

도시철도차량 신뢰도/가용도 관리시스템 개발을 위한 기초연구

A Study to the Development of Reliability/Availability Management System of the Urban Transit EMU' Maintenance

박기준† 정중덕* 한석윤** 서명원***
Kee-Jun Park Jong-Duck Chung Seok-Youn Han Myung-Won Suh

Abstract

It is very important that reduce the maintenance cost and extend life time of the urban transit EMU through effective maintenance method research. The maintenance cost of the urban transit EMU shares 70%~80% of it's life cycle cost. It means that the maintenance cost is bigger than the introduction cost of the urban transit EMU. In this study, we were survey and analysis for the reliability centered maintenance of internal and external many industry parts. Finally, we suggested the reliability/availability management System of the Urban Transit EMU' Maintenance.

장기간 수명주기(Life Cycle)을 갖는 도시철도차량은 초기 도입비용보다 유지보수비용이 많은 비중(70%~80%)을 점유하고 있으므로 효율적인 유지보수 연구를 통하여 유지보수 비용의 절감과 대형시스템의 수명 연장을 추구하는 일이 무엇보다 시급하다. 이를 위해 본 연구에서는 신뢰성기반의 유지보수체계에 대해 여러 산업분야의 국내·외 사례 조사분석을 수행하였으며, 이를 통하여 도시철도차량의 가용도/신뢰도 관리시스템 관련 시스템 개발방향을 제시하였다.

1. 서 론

장기간 수명주기(Life Cycle)을 갖는 도시철도차량은 초기 도입비용보다 유지보수비용이 많은 비중(70%~80%)을 점유하고 있으므로 효율적인 유지보수 연구를 통하여 유지보수 비용의 절감과 대형시스템의 수명 연장을 추구하는 일이 무엇보다 시급하다. 또한, 유지보수 결함으로 인한 대형사고 발생은 인명피해 및 막대한 재산 손실로 사회 안전과 환경에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되고 있으며, 도시철도차량의 유지보수에 있어서 검수 주기 마련과 반복적 사고/고장의 원인 규명이 필요하게 되었다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 도시철도차량의 신뢰성 평가를 통해 주어진 운영조건에서 각 물리적 시스템들이 기능을 안전하게 유지할 수 있도록 보전 계획을 수립하는 것이며 이러한 보전계획 수립을 위해서 체계적인 신뢰성 기반의 유지보수 절차 및 방법의 확립이 필요하다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단, 책임연구원, E-mail : kjpark@krri.re.kr
TEL : (031) 460-5712 FAX : (031) 460-5749

* 정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단, 책임연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구부장, 수석연구원

*** 비회원, 성균관대학교 기계공학과, 교수

도시철도차량 시스템을 운영하는 선진국의 경우 장치의 고장특성과 발생확률을 고려하여 정비검수주기를 수립하고 있으나, 국내의 정비검수주기는 제작사에서 제공한 자료에 따라 그 주기를 결정하여 정비검수 하도록 되어있다. 그러나 거대하고 복잡한 장치의 검수주기를 고장특성에 따르지 않고 제작사로부터 제공된 데이터만을 기준으로 정비주기를 결정하는 것은 도시철도차량 시스템 전체에 대한 가용성 향상 및 고장 예방에 효과적이지 못하다.

따라서 도시철도차량의 신뢰도 및 LCC(Life Cycle Cost) 기준을 정하고 신뢰성기반의 유지보수체계를 도시차량 유지보수에 적용함으로써 정성적인 고장 분석을 정량화 및 시스템화 하고, 시스템 신뢰성 및 고장 발생을 확률적인 방법으로 예측하며, 시스템 가용성 및 예방정비 주기를 결정하는 것이 도시철도차량의 효율적인 운영 및 안전성 향상에 필요하다.

