한국철도학회논문집
제8권 제6호 2005년 | pp. 520-524

간략화 전과정 평가(S-LCA)기법을 이용한 전동차 구체의 환경성 평가

Environmental Impact Assessment of the Carbody of a Electric Motor Unit(EMU) Using Simplified Life Cycle Assessment(S-LCA)

김용기† · 이재영* · 목재균* · 정인태**
Yong-Ki Kim · Jae-Young Lee · Jai-Kyun Mok · In-Tae Jeong

Abstract

It is consequential to reduce the environmental impact of a product for sustainable development in 21st Century. In the field of transportation, especially, the technological market concerned about reduction and assessment of greenhouse gas emission is expected to be extended. The LCA has been esteemed and utilized as a realistic alternative to improve the environment by the assessment of environmental impacts. In this study, simplified life cycle assessment(S-LCA) was performed to analyze the environmental impacts quantitatively, which were produced through the life cycle of a electric motor unit(EMU). The object of the present work is to investigate main parameters of environmental impacts and to establish the plans to improve the environment impact of EMU. As a result of quantitative assessment for environmental impact and manufacturing, the EMU carbody made of SUS showed acidification(AD) and marine water aquatic ecotoxicity(MAET) the most, while that made of Mild showed high impact of global warming(GW) and abiotic resources depletion(ARD). For the SUS EMU, the high AD and MAET impact is occurred by the discharged pollutants during acid-washing process. Also, high value of GW and ARD for Mild EMU is resulted from the consumption of iron ore, coal and crude oil during manufacturing. Therefore, the environment impact of carbody would be decreased by enhancing of energy efficiency and the lightening the weight of it.

Keywords : 전동차 구체(electric motor unit carbody), 전과정 평가(life cycle assessment), 전과정 목록(life cycle inventory), 환경영향(environmental impact)

1. 서 론

21세기 지속가능한 개발을 전제로 국제적으로 환경규제가 강화되고 있으며, 2005년 2월 교토의정서가 비준됨에 따라 환경부하의 저감 및 친환경적 산업 육성을 위한 국가 차원의 환경생산체계 구축이 진행되고 있다. 이에 각 산업 및 제품 생산 과정에서 유발되는 환경부하에 대한 문제는 환경친화적 산업 육성과 정부의 정책의지와 결합하여 향후 국제 무역 및 산업 활동에 막대한 영향을 미치게 될 것으로 전망된다[1].

철도수송수단에 있어서도 지구온실가스[2] 및 기후변화 협약 등과 관련된 온실가스 저감 대책의 수립은 향후 교통수송정책의 주요 사항으로 대두되고 있다. 현재 환경친화적인 철도산업의 육성을 위한 정부, 업계, 민간의 관심이 증대되고 있으며 환경친화적 철도수송수단의 육성을 위한 조치 및 활동 등이 진행되고 있다. 그러나 철도차량의 전과정(life cycle)에 걸쳐 얼마만큼 환경부하를 배출하는지에 대한 정량화가 되고 있지 않으며, 환경친화성 평가방법에 있어서도 기법들은 정성적인 방법에 근거하고 있어 국가정책 결정 중 경제성에 입각한 효율적인 결정을 하기 어려운 상황이다. 또한 철도차량 제작시 자재의 사용량, 에너지 소비량, 폐기물 발생량 등 환경부하 요인은 단계별로 복잡하기 때문에 이와 관련된 환경영향 정보를 구체적이면서 정량적인 형태로 나타내는 것이 환경성능 개선을 위한 가이드라인[3]과 환경성능평가 활성화를 위해서도 매우 중요하게 여겨지고 있다.

