

# 산업연관분석법 기반 LCA 모델과 Hybrid LCA 모델의 건축물 이산화탄소 배출량 평가결과 비교

홍태훈\* · 지창윤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 건축공학과

## Comparison of the CO<sub>2</sub> Emissions of Buildings using Input-Output LCA Model and Hybrid LCA Model

Hong, Taehoon\* · Ji, Changyoon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Yonsei University

**Abstract :** This study aims to determine whether or not the input output life cycle assessment (I-O LCA) model can be used to assess the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission of buildings in initial planning phase. To ensure this end, this study proposed I-O LCA model which is the simplified LCA model and Hybrid LCA model which is the detailed LCA model, and then assessed and compared the CO<sub>2</sub> emission of six case projects (three apartment complexes and three educational facilities) using the two LCA model. The results of the case study showed that the CO<sub>2</sub> emissions assessed by the I-O LCA is significantly similar to the CO<sub>2</sub> emission assessed by the Hybrid LCA model. The similarity of results from both LCA models was 78.2-86.3% in apartment complexes and 59.9-84.8% in educational facilities. However, the CO<sub>2</sub> emissions from I-O LCA model were smaller than the CO<sub>2</sub> emissions from Hybrid LCA model in case study. Nevertheless, the case study showed that the I-O LCA model was capable of assessing the CO<sub>2</sub> emission of buildings quite appropriately although the I-O LCA model is the simplified LCA model which considers only the construction cost. The I-O LCA model is expected to be a useful tool for assessing the CO<sub>2</sub> emission of buildings in initial planning phase.

**Keywords :** Life Cycle Assessment, Input-Output LCA, Carbon dioxide, Simplified assessment model

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

지구온난화와 같은 환경문제로 인하여 이산화탄소 저감은 모든 산업에서 필수 요소로 자리 잡고 있다. 특히 전체 산업에서 배출되는 이산화탄소의 약 30%가 건설산업으로부터 배출되고 있는 만큼 (Li 2006), 건축물로부터 배출되는 이산화탄소 저감에 대한 요구는 지속적으로 커져가고 있다. 건축물로부터 배출되는 이산화탄소를 저감하기 위하여, 건축물에 대한 이산화탄소 배출량을 정량적으로 제시하는 방법은 필수적이다. 이에 따라, 전과정평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA) 방법론을 바탕으로 건축물의 이산화탄소 배출량을 평가하는 다양한 방법이 개발되어 왔다.

한국은행에서 제시하는 산업연관표(Input-output table)는 국내 산업부문을 403가지로 구분하고, 각 산업부문별 정보를 제시하고 있다. 산업연관표의 403가지 산업부문은 모래, 시멘트, 레미콘, 형강과 같은 건설 자재와 관련된 산업을 포함하고 있기 때문에, 많은 연구자들은 산업연관표를 이용하여 건축물 자재로 인한 이산화탄소 배출량 평가를 위한 LCA 모델을 개발하였다. 이러한 평가방법들은 건축물을 구성하는 자재목록 및 물량과 같은 상세한 설계정보를 바탕으로 이산화탄소 배출량을 산출한다(Hong et al. 2012c, Lee 2002, Lee and Yang 2009, Kim et al. 2004). 이로 인해, 기존 연구에서 제시한 평가방법들은 설계가 완료된 건축물을 평가하거나, 이산화탄소 배출량이 낮은 설계안의 선정을 지원하는 도구로 활용되어 왔다.

하지만, 국가 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 건설 프로젝트로 인한 이산화탄소 배출량을 기획 초기단계부터 파악해야 한다. 즉, 건설 프로젝트에 의한 이산화탄소 배출량이 미리 파악되어야 국가 온실가스 배출량 감축 목표의 달성 가능 여부를 판단할 수 있으며, 이를 바탕으로 프로

\* Corresponding author: Hong, Taehoon, Department of Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

E-mail: hong7@yonsei.ac.kr

Received May 7, 2014; revised June 12, 2014

accepted June 20, 2014

젝트에 대한 계획을 변경하거나 이산화탄소 배출량을 저감할 수 있는 기술을 추가 적용하는 등의 합리적인 의사결정을 내릴 수 있다. 이러한 이유로, 기획 초기단계부터 건축물의 이산화탄소 배출량을 예측할 수 있는 방법이 요구된다.

한국은행에서 제시하는 산업연관표는 건설자재 관련 산업과 더불어, 주택건설, 비주택건설, 도로건설과 같은 건설산업도 포함하고 있다(Bank of Korea 2013). 산업연관 분석법 기반의 LCA 모델(이하 I-O LCA 모델)은 제품이나 서비스의 비용 정보만을 이용하여 이산화탄소 배출량을 산출할 수 있기 때문에, 건축 프로젝트에 대한 총 공사비 정보만을 이용하여 기획단계에서 건축물의 이산화탄소 배출량을 평가하는 것이 가능하다.

이에 따라, 본 연구에서는 기획 초기단계의 개략평가 모델로서 I-O LCA 모델의 활용 가능성을 확인하기 위하여, I-O LCA 모델의 이산화탄소 배출량 평가 정확도를 파악하고자 한다. 이를 위하여, 본 연구에서는 개략평가 모델인 I-O LCA 모델과 상세평가 모델인 Hybrid LCA 모델을 정의하고, 이를 이용하여 다양한 건축물에 대한 이산화탄소 배출량을 산출 및 비교·분석하고자 한다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 개략 평가모델인 I-O LCA 모델의 이산화탄소 배출량 평가 정확도를 파악하기 위하여, 다음과 같은 순서에 따라 연구를 진행하고자 한다. 먼저, LCA에 관한 기존 연구를 검토하여, I-O LCA 모델과 Hybrid LCA 모델을 정의한다. LCA 모델의 평가범위는 건축물 준공단계까지 배출되는 이산화탄소량을 평가하는 것으로 한정하였다. 둘째, 두 LCA 모델을 이용하여 사례 건축물에 대한 이산화탄소 배출량을 평가한다. 본 연구에서는 사례분석의 범위를 설비, 토목, 조경공사를 제외한 건축공사로 한정하였다. 셋째, 평가결과를 비교함으로써, I-O LCA 모델의 평가 정확도를 파악한다.

