

산업연관분석법을 이용한 강도에 따른 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터 구축

An analysis on CO₂ emission of structural steel materials by strength
using Input-Output LCA

홍 태 훈*
Hong, Tae-Hoon

지 창 윤**
Ji, Chang-Yoon

장 민 호***
Jang, Min-Ho

Abstract

Along with the increasing interest in environmental problems such as global warming, the South Korean government has established policies and regulations to reduce the amount of greenhouse gases, targeting a 30% reduction of CO₂ compared to business-as-usual levels by 2020. Thus, there have been many studies in construction field to control and reduce the amount of CO₂ emitted from buildings. CO₂ emission from the building construction could be obtained by using the life cycle assessment(LCA) methodology. In LCA, it is essential to have life cycle inventory(LCI) data of construction materials consisting of CO₂ emission data that have been defined and examined in a detailed way in order to obtain more accurate and detailed CO₂ emission of buildings. To date, however, the LCI data have been acquired only for the representative materials. Accordingly this study aimed to propose detailed CO₂ emission data for steel rebar and H-beam, which are the essential structural steel materials, by strength and type. To accomplish the objective, this study used Input-Output LCA methodology which is based on the Input-Output table. It is believed that the CO₂ emission data of steel materials acquired from this study would allow a more accurate assessment of CO₂ emission for diverse structural design alternatives.

Keywords : CO₂ emission, Input-Output LCA, Life Cycle Assessment, Steel Product

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

지구온난화와 같은 환경문제에 대한 인식의 확산과 함께, 각 산업분야에서 발생하는 환경부하에 대한 관심이 점점 확대되어 왔다. 그 중, 지구온난화를 유발하는 대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO₂)는 교토의정서에 의해 감축대상으로 명시되어 있다

(UN 1997). 대한민국 역시 이산화탄소를 줄이기 위하여, “저탄소 녹색성장”이라는 국가적 비전을 제시하고, 2020년까지 탄소 배출량을 BAU 대비 30% 수준을 감축하는 것을 목표로 하는 정책 및 제도를 마련하였다. 한편, 다량의 이산화탄소를 발생시키는 건축물에서는 2020년까지 26.9%의 온실가스 배출량을 감축하는 것을 목표로 정책을 추진하고 있다(녹색성장위원회 2011).

이러한 정책 방향과 함께, 건축물로부터 배출되는 이산화탄소

* 중신회원, 연세대학교 건축공학과 부교수, 공학박사(교신저자), hong7@yonsei.ac.kr

** 일반회원, 연세대학교 대학원 건축공학과 박사과정, changyoon@yonsei.ac.kr

*** 일반회원, 연세대학교 대학원 건축공학과 석사과정, minmin40@yonsei.ac.k

의 적절한 관리와 감축을 위하여 전과정평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA)를 이용한 방법들이 활발하게 연구되어 왔다. 특히, LCA는 다양한 설계안에 대한 환경영향 평가를 통해, 환경적으로 가장 우수한 설계안의 선정을 지원하는 도구로서 연구되었다(백정훈 외4 2011, Tae et al. 2011, Hong et al., 2012a). 최근에는 건축물의 설비나 건축적 요소뿐만 아니라, 건축물 생산과정에서 배출되는 이산화탄소의 대부분을 차지하는 구조체의 설계과정에서도 환경영향을 평가하여, 비용뿐만이 아니라 환경적으로 우수한 설계안을 제시하고자 하는 연구가 수행되고 있다(홍태훈 외3 2011, Hong et al. 2012a).

건축물에 대한 이산화탄소 배출량 평가를 위해서는 모든 건축 자재에 대한 이산화탄소 배출량 데이터가 필요하지만, 현재까지 구축된 건축 자재들에 대한 데이터의 부족으로 인하여 완벽한 평가를 수행하는 것은 불가능하다. 그럼에도 불구하고, 대부분의 연구들은 데이터의 확보보다는 데이터를 활용한 평가모델의 개발에 집중되어 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 건축물로 인해 발생하는 이산화탄소 배출량을 정확하게 평가할 수 있도록, 보다 정확하고 상세한 수준으로 구분된 건축자재의 이산화탄소 배출량 데이터를 제시하고자 하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

콘크리트이나 구조용 강재와 같은 구조 자재는 모든 건축물에 반드시 사용되는 중요한 자재이다. 콘크리트의 경우에는 Hong et al., 2012c의 연구에 의해, 강도와 레미콘 특성에 따라 구분되는 이산화탄소 배출량 데이터가 제시되었지만, 구조용 강재의 경우에는 제한적인 수준의 이산화탄소 배출량 데이터만이 현재 까지 제시된 상황이다. 즉, 현재 국내외에 구축된 구조용 강재에 대한 이산화탄소 배출량 데이터는 표 1과 같은 수준에 머물러 있을 뿐, 강도에 따라 상세하게 구분된 데이터는 존재하지 않는다. 이에 따라, 본 연구에서는 철근이나 H형강과 같은 구조용 강재를 연구 대상으로 정의하였다. 즉, 표 5에 제시된 것처럼, 현재 국내에서 구조용 강재로 주로 사용되는 철근과 H형강 제품을 대상으로 하여, 이산화탄소 배출량 데이터를 제시하고자 한다.

