

8200호대 전기기관차 주변환장치 LCC 분석

Life Cycle Cost Analysis of Main Conversion System in 8200 Series Electric Locomotive

김 완 일* · 이 계 승* · 최 종 록** · 김 재 문

(Wan-il Kim · Kye-Seung Lee · Jong-Rok Choi · Jae-Moon Kim)

Abstract 8200 Series Electric Locomotives are mostly imported from overseas due to aging and uncertainty of source technology, and it's the maintenance cost is increasing. We are analyzed life cycle costs based on international standards such as IEC 60300-3-3 and IEC62278. The main conversion system of the 8200 series electric locomotive is closely related to vehicle operation and is one of the subsystems requiring frequent maintenance. In this paper, the life cycle cost of the main conversion unit in 8200 series electric locomotive is analyzed based on the maintenance manual. As a result of analysis, maintenance cost of GTO module and control device is relatively high, and it is confirmed that the cost increases according to the useful life.

Key Words : 8200 series electric locomotive, Life cycle cost, Main conversion, IEC 60300-3-3, Useful life

1. 서 론

국내에서 운행 중인 8200호대 전기기관차는 개통이후 유지보수 측면에서 주요 부품에 대한 해외 의존도가 높아서 부품구매에 어려움이 발생되고 있다. 또한 주요부품 교체 자료에 의하면 특정대상 부품에 대한 단종 및 물가상승으로 인해 유지보수 비용이 급격히 증가하는 실정이다. 이로 인해 최근 철도분야에서는 타 산업분야에서 적용되고 있는 수명주기비용(Life Cycle Cost, 이하 LCC)에 대해서 다양한 연구가 수행되고 있다[1].

철도차량의 안정적인 운행, 운영 및 경제적인 유지보수를 위해 수명주기비용 예측을 위해 'IEC 60300-3-3' 유럽규격을 근간으로 국내에서 관련 규격을 제정하였다. 뿐만 아니라 'ISO', 'NORSOK', 'REMAIN', 'UNIFE', 'PROMAIN' 등 규격들이 다양한 범위로 확대되어 적용되고 있다[1]. 시스템에 대한 수명주기비용은 크게 투자(investment cost), 운영비용(operating cost), 유지보수(maintenance cost), 폐기비용(disposal cost)으로 구성된다. 이것은 시스템을 설계에서부터 개발 및 운용, 폐기까지 전 과정에 대한 평가를 통해 최적화된 운영과 유지보수가 가능한 방법이다[2]. 따라서 국외에서 도입되어 운행되고 있는 철도차량의 경우 국산화 개발이 앞으로 지속적으로 이루어져야 하므로 주요 부

품 및 서브시스템(sub system)에 대한 LCC 연구가 필요하다. 그 중 8200호대 전기기관차의 주변환장치는 국산화 개발 중에 있어 개발에서부터 폐기까지의 유지보수 비용절감을 위해 LCC 분석이 필수적으로 요구되는 시점이다.

본 논문에서는 8200호대 전기기관차내 장착되어 사용 중에 있는 주변환장치에 대한 수명주기비용을 분석하였다. 이를 위해 주변환장치 BOM(Bill of Material)을 활용하여 부품수준인 PBS(Product Breakdown Structure) 분류체계를 설정하였다. 또한 8200호대 유지보수 매뉴얼(manual)을 통하여 PBS 분석 및 정비를 통해 획득한 자료 등을 활용하여 수명주기비용을 분석하였다. 이를 통해 얻어진 수명주기비용은 철도차량의 안전을 도모하며 운영비 절감뿐만 아니라 주변환장치의 국산화 개발에 활용을 극대화할 수 있다.

2. 본 론

LCC분석은 다양한 방법이 존재하지만 국내에서 운용되는 8200호대 전기기관차의 수명주기비용 예측 방식으로 KS A IEC 60300-3-3규격을 채택하였다. LCC를 산출하기 위해 8200호대 전기기관차 유지보수 매뉴얼에 준하였다. 즉 기본정비(Examination Service, ES), 경정비(Limited Inspection, LI-3, 8), 중정비(General Inspection, GI-3, 6, 9, 10)를 바탕으로 주변환장치에 대한 수명주기비용을 분석하였다.

