

# 스마트 팩토리 최적화를 위한 GAF 기반 시계열 클러스터링 및 변동성 분석

구남석<sup>1</sup>, 박선아<sup>1</sup>, 도윤미<sup>2</sup>, \*이상금<sup>1</sup>  
\*국립한밭대학교<sup>1</sup>, 한국전자통신연구원<sup>2</sup>

{kns2931, ssunaa0322} @gmail.com, ydoh@etri.re.kr, \*sangkeum@hanbat.ac.kr

## Time Series Clustering and Variability Analysis Based on GAF for Smart Factory Optimization

Namseok Koo<sup>1</sup>, Suna Park<sup>1</sup>, Yoonmee Doh<sup>2</sup>, and \*Sangkeum Lee<sup>1</sup>

\*Hanbat National University<sup>1</sup>, Electronics and Telecommunications Research Institute<sup>2</sup>

### 요약

본 연구는 제지 공정에서 주로 기계 장비의 결함, 원재료 불균일, 공정 지연 등의 형태의 불안정성을 시계열 데이터와 GAF(Gramian Angular Field) 기법을 활용하여 분석한다. 제지 공정의 파지 태그인 세 가지 펄프 태그(활엽수, 침엽수, 화학-기계적 펄프)와 초지공정 태그인 전건조기, 후건조기, 와이어 속도, 지료 유량 태그를 대상으로 상관관계 분석을 수행하고, GAF로 변환된 데이터를 기반으로 PCA(Principal Component Analysis)와 K-Means 클러스터링을 진행한다. GAF 기법을 통해 시계열 데이터의 복잡한 패턴을 시각적으로 표현함으로써 클러스터링의 정확도를 높일 수 있으며, 각 클러스터는 제지 공정의 안정성과 불안정성을 효과적으로 구분했다. 클러스터 0은 시계열 데이터의 변동이 적고 비교적 안정적인 패턴을, 클러스터 1과 2는 큰 변동을 보이는 패턴으로 불안정성이나 지중 교체와 관련된 구간을 반영한다. 이를 통해 제지 공정의 안정성과 불안정성 패턴을 효과적으로 분석할 수 있다.

### I. 서론

전 세계적으로 제지 및 펄프에 대한 수요는 꾸준히 증가하는 추세이다. 제지 산업은 2017년, 전 세계 산업 에너지 소비의 약 6%를 차지할 정도로 에너지 집약적인 산업이다. 파리 협정의 목표에 따라, 2050년까지 기후 중립성을 목표로 PPI(Pulp and Paper Industry)는 탄소 배출 제로 운영으로 전환해야 한다. 에너지 가격이 상승하는 상황에서 탄소 중립 목표를 달성하기 위해서는 에너지 효율 최적화가 필수적이다[1]. 제지 공정 중 에너지 소비가 많은 초지 공정의 진행 단계는 와이어, 프레스, 드라이어, 캘린더이다.

제지공정의 운영 방식을 바탕으로 품질에 영향을 많이 주는 태그로 건조기, 와이어 속도, 지료 유량, 펄프 태그를 선정한다. 이 값의 변동을 최소화하면 공정의 안정성에 기여할 수 있다. 공정 이상은 주로 기계 장비의 결함, 원재료 불균일, 공정 지연 등의 형태로 나타나며, 에너지 낭비와 생산성 저하로 이어질 수 있다. 특히 심각한 공정 이상이 발생할 경우, 생산 설비를 멈추고, 재가동하는 과정에서 많은 시간과 비용이 소모된다[2].

본 논문에서는 제지 공정에서 발생하는 불안정성 패턴을 시계열 데이터와 GAF(Gramian Angular Field) 기법을 통해 변환한 이미지를 활용하여 시계열 데이터의 시각적 패턴을 강조하여 분석한다. 펄프 태그의 변동성을 PCA(Principal Component Analysis) 및 K-Means 클러스터링 기법을 통해 분류하고, 클러스터별로 공정 태그의 변동성을 분석하여 공정 불안정성을 평가한다. 이를 통해 제지 공정의 불안정성에 대한 패턴을 확인하고 대응하여 에너지 절감 및 효율화에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

### II. 본론

#### 2.1 데이터 수집 및 상관관계 분석

1년간의 제지 공정 시계열 데이터를 분석 대상으로 사용한다. 1분 단위로 수집된 세 가지 펄프 태그(활엽수,

침엽수, 화학-기계적 펄프)와 제지공정의 운영 방식을 바탕으로, 공정 제어와 밀접하게 연관된 전건조기, 후건조기, 와이어 속도, 지료 유량 태그 데이터를 사용한다. 그림 1에서 태그 간의 상관관계를 스피어만 상관계수를 통해 분석하였으며, 기존 제지공정의 운영 방식에 연관된 태그들이 실제로 높은 상관성이 보임을 확인하였다.

