

강교량구조물의 환경적합성에 관한 전과정평가

Life Cycle Assessment of Steel Box Girder Bridge

김상호* · 최문석** · 조광일*** · 윤지현****

Kim, Sang-Hyo · Choi, Moon-Seock · Cho, Kwang-Il · Yoon, Ji-Hyun

Abstract

Recently, methods on minimizing environmental effect caused from human-made goods have been studied in various research fields. Such issue has been also spotlighted into the civil engineering field; however, application of environmental performance assessment on civil structures is very complicated, since they handles vast ranges of materials and has comparatively long life span with various construction stages. Thus, this study intended to apply environmental performance assessment into an ordinary type of steel box girder bridge, using most popular Life cycle assessment (LCA) procedures, which are called Survey-based method and Indirect method. For better comparison of two methods, greenhouse effect of the example bridge is considered. As result of analysis, total CO₂ emission is evaluated as 241.27 ton with Survey-based method while it is evaluated as 221.03 ton with Indirect method. It is also revealed that most CO₂ is generated from the process of manufacturing and producing construction materials. Such result indicates that the efficient design which secures certain level of structural safety with minimized input materials. It is considered that the specific LCA on civil structure performed in this study could be utilized to other civil structures for reasonable environmental performance assessment.

Keywords : *environmental performance assessment, life cycle assessment, survey based method, indirect method.*

요 지

최근 들어 여러 분야에서 환경오염을 최소한으로 줄일 수 있는 대책을 연구하고 있다. 하지만 토목구조물의 경우 많은 자재와 공정과정을 거쳐 건설되어 환경에 미치는 영향이 적지 않을 것으로 예상됨에도 불구하고 현재까지도 환경오염에 대한 대책과 연구가 부족한 현실이다. 따라서 본 논문에서는 환경오염 대책 수립을 위해 반드시 수행하여야 하는 환경적합성평가를 강박스교량을 대상으로 수행하였다. 토목구조물 생애주기 단계를 반영하여 타 분야에서도 널리 쓰이고 있는 환경적합성평가방법인 전과정평가(LCA)절차에 따라 평가를 실시하였으며, 대표적인 전과정평가 방법인 직접조사법과 간접추계법을 사용하여 대상교량의 환경영향을 검토하였다. 분석결과, 온실가스의 대표적인 CO₂를 기준으로 평가하였을 때 직접조사법을 이용할 경우 241.27 ton의 CO₂가 발생하였으며, 간접추계법을 사용할 경우 221.03 ton의 CO₂배출량이 발생하였다. 또한 발생한 CO₂는 대부분 건설자재 제조/생산단계에서 배출되는 경향을 보여, 환경오염을 줄이기 위해서는 구조적 안전성을 유지하는 범위 내에서 원자재의 총량을 줄이는 효율적인 설계가 필요할 것이라 판단된다. 본 논문에서 진행된 토목구조물에 대한 상세한 전과정평가는 향후 토목구조물에 대한 환경적합성 평가 기준 마련을 위한 연구 시, 참고자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 환경적합성평가, 전과정평가, 직접조사법, 간접추계법

1. 서 론

최근 들어 생태계 주변의 수질, 토질, 대기 등을 보호하고자 하는 운동이 일어나고 있다. 각 관련 산업 분야에서는 환경부하를 최대한 적게 할 수 있는 대책을 내세워 이를 적용시켜 나가고 있다. 특히, 자동차 분야에서는 폐 자동차 처리시스템에 대한 환경적합성평가가 수행된 사례가 있다 (홍석진 등, 2005).

환경문제를 검토하기 위한 방법으로 전과정평가방법이 있으며, 이 방법은 환경부하를 평가하는 다른 기술과 비교하였을 때 구조물에 의한 영향뿐만 아니라 건설되어지는 구조물의 과정(재료생산, 조립, 수송, 사용, 유지, 폐기 등)에서 발생하는 환경영향을 고려할 수 있다. 또한 여타 기술들에 비해 주관성이 개입될 수 있는 부분이 비교적 적어, 보다 객관적인 평가를 내릴 수 있는 이점이 있다(UNEP, 1996). 현재 생산 및 제조 분야에서는 전과정평가를 이용한 개선된

*정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : sanghyo@yonsei.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (E-mail : ms50000@yonsei.ac.kr)

***포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원 (E-mail : kicho@rist.re.kr)

****정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (E-mail : yedjh@yonsei.ac.kr)

모델을 공정설계 시 참조하여 환경비용 절감효과를 거두고 있으며 이에 따라 경제적, 기술적, 환경적 후방효과가 광범위하게 지고 있다.

건설 분야에서 환경문제는 큰 이슈가 되고 있으며 구조물의 합리적인 환경평가를 수행함으로써 환경영향을 최소화하려는 노력이 꾸준히 이루어지고 있다(김신도 등, 1999; 이선동과 유호천, 2005; 고평훈, 2007). 뿐만 아니라, 정영신 등(2008)과 이강희와 양재혁(2009)은 전과정평가를 위한 데이터 축적 및 건축물의 LCA평가 프로그램 작성 연구를 진행하였다. 그러나 토목 구조물을 대상으로 다양한 전과정평가방법을 이용하여 환경영향을 평가하고, 결과를 분석한 연구는 아직 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 앞으로 보다 강화될 환경규제와 각종 산업에 대한 CO₂ 배출량 저감에 적극적으로 대처하고자 토목구조물에 대한 전과정평가를 수행하였다. 대표적 토목구조물인 강박스 거더교를 대상으로 직접조사법(Survey-based method)과 간접추계법(Indirect method)을 이용하여 환경영향평가를 수행하였으며, 두 방법으로부터 산출된 CO₂ 배출 특성을 파악하였다. 특히, 교량의 건설공정을 세부적으로 검토하여, 차후 토목구조물의 환경적합성 평가기준 제정에 관한 연구가 진행될 시에 참조할 수 있는 프로세스를 제시하고자 하였다.

2. 전과정평가의 방법과 절차

전과정이란 하나의 제품이나 활동에 대한 제조 단계 및 자연 자원 추출로부터 최종 처분까지의 연속적이고 상호 연관된 관계를 의미한다. 따라서 전과정평가에서는 입·출력의 목록을 수립하고 정성적, 정량적 평가를 수행하여 연구의 목적과 관련된 시스템의 주요한 측면들을 파악한다. 또한 전과정평가는 하나의 제품이나 활동에 관련된 환경적인 영향에 대해서 평가하는 체계적인 도구이다. 이러한 전과정평가는 다양한 대상물에 적용이 가능하며 규모가 큰 토목구조물에도 평가를 시행할 수 있다.

2.1 전과정평가의 방법

전과정평가를 하는 대표적인 방법으로는 직접조사법(Survey-based method)과 간접추계법(Indirect method), 그리고 조합방법(Hybrid method)이 있다.

