

도시철도 차량을 위한 예방보전시스템 개발

하성훈 · 장석화 · 유우식[†]

인천대학교 산업경영공학과

Development of the Preventive Maintenance System for an Urban Transit

Seong-Hoon Ha · Suk-Hwa Chang · Woo-Sik Yoo[†]

Department of Industrial & Management Engineering, University of Incheon

This paper addresses a the maintenance system based on the concept of RAMS (Reliability, Availability, Maintenance, Safety) for the effective maintenance of the urban transit. A systematic approach for developing a cost-effective maintenance strategy based on the component reliability of the system in question is performed according to the following steps : definition of function, functional failures of the systems, construction of RBD (Reliability Block Diagram), and the calculation of reliability indices. The developed preventive maintenance system generates maintenance plan and repair request based on the analysed RAMS data of components and maintenance experience.

Keywords : Reliability, Preventive Maintenance, RAMS

1. 서 론

대형시스템은 기계적, 전기적으로 매우 복잡한 구조를 가진 시스템으로 운영 및 유지, 보수에 필요한 비용이 총 수명주기비용(Life Cycle Cost, LCC)의 60%를 차지할 정도로 유지보수비가 전체운영비에 미치는 영향이 크다고 알려져 있어 유지보수비용의 절감을 이루는 것이 중요하다. 또한 장비가 대형화되고 복잡화 될수록 고장으로 인해 생기는 손실은 단순히 운행중단, 서비스 중단의 문제뿐 아니라 인명의 피해까지 있을 수 있고 기업의 이미지에 막대한 영향을 끼칠 수 있다. 그러므로 충분한 가동성, 보전성을 유지하기 위해 문제발생을 최소화하도록 시스템을 구성하는 주요 어셈블리단위가 체크되고, 예방보전활동이 이루어져야 한다. 이는 시스템이 고가의 부품으로 구성되어 유지보수 비용이 높을

뿐만 아니라 유지보수를 위하여 운영 스케줄에서 부품을 떼어내는 복잡한 절차가 필요하게 되어 시스템의 효율적인 운영에 크게 영향을 미치게 되기 때문이다. 그러므로 설비의 돌발적인 고장을 줄여 시스템 중단을 최소화하고 고객서비스를 향상하여 안전운행을 유지하는데 도움을 줄 수 있게 하기 위한 예방정비를 위해 정보화 시스템의 개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 대형복잡시스템의 하나인 도시철도를 대상으로 도시철도 운용중 생기게 되는 고장데이터를 가지고 RAMS분석, 고장영향분석을 하고, 고장코드 관리 등 유지보수 체계를 정함으로써 신뢰성기반의 유지보수체계를 확립함에 있다.

신뢰성과 관련된 연구내용을 보게 되면 1950년대에는 신뢰성의 기초정립과 신뢰성 척도의 연구가 진행되었다. 1960년대에는 지표를 확대적용하기 위한 연구가 진

[†] 교신저자 wsyoo@incheon.ac.kr

※ 본 연구는 2006년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의해 수행되었음.

행되었으며, RCM기법에 관한 연구가 진행되었다. 또한 1970년대부터는 이 기법을 항공이나 원자력분야에 실제 적용함으로써 효과를 거두게 되었고 1980년대부터는 국내에서도 RAMS 분석기법을 적용하게 된다. 현재 다른 분야에서는 이미 많은 신뢰성분석에 관한 연구가 진행되어왔고 철도의 경우 최근에 들어 활발하게 연구가 진행되고 있다. 최근에 고속철도 시스템의 신뢰성 연구와 RCM 기법을 이용한 유지보수체계 구축 연구가 진행되었다[7, 8]. 그리고 도시철도 유지보수를 위한 정보화시스템 개발 방법론 연구가 한국 철도기술 연구원에서 수행되었는데 본 논문은 제동 장치를 중심으로 활용 가능한 예방 보전 시스템을 개발하였다.

