

## 도시철도 유지보수 예방정비체계 구축 방법론에 관한 연구

이호용, 박기준, 안태기, 한석윤, 서명원  
철도연구원, 철도연구원, 철도연구원, 철도연구원, 성균관대학교

### A Study on the construction methodology of preventing maintenance system for Urban transit

H. Y. Lee, K. J. Park, T. K. Ahn, S. Y. Han, M. W. Suh  
KARI, KARI, KARI, KARI, SKKU

**Abstract** - The safety of staff, customers and of general Public in general viewed as one of the most important requirements in the urban transit. The maintenance computerization system for car of urban transit is a part of standardization and development of urban transit system, and We have been performed the establishment of maintenance computerization system from 2001 to 2005. The RAMS(reliability, availability, maintainability and safety) estimation for maintenance computerization system are utilized in a variety of computerization system for user's convenience and safety in maintenance. Ever since its inception though, the urban transit has searched for ways to improve reliability, availability, maintainability and safety of the railway subsystem. Provision of a reliable maintenance system include RAMS of the vehicles plays a very important role in achieving a safe system.

#### 1. 서 론

우리나라 도시철도는 30여년 역사를 가지고 있고, 현재 19개 노선에서 약 580 km를 운행하고 있으며, 국민생활과 밀접한 교통수단으로 성장하였다. 지난 30년에 걸쳐 유지보수 분야는 다른 관리 분야에 비해 많은 변화를 해왔다. 그 변화는 장비의 양적인 증가뿐만 아니라 다양성의 증가에도 기인한다. 전동차들은 점차 복잡하게 설계되고, 조직과 기능의 변화를 고려하는 관점에서 유지보수 정책이 세워져야 한다.

현재의 유지보수의 작업형태가 작업일지 등으로 이루어져 체계적인 관리의 어려움이 발생하고 전산화작업을 몇몇 운영기관에서 진행하고 있으나 결과데이터의 가공성의 활용이 미흡하다. 최근에는 장비의 고장이 안전과 환경에 큰 영향을 미치는 것으로 널리 인식되고 있으며, 도시철도 유지보수가 비용과 안전성에 큰 영향을 미친다는 사실을 많은 사람들이 인식하고 있다. 유지보수의 핵심은 이러한 변화요구에 대한 적절한 대응과 안전성을 향상하는 것이다. 이를 위해서 신뢰성, 가용성, 정비성 및 안전성을 향상할 있는 RAMS 적용 방법론과 분석기술이 반드시 필요하다. RAMS기법은 제작사의 설계 및 생산기술 뿐만 아니라 제품수명 및 유지보수와 관련된 기술을 구현하는데 필수요건이며 이러한 기법을 이용하여 유지보수체계를 구축하려면 많은 시간과 비용이 소모되어 운영기관 독자적으로 수행하는데 어려움이 따른다. 따라서 도시철도유지보수 예방정비 구축방법론을 개발하여 국내외 철도유지보수 기술 향상에 큰 도움이 되고자 한다. 또한 국내 도시철도 운영기관에서 개별적으로 이루어지는 예방정비시스템 구축을 국가적 유지보수 정보관리시스템으로 구축하고 보급함으로써 중복투자 및 예

산낭비를 막을 수가 있으며, 유지보수 기술을 공유하여 효율적인 예방정비시스템을 이루어 낼 수 있다. 예방정비 시스템에서 주된 쟁점은 국내 도시철도 분야를 세계적인 경쟁력을 가진 분야로 육성하고 수명주기비용을 최적화하여 경제성을 극대화시키고 사고/고장에 대한 예방정비로 안전성향상에 기여하도록 구축하는 것이다. 또한, 검사단계에서 고장 사례 제공하고 교환/정비에서는 예방정비 관련 데이터 갱신하며, 유지보수가 이루어지는 모든 과정이 시스템에 반영되도록 하여 인공지능을 가지도록 도시철도유지보수 예방정비 구축방법론을 제시하고자 한다.(1)