2.1 주변환장치의 PBS 분류체계 및 분석

주변환장치의 PBS는 LCC 모델링 및 분석에 기본적인 핵심요

Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea
E-mail: goldmoon@ut.ac.kr

* Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

** Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

Received : October 24, 2017; Accepted : November 3, 2017

소이며 유지보수 측면에도 많은 영향을 미친다. 주변환장치의 PBS 구조는 제품의 수리나 조립과정을 기반으로 사용되는 품목들을 트리(Tree)구조로 나타낸다. PBS는 공간 중심적이기 때문에 품목 선정 과정이 간단하고 이해하기 쉬운 장점을 갖으나 동일한 기능의 장치가 중복되어 여러 번 인식되는 경우가 발생한다. 그러므로 PBS 선정은 대분류, 중분류, 소분류로 시스템에 전체 형상을 결정하고 분류마다 어느 위치에 구성품이 사용될 지 Level 별로 고려해야 한다[3, 4]. 그림 1은 8200호대 주변환장치에 대한 PBS 분류체계이며 PBS를 도출하기 위해 주변환장치의 부속품 및 부품 수준에 대하여 상세한 분류를 정의한다. 크게 3단계로 이루어지며 기능적 분류장치의 대분류, 물리적 및 전기적 인터페이스(interface)의 중분류, 장치별 구성요소 또는 부품수준의 소분류로 나타낸다.

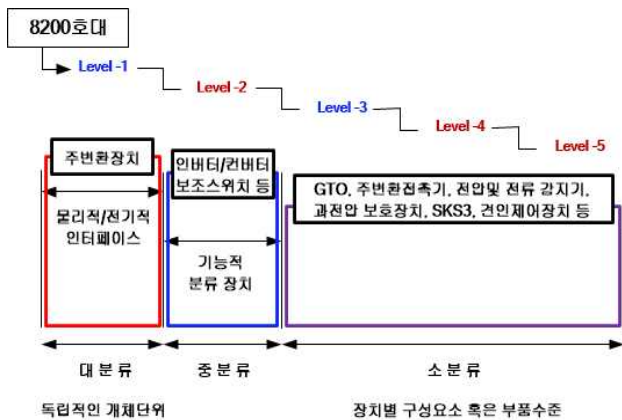


그림 1 PBS 분류체계
Fig. 1 PBS Classification of System

주변환장치의 PBS 분류체계는 물리적/전기적 인터페이스의 관계를 반영한 Level-1, 기능적 특성 및 독립적으로 정의될 수 있는 개체 단위 장치를 Level-2로 분류하였고 Level-3과 Level-4는 장치별 구성요소 또는 부품 수준의 상세한 분류체계로 구성하였다. Level-1과 Level-2는 철도차량에 적용 가능한 수준의 분류로 정의하였으며, Level-3과 Level-4는 전기기관차의 형식 및 구조에 따라 달라질 수 있다. 그림 2는 8200호대 전기기관차 주변환장치의 PBS를 나타내며 이는 주변환장치를 기능에 따른 부품별로 세분화하여 분류한 구조를 보여준다. 주변환장치의 PBS는 시스템의 전체 형상을 Level별로 결정하고 각 구성품이 어느 위치에 사용되는지 고려해야 할 LCC분석의 기초단계이자 핵심이다. 우선적으로 기능적 분류를 적용하여 차체 및 설비, 주행장치, 제동장치, 전력추진장치, 보조전원장치, 차상신호장치, 열차제어장치, 연결장치로 분류된다. 주변환장치는 Level-2에 다시 기능적 분류를 통해 인버터/컨버터, 보조스위치 기기함으로 분류되며 Level-3과 Level-4에서는 장치별 구성요소와 부품수준으로 분류한다.

