Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 5, pp.7-18 (2005)

Copyright © 2005 KSAE
1225-6382/2005/077-02

VVVF 도시철도 차량의 신뢰성 평가 시스템 개발에 관한 연구

배 철 호[1] · 김 성 빈[1] · 이 호 용[2] · 장 석 화[3] · 서 명 원[*4]

성균관대학교 기계공학부 대학원[1] · 한국철도기술연구원[2] · 인천대학교 산업공학과[3] · 성균관대학교 기계공학부[4]

A Study on Development of the Reliability Evaluation System for VVVF Urban Transit

Chul-Ho Bae[1] · Sung-Bin Kim[1] · Ho-Yong Lee[2] · Suk-Hwa Chang[3] and Myung-Won Suh[*4]

[1]*Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Geonggi 440-746, Korea*
[2]*Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woulam-dong, Uliwang-si, Geonggi 437-050, Korea*
[3]*Department of Industrial Engineering, Incheon University, Incheon 402-749, Korea*
[4]*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Geonggi 440-746, Korea*
(Received 28 October 2004 / Accepted 7 July 2005)

Abstract : Over the past twenty years, the maintenance system has been developed and its importance has been increased. For the effective maintenance of the urban transit, we have developed the maintenance system based on the concept of RCM(Reliability Centered Maintenance). RCM analysis is a systematic approach to developing a cost-effective maintenance strategy based on the various components's reliability of the system in question. It is performed according to process that includes the following steps; definition of function and functional failures of the systems, construction of RBD(Reliability Block Diagram), performance of FMEA(Failure Modes & Effects Analysis) and calculation of the reliability index. The final process of RCM is to determine appropriate failure maintenance strategies. This paper aims to define the procedure of maintenace based on the concept of RCM for urban transit. The key for a successful maintenance system is an automated scheduling to the maximum extent possible and timely executions. The developed system issues maintenance plan and repair request based on analyzed data and maintenance experience.

Key Words : Reliability(신뢰성), FMEA(Failure modes & Effects analysis, 고장영향분석), Urban transit(도시철도), Maintenance(유지보수), MTBF(Mean time between failure, 평균 수명시간), LCC(Life cycle cost, 총수명 주기비용)

1. 서 론

우리나라 도시철도는 30여년 역사를 가지고 있고, 현재 19개 노선에서 약 580 km를 운행하고 있으며, 국민생활과 밀접한 교통수단으로 성장하였다. 지난 30년에 걸쳐 유지보수 분야는 다른 관리 분야에 비해 많은 변화를 해왔다. 그 변화는 장비의 양적인 증가뿐만 아니라 다양성의 증가에도 기인한다. 도시철도 전동차는 전기, 기계적으로 결합된 매우 복잡한 구조를 가진 대형시스템으로 고속주행에 따른 안정성의 확보와 이를 유지할 수 있는 유지보수 시스템의 구축이 필수적이다. 일반적으로 대형복잡 시스템(complex system)의 운영 및 유지, 보수에 필요한 비용은 총수명주기비용(Life Cycle Cost, LCC)

*To whom correspondence should be addressed.
suhmw@yurim.skku.ac.kr

의 60% 정도를 차지할 정도로 유지보수비가 전체 운영비에 미치는 영향이 크다고 알려져 있어 효율적인 운영, 유지, 보수 시스템의 구축을 통하여 유지보수 비용의 절감을 추구하는 일이 무엇보다 시급하다.[1] 본 연구에서는 장기적인 유지보수 비용의 절감을 위해 유지보수 과정에서 획득된 자료를 데이터베이스화하고, 이 자료로부터 각 장비의 신뢰도 예측, 고장영향분석 등을 수행하여, 도시철도 차량의 신뢰성 평가 시스템을 개발하고자 한다.

2. 도시철도의 신뢰성 평가

도시철도의 신뢰성 평가를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 논리적 절차에 따라 예방정비 관련 업무를 합리적으로 판단하였다. 첫째, 대상을 계통(system)과 부계통(sub-system)으로 구분한 후, 그들의 기능(function)을 정의하고 기능 수행에 중요한 고장현상을 식별한다. 둘째, 중요 고장현상에 대한 고장원인을 식별한다. 셋째, 주요 고장원인에 대해서 안전 및 경제측면을 고려하여 효율적인 예방정비를 논리적으로 선택한다. 유지보수 시스템의 신뢰성을 공학적으로 다루기 위해서는 이를 정량화할 수 있는 지표들이 필요하게 되며, 신뢰성 기술 분야에서 사용하고 있는 여러 가지 지표들을 이용하여 도시철도의 신뢰성을 평가하였다.

본 연구에서는 도시철도 4호선 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) 제어방식의 전동차에 대해서 신뢰성 평가를 하였다. 이를 위해 도시철도 VVVF 차량의 BOM(Bill of Material)을 구성하였고, 사고/고장 분류 체계를 표준화 하여 고장/정비이력 데이터를 수집하였다. 또한, 전동차의 각 서브시스템 별로 신뢰성 블록도(Reliability Block Diagram, RBD)를 구성하여, 고장영향분석(Failure Modes & Effect Analysis, FMEA) 및 신뢰성 지표 분석을 수행하였다.

2.1 도시철도 유지보수체계 표준화

도시철도 유지보수체계의 표준화는 유지보수를 위한 BOM, 사고/고장코드 및 조치코드에 대한 표준화로 크게 나누어 수행하였으며, 이러한 유지보수 체계 표준화 코드를 시스템에 반영하여 각종 고장/정비이력 정보를 데이터베이스화 하였다. 이 때, BOM 코드는 전동차의 장치 및 부품에 대한 분류, 사고/고장코드는 고장에 대한 분류, 조치코드는 조치부품 및 조치결과에 대한 분류를 나타낸다.

2.1.1 VVVF 전동차의 BOM 구성

전동차의 BOM은 특정 제품이 어떤 부품들로 구성되는가에 대한 계층데이터로 기본적으로 부품고장이 발생한 경우 혹은 정기적인 유지보수를 수행하는 경우 교체되는 최소 단위인 LRU(Line Replaceable Unit)로 구성된다.