구조용 강재에 대한 이산화탄소 배출량 데이터를 구축하기 위해서는 먼저, 자재 및 재료의 이산화탄소 배출량 데이터를 구축하는데 활용될 수 있는 방법이 파악되어야 한다. 이를 위해 기존 연구를 분석한 결과, 현재 상황에서는 산업연관분석법(Input-Output LCA)이 적합한 것으로 판단되었다. 따라서 한국은행에 의해 2009년도에 발표된 2007년 산업연관표를 이용하여 건축물에서 사용되는 철근과 H형강의 이산화탄소 배출량 데이터를 구축하였다. 연구의 진행 순서는 다음과 같다.

표 1. 각 국가별 구조 자재의 이산화탄소 배출량 데이터

구분	품명	CO ₂ 배출량 (kg-CO ₂ /kg)	비고
건설기술 연구원	H형강	0.3877	직접조사법
	일반 이형철근	0.3857	
	고장력 이형철근	0.3962	
지식경제부	전기로제강 철근	0.3405	직접조사법
	전기로제강 H형강	0.4188	
NREL (US)	열간압연 강재	2.2712	직접조사법
	냉간압연 강재	2.5802	
ELCD(Europe)	철근	1.0019	직접조사법
이강희, 양재혁 (2009)	일반철근	4.4166	산업연관 분석법
	H형강-보통강	5.1864	

- (1) 구조용 강재의 강도 변화에 영향을 주는 요인과 강도에 따른 이산화탄소 배출량에 차이를 야기하는 요인을 정의하였다.
- (2) 강도 및 특징에 따른 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터의 구축을 위해 요구되는 전제조건을 정의하였다.
- (3) 한국은행에서 발표한 2007년 산업연관표를 사용하여 강재에 대한 이산화탄소 배출 원단위를 제시하였다.
- (4) 마지막으로 각각의 구조용 강재의 특성이 반영된 가격정보를 활용함으로써, 강도와 특징에 따라 구분되는 철근과 H형강의 이산화탄소 배출량 데이터를 구축하였다.

2. 건물 구조체에서의 이산화탄소 배출량 평가 연구

2.1 구조자재 이산화탄소 배출량 정보 구축 현황

건축자재의 이산화탄소 배출량 데이터를 얻는 방법으로는 생산과정을 직접 조사하는 직접조사법(Process based LCA)과 산업연관표를 이용하여 간접적으로 추정하는 산업연관분석법(Input-Output LCA)이 있다. 직접조사법은 각 자재의 생산과정에 대한 직접적인 조사·측정을 통해 생산과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 직접 확보하는 방법으로서, 보다 상세한 분석결과를 얻는데 적합하다(Bilec et al. 2006). 하지만, 정부기관이나 생산기업 등으로부터 상세한 데이터를 필요로 하여, 다양한 건축자재에 대한 이산화탄소 배출량 데이터를 확보하기에는 한계가 있다(Bilec et al. 2006, Sharrard et al. 2007). 이러한 이유로, 직접조사법은 일반적으로 가장 중요하다고 생각되는 몇몇의 프로세스나 자재에 대한 평가에만 적용된다. 국내에서는 직접조사법을 활용하여 지식경제부, 건설기술연구원에 의해 건축자재의 LCI (life cycle inventory)가 구축되었다. 하지만, 앞서 언급한 직접조사법의 한계로 인하여, 현재까지 구축된 데이터의 수는 제한적이다. 레미콘의 경우에는 Hong et al., 2012b의 연구를 통해 강도에 따라 구분되는 이산화탄소 배출량 데이

터가 제시되는 반면, 철근과 H형강의 데이터는 표 1에서와 같이 강도의 차이에 따라 구분되지 않는 하나의 값으로만 제시되고 있다.

한편, 산업연관분석법 (Input-Output LCA)은 직접조사법과 달리, 재화나 서비스를 생산하기 위하여 산업부문간의 직·간접적인 투입·산출 관계를 보여주는 산업연관표를 이용하여 간접적으로 분석하는 방법이다. 이강희와 양재혁(2009)은 산업연관 분석법을 활용하여, 주요 건축자재에 대한 이산화탄소 배출 원 단위를 제시하였다. 하지만, 현재까지 구축된 구조용 강재에 대한 이산화탄소 배출량 데이터는 표 1에서와 같이 제한적이다.

2.2 산업연관분석법 (Input Output LCA)

산업연관표는 국민경제에 있어서 통상 1년간에 이루어진 재화나 서비스의 산업상호간의 거래를 행렬로 나타낸 것으로, 투입·산출표(input-output tables)라고도 한다. 이러한 산업연관표는 국가 전체 산업의 재화와 서비스를 만드는 과정에 있어 산업 상호간의 투입 및 산출 관계를 제시함으로써, 산업부문간의 직·간접적인 관계를 보여줄 수 있다(이강희와 양재혁 2009). 그리고 산업연관표는 산업부문 사이의 투입·산출 관계를 화폐단위(즉, 원단위)로 제시하지만, 화폐는 물품이나 자원의 흐름으로 생각하는 것이 가능하다. 즉, 산업연관표에 제시된 화폐단위 정보를 기반으로, 산업부문 간에 흐르는 에너지나 자원의 흐름을 분석하는 것이 가능하다(김종업 외 2인 2004).

산업연관분석법은 이러한 산업 간의 상호 연관관계를 보여주는 산업연관표를 기반으로 하여, 재화나 서비스를 생산하는 과정에서 투입되거나 배출되는 요소를 정량적으로 파악하고자 하는 분석방법이다(Chris et al. 1998). 산업연관분석법은 생산과정에서 사용되는 직접적인 에너지소비량뿐만 아니라 간접적으로 소비되는 에너지 및 환경부하량을 빠짐없이 추계할 수 있기 때문에 환경부하를 종합적으로 파악할 수 있다. 또한, 국가 전체를 포괄하여 조사된 데이터를 기반으로 하기 때문에 분석방법이 비교적 효율적일 뿐 아니라 추계결과 또한 객관적이라는 장점을 가진다.

