전동차 생태효율성(Eco-efficiency)방법론 개발
Development of Eco-Efficiency for Electric Motor Unit(EMU)

최요한[1], 정인태[2], 이건모[3], 김용기[4]
Yo-Han Choi, In-Tae Jeong, Yong-Ki Kim, Kun-Mo Lee

ABSTRACT

To improve the environmental performance Electric Motor Unit(EMU) during it's life cycle, quantitative environmental performance Assessment(Life Cycle Assessment; LCA) is implemented. But the result of LCA is not easy to apply on environmental communication, EMU ecodeign, environmental friendly EMU marketing and so on. Because it is not only hard to understand but also should consider economical and technical limitation, etc. So EMU Eco-Efficiency(E/E) is developed which could use to improve EMU environmental performance. EMU E/E is indicator which shows value generated by EMU through it's life cycle, while EMU also generates environmentla impact. The value generated by EMU vs. the environmental impact of EMU varies by choosing which value parameter and environmental impact parameter. Thus it is important that choose appropriate parameters.

This study shows two EMU E/E. EMU E/E Type I stands for EMU operational efficiency vs. EMU environmental impact on Global Warming(GW). And EMU E/E type II stands for EMU annual total income by fare vs. EMU environmental impact on GW. The case study shows that EMU E/E can be a indicator of EMU environmental improvement as indicator which consider environmental impact and value of EMU simultaneously.

---

1. 서론

전동차는 많은 부품과 긴 제품수명을 가지기 때문에 전동차의 환경성을 판단하기 위해서는 전동차의 전과정에 대한 정량적인 환경성 평가가 이루어져야 한다. 정량적으로 환경성을 평가하는 도구의 종류에는 여러 가지가 있지만 그 중 대표적인 것이 전과정 평가(Life Cycle Assessment, 이하 □□LCA□□)이다. LCA는 국제표준화기구(International Organisation for Standardization, 이하 □□ISO□□)에 의해 ISO 14040 시리즈 국제표준으로 제정된 제품 환경성 평가 도구이다. 정량적인 전동차 환경성 평가 결과는 다음과 같은 용도에 사용될 수 있다.

- 전동차의 환경성 파악
- 전동차의 환경성 개선
- 전동차의 환경성 정보전달
- 전동차 친환경 마케팅

그러나 정량적 환경성 평가 결과는 비 전문가들이 해석하기에 어려움이 있고, 또한 환경적인 측면만을 고려하기 때문에 제품 개선에 활용할 경우, 경제적, 기술적인 제한 요인들과의 trade-off 가능성을 다시 고려해야 한다. 따라서 환경성과 경제성 및 기술수준과의 동시 고려를 위해 새로운

1) 아주대학교 환경공학과, 석박사통합과정
2) 아주대학교 환경공학과, 박사과정
3) 아주대학교 환경건설교통공학부, 교수
4) 한국철도기술연구원, 책임 연구원, 정회원

지표가 필요하다. 이와 같이 제품의 환경성 정보를 보다 쉽게 전달하고 유용하게 활용하기 위해서 전동차 생태효율성 지수(EMU E/E Type I, EMU E/E Type II)를 제안한다.

생태효율성(Eco-Efficiency, 이하 E/E)이란, World Bussiness Council for Sustainable Development(지속가능 발전을 위한 세계 기업 협의회, 이하 'WBCSD')에 의해 제창된 개념으로 E/E에 대한 WBCSD의 정의는 다음과 같다. "Eco-efficiency is reached by the delivery of competitively priced goods and services that satisfy human needs and bring quality of life, while progressively reducing ecological impacts and resource intensity throughout the lifecycle to a level at least in line with the earth's estimated carrying capacity." 즉 지구의 환경용량(carrying capacity) 내에서 환경영향 및 자원소모의 크기를 저감함과 동시에 사람의 필요를 만족시키고 삶의 수준을 제고시키는 경쟁력 있는 제품에 의해 달성되는 지표이다. 제품의 E/E를 표현하기 위해서는 제품의 환경에 대한 영향과, 제품의 가치를 정량화해야 한다. 그렇게 정량화된 환경영향과, 제품의 가치를 이용하여 단일지수로 표현한다. 여기서 제품의 가치는 제품이 가지는 경제적, 기능적, 공익적 가치를 포함한다. E/E는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Eco\text{-}efficiency = \frac{\text{Product or Service Value}}{\text{Environmental influence}} \quad ---(1)$$

