

## 동력분산식 철도차량 주회로 차단시스템의 RAM 분석 및 수명주기비용 추정

# RAM Analysis and Life Cycle Cost Estimation of Main Circuit Breaker System for EMU Vehicle

박재영\*† · 박재현\*\* · 이현우\*\*\*

Jaeyoung Park\*, Jaehyun Park\*\* and Hyunwoo Lee\*\*\*

(Received 06 October 2023, Revision received 25 October 2023, Accepted 26 October 2023)

**초록 :** 국내 철도운영기관은 철도안전법에 따른 철도안전관리시스템 기술기준에 따라 신규 차량 또는 부품 개발 시 RAMS 분석 결과 및 이를 바탕으로 한 수명주기비용 분석 결과도 요구하고 있다. 이는 국제표준인 IEC 62278 및 62279를 기반으로 시스템 수명주기에 따른 RAM 및 안전성 활동을 적용하여 최적의 유지보수 방법을 찾는 것이 목적이다. 본 연구에서는 동력분산식 고속차량용 모듈형 주회로 차단기 시스템의 모듈박스 및 주요부품에 대하여 신뢰성 분석 및 수명주기비용 추정을 수행하였다. 주요부품의 신뢰성 분석 결과 및 사후 유지보수 비용과 예방 유지보수비용을 추정하였으며, 수명주기비용 비용절감을 위한 수명주기 단계별 고려사항을 적용하여 비용절감 효과를 확인하였다.

**키워드 :** 신뢰성, 유지보수성, 수명주기비용, 동력분산식 고속차량, 주회로 차단기

**Abstract :** Domestic railway operating organizations require RAMS (reliability, availability, maintainability and safety) analysis results as a necessity when developing new vehicles or parts according to the railway safety management system technical standards under the Railway Safety Act. Based on the international standards IEC 62278 and 62279, the purpose is to find the optimal maintenance management plan by applying RAM and safety activities according to the system life cycle. In this study, life cycle cost analysis based on RAM analysis was performed on the modular box and main parts of the module-type main circuit breaker system for high-speed electric multiple unit (EMU) rail vehicle, which is currently being developed for localization. For the life cycle cost analysis method, a cost evaluation model applicable to railway vehicles was used, and corrective maintenance costs and preventive maintenance costs were presented by applying the failure rate calculation results of major parts, maintenance manuals, and detailed maintenance rules.

**Key Words :** Reliability, Maintainability, Life Cycle Cost, EMU Vehicle, Main Circuit Breaker

\*† 박재영(<https://orcid.org/0009-0001-4099-5984>) : 책임연구원,  
(주)큰날개 기술연구소

E-mail : jaeyoung.park@bigtel.net, Tel : 02-478-8585

\*\*박재현(<https://orcid.org/0009-0008-0850-5333>) : 이사, (주)  
큰날개 기술연구소

\*\*\*이현우(<https://orcid.org/0009-0009-9116-9138>) : 부사장,  
(주)큰날개 기술연구소

\*† Jae-Young Park(<https://orcid.org/0009-0001-4099-5984>) :  
Senior Researcher, Reliability Division, BIGTEL Corp.

E-mail : jaeyoung.park@bigtel.net, Tel : 02-478-8585

\*\*Jaehyun Park(<https://orcid.org/0009-0008-0850-5333>) : Director,  
Reliability Division, BIGTEL Corp.

\*\*\*Hyunwoo Lee(<https://orcid.org/0009-0009-9116-9138>) :  
Vice president, Reliability Division, BIGTEL Corp.

## 1. 서 론

1960년대부터 국내 철도차량 제작이 시작되어, 1990년대 이후에는 국내 운영 철도차량은 대부분 국산화 기술개발이 이루어지고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 기술개발과는 별개로 철도차량의 운행 중 발생하는 고장으로 인해 승객의 불편이나 가용도가 떨어지고, 중요 고장의 경우 열차지연, 승객불편, 교통혼란 등을 초래하게 된다. 이에 따라 전동차를 구성하는 장치들의 신뢰성이 중요하게 요구되고 있다.

