

경전철의 고무 타이어 PHM 기술 개발에 관한 연구

엔드하르타 알폰수스 주란토*, 정도식, 이철림, 김경은
네모시스(주)

A Study on Development of PHM Technology for Rubber Tires in Light Rail Vehicles

Alfonsus Julanto Endharta*, Dosik Jeong, Chullim Lee, Kyung-Eun Kim
Nemosys Co., Ltd.

요약 본 논문은 경전철의 고무 타이어 유지보수에 고장 예지 및 상태 관리(Prognostics and Health Management, 이후 PHM) 기술을 적용하기 위한 통합 시스템에 관한 개발 과정을 설명한다. PHM 기술은 센서 시스템을 활용하여 데이터를 측정하고, 측정 값을 지속적으로 모니터링 하며, 타이어 상태를 진단하고, 각 타이어의 잔여수명을 예측하는 것이 특징이다. 타이어 상태 및 잔여수명 예측 결과를 활용하여 타이어 유지보수 일정을 산출한다. PHM 통합 시스템은 철도 안전 관리자, 철도 평선 관리자, 유지보수 관리자가 시스템을 효과적이고 효율적으로 활용할 수 있도록 개발한다. 통합 시스템 개발을 통해 수명주기비용을 절감하고, 운행 가용성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract The paper proposes an integrated system to support the application of Prognostic and Health Management (PHM) technology on the maintenance of rubber tires in light rail metro vehicles. PHM technology features the utilization of sensor systems to measure the data, the continuous monitoring of the measurements, the fault condition diagnostic, and the remaining useful life prediction of each tire. Also, the tire maintenance scheduling is performed by utilizing the results of the tire condition and the remaining useful life prediction. The proposed integrated system is developed so that the railway safety managers, fleet managers, and maintenance managers can utilize the system effectively and efficiently. Through the development of the integrated system, it is expected that the life cycle cost will be reduced, and the operation availability will be improved.

Keywords : Tire, Data, Condition-Based Maintenance, Prognostics And Health Management, Railway, Software

1. 서론

경전철 시스템은 수백만 명의 승객에게 효율적이고 안정적인 통근을 보장하는 도시 교통망의 핵심 구성 요소이다. 경전철 시스템의 안전하고 비용 효율적인 운영은 주요 구성 요소의 상태에 크게 의존한다.

경전철 시스템에서 중요한 구성 요소 중 하나는 바퀴

이다. 고무 타이어는 철도 바퀴의 대체로 활용되어 있으며 강철 바퀴와 비교할 때 고무 타이어를 사용하면 상당한 이점이 있다. 빠른 가속, 가파른 비탈면을 오르거나 내려갈 수 있는 능력, 짧은 제동 거리, 차량 내외 차량 외에서의 조용한 주행, 줄어든 유지보수 비용과 철도 선로 마모 감소가 포함된다. 경전철 고무 타이어 사용 단점은 타이어 펑크 가능성과 교체 빈도가 높다는 점이다.

본 연구는 국토교통부/ 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었다. (RS-2020-KA156015)

*Corresponding Author : Alfonsus Julanto Endharta(Nemosys Co., Ltd.)

email: alfon@nemosys.kr

Received January 8, 2024

Accepted February 6, 2024

Revised January 30, 2024

Published February 29, 2024

고장 예지 및 상태 관리(Prognostics and Health Management, 이후 PHM)는 기계, 설비, 항공, 발전소 등의 상태 정보를 수집하여 시스템의 이상 상태를 감지하고 분석 및 진단을 통해 고장 시점을 미리 예측하여 설비 관리를 최적화 하는 최신 기술이다. PHM 기술은 상태 기반 유지보수 플러스(Condition-Based Maintenance Plus, 이후 CBM+)라고 한다. PHM 기술은 경전철과 똑 같이 복잡한 시스템의 신뢰성, 가용성, 유지보수성, 안전성을 향상시키는 것을 목표로 하며, 데이터 측정을 위한 센서 기술, 지속적인 모니터링, 상태 진단 또는 이상 감지를 위한 딥러닝 모델, 유지보수 의사 결정 프로세스를 지원하는 고장 예지가 포함된다.

