

CO₂ 배출량 추정을 위한 간략 모델 개발: 아스팔트 포장을 중심으로

Development of a Simplified Model for Estimating CO₂ Emissions: Focused on Asphalt Pavement

김규연* · 김성근**

Kyu-Yeon Kim* · Sung-Keun Kim**

Abstract

Global warming due to increased carbon dioxide is perceived as one of the factors threatening the future. Efforts are being made to reduce carbon dioxide emissions in each industry around the world. In particular, environmental loads and impacts during the life cycle of SOC structures and buildings have been quantitatively assessed through a quantitative method called Life Cycle Assessment (LCA). However, the construction sector has gone through difficulty in quantitative assessment for several reasons: 1) LCI DB is not fully established; 2) the life cycle is very long; 3) the building structures are unique. Therefore, it takes enormous effort and time to carry out LCA. Rather than estimating carbon emissions with accuracy, this study aims to present a simplified estimation model that allows owners or designers to easily estimate carbon dioxide emissions with little effort, given that rapid and rough decisions regarding environmental load reduction are to be made. This study performs the LCA using data from 25 road construction projects across the country, followed by multiple regression analyses to derive a simplified carbon estimation model (SLCA). The study also carries out a comparative analysis with values estimated by performing a typical LCA. The comparison analysis shows an error rate of less than 5% for 16 road projects.

Keywords : Low Carbon, Life Cycle Assessment, Simplified Life Cycle Assessment, Road Construction, Asphalt Pavement

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

미래를 위협하는 요인의 하나로 이산화탄소 증가로 인한 지구온난화가 지적되고 있다. 우리나라도 지구온난화로 인하여 2018년 서울 기온이 39.6°C에 이르는 때가 있었으며, 지난 100년간 연평균 기온이

1.8°C 상승하였다. 지속 가능한 발전과 기후변화에 대응하기 위하여 1992년 브라질 리우에서 유엔기후 변화회의에서 협약을 체결하였으나 강제성이 없어서 실제적인 효과를 거두지 못했다. 1997년 일본 도쿄에서 교토의정서를 채택하여 38개국 이 온실가스 저감에 대한 의무를 규정하고 온실가스 배출권 거래 제도를 도입하였다. 우리나라의 경우 2002년 11월

*서울과학기술대학교 공과대학 조교 석사(주저자: kkyu_yeon@seoultech.ac.kr)

**서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수(교신저자: cem@seoultech.ac.kr)

교도의정서를 비준하였으며, 2030년 국가 온실가스 감축목표로 2017년 배출량 대비 24.4% 감축을 목표로 하고 있다(환경부, 2020). 2015년 프랑스 파리에서 개최된 유엔기후변화회의에서 대기온도를 2°C 아래로 하는 것을 목표로 정하였으며 구속력이 있는 파리기후협약은 2016년 11월에 발효가 되었다. 이러한 기후협약은 우리나라의 각 분야에 많은 영향을 미치고 있으며 이산화탄소 배출량 감소를 위한 정책 및 제도를 시행하는데 계기가 되고 있다. 하지만 이러한 협약에도 불구하고 국내 건설산업은 기후변화에 대응하기 위한 구체적인 방안의 마련과 시행노력이 타분야에 비하여 소극적인 모습을 보이고 있다.

기후변화는 여러 가지 요인으로 발생하고 있다. 주로 에너지를 사용하는 과정에서 대기 중에 온실가스가 증가하는데 이러한 결과로 지구온난화가 초래되고 있다. 온실가스 배출량 통계를 살펴보면 이산화탄소가 90% 이상을 차지하는 것으로 나타나고 있다. 특히 건설산업의 경우에는 토지전용, 건설재료의 채취 및 가공, 시공 및 운영과정에서 많은 에너지가 사용되고 있으며 건설폐기물 배출 등으로 많은 온실가스를 배출하고 있는 상황이다(Kang, 2016). 미국에서는 2차적인 효과까지 감안한 에너지 소비량은 전 세계에서 소비되는 에너지의 50%가 건설산업에서 소비되고 있는 것으로 발표되었다(Chapman and Rennison, 1998). 국내의 경우에는 건설 프로젝트의 전과정에서 발생하는 에너지 소비량과 가스 배출량에 대한 구체적인 데이터가 미비한 상황이다. 온실가스 저감을 위한 현황 파악과 이것에 근거한 방안마련 및 실행을 위하여 건설산업 분야별, 시설물별, 공종별 관련 데이터의 수집과 분석이 필요한 상황이다. 기존 연구에 따르면 토목공사의 경우에는 토공, 포장공, 부대시설공에서 상대적으로 많은 에너지가 사용되어 환경부하가 심해지는 경향을 보이고 있으며, 건설기계의 투입이 많은 공종이나 콘크

리트 및 아스팔트 등의 재료가 많이 투입되는 공종일 수록 환경부하가 많이 생기는 것으로 보고되고 있다.

전과정 평가(Life Cycle Assessment: LCA)는 환경성 평가의 도구로서 국제적으로 정량화된 방법이다. 이것은 제품 및 구조물의 전과정 동안 투입된 자원, 자재, 장비 등에 의하여 발생한 환경부하 및 환경영향을 정량적으로 평가하는 기법이다. LCA는 환경영향 정도를 계산하기 위하여 전과정 단계에서 수많은 데이터를 수집하고 가공해야 하므로 복잡하고 많은 시간과 노력이 필요하다. 특히 사회간접자본시설물을 대상으로 하는 경우에는 LCA를 수행하는데 복잡성이 더욱 증가하게 된다.

