

철도 신뢰성 관리체계 연구 동향

On the Research Trends in Railroad Reliability Management System

김 종 곁* · 송 정 무** · 김 형 만**

Jong-Gurl Kim · Jung-Moo Song · Hyung-Man Kim

Abstract

철도 시스템은 차량, 전력, 신호, 선로구축물시스템이 유기적으로 결합된 복합시스템으로 사고 발생 시 원인규명이 어렵고 인명에 치명적인 결과를 초래하게 되며 사소한 고장이라도 열차지연에 미치는 과급효과는 지대하여 시스템의 신뢰성확보가 매우 중요하다[26]. 실제로 세계 각국의 철도산업은 시스템의 신뢰성 향상을 위해 신뢰성 기법에 기반을 둔 다양한 이론을 통해 신뢰성 향상과 안전성 향상에 최선을 다하고 있다. 본 연구에서는 철도 신뢰성관리와 관련된 국내 연구동향과 철도 운영기관 및 기업에서 적용하고 있는 신뢰성 적용 현황을 분석한다. 그리고 국외 연구 동향과 주요 적용 현황을 정리한다. 또한 철도 신뢰성과 관련된 국내외 규격을 조사하고 이들 규격의 내용을 분석한 후 국내 적용방향을 제시한다.

Keywords: RAMS(Reliability, Availability, Maintainability & Safety), RCM(Reliability Centered Maintenance), RAMP(Reliability, Availability, Maintainability plan), SSPP(System Safety Program Plan), 철도신뢰성, 유지보수, 예방보전

* 성균관대학교 시스템경영공학과

** 성균관대학교 산업공학과

1. 서 론

도시철도란 “도시교통의 원활한 소통을 위하여 도시교통권역에서 건설·운영하는 철도·모노레일 등 궤도에 의한 교통시설 및 교통수단”으로 도시철도법에서 정의하고 있다[8]. 이러한 도시철도는 세계적으로 수백 종이 운영되고 있으며, 우리나라도 서울과 부산등 대도시에서 19개 노선 590여km에서 운영되고 있는 매우 중요한 대중 교통수단이다[22]. 최근 녹색성장의 일환으로 노선수가 점차 확대되어 가고 있는 추세이다.

이러한 도시철도시스템은 다양한 요소가 유기적으로 결합된 복합시스템으로 고장 또는 사고의 발생은 큰 희생과 고 비용을 초래하고, 복구와 신뢰회복에 많은 자원과 노력이 소모되기 때문에 안전과 높은 신뢰성이 가장 중요하게 요구된다. 최근의 국제 입찰에서는 시스템의 신뢰성을 중요시하여 제작 사양서에 신뢰성의 조건을 충족시키도록 요구하고 있다.

현재 이러한 중요성을 인식하고 도시철도와 관련해서 신뢰성 관리체계에 대한 도입과 연구가 국내에서 활발히 진행되고 시장동향이 점차 국제 수준에 걸맞게 변하고는 추세지만 아직까지 대부분의 연구는 선진 외국 철도의 소개와 국제규격 및 최신 신뢰성 기술 도입의 필요성과 중요성을 제시하는데 그치고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내외 도시철도시스템에 적용된 신뢰성 관리체계의 동향을 연구하고 철도신뢰성 관리와 관련된 국외 규격을 분석한 후 국내 도시철도에 적용하기 위한 적합성을 따지고 국내의 도시철도에 적용이 가능하도록 방향을 제시함으로써 국내 철도분야의 신뢰성 수준을 한 단계 올리는 중요한 동기를 제공하고자 한다.

2. 유관논문 조사방법

2.1 연구영역

국내외 도시철도 시스템에 적용된 신뢰성 관리체계에 대해서 정리하고, 현재 철도시스템에서 활발히 적용시키고 있는 신뢰성 관리체계 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety)의 연구 동향을 분석 하고자 한다.

2.2 조사방법

국내외 도시철도 시스템에 적용된 신뢰성 관리체계에 대해서 정리하고자 NDSL을 포함한 총 6곳 (Science Direct, IEEE Xplore, Emerald, Springer Link, DBPIA)의 논문을 검색해 국내외 유관 논문을 수집하여 정리하였다. 국내외 도시철도 운영기관과 기업의 RAMS 적용현황을 정리하기 위해 국토해양부, 서울특별시도시철도공사, 한국철도시설공단 등의 홈페이지 자료를 참고였다.

3. 국내외 철도의 신뢰성 관리체계

3.1 해외 연구동향

유럽, 일본과 같은 철도강국에서 기술을 보유하고 있으나 대외적으로 신뢰성 평가결과와 요구조건만 발표하고 세부내용은 공개를 하지 않는다. 또한 평가결과도 개별 시스템 또는 요수 부품별로 수행한 결과만을 보여주고 있다. 그러나 철도에 관한 RAMS 국제규격 IEC-62278이 2002년 9월에 발표되었고, 적정수준의 RAMS를 보증하도록 세계 각국에서 국제 입찰사양에 적용하는 추세이다.

[표 1] 해외 유관논문의 연구주제 정리

저자	연구주제
Elms(2001)	철도시스템의 안전성에 관한 연구
Mettas(2000), (2001)	철도시스템의 신뢰도 분석에 관한 연구
Bogdaniuk(2003)	철도시스템의 고장예측에 관한 연구
Larry(2005)	설계단계에서의 신뢰성 결함 예측 및 관리에 대한 연구
Takeshi Mizuma(2004a), (2004c)	철도시스템의 신뢰성 평가에 대한 연구
Carretero(2003)	철도시스템의 신뢰성 중심의 보전 도입에 대한 연구
Ferreira(2003)	철도시스템의 신뢰도조사를 위한 통계적 분석의 연구
Fukuoka(2002)	네트워크형 신뢰성평가 모델에 대한 연구

Ferreira 등(2003)은 실제 사용조건하에서 철도 베어링 신뢰도 조사에 관한 연구를 실시하였다. 고장난 베어링 자료를 7개의 그룹으로 구분하여 3모수 와이블 고장 분포를 적합하였다. 통계 분석을 수행하기 위하여 모수추정은 비선형 회귀분석 방법을 활용하였으며, 베어링 정상수명 L10(제10백분위수)을 추정하기 위해 두 가지 방법으로 구분하여 비교 분석을 실시하였다[33].

