# 철도차량 수명유지비용 계산을 위한 유지보수 비용모델 연구

# A Study of the Maintenance cost model for the Life Cycle Cost Calculation of the Railroad Vehicle

김재훈†* 전현규*, 박준서*

**Kim, Jaehoon Jun, Hyun-kyu Park, Jun-seo**

**ABSTRACT**

Life cycle costing is one of the most effective approaches for the cost analysis of long-term life products, like as railroad vehicle. Life cycle costing includes the cost of concept design, development, manufacture, operating, maintenance and disposal. Especially, life cycle costing in the railroad industry has been focused on the maintenance cost. In this paper, we investigated the standard, guide and maintenance information of railroad vehicle. For this purpose, we suggested the cost model of railroad vehicle maintenance information. We also performed maintenance cost analysis on the some sub-system of railroad vehicle for the case study.

## 1. 서 론

수명주기 비용(Life Cycle Cost, 이후 LCC)은 해당 시스템의 개념설계 및 개발, 제작, 운영, 유지보수 및 폐기 단계에 이르기까지 소요되는 모든 비용을 포괄한다. LCC의 개념은 1970년대 미국 국방부에서부터 적용되기 시작하였으며, 이 후 발전설비 및 화학 플랜트 등 장치산업 등으로 그 대상 영역이 확대되었고, 1990년대에 들어서는 항공시스템, 철도시스템 등 다양한 분야가 융합된 대형 시스템 산업으로 확대 적용되고 있다.

특히 철도시스템의 경우에는 구성 시스템이 복잡할 뿐만 아니라 25년 이상 오랜 시간 사용으로 인해 유지보수 활동이 많으며 이에 소요되는 비용 또한 많다. 따라서 철도시스템의 LCC 계산에 있어 그 핵심은 얼마나 정확하게 유지보수 비용을 계산하느냐가 관건이라 해도 과언이 아니다. 따라서 본 연구에서는 철도시스템 LCC 모델링 개발의 일환으로 철도차량의 정확한 유지보수 비용을 계산하기 위하여, 규격과 가이드 등 관련 자료 분석을 통하여 철도차량에 적합한 예방정비와 보수정비 관련 유지보수 비용계산 모델 연구하였으며, 철도차량 주요 부품을 대상으로 유지보수 비용 계산 및 민감도 분석을 수행하였다.

### 2.1 철도차량 수명유지보수 비용모델을 위한 유지보수정보 템플릿 제안

철도차량 수명유지보수 비용모델을 위하여 본 연구에서는 앞선 논문을 통해 EN50126-1 규격과 UNIFE LCC 모델 가이드 자료 분석결과를 통하여 철도차량에 적합한 예방정비와 보수정비정보 템플릿을 제안하였다[1]. 본 연구에서 제안하는 철도시스템 LCC 모델을 위한 유지보수정보 DB 템플릿은 그 기본이 유지보수에 대한 기대비용 계산에 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 템플릿은 UNIFE LCC 유지정보 템플릿과 같이 유지보수 기대비용을 계산할 수 있는 항목을 기본으로 포함하며, 추가로 철도시스템 RAMS 관점에서 EN 50126-1

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원
E-mail : lapin95@krri.re.kr
TEL : (031)460-5248 FAX : (031)460-5279
* 정회원, 한국철도기술연구원

표 1 Corrective maintenance template contents

| | | |
|---|---|---|
| ID.No | | SRU 분류 코드 |
| Item Name | | SRU 이름 |
| Quantity | | 열차당 LRU 수 |
| Failure mode | | FMEA 통한 LRU의 고장모드 |
| Maintenance task | | 보수정비 업무 설명 |
| Spare Parts | | 작업에 필요한 소비재 및 예비품 |
| Failure rate(in failure/Mh) | | LRU 고장모드의 고장률(백만 시간당 고장 횟수) |
| Repairable (Y/N) | | 수리 가능 여부 |
| Spare Part cost | | 예비품 비용 |
| 1st, 2nd line Material cost | | 재료비 |
| 3rd rep Material cost | | |
| 1st, 2nd line | Personnel | 예방정비 인원 수 × 유지보수 작업 시간 |
| | Man hour | |
| 3rd rep | Personnel | |
| | Man hour | |
| Skill level | | 예방정비 작업자 기능 레벨 |
| Notes | | 기타 사항 및 주석 |

