

용인경전철 차량부품 정비 데이터 분석 및 상태기반 예지 유지보수 방안 연구

이경호¹⁾, 이중윤²⁾, 김영민^{2)*}

1) 용인경전철 차량팀, 2) 아주대학교 시스템공학과

A Study on the Maintenance Data Analysis of Vehicle Parts of Yongin Light Rail and Condition-Based Prediction Maintenance

Kyeong Ho Lee¹⁾, Joong Yoon Lee²⁾, Yeong Min Kim^{2)*}

1) *Yongin Light Rail Train Vehicle Team*, 2) *Ajou University Systems Engineering*

Abstract : The Yongin Light Rail train was manufactured by Bombardier Transportation in Canada in 2008 and is a privately invested railway line that has been operating in Yongin-si, Gyeonggi-do, since 2013. When the frequency of train failure increases due to aging, and there is a delay in the delivery period of imported parts used in the Bombardier manufactured trains, timely vehicle maintenance may not be performed due to lack of parts. To solve this problem, it is necessary to build a 'vehicle parts maintenance demand forecasting system' that analyzes the accurate and actual maintenance demand annual based on the condition of vehicle parts. The full scope of analysis in this paper analyzes failure data from various angles after opening of Yongin light rail vehicle to analyze failure patterns for each part and identify replacement cycles according to possible failures and consumption of parts. Based on this study, it is expected that Yongin Light Rail's maintenance system will change from the existing time-based replacement (TBM) concept to the condition-based maintenance (CBM) concept. It is expected that this study will improve the efficiency of the Yongin Light Rail maintenance system and increase vehicle availability. This paper is a fundamental for establishing of a system for predicting the replacement timing of vehicle parts for Yongin Light Rail. It reports the results of data analysis on some

Received: March 16, 2022 / **Revised:** June 22, 2022 / **Accepted:** June 24, 2022

* 교신저자 : Yeong Min Kim / Ajou University Systems Engineering / pretty0m@ajou.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

vehicle parts.

Key Words : Yongin Light Rail train. condition-based predictive maintenance method. vehicle parts maintenance. RAMS. data analysis

1. 서 론

용인경전철 차량은 2008년 캐나다 봄바디어 트랜스포테이션(Bombardier Transportation)사가 제작한 열차로, 2013년부터 경기도 용인시 내 영업운행을 시작한 민자 경전철 열차이며, 선형유도장치 방식을 통한 1량 1편성 무인 운전 열차이다.

최근 열차 노후화에 따른 열차 고장 빈도가 증가하고, 외산 열차에 사용되는 수입 부품의 납품 기간 장기화 문제가 발생하여, 주행 장치의 전원 케이블 열화 발생에 따른 교체 부품이 없어 적시에 차량 정비를 수행하지 못하는 경우가 주행 장치 부품에서 2건, 보조 전력 장치 부품에서 2건 등 발생하게 되었다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 차량부품 상태를 기반으로 한 정확하고 실제적인 연간 단위 정비 수요량을 분석할 수 있는 ‘차량부품 정비 수요량 예측 시스템’ 구축이 필요하다.

이미 코레일이나 서울교통공사와 같은 철도 운영기관에서는 신뢰성 중심 유지보수(Reliability Centered Maintenance, RCM) 적용하여 자체 프로그램을 개발 운영 중이다. 또한, 타 철도 기관에서는 신뢰성을 적용한 시스템 개발에 총력을 다하고 있으며, 이와 관련된 연구를 진행, 데이터를 축적하고 있다.[1] 또한, 수집된 데이터를 활용하여 시스템을 구분하고, 중요 항목 선정 후 고장 모드 영향 분석(Failure Mode and Effects Analysis : FMEA)을 통해 예방 정비에 대한 개선 방법을 도출하여 변경하는 등 유기적으로 철도 유지보수 방식에 효율을 높이고자 노력하고 있다.[2]

용인경전철 열차 시스템은 총 17개 하부시스템, 총 350개 이상의 말단 부품으로 구성되어 있다. 본 논문의 분석 범위는 용인경전철 차량이 영업 운행

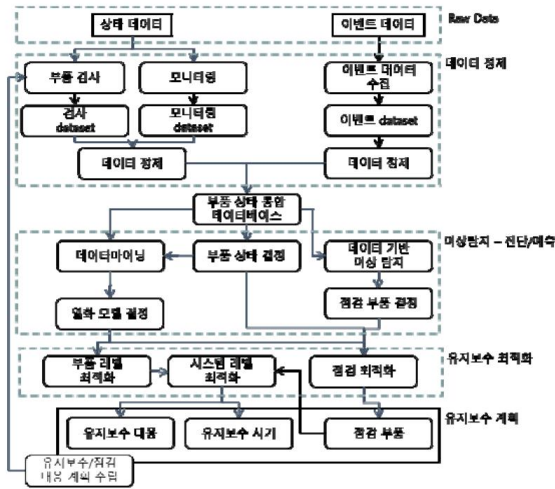
시작한 2013년부터 기록된 9,000 여개의 RAMS 고장 데이터이다.

이를 기반으로 날짜, 계절, 주행거리 등을 분류하여 부품별 고장 패턴을 시각화하였고, 이를 통해 향후 발생할 수 있는 고장 및 부품 소모에 따른 교체 주기를 파악하는 기초 자료로 활용한다.

용인경전철의 유지보수 시스템은 대부분 시간 기반 유지보수(Time Based Maintenance, TBM) 방식으로 예방정비를 하고 있으며[3], 대부분 철도차량의 경우 예방 정비는 부분적으로 상태기반 유지보수(Condition Based Maintenance, CBM)를 적용하고 있으나, 많은 부분 운행 TBM에 의존하고 있다.[4]

이러한 TBM 방식은 부품 수명 및 성능 저하를 고려하기보다는 주기적으로 부품을 교체하여 최상의 성능을 유지하는 데에 무게를 두어 시스템의 안전을 도모한다. 하지만 이러한 유지보수 방식은 유지보수 비용을 상승시키는 원인이 될 수 있으며, 부품 및 시스템의 노화 과정을 고려하지 못한다.

