

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.3.817

JCCT 2023-5-97

식품가공공장의 에너지 절감을 위한 batch식 가열 공정 에너지 소비 분석 : 사례 연구

Energy Consumption Analysis of Batch Type Heating Process for Energy Savings in Food Processing Plants

여채은*, 조우진**, 구재회***, 임채영****

Chae-Eun Yeo*, Woo-jin Cho**, Jae-Hoi Gu***, Chae-Young Lim****

요약 제조 공장은 기후 변화에 따른 에너지 사용 절감 문제에 직면해 있다. 에너지 소비 절감은 생산 비용 절감 및 효율 개선과 같이 가장 중요한 문제 중 하나로 볼 수 있다. 제조 산업 군 중에서도 식품 에너지 소비 규모 증가는 식생활 수준 향상 및 인구 증가와 더불어 점차 높아지고 있다. 식품가공공장의 에너지 절감을 위해서는 에너지 다소비 공정에서의 에너지 소비 특성을 파악하고 분석하는 것이 중요하다. 이에 앞서 기존 에너지 소비량을 모니터링하고 분석하여 절감 방안을 도출하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 육가공류를 생산하는 중소기업 규모 식품가공공장을 사례 연구로 하여 batch식 가열 공정의 주기·단계 수준에서의 에너지 소비 구조를 파악하고 분석하고자 하였다. 이를 통해 개별 공정 작업 조건에서 얻을 수 있는 현실적이고 정량적인 목표를 수립하고자 하였다. 본 연구 결과는 향후 중소기업 식품 공장 공통 핵심 공정에 대한 확산 보급형 에너지 절감 FEMS 기술 개발의 기초 자료로 활용될 것이다.

주요어 : 에너지 절감, 에너지소비분석, 배치시스템, 에너지관리, 공장에너지관리시스템

Abstract Manufacturing plants face the challenge of reducing energy use in response to climate change. Reducing energy consumption can be seen as one of the most important issues, such as reducing production costs and improving efficiency. Among manufacturing industries, the increase in energy consumption in the food industry is gradually increasing along with the improvement of the standard of living and the increase in population. In order to save energy in food processing plants, it is important to identify and analyze energy consumption characteristics in energy-consuming processes. Prior to this, it is necessary to monitor and analyze existing energy consumption to derive reduction measures. In this study, a small and medium-sized food processing plant producing processed meat products was used as a case study to identify and analyze the energy consumption structure at typical cycle/stage level of the batch heating process. From this, we tried to establish realistic and quantitative goals that can be obtained under individual process operating conditions. The results of this study will be used as basic data for the development of diffusion and pervasive energy saving FEMS technology for common core processes of food factories of small and medium-sized enterprises in the future.

Key words : Energy savings, Energy consumption analysis, Batch system, Energy management, FEMS

*정회원, 고등기술연구원 에너지환경IT융합그룹 연구원 (제1저자) Received: April 15, 2023 / Revised: April 30, 2023

**정회원, 고등기술연구원 에너지환경IT융합그룹 연구원 (참여저자) Accepted: May 5, 2023

***정회원, 고등기술연구원 에너지환경IT융합그룹 연구위원 (참여저자) *Corresponding Author: cylim@iae.re.kr

****정회원, 고등기술연구원 에너지환경IT융합그룹 선임연구원(교신저자)Dept. of Energy Environment IT Convergence Group,

접수일: 2023년 4월 15일, 수정완료일: 2023년 4월 30일 Institute for Advanced Engineering, Korea

게재확정일: 2023년 5월 5일

I. 서론

제조 공장은 높은 화석연료 소비로 인한 기후 변화와 에너지 비용에 대한 우려로 인해 탄소 발자국을 줄여야 하는 압력이 커지고 있다. 이는 탄소 배출 관련한 규제와 개발도상국의 에너지 수요 증가 등으로 인한 에너지 비용으로 미래에 훨씬 더 중요한 문제로 대두될 것이다 [1].