최근 신뢰성기반의 유지보수 시스템에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있으나 국내외 관련 연구 사례가 미흡하고 또한 대형 복잡시스템의 사고/고장 발생 시 대책수립과 개선을 위한 체계가 미흡한 실정이고 도시철도차량 운행 과정에서 합리적 유지보수 기준의 필요에 따라 본 연구를 수행하였다. 신뢰성의 개념을 유지보수 과정에 도입하고 도시철도차량의 각 물리적 시스템의 기능을 유지할 수 있도록 현재 운용조건에 적합한 정비검수계획을 수립하는데 필요한 Data를 축적 할 수 있는 도시철도차량의 가용도 및 신뢰도 관리시스템 개발을 위해 국내외 사례 조사와 분석을 통하여 시스템의 개발 방향을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

이를 위해 본 연구에서는 도시철도차량의 가용도/신뢰도 관리시스템 관련 국내외 사례 조사·분석을 통하여 RCM 기반의 유지보수 시스템 개발방향을 제시하고자 한다.

2. 신뢰성기반 유지보수 역사

지난 20년간 유지보수는 다른 관리체계보다 많은 변화가 있었다. 이러한 변화는 유지보수가 필요한 전세계의 실물자산 (공장, 장비 및 빌딩)의 숫자와 형태의 증가, 더욱 복잡해진 설계, 새로운 유지보수 기술 및 유지보수 조직과 책임에 대한 견해의 변화 등에 기인한 것이다. 유지보수 또한 변화하는 기대에 부응하고 있다. 이러한 기대에는 장비고장이 안전과 환경에 미치는 영향에 대한 인식의 증가, 유지보수와 제품 품질의 상관관계에 대한 인식의 증가 및 공장 가동률 제고와 비용 절감에 대한 압력의 증가 등이 있다. 유지보수 인원들은 기술자로서 또한 관리자로서 항상 완전히 새로운 사고와 행동방식을 갖추고 있어야 한다. 반면에, 유지보수 시스템은 많은 전산화에도 불구하고 점점 더 제약이 두드러지고 있다.

민간 및 군용 항공기 분야 외에는 신뢰성기반 유지보수 방법론의 활용이 법적 의무가 아니다. 이런 이유로 인하여, 신뢰성을 바탕으로 하는 유지보수 프로그램의 개발방법들이 현재 많이 제공되고 있다. 이러한 방법의 일부는 논문의 주제나 전문 소프트웨어의 대상이 되고 있다. 수준분석의 선정은 기업이 정한 목표 (가용성, 경제적 측면, 제약요소, 기타)에 의존하고 있다. 핵분야와 마찬가지로, "ALARA" 개념 (As Low As Reasonable and Achievable, 타당하고 목표달성 가능한 범위에서 최소한의 비용으로)이 다른 산업분야에도 적용될 수 있다.

지난 50년간의 유지보수 변천과정은 다음과 같다. Moubray[1]에 의하면, 1930년대 이후의 유지보수의

변천과정은 3기간으로 구분될 수 있다. <그림 1.>에 유지보수에 대한 세대의 변천과정이 나타나 있다.

2.1 제 1 세대

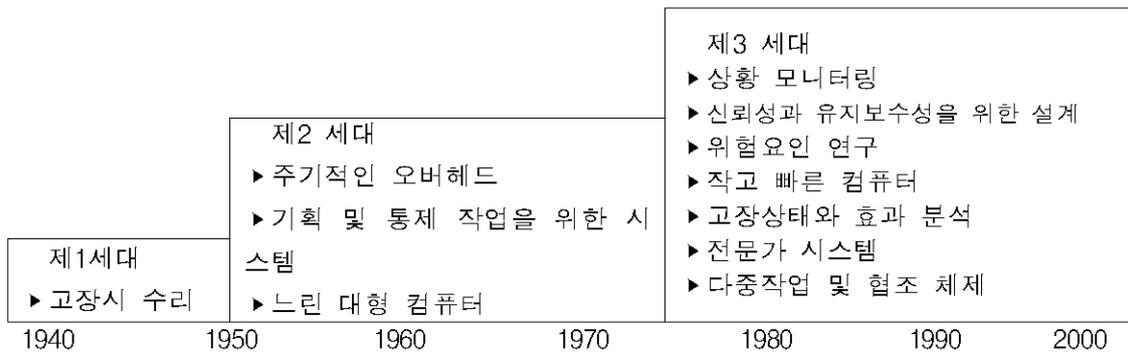
이 기간은 세계 제2차 세계대전까지의 기간이다. 이 기간에는 산업들이 기계화가 많이 되어 있지 않았고, 따라서 고장시간도 그다지 중요하지 않았다. 이것은 장비고장의 사전예방이 대부분 관리자의 마음에서 우선순위가 높지 않았다는 것을 의미한다. 동시에, 대부분의 장비들은 단순했고, 그 중 일부는 과잉설계 됐다. 따라서 수리가 쉽고 신뢰성이 있었다. 결과적으로, 세척, 정비 및 운할처리 등과 같은 일상적인 것 이상의 체계적인 유지보수에 대한 수요가 없었다.

