

# 철근 생산과정의 에너지 사용량 및 CO<sub>2</sub>배출량 산출에 관한 연구

## A Study on Energy Consumption and Estimation of CO<sub>2</sub> from Re-bar Production

최재휘\*  
Choi, Jae-Hwi

이동훈\*\*  
Lee, Dong-Hoon

권기덕\*\*\*  
Kwon, Gi-Deoc

김선국\*\*\*\*  
Kim, Sun-Kuk

### Abstract

As global warming progresses, nations around the world are trying to reduce emission of CO<sub>2</sub> that accounts for the greatest portion of greenhouse gases. To reduce CO<sub>2</sub> emission, it is first necessary to estimate CO<sub>2</sub> emission of each industry. Government authorities estimate basic unit of CO<sub>2</sub> emission from re-bar that is one of the key materials of construction industry with LCA technique (Life Cycle Assessment). However, basic unit of CO<sub>2</sub> emission varies from organization to organization. The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2004) publishes it 3.48(TCO<sub>2</sub>/ton) and 0.30(TCO<sub>2</sub>/ton) with input-output analysis while the Korea Environmental Industry & Technology Institute (2008) defines it as 0.34(TCO<sub>2</sub>/ton) with process analysis, which indicates ambiguity in application of basic unit of CO<sub>2</sub> emission. Based on the analysis of conventional methods used for estimating the CO<sub>2</sub> emission, therefore, this research suggests existing problems on the methods and focuses on proposing an strategy to effectively estimate the basic unit of CO<sub>2</sub> emission according to the energy consumption limited to the re-bar production in steel mill in order to overcome the problems. The result of this research is expected to be helpful in calculating and reducing CO<sub>2</sub> emission.

키워드 : LCA, 제강소, 철근 생산, 에너지 사용량, CO<sub>2</sub> 산정

Keywords : LCA, Steel mill, Re-bar production, Energy consumption, CO<sub>2</sub> estimation

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

CO<sub>2</sub>배출량 저감을 위하여 먼저 각 산업의 CO<sub>2</sub>량 산정이 필요하다. 건설산업에서 주요 자재로 사용하는 철근은 국가 기관 및 여러 연구자에 의해 LCA(Life Cycle Assessment) 기법으로 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정한 바 있다.

이강희 외 1인(2009)은 산업연관분석의 생산유발계수에 따라 일반철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 4.8869(TCO<sub>2</sub>/ton), 1.8208(TCO<sub>2</sub>/ton)로, 김종엽 외 2인(2004)은 이형철근을 0.1829(TCO<sub>2</sub>/ton), 원형철근을 0.1899(TCO<sub>2</sub>/ton)로 산정하였다. 그리고 건설교통부(2004)는 산업연관분석의 생산유발계수에 따라 일반철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 3.5000(TCO<sub>2</sub>/ton), 0.3015(TCO<sub>2</sub>/ton)로 산정하였다. 그러나 연구자에 따라 CO<sub>2</sub>배출원단위가 상이하므로 선택의 문제가

남아있다. 또한 상대평가에 머무는 산업연관방식에 의한 값이므로 CO<sub>2</sub>저감을 위한 정확한 CO<sub>2</sub>량 산정을 고려하면 한계가 있다. 따라서 공정분석을 통해 CO<sub>2</sub>량을 직접 계측하여 산정 값의 신뢰도가 높은 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정이 시급한 실정이다.

한국환경산업기술원(2008)은 유일하게 개별적산방식을 통해 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 0.3405(TCO<sub>2</sub>/ton)로 공시하고 있다. 그러나 기존의 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>산정은 산출물을 일일이 계측하므로 시간과 비용이 많이 소요된다.

따라서 본 연구는 LCA 기법에 따른 기존 철근 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정의 문제점을 분석하여 제강소의 철근 생산에 따라 효과적으로 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정할 수 있는 개선방안을 제시하고 타당성을 검토하고자 한다.

본 연구의 결과는 제강회사 및 국가차원의 CO<sub>2</sub>저감관리에 긍정적 영향을 미칠 것이며, 생산 이후 단계의 CO<sub>2</sub>산정에 따라 철근 전 과정 CO<sub>2</sub>배출량 산정이 가능할 것으로 기대된다.

\* 경희대학교 건축공학과 석사과정 (chjheda@naver.com)

\*\* 교신저자, 경희대학교 건축공학과 박사과정 (donghoon@khu.ac.kr)

\*\*\* 경희대학교 건축공학과 석사과정 (okkkd@nate.com)

\*\*\*\* 경희대학교 건축공학과 정교수, 공학박사 (kimskuk@khu.ac.kr)

**1.2 연구의 범위 및 방법**

본 연구는 효과적인 연구진행과 결과도출을 위해 경로가 다양하고 복잡한 원자재 채취와 운송은 고려대상에서 제외하고, 제강소의 철근 생산에 한정한다. 그리고 한국철강협회의 회원사 7개 업체 중 5개 업체가 사용하는 전기로 제강방식을 대상으로 한다. 또한 국내 철근 생산의 약 37.92%(H사 4분기 기업설명회 보고서, 2006)를 차지하고, 유일하게 사용에너지에 대한 자료를 공시하는 H사를 기준으로 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정한다. 그리고 이 값이 국내 철근 생산의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 대표한다고 가정한다.

철근 생산의 CO<sub>2</sub>산정을 위해서는 생산프로세스의 기본적인 내용을 충분히 인식하고, 적절한 방법에 의한 모델 구축이 필수적이다. 본 연구는 철근 생산에 따른 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정의 개선방안을 도출하기 위하여 다음과 같이 진행한다.

첫째, 지금까지 국내 및 국외에서 수행된 CO<sub>2</sub>산정 관련연구에 대해 고찰한다.

둘째, 공식적인 자료를 참고하여 에너지원을 활용한 CO<sub>2</sub>산출 방법을 알아본다.

셋째, LCA기법에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정사례를 분석하여 문제점을 도출한다.

넷째, 제강소의 철근 생산에 따라 적절하게 사용할 수 있는 개선된 방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정모델을 제시한다.

다섯째, H사의 한정된 자료를 참고하여 개선방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정하고, 타당성을 검증한다.