제조 공장에서의 에너지 소비를 절감하는 것은 생산 효율성 개선 및 생산 비용 절감과 더불어 작업장에서 가장 중요한 생산 문제 중 하나로 볼 수 있다 [2].

이에 계측 모니터링 시스템 미비와 단순제어로 인한 상당한 과잉 에너지 소비 문제를 겪는 중소기업 규모 제조업체에 대한 생산정보 및 에너지관리시스템 기술 도입과 적용은 필수불가결하다 [3].

제조 산업 군 중에서도 식품 산업 분야에 대한 관심은 인구 증가와 식생활 수준 향상에 따른 식품 에너지 소비 규모의 증가로 인하여 점차 높아지고 있다. 식품 산업은 에너지 집약적 활동을 포함하며, 총 생산 비용 중 에너지에 관한 비용은 20%에서 50%를 차지하고 있다고 알려졌다 [4][5][6].

이에 식품제조공장에서의 에너지 효율 개선과 에너지 소비 분석을 위한 다양한 연구는 수행되어 왔다. 이 중 일부는 유제품 공정에 대한 전기 및 열에너지 전반에 걸친 에너지 집약적 장치에 대하여 에너지 소비를 평가하였다 [7].

다른 이전 연구로는 소시지 가공 공정의 전기 및 열 에너지를 대상으로 한 인프라 구조, 제조공정 및 냉장 시스템 전반의 에너지소비 평가를 연구하였다 [8].

60개 가공 산업에 걸친 포르투갈의 식품 가공 산업의 육류, 유제품, 원예 및 빵과 페이스트리 제품의 전기 및 열에너지 소비 현황이 조사되었다 [9]. 최근에는 에너지관리식품 기업의 IoT 기반 스마트 에너지 시스템 적용을 위한 에너지 효율성 개선 연구가 음료 공장의 사례 연구로 수행되었다 [10].

그러나 개별 공정 또는 장비에 대한 작업 조건에서 얻을 수 있는 가이드라인을 제공하지는 않는다.

본 연구에서는 식품제조공정의 주요 공정 단계 중 보편적으로 널리 사용되는 batch 식 가열 공정에 대한 에너지 소비 분석을 통해 에너지 소비 특성을 파악하고 주요 에너지 절감을 위한 타격을 선정하고자 한다. 이

러한 에너지 소비 분석에 대한 접근은 에너지 소비 수준 파악과 현재의 공장 내 에너지 소비 성능 평가, 그리고 향후 에너지 절감을 위한 정량적인 지표를 확립과 함께 에너지 관리 시스템 구축에 있어 도움을 준다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 식품가공공장에서 에너지 소비 분석을 위한 방법 및 분석 범위와 절차에 대하여 설명한다. 3장에서는 설명한 에너지 소비 분석을 대상 식품가공공장에서 적용한 사례 연구를 설명한다. 4장은 본 연구에서의 결론을 기술하여 후속 연구에 대하여 다룬다.

II. 에너지 소비 분석 절차 및 방법

1. 가열 공정에서의 에너지 소비 분석

대부분의 식품가공공장에서는 열 공급을 위한 스팀 수요가 높으며 스팀 생산은 연료 소비의 상당한 부분을 차지한다고 볼 수 있다 [11].

따라서 본 연구에서는 식품가공공장의 batch 식 가열 공정에서의 에너지 소비 분석이 시도되었다. 에너지 소비 분석 방법론은 지역 벤치마킹을 다른 방법론을 참고하여 채택하였다 [12].

본 연구에서는 다른 공장과의 비교 없이 개별 공장 자체에서의 에너지 절감을 위한 정량적 목표를 식별한다.

식품 가공 공장의 가열 라인에서의 일반적인 주기는 서로 다른 레시피에 의하여 구분되는 정상 조건에서의 생산되는 제품에 대한 반복되는 주기를 의미한다. 이외의 추가적인 비생산적인 활동은 본 연구에서의 에너지 소비 분석을 위한 주기 범위에서 제외된다. 일반적인 주기는 승온 패턴 및 열전달 방식이 각기 다른 제품군별 레시피를 바탕으로 식별될 수 있다.