2.2 제 2 세대

이러한 의존성이 점차 증가함에 따라, 고장시간은 첨예한 쟁점으로 부각됐다. 이것은 장비고장은 예방돼야 한다는 생각으로 이어졌고, 급기야 예방유지보수의 개념으로까지 이어졌다. 1960년대는 이것이 정기적인 장비 오버홀의 형태로 이루어졌다. 유지보수 비용도 다른 운영비에 비해 급격히 상승하기 시작했다. 이것은 유지보수 기획과 통제 시스템의 증가로 이어졌다. 이로 인해, 유지보수가 보다 통제범위 안으로 들어오게 됐고, 현재는 유지보수 업무의 일부로 정착됐다. 마지막으로, 고정자산 투자에 따르는 자본비용과 그 자본규모는 사람들로 하여금 자산수명의 극대화를 위한 방법을 찾게 만들었다.

2.3 제 3 세대

1980년대에는 기계화와 자동화가 더욱 진전되었으며, 이것은 의료, 데이터 처리, 원격통신 및 빌딩관리 등의 여러 분야에서 신뢰성과 가용성이 핵심 요소가 됐다는 것을 의미한다. 자동화가 더욱 진전될수록, 잦은 고장은 만족스런 품질표준을 유지하는 능력에 영향을 준다는 것을 의미한다. 이 점은 제품 품질 뿐만 아니라 서비스 표준에도 마찬가지로 적용된다. 고장이 잦을수록, 안전과 환경에는 심각한 결과가 초래될 수 있고, 동시에 그 영향력에 대한 표준이 급속히 부각되고 있다. 유지보수 비용 자체도 절대금액과 총비용 대비 비중에서 점차 증가하고 있다. 일부 국가에서는 이 비용이 운영비에서 최고 아니면 두 번째로 높은 비중을 차지하고 있다. 그 결과, 불과 30년 만에 유지보수 비용이 미미한 수준에서 비용통제 우선순위가 최고의 순위로 올랐다.



<그림 1.> 세대별 유지보수 특징

3. 여러 산업의 신뢰성기반 유지보수 사례 분석

3.1 항공우주 산업

항공기 유지보수 철학이 지난 20년간 지속적으로 발전됐다. 과거에 해군은 유지보수 작업을 위한 예산에는 제약이 없다는 전제하에 운용했었다. 그러나 현재는 대부분의 예산에 제약이 있을 뿐만 아니라, 대부분의 경우에 부족한 것이 현실이다. 이것은 유지보수 기술과 장비 가용성을 제고시키는 새로운 정책들을 모색하게 만들었다. NAVAIR Affordable Readiness (만반의 준비)가 그러한 정책이다. 이것은 신뢰성 중심 유지보수를 통합적인 유지보수 개념의 개발 및 이행을 위한 중심적 틀이라고 인식하고 있다. 현재 NAVAIR 신규취득 자산과 주요 시스템 변경에 RCM이 모두 적용되고 있다. 해군은 RCM 프로그램의 지침을 제시하는 몇 가지 문서를 이용하고 있다. 이러한 문서는 다음과 같다.

- NAVARINST 4790.20, 신뢰성중심 유지보수 프로그램 : 이 문서는 NAVAIR 항공기, 시스템 및 지원 장비의 효과적인 RCM 분석을 성공적으로 계획, 이행 및 수행하기 위해 필요한 정책적 지침과 책임소재를 개략적으로 설명하고 있다.