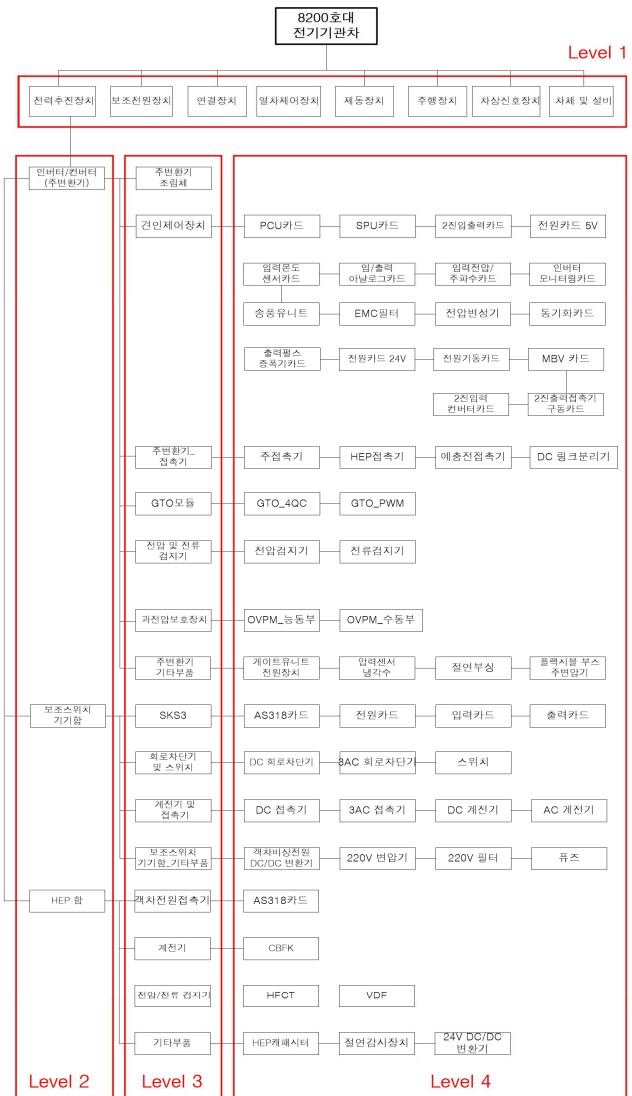


그림 2 8200호대 주변환장치에 대한 PBS
Fig. 2 PBS of Main Conversion System in 8200 Series

2.2 주변환장치의 CBS 분석 및 비용평가모델

수명주기비용은 총 수명주기 비용을 예측하기 위해 비용 구성 요소로 분류되어야 하며 이러한 비용 요소는 명확하게 정의되거나 예측 가능하도록 개별적으로 식별되어야 한다. 획득비용은 제품의 도입단계에서 정확히 예측되는 부분으로 지역의 운영 특성, 운영방식, 예상수송인원 등을 충분히 검토하여 결정할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 8200호대 전기기관차가 차량기준으로 도입되어 주변환장치만의 획득비용($Cost_{preventive}$)을 예측하는 것은 어려움이 있어 적용하지 않았다. 표 1은 주변환장치의 비용분류구조 형태를 나타낸다.

표 1 주변환장치의 비용분류구조 형태

Table 1 Cost Breakdown structure form of main conversion system

Years	Maintenance cost(천원)						NPV(%)		
	Preventive maintenance cost				Operation expenses	Failure maintenance cost	Sum	Cumulative cost	NPV
	GTO	Control device	...	Air blower	Vehicle station operation cost				
1	4,729	4,729		4,729	-	34,584	88,166	88,166	87,293
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
30	913,774	406,662	...	86,381	51,966	46,152	-	-	-
합계(백만원)	2,637	1,947	-	383	-	-	8,936	8,936	7,463