**2. 예비적 고찰**

**2.1 관련연구동향**

L. Price 외 5인(2001)은 중국의 철강 생산에 따른 에너지 사용량과 CO<sub>2</sub>배출량 산정에 대한 기존 통계방법의 문제점을 지적하고 새로운 방법 적용 시 45%의 저감효과가 있음을 설명하였다. Angela Acree Guggemos 외 1인(2005), Timothy Werner Johnson(2006)은 LCA기법을 이용하여 철강과 콘크리트 구조 빌딩의 환경영향을 비교하였다. 그러나 철근 생산을 중점으로 기법에 따른 CO<sub>2</sub>배출량의 차이와 CO<sub>2</sub> 산정의 개선방안을 제시한 연구는 없다.

지금까지 국내에서는 건설 산업에서 건축자재를 대상으로 한 에너지소비 및 CO<sub>2</sub>배출원단위, 환경부하 산출방법에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 다음 표 1은 기존 연구에서 제시한 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위이다.

표 1. 기존 연구자에 의한 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위

연구자	산정방식	대상	CO <sub>2</sub> 배출원단위 (TCO <sub>2</sub> /ton)
이강희(2009)	산업연관방식 (I-A) <sup>-1</sup> 형 (I-Ad) <sup>-1</sup> 형	일반철근	4.8869
			1.8208
김중엽(2004)	산업연관방식	이형철근	0.1829
		원형철근	0.1899

이강희 외 1인(1996, 2009), 김중엽 외 2인(2004, 2005), 정영선 외 4인(2007)은 주요 건축자재 및 건설단계의 에너지소비 및 환경부하 산정에 관한 연구를 하였다. 그러나 모든 연구들은 시간과 비용 측면에서 효율적으로 CO<sub>2</sub>배출원단위 값을 산출할 수 있지만 상대적인 평가라는 한계를 가지는 산업연관방식에 의한 것이었다. 그리고 연구자에 따라 CO<sub>2</sub>배출원단위 값이 상이하다. 따라서 CO<sub>2</sub>배출원단위의 타당성이 문제시 된다.

표 2는 최신의 국내 기관별 LCI DB(Life Cycle Inventory database) 구축현황이다. 한국환경산업기술원(2008)은 개별적산방식에 의해 개발되어 물질 및 부품제조, 수송, 폐기에 관련된 358개의 모듈을 관리하고, 건설교통부(2004)는 산업연관방식에 의해 개발된 건설자재부문 250개의 모듈을 관리한다. 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위는 국가 기관, LCA기법, 분석 기간에 따른 차이가 반영되어 상이한 값을 나타낸다. 건설교통부(2004)는 환경부 및 산업자원부(2004)에서 제시한 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위 값과 비교하였으나 구체적인 분석이 아닌 단순한 현황 파악에 머무르고 있다.

표 2. 국가 기관별 LCI DB 구축현황

구분	한국환경산업기술원	건설교통부
개발 모듈 수	358개	250개
관리운영 기관	환경부, 산업자원부	한국건설기술연구원, 건설교통부
공개일	2008년 7월 1일	2004년 12월 5일
모듈개발 방법	개별적산법 (Process Method)	산업연관분석법 (I/O Method)
모듈내용	물질 및 부품제조(260개), 수송(35개), 폐기(28개) → 총 358개	1995년, 2000년 산업연관표를 이용하여 건설자재부문(250개) 구축
철근의 CO <sub>2</sub> 배출원단위	국가 LCI DB 정보망 → 0.3405 (TCO <sub>2</sub> /ton)	건축물 LCA를 위한 원단위 작성 및 프로그램 개발 연구 - 건설교통기술혁신사업 제2차년도 최종보고서 → 3.500(TCO <sub>2</sub> /ton) : (I-A) <sup>-1</sup> 형 활용 → 0.3015(TCO <sub>2</sub> /ton) : (I-Ad) <sup>-1</sup> 형 활용

또한 조균형 외 1인(2003)은 LCA기법에 따른 에너지 및 환경부하 산출방법론을 비교한 연구를 하였다. 그러나 시멘트를 대상으로 LCA기법에 따른 CO<sub>2</sub>배출량의 차이를 비교하고, 방법에 따른 장단점에 대해서만 제시하고 있어 선택의 문제를 연구자에게 남겨놓았다.

건설 산업의 CO<sub>2</sub>산정을 위해서는 특정 자재들을 중점 대상으로 한 많은 연구가 필요하며, 상황에 맞게 LCA기법을 달리하거나 조합하는 방식으로 값을 도출해야 한다. 특히 철근은 건설에서 많이 사용되는 주요자재임에도 불구하고 현재까지 적절하고 효과적이지 못한 방식으로 CO<sub>2</sub>를 산정한다. 또한 산출방식에 따라 CO<sub>2</sub>배출원단위가 다르기 때문에 선택 및 적용 시 문제를 가진다.

## 2.2 LCA기법

LCA는 제품 또는 시스템의 전 과정에 걸쳐 필연적으로 발생하는 환경부하를 규명하고, 환경부하가 환경에 미치는 영향을 평가하여 이를 저감, 개선하고자하는 기법이다.

이 기법의 목적은 인간 활동의 다양한 국면에서 환경부하를 저감하는 방향으로 의사결정을 하기 위한 판단재료를 제공하는데 있다.

제품이나 시스템의 파급효과를 포함한 에너지소비량과 환경부하의 LCA는 크게 나누어 일반적인 방식인 개별적 산법(process analysis)과 산업연관분석법(Input-Output analysis), 그리고 이 두 가지를 조합한 혼합방법(hybrid method)의 3가지로 구분할 수 있다.

개별적산법은 한 제품이 만들어지기 위해 투입되는 모든 물질의 종류와 양, 그리고 투입되는 물질에 따라 배출되는 환경부하와 부산물 등을 일련의 공정도 추정으로 목록분석을 행하는 방법이다.

산업연관분석법은 적산법과 같은 직접적인 조사·분석방법이 아니라 건축물이 가지고 있는 특성을 활용한 간접적인 목록분석 기법으로 국내 산업 간의 거래 기록표인 산업연관표를 이용하여 목록분석의 데이터 값을 추정하는 매크로적인 방식이다.

혼합법은 개별적산법과 산업연관분석법을 적절히 혼합하여 분석하는 방식이다.

조준형 외 1인(2003)에 따르면 이론적 분석방법론의 비교결과, 분석범위와 시간·비용적 측면은 산업연관분석법이 가장 효과적이고, 데이터의 신뢰성과 분석공정의 반영도 측면은 개별적산법과 혼합법이 양호한 것으로 나타난다.