이에, 상태기반 유지보수를 수행하기 위해서는 그림 1의 상태기반 유지보수의 전체 프레임워크 도식과 같이 각 부품의 현재 상태를 나타내는 상태 데이터와 부품의 사고 및 유지보수 등을 기록한 데이터를 각각 정제하여 데이터베이스에 통합해야 한다. 이후 통합된 데이터를 바탕으로 현재 상태를 진단하고, 부품의 열화 모델을 결정하여 미래 상태를 예측, 도출하여 현재 취해야 할 유지보수 행동을 결정한다. 이어서 시스템 전체의 제약조건을 고려하여 전체 시스템에 대한 유지보수 방법을 최적화한다.[5]



[Figure 1] CBM Framework

유지보수 방법은 크게 사후 정비(Corrective Maintenance, CM)와 사전 정비(Proactive Maintenance)로 분류되고, 사전 정비는 다시 예방 정비(Preventive Maintenance, PM)와 예지 정비(Predictive Maintenance)로 분류된다. 예지 정비는 1단계 진단기반(Diagnostic) CBM에서 2단계 예지기반(Prognostic) CBM으로 발전되고 있다.[6]

이에, 고장 데이터를 분석하는 본 논문을 바탕으로 용인경전철 유지보수 시스템을 TBM 방식에서 1, 2단계의 CBM 방식으로 변경하고, CBM 기반인 예지 유지보수 전환을 통해 용인경전철 차량의 소모성 부품의 교체주기 및 소모량을 실제 국내 운용환경 기준으로 재설정하고자 한다.

더 나아가 수리 가능 및 수리 불가 소모성 자재 각 부품에 대한 수명 주기를 최대한 반영하여 용인경전철 열차 시스템에 최적화된 유지보수 모색이 필요함에 따라 향후 연구 과제에 대해 제시 한다.

본 논문은 용인경전철 유지보수 시스템의 효율성 개선과 예산에 대한 적절한 배정 및 차량 가용도 증가에 도움이 될 것으로 기대한다.

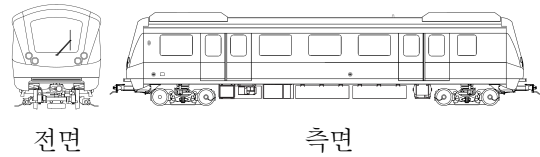
본 논문은 용인경전철 차량부품의 교체 시기 예측 시스템 구축을 위한 기초연구로 일부 차량부품에 대한 데이터 분석결과에 대한 보고이다.

2. 용인경전철 열차 시스템 개요

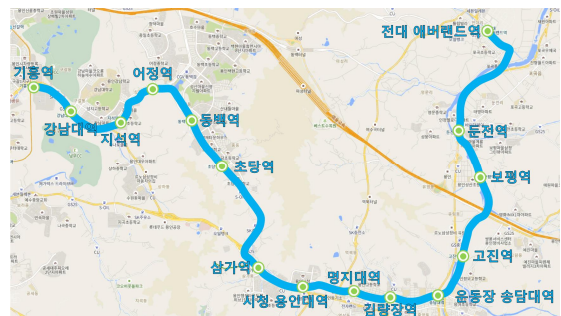
2.1 용인경전철 사업 소개

용인경전철은 2008년 제작되어 2013년부터 용인시 내 영업 운행을 시작한 무인 운전 시스템 민자 철도 운행 사업이다.

2.1.1 용인경전철 열차 도면 및 노선도



[Figure 2] Yongin Light Rail train Drawing



[Figure 3] Yongin Light Rail train Business route

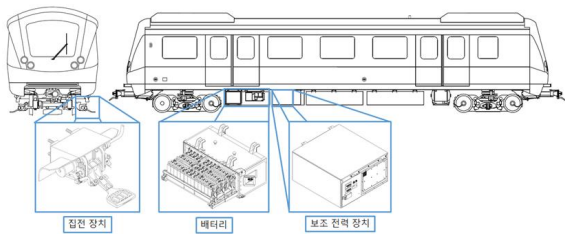
- 명칭 : 용인 에버라인
- 영업 연장 : 36.016km
- 표정 속도 : 36.28km/hr
- 수송 인원 : 133명/1량
- 운행 횟수 : 평일-584회, 주말-495회
- 수송 량 : 23천명/일, 161천명/주, 691천명/달
- 운전 방식 : 완전 자동 무인 운전
- 추진 방식 : 선형유도전동기(LIM)
- 차륜 방식 : 철제차륜 (D = 660mm)
- 제작사 : 캐나다 봄바디어 트랜스포테이숀, 30량 제작(101호~130호)
- 편성 : 1량 1편성

2.1.2 용인경전철 열차 17개 주요 시스템

용인경전철 열차는 7가지 분류를 통해 17개 주요 시스템으로 구성된다.

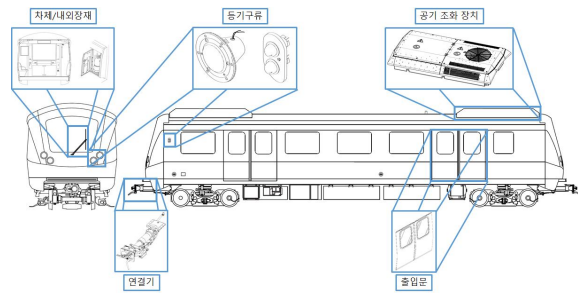
<Table 1> systems breakdown structure(SBS) of Yongin light rail trains.

Level 1	Level 2	Level 3	기능	접점
Yongin Light Train	전기 시스템	집전 장치	열차 가압	육안 및 간격 점검
		배터리	전장비 작동	전해질 점검
		보조 전력 장치	전력 분배	기능 점검
	차체 시스템	차체	열차 골격	육안 점검
		출입문	승객 통행	기능 및 육안 점검
		내외장재	승객 편의	육안 점검
		공기 조화 장치	공기 정화	기능 점검
		등기구류	조명	육안 점검
		연결기	열차 구원	기능 점검
	주행 시스템	선형 유도 장치	주행	기능 점검
	제동 시스템	제동 시스템	제동	기능 점검
	대차 시스템	대차	열차 지지	육안 점검
		공기 공급 장치	높이 유지	기능 점검
	제어 시스템	제동 감시 장치	단계 제동	기능 점검
		차상 신호 장치	무인 운전	기능 점검
		열차 감시 장치	열차 제어	기능 점검
	통신 시스템	통신 장치	통신	기능 점검



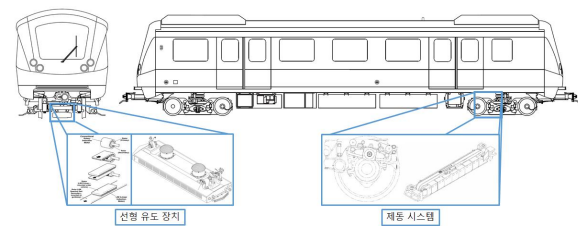
[Figure 4] 17 major systems of Yongin light rail trains—electronic system

전기 시스템은 열차에 750VDC 전력을 가압하는 집전 장치[7], 전기 장비를 최소 운용하는 배터리 [8], 가압된 750VDC를 각 세부 시스템에 적당한 전류, 전압으로 변환하여 분배하는 보조 전력 장치 [9]로 이루어져 있다.