식 (1)의 분자에는 해당 제품 (여기서는 전동차)의 가치를 잘 나타낼 수 있는 파라미터를 선정한다. 마찬가지로 분모에는 제품의 환경영향을 잘 나타낼 수 있는 파라미터를 선정한다. 분모와 분자에 선정되는 파라미터들은 한 가지 파라미터만을 고려한 단일 파라미터를 사용할 수도 있고, 복합 파라미터를 사용할 수도 있다. 즉 목적에 따라 다르므로 E/E의 단위는 따로 정해져 있지 않다.

E/E의 가장 큰 특징은 제품의 환경영향 대비 제품의 가치로 표현한다는 것이다. 그러나 제품의 환경영향은 자원고갈, 지구온난화, 산성화 등 여러 가지로 나타나고, 가치 또한 제품의 기능, 수명, 경제적 가치, 산업파급효과 등 여러 가지로 나타난다. 따라서 E/E 용도에 맞는 파라미터를 선정하는 것이 가장 중요하다. 단, 파라미터 선정에 있어서 정량화 가능, 데이터 시간범위 일치와 중복(double counting)계산 방지 등을 고려해야 한다.

2. 방법론

2.1 전동차 Eco-Efficiency 제안

전동차는 여러 가지 가치와 환경영향을 가진다. E/E는 전동차의 모든 가치와 환경영향을 포함할 수도 있지만, E/E의 목적, 용도, 대상청중에 맞게 가장 적합한 파라미터를 선정하여 표현할 수도 있다. 이 연구에서는 E/E의 목적, 용도, 대상청중을 설정하고 이에 적합한 파라미터를 선정하여 EMU E/E를 제안하였다.

이 연구에서 개발한 EMU E/E의 목적은 두 전동차간 환경영향 대비 기능적, 금전적 가치 비교 및 전동차 환경성 개선을 위한 지표로 사용하는 것이다. 그리고 개발된 EMU E/E의 주 사용자로 전동차 운영처를 고려하였으며, 전동차 운영처는 이 결과를 이용하여 다음과 같은 용도로 사용할 수 있도록 개발하였다.

- 이해관계자에게 홍보
- 내부운영개선 자료
- 전동차 신규 발주시, 설계사양 참고자료
- 철도정책 수립기관에 전동차 환경성 정보, 정책개발 방향 자료 제공

전동차가 가지는 가치는 다양한 관점에서 다양하게 정량화 할 수 있다. 기능적 가치로서 제품 수명, 수송량(명, 인_Km 등), 경제적 가치로서 운수 사업수익, 총매출액, 전동차량의 가치, 공익적 가치로서 전동차 선호도, 정시성 등 여러 가지가 있다. 전동차의 환경영향 또한 다양하게 나타난다. 전동차는

지구온난화, 자원고갈, 산성화 등과 같은 거시적인 환경영향 뿐만아니라 소음, 진동, 비산먼지, 수계 및 대기 배출물과 같은 미시적인 환경영향도 갖고 있다.

또한 E/E 파라미터들을 선정하기에 앞서서, 해당 파라미터가 정량화 가능한 것인지, 데이터의 시간적 범위들이 일치 하는 지 고려해야 하며 이를 위해 시스템 바운더리를 미리 설정하여야 한다.

이상의 사항들을 고려하여 두 가지 형태의 EMU E/E를 제안하였다.

2.2 EMU E/E Type I

EMU E/E Type I에서는 전동차의 가치중에서 전동차의 기능을, 전동차의 환경영향중에서 지구온난화를 파라미터로 선정하였다. 선정 이유와 정량화 방법을 아래에 기술하였다.

