

# 공장에너지관리시스템(FEMS)에서의 제지공정 스팀 원단위 회귀 분석 연구

송지원<sup>1\*</sup>, 김소연<sup>1</sup>, 정민규<sup>1</sup>, 구돈익<sup>1</sup>, 서기정<sup>1</sup>, 노현규<sup>2</sup>, 양현민<sup>2</sup>, 김민성<sup>1,2\*\*</sup>

중앙대학교 대학원 지능형에너지산업융합학과<sup>1</sup>, 중앙대학교 에너지시스템공학과<sup>2</sup>

um0203@cau.ac.kr\*, minsungk@cau.ac.kr\*\*

## A study on the regression analysis of the steam intensity at paper making process in the Factory Energy Management System(FEMS)

<sup>1</sup>Jiwon Song, <sup>1</sup>Soyeon Kim, <sup>1</sup>Minkyu Jung, <sup>1</sup>Donik Ku, <sup>1</sup>Gijeong Seo, <sup>2</sup>Hyunkyu Noh, <sup>2</sup>Hyunmin Yang, <sup>1,2</sup>Minsung Kim

<sup>1</sup>Department of Intelligent Industry and Energy, Chung-Ang University

<sup>2</sup>School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University

### 요약

본 논문에서는 공장에너지관리시스템(FEMS)에서 제지공정 스팀 원단위 개선을 위해 회귀 분석을 활용할 수 있는 방안에 대해 제시하였다. 먼저 릿지 회귀 모델 구성을 위해 공장 내 설치된 계측 센서를 통해 공장 내 온도 및 습도, 종이의 생산평량, 릴속도를 피쳐 데이터(독립변수)로, 스팀 투입 유량을 레이블 데이터(종속변수)로 선정하였다. 누락 데이터 및 이상 데이터는 전처리를 진행하였으며, 전처리가 완료된 데이터를 구성한 릿지 회귀 모델에 적용시킨 결과, 97.26%의 평균 정확도를 얻을 수 있었다. 이후 학습 데이터와 테스트 데이터의 기간을 제외하고 작동 조건이 동일한 릿지 회귀모델을 구성하여 1개월 치의 스팀 투입유량을 예측하였다. 그 결과, 공정에서 운전조건에 큰 차이가 없음에도 스팀 투입유량이 급격하게 증가하는 스팀 원단위 이상 구간을 발견하였고, 이러한 이상 구간에서는 릿지 회귀 모델이 스팀 유량의 변화를 잘 예측하지 못하는 것을 확인하였다. 이러한 스팀 원단위 이상 구간은 적정 스팀 유량보다 과도한 스팀유량이 들어간 것으로 판단할 수 있다. 본 연구 내용은 FEMS에서 스팀 원단위 이상 구간 검출 및 진단에 대한 가이드라인으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

### I. 서론

공장에너지관리시스템(FEMS)란 공장 내 에너지 소비 현황 파악을 통한 최적운전을 제어하는 시스템이다. [1] 공장의 산업공정에서 요구되는 열원은 스팀의 형태로 공급되는 경우가 많은데, 이는 스팀의 잠열을 이용할 수 있기 때문에 공정 중에 열원의 온도를 안정적으로 확보할 수 있고, 증기가 응축할 때의 잠열을 이용할 수 있기 때문이다. [2]

기존 FEMS 관련 연구에서는 에너지 효율화를 통한 에너지 원단위 (에너지 투입량 / 생산량) 향상에 집중하였다. 그러나, 에너지 가격이 상승함에 따라 스팀 가격도 상승하고 있고, 산업 공정에서의 스팀에너지는 회수가 어려운 부분이 있어 스팀 원단위 (스팀 투입량 / 생산량)의 향상도 FEMS 연구에서 중요한 목적 중 하나로 떠오르고 있다. 따라서 본 연구에서는 제지 공정 중 대표적 스팀 다소비 공정인 초지 공정을 대상으로 회귀 분석을 통해 스팀 투입량을 예측하고, 이를 스팀 원단위 개선 방안의 참조 지표로 삼고자 한다.