본 연구에서는 기존의 수직적인 구조를 가지는 BOM 데이터 대신, 컴포넌트(component) 개념을 도입하여 전동차의 마스터 BOM 설계를 선행하고, 룰셋(ruleset)에 따라 기능별 BOM을 구성하는 컴포넌트 기반의 BOM 관리시스템을 구축하였다. 이를 통해 환경 변화나 데이터 변환 시에는 룰셋의 변경만으로 구조가 변화하도록 하여, 설계 시 적용된 내용의 변경이 있어도 통합적으로 관리되어 반영될 수 있도록 하였다.[2,3]

2.1.2 사고/고장 체계 표준화

도시철도 차량에서 사용되는 사고/고장 코드체계는 유지보수작업을 위한 필수 사항이며, 특히 부품코드 체계의 표준화와 연계하여 각 장치별 고장현상 및 고장원인, 조치내역 등을 포함하는 표준코드 체계가 필요하다. VVVF 도시철도차량의 신뢰성 평가 시스템을 위한 사고/고장 코드의 코드화 규칙 및 적용예는 Fig. 1과 같다.[4]

2.2 VVVF 전동차의 신뢰성 블록도 구성

다수의 구성요소로 이루어진 시스템에서 각 구성요소와 시스템간 기능적 관계를 신뢰성 모형이라 하고 이를 그림으로 나타낸 것을 신뢰성 블록도라고 한다.[5] 신뢰성 블록도는 크게 직렬계와 병렬계로 나눌 수 있다. 시스템의 구성요소 중 하나가 고장이 나면 시스템 전체가 고장이 나는 신뢰성 모형이 직렬계이고, 시스템의 구성요소가 모두 고장났을때, 전체 시스템이 고장나는 신뢰성 모형이 병렬계이다.

본 연구에서는 전동차의 각 서브시스템 별 신뢰성 지표(고장률, 신뢰도, 평균수명시간 등)를 산출

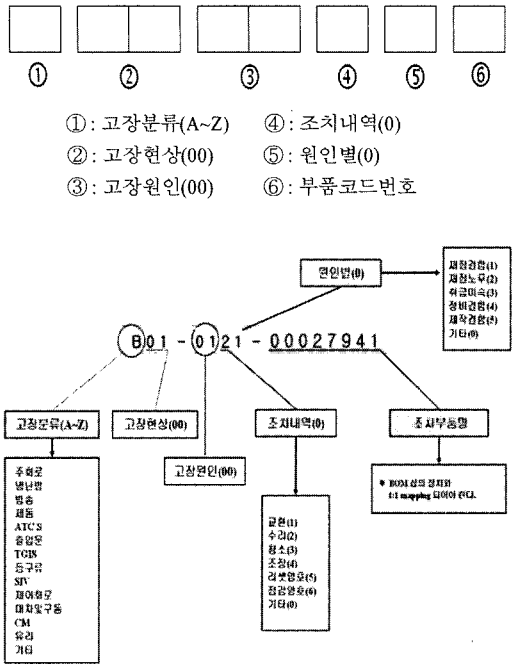


Fig. 1 Construction of the failure code

하기 위해 마스터 BOM을 기준으로 신뢰성 모형을 구성하였다. 아래의 Table 1은 VVVF 전동차의 14개 서브시스템 중 마찰제동장치를 구성하는 하위 부품

Table 1 Parts list of friction brake & pneumatic system

Subsystem	Units & Parts
Friction brake & Pneumatic system	Brake control Brake - Brake disc - Brake pad Compressed air supply Reservoir Pneumatic horn

Fig. 3 Friction Brake & Pneumatic System reliability block diagram

이고, Fig. 2~3은 본 연구에서 구성한 VVVF 전동차 마찰제동장치의 기능 블록도(Functional Block Diagram, FBD) 및 신뢰성 블록도이다.

2.3 도시철도 전동차의 신뢰도 평가

일반적으로 신뢰성에서 말하는 신뢰도(reliability)란 「시스템이나 기기, 부품 등이 주어진 조건 하에서, 의도하는 기간동안, 규정된 기능을 고장 없이 발

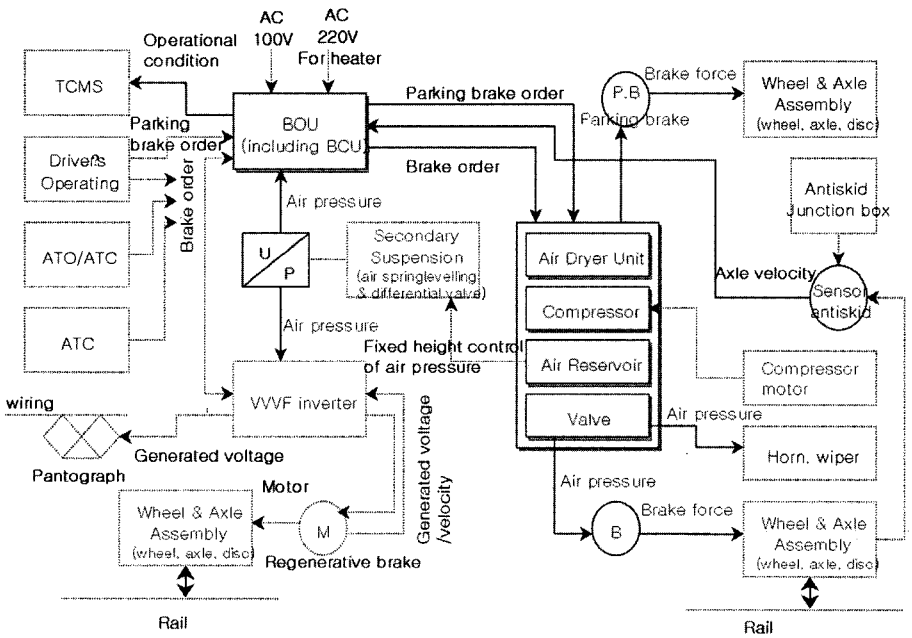


Fig. 2 Friction brake & pneumatic system functional block diagram

휘할 확률」이라고 정의 내리고 있다(Korean Industrial Standard, KS). 도시철도 VVVF 전동차의 신뢰도 지표는 지수분포를 따르고 있어 일반적인 관계를 이용해서 식 (1)과 같이 신뢰도 함수를 나타낼 수 있다.

$$R(t) = exp[-\int_0^t \lambda(t)dt], t \geq 0 \quad (1)$$

여기서, t는 전동차 각 부품의 가동시간이고, $\lambda(t)$는 고장율 함수를 말한다. 이러한 함수식을 이용하여 식 (2)와 같이 전동차 각 부품의 평균수명(mean life) 또는 기대수명(expected life) $E(T)$를 산정할 수 있다.[6,7]

$$E(T) = \int_0^\infty R(t)dt = MTBF(or\ MTTF) \quad (2)$$

이 때, MTBF(Mean Time Between Failure)는 평균고장간격으로 고장이 나면 수리가 가능한 시스템의 경우에 적용하였고, 반면에 MTTF(Mean Time To Failure)는 평균고장시간으로 수리가 불가능하기 때문에 교체하여야만 하는 부품일 경우에 사용하였다.