## 2.3 에너지를 활용한 CO<sub>2</sub>배출량 산정방법

CO<sub>2</sub>량을 산출하기위해 에너지기본법 시행규칙 제5조 제1항의 에너지원별 순발열량(GJ)과 1996년에 개정된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) Reference Manual, 국가에너지통계 종합정보시스템에서 에너지경제연구원이 제시한 탄소배출계수(TC/GJ)를 이용한다.

여기서 순발열량은 단위 에너지원의 총발열량에서 수증기 잠열을 제외한 발열량이다. 순발열량을 활용하는 것은 자연현상에 의한 CO<sub>2</sub>발생을 제외하고 인위적인 상황에 따른 CO<sub>2</sub>발생 요소를 반영하기 위함이다.

국가 고유의 배출계수가 없는 국내 여건상 IPCC에서 제시하고 있는 탄소배출계수(TC/GJ)를 사용한다. 이는 탄소톤(TC)을 구하는데 사용되기 때문에 탄소톤(TC)을 이산화탄소톤(TCO<sub>2</sub>)으로 전환할 필요가 있다. 탄소분자량이 12이고 산소분자량이 16이므로 이산화탄소발생량=탄소발생량×(44/12)이다. 본 연구에서 제시하는 CO<sub>2</sub>배출계수(TCO<sub>2</sub>/GJ)는 탄소배출계수(TC/GJ)를 위의 식으로 변환한 것이다.

IPCC Reference Manual에 나와 있지 않은 전력의 경

우는 국가에너지통계 종합정보시스템에서 에너지경제연구원이 제시한 CO<sub>2</sub>배출계수(TCO<sub>2</sub>/MWh)를 활용하면 된다. 전기에너지 사용량의 단위인 MWh로 변환하면 CO<sub>2</sub>량을 산정할 수 있다. 다음 표 3은 에너지원에 따른 순발열량과 CO<sub>2</sub>배출계수를 나타낸 것이다.

표 3. 에너지원별 순발열량 및 CO<sub>2</sub>배출계수  
(에너지기본법 시행규칙 제5조 제1항,  
1996 IPCC Reference Manual, 에너지경제연구원)

에너지원	단위	순발열량		전력 외의 CO <sub>2</sub> 배출계수 : (TCO <sub>2</sub> /GJ)
		kcal	GJ환산	전력의 CO <sub>2</sub> 배출계수 : (TCO <sub>2</sub> /MWh)
원유	kg	10,100	0.0423	0.0733
휘발유	ℓ	7,400	0.0310	0.0693
실내등유	ℓ	8,200	0.0343	0.0719
보일러등유	ℓ	8,350	0.0350	0.0719
경유	ℓ	8,450	0.0354	0.0741
B-A유	ℓ	8,750	0.0366	0.0774
B-B유	ℓ	9,100	0.0381	0.0774
B-C유	ℓ	9,350	0.0391	0.0774
프로판	kg	11,050	0.0463	0.0631
부탄	kg	10,900	0.0457	0.0631
나프타	ℓ	7,450	0.0312	0.0733
용제	ℓ	7,350	0.0308	0.0733
항공유	ℓ	8,200	0.0343	0.0715
아스팔트	kg	8,350	0.0391	0.0807
윤활유	ℓ	8,650	0.0362	0.0733
석유코크	kg	7,850	0.0329	0.1008
부생연료1호	ℓ	8,350	0.0350	0.0179
부생연료2호	ℓ	9,200	0.0385	0.0774
천연가스(LNG)	kg	11,750	0.0492	0.0561
도시가스(LNG)	Nm <sup>3</sup>	9,550	0.0400	0.0561
도시가스(LPG)	Nm <sup>3</sup>	13,800	0.0578	0.0631
국내무연탄	kg	4,600	0.0193	0.0983
수입무연탄	kg	6,400	0.0268	0.0983
유연탄(연료용)	kg	5,950	0.0249	0.0946
유연탄(원료용)	kg	6,750	0.0283	0.0946
아역청탄	kg	5,000	0.0209	0.0946
코크스	kg	7,000	0.0293	0.1082
전력	KWh	2,150	0.0090	0.4240
신탄	kg	-	-	-

## 3. 기존방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원 단위 산정

### 3.1 산업연관방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원 단위

#### 3.1.1 산업연관분석의 원리

산업연관분석은 일정기간 동안 국민 경제 내에서 생산된 모든 재화와 서비스의 산업간 거래관계를 일정한 원칙에 따라 행렬형식으로 기록한 산업연관표를 바탕으로 산업간 상호연관관계를 수량적으로 분석하는 방법이다.

산업연관표로부터 산출되는 투입계수는 각 산업부문으로 파급되는 생산유발효과의 크기를 계측하는데 이용되지만, 산업부문수가 많은 경우에는 투입계수를 매개로 하여 무한히 계속되는 생산파급효과를 일일이 계산한다는

것이 현실적으로 불가능하다. 따라서 역행렬로 생산유발계수를 도출하여 이용하게 된다. 다음 식 (1)은 최종수요 변동에 따라 각 산업부문에서 직·간접적으로 유발되는 총산출액을 산정할 수 있는 수급방정식이다.

$$AX + Y = X$$

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad (1)$$

여기에서,  
 I : 주대각요소가 모두 1이고 그 밖의 요소는 0인 단위행렬  
 A : 투입계수행렬  
 $(I - A)^{-1}$  : 생산유발계수  
 Y : 최종수요 벡터  
 X : 각 산업부문별 총 산출액(투입량)

3.1.2 산업연관분석에 의한 CO<sub>2</sub>산출 프로세스

산업연관표의 에너지산업 부문은 19개이다. 이들 에너지 산업 중, 연소가 되지 않고 2차 에너지산업의 원료로만 투입이 되거나 기타 제품의 원료로 직접 투입됨으로 CO<sub>2</sub>배출에는 영향을 미치지 않는 에너지산업을 제외하고, 실질적으로 연소가 이루어지는 무연탄, 유연탄, 연탄, 석탄 코크스 광물타르 및 분류카본, 휘발유, 제트유, 등유, 경유, 중유, 액화석유가스, 도시가스의 11가지 에너지원이 CO<sub>2</sub>배출에 영향을 준다고 가정한다(한국건설기술연구원, 2004). 추계된 에너지원의 생산유발계수와 최종수요 벡터를 이용해 각 부문의 생산유발액을 산출한다.

