

열역학 이론 기반의 물류센터 전기에너지 소비량 산출 모형

최 련¹, 김영주², 김철순^{3*}

¹버지니아대학교 건설환경공학부

²한국철도기술연구원 물류시스템연구실, ³서울대학교 건설환경공학부

Estimation Model of Electric Energy Consumption on Logistics Center Based on Thermodynamics Theory

Lian Cui¹, Young-Joo Kim², Cheolsun Kim^{3*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, University of Virginia

²Logistics System Research Division, Korea Railroad Research Institute

³Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

요 약 최근 물류센터는 대형화·첨단화에 따른 다양한 설비 및 장비의 도입으로 전기에너지 소비가 급격히 증가하고 있다. 본 연구는 물류센터의 전기에너지 사용 현황 및 소비 특성을 정량적으로 분석하고, 효율을 평가하기 위한 전기에너지 표준 소비량을 추정하는 모형을 구축하는 것을 목적으로 한다. 제시된 모형은 물류센터의 온도요인이 전기에너지 소비에 큰 영향을 미치는 특성을 효과적으로 반영하기 위하여 열역학 이론을 도입하였다. 모형은 물류센터 벽면의 열전도, 출입문 열대류 및 취급물품의 열 손실로 구성된 냉동기 운용에너지 부문과 물류활동을 위한 기계설비의 전력소모 부문으로 구성된다. 모형은 또한 물류센터 운영자가 에너지 소비 효율을 평가하고 개선전략을 수립하는 것을 지원할 수 있도록 다양한 설명변수들을 포함한다. 실제 물류센터의 에너지 소비량을 기반으로 본 연구에서 개발된 모형의 적용성이 평가된다.

Abstract Electric energy consumption is always followed by the introduction of diversity scale-up and state-of-the-art equipments in logistic centers. In order to analyze the status and the characteristic of the electric energy consumption quantitatively, and also to evaluate the efficiency of the electric energy, this research aims to develop an estimation model of standard electric energy consumption for logistic centers. The proposed model applies the thermodynamics theory so as to effectively reflect the peculiarity that the temperature in the logistic center influences the electric energy consumption. And the model consists of the energy consumed by the refrigerator, which can be subdivided into the heat conducted through the wall, the heat convected by the open doors and the heat lost into the goods, and the electric consumption of the machinery equipments. The model also includes a variety of explanatory variables to support an operator of logistics centers in evaluating the efficiency of energy consumption and establishing improvement strategies for energy efficiency. Application of the model developed in this study is discussed with observed data on energy consumption of a logistics center.

Keywords : Electric Energy, Energy Efficiency, Estimation Model, Logistics Center, Thermodynamics Theory

1. 서론

물류산업은 다른 산업의 가치를 실현하는 데 있어서

그 기반이 되는 국가 경제의 동맥이라 할 수 있다. 특히, 무역의존도가 높은 우리나라에서는 물류산업의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 우리나라 국가물류비는 2004년

본 논문은 국토교통부 교통물류연구사업의 지원에 의해 연구되었음.

*Corresponding Author : Cheolsun Kim (Seoul National University)

Tel: +82-2-880-1536 email: kcs529@snu.ac.kr

Received August 21, 2015

Revised (1st September 7, 2015, 2nd October 7, 2015)

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

88조 원에서 2010년 131조 원으로 약 50% 증가하였으며, 연평균 6.8%의 꾸준한 증가세를 보이고 있다. 또한, 2010년 기준 국가물류비는 GDP의 11.1%를 차지하고 있다[1]. 정부는 지난 해 “물류산업 선진화 방안”을 발표하면서 세계적 물류산업 규모의 지속적인 확대 가능성을 전망하고, 국내 물류산업의 중요성을 강조하기도 하였다[2].