전동차 가치: 전동차의 가장 주요한 기능은 인원을 수송하는데에 있다. 그 외의 다른 기능은 부가적인 기능이라 할 수 있다. 따라서 전동차 가치 파라미터로 인원 수송과 관련된 인자를 고려한다. 수송량은 여러 가지 형태로 측정되고 통계적으로 관리되고 있다. 그러나 그 수송량은 유동인구, 차량의 크기, 노선의 길이와 같은 변수에 종속되어 있다. 즉, 서로 다른 노선의 전동차간의 비교나 시간에 따른 비교 또는 차량에 따른 비교가 어렵다. 따라서, 여기서는 전동차 해당 노선의 전동차 운영효율[식 (2)]을 전동차의 가치로 보았다. 전동차는 노선별로 운행횟수, 영업거리, 정원등이 고정되어 있어서 연간 수송가능한 능력(인_Km)이 정해져 있다. 이를 연간 여객 수송 능력으로 정의하고, 실제로 여객을 수송한 양(인_Km)을 통계를 이용하여 구한 후 연간 여객 수송 실적이라고 정의하였다. 따라서 전동차 운영 효율은 연간 여객 수송 실적을 연간 여객 수송 능력으로 정의할 수 있다.

$$\text{전동차운영효율} = \frac{\text{연간여객수송실적}}{\text{연간여객수송능력}} \quad \text{---(2)}$$

전동차 환경영향: 전동차는 전과정중 사용(운행)단계에서 발생하는 전력소모로 인한 환경영향이 가장 크다. 전력소모는 화석연료의 연소에 의한 지구온난화에 많은 영향을 미친다. 게다가 지구온난화는 교토의정서의 발효와 더불어 비 전문가들이 이해하기에도 쉽다. 따라서 전동차의 환경영향을 지구온난화지수(Global Warming Potential, 이하 'GWP')를 이용해 나타낸다. 이 연구에서는 그중에서도 Life Cycle Impact Assessment (전과정영향평가, 이하 'LCIA') GWP 범주의 특성화 결과값(Characterized index of GWP category, 단위: Kg CO_2-eq)을 사용하였다. LCIA의 GW값을 사용하면 전동차 시스템 경계 내에서 발생하는 지구온난화에 대한 영향을 정량화 할 수 있다. LCA에 대해서는 2.4절에서 별도로 간단하게 소개하였다.

EMU E/E Type I: 식 (3)은 위에서 언급한 전동차 가치와 전동차 환경영향을 식으로 나타낸 것이다. 식 (3)은 지구 온난화 가스 1 ton-CO2 eq을 배출하는 동안 얼마나 전동차를 효율적으로 운영했는지를 보여주는 지표이며 수치가 높을 수록 친환경적으로 전동차를 운영하였음을 보여준다.

$$EMU\ E/E\ Type\ I = \frac{\text{전동차운영효율}}{\text{지구온난화지수}} \quad \text{---(3)}$$

2.3 EMU E/E Type II

EMU E/E Type II는 전동차의 경제적 가치와 환경영향과의 관계를 나타내는 E/E이다. 파라미터로는 운수사업수익과 지구온난화지수를 선정하였고, 파라미터 도출방법과 단위를 다음에 보였다.

전동차 가치: 전동차의 경제적 가치는 총 매출액, 당기 순이익, 운수 사업수익, 차량가치 등 여러 가지로 표현할 수 있다. 여기서는 전동차로 인해 발생하는 수입, 즉 연간 운수 사업 수익을 가치 파라미터로 선정 하였다. 전동차의 주요 가치는 운송하는 것이고 운송은 고객이 운임을 지불하는 형태로 그 가치를 인정 받는다. 그 운임의 연간 총합을 연간 운수 사업 수익이라고 정의한다. 단. 운수 사업 수익내에는 보통권, 정기권, 교통카드, 할인권과 같은 여러 가지 형태의 수익이 있지만, 운수

사업 수익 구성에 대해서는 논점에서 벗어나므로 무시한다. 연간 운수 사업 수익을 차량 보유 대수로 나눈 값을 가치 파라미터로 사용한다.