각 에너지원의 단위가격은 부문별·품목별 공급액표에 공시되어 있다. 단위가격을 활용하면 에너지원별 단위당 물량을 알 수 있다. 단, 부문별·품목별 공급액표는 2000년 산업연관표 실측표에만 나타나므로 2000년 이후의 단위가격을 알고 싶으면 생산자물가지수를 이용하여 환산할 필요가 있다.

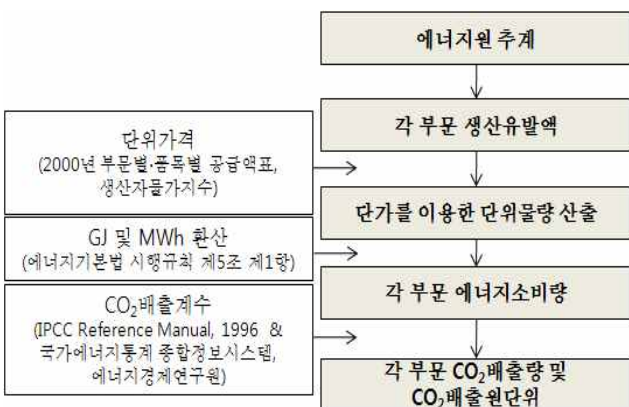


그림 1. 산업연관분석에 의한 CO<sub>2</sub>산출 프로세스

에너지원별 단위당 물량을 에너지소비량으로 환산하고, CO<sub>2</sub>배출계수를 적용하면 구하고자 하는 제품의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정할 수 있다. 그림 1은 산업연관분석에 의한

CO<sub>2</sub>산출 프로세스를 나타내고 있다.

3.1.3 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정사례

2000년 산업연관표를 이용한 건설교통부(2004)의 연구에서 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정결과는 다음 표 4와 같다.

표 4. 단위기준당 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위(건설교통부, 2004)

생산유발계수	부문명칭	단위	단가 (원)	CO <sub>2</sub> 배출원단위 (kg-CO <sub>2</sub> /kg)
(I-A) <sup>-1</sup>	일반철근	kg	287	3.5000
	고장력철근	kg	284	3.4660
(I-Ad) <sup>-1</sup>	일반철근	kg	287	0.3015
	고장력철근	kg	284	0.2986

일반철근을 기준으로 했을 때 (I-A)<sup>-1</sup>형의 생산유발계수에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위는 3.5000(kg-CO<sub>2</sub>/kg)이고, (I-Ad)<sup>-1</sup>형에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위는 0.3015(kg-CO<sub>2</sub>/kg)이므로 약 11.6배의 차이가 있다. 이는 생산유발계수의 차이에 따른다. 비경쟁형 생산유발계수인 (I-Ad)<sup>-1</sup>은 국산과 수입을 구분하여 작성하기 때문에 국산거래표를 이용하면 최종수요 발생에 따른 국내생산과급효과만을 파악하는데 적합하다. 그러나 많은 건축 자재 및 원료에서 수입부문의 비중이 날로 커지고 있음을 감안하면 국산품과 수입품을 구분하지 않고 각 수요부문에 일괄 배분하는 경쟁형 생산유발계수인 (I-A)<sup>-1</sup>을 사용하는 것이 바람직하게 보인다. 그러나 경쟁형 생산유발계수를 사용하는 것은 철근을 생산하기 위해 필요한 수입 원료 및 에너지까지 반영된 것이기 때문에 해외에서 발생된 CO<sub>2</sub>까지 포함한 결과로 나타난다. 따라서 국내 철근산업에 한정된 CO<sub>2</sub>산정을 위해서는 미비한 점이 있다.

또한 산업연관방식은 각 산업부문의 최종수요를 위해 직·간접적으로 유발하는 모든 요소를 포함하는 특징을 가지고 있기 때문에 제강소 생산에 국한된 CO<sub>2</sub>배출원단위 산출이 어렵다.

3.2 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위

3.2.1 제강소의 철근생산프로세스

전기로 제강에 의한 철근 생산은 먼저 철스크랩(철강재 생산과정, 철강수소산업의 가공과정, 철강을 소재로 한 제품의 폐기과정에서 발생하는 고철)이나 환원철을 장입한다. 그리고 전극에 전류를 통함으로써 전극과 철스크랩 사이에 발생하는 아크열(전기 방전 시 발생하는 열)로 고철을 용해하여 쇳물을 제조하는 전기로 제강을 거친다. 이후, 전기로에서 나온 쇳물을 LF(Ladle Furnace: 쇳물을 정련하는 설비)에서 아크열로 승온 및 성분조정을 하고 용융된 쇳물을 연속적으로 주조하여 반제품을 만들게 된다. 반제품이란 최종 철강제품을 생산하기 위한 중간단계의 제품으로 철근의 재료가 되는 반제품은 빌렛(절단면의 한 변이 60~160mm, 길이는 1~9m)이다. 제강공정을

통하여 빌렛이 만들어지게 되면 압연공정을 통하여 다양한 규격(두께, 길이)의 철근을 만들어지게 된다. 압연공정은 먼저 빌렛을 압연에 필요한 온도까지 가열하고 두 개의 롤에 힘을 가하여 빌렛을 원하는 모양의 완제품인 철근으로 만드는 과정을 말한다. 아래 그림 2는 전기로 방식에 의한 철근 생산프로세스를 나타낸 것이다.

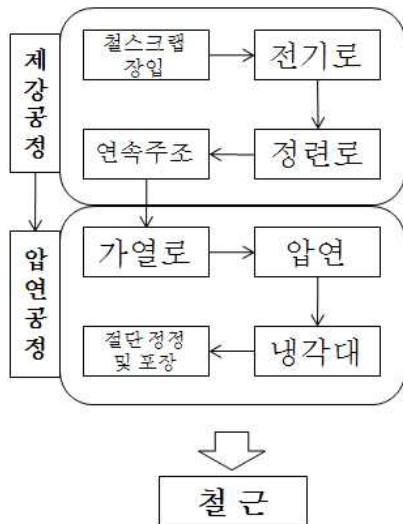


그림 2. 전기로 방식의 철근생산프로세스

### 3.2.2 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정사례

표 5는 철근생산프로세스에 따라 철근 1kg을 생산 시 0.001kg 이상 투입되는 자원 및 원자재의 명칭과 양, 그리고 이에 따른 CO<sub>2</sub>배출원단위를 표기한 것이다.