도시철도 전동차는 전기, 기계적으로 결합된 매우 복잡한 구조를 가진 대형시스템으로 안정성의 확보와 이를 유지할 수 있는 유지보수 시스템의 구축이 필수적이다. 일반적으로 대형복잡시스템(complex system)의 운영 및 유지, 보수에 필요한 비용은 총수명 주기비용(LCC, Life Cycle Cost)의 60 % 정도를 차지할 정도로 유지보수비가 전체 운영비에 미치는 영향이 크다고 알려져 있어 효율적인 운영 및 유지보수 시스템의 구축을 통하여 유지보수비용의 절감을 추구하는 일이 무엇보다 시급하다. 도시철도 전동차는 고가의 부품으로 구성되어 유지보수비용이 높을 뿐만 아니라 유지보수를 위하여 차량 운용 스케줄에서 차량을 떼어내는 복잡한 절차가 필요하게 되어 차량의 효율적인 운영에 크게 영향을 미치게 된다. 체계적이고 효율적인 예방정비를 위해서는 유지보수 과정에서 획득된 자료를 표준화된 방법으로 데이터베이스화하고, 이 자료로부터 각 장치의 신뢰도를 예측, 고장모드의 정의 및 영향분석, 고장 트리 분석 및 평균수리시간예측 등의 기능을 수행한다. 분석된 자료와 유지보수의 경험을 바탕으로 효율적인 예방정비 절차가 이루어지고, 유지보수 작업 결과를 피드백 할 수 있는 인공지능 예방정비체계 구축방법에 대한 연구가 필요하다. 이러한 방법론은 앞으로 새로이 도입되는 경량전철까지도 체계적으로 관리될 수 있어야하며 신뢰성/가용성/유지보수성을 향상시킬 수 있는 안전관리시스템에도 포함될 수 있도록 방법론이 체계적으로 구축되도록 해야 한다.

#### 3. 예방정비를 위한 RAMS 지표정의

##### 3.1 신뢰성 지표

일반적으로 신뢰성에서 말하는 신뢰도(reliability)란 시스템이나 기기, 부품 등이 주어진 조건 하에서, 의도하는 기간동안, 규정된 기능을 고장 없이 발휘할 확률이라고 정의 내리고 있다.(KS) 도시철도 시스템은 대형화 및 복잡한 구조로 이루어져 있고 시스템이 환경적 조건인 온도나 습도, 진동 또는 소음 등 외부로부터의 자연적 조건들과 사용자의 습관이나 문화사회적으로 인한 신뢰도를 포함하고 있어야 한다. 도시철도 유지보수 신뢰도지표는 지수분포를 따르고 있어 일반적인 관계를 이용해서 식(1)에서와 같이 신뢰도 함수를 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 도시철도 운영시간이고,  $\lambda(t)$ 는 고장율함수를 말한다.  $R(t)$ 과  $\lambda(t)$  등의 지표들은 시간에 따라 변화하여 가는 함수들이기 때문에 이들을 대표하는 하나의 지표를 개발할 필요가 있게 된다. 이러한 지표는 중심을 나타내는 지표와 산포를 나타내는 지표로 크게 나눌 수 있다. 중심을 나타내는 지표로서는, 평균수명(mean life) 또는 기대수명(expected life)  $E(t)$ 를 많이 사용한다. 즉,  $E(t)$ 는 식(2)과 같이 성립된다.

$$E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt = MTBF(\text{or } MTTF) \quad (2)$$

이 때, MTBF(Mean Time Between Failure)는 평균고장간격으로 고장이 나면 수리가 가능한 시스템의 경우에 많이 쓰인다. 반면에 MTTF(Mean Time To Failure)는 평균고장시간으로 수리가 불가능하기 때문에 교체하여야만하는 부품일 경우에 많이 쓰인다. 신뢰성에서 수명의 단위로 시간 대신에 사용거리 또는 회수 등도 사용되기 때문에, MTBF 이외에도 MCTF(Mean Cycle To Failure), MKTF(Mean Kilometer To Failure) 혹은 MRBF(Mean Rounds Between Failure) 등이 사용되기도 한다. 이러한 지표를 이용하여 시스템에 대한 신뢰성을 평가하겠다.

