

전과정평가에 기반한 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량 분석*

An Analysis of Carbon Dioxide Emission from Apartment Housings in Seoul by Life Cycle Assessment(LCA)

배은석** · 오규식***
Bae, Eun-Seok · Oh, Kyu-shik

Abstract

Apartment housings are the most representative type of residence in Korea and thought to be significant sources of energy consumption and CO₂ emissions. But quantitative assessments of CO₂ emissions during the life cycle of apartment housings are still quite rare. Therefore, this study presents a life cycle assessment of apartment housings in Seoul, Korea. In this study, apartment housings were classified into ten types by their building types, heating systems, and heating fuels. Analysis was conducted to analyze the amount of CO₂ emissions of each type during the construction phase, operation phase, and dissolution/disposal phase. The results indicate that the average amount of CO₂ emissions of apartment housings is 2208.40kg-CO₂/m² for a 40-year service life, and that most targeted measures to reduce such emissions should be in the operation phase. The results also show that BBA, CAA, and BAA types are consuming more energy and emitting more CO₂ than other types. Apartment housings in Jongro-gu, Dongjak-gu, Gangdong-gu and Guro-gu are more intensive in terms of energy consumption and CO₂ emissions than other districts. The results of the study can be useful to the urban planning and architectural fields in efforts to reduce the amount of CO₂ emissions.

키 워 드 · 전과정평가(LCA), 아파트, 기후변화, 이산화탄소 배출

Keywords · Life cycle assessment(LCA), Apartment housing, Climate change, CO₂ emission

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

세계 각지의 관측 결과에 따르면 지구 온난화가 뚜렷하게 진행되고 있는 것으로 보고되고 있으며, 실제로 지난 60년 가까이 전 세계의 기온이 꾸준히 상승해 왔다(Archer and Rahmstorf, 2009). 지구

온난화의 주원인인 온실가스의 감축을 위해서는 도시 내 다양한 부문별 온실가스 배출량을 파악하고, 이들을 종합하여 도시 전체의 배출량을 예측하는 것이 필요하다.

온실가스는 다양한 에너지 소비 때문에 발생하게 되는데, 국제사회에서는 제품의 생산 및 소비과정에서 필연적으로 발생하는 자원 에너지 소비 및 환경 오염부하를 정성적, 정량적으로 평가하여 이를 저감

* 이 연구는 "환경부 기후변화대응환경기술개발사업(과제번호: 2014001310010)"의 지원으로 수행되었습니다.

** Hyundai Engineering (First author : eunseokbae@hec.co.kr)

*** Hanyang University (Corresponding author : ksoh@hanyang.ac.kr)

시키거나 개선하고자 하는 노력의 일환으로 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 개발하고 보급하는 중이다(김선희·김동민, 1995).

ISO 14044(2006)에 의하면 전과정평가란 제품의 전 생애주기에 걸쳐 투입되고 산출되는 목록의 작성과 잠재적인 환경영향을 평가하는 방법으로 정의하고 있으며, 모든 산업 분야에서 환경에 미치는 영향에 대한 정보를 제공하는 유용한 도구로서 인식되고 있다. 이런 측면에서 도시의 다양한 부문에 전과정평가를 활용한다면 실질적인 온실가스 배출량의 파악과 온실가스를 감축하기 위한 유용한 기초 자료로 제공될 수 있을 것이다.

한편, 2010년 인구주택 총 조사에 따르면, 아파트는 우리나라 주택의 58.4%를 차지하고 있는 대표적인 주택 유형이다. 그만큼 다수의 국민이 아파트에 거주하면서 에너지를 소비하고 있어 대규모의 온실가스를 배출하고 있다. 그런데 아파트는 그 형태와 자재가 다양하고, 수명주기 또한 일반제품보다 상당히 길기 때문에 전과정평가를 이용한 환경영향평가가 어려운 것이 사실이다.

이에 본 연구의 목적은 전과정평가를 기반으로 하여 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량을 분석하는 것이다. 이를 위해서 우선 아파트를 대표적인 유형으로 분류하고, 유형별 건설, 운영, 해체/폐기 단계에서 사용되는 에너지와 이산화탄소 배출량을 추정한다. 이를 활용해 보다 환경 친화적인 아파트 유형은 무엇인지 파악하고, 더불어 서울시 행정구역별 아파트에서 배출되는 이산화탄소량과 그 특징을 분석함으로써 건축 및 도시계획적 시사점을 제시하고자 한다.

2 연구의 범위 및 흐름

본 연구의 공간적 범위는 서울시이며, 시간적 범위는 2005년~2006년이다. 시간적 범위는 전과정평

가의 운영단계에서 필요로 하는 개별 아파트의 실제 에너지 사용량(전력, 가스, 지역난방, 상수도)의 측정 시점이다. 연구는 크게 아파트의 유형화, 아파트의 전과정평가, 전과정평가 결과의 해석 순으로 이루어진다(그림 1).



그림 3. 연구의 흐름
Fig. 1. The Flow of Research

II. 이론고찰 및 선행연구 검토

1. 전과정평가

1) 전과정평가의 개요

ISO 14040(1997)에 의하면 전과정평가는 목적

및 범위설정, 목록분석, 영향평가, 해석 등 4단계로 구성된다(그림 2).

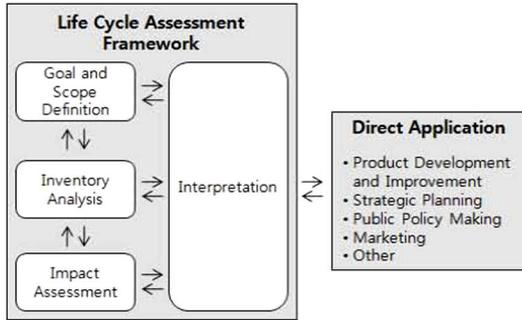


그림 2. 전과정평가의 틀

Fig. 2. The Framework of Life Cycle Assessment

목적 및 범위 설정은 전과정평가의 목적은 무엇이며, 평가 결과를 어디에 활용할 것인가를 설정하는 단계로서 분석 대상과 깊이, 범위, 데이터의 범주 등을 설정한다. 평가의 목적에 따라 분석의 범위와 필요한 데이터 그리고 결과가 다르게 도출되기 때문에 우선 목적과 범위를 구체적으로 정의하는 것이 중요하다.

목록분석은 LCA 수행의 핵심적인 단계로서 첫 단계에서 정의한 분석 범위에 투입되는 에너지 및 원료와 그로 인해 산출되는 제품, 부산물, 오염물질 등의 종류와 양을 파악하여 정량화하는 일련의 과정이 이루어지게 된다. 목록분석의 목적은 분석 범위의 전과정에서 나타나는 물질(에너지, 자원)의 흐름과 환경부하를 계산하기 위한 것으로 광범위한 자료가 필요하지만, 연구자가 설정한 연구의 목적과 범위에 따라 데이터의 수집범위는 축소 또는 확대될 수 있다.

영향평가 단계는 목록분석단계에서 규명된 에너지 및 자원의 수요와 배출물이 환경에 미치는 잠재적인 영향을 기술적, 정량적, 경우에 따라서는 정성적으로 파악하고 평가하는 단계이다.

해석은 분석 결과를 기초로 결론을 도출하고, 한계점과 대안 모색 등 시사점을 제공하는 것을 목적으로 한다.

2) 전과정 목록분석 방법론

전과정평가에서 전과정 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis)은 시스템에서 전과정에 걸쳐 투입되는 에너지 및 원료 소요량과 배출되는 환경오염물질을 정량화하여 수집하는 작업이다. 데이터의 수집방법에 따라 크게 개별적분석법(Process Analysis)과 산업연관분석법(Input-Output Analysis), 그리고 두 가지 방법을 조합한 조합법(Hybrid Analysis)²⁾ 등이 활용될 수 있다.

2. 선행연구 검토

1) 건축물의 전과정평가

건축물의 전과정평가에 관한 선행연구를 살펴보면 다음의 연구주제로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 건축물 전과정평가의 개념과 방법에 대한 연구이다. Khasreen et al.(2009)은 건축물 전과정평가의 중요성과 방법론을 강조했고, Ortiz et al.(2009)은 2000년부터 2007년까지의 전과정평가에 관한 선행연구를 정리하면서 전과정평가를 환경의 질 향상을 위해 유용성이 높은 도구라고 설명하였다.

둘째, 이산화탄소 배출량 원단위를 구축하기 위한 연구이다. 김종엽 외(2004), 국토해양부·한국건설교통기술평가원(2008), 유지환·신성우(2010)는 건축 자재에 대한 이산화탄소 배출량 원단위 데이터베이스 구축에 관한 연구를 수행한 바 있다.

셋째, 특정 단계에 대한 평가로 김종엽(2005)은 건설단계를 중심으로 환경부하를 평가하여 건설과정에서의 에너지 소비 및 이산화탄소 배출 특성을 파악하였다. 최두성 외(2011)는 공동주택을 대상으로 시공단계에서 투입자재에 대한 내재에너지 소비

에 따른 이산화탄소 배출량 원단위를 산출하고, 공동주택 단지의 주동형태조합에 따른 이산화탄소 배출량을 산출하였다. Blengini(2009)는 철거 및 폐기 단계를 중심으로 에너지와 온실가스 배출량을 평가하였다.

