

틸팅열차의 전과정평가를 통한 철도차량 환경성 개선방안연구

Study on Improving the Environmental Performance of a Railway Vehicle through a Life Cycle Assessment of the Tilting Train

이철규* · 김용기 · 이재영 · 최요한 · 김초영

Cheul Kyu Lee · Yong-Ki Kim · Jae-Young Lee · Yo-Han Choi · Cho-Young Kim

Abstract Recent international environmental regulations are focused on reducing pre-contamination and on sustainable development prior to the usage stage of a product. The Environmental Performance Declaration is being used as a tool for quantifying the environmental performance of products, to reduce contamination in advance, and for advertising the results of railway vehicles in Europe. In this study, a life cycle assessment of the tilting train was conducted, the first such case study in Korea, according to the ISO 14025 standard and Korea EDP (Environmental Declaration of the Product) rule. As a result of the LCA, the life cycle carbon emission of the tilting train was determined to be 3.54×10^7 kgCO₂eq. which is higher than that of a European train. Also, the amount of CO₂ emission of the Mcp and car body is higher than that of the other car and bogie.

Keywords : Railway vehicle, Tilting train, Environmental performance, LCA, CO₂

초 록 국제환경규제는 제품사용단계에서 발생한 환경오염에 대한 사후처리방식에서 설계단계에서 사전환경오염차단과 자원순환으로 전환하고 있다. 사전환경오염 차단도구로는 제품의 환경성능을 정량화하고 이러한 정보를 객관적으로 제공하는 환경성 인증제도가 활용되고 있으며 유럽에서는 이를 구매단계부터 적용하고 있다. 본 연구에서는 국내 최초로 틸팅열차를 대상으로 ISO 14025기준과 환경부 환경성적표지제도의 작성지침에 따라 전과정평가를 수행하였으며 그 결과를 제시하였다. 틸팅열차 1편성의 생애주기 온실가스 총배출량은 3.54×10^7 kgCO₂eq.로 분석되었으며 이는 유럽의 동일한 철도차량 온실가스 배출량과 비교할때 높은 수치이다. 차량별 온실가스배출량 분석결과 동력분산식임에도 Mcp차량의 배출량이 상대적으로 많았으며 차체의 배출량이 대차보다 높음을 확인하였다.

주요어 : 철도차량, 틸팅열차, 환경성적표지, 전과정평가, 온실가스

1. 서 론

국내산업의 온실가스 배출규제는 크게 사업장에서 배출되는 강제적 온실가스 배출규제와 제품 및 서비스 단위로 배출되는 자발적 감축으로 구분할 수 있다.

이는 온난화로 인하여 강화된 국제 환경규제동향과 일치하는 것으로 ISO 14064시리즈[1-3]를 활용한 온실가스 에너지 목표관리제와 ISO 14020시리즈[4]를 기반으로 한 제품의 탄소성적표지제도가 대표적이다.

이러한 규제는 사업장과 제품을 대상으로 생애주기 온실가스 배출량을 정량화하여 그 결과를 평가, 관리하여 궁극적으로 배출량을 저감하도록 하는 활동이며 이러한 도구로는 ISO 14040시리즈[5,6]의 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)기법이 있다.

온실가스 배출규제 외에도 사전환경오염예방을 위한 대표

적인 환경규제는 에너지사용제품에 대한 친환경설계지침인 EuP[7], 유해물질 사용금지 규제인 RoHS[8], 전기전자제품의 폐기단계 처리지침인 WEEE[9], 폐기단계 재활용률을 95%이상으로 규제하고 있는 ELV[10]등이 있다.

국제철도연합(UIC)[11]에서는 이러한 국제환경규제에 대한 대응기술개발을 위하여 RAVEL(RAiL VEhicLe eco-efficient design)[12], REPID[13], PROSPER(Procedures for Rolling Stock Procurement with Environmental Requirement phase)[14] 등의 철도차량 환경성 개선프로젝트를 수행하였으며 그 결과 UIC CODE 345(Environmental specifications for new rolling stock)[15] 지침을 작성, 제시하였다.

