

초등학교 건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량 평가

지창윤¹ · 홍태훈* · 정재욱¹

¹연세대학교 건축공학과

Evaluation of Life Cycle Energy Consumption and CO₂ Emission of Elementary School of Buildings

Ji, Changyoon¹, Hong, Taehoon*, Jeong, Jaewook¹

¹Department of Architectural Engineering, Yonsei University

Abstract : This study investigates and analyzes the total amount of energy consumption and CO₂ emission during the material manufacturing, transportation, construction, operation, and disposal phases of eight elementary school buildings in South Korea. Toward this ends, the hybrid LCA model is proposed. The life cycle energy consumption and CO₂ emission of eight case buildings are assessed using the hybrid LCA model with an assumption that the operation period is 40 years. As a result, the embodied(sum of the energy consumption in the material manufacturing, transportation and construction phases), operational and disposal energy were 2,279, 11,182, 228 Mcal/m², respectively, on average. The average embodied, operational, and disposal CO₂ emission were 604, 2,708, 60 kg-CO₂/m², respectively, on average. This result indicates that about 17% of life cycle energy (or CO₂ emission) is consumed in the material manufacturing, transportation and construction phases. Thus, it is necessary to consider the embodied energy and CO₂ emission to reduce the life cycle energy and CO₂ emission of school buildings. In addition, while the insulation standard of building have been provided based on the climate zone, energy consumption in operation phase still varied depending on the regions in this study. Thus, the insulation standard of building needs to be improved through considering the climate of regions in detail.

Keywords : Life Cycle, Energy Consumption, Carbon Dioxide Emission, Embodied Energy, Elementary School Building

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축물은 생애주기(Life cycle) 기간 동안 많은 양의 자원과 에너지를 소비하는 대표적인 주체이다. 우리나라의 경우, 건물부문의 에너지소비량은 국가 전체 에너지소비량의 약 22%를 차지하고, 온실가스 배출량은 국가 전체 배출량의 약 25.2%를 차지할 만큼, 높은 비중을 차지한다(MOLIT 2014). 이에, 세계의 각 국가들은 건축물의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량 감축을 위한 다양한 정책 및 제도를 시행하고 있다. 대한민국 정부는 건축물 에너지사용량 및 이산화탄소 배

출량의 감축을 위한 체계적 기반을 마련하기 위하여, 녹색건축물 조성 지원법을 제정하고, 제1차 녹색건축물 기본계획을 발표하였다. 게다가, 2025년까지 제로에너지 건축물(Zero energy building)의 달성을 목표로, 건축물 에너지절약설계 기준을 강화함은 물론 녹색건축인증제, 건축물 에너지효율등급인증제, 건축물 에너지소비증명제와 같은 다양한 제도를 시행하고 있다(MOLIT 2014). 연구 측면에서도, 건축물의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량의 감축을 목표로 하는 다양한 연구가 수행되어 왔다. 예를 들어, Hong et al.(2012a, b)은 초등학교와 공동주택의 운영 과정에서 발생하는 에너지 사용량 및 이산화탄소 배출량을 저감할 수 있는 관리 기술을 제안하였다. Lee et al.(2012)은 단독주택에 적용되는 다양한 에너지 저감 기술의 효과를 파악하기 위하여, 각 에너지 저감 기술의 적용에 따른 운영단계에서의 에너지 요구량 변화를 분석하였다.

건축물의 운영단계에서 사용되는 에너지는 생애주기 에

* Corresponding author: Hong, Taehoon, Department of Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea
E-mail: hong7@yonsei.ac.kr

Received February 16, 2016; revised February 24, 2016

accepted February 26, 2016

너지사용량의 대부분을 차지하기 때문에, 대부분의 기존 정책 및 연구들은 건축물의 운영단계에 발생하는 에너지사용량과 이산화탄소 배출량 감축에 집중하였다. 하지만, 자재 생산, 자재운송, 시공 및 해체·폐기단계에서의 에너지사용량 역시 생애주기 에너지사용량의 상당 부분을 차지한다(Ramesh et al. 2010). 국외 연구자들은 생애주기 측면에서 건축물의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 파악하기 위한 다양한 연구를 통해(Rameshe et al. 2010), 내재에너지(Embodied energy) 및 내재된 이산화탄소 배출량(Embodied CO₂ emission)의 중요성을 입증하였다. 하지만 국내의 교육 시설물을 대상으로 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가한 연구는 아직까지 없다.

제로에너지 건축물의 달성을 위해서는 운영단계에서의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량뿐 아니라, 자재생산단계에서 해체폐기단계까지를 포함하는 생애주기 측면에서의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량이 모두 고려되어야 한다. 이에 따라, 본 연구에서는 국내 초등학교 건축물을 대상으로, 생애주기에서의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가·분석하고자 한다. 특히, 사례분석을 통하여 내재에너지 및 내재된 이산화탄소 배출량의 중요성을 검토하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

전과정평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA) 방법론은 제품 또는 서비스의 생애주기 동안에 필연적으로 발생하는 환경부하 물질을 규명하고 이러한 환경부하 물질들로 인한 환경영향을 평가하는 기법으로(ISO 2006), 건축물의 생애주기 동안 발생하는 다양한 환경영향을 평가하는데 활용되어 왔다(Hong et al. 2014a, b, Hong and Ji 2014, Jang et al. 2015). 이에 따라, 본 연구에서는 먼저 건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가할 수 있는 Hybrid LCA 모델을 제시하고자 한다. 그리고 제시된 Hybrid LCA 모델을 이용하여 초등학교 건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가하고자 한다.

