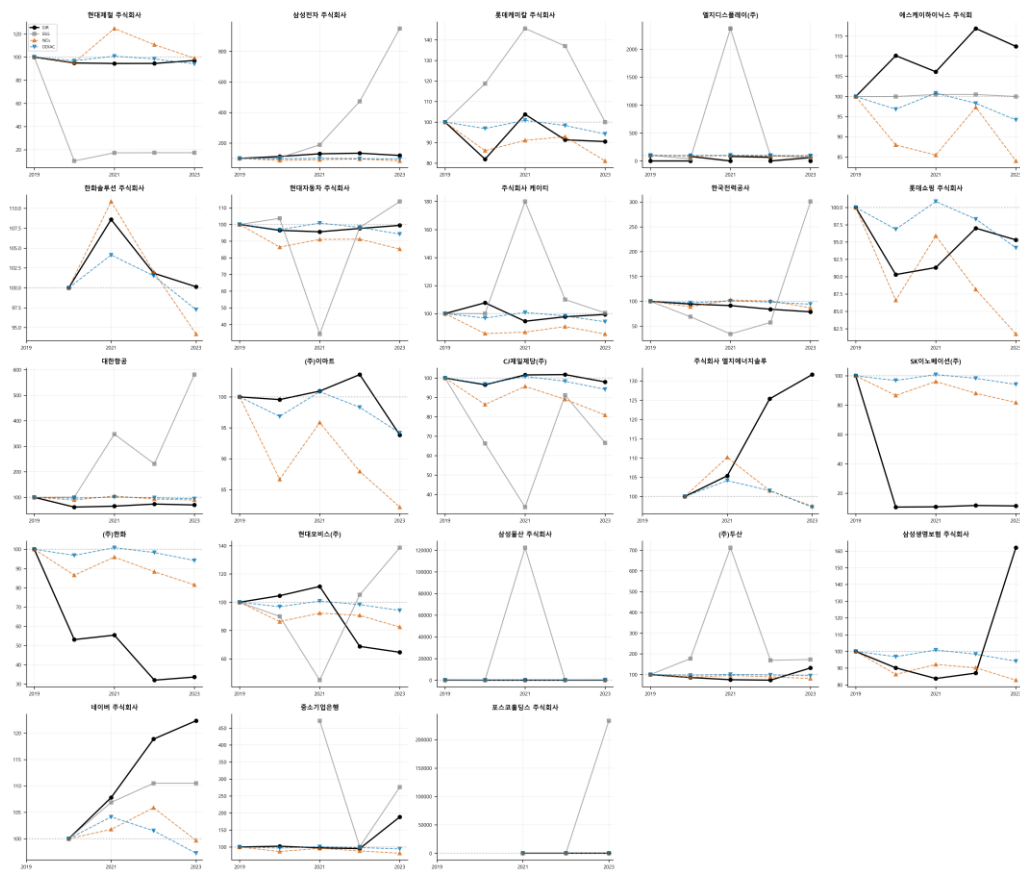


그림 19. 23개사 z-score 정규화 시계열

그림 G. Top 6 배출 기업 GIR vs 위성-ODIAC 종합 추이 (2019-2023)

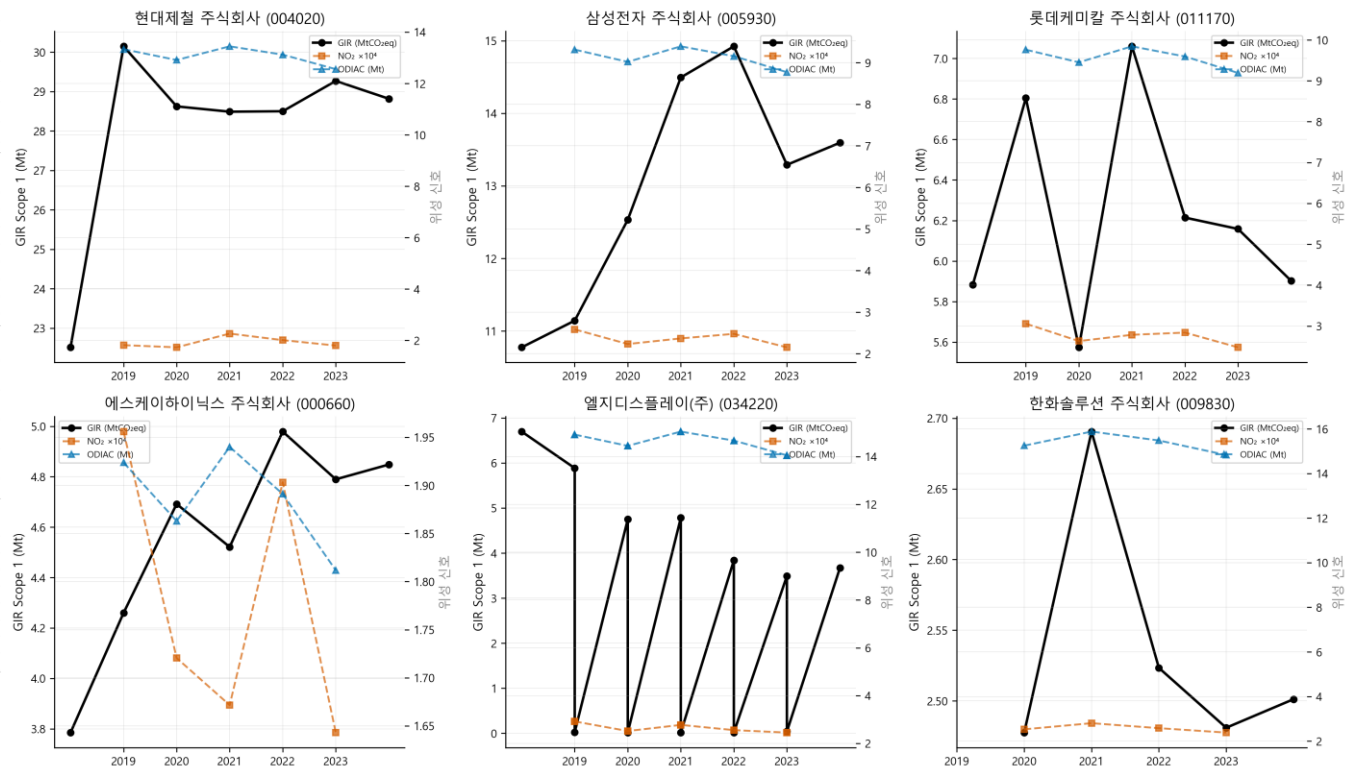
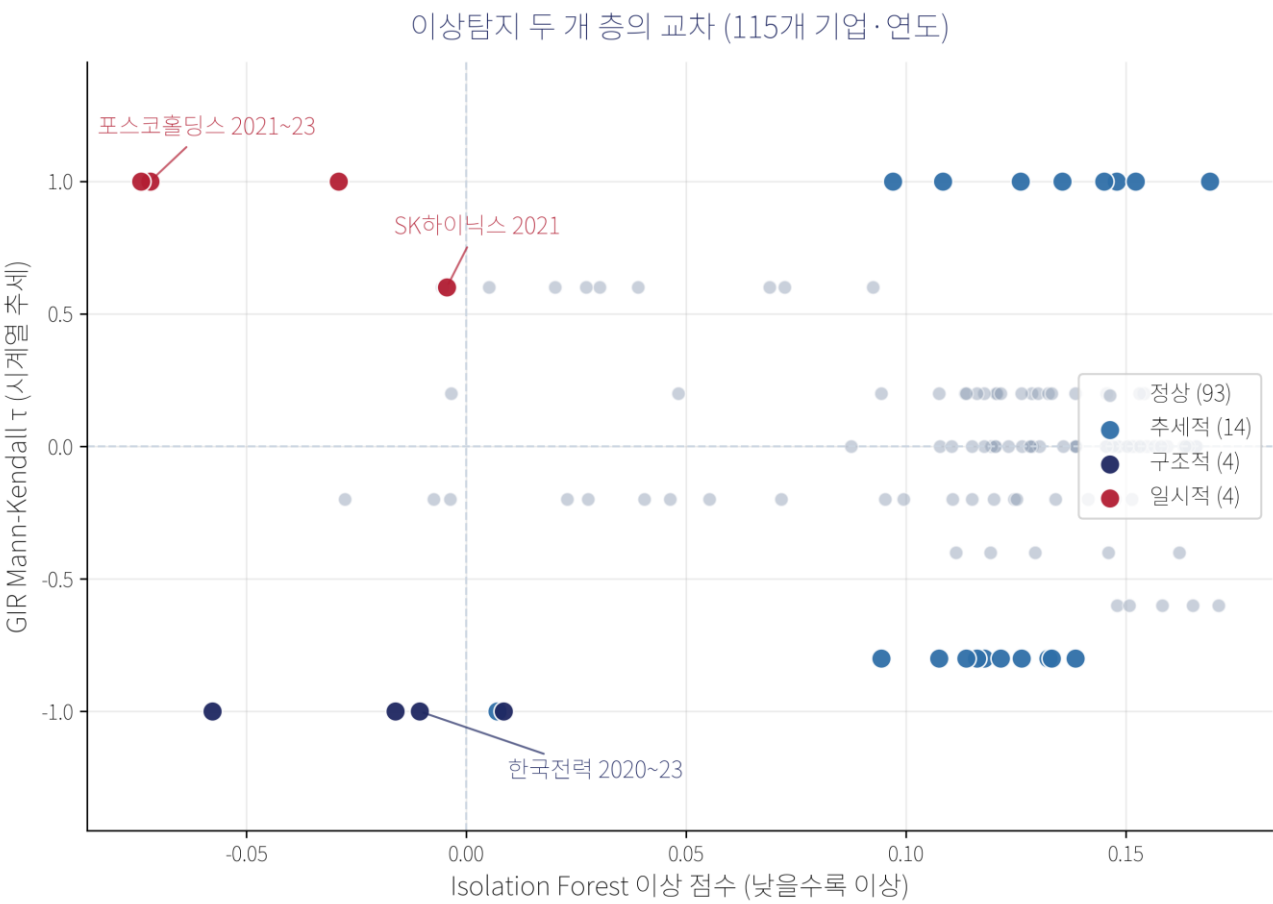