친환경 철도차량 제작 및 구매지침인 UIC CODE 345는 국제환경규제 요구사항을 철도차량의 환경사양(Environmental specification)에 반영한 것으로 철도운영사가 신규 철도차량 도입을 검토할 때 생애주기 환경성이 반영된 철도차량에 가산점을 부여하여 우선 구매하도록 하고 있다.

철도차량의 생애주기 환경성인증은 유럽의 경우 스웨덴 EPD센터(Environment Performance Declaration)[16]에서 취득하도록 하고 있으며 봄바르디어, 지멘스 등 유럽 철도차

*Corresponding author:

Tel.: +82-31-460-5372, E-mail : cheul@krrri.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.1.1

량제작사는 자사의 철도차량 환경성을 인증받고 홍보에 활용하고 있다[17].

철도차량에 대한 생애주기 환경성을 요구하는 국제동향과 달리 국내에서는 주요부품에 한정된 연구만 수행되고 있다 [18,19]. 따라서, 본 연구에서는 국내 최초로 틸팅열차 1편성을 대상으로 철도차량의 생애주기 환경성을 분석하였으며 그 결과를 유럽 철도차량의 환경성 인증결과와 간략히 비교하였다. 이를 통하여 구매단계에서부터 적용하고 있는 유럽 철도시장 진출을 위한 국내 철도차량 산업의 환경경쟁력 향상방안을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 전과정평가와 환경성인증제도

전과정평가(LCA)는 제품 및 서비스 등에 대하여 설계, 원료취득, 제조, 운송, 사용 및 폐기의 생애주기에서 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 방법이다. 전과정평가는 Fig. 1과 같이 목적 및 범주 정의(Goal and scope definition)와 전과정목록분석(Life cycle inventory analysis), 전과정영향평가(Life cycle impact assessment), 전과정해석(Life cycle interpretation)으로 구성되어 있으며 전과정평가를 구성하는 각 단계들은 전과정평가의 완전성과 신뢰성을 제고하기 위해서 반복적으로 피드백 할 수 있도록 구성되어 있다[5,6].

전과정평가는 제품 및 서비스가 생애주기에서 환경에 미치는 영향을 지구 온난화, 오존층 파괴, 무생물 자원 고갈 등 여러 환경영향범주들에 미치는 영향으로 정량화 할 수 있다. 이러한 특성으로 전과정평가방법은 조직에서 배출하는 온실가스를 정량화 하는 국제표준[1-3]의 제정과 제품의 탄소 발자국(Carbon footprint for product, CFP)을 산정하는 국제표준[20]의 도구로 활용되고 있다.

환경성 인증제도는 생애주기(원료채취, 생산, 소송 및 유통, 사용, 폐기과정)에서 발생하는 환경영향범주(지구온난화, 산성화, 부영양화, 오존층 고갈 등)별 환경성을 정량화하고 그 결과를 제품에 표기하는 제도이다. ISO 14020시리즈의 환경성 인증제도는 3가지의 유형이 있으며 Type I이 일반적으로 알려진 환경마크제도이다. 환경마크제도는 대상 제품

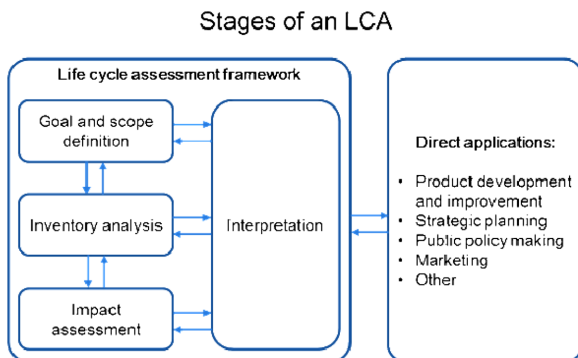


Fig. 1 Relationships between elements within the interpretation phase with the other phases of LCA [5]

중에서 타 제품에 비하여 환경성이 우수한 제품을 3자 검증을 통하여 인증하는 라벨이며, Type II는 환경성을 주장하고 싶은 조직이나 기업이 환경정보를 개발하여 자체적으로 주장하는 제도이다. Type III는 원료채취부터 폐기까지의 생애주기 환경성을 정량화하여 제품에 표시하는 방식으로 본 연구결과를 활용하여 취득한 인증은 Type III에 해당된다. 이러한 환경성 인증제도는 국내에서는 한국환경산업기술원이 주관하고 있다.