본 연구에서는 기존 LCA의 불편함을 해소하면서 환경부하량을 추정할 수 있는 간략화된 전과정 평가(Simplified Life Cycle Assessment: SLCA) 모델을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 도로시설물을 대상으로 하고 있으며 도로공사를 구성하는 공종 중에서 아스팔트 포장공에 한정하여 수행되었다. 연구의 구체적인 방법은 다음과 같다.

1.2.1 LCA 관련 연구동향 조사

LCA 및 SLCA 개념 및 이론적인 고찰을 실시하고, 건설분야에서 실시된 LCA 선행연구를 분석한다. 일반적인 LCA의 한계점을 분석하고 SLCA 모델 개발 방향을 설정한다.

1.2.2 SLCA 모델 구축을 위한 자료 수집

25개 도로공사를 대상으로 포장공사 관련 자료를 수집한다. 수집된 자료에서 차도 본선부와 길어깨부 구역의 데이터를 분류 및 정리한다. 세부공종으로 포장, 코팅, 포설, 다짐, 마킹, 파쇄 단계와 관련된 자료를 수집한다.

1.2.3 LCA 평가 실시 및 분석

수집된 자료를 이용하여 일반적인 LCA를 실시하여 전과정 단계별로 환경영향범주별로 결과를 도출한다. 도출된 결과를 이용하여 아스팔트 포장공사에서 주된 환경부하물질과 가장 환경부하가 많이 발생하는 요인을 파악한다.

1.2.4 SLCA 모델 제시 및 검증

수집 및 분석된 자료를 바탕으로 파레토법칙을 이용하여 탄소배출량이 가장 많이 발생하는 세부공종 및 요인을 파악한다. 또한 포장공사 자료를 인자별로 물량을 분기하고 이것을 바탕으로 다중회귀분석을 실시하여 SLCA 모델을 도출한다. 검증을 위하여 신규 도로공사 자료를 이용하며, 전통적인 LCA 방법론을 적용하여 탄소배출량을 추정한다. 본 연구에서 제시된 SLCA 모델을 이용하여 탄소배출량을 추정하고 결과치 차이를 비교함으로써 SLCA 모델의 유용성을 검증한다.

2. 관련 이론

2.1 간략 전과정 평가

ISO(International Organization for Standardization) 14040에 의하면 LCA 분석은 전과정에서 투입물과 산출물에 대한 목록을 작성하고 이와 연관된 잠재적인 환경영향을 평가하며, 목록분석 결과와 환경영향을 평가하기 위한 기법으로 정의하고 있다. 건설분야에서도 LCA는 구조물의 전과정인 계획 및 설계, 시공, 운영 및 유지관리, 해체단계 등의 과정 동안에 소모되고 배출되는 에너지와 물질의 양을 정량화하여 이들이 환경에 미치는 영향을 평가하기 위한 도구로 사용되고 있다. 하지만 전과정에서의 환경부하를 계산하기 위해서 많은 데이터를 수집하고 가공해야 하며 분석에 많은 시간과 노력이 요구된다.

SLCA는 분석 목적에 적절하게 일반적인 LCA에서

수행하는 과정의 특정 부분을 생략하거나 간략화함으로써 구조물에 대한 환경부하를 추정할 때 시간과 노력을 줄일 수 있다. 하지만 정성적 데이터 사용으로 인한 결과의 신뢰성 부족이 문제로 대두되고 있기에 LCA 수행 목적에 부합하면서 결과의 불확실성을 줄일 수 있는 노력이 필요하다. LCA를 수행하기 위한 방법론을 간략화할 때에 분석범위를 한정하거나 모델링 절차를 단순화하거나, 평가를 수행하는데 필요한 데이터를 줄이는 방법을 사용한다. 또한 정량적인 데이터를 취득하는 데 어려움이 있거나 데이터를 이용할 수 없는 경우에는 정성적인 정보로 대체하거나 평가시 차지하는 비율이 높지 않으면 제외는 시키는 방법 등으로 간략화를 시도할 수 있다(권은선, 2003).

건설분야에서 수행된 LCA 연구의 대표적인 사례를 살펴보면 전과정 투입물 및 배출물 정량적 데이터를 목록화한 LCI DB(Life Cycle Inventory Database) 구축과 관련한 연구들(이관호, 2002; 이신원, 2010; 최두성 외, 2013; 김익·손민정, 2015)이 진행되었으며, SOC(Social Overhead Capital) 구조물 타입별로 전과정 평가를 수행한 연구들(김도균, 1996; 이태규, 2008; 노형민, 2010; 이철규·김종수, 2011; 민성규, 2013; 공찬휘 외, 2016)이 진행되었다. 또한 환경성과 경제성의 통합평가에 관한 연구들(박광호, 2004; 김창학 외, 2010; 김운덕 외, 2011)이 수행되었다. 건설산업에서의 LCA 평가는 제조업과는 달리 생애주기가 긴 특성이 있으며 구조물 자체도 유일성이 존재하기에 각 단계별로 환경부하를 추정하는데 사용되어야 하는 데이터의 획득이 어렵다. 따라서 환경부하분석의 신뢰성을 높이기 위한 데이터 취득 및 처리방법에 대한 연구가 필요한 실정이다.

