

철도시스템 이상진단 및 예지정비를 위한 FMEA 분석 방안 연구

오왕석¹ · 김경화² · 김재훈^{3*}

A Study on FMEA Analysis Method for Fault Diagnosis and Predictive Maintenance of the Railway Systems

Wang Seok Oh¹ · Kyeong Hwa Kim² · Jaehoon Kim^{3*}

¹Corresponding Author

Jaehoon Kim

Tel : +82-31-460-5248

E-mail : lappin95@krri.re.kr

Received : September 20, 2023

Revised : October 18, 2023

Accepted : October 23, 2023

Abstract : With the advent of industrialization, consumers and end-users demand more reliable products. Meeting these demands requires a comprehensive approach, involving tasks such as market information collection, planning, reliable raw material procurement, accurate reliability design, and prediction, including various reliability tests. Moreover, this encompasses aspects like reliability management during manufacturing, operational maintenance, and systematic failure information collection, interpretation, and feedback. Improving product reliability requires prioritizing it from the initial development stage. Failure mode and effect analysis (FMEA) is a widely used method to increase product reliability. In this study, we reanalyzed using the FMEA method and proposed an improved method. Domestic railways lack an accurate measurement method or system for maintenance, so maintenance decisions rely on the opinions of experienced personnel, based on their experience with past faults. However, the current selection method is flawed as it relies on human experience and memory capacity, which are limited and ineffective. Therefore, in this study, we further specify qualitative contents to systematically accumulate failure modes based on the Failure Modes Table and create a standardized form based on the Master FMEA form to newly systematize it.

Key Words : CBM, PHM, reliability, FMEA, FMECA

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

1. 서론

철도차량의 생애 주기 비용 (LCC: Life Cycle Cost) 중 유지보수비는 30%로서 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 안전과 서비스 품질뿐만 아니라 유지보수의 효율성이 매우 중요한 요소가 되고 있다¹⁾. 현재 철도 분야의 유지보수는 크게 예방정비(Preventive maintenance) 또는 사후정비(Corrective maintenance)를 하고 있다²⁾. 따라서 국내에서는 유지보수의 효율성을 높이고 유지보수 비용을 절감하기 위한 방법으로, 2010년대부터 CBM (Condition Based Maintenance) 기법에 대한 연구와 현장 적용이 이루어져 왔다. CBM은 철도차량의 상태를 실시

간으로 모니터링하고 예측하여 유지보수 주기를 최적화하는 기술이다. CBM을 적용하면 철도차량의 안전성, 신뢰성, 효율성을 향상시킬 수 있으며, 국내 철도산업에서는 2010년대부터 주요 기업들이 CBM 기술을 개발하고 있다.

CBM과 유사하게 국내 철도분야에서는 PHM (Prognostics and Health Management)에 대한 연구도 이루어지고 있다. 국내 철도산업에서의 PHM 연구는 아직 초기 단계에 있지만, 빠르게 발전하고 있으며, PHM 기술은 철도산업의 안전성과 효율성을 높이는데 주요한 역할을 할 것으로 기대한다³⁾.

CBM과 PHM은 모두 장비의 상태를 모니터링하고

¹서울과학기술대학교 철도안전공학과 박사과정 (Department of Railway Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

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

³한국철도기술연구원 책임연구원 (Korea Railroad Research Institute)

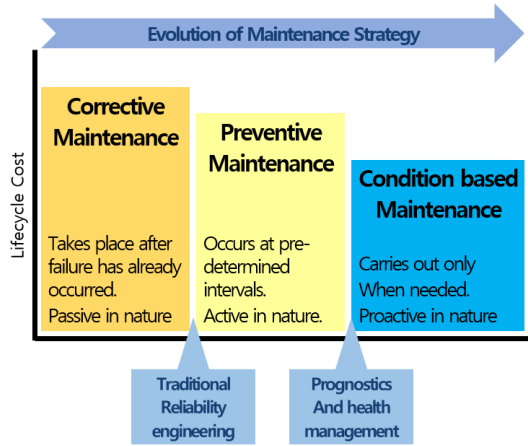


Fig. 1. Changes in maintenance technology³⁾.

고장을 예측하여 유지보수 효율을 높이는 것을 목표로 하는 기술이다. 통상적으로 CBM과 PHM은 유사한 의미로 사용되고 있으나 CBM은 주기적 또는 실시간으로 장비의 상태를 진단하여, 진단된 결과에 의해 유지보수를 수행하는 유지보수 활동의 한 종류이며, PHM은 센서를 부착하여 장비의 상태를 진단하고 잔존수명을 예지하는 기술 또는 학문영역을 표현할 때 사용된다.