### II. 본론

제지공정은 조성공정, 초지공정, 코팅공정, 완전공정으로 나누어지며 그 중 초지공정은 종이를 건조하는 공정이다. 초지공정에서는 함수율 약 50%의 종이가 프리드라이어(Pre-dryer), 사이저(Sizer), 애프터드라이어(After-dryer)를 통과함에 따라 함수율 약 3~5% 정도의 종이로 건조된다. 이 때, 드라이어에서 종이 스팀 실린더를 통과하면서 수분이 증발되는 구조이다. 초지공정의 다이어그램은 Fig. 1에 나타내었다.

회귀분석 모델 구성을 위해서는 먼저 레이블 데이터(종속변수)에 따른 피쳐 데이터(독립변수) 선정이 선행되어야 한다. 초지공정의 입열의 대부분은 종이를 건조하기 위한 스팀(62%)과 공기(34%)로 이루어져 공정 내로 유입된다. [3] 따라서 공기에 영향을 미치는 공장 내 온도, 습도 데이터

를 피쳐 데이터로 선정하였다. 또한, 종이 건조를 위해 사용되는 스팀에너지는 건조 실린더와 종이의 무게 및 수분함량의 상관성 특징을 지닌다. [4] 따라서 릴속도와 생산평량 또한 피쳐데이터로 선정하였다.

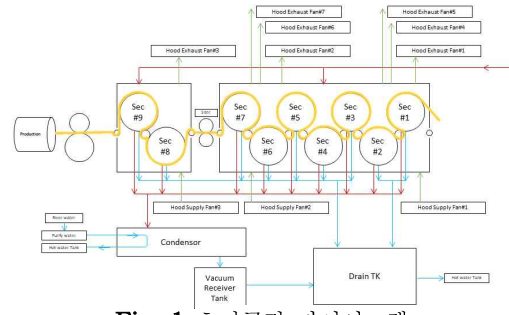


Fig. 1 초지공정 다이어그램

이후, 공장에서 5초 간격으로 계측 중인 온도, 습도, 생산평량, 릴속도 (이하 피쳐데이터) 및 스팀 투입유량 (이하 레이블 데이터)을 수집하였다. 수집된 데이터 중 누락데이터는 Fig. 2와 같이 직전 30초 동안의 평균값을 이용하는 이동창평균(moving window average)법을 사용하여 대체하였으며, 값의 변화가 지나치게 큰 이상치 데이터는 정상 상태의 데이터의 평균으로 대체하였다.

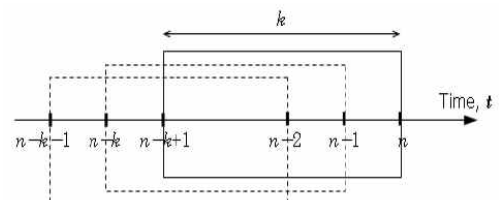


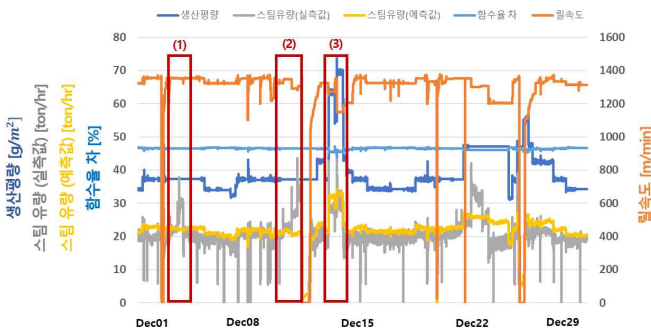
Fig. 2 Moving windows of n sequential data points at kth time

전처리한 데이터를 바탕으로 회귀 모델을 이용하여 스팀 투입량 예측 모델을 구성하였다. 회귀 모델은 기존 선형 회귀 모델에 규제항을 추가한 릿지 회귀를 사용하였다. 학습 데이터와 테스트 데이터는 각각 9개월, 3개월로 나누어 구성하였으며 알파 값은 1로 고정하였다. 회귀 모델의 성능 예측은 테스트 데이터의 실측값과 예측값 간의 절대오차를 기준으로 하는 정확도를 사용하여 평가하였으며, 그 결과 최종 FEMS에서 에너지종별 예측 시스템 구현을 위해 필요한 95%의 정확도보다 높은 평균 97.26%의 정확도를 보였다. Table 1에는 릿지 회귀 모델의 작동 조건을 정리하였다.