그림 20. 상위 배출 6개사 다중 패널. 동일 자료.

8 이상탐지 3층 앙상블의 분류 결과



등급	정의	건수	대표 사례
구조적	1층과 2층 동시	4	한국전력 2020~23
추세적	2층(방향 불일치)만	14	복수 기업·연도
일시적	1층(단면)만	4	포스코 3년, SK하이닉스 2021
정상	해당 없음	93	채널 정합 다수

한국전력의 4년 연속 구조적 이상은 단일 기업으로 표본 절대값을 압도하는 규모 효과에 기인하며, 공시 신뢰성의 문제로 직접 해석되지 않음을 명시함. 이 해석 유보(caveat)를 분류 결과에 함께 기재하는 것이 본 체계의 운영 원칙임.

패턴 분류와 독립적인 방법이 같은 기업을 다시 지목하였고, contamination 전 구간에서 핵심 기업의 분류는 변동이 없었으며, KCGS 라벨 기준 정밀도는 0.71에서 최대화되어 시장의 평가 조정과도 정합함.

그림 21. 단면 이상 점수와 시계열 추세의 교차 분포

9

모형 정확도의 종합

- 분석을 구성하는 각 모형의 정확도 지표를 한 표로 종합함. 기상보정의 설명력은 국제 문헌과 동일 범위이고, 이상탐지의 교차검증 성능과 외부 라벨 정밀도, 회귀의 기업 내 설명력이 모두 보고 기준을 충족함. 각 지표는 서로 다른 모형의 것이므로 단일 성능으로 합산하지 않고 개별 보고함.

모형	지표	값	해석
ERA5 기상보정 회귀	결정계수 R ² (4성분)	0.67 ~ 0.94	Fioletov 외(2025) 261개 도시 결과와 동일 범위
MERRA-2 민감도 검증	결정계수 R ² (4성분)	0.64 ~ 0.91	모델 교체 시 순위와 패턴 식별 유지
이상탐지 (RF 기반)	5-fold 교차검증 AUC	0.86	단면 이상 분류의 판별력 확보
이상탐지 외부 검증	KCGS 21건 라벨 정밀도	0.71	contamination 0.10에서 최대화
Heckman 2단계 회귀	기업 내(within) R ²	0.41	패널 내 변동의 설명력

이 지표들의 공개는 결과 유의성의 입증을 넘어선 의미를 가진다.
2028년 첫 실공시가 공표되는 순간, 본 체계의 예측이 타당했는지를 사후 검증(retrospective validation)할 수 있는 기준선을 오늘 미리 설정 가능

