

VVVF 직류전동차 유지보수 데이터 기반의 RAM 적용에 관한 연구 (The study about a RAM application of a VVVF direct subway maintenance data foundation)

이도선*
Lee, Do-Sun

김은실**
Kim, Eun-Sil

박수중***
Park, Soo-choong

ABSTRACT

Recently, the concern for the reliability of railway is increasing, also the study about reliability is being processed at a good pace. However, in case of an existing railway operating it is true that the railway system is being operated without a clear RAM standard. There is not a clear RAM standard about product manual of a city railroad, and there are only basic provisions concerning traction motor which can be called a main equipment. In this paper, we calculated the availability and reliability of subway having MKBSF, MKBF, MTBF, MTTR analyzing accumulated maintenance data about a main equipment of a VVVF direct subway being operated in line #4. By watching the reliability grade of a VVVF subway being operated and manufactured within the country and being applied with the development of a city railway reflected by RAM manual when the new subway is manufactured, and with the basic data of RCM, we'd like to grope the methods which can be improved by operation stability of a city railway.

1. 서론

최근 들어 철도차량의 신뢰성에 대한 관심이 높아지고 있으며, 신뢰성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 기존에 운영중인 철도차량의 경우 명확한 RAM 기준이 없이 제작 운영되고 있는 것이 사실이다. 국내 도시철도운영기관의 도시철도차량 제작사양에 명확한 RAM 기준이 정립되어 있지 않으며, 대부분 핵심장치라 할 수 있는 '견인전동기'에 대해서만 기초적인 조항이 있을 뿐이다.

이에 본 논문은 4호선에서 운용되는 VVVF 직류전동차의 주요 장치에 대하여 축적된 유지보수(운영) 데이터를 분석하여 각종 자료를 추출 MKBSF · MKBF · MTBF · MTTR를 구하여 전동차의 가용도 및 신뢰도를 산출하였다. 이것은 국내 가장 많이 제작되어 운영중인 VVVF전동차의 신뢰성 정도를 가늠해 봄으로써, 신규전동차 제작시 RAM사양에 반영되어 도시철도 차량의 발전과 신뢰성정비(RCM)의 기초자료로 활용되어짐으로써 검수/정비 신뢰성을 높여 도시철도차량의 운행안정성이 향상될 수 있는 방안을 모색해 보고자 하였다.

서울메트로에서는 한국철도기술연구원과 2003.1월 전동차 유지보수 정보화시스템을 구축협약을 체결하여 대한민국 최초로 현장 사용자 기반의 정보화시스템(RIMS)을 구축하였고, 2004.10월부터 창동차량사업소에서 4호선을 대상으로 시험운행을 하게 되었고, 이어서 2005.3월 경정비 부분(창동차량사업소 검수

* 이도선, 정회원, 철도전문대학원(서울메트로)
E-mail : dosun8940@hanafos.com
TEL : (02)6110-6070 FAX : (02)6110-6079
** 김은실, 비회원, 철도전문대학원(서울메트로)
*** 박수중, 정회원, 서울메트로

부)과 중정비 부분(지축차량사업소 정비부)을 통합하여 본격적인 철도차량 정보화시스템(RIMS ; Rolling-stock Information Maintenance System)의 시범운영을 하게 되었다.

