

세부 공정별 CO₂ 배출 분석 및 환경비용 원가배분을 위한 Activity-based LCA 모델의 도입

- 커튼월 공사를 중심으로 -

Implementing Activity-based LCA Model for Carbon Dioxide Emission Analysis and Allocation of Environment Cost

임지연* 이준성** 신승우*** 손정욱****
Lim, Ji Youn Yi, June-Seong Shin, Seung-Woo Son, Jeong-Wook

Abstract

As worldwide efforts to reduce global warming gases, the construction Industry is endeavoring to diminish carbon dioxides emissions. Especially, by introducing the LCA methodology to the industry, A variety of related studies to measure the emission of carbon dioxides have been conducted. However, when the conventional LCA methodology is applied to the construction projects, some limitations have been reported. To overcome the restrictions derived from the industry characteristics, this research suggested the Activity-based LCA model by applying the Activity-based Costing (ABC), which breaks down the whole life cycles into more detailed stages. By implementing the newly developed model, forecasting accuracy of CO₂ emission was elevated, and the critical control points on carbon dioxides were established. Through the case study of aluminium curtain-wall system, this research verified the usefulness of the Activity-based LCA.

Keywords : *Activity-based LCA, Curtain Wall, Carbon Dioxides Emission, Environment Cost, Activity-based Costing*

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 급격하게 진행되고 있는 온난화 현상에 대한 국제사회의 우려가 커짐에 따라 온실가스 배출량 감축을 위한 노력이 전 세계적으로 이뤄지고 있다. 이러한 세계적인 기조에 정부는 2011

년 7월 온실가스 배출량 감축을 위해 2020년 배출 전망치의 30% 감축 목표를 수립하였고, 건설 산업의 경우 2020년 배출 전망치 대비 26.9%를 의무적으로 감축해야하는 목표치를 할당 받았다.

이러한 움직임에 능동적으로 대처하기 위하여 건설 분야에서는 전 생애주기를 대상으로 온실가스 배출량을 평가하는 LCA방법론이 각광을 받고 있다. LCI(Life Cycle Inventory) DB구축

* 일반회원, 이화여자대학교 대학원 건축공학과 석사과정, moonurella@hotmail.com

** 중신회원, 이화여자대학교 건축공학과 교수, 공학박사 (교신저자), jsyi@ewha.ac.kr

*** 일반회원, 이화여자대학교 대학원 건축공학과 박사과정, gigsbunny@naver.com

**** 중신회원, 이화여자대학교 건축공학과 교수, 공학박사, jwson@ewha.ac.kr

및 LCA 평가 프로그램개발 등과 같은 LCA의 환경평가방법의 도입을 위한 연구가 수행되었으며(한국건설기술연구원, 2003; 2004), 많은 연구기관 및 기업을 중심으로 건설 프로젝트에 발생하는 온실가스 배출량의 실질적인 데이터 도출을 위한 프로그램을 개발해오고 있다. 그러나 현행 LCA는 생애주기 단계에서의 투입물과 산출물을 포괄적으로 단순 산정하고 있어 방대한 종류의 자재와 복잡한 생산구조 체계를 가지고 있는 건설업에 활용되기에는 많은 한계점을 보이고 있다. 특히 온실가스 배출 지점의 정확한 구분이 불가능한 바, 실질적인 온실가스 관리도구로서 그 역할을 수행하기 어렵다. 또한 기존의 LCI DB는 전기, 콘크리트, 철강 등 원자재 성격이 강한 자재에 한정되어 구축되어 있는 상황이다.

이러한 한계를 극복하고 건설 분야에서 LCA 방법론의 활용성을 제고하기 위해서는 생애주기를 보다 세분화하여 평가하는 과정이 필요한 것으로 분석된다. 이에 본 연구에서 제안하고자 하는 Activity-based LCA 모델은 ABC 원가관리방식(Activity-based Costing)의 'Activity'를 기준으로 생애주기를 세분화하고, 이처럼 세부공정 단위로 분류된 생애주기를 중심으로 단계별 모니터링을 가능하도록 하였다. 또한 각 생산활동 Activity를 원자재 수준으로 구축된 LCI DB에 결합시킴으로써 전자재 생산과정상에서 발생하는 CO₂배출량 분석이 실질적인 생산관리 도구로서 활용될 수 있는 기반을 제공함에 그 개발 목적이 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 기존 연구 고찰을 통해 건설 분야에 적용되는 LCA 방법론의 문제점을 확인하고, 도입 및 활용의 한계점을 지적하고자 한다. 향후 건설 분야에서의 실질적 활용을 위해서는 세분화된 LCA의 방법론이 필요하다고 판단되어 ABC원가관리 기법을 차용, Activity-based LCA 모델을 제안하고자 한다. 개발된 모델의 활용성을 검증하기 위하여 최근 대형 건축물 외장마감재로 가장 광범위하게 적용되고 있는 알루미늄 재료의 유닛타입 커튼월 시스템을 대상으로 연구를 수행하였다. 유닛타입 커튼월 시스템의 경우 현장시공부분이 타 전자재에 비하여 낮아 데이터의 불확실성이 상대적으로 낮은 편이다. 이에 본 연구에서 제안하는 Activity-based LCA 모델의 검증을 위한 사례로 적합할 것으로 판단된다. 투입 자재의 기본적인 LCI(Life Cycle Inventory) DB는 한국건설기술연구원(2003)에서 개발한 것을 차용하였다.

2. 기존 연구 고찰

2.1 건설 분야 LCA 방법론 관련 연구

건설 분야는 환경 영향 평가를 위하여 보편적으로 LCA를 도입하여 활용하는 제조업과는 달리 생애주기가 현저하게 길고 투입물과 산출물의 목록이 방대하여 LCI DB 구축 및 파악에 어려움이 존재한다. 한국건설기술연구원(2003)에서는 대표적인 건축자재에 대하여 직접조사법 및 IPCC 산출 방식을 활용하여 LCI DB를 구축하였고, 구축된 DB를 중심으로 LCA 평가 프로그램인 'KLCA'를 개발하였다(2004). 그러나 국내 개발 프로그램은 실시단계 이후에 자재물량을 직접 입력하는 방식으로 계획초기 단계에서 친환경건축기술의 대안설정이 어려우며, 평가에 상당한 시간과 노력이 요구되는 등의 한계를 지니고 있다(백정훈 2011). 뿐만 아니라 구축 DB가 건설 프로젝트에 투입되는 모든 자재를 다루지 못하므로 실효성에 의문이 제기되며 평가 대상인 생애주기가 길어 이를 활용한 저감방안 수립으로써의 관리도구로 활용하기에는 한계가 있다.