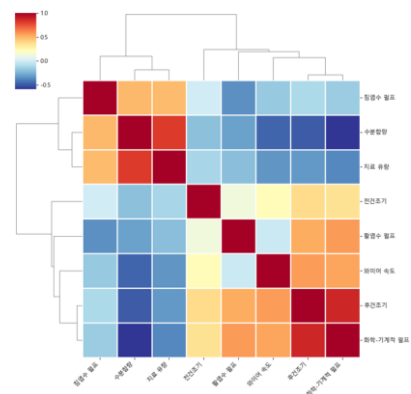


그림 1. 공정, 펄프 태그 상관관계 히트맵

#### 2.2 시계열 데이터 PCA 및 클러스터링 분석

시계열 데이터에 대하여 PCA 및 K-Means 클러스터링을 적용한 결과, 그림 2에서 나타난 바와 같이 세 가지 펄프 태그(활엽수, 침엽수, 화학-기계적 펄프)의 시계열 데이터 간 변동성은 클러스터 간에 큰 차이가 없는 것으로 관찰하였다. 클러스터링 이후, 비교 분석을 위하여 시계열 데이터를 GAF 기반 이미지로 변환하여 분석한 결과에서도 유사한 경향을 확인하였다. 결론적으로, 세 클러스터 간의 경계가 명확하지 않으며, 클러스터들이 서로 중첩되는 경향을 보였다. 이는 시계열 데이터의 패턴의 복잡성과 비선형적인 특징으로 인해

클러스터링 기법에 효과적으로 작동하지 못한 것으로 판단된다. 따라서, 클러스터 간의 차이를 명확히 도출하기 위해 시계열 데이터의 비선형적 특성을 더 잘 반영할 수 있는 고차원적 접근 방식이 필요함을 확인하였다.

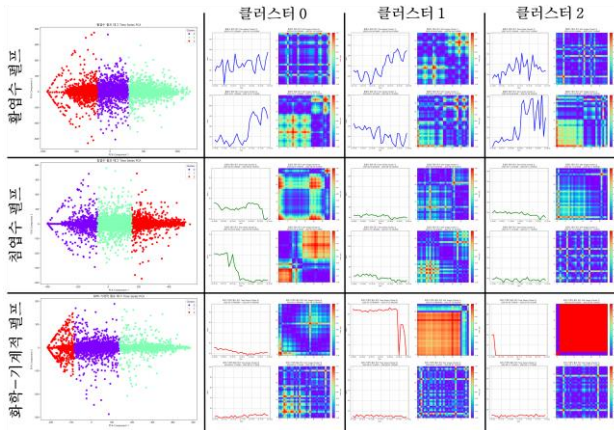


그림 2. 시계열 데이터 클러스터링 결과

### 2.3 GAF 기반 이미지 데이터 PCA 및 클러스터링 분석

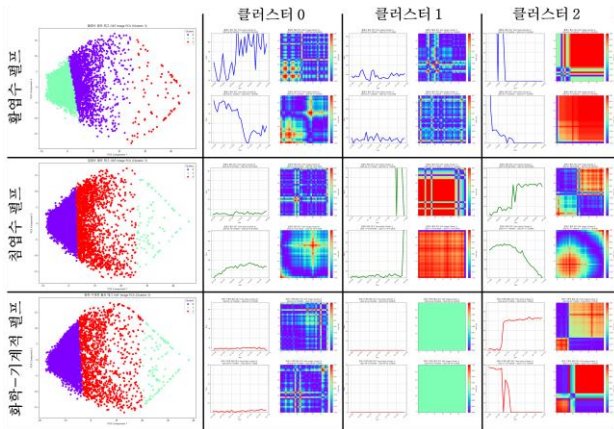


그림 3. GAF 기반 이미지 데이터 클러스터링 결과

위 내용과 같이 시계열 데이터를 그대로 사용한 PCA 와 K-Means 클러스터링은 공정 불안정성을 명확히 분류하는 데에는 한계가 있다. 따라서 시계열 데이터의 복잡한 패턴을 더 명확하게 분석하기 위해 GAF 기법을 도입한다. GAF 기법은 시계열 데이터의 각 시점 간의 관계를 2 차원 이미지로 변환하여, 복잡한 데이터 패턴을 시각적으로 표현함으로써 클러스터링의 정확도를 높일 수 있다[3].