Larry(2005)는 복합시스템에서 설계결함을 확인하고 신뢰성결함을 개발초기 단계에서 수정하는 신뢰성 업무가 얼마나 유효한지를 측정하기 위해 BRTE(basic reliability tasks effectiveness) 개념을 도입하고 헬리콥터 및 미사일 등에 적용하여 그 결과를 제시하였다[34].

Bogdaniuk 등(2003)은 레일이 철도노선에서 고가의 구성 품이므로, 레일의 피로(fatigue) 고장을 예측함으로써 수명을 증가시키는 연구를 수행하였다[30].

Elms(2001)은 철도 안전성에 관한 연구를 수행하여 안전관리문제를 상세하게 설명하였다. 철도안전을 이해하기 위해서는 철도 운영의 본질을 파악하여야 하며 철도 안전시스템의 서로 다른 요소들에 대한 통합과 안전이 경영의 주류로써 통합되어야 함을 강조하고 있다[32].

水間 毅 등(2004a)은 일본 철도의 안전성 분석방법을 설명하였다. FMEA나

FTA(fault tree analysis)를 통해 설계단계에서 정적으로 확인한 후, 시험이나 시뮬레이션으로 고장을 발생시켜, 신뢰성의 평가를 동적으로 실시하여 분석한다. 또한 국제 규격에 적합한 정량적인 평가방법의 검토 결과를 제시하였다[29].

또한 水間 毅 등(2004c)은 철도기술의 정량적 평가를 위해 개발한 시뮬레이터를 이용하여 LRT(light rail transit)에 적용한 예를 제시하였다[28].

Carretero 등(2003)은 철도 네트워크를 대상으로 한 대형복합 시스템의 RCM 적용에 관한 연구를 수행하였다. 적절하고 효과적인 유지보수 개념을 달성하기 위한 철도 하부구조의 RCM 적용 문제점을 설명하고, 이러한 문제점을 해결하기 위해 CMMS(computerized maintenance management system)와 연구자의 방법론을 제시하였으며 다음 [표 2]과 같은 특징을 정리하였다[31]. 특히 성공적인 프로젝트의 사례로, 스페인 철도회사(RENFE ; Spanish railway company)와 독일 철도회사(DB A.G.)가 RCM 방법에 따른 TPM(total preventive maintenance)을 수행하는 대형 프로젝트를 소개하고 있다.

[표 2] Carretero방법의 효과 [31]

효 과	설 명
short-term (단기)	• 시간과 문서업무의 단축
	• 유지보수에 대한 정확한 정보의 수집 가능
long-term (장기)	• 더 나은 PM은 장비수명을 증가 시키고 고장 수리비용을 줄임
	• 예상치 못한 고장시간이 없을수록 생산량은 증가
	• 재료와 부품의 구매 비용이 감소
	• 저장품과 물품목록의 효과적인 최신 기록이 가능
	• 해당 시스템에 적용 가능한 적절한 LCC(Life Cycle Cost)기법 적용이 가능

Fukuoka(2002)는 철도가 수많은 하위 부품들이 상호 의존적으로 구성되어 있어서 ETA(event trees analysis), FTA와 같은 기존의 리스크 분석방법을 개별적으로 적용하여서는 충분한 효과를 거두기 어렵기 때문에 네트워크형 신뢰성평가모델인 TSID(Typed State Influence Diagram)를 제안하고 있다[35].

Mettas(2000)은 신뢰성 할당문제의 비선형 프로그래밍 식과 비선형 프로그래밍 알고리즘에 사용되는 비용 함수를 정식화하였다. 시스템 신뢰성 목표 요구사항을 만족하는 최적 구성품 신뢰도의 해를 도출하고, 시스템의 비용을 최소화하는 신뢰도 할당과 최적화 방법을 제시하였다. 또한 소프트웨어 도구인 BlockSim을 이용하여 복잡한 시스템의 할당문제를 수치예로 설명하였다[37].

Mettas 등(2001)은 비수리계 시스템의 신뢰도를 추정하기 위한 분석적인 접근방법(analytical methods)의 장점을 시뮬레이션 방법과 비교하여 설명하였다. 여기서 소프트웨어 도구인 BlockSim을 이용하여 복잡한 시스템의 분석절차를 수치예로 제시하였다. 일단 시스템의 신뢰도 함수가 결정되면, 다음 [표 3]와 같은 절차를 이용한 시스템

의 신뢰도분석을 설명하였다[36].

[표 3] Mettas의 비수리계 시스템의 분석적 방법 [36]

step	description
1	시스템의 pdf 측정
2	보증기간의 측정
3	시스템 고장률의 측정
4	시스템의 MTTF의 측정
5	구성요소의 신뢰도 중요성
6	최적화 및 신뢰성 할당기법을 활용
7	정적인 요소와 시간종속적인 요소를 복합적으로 구성하고 있는 시스템의 분석

3.2 국내 연구동향

[표 4] 국내 유관논문의 연구주제 정리

저자	연구주제
정인수(2008)	철도차량의 신뢰성 목표 값 설정에 관한 연구
정인수(2008)	운영환경을 고려한 신뢰성 검증시험에 관한 연구
이강원(2007)	목표신뢰도 달성을 위한 신뢰도 할당 모델에 관한 연구
이호용(2005)	도시철도의 예방정비 시스템과 전문가 시스템 구축에 관한 연구
서승일(2004a)	고속전철용 고장정보체계에 대한 연구
서승일(2004b)	고속열차의 신뢰성 향상 및 신뢰성 평가에 대한연구
한석윤(2004d)	신뢰도 중심 유지보수 체계의 적용에 대한 연구
한석윤(2004d)	RAM관리 및 평가를 위한 연구
박광복(2004)	신뢰성관리계획 및 수립에 관한 연구
구병춘(2002)	전동 차량에 대한 신뢰성 평가에 대한 연구
정종덕(2002)	전동차의 내구도 시험평가에 관한 연구
장준순(2000)	고속전철 시스템의 신뢰도 목표 설정 및 배분에 관한 연구

정인수 등(2008)이 신뢰성 목표 값 설정의 연구로 철도차량의 서비스 신뢰도, 로지스틱 신뢰도, 가용도, 유지보수성 측면에서 RAM 목표 값을 설정하는 방법을 제시하였고, 이 설정방법을 실제 철도차량 운영데이터에 적용하였다[20].

