

# 염해 환경하의 철근콘크리트 구조물의 친환경 내구설계 시스템 개발에 관한 연구

## A Study on the Development of Sustainable Durability Design System for Reinforced Concrete Structure under Chloride Attack Environments

김 낙 현\*                      노 승 준\*\*                      태 성 호\*\*\*  
Kim, Rak-Hyun              Roh, Seung-Jun              Tae, Sung-Ho

### Abstract

This study was suggested to develop sustainable durability design system and proposed the plan to evaluate design conditions that meet the intended service life and LCCO<sub>2</sub> reduction level of reinforced concrete structure easily from the early design stage. For that the W/B and covering depth of the concrete structure were calculated through calculation of service life based on standard specification expression and the quantitative reduction rate of the vertical member of reinforced concrete structure by the calculated W/B was applied. Life cycle of building classified into construction stage, operation stage, maintenance stage, and demolition/disposal stage and the method of CO<sub>2</sub> evaluation of each stage was proposed. For construction stage, the major construction materials that take up over 80% CO<sub>2</sub> emitting during building construction were selected and the CO<sub>2</sub> evaluation method for 5 standard apartment houses was proposed. Also, for operation stage, CO<sub>2</sub> emission was calculated through calculation of heating load by energy efficiency rating certification system. For maintenance stage, CO<sub>2</sub> emission was calculated using concept of re-construction by life and for demolition/disposal stage was calculated with the use of construction standard estimate.

As a result of the case study by such evaluation methods, 80 years of service life and 17 specifications of sustainable durability design that meet the 40% intended LCCO<sub>2</sub> reduction level were deduced. The Maximum LCCO<sub>2</sub> reduction rate was analyzed by 47.2%.

키워드 : 친환경 내구설계 시스템, 철근콘크리트 구조물, 전과정 CO<sub>2</sub>  
Keywords : Sustainable Durability Design System, Reinforced Concrete Structure, Life Cycle CO<sub>2</sub>

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 목적

기후변화에 따른 지구온난화에 대한 우려가 높아짐에 따라 세계 각국에서는 온실가스 저감대책 수립이 주요 이슈로 대두되고 있다. 특히 우리나라의 경우 2009년 녹색성장위원회 출범, 2010년 저탄소 녹색성장기본법의 시행 등 온실가스 저감을 위한 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 시대적 배경으로 불 때 에너지 소비 30% 이상, CO<sub>2</sub> 배출 30% 이상을 차지하고 있는 건축물에서의 환경

부하저감은 우선적으로 해결해야 할 과제이다<sup>1)</sup>.

현재 저탄소 건축물 조성을 위한 제도 기반 마련을 위해 합리적인 건축물의 CO<sub>2</sub> 배출량 평가 및 저감을 위한 연구가 요구되고 있다. 현재 국내에서 연구되고 있는 전과정CO<sub>2</sub> (이하 LCCO<sub>2</sub>) 평가 방식은 실시설계 이후에 산정된 투입물량을 직접 입력하는 방식으로 LCCO<sub>2</sub>를 산정하고 있어 평가를 위해 많은 시간과 노력이 요구되며, LCCO<sub>2</sub> 배출량 평가시 실시설계 수준의 도면정보 등이 필요하기 때문에 실질적인 환경부하 저감을 위한 설계변경은 어려운 실정이다. 이에 본 연구는 설계초기단계에서부터 내구수명 산정기법을 적용하여 철근 콘크리트 구조물의 목표내구수명과 목표 LCCO<sub>2</sub> 저감량을 만족하는 구조물의 친환경 내구설계조건을 제안하는 시스템 개발을 목적으로 한다.

### 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 내구설계조건에 따른 건축물의 수명산정과 CO<sub>2</sub>배출량의 종합적인 평가를 위해 한국콘크리트학회

\* 주저자, 한양대학교 대학원 건축환경공학과 석사과정 (redwow6@hanyang.ac.kr)  
\*\* 정회원, 한양대학교 대학원 건축환경공학과 석사과정 (roh.seungjun@gmail.com)  
\*\*\* 교신저자, 한양대학교 공학대학 건축학부 조교수, 공학박사 (jnb55@hanyang.ac.kr)  
본 연구는 교육과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.(과제번호:R11-2005-056-01003-0)

에서 제시하고 있는 내구수명 산정방식을 통해 내구수명을 산정하였고 열화환경은 염해로 한정하였다. CO<sub>2</sub> 배출량 평가는 최근 주요 논점으로 부각되고 있는 건축물의 전 생애주기 관점에서 평가하였고, 이를 위해 건축물의 Life Cycle을 건설단계, 운영단계, 유지관리단계, 해체/폐기단계로 구분하였다. 건설단계는 건축공사에 사용되는 건설자재 중 CO<sub>2</sub> 배출량에 영향을 미치는 주요건설자재를 대상으로 평가하였고, 운영단계는 난방부하 배출량에 영향을 미치는 주요변수인 창호와 단열재를 대상으로 건물에너지효율등급 인증제도에서 채택하고 있는 가변난방도일법을 적용하여 난방부하 에너지 소비량을 산정하여 내구수명에 따른 LCCO<sub>2</sub> 배출량을 평가하는 친환경 내구설계 평가 시스템을 제안하였다.

본 연구의 방법은 아래와 같다.

첫째, 한국콘크리트학회의 염해에 대한 내구설계기법을 이용하여 건축물의 해안으로 부터의 거리, 물-시멘트비, 철근의 피복 두께에 따른 내구수명 데이터베이스를 구축한다.

둘째, 건축물의 전 생애주기를 건설단계, 운영단계, 유지관리단계, 해체/폐기단계로 구분하여 각 단계별의 CO<sub>2</sub> 배출량을 평가한다.

셋째, 내구설계조건에 따른 건축물의 내구수명과 LCCO<sub>2</sub> 배출량과의 상관관계를 분석한다.

넷째, 친환경 주택건설의 건설 기준 및 성능과 건물에너지효율등급인증제도의 표준건축물을 이용하여 건축물의 형태에 따른 LCCO<sub>2</sub> 배출량을 평가한다.

다섯째, 목표내구수명과 LCCO<sub>2</sub> 저감량을 만족하는 친환경내구설계 조건을 제안한다.