2.2 틸팅열차시스템의 전과정평가

2.2.1 대상제품, 기능 및 기능단위

본 연구에서는 6량 1편성(Mcp-M-T-Th-M-Mcp)으로 구성된 틸팅열차시스템을 대상으로 하였으며, 철도노선을 이용하여 사람, 수화물 및 물품을 수송하는 것으로 기능을 정의하였다. 기능단위는 최고운행속도는 180km/h, 설계속도 200km/h, 좌석은 278석 및 틸팅각도는 최대 8도로 설정하였으며 참고흐름은 틸팅열차시스템 1편성으로 설정하였다.

2.2.2 시스템경계

시스템경계는 본 연구를 통하여 환경부에서 고시한 틸팅열차의 작성지침[21]에 따라 Fig. 2와 같이 설정하였다. 작성지침은 재료단계에서부터 제작, 운행단계 및 폐기단계를 모두 포함하고 있으나 현장데이터는 철도차량의 특성을 고려하여 열차조립과 사용단계의 데이터만을 수집, 반영하였다. 상위흐름데이터는 틸팅열차를 레벨0으로 하였을 때 레벨3(차체, 의장, 기장, 대차)까지 재질정보를 수집하여 연결하였다.

틸팅열차의 사용단계 소비전력량은 식 (1)과 같이 산출하였다. 여기서, 틸팅열차의 수명은 철도안전법[22]에 따라 25년으로 고려하였으며, 량당 평균운행거리는 시운전단계인 틸팅열차의 상황을 고려하여 현재 운행중인 새마을호의 총 운행거리를 새마을호 운행대수로 나눈 값을 적용하였다.

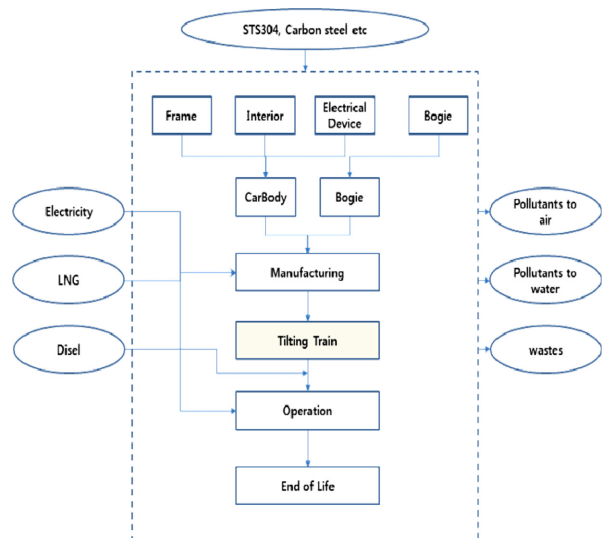


Fig. 2 System boundary of tilting system

전력소비량 = 소비전력원단위(kWh/km) × 량당 평균운행
거리(km/yr) × 제품수명(yr) (1)

유지보수단계의 환경성은 열차의 차종, 상태 및 노선별로 다른 부품별 성능저하특성을 모든 철도차량에 동일하게 적용할 수 있는 교체주기 산정데이터의 부족 등으로 인하여 본 연구에서는 제외하였다.

Cut-off 기준으로는 틸팅열차시스템의 조립공정에 투입되는 ‘원료물질과 보조물질의 총량’ 대비 사용되는 ‘조립품 및 부품수준의 질량누적비율’ 95%까지를 포함하고, 일부 수집이 불가능한 부품의 경우 data gap으로 처리하였으며 data gap 처리된 부품의 중량은 전체의 약 1% 수준이다.

