



# 디지털 트윈을 활용한 스마트 팩토리 에너지 효율화 모델링 및 플랫폼 개발

Development of Energy Efficiency Modeling and Platform  
for Smart Factories Using Digital Twin

캡스톤 디자인 I 최종발표

팀명 : **EcoNOVA**  
팀원 : 박선아, 서지윤  
지도교수 : 이상금  
발표자: 서지윤  
발표일: 2025.06.11

#Digital Twin  
#Smart Factory  
#Optimization  
#Artificial Intelligence  
#Big Data  
#Web  
#Real-Time Monitoring



# CONTENTS

**01** 목표 및 개요

**05** 설계 및 문제 해결 방법

**02** 전체 시스템 구성도

**06** 팀원의 역할

**03** 주요 기능

**07** 데모

**04** 시스템 성능

**08** 질의 응답

# Objectives & Overview

## 목표 및 개요

---



## 연구 배경

### 기온 상승

2025년 1월, 전 지구 평균기온은 산업화 이전 대비 **1.75°C** 상승(C3S<sup>1)</sup>).

### 지구 온난화 가속화

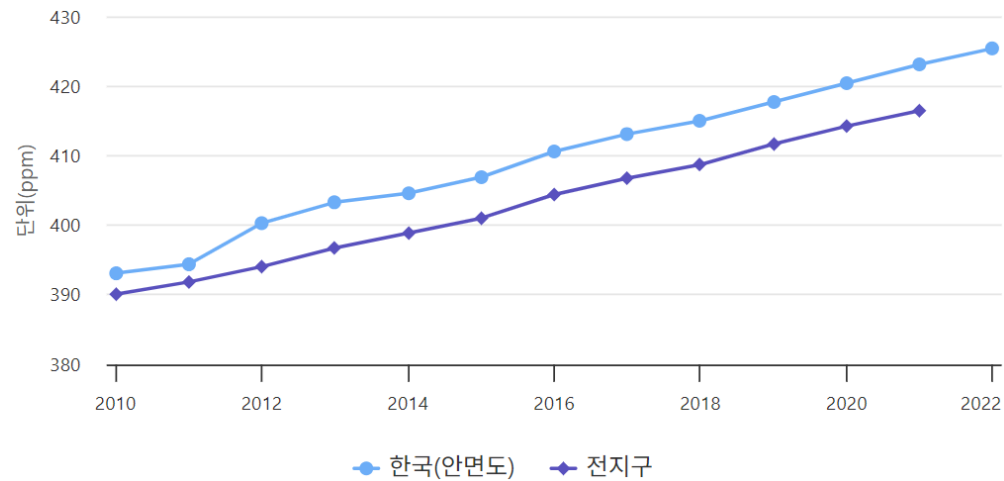
산업화 이후 이산화탄소 배출 증가로 지구 온난화 현상은 더욱 가속화.

### 자본·에너지 다소비 산업

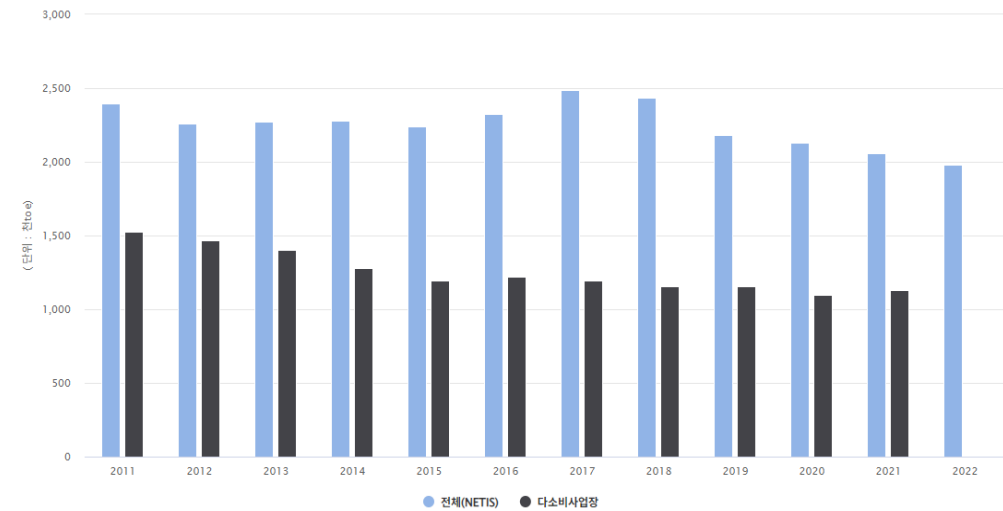
철강, 석유, 요업과 함께 **6대 다소비 업종** 중 하나.

### 에너지 효율화 필요

제지 업종의 연도별 에너지 사용 추이가 꾸준함을 통해 에너지 효율화의 필요성 확인.



출처 : 탄소중립 정책포털



출처 : EG-TIPS 에너지 온실가스 종합정보 플랫폼

1) C3S (Copernicus Climate Change Service): 유럽연합의 기후 변화 데이터 및 분석 서비스.

## 문제인식 및 목표



출처 : 한국제지

### 1. 펄프/계절 기반 최적화

#### 문제인식

- 조성공정 : 펄프 의존도가 높음.  
전기 에너지의 35% 소비.
- 초지공정 : 120-150°C의 고온 스팀 필요.  
전체 에너지의 60% 이상 소비.

#### 해결전략

- 원료 특성, 공정 조건의 복합적 영향 분석.
- 환경요인기반 에너지 소비 패턴 변화 분석.
- 계절 및 공정 변수 간의 상호작용 고려.

### 2. 품질/생산량 기반 최적화

#### 문제인식

- 전력 데이터의 부재.
- 에너지 효율 평가를 위한 지표 필요.
- 생산량 사용시 초반의 불안정성 확인.

#### 해결전략

- 초반부 품질의 불안정성 파악.
- 품질에 따른 생산량 도출 필요.
- 품질, 생산성, 에너지 효율을 동시에 고려.

### 목표

- 펄프 배합비와 환경, 공정 변수 기반 스팀 사용량 분석 및 최적화 전략 수립
- 공정 데이터 기반 다목적 최적화 함수 설계 및 강화학습 기반 운전 시나리오 도출
- 스팀 에너지 절감과 품질, 생산성을 동시에 고려한 에너지 효율화 전략 수립

## 데이터 설명

데이터 기간

2022년 1월 1일 ~ 12월 31일 (1년간)

1분 단위로 수집된 시계열 데이터

데이터 크기

481,311개 행

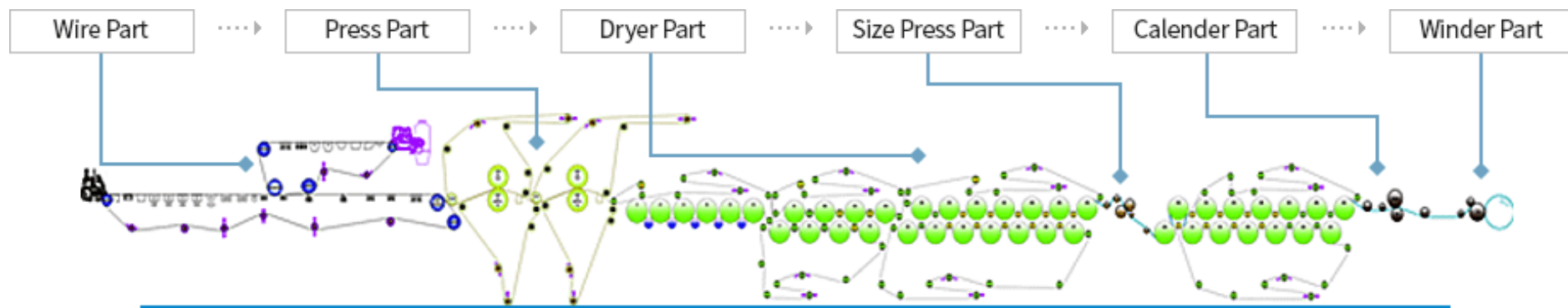
2061개 열

주요 태그

장비 센서 데이터

에너지 관련 데이터 → 출처 불분명

※ 본 데이터는 기업의 실증 데이터로서, 보안 및 기밀 유지 정책에 따라 정확한 변수명을 공개할 수 없는 점 양해 부탁드립니다.