10 선택편향 통제 회귀와 통계적 유의성

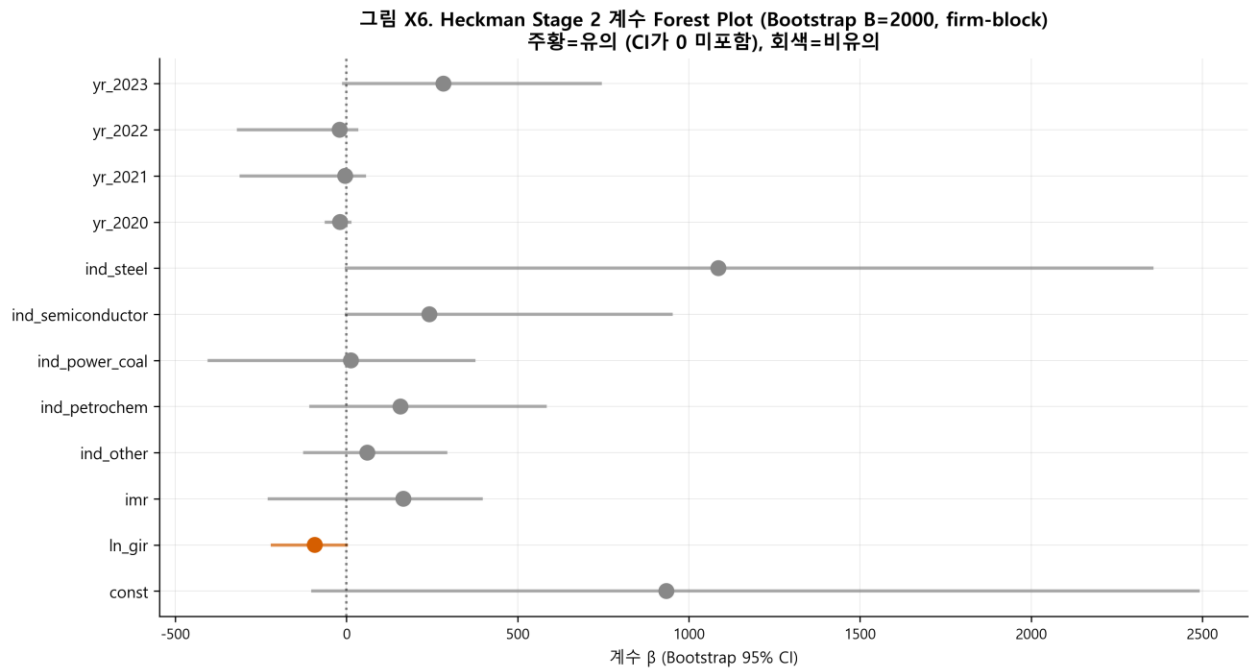


그림 22. 회귀계수 forest plot (Bootstrap 95% CI). 자료: heckman_results.csv

변수	β	SE	Bootstrap 95% CI	판정
상수	+934.34	625.85	[-98.05, +2,488.08]	n.s.
In(GIR Scope 1)	-92.64	54.35	[-216.31, -0.13]	유의*
역밀스비 (IMR)	+166.19	124.52	[-225.92, +392.87]	n.s.
산업: 철강	+1,086.28	594.82	[-0.00, +2,352.60]	경계
산업: 반도체	+242.09	202.60	[-0.04, +947.97]	경계
연도: 2023	+283.14	250.81	[-8.39, +741.53]	경계

규모 계수의 신뢰구간이 0을 포함하지 않아 가설 H1이 지지됨(N=104). 배출 규모가 클수록 괴리가 작다는 방향은 강제 검증을 받는 대형 배출자의 산정 정확도가 체계적으로 높음을 의미함. 이는 검증이 실제로 품질을 만든다는 증거이자, 의무화를 어디까지 확대할 것인가라는 임계값 설계 질문에 대한 정량적 답임. 패턴군 차이는 Kruskal-Wallis H 17.42(p<0.01), Dunn 사후비교에서 D(0.46)가 A ↓ (0.21)보다 유의하게 높으며, D의 부호 불일치 100%는 Fisher 정확검정 p 0.018로 유의함. 소표본 특성상 방향만 해석함.

- 이상 판정의 근거를 변수 단위로 분해함. 전역 분해(좌)에서 기여도는 기상보정 NO₂, 로그 배출량, 괴리율, 보정 SO₂, ODIAC의 순으로, 패턴 D 식별의 결정적 특성이 위성과 ODIAC 잔차임이 정량적으로 확인됨. 이상 점수 1위 사례의 개별 분해(우)에서는 위성 신호의 하강과 공시 규모의 상승이 동시에 점수를 끌어올렸음이 보임.
- 입력 8변수는 로그 배출량, 위성 4종 잔차, ODIAC, 경계층고, 에너지 사용량이며, 개입적 방식을 채택해 변수 간 상관에 따른 기여도 왜곡을 통제함. 검증 인력이 특정 기업을 우선하는 이유를 즉시 설명할 수 있어야 한다는 행정적 요구에 대응하는 장치임.