하지만, 현재 한국은행에서 발표되는 산업연관표는 404개의 산업부문으로 구분되어 있어, 모든 건축 자재나 재료를 포괄할 만큼 상세한 결과를 제시하지는 못한다. 따라서 여러 산업부문이 혼합되어 생산되는 건축 자재와 재료의 경우에는 각 부분에 대한 산업연관분석과정을 수행하여 통합하는 과정이 요구된다. 또한, 신기술이나 재활용 등의 산업연관표에 포함되지 않는 사항을 분석하는 것은 불가능하다는 한계를 가진다. 하지만, 이러한 한계에도 불구하고, 건축자재에 대한 이산화탄소 배출량 정

보를 정량화하는데 매우 효과적이라고 여겨진다(이강희와 양재혁 2009).

산업연관분석을 위해 한국은행에서 발표하는 산업연관표의 생산유발계수가 이용될 수 있다. 생산유발계수는 하나의 산업부문에 속하는 제품을 1원단위 생산하는 과정에서 타 산업부문에 직·간접적으로 생산을 유발하는 계수를 의미한다(한국은행 2007). 이는 제품 1원단위의 생산을 위하여 생산유발계수에 해당되는 만큼의 산업부문별 제품이 사용된 것으로 해석될 수 있다. 404개의 산업부문에는 에너지 부문도 포함하고 있기 때문에, 산업연관표를 이용하면 하나의 제품을 생산하는 과정에서 소비되는 에너지의 양을 파악하는 것이 가능하다. 산업연관분석법은 이러한 논리를 바탕으로 에너지소비량을 산출하고, 산출된 에너지 소비량 결과를 바탕으로 이산화탄소 배출량을 산출하는 방법이다.

앞서 설명한 내용을 수식으로 표현하면 아래의 식(1)과 같다(Ronald et al. 1985).

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

X : 각 산업부문별 투입량

(I-A)⁻¹ : 생산유발계수

Y : 건축자재와 재료 등의 최종 수요

3. 건축 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터 구축

3.1 데이터 구축을 위한 기본사항 정의

3.1.1 이산화탄소 배출요인

이산화탄소 배출량 데이터의 구축을 위해서는 배출요인에 대한 명확한 정의가 요구된다. 이산화탄소 배출요인은 크게 에너지원의 연소와 같은 인위적 요인과 동식물의 호흡 등으로 배출되는 자연적 요인으로 구분될 수 있다(김종업 외2 2004).

먼저 자연적 요인은 본 연구의 대상인 강재를 생산하지 않는 과정에서도 동일하게 발생하므로, 구조용 강재 생산과정에서의 이산화탄소 배출요인에서 제외하였다. 인위적 배출 요인은 크게 에너지원의 연소와 석회 소성에 의한 발생으로 구분될 수 있다(Hong et al. 2012b). 콘크리트나 시멘트의 경우, 생산하는 과정에서 석회 소성으로 인해 많은 양의 이산화탄소가 배출되지만, 그 외의 대부분의 자재들은 에너지원의 연소에 의해 대부분의 이산화탄소 배출이 야기된다. 구조용 강재 역시 생산과정에서 많은 양의 에너지가 사용되기 때문에, 에너지의 연소는 구조

용 강재에 대한 이산화탄소 배출의 가장 중요한 요인으로 정의될 수 있다. 따라서 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터를 확보하기 위해서는 강재의 생산과정에서 사용되는 에너지의 양을 파악하는 것이 중요하다.

한국은행에서 발표하는 산업연관표에 포함된 에너지 부문은 표 2와 같다(한국은행 2009). 따라서 본 연구에서는 표 2에 포함된 에너지원의 연소에 의해 배출되는 이산화탄소를 바탕으로, 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터를 구축하고자 한다.

3.1.2 강재의 강도 및 이산화탄소 배출량 변화요인

강재의 강도에 따른 이산화탄소 배출량의 차이를 확인하기 위하여 기존 문헌을 살펴본 결과, 이산화탄소의 배출량은 강도에 따른 차이보다는 생산하는 공법과 생산과정의 효율에 따라 달라지기 때문에, 강도별 이산화탄소 배출량 데이터가 구축되지 않았음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 본 연구에서는 구조용 강재의 강도의 변화를 야기하는 요인들을 분석함으로써, 강도에 따른 이산화탄소 배출량 데이터를 확보하고자 하였다.

이를 위하여, 대한민국에서 건축 구조용 강재를 전문으로 생산하는 업체의 전문가와 면담을 진행하였다. 그 결과, 구조용 강재를 생산하기 위하여 투입되는 원자재의 차이에 따라 강재의 강도가 변하는 것이 확인되었다. 또한, 강재의 크기에 따라 생산 장비의 규모가 달라진다는 사실이 확인되었다. 이에 따라, 본 연구에서는 투입되는 원자재의 차이와 생산 장비의 차이로 인한 에너지 소비량의 차이로 인하여, 각 구조용 강재의 이산화탄소 배출량이 달라진다고 가정하였다.