넷째, 건축물의 전생애 동안 배출되는 이산화탄소를 종합적으로 고려한 연구이다. Adalberth(1997)는 스웨덴에서 1991년과 1992년 사이에 지어진 3채의 단독주택을 대상으로 50년의 수명주기로 전과정평가를 수행하였고, Seo and Hwang(2001)은 공동주택, 단독주택, 연립주택 등 주거용 건축물의 자재생산에서 건설, 사용 및 해체와 폐기단계에 이르는 과정에 대해 이산화탄소 배출량을 정량화하고, 이를 저감하기 위한 대체에너지 이용기술의 적용가능성을 검토하였다. Norman et al.(2006)은 고밀주거단지와 저밀 주거단지의 전과정평가를 바탕으로 도시형태가 에너지 소비 및 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하였다.

다섯째, 전과정평가의 활용을 위한 기법 및 도구 개발에 대한 연구이다. Tae et al.(2011)은 건물의 전과정평가를 건설, 운영 및 유지, 해체 및 폐기단계로 구분하여, 아파트의 생애주기에 따른 이산화탄소 배출량 간이평가 기법을 개발하였다. 정영선(2010)은 주거용 건축물을 대상으로 적용할 수 있는 전과정평가에 의한 이산화탄소 배출량 예측모델을 개발하였고, 우지환(2011)은 건설, 운용 및 유지관리, 해체 및 폐기단계에 이르는 단계별 과정에서 발생하는 환경부하 및 경제성을 고려한 공동주택의 친환경 최적설계 평가 시스템을 개발하였다.

이상의 연구 검토 결과, 전과정평가의 활용성을 높이기 위한 평가 프로그램의 개발 연구, 전과정평가 결과의 신뢰성을 높이기 위한 원단위 DB 연구, 그리고 실제 건축물을 사례로 전과정평가를 수행한 연구를 살펴볼 수 있었다. 그러나 대부분의 연구는 개별 건축물에 대한 전과정평가를 실시하는 것에

그쳐 서로 다른 건축물 간의 비교·분석이나, 도시 차원에서의 전과정평가를 도입한 연구는 부족한 실정이다.

2) 아파트 유형과 에너지 소비량

아파트의 유형과 에너지 소비량에 관한 연구는 전과정평가 중에서도 특히, 운영단계에 많은 시사점을 줄 수 있다. 이봉진 외(2004)는 서울·경기지역의 아파트를 난방방식(LNG 개별난방, LNG 중앙난방, 지역난방)에 따라 에너지 소비량을 조사하여 난방 방식에 따른 에너지 소비량의 차이를 분석하였다. 이강희·채창우(2008)는 공동주택의 에너지 소비는 건물 외적 요인, 건물 내적 요인, 관리특성, 지리적 입지 등의 특성에 의해 좌우되며, 세대수, 관리면적, 난방방식, 창면적비, 주동 체적, 등의 요인이 상관분석에서 유의한 결과를 나타낸다고 하였다. 김진관 외(2009)는 판상형과 탑상형 아파트의 도시가스 사용량의 차이를 11개 아파트를 대상으로 분석하였다. 천진수(2010)는 판상형과 탑상형 아파트의 외부기온, 준공연도, 경년변화, 주호의 면적, 층별, 용도별, 형태별, 방향별, 계단실의 위치, 옥상 형태 등의 조건에 따른 도시가스사용량을 조사 분석하였다.

이상의 연구 검토 결과, 아파트의 에너지 소비량은 물리적 특성(판상형/탑상형, 난방방식, 세대수, 면적, 층수, 경과연수, 창면적비, 주동체적, 준공연도, 용도 및 형태 등), 자연적인 요인(입지, 기온, 향 등), 사회·경제적인 요인(관리특성 등) 등에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다.

III. 분석방법

1. 아파트의 유형화

본 연구에서 아파트를 유형화하는 이유는 건설단계에서 사용되는 자재의 종류와 그 양이 무수히 많

아 모든 아파트마다 실제 사용된 자재와 양을 조사하는데 현실적인 제약이 따르기 때문이다. 또한, 전과정평가의 결과를 해석할 때, 같은 유형의 아파트 집단끼리 비교·분석을 통해 시사점을 도출하기 위해서이다. 유형화를 위해서 우선 선행연구와 자료의 구득 가능성을 고려하여 (표 1)과 같이 면적, 세대수, 주동형상, 현관구조, 층수, 준공연도, 난방방식, 난방연료에 대한 자료를 조사한다. 다만, 선행연구에서 밝힌 창면적비, 주동체적, 입지, 기온, 향, 관리특성 등은 자료의 한계로 인해 동일하다고 가정한다.

일반적으로 공동 주택의 주동형식은 주거동의 장단변비에 따라, 크게 판상형과 탑상형으로 구분하지만, 어느 정도의 길이 이하를 탑상형으로 볼 것인가에 대한 명확한 기준이 정의된 바는 없다. 다만 서울시나 부산시에서 주거동의 인동간격을 규정하기 위해 평면의 장단변비가 4:1이하인 주동을 탑상형이라고 명시하고 있지만, 이것은 16층 이상인 초고층 아파트에만 해당되고, 또 평면상 길이가 긴 절곡 판상형태의 주거동도 탑상형으로 분류될 수 있는 문제를 가진다(김형진 외, 2009; 심우갑 외, 2001).

이러한 이유에서 서울시 아파트 자료에는 주동형상에 대한 분류는 하고 있지 않고, 주호진입 방식에 따라 계단실형, 복도형, 홀형, 계단 및 복도의 혼합형 등으로 구분하고 있다. 따라서 본 연구에서는 주호진입 방식에 따라 판상형은 각 세대를 상/하 및 좌/우로 연결하여 주거동 건축물 전체의 형태를 판상의 형태로 배치한 계단실형, 복도형으로 정의하며, 탑상형은 엘리베이터·계단실을 중앙의 홀에 배치하고 그 주위에 각 세대를 배치하는 홀형으로 정의한다(김창언 외, 2007). 다만, 계단 및 복도형이 혼합되어 있는 형태의 경우는 어느 형태로 볼 것인지에 대한 기준이 명확하지 않고, 전체에서 차지하는 비율이 높지 않기 때문에 분석에서 제외하도록 한다.

표 1. 자료조사
Table 1. Data Collection

항목 Items		항목 Items	
면적 Area	세대별 Households	세대수 Number of Households	동별 Individual Building
	단지별 Complex		단지별 Complex Building
층수 Story		준공연도 Built year	
주동형상 Building Type	판상형 Flat	현관구조 Entrance Type	계단식형 Direct Access
	탑상형 Tower		복도형 Corridor Access
		홀형 Hall Access	
난방방식 Heating System	개별난방 Individual	난방연료 Heating Fuel	도시가스 City Gas
	중앙난방 Central		열병합 Cogeneration
	지역난방 District		

다음으로 (표 1)의 조사항목 중에서 가장 대표적인 특징이라 할 수 있는 주동형상과 현관구조, 난방방식과 난방연료를 기준으로 유형화하고자 한다. 주동형상과 현관구조는 ‘판상형+계단실형’, ‘판상형+복도형’, ‘탑상형+홀형’으로 분류한다. 난방방식은 개별난방, 중앙난방, 지역난방으로 분류하며, 난방연료는 도시가스와 열병합으로 분류한다. 본 연구에서 설정한 기준에 의해 (표 2)와 같이 AAA 유형부터 CCB 유형까지 총 10가지의 유형으로 서울시 아파트를 분류한다.

2. 아파트의 전과정평가

본 연구에서의 전과정평가는 ISO 14040의 지침에 따라 우선 전과정평가를 수행하는 목적과 범위 투입물 및 산출물을 정량화하기 위한 자료의 수집과 계산 절차를 수행한다. 목록분석은 건설단계(자재 생산, 운송, 시공), 운영단계(전력, 가스, 지역난방, 상수도), 철거/폐기단계(해체, 운송, 중간처리)로

표 2. 아파트 유형화 방법
Table 2. Classification Method of Apartment Housings

유형 Type	주동형상 및 현관구조 Building Type and Entrance Type	난방방식 Heating System	난방연료 Heating Fuel
AAA	판상형+계단실형(A) Flat+Direct access(A)	개별난방(A) Individual(A)	도시가스(A) City gas(A)
ABA	판상형+계단실형(A) Flat+Direct access(A)	중앙난방(B) Central(B)	도시가스(A) City gas(A)
ACA	판상형+계단실형(A) Flat+Direct access(A)	지역난방(C) District(C)	도시가스(A) City gas(A)
ACB	판상형+계단실형(A) Flat+Direct access(A)	지역난방(C) District(C)	열병합(B) Cogeneration(B)
BAA	판상형+복도형(B) Flat+Corridor Access(B)	개별난방(A) Individual(A)	도시가스(A) City gas(A)
BBA	판상형+복도형(B) Flat+Corridor Access(B)	중앙난방(B) Central(B)	도시가스(A) City gas(A)
BCA	판상형+복도형(B) Flat+Corridor Access(B)	지역난방(C) District(C)	도시가스(A) City gas(A)
BCB	판상형+복도형(B) Flat+Corridor Access(B)	지역난방(C) District(C)	열병합(B) Cogeneration(B)
CAA	탑상형+홀형(C) Tower+Hall access(C)	개별난방(A) Individual(A)	도시가스(A) City gas(A)
CCB	탑상형+홀형(C) Tower+Hall access(C)	지역난방(C) District(C)	열병합(B) Cogeneration(B)

설정한다. 마지막으로 영향평가 및 해석 단계에서는 전과정평가의 목적에 부합하도록 아파트 유형별 이산화탄소 배출량을 비교·분석하였다.

