

# 공장에너지관리시스템(FEMS)를 위한 공정 에너지밸런스에 대한 연구

김소연<sup>1\*</sup>, 정민규<sup>1</sup>, 구돈익<sup>1</sup>, 정상훈<sup>1</sup>, 배수진<sup>1</sup>, 서기정<sup>2</sup>, 송지원<sup>2</sup>, 김민성<sup>1,2\*\*</sup>

중앙대학교 대학원 지능형에너지산업학과<sup>1</sup>, 중앙대학교 에너지시스템공학부<sup>2</sup>,  
nuri36@cau.ac.kr\*, minsungk@cau.ac.kr\*\*

## Study on Energy balance for Factory Energy Management System (FEMS)

<sup>1</sup>Soyeon Kim, <sup>1</sup>Minkyu Jung, <sup>1</sup>Donik Ku, <sup>1</sup>Sanghun Jeong, <sup>1</sup>Soojin Bae, <sup>2</sup>Gijeong Seo, <sup>2</sup>Jiwon Song, <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

Energy efficiency technologies became a key technology for energy saving. By applying FEMS(Factory Energy Management System) in the industrial sector, energy efficiency can be achieved continuously and energy intensity can be improved. Energy balance is the most important in FEMS, and we can figure out the factory energy use status. In energy balance, the heat flow is analyzed focusing on the in/output of heat not the flow of materials. In this paper, the energy balance of the drying process in paper making process is carried out. As a result, it is turned out that infiltration air, which is air inside the factory (outside the hood) and is colder than inside the hood, is flowing to the hood, so this resulted in heat loss in the hood. Like this, in the current situation where the cost of energy diagnosis is such high, energy balance can implement FEMS by visualizing the heat flow. With real-time changing Sankey diagrams or pie charts, it can optimize operation by providing real-time data so that operators can achieve stable and automatic operation. Finally, as data are accumulated, the energy efficiency can be realized through the energy saving and energy intensity improvement.

### I. 서론

한국의 에너지원단위는 2017년 0.159 toe/\$1,000로 OECD 평균 0.104에 비해 현재까지 높은 수준이다. (1) 또한 산업부문의 에너지 소비량은 최종에너지 소비의 약 40%를 차지하며 이 부문의 에너지 사용에 대한 체계적인 관리와 절감 방안이 마련되어야 한다. IEA는 WEO(World Energy Outlook)에서 2040년까지 에너지 절감량의 약 60%가 향상된 에너지 효율화에 기인할 것으로 예상하였다. (2) 산업부문에서 에너지 관리시스템을 적용함으로써 지속적이고 장기적으로 에너지 효율화를 실현할 수 있으며, 원단위 향상을 목적으로 산업 공정 및 공장에 최적화한 에너지관리시스템을 공장에너지관리시스템(FEMS)라 한다.

Fig. 1과 같이 공장 에너지 최적화 과정은 유틸리티 효율 분석을 통해 공정 원단위를 도출 및 분석할 수 있고, 유틸리티의 이상진단을 통해 개별 설비 최적화 운전 및 공정 최적화 운전을 실현할 수 있다. 유틸리티는 에너지사용량신고 자료 기준 에너지다소비 8대 설비를 우선으로 적용하며, 한국에너지공단의 에너지관리표준 모델에 따라 주요 지표를 사용하여 열정산을 수행한다. 아래 Fig. 2의 Level 3와 같이 개별 설비 한 대당 주요 지표가 매우 많고 공장에는 다양한 설비가 공전하고 있으므로 현실적으로 주요 지표를 대상으로 데이터를 측정하여 공장의 모든 에너지 현황을 파악하고 운전을 최적화하는 것은 불가능에 가깝다.

이에 본 논문에서는 공정 단위 중심의 에너지밸런스 분석 방법을 소개하고 이를 통해 공장 에너지의 실효적 절감을 실현하기 위한 의견을 제안하고자 한다.

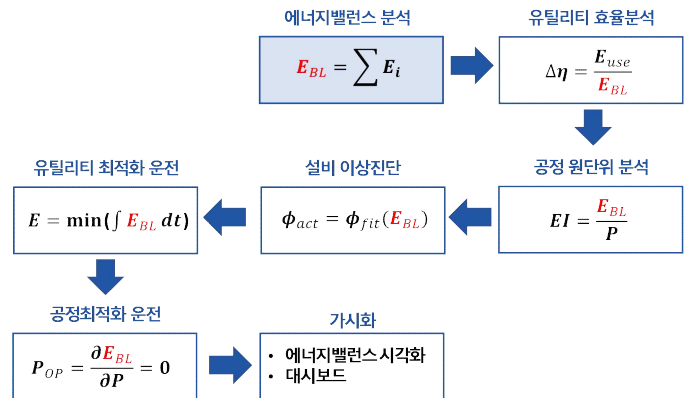


Fig. 1 FEMS 공장 에너지 최적화 과정

### II. 본론

공장 에너지 최적화를 위해 에너지관리표준 모델(3)의 주요 지표 중 열정산 필수 항목만으로 최소화하는 것은 반드시 선행되어야 한다. 펌프(송풍기)를 예로 들면, Fig. 2와 같이 15개의 지표가 필요하나 유틸리티의 spec sheet에 존재하는 항목을 우선 분류하고, 축소하면 3~5개의 지표로 열량 계산을 위해 최소화할 수 있다. 이리나 이마저도 공정에서 에너지 사용량 현황 파악을 위해 감사체적의 설정에 따라 유틸리티가 아닌 공정 단위로 주요 지표를 최소화하는 것이 필요하다.