- NAVAIR 00-25-403, 해군 항공기 신뢰성중심 유지보수 절차에 대한 지침 : 이 매뉴얼은 RCM, RCM 이론 및 특정 지침을 위한 계획수립, 분석의 문서화 및 분석결과에의 이행 등을 포괄하고 있다.

- MIL-STD-2173 (AS), 해군의 항공기, 무기시스템 및 지원장비 등을 위한 신뢰성중심 유지보수 요건: 이 표준은 해군의 항공기, 시스템 및 지원장비 등에 대한 RCM 분석을 실시하기 위한 절차를 규정하고 있다.

신뢰성기반 유지보수 방법론은 United 항공사가 미 국방부를 위해 처음으로 개발한 것이며, 1978년에 발표됐다. 신뢰성기반 유지보수는 MSG-3 [MSG93] 및 LCC 등의 서비스와 더불어 군사용 및 상업용 우주분야에서 광범위하게 이용돼왔다. 이러한 산업의 예로는 항공기 운항업자, 제조업자, 항공교통 관리 시스템 및 하물처리 시스템 등이다. 그러나 도시철도차량에 이와 같은 기법을 적용하기 위한 신뢰성기반 유지보수 활용은 매우 상이할 수 있다. 항공 우주산업과 관련된 신뢰성기반유지보수에 대한 상세한 자료는 첨부한 참고자료를 참조하길 바란다.

3.2 원자력 산업

원자력 분야는 신뢰성기반 유지보수 방법론을 처음으로 이용한 분야의 하나로서, 그것은 우주산업 분야와의 유사성 (안전성, 가용성, 유지보수 비용) 때문이었다. 현재는 전기를 발전하는 400개 이상의 원자력 발전소들이 상이한 방법으로 신뢰성기반 유지보수를 이용하고 있다. 안전규칙이 매우 엄격하기 때문에, 모든 원자력 발전소들은 이러한 규칙을 준수하기 위해 전문조직에 의해 점검을 받는다.

원자력 산업에서는 신뢰성기반 유지보수 적용이 강하게 추천됐다. 고장상태와 효과 분석 (FMEA, Failure Mode and Effect Analysis)은 기능고장으로 이어지는 부품고장의 주요 상태와 현장의 구성요소, 시스템 및 공장의 각 부품에 대한 영향력을 파악할 수 있는 틀을 제공한다. 안전성과 신뢰성을 보장하기 위해 대부분의 원자력 발전소에서 광범위하게 이용된다. 이용 사례는 다음과 같다.

- 미국 원자력규제 위원회 (NRC, Nuclear Regulatory Commission) : 이 단체는 전체적인 원자력 규정집 (유지보수 포함)을 발행하고 있다.신뢰성기반 유지보수 기술이 유지보수 관련 권장 기술로 이용되

고 있다. [NRC 1991, NRC 1995]

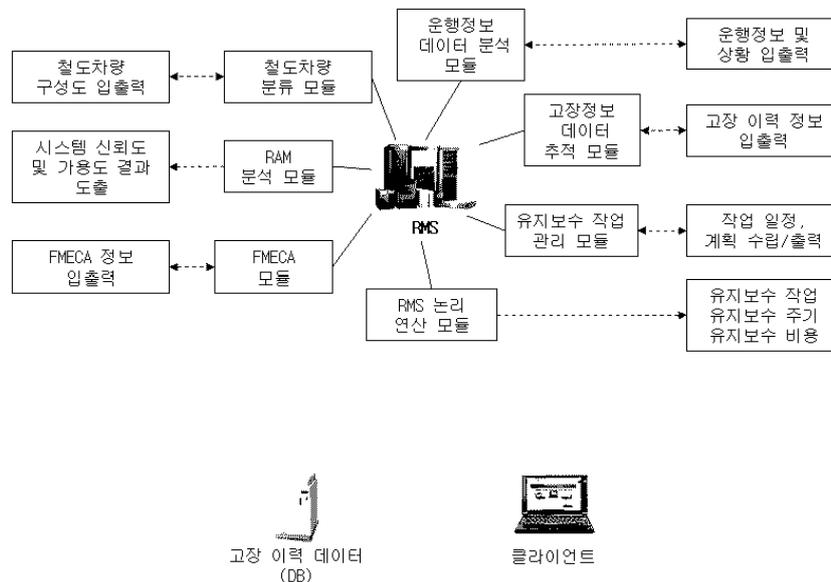
- OMF (Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité) (프랑스의 EDF).

