도어시스템의 운영데이터를 통한 RAM 성능 평가 사례 연구

A case study on evaluating RAM performance of the door systems through field data

정용† 김종운* 김종봉**

Jeong, Yong **Kim, Jong-Woon** **Kim, Jong-Bong**

ABSTRACT

This article deals with a case study on evaluating RAM(Reliability, Availability and Maintainability) performance of the door systems. The RAM performance is analysed based on the field data. The definition and category of failures of the door systems are presented and reliability for each categories is predicted with field data. MTTR(Mean Time To Repair) is estimated through the replacement time of line replaceable units(LRU). The availability is predicted based on the estimated reliability and maintainability.

국문요약

본 연구는 현장 운영데이터 분석을 통한 도시철도차량 도어장치의 RAM(신뢰성, 가용성, 유지보수성) 성능 평가 사례를 다룬다. 이를 위하여 도어장치의 고장을 분류하고 정의하며, 각 고장 범주별 신뢰도를 운영 데이터를 통해 분석한다. 유지보수성 평가를 위해서 유지보수 전문가를 통해 LRU(Line Replaceable Unit)를 분류하고 LRU별 교환시간의 추정하여 도어시스템의 평균수리시간을 추정한다. 도어시스템의 가용도는 분석된 신뢰도 및 유지보수성을 기반으로 분석한다. 본 연구에서 제시하는 도어시스템의 RAM 평가 사례는 도어시스템의 적절한 RAM 요구조건의 수립과 운영단계의 RAM 성능 향상을 위한 정책 수립으로 이어질 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서 론

우리나라 도시철도는 1974년 서울 1호선을 처음으로 비약적으로 발전하고 있고, 또한 건설중에 있다. 차량시스템의 발전과 함께 유지보수체계의 새로운 시스템 도입도 계속되고 있다. 경영적인 측면에서 보면 저비용을 원할것이며, 유지보수의 측면에서 보면 무결점에 도달하기를 원할것이다. 저비용을 강조하면 서비스의 질은 낮아질것이며, 유지보수을 강조하면 비용이 많이 소요될것이다. 이 두가지을 적절하게 혼합해서 사용해야만 한다. 하지만 대부분의 후발 운영기관들은 차량의 특성을 고려하지 않고 기존의 시스템을 그대로 모방하고 있는게 현실이다. 예측한다는 것이 가장 어려운 문제다. 하지만 기존 데이터를 분석하거나, 현재 빈번히 발생하는 고장에 대해서 신속히 조치하고 대응할수 있는 시스템을 구축함으로서 고장 및 사고를 최소화 할수 있을 것이다. 도시철도의 경우 개통 초기의 차량고장으로 운행이 지연되는 사고가 반발하였으며, 내구 연한이 가까워진 전동차의 유지보수가 적절히 이루어지지 않아 교체 주기를 넘긴 부품 및 시스템 고장으로 차량 운행이 중단되는 사고가 반발하고 있다. 이러한 시스템의 고장으로 인한 승객 불편을 최소화하기 위해 신뢰성이 높은 철도시스템에 대한 요구가 증가

† 책임저자 : 정회원, 인천광역시지하철공사, 차량경정비팀
E-mail : kubig77@hotmail.com
TEL : (032)451-3821 FAX : (032)451-3830
* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실
** 정회원, 서울산업대학교, 자동차공학과

하고 있다. 본 연구에서는 본선 운행시 열차지연의 대부분의 고장을 차지했던 출입문 장치에 대해 운영데이터를 분석하여 LRU(Line Replaceable Unit)별 고장을 로지스틱고장, 서비스고장으로 분류하여 로지스틱고장간평균거리(MKBLF)와 서비스고장간평균거리(MKBSF)를 산출하고, 유지보수 전문가를 통해 LRU별 교환시간의 추정하여 도어시스템의 평균수리시간을 추정한다. 도어시스템의 가용도는 분석된 신뢰도 및 유지보수성을 기반으로 분석하였다.

2. 본 문

2.1 도어시스템의 개요

각 차량은 8개(한쪽 면에 4개씩)의 출입문이 전기적으로 동시 구동되며 각 출입문은 두개의 문짝을 가지고 있다. 도어시스템을 구성하고 있는 장치 중 가장 핵심이 되는 장치는 도어엔진과 DCU이다. 도어엔진은 전동차의 출입문을 자동적으로 개폐하는 장치로서 주요 유닛들로 도어 구동용 모터, 스핀들, 브레이크가 있다. DCU(Door Control Unit)는 도어엔진을 제어하는 장치로서 한 개의 DCU는 두개의 출입문을 제어한다. 도어엔진의 구성 및 특징은 그림 1과 도표 1과 같다.