PHM 또는 CBM+ 기술이 시작했지만, CBM 적용 사례는 아직 최신 기술이다. Park et al.(2023)은 유도무기 체계에 PHM 전략을 적용하여 핵심성과지표의 변화를 분석하고 잔존수명을 예측하여 정비주기를 최적화한 사례를 연구하였다[1]. Hyun et al.(2020)은 전자무기 체계에 PHM을 적용하여 120일 동안 측정 장비로 전류와 RF 신호를 수집하고 전류, RF 신호, 전류와 RF 신호의 조합 등 세 가지 파라미터를 사용하여 잔여수명(Remaining Useful Life)을 예측하였다[2]. Min(2023)은 사례 연구로 고속 차량(Electric Multiple Unit)을 고려하고 상태 모니터링 및 고장 예측 기술을 포함하는 PHM 플랫폼을 개발했다[3]. Oh et al.(2023)은 수소 충전 시스템에 CBM+ 적용 사례 연구를 수행하였으며, 시스템 안전 관리에 중점을 두었다[4]. 수소 충전소의 압축기에 CBM+ 적용 방안을 연구하였으며, 진단 모델에서 소리, 진동 및 전류 데이터를 고려하는 이상 감지 방법으로 Long Short-Term Memory(LSTM) Autoencoder가 사용되었다[5]. Kim et al.(2023)은 해군 전투체계의 전자광학 추적체계에 CBM+를 적용한 사례 연구를 수행한 결과, CBM+ 적용 시 시스템 유지보수 비용을 절감하고 시스템 가용성을 향상시킬 수 있는 것으로 언급하였다[6]. Son et al.(2022)은 열상감시체계의 열상관측장비에도 CBM+를 적용하였다. Convolutional Neural Network(CNN), LSTM과 같은 딥러닝 모델을 고려하고 운용 시간 및 온도를 기반으로 이상 상태를 측정하였다[7]. Shin et al.(2022)은 설계 초기 단계에서 디젤 엔진 터보 차저에 대한 CBM+ 적용 타당성 조사를 수행하였다[8]. CBM+의 효과를 향상시킬 수 있는 센서 장치 선정에 중점을 두었으며, 시스템 설계의 유효성을 평가하기 위해 Design Failure Mode and Effect Analysis를 수행하였다.

앞서 언급한 연구에서 특징 데이터 추출, 상태 분류 또는 진단, 잔여 수명 예측 등 한 가지 목적을 위해 모델을 개발하였다. 본 논문에서는 데이터 수집, 모니터링, 진단, 고장 예지에 이르는 PHM 기술의 전반적인 기능을 결합하여 경전철 고무 타이어 PHM 통합 시스템에 적용하는 것을 목표로 한다. 또한, 예측 상태 지수를 기반으로 최적의 유지보수 일정을 선정하고 효율적이고 효과적인 경전철 운영 및 유지보수를 지원하기 위한 PHM 기술 기반의 통합 시스템을 개발한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서 고무 타이어 경전철에 대해 간략히 설명하고, 3절에서 PHM 기술에 대해 설명하며, 4절에서 제안하는 PHM 통합 시스템에 대해 설명한다. 5절에서 결론을 제시한다.

2. 고무 타이어 경전철

고무 타이어 경전철은 유연성과 이동성을 향상시키기 위해 기존 철도 시스템의 요소와 고무 타이어를 결합한 대중교통 시스템의 일종이다. 기존의 강철 바퀴 열차와 달리 고무 타이어 경전철은 버스나 자동차와 같은 공압 타이어를 사용하여 전용 철도 선로와 일반 도로에서 모두 운행할 수 있다. 고무 타이어 경전철 차량의 주요 특징과 장점은 다음과 같다.

- 고무 타이어는 비나 눈과 같은 악천후 조건에서 더 나은 견인력과 추진력을 제공하며, 다양한 기후에서 효율적인 서비스 수준을 유지할 수 있다.
- 강철 바퀴에 비해 고무 타이어는 소음이 적기 때문에 고무타이어 경전철은 더 조용하게 운행하며, 소음 공해를 최소화하는 것이 중요한 도심 지역에서 유용하다.
- 고무 타이어를 장착한 경전철은 기존 철도 차량에 비해 더 작은 곡선을 교차하고 더 유연한 경로를 지나갈 수 있으며, 날카로운 곡선과 복잡한 거리 레이아웃이 있는 밀집된 도시 지역을 운행하는 데 적합하다.
- 고무 타이어 경전철의 제동 시스템은 반응성이 향상되어 정차 시 빠르게 감속하고 제어할 수 있으며, 정차가 잦은 도심 환경에서 유용하다.
- 고무 타이어 경전철 전용 선로를 건설하는 것은 기존의 중전철 시스템에 비해 비용이 적게 들며, 대중교통 네트워크를 확장하려는 도시에 유용하다.
- 일부 고무 타이어 경전철 시스템은 제동 에너지를

전기 에너지로 변환하는 회생 제동 기술을 사용하며, 에너지 효율에 기여하고 전반적인 운영비용을 절감할 수 있다.