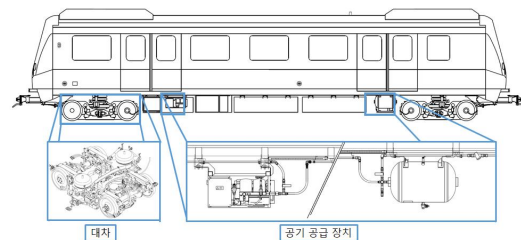
[Figure 5] 17 major systems of Yongin light rail trains—Carbody system

차체 시스템은 주요 골격과 승객 편의, 안전장치로 이루어져 있는 차체, 내외장재[10]와 등기구류, 모터 및 벨트 구동 방식인 출입문 장치[11], 쾌적한 열차 내부 공기 질을 위한 공기 조화 장치[12], 구원 운전 등을 위해 타 편성과 연결할 수 있도록 하는 연결기[13]로 이루어져 있다.



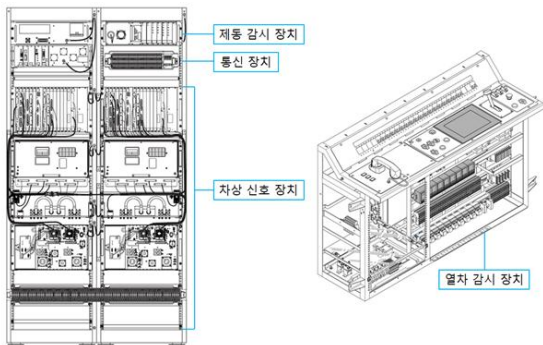
[Figure 6] 17 major systems of Yongin light rail trains—Propulsion, Brake system

용인경전철의 주행 장치는 선형 유도 장치로 이루어져 있으며, 그 형태는 전동모터의 회전자와 고정자를 평행하게 펼친 형태이다.[14] 제동 시스템은 회생 제동, 디스크 제동, 완전 유압 제동, 전자식 방식 비상 트랙 제동 방식으로 이루어져 있다.[15]



[Figure 7] 17 major systems of Yongin light rail trains—Truck system

대차 시스템은 대차와 공기 공급 장치로 이루어져 있으며, 용인경전철의 대차는 차량의 방향에 따라 차륜과 차축이 이동하는 조향 대차이다.[16] 또한, 용인경전철은 타 전동차와는 다르게 판타그래프가 없고, 완전 유압 제동 시스템으로 공기 공급 장치는 오직 열차 높이 제어 및 연결기의 완해를 위한 압축 공기를 공급하는 역할을 하고 있다.[17]



[Figure 8] 17 major systems of Yongin light rail trains -Control, Communication system

열차 제어 시스템으로는 기상 상황 및 외부 상황에 따라 제동 단계를 부여 작동하는 제동 감시 장치 [18], 무인 운행을 위한 차상 신호 장치, 관계 직원이 열차 상태 감시 및 열차 제어를 할 수 있는 열차 감시 장치로 이루어져 있다.[19] 또한, 관제와 승객이 통신하고, 열차 내 관제 방송을 할 수 있는 통신 장치가 있다.[20]

3. 용인경전철 고장 데이터 분석

용인경전철 시스템은 2013년 영업 운전을 시작한 이후 열차 유지보수 프로그램을 통한 고장 유지보수 내역을 기입 하여 고장 관리하고 있으며, 2016년부터 RAMS 데이터 관리를 시작하였다.

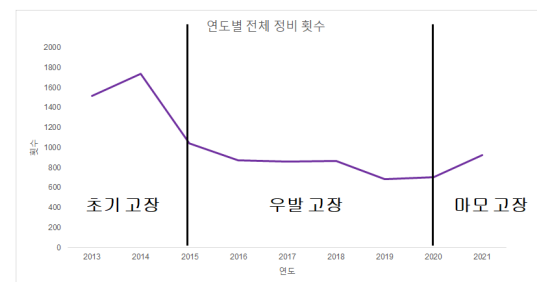
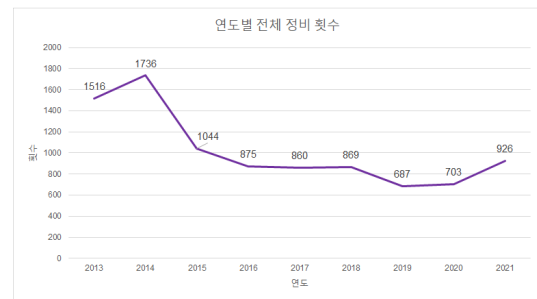
본 논문을 통해 해당 데이터의 날짜, 계절, 운행 거리 등을 기준으로 열차별, 장치별 고장 내역을 분석하고, 향후 발생 추이를 예측하는 기초 자료가 되도록 한다.

본 논문에서는 현재 용인경전철 운영 시 사용하는 유지보수 프로그램 및 RAMS 데이터를 활용하여 분석하였다.

3.1 시간에 따른 고장 발생 추이 분석

3.1.1 시간별 고장 정비 발생 추이

현재 용인경전철 차량 노후화에 따른 고장 발생이 증가함에 따라 시간 흐름에 따른 고장 발생 추이를 분석하였다.



[Figure 9] Frequency of Corrective Maintenance Per Year

고장 및 부품 교체 데이터에 대한 연도별 분석 결과 그림 9의 형태로 나타났으며, 해당 그래프의 형태는 전형적인 욱조 곡선 형태로 볼 수 있었다.

욕조 곡선은 고장 기간을 세 가지 패턴(초기, 우발, 마모)으로 구분할 수 있다.

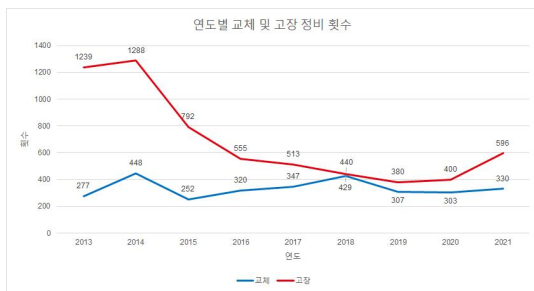
초기 고장(Decreasing Failure Rate, DFR)은 시스템에 완벽하게 완성되기 전의 단계로서 시간에 따라 고장률이 감소하며 부적절한 설치, 작업자의 조작 미숙, 제조상의 결함 등이 원인이 될 수 있다.

DFR 단계 이후에는 고장률이 일정한 우발 고장(Constant Failure Rate, CFR) 단계에 접어들게 된다.

다. 고장 발생의 주요 원인은 우발 고장으로서는 외란에 의한 과도한 스트레스, 혹은 예측하지 못한 품질 관리 등이 있다. 일정한 고장률을 유지한다는 것은 고장 발생을 미리 알 수 없고 확률적으로 일정하게 고장이 발생한다는 의미를 갖고있다.