2. 에너지 소비 평가 절차

1) 에너지 소비량 계산

각각의 단계에서의 에너지 소비량의 합산은 일반적인 주기에서의 에너지 소비량과 같다. 평균, 최대 및 최소 에너지 소비량은 이전 연구에서 정의된 식을 참고하여 계산되었다 [12].

일반적인 주기에서 최소 그리고 최대 에너지 소비량은 식별된 서로 다른 개별 단계 각각의 최소, 그리고 최대 에너지 소비량을 합산하여 계산된다. 일반적인 주

기 및 단계별 에너지 절감을 위한 에너지소비의 최저치

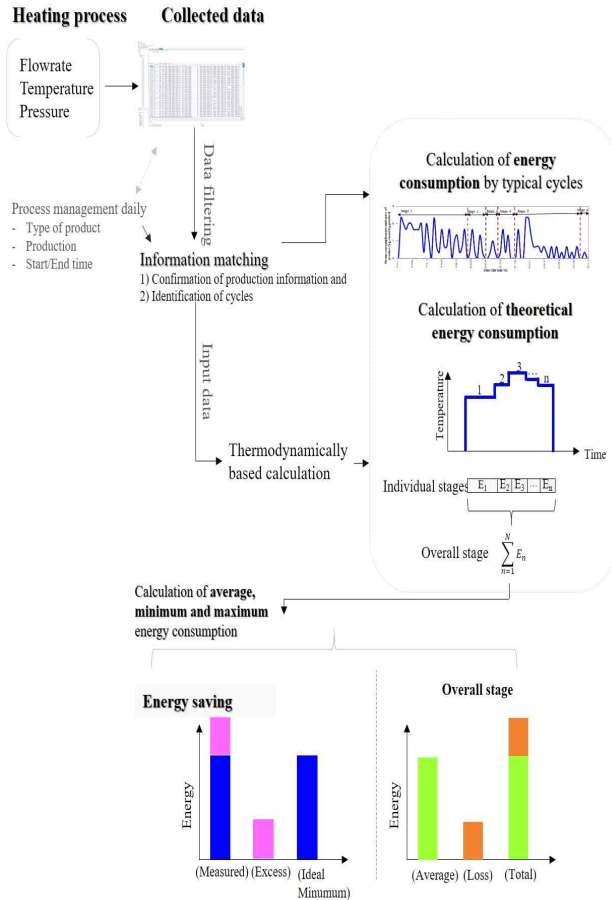


그림 1. 단계별 이론 에너지 소비량 계산을 위한 순서도
 Figure 1. Flow chart for calculating theoretical energy consumption for individual stage.

는 측정된 데이터 기반의 최소 에너지 소비량과 이론적 에너지 소비량으로 구분될 수 있다. 이론적 에너지 소비량은 최대 에너지 절감을 위한 경계와 향후 상세한 에너지 패턴 분석을 위한 정량적인 지표의 역할을 수행한다. 에너지 소비 분석을 위한 간략한 절차는 그림 1에 나타내었다.

2) 이론 에너지 소비량 계산

식품가공공장의 가열 공정에서의 이론적 에너지 소비량은 다음의 몇 가지 가정과 단순화한 접근 방식에 의하여 계산된다 [13][14]. 개별 단계에 대한 이론적 에너지 소비량 계산을 위한 순서도는 그림 2에 나타내었다.