2.1.1 직접조사법

개별적산방법이라고도 불리는 직접조사법은 구조물과 시스템을 설계도서와 견적서 등으로부터 제조공정·소재 등으로 구분하여 각각의 공정에서 완성품이 어떻게 제조되고 폐기되는지를 공정마다 구체적으로 조사해 나가는 방법이다. 즉, 건설시 투입되는 건설재료를 구성하는 구성 물질과 원자재를 사용함으로써 발생하는 환경오염물질을 원소 단위별로 데이터베이스화한다. 여기에 해당 재료의 사용량을 적용시켜 각 건설공정에 사용되는 실질적 물질의 input-output 데이터를 정리한다. 그 후 환경오염물질 데이터베이스에 input-output 데이터를 적용시켜 각 자재별, 공정별 환경오염물질 배출량을 검토할 수 있다. 본 방법은 제조에서부터 폐기까지의 전 공정에 걸쳐서 실질적인 환경오염분석이 가능하기 때

문에 전과정평가에 널리 이용되고 있다.

직접조사법을 이용한 전과정평가의 신뢰도 높고 정확한 결과를 위하여 국내외 환경관련 기관들에서는 다양한 원자재와 구성물질을 포괄할 수 있는 공인된 데이터베이스를 구축하는 연구를 꾸준히 진행하고 있다(EMPA, 1998; Frischknecht, 1996; IDEMAT, 2001). 국내의 전과정평가 데이터베이스는 1998년부터 현재까지 환경부와 산업자원부의 주도 하에 전과정단계라는 항목으로 물질 및 부품제조(260개), 가공공정(35개), 수송(35개), 폐기(28개)로 구성된 총 358개가 구축되어 있는 상태이다(한국환경산업기술원, 2006). 직접조사법을 기반으로 하는 전과정평가 소프트웨어로는 SimaPro(R) 7 (PRE Consultants, 2008), BEES 3.0d(NIST, 2008), Gabi 4.2(PE International, 2006), TEAM 4.5(TM)(ECOBILAN, 2006)등이 대표적이며, 국내 소프트웨어로는 TOTAL 2.3.1 등이 있다. 이러한 직접조사법은 신뢰도 높고 비교적 정확한 전과정평가 결과를 계산해낼 수 있지만, 일반적으로 자료를 모으는데 많은 시간이 걸리며 그만큼 비용이 많이 든다(Lee *et al.*, 2009).

2.1.2 간접추계법

산업연관방법이라고도 불리는 간접추계법은 산업연관표를 이용하여 각 산업별 최종 수요액으로부터 역행렬표 등을 이용해 궁극적으로 유발되는 생산액을 구하여 에너지소비량과 환경부하량 등을 산출하는 방법이다. 이 방법은 직접조사법에 비하여 정확도가 떨어지지만, 분석시간 및 가격적인 면에서 직접조사법보다 효율적이다(Lee *et al.*, 2009). 산업연관표를 전과정평가에 이용하기 위해서는 우선 산업연관표 내의 항목들을 에너지와 비에너지 산업으로 구분할 필요가 있는데, 이를 구분하여 정리한 것이 EIO(Energy Input-Output) Table이다. EIO Table을 이용한 환경부하 평가방법에 대한 보다 자세한 설명은 건설교통부(2004)의 연구를 참조할 수 있다. 직접조사법과 달리 산업연관표를 이용하는 간접추계법은 하나의 수직주체(한국의 경우 한국은행)에 의해 만들어진 통합된 데이터가 사용되므로 일관성과 객관성이 반드시 확보되어야 하며, 전과정평가를 수행하는 국가에 따라 평가결과가 다소 차이를 보일 수 있다.

2.1.3 조합방법

이 방법은 2.1.1 및 2.1.2절에서 언급한 직접조사법과 간접추계법을 조합하여 환경부하를 정량화하는 방법으로 대개 이 방식은 직접조사법으로 구한 구조물에, 간접추계법으로 구한 에너지 원단위와 환경오염 배출원단위 등을 적용한다. 특히, 다양한 제품이 조합되거나 시스템성이 있는 대상에 효과적으로 이용할 수 있다. 이 방식은 상세한 부문구분이 가능하며, 포괄적이라는 장점을 가지고 있다. 그러나 일부 데이터가 간접추계법으로부터 구해지는 만큼 객관성이 결여될 수 있으며, 설계도서와 견적서 등으로부터 재료의 소재를 파악하는 등의 직접조사법의 단점도 일부 공유하고 있어 작업량이 방대해질 수 있다는 단점을 가지고 있다(국토해양부, 2009). 본 연구에서는 앞서 다룬 직접조사법과 간접추계법을 중심으로 전과정평가를 수행하였으며, 조합방법에 대한 연구는 추후 연구로 진행할 예정이다.

2.2 전과정평가의 절차

전과정평가는 평가대상물의 성격에 따라 절차는 유동적으로 변하며, 본 절에서는 토목구조물에 적용 가능한 환경적합성평가 절차를 간략하게 서술하였다.

2.2.1 목적 및 범위 정의

전과정평가를 수행하기에 앞서 평가 수행 대상과 목적 그리고 평가범위를 구체화한다. 목적에 맞는 평가결과를 얻기 위해 전제조건을 제시하고 전과정평가의 결과는 설정한 범위 내에서만 유효한 것으로 한다. 또한 이 단계에서는 사용할 목록분석방법과 환경영향범주(Environmental impact category) 등을 명시하도록 한다.

2.2.2 데이터 수집

대상물의 설계에서부터 폐기까지의 생애주기단계를 고려하여 평가목적과 범위에 맞는 데이터를 수집한다. 이 때, 대상물의 종류에 따라 데이터의 수집방법은 차이를 보일 수 있다.

2.2.3 목록분석

목록분석(LCI, Life Cycle Inventory)단계에서는 목적 및 범위 정의 단계에서 선정된 평가대상에 투입되는 에너지 및 원자재, 그리고 배출되는 부산물, 오염물질 등의 종류와 양을 파악하여 이를 데이터베이스에 적용하여 정량화한다. 목록분석은 공정도 작성-투입자재량 적용-데이터베이스 적용-투입량 산출량 계산 등 총 4가지 단계로 나눌 수 있다.

2.2.4 영향평가

영향평가(LCIA, Life Cycle Inventory Assessment)는 목록분석에서 산출되어 계산된 에너지 및 원자재 소요량, 배출물 목록 및 범위 정의 단계에서 명시한 환경영향범주에 미치는 잠재적인 영향을 정량적인 수치로 표시하는 단계이다. 이러한 정량화 과정은 특성화(Characterization)-정규화(Normalization)과정을 거치게 된다. 특성화 과정은 목록분석을 통해 정량화된 데이터(Inventory data)를 관련된 환경영향범주에 적용시켜 분석대상이 해당 환경영향범주에 미치는 환경영향을 평가하는 과정이다. 정규화 과정은 모든 경우에 수행하는 과정은 아니나, 영향평가지 고려된 환경영향범주간 중요순위 및 가중치를 결정한 뒤, 전과정평가의 결과를 하나의 정량화된 값으로 구하고자 할 때 수행한다. 이 때, 환경영향범주간 가중치를 산정하는 대표적인 방법으로는 AHP(Analytic Hierarchy Process)방법 등이 있다.