전동차 환경영향: 전동차의 환경영향 또한 금전적 가치로 환산할 수 있다. 예를 들어, 폐수처리 비용, 공기정화 시설 비용, 대기오염 방지 비용, 소음 차단 벽 설치 비용 등을 들 수 있다. 또 다른 방법으로 지구 온난화 가스를 이용할 수 있다. 전동차는 전과정에서 전력 사용 등으로 인해 지구 온난화 가스를 배출한다.이 지구 온난화 가스 배출을 저감하기 위해 교토의정서가 지난 2005년에 발효되었고 이와 함께 탄소 배출권이 거래되고 있다. 탄소 배출권 거래란, 기업이나 정부가 할당된 기준 배출량 이하로 이산화탄소 배출량을 저감하면, 기준이하로 저감한 이산화탄소의 양을 이산화배출기준을 초과한 정부나 기업에 판매하는 것이다. 현재 탄소 배출권 거래가는 2006년 1월 현재 이산화탄소 톤당 22.65유로로 앞으로 계속 상승할 것으로 예측되고 있다. 예를 들어, 우리나라의 경우 2004년 현재 전기차량으로 인해 연 63만 톤의 이산화탄소가 배출되고 있다(이재영 외, 2006). 이를 배출권 거래 가격으로 환산해 보면 567만 유로, 약 79억원이다.[1] LCA에서 도출되는 GWP 역시 이산화탄소 무게로 환산되므로 이를 탄소 배출권 거래가격으로 다시 환산하여 사용한다.

EMU E/E Type II: 식 (4)는 전동차로 인해 발생한 이산화탄소를 저감하기 위해 필요한 비용 대비 전동차를 통해 얻은 이익을 나타낸다.

$$EMU\ E/E\ II\ Type = \frac{\text{운수사업수익}}{GWP} \qquad ---(4)$$

2.4 LCA 수행 : GWP 도출

LCA는 전동차의 전과정에 걸친 환경영향과 자원 소모를 정량화 할 수 있고, 주요 환경성 이슈를 규명할 수 있어서 LCA결과를 다용도로 이용할 수 있다. LCA를 수행할 때, ISO 14040(ISO, 1997), ISO 14041(ISO, 1998), ISO 14042(ISO, 2000) 표준 문서의 방법론을 참조하여 수행하였다.

LCA는 기본적으로 목적 및 범위 설정(Goal and Scope definition), 전과정 목록분석(Life Cycle Inventory), 전과정영향평가(Life Cycle Impact Assessment), 전과정해석(Life Cycle Interpretation)의 네 단계로 구성된다. 목적 및 범위 설정에서는 LCA를 수행하는 목적, 대상청중 등을 기술하고, 전동차의 전과정에 대한 시스템 경계를 설정한다. 전과정 목록 분석에서는 전동차의 시스템 경계 내로 들어오고 나가는 기본흐름(elementary flow)을 모두 계산하여 목록화 한다. 전과정영향평가는 전과정 목록에서 구축된 목록에서 환경영향 범주중에서 GW와 관련된 물질들을 특성화 하여 그 결과값들을 합친 단일지수 형태로 최종 결과를 도출한다. 전과정해석은 이번 연구에서는 고려하지 않는다. 개략적인 LCA

그림 1 LCA framework

[1] 2004년 12월 1일 현재, 이산화탄소 톤당 9유로, 주린원 · 배재수, 탄소배출권 거래제도와 산림경영에의 시사점, 농업전망 2006, 2006 http://aglook.krei.re.kr/down/oy2006/hwp/2006oy14_hwp.pdf

framework를 그림 1에 도시하였다.

3. 사례연구

3.1 대상 제품 선정

두 전동차간 환경영향 대비 기능적, 금전적 가치 비교 및 전동차 환경성 개선을 위한 지표로 사용하기 위해 EMU E/E Type I,II 를 개발하였다. 또한 전동차 운영처를 주사용자로 고려하였다.