1) 목적 및 범위설정

전과정평가의 목적은 아파트 유형별 이산화탄소 배출량을 추정하는 것이다. 분석의 기본 단위는 면적당 이산화탄소 배출량(kg-CO₂/m²)과 세대당 이산화탄소 배출량(kg-CO₂/세대)으로 설정한다.

2) 건설단계

아파트의 건설단계에서 발생하는 직·간접적인 에

너지 소비 및 이산화탄소 배출량을 평가하기 위해 크게 자재 생산, 운송, 시공단계로 구분한다.

(1) 자재 생산단계

① 대표자재의 선정 및 물량산출

아파트 건설을 위해 투입되는 자재는 크게 건축, 기계, 토목, 조경 순으로 많이 소요된다고 알려졌다. 그리고 아파트 1개동을 건설하는 데 필요한 전체 건설의 자재는 약 500여 종이 넘으며, 약 1500여 개의 규격이 서로 다른 자재가 소요된다. 건설 자재의 생산에 의한 환경부하 파악을 위해서는 이런 모든 자재를 반영하는 것이 합당하다. 그러나 모든 자재를 조사하는 것이 현실적으로 어려우므로 ISO 14044에는 전과정평가의 목적에 따라 제외기준(Cut-off Criteria)을 적용할 수 있다고 제시하고 있다.

이에 본 연구에서는 제외기준을 적용하여 아파트 건설에 투입되는 대표자재 목록을 선정한다. 대표자재의 선정은 ‘공동주택 공사비 분석 자료(2006)’³⁾에서 제시한 공동주택 건설에 사용되는 주요자재를 활용한다. 시공에 사용된 각 자재의 질량을 기준으로 가장 많이 소요되는 레미콘, 콘크리트 파일, 철근, 시멘트 등을 포함하여 거푸집, 톱카펫트(장판), 타일, 유리, 동관, XL관, 전선, 조명기구, 석고보드, 벽돌, 각재, 합판, 벽지, 페인트, 단열재 등 총 19가지 주요자재를 분석 대상으로 선정한다. 이렇게 선정된 대표자재별 불량산출을 위해 ‘공동주택 공사비 분석 자료’에서 제시한 계단식, 복도식, 탑상식 별로 면적당 평균 자재 소요량을 선정한다(표 3).

② 대표자재 원단위 DB

대표자재별 이산화탄소 배출량 원단위 DB는 개별적산법과 산업연관분석법을 모두 활용한 혼합분석방식법을 사용한다. 개별적산법은 국가 LCI DB로

표 3. 대표자재의 m²당 소요량
Table 3. Quantity of Major Materials per m²

자재 Materials		계단실형 Direct Access	복도형 Corridor Access	홀형 Hall Access
구조자재 Structural Materials	철근 Rebar	64.28kg	55.58kg	57.93kg
	레미콘 Ready-Mixed Concrete	0.72m ²	0.59m ²	0.59m ²
	거푸집 Form	5.30m ²	4.53m ²	4.60m ²
	파일 Pile	0.05EA	0.04EA	0.04EA
마감자재 Finishing Materials	벽돌 Brick	32.39EA	32.39EA	32.39EA
	룸카펫트 Vinyl Floor Paper	0.62m ²	0.60m ²	0.61m ²
	타일 Tile	0.51m ²	0.36m ²	0.39m ²
	시멘트 Cement	0.57EA	0.47EA	0.49EA
	유리 Glass	0.24m ²	0.17m ²	0.18m ²
	석고보드 Gypsum Board	1.43m ²	1.43m ²	1.43m ²
	각재 Timber	0.01m ²	0.01m ²	0.01m ²
	합판 Plywood	0.01m ²	0.01m ²	0.01m ²
	벽지 Wallpaper	2.01m ²	2.01m ²	2.01m ²
	페인트 Paint	0.33ℓ	0.33ℓ	0.33ℓ
설비자재 Equipment Materials	단열재 Insulation	0.52m ²	0.52m ²	0.52m ²
	동관 Copper Tube	1.17m	1.04m	1.38m
	XL관 XL Pipe	2.80m	2.95m	2.81m
	전선 Wire	7.91m	7.53m	7.07m
	조명기구 Lighting Fixture	0.14EA	0.14EA	0.14EA

분류된 건축자재 환경성정보 국가 DB 구축사업 최종보고서(국토해양부, 2008)의 64개 부문, 환경부와 지식경제부에서 개발한 국가 LCI DB(한국환경산업기술원)의 건축자재 23개 부문을 활용하며, 산업연관분석법은 2000년도 산업연관표를 근거로 작성한 연구(정영선, 2010)를 참고한다(표 4). 다음으로 (식 1)에 따라 자재 생산단계에서의 이산화탄소 발생량을 산정한다.

주요자재의 CO₂ 발생량
= ∑(자재 물량 × CO₂ 발생량 원단위) (식 1)

(2) 운송단계

운송단계의 에너지 소비는 자재의 생산지에서부터 건설현장까지 운반하기 위한 트럭 등의 운송장비에 의해 소비된다. 이때 소비되는 에너지양을 조

사·분석하여 IPCC의 에너지원별 탄소배출계수를 적용하면 운송단계의 이산화탄소 배출량을 산정할 수 있다. 이를 위해서 자재별 운송장비 및 적재용량, 저장장소에서 현장까지의 거리, 운송장비의 대수, 운송장비별 에너지소비량 및 이산화탄소 배출량 원단위가 필요하다.

자재별 운송장비는 2013년 건설공사 표준품셈과 선행연구에서의 결과를 참고하여 실제 현장에서 주로 사용되는 운송 장비를 선정하고, 장비별 적재용량과 에너지 소비량 및 CO₂ 배출량을 조사한다. 다음으로 각 저장장소에서 현장까지의 거리는 아파트 별로 시공 당시의 운송 거리를 적용해야 하지만 자료 구득이 현실적으로 어려우므로 본 연구에서는 김종엽(2005)의 연구에서 제시한 평균 운송거리 30km를 적용한다. 다음으로 (식 2)에 따라 운송단계에서의 이산화탄소 배출량을 산정한다.

표 4. 대표자재별 이산화탄소 발생량 원단위
Table 4. The Basic Unit of CO₂ for Each Material

자재 Materials		CO ₂ 배출량 CO ₂ Emissions	단위 Unit	출처 Data Sources
철근 Rebar	고장력이형철근 High-tension Deformed Bar	0.39625	kg	국토해양부(2008) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008)
거푸집 Form	유로폼 Euroform	0.39538	EA	
파일 Pile	콘크리트 파일 Concrete Pile	0.39538	kg	
름카펫트 Vinyl Floor Paper	경보행 바닥재 Residential Flooring	1.09500	kg	
타일 Tile	타일 Tile	0.34538	kg	
벽지 Wall Paper	PVC 벽지 PVC Wallpaper	1.89991	m ²	
합판 Plywood	합판 Plywood	801.33347	m ²	국가LCI DB Korea LCI Database
레미콘 Ready-Mixed Concrete	25-210-15	409.98106	m ³	
시멘트Cement	시멘트Cement	1.04880	kg	
유리 Glass	판유리 Plate Glass	0.75083	kg	정영선 (2010) Jeong, Y.S. (2010)
동관 Copper Tube	동관 Copper Tube	3.02148	kg	
XL관 XL Pipe	플라스틱 파이프 Plastic Pipe	0.40310	m	
전선 Wire	절연전선 Insulated Wire	0.06612	m	
조명기구 Lighting Fixture	형광등기구 Fluorescent Lighting Fixtures	35.65062	set	
각재 Timber	각재 Timber	0.04867	m ³	
단열재 Insulation	스티로폼 Styrofoam	7.71169	m ³	
벽돌 Brick	콘크리트 벽돌 Concrete Brick	0.13102	EA	
석고보드 Gypsum Board	석고보드 Gypsum Board	11.35087	EA	
페인트 Paint	수성페인트 Water Paint	4.10952	L	

운송단계의 CO₂배출량

$$= \frac{\text{자재 물량}}{\text{장비 적재량}} \times \frac{\text{운송거리}}{\text{장비의 km 당 CO}_2\text{배출량}} \quad (\text{식 } 2)$$

(3) 시공단계

시공단계의 에너지 소비 및 이산화탄소 배출은 현장에서 건축물을 시공하기 위해 사용하는 건설 기계장비, 운반장비, 현장사무소 및 기타 시설물에 대한 유류 및 전기 사용량의 총합으로 계산할 수 있다(우지환, 2010). 현장별로 기록되어 있는 건설 기계장비의 종류와 유류의 종류 그리고 유류의 사용량과 현장사무소의 전력 사용량을 조사하면 정확한 산정이 가능하다. 그러나 본 연구에서는 지구별 예산내역서 및 일위대가를 적용하여 유류 29개 공구, 전력 36개 공구 총 65개의 자료를 기준으로 연

구를 수행한 김종엽(2005)의 연구결과를 활용한다.

3) 운영단계

건축물은 일반 제품들과는 다르게 수명주기가 상당히 긴 제품으로 운영단계에서의 에너지 소비 및 이산화탄소 배출량이 전과정평가의 많은 부분을 차지한다. 일반적으로 건축물의 운영에 소비되는 에너지 사용량은 실측 자료를 직접 입력하는 단순입력 방식과 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 활용한 방법, 그리고 우리나라에서 제공하는 에너지 효율인증제도와 그린홈인증제도 등 체크리스트 형식을 이용하여 산정하는 방식이 있다(우지환, 2010).

