KJCEM 15. 1. 087~100
January 31, 2014

www.kicem.or.kr (pISSN 2005-6095)
http://dx.doi.org/10.6106/KJCEM.2014.15.1.087

공동주택 재건축과 리모델링의 친환경성 비교분석
- CO_2 배출량 분석을 중심으로 -

김치백[1] · 신동우* · 한주연[2] · 황영규[3]
[1]아주대학교 건축공학과 · [2]단국대학교 건축공학과 · [2]경기과학기술대학교 건축인테리어과

Comparison Analysis of Environmental Performance between Reconstruction and Remodeling Alternatives for Aged
- Focused on CO_2 Emissions Analysis -

Kim, Chibaek[1], Shin, Dongwoo*, Han, Juyeon[2], Hwang, Youngkyu[3]
[1]Department of Architectural Engineering, Ajou University
[2]Department of Architectural Engineering, Dankook University
[3]Department of Architectural and Interior Design, Kyeonggi College of Science and Technology

Abstract : Environmental problems and the shortage of natural resources are currently gathering more attention in Korea and international countries. With these problems, it is reported that most current domestic buildings are emitting approximately 138 million tons of greenhouse gas. According to a recent report from the investigation of Korean housing population, the total number of households is approximately 12.9 millions, and the apartments that were built more than 15 years ago amounted to 3.1 millions. This shows that the rates of old apartment housings are increasing. Therefore, it is necessary to consider the deteriorated facilities and environmental improvement. Also, the construction industry is benefited by improving these housings which may need either remodeling or reconstruction. Environmental friendly buildings are a rising consideration for remodeling and reconstruction projects; it helps to determine many business matters in construction. The main purpose of this research is to improve environmental condition in apartments with comparison analysis between remodeling and reconstruction alternatives. This research is focused on characteristics of remodeling and reconstruction and it sets up the same condition with each level in order to evaluate the value of environmental friendliness and analyze its definition. The result of this research provides a unique emitting rate at a novel framework and this will cause the reduction of CO_2. It is analyzed that the remodeling construction can reduce the great amount of CO_2. Therefore, it will be a good decision guideline in selecting the most eco-friendly alternative to improve environment for building construction. Although reconstruction is a popular alternative nowadays in Korea, this research can provide a reason why decision makers should put more emphasis on remodeling as an environment-friendly alternative.

Keyword : Remodeling, Reconstruction, Life Cycle Assessment, CO_2 Reduction, Aged-Apartment Construction

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 국내외적으로 환경문제와 자원고갈에 대한 관심이 높아지는 가운데, 온실가스로 인한 지구온난화에 대응하기 위하여 유엔환경개발(UNCE)에서 기후변화협약(UNFCCC)을 채택하고, 교토의정서를 발효하는 등 지구의 환경부하를 줄이기 위한 노력이 계속되고 있다.

국내 건물부문의 온실가스 배출 현황은 2007년 약 1억 3800만톤이고, 2020년 배출전망(BAU) 예측치는 약 1억 7900만톤으로 예측되고 있다(Table 1). 정부의 2020년 건물부문 절감목표는 약 4,800만톤으로 26.9%를 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 인구 주택 총 조사 결과에 따르면, 국내 총 가구수는 13,883,571가구이고, 그 중 15년 이상 경과된 아파트는 약 310만호(2011년 기준)에 달하고 있다. 이는 노후화 공동주택이 지속적으로 발생하고, 노후화된 설비나 환경개선에 대한 고려가 필요함을 의미한다.

Table 1. National Greenhouse Gas Reduction Target in Korea

(Unit: Million Ton, Approximate Value)

Greenhouse Gas Emission Current Status and Predicted Value (Building Sector)		Reduction Target	
Year 2007	Year 2020년(BAU)		
138	179	48 (26.9%)	
		Household	23.6
		Industrial	24.4

* Corresponding author: Shin, Dongwoo, Department of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea, E-mail: dshin@ajou.ac.kr
Received April 23, 2012: revised March 15, 2013
accepted December 2, 2013

노후화된 공동주택의 개선방법은 크게 재건축과 리모델링 사업이 고려되는데, 온실가스 문제와 함께 친환경성 평가의 중요성이 대두되고, 사업수행시 사업결정의 주요 지표 중 하나로 자리잡고 있다. 본 논문의 목적은 공동주택 주거환경 개선을 위한 두 가지 대안이라고 볼 수 있는 재건축과 리모델링의 친환경성을 비교분석해 보는 것이다. 이를 위하여 재건축과 리모델링사업의 특성을 파악하고, 친환경성 비교를 위해 단계별로 동일한 조건을 설정하여, 전생애주기 친환경성 평가와 그 의미를 해석해 보고자한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 초기 노후화된 공동주택에 대한 개선방안인 재건축과 리모델링을 환경부하(CO_2)측면에서 비교평가를 수행하는 것을 목적으로 하였다. 연구의 범위는 재건축과 리모델링을 각 철거단계, 시공단계, 사용/유지보수단계로 구분하고, 친환경성 평가를 위한 대상건축물을 선정하였다. 대상건축물에 대한 재건축과 리모델링 대안을 대안A(재건축), 대안 B(리모델링1), 대안C(리모델링2)로 설정하고, 친환경성 분석을 위한 기본가정(사업수행시기, 분석기간, 운영기간)을 수립하였다. 다음으로 설정된 대안의 각 단계별(해체/철거, 시공, 운영단계) 데이터 수집방법을 제시하고, 탄소배출량을 측정하여 대안별 친환경성을 분석하고 해석을 실시하였다. (Fig. 1)

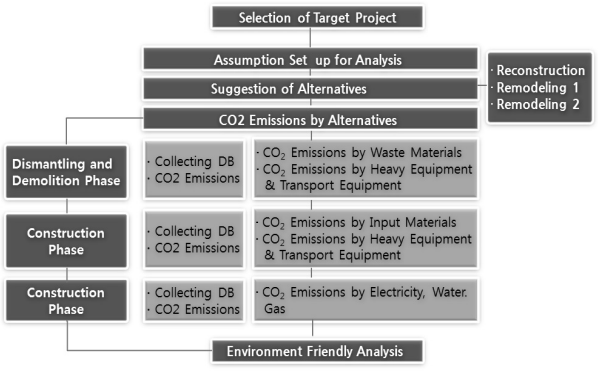


Fig. 1. Research Scope and Methodology

2. 이론적 고찰

2.1 친환경성 평가에 관한 이론적 고찰

건축물의 생애주기 동안 온실가스나 유해물질 등에 대한 발생량을 산정하여 건축물의 환경영향 평가기준으로 사용할 수 있다. 지구 환경에 악영향을 끼치 는 온실가스는 CO_2, CFCs, CH_4 , N_2 O 등이 있다. IPCC(1995)의 "온실가스의 주요 배출원과 온난화 기여도" 자료에 따르면 이 중 CO_2의 배출량이 차지하는 비율이 65%로 가장 크고, 주요 배출 원인으로는 에너지 사용, 산림벌채 등으로 나타났다. 따라서 온실가스 중 CO_2 배출량을 정량적으로 분석하여야 하며, 이러한 온실가스 배출량을 정량화하여 분석하고 평가하는 방법으로 LCA(Life-Cycle Assessment)를 사용한다. 여기서 LCA란 건축물의 라이프 사 이클에 걸쳐 발생되는 투입물과 산출물을 작성하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 종합적으로 평가하는 방법이다.

LCA 평가방법은 다음과 같은 4단계의 분석과정을 거친다. 1단계는 LCA 목적 및 범위 정의 단계, 2단계는 LCI(Life-Cycle Inventory analysis) 전과정 목록분석 단계이다. 3단계는 LCIA(Life-Cycle Impact assessment) 전과정 영향평가 단계이며, 마지막으로 4단계는 Life-Cycle interpretation는 전과정 해석단계이다. 이 중 2단계 LCI(Life-Cycle Inventory analysis)는 전과정 목록분석 단계로써 특정 제품의 전과정에 걸쳐 발생하는 투입물과 산출물을 종합하여 정량화하는 단계이다. 이 단계에서 사용되는 기법으로 직접조사법과 산업연관분석법 그리고 혼합법이 있다. 수많은 자재로 이루어지는 건축산업의 특성상 건축물의 라이프사이클에서 투입되는 자재 등의 원료채굴, 가공, 생산 등의 전과정을 현장에서 직접 조사하는 직접조사법은 시간과 비용적인 측면에서 적합하지않다. 산업연관분석법은 산업연관분석표를 사용하여 산업 간의 상호관계를 정량적으로 파악하는 방법으로써 산업연관표는 거래관계를 화폐가치 단위로 기술하지만, 이 금액의 흐름과 함께 물자가 이동한다고 가정할 때 산업 간에 흐르는 에너지나 자원의 흐름을 분석할 수 있어 환경분석으로 응용이 가능하다.

즉, 산업연간분석표의 형식을 확장하여 산업간 만이 아닌 자연환경에서 산업으로의 투입(자원채취)이나 산업으로부터 자연환경으로의 산출(폐기물, 오염물질 배출)까지 포함한 물량 단위의 투입산출표를 작성하면 환경문제에서의 응용이 가능하다는 개념이다.(허탁 1996)

2.2 선행연구

다음 Table 2는 공동주택의 친환경성 평가에 관하여 현재까지 진행된 선행연구를 요약한 것이다. 기존 친환경성평가 분석에 관한 연구들을 살펴보면 주로 공동주택 생애기간의 특정 단계를 분석하거나, 전생애주기를 분석을 하기 위한 개념 및 모델 수립에 관한 연구가 진행되었다. 그러나 재건축과 리모델링의 전생애주기 관점에서 친환경성 분석에 대한 연구는 부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 재건축과 리모델링의 친환경성 평가를 위하여 비교 조건을 설정하고, 각 단계별 이산화탄소 배출량을 실 사례를 중심으로 특정단계의 친환경성분석이 아닌 전생애주기의 친환경성 분석을 실시하여 노후공동주택개선 사업추진시 재건축과 리모델링의 친환경성 평가가 가능하도록 하였다.