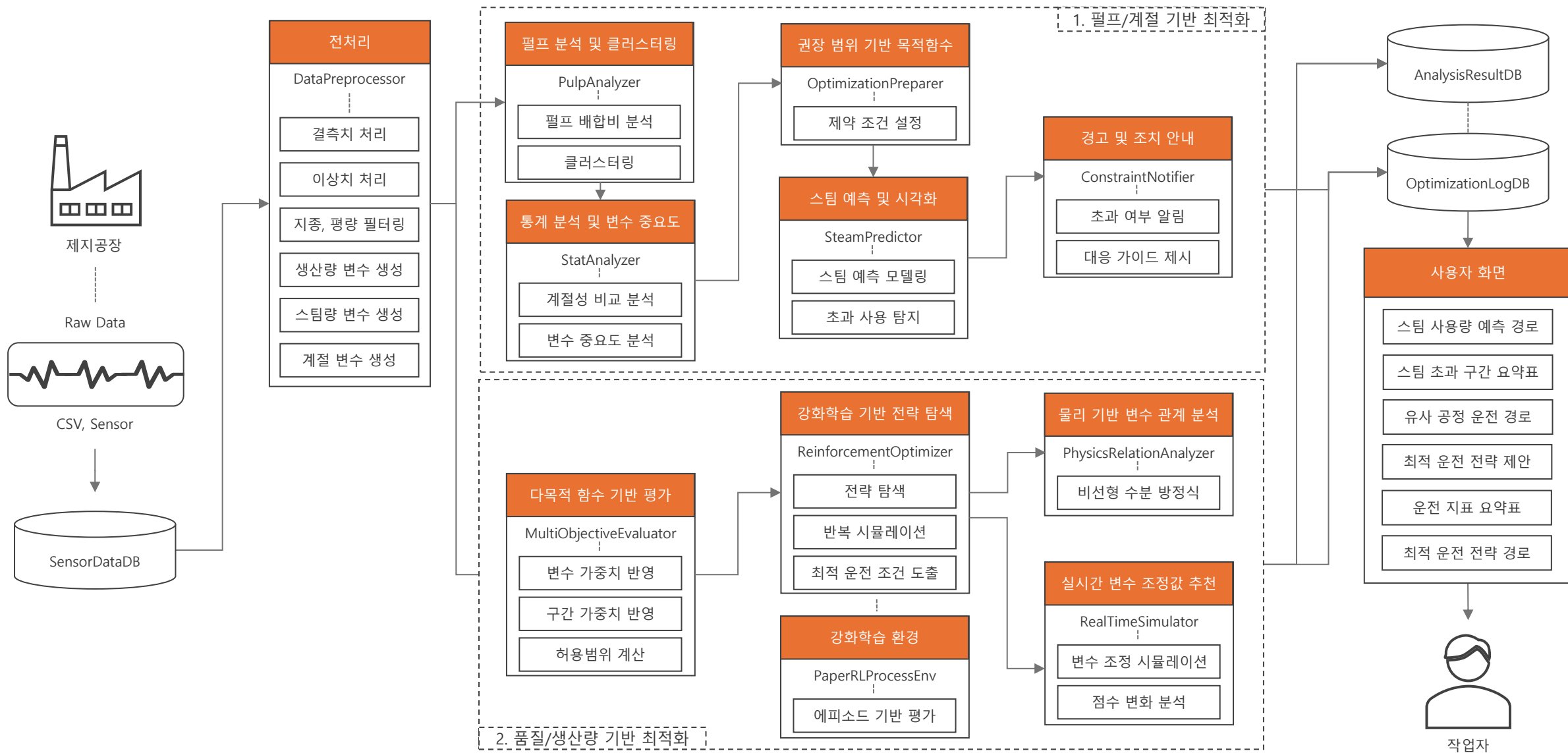
## Overall System Architecture

# 전체 시스템 구성도

---

2

# 전체 시스템 구성도





## Main Functions 주요 기능

---

3

# 1. 펄프/계절 기반 최적화

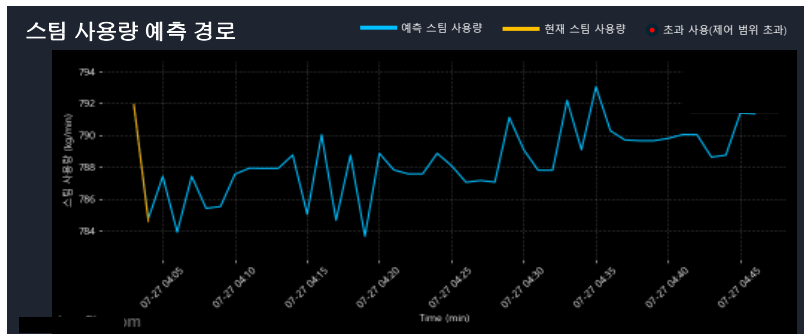
## ● 1. 스팀 사용량 예측 모니터링 기능

### 기능 설명

- 현재 운전 중인 공정 데이터를 기반으로 스팀 사용량을 예측.
- 계절별로 설정된 권장 제어범위를 기준으로, 각 제어변수가 권장 최소/최대 범위를 벗어나는지 판단.
- 실제 스팀 사용량이 예측 스팀 사용량보다 높고, 동시에 제어변수가 권장 범위를 벗어나는 경우 강조 표시.

### 활용 효과

- 공정 운전자가 스팀 과다 사용 시점을 직관적으로 식별 가능.
- 과다 사용 시점에 어떤 제어 변수가 원인인지 추적 가능.
- 예측 및 실제의 비교, 제어범위 초과 정보의 통합으로 효율적 운전 전략 수립 가능.



## ● 2. 스팀 초과 구간 요약 기능

### 기능 설명

- 현재 공정 데이터를 기준으로 스팀 사용량이 예측 스팀 사용량을 초과, 동시에 제어변수가 권장 범위를 초과한 시점의 데이터 제공.
- 해당 시점마다 제어변수 각각에 대한 권장 최소/최대값과 현재값 비교 후 초과 방향(상한/하한), 초과량 계산.
- 해당 시점, 초과 변수, 현재값, 권장값, 초과량을 표 형태로 제공.

### 활용 효과

- '어떤 변수에서 얼마만큼 초과했는지'를 수치로 제시해 운전 조건 조정 시 정확한 기준값 제공.
- 반복적으로 초과 발생하는 제어변수를 파악해 공정 제어 전략 개선에 이용 가능.
- 시점별, 변수별, 초과량 등 상세 정보를 이용해 보고 및 분석 자료로 활용 가능.