본 연구에서는 2005년 1월부터 2006년 12월까지의 전력, 가스, 지역난방, 상수도 부문의 실제 사

용량 자료를 각 관리기관을 통해 수집하여 단순입력방식으로 적용하고, 아파트의 수명주기는 40년을 기준으로 한다.

운영단계의 이산화탄소 배출량은 전력의 경우, 전력거래소에서 공시하는 전력부문 온실가스 배출계수인 0.4585ton-CO₂/MWh를 적용한다. 도시가스는 석유환산기준 순발열량(9,550kcal)과 IPCC 탄소배출계수(0.637)을 이용하여 산정한다. 지역난방은 서울시 전역에 공급되는 서비스가 아니라, 일부 지역에 한해서 공급되고 있으며, 생산설비별 온실가스배출량 원단위 값이 다르기 때문에 각 지역별 다른 원단위 값을 적용한다. 최영국 외(2008)의 연구에 따라, 남서울 및 상암의 경우 1000Gcal 당 0.2 ton-CO₂, 강남은 212.4ton-CO₂, 강서는 231.9ton-CO₂, 노원은 226.4ton-CO₂를 각각 적용한다. 마지막으로 상수도, 하수도, 송수 과정에서 에너지 소비가 발생하게 되는데, 0.587kg-CO₂/m³를 적용하여 이산화탄소 배출량을 산정한다. 다음으로 (식 3)에 따라 운영단계에서의 이산화탄소 배출량을 산정한다.

$$\text{운영단계의 CO}_2 \text{ 배출량} = \sum(\text{소비량} \times \text{CO}_2 \text{ 배출량 원단위}) \quad (\text{식 3})$$

4) 해체 및 폐기단계

건축물의 해체 및 폐기단계는 건축물 수명이 끝나 구조물이 해체되고 건축폐기물이 발생되어 처리되는 단계를 뜻하며 크게 건축물 해체, 폐기물 운송, 폐기물 처리 및 매립단계로 구분할 수 있다.

(1) 해체단계

공사현장에서 발생하는 건설폐기물의 일반적인 단위면적당 발생량의 산정은 건설공사 표준품셈(건설연구원 편집부, 2013)에서의 자료와 앞서 본 연구에서 산정한 유형별 대표자재 소요량을 참고한다. 해체 장비에 의한 에너지 소비 및 이산화탄소 배출

은 우지환(2011)의 연구에서 밝힌 장비의 제원별 특성을 고려한 장비별 작업효율과 시간당 연료 소비량 분석 결과를 활용한다.

(2) 폐기물 운송단계

폐기물 운송단계의 이산화탄소 배출량 산정은 기본적으로 건설 자재의 운송단계와 동일하다. 최근에 처리되는 건설폐기물의 처리방법 변화 추이를 살펴보면 건설폐기물의 약 98%가 재활용되는 것을 알 수 있다(환경부, 2011). 따라서 본 연구에서는 모든 폐기물이 재활용을 위한 중간처리업체로 이동되는 것으로 가정한다.

해체현장과 중간처리업체 간의 거리는 아파트와 최단 거리에 있는 업체의 거리라고 가정한다. 이를 위해 각 아파트의 중심점과 한국건설자원협회에 등록된 처리업체의 위치를 기준으로 거리를 구한다. ArcGIS 10.0의 OD Cost Matrix⁴⁾를 활용하여 동별 아파트 중심점과 중간처리업체 간의 최단거리를 산정하고, 이들의 평균거리를 적용한다.

(3) 폐기물 중간처리단계

폐기물 중간처리는 건설폐기물의 처리방법 변화 추이(환경부, 2011)에 근거하여 전량 재활용을 하는 것으로 가정한다. 따라서 해체단계에서 발생한 폐기물 중 재활용할 수 없는 폐기물을 매립하는 단계는 고려하지 않는다.

본 연구에서는 이홍석(2001)의 현장조사를 통한 중간처리 시 사용되는 에너지의 조사 자료를 활용하여 중간처리단계의 에너지 사용량을 계산하고 그에 따른 이산화탄소 배출량을 산정한다.

IV. 사례연구

1. 아파트의 유형화 결과

2006년 12월을 기준으로 서울시에 총 3,833개의 아파트 단지가 조사되었다. 이 중에서 현황자료 구득이 어려운 아파트를 제외하고, 총 3,115개의 아파트를 대상으로 유형화를 실시하였다. 유형화 결과 AAA 유형(56.40%)이 가장 많은 분포를 보이고 있는 반면, CCB 유형(0.19%)은 가장 적은 분포를 보인다(그림 3). CCB 유형의 경우, 샘플수가 적어 통계적으로 유의미한 결과를 도출한다고 보기에 어렵기 때문에 분석에서는 제외하도록 한다.

건설단계에서의 유형을 살펴보면, ‘관상형+계단실형’(68.74%), ‘관상형+복도형’(30.19%), ‘탑상형+홀형’(1.07%)으로 ‘관상형+계단실형’이 절대적으로 많음을 알 수 있다. 이는 2000년 이전 아파트는 관상형 주동이 대부분이었으며, 탑상형은 2000년대 초 반부터 초고층 아파트의 새로운 형태로 등장했기 때문이다(이지은 외, 2014). 난방방식에 의한 구분에서는 개별난방 76.77%, 중앙난방 8.03%, 지역난방 15.2%로 나타났으며, 난방연료에 의한 유형에서는 도시가스 87.58%, 열병합 12.42%로 분석되었다.

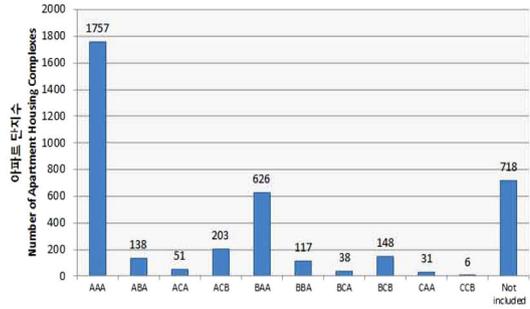


그림 3. 서울시 아파트의 유형별 분포
Fig. 3. Distribution of Apartment Housing Complex Types in Seoul

2. 아파트의 전과정평가 결과

전과정에 따른 이산화탄소의 평균 배출량을 살펴 보면, 건설단계가 18.59%, 운영단계가 80.34%, 해체 및 폐기단계가 1.06%인 것으로 분석되었다. 운영단계에서의 배출량은 아파트의 수명주기 40년을 기준으로 한 것임을 감안한다면, 건설단계에서의 배

표 5. 전과정평가의 유형별 이산화탄소 배출량(kg-CO₂/m²)

Table 5. Carbon Dioxide Emissions by Apartment Housing Types(kg-CO₂/m²)

구분 Type	건설단계 Construction Phase				운영단계(40년 수명주기 고려) Operational Phase(40 Years of Service Life)					해체/폐기단계 End-of-life				합계 Total
	자재생산 Material Production	운송 Transport	시공 Construction	소계 Subtotal	전력 Electricity	도시가스 City Gas	지역난방 District Heating	상수도 Water Supply	소계 Subtotal	해체 Demolition	운송 Transport	처리 Recycling	소계 Subtotal	
AAA	403.52	5.83	11.08	420.43	725.45	929.74	-	73.18	1,728.37	17.43	1.92	4.71	24.06	2,172.86
ABA	403.52	5.83	11.08	420.43	742.89	993.68	-	78.41	1,814.98	17.43	1.92	4.71	24.06	2,259.47
ACA	403.52	5.83	11.08	420.43	824.08	151.46	688.87	74.80	1,739.21	17.43	1.92	4.71	24.06	2,183.70
ACB	403.52	5.83	11.08	420.43	776.82	69.65	641.51	68.37	1,556.35	17.43	1.92	4.71	24.06	2,000.84
BAA	345.83	5.02	11.08	361.93	916.95	1,035.54	-	86.42	2,038.91	14.94	1.65	4.04	20.63	2,421.47
BBA	345.83	5.02	11.08	361.93	992.63	1,223.69	-	105.17	2,321.48	14.94	1.65	4.04	20.63	2,704.04
BCA	345.83	5.02	11.08	361.93	777.61	86.00	730.41	101.80	1,695.82	14.94	1.65	4.04	20.63	2,078.38
BCB	345.83	5.02	11.08	361.93	932.47	94.41	730.86	95.97	1,853.71	14.94	1.65	4.04	20.63	2,236.27
CAA	363.37	5.16	11.08	379.61	1,141.78	1,044.86	-	78.70	2,265.34	15.48	1.70	4.18	21.36	2,666.31
Avg.	393.75	5.69	11.08	410.52	766.70	855.39	76.25	76.06	1,774.41	17.01	1.87	4.60	23.48	2,208.40

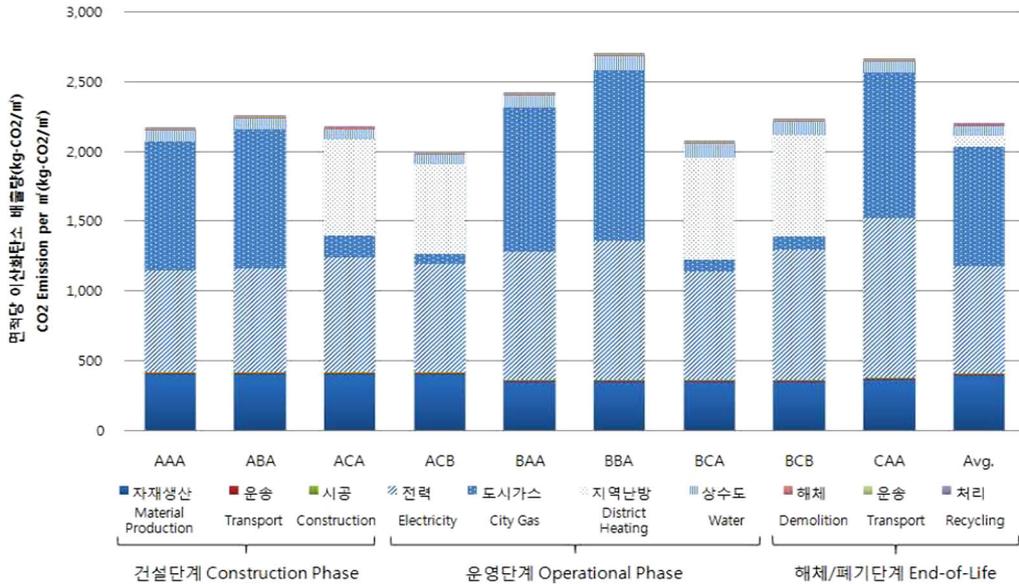


그림 4. 전과정평가의 유형별 이산화탄소 배출량(kg-CO₂/m²)
 Fig. 4. Carbon Dioxide Emissions by Apartment Housing Types(kg-CO₂/m²)

출량은 짧은 기간에 많은 양의 이산화탄소 배출이 이루어짐을 알 수 있다(표 5, 그림 4).

