한국철도학회논문집
제9권 제6호 2006년 | pp. 739-745

철도시스템 RCM 적용을 위한 신뢰성 및 안전성 분석 활동에 관한 연구

A Study on the Analysis of the Reliability and the Safety to apply RCM to Railway System

신석균† · 김수명* · 이덕규** · 이경학*** · 이기서****
Seok-Kyun Shin · Soo-Myung Kim · Duk-Gyu Lee · Kyoung-Hak Lee · Key-Seo Lee

Abstract

The role of maintenance in railway is going to be extended to improve the reliability of railway system in the aspect of Asset management gradually. In this paper, the meaning of reliability and safety in RCM which has been applied in order to improve the efficiency of maintenance is deduced. And the analysis task of reliability and safety which has been recommended in railway standards such as EN50126 and IEC62278 is reviewed in the aspect of RCM. Finally, the several ways are proposed to apply RCM to railway system through the comparison between the RCM procedure and the analysis procedure for the reliability and safety in railway standards. Hereafter, if the analysis of reliability and safety is performed with the concept of RCM in the beginning of railway business, it will be more efficient to improve the reliability and manage the railway asset.

Keywords : RCM(신뢰성기반 유지보수), Reliability(신뢰성), Safety(가용성), Preventive Maintenance(예방정비), FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis: 고장 유형 및 영향에 따른 치명도 분석), FRACAS(Failure Reporting & Corrective Action System : 고장 및 개선 조치), LBS(Logistic Breakdown Structure), PHA (Preliminary Hazard Analysis), FTA(Fault Tree Analysis), HAZOP(Hazard Analysis & Operability), RBD(Reliability Block Diagram)

1. 서 론

현재까지 철도시스템은 다양한 첨단기술을 바탕으로 시스템 고유의 신뢰성 확보를 위한 연구개발의 흐름으로 진행되어왔다. 그러나 철도시스템과 같이 기능고장으로 인해 대형사고를 초래하는 시스템의 경우, 시스템 전반에 걸친 안전성 확보가 연구의 중심이 되었으며, 정량화된 신뢰성을 보유한 부품이나 시스템 구조에 대한 연구개발로는 운영 및 유지보수와 관련한 신뢰성 향상에 한계가 드러나게 되었다[2]. 신뢰성 향상에 대한 정의는 시스템 고유 신뢰성 이외에, 적합한 운영이나 수정조치를 통해 시스템에 요구되는 수명만큼 고장 발생을 감소하는 의미를 포함한다[5]. 상기 신뢰성 향상의 개념에 부합하기 위하여, 철도시스템을 포함한 원자력 분야나 항공기와 같은 인프라 산업에서의 신뢰성 분석 개념이 설계 측면에서 유지보수 측면으로 변화되고 있다. 이러한 유지보수 측면의 신뢰성 분석 개념을 도입한 방법이 신뢰성 기반의 유지보수(RCM : Reliability Centered Maintenance)이다[그림 2. 참조]. 또한 유지보수 개념의 변화와 더불어, 철도와 같은 국가인프라사업의 정책분야에 시스템의 운영 측면을 고려한 자산 관리체계(Asset Management)의 개념 반영이 확대되고 있다.

현재 국내에서는 지방자치단체를 중심으로 경량전철사업이 활발히 진행 중이며, 각 운영기관이 자산관리를 위해 기존 서비스의 수익이외에 관심을 가져야 될 부분은 유지보수 업무에 대한 효율적인 관리이다. 그림 1은 철도와 같은 국가인프라사업에 적용되는 자산관리체계에서 유지보수의 접근방법, 그리고 유지보수 내의 RCM 중요성을 나타낸다[2].

