

전동차 전기장치의 선진 유지보수 활동사례

A case of maintenance activity in advanced countries for apparatus of electric rolling stock

김민표* 이상수* 광상록* 박찬우* 조연옥*
Kim, Min-Pyo Lee, Sang-Soo Kwak, Sang-Log Park, Chan-Woo Cho, Yun-Ok

ABSTRACT

Present periodic maintenance activities are carried on electric rolling stock in Korea based on predetermined inspection intervals. And this can be seen as a first generation of maintenance techniques without taking into consideration a degree of aging or degradation of the componets . In this study, we have analyzed the current status of maintenance being used in the techniques in various activities such as overseas railway operation organization, and good cases for the advanced country's maintenance system being carried out effectively. Based on the analysis, we would derive implications for efficient application and improvement guidance of maintenance system in electric rolling stock.

1. 서론

현재 국내에서 수행중인 전동차의 유지보수 활동은 장치별로 설정된 검수주기에 따라 수행되는 정기적인 점검과 고장발생 이후 보수하는 개념으로 구분 할 수 있고, 전동차 전기장치의 노후정도나 열화상태를 고려하지 않는 제1세대의 유지보수기법을 사용한다고 할 수 있다. 최근 전동차의 운행 중에 고장이 빈번하게 발생하고 있으며, 이는 사회적으로 문제점이 대두되고 있다. 반면 시스템 고장으로 인한 인적·물적 피해규모가 큰 항공, 에너지, 전기, 석유화학 등의 산업에서는 1950년대부터 지속적인 연구가 진행되어 상태기반 예측유지보수(Condition Based Maintenance, CBM), 신뢰도기반의 예측유지보수(Reliability Centered Maintenance, RCM) 등의 비용효과를 고려하는 제3세대 유지보수 개념이 현재 적용중이다. 최근 유지보수의 효율적 시행을 위한 유지 정보시스템관련의 연구 등 수행중이나 유지보수 기술에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 철도산업은 물론 타산업에도 예측유지보수의 개념이 오래전부터 도입되어 효과적으로 시행중인 선진국 전동차의 유지보수 체계와 유지보수사례에 대한 분석을 수행하였다. 선진국에서 수행중인 유지보수 활동은 운행 중 차량정차시의 승객의 불편 감소보다는 유지보수 비용절감, 시간감소, 주기선정, 재고물량의 감소 등 경제적인 분야에 집중되어 수행이 되고 있다. 이들 유지활동 분석 자료를 바탕으로 국내 유지보수 체계의 개선방향과 효율적 적용을 위한 시사점을 도출하고자 하였다.

* 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

2. 전동차 전기장치의 선진유지보수체계

2.1 유지보수체계의 변화

최근 많은 산업들이 대형화, 복잡화 및 사용자의 기기에 대한 기대수준의 향상으로 유지보수 체계에 많은 변화가 발생하였다. 대형화 복잡화에 따른 피해비용 증가, 가동정지에 따른 손실의 최소화, 인적안전, 환경보호 등 증가하는 사용자의 기대수준을 비용효과를 고려하여 충족시키기 위해 유지보수 활동 [1]역시 변화하였다. 이들 활동은 1930년대 이후 1세대, 2세대, 3세대로 구분지어지며, 주된 특징을 그림 1에 간략히 나타내었다. 제1세대의 유지보수 활동은 시간주기에 따른 정기적인 교체 혹은 고장발생 이후에 수리하는 유지보수 활동으로 볼 수 있으며, 주요 활동은 윤활·세척·교체와 같은 간단한 작업들로 구성이 되어 있고, 제 2세대의 유지보수 활동은 제2차 세계대전 중 유지보수의 중요성에 대한 인식이 급격히 변화하였다. 이는 소요되는 인력과 자원을 효율성 극대화과 이를 위한 기계부품의 신뢰성 향상을 위해 추진되었다. 기계에 대한 의존도가 증가하면서 기계의 고장시간, 기계의 수명연장, 낮은 유지보수 비용을 매우 중요한 인자로 고려하였으며, 장비고장을 예방하는 차원에서 예측유지보수 개념이 도입되었고, 관리절차를 개선하는 방법이 적용되었다. 제3세대의 유지보수 활동은 1970년대 중반 이후 대상 시스템에 대한 높아진 기대감, 새로운 연구 수행, 기술의 발달로 철도, 항공, 원자력 등과 같은 복합 시스템의 일반화와 고장발생에 따른 환경적, 경제적, 사회적 파장 증가에 대처하기 위한 유지보수 활동이 수행되었다.