Table 2. List of Previous Research on Environmental Performance Evaluation

Author	Research Contents	Source
Kim, Y. M. et al. (2010)	$LCCO_2$ Comparison Analysis between Existing Design Criteria-based Apartment and Low-energy Apartment	Journal of Facilities Engineering in Korea, Vol. 22, no. 4
Lee, K. H. (2003)	Comparison Analysis on Environmental Impact and Energy Consumption of Reconstruction and Remodeling for Aged-Apartment Construction	Journal of Korean Institute of Housing Vol. 14, No. 5.
Lee, K. H. (2008)	Prediction of Life Cycle Energy and CO_2 emission for Apartment Construction	Journal of Korean Institute of Housing, Vo. 18, no. 8.
Lee, J. H. et. al. (2002)	Environmental/Economical Evaluation Model of Reconstruction and Remodeling for Apartment Construction	Conference Proceedings of Korean Institute of Construction Engineering and Management

3. 친환경성 평가 조건 설정

친환경성 평가를 위해 공동주택의 분석기간 산정과 재건축 및 리모델링 시점, 부분수선, 대수선 등의 시점의 표준화가 필요하다. 왜냐하면 재건축과 리모델링별, 단지별 특성 등 여러가지 변수 요인으로 인하여 비교평가가 어렵기 때문이다. 따라서 본 장에서는 재건축과 리모델링 대상 건축물의 분석기간, 재건축 및 리모델링 시점 등을 표준화하여 친환경성 평가가 가능한 평가 방법을 개발하고, 사례를 선정하여 적용하고자 한다.

3.1 재건축 및 리모델링의 친환경성 평가항목 비교

재건축과 리모델링공사에 발생하는 환경부하를 효과적으로 분석하기 위해서는 먼저 공동주택의 특성을 반영할 수 있도록 단계별 분류를 한다. 재건축과 리모델링 공사의 단계별 구성 항목을 비교해 보면 다소 차이가 있다.

해체철거 단계의 재건축은 전면철거로 인해 폐콘크리트, 폐목재류, 폐철근류, 폐토사 등으로 인한 다량의 CO_2발생이 예측된다. 리모델링의 경우 부분철거로 인해 구조체에 해당하는 폐콘크리트, 폐철근류의 발생이 소량에 그칠것이라 예측된다. 반면 구조체를 제외한 내외부 수장재 및 마감재 폐기물로 인한 CO_2발생은 재건축과 리모델링이 유사하거나 같다고 할 수 있다.

시공단계에서 재건축은 전면철거로 구조체 보수/보강이 없으며, 리모델링의 경우 구조체 보강 또는 구조의 변경으로 콘크리트 및 철근 등의 물량 투입으로 인한 CO_2가 발생하게 된다. 또한 재건축의 골조공사에서는 콘크리트, 철근, 거푸집등의 물량 투입으로 인하여 다량의 CO_2가 발생되며, 리모델링의 경우 기존구조를 변경하지 않는다면 구조체 보강으로 대체하여 CO_2가 발생하지 않으며, 증축(수평, 수직)을 한다면 그 부분에 대한 CO_2가 발생하게 된다. 마감공사의 경우 재건축과 리모델링 두 공사 모두 전면 마감공사를 실시하므로 발생하는 CO_2의 양이 같거나 유사하다고 예측된다. 운영단계는 재건축과 리모델링의 성능이 같다고 가정하였을 때 발생하는 CO_2는 유사할 것으로 예측된다. 위에서 분석한 재건축과 리모델링의 환경부하 주요 항목을 비교하면 Table 3와 같다.

Table 3. Comparison Analysis on Environmental Load between Reconstruction and Remodeling Projects

Item	Sub-Item	Reconstruction	Load*	Remodeling
Demolision	-	Overall Demolition	>>	Partial Demolition (Incl. Interior Finish Materials)
Construction	Structural Reinforcement	No reinforcement needed	<	CO_2 Emission for Reinforcement
	Structural Work	Huge amount of CO_2 Emission	>>	Few amount of CO_2 Emission (It may vary when vertical/horizontal Expansion required.)
	Finish Work	Overall Finish Work	≒	Overall Finish Work
Operations	Heating/Cooling	Similar Operation Period and Energy Consumption	≒	Similar Operation Period and Energy Consumption
	Electricity		≒	
	Water Supply		≒	
	Repair	Similar Repair Scope	≒	Similar Repair Scope

* >> Large Difference , > Small Difference ≒ Same or Simiiar

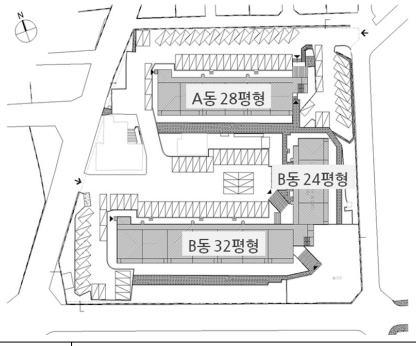
따라서 본 논문에서는 재건축과 리모델링사업 수행시 전생애주기 동안 발생하는 CO_2를 비교하기 위하여 대상건축물을 선정하고, 대상건축물의 해체철거 단계 및 시공단계의 구조체 보수/보강, 골조공사 공사를 중심으로 분석을 수행하고, 추가적으로 운영단계분석을 통하여 전생애주기 CO_2 배출량 측정을 통한 분석을 실시하였다.

3.2 공동주택 대상 프로젝트의 선정 및 개요

재건축과 리모델링의 친환경성 비교 분석을 수행하기 위한 대상 건축물은 서울 강동구 둔촌동에 소재한 '둔촌동 아파트'로 선정하였다. 1988년 1월에 준공된 소규모 공동주택으로 노후화가 상당히 진행되었으며, 입주민들이 적극적인 관심과 참여로 재건축 또는 리모델링을 추진하고 있다. 따라서 본 논문에서는 대상 건축물을 대상으로 재건축 및 리모델링 대안을 제시하여 친환경성 평가를 실시하고자 한다. Table 4는 서울 둔촌동 H아파트 단지현황을 나타낸 것이다. 대지면적은 7,909m^2이고, 2개동 196세대로 구성되어있다. A

동은 28평형 72세대(6세대×12층)이며, B동은 24평형 40세대(4세대×10층)와 32평형 84세대(7세대×12층)으로 구성되어있다. 용적률은 226.52%이며, 구조형식은 철근콘크리트 벽식라멘 구조이다.

Table 4. Overview of H Apartment (Case Project)



Location	Doon-Cheon Dong, Gang-Dong Gu, Seoul
Project Area	7,909.00m²(2,392.47 PY)
Project Size	2 Buildings (10 and 12 Floors), 196 Units
Floor Type	79.3m2(24PY) 92.6m2(28PY), 105.8m2(32PY)
Gross Area Ratio	226.52%
Structural Type	RC Concrete-Wall Type Ramen Structure
Parking Space	81 cars (0.41car/unit)

3.3 재건축과 리모델링 대안의 설정

대안의 설정은 기본적으로 재건축 대안과 리모델링 대안 두가지로 설정하였으며, 대안에 대한 주요내용은 Fig 2와 같다. 추가적으로 현행 법규에서는 어렵지만 리모델링 규제완화 논의가 있으므로 리모델링의 환경부하 검토를 위하여 대안C(리모델링2)를 분석하였다.

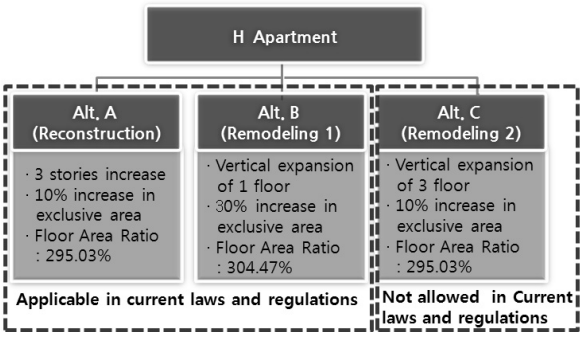


Fig. 2. Reconstruction and Remodeling Alternatives for Environmental Performance Evaluation

Table 5는 기존단지에 재건축/리모델링 대안설정을 요약한 것이고, 대안A(재건축)을 살펴보면 15층 2개동으로 신축하여, 196세대에서 230세대로 34세대가 증가하였고, 용적률은 295.03% (법정상한선 300%)을 적용하였다. 대안 B(리모델링1)의 경우 기존아파트와 세대수는 동일하게 적용하고 1층 필로티를 신설하여 상부 1개층을 증축하였다. 또한 수평증축을 통해 전용면적이 30% 증가하였다. 대안C(리모델링2)의 경우 현행법규내에서 불가능한 3개층 수직 증축하여 196세대를 230세대로 증가하였으며 전용면적은 10%증가하였다. 대한건축학회 연구결과 에 따르면 리모델링의 3개층 수직증축은 안정성에 문제가 없다는 것이고, 또한 수직증측 허용시 가구당 분담금 감소의 효과를 가져오기 때문에 법규 완화시 대안C(리모델링2) 채택이 유력하다.