표 5. 제강소의 철근 생산에 따른 투입 및 산출물 (한국환경산업기술원, 2008)

INPUT	값 (kg/철근 1kg)	OUTPUT	값 (kg/철근 1kg)
Air	0.0033	Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	0.3405
Crude oil	0.0235		
Dolomite(CaMg(CO <sub>3</sub> ))	0.0078		
Graphite	0.0018		
Hard coal	0.1436		
Iron ore	0.0247		
Limestone	0.0405		
Natural gas	0.0208		
Sand(SiO <sub>2</sub> )	0.0037		
Steel scrap	1.2229		
Water	7.5879		
Unspecified materials	0.0016		

한국환경산업기술원(2008)이 제시하는 개별적산방식에 의한 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위는 0.3405(kg-CO<sub>2</sub>/kg)이다. 이는 철근 생산 공정에 투입되는 모든 자원 및 원자재를 조사하고 산출물을 직접 계측한 결과이기 때문에 신뢰성

이 크다. 그러나 CO<sub>2</sub>배출원단위에 영향을 미치는 투입물과 산출물 간의 연계성에 대한 설명이 없다. 즉, 투입물과 산출물의 계측결과를 나열하고 투입물이 산출물에 어떻게 영향을 미치는지 알 수 없다. 이는 환경부하 평가를 위한 체계가 제대로 구비되어 있지 않고 CO<sub>2</sub>배출량 산정을 위해 시간과 비용이 많이 소요됨을 반증한다. 한국환경산업기술원은 2008년에 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 공시하였지만 2001년에 기록하여 산정한 값이다. CO<sub>2</sub>배출원단위가 수시로 산정되지 못하는 문제점을 드러내고 있다.

## 4. 개선적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위

### 4.1 철근 생산 시 소요되는 에너지

2006년 기준으로 국내 철근 총 생산량은 10,049,000톤(한국철강협회)이고, H사의 철근 생산량은 3,811,000톤(H사 4분기 기업설명회 보고서, 2006)이다. H사는 국내 철근 총생산의 약 37.92%를 차지하고 있으며, 최대 생산기업이다. 따라서 H사의 제품 생산에 사용되는 에너지원은 대표성을 가진다.

2007년 H사의 환경보고서에 따르면 에너지 사용비율은 2004년에 전기 82.8%, LNG(도시가스) 11.1%, 병커C유 5.9%로 3개의 에너지가 담당하는 사용비율이 전체 에너지사용의 99.8%를 차지한다. 2005년에는 전기 84.1%, LNG(도시가스) 10.7%, 병커C유 5.1%로 3개의 에너지가 총 99.9%를 차지하고, 2006년에는 전기 82.6%, LNG(도시가스) 12%, 병커C유 5.4%로 3개의 에너지가 전체 사용에너지의 100%를 차지한다. 본 연구에서는 사용량이 매우 적은 0~0.2%의 에너지원들은 고려하지 않는다. 따라서 전기로 제강공정에 의해 철근을 생산하는데 필요한 에너지원은 전기, 병커C유, LNG(도시가스)이다.

위의 그림 3은 철근을 생산하는 전기로 공정에서 투입되는 원료 및 에너지와 이에 따라 발생하는 배출물을 나타내고 있으며 대기배출물에는 CO<sub>2</sub>가 포함되어 있다.

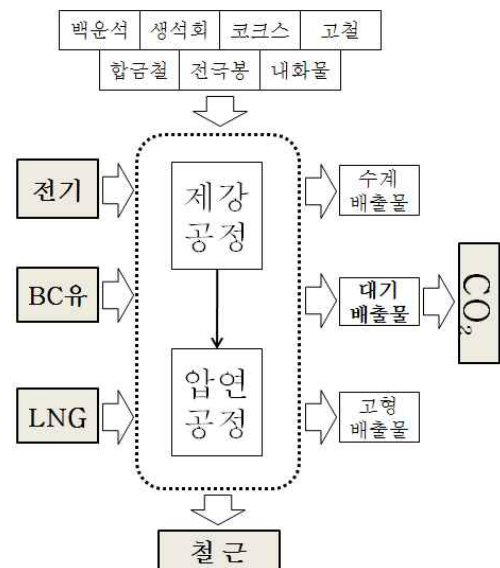


그림 3. 철근 생산 시 소요 에너지와 CO<sub>2</sub> 배출과의 관계

### 4.2 CO<sub>2</sub>배출원단위 개선모델

철근의 생산을 위해 투입되는 에너지원은 전력, 병커C유, LNG(도시가스)이다. 2.3절에서 언급한 에너지원을 활용한 CO<sub>2</sub>배출량 산정방법을 사용하면 제강소에 한정된 철근 생산의 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정이 가능하다.

각각의 에너지 소비량을 측정하여 순발열량(GJ)으로 환산시키고, CO<sub>2</sub>배출계수(TCO<sub>2</sub>/GJ or TCO<sub>2</sub>/MWh)를 통하여 CO<sub>2</sub>배출량(TCO<sub>2</sub>)을 산정한다. 최종적으로 생산된 철근량(Ton)을 적용하면 CO<sub>2</sub>배출원단위(TCO<sub>2</sub>/Ton)가 산출된다.

생산 공정 단계별 전력, 병커C유, LNG(도시가스)의 투입량에 대한 조사가 수행된다면 각 단계의 산출물에 대한 CO<sub>2</sub>배출량 데이터를 얻을 수 있다. 이로 인해 철근 생산 공정에 따른 세분화된 CO<sub>2</sub>발생량 차이를 알 수 있으며, 추후 CO<sub>2</sub>저감 관리에 영향을 줄 수 있다.

그림 4는 철근 생산에 따른 CO<sub>2</sub>배출원단위를 공정에 따라 세분화하여 간편하게 산정할 수 있는 개선모델을 도식화한 것이다.

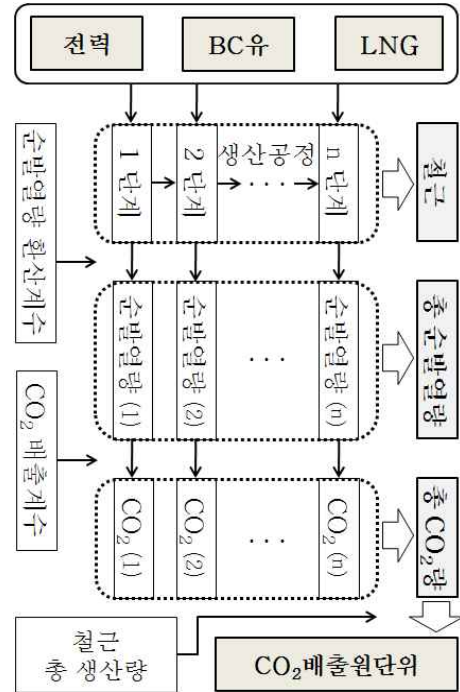


그림 4. 철근 생산의 CO<sub>2</sub>배출원단위 개선모델

### 4.3 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정

현재 철근 생산 시 공정별로 투입되는 에너지원의 종류 및 양을 공시한 제강회사는 없다. 그러나 H사는 유일하게 자사의 보고서를 통해 철근의 생산량, 업체의 총에너지 사용량, 에너지 사용비율을 공시하고 있다. 따라서 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위 추정이 가능하다.