**Table 1** 릿지 회귀 모델의 작동 조건

Parameter	Values
피쳐 데이터	온도[°C], 습도[%], 릴속도[m/min], 생산평량[g/m <sup>2</sup> ]
레이블 데이터	스팀 투입 유량 [ton/hr]
학습 데이터 기간	9개월 (2022.11.01.~2023.07.31.)
테스트 데이터 기간	3개월 (2023.08.01.~2023.10.31.)
알파( $\alpha$ )	1.0
반복횟수	1000
train/test 분할 비율	8 : 2

위와 같은 릿지 회귀모델을 구성한 후, 스팀 원단위 개선을 위한 판단지표로 삼기 위해 1개월 치의 학습 데이터(2022.11.01.~2022.11.30.)를 바탕으로 1개월 치의 테스트 데이터(2022.12.01.~2022.12.31.)의 스팀 순시 유량을 예측하였다. 나머지 작동 조건은 Table 1과 동일하게 구성하였으며 그 결과를 아래 Fig. 3에 나타내었다.



**Fig. 3** 초지공정에서의 생산평량, 스팀 유량 (실측값, 예측값), 함수율 차, 릴속도 추이 (2022.12.01.~2022.12.31.)

Fig. 3에서 (1)번 구간과 (2)번 구간의 경우, 릴속도와 생산평량에 큰 변화가 없음에도 불구하고 실측 스팀 유량의 값이 급격하게 증가하는 구간이 존재한다. 이와 같은 경우 릿지 회귀 모델이 스팀 유량을 잘 예측하지 못하고 있음을 알 수 있다. 종이의 드라이어 전후 함수율 차가 전 구간에 걸쳐 거의 일정하게 유지되고 있으므로 (1)번과 (2)번 구간은 적정 스팀 투입 유량보다 스팀을 더 많이 투입해 스팀 원단위가 나빠지는 이상 구간이라고 정의가 가능하다. (3)번 구간의 경우, 스팀 유량이 급격히 증가하지만 회귀 모델이 스팀 유량을 잘 예측하므로, 정상 구간으로 정의할 수 있다.

### III. 결론

본 연구에서는 공장 내 센서에서 실측된 데이터를 바탕으로 스팀 투입 유량을 릿지 회귀 모델을 구성하여 예측하고, 이후 구성된 회귀 모델 및 공정 내 운전조건을 활용하여 스팀 원단위 이상 구간을 판단하였다. 릿지 회귀 분석 모델의 정합성은 테스트 데이터의 실측값과 예측값의 절대오차를 기준으로 하는 정확도로 판단하였으며, 그 결과 평균 97.26%의 정확도

를 나타내었다. 이후, 학습 데이터 기간과 테스트 데이터 기간을 제외하고 동일한 조건의 릿지 회귀 모델을 통해 한달 치 스팀 투입유량을 예측한 결과 스팀 원단위 이상 구간에서는 예측값과 실측값의 편차가 다른 구간에 비해 크게 나타나는 것을 확인하였다. 본 연구 내용은 FEMS에서 스팀 원단위 이상 구간 검출 및 진단에 대한 가이드라인으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단(NRF) 이공분야 기초연구사업(2019R1A2C108 869415), 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지기술개발사업(2020202 0900290, 20211050100010), 한국에너지기술연구원 (KIER2023-360-05-03 -07)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] Lee, D., & Cheng, C. C. (2016). Energy savings by energy management systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 760-777.
- [2] 김민수. (2016). 산업용 열네트워크와 스팀히트펌프. *기계저널*, 56(8), 37-41.
- [3] 김소연, 정상훈, 구돈익, 서기정, 정민규, 김민성. (2022). 초지 건조공정에서 공장에너지관리시스템(FEMS) 개발을 위한 에너지밸런스 연구. *대한설비공학회 학술발표대회논문집*, 535-538, 평창.
- [4] 이상금, 도윤미, 신영미, 권순현, 이좌형, 김선혁, 허태욱. (2022). 제지 공정 건조 스팀에너지 모델링 방법론. *한국통신학회 학술대회논문집*, 458-459, 제주.