## 2. 기존연구의 고찰

### 2.1 건축물의 내구설계

콘크리트 구조물의 내구성이란 주어진 환경에서 시간경과에 따른 내구적 성능저하, 즉 열화에 저항하는 성질을 의미한다. 내성은 시멘트가 경화되기 전에 있는 시공단계, 시멘트의 수화가 시작되는 초기 양생단계, 장기간의 사용환경에서 다양한 열화인자가 콘크리트에 영향을 미치는 구조물의 사용단계 등, 구조물의 Life Cycle에 걸쳐 관련이 있다. 철근콘크리트조 건축물의 다양한 열화인자에 대한 연구가 진행되어 왔으며 특히 염해에 대한 내구설계는 오래 전부터 많은 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 염해환경의 철근콘크리트 구조물의 내구수명을 평가하는데 가장 중요한 물리량은 염화물이온 확산계수와 표면 염소이온 농도이다. 특히 염화물이온 확산계수에 대한 많은 모델들이 존재하며 각 국가에서는 국가 고유의 환경에 적합한 모델을 채택하여 내구수명을 산정하고 있다.

국내의 내구수명 산정은 한국콘크리트학회의 “콘크리트 표준시방서 내구성편”을 따르고 있다. 콘크리트의 염화물이온 확산계수의 예측값은 평가 대상 콘크리트에 대해 실제 실험이나 실측된 자료를 통해 구하는 것을 원칙으로 하고 있다. 실험을 통해 확산계수를 도출한 경우 확산

계수예측을 위한 식을 제시하고 있으며, 신뢰할 만한 데이터를 확보하지 못하였을 경우에는 기존 데이터의 회귀분석식으로 산정한 계수를 사용하도록 하고 있다.

일본에서는 실내 침지시험에 의한 데이터와 수년 또는 수십 년에 걸쳐 염화물 침투를 받은 시험체를 대상으로 회귀분석하여 모델식을 제시하였다. 이는 KCI의 “콘크리트 표준시방서 내구성편(2004)”과 유사한 기준의 모델식으로 최근 “콘크리트 표준시방서 유지관리편(2007)”에서 염화물 이온의 확산계수 산정식이 개정되어 제시되고 있다. 미국에서는 ACI-365 Committee를 통하여 “ACI 365.1 R-00 : Service-Life Prediction”로 염해에 대한 내구성 설계를 제시하고 있다. ACI 365에서는 Life-365모델을 통하여 시간, 온도 등의 변화에 따른 염화물 이온의 확산계수 변화를 반영하고 있다. 유럽에서는 콘크리트의 염소이온 확산계수의 전위차 측정을 통해 내구수명을 예측하도록 하고 있는데, 여기에는 NT build 492 방법이 사용된다.

건축연구국제협의회(WC80(Service Life Prediction, 내구성 예측)에서는 CIB W80/RILEM 175-SLM(건축물의 내용연수 산정방법) 위원회를 출범시켜 활발한 활동을 전개하고 있다. 1993년에 CIB·RILEM의 지원을 전제로 TC59/ SC13/WG9(Service Life Design)를 신설하여 내구설계에 관한 새로운 ISO 규격을 작성하였다. 이후 TC98/SC2에서 국제표준 제정안 ISO 13823:2008 (내구성을 갖춘 건축물 설계를 위한 기본원칙)을 발표하여 내구성을 확보하는 절차를 권고하고 있으며 앞으로 LCA, 유지보전 등에 관한 규격을 제정하기 위해 연구를 계속 진행하고 있다.

### 2.2 건축물의 전 생애주기 평가

전 생애주기평가(LCA)는 제품 시스템의 전과정에 걸쳐서 소모되는 자원과 발생하는 배출량의 양을 정량화 하여 이들이 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 환경영향평가기법으로 국제표준화기구 (ISO, International Organization for Standardization)에서 ISO 14040으로 정의하고 있으며, 건축분야에 대한 연구는 제품과 소재를 대상으로 한 제품의 전 생애 평가 (Product Life Cycle Assessment)를 참고로 하여 시작되었다. 건축물에 적용하기 위해서는 복잡한 구조와 긴 수명을 갖는 건축물의 특성을 고려하여 라이프사이클 단계 및 범위를 설정하고 투입물과 산출물을 구분하여 평가대상의 목록분석과 평가 프로세스 단계를 구축하는 과정이 우선시 되어야 한다. LCA 목록분석은 데이터베이스 구축 방식에 따라 개별적산방식(Process Analysis)과 산업연관방식(Input-output Analysis), 그리고 이 두가지를 조합한 조합방식의 3가지로 구분할 수 있다. 그 중 산업연관분석방식은 산업 부문 통화량의 직·간접적인 흐름 및 연관관계에 따라 에너지소비량을 간접적으로 분석하는 방식으로 분석대상의 범위가 넓어 종합적인 분석이 가능한 방식이다. 건축물의 전 생애평가(LCA)는 건설단계, 운영단계, 유지 및 관리단계, 해체 및 폐기단계로 구분되는 건축물 라이프사이클 동안의 모든 공정 및 활동들을 포함하며, 정량적인

건축물의 환경부하량을 산출하기 위한 도구로 사용된다. 또한, 지속가능한 개발을 위하여 각 단계별로 자원, 에너지 소비 및 CO<sub>2</sub> 배출량 등을 최소화하는 개선점 도출을 전 생애평가의 궁극적인 목적으로 한다.

건축물의 전 생애주기를 고려한 환경부하 평가를 위해 선진국들은 1990년대 초부터 국가차원의 개발에 착수하였고 LCA 방법을 활용한 건축물 환경성능평가 연구가 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 표 1은 국내외 주요 건축물 LCA 평가 프로그램 및 특징을 나타낸다.

Eco-Quantum은 네덜란드 IVAM환경연구소에서 개발한 최초의 건축물 LCA 기반의 컴퓨터 프로그램으로 건축물 전 생애에 걸쳐 에너지소비에 따른 영향과 사용단계의 유지보수 및 건설관련 부품의 내구성 차이, 재활용을 등 다양한 조건을 평가하고 있다. Domestic, Research 버전을 이용하여 각각 주택, 사무소를 평가한다. LCA-MCDM은 국제기구인 IEA에서 개발한 종합설계평가 프로그램으로 전과정 비용요소, 자원사용요소, 환경부하요소등 크게 6가지 평가항목으로 구성되어 있으며 제반 환경 요인에 의한 영향을 수치화 또는 도식적으로 통합하여 비교가 가능하다. 핀란드 VTT연구소에서 개발한 Becost는 웹기반의 프로그램으로 재료생산, 수송, 시공, 유지, 해체 등 건축의 전 생애주기 각 단계 결과에서 얻은 환경영향 데이터를 이용하여 마케팅, 시스템 관리에도 활용하고 있다. BRE가 개발한 Invest는 설계자들이 설계 초기 단계의 건물재료의 LCA를 평가할 수 있도록 구성되어 있으며 Eco-point라는 환경영향의 평균 측정값을 통해 정보를 제공하였다. 2003년에는 Web 기반의 Invest2