### 3.2 가용성 지표

가용도함수는 기기의 고장분포와 보전원에 따라 달라지는 보전시간분포에 의하여 결정이 된다. 주어진 시간간격  $[t_1, t_2]$ 에서의 가용도함수의 평균은 식(3)이 되며, 이를 구간 가용도(interval availability)라고 한다. 이러한 가용도함수는 시간에 따라 달라지는 함수이므로 이를 대표할 수 있는 지표가 필요하게 된다. 그 첫째가 고유의 가용도(inherent availability)로써 식(4)와 같이 표현된다. 이것은 기기의 메이커가 만들어 넣은 가용도를 말한다.

$$\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (3)$$

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (4)$$

도시철도 유지보수의 최종 목표는 기기나 시스템의 가용도를 극대화하는 것이라 볼 수 있으므로, 경영자 입장에서는 고유의 가용도를 최대화할 수 있도록 MTBF의 최대화와 MTTR의 최소화에 노력하여야 하며, 사용자 측면에서도 MTBF를 길게 하고 고장 발생시에는 MTTR을 최소로 하는 활동이 필요하다.

### 3.3 정비성 지표

신뢰성공학에서는 시스템의 유효성(systems effectiveness)의 측면에서, 신뢰도와 함께 다음과 같이 정비성(maintainability)라고 하는 지표를 사용한다. 정비성이란 정비 가능한 시스템, 기기, 부품 등이 규정된 조건하에서 일정 시간내에 정비를 완료할 수 있는 확률이라고 정의 할 수 있다. 정비방식에는 고장이 발생되기 전에 부품을 교체하고, 윤활유를 교환하는 등을 실시하는 예방정비(PM, Preventive Maintenance) 방식과 고장이 발생되었을 때 정비하는 사후정비(BM, Breakdown Maintenance) 방식이 있다. 그러나 그

이외에도 개량정비(CM, Corrective Maintenance), 상태정비(CBM, Condition Based Maintenance) 및 신뢰도중심 정비(RCM, Reliability Centered Maintenance)방식 등 여러 가지 정비방식으로 나눌 수 있다.

정비시간을 나타내는 확률변수를  $t$ 라고 할 때,  $t$ 시간 이전에 정비를 완료할 확률을 나타내는 정비성  $M(t)$ 는 식(5)와 같다.

$$M(t) = P(T \leq t) = \int_0^t m(t) dt \quad (5)$$

여기서,  $m(t)$ 는 정비시간의 확률밀도함수이다. 만일, 정비시간에 대한 확률밀도함수가 지수분포를 따르며, 그때의 수리율이  $\mu$ 라고 하면(참고 : 신뢰도에서의 고장률  $\lambda$ 에 대응), 이때의 정비성함수는 식(6)과 같은 관계로 나타낸다.

$$M(t) = \int_0^t \mu e^{-\mu t} dt = 1 - e^{-\mu t} \quad (6)$$

신뢰도의 지표에서, 시스템의 평균수명을 계산한 것과 같이 수리시간의 기대치를 구하면 수리시간의 기대치는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) dt \quad (7)$$

식(7)를 평균수리시간(MTTR, Mean Repair Time)이라 하여 정비성을 대표하는 지표로 많이 사용된다. 특히,  $m(t)$ 가 앞에서와 같이 지수분포를 따른다면 식(8)이 된다.

$$E(t) = MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (8)$$

### 3.4 안전성 지표

어떠한 시스템에 대해 제한된 조건(시설, 시간, 비용 등)하에서 규정된 기간동안 인원, 장비, 설비에서 발생할 수 있는 상해 및 손상을 최소화하기 위한 설계적 보증을 안전성이라고 하며, 이를 정량화 한 것이 안전도이다.

$$\text{안전도}(S) = \frac{\text{위험사건수}}{\text{총주행거리}} \quad (9)$$

도시철도에서 시스템이나 장치가 안전하지 않다는 것은 곧 위험요소를 가지고 있다는 것을 암시하므로 안전성 해석에서는 위험의 정도를 단계별로 구분하여 평가할 필요가 있다.