먼저 전동차의 재질은 구체에 따라서 Mild 구체, SUS 구체 그리고 알루미늄 구체 전동차로 구분할 수 있다. 그러나 이번 EMU E/E에는 전동차 제작과정 또한 포함되어 있다. 따라서 현재 제작되지 않는 Mild 구체는 대상제품에서 제외하였다. 동일 노선에서 운용되는 차량들은 재질에 상관없이 데이터 수집이 구분되지 않으므로 의미가 없다. 다른 노선 같은 차량의 경우 환경영향의 대부분을 차지하는 사용단계의 전력사용량에서 별 차이가 없으므로 굳이 환경영향에 대비하여 비교하는 의미가 없다.

이 연구에서는 다른 노선의 다른 재질 차량으로 선정하였다. 즉 전동차 A(SUS 구체 전동차, 서울지하철 2호선, 서울메트로)와 전동차 B(알루미늄 구체 전동차, 광주지하철 1호선, 광주지하철공사)를 선정하였다.

참고로 이 연구는 동일 노선에서 전동차의 환경성이 개선되었을 경우 적용이 가능하다. 단 데이터 수집이 전제되어야 한다.

3.2 EMU E/E Type I: 가치 파라미터- 전동차 운영 효율

전동차 운영효율을 표1과 같이 도출하였다. 수송가능최대인원은 전동차 한 편성 당 정원을 사용하였고, 연간운행거리는 연간 편성 회수에 영업거리를 곱하였다. 여객 수송실적은 통계치를 사용하였다.

표 1 전동차 운영 효율

EMU E/E Type I 가치 파라미터	A	B	근거
여객 수송 능력(인_Km/연)	15,379,964,160	394,028,237	수송가능최대인원×연간운행거리
여객 수송 실적(인_Km/연)	1,378,542,880[1)]	28,509,732.2[2)]	1) 통계치, 통계연보, 2) 통계치, 광주지하철공사
전동차 운영 효율	0.0896	0.0724	여객 수송 실적/여객 수송 능력

3.3 EMU E/E Type I: 환경영향 파라미터- GWP 도출

LCA 목적 및 범위설정을 표 2에 나타내었다. 각 전동차 LCA 수행에 대한 Process Tree는 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 그리고 표 3에서 GWP 범주에 관한 전과정영향평가 결과를 나타내었다.

표 2 LCA 목적 및 범위설정

비교대상	A	B
	서울지하철 2호선(본선)[1)] SUS 구체 전동차	광주지하철 1호선[2)] 알루미늄 구체 전동차
LCA		
수행목적	E/E 환경영향 지수(지구온난화 지수) 도출	
전과정 범위	원료물질 취득에서 사용단계까지 (Cradle to Gate)	
기능, 기능단위	승객을 운송하는 전동궤도차량, T-car 1량	
공간적 범위	한국	
시간적 범위	1년(2004.1.1~2004.12.31, 외부데이터는 최근 10년이내) 단, A1 차량 데이터는 개통일(2004.4.28) 이후의 데이타	
기술 수준	최선의 가능한 기술	
2004년 전력사용량(KWh/량)	282,970,532	144,393.9

그림 2 전동차 A(SUS 구체) Process tree

그림 3 전동차 B(Al 구체) Process tree

전과정 목록 분석을 수행하게 되면 전과정에서 발생한 환경영향을 정량화 하게된다. 이 연구에서는 그 중에서 지구온난화와 관련된 물질만을 선택한 후, 지구온난화 특성화 지수를 곱하여 특성화 값을 얻었다.

표 3 전과정 영향평가 결과

EMU E/E Type I 가치 파라미터- 전과정 영향평가(GWP)					
A			B		
GWP(ton CO_2-eq)					
물질명	특성화 지수	특성화 값	물질명	특성화 지수	특성화 값
CO2	1	2.27E+02	CO2	1	9.44E+01
HCFC-22	1700	2.60E-07	HCFC-22	1700	5.54E-08
CH4	21	3.18E+00	CH4	21	1.33E+00
N2O	310	5.31E-01	N2O	310	2.44E-01
계		231	계		96.0

3.4 EMU E/E Type II: 가치 파라미터- 운수 사업 수익

운수 사업 수익은 각 운영처 홈페이지에 공시된 경영 성과자료를 이용하였다.