표 2 전기기관차 개통별 고장현황

Table 2 Main Conversion Device Failure Status

year division	total	Power conversion	Electrical system	Air braking	Driving device	Etc
'11년	27	5	8	5	8	1
'12년	24	2	9	2	11	-
'13년	26	5	12	2	3	4
'14년	27	9	9	1	5	3
'15년	18	3	10	1	4	-
Sub total	122	24	48	11	31	8
Failure rate [%]	-	19.6	39.3	9.0	25.4	6.5
Annual average	24.1	4.8	9.6	2.2	6.2	1.6

소유비용($Cost_{corrective}$)은 운영비, 예방정비비, 고장정비비 등을 포함한다. 운영비는 주변환장치 유지보수에 따른 차량내의 전력사용 등 일반적인 차량기지 운영비를 의미한다. 예방정비비는 매뉴얼에 따라 사전에 결정된 주거나 이미 규정된 범위 내에서 고장의 확률을 줄이거나 장비기능저하를 방지하기 위한 정비를 의미한다. 고장정비비는 결함 인식 후 장비에 필요한 기능을 수행할 수 있는 상태로 되돌리기 위한 정비로 비용적으로 가장 단순한 형태의 유지보수 비용이다. 폐기비용($Cost_{operation}$)은 부품의 내용연수가 도래했을 때 따른 비용으로 현재까지 자료를 통해 비용 추정을 불가능하며 수명주기비용 산출이 어려운 부분이다. 이와 같이 IEC 60300-3-3 비용평가모델을 그대로 적용하기에는 많은 문제점이 존재 하므로 주변환장치의 LCC를 분석하기 위해 비용평가 모델을 식 (1)과 같이 설정하고 LCC를 분석하였다.

$$LCC = Cost_{preventive} + Cost_{corrective} + Cost_{operation} \quad (1)$$

2.3 주변환장치의 고장현황 및 유지보수주기 분석

신뢰도 및 정확도가 높은 LCC분석을 위해서는 과거의 고장이

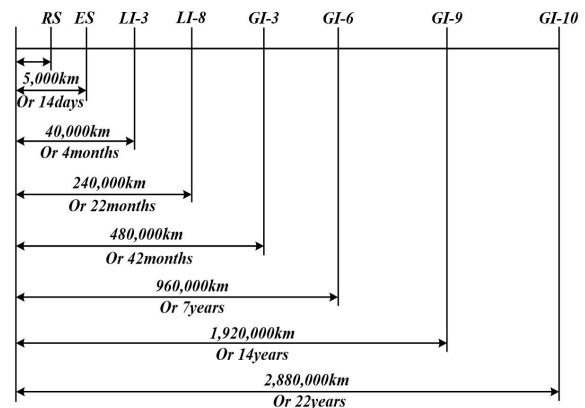


그림 3 8200호대 전기기관차 설비별 정비주기

Fig. 3 Maintenance cycle of 8200 series electric locomotive by facility

력에 대한 분석, 유지보수 점검주기 분석, 열차의 고장빈도 및 부품의 수명 등 많은 데이터를 기반으로 분석하여야 한다.

본 논문에서는 표 2와 같이 최근 5년간 전기기관차의 개통별 고장현황에 대해 조사하였고 고장현황에 대한 고장비율을 식 (2)와 같이 계산하였다. 전기계통이 고장비율이 39.3%로 타 설비에 비해 상대적으로 높으며, 본 논문에서 LCC 분석을 하고자 하는 주변환장치도 19.6%를 차지한다.

$$\text{고장비율} = \text{각 서브시스템} / \text{누적 고장건 수} \quad (2)$$

한편 그림 3은 이러한 4단계의 정비 범위 및 종류에 따른 유지보수 체계의 정비주기를 나타내었다[3][5]. 8200호대 전기기관차의 유지보수 체계는 정비 범위 및 종류에 따라서 크게 4단계의 주기로 구성되며, 각각의 유지보수는 주행거리와 일정기간 한도에 따라 구분된다. 1단계에 해당되는 반복정비(Return Service, RS)의 경우 정기 운행 중 검사로 운행 동안 안전에 영향을 줄 수 있는 불규칙하고 우발적인 고장을 찾아내는 검수단계이다. 2단계인 기본정비(Examination Service, ES)는 예정된 검수 주기와 동일 이상 범위까지 운행 서비스를 달성 할 수 있도록 사전에 정의된 신뢰성 수준을 보장하기 위한 부품의 정기 주기검수이다. 3단계 경정비(Limited Inspection, LI)는 교체검수 및 정기