철도산업의 발전에 따라 유럽에서는 1999년에 철도 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability and Safety)에 대한 유럽규격인 EN 50126을 발간하였다. EN 50126은 2002년 9월에 IEC 62278<sup>3)</sup>로 국제 규격으로 제정되었다. 이러한 규격을 바탕으로 해외 대부분의 철도 프로젝트 사양서에는 어떤 형태로든 RAMS 요구사항이 반영되고 있다.<sup>2)</sup>

현재 국내 철도 운영기관은 철도안전법 내 철도안전관리체계 기술기준에 따라 신규 차량 및 부품을 도입하고자 할 때 RAMS 분석 결과를 필수적으로 요구하고 있다. 이는 IEC 62278<sup>3)</sup> 및 IEC 62279<sup>4)</sup>를 기반으로 시스템 생명주기에 따른 RAM 및 안전성 활동을 적용하여 최적의 유지보수 관리 방안을 찾는 것이 목적이다. 또한 최근 들어 철도 운영사에서는 운영 유지보수 비용을 예측하기 위하여 RAMS 분석 결과를 바탕으로 한 수명주기비용(Life Cycle Cost, LCC) 분석 결과를 요구하고 있다. 하지만 제대로 된 RAMS 분석 수행에는 데이터 관리 미흡, 분석 능력 및 인력의 부족, 분석 결과의 활용 부재 등 많은 어려움이 존재한다.<sup>5)</sup>

이에 본 연구에서는 RAMS 국제 기준서인 IEC 62278에서 요구하는 절차에 따라 동력분산식 고속철도 차량용 모듈형 주회로 차단시스템에 대한 고장률 예측, 신뢰성 분석, 고장유형 및 영향 분석 및 유지보수성 분석을 수행하였으며, 그에 따른 수명주기비용을 추정하였다. 추정된 수명주기비용의 절감을 위한 방안을 적용하여 비용절감 효과를 확인하였다.

## 2. 모듈형 주회로 차단시스템

모듈형 주회로 차단시스템은 전기동차의 지붕에 탑재되는 장치로서, 가선 전원으로부터 전원을 입력받아 차량을 기동하며, 이상 전류 발생 시 주회로 차단기가 개방되어 전원을 차단하고, 주회로 내의 충전전압을 접지스위치를 통해 방전시켜 차량 내 고압 장치의 보호를 목적으로 하는 장치이다.

모듈형 주회로 차단시스템은 주회로 차단기, 접지스위치, 단로기, 진공차단부, 계기용 변압기, 전류용 변압기, 피뢰기, 진단감시장치 등으로 구성되어 있다. 주회로 차단기는 진공 인터럽터를