---

1) 서울메트로, www.seoulmetro.co.kr
2) 광주광역시 도시철도공사, subway.gwangju.kr

표 4 운수 사업 수익

EMU E/E Type II 가치 파라미터	A	B	근거
운수 사업 수익(원/량)	403,511,780	107,562,508	통계치, 홈페이지

3.5 **EMU E/E Type II: 환경영향 파라미터- GWP도출**

LCA에서 도출된 GWP를 이용하여 2004년 12월 1일 기준 탄소배출권 거래가격을 이용해 화폐가치로 환산하였다.

표 5 GWP 도출

EMU E/E Type II 가치 파라미터	A	B	근거
GWP(원/량)	2,898,354	1,204,511	계산치

4. 결과 및 토의

4.1 결과

전동차 A와 전동차 B와의 비교를 표 7에 보였다. 즉, 전동차 운영효율이 1.24배 좋고 일일 차량당 운수사업수익도 3.75배 더 좋다. 전동차 A는 B보다 전동차 운영 효율이나 운수 사업수익이 좋다. 반면에 전동차 A는 B보다 지구 온난화에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

표 6 EMU E/E 도출 결과

	A	B
EMU E/E Type I (1.0E-4/ton CO_2-eq)	3.88	7.51
EMU E/E Type II(원/원)	139.2	89.3

표 7 전동차 A 와 전동차 B의 비교

	EMU E/E Type I		EMU E/E Type II		EMU E/E Type I	EMU E/E TypeII
	전동차 운영효율	GWP	운수 사업수익	GWP		
A/B	1.24	1.64	3.75	1.63	0.76	1.57

4.2 결론 및 차후 연구 방향

가장 큰 차이는 환경영향에 의해 나타났다. EMU E/E에서 두 차량간 격차가 줄어들거나 역전된 것은 전동차 B의 환경성이 월등히 좋기 때문이다.

운영처에서는 Type I을 이용하여 전동차 운행 시간대, 편성의 다양화 등을 통한 운영효율 제고와 전동차의 환경성 개선등을 고려하는 지표로 사용할 수 있다. 그리고 Type II는 절대적인 지표로서 전동차 A의 경우, 간단하게 환경에 100원만큼의 손해를 끼쳐서 13920원의 이익을 내었다고 해석할 수

있다. 이를 이용하여 운영처는 이해관계자들에게 전동차의 친환경성을 전달하고, 마케팅에 활용할 수 있으며 전동차의 환경성 개선과 전동차 운수사업수익의 제고를 Type II를 통해서 확인할 수 있다.

이상으로 전동차의 환경성 제고에 효과적으로 사용할 수 잇는 정량적 도구를 개발하고 제안하였다. 체계적인 전동차 환경성 제고를 위해서는 다음과 같은 연구들이 계속해서 진행되어야 한다.

-. 전동차에 친환경제품설계 도입

-. 전동차 친환경성 제고를 위한 정책적 접근

5. 사사

이 연구는 건설교통부에서 시행한 국가교통핵심기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

6. 참고문헌

1. ISO, ISO 14041 Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis, 1998
2. Kun-Mo Lee and Atsushi Inaba, "Life Cycle Assessment Best Practices of ISO 14040 Series", 2004
3. 국가청정생산지원센터, 국가 LCI Database 구축 방법론 및 관리·보급확산 방안, 2004
4. W. Wimmer et al., Ecodesign Implementation, 2004
5. 한국철도기술연구원, 전동차 전과정 평가 시스템 개발, 1차년도 최종보고서, 건설교통부, 2005
6. W. Dewulf et al., Integrating Eco-Efficiency in Rail Vehicle Design,2001
7. 한국철도공사·한국철도시설공단, 2004 철도 통계 연보, 2005
8. 서울메트로, www.seoulmetro.co.kr, (2006.3.27)
9. 광주광역시 도시철도공사, subway.gwangju.kr, (2006.3.27)