가 개발되었다.<sup>2)</sup>호주의 LISA는 다양한 자재의 LCI DB를 활용하여 건축자재생산 부분에 대한 분석성이 좋으며 단순한 입력방식으로 평가 소요시간이 적게 투입된다. 일본의 GEM-21P는 시미즈 건설의 자사 건축물에 대해서 환경부하 저감을 목적으로 개발되었으며, 자사의 실적 건축물의 통계데이터를 활용하여 단위면적당 에너지 투입량을 추계하는 방식으로 계획 초기 단계에서 복수의 에너지절감 대안에 대해서 검토가 가능하다. Carbon Navigator 역시 GEM-21P와 마찬가지로 다이세이 건설의 자사 건축물에 대해서 계획단계에서 전 생애 환경부하 저감안을 피할 수 있도록 개발되었으며, 자재 물량과 에너지 사용량을 추계모델식을 이용하여 입력하고 있다.<sup>3)</sup>

국내의 경우 친환경건축연구센터가 개발한 SUSB-LCA 이 있다. SUSB-LCA의 입력방식은 건축자재, 에너지 사용량 직접 입력방식, 추계모델식을 채택하고 있으며 에너지, 탄소배출량, 비용 분석 및 친환경요소기술을 적용한 경우와의 케이스 비교가 가능 평가 프로그램으로 실시설계단계에서 평가가 가능하다.<sup>4)</sup> 삼성물산의 Eco-pia 역시 LCCO<sub>2</sub>, LCE, LCC의 평가가 가능하다. CO<sub>2</sub>원단위는 산업연관분석법을 이용하였고 지속적인 LCI DB의 보완이 이루어질 수 있도록 구성되어 있으며 실시설계단계에서 평가 가능하다.<sup>5)</sup> 이처럼 LCA에 대한 평가 프로그램 개발은 연구가 학연산에 걸쳐 활발히 진행되고 있으며, 국내에서도 해외의 개발 사례와 마찬가지로 설계초기단계부터 환경부하를 평가하여 실질적인 절감방안을 제안할 수 있는 프로그램 개발이 필요하다고 판단된다.

표 1. 건축물 LCA 평가 프로그램 및 특징

구분	개발국	개발기관	개발년도	평가대상	주요특징
Eco-Quantum	네덜란드	IVAM Environmental Research	1996	주택, 사무소	<ul style="list-style-type: none"> <li>최초의 건축부문 LCA 의사결정 도구</li> <li>설계초기단계에서 손쉽게 분석 가능, 12개의 환경영향으로 점수화</li> <li>자원고갈, 방출, 에너지 소비 및 폐기물의 환경지표로 자동 변환</li> </ul>
LCA-MCDM	국제기구	IEA SHC Task-23	1999	사무소	<ul style="list-style-type: none"> <li>워크시트평가 방식</li> <li>6개부문(비용,자원,환경,미학,기능성 등) 23가지 항목 평가</li> <li>분석결과와 수치화, 도식화가 간결하여 비교 분석 용이</li> </ul>
Becost	핀란드	VTT	2003	모든 건축물	<ul style="list-style-type: none"> <li>디자인 초기 단계부터 건물의 라이프사이클 환경영향 예측</li> <li>Web 기반 평가틀로 사용자의 접근성이 좋음</li> <li>구조형태 및 재료, 대지면적, 내구연한 등의 입력방식</li> <li>다양한 단계별 평가 및 분석결과 제공</li> </ul>
Invest2	영국	BRE	2003	주택	<ul style="list-style-type: none"> <li>Web 기반 평가틀로 사용자의 접근성이 좋음</li> <li>설계초기단계의 건물 재료의 LCA 평가틀,재료에 대한 선택안 제공</li> <li>프로그램의 고유지표인 ECOPOINT로 평가</li> </ul>
LISA	호주	University of Newcastle	2003	모든 건축물	<ul style="list-style-type: none"> <li>단순한 디자인 인터페이스로 구성</li> <li>LCI DB사용으로 자재생산 부분의 분석성이 좋음</li> <li>단순한 체크리스트 형식의 입력방식으로 CO<sub>2</sub>분석 가능</li> </ul>
GEM-21P	일본	清水建設 (시미즈건설)	2008	모든 건축물	<ul style="list-style-type: none"> <li>일본건축학회 이산화탄소 원단위 데이터 활용, 지속적 DB보완</li> <li>건물의 용도와 규모데이터를 통한 CO<sub>2</sub> 배출량 산출</li> <li>자재, 시공, 운송, 유지보수, 해체에 이르는 전생애 평가</li> <li>간이 및 상세평가, 리모델링에 대한 CO<sub>2</sub> 배출 평가 가능</li> </ul>
Carbon Navigator	일본	大成建設 (다이세이건설)	2009	주택, 사무소	<ul style="list-style-type: none"> <li>일본건축학회 이산화탄소 원단위 데이터 활용, 지속적 DB보완</li> <li>PAL-navi, ERR-navi, aurora, CarbonCalc, PAL-자동계산으로 구성</li> <li>PAL-자동계산은 BIM과 연동하여 실시설계 단계에서의 효율화 도모</li> <li>계획초기단계에서 CO2감축 대책의 시뮬레이션 실시</li> </ul>
SUSB-LCA	한국	친환경건축연구센터	2007	모든 건축물	<ul style="list-style-type: none"> <li>건축물의 LCE, LCCO<sub>2</sub>, LCC 평가 가능</li> <li>기존의 대안과 비교 가능, Data Base의 수정·보완이 용이</li> <li>산업연관분석을 통한 이산화탄소 원단위 데이터 활용</li> <li>실시설계단계에서 평가</li> </ul>
Eco-Pia	한국	삼성건설	2009	모든 건축물	<ul style="list-style-type: none"> <li>신재생에너지 사용에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 저감량 평가 가능</li> <li>건축물의 LCE, LCCO<sub>2</sub>, LCC 평가 가능</li> <li>산업연관분석을 통한 이산화탄소 원단위 데이터 활용, 지속적 DB보완</li> <li>단계별 LCI DB의 입출력 가능, 실시설계단계에서 평가</li> </ul>

3. 친환경 내구설계 시스템

3.1 개요

친환경 내구설계란 목표내구수명과 목표 LCCO<sub>2</sub> 저감량을 만족하는 설계 조건을 제안하는 것으로 설계초기단계에서 평가 건축물의 규모 및 입지조건을 고려하여 W/B, 피복두께, 창호종류, 단열재 종류와 같은 기초적인 설계항목을 제안하여 구조물의 수명예측과 환경부하저감량을 평가하는 시스템이다.<sup>6)</sup> 여기서의 건축물의 수명은 재료의 노후화를 수반한 건축물의 물리적인 내구수명을 의미하며 철근의 부식발생시점을 내구한계상태로 설정하였다.

