

간략화된 전과정 평가를 이용한 전동차 대차의 환경영향 진단

Evaluation of environmental impacts for the bogie of electric motor unit (EMU) using simplified life cycle assessment (S-LCA)

이재영* · 김용기* · 윤희택* · 양윤희**

Jae-Young Lee · Yong-Ki Kim · Hee-Taek Yoon · Yun-Hee Yang

Abstract

In this study, the environmental impacts of a bogie in the electric motor unit(EMU) were evaluated quantitatively using simplified life cycle assessment(S-LCA). Target was the bogie and life cycle inventory(LCI) database for the bogie was established. The software used for simplified LCA was PASS. Environmental impacts with the parts of the bogie were dependent on their weight significantly. Among impact categories, abiotic resource depletion(ARD) and global warming(GW) were shown dominantly. Global warming was occurred mainly due to the emission of CO₂ released from energy consumption and abiotic resource depletion was caused mostly by the consumption of iron ore for the manufacturing of steel. Therefore, the environmental impacts of the bogie could be reduced by the light-weighting of EMU and the improvement of energy efficiency.

Keywords : life cycle assessment(LCA, 전과정 평가), electric motor unit(EMU, 전동차), environmental impact(환경영향), bogie(대차)

1. 서론

지속가능한 개발(sustainable development)은 21세기 국제사회의 주요 화두이다[1-7]. 따라서 기술혁신과 경제성장 뿐만 아니라 이로 인해 발생하는 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 환경친화적인 개발이 요구된다[1]. 유럽을 중심으로 세계 각국에서는 각종 환경규제를 만들어 환경문제에 적극적으로 대처하고 있으며, 수출에 의존하고 있는 국내 산업체의 경우 이에 따른 무역장벽 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히, 2005년 2월 발효된 기후변화협약 교토의정서(Kyoto Protocol)는 이산화탄소 감축에 대한 실질적인 국제 규제이며, 현재도 다양한 후속 조치들이 활발히 논의되고 있다[2].

국내의 경우 현재 이산화탄소 배출량이 세계 10위권이며, 특히 대부분의 산업이 에너지 소비량이 높기 때문에 이산화탄소 배출량의 증가 수준은 세계 1위에 해당한다.

OECD 가입국으로써 멕시코와 더불어 1차 감축대상국에서는 제외되었으나, 향후 2차 감축대상국에는 포함될 것이 확실시되고 있다. 고에너지 소비 산업이 중심인 국내의 여건을 고려할 때, 이는 산업전반에 걸쳐 심각한 타격을 미칠 것으로 예상된다[2].

이러한 국내외 환경문제의 변화는 기존에 오염이 발생한 후에 처리하는 기술 위주로의 개발에서 벗어나 제품이나 공정의 개발단계에서부터 환경성을 고려하는 환경평가기법 개발로의 전환을 유도하고 있다. 특히 전과정 평가(Life cycle assessment, LCA)는 대표적인 환경영향 평가기법으로써 제품의 생산단계에서부터 폐기단계까지(Cradle to grave, 일명 요람에서 무덤까지로 일컬음) 전과정에 걸쳐 제품에 대한 환경성을 평가하여 환경 문제에 대한 근본적인 개선안을 제시하는데 활용되고 있다[3-7].

국내의 환경매체들 중에 특히 수송수단의 환경부하는 상당량을 차지하고 있는 실정이다[1]. 상대적으로 철도는 수송수단 중 가장 환경친화적인 매체이다[5-7]. 그러나 향후 지속적으로 미래사회의 중추적인 교통수단으로써 대중교통의 중심으로 활용되기 위해서는 기존의 환경친화적 이미지를 더욱 강화하고 환경영향을 최소화할 필요가 있다[5].

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 교통핵심연구팀
E-mail : jyong@krrri.re.kr
TEL : (031)460-5388 FAX : (031)460-5649

* 한국철도기술연구원

** 아주대학교

특히, 출퇴근 교통수단으로 이용되고 있는 지하철의 경우, 신속성과 정시성의 장점으로 인해 수요가 계속 증가할 것으로 예상된다. 따라서 수송수단에 대한 환경문제의 국내외 대응에 지하철도 적극적으로 대처하기 위해서는 환경성을 평가하고 개선하는 연구가 무엇보다 시급히 요구된다.