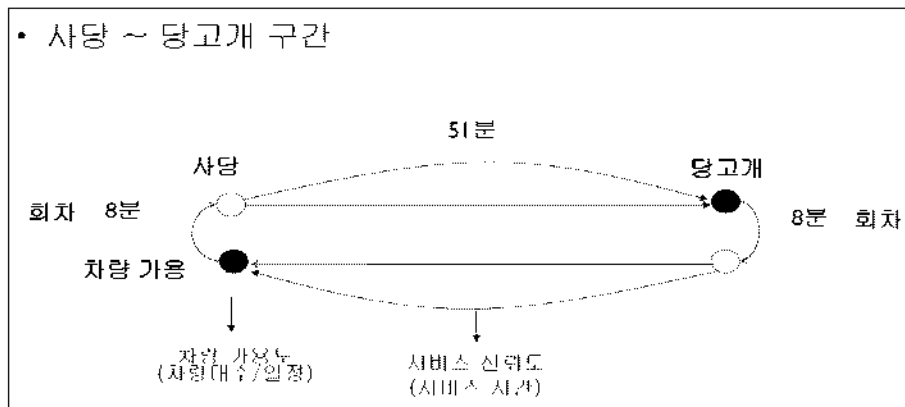
이후 2006년부터 서울메트로 차량분야 5개 차량사업소(군자, 신정, 지축, 창동, 수서) 전체를 대상으로 확대적용을 2007년말 까지 단계적으로 완료하고, 2009년 현재 차량분야 전동차 유지보수 전 분야에 걸쳐 RIMS를 사용하고 있다. 따라서 매일 매일 기지에 입고되는 전동차를 월상검사, 일상검사, 도착검사, 특별검사 등을 통하여 전동차는 검사수선이 이루어지고 작업한 유지보수 내용이 RIMS시스템에 입력되고 있어 이러한 모든 데이터를 수집·분석하여 철도차량의 RAM값과 비교분석을 통하여 도시철도차량의 신뢰성이 어디쯤에 위치하는지를 연구가 필요할 것으로 보고 이번 논문에는 서울메트로 4호선 직류VVVF 전동차의 유지보수 데이터를 기반으로 RAM 적용을 통한 신뢰성 평가에 관한 연구를 시도해 보고자 한다.

2. RIMS의 구성

도시철도 유지보수 정보화시스템(RIMS)은 유지보수작업, 유지보수자재, 유지보수지원, 기술자료, 전문가시스템 등 총 6개 시스템으로 구성되어 있으며, 전동차 유지보수와 관련된 모든 업무를 표준화·전산화 시킨 것으로 전동차 검수/정비업무 수행시 과거 종이와 수작업으로 이루어지던 모든 업무처리 과정과 결과의 처리 즉, 전동차 검사계획 수립 및 작업지시, 기술자료 검색 및 활용, 자재 검색 및 청구/출급, 전동차 검사실적, 고장관리 등을 전자결재 및 전산화하여 유지보수 제반업무를 최적화시켰으며, 시스템 별 특징은 전동차를 구성하는 모든 장치, 부품, 어셈블리 등의 큰 범주로부터 작은 범주로 분류하여 계층별 디렉토리 형태의 BOM(Bill Of Material) 시스템을 구성하여 도면·정비메뉴얼·부품목록 등 각종 기술자료를 링크하여 신속한 정보를 제공하고, 작업자의 노하우와 지식경험을 데이터베이스화 하여 직원간 지식을 공유할 수 있는 시스템으로 업무의 효율성 및 활용성을 증대하였다.

3. DC VVVF 차량의 RAM기초데이터

철도 차량의 RAM업무는 차량개발 최초개념 설계부터 폐기까지 전 수명주기동안 수행되는 업무로서 설계 및 시험 그리고 운영단계의 모든 자료들을 데이터베이스화하여, RAMS 요소별 예측 및 분석활동을 통해 철도차량의 성능개선과 유지보수체계 개선을 지원하는 업무라 하겠다.



<그림 1>DC VVVF 차량 운행 구간

서울메트로 4호선은 서울메트로(창동차량사업소)와 철도공사 양기관이 운영을 하고 있으며, 창동차량사업소는 총 4개의 차종(현대 VVVF 2종/DC전용 · AC-DC겸용, 대우 VVVF 2종/DC전용 · AC-DC겸용)의 전동차 470량을 보유하고 있으며, 이중 DC전용 260량은 당고개와 사당사이의 직류구간의 운영을 담당하고 있고, AC-DC 210량은 당고개~사당~오이도 구간 즉, 직류-교류 양쪽구간을 운행하고 있다.

