

철도차량의 유지관리 최적화를 위한 RCM 프로세스 개발 및 적용

신건영 · 이희성[†]

서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과

(2015년 1월 27일 접수, 2015년 3월 13일 수정, 2015년 3월 17일 채택)

Development and Application of RCM Process for the Optimized Maintenance of Railway Vehicle

Kun Young Shin, Hi Sung Lee[†]

Dept. of Rolling Stock System Engineering, Seoul National University of Science & Technology

(Received 27 January 2015, Revised 13 March 2015, Accepted 17 March 2015)

요 약

최근 신뢰성을 기반으로 한 기법을 철도차량 유지관리에 도입, 적용하기 위해 많은 계획을 세우고 정착시키려는 업무가 진행되고 있으나 시간 및 비용대비 성과에 대해 기술적인 향상이 필요하다. 신뢰성기반의 유지관리 활동은 군수분야에서 시작하여 원자력, 항공 분야 등에서 가장 활발히 추진중이지만 국내철도 현장에도 접목하려는 연구를 본 논문에서 제시하였다.

철도 운영기관에서 신뢰성관련 업무를 도입하거나 적용하기 위해서는 우선 내부의 유지관리 환경을 검토할 필요가 있으며, 이러한 검토결과를 기반으로 각종 신뢰성 기법들을 철도현장에 맞게 적용하고, 특화된 신뢰성프로세스의 정립과 주요 대상 시스템을 선정하여 RCM (Reliability Centered Maintenance) 기법을 적용하여 적정성을 검토하였다. 그 결과 철도차량 유지관리를 보다 체계적이고 합리적인 방법으로 시행하기 위한 절차를 제시하였다.

주요어 : 신뢰성중심유지보수, RCM, 고장모드영향분석, FMEA

Abstract - Recently, RCM(reliability centered maintenance) process is introduced and applied for the planning and implementing efficient and effective maintenance system in terms of optimal rolling stock maintenance. Particularly, cost-time benefits analysis associated with the implementation of RCM for rolling stock maintenance is necessary and required for railway operator in advance. The RCM process was primarily starting from military, airplane and nuclear industries and is now adapted in railway industry for local railway operators. This paper focuses on suggesting the way of connecting the RCM process with railway maintenance activities in the railway operation field.

Thus, in order to introduce and establish reliability activities, it needs to review and evaluate the maintenance environment in the organizational point of view. Based on these reviews and evaluations, various maintenance methodologies are reviewed for customizing local railway field situations and establish specific process in the application of major systems on the reliability technology. In this paper, the railway RCM process is proposed for the establishment and construction of the systematic and optimal maintenance system.

Key words : RAMS, RCM, Reliability Process, FMEA

[†]To whom corresponding should be addressed.
Dept. of Rolling Stock System Engineering,
Seoul National University of Science & Technology
Tel : 02-970-6877 E-mail : hslee@seoultech.ac.kr

1. 서론

국방, 원자력, 항공 등 많은 분야에서 신뢰성 관련된 활동들이 많이 이루어 지고 있다. 국내 철도차량 분야에서는 90년대 중반 고속철도(KTX)가 도입되면서 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety)와 RCM(Reliability Centered Maintenance)이라고 하는 신뢰성 중심의 유지관리 기법이 소개되어 활용되고 있다.

약 20여년이 되어가는 현 시점에서 RAMS 및 RCM이라고 하는 신뢰성 기술들이 철도제작사 및 철도운영사에게는 실질적이기 보다는 이론적인 형태의 업무를 수행하고 있는 현실이다. 하지만 신뢰성 관련 규격이 국외로부터 도입되고 최근 몇 년전부터 신규 철도차량 발주시 필수적으로 RAMS 요구사항을 제시하고 평가를 받고 있다. 철도사고가 빈번하게 발생하고 안전에 대한 중요성이 인식되고, 철도안전법이 개정되면서 철도 운영기관에서도 이제는 신뢰성과 관련된 제반 활동을 의무적으로 수행해야하고 정기적인 평가를 받도록 제도화 되었다[1,2].

