

통계적 기법을 활용한 계절 기반 제지공정 분석

박선아, 도윤미, 최진영*

국립한밭대학교, 한국전자통신연구원*

ssunaa0322@gmail.com, {ydoh, choij0*}@etri.re.kr

Seasonal Analysis of Paper Making Process using Statistical Techniques

Suna Park, Yoonmee Doh, Jinyoung Choi*

Hanbat National University, Electronics and Telecommunications Research Institute*

요 약

본 논문에서는 제지공정 데이터로부터 계절 변화가 제지공정과 평량에 미치는 영향을 분석하였다. 기온, 습도, 기압 등의 환경 요인과 공정 변수 간의 관계를 표준 편차와 변동계수를 통해 분석한 결과, 여름과 겨울철에 변동성이 봄과 가을 대비 0.23으로 가장 큰 차이를 보였다. 겨울철에 저평량을 생산할 때 후건조부 공정데이터의 변동 폭이 크게 증가한 것을 확인하였다. ANOVA(Analysis of Variance) 및 Tukey HSD(Honestly Significant Difference) 테스트를 통해 계절 간 차이가 통계적으로 유의미함을 검증하였다. 본 연구는 제지공정에서 계절적 변동성을 고려한 최적화 전략의 필요성을 보였으며, 향후 계절 변화에 대응하기 위한 최적화 방안 개발의 중요성에 기여한다.

I. 서 론

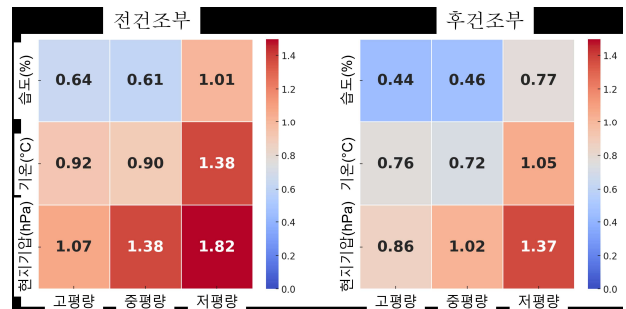
IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 6차 보고서에 따르면, 산업혁명 이후 급격히 증가한 온실가스 배출로 인해 지구 온난화가 가속화되었으며, 이는 전 세계적으로 이상 기후 현상을 초래하고 있다[1]. 제지업종의 경우, 뚜렷한 사계절과 밀접한 관련이 있다[2]. 제지업종은 연중 생산량이 높은 연속공정으로 제품 품질을 유지하기 위한 효율적인 공정 운영 방안이 필요하다. 따라서 환경 조건의 변화에 영향을 받는 제지공정의 특성을 고려하여 현장에서 안정적인 생산을 유지할 수 있도록 계절에 따른 공정데이터 분석을 수행하였다. 제지공정은 조성공정, 초지공정, 코팅공정, 완성공정으로 나뉘며, 이 중 초지공정은 전체 스프 에너지의 60% 이상을 소비한다[3]. 초지공정의 건조부는 여름철의 높은 온도와 습도, 겨울철의 건조한 기후로 인해 종이의 건조와 품질 유지에 직접적인 영향을 받는다. 본 연구는 이러한 계절적 환경 조건이 제지공정에 미치는 영향을 분석한다.

II. 본론

2.1 데이터 수집 및 전처리

본 연구에서는 2022년 1월부터 11월까지 수집된 제지공정 데이터를 분석하였다. 데이터는 1분 단위로 수집되었으며, 공정 설비의 센서로부터 취득된 총 2,061개의 변수를 포함하고 있다. 공정 변수와 더불어 기온, 습도, 현지기압 등의 기상 데이터를 병합하여, 환경 조건과 변수 간의 관계를 분석한다. 제지공정에서 종이의 종류인 지종과 종이의 중량인 평량은 물리적 특성과 품질에 직접적인 영향을 미치는 중요한 변수이다. 평량이 높을수록 단위 면적당 많은 펄프가 있는 것을 의미하므로 종이가 두꺼워진다. 본 논문에서는 수집된 제지데이터의 평량을 고평량, 중평량, 저평량 3가지로 분류하였다. 데이터 신뢰성을 위해 결측치 비율이 90% 이상인 변수를 제거하고, 6-sigma 기법을 사용해 평균에서 표준편차의 6배를 벗어나는 이상치를 제거하였다[4]. 또한, 연속 공정의 특성을 고려해 선형 보간법과 평균 대체법으로 결측치를 보완하였다.