원자력산업은 잠재적인 치명적 고장 때문에 안전성과 신뢰성에 대한 엄격한 요건을 갖고 있다. 이러한 점은 도시철도와 유사한데, 이는 철도 기반시설도 일부 고장이 커다란 재앙으로 이어질 수 있기 때문이다. 미국의 원자력산업에서 보다 흥미로운 점은 원자력규제 위원회 (Nuclear Regulatory Commission)의 존재로서, 이들은 안전성 처리를 규정 및 통제하는 일을 맡고 있다. 미국에는 안전성 검사기관이 많이 있으며, 이들은 모든 원자력 발전소에 동일한 규정을 적용하고 있다. 신뢰성기반 유지보수가 이와 같은 검사기관들의 요구조건을 제일 많이 충족시키는 기법이다. 원자력과 관련된 신뢰성기반유지보수에 대한 상세한 자료는 첨부한 참고자료를 참조하길 바란다.

4. 철도산업의 신뢰성기반 유지보수 사례 분석

4.1 도시철도

시스템의 구축 목표는 철도차량 시스템 제작사에서 제공하는 고유 신뢰도를 근거로 수립된 기존의 철도차량 유지보수 절차 및 주기수립 방법을 개선하기 위해 철도차량 유지보수시스템에 신뢰성 기반의 유지보수시스템을 적용함으로써, 장치의 고장특성을 파악하여 고장유형 별 유지보수 작업을 결정하고, 최적의 예방정비 주기와 장치 교체주기를 선정하여, 철도차량 시스템의 신뢰도 및 가용도를 극대화시킬 수 있는 윈도우 기반의 고장분석을 통한 신뢰성기반 유지보수 시스템을 개발하는 것이다.



<그림 2.> 도시철도차량 신뢰성기반 유지보수 시스템 구성도

<그림 2.>에 나타난 바와 같이 도시철도차량 신뢰성기반 유지보수 시스템의 주요기능은 다음과 같다.

- 철도차량의 신뢰도, 가용도 및 유지보수도(이하 RAM), 수명주기비용 분석 및 관리
- 신뢰도, 가용도, 유지보수도 및 안전성(이하 RAMS) 기반의 고장분류 및 관리를 통한 철도차량의 고장관리 체계 수립

- 고장유형 및 영향에 따른 치명도 분석(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, 이하 FMECA)
- 교체 부품 및 장치의 안전성(환경성), 운영성, 효율성 등에 근거하여 고장 유형별 유지보수 작업관리 체계수립
- FMECA 수행 및 Life-Exploration 진행을 위한 전동차의 고장발생 데이터 관리
- 장치의 고장률과 평균수명(Mean Time Between Failure, 이하 MTBF) 등의 신뢰도 수치 및 유지보수 비용을 통한 최적의 예방정비 및 교체주기 선정
- 철도차량 시스템의 수명주기 비용, 정비 주기에 따른 교체 비용 및 작업 소요비용 등의 관리를 통한 철도차량의 유지보수 비용관리 체계수립
- 예방정비 및 교체 주기의 적절성 평가 및 변경사항 관리
- 부품의 고장률 데이터를 통한 수명분석