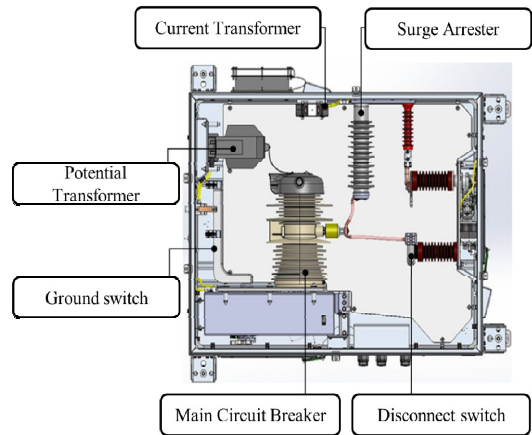


Fig. 1 Main circuit breaker system for EMU

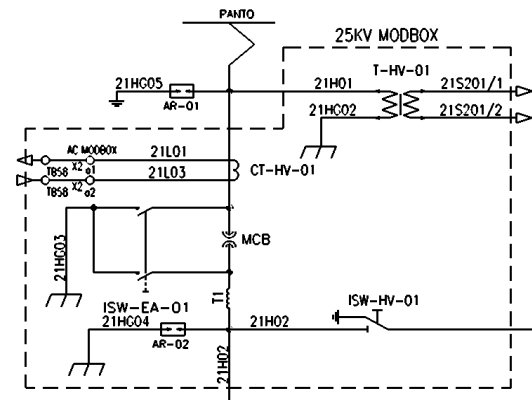


Fig. 2 Main circuit diagram for module box

포함하는 진공차단부와 진공차단부의 개폐 동작을 위한 조작기구부와 동작을 위한 신호및 압력을 제어하는 제어부로 구성되어 있다. 진공차단부의 핵심 부품인 진공 인터럽터는 전원의 통전과 차단을 담당하는 부품으로 진공상태의 높은 절연내력과 전자기력을 이용한 아크소호 성능을 바탕으로 차단기의 소형화 및 경량화를 가능하나 해당 성능을 유지하기 위해서는 진공 인터럽터 동작 수명내에 고진공도 유지, 개폐접점의 내구성 등의 고신뢰성 요구된다. 단일 박스 내에 각종 기기를 모두 통합 설치하여 외부 상황변화(기온, 습도, 비 또는 눈, 압력 등)에 의한 영향을 최소화하고 외부로부터의 충격으로부터 보호하여 제품의 신뢰성 및 전력공급 안정성을 확보하기 위하여 박스형태로 모듈화하였다. Fig 1과 Fig. 2에 시스템의 구성과 모듈박스 주회로 구성도를 나타내었다.

### 3. RAM 분석

#### 3.1 RAMS 분석 및 LCC의 필요성

IEC 62278은 철도 시스템의 RAMS 관리 원칙을 제공하는 국제표준으로, 개념설계부터 폐기까지 총 14단계 수명주기 모든 단계에서 신뢰성 및 안전성 등을 확보하기 위해 각 단계별 과정과 절차에 대해 다루고 있다.<sup>6)</sup>

RAM 분석은 시스템의 설계단계부터 시작되며, 가장 먼저 시스템의 체계정리 업무 및 분석단계의 업무를 수행하게 된다. 다음으로 정리된 시스템 체계에서 정의된 최하위 단계에 대한 FMECA를 수행하고 마지막으로 시스템 기능도를 바탕으로 신뢰성 블록도를 작성한다. 시스템의 신뢰도와 유지보수도는 신뢰성 블록도와 FMECA를 기초로 예측된다. 시스템 신뢰도와 유지보수도에 대한 예측은 시스템을 제작하고 설치하기 이전에 수행되며, 예측된 결과가 RAM 요구사항을 만족하는지 확인한다. 만약 예측된 값이 RAM 요구사항을 만족시키지 못할 경우, 설계 및 운영절차는 호환성을 입증할 수 있도록 수정되어야 한다. 이런 입증 작업은 RAM 요구사항과 설계단계에서 RAM 분석 데이터 사이의 호환성을 검토하는 것을 포함

하지만 시운전 및 운영단계에서 수행되는 통계적 입증 과정은 포함하지 않는다.

Kim 등<sup>7)</sup>은 RAMS는 철도 서비스의 품질을 결정하는 중요한 요소 중 하나이며, RAMS 성능 향상을 통해 철도 서비스의 품질을 높이기 위해서는 높은 RAMS 성능을 가진 시스템을 획득하여야 하며 또한 획득된 시스템의 RAMS 성능을 지속적으로 유지하여야 한다고 언급하였다. 이를 위해서 국내 철도 운영기관에서는 구매사양서에 RAMS에 대한 요구사항을 명시하여 높은 RAMS 성능을 가진 시스템이 도입될 수 있도록 하고 있다. 특히 최근 들어 국토교통부에서는 모든 운영기관은 RAMS 분석을 통한 RCM 수행을 필수적으로 수행하도록 법제화하고 있다.

스위스 고속철도 X2000의 경우, 프로젝트 기간과 사업운전 개시 후 1년 동안의 LCC 검증을 요구하였으며, 요구조건을 충족하지 못할 경우에 재설계 및 설치 후 다시 1년간 LCC 검증을 요구하고 최종적으로 실패할 경우 위약금을 물도록 명시한 내용이 존재한다. 유럽에서는 LCC에 관한 사항은 계약요건의 하나로 요구되고 있다.<sup>7,8)</sup>

국내의 경우, Park 등<sup>9)</sup>은 국외 전동차 LCC 연구동향 및 국제 규격에 대한 전략을 제시하였고, Chun 등<sup>10)</sup>은 입환 기관차에 대한 LCC 분석을 통해 기존 기관차의 수명연장 결정 및 경제성 분석을 수행하였다. Kim 등<sup>11)</sup>은 철도차량의 유지보수 비용 계산을 위해 유지보수정보 양식을 제안하고 차량에 대한 전 주기 유지보수비용을 계산하였다.

최근 들어 철도 관련 산업에서 다수의 RAMS 및 LCC에 관련된 논문들이 연구되고 있으며, 실질적으로 신규 부품개발 사업의 경우 대부분 하나의 필수적인 절차로 인식되고 있다.