마모 고장(Increasing Failure Rate, IFR)은 대부분 장비 사용 기간의 장기화에 따른 것으로, 원인은 마모, 피로, 노화 등이다. 결국, 고장률이 높아지는 IFR 발생 시점이 적절한 정비 혹은 예방정비 시점이라 할 수 있다. 육조 곡선은 부품의 종류에 따라 그 형태가 조금씩 다르게 표현된다.[21]

분석결과 실제 연도별 시간의 흐름에 따른 정비율이 증가세로 확인되어 마모 고장의 단계로 접어들고 있음을 알 수 있었으며, 해당 내용을 단순 교체 및 고장 조치 데이터로 분류해보았다.



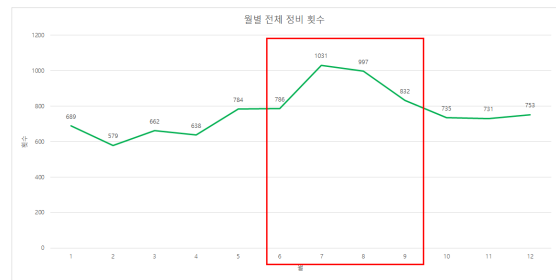
[Figure 10] Frequency of Replacement parts & Failures Per Year

분석결과 연도별 부품 교체 횟수는 비슷한 수준으로 유지되는 것을 알 수 있었고, 시간의 흐름에 따른 고장 정비 횟수가 ‘육조 곡선’의 형태를 띄고 있음을 알 수 있었다.

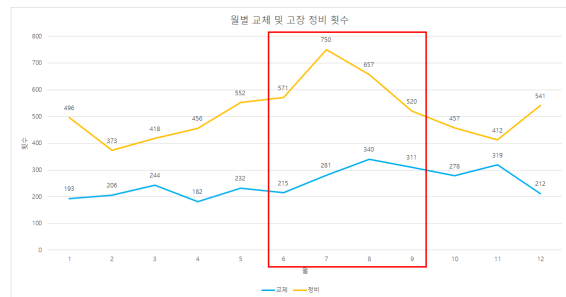
3.1.2 월별(계절별) 고장 정비 발생 추이

고장 및 부품 교체 데이터에 대한 월별 분석결과 그림 11의 형태로 나타났으며, 기온이 높은 6~9월에 정비 횟수가 늘어나는 것을 알 수 있었다.

또한, 해당 데이터를 단순 부품 교체 및 고장에 따른 점검 데이터로 나누어 분석해 보았다.



[Figure 11] Frequency of Corrective Maintenance Per Month.



[Figure 12] Frequency of Replacement parts & Failures Per Month

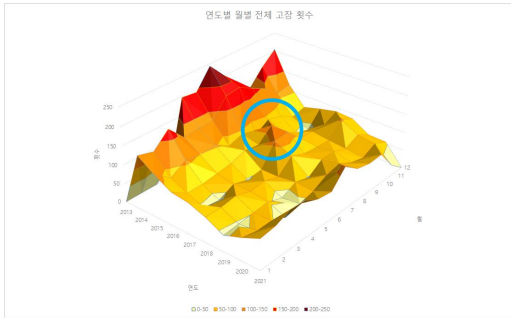
월별 단순 교체는 전체적으로 비슷한 수준으로 발생하는 것이 확인되었고, 고장 및 알람 발생에 따른 정비 횟수는 기온에 영향을 받는 것이 더욱 두드러지게 나타났다.

이에 계절별 전체 정비 횟수로 분류하여 분석한 결과 여름철 정비 횟수가 높다는 것이 확인되었다.

해당 고장은 대부분 높은 기온에 영향을 받는 장치인 출입문 제어 판넬(Local Door Control Panel, LDCB)과 제동 감시 장치(Brake Assurance Monitor, BAM)의 고장 및 이상 작동으로 인한 조치 정비로 확인되었다.

특히, 2016~17년도에는 여름철 전력비 절감을 위해 기지 내 대기하고 있는 열차는 모두 대기모드로 전환하였고, 대기모드 전환 시 공기 조화 장치의 동작 중지로 인해 열차 내 기온이 급격히 상승하여 LDCB와 BAM의 이상 동작이 다수 발생하였다. 이는 ‘3.1.3 고장 정비에 대한 시각적 종합 분석’을 통해 확인할 수 있었다.

3.1.3 고장 정비에 대한 시각적 종합 분석

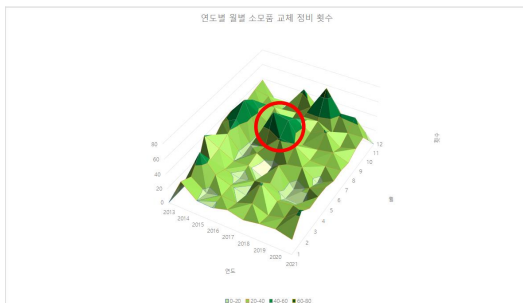


[Figure 13] Frequency of Corrective Maintenance Per Year/Month

연도별 및 월별 전체 정비 횟수를 종합적으로 시각화하였다. 초기 고장을 제외한 정비 횟수가 안정화 되는 것이 확인되었다.

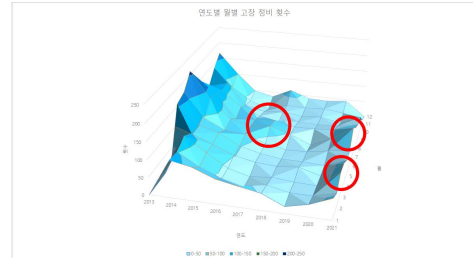
다만 특이한 점은 2016~17년도 여름철 정비 횟수가 높았던 것이 확인되었다.

증가 사유로는 첫 번째, 교체도유기 교체 등 소모성 자재 교체 횟수가 높았으며 두 번째로, 당시 전력비 절감을 목적으로 기지 내 열차 대기 모드로 전환 및 대기 시켰는데, 이로 인해 열차 내 기온이 고온으로 상승하게 되어 LDCB와 BAM의 고장이 다수 발생하였기 때문으로 확인되었다. 현재는 기상 상황에 따라 기지 내 열차 대기 모드 여부를 결정하여 고장 횟수가 감소할 수 있도록 하였다. 종합 분석 그래프를 소모성 자재 단순 교체와 고장에 따른 정비로 나누어 보면 그림 14과 그림 15로 분석할 수 있었다.



[Figure 14] Frequency of Replacement parts Per Year/Month

2016~17년 8월 교체 발생 횟수 증가 사유 확인 결과, 당시 해외품 수입 자재의 입고 지연으로 인해 전차량 교체 도유기 및 소모성 자재의 일괄 교체가 발생하였기 때문으로 확인되었다.