표 2 Preventive maintenance template contents

| | | |
|---|---|---|
| ID.No | | SRU 분류 코드 |
| Item Name | | SRU 이름 |
| Quantity | | 열차당 LRU 수 |
| Step No. | | 예방정비 업무 식별 번호 |
| Maintenance Action Codes | | 예방정비 업무 고유 코드 (IN, SV, RP, NDT, RM, OV) |
| Maintenance Task | | 예방정비 업무 설명 |
| Spare Parts | | 작업에 필요한 소비재 및 예비품 |
| Interval | | 예방정비 주기 및 단위 |
| Interval unit (km/d/m/y) | | |
| Spare Part Cost | | 예비품 비용 |
| 1st, 2nd line Material cost | | 재료비 |
| 3rd rep Material cost | | |
| 1st, 2nd line | Personnel | 예방정비 인원 수 × 유지보수 작업 시간 |
| | Man hour | |
| 3rd rep | Personnel | |
| | Man hour | |
| Skill level | | 예방정비 작업자 기능 레벨 |
| Notes | | 기타 사항 및 주석 |

과 같은 RAMS 고려 항목을 추가하였다. 본 연구에서 제안한 유지보수정보 DB 템플릿과 항목은 표1~2와 같다.

기본적으로 보수정비의 유지보수 단위는 UNIFE LCC 모델과 동일하게 라인 교체 가능 유닛인 LRU 단위가 아닌, 예비품 단위인 SRU 단위로 정하고 있다. 이것은 실제로 철도시스템 운영기관에서 유지보수 활동을 SRU 단위에서 수행하고 있기 때문이며, 만일 LRU 단위만을 고려할 경우 LRU 단위로 교체가 이루어진 이후 하위의 SRU 단위에서 수리 혹은 교체가 발생한 경우에 대해서는 계산이 불가능하다[2][3][4].

또한 유지보수 레벨 정의에 있어서도 제안된 유지보수정보 템플릿은 표 1~2와 같이 1차 line, 2차 depot, 3차 workshop(정비창) 등의 제3의 장소에서의 유지보수 활동으로 구분하였으며, 1차 line과 2차 depot를 하나로 묶어 동일한 유지보수 레벨로 정의하였으며, 정비창과 같은 제3의 장소는 독립적인 유지보수 레벨로 정의하였다. 하지만 앞서 설명한 것과 같이 보수정비에 있어 고장모드는 RAMS 요구사항에 중대한 영향을 미치는 요소이기 때문에 보수정비 분석템플릿에 SRU의 “고장모드” 정보에 관련된 항목을 추가하여, 이를 고려하도록 하였다. 또한 “부가 물품” 항목을 추가하여 유지보수비용 계산에 필수적인 재료비 계산은 예비품 비용 외에 부가적으로 소비되는 물품들에 대한 비용을 포함하여 “재료비” 항목에 입력하도록 하였다. 이 경우 SRU의 “수리 가능여부” 항목을 두어 이를 고려하도록 하였다. (예, SRU 항목: 베어링, 부가 물품 항목: 윤활제, 예비품 비용 항목: 베어링 예비품 비용, 재료비 항목: 예비품 비용 또는 수리 가능한 SRU의 경우 수리비용 + 부가 물품 비용). 이외 보수정비 활동횟수와 관련해서는 SRU의 고장모드에 따른 “백만 시간당 고장률”을 이용도록 하였다. 기타 보수정비정보 템플릿의 항목은 표2와 같이 구성되어 있다. 예방정비정보 템플릿의 경우 앞서 설명한 보수정비정보 DB 템플릿과 기본적인 항목에서 유사하다. 하지만 예방정비는 주기적으로 유지보수 활동이 반복되기 때문에 예방정비정보 DB 템플릿에 예방정비 업무를 코드화하였으며 (코드 IN:Inspection, SV: Servicing, RP: Replacement/Replenishment of consumables, NDT: Non-Destructive Test, RM: Removal for overhaul/replacement, OV: Major parts′ renewal/replacement during overhaul), 예방정비 활동횟수와 관련하여 주기를 거리(km)와 시간(day/month/year)으로 구별하여 입력하도록 하였다. 하지만 철도시스

템 유지보수 총비용을 계산하기 위해서는 제안된 유지보수정보 DB 템플릿의 경우에도 UNIFE LCC 모델과 같이 추가로 열차 총 수량, 총 운행거리 및 시간, 년당 가동 시간 등 글로벌 데이터 항목은 별도로 정의되어야 한다.