GAF 로 변환된 이미지를 기반으로 클러스터링을 수행한 결과, 그림 2 에서 시계열 데이터를 그대로 사용할 경우 클러스터링 된 데이터의 패턴이 명확하게 구분되지 않지만, GAF 로 변환한 이미지를 사용하면 시계열 데이터의 패턴이 명확하게 구분된다. 그림 3 에서 침엽수 펄프의 패턴을 분석하면, 클러스터 0 의 경우 이미지에서 빨간색과 파란색의 영역이 작고 비교적 균일한 분포를 보인다. 이는 시계열 데이터에서 큰 변동이 없는 안정적인 패턴을 의미한다. 반면, 클러스터 1, 2 의 경우, 빨간색 또는 파란색 영역이 크게 나타나며, 시계열 데이터에서 큰 변동 폭을 가진 구간을 반영한다. 이러한 변동 폭은 시계열 데이터의 복잡한 패턴을 더욱 선명하게 보여준다. 그림 2, 3 에 대하여 비교 분석 시, 세 가지 펄프 태그(활엽수, 침엽수, 화학-기계적 펄프)의 클러스터 간 패턴 차이가 두드러진다.

또한 공장 작업자와의 인터뷰를 통해 공정의 불안정성은 주로 수분 함량과 평량이 적절히 조정되지 않을 때 발생한다는

사실이 확인되었다. 실제로 클러스터링 결과에서 침엽수와 화학-기계적 펄프는 유사한 패턴으로 클러스터링 되므로 주로 같이 사용되는 것을 알 수 있다. 이는 화학-기계적 펄프의 사용량이 증가하면 제지의 수분 함량이 상승하고, 이를 보상하기 위해 수분 흡수율이 높은 침엽수 펄프 사용량이 증가시키는 경향이 있다.

### 2.4 평균과 표준편차를 통한 클러스터링 결과 분석

세 가지 펄프 태그(활엽수, 침엽수, 화학-기계적 펄프)에 대해 GAF 기반 이미지 데이터 클러스터링 결과로 도출된 세 가지의 클러스터 내에서 전건조기, 후건조기, 와이어 속도, 지료 유량 태그의 변동성을 분석하였으며, 표준편차를 기준으로 공정의 안정성을 평가하였다. 표 1 에서 클러스터 1 의 공정 태그의 표준편차는 클러스터 0, 2 와 비교해 가장 작고 안정적인 패턴을 보였다. 반면, 표 2, 3 에서 불안정적인 패턴을 보이는 클러스터 1, 2 의 와이어 속도는 안정적인 패턴인 클러스터 0 에 비해 높은 평균값을 가지며, 변동의 범위가 크다는 것을 알 수 있다.

이는 펄프의 상태 변화가 공정 태그에 직접적인 영향을 미친다는 것을 시사한다. 즉, 펄프의 변동성은 공정 태그들의 변동성에 있어 중요한 원인으로 작용한다.

클러스터	활엽수 펄프 태그							
	전건조기		후건조기		와이어 속도		지료 유량	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
0	3.51	1.08	1.82	0.91	928.60	243.65	10.20	1.22
1	3.93	0.82	1.75	0.67	862.99	151.18	10.76	1.04
2	2.36	1.14	2.62	1.10	1120.82	322.04	8.44	2.67

표 1. 활엽수 펄프 태그 클러스터별 공정 태그의 평균 및 분산

클러스터	침엽수 펄프 태그							
	전건조기		후건조기		와이어 속도		지료 유량	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
0	3.65	1.41	1.41	0.76	779.72	272.10	9.85	2.92
1	2.68	0.96	2.52	0.94	1121.28	197.82	9.36	1.30
2	3.52	0.93	2.43	0.86	1052.94	209.59	10.21	1.37