최근 물류센터는 생산성 향상에 초점을 추고 대형화·첨단화 되면서 전력 소모가 큰 대형 설비들이 도입되고 있다. 실제로 국토교통부 물류센터 통계조사에 의하면 물류센터에서 사용되는 전기요금은 연면적 대비 평균 2,794(천 원/m²)이며, 냉동·냉장창고를 포함하는 경우에는 6,384(천 원/m²)이다[3]. 부산에 위치한 대표적인 수산물 취급업체인 G물류센터의 경우 연간 전기요금이 무려 2억 원으로 매출액의 20%를 차지하는 것으로 조사되었다.

또한, 한국전력공사 자료에 의하면 전기요금은 2011년-2013년 3년 간 총 5차례 인상 되었으며 누적 인상은 26%에 달한다[4]. 전기요금은 지속적으로 인상될 것으로 예상되며, 물류센터 운영비용에서 전기요금이 차지하는 비중이 더욱 높아질 전망이다. 이처럼 물류센터의 전기에너지 소비를 절감하는 것은 물류비 부담을 덜어줄 뿐만 아니라 물류산업의 발전을 촉진할 수 있다.

우리나라는 전기에너지를 생산하기 위한 1차 에너지원의 해외 의존도가 매우 높다[5]. 이로 인해 다양한 산업분야에서의 전기에너지 절감이 사회적 이슈로 떠오르고 있으나, 물류산업에서의 관심도는 상대적으로 낮다. 물류센터의 전기에너지 소비 절감을 위해서는 우선적으로 물류센터의 전기에너지 사용 현황 및 소비 특성을 파악하는 기초연구가 필요하다. 본 연구에서는 물류센터 전기에너지 표준 소비모형을 구축하여 전기에너지 사용 효율을 평가할 수 있는 기초를 마련하고자 한다. 또한, 모형의 구축 및 분석과정에서 다양한 설명변수를 도입함으로써 물류센터의 특성에 따라 전기에너지 절감을 위한 전략을 수립하는데 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다.

물류센터의 전기에너지 소비는 지리적 특성, 물품의 특성, 운영온도와 물류활동의 특성 등 다양한 요인에 의해서 결정된다. 이러한 요인을 정량적으로 측정하는 것은 매우 어려운 작업이며, 요인별 상관성으로 인하여 그 패턴이 일정하지 않다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 물류센터에서 소비되는 총 에너지를 열과 전기의 형태로 구분하였다. 기존 연구에서 널리 활용

되는 열역학 이론[6]을 토대로, 열역학 기반의 물류센터 전기에너지 표준 소비량 산출 모형을 개발하였다. 또한, 동종업계의 설문을 통하여 우수 물류센터를 선정하고, 해당 물류센터의 실측자료를 활용하여 최적화된 운영 상태에서의 전기에너지 소비모형을 검증하였다.

2. 기존연구 고찰

본 연구에서 제시하는 전기에너지 소비량 산출 모형은 궁극적으로 물류센터의 에너지 효율을 평가하는데 활용할 수 있다. 기존의 연구는 일반 건축물과 공장에 초점이 맞추어져 있으며, 크게 건축물에 대한 에너지 평가와 산업 자체의 에너지 평가로 구분할 수 있다. 건축물에 대한 에너지 평가는 해당 건축물의 평가를 통한 다양한 정도의 적용과 관련되어 있고, 산업 자체의 에너지 평가는 평가를 위한 공통지표의 개발과 밀접하게 관련되어 있다.

2.1 건축물 에너지 평가

건축물 에너지효율등급 인증제는 에너지 절감률에 의해 등급이 나뉘어져 있으며, 에너지 절감률은 건축물에 설치된 난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기시스템에서 소요되는 에너지에 근거하여 산출한다[7]. 건축물의 에너지소요량을 산출하는 개념은 본 연구에서도 일부 활용하고 있으나 물류활동 특성을 반영할 수 없으므로 직접 적용하지 못한다.

대표적인 해외 에너지 평가 방식으로는 IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol)가 있는데 건축물의 에너지사용량 시계열자료를 통해 과거 대비 절감효과를 분석한다[8]. 이러한 방식은 특정 시점의 에너지 소비량을 산출하는 본 연구와는 다른 접근 방법이다.