또한 건설 분야의 생애주기가 긴 특성 상 생애주기의 한 단계만을 대상으로 환경영향평가를 수행하기도 한다. 그 일례로 권석현(2008)은 철거 및 해체단계의 환경성 평가 및 경제성 평가를 수행하였다. 상기 연구는 해체장비별 분석 및 폐기 단계 3R(Reduce, Reuse, Recycle)에 대하여 모두 평가하고 해체 및 철거 단계에 속하는 해체, 운송, 폐기물 처리 과정에 대한 환경성 평가에 관하여 논하였다. 또한 한승원(2011)은 시공단계를 중심으로 해당 단계에 속한 투입물인 건설자재 및 장비를 산업연관 분석법으로 분석하고 CO₂원단위 DB를 작성하였다. 구축한 DB를 활용하여 사례프로젝트의 시공단계의 공법에 따른 CO₂배출량을 산출하였다. 김지혜(2007)는 건설폐기물에 대한 LCA를 수행하여 CO₂의 배출특성을 고려한 건설폐기물 관리방안을 수립 기준을 제시하였다. Bae(2009)는 고층 주거건물의 자재인 철근(Rebar)공급의 사례를 토대로 린(Lean) 자재 조달 시스템의 환경평가를 수행하였다. 전통조달방식과 JIT(Just In Time)조달 방식을 비교함으로써 조달방식차이에서 발생하는 환경영향평가를 수행하였다. 그러나 이와 같이 생애주기의 일부분만을 평가 대상으로 삼는 기존 연구 결과는 정량적인 데이터 도출 수준에 머물 뿐 환경적 유해인자에 대하여 어떠한 관리 방안의 제시하는 역할을 수행할 수 없는 한계를 지니고 있다.

건설 분야의 전 생애주기에 걸쳐 LCA를 분석한 결과물은 주로 대안의 비교 시 효과적으로 활용되기도 한다. Weiland(2008)는 미국 I-5의 도로포장 교체를 위한 Portland Cement Concrete (PCC)와 Hot Mix Asphalt (HMA)의 대안을 비교하기 위한 LCA를 수행하였다. 또한 이신원(2011)은 하수처리수 재이용시설의 LCA를 수행하였다. 이를 위해 ISO 14040시리즈의 평가 수행 절차에 의거하여 지식경제부의 DB와 Simapro DB를 혼용한 LCI DB를 활용하였다. 상기 연구는 전생애주기 관점에서 평가하였고, 그 결과 유지관리단계가 환경영향성이 가장 높은 것으로 파악하였다. 이처럼 건설 분야에서 기존 LCA를 기반으로 수행한 연구들은 대안의 단순한 수치적 비교를 위한 도구로의 활용에 그칠 가능성이 많으며 CO₂ 배출 관리도구로서 활용할지라도 유지관리 단계가 매우 길어 여타 생애주기 단계에서 그 관리의 중요성이 배제될 가능성이 크다.

따라서 CO₂ 배출량의 정확한 배출 원인 및 세부적 공정을 파악하고, 이를 중심으로 저감계획을 수립하기 위한 의사결정의 기준으로 활용하기 위해서는 LCA 평가 주기의 세분화가 필요하다고 판단된다.

2.2 ABC 원가관리방식

전통적 원가관리시스템은 원가를 생산량이나 작업시간에 의거하여 이를 할당해왔는데 이는 총생산에서 직접노무비가 큰 비중을 차지할 경우 적합한 방식이다. 그러나 기계화 및 자동화, 생산 공정 혁신, 다품종 소량생산 등으로 대변되는 오늘날의 생산방식에서는 직접노무비의 비중이 축소되고 설비관련 고정비를 포함한 간접비가 크게 증가한다. 따라서 전통적 원가관리방식에 의존할 경우 가격의 왜곡, 나아가 잘못된 경영전략의 수립을 초래할 수 있다는 지적이 제기되었다(백동현 2005 재인용). 이를 위해 제안된 원가관리방식이 ABC 원가관리방식이다.

ABC 원가관리방식이란 정확한 원가의 계산을 위해 기업의 기능을 각 특성별 'Activity'로 구분한 후 이를 기본적인 원가관리 대상으로 삼아 Activity별로 원가를 집계하고 이를 토대로 배분 기준이 되는 자원동인 (Resource Driver)과 활동동인 (Activity Driver)을 적용하여 제품에 원가를 할당하는 원가관리방법이다.

여기서 'Activity'는 자원을 사용하여 가치를 창출하는 작업으로써 원가를 발생시키는 기본적인 분석단위이며 기업의 제품 생산과정에서 자원을 소비하는 구체적인 사건이나 거래라고 정의한다. Activity(활동)는 크게 1) 단위수준활동 (unit-level activity), 2) 묶음수준활동 (batch-level activity), 3) 제품수준활동 (product-level activity), 4) 시설수준활동 (facility-level

activity)으로 구분된다. 단위수준활동은 제품 한 단위가 생산될 때마다 수행되는 활동으로 제품생산량에 비례하여 이루어지는 활동이다. 묶음수준활동은 수량의 묶음단위로 이루어지는 활동으로 구매조달활동, 표본품질검사활동, 작업준비활동 등이 이에 해당한다. 제품수준활동은 제품라인을 유지하기 위해 수행하는 활동으로 기업의 R&D활동, 설계변경활동 등이 이에 해당한다. 시설수준활동은 제품을 생산하기에 들어가는 유지관리활동, 환경미화활동, 안전관리활동 등이 이에 해당한다(송상엽 2010).

ABC에서 'Activity'를 제품의 원가로 배분시키기 위해서는 그림1과 같이 '자원-자원동인-활동-활동동인-대상'의 다섯 단계를 거치게 된다. 이러한 단계를 거침으로써 Activity에서 발생하는 비용을 정확하게 파악하고 이를 원가에 분배하여 합리적인 원가 추정이 가능해진다.