2006년의 H사 제품 총생산량은 9,288,000톤(H사 4분기 기업설명회 보고서, 2006)이고, 에너지 총사용량은

65,146,044GJ(H사 환경보고서, 2007)이다. 2006년 철근의 총 생산량은 3,811,000톤(H사 4분기 기업설명회 보고서, 2006)이므로 철근을 생산하는데 사용된 에너지량은 26,730,359GJ로 추정된다.

2007년 H사 환경보고서에서 공시한 2006년의 에너지 사용비율(전기 82.6%, LNG(도시가스) 12%, 병커C유

표 6. H사의 CO<sub>2</sub> 산정 관련자료 및 CO<sub>2</sub>배출원단위

년도	2004			2005			2006		
제품 총생산량(톤)	7,848,000			8,180,000			9,288,000		
에너지 총사용량(GJ)	52,581,600			62,226,008			65,146,044		
철근 총생산량(톤)	3,787,000			3,778,000			3,811,000		
철근을 생산하는데 사용된 에너지양(GJ)	25,372,900			28,739,591			26,730,359		
에너지 사용비율(%)	전기	LNG	병커C유	전기	LNG	병커C유	전기	LNG	병커C유
	82.8	11.1	5.9	84.1	10.7	5.1	82.6	12	5.4
에너지별 소비량(GJ)	전기	21,008,761 ->2,334,307MWh		전기	24,169,996 ->2,685,555MWh		전기	22,079,277 ->2,453,253MWh	
	LNG	2,816,392		LNG	3,075,136		LNG	3,207,643	
	병커C유	1,497,001		병커C유	1,465,719		병커C유	1,443,439	
에너지별 CO <sub>2</sub> 배출량 (TCO <sub>2</sub> )	전기	989,746		전기	1,138,675		전기	1,040,179	
	LNG	158,000		LNG	172,515		LNG	179,949	
	병커C유	115,868		병커C유	113,447		병커C유	111,722	
철근 생산의 CO <sub>2</sub> 총배출량 (TCO <sub>2</sub> )	1,263,614			1,424,637			1,331,850		
철근 생산의 CO <sub>2</sub> 배출원단위 (TCO <sub>2</sub> /ton)	0.3337			0.3771			0.3495		
2004~2006년 CO <sub>2</sub> 배출원단위 평균값 (TCO <sub>2</sub> /ton)				0.3534					
2004년과 2006년의 CO <sub>2</sub> 배출원단위 평균값 (TCO <sub>2</sub> /ton)				0.3416					

5.4%)을 적용하여 에너지별 소비량을 구하면 전기는 22,079,277GJ, LNG(도시가스)는 3,207,643GJ, 벙커C유는 1,443,439GJ이다. 에너지기본법 시행규칙 제5조 제1항에 따르면 1KWh는 0.009GJ이므로 전기의 사용에너지는 2,453,253MWh이다.

이 값들에 CO<sub>2</sub>배출계수를 적용하면 에너지별 이산화탄소 배출량은 전기 1,040,179TCO<sub>2</sub>, LNG(도시가스) 179,949TCO<sub>2</sub>, 벙커C유 111,722TCO<sub>2</sub>이다. 따라서 철근을 생산하는데 발생하는 이산화탄소 총배출량은 1,331,850TCO<sub>2</sub>이다. 2006년 철근의 총 생산량은 3,811,000톤이므로 철근 생산의 CO<sub>2</sub>배출원단위는 0.3495(TCO<sub>2</sub>/ton)이다.

2004년 이전과 2006년 이후에는 공시된 자료가 없으므로 철근 생산의 CO<sub>2</sub>배출원단위 추정이 불가능하지만

2004년도와 2005년도 철근 생산에 따른 CO<sub>2</sub>배출원단위는 표 6에 나타난 바와 같이 H사 기업설명회 보고서와 환경보고서의 데이터를 받쳐 및 참고하여 추정할 수 있다. 2004년도 CO<sub>2</sub>배출원단위는 0.3337(TCO<sub>2</sub>/ton)이고, 2005년도 CO<sub>2</sub>배출원단위는 0.3771(TCO<sub>2</sub>/ton)이다.

2004년 대비 2005년도 CO<sub>2</sub>배출원단위가 약 13% 증가한 이유는 공장 증설에 따른 에너지의 일시적 과다 사용에 있다(H사 환경보고서, 2007).

2004~2006년의 개선된 개별적산방식에 따른 H사 평균

CO<sub>2</sub>배출원단위는 0.3534(TCO<sub>2</sub>/ton)이다. 그러나 특별한 상황이었던 2005년도 CO<sub>2</sub>배출원단위를 제외한 2004년과 2006년의 CO<sub>2</sub>배출원단위의 평균값은 0.3416(TCO<sub>2</sub>/ton)이다. 이는 국가 LCI 데이터베이스정보망(한국환경산업기술원, 2008)에서 공시하고 있는 전기로제강-철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위 값인 0.3405(TCO<sub>2</sub>/ton)와 약 0.3%의 오차가 있을 정도의 신뢰성을 가진다.

#### 4.4 기존방식과 비교를 통한 개선방식의 타당성 분석

표 7은 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정함에 있어 기법에 따른 차이점 및 문제점을 알기 위해 비교한 것이다. 이를 통해 개선된 적산방식에 의한 CO<sub>2</sub> 산정의 효용성을 확인할 수 있다.