2.2 아스팔트 도로포장

본 연구의 대상구조물인 도로는 교통량 및 교통하중, 노반지지력 등에 따라 자갈길에 역청재를 소량

사용한 간단한 포장시공부터 고급포장에 이르기까지 목적에 맞게 자유롭게 포장할 수 있는 것이 특징이다. 일반적인 도로의 구조(Fig. 1)는 차도와 길어깨로 구성된다. 경우에 따라서는 길어깨부에 측대와 측구를 포함하기도 한다. 차도부는 아스팔트 표층과 기층, 보조기층, 노상, 차단층 또는 동상방지층으로 이루어져 있다.

최근 들어 표층의 일부분을 중간층으로 사용하는 경우가 있는데 이는 탄성이론을 바탕으로 전단응력이 최대로 발생하는 부분을 보강하는 개념으로 적용되고 있다. 대체로 아스팔트 포장은 외관이 고우며 티끌이나 먼지가 나지 않고 교통에 의한 소음이 적다. 포장은 도로의 차도부를 시공하는 것이 주체가 되며 가장 중요하다. 도로포장의 두께는 아스팔트나 콘크리트 등으로 이루어진 표층부의 두께와 그 아래의 노반 두께를 합한 두께인데, 주로 교통량과 노상의 지지력에 의해 결정된다. 국내의 경우는 그 두께가 60~75cm로 설계 및 시공된다. 길어깨는 차도의 측방여유폭을 확보하기 위하여 차도에 접촉하여 설치하는 도로의 부분으로서, 도로의 주요 구조물을 보호하고 보행자를 포함하여 교통의 안정성, 쾌적성을 확보함과 동시에 도로의 유지, 관리 및 차량의 비상주차에 필요한 공간을 제공하는 역할을 한다. 길어깨부는 본선 포장구조가 아스팔트인 경우에는 폭, 기능, 시공의 정밀성 등을 고려하고 노상의 지지력,

동결심도, 교통량, 과거의 실적 등을 종합적으로 검토하여 결정하되 작업차나 고장차량 등의 일시적인 교통하중에 견딜 수 있는 구조를 원칙으로 한다. 일반적으로 길어깨는 연성기층 또는 안정처리 기층에 아스팔트 표층으로 이루어져 있고 본선 포장구조가 콘크리트인 경우에는 강성 또는 연성 표층으로 구성된다(김규연, 2015).

상기에 언급된 도로포장의 구성을 확인하여 LAC 분석시 분석범위와 분석대상 공종을 확정하고 시스템 경계를 설정하는데 사용하고자 한다.

3. LCA의 범위설정

3.1 대상 도로공사 데이터 개요

SLCA 모델을 구축하기 위하여 Table 1(김규연, 2015)과 같이 전국 25곳 도로공사에서 아스팔트 포

Table 1. Collected Data Set

Data	Location	Data	Location
1	Gyeonggi-do Yeoncheon-gun(1)	14	Gyeongsangnam-do Geoje-si
2	Gyeonggi-do Yeoncheon-gun(2)	15	Gwangju Gwangsan-gu
3	Gyeonggi-do Namyangju-si	16	Ulsan Ulju-gun
4	Gyeongsangbuk-do Yecheon-gun(1)	17	Gyeongsangnam-do Changwon-si(1)
5	Gyeongsangbuk-do Yecheon-gun(2)	18	Jeollanam-do Haenam-gun
6	Gyeongsangbuk-do Yeongju-si(1)	19	Gyeongsangnam-do Changwon-si(2)
7	Jeollanam-do Hwasun-gun	20	Gyeonggi-do Seongnam-si
8	Jeollanam-do Jangseong-gun	21	Gyeongsangbuk-do Bonghwa-gun
9	Seoul Seongdong-gu	22	Gyeongsangbuk-do Seongju-gun
10	Seoul Eunpyeong-gu	23	Jeollanam-do Suncheon-si
11	Seoul Gwangjin-gu	24	Gyeongsangnam-do Uiryeong-gun
12	Seoul Gangnam-gu	25	Gyeonggi-do Paju-si
13	Gyeongsangbuk-do Yeongju-si(2)		

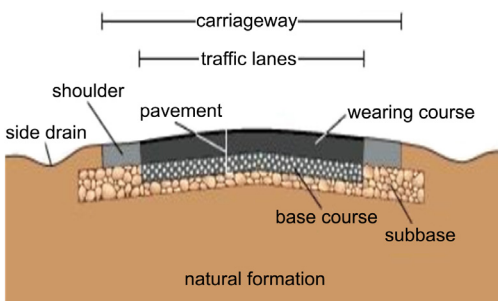


Fig. 1. Schematic Cross Section of a Roadway (Encyclopedia Britannica, 2021)

장과 관련한 시방서, 설계도, 물량산출서 및 포장공사 시공계획서를 취득하였다.

3.2 분석범위 설정

목록분석은 연구대상 시스템에 대한 자료를 수집하여 기능단위에 적합하게 계산하고 건설프로세스의 전과정에서 발생하는 환경부하를 파악하는 단계이다. 파악된 데이터들은 평가단계에서 잠재적인 환경영향을 평가하는 데 사용된다. 건설재료나 건설프로세스의 전과정에 걸친 자료수집시 정보부족 및 기밀정보 등의 이유로 모든 자료의 수집이 불가능할 수도 있다. 이러한 경우에 LCA 목적 및 범위설정을 수정하거나 필요한 부분은 객관적 정정을 사용하여 문제를 해결한다. 본 연구에서는 Table 2에 나타낸 바와같이 도로공사 시공의 아스팔트 포장단계에서 차도 본선부와 길어깨 구역을 LCA분석을 위한 기능단위로 설정하였다.