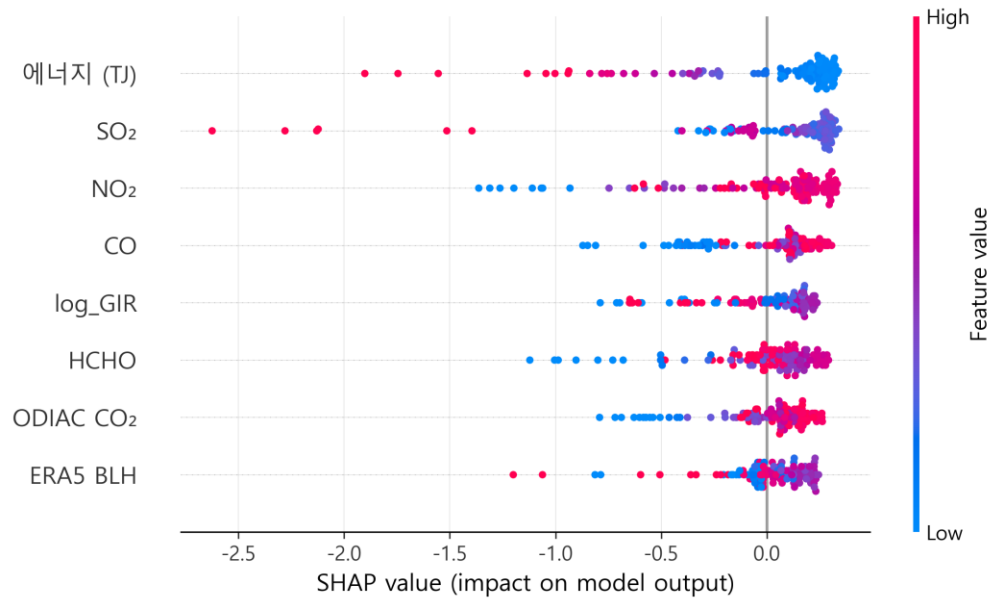


그림 23. SHAP 전역 beeswarm

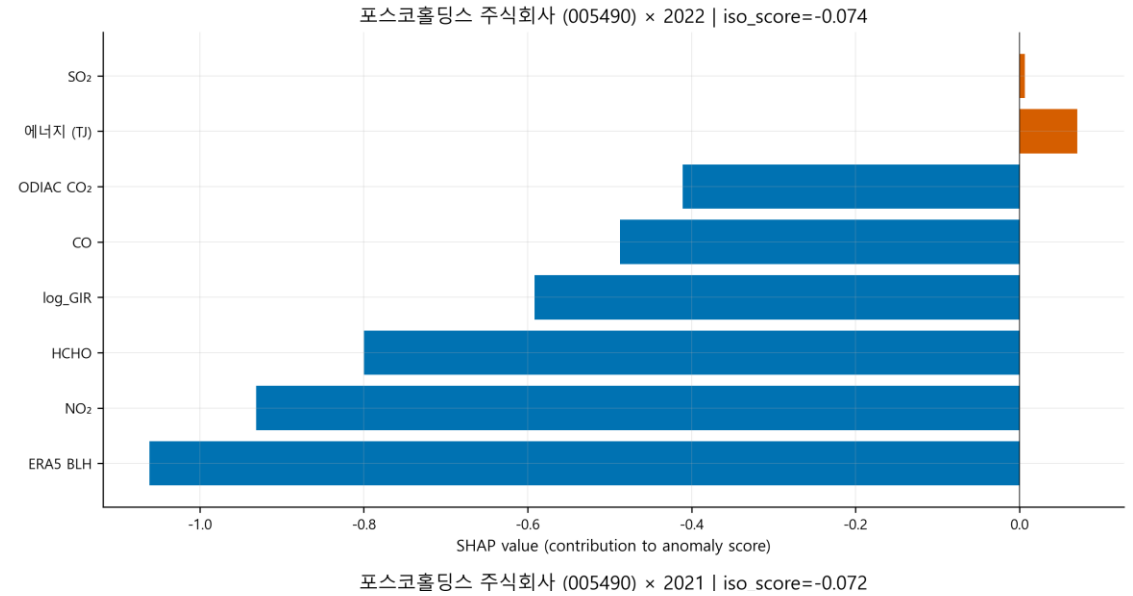


그림 24. 이상 점수 1위 사례의 waterfall 분해

12 검증 우선순위, 분석 결과의 행정 입력값 전환

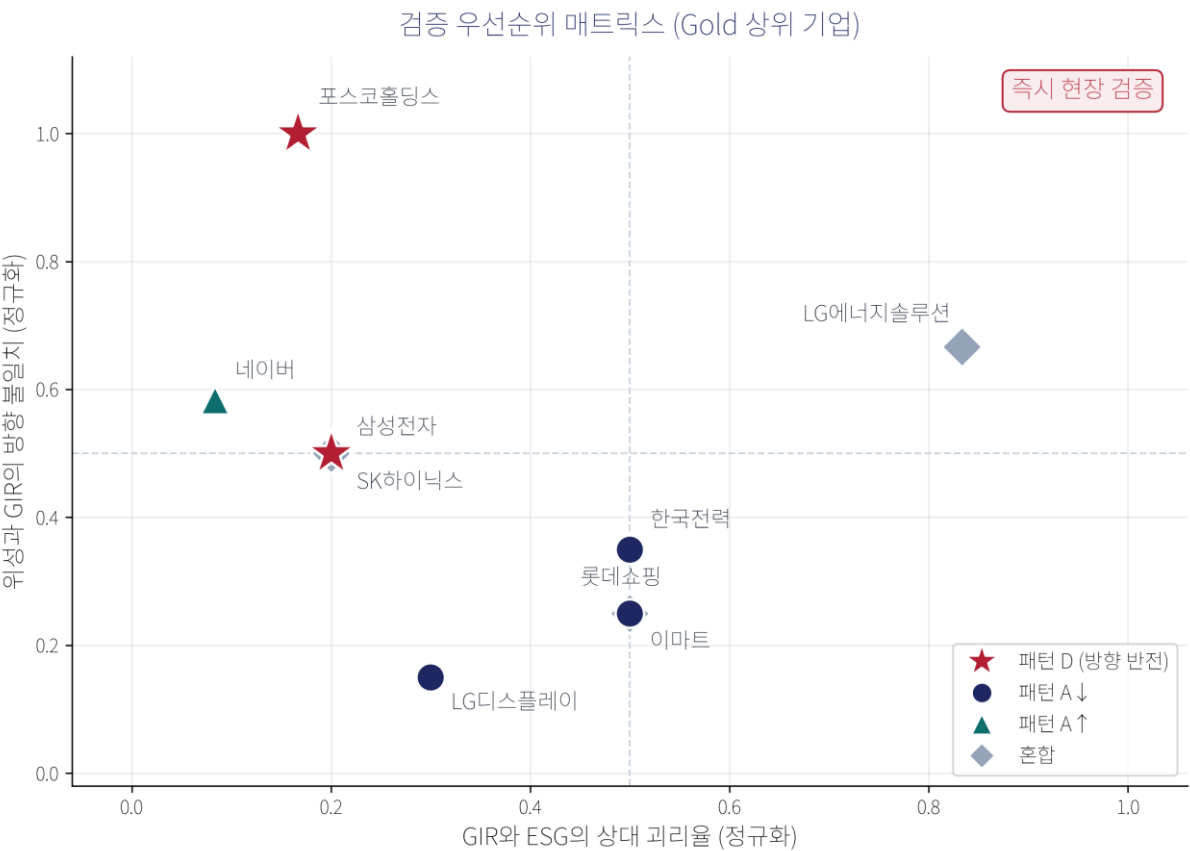


그림 25. 검증 우선순위 매트릭스

순위	기업	점수	패턴·등급
1	한국전력공사	0.54	A ↓ , 구조적 (재분류)
2	포스코홀딩스	0.47	D, 일시적 (1순위 검증)
3	LG에너지솔루션	0.40	mixed, 추세적
4	네이버	0.40	A ↑ , 추세적
5	CJ제일제당	0.38	mixed, 추세적

우선순위 점수는 괴리율 0.4, 위성 불일치 0.4, 이상등급 0.2의 가중합으로 사전 등록함.
1위 한국전력은 규모 효과로 재분류하여 실질 1순위는 포스코홀딩스이며, 동일 산식이 49개사 전체에 8시간 이내로 확장됨. 이 한 장에서 분석의 끝과 행정의 시작이 맞닿음.
통계적 발견이 검증 일정과 자원 배분이라는 실무 언어로 번역되는 지점이며, 본 연구가 분석을 넘어 체계의 설계임을 보여주는 산출물임.

- 발견 1. 제도가 작동하는 다수와 사각지대의 소수가 공존한다

- 23개사 중 12개사가 네 채널 일관 하강을 보여, 미세먼지 종합대책과 배출권거래제의 효과가 기업의 보고가 아니라 독립 위성 관측으로 확인되었다. 바로 그 정합의 배경 위에서 방향 반전 2개사가 통계적으로 도드라진다. 즉 본 결과의 분포 자체가 현행 검증 체계의 작동과 사각지대를 동시에 보여주는 제도 평가다.

- 발견 2. 방향 반전은 특정 기업의 문제가 아니라 구조의 결함이다

- 포스코홀딩스의 공시-물리 완전 역전(τ +1.00 대 -1.00)은 정당한 사유로 설명될 수도 있다. 그러나 핵심은, 대조표 없는 공시 체계가 이런 신호를 5년간 누구도 검토하지 않은 채 통과시켰다는 사실이다. 검증 절차가 있었다면 반드시 포착되었어야 할 신호가 포착되지 않았다는 것, 이것이 본 연구가 제도 설계로 답하려는 문제다.