전동차는 제작시 원재료를 사용하여 부품을 제조하고, 또 제조된 부품을 통해 단품을 제작 조립하여 전동차를 완성

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 교통핵심연구팀
E-mail : ykkim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5382 FAX : (031)460-5499
* 한국철도기술연구원
** 아주대학교

하게 된다. 전동차의 제작, 운행 및 폐차과정에서 환경부하물질을 방출하게 된다. 따라서 전동차 부품의 원료채취부터 제작과정에서 발생되는 환경부하물질의 파악과 부하물질 저감을 통한 제품이나 서비스 환경에서의 정량적인 평가방법을 통해 환경친화적인 이미지를 강화시키고 환경영향 최소화 방안이 시급히 마련되어야 한다. 이에 전동차 라이프사이클 과정에서 발생시키는 자원 및 에너지소비량, 온실가스 배출량을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하고 환경친화적인 교통수단을 권장하고 나아가 기후변화협약 등 국제적인 환경 변화에 능동적인 대응책의 수립이 필요하다[4].

본 연구에서는 전동차는 다른 철도차량보다 환경부하는 적지만 수송에 필요한 다량의 에너지, 자원의 사용비율이 상대적으로 높으므로 전과정 평가를 수행하여 환경성에 대한 정량적 비교분석을 통해 개선점을 파악하고자 한다. 전동차의 단위 부품은 수천 개로 구성되어있으며, 다양한 재료의 복합체로 구성되어 있어 국내에서는 전동차에 대한 DB의 구축이 전무한 실정으로 환경성을 평가하는데 많은 애로점이 발생하고 있다. 따라서 전동차를 구체별로 전과정 목록작성 및 DB를 구축하고 각 부품에 대한 주요 재질을 선정하여 간략화 전과정 평가(simplified LCA, S-LCA)를 통해 환경성 평가를 수행하였다.

2. 전과정 평가의 개요

2.1 전과정 평가의 정의

환경영향을 전과정(life cycle)에 걸쳐 파악하고 이를 감소시키기 위한 기법중의 하나가 전과정 평가(LCA)이다[5,6]. 전과정평가는 목적 및 범위 정의(goal and scope definition), 전과정 목록분석(life cycle inventory analysis), 전과정 영향평가(life cycle impact assessment)와 전과정 해석(life cycle interpretation) 단계를 거쳐서 수행된다[7,8]. 이와 같은 4단계로 구성된 전과정 평가의 골격을 Fig. 1에 나타내었다. 전과정 목적 및 정의 단계는 전과정 평가 연구결과의 이용분야를 고려하여 연구목적의 정의 및 범위 설정, 예상결과, 경계조건, 기능단위 및 가정들을 정의하는 단계이다.

전과정 목록(LCI)은 제품이나 서비스 시스템의 전과정에 관련된 투입물과 산출물을 규명하고 시스템과 관련된 자원, 에너지 사용량 및 환경배출물을 정량화는 것이다. 목록분석의 주요 작업은 공정도에 따라 투입물과 배출물에 대한 데이터를 수집하는 것이며, 많은 시간과 비용이 소요되며, 데이터의 질에 따라 시스템 경계 등이 재조정될 수 있다.

전과정영향 평가는 분류화, 특성화, 가중치, 정규화 단계가 포함된다. 전과정 영향평가의 주요이슈로는 무생물 자원

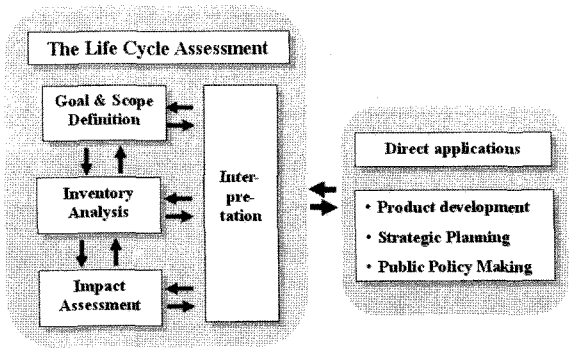

Fig. 1. Phase of an LCA

고갈(abiotic resource depletion, ARD), 산성화(acidification, AD), 수계생태독성(freshwater aquatic ecotoxicity, FAET), 해양생태독성(marinewater aquatic ecotoxicity, NAET), 토양생태독성(terrestrial ecotoxicity, TET), 부영양화(eutrophication, Eut), 지구온난화(global warming, GW), 인간독성(human toxicity, HT), 오존층 파괴(ozone depletion, OD), 광화학 산화물 생성(photochemical ozone creation, POC)을 들 수 있다. 단계 및 영향범주별로 가장 큰 기여도를 보이는 공정과 공정에서 가장 큰 기여를 하는 물질도 규명할 수 있다.