Table 2. LCA Scope

Target area	Work type
<ul style="list-style-type: none"> • Traffic lanes • Shoulder 	Pavement, Coating Spreading, Compacting Marking, Crushing

Table 3. System Boundary for LCA

Phase	System Boundary		
	Material production	Overlay	Pavement
Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Ascon production: Heavy oil • Glass egg: Plate glass • Paint 		Coating, Spreading, Compacting, Marking
Operation & Maintenance	Material production <ul style="list-style-type: none"> • Ascon production: Heavy oil • Glass egg: Plate glass • Paint 	Overlay	Lane painting
		Coating, Spreading, Compacting, Marking	Marking
Demolition	Material production <ul style="list-style-type: none"> • Ascon production: Heavy oil • Glass egg: Plate glass • Paint 	Overlay	Cutting
		Coating, Spreading, Compacting, Marking	Crushing

3.3 시스템 경계 및 가정사항

초기 건설단계에서 발생하는 자재의 운송은 해당 자재를 생산하기 위한 원자재의 운송을 제외한 완제품 자재의 운송만을 대상으로 하였다. 설계내역서에서 주요 자재로 규정하고 있는 아스콘의 운송과정과 그외의 건설자재의 운송과정 및 건설장비 운송과정은 시스템 경계에서 제외하였다. 또한 시설물의 전과정에 사용되는 건설장비의 운송과정도 제외하였다. Table 3은 건설단계별로 시스템 경계를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 시방서, 설계도, 물량산출서 및 포장공사 시공계획서를 기반으로 목록구성을 하였고, 상기 자료에서 언급되지 않는 일반적인 사항과 누락 부분에 대해서는 건설공사 표준품셈과 건설기계경비산출표, 도로설계편람을 참고하여 LCA 분석을 수행하였다. 시스템 경계에 반영되는 건설자재는 설계내역서를 기준으로 작성하였으며, 특정 건설자재의 정확한 재질이 명시되지 않은 경우에는 같은 기능을 수행하는 일반적 건설자재를 사용하는 것으로 가정하였다. LCI DB는 국가데이터베이스를 사용하였으며, DB가 구성되지 않은 아스콘은 중유사용량으로 대체하였고, 페인트는 아크릴계 도로료 유리알은 판유리로 대체하여 분석을 실시하였다.

3.4 목록 분석

대상시설물의 전과정을 시공, 유지관리 및 해체단계로 구분하고 각 단계별로 필요한 데이터를 수집하였다. 투입되는 원료 및 건설재료는 공사내역을 분석하여 작성하였고, 투입되는 에너지는 건설장비에 사용되는 경우 및 증유의 사용량으로 하였다. 다음 Table 4는 각 단계별로 전과정 목록을 나타낸 것이다.

건설장비의 사용량은 내역서에서 제시하는 시공 물량을 건설공사 표준품셈과 건설기계경비산출표의 건설장비 작업능률을 참고하여 개별 장비의 작업 시간을 산출하였고 건설장비의 작업시간에 해당 장비의 시간당 유류 소모량을 적용하여 계산하였다.

도로설계편람을 참고하여 유지관리단계의 목록 분석을 수행하였고 내구연한은 10년으로 설정하였다. 10년간 2회에 걸쳐 5cm씩 덧씌우기를 수행하는 것으로 하였으며, 차선도색은 2년마다 전 구간 도색을 수행하는 것으로 하였다.

해체단계 목록구성에서는 전문가와의 면담결과

에 따라서 포장면 일부 절삭 및 폐기작업을 목록으로 구성하였으며, 내구연한 10년이 지나면 전 구간 5cm를 절삭하고 10cm만큼 덧씌우기 하는 것으로 하였다.

4. 전과정 영향평가

4.1 공정트리 형성

전과정 영향평가를 위한 환경부와 한국환경산업기술원에서 개발한 환경성적표지 전용 LCA 소프트웨어 TOTAL을 사용하였으며 Fig. 2와 같이 도로포장에 대한 공정트리를 생성하여 평가를 실시하였다. TOTAL을 이용하여 공정트리-목록구성-목록적용 과정을 데이터가 조사된 도로현장마다 각각 영향평가를 수행하였다.

4.2 전과정 영향평가 결과

도로현장 25곳을 대상으로 실시한 전과정 영향평가 결과는 Fig. 3에서 보는 바와같이 6가지 환경영향

Table 4. Life Cycle Inventory by Construction Phase

Phase		System Boundary	
Construction	Material	Spreading & Compacting	Asphalt
		Lane painting	Glass egg, Paint
	Equipment	Spreading & Compacting	Distributor, Asphalt finisher, Tire roller, Truck, Moter grader, Water spray truck
		Lane painting	Line marker
Operation & Maintenance	Material	Overlay	Asphalt
		Lane painting	Glass egg, Paint
	Equipment	Overlay	Distributor, Asphalt finisher, Tire roller, Truck
		Lane painting	Line marker
Demolition	Cutting	Equipment	Road crusher
		Overlay	Asphalt
	Material	Lane painting	Glass egg, Paint
		Overlay	Distributor, Asphalt finisher, Tire roller, Truck
Equipment	Overlay	Distributor, Asphalt finisher, Tire roller, Truck	
	Lane painting	Line marker	