그림 1. 도어엔진의 구성

도표 1. 도어엔진의 특징

구분	DO-ES001(SPINDLE 방식 도어 엔진)
최 대 행 정	1300mm ± 5mm
완 충 행 정	약 160mm
작 동 온 도	-25℃ ~ +70℃
작 동 습 도	최대 95%
열 리 는 힘	최대 400N
닫 히 는 힘	최대 400N
열리는 시간	2.5 ± 0.5sec
닫히는 시간	3.0 ± 0.5sec
전 압	DC 100V + 10% ~ -30%

경정비의 경우 출고검사는 출고전에 시행하는 검사로서 운전실에 설치되어 있는 TIDK(열차제어정보 운전자화면: Train Information Display Keyboard)의 화면을 통해 출입문의 개폐동작을 확인 할수 있다. 입고검사는 본선운행을 마치고 기지로 입고되는 전동차에 대해서 시행하는 검사로서 운전실의 TIDK의 화면을 통해서, 그리고 다른 한명의 검사원은 실내의 출입문의 개폐동작을 육안으로 검사 하고 있다. 일상검사는 서울메트로나 서울도시철도 등의 경우는 3일 검사주기를 사용하고 있지만, 인천지하철은 7일 검사를 하고 있다. 일상검사의 경우는 운전실의 TIDK의 화면을 통해서, 그리고 두명의 검사원

은 실내 출입문의 각종 시험을 실제 시행하고 있다. 월상검사는 운전실의 TIDK의 화면을 통해서, 그리고 네명의 검사원이 실내 출입문의 실제 동작 상태 및 각종 시험을 통해 보다 더 정밀한 검사를 하고 있다. 특별검사는 1년에 1회 검사를 하는 것으로서 계절적으로 취약한 시기에 시행하고 있다. 객실안전설비 검사는 화재 또는 비상시에 출입문 장치중 진입, 탈출장치를 중점적으로 검사하고 있다. 중정비의 경우는 3년검사(중간검사)와 6년검사(전반검사)로 나누어 지는데 출입문을 취거후 에어청소 및 세척을 한다. 각종 배선 및 볼트류의 이완여부를 확인하며 출입문 취부후 개폐동작 시험을 정밀하게 시행한다. 출입문장치에 대한 검사 종류 및 검사 방법은 도표 2와 같다.

도표 2. 출입문장치 검사종류 [기준: 인천지하철]

구분		검사주기	검사방법
경정비	출고검사	출고전	운전실 화면을 통한 검사
	입고검사	입고후	운전실 화면과 실제 개폐동작 육안 검사
	일상검사	7일검사	운전실 화면과 실제 개폐동작 육안 검사
	월상검사	3개월	운전실 화면과 실제 개폐동작 정밀 검사
	특별검사	1년	운전실 화면과 실제 개폐동작 정밀 검사 및 추가검사
	객실안전 설비점검	1개월	비상장치 정밀 검사
중정비	중간검사	3년	청소 및 세척작업 후 운전실화면과 실제 개폐동작 정밀 검사
	전반검사	6년	청소 및 세척작업 후 운전실화면과 실제 개폐동작 정밀 검사

2.2 도어시스템의 체계 모형 및 고장정의

시스템의 RAM 특성을 분석하기 위해서는 시스템의 구조체계를 각 장치의 RAM 특성을 바탕으로 모형화해야 한다. 시스템의 구조체계를 정의하는 코드들로 WBS(Work Breakdown Structure), PBS(Product Breakdown Structure)등의 코드들이 있지만 이들은 설계 업무 특성에 적합하게 모형화된 것으로 RAM 업무의 기준으로 사용하기에는 어려운 경우가 있다. 일반적으로 WBS, PBS는 하드웨어의 형상을 근거로 한 설계 및 업무 특성에 따라 생성되지만, RAM 측면에서는 품목의 설계 특성보다는 품목의 고장 및 유지보수 특성이 더욱 중요하다. 본 연구에서는 유지보수 경험으로부터 도어시스템의 유닛들 중 주요 고장이 발생하고, 운영사내에서 유지 보수되는 유닛만을 선별하여 아래 도표 3과 같이 LBS를 구성하였다.

