

# 필드데이터에 의한 철도차량 신호장치 구성품의 최적 교체주기 결정에 관한 연구

박병노<sup>1</sup> · 김경화<sup>2</sup> · 김재훈<sup>3\*</sup>

## A Study on Determining the Optimal Replacement Interval of the Rolling Stock Signal System Component based on the Field Data

Byoung Noh Park<sup>1</sup> · Kyeong Hwa Kim<sup>2</sup> · Jaehoon Kim<sup>3\*</sup>

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Jaehoon Kim

Tel : +82-31-460-5248

E-mail : lapin95@krri.re.kr

Received : March 20, 2023

Revised : April 4, 2023

Accepted : April 14, 2023

**Abstract** : Rolling stock maintenance, which focuses on preventive maintenance, is typically implemented considering the potential harm that may be inflicted to passengers in the event of failure. The cost of preventive maintenance throughout the life cycle of a rolling stock is 60%-75% of the initial purchase cost. Therefore, ensuring stability and reducing maintenance costs are essential in terms of economy. In particular, private railroad operators must reduce government support budget by effectively utilizing railroad resources and reducing maintenance costs. Accordingly, this study analyzes the reliability characteristics of components using field data. Moreover, it resolves the problem of determining an economical replacement interval considering the timing of scrapping railroad vehicles. The procedure for determining the optimal replacement interval involves five steps. According to the decision model, the optimal replacement interval for the onboard signal device components of the "A" line train is calculated using field data, such as failure data, preventive maintenance cost, and failure maintenance cost. The field data analysis indicates that the mileage meter is 9 years, which is less than the designed durability of 15 years. Furthermore, a life cycle in which the phase signal has few failures is found to be the same as the actual durability of 15 years.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : field data, optimal replacement interval, preventive maintenance cost, corrective maintenance cost

## 1. 서론

철도는 다른 교통수단보다 이산화탄소 배출량이 적고(승용차 147.5 g/인·km, 버스 50.6 g/인·km, 지하철 33.6 g/인·km)<sup>1)</sup> 에너지 절약형 운송수단으로(승용차의 약 1/6, 비행기의 약 1/4) 대량 수송성이 높아 그린 모빌리티의 중심이 되고 있다. 최근에는 철도운영 효율성 제고를 위하여 다양한 형태의 철도시스템이 도입되고 있으며 주요 거점 간 이동시간을 획기적으로 단축하기 위한 고속화 사업을 진행하고 있다.

그동안 철도안전에 대한 정책마련·제도개선·투자확대 등 철도안전 강화를 지속적으로 시행하여 운행장애는 감소추세이나 충돌·탈선 등의 중대사고와 운행장애로 인한 열차지연이 계속 발생하고 있어(2020년 136건, 2021년 133건)<sup>2)</sup> 이용객 불안·불편이 심화되고 있다. 이러한 열차사고의 주요 원인중의 하나는 시스템 노후화에 있다. 국내에서 운행되고 있는 철도차량은 전체 22,354칸이며(2021년 12월 기준) 이중 53%(11,828칸)가 20년 이상 경과된 차량으로<sup>3)</sup> 사고 위험성이 높다.

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 철도안전공학과 박사과정 (Department of railroad Safety Engineering, Seoul National University of Science & Technology)

<sup>2</sup>서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수 (Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

<sup>3</sup>한국철도기술연구원 책임연구원 (Department of Railroad Vehicle Technology, Korea Railroad Research Institute)

최근 5년간(2017~2021년) 발생한 운행장애 통계<sup>4)</sup>를 보면 기술적 요인으로 인한 지연운행이 513건이며, 이중 차량고장으로 인한 지연운행이 390건(76%)으로 가장 높게 나타났다. 고장원인은 단품불량 및 부품 노후로 인한 지연운행이 292건(75%)으로 가장 높게 나타나 유지보수 활동을 통한 철도차량의 안전과 품질확보의 중요성이 강조되고 있다.

철도차량의 고장은 신뢰성을 저하시키고 수입을 감소시키며 운행지연에 따른 이용객의 시간손실을 유발하여 비용손실을 크게 한다.

고장을 예방하고자 시행하는 유지보수 활동은 고장 발생 시 교체 및 수리를 하는 교정정비(Corrective maintenance)와 일정주기마다 점검을 시행하여 결함을 미리 발견하거나 사전 예방조치를 시행하는 예방정비(Preventive maintenance)로 크게 구분할 수 있으며, 철도차량의 경우 예방정비에 더 큰 비중을 두고 있다.

한편 철도차량과 같은 긴 수명주기(25~30년)를 갖는 시스템은 전 수명주기 동안 유지관리에 소요되는 비용은 초기 구입비용보다 더 많은 비중(60%~75%)을 차지한다<sup>5)</sup>.

이러한 이유로 유지보수 활동은 경제적인 관점에서 관리할 필요가 있으며, 예방정비 주기 결정과 같은 최적 유지관리를 시행하기 위한 의사결정은 철도차량 운영 및 유지보수 측면에서는 매우 중요한 사항이다<sup>6)</sup>.