- 발견 3. 통계적 발견은 행정 자원 배분으로 번역된다

- 규모가 클수록 괴리가 작다는 회귀 결과는 강제 검증이 공시 품질을 만든다는 증거이자 의무화 임계값 설계의 근거다. 우선순위 점수는 이 발견을 49개사의 검증 일정으로 전환하여, 분석이 그 자체로 행정 입력값이 되게 한다.

13

강건성 검증과 연구의 한계

검증 축	내용	결과
기상모델 교체	ERA5를 MERRA-2로 전면 대체	패턴 D 2개사, 구조적 이상 4건 분류 불변
파싱 신뢰도	ESG 저신뢰(LOW) 14건 제외 재분석	핵심 결과 유지
표본 정의	Silver 205개사, Bronze 600개사 비교군 대조	동일한 방향성 확인
판정 임계값	Mann-Kendall 기준 0.2 / 0.4 / 0.6 변경	패턴 D 분류는 0.6에서도 유지
공간 버퍼	위성 추출 반경 5 / 10 / 15 km 변경	산업시설 5개사 신호 안정

– 한계의 명시와 해석의 절제

- 본사 좌표 18개사의 위성 신호는 도시 배경과 혼재되므로 해석을 보수적으로 한정함. 핵심 발견 기업은 모두 산업시설 좌표 신뢰군에 속함. 소표본의 넓은 신뢰구간에는 계수 크기 해석의 자제와 Bootstrap 병기로 대응하고, 방향 반전의 원인은 세 경쟁가설 중 어느 것으로도 단정하지 않음.
- 검증 설계의 원리는 서로 다른 다섯 가정, 곧 기상 입력, 데이터 품질, 표본 구성, 판정 기준, 공간 정의를 각각 독립적으로 흔드는 것임. 하나의 결과가 다섯 방향의 공격을 모두 견딜 때 비로소 발견이라 부를 수 있음.

05. 결론 및 활용

1

업종별 배출 궤적과 기업 이질성

그림 X3. 업종별 GIR Scope 1 5년 추이 (2019-2023)

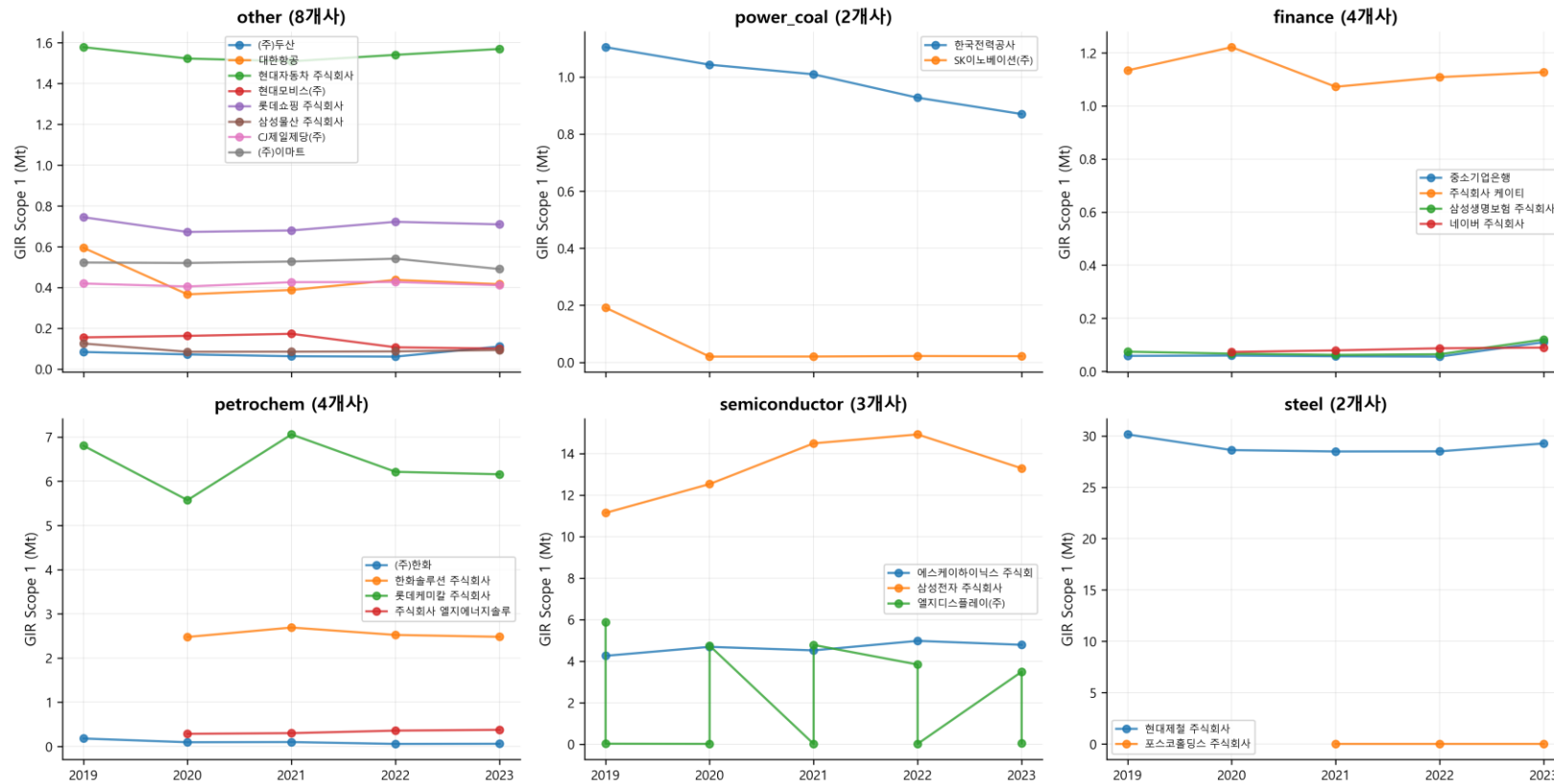


그림 26. 업종별 GIR Scope 1 궤적 (2019~2023).

- 왜 업종을 펼치는가

- 산업 평균은 개별 기업의 신호를 가림. 검증의 단위를 결정하기 전에 산업 내부의 이질성을 직접 확인할 필요가 있음.

- 무엇이 보이는가

- 철강과 발전이 절대 규모에서 표본을 압도하는 가운데, 같은 업종 안에서도 기업별 궤적이 뚜렷하게 갈라짐. 같은 철강의 포스코홀딩스는 방향 반전을, 현대제철은 혼합 패턴을 보임.

- 결론

- 검증 체계는 산업 단위가 아니라 기업 단위로 설계되어야 하며, 본 연구의 우선순위 산식이 기업 단위인 이유임.