2.2.5 결과해석 및 검토

결과해석(Interpretation)단계는 목록분석과 영향평가단계의 결과를 기초로 하여 환경적합성평가의 결과를 분석하는 단계이다. 이 단계에서는 영향평가에 대한 개선방안을 마련하고, 이 과정에서 해석 수행자가 원하는 답을 얻지 못하였을 경우에는 데이터 수집 단계로 이동하여 재해석을 실시한다. 결과의 정리 시에는 전과정분석을 수행하면서 사용된 자료의 출처, 평가 전 가정사항 및 전제조건을 반드시 명시하도록 한다. 그림 1은 토목구조물에 해당하는 전과정평가의 일반적인 절차를 나타낸 것이다.

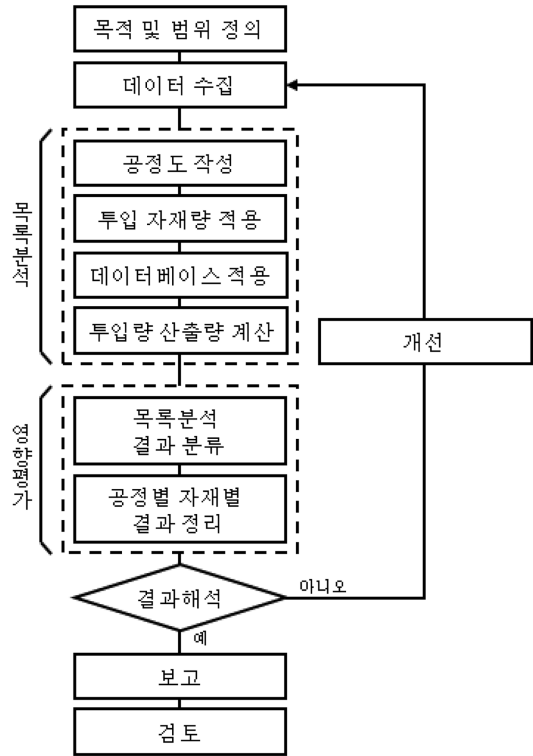


그림 1. 토목구조물을 대상으로 실행하는 전과정평가 절차

3. 강교량에 대한 전과정평가

본 장에서는 2장에서 언급한 전과정평가의 절차 단계별로 대표적 토목구조물인 강박스거더교를 선정하여 전과정평가를 수행하였다. 보다 일반적인 교량구조물의 전과정평가를 위해서는 많은 교량을 대상으로 하여 개략적인 환경부하 배출추세를 검토하여야 하지만, 본 연구에서는 직접조사법과 간접추계법을 이용한 환경부하 배출량의 차이를 비교하기 위하여 한 개의 대상교량에 대해 전과정평가를 수행하였다. 대상교량인 강박스거더교는 실제 설계·시공된 영덕·양재간 고속도로의 머내고가교로, 도로교설계기준(2005)에 따라 설계되었으며 6경간 연속교이다. 개략적인 제원과 단면은 표 1 및 그림 2와 같다.

표 1. 대상교량의 제원

구분	제원
경간 구성	6 @ 55 = 330 m
교폭	17.07 m
거더개수	3개
등급	1등급

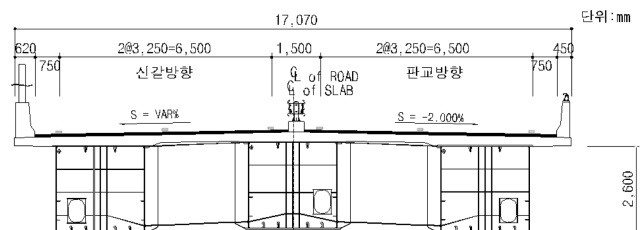


그림 2. 대상교량의 단면도

3.1 목적 및 범위 설정

강교량을 직접조사법과 간접추계법으로 전과정평가를 시행하여 공정별 환경부하에 대해 비교·분석하는 것을 목적으로 하고 대상 강박스저더교는 수명을 100년을 갖는 구조물이라 가정하였다. 평가 범위는 구조물의 원료획득단계부터 해체 및 철거단계까지의 전 생애주기를 고려하였다. 그러나 교량의 유지관리단계에서 각종 보수·보강 및 수리를 위하여 추가적인 건설자재가 투입될 수 있으며, 이러한 사항은 원칙적으로 교량의 파괴확률을 고려한 확률적 접근을 통해 이루어져야 한다. 그러나 이러한 접근은 난해할 뿐만 아니라 본 연구의 목적에도 벗어나므로 여기서는 교량의 도색 등의 간단한 유지관리만을 고려하는 것으로 범위를 제한하였다. 교량의 폐기단계의 경우에는 향후 100년 후의 다양한 건설 쓰레기의 처리방안 및 재활용 방법을 예측하기 어렵고, 각 폐기물별로 그 방법 또한 다양하여 분석이 난해하므로, 본 연구에서는 건설폐기물 처리 및 해체에 필요한 유류사용량만을 고려하여 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 대상교량의 각 생애주기단계를 총 62개 세부공정으로 나누고, 해석 및 결과비교의 편의를 위하여 이를 다시 자재 생산공정, 유류 사용공정, 운반공정으로 분류하여 평가하였다. 이 때, 각 원자재는 지정된 공급처로부터 지속적으로 공급받는다 가정하였으며, 원자재가 수입에 의존하는 물품이라면, 수입국으로부터 운송되는 거리에 따른 에너지사용은 분석에 포함시키지 않았다. 또한, 강관 파일, 강교 제작 등 강재관련 공정의 경우 강관, 강봉 생산 후 용접, 절단 등을 통하여 가공하는 단계가 있으나, 이러한 공정과 관련된 데이터가 부족하며, 해당 공정에서 배출되는 환경부하량은 미미할 것으로 예측됨으로 전과정평가 범위에서 제외하였다. 또한, 산성화, 부영양화, 오존층파괴 등 여러 가지 환경영향범주를 설정하여 직접조사법과 간접추계법의 분석결

과를 비교할 수도 있으나, 지구온난화와 관련된 CO₂배출계수의 경우 IPCC(2007)등에 의해 세계적으로 공인되어있고, 전 세계적으로도 지구온난화 문제가 가장 큰 환경이슈가 되고 있으므로 본 연구에서는 지구온난화와 관련된 환경오염물질 배출량을 기준으로 두 전과정 평가방법을 비교·분석하였다.

3.2 데이터 수집

직접조사법과 간접추계법에서는 공통적으로 전체 공정도, 각 원료 및 자재의 운송거리, 각 공정에서 사용된 유류량, 고품폐기량의 발생량 등의 자료가 필요하다. 특히 간접추계법에서는 현 시세를 반영한 실적공사비 및 단가에 대한 정보가 필요하다. 또한, 대상교량의 경우 최근에 준공되어, 아직까지 대대적인 유지관리 및 보수가 이루어지지 않았으므로 유지/보수단계에서 사용 될 원자재 및 건설재료, 사용 유류량과 해체 및 재활용단계에서 적용될 고품 폐기량에 대한 데이터가 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 2001년 조사된 고속도로상의 강교 평균 재도장주기인 10년간 1회 재도장을 실시한다고 가정하고 물량을 산출하였다. 해체 및 재활용단계에서는 설계에서 반영된 원료획득단계, 건설자재 제조/생산단계에서의 물량을 바탕으로 역품셈하는 방법을 이용하였다. 대개 토목구조물에서는 건축물과는 달리 일반적으로 건설자재 제조/생산단계에서의 환경오염정도가 사용 및 유지/보수단계에 비해 높기 때문에 건설자재 제조/생산단계의 구체적인 데이터를 수집하였다.