예방정비 중에서도 그 효과가 가장 확실한 것은 구성품을 적시에 교체하여, 고장 증가를 예방하는 것이다. 그러나 잦은 구성품의 교체는 예방정비 비용 증가를 초래할 수 있어 적절한 교체주기를 결정하는 것은 철도 운영기관의 경영측면에서 매우 중요한 사항이다.

그동안 국내외로 시스템 구성품 교체 및 정비주기에 관한 다양한 주제의 연구가 진행되었다. 최적 유지보수주기를 결정하기 위해 연구자들은 다양한 결정모형을 개발하고, 방법론을 제시하였다<sup>7-14)</sup>.

국내에서 운행하는 철도차량은 철도안전법에 의하여 기대수명이 설정되어 있으며 수명 도래 시 대부분의 철도차량은 안전진단을 거쳐 폐기된다. 이때 구성품들도 같이 폐기되어 철도차량의 유효서비스 기간(폐기시점)을 고려한 구성품 적정 교체정책이 필요하다.

기존 연구들은 이러한 철도차량 운영 및 유지보수 특성을 고려하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 필드데이터를 통한 구성품의 신뢰성 특성을 분석하고 철도차량 폐기시점을 고려한 경제적인 교체주기 결정 문제를 다룬다.

이를 위해 2장에서는 구성품의 신뢰성 특성을 모형화하기 위한 필드데이터 수집 방법을 기술하고, 3장에

서는 최적 교체주기 결정 절차와 모형을 제시한다. 그리고 4장 사례연구에서는 2, 3장에서 제시한 모형 및 방법론을 철도차량 차상신호장치의 구성품에 적용하였다.

## 2. 철도차량의 필드데이터 수집 및 활용

### 2.1 필드데이터 수집

일반적으로 구성품의 수명에 관련된 품질 특성치를 구하기 위한 데이터들은 실험실에서 행해지는 수명시험 등으로 얻어지는 정보로부터 수집된다. 그러나 실험실에서 얻어지는 데이터들은 제품의 실제 사용조건들을 모두 반영하는 것이 불가능하므로 실제 사용 환경에서 제품수명에 대한 정보를 왜곡하여 나타낼 수 있는 위험이 있다. 이러한 문제점 해결을 위해 사용현장의 운영 및 고장데이터, 즉 필드데이터(Field data)를 얻고 이를 분석하는 것은 매우 중요하다.

필드데이터의 활용은 주로 ① 신뢰도 평가 및 설계상의 예측치와 비교, ② 제품에 대한 변경 및 개선 정보 제공, ③ 설계변경의 영향 확인, ④ 보증비용(Warranty cost) 추정, ⑤ 정비 및 부품교체 정책설계를 위한 중요한 정보로 활용된다<sup>15,16)</sup>.

필드데이터는 사용 장소, 사용자의 특징과 같은 환경특성의 영향을 받으며 실제 사용 중 발생한 다양한 고장 정보를 담고 있어 해당 구성품의 실질적이고 고유한 수준을 가늠하는 의미 있는 자료로 가치가 높다.

철도차량은 운행 중 또는 정비과정에서 다양한 정성적, 정량적 데이터들이 생성되며, 이를 수집하고 분석하는 일은 제작자나 운영자에게 모두 중요하다. 정성적 데이터는 고장원인, 고장영향, 고장모드 등의 내용이 포함되고, 정량적 데이터는 고장 발생 시의 각 장치의 입출력 값, 운행거리, 온도 습도 등 운행환경 등이 있다. 이러한 데이터들은 실제 사용 중 획득한 다양한 정보 내용으로 원인규명에 필요한 구체적인 정보들이므로 매우 중요한 자료이다.

유지보수 주기를 설정할 때 관련정보가 많을수록 통합적인 알고리즘을 최적화할 수 있기 때문에 관련 정보를 최대한 반영하여 점검 및 교체주기를 설정하는 것이 중요하다.

철도차량은 운용환경을 중심으로 데이터가 기록, 수집, 분석, 활용되기 위해 정비 및 부품공급을 고려하는 LBS(Logistic Breakdown Structure) 개념의 계층구조를 적용하면 시스템 구성장치에 대한 고장정보를 체계적으로 관리하고 분석할 수 있다. LBS는 시스템(차량) > 서브시스템 > 장치 > 부품 단계로 분류되며 더 세분화

Table 1. Rolling stock LBS classification system

Level	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Items	5	15	78	415	455	147	5

Table 2. Failure classification

Failure classification		Definition
Dangerous failure	Railroad accident	Failure caused railroad accidents
	Potential risk	Failure could have led to a railroad accident
Service failure	Operation disorder	Delayed train operation for more than 20 minutes (by terminus)
	Service failure	Delayed for more than 5 minutes due to a Failure that caused service disruption
Logistic failure	Function failure	Train operation delayed by more than 3 minutes and less than 5 minutes due to functional failure
	Minor failure	A simple failure that does not interfere with train operation with a minor failure effect
	Extinction failure	A failure in which the failure phenomenon is automatically extinguished without a failure action

할 수 있다. LBS를 만들 때에는 신뢰도 관리기준을 고려하여 계층 수를 적정수로 설정하고 식별된 마지막 아이터은 LRU(Line Replaceable Unit, 라인 교체 가능 장치) 이어야 한다.