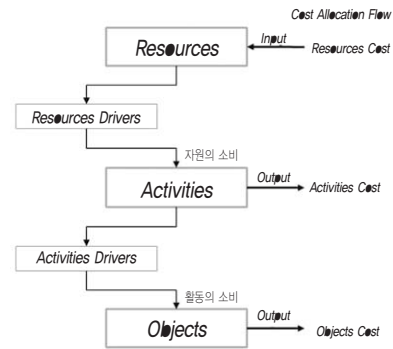


그림 1. ABC의 원가배분 구조

2.3 ABC 원가관리방식을 활용한 환경비용 원가 배분 및 환경 경영 관련 연구

ABC 원가관리방식은 환경적 요인들을 세분화하여 원가에 환경비용을 부과하는 방식으로 환경 경영의 도구로서 활용되기도 한다(Emblemsvåg, 2001).

환경비용분석에서 ABC 원가관리방식을 활용하는 이유는 크게 두 가지로 축약 할 수 있다. 이는 ABC가 Activity와 그 Activity에 소비된 자원, 자원 소비의 인과관계를 나타내는 자원동인, Activity의 소비로 인한 제품 및 Activity소비의 인과관계인 활동 동인 등을 식별하기 때문이다. 또한 ABC가 제품을 제조하는데 발생하는 수많은 Activity 중 환경관련 Activity의 분석을 위해 따로 분류하여 분석을 수행하지 않더라도 원가분석을 수행할 수 있기 때문이다(육근효 2009).

이러한 이유로 ABC 원가관리방식은 제품의 환경비용원가를 추정하는데 널리 활용되었으며 관련 연구 또한 활발하게 수행되었다. 박경희(1998)는 ABC 원가관리방식에 근거하여 환경비용

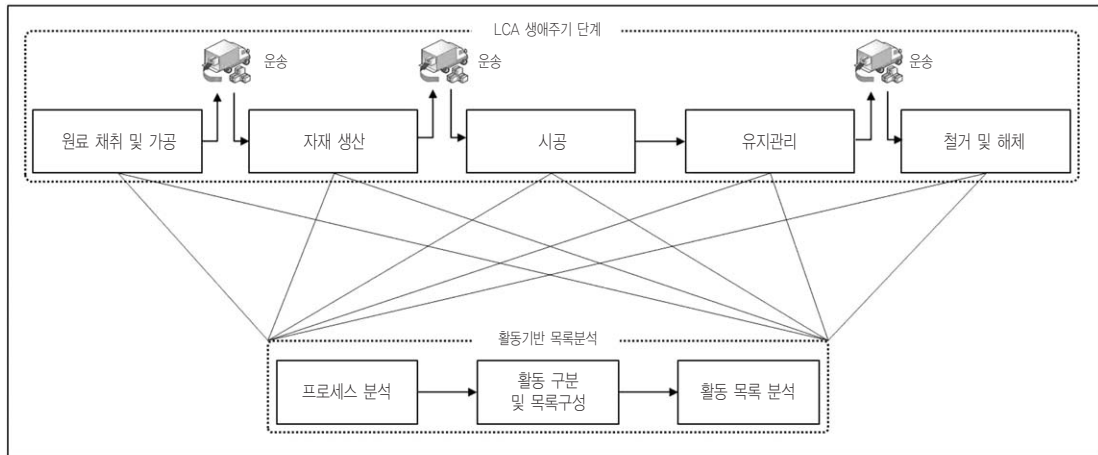


그림 2. Activity-based LCA모델 다이어그램

원가를 추정하고 관리하는 기법 도입을 위하여 개념적인 고찰을 수행하였다. 이봉연(2001)은 기업의 사례를 토대로 ABC 원가관리방식을 중심으로 환경원가배분을 위한 Activity배분을 다룬 모델을 설계하였다. 백동현(2005)은 ABC 개념에 기초하여 경영 자원 투입 분석 시스템을 개발하여 특정 Activity를 위해 투입된 조직과 자원 등을 파악하는데 용이하도록 하였다.

또한 ABC 원가관리방식은 환경비용원가를 추정하는데 그치는 것이 아니라 이를 환경 경영의 도구로써도 활용하기도 하였는데, Chen(1996)은 경영시스템을 계층화시켜 이를 환경 Activity와 연관시켜 활동기반 경영관리 체계를 구축하였으며, Emblemssvåg(2001)은 ABC를 활용한 자원과 에너지 비용을 중심으로 하는 환경경영 모델을 구축하고 시뮬레이션을 통해 환경 비용이 과도한 Activity를 식별하도록 하였다.

따라서 본 연구에서는 복잡한 건설 산업 구조를 대변할 수 있도록 생애주기보다 세분화된 단계의 필요성을 인지하였다. 이를 위해 본 연구에서는 생애주기를 세분화하는 방안으로 ABC 원가관리방식의 Activity를 환경비용원가를 추정하기 위한 방안으로 활용하였으며, Activity를 분류하는 방식을 LCA의 생애주기를 세분화하는 과정에 차용하여 Activity-based LCA모델을 구축하고자 한다.

3. Activity-based LCA 모델

3.1 Activity-based LCA 모델의 개념

건설 분야의 생산품은 1)원료채취 및 가공, 2)자재 생산, 3)시공, 4)유지관리, 5)철거 및 해체의 생애주기 단계를 갖는다. 추가적으로 각 생애주기 단계를 거침에 따라 운송 단계가 발생하기

도 한다. Activity-based LCA모델은 건설 분야의 생애주기 단계를 중심으로 'Activity' 개념을 적용하여 분석한다. 생애주기 단계 별 프로세스 분석을 통해 프로세스를 중심으로 유형별로 'Activity'를 분류하고, 분류된 'Activity'의 CO₂ 배출량을 분석하여 Activity별 배출량과 요인이 식별 가능하도록 한다. 즉, Activity단위로 LCA분석을 수행하고, 이를 토대로 CO₂의 배출량을 측정하여 배출 지점의 분석을 통한 원인 파악 및 환경비용 원가배분에 이를 활용하는 것이다[그림 2].