고무 타이어 경전철은 부산 도시철도 4호선, 의정부 경전철, 서울 경전철 신림선과 인천국제공항에서 운행하고 있다.

3. PHM 기술

PHM 기술은 데이터 측정 및 수집, 진단, 예지 등 세 가지 기술로 구분할 수 있다. PHM 기술을 위해서는 세 가지 기술을 아우르는 종합적인 기술 구현이 필수적이지만, 기존 방법론은 신호 취득, 신호 분석, 하위 시스템 수준에서의 CBM 적용 가능성만 제시하고 있어 운영 시스템 전체에 대한 종합적인 상태기반 유지보수 방법으로 확대 적용하기에는 많은 한계가 있다. 따라서 데이터 취득 및 전처리 기술, 진단 기술, 예지 기술 등을 유기적으로 연계할 수 있는 종합적인 상태기반 유지보수 체계를 구축함으로써 고장을 사전에 예방하여 유지보수 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

3.1 데이터 측정 및 전처리

유·무선 센서를 활용하여 주요 시스템의 고장과 관련된 상태 및 열화 관련 데이터를 획득하는 단계로서 센싱 데이터는 노이즈를 포함하기 때문에 신호와 노이즈를 분리할 수 있는 신호 처리 기술을 필요하다. 시계열 분석 혹은 주파수 분석 방법은 안정된 신호를 분석하는 방법으로 사용되어 있으며, 웨이블릿 변환 및 공동 시간-주파수 분석 방법 등이 불안정한 신호 분석을 위해 활용되어 있다. 시계열 분석 및 특이값 분해 방법 등 센싱 데이터를 모형화하기 위하여 사용된다. 노이즈 외에 누락된 데이터도 문제이다. 누락된 데이터는 다양한 방법을 통해 해결될 수 있으며 대부분의 연구는 데이터 대체 기법을 활용하여 해결한다.

3.2 상태 진단 (Diagnostics)

진단 기술은 획득하고 전처리 적용된 신호를 기반으로 정상 및 비정상 상태인지 의사 결정하는 단계로서 신호 데이터에 대한 모형화 과정을 필요하다. 일반적으로 정상 신호 데이터에 대해서 노이즈를 가정하지만 비정상일 경우 일정한 경향 또는 정상보다 큰 산포를 보이는 경우

가 많다. 따라서 진단 기술을 통해 전처리 적용된 신호의 모형을 구축하는 것이 필요하며, 상태 진단을 위해 브라우니안 모션, 로지스틱 회귀, 히든 마코프 모델, 서포트 벡터 머신과 같은 다양한 통계 및 기계 학습 방법이 사용되었다. Saranga and Knezevic(2001)은 시스템 신뢰도 예측을 위해 CBM+ 하에서 관련 상태 예측 값을 기반으로 한 방법론을 제시하였다[9]. Lin et al.(2004)은 비례 위험 모델을 사용하여 진동 신호에서 유용한 상태 지표를 추출하고 추출된 정보를 기반으로 기어박스의 최적 정비 주기를 산출하였다[10]. Kim et al.(2023)은 운행 중 획득한 3축 진동 가속도 센서로 측정된 진동 신호를 고려하여 타이어 상태를 진단하기 위한 상태지수를 설정하고 진동 신호 데이터를 기반으로 모델을 개발하였다[11].

본 연구에서 CNN 모델은 상태 진단 모델을 활용한다. 측정된 진동 가속도 데이터는 모델 입력 데이터로 활용한다. 수동적으로 측정된 고무 타이어의 깊이는 목표 변수로 정하고 모델 학습은 진행한다. 따라서 CNN 모델의 출력 값은 타이어 깊이 예측 값이고 0~100으로 표준화된 값은 상태 지수로 산정하며, 100점은 가장 좋은 타이어 상태를 뜻하고 0점은 고장 상태를 뜻한다.

3.3 고장 예지 (Prognostics)

예지 기술은 신호 전처리 과정을 거쳐 열화 데이터의 신호를 추출한 후에 신호 데이터를 기반으로 언제 고장(일반적으로 시스템의 열화과정이 치명적 수준에 도달할 경우 고장이라 명시함)이 발생할지 열화데이터 모형을 통해 고장을 예측하는 기술을 포함한다. 열화과정을 모형화 하는 기술로는 Gaussian Process, 자기회귀 이동평균(Autoregressive Moving Average, ARMA) 모형, 고장/열화 메커니즘 모형 등이 많이 활용되어 있다. 하지만 일반적으로 하부시스템 혹은 시스템 고유의 열화과정에 따라 모형이 달라지기 때문에 보편적인 방법론을 적용하는 것이 어려우며, 물리 또는 기계적 특성을 파악하여 이를 기반으로 하는 모형개발을 필요하다.