3.3 목록분석

3.3.1 공정도 작성

앞서 정의했던 평가 대상범위를 고려하여 총 62가지 세부공정을 작성하였다. 그림 3에는 대상교량의 생애주기에 있어

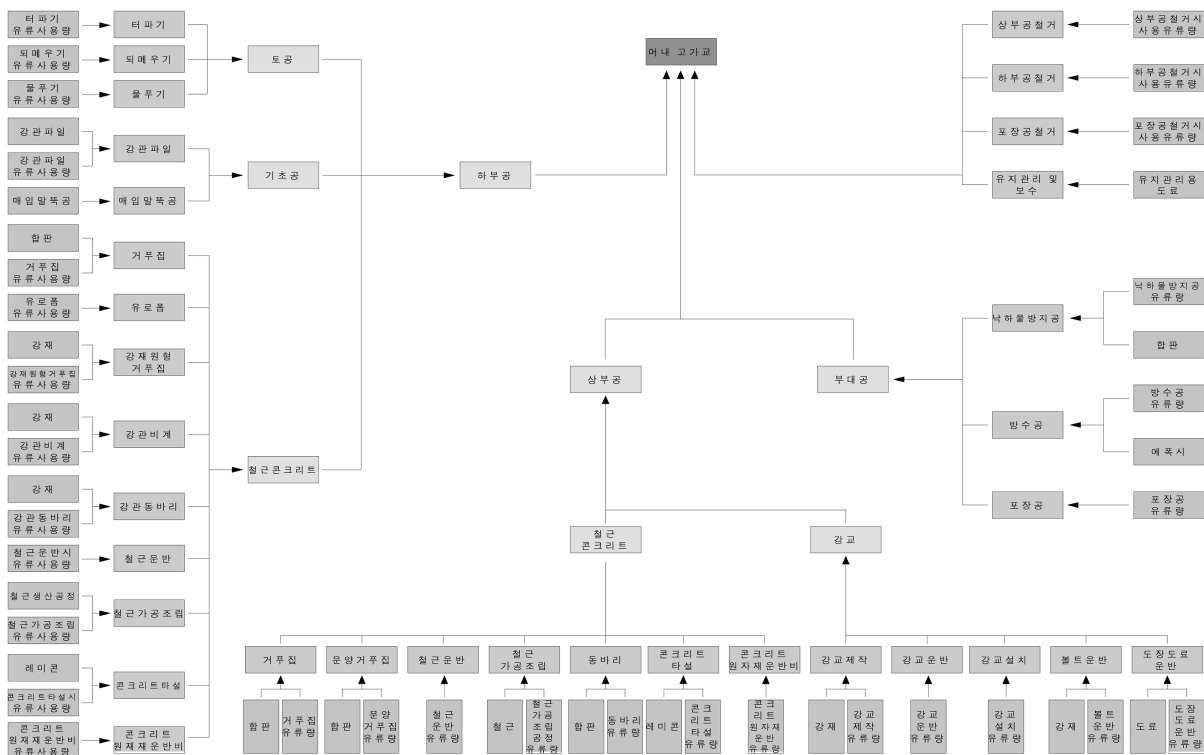


그림 3. 전과정 평가를 위한 공정간 계층구조

표 2. 대상교량의 62가지 세부공정 및 분류

분류	세부공정	구분			
		자재생 산공정	유류사 용공정	운반 공정	
토공	터파기		○		
	되메우기		○		
	물푸기		○		
기초공	강관파일생산	○			
	말뚝매입공		○		
	강관파일운반			○	
교각 및 교대	거푸집생산	○			
	거푸집 합판 운반			○	
	유로폼 설치		○		
	강재 거푸집 생산	○			
	강재 원형 거푸집 설치		○		
	강재 거푸집 운반			○	
	강관 비계 생산	○			
	강관 비계 설치		○		
	강관동바리 생산	○			
	강관동바리 설치		○		
	강관동바리 운반			○	
	철근 생산	○			
	철근 운반			○	
	철근 조립		○		
	하부공 레미콘 생산	○			
	하부공 레미콘 운반			○	
	하부공 콘크리트 타설		○		
	교각교대 콘크리트 원자재 운반		○		
	바닥판	거푸집 합판 생산	○		
		합판 운반			○
거푸집 설치			○		
문양거푸집 합판 생산		○			
합판 운반				○	
문양거푸집 설치			○		
상부공 철근 운반				○	
상부공 철근 생산		○			
상부공 철근 조립			○		
동바리용 합판 생산		○			
동바리용 합판 운반				○	
상부공 동바리 설치			○		
상부공 레미콘 생성		○			
상부공 레미콘 운반				○	
상부공 콘크리트 타설			○		
콘크리트 원자재 운반			○		

서 자재의 이동경로와 쓰임새를 알기 쉽게 나타낸 각 공정의 계층구조를 나타내었다. 세부공정 각각의 명칭과 분류는 표 2에 나타내었다. 표 2에서는 목적 및 범위설정에서도 언급하였듯이 총 62가지 세부공정을 자재 생산공정, 유류 사용공정, 운반공정으로 구분하였다. 공정의 구분 기준은 데이터

표 2. 계속

분류	세부공정	구분		
		자재생 산공정	유류사 용공정	운반 공정
강거더	상부공 강거더 생산	○		
	강재 운반			○
	강교 제작 공정		○	
	강거더 운반			○
	강교 설치		○	
	상부공 볼트 생산	○		
	상부공 볼트 운반			○
	상부공 볼트 작업		○	
	도료 생산	○		
	도료 운반			○
낙하물 방지판	낙하물 방지판 생산	○		
	현장 자재 이동		○	
	낙하물 방지판 설치 작업		○	
방수공	방수재 생산	○		
	이스콘 포장재 운반			○
	방수 작업		○	
포장공	포장 작업		○	
유지 관리	유지관리 도료 생산	○		
철거공	상부구조 철거		○	
	하부구조 철거		○	
	부대시설 철거		○	

를 얻을 수 있는 범위에 제한하였으며, 토공에서 터파기, 되메우기, 물푸기 등과 같은 공정의 경우는 유류를 사용하는 공정만으로 이루어진다고 가정하였다. 사용 및 유지/보수단계의 경우에는 도료를 주기적으로 사용하고, 해체 및 재활용의 경우에는 하부시설, 상부시설, 부대시설에 대해서 철거하는 과정에서 소비하는 유류를 고려하였다.