2. 도시철도 유지보수 체계화

2.1 개요

본 논문에서는 도시철도의 유지보수 체계화를 위해 사고/고장분류를 표준화하였고, 또한 기능블럭도와 신뢰성 블럭도를 정립하였다. 기능 블럭도와 신뢰성 블럭도는 차량 시스템 내의 장치/부품의 고장 영향을 분석하기 위해 장치/시스템간의 인터페이스를 고려하여 상호 연결된 블럭을 사용하는 신뢰성 해석 방법으로 각 서브시스템뿐만 아니라 차량 전체 시스템 평가에 유용한 방법이다. 본 논문에서는 도시철도차량을 총 13개의 서브시스템으로 구분하였고 이중 제동장치에 대해서 중점

<표 1> 신뢰성관련 기존연구

시기	연구자	내용
1950년대	전자기신뢰성 고문단[3] Drenick[10] Weibull[2]	신뢰성연구의 기초개념정립 신뢰성척도인 MTBF와 고장율이 사용 와이블분포가 연구 FMEA, FTA 연구추진
1960년대	Moubray[9, 13]	FMEA, FTA연구확대진행 RCM(Reliability Centered Maintenance)연구
1970년대	민간항공분야 Darling[9]	RAMS기법 도입 원자력유지보수에 RAMS지표이용
1980년대	원자력연구소 (국내)[11]	원자력유지보수에 RAMS지표이용
1990년대	한국건설기술연구 원[4]	전기수용설비의 예방보전연구
2000년대	철도기술연구원 [6, 7, 8]	고속철도시스템 신뢰성연구진행 RCM기법이용한 고속철도의 유지보수체계구축 도시철도 정보화시스템 개발방법론연구

적으로 기능 블럭도와 신뢰성 블럭도를 통해 신뢰성에 대한 평가를 진행하였다.

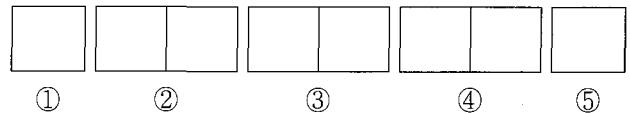
2.2 고장코드 체계 표준화

고장코드 체계의 표준화를 위해 본 논문에서 제시하고 있는 방법은 고장코드와 조치코드의 확립이다. 고장코드는 고장분류, 중분류, 고장현상과 고장원인, 중요도의 5가지 항목으로, 조치코드는 조치내역과 조치부품명, 조치결과 등의 3가지 항목으로 조합되어있다.

정의한 사고/고장 분류체계에 따라 작업자들은 작업 기록을 입력하게되고, 관리자는 입력단의 내용을 점검하여 용어를 통일시킨다. 특히, 고장현상과 원인 부분은 작업자의 입력에 따라 용어의 표준화가 이루어지며, 다른 항목들도 신규내용의 추가요청이 있을 경우 관리자의 승인과정을 거쳐 등록하게 된다. 이러한 작업이 효과적으로 이루어지면 하나의 고장현상에 대한 원인 및 조치사항 등의 관련 항목들이 사례로 결정되게 되고, 여기에 코드를 부여하게 된다.

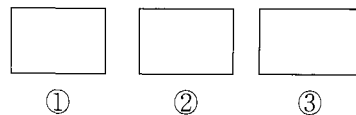
2.3 기능 블럭도 구성

- 1) 고장코드
- 2) 조치코드



- ① : 고장분류(A~Z)
- ② : 중분류(00)
- ③ : 고장현상(00)
- ④ : 고장원인(00)
- ⑤ : 중요도(0)