본 연구에서는 대중교통의 핵심인 지하철의 전동차에 대한 전과정 평가를 수행함으로써 환경성을 정량적으로 파악하고 개선방향을 살펴보고자 하였다. 그러나 일반적으로 전동차의 부품은 수천 개이며, 다양한 재료의 복합체로 만들어져 있기 때문에 국내에는 현재 전동차에 대한 전과정 목록 데이터베이스가 구축되어 있지 않은 실정이다. 따라서 우선 전동차의 주요부품을 선정하여 데이터베이스를 구축하고 각 부품에 대한 간략화된 전과정 평가(simplified LCA, S-LCA)를 수행하였다. 이에 전동차의 주요부품으로 전동차차체 하부에 위치하여 주행과 직접적인 관련이 있는 대차(bogie) 1대를 기능 단위로 선정하였다.

2. 전과정 평가의 개요

2.1 전과정 평가의 정의 및 단계

전과정 평가란 생산품, 공정 등이 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 도구로서 일반적으로 목적 정의 및 범위 설정(Goal and scope definition), 전과정 목록(Life cycle inventory, LCI), 영향평가(Impact assessment), 개선평가(Improvement assessment)의 4 단계로 구성되어 있다 (Fig.1)[2-4].

첫 번째, 전과정 평가의 목적 정의 및 범위 설정 단계는 연구의 목적, 예상 결과, 경계 조건 및 가정들을 정의하는 단계이다. 두 번째 단계인 전과정 목록은 평가 대상의 정의된 시스템과 관련된 자원 사용량, 에너지 사용량 및 환경배출물을 정량화하는 것이다. 목록분석에서의 주된 작업은 공정도에 따라 각 공정의 투입물과 배출물에 대한 데이터를

수집하는 것이다. 이는 많은 시간과 노력, 비용이 소요되며, 데이터의 질에 따라 시스템 경계 등이 재조정될 수 있다. 일단 전과정목록에 의하여 시스템의 투입물과 배출물이 정량화되면 전과정평가의 세 번째 단계인 영향평가를 수행할 수 있다. 영향평가는 보통 분류화, 특성화, 정규화, 가중치 부여로 분류된다. 주로 사용되는 영향범주는 다음과 같다.

- 자원고갈(Abiotic Resource Depletion, ARD)
- 온실효과(Global Warming, GW)
- 오존층파괴(Stratospheric Ozone Depletion, OD)
- 산성화(Acidification, AD)
- 부영양화(Eutrophication, Eut)
- 광화학산화물생성(Photochemical Oxidant Creation, POC)
- 수계독성(Freshwater Aquatic Eco Toxicity, FAET)
- 해양독성(Marine Aquatic Eco Toxicity, MAET)
- 토양독성(Terrestrial Eco Toxicity, TET)
- 인간독성(Human Toxicity, HT)

마지막 단계인 개선평가는 목록분석 및 영향평가 결과를 평가하고 이를 바탕으로 시스템의 주요 환경 이슈를 규명하는 과정이다. 이는 제품의 전과정에서 시스템 전체에 주요하게 환경 영향을 미치는 공정 또는 재질 등을 판단하는 것을 의미한다. 개선평가의 가장 중요한 과제는 기존의 방식을 대체할 수 있는 현실적인 안을 도출해야 한다. 따라서 이 과정은 단순히 전과정 평가 수행자만이 이행하는 것이 아니라 설계엔지니어, 생산요원, 구매담당자 등이 함께 개선평가의 결과를 이용하여 대안을 찾아야 한다.