2.2 간략화 전과정 평가(simplified LCA)

전과정 평가는 생산품, 공정 및 활동 등이 환경에 미치는 영향을 평가하기 위한 도구로 널리 사용되고 있지만, 제품의 전과정에서의 환경부하를 계산하기 위해서 많은 데이터를 수집하고 가공해야 하므로 많은 시간과 비용이 요구된다. 이러한 전과정 평가의 단점을 보완하기 위해 간략 전과정 평가는 연구 수행 목적에 맞게 특정 부분을 생략하거나 간략화 함으로써 제품에 대한 환경성 평가를 수행하는데 있어 많은 시간과 비용을 절약할 수 있다[9]. 정성적 데이터 사용으로 인한 결과의 재현성 부족, 전과정 평가 수행목적에 부합하면서 결과의 불확실성을 줄일 수 있는 문제를 해결하여야 한다.

Table 1. Characteristics of S-LCA

장 점	단 점
적은 시간 투자	특정부분의 생략으로 LCA 불확실성
데이터 수집에 대한 인력 투입 감소로 경제적 환경영향 평가 수행	정성적 데이터 사용으로 다른 결과 값 도출 가능
특정제품에 대한 환경성 평가의 반영으로 설계 변경 용이	전체적인 물질 추적 불가능

3. 차량 구체의 환경성 평가

3.1 목적 및 범위 정의

전동차 1 량을 대상으로 SUS 및 Mild 차량 구체에 대한 전과정 목록을 작성하고 이를 토대로 간략화 전과정 평가기법을 이용하여 환경부하를 정량적으로 계산하였고, 대상제품에 대한 환경성을 비교 분석하였다. 시스템 경계는 제품의 전과정 중 원료취득에서부터 제조공정(Cradle to Grave; CtG)까지 이에 관련된 투입물과 배출물을 연구 대상으로 하였다. 데이터 범주는 ISO 14040 [10]에 제시된 누적무게, 누적에너지 등의 cut-off기준을 적용하여 연구대상 단위공정을 선정하였다. Table 2와 Table 3은 전동차 구체의 구성품 현황을 나타내며, 중량은 계산된 환산 값으로 표시하였다.

3.2 전과정 목록분석

구체의 전과정 목록 DB는 원료물질의 채취단계에서 부터 구체의 제조 공정까지를 포함한다. 단위 공정별 데이터는 차량 1 대를 기준으로 계산하였으며, 전과정 평가 소프트웨어 프로그램인 PASS를 이용하여 전과정 목록 분석을 수행하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 차량 구체의 공정 tree이다. 각 차량에 투입되는 구체에 대한 시스템 경계는 구체 전체 투입물에 대한 누적무게 99%까지 설정하였으며 재질의 투입물 및 배출물은 DB를 이용하여 수행하였다. 환경 유해물질이 아니면서 무게비율이 낮은 부품 및 물질은 system boundary에서 제외하였다.

Table 2. Carbody composition for SUS car

구성품	중량(kg)
Under frame	3,535
Side frame	2,078
Cab frame	1,055
Roof frame	1,839
단부골조	439
Total	8,946

Table 3. Carbody composition for Mild car

구성품	중량(kg)
Under frame	3,777
Side frame	4,131
Ceiling frame	255
Roof frame	1,240
End frame	528
Total	27,823