## 4. RAMS 기반의 예방정비체계 구축

### 4.1 예방정비시스템 프로그램 개발 방향

본 연구에서 성공적으로 RAMS 기법을 이용한 도시철도 예방정비시스템 개발을 위한 기초 작업과 상용 프로그램 분석을 통해 데이터 처리 및 관리 기술을 분석하고 예방정비시스템 개발을 위한 가이드라인을 제시한다. 도시철도 차량 고장유형 분류시스템 구축을 위해서는 고장 유형 분석, 중요 고장에 대하여 핵심적인 부품을 체계화함으로써 프로그램개발의 신뢰성을 갖출 수 있을 것이다. 부품 수명주기 예측 절차 구축을 위해서는 RAMS기법(4)을 이용한 신뢰성 기반 분석을 체계화하고 데이터 축적, 분석 등을 위한 표준화하는 방법을 구축해야 한다.

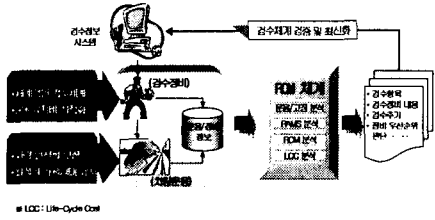


Fig. 1 예방정비시스템 설정 개념도

### 4.2 BOM을 이용한 예방정비시스템 구축

BOM(Bill of Material)을 간단히 정의하면 특정 제품이 어떤 부품들로 구성되는가에 대한 계층데이터이다. 그리고 BOM에서 가장 기본이 되는 정보는 제품 구조 정보이다. 도시철도 유지보수 예방정비시스템의 신뢰성 분석을 위해서는 BOM체계가 필수적으로 구축되어야 한다. 도시철도 유지보수에 사용되는 BOM 체계를 정리하기 위해서 먼저 각 장치별 유지보수현황을 파악하여 검사방법 및 장치별 분류체계를 적용한 BOM이 필요하다. 이 BOM 체계는 서브시스템과 인터페이스가 되도록 구성되어야 하며, 장치/시스템간 기능 분석이 가능하도록 구성되어야 한다. BOM 분석은 신뢰성 블록도, FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) 및 FTA(Fault Tree Analysis)를 분석하는데 필수적인 요소이다. 이러한 유지보수체계 BOM 구성도는 Fig. 2와 같이 병렬과 직렬이 혼합되어 연결되어 있으며 신뢰성 평가를 위해서는 각 부품별 설정위치 및 수량 등이 관리 될 수 있도록 구축되어야 한다. 표준화된 BOM 체계를 구축함으로써 정비작업에 사용되는 부품을 지정하고 소요수량, 규격 및 기능 분석이 가능함과 동시에 RAMS분석을 위한 통계기초자료로써 충분한 가치가 있다.