도표 3. 도어시스템의 LBS

레벨	ID	서브시스템/하위 부품			개수
1	LA	도어시스템			
2	LAA		도어엔진		1
3	LAAA			스핀들	1
3	LAAB			모터	1
3	LAAC			브레이크	1
3	LAAD			위치센서	1
3	LAAE			출입문바이패스스위치	1
3	LAAF			출입문비상스위치	1
3	LAAG			리미트스위치	1
3	LAAH			출입문선택계전기	1
3	LAAI			상부로울러	2
2	LAB		DCU		1
2	LAC		이탈방지턱		1

시스템의 RAM 특성을 분석하기 위해서는 시스템의 고장을 분류하여야 한다. 정인수 등이 제안한 고장의 분류 기준에 따라 고장을 분류하면 도표 4와 같으며, 도표 4에 도어시스템의 기능 저하에 의한 서비스고장을 정의하였다. 도표 5는 도어시스템의 서비스고장을 일으킬 수 있는 고장의 내용을 분류하였다.

도표 4. 고장의 분류

구분	정의
로지스틱고장	서브 시스템 또는 구성품의 수리 또는 교환을 요구하는 고장
서비스고장	운행중 또는 검사과정에서 발생한 고장으로 서비스 운행에 장애를 주는 고장 - 5분 이상의 예정된 서비스의 지연을 초래하는 고장 - 승객의 하차를 초래하는 고장 - 열차의 운행 출고 불가를 초래하는 고장 - 열차의 기지 회차를 초래하는 고장 - 서비스 도중 특정한 기능이 상실되거나 해당 기능의 성능이 정의된 최소 수락 기준이하로 떨어짐(도어시스템의 경우: • 한 량의 한 측면의 4개의 출입문 중 2개 이상의 출입문 사용 불가 • 출입문의 수동 닫힘 불가)

도표 5. 도어시스템의 서비스고장을 유발할 수 있는 고장내역

고장번호	고장내용
1	저속도 및 도어열림 고장
2	DCU안전릴레이 고장
3	오른쪽 도어 닫힘의 리미트스위치 고장
4	왼쪽 도어 닫힘의 리미트스위치 고장
5	오른쪽 모터 전류회로가 단절됨
6	왼쪽 모터 전류회로가 단절됨
7	오른쪽 도어 위치센서 고장
8	왼쪽 도어 위치센서 고장
9	오른쪽 도어 잠김해제 고장
10	왼쪽 도어 잠김해제 고장
11	오른쪽 도어 닫힘 고장
12	왼쪽 도어 닫힘 고장
13	오른쪽 선택 릴레이 고장
14	왼쪽 선택 릴레이 고장

2.3 도어시스템의 신뢰성 분석

도어시스템의 신뢰성을 분석하기 위해 인천지하철 1호선 전동차의 2005년 1월부터 2007년 12월까지의 고장내역을 분석하였다. 도표 6은 도어시스템의 각 장치별 고장범주(로지스틱고장, 서비스고장)별 고장간평균주행거리(단위:Km)를 나타내는데, 도표 6의 각 값들은 지하철 운영기관의 정보보호를 위하여 일부 변경되었다.

도표 6. 도어시스템의 신뢰성 예측 결과

레벨	ID	품명	고장개수(전체편성)		고장간평균거리(편성당)	
			로지스틱 고장	서비스 고장	MKBLF	MKBSF
1	LA	도어시스템	263	17	27,272	421,912
2	LAA	도어엔진	47	6	152,607	1,195,418
3	LAAA	스핀들	1	-	7,172,509	-
3	LAAB	모터	3	1	2,390,836	7,172,509
3	LAAC	브레이크	1	-	7,172,509	-
3	LAAD	위치센서	1	1	7,172,509	7,172,509
3	LAAE	출입문바이패스스위치	1	-	7,172,509	-
3	LAAF	출입문비상스위치	3	-	2,390,836	-
3	LAAG	리미트스위치	32	2	224,141	3,586,255
3	LAAH	출입문선택계전기	2	1	3,586,255	7,172,509
3	LAAI	상부로울러	3	1	2,390,836	7,172,509
2	LAB	DCU	198	10	36,225	717,251
2	LAC	이탈방지턱	18	1	398,473	7,172,509