평가 프로세스는 건축물의 개요를 입력하고 목표로 하는 내구수명과 전 생애주기 동안의 CO<sub>2</sub> 저감률을 설정한다. 전 생애주기 평가는 건설단계, 운영단계, 유지관리단계, 해체폐기단계로 평가를 진행하여 평가 대상의 친환경 내구설계 조건을 제안한다. CO<sub>2</sub>배출 원단위는 2003년 산업연관표와 IPCC에서 제시한 탄소배출계수를 이용하였다. 친환경 내구설계 프로세스는 그림1과 같다.

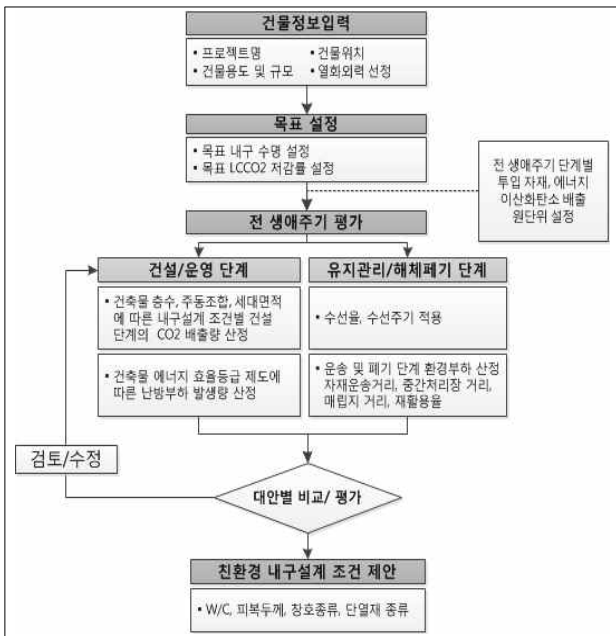


그림 1. 친환경 내구설계 프로세스

3.2 표준주택의 설정

표준공동주택은 본 연구에서 친환경 내구설계 평가시 에너지 절감량 및 CO<sub>2</sub> 저감량을 비교대상 주택으로 설계된 공동주택을 의미한다. 전 생애주기 평가를 위해 설정된 표준공동주택은 평형별 면적, 주동 형식, 층수, 구조, 열관류율 등으로 구성되어 있다. 평형별 면적선정 기준은 2009년 10월 국토해양부 고시된 "친환경 주택건설의 건설기준 및 성능"에서 제시하고 있는 다섯가지 종류의 평면을 기준으로 주동 형식, 층수를 조합하였으며<sup>7)</sup>, 벽체와 창호의 열관류율은 "건축물의 설비기준 등에 관한 규칙"에 의한 "지역별 건축물부위의 열관류율표"의 기준<sup>8)</sup>을 이용하였다. 표준공동주택 모델의 구성은 표 2와 같다.

표 2. 표준공동주택의 구성

구분	내용	구분	내용
층고	2.9m	수명	40년
세대전용면적	84m <sup>2</sup>	외벽열관류율	0.58(W/m <sup>2</sup> K)
층수	20층	창호열관류율	3.3(W/m <sup>2</sup> K)
구성조합	2호 관상형	난방방식	지역난방방식
W/B	60 %	외벽피복두께	50mm

3.3 건축물 내구 수명 산정

1) 건축물 내구 수명 산정

내구수명 산정 대상은 공동주택의 외벽으로 설정하고 열화 환경은 염해를 대상으로 하였다. 염해에 대한 허용가능한 성능저하 상태는 철근부식이 발생하지 않는 것을 기본으로 하여 KCI<sup>9)</sup>의 내구성 평가기법을 근거로 평가하였다. 외벽의 내구설계시 염화물이온에 의한 한계 상태의 예측은 식(1)을 이용하였다.

$$C(x,t) = (C_0 - C_i) \times \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] + C_i \quad (1)$$

여기서, C(x,t) : 시간t, 거리x에서의 염화물 이온량 (kg/m<sup>3</sup>), C<sub>0</sub> : 겉보기 표면염화물 이온량(kg/m<sup>3</sup>), C<sub>i</sub> : 초기 염화물 이온량(kg/m<sup>3</sup>), erf : 오차함수, x : 표면으로부터의 거리(cm), t : 경과시간(sec) 이다. 건축물 내구수명 데이터베이스 구축을 위해 표 3과 같이 내구설계 조건을 설정하였다.

표 3. 건축물 내구설계 조건

구분	종류
목표내구수명	80 년
열화환경	염해환경
임계염화물이온량	1.2kg/m <sup>3</sup>
물-시멘트비	40%, 45%, 50%, 55%, 60%
피복두께	20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm
해안선으로부터 거리	비탈대, 해안선근처, 100m, 250m, 500m, 1km
시멘트 종류	보통 포틀랜드 시멘트, 고로시멘트

2) 물-결합재비에 따른 콘크리트 강도 추정

콘크리트 압축강도는 단위 시멘트량이나 물-결합재비와 매우 밀접한 상관성이 있어 이들 요인의 측정결과로 콘크리트의 압축강도를 추정할 수 있다. 구조부재의 강도를 고려한 염화물 확산계수를 산정하기 위하여 사용된 콘크리트의 강도에 따른 배합표상의 W/B자료를 이용하여야 하나, 본 연구에서는 콘크리트 표준시방서<sup>10)</sup>의 물-결합재비에 따른 콘크리트 강도 추정식을 사용하여 강도에 따른 W/B를 사용하여 염화물 확산계수를 산정하였다.

$$f_{28} = -13.8 + 21.6 \times (B/W) \quad (2)$$

또한, 강도가 변경된 콘크리트의 적용은 수직부재의 단면을 변화시키며 이로 인한 구조 부재의 투입물량 변화를 유발하게 된다. 기존의 문헌<sup>11)</sup>을 이용하여 강도 변경에 따른 수직부재의 콘크리트 및 철근의 자재 절감률을 산정하고 이러한 자재 저감이 건축물의 LCCO<sub>2</sub>에 미치는 영향을 평가 할 수 있도록 하였다. 표 4는 표준공동주택의 W/B별 물량 저감률을 나타낸다.