건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가하기 위해서는 건축물의 개요정보, 자재물량, 운영단계 에너지사용량 등과 같은 다양한 데이터가 필요하다. 게다가, 건축물의 종류, 규모, 지역 및 사용자 특성과 같은 요인들은 건축물을 구성하는 자재 및 운영단계에서의 에너지사용량에 영향을 줄 수 있다. 모든 건축물에 대한 필요 데이터를 확보하는 것은 불가능하므로, 본 연구에서는 평가대상 건축물을 한정하였다. 특히, 초등학교 건축물은 교육청의 운영규정을 기반으로 운영되기 때문에, 사용자의 특성에 따른 운영 에너지사용량의 차이는 크지 않다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 동일할 난·난방 방식을 적용한, 전국 8개 지역의 8개 초등학교 건축물을 대상으로 하였다. 선정된 초등학교 건축

물은 녹색건축물 우수등급을 받았으며, 각 초등학교에 대한 개요정보는 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of the case school buildings

School	Construction year	Region	Cooling/ Heating type	Energy source	Total floor area (m ²)
A	2009	Seoul	Individual	Electricity	12,532
B	2009	Chungcheongnam-do	Individual	Electricity	8,189
C	2008	Jeollabuk-do	Individual	Electricity	9,658
D	2007	Daegu	Individual	Electricity	11,994
E	2009	Gwangju	Individual	Electricity	9,530
F	2007	Jeollanam-do	Individual	Electricity	8,588
G	2007	Gyeongsangbuk-do	Individual	Electricity	9,235
H	2009	Busan	Individual	Electricity	7,525

2. 기존연구 고찰

LCA는 제품 및 서비스의 생애주기 동안 발생하는 환경영향을 정량화하기 위하여 사용되는 대표적인 방법이다(ISO 2006). 환경에 대한 관심의 증가와 함께, 건축물의 환경영향 평가를 위하여 LCA를 이용한 연구가 지속적으로 증가하고 있다.

많은 연구자들이 제품, 서비스 등의 생애주기 동안 발생하는 이산화탄소 배출량과 같은 환경영향을 평가할 수 있는 평가모델을 개발하였다. SimaPro, Total, PASS 등은 대표적인 LCA 평가 프로그램이다. 하지만, 건축물은 일반 제조 제품에 비해 더욱 복잡하고 많은 자재를 포함하기 때문에, 기존에 개발된 평가 프로그램을 이용하여 평가하기에는 다소 어려움이 있다. 이에, 많은 연구자들은 건축물에 대한 환경영향을 평가할 수 있는 LCA 모델을 개발하였다(Jang et al. 2015, Lee et al. 2009).

한편으로는, 개발된 LCA 평가 모델을 이용하여 다양한 사례 건축물 또는 설계안에 대한 환경영향을 평가하였다. 예를 들어, Hong and Ji(2014)는 LCA 평가 모델을 이용하여 친환경 인증 건축물과 비인증 건축물의 생애주기 환경영향을 평가·비교하였다. Gustavsson et al.(2010)은 LCA를 이용하여 주거 건축물에 대한 생애주기 에너지사용량을 평가·분석하였다.

다양한 건축물에 대한 생애주기 환경영향 평가가 수행되었음에도 불구하고, 초등학교 건축물을 대상으로 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가한 연구는 없다. 비록 Kim et al. (2012) 연구에서 우리나라 초등학교 건축물의 에너지사용량 특성을 분석하였으나, 운영단계 에너지 사용량만을 고려하였다. 따라서 본 연구에서는 LCA 모델을 활용하여 8개 초등학교 건축물에 대한 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가·분석하고자 한다.

3. 초등학교 건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량 평가

3.1. 평가 범위 정의

건축물의 생애주기는 자재생산, 자재운송, 시공, 운영 및 해체·폐기단계를 포함한다. 본 연구 역시 자재생산부터 해체·폐기단계를 모두 포함하는 건축물 생애주기 동안 발생하는 내재에너지(Embodied energy) 및 이산화탄소 배출량(Embodied CO₂ emission) (즉, 자재생산, 자재운송, 시공 단계에서의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량), 운영에너지(Operational energy) 및 이산화탄소 배출량(Operational CO₂ emission), 해체·폐기 에너지(Disposal energy) 및 이산화탄소 배출량(Disposal CO₂ emission)을 평가하고자 한다.

일반적으로 건축물의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 다룬 기존 연구들은 생애주기 각 단계에서 직접적으로 사용되는 에너지나 배출되는 이산화탄소만을 고려한다. 하지만, LCA 측면에서 건축물의 생애주기를 고려한다면, 간접적인 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 포함하는 것이 타당하다(Jang et al. 2015). 따라서 본 연구에서는 직접적인 부분과 간접적인 부분을 모두 포함하여, 건축물 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가한다.

초등학교 건축물의 생애주기 동안에는 경유, 휘발유, 전력, 가스 등 다양한 에너지원이 사용될 수 있다. 1차 에너지(Primary energy)는 최종에너지로 전환 될 때의 손실이 발생하기 이전 과정에서 투입되는 모든 연료를 고려한 에너지를 말한다. 따라서 본 연구에서는 모든 에너지원의 사용량을 1차 에너지로 통합하였다. 그리고 건축물 규모에 따른 차이가 고려되도록, 기능단위(Functional unit)는 단위 면적(m²)당 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량으로 정의하였다.