[Figure 15] Frequency of Failures Per Year/Month

2016~17년 여름철 전력비 절감을 위한 기지 내 대기모드 설정으로 열차 내부 온도 상승으로 LDCB와 BAM 이상 작동이 다수 발생하였다.

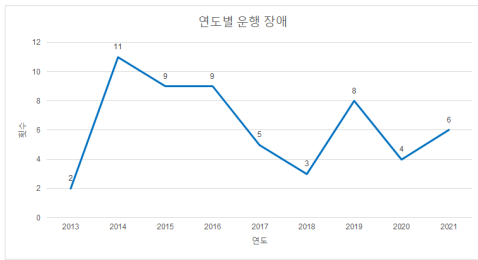
2021년도 5월과 9월의 고장 상승 요인 확인 결과 5월에는 신설된 플랫폼 스크린 도어(PSD)의 운영으로 인한 통신 시스템의 고장이 다수 발생하였으며, 9월에는 PSD로 인한 출입문 장치의 고장이 다수 발생한 것이 확인되었다.

이와 같이 전체 정비 횟수, 소모성 자재 교체 및 고장 정비 횟수 데이터를 연도별, 월별로 종합 조감도로 분석한 결과, 전체적으로 초기 고장을 제외한 시간의 흐름에 따라 안정화되는 것을 알 수 있었다. 또한, 특정 연도 및 월에 발생한 이슈들을 구체적으로 확인할 수 있었다.

3.2 본선 지연(운행 장애) 발생 추이 분석

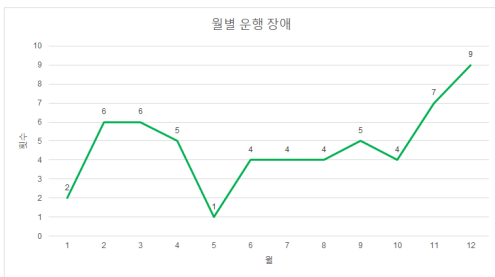
3.2.1 시간별 운행 장애 발생 추이

운행 장애란 교통'철도 안전법'에 따라, 철도 차량의 운행에 지장을 초래하는 것으로 철도 사고에 해당하지 않는 고장을 의미한다.[22]



[Figure 16] Frequency of operation obstacle Per Year

본선 운행 중 지연 운행이 발생한 고장 데이터를 연도별로 분석한 결과 일정한 패턴이 확인되지 않았다. 다만, 2014년 개통 초기에 운행 장애가 가장 많이 발생한 것이 확인되었다.



[Figure 17] Frequency of operation obstacle Per Month

월별 분석결과 일정한 패턴이 확인되지 않았으며, 12월의 운행 장애 증가 요인은 출입문 장치 고장 및 차상 신호 장치 고장으로 확인되었고 마찬가지로 12월에 발생한 운행 장애 간에도 일정한 패턴은 발견되지 않았다.

3.2.2 위험도별 운행 장애 발생 추이

용인경전철 운행 장애는 다음의 6가지로 분류하여 관리하고 있으며 운행 장애에 따른 고장 분류 후 연도별 분석을 진행하였다.

위험도에 따른 운행 장애 연도별 분석 결과 5분 미만의 경미한 운행 장애는 감소하는 추세로 확인되었고, 5분 이상 10분 이하의 최저 운행 장애는 안정 수준으로 유지되며 발생 되는 것이 확인되었다. 중요한 것은 11분 이상의 심각한 운행 장애는 개통 이후 꾸준히 증가하는 것으로 확인되었으며, 이에

운행 장애에 대한 장치별 분석을 하였다.

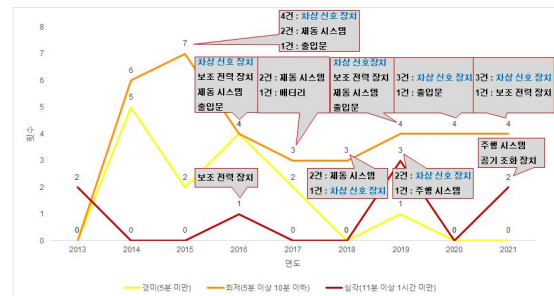
<Table 2> Hazard of Operation Obstacle

번호	위험도	설명
1	경미	용인경량전철의 일부가 최소 5분 미만 지연
2	최저	용인경량전철의 일부가 최소 5분 이상 10분 이하 지연
3	심각	용인경량전철 일부가 최소 11분 이상 1시간 미만 경미한 수리를 위하여 일부 폐쇄
4	중대	용인경량전철의 일부가 최소 1시간 이상 1일 미만 동안 중요한 수리를 위하여 폐쇄
5	매우 심각	용인경량전철 일부가 최소 1일 이상 1주일 미만 동안 중요 재건이나 수리를 위하여 폐쇄
6	재해 수준	중요 재건을 위하여 용인경량전철의 일부가 최소 1주일 이상 장기간 폐쇄



[Figure 18] Frequency of Operation Obstacle by Hazard Per Year(1)

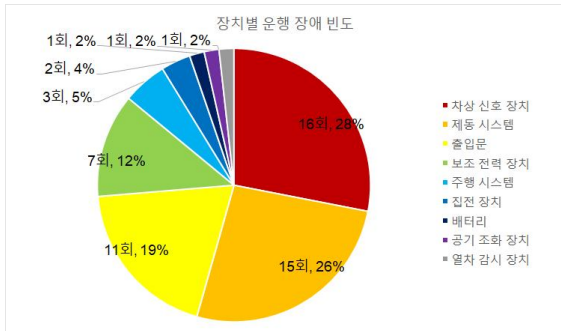
3.2.3 운행 장애 발생 주요 장치 분석



[Figure 19] Frequency of Operation Obstacle by Hazard Per Year(2)

분석결과 주요 장애 장치는 차상 신호 장치로 확인되었으며, 그림 20과 같이 제동 시스템, 출입문

장치 순으로 발생하였다.

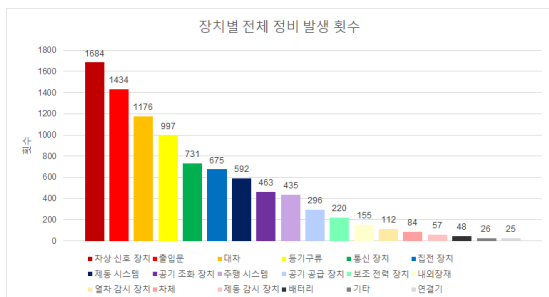


[Figure 20] Rate of Operation Obstacle by Parts

운행 장애는 시간이 흐름에 따라 경미한 운행 장애는 감소하고, 심각한 운행 장애는 증가하는 추세로 확인 되었다. 이에 주요 고장 장치를 분석하여 고장률을 낮춰 심각한 운행 장애가 발생 하지 않도록 유지보수하는 것이 필요함을 확인하였고, 그 방안으로 상태기반 유지보수 방식을 제안하는 바이다. 또한, 운행 장애 대한 장치별 고장 비율은 차상 신호 장치가 가장 많은 것으로 확인 되었다. 해당 차상 신호 장치에 대한 고장 원인 등의 세부 분석 및 대책은 ‘3.5 주요 고장 장치 추이 분석’에 수록하였다.