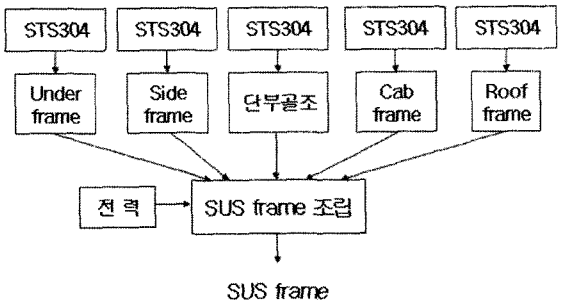

Fig. 2. Process tree of carbody for SUS car

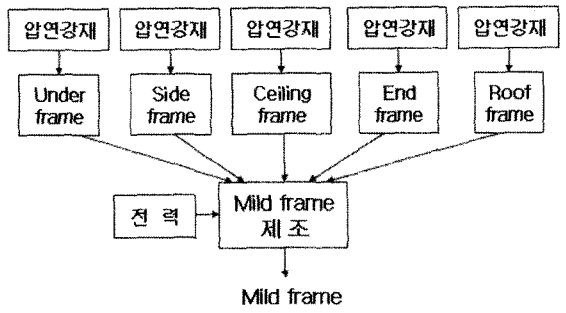

Fig. 3. Process tree of carbody for Mild car

3.3 전과정 영향평가 및 해석

전동차의 SUS 및 Mild 차량 구체에 대한 간략화 전과정 평가를 통해 영향범주별 및 공정도에 관한 환경영향 기여도를 알아보았다. 구체별 영향범주에 따른 환경영향 기여도를 Table 4, 5 및 Fig. 4, 5에 도식화하여 나타내었다. 10개의 영향범주별 SUS 구체에서 주요 환경영향 범주별 환경영향은 산성화(AD) 38.48%, 해양독성(MAET) 30.44%. 지구온난화(GW) 16.25% 순으로 나타났다. Mild 구체의 경우 지구온난화지수(GW) 47.54%, 무생물자원고갈(ARD) 40.34%를

Table 4. Contribution of environmental impacts with impact category(SUS car)

영향범주	WI	기여도
무생물 자원고갈(ARD)	1.444E-04	3.453 %
산성화(AD)	1.609E-03	38.476 %
수계 독성(FAET)	1.789E-04	4.277 %
해양 독성(MAET)	1.273E-03	30.443 %
토양 독성(TET)	8.160E-05	1.951 %
부영양화(Eut)	4.300E-06	0.103 %
지구 온난화(GW)	6.803E-04	16.265 %
인간 독성(HT)	1.166E-04	2.787 %
오존층 파괴(OD)	6.447E-06	0.154 %
광화학 산화물 생성(POC)	8.751E-05	2.092 %

Table 5. Contribution of environmental impacts with impact category(Mild car)

영향범주	WI	기여도
무생물 자원고갈(ARD)	1.312E-03	40.341 %
산성화(AD)	3.050E-05	0.938 %
수계 독성(FAET)	1.530E-05	0.470 %
해양 독성(MAET)	2.923E-04	8.987 %
토양 독성(TET)	3.399E-06	0.105 %
부영양화(Eut)	7.308E-08	0.002 %
지구 온난화(GW)	1.546E-03	47.541 %
인간 독성(HT)	6.188E-06	0.190 %
오존층 파괴(OD)	4.023E-07	0.012 %
광화학 산화물 생성(POC)	4.596E-05	1.413 %

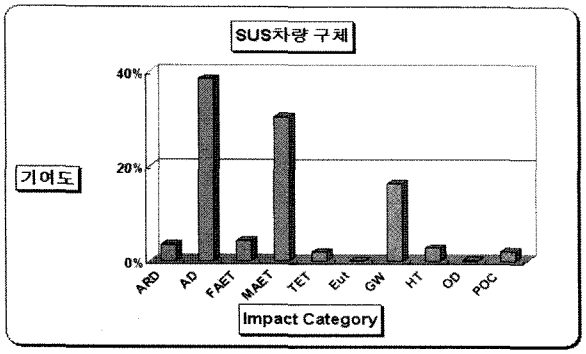

Fig. 4. Contribution of environmental impacts(SUS car)

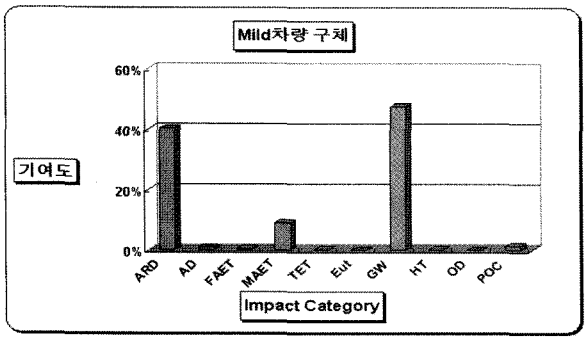

Fig. 5. Contribution of environmental impacts(Mild car)

