

# [기술보고서] AI 기반 지능형 온실가스 통합관리 플랫폼

## 1. 플랫폼 개요 및 개발 목적, 전략적 가치

본 플랫폼은 부산광역시 산하 23개 환경 기초시설에서 발생하는 온실가스 데이터를 통합 관리하기 위해 개발되었습니다. 기존 비효율적 수기 관리 체계를 AI 기반의 자동화 시스템으로 전환하여 행정 생산성을 극대화하고, 데이터 기반의 탄소중립 의사결정 체계를 구축하는 데 그 목적이 있습니다.

- 개발배경 : 23개 사업장의 엑셀 수기 관리로 인한 데이터 파편화 및 행정 비효율 해결
- 개발목표 : 실시간 통합 대시보드 전환을 통한 탄소중립 DX 및 의사결정 지능화
- 대상범위 : 소각, 하수처리, 매립 등 23개 환경기초시설
- 핵심가치 : 업무 자동화(DX), 선제적 리스크 관리, 지자체 탄소중립 데이터 주권 확보
- 핵심지표 : 부산시 목표 달성률, 경영평가 배점(0.4점), 배출권 할당량 수지 분석
- 핵심기술 : State Machine 기반의 데이터 추출, 계절성을 반영한 보수적 예측 알고리즘, Sovereign AI 아키텍처

## 2. 기술 아키텍처 및 데이터 흐름 (System Architecture)

보안이 엄격한 공공기관 특수성을 고려하여, 외부 클라우드 의존 없이 내부 인프라에서 독립적으로 구동되는 Sovereign AI 모델을 채택했습니다.

### 2.1. 기술 아키텍처

- Frontend (React19 + TypeScript) : 최신 React 프레임워크 사용으로 대규모 환경 지표를 실시간으로 렌더링하고, 사용자 친화적인 드래그 앤 드롭 인터페이스를 제공합니다.
- Backend (Flask + Python) : 고성능 정규표현식 엔진과 데이터 분석 라이브러리 결합으로 복잡한 환경 데이터를 처리합니다.
- Database (SQLite) : WAL(Write-Ahead Logging) 모드를 적용하여 데이터 일관성과 처리 속도를 확보했으며, 포터블 파일 구조로 데이터 이동성을 높였습니다.
- Deployment (Zero-Install) : PyInstaller를 활용한 EXE 패키징으로 망 분리 환경에서도 별도 설치 없이 USB만으로 구동 가능한 환경을 구현했습니다.

### 2.2. 데이터 흐름도

- ① Input : 사용자 기반 다중 엑셀 파일 드래그 앤 드롭 업로드
- ② Processing : Flask 백엔드의 Section-Restricted State Machine이 비정형 데이터를 실시간 정형화
- ③ Storage : SQLite (WAL Mode)를 통해 동시성 제어 및 데이터 무결성 확보
- ④ Analysis : AI 분석 엔진이 통계적 이상치 탐지 및 보수적 예측값 산출
- ⑤ Output : React19 기반 고해상도 시각화 대시보드 및 단일 HTML 독립 보고서 생성

### 3. 핵심 알고리즘 및 AI 모델 상세

#### 3.1. State Machine 기반 비정형 데이터 추출 엔진

규격화되지 않은 23개 사업장의 엑셀 데이터를 정밀하게 수집하기 위해 상태 머신(State Machine) 파싱 기술을 적용했습니다.

- 상태 전이 로직 : 헤더 발견 전까지 탐색 모드를 유지하며, 헤더 포착 시 플래그를 활성화하여 추출 모드로 전환합니다.
- 동적 유닛 병합 : 정규표현식을 사용하여 동일 지표 내에 1호기, 2호기 등으로 분산된 데이터를 실시간으로 식별하고 하나의 시설 지표로 자동 합산합니다.
- 유니코드 정규화 : 특수문자를 일반 텍스트로 정규화하여 매핑 오류를 사전에 차단합니다.