2000년 산업연관표를 활용한 산업연관분석에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위(국토해양부, 2004)는 경쟁형 생산유발계수를 이용하였을 때 3.5000(TCO<sub>2</sub>/ton)이고, 비경쟁형 생산유발계수를 사용하였을 때 0.3015(TCO<sub>2</sub>/ton)이다. 이는 공통적으로 철근을 생산하는 산업에서 재화와 서비스에 대한 최종수요가 발생하였을 때, 생산유발효과의 크기를 계속하는데 무한히 계속되는 생산과급효과를 일일이 계산하고 있다. 그리고 원자재 채취부터 철근이 만들어지기까지의 모든 요소가 내재되어 있기 때문에 제강단계에 따른 국한된 데이터를 얻을 수 없다. 또한 비경쟁형 생산유발

표 7. 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정기법에 따른 비교

구분	산업연관분석법		기존 개별적산법	개선 개별적산법
	(I-A) <sup>-1</sup> 사용	3.50(TCO <sub>2</sub> /ton)		
철근의 CO <sub>2</sub> 배출원단위	(I-Ad) <sup>-1</sup> 사용	0.30(TCO <sub>2</sub> /ton)	0.34(TCO <sub>2</sub> /ton)	0.34(TCO <sub>2</sub> /ton)
CO <sub>2</sub> 산정의 편의성	산업연관표를 활용하여 간편하게 CO <sub>2</sub> 산정이 가능함. 그러나 2000년 이후의 산업연관표에는 부문별 품목별 공급액표가 제시되지 않아 단위가격을 이용한 물량산출에 한계가 있음. (○)		많은 자원에 대한 분석의 어려움이 있고, 인력과 측정장비 사용으로 인한 CO <sub>2</sub> 산정의 번거로움으로 2001년 이후 CO <sub>2</sub> 배출원단위를 산정한 사례가 없음. (△)	제강업체별 자료를 이용하고 철근 생산을 위해 투입되는 에너지원만 한정하여 고려하기 때문에 비교적 간단한 산정이 가능함. (●)
CO <sub>2</sub> 기록범위	(I-A) <sup>-1</sup> 을 사용할 경우, 수입원자재 및 자원을 채취하고 운송하는데 발생하는 CO <sub>2</sub> 량이 부가됨. (I-Ad) <sup>-1</sup> 을 사용하여 국내생산과급효과만 반영할 경우, 수입에 의존하는 원료에 대한 요소가 누락됨. 원자재 채취에서 제조까지의 모든 요소가 내재됨. 제강소에 국한된 데이터 산출이 어려움. (△)		국내 제강소의 생산에 한정하여 기록된 결과임. 공정에 따라 세분화된 데이터를 제시하지 않음. (●)	국내 제강소에서 생산 시 투입되는 주요 에너지원인 전력, 벙커C유, LNG(도시가스)에 의해 산출된 결과임. 에너지원의 투입구조와 생산량에 대한 업체 자료를 통해 공정별 CO <sub>2</sub> 배출량 파악이 가능함. (●)
분석결과 신뢰도	철근의 최종수요가 발생하였을 때 무한히 계속되는 생산과급효과를 일일이 계산하고 있으므로 신뢰성이 작음. (△)		50가지 이상의 투입자원이 반영되고 산출물을 직접 측정하기 때문에 신뢰도가 높음. (●)	CO <sub>2</sub> 배출에 영향을 미치는 한정된 자원을 적용하여 신뢰성 있는 데이터 산출이 가능함. 주요 에너지원 외 0~0.2%의 에너지를 반영하지 않아 CO <sub>2</sub> 배출원단위 값의 오차가 있으나 매우 작음. (○)
분석시간 소요도	산업연관표를 이용하기 때문에 CO <sub>2</sub> 량을 신속하게 산정 가능함. (●)		모든 투입물을 조사하여 오랜 시간이 소요됨. (△)	기업별 자료를 활용하여 CO <sub>2</sub> 량을 신속하게 산정 가능함. (●)
소요비용	한국은행의 산업연관표를 이용하기 때문에 산출비용이 없음. (●)		산출물 측정에 따른 인력 및 장비 사용으로 인한 비용이 과다함. (△)	기업별 자료를 이용하기 때문에 산출비용이 없음. (●)

● : 양호 ○ : 보통 △ : 낮음

계수를 이용해 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정하였을 때, 철근 생산에 필요한 원료들 중 수입에 의존하는 것들이 있기 때문에 누락되는 요소들이 많다.

경제성과 편의성을 기준으로 할 때는 산업연관방식이 효과적일 수 있으나 국제사회의 요구에 따라 CO<sub>2</sub>배출량을 감소시키기 위해서 정확한 CO<sub>2</sub> 산정이 필요하다는 점을 감안하면 상대적 평가방법인 산업연관분석에 의한 CO<sub>2</sub> 산정은 한계가 있다.

기존의 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위(한국환경산업기술원, 2008)는 0.3405(TCO<sub>2</sub>/ton)이다. 이는 전기로 제강에 의한 철근 생산 공정에 따라 투입되는 50가지 이상의 자원 및 원자재와 산출물을 직접 계측한 결과이다. 따라서 데이터의 신뢰성이 크다.

그러나 투입물과 산출물간의 연계성에 대해 언급하지 않아 CO<sub>2</sub> 배출에 영향을 미치는 주요 인자 파악이 어렵다. 또한 인력 및 장비 사용에 따른 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 2001년 이후 철근의 CO<sub>2</sub>배출원단위는 산정된 사례가 없다.

본 연구에서는 기존의 산업연관방식과 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위의 문제점을 개선한 방식으로 철근 생산의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정한다. 주요 에너지원인 전력, 병커C유, LNG(도시가스)의 사용량과 철근 총생산량을 알면 CO<sub>2</sub>배출원단위를 간편하게 구할 수 있다. 또한 기업별 자료를 활용하기 때문에 시간과 비용이 적게 든다. 그러나 현재 제강회사는 철근 생산 시의 에너지 사용량을 공시하고 있지 않으므로 H사의 한정된 자료를 이용하여 추정하는 방법으로 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정한 결과, 기존의 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위 값과 약 0.3%의 미미한 오차를 가지기 때문에 개선된 개별적산방식의 신뢰성을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 제강소의 철근 생산에 한정하여 개선된 개별적산방식을 제안하고 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정하였다. 그리고 기존의 CO<sub>2</sub>배출원단위 산정방식과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 철근 생산을 위해 사용되는 주요 에너지는 전력, 병커C유, LNG(도시가스)로 확인되었다. 이에 따라 CO<sub>2</sub>배출원단위 개선모델에서 에너지 사용량, 순발열량 환산계수, CO<sub>2</sub>배출계수, 철근 총생산량을 이용하여 공정의 단계별 CO<sub>2</sub>배출량 및 CO<sub>2</sub>배출원단위를 간단히 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2) H사의 2004~2006년 실적 데이터를 투입하여 개선된 방식으로 제강소 철근 생산의 전 과정에 대한 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정한 결과, 2004년은 0.3337(TCO<sub>2</sub>/ton), 2005년은 0.3771(TCO<sub>2</sub>/ton), 2006년은 0.3495(TCO<sub>2</sub>/ton)로 분석되었다. 공장 증설에 따른 에너지의 일시적 과다 사용에 의해 CO<sub>2</sub>배출량이 약 13% 증가한 2005년도를 제외하고 2004년과 2006년의 CO<sub>2</sub>배출원단위 평균값은

0.3416 (TCO<sub>2</sub>/ton)으로 확인되었다.