1) 건설단계

건설단계의 평균 이산화탄소 배출량은 410.52 kg-CO₂/m²으로 분석되었으며, 자재 생산단계의 배출량이 건설단계 전체의 약 95.91%, 운송단계는 1.39%, 시공단계는 2.70%를 차지하고 있다.

유형별로는 ‘관상형+계단실형’이 420.43kg-CO₂/m²으로 가장 많고, ‘탑상형+홀형’이 379.61kg-CO₂/m², ‘관상형+복도형’이 361.93kg-CO₂/m²으로 분석되었다. 이는 계단실형의 m²당 주요자재의 물량이 복도형이나 홀형에 비해 더 많이 소요되었기 때문이다. 본 연구에서 선정한 19가지의 주요자재 중에서도 상위 10위까지의 자재가 전체의 약 96%의 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타났으며, 그 중에서도 레미콘이 약 67%를 차지해 가장 주요한 이산화탄소를 배출 요인임을 알 수 있다(표 6).

표 6. 자재별 이산화탄소 배출량(단위: kg-CO₂/m²)
 Table 6. CO₂ Emissions by Material(kg-CO₂/m²)

자재 Materials	계단실형 Direct Access	복도형 Corridor Access	홀형 Hall Access
레미콘 Ready-Mixed Concrete	276.56	233.04	242.15
파일 Pile	28.21	26.32	30.34
철근 Rebar	25.47	21.56	22.95
시멘트 Cement	23.95	19.70	20.69
석고보드 Gypsum Board	9.99	9.99	9.99
유리 Glass	5.42	3.80	4.00
조명기구 Lighting Fixture	5.15	4.21	4.85
합판 Plywood	4.66	4.66	4.66
벽돌 Brick	4.24	4.24	4.24
단열재 Insulation	3.98	3.98	3.98
벽지 Wallpaper	3.81	3.81	3.81
동관 Copper Tube	3.54	3.26	4.16
타일 Tile	2.83	2.01	2.13

거무집 Form	1.73	1.50	1.52
페인트 Paint	1.34	1.34	1.34
XL관 XL Pipe	1.13	1.02	1.13
러그펫트 Vinyl floor paper	0.97	0.93	0.95
전선 Wire	0.52	0.43	0.47
각재 Timber	0.00	0.00	0.00
합계 Total	403.52	345.83	363.37

2) 운영단계

운영단계에서의 분석 결과, 연간 배출량은 m^2 당 평균 44.43kg-CO₂인 것으로 분석되었다. 부문별로는 전력에 의한 배출량이 43.32%, 도시가스에 의한 배출량이 48.02%를 차지한다. 그 이유는 지역난방을 사용하는 가구가 15.2%로 전체에서 차지하는 비율이 그만큼 낮기 때문이다.

난방방식에 따른 도시가스와 지역난방의 배출량을 살펴보면, 중앙난방 방식이 26.45kg-CO₂/ m^2 ·년으로 가장 많은 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 개별난방 방식이 23.62kg-CO₂/ m^2 ·년, 지역난방 방식이 도시가스와 지역난방을 모두 합쳐 19.07kg-CO₂/ m^2 ·년으로 나타났다(표 7).

표 7. 난방방식별 이산화탄소 배출량(kg-CO₂/ m^2 ·년)
Table 7. CO₂ Emissions by Heating System (kg-CO₂/ m^2 ·year)

구분 Type	전력 Electricity	도시가스 City Gas	지역난방 District heating	상수도 Water Supply	합계 Total
개별난방 Individual	18.88	23.62	-	1.87	44.38
중앙난방 Central	20.32	26.45	-	2.15	48.92
지역난방 District	20.59	2.17	16.90	1.96	41.62
평균 Avg.	19.17	21.38	1.91	1.90	44.43

3) 해체 및 폐기단계

해체 및 폐기단계에서는 해체 단계에서의 이산화

탄소 배출량이 약 72.44%로 가장 많은 부분을 차지하며, 처리단계에서 19.58%, 운송단계에서 7.98%를 배출하고 있다. 유형별로는 계단실형이 가장 많으며, 복도형이 가장 적음을 알 수 있는데, 이는 건설단계에서의 자재 소요량 차이에서 기인한 것이다.

3. 아파트의 전과정평가 결과의 종합

1) 유형별 분석

아파트 유형별 전과정평가를 수행한 결과, 면적당 평균 이산화탄소 배출량은 2,208.40kg-CO₂이며, 세대당 평균 배출량은 268,292.89kg-CO₂인 것으로 분석되었다. 우선 면적당 이산화탄소 배출량은 BBA(판상+복도형, 중앙난방, 도시가스)유형이 2,704.05kg-CO₂으로 가장 높으며, CAA(탑상+홀형, 개별난방, 도시가스)유형이 2,666.31kg-CO₂, BAA(판상+복도형, 개별난방, 도시가스) 유형이 2,421.47kg-CO₂으로 이산화탄소 배출량이 많은 유형에 속한다.

반면 ACB(판상+계단실형, 지역난방, 열병합)유형이 2,000.84kg-CO₂으로 가장 적은 이산화탄소 배출 유형으로는 분석되었다. 이는 BBA유형의 약 74%로 전용면적 85 m^2 , 4호 조합의 15층 아파트 1개 동을 기준으로 산정하면 약 358만kg-CO₂의 배출량 차이를 가져오며, 이를 재화가치로 환산하면 5억7천8백여만 원의 가치이다⁵⁾. 이 밖에 BCA(판상+복도형, 지역난방, 도시가스)유형 2,078.38kg-CO₂, AAA(판상+계단실형, 개별난방, 도시가스)유형 2,172.86kg-CO₂, ACA(판상+계단실형, 지역난방, 도시가스)유형이 2,183.70kg-CO₂으로 배출량이 적은 유형에 속한다고 볼 수 있는데, 일반적으로 지역난방을 난방방식으로 채택한 아파트가 면적당 이산화탄소 배출량이 적은 것으로 분석되었다.

다음으로 한 세대에서 배출하는 평균 이산화탄소 배출량을 살펴보면, ACA(판상+계단실형, 지역난방, 도시가스)유형이 332,141.40kg-CO₂를 배출하여 가

표 8. 유형별 이산화탄소 배출량
Table 8. CO₂ Emissions by Apartment Housing Types

유형 Type	면적당 이산화탄소 배출량(kg-CO ₂ /m ²) CO ₂ Emissions by Area(kg-CO ₂ /m ²)					세대당 이산화탄소 배출량(kg-CO ₂ /세대) CO ₂ Emissions by Household(kg-CO ₂ /household)				
	평균 Avg.	중위수 Median	표준편차 S.D.	최솟값 Min.	최댓값 Max.	평균 Avg.	중위수 Median	표준편차 S.D.	최솟값 Min.	최댓값 Max.
AAA	2,172.86	2,243.74	481.64	976.65	3,353.65	273,611.96	262,402.25	102,363.43	64,763.39	849,888.57
ABA	2,259.47	2,431.22	548.55	957.41	3,459.77	323,063.69	313,061.18	132,033.78	81,935.55	827,686.11
ACA	2,183.70	2,055.36	314.81	1,578.66	2,878.91	332,141.40	316,993.76	97,940.82	175,038.65	613,650.15
ACB	2,000.84	1,999.58	263.40	1,361.10	2,632.51	290,321.32	282,280.73	84,968.45	135,373.17	594,189.16
BAA	2,421.47	2,383.55	347.72	1,569.73	3,222.16	224,385.98	222,456.02	56,139.58	100,104.95	530,463.92
BBA	2,704.05	2,713.65	279.29	1,988.82	3,166.12	226,870.64	204,082.39	67,896.40	124,768.37	395,316.44
BCA	2,078.38	2,090.31	286.72	1,509.89	2,483.50	172,019.53	147,096.17	55,023.88	127,019.37	277,460.49
BCB	2,236.27	2,237.70	210.71	1,829.39	2,686.11	186,444.20	161,605.49	67,918.66	130,002.74	514,686.78
CAA	2,666.31	2,441.51	496.11	2,089.34	3,527.21	277,163.78	280,583.49	78,115.83	153,882.80	476,004.60
Avg.	2,208.40	2,253.95	358.77	1,540.11	3,045.55	268,292.89	256,887.76	83,035.62	117,375.77	575,417.70

장 많은 유형이며, ABA(판상+계단실형, 중앙난방, 도시가스)유형이 323,063.69kg-CO₂, ACB(판상+계단실형, 지역난방, 열병합)유형이 290,321.32kg-CO₂를 배출하여 배출량이 많은 유형에 속한다. 반면 가장 적은 유형은 BCA(판상+복도형, 지역난방, 도시가스)유형이 172,019.53kg-CO₂으로 ACA유형의 약 52% 정도이며, 이는 2천6백여만 원의 가치이다. 이 밖에 BCB(판상+복도형, 지역난방, 열병합)유형이 186,444.20kg-CO₂, BAA(판상+복도형, 개별난방, 도시가스)유형이 224,385.98kg-CO₂으로 배출량이 적은 것으로 분석되었다(표 8).