스팀 초과 구간 요약표

시간	공정변수	현재값	권장 최대	초과량
04 : 10	스팀 온도	120.290	120.231	+ 0.059
04 : 13	스팀 온도	120.240	120.231	+ 0.009
04 : 16	후건조기압력	2.108	2.056	+ 0.052
04 : 20	후건조기압력	2.075	2.056	+ 0.019

## 2. 품질/생산량 기반 최적화

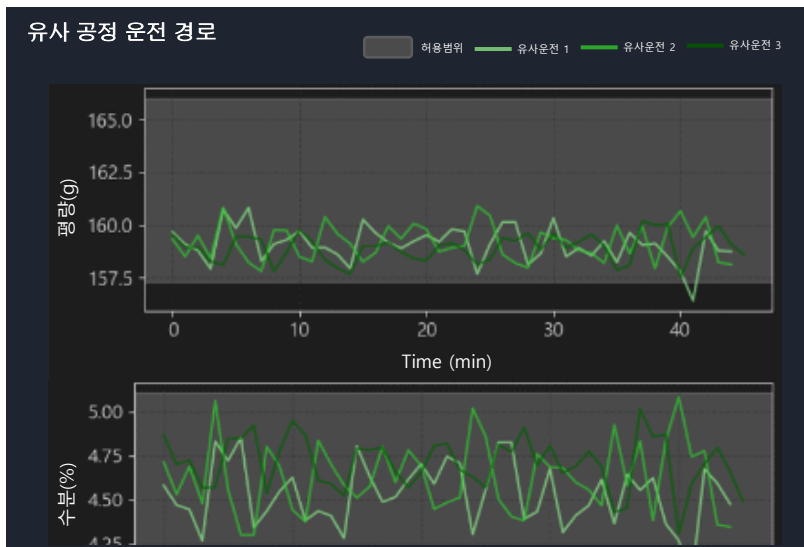
### ● 1. 유사 공정 운전 모니터링 기능

#### 기능 설명

- 현재 운전 중인 공정 조건과 유사한 과거 공정 운전을 자동으로 탐색하여 시계열로 비교.
- 유사도 기준은 지중, 평량, 주요 센서 변수를 바탕으로 하며, 유사도 높은 공정 운전 3개를 선정해 궤적을 시각화.
- 시계열 그래프를 통해 과거 유사 공정 운전의 평량, 수분 등 운전 데이터를 현재 공정과 함께 확인 가능.

#### 활용 효과

- 공정 운전자가 현재 공정이 정상 범위에 있는지 직관적으로 판단 가능.
- 품질 이상 발생 시 과거 유사 사례와 비교해 원인을 빠르게 추론 가능.
- 안정적인 과거 운전 패턴을 참조하여 현장 운전 개선 방향 설정 가능.



### ● 2. 최적 운전 전략 제안 기능

#### 기능 설명

- 현재 공정 데이터를 기준으로 주요 변수들의 조정 방향 및 점수 변화를 제안.
- 다목적 함수 기반 모델을 활용하여 변수별 조정 시 예측 점수의 증가량을 계산.
- 속도, 평량, 유량, 수분, 압력 등 각 변수에 대해 수치 기반의 최적 조정안을 도출.

#### 활용 효과

- 작업자는 '무엇을, 얼마나' 조정해야 할지를 명확하게 파악 가능.
- 직관에 의존하지 않고 실제 모델 기반의 수치적 근거를 바탕으로 조정 결정 가능.
- 품질과 에너지 효율을 동시에 향상시킬 수 있는 전략 수립 가능.

#### 최적 운전 전략 경로

현재 점수

77.251

최대 점수

82.901 (△ 5.650)

- 속도를 +1.65만큼 조정하면 y 점수가 ▲1.29 향상됩니다.
- 평량을 +0.43만큼 조정하면 y 점수가 ▲2.43 향상됩니다.
- 지료유량을 -0.05만큼 조정하면 y 점수가 ▲1.18 향상됩니다.
- 수분을 +0.05만큼 조정하면 y 점수가 ▲0.32 향상됩니다.
- 후건조기 압력을 -0.08만큼 조정하면 y 점수가 ▲0.43 향상됩니다.

## 2. 품질/생산량 기반 최적화

### ● 3. 운전 지표 요약 기능

#### 기능 설명

- 현재 공정의 주요 운전 지표에 대해 '현재 평균', '과거 평균', '허용 편차'를 테이블 형태로 제공.
- 표에 포함된 지표는 속도, 압력, 평량, 유량, 수분 등이며, 실시간으로 갱신 됨.
- 각 변수별 정상 범위 이탈 여부를 직관적으로 확인 가능.

#### 활용 효과

- 현재 공정이 과거 기준에 비해 정상 범위에 있는지 여부를 쉽게 판단 가능.
- 품질 이상 또는 비정상 운전의 원인 추적이 용이.
- 공정 조정 전, 현재 상태에 대한 객관적인 진단 가능.

운전 지표 요약표

	현재 평균	가중 평균	허용편차
속도(m/min)	750.629	753.760	16.500
후건조기 압력(kg/cm <sup>2</sup> )	2.423	1.654	0.824
평량(g)	158.601	161.657	4.335
지료 유량(kg/min)	12.200	11.936	0.549
수분(%)	4.474	4.665	0.461

### ● 4. 최적 운전 전략 경로 제공 기능

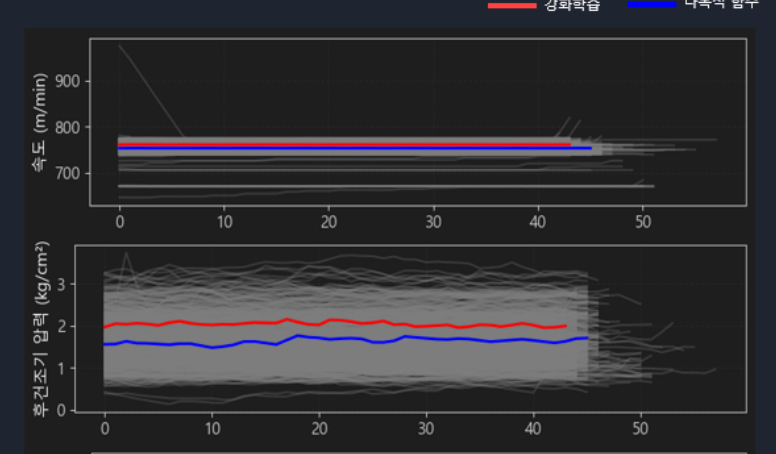
#### 기능 설명

- 현재 공정의 지중, 평량에 대해 **강화학습 기반 최적전략, 다목적 함수 기반 최적 전략**의 변수 궤적을 시계열 그래프로 병렬 비교.
- 회색선은 기존 다수의 과거 공정 운전, 빨간선은 강화학습 결과, 파란선은 다목적 함수 결과.
- 변수별로 시계열 상의 궤적 차이를 직관적으로 확인 가능.

#### 활용 효과

- **현재 공정의 지중, 평량에서의 최적의 운전 전략**을 확인하여 공정 운전자에게 최적의 정답지를 제공 가능.
- 변수별 개선 여지를 파악하고, 실제 적용 가능한 목표 궤적을 설정 가능.
- 최적 시나리오와 비교하여 구체적인 운전 전략 수립 및 성능 향상 분석에 활용가능.

최적 운전 전략 제안



# System Performance

## 시스템 성능

---

4

## 요구사항 테스트 결과

### ● 성능 요구사항

#### 스팀 사용량 예측 응답 시간

- 스팀 예측 모델의 예측은 1분 이내 완료.
- 시뮬레이션 모드에서도 처리속도 유지.
- 예측 처리 시간 측정 결과 : 평균 15초.  
→ 1분 이내 응답 요구 만족.

#### 최적 시나리오 도출 시간

- 목적함수 계산시 총 처리시간 5분 이내 완료.
- 강화학습 기반 시나리오 생성도 동일한 수준의 처리 시간 내 수행.
- 다목적 최적화 : 평균 처리시간 10초.
- 강화학습 기반 시나리오 생성 : 15초 내 수행.  
→ 5분 이내 응답 요구 만족.

### ● 품질 요구사항

#### 시스템 신뢰성

- 시스템 중단 시 알람 발생, 관리자에게 자동 통보.
- 고장 발생 시 시스템 평균 복구 시간(MTTR) 30분 이내로 제한.
- 시스템 전체 통합이 완료되지 않아 복구시간 및 알람 기능에 대한 신뢰성 검증은 추후 진행 예정.