3.2 Activity 특성

Activity-based LCA모델이 기존 LCA모델과 구별되는 특징 중 하나는 목록분석 수행 시 목록을 Activity단위로 작성하는 것이다. 건설 산업은 기본적으로 프로세스를 근간으로 하는 산업이며 프로세스의 경계가 뚜렷하기 때문에 프로세스를 'Activity'로 지정할 수 있는 기준이 명확하게 구분될 수 있다. 따라서 프로세스를 중심으로 하는 Activity-based LCA모델의 적용이 용이할

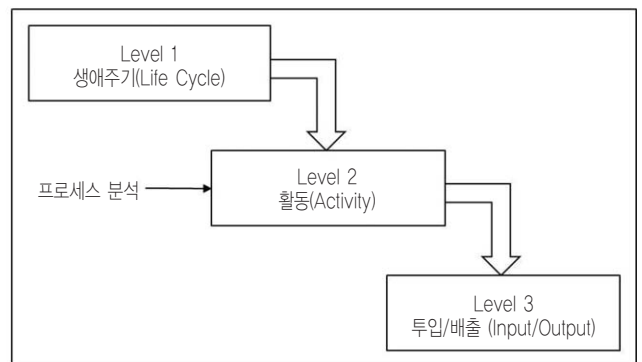


그림 3. Activity-based LCA 목록 level

것으로 판단된다. 이러한 관점에서 LCA의 목록분석을 위해서는 'level1) 생애주기기반, level2) Activity기반, level3) 투입 및 배출기반'으로 계층화하여 분류할 수 있다[그림3].

LCA방법론에서 목록분석 시 수행하는 단계의 분류 및 활용 데이터는 생애주기(level1)와 그에 상응하는 투입 및 배출(level3)되는 자원, 에너지 등의 상세목록이라 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서는 CO₂ 배출 분석을 위하여 생애주기단계의 상세 프로세스를 분석하여 Activity(level2)로 지정하고, 이를 기준으로 투입 및 배출 목록을 구성하고자 한다. 앞서 ABC의 'Activity'에 대한 정의와 마찬가지로 Activity-based LCA모델의 'Activity'은 상세 프로세스 분석을 통해 유사작업을 수행하는 프로세스를 동일한 Activity로 분류하여 병합할 수 있다. 이 때 Activity 분류의 기준이 되는 환경영향관점에서의 가치는 자원이나 에너지와 같은 투입물이나 LCA분석 시 배출 물질 등 환경영향분석에 활용될 수 있는 데이터들인 환경적 가치를 의미한다(Jam Emblemsvåg 2001).

따라서 본 연구에서는 건설 분야의 Activity-based LCA의 관리체계를 구축하는 목적에 부합하기 위해 유사한 프로세스의 환경적 영향배출 요인이 다르지 않다고 판단되는 프로세스들을 병합하여 동일한 Activity로 분류하였다. 본 연구에서 제안하는 Activity의 분류 기준 외에도 활용 목적에 따라 관리지점의 선정, 관리지침의 수립 등을 수행하기에 용이하다고 판단되는 기준을 적용하여 Activity를 분류할 수 있다.

3.3 Activity 분류 기준

앞서 분석한 Activity의 특성을 중심으로 건설 분야에서 환경적 영향 요인에 의해 설정된 Activity는 1)자원 투입, 2)에너지 사용, 3)환경적 영향을 미치는 정도 및 유형 등을 종합적으로 고려하여 도출할 수 있다. 본 연구에서는 환경에 영향을 미치는 물질의 배출 방식에 따라 도출된 Activity을 1)Direct Activity(DA), 2)Indirect Activity(IA), 3)Changeable Activity(CA), 4)Non-Impact Activity(NA)로 분류하여 명명하기로 한다. 'Direct Activity'는 건설 분야에서 자원의 투입이나 에너지의 사용으로 인해 직접적으로 환경적 영향을 미치는 Activity를 말한다. 'Indirect Activity'는 설계, 주문, 접수, 품질 검사 등과 같이 Activity를 통해 간접적으로 환경에 영향을 미치는 물질을 배출하는 것으로 일컫는다. 즉, 자원이나 에너지의 직접적인 투입은 발생하지 않으나 그 Activity가 공장의 유지관리 측면에서 사용하는 에너지와 자원이 있을 경우에는 Indirect Activity로 선정할 수 있다. 'Changeable Activity'는 운송과 같이 프로젝트에 따라 기능단위의 투입/배출 물질의 양이 달라지는 Activity를 일

컾는다. 이에 Changeable Activity는 동일 공장에서 생산되는 제품일지라도 자재의 운송과정을 추적하여 프로젝트마다 각각의 투입/배출물 따로 산출해야 한다. 'Non-Impact Activity'는 Activity를 통해서 환경에 영향을 미치는 요인을 전혀 배출하지 않는 Activity로, 여기에는 휴식시간, 대기시간 등이 해당된다.

3.4 커튼월 시스템의 Activity 지정

커튼월 시스템의 Activity 지정을 위하여 커튼월 시스템의 전 생애주기에 걸쳐 보다 상세하게 세부 공정을 분석하였다. 분석된 세부 공정을 중심으로 Activity Driver인 환경영향 여부에 따라 Activity를 분류하였다. 분류된 Activity는 총 4가지의 Activity 유형으로 지정하여 구분하고, 이를 코드화 시켜 활용도를 높이고자 하였다[표 1].

표 1. 커튼월 시스템 Activity

level 1	level 2	Activity 유형	Activity코드
Life Cycle	Activity		
원료의 채취 및 가공	알루미늄 압출 바 가공	DA	A11
	알루미늄 판 가공	DA	A12
	판유리 가공	DA	A13
	용융아연도금강판 가공	DA	A14
자재생산 및 조립	알루미늄 압출 바 절단	DA	B11
	알루미늄 압출 바 가공	DA	B12
	알루미늄 판 편칭	DA	B21
	알루미늄 판 절곡	DA	B22
	알루미늄 패널 도장	DA	B23
	알루미늄 패널 단열	IA	B24
	유리 재단	DA	B31
	유리 강화	DA	B32
	유리 복층화	DA	B33
	커튼월 조립	DA	B41
	Glazing	IA	B42
	품질검사	IA	B43
	출하	DA	B44
	운송 시공	운송	CA
반입		DA	D11
검수		IA	D12
양중		DA	D13
하자 보수	설치	DA	D14
	하자 접수	IA	E11
	가설 설치	DA	E12
해체 및 철거	하자 보수	DA	E13
	해체	DA	F11
	운송	CA	F12
	폐기물 처리	DA	F13

4. 사례 개요 및 분석 수행 조건

4.1 Activity-based LCA 목표 및 범위

본 연구에서는 Activity-based LCA를 수행함으로써 커튼월

시스템의 Activity에 따른 환경적 영향을 미치는 배출량을 측정하고, 향후 관리지점이 지정될 수 있도록 하는 Activity를 파악하고자 한다. 특히 공장생산이 대부분인 유닛타입 커튼월 시스템에 대하여 사례 적용함으로써 현장시공 시 발생하는 불확실성을 줄여 보다 효과적으로 Activity-based LCA의 활용을 제안하고자 한다.