RAM분석은 4호선 직류 VVVF전동차인 401편성~409편성을 대상으로 '05.01.01 ~ '07.12.23 기간의

정비 데이터 및 고장데이터를 기반으로 하였다. 표1과 표2는 편성별 및 장치별 RAM분석을 위한 기초 데이터이다.

구분	401	402	403	404	408
총주행거리KM	274,395	305,150	289,796	315,847	334,030
총운행시간(H)	9,147	10,172	9,660	10,528	11,134
총유지보수작업시간(Mpt)	1,128	1,161	1,124	1,189	1,184
장애건수(총 7건)	1	2	1	2	1
고장수리시간(Mct)	3	8	3	7	4

< 표 1 > 편성별 신뢰성 및 가용성 기초데이터

구분	보조전원장치	제동	출입문
총주행거리KM	331,771	313,522	317,317
총운행시간(H)	11,059	10,451	10,577
총유지보수작업시간(Mpt)	1,199	1,172	1,181
장애건수	1	3	3
고장수리시간(Mct)	4	9	12

< 표 2 > 장치별 신뢰성 및 가용성 기초데이터

4. 신뢰성(Reliability)

신뢰성이란 사전적으로는 “아이템이 주어진 조건에서 규정된 기간동안에 요구된 기능을 발휘할 수 있는 성질” 이라 되어있다. 그러나 신뢰성은 기술의 발달과 고객의 요구에 따라서 달라지며, 신뢰성의 범위와 해석도 시대의 요구에 따라서 달라질 수 있다. 보통 신뢰도는 시간의 함수로 그 시간까지 고장이 나지 않을 확률 $R(t)$ 로 나타내며, 그 반대인 비신뢰도는 $F(t) = 1 - R(t)$ 로 나타낸다. 신뢰성을 향상시키기 위해서는 고장분석이 기본이 되며 이를 통해 고장률을 감소시켜야 한다. 신뢰도 지수들을 수학적으로 표현하기 위해 $f(t)$ 를 시스템의 시간에 대한 고장밀도함수(PDF)라고 할 때, 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt = \exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right) = e^{-\lambda t} \quad t > 0$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad t > 0$$

$$F(t) + R(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt = 1$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

$$f(t) = \frac{df(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$$

f(t)의 평균치인 평균수명(mean life) E(t)를 구하면

$$E(t) = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda}$$

일반적으로 많은 부품들로 구성된 시스템의 수명분포는 Drenick 정리에 의해 지수분포(exponential distribution)를 따른다. 지수분포의 경우 고장률 $\lambda(t) = \lambda$ 이므로 수리계에서 MTBF(Mean Time Between Failure) = $1/\lambda$ 이 되고 비 수리계에서는 MTTF(Mean Time To Failure) = $1/\lambda$ 이 된다. 신뢰성 성장(Reliability Growth)을 고장률 $\lambda(t)$ 를 줄이는 과정 또는 MTBF가 상승하는 과정이라 하겠다.

신로도의 척도는 MTBF(Mean Time Between Failure)평균고장간 시간과 MDBF(Mean Distance Between Failure)평균고장간거리로 나타낸다. 철도차량의 경우 MDBF를 MKBF(Mean Kilometer Between Failure)로 나타낸다.

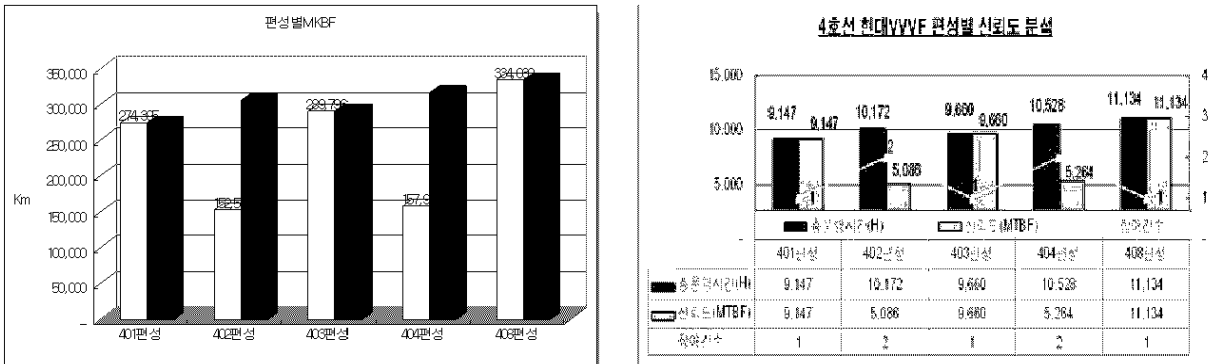
$$MTBF = \frac{T(t)}{r} \quad MDBF = \frac{D(t)}{r}$$