### 3.2 RAM 분석

#### 3.2.1 계층구조 및 신뢰성 분석

주회로 차단시스템에 대한 신뢰성 분석을 수행하기 위해 먼저 하위 구성품을 계층구조(PBS)로 구분하고, 각 부품에 대한 상세 부품 명세서를 수집, 정리하여 동작환경, 온도, 품질 수준, 전기적 특성, 기계적 특성 등을 파악한다. 부품제조사에

Table 1 Prediction result of main circuit breaker

Item	Failure rate (Failures/hour)
Module-type Main circuit breaker	
Main circuit breaker	6.32E-06
Disconnect Switch	1.34E-06
Potential Transformer Ass'y	2.37E-07
Current Transformer Ass'y	1.49E-07
Surge Arrester Ass'y	1.04E-07
Transient inductor	3.37E-09
Control connector	4.98E-08
Module box	2.92E-08
Diagnostic monitoring device	7.26E-06
Phase Control Ass'y	1.81E-07

서 제공하는 데이터 시트 및 유사 제품의 수명 자료를 검토하고, 이에 대한 자료가 없는 경우에는 EPRD, NPRD와 같은 데이터북을 활용하여 고장률을 산출하였다.<sup>12,13)</sup> 주요 부품에 대한 고장률 예측 결과를 Table 1에 나타내었다. 고장률을 예측한 결과를 기반으로 신뢰성 블록도(Reliability Block Diagram; RBD)를 구성하여 각 하위 시스템 및 전체 시스템에 대한 신뢰도를 분석하였다.

신뢰도를 분석하는 전통적인 방법은 고장 나무 분석(Fault Tree Analysis, FTA)과 RBD가 있다. FTA는 논리합(OR)이나 논리곱(AND) 등의 간단한 논리게이트를 이용하여 시스템의 고장원인에 대한 사건(event)를 하향식 방법으로 전개하여 분석하는 방법이다. RBD는 이와 달리 시스템을 구성하는 하위 장비들의 연관관계를 이용하여 신뢰성과 가용성을 평가하는 방법 중 하나이다. 하드웨어 관점에서 시스템의 구조 정보만을 활용하는 방법이며, 비교적 짧은 시간에 시스템 기능 중심의 신뢰성 분석을 위한 모델을 생성할 수 있다. 본 연구에서는 RBD를 이용하여 신뢰도를 분석하였다.

RBD는 기능 블록도를 기준으로 하여 아이템이 주어진 기능을 수행하기 위하여 정상적으로 동작하여야 하는 하드웨어 블록의 연결 관계도를 나

타내며, RBD를 이용하면 n개의 독립된 부품들로 구성된 시스템에 대한 신뢰도, 평균 수명(MTBF) 등과 같은 신뢰도 척도들을 산출할 수 있다. RBD 구성은 실제 시스템의 구성도와 비슷하다. 그러나 경우에 따라서는 고장 메커니즘을 보여 줄 수 있으므로 RBD 구성은 간단한 물리적 구성도와는 다소 차이가 있다. 이러한 다양한 현상 때문에 RBD는 물리적인 구성뿐만 아니라 고장 메커니즘 및 기능적 관계도까지 보여 준다.

일반적으로 RBD에서 직렬 구조는 Fig. 3과 같이 작성되며, 각 부품의 수명이 지수 분포를 따르면 이 시스템의 신뢰도( $R_S(t)$ )와 평균 수명(MTBF<sub>S</sub>) 산출 방법은 아래 식 (1), (2)와 같다.

$$R_S(t) = R_1(t) \times \dots \times R_n(t) = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t} \tag{1}$$

$$MTBF_S = \int_0^\infty e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t} dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\lambda_S} \tag{2}$$

또한 병렬 구조에 대한 RBD는 Fig. 4와 같이 작성되며, 각 부품의 수명이 지수 분포를 따르면 이 시스템의 신뢰도( $R_S(t)$ )와 평균 수명(MTBF<sub>S</sub>) 산출 방법은 아래 식 (3), (4)와 같다.