이렇게 면적과 세대에 따라 배출량의 차이가 나타나는 것은 복도형 아파트가 계단실형이나 홀형에 비해 소형 아파트로 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 복도형 아파트의 한 세대 평균 면적은 91m²로, 계단실형 132m², 홀형 105m²에 비해 소형이 많다고 할 수 있다. 따라서 면적당 배출량이 많더라도 한 세대에서 배출하는 이산화탄소의 양은 더 적은 것으로 분석된다.

2) 지역별 전과정평가의 비교

지역별 전과정평가 결과의 비교를 통해 상대적으로 이산화탄소 배출량이 많은 지역과 적은 지역을 파악할 수 있다. 아파트의 수명주기 40년을 고려하여 아파트에서 배출하는 이산화탄소의 총 누적량을 살펴본 결과 강남구, 노원구, 송파구에서 가장 많은 이산화탄소가 배출되는 것으로 나타났다. 이들 지역은 기본적으로 아파트 단지 및 세대수가 많은 지역에 속하며, 총 연면적이 큰 지역이다. 반면 종로구, 중구, 금천구, 강북구 등의 지역은 아파트가 적게 밀집된 지역으로 총 배출량도 적은 지역으로 밝혀졌다(그림 5, 6).

구 및 동별 아파트 면적당 배출량(kg-CO₂/m²)과 세대당 배출량(kg-CO₂/세대)을 산정하였다. K-평균 군집분석 결과, 면적당 이산화탄소 배출량은 종로구, 동작구, 강동구, 구로구, 강북구가 배출량이 많은 지역으로 나타났으며, 성동구, 서초구, 성북구, 강남구, 용산구, 동대문구, 서대문구는 낮은 지역으로 나타났었다(그림 7). 반면에 세대당 배출량은 서초구, 강남구, 용산구가 가장 높게 나타났으며, 중구,

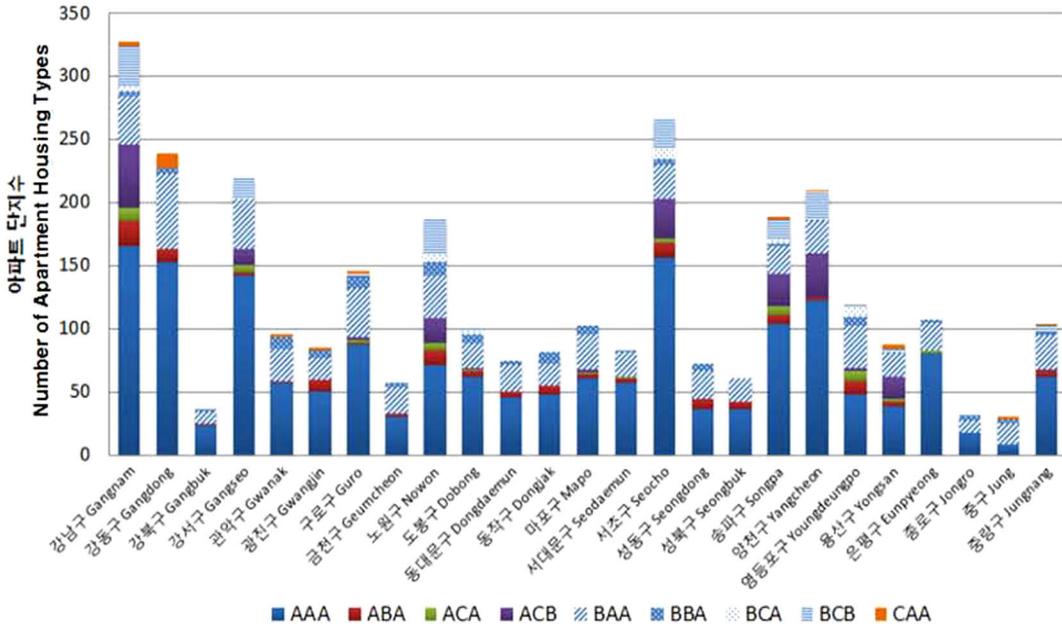


그림 5. 구별 아파트 유형 분포

Fig. 5. Distribution of Apartment Housing Types by District

노원구, 중랑구, 서대문구, 도봉구 등에서 낮게 나타났다. 이는 서초구, 강남구, 용산구가 세대당 평균 아파트 면적이 각각 157㎡, 171㎡, 146㎡로 대형 아파트의 비율이 높은 지역이기 때문이다(그림 8).

전과정평가의 결과를 지역별로 살펴보는 것에는 다양한 의미가 있다. 우선, 향후 도시계획 및 관리, 단지계획, 건축 설계 및 시공에 참고할 수 있는 기초자료가 될 수 있을 것이다. 특히, 재개발, 재건축 등 도시개발사업의 수립 시 환경에 대한 고려로써 이산화탄소의 배출량이 단위면적 또는 세대수에 비해 많은 지역이라면 보다 친환경적인 대안의 선택을 적극적으로 검토해 볼 수 있을 것이다. 최근 아파트 재건축 연한이 종전 최대 40년에서 30년으로 단축되면서 서울시 아파트의 약 8.7%가 현시점을 기준으로 할 경우 재건축이 가능하게 되었고, 5년 이내에는 약 16.3%가 재건축이 가능하게 된다. 유형별로는 AAA유형이 27.22%, BAA유형이 18.34%

BCB유형이 16.17%로 가장 많으며, 지역별로는 강남구 13.72%, 서초구 9.74%, 영등포구 8.75%, 용산구 8.55%가 분포해 있다.

이산화탄소의 전과정평가가 관점에서 살펴보면 면적 당 배출량이 많은 BBA, BAA유형이 많이 분포하고 있으며, 재건축 연한 시점에도 근접한 영등포구, 중구, 강동구, 구로구 지역의 재건축을 우선적으로 고려하는 것이 타당하다. 또한 본 연구에서의 결과와 같이 재건축 시에는 ACB, BCA, ACA유형으로 계획하는 것이 보다 친환경적이다. 그러나 건설, 운영, 해체 및 폐기 단계에 따른 세부적인 조합에 대한 고민과 아파트의 규모 등을 종합적으로 고려해야 하기 때문에 특정한 유형의 아파트를 장려하는 것도 중요하지만, 이와 더불어 이산화탄소 배출량을 저감할 수 있는 자재의 사용, 친환경 건축기술의 도입, 에너지 사용량 저감을 위한 설계방안 등을 고려하여 어느 정도의 이산화탄소 배출량 저

전과정평가에 기반한 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량 분석

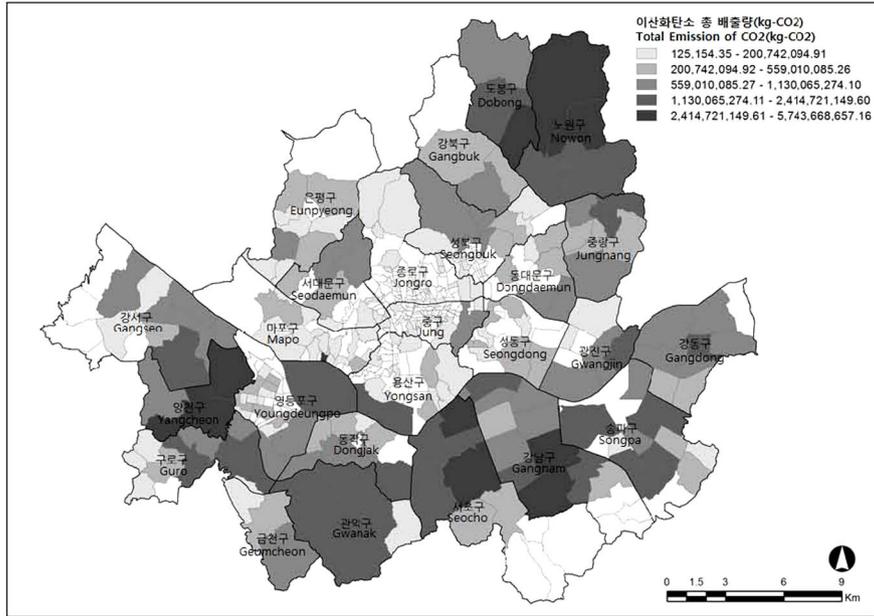


그림 6. 이산화탄소의 총 배출량(kg-CO₂)
Fig. 6. Total Emissions of CO₂(kg-CO₂)