<그림 1> 고장코드 분류규칙

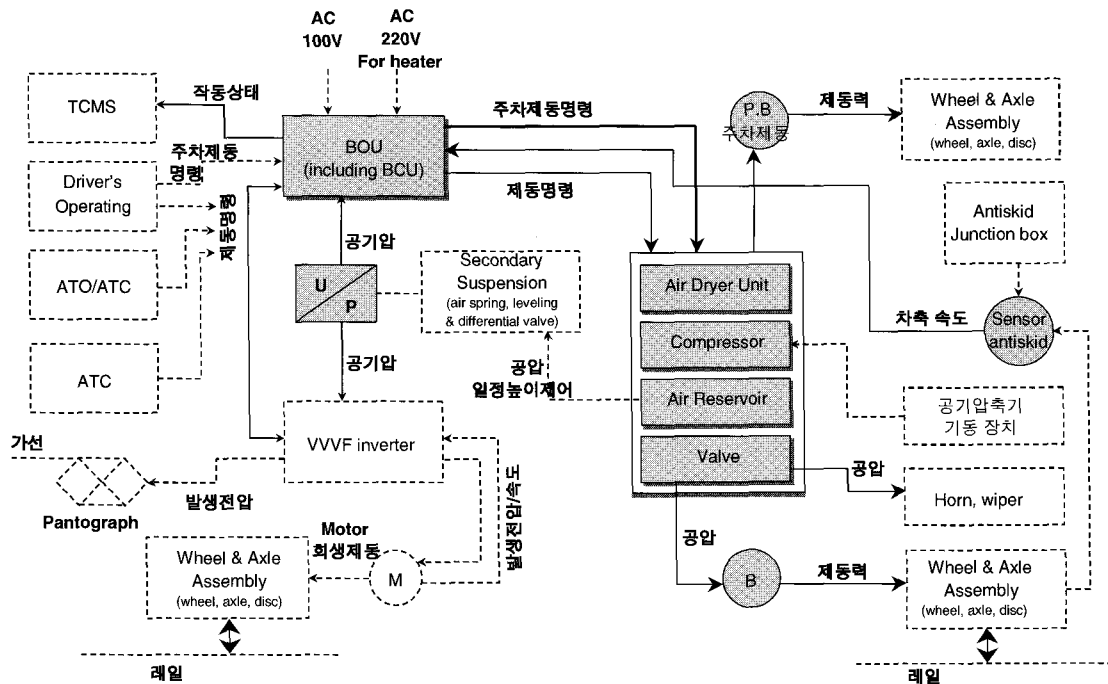


- ① : 조치내역(0)
- ② : 조치 부품명(00000000)
- ③ : 조치결과(0)

<그림 2> 조치코드 분류규칙

제동장치의 기능 블럭도는 <그림 3>에 나타나 있다.

도시철도에 적용되는 제동의 종류는 (1) 상용제동 (2) 비상제동, (3) 보안제동, (4) 정차제동이 5) 주차제동 있으며 제동방식으로는 (1) 견인전동기와 인버터를 통해 이루어지는 전기적인 회생제동과 (2) 차륜 또는 디스크와 마찰재의 접촉 마찰 저항을 통해 이루어지는 마찰



〈그림 3〉 제동장치 기능 블록도

(공기) 제동으로 나누어진다. 정상적인 경우 감속의 대부분은 회생제동이 담당하게 되며 일정속도 이하가 되거나 회생제동 부족분에 대해 마찰제동이 작동하게 된다. 만일 회생 제동력이 상실되는 경우 마찰(공기)제동만으로 제동이 이루어진다. 전동차에 적용되는 제어 우선 순위는 다음과 같다.

- (1) 제동 초기 : 구동차 공기제동 + 부수차 공기제동
- (2) 구동차회생제동 + 부수차 공기제동은 회생제동 부족분 공기제동 분담
- (3) 구동차회생제동 + 부수차 공기제동 + 제동력 부족 시 구동차 공기제동

• 응하중 제어

승객하중에 따라 변화하는 공기스프링의 압력을 감지하고 감지된 공기압력을 차량 중량에 따라 증감시켜 전동차가 승객하중에 관계없이 일정한 감속도를 갖도록 한다.

• 상용제동

상용제동은 상용운전시 체결되는 제동 방식이며, 응하중 제어, 저크제한 및 일괄 교차제어 등을 고려하여 제어 우선순위에 따라 제동을 체결한다.

• 비상제동

비상제동은 상용제동이 그 기능을 상실한 경우 체결

된다.

• 보안제동

보안제동장치는 인통 지령선, 압력 공기원을 상용제동 시스템 및 비상제동 시스템과 전혀 공유하지 않는 독립된 제동 시스템으로 상용제동 시스템과 비상제동 시스템이 둘다 고장난 경우에 사용되는 제동 시스템이다.

• 정차제동

원헨들 형식의 주간제어기가 적용된 전동차에 있어서 경사진 궤도에서 출발시 전동차의 rolling을 방지하기 위한 제동 방식으로 주간제어기가 타행 또는 제동 위치에 있고 열차속도가 2Km/h 이하일 때 체결된다.

