

제지 초지공정 스팀 에너지 절감을 위한 모델링 연구

최진영¹, 정범희², 도윤미¹, 이상금^{2*}

한국전자통신연구원¹, *국립한밭대학교²

{choij0, ydoh}@etri.re.kr, qjagmlck@gmail.com, *sangkeum@hanbat.ac.kr

Modeling Research to Reduce Steam Energy in Paper Making Process

Jinyoung Choi¹, Yoonmee Doh¹, Beomhee Jung², Sangkeum Lee^{2*}

Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI)¹, *Hanbat National Univ.²

요약

본 논문에서는 제지공정 에너지 절감을 위한 에너지 모델링 방법을 제안한다. 제지공정에서 소비되는 에너지의 약 60% 이상이 초지공정의 건조과정에서 소비되고, 스팀에너지 회수가 어려운 특성을 가진다. 상관성 분석을 통해 스팀 압력, 스팀 온도, 회수열, 회석물 압력이 에너지 소비와 관련된 주요 요인임을 확인하였다. MLP를 활용하여 회수열과 스팀 압력, 스팀 온도, 회석물 압력과의 관계성을 분석하였다. 생산량 상위 10가지 종이를 독립변수로 SVM을 수행한 결과, 0.82의 정확도를 보였다. 스팀에너지 소비의 주요 특징 추출과 회수열 관련 주요 인자 관계성 분석을 통해 제지업종의 회수에너지 절감 기술 개발에 활용될 수 있고, 궁극적으로 에너지 절감에 기여할 수 있다.

I. 서론

국내에서 2050년까지 온실가스의 배출량과 흡수량을 같아지도록 하여 순(Net)배출량이 '0'이 되는 '넷제로(Net Zero)' 달성 프로젝트에 동참하고 있다. 온실가스의 대부분은 에너지 사용의 결과로 발생하므로 에너지 소비 효율 향상이 중요하다 [1]. 에너지 소비 상위 5개 산업에는 펄프 및 제지 산업(PPI)이 포함된다. PPI는 365일 24시간 가동되는 에너지 다소비 업종으로 직접적인 산업 이산화탄소 배출량의 2.2% 비중을 차지하기 때문에 에너지 절감 기술 개발이 중요하다 [2].

제조공정은 원료 펄프로부터 기계적 또는 화학적 공정을 거쳐 종이로 제조되고, 조정/초지/코팅/완전 공정 과정을 거친다. 초지공정에서는 탈수와 건조를 수행하는 공정으로, 지층 형성, 압착 탈수, 건조, 표면 처리 등의 과정을 수행하기 위해 제지공정 전체 스팀 소비 비율 중 60% 이상이 소비된다 [3].

그림 1은 제지공정 설비 구조도로 스팀을 이용하여 시트 형태의 종이 수분 함량을 일정하게 건조하는 과정을 의미한다. 헤드박스에서 원료가 공급되고 와이어에서 지필이 형성되면, 프레스에서 압착 탈수 과정을 거치게 된다. 드라이어에서는 잔류 수분을 증발시키게 되는데, 프리드라이어에서 50~55%의 수분함량을 가진 종이 가 애프터 드라이어 출구 과정에서는 3~5%의 수분함량을 가진 상태로 건조된다. 종이는 실린더를 통해 건조되며 증발된 수분은 공기 계통을 통해 배출된다. 건조 후 스팀은 기액 분리 탱크로 모여 보일러를 통해 순환된다.

건조과정에서 물을 증발시켜야 하므로 많은 에너지를 요구하여 여러 제지산업의 에너지 효율 개선연구가 이 과정에 집중되어 있다. 종이 종류와 두께에 맞는 고품질 생산을 위해 헤드 박스, 와이어, 드라이어 부분에서 많은 스팀이 배출되어 에너지 손실이 발생하게 되므로 스팀에너지 절감 방안이 필요하다 [3].