3.2. 건축물 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량 평가를 위한 Hybrid LCA 모델

3.2.1 최종 에너지 사용량 산출

Jang et al.(2015)은 모래, 합판, 시멘트, 레미콘 등의 건설자재를 생산하는 과정에서 직·간접적으로 사용되는 최종 에너지사용량을 산출할 수 있는 산업연관표(Input-Output table) 기반의 LCA 모델을 제시하였다. 이에 따라, 본 연구는 초등학교 건축물의 자재생산단계에서 사용되는 최종 에너지사용량을 산출하기 위하여, Jang et al.(2015)이 제시한 수식 (1)에서 (3)을 이용하였다. 즉, 각 사례 건축물의 내역서에 제시된 자재비 정보를 수식 (1)에서 (3)에 적용함으로써, 자재생산 과정에서 직·간접적으로 사용된 최종 에너지사용량을 산출하였다. 여기서 최종 에너지는 1차 에너지를 변환·가공해서 얻은 전기, 도시가스, 휘발유 등의 2차 에너지를 의미한다.

$$X_{dir} = A \times Y \tag{1}$$

$$X_{ind} = ((I - A)^{-1} - A) \times Y \tag{2}$$

$$QE_i = x_i \div UP_i \tag{3}$$

X_{dir} : 직접 투입되는 에너지원 i 에 대한 투입량 정보(x_i)를 포함하는 에너지산업 부문별 투입량 벡터
 A : 투입계수표
 Y : 산업부문별 최종 수요
 X_{ind} : 간접 투입되는 에너지원 i 에 대한 투입량 정보(x_i)를 포함하는 에너지산업 부문별 투입량 벡터
 $(I - A)^{-1}$: 생산유발계수표
 QE_i : 에너지원 i 의 투입량(물량단위)
 x_i : 에너지원 i 의 투입량(금액단위)
 UP_i : 에너지원 i 의 단위가격

Jang et al.(2015)에서 개발한 모델은 한국은행에서 제시한 2010년 산업연관표를 기반으로 개발되었다. 본 연구에서 선정된 초등학교 건축물은 2007년에서 2009년에 신축된 건축물로, 각 건축물의 내역서는 건축년도의 단가를 기준으로 작성되어 있다. 산업연관표 기반의 LCA 모델은 각 산업 부문에 투입된 비용정보를 기반으로 에너지사용량을 산출하기 때문에, 단가의 차이는 결과의 차이로 이어질 수 있다. 따라서 이러한 문제의 해결을 위하여, 한국은행에서 제시하는 생산자물가지수(Produce price index)를 활용하여 각 건축물 내역서의 자재단가를 2010년 기준 단가로 변환하였다. 또한, 내역서에 포함된 자재비 단가는 자재의 운송비 및 이윤 등을 포함한 소비자 가격이기 때문에, Chang et al.(2012)의 연구를 참고하여 내역서에 제시된 자재비의 90%를 직접 자재 생산비로 설정하였다.

운송단계에서 직접적으로 사용되는 에너지량은 건축자재를 현장까지 운송하는 운송장비에 의해 사용되는 연료를 바탕으로 산출된다. 시공단계에서의 직접 에너지사용량은 시공 중장비에 의해 사용되는 에너지량을 의미한다. Hong et al.(2014b)은 수식 (4), (5)와 같이, 주요 건축자재의 물량정보를 바탕으로, 운송장비 및 시공 중장비에 의해 직접적으로 사용되는 연료를 산출하는 모델을 제시하였다. 따라서 수식 (4)와 (5)를 이용하여, 자재운송 및 시공단계에서의 직접 에너지소비량은 산출될 수 있다. 이때, 운송거리는 운송과정에 대한 국가 LCI (Life Cycle Inventory) 데이터베이스를 구축할 때 사용되었던 30km로 설정하였다.

$$QDE_i = 2 \sum_j \frac{QM_j \times TD_{j,m}}{LC_{j,m} \times FE_{m,i}} \tag{4}$$

$$QDE_i = \sum_j \frac{QM_j \times EC_{j,n}}{AWD_{j,n}} \tag{5}$$

QDE_i : 자재운송 또는 시공단계에서 직접적으로 사용된 에너지원 i 의 양
 QM_j : 자재 j 의 물량
 $TD_{j,m}$: 자재 j 를 운송하는 운송장비 m 의 운송거리
 $LC_{j,m}$: 운송장비 m 의 자재 j 에 대한 적재 용량
 $FE_{m,i}$: 에너지원 i 를 사용하는 운송장비 m 의 연비
 $EC_{j,n}$: 시공작업 i 에 사용되는 시공장비 n 의 단위시간당 연료소비량
 $AWD_{j,n}$: 시공장비 n 의 시공작업 i 에 대한 작업효율

한국교육개발원에서 발간하는 교육통계연보에서는 전국 초등학교 건축물의 연평균 에너지사용량 데이터를 제시한다 (MEST 2010). 따라서 운영단계에서의 직접적인 에너지 사용량은 교육통계연보에서 제시하는 건축물의 실제 에너지사용량 데이터에 초등학교 건축물의 운영기간을 적용하여 산출하였다. 본 연구에서는 법인세법 시행규칙에서 정의하는 철근콘크리트 건축물의 내용연수인 40년을 운영기간으로 설정하였다.

Jeong et al.(2015)은 건축물의 해체, 폐기물의 운송 및 폐기 과정에서 직접적으로 사용되는 에너지량을 산출하는 모델을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 Jeong et al.(2015)에서 제시한 수식 (6)을 사용하여, 해체·폐기단계에서의 직접적인 에너지사용량을 산출하였다.

$$QDE_i = QW_j \times QES_{i,j,k} \quad (6)$$

QDE_i : 에너지원 i 에 대한 직접 사용량
 QW_j : 건설 폐기물 j 의 물량
 $QES_{i,j}$: 건설폐기물 j 의 처리과정에서 직접 사용되는 에너지 i 의 양

운송, 시공, 운영 및 해체·폐기단계에서 간접적으로 사용되는 에너지사용량은 Jang et al.(2015)에서 제시한 수식 (2)를 사용하여 산출된다. 다만, 수식 (2)는 비용 데이터를 기반으로 하기 때문에, 수식 (2)는 수식 (7)과 같이 변환하여 적용되어야 한다. 그리고 수식 (7)을 통해 산출된 결과를 수식 (3)에 적용함으로써, 운송, 시공, 운영 및 해체·폐기단계에서 간접적으로 사용되는 최종 에너지사용량은 산출된다.