III. Case study

1. 데이터 수집

본 연구에서의 주요 목표는 가열 공정에서의 에너지 소비 패턴을 더 잘 이해하며 에너지 절감량을 추정할 수 있는 의미있는 지표를 얻어내는 것이다. 이를 위한 첫 번째 단계는 에너지 소비 분석에 있어 필요한 데이터를 수집하는 것이다. 에너지 소비 분석에 있어 필요한 스팀 유량, 온도, 압력 데이터는 공장 내 구축된 계측 센서에 의하여 수집된다. 얻어진 데이터는 광범위한 측정 형태로 PLC를 거쳐 database에 적재된다. 데이터 처리 과정에서 결측치, 혹은 이상치를 갖는 데이터는 제외된다 (데이터 필터링).

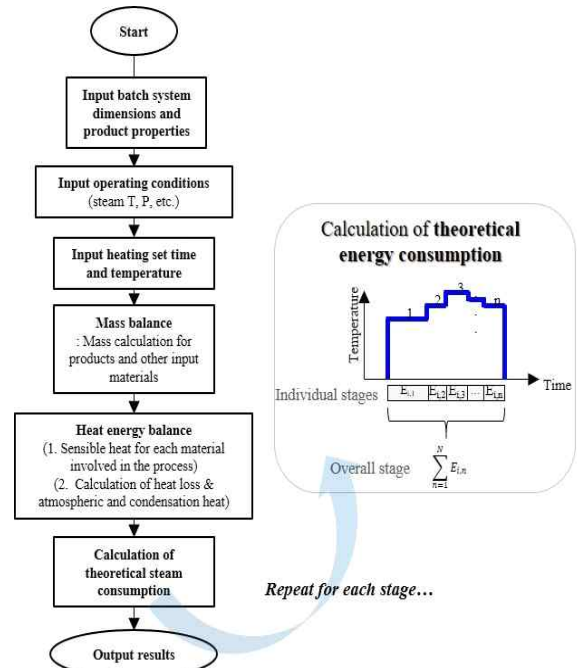


그림 2. 단계별 이론 에너지 소비량 계산을 위한 순서도
 Figure 2. Flow chart for calculating theoretical energy consumption for individual stage.

2. 에너지 소비 분석을 위한 대상 공정 설명

에너지 소비 분석을 위하여 제안된 방법론은 육가공류를 생산하는 중소기업 규모의 식품가공공장의 실제 사례 연구에 적용되었다. 가열 공정은 batch 방식의 가열 시스템에 의해 운전되며 한 주기당 6 단계로 구분된다. 제품 온도는 열 매체로 사용되는 스팀을 통해 제어된다. 그림 3(a)는 대상 가열 공정의 에너지 흐름 개략도를 보여준다. 한편, 그림 3(b)는 가열 공정 구조를 설명한다. 다수로 이루어진 가열 시스템의 열처리 능력

은 동일한 것으로 간주된다. 에너지 소비 분석은 동일한 가열 공정에 대하여 구분되는 1개의 라인에서 수집된 데이터로 수행되었다.

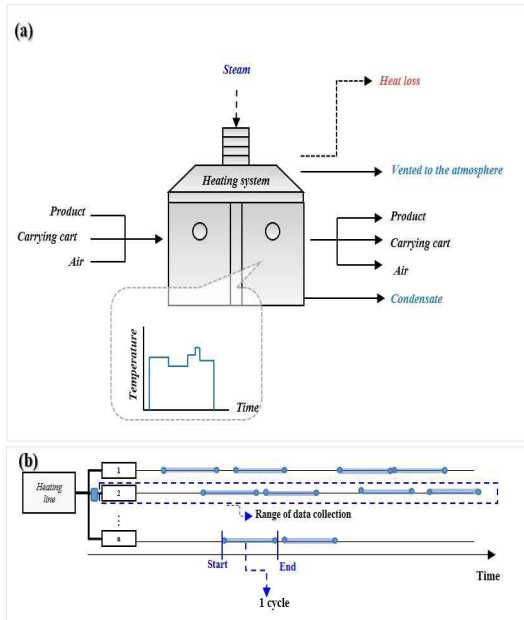


그림 3. 대상 식품가공공장의 가열 공정 개략도: (a) 단순화된 에너지 흐름, (b) 가열 라인 데이터 수집 범위 및 주기에 대한 설명
 Figure 3. Schematic diagram of the heating process of the target food processing plant: (1) simplified energy flow, (2) description of the heating line cycle and collection range.