정인수 등(2008)은 철도차량의 특성과 운영환경을 고려하여 가장 적합한 신뢰성 검증시험을 위하여 여러 산업분야에서 사용되는 신뢰성 시험방법에 대해 조사하고, 이

시험방법들이 철도차량에 적용될 수 있는지를 평가하였다. 그리고 적용할 수 있다고 판단되는 시험방법을 실제 철도차량의 데이터에 적용하여 신뢰성 검증 결과를 비교하였다[19].

이강원 등(2007)은 새로운 고속철도차량인 KTX-II의 목표 신뢰도 달성을 위해 가장 효과적으로 사용될 수 있는 신뢰도 할당 모델을 조사하였다. 항공기, 자동차, 발전소 등에서 사용된 신뢰도 할당 모델을 조사하고, 철도차량에 적합한 할당 모델을 평가하여 제안하였다[14].

이호용(2005)은 정보화 기술을 접목한 예방정비시스템과 전문가시스템을 구축하는 연구와 신뢰성 평가의 기본이 되는 부품 기반의 도시철도 유지보수 마스터 BOM(bill of materials)을 연구하였다[15].

서승일 등(2004a)은 한국형 고속열차의 RAM 성능 입증을 위해 고속전철용 고장정보체계(failure information system)를 개발하여 적용하였다. 시스템과 부품단위로 분류하고, 각 시스템 및 부품의 고장기록과 유지보수 기록을 입력함으로써 고장 및 유지보수 정보를 체계적으로 검색할 수 있으며, 입력된 자료를 분석하여 시스템 및 부품단위에서 신뢰성과 유지보수성, 가용성 등의 신뢰성 자료를 산출할 수 있도록 하였다[11].

서승일 등(2004b)은 한국형 고속열차(Korea High Speed Train)를 상용화하기 위한 신뢰성 향상 연구 및 시험의 실시에 관한 연구를 수행하였다. 특히, 한국형 고속열차의 주요 시스템인 보조전원 시스템을 대상으로 기능분석 및 신뢰성 해석을 실시하고, 해석 결과를 기초로 하여 신뢰성 향상 방안을 모색하고 신뢰성을 평가하였다[12].

한석윤 등(2004d)은 국내 도시철도의 신뢰성 관리체계 및 현황을 조사하고 국외 선진국에서 도입하여 실시하고 있는 국제규격 동향을 분석하였다. 특히, 한국철도기술연구원에서 개발하여 경산 시험선에서 운영 중인 고무차륜 AGT 시스템에 신뢰성 중심 유지보수체계를 적용하기 위한 RCM의 방법론을 구체적으로 제시하였다[23].

한석윤 등(2004e)은 고무차륜 AGT 차량시스템에 적용할 수 있는 고장정보 체계를 구축하여 시험초기에 발생할 수 있는 잠재적 고장원인을 조기에 파악하여 영업선의 신뢰성 향상에 기여할 수 있는 신뢰성 관리체계를 제시하였다. 차량시스템의 고장과 목표 RAMS 요구사항을 정의하고, 목표 RAMS 관리 및 평가를 위한 신뢰성 시험계획과 신뢰성 분석 및 평가절차를 수립하였으며, 고장정보체계에 따른 신뢰성 분석 개발 프로그램의 활용을 약속하였다[25].

박광복 등(2004)은 연구개발단계에서 틸팅열차의 신뢰성 관리계획 수립에 관한 연구를 수행하였다. 참여기관이 설계, 제작 및 시험단계에서 필요한 신뢰성 활동을 제시하였다.

오지은 등(2004)은 홍콩전동차에 적용한 시스템 보증기술 방법을 소개하였다[13].

구병춘 등(2002)은 표준전동차를 14개의 서브시스템으로 나누고 신뢰성을 평가하였는데 차체와 대차에 대해서는 구조신뢰성기법을 적용하였다. 그리고 나머지 서브시스템에는 MIL-HDBK나 SWSC-98LE1을 적용하여 신뢰성을 평가하여 MTBF가 275.3시간 임을 확인하였다. 연구의 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다[1].

- 1) 시스템분류
- 2) 기능 블록선도 작성
- 3) 신뢰성 블록선도 작성
- 4) 고장률 예측
- 5) 신뢰도 계산
- 6) 위험도 해석

백영구 등(2002)은 고장유형 및 영향분석법(FMEA ; failure modes and effects analysis)의 장단점을 분석하였으며, 제품의 설계, 제조공정에만 적용하던 것을 시험, 운영, 서비스, 폐기에 이르기까지 수명주기로 확장하여 실시할 것을 제안하고 있다[10].

정중덕 등(2002)은 도시철도 표준화·국산화 사업을 통해 개발된 표준전동차의 내구도 시험평가에 관한 내용과 시험결과를 기술하였다. 내구도 주행시험의 총 주행거리는 약 10만km로서 시험 운행하는 동안에 큰 고장 없이 시스템이 안정화되어 있음을 파악하였다. 그리고 내구도 주행시험에서 표준전동차 및 핵심장치의 성능을 입증하여 국산화 용품을 도시철도 운영기관에 공급할 수 있는 계기를 마련하고 표준화체계 정착에 기여하였다[21].