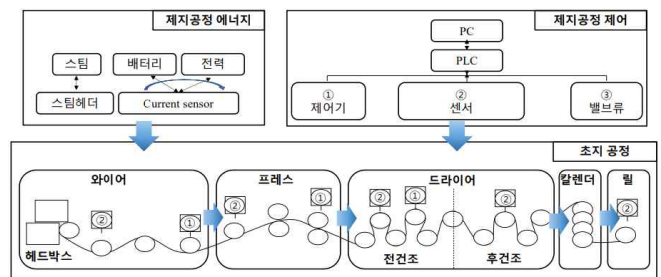


그림 1. 제지공정 설비 구조도

본 논문에서는 제지공정에서 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 초지공정의 건조과정에서 최초 원료가 공급되는 헤드박스와 가장 많은 스팀에너지가 소비되는 드라이어 과정을 분석한다. MLP(Multi-Layer Perceptron)를 활용하여 회수열에 따라 다양한 상관성을 분석하고, SVM(Support Vector Machine)을 통해 스팀에너지 관련 주요 인자와 종이 종류의 관계성을 분석한다.

II. 초지 공정 데이터 분석

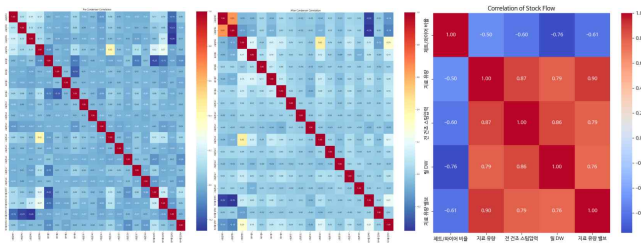
에너지 수요를 파악하고 예측하기 위해 제지공정에서의 상호 관계 파악이 필요하다. 에너지 효율과 관련된 스팀 온도 및 압력, 회수열, 종이 유량 등 여러 요인이 종이 종류와 두께에 따라 값이 설정된다. 공급 요인의 입력 변화에 따른 공정 반응의 특성을 분석하고, 종이의 연관성을 파악한다.

2-1. 데이터 상관성 분석

데이터를 정제하기 위해 원데이터의 잡음 처리를 진행하였다. 데이터의 정보 오류에 따라 생긴 결측치를 해결하기 위해 최빈값을 적용하고, 표준

편차와 평균의 값을 비교하여 최빈값 적용 후에도 데이터의 상관관계에 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

그림 2는 (a)전건조부, (b)후건조부와 (c)헤드박스의 스피어만 상관관계 분석 결과이다. 스팀 압력, 스팀 온도, 회수열, 회석물 압력과 종이 유량이 상관관계가 있음을 알 수 있다.