공정 분석은 에너지밸런스에서 가장 중요한 부분이다. 공장의 에너지 관리자는 생산량과 품질을 위해 공정도를 작성하고 열의 입출력을 고려하지 않는다. 따라서 에너지밸런스에 적용하여 열이 어떻게 분배되는가를 분석하기는 어렵다. 에너지밸런스를 위해서는 열의 입출력을 중심으로 물

질별 열흐름을 분석하는 것이 중요하다. 이에 따라 유틸리티 단위가 아닌 공정 단위 중심으로 분석한다.

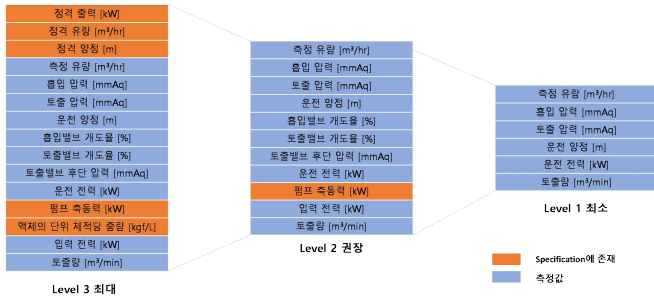


Fig. 2 펄프(송풍기) 열정산을 위한 주요지표 최소화

본 논문에서는 제지 초기 공정 중 건조 과정에 대한 에너지밸런스 분석하였다. 초기 공정은 탈수부와 건조부로 구성되어 있으며 종이의 두께와 수분량이 결정되어 제품이 완성되는 과정이다. 프레스(Press)에서 압착 탈수 후 드라이어 후드 내부로 이동한 지료는 가열된 스팀 실린더 사이를 이동하면서 수분이 증발된다.

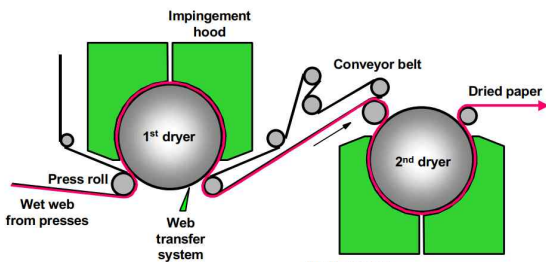


Fig. 3 드라이어 후드 내부(Valmet) (위), 종이 건조 과정<sup>(4)</sup> (아래)

Fig. 3의 빨간색으로 표시된 것이 종이이다. 후드 내에는 종이에서 증발된 수분이 포함된 습증기의 배기 및 외부 공기 급기 설비, 실린더 스팀 공급 및 응축 시스템 등 전체 종이 제조 공정 열에너지 사용량의 80%를 차지하는 에너지 다소비 공정으로 에너지관리(FEMS)가 필요하다. 에너지 절감을 위해서 보통 후드 외부로 배출되는 습증기는 열회수장치를 통해 외기 온도의 후드 공급 공기를 예열한다.

열 에너지 절감 차원에서 열 회수량이 최대일 때 에너지 비용이 가장 많이 절감되지만, 후드 배기의 온도가 낮아지거나 후드 내의 습도가 증가하면서 이슬점(dew point)에 도달하게 되면 응축으로 인해 지절이 발생한다. 또, 후드로 공장 내부의 공기가 침입하는데 유입 유량이 정상 범위를 벗어나게 되면 온도차로 인해 응축이 발생한다. 후드의 배기 공기(exhaust air)와 급기 공기(supply air), 침입 공기(infiltration air)가 균형을 이루는 지점을 제로 레벨(zero-level)이라고 하고, 이는 제지 품질을 위해 중요한 지표이다. 제로 레벨이 너무 높거나 낮으면 생산 품질이 저하되

고 응축으로 인한 지절량이 증가하게 된다.

열 공정은 계절에 따라 손실이나 흐름에 변화가 크지만 일반적으로 동일하게 운전할 가능성이 높다. 초지 후드 내로 침입되는 공기(infiltration air)의 온도는 후드 외부(공장 내부)의 온도이므로 계절에 따라 온도 편차가 발생하고 생산량과 지절율에 영향을 미친다. 따라서 에너지밸런스 데이터를 축적하고 분석함으로써 계절별 운전을 최적화하고 원단위 향상에 도움을 줄 수 있다. 계절뿐만 아니라 생산 지종에 따라 축적 데이터를 분석하여 급/배기 공기 온도, 습도 등의 열 흐름 변화를 파악할 수 있다.