2.2.3 데이터수집

1) 제조전단계

틸팅열차시스템의 제조 전 및 제조단계 데이터는 환경부의 환경성적표지 공통 및 개별 작성지침에 따라 틸팅열차 1편성에 대한 주요 구성품을 누적중량순으로 구분하여 총 중량 292ton 중 95% 수준인 278ton에서 1차 cut-off을 하고 Mcp, M 및 T car량별 재질누적순으로 95%에 해당되는 2차 cut-off을 Table 1과 같이 수행하였다. 그 결과 최종 cut-off 후의 틸팅열차시스템의 중량은 271,783kg이다.

틸팅열차시스템 1편성의 주요 구성품별 중량 및 재질기준 2차 cut-off을 수행한 결과 driver cabin facility 중 cab mask body의 경우 재질중량이 95%에 포함되지 않아 cut-off 되었음을 확인할 수 있다. 이러한 과정은 M, T & Th car 모두 동일하게 반영하였다.

LCI DB(Life Cycle Inventory Database)는 국내 환경부 [23]와 지경부[24] 및 ASME[25] 데이터베이스를 활용하였으며 국내 DB에 없는 경우, ecoinvent DB[26]를 사용하였다.

2) 제조단계

Table 2에 정리한 바와 같이 틸팅열차의 제조단계는 틸팅열차 1편성의 차체와 대차의 조립공정을 대상으로 하였다. 철도차량의 차체와 대차조립단계 에너지사용량은 현대로템사의 2010년 연간 전력 및 LNG 데이터를 수집, 적용하였으며, 틸팅열차 고유의 복합소재 차체는 ㈜한국화이바의 해당 공정 전력 및 LPG 사용량을 확보하여 반영하였다.

3) 운송단계

차량제작 후 틸팅열차의 운송은 철도차량 제작사인 현대로템(창원)에서 오송차량기지(311km) 까지의 수송을 고려하였다. 오송차량기지까지의 운송은 디젤동차로 견인하며 이때의 투입물은 디젤유를 적용하였다. 디젤유의 투입량은

Table 1 95% Cut-off results of Mcp car's components

Component	Sub component	Composition	Weight (kg)	Ratio (%)	Cumulative weight (kg)	Cumulative ratio (%)
Carbody	Under frame	STS301L	5.02×10 ³	85.0	5.02×10 ³	85.0
		SM490	8.86×10 ²	15.0	5.91×10 ³	100.0
	Car body block (frame)	STS304	1.39×10 ³	100.0	1.39×10 ³	100.0
	Car body block	Glass fiber	2.46×10 ²	11.2	2.46×10 ²	11.2
		Carbon fiber	1.62×10 ³	73.6	1.86×10 ³	84.8
		AL H/C	3.34×10 ²	15.2	2.20×10 ³	100.0
	Cab structure ass'y	SS400	1.50×10 ³	82.6	1.50×10 ³	82.6
STS304		3.16×10 ²	17.4	1.82×10 ³	100.0	
Roof facility	Pantograph	Carbon steel	1.20×10 ²	100.0	1.20×10 ²	100.0
	Pantograph tilting device	Carbon steel	3.50×10 ²	100.0	3.50×10 ²	100.0
	Main circuit breaker	Steel plates	7.29×10 ¹	46.1	7.29×10 ¹	46.1
		Glass wool	6.08×10 ¹	38.4	1.34×10 ²	84.6
		Copper	2.43×10 ¹	15.3	1.58×10 ²	100.0
Driver cabin facility	Cab sub ass'y	STS304_Frame	2.94×10 ²	66.0	2.94×10 ²	66.0
		FRP_PENOL LAMINATE Pannel	1.30×10 ²	29.2	4.24×10 ²	95.2
		FRP4_CAB MASK body	2.10×10 ¹	4.72	4.45×10 ²	100.0
Connector	Connector and buffering	SPECIAL GRAY CAST IRON	9.11×10 ¹	35.0	9.11×10 ¹	35.0
		DISC - SPECIAL GRAY CAST IRON	8.28×10 ¹	31.8	1.74×10 ²	66.8
		GCD400	6.27×10 ¹	24.1	2.36×10 ²	90.9
		SM45C(SEAT)	2.07×10 ¹	7.9	2.57×10 ²	98.9
		Sintered	2.62	1.0	2.60×10 ²	99.9
		STS304	2.19×10 ⁻¹	0.08	2.60×10 ²	100.0