3.3.2 투입 자재량 적용

직접조사법에서는 원료 및 자재의 단위를 통일시켜 다음의 데이터베이스를 적용 시 효율적인 계산이 가능하도록 하였다. 이 때 ton 및 kg의 단위를 사용하였다. 간접추계법에서는 공정별 사용된 원료 및 자재들을 건설공사 실적 공사비 적용 공정 및 단가에서 표현된 단위에 맞추어 가격(원)단위로 환산하였다. 직접조사법과 간접추계법 두 방법 모두에서는 투입 자재량의 적용 시 공정의 결과물이 이동하는 이동경로 유류 사용량을 계산하는데 필요하기 때문에 함께 고려하였다.

3.3.3 데이터베이스 적용

직접조사법의 경우 환경부와 산업자원부에서 개발한 데이터베이스(한국환경산업기술원, 2006)를 이용하여, 사용된 원료 및 자재의 투입물과 산출물에 대해서 분석하였다. 이 때, 한국환경산업기술원(2006)의 데이터베이스에 의하면, 강재에 대해 후판, 강관 등 다양한 항목을 제시하고 있으나, 각 항

목에 대하여 환경부하물질 배출량이 유사하므로, 본 연구에서는 강제 관련 공정에 이용되는 다양한 강제 재료를 ‘강제 (Steel)’ 항목으로 통일하여 분석하였다. 반면, 각 공정마다 쓰이는 유류사용량에 따른 환경부하는 데이터베이스가 따로 마련되어 있지 않다. 따라서 운반거리 당 사용된 유류량을 고려하듯이 건설용 트레일러 연비 3.5 km/l를 기준으로 유류 사용량을 운반거리로 환산하여 계산하였다.

간접추계법의 경우에는 한국은행에서 발행한 2003년 산업연관표(한국은행, 2007)를 바탕으로 구축된 EIO Table을 사용하였다. 또한, EIO Table의 행렬연산을 통하여 산출된 직접에너지 투입행렬과 총 에너지 투입행렬을 만들었다. 여기서 계산된 총 에너지 투입행렬은 공정별 물량 산출량을 가격으로 변환해준 값에 대입하였다.

직접조사법에 대하여서는 한국환경산업기술원(2006)의 데이터베이스를 적용한 상용 전과정평가 해석프로그램인 TOTAL 2.3.1을 이용하였다. 간접추계법의 경우, 이러한 프로그램이 마련되어 있지 않아, 엑셀 등을 이용한 수작업을 통하여 환경부하량을 산출하였다.

3.3.4 투입량, 산출량 계산

직접조사법을 통한 전과정평가 수행 시 ‘3.3.2 투입자재량 적용’에서 계산된 투입 및 산출 물량과 ‘3.3.3 데이터베이스 적용’에서 준비한 데이터베이스를 사용하여 투입량 및 산출량을 구할 수 있다. 투입량과 산출량을 계산하면 전체공정 또는 각 공정에서 사용되는 원료 및 자재의 종류와 자재의 양, 산출량 및 환경오염 발생물질의 양까지 확인할 수 있다. 그 예는 표 3과 같다.

이는 14000여개에 해당하는 투입량과 산출량 항목개수 중

에서 한 개 공정(강관비계 생산공정)의 투입량과 산출량의 일부분이다. 투입량은 방향 항목에서 input으로 표기하였으며 산출량은 output으로 표기하였다. 또한 이에 따른 물질명과 단위, 양을 표기하여 물질의 흐름을 정리하였다. 이러한 작업을 통하여 환경오염에 영향을 끼치는 물질들에 대한 용량을 추출하였다.

간접추계법을 사용할 때에는 ‘3.3.3 데이터베이스 적용’ 단계에서 환산해준 공정별 도입된 총 원료 및 자재 가격을 총 에너지 투입행렬에 적용하였다. 표 4는 간접추계법에 따른 총 에너지 투입행렬의 일부분이다. 또한 공정별 사용된 유류 및 생산 물질 운송 과정에서 소비된 유류에 대해서는 연료별 배출계수(CEF: Carbon Emission Factor)를 적용하였다.

3.4 영향평가 및 결과

대표적인 환경영향범주인 지구온난화에 대하여 영향평가를 수행하였으며, 직접조사법과 간접추계법으로부터 구해진 영향평가 결과를 대상교량의 생애주기별로 분류하여 비교...분석하였다. 본 연구에서는 지구온난화라는 단일 환경영향범주에 대하여 분석을 수행하였으므로 특성화 단계만을 진행하였으며, 정규화 단계는 생략하였다.

3.4.1 목록분석 결과 분류

직접조사법에서는 목록분석 수행 시 적용되었던 물질들의 투입물과 산출물들 중에서 지구온난화 환경영향범주와 관련된 물질들을 분류하였다. 대표적으로 CO₂가 있으며, CFC₁₁, CFC₁₂, CFC₁₃, CFC₁₁₄, Halon₁₃₀₁, HCFC₂₂, Methane, N₂O, C₂F₆, CF₄등은 각기 해당하는 CO₂를 기준으로 한 환산계수를 곱하여 지구온난화 영향평가결과를 산출하였다. 표 5는

표 3. 개별적산방법에 따른 투입량과 산출량 (일부분)

방향	데이터 범주	배출환경	물질명	단위	양
Input	Resource	Technosphere	Sulfur dioxide	kg	1.054E+00
Input	Resource	Technosphere	Sulfur	kg	9.250E+01
Input	Resource	Technosphere	Uranium	kg	2.193E+02
Input	Resource	Technosphere	Zinc	kg	6.919E-03
Input	Resource	Technosphere	Water(Unspecified)	kg	5.520E+02
Output	Contaminant	Soil	Benzene	kg	8.513E+01
Output	Waste	Soil	Coal Tar	kg	2.943E+02
Output	Waste	Air	Dust	kg	8.163E+02
Output	Waste	Air	Industrial waste	kg	2.400E+05
Output	Contaminant	Air	Acetaldehyde	kg	6.996E+03

표 4. 간접추계법에 따른 총 에너지 투입행렬 (일부분)

범주		에너지			비에너지		
		등유	경유	중유	합판	도료	시멘트
에너지	등유	1.01549	0.00110	0.00112	0.00125	0.00243	0.00238
	경유	0.00389	1.00444	0.00425	0.01604	0.01930	0.05556
	중유	0.01523	0.00564	1.00756	0.01165	0.01443	0.03063
비에너지	합판	0.00007	0.00002	0.00004	1.09645	0.00075	0.00057
	도료	0.00040	0.00011	0.00021	0.01229	1.02443	0.00145
	시멘트	0.00003	0.00001	0.00002	0.00008	0.00010	1.03523

표 5. 지구온난화와 관련된 물질의 CO₂를 기준으로 한 환산계수 (GWP: Global Warming Potential) (IPCC, 2007)

지구온난화 물질	계수
CO ₂ (carbon dioxide)	1
CFC-11	4000
CFC-12	8500
CFC-13	11700
CFC-114	9300
Halon-1301	5600
HCFC-22	1700
Methane	21
N ₂ O(nitrous oxide)	310
C ₂ F ₆ (perfluoroethane)	9200
CF ₄ (perfluoromethane)	6500

각 물질들을 CO₂로 환산해주는 환산계수이다(IPCC 2007).