#### 사용자 운용 및 학습

- 초보자도 안내를 통해 30분 내 기본기능 습득.
- 오류 발생 시 명확한 안내 제공.
- 직관적 화면 구성과 단계적 기능 안내 필요.
- 사용자 인터페이스 및 매뉴얼 구성이 완료되지 않아 사용자 테스트는 시스템 통합 이후 수행될 예정.

### ● 제약 요구사항

#### 개발 및 실행 환경 제한

- 예측 모델은 Python 기반 프레임워크 사용.
- 웹 인터페이스는 내부 서버 배포 가능 구조로 설계.
- 전체 시스템 패키징 및 배포 환경 검증은 통합 완료 이후 내부 운영 환경을 기반으로 적용 여부 확인 예정.

# System Design & Problem Solving

## 설계 및 문제해결 방법

---



# 1. 펄프/계절 기반 최적화

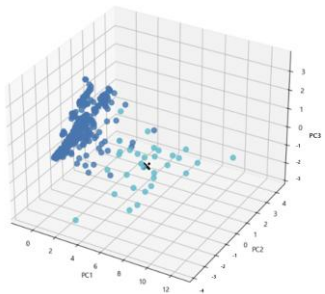
## ● 1. 펄프 분석 및 클러스터링(PulpAnalyzer)

### 목적

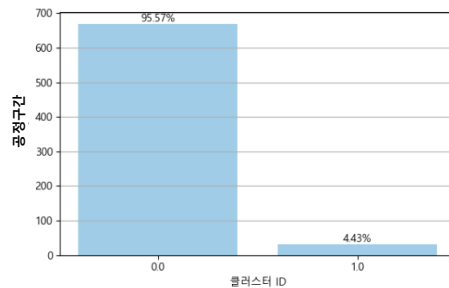
: 펄프 배합비의 특성과 계절적 영향을 반영하여, 공정상 안정적이고 일반적인 운전 조건을 대표하는 공정 구간을 계절별로 도출.

### 구성 포인트

- 펄프 배합 비율화 및 클러스터링
  - 5가지 펄프 투입량을 비율화 및 실루엣 스코어로 최적 조합 도출.
  - 평균, 분산 기반 K-means 클러스터링으로 유사 배합 특성 그룹 도출.
  - 클러스터 0이 669개, 클러스터 1이 31개로 클러스터 0만 필터링하여 사용.
- 중심 벡터 도출 및 거리 계산
  - 각 클러스터의 중심 벡터 계산을 통해 평균 배합비 도출.
  - 각 데이터와 중심 벡터 간 거리 계산 및 거리 분포 유사도 판단.
  - 계절간 분포의 비대칭성을 반영하기 위해 z-score로 정규화.
- 통합 점수 기반 계절별 대표 공정구간 선정
  - 계절 내 거리 분포의 비대칭성 반영을 위해 z-score + 분산 기반 통합 score를 활용.
  - 계절별 데이터 수 불균형을 보완하기 위해 최소 개수 지정 및 상위 5% 공정구간 선정.



클러스터링 결과 PCA 기반 시각화



클러스터 분포 수 시각화

### 문제 해결

#### • 문제1. 클러스터링 성능 저하

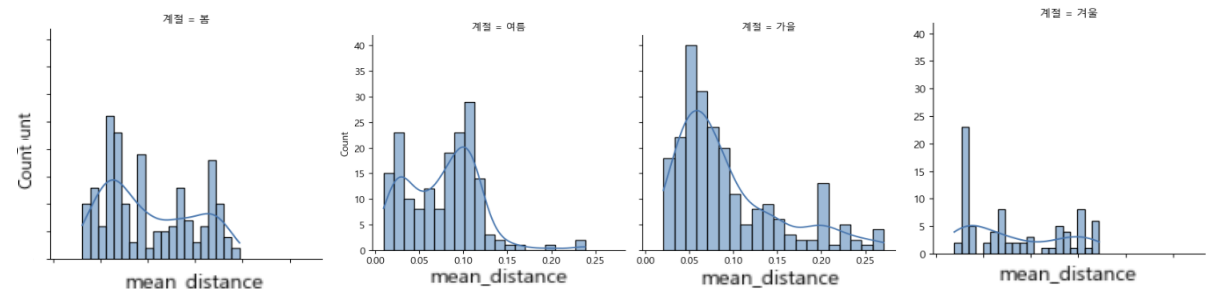
- 1분 단위 시계열 데이터에서 펄프 배합비를 직접 클러스터링 한 경우 데이터가 과도하게 많아 **명확한 패턴 구분이 어려우며**, 공정구간 단위 평균값만 사용한 경우 정보가 **단편화**되어 실루엣 점수가 낮게 나타남.

⇒ **공정 단위별로 평균을 내되, 분산을 함께 고려한** 클러스터링을 통해 대표성과 안정성 모두를 반영한 분류를 적용, 실루엣 점수 기준으로도 명확한 클러스터 구분을 확인함.

#### • 문제2. 클러스터 불균형

- K-means 클러스터링 결과에서 한 클러스터가 대부분을 차지하고, 두 클러스터 간의 **비율이 극단적**이라 정량적 비교 및 해석에 어려움을 겪음.

⇒ 각 클러스터별 스팀 사용량 통계 분석을 통해 다수를 차지하는 **클러스터 0은 일관된 안정적 배합**, 소수인 **클러스터 1은 높은 평균과 분산**으로 인해 **비효율적 조건으로 해석**. 또한 펄프 배합비 패턴 분석을 통해 클러스터 0은 분산과 IQR이 낮아 일반적인 배합 조건, 클러스터 1은 활엽수, 재활용 및 파지의 편차가 높아 혼합조합의 다양성이 크다고 판단. 이를 통해 클러스터 0을 중심으로 분석 진행.



계절별 평균 거리 분포



# 1. 펄프/계절 기반 최적화

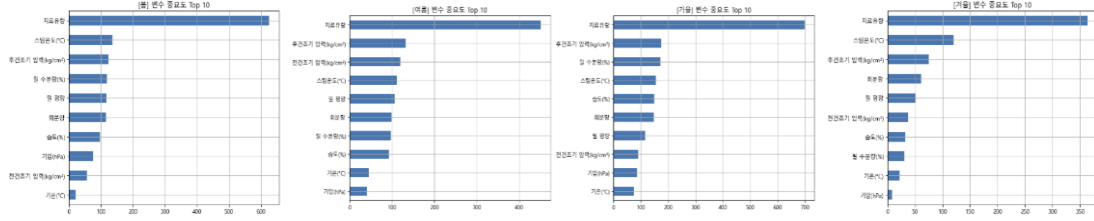
## ● 2. 통계 분석 및 변수 중요도(StatAnalyzer)

### 목적

: 계절별 대표 공정구간 데이터를 활용하여 변수 간 통계적 차이 및 중요도 분석, 스팀 사용량에 영향을 미치는 **주요 요인**을 정량적으로 평가.

### 구성 포인트

- 기초 통계 분석
  - 각 공정구간 단위로 평균, 표준편차, 최소/최대값, IQR을 계산하고 계절별로 요약 통계 정리.
- 계절 간 통계 차이 검정
  - Kruskal-Wallis, Levene, ANOVA 분석을 통해 **계절 간 유의미한 차이**를 가지는 변수 도출.
  - 공정 속도, 수분량, 후건조기 압력 등에서 계절에 따른 유의미한 변화 존재.
- LightGBM 기반 변수 중요도 산출
  - 계절별로 LightGBM 회귀 모델 학습 후, **변수 중요도 정량화**.
  - 중요도가 높은 변수 중심으로 공정 영향도 해석.
- SHAP 분석을 통한 개별 예측 기여도 해석
  - LightGBM 모델 기반 SHAP 값 계산, 변수별 **예측 영향도**를 직관적으로 해석.
  - 각 샘플 단위에서 변수의 작용 방향 및 크기 시각화.