Fig. 1은 고장시간 비용을 줄이기 위한 유지보수 전략의 진화를 보여준다. 유지보수 전략은 교정 유지보수 및 예방 유지보수에서 상태기반 유지보수 또는 예측 유지보수로 발전했다. 교정 유지보수 전략의 원칙은 시스템이 고장날 때까지 운영하는 것이다. 예방적 유지보수는 미리 정해진 간격으로 시스템 검사를 예약하는 반면, 상태기반 유지보수는 시스템을 실시간으로 모니터링하고 필요할 때만 유지보수 조치를 권장한다³⁾. 예측 진단을 통해 유지보수 주기를 더 연장할 수 있을 것으로 간주되고 있다⁴⁾.

본 연구에서는 정확성과 신뢰성의 관점에서 접근할 경우, 철도 시스템을 구성하는 고가의 장비나 안전이 중요한 장비에 주기적인 유지보수 보다는 필요시 유지보수를 적용하는 것이 더 유리한 것으로 전제하고, PHM을 적용하기 위한 대상 장치 선정부터 감시 방법의 정의, 그리고 PHM 적용 결과의 유효성을 확인하고자 한다.

2. 배경 연구

PHM (Prognostics and Health Management: 건전성 예측 및 관리) 기술은 발전소, 설비, 기계, 항공 등의 시스템의 상태 정보를 수집하여 정상이 아닌 상황을 인지하고 분석 및 예지 진단을 통해 고장시점을 미리 예측하여 설비관리를 최적화하는 기술이다. Fig. 2는 PHM의

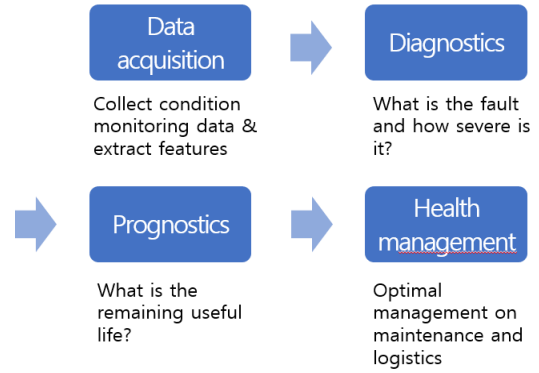


Fig. 2. Four major steps of PHM³⁾.

네가지 주요단계를 표시한 것이다³⁾. 1980년대 빈번했던 헬리콥터 사고를 예방하기 위해 영국에서 개발이 시작되었으며, 주로 항공우주 분야에서 연구가 이루어졌고, 최근에는 많은 산업분야에서 활발히 적용되고 있다⁵⁾.

PHM은 고장발생으로 인한 손실비용이 크고, 높은 신뢰도가 요구되는 시스템에 적합한 기술이며 생산제조, 항공우주, 반도체 전자, 플랜트, 중공업에 이르기까지 다양한 산업군에서 설비 가동률을 높이고 고장을 예방하기 위해 적용되고 있다⁵⁾. 우리나라에서도 새로운 성장 동력 중 하나로 IoT 및 CPS(Cyber Physical System)를 기반의 스마트 팩토리 사업에 중점투자하고 있으며, 생산설비의 고장 예방이 가장 중요한 요소로서 이를 위해 PHM이 이용된다. 또한 발전설비 및 철도와 같이 안전성 및 신뢰성이 중요한 사회기반 시설에도 PHM 기술을 적용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다⁵⁾.

PHM은 크게 다음 3가지 단계로 구성된다⁷⁾.

- 가. 이상감지 - 성능 저하 설비의 고장 감지
- 나. 분석 및 예지 진단 - 이상 원인 파악, 예측 진단
- 다. 설비 관리 - 장애 요소와 고장 원인 정비

본 연구에서는 철도시스템의 유지보수에 PHM을 적용하기 위하여, 위의 3 단계를 아래와 같이 다시 정의하였다.

Fig. 3의 PHM 적용 단계별 활동을 간략히 설명하면 아래와 같다.

또한, 본 연구에서는 Fig. 3의 PHM 단계를 철도차량 및 시설의 유지보수에 적용함에 있어서 기존의 신뢰성 분석 기법 중 장비/설비 등의 고장을 분석하는데 유용

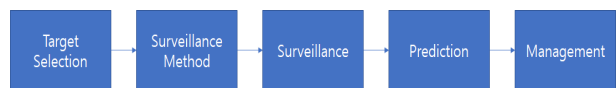


Fig. 3. Application stage of PHM³⁾.