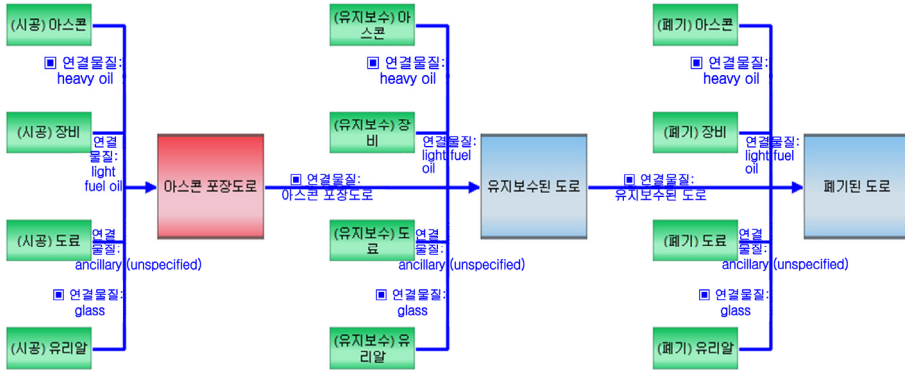


Fig. 2. TOTAL Process Tree (Screen Captured by TOTAL)

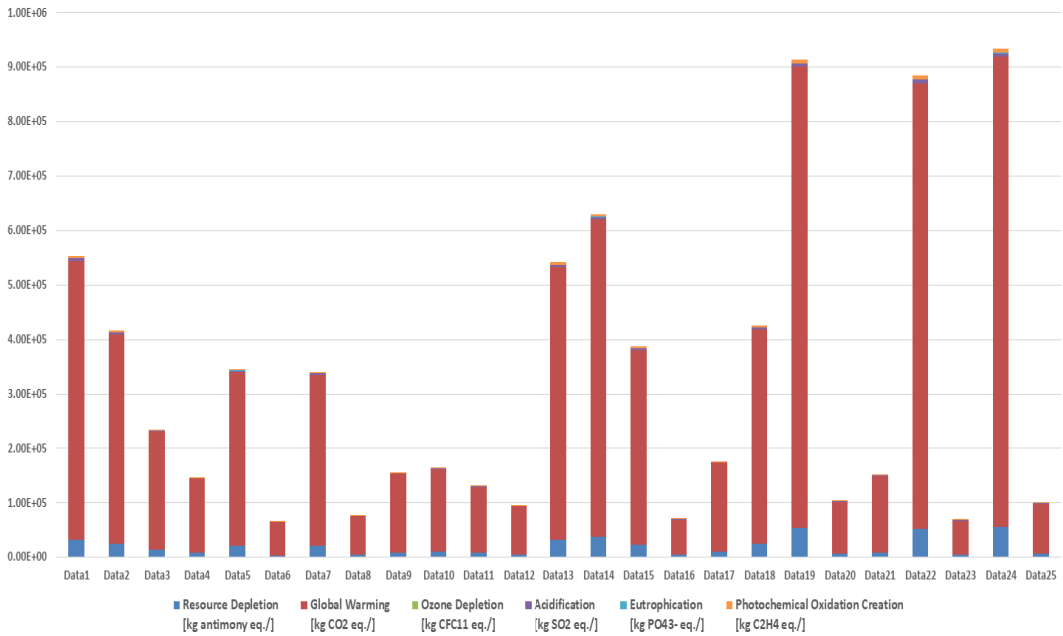


Fig. 3. Environmental Impact Analysis Result

범주별로 분석결과가 도출되었다.

아스팔트 포장의 전과정 영향평가 결과에 따르면 환경부하물질의 전체 발생량의 92.49%가 지구온난화 범주에서 발생하였다. 이것은 LCI DB에서 아스콘을 대체하여 사용되는 중유와 건설장비의 사용에 따른 경유의 사용량이 목록구성의 대부분을 차지하는 에너지 투입의 결과로 판단된다. 아스팔트 포장의 시공, 유지관리 및 해체단계의 영향평가 결과와 전

과정 단계별 환경부하는 CO₂가 81.99%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

지구온난화 범주의 CO₂ 배출을 시공, 유지관리, 폐기단계 별로 분석하여 보면 Fig. 4에서 보는 바와같이 25곳 도로현장 모두 시공단계에서 CO₂가 가장 많이 배출되는 것을 알 수 있다.

다음 단계로 어떤 요인으로 인하여 25곳 현장의 시공단계에서 가장 많은 CO₂가 배출되는지 분석을

실시하였다. 시공단계에서 CO₂ 배출 요인들은 여러 가지가 있으나 파레토법칙에 근거하여 배출에 가장 영향을 많이 미치는 요인인 아스콘과 건설장비를 중점으로 분석을 하였다.

시공단계의 세부 공정별 탄소배출량을 분석하여 보면 Fig. 5와 같이 나타나고 있다. CO₂는 아스콘 공정에서 도로포장 시공단계에서 대부분 배출되고 있

다. 건설장비의 경우 규격과 작업량에 따라서 사용되는 유류량이 결정되며 유류량을 기준으로 CO₂ 배출량을 산정할 수 있다. 분석결과에 따르면 포장공사에서 가장 많이 사용된 다짐장비의 경우 CO₂ 배출량이 가장 큰 것을 알 수 있었으며, 대상 도로현장 25 곳 모두 비슷한 양상을 보이고 있다.