3.3 장치별 고장 빈도 분석

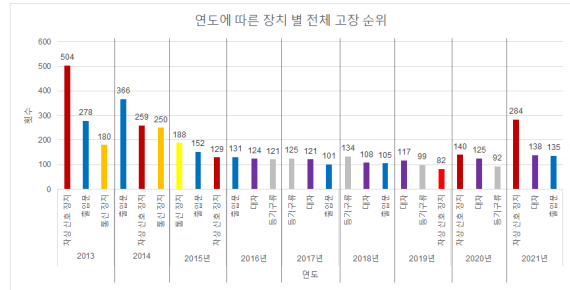
소모성 자재 교체 및 고장 발생을 모두 포함한 각 17개 주요 시스템 장치별 정비 비율을 분석하였다.



[Figure 21] Frequency of Corrective Maintenance by Parts

장치별 운행 장애 빈도와 마찬가지로 차상 신호

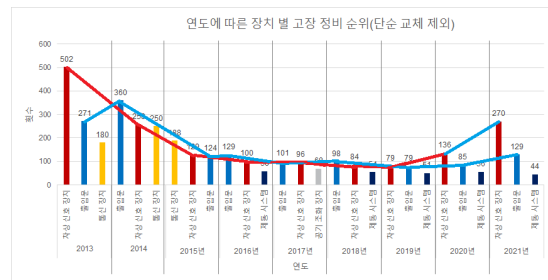
장치가 가장 많은 정비 비율을 이룬다는 것을 알 수 있다.



[Figure 22] Frequency of Corrective Maintenance by Top3 Parts Per Year

더욱 자세한 분석을 위해 연도별 정비 비중이 높은 상위 3가지 장치를 분류하여 분석하였다. 분석 결과, 소모성 자재 교체로 인해 주요 장치 고장의 내용이 후 순위로 밀려 고장 정비에 대한 정확한 분석이 이루어지지 않는 문제가 발생하여, 이를 소모성 자재 단순 교체 건수를 제외하여 분석하였다.

그림 23의 그래프에 표기한 바와 같이, 매년 발생하는 차상 신호 장치와 출입문의 고장 빈도 끝단을 연결하면 그림 9과 그림 10의 그래프와 같이 육조 곡선의 형태가 나타나는 것을 알 수 있다.



[Figure 23] Frequency of Failures by Top3 Parts Per Year

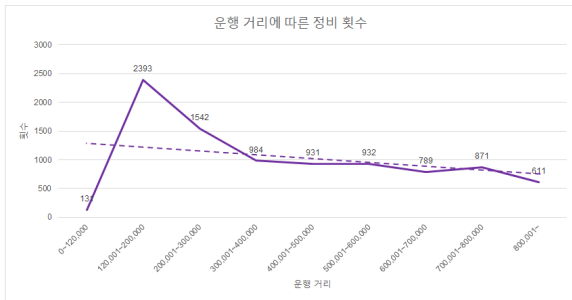
이를 통해 차상 신호 장치와 출입문의 고장 빈도 수가 시간에 따른 전체 고장률에 유의미한 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

3.4 운행 거리에 따른 고장 발생 추이 분석

개통 이후 현재까지의 운행 거리에 따른 정비 및

고장 발생에 대한 추이를 10만km당 정비 횟수로 분류하여 분석하였다. 다만, 개통 초기에는 운행 거리에 대한 데이터가 일부 관리 되지 않아 데이터의 부재로 초기 구간을 0~120,000km, 120,000~200,000km로 구분하여 분석하였다.

3.4.1 운행 거리에 따른 정비 횟수 추이 분석



[Figure 24] Frequency of Corrective Maintenance by Mileage

분석결과 운행 거리가 증가함에 따라 전체 정비 횟수는 오히려 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 시간에 따른 고장 발생 추이 분석의 육조 곡선 형태 결과와 다소 상이 한 결과임을 알 수 있다.

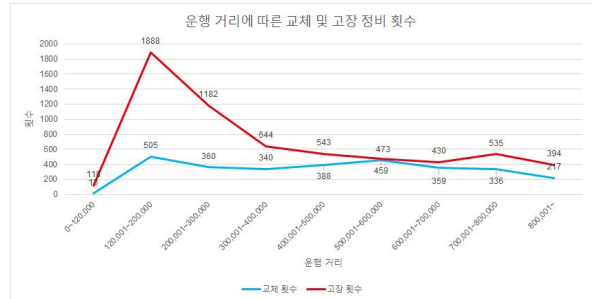
이를 통해서, 거리 관점으로는 아직 마모 고장의 단계에 접어들지 않았으며, 시스템의 수명이 도달하지 않았다는 것을 알 수 있다.

시간과 운행 거리에 따른 정비 횟수 분석 추이 결과가 상이 한 이유는, 승객 편의를 위해 꾸준히 열차 운행 횟수를 증가시켜 차간 시간을 줄이는 한편, 출퇴근 시간의 열차를 증설 운행하는 등 단위 시간당 운행 거리가 늘어났기 때문이다. 이로 인해, 단위 시간당 고장 횟수도 증가하게 되었고, 시간에 따른 고장 추이 분석 결과도 육조 형태로 나타났다는 것을 알 수 있다.

연도별 평균 운행 거리 분석은 ‘3.4.2 연도별 운행 거리 추이 분석’에 수록하였다.

운행 거리에 따른 소모성 자재 교체 건수는 비슷한 수준으로 유지되었다. 이는, 시간에 따른 소모성 자재 교체 건수와 비슷한 양상임을 알 수 있는데, 운행 거리에 영향을 받는 자재와 시간의 흐름에 영

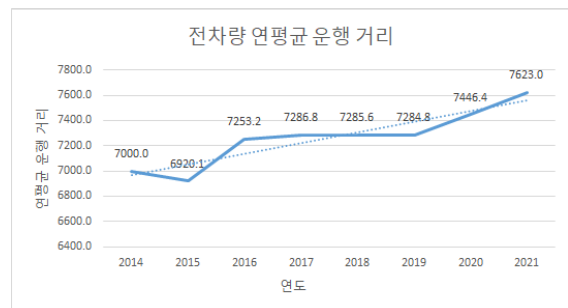
향을 받는 소모성 자재의 데이터가 혼재되어 있기 때문이다.