표 4. W/B 적용에 따른 물량 저감률

W/B (%)	강도(MPa)	콘크리트저감률(%)	철근저감률(%)
60	22.2	0.00	0.00
55	25.5	2.02	0.58
50	29.4	10.97	4.98
45	34.2	19.15	9.30
40	40.2	26.05	14.00

3.4 건축물의 전생애주기 이산화탄소 배출량

1) 건설단계

① 건축자재 생산단계

주요자재 선정을 위해 산업연관분석의 CO<sub>2</sub> 원단위를 이용하여 CO<sub>2</sub> 배출 비율이 많은 6가지의 대표물량(철근 및 봉강, 레미콘, 합판, 콘크리트제품, 산업용 플라스틱제품, 도료)을 선정하였다. 내구 설계의 대상이 되는 구조체의 물량을 앞에서 선정한 주요자재를 바탕으로 기본설계 단계에서 자동물량산출방식에 의한 평가를 위해 친환경 주택건설의 건설 기준 및 성능에서 채택한 5가지 면적의 표준주택 도면을 근거로 공동주택에 일반적으로 적용되는 사항을 적용하여 6가지의 주요자재의 물량산출을 하였으며 2009년 건축공사 일위대기<sup>12)</sup>를 적용하여 총 71가지 세부자재의 물량산출내역을 표 5와 같은 공동주택의 형태별로 데이터베이스를 구축하였다. CO<sub>2</sub>배출 원단위는 2003년 산업연관표<sup>13)</sup>를 이용하였고 기존의 문헌<sup>14)</sup>에 근거하여 콘크리트 강도에 따른 CO<sub>2</sub>원단위 변동을 고려한 자재생산단계의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

자재생산단계의 CO<sub>2</sub> 배출량

$$= \sum(\text{주요자재의 사용량} \times \text{CO}_2 \text{ 원단위}) \quad (3)$$

표 5. 표준공동주택의 자재생산단계 물량산출 내역

번호	품 명	규 격	단위	단위면적당 투입물량
1	레미콘(수평)	25-240-15	m <sup>3</sup>	0.6476
	레미콘(수직)	25-240-15	m <sup>3</sup>	0.8411
2	이형철근	H10	TON	0.1222
		H13	TON	0.0635
		H16	TON	0.0234
		H19	TON	0.0231
		H22	TON	0.0713
3	합판거푸집	3회 (목재)	m <sup>2</sup>	0.4660
	합판거푸집	WALL (유로폼)	m <sup>2</sup>	0.4131
	GANG FORM	ELEV. / PIT	m <sup>2</sup>	0.0138
	GANG FORM	요철 측벽	m <sup>2</sup>	0.0119
4	부근CON'C		m <sup>3</sup>	0.0110
	시멘트벽돌	0.5B	천매	0.0308
	시멘트벽돌	1.0B	천매	0.0119
	시멘트		포	1.2765
5	모래		m <sup>3</sup>	0.0986
	합지판	T59	m <sup>2</sup>	0.5125
	합지판	T79	m <sup>2</sup>	0.1348
	결로방지단열재	T9	m <sup>2</sup>	0.1662
	비닐장판지		m <sup>2</sup>	0.4583
	PVC 천정재	육실 천정	m <sup>2</sup>	0.0806
6	PVC 선홈통	Φ150	m	0.0856
	수성페인트	내벽 3회	m <sup>2</sup>	1.2773
	수성페인트	내천정 3회	m <sup>2</sup>	0.0849
	세라믹페인트	3회	m <sup>2</sup>	0.0215
	방청페인트		m <sup>2</sup>	0.0839
	무늬코트		m <sup>2</sup>	0.4842
	다체무늬도료	3회	m <sup>2</sup>	0.1632

② 건축자재 운송단계

운송단계에서의 CO<sub>2</sub> 배출량은 건축물 시공 시 사용되는 대표자재를 자재저장장에서 건설현장까지 운반하는 데 소요되는 화물자동차의 유류소비량으로 한정한다.

운송단계 유류사용량

$$= (\text{각 자재의 물량산출값} / \text{화물자동차 적재량})$$

$$\times \text{거리(km)} / \text{화물자동차의 연비(km/ℓ)} \quad (4)$$

자재운송단계의 CO<sub>2</sub> 배출량

$$= \sum(\text{운송단계 유류사용량} \times \text{CO}_2 \text{ 원단위}) \quad (5)$$

③ 건축물 시공단계

건축물 시공단계에서 배출되는 CO<sub>2</sub> 산출은 현장에서 건축물 시공을 하기위해 소비되는 건설기계장비, 운반 장비, 현장사무소 및 기타시설물에 대한 유류 및 전기 사용량의 총합으로 계산할 수 있다.

$$E_D = 2.39186 \times A_f \quad (6)$$

$$E_G = 0.04841 \times A_f \quad (7)$$

$$E_E = 10.47064 \times A_f \quad (8)$$

여기서 E<sub>D</sub>는 경유사용량[ℓ], E<sub>G</sub>는 휘발유사용량[ℓ], E<sub>E</sub>는 전력사용량[kWh], A<sub>f</sub>는 건축물의 연면적[m<sup>2</sup>]을 나타내며 각 에너지사용량은 본 연구에서 제한한 데이터베이스를 이용하여 식 9과 같이 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하였다.

건축물 시공단계의 CO<sub>2</sub> 배출량

$$= \sum(\text{시공단계의 각 에너지사용량} \times \text{CO}_2 \text{ 원단위}) \quad (9)$$

2) 운영단계

운영단계는 에너지관리공단의 건물에너지효율인증제도<sup>15)</sup>(국토해양부고시 제2009-1306호)에서 제시하고 있는 난방에너지 소비량 산출결과를 사용하였다. 이는 가변난방도일법에 기초하여 난방부하 에너지 소요량을 계산하여 신청주택의 각 세대와 표준주택에 대한 에너지 소요량을 산출하고, 단위세대 및 단위공동주택의 가산항목에 해당하는 절감률을 추가하여 효율등급을 평가한다. 본 연구에서는 난방부하 배출량의 주요 변수인 건축물의 창호와 단열재의 종류에 따라 창호 3종류, 외벽의 구성조합 3종류를 채택하여 9가지의 사양에 따른 난방부하 에너지 사용량을 산정하였다. 건축물의 창호종류와 외벽 사양에 따른 열관류율은 에너지절약설계기준의 단열재 등급분류에 따라 구분하였다.