표 3 설비별 점검항목

Table 3 Inspection Items by Equipment

Part	Inspection items	Main inverter	LI-3	LI-8	GI-3	GI-6	GI-9	GI-10
Main inverter	54	2	16	22	33	51	52	64
Central Control Unit	14	2	8	11	14	14	14	14
Yearly inspection	Number	182.5	3	0.5	1	0.15	0.07	0.45
Inspection period	Year/Day	5/3	90/5	90/5	90/5	90/5	90/5	90/5

표 4 점검종별 분석방법

Table 4 Analysis method of inspection type

Type of inspection	Analysis method	Type of inspection	Analysis method
ES	5명 × 3일	LI	90명 × 5일
GI	90명 × 5일	-	-

예방 유지보수(부품이 예정된 사용수명에 도달하였을 때) 또는 임시 예방 유지보수 작업(검사로 교정 유지보수 작업이 한계에 도달하였을 때)을 실행하는 동안에 착수하는 부품 교환검수이다. 마지막으로 4단계 중정비(General Inspection, GI)는 분해된 조립체 또는 부품에 대한 유지보수 작업으로 동일한 가동조건 및 승차감을 유지하도록 해당 조립체 또는 부품의 개조작업을 한다.

2.4 전기기관차 주변환장치 LCC 분석방법

2.4.1 예방정비비

8200호대 전기기관차 주변환장치의 개량 및 교체비는 초기 제품의 단가에 근거하여 내용연수 후에 교체하는 비용으로 산출하였다. 연간 예방정비비를 산출하기 위해 식 (3)을 적용하였다. 임율은 인건비를 나타내며 점검종별분석은 표 4와 같이 기본정비, 중정비, 경정비로 나뉜다. 점검항목비용, 점검횟수 및 교체비용은 표 3의 설비별 점검항목의 부품과 검수기간을 의미하며 교체비용은 표 5의 내용연수에 따른 교체비용으로 나타낸다.

$$\text{연간 예방정비비} = \text{임율} \times \text{점검종별분석} \times \text{점검항목비용} \times (\text{점검횟수} + \text{교체비용}) \quad (3)$$

표 3은 8200호대 전기기관차 유지보수지침서를 설비별로 점검항목을 나타내었으며 주변환장치인 경우 검사항목이 54개이다. 점검종별 당 비율 산정은 유지보수지침서를 참고하여 설비별로 점검항목에 대한 비율을 환산하였다.

점검종별 분석방법은 유지보수지침서를 참고하여 점검종별 분석방법을 설정하였다. 점검종별마다 차량주행거리 또는 주행일수

표 5 고장정비비의 산정방법

Table 5 Calculation method of breakdown cost

Failure maintenance cost	(도입이후 부품당 교체수/총편성/사용년도) × 부품단가
Replacement cost Depending on the service life	각 부품단가 = 1.01 ^(내용연수-1)

표 6 서브시스템별 내용연수

Table 6 Cycle period on Subsystem

Part	Year	Part	Year
GTO module	10	견인제어장치	6
주변환접촉기	6	전압전류검지기	6
과전압보호장치	6	주변환송풍기	10
SKS3	6	스위치	6
계전기/접촉기	6	기타	6