간접추계법은 직접조사법과 같이 평가 대상구조물에 한해서 유출되는 환경부하물질들을 나열하는 과정이 아니므로 특정 물질에 대한 추적보다는 공정에 투입된 물질들에 대해서도 다른 물질, 다른 분야 간의 관계를 분석하였다. 이 과정에서 대상교량의 생애주기단계별 자재생산공정, 유류사용공정, 운송공정에서 배출되는 CO₂환산배출량에 대하여 결과를 산출하였다.

3.4.2 영향평가 결과

건설자재를 구성하는 물질 중 환경에 부정적 영향을 끼치는 특정 물질들을 각 환경영향범주에 따라 구분하여 환경오염정도를 수치로 나타낼 수 있다. 따라서 이 결과 값으로 사용지는 평가 목적에 맞게 각 공정별이나 환경영향범주로 환경오염정도를 분석할 수 있다.

본 연구에서 직접조사법과 간접추계법 간의 비교대상으로 삼은 환경영향범주인 지구온난화는 표 5와 같이 정량화 지표로서 GWP(Global warming potential)를 이용하고 있으며, 이는 CO₂배출량을 기준으로 계수를 정리하고 있다. 따라서 영향평가의 결과에 해당하는 정량적 수치를 'CO₂환산배출량' 혹은 'GWP값'이라고 부르는 것이 옳은 표현이나, 앞으로 이에 대한 언급이 많으므로 간단히 'CO₂배출량'으로 줄여 부르도록 하겠다.

직접조사법과 간접추계법으로 영향평가를 수행한 결과, 대상교량의 전체 CO₂환산배출량은 표 6과 같이 각각 241.27 ton CO₂-eq와 221.03 ton CO₂-eq로 나타났다. 직접조사법을 기준으로 삼았을 때 간접추계법이 8.39% 차이를 보였다. 각 공정분류별로 보면, 자재생산공정의 경우 직접조사법이 간접추계법에 비해 약 14% 높은 배출량을 보였으며, 유류사용공정 및 운반공정에서는 각각 19%, 26% 간접추계법이

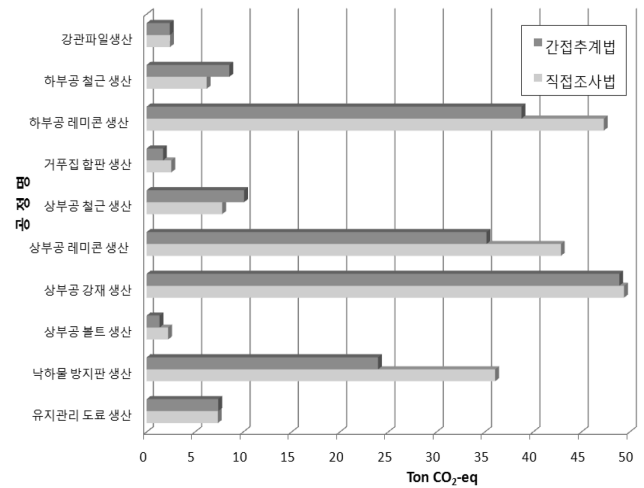


그림 4. 자재생산공정의 CO₂ 환산배출량

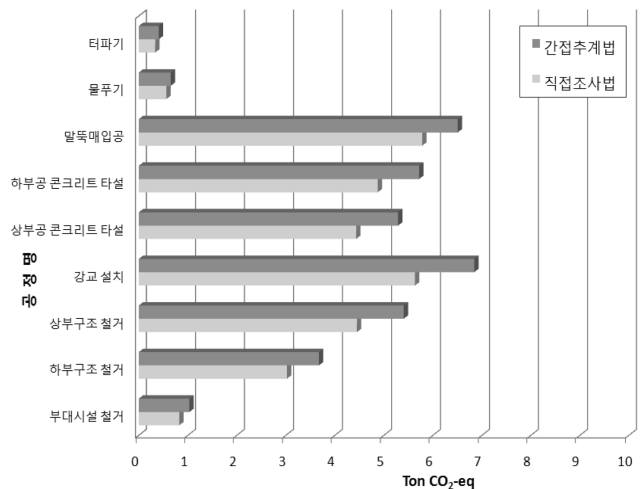


그림 5. 유류사용공정의 CO₂ 환산배출량

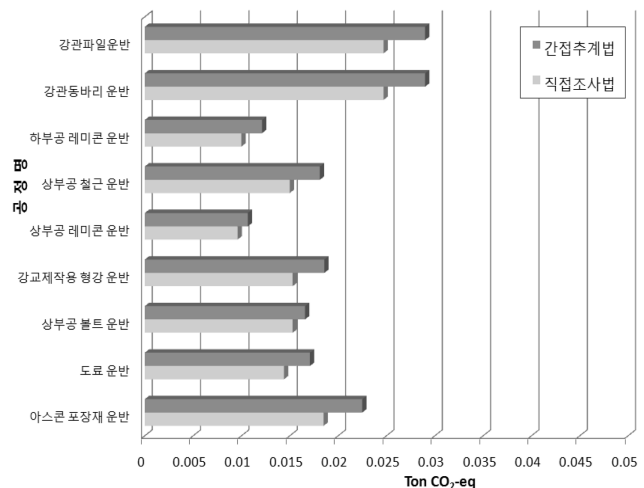


그림 6. 운반공정의 CO₂ 환산배출량

높은 배출량을 보였다.

이와 같은 환경부하의 정량적인 값은 환경부하량 배출 관

표 6. 두 가지 방법으로 산출한 공정 범주별 CO₂ 환산배출량

	자재생산공정 CO ₂ 환산배출량	유류사용공정 CO ₂ 환산배출량	운반공정 CO ₂ 환산배출량	합계
직접조사법	209.67	31.41	0.19	241.27
간접추계법	183.46	37.32	0.24	221.03

런 기준이 마련되었을 경우 참조자료로서 활용이 가능하다고 보여지나, 토목 분야에서는 아직 위와 같은 기준 마련이 미비한 수준이다. 따라서 본 연구는 어떠한 환경적합성 기준에 부합하는지 여부를 평가하기보다는 교량의 각 공정별 환경부하 배출 특성을 살펴보고 차후 교량의 환경부하량 저감을 위한 연구 수행 시 참조할 수 있는 평가 프로세스를 제시하고자 하였다.

자재생산공정, 유류사용공정, 운반공정 등 각 공정별 CO₂ 배출량은 다음 그림 4~6과 같다. 공정별 영향평가결과를 나타내는 각 그림에서는 환경영향평가 분석을 위해 배출된 CO₂양이 매우 적은 공정은 나타내지 않았으며, 자재생산공정, 유류사용공정, 운반공정의 방법에 대해 각각 CO₂배출량 상위 9~10개의 공정만을 나타내었다.

그림 4에서 보이는 바와 같이, 자재생산공정에서 배출된 CO₂배출량은 직접조사법과 간접추계법이 비슷한 추세를 보였다. 자재생산공정에서 배출된 전체 CO₂배출량은 직접조사법을 사용한 영향평가에서 209.67 ton, 간접추계법을 사용한 영향평가에서 183.46 ton이었으며, 직접조사법에서 CO₂배출량이 26.21 ton만큼 더 높았다. 평가결과, 환경오염에 가장 큰 영향을 미치는 공정은 두 방법에서 모두 상부공 강거더 생산과 상·하부공 레미콘생산으로 나타났다.