표 6. 표준건축물 창호종류 및 외벽 사양

구분기호	구성 사양	열관류율(W/m <sup>2</sup> K)
창호 종류	1 금속재복층유리 (열교차단재 적용, 공기층두께 6mm)	3.00
	2 금속재 복층 유리 (Low-E유리, 공기층두께 12mm)	2.20
	3 플라스틱 복층유리 (공기층두께 6mm)	1.55
외벽 사양	가 시멘트몰탈+콘크리트+비드법보온판1종4호 110mm+방습막+석고보드+벽지	0.47
	나 시멘트몰탈+콘크리트+유리면보온판2호 110mm+방습막+석고보드+벽지	0.29
	다 시멘트몰탈+콘크리트+압출법보온판특호 100mm+방습막+석고보드+벽지	0.19

건물에너지 효율등급 프로그램을 이용하여 단위세대 열 손실 및 열취득량을 통한 에너지소비량을 산정했다. 건물의 난방에너지 소요량을 건축물의 수명동안 건축물 난방 방식에 따른 연료별 총 에너지사용량을 산출하고 IPCC의 연료별 탄소배출계수를 이용하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

운영단계 에너지소비량

$$= (\text{신청주택 단위세대 Type별 에너지소요량(GJ)} \times \text{단위세대 Type별 세대수}) \times \text{수명} \quad (10)$$

건축물 운영단계의 CO<sub>2</sub> 배출량

$$= \Sigma(\text{운영단계의 에너지소비량} \times \text{CO}_2 \text{ 원단위}) \quad (11)$$



그림 2. 에너지효율등급 평가프로그램

3) 유지 및 관리단계

건축물의 유지 및 관리단계는 건축물의 생애기간 동안의 건축자재의 열화, 파손, 훼손에 대한 수선 및 교체에 따른 물량 증가량으로 환경부하량을 평가할 수 있다. 하지만 에너지 사용 시점과 그 실측데이터 등은 정확하게 수집하기가 매우 어렵다. 이에 기존의 연구를 이용하여 건축물의 단위 면적 당 유지관리 비용을 산정하고 여기에 금액 당 환경부하 원단위를 곱하여 산정하는 방식을 이용하였다.<sup>16)</sup> 또한 건축물의 수명이 다하여 건축물의 유지 및 보수단계의 CO<sub>2</sub> 배출량을 재건축시 발생하는 CO<sub>2</sub> 량으로 대체하였다.

4) 해체 및 폐기단계

건축물의 해체 및 폐기단계의 분석 범위는 내구수명이 다한 건축물의 해체와 건설폐기물의 처리를 위한 운송을 포함한다. 해체단계에서는 폐기물배출량과 면적을 이용하여 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 폐기물배출량산출은 건설공사 표준품셈<sup>17)</sup>의 RC구조물의 단위면적당 폐기물 배출량을 이용하였다.

해체단계의 CO<sub>2</sub> 배출량

$$= \Sigma(\text{해체장비의 연료소비량} \times \text{CO}_2 \text{ 원단위}) \quad (12)$$

폐기단계에서의 폐기물 배출량과 운송차량 용량, 거리, 연비를 이용하여 발생하는 에너지를 이용하여 이산화탄소 배출량을 산정하였다.

폐기물 운송단계 유류사용량 =

$$(\text{각 폐자재의 양} / \text{화물자동차 적재량}) \times \text{거리(km)} / \text{화물자동차의 연비(km/ℓ)} \quad (13)$$

폐기물 운송단계의 CO<sub>2</sub> 배출량 =

$$\Sigma(\text{폐기물 운송단계 유류사용량} \times \text{CO}_2 \text{ 원단위}) \quad (14)$$

4. 친환경 내구설계 시스템 평가사례 분석

4.1 개요

본 연구에서는 염해 환경에 노출된 공동주택을 대상으로 친환경 내구설계 시스템의 평가 사례 분석을 실시하였다. 건축물의 건설 지역, 용도, 연면적, 층수, 해안선으로부터의 거리를 입력한후 대상건축물의 목표내구수명을 80년, 목표 LCCO<sub>2</sub> 저감율을 표준 건축물 대비 40%로 지정한다.

표 7. 대상 건축물 개요

단위세대 평면도	구분	내용
	건물형태	2호 판상형
	대지위치	속초, 250m
	구조형식	RC조
	세대전용면적	84m <sup>2</sup>
	세대수	40세대
	층수	20층
	난방방식	개별난방방식
	목표내구수명	80년
	목표LCCO <sub>2</sub> 저감율	40%

4.2 내구 수명 계산

KCI 내구수명 산출기법과 관련하여 구축된 데이터에서는 해안선과의 거리 250m에 대해 목표 내구수명을 만족하는 데이터를 추출한다. 초기염화물 이온량은 0kg/m<sup>3</sup>으로 설정하였고 내구설계 대상 부재는 구조체는 균열발생이 없는 건전한 콘크리트 구조체로 공동주택의 외벽을 대상으로 하였다. 물-결합재비와 피복두께 별 철근의 발청한계 염화물 이온량 1.2kg/m<sup>3</sup>을 초과하지 않는 내구설계 조건을 분석한 결과 표 7과 같이 분석 되었다. OPC의 경우 W/B와 피복두께는 40%, 60mm일 때 만족하였고, 고로시멘트의 경우 W/B와 피복두께는 55%, 60mm인 경우와 50%, 60mm인 경우, 45%, 50mm 이상, 40%, 40mm 이상인 경우 등 8가지조건에서 내구수명 80년을 만족하는 것으로 분석 되었다.