Table 5. Reconstruction/Remodeling Alternatives

Item	Existing Apartment	Alt. A Reconstruction	Alt. B Remodeling 1	Alt. C Remodeling 2
Unit	196	230	196	230
Building	2	2	2	2
Floor	12	15	13 (1F-Piloti)	15층
Gross Area	17,915.0 m²	23,499.6 m²	24,464.1 m²	23,499.6 m²
Gross Area Ratio	226.52%	295.03%	304.47%	295.03%
Building Type	Corridor	Stair	Stair	Stair
Plan Expansion	-	10%	30%	10%
Vertical Expansion	-	3 floor level expansion	1 floor level expansion	3 floor level expansion
Regulations	-	Applicable	Applicable	Not allowed to vertically expand 3 floor levels

* Note: Daylight, zoning restrictions are not applied.

3.4 각 단계별 원단위 DB 적용

건축물의 LCA를 평가하기 위해서는 개별적산법과 산업연관분석법이 있다. 개별적산법은 제품의 설계도서과 견적서 등의 제조공정, 소재등으로 구분하여 각각의 제품이 제조되어 폐기되는지 제품마다 조사하여 에너지 소비량과 이산화탄소 발생량을 파악한다.

또 다른 방식으로는 산업연관방식이 있다. 산업연관방식은 한 나라의 각 산업에서 생산된 재화 및 서비스가 다른 산업을 위한 원재료로 투입됨으로써 산업들이 직간접적으로 연관관계를 맺고 있다. 이러한 산업간의 상호 연관관계를 수량적으로 파악하고 분석하는 방법이 산업연관분석법이다. 본 연구에서는 건축자재와 재료부문은 산업연관분석법을 기반으로 원단위 DB를 적용하였고, 운영단계에서의 원단위 DB는 환경부에서 제시한 에너지원별 DB를 적용하였다.(Table 6) 또한 CO_2원단위 DB를 적용하는데 있어서 kg-CO_2/단위 방식과 kg-CO_2/백만원 방식이 있다. kg-CO_2 방식의 경우 내역서의 단위와 원단위 DB의 단위가 일치하지 않는 경우가 발생하여, 본 연구에서는 kg-CO_2/백만원 방식을 적용하였다.

Table 6. Won-Unit DB Application by Construction Phase

Phase	Classification	Contents	Source
Demolition	Waste Materials	CO_2 Emissions by Materials	Korea Institute of Construction Technology
	Heavy Equipment	CO_2 Emissions by Heavy Equipment	Korea Institute of Construction Technology
	Transport Equipment	CO_2 Emissions by Transport Equipment	Kim et al.
Construction	Input Materials	CO_2 Emissions by Materials	Korea Institute of Construction Technology
	Construction Equipment	Construction Equipment Energy Consumption, CO_2 Emissions by Construction Equipment	Korea Institute of Construction Technology, Ministry of Environment
	Transport Equipment	CO_2 Emissions by Transport Equipment	Tea et al.
Operation	Electricity, Gas, Water	CO_2 Emissions by Energy	Ministry of Environment

4. 친환경성 평가 방법 구축

4.1 해체철거단계

4.1.1 해체철거단계 데이터 수집

해체 철거단계에서 발생하는 주요 폐기물은 Table 7과 같이 폐콘크리트, 폐금속, 폐벽돌, 폐타일, 폐합성수지, 폐유리 등이며, 리모델링에서는 그 특성상 폐콘크리트와 폐금속의 발생이 적다.

Table 7. Wastes Generated by Dismantling and Demolition

Phase	Material	Reconstruction	Remodeling
Dismantling and Demolition	Waste Concrete	High	Low*
	Waste Metal	High	Low*
	Waste Bricks	High	High
	Waste Tiles	High	High
	Waste Plastics	High	High
	Waste Glass	High	High

하지만 발생하는 폐기물이 모두 순수 폐기되는 것이 아니므로, 폐기물 종류에 따른 재사용 및 재생이 가능한 폐기물을 제외하여 CO_2 평가를 실시하였다. 폐기물 종류에 따른 재사용 및 재생 비율에 대한 환경부의 조사보고서에 의하면 콘크리트의 경우 재생비율이 99.9%로서 거의 손실이 없고, 폐금속은 재생비율이 96%로, 손실은 4%에 불과한 것으로 조사되었다.(Table 8) 이를 적용하여 해체철거단계에서 발생하는 폐기물을 측정하고 재활용되지 않는 폐기물에 대한 CO_2배출량을 측정할 수 있을 것이다.

Table 8. Recycling Rate by Waste Type

Type	Generation rate	Recycling rate	Unrecyclable rate
Waste Concrete	100	99.9%	0.1%
Waste Metal	100	96.0%	4.0%

4.1.2 해체철거단계 탄소배출량 산정

(1) 해체철거 단계에서의 CO_2 발생량 측정 방법(자재)

해체철거단계에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 각 폐기물의 발생량에 재활용 불가능한 비율을 곱하고, 거기에 각 자재별 CO_2배출계수를 곱하여 산출한다. 산식은 Formula 1과 같다.

$$CO_2\ Emissions = \Sigma(Wi \times Di \times COi) \quad \text{— (1)}$$

Wi : Amount of each waste
Di : Ratio of material that cannot be recyled or reused
COi : CO_2 emissions coefficient for each material

일반적으로 폐기물 전체물량에 대해서 CO_2발생량을 측정하고 있지만, 폐기물 중 재활용/재사용이 불가능한 폐기물량을 측정한다. 재활용 또는 재사용이 가능한 폐기물은 환경부하로 볼 수 없으므로 본 논문에서는 발생폐기물량에서 재활용/재사용 가능한 물량을 제외한 나머지 물량에 대해서 CO_2 발생을 측정하였다.

(2) 해체철거 단계에서의 CO_2 발생량 측정 방법(철거장비 및 운송장비)

철거단계에서는 자재 뿐만 아니라 철거작업 수행을 위한 각종 장비의 사용으로 CO_2가 발생한다. 이를 측정하기 위하여, 첫째 철거시 발생하는 각 폐기물의 발생량을 파악하고, 둘째 파악된 폐기물을 처리하기 위한 장비(중장비/장비/운송장비)의 소요 에너지/소요 유류량을 파악하며, 셋째 파악된 소요 에너지/소요 유류량을 CO_2량으로 환산하여 철거단계 장비의 환경부하를 측정한다. 해체 철거단계 사용되는 장비에서의 이산화탄소 배출량을 계산하기 위한 산식은 Formula 2와 같다.

$$CO_2\ Emissions = \Sigma(Wi \times Ei \times Ti) \quad \text{— (2)}$$

Wi : Amount of each waste
Ei : Energy or fuel requirement of heavy equipment for disposal of waste\
Ti : Coefficient for conversion of energy or fuel requirement into CO_2

4.2 시공단계

4.2.1 시공 단계 데이터 수집

시공단계에서는 탄소배출을 수반하는 다종 다양한 작업들이 이루어지므로 그 작업들로부터 탄소배출량을 산정하기 위한 데이터 수집이 요구된다. 시공단계에서 수집할 수 있는 자료는 설계내역서, 일위대가표, 자재 및 에너지별 온실가스 배출 원단위 등이 있으며, 해당 자료를 이용하여 공종별 투입자재량과 장비사용량을 산정한다.

4.2.2 시공단계 탄소배출량 산정

(1) 시공단계에서의 CO_2발생량 측정방법(자재)

시공단계에서 자재에 대한 탄소배출량은 투입되는 자재량에 각 자재별 CO_2원단위 배출계수를 곱하고, 거기에 각 자재별 산업연간분석법에서 제시한 단위 변환을 위한 계수를 곱하여 산출한다. 시공단계에서의 투입되는 자재의 CO_2발

생량 측정산식은 Formula 3과 같다.

CO_2 Emissions = Σ(Wi× COi× Ri) —— (3)

Wi : Amount of input material
COi : Unit CO_2 emissions coefficient by material
: Coefficient for each material
Ri (Conversion for material Unit conversions coefficient suggested in the inter-industry analysis method)

자재별 계수(Ri)를 적용하는 것은, 가령 목재가 원단위 CO_2배출계수가 kg으로 되어 있고, 설계내역서상 m로 되어 있는 경우에는 목재의 폭, 높이, 길이(m)를 곱하여 부피(m^3)로 산정하고, 목재의 비중 kg/m^3을 곱하여 kg으로 변환하여 원단위 CO_2배출계수를 적용하는 경우와 같이 데이터의 단위와 배출계수의 단위가 일치하지 않을 때 이를 보정하기 위하여 사용된다.

1) 운송장비

운송장비로 인하여 발생되는 CO_2를 측정하는 방법은 투입되는 자재량에 그자재를 운송하는데 소요되는 운송장비의 대수를 곱하고, 운송장비의 거리당 CO_2발생량에 운송거리를 곱하여 Formula 4와 같이 산출한다.

CO_2 Emissions = Σ(Wi× Ni× Mi×COi) —— (4)

Wi : Amount of input material
Ni : Number of equipment for transport of materials
= Total waste amount/Vehicle loading capacity
Mi : Material transport distance
COi : Unit CO_2 emissions coefficient per distance unit

2) 작업장비

작업장비의 CO_2배출량을 측정하기 위해서는 공사에 투입된 장비의 종류, 유류, 전기량과 사용시간을 파악하여 산정하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 실제 공사에 투입되는 장비에 대한 유류 및 전기사량용량에 대한 정보를 구하기는 매우 어려우므로 그 대안으로 한국건설기술연구원에서 제공한 건설장비사용에 에너지소비량 원단위를 이용하였다. 작업장비의 CO_2배출량은 에너지소비량에 따른 CO_2 배출계수를 곱하여 Formula 5와 같이 산출한다.