아스콘의 경우에는 유지관리단계에서 10년간 2



Fig. 4. CO₂ emission ratio by construction phase

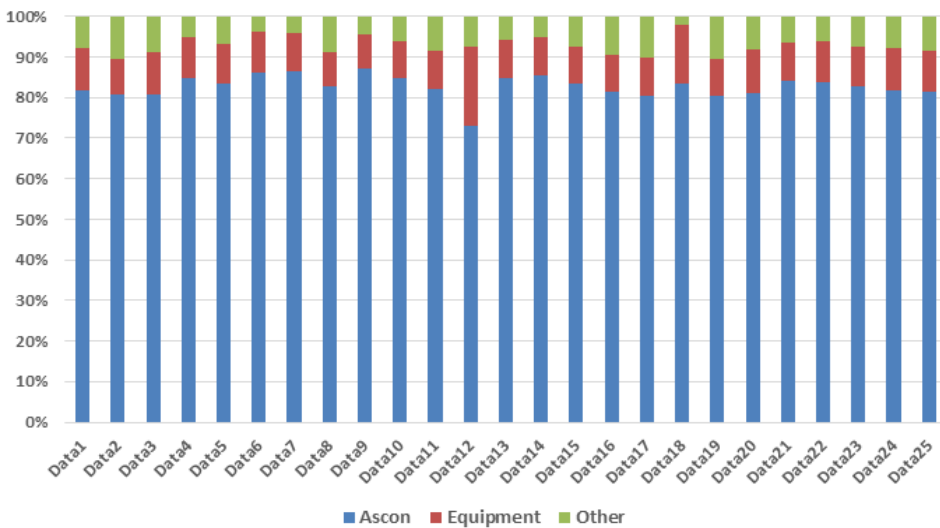


Fig. 5. CO₂ emission factors in construction

회에 걸쳐 5cm씩 덧씌우기를 실시하고 해체단계에서는 10년에 10cm 덧씌우기를 하므로 환경부하량이 거의 동일하게 나타났다. 시공단계에서 아스팔트 포장의 두께 및 폭에 따라서 환경부하량이 달라졌고 건설장비의 경우에는 시공단계, 해체단계, 유지관리 단계 순으로 CO₂ 배출량이 크게 산출되었다. 이런 결과는 시공단계에서 다른 단계보다 라인마크를 제외한 건설장비들을 운용하는 시간이 많았기 때문인 것으로 판단된다. 해체단계에서는 브레이커의 유류소모량이 다른 건설장비들 보다 월등히 크기 때문에 유지관리단계 보다 CO₂ 배출량이 높게 산출되었다.

5. CO₂ 배출량 추정용 간략 모델

5.1 간략모델 개발을 위한 데이터

25곳의 도로현장 데이터를 기준으로 세부 물량을 계산하였으며, 시스템 경계는 아스팔트 포장공에서 사용되는 건설자재와 건설장비의 작업시간 및 에너지 소비량을 기준으로 하였다. 각 도로공사 현장의 시공, 유지관리 및 폐기단계에서 사용되는 건설장비의 연료 사용량과 투입되는 건설자재를 파악하여 취합된 데이터를 기준으로 아스팔트 포장공사 수행시 발생하는 CO₂ 배출량을 산정하도록 하였다. 수량산

Table 5. Input Data for SLCA Model

Data	CO ₂	Ascon	Prime Coating	Subbase Layer	Tack Coating	Anti-Frost Layer	Lane Painting
1	420400	74552.35	112912.5	24347.02	67747.49	99743.52	4465.482
2	317400	65079.15	68629.58	21961.2	68629.58	30397.3	4567.593
3	178700	32373.88	45612.38	16421.82	39305.32	46932.14	2179.61
4	111100	19954.78	31589.23	12798.5	12692.16	30612.88	780.797
5	262080	50267.08	67532.13	34793.19	38877.01	42115.59	2474.674
6	49270	9880.4	16426.89	6563.14	3440.504	6768.95	257.61
7	256800	54757.56	58762.5	29813.2	57124.77	0	1483.576
8	58650	14518.31	14753.18	6935.8	15231.45	0	724.5971
9	117900	29609.75	33387.53	12474.9	19485.21	0	667.027
10	124500	23008.73	36725.6	12310	20991.96	5866.1	1038.5
11	100000	15393.41	9943.65	5480	25604.2	3132	1165.91
12	72460	13517.03	14107.32	6942.049	30784.18	7981.941	757.33
13	409700	83870.63	103517.8	31452.89	84509.19	84437.61	3294.847
14	476100	95172	65800	77627.5	62700	0	3266.548
15	293250	62009.82	66154.73	33547.89	64043.33	12850.38	2976.047
16	53480	9528.703	14186.25	5311	6233.1	0	708.35
17	134400	22268.08	39085.95	9878.9	25544.22	19693.7	1911.804
18	320500	94944.09	29751.67	17448.13	23337.69	0	913.1887
19	698000	134348.2	165468.7	89347.5	163786	0	10213.75
20	78880	16344.79	17794.25	21961.2	17031.15	30397.3	893.0759
21	114400	21317.3	31363.5	10103	28857.6	34722	1028.174
22	669900	131000.9	165200.3	65857	154089.8	16368	5759.651
23	51890	9971.772	13038.75	5975	11917.8	688	525.5957
24	709200	128002.1	184392.6	49126.78	188187	64752.76	7746.364
25	75790	11912.74	24671.59	6815.17	9036.282	18858.23	884.5602

출서 데이터를 기반으로 하여 세부 물량을 계산하였고, 간략모델 개발을 위한 변수로 아스콘(ton), 프라임코팅면적(m²), 보조기층량(m³), 텍코팅 면적(m²), 동방층량(m³), 차선도색 면적(m²)으로 설정하였다. Table 5는 모델 개발을 위하여 사용된 입력변수 값들이다.