표 2. 구조용 강재 부문의 생산유발계수

항 목	생산유발계수	
	철근 및 봉강	형 강
무 연 탄	0.01471	0.013114
유 연 탄	0.071602	0.064978
원 유	0.051524	0.052855
천연가스(LNG)	0.023119	0.023335
기타 석탄제품	0.088715	0.07906
나 프 탄	0.007866	0.007668
기타 석유정제품	0.002327	0.002271
휘 발 유	0.003923	0.004198
등 유	0.003667	0.005362
경 유	0.04313	0.042328
중 유	0.012603	0.014043
액화석유가스	0.005299	0.005
도시가스	0.030026	0.030306

3.1.3 강재의 가격 결정요인

제품의 가격은 원자재, 제품생산과정에 사용된 에너지, 수요·공급의 관계 등의 다양한 요인에 의하여 결정된다. 이러한 다양한 가격결정 요인들 중, 원자재와 제품 생산과정에 사용된

에너지는 이산화탄소 발생량에 영향을 줄 수 있는 요인으로 작용할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 구조용 강재의 강도와 크기의 변화에 따라 원자재의 종류와 양, 생산과정에 사용된 에너지가 달라진다. 즉, 구조용 강재의 가격은 각 강재를 생산하기 위하여 투입된 원자재의 차이와 사용된 에너지의 차이를 반영한다고 가정할 수 있다.

전문가 면담을 통해 해당 업체에서 생산하는 철근과 H형강의 가격을 결정하는 요인을 파악한 결과, 빈번하게 사용되지 않는 제품을 제외하면 수요·공급의 관계에 의해 가격이 변화하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 예를 들어, 구조용 강재로의 사용을 목적으로 SS400, SS490, SM400A, SM400B, SM490A, SM490B, SHN400, SHN490 등의 H형강이 생산된다. 하지만, 면담조사 결과, SS400, SM490A, SHN490을 제외한 제품들은 구조용 강재로 사용되지 않는다는 것이 확인되었으며, 이들 제품들은 수요·공급의 관계에 따라 추가 가격을 포함하고 있음이 확인되었다. 따라서 표 3에 제시된 철근과 H형강은 원자재의 차이와 제품생산과정에 사용된 에너지의 차이로 인하여, 각 제품 사이의 가격차이가 야기되었다고 생각할 수 있다. 그리고 산업연관분석은 가격을 기준으로 결과를 제시하기 때문에, 앞서 정의된 가정에 맞추어 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터를 확보하는데 활용될 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 표 3에 제시된 주요 구조용 강재로 활용되는 제품들만을 대상으로 하여, 이산화탄소 배출량 데이터를 제시하고자 하였다.

표 3. 구조용 강재별 단가정보

구 분	강 도	규 격	단가 (원/ton)
철 근	SD300	D10	586,000
		D13	576,000
		D16~32	573,000
	SD400	D10	591,000
		D13	581,000
		D16~32	578,000
	SD500	D10	621,000
		D13	611,000
		D16~32	608,000
SD600	D10	641,000	
	D13	631,000	
	D16~32	628,000	
H형강	SS400	소형	700,000
		대형	750,000
	SM490A	소형	750,000
		대형	800,000
	SHN490	소형	740,000
		대형	790,000

앞서 정의한 기본사항은 아래와 같이 요약될 수 있다. 첫째, 구조용 강재의 이산화탄소 배출요인은 생산과정에서 사용되는 에너지의 연소이다. 둘째, 구조용 강재의 강도에 변화를 주기 위해서는 투입되는 원자재나 생산 공정이 변화되어야 한다. 셋째, 구조용 강재의 가격은 이러한 각 강재를 생산하는 과정의 차이를 반영한다. 즉, 강재의 가격은 각 강재를 생산하는 과정에서 투입된 에너지원과 투입된 원자재를 반영한다.

3.2 이산화탄소 배출량 데이터 구축

산업연관분석법을 이용하여 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터를 구축하기 위한 프로세스는 그림 1과 같다.



그림 1. 이산화탄소 배출량 데이터 구축 절차

먼저, 한국은행에서 발표한 산업연관표로부터 구조용 강재가 포함되는 산업부문의 표 2에서 제시된 에너지 항목에 대한 생산유발계수만을 추출한다. 본 연구에서는 한국은행에서 2009년에 발표한 2007년의 산업연관표를 활용하여, 이산화탄소 배출량 데이터를 구축하였다. 산업연관표에 제시된 404개의 산업부문 중 구조용 강재를 포함하는 항목은 “철근 및 봉강”과 “형강”이 존재하며, 각 항목에 해당하는 생산유발계수는 표 2와 같다.

표 2의 생산유발계수는 1원단위의 “철근 및 봉강”과 “형강”을 생산하는 과정에서 사용되는 에너지의 비용을 나타낸다. 이에 따라, 각 구조용 강재의 단위가격 정보를 적용하면 1원단위의 제품을 생산하는데 사용되는 연료의 비용이 산출된다. 그리고 산출된 결과를 각 연료의 단위가격으로 나누어줌으로써, 구조용 강재 1원단위를 생산하는데 사용되는 연료별 소비량을 산출할 수 있다. 사용된 가격정보는 표준화된 값을 적용하기 위하여 (사)한국물가정보에 등록된 데이터를 적용하였다. 그리고 산업연관표의 기준시점인 2007년에 맞추기 위하여, 구조용 강재와 연료의 가격정보 역시 2007년의 가격을 적용하였다. 본 연구에서 제시하고자 하는 철근과 H형강의 가격 정보는 표 3에 나타난

것과 같고, 연료별 가격정보는 표 4에 나타난 것과 같다. 그리고 위의 설명을 식으로 나타내면 아래의 식 (2)와 같이 정리될 수 있다.