Table 1. Considerations for each step of PHM application

Phase	Description
Target selection	What equipment/facilities will be monitored?
Surveillance method	How/what data will be collected from the equipment/facility?
Surveillance	How to extract meaningful information from collected data?
Prediction	How can we predict abnormalities in advance through collected data?
Management	How to determine maintenance timing, maintenance target, and maintenance period based on predicted information?

하게 사용되어진 FMEA 기법을 PHM의 대상 장치를 선정하는데 활용하고자 한다.

FMEA는 정성적 신뢰성 예측 기법 또는 고장 해석 기법으로써, 이미 오래전부터 철도차량의 유지보수에 활용되어져 왔다⁸⁾.

3. PHM 적용 방안

본 절에서는 정확성과 신뢰성의 관점에서 철도 시스템을 구성하는 고가의 장비나 안전이 중요한 장비에 PHM을 적용하기 위하여 Fig. 3의 PHM 단계별 방법들을 정의하고자 한다.

3.1 PHM 대상 선정

PHM의 구현 및 비용을 고려할 때, 시스템을 구성하는 모든 장치 혹은 부품에 대해서 PHM을 적용하는 것은 효율성이 높지 않음을 알 수 있다.

본 연구에서는 시스템을 구성하는 장치 혹은 부품 중 고가의 혹은 안전 및 서비스에 높은 영향을 미치는 장치/부품을 선정하는 방법으로 FMEA 기법을 Fig. 4와

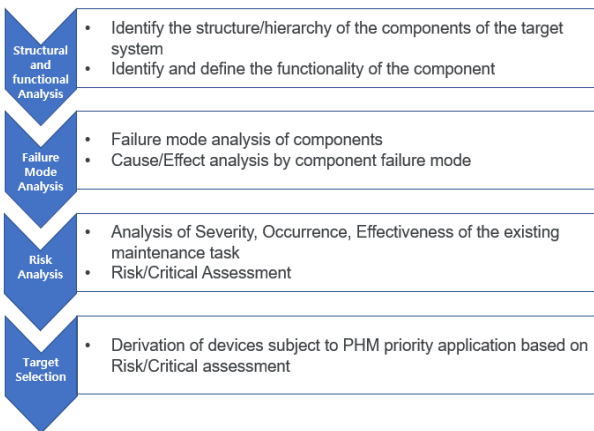


Fig. 4. PHM target selection procedure through FMEA analysis³⁾.

같이 절차를 수립하여 적용하였다.

이미 알려진 위험도는 심각도(치명도) 와 발생빈도로 나타낼 수 있다.

Fig. 4의 절차에 따라 수행된 FMEA를 통하여 시스템을 구성하는 장치 혹은 부품에 대한 치명도는 시스템의 고장으로 인한 피해 발생의 영향도를 나타낸다⁹⁾.

본 연구에서는 Fig. 4의 FMEA 절차에 따라, AIAG and VDA, “FMEA Handbook”에 자동차에 적용된 risk는 10단계로 정의를 내렸으나, 철도에서는 이미 사용되고 있는 risk matrix를 적용 아래와 같이 대상 장치를 선정한다. 이때 위험도 평가는 정량적 혹은 정성적 평가로 구분한다¹⁰⁾.

- 치명도가 높은 (C5에서 C1으로 높은 순) 하위시스템 혹은 부품을 선택
- 하위시스템 혹은 부품이 수행하는 기능이 시스템의 안전기능에 어떠한 영향을 미치는지 확인하여, 우선순위가 높은(D4에서 D1으로 높은 순) 하위시스템 혹은 부품을 선택

Table 2. PHM target selection criteria

	C5	C4	C3	C2	C1
D1	P4	P4	P3	P2	P1
D2	P4	P4	P4	P3	P2
D3	P5	P5	P5	P4	P3
D4	P5	P5	P5	P5	P4

위의 Table 2에서 C는 고장모드에 대한 치명도를 나타낸다. 고장 모드에 대한 C는 FMEA 수행시 분석되는 심각도를 기준⁹⁾으로 철도시스템에 일반적으로 적용되는 수준으로 아래와 같이 정의하였다.

Table 3. Criticality rating according to failure mode (C)

Failure level	Description	Quantitative criteria
C1	Cause large-scale loss of life, loss of systems or serious environmental damage	3 or more people death
C2	Cause serious loss of life, occupational diseases and damage to critical systems or the environment	1 death <= X < 3 deaths
C3	Causes minimal injuries, occupational diseases and minimal system or environmental damage	1 person seriously injured <= X < 1 death
C4	Causes minor injuries and occupational diseases, minor damage to systems or the environment	Less than 1 person seriously injured
C5	Causes very minor injuries and occupational diseases, very minor damage to systems or the environment	Minor injury to less than 1 person

위의 Table 2에서 D는 해당 고장 모드가 시스템의 주기능 고장을 발생시킬 수 있는 연관성을 D1부터 D4까지 아래와 같이 정의하였다.