MKBLF: Mean Kilometer Between Logistic Failures
MKBSF: Mean Kilometer Between Service Failures

2.4 도어시스템의 유지보수성 분석

유지보수란 어떤 시스템이 정상적 동작상태를 유지하기 위해 행하는 모든 것 또는 한 아이템의 수명주기 동안 행하는 기술적, 행정적, 관리활동으로 기능을 달성 할 수 있는 범위내의 조건으로 복원시키거나 범위 이내를 유지하도록 계획된 모든 활동을 말한다. 유지보수는 시간에 따라 유연하게 변할 수 있어야 한다. 전동차의 고장은 초기에는 접촉불량이라든지 미세한 고장이 주를 이루지만, 전동차가 시간이 지남에 따라 노후화되면 부품자체의 불량 또는 노후화에 따른 고장 등 심각한 고장으로 보다 예방 유지보수의 개념이 중요하게 된다. 유지 보수의 형태를 보면 크게 사후 유지 보수와 예방 유지 보수로 나눌수 있다. 고장의 접수는 사후 유지 보수의 경우는 본선 운행중 발생하는 고장내역을 기준으로 예방 유지 보수의 경우는 차량 점검중 발생하는 고장내역에 따른다. 예방 유지 보수의 강화는 경영적인 측면에서는 중복검사 또는 과잉검사를 초래 할수 도 있다. 고장 조치는 그동안 발생했던 고장 이력과 현 시점에 발생한 고장 데이터를 분석하여 고장 조치를 한다. LRU단위의 단품을 교환하고, 교환된 단품에 대해 수리를 시작한다. 단품내의 부품을 교환하거나 수선이 불가할 경우 불용 처분한다. 고장에 대한 대책으로서는 점검주기를 조정 또는 추가하여 보다 정밀 점검을 시행하며, 수명이 도래한 부품에 대해서는 일괄 교환한다. 또한 필요시 바로 교환 할수 있도록 예비품을 확보하여 신속한 유지보수를 가능토록 해야 한다. 유지보수형태에 대해서 도표 7에 정리하였고, 도표 8는 도어시스템에 대한 LBS(Logistic Breakdown Structure)를 나타내며 각 부품에 대한 보수정비률과 교환 및 조정시간을 정리하였다. 도표 9는 총공정시간 대비 출입문장치의 검사시간과 투입인원에 대해 정리하였다.

도어시스템의 평균수리시간(MTTR: Mean Time To Repair)은 아래와 같이 계산된다.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \times t_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}$$

n : 도어시스템의 보수정비 대상 아이템 개수

λ_i : i번째 보수정비 대상 아이템의 고장률

t_i : i번째 보수정비 대상 아이템의 보수정비시간

도표 8의 데이터를 기초로 위의 수식에 따라 도어시스템의 MTTR을 계산한 결과 7.58분으로 분석되었다.

도표. 7 유지 보수 형태

<table>
<tr><td colspan="3">유지 보수</td></tr>
<tr><td colspan="2">사후 유지 보수</td><td>예방 유지 보수</td></tr>
<tr><td colspan="2">운행시 고장 발생</td><td>점검시 고장 발생</td></tr>
<tr><td colspan="2">고장내역 및 데이터 확인</td><td>고장내역 및 데이터 확인</td></tr>
<tr><td colspan="3">LRU 교환 및 부품 수선의뢰</td></tr>
<tr><td rowspan="2">수선</td><td>자체수선</td><td>부품 교환</td></tr>
<tr><td>외주의뢰</td><td>외주수선의뢰</td></tr>
<tr><td rowspan="3">대책</td><td>점검주기 조정</td><td>점검주기 강화 및 특별점검 실시</td></tr>
<tr><td>부품교환</td><td>수명 도래한 부품 전체 교환</td></tr>
<tr><td>예비품 확보</td><td>신속한 유지보수를 위해 예비품 확보</td></tr>
</table>