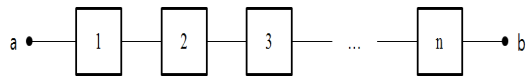


Fig. 3 Serial system

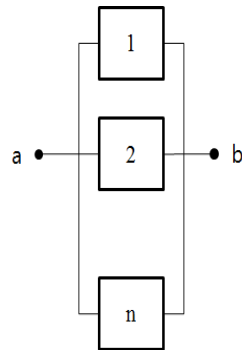


Fig. 4 Parallel system

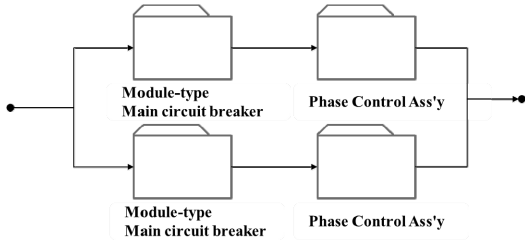


Fig. 5 Reliability block diagram for module type MCB

$$R_S(t) = 1 - (1 - R_1(t)) \times \dots \times (1 - R_n(t)) \quad (3)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t})$$

$$MTBF_S = \int_0^{\infty} \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \right] dt \quad (4)$$

모듈형 주회로 차단시스템은 6량 1편성 차량의 앞과 뒤에 설치되며, 병렬로 운용된다. 전체 시스템의 RBD는 Fig. 5에 나타내었으며, 평균수명(MTBF)은 64,707시간으로 산출되었다.

### 3.2.2 FMEA 및 유지보수성 분석

고장모드 및 영향 분석은 시스템이나 기기의 잠재적인 고장모드를 찾아내고, 시스템이나 기기의 가동 중에 이와 같은 고장이 발생하였을 경우 미치는 영향을 조사 및 평가하여 영향이 큰 고장모드에 대하여 적절한 대책을 수립하는 구조공학적 분석 방법이다. 주회로 차단시스템에 대한 주요 고장모드에 대한 영향을 파악하기 위해 FMEA(Failure Mode & Effect Analysis)를 수행하였으며, 고장모드, 영향 및 일반적인 사후 유지보수

Table 2 Failure mode and effect analysis result of module type Main circuit breaker system

Item	Failure mode	Effect	Corrective Maintenance task (Basically)	MTTR (Hour)
Module-type Main circuit breaker				1.60
Main circuit breaker	Unblockable, Impossible to input, Insulation breakdown, Earthing switch failure	Unable to apply vehicle starting current, Equipment damage due to accidental current flow	1. Check failure records 2. Try to recover by restarting 3. Disassemble 4. Replace broken parts 5. Functional test 6. Check for abnormalities	2.30
Disconnect switch	Switch failure, Unblockable	Unable to open and close the disconnecter		1.00
Potential Transformer Ass'y	Shorted, Opened	Unable to operate vehicle due to unavailability of C.I.		1.00
Current Transformer Ass'y	Shorted, Opened	Over current detection impossible		1.50
Surge Arrester Ass'y	Unable to discharge	High-voltage equipment burnout and failure		1.00
Transient inductor	Deterioration, Fracture	High-frequency surge reduction not possible		1.00
Control connector	Cannot transmit control signal	Main circuit breaking system not working, Unable to apply vehicle starting current		1.00
Module box	Crack, Fracture	Expose the system to the external environment		3.00
Diagnostic monitoring device	Unable to diagnose, Cannot transmit signal	Unknown vacuum status		1.50
Phase control Ass'y	Out of control, Inability to process signals	Phase controller disabled		0.70

에 대한 활동과 평균수리시간(Mean Time To Repair; MTTR)을 Table 2에 나타내었다.

FMEA 분석 결과, 주회로 차단시스템의 주요 고장모드는 차단/투입 불가, 절연파괴, 제어신호 전달 불가, 접지스위치 고장, 보조접점 절손 등 하부 장치별로 다양하게 나타났으며, 이러한 고장의 결과로는 하부 장치의 제어불가, 지락사고 발생, 차량 기동전류 인가 불가, 고압기기 소손 등 차량의 운행에 영향을 주는 항목들이 존재했다. 이러한 고장 분석결과 중 발생빈도가 가장 높은 고장은 설계예방책을 활용하여 발생빈도를 줄이는 방향으로 설계하여야 한다.

유지보수는 요구되는 기능을 수행할 수 있는 상태로 아이템을 유지하거나 회복시키기 위한 관리 활동을 포함한 모든 기술적 행정적 활동의 조합이다. 유지보수는 크게 사후 유지보수와 예방 유지보수로 구분할 수 있다.