$$X_{ind} = ((I - A)^{-1} - A) \times (QE_{dir,i} \times UP_i) \quad (7)$$

X_{ind} : 자재 j 의 운송을 위하여 직접적으로 사용된 에너지원 i 의 생산과정에서 간접적으로 투입되는 에너지원의 투입량 벡터
 $(I - A)^{-1}$: 생산유발계수표
 A : 투입계수표
 QE_i : 에너지원 i 의 투입량(물량단위)
 UP_i : 에너지원 i 의 단가

3.2.2 1차 에너지 사용량 산출

앞서 제시한 수식 (1)에서 (7)을 사용하여 산출된 결과는 최종 에너지사용량을 의미한다. 따라서 수식 (1)에서 (7)의 결과에 건축물에너지효율등급인증제도운영규정에서 제시하는 “1차 에너지 환산계수”를 적용하여, 건축물 생애주기에서의 1차 에너지 사용량은 산출되었다. 그리고 각각 다른 단위로 표현되는 1차 에너지사용량은 에너지법 시행규칙에서 제시하는 에너지열량 환산기준의 순발열량을 적용하여, Mcal로 표기하였다. 수식 (8)은 최종 에너지사용량을 1차 에너지 사용량으로 변환하는 과정을 보여주며, Table 2는 주요 에너지원에 대한 에너지열량 환산계수를 보여준다.

$$TEC = \sum_i x_i \times F_i \times C_i \quad (8)$$

TEC : 생애주기 총 1차에너지사용량
 x_i : 최종 에너지 i 의 사용량
 F_i : 에너지원 i 에 대한 1차에너지 환산계수
 C_i : 에너지원 i 에 대한 에너지열량 환산계수(순발열량)

3.2.3 이산화탄소 배출량 산출

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 에너지원에 따른 탄소배출계수를 제시하고 있다. 탄소배출계수에 이산화탄소분자량(44)과 탄소원자량(12)을 적용하면, 이산화탄소 배출계수를 산출할 수 있다. 그리고 한국전력거래소에서는 전력에 대한 이산화탄소 배출계수를 제시하고 있다. 따라서 수식 (9)와 같이, 수식 (1)에서 (7)을 통해 산출된 최종 에너지사용량에 Table 2의 이산화탄소 배출계수를 적용하면, 건축물의 생애주기 이산화탄소 배출량을 산출할 수 있다.

$$TCE = \sum_i x_i \times CF_i \quad (9)$$

TCE : 생애주기 총 이산화탄소 배출량
 x_i : 최종 에너지 i 의 사용량
 CF_i : 에너지원 i 에 대한 이산화탄소 환산계수

Table 2. Examples of net calorific value and carbon dioxide emission factor

Energy source (i)	Unit	Net calorific value (Ci)	Carbon dioxide emission factor (CFi)
Diesel	l	8,420 Kcal/unit	2.584 kg-CO ₂ /unit
Gasoline	l	7,230 Kcal/unit	2.076 kg-CO ₂ /unit
Liquefied natural gas	kg	11,780 Kcal/unit	2.751 kg-CO ₂ /unit
Town gas	Nm ³	13,780 Kcal/unit	2.200 kg-CO ₂ /unit
Anthracite	kg	4,450 Kcal/unit	1.795 kg-CO ₂ /unit
Electricity	kWh	2,110 Kcal/unit	4.705 kg-CO ₂ /unit

4. 결과 분석 및 논의

4.1. 1차 에너지 사용량

Table 3은 8개 초등학교 건축물의 생애주기 동안 직접적으로 사용된 1차 에너지량의 산출 결과를 보여준다. 학교에 따라 다소 차이가 있지만, 내재에너지는 평균적으로 492 Mcal/m², 운영에너지는 7,056 Mcal/m², 해체·폐기 에너지는 124 Mcal/m²인 것으로 나타났다. 그리고 생애주기 에너지 사용량은 최소 4,328 Mcal/m²에서 최대 12,475 Mcal/m²의 범위로 나타났으며, 평균 7,672 Mcal/m²인 것으로 나타났다.

Table 3. Direct primary energy of the case school buildings

School	Life cycle primary energy per unit area (Mcal/m ²)			
	Embodied	Operational	Disposal	Total
A	689(5.5%)	11,618(93.1%)	168(1.3%)	12,475
B	436(4.5%)	9,033(94.1%)	132(1.4%)	9,601
C	439(4.9%)	8,410(93.8%)	118(1.3%)	8,966
D	638(9.7%)	5,815(88.5%)	119(1.8%)	6,572
E	431(6.4%)	6,147(91.7%)	123(1.8%)	6,700
F	403(7.2%)	5,172(92.1%)	44(0.8%)	5,618
G	514(7.2%)	6,484(91.2%)	115(1.6%)	7,112
H	383(8.9%)	3,774(87.2%)	171(3.9%)	4,328
Mean	492(6.4%)	7,056(92.0%)	124(1.6%)	7,672
S.D.	114	2,495	39	2,573

Table 3의 결과는 직접적인 에너지사용량만을 고려한 결과이다. 본 연구에서는 직접 에너지사용량과 함께 간접 에너지사용량을 고려하였다. Fig. 1에서 직접 에너지사용량을 살펴보면, 평균값을 기준으로 내재에너지는 6.4%, 운영에너지는 92.0%, 해체·폐기 에너지는 1.6%를 차지하는 것을 알 수 있다. 하지만, 간접 에너지사용량에서는 내재에너지, 운영에너지, 해체·폐기 에너지의 비율이 각각 29.7%, 68.6%, 1.7%로 나타났다. 즉, 직접 에너지사용량에서는 492 Mcal/m²에 불과하던 내재에너지가 간접 에너지사용량에서는 1,787 Mcal/m²로 크게 증가하였다. 반면, 운영에너지의 경우에는, 7,056 Mcal/m²의 직접 에너지보다 작은 4,126 Mcal/m²만이 간접적으로 사용된 것으로 나타났다. 해체·폐기 에너지 역시 직접 에너지사용량(124 Mcal/m²)에 비해 간접 에너지사용량(105 Mcal/m²)이 작게 나타났다.