T(t)= Total Operation Time
D(t)= Total Operation Distance
r= Number of Failure



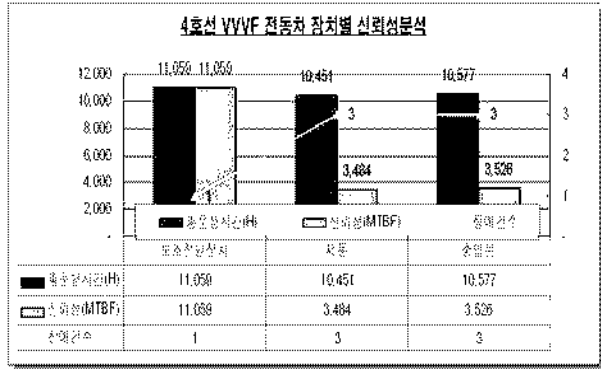
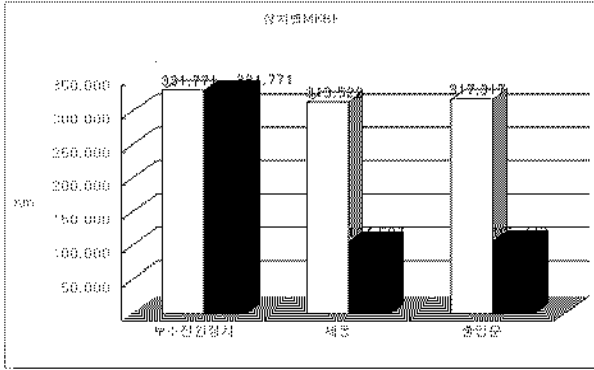
< 그림 2 > MKBF 및 MTBF산출 과정

MKBF 및 MTBF의 산출은 RIMS(철도차량 유지보수 정보화시스템 Rolling-Stock Information Maintenance System)의 기초데이터를 기반으로 장애(본선 10분이상 지연차량)로 기록된 데이터에 대해 산출하였다. 총9개편성에 중에서 405편성을 비롯한 4개편성은 대상기간동안 장애 건수가 없어 제외하였으며, 제외된 편성에 대해서는 좀더 시간을 가지고 지켜보아야 할 것이며, 제외된 편성의 신뢰도는 매우 높음을 알 수 있다.



< 그림 3 > 편성별 MKBF 및 MTBF

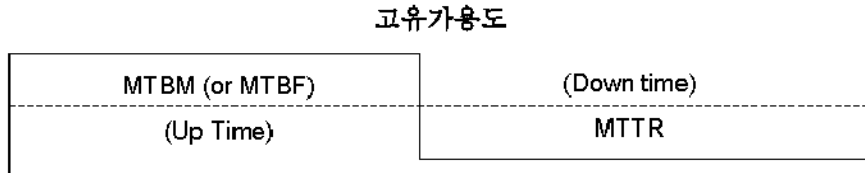
기준이 달라 단순 비교하기는 어렵지만 차량에 대한 고장분석 결과 미국의 각 도시철도 운영기관이 표준으로 사용하고 있는 차량당 MKBF 160,900km보다 차량은 매우 우수한 것을 알 수 있다.