3. 에너지 소비 분석 결과

일반적인 주기 내 단계별 에너지 소비 현황을 파악하는 것은 에너지 관리를 위한 절감 방안 제시에 앞서 수행되어야 할 것이다.

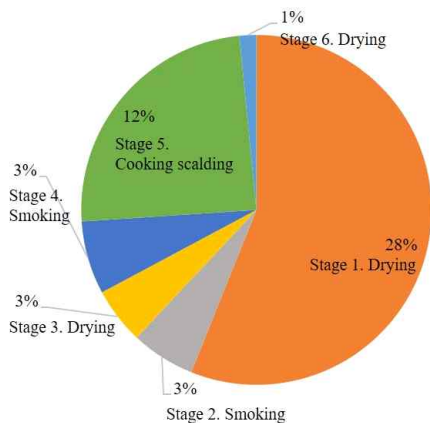


그림 4. 대상 식품가공공장 가열 공정의 평균 에너지소비 비율 분포
 Figure 4. Distribution of the average energy consumption (%) of the heating process of the target food processing plant

그림 4 는 대상 식품가공공장의 가열 라인에서의 평균 에너지 소비 비율을 나타낸다. 그림 4 에서 볼 수 있듯이 대상 식품가공공장의 가열 라인의 단계 1(건조 단계) 는 총 가열 공정 소비량의 약 28%를 차지한다. 대기 온도에서 목표 온도까지 도달을 위한 승온 과정에서의 현열 소모가 주된 원인임을 확인할 수 있다. 그래프에서 나타난 오차범위는 케이스별 에너지 소비가 불규칙하게 분포함을 나타낸다. 이러한 에너지 소비 분포 결과는 에너지 절감 측면에서 에너지 관리에 대한 주된 방향성을 제시해준다.

그림 5 는 일반적인 가열 주기 내 각 단계에서의 이론, 최소 및 평균, 그리고 최대 에너지 소비량의 분포를 보여준다. 최대 에너지 소비량은 향후 최대 소비 제어를 위한 지표로 작용될 수 있다. 한편, 평균 에너지 소비량과 최소 에너지 소비량의 차이는 바람직한 에너지 소비를 위하여 줄일 수 있는 가능한 에너지 량으로 간주할 수 있다. 평균 에너지 소비량과 최소 에너지 소비량과의 차이에서도 유사한 경향을 나타내었다. 단계 1 은 절대적인 에너지 소비량뿐만 아니라 앞선 소비량의 차이 또한 가장 크다. 따라서 효과적인 에너지 소비를 위해서는 단계 1의 에너지 절감이 우선적으로 이루어져야 함을 확인할 수 있다.

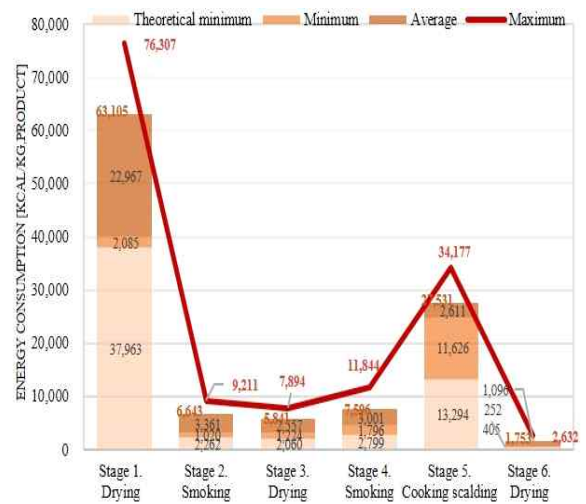


그림 5. 대상 식품가공공장 가열 공정의 각 단계에서의 에너지 소비 분포 : 이론, 최소, 평균 및 최대 에너지 소비
 Figure 5. Distribution of energy consumption at each stage in the heating line: Theoretical and minimum, average and maximum energy consumption