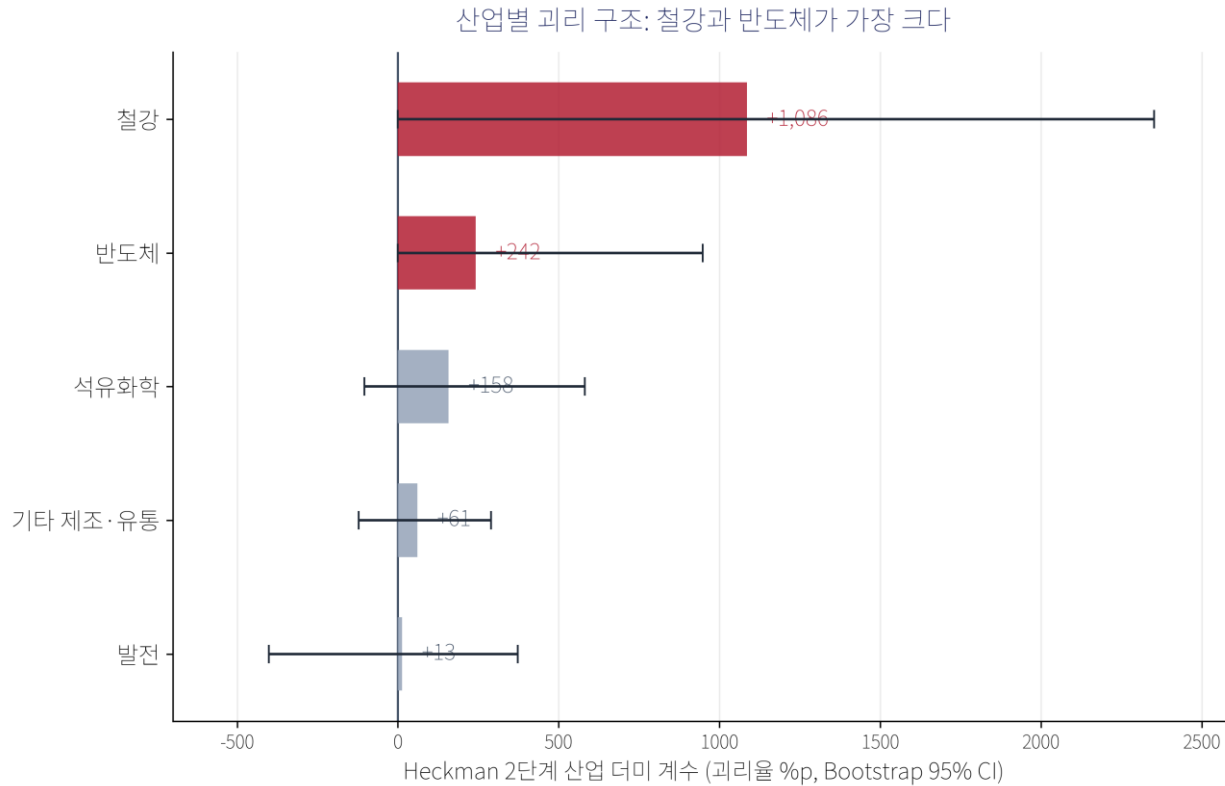


그림 27. 산업 더미 계수 (Bootstrap 95% CI)

- 첫째, 패턴 D는 철강과 반도체에서만 출현하였음. 절대 배출이 크고 지주 전환이나 시설 증설처럼 보고경계를 흔드는 구조 변화가 활발한 산업이며, 선택편향을 통제한 회귀의 산업 계수(철강 +1,086, 반도체 +242)가 가장 큰 두 산업과 정확히 일치함. 서로 독립인 두 분석이 같은 산업을 지목한 것임.
- 둘째, 패턴 C는 현대모비스 1건으로, 보고 범위 확대 시점의 변동성이 유력한 설명임.
- 셋째, 위성 NO₂는 12개사에서 단조 하강하여 산업별 차이보다 공통의 정책 효과가 강함을 보임. 다수의 A ↓는 제도가 작동한다는 증거이기도 함.
- 넷째, 금융·서비스 기업은 Scope 1이 미미하여 4중 비교의 경계 사례임. 의무공시에서 이들 기업의 본질적 의제는 Scope 2와 3의 검증이며, 차기 연구 과제로 명시함.

3

분석 결과의 활용, 세 가지 정책 설계

- 분석은 발견에서 멈추지 않고 제도의 언어로 번역될 때 비로소 완성된다. 본 연구의 산출물 4종, 곧 기업별 괴리율, 위성 방향 일관성 점수, 이상탐지 등급, 우선순위 점수는 별도 가공 없이 행정 입력값으로 전환되며, 이를 제도에 연결하는 세 가지 설계를 제안한다.

제언 1. KEITI 공시 신뢰성 지수 (DRI) 4종 산출물을 단일 지수로 통합하여 KEITI 환경책임투자 플랫폼에 편입함. 투자자는 KCGS 등급과 DRI의 이중 선별로 의사결정하고, 플랫폼은 4종 비교 그래프를 공개하여 시민이 직접 확인하게 함.	제언 2. 현장검증 우선순위 매트릭스 priority score의 자동 산출로 검증 자원을 차등 배분함. 상위 25% 집중 시 패턴 D 추정 기업을 전부 포함하면서 검증 부담을 75% 절감하며, SHAP 분해가 선정 근거를 설명함.	제언 3. KSSB 3단계 검증 프로토콜 공시 시점에 GIR 대조표 첨부과 괴리 20% 초과 시 원인 설명을 의무화하고, 검증 시점에 위성 잔차 데이터베이스 검토를 포함하며, 국제 정합 단계에서 CBAM 신고와의 일관성을 연계함.
---	--	---

트리거 조건	제도적 대응
괴리율 20% 이내, 패턴 B 또는 C	1년 내 자진 수정 허용 (자체 시정 경로)
괴리율 20% 초과 또는 패턴 D	독립 검증기관 지정의 현장 검증
구조적 불일치와 패턴 D의 중첩	공시 보류 후 감사인 의견을 거쳐 재제출

4 What-if 시나리오, 2028년의 세 가지 미래

- 동일한 4중 비교 알고리즘을 KSSB 1차 의무화 대상 49개사로 확장 적용했을 때의 시나리오 3종을 사전 시뮬레이션함. 본 표본의 패턴 D 발생률 8.7%(2/23)를 외삽하면 49개사 중 약 4~5개사가 방향 반전 위험군으로 추정됨.