5.2 SLCA 모델

다중회귀분석을 통하여 CO₂ 배출량 간략 추정 모델을 제시하고자 한다. 상기절에 언급된 입력 데이터 중에서 유의미한 변수를 선정하기 위하여 회귀분석 결과에서 R²값과 P-value를 분석하였다. 분석된 R²값은 0.99이상으로 회귀식 설명력이 매우 높았고 P-value가 0.05보다 높은 값 중 가장 큰 값을 가지는 변수를 순차적으로 탈락시키면서 최종 변수를 결정하였다. 25곳 도로현장 데이터에 대하여 교차검증을 실시하였고 그 중에서 23곳이 유의미하게 나왔다. Table 5의 14번과 18번 데이터 셋의 P-value가 각각 0.655, 0.376으로 산출되었으며 교차분석 오차를 산정한 결과 해당 데이터 셋은 무의미한 것으로 판단되었다.

간략 추정 모델에 최종적으로 반영된 변수는 아스콘량(X₁), 프라임코팅면적(X₂), 그리고 보조기층량(X₃)이 선정되었으며 회귀모델식은 다음 식 (1)과 같다.

$$Y = 2.881113 X_1 + 1.48404X_2 + 0.949947 X_3 - 3138.54 \quad (1)$$

X₁은 아스콘에서 발생하는 CO₂ 배출량에 영향을 미치는 변수이다. 건설장비에서 발생하는 CO₂ 배출량은 포장두께에 거의 영향을 받지 않는다. 프라임코팅 면적은 도로의 폭과 연장에 영향을 받으므로 X₂가 건설장비에서 발생하는 CO₂ 배출량에 영향을 미친다. X₃은 보조기층과 관련된 변수로 CO₂ 배출량에 영향을 미치는 요소이다. 간략화 모델의 항으로 선

택된 아스콘량, 프라임코팅면적, 보조기층량에 대한 25곳 도로현장의 데이터를 이용하여 다중회귀분석을 실행한 결과 P-value와 R² 값의 측면에서 유의미한 것으로 판단된다.

5.3 간략 추정 모델의 검증

간략하게 CO₂ 배출량을 추정하기 위한 회귀모델의 정확도를 검증하기 위하여 조사된 25곳의 도로현장 데이터를 이용하여 일반적인 LCA를 수행하였을 때와 간략 모델(SLCA)을 이용한 CO₂ 배출량을 비교하여 보았다. 비교 결과는 다음 Table 6과 같다. 현장

Table 6. Error rate (LCA VS. SLCA)

Data	LCA CO ₂	SLCA CO ₂	Error Rate
1	420400	402350.3	4.29%
2	317400	307072.9	3.25%
3	178700	173424.8	2.95%
4	111100	113391	2.06%
5	262080	274958.7	4.91%
6	49270	55940.82	13.54%
7	256800	270151.1	5.20%
8	58650	67173.3	14.53%
9	117900	143569.4	21.77%
10	124500	129348.4	3.89%
11	100000	61174.1	38.83%
12	72460	63335.98	12.59%
13	409700	422005.4	3.00%
14	476100	442454.6	7.07%
15	293250	305563.8	4.20%
16	53480	50412.87	5.74%
17	134400	128407.9	4.46%
18	320500	331133.6	3.32%
19	698000	714371.3	2.35%
20	78880	91221.99	15.65%
21	114400	114421	0.02%
22	669900	682014.4	1.81%
23	51890	50617.23	2.45%
24	709200	685963.9	3.28%
25	75790	74271.11	2.00%

에 따라서는 배출량 추정값의 오차율이 최대 38.83% 이르는 경우도 있으나 25곳 도로현장 중에서 16곳 도로현장의 추정된 CO₂ 배출량 값의 오차가 5% 미만으로 나타났다. 이러한 사실은 간략 모델을 설계 단계 등에서 의사결정을 하기 위한 보조도구로 사용하는데 무리가 없을 것으로 판단된다.

6. 결론

지속 가능한 발전을 위하여 각 나라에서 탄소배출량을 줄이기 위한 노력은 옵션이 아니라 필수적인 상황이 되었다. 현재 산업군별로 환경부하를 줄이기 위해 노력하고 있는데 환경부하를 줄이는 방안을 마련하기 위해서는 현재 상황을 파악해야만 하고 그것에 근거하여 어떤 조치를 해야만 한다. 전과정 평가는 건설, 사용, 폐기 등의 전체 라이프사이클 동안에 발생하는 환경부하를 정량적으로 산출하는 방법론을 제시하고 있으며 각 산업분야에서 환경부하 평가를 위해 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 전과정 평가는 국제표준화기구에서 그 절차와 방법론을 규정하고 있다. 하지만 건설업과 같이 라이프사이클 기간이 매우 길고 구조물 및 건축물이 유일무이한 경우에는 환경부하를 산정하는 작업은 매우 복잡하고 시간과 노력이 많이 들어간다.

본 연구는 발주자나 설계자가 환경부하 저감과 관련한 의사결정이 필요한 경우에 복잡하고 노력이 많이 요구되는 분석과정을 거치지 않고 간단하게 환경부하량을 추정할 수 있도록 간략모델을 제시한 측면에서 의미를 갖는다. 제시된 모델은 25곳 현장데이터를 근거로 하여 다중 회귀분석을 실시하여 신뢰성을 확보하도록 하였다. 추정식의 정확도를 검증하기 위하여 25곳 도로현장에서 수집된 데이터를 기반으로 일반적인 LCA를 수행하여 산출된 CO₂ 배출량과 간략 추정식으로 산출된 CO₂ 배출량과 비교를 실시하였다. 탄소배출량 비교 결과 전체 25곳 도로현장

중에서 16곳 도로현장의 결과가 오차율 5% 미만으로 나타나 의사결정 도구로 사용하는데 무리가 없는 것으로 판단되었다. 물론 정확한 CO₂ 배출량을 산정하기 위해서는 일반적인 LCA를 수행해야 할 것이며, 제시된 모델은 도로공사 중에서 아스팔트 포장에 한정하여만 사용될 수 있는 한계점은 있다. 추후 연구에서는 일반적인 도로공사를 위한 간략화 모델을 제시하고자 한다.