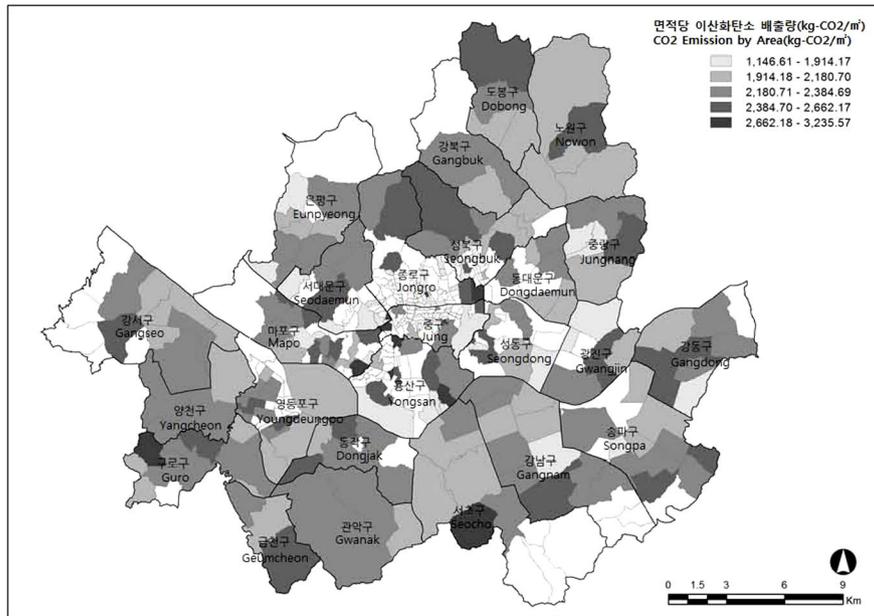


그림 7. 아파트 면적당 이산화탄소 배출량(kg-CO₂/m²)
Fig. 7. CO₂ Emissions by Apartment Housing Area(kg-CO₂/m²)

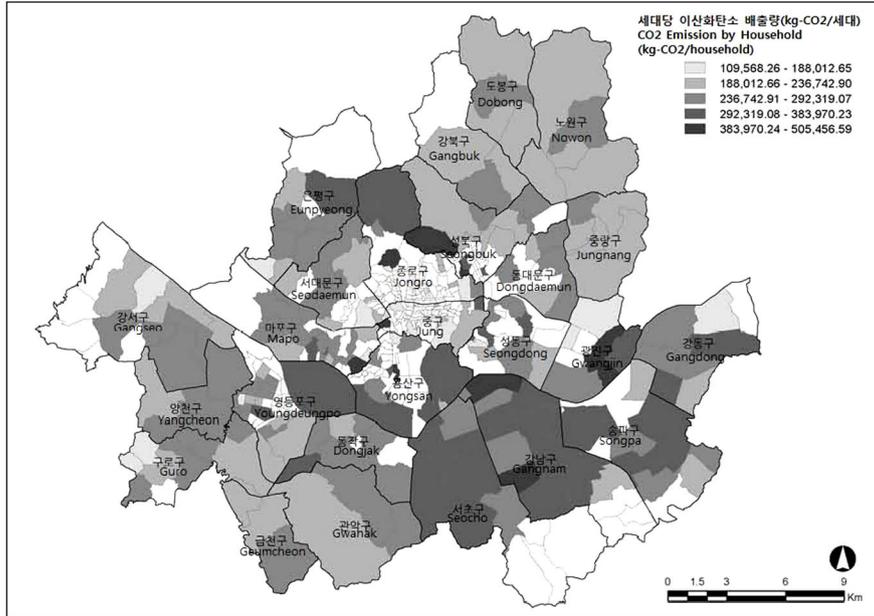


그림 8. 아파트 세대당 이산화탄소 배출량(kg-CO₂/세대)
 Fig. 8. CO₂ Emissions by Apartment Housing Household(kg-CO₂/household)

감이 가능하다는 것이 사전에 검토되는 것 또한 중요하다.

V. 결론

본 연구에서는 서울시 에너지 사용량의 58.2%를 차지하고 있는 가정·상업부문 중에서 우리나라의 대표적 건축물 형태인 아파트를 대상으로 전 생애 주기 동안 배출되는 이산화탄소의 양을 정량적으로 파악하였다. 구체적으로는 서울시 아파트를 대상으로 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 요소를 기준으로 하여 유형화를 실시하고, 유형별 건설, 운영, 해체/폐기 단계에 이르는 동안 배출되는 이산화탄소의 양을 산정하였다. 그리고 전과정평가 결과의 해석에 의해, 아파트의 유형, 구 및 동별 이산화탄소 배출량을 산정할 수 있었다. 주요 연구결과를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 아파트의 전과정평가를 통해 단계별 이산화탄소 배출량의 감축을 위한 핵심적 요소를 규명할 수 있었다. 건설단계에서는 콘크리트 제품 생산 단계에서의 이산화탄소 배출량 저감, 운영단계에서는 전력 및 난방에너지 사용량의 감축, 해체/폐기단계에서는 해체공법의 선택이 특별히 중요한 요소를 알 수 있었다. 이 중에서도 운영단계에서의 배출량이 가장 많은 부분을 차지하며, 지역난방 방식과 열병합 발전을 에너지 연료로 사용하는 방식이 평균적으로 가장 적은 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다.

둘째, 유형별 전과정평가 결과를 면적당 배출량과 세대당 배출량으로 비교해 본 결과, 가장 많은 이산화탄소 배출 유형으로는 탑상형의 초고층 아파트와 복도형이면서 중앙난방을 사용하는 아파트가 주를 이루었다. 한편, 가장 적은 이산화탄소 배출 유형은 계단실형의 판상형 아파트가 주를 이루고

있음을 알 수 있다.

셋째, 법정동 및 자치구 별 면적당 이산화탄소 배출량의 평균, 세대당 이산화탄소 배출량의 평균, 40년 수명주기를 고려한 총 이산화탄소 배출량을 산정하였다.

본 연구는 9가지 유형의 아파트에 대한 이산화탄소 배출량의 상대적 비교와 더불어 지역 및 경과 연수에 따른 배출량을 비교하였다. 아파트는 우리나라의 대표적인 주택형태이고, 앞으로도 그 추세가 유지될 전망으로서, 본 연구의 결과는 도시계획 및 건축분야에 있어서 이산화탄소 배출량을 저감하기 위한 전략 수립에 긴요한 시사점을 제공하였다.

그러나 본 연구에서 거주자의 경제적 능력, 생활 방식과 같은 사회 및 경제적 요인, 지역별 기후의 차이, 향·일조 등과 같은 자연적 요인, 주거동의 배치형식, 시공기술의 차이 등과 같은 물리적 요인 등에 대한 고려가 이루어지지 않았다. 후속 연구를 통해 이와 같은 요소들을 고려한다면 보다 구체적으로 현실을 반영한 연구 결과를 도출할 수 있을 것이다. 아울러 아파트 이외의 다른 형태의 주택 및 건축물을 포괄하는 연구도 필요할 것이다.

주1. 주택은 크게 단독주택과 공동주택으로 구분한다. 단독주택은 일반단독주택, 다중주택, 다가구주택, 공관으로 세분화되며, 공동주택은 아파트, 연립주택, 다세대주택, 기숙사로 세분화된다. 이때, 아파트는 주택으로 쓰이는 층수가 5개 층 이상인 주택을 의미하므로, 본 연구에서도 5개 층 이상의 주택을 아파트로 간주하였다(건축법 시행령 제3조의 4 관련).

주2. 개별적산법은 설계도서와 견적서 등으로부터 원료와 제조공정, 사용 등으로 구분하여 각각의 제품이 어떻게 제조되어 폐기되는지를 제품마다 구체적으로 조사해 나가는 방법으로 가장 정확하다. 산업연관분석법은 산업연관표를 활용하여 에너지 소비량과 환경부하량을 구하는 방법이다. 이는 작간접적인 에너지 소비량 및 환경부하량을 빠짐없이 추계할 수는 있지만, 산업구조와 생산활동이 단순화, 평균화되어 있기 때문에 각각의 제품과 기술분석에는 불충분한 단점이 있다. 본 연구에서는 가급적 개별적산법을 활용하고자 하였으나, 개별적산법에

의한 원단위가 없는 자재의 경우에는 산업연관분석법을 활용한 연구를 참고하였다.

- 주3. 2006년도 주택공사에서 설계하여 적용하고 있는 평형별로 대표적인 아파트 평면을 대상으로 아파트 건설에 소요되는 공사비를 분석하여 형별 규모에 따라 공종별(건축, 기계, 전기, 통신, 토목, 조경) 금액을 산출한 자료이다. 본 연구에서는 서울시의 모든 아파트 평면을 분석하여 자재 소요량을 산출하는 방식을 대신하여 공동주택 공사비 분석자료를 활용하였다.
- 주4. OD Cost Matrix는 ArcGIS의 네트워크 분석 모듈 중 하나이다. 이는 출발지에서 도착지까지 가는 가장 최적의 경로(시간, 거리 등)를 분석하는 도구로써, 가장 근접한 응급시설이나, 서비스 지역의 분포 등을 분석하는데 활용된다. 본 연구에서는 각 아파트에서 가장 근접한 중간처리업체까지의 실제 도로 상의 거리를 분석하기 위해 활용하였다.
- 주5. 이산화탄소의 가치는 '제4차 교통시설 투자평가 지침(국토해양부, 2011)'의 편익산정 기준에 따라 톤당 161,400원을 적용하였다.