사용시간이 높을수록 타이어 깊이가 줄어든다는 것이 과학적으로 입증되었으므로 본 연구에서 타이어 마모 모델에 열화 모델을 적용할 수 있다는 것을 유추할 가능하다. 타이어 별 기록된 상태 지수 값과 해당 타이어의 누적 운영 시간 변수를 활용하고 회귀 분석 모델 기반으로 고장 예지 모델을 선정한다. 선형 모형, 지수 모형 및 2차 함수 모형과 함께 고려하여 다음과 같은 절차를 통해 미래의 타이어 상태 지수를 예측하고 임계값과 비교해서 고장 예지를 한다.

1. 타이어 별 최근 90일 동안 수신된 상태 지수 데이터 Y 는 반응 변수로 정의 및 해당 타이어의 사용 일수 데이터 X 는 설명 변수로 정의한다.

1.1. y_t 는 t 번째 일의 타이어 상태 지수 값이고 x_t 는 t 번째 일의 타이어의 누적 사용일수에 의미로 한다.

$$Y = \{y_{t-89}, y_{t-88}, \dots, y_{t-1}, y_t\}$$

$$X = \{x_{t-89}, x_{t-88}, \dots, x_{t-1}, x_t\}$$

2. 입력 데이터 활용하여 3가지 회귀 분석 모형을 구축하고 최소자승법으로 최적화 한다.

- 선형 모형 : $\hat{Y} = \beta_{i0} + \beta_{i1}X$

- 지수 모형 : $\hat{Y} = 100 - \exp(\beta_{i0} + \beta_{i1}X)$

- 2차 함수 모형 : $\hat{Y} = \beta_{i0} + \beta_{i1}X + \beta_{i2}X^2$

3. 모형 별 모형 성능 지표인 RMSE 값 산출한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{n}}$$

Y_t = 실제 값

\hat{Y}_t = 예측 값

n = 데이터 개수

4. RMSE 값을 비교하여 RMSE 값이 가장 낮은 모델을 최적 모형으로 선정한다.

5. 최적 모형을 활용하여 해당 타이어의 다음 1일~90일 상태 지수 예측 값을 산출한다.

6. 고장 상태 지수의 임계값과 비교하여 가능한 고장 날짜를 고장 예지 결과로 산정한다.

일일 센싱 데이터를 활용하고 상태 지수는 매일 산정한다. 일일 타이어 깊이 값의 변동이 크지 않아서 수집된 타이어의 상태 지수를 활용하여 매주 새로운 모델을 최적화 하고 고장 예지를 자동적으로 수행한다.

4. PHM 통합 시스템 개발

4.1 PHM 통합 시스템 기능 설명

경전철 타이어에 부착된 센서 장치로부터 수집된 원시 데이터를 덤프 적재한 이후, 해당 데이터의 정제 작업 및 가공 처리 후 데이터베이스에 저장하고, 별도의 상태 진단 알고리즘 모듈을 적용하여 편성, 차호, 위수 별 타이어 상태를 모니터링 하는 기능을 제공한다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 경전철 고무타이어에 달린 압력 및 온도 센서 정보를 수집하고 차량장치에서 TCP/IP 소켓 및 LTE-A 망을 통해 직접 송신한다. 센싱 데이터 집계, 정제 처리, 화면 제공 등 모든 기능을 단일화 하여 데이터베이스 서버에서 처리한다.