CO_2 Emissions = ECA× COi —— (5)

ECA= 0.0017 × Af+37.5
ECA : Energy consumption by process in the construction phase
Af : Gross floor area of the building [m^2]
COi : Unit CO_2 emissions coefficient according to energy consumption

4.3 운영단계

리모델링의 경우도 설비시설이 전면적으로 교체되고, 단열부분이 보강되므로 에너지성능의 유의미한 차이는 없다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 운영단계에서 배출되는 CO_2배출량은 동일하다고 가정하였다. 하지만 운영단계를 포함함으로써 재건축과 리모델링의 전생애주기의 친환경성 평가를 수행하고자 한다.

4.3.1 운영단계 데이터 수집

운영단계에서는 전력, 가스, 수도 사용량을 산출하여 탄소배출량을 측정한다. 이를 위하여 공동주택관리정보시스템을 활용하여 수집한다. 국토해양부가 구축한 공동주택관리정보시스템(www.k-apt.net)은 주택법 45조제3항 및 주택법시행령 제58조제8항의 규정에 의하여 공동주택의 관리주체는 반드시 공개하게 되어 있다. 따라서 분석대상이 되는 공동주택의 수도, 전력, 가스 사용량의 자료 수집이 용이하고, 자료의 신뢰성을 확보 할 수 있기 때문에 공동주택관리정보시스템 데이터를 적용하였다. 다만 공동주택관리정보시스템에서 집계가 잘 되지 않는 부분이 있다면 개별세대를 대상으로 자료를 수집하여 탄소배출량을 산정할 수도 있다.

4.3.2 운영단계 탄소배출량 산정

운용단계는 유틸리티(전기, 도시가스, 수도) 사용에 의한 탄소배출량으로 산정하고, 유지보수 공사가 이루어진 경우 시공단계 탄소배출량 산정과 동일한 방법으로 탄소배출량을 산정한다. 각 유틸리티 에너지원에 대한 이산화탄소 배출계수는 환경부 자료인 에너지원별 이산화탄소 배출계수를 적용한다. (Table 9)

Table 9. CO_2 Emissions Coefficient by Energy Source

Energy Source	Unit	CO_2 Emissions Coefficient
Electricity	$kgCO_2/kwh$	0.440
Water	$kgCO_2/m^3$	0.587
Gas	$kgCO_2/m^3$	2.347
LP Gas	$kgCO_2/m^3$	6.600
Gasoline	$kgCO_2/l$	2,347
Diesel	$kgCO_2/l$	2.640
Kerosene	$kgCO_2/l$	2.530

전력 사용에 따른 이산화탄소배출량은 전력사용량에 전기에 대한 CO_2배출계수를 곱하여 Formula 6과 같이 산출한다.

CO_2 Emissions = Σ(Wi× COi) —— (6)

Wi : Electricity Consumption (kWh)
COi : CO_2 emissions coefficient for electricity consumption ($kgCO_2/kWh$)

도시가스 사용에 따른 이산화탄소배출량은 전기와 마찬가지로 도시가스 사용량(m^3)에 도시가스의 CO_2배출계수를 곱하여 Formula 7과 같이 산출한다.

CO_2 Emissions = Σ(Wi× COi) —— (7)

Wi : Gas Consumption (m^3)
COi : CO2 emissions coefficient for gas consumption ($kgCO2/m^3$)

수도사용에 따른 탄소배출량은 수도 사용량(m^3)에 수도사용량에 따른 배출계수를 곱하여 Formula 8과 같이 산출한다.

CO_2 Emissions = Σ(Wi × COi) —— (9)

Wi : Water Consumption(m^3)
COi : CO_2 emissions coefficient for water consumption ($kgCO_2/m^3$)

5. 사례적용

5.1 대안별 친환경성 평가

5.1.1 해체철거단계

해체철거단계는 투입자재와 투입장비로 인한 CO_2배출량을 측정한다. 앞서 제시한 해체철거단계의 데이터 수집방법과 4.1.2의 CO_2배출량 산정 방법-식(1)을 이용하여 해체철거단계의 CO_2발생량을 측정한다. 또한 환산계수는 건설기술연구원의 계수를 적용하였다.

(1) 폐기물에 의한 CO_2 발생량

대안별 발생하는 폐기물 종류 및 CO_2량은 Table 10과 같다. 대안A(재건축)의 경우 전면철거로 인하여 총 109.9ton-CO_2가 발생하였다. 폐콘크리트는 재활용 불가능한 비율이 워낙 낮아 CO_2발생이 미미하였고, 이는 대안(리모델링 1, 2)도 마찬가지이다. 결국 폐기물에 의한 CO_2 발생량은 폐철근에 좌우된다. 대안 B(리모델링1) 경우 전용면적 30%증가에 따른 수평증축의 확장 접합부 철거 및 상부 1개층 증축에 따른 접합부 철거 등으로 인하여 약 21.3ton-CO_2가 발생하였다. 대안C(리모델링2)의 경우도 대안 B(리모델링1)과 유사하다. 다만 1층 필로티를 철거하지 않으므로 발생량은 다소 적은 것으로 나타났다.

Table 10. Waste and CO_2 Emissions by Alternative

Alt.	Material	Unit	Amount of Waste	Ratio Unrecyc-lable	Amount Unrecyc-lable	Emissions Coefficient (kg-CO_2 /Unit)	CO_2 Generation (ton -CO_2)
Reconstruction	Waste Concrete	m^3	7,268.7	0.1%	7.27	1053.10	0.3
	Waste Reinforcement bar	ton	851.9	4.0%	34.08	4045.76	109.6
	CO_2 emissions by wastes						109.9
Remodeling 1	Waste Concrete	m^3	1,406.7	0.1%	1.41	1053.10	0.1
	Waste Reinforcement bar	ton	165.1	4.0%	6.60	4045.76	21.2
	CO_2 emissions by wastes						21.3
Remodeling 2	Waste Concrete	m^3	1,125.5	0.1%	1.13	1053.10	0.1
	Waste Reinforcement bar	ton	131.7	4.0%	5.27	4045.76	16.9
	CO_2 emissions by wastes						17.0

(2) 투입장비로 인한 CO_2 발생량

위에서 산출한 폐기물량을 기초로 해당 작업을 수행하는데 소요되는 장비의 CO_2발생량은 4.1.2의 Formula 2에 따라 측정된다. 본 연구에서는 브레이카+백호우 1.0m^3, 크라샤+백호우 1.0m^3 장비를 사용하여 해체 철거시 발생하는 CO_2를 산출하였다. 해체단계에서 사용되는 장비의 종류와 작업량, 단위 연료소비량, CO_2 원단위는 Table 11과 같다.

해체철거작업은 바닥과 벽체 부위로 구분할 수 있고, 바닥 철거작업은 브레이카+백호우 장비조합으로, 벽체 철거작업은 크라샤+백호우 장비조합으로 설정하였다.

Table 11. Heavy Equipment Use and Workload in Dismantling and Demolition

Equipment	Specification	Workload (m^2/hr)	Energy Consumption (L/hr)	Unit CO_2 Emissions Coefficient (kg-CO_2/m^2)
Breaker + Back Hoe	0.12 m^3	92.3	2.40	0.0687
	0.20 m^3	153.8	3.80	0.0652
	0.40 m^3	307.7	9.00	0.0773
	0.70 m^3	538.4	10.50	0.0515
	1.0 m^3	769.2	17.70	0.0608
Crusher + Back Hoe	0.12 m^3	31.6	2.40	0.2007
	0.20 m^3	52.6	3.80	0.1907
	0.40 m^3	105.3	9.00	0.2258
	0.70 m^3	184.2	10.50	0.1505
	1.0 m^3	263.2	17.70	0.1776

Table 12는 해체철거시 철거 장비로 인한 CO_2발생 내역을 요약한 것이다. 대안A(재건축)은 전면철거로 인하여 작업면적도 크므로 약 3.6ton-CO_2를 배출하였다. 대안 B(리모델링1)은 약 0.9ton, 대안C(리모델링2)는 약 0.7ton 의 이산화탄소를 각 배출하였다. 구체적인 산출과정을 살펴보면, 가령 대안A(재건축)은 전면철거이므로 바닥 철거작업면적은 25,440.5m^2로 산정되고, 투입되는 장비인 브레이카와 백호우의 CO_2원단위인 0.0687(kg-CO_2/m^2)를 곱하면 1,747.7kg의 CO_2발생량이 산출된다. CO_2배출량이 큰 순서로 살펴보면, 대안A(재건축), 대안 B(리모델링1), 대안C(리모델링2)순이다. 철거 장비로 인한 CO_2배출량은 사용되는 작업장비의 종류와 규격과 작업조건, 작업면적(작업부위 포함) 등에 영향을 받으나, 본 논문에서는 동일한 장비규격(브레이카+백호우 1.0 m^3) 으로 설정하고, 작업조건을 고려하지 않았으므로 결국 작업면적과 CO_2발생량은 비례관계에 있다.