## 2. 기존연구 고찰

### 2.1 전과정평가(Life Cycle Assessment)

LCA는 ISO 140000 시리즈에 의해 표준화된, 제품 및 서비스의 생애주기 동안 발생하는 환경영향을 정량화하기 위하여 사용되는 대표적인 방법이다(ISO 2006).

LCA 방법론은 크게 세 가지로 구분된다. 먼저, 제품 및 서비스가 생산되고 폐기되는 과정을 직접 상세하게 조사하여 투입물과 배출물을 파악하는 방식인 직접조사법(Process-based LCA)이 있다. 직접조사법은 시간과 비용, 인력의 소모가 많으나 평가결과의 신뢰도가 높다는 특징을 가진다. 둘째, 산업연관표를 활용하여 제품 및 시스템에 관

련된 산업부문에서 배출되는 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량 등을 산출하는 산업연관분석법(I-O LCA)이 있다. 이 방법은 건축물과 같이 복잡한 구조를 가진 제품 및 시스템에서의 적용에 유리하지만, 제품 및 시스템 개개의 분석이 어렵고 산업연관표에 적절한 산업이 없는 경우 유사 산업을 추론하여 해석해야 한다는 문제점을 가진다(Choi et al. 2013). 마지막으로 두 가지 방법을 장점을 절충한 혼합법(Hybrid LCA)이 있다. 일반적으로 다양한 자재와 긴 생애주기기간을 가진 건축물의 경우, 혼합법을 기반으로 하는 평가 모델이 주로 개발되어 왔다(Hong et al. 2012c, Tae et al. 2011).

### 2.2 건축물의 이산화탄소 배출량 평가에 관한 기존 연구

건축물의 이산화탄소 배출량을 평가하기 위하여, LCA 방법론을 이용한 다양한 연구들이 수행되어 왔다.

먼저, 몇몇 연구에서는 건축물에 대한 이산화탄소 배출량 평가를 위한 기초자료인, 건축 자재에 대한 이산화탄소 배출량 원단위 데이터를 구축하였다. 예를 들어 Lee and Yang (2009)과 Kim et al. (2004)은 주요 건축자재의 에너지 소비 및 이산화탄소 배출량 원단위를 구축하였고, Hong et al. (2012a, b)은 대표 건축자재인 콘크리트와 철골, 철근을 대상으로 강도에 따른 이산화탄소 배출량 원단위를 구축하였다.

다른 한편으로, 건축물의 이산화탄소 배출량 평가모델을 개발하기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다. Jung et al. (2008)은 건축 시 투입되는 건축자재의 상세 물량데이터와 운영단계의 에너지사용량 데이터를 바탕으로, 건축물의 전생애주기 동안 배출되는 이산화탄소량을 산출하는 방법을 제시하였다. Hong et al. (2013)은 건축자재에 대한 물량 정보와 시공계획 정보를 바탕으로 건축물의 건축자재, 운송, 시공단계에서 배출되는 이산화탄소 배출량을 산출하는 방법을 제시하였다. 한편 몇몇 연구에서는 건축물에 대한 이산화탄소 배출량 평가를 간소화할 수 있는 방법이 제시되기도 하였다. Choi et al. (2013)은 이산화탄소 배출량 평가를 간소화하는 방법으로서, 국내의 다양한 아파트에 투입되는 건축자재를 분석하여 건축공사 주요 자재를 선정하였다. Tae et al. (2011) 역시 “그린홈 인증제도”에서 제시하는 표준 공동주택에 투입되는 건축자재를 분석함으로써, 건축자재 이산화탄소 배출량의 80% 이상을 차지하는 주요 자재를 선정하고, 이를 데이터베이스로 구축하여, 표준 공동주택에 대한 이산화탄소 배출량을 간단하게 산정할 수 있는 모델을 개발하였다. Jeong et al. (2014)는 초등학교 건축물에 대한 특성 정보와 자재 물량 데이터를 구축하고, 사례기반추론(Case based reasoning) 방법을 이용하여 평가 대상 건축물에 대한 자재 물량 정보를 추출함으로

써, 건축물의 이산화탄소 배출량을 산출할 수 있도록 하였다. Moon et al. (2014)는 공동주택을 대상으로 사례기반 추론을 기반으로 이산화탄소 배출량을 평가하는 모델을 제시하였다.

비록, Tae et al. (2011), Jeong et al. (2014), Moon et al. (2014) 등의 연구에서 건축물에 대한 이산화탄소 배출량을 개략적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하였지만, 이들 역시 건축물에 대한 주요 개요 정보를 필요로 한다. 또한, 추출된 건축 자재의 물량 정보를 입력함으로써 이산화탄소 배출량을 평가하기 때문에, 복잡한 평가 과정을 필요로 한다. 특히, 프로젝트의 기획단계에는 연면적, 건축면적, 층수와 같은 건축물에 대한 개요정보가 제시되지 않기 때문에, 기존 연구에서 제시한 모델을 이용하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기획단계에서 건축물 이산화탄소 배출량 평가를 위한 개략평가 모델로서 I-O LCA 모델의 활용 가능성을 확인하기 위하여, I-O LCA 모델의 이산화탄소 배출량 평가 정확도를 검토하고자 한다.