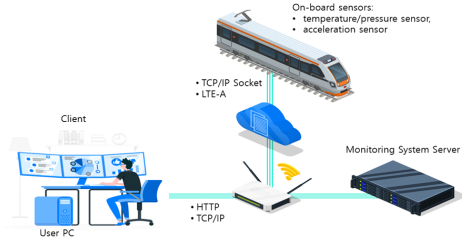


Fig. 1. PHM integrated system architecture

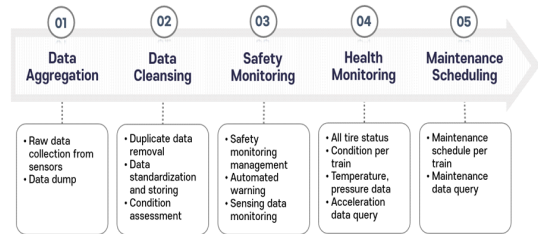


Fig. 2. PHM integrated system configuration

PHM 통합 시스템의 주요 기능은 Fig. 2과 같이 구성된다. 데이터 집계(Data Aggregation)는 고무 타이어에서 장착한 센서에서 데이터 수집과 데이터 덤핑이 포함된다. 데이터 정제(Data Cleansing)는 중복 데이터 검증 및 제거, 데이터 표준화 및 표준화된 데이터 저장, 전제된 데이터를 기반으로 상태 진단을 포함한다. 안전 모니터링(Safety Monitoring)은 차량별 상태 진단 결과, 비고장 타이어 자동 경고, 센싱 데이터(온도 및 압력 데이터) 추이 시각화 등을 포함한다. 헬스 모니터링(Health Monitoring)은 타이어 상태 지수에 대한 상세한 현재 정보, 온도 및 압력 데이터 시각화, 가속도 데이터 시각화 등이 포함된다. 유지보수 스케줄링(Maintenance Scheduling)에는 각 타이어의 과거 상태 지수를 기반으로 차량 별 유지보수 일정 최적화가 포함하고 유지보수 이력을 제공한다.

주요 메뉴에 대한 기능 별 접근 권한을 제어하기 위해 총 4종류의 역할을 정의하였고 각 역할 별 하위 메뉴는 Table 1과 같이 구성하였다.

Table 1. Menus of PHM integrated system and the corresponding user roles (O: assigned, X: not assigned)

No	Menu	Sub-Menu	Role			
			Safety manager	Train Fleet Manager	Maintenance Manager	System Administrator
1	Safety monitoring system	Safety monitoring	O	O	X	O
2		Sensing data monitoring	O	O	X	O
3	Health monitoring system	Health current status	X	O	O	O
4		Health inquiry per train	X	O	O	O
5		Failure prediction	X	O	O	O
6		Sensing data query	X	O	O	O
7	Maintenance scheduling system	Maint. schedule optimization	X	X	O	O
8		Maintenance record query	X	X	O	O
9	Administrator menu	Tire master management	X	X	X	O
10		Sensor master management	X	X	X	O
11		Threshold setting	X	X	X	O
12		Sensing data log	X	X	X	O

4.1.1 안전 모니터링 메뉴

안전 모니터링 메뉴는 안전성 관리자와 차량 편성 관리자에게 경전철 운행의 안전 정보를 제공하고 안전 정보를 기반으로 즉시 운행 중지를 의사 결정에 지원을 제공한다. 안전 모니터링과 센싱 데이터 모니터링 하위 메뉴를 포함한다. 안전 모니터링 하위 메뉴에서는 타이어 전체 상태를 한 화면에서 확인할 수 있도록 편성별로 타이어 상태를 Fig. 3에서 보는 바와 같이 표시한다. 타이어 상태는 정상과 경고 상태로 나누며 타이어 상태 등급에 따른 색 변화로 타이어 상태 확인 가능하다. 자동적으

로 타이어 상태 현황을 업데이트하며 타이어 상태에 이상이 있는 경우 경고 알림 제공한다. 센싱 데이터를 기반으로 온도 기준값 섭씨 90도 초과, 공기압 기준 값 110psi 미만일 경우 경고 알림 도 제공한다.

센싱 데이터 모니터링 하위 메뉴에서는 편성 별 차호 별 센싱 데이터 시각화 차트를 표시한다. 타이어 센싱 데이터와 경고 기준에 따라 차호 별 상태를 진단하고 1분마다 자동으로 화면을 새로고침 하여 타이어 센싱 데이터를 업데이트하며 센서 데이터에 이상이 있는 경우 알림을 제공한다.