계절별 LightGBM 기반 변수 중요도

## ● 3. 권장 범위 기반 목적함수(OptimizationPreparer)

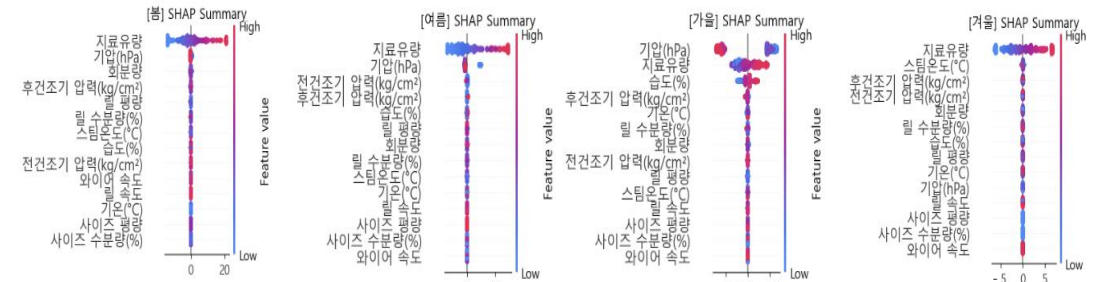
### 목적

: **계절별 제어변수 및 제약조건** 변수의 통계 기반 **권장 범위 도출**, 최적화 및 운전 가이드 설정에 활용.

### 구성 포인트

- 계절별 제약조건 설정
  - 계절별 대표 공정구간 데이터를 기반으로 **제어변수 및 제약조건**에 대해 평균, 표준편차를 활용한 권장 최소/최대값을 계산하여 **계절별 운전 허용범위** 설정.

⇒ 제어 변수 및 제약조건을 기반으로 한 목적함수 도출, 목적함수를 기반으로 한 최적값 기반 초과 범위 탐지 및 알림 기능 제안 예정



계절별 SHAP 분석을 통한 개별 예측 기여도

# 1. 펄프/계절 기반 최적화

## ● 4. 스팀 예측<sup>[1]</sup> 및 시각화(SteamPredictor)

### 목적

: LSTM 기반 모델을 활용하여 스팀 사용량 예측 및 공정 구간 단위 정확도 평가, 시각화를 통한 예측 성능 분석

### 구성 포인트

- LSTM 기반 예측 모델 학습 및 적용<sup>[2]</sup>
  - 제어변수를 입력, 스팀 사용량을 출력변수로 스팀 사용량 예측 수행.
- 시계열 그래프 시각화
  - 예측 스팀 사용량과 실제 스팀 사용량 시각화.
  - 계절별 권장 제어 범위 및 실제 스팀 사용량이 예측값을 동시에 초과하는 이상구간 강조.

### 문제 해결

- 문제1. 초기 모델 예측 한계
  - 기존 상위 지종을 기반으로 한 예측 모델에서 환경/공정변수, 펄프 클러스터를 입력으로 스팀 사용량 예측을 진행했고, R<sup>2</sup> score 0.9이상의 높은 예측 성능을 확인. 하지만 계절성의 반영이 미흡하고, 단순 예측에 머물러있어 에너지 효율화에 한계 존재.

⇒ 각 계절별 공정 특성의 차이를 반영할 수 있도록 통계분석 및 대표 공정구간 도출을 통해 계절별로 세분화된 분석 진행. 제어 변수 등의 권장 범위를 기존 예측 모델에 적용함으로써 단순 예측 뿐만 아니라 제어 기준 기반 정밀 예측이 가능하도록 구성.

## ● 5. 경고 및 조치 알림(ConstraintNotifier)

### 목적

: 제어변수가 계절별 권장 범위 초과시 시각적 강조 및 정량적 요약

### 구성 포인트

- 계절별 권장 제어 범위 기준 초과 여부 판단
  - 지정된 제어 변수가 계절별 권장 최소/최대값을 벗어나는지 여부 판단.
- 초과 강조 지점 탐지
  - 실제 스팀 사용량이 예측값보다 높고, 동시에 하나 이상의 제어변수가 권장 범위 초과인 시점을 이상 구간으로 판단.
- 초과 항목 테이블 요약
  - 초과 발생 시각, 초과 변수, 현재값, 권장 최소/최대값, 초과량 정리.

스팀 초과 구간 요약표

시간	공정변수	현재값	권장 최대	초과량
04 : 10	스팀 온도	120.290	120.231	+ 0.059
04 : 13	스팀 온도	120.240	120.231	+ 0.009
04 : 16	후건조기압력	2.108	2.056	+ 0.052
04 : 20	후건조기압력	2.075	2.056	+ 0.019

[1] Lee, S., Nengroo, S. H., Jung, Y., Kim, S., Kwon, S., Shin, Y., ... & Har, D. (2023, June). Factory Energy Management by Steam Energy Cluster Modeling in Paper-Making. In 2023 11th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid) (pp. 1-5). IEEE.

[2] Yang, M., Xu, X., Cheng, H., Zhan, Z., Xu, Z., Tong, L., ... & Ahmed, A. M. (2023). Industrial steam consumption analysis and prediction based on multi-source sensing data for sustainable energy development. Frontiers in Environmental Science, 11, 1187201.

## 2. 품질/생산량 기반 최적화

### ● 1. 다목적 함수 기반 평가 (MultiObjectiveEvaluator)

#### 목적

: 생산량, 품질, 에너지 효율 등 다양한 공정 목표를 하나의 평가 함수로 통합하여 정량적인 운전 전략 평가

#### 구성 포인트

##### • 변수 가중치 반영

- 각 변수별 중요도( $w_i$ )를 정량화하여 전체 점수에 반영
- 품질 관련 변수는 높은 가중치, 부가적 요소는 낮은 가중치 설정

##### • 구간 가중치 반영

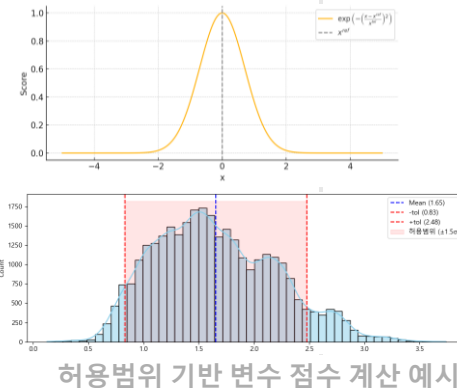
- 공정 시간 구간( $T_j$ )에 따라 중요도를 달리 설정
- ex) 초반은 품질 안정성, 중반은 생산성, 후반은 품질 유지

##### • 허용범위 계산

- 기준값( $x_i^{ref}$ )과 허용오차( $x_i^{tol}$ )를 기준으로 정상 범위를 설정
- 이 범위에서 벗어난 값은 점수에 불이익을 주어 패널티 부여
- 변수값과 기준값의 차이에 따라 점수를 감산하여 반영

$$y = \sum_{j=1}^3 a_j \cdot \frac{1}{|T_j|} \sum_{t \in T_j} \left( \sum_{i=1}^n w_i \cdot \exp \left( - \left( \frac{x_i(t) - x_i^{ref}}{x_i^{tol}} \right)^2 \right) \right)$$

수식 기호	의미
$x_i(t)$	변수 i의 시점 t 값
$x_i^{ref}$	변수 i의 기준값(이상값)
$x_i^{tol}$	변수 i의 허용 편차(범위)
$w_i$	변수 i의 중요도 가중치
$a_j$	시간 구간 j의 가중치
$T_j$	시간 구간 j
y	최종 품질 점수



