

## 제지 공정 시스템 에너지 절감을 위한 데이터 분류 및 특성 연구

정연지, 도윤미, 김선혁, 이상금

한국전자통신연구원

yeonjiyeriel@gmail.com, {ydoh, seonh, sangkeum}@etri.re.kr

## A Study on Data Classifications and Characteristics for Energy Consumption Reduction in Paper-Making Processes

Yeonji Jung, Yoonmee Doh, Seon hyeog Kim, Sangkeum Lee

Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

## 요약

본 논문은 지구촌의 기후 위기를 대응 및 탄소중립을 추진하기 위해 제지 공정의 건조 공정에서 발생하는 지열 현상에 관련한 건조 공정에 영향을 주는 요인들을 분석하였다. 영향 인자 상호 관계를 파악하기 위해, 생산 및 운영 데이터를 이용하여 독립 변수 선정 및 모델을 확보하고, 인자의 입력 변화에 따른 공정 반응의 특성을 분석하였다. 생산현장의 설비 운영 데이터로부터 지열 발생을 추출하고 스피어만 상관성을 이용한 분석의 결과, 종이의 종류(지종), 건조 공정의 실린더, 스팀에너지 공급 압력 및 온도가 지열 발생에 대한 영향인자로 파악되었다. 이러한 주요 인자들과 지종의 상관관계를 바탕으로 특징인자를 추출하였고 SVM 모델로 분류하였고 T-SNE 차원축소를 활용해 군집화 및 시각화를 진행하여 그 특성을 분석하였다.

## I. 서론

산업혁명의 발전과 자본주의의 성장이 가속화되면서 자연 생태계 파괴, 지구온난화 등으로 심각한 기후변화를 초래하였다. 기후 위기를 대응하기 위해 지구촌에서는 탄소중립을 추진한다. PPI(Pulp and Paper Industry)는 전 세계에서 에너지 사용량이 많은 5 가지 산업 중 하나이다. 2000~2018 년 동안 연평균 0.3%의 에너지 사용이 증가하였다. 이는 전 세계 산업 에너지 소비의 6%, 직접적인 산업 CO2 배출량의 2%를 차지한다[1]. 코로나 19 팬데믹 이후 산업 활동 재개로 생산량이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 2021~2030 년 사이에 배출량이 연평균 약 4% 감소하여 '2050 탄소 중립 시나리오(2050 년까지 세계 탄 소 순배출량이 0 이 되는 탄소 중립)'에 맞추기 위해선 상당한 노력이 필요하다[2]. 탄소 절감을 위해 제지 공정 내에 필요 이상의 에너지를 줄여야 한다.

제지공정에서는 종이를 만드는 원료인 펄프는 목재 등의 섬유 식물을 기계적 또는 화학적으로 처리해 만들어서 종이로 제조한다. 종이의 일반적인 제지공정은 4 단계인 조지공정, 초지공정, 코팅공정, 완전공정으로 나뉜다.

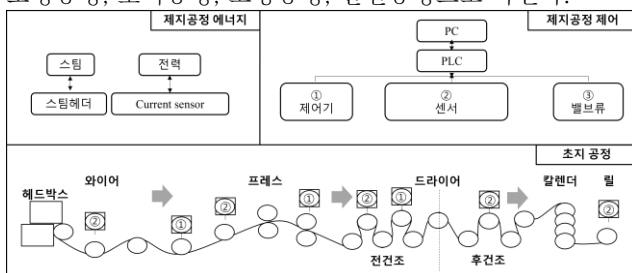


그림 1. 제지공정 중 초지공정 구조(예시)

다량의 스팀에너지를 사용하는 초지공정은 일정한 농도의 지료를 원료로 하여 종이를 만드는 공정으로서 지층 형성, 압착 탈수, 건조, 표면처리 등의 과정으로 이루어진다.

그림 1 에서 초지공정과 에너지 및 제어 시스템의 전체적인 구조를 보여준다. 그림 1 에서 헤드박스에서 분출된 원료는 와이어 파트에서 지필로 형성된 다음, 프레스 파트에서 압착 탈수 과정을 거치며, 드라이어 파트에서 잔류 수분을 증발시킨 다음 슈퍼 캘린더에서 종이의 두께가 조절되어 제품으로 완성된다.