산업통상자원부의 연구에서는 냉동기의 경제적 운용을 위하여 여러 가지 냉동기 기종에 대한 생산 열량을 산출하였는데[9], 이는 개별 설비를 세부적으로 평가하는데 적합하다.

이외에도 DeST, EnergyPlus, DOE-2 등과 같은 공인된 건축물 에너지 시뮬레이션으로 평가하는 방법이 있다 [10]. 시뮬레이션 기법은 벽체의 구성 및 내·외부 온도, 실내 온도 변화, 그리고 공조시스템의 구성에 따른 열평형을 상세하게 분석하여 건축물의 에너지 소비를 평가한

다. 시뮬레이션 방식은 일반 건축물을 대상으로 발전되어 왔으며, 재실 인원의 활동량이 반영된다. 그러나 재실 인원보다는 취급하는 물품의 특성 및 물류활동에 의한 영향이 큰 물류센터의 에너지 소비패턴과는 차이가 있다.

2.2 생산 산업의 에너지 평가

산업통상자원부에서는 에너지 다소비 산업인 철강, 석유화학, 시멘트 등의 산업에 대한 에너지 효율을 평가할 수 있는 지표를 개발하였다[11]. 에너지 효율성 지표에 생산량과 부가가치를 에너지소비량과 결합하여 원단위로 반영하였다. 물류센터는 취급물품이 고정되어 있지 않으므로 원단위 개념의 도입에는 한계가 있다.

건축물의 에너지 평가 방식은 물류활동을 반영하기 어렵고, 생산 산업의 평가 방식은 생산물품에 따라 전기 에너지 소비가 결정된다. 그러나 물류센터라는 복합적 특성을 갖고 있는 대상에 대해서는 그 특성을 정확하게 반영할 수 있는 독창적인 모형이 필요하다. 본 연구에서는 물류센터의 구조적 특성과 활동 특성을 반영할 수 있는 열역학 이론 기반 전기에너지 소비량 산출 모형을 구축하였다.

3. 전기에너지 소비량 산출 모형

본 연구는 상대적으로 전력 소비가 큰 냉동·냉장 물류센터를 대상으로 한다. 물류활동을 위한 기계설비의 전력 소모량을 산출하고, 거기에 냉동·냉장창고의 온도 유지를 위한 냉동기 운용 에너지를 추가한다. 물류센터 전기에너지 소비량은 냉동·냉장창고의 열에너지 소비와 기계설비의 전기에너지 소비로 구성된다. 물류센터의 에너지 소비 구성 상세 내용과 개념도는 Table 1과 Fig. 1에 기술하였다. 모형의 구성에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

3.1 냉동냉장창고 열에너지 소비

냉동·냉장창고는 물품의 특성에 근거하여 냉동기를 가동하고, 보관공간의 온도를 일정하게 유지해야 한다. 냉동기는 통상 내부온도가 유지하려는 온도와 일정 편차가 생기면 가동하고, 설정온도에 도달하면 멈추는 자동 제어 방식이다. 그러므로 냉동기의 가동시간을 측정하기 어렵다. 본 모형에서는 열량 손실을 측정하는 간접적인

방법으로 냉동·냉장창고의 에너지 소비량을 계산한다.

Table 1. Energy consumption of the logistics center

Frozen and chilled storage	Exterior wall
	Logistics activities
	Handling goods
Machinery equipment	Distribution and processing equipment
	Classification facilities and conveyor
	Lift for goods
	AS/RS
	Fork life
	Etc.