### 2.2 철도차량 수명유지보수 비용모델을 위한 CBS 개발

본 연구에서는 앞서 설명한 철도차량에 적합한 예방정비와 보수정비정보 템플릿을 바탕으로 하여 이를 연계하여 사용할 수 있도록 CBS를 개발하였다. 먼저 예방정비비용 예측을 위한 CBS 개발을 위하여, 예방정비비는 예방정비활동을 위해 소요되는 비용으로 크게 식(1)과 같이 인건비 및 재료비로 구성하였다.

$$\text{총 예방정비비용} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(\text{인건비}_j + \text{재료비}_j) \qquad \text{식(1)}$$

여기서

i= 예방정비가 필요한 SRU의 종류

j= 정비주기(일상, 월상, 2year, 4year 등)

인건비j=i번째 SRU의 j번째 정비주기시 소요되는 인건비

재료비j=i번째 SRU의 j번째 정비주기시 소요되는 재료비

여기에서 인건비는 예방정비활동을 위해 소요되는 순수 인건비로 정의된다. 즉, 물류보급을 위해 기다리는 시간 등은 고려하지 않으며, 예를 들어 예방정비 활동이 모듈의 분리, 분해, 청소, 조립 및 설치 작업으로 이루어져 있다고 하면 각각의 작업을 수행하는데 필요한 소요시간과 이를 위해 필요한 작업자의 기술력 및 기술력에 따른 인시비를 이용하여 식(2)와 같이 계산한다.

$$\text{인건비} = \sum_{i=1}^{n}\text{대상열차수}\times PM\text{횟수}_i\times\text{차량당 부품수}\times PM\text{당 소요시간}_i\times\text{인시비}_i \qquad \text{식(2)}$$

년간 예방정비활동의 횟수는 년간 상업운행거리와 예방유지보수주기(frequency)로부터 산출할 수 있으며 예방정비를 위해 소요되는 시간 및 인시비는 내부수행 또는 외주에 따라 기술, 소요시간 및 인시비가 달라질 수 있으므로 이를 구분함으로써 적절한 비용산출이 가능하도록 하였다. 한편, LCC 모델은 빈도계산시 예방정비주기를 각각 독립적 사건으로 간주하므로 예방정비 주기가 겹치는 사건이 발생할 수 있다. 예를 들면 3M과 3Y의 경우 3Y째에 이르면 3M도 수행하고 3Y도 수행하는 것으로 계산할 수 있으므로 상위검수를 수행하면 하위 검수도 수행한 것으로 모델링 한다. 즉 6년 검수를 수행했으면 일상검수, 3개월 검수, 6개월 검수 및 3년 검수를 수행한 것으로 간주하며, 3년 검수를 수행하면 일상검수, 3개월 검수 및 6개월 검수를 수행한 것으로 간주한다. 예방정비활동을 위한 재료비는 크게 수명주기가 도래하여 교환되는 부품의 부품비와 청소, 그리스 도포, 윤활, 분해 및 점검 등에 필요한 접착제, 나사, 볼트 등의 부대비로 구성된다. 부품비는 교환이 일어나는 마지막 단위의 부품비용으로 계산한다. 이 경우 부품비는 교환을 위한 순수 부품 비용이며, 이러한 작업을 수행하기 위한 일련의 비용은 인건비로 보충된다. 일반적으로 부대비용은 예방정비활동의 종류 및 부품의 상태에 따라 달라지므로 매번 정확한 비용을 산출하기는 어렵다. 따라서 비용산출이 용이할 경우에는 직접 비용을 입력하고 비용산출이 용이하지 않을 경우에는 부품 값의 일정한 비율을 간접적으로 계상한다.

$$재료비 = \sum_{i=1}^{n} 대상열차수 \times PM횟수_i \times 차량당\ 부품수 \times (예비품및기타재료비)_i \quad 식(3)$$