### 3. LCA 방법론

본 연구에서는 개략평가 모델인 I-O LCA 모델의 평가 정확도를 확인하기 위하여, I-O LCA 모델과 Hybrid LCA 모델을 이용하여 산출된 다양한 건축물의 이산화탄소 배출량을 비교하고자 하였다. 이를 위하여, 먼저 I-O LCA 모델과 Hybrid LCA 모델을 정의하였다.

#### 3.1 I-O LCA 모델

산업연관표는 국가의 생산시스템이 모두 직간접적으로 연관되어 있다는 가정을 기반으로, 각 산업부문별 영향 정도를 정량적으로 제시한다(Bank of Korea 2007). 따라서 산업연관표를 이용하면, 건축물을 생산하는데 있어 직간접적으로 연관을 가지는 모든 산업으로부터 발생하는 모든 이산화탄소 배출량을 산출하는 것이 가능하다. 한국은행에서 제시하는 산업연관표는 투입계수표(Input coefficient matrix)와 생산유발계수표(Production inducement coefficients)를 포함한다. 투입계수는 각 산업부문이 1원의 생산물을 생산하기 위하여 관련 산업부문으로부터 직접적으로 투입되어야 하는 투입량을 의미한다. 따라서 투입계

수표를 이용할 경우, 하나의 산업부문에서 최종수요가 증가하였을 경우 이를 충족시키기 위하여 관련 산업부문에서 얼마만큼의 생산이 이루어져야 하는지를 파악할 수 있다.

앞서 언급한 것과 같이, 국가 산업부문을 403가지로 구분하는 산업연관표는 Table 1과 같이 “0030 무연탄”, “0031 유연탄”, “0033 천연가스”, “0131 연탄”, “0134 휘발유” 등의 에너지산업을 포함하고 있다. 따라서 수식 (1)과 같이 최종수요에 투입계수를 적용하면, 최종수요를 생산하기 위해 직접적으로 요구되는 에너지 투입량을 산출하는 것이 가능하다. 산업연관표는 “0305 주택건축”과 “0306 비주택건축” 산업부문을 포함하고 있기 때문에, 수식 (1)에 주택건축 또는 비주택건축을 위한 공사비용을 최종수요로 적용함으로써, 주택건축이나 비주택건축을 위해 직접적으로 요구되는 에너지원별 투입량을 파악할 수 있다.

$$X=A \times Y \tag{1}$$

X: 에너지원 i에 대한 투입량 정보(x<sub>i</sub>)를 포함하는 에너지산업 부문별 투입량 벡터  
 A: 투입계수표  
 Y: 산업부문별 최종 수요

한편, 생산의 파급효과는 무한히 계속된다. 예를 들어, 레미콘 산업부문에서 1원의 최종 수요 증가는 1차적으로 0.26335원의 시멘트 투입을 유도하고, 0.26335원의 시멘트 생산은 다시 2.094E-05원(=0.26335×0.00008)의 레미콘 투입을 유도한다. 다시 2.094E-05원의 레미콘 투입은 5.515E-06원(=2.094E-05×0.26335)의 시멘트 투입을 유도한다. 이처럼 생산의 파급효과는 3차, 4차, ..., n차로 무한히 계속된다고 볼 수 있으나, 투입계수를 이용한 방법은 무한히 계속되는 생산파급 효과를 산출하는 것은 현실적으로 불가능하다. 레온티에프 역행렬(Leontief inverse matrix)이라고도 불리는, 생산유발계수표는 각 산업부문에서 1원의 생산물을 생산하기 위하여 관련 산업부문으로부터 직간접적으로 투입되어야 하는 투입량을 보여준다. 따라서, 생산유발계수표를 이용하면 이러한 문제의 해결이 가능하다. 즉, 수식 (2)에 주택건축 또는 비주택건축을 위한 공사비용을 최종수요로 적용함으로써, 주택건축이나 비주택건축을 위해 간접적으로 요구되는 에너지원별 투입량을 산출할 수 있다.

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

X: 에너지원 i에 대한 투입량 정보(x<sub>i</sub>)를 포함하는 에너지산업 부문별 투입량 벡터  
 (I-A)<sup>-1</sup>: 투입계수표  
 Y: 산업부문별 최종 수요

Table 1. Energy-related commodities in Input-Output Table

Code	Commodity section	Code	Commodity section
0030	Anthracite	0138	Heavy oil
0031	Bituminous coal	0139	Liquefied petroleum gas (LPG)
0033	Natural gas	0298	Hydroelectric power generation
0131	Coal briquette	0299	Fire power generation
0134	Gasoline	0300	Nuclear power generation
0136	Kerosene	0301	Other generation
0137	Light oil	0302	Manufactured gas supply



수식 (1)과 (2)를 통해 산출된 에너지원별 투입량은 “원”을 단위로 하는 금액정보이다. 따라서 수식 (3)과 같이 수식 (1)과 (2)를 통해 산출된 결과를 에너지원의 단위 가격으로 나누어줌으로써, 물량단위의 에너지원별 투입량을 산출할 수 있다. 그리고 수식 (4)와 같이, 수식 (3)을 통해 산출된 에너지원별 투입량(물량단위)에 에너지원별 생산 및 연소 과정에서의 이산화탄소 배출량 계수를 적용함으로써, 건축물의 생산과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 산출될 수 있다.

$$Q_i = x_i \div UP_i \quad (3)$$

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n \{Q_i \times (CC_i + CP_i)\} \quad (4)$$

$Q_i$ : 에너지원*i*의 투입량(물량단위)

$x_i$ : 에너지원*i*의 투입량(금액단위)

$UP_i$ : 에너지원*i*의 단위가격

$CO_2$ : 건축물 생산과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량

$CC_i$ : 에너지원*i*의 생산과정에서 배출되는 이산화탄소량계수

$CP_i$ : 에너지원*i*의 생산과정에서 배출되는 이산화탄소량계수

### 3.2 Hybrid LCA 모델

Hybrid LCA 모델은 자재생산단계, 자재운송단계, 시공단계로 구분하여 건축물 생산과정에서의 이산화탄소 배출량을 산출한다. 자재생산단계에서 배출되는 이산화탄소는 산업연관분석법을 이용하여 산출되고, 자재운송단계와 시공단계에서 배출되는 이산화탄소는 직접조사법과 산업연관분석법을 조합하여 산출된다.