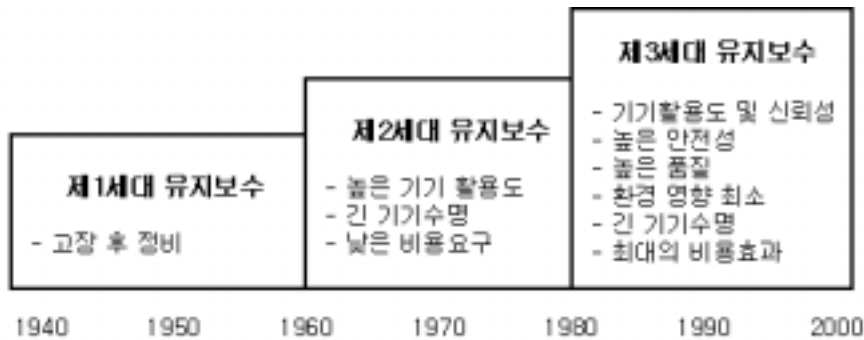


그림 1. 유지보수 활동에 대한 기대수준의 변화

유지보수 활동에 대한 기대치 증가 외에 새로운 연구결과로 인해 고장과 노후화에 대한 인식이 변화하였다. 이는 기기 사용시간과 고장률 사이의 관계가 변화하였음을 의미한다. 과거에는 고장률이 기기의 사용시간에 따라 증가하는 곡선 혹은 초창기와 수명말기에 높은 고장률을 나타내는 욕조(Bathtub)형태의 곡선을 보였다. 그러나 유지보수체계의 개선과 설계개선으로 1980년대 이후에는 그림 2와 같이 다양한 형태의 고장률 곡선[2]이 나타나게 되었다.

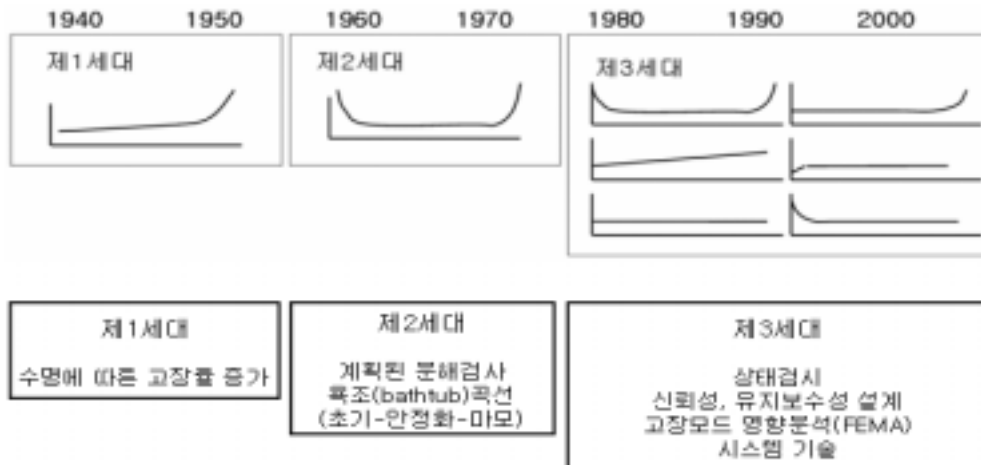


그림 2. 시대별 유지보수 활동에 따른 고장률 변화 곡선

제3세대에서의 시간에 따른 고장형태를 보면, 1세대와 2세대에 나타나는 형태는 물론 전체 수명주기 동안에 고장률이 일정한 이상적인 형태, 고장률이 점진적으로 증가하는 형태, 초기에 고장이 없다가 일정 시간 이후 일정한 고장률이 유지되는 형태, 초기에 높은 고장률이 있었으나 안정화 단계이후 일정한 고장률이 유지되는 형태가 있다. 새로운 기준의 적용으로 위험원 분석(Hazard Analysis), 고장모드 및 영향분석(FMEA, Failure Modes and Effects Analysis), 상태감시에 기초한 유지보수 기술, 신뢰성과 유지보수성에 입각한 장비의 설계, 팀웍이나 유연성을 목표로 한 조직위주의 사고방식, 전문가시스템의 개발 등이 있다.

2.2 신뢰도 기반의 유지보수 활동사항 및 상태진단 기법

신뢰성과 관련한 유지보수체계[3]를 적용하기 위해서는 다양한 절차가 요구되며 적용분야에 따라 차이가 있을 수 있다. 주로 적용이 되는 절차를 표 1에 요약하였다.