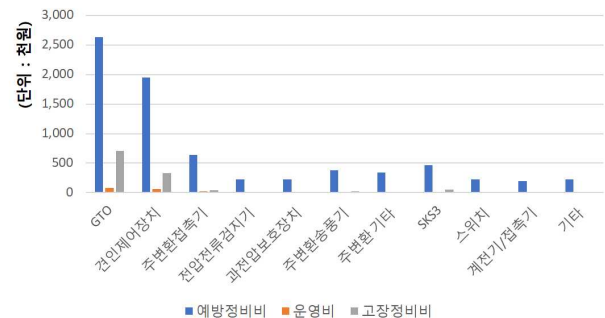


그림 4 주변환장치 LCC 분석 그래프

Fig. 4 LCC Analysis graph of Main Conversion System

에 의하여 점검주기가 다르며 점검수준의 단계에 따라 투입되는 인원 및 점검일수가 다르다. 표 4는 점검종별 분석방법을 나타내며 LI와 GI 단계에서는 5일 동안 90명이 투입하여 점검한다.

2.4.2 운영비 및 고장정비비

운영비는 유지보수 시 소비되는 비용을 뜻하며 차량 유지보수에 소비되는 전력비, 차량기지 운영과 유지보수에 따른 공구비를 나타낸다. 주변환장치의 운영비는 차량기지의 운영비 3%에 불과하므로 예방정비비에 3%를 곱하여 운영비를 산출하였다. 고장정비비는 전기기관차 도입 이후 주변환장치의 부품당 사용량 분석자료와 유지보수지침서의 전기 소요량을 비교하여 전기 소요량 외에 사용된 부품 수량을 파악하여 금액을 산정하였다. 표 5는 고장정비비의 산정방법을 나타내며 내용연수는 부품의 수명 및 교체시기를 의미한다.

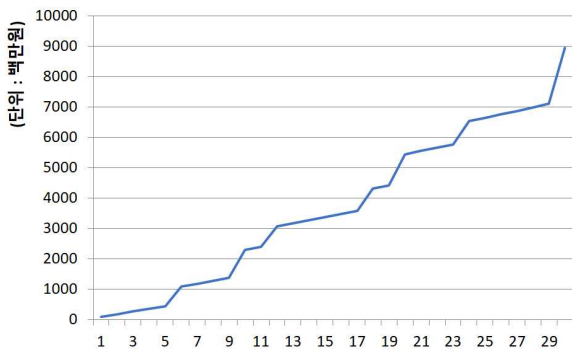


그림 5 년도별 주변환장치 LCC 분석
 Fig. 5 Life cycle cost analysis of PWM modules by year

2.5 전기기관차 주변환장치 LCC 분석

본 논문에서는 전기기관차 주변환장치의 부품을 Level-3 수준으로 분류하여 각각의 부품별로 LCC를 분석하였다. 그림 4는 주변환장치에 1편성 기준 LCC 분석을 나타낸다. 유지관리비는 GTO, 제어장치, 접촉기, 검지기, 보호장치, 송풍기, SKS3, 스위치, 계전기, 기타로 법인세법에 의한 내용연수는 10년이므로 품목별 내용연수가 다르기 때문에 총 분석기간을 30년으로 정하여 PBS의 Level-3까지 해당하는 항목을 분석하였다.

LCC를 분석해 보면 일반적으로 유지관리비 중에 예방정비 비용의 비율이 가장 큰 것을 알 수 있다. 이것은 전기기관차를 유지하기 위한 정기적 유지보수에 따른 비용이므로 필수 요소가 된다. 다음으로 큰 비용은 고장정비 비용이다. 고장정비 비용은 전기기관차 운행 이후 부품 사용수를 파악하여 계산된 비용으로 고장에 따라 부품을 교체한 비용이다. 이것은 전기기관차의 LCC의 절감을 위해서 가장 중요한 요소로 분석된다.

표 6은 8200호대 전기기관차 주변환장치를 구성하는 주요 서브시스템의 내용연수를 나타낸다. 주변환장치는 10개의 서브시스템을 갖고 GTO 모듈과 주변환송풍기의 내용연수는 10년이고 그 외 견인제어장치, 주변환접촉기, 전압전류검지기, 과전압보호장치, SKS3, 스위치, 계전기/접촉기, 기타는 6년의 내용연수를 갖는다. 이것은 고장으로 인한 차량 운행에 지장을 주지 않기 위한 예방정비 차원에서 이루어진다.