4.2 적용 사례 개요

본 연구에서 제안된 Activity-based LCA분석을 수행한 사례 대상 현장은 서울시 용산구 동자동에 위치한 D업체의 주상복합 아파트 현장이다. 커튼월 시스템 자재 생산물량 및 이에 수반되는 투입/배출물 정보는 생산납품을 담당한 S전문건설업체의 생산공장에서 수집되었다. 개발모델 검증을 위한 사례연구 대상의 현장 개요는 아래 [표 2]와 같다.

표 2. 사례현장 개요

구분	개요
공사명	D주상복합 아파트 도시환경정비사업
공사기간	2009.09 ~ 2013. 01
현장위치	서울시 용산구 동자동
공장위치	경기도 고양시 일산동구 지명동
공사규모	대지면적: 10,991㎡ 건축면적: 5,481㎡ 연면적: 109,707㎡ 총 수: 지하 9층, 지상 27, 30, 35층 (총 4개동)
외장재료	알루미늄 커튼월+복층유리

4.3 분석 수행 조건

LCA분석은 수행 조건이 얼마나 명확한지에 따라 연구의 재현성과 결과의 신뢰성이 높아진다. 따라서 본 논문은 건설 프로젝트마다 그 특성이 달라질 수 있는 커튼월 시스템의 사이즈, 운송거리, 재활용율 등의 항목을 명확히 하여 재현성과 신뢰성을 높이고자 하였다.

또한 본 연구의 자재생산 및 조립 단계는 2011년 5월부터 10월까지의 생산량, 운송 및 시공단계는 2011년 6월부터 11월 사이의 시공 장비 가동 시간 및 가동률을 중심으로 직접조사를 수행함으로써 결과의 정확성을 제고하고자 하였다.

4.3.1 커튼월 시스템

커튼월 시스템은 현장에 따라 맞춤 제작하는 경우가 많아 기준이 되는 커튼월 시스템의 사이즈를 일반화할 수 없으므로 본

논문의 사례 현장에 적용된 커튼월 시스템 중 가장 보편적인 형태와 사이즈를 가진 시스템을 선택하여 적용하였다. 이에 본 현장에 시공한 커튼월 시스템 중 단순 유닛 타입인 1200mm×3200mm, 두께 160mm, 24mm 복층 강화유리를 적용한 커튼월 시스템을 본 논문의 연구 대상으로 하였다. 대상 커튼월의 중량은 유리 제외 약 100kg이며, 유리 포함 시에는 약 150kg이다.

4.2.2 운송

생산업체와 현장과의 거리는 약 25km, 운송 경로는 지방도로만 이용하는 것으로 하며, 운송수단은 경유를 사용하는 5톤 트럭이다. 트럭 한 대 당 4팔레트(pallet)를 실을 수 있으며, 1팔레트 당 4-5세트의 유닛 커튼월을 운반할 수 있다. 즉, 1회 운송량은 5톤 트럭 기준 유닛커튼월 16-20세트이다.

4.3.3 하자보수 및 폐기처분

유닛타입 커튼월 시스템은 현장시공부분이 적어 하자사례가 적은 편이다. 또한 사례 대상 현장이 시공단계에 있기 때문에 하자보수 및 폐기처분 단계의 실제 데이터를 적용할 수 없다. 이에 하자보수는 시공업체 및 생산업체로 구성된 전문가단의 자문 결과를 토대로 하자보수담보기간동안 1회의 하자보수를 전체 커튼월 시스템 설치물량 중 5%에 한해 실시하는 것으로 가정하였다.

또한 본 연구의 해체 및 철거 단계에서는 한국폐기물협회(2009)에서 발표한 폐기물 분류에 따른 매립, 소각, 재활용 비율에 근거하여 커튼월 시스템의 자재구성 중 폐알루미늄에 대해서는 95%를, 폐유리에 대해서는 60%는 스크랩 처리하여 재활용하는 것으로 하며, 그 외 나머지 폐자재에 대해서는 매립하는 것으로 하였다.

하자보수 및 해체 및 철거 단계는 완공 이후의 시점에서 발생하는 Activity이므로 직접조사법을 수행하지 못하는 점을 감안하여 앞서 제시한 수행조건에 따라 식(1)을 적용하여 추정치를 산정하였다.

$$E_k = P_k \times W_k \times O_k \text{ (kwhr)} \quad \dots (식1)$$

여기서, E_k : k장비 활용한 Activity의 에너지 사용량 (kWhr)

P_k : k장비 에너지 출력 (kw/hr)

W_k : k장비 총 가동시간 (hr)

O_k : k장비 Activity 내 가동률

이를 정리하면 다음 [표 3]과 같다.

표 3. LCA분석 수행조건

대상	구분	분석수행조건
커튼월 시스템	타입	단순 유닛 타입
	사이즈	1200mm×3200mm, 두께 160mm
	유리	24mm 복층강화유리
	중량	기본프레임: 100kg, Glazing 사: 150kg
운송	운송거리	약 25km
	도로	지방도로만 이용
	수단	5톤 트럭
	적재량	트럭1대당 4팔레트
하자보수 및 폐기처분	하자보수	하자보수담당기간동안 1회, 전체 설치물량 중 5%에 한해 실시
	재활용율	페알루미늄: 95%, 폐유리: 60%

다. 또한 '원료채취 및 가공' 단계는 기 구축된 LCI DB 활용 시 '자재 생산 및 조립' 단계의 원료 투입 부분에서 반영이 되므로 본 연구에서는 분석 대상에 포함시키지 않았다. '해체 및 철거' 단계와 '유지 관리(하자 보수)' 단계에서는 현재 대상 사례 프로젝트가 시공 중에 있으므로 실증적 데이터를 확보할 수 없어 추정치로 대체하여 분석을 수행하였다. 추정치로도 파악하기 어려운 데이터가 포함된 Activity는 본 연구의 사례에서 해당 Activity의 영향도 및 중요도를 파악하여 시스템 경계 설정 시 포함여부를 결정하였다. 커튼월 시스템의 단위 유닛을 기능단위로 하여 각 단계의 투입 원료 및 에너지를 기능흐름으로 설정한 본 연구의 시스템 경계는 [그림 4]의 음영처리 부분과 같다.