Table 1과 Table 2는 A사의 철도 차량 LBS 구분체계와 고장구분을 나타낸다. 레벨 1(L1)은 차량 종류, 레벨 2와 3(L2, L3)은 장치, 레벨4~7(L4 ~ L7)은 해당 장치를 구성하는 부품을 단계별로 세분화하여 나타낸다.

아이터의 고장은 운행에 영향을 주느냐 그렇지 않느냐에 따라 그 영향의 정도가 매우 다르다. 따라서 고장 데이터는 고장에 대한 명확한 정의가 필요하다. 고장 정보에는 해당 장치(부품), 고장발생 시점, 고장원인, 고장영향 등 활용가능한 모든 자료가 포함되어야 한다. 고장데이터 수집 항목 중 교정정비는 운행 중 발견된 고장으로 발생 시점을 정확히 알 수 있으나 예방정비는 점검활동 중 발견된 고장을 고장 시점을 정확히 기록하지 못하는 단점이 있다.

고장정보에는 해당 장치(부품), 고장발생 시점, 고장원인, 고장영향 등 활용가능한 모든 자료가 포함되어야 한다. 고장데이터 수집 항목 중 교정정비는 운행 중 발견된 고장으로 발생 시점을 정확히 알 수 있으나 예방정비는 점검활동 중 발견된 고장을 고장 시점을 정확히 기록하지 못하는 단점이 있다.

## 2.2 필드데이터 활용

대부분의 철도 운영기관에서는 차량 운행정보, 고장



Fig. 1. Reliability analysis procedure.

정보, 유지보수정보 등 필요한 데이터를 수집, 관리하기 위해 관리체계를 구축하여 운영하고 있다. Fig. 1은 데이터 관리 및 신뢰성 업무절차를 나타낸다.

운영 중 발생하는 모든 고장에 관한 데이터는 통합 정보시스템을 이용하여 등록된다. 고장 데이터는 교정 정비 고장과 예방정비 고장을 모두 포함하며, 고장 분석 및 개선 활동에 충분히 활용될 수 있도록 고장발생, 고장분석, 고장조치 내역 등을 모두 포함한다.

신뢰성분석시스템에 연계된 고장조치실적 정보를 기준으로 신뢰성, 가용성, 정비성 지표를 모니터링 하고 신뢰성 취약장치 도출 관리, 점검주기 기준(항목) 변경 등 정비활동에 적용한다. 이처럼 필드데이터는 신뢰성 지표 분석, 고장 원인분석, 수명주기 비용분석 등 유지관리 업무에 효과적으로 활용된다.

## 3. 최적 교체주기 결정 절차 및 모형

### 3.1 최적 교체주기 결정 절차

본 논문에서는 철도차량의 유효서비스 연수 동안 비용을 고려한 구성품의 최적 교체주기를 결정하는 절차를 다음과 같이 5단계로 제안하고자 한다.

Fig. 2는 결정 업무절차를 나타낸다.

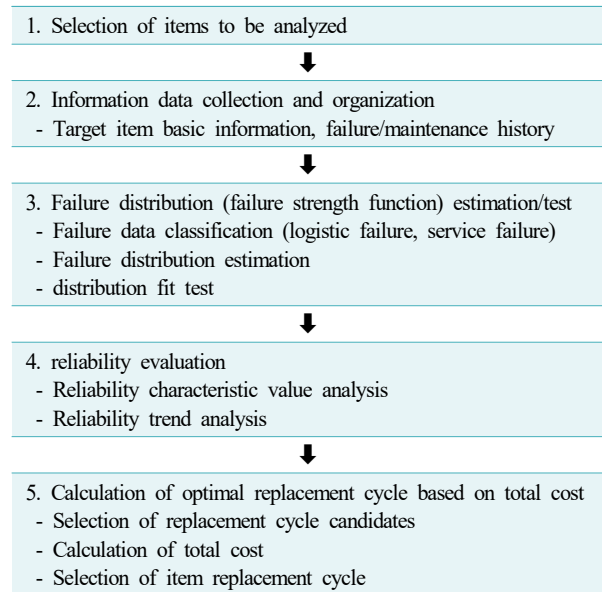


Fig. 2. Procedure for determining the optimal replacement cycle.