또한 보수정비비용 예측을 위한 CBS 개발을 위하여, 보수정비비용도 보수정비활동을 위해 소요되는 인건비 및 재료비로 구성하였다. 보수정비비용은 고장이 발생하였을 때 파급되는 손실 및 사회적비용 등은 비용산출시 고려하지 않았으며 단지 고장을 수리하기 위해 필요한 인건비 및 재료비로 한정하였다. 또한 실제고장의 발생은 불규칙적으로 발생하나 모델의 단순화를 위하여 고장율을 토대로 일정한 주기마다 고장이 발생한다고 가정하였으며 총 수명주기 동안 발생할 것이라 예측되는 모든 고장비용을 계산하여 이를 수명주기로 나누어 년간 발생하는 보수비용을 계산하였다.

$$보수정비비 = \sum_{i=1}^{n} (인건비_i + 재료비_i) \quad 식(4)$$

보수정비를 위한 인건비는 년간 발생하는 총 보수발생횟수와 고장모드에 따른 수리시간 및 인시비로 계산할 수 있다. 고장발생횟수는 고장율(횟수/백만km)과 년간 운행거리로부터 산출할 수 있으며, 수리시간은 열차복구를 위한 순수정비시간과 고장난 부품의 수리를 위해 필요한 부품수리시간의 합으로 계산한다. 고장율이 년간운행거리보다 긴 부품이 있으므로 년간 고장발생 횟수를 산출할 때에는 총 수명주기 기간중 발생할 수 있는 고장횟수를 계산하여 이를 수명주기로 나눔으로써 년간 발생할 수 있는 고장횟수를 산출한다.

$$인건비_i = 총열차수 \times 고장율_i \times (교체정비시간_i + 수리정비시간_i) \times 인시비 \times 가동시간_i \times 수명주기 \quad 식(5)$$

보수정비에 소요되는 재료비는 고장의 심각도에 따라 예비품 비용 및 기타 부대비용이 다르므로 이를 고려하여 산출하도록 하였다. 즉 고장의 수리가 부품의 교환을 동반하지 않고 검사 등으로 끝나면 재료비 발생 없이 인건비만 지출되며, 고장의 수리가 부품의 일부 교환 혹은 수리를 동반하면 예비품 비용 없이 기타 부대비용 지출을 계산한다. 또한 고장의 수리가 부품의 전체 교환으로 이루어지면 재료비는 예비품 비용과 이에 따른 기타 부대비용 지출을 모두 포함하며 계산한다.

$$재료비i = 총대상열차수 \times 고장율_i \times 환율 \times 교체비율_i \times (예비품비및기타부대비용)_i \times 가동시간_i \times 수명주기 \quad 식(6)$$

### 2.3 철도차량 주요 부품을 대상으로한 유지보수 비용 계산 및 민감도 분석

본 연구에서는 지금까지 철도차량 수명유지보수 비용모델을 위해 제안한 CBS 및 유지보수정보 템플릿 결과를 바탕으로 차량 주요장치에 대하여 LCC 예측 및 분석을 수행하였다. LCC 예측 및 분석을 위한 대상 시스템으로는 전동차 주요장치 중 보조전원장치, 열차정보관리장치(TIMS)를 대상으로 하여 LCC 예측 및 분석을 수행하였다. 이 때 전동차는 10량 1편성 차량을 기준으로 LCC 예측 및 분석에 필요한 주요장치의 수량을 산정하여 수행하였으며, 철도차량 LCC 비용의 핵심인 유지보수 비용을 중심으로 예측 및 분석을 수행하였다.

먼저 전동차 10량 1편성에 대한 총 운행거리 및 시간, 년당 가동 시간 등 필수적인 글로벌 데이터 항목을 조사하여 표 3에 나타내었다. 글로벌 데이터의 각 해당 값들은 현재 운행되고 있는 국내 전동차의 데이터 조사를 바탕으로 하여 입력하였다. 또한 보수 및 예방정비 항목에 관해서는 해당 장치의 유지보수 규정 및 현장과 제작사 조사를 통하여 수집하였다.