인용문헌

References

1. 건설연구원, 2013. 「건설공사 표준품셈」, 서울.
An editorial department of Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2013. *Standard of Construction Estimate*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Seoul.
2. 국토해양부, 2011. 「제4차 교통시설 투자평가지침」, 경기.
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011. *Fourth Guidelines of Transportation Investment Appraisal*, Seoul.
3. 국토해양부·한국건설교통기술평가원, 2008. 「건축자재 환경성정보 국가 D/B 구축사업 최종보고서」, 서울.
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2008. *National D/B for Environmental Information of Building Products*, Seoul.
4. 김선희·김동민, 1995. "LCA(Life Cycle

- Assessment) 의 방법론과 적용에 관한 연구”, 「한국폐기물학회지」, 12(1): 145-152.
- Kim, S.H., Kim, D.M., 1995. "A Study on Methodology and Application of Life Cycle Assessment", *J. Korean Solid Wastes Engineering Society*, 12(1): 145-152.
5. 김종엽·김성완·손장열, 2004. "건축물 LCA를 위한 건설자재의 환경부하 원단위 산출 연구: 산업연관표에 의한 에너지소비량 및 이산화탄소 배출량을 중심으로", 「대한건축학회지」, 20(7): 211-218
- Kim, J.Y., Kim, S.W., Sohn, J.Y., 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 CO2 Emission by I/O table", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 20(7): 211-218.
6. 김종엽, 2005. "전과정평가에 의한 공동주택 건설단계에서의 이산화탄소 배출량 평가", 한양대학교 대학원 박사학위논문
- Kim, J.Y., 2005. "Evaluating CO2 Emission in Construction Stages of Apartment Buildings by Life Cycle Assessment", Ph. D. Dissertation, Hanyang University.
7. 김진관·전진수·이병호, 2009. "판상형 아파트와 탑상형 아파트의 도시가스 소비 특성에 관한 연구", 「한국주거환경학회논문집」, 7(2): 55-65.
- Kim, J.G., Chun, J.S., Lee, B.H., 2009. "Comparative Study on the City Gas Consumption Characteristics of Flat-type Apartment and Tower-type Apartment" *Journal of The Residential Environment Institute of Korea*, 7(2): 55-65.
8. 김창언·김종환·김진원, 2007. 「건축계획·설계론」, 서울: 도서출판 서우.
- Kim, C.O., Kim, J.H., Kim, J.W., 2007. *Architectural Planning & Design Theory*, Seoul: Publisher Seowoo.
9. 김형진·박찬규·김영석, 2009. "행정중심도시 공동주택 설계공모안에 나타난 판상형 주동의 계획 특성에 관한 연구", 「대한건축학회지」, 25(8): 275-284.
- Kim, H.J., Park, C.K., Kim, Y.S., 2009. "A Study on the Planning Characteristic of 'Point Blocks' in the Apartment Housing Design Competitions of Sejong City", *Journal of Architectural Institute of Korea*, 25(8): 275-284.
10. 대한주택공사, 2006. 「공동주택 공사비 분석자료 (견적기준)」, 경기
- Korea National Housing Corporation, 2006. *Analysis of Apartment Building Construction Cost data(Estimating standards)*, Gyeonggi.
11. 우지환·신성우, 2010. "표준공동주택의 주요 건설자재 설정을 통한 공동주택 환경부하 비교평가에 관한 연구", 「한국생태환경건축학회논문집」, 10(1): 85-90
- Woo, J.H., Shin, S.W., 2010. "The Environmental Load Comparison Evaluation of the Apartment House for Main Construction Materials of Standard Apartment House", *Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 10(1): 85-90.
12. 우지환, 2011. "환경부하 및 경제성을 고려한 공동주택의 전생애 친환경 최적설계 평가 시스템 개발에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문
- Woo, J.H., 2011. "Sustainable Optimum Design Evaluation System Development by Environmental and Economical Efficiency of Life Cycle of the Apartment Houses", Ph.D. Dissertation, Hanyang University.
13. 이강희·채창우, 2008. "공동주택 사용부문의 이산화탄소 배출량 추정모델 연구", 「한국생태환경건축학회논문집」, 8(4): 19-27.
- Lee, K.H., Chae, C.U., 2008. "Estimation Model of the Carbon Dioxide Emission in the Apartment Housing During the Maintenance Period", *Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 8(4): 19-27.
14. 이봉진·정동열·이선·홍희기, 2004. "한국형 아파트의 난방에너지 분석 2: 난방방식에 따른 차이", 「설비공학논문집」, 16(5): 459-467.

- Lee, B.J., Chung, D.Y., Lee, S. Hong, H.K., 2004. "Analysis of Heating Energy in a Korean-Style Apartment Building 2: The Difference according to Heating Type", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 16(5): 459-467.
15. 이지은·이강업, 2014. "아파트의 평면 형태에 따른 채광 및 에너지성능 비교", 「대한건축학회지」, 30(3): 113-120
- Lee, J.E., Lee, K.U., 2014. "Comparison of Daylighting and Energy Performance According to Apartment Floor Shapes", *Journal of Architectural Institute of Korea*, 30(3): 113-120.
16. 이홍석, 2001. "건축물 폐기단계에서 에너지소비량과 이산화탄소 발생량에 관한 기초 연구", 중앙대학교 대학원 석사학위논문
- Lee, H.S., 2001. "A Study on Energy Consumption and Amount of Carbon Dioxide in the Building Demolition Process", Masters's Degree Dissertation, Chung-ang University.
17. 심우갑·이정우·여상진, 2001. "국내 아파트 단지에 적용된 탑상형 주거동의 계획 특성에 관한 연구", 「대한건축학회지」, 17(10): 43-52
- Shim, W.G., Lee, J.W., Yeo, S.J., 2001. "A Study on the Planning Characteristics of ' Tower-type Block ' in Korean Apartment Housing Estates, Focused on Recent Cases", *Journal of Architectural Institute of Korea*, 17(10): 43-52.
18. 정영선, 2010. "주거건물의 전과정에 따른 이산화탄소 배출량 예측모델에 관한 연구", 서울시립대학교 대학원 박사학위논문.
- Jeong, Y.S., 2010. "A Study on Prediction Model of Carbon Dioxide Emission in Life Cycle for Residential Buildings", Ph.D. Dissertation, University of Seoul.
19. 천진수, 2010. "도시가스 사용량 분석을 통한 공동주택의 에너지 소비특성에 대한 연구", 경상대학교 대학원 박사학위논문.
- Cheon, J.S., 2010. "The Study of Energy Consumption Characteristic of Apartment Based on Analysis of City Gas Use", Ph.D. Dissertation, Gyeongsang National University.
20. 최두성·전홍찬·조균형, 2011. "공동주택 평면유형조합에 따른 시공단계 CO₂ 배출원단위 특징 분석", 「한국생활환경학회지」, 18(3): 330-337.
- Choi, D.S., Chun, H.C., Cho, K.H., 2011. "Analysis of the Characteristic for CO₂ Emission Intensity of the Plane Types in Apartments", *J. Korean Soc. Living Environ. Sys.*, 18(3): 330-337.
21. 최영국·정진규·심우배·이문원·임은선·김명수·왕광익·서연미·박정은, 2008. 「기후변화에 대응한 지속가능한 국토관리 전략(Ⅰ)-지역별 온실가스 인벤토리 구축 및 지역특성 분석」, 경기: 국토연구원.
- Choi, Y.K., Chung, J.K., Sim, O.B., Lee, M.W., Im, E.S., Kim, M.S., Wang, K.I., Seo, Y.M., Park, J.E., 2008. *Climate Change and Sustainable Land Management Strategies in Korea*, Gyeonggi: Korea Research Institute For Human Settlements.
22. 환경부, 2011. 「제2차 건설폐기물 재활용 기본계획 수립을 위한 연구」, 서울.
- Ministry of Environment, 2011. *The Second Study for Master Planning for Construction Waste Recycle*, Seoul.
23. K. Adalberth, 1997. "Energy use during the Life Cycle of Single-Unit Dwellings: Examples", *Building and Environment*, 32(4): 321-329.
24. Archer, David and Rahmstorf, Stefan, 2009. *The Climate Crisis: An Introductory Guide to Climate Change*, U.K.: Cambridge University Press.
25. Gian Andrea, Blengini, 2009. "Life Cycle of Building, Demolition and Recycling Potential: A Case Study in Turin, Italy", *Building and Environment*, 44: 319-330.
26. ISO 14040, 1997. *Environmental Management-Life cycle Assessment-Principle and Framework*, Switzerland.

27. ISO 14044, 2006. *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines*, Switzerland.
28. Mohamad Monkiz Khasreen, Phillip F.G. Banfill, and Gillian F.Menzies, 2009. "Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review", *Sustainability*, 1(3): 674-701.
29. Norman, J., MacLean, H., and Kennedy, C., 2006. "Comparing High and Low Residential Density: Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions", *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1): 10-21.
30. Oscar Ortiz, Francesc Castells, and Guido Sonnemann, 2009. "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA", *Construction and Building Materials*, 23(1): 28-39.
31. Seo, S.W. and Hwang, Y.W., 2001. "Estimation of CO₂ Emission in Life Cycle of Residential Buildings", *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(5): 414-418.
32. Tae, S.H., Shin, S.W., Woo J.H. and Roh, S.J., 2011. "The Development of Apartment House Life Cycle CO₂ Simple Assessment System Using Standard Apartment Houses of South Korea", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 1454-1467.
33. <http://www.edp.or.kr>
34. <http://www.kosis.kr>
35. <http://www.kpx.or.kr>

Date Received 2014-06-20
 Reviewed(1st) 2014-07-30
 Date Revised 2014-11-04
 Reviewed(2nd) 2014-11-10
 Date Accepted 2014-12-15
 Final Received 2015-03-10