Table 2 The amount of electricity, LNG and LPG consumed in the manufacturing stage of the tilting train

Classify	# Of annual production	Electricity(kWh)		LNG(Nm ³)		LPG(Nm ³)	Remarks
		1car	1formation	1car	1formation	1formation	
Carbody	-	-	5,774	-	-	5,184	Hankook fiber
Bogie	718	4,313	25,877	380	2,283	-	Rotem
Painting	776	9,593	57,555	2,130	12,778	-	Rotem
Design	700	5,343	32,061	952	5,713	-	Rotem
Test run	764	5,522	33,131	43	259	-	Rotem
Total		24,771	154,398	3,505	21,033	5,184	

2010년 철도통계연보데이터[27]를 참조하여 계산한 디젤동차의 연료연비 4l/를 적용하였다.

4) 운행단계

시운전단계에서 틸팅열차 1편성당 연간평균 운행거리는 2010년 철도통계연보를 참조하여 새마을열차 연간 운행거리인 10,446,976.7 열차키로에 새마을열차 운행편수 44편을 나누어 도출한 240,000km를 1편성당 연간 운행거리로 설정하였다.

틸팅열차시스템의 운행전력 원단위는 철도차량용 적산전력계를 사용하여 현장에서 측정하였다. 측정장비는 Fluke사의 PQ Analyze(Fluke 1760)를 이용하였으며 시험구간은 제천-원주 노선 46.6km구간에서 dummy를 활용한 만차조건에서 측정하였다. 측정결과 틸팅열차의 전력원단위는 11.45 kWh/km로 분석되었다.

5) 폐기단계

틸팅열차의 폐기단계에서는 재료별로 재활용시나리오를 연결하였으며 틸팅차체에 적용된 탄소섬유복합재의 재활용은 탄소섬유복합소재의 재활용기술의 연구결과[28]를 적용하였으며 이를 제외한 차량재료는 환경부의 전국폐기물발생 및 처리현황 및 사업장 배출시설 폐기물[29]의 재료별 처리비율을 적용하였다. 전과정목록 데이터베이스는 국내 폐기DB를 적용하였으며 국내 DB가 없는 경우 KEITI에서 제공한 국외 DB를 활용하였다. 철도차량에 사용된 금속 및 비철금속 구분은 금속재료[30]를 참고하였다. Table 3에서와 같이 틸팅열차시스템에 투입된 재료는 철금속이 약 74%로 가장 많았으며 다음 비철금속, 목재의 순이었으며 폐기단계 재료

재활용율은 약 76% 수준으로 분석되었다. 이는 재활용율이 98%에 달하는 봄바르디어사의 철도차량[17]과 비교하여 저조하며 ELV등의 국제환경규제[10] 요구사항을 만족하지 못하고 있음을 확인하였다.

2.2.4 영향평가결과

1) 영향평가방법

전과정 목록분석에 사용한 LCA software는 지경부의 PASS[31]이며 LCIA 방법론으로는 환경부에서 제정한 환경성적표지 방법론[21]을 사용하였다. 환경영향범주(Environmental impact category)는 환경성적표지 방법론에서 제시하는 지구온난화 등의 6개 영향범주별로 특성화(Characterization) 값을 산출하였다.

2) 전과정평가결과

환경영향범주별 환경영향을 분석한 결과를 Table 4에 정리하였다. 틸팅열차는 6개 환경영향범주 중에서 온실가스배출지표인 지구온난화 기여도(Global Warming)가 가장 높은 것임을 확인할 수 있었으며 그 뒤로 산성화(Acidification), 자원소모(Resource Depletion) 및 부영양화(Eutrophication)의 순으로 분석되었다. 지구온난화 기여도는 운행단계에서의 배출량이 전체배출량의 약 96%를 차지함을 알 수 있었다.