#### 문제 해결

##### • 문제1. 다중 목표 평가

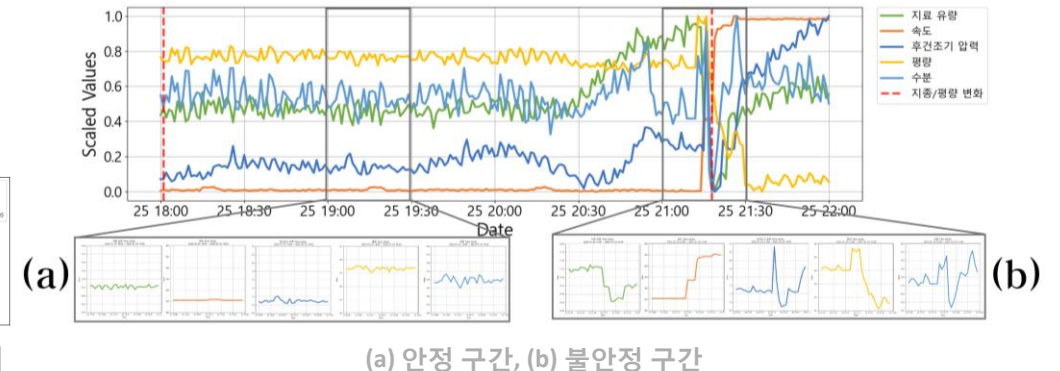
- 품질, 생산량, 안정성 등 서로 다른 공정 목표가 혼합되어 있어, 단일 기준으로 운전 전략의 성능을 정량적으로 평가하기 어려움
- 단순 평균이나 특정 지표만을 기준으로 할 경우, 전체 공정 품질을 정확하게 반영하지 못함.

⇒ 생산량, 품질, 에너지 효율 관련 변수에 대해 **중요도 가중치( $w_i$ )**를 설정하고, 변수별 **허용오차 기반 패널티**를 통합하여 다목적 함수를 설계함으로써 다양한 목표를 하나의 점수로 통합 평가할 수 있도록 구성.

##### • 문제2. 구간 변동성 발생

- 지종과 평량이 변경되는 구간에서 센서 값의 급격한 변동성이 발생하며, 이로 인해 수분 등 **품질 변수에 대한 신뢰성이 급격히 저하**되었고, 정량적 평가에 오류가 발생.

⇒ 공정을 시간 구간별로 분할하고, **구간별 가중치( $T_j$ )**를 반영하여 구간별 변동성이 큰구간에는 감점 계수를 적용함으로써, 시각 구간 특성을 반영한 평가 모델 구현.



## 2. 품질/생산량 기반 최적화

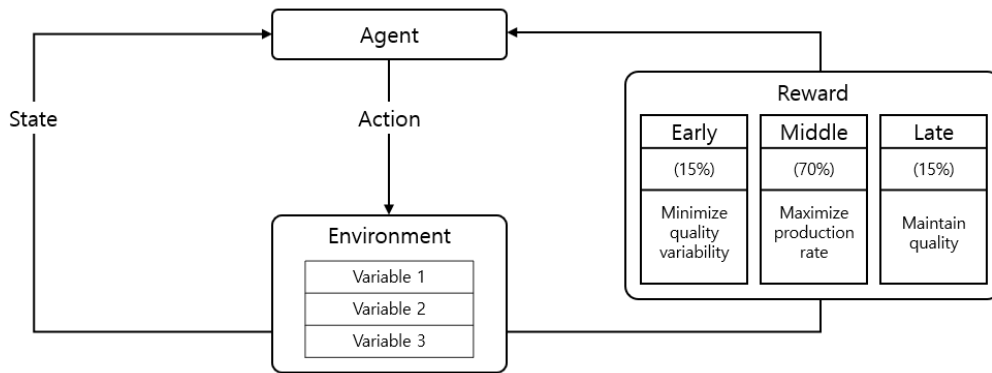
### ● 2. 강화학습 기반 전략 탐색 (ReinforcementOptimizer)

#### 목적

: 복잡한 공정 조건 하에서 반복 학습을 통해 최적 운전 전략을 자동 탐색

#### 구성 포인트

- 전략 탐색
  - 에이전트가 상태를 관찰하고 액션(변수 조정)을 선택
  - 다목적 함수 기반 점수를 보상으로 받아 학습
- 반복 시뮬레이션
  - 하나의 공정 운전을 여러 번 시뮬레이션하여 최적 전략 수립
- 최적 운전 조건 도출
  - 학습된 정책에 따라 특정 조건에서 최대 점수가 나오는 변수 조합 선택
  - 공정의 지중, 평량 단위로 운전 조건 추천 가능



강화학습 구조

#### 선택 이유

##### • 선택1. OpenAI Gym 스타일 환경

- 강화학습 표준 인터페이스  
reset(), step(), state, reward 구조를 통일시켜 다양한 RL 알고리즘과 호환 가능.
- 실제 공정을 유연하게 시뮬레이션  
제지 공정은 시계열 기반이며 상태 변화가 계속 일어나므로, step-by-step 시뮬레이션이 필요.
- 학습 반복과 평가 자동화에 유리  
공정 운전 단위 시뮬레이션을 반복적으로 자동화하고 보상을 계산하는 데 적합한 구조.

##### • 선택2. PPO(Proximal Policy Optimization) 알고리즘<sup>[3]</sup>

- 안정적인 학습  
기존 강화학습 알고리즘(DQN, A2C 등)은 학습이 불안정하거나 튜닝 정책이 나올 수 있음.  
PPO는 정책 변화 폭을 제한(clipping)하여 갑작스러운 행동 변화를 억제하고 안정적인 수렴을 유도.
- 상대적으로 적은 튜닝  
학습률이나 보상 설계에 민감하지 않아, 실제 산업 환경에서 빠르게 적용 가능.
- 복잡한 상태 공간에도 강함  
제지 공정처럼 여러 변수(속도, 압력, 수분 등)가 상호작용하는 환경에서 효과적으로 학습 가능.

## 2. 품질/생산량 기반 최적화

### ● 3. 물리 기반 변수 관계 분석 (PhysicsRelationAnalyzer)

#### 목적

: 데이터 기반이 아닌 물리적 수식으로 변수 간 관계를 모델링하여 공정 해석 가능성 확보

#### 구성 포인트

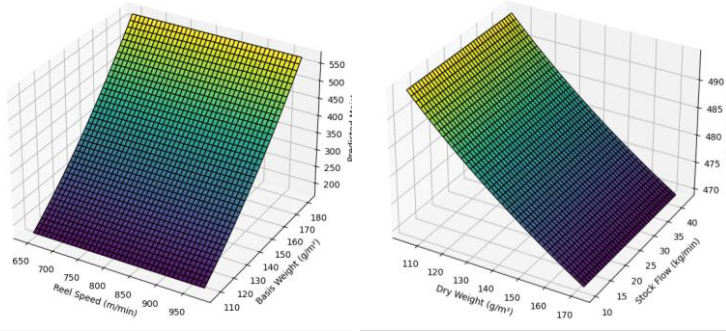
##### • 비선형 수분 방정식

- 수분함량을 주요 운전 변수(속도, 평량, 압력 등)로부터 예측
- 로그, 제곱, 루트 등의 변환 적용하여 비선형 회귀 모델 구성

$M(t) = -1.434 \cdot \log(v(t))$	기호	의미 (추정)
$+ 0.206 \cdot P_2(t)$	v	릴 속도
$+ 0.663 \cdot P(t)$	P2	전건조기 압력
$- 0.001 \cdot A^2(t)$	P	후건조기 압력
$+ 0.633 \cdot \log(C(t))$	A <sup>2</sup>	후건조기 압력 제곱
$+ 0.021 \cdot B^2(t)$	C	농도
$- 0.519 \cdot B(t)$	B, B <sup>2</sup>	평량 및 평량 제곱
$- 51.03 \cdot \log(W(t))$	W	건조중량
$- 0.0054 \cdot U(t)$	U	유량
$+ 249.6$		