표 1. 신뢰성과 관련한 유지보수 체계의 적용절차

절 차	내 용
기능과 성능기준의 정의	부품을 사용하여 달성하고자 하는 기능의 결정과 기능이 정상적으로 작동할 경우 달성되는 성능에 대한 정의가 요구된다.
고장에 대한 정의	유지보수 활동의 목표는 장비의 기능 및 성능기준에 따라 결정되며, 고장이란 사용자가 요구하는 기능 및 성능을 만족하지 못하는 상태로 정의가 가능하다. 이를 위해서는 대상 부품이 어떤 형태의 고장을 유발하는가를 예측하고 이에 따라 고장을 유발하는 환경요인, 고장의 원인을 파악하여야 한다.
고장 모드의 결정	기능과 성능기준의 결정에 따른 고장이 정의된 후에는 고장을 유발하는 원인을 정의하는 것이다. 주된 고장원인에는 마모, 열화, 과도한 운영조건 등이 있을 수 있으며, 장비의 사용 환경에서 발생했거나 발생 가능성이 있는 원인들을 포함한다.
고장의 결과 결정	고장의 원인이 판별되면, 부품의 고장에 따른 영향을 결정하는 것이다. 여기에는 고장의 원인, 고장이 안전성을 위협하는 경로, 고장에 따른 영향 및 피해, 고장의 수리를 위한 활동이 결정되어야 한다. 이는 피해 심각도에 따라 유지보수 활동이 다르게 정의 될 수 있기 때문이다.
사고 예방 활동	많은 운전경험이 있는 경우 기존의 신뢰성 자료로부터 어느 정도 고장의 예측이 가능하지만 기존에 확보된 자료가 불충분 혹은 이례상황이 발생한 경우에 대한 고려를 포함하여야 한다.
의무 준수사항	위에 언급된 내용의 수행을 위해서는 고장발견 활동, 설계변경, 언제 발생할지 예측되지 않는 부품에 대한 계획되지 않은 점검활동 등이 수행되어야 한다. 이는 고장을 허용하고, 고장을 수리하되 발생된 형태의 고장원인을 제거해 가는 과정을 제공하기 위함이다.

신뢰도 기반의 효율적인 유지보수 활동을 위한 상태진단 기법을 적용기기별로 표 2에 나타내었다. 진동감시는 가장 일반적인 기술로 회전기와 같은 부품의 구조적 안정성 결정에 효과적이며, 모든 회전기에 적용 가능하다. 분석항목으로는 마모, 균형, 정렬, 기계적 손상, 베어링마모, 벨트결함, 기포, 피로, 기어손상, 난류유동, 구조물 진동 주파수 등이 있고, 적외선 열감지는 적외선 감지장치를 활용하여 기기의 온도 변화를 비접촉 상태에서 측정하는 방법으로 대상이 되는 동력기기의 온도를 측정 후, 정상기기의 온도 상태와 비교하여 이상여부를 판단한다. 적용기기에는 변압기, 모터제어기, 전력선과 같은 전기기계와 열교환기, 콘덴서, 냉각기 및 기타 기계시스템 등 다양하다. 윤활, 마모부분 분석은 기계적 마모 결정, 윤활상태 결정, 윤활제 오염도 결정하며, 윤활, 마모에 대한 다양한 정보를 제공한다. 적용 분야별로 다양한 측정기법이 존재하며, 분석항목에는 육안, 후각검사, 점도측정, 용해도,

재질분석, 적외선 스펙트럼분석 등이 있고, 비파괴검사는 제품의 기능에 손상을 주지 않고 재질의 특성을 분석하는 방법으로, 고가 제품 품질검사, 용접부 결함 검사 등에 활용된다. 분석항목에는 X-Ray, 초음파, 침투탐상, 와전류탐상 등이 있으나 결과의 판독에 전문성이 요구된다. 위에서 설명한 상태진단 기법과 적용대상 기기[3]의 예를 표 2에 나타내었다.

표 2. 적용기기별 적용 가능한 상태진단 기술

적용기술 \ 적용기기	모터	터빈	펌프	전기모터	디젤발전기	컨덴서	중장비/크레인	써킷브레이크	밸브	열교환기	전기시스템	변압기	탱크/배관
진동분석	○	○	○	○	○		○						
윤활, 연료소모	○	○	○	○	○		○					○	
마모형상 분석	○	○	○	○	○		○						
베어링온도 분석	○	○	○	○	○		○						
성능 검사		○	○	○	○	○				○		○	
초음파 검사	○	○	○	○	○	○			○	○	○	○	
초음파 전달			○			○			○	○			
적외선 온도측정	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
비파괴시험						○				○			○
육안검사	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
절연저항	○			○	○			○			○	○	

2.3 전기장치의 유지보수 활동을 위한 상태진단 기법

일반 기계부품의 경우 마모, 처짐에 따른 외형적인 치수변화를 간단히 측정하여 어느 정도 기기의 고장을 예측할 수 있다. 그러나 본 과제의 대상인 전기장치의 경우 외형적인 변화로 예측이 어려우며, 전기장치에는 전동차 운행정지를 초래할 수 있는 주요 품목이 많이 있다. 이를 위해 개발된 전기장치의 상태감시 혹은 진단 시험들을 다음에 설명하였다.