5. 커튼월 시스템의 Activity-based LCA 분석

5.1 시스템 경계 설정

3.4절에서 분석한 생애주기 상세프로세스의 Activity(표1)들을 토대로 'Direct Activity'와 'Changeable Activity'에 해당하는 Activity를 중심으로 Activity-based LCA분석의 시스템 경계를 설정하였다.

사람의 인력이나 시설관리, 주문 등과 같은 'Indirect Activity'의 경우, 노동력의 차이, 시설의 노후화 등에 따라 결과 수치가 달라 질 수 있어 본 연구의 분석 대상에서는 제외시켰

5.2 Activity별 목록 분석

5.2.1 투입 목록 분석

Activity별 목록 분석을 위하여 사례 대상 커튼월 시스템의 총 생산 물량과 총 에너지 사용량을 조사하였다. 또한 각 세부공정으로 대변되는 Activity에 해당하는 장비의 가동률을 고려하여 각각의 에너지사용량을 파악하였다.

커튼월 시스템은 일반적으로 중량(kg)단위를 기준으로 삼아 물량을 산출한다. 그러나 본 연구는 Activity-based의 목적에 부합하도록 하나의 자재가 가지는 모든 Activity를 포함할 수 있

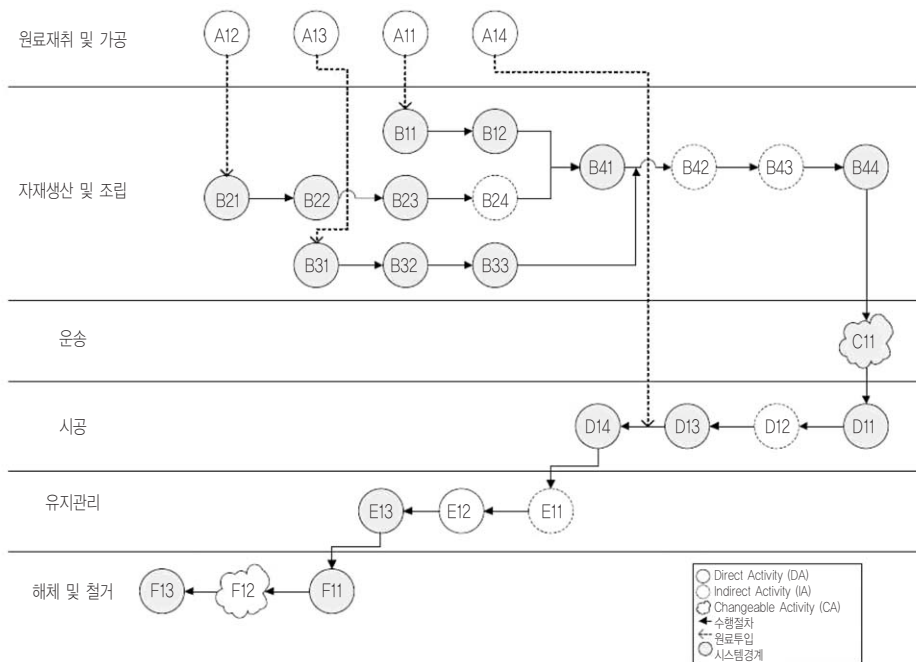


그림 4. 커튼월 시스템의 Activity 시스템 경계

도록 유닛단위 커튼월 시스템의 구성 자재를 하나의 단위로 설정하였다. 이를 위해 중량에 의해 산출된 커튼월 시스템을 단위 유닛의 중량인 150kg으로 나누어 총 생산 갯수(unit)를 파악하였다[표 4].

표 4. 유닛 커튼월 시스템 자재별 총 생산 물량

구분		생산 물량	
총 생산량(kg)	커튼월 시스템 자재	알루미늄 압출 바	209,738
		알루미늄 강판	37,013
		24mm 복층 강화유리	123,350
	앵커 및 볼트 자재	아연도금강판(10T)	3,465
총 생산 유닛 개수(unit)		2,467	

앞서 파악한 생산물량에 근거하여 Activity별 단위 유닛 당 자원 및 에너지의 투입목록을 살펴보면 다음 [표 5]와 같다.

표 5. Activity별 단위 유닛 당 투입 목록

생애주기	Activity	투입물량		단위
		자원명	투입량	
자재생산 및 조립	B11	알루미늄 압출 바	42.51	kg/unit
		전기	20.17	kwhr/unit
	B12	알루미늄 압출 바	42.51	kg/unit
		전기	22.18	kwhr/unit
	B21	알루미늄 강판	7.50	kg/unit
		전기	1.64	kwhr/unit
	B22	알루미늄 강판	7.50	kg/unit
		전기	1.64	kwhr/unit
	B23	전기	0.66	kwhr/unit
	B31	판유리	16.67	kg/unit
		전기	3.61	kwhr/unit
	B32	판유리	16.67	kg/unit
		전기	3.61	kwhr/unit
	B33	판유리	16.67	kg/unit
	B41	전기	3.61	kwhr/unit
		경유	1.34	L/unit
B44	경유	0.24	L/unit	
운송	C11	5톤트럭	0.06	대/unit
시공	D11	경유	0.24	L/unit
	D13	전기	25.96	kwhr/unit
		아연도금강판	1.40	kg/unit
	D14	전기	5.96	kwhr/unit
하자보수	E11	전기	0.21	kwhr/unit
해체 및 철거	F11	경유	2.36	L/unit
	F13	경유	0.28	L/unit

5.2.2 배출 목록 분석

Activity별로 분류된 투입 목록을 바탕으로 배출 목록을 분석하였다. 배출 목록 분석을 위해 투입 자원 및 에너지의 LCI DB는 ISO14040시리즈에서 LCI DB사용 시 그 DB는 국가(National) 혹은 지역(Regional)을 기반의 DB사용을 권고하고 있는 바, 그에 따라 전 Activity의 자원 및 에너지관련 LCI DB는 국내 개발 DB를 활용하였다.