시스템의 고장율 및 신뢰도는 시스템을 이루고 있는 각 컴포넌트의 관계가 직렬계인지, 병렬계인지에 따라 달라지는데, 만약 앞 절에서 구성한 신뢰성 모형이 직렬계일 경우에 시스템의 고장율 및 신뢰도는 식 (3)~(4)와 같다.

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n = \sum_{i=9}^{n} \lambda_i \quad (3)$$

$$R = R_1 \times R_2 \times \cdots \times R_n = \prod_{i=1}^{n} R_i \quad (4)$$

신뢰성 모형이 병렬계일 경우에 시스템의 고장율 및 신뢰도는 식 (5)~(6)과 같다.

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \cdots + \frac{1}{\lambda_n}\right) - \left(\frac{1}{\lambda_1+\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1+\lambda_2} + \cdots + \frac{1}{\lambda_1+\lambda_2}\right) + \cdots + (-1)^{n+1}\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i} \quad (5)$$

$$R = 1 - F = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - R_i) \quad (6)$$

여기서, $i(i = 1,2,\cdots,n)$는 시스템의 구성요소이며, 각 구성요소에 대한 고장률을 λ_i, 신뢰도를 R_i라 정의한다. λ와 R은 시스템의 고장율과 신뢰도이다.

본 연구에서는 도시철도 VVVF 전동차의 신뢰성 평가를 수행하기 위한 중요 항목인 고장을 먼저 정의하고, 전동차 편성 차량에 대한 목표 신뢰도를 제시한다. 또한 전동차를 구성하는 서브시스템에 대한 신뢰도를 상기한 방법론으로 산정하고, 제시된 편성차량의 목표 신뢰도와 비교 · 평가를 할 것이다.

전동차 시스템 또는 부품의 고장이라 함은 관련 고장 및 운행 고장을 말하며, 비관련 고장(예: 다른 장치의 오작동과 관련된 고장)은 고장으로 분류하지 않는다. 여기서 운행 고장이란, 영업운행, 시운전 또는 출고전 장치상태 시험동안 다음의 세가지 사항을 유발하는 모든 관련 고장으로 정의한다. 첫째로 출고전 시험은 성공적으로 완료가 되었으나 차량을 영업운행에 투입하지 못한 경우이고, 둘째로 영업운행 도중 운행이 불가하여 차량을 입고 조치한 경우이며, 셋째로 5분 이상의 영업운행 지연이 발생한 경우이다. 상기와 같은 정의에 의해 전동차량의 신뢰성 평가 척도는 MTBF(Mean Time Between Failures), MDBF(Mean Distance Between Failures), MTBSF (Mean Time Between Service Failures), MDBSF(Mean Distance Between Service Failures) 등을 고려할 수 있다. 이 중, 본 연구에서는 MTBF 및 MDBF를 신뢰성 평가의 척도로 채택하였다.

앞절에서 정의한 신뢰성 블록도를 이용한 시스템간의 관계와 식 (1)~(2)를 이용하여 마찰제동장치의 MTBF를 구하면 Table 2와 같다. 전동차의 서브시스템인 마찰제동장치는 2량 1unit단위로 구성되어 있으며 10량 1편성이기 때문에 편성에 대한 마찰제동장치의 MTBF =1,029(시간/편성)이다.

전동차 편성 차량에 대한 목표 신뢰도는 현재 운행 중인 검수 기준에 근거하면 Table 3과 같다. 따라서, 본 연구에서는 전동차를 구성하는 서브시스템

Table 2 Reliability estimate of Friction Brake and Pneumatic system

Subsystem	Failure rate (×10-6hour)	MTBF (hour-Unit)	MDBF (km-Unit)
Brake control	202.2	4,946	148,368
Valves	106.9	9,355	280,636
(Friction) Brake	122.6	8,157	244,698
Air compressor	8	125,000	3,750,000
Reservoirs	20.6	48,544	1,456,411
Pneumatic horn	25.6	39,063	1,171,875
Total (unit)	485.9	2,058	61,741

Table 3 Desired reliability of vehicle

Item	Desired reliability per vehicle
MTBF	115 hour/vehicle
MDBF	3,450 Km/vehicle
MTBSF	400 hour/vehicle
MDBSF	12,000 Km/vehicle

Table 4 Result of urban transit reliability estimate

Subsystem	Desired		Result		
	MTBF (hours)	Ratio (%)	MTBF (hours)	Ratio (%)	Failure rate ($\times 10^{-4}$)
Vehicle cabling/Piping	-	-	-	-	-
Carbody and gangway	46,000	0.25	-	-	-
Interior & facility	767	15.0	-	-	-
Door & door control	719	16.0	719	28.92	13.91
Air comport system (HVAC)	1,554	7.4	3,133	6.64	3.19
Power distribution & aux. equipments	1,173	9.8	3,212	6.47	3.12
Propulsion & electric braking system	1,513	7.6	4,231	4.91	2.37
Truck (bogie)	3,710	3.1	-	-	-
Friction brake & pneumatic system	898	12.8	1,029	20.21	9.72
Coupler and draft gear	14,375	0.8	16,667	1.25	0.6
Lighting (system)	-	-	-	-	-
Train control and monitoring system	3,485	3.3	4,472	4.65	2.24
Information & communication	685	16.8	973	21.4	10.28
Signal (ATC/ATO)	1,608	7.15	3,811	5.45	2.63
Total(unit)	115	100	208	100	48.06