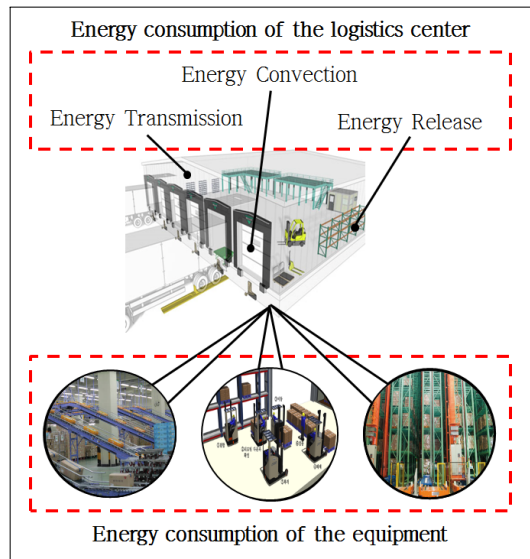


Fig. 1. Composition of the energy consumption

냉동·냉장창고의 열에너지 소비는 i) 창고벽체를 통해 외부로부터 침입되는 열량(열 전도), ii) 입출고시 출입문 개방으로 인한 대류현상에 기인한 열량 침입 즉, 물류활동에 의한 열량 에너지 소비(열 대류), iii) 취급물품의 입출고 전후 온도 차이에 의한 열량 방출(열 평형)로 구성된다. 이러한 열량들은 모두 냉동기 가동 시 다시 외부로 배출된다. 그러므로 냉동기의 전기에너지 소비량은 침입된 열량을 합산하여 다음과 같이 산출한다. 본 연구에서 활용하고 있는 전도, 대류 및 평형 관련 수식은 열역학 분야에서 흔히 활용되는 기본 수식[6]이며, 물류센터의 특성을 반영하여 활용하고 있다.

$$Q_{cool} = \frac{1}{\epsilon} \left[\sum \frac{(t_w - t_f)}{\left(\frac{\delta}{A \cdot \lambda}\right)} \cdot T + A' \cdot h \cdot (t_w - t_f) \cdot T' + \sum c \cdot m \cdot (t_m - t_f) \right] \quad (1)$$

s.t.

Q_{cool} : 냉동·냉장창고 전기에너지 소비량 (J)

ϵ : ($\approx 2.5 + 0.05t_f$) 냉동시스템 열효율계수

t_f : 창고 내부 온도 (K)

t_w : 창고 외부 온도 (K)

δ : 벽의 두께 (m)

A : 벽의 면적 (m^2)

λ : 열전도계수 (W/m·K)

T : 물류센터 사용시간

A' : 창고 문의 면적 (m^2)

h : 공기의 자연 열전도계수 (W/m²·K)

T' : 창고 문을 여는 시간

c : 취급물품의 비열 (J/kg·°C)

m : 물동량 (kg)

t_m : 취급물품의 입고 전 온도 (K)

3.1.1 냉동·냉장창고 외벽 열량 소비

내부온도를 일정하게 유지하고 있을 때, 벽체 내·외부 온도 차이에 의해 외부로부터 침입되는 열량은 다음과 같이 표현할 수 있다. 벽면의 면적과 재질에 따라 크게 좌우될 수 있다.

$$Q_{wall} = \sum \frac{(t_w - t_f)}{\left(\frac{\delta}{A \cdot \lambda}\right)} \quad (2)$$

냉동·냉장창고 벽체의 열량 침입은 벽체 내·외부 온도 차이에 정비례한다고 가정하며, 벽체의 열전도 성능, 두께 및 면적에 의해 결정된다. 침입 열량은 냉동·냉장창고 공간의 전체 벽면에 대하여 계산한다. 벽체가 단층이 아닌 복합구조일 때에는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum \frac{(t_w - t_f)}{\left(\frac{\delta}{A \cdot \lambda}\right)} = \sum \frac{(t_w - t_f)}{\left(\frac{\delta_1}{A_1 \cdot \lambda_1} + \frac{\delta_2}{A_2 \cdot \lambda_2} + \frac{\delta_3}{A_3 \cdot \lambda_3}\right)} \quad (3)$$

벽체가 삼층 구조라고 가정할 때 λ_i , A_i 와 δ_i 는 각각

벽체의 제 i 층 구조의 열전도계수, 면적과 두께를 의미한다.