표 6. Activity별 단위 유닛 당 CO₂ 배출량

(단위 : kg/unit)

생애주기	Activity	CO ₂ 배출량
자재생산 및 조립	B11	6.24E+02
	B12	6.25E+02
	B21	1.42E+01
	B22	1.42E+01
	B23	3.20E-01
	B31	1.43E+01
	B32	1.43E+01
	B33	1.43E+01
	B41	6.55E-01
	B44	1.66E-02
운송	C11	1.33E-01
시공	D11	1.66E-02
	D13	1.26E+01
	D14	5.57E+00
하자보수	E11	5.18E-03
해체 및 철거	F11	1.61E-01
	F13	7.24E-04

산출된 Activity별 배출 목록은 국내 LCI DB 중 자재 분야에서 알루미늄 압출 바, 알루미늄 판, 판유리, 용융아연도금 판 등을 참고하였고, 에너지 분야에서 경유, 전기 등을 참고하였다. Activity 중 유사한 작업 환경과 동일한 투입 자원 및 에너지가 사용된 경우 목록 분석을 1회만 실시하였다. 본 연구에서는 LCI DB에서 배출 목록 중 대기배출물인 CO₂ 배출량을 중심으로 활용하였으며, 이에 따른 Activity별 배출 목록 분석은 [표 6]과 같다.

5.3 커튼월 시스템 CO₂ 배출 결과 분석

5.3.1 Activity-based LCA 결과 분석

본 연구에서 제안한 Activity-based LCA 모델을 활용하여 커튼월 시스템의 CO₂ 배출 분석한 결과, 자재생산 및 조립 단계 중 알루미늄 압출 바 절단 Activity(B11)와 알루미늄 압출 바 가공 Activity(B12)의 평가 값이 다른 Activity들에 비해 압도적으로 많은 것으로 나타났다. 대체적으로 자재 및 생산 단계 Activity들의 CO₂ 배출량이 우위적인 양상을 보였으나 시공 단계의 양중 Activity(D13)에서는 일부 자재 및 생산 단계의 다른 Activity보다 CO₂ 배출량이 많은 것으로 드러났다. 이는 자재 생산 및 조립 단계에서 원자재의 투입이 집중되어있기 때문이다. 본 연구에서 분석한 커튼월 시스템의 Activity-based LCA의 결과에서 볼 수 있듯이, 알루미늄 커튼월을 구성하는 주 원자재인 알루미늄 압출 바, 알루미늄 강판, 24mm 복층 강화유리가 투입되는 Activity에서 두드러지게 높은 CO₂배출량을 보이고 있음을 알 수 있다. 이를 도식화하면 [그림 5]와 같다.

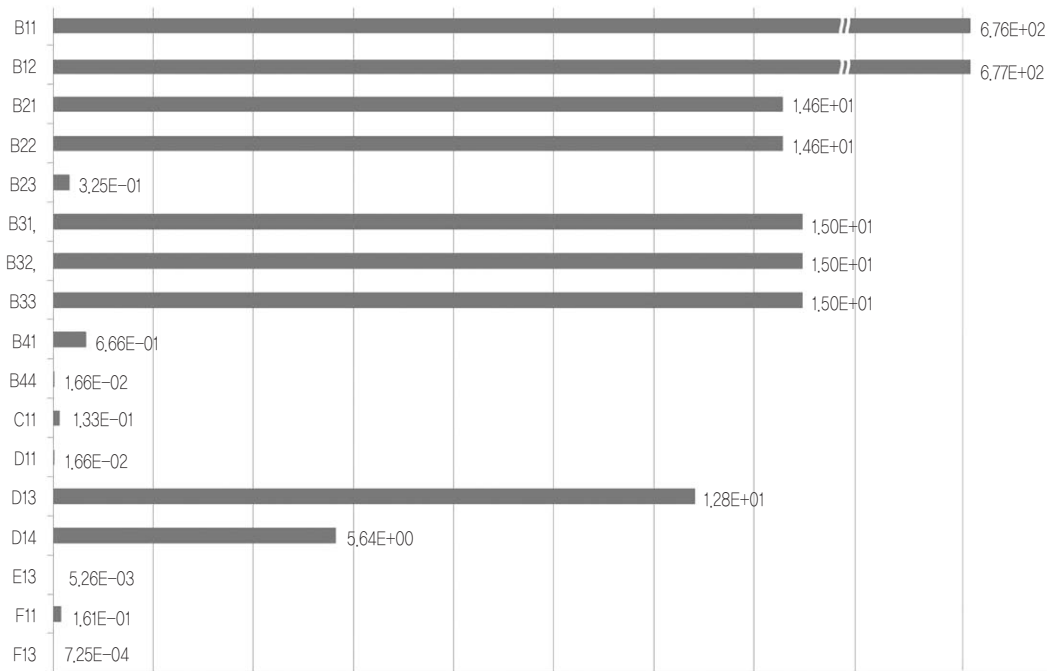


그림 5. 커튼월 시스템 온난화 환경영향범주 Activity별 결과

5.3.2 기존 LCA와의 차별성

기존 LCA의 결과는 아래 [표 7]과 같이 자재생산 및 조립 단계가 CO₂ 배출량이 월등하게 높았으며, 그 다음으로는 시공 단계가 높았으며, 해체 및 철거 단계, 운송 단계, 하자보수 단계가 그 뒤를 이었다.

표 7. 기존 LCA 생애주기 단계별 CO₂ 배출량

(단위 : kg/unit)

생애주기	CO ₂ 배출량
자재생산 및 조립	1.32E+03
운송	1.33E-01
시공	1.82E+01
하자보수	5.18E-03
해체 및 철거	1.62E-01

그러나 본 연구에서 제시된 Activity-based LCA 모델의 세분화된 결과와 비교하여 볼 때, 몇몇 시공 단계 Activity(D13, D14)는 자재생산 및 조립에 해당하는 일부 Activity (B23, B41, B44)보다 더 많은 양의 CO₂ 를 배출하는 것으로 분석되었다. 이는 기존의 LCA 결과에서는 제공되지 않는 정보이며, 이를 활용하여 CO₂ 배출 원인을 보다 세분화하여 파악할 수 있을 뿐만 아니라 향후 CO₂ 저감방안 수립에도 명확한 근거 제시를 가능하도록 한다. 또한 기존의 LCA 분석 결과에 의하여 환경비용을 추

산할 경우 가장 많은 CO₂ 배출량을 보인 자재생산 및 조립 단계에서 환경비용의 부담이 집중될 수 있다. 그러나 Activity-based LCA를 활용하면 실제 CO₂ 발생량이 집중되는 Activity에 환경비용을 합리적으로 배분할 수 있으므로 보다 효과적인 생산관리를 가능하게 한다.