자재생산단계에서는 다양한 건축자재의 생산과 직·간접적으로 영향을 받는 모든 산업을 고려하는 반면, 운영 및 해체·폐기단계에서는 사용되는 에너지원(즉, 전력, 도시가스, 경유, 휘발유)의 생산과정과 직·간접적으로 관련된 산업만이 고려된다. 이로 인하여, 운영 및 해체·폐기단계에서는 자재생산단계와 비교하여 상대적으로 적은 산업만이 고려되기 때문에, 운영 및 해체·폐기단계에서의 간접 에너지사용량의 증가는 작게 나타난 것으로 여겨진다.

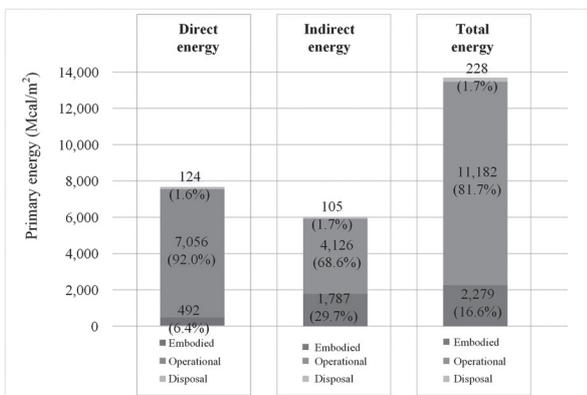


Fig. 1. Life cycle primary energy in each phase

결국, Table 4와 같이, 직·간접 에너지사용량을 모두 고려할 경우, 내재에너지는 평균적으로 2,279 Mcal/m² (16.6%), 운영에너지는 11,182 Mcal/m² (81.7%), 해체·폐기 에너지는 228 Mcal/m² (1.7%)로 나타났다. 그리고 생애주기 에너지사용량은 최소 8,485 Mcal/m²에서 최대 21,438 Mcal/m²의 범위로 나타났으며, 평균 13,689 Mcal/m²로 산출되었다.

Ramesh et al.(2010)은 주거 및 사무실 건축물에 대한 생애주기 에너지사용량을 분석한 기존 연구들을 검토하였다. Ramesh et al.(2010)에 따르면, 사무실 건축물의 경우, 내재에너지는 평균 2,719 Mcal/m² (최소 1,420 Mcal/m²에서 최대 4,784 Mcal/m²)이고, 운영에너지는 평균 13,070 Mcal/m² (최소 8,845 Mcal/m²에서 최대 34,933 Mcal/m²)인 것으로 나타났다. 그리고 내재에너지와 운영에너지의 비율을 각각 17.2%와 82.8%인 것으로 나타났다. 비록 본 연구에서 평가한 초등학교 건축물과 Ramesh et al.(2010)에서 검토한 건축물은 지역, 규모, 용도 등이 다르지만, 본 연구의 결과는 기존 연구의 평가 결과와 상당부분 일치하는 것으로 나타났다.

Table 4. Life cycle primary energy of the case school buildings

School	Life cycle primary energy per unit area (Mcal/m ²)			
	Embodied	Operational	Disposal	Total
A	2,727(12.7%)	18,400(85.8%)	310(1.4%)	21,438
B	2,101(12.6%)	14,306(85.9%)	244(1.5%)	16,651
C	1,571(10.4%)	13,319(88.2%)	218(1.4%)	15,108
D	2,635(21.8%)	9,258(76.4%)	220(1.8%)	12,114
E	1,960(16.4%)	9,736(81.7%)	227(1.9%)	11,923
F	2,362(22.2%)	8,191(77.0%)	81(0.8%)	10,634
G	2,681(20.4%)	10,269(78.0%)	212(1.6%)	13,162
H	2,193(25.8%)	5,977(70.4%)	315(3.7%)	8,485
Mean	2,279(16.6%)	11,182(81.7%)	228(1.7%)	13,689
S.D.	403	3,948	72	4,020

4.2. 이산화탄소 배출량

이산화탄소 배출량에 대한 평가결과와 유사하게 나타났다. Table 5 및 Fig. 2와 같이, 직접적인 이산화탄소 배출량만을 고려하는 경우, 내재된 이산화탄소 배출량은 평균적으로 132 kg-CO₂/m² (7.6%) 운영단계에서의 이산화탄소 배출량은 1,573 kg-CO₂/m² (90.4%) 해체·폐기 단계의 이산화탄소 배출량은 34 kg-CO₂/m² (2.0%)로 산출되었다. 그리고 생애주기 이산화탄소 배출량은 평균 1,740 kg-CO₂/m²로 나타났다. 하지만, 간접적인 이산화탄소 배출량에서는 내재된 이산화탄소 배출량, 운영단계 이산화탄소 배출량, 해체·폐기단계 이산화탄소 배출량의 비율이 각각 28.9%, 69.6%, 1.6%로 나타났다. 즉, 내재된 이산화탄소 배출량 중 직접 배출량(132 kg-CO₂/m²)에

비해 약 3.6배 증가한 472 kg-CO₂/m²가 간접적으로 배출되었다. 운영단계에서의 이산화탄소 배출량은 1,573 kg-CO₂/m²에 비해 작은 1,134 kg-CO₂/m²가 간접적으로 배출되었으며, 해체·폐기단계에서의 이산화탄소 배출량 역시 직접 배출량(34 kg-CO₂/m²)에 비해 작은 26 kg-CO₂/m²만이 간접적으로 배출되었다. 결과적으로, 건축물 생애주기 동안 1,632 kg-CO₂/m²가 간접적으로 배출된 것으로 나타났다.