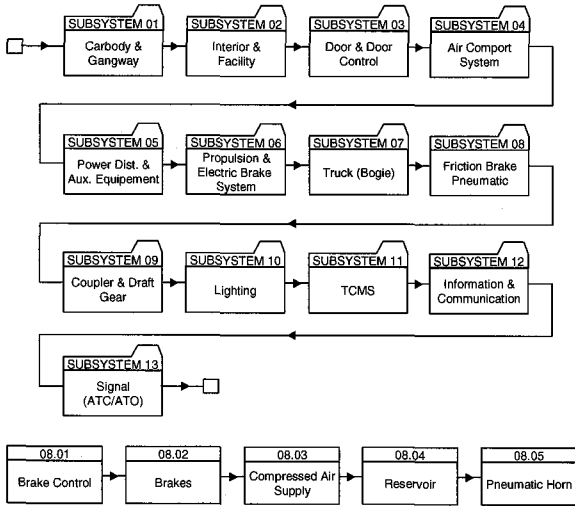
• 주차제동

주차제동장치는 기존 차량의 수용제동장치의 대체 기능으로서 차내의 압력공기가 없는 상태에서 필요한 제동으로 일반제동장치 제동력 개념과는 반대로 공기압력에 의한 완해, 스프링력에 의한 제동 체결 방식을 채택하고 있다.

2.4 신뢰성 블록도

본 절에서는 전체 시스템에 대한 신뢰성 블록도(Reliability Block Diagram, RBD)와 제동장치에 대한 신뢰성 블록도 구성에 대해 설명한다. 신뢰성 블록도 구성은

시스템, 서브시스템, 부품간의 물리적인 구조, 기능 및 상호 인터페이스를 고려하여 구성하며 신뢰성 블록도 구성은 차량 전체 시스템에서 서브시스템, 장치, 부품으로의 BOM 형식으로 구성된다.



〈그림 4〉 전체시스템과 제동장치의 신뢰성 블록도

도시철도 차량 시스템의 신뢰성 블록도는 차량을 구성하는 13개의 서브시스템의 직렬 구조로 표현할 수 있으며 이는 서브시스템 중에서 하나라도 고장이 발생하면 차량 운행이나 성능에 영향을 미치기 때문이다. <그림 4>는 전체시스템과 제동장치에 관한 신뢰성 블록도이다.

3. 도시철도 RAMS 평가

도시철도의 RAMS 평가는 다음과 같은 절차를 거친다.

첫째, 각 서브시스템이 갖는 특성 및 발생가능 고장모드를 고려해 고장모델링을 하고 이를 기초로 각 서브시스템의 고장률을 예측한다.

둘째, 예측된 서브시스템의 고장률로부터 차량기준의 MTBF를 계산하고, 설정된 각 서브시스템의 신뢰성 배분값을 만족시키는지 여부를 확인한다.

셋째, 실제 고장데이터를 분석하여 신뢰도 예측값과의 비교 분석한다.

목표 신뢰도 설정은 도시철도 차량과 유사한 시스템으로 구성된 국내외 도시철도 차량에 대한 실제 운행 데이터 및 기술 사양내의 요구 신뢰도의 분석을 통해서 이루어진다. 전동차의 차량 목표 신뢰도는 국내외 유사 차량에 대한 영업운행 데이터 및 사양내의 요구사항과 전동차의 운행 조건, 구성 시스템의 기술적 특성들을 비교 분석하여 설정한다[5].

- 1일 평균 주행 거리 : 1000km
- 전차 편성 단위 : 10량 1편성
- 표정 속도 : 30km/h 이상

전동차의 운행 조건을 기준으로 서울지하철공사 1~4호선 전동차의 영업 운행 데이터를 조사하여 설정된 서브시스템의 신뢰도는 다음과 같다.

〈표 2〉 전동차의 목표신뢰도

서브시스템	MTBF(hours)	비율(%)
제동장치	898	12.8

다음으로 제동장치의 신뢰성 예측치를 구한다.