한편, 직접조사법을 사용하여 산출한 CO₂배출량이 간접추계법을 사용하여 산출한 CO₂배출량보다 높게 나타났으나, 모든 세부공정에서 직접조사법에 의한 배출량이 간접추계법에 의한 배출량보다 높은 것은 아니었다. 세부공정별로 분석해보면, 유지관리를 위한 도로생산과정의 경우 직접조사법이 간접추계법보다 CO₂배출량이 약 0.54% 더 적게 발생하였고, 철근 생산과정의 경우에도 24.91% 더 적게 발생하였다. 그러나 그 외의 생산공정은 직접조사법을 사용한 CO₂배출량이 산업연관방법을 사용한 CO₂배출량보다 높았다(낙하물 방지판 생산: 33.58%, 상부공 볼트 생산: 39.92%, 상부공 강거더생산: 0.992%, 상부공·하부공 레미콘생산: 평균 17.95%, 거푸집 합판 생산: 33.58%, 강관파일 생산: 1.03%).

이는 목록분석과정을 거치면서 직접조사법과 간접추계법간 적용한 데이터베이스의 차이(직접조사법의 경우 한국환경산업기술원(2006) 데이터베이스, 간접추계법의 경우 한국은행(2007)의 산업연관표)로부터 오는 것에 기인한다고 판단된다. 특히, 두 데이터베이스 모두 토목을 포함한 건설분야만을 위하여 만든 데이터베이스가 아닌 만큼, 누락된 건설재료는 유사한 재료로 대체하여 수행하였으며, 이와 같은 과정에서 생긴 오차라 판단된다.

철근 생산과정을 제외하면, 상부공 강거더생산, 상·하부공 레미콘생산 등 다량의 재료가 투입되는 공정에서 직접조사법의 CO₂배출량이 간접추계법의 CO₂배출량에 비해 크게 나타나는 경향을 보이므로, 전반적으로 직접조사법이 보다 보수적인 평가결과를 나타냄을 알 수 있다.

그림 5는 유류사용공정의 CO₂배출량이며 직접조사법과 간접추계법을 사용한 두 가지 결과 모두 공정별 CO₂의 배출양상이 비슷했다. CO₂의 총량의 절대적 수치는 직접조사법의 경우 31.41 ton, 간접추계법의 경우 37.32 ton으로 직접조사법을 기준으로 간접추계법을 사용한 결과가 16.30% 더 높았다.

가장 많은 CO₂배출량을 보인 세부공정은 말뚝대입공으로, 5.78 ton의 CO₂가 배출되었고, 다음으로 강교설치와 하부공 콘크리트 타설 공정 순으로 CO₂ 발생량이 산출되었다. 또한 그림 6, 7에서 볼 수 있듯이 건설자재 제조/생산단계 외에 해체 및 재활용 단계에 속하는 상부, 하부, 부대시설 해체 단계에서 많은 양의 CO₂가 배출되었다. 상부, 하부, 부대시설 철거로 인한 전체 CO₂배출량은 개별적산방법에서 8.30 ton으로 전체 31.41 ton의 CO₂배출량에서 26.42%에 해당하는 비교적 많은 CO₂배출량을 보였다. 특히, 모든 공정에서 간접추계법에 의한 CO₂배출량이 더 높은 값을 보였는데, 이로부터 유류사용에 관한 지구온난화 환경영향법주의 평가결과는 간접추계법이 직접조사법에 비해 전반적으로 높은 결과를 보인다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 대상교량의 폐기단계 시 교량의 철거에 이용되는 유류만을 해석 범위에 포함시켰으나, 철거 후 건설폐기물 처리에 의한 환경오염이 지대할 것으로 예측되므로 실제로는 폐기단계에서 보다 많은 CO₂배출량을 보일 것으로 판단된다.

그림 6의 경우 유류를 소비하는 운반공정에서 배출된 CO₂배출량의 양을 나타낸다. 총 CO₂배출량은 직접조사법을 사용하였을 때 총 0.19 ton, 간접추계법을 사용하였을 때에는 총 0.24 ton이 배출되었다. 유류를 소비하는 운반공정의 CO₂배출량은 자재가 운반되어 오는 거리가 CO₂의 발생량에 관련이 있다. 예를 들어 레미콘의 경우 레미콘을 구성하는 시멘트, 모래, 골재의 운반거리까지 고려하여 총 272 km의 거리를 운반하지만 도로의 경우 상도, 중도, 하도로 나뉘어 총 380.2 km에 해당하는 거리를 운반한다. 따라서 도로의 양(1회: 3662 kl=4031 ton)은 하부공에 투입되는 레미콘의 물질 양(2683 m³=6441 ton)보다 적은 양이지만 도장도로운반 공정을 기준으로 도장도로운반 공정에서의 CO₂배출량은 콘크리트원자재운반 공정에서의 CO₂배출량 보다 30.56% 더 많이 발생되었다. 운반공정 역시 모든 세부공정에서 직접조사법보다 간접추계법에서 높은 CO₂배출량을 보였다.

3.4.3 결과 및 개선

영향평가를 공정별로 자재생산공정, 유류사용 공정, 운반공정 3가지 범주로 나누어 분석을 실시한 결과, 건설자재 제조/생산단계에서 대부분의 CO₂가 배출되었다. 따라서 재료의 운송거리나 에너지 효율이 높은 건설장비를 사용하는 것도 좋은 방안이 될 수도 있겠지만, 구조 안정성, 내구성 등의 기본적인 강교량의 조건을 충족하면서 환경부하 배출이 높은 자재/공정을 최소화하는 효율적인 설계가 환경부하를 줄이는 효과적인 방법이 될 것으로 판단된다.

또한 본 논문에서는 해체 및 재활용 단계의 경우 유류만을 사용한다고 가정하였다. 하지만 실제 건설의 해체 및 재활용 단계에서의 환경오염은 건설폐기물의 처리 및 재활용 공정에 의해 본 연구에서 산출된 전과정평가 결과보다 많은 양의 환경부하를 발생시키리라 판단된다. 차후 건설폐기물의 폐기 및 재활용에 의한 전과정평가 연구를 통해 이를 개선해 나가자 한다. 아울러, 앞서 언급했던 조합방법에 의한 전과정평가가 이루어진다면 보다 다양한 결과분석이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 교량의 전과정평가 결과에 의하면 직

접조사법에 의한 CO₂배출량이 간접추계법에 의한 CO₂배출량보다 보수적인 결과를 나타냈다. 일반적으로 직접조사법이 간접추계법보다 신뢰도 높은 평가결과를 보임으로(Lee *et al.*, 2009) 간접추계법으로 산출된 CO₂배출량이 실제보다 저평가되었다고 판단하는 것이 보다 옳은 표현이라 사료된다. 그러나 직접조사법이 지구온난화 뿐만 아니라 산성화, 부영양화, 오존층 파괴와 같은 다른 환경영향범주에 대한 전과정 평가가 비교적 쉬운 반면, 간접추계법의 경우에는 이를 고려하기 위하여 산업연관표를 각 환경영향범주별로 재구성해야 하는 등의 단점이 있다. 따라서 보다 많은 환경영향범주를 포함하는 실질적인 전과정평가 수행을 위해서는 직접조사법을 이용하되 부족한 데이터를 개선해 나가는 편이 보다 합리적이라 판단된다.