운영기관에서는 보다 체계적이고, 과학적이며 객관적인 새로운 유지관리 정책의 변화가 필요하였고, 유지관리중에 수집되는 필드데이터를 RAMS 측면에서 유지관리 결과로 활용하기 위한 규정을 제정하거나, 조직 및 시스템의 구축 등 기존의 유지관리 체계를 철도안전법에서 요구하는 수준으로 변화되고 있다.

철도차량의 신뢰성은 과거 철도연구기관이나 제작사 위주의 활동이었다면, 본 논문에서는 철도운영기관 중심으로 전동차의 효율적인 유지관리를 위해 적용 가능한 신뢰성프로세스를 검토 및 개발하고, 전동차 안전운행에 매우 중요한 장치인 제동장치에 대하여 프로세스를 실제 사례에 적용하여 현재 유지관리 기준에 접목하여 합리적이고 실제적이며, 최적화된 유지관리 업무에 적용하는 방안을 연구하여 그 적용절차에 대해 결과를 제시하였다.

2. 신뢰성 프로세스 검토 및 적용

철도서비스는 공익성과 서비스성 및 안전성을 모두 고려해야 하는 특수한 분야이다. 철도차량의 경우 수만개의 부품과 반입시기에 따른 다른 제작사의 제품이 도입되고, 이러한 다양한 종류의 철도차량 부품을 유지관리에 있어 표준화하고 각각의 수명을 분석

하고 운영하는 것은 많은 노력이 필요하며, 전사적인 노력과 관리 및 운영이 필수적이다. 유지관리 프로세스를 재검토해보고, 체계적이고 과학적인 프로세스를 도입, 적용할 수 있다면, 현재보다 한 세대 발전되고 고품질의 서비스를 제공하여 안전운행 및 승객서비스성을 향상 시킬 수 있다. 철도운영기관의 유지관리 경험을 기반으로 해외에서 적용되고 있는 신뢰성 프로세스들을 검토하고 철도차량 유지관리에 즉시 적용할 수 있는 최적화된 프로세스를 다음과 같이 제시하였다.

2.1. RCM Process 검토

RCM과 관련된 각종 국제 기준들은 美 국방분야(MIL-STD-2173)의 RCM Process를 비롯하여 RCM II, 국제규격(IEC60300-3-11), 미국자동차공학회(SAE JA1012), RCM-Worksaver 등에서 RCM프로세스와 신뢰성을 결정하는 절차를 제안하고 있다[3-7].

미 군수장비나 항공에서 적용하던 것을 산업체에 적용하기 위하여 실무적으로 접근된 절차로 RCM II를 많이 활용하고 있으며, 국내에서는 RCM을 전체시스템에 적용하는 것이 아니라 안전성에 치명적인 시스템만을 적용하는 SRCM(Streamlined RCM) 기준을 제시하기도 하였다[8,9].

본 연구에서는 각각의 프로세스를 검토하여 현재 시행하고 있는 철도차량 유지관리 업무에 가장 적합한 RCM Process를 개발하였고 이를 국내 철도차량 유지관리 업무에 적용하는 방안에 대하여 연구하였다.

2.2. RCM Process 적용

RCM Process는 Fig. 1과 같이 7단계로 정의하였으며, 1단계는 시스템을 선택하고 정보를 수집하는 단계이다. 2단계는 각 시스템의 경계를 정의하고, 3단계에서는 시스템 설명 및 기능블록도를 작성하고, 4단계에서는 시스템과 기능 고장을 정의하고, 5단계에서는 고장모드영향분석을 수행한다. 6단계에서는 결정논리를 분석하고 마지막 7단계에서는 유지보수 업무를 선정하는 단계이다. 또한, 유지관리 업무 적용을 통해 데이터를 수집하고, 피드백 활동을 지속적으로 수행하여야 하여야 한다.