신뢰성블록도에서 구성한 바와 같이 제동장치는 제동 제어부(brake control), 공기압축기(air compressor), 마찰제동(friction brake), 공기통(reservoirs) 등으로 구성되므로 제동장치의 고장률은 제동장치 구성품들의 고장률 합으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{BRAKE} = \lambda_{BC} + \lambda_{CP} + \lambda_{FB} + \lambda_{RS} + \lambda_{VV}$$

여기서, λ_{BC} : 제동 제어부

λ_{CP} : 공기압축기(air compressor)

λ_{FB} : 마찰 제동부(friction brake)

λ_{RS} : 공기통(reservoirs)

λ_{VV} : 밸브류(valves)에 대한 고장률

일때, 신뢰성 예측치는 다음과 같다[5].

〈표 3〉 전동차의 신뢰성 예측치

서브시스템	MTBF	고장률
제동장치	1,029	0.000972

주) 제동장치 MTBF = 1,029 (시간 - 편성)

예측한 제동장치의 MTBF 값은 제동장치의 신뢰성 배분값인 MTBF = 898(시간 - 편성)을 만족시키는 것으로 확인되었다.

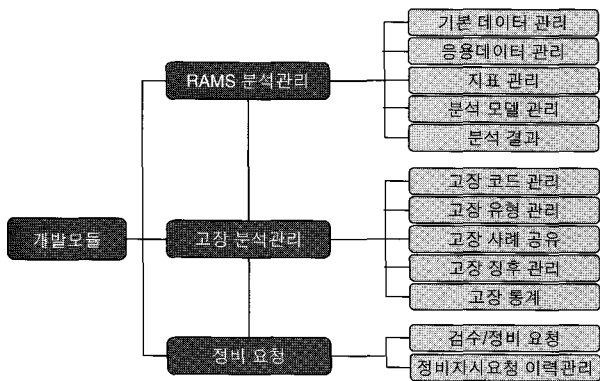
4. 도시철도 예방정비시스템 개발

4.1 개요

예방정비시스템은 단발성으로 구축하는 것이기보다는 지속적으로 개정(update)되는 과정이다. 앞장에서 설명한 신뢰성평가에 의해 계산된 값들은 초기의 값으로 사용

이 되고 이후 실제 운용중 발생하는 고장 데이터의 이력을 가지고 신뢰성분석이론을 적용해 RAMS 정보값을 갱신한다. 정보의 갱신은 일주일을 주기로 이루어지게 되며 이때 고장정비에 대한 내용이 새로 입력되어 있으면 그 정비이력을 가지고 RAMS 정보를 다시 갱신하게 된다.

본 논문에서 개발된 예방정비 시스템의 기능별 모듈은 아래와 같다.