에 대한 목표 신뢰도(desired reliability)를 산정하기 위해 유사 차량이나 시스템에 대한 경험 데이터를 사용하고, 각 시스템의 가중치에 의한 신뢰도 분배를 수행하는 ARINC(Aeronautical Radio Incorporated) 기법[8,9]을 적용하였다. 그 결과로서 Table 4와 같은 전동차량 14개의 서브시스템에 대한 목표 신뢰도를 얻었다. 여기서, Vehicle Cabling/ Piping의 경우는 다른 장치와 같은 기능품이 아닌 각 서브시스템간의 공압 및 전기적 인터페이스 관계를 의미하는 것으로 별도의 MTBF와 MTBSF를 갖지 않는다. 또한 등구류(lighting)의 경우는 주 구성품이 형광등으로 이는 기능품의 역할보다는 소모품의 성격을 갖기 때문에 전체 MTBF에서 제외하였다.

Table 2와 같은 각 서브시스템의 MTBF와 식 (3)~(6)을 이용하여 차량 전체의 MTBF를 구한 결과를 목표 신뢰도와 비교하여 Table 4에 나타내었다. 차체, 대차 및 의장의 경우 이들 서브시스템들은 일반적으로 고장률이 아주 작아서 전체 차량의 고장률 계산에 큰 영향을 주지 않으므로 계산에서 생략하였다. 먼저 Table 2와 Table 4를 비교하여 보면, 전동차 마찰제동장치의 MTBF는 앞서 기술한 바와 같이 1,029(시간/편성)으로, 이는 Table 4에서 나타낸 마찰제동장치의 목표 MTBF인 898(시간/편성)을 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 차량 전체 시스템으로 확장하여, 각 서브시스템의 MTBF로부터 각 서브시스템의 고장률을 구했고, 전동차량의 각 서브시스템은 직렬로 구성되어 있으므로 차량 전체 시스템의 MTBF는 각 서브시스템들의 고장률의 합 0.004806 의 역수인 208시간이 된다. 따라서, 차량 전체 시스템의 MTBF(208시간)는 목표 신뢰도 값인 115시간을 만족시키는 것으로 평가되었다.

2.4 도시철도 전동차의 고장영향 분석

고장영향 분석(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)은 시스템이나 기기의 잠재적인 고장 모드를 찾아내고, 시스템이나 기기의 가동 중에 이와 같은 고장이 발생하였을 경우 임무수행에 미치는 영향을 조사하여 평가하는 것이다. 이를 통해 영향이 큰 고장 모드에 대하여 적절한 대책을 세움으로써 고장을 미연에 방지하고자 하는 방법이다. 도시철도 전동차의 고장영향 분석은 치명도(hazard severity)와 발생빈도(hazard frequency)를 항목으로 한 고장평점법[10]을 도입하였다.

2.4.1 위험도 평가

위험도 평가를 위한 고장평정법은 고장에 대한 평점 요소를 정하여 각 요소에 대한 계수를 기술적 판단에 의해서 평가하고 고장평점을 계산하는 방법이다. 고장평점법의 5가지 평점 요소는 기능적 고장의 중요도, 치명도, 발생빈도, 방지 가능성 등이며, 본 연구에서의 평가 요소는 치명도, 발생빈도 항목을 바탕으로 하였다. 따라서 본 연구에서는 식 (8)을 바탕으로 고장평점을 산정하였다.

$$C_s = (C_1 \times C_2)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

여기서, C_s은 고장평점이고, C_1은 치명도이며, C_2는 발생빈도를 나타낸다. 치명도는 사람의 오류, 환경 조건, 부적절한 설계, 절차상의 과실, 시스템, 서브시스템 또는 부품의 고장, 오동작으로 인해 발생하는 위험의 정도를 구분한 것으로 Table 5와 같이 정의하였다. 발생빈도는 하나의 고장, 즉 고장현상, 고장원인 등이 발생하는 빈도로서, MIL - STD - 1629A에 근거하여 Table 6과 같이 정의 하였다.

Table 5 Severity classification

Level	Severity	Definition	C1
1	Catastrophic	Major system damage/loss - impossibility of attainment of mission	10
2	Critical	Partial system damage - interruption of attainment of mission - measures impossibility by using supplementary means	7
3	Marginal	Minor system damage - impossibility of attainment of minor mission - measures impossibility by using supplementary means	4
4	Negligible	Minor failure - have no effect on mission	1

Table 8은 도시철도 VVVF 전동차량의 서브시스템 중, 제동장치의 구성품인 마찰제동부의 고장영향분석을 수행한 결과이다. Table 8에서 볼 수 있듯이 '피스톤 고착'이라는 고장은 고장등급이 I 로써 치명적 고장으로 분류하고, 다른 고장보다 우선적으로 정비/검수가 되어야 하며, 이에 대한 대책이 세워져야 한다. 이러한 방법으로 정의된 고장등급은 Table 7을 기준으로 하였으며, 유지보수 시스템을 통한 정비계획 수립 시, 등급별 정비 우선권을 부여할 수 있도록 구성하였다.

Table 6 Occurence frequency classification

Level	Frequency	Definition	C2
1	Frequent	Frequent occurrence	10
2	Probable	Several occurrence possibility during item's operating free time interval	7
3	Occasional	Sometimes occurrence possibility during item's operating free time interval	5
4	Remote	Unlikely to occur but the probability of occurrence exists during item's operating free time interval	3
5	Improbable	Assume failure does not occur	1

Table 7 Relation between Cs and failure rank

Failure class	Failure marks(Cs)	Failure classification
I	7~10	Critical failure
II	4~7	Major failure
III	2~4	Minor failure
IV	below 2	Negligible failure

2.4.2 안전도 평가

어떠한 시스템에 대해 제한된 조건(시설, 시간, 비용 등)하에서 규정된 기간동안 인원, 장비, 설비에서 발생할 수 있는 상해 및 손상을 최소화하기 위한 설계적 보증을 안전성이라고 하며, 이를 정량화 한 것이 안전도이다. 도시철도 전동차에 대한 안전도는 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$\text{안전도}(S) = \frac{\text{위험사건수}}{\text{총주행거리}} \tag{9}$$