Fig. 3. Safety monitoring screen

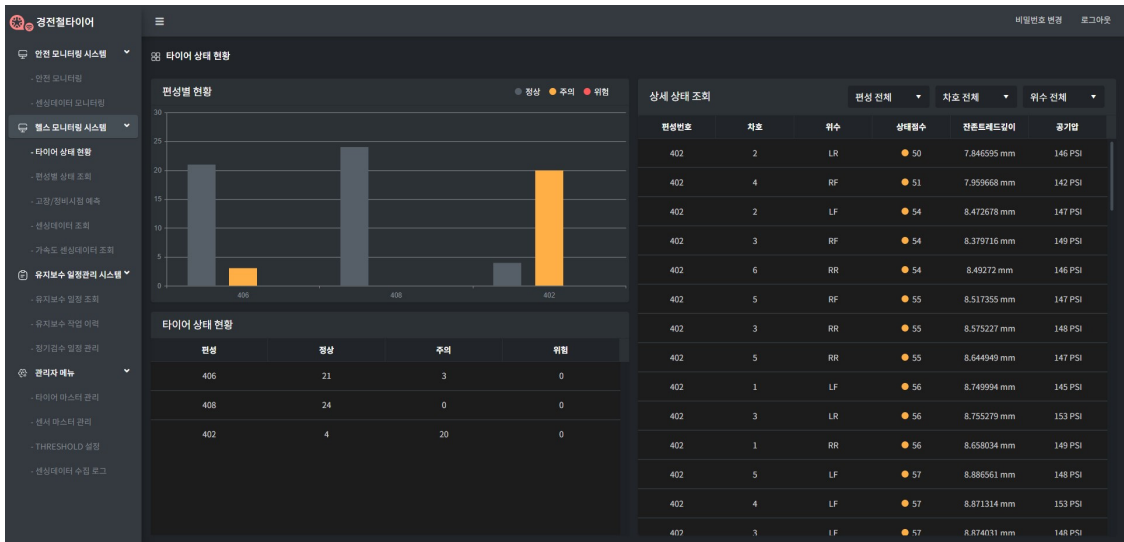


Fig. 4. Tire health current status screen

4.1.2 헬스 모니터링 메뉴

헬스 모니터링 메뉴에서는 타이어 상태 현황, 편성 별 상태 조회, 온도/압력 센싱 데이터 조회 및 가속도 센싱 데이터 조회 하위 메뉴가 포함한다.

타이어 상태 현황 하위 메뉴에서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 편성 별 타이어 상태 현황을 확인할 수 있도록 막대그래프로 표시하여 편성 별로 정상, 주의, 위험 등급의 타이어 개수를 산출하고, 타이어의 상태 등급 별 현황을 확인할 수 있도록 표로 표시하며, 타이어의 편성번호,

차호, 위수 정보와 상태지수, 잔존 마모량, 공기압 정보 확인 가능하다. 타이어 진동과 관련한 물리적 기법을 활용하여 상태지수 산출한다.

편성별 상태 조회 하위 메뉴에서는 조회할 편성번호를 선택하여 편성별 타이어 상태를 표로 제공하고 차호와 위수별로 타이어 상태 등급에 따른 색 변화로 타이어 상태 정보를 제공하며 타이어의 상태지수와 잔존 마모량, 공기압 정보는 표로 제공한다.

압력/온도 센싱 데이터 조회와 가속도 센싱 데이터 조

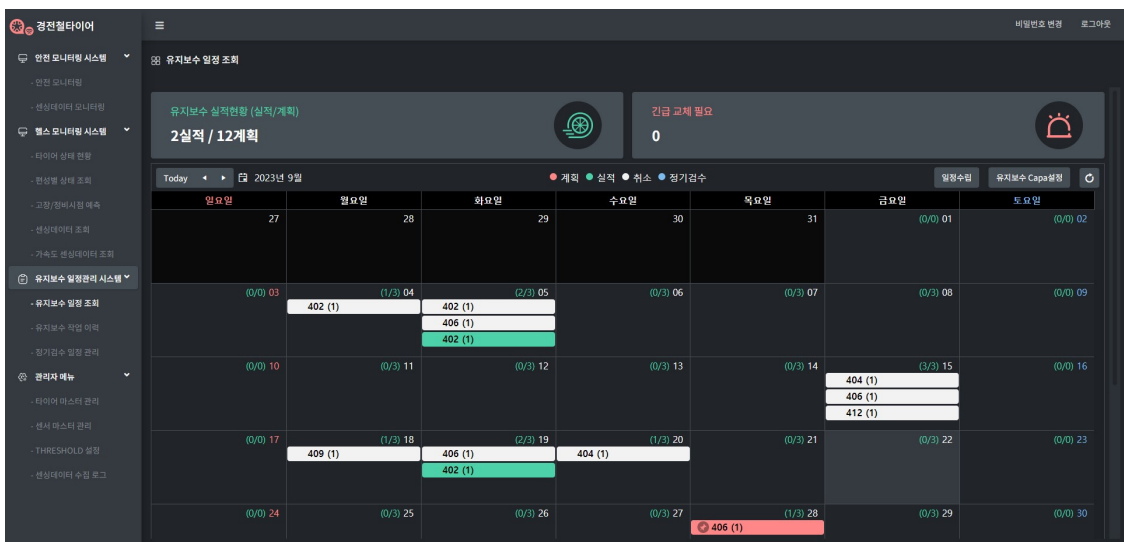


Fig. 5. Maintenance schedule inquiry screen

회 하위 메뉴에서는 조회할 차량 편성번호 및 차호를 선택하여 해당 편성의 차호의 타이어 온도/압력 데이터 및 가속도 데이터를 시각화 차트를 제공한다. 고장 예지 하위 메뉴에서는 타이어 별로 현재 상태지수와 고장예측 날짜가 포함된 표를 제공한다.