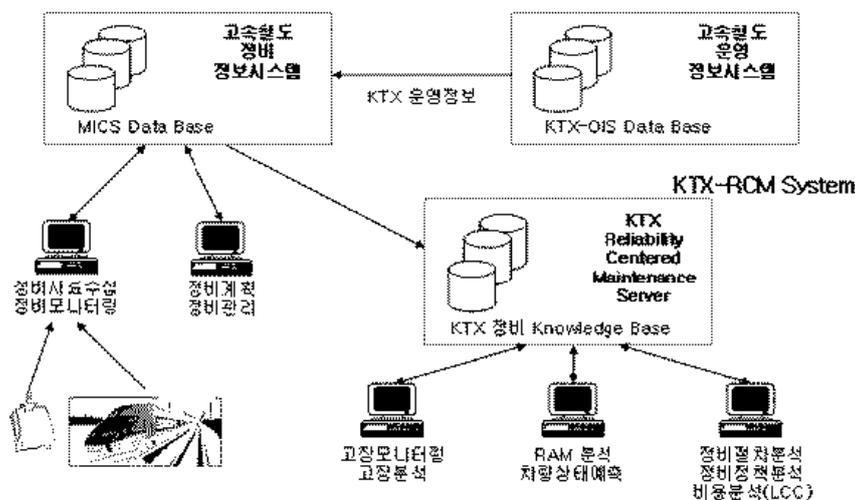
4.2 고속철도

고속철도에서 신뢰성기반의 유지보수시스템을 구축한 배경은 다음과 같다.

- 한국실정에 적합한 신뢰성 기반 고속철도차량 유지보수시스템 구축
- KTX 정비정책 전반을 이끌고 나갈 체계적, 과학적 시스템 요구
- 고속전철 운영기관의 독자적인 KTX 운영

시스템의 구축목적 및 목표는 다음과 같다.

- 항공사 수준 유지보수체계 구축
- 유지보수기술 축적, 기술자립기반 확보
- 변화하는 운영환경에 대처할 수 있는 유지보수체계 구현
- 유지보수 정책 및 주기의 최적화 : KTX의 신뢰성, 가용성 확보



<그림 3.> 고속전철 신뢰성기반 유지보수 시스템 개념도

<그림 3.>에 나타난 바와 같이 고속전철 신뢰성기반 유지보수 시스템의 주요기능은 다음과 같다.