3.1.2 물류활동 시 열량 소비

물류센터의 가장 독특한 특징은 물류활동이 일어난다는 점이다. 개별 물류활동의 특성에 따라 열량 소비 특성도 매우 다르게 나타난다. 취급물품의 입고고 물류활동에 의하여 출입문이 개방될 때, 출입구를 기준으로 내·외부 온도 차이로 인하여 공기의 대류현상이 일어난다. 이때 침입되는 열량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{activity} = A' \cdot h \cdot (t_w - t_f). \quad (4)$$

3.1.3 취급물품 열량 소비

취급물품의 입고 전 온도는 냉동·냉장창고의 설정온도와 동일한 것으로 가정할 수 있으며, 이 온도가 냉동·냉장창고의 온도보다 높으면 입고 후 열량을 방출한다. 단, 상온의 물품을 냉동시키는 경우에는 취급 물품의 열량을 별도로 산출해야 한다.

$$Q_{goods} = \sum c \cdot m \cdot (t_m - t_f) \quad (5)$$

3.2 기계설비 전기에너지 소비

물류센터의 기계설비 운용에 따른 전기에너지 소비는 개별 시설의 작업시간과 소비전력에 의하여 결정된다.

$$W_{machine} = \sum_i P_i \cdot t_i \quad (6)$$

s.t.

$W_{machine}$: 기계설비의 전력소비 (kWh)

P_i : 기계설비 i 의 단위시간 전력소비 (kW)

t_i : 기계설비 i 의 가동시간 (h)

$i \in I$: 기계설비의 유형

본 연구에서 기계설비는 전력소모량을 고려하여 유통 가공설비, 분류시설/컨베이어, 승강기, AS/RS, 지게차 및 기타로 구분하였다.

3.3 전기에너지 표준소비량 산출 모형

물류센터 전기에너지 소비를 구성하고 있는 냉동·냉장창고의 열에너지 소비 부분과 기계설비의 전기에너지 소비 부분을 종합하고 단위를 통일하여 아래와 같은 전기에너지 표준소비량 산출 모형을 구축하였다.

$$W_{total} = \frac{1}{\epsilon} \left[\sum \frac{(t_w - t_f)}{\left(\frac{\delta}{A \cdot \lambda}\right)} \cdot T + A' \cdot h \cdot (t_w - t_f) \cdot T' + \sum c \cdot m \cdot (t_m - t_f) \right] \times \frac{1}{3.6 \times 10^6} + \sum_i P_i \cdot t_i \quad (7)$$

모형에서 사용된 변수들의 표기법은 전술했으므로 생략하며, 모형의 최종 단위는 kWh로 통일한다. $\frac{1}{3.6 \times 10^6}$ 은 단위 J에서 kWh로의 환산계수이다.

4. 실증사례 분석

4.1 부산시 D물류센터 개요

본 연구에서 제시한 모형을 검증하기 위하여 부산시 소재 D물류센터 자료를 활용하였다. D 물류센터는 수산물물 주요 취급물품으로 하며 건축면적 4,551m², 지하 2층과 지상 10층으로 구성된 물류센터이다. 최적화된 운영 상태를 반영하기 위하여 동종업계의 설문을 통해 가장 우수한 물류센터를 선정하였다. 2층은 사무실로 사용하고 있으며, 연면적이 46,886m²에 달한다. 36명의 상시 근로자가 있으며 냉동·냉장창고를 운영하고 있다. Fig. 2는 물류센터의 개략적인 형태를 보여준다. Table 2는 물류센터 제원, Table 3은 층별 운영상황을 보여준다. 그 외 각종 설비 및 장비 관련 정보는 Table 4에서 볼 수 있다. D물류센터가 운용하고 있는 설비 및 장비는 냉동기와 조명시설, 지게차, 수직반송기, 취급물품 E/L 등이 있다.