2.2 계절 변화와 공정 변수 분석



<그림 1> 평량별 건조부의 기상환경 상호 정보량 히트맵

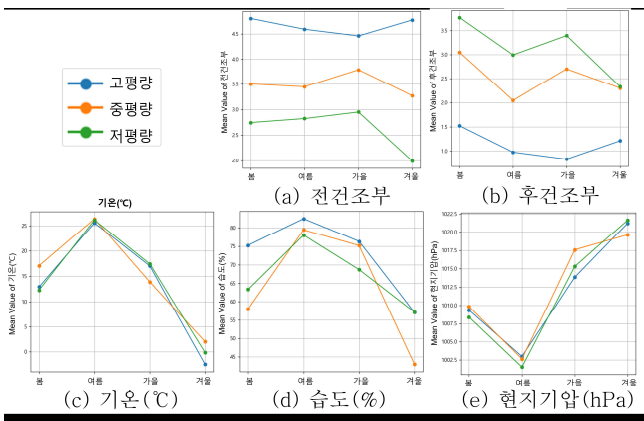
기후 변화가 제지공정에 미치는 영향을 분석하기 위해, 초지공정의 전건조부와 후건조부를 기상환경과의 상호 정보량(Mutual Information) 기반 으로 분석하였다. 가장 뚜렷한 차이를 보인 기압은 공기 밀도와 열 전달에 직접적으로 영향을 미쳐, 제지 공정의 열역학적 효율성에 중요한 변수임을 확인하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이, 전건조부에서는 저평량에서 기압과의 상관성이 1.82로 가장 높았으며, 중평량에서는 1.38, 고평량에서는 1.07로 나타났다. 후건조부에서도 유사한 경향이 나타나, 저평량에서 기압과의 상관성은 1.37로 가장 높고, 중평량과 고평량에서는 각각 1.02와 0.86로 점차 감소하는 모습을 보였다. 평량이 낮을수록 기상환경과의 상호작용이 더 강해지는 경향을 확인하였다. 이를 바탕으로, 기상환경의 변화에 따른 공정변수의 변동성을 계절별로 표준 편차(Standard Deviation)와 변동계수(Coefficient of Variation)를 통해 분석하였다. 표 1을 보면 전건조부의 경우, 저평량에서 겨울철의 변동계수는 0.433, 표준 편차는 0.860으로 가장 높은 변동성을 보였다. 여름철에도 저평량의 변동계수는 0.153, 표준 편차는 0.432로 상당히 높은 변동성을 나타냈다. 고평량에서는 여름과 겨울철 각각 변동계수 0.063, 0.019로 낮은 변동성을 보였다. 후건조부의 경우, 고평량에서 겨울철 변동계수는 0.463, 표준 편차는 0.560으로 가장 높은 변동성을 기록하였다. 여름철 고평량의 변동계수

는 0.273, 표준 편차는 0.266으로 나타났으며, 중평량과 저평량에서도 겨울과 여름철에 높은 변동성이 관찰되었다. 따라서 계절별 변동성을 분석한 결과 겨울철과 여름철에 공정변수의 변동성이 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다.

<표 1> 표준편차 및 변동계수를 통한 평량별 계절 변동성

공정변수	평량	봄(SD/CV)	여름(SD/CV)	가을(SD/CV)	겨울(SD/CV)
전건조부	고평량	0.136 / 0.028	0.291 / 0.063	0.185 / 0.042	0.088 / 0.019
	중평량	0.446 / 0.127	0.501 / 0.145	0.422 / 0.112	1.037 / 0.317
	저평량	0.254 / 0.093	0.432 / 0.153	0.375 / 0.127	0.860 / 0.433
후건조부	고평량	0.655 / 0.439	0.266 / 0.273	0.166 / 0.199	0.560 / 0.463
	중평량	0.603 / 0.198	0.624 / 0.385	0.459 / 0.170	0.748 / 0.326
	저평량	0.383 / 0.102	0.662 / 0.221	0.739 / 0.218	0.565 / 0.243

2.3 평량별 변동성 분석



<그림 2> 평량 및 계절에 따른 건조부 공정 변수의 계절적 변동성 : (a) 전건조부; (b) 후건조부; (c) 기온; (d) 습도; (e) 현지기압

평량에 따른 주요 공정 변수인 스팀 제어값과 계절별 변동성을 분석한 결과, 그림 2의 (a)에서 고평량은 스팀 제어값이 봄에 4.81에서 겨울에 4.78로 약 0.03 감소하였고, (b)에서는 봄에 1.52에서 겨울에 1.21로 약 0.31 감소하여 비교적 낮은 변동을 보였다. 반면, (a)의 저평량에서는 봄에 2.74에서 겨울에 1.99로 약 0.75 감소하였으며, (b)는 봄에 3.77에서 겨울에 2.24로 약 1.53 감소하여 스팀 제어값의 더 큰 변동폭을 보였다.