안전성 분석은 고장영향 분석(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)을 통해 산출된 위험도 평가를 바탕으로 수행한다. 즉, 본 연구에서 수행한 고장영향 분석을 통해 결정된 고장 등급이 I 인 고장 횟수를 위험 사건수로 정의하고, 총 주행거리 1백만 Km에 대한 안전도를 평가하여 시스템에 반영하였다.[8]

Table 8 FMEA of friction brake

Mode	Result of FMEA			
Piston sticking	Cause	Contamination		
	Effect	Output of low pressure		
	Severity	1	Occurence	2
	Cs	8.366	Grade	I
Cylinder air leakage	Cause	Contamination		
	Effect	Output of low pressure		
	Severity	2	Occurence	3
	Cs	5.916	Grade	II
Spring fracture/ Weakening	Cause	Fatigue		
	Effect	Poor pressure adjustment		
	Severity	3	Occurence	2
	Cs	5.291	Grade	II
Bleeder valve sticking	Cause	Contamination		
	Effect	Exhaust of unsuitable gas		
	Severity	4	Occurence	2
	Cs	2.645	Grade	III
Lining weakening	Cause	Aging/Heat		
	Effect	Poor contact between exposed steels reducing of arresting capacity		
	Severity	2	Occurence	2
	Cs	7	Grade	I
Bearing abrasion	Cause	Lack of oil supply		
	Effect	Low rotation		
	Severity	3	Occurence	3
	Cs	3.464	Grade	III
Seal abrasion	Cause	Aging		
	Effect	External air leakage		
	Severity	2	Occurence	4
	Cs	4.582	Grade	II
Housing fracture	Cause	Vibration/fatigue		
	Effect	External air leakage		
	Severity	4	Occurence	3
	Cs	1.732	Grade	IV

3. 도시철도 유지보수 시스템 개발

유지보수 시스템은 전동차의 고장 이력을 신뢰성 평가를 통해 산출된 MTBF가 만료된 장치 중에서 위험도 수준이 높은 장치를 우선 정비/검수 계획 수립에 반영한다. 정비 후 고장 등록을 통해 신뢰성 지표와 고장영향분석 결과를 업데이트 한다. 업데이트 된 자료를 근거로 하여 정비/검수 계획을 수립하는 과정이 반복된다. 수립된 정비/검수 계획 품목에 대해서는 전문가 시스템을 통해 정비절차를 참고할 수 있도록 하였다. 따라서, 시스템의 구성은 크게 고장 관리 시스템, 예방정비 시스템, 전문가 시스템으로 되어 있다. 신뢰성 기반의 유지보수 시스템 구성도는 Fig. 4에 나타내었다. 시스템의 개발 환경은 Web 기반이고, Web Tier 개발 환경은 JSP와 Java를 사용하였으며, 데이터베이스는 오라클 9i를 사용하였다.

Fig. 5를 통해 신뢰성 기반의 도시철도 유지보수 시스템 개발을 위해 본 연구에서 수행한 연구를 간결하게 나타내었다. 평가방법을 선정시에는 정성적 평가와 정량적 평가로 나누어 시스템을 평가하여야 한다. 따라서 사고/고장 원인 분석을 통하여 정성적 평가를 할 수가 있으며, 부품 고장율을 이용해 신뢰성 지표를 계산하여 예방정비를 할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

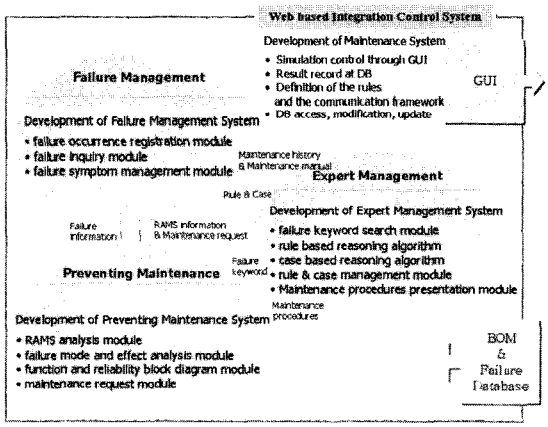


Fig. 4 Architecture of maintenance system

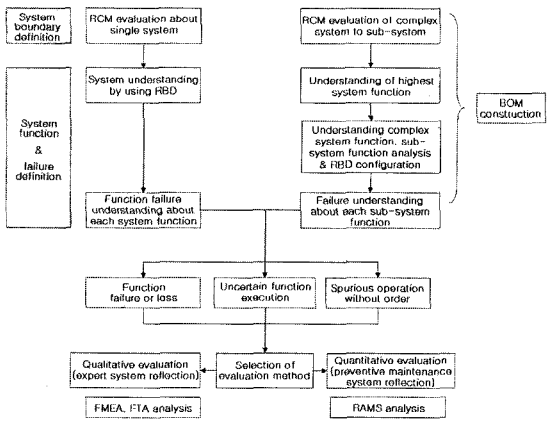


Fig. 5 Development flowchart of maintenance system based on RCM for urban transit