지구온난화기여도를 틸팅열차의 차량 별로 분석한 결과를 나타낸 Fig. 3에서와 같이 동력분산식 열차임에도 불구하고 Mcp차량의 온실가스배출 기여도가 가장 높음을 확인할 수 있다. 또한 Mcp 차량의 차체와 대차의 온실가스 배출량을 비교한 결과 차체로부터 배출되는 온실가스 양이 전체의 약 80%로 대차보다 높음을 확인하였다.

Table 3 Potential recyclability of the tilting train

Classify	Ferrous	Non ferrous	Wood	Composite	Electric	Glass	Rubber	Paint	Panel	Plastic	Polymer	Total	
												kg	%
Landfill	14,960	1,600	1,592	1,318	-	1,487	560	363	310	325	104	22,618	8.3
Incineration	15,161	1,621	3,491	8,093	3,222	667	3,440	2,229	1,902	1,997	637	42,461	15.6
Recycling	170,690	18,254	6,711	2,353	3,222	2,508	1,000	648	553	580	185	206,704	76.1
Total	Kg	200,811	21,476	11,794	11,763	6,444	4,661	5,000	3,240	2,765	925	271,783	100
	%	73.89	7.90	4.34	4.33	2.37	1.72	1.84	1.19	1.02	0.34	100	-

Table 4 Life cycle impact assessment results of the tilting train

Environment impact category/life cycle	Material	Manufacturing	Use stage	End-of-Life	Total
Resource depletion [kg antimony eq.]	1.06×10^4 (15.08%)	7.76×10^2 (1.10%)	5.90×10^4 (83.79%)	2.02×10 (0.03%)	7.04×10^4 (100%)
Global warming [kg CO ₂ eq.]	1.21×10^6 (3.42%)	1.60×10^5 (0.45%)	3.40×10^7 (96.10%)	8.42×10^3 (0.02%)	3.54×10^7 (100%)
Ozon depletion [kg CFC ₁₁ eq.]	6.68×10^{-1} (5.36%)	3.13×10^{-3} (0.36%)	9.40×10^{-4} (94.26%)	4.81×10^{-2} (0.02%)	7.20×10^{-1} (100%)
Acidification [kg SO ₂ eq.]	9.63×10^3 (13.71%)	6.45×10^2 (0.36%)	1.69×10^5 (85.85%)	4.38×10 (0.08%)	1.80×10^5 (100%)
Eutrophication [kg PO ₄ ³⁻ eq.]	1.71×10^3 (92.76%)	4.48×10 (0.46%)	1.07×10^4 (0.13%)	1.03×10 (6.68%)	1.25×10^4 (100%)
PhotoOxidants [kg C ₂ H ₄ eq.]	2.83×10^3 (90.77%)	3.98×10 (1.28%)	2.42×10^2 (7.78%)	5.29 (0.17%)	3.11×10^3 (100%)