3. 신뢰성분석 절차 적용

각 단계별 세부사항은 다음과 같다. 철도차량은 컴퓨터

터, 인버터, 제동장치 등 12개 시스템으로 구성되어 있으며, 8량 1개 편성 기준으로 1만여종에 약 60만개의 파트 부품으로 조립되어 있다. 또한 각 시스템간 기능들이 상호 연결되어 동작되며, 기계, 전기, 전자, 통신장치 등의 복합적인 시스템들로 구성되어 있어, 전동차를 기능적으로 분류하는 절차를 가장 먼저수행하여야 한다. 우선 RCM Process에 적용하기 위하여 전동차 안전장치이며 가장 중요한 장치중에 하나인 제동시스템을 선정하여 Fig. 1의 절차에 따라 분석하였다.

3.1. 적용단계

1단계 : 시스템 선택 및 정보수집

제동시스템과 관련된 모든 정보들을 수집하였다. 기존 전동차의 기술자료들은 약 20년전에 제작된 만컴 컴퓨터 파일이 아닌 텍스트 (책자) 형태의 자료들이 많았고, 자료의 유실이나 훼손 등으로 인하여 자료 수집에 한계가 있었다. 하지만 현장 전문가들의 인터뷰와 경험의 자원을 활용할 수 있었으며, 최근에는 전자매뉴얼 등 전산화가 되어 과거보다 효율적인 자료의 습득 및 관리가 용이 하였다.

2단계 : 시스템 경계 정의

다음은 분석하고자 하는 시스템들의 경계를 정의하는 단계이다. 수많은 부품들의 집합체인 전동차 시스템들중 제동기능을 수행하는 부품들의 선별을 위해 운전

실에서 제동을 취급하거나 완해하는 스위치부터 제어장치, 제동실린더까지 관련된 모든 부품을 대상으로 Table 1과 같이 전동차 부품 구성체계인 BOM (Bill of Material)을 기준으로 현장에서 교체하는 단위인 LRU (Line Replaceable Unit) 레벨에서 비상제동차단 스위치 등 49개 품목을 선정하였다.

3단계 : 시스템 설명 및 기능블록도 작성

전동차 제동시스템은 안전을 위해 모두 5가지의 제동기능을 가지고 있다. 상용제동, 비상제동, 보안제동, 주차제동, 정차제동으로 분류할 수 있으며, 열차가 정차시 컴퓨터에 의해 자동으로 체결되는 기능인 정차제동을 제외하고 4가지 제동시스템을 대상으로 기능블록도를 작성하였다.

4단계 : 시스템 기능 및 기능고장 정의

분석대상인 49개 아이템 각각의 기능과 기능고장을 정의하는 단계이며, 각 아이템의 기능 및 역할을 분석할 수 있는 중요한 단계이다. Table 2는 주차제동스위치 및 ATO(Automatic Train Operation)제동 계전기 부품의 예시이다.

5단계 : 고장모드 영향 및 치명도분석(FMECA)