이는 (c), (d), (e)와 같이 봄과 겨울 사이의 기온 변화, 습도 감소, 기압 상승과 같은 환경적 요인이 반영된 결과로 보인다. 예를 들어, 기온은 봄에 약 12.9°C에서 겨울에 -0.15°C로 하락하였고, 습도는 봄에 약 75.2%에서 겨울에 57.2%로 감소하였다. 또한, 기압은 봄에 약 1009.9 hPa에서 겨울에 1021.7 hPa로 상승하였다. 이러한 환경 변화는 특히 후건조부의 스팀제어값에 더 큰 영향을 미쳤으며, 평량이 낮을수록 겨울철 후건조부의 변동성이 크게 증가하는 경향을 확인하였다. <그림 1>에서는 저평량에서의 영향이 두드러지며, <그림 2>에서는 그 원인이 겨울철의 환경적 요인임을 확인할 수 있다.

2.4 통계적 검증 및 결과

계절성에 따른 공정 변수의 차이를 검증하기 위해 ANOVA(Analysis of Variance) 및 Tukey HSD(Honestly Significant Difference) 테스트를 수행하였다[5]. <표 2>에 고평량과 저평량에서 모든 변수에 대해 매우 높은 ANOVA F-value가 나타났으며, 계절 간 평균 차이가 통계적으로 유의미함을 보였다. 중평량의 전건조부에서는 다른 변수조건 대비 낮은 F-value 결과를 통해 다른 평량 대비 타변수조건 설정 및 추가 분석이 필요하다.

Tukey HSD 테스트 결과, 계절 간 평균 차이의 절대값은 대체로 0.05에서 0.75 사이로 나타났으며, 이는 계절 변화가 공정 변수들의 변동성을 크게 유발할 수 있음을 의미한다. 모든 평량에서 후건조부의 F-value가 전건조부보다 더 높게 나타났으며, 이는 후건조부가 계절 변화에 더 민감하게 반응함을 의미한다. 특히, 평량이 낮을수록 계절적 변화가 공정데이터 값 설정에 크게 작용하였고, 가을과 겨울철에는 후건조부의 변동폭이 크게 증가하였다. 이러한 결과는 기온 감소와 습도 감소가 건조 공정에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다. 따라서 제품의 품질을 유지하기 위해 저평량의 후건조부에서의 환경 조건의 영향력을 고려할 필요성이 있다.

<표 2> 평량별 건조부의 ANOVA 및 Tukey HSD 테스트 결과

평량	공정변수	ANOVA F-value	Tukey HSD Significant
고평량	전건조부	3567.854	TRUE
	후건조부	3457.156	TRUE
중평량	전건조부	724.739	TRUE
	후건조부	2957.967	TRUE
저평량	전건조부	2559.588	TRUE
	후건조부	3098.263	TRUE

III. 결론

본 연구에서는 표준 편차를 통해 계절별 변동성을 분석한 결과, 여름과 겨울에 전건조부에서는 평균 0.53, 후건조부에서는 평균 0.57로 크게 나타나는 것을 확인하였다. 봄과 가을을 비교했을 때, 전건조부에서는 평균 0.30, 후건조부에서는 평균 0.50의 변동성을 보였으며, ANOVA 및 Tukey HSD 테스트를 통해 공정 변수의 계절별 차이를 검증하였다. 또한 평량이 낮을수록 계절적 변화에 더 민감하게 반응했으며, 가을과 겨울철에는 후건조부에서 저평량의 변동폭이 기온과 습도의 감소로 인해 1.06 이상 크게 증가하였다. 향후 연구에서는 계절적 변동성에 따른 공정 최적화를 통해 에너지 소비를 줄이는 방안을 구체화하고, 실시간 기상 데이터를 활용하여 공정 조건을 자동으로 조정할 수 있는 시스템 개발을 통해 다양한 기후 시나리오에 따른 공정 변수 변화를 예측하고 대응 전략을 마련하는 연구가 필요하다. 이를 통해 제지공정의 안정성을 강화하고, 기후 변화로 인한 영향을 최소화할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] 오채운, 송예원, 김태호. "IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 기반, 기후기술 대응 시사점: 탄소중립 10대 핵심기술을 중심으로", NIGT Focus, pp. 1-22, 2023.
- [2] 이광석. "우리나라 계절별 습도변화가 국산 아트지의 인쇄적성에 미치는 영향", 한국인쇄학회지, 16(2), pp. 45-59, 1998.
- [3] 이상금 외. "제지공정 건조 실린더의 스팀에너지3차원 모델링 방법론", 한국통신학회 종합 학술 발표회(하계), pp.458-459, 2022.
- [4] 박주석, 김동수. "제조업과 서비스업에서의 6시그마 적용에 관한 비교 연구", 한국경영과학회 학술대회논문집, pp. 289-292, 2004.
- [5] 정미미, 엄한주. "Two-way ANOVA 분석절차 및 사후검증방법의 이해", 한국체육측정평가학회지, 13(2), pp. 1-15, 2011.