표 2. 침엽수 펄프 태그 클러스터별 공정 태그의 평균 및 분산

클러스터	화학-기계적 펄프 태그							
	전건조기		후건조기		와이어 속도		지료 유량	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
0	3.10	1.02	2.30	1.04	1071.24	236.11	9.82	1.18
1	4.51	0.42	1.50	0.69	750.47	148.45	11.22	0.71
2	2.59	1.32	2.08	0.99	960.19	321.07	8.60	3.05

표 3. 화학-기계적 펄프 태그 클러스터별 공정 태그의 평균 및 분산

### 2.5 실제 제지공정 패턴 분석 검증

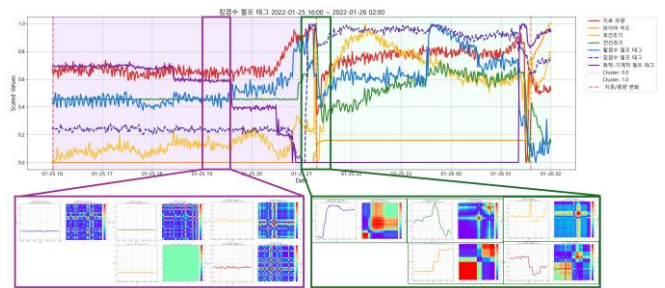


그림 4. 1월 25일 공정 태그 변화 및 GAF 패턴

1월 25일의 실제 공정 데이터를 기반으로 표 2 의 침엽수 펄프 태그의 패턴을 분석 및 검증한다. 그림 4 를 보면, 클러스터 0 과 클러스터 1 로 구분된 패턴 중 클러스터 1 이 공정 불안정성이 큰 구간임을 확인하였다. 클러스터 0 구간에서는 그래프 아래쪽에 제시된 시계열 그래프와 같이 지료 유량, 와이어 속도, 전건조기, 후건조기 태그들의 변동성이 낮은 것을 확인할 수 있다. 반면, 클러스터가 바뀌는 21 시 지점에서 지중과 평량 교체가 발생한 후부터, 공정

태그들의 변동 패턴이 급격하게 변화한다. 이 시점의 GAF 패턴을 살펴보면, 지료 유량, 전건조기, 후건조기 태그들의 변동성 역시 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 결론적으로, GAF 기법을 통해 1월 25일의 데이터에서 공정 변동성과 펄프 태그 변동성 간의 상관관계를 명확히 파악할 수 있었으며, 이러한 분석은 공정의 안정성과 불안정성 구간을 시각적으로 구분하는데 매우 유용하다.

### III. 결론

본 연구에서는 GAF 기법을 활용하여 제지 공정에서 발생하는 펄프 태그의 변동성을 분석하고, 이를 바탕으로 공정의 불안정성을 효과적으로 탐지할 수 있음을 확인하였다. 시계열 데이터를 GAF로 변환하여 시각적 패턴을 강조하고, K-Means 클러스터링을 통해 공정의 안정성과 불안정성 구간을 명확히 구분하였다. 특히, 지종과 평량 교체 시점에서 공정 불안정성이 크게 나타났으며, 펄프 태그와 공정 태그의 변동성이 밀접하게 연관되어 있음을 평균과 표준편차를 통해 확인하였다.

향후 연구에서는 GAF 기법을 CNN(Convolutional Neural Network)과 결합하여 더욱 정교한 공정 불안정성 예측 모델 구축을 통해 제지 공정의 안정성과 효율성을 더욱 체계적으로 관리하고, 빅 데이터 분석을 통한 스마트 제조 기법으로 공정 최적화와 에너지 절감에 크게 기여할 수 있으며, 제조 공정의 복잡한 데이터를 분석하고 공정 상태를 예측할 수 있는 가능성을 제공한다[4].

### 참 고 문 헌

- [1] Davies, R. W. "The Data Encryption Standard in Perspective." Computer Security and the Data Encryption Standard, pp. 129-132.
- [2] 김선혁, 신영미, 도윤미, 허태욱, 이일우.  
"공장에너지관리시스템(FEMS)의 이상 진단 알고리즘 경량화를 위한 데이터 전처리 방법." 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 1744-1745, 경북, 2022-05-26.
- [3] Furszyfer, Dylan D., et al. "Lightweight Gramian Angular Field Classification for Edge Internet of Energy Applications." Processes 2022, 5(39): 1-13.
- [4] Furszyfer, Dylan D., et al. "Big Data Analytics for Smart Manufacturing: Case Studies in Semiconductor Manufacturing." Renewable and Sustainable Energy Reviews 167 (2022): 112706.