표 8. 내구 수명 산정 결과

W/B (%)	시멘트 종류	피복두께별 염화물 이온량 (kg/m <sup>3</sup> )				
		20mm	30mm	40mm	50mm	60mm
60	OPC	2.602	2.414	2.235	2.063	1.900
	고로	2.345	2.051	1.781	1.535	1.312
55	OPC	2.537	2.322	2.118	1.924	1.743
	고로	2.273	1.952	1.661	1.400	1.168
50	OPC	2.452	2.201	1.965	1.746	1.544
	고로	2.181	1.828	1.513	1.237	0.998
45	OPC	2.338	2.042	1.769	1.522	1.298
	고로	2.065	1.674	1.334	1.045	0.804
40	OPC	2.186	1.835	1.521	1.246	1.007
	고로	1.920	1.485	1.123	0.828	0.595

4.3 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정

1) 건설단계

내구설계 조건에 따른 건설단계의 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다. 자재생산단계에서 표준공동주택의 CO<sub>2</sub> 배출량은 1576.5kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>으로 분석되었다. 친환경설계안, 즉 내구설계 조건에 따라 고강도 콘크리트로 대체하여 발생된 투입물량 변화율, 콘크리트 CO<sub>2</sub> 원단위를 적용하여 평가한 결과 자재생산단계의 CO<sub>2</sub>배출량이 최대 6.3% 절감이 되는 것으로 분석되었다. 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 절감률은 강도 변화에 따른 수직부재물량과 CO<sub>2</sub> 원단위의 증감수치가 상쇄되어 3.2% 저감되는 것으로 분석되었고, 철근의 경우는 콘크리트의 강도변화에 따른 수직부재 물량 저감만이 고려되어 8.8%의 CO<sub>2</sub> 절감률을 나타냈다.

운송단계와 시공단계의 CO<sub>2</sub> 배출량은 4.13kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>와 10.96kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>으로 분석되었다. 자재생산단계와 건설단계전체의 이산화탄소 배출량은 하기의 표와 같다.

표 9. 자재생산단계 이산화탄소 배출량

W/B (%)	CO <sub>2</sub> 배출량 (Ton-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )						계
	콘크리트	철근	거푸집군	콘크리트 제품	산업용 플라스틱	도료	
60	0.512	0.953	0.032	0.052	0.027	0.001	1.577
55	0.520	0.949	0.032	0.052	0.027	0.001	1.581
50	0.512	0.923	0.032	0.052	0.027	0.001	1.547
45	0.518	0.897	0.032	0.052	0.027	0.001	1.528
40	0.496	0.869	0.032	0.052	0.027	0.001	1.477

표 10. 건설단계 이산화탄소 배출량

W/B (%)	CO <sub>2</sub> 배출량 (Ton-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )				계
	자재생산	운송	시공	계	
60	1.5759	0.0041	0.0110	1.5910	
55	1.5806	0.0041	0.0110	1.5957	
50	1.5463	0.0041	0.0110	1.5614	
45	1.5270	0.0041	0.0110	1.5421	
40	1.4765	0.0041	0.0110	1.4916	

2) 운영단계

건물에너지효율등급인증제도를 이용하여 80년간의 에너지사용량과 그에 따른 이산화탄소 배출량을 산정한다.

창호의 종류와 외벽의 조합에 따른 열손실 및 열취득량을 이용하여 난방에너지소요량을 산출하였다. 표준공동주택과 평가공동주택의 난방방식은 개별난방으로 설정하였으며 에너지원은 천연가스(LNG)를 적용하였다. IPCC에서 제시된 천연액화가스의 탄소배출계수 15.3 C-kG/GJ을 이용하여 LCCO<sub>2</sub> 배출량을 평가한 결과 표준공동주택은 2005.4kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>으로 평가되었다. 운영단계에서의 최대CO<sub>2</sub> 절감률은 창호-외벽조합 '3-다'를 선택하였을 때 40.16%까지 저감되는 것으로 평가되었다. 표 11은 각 사양에 따른 단위면적당 이산화탄소 배출량을 나타낸 것이다.

표 11. 운영단계 CO<sub>2</sub> 배출량

창호 외벽	난방에너지소요량 (GJ/year)	CO <sub>2</sub> 배출량 (Ton-CO <sub>2</sub> )	단위면적당 CO <sub>2</sub> 배출량 (Ton-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )
1-가	45.405	8151.106	2.005
1-나	41.345	7422.254	1.825
1-다	39.120	7022.822	1.727
2-가	38.537	6918.162	1.701
2-나	34.583	6208.340	1.527
2-다	32.417	5819.500	1.431
3-가	33.105	5943.010	1.462
3-나	29.249	5250.780	1.291
3-다	27.164	4876.481	1.199

3) 유지 및 보수단계

유지 및 보수단계의 CO<sub>2</sub>배출량은 전 생애주기 동안 47.3 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 평가되었다. 평가 공동주택의 경우 내구수명 80년을 만족시키지 못하기 때문에 자재생산단계, 운송단계, 시공단계, 해체 및 폐기단계의 CO<sub>2</sub>배출량을 각각 1회씩 가산하여 평가하였다. 표준건축물의 유지 및 보수단계의 CO<sub>2</sub> 배출량은 1.634kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>으로 평가하였다.

4) 해체 및 폐기단계

건축표준품셈을 이용하여 해체단계에서의 에너지 사용량을 이용하여 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 폐기단계의 투입운송차량은 16ton트럭으로 설정하였고 에너지원은 경유로, 연비는 2.74(km/ℓ)로 설정하고 운송편도거리는 30km으로 설정하여 평가하였다.

평가 결과 해체 및 폐기단계에서 이산화탄소 배출량은 106.6kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 평가되었다.

4.4 친환경 내구설계 평가

표준공동주택의 CO<sub>2</sub>배출량은 5,178.4 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 목표 LCCO<sub>2</sub> 저감률을 만족하는 수치는 3,107.2 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>이다. 친환경 내구설계 평가 결과, 그림3과 같이 내구수명을 만족하는 36종류의 설계조건 중 17종류 설계 조건이 목표 LCCO<sub>2</sub> 저감률 40%를 만족하는 것으로 평가되었다.