#### 3.2.1 자재생산단계

한국은행의 산업연관표는 “0305 주택건축”과 “0306 비주택건축” 산업부문뿐만 아니라, “0038 모래및자갈”, “0039 쇠석”, “0040 건설용석재”, “0114 제재목”, “0115 합판”, “0148 합성수지”, “0167 산업용플라스틱제품”, “0179 시멘트”, “0180 레미콘”, “0181 콘크리트제품” 등의 다양한 건축자재를 포함하는 산업부문을 포함한다. 따라서 산업연관분석법을 이용하여, 각 건축자재에 대한 이산화탄소 배출량을 산출하는 것이 가능하다. 즉, 수식 (1)과 (2)의 최종 수요에 주택건축(또는 비주택건축)을 위한 공사비 대신 건축물을 구성하는 개별 건축자재에 대한 자재비를 적용함으로써, 각 건축자재를 생산하기 위해 직간접적으로 요구되는 금액단위의 에너지원별 투입량을 산출할 수 있다. 그리고 수식 (1)과 (2)를 통해 산출된 결과를 수식 (3)과 (4)에 적용함으로써, 자재생산단계에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 산출된다.

#### 3.2.2 자재운송단계

운송단계에서 배출되는 이산화탄소는 건축자재를 현장까지 운송하는 운송장비에 의해 사용되는 연료를 바탕으로 산출된다. 즉, 운송장비에 의해 사용된 연료 소비량에 각 연료가 연소 및 생산되는 과정에서의 이산화탄소 배출 계수를 적용함으로써, 자재운송단계에서의 이산화탄소 배출량은 산출될 수 있다. Hong et al. (2013)은 수식 (5)와 같이, 내역서의 건축자재에 대한 물량정보를 바탕으로 운송장비에 의해 사용되는 연료를 산출할 수 있는 수식을 제시하였다. 또한, 각 운송장비에 대한 적재용량 및 연비정보는 기존 연구에서 제시한 데이터를 사용될 수 있다(CAK 2011, Hong et al. 2013, KICT 2004). 따라서 수식 (5)를 이용함으로써, 자재운송단계에서 사용되는 연료 소비량은 산출될 수 있다. 그리고 수식 (6)과 같이, 연료 소비량에 연료의 연소과정에서의 이산화탄소 배출 계수를 곱해줌으로써, 자재운송단계에서의 직접적인 이산화탄소 배출량은 산출된다.

$$QED_i = 2 \sum_j \frac{QM_j \times TD_{j,m}}{LC_{j,m} \times FE_{m,i}} \quad (5)$$

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n QED_i \times CC_i \quad (6)$$

$QED_i$ : 자재*j*의 운송을 위하여 운송장비 *m*에 의해 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 적재용량

$FE_{m,i}$ : 에너지원*i*를 사용하는 운송장비 *m*의 연비

$CO_2$ : 직접 사용된 에너지원*i*의 연소로부터 배출되는 이산화탄소량

$CC_i$ : 에너지원*i*의 연소과정에서 배출되는 이산화탄소량 계수

자재생산과정에서의 간접적인 에너지 소비량 산출과정과 동일하게, 자재운송단계에서 사용된 연료의 생산 파급효과로 인해 발생하는 에너지원별 투입량 역시 고려되어야 한다. 즉, 수식 (2)에 자재운송단계에서 직접 사용된 에너지를 최종수요로 적용함으로써, 직접 사용된 에너지원의 생산을 위해 간접적으로 요구되는 에너지원별 투입량을 산출할 수 있다. 다만, 수식 (5)를 통해 도출되는 직접 에너지 사용량은 물량이기 때문에, 수식 (7)과 같이 에너지원별 단가를 곱해줌으로써 금액단위의 에너지 소비량으로 변환해 주어야 한다. 수식 (7)을 통해 산출된 결과를 수식 (3)과 (4)에 적용함으로써, 자재운송단계에서 간접적으로 발생하는 이산화탄소량은 산출된다.

$$X = (I - A)^{-1} \times (QED_i \times UP_i) \quad (7)$$

$X$ : 에너지원  $i$ 에 대한 투입량 정보( $x$ )를 포함하는 에너지산업 부문별 투입량 벡터  
 $QED_i$ : 자재 $j$ 의 운송을 위하여 운송장비 $m$ 에 의해 직접적으로 사용된 연료 $i$ 의 양  
 $UP_i$ : 에너지원 $i$ 의 단가

### 3.2.3 시공단계

시공단계에서 배출되는 이산화탄소의 산출방법은 시공 장비에 의해 직접적으로 사용되는 에너지 소비량의 산출 방법을 제외하고, 자재운송단계와 동일하다. 시공단계에서 사용되는 에너지의 양은 Hong et al. (2013)의 연구에서 제시한 것과 같이, 내역서에 제시된 물량정보를 수식 (8)에 적용함으로써 산출된다. 이때 사용되는 시공장비의 단위 시간당 작업량 및 연료사용량 정보는 기존연구에서 제시하는 데이터가 사용될 수 있다(CAK 2011, Hong et al. 2013, KICT 2004).