본 논문에서는 초지 공정의 DCS(Distributed Control System)/QCS(Quality Cleaness Service)와 생산되는 지종 및 평량 간의 관계성을 SVM(Support Vector Machine)과 T-SNE(T-distributed Stochastic Neighbor Embedding) 기법을 사용하여 분석한다.

## II. 상관성 분석

생산 가동 중 지열 발생 시 제지공정의 안정화를 위한 진단 및 유지 관리 시간이 생기게 되어 많은 펄프와 에너지 및 전력을 의미 없이 소모하게 된다[3].

제지 공정에서는 에너지 효율과 연관된 실린더에 가해지는 스팀 온도 및 압력, 지필의 수분량 및 평량 등과 연관된 인자를 생산하는 지종에 따라서 제어한다. 다양한 종속 변수들에 영향을 받는 지종 교체는 지열 현상을 유발하는 원인 중 하나일 수 있다.

## 2-1. 스피어만 상관계수

스피어만 상관계수(Spearman's Rank Correlation Coefficient)는 두 변수 간의 순위를 부여하고 상관 계수를 계산하는 기법이다. 피어슨 상관계수와 달리 비선형 관계의

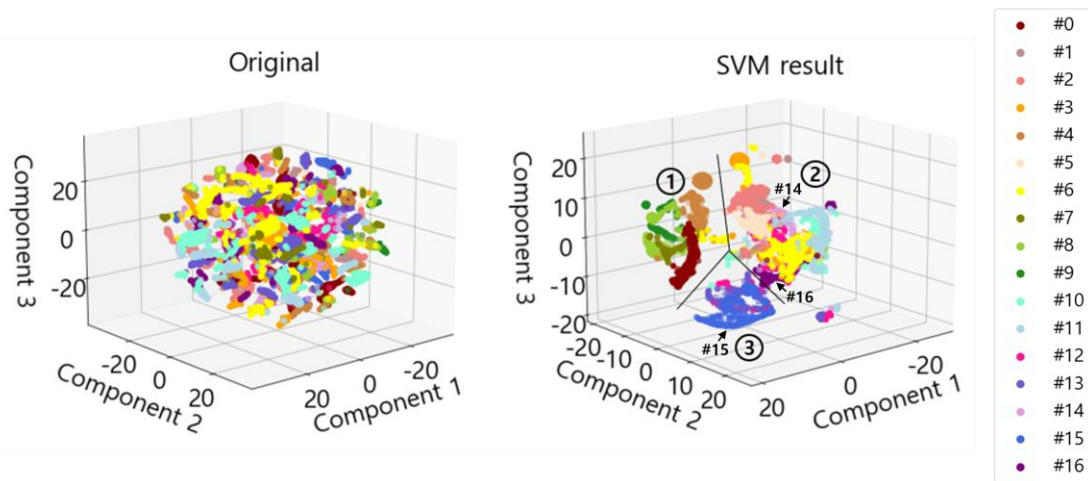


그림 2. 원본 및 SVM 모델 데이터 T-SNE 시각화

연관성을 파악할 수 있다는 장점이 있어, 복잡도가 높은 제지 공정의 상관관계 분석에 활용할 수 있다.

초지공정의 DCS, QCS 데이터 중 지질 발생 요인을 찾기 위해 15 분 간격으로 샘플링된 데이터를 이용한다. 해당 데이터에서 지중, 공정 에너지 전력의 역률, 스팀 압력, 드라이 실린더, 회분량에 관련된 요인이 스피어만 상관 계수로 하여 지질에 영향을 주고 있으며, 에너지 소비와 관련된 태그를 SVM, T-SNE 기법에 사용한다.

## 2-2. SVM

SVM은 여러 클래스로부터 분류 경계를 찾으며 주어진 데이터가 어느 카테고리에 속하는지 판단하는 선형 분류 모델이다. 사용하는 데이터가 비선형이기에 RBF(Radial Basis Function) 커널을 적용하여 선형으로 분리될 수 없는 경우를 해결한다.