장중순 등(2000)은 고속전철 시스템의 신뢰도 목표 설정 및 배분에 관한 연구를 하면서, 한국형 고속철도차량의 신뢰도 요구사항이 주어졌을 때 고장유형에 따른 신뢰도 목표를 설정하고 이를 ARINC 모델에 의해 서브시스템과 조립 체에 할당하는 연구를 수행하였다[17].

4. 철도 시스템에 있어서 RAMS 적용 현황

4.1 해외 도시철도 RAMS 적용 현황

1990년대 유럽 연합회 CENELEC에서 실질적 구속력을 가지고 운영되는 철도관련 표준을 제정하였다. 이는 유럽연합 내에서 국가 간의 상이한 신호 보안시스템의 안전성 요건을 공통화 하여 타국의 신호 시스템의 도입을 용이하게 하였으며 유럽연합 고속 철도망의 구축 및 열차 제어 시스템의 개발을 촉진하였다.

철도분야의 신뢰성 연구는 150여 년 전부터 철도를 개발하여 운영하고 있는 유럽에서 철도분야의 개발 및 운영에서 특별히 요구되는 RAMS기법을 적용하여 철도 기술 개발의 효율성을 높이기 위한 연구가 활발히 추진되었다. 이 노력은 철도산업의 상호 운용성과 상호 인증 제도를 기반으로 신뢰성, 가용성, 보전성 그리고 안전성의 유럽 표준(European Norm)으로 제정하였으며, 지속적으로 수정 보완 진행 중에 있다.

미국의 철도산업은 1987년 이래 안전성 관련분야에서 큰 진보를 이루었고, 현재 주요선로와 장치 유지보수에서 성과를 나타내 새로운 차량 등의 철도 구매에서 안전을 최우선적으로 고려하고 있다. 미국의 FRA(Federal Railroad Administration)의 안전

최우선 요구는 철도 안전성의 증가를 촉진하였으며, 이후 미국에서는 FRA의 규정은 모두가 따라야하는 안전 수준으로 인식되고 있다. 미국에서의 RAMS 표준 적용은 철도 RAMS의 활용을 통한 기술수준 향상보다는 안전성 확보를 위한 가이드라인의 제시를 통하여 철도 시스템의 기술성장을 도모하고 있다.

일본은 세계에서 가장 먼저 고속철도를 개발 실용화하며 철도 기술을 꾸준히 발전시켜 왔다. 1970년대부터 안전성과 신뢰성 연구를 시작하여 30여 년 동안 철도분야에서 개발한 제품에 대해 설계에서 폐기까지 안전성과 신뢰성에 대하여 검증한 자료와 노하우를 가지고 있다. 또한 철도신호 기술의 첨단화에 따라 대학, 철도회사, 산업계 등의 관련 전문가들이 전문가 위원회를 1994년에 구성하여 30여 년 동안 축적된 기술과 경험을 바탕으로 2년간의 조사 및 검토를 실시하였고 신뢰성 관련 국제 규격에 관한 논의가 활발히 이루어지고 있다. 특히 예전부터 일본에서 실시되어온 안전성 평가에 관한 개념과 국제규격인 IEC 62278 도입에 대한 대응 방법에 대해서 검토하고 있다. 유럽의 경우와는 달리 일본 철도 분야에서는 일반적으로 명확한 문서화, 증명화에 의한 인증 등 형식적인 측면보다는 안전 확인 주행시험 등 실제 주행을 통한 평가에 중점을 두고 있다. 따라서 안전성, 신뢰성 등에 관해서는 충분한 실적이 있음에도 불구하고, 수치적인 평가와 그것을 인증하는 문서화 등의 과정은 지연되고 있다[27].

그러나 일본도 국제표준화 추세에 따라 IEC 규격에서 정의하고 있는 평가 및 관리 프로세스를 점증적으로 수용하는 한편 일본의 입장을 적극적으로 반영하는 활동을 할 것으로 생각된다.

[표 5] 각국의 철도 RAMS 적용현황 [9]

국가	현황	적용 분야
유럽	철도 RAMS 표준의 제정 및 시행중에 있으며, 유럽연합(EU) 내의 전 회원국(25개국)에서 적용되고 있다.	차량, 신호
미국	RAMS 적용보다는 철도안전 프로그램을 제정하여 적용하고 있다.	차량, 신호 (기관차, 화차 등)
일본	IEC와 CENELEC의 철도 안전관련 법규를 종합하여 만든 “열차신호시스템의 안전성 기술지침”을 기본으로 RAMS 요건과 접목한 적용을 하고 있다.	차량, 신호

해외의 경우 RAMS 목표를 정한 후 이를 달성하기 위한 노력과 기술을 개발하고 있다. 특히 고객의 서비스 품질과 안전을 보장하기 위해서 철도시스템을 구성하는 하위 구성 품까지도 RAMS 관리를 하고 있다.

4.2 국내 도시철도 운영기관과 기업의 RAMS 적용 현황

국내의 RAMS 적용은 철도차량기업을 중심으로 차량납품에 필요한 신뢰성 평가위주로 되어 있다. 또한 주로 안전성 평가의 일부분으로 수행되었으며, 차량, 신호, 전력, 선로구축물 등이 통합된 종합시스템의 신뢰성 평가는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

1) 국내 도시철도 운영기관의 유지보수 활동

국내에서 운행 중인 도시철도시스템은 계획단계에서부터 신뢰성을 체계적으로 적용한 시스템은 거의 없다. 따라서 고유 신뢰성보다 운영 신뢰성을 높이기 위해서 유지보수 활동에 크게 의존하고 있다.

도시철도 운영기관에서는 유지보수 활동과 안전관리를 이용승객의 수, 사용 환경, 시스템 특성을 고려하기보다는 검수주기별 유지보수를 시행하는 방법으로 관리하고 있다. 또한 각 대도시별로 검사주기, 방법, 인력 등이 상이하고 차량정비에 관련된 이력도 2~6년 내에 폐기되는 실정이다. 따라서 신뢰성과 안전성을 향상하기 위해서는 검수설비의 현대화, 정비작업 표준화, 유지보수관리 및 기록의 정보화 등을 추진하고, RCM 기법을 적용한 예방정비시스템의 적용이 시급하다[23].