$$FC_i^j = \frac{X_i^j \cdot PP_i}{FP^j} \quad \text{----- (식 2)}$$

FC_i^j : 구조용 강재 i를 생산하는데 사용되는 연료 j의 소비량

X_i^j : 구조용 강재 i에 대한 연료 j의 생산유발계수

PP_i : 구조용 강재 i의 단가

FP^j : 연료 j의 단가

에너지법 시행규칙에서는 다양한 에너지원의 순발열량을 포함하는 에너지열량 환산기준을 제시하고 있다. 에너지열량 환산 기준에서는 석유 17종, 가스 3종, 석탄 7종, 전기 등 3종을 포함하여, 총 20종의 에너지원에 대한 순발열량 계수를 포함하고 있으며, 이를 이용하면 앞서 산출된 각 연료량을 석유환산톤(toe)으로 변환하는 것이 가능하다(지식경제부, 2011). 그리고 석유환산톤(toe)은 원유 1톤이 갖는 열량으로 107kcal의 열량을 의미한다. 앞서 설명된 내용을 수식으로 나타내면 아래 식 (3)와 같이 정리될 수 있다.

$$EPI_i = FC_i^j \cdot ECR^j \quad \text{----- (식 3)}$$

EPI_i : 구조용 강재 i를 생산하는데 사용되는 에너지원 j의 순발열량

FC_i^j : 구조용 강재 i를 생산하는데 사용되는 연료 j의 소비량

ECR^j : 연료 j의 순발열량 계수

그리고 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 에너지원의 연소로 인한 이산화탄소 배출량을 계산할 때 활용할 수 있는 탄소배출계수를 제시하고 있다. 현재까지 대한민국 고유의 탄소배출계수는 개발되지 않았기 때문에, IPCC의 탄소배출계수를 사용하여 이산화탄소 배출량을 계산할 수 있다. 표 4에는 에너지원별 순발열량과 탄소배출계수가 제시되어 있다.

탄소배출계수를 통해 산출된 탄소배출량을 이산화탄소 배출량으로 변환하기 위해서는 탄소와 이산화탄소 사이의 상대적 관계가 반영되어야 한다. 즉, 아래의 식 (4)와 같이, 에너지원의 순발열량에 탄소배출계수와 이산화탄소 분자량(44)을 탄소원자량(12)으로 나눈 값을 곱해주면, 에너지원에 의해 배출되는 이산화탄소 배출량이 산출된다.

표 4. 에너지원별 순발열량 및 탄소배출계수

항목	단가(원)	순발열량(10 ³ -TOE)	탄소배출계수
무연탄	91.6	0.445	1.1
유연탄	101.36	0.537	1.059
원유	712.58	1.008	0.829
천연가스(LNG)	706.45	1.178	0.637
기타 석탄제품	96.48	0.491	1.08
나프타	612	0.716	0.783
기타 석유정제품	380	0.936	0.912
휘발유	1,536.00	0.723	0.783
등유	1,005.50	0.82	0.812
경유	1,384.00	0.842	0.837
중유	664.76	0.982	0.875
액화석유가스	1,053.00	1.098	0.713

$$CE_i^j = EP_i^j \cdot CEF^j \cdot \frac{44}{12} \quad \text{--- (식 4)}$$

CE_i^j : 강재 i의 생산을 위한 에너지원 j로 인한 이산화탄소 배출량

EP_i^j : 강재 i를 생산하는데 사용되는 에너지원 j의 순발열량

CEF^j : 에너지원 j의 탄소배출계수

44/12 : 이산화탄소의 분자량/탄소의 원자량

4. 건축 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터 구축 결과

4.1 철근

표 3에 나타난 것과 같이, 국내에서 건축 구조용 강재로서 주로 사용되는 철근은 강도에 따라 4가지 종류로 구분된다. 또한, 철근의 굵기에 따라 크게 3가지 종류로 구분된다. 총 12가지 종류의 철근을 대상으로 앞서 3장에서 설명한 방법에 따라 이산화탄소 배출량을 산출한 결과는 표 5와 같다. 예를 들어, 철근 SD300 D10의 이산화탄소 배출량은 표 2에 제시된 것과 같이 다양한 에너지원을 원인으로 한다. 그 중, 무연탄에 의한 이산화탄소는 다음과 같은 과정을 통해 산출된다. 먼저 표 2에 제시된 “철근 및 봉강”의 무연탄 생산유발계수인 0.01471에 표 3에 제시된 SD300 D10의 가격인 586,000원을 곱하면, 8,620.06원이 산출된다. 그리고 산출된 값을 표 4의 무연탄 단가인 91.60원으로 나누면 94.11kg의 무연탄 사용량이 산출된다. 94.11kg에 표 4의 순발열량 0.445를 곱하면, 에너지소비량 41.8769310-3toe가 산출된다. 그리고 여기에 표 4의 탄소배출계수 1.10과 44/12를 곱하면, 최종적으로 무연탄에 의한 SD300 D10의 이산화탄소 배출량 168.9kg-CO₂/ton이 산출된다. 무연탄에 대한 순발

열량과 이산화탄소 배출량 산출과정은 아래의 식 (5), (6)과 같이 표현될 수 있다. 그리고 이와 동일한 과정에 따라, 모든 에너지원에 대한 결과를 통합하면, 표 5의 SD300 D10의 값인 2454.9kg-CO₂/ton이 산출된다.