FMECA(Failure Mode Effect and Criticality Analysis)는 제동 기능관련 부품의 고장모드, 원인 및 영향

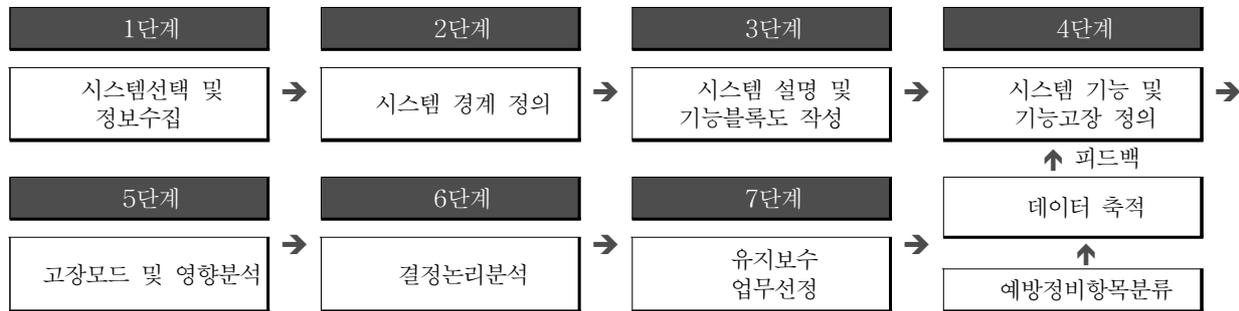


Fig. 1. Application of Reliability Process

Table 1. BOM Function Classification (Current Case)

구 분	LRU 부품	비고
전기장치 (열차제어)	- 비상제동차단스위치 등 조작 스위치 6종 - 정차제동차단스위치 등 텀블러 스위치 10종	16종
공기/제동장치	- EPL전공변환밸브 등 밸브류 14종 - EOD, 전공변환기 등 제어장치 15종	29종
대차장치	- BFC 블록브레이크 유니트 등 4종	4종

Table 2. Function and Failure Definition

번호	부품명	규격	기능	기능고장
1	주차제동 스위치 (녹색)	∅25, AC250V/6A, 2a2b, 녹색	주차제동 체결용 스위치로 취급시 주차제동 전자밸브를 동작 시킴	스위치에 의한 주차제동 체결 불가
2	ATO제동	5,6,7,8호선 전동차 RAX-L440, A형	자동운전시 ATO지시에 의해 제동지령신호를 송신,정차시 정차제동 지령송신	자동운행 중 제동력 요구시 제동지령 불가

Table 3. Severity criteria

구 분	등 급	C1	C2	C3	C4	C5	C6
		미미한	경미한	심각한	중대한	치명적인	재난발생가능
서비스 (Service)	서비스지연	서비스고장 <5 mins (5분미만)	>5 mins <10 mins (5분 이상~10분미만)	>10 mins <1 hours (10분 이상~1시간미만)	>1 hours <8 hours (1시간이상~8시간 미만)	>8 hours <1 day (8시간이상~1일 미만)	>1 day (1일 이상)
안전성 (Safety)	사 망	0	0	0	0	1	>2
	중 상	0	0	0	>1		
	경 상	0	0	>1			

Table 4. Reference frequency of occurrence

등 급		범 위	분석건수
F5	빈번한	More than 10 times per year (연간 10회 이상)	7
F4	가능성이 있는	Once to 10 times per year (연간 1회 ~ 10회)	32
F3	때때로	Once every 1 to 10 years (10년1회 ~ 1년1회)	44
F2	가능성이 희박한	Once every 10 to 100 years (100년1회 ~ 10년1회)	25
F1	가능성이 없는	Less than once every 100 years (100년 1회 이하)	245

(부품,시스템,차량)을 분석하는 단계로서 신뢰성분석 기법의 핵심단계이다. 26만건의 유지보수 데이터와 사내 전문가와의 인터뷰 등을 통해 분석하였다. 이 단계가 프로세스중 가장 전문성이 필요한 단계이었으며, 여러 가지 경험들을 토대로 기발생되었던 사례들과 잠재적으로 발생가능성이 있는 모드들을 도출하였다.

고장모드영향분석(FMEA : Failure Mode and Effect Analysis) 전동차량 제동장치의 경우 49개 아이템에 14개의 고장모드와 28개의 고장원인이 분석 되었다. 고장모드는 누기(89개), 동작불량(64개), 접촉불량(42건) 순으로 빈도가 높았으며, 또한, 고장원인은 이물질(45건), 풀림(44개), 충격(41개) 순으로 빈도가 높게 분석 되었다.