2.2 간략화된 전과정 평가

환경성 평가의 도구로서 전과정 평가는 정량화된 방법으로 각광을 받고 있으나, 단계의 복잡성 및 시간과 노력, 비용 소모가 높은 단점을 가지고 있다. 최근에는 이러한 단점을 개선하기 위하여 전과정 평가의 방법론을 간략화(Simplified)하여 제품 또는 공정의 환경성 평가에 활용하는 사례가 늘고 있다[7]. 전과정 평가를 간략화하는 방법으로는 전과정 평가의 단계를 축소 또는 제거하거나 목록의 일부사항 제거, 정량적 자료뿐만 아니라 정성적 자료의 사용, 특정 환경영향과 문제에 대한 집중적인 평가 등이 있다. 간략화된 전과정 평가는 적은 노력과 비용으로 제품에 대한 환경성 평가를 융통성 있게 수행할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 결과의 불확실성, 정성적 데이터 사용으로 인한 결과의 재현성 부족, 적용 대상의 한계 등의 문제를 해결해야 한다 (Table 1).

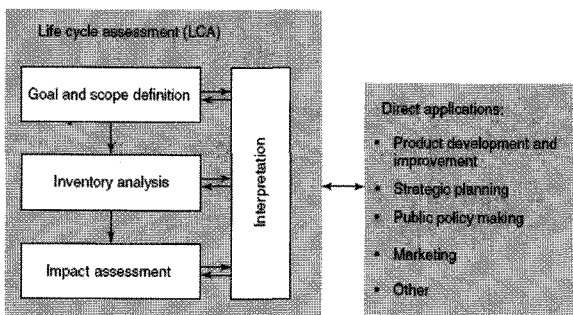


Fig. 1. Procedures of LCA

Table 1. Characteristics of simplified LCA

장점	단점
적은 시간 투자	특정부분 수행 생략으로 인한 결과의 불확실성
데이터 수집에 따른 인력소모량 감소로 경제적 환경영향평가 수행 가능	정성적 데이터 사용으로 수행자에 따라 다른 결과값 도출 가능
특정제품에 대한 환경성 평가를 위해 즉각적인 설계변경 용이	전체 물질흐름 추적 불가능

3. 대차의 환경영향진단

3.1 목적 및 범위정의

본 연구대상은 전동차 전체 중량의 약 50 %를 차지하고 있는 대차(bogie)이다. 연구목적은 전동차의 주요 부품 중 하나인 대차의 전과정 목록을 작성하고 이에 대한 간략화된 전과정 평가를 수행함으로써 환경부하를 정량적으로 계산하여 그 특징을 살펴보는 것이다. 전체 시스템의 경계는 원료 취득에서부터 제조 공정(Cradle to Gate, CtG)까지로 하였다. 각 공정과 관련된 투입물과 배출물을 연구 대상으로 하였으며, 누적무게, 누적에너지 및 환경관련성 등의 cut-off 기준에 따라 일부 단위 공정은 제외하였다.

Table 2는 대차의 구성품 현황을 나타내며, 중량은 cut-off 되어 감소된 대차 비율만큼을 곱하여 계산한 환산값으로 표시하였다.

3.2 전과정 목록분석

대차의 전과정 목록 데이터베이스는 원료물질의 채취단계에서부터 대차의 제조 공정까지를 포함한다. 데이터베이스 작성을 위해 중량기준으로 대차의 assay별 분류를 바탕으로 해당업체로부터 관련 정보를 수집하였다. 각각의 단위 공정별 데이터는 대차 1대를 기준으로 하여 계산하였다. 전과정 평가 소프트웨어 프로그램인 PASS를 이용하여 전과정 목록 분석을 수행하였다. PASS는 국내에서 개발된 소프트웨어로 국가 데이터베이스(산업자원부, 환경부)가 포함되어 있으며, 사용법도 쉽고 간편하여 간략화된 전과정 평가를 수행하기에 용이하다.