$$EP_i^j = (0.01471 \times 586,000) \div 91.6 \times 0.445 = 41.8769(10^{-3} \text{toe}) \quad \text{--- (식 5)}$$

$$CE_i^j = 41.8769 \times 1.1 = 168.904 \text{kg-CO}_2/\text{ton} \quad \text{--- (식 6)}$$

표 5. 구조용 강재의 에너지소비 및 이산화탄소 배출량 데이터

항목	강도	규격	에너지소비량 (toe/ton)	CO ₂ 배출량 (kg-CO ₂ /ton)
철근	SD300	D10	0.6638	2454.882652
		D13	0.6524	2412.990456
		D16 ~ 32	0.649	2400.422798
	SD400	D10	0.6694	2475.828749
		D13	0.6581	2433.936554
		D16 ~ 32	0.6547	2421.368895
	SD500	D10	0.7034	2601.505336
		D13	0.6921	2559.61314
		D16 ~ 32	0.6887	2547.045482
	SD600	D10	0.7261	2685.289726
		D13	0.7147	2643.397531
		D16 ~ 32	0.7113	2630.829872
H형강	SS400	소형	0.7321	2689.820098
		대형	0.7844	2881.950105
	SM490A	소형	0.7844	2881.950105
		대형	0.8367	3074.080112
	SHN490	소형	0.774	2843.524104
		대형	0.8263	3035.654111

철근 강도의 변화에 따른 이산화탄소 배출량의 변화를 확인하기 위하여 SD300, SD400, SD500, SD600 강도의 D10 철근의 결과를 비교하였다. 그 결과, 각 철근 1ton에 대한 이산화탄소 배출량은 각각 2,454.8827kg-CO₂, 2,475.8287kg-CO₂, 2,601.5053kg-CO₂, 2,685.2897kg-CO₂이었다. 이는 철근의 강도가 증가함에 따라 배출되는 이산화탄소의 양이 증가한다는 것을 보여준다. D13과 D16의 철근에 대해서도 동일하게 비교한 결과, D10 철근에서와 같이 동일한 경향을 보이는 것이 확인되었다.

그리고 철근의 크기의 변화에 따른 이산화탄소 배출량의 변화를 확인하기 위하여 SD300 강도를 대상으로 10mm, 13mm, 16~32mm의 3가지 규격의 철근에 대한 이산화탄소 배출량 산출 결과를 비교한 결과, 각각 2,454.8827kg-CO₂, 2,412.9905kg-CO₂, 2,400.4228kg-CO₂의 이산화탄소가 배출된다는 사실이 확인되었다. 그리고 SD400, SD500, SD600에 대한 결과 역시

이와 유사하게 도출되었음이 확인되었다. 이는 철근의 크기가 작아질수록 동일한 양의 철근을 생산하기 위하여 더 많은 공정이 요구되기 때문인 것으로 생각된다. 그림 2는 앞서 설명된 철근의 이산화탄소 배출 경향을 명확하게 보여준다.

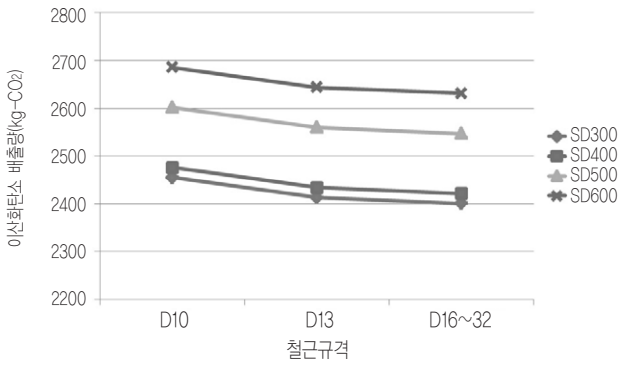


그림 2. 철근의 이산화탄소 배출량 분석 결과

4.2 H형강

국내에서 건축 구조용으로 생산되는 H형강은 인장강도 및 원료 성분비 등에 따라서 약 8가지로 분류되며, 각각의 강종은 단면의 크기에 따라 소형과 대형으로 분류된다. 앞서 설명한 것과 같이, 8가지의 강종 중 SS400, SM490A, SHN490의 3가지 강종이 대표적으로 사용되는 강종에 해당된다. 3가지 강종의 H형강은 다시 소형과 대형으로 구분되어 관리된다. 이에 따라 총 6가지 종류의 H형강을 대상으로 1ton에 대한 이산화탄소 배출량을 산출하였으며, 산출결과는 표 5와 같다.

소형의 H형강을 대상으로 각 강종의 이산화탄소 배출량을 비교한 결과, SS400, SM490A, SHN490이 각각 2,689.8201kg-CO₂, 2,881.9501kg-CO₂, 2,843.5241kg-CO₂를 배출하였으며, 이로부터 형강의 강도가 증가함에 따라 이산화탄소 배출량 또한 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 그리고 비록 SM490A와 SHN490의 인장강도는 동일하지만, 두 제품을 생산하는 과정에서 투입되는 원자재의 성분비의 차이로 인하여 이산화탄소 배출량에서도 차이를 보이는 것으로 판단되었다. 그리고 대형 H형강에 대해서도 동일하게 분석한 결과, 소형 H형강에서와 유사하게 강도의 증가에 따라 이산화탄소 배출량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

그리고 소형 형강과 대형 형강을 비교한 결과, 소형 형강에 비해 대형 형강에서 더 많은 양의 이산화탄소가 배출되는 것이 확인되었다. 이는 형강의 크기가 커질수록 더 큰 생산 장비의 사용으로 인해, 더욱 많은 에너지의 사용이 요구되기 때문인 것으로

해석될 수 있다. 그림 3은 앞서 설명된 H형강의 이산화탄소 배출 경향을 명확하게 보여준다.