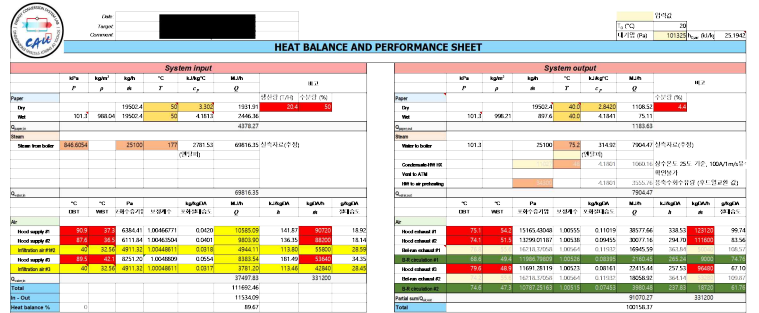


Fig. 4 엑셀 기반 초기공정 에너지밸런스 분석 모델

REFPROP과 습공기 물성 프로그램을 이용하여 Fig. 4와 같이 엑셀 기반의 에너지밸런스 모델을 구현하였다. 에너지밸런스는 Fig. 5와 같이 가시화 할 수도 있다. Fig. 3을 보면, 공기의 히트밸런스 분석 결과 출열의 91%가 배기 공기(exhaust air)에 의해 외부로 배출되며 입열의 대부분은 종이를 건조하기 위해 실린더로 공급하는 스팀(62%)과 공급 공기(supply air)와 침입 공기(infiltration air) (34%)에 의해 공정 내로 유입된다. 전체 후드의 46.6%는 침입 공기로 구성되어 있음을 알 수 있다. 침입 공기는 후드 내부보다 저온인 공장 내부(후드 외부) 공기가 유입되는 것으로, 이로 인해 후드 내부에 열 손실이 많을 것으로 예상된다. 에너지밸런스는 89.67%의 정확도로 산정되었다. 10.33%는 손실된 열이 아닌, 계측 데이터 부족 및 정확성에 의한 오차이므로 계측 데이터 확대가 필요하다.

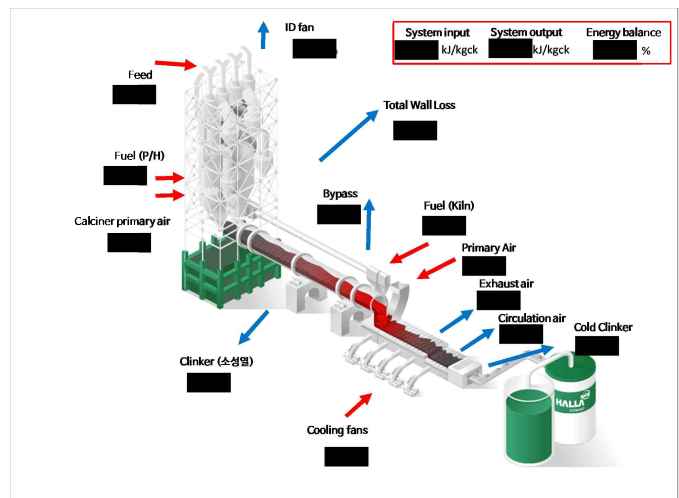


Fig. 5 시멘트 소성공정 실시간 에너지밸런스 화면 구현

### III. 결론

에너지 진단 비용이 매우 높은 상황에서 에너지밸런스는 유량, 온도, 열량 등 열의 흐름을 가시화함으로써 FEMS를 구현할 수 있다. 실시간으로

변화하는 Sankey diagram이나 Pie chart 등으로 공장 운전자가 안정적인 연속 운전이나 자동 운전이 가능하도록 실시간 측정 데이터를 제공하며 Fig. 5와 같이 운전자가 요구하는 화면 구성(열량, 풍량, 온도, 운전 상태 표시, 위험 알람 등)을 통해 운전을 최적화할 수 있다. 최종적으로 데이터가 축적됨에 따라 에너지 절감 및 원단위 향상을 통해 에너지 효율화를 실현 가능할 것으로 사료된다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기초연구사업(2019R1A2C1088694), 한국에너지기술평가원 에너지기술개발사업 (20202020900290, 20212050100010), 환경부 미세먼지사각지대관리기술(2020003060005)의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] IEA, World Energy Balances, 2018.
- [2] IEA, World Energy Outlook, 2014.
- [3] 한국에너지공단, 에너지관리기준.
- [4] PIKULIK, I. I., POIRIER, 2003, N. A. New developments in paper and board drying. In: Proceedings of the International Conference on the Chemical Technology of Wood, Pulp and Paper, Slovak Technical University, Bratislava, p. 56-65.