D물류센터는 전력감시 시스템, 원격제어와 모바일 제어 등 자동화 시스템을 도입하여 전기에너지 소비에 대한 관리가 체계적으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 D물류센터를 최적화된 운영 상태라고 가정하고, 전기에너지 표준소비량 산출 모형을 검증하는데 활용하였다. D물류센터 운영온도는 지하 2층이 -50℃, 지상 1/3/10층이 3℃이며 기타 층은 -22℃이다. 물류센터에서 사용하고 있는 기계설비는 Table 4와 같이 냉동기, 조명시설, 지게차, 수직반송기와 취급물품 E/L로 구성되어 있다. 여기서 소비전력은 단위시간에 해당 유형의 기계 설비가 100% 운용될 때 소비되는 전력이다.



Fig. 2. Front view of the D logistics center in Busan

Table 2. General information

Branch		Headquarter	
Address	City	Busan	
	Zone	Seo gu	
Operating mode			Frozen and chilled
Scale	Construction area	m ²	4,551
	Construction gross area	m ²	46,886
	Floor height	m	6.3
	Dock	ea	36
Year built			2008
Number of employees		persons	36
Shipping and receiving	Day	times	3
	Week	times	15

Table 3. Operating conditions of the floor

Floor	Total area (m ²)	Frozen and Chilled area (m ²)	Floor height (m)	Nominal tonnage	Level
B2	7,434.9	2,539.2	7.5	3,047 2,712	SF C&F
B1	4,129.1	-	-	-	-
1	3,845.3	2,204.6	7.9	5,316	C&F
2	1,089.9	-	-	-	-
3	3,798.4	2,912.7	7.5	6,501	C&F
4	3,798.4	2,912.7	6.3	5,767	F
5	3,798.4	2,912.7	6.3	5,767	F
6	3,798.4	2,912.7	6.3	5,767	F
7	3,798.4	2,912.7	6.3	5,767	F
8	3,798.4	2,912.7	6.3	5,767	F
9	3,798.4	2,912.7	6.3	6,012	F
10	3,798.4	2,434.0	6.3	4,819	C&F
Total	46,886.0	27,565.8		57,312	

Table 4. Equipment and facility

Refrigerator	Numbers		18
	Consumption	kW	1,725
	Operating hours	min/day	600
Lighting	Numbers		360
	Consumption	kW	90
	Operating hours	min/day	480
Fork lift	Numbers		20
	Consumption	kW	226
	Operating hours	min/day	480
Vertical conveyor	Numbers		9
	Consumption	kW	300
	Operating hours	min/day	480
Elevator	Numbers		1
	Consumption	kW	300
	Operating hours	min/day	480

4.2 물류센터 에너지 효율 분석

본 연구에서는 2013년 8월을 기준으로 한 달간의 에너지 효율을 분석한다. 해당 월 평균기온은 25.4℃이고, 총 입출고 물동량은 13,192톤이며 동결 물동량은 76톤이다.

4.2.1 모형에 의한 소비전력 산출

냉동·냉장창고의 벽체 단열 재료는 PIR인 경우 두께는 100T에 열통과율은 0.22(kcal/m²·h·℃)이다. 공기의 자연 열대류 전도계수는 온도에 의해 변하지만 변화량이 크지 않으므로 1(W/m²·K)로 가정한다. 톤 당 취급물품 처리시간은 0.3시간으로 한다. 농축수산물의 비열은 수분 비율에 의해 결정되는데 $C = 1.79 + 2.36x$ 이다[12]. 농축수산물의 수분 비율은 70%~85%, 본 연구에서는 75%를 가정하여 3.35(kJ/kg·K)로 설정한다. 구득한 자료에 근거하여 각 냉동·냉장창고의 월별 열량 손실, 즉 월 전력소비량을 모형에 의해 산출하면 Table 5와 같다.

Table 4의 설비 및 장비 현황에 근거하여 월 기계설비 소비전력을 산출하면 Table 6과 같다. 그 중 지게차는 두 대씩 교대근무를 하는 형태이므로 실제 작업 대수는 10대로 하고, 기타 설비 및 장비의 정보는 그대로 사용한다.