2) 국내 철도관련 기업의 RAMS 현황

철도관련 기업은 도시철도 제작 사양서 등에서 제시하고 있는 RAMS의 기준에 적합하도록 기술수준을 개선해 나가고 있다. 예로서 차량 제작사에서 홍콩에 수출한 전동차는 RAMS에 대한 시스템 보증기술을 해외 전문기관의 공동으로 수행하여 적용하였다.

국내기업의 RAMS 적용은 [표 6]에서 표시한 RAM 4단계 수행업무 선택하여 적용하고 있다.

[표 6] 도시철도차량 RAMS 단계별 수행업무 [13]

단계 구분	내용
예비 RAMS 분석단계	<ul style="list-style-type: none"> RAMS 목표를 설정하기 위한 단계
설계 및 제작 단계	<ul style="list-style-type: none"> 확정된 시스템 요구사항의 설계 분석 단계로 안전성과 RAM으로 분류하여 상세분석(이 단계에서 RAMS 분석의 대부분을 수행)
시운전 단계	<ul style="list-style-type: none"> 위험감소 저감 방안의 유효성 입증 및 장치/부품의 신뢰성과 유지보수성 성능자료를 수집하여 분석단계의 결과와 상호 비교, 신뢰도 성장을 위한 개선방안 설정, 설계 오류로 인한 유형고장(pattern failure) 발생여부 검증 및 각종 고장을 FRACAS(failure reporting, analysis and corrective action system)원리에 의한 분석 및 대책을 수립
자료수집 및 RAM 실증	<ul style="list-style-type: none"> 고장 및 이로 인한 보수정비 내역과 예방정비 내용의 유효성을 분석하고, 설계단계의 RAMS 특성 예측 결과 및 발주기관 공고 사양상의 RAMS 요구사항 만족여부 입증 RAM 실증(demonstration) 과정에서 얻어진 종합 분석 결과는 발주기관에 제공, 향후 차량 운영계획 작성시 활용

4) 일반철도의 RAM 적용현황

국내서 운행되고 있는 일반 철도의 경우에도 도시철도와 마찬가지로 수명주기에 따른 체계적인 RAM관리 보다는 유지보수 위주의 관리를 하고 있다. 다만, 프랑스에서 도입한 고속전철(KTX)의 경우 신뢰성 목표를 설정하고 있으며 신뢰성중심 유지보수 시스템을 구축하고 있다. 그러나 이 시스템은 유지보수 관리 및 비용 최적화가 주요 목적임으로 RAM의 수명주기 관점에서는 미흡하다.

[표 7] 기존 철도시스템의 현황 [16]

구분	현황	비고 (동력방식)
전동차 및 전기기관차	<ul style="list-style-type: none"> • 유지보수에 중점 • 2003년 이후에 발주한 시스템의 경우 RAM을 적용 할 것을 부분적으로 명시하고 있음 	전기동력
새마을, 무궁화 통근열차 등	<ul style="list-style-type: none"> • 기존에 운행되고 있는 시스템은 RAM을 적용하지 않았으며 운행이후에는 유지 보수에 중점 	디젤동력 및 객차
고속철도(KTX)	<ul style="list-style-type: none"> • 2004년부터 국내 운영을 시작하였으며, 프랑스에서 기술을 도입 • 수명주기관점의 관리보다는 차량운행시의 유지보수 최적화에 중점을 두고 운영신뢰성 위주의 관리 	전기동력

5. 철도 신뢰성의 국내외 규격

5.1 국내규격

신뢰성과 관련한 국내규격으로는 한국산업규격 KS C IEC 62278, 60300-3-1, 3-5, 3-7, 3-9가 있는데 이는 IEC 62278, 60300-3-1, 3-5, 3-7, 3-9를 번역한 것으로 신뢰성 관련 사양서 및 설명서, 신뢰성 분석기법, 신뢰성 시험조건과 통계적 시험원칙, 전자제품의 신뢰성 스트레스 스크리닝, 기술적 시스템의 리스크 분석에 대해 기술되어 있다. 그 이외에도 KS A IEC 60319에는 전자부품의 신뢰성 데이터의 제시 및 설명이, KS A IEC 61014에는 신뢰성 성장프로그램, KS A IEC 61649에는 와이블 분포에 따르는 적합도 검증 등에 대해, KS A IEC 61650에는 신뢰성 데이터 분석기법, KS A IEC 61710에는 거듭제곱법칙 모형에 관해 기술하고 있다[24].

건설교통부(現 국토해양부)에서 도시철도의 효율적인 운영과 호환성확보 등을 위하여 정한 “도시철도차량 표준사양(2009. 9. 23)”에는 운전 및 유지보수 조건에 대해서 포괄적으로 기술되어 있으며[5] “도시철도 차량관리에 관한 규칙(2009. 8. 17)”에는 전동차 및 고무차륜 등의 표준규격과 주요 구성요소의 규격을 규정한다[4].

“도시철도 차량의 성능시험에 관한 기준(2009. 9. 23)”에는 전차선로 설치상태 및 성능확인, 자동 열차 감시 장치시험, 지상제어장치시험, 지상 신호 및 열차 제어 설비 시험 등의 각종 성능시험을 규정하고 있다[3].

“도시철도용품의 품질인증요령(2010. 7. 9)”은 도시철도에 사용되는 부품·기기 또는 장치 등의 성능 및 안전성 확보를 위하여 도시철도 구조물의 품질평가에 필요한 사항을 규정하고 있다[6].

“도시철도차량의 정밀진단지침(2009. 7. 28)”은 차량사용내구연한의 연장 가능여부를 확인하기 위하여 결함 및 부식검사의 상태평가, 전선열화검사의 안전성 평가 및 잔존 수명평가를 실시할 때 필요한 사항을 규정하고 있다[2].

이상에 살펴본 바와 같이 도시철도와 관련 된 건설교통부(現 국토해양부)의 법령에는 RAM에 대한 구체적인 적용범위 또는 내용이 미흡하다.