그림 5는 전기기관차 주변환장치를 30년 동안 누적비용을 분석한 결과 그래프이다. 연도별 LCC를 분석해 보면 6년, 10년, 12년, 18년, 20년, 24년, 30년에서 타 년도에 비해 상대적으로 비용이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 주변환장치의 부품들이 표 6에서 보듯이 내용연수에 따라 교체가 이루어짐을 알 수 있다. 특히 부품단가가 고가인 GTO 모듈의 내용연수가 10년 주기이고 제어장치, 접촉기, 스위치 및 계전기의 내용연수가 6년으로 교체가 이루어지기 때문에 내용연수 주기로 비용이 크게 변화가 이루어짐을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 LCC 비용이 주변환장치 사용연수에 따라 증가 추이를 보이고 있는데 이는 부품비, 물가상승률 및 인건비 상승에 영향을 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 8200호대 전기기관차의 주변환장치에 대해서수명주기비용을 유지보수주기 및 운영예산에 근거하여 분석하였다. 수명주기비용은 유지보수지침서를 참조하여 점검종별 분석, 운영비, 내용연수, 유지보수비, 기타비용 등을 통해 각 Level의 부품별, 연도별로 세부적으로 분석하였다. 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 8200호대 전기기관차의 주변환장치에 대한 추정 가능한 수명주기비용 분석을 위해 적합한 LCC 모델을 설정하였다.
- (2) 유지보수지침서 및 최근 5년간 계통별 고장 데이터를 근거로 운영비, 예방정비비, 고장정비비 등을 추정하기 위한 분석방법을 설정하였다.
- (3) 분석결과 GTO 모듈, 제어장치의 유지보수 비용이 상대적으로 높으며, 내용연수에 따라 비용이 증가됨을 확인 하였다.

향후 8200호대 주변환장치 국산화 개발을 통해 서브시스템별 재료비를 최소화하고 전력용 반도체 소자 등 고가 소자에 대한 고장율을 최소화 한다면 수명주기비용 절감이 가능할 것이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술 연구사업 중 '전기기관차(8200호대) 주변환장치 및 종합제어장치 실용화 기술개발' 과제의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] J. M Kim, C.J Yoon, Y.S Kim, C.Y Chang and J.S Lee, "The Life Cycle cost Estimation using the Maintenance Information of a Propulsion Control System in the High Speed Train(KTX-1)", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 60, No. 11, pp. 2176-2181, 2011
- [2] Y. S Kim, J. M Kim and C.Y Chang, "The Life Cycle Cost Estimation of a developing Propulsion Control System in the High Speed Train(KTX-1)", Proceedings of KIEE, pp. 202-204, 2012
- [3] J. D Chung and D. S Bae, "Life-Cost-Cycle Evaluation Analysis of the Shunting Locomotive", Journal of the Korean Society for Railway, Vol.8 No.3, pp. 260-266, 2005
- [4] C. J Yun, M. G Noh and J. M Kim, "The Life Cycle Cost Estimation for Domestic Products Motor Black of KTX-1

Considering Periodic Maintenance”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 2, pp. 288-292, 2013

- [5] Korail 8200 Series Electric Locomotive Maintenance Manual, Korail, 2016

저 자 소 개



김 완 일 (Wan-il Kim)

2016년 한경대학교 전기전자제어공학과 졸업.
2017년~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과 재학



이 계 승 (Kye-Seung Lee)

2016년 한국철도대 철도차량전기와 졸업.
2017년~현재 한국교통대학교 일반대학원 철도차량운전시스템공학과 재학



최 종 록 (Choi-Jong Rok)

2002년 한국방송대학교 졸업. 2004년~2007년 부산고속철도차량정비단 평가팀장. 2007년~현재 철도공사 인재개발원 교수



김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원. 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 교수
E-mail : goldmoon@ut.ac.kr