Table 12. CO_2 Emissions by Heavy Equipment Use in Dismantling and Demolition

Alt.	Equipment	Equipment Specification	Unit CO_2 Emissions Coefficient (kg-CO_2 /m^2)	Work Area (m^2)	Work Sections (Waste Generated)	CO_2 Emissions (ton-CO_2)
Reconstruction	Breaker + Back Hoe	1.0 m^3	0.0687	25,440.5	Floor (Concrete, Re-bar)	1.7
	Crusher + Back Hoe	1.0 m^3	0.1776	10,903.1	Walls (Concrete, Re-bar)	1.9
	CO_2 emissions by Heavy Equipment					3.6
Remodeling 1	Breaker + Back Hoe	1.0 m^3	0.0687	8,761.1	Floor (Concrete, Re-bar)	0.6
	Crusher + Back Hoe	1.0 m^3	0.1776	1,958.6	Walls (Concrete, Re-bar)	0.3
	CO_2 emissions by Heavy Equipment					0.9
Remodeling 2	Breaker + Back Hoe	1.0 m^3	0.0687	7,193.6	Floor (Concrete, Re-bar)	0.5
	Crusher + Back Hoe	1.0 m^3	0.1776	1,217.9	Walls (Concrete, Re-bar)	0.2
	CO_2 emissions by Heavy Equipment					0.7

(3) 운송장비 CO_2 발생량

해체철거시 발생된 폐기물을 처리장까지 운반하는데 필요한 운송장비가 발생시키는 CO_2발생량은 Formula 2가 사용되어 측정되며 그 결과는 Table 13과 같다. 운송장비는 각 대안 동일하게 11톤 트럭으로 설정하여, Table 10의 폐기물량을 운송하였을 때 사용되는 총 대수를 산정하였다. 11톤 트럭 사용시 적용된 원단위 DB는 철근 콘크리트 건축물의 LCA 평가에 관한 기초적 연구(김태영외 1명,2009)의 운송장비별 에너지소비량 및 CO_2 발생량을 적용하였다. 가령 대안A(재건축)의 해체철거로 발생된 폐콘크리트 7,268.7m^3은 무게(ton)로 환산하면 15,991.1ton이 되고, 11톤 트럭으로 운송하기 위하여는 총 1,454대수로 산출된다. 그리고 11톤 트럭이 중간처리장(30km기준)까지 수송하였을 때의 CO_2발생량인 20.79kg-CO_2/대 를 1,454대에 곱하여 전체 CO_2발생량 30.2ton (30,228.6kg-CO_2)를 산출하였다. 같은 방법으로 대안별 운송장비로 인한 CO_2 발생량은 대안A(재건축)은 31.8 ton-CO_2로 대안중 가장 큰 이산화탄소 배출량을 나타냈고, 대안 B(리모델링1) 6.20ton-CO_2, 대안C(리모델링2) 4.95ton-CO_2로 나타났다. 운송장비로 인한 CO_2 발생량 산식은 폐기물 총량에 비례하므로 위 결과는 당연하다.

Table 13. CO_2 Emissions by Waste Transport in the Dismantling and Demolition

Alt.	Material	Unit	Quantity	Volume (m^3)	Specific Weight	Weight (ton)	Equipment	No. Units	CO_2 Emissions (ton-CO_2)
Reconstruction	Waste Concrete	m^3	7,268	7,268.7	2.2	15,991	11-ton truck	1,454	30.2
	Waste re-bar	ton	851	-	-	851.9	11-ton truck	77	1.6
	CO_2 emissions by Waste Transport								31.8
Remodeling 1	Waste Concrete	m^3	1,406	-	2.2	3,094	11-ton truck	282	5.86
	Waste re-bar	ton	165	-	0	165	11-ton truck	16	0.33
	CO_2 emissions by Waste Transport								6.20
Remodeling 2	Waste Concrete	m^3	1,125	-	2.2	2,476	11-ton truck	226	4.70
	Waste re-bar	ton	131	-	0	131	11-ton truck	12	0.25
	CO_2 emissions by Waste Transport								4.95

5.1.2 시공단계

시공단계에서의 CO_2가 발생은 크게 투입되는 자재와 시공과정에 사용되는 건설장비에 의한 것이므로 이를 산출한다. 투입자재의 경우에는 생산단계로 분류하여 CO_2가 발생량을 산출할 수 있으나, 본 논문에서는 공동주택의 Life Cycle을 해체철거단계, 시공단계, 운영단계로 분류하여 생산단계를 시공단계에 포함시켜 CO_2발생량을 산출하였다.

(1) 투입물량 CO_2 발생량

투입자재의 CO_2 발생량을 파악하기 위하여 우선 설계내역서를 기초로 투입자재를 산출한 후 건설자재 원단위 DB 부문명칭으로 분류한 결과 34종으로 나타났으며, 그 자세한 분류내역은 Table 14와 같다.

Table 14. DB of Input Materials

Materials	Items
Wood	Cutting wood
Iron Door	Fire door
Hardware	Hinge , Door lock, Door check, Roof drain , Finish hardware, Pivot hinge , Trench
Masonry	Stone tiles, Marble, Terrazzo, Fire step
Ready-mixed concrete	Concrete, Lightweight aerated concrete, Plain concrete
Door, Window, Frame	Wood window,
Brick	Brick
Cement	Mortar, Resins plaster, Liquid water-proofing cement
Block	Concrete lintel
Plaster board	Gypsum panel
water paint	Vinyl paint , Eco-friendly paint
Styrofoam	Polystyrene foam , Insulation, Buffer material
Silicone resins.	Caulking., Stone caulking. shower booth sill
Acrylic paint	Acrylic paints , Preventing condensation paint , Rust-resistant paint
Aluminum sash	Aluminum sash
Aluminum plate	Aluminum ceiling finish AL molding
Epoxy resin	Liquid-applied membrane waterproofing, Polymer waterproofing
Hot rolled steel	Stainless down pipe rain leader
Glass	Clear glass, Pair glass
Reinforcement bar	Steel bar
Wallpaper	Silk wallpaper
Wire mesh	Wire mesh
Tile	Porcelain tile, Porcelain tile, Stone tile
Drywall	Plaster board
Board	Baseboard, Door stud, 반자돌림, Access hole, Curtain box, Plywood floor
Polyvinyl chloride.	PVC window
Ppolyurethane resin	Urethane foam filling
Plastics bar	Segregation
Plastics sash bar	Thermohardening resin
Plastics pipe	Balcony drain ,PVC down pipe rainleader
Section steel	Lightweight steel ceiling frame
Granite	Granite capping stone, Molding stone
Talcum powder	Stone spray coat

시공단계 투입자재에 의한 인한 CO_2발생량 산정은 4.2.2의 Formula 3에 따른다. 설계내역서의 건축공사 공종분류시스템(WBS)에 따라 각 공종에 투입되는 자재로 인한 CO_2 발생량과 구성비를 산출하고, 각 대안별로 요약 정리하면 Table 15와 같다. 대안 B(리모델링1)과 대안C(리모델링2)는 수장공사가 25%의 발생비율을 보이고, 다음으로 철근콘크리트공사, 미장공사의 순으로 CO_2발생비율이 높다.

철근콘크리트 공종의 CO_2산출방법은, 가령 대안A(재건축)에 있어 설계내역서상 레미콘 총 물량은 13,826 m^3이고, 산업연간분석의 단위도 m^3 단위환산이 필요 없이 곧바로 레미콘의 원단위 CO_2배출계수를 곱하여 산출하며, 반면 철근의 경우 내역서상 단위(ton)를 원단위 환산 단위(kg)으로 변

환하기 위하여 계수 1000을 곱한 다음 원단위 CO_2배출계수를 곱하여 산출한다.

Table 15. CO_2 Emissions and Ratio by Construction Work Types

Wokk type	Reconstruction		Remodeling 1		Remodeling 2	
	CO_2 Emissions (ton-CO_2)	Ratio (%)	CO_2 Emissions (ton-CO_2)	Ratio (%)	CO_2 Emissions (ton-CO_2)	Ratio (%)
Reinforced concrete Work	6,534.5	43	2,481.4	21.2	1,507.7	14.9
Masonry Work	768.6	5.1	596.9	5.1	768.6	7.6
Stone Work	73.6	0.5	81.2	0.7	73.6	0.7
Tile Work	111.3	0.7	96.7	0.8	111.3	1.1
Wood Work	23	0.2	22	0.2	23	0.2
Waterproofing Work	734.9	4.8	965.7	8.2	734.9	7.3
Metal Work	328	2.2	359.2	3.1	328	3.3
Plaster Work	1,668.2	11	1,802.8	15.4	1,588.2	15.7
Painting Work	811.4	5.3	372.7	7.4	811.4	8
Interior Finishing Work	2,664.0	17.5	2,378.5	24.5	2,664.0	26.4
Joiner's Work	478.5	3.1	398.6	3.4	478.5	4.7
Glazing Work	836.7	5.5	1,173.8	10	836.7	8.3
Roof and Gutters Work	161.4	1.1	0.9	0	161.4	1.6
Total	Total	100	11,730.50	100	10,087.10	100

대안A(재건축)과 대안 B(리모델링1)을 비교하면, 대안A(재건축)의 레미콘 사용량은 13,826m^3이고 철근은 1,798ton이 소요되어 6,534.5ton의 CO2가 배출되는데, 대안 B(리모델링1)의 경우 전용면적 30%증가와 상부1개 층 증축으로 인한 자재투입으로 레미콘 4,801m^3, 철근 688ton이 소요되어 2,481.4ton이 배출되므로 4,053.1ton의 절감효과를 얻을 수 있었다. 또한 대안A(재건축)과 대안C(리모델링2)는 5,026.9ton의 차이를 보이는데, 이는 투입자재의 물량 차이에 의한 것임을 알 수 있다. 다른 공종도 철근콘크리트 공사와 동일한 방식으로 CO_2발생량을 산출하였으며, 각 공종의 CO_2발생량 산출에 대한 상세한 산출근거는 김치백(2012)의 연구에서 확인 할 수 있다. 각 공종에 대해서 CO_2발생량을 측정한 결과는 다음 Table 16과 같다.

대안별 단위면적당 CO_2발생량을 비교하면 Table 17과 같다. 대안A(재건축)은 646.4kg-CO_2/m^2이고, 대안 B(리모델링 1)은 대안A(재건축) 대비 77.2%인 479.5kg-CO_2/m^2로 22.8%의 저감효과를 보였다. 대안C(리모델링2)의 경우 대안A(재건축)대비 66.39%을 배출하여, 33.6%의 저감효과를 보였다.