① 분석 대상 아이템 선정

첫 번째 단계는 분석 대상 아이템 선정 단계로 아이템 고장이 운영 및 유지보수 측면에서 악영향 있고, 노화에 따라 단위시간당 고장빈도가 증가하는 아이템으로 교체에 의해 신뢰성을 제고할 수 있다. 이러한 특징을 가지는 아이템을 분석 대상으로 선정한다.

② 정보 데이터 수집 및 정리

두 번째 단계는 분석에 필요한 정보 데이터를 수집하고 정리한다. 분석에 필수적인 아이템 정보는 수리 가능 여부, 수리비용, 부품 단가, 교정(예방)정비에 투입된 인원 및 시간, 사용된 물품 수량 등이다. 또한 고장 시 누적 운행 시간 및 거리, 고장 범주(서비스고장 등), 고장 조치, 고장 영향(운행 지연 등) 정보를 수집한다.

③ 고장분포(고장강도함수) 추정 및 검증

세 번째 단계에서는 고장데이터 분류에 따른 고장분포를 추정하고 적합성을 검증한다. 고장 구분은 운행지연을 유발하는 서비스 고장과 로지스틱 고장으로 구분하여 고장분포를 추정하여 예상되는 고장 횟수를 산출한다. 최근 추세 반영이 안되는 경우 분석 대상 데이터 기간 범위를 조정할 수 있다.

④ 신뢰성 평가

네 번째 신뢰성 평가 단계는 교체주기 선정의 검증 과정에 유용한 정보로 활용될 수 있다. 아이템의 평균 고장간격, 수명 표준편차와 B수명(B5, B10, B50)등의 대푯값들과 운행 시간(또는 거리)이 지남에 따른 고장률 변동 등 유효한 신뢰성 정보가 될 수 있다.

⑤ 총 비용 기반 최적 교체주기 산정

마지막 단계에서는 차량의 수명을 고려하여 아이템 교체주기 후보를 선정하고 후보 각각에 대해 총 비용을 산출한다. 총 비용은 교체주기에 따라 변동되는 비용으로 교정정비 비용, 예방정비 비용, 서비스고장 손실비용, 재고 비용의 합으로 구성된다.

각 비용요소의 모형은 3.2장에서 기술하며, 총 비용이 최소가 되는 교체주기를 최적 교체주기로 산정한다.

3.2 최적 교체주기 결정 모형

본 논문에서는 교정정비 비용, 예방정비 비용, 서비스 손실비용, 재고비용을 고려한 경제적 관점에서 총 비용을 최소화 하는 교체주기를 최적 교체주기로 정하는 평가 모델을 적용하며 비용 산출은 다음과 같다.

① 교정정비 비용

운행 중 발생한 고장 처리비용인 교정 정비비용은 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{교정정비 비용} &= \text{예상 고장횟수} \times \text{회당 고장 수리 비용} \\ &= H'(T^*) \cdot (C'_{mh} \cdot MT_{cm} + C'_{ma}) \cdot \frac{TL}{T^*} \end{aligned}$$

위에서  $H'(T^*) = \int_0^{T^*} h'(t)dt$ 이며,  $T^*$ 기간 동안 예상되는 로지스틱고장 횟수 이다.

예상 고장횟수는 고장 이력 데이터로부터 고장시간 분포의 형상모수와 척도모수를 추정하여 구한다.

$(C'_{mh} \cdot MT_{cm} + C'_{ma})$ 은 1회 고장수리당 발생하는 비용이다.  $\frac{TL}{T^*}$ 은 철도차량 유효수명 기간이며, 철도차량 유효 서비스 연수를 각 교체주기 후보 값으로 나누어 산출한다. 회당 고장 수리 비용은 소요되는 비용, 시간 및 재료비로 계산된다.

② 예방정비 비용

고장을 사전에 예방하고자 시행하는 예방적 교체비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{예방정비 비용} &= \text{예방 교체 횟수} \times \text{회당 예방적 교체비용} \\ &= \left\{ \left( \frac{TL}{T^*} \right) - 1 \right\} \cdot (C''_{mh} \cdot MT_{pm} + C''_{ma}) \end{aligned}$$

$(C''_{mh} \cdot MT_{pm} + C''_{ma})$ 은 고장을 사전에 방지하기 위한 예방적 교체비용으로 소요되는 비용, 시간 및 재료비로 계산된다.

③ 서비스고장 손실비용

철도차량의 운행지연을 유발하는 서비스고장 손실비용은 이용승객에 대한 시간당 노동생산성으로 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{서비스고장 손실비용} &= \text{예상 지연 횟수} \times \text{서비스지연 가치} \\ &= \text{손실비용} \times \text{평균 지연시간} \\ &= H''(T^*) \cdot C'''_{pe} \cdot T_d \cdot \frac{TL}{T^*} \end{aligned}$$

위에서  $H''(T^*) = \int_0^{T^*} h''(t)dt$ 이며,  $T^*$ 기간 동안 발생하는 서비스고장 횟수이며,  $C'''_{pe}$ 은 서비스지연에 따른 단위시간당 손실비용,  $T_d$ 는 서비스고장 발생 시 평균

서비스 지연시간이다.