Table 5. Heat loss of the floor (unit: kWh)

Floor	Wall	Entrance	Goods	Total loss
B2	85,063.6	29,835.8	0	114,899.4
1	33,223.2	8,863.7	1,584.2	43,671.0
3	-5,371.1	8,863.7	0	3,492.6
4	27,548.9	18,756.2	0	46,305.1
5	14,193.0	18,756.2	0	32,949.2
6	14,193.0	18,756.2	0	32,949.2
7	14,193.0	18,756.2	0	32,949.2
8	14,193.0	18,756.2	0	32,949.2
9	27,548.9	18,756.2	0	46,305.1
10	8,144.6	8,863.7	0	17,008.3
Total	232,929.9	168,963.9	1,584.2	403,478.0

Table 6. Monthly power consumption of the equipment

Contents	Power (kW)	Operating hours (h)	Numbers (ea)	Power consumption (kWh)
Lighting	90	8	360	21,600
Fork lift	113	8	20	27,120
Vertical conveyor	300	8	9	72,000
Elevator	300	8	1	72,000
Total	-	-	-	192,720

4.2.2 모형 산출 결과 vs. 실제 사용량

전기에너지 표준소비 산출 모형에 의한 결과와 D물류센터의 실제 측정된 자료와의 비교 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. Power consumption analysis

Contents		Power consumption (kWh)	Rate (%)	
Theoretical consumption	Thermal loss	Wall	232,929.9	39.1
		Entrance	168,963.9	28.3
		Goods	1,584.2	0.3
		Sub total	403,478.0	67.7
	Equipment consumption	Lighting	21,600.0	3.6
		Fork lift	27,120.0	4.5
		Vertical conveyor	72,000.0	12.1
		Elevator	72,000.0	12.1
		Sub total	19,2720.0	32.3
	Total		596,198.0	100.0
	Observed consumption		634,824.0	-
(Observed/model)		106.5%		

모형 대비 실제사용량은 106.5%로 분석되었으며, 이러한 차이가 발생한 원인을 탐색하기 위하여 국내 물류센터 관련 산학연 전문가 논의를 통해 의견을 수렴하였다. 논의 결과 모형과 관측값과의 차이가 발생하는 원인은 i) 기계적이지 않은 근로자 작업의 임의성, ii) 창고 내부온도의 미세한 변화, iii) 물류활동의 특정 시간 집중으로 인한 외부온도 및 지역 평균기온 등 일부 가정 사항과의 차이 발생, iv) 기계설비 부하량에 따른 전력소비 미 고려로 인하여 발생한 것으로 판단된다.

이러한 차이는 근로자의 작업속런도를 높이고, 허용된 냉동·냉장창고 출입문 개방시간 내에 작업을 종료할 수 있도록 교육하고, 물류활동별 경제적 처리 물동량을 준수하도록 하는 등의 방법으로 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 열역학 이론을 기반으로 물류센터의 표준 전기에너지 소비량을 열량손실과 기계설비의 전력소비 두 가지 측면으로 구분하여 계산하는 모형을 제시하였다. 그 중 냉동·냉장창고의 열에너지 소비는 외벽의 열량 소비, 물류활동 시 출입문 개방으로 인한 열량 소비, 취급물품의 열량 방출로 구성되었고, 기계설비의 전기에너지 소비는 각종 기계설비의 공률과 가동시간으로부터 전체 기계설비의 전력소비를 산출하였다. 또한, 동종업계의 설문을 통해 최적 운영 상태인 D물류센터를 선정하고 사례분석을 통해 모형을 검증하였다. 국내 물류센터 산학연 전문가 논의를 통하여 모형과 관측값과의 차이를 발생시키는 원인을 탐색하였다. 단, 원인별로 정량적인 차이를 밝혀내는 일은 추후 연구로 진행하기로 한다.