Table 17. CO_2 Emissions per Unit Area by Alternative

Classification	Reconstruction	Remodeling 1	Remodeling 2
Total CO_2 Emissions	15,194.0	11,730.5	10,087.1
Ratio of CO_2 Emissions relative to Reconstruction	100%	77.20%	66.39%
Difference in CO_2 Emissions relative to Reconstruction	0	-3,463.5	-5,106.9
CO_2 Emissions per unit Area (kg-CO_2/m^2)	646.6	479.5	429.2

(2) 투입장비 CO_2 발생량

시공단계의 투입장비는 자재를 운반하기 위한 운송장비와 시공을 위한 작업장비로 분류된다.

1) 운송장비

운송장비로 인한 CO_2배출량을 정확히 산출하기 위해서는 실제로 투입되는 다양한 운송장비를 모두 고려하여야 한다. 그러나 이러한 데이터를 수집하기는 매우 어려우므로 본 논문에서는 투입자재를 산출하고, 그 자재를 운송하는 운송장비를 최소한으로 단순화하여 설정한 다음 4.2.2의 식(3)를 이용하여 CO_2배출량을 산출하였다.

대안A(재건축)의 운송장비는 일위대가를 분석하여 트럭으로 설정하였고 규격은 1톤, 2.5톤, 4.5톤, 8톤, 11톤, 레

Table 16. CO_2 Emissions by Alternative for Reinforced Concrete Work

Alternative	Specification			Inter-Industry Analysis				Coefficient	CO2 Emissions (ton-CO2)	CO2 Emissions Difference relative to Reconstruction,
	Material	Unit	Quantity	Industry Sector	Unit	Unit Cost	CO2 (kg-CO2/1 million Won)			
Reconstruction	Concrete	m^3	13,826	Ready-mixed Concrete	m^3	50,930	1,053.1	1.0	741.5	0
	Steel bar	ton	1,798	General steel bar	kg	795	4,045.8	1000	5,793.0	0
CO_2 Emissions in Reinforced Concrete Work									6,534.5	0 (100%)
Remodeling 1	Concrete	m^3	4,801	Ready-mixed Concrete	m^3	50,930	1,053.1	1.0	257.5	-484.0
	Steel bar	ton	688	General steel bar	kg	795	4,045.8	1000	2,223.9	-3569.1
CO_2 Emissions in Reinforced Concrete Work									2,481.4	-4,053.1 (38.0%)
Remodeling 2	Concrete	m^3	2,905	Ready-mixed Concrete	m^3	50,930	1,053.1	1.0	155.8	-585.7
	Steel bar	ton	417	General steel bar	kg	795	4,045.8	1000	1,351.9	-4,441.1
CO_2 Emissions in Reinforced Concrete Work									1,507.7	-5,026.9 (23.1%)

미콘차 등으로 분류되며, 각 운송장비의 소요대수, 단위 CO_2발생량, 투입자재별 운송 CO_2발생량을 파악하였다. 가령 대안A(재건축)의 철근을 운송하는데 발생하는데 CO_2를 측정하기 위하여는 설계내역서에서 투입되는 철근물량이 1,797.7ton임을 산출하고, 운송장비는 11톤 트럭으로 하여 총 164대가 소요되며, 운반거리 30km기준하였을 때, 대당 20.8kg-CO_2의 이산화탄소가 발생하므로 이를 곱하면 3,409.6kg의 CO_2발생을 산출할 수 있다. 같은 방법으로 건축철물, 창호재, 유리 등의 투입자재 운송에 따른 CO_2발생량을 측정할 수 있다. 단위면적당 운송장비 사용에 따른 CO_2배출량을 정리하면 Table 19와 같다. 대안C(리모델링2)가 가장 적은 1.6kg-CO_2/ m^2를 배출하였으며, 대안A(재건축)은 2.3배가 많은 3.7kg-CO_2/ m^2를 나타낸다. 그러나 운송장비에 따른 CO_2 배출량은 시공단계의 투입자재의 그것과 비교하였을 때 0.6% 정도에 불과하므로 전 생애주기 CO_2배출량 산정에는 무시할 수 있는 정도이다.

Table 18. CO_2 Emissions by Transport Equipment Use in Reconstruction

Item		Unit	Quantity	Equipment Used	No. Units	CO_2 [kg-CO_2/Unit]	CO_2 Emissions [kg-CO_2]
Materials	Reinforcement bar	ton	1,797	11 ton Truck	164	20.8	3,409
	Cement	ton	3,879	11 ton Truck	353	20.8	7,338
	Ready-mixed Concrete	m^3	32,712	Mixer Truck ($6m^3$)	2,974	24.9	61,829

* 11-ton truck CO_2 generation approx. 20.79kg-CO_2/Unit (30km transport distance)

Table 19. CO_2 Emissions from Transport Equipment by Alternative

Item	Reconstruction	Remodeling 1	Remodeling 2
Total materials input(ton)	4,147.7	2,312.6	1,821.4
CO_2 Generation of Equipment Used(ton-CO_2)	86.5	48.1	37.9
CO_2 per Unit Area (Kg-CO_2/m^2)	3.7	2.0	1.6

2) 작업장비

시공단계의 작업장비의 CO2배출량을 측정하기 위하여 4.2.2의 Formula 5를 활용하여 산출한다. 예를 들어 대안A(재건축) 경우 신축으로 인하여 공사 연면적은 23,499.7m^2가 된다. 공사연면적을 위 Formula 4-5의 회귀식에 대입하여 건설장비 에너지소비량 77.5TOE를 계산하고, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시하고 있는 경유의 탄소배출계수 0.837ton C/TOE를 곱하여 64.8ton C 탄소배출량 값을 얻어낸다. 위 56.1ton C는 탄소배출량이므로 이산화탄소(CO2)값으로 변환하기 위해서는 ton C값에 44/12(이산화탄소분자량/탄소원자량)을 곱하여 (TCO2 = TC * 44/12) 238.0ton 의 이산화탄소배출량을 구했다. 이와 같은 방법으로 대안 B(리모델링1)과 대안C(리모델링2)의 공사면적에 해당하는 부분을 산출하고 투입장비 사용에 다른 CO2 배출량을 계산하면 Table 20과 같다.

Table 20. CO_2 Emissions Due to Use of Equipment by Alternative

Item	Gross Floor Area (m^2)	Construction Equipment Energy Consumption(TOE)	CO_2 Emissions by Equipment Operation (ton-CO_2)
Reconstruction	23,499.7	77.5	238.0
Remodeling 1	6,549.0	48.7	149.6
Remodeling 2	5,584.6	47.1	144.5

5.1.3 운영단계

재건축과 리모델링의 운영단계의 CO_2발생량을 산출하기 위하여 기준안의 가스, 전기, 수도 사용량을 공동주택관리정보시스템의 대상주택의 사용료 상세내역을 조사하여 적용하였다. 조사 기간은 2010년 11월 ~ 2011년 10월으로, 12개월간 데이터를 수집하여 대안별 30년간 운영하는 것으로 가정하고 동일하게 적용하였다. 다음 Table 21은 12개월간(2010. 11~2011.10) 총 사용된 전기사용량은 741,017.0 kWh이며, 전기사용량에 따른 CO_2배출량(Formula 4-6)과 에너지원별 이산화탄소 배출계수(Table 9)를 이용하여 CO_2배출량을 측정한 결과 326,047kg 나타났다. Table 21을 살펴보면 월별 CO_2 발생량에 큰 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 방법으로 가스, 수도사용량을 조사하여 운영단계의 CO_2배출량을 산출하였다.

Table 21. Electricity Consumption in the Operation Phase

Month	Electrical Power Consumption (kWh)	CO_2 Emissions (kg-CO_2)
Nov. 2011	52,487.0	23,094.3
Dec.	56,270.0	24,758.8
Jan. 2010	57,815.0	25,438.6
Feb.	61,514.0	27,066.2
Mar.	59,070.0	25,990.8
Apr.	50,379.0	22,166.8
May.	69,912.0	30,761.3
Jun.	64,123.0	28,214.1
Jul.	66,278.0	29,162.3
Aug.	69,619.0	30,632.4
Sep.	63,712.0	28,033.3
Oct.	69,838.0	30,728.7
Total	741,017.0	326,047

앞서 공동주택관리정보시스템을 통해 수집된 가스, 전기, 수도 사용량을 활용하여 운영단계에서 발생하는 연간 CO_2 배출량을 산출하였다. 이를 적용하여 운영단계(30년간)에서 발생하는 CO_2배출량을 측정하였다. 연간 발생된 CO_2 1,348ton 중 가스가 996ton으로 73.9%의 비율을 차지하며, 전기는 326ton 으로 24.2%, 수도는 26 ton으로 2.0%의 비율로 CO_2를 배출시킨다.

Table 22. Annual CO_2 Emissions in the Operation Phase

Item	CO_2 Emissions (ton-CO_2/year)	Ratio(%)
Gas	996 ton-CO_2/Year	73.9
Electricity	326 ton-CO_2/Year	24.2
Water	26 ton-CO_2/Year	2.0
Total	1,348 ton-CO_2/Year	100.0

앞의 운영단계의 연간 CO_2배출량(Table 21)을 토대로 30년간 사용하였을 때의 대안별 CO_2발생량을 산출하면 Table 22와 같다. 본 연구에서 대안설정은 Table 5와 같이 대안A(재건축)과 대안C(리모델링2)의 연면적을 같게 설정하였으므로 두 대안의 30년간 CO_2발생량은 총 37,245ton으로 동일하다. 대안 B(리모델링1)은 연면적을 약간 크게 설정하였으므로 이에 비례하여 38,668 ton으로 산출되었다.