Table 4. Functional rating according to failure mode (D)

Failure level	Description
D1	Probability of functional failure when an abnormality (failure) occurs $\geq 90\%$
D2	Probability of functional failure when an abnormality (failure) occurs $\geq 70\%$
D3	Probability of functional failure when an abnormality (failure) occurs $\geq 50\%$
D4	Probability of functional failure when an abnormality (failure) occurs $\geq 30\%$

위의 Table 3과 Table 4를 기준으로 특정 부품 혹은 장치의 고장이 시스템에 미치는 영향도를 조합하여 PHM의 대상으로 선정하는 기준을 정의하였으며, 그 내용은 아래와 같다.

Table 5. PHM target level

Failure level	Description	Precautions
P1	Failure of a specific part or device may result in very serious human or material damage	Very necessary
P2	Failure of a specific part or device may result in serious human or material damage	Very necessary
P3	Failure of certain parts or devices may result in human or material damage	Necessary
P4	Failure of certain parts or devices may result in minor human or material damage	Options
P5	Failure of a specific part or device may result in minor human or material damage	Unnecessary

본 연구에서는 Table 5를 기준으로 P1 부터 P3까지를 PHM을 적용하는 대상 선정의 기준으로 정의하였다. 즉, Table 5를 기준으로 P1에서 P3에 해당하는 부품 혹은 장치 등을 선정하고 감시함으로써, 예방적 조치를 수행하여 발생할 수 있는 인적 손실 및 시스템의 피해를 최소화할 수 있을 것으로 기대한다.

3.2 감시 방법

감시는 설비 건전성을 표현할 수 있는 물리량을 계측하는 단계이며, 잘못된 감시 방법을 적용하거나 불필요한 계측 데이터가 수집된다면 이후 과정이 아무리 좋고 원활히 수행하였다고 해도 좋은 PHM 결과를 기대하기 어렵다¹¹⁾. 이러한 이유로 감시 방법과 기준을 잘 설계하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

아래의 Table 6은 시스템을 구성하는 부품 혹은 장치에 대한 감시 방법을 정의한 것이다.

Table 6. Surveillance method for each surveillance target

Surveillance method	Description
Vibration	Applies to objects that vibrate during operation, such as rotating bodies, doors, and vehicle connections
Noise	Applies to objects that generate noise during operation, such as rotating bodies, doors, and vehicle connections
Temperature	Applies to objects where temperature may rise due to strong rotation or pressure, such as brake pads, wheel axles, and oils
Speed	Applies to objects that perform rotational motion, such as wheel axles and motor drive shafts
Pressure	Applies to objects to which pressure is applied directly or indirectly
Current	Applies to objects that can be damaged by overcurrent or undercurrent
Voltage	Applies to objects that can be damaged by overvoltage or undervoltage

Table 6에서 정의한 감시 방법들 외에도 부품 혹은 장치의 특성에 따라 다른 감시 방법이 적용될 수도 있다.

Table 6의 예에서, 물리적으로 움직이는 대상을 감시할 경우에 적용할 수 있는 감시 방법으로 진동과 소음 등을 고려할 수 있다. 진동을 감시 방법으로 선택한 경우, 감시의 정확도를 향상시키기 위해서는 감시 대상에 진동을 감지할 수 있는 설비를 직접 설치하는 것이 가장 효과적인 것이다. 다만, 모든 감시 대상이 설비를 직접 설치할 수 있는 것은 아니다. 소음의 경우에는 감시 대상에 직접 설치하지는 않더라도 최대한 가까운 위치에 소음을 측정할 수 있는 설비를 설치하여 주변의 노이즈를 최소화하는 것이 감시 정확도를 향상시키는 방법일 것이다. 이에, 본 연구에서는 PHM 대상에 대한 감시 설비의 설치 위치를 기준으로 감시 방법의 기준을 아래와 같이 정의하였다.

Table 7. Classification according to surveillance method (location) by surveillance target

Surveillance category	Description
M1	Monitoring by installing directly on the monitoring target (simple bracket)
M2	Monitoring by installing (bracket) around the surveillance target
M3	Monitoring by installing (bracket) on a device connected to the monitoring target
M4	Monitoring by installing (bracket) around the device connected to the monitoring target
M5	No monitoring (Monitoring devices cannot be installed)

3.3 감시

감시설비로부터 획득하는 계측 데이터에서 유의미한

Table 8. Surveillance and diagnostic phase

Phase	Description
Abnormal detection	Steps to detect abnormalities
Abnormal classification	Steps to distinguish between the above types - In case of malfunction - In case of operator's or operator's mistake - Natural Disasters
Fault isolation	If the above cause is a failure due to a defect, the step of specifying the defect occurrence area
Identify the cause	Steps to determine the cause of the defect

정보를 추출하고 이를 표현하는 과정을 감시라고 한다. 감시 과정을 통하여 감시 대상에 대한 진단을 수행할 수 있으며, 진단은 아래와 같이 세분화 될 수 있다.