4.1.3 유지보수 일정 관리 메뉴

유지보수 일정 관리 메뉴를 통해 유지보수 관리자에게 경전철 편성 별로 최적의 유지보수 일정을 제공하는 것이 목표로 한다. 유지보수 일정 조회, 유지보수 작업 이력과 점검검수 일정 관리 하위 메뉴가 포함한다.

유지보수 일정 조회 하위 메뉴에서 타이어 별 과거 상태 지수 데이터를 활용하여 타이어 별 유지보수 일정 수립 가능하고 수립된 일정은 달력 형식으로 Fig. 5에서 보는 바와 같이 현시한다.

유지보수 작업 이력 하위 메뉴에서 모든 타이어 유지보수 작업 이력을 표 형식으로 제공한다. 유지보수 일자, 편성 번호, 차호, 유지보수 작업자 명, 유지보수 소요시간과 조치 내용이 포함한다. 점검검수 일정 관리 하위 메뉴에서는 타이어 점검검수 이력을 제공한다. 점검검수 일자, 편성 번호와 점검 주기가 포함한다.

4.1.4 관리자 메뉴

관리자 메뉴를 통해 타이어 마스터 관리, 센서 마스터 관리, 임계값 설정 및 센싱 데이터 수집 로그 하위 메뉴가 포함한다. 타이어 마스터 관리 메뉴에서 타이어 별 타이어ID와 해당 타이어 모델 명, 부착한 편성번호, 차호, 위치 및 입고/폐기 일자와 같은 정보를 기록하고 센서 마스터 관리 메뉴에서는 모든 센서에 대한 부착한 타이어 ID, 편성번호, 차호 및 입고/폐기 일자를 기록한다. 임계값 설정 메뉴에서 긴급교체에 대한 임계값, 온도 및 압력에 대한 임계값을 설정이 가능하다. 센싱 데이터 수집 로그 메뉴를 통해 원시 데이터를 조회 가능하여 데이터 수신 문제가 있는지 확인할 수 있게 구축하였다.

4.2 PHM 통합 시스템 사용의 기대 효과

기존 타이어 유지보수는 주기적으로 수동적으로 타이어의 깊이를 측정하고 타이어 깊이 임계치를 도달하면 타이어 교환을 수행한다. 또한, 주기적으로 육안 검사로 타이어 균열과 편마모를 확인한다.

통합 시스템의 모니터링 기능은 타이어 교환 필요성을 확인하는 대안으로 사용할 수 있으며 육안 검사 업무 빈

도를 줄이거나 완전히 제거할 수 있다. 따라서 육안 검사 및 측정 업무와 관련한 인건비를 절감한다.

편성 단위로 유지보수를 진행하기 때문에 편성 단위로 종합된 편성별 타이어 상태 지수 및 고장 예지 결과를 고려하고 편성 별 유지보수 일정을 선정한다. 기지의 정비선과 정비자 수 등 한정된 정비 자원을 고려하여 최적의 유지보수 일정을 도출한다. 따라서 상태가 좋은 경전철은 중단하지 않고 정비가 필요한 경전철은 더 효율적이고 효과적으로 정비를 할 수 있다.

5. 결론

연구 결론은 다음과 같다.

1. 경전철 고무 타이어 유지보수에 PHM 기술을 적용하고 경전철 시스템의 신뢰성, 가용성, 유지보수성과 안전성을 개선하기 위해 PHM 통합 시스템을 개발하였다.
2. 경전철 고무 타이어에 부착된 압력/온도 센서 및 진동 가속도 센서 정보를 수집하고 차상장치에서 TCP/IP 소켓 및 LTE-A 망을 통해 송신하였다.
3. 원시 데이터 집계, 정제 처리, 화면 제공 등 모든 기능을 단일화하고 데이터베이스 서버에서 처리하는 것으로 구축하였다.
4. 철도 안전 관리자, 철도 평선 관리자, 유지보수 관리자가 PHM 통합 시스템의 사용대상자로 정의하였으며, PHM 통합 시스템의 주요 기능은 안전 모니터링, 헬스 모니터링, 유지보수 일정 관리 기능이 포함하였다.
5. PHM 통합 시스템 사용하여 점검 인건비가 포함된 타이어의 수명주기비용을 절감하고, 운행 가용성을 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

본 논문에서 개발한 PHM 통합 시스템은 특정 시스템을 위해 개발하였지만, 동일한 개념으로 일반적인 시스템에 적용 가능한 PHM 통합 시스템을 개발하는 것으로 개선이 필요하다.

References

- [1] J. S. Park, S. K. Han, W. Lee, K. M. Moon, "Research on the application of PHM for guided weapon system infrared seeker", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.24, No.9, pp.427-435, Sep.