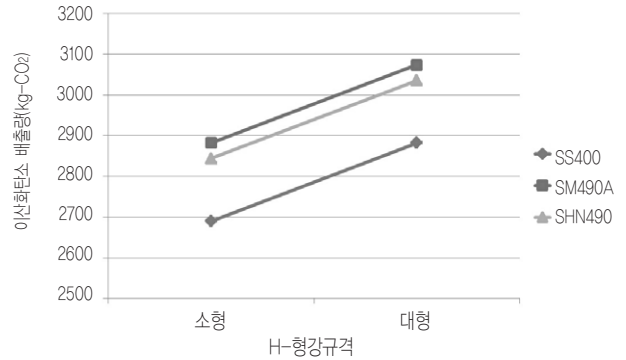


그림 3. H형강의 이산화탄소 배출량 분석 결과

4.3 분석 및 요약

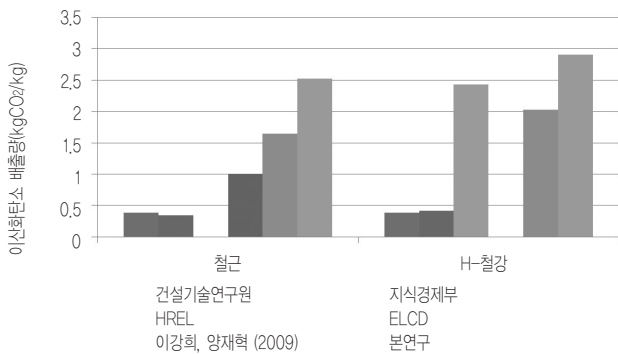
위에서 제시한 바와 같이, 산업연관분석법을 이용하여 4가지 강종의 철근과 3가지 강종의 H형강에 대한 이산화탄소 배출량 데이터를 산출하였다. 그리고 산출된 이산화탄소 배출량을 살펴본 결과, 거의 유사한 값을 보이지만, 강도와 규격에 따라 일정한 차이를 보이는 것이 확인되었다.

본 연구를 통해 도출된 철근과 H형강의 이산화탄소 배출량 데이터의 타당성을 확인하기 위하여, 표 5의 결과를 기존 연구에서 제시하는 철근과 형강의 이산화탄소 배출량과 비교하였다. 기존 연구에서는 철근과 형강 각각 하나의 값만을 제시하고 있으므로, 강도와 규격에 따라 구분된 결과의 평균값을 이용하여 비교하였다.

그 결과, 본 연구를 통해 도출된 값이 직접조사법을 통해 구축된 건설기술연구원과 지식경제부의 데이터에 비해 상대적으로 큰 것으로 확인되었다. H형강의 경우에는 National Renewable Energy Laboratory (NREL; US)의 데이터와 가장 유사한 것으로 나타났다. 그리고 동일한 산업연관분석법을 이용한 이강희와 양재혁(2009)의 연구에서는 결과 값이 본 연구의 데이터보다 크게 도출됨으로써, 직접조사법을 통한 데이터보다 큰 것을 확인할 수 있다.

직접조사법은 평가자가 분석범위를 설정하기 때문에, 산업연관분석법에 비해 직접적인 요인들만이 포함될 가능성이 있다. 즉, 산업연관분석법은 직·간접적인 모든 요인들을 포함하고 있기 때문에, 본 연구의 결과값이 직접조사법에 비한 데이터에 비해 큰 값이 도출된 것으로 생각된다. 이러한 경향은 이강희와 양재혁(2009)의 연구결과에서도 동일하게 나타났다. 다만, 각 연

구에서 사용된 산업연관표와 철근 및 H형강의 단가의 차이로 인하여 이강희와 양재혁(2009)의 연구결과와 다소 차이가 발생한 것으로 파악된다.



비고 : NREL은 US에서 구축한 National Renewable Energy Laboratory, ELCD는 European Commission에서 구축한 LCI DB

그림 4. 이산화탄소 배출량 비교 결과

5. 결론

본 연구에서는 건축 구조설계안에 대한 보다 정확한 이산화탄소 배출량 평가가 가능하도록 하기 위하여, 강도에 따라 상세히 구분된 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터를 구축하고자 하였다. 본 연구에서는 산업연관분석법을 이용하여 대표적인 구조용 강재인 철근과 H형강의 이산화탄소 배출량 데이터를 강도 및 규격에 따라 제시하였다. 그리고 이를 위해, 한국은행에서 발표한 2007년 산업연관표와 (사)한국물가정보에서 제공하는 2007년의 철근과 H형강, 에너지원의 가격정보를 바탕으로 산업연관분석을 시행하였다.

그 결과, 4개 강도의 철근과 3개 강종의 H형강에 대한 이산화탄소 배출량 데이터를 확보하였다. 구축된 데이터를 살펴본 결과, 강도가 증가할 때 이산화탄소 배출량 역시 증가하는 것이 확인되었다. 그리고 철근의 경우에는 규격이 작을수록, H형강은 규격이 클수록 많은 양의 이산화탄소를 배출한다는 사실이 확인되었다. 그리고 본 연구의 결과는 기존 연구의 데이터와 LCI 데이터의 값의 범위에 포함되므로, 타당한 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 제시하는 각 강도 및 규격에 따른 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터를 활용하는 것이 가능한 것으로 파악된다. 그리고 향후 구조설계안에 대한 이산화탄소 배출량 평가에 본 연구에서 제시하는 결과를 활용한다면, 보다 정확한 평가가 가능하리라 기대된다.