차지하였다. 영향범주별 주요 물질분석을 통해 산성화와 해양생태독성에서 가장 큰 기여를 하는 물질을 분석한 결과, 산성화 영향범주에서는 염소가 78.81%의 주된 인자로 규명되었고, 이산화황이 16.08%의 기여도를 보였다. 해양생태독성에서는 불화수소의 기여도가 76.36%를 차지하였고, 바나듐이외의 물질이 나머지를 차자하였다. 이러한 결과는 SUS

Table 6. Contribution of environmental impacts with activity (SUS car)

Activity	WI	기여도
단부골조	1.969E-04	4.707 %
Cab frame	4.731E-04	11.311 %
Roof frame	8.247E-04	19.717 %
Side frame	9.319E-04	22.279 %
Under frame	1.585E-03	37.900 %
구체 제조공정	1.709E-04	4.086 %
Total	4.183E-03	100.000 %

Table 7. Contribution of environmental impacts with activity (Mild car)

Activity	WI	기여도
Ceiling frame	5.062E-05	2.243 %
End frame	1.048E-04	4.644 %
Roof frame	2.461E-04	10.907 %
Side frame	8.200E-04	36.335 %
Under frame	7.497E-04	33.221 %
Mild 구체 조립	2.855E-04	12.651 %
Total	2.257E-03	100.000 %

의 제조시 산세척공정으로 인해 많은 산성화 물질과 해양생태에 미치는 물질들이 배출되기 때문인 것으로 분석된다.

Mild 차량 구체의 무생물 자원고갈과 지구온난화에 영향을 미치는 물질을 알아보기 위해 영향범주별 주요물질을 분석한 결과 각각 철광석과 이산화탄소가 주된 영향인자로 확인되었다. 구체를 구성하는 물질이 압연강재이고, 이들을 구성하는 원료물질이 철광석이므로 구체의 각 공정별로 다량 소모되는 철광석으로 인해 무생물 자원고갈이 주요 환경영향범주로 규명되었다. 압연강재를 생산하거나 구체를 조립 및 제작하는 과정에서 에너지 소비가 크고 이에 따른 이산화탄소 배출량이 높으므로 지구온난화의 환경영향 기여도가 높게 나타났다.

Table 6, 7과 Fig 6, 7은 구체의 구성품에 대한 공정별 환경영향과 기여도를 나타낸 것이다. SUS 구체에서는 under frame의 환경영향 기여도가 37.9%로 가장 높은 환경영향으로 규명되었으며, side frame, roof frame 순으로 나타났다. Mild차량 구체에서는 side frame이 36.34%의 가장 높은 환경영향 기여도를 보였으며, under frame, 구체조립 순으로 나타났다. 이는 구체의 환경영향 기여도가 구성품의 중량비와 밀접한 관계가 있는 것을 Table 2와 Table 3을 통해 알 수 있으며, 중량이 환경영향에 주요한 영향인자로 작용함을 확인할 수 있다. 특히 Mild차량 구체의 조립단계에서 환경

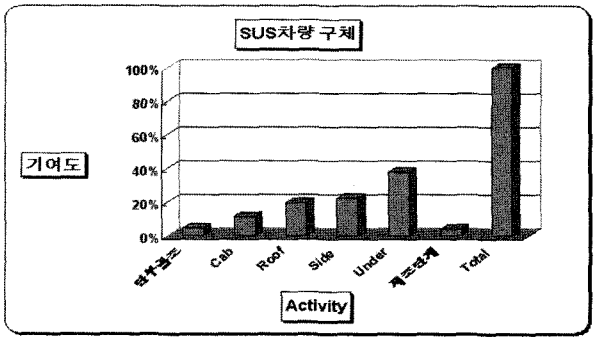

Fig. 6. Contribution of environmental impacts with activity (SUS car)