$$QED_i = \sum_k \frac{QM_k \times EC_{k,n}}{AWD_{k,n}} \quad (8)$$

$QED_i$ : 시공장비에 의해 직접적으로 사용된 에너지원 $i$ 의 양  
 $QM_k$ : 시공작업 $k$ 의 물량  
 $EC_{k,n}$ : 시공작업 $k$ 에 사용되는 시공장비 $n$ 의 단위시간당 연료소비량  
 $AWD_{k,n}$ : 시공장비 $n$ 의 시공작업 $k$ 에 대한 작업능력

## 4. 사례분석

### 4.1 사례분석 개요

본 연구에서는 앞서 정의한 I-O LCA 모델과 Hybrid LCA 모델의 이산화탄소 배출량 평가결과의 차이를 확인 하기 위하여, 사례분석을 실시하였다. 산업연관표는 주택 건축과 비주택건축으로 건축 관련 산업부문을 구분하기 때문에, 본 연구에서는 주택건축과 비주택건축으로 구분하여 사례분석을 시행하였다. 주택건축에 대한 평가결과 비교를 위하여, 현재 국내 거주형태 중 가장 높은 비율을 차지하는 아파트(3개 단지)를 대상으로 사례분석을 시행하였다. 이때, 관리동, 경비실, 노인정과 같은 부속시설은 분석대상에서 제외하였다. 비주택건축에 대한 평가결과 비교를 위해서는, 교육시설물(3개 학교)에 대한 이산화탄소 배출량을 평가하였다. Table 2와 3은 사례분석을 위한 아파트 단지와 교육시설물에 대한 개요정보를 보여준다.

사례분석은 다음과 같은 기준에 따라 시행되었다.

Table 2. Summary of apartment complexes

	"B" apartment complex	"K" apartment complex	"S" apartment complex
Year	2004	2005	2007
Location	Seoul	Seoul	Seoul
Total floor area	75,089.5m <sup>2</sup>	36,997.80m <sup>2</sup>	53,910.89m <sup>2</sup>
Structure type	R.C.	R.C.	R.C.
Material cost	KRW 18,237,843,717	KRW 11,620,820,752	KRW 12,783,528,689
Construction cost	KRW 29,121,927,642	KRW 15,498,678,594	KRW 21,304,673,058

Table 3. Summary of educational facilities

	"U" educational building	"K" educational building	"J" educational building
Year	2008	2009	2009
Location	Seoul	Seoul	Seoul
Total floor area	14,555.00m <sup>2</sup>	7,670.00m <sup>2</sup>	9,030.01m <sup>2</sup>
Structure type	R.C.	R.C.	R.C.
Material cost	KRW 3,449,513,768	KRW 1,983,644,752	KRW 2,657,701,323
Construction cost	KRW 6,194,358,005	KRW 3,626,905,562	KRW 3,742,751,417

- 한국은행에서 제시한 2010 산업연관표(투입계수표, 생산유발계수표)를 사용하였고, 에너지원별 단가는 국가 에너지통계종합정보시스템에서 제시하는 2010년 기준 값을 사용하였다.
- 에너지원의 생산에 대한 이산화탄소 배출량 계수는 Table 4와 같이, 환경부와 지식경제부에서 구축한 LCI(life cycle inventory) 데이터를 활용하였다. 무연탄, 유연탄, 연탄을 구분하여 구축한 데이터는 없기 때문에, 지식경제부에서 구축한 석탄의 LCI 데이터를 동일하게 적용하였다. 전기 역시 수력, 화력, 원자력, 기타발전으로 구분하여 구축한 데이터가 없기 때문에, 지식경제부에서 구축한 전기 LCI 데이터를 동일하게 적용하였다. LCI 데이터는 국가 LCI 데이터베이스 정보망(Korea LCI Database Information Network)으로부터 확보되었다(KEITI 2013).
- 에너지원의 연소에 대한 이산화탄소 배출량 계수는 Wang (1999)이 제시하는 데이터를 사용하였다(Wang 1999).
- 각 건축물의 설계 시점이 다르기 때문에, 한국은행에서 제시하는 생산자물가지수(Produce price index)를 활용하여, 내역서의 자재비를 2010년 기준값으로 변환하였다. 또한, 내역서에 포함된 자재비 단가는 자재의 운송, 이윤 등을 포함하는 가격이기 때문에, Chang et al. (2012)과 같이, 내역서에 제시된 자재비의 90%를 직접 자재 생산비로 설정하였다.
- 자재운송단계에서의 에너지사용량을 산출하기 위하여, 운송거리는 대한민국 LCI DB 구축 시 표준거리로 사용된 30km로 설정하였다.

Table 4. CO<sub>2</sub> emission from the production and combustion of energy sources

Energy source	Unit	Production		Combustion	
		CO <sub>2</sub> emission factor	Reference	CO <sub>2</sub> emission factor	Reference
Anthracite	kg/kg	0.1949	A	1.7130	C
Bituminous coal	kg/kg	0.1949	A	2.2748	C
Natural gas	kg/kg	0.4809	B	2.8000	C
Coal briquette	kg/kg	0.1949	A	1.7132	C
Gasoline	kg/l	0.0580	A	0.6804	C
Kerosene	kg/l	0.1898	B	2.4928	C
Light oil	kg/l	0.0561	A	2.6671	C
Heavy oil	kg/l	0.2592	B	-	-
Liquefied petroleum gas	kg/kg	4.97E-09	A	6.7003	C
Hydroelectric power generation	kg/kWh	0.4872	A	-	-
Fire power generation	kg/kWh	0.4872	A	-	-
Nuclear power generation	kg/kWh	0.4872	A	-	-
Other generation	kg/kWh	0.4872	A	-	-
Manufactured gas supply	kg/Nm <sup>3</sup>	0.5864	B	2.2355	C