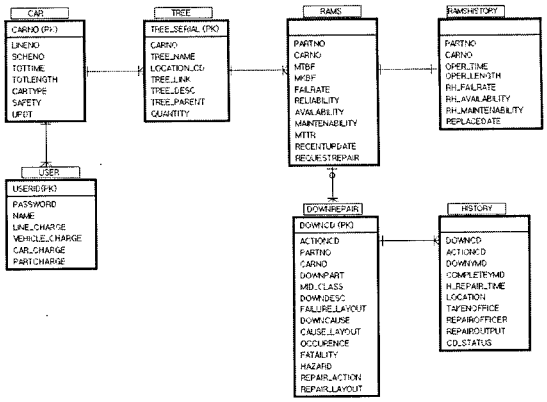
3.1 데이터베이스 설계

본 연구에서 구축한 데이터베이스는 빠른 처리속도, 안정성, 유지보수 용이성, 확장성을 고려하여 구축하였다. 이를 위해 데이터 모델링을 통한 정규화, 비정규화로 최적의 데이터베이스 구조로 설계하였고, 업무처리유형 분석을 물리적 데이터베이스로 설계하였다. 또한, 데이터의 네트워크 이동성을 최소화하고 단순화 할 수 있도록 설계단계에 반영하고, 대용량 데이터의 빠른 처리를 보장하기 위해 DBMS(Data Base Management System) 설정을 최적화 하였다. 이를 기반으로 ERD(Entity Relationship Diagram)에서는 분석단계에서 도출한 객체모형인 개념적 데이터베이스를 근간으로 상세한 논리적 데이터베이스를 설계하였다. 이를 물리적(physical) 데이터베이스와 논리적(logical) 데이터베이스로 구분하여 각 테이블별 Primary Key와 Foreign Key를 설정하고, 각각의 속성을 상세화 하였다. 개념적 데이터베이스로 도출한 분석단계 객체의 각 속성과 화면설계를 참조로 구체적인 논리 데이터 엔터티(Entity)와 속성을 연결한 ERD를 설계하였다. 물리적설계는 점진적 개발 단계에 구체적인 DAO(Data Access Object) 작성에 의한 SQL(Structured Query Language)문을 구체화함으로써 필요한 물리적 모델을 구성하였다.

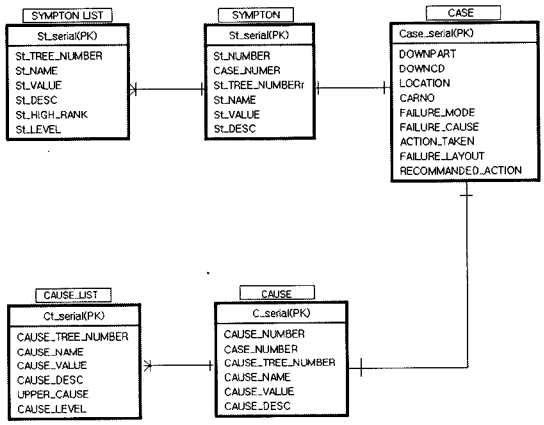
이와 같이 구성된 ERD는 각 어플리케이션 컴포넌트별 추출된 테이블의 개수가 6개인 예방정비시스템, 5개인 전문가시스템으로 구성하였다. 설계된 ERD는 자동화 툴(tool)인 ER-Win에 의해 작성되고, ERD 이미지만으로는 정의한 내용을 상세히 볼 수 없어 테이블 정의서(Table Specification)를 작성하였다. 테이블 정의서에서는 엔티티별로 테이블과 영문명을 정의하여, 물리적 데이터베이스 설계를 통해 각각의 테이블과 컬럼(Column)으로 정의할 수 있도록 하였다. 각 테이블 정의서에는 ERD에서 정의한 데이터를 테이블 ID, 테이블 명, 테이블 설명, 컬럼 ID, 컬럼 명, 컬럼 설명, PK(Primary Key), 타입(type) 등으로 구성하였다. 본 연구를 통해 구축한 데이터베이스는 Fig. 6에 나타내었다.

3.2 도시철도 유지보수 시스템 모듈

본 연구에서 개발한 도시철도 유지보수 시스템은



(a) Database of preventive maintenance system



(b) Database of expert system

Fig. 6 Database of maintenance system for urban transit

도시철도 4호선 VVVF 전동차의 신뢰성 평가를 근거로 시스템을 구성하였으며, 이 시스템은 신뢰성 지표 분석 모듈, 고장영향 분석 모듈, 기능블록도 조회 모듈, 정비요청 모듈 등, 4가지 모듈을 포함하고 있다.

먼저 신뢰성 지표 분석 모듈에서는 전동차량의 호선별, 편성별, 차량 번호별로 시스템, 서브시스템, 장치별, 부품별 고장률, MTBF, MKBF, 신뢰도(reliability), 가용도(availability), 정비도(maintainability), 안전도(safety) 지표를 열람할 수 있게 하였다. Fig. 7에서 보는바와 같이 마스터 BOM을 통하여 위수관리가 되게 하였다. 즉, 같은 단위 부품이더라도 환경적 요인, 시스템 특성이 다르면 고장이 다르게 발생하여 신뢰성 지표도 다르게 된다. 여기서 산출된 신뢰성 지표는 정비/검수 계획 수립 시에 반영된다.