3) H사에서 철근 생산을 위해 전력, 병커C유, LNG(도시가스)가 총 에너지 사용량의 99.8~100%를 차지하는 것으로 조사되었다. 0~0.2%의 나머지 투입에너지를 반영하지 않기 때문에 CO<sub>2</sub>배출원단위 값에 오차가 있다. 이에 따라 기존의 개별적산방식과 CO<sub>2</sub>배출원단위 값을 비교한 결과 개선된 개별적산방식의 CO<sub>2</sub>배출원단위는 0.0011 (TCO<sub>2</sub>/ton)인 약 0.3% 정도 작은 값으로 분석되었다. 따라서 개선된 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위 값은 기존의 개별적산방식에 의한 CO<sub>2</sub>배출원단위 값과 비교하였을 때 미미한 차이가 있으며 신뢰성을 가지는 것으로 확인되었다.

4) 산업연관분석법에 의한 철근의 CO<sub>2</sub> 산정은 철근의 원자재 채취에서 제조까지 모든 요소를 포함하고 있기 때문에 제강소에 국한된 CO<sub>2</sub>배출원단위 값을 도출할 수 없는 것으로 조사되었다. 개선된 개별적산방식은 기존의 개별적산법에 비해 인력과 계측장비의 사용, 많은 자원을 분석해야하는 번거로움 없이 제강업체별 자료를 활용하여 시간과 비용 측면에서 효율적이고 간편한 CO<sub>2</sub> 산정이 가능한 것으로 분석되었다.

철근 생산의 CO<sub>2</sub>배출원단위를 산정하기 위하여 개선된 적산방식은 기존의 LCA기법과 비교해 보았을 때 많은 효율성이 있다. 그러나 투입물과 산출물에 대한 자료를 공시하지 않는 기업들이 많기 때문에 추후 제강소별 철근 생산 공정에 따른 세분화된 에너지 소비량과 최종생산량 파악이 필요하다. 이를 시스템화하여 기업별 CO<sub>2</sub>배출량을 쉽게 비교할 수 있다면 국가차원의 CO<sub>2</sub>배출량 저감관리에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한 생산 이후 단계의 CO<sub>2</sub>배출량 산정에 따라 철근 전 과정의 CO<sub>2</sub>를 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NO. R11-2010-0001860)

## 참고문헌

1. 국가에너지통계 종합정보시스템, www.ksesis.net
2. 건설교통부, 한국건설기술연구원, 건축물 LCA를 위한 원단위 작성 및 프로그램 개발 연구-LCA기법에 근거한 친환경 건축물 평가방안 구축, 건설교통기술혁신사업 제2차년도 최종보고서, 2004
3. 기후변화 정부간 위원회(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change), www.ipcc.ch
4. 김종엽, 이승언, 손장열, 공동주택 신축단계에서의 에너지소비 및 CO<sub>2</sub>배출 특성 평가, 대한건축학회 논문집 계획계, 제21권 제4호, 2005, p.199~206
5. 김종엽, 김성완, 손장열, 건축물 LCA를 위한 건설자재의 환경



- 부하 원단위 산출연구, 대한건축학회 논문집 계획계, 제20권 7호 통권 189호, 2004, p.211~218
6. 김종엽, 이승언, 손장열, 건축물 건설단계에서의 에너지소비량 및 CO<sub>2</sub>배출량 원단위 산출, 대한건축학회논문집, 제20권 제10호 통권192호, 2004, p.319~326
  7. 에너지기본법 시행규칙 제5조 제1항, 국회법률지식정보시스템, [likms.assembly.go.kr/law/](http://likms.assembly.go.kr/law/)
  8. 이강희, 양재혁, 주요 건축자재의 에너지소비와 이산화탄소 배출원단위 산정 연구, 대한건축학회논문집 계획계, 제25권 제6호 통권 248호, 2009, p.43~50
  9. 이강희, 이경희, 건축활동에 따른 에너지소비량 및 이산화탄소 배출량 추정, 대한건축학회논문집, 제12권 제7호 통권93호, 1996, p.197~205
  10. 정영선, 박은미, 채창우, 강제식, 이승언, 주요자재를 대상으로 공동주택 신축단계에서의 온실가스 배출량 평가 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제27권 제1호 통권21집, 2007, p.797~800
  11. 조균형, 최두성, 건설산업의 에너지 및 환경부하 산출방법론에 관한 비교연구, 대한건축학회 논문집, 제19권 제6호 통권 176호, 2003, p.155~162
  12. 지식경제부(구 산업자원부), [www.mke.go.kr](http://www.mke.go.kr)
  13. 한국철강협회, [www.kosa.or.kr](http://www.kosa.or.kr)
  14. 한국환경산업기술원, 국가 LCI 데이터베이스정보망, [www.edp.or.kr](http://www.edp.or.kr)
  15. 현대제철, [www.hyundai-steel.com](http://www.hyundai-steel.com)
  16. 현대제철, 환경보고서, 2007
  17. 현대제철, 4분기 기업설명회 보고서, 2006
  18. 환경부, [www.me.go.kr](http://www.me.go.kr)
  19. Angela Acree Guggemos, Arpad Horvath, Comparison of Environmental Effects of steel- and Concrete-framed Buildings, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 2005, p.93~101
  20. L. Price, J. Sinton, E. Worrell, D. Phylipsen, X. Hu, J. Li, Energy use and carbon dioxide emissions from steel production in China, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001
  21. Timothy Werner Johnson, Comparison of Environmental Impacts of Steel and Concrete as Building Materials Using the Life Cycle Assessment Method, the Department of Civil and Environmental Engineering, Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering, 2006

투고(접수)일자: 2010년 3월 29일

심사일자: 2010년 4월 5일

게재 확정일자: 2010년 7월 20일