3.4 예측

감시 설비를 통하여 진단한 데이터를 기준으로 시스템 혹은 부품의 건전성을 예측하는 것은 PHM을 통하여 철도시스템의 유지보수를 수행하는 단계에 있어 가장 중요한 요소이다. 시스템 혹은 부품 등의 건전성을 예측하는 기준은 크게 세가지로 구분될 수 있다.

Table 9. Prediction method

Phase	Description
Fault prediction	By identifying measured abnormalities, predicting the time until failure (maintenance margin time) allows preventive measures to be taken before failure occurs
Status prediction	By identifying measured abnormalities, it is possible to predict the condition of the device in advance and perform maintenance at the upcoming maintenance cycle
Life prediction	By identifying measured abnormalities, it is possible to predict the lifespan of devices or parts and take preventive measures before failure occurs

Table 9와 같은 예측을 위해서는 예측 모델이 필요하며, 경험기반방법(Experience based approach), 데이터 기반방법(Data-driven approach), 그리고 물리적 고장 메커니즘 기반 모델(PoF based degradation model)의 세 가지가 주요 방법으로 연구되고 있다¹²⁾.

본 연구에서는 물리적 고장 메커니즘 기반 모델(PoF based degradation model)을 활용하고자 하며, 온라인 건전성 데이터를 활용하여 손상모델 실시간 업데이트 및 미래를 예측하는 방법을 활용한다. 이 방법의 장점으로는 가장 정확한 방법이며, 적은 고장 데이터로 가능하고, 물리적 모델에 기반하므로 일정 시간 이상의 미래 고장 예지도 가능하다¹³⁾.

이에 본 연구에서는 물리적 고장 메커니즘 기반 모델(PoF based degradation model)을 활용하여 P-F Interval

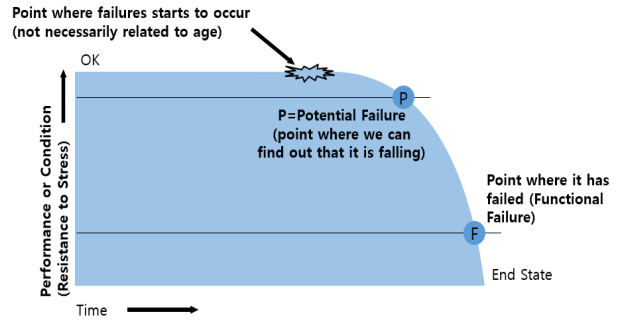


Fig. 5. P-F Interval⁵⁾.

Range의 분석에 중점을 두었다. P-F Interval은 감시를 통하여 시스템 혹은 부품의 이상이 검지 되는 시점부터 실제 고장모드로 전이되는 시간을 예측할 수 있는 중요한 지표이다¹⁴⁾.

Fig. 5는 PHM 대상을 감시하는 방법에 따른 P-F Interval을 나타내는 일반적인 선형을 보여준다. Figure. 6에서는 감시하는 방법을 진동(Vibration), 소음(Noise), 열(Heat)에 따라 각각 분석된 지표를 보여준다.

3.5 PHM Factor 정의 및 분석

본 연구에서는 앞의 3.1절부터 3.4절까지의 PHM 적용 단계를 토대로 FMEA에 아래와 같은 분석 Factor들을 PHM 선정 대상에 대하여 추가로 정의하였다.

Table 10. PHM Factor(s)

Phase	Description
HM Potential Failure	Failure types for PHM selection targets
HM Failure Mode	System failure mode caused by failure of PHM selection target (system failure mode to be prevented through PHM)
Sensing Method	Monitoring methods for PHM selection targets
Sensing Possibility	HM Potential Failure detection rate when applying the sensing method
P-F Interval Range	Time for HM Potential Failure to transition to HM Failure Mode

4. 사례연구

본 연구에서는 3장에서 논의된 PHM을 추가 적용한 FMEA 분석법을 철도 시스템에 적용하여 실제 발생 가능한 고장에 대한 고장 검지율을 시험하였다. 시험 대상은 서울 지하철 4호선에 설치된 스크린 도어 시스템을 선정하였다.