시나리오	내용	정량 결과
W1 검증 체계 부재	시행령이 GIR 대조와 위성 추세 확인을 요구하지 않는 기준 시나리오. 검증기관은 기업 제출 수치만으로 검증함	패턴 D 추정 4~5개사가 검증 누락 위험에 노출
W2 DRI 도입 (본 연구 채택)	KEITI가 4중 비교를 DRI로 표준화하고 우선순위 상위 25%(약 12개사)에 검증 자원을 집중 배분함	위험군 100% 포함, 검증 부담 75% 절감, 49개사 산출 8시간
W3 글로벌 표준화	시행령 채택 후 ISSB와 CBAM에 양자 정합화. 철강 등 6대 CBAM 분야 수출 기업의 기본계수 적용을 회피함	연 2,000~3,500억 원 탄소 부담 절감 (KOTRA 2024 추정)

세 시나리오의 차이는 알고리즘이 아니라 제도 채택의 유무에서 발생함. 기술적 준비, 곧 공개된 코드와 확장 가능한 산식과 8시간의 컴퓨팅은 이미 완료되어 있음.

5 비용편익 분석과 리스크 대응 설계

편익 채널	산출 근거	연간 추정
검증 자원 효율화	인건비 80만 원 × 5일 × 절감 37개사	1.5억 원
CBAM 대응 절감	6대 분야 수출 기업의 기본계수 적용 회피	2,000~3,500억 원
시장 신뢰 회복	정보 비대칭 축소에 따른 책임투자 유입 (국민연금 가이드라인 기준)	5,000억~1조 원
행정 자동화	49개사 분석 자동화에 따른 인건비 절감	약 1억 원

비용은 DRI 모듈 개발 약 5억 원과 위성 인프라 약 3억 원의 초기 투자 9억 원에 연간 운영 약 1억 원으로, 편익 대비 비용 비율은 압도적이며 초기 투자 회수 기간은 1주일 미만으로 추정됨.

- 도입을 막을 수 있는 질문들에 미리 답해 둬
- 기업의 평판 우려에 대하여는 그린워싱을 단정하지 않는 보고 원칙과, 정당한 사유를 공시하면 우선순위에서 제외되는 자체 시정 경로로 답함.
 - 시민사회의 즉각 공개 요구에 대하여는 플랫폼에 산업 분포와 패턴 통계만 공개하고 기업 단위 결과는 검증기관에 비공개 전달하는 단계적 공개로 답함.
 - 위성 자료의 법적 증거능력 한계에 대하여는 활용 범위를 현장 검증 우선순위의 보조 자료로 한정하고, 행정 처분은 명세서 재산정과 현장 검증에 근거하도록 설계하여 답함.

- 발견

- 기업 단위 4중 검증을 통하여 공시 상승과 물리 관측 하강의 방향 반전 2개사를 정량적으로 식별함. 포스코홀딩스는 $\tau +1.00$ 대 -1.00 의 완전 역전이며, 사전 등록한 가설 네 개가 모두 임계값을 충족함.

- 방법론

- ERA5 기상보정, 4중 Mann-Kendall, 3중 부분지도 이상탐지, Heckman 선택편향 통제, SHAP 설명가능성을 재현 가능한 단일 파이프라인으로 결합함. 모든 확률적 절차의 시드가 고정되어 비트 단위 재현이 가능함.

- 정책 직결성

- 표본이 KSSB 2028년 1차 의무화 대상과 일치하므로 DRI, 우선순위 매트릭스, 3단계 검증 프로토콜이 즉시 적용 가능하며, What-if 시뮬레이션으로 도입 효과를 정량화함.

- 영구 시스템

- ESG 수집과 파싱의 자동화 파이프라인과 전체 코드를 공개하여 일회성 분석이 아닌 인프라로 남김.

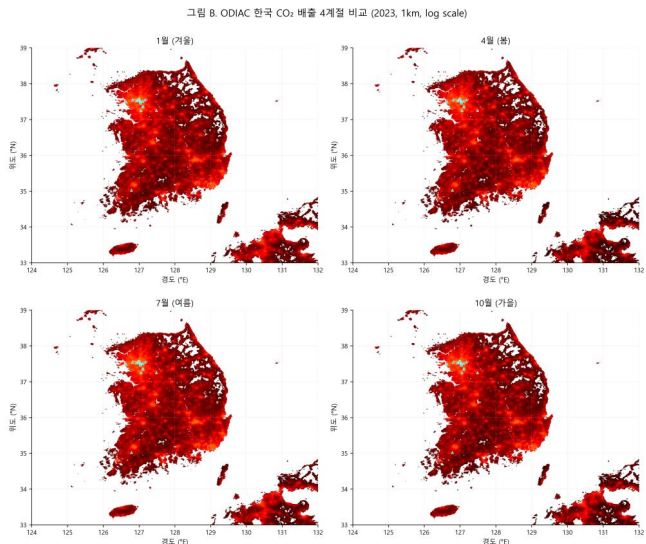
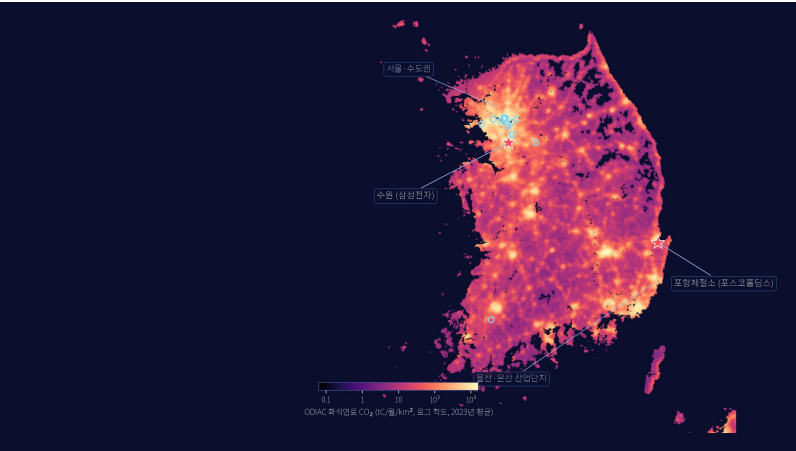
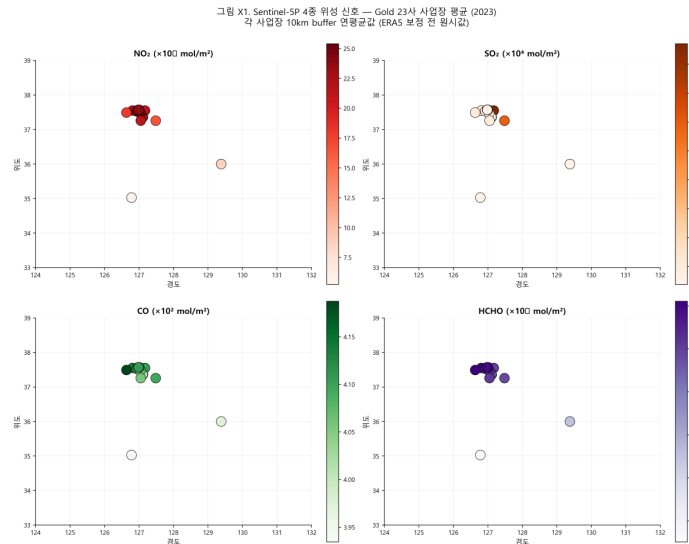
공시의 신뢰는 선언이 아니라 교차 검증에서 확보된다. 하늘의 관측은 이미 준비되어 있었고, 본 연구는 그것을 제도의 언어로 번역하였다. 2028년 첫 의무 공시의 숫자를 믿어도 되는가라는 질문에, 이제 데이터로 답할 수 있다.