사후 유지보수(CM)는 고장이 일어난 후 처리하는 것으로 “결함 인식 후에 아이템이 요구기능을 수행할 수 있는 상태가 되도록 하기 위해 수행되

Table 3 Preventive maintenance cycle

Inspection	Inspection interval	
	Distance (km)	Inspection period
Examination Service (ES)	5,000 (max.)	5 days
Major Inspection (MI)	25,000 (max.)	20 days
Systematic Works on Train-set (SWT)	50,000 ~ 55,000	-
Limited Inspection (LI)	150,000 ~ 165,000	4.5 months
General Inspection (GI)	300,000 ~ 330,000	9 months
Full General Inspection (FGI)	1,200,000 (max.)	3 years
Half Life Operation (HLO)	-	Operation 15 years (±20%)

는 보전”으로 정의하고 있다. 유지보수성 분석을 위한 MTTR 예측은 다음의 수식을 활용한다.

Table 4 Preventive maintenance of main circuit breaker and disconnect switch

Item	Preventive maintenance activities	Inspection						Maintenance time (h)
		ES	MI	LI	GI	FGI	etc.	
Module-type Main circuit breaker	Check from TCMS display	O	O	O	O	O		0.16
	Inspection counter			O	O	O		0.50
	Visual inspection			O	O	O		0.33
	Cleaning module box					O		1.00
Main circuit breaker	Functional test(MCB)			O	O	O		0.33
	Functional test			O	O	O		0.50
	Measurement Vacuum interrupter stroke					O		0.50
	Replace part					O		2.00
	Replace capacitor						10y	1.00
	Replace vacuum interrupter						10y	1.00
Disconnect Switch	Functional test			O	O	O		0.50
	Withstand test					O		0.33
	Measurement operating characteristics					O		0.50
	Replace part					O		2.00

$$MTTR_{System} = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i \times MTTR_i)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (5)$$

시스템에 대한 평균수리시간(MTTR)은 1.60시간으로 분석되었다.

예방 유지보수는 "아이템의 고장확률 또는 기능열화를 줄이기 위해 미리 정해진 간격 또는 규정된 기준에 따라 수행되는 유지보수"로 정의되며, 고장 검지를 위한 시험, 주유, 청소, 조정, 정교교환 등의 항목들이 포함된다. 현재 운영 중인 동력분산식 차량의 정비종류 및 검수주기는 Table 3에 표기하였다.<sup>14)</sup> 시스템의 하부장치인 주회로 차단기 및 고압회로 차단기에 대한 예방 유지보수 결과를 Table 4에 정리하였다.

#### 4. 수명주기비용 추정

수명주기(Life Cycle)란 제품의 계획에서부터 폐기까지에 이르는 전 과정을 나타내는 용어로 일반적으로 계획단계, 설계단계, 입찰 및 계약단계, 시공단계, 인도관계, 유지관리단계, 해체, 폐기단계 등 모든 단계를 포함한다. 따라서 철도차량의 수명주기비용은 철도차량의 수명주기 동안 발생하는 모든 비용 즉 계획, 설계, 시공, 유지관리, 해체, 폐기 등에 소요되는 전체 비용을 의미한다. 일반적인 수명주기비용은 식 (6)과 같이 구성된다.

$$LCC_{Total} = Cost_{Purchase} + Cost_{Operation} + Cost_{Adoption} + Cost_{Maintenance} + Cost_{Dispose} \quad (6)$$

수명주기비용 추정 대상은 현장교체단위(LRU)를 기준으로 구성된 PBS를 기준으로 수행하였으며, 아래의 Table 5와 같이 LCC 분석에는 RAM 분석 단계별로 요구되는 파라미터들이 존재한다. 아이템의 고장확률 또는 기능열화를 줄이기 위해 미리 정해진 간격 또는 규정된 기준에 따라 수행되는 예방보전에 대한 비용과 결함 인식 후에 아이템이 요구기능을 수행할 수 있는 상태가 되도록

Table 5 Required information for LCC analysis

Phase	Information
PBS	PBS
Prediction	Failure rate
Preventive Maintenance	Maintenance cycle, Number of operations, Maintenance time, Number of workers, Required item
Corrective Maintenance	MTTR, Number of workers Required item, Spare part cost
Labor Cost	Labor Cost (per hour)
Total Life Cycle	30 year

복구하기 위해 수행되는 사후보전에 대한 비용 등을 적용하여 분석을 수행하였다.