Table 5. Direct CO₂ emission of the case school buildings

School	Life cycle CO ₂ emission per unit area (kg-CO ₂ /m ²)			
	Embodied	Operational	Disposal	Total
A	192(6.8%)	2,591(91.6%)	47(1.6%)	2,829
B	112(5.2%)	2,014(93.1%)	37(1.7%)	2,163
C	123(6.0%)	1,875(92.4%)	33(1.6%)	2,030
D	173(11.5%)	1,296(86.3%)	33(2.2%)	1,502
E	116(7.6%)	1,371(90.1%)	34(2.2%)	1,521
F	106(8.3%)	1,153(90.7%)	12(1.0%)	1,271
G	133(8.3%)	1,446(89.8%)	32(2.0%)	1,611
H	100(10.1%)	841(85.1%)	47(4.8%)	989
Mean	132(7.6%)	1,573(90.4%)	34(2.0%)	1,740
S.D.	33	556	11	580

직·간접 이산화탄소 배출량을 모두 고려할 경우, Table 6과 같이 내제된 이산화탄소 배출량은 평균적으로 604 kg-CO₂/m² (17.9%), 운영단계에서의 이산화탄소 배출량은 2,708 kg-CO₂/m² (80.3%), 해체·폐기단계의 이산화탄소 배출량은 60 kg-CO₂/m² (1.8%)로 나타났다. 생애주기 이산화탄소 배출량은 최소 2,107 kg-CO₂/m²에서 최대 5,227 kg-CO₂/m²의 범위로 나타났으며, 평균 3,372 kg-CO₂/m²인 것으로 산출되었다.

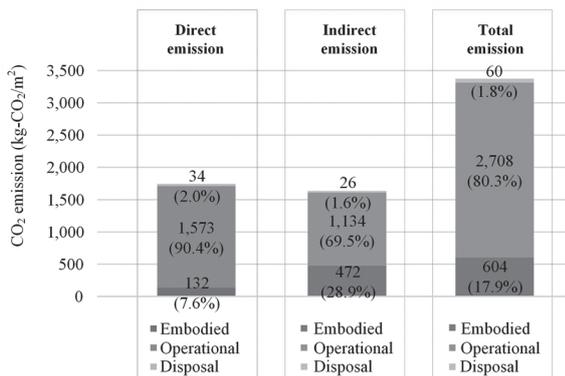


Fig. 2. Life cycle CO₂ emission in each phase

Table 6. Life cycle CO₂ emission of the case school buildings

School	Life cycle CO ₂ emission per unit area (kg-CO ₂ /m ²)			
	Embodied	Operational	Disposal	Total
A	739(14.0%)	4,457(84.5%)	82(1.5%)	5,277
B	545(13.4%)	3,465(85.0%)	64(1.6%)	4,075
C	427(11.5%)	3,226(87.0%)	57(1.5%)	3,710
D	696(23.3%)	2,238(74.8%)	58(1.9%)	2,991
E	519(17.7%)	2,358(80.3%)	60(2.0%)	2,937
F	624(23.7%)	1,984(75.5%)	21(0.8%)	2,629
G	708(21.8%)	2,487(76.5%)	56(1.7%)	3,251
H	576(27.4%)	1,448(68.7%)	83(3.9%)	2,107
Mean	604(17.9%)	2,708(80.3%)	60(1.8%)	3,372
S.D.	107	956	19	981

4.3. 논의

4.3.1 단계별 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량

Table 3에서 6은 8개 초등학교 건축물에 대한 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량 평가결과를 보여준다. 앞서 언급한 것과 같이, 직접 에너지사용량만 고려하면 생애주기 에너지사용량의 평균 6.4%(최소 4.5%에서 최대 9.7%)만이 내제에너지에서 발생하는 것으로 나타났다. 하지만, 간접 에너지사용량을 함께 고려하는 경우에는 생애주기 에너지사용량에 대한 내제에너지의 비율이 평균 16.6%(최소 10.4%에서 최대 25.8%)까지 높아지는 것으로 나타났다. 이산화탄소 배출량 측면에서의 결과 역시 에너지 사용량에 대한 평가 결과와 유사하였다. 직·간접 이산화탄소 배출량을 모두 고려하면 내제된 이산화탄소 배출량의 비율은 평균 18.0%(최소 11.6%에서 최대 27.4%)를 차지하는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 내제된 에너지 사용량 및 이산화탄소 배출량이 생애주기 측면에서 상당한 부분을 차지한다는 사실을 보여준다. 특히, 운영단계와 비교하여 내제된 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량은 1~2년의 짧은 기간 동안 발생하기 때문에, 이를 감안하면 내제에너지 및 이산화탄소 배출량의 중요성은 상당하다고 할 수 있다. 이에 따라, 건축물의 생애주기 관점에서 에너지사용량(또는 이산화탄소 배출량) 감축을 달성하기 위해서는, 운영에너지 및 이산화탄소 배출량 뿐만 아니라 내제에너지와 이산화탄소 배출량이 고려되어야 할 필요가 있다.

에너지경제연구원에서는 산업, 수송, 가정, 상업·공공 및 대형건물 등 5개 부문에서의 에너지사용량을 조사하여, 3년마다 “에너지 총조사보고서”를 발표하고 있다. 에너지 총조사 보고서의 산업부문에서는 건설업을 포함하고 있지만, 건설업체 본사에서 사용하는 에너지만을 고려할 뿐 건설현장에서의 에너지 사용량은 포함하지 않는다(KEEI 2015). 이로 인하여, 건축물 운영 이전 단계에서 발생하는 내제에너지 및 이산화탄소 배출량에 대해서는 조사 및 분석이 시행되지 못하는 실

정이다. 따라서 에너지 사용량 및 이산화탄소 배출량 감축 목표의 달성을 촉진하기 위하여, 건축물의 자재생산, 자재운송, 시공단계에서 발생하는 내재된 에너지 사용량 및 이산화탄소 배출량을 고려하는 방안이 마련되어야 할 것이다.