예상 지연 횟수는 서비스고장 데이터로부터 고장 분포의 형상모수 및 척도모수를 추정하여 산출한다.

서비스지연에 따른 시간 가치 손실비용은 시간당 손실비용, 전동차 평균 이용인원을 적용하여 구한다.

④ 재고비용

재고비용은 교정정비, 예방정비에 필요한 아이템 수량과 부품 단가로 산출한다.

$$\begin{aligned} \text{재고비용} &= \text{재고 소요 수량} \times \text{부품 단가} \\ &= H'''(T^*) \cdot \frac{TL}{T^*} \cdot P \end{aligned}$$

$$\text{위에서 } H'''(T^*) = \max \left\{ \int_0^{MT_{cm}'} h'(t) dt, \int_{T^* - MT_{cm}'}^{T^*} h'(t) dt \right\}$$

이며,  $T^*$ 기간 동안 필요한 재고 수량 값이다.

위에서 열거한 비용요소를 종합하여 유효서비스 연수 동안 총 비용이 최소가 되는 교체주기를 선정하기 위한 산출식은 아래와 같다.

$$\min_T \left[ \begin{aligned} &H'(T^*) \cdot (C'_{mh} \cdot MT_{cm} + C'_{ma}) \cdot \frac{TL}{T^*} \\ &+ \left\{ \left( \frac{TL}{T^*} \right) - 1 \right\} \cdot (C''_{mh} \cdot MT_{pm} + C''_{ma}) \\ &+ H''(T^*) \cdot C'''_{pc} \cdot T_d \cdot \frac{TL}{T^*} \\ &+ C'''_{sp} \end{aligned} \right]$$

< 기호 >

- $H'(t)$  : 로지스틱 고장의 고장강도함수
- $H''(t)$  : 서비스 고장의 고장강도함수
- $MT_{cm}'$  : 아이템의 1회 교정정비에 소요되는 시간
- $MT_{pm}'$  : 아이템의 1회 예방정비에 소요되는 시간
- $C'_{mh}$  : 아이템의 1회 교정정비에 소요되는 시간당 비용
- $C'_{ma}$  : 아이템의 1회 교정정비에 소요되는 재료비
- $C''_{mh}$  : 아이템의 1회 예방정비에 소요되는 시간당 비용
- $C''_{ma}$  : 아이템의 1회 예방정비에 소요되는 재료비
- $C'''_{pc}$  : 아이템의 1회 고장 발생에 따른 시간당 손실 비용
- $T_d$  : 서비스고장 발생 시 평균서비스지연시간
- $TL$  : 철도차량 유효 서비스 연수
- $T^*$  : 최적 경제적 교체 주기
- $C'''_{sp}$  : 유효 서비스 연수 동안 아이템의 고장정비를 위한 예비품 구입 비용

< 가정 >

- 철도차량의 수명(TL, Train Life)은 25년으로 정해져 있으며, 수명이 도래하면 폐기되고 그 구성품도 폐기된다. 이때 폐기 비용은 없다.
- 구성품이 사용수명에 이르면 동일한 신제품으로 교체된다.
- 해당 기간 동안의 인건비, 재료비, 구매비용, 손실비용 등 일반적인 비용상승 요인의 고려하지 않는다.
- 아이템은 수리가 가능하며, 비동질포아송과정(NHPP: Non Homogeneous Poisson Process)을 따른다.
- 아이템의 고장은 멱함수과정(Power-law Process)을 따른다.

$$h(t) = \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1}, t \geq 0$$

$t$ : 고장 시간,  $\beta$ : 형상 모수,  $\theta$ : 척도 모수

## 4. 사례 연구

### 4.1 분석 대상장치 개요

분석 대상장치는 A사 전동차의 최근 6년간 고장발생 내역 중 가장 많은 건수를 차지한 차상신호장치로 하였으며(72%), 이중에서도 서비스고장 건수가 많은 위치확인 전송보드(CBK)를 대상장치로 하였다.

차상신호장치는 다음과 같은 기능을 수행한다<sup>17)</sup>.

- ① 주행거리계와 지상설비를 통한 열차위치 확인
- ② 열차 안전운행 구간을 정하고 비상 상황시에 비상제동제어, 지상신호 설비로부터 정보를 수신해 다음 정차 위치, 선행 열차 위치 계산
- ③ 전동차 출입문 개폐제어
- ④ 차상신호 시스템은 열차 동작, 열차 출발, 열차 식별, 출입문 개폐 지령, 출발 지령의 제어

이러한 기능을 수행하기 위한 차상신호 주요 구성장치는 다음과 같으며 Table 3은 차상신호장치의 LBS 체계를 나타낸다.