이론 에너지 소비량과의 각 단계의 에너지 소비량의 비교는 에너지 절감을 위한 경계선 역할을 한다. 각 단계에서 이론 에너지 소비 대비 최소 에너지 소비량의

절대 차이는 에너지 소비 관점에서 필요로 하는 이론(경계) 에너지와 실제 공정 과정에서의 간극을 의미할 수 있다. 이론 에너지 소비량과 최소 에너지 소비량에 대한 확연히 큰 소비량 차이가 나타난 단계에 대한 공장 현장 특이사항 확인 및 열처리 과정에 대한 재검토가 필요하다.

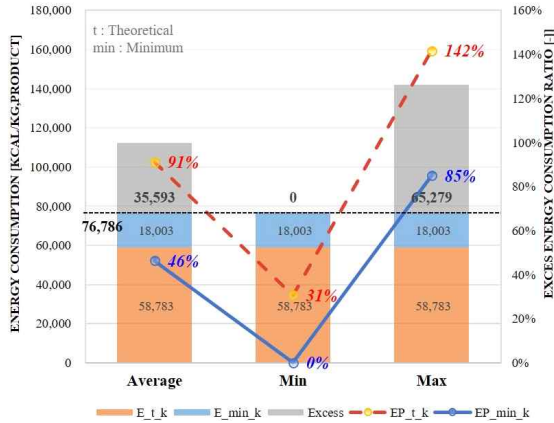


그림 6. 대상 식품가공공장 가열 공정에서의 일반적인 주기 내 에너지 소비분석 및 에너지소비 과잉을 결과

Figure 6. Results of energy consumption and excess ratio in typical cycle of heating process.

그림 6은 가열 공정에서의 주기별 과잉 에너지 소비량과 에너지 소비 과잉율을 나타낸다. 일반적인 주기 기준 가열을 위한 열에너지는 평균 에너지 소비량 기준 최소 46%가 낭비되고 있음을 알 수 있다. 가열라인의 에너지소비량 현황은 평균 최대 약 91% (이론 에너지소비량 기준), 최대 에너지 소비량 기준 142%의 에너지 소비 과잉율이 낭비됨을 확인하였다. 대상 식품가공공장의 에너지 낭비는 현장생산 관리자의 수동 제어와 최적화되지 않은 가공 작업에서의 에너지 절약 의식 부족으로 인해 초래된다. 한편, 평균 에너지 소비량 대비 에너지 소비 과잉율(최소치 기준)은 약 46% 에너지 절감이 가능함을 수치로 보여준다.

표 1. 에너지소비분석 결과의 대표성 검증

Table 1. Verification of representativeness of energy consumption analysis results

Energy consumption per product [kcal/(kg-product)]	For a week	For a month	Relative difference [%]
	Sampling data (target)	Collection data	
Average	112,378	102,869	9.24
Maximum	142,064	134,847	5.35
Minimum	76,786	80,128	4.17

비교적 짧은 기간 수집된 데이터를 기반으로 에너지 소비 분석 방법론을 적용하여 도출된 결과가 대표성을 갖는지에 대한 검증 과정은 필요하다. 표 1은 앞서 에너지 소비 분석 방법론이 적용된 샘플링 데이터와 한 달간 수집된 에너지 소비량 데이터 결과의 평균, 최대, 그리고 최소 에너지 소비량을 비교한 결과이다. 샘플링 데이터는 앞선 2절에서 설명된 에너지 소비 분석 절차에 의하여 얻어진 값을 의미한다. 한 달간의 수집 데이터는 각 일반적인 주기 당 얻어진 스팀 량과 압력을 바탕으로 에너지 소비량을 구하여 얻어졌다. 샘플링 데이터와 수집된 데이터의 에너지 소비량의 상대적인 차이(백분율)은 각각 제품 당 평균, 최대, 그리고 최소 에너지 소비량에 대하여 9.24%, 5.35%, 그리고 4.17%이었다.