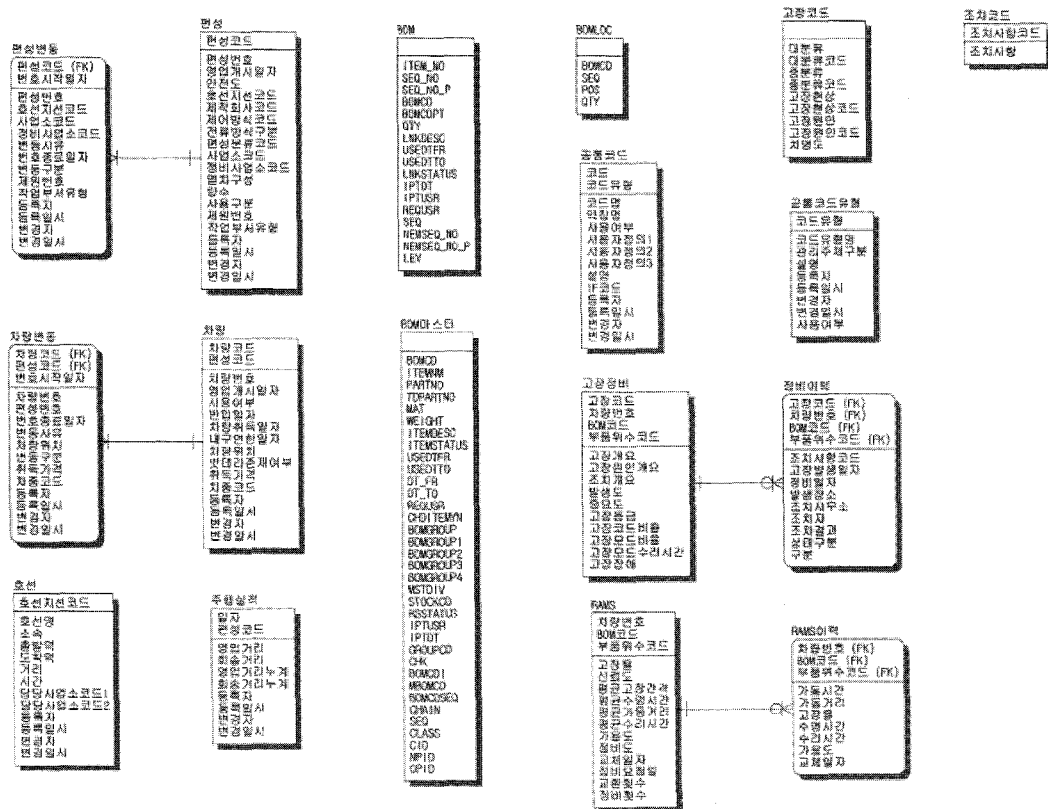


<그림 5> 기능분석도

차량 검수/정비 시스템에서 기록한 실적/이력 데이터들과 차량운행정보 자동 수집 시스템에서 기록된 차량 운행/고장 이력 데이터 등이 모델에 따라서 적절히 가공되어 분석을 위한 자료로 저장된다. 이 자료는 데이터 분석 작업을 거쳐서 예상 수명이나 각종 신뢰도 지표들을 산출하는 근거가 된다. 이렇게 계산된 수명이나 신뢰도 지표는 일반 유지보수 업무를 신뢰성에 기반한 유지보수가 되도록 도와주며 통계에 의해 계산된 정비 주기에 의하여 인력의 과투입 또는 부족투입을 방지할 수 있다.

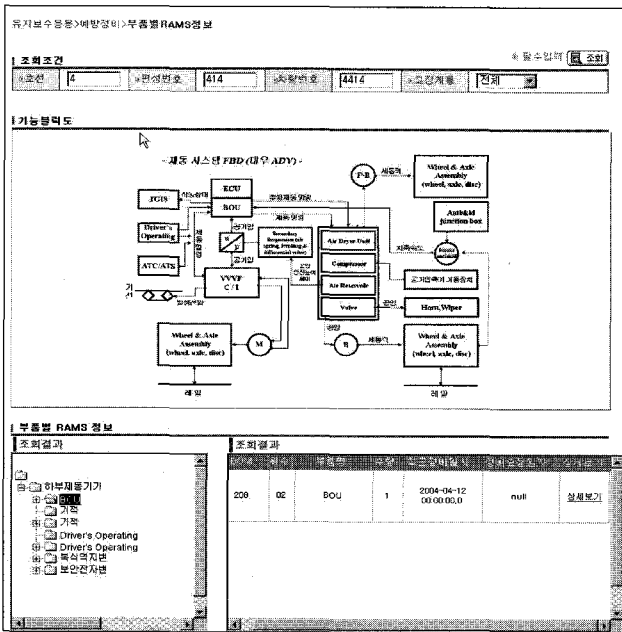
4.2 RAMS 분석 관리

예방정비시스템에서는 Master BOM에서부터 호선별, 편성별, 차량번호별로 사고/고장에 대한 자료를 조회할 수 있고 이때 고장이 발생한 장치별 RAMS 지표를 작업자에게 현시한다. 또한 RAMS 지표를 분석하여 자동으로 작업자에게 Warning 메시지를 전송하도록 하여 고장이 발생되기 이전에 예방정비가 이루어지도록 개발한다. 같은 부품이라도 환경적요인, 시스템 특성에 따라 고장이 다르게 발생하기 때문에 위수관리가 되도록 하여



<그림 6> 데이터베이스 구조

시스템의 특성에 따라 RAMS 지표가 관리되고 평가되도록 개발한다. 전동차는 대형 복잡 시스템이기 때문에 단위부품의 특성이 시스템과 연계되어 작동하면 RAMS 평가가 다르게 된다. RAMS 지표가 관리됨으로써 Life cycle cost가 평가되어지고 신규 차량 도입 시 설계에 반영되도록 한다. <그림 7>은 부품별로 RAMS 정보를 볼 수 있는 화면이다. 검색조건에 의해 해당하는 시스템의 기능블럭도를 볼 수 있고, BOM 구조대로의 트리에서 선택한 부품의 RAMS 정보를 조회할 수 있다.