- ① 픽업코일 : 궤도로부터 연속정보를 수신
- ② 비컨안테나 : 차상 정보전송 장치로 궤도측 비컨안테나와 차상신호장치 간의 데이터 전송
- ③ 주행거리계 : 열차의 속도, 가속도 측정
- ④ 차상신호장치 큐비클 : 주행거리계, 비컨안테나, 픽업코일 등과 인터페이스하고 열차를 제어
- ⑤ 운전실속도표시기 : ATP, ATO 관련 항목 표시

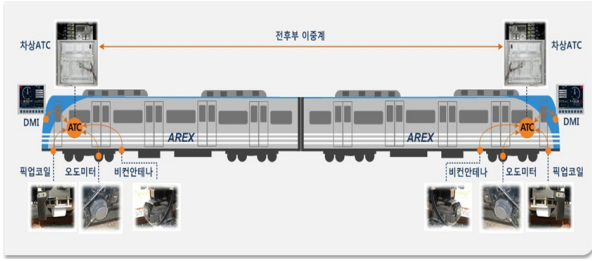


Fig. 3. Schematic of rolling stock signal system.

Table 3. LBS rolling stock signal devices

Level1	Level2	Level3	Level4
Onboard ATC device	Onboard ATC device (upper)	Cubicle	QN relay
			Fuse
			FAN Tray
			and others
		PCE rack	CBK board
			CRV board
			CSS board
			CKD board
		and others	
	RAC rack	REL board	
		CAR board	
		SWI board	
		and others	
	Cab device	Loud Speaker	
		PUSH button	
		DMI device	
	Onboard ATC device (lower)	Beacon antenna	Beacon antenna
			Damper
Cable & connector			
Odometer		Odometer	
		Sensor	
		Wing guide	
		Differential disc	
and others			
Pickup coil device		Pickup coil	
	Cable & connector		

분석대상 차량은 모두 26개 편성으로 2007년 3월부터 운영을 시작했다. 수집된 필드데이터 기간은 2016년 1월부터 2022년 7월(약 7년 7개월)까지이며 고장 이력 개수는 총 1,246개이다.

#### 4.2 위치확인 전송보드(CBK, Carte Tachymétrie et Localisation) 최적 교체주기 선정

차상신호장치 컴퓨터 랙에 설치되어있는 CBK 위치확인 전송보드는 차량 하부에 설치되어 있는 안테나와 차축

의 회전을 검지하는 회전속도계와의 인터페이스를 관리한다. 열차운행 중 비이컨 정보를 처리하고 열차 위치를 확인하며 회전속도계와 오차가 있을 시 이를 검지한다.

분석기간 동안 고장건수는 74건이며 모두 열차운행 중 발생한 고장(교정정비)이다. 이때 열차지연을 유발한 서비스고장 건은 58건으로 고장건 대부분이 열차지연을 일으켰다. 고장 건을 대상으로 멱함수(Power-law Process)로 적합시켜 분석한 결과 전체적으로 고장률은 증가하는 것으로 분석되었다.

로지스틱고장의 분포 모형은 Fig. 4와 같으며 형상모수는 1.77로 완만한 고장증가 추이를 보인다.

서비스고장의 분포 모형은 Fig. 5와 같으며 형상모수는 2.29로 전체 고장건수에 비해 고장 증가세가 급격하다. 이는 보드 노후화로 운행 13년~14년차에 운행지연 고장이 크게 증가했기 때문이다.

보드의 신뢰성 지표는 Table 4와 같으며, 평균고장간격 즉 평균수명은 57,663시간이다. 18,574시간이 지났을 때 전체 제품 중에서 10% 고장이 발생할 수 있음을 나타낸다.

Table 4. Shape and scale parameters of CBK board

Failure classification	Shape parameter ( $\beta$ )	Scale parameter ( $\theta$ )
Logistic failure	1.77	64,842.07
Service failure	2.29	85,288.07

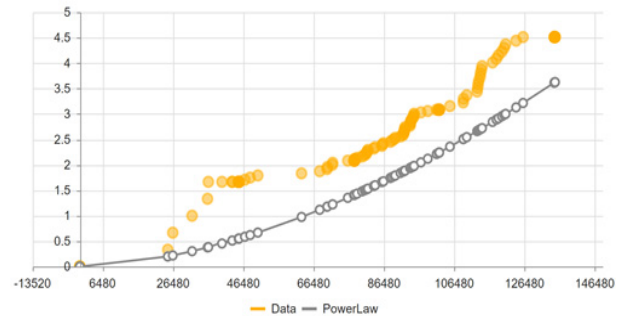


Fig. 4. Logistic failure distribution of CBK board.

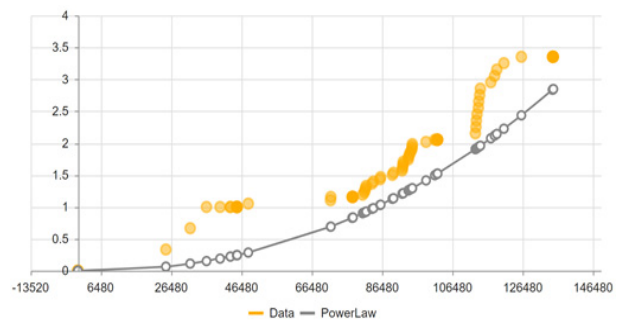


Fig. 5. Service failure distribution of CBK board.