※ Note: A: Ministry of Knowledge, Economy, B: Ministry of Environment, C: Wang (1991)

## 4.2 분석결과

### 4.2.1 아파트단지 이산화탄소 배출량

Table 5는 두 LCA 모델을 이용하여 산출한 아파트 단지의 평가결과를 보여준다. 먼저 Hybrid LCA 모델의 평가결과를 살펴보면, 자재생산단계에서 약 93.9-96.2%의 이산화탄소가 배출되었고 자재운송단계와 시공단계에서는 각각 약 2.4-3.7%와 0.7-2.4%의 이산화탄소가 배출되었다. 일반적으로 자재운송단계에 비해 시공단계의 이산화탄소 배출량이 높지만, 3가지 아파트 단지 사례의 내역서는 많은 양의 연료소비를 야기하는 토공사 관련 내역을 포함하지 않고 있었다. 이로 인하여, 시공단계에 비해 운송단계의 결과가 더 큰 것으로 나타났고, 자재생산단계의 비율은 다소 높게 나타났다.

단위면적당 이산화탄소 배출량은 약 557.9 ~ 697.3kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 결과가 도출되었다. 이는 Tae et al. (2011)에서 제시한 표준 아파트의 단위면적당 이산화탄소 배출량인 488.6kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>에 비해 다소 큰 결과이다. 이러한 차이는 Tae et al. (2011)의 모델과 달리, 본 연구에서 정의한 Hybrid LCA 모델은 자재, 운송, 시공단계에서 직간접적으로 배출되는 모든 이산화탄소를 모두 고려하기 때문인 것으로 파악된다. I-O LCA 모델을 통해 산출된 단위면적당 이산화탄소 배출량은 Hybrid LCA 모델의 결과에 비해 다소 작은 값인, 약 453.0 ~ 549.4kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 산출되었다.

Table 5. Results of the apartment complexes

Model	Complex	Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )		
		Quantity (t-CO <sub>2</sub> )	Intensity (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	
Hybrid LCA model	"S" complex	Material	28,232.03 (93.9%)	523.7
		Transportation	1,126.78 (3.7%)	20.9
		Construction	718.49 (2.4%)	13.3
		Total	30,077.30 (100.0%)	557.9
	"K" complex	Material	24,825.57 (96.2%)	671.0
		Transportation	788.42 (3.1%)	21.3
		Construction	185.78 (0.7%)	5.0
		Total	25,799.77 (100.0%)	697.3
	"B" complex	Material	45,750.92 (95.6%)	609.3
		Transportation	1,296.90 (2.7%)	17.3
		Construction	784.49 (1.6%)	10.4
		Total	47,832.31 (100.0%)	637.0
I-O LCA model	"S" complex	24,424.32	453.0	
	"K" complex	20,171.91	545.2	
	"B" complex	41,256.49	549.4	

### 4.2.2 학교 건축물 이산화탄소 배출량

Table 6은 두 LCA 모델을 이용하여 산출된 교육시설물의 평가결과를 보여준다. Hybrid LCA 모델의 평가결과를 살펴보면, 자재생산단계에서 89.7 ~ 93.9%의 이산화탄소가 배출되었고 운송단계와 시공단계에서는 각각 약 3.6 ~ 4.4%와 2.0 ~ 6.0%의 이산화탄소가 배출되었다. "U" 학교의 내역서는 토공사 관련 내역을 포함하고 있어, 시공단계의 결과가 운송단계보다 크게 나타난 반면, "K"와 "J" 학교의 경우에는 시공단계 배출량이 가장 작은 것으로 나타났다.

Table 6에 나타난 것과 같이, 교육시설물에 대한 단위면적당 이산화탄소 배출량은 약 513.2 ~ 637.2kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로, 아파트 단지의 단위면적당 이산화탄소 배출량(557.9 ~

Table 6. Results of the education buildings

Model	School	Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )		
		Quantity (t-CO <sub>2</sub> )	Intensity (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	
Hybrid LCA model	"U" school	Material	6,992.67 (89.7%)	480.4
		Transportation	342.09 (4.4%)	23.5
		Construction	464.62 (6.0%)	31.9
		Total	7,799.38 (100.0%)	535.9
	"K" school	Material	3,694.911 (93.9%)	481.7
		Transportation	162.62 (4.1%)	21.1
		Construction	78.53 (2.0%)	8.7
		Total	3,936.07 (100.0%)	513.2
	"J" school	Material	5,398.48 (93.8%)	597.8
		Transportation	206.94 (3.6%)	22.9
		Construction	148.55 (2.6%)	16.5
		Total	5,753.96 (100.0%)	637.2
I-O LCA model	"U" school	6,044.91	415.3	
	"K" school	3,339.37	435.4	
	"J" school	3,446.03	381.6	



697.3kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>)에 비해 다소 작았다. 이는 아파트에 비해 학교 건축물이 낮고, 투입되는 마감재 역시 적기 때문인 것으로 파악된다. I-O LCA 모델을 통해 산출된 단위면적당 이산화탄소 배출량 역시 Hybrid LCA 모델의 결과에 비해 다소 작은 값인, 약 381.6 ~ 435.4kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 산출되었다.