4.1 스크린 도어 시스템의 구조

서울시 지하철에 적용되는 스크린도어는 Fig. 6와

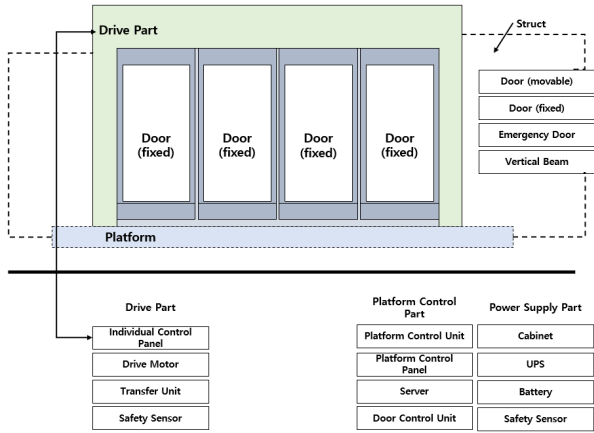


Fig. 6. Screen door structure.

같이 같은 구조로 이루어져 있다.

- 구동부: 스크린도어를 열고 닫을 수 있도록 제어하는 장치(구동모터-도어엔진, 제어반 등)
- 구조체: 스크린도어의 동작 대상 및 고정체 (가동문, 고정문, 비상문, 수직빔 등)

4.2 PHM 대상 선정

부록의 Fig. 9는 스크린도어의 FMEA 분석 내용 중 PHM 선정 대상을 정의하기 위하여 스크린도어의 구성 부품에 대한 치명도 및 고장영향도(Table 3 참조)를 나타내고 있다. 부록의 Fig. 7에서는 도어엔진 조립체를 구성하는 베이스빔 및 모터조립체가 Table 2를 기준으로 P2 등급에 해당하는 부품으로 정의된다(선정 순위 높음).

부록의 Fig. 7은 Fig. 9를 Table 1에 적용하여 선정된 PHM 대상(Fig. 7의 HM 대상 항목)의 예를 보여준다. 감시 장치는 해당 부품을 통하여 감시할 수 있는 대상을 나타낸다.

4.3 PHM 대상의 감시방법 정의

부록의 Fig. 7를 통하여 선정된 PHM 대상 항목들에 대해서는 Table 5와 같이 감시 방법과 감시 설비의 설치 위치 등을 정의한다. 본 연구에서는 HM 대상으로 선정된 장치들에 대해서, 부록의 Fig. 8과 같이 감시방법을 선정하였다.

4.4 PHM 대상에 대한 Factor 분석

PHM 대상으로 선정된 항목들에 대해서는 Table 7에서 정의된 Factor들을 분석하여 PHM 수행의 효율성을 예측하였다. Factor에 대한 분석은 아래와 같이 수행하였으며, 그 결과는 부록의 Fig. 8과 같다.

- HM Potential Failure와 HM Failure Mode 분석 :
 - HM Potential Failure Mode로 인하여 HM Failure Mode (주기능)에 해당하는 고장을 유발하는지를 확인
- Sensing Possibility :
 - Potential Failure를 Sensor 부착을 통해 상태를 감시 가능한지를 확인
- P-F Interval Range :
 - P-F Interval이 정비하기 위한 시간보다 길어야 함.
 - 정비시간 보다 P-F Interval이 짧다면, Potential Failure를 감지하더라도 조치하는데 어려움이 발생함.

4.5 PHM 실행 및 결과 분석

본 연구에서는 실제 운영중인 서울 지하철 4호선 스크린도어에, 3장에서 논의한 PHM 기법이 반영된 FMEA에 적용하여 분석함으로써, PHM을 통한 시스템 및 부품의 감시 방법의 고장 검지 효율성을 확인하였다.

PHM 적용은 대상의 선정과 감시 방법 및 감시 설비의 설치 위치, 그리고 감시 중 획득한 데이터의 분석 방법에 따라 차이를 보일 수 있으나, 본 연구에서는 특히, 감시 설비의 설치 위치에 따라 검지 효율성이 크게 차이가 남을 확인하였다. 즉, 획득한 데이터가 예측에 미치는 영향은 감시 방법도 중요하지만, 설치 위치가 매우 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Table 11. Failure detection rate by installation location

		Detection rate			
		D4	D3	D2	D1
Installation location	M1	30% >	40% >	60% >	100%
	M2	20% >	30% >	50% >	90% >
	M3	10% >	30% >	40% >	60% >
	M4	5% >	10% >	30% >	40% >

Table 11은 PHM을 적용함에 있어 PHM 대상에 직접 감시 설비를 설치하여 측정하는 것이 가장 높은 고장 검지율을 보여준다. 다만, 현실적으로 모든 PHM 감시 대상에 직접 감시 설비를 설치하는 것은 기술적, 공간적인 제약이 있을 수 밖에 없으며, 직접 설치가 불가능한 경우 (M2 이상)에는 PHM 대상에 대한 감시 설비의 수를 늘리는 것도 방법이 될 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 정확성과 신뢰성의 관점에서 철도 시스템을 구성하는 고가의 장비나 안전이 중요한 장비에

PHM을 적용하기 위한 방안을 정의하여 시스템의 고장을 사전에 예측하고 이를 방지할 수 있는 예방정비로써 PHM 도입의 적정성을 확인하고자 하였다.