리모델링은 설비시설이 전면적으로 교체되고, 단열부분이 보강되므로 재건축과 비교하여 에너지 성능에 차이 없을 것으로 가정하였다. 따라서 운영단계에서는 대안별 단위면적당 발생하는 CO_2량은 52.8kg 으로 동일하다. 그럼에도 불구하고 운영단계를 포함으로써 재건축과 리모델링의 전 생애주기의 친환경성 평가를 수행 할 수 있게 된다.

Table 23. Operation Phase CO_2 Emissions by Alternative

Item	Unit	Reconstruction	Remodeling 1	Remodeling 2
Gas consumption	m^3	917,011.5	952,061.5	917,011.5
Electricity consumption	kWh	300,192.2	311,666.1	300,192.2
Water consumption	m^3	24,286.3	25,214.5	24,286.3
Total CO_2 generation (annual)	kg-CO_2	1,241,490	1,288,942	1,241,490
Total CO_2 generation (30 years)	ton-CO_2	37,244.7	38,668.3	37,244.7
Gross Floor Area	m^2	23,499.6	24,464.1	23,499.6
CO_2 Generation per Unit Area (Annual)	kg-CO_2/m^2	52.8	52.8	52.8
CO_2 Generation per Unit Area (30 Years)	kg-CO_2/m^2	1584.9	1584.9	1584.9

5.2 친환경성 평가결과의 종합 및 분석

5.2.1 친환경성 평가

대상건축물에 대한 재건축과 리모델링 각 대안의 해체철거단계, 시공단계 ,운영단계의 친환경성 평가를 CO_2발생량으로 기준하여 실시하면 Table 24와 같다. 철거단계는 각 대안 모두 CO_2발생비율이 평균 1% 정도로, 철거단계가 전체 생애주기에 미치는 영향은 매우 적다. 다만 대안A(재건축)의 CO_2배출량은 31.8ton으로, 대안(리모델링1,2)와 비교하여 약 5.6배에 이르는데, 이는 대안A(재건축)은 전면철거로 인하여 철거면적 증가와 이와 수반되는 건설폐기물이 다량 발생하기 때문이다. 시공단계는 투입자재, 투입장비(운송,작업)으로 인해 발생하는 CO_2를 측정한 것이다. 대안A(재건축)은 15,518.5ton 으로 대안 B(리모델링1)의 1.3배, 대안C(리모델링2)의 1.5배를 더 배출하였다. 이러한 차이는 재건축과 리모델링이 가지는 특성상 당연한 것이다. 또한 전 생애주기 동안 시공단계에서 발생되는 CO_2의 비율은 대안A(재건축)이 29.4%, 대안 B(리모델링1)은 23.6%, 대안C(리모델링2)는 21.6%를 차지하였다.

운영단계는 전 생애주기에서 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 측정되었다. 본 연구에서는 재건축과 리모델링의 운영단계에서의 단위면적당 에너지소비량을 동일하게 가정하고 친환경평가를 수행했기 때문에, 각 대안별 CO_2배출량은 유사한 수준으로 나타났다. 또한 전생애주기 동안 운영단계에서 발생되는 CO_2의 비율은 대안A(재건축)이 70.5%, 대안B(리모델링1)은 76.4%, 대안C(리모델링2)는 78.4%를 차지하였다. 철거단계, 시공단계, 운영단계(30년)로 하여 전생애주기의 친환경평가 하였을 때, 대안A(재건축)은 총 52,795 ton의 CO_2가 발생하였으며, 대안 B(리모델링1)은 50,603ton, 대안C(리모델링2)는 47,519ton이 발생하였다. 대안A(재건축) 대비 대안 B(리모델링1)의 CO_2발생량 차이는 95.85%로, 대안 B(리모델링1)이 약 4.1% 정도의 CO_2감소효과를 얻는 것으로 나타났다. 또한 대안C(리모델링2)의 경우 대안A(재건축) 대비 90.01%로 10%정도의 CO_2절감효과를 나타냈다. 대안C(리모델링2)의 경우 3개 층 수직 증측으로 현행법규 내에서는 추진이 어렵지만 리모델링 대안 중 10% 이상의 이산화탄소 배출량 저감효과를 보이므로 재건축과 리모델링 사업추진시 친환경평가에서 유리할 것으로 판단된다.

Table 24. CO_2 Generation by Alternative/Phase (All Buildings)

Unit: ton-CO_2

Item	Reconstruction	Remodeling 1	Remodeling 2
Demolition	31.8 (0.06%)	6.2 (1.17%)	5.0 (0.94%)
Construction	15,518.5 (29.4%)	11,928.2 (23.6%)	10,269.5 (21.6%)
Operation	37,244.7 (70.5%)	38,668.3 (76.4%)	37,244.7 (78.4%)
Total	52,795.0 (100%)	50,602.7 (100%)	47,519.2 (100%)
Ratio of CO_2 Emissions relative to alternative (reconstruction)	100%	95.85%	90.01%

* Assuming 30 years for the operation phase

Table 25는 대안별로 각 단계별 단위 면적당 발생하는 CO_2발생량 결과를 요약한 것이다. 단위면적당 CO_2발생량 비교는 환경부하 측면에서 유리한 대안을 찾는데 기여할 것이다. 단위 면적당 가장 적은 CO_2를 배출한 대안은 대안C(리모델링2)서 2,022kg이고, 대안A(재건축)이 가장 많은 2,247kg로 나타났다. 대안C(리모델링2)의 단위 면적당 CO_2 배출량이 적은 이유는 기존 공동주택의 부분적으로 골조보수/보강을 통해 투입자재 물량과 장비를 줄일 수 있었던 것이 주요 요인이다. 또한 현재 일반적으로 추진되는 전용면적 30%증가, 상부 1개층 증축하는 리모델링 방식인 대안B(리모델링1)보다 대안C(리모델링2)가 CO_2배출 측면에서 유리하다는 결론이 도출된다. 다만 대안C(리모델링2)의 경우 법적 규제로 인한 한계가 있으나 앞으로 정책적 변동 가능성은 충분하므로 친환경 평가에 검토할 가치가 있다고 본다.

Table 25. CO_2 Emissions by Alternative/Phase (Per Unit Area)

Unit: kg-CO_2/m²

Item	Reconstruction	Remodeling 1	Remodeling 2
Demolition	1.35	0.25	0.21
Construction	660.4	487.6	437.0
Operation	1,584.9	1,584.9	1,584.9
Total	2,246.6	2,071.8	2,022.1
Ratio of CO_2 Emissions relative to reconstruction	100%	92.2%	90.0%
Difference in CO_2 Emissions relative to reconstruction	-	-174.8	-224.5

Fig 3은 해체철거/시공/운영단계의 대안별 단위면적당 CO_2 발생량을 그래프로 나타낸 것이다. 대안A(재건축)과 대비하여 대안 B(리모델링1)은 7.8%, 대안C(리모델링2)는 10.0%의 CO_2저감효과를 보인다. 운영단계를 고려하지 않고 해체철거단계와 시공단계의 단위면적당 CO_2측정하였을 때 (Fig 4 참고), 대안A(재건축) 대비 대안 B(리모델링1) 26.3%, 대안C(리모델링2) 33.9%의 절감효과를 보였다. 이는 재건축과 리모델링사업 수행시 리모델링이 시공단계에서 CO_2저감효과가 크므로, 단기간에 CO_2배출량을 줄일 수 있는 대안으로 고려할 수도 있을 것이다.

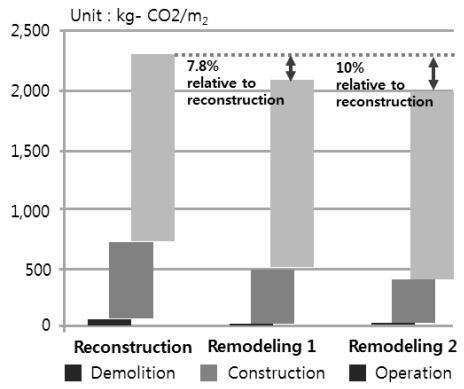


Fig. 3. CO_2 Emissions per Unit Area by Alternative (Demolition, Construction and Operation Phase)

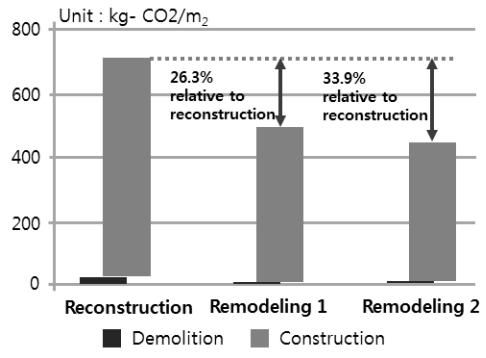


Fig. 4. CO_2 Emissions per Unit Area by Alternative (Demolition and Construction Phase)

5.2.2 탄소배출권시세적용평가

본 논문에서 대안으로 제안한 대안A(재건축)과 대안(리모델링1, 2)에서 산출한 단위면적당 발생하는 CO_2배출량을 1세대(85m²)에 탄소배출권 시세와 연계하여 분석하였다. 탄소배출권 시세는 유동적이기 때문에 EUA(European Union Allowance) 기준 2011년 1년의 평균값인 13.6유로/ton-CO_2 고 한화(1유로:1,544원)로 환산하여 21,019원/ton-CO_2를 적용하였다. Table 26는 85m² 1세대를 기준으로 CO_2배출량과 탄소배출 비용을 계산한 결과이다. 대안A(재건축)의 경우 총 생애주기 기간에서 약 190,961kg의 CO_2를 배출하였고, 대안 B(리모델링1)의 경우 176,103kg을 배출하였다. 대안A(재건축)과 대안 B(리모델링1)의 CO_2 배출량 차이는 14,858kg이고 탄소배출권 시세를 적용하였을 때 약 312,300원의 경제적 이득을 얻을 수 있었다. 또한 대안A(재건축)과 대안C(리모델링2)를 비교하였을 때 CO_2배출량 차이는 19,083kg, 경제적 이득은 401,095원으로 나타났다. 이는 대안C(리모델링2)가 대안 B(리모델링1)과 대안A(재건축) 보다 환경비용 절감효과가 크다는 결론을 얻게 되었다.