6. 결론

건설 분야의 LCA도입은 CO₂ 배출량을 감축하려는 전 세계적인 움직임과도 일맥상통한다. 이러한 LCA도입에 대한 요구에 따라 건설 자재 LCI DB의 구축, 평가 프로그램의 개발 등 관련 연구가 수행되었으며, 상당부분 개발이 완료되었다. 그럼에도 불구하고 다수의 투입 자재와 장비, 오랜 기간에 걸친 생애주기는 건설 분야에서의 LCA적용 활성화에 장애요인이 되어 왔다. 이에 건설 분야에서 LCA의 도입 활성화와 관리 도구로서의 활용을 위해서는 LCA 분석 방식의 변화가 요구되는 바였다. 이와 같은 문제의식에서 시작한 본 연구는 ABC원가관리방식의 'Activity'를 건설 분야의 생애주기를 세분화하는 방안의 개념으로 도입하여 'Activity-based LCA'를 제안하였다. 또한 이를 활용하여 커튼월 시스템의 사례를 중심으로 CO₂ 배출량을 분석하여 관리도구로서의 활용과 기존에 구축된 LCI DB를 본 연구에서 차용함으로써 활용 가능성을 제고하는 방안을 제안하

였다.

또한 기존의 LCA 분석 결과와의 해석의 차별성을 보임으로써 Activity-based LCA의 세분화된 분석 체계가 관리도구로서의 역할과 환경비용의 합리적인 원가배분을 수행함을 입증하였다.

본 연구에서는 기 구축된 LCI DB가 Direct Activity만을 포함하는 생애주기의 데이터를 포함하고 있어 사례 검증에 있어서 'Direct Activity'와 일부 'Changeable Activity'에 해당하는 Activity만을 대상으로 Activity-based LCA분석을 수행하였다. 또한 '자재생산 및 조립' 단계를 제외한 생애주기 단계의 목록분석은 에너지소비량에 근거한 추정치를 활용한 점에서 연구의 한계를 가지고 있다. 향후 연구에서는 분석의 범위를 전 Activity로 확장하고, 전생애주기에 걸친 실증적 데이터를 고려한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0004798)

참고문헌

한국 환경 산업 기술원- 국가 LCI 데이터베이스 정보망 <http://www.edp.or.kr/lcidb/>

권석현 · 김경주 · 김병수 · 김상범(2008). LCI DB를 활용한 해체공사 환경경제성 평가. 한국건설관리학회 2008 정기학술 발표대회 논문집.

김지혜 · 차희성 · 신동우 (2007). CO₂ 배출 특성을 고려한 건설 폐기물 관리방안 수립기준: 고층 주거건물 건설 프로젝트를 대상으로 한 사례조사. 한국건설관리학회, 8(6)

박경희 (1998). 활동기준원가회계에 의한 환경원가의 관리. 이화경영논문, 16.

백동현 · 설원식 (2005). 활동기준원가개념에 기반한 경영자원투입분석 시스템 개발-정부투자기관의 구축사례를 중심으로-. 산업경영시스템학회지 28(2).

백정훈 · 태성호 · 노승준 · 이주호 · 신정우 (2011). 건축물 계획

단계 LCCO₂ 평가시스템의 필요요소에 관한 연구. 한국건설관리학회 논문집, 12(3).

송상엽 (2010). IFRS 원가관리회계. 응지.

육근효 (2009). 환경관리회계-이론과 실천사례-. 집문당

이봉연 (2001). 환경원가배분에 관한 연구-활동기준 원가시스템을 중심으로-. 상명대학교 박사학위논문.

이신원 · 김성근 (2011). 친환경 설계를 위한 하수처리수 재이용 시설의 전과정 평가. 대한토목학회논문집, 31(2D).

한국건설기술연구원 (2003). 건설부문 LCA 활용방안에 관한 연구. 한국건설교통기술평가원 연구보고서.

한국건설기술연구원 (2004). 건설물의 LCA를 위한 원단위 작성 및 프로그램 개발 연구. 한국건설교통기술평가원 연구보고서.

한국폐기물협회 (2010). 2009 전국폐기물발생 및 처리현황, 환경부 연구보고서

한승원 (2011). 시공단계 공법에 따른 투입자원과 이산화탄소 배출량에 관한 연구. 서울시립대학교 석사학위논문.

Bae, Jin-Woo · Kim, Yong-Woo (2009). Assessing the Environmental Impacts of Lean Supply System: A Case Study of Rebar Supply in High-Rise Condominium Construction Projects. Construction, ASCE Conference Proceeding Paper pp.1009~1018.

Craig Weiland (2008). Life-Cycle Assessment of I-5 Pavement Replacement. University of Washington Research Report.

F. Frank Chen (1996). Activity-based approach to justification of advanced factory management systems. Industrial Management & systems, 17(24).

Jan Emblemståg · Bert Bras (2000). Activity-Based Cost and Environmental Management: A Different Approach to the ISO 14000 Compliance. Kluwer Academic Publishers.

논문제출일: 2012.02.20
 논문심사일: 2012.02.24
 심사완료일: 2012.04.24

요 약

지구 온난화의 주범인 온실가스 배출량을 규제하고자 하는 전 세계적인 기조에 따라 건설 분야에서도 이와 관련하여 다양한 노력이 시도되고 있다. 그 일례로 LCA (Life cycle Assessment) 방법론 도입을 통해 CO₂ 배출량을 정량적으로 측정하려는 연구가 활발하게 수행되고 있다. 그러나 일반 제조업에서 수행되고 있는 기존의 LCA 방법론은 다양한 자재의 투입과 복잡한 생산구조를 가지고 있는 건설업에 활용되기에는 많은 한계가 있다. 이에 본 연구는 보다 정확하고 세분화된 환경영향 평가를 도출할 수 있도록, 기존 LCA 방법론에 ABC원가관리방식을 도입한 Activity-based LCA 모델을 제안하였다. 이를 기반으로 대표적 온실가스인 CO₂의 주요 배출 Activity와 각각 배출량에 대한 정확한 예측이 가능 하도록 하는 모델을 제시하였으며, 실제 시공 중인 건물의 커튼월 시스템 공정을 대상으로 하여 그 유용성을 검증하였다.

키워드 : Activity-based LCA, 커튼월 시스템, CO₂ 배출, 환경비용, ABC원가관리