4.3.2 지역에 따른 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량

기후는 건축물에 적용되는 기술이나 운영단계에서의 에너지 사용량에 영향을 주는 주요 요인이기 때문에, 초등학교 건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량은 지역에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서 평가한 사례 건축물은 서울, 충남, 전북, 광주, 전남, 대구, 경북, 부산 지역에 건설된 초등학교 건축물이다. 이에 따라, 본 연구에서는 건축물 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 지역에 따라 비교하였다.

Fig. 3과 같이, “A” 초등학교 건축물은 “건축물의 에너지절약 설계기준”에서 규정하는 중부지역에 포함되고, 나머지 초등학교 건축물은 남부지역에 포함된다. Fig. 3과 같이, 내재 에너지와 해체·폐기 에너지는 기후에 크게 영향을 받지 않았지만, 운영 에너지 사용량은 기후의 영향을 받는 것으로 나타났다. 예를 들어, Fig. 3 (b)와 같이, 위도가 가장 높은 서울 지역의 “A” 초등학교 건축물의 운영 에너지 사용량은 가장 높게 나타난 반면, 위도가 가장 낮으며 해양성 기후 지역인 부산 지역의 “H” 초등학교 건축물의 운영 에너지 사용량은 가장 낮게 나타났다. 하지만, 내재된 에너지 사용량은 경북 포항에 위치한 “G” 초등학교가 서울에 위치한 “A” 초등학교 다음으로 높게 나타났으며, 해체·폐기단계의 에너지 사용량은 “H” 초등학교 건축물이 가장 높게 나타났다. 게다가, Table 7과 같이, 각 지역의 기후 조건을 대변할 수 있는 각 학교의 위도와 에너지사용량과의 상관관계를 분석한 결과, 운영단계만이 유의한 결과를 가지는 것으로 나타났다. 비록 중부지역과 남부지역에 따라 다른 단열 기준을 규정하지만, 본 연구의 결과는 다른 단열 기준에도 불구하고 초기에 설치되는 자재로 인한 에너지사용량은 크게 다르지 않다는 결과를 보여준다.

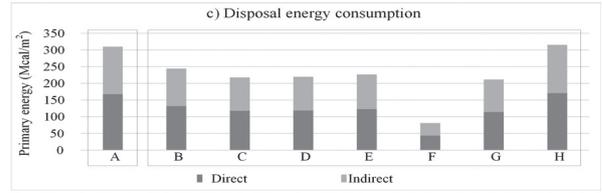
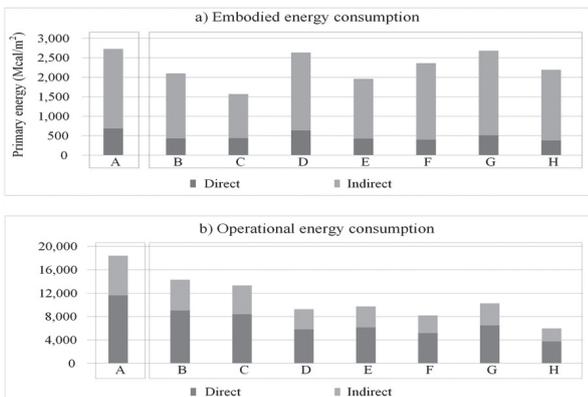


Fig. 3. Life cycle primary energy consumption of each building

Table 7. Pearson's correlation coefficient between latitude of buildings and energy consumption

	Life cycle energy consumption		
	Embodied	Operational	Disposal
Correlation coefficient	0.367	0.898**	0.517
Significance probability	0.371	0.002	0.190

4.3.3 내재된 에너지와 운영 에너지의 관계

일반적으로 에너지성능의 향상을 위해서는 추가적인 자원(자재, 설비 등)이 요구된다. 이는 운영단계에서의 에너지 사용량을 낮출 수 있지만, 내재에너지의 증가로 이어질 수도 있다. 이러한 측면에서, 내재에너지에 따라 운영에너지가 어떠한 변화를 가지는지에 대한 분석이 필요하다. 본 연구의 결과는 Fig. 4와 같이, 내재에너지와 운영에너지가 어떠한 상관성도 없는 것으로 나타났다. 특히, 0.069의 상관계수(유의확률 0.870)로 도출된 Pearson 상관관계 분석결과 역시 내재에너지의 변화와 운영에너지가 관련이 없다는 사실을 지지한다. 이러한 결과는 초기 단계에 많은 양의 자재 투입이 반드시 운영단계의 에너지 사용량 감축을 이끌지는 않는다는 것을 의미한다.

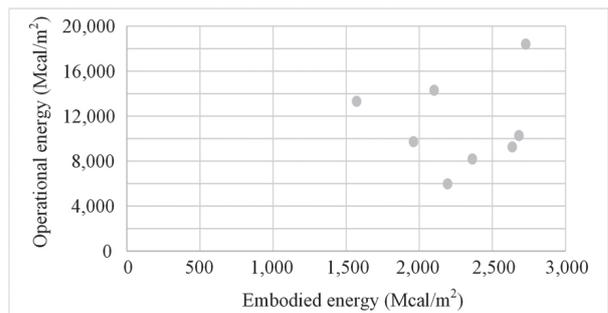


Fig. 4. Relation of embodied and operational energy

5. 결론

본 연구에서는 LCA 모델을 이용하여, 8개 지역(서울, 광주, 대구, 부산, 충청남도, 전라북도, 전라남도, 경상북도)에 위치한 8개 초등학교 건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가·분석하고자 하였다. 이를 위하여, 먼저 자재생산, 자재운송, 시공, 운영, 해체·폐기단계를 포

함하는 건축물 생애주기에서의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가할 수 있는 LCA 기반의 모델을 정의하였다. 그리고 정의된 모델을 이용하여 사례 건축물의 내재에너지(즉, 자재생산, 자재운송, 시공단계에서의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량), 운영에너지, 해체·폐기 에너지를 포함한 생애주기 에너지사용량을 평가하였다. 이와 함께, 생애주기 이산화탄소 배출량을 평가하였다.