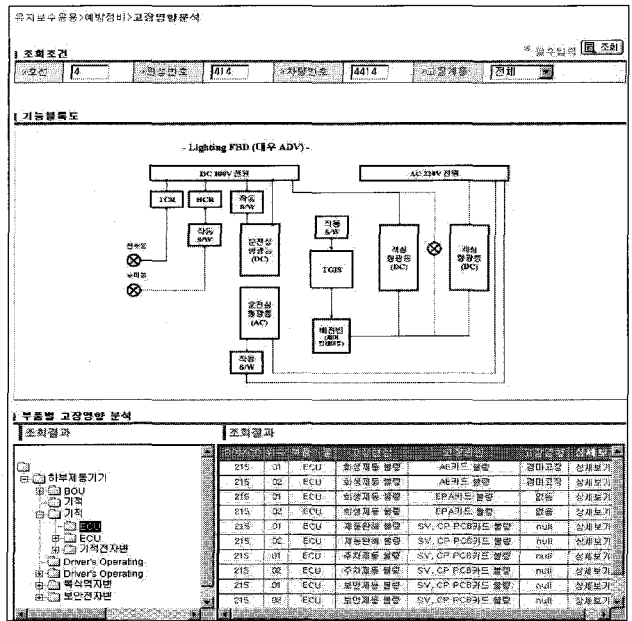


<그림 7> 부품별 RAMS 정보

<그림 7>은 부품별 RAMS 상세정보이다. 조회결과 나타난 부품에 대한 상세한 RAMS 정보를 나타내고, 아래쪽에 있는 도표와 그래프는 시간에 따른 RAMS 지표의 변화치를 보여주고 있다.

4.3 고장 분석 관리

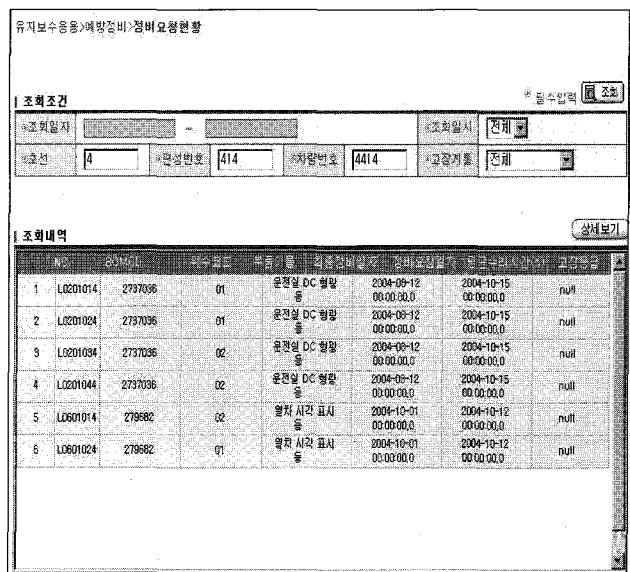
사고/고장발생시 작업자는 고장현상과 원인을 분석하여 조치를 취한다. 이때 작업등록을 하게 되며 작업등록을 해야 한다. 이때 고장부품, 고장현상, 고장원인, 조치사항을 입력하게 되며 이 결과를 분석하여 고장영향을 분석하게 되고, 결과를 Master BOM이나 조회조건을 이용해 조회한다. <그림 8>은 고장 분석 관리의 화면이다. 해당부품으로 인해 일어날 수 있는 고장의 종류와 그 고장의 영향은 어떠한 것들이 있는지 조회할 수 있다. 여기서 고장의 관리는 앞서 말한 고장코드 표준화에서 정한 고장코드를 사용한다.