본 연구에서는 이를 위하여 FMEA를 통한 PHM 대상 선정하는 방법을 정의하였으며, 선정된 PHM 대상 항목들에 대한 PHM Factor를 분석 정의함으로써, 부품 혹은 시스템의 고장을 사전에 감지할 수 있는 여부를 예측 정의하고, 실제 PHM을 수행한 후 그 효율성을 확인하였다.

다만, PHM Factor 중 P-F Interval과 같은 예측 모델을 통한 분석 방법은 아직 추가 연구가 필요하며, 이는 향후 예방정비의 시점을 추정할 수 있는 중요한 Factor로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgment: This work was supported by Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Korea government(MOLIT) (No. RS-2021-KA164547, Development of Self-Powered and Wireless Safety Monitoring Technology for Railway Power Supply Systems.

References

- 1) K.S. Lee and J.W. Kim, "A Study on Condition Based Maintenance for Rolling Stock", The Korean Society For Railway, Fall Conference Papers, 2016.
- 2) K. J. Kim and K. O. Lee, "A Study on the Improvement for EMU Maintenance System of Urban Transit", J. Korean Soc. Saf., Vol. 25, No. 1, pp. 87-92, 2010.
- 3) N. H. Kim, D. An and J. H. Choi, "Prognostics and Health Management of Engineering Systems", 1st Edition,

- Springer International Publishing Switzerland 2017.
- 4) J. H. Lee and M. S. Kim, "Analysis of Advantages and Disadvantages of CBM and PHM", The Korean Society of Mechanical Engineer, 2023.
- 5) Korea Society for Prognostics & Health Management, PHM introduction, <http://www.phm.or.kr/m/asso/greet.php>
- 6) D. U. Kim, "Remaining Life Evaluation of Thermal Power Plant Boiler via Image Reverse Engineering", Master Thesis, Ajou University, 2021.
- 7) S. H. Lee and B. D. Yoon, "Direction of Industry 4.0 and Failure prediction and Health Management Technology (PHM)", Journal of KSNVE , Vol. 25, No. 1, pp. 22-28, 2015.
- 8) E. G. Lee, "A Study on RCM Application to SMRT AF Track Circuits", Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2017.
- 9) AIAG and VDA, "FMEA Handbook", 2nd Edition, 2022.
- 10) Y. S. Kim, "The Study of Risk Matrix Development for Urban Metro EMU", J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 6, pp. 111-117, 2011.
- 11) Onepredict Technical Blog, <https://tech.onepredict.ai/c67c1c1b-72ef-4d96-99e7-cfbc829813fd>
- 12) R. Rajkumar, "Prognostics and Health Management of Electronics: A Review", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 58, No. 2, 2009.
- 13) J. Yang, S. Wang and Y. Liu, "Simulation for Prognostics and Health Management", published in Proceedings of the ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2019.
- 14) Marius Basson, "RCM3 - Risk-Based Reliability Centered Maintenance", 3rd Edition, Industrial Press Inc, 2018.

부 록

SEQ. #	고장유형 관리번호 (ID)	BOM코드	장치명 (ITEM DESCRIPTION)			HM 대상	감시장치
			.v.Lv.2	Lv.3	Lv.4		
3		BOMCD-04-04-01-00-0000	모터발전 조립체				
4	FMECA-04-04-001	BOMCD-04-04-01-01-0000	베이스범			P2	모터
5	FMECA-04-04-002						
6	FMECA-04-04-003						
7	FMECA-04-04-004						
8	FMECA-04-04-005	BOMCD-04-04-01-02-0000	모터 조립체			P2	모터
9	FMECA-04-04-006						
10	FMECA-04-04-007	BOMCD-04-04-01-03-0000	DCU 조립체			P1	자재
11	FMECA-04-04-008						

Fig. 7. Example of PHM selection.