에너지 소비 분석 방법론이 적용된 최대, 그리고 최소 에너지 소비량은 각각 일종의 상한선, 그리고 하한선으로 작용할 수 있다. 수집된 한 달간의 일반적인 주기에서의 에너지 소비량 분포는 모두 에너지소비분석 상하한 범위 안에 위치함을 확인하였다. 데이터의 수집된 기간과 제한된 수집 데이터의 수를 고려하였을 때 샘플링 데이터와 수집된 데이터의 에너지 소비량의 상대적인 차이는 가열 공정에서의 에너지 소비 분석 결과를 대표성을 갖는다고 볼 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 식품가공공장의 batch 식 가열 공정에서의 에너지 소비 분석을 위한 방법론을 제안하고 이를 각 주기·단계 수준에서 활용하였다. 일반적인 주기 내 단계 수준에서 실행 가능한 에너지 절감 목표 설정을 위하여 동일한 가열라인에서의 에너지 소비량을 측정하고 비교해야 한다.

사례 연구로 육가공류를 생산하는 식품가공공장의 batch식의 한 가열 라인에서의 일반적인 주기 내 단계별 에너지 소비 분포를 얻었다. 최초 온도에서 가열 온도까지 승온 기울기가 크며 비교적 열처리 시간이 길게 진행되는 단계 1에서 에너지 소비가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 가열 라인의 일반적인 주기 기준 총괄 평균 과잉 에너지 소비율은 약 46% (이론 에너지 소비량 기준 91%)에 달하였다. 단계 1은 일반적인 주기 내 각 단계 중 과잉 에너지 소비량의 약 65% (이론 에

너지 소비량 기준 47%) 을 차지하는 주요 과다 에너지 소비 단계임이 확인되었다.

에너지 소비 분석 대상 데이터 샘플의 연구 결과가 대표성을 갖는지 확인하기 위한 간략한 검증 절차는 수행되었다. 샘플링 데이터와 이상치 (outlier) 에 대하여 필터링된 전체 수집 데이터에 대한 평균, 최대, 그리고 최소 에너지 소비량과의 상대적인 차이는 모두 10% 이내로 각 9.24%, 5.35%, 그리고 4.17%에 분포하였다. 이는 짧은 기간과 한정된 데이터 수를 고려하였을 때 가열 라인에서의 에너지 소비 분석 결과를 대표할 수 있음을 결론지을 수 있다. 향후 긴 측정 시간에 따른 추가된 수집 데이터에 따라 결과는 약간 조정될 수 있다.

본 연구에서의 식품가공공장에서 실제 사례 연구는 제안된 에너지 소비 분석 방법론의 적용을 설명한다. 에너지 소비 분석 방법론의 적용으로 얻어진 에너지 소비 분석 결과는 에너지 관리를 위한 주요 에너지 절감 요인 모색과 실행 가능한 에너지 절감 목표 설정이 가능하게 한다. 평균 에너지소비량은 대상 식품가공공장의 가열 공정에서의 에너지 소비 수준을 파악하도록 하며, 최대 에너지소비량은 이상치 제어를 위한 상한선의 정도를 알 수 있도록 한다. 평균 에너지소비량은 현 공장의 가열 공정에서의 에너지 소비 수준을 파악하도록 하며, 최대 에너지소비량은 이상치 제어를 위한 상한선의 정도를 알 수 있도록 한다. 에너지소비분석방법론의 적용은 식품가공공장 내 공정에 대한 대대적인 수정이나 장비의 개선 없이도 에너지 관리 측면에서 쉽게 적용할 수 있는 의사 결정을 지원한다.