< 그림 4 > 장치별 MKBF 및 MTBF

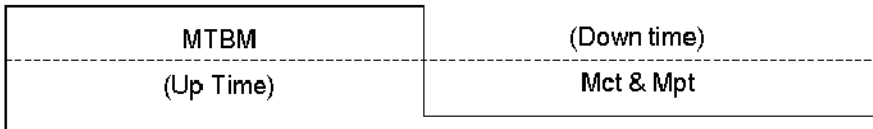
5. 가용성(Availability)

가용도란 시스템의 신뢰성과 유지보수성을 시스템의 활용 측면으로 변형한 척도라 할 수 있다. 어떠한 시스템이 어떠한 시점에서 운용가능한 상태에 있는냐는 것으로 이해 할 수 있으며, 시스템의 신뢰도와 유지보수성에 따라 가용성의 우수성이 결정되며, 고유가용도와 성취 가용도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

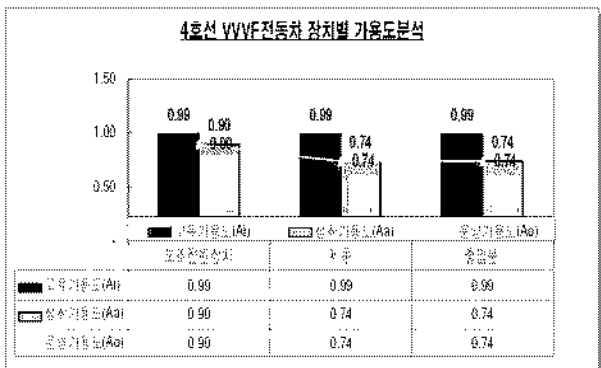
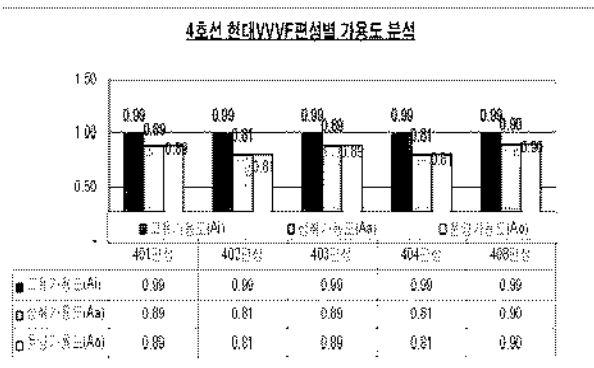


$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTRR}$$

성취가용도



$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + Mct + Mpt}$$



< 그림 5 > 편성 및 장치별 가용도

편성 및 장치별 고유가용도를 살펴보면 매우 우수하다는 것을 알 수 있는데, 반면 성취 가용도 및 운영가용도를 살펴보면, 편성별 가용도는 대상기간동안 장애건수가 없어 제외된 편성을 감안한다면 전체적으로는 우수하다고 할 수 있으나 장치별 가용도는 저조합을 알 수 있는데 이는 대상장치에 대한 장애고

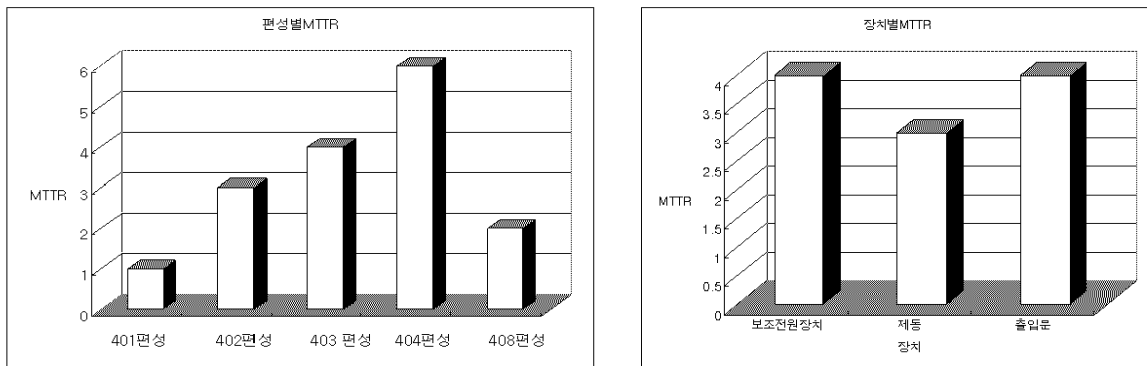
장 조치시간은 짧는데 비해 전체(일상검사, 월상검사, 도착검사, 출고검사 등)유지보수 시간이 길기 때문에 사료된다.