식 (7)은 유지보수비용으로 기본적으로 인건비와 재료비로 구성되며, 전체 수명주기 동안의 유지보수 시행 횟수, 아이템 수량, 인건비 단가 등을 고려하여 그에 따른 각각의 비용을 산출하였다.

$$Cost_{Maintenance} = Cost_{Labor} + Cost_{Material} \quad (7)$$

고속열차의 기대수명(30년) 동안 매년 발생하는 수명주기비용 추정 결과와 항목별 비율을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 고속열차 1편성에 대한 주회로 차단기의 전체 수명주기비용은 약 4억4천6백만 원 정도이며, 전체 비용에서 초기 구매 20%,

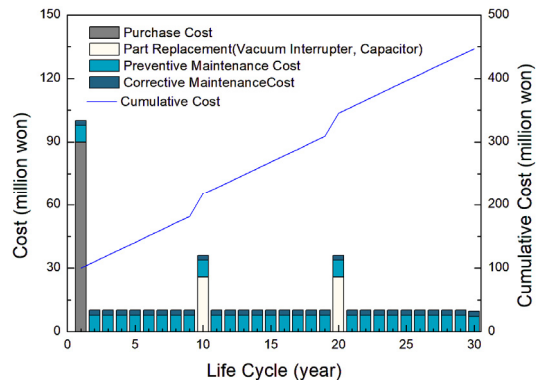


Fig. 6 LCC result for module-type MCB

10년마다 교체하는 부품 비용 12%, 사후 유지보수 비용 16%, 예방 유지보수 비용이 약 52% 정도 차지하였다. 하지만 이러한 유지보수 항목은 고장률과 유지보수 계획에 의한 예측 결과이며, 수명주기 동안 발생할 수 있는 많은 불확실성이 존재하기 때문에 정확성을 보장하기 어렵다. 따라서 수명주기의 단계에 따른 LCC 절감을 위한 고려사항을 아래와 같이 정리하였다.

- 1) 계획단계 : 타당성 평가에 사용되는 비용정보를 통해 수명주기를 체계적으로 인식하게 하고, 사용가치에 대한 초기 투입비용 및 유지보수 비용의 균형점을 찾는다.
- 2) 설계단계 : 수명주기에서 발생하는 다양한 불확실성 제약조건을 수치화하여 경제적인 설계대안을 마련한다.

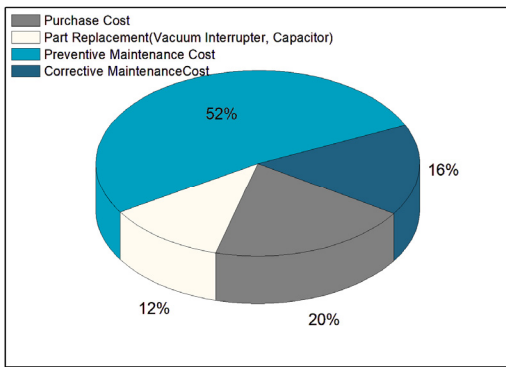


Fig. 7 LCC ratio by element

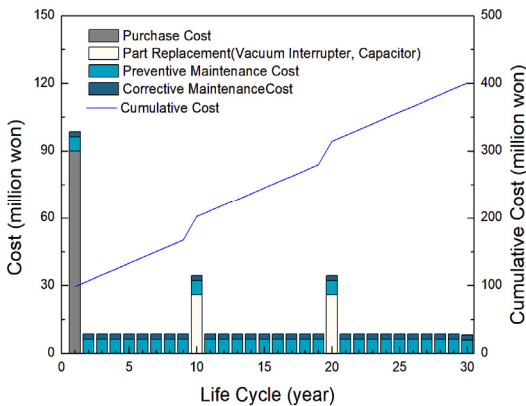


Fig. 8 Modified LCC result

3) 제작단계 : 제작사에 적합한 차량/설비 제작 공법과 자원을 선택하게 하고, 원가분석의 합리성에 도움을 주어 높은 품질의 차량/설비를 제작한다.

4) 운영 및 유지보수 단계 : 제작된 차량/설비의 유지보수, 외부 환경적 변화 요인 등을 예측하여 자산 가치에 대한 불확실성에 대비할 수 있는 운영비용의 변화를 비교 분석한다.