- 편성 신뢰성 지표 현황 : 차량 운행실적 수집, 고장차량 조치내역 수집, 검수실적 수집, RAM

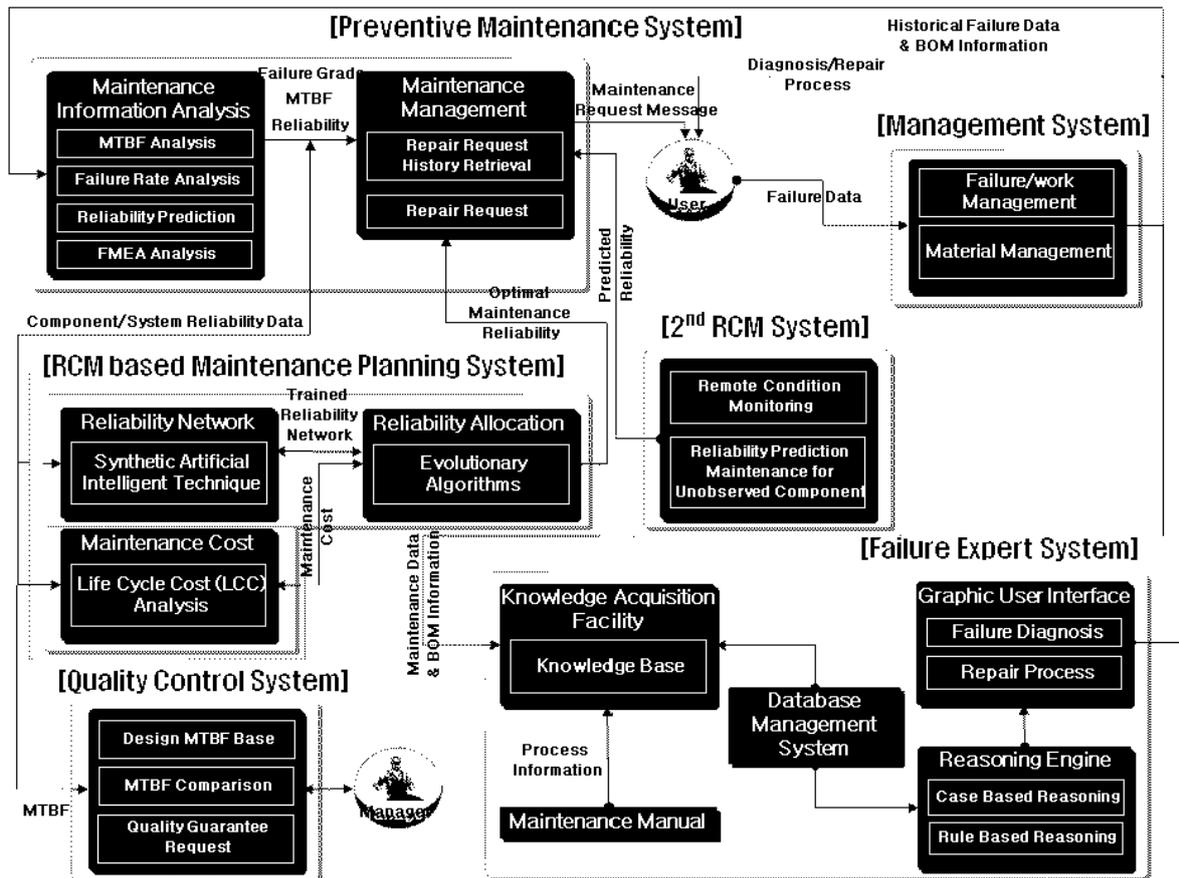
분석 실시, RAM자료 통계 추정

- 기능별 신뢰성 지표 현황 : 차량 운행실적 수집, 고장차량 조치내역 수집, 고장소개 분류, RAM 분석, RAM자료 통계 추정

- 고장자료 관리 : 고장차량 조치내역 수집, 운행중 장애내역 조치현황 등록, 월별 장애발생 현황

5. 도시철도차량 신뢰도/가용도 관리시스템 구축 방안

본 연구에서는 국내의 신뢰성 기반 유지보수체계에 대한 사례를 조사·분석한 결과와 도시철도차량의 유지보수정책의 의사결정에 반드시 필요하다고 판단되는 기능을 바탕으로 하여 <그림 4>와 같은 가용도/신뢰도 관리시스템 구축(안)을 제안 한다. 본 연구에서 제시하는 가용도/신뢰도 관리시스템은 <그림 4>와 에 나타난바와 같이 총 6가지 모듈로 구성되어 있다.



<그림 4.> 도시철도차량 신뢰도/가용도 관리시스템 구성도

5.1 Quality Control System

Quality Control System은 기본 MTBF 목표치를 설계하고 설계한 MTBF에 대하여 시스템의 특성을 비교한다. 이에 따라 비용에 대한 최적 MTBF를 설계한 후 Quality Guarantee를 관리자에게 요청한다.

5.2 RCM based Maintenance Planning System

RCM based Maintenance Planning System은 다시 3가지의 모듈로 나누어지는데 종합적인 인공 지능 기술을 갖는 Reliability Network 모듈, Life Cycle Cost(LCC) 분석을 통해 시스템의 유지보수 비용을 구하는 Maintenance Cost 모듈, Reliability Network와 Maintenance Cost로부터 받은 데이터에 Evolutionary Algorithm을 적용하여 신뢰도를 할당하는 Reliability Allocation 모듈로 구성된다.

5.3 2nd RCM System

2nd RCM System은 원격으로 시스템의 상태를 모니터링하고 진단한 결과를 바탕으로 신뢰도를 예측하고 이를 바탕으로 검수 또는 정비를 요청하는 시스템이다.

5.4 Preventive Maintenance System

Preventive Maintenance System은 2가지의 모듈로 다시 나누어지는데 Maintenance Information Analysis 모듈은 MTBF와 Failure Rate를 분석하여 신뢰도를 예측하고 FMEA 분석을 수행하는 모듈이다. Maintenance Management 모듈은 Maintenance Information Analysis 모듈로부터 Failure Rate, MTBF, Reliability에 대한 데이터를 받아 고장을 요청하는 모듈이다.