- Infrared Thermography(적외선 온도측정)
- Insulation Power Factor Testing(절연 인자 측정, Dissipation factor와 동일)
- Insulation Oil Analysis(절연유 분석)
- Gas in oil Analysis(절연유 함유 가스 분석)
- Megaohmmeter Testing(절연저항 시험)
- Surge Testing(서지 시험)
- Motor Current Analysis and Signature(Spectrum) Analysis

3. 선진국의 철도산업 유지보수 사례 및 시사점 도출

현재 철도산업은 보다 높은 효율성 및 수용능력에 대한 요구, 비용절감, 정비사업장의 능력향상 등의 문제에 직면해 있으며, 이러한 철도산업에서는 그에 부응하는 유지관리를 위해 충족해야하는 요건들이 있다. 이를 충족시키는 요건이 예측 유지보수의 기법들이며, 이중 RCM은 물리적 자산에 대한 유지관리 요구사항을 규정하는 접근방법으로 유럽의 철도산업에 효과적으로 적용중인 방법이다.



그림 3. 선진 유지활동 시스템의 적용조건

3.1 UITP (세계도시철도 협회)의 유지보수 활동 분석내용

효율적인 유지보수는 국내는 물론 국제적인 문제로 대두되고 있으며, 철도차량의 국경이동이 많은 유럽의 경우 차량안전기준에 유지보수 사항이 포함되어 있다. 또한 기준 외에 보다 효율적인 유지보수를 위해 UITP에서는 유럽과 홍콩의 12개 도시철도 운영기관의 2년간의 통계 및 신뢰성 자료를 바탕으로 세부적인 분석을 수행하여 예측유지보수 기법[4]의 적용성을 극대화 하려고 하였다. 유럽의 도시철도 운영기관 중 일부는 정부로부터 운영비용을 보조받지만, 일부 민간기업은 경쟁체제로 되어 있어 경제성을 중요하게 평가하고 있다. 경제성평가의 영향으로 유지보수 비용절감 노력이 진행 중에 있으며, 민간 기업의 유지보수 노력이 정부지원을 받는 기관에 영향을 미쳐 대부분의 운영기관에서 유지보수 비용절감을 위한 노력이 진행 중이고, 비용절감 노력의 결과로 유지보수 조직의 변화와 시스템의 자동화가 급격히 성장하고 있다. 유지보수 조직개편은 철도 유지보수 기술과 시스템의 복잡성이 증가하여 유지보수 작업의 아웃소싱, 독립된 유지보수 회사의 설립 등이 포함시키게 되었으며, 이를 통해 해당분야의 전문성과 경험을 갖춘 사내 전문인력 확보의 어려움을 해소하고자하였다. 지하철 운영 시스템의 자동화는 초기 투자비용은 소요되지만 전수명 주기비용(Life Cycle Cost)을 고려한다면 이익이 되는 것으로 나타났다.

3.2 프랑스 알스톰사(Alstom)의 유지보수 활동[5]

활 동	기대효과
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유지보수 대상품목의 분석 ▪ 사고발생시 다양한 인자를 고려한 평가 ▪ 작업효율을 위한 공간 배치와 장비 및 기술 할당 ▪ 상태진단유지보수 프로그램의 인식 및 전략 설정 ▪ 기술적용을 위한 교육수행 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 철도차량의 운행중 신뢰성 향상 ▪ 주요부품의 MTTF(Mean Time To Failure)의 증대 ▪ 차량운행의 주요 고장발생빈도 저감 ▪ 철도차량의 이용 효율성의 증진 ▪ 물질적인 자원의 사용 축소 ▪ 중수선 기간주기의 확대

표 3. 프랑스 알스톰사(Alstom)의 유지보수 활동

3.3 런던지하철의 유지보수 사례

영국의 런던지하철의 유지보수 사례로 북부선로를 운행하는 도시철도차량에 새로운 대차프레임을 적용한 사례가 있었다. 새로운 대차프레임의 경우 기존의 대차보다 향상된 성능으로 설계되었지만, 지역적 특성으로 인해 베어링부분의 불량률이 빈번하게 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 베어링부분의 진동 감시 시스템을 개발하여 분석을 수행하였으며 세부적인 요인들을 찾아 문제를 해결하였다.