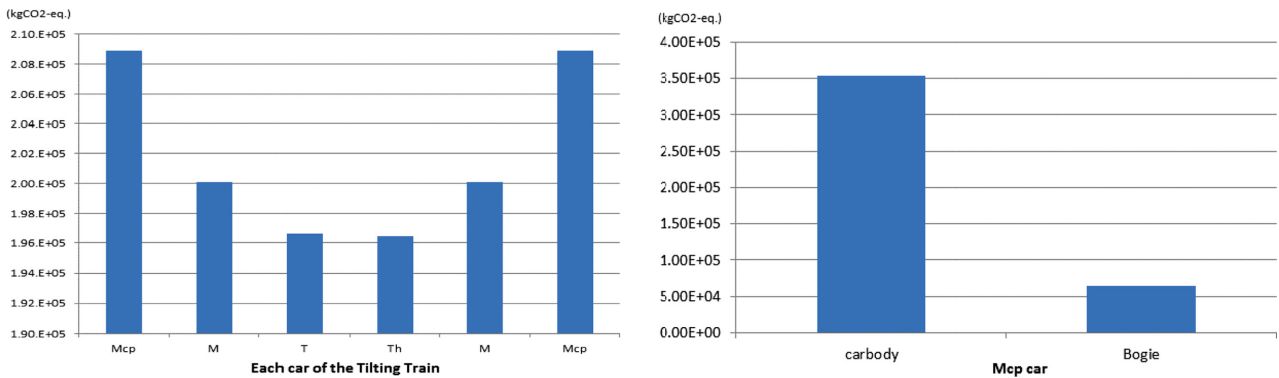


Fig. 3 CO₂ emission comparison results

3. 결 론

본 연구는 국내 최초로 시운전중인 틸팅열차시스템을 대상으로 환경부의 환경성 인증제도 중 Type III의 작성지침에 따라 전과정평가를 수행하여 생애주기 환경성을 정량화한 연구로, 철도차량 도입단계에서부터 환경성을 검토하여 친환경 철도차량을 도입하도록 규제하고 있는 선진국의 규제동향에 대응기반을 구축할 수 있는 기초연구로 사료되며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 연비 산정기준이 표준화되어 있는 자동차와 달리 철도차량은 운행전력량 표준산정지침이 없어 본 연구에서는 시운전노선 중 특정구간에서 전력량 측정기기로 측정된 값을 반영하였다. 결과적으로, 철도차량의 경우에는 운행단계의 온실가스 배출량이 전체의 약 96%에 이를 정도로 중요한 항목임을 확인하였다. 따라서 철도차량의 차종 및 운행노선별로 다른 에너지 소비특성을 적절하게 반영할 수 있는 시운전노선구축과 표준노선 설정이 요구됨을 확인하였다. 이로부터 동일한 운행조건하에서 비교 가능한 전력원단위의 측정이 가능하다.

(2) 철도차량 1편성에 대한 생애주기 환경성 정량화를 위하여 조사된 주요부품은 약 230여개에 이르며, 주요부품별 재질, 중량 및 제작단계 공정정보를 수집하여 평가에 반영하였다. 이러한 과정에서 철도차량관련 데이터관리가 상당히 열악함을 알 수 있었다. 국제환경규제 대응을 위한 체계적인 데이터관리시스템 구축이 요구된다.

(3) 생애주기 철도차량 환경성 정량화에는 유지보수단계

에서 교체되는 부품을 고려하여야 한다. 하지만 다양한 노선에서 운행되고 있는 철도차량 차종별로 동일하게 적용할 수 있는 유지보수 기준이 명확하지 못하여 본 연구에서는 제외하였다. 환경성 인증제도는 불규칙적인 부품의 교체는 대상에서 제외하고 있으며 주기적으로 근거 있는 교체만을 반영하도록 하고 있어 이에 대한 추가연구와 기준수립이 요구된다.

(4) 마지막으로 폐기단계에서 95% 이상의 차량재료 재활용률을 제시하고 있는 선진 철도차량과 달리 국내 철도차량의 재활용률은 상당히 저조한 수준임을 폐기단계 재활용률 산정결과로부터 확인하였다. 이는 폐기단계 재료 재활용기반과 인식이 선진국대비 저조한 수준이 원인이다. 폐기단계의 재료 재활용률은 운행단계의 높은 온실가스 배출량을 상쇄할 수 있기 때문에 중요하다. 따라서, 지속가능한 철도시스템 구축을 위하여 철도차량에 적용가능한 수준의 재활용기반시설 구축과 요소기술개발이 요구된다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 「틸팅열차 운행 유지보수 효율화 SE연구」와 한국철도기술연구원의 「철도 친환경성 향상기술 개발」사업의 지원을 받아 이루어 졌음을 밝힙니다.