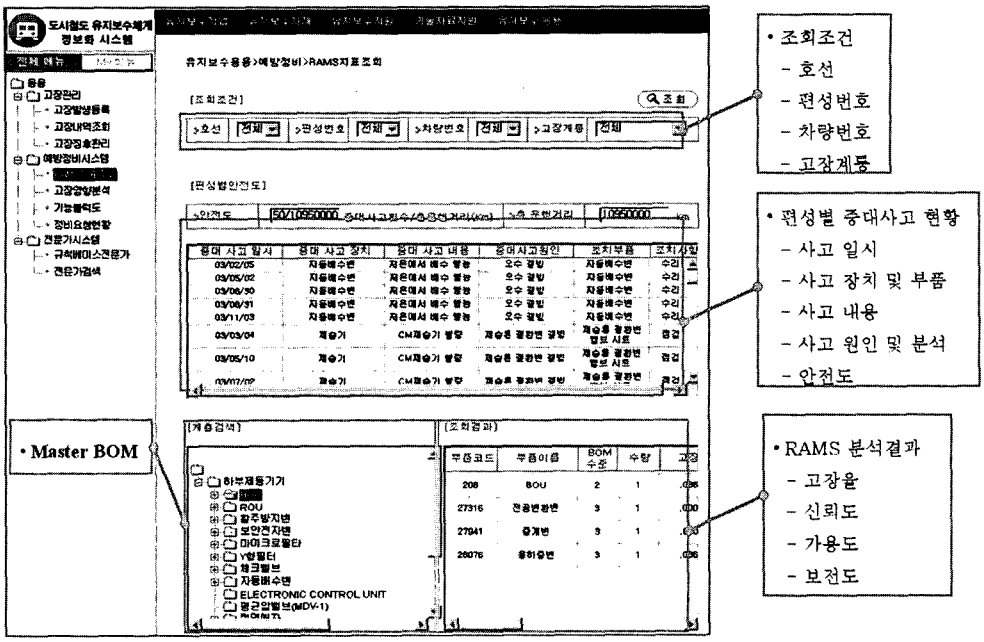


Fig. 7 Screen of reliability analysis module

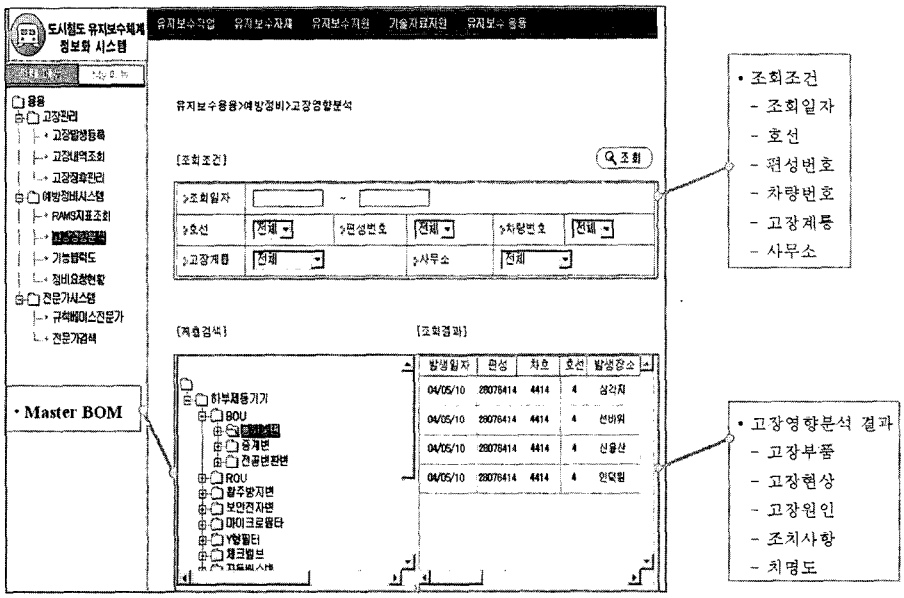


Fig. 8 Screen of FMEA module

고장영향 분석 모듈에서는 전동차량의 장치별 고장현상, 고장원인, 조치사항, 위험도 수준 등을 열람할 수 있게 하였다. 즉, 사고/고장발생 시 작업자는 고장현상과 원인을 조회하여 조치를 취할 수 있고 각 장치가 전체 시스템에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 신뢰성 지표 분석 모듈과 마찬가지로 여기서 산출된 데이터는 정비/검수 계획 수립 시에 반영된다. 고장영향 분석 모듈은 Fig. 8과 같이 구성되어 있다. 신뢰성 지표 분석 모듈과 마찬가지로 산출된 데이터는 정비/검수 계획 수립 시에 반영된다.

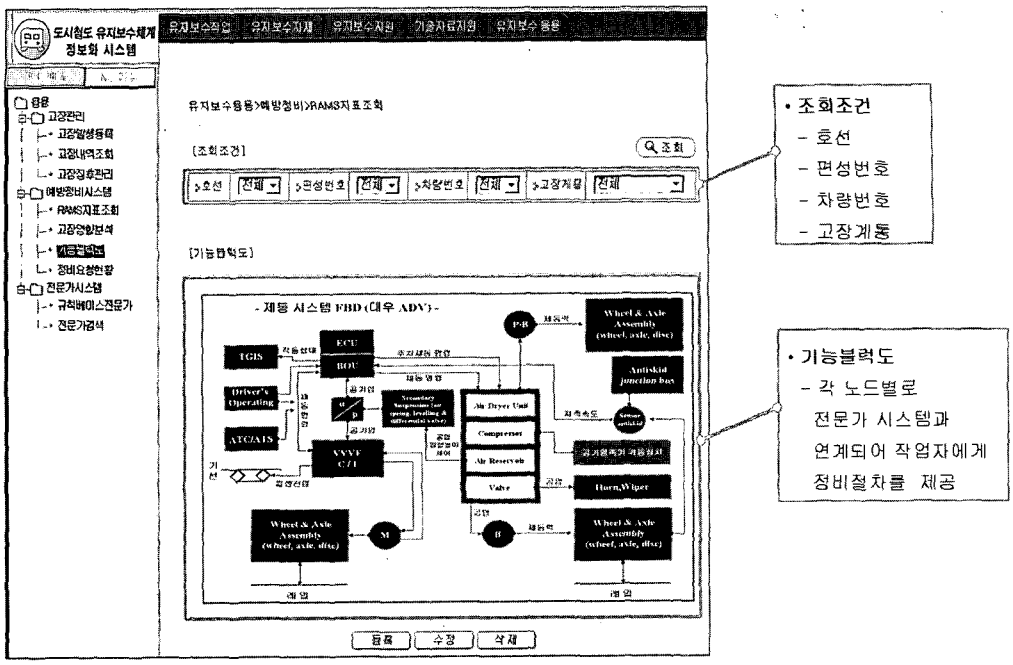


Fig. 9 Screen of FBD module

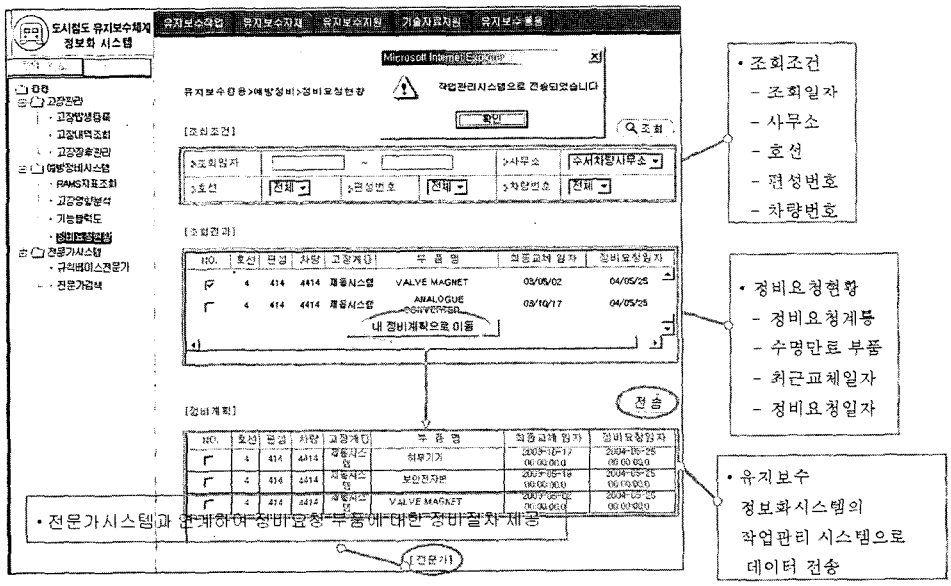


Fig. 10 Screen of repair request module

Fig. 9와 같은 기능블록도 조회 모듈에서는 전동차의 시스템 구성요소간 기능적 관계를 한눈에 알아 볼 수 있도록 구성하였다. 향후에는 기능블록도의 각 노드별로 전문가시스템과 연계되어 작업자에게 정비절차 및 고장진단 절차를 제공할 수 있도록 할 것이다.