참고문헌

1. 공찬휘·황용우·문진영·곽인호(2016), "LCA기반 물질흐름분석 기법을 이용한 고속도로 건설에서의 총자원요구량 산정", 「대한환경공학회지」, 38(8): 403~410.
2. 권은선(2003), "환경친화적인 제품 설계를 위한 Simplified LCA 및 반정량적 Matrix 방법론 개발에 관한 연구", 석사학위논문, 건국대학교 대학원.
3. 김규연(2015), "아스팔트 포장의 탄소배출량 추정을 위한 간략화 LCA 모델", 석사학위논문, 서울과학기술대학교 대학원.
4. 김도균(1996), "전과정평가(LCA)기법에 의한 강구조 교량과 콘크리트교량의 환경성과 경제성의 기초적 비교", 석사학위논문, 한국과학기술원.
5. 김운덕·차희성·김경래·신동우(2011), "LCC-LCA 통합 분석에 의한 친환경 건설기술 평가방법", 「한국건설관리학회논문집」, 12(3): 91~100.
6. 김익·손민정(2015), "건설재료의 환경성 평가를 위한 LCI DB 구축", 「건축시공」, 15(2): 28~34.
7. 김창학·신민호·강인석(2010), "경제성 환경성 통합 평가를 위한 정보통합시스템", 「대한토목학회논문집」, 30(6D): 615~622.
8. 노형민(2010), "교량의 폐기 및 재활용 단계를 고려한 환경적합성평가와 통합 VE에 관한 연구", 석사학위논문, 연세대학교 대학원.
9. 민성규(2013), "LCA 분석을 활용한 공항포장의 환경부하 저감방안 수립을 위한 연구", 석사학위논문, 서울과학기술대학교 대학원.
10. 박광호(2004), "건설사업의 환경적, 경제적, 사회적 평가를 위한 TBL통합모델의 개발", 박사학위논문, 인하대학교 대학원.

11. 이관호(2002), “건축물의 환경성능과 경제성을 고려한 평가 프로그램 개발”, 박사학위논문, 중앙대학교 대학원.
12. 이신원(2010), “전과정평가를 이용한 하수처리 재이용시설의 환경영향 평가”, 석사학위논문, 서울과학기술대학교 대학원.
13. 이철규·김중수(2011), “건설단계에서의 철도시설물 온실가스저감방안 연구”, 『한국철도학회논문집』, 14(5): 425~432.
14. 이태규(2008), “교량의 합리적인 환경부하 평가를 위한 LCA평가법에 관한 연구”, 석사학위논문, 연세대학교 대학원.
15. 최두성·박진중·전홍찬(2013), “폐기단계에서 LCI DB 구축을 위한 CO₂ 발생량에 관한 연구”, 『한국생태환경건축학회논문집』, 13(5): 103~110.
16. 환경부(2020), 「2030 국가 온실가스 감축목표 및 장기저탄소 발전전략 보도자료」.
17. Chapman, R. E. and R. Rennison (1998), *Approach for Measuring Reductions in Operations, Maintenance and energy Costs: Baseline Measures of Construction Industry Practices for the National Construction Goals*, NIST, NISTIR 6185.
18. Encyclopedia Britannica (2021), “The modern road: Road engineering”, <https://www.britannica.com/technology/road/The-modern-road>
19. Kang, W. S. (2016), “Framework convention on climate change and countermeasures for construction industry”, *Real Estate Focus*, 93: 16~27.

요 약

미래를 위협하는 요인의 하나로 이산화탄소 증가로 인한 지구온난화가 지적되고 있다. 각 나라들과 각 산업별로 이산화탄소 배출량을 줄이고자 하는 노력을 기울이고 있으며 전과정 평가라는 정량화된 방법으로 구조물 및 건축물의 전과정 동안 발생하는 환경부하 및 환경영향을 정량적으로 평가하고 있다. 하지만 건설분야의 경우에는 LCI DB도 충분히 구축되어 있지 않고 전과정 기간이 매우 길고 구조물 및 건축물도 유일무이한 경우가 많아서 전과정 평가를 수행하는데 많은 노력과 시간이 필요하다. 본 연구에서는 아주 정확한 탄소배출량을 추정하기 보다는 발주가또는 설계자가 환경부하 저감과 관련한 신속한 의사결정이 필요한 경우에 적은 노력으로 이산화탄소 배출량을 편리하게 추정할 수 있는 간략화된 추정모형을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다. 전국 25개 도로현장 데이터를 이용하여 일반적인 LCA를 수행하였으며 수행된 결과를 이용하여 다중회귀분석을 실시하여 간편 추정식을 도출하였다. 간편 추정식으로 산출된 이산화탄소 배출량과 일반적인 LCA를 수행하여 추정한 배출량을 비교한 결과 16개 도로현장의 경우에 오차율이 5% 미만으로 의미있는 결과가 도출되었다.

주제어 : 저탄소, 전과정 평가, 간략화 전과정 평가, 도로공사, 아스팔트 포장