모형에 의한 이상적인 전기에너지 소비량 대비 D물류센터의 소비량은 냉동기에 의한 열량 손실 67.7%, 기계설비에 의한 전력 소비 32.3%로 구성된다. 그 중 외벽의 열량 손실 비중이 가장 높고, 물류활동 시 출입구에서 소비되는 열량이 그 다음으로 분석되었다. 비슷한 유형의 물류센터에서도 이와 유사한 패턴을 보일 것으로 판단된다. 그러므로 물류센터의 에너지 절감을 위해서는 단열성이 좋은 재료로 벽체를 구성하고, 물류활동 시 출입문의 공기 대류를 감소시키는 것이 관건이다. 여기에

더해 결과 분석 과정에서 진단된 다양한 에너지 비효율 항목에 대한 대비책을 마련할 수 있을 것이다.

본 연구에서 제시하고 있는 물류센터 전기에너지 표준 소비모형은 물류센터의 구조 및 활동 특성에 근거하여 전기에너지 소비를 정량적으로 산출하고 평가할 수 있다. 또한, 다양한 설명변수의 도입을 통하여 분석 과정에서 전기에너지 소비효율을 진단할 수 있다. 이러한 모형의 특성은 물류센터를 운영하는데 있어서 전기에너지 절감을 위한 효과적인 전략을 수립하는데 있어서 큰 도움을 줄 것으로 기대된다.

References

- [1] The Korea Transport Institute, "Korean Macroeconomic Logistics Costs in 2010", 2013.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Press released in August 27th, 2013.
- [3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Project on the Development of Logistics Facilities Energy Savings (Dock Systems, Fan Systems, the Self Powered Roller, the Energy Control & Management System)", Survey data, 2014.
- [4] Korea Electric Power Corporation, "Table of Electricity Fare", 2013. (http://home.kepco.co.kr/kepco/KO/ntcob/list.do?boardCd=BRD_000099&menuCd=FN05030103)
- [5] Korea Energy Statistics Information System, "Status of Domestic Energy Consumptions, 2015. (<http://www.kesis.net/flexapp/KesisFlexApp.jsp>)
- [6] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", John Wiley & Sons, 2010.
- [7] Korea Energy Agency, "Operational Regulations of the Building Energy Efficiency Rating Certification System", 2013.
- [8] Efficiency Valuation Organization (EVO), "International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP), Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings", 2012.
- [9] Ministry of Trade, Industry and Energy, "The Technical Developing Study of Energy Saving BEMS (building energy management system) Package", 2005.
- [10] D. D. Zhu, D. Yan, T. Z. Hong, and C. Wang, "Comparison of Building Energy Simulation Programs: DeST, EnergyPlus and DOE-2", *Building Science*, 28(2), pp. 218-226, 2012.
- [11] Ministry of Trade, Industry and Energy, "A Study of the Industry Energy Efficiency Plan Against Climate Change", 2010.
- [12] M. E. Schmalko, R. O. Morawicki, and L. A. Ramallo, "Simultaneous Determination of Specific Heat Capacity

and Thermal Conductivity Using the Finite-difference Method", *Journal of Food Engineering*, 31(4), pp. 531-540, 1997.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(96\)00074-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(96)00074-X)

최 련(Lian Cui)

[정회원]



- 2015년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부 교통물류전공 (공학석사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : University of Virginia 교통물류전공 박사과정

<관심분야>

물류에너지, 교통물류관리

김 영 주(Young-Joo Kim)

[정회원]



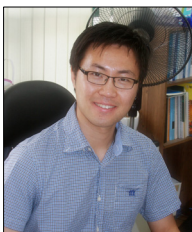
- 2002년 8월 : KAIST 산업공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 : KAIST 산업공학과 (공학박사)
- 2007년 10월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도물류, 물류센터, 물류장비 및 효율화 기술개발

김 철 순(Cheolsun Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 (경영학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 건설환경공학부 교통물류전공 박사 수료

<관심분야>

신재생에너지, 교통물류관리