도표. 8 도어시스템의 LBS

레벨	ID	품명	LRU 여부	보수정비		교환 시간	조정 시간	비고
				교환 비율	조정 비율			
1	LA	도어시스템	×					
2	LAA	도어엔진	○	-	-	90분	-	스핀들고장 시교환
3	LAAA	스핀들	×	-	-	-	-	
3	LAAB	모터	○	100%	-	30분	-	
3	LAAC	브레이크	○	100%	-	30분	-	
3	LAAD	위치센서	○	100%	-	15분	-	
3	LAAE	출입문바이패스스위치	○	100%	-	15분		
3	LAAF	출입문비상스위치	○	5%	95%	15분	5분	
3	LAAG	리미트스위치	○	5%	95%	20분	5분	
3	LAAH	출입문선택계전기	○	100%	-	30분	-	
3	LAAI	상부로울러	○	5%	95%	60분	5분	
2	LAB	DCU	○	100%	-	5분	-	
2	LAC	이탈방지턱	○	100%	-	5분	-	

도표 9. 출입문장치 검사종류 [기준: 인천지하철]

구분		검사주기	총공정시간	출입문 검사시간 및 투입인원
경정비	출고검사	출고전	40분	10분/1명
	입고검사	입고후	60분	20분/2명
	일상검사	7일검사	80분	30분/2명
	객실안전 설비점검	1개월	60분	40분/2명
	월상검사	3개월	2.5일	120분/4명
	특별검사	1년	60분	60분/4명
중정비	중간검사	3년	29일	6일/4명
	전반검사	6년	29일	6일/4명

2.5 도어시스템의 가용성 분석

고유가용도(A_i)는 성취가용도(A_a)의 정의는 다음과 같다.

$$A_a = \frac{TUT}{TUT + TDT_{PM} + TDT_{CM}}$$

$$A_i = \frac{TUT}{TUT + TDT_{CM}} = \frac{MTBLF}{MTBLF + MTTR}$$

TUT : 전체운영시간

TDT_{CM}: 보수정비로 인한 총 다운시간

TDT_{CM}: 예방정비로 인한 총 다운시간

운영 가용도는 인천지하철1호선의 경우 행정 및 유지보수 지원에 의한 유지보수의 지연은 거의 발생하고 있지 않기 때문에 이에 대한 값은 무시하였다. 이와 같은 경우에는 운영가용도는 성취가용도와 동일하다고 볼 수 있다. 도어시스템의 고유가용도는 위의 식에 의해 산출하였고 성취가용도는 정인수 등 [4]의 가용도 산출 사례와 같은 방법을 사용하였다. 그 결과는 다음과 같다.

$$A_i = \frac{MTBLF}{MTBLF + MTTR} = \frac{853.48}{853.48 + 0.1263} = 0.99985$$

$$A_a = \frac{TUT}{TUT + TDT_{PM} + TDT_{CM}} = \frac{9417}{9417 + 728 + 1.4} = 0.928$$

3. 결 론

본 연구는 현장 운영데이터 분석을 통한 도시철도차량 도어장치의 RAM(신뢰성, 가용성, 유지보수성) 성능 평가 사례를 다루었다. 이를 위하여 유지보수 경험으로부터 도어시스템의 유닛들 중 주요 고장이 발생하고, 운영사내에서 유지 보수되는 유닛만을 선별하여 LBS를 구성하였다. 도어장치의 로지스틱 고장과 서비스 고장에 대하여 정의하였고, 구성된 LBS 각 아이템에 대한 신뢰성을 운영데이터로부터 분석하였다. 유지보수성 평가를 위해서 유지보수 전문가를 통해 LRU(Line Replaceable Unit)를 분류하고 LRU별 교환시간 및 조정시간을 추정하여 도어시스템의 평균수리시간을 추정하였다. 또한 도어시스템의 가용도를 분석된 신뢰도 및 유지보수성을 기반으로 평가하였다. 본 연구에서 제시하는 도어시스템의 RAM 평가 사례는 도어시스템의 적절한 RAM 요구조건의 수립과 운영단계의 RAM 성능 향

상을 위한 정책 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 인천지하철, “전동차 정비지침서 1권 4장”, 1999
2. 유양하, 이희성, 서승일 “MKBSF산출을 통한 KTX신뢰성 연구”, 2005
3. 정인수, 이강원, 김종운 “철도차량의 구매 요구사항에 포함하는 RAMS 특성값에 관한 연구”, 한국철도학회논문집 제 11권 pp. 371～377
4. 정인수, 이강원, 김종운 “철도차량 정량적 신뢰성・가용성・유지보수성(RAM) 목표값 설정에 관한 연구”, 한국철도학회논문집 제 11권 pp. 390～397