[Figure 25] Frequency of Replacement parts & Failures by Mileage

시간에 영향을 받는 소모성 자재와 거리에 영향을 받는 소모성 자재에 대한 정확한 분석을 위해서는 추후 더 연구할 필요가 있다. 해당 분석을 통해, 소모성 자재에 대한 자재 소모량 예측도 가능하게 되어 상태기반 예지 유지보수 및 예산, 수급 계획을 더욱 효율적으로 반영하여 운영할 수 있다.

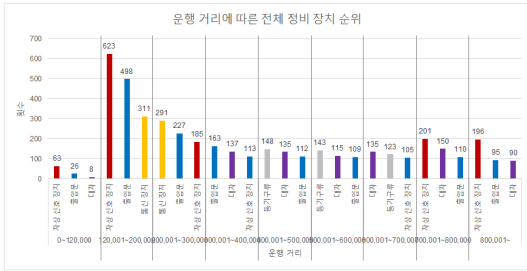
3.4.2 연도별 운행 거리 추이 분석



[Figure 26] The average annual mileage of all Vehicles

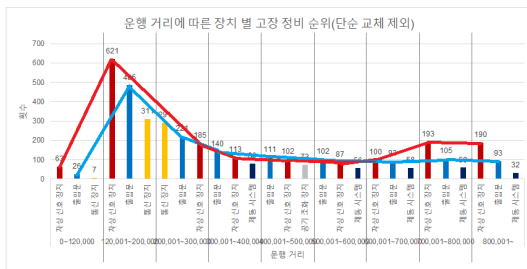
전차량에 대한 연도별 연평균 운행 거리를 분석한 결과 꾸준히 증가하는 것으로 확인되었으며, 육조 곡선 형태의 마모 고장의 단계로 확인되었던 시간에 따른 고장 빈도 증가는 운행 거리증가에 따른 고장 증가 때문임이 확인되었다. 이후 꾸준한 데이터 관리를 통해 운행 거리에 따른 고장 발생률 추이를 살펴야 한다.

3.4.3 운행 거리에 따른 장치별 고장 빈도 분석



[Figure 27] Frequency of Corrective Maintenance by Top3 Parts by Mileage

소모성 자재 교체를 포함한 운행 거리에 따른 정비 장치 순위 분석 결과 등기구류 및 대차 등의 소모성 자재 교체 건이 상위 3순위 이내를 차지하는 것을 알 수 있었다. 이는 운행 거리 30만Km부터 전체 고장률이 감소하였고, 이에 비해 소모성 자재의 교체는 소수의 장치에 편중되어 지속 발생하는 반면, 고장 횟수는 단순 교체 외 나머지 장치에 고루 분배되어 발생하기 때문이다.



[Figure 28] Frequency of Failures by Top3 Parts by Mileage

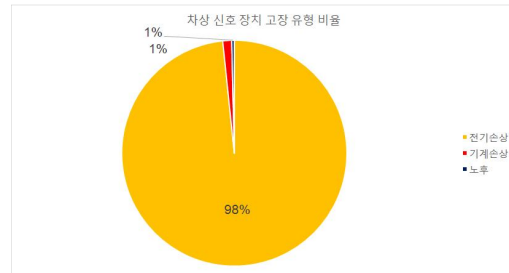
이에, 소모성 자재 단순 교체 건을 제외한 고장 정비 데이터를 분석하면 그림 27의 그래프의 형태가 된다. 운행 거리 10만Km마다 고장 정비 상위 3순위 이내 발생하는 차상 신호 장치와 출입문 장치의 끝 단을 연결해보면 그림 24, 그림 25의 그래프 형태임을 알 수 있다.

‘3.3 장치별 고장 빈도 분석’의 그림 23을 통해 시사하는 바와 마찬가지로, 운행 거리에 따른 전체 고장률에 차상 신호 장치와 출입문의 고장 빈도수가 유의미한 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

3.5 주요 고장 장치 추이 분석

앞서 분석한 결과 차상 신호 장치와 출입문이 주요 고장의 원인이라는 것을 알 수 있었다. 이 두 장치 중에 차상 신호 장치에 대한 고장 분석을 하였다.

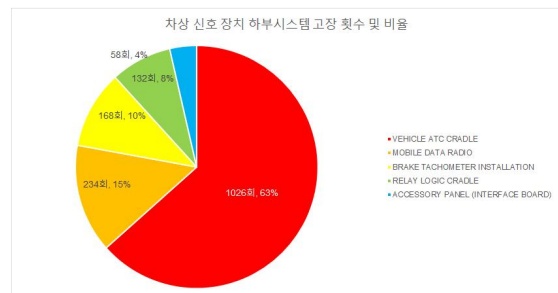
3.5.1 차상 신호 장치 고장 유형 분석



[Figure 29] Rate of failure of Vehicle Automatic Train Controller(VATC)

현재 용인경전철에서 분류하는 고장 유형이 더 깊은 단계로 세분화되어 있지 않아 전기 손상으로 인한 고장이 98%임이 확인되었다. 이 부분도 추후 논의와 분석을 통해 고장 유형을 세분화하고 확인할 필요가 있다.

3.5.2 차상 신호 장치 고장 하위 장치 분석



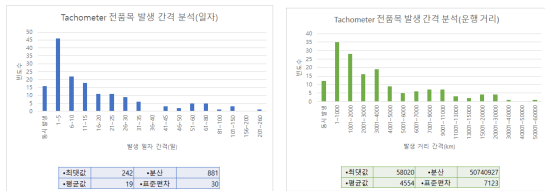
[Figure 30] Rate of failure of VATC Low Systems

차상 신호 장치를 구성하는 하위 시스템들 중 주요 고장이 발생하는 장치들을 확인해 본 결과 Vehicle ATC Cradle(VATC Cradle)이 63%(1026회), Mobile Data Radio(MDR)가 15%(234회), Brake Tachometer Installation (Tachometer)이 10%(168회), Relay Logic

Cradle이 8%(132회), Interface Board가 4%(58회), 기타 순으로 발생하였다.

대표적으로 Tachometer에 대한 시간, 운행 거리에 따른 고장 간격을 분석하고, 현재의 문제점과 고장률을 낮추는 방안을 모색하였다.

3.5.3 Tachometer 고장 발생 간격 분석



[Figure 31] frequency distribution table of Tachometer by Date & Mileage of occurrence

Tachometer은 회전속도계라고 불리며 차량의 현 속도, 차륜의 움직임 등을 감지 및 감시하는 장치이다. Tachometer는 차륜에(6개/1편성) 설치되며, 각각의 위치에서 발생 수집된 신호는 제동, 주행, 차상 신호 장치 등으로 분배되어 전달된다.