References

[1] ISO (2006) ISO 14064-1 Greenhous gases – Part 1: Specifica-

- tion with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals, ISO, Geneva, Switzerland.
- [2] ISO (2006) ISO 14064-2 Greenhouse gases – Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification and reporting of greenhouse gas emission reductions and removal enhancements, ISO, Geneva, Switzerland.
- [3] ISO (2006) ISO 14064-3 Greenhouse gases – Part 3: Specification with guidance for the validation and verification of greenhouse gas assertions, ISO, Geneva, Switzerland.
- [4] ISO (2000) ISO 14020 Environmental labels and declarations - - General principles, ISO, Geneva, Switzerland.
- [5] ISO (2006) ISO 14040 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, ISO, Geneva, Switzerland.
- [6] ISO (2006) ISO 14044 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, ISO, Geneva, Switzerland.
- [7] Eup Directive (2005) EcoDesign Requirements for Energy Using Products, <http://www.eup-ecodesign.com/>, EU.
- [8] RoHS Directive (2002) Restriction of Hazardous Substances Directive, EU.
- [9] WEEE Directive (2002) Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, EU.
- [10] ELV Directive (2000) End of Life Vehicles, EU.
- [11] UIC, International Union of Railways, Paris, <http://www.uic.org/>.
- [12] RAVEL project (2002), <http://www.ravel-project.de/>.
- [13] REPID, Rail Environmental Performance Indicators and Data formats.
- [14] PROSPER, Procedures for Rolling Stock Procurement with Environmental Requirements, 2005, UIC.
- [15] UIC CODE 345 (2006) Environmental specifications for new rolling stock.
- [16] EPD (2009) Product Category Rules (PCR) for preparing an environmental product declaration (EPD) for Rail Vehicles, Sweden.
- [17] Bombardier Transportation (2010) SPACIUM Environmental Product Declaration.
- [18] Y.K. Kim, J.Y. Lee, Y.H. Choi (2006) Life Cycle Assessment on the Interior Panel of Electric Motor Unit (EMU), *Journal of The Korean Society for Railway*, 9(5), pp. 517-523.
- [19] Y.H. Choi, S.Y. Lee, Y.K. Kim, K.M. Lee (2007) Comparative LCA of three types of Interior Panel (IP) in Electric Motor Unit (EMU), *Journal of The Korean Society for Railway*, 10(5), pp. 596-599.
- [20] ISO (2011) ISO/CD 14067 Carbon footprint of products – quantification and communication, ISO, Geneva, Switzerland.
- [21] Product Category Rule of the Tilting Train for the EDP(2010), KEITI, http://www.edp.or.kr/edp/guide/guide_list.asp.
- [22] Korea Railway Safety Law (2012) MOLIT.
- [23] Korea Environmental Industry Technology Institute, Korea LCI Database Information Network(2011), <http://www.edp.or.kr/lcidb/english/main/main.asp>.
- [24] KNCPC, Korea National LCI Information System(2011), http://www.kncpc.re.kr/lci/LCIDB/introduction_DB.asp.
- [25] Association of Plastics Manufacturers in Europe(2011), Plastics Europe's Eco-profile Programme, <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles.aspx>.
- [26] Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2011) ecoinvent centre, <http://www.ecoinvent.org/database/>.
- [27] Statistical YearBook of Railroad (2010) MOUT-related statistics, <http://stat.mltm.go.kr/portal/cate/statView.do>.
- [28] C.K. Lee, Y.K. Kim, P. Pruitichaiwiboon, J.S. Kim, K.M. Lee, C.S. Ju (2010) Assessing environmentally friendly recycling methods for composite bodies of railway rolling stock using life-cycle analysis, *Transportation Research Part D*, 15, pp. 197-203.
- [29] Korea national status of waste generation and treatment, MEV, Kwacheon, Korea.
- [30] Y.M. Yeon, *Metallic Material* (2003)
- [31] PASS, http://www.kncpc.or.kr/green/lca_pass.asp.

접수일(2012년 10월 15일), 수정일(2013년 7월 18일),
게재확정일(2013년 8월 9일)

Cheul-Kyu Lee : cheul@krri.re.kr

Eco-Transport Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobakmulkwon-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Yong-Ki Kim : ykkim@krri.re.kr

Eco-Transport Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobakmulkwon-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Jae-Young Lee : iyoung@krri.re.kr

Eco-Transport Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobakmulkwon-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Yo-Han Choi : yhchoi10@kncpc.re.kr

Industrial Environment Division, Korea Institute of Industrial Technology, Hanshin Intervalley 24 East B/D 18F, Yeoksam-dong, Seoul 707-34, Korea

Cho-Young Kim : chykim0809@ecoeye.com

Sustainable Business Division, Ecoeye, 7F Hankook Bldg., 186-4, Gumi-dong, Bundang-gu, Gyeonggi-do 463-870, Korea