본 연구에서는 구조용 강재의 가격이 각 강재를 생산하는 과

정에서 사용된 에너지와 투입된 원자재의 특징을 포함할 것이라는 가정을 바탕으로 하였다. 하지만, 실제 제품의 가격을 결정하는 요인으로는 생산과정의 특징뿐만 아니라, 수요·공급의 관계 역시 중요하게 작용한다. 이러한 한계로 인하여, 본 연구에서는 주로 사용되는 대표적인 구조용 강재만을 대상으로 하여 데이터를 구축하였다. 따라서 향후 연구에서는 특수한 강재의 가격을 향상시키는 요소에 대한 분석을 포함하여, 특수 강재에 대한 이산화탄소 배출량 데이터 역시 구축될 필요가 있다. 또한, 강재의 가격결정 요인에 대한 상세한 분석을 통해, 보다 정확한 데이터가 제시되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업(11첨단도시G03)의 연구비 지원을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김종엽 · 김성완 · 손장열 (2004). “건축물 LCA를 위한 건설자재의 환경부하 원단위 산출 연구”, 대한건축학회논문집 계획계, 제20권 제7호, pp.208~215
- 녹색성장위원회(2011). 2020년 저탄소 녹색사회 구현을 위한 로드맵, 부문별, 업종별, 연도별 온실가스 감축목표 확정, 보도 자료
- 백정훈 · 태성호 · 노승준 · 이주호 · 신성우 (2011). “건축물 계획 단계 LCCO₂ 평가시스템의 필요요소에 관한 연구”, 한국건설관리학회 논문집, 제12권 제3호, pp.31~41
- 이강희 · 양재혁 (2009). “주요 건축자재의 에너지소비와 이산화탄소 배출원단위 산정 연구”, 대한건축학회논문집 계획계, 제25권 제6호, pp.43~50
- 지식경제부 (2011). 에너지법 시행규칙, 법제처
- 한국은행 (2007). 산업연관분석 해설, 한국은행, pp.77~94
- 한국은행 (2009). 2007년 산업연관표, 한국은행
- 홍태훈 · 장민호 · 지창윤 (2011). “건축물 시공단계에서의 이산화탄소 배출량 평가를 위한 고려요소 분석”, 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, pp.405~406
- Bilec M, Ries R · Matthews HS · Sharrard AL (2006). “Example of a hybrid life-cycle assessment of construction processes.” Journal of Infrastructure Systems, 12(4), pp.207~215
- Chris T. Hendrickson · Arpad Horvath · Satish Joshi and

Lester B. Lave (1998). "Economic Input-Output Models for Environmental Life Cycle Assessment" Environmental Science & Technology

Hong T · Ji C · Jang M · Park H (2012a). "Integrated Model for Assessing the Cost and CO₂ Emission(IMACC) for Sustainable Structural Design in Ready-Mix Concrete." Journal of Environmental Management, 103. pp.1~8

Hong T · Jang M · Ji C · Park H (2012b). "Conversion Method for Expanding Life Cycle Inventory Database in the Domestic Construction Field." Under review in the Journal of Environmental Management

Hong T · Ji C · Jang M · Park H (2012c). "Predicting the CO₂ Emission of Concrete Using Statistical Analysis." Journal of Construction Engineering and Project Management, 2(2). pp.53~60

Ronald E. Miller and Peter D. Blair (1985). Input-Output Analysis : Foundation & Extension, pp.200~205.

Sharrard AL · Matthews HS · Roth M (2007), "Environmental implications of construction site energy use and electricity generation." Journal of Construction Engineering and Management, 133(11). pp.846~854

Tae S · Baek C · Shin S. (2011). "Life cycle CO₂ evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete." Environmental Impact Assessment Review 31(3). pp.253~260

UN (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations, Kyoto

논문제출일: 2012.05.31
 논문심사일: 2012.06.01
 심사완료일: 2012.06.19

요 약

지구온난화와 같은 환경문제에 대한 인식의 확산과 함께 대한민국 정부는 탄소배출량을 2020년까지 BAU 대비 30% 감축하는 것을 목표로 다양한 정책 및 제도를 마련하고 있다. 이에 따라, 건설산업 분야에서는 건축물로부터 배출되는 이산화탄소를 적절하게 관리하고 감축하기 위한 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 건축물에 대한 정확한 이산화탄소 배출량 평가를 위해서는 건축자재에 대한 상세한 수준의 이산화탄소 배출량 데이터가 필요하지만, 현재까지는 대표적인 자재의 데이터만 제시되어 왔다. 이에 따라 본 연구에서는 건축물의 시공에 필수적으로 사용되는 구조용 강재인 철근과 H형강의 이산화탄소 배출량 데이터를 강도 및 규격에 따라 상세한 수준으로 제시하고자 하였다. 이를 위해 산업연관표를 바탕으로 하는 산업연관분석법을 적용하였다. 본 연구에서 제시하는 강도 및 규격에 따른 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터를 활용하면, 다양한 구조설계안에 대하여 보다 정확한 이산화탄소 배출량 평가가 가능할 것으로 판단된다.

키워드 : 이산화탄소 배출량, 산업연관분석법, 전과정평가, 건축구조용 강재