또한 각각의 고장모드가 열차운행에 미치는 영향의 정도를 치명도 분석(CA:Criticality Analysis)을 통해

분석하였다. 고장모드에 따른 심각도는 Table 3과 같이 발생빈도는 Table 4과 같이 정의하여 Table 5,6의 매트릭스에 따라 허용가능한 수준을 검토한다.

6단계 : 결정논리분석(LTA)

고장유형에 따라 기관사(유지보수자)의 인지여부, 안전관련 모드, 운행서비스 및 승객서비스에 영향을 미치는 모드인지를 분류하는 단계로서 Table 7와 같이 7단계로 LTA(Logic Tree Analysis)를 표준화하였다. 특히 LTA에서는 열차 안전과 열차운행 및 승객서비스에 미치는지 로직화 한 것으로 분석결과를 활용하여 유지관리 기준 마련시 유용하게 활용될 수 있다.

7단계 : 유지보수 업무선정

마지막 단계는 유지보수 업무를 선정하기 위한 단

Table 5. Risk matrix grading

발생빈도 \ 심각도		C1	C2	C3	C4	C5
		미미한 (Marginal)	심각한 (Serious)	중대한 (Critical)	치명적인 (Catastrophic)	재난 발생가능 (Disastrous)
F5	빈번한 (Frequent)	B	A	A	A	A
F4	가능성 있는 (Probable)	B	B	A	A	A
F3	때때로 (Occasional)	C	B	B	A	A
F2	가능성 희박한 (Remote)	C	C	B	B	A
F1	가능성 없는 (Improbable)	C	C	C	B	A

Table 6. Risk matrix and ALARP

등급	매트릭스 정의	조치행위	비고
A	수용불가능한 (Unacceptable)	허용할 수 없는 위험원이며 반드시 제거되어야 함.	
B	허용가능한 (Tolerable)	적절한 통제 및 동의를 수용 할 수 있음.	ALARP
C	수용가능한 (Broadly Acceptable)	어떠한 동의 없이 수용할 수 있음.	

Table 7. LTA(Logic Tree Analysis) Result

기호	설 명	비고
A	안전성에 영향을 미치는 문제	
B	자력 운행이 불가능한 경우	
C	운행이 불가능한 경우 (서비스 측면)	
D	응급조치후 운행 가능한 경우 (출력저하 등)	
E	고객 서비스(운용자 애로) 상의 문제	
F	경미한 문제	
G	운용자(기관사)가 정상적인 운영조건하에서 인지할 수 없는 고장상태	

계로서 FMECA(Failure Mode and Effect Analysis)를 통하여 얻어진 고장모드를 유지관리에 가장 적합한 정비업무를 선정하는 단계이며, RCM 결정로직과 공사의 유지보수 기준을 참조하여 유지보수 업무 선정 로직을 Fig. 2와 같이 표준화하였다.

업무선정 로직 절차에 따라 제동시스템을 분석한 결과 49개 LRU(Line Replaceable Unit)부품 레벨에서는 사용시간에 따라 신뢰성을 결정하는 TD(Time Directed)는 없었으며 모두 점검에 의해 상태에 따라 신뢰

성을 결정하는 CD(Condition Directed) 대상이 많았다. 상태점검은 외관(육안)점검이 166개, 기능점검이 218개, 측정점검이 1개로 분석되었다.

3.2. 유지보수 적용 사례

교체주기가 정해져 있는 대상은 Fig. 2와 같이 TD 대상업무로 분류하여 구체화(교환주기 명확화)하고, 검사 주기에 따라 검사하는 상태기반 CD 대상 업무를 구체화하기 위하여 외관(육안)점검, 기능점검, 측정점검, 분