성능 : MAE 0.082 / RMSE 0.138 / R<sup>2</sup> 0.713

수분 영향 변수 분석



#### 문제 해결

##### • 문제1. 복잡한 변수 간 관계 해석의 한계

- 제지공정은 시간에 따라 복잡하게 변화하며, 수많은 센서 변수들이 상호작용함
- 변수 간 관계가 비선형적이고 다변량 구조를 가지므로, 단순한 선형 회귀나 상관관계 기반 분석만으로는 수분과 같은 품질 변수를 정확히 설명하기 어려움
- 실제로 선형 모델을 사용하면 예측 성능이 매우 낮고, 공정 운전의 해석력도 확보되지 않음



- 수분 예측 정확도 향상을 위해 로그, 제곱항 등 비선형 항을 포함한 회귀 모델을 설계, 실제 공정 데이터를 기반으로 지도학습 방식의 회귀 계수 추정 수행.
- 모델 성능 평가 결과 MAE 0.08, R<sup>2</sup> 0.71 수준으로, 실제 수분값을 높은 정확도로 예측 가능.
- 강화학습이 도출한 최적 정책의 신뢰성과 타당성을 확보하기 위한 해석 가능한 물리 모델로서의 역할 수행.
- 변수 변화량에 따른 수분 예측 민감도도 계산 가능하며, 이를 기반으로 공정 제어 가이드 제시 가능.

(예: 릴 속도 10 m/min 증가 시 수분 0.02% 감소)

변수	수식 영향	효과
릴 속도 v	$-1.434 \cdot \log(v)$	속도 증가 시 수분 감소 (점점 완만하게)
평량 B	$+0.021 \cdot B^2 - 0.519 \cdot B$	B가 커질수록 수분이 비선형 증가
건조중량 W	$-51.03 \cdot \log(W)$	W가 증가하면 수분 감소 (급격히)
유량 U	$-0.0054 \cdot U$	U 증가 시 수분 소폭 감소

## 2. 품질/생산량 기반 최적화

### ● 4. 실시간 변수 조정값 추천 (RealTimeSimulator)

#### 목적

: 현재 운전 조건에 대해 각 변수 조정 시 다목적 점수가 얼마나 개선되는지 시뮬레이션을 통해 실시간으로 제안

#### 구성 포인트

- **변수 조정 시뮬레이션**
  - 현재 시점에서 각 변수를  $\pm$ 방향으로 소폭 조정
  - 조정된 상태에 대해 점수 재계산
- **점수 변화 분석**
  - 변수별 조정량에 따른  $\Delta$ 점수 계산
  - 점수 향상에 기여한 변수 우선순위 도출
  - 예: "속도 +1.5  $\rightarrow$  점수 +1.2", "압력 -0.1  $\rightarrow$  점수 +0.3"

#### 최적 운전 전략 경로

현재 점수

77.251

최대 점수

82.901 ( $\Delta$  5.650)

- 속도를 +1.65만큼 조정하면 y 점수가  $\Delta$ 1.29 향상됩니다.
- 평량을 +0.43만큼 조정하면 y 점수가  $\Delta$ 2.43 향상됩니다.
- 재료유량을 -0.05만큼 조정하면 y 점수가  $\Delta$ 1.18 향상됩니다.
- 수분을 +0.05만큼 조정하면 y 점수가  $\Delta$ 0.32 향상됩니다.
- 후건조기 압력을 -0.08만큼 조정하면 y 점수가  $\Delta$ 0.43 향상됩니다.

#### 문제 해결

##### • 문제1. 실시간 운전 추천

- 공정에서는 **작업자의 직관에 의존하여 변수 조정을 수행했으며**, 각 변수의 변화가 공정 성능에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 어려움.
- 다변수 조합 전체에 대한 시뮬레이션은 연산량이 과도하게 증가하여 실시간 적용이 불가능.



- 변수별로  $\pm$  소폭 조정(예:  $\pm 1\%$ ,  $\pm 5\%$ ) 시나리오만을 생성하는 경량화된 시뮬레이션 구조를 설계하여, 빠른 계산이 가능.
- **각 변수의 변화에 따른 다목적 함수 점수 변화량을 계산**하고, 기여도가 높은 변수를 우선적으로 선별하여 추천 리스트로 제시.
- 사용자 인터페이스(UI)에는 "현재 변수 상태  $\rightarrow$  조정값  $\rightarrow$  점수 변화량" 흐름이 직관적으로 나타나도록 구성하여, **작업자가 빠르게 판단하고 실행**할 수 있도록 지원.

## Roles of Team Members

### 팀원의 역할

---

6



## 팀원의 역할



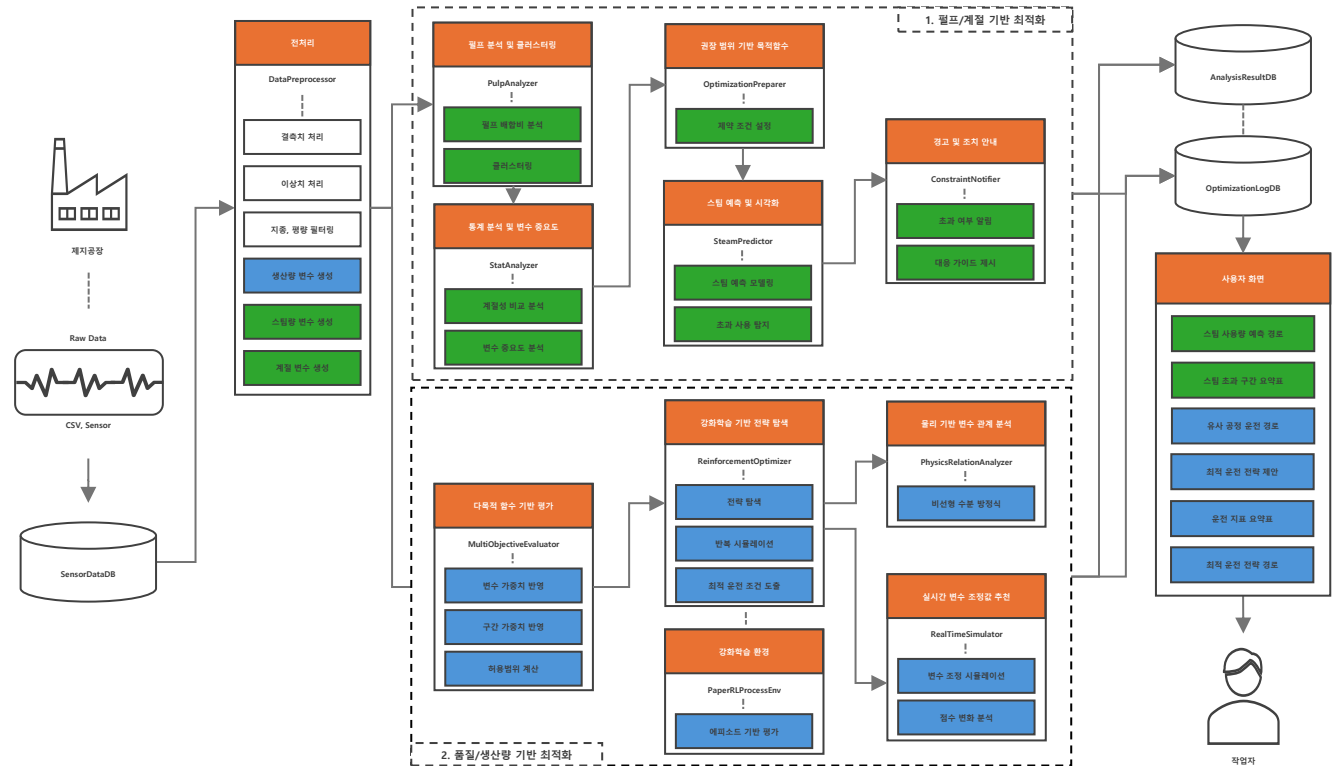
박선아 (팀장)

품질/생산량 기반 최적화	전처리
	다목적 함수 기반 평가
	강화학습 기반 전략 탐색
	실시간 변수 조정값 추천
시각화	물리 기반 변수 관계 분석
	유사 공정 운전 경로
	최적 운전 전략 제안
	운전 지표 요약표
	최적 운전 전략 경로



서지윤 (팀원)

펄프/계절 기반 최적화	전처리
	펄프 분석 및 클러스터링
	통계 분석 및 변수 중요도
	권장 범위 기반 목적함수
시각화	스팀 예측 및 시각화
	경고 및 조치 안내
	스팀 사용량 예측 경로
	스팀 초과 구간 요약표



※ 색상 표시 없는 부분은 공동 작업.