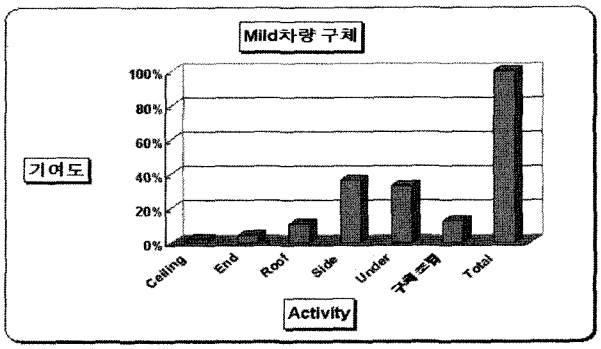

Fig. 7. Contribution of environmental impacts with activity (Mild car)

영향의 기여도는 제작 및 제조공정에서 많은 에너지를 소모하기 때문에 환경영향에 미치는 지구온난화 물질의 배출 때문인 것으로 분석되었다.

6. 결 론

간략화 전과정 평가(S-LCA)를 통해 전동차에 관한 SUS 차량 구체와 Mild차량 구체의 환경영향범주별 기여도 분석과 공정별 환경영향 파악 및 주요 물질의 정량적 환경성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 간략 전과정평가기법을 이용하여 전동차의 SUS와 Mild 차량 구체에 대한 전과정 목록 분석을 토대로 영향범주별, 공정별로 정량적인 환경영향을 평가할 수 있었다. SUS차량 구체의 주요 환경범주는 산성화와 해양 독성이었고, Mild 차량 구체는 무생물자원고갈과 지구온난화로 규명되었다. SUS차량 구체는 제작시 산세척 공정에 의해 산성화와 해양 독성에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. Mild차량 구체의 경우에는 주요 재료가 압연강재로서 원재료인 철광석의 소모가 무생물 자원고갈에 주요 영향을 미치고 있으며, 에너지 사용에 따른 이산화탄소 배출이 지구온난화에 기여함을 알 수 있었다.

(2) 구체별 공정별 환경영향 기여도는 구성품의 중량에 의해 큰 영향을 받았으며, 중량의 40%이상을 차지하는 SUS, Mild차량 구체별 under frame 37.9%, side frame 36.3%의 가장 높은 환경영향 기여를 나타내었다.

(3) 구체 구성품의 중량과 에너지 사용이 환경영향과 관련이 있음을 확인하였다. 따라서 전동차의 환경영향을 개선하고 저감하기 위해서는 전동차 구체 구성품의 경량화와 에너지 사용의 효율성 및 에너지 사용 저감 등이 필요하다.

후 기

본 연구는 건설교통부에서 주관하는 국가교통핵심기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김용기, 이재영 (2005). "전동차 전과정평가 시스템 개발", 한국철도기술연구원.
2. Naoki AIHARA, Taro Tsujimura (2002). "Basic Study on Environmental Aspect of Tokaido Shinkansen Line by LCA Methods", RTRI Report, Vol.16, No.10.
3. (1999). "Nordic Environmental Manual", VR/NSB/SJ/DSB.
4. Taro Tsujimura (2002). "Global Environmental Issues and Life Cycle Assessment", RTRI Report, Vol.16, No.10.
5. Jun TAKATA, Naoki AIHARA, Taro Tsujimura (2002). "Analtsis of Environmental Loads by Railways and Other Traffic Systems", RTRI Report, Vol. 16. No. 10.
6. Kun-Mo Lee, Atsushi Inaba (2004). "Life Cycle Assessment Best Practices of ISO 14040 Series", Asia Pacific Economic Cooperation, Ajou University, Korea.
7. Michael Z. Hauschield (2005). "Assessing Environmental Impacts in a Life-Cycle Perspective", Environmental Science & Technology.
8. 정인태, 양윤희, 이건모, 김용기 (2005.5). "철도산업과 전과정평가", 2005한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
9. 양윤희, 이건모, 정인태, 김용기 (2005.5). "전과정평가와 간략전과정평가의 비교분석 및 철도산업에의 활용방안", 2005한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
10. (1997). "ISO 14040, Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and frame work", ISO.