부록. Gold 23개사 4채널 Mann-Kendall τ 전수표

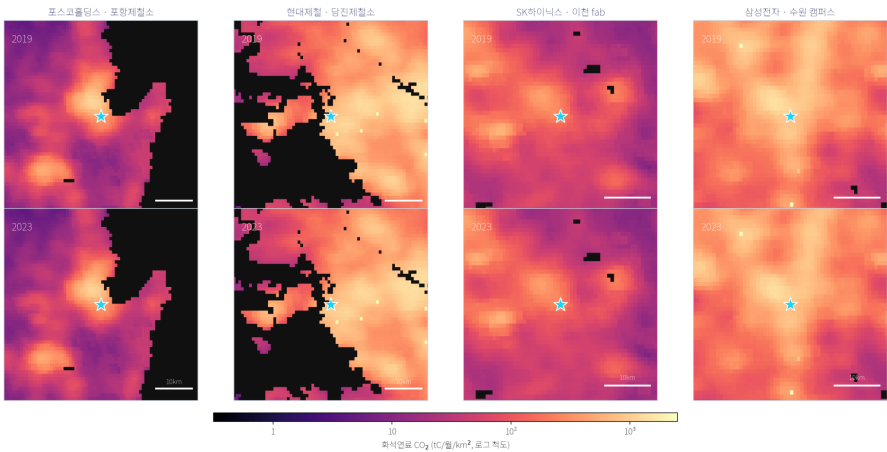
종목코드	기업명	산업	GIR τ	ESG τ	NO ₂ τ	ODIAC τ	패턴	priority
005490	POSCO홀딩스	철강	+1.00	+0.67	-1.00	-1.00	D	0.47
005930	삼성전자	반도체	+0.60	+1.00	-0.40	-0.40	D	0.32
012330	현대모비스	자동차부품	-0.40	+0.40	-0.60	-0.20	C	0.28
035420	네이버	ICT	+1.00	+0.83	0.00	+0.20	A ↑	0.40
015760	한국전력공사	발전	-1.00	-0.83	-0.60	-0.40	A ↓	0.54
004020	현대제철	철강	-0.20	-0.20	+0.20	-0.40	mixed	0.22
096770	SK이노베이션	정유	0.00	-0.40	-0.60	-0.40	mixed	0.18
373220	LG에너지솔루션	이차전지	+1.00	+0.50	-0.33	-0.33	mixed	0.40
011170	롯데케미칼	화학	-0.40	-0.40	-0.60	-0.40	A ↓	0.16
009830	한화솔루션	화학	-0.20	+0.40	-0.33	-0.33	mixed	0.21
000880	한화	화학	-0.40	-0.20	-0.60	-0.40	A ↓	0.18
000660	SK하이닉스	반도체	+0.60	+0.60	-0.40	-0.20	mixed	0.28
034220	LG디스플레이	디스플레이	-0.80	-0.40	-0.60	-0.40	A ↓	0.20
005380	현대자동차	자동차	0.00	+0.20	-0.60	-0.40	A ↓	0.19
003490	대한항공	항공	-0.40	+0.80	-0.40	-0.20	mixed	0.24
028260	삼성물산	건설	+0.20	+0.20	-0.60	-0.20	mixed	0.22
000150	두산	지주	-0.60	-0.40	-0.60	-0.20	A ↓	0.16
097950	CJ제일제당	식품	+0.20	-0.20	-0.60	-0.20	A ↓	0.38
023530	롯데쇼핑	유통	-0.20	+1.00	-0.60	-0.20	mixed	0.31
139480	이마트	유통	-0.40	-0.20	-0.60	-0.20	A ↓	0.15
032830	삼성생명	보험	0.00	-0.20	-0.60	0.00	A ↓	0.13
024110	중소기업은행	은행	해당없음	해당없음	-0.40	0.00	A ↓	0.10
030200	KT	통신	-0.20	해당없음	-0.40	0.00	A ↓	0.12

강조 행은 패턴 D, C, A ↑ 사례. priority score = 0.4×|과리율| + 0.4×|위성 불일치| + 0.2×이상등급. 신뢰구간은 보조파일(mk_tau_bootstrap_ci.csv)에 수록. 자료: 제출 보고서 부록 A.

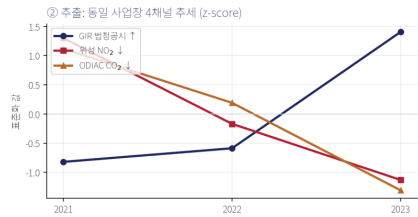
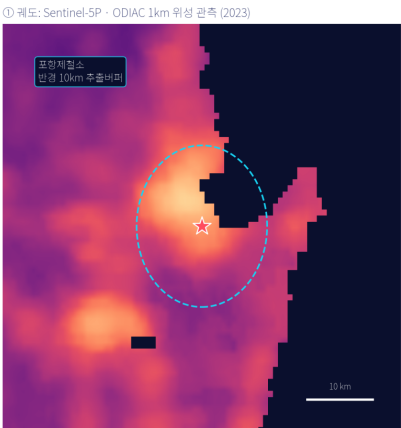
부록. 본 연구가 직접 처리한 위성·공간 자산



최첨단 위성 기반 사업장별 CO₂ 배출 검증 — ODIAC 1km 해상도, 2019년 대비 2023년



위성 궤도에서 공식 검증 판정까지 — 포스코홀딩스 검증 파이프라인



③ 판정: 공식-물리 방향 반전 (패턴 D)

GIR 법정공시	$\tau = +1.00$	상승
ESG 자체보고	$\tau = +0.67$	상승
위성 NO ₂	$\tau = -1.00$	하강
ODIAC CO ₂	$\tau = -1.00$	하강

공시는 상승, 독립 관측은 하강 → 최우선 검증 신호

Sentinel-5P 4종 1,380 사이트월, ODIAC v2024 60개월 1km 래스터, 4개 산업시설 확대 검증, 궤도-판정 파이프라인까지. 모든 위성 영상은 공개 데이터를 본 연구가 직접 처리한 산출물임.

감사합니다

공개 저장소 github.com/zxsa0716/AX_Contest (MIT License, 코드·데이터 명세·의사결정 기록 4건, 전 분석 재현 가능)

부록 자료 제출 보고서 11장과 부록 6종, 상세 발표덱 5종 75장, 슬라이드별 발표 대본, 예상 질의 10건 답변

팀 Save Earth | 최희도 | zxsa0716@kookmin.ac.kr