표 3 글로벌 데이터 항목 및 조사 내용

| | |
|---|---|
| Manhour cost | 9,375원 (= 월평균 1,500,000원 / 근무일 수 20일 / 8시간 근무) |
| Number of trains | 10량 1편성 |
| Operation distance | 130,000 km/y (≃ 400,000 km / 3년)<br>국내 전동차 운영사 유지보수 스케줄 참조 |
| Life Cycle Length | 25 년 (내구연한) |
| Powered time per year | 5,200 시간 (= 130,000 km / 전동차 표정속도 25km/h) |

먼저 유지보수비용 예측을 위한 DB 구조 결과 따라 제안된 유지보수 템플릿을 이용하여 보조전원장치에 대하여 조사된 내용을 각 항목에 맞춰 입력하였다. 이때 본 연구에서는 앞서 설명한 것과 같이 LRU가 아닌 SRU 단위로 유지보수비용 분석 및 계산을 수행하였다. 보조전원장치의 각 하위 모든 48개 SRU에 대하여 각 항목을 입력하여 보조전원장치의 SRU 유지보수비용을 계산하였다.

이렇게 계산된 10량1편성 전동차 보조전원장치의 25년 유지보수비용 예측 결과는 표 4와 같다. 계산결과 보조전원장치에 대한 예방정비 비용은 약 6천2백만 원으로 보수정비 비용 약2백3십만 원과 비교하여 27배 많은 것을 알 수 있으며, 보조전원장치에 관한 유지보수비용의 대부분은 예방정비 수행에 발생하는 것으로 예측되었다. 또한 지출된 유지보수비용의 비목 분포에 있어서 예방정비와 보수정비가 서로 다른 것을 알 수 있다. 예방정비의 경우에는 실제 부품의 예방 교환 및 수리의 재료비보다는 정규적인 예방점검 활동에 따른 인건비 지출이 훨씬 많은 것으로 예측 되었다. 하지만 보수정비의 경우에는 실제 고장이 있는 부품에 대해서만 교환 및 수리가 수행되기 때문에 이를 보수하는데 걸리는 작업시간에 따른 인건비 보다는 교환 및 수리되는 부품의 재료비용이 더 많이 드는 것으로 예측되었다.

표 4 보조전원장치 유지보수비용 예측치 (25년)

| Cost | CM | PM |
|---|---|---|
| Man hour Cost | 96,327 Won | 60,953,063 Won |
| Material Cost | 2,198,280 Won | 1,323,000 Won |
| Total Cost | 2,294,608 Won | 62,276,063 Won |

또한 각 년도별 보수정비와 예방정비비용 변화를 예측한 결과, 그림 1과 같이 보조전원장치의 보수정비는 시간 지남에 따라 고장율이 변하지 않기 때문에 보수정비의 인건비와 재료비는 일정한 것으로 예측되었다. 하지만 그림 2와 같이 보조전원장치의 예방정비 항목 및 스케줄에 따라 예방정비의 인건비는 3년을 주기, 재료비의 경우에는 부품 교환에 따라 10년을 주기로 증감을 반복하며, 이에 따라 예방정비비용 또한 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 철도차량 운영사의 경우에는 이러한 결과를 고려한다면, 보다 효율적인 예산 및 인력 운영 계획을 수립할 수 있을 것이라 판단된다.

그림 1 보조전원장치 각 년도별 CM비용

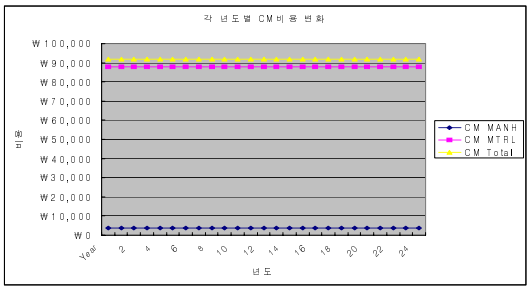
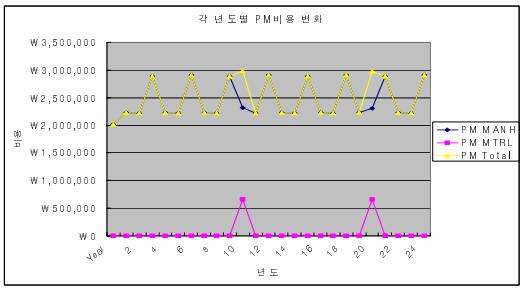



그림 2 보조전원장치 각 년도별 PM비용




본 연구에서는 보조전원장치 이외에 전동차의 주요장치인 열차정보관리장치(Train Information & Monitoring System, 이하 TIMS)를 대상으로 LCC 예측 및 분석을 수행하였다. 일반적으로 TIMS는 중앙유닛(Centeral Unit)과 로컬유닛(Local Unit) 그리고 디스플레이 유닛(Display Unit)과 디스플레이 컨트롤러(Display Controller)의 4개 SRU로 구성된다.