공정 에너지 전력, 건조 공정의 실린더, 스팀 공급 압력 및 온도, 회분량에 대한 요인을 종속변수로 설정한다. 공정에서 생산이 많은 상위 17 가지 지중을 독립변수로 SVM 기반 상관성 분석한다. 15 분 간격의 총 308 만 개의 데이터셋으로 SVM을 이용한 분류 모델의 성능 평가지표인 정확도 점수는 0.98 이며 아래 그림 3 과 같은 결과를 보여준다.

공정 에너지 전력, 건조 공정의 실린더 내 스팀 공급 압력 및 온도, 회분량에 대한 요인으로 생산하는 종이의 종류를 특정할 수 있다.

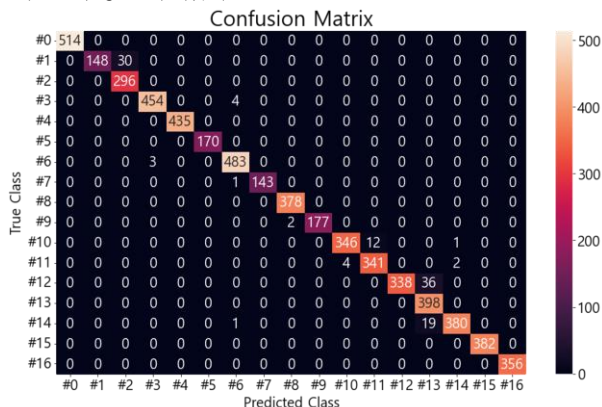


그림 3. SVM 분류에 의한 평가지표인 오차행렬

## 2-3. T-SNE

T-SNE 는 고차원의 복잡한 데이터를 저 차원 데이터로 변환하는 차원 축소 기법이다. 해당 기법의 결과는 해석하기 모호하여 시각화에 주로 사용된다. 그림 2 에서 왼쪽은 원본 데이터, 오른쪽은 SVM 모델에 적용한

결과 데이터를 T-SNE 에 적용한 결과를 보여준다. 스피어만 상관 계수를 바탕으로 특징인자 추출을 통해 SVM 모델의 분류를 통해 평량을 기준으로 그룹 1 은 고평량(150~250), 그룹 2 은 저평량(50~100), 그룹 3 은 중평량(100~150)으로 분류되어 분류에도 평량을 기준으로 3 군집수로 군집화하는 것을 볼 수 있다.

각 그룹의 그룹 1 의 지중 #1, #2, #3 과 그룹 2 의 지중 #5, #6 그리고 그룹 3 의 지중 #10, #11, #12 는 서로 같은 지중이다. 시각화가 잘 보이지 않는 지중 #14, #15, #16 은 같은 종이임에도 평량을 기준으로 각기 다른 그룹에 속한다. 이처럼 평량이 제지 공정에서 중요한 요인임을 알 수 있다.

## III. 결론

본 논문에서는 제지 업종의 건조 공정에서 발생하는 지질 현상과 관련한 제지 공정 에너지 절감을 위하여 SVM 과 T-SNE 을 이용한 특성을 도출하였다. 그 결과, 지질 발생에 요인으로 지중, 공정 에너지 전력의 역률, 스팀 압력, 드라이 실린더, 회분량에서 상관성을 확인하였다. 해당 요인을 기반으로 개발된 SVM 모델에서는 종이의 종류를 학습 및 높은 정확도로 분류하여 0.98 이라는 높은 정확도 점수를 획득하였다. T-SNE 시각화에서는 평량을 기준으로 3 가지 군집화를 이룬다. 이러한 특성에 대한 원인 파악을 통하여 추후 지질 예측을 위한 메커니즘 개발로 확장 진행할 계획이다.

## ACKNOWLEDGMENT

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

## 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Lipiäinen, Satu, et al. "Sustainable Production and Consumption." (2021).
- [3] 이상금, 도윤미, 신영미, 권순현, 이좌형, 김선혁, 허태욱. (2022). 제지공정 건조 스팀에너지 모델링 방법론. 한국통신학회 학술대회논문집, (), 458-459.