### 4.3 결과분석 및 논의

Fig. 1은 I-O LCA 모델과 Hybrid LCA 모델을 통해 산출된 이산화탄소 배출량을 비교한 결과를 보여준다. Fig. 1과 같이, 가장 유사도가 높은 아파트 단지인 “S” 아파트 단지의 경우 I-O LCA 모델의 결과는 Hybrid 모델의 결과와 86.3%의 유사도를 가진 것으로 나타났다. 학교 건축물 역시 “J” 학교 건축물을 제외하면 77.5 ~ 84.8%까지 유사한 것으로 나타났다. “J”학교 건축물의 경우에는 다른 사례들에 비해 약 20% 낮은 59.9%의 유사도를 보여주었다. 이처럼 I-O LCA 모델은 총공사비를 유일한 입력요소로 하는 간단한 모델임에도 불구하고, Hybrid LCA 모델의 결과와 비교적 유사한 결과를 제시하고 있다.

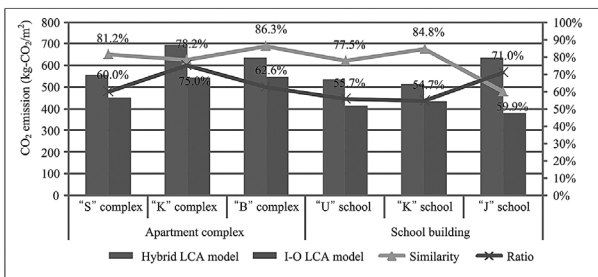


Fig. 1. The results of comparison

하지만, 이는 I-O LCA 모델의 결과가 약 14.7~40.1%의 오차를 나타낸다는 것을 의미한다. Fig. 1과 같이, I-O LCA 모델은 전반적으로 Hybrid LCA 모델에 비해 건축물의 이산화탄소 배출량을 작게 산출하였다. 예를 들어, “S”, “K”, “B” 아파트 단지의 경우 I-O LCA 모델은 Hybrid LCA 모델에 비해 각각 18.8%, 21.8%, 13.7% 작은 결과를 제시하였다. 교육시설물의 경우에도 I-O LCA 모델은 Hybrid LCA 모델에 비해 15.2~40.1%까지 작은 결과를 제시하였다.

I-O LCA 모델이 기획 초기단계에 건축물의 이산화탄소 배출량 예측에 활용되기 위해서는, I-O LCA 모델의 평가 정확도 향상이 반드시 수반되어야 한다. 따라서 I-O LCA 모델의 평가 정확도 향상을 위하여, 이러한 차이의 원인이 분석되어야 할 필요가 있다. 예를 들어, I-O LCA 모델과 Hybrid LCA 모델 모두 내역서의 정보를 바탕으로 건축물의 이산화탄소 배출량을 산출하지만, I-O LCA 모델은 총

공사비를 바탕으로 산출하는 반면, Hybrid LCA 모델은 자재비와 자재물량을 바탕으로 이산화탄소 배출량을 산출한다. 이러한 이유로, 공사비 대비 자재비 비율의 차이는 I-O LCA 모델의 정확도에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 공사비 대비 자재비의 비율이 높을수록, I-O LCA 모델을 통해 산출된 이산화탄소 배출량은 Hybrid LCA 모델의 결과에 비해 작게 나타날 수 있다. Fig. 1에 나타난 것과 같이, 다른 사례에 비해 공사비 비율이 높은 “K” 아파트 단지과 “J” 학교 건축물의 경우, I-O LCA 모델의 평가결과는 Hybrid LCA 모델의 결과에 비해 상당히 작게 나타났으며, 이로 인하여 I-O LCA 모델의 유사도 역시 각각 78.2%와 59.9%로 낮게 나타났다. 이러한 결과에 근거하면, 공사비 대비 자재비의 비율을 바탕으로 이산화탄소 배출량 평가결과를 조정함으로써, I-O LCA 모델의 평가 정확도를 향상시키는 것이 가능하다.

공사비 대비 자재비의 비율 외에도, I-O LCA 모델의 정확도에 영향을 주는 다양한 요인이 있을 수 있다. I-O LCA 모델이 기획 초기단계 건축물의 이산화탄소 배출량 평가에 활용되기 위해서 평가 정확도의 향상은 필수적이다. 따라서 I-O LCA 모델의 정확도를 향상시키기 위하여, 더욱 많은 사례에 대한 분석을 바탕으로 I-O LCA 모델의 정확도에 영향을 주는 원인에 대한 분석이 수행되어야 할 것이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 I-O LCA 모델의 이산화탄소 배출량 평가 정확도를 파악하기 위하여, 상세평가 모델인 Hybrid LCA 모델과 I-O LCA 모델을 이용하여 건축물에 대한 이산화탄소 배출량을 평가하고, 결과를 비교하였다. 3개의 아파트 단지과 3개의 교육시설물에 대한 이산화탄소 배출량 평가결과를 비교한 결과, I-O LCA 모델의 결과가 Hybrid LCA 모델의 결과와 비교적 유사하다는 사실이 확인되었다. 공동주택의 경우 78.2~86.3%까지 유사하였고, 교육시설물의 경우에는 59.9~84.8%의 유사도를 보여주었다.

비록 몇몇 사례에서는 낮은 유사도가 나타났지만, I-O LCA 모델이 총 공사비를 유일한 입력 요소로 사용하는데도 불구하고, 상세 평가모델인 Hybrid LCA 모델의 결과와 비교적 유사한 결과를 제시하였다. 이는 I-O LCA 모델이 프로젝트의 초기 기획단계에 건축물의 이산화탄소 배출량을 예측하는데 활용될 수 있다는 것을 의미한다.