3.3 환경영향평가 및 해석

전동차의 대차에 대한 간략화된 전과정 평가를 통해 영향범주별 및 공정별 환경영향 기여도를 살펴보았다. 먼저 영향범주에 따른 환경영향 기여도는 Table 3과 Fig. 2에 나타내었다. 10개의 영향범주 중에 무생물 자원고갈(ARD)과 지

Table 2. Bogie composition

Parts	Components	Weight (kg)
Journal Box	Journal Box	563.4
	Bearing Ass'y	290.5
	Cover	112.2
	Pole Wheel	26.8
Disk Brake Ass'y	Slinger	33.0
	Brake Cylinder	378.5
	Brake Lining Head Ass'y	119.7
	Brake Lever	291.2
	Fixed Point Support	106.8
	Brake Lining Hanger	30.8
	Special Bolt	17.3
Center Pivot Device	Pin	46.2
	Hex. Nut	1.3
	Hex. Bolt	18.0
	Spring Washer	2.1
	Spacer	25.9
	Wedge	20.2
	Liner	11.8
	Lateral Buffer	8.8
	Lateral Damper	26.4
	Bush	24.2
Wheel & Axel Ass'y	Center Pivot Support Rubber	43.3
	Center Pivot Block	109.5
	Center Pivot	184.9
Bogie Frame	Wheel	3063.5
	Axel	1835.5
	Brake Disk Ass'y	1254.5
Primary Suspension Ass'y	Side Frame	928.7
	Cross Beam Ass'y	1045.4
	Aux. Reservoir Ass'y	198.1
Total	Axel Spring	461.3
	Safety Hanger	31.7
	Clamping Plate	26.4
Total		11,338

구온난화(GW)가 각각 40.31%, 47.17%로 대부분을 차지하였다. 무생물 자원고갈과 지구온난화에 영향을 미치는 물질을 살펴보기 위해 영향범주별 주요 물질을 분석한 결과, 각각 철광석, 이산화탄소가 주된 영향인자로 확인되었다(data not shown). 일반적으로 대차를 구성하는 물질이 대부분 압연강재이고, 압연강재의 원료물질이 철광석이므로 대차의 각 공정별로 다량 소모되는 철광석으로 인해 무생물 자원고갈이 주요 영향범주로 규명되었다. 또한 압연강재를 생산하

Table 3. Contribution of environmental impacts with impact category

Impact Category	WI	Contribution
무생물 자원고갈(ARD)	1.056E-03	40.31%
산성화(AD)	2.714E-05	1.04%
수계 독성(FAET)	1.467E-05	0.56%
해양 독성(MAET)	2.306E-04	8.81%
토양 독성(TET)	2.769E-06	0.11%
부영양화(Eut)	6.939E-08	0.00%
지구온난화(GW)	1.236E-03	47.17%
인간 독성(HT)	9.499E-06	0.36%
오존층 파괴(OD)	9.004E-06	0.34%
광화학 산화물 생성(POC)	3.407E-05	1.30%

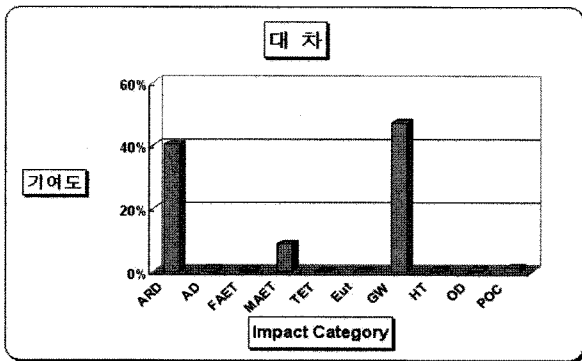


Fig. 2. Contribution of environmental impacts with impact category

거나 대차를 조립하는 과정에서 에너지 소비가 크고, 이에 따른 이산화탄소 배출량이 높으므로 주된 영향범주로 지구온난화의 환경영향 기여도가 높게 나타났다.

Table 4와 Fig. 3은 대차의 구성품에 따른 환경영향 기여도를 나타내었다. Wheel & axel assay의 환경영향 기여도가 44%로써 대차의 구성품 중에 가장 높았으며, bogie frame, 제조 공정(대차조립단계) 순으로 높은 환경영향을 보였다. 구성품의 환경영향 기여도는 각 구성품의 중량과 밀접한 관계가 있다. Table 2에서 보듯이 대차 구성품의 중량 분포는 wheel & axel assay, bogie frame, disk brake assay 등의 순서로 되어 있다. 이는 환경영향 기여도의 순서와 동일한 것으로 중량이 환경영향에 주요한 영향인자로 작용함을 확인할 수 있다. 또한 대차의 조립단계인 제조 공정에서는 많은 양의 에너지를 소모하기 때문에 환경영향이 높게 규명되었다.