Table 5. CBK board reliability indicators

Mean Time Between Failures (MTBF)	(Unit: Hour)			
	B5	B10	B20	B50
57,663	12,452	18,574	28,181	52,896

총 비용 기반 최적 교체주기를 선정하고자 교정정비 비용, 예방정비 비용, 서비스고장 손실비용, 재고비용은 다음과 같은 관련 정보를 이용하여 계산하였다.

Table 6. Corrective maintenance cost information

Material cost (Outsourcing repair cost)	Repair Man-hour (per piece)	Repair cost (per case)	Hourly wage
1,430 Thousand Won	4.02 Man Hour	1,547 Thousand Won	29 Thousand Won

Table 7. Preventive maintenance cost information

Number of installations per vehicle	Replacement time Man-hour (per piece)	Price	Preventive replacement cost(per case)
2	4.02 Man Hour	26,021 Thousand Won	52,277 Thousand Won

Table 8. Loss of Service Cost Calculation Information

Average delay time	Lost cost per hour	Average number of passengers per hour
0.083 Hour	37,561 Won (OECD, 2020) <sup>18)</sup>	13,733 people (A Company, 2019)

재고비용을 산출하기 위한 교체주기 당 재고수량은 수리시간(180일) 동안의 예상 고장횟수와 1교체주기 동안의 예상 고장횟수를 비교하여 그중 큰 값을 선택한다. 보드의 25년(전동차 기대수명) 동안 교정 정비비용, 예방적 교체비용, 서비스고장 손실비용, 재고비용

을 합한 총 비용은 Fig. 6과 Table 9와 같다.

교체주기 간격이 클수록 보수정비 비용과 고장손실 비용은 늘어나고 예방적 교체비용은 줄어든다. 재고

Table 9. Board optimal replacement cycle cost calculation result

Exchanging period	(Unit: Thousand Won)				
	Corrective maintenance cost	Prevention replacement cost	Service loss cost	Inventory cost	Total cost
1	11,271	12,546,609	58,089	156,130	12,772,099
2	19,171	6,273,305	142,245	130,108	6,564,829
3	26,156	4,182,203	240,191	130,108	4,578,658
4	32,607	3,136,652	348,325	130,108	3,647,692
5	38,687	2,091,102	464,727	130,108	2,724,624
6	44,488	2,091,102	588,172	130,108	2,853,870
7	50,066	1,568,326	717,799	104,086	2,440,277
8	55,460	1,568,326	852,966	104,086	2,580,838
9	<b>60,698</b>	<b>1,045,551</b>	<b>993,170</b>	<b>104,086</b>	<b>2,203,505</b>
10	65,802	1,045,551	1,138,006	104,086	2,353,445
11	70,787	1,045,551	1,287,142	104,086	2,507,566
12	75,668	1,045,551	1,440,294	104,086	2,665,599
13	80,454	522,775	1,597,223	104,086	2,304,538
14	85,155	522,775	1,757,721	104,086	2,469,737
15	<b>89,778</b>	<b>522,775</b>	<b>1,921,605</b>	<b>104,086</b>	<b>2,638,244</b>
16	94,329	522,775	2,088,713	104,086	2,809,903
17	98,815	522,775	2,258,901	104,086	2,984,577
18	103,239	522,775	2,432,039	104,086	3,162,139
19	107,606	522,775	2,608,011	104,086	3,342,478
20	111,920	522,775	2,786,710	104,086	3,525,491
21	116,183	522,775	2,968,038	104,086	3,711,082
22	120,400	522,775	3,151,906	104,086	3,899,167
23	124,571	522,775	3,338,233	104,086	4,089,665
24	128,701	522,775	3,526,941	78,065	4,256,482
25	132,790	0	3,674,591	78,065	3,885,446

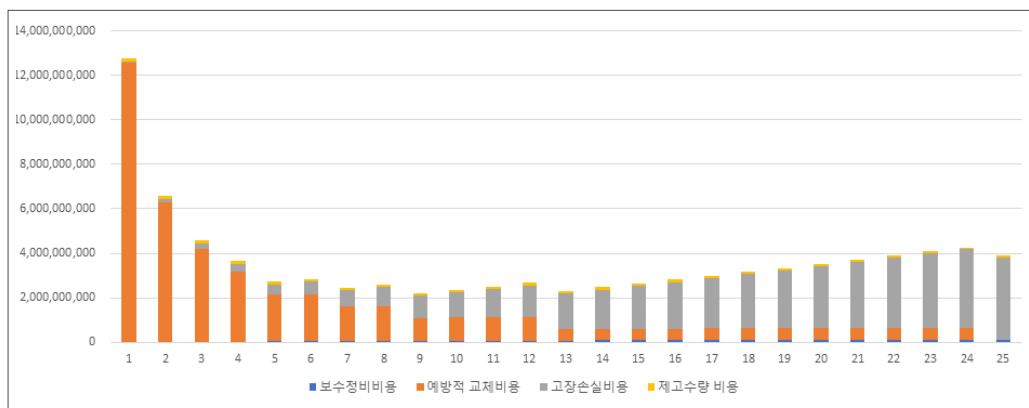


Fig. 6. Analysis of cost calculation by year.