하지만, 사례분석 결과 몇몇 사례에서 I-O LCA 모델의 평가 정확도는 상당히 낮은 것으로 나타났다. 따라서 I-O LCA 모델이 초기 기획단계에서 건축물의 이산화탄소 배출량 예측에 활용되기 위해서는 이러한 오차의 원인을 분석하고, 분석 결과를 바탕으로 I-O LCA 모델의 평가 정확도

를 향상시키는 방법의 제시가 수반되어야 할 것이다. 특히, 본 연구에서는 단지 공동주택 3개 단지와 교육시설물 3개 학교를 대상으로 이산화탄소 배출량 평가결과를 비교하였다. 사례분석에 활용된 대상 건축물이 모든 건축물을 대표하는 것은 아니기 때문에, 평가결과를 일반화하기에는 문제가 있다. 따라서 향후 연구에서는 추가적인 건축물에 대한 평가 및 비교가 수행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 첨단도시개발 연구개발사업의 연구비지원(11첨단도시G03)에 의해 수행되었습니다.

### References

Bank of Korea (2007). Input-Output Analysis Explanation. Bank of Korea. South Korea.

Bank of Korea (2013). 2010 Input-Output Tables. Bank of Korea. South Korea.

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.

Choi D., Chun H., and Cho K. (2013). “A Study on the LCA of an Apartment House through a Simplified Technique.” *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 29(1), pp. 307-316.

Construction Association of Korea (CAK). (2011). General Information for Construction. Construction Association of Korea, Seoul, South Korea.

Hong, T., Ji, C., and Jang, M. (2012a). “An analysis on CO<sub>2</sub> emission of structural steel materials by strength using Input-Output LCA.” *Korean journal of Construction Engineering and Management, KICEM*, 13(4), pp. 131-139.

Hong, T., Ji, C., Jang, M., and Park, H. (2012b). “Predicting the CO<sub>2</sub> Emission of Concrete Using Statistical Analysis.” *Journal of Construction Engineering and Project Management, KICEM*, 2(2), pp. 53-60.

Hong T., Ji C., and Park H. (2012c). “Integrated Model for Assessing the Cost and CO<sub>2</sub> Emission (IMACC) for Sustainable Structural Design in Ready-Mix Concrete.” *J. Environ. Manage.*, 103, pp. 1-8.

Hong T., Ji C., Jang M., and Park H. (2013). “Assessment Model for Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions during the Construction Phase.” scheduled for publication in *J. Manage. Eng.*

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

Jeong K., Ji C., Koo C, Hong T, and Park HS. (2014). “A model for predicting the environmental impacts of educational facilities in the project planning phase.” *J. Clean. Prod.* in press.

Jung B., Lee H., Choi Y., and Lee K. (2008). “Application of Life Cycle Assessment into the Apartment Housing and Calculation of the Energy Consumption and Emission.” *Proc., Academic conference, The Korean Housing Association.* Daejeon, South Korea. pp. 235-240.

Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI). Korea LCI Database Information Network. South Korea; Ministry of Environment: 2004. Accessed on 15 October 2013. <[http://www.edp.or.kr/lcidb/english/lcidb/lcidb\\_intro.asp](http://www.edp.or.kr/lcidb/english/lcidb/lcidb_intro.asp)>.

Korea Institute of Construction Technology (KICT). (2004). The Environmental Load Unit Composition and Program Development for LCA of Building - The Construction of Method with LCA for Estimating Environmental Building. Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning, South Korea.

Lee K. (2002). “A Study on the Application of Life Cycle Assessment for the remodeled Multifamily Housing - Focused on the Inventory Analysis of LCA-.” *Korean journal of Construction Engineering and Management*, 18(12), 16-23.

Lee K., and Yang J. (2009). “A Study on the Functional Unit Estimation of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emission in the Construction Materials.” *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 25(6), pp. 43-50.

Li Z. (2006). “A new life cycle impact assessment approach for buildings.” *Build. Environ.*, 41(10), pp. 1414-1422.

Kim J., Kim S., and Sohn J. (2004). “A Study on the Estimation of the Environmental Load Intensity



- of Construction Materials for the Building LCA - Focused on the amount of Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emission by I/O table -." Journal of the Architectural Institute of Korea, 20(7), pp. 211-8.
- Moon H., Hyun C., and Hong T. (2014). "Prediction Model of CO<sub>2</sub> Emission for Residential Buildings in South Korea." J. Manage. Eng. in press.
- Tae S., Shin S., Woo J., and Roh S. (2011). "The development of apartment house life cycle CO<sub>2</sub> simple assessment system using standard apartment houses of South Korea." Renew. Sust. Energ. Rev., 15(3), pp. 1454-1467.
- Wang M.Q. (1999). GREET 1.5: Transportation fuel-Cycle model, volume 2: appendixes of data and results. Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.

---

**요약 :** 본 연구는 기획단계에서 건축물의 이산화탄소 배출량 평가에 개략평가모델인 I-O LCA 모델의 활용 가능성을 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여, I-O LCA 모델과 Hybrid LCA 모델을 정의하고, 두 LCA 모델을 이용하여 아파트 3개 단지 와 3개 교육시설물에 대한 이산화탄소 배출량을 평가하고, 결과를 비교하였다. 사례분석 결과, I-O LCA 모델을 통해 산출된 이산화탄소 배출량은 Hybrid LCA 모델을 통해 산출된 이산화탄소 배출량과 상당히 유사하였다. 아파트 단지의 경우 78.2-86.3%의 유사도를 나타내었고, 학교 건축물의 경우 59.9-84.8%의 유사도를 나타내었다. 하지만, 전반적으로 I-O LCA 모델 에 의해 산출된 이산화탄소 배출량은 Hybrid LCA 모델의 결과에 비해 작았다. 그럼에도 불구하고, 사례분석 결과는 총공사 비를 유일한 입력요소로 하는 간단한 모델인, I-O LCA 모델이 상당히 높은 정확도를 가진다는 사실을 보여주었다. I-O LCA 모델은 프로젝트의 초기 기획단계에 건축물의 이산화탄소 배출량을 예측하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**키워드 :** 전과정평가, 산업연관분석법, 이산화탄소, 개략평가모델

---