#### 3.2. 계절성 가중치 반영 보수적 예측 모델

단순 산술 평균의 오류를 극복하기 위해 환경 시설 운영 특성을 반영한 보수적 예측 모델을 구축했습니다.

- 가중치 로직 : 누적 평균 배출량에 1.04의 보수적 가중치를 적용하여 에너지 소비가 급증하는 동·하절기 피크 타임 리스크를 반영합니다.

연말 예상 배출량 산정식	설 명
$E_{pred} = \left( \frac{\sum E_{curr}}{M_{count}} \right) \times 12.48$	12.48은 12개월에 1.04의 가중치를 적용한 수치로, 계절별 피크 부하를 고려한 보수적 추정치입니다.

- 계절성 패턴 분배 : 남은 월의 예측치를 배정할 때 전년도 해당 월의 배출 비중을 분석하여 현재 데이터에 동적으로 투영합니다.

연말 예상 배출량 산정식	설 명
$E_{future} = E_{remain} \times \left( \frac{E_{prev\_month}}{\sum E_{prev\_future\_months}} \right)$	남은 예상량을 전년도 해당 월의 배출 패턴 비율에 맞춰 분배하여 현실적인 추이선을 제공합니다.

#### 3.3. 지능형 이상치 탐지 및 리스크 관리

- 통계적 이상 탐지 : 전년 동월 대비 급증 또는 급감 시 '위험/주의' 카드를 자동 생성하여 현장 점검의 우선순위를 결정하는 근거가 됩니다.
- 자연어 생성 브리핑 : 단순 수치 나열이 아닌, 핵심 KPI를 인간의 언어로 재구성하여 대시보드 상단에 실시간으로 브리핑합니다.
- 주요 변동 요인 분석 : 전사 배출량 변화에 가장 큰 영향을 미친 특정 사업장과 배출원(Scope)을 문장 내에 포함하여 의사결정의 신속성을 높입니다.

#### 4. 주요 모듈별 상세 기능

모듈명	핵심 기능 및 시각화 요소
통합 관리실	AI 대시보드 브리핑, YoY 비교 차트, 전사적 배출 순위, 이상치 알림 카드
부산시 목표	기준연도(2018) 대비 감축률 게이지, 실시간 목표 달성 시뮬레이션
경영평가 지표	행정안전부 평가 기준 자동 산정 및 시각화 게이지
배출권 할당량	배출권거래제 기반 추가 할당 및 취소량 자동 예측, 사업장별 소진율 관리
사업장 분석	각 사업장의 배출원별 스택 차트, 성상별 소각량 및 하수처리 운영지표 정밀 분석
데이터 업로드	연도별 드롭존을 통한 멀티파일 자동 매핑 및 실시간 연동 상태 표시

#### 5. 정량적 혁신 성과 및 사회적 가치

- 행정 효율성 : 기존 수기 취합 시 수일이 소요되던 프로세스를 10초 이내로 단축(99% 이상 단축)했습니다.
- 예산 절감 : 외부 솔루션 용역 없이 인하우스 개발을 통해 구축 비용을 절감하고, 국가 공인 프로그램 저작권을 확보하여 기관의 디지털 자산을 생성했습니다.
- 법적 자산화 : 한국저작권위원회 프로그램 저작권 등록을 통한 공용 소프트웨어 지위를 확보하였습니다.(제C-2026-017307호)
- 확산성 : 현재 부산광역시 전체 배출권거래제 통합 관리 플랫폼으로의 확산을 추진 중이며, 전국의 지자체 표준 모델로 활용 가능합니다.

#### 6. 결론 및 향후 계획

본 플랫폼은 공공부문 실무자가 현장의 문제를 기술로 직접 해결한 탄소중립 DX의 모범 사례입니다. 향후 부산광역시 전체 시설로의 확산과 더불어, 인공지능 기반의 운영 최적화 가이드를 제공하는 지능형 환경 행정 시스템으로 고도화할 계획입니다.