# Demonstration

## 데모

---



## 현재 공정 정보

현재 날짜

2022-7-27

현재 시간

04 : 35

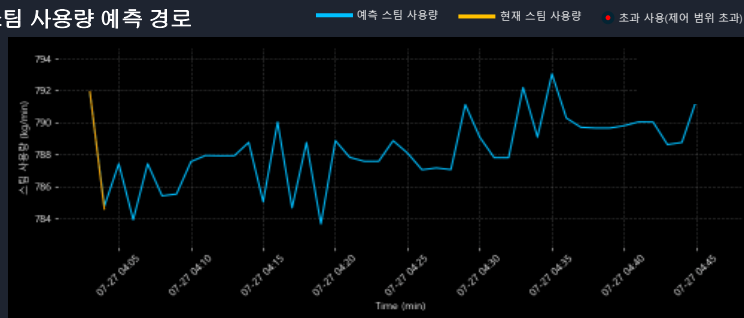
지중

좋은 중이

평량

95g

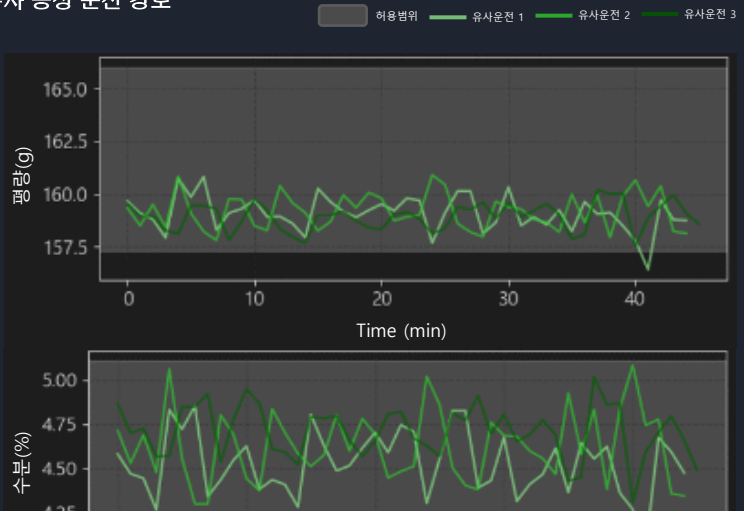
## 스팀 사용량 예측 경로



## 스팀 초과 구간 요약표

시간	공정변수	현재값	권장 최대	초과량
04 : 10	스팀 온도	120.290	120.231	+ 0.059
04 : 13	스팀 온도	120.240	120.231	+ 0.009
04 : 16	후건조기압력	2.108	2.056	+ 0.052
04 : 20	후건조기압력	2.075	2.056	+ 0.019

## 유사 공정 운전 경로



## 최적 운전 전략 경로

현재 점수

77.251

최대 점수

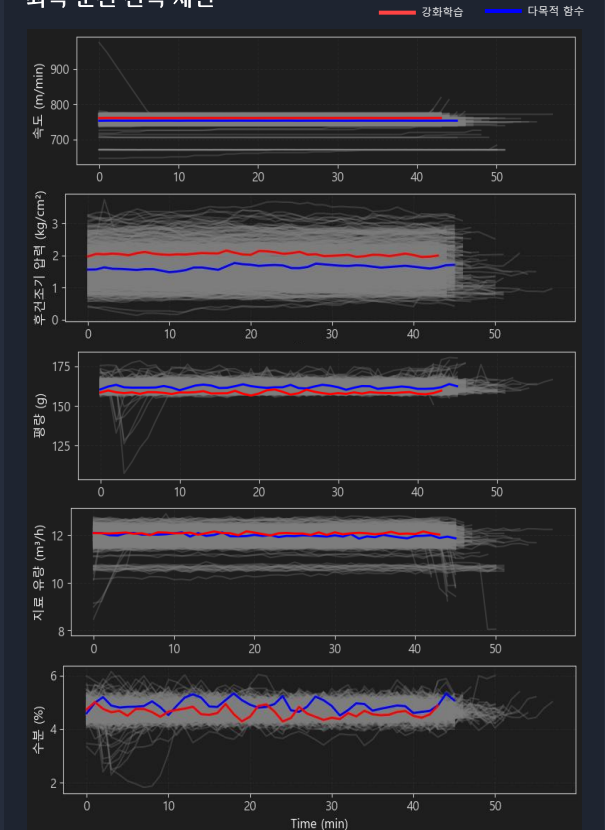
82.901(△ 5.650)

- 속도를 +1.65만큼 조정하면 y 점수가 ▲1.29 향상됩니다.
- 평량을 +0.43만큼 조정하면 y 점수가 ▲2.43 향상됩니다.
- 치료유량을 -0.05만큼 조정하면 y 점수가 ▲1.18 향상됩니다.
- 수분을 +0.05만큼 조정하면 y 점수가 ▲0.32 향상됩니다.
- 후건조기 압력을 -0.08만큼 조정하면 y 점수가 ▲0.43 향상됩니다.

## 운전 지표 요약표

	현재 평균	가중 평균	허용편차
속도(m/min)	750.629	753.760	16.500
후건조기 압력(kg/cm <sup>2</sup> )	2.423	1.654	0.824
평량(g)	158.601	161.657	4.335
치료 유량(kg/min)	12.200	11.936	0.549
수분(%)	4.474	4.665	0.461

## 최적 운전 전략 제안





## + 향후 계획

세부 작업 구분	여름방학		캡스톤Ⅱ		
	7월	8월	9월	10월	11월
시스템 설계 및 DB 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>전체 공정 흐름도 설계</li> <li>InfluxDB 구조 설계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>공정 운전 단위 데이터 구성 확정</li> <li>입출력 변수 정리</li> </ul>	-	-	-
모델 연동 및 시뮬레이터 구현	<ul style="list-style-type: none"> <li>점수 수식 코드 연결</li> <li>스팀 예측 모델 구조화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>변수 입력 → 점수 출력 API 구현</li> <li>강화학습 시나리오 연동</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>시뮬레이터 연결 테스트</li> </ul>	-	-
대시보드 UI 및 시각화 구현	<ul style="list-style-type: none"> <li>대시보드 구성안 기획</li> <li>초기 UI 구성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>슬라이더, 경로 비교 구현</li> <li>유사 공정운전 시각화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>점수 변화/경고 시각화 레이아웃 개선</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>시나리오별 전략 안내 완성</li> </ul>	-
작업자 테스트 및 피드백	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>내부 시연 준비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>예비 테스트 시작</li> <li>기능별 피드백 수렴</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>피드백 반영 및 최종 점검</li> </ul>	-
문서화 및 시연 준비	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>기술 문서 초안</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>시연 영상 녹화발표 자료 작성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용자 매뉴얼 + 최종 보고서 제출</li> </ul>

캡스톤 디자인 I 최종발표

감사합니다

팀명 : EcoNOVA

팀원 : 박선아, 서지윤

지도교수 : 이상금

발표자: 서지윤

발표일: 2025.06.11



Q

&

A