정비요청 모듈은 신뢰성 지표 분석 모듈에서 산정한 결과를 이용하여 경고 메시지를 제공한다. 즉

수명이 만료된 부품목록과 그에 관련된 정보를 제공하도록 구성하였다. 또한, 조회된 부품에 대해서는 고장영향분석을 통해 정비시 우선권을 부여하여 정비계획을 수립할 수 있도록 구성하였다. Fig. 10과 같이 수립된 정비계획에 대해서는 전문가시스템과의 연계를 통해 해당부품에 대한 정비절차를 제공받을 수 있도록 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시철도 전동차의 유지보수 시스템을 구축하기 위해 신뢰도 평가 및 고장영향 분석 등을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 도시철도 전동차의 신뢰도 평가를 위해 VVVF 전동차를 대상으로 BOM을 구성하였고, 사고/고장 분류체계를 표준화 하였으며, 기능 블록도 및 신뢰성 블록도를 구성하였다. 본 논문에서는 VVVF 전동차의 서브시스템 중, 마찰제동장치를 예로하여 기술하였다. 결과로, 현재 전동차 마찰제동장치의 평균수명 시간은 1029 시간/편성으로 설계 단계의 목표 평균수명 시간인 898 시간/편성을 만족하는 것으로 나타났고, 이를 확장하여 마찰제동장치를 비롯한 차량 전체 시스템의 MTBF를 계산하면 208시간으로 목표 신뢰도 값인 115시간을 만족시키는 것으로 평가되었다.
2) 고장영향 분석을 위해서 본 연구에서는 고장평점법을 이용하였다. 앞서 기술했듯이, 고장평점법은 평가 인자들에 대한 기준이 필요한데, MIL-STD-1629A에 근거하여 고장 평점법에 필요한 각 평가 인자들의 분류기준을 세웠고, 신뢰성 평가와 마찬가지로 VVVF 전동차의 서브시스템 중, 마찰제동장치를 예로하여 분석을 수행하였다. 결과로, 마찰제동장치에서는 '피스톤 고착'이라는 고장현상이 가장 높은 등급인 I 등급을 받았고, 원인은 '오염'이었으며, 이 고장현상으로 인해 상위 시스템에 끼치는 영향은 '낮은 압력출력'이었다.

본 연구에서 개발한 유지보수 시스템은 신뢰성 평가를 통해 수명이 만료된 부품의 정비요청 시, 고장영향 분석을 통한 고장현상, 고장원인, 고장영향 등을 현시하여 정비에 고려할 수 있도록 구성하였다. 신뢰성 기반의 유지보수 시스템은 1회용으로 구축하는 것이라기보다는 위와 같은 분석기법을 이용하여 지속적으로 개정되는 과정이다. 성공적인 유지보수 시스템의 구축은 불필요한 정비/검수 횟수를 줄이고, 향후 일어날 고장에 대한 대비를 할 수 있을 것이다. 이는 도시철도 운영 유지비를 절감할 수 있을 뿐 아니라, 안전성을 확보하여 도시철도의 대국민 신뢰성을 제고시키는데 큰 이바지를 할 것이다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 기계기술연구소의 연구비 지원 및 2004년도 두뇌한국21 사업의 지원으로 이루어 졌으며, 한국철도기술연구원 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1) H. Y. Lee, K. J. Park, T. K. Ahn, G. D. Kim, S. K. Yoon and S. I. Lee, "A Study on the RAMS for Maintenance CALS System for Urban Transit," Korean Society for Railway, Vol.6, No. 2, pp.108-113, 2003.
2) C. H. Bae, H. Y. Lee, K. H. Kim and M. W. Suh, "Modeling and Implementation of a Master BOM Management System Using Component Technique for Maintenance System of Urban Transit," Spring Conference Proceedings, Vol.3, KSAE, pp.1385-1390, 2004.
3) S. Y. Han, K. J. Park, G. D. Kim, M. O. Kim, W. D. Lee, J. S. Hong, T. K. Kim, H. Y. Lee and J. L. Sin, "A Study on the Development of Standardization and Information to Maintenance System for Urban Transit," Korean Railroad Research Institude, pp.63-88, 2003.
4) K. H. Kim, C. H. Bae, H. Y. Lee and M. W. Suh, "A Study on the Standardization of Failure Classification Method for IT Maintenance System of Urban Transit," Spring Conference Proceedings, Vol.3, KSAE, pp.1361-1365, 2004.
5) H. S. Jung, D. H. Park and C. J. Kim, Reliability Analysis and Application, Youngji

Press, Seoul, pp.85-105, 2000.
6) S. Y. Lee, Reliability Engineering, HyungSul Press, Seoul, pp.9-44, 2000.
7) Relex Software Co., A Giude Book for Reliability Prediction, Kyo Woo Sa Press, Seoul, pp.4-7, 2002.
8) W. K. Kim, System Reliability Engineering, Kyo Woo Sa Press, Seoul, pp.239-253, 1999.
9) K. S. Lee, B. C. Goo, W. H. Yoo and J. W. Seo, "A Study on the Development of Standardization and Information to Maintenance System for Urban Transit," Korean Railroad Research Institude, Seoul, pp.217-262, 2001.
10) C. J. Kim and C. W. Bak, Reliability Engineering, Korean National Open University Press, Seoul, pp.161-174, 2003.