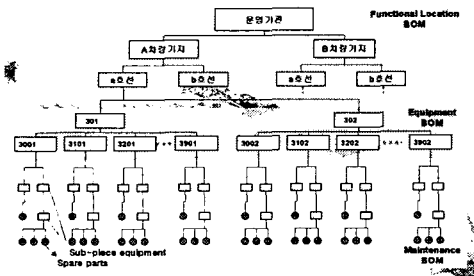


Fig. 2 유지보수체계 BOM 구성도

### 4.3 도시철도 유지보수 예방정비시스템 구성도

예방 정비 시스템은 각종 고장 유형이나 징후, 고장 사례 등을 체계화하여 필요한 인원 모두가 공유할 수 있도록 제공한다. 또한 고가의 중요한 부품이나 고장에 치명적인 부품들에 대해 RAMS분석 기법을 적용하여 신뢰도 및 수명 주기 등을 통계적으로 규명하고 안전에 직결되는 치명적 요인을 분석하여 제공한다. 그림 3은 예방정비 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 예방 정비 시스템은 예방 정비 모델의 등록으로 시작된다. 예방정비 모델이란 실적/이력 데이터의 수집에서부터 데이터의 가공, 지표 계산식 설정, 분석 모델 계산식 설정에 이르는 다양한 규칙들의 모임이며 예방 정비 시스템은 이러한 예방정비 모델에 따라서 각종 신뢰도 및 수명 분석 결과를 자동으로 계산하여 데이터로 저장해주는 시스템이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 예방 정비 시스템에 모델을

등록하고 나면 차량 검사/정비 시스템에서 기록한 실적/이력 데이터들과 차량 운행정보 자동 수집 시스템에서 기록된 차량 운행/고장 이력 데이터 등이 모델에 따라서 적절히 가공되어 분석을 위한 자료로 저장된다. 저장된 자료는 모델에 미리 정의된 데이터 분석 작업을 거쳐서 예상 수명이나 각종 신뢰도 지표를 산출하는 근거가 된다.

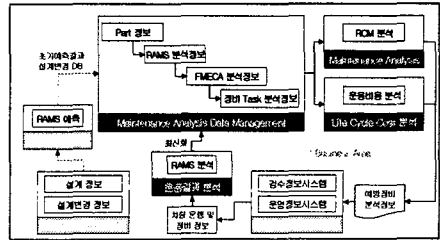


Fig. 3 예방정비시스템 구축 구성도

### 5. 구축 방법 및 결론

도시철도예방정비시스템은 RAMS을 근거로 시스템을 구성해야 하며 이 시스템은 4가지 체계로 개발될 것이다. 첫째, 관련데이터 조사 및 체계화는 기존의 고장이력을 조사하고 정비담당자에게 요청하여 필요한 데이터를 수집하는 것이다. 둘째, RAMS 모듈은 RAMS 분석을 수행하기 위한 분석모델을 만들어 시스템을 설계해야 한다. 그래야만 차량 및 주요 부품에 대한 RAMS 요소별 분석 절차를 체계화할 수 있다. 셋째, 고장분석 관련 모듈개발은 가장 중요한 부분으로 표준화된 고장코드 구축 및 고장통계 시스템을 구축하는 것이다. 넷째, 정비요청관련 모듈은 검사/정비 계획의 긴급검사 절차 규칙화 및 필요한 검사내역 자동생성을 위하여 전문가 시스템과 연동하도록 개발 할 것이다.

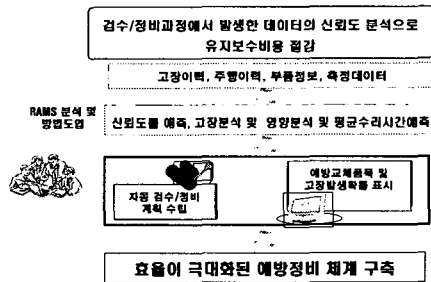


Fig. 5 예방정비시스템의 시스템 역할 및 효과

### 참고문헌

- (1) 한국철도기술연구원, 2000, "철도 CALS 구축을 위한 정보전략계획 수립"
- (2) 이호용 외 4명, 2003, "도시철도유지보수체계 시스템의 예방정비시스템에 대한 연구(I)", 한국철도학회지, Vol. No 2, pp. 108113.
- (3) Darling, S., 1991, "A Preventive Maintenance Improvement Project at Texas Utilities Comanche Peak", Nuclear Plant Journal.
- (4) 이호용 외 4명, 2003, "도시철도유지보수시스템을 위한 분류체계 표준화 방안 연구", 대한산업공학회 2003년도 추계 학술대회는논문집, pp.319322.
- (5) 이호용 외 4명, 2003, "도시철도유지보수체계 시스템의 RCM에 대한 연구", 대한전기학회추계학술대회 논문집 PP426-428.