설계단계 및 유지보수 단계의 LCC 절감 방안을 적용한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 고속열차 1편성당 기대수명(30년) 동안 약 4천만 원 정도의 비용절감 효과를 보인다. 이를 국내에서 운용되는 고속열차 1,500여 량(110여 편성, 2020년 기준 근사치)에 적용하면, 기대수명 동안 약 40여 억 원 가량의 절감 효과를 보이는 것으로 확인되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 모듈형 주회로 차단시스템에 대한 국제 규격 및 국내 철도운영기관의 신뢰성 관리체계를 적용하여 RAM 분석 및 수명주기비용을 추정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하위 구성품을 계층구조(PBS)를 분석하고, 각 부품에 대한 고장률을 예측한 결과를 기초로 RBD를 구성하여 각 하위 시스템 및 전체 시스템에 대한 신뢰도를 분석하였다. 시스템의 MTBF는 64,707시간으로 분석되었다.

2) FMEA 및 유지보수성 분석을 통해, 고장 유형, 영향, 사후보전 시 수행되는 활동 및 소요시간 등을 정리하여 유지보수성 분석을 수행하였으며, MTTR은 1.60시간으로 분석되었다. 또한 철도운영기관에서 관리하는 기준에 따른 예방 유지보수 결과를 정리하였다.

3) 모듈형 주회로 차단시스템의 수명주기비용(LCC)을 추정하여 예방 및 사후 유지보수에 소요되는 비용을 추정하였으며, LCC 비용 절감 방안을 적용하면 국내에서 운용되는 고속열차에 대하여 30년 동안 약 40여 억 원 가량의 비용 절감효과를 보이는 것으로 확인하였다. 이러한 자료는 향후 유사 시스템에 대한 RAM 목표 수립 및 LCC 분석 등 기초자료로 유용하게 활용될 것으로 보인다.



## 후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호 :RS-2020-KA156008)

## Author contributions

H. W. Lee; Conceptualization, Methodology, Resources, Writing-review & editing. J. Y. Park; Data curation, RAM analysis, LCC estimation, Writing-original draft. J. H. Park; Validation, Project administration.

## References

1. The Korea Railway Association, 2019, Korea Railway History 3(Technology), The Korea Railway Association.
2. I. S. Chung, K. W. Lee and J. W. Kim, 2008, "A Study on RAMS Parameters in the Procurement Requirement for Rolling Stock", Journal of the Korean Society for Railway, 11(4), 371-374.
3. IEC 62278, 2002, Railway applications - specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), International Electrotechnical Commission
4. IEC 62279, 2002, Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems, International Electrotechnical Commission.
5. H. W. Lee and J. Y. Park, 2022, "A study on the application method of RAMS analysis and reliability management system for railway vehicle components", Journal of the Korean Data & Information Science Society, 33(6), 1053-1064. (<https://dx.doi.org/10.7465/jkdi.2022.33.6.1053>)
6. J. W. Kim, J. S. Park H, Y, Lee and J. H. Kim, 2008, "A Conceptual Procedure of RAMS Centered Maintenance for Railway Systems", Journal of the Korean Society for Railway, 11(1), 19-25.
7. B. Burström, G. Ericsson, and U. Kjellsson, 1994, "Verification of life-cycle cost and reliability for the Swedish high speed train X2000", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 166-171.
8. U. Kjellsson, 1999, "From X2000 to crugarina : Development of LCC technology", Proceedings of World Congress Railroad Research, 1-7.
9. J. M. Park, P. H. Kim and J. K. Lee, 2002, "Investigation into life cycle cost of Electric Multiple Unit (EMU)", 2002 Autumn Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway, 396-407.
10. J. D. Chun and D. S. Bae, 2005, "Life-cost-cycle evaluation analysis of the shunting locomotive", Journal The Korean Society for Railway, 8(3), 260-266.
11. J. H. Kim, H. K. Jun, J. S. Park and H. Y. Jeong, 2009, "A study on the life cycle cost calculation of the railroad vehicle based on the maintenance information", Journal The Korean Society for Railway, 12(1), 88-94.
12. EPRD, 2016, Electronic Part Reliability Databook, Reliability Analysis Center.
13. NPRD, 2014, Nonelectronic Part Reliability Databook, Reliability Analysis Center.
14. KORAIL, 2022, Railway vehicle maintenance regulations, KOREA RAILROAD, 1-19.