영국의 Virgin社에서 운영되는 펜돌리노 틸팅열차에서는 마모부품에 대한 검사시 최악의 시나리오를 가

정하여 시행된다. 그러나, 실제 운영 중에는 최악의 시나리오보다 완화된 조건으로 운행되어 사전에 설정된 교환주기보다 부품을 오랫동안 사용할 수 있다. 이들 교환부품은 교체비용이 높은 것들이 많으며, 교체주기 설정역시 최적화가 어려운 품목이 많이 있다. 이를 위해 유지보수 전문회사에서는 열차 검사를 위해 전문검사시스템을 개발하여 사용 중이다.

3.4 영국의 철도유지보수 관련기준

영국의 철도안전기준표준위원회(RSSB, Rail Safety & Standard Board)에서는 철도시설관리자인 Network Rail이 관리하는 선로를 운행하는 차량에 대한 유지보수 요건[6]을 정의하고 있고, 이들 내용을 다음에 요약하였다.

① 유지보수 정책

- 차량의 유지보수 관련 관리의 임무와 책임의 할당
- 운행 중인 모든 차량에 대해 유지보수 계획을 확인할 것
- 유지보수 기록 유지(작업자, 장비, 계획, 관련 문서 포함)
- 계획에 대한 일반적인 주기와 특별 환경에 대한 주기(주요 위험요인 발견, 주요사고발생, 차량으로 인한 장애발생, 설계변경, 운행형태 변경, 장비 변경)를 계획에서 고려하기 위한 방안

② 유지보수 계획

- 모든 차량의 구성품 확인과 고장관련 위험성의 파악을 통한 주요 유지보수 부품 도출
- 검사일정과 정기적인 검토키가 필요한 항목의 도출
- 주요부품에 대한 안전확보 확인을 위한 활동 정의

③ 의무적으로 수행하는 유지보수 대상부품

- 제동시스템, 속도제어 시스템, 신호 및 통신 시스템의 세부적 유지보수 요건을 기술

4. 결론

본 논문에서는 선진국 전동차 유지보수 활동의 사례를 중심으로 분석하여 국내 유지보수 체계에 관한 개선 방향과 효율적 적용을 위한 시사점을 도출하였다. 선진국에서 수행중인 유지보수 활동을 분석한 결과 유럽의 도시철도의 경우에는 우회선로가 많이 존재하여 유지보수 문제로 인한 운행 중 차량정차시의 승객의 불편 감소보다는 유지보수 비용절감, 유지보수 주기의 선정, 재고물량의 감소, 유지보수 시간감소 등 경제적인 분야에 집중되어 수행되고 있었다. 국내 전동차의 사고사례를 분석하면 전동차의 고장률이 노후정도와 비례하는 것으로 나타나 있는데, 이는 1세대의 유지보수 특성으로 신뢰성 기반이나 상태진단 개념 도입시 성공가능성이 많음을 알 수 있었다. 이 상태진단 기법으로 진동감시, 적외선 열감지, 윤활 및 마모감지, 비파괴검사 등이 다양한 산업체에서 사용하는 기법별로 적용중인 부품의 현황조사를 통해 전기장치의 정밀진단에 적용 가능한 상태진단 기법의 기초자료로 활용하였다. 현재 이들의 내용 중 일부는 유지보수 작업시 사용 중이나 암유된 가스분석, 유전손실실험, 부분방전 실험 등은 적용되지 않고 있다. 이런 적용장비나 적용기법, 분석절차 등에 대해서는 지속적인 연구가 필요하다. 이로 인해 국내 전동차의 유지보수 활동에 대한 올바른 방향을 제시하고, 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

- [1] “전기동차 유지보수체계 개선을 위한 전기장치 정밀진단”, 한국철도공사, 2005.12
- [2] “전동차 전기추진장치의 고장예방 및 유지관리자동화시스템 기술개발” 보고서, 한국철도기술연구원, 2000
- [3] NASA, "Reliability centered maintenance guide for facilities and collateral equipment", 2000
- [4] Holger Albert, "Automation in Meter Networks", UITP, 2005
- [5] “알스톰(Alstom)의 상태진단에 기초한 유지관리방법”, International Railway Journal, 2005
- [6] RSSB, "Risk Management Forum : Maintenance-Managing the Risk", 2005