40년의 운영기간을 가정하여 평가한 결과, 내재에너지, 운영에너지, 해체·폐기에너지는 평균적으로 2,279 Mcal/m², 11,182 Mcal/m², 228 Mcal/m²로 산출되었다. 각 단계별 이산화탄소 배출량은 604 kg-CO₂/m², 2,708 kg-CO₂/m², 60 kg-CO₂/m²로 산출되었다. 평가 결과에 따르면, 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량의 약 17%가 자재생산, 자재운송, 시공단계에서 발생한다. 따라서 건축물의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량 감축 목표를 달성하기 위해서는 내재에너지 및 이산화탄소 배출량이 반드시 고려되어야 한다. 한편, 운영에너지는 지역(기후)에 따라 확연하게 구분되는 반면, 내재에너지는 지역에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 제로에너지 건축물의 빌딩의 실현을 위해서는 지역에 따라 보다 상세하게 구분된 단열 기준이 필요하다는 사실을 보여준다.

건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량은 동일한 용도의 건축물이라 하더라도, 규모, 지역, 사용 에너지원의 종류, 냉·난방 방식, 사용자 특성 등의 다양한 요인에 따라 달라질 수 있다. 하지만 본 연구에서는 8개 지역에 위치하고, 동일한 냉난방 방식을 적용한 8개 건축물만을 평가하였다. 이로 인하여, 지역에 따른 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량의 차이는 분석하였으나, 규모, 냉·난방 방식, 에너지원의 종류 등의 차이에 따른 결과의 변화는 파악하지는 못하였다. 특히, 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 추가적인 평가가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(No. 2015R1A6A3A01061239)과 국토교통부 첨단도시개발 연구개발사업(11첨단도시G03)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

Chang Y., Ries R.J., and Lei S. (2012). "The embodied energy and emissions of a high-rise education building: A quantification using process-based hybrid life cycle inventory model." *Energ. Buildings.*,

55, pp. 790-798.

Gustavsson L., Joelsson A., and Sathre R. (2010). "Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building." *Energ. Buildings*, 42, pp. 230-242.

Hong T., Jeong K., and Ji C., (2014a). "Comparison of Environmental Impacts of Green and Traditional Buildings using Life Cycle Assessment." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(3), pp. 55-62.

Hong T., Ji C., Jang M., and Park H. (2014b). "Assessment Model for Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions during the Construction Phase." *J. Manage. Eng.*, 30(2), pp. 226-235.

Hong T., and Ji C. (2014). "Comparison of the CO₂ Emissions of Buildings using Input-Output LCA Model and Hybrid LCA Model." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(4), pp. 119-127.

Hong T., Koo C., and Kim H. (2012a). "A Decision Support Model for Improving a Multi-Family Housing Complex based on CO₂ Emission from Electricity Consumption." *J. Environ. Manage.*, 112(15), pp. 67-78.

Hong T., Koo C., and Jeong K. (2012). "A Decision Support Model for Reducing Electric Energy Consumption in Elementary School Facilities." *Appl. Energ.*, 95(7), pp. 253-266.

ISO 14040 (2006). *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. International Organization for Standardization.

Jang M., Hong T., and Ji C. (2015). "Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea." *Environ. Impact Asses.*, 50, pp. 143-155.

Jeong K., Ji C., Koo C., Hong T., and Park H. (2015). "A Model for predicting the Environmental Impact of educational facilities in the project planning phase." *J. Clean. Prod.*, 107, pp. 538-549.

Kim T., Lee K., and Hong W. (2012). "Energy consumption characteristics of the elementary schools in South Korea." *Energ. Buildings*, 54, pp. 480-489.

Korea Energy Economics Institute (KEEI) (2015). 2014 Energy Consumption Survey. Korea Energy

- Economics Institute, Ministry of Trade, Industry & Energy.
- Lee K., Tae S., and Shin S. (2009). "Development of a Life Cycle Assessment Program for building (SUSB-LCA) in South Korea." *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 13(8), pp. 1994-2002.
- Lee M., Kim W., Lee W., and Lee W. (2012). "A Study about Reduction Rates of Building Energy Demand for a Detached House according to Building Energy Efficient Methods." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 28(5), pp. 275-282.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2014). First Green Building Master plan in South Korea. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Ramesh T., Prakash R., and Shukla K., (2010). "Life cycle energy analysis of buildings: An overview." *Energ. Buildings*, 42, pp. 1592-1600.

요약 : 본 연구에서는 LCA 모델을 이용하여 8개 초등학교 건축물의 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가·분석하였다. 이를 위하여, 자재생산, 자재운송, 시공, 운영, 해체·폐기단계를 포함하는 건축물 생애주기에서의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량을 평가할 수 있는 LCA 기반의 평가모델을 정의하고, 모델을 이용하여 사례 건축물을 평가하였다. 40년의 운영기간을 가정하여 평가한 결과, 내재에너지(즉, 자재생산, 자재운송, 시공단계 에너지사용량의 합), 운영에너지, 해체·폐기에너지는 평균적으로 2,279, 11,182, 228 Mcal/m²로 산출되었다. 각 단계별 평균 이산화탄소 배출량은 604, 2,708, 60 kg-CO₂/m²로 산출되었다. 평가결과는 생애주기 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량의 약 17%가 자재생산, 자재운송, 시공단계에서 발생한다는 사실을 보여준다. 따라서 건축물의 에너지사용량 및 이산화탄소 배출량 감축 목표를 달성하기 위해서는 내재에너지 및 이산화탄소 배출량이 반드시 고려되어야 할 것이다. 게다가, 운영에너지는 지역에 따라 확연하게 구분되는 반면, 내재에너지는 지역에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 운영단계의 에너지 사용량 편차를 줄이기 위해서는 지역에 따라 보다 상세하게 구분된 단열 기준이 제시되어야 할 것이다.

키워드 : 생애주기, 에너지사용량, 이산화탄소 배출량, 내재에너지, 초등학교