비용은 시간에 따른 고장의 증가정도(형상모수)의 영향을 받는다.

## 5. 결론

본 논문에서는 철도차량 구성품에 대한 경제적 관점의 최적 교체주기를 결정하는 4가지 비용요소와 5단계의 교체주기 결정 절차를 제안하였다.

교체주기에 영향을 주는 비용 요소는 교정정비 비용, 예방정비 비용, 서비스고장 손실비용, 재고비용이며 5단계의 결정절차는 다음과 같다.

- ① 분석 대상 아이템 선정
- ② 정보데이터 수집
- ③ 고장감도 함수 검/추정
- ④ 신뢰성 평가
- ⑤ 총 비용기반 교체주기 선정

유효서비스 연수 동안 최적 교체주기는 총비용이 최소가 되는 시점이다. 이를 확인하기 위해 전동차 차상 신호장치(위치확인 전송보드)의 필드데이터를 적용하여 최적 교체주기를 산정한 결과 기존에 설정된 내구연한(15년) 보다 짧은 9년에 교체하는 것이 경제적으로 효과가 제일 높은 것으로 분석되었다.

**Acknowledgement:** This research was supported by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport's national research and development project [NTIS 1615012817], 2022.

## References

- 1) Carbon Emissions Transportation Demand Management Policy, pp. 11-12, Seoul Institute, 2017.
- 2) Railroad Safety Annual Report, Korea Transportation Safety Authority, pp. 49-50, 2021.
- 3) Railroad Safety Monthly Report, Korea Transportation Safety Authority, pp. 19-20, 2022.
- 4) Railroad Safety Annual Report, Korea Transportation Safety Authority, pp. 56-57, 2021.
- 5) Louis-Marie "Reducing rolling stock maintenance cost", SNCF, pp. 1-2, 2012.
- 6) D. K. Kim and B. N. Park, "A Study to Determine Optimal Inspection Intervals using a Multi-criteria Decision Mode", Journal of Applied Reliability, Vol. 21, No. 3, pp. 282-293, 2021.
- 7) R. J. Ferreira and C. A. Cavalcante, "A Multi-criteria Decision Model to Determine Inspection Intervals of Condition Monitoring based on Delay Time Analysis", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 94, No. 5, pp. 905-912, 2009.
- 8) F. Zhang and Y. Ma, "Optimal Maintenance Policy Considering Imperfect Repairs and Non-constant Probabilities of Inspection Errors," Reliability Engineering & System Safety, Vol. 193, pp. 106615, 2020.
- 9) J. I. Lee, "A Study on Optimization of Preventive Maintenance for Urban Transit Vehicle using Genetic Algorithm", Dept. of Mechanical Engineering Graduate School Sungkyunkwan University, 2011
- 10) K. M. Jung, "Optimal Replacement Policy after Extended Warranty for a System with Minimal Repair Warranty", Journal of Applied Reliability, Vol. 13, No. 2. pp. 77-86, 2013.
- 11) K. J. Park and J. D. Chung, "A Study on the Maintenance Period Optimization for the Urban Tansit Vehicles" Journal of Korean Society for Railway, pp. 22-26, 2011.
- 12) J. H. Park and B. N. Park, "A Study on Two-phase Condition-based Maintenance Scheduling for Rolling Stocks with Left-truncated and Right-censored Data", Journal of Applied Reliability, Vol. 22, No. 2, pp. 118-131, 2022.
- 13) D. K. Lee and H. S. Lee, "A Study on the Life Cycle Establishment and Improvement of Main Parts for Electric Locomotive", J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 2, pp. 1-9, 2021
- 14) B. M. Jang and J. W. Lee, "Study on the Replacement Period Decision for Clearance Detectors in Railway Turnouts Using Bathtub Curve", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 21, No. 11, pp. 1094-1103, 2018.
- 15) Y. W. Seo and D. H. Choi, "Study on Usability Analysis using Field Data Analysis Result", Journal of Applied Reliability, Vol. 19, No. 1, pp. 55-67, 2019.
- 16) M. S. Kim and G. T. Oh, "Field Data Analysis for an Industrial Compressor", Journal of the Korean Institute of Plant Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 71-79, 2016.
- 17) H. J. Park, "Signal System theory and System", Airport Railroad Co, pp. 161-162, 2003.
- 18) OECD, <https://stats.oecd.org>, Level of GDP per capita and productivity, 2021.