5.5 Management System

Management System은 시스템이 고장이 발생하거나 작동하는 모든 상황에 대하여 시스템의 작동 환경을 관리하고 자재 관리 등을 수행하는 유지보수 작업 모듈이다.

5.6 Failure Expert System

Failure Expert System은 고장 발생시 실무자에게 상황에 따른 고장 종류와 고장 수리 방법 등 고장에 관련한 정보를 제공하여 실무자를 지원해 주는 시스템이다. Failure Expert System은 총 5가지의 모듈로 구성되는데 Knowledge Acquisition Facility 모듈은 실무자로부터 고장에 관련된 정보를 받아 데이터를 취득하는 모듈이다. Maintenance Manual 모듈은 고장 정비, 유지보수에 대한 정보를 제공하는 모듈이다. Database Management System 모듈은 Knowledge Acquisition Facility 모듈에서 취득한 데이터를 Reasoning Engine 모듈에 전달하여 주는 모듈이다. Reasoning Engine 모듈은 사례에 따른 추론, 규칙에 따른 추론을 수행한다. Graphic User Interface 모듈은 Reasoning Engine 모듈에서 수행한 사례나 규칙 기반 추론에 대한 데이터를 받아 실무자가 쉽게 사용할 수 있도록 구성한 모듈로써 고장 진단을 수행하고 수리 과정에 대한 정보를 실무자에게 제공한다.

6. 결 론

장기간 수명주기(Life Cycle)을 갖는 도시철도차량은 초기 도입비용보다 유지보수비용이 많은 비중(70%~80%)을 점유하고 있으므로 효율적인 유지보수 연구를 통하여 유지보수 비용의 절감과 대형시스템의 수명 연장을 추구하는 일이 무엇보다 시급하다. 현재까지 개발된 가장 효율적인 유지보수 기법은

신뢰성기반의 유지보수체계이다. 신뢰성기반의 유지보수체계는 매우 복잡하고 어려우며 단편적인 기능만으로 그 효과를 달성할 수 없다. 도시철도차량 제작사에서 RAM 기반의 설계와 제작이 이루어져, 그 도시철도차량을 운영하는 운영기관에 제작시 제안된 RAM Data, FMEA, FMECA, FT, RBD 등 모든 Data가 제공되어야 한다. 그 이후에 운영기관이 도시철도차량을 운영하면서 제작시 제안된 RAM Data와 운영시 얻어진 RAM Data를 비교 분석하여 문제점을 찾아내고 대책을 세우는 등의 신뢰성기반의 유지보수 업무를 수행해야 한다. 이렇게 전반적인 부분에 적용되어 시스템이 운영되기 위해서는 본 연구에서 제안한 바와 같이 단순한 시스템이 아닌 매우 복잡한 시스템으로 도시철도차량의 신뢰도/가용도가 관리될 수 있도록 구축되어야 한다.

참고문헌

1. MOUBRAY John, "유지보수 관리 - 새로운 패러다임", Maintenance, Volume 11, n°1, 1996.
2. NAVAIR, 해군 항공기 신뢰성중심 유지보수. 이 매뉴얼은 NAVAIR 00-25-403을 대체. Direction of commander, Naval Air Systems command, 1996.
3. NAVARINST, "신뢰성중심 유지보수 프로그램", Direction of commander, Naval Air Systems command.
4. NAVARINST, "해군 항공기 신뢰성중심 유지보수 과정을 위한 지침", Direction of commander, Naval Air Systems command.
5. BOOKLESS Colin, SHARKEY Michael, "핵 산업에서 능률적인 RCM", Maintenance, 14-1, février 1999.
6. Nuclear Research Committe, "핵발전소의 실효적 시험의 지침", Campbell, P., NUREG-1482, 1995년 4월.
7. 한국철도공사, "고속전철 신뢰성기반 유지보수 시스템 설명자료"
8. 서울도시철도공사, "구매조건부 신제품 개발사업 계획서", 2006