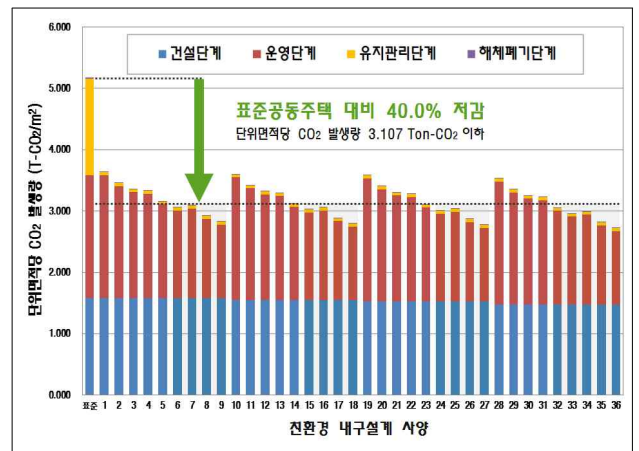


그림 3. 친환경 내구설계 조건별 CO<sub>2</sub> 배출량

표 12. 친환경 내구설계 평가 결과표

구분	W/B (%)	피복 두께 (mm)	창호 외벽	단계별 CO <sub>2</sub> 배출량(Ton-CO <sub>2</sub> )					CO <sub>2</sub> 절감률 (%)
				건설 단계	운영 단계	유지 관리	해체 단계	계	
표준	60	40	1-가	1.576	2.005	0.047	0.011	5.178	0
Case6	55	60	2-다	1.581	1.431	0.047	0.011	3.070	40.721
Case7	55	60	3-가	1.581	1.462	1.634	0.011	3.101	40.122
Case8	55	60	3-나	1.581	1.291	0.047	0.011	2.930	43.425
Case9	55	60	3-다	1.581	1.199	0.047	0.011	2.838	45.201
Case15	50	60	2-다	1.546	1.431	0.047	0.011	3.035	41.397
Case16	50	60	3-가	1.546	1.462	0.047	0.011	3.066	40.798
Case17	50	60	3-나	1.546	1.291	0.047	0.011	2.895	44.100
Case18	50	60	3-다	1.546	1.199	0.047	0.011	2.803	45.877
Case24	45	50	2-다	1.528	1.431	0.047	0.011	3.017	41.744
Case25	45	50	3-가	1.528	1.462	0.047	0.011	3.048	41.146
Case26	45	50	3-나	1.528	1.291	0.047	0.011	2.877	44.448
Case27	45	50	3-다	1.528	1.199	0.047	0.011	2.785	46.225
Case32	40	40	2-나	1.477	1.527	0.047	0.011	3.062	40.875
Case33	40	40	2-다	1.477	1.431	0.047	0.011	2.966	42.729
Case34	40	40	3-가	1.477	1.462	0.047	0.011	2.997	42.131
Case35	40	40	3-나	1.477	1.291	0.047	0.011	2.826	45.433
Case36	40	40	3-다	1.477	1.199	0.047	0.011	2.734	47.210

표 12는 목표내구수명 80년과 목표 LCCO<sub>2</sub> 절감률 40%를 만족시키는 설계 사양과 생애주기별 발생하는 단위면적당 LCCO<sub>2</sub> 배출량을 나타낸다. 최대 LCCO<sub>2</sub> 절감량을 가지는 친환경 내구설계사양은 W/B는 40%, 피복두께 40mm, 창호-외벽을 '3-다' 조합인 경우로 평가되었으며 이때 LCCO<sub>2</sub> 절감률은 47.2%으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 설계초기단계에서부터 내구수명 산정기법을 적용하여 철근 콘크리트 구조물의 목표내구수명과 목표 LCCO<sub>2</sub> 저감량을 만족하는 구조물의 친환경 내구설계조건을 제안하는 시스템 개발을 목적으로 연구를 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 친환경 주택건설의 건설 기준 및 성능에서 제시된 공동주택 평면을 기준으로 CO<sub>2</sub> 배출 주요 자재를 선정하고 건물에너지효율등급인증제도의 난방부하 산정방식을 통한 LCCO<sub>2</sub> 평가기법과 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계 개념을 접목한 친환경 내구설계 시스템을 제안하였다.
2. 내구설계를 통해 강도가 높아진 평가 공동주택은 표준 공동주택과 비교하여 건설단계에서 CO<sub>2</sub> 배출량이 6.3% 저감하는 효과가 있었다.
3. 창호와 단열재 조합변경을 통해 평가 공동주택은 표준 공동주택과 비교하여 운영단계에서 CO<sub>2</sub> 배출량이 40.2% 저감 하는 결과를 얻었다.
4. 내구설계 평가 사례를 대상으로 목표 내구수명 80년

을 만족하는 친환경 내구설계 기법을 평가하여 LCCO<sub>2</sub> 배출량이 약 40%절감되는 사양 17 종류의 설계조건을 제안하였다.

5. 최대 LCCO<sub>2</sub> 절감량을 가지는 친환경 내구설계사양은 W/B는 40%, 피복두께40mm, 창호-외벽을 '3-다' 조합인 경우로 평가되었으며 이때 LCCO<sub>2</sub> 절감률은 47.2%으로 분석되었다.

참고문헌

1. Zhuguo L., A new life cycle impact assessment approach for buildings, Building and Environment, 2006, pp.1414-1422
2. Peuportier B., Putzeys K., Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools, PRESKO European Thematic Network, WP2 Final Report, 2005, p1-48
3. Sungho T., Sungwoo S., Jeehwan W., Seungjun R., The development of apartment house life cycle CO2 simple assessment system using standard apartment houses of South Korea, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, pp.1454-1467
4. Kanghee L., Sungho T., Sungwoo S., Development of a Life Cycle Assessment Program for building (SUSB-LCA) in South Korea, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, pp.1994-2002
5. 이강희, 류승훈, 이은택, 정미홍, 공동주택 라이프사이클 이산화탄소 산정 프로그램(Eco-pia) 개발에 관한 연구, 한국전과정평가학회지, 2010년, pp.49-58
6. 태성호, 백정훈, 김태형, 철근 콘크리트 구조물의 친환경 내구설계 시스템 제안 및 평가, 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집, 2009년, pp.97-102
7. 국토해양부, 친환경 주택건설의 건설기준 및 성능, 친환경주택의 설계 및 성능평가 지침, 2009년, pp.6-9
8. 에너지관리공단, 건축물의 에너지절약설계기준, 2011년, pp. 54-61
9. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서 내구성편, 2004년, pp. 15-17
10. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 2009년 pp.119-124
11. 최준철, 김영찬, RC조 건물에서 콘크리트강도 변경의 효율성에 대한 연구, 대한건축학회 논문집 2008년, pp.209-214
12. 직산연구회, 건축공사일위대가, 대건사, 2009년 pp.258-301
13. 한국은행, 2003년 산업연관표, 2003년, pp.313-846
14. 김태형, 태성호, 콘크리트 생산에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 평가 시스템 개발에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 2010년, pp. 787-796
15. 에너지관리공단, 건물에너지 효율등급 인증제도 운영규정, 2011년, pp.1-19
16. 정영선, 최경석, 강제식, 이승언, 건축물의 환경부하 평가를 위한 LCA 프로그램 개발에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 2008년, pp.259-266
17. 한국건설기술연구원, 건설공사 표준품셈, 2009년 pp.796-798

투고(접수)일자: 2011년 5월 11일  
 심사일자: 2011년 5월 17일  
 게재확정일자: 2011년 7월 27일