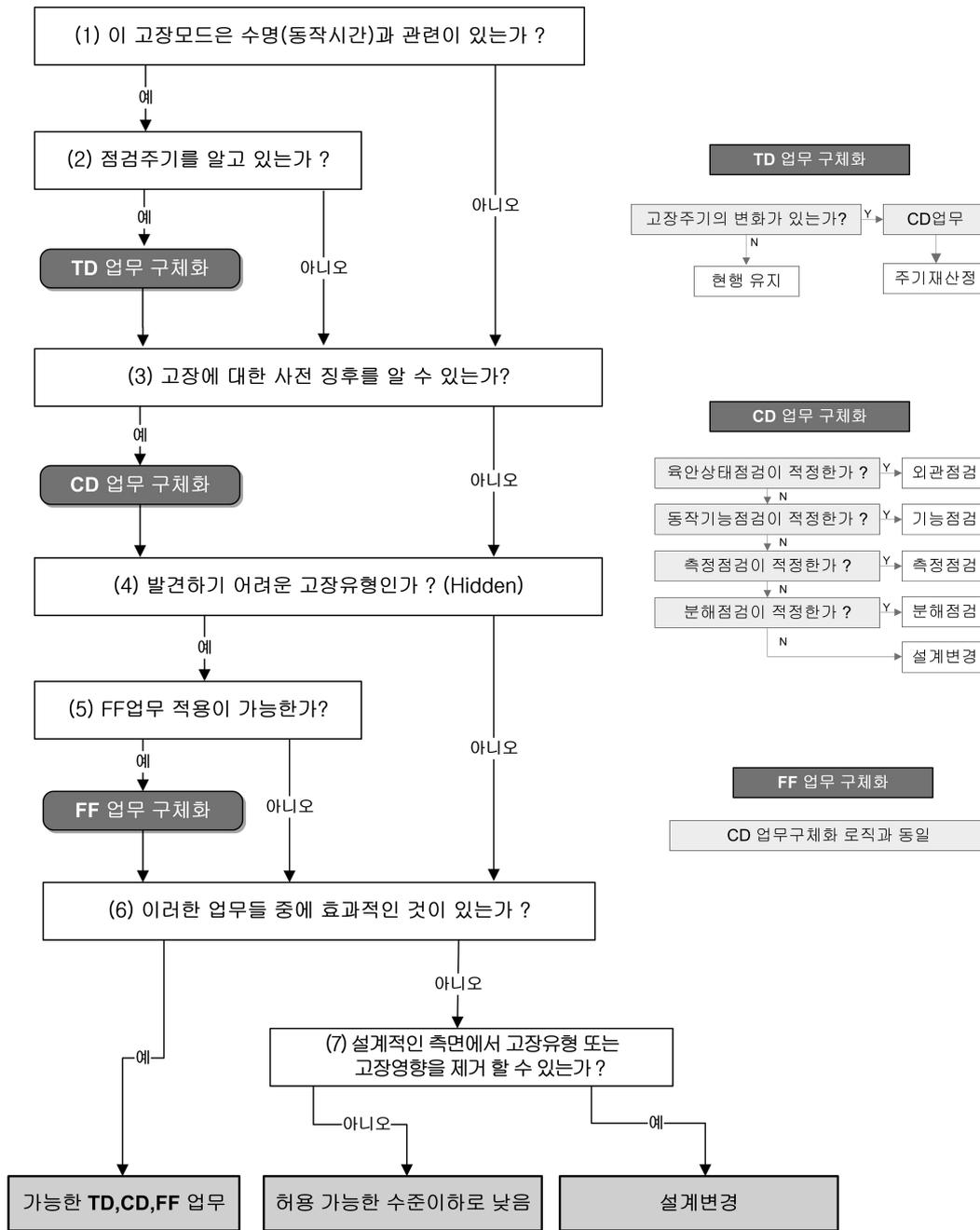


Fig. 2. Procedures for Business Selection

해점검으로 세분화하였다.

이렇게 분류된 대상업무는 철도차량의 유지관리지침인 전동차검사 기준[10]에 따라 매칭작업을 하여 현재의 업무가 FMEA를 통해 분석된 고장모드를 발견하는 유지관리 대상업무와 적정한지를 비교 평가하였다.