대구 지하철 화재사고(2003. 2. 18)를 계기로 개정된 “도시철도 건설규칙(2009. 9. 23)”은 도시철도 이용자의 안전을 최우선적으로 확보하기 위해 정거장·터널 등에 설치되는 구조물의 방재성능을 강화하고 비상상황이 발생할 경우 승객이 긴급히 대피할 수 있도록 특별피난계단을 설치하도록 하는 등 도시 철도건설시의 안전기준을 강화하고 있다. 또한 2009년 8월에 개정된 “도시철도 차량안전기준에 관한 규칙”에도 비슷한 이유로 화재 안전기준을 보완하고 제동장치 완해불능 시 예외규정 마련과 통신장치 기준의 규정 등의 안전기준에 관한 규칙을 강화하고 있다[7].

5.2 국제규격

IEC 62278(2002)6은 철도 RAMS에 관한 규격이다. 이 규격은 철도전체를 대상으로 하고 있으며, 대상이 되는 시스템의 위험요인을 찾아 위험도를 해석하고, 필요한 RAMS를 확보하기 위해 14단계로 구성된 시스템 수명주기 단계별 RAMS 업무의 목적, 요구사항, 입력·출력, 증명사항 등을 정의하고 실시해야 할 업무와 내용 등을 규정하고 있다.

IEC 60300(1991)은 종합신뢰성관리에 관한 규격으로 제품 설계와 개발, 평가 및 프로세스에 대한 종합신뢰성 경영 지침을 제공하고 있다. 제품이나 프로젝트 단계를 정의하기 위해 수명주기 모델이 사용되는데 다양한 고객의 요구를 만족시키도록 시간-단계별 제품 실현에 적합한 맞춤형 프로세스를 권장하고 있다. IEC 60300은 제공되는 제품, 유형, 크기에 관계없이 모든 수명주기단계와 계약 상황 동안 모든 조직에 적용할 수 있다.

IEC 62280(2002)은 소프트웨어에 관한 규격으로서 수명주기에 있어서 안전성 확보를 위한 요구사항과 그 요구사항이 충족되어 있음을 명확하게 하는 과정을 규정하고 있다[10].

EN 50129(1997)는 아직 IEC 규격으로 등록되지는 않았으나, 철도신호 전자시스템의 안전성에 관한 규격으로 신호시스템의 인가 및 도입을 위해 필요한 안전성 요건과 그 문서관리에 대해서 규정한 것이다[10].

EN 50126(1999)은 하위 지침으로 안전성에 관한 CLC/TR50126-2와 철도차량에 대한 CLC/TR50126-3이 있다. IEC62278로 국제 규격화 되었다[10].

EN 50128(2001)은 철도 제어와 보호시스템의 소프트웨어에 관한 규격이다[10].

MIL-STD-785B(1980)는 시스템, 장비의 개발과 생산에 대한 신뢰성 프로그램에 일반적 요구사항과 구체적인 임무를 제공하고 있으며 주로 신뢰성 관리 프로그램에 적용된다[24]. 주요 내용은 [표 8]과 같다.

5.3 국제규격의 비교분석

여기서는 IEC 60300, IEC 62278, MIL-STD-785B 규격의 적용분야, 신뢰성 프로그램의 주요 내용을 비교 분석한다.

1) 규격의 적용분야

각 규격이 적용되는 분야는 [표 9]과 같다.

[표 8] MIL-STD-785B 내용 [24]

Task	내용
Task 100	프로그램 감독과 관리
101	신뢰성 프로그램 추진계획
102	공급업자 신뢰성 인증 및 계획
103	프로그램 심사
104	FRACAS(failure reporting, analysis & corrective action system)
105	고장분석 위원회
Task 200	설계 및 평가
201	신뢰성 모델링
202	신뢰성 배분
203	신뢰성 예측
204	FMECA(고장모드 영향 치명도 평가)
205	SCA(sneak circuit analysis)
206	전자부품/회로 공차분석
207	부품프로그램
208	중요부품명세
209	기능시험, 보관, 운반, 포장, 취급, 정비에서의 신뢰성 평가
Task 300	개발 및 제조시험
301	환경시험
302	신뢰성 성장관리 프로그램
303	신뢰성 인증 프로그램
304	제조 신뢰성 보증시험

[표 9] 규격의 적용분야

IEC 60300	IEC 62278	MIL-STD-785B
<ul style="list-style-type: none"> 특정 제품 요구를 만족시키기 위한 신뢰성 경영시스템의 세부 계획과 실행 제품, 유형, 크기에 관계 없이 모든 수명 주기 단계와 모든 조직에 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 전체 철도 노선에서부터 노선내의 주요 시스템 개별 및 결합된 하부 시스템들 주요 시스템 구성요소들 <ul style="list-style-type: none"> -새로운 시스템 -기존 시스템에 통합된 새로운 시스템 -철도인증기관과 관련 산업체 	<ol style="list-style-type: none"> 표준의 적용 <ul style="list-style-type: none"> 미국 국방성 계약의 구 체화된 획득 직무 상태 제안의 요구 정부조직 내에서 요구되는 개발 제품의 신뢰성 프로그램 요구 시스템과 장치의 초기배치에 선택적으로 적용 직무 기술에 적용 <ul style="list-style-type: none"> 정부규칙 특정한 시스템들 장치 프로그램 타입, 크기 지침에 적용 <ul style="list-style-type: none"> 표준, 상세한 직무 기술

2) 신뢰성 프로그램

세 가지 규격의 신뢰성 프로그램 주요 내용을 비교하여 [표 10]에 정리 하였다. [표 11]에는 각 규격에서 기술하고 있는 신뢰성 관리항목을 비교하였다.