SEQ. #	고장유형 관리번호 (ID)	BOM코드	장치명 (ITEM DESCRIPTION)			Sensing Method	Sensing Possibility
			.v.Lv.2	Lv.3	Lv.4		
5	FMECA-04-04-002	BOMCD-04-04-01-02-0000	모터 조립체			진동	<= 90%
6	FMECA-04-04-003						
7	FMECA-04-04-004						
8	FMECA-04-04-005						
9	FMECA-04-04-006	BOMCD-04-04-01-03-0000	DCU 조립체			설치불가	N/A
10	FMECA-04-04-007						
11	FMECA-04-04-008						
12	FMECA-04-04-009					N/A	N/A

Fig. 8. Definition of monitoring method for each PHM target.

SEQ. #	고장유형 관리번호 (ID)	BOM코드	장치명 (ITEM DESCRIPTION)			기능 (Function)	고장유형 (Failure Mode)	고장원인 (Failure cause)	F (빈도)	S (사상사 고 심각 도)	R (위험도 등급)	D (고장영 향도)	SCIL	
			lv.1	lv.2	lv.3									lv.4
1	2	3	4			6	7	8	24	25	26		27	
1		BOMCD-04-00-00-00-0000-00-00				출입문장치								
2		BOMCD-04-04-00-00-0000				객실동로문	객실간 승객 이동을 위한 객실 동로문 열림 및 닫힘							
3		BOMCD-04-04-01-00-0000				도어오픈 조립체	도어작동의 구동부분							
4	FMECA-04-04-001	BOMCD-04-04-01-01-0000				베이스빔	도어 오픈의 부품을 지지	이완	고정볼트 이완	F1	C1	1등급	D2	X
5	FMECA-04-04-002						탈락	부품고정볼트 이완 및 분해로 기능불능	F1	C1	1등급	D2	X	
6	FMECA-04-04-003						파손	볼트 손상	F1	C1	1등급	D2	X	
7	FMECA-04-04-004						장력부족	장력조절 조정 미흡	F1	C1	1등급	D2	X	
8	FMECA-04-04-005	BOMCD-04-04-01-02-0000				모터 조립체	자동으로 벨트가 회전하도록 함	단선	단선 발생	F1	C1	1등급	D2	X
9	FMECA-04-04-006						이완	진동/조임이 약함	F1	C1	1등급	D2	X	

Fig. 9. FMEA analysis (Criticality, failure effect).

SEQ. #	고장유형 관리번호 (ID)	BOM코드	장치명 (ITEM DESCRIPTION)			기능 (Function)	고장유형 (Failure Mode)	HM Potential Failure	HM Failure Mode	Sensing Method	Sensing Possibility	PF Interval Range	PF Interval Consistency
			lv.1	lv.2	lv.3								
2		BOMCD-04-04-00-00-0000				객실동로문	객실간 승객 이동을 위한 객실 동로문 열림 및 닫힘						
3		BOMCD-04-04-01-00-0000				도어오픈 조립체	도어작동의 구동부분						
4	FMECA-04-04-001	BOMCD-04-04-01-01-0000				베이스빔	도어 오픈의 부품을 지지	이완	베이스빔 탈락으로 인하여 모터조립체의 정상동작 불가 -> 도어개폐 불가	진동	<= 90%	2M	비선형
5	FMECA-04-04-002					탈락	볼트 마모/크랙						
6	FMECA-04-04-003					파손							
7	FMECA-04-04-004					장력부족	볼트 이완 (느슨해짐)						
8	FMECA-04-04-005	BOMCD-04-04-01-02-0000				모터 조립체	자동으로 벨트가 회전하도록 함	단선	단선	모터조립체의 정상동작 불가 -> 도어개폐 불가	N/A	N/A	N/A
9	FMECA-04-04-006					이완	벨트 이완 (느슨해짐)						
10	FMECA-04-04-007	BOMCD-04-04-01-03-0000				DCU 조립체	도어시스템 제어 (열림/닫힘/장력감지)	감지	고장 후 조치만 가능	N/A	N/A	N/A	N/A
11	FMECA-04-04-008						장력불량						
12	FMECA-04-04-009						작동불량						
13	FMECA-04-04-010	BOMCD-04-04-01-04-0000				안전제 조립체	도어 시스템과 차량 배전과의 인터페이스	작동불량		고장 후 조치만 가능			
14	FMECA-04-04-011	BOMCD-04-04-01-05-0000				도어열림트위치	열림 감지	장력불량		고장 후 조치만 가능			
15	FMECA-04-04-012						고각						
16	FMECA-04-04-013	BOMCD-04-04-01-06-0000				벨트 조립체	벨트 장력조절	이완	모터조립체의 정상동작 불가 -> 도어개폐 불가	설치불가	N/A	N/A	N/A
17	FMECA-04-04-014					장력부족	벨트 이완 (느슨해짐)						
18	FMECA-04-04-015					편마모							

Fig. 10. Example of Factor(s) analysis results for PHM target.