Table 4. Contribution of environmental impacts with activity

Activity	WI	Contribution
Bogie Frame	4.714E-04	17.998 %
Center Pivot Device	9.588E-05	3.660 %
Disk Brake Ass'y	2.503E-04	9.555 %
Journal Box	2.051E-04	7.828 %
Primary Suspension Ass'y	9.925E-05	3.789 %
Wheel & Axel Ass'y	1.166E-03	44.506 %
제조공정(대차조립)	3.317E-04	12.663 %
Total	2.619E-03	100.000 %

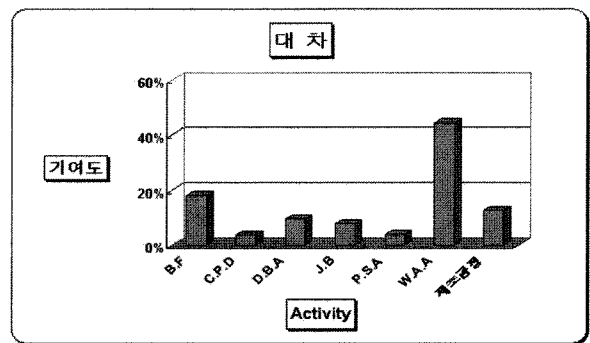


Fig. 3. Contribution of environmental impacts with activity

4. 결론

전동차의 대차에 대한 환경영향을 살펴보기 위해 간략화된 전과정 평가를 이용하여 영향범주별 및 공정별로 환경영향 기여도를 정량적으로 계산하였다.

- (1) 대차의 주요환경 영향범주는 무생물 자원고갈과 지구온난화로 규명되었다. 대차의 주재료인 압연강재의 원재료로써 철광석의 소모가 무생물 자원고갈에 주로 영향을 미쳤으며, 에너지 사용에 따른 이산화탄소 배출은 영향범주인 지구온난화에 높게 기여하였다.
- (2) 대차의 공정별 환경영향 기여도는 구성품의 중량에 의해 크게 영향을 받았으며, 그 결과 대차 중량의 50% 이상을 차지하는 wheel & axel assay가 가장 높은 환경영향을 나타내었다.
- (3) 구성품의 중량과 에너지 사용량이 환경영향과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 따라서 전동차의 환경영향 개선하기 위해서는 전동차 구성품의 경량화와 에너지 사용 효율 증대 및 에너지 사용량 저감 등이 필요하다.

참고문헌

1. 한화진, 오소영 (1999), 지구온난화가스 저감 대책 동향 분석 및 국내대응방안 연구-수송부분 중심, 한국환경정책 평가연구원.
2. 김상용 외 공역 (1998), 환경 전과정평가, 시그마프레스.
3. Kun-Mo Lee and Atsushi Inaba (2004), Life cycle assessment: Best practice of ISO 14040 series, Asia-Pacific Economic Cooperation, Ajou University, Korea.
4. G. Rebizer, *et al.* (2004), Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and application, *Environmental International*, vol.30, pp.701-720.
5. Toru Miyauchi, Takafumi Nagatomo, Taro Tsujimura and Hiroshi Tsuchiya (1999), Fundamental investigation of LCA of Shinkansen vehicles, *QR of RTRI*, vol.40, no.4, pp. 204-209.
6. 박인성, 곽종명, 박희일, 허탁 (2004), 국내 철도수송의 전과정목록 데이터베이스 구축, 한국전과정평가학회.
7. Tak Hur, Jiyong Lee, Jiyeon Ryu and Eunsun Kwon (2005), Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system, *Journal of Environmental Management*, vol.70, pp.229-237.