Table 26. CO_2 Emissions and Carbon Emission Costs for 1 Unit (85m²)

Item	Reconstruction	Remodeling 1	Remodeling 2
CO_2 Emissions per Unit Area (kg-CO_2/m²)	2,246.6	2,071.8	2,022.1
CO_2 Emissions of 1 Unit (kg-CO_2)	190,961.0	176,103.0	171,878.5
Difference in remodeling CO_2 emissions relative to reconstruction (kg-CO_2)	-	- 4,858.0	-19,082.5
Difference in carbon emission costs for remodeling relative to reconstruction	-	-312,300원	- 401,095원

이를 전국적으로 확대하여, 노후공동주택의 개선대상을 100만호 공급한다고 가정한다면, 대안C(리모델링2)가 대안A(재건축)에 비하여 약 1900만톤의 CO_2절감효과와 4천억원의 환경비용을 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이는 2020년 정부의 건물부문 절감목표 약 4,800만톤의 약 39.6%에 해당하는 것으로 그린 홈 100만호를 리모델링으로 공급할 경우에 건물부문 온실가스 감축에 상당한 기여가 가능하다고 판단된다. 다만 위 정부의 절감목표는 연간 기준으로 리모델링의 추진 시기 및 일정에 따라 절감효과는 분산될 수 있다.

6. 결론

본 논문은 노후 공동주택의 개선방식 대안을 재건축과 리모델링으로 나누고, 각 해체철거단계, 시공단계, 운영단계(30년)에서 투입되는 자재, 장비, 에너지를 파악하여 전생애주기 동안 각 대안별 이산화탄소 배출량을 산출함으로서

친환경성을 평가하고자 하였다.

위 재건축과 리모델링 대안을 대상으로 전생애주기 동안 친환경성을 분석하여 도출한 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 해체철거단계의 구성항목(발생 폐기물, 철거장비, 운송장비) 중 발생 폐기물에 의한 CO_2배출량이 약 75.3% (각 대안 평균)을 차지하고, 운송장비 21.8%, 철거장비 2.9%의 분포를 보인다. 이는 해체철거단계에서 CO_2배출량을 줄이기 위해서는 폐기물 발생을 줄이고, 재활용 비율을 높이는 것이 중요함을 의미한다. 단위면적당 발생량은 대안A(재건축)이 6.18kg-CO_2/m^2로 가장 많은 이산화탄소 배출했다. 대안 B(리모델링1)과 대안C(리모델링2)는 각각 1.16, 0.95 CO_2/m^2로 대안A(재건축) 대비 약 5배 이상의 CO_2저감효과가 있는 것으로 나타났다.

둘째, 시공단계에서 투입자재, 운송장비, 작업장비에 의하여 CO_2가 발생하게 되는데, 대안A(재건축)과 대안(리모델링 1,2) 모두 투입자재로 인한 CO_2발생비율이 98% 정도로 압도적으로 높다. 그리고 장비의 CO_2발생비율은 운송장비 0.5%, 작업장비 1.5% 정도의 미미한 수준이다. 단위면적당 발생량은 대안A(재건축) 대비 대안(리모델링)이 약 30%정도의 저감효과가 있는 것으로 분석되었다. 주된 차이는 골조부분(철근, 콘크리트)의 투입자재 물량 차이로 발생한다.

셋째, 운영단계에서의 에너지 소비량은 대상건축물의 최근 12개월간 가스, 전기, 수도의 실제 사용량을 조사하여 단위면적당 소비량을 같게 하고 30년간 운영기간을 설정하여 각 대안에 적용하였다. 운영단계는 전 생애주기에서 약 70%의 높은 비율을 차지하는 것으로 측정되었다. 따라서 지금까지 친환경성 평가는 해체철거 및 시공단계에 대한 연구에 치중되어 있었으나 앞으로는 운영단계의 친환경성 평가방법 및 기법개발에 보다 많은 연구가 요구된다.

넷째, 전생애주기의 친환경평가 하였을 때, 대안A(재건축) 대비 대안 B(리모델링1)의 CO_2발생량 차이는 95.85%로, 대안 B(리모델링1)이 약 4.1% 정도의 CO_2감소효과를 얻는 것으로 나타났다. 또한 대안C(리모델링2)의 경우 대안A(재건축) 대비 90.01%로 10%정도의 CO_2절감효과를 나타냈다. 대안C(리모델링2)의 현행법규 내에서는 추진이 어려운 한계가 있으나 10% 이상의 이산화탄소 배출량 저감효과를 보이므로 법규완화시 친환경성에 유리할 것으로 판단된다.

다섯째, 단위세대(85m^2)를 기준으로 탄소배출권시세를 적용한 결과 대안C(리모델링2)가 대안A(재건축)에 비하여 40만원 정도의 환경비용 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 개선사업이 필요한 노후 공동주택 중 리모델링이 가능한 가구를 100만호로 가정하면, 약 1900만톤의 CO_2감축효과와 4천억원의 환경비용을 절감 할 수 있고, 이는 2020년 정부의 건물부문 절감목표에도 상당한 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

여섯째, 재건축과 리모델링 사업은 조합원의 결정에 달려 있다. 하지만 정부 정책과 함께 환경부하와 환경비용에 대해 고려한다면 본 연구는 재건축과 리모델링의 결정에 주요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2005-0049719).

References

National Statistics Portal (2011), “Population-Housing Investigation Results,” (http://www.kosis.kr).

Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MLIT) (2011), "Guideline for Computing CO2 Emission by Facility"

Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MLIT), "Apartment Housing Management Information System,“ www.k-apt.net.

Kim, T. H. and Tae, S. H. (2009), “An Exploratory Study on LCA Evaluation for RC Concrete Buildings”, Architectural Institute of Korea, pp. 305-309.

Green Growth Committee (2011), “Greenhouse Gas Emmision Reduction Target,” http://www.greengrowth.go.kr.

Kim, C. B. (2012), A Study on Environmental Assessment of Reconstruction and Remodeling for Aged-Housing Projects, M.S. Thesis, Department of Arch. Engr., Ajou University.

Korean Institute of Construction Technology (KICT) (2004), A Study on Development of LCA Analysis for Building Projects, pp. 127-128.

Huh, T. (1996), "A Concept of LCA and Current Status of Korea and International Countries ", Indusrial Technology Research Institute, Kunkook University.

Ministry of Environment (MOE) (2006), “A Report on Construction Debris Recycling Statistics Investigation in 2006”, pp. 50-51.

Ministry of Environment (MOE) (2011), “National Greenhouse Gas Emission Reduction Target by Industry Sector”, MOE.

Ministry of Environemnt (MOE) (2011), "Climate Change Advertizement Portal (Greenhouse Gas Emission Computation Service)" (http://www.gihoo.or.kr).

Kim, Yoon-Duk, Cha, Hee-Sung, Kim, Kyung-Ra, Shin, Dong-Woo. (2011), "Evaluation Method of Green Construction Technologies Using Integrated LCC and LCA Analysis", *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 12(3), pp. 91-100.

Chae, Swong-Hyun, Kim, Kyung-Rai, Shin, Dong-Woo, Cha, Hee-Sung. (2012), "A Model for Evaluating

Eco-friendly Demolition Works for Remodeling in the Pre-construction Stage", *Korean journal of Construction Engineering and Management* KICEM, 13(1), pp. 14-23.

요약: 최근 국내외적으로 환경문제와 자원고갈에 대한 관심이 높아지는 가운데, 국내 건물부문의 온실가스 배출량은 매년 증가하는 추세이다. 또한 국내 노후화 공동주택이 지속적으로 발생하여 온실가스 증가에 주요원인이 되고 있다. 이는 정부의 2020년 건물부분의 이산화탄소 배출량 저감을 위해 노후화된 설비나 환경개선에 대한 고려가 필요함을 의미한다. 노후화된 공동주택의 개선방법은 크게 재건축과 리모델링 사업이 고려되는데, 온실가스 문제와 함께 친환경성 평가의 중요성이 대두되고, 사업수행시 사업결정의 주요 지표 중 하나로 자리잡고 있다. 본 연구의 목적은 공동주택 주거환경 개선을 위한 두 가지 대안이라고 볼 수 있는 재건축과 리모델링의 친환경성을 비교분석해 보는 것이다. 이를 위하여 본 논문에서는 재건축과 리모델링사업의 특성을 파악하고 , 친환경성 비교를 위해 단계별로 동일한 조건을 설정하여, 전생애주기 친환경성 평가와 그 의미를 해석해 보았다. 연구결과로 전생애주기의 LCA 평가를 하였을 때, 대안A(재건축) 대비 대안B(리모델링1)의 CO_2발생량 차이는 95.85%로 약 4.1% 정도의 CO_2감소효과를 얻는 것으로 나타났다. 또한 대안C(리모델링2)의 경우 대안A(재건축) 대비 90.01%로 10%정도 CO_2절감 효과를 나타냈다. 또한 단위세대(85m2)를 기준으로 탄소배출권시세를 적용한 결과 대안C(리모델링2)가 대안A(재건축)에 비하여 40만원 정도 환경비용 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 공동주택의 주거환경 개선의 대안을 선택함에 있어서 중요한 근거가 될 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 리모델링, 재건축, 생애주기분석, 친환경성 평가, CO_2 저감, 노후공동주택