6. 유지보수성 (Maintainability)

유지보수성은 어떤 시스템이 고장 났을 때 규정된 기술요원이 가용한 자원을 이용하여 주어진 시간에 주어진 성능을 원상복귀 시킬 수 있는가를 나타내는 것으로 그 척도는 MTTR(Mean Time To Repair) 평균수리시간 이다. MTTR은 장애건수에 대한 장애고장 총수리시간으로 산출하였다.

$$MTTR = \frac{M(t)}{m}$$

M(t)= Total Maintenance Time
m= Number of Maintenance



< 그림 6 > 편성 및 장치별 MTTR

유지보수성에 대한 비교대상 자료가 없어 DC VVVF차량의 유지보수성에 대해 언급하기는 어려우나 장애로 기록된 중대 고장의 조치시간인 만큼 MTTR이 길다는 것을 알 수 있다.

7. 결 론

DC VVVF차량의 RAM산출결과 신뢰성 및 가용성이 매우 우수하다는 것을 알 수 있는데, 이는 VVVF전동차량이 구형 저항차 및 초퍼차량에 비해 재질의 고급화 및 경량화되어 제작되었으며, 기계적 구성부품의 단순화 및 무접점화, 회전기류 기기축소 및 AC모터 채용 등으로 인하여 구형에 비해 내구성 및 유지보수성 안전도가 향상되었기 때문으로 사료된다. 또한 TGIS장치가 채용되어 차량의 고장을 미리 감지할 수 있게 된 결과 예지 정비가 가능함에 따라 고장발생을 줄일 수 있었으며, 고장발생 시에도 빠른 조치로 장애로 연결되지 않은 결과로 생각되어진다. 유지보수성에 대해서는 비교 자료부족으로 언급하기 어려우나 다소 높은 것으로 사료되는데, 이는 대상 자료가 장애로 연결된 중대고장에 대한 조치시간이 산정되었기 때문으로 생각되어 진다.

참고문헌

1. 철도시스템 RAM 관리체계 구축을 위한 기반연구, 2006.12월, 최성규외9명
2. 철도시스템 RAM 관리체계 구축을 위한 기반연구, 2005.12월, 박준서외8명
2. 철도시스템적용을 위한 SRCM 개발에 관한 연구, 2006.12월, 광운대학교 신석균(박사학위논문)
3. 철도차량의 RAMS 성장에 관한 연구, 2004.12월, 대구대학교 이환태(박사학위 논문)

4. 신뢰성 기반의 도시철도 예방정비기법 및 전문가시스템 개발에 관한 연구, 2004.12, 이호용(박사학위 논문)
5. 철도차량 정량적 신뢰성·가용성·유지보수성(RAM) 목표값 설정에 관한 연구, 정인수,이강원,김종운, 2008.8월, 한국철도학회 논문집 제11권 제4호
6. MKBSF 산출을 통한 KTX 신뢰성 연구, 2005.1월, 유양하(서울산업대 철도전문대학원 석사학위논문)
7. 공공교통 전동차 안전운행을 위한 RIMS 프로젝트 적용의 성공요인에 관한 연구, 2007.9, 손영진(서울산업대 철도전문대학원 박사학위논문)
8. 전동차 유지보수 개선에 관한 연구, 2005.1월, 김동민(서울산업대 철도전문대학원 석사학위논문)
9. RIMS 데이터를 활용한 전동차 운행 신뢰성 향상방안, 2007.10월, 박수중·이도선·전서탁·손영진(한국철도학회 추계학술대회 논문)