2023.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.9.427>
- [2] D. Hyun, S. Kim, Y. Lee, H. Lee, S. Lee, K. Kwon, B. Moon, "A study of PHM technology application to an electronic weapon system", *Journal of Applied Reliability*, Vol.20, No.3, pp.246-253, Sep. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.33162/JAR.2020.09.20.3.246>
- [3] B. W. Min, "Improved fault prediction algorithm of high-speed EMUs based on PHM technology", *International Journal of Content*, Vol.19, No.2, pp.100-111, June 2023.
DOI: <http://doi.org/10.5392/IJcC.2023.19.2.100>
- [4] B. S. Oh, D. S. Shin, Y. H. Lee, J. S. Jang, "Study on using CBM+ for the commercialization of the safety management of hydrogen refueling stations", *Journal of Applied Reliability*, Vol.23, No.1, pp.18-31, Mar. 2023.
DOI: <http://doi.org/10.33162/JAR.2023.3.23.1.018>
- [5] B. S. Oh, D. S. Shin, Y. H. Lee, J. S. Jang, "Development of technology for CBM+ data acquisition of hydrogen refueling station compressor", *Journal of Applied Reliability*, Vol.23, No.1, pp.51-72, Mar. 2023.
DOI: <http://doi.org/10.33162/JAR.2023.3.23.1.051>
- [6] H. Kim, J. Kim, S. Park, "A study on the application of electro-optical tracking system (EOTS) CBM+ based on mission criticality of naval combat system", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.24, No.1, pp.270-279, Jan. 2023.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.1.270>
- [7] M. Son, Y.-G. Kim, S.-C. Noh, M. Kim, K. Kim, "Exploring the application of CBM+ in an ISR weapon system, thermal observation device", *Journal of Applied Reliability*, Vol.22, No.3, pp.240-247, Sep. 2022.
DOI: <http://doi.org/10.33162/JAR.2022.9.22.3.240>
- [8] B.-C. Shin, J.-W. Hur, "A study of sensor reasoning for the diesel engine Turbocharger CBM+ application in the early design stage", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.7, pp.121-126, Jul. 2022.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.7.121>
- [9] H. Saranga, J. Knezevic, "Reliability prediction for condition-based maintained systems", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.71, No.2, pp.219-224, Feb. 2001.
DOI: [http://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00094-6](http://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00094-6)
- [10] D. Lin, M. Wiseman, D. Banjevic, A. K. S Jardine, "An approach to signal processing and condition- based maintenance for gearboxes subject to tooth failure", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.18, No.5, pp.993-1007, Sept. 2004.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ymssp.2003.10.005>
- [11] S. M. Kim, Y. E. Jeong, Y. J. Kim, Y. S. Kim, "Development of a diagnostic algorithm for tire state based on sensor data", *Journal of Applied Reliability*, Vol.23, No.1, pp.105-114, Mar. 2023.
DOI: <http://doi.org/10.33162/JAR.2023.3.23.1.105>

Alfonsus Julanto Endharta

[정회원]



- 2011년 2월 : Sepuluh Nopember Institute of Technology 통계학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 부산대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2016년 3월 ~ 2017년 2월 : 부산대학교 산업공학과 연구원
- 2017년 3월 ~ 2019년 2월 : 포항공과대학교 산업경영공학과 연구교수
- 2019년 3월 ~ 현재 : 네모시스(주) 책임연구원

<관심분야>

RAMS, 통계분석, 신뢰성분석, CBM/PHM

정 도 식(Dosik Jeong)

[정회원]



- 2000년 2월 : 강원대학교 산업공학과 (공학사)
- 2000년 5월 ~ 2009년 2월 : 제노시스
- 2009년 3월 ~ 2016년 8월 : 카이엠
- 2016년 10월 ~ 현재 : 네모시스(주) 상무

<관심분야>

RAM, 시뮬레이션

이 철 림(Chullim Lee)

[정회원]



- 2015년 7월 ~ 2018년 3월 : 팀와이퍼 기술혁신팀 팀장
- 2018년 3월 ~ 2019년 2월 : 다운에스엔씨 개발팀 차장
- 2019년 6월 ~ 2019년 12월 : 오토스테이 개발팀 수석
- 2019년 12월 ~ 현재 : 네모시스 주식회사 소프트웨어개발팀 팀장

<관심분야>

정보통신, IT, 인공지능, CBM/PHM

김 경 은(Kyung-Eun Kim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 경기대학교 공학대학 화학공학과 (화학공학 학사)
- 2020년 10월 ~ 2022년 4월 : 디리아
- 2022년 4월 ~ 현재 : 네모시스(주) 선임

〈관심분야〉

정보통신, IT, CBM/PHM