표 5 TIMS 유지보수비용 예측치 (25년)

| Cost | CM | PM |
|---|---|---|
| Man hour Cost | 8,852 Won | 787,500 Won |
| Material Cost | 41,556 Won | 0 Won |
| Total Cost | 50,408 Won | 787,500 Won |

이렇게 입력된 정보를 바탕으로 계산된 전동차 TIMS의 25년 유지보수비용은 표 5와 같이 예측되었다. 예측결과 TIMS의 경우에도 유지보수 비용의 지출은 예방정비보다는 보수정비가 더 많은 것으로 나타났다. 하지만 TIMS의 경우에는 보조전원장치의 유지보수비용 예측치와 비교하여 상당히 작은 비용이 지출되는 것으로 예측되었다. TIMS 보수정비의 경우에는 보조전원장치와 달이 SRU 개수도 4개로 적을 뿐만 아니라 보수정비 업무가 1 & 2차 line이 아닌 3차의 Component shop에서 주로 이루어지며, 이때의 평균 재료비는 105,963원로 보조전원장치의 평균 재료비 395,159원보다 작기 때문이다. (참고로 TIMS의 전체 평균 고장률은 5.93E-06 MTBF로 보조전원장치 SRU의 평균 고장률 2.16E-06 MTBF 보다 높다) 예방정비에 있어서는 SRU 개수도 적을 뿐만 아니라 예방정비 종류 및 간격이 각 SRU에 대하여 매1년마다 수행하는 Visual Inspection만을 요구하기 때문에 예방정비에 따른 인건비 지출이 적으며, 예방정비 재료비의 경우에는 예방 교환 및 서비스 등 재료비가 소요되는 예방정비업무가 없기 때문에 재료비 발생이 없는 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 그림 3~4의 각 년도별 보수 및 예방정비 변화 그래프를 통해 더욱 잘 나타난다. 먼저 보수정비의 경우에는 보조전원장치와 같이 고장율이 일정하기 때문에 그림 3과 같이 보수정비의 인건비와 재료비가 매년 일정한 것으로 예측되었다. 하지만, 예방정비의 경우에는 보조전원장치의 년도별 예방정비 증감과 다르게 매1년마다 수행하는 Visual Inspection에 따라 예방정비의 인건비가 2년차부터 일정하게 지출되며, 재료비는 발생하지 않는 것으로 계산되었다.

그림 3 TIMS 각 년도별 CM비용

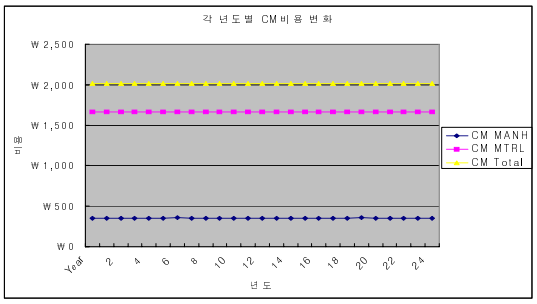
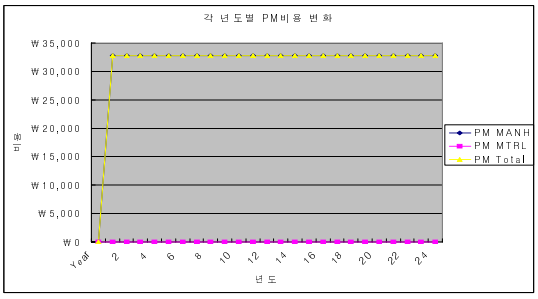



그림 4 TIMS 각 년도별 PM비용



참고문헌

[1] 김재훈, 전현규, 김종운, 박준서, 심여울, 2008, “철도차량 유지보수정보를 이용한 수명주기비용 계산 연구”, 한국철도학회논문집 심사중

[2] Railway applications-The specification and demonstration of RAMS -part3: Guide to the application of EN 50126-1 for rolling stock RAMS

[3] UNIFE "Guidelines for life cycle cost volume 1~4"

[4] 유원희 외, 2000, “전동차 중정비 검수업무의 외주화 방안에 관한 연구”, 철도청