(a) 전건조부 (b) 후건조부 (c) 헤드박스
그림 2. 전/후 건조부와 헤드박스의 상관성 분석 결과

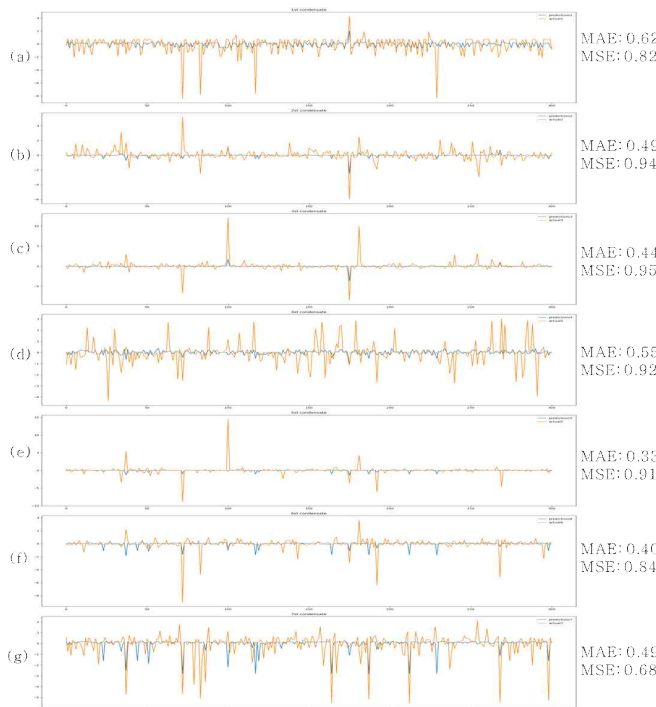


그림 3. MLP 회수열 예측 결과

2-2. MLP

MLP란 여러 개의 퍼셉트론 뉴런을 여러 층으로 쌓은 다층신경망 구조 모델로 복잡한 패턴 분류를 분석하는데 용이하여 복잡도가 높은 제지공정을 분석하는데 사용되었다. 결과 지표로 MAE(Mean Absolute Error)와 MSE(Mean Squared Error)를 사용하였고, 평균 MAE 값은 0.47이고, 평균 MSE 값은 0.86이다. 그림 3은 회수열 설비 7개에 대한 MLP 결과이다. 스팀압력, 스팀온도, 회석물 압력에 해당하는 22개의 태그 데이터를 기반으로 회수열 설비 7개의 값을 예측하였고, 물질(종이/수분/공기)의 흐름에 따라 순차적으로 a부터 g까지 정의하였다. 전반적으로 실제 값보다 예측 값 변화가 큰 경향을 띄는데, 이유는 다음과 같이 해석될 수 있다.

(a), (b), (c)의 경우 전건조부에서 배출되는 회수열이 모이는 설비로 (a)에서 (c)까지 건조되는 수분량과 배출되는 회수열이 점진적으로 증가한다. 전건조부 이후 사이즈 프레스를 거치게 되고, 이 때 유입되는 공기로 인해 종이의 수분량이 변경될 수 있다. 스팀압력, 스팀 온도 등 입력 값이 변경될 수 있고, (d)는 변화된 값에 영향을 받는다. (d)부터 (g)까지는 후건조

부에서 배출되는 회수열이 모아지는 설비이다. (g)의 경우 앞단에서의 잔여 회수열이 모여지는 마지막 단계로 작업자가 입력 값을 면밀히 조정할 가능성이 있다. 건조 과정에 따라 스팀 압력 등 입력 값이 변화하고, 회수열이 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

2-3. SVM

SVM은 데이터의 이상치가 많이 포함된 경우에도 좋은 성능을 발휘하는 모델로 데이터 간 의존도가 높은 제지공정 분석에 활용되었다. 주요 요인인 스팀압력, 스팀온도, 회석 물 압력, 회수열, 종이 유량이 포함된 변수를 기반으로 가장 많이 생산된 10개의 종이를 분류하였다. 그림 4는 SVM 평가 지표인 오차행렬로 평균 정확도는 0.82이다. 본 연구에서 도출한 스팀 에너지 관련 주요 요인으로부터 종이를 특징지을 수 있음을 확인하였다.

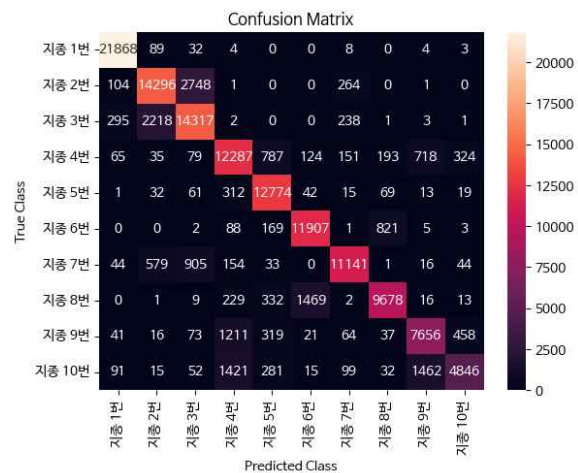


그림 4. SVM 종이 분류 결과

III. 결론

본 논문에서는 제지공정 에너지 절감을 위한 초지공정 스팀에너지 모델링을 제안하였다. MLP 모델을 이용해 회수열, 스팀 압력, 스팀 온도, 회석물 압력 관계성을 분석하였다. SVM을 활용해 종이 종류 10종을 분류하여 0.82라는 결과를 획득하였다. 회수열 기반 스팀에너지 주요 요인 분석과 종이의 관계성 분석을 통해 제지업종의 회수에너지 절감 기술 개발에 활용될 수 있다. 추후 에너지 모델 개선을 통해 회수열 예측 성능 향상과 SVM 모델 검증 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20202020800290)

참고 문헌

[1] 대한민국 2050 탄소중립 전략, 2020.12.
 [2] Del Rio, Dylan D. Furszyfer, et al. "Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options." Renewable and Sustainable Energy Reviews 167 (2022): 112706.
 [3] 이상금, (2022). 제지공정 건조 스팀에너지 모델링 방법론. 2022년도 한국통신학회 하계종합학술대회, page 458-459.