<그림 8> 고장 분석 관리

4.4 정비요청

<그림 9>는 정비요청현황 모듈로 RAMS 지표분석 모듈에서 기술한 작업자 Warning 메시지, 즉 수명이 만료된 부품목록과 그에 관련된 정보를 제공하도록 구성한다. 또한, 조회된 부품에 대해서는 RAMS 분석 및 고장영향분석을 통해 정비시 우선권을 부여하여 정비계획을 수립할 수 있도록 구성한다. 계획된 정비부품은 작업관리시스템으로 전송하여 유지보수 작업시 안전성과 효율성을 높일 수 있도록 한다.



<그림 9> 정비요청현황

5. 결론 및 기대효과

본 논문에서는 도시철도 차량의 유지보수를 위한 예방보전시스템 개발 내용을 소개하였다. RCM 기반의 예방보전 시스템구축으로 예상치 못한 고장이 감소될 경우 당연히 가용도 및 신뢰도는 증대된다. FMEA 등을 통한 분석은 각 고장 시스템에 미치는 결과를 검토하여 각 고장 모드별로 가장 효과적인 정비 방안을 제시하였다. 또한 부품의 예상수명을 통한 정비요청으로 잠재 고장이 실제 기능 고장으로 발전하는 것을 예방하여 준다. 동시에 정기보수의 빈도 역시 절감시켜서 시스템의 가용도 및 신뢰도가 향상되는 효과를 준다. 이에 따라 본 연구에서 제안한 예방정비시스템을 구현함으로써 다음과 같은 주요 결과를 얻을 것으로 기대된다.

- 1) 도시철도차량의 가용도, 신뢰도, 안전도 제고
- 2) 보수 정비 비용 절감
- 3) 업무 담당자에게 동기부여
- 4) 보수 정비 관련 지식경영

현재 개발된 시스템은 서울 도시철도 중 제동장치에 대해 운행 중 발생하게 되는 고장 데이터를 가지고 RAMS 분석을 실시하여 각 부품의 신뢰성을 평가하는 시스템이다. 따라서 1년 정도 실제 상용하면서 데이터를 충분히 누적하였을 때 효과를 기대할 수 있을 것이다. 또한 본 연구가 실제적인 효과를 얻기 위해서는 도시철도 운용 중 지속적인 관리가 이루어져야 하고, 사용자들의 데이터 수집노력이 필요하다.

본 연구에서 제안하는 시스템은 현재 철도기술연구원에서 주관하여 도시 철도 유지보수 업무에 시험 중이며 향후 사용데이터가 누적되면 도시 철도 차량의 유지 보수 업무에 효율적으로 사용될 것이다.

참고문헌

- [1] 신덕호, 이종우, 김종기, 이영훈, 김백현, 이기서; “내장형 철도신호 제어 시스템의 정량적 RAMS 평가에 관한 연구”, 철도학회 추계학술대회, 2003.
- [2] 이상용; 신뢰성공학, 형설출판사, pp. 29-36, 2001.
- [3] 정해성, 박동호, 김재주; “신뢰 성분석과 응용”, 영지문화사, 2000.
- [4] 한국건설기술연구원; “전기설비 고장사고예방 및 진단기법에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회, 1996.
- [5] 한국철도기술연구원; “표준전동차 RAMS 평가연구”, 건설교통부, 2001.
- [6] 한국철도기술연구원; “도시철도 유지보수 정보화시스템 개발방법론에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2002.
- [7] 한국철도기술연구원; “RCM을 이용한 고속철도 차량의 유지보수체계구축”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2002.
- [8] 한국철도기술연구원; “고속철도시스템신뢰성 및 운영효율화 기술개발 1차년도 연차보고서”, p. 48. 2003.
- [9] Darling, S.; “A Preventive Maintenance Improvement Project at Texas Utilities Comanche Peak,” *Nuclear Plant Journal*, 1991.
- [10] Drenick, F. F.; “The Failure of Incomplex Equipment,” *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 8 : 680-690.
- [11] Electric Power Research Institute; RCM Evaluation (Training Material), 1995.
- [12] Moubray, J.; *Reliability-centered maintenance*, TWI press, Inc., 2000.
- [13] Resnikoff, H. L.; *Mathematical Aspects of Reliability-centered maintenance*, Dolby Access Press, Los Altos, California, 1978.