[표 10] 신뢰성 프로그램 비교

IEC 60300	IEC 62278	MIL-STD-785B
<ul style="list-style-type: none"> 수명주기에 따라 신뢰성 있는 제품 실현 계획 신뢰성프로그램 맞춤제작 시스템과 소프트웨어 <ul style="list-style-type: none"> - 시스템 구조 - 내고장성 설계 - 내고장성 완화과정 - 관련 품질보증 인적요인 <ul style="list-style-type: none"> - 인간-기계 인터페이스 설계 - 운영과 유지보수 - 인간 운영의 안전성 - 시스템 유지, 사용, 처리 - 신뢰성 측정, 분석, 개선 	<ul style="list-style-type: none"> 제품의 수명주기 수명주기에 필요한 모든 RAMS 직무 책임 직원과 필요한 RAMS 자원 문서화된 RAMS 관리 	<ul style="list-style-type: none"> 신뢰성 프로그램 계획 (TASK 101) 신뢰성 프로그램 검토 (TASK 103) 신뢰성 예측 (TASK 203) 신뢰성 개발/성장 테스트 (RDGT) 프로그램 (TASK 302) 정성적인 신뢰성 테스트 (RQT) 프로그램 (TASK 303) 제품 신뢰성 수용 테스트 (PRAT) 프로그램 (TASK 304)

[표 11]에서 공통으로 추구하고 있는 신뢰성 관리 항목은 관리 추진계획, 고장영향평가, 고장분석, 자료수집·분석, 환경시험, 스트레스 스크리닝이다. 또한 신뢰성과 안전성을 확보하기 위하여 수명주기의 각 단계별 업무와 내용을 명확히 하고 문서로 정리할 것을 요구하고 있다. IEC 60300, 62278은 관리적인 측면을 강조하고 있고 MIL-STD-785B는 분석·평가·시험관련 내용이 주로 구성되어 있다.

5.4 신뢰성 규격의 국내 적용방안

[표 11] 신뢰성 규격의 관리 항목 비교

비교 기준	비교 항목	IEC 60300	IEC 62278	MIL-STD-785B
신뢰성 관리	관리 추진계획	○	○	○
	관리 책임	○	○	
	프로그램 심사		○	○
	자원관리	○		
	고객·제품 서비스	○	○	
	신뢰성 인증 계획		○	○
	위험도 관리	○	○	
	신뢰성성장관리			○
신뢰성 분석·평가	신뢰성 모델링			○
	신뢰성 배분	△		○
	신뢰성 예측			○
	고장 영향 평가	○	○	○
	제품분석			○
	고장분석	○	○	○
	자료수집·분석	○	○	○
	위험도 분석	○	○	
	수명주기	○	○	
	신뢰성 요구사항	○	○	
	안전성 관련		○	
	고장분석위원회			○
	보고	○	△	○
	신뢰성 시험	신뢰성 성장시험	○	
환경시험		△	△	○
인증시험				○
보증시험		△		○
스트레스 스크리닝		○	○	○
보전성 시험		○	○	
타당성 시험			○	

(○: 적용, △: 부분적용)

앞에서 분석한 바와 같이 철도신뢰성 규격은 각각 특징이 있다. 따라서 이들 규격의 적용은 사용기관의 특성 즉 기업, 운영기관, 연구기관 등의 특성과 사용목적에 맞도록 맞춤형 적용이 필요하다. 이를 간략히 설명하면 다음과 같다.

- 운영기관의 경우 제작된 제품을 구매하여 운영해야 함으로 운영 및 유지 보수에 중점을 둔다. 따라서 운영신뢰성을 높이기 위한 활동이 필요하며 신뢰성경영시스템과 RCM 적용이 효과적이다.

- 신제품을 개발하는 연구기관의 경우 계획단계에서부터 종합 성능 및 안전성시험 그리고 내구성 평가에 이르기까지 제품의 전 수명주기에 걸쳐 종합적으로 적용되어야 한다.

- 철도부품에 대한 신뢰성을 높이기 위해서는 신뢰성 인증 제도를 도입하고 인증을 획득한 제품에 대해서는 우대하는 제도적 접근이 필요하다.

6. 결 론

국내외 도시철도분야의 연구 동향과 적용현황, 국제규격을 분석한 결과 다음과 같은 개선 방향을 도출하였다.

- 1) 신뢰성 향상을 위한 제도적인 지원방안을 마련하고 지속적인 투자로 철도분야의 신뢰성 전문가를 양성할 필요가 있다. 좀 더 현실적이고 구체적인 신뢰성관련 규격을 제정할 필요가 있고, 승객의 안전과 직결된 만큼 안전과 관련된 규정은 사고가 난 후가 아닌 사고를 미리 방지하는 방향으로 신속히 규정하고 개정할 필요가 있다.

- 2) 국내외 기술수준을 고려하여 목표 신뢰수준(예: 전체시스템 및 각 하위 시스템과 부품들에 대한 목표 신뢰성 기준 설정과 가용도 요구사항)을 설정하고 개념정의 단계에서 폐기에 이르는 전 수명주기에 걸쳐 신뢰성 관리가 필요하다. 이를 위해서는 IEC 60300의 신뢰성경영시스템을 경영의 기반으로 하여 적용하고 IEC 62278 신뢰성관리를 적극 수용한다.

- 3) 신뢰성 중심 유지보수(RCM)를 적용하여 운영단계의 시스템 및 부품의 신뢰성 자료를 지속적으로 확보하고, 개발시스템에 적합한 유지보수 방법을 구성하여 이를 신뢰성향상을 위해 적극 활용할 필요가 있다.