그림 31에는 Tachometer 전체 고장 품목에 대한 발생한 고장 간격(일자/운행 거리)을 표기하였다. 이를 통해, 전차량의 Tachometer 시스템을 한 덩어리로 보았을 때 평균 고장 간 시간(MTBF)이 19일 및 4,554km임을 확인하였다.

하지만, 해당 분석은 전체 Tachometer 시스템에 대한 총괄적인 분석으로, 개별 부품에 대한 수명을 예측하기에는 분명한 한계가 있다.

이에, 개별 Tachometer에 대한 관리 방식을 변경하여 각개 자산 데이터 관리를 통한 개별 고장 관리 시스템에 대한 필요성이 있음을 확인하였다.

더 나아가, Tachometer 개별 부품의 상태기반 예지 유지보수를 위해 주기적인 벤치 테스트 상태 기록 또는, 실제 역 간 도착 시간과 Tachometer 기록 시간을 비교하여 속도 차이를 통한 성능 기록 등 Tachometer 각 부품에 대한 데이터 및 예상 수명 관리가 이루어져야 한다.

본 논문을 통해 분석한 결과, Tachometer 등 용인경전철 열차 부품에 대한 예지 정비에 필요한 데

이터를 수집하고 있지 않음을 식별하였다. 본 논문을 통해서도 상태기반 예지 정비(CBM) 체계 구축을 위해 측정해야 할 Tachometer 데이터 항목, 측정비 단위 부품별 기능과 관련 하중을 직접 또는 간접으로 측정할 수 있는 방안을 수립하였다.

향후 관련 분석을 모든 정비 단위 부품으로 확장할 예정이며, 차량 전체 부품에 대한 상태기반 예지 정비(CBM) 체계를 구축할 계획이다.

4. 결론

용인경전철 CBM 시스템 구축을 위한 기초연구로 2013년 개통 이후 발생한 약 9,000개의 용인경전철 고장 정비 데이터를 분석하였다.

본 논문의 분석을 통해, 운행 거리증가에 따른 열차 고장률 및 심각한 운행 장애 발생 추이가 증가함을 시각적으로 확인하였다.

이에 열차 수명 증가와 고장률 감소를 위해 기존 대비 효율적인 유지보수 방법 적용이 필요하며, 그 방법으로 CBM 시스템을 구축하여 선제적으로 주요 고장 장치 교체 횟수는 증가시키는 대신 열차 고장률을 감소시키는 것을 제시하는 바이다.

우선 적용해야 하는 열차 부품을 찾기 위해 실제 운영에 따른 역대 고장 데이터 분석 결과, 차상 신호 장치와 출입문 장치의 고장이 전체 고장에 유의미한 영향을 끼친다는 것을 시각적으로 확인하였고, CBM 시스템 구축을 통해 해당 장비의 고장을 방지하여 전체 고장률 감소 효과를 기대할 수 있다.

또한, 시스템을 구성하고 있는 구성품들의 고장률과 구성품들이 시스템에 미치는 영향을 함께 고려하여 예방정비 주기를 산출하고, 구성품의 신뢰도 뿐만 아니라 고장영향비(Failure effect ratio)를 고려한 시스템의 최적 예방정비 주기를 산출이 필요하다.[23]

더 나아가 신뢰성 높은 CBM 시스템 구축을 위해 타겟 부품에 설치된 센서들을 통해 수집된 상태의 정보를 분석하여 부품의 결함 여부를 자동으로 판단

하고 수명을 예지하는 기술 및 소프트웨어 개발이 필요하다.[24]

열차 수명 증가 및 고장률을 감소하기 위해 CBM 전환에 필요한 향후 과제로는 다음과 같다.

- 각 부품 특성에 맞는 고장 유형 세분화 및 분류 작업
- 각 부품에 대한 고장 기준 정립 및 실 측정을 통한 상태기반 예지 유지보수 실행
- 부품 개별에 대한 관리 및 고장 데이터 이력 관리 시스템 구축
- RAMS 및 고장 데이터를 통해 CBM 적용을 위한 자재 관리 소프트웨어 개발 및 사용
- 소모성 자재의 데이터 분석을 통한 자재별 시간 및 운행 거리의 영향 여부에 따른 분류 관리
- 상태기반 유지보수 적용을 통한 정비 비용 감소 방안 강구

References

1. 오안섭, 신국호, 임병진, 최용각, 신건영, 황홍환, 이덕규, RCM을 적용한 전동차 유지보수 시스템 개발에 관한 연구, 한국도시철도학회논문집, 2(2), 179-184, 2014.
2. 송미옥, 박병노, 박균, 신뢰성 분석결과를 활용한 예방정비 적용사례, 한국철도학회 학술발표대회 논문집, 924-931, 2013.
3. 280-V00-PMM-010301-R3 Vehicle Scheduled Maintenance.
4. 유양하, 이낙영, 철도차량 신뢰성기반유지보수 방안 연구, 한국철도학회 논문집, 16(3), 183-188, 2013.
5. 송성준, 김정운, 여화수, 철도 상태기반 유지보수를 위한 소프트웨어 구성, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 1237-1242, 2016.
6. 이관섭, 김종운, 철도차량 상태기반 유지보수체계 추진전략, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 391-395, 2015.
7. 280-V00-RMM-010302 Power Collection.
8. 280-V00-RMM-010304 Battery.
9. 280-V00-RMM-010303 APU.
10. 280-V00-RMM-010305 Lighting.
11. 280-V00-RMM-010309 Doors.
12. 280-V00-RMM-010310 HVAC.
13. 280-V00-RMM-010315 Couplers.
14. 280-V00-RMM-010306 Propulsion & LIM.
15. 280-V00-RMM-010307 Brakes.
16. 280-V00-RMM-010316 Trucks.
17. 280-V00-RMM-010317 Air Supply.
18. 280-V00-RMM-010308 BAM.
19. 280-V00-RMM-010314 Health Management.
20. 280-V00-RMM-010311 Comms.
21. 장병목, 이종우, 육조곡선을 활용한 철도분기기 밀착검지기 교체 주기 결정에 관한 연구, 한국철도학회 논문집, 21(11), 1094-1103, 2018.
22. 철도안전법, 법률 제17746호, 2020. 12. 22., 일 부개정.
23. 이연호, 이익도, 이동우, 손기홍, 하부 구성품의 신뢰도 특성을 고려한 복합 시스템의 최적 예방 정비 주기 산출, 대한산업공학회지, 37(4), 390-399, 2011.
24. 이현규, 철도차량 주요부품 고장예지 및 건전성 관리 기술 기반의 유지보수지원 시스템 설계, 한국경영과학회 학술대회논문집, 5069-5073, 2016.