또한 주기적으로 현장에서 수집되는 고장 데이터들을 분석하여 유지관리의 적성성과 피드백 활동을 통해 최적화된 유지관리 업무를 수행 하도록 하였다. 본

연구를 통해 불필요한 점검을 줄이고 안전 및 열차 운행에 미치는 영향이 큰 개소를 선택하고 집중할 수 있는 업무체계가 확보될 수 있었다.

4. 결론

철도차량에 신뢰성관리 절차인 RCM(Reliability Centered Maintenance)를 적용하기 위해 각 단계별 분석

을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫 번째로 주기교환(Time Directed) 품목을 늘려야 한다는 것이다. FMECA를 통한 현재의 유지관리기준은 적절한 것으로 보였으나, 상당수의 부품이 일정주기에 도달하면 시행하는 검사를 기본으로 하고 있었다. 하지만 이러한 분석을 통해 안전 및 운행에 밀접한 부품과 시간과 관련된 부품은 수명분석을 통해 정해진 주기에 교환해야 한다는 것이었다. 두 번째로는 지속 가능한 조직과 전산시스템 활용이다. RCM 프로세스에 따라 신뢰성을 분석하는 것은 전문화된 지식과 경험이 필요하였으며, 방대한 자료가 생성되었다. 따라서 이를 전산화하여 주요장치에 대하여 확대하고 체계적인 분석의 연속성과 분석결과의 모니터링, 심층분석, 정비업무에 반영 등의 피드백 업무를 체계적으로 수행할 수 있는 인프라로서 시스템이 갖추어져야만 한다. 이 작업은 현실적으로 수기작업으로는 비효율적이기 때문이다. 세 번째로는 각종 데이터의 신뢰성 확보를 위해 부품의 이력관리가 필요하다는 것이다.

또한, 수선후 재 사용되는 부품이 다수를 차지하고 있어, 수선후 재 사용되는 부품은 신품과 같은 품질을 요구할 수 없으므로 수리품질을 향상시킬 수 있는 방안과 습성부품 파악 및 정확한 수명예측을 위해서는 부품 이력관리를 통해 사용수명주기(부품 취득, 사용, 수선, 폐기)까지의 관리가 시행되어야만 한다.

효율적이고 체계적인 전동차 신뢰성 업무수행을 위해 철도 운영기관 중심의 적합한 신뢰성 프로세스를 개발하여 현 유지보수 체계에 접목하고, 기 수행중인 유지관리 체계를 신뢰성 중심의 유지관리 체계로 변화시키는 작업을 우선적으로 시행할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 서울과학기술대학교의 교내연구비 지원으로 연구되었습니다.

Reference

1. KS C IEC 62278, Railway applications - Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety(RAMS), Korea Standards Association, 2004
2. Railway Safety Law, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2013

3. Moubray, J., Reliability Centered Maintenance [RCM II], Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 198-201, 1997
4. KS A IEC 60300-3-11 Dependability management-Part 3 11, Application guide Reliability centred maintenance, Korea Standards Association, pp. 4-17, 2004
5. MIL-STD-2173, Reliability Centered Maintenance, Department of Defense, pp. 15-22, 1986
6. SAE JA1012, A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard, The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space, pp. 48, 2002
7. Anthony M. Smith, RCM Gateway to World Class Maintenance, Daega, pp. 269-273, 2004
8. S. K. Sin, A Study on the development of SRCM for the railway system application, Ph.D, Kwang-woon University, 2006
9. Y. H. Yu . “A Study on Reliability Centered Rolling Stock Maintenance Methods”, Journal of the Korean Society for Railway Vol.16, No.3, pp. 183-188 , 2013
10. Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation, Rolling stocks maintenance guidelines , Article 5 & 9, Chapter 2, Revision 2012.6.20