7. 참 고 문 헌

- [1] 구병춘, 김남포, “표준 전동차의 신뢰성 평가”. 한국철도학회, 2002.
- [2] 국토해양부고시 제2009-515호, 도시철도 차량의 정밀진단지침, 2009. 7. 28
- [3] 국토해양부고시 제2009-641호, 도시철도차량 성능시험, 2009. 8. 17
- [4] 국토해양부고시 제2009-642호, 도시철도차량 표준규격, 2009. 8. 17

- [5] 국토해양부고시 제2009-929호, 도시철도시설 표준규격, 2009. 9. 23
- [6] 국토해양부고시 제2010-468호, 도시철도용품의 품질인증요령, 2010. 7. 9.
- [7] 국토해양부령 제2009-769호, 도시철도차량 안전기준에 관한 규칙, 2009. 8. 19
- [8] 도시철도법 제3조(정의), 국토해양부 홈페이지 법령자료(www.moct.go.kr)
- [9] 민병찬, 전기철도 직류 1500V 급전시스템의 신뢰성 향상을 위한 RAMS 연구, 고려대학교석사학위논문, 2009.
- [10] 백영구, 윤상문, “시스템의 신뢰성과 안전성향상을 위한 FMEA개선에 관한 연구”, 한국철도학회, 2002..
- [11] 서승일, 박춘수, 목진용, 이태형, 김기환, “한국형 고속열차의 고장정보체계 구축에 관한연구”, 한국철도학회, 2004.
- [12] 서승일, 박춘수, 한영재, 이태형, 김기환, “한국형 고속열차 보조전원 시스템의 신뢰성 해석”, 한국철도학회, 2004.
- [13] 오지은, 강찬용, 김철호, “철도차량 RAMS 적용에 관한 연구”, 한국철도학회, 2004.
- [14] 이강원, 정인수, “KTX-II 고속차량을 위한 신뢰도 할당 모델”, 한국철도학회, 2007.
- [15] 이호용, 배철호, 김규희, 서명원, “도시철도 전동차의 유지보수 정보화를 위한 컴포넌트 기반의 BOM 관리시스템 개발에 관한 연구”, 대한기계학회, 2005.
- [16] 이환태, 철도차량의 RAMS 성장에 관한 연구, 대구대학교 박사학위논문, 2005.
- [17] 장중순, 김명수, “고속전철 시스템의 신뢰도 목표 설정 및 배분”, 대한설비관리학회, 2000.
- [18] 정인수, 철도차량의 RAMS 요구사항 설정과 검증에 관한 연구, 서울산업대학교 박사학위 논문, 2009.
- [19] 정인수, 김종운, 이강원, “철도차량 정량적 신뢰성 요구사항의 검증시험에 관한 연구”, 한국도학회, 2008.
- [20] 정인수, 이강원, 김종운, “철도차량 정량적 신뢰성, 가용성, 유지보수성(RAM) 목표값 설정에 관한 연구”, 한국철도학회, 2008.
- [21] 정종덕, 김원경, 한석윤, 이호용, 안태기, 한성호, “표준전동차 10만km 내구도 시험평가”, 한국철도학회, 2002.
- [22] 한석윤, 이호용, 홍재성, 정종덕, “도시철도시스템기술의 주요 현안과 개선 방향”. 한국철도학회, 2007.
- [23] 한석윤, 하천수, 이한민, “고무차륜 AGT 차량의 신뢰성 중심 유지보수(RCM)에 관한 연구”. 한국철도학회, 2004.
- [24] 한석윤, 하천수, 전봉룡, 이호용, “철도신뢰성관련 국제 규격비교 분석연구”, 대한안전경영과학회, 2005.
- [25] 한석윤, 하천수, 홍순기, 김종결, “고무차륜 AGT 시스템 신뢰성평가계획연구”, 대한산업공학회, 2004.
- [26] 한석윤, 하천수, 홍순기, 이호용. “도시철도운영기관의 종합신뢰성 경영시스템 적용방안 연구”, 한국철도학회, 2005.
- [27] 水間 毅, “新しい交通システムの安全性,信頼性におけるRAMS規格適用例”, J-rail

- '04 鐵道技術聯合ツソボヅウム pp.147~150, 2004b..
- [28] 水間 毅 外 2人, “ツミュレータによる鐵道技術の 定量的評價法”, 交通安全公害研究所, 2004c(平成16年).
- [29] 水間 毅 外3(輕量電鐵安全認證着手報告書), 鐵道システムにおける安全性の定量的 的 評價法, 交通安全害研究所, 2004a. 2.
- [30] Bogdaniuk, B., Massel, A. and Radomski, R., “Increasing rail life by forecasting fatigue failure”, NDT&E International, Vol. 36, pp.131~134, 2003.
- [31] Carretero, J., Perez, J., Garcia-Carballeira, F., Calderon, A., L., Cotania, N. and Prete, P., Applying RCM in large scale systems : a case study with railway network”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 82, pp.257~273, 2003.
- [32] Elms D. G., “Rail safety”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 74, pp.291~297, 2001.
- [33] Frreira, J. L. A., Blthazar, J. C. and Araujo, A. P. N., “An investigation of rail bearing reliability under real condition of use”, Engineering Failure Analysis, Vol. 10, pp.745~758, 2003.
- [34] Larry H. Crow, “Studies and Methods for Improvement the Effectiveness of Reliability Tasks”, IEEE, 2005.
- [35] Hiroshi Fukuoka, “Reliability Evaluation Method for the Railway System : A model for Complicated Dependency”, QR of RTRI, Vol 43, No.4, pp.192~196, Dec 2002.
- [36] Mettas, A. and Savva, M., “System Reliability Analysis : The Advantages of UsingAnalytical Methods to Analyze Non-Repairable System”, 2001 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2001.
- [37] Mettas, A., “Reliability Allocation and Optimization of Complex System”, 2000 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000.

저 자 소 개

김 종 결

서울대학교 계산통계학에서 석사

한국과학기술원 산업공학과에서 박사학위

현재 한국품질보증/PL 연구회 회장으로 활동

성균관대학교 시스템경영공학과 교수로 재직

주소 : 경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과 27416호실

송 정 무

남서울대학교 산업공학과를 졸업

현 성균관대학교 산업공학과 석사재학

관심분야: 신뢰성공학, 통계적 공정관리

주소 : 경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과 26418B호실

김 형 만

상지대학교 산업공학과를 졸업

성균관대학교 산업공학과 석사

성균관대학교 산업공학과 박사수료

현 에텍스아카데미 e-Learning 강사로 활동

상지대학교 시스템경영공학과 외래교수

관심분야: 신뢰성공학, 품질공학, TRIZ, 제품개발

주소 : 경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과 26418B호실