향후 식품가공공장에서 에너지 절감 기술 확산 및 보급화를 위한 추가 연구가 고려된다. 적은 투자로 최대의 에너지 절감 효과를 얻기 위해서는 공장에서의 다양한 공정에 대한 에너지 소비 분석이 필요할 것이다. 다음과 같은 방향을 초점으로 추가 연구가 진행될 수 있다. i) 식품가공공장의 다양한 열처리 공정에서의 자세한 에너지 소비량 분석, ii) 에너지 다소비 공정(핵심 공정) 위주의 에너지절감 기술 개발, iii) 식품가공공장에서 에너지관리시스템 적용을 위한 다소비 공정 위주의 에너지 소비량 예측 및 평가. 본 연구는 중소기업 규모의 식품가공공장의 공통 핵심 공정에 적용 가능한 에너지 절감 기술을 개발하기 위한 출발점이 될 것이다.

References

- [1] K. Fang, N. Uhan, F. Zhao, and J.W. Sutherland, "A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 30, No. 4, pp. 234-240, 2011.
- [2] F. Shrouf, J. Ordieres-Meré, A. García-Sánchez, and M. Ortega-Mier, "Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs," *Journal of Cleaner Production*, Vol.67, pp. 197-20, 2014.
- [3] C.G. Kim, H.C. Kwon, H. Zun, and K.B. Yoon, "The Standardization and effect analysis of core business process of the digital production information management system (integrated POP system) through case construction of chemical manufacturing industry," *The journal of the convergence on culture technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 43-49, 2017.
- [4] UN Water, Water, food and energy. Obtido de UN Water, 2015. Retrieved from <http://www.unwater.org/water-facts/water-food-and-energy/>
- [5] J.M. Clairand, M. Briceño-León, G. Escrivá-Escrivá, and A.M. Pantaleo, "Review of energy efficiency technologies in the food industry: trends, barriers, and opportunities." *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 48015-48029, 2020.
- [6] J. Bundschuh, G. Chen, S. Mushtaq, "Towards a sustainable energy technologies based agriculture," *Sustainable Energy Solutions in Agriculture*, Vo. 3, pp. 3-15, 2014.
- [7] S.O. ALABI, C.J. DIJI, "ENERGY EFFICIENCY AND MANAGEMENT ASSESSMENT OF A FOOD PROCESSING INDUSTRY: A STUDY OF A DAIRY INDUSTRY, NIGERIA," Vol. 6, No. 1, January 2021.
- [8] J. Nunes, P.D. Silva, L.P. Andrade, and P.D. Gaspar, "Key points on the energy sustainable development of the food industry - Case study of the Portuguese sausages industry," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 393-411, 2016.
- [9] D. Morais, P.D. Gaspar, P.D. Silva, L.P. Andrade, and J. Nunes, "Energy consumption and efficiency measures in the Portuguese food processing industry," *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 46, No. 8, e14862, 2022.
- [10] S. Jagtap, S. Rahimifard, and L.N. Duong, "Real

- time data collection to improve energy efficiency: A case study of food manufacturer,” Journal of food processing and preservation, Vol. 46, No. 8, e14338. 2022.
- [11]R.N. Pereira, and A.A. Vicente, “Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing,” Food Research International, Vol. 43, No. 7, pp. 1936-1943, 2010.
- [12]H.A. ElMaraghy, A.M. Youssef, A.M. Marzouk, W.H. ElMaraghy, “Energy use analysis and local benchmarking of manufacturing lines,” Journal of cleaner production, Vol. 163, pp. 36-48, 2017.
- [13]C.E. Yeo, C.Y. Lim, D. Kim, and J.H. Gu, “Prediction of Steam Energy Consumption for Energy Saving in Food Processing Plant Heating Process,” JOURNAL OF THERMAL ENVIRONMENTAL &ENGINEERS, Vol. 16, pp. 35-43, 2021.
- [14]Y. Seow, S. Rahimifard, “A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems,” CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 258-264, 2011.

※ 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구입니다.
(No. 20202020800290)