끝으로, 토목분야에서 환경적합성 평가가 이루어지고, 합리적인 평가 프로세스가 개발되기 위해서는 다양한 토목 원자재 및 부재들에 대한 전과정평가 데이터베이스 확충이 반드시 필요하다고 사료된다. 예를 들면, '결설용 강재'라는 획일화된 데이터베이스보다는 강관, 강판, 강재 동바리 등 다양한 형태의 가공품에 대한 독립적인 데이터베이스가 요구된다. 뿐만 아니라, 같은 원자재라도 다양한 형태의 가공과정과 조립과정을 거치게 되는데, 현재 현장에서 축적하는 자료로는 이를 '유류 사용량'으로 밖에 고려할 수 없다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 다양한 건설자재에 대한 환경부하 배출 원단위 개발 연구가 필요하다. 건축물 분야에서는 건설교통부(2004) 등의 연구를 통해 CO₂를 중심으로 한 환경부하 배출 원단위 개발 연구가 활발히 진행 중이다. 그러나 이러한 연구가 아직까지는 CO₂배출량을 중심으로 한 환경적합성 평가에 치중되어 있다. 따라서 보다 많은 환경영향범주를 포함시키기 위해서는 각 건설자재별로 원자재 획득, 가공, 제품화에 걸친 모든 제조 과정에서 발생, 소요되는 물질들을 국내 제조업 실정을 고려하여 추적하는 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 강박스거더교를 대상으로 전과정평가의 대표적인 방법인 직접조사법과 간접추계법을 이용하여 구조물의 환경영향평가를 분석하였다. 두 방법으로부터 나온 환경영향평가 결과를 비교·분석하여 향후 환경적합성평가가 구조물의 설계에 반영될 시 참고할 수 있는 프로세스를 제시하고자 하였다. 다음 사항들은 본 연구로부터 얻어진 결론이다.

1. 본 논문에서 선정된 강교량에 대해서 전과정평가를 수행한 결과 직접조사법을 사용하였을 때는 241.27 ton의 CO₂가 발생하였으며 간접추계법을 사용하였을 때 221.03 ton의 CO₂배출량이 발생하였다. 이러한 차이는 목록분석과정을 거치면서 직접조사법과 간접추계법간 적용한 데이터베이스의 차이에 기인한다고 판단된다. 그러나, 대상교량의 각 세부공정에 대한 영향평가 결과의 추세는 두 방법이 서로 비슷한 양상을 나타내었다.
2. 유류사용공정과 운반공정에 대한 환경영향평가의 경우 모든 세부공정에서 간접추계법에 의한 결과가 직접조사법에 의한 결과보다 높은 평가결과를 나타내었다. 따라서 유류

사용에 관한 지구온난화 환경영향범주의 평가결과는 간접추계법이 직접조사법에 비해 전반적으로 높은 결과를 보인다라는 것을 알 수 있다.

3. 본 논문에서는 강교량의 62가지 세부공정에 대해서 자재생산공정, 유류사용공정, 운반공정으로 영향평가결과를 구분하였다. 평가결과, 대부분의 CO₂는 자재생산공정에서 배출되었다. 이와 같은 영향평가결과로부터 구조 안전성, 내구성 등의 기본적인 강교량의 조건을 충족하면서 환경부하 배출이 높은 자재/공정을 최소화하는 효율적인 설계가 환경부하를 줄일 수 있는 최선의 방법이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단과, 지식경제부 원전기술혁신사업-단기핵심기술 단기과제 신뢰성기반 성능중심 설계기법에 따른 원전격납구조물의 해석 및 설계기법 과제의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

고광훈 등(2007) 건축물 해체 폐기물 처리에 대한 전과정평가. 한국전과정평가학회지, 한국전과정평가학회, 제8권 제1호, pp. 1-9.

국토해양부(2009) 강구조물의 성능중심 설계지침, 연구보고서, 06 기반구조A01, 한국건설기술연구원

건설교통부(2004) 건축물의 LCA를 위한 원단위 작성 및 프로그램 개발 연구. 건설교통기술혁신사업 제 2차년도 최종 보고서, 한국건설기술연구원.

김신도, 이임학, 황의현(1999) 건축 환경부하(CO₂)에 관한 Life Cycle 연구. 1999년 한국전과정평가학회 정기총회 연구논문집, 한국전과정평가학회, pp. 52-55.

박광호(2000) 고속도로의 전과정에 따른 환경부하 평가를 위한 데이터베이스 구축. 석사학위논문, 중앙대학교.

이강희, 양재혁(2009) 주요 건축자재의 에너지소비와 이산화탄소 배출원단위 산정 연구. 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제 25권 제6호, pp. 43-50

이강희(2005) 건축물의 LCA 적용방안. 2005년도 학술 발표회 논문집, 대한설비공학회, 제34권 제12호, pp. 15-20.

이선동, 유호천(2005) 사무소건축 리모델링에서의 전과정 평가에 관한 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 한국태양에너지학회, 제24권 제3호, pp. 85-92.

한국은행(2007) 2003년 산업연관표. 한국은행

한국환경산업기술원(2006) 국가 LCI DB, www.keiti.re.kr

홍석진 등(2005) 국내 폐자동차 처리시스템에 대한 전과정 평가. 한국자동차공학회논문집, 한국자동차공학회, 제13권 제6호, pp. 105-112.

ECOBILAN (2006) Team 4.5(TM), Ecobilan

EMPA (1998) BUWAL 250, Swiss Federal Laboratories for Material Science and Technology, Switzerland

IDEMAT (2001) Inventory data of materials, Faculty of Design, Engineering and Production, Delft University of Technology, Delft, Netherland.

IPCC (2007) Fourth assessment report(AR4), Working Group 1, Chapter 2, Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, Intergovernmental Panel on Climate Change, Table 2.14, p. 212.

Lee, K., Tae, S., and Shin, S. (2009) Development of a life cycle assessment program for building (SUSB-LCCA) in South

- Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, Issue 13, pp. 1994-2002.
- Miller Ronald, E. and Blair Peter, D. (1985) *Input-Output analysis : foundations and extensions*, Prentice-Hall, Inc, pp. 200-204.
- NIST (2008) BEES 3.0d, National Institute of Standard and Technology.
- PE International (2006) Gabi 4, PE International - Experts in Sustainability.
- PRE Consultants (2008) SimaPro(R) 7.1.8, Product ecology consultants.
- UNEP (1996) *Life Cycle Assessment-What it is and how to do it*, UNEP, Paris, France, pp. 7-8.
- Frischknecht, R., Hofstetter, P., Knoepfel, I., Menard, M., Dones, R. and Zollinger, E. (1996) *Oko-inventare von energiesystemen*, ETH-TSU, Zurich, Switzerland.

(접수일: 2010.8.27/심사일: 2011.1.11/심사완료일: 2011.2.28)