† 책임저자 : 회원, 광운대학교, 정보제어공학과 박사과정
E-mail : xelmo@daum.net
TEL : (02)940-5154 FAX : (02)943-2382
* 회원, 도시철도공사, 정비지원팀장
** 회원, 도시철도공사, 기지사업팀장
*** 비회원, 광운대학교 전자통신공학과 박사과정
**** 회원, 광운대학교 정보제어공학과 정교수

본 논문에서는 RCM 개념의 검토를 통해, 철도시스템에서 요구하는 신뢰성 및 안전성의 중요성을 도출하고자 한다. 또한 RCM 분석절차와 EN50126 및 IEC62278에서 권고하는 신뢰성 및 안전성 분석 활동 절차를 비교하고 상관관계를 연구함으로써, 향후 철도시스템의 효율적인 RCM 도입 시 적합한 활동절차 및 방안을 제시하고자 한다.

2. RCM 소개 및 절차

2.1 RCM 배경

최근 산업시스템은 장치의 요소기술발전에 따라 유지보수에 대한 개념 또한 그림 2와 같이 제 3세대에 거쳐 변화되고 있다[5].

1세대에서 군수 분야를 중심으로 발전된 유지보수의 개념은 단순한 사후정비의 개념에서 출발하였다. 2세대로 진화하면서 정기적인 분해검사(Overhaul)를 통한 유지보수의 개념이 도입되기 시작하였으나 분해검사 후 초기 고장률이 급증하면서, 고장발생을 최소화하기 위해 RCM이라는 개념이 최초로 수립되었다. 초기 RCM은 항공 산업에서 시스템의 수명을 연장하고 가용성 향상 및 시스템 비용 절감을 위한 개념에서 출발하였다. 제 3세대로 분류되는 1980년대부터는 발전된

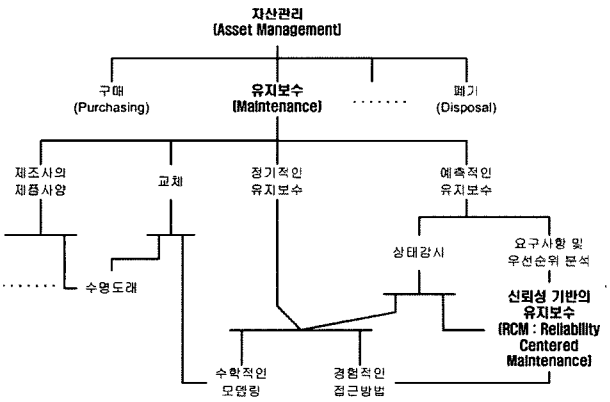

그림 1. 자산관리체계에서의 유지보수 역할

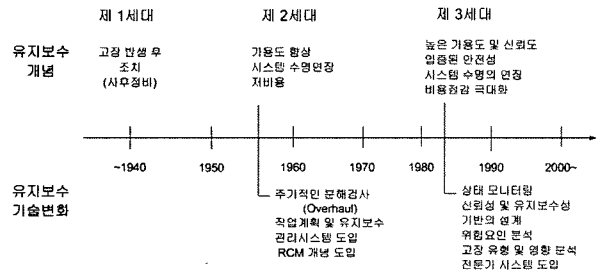

그림 2. 유지보수개념 및 기술의 변화

컴퓨터 성능을 기반으로 시스템에 대한 신뢰성, 유지보수성 및 안전성을 고려한 설계가 일반화 되면서, RCM이 본격적으로 일반 산업에 적용되게 되었다.

2.2 RCM 일반 절차

2.2.1 RCM 적용을 위한 기본질문사항

RCM의 적용 시 고려해야할 기본적인 질문사항은 표 1과 같다[5,6]. 본 질문사항들은 시스템의 요구사항 및 기능, 그리고 인터페이스를 정의하고, 해당 시스템이 기능상 고장을 발생할 수 있는 경로 등을 규명하기 위해 사용된다.

2.2.2 RCM 적용 절차

RCM의 적용은 순환식 구조로 그림 3과 같이 진행된다. 단계별로 수행되는 업무를 통해 도출된 결과를 바탕으로 예방정비에 대한 주기 및 정책이 지속적으로 개선되어야 함을 알 수 있다.

2.2.3 RCM 분석 절차

그림 3에서 소개된 RCM 적용을 위해, 수행되어야하는 분석절차는 시스템 수명주기에 따라 그림 4와 같이 정의된다[9].

표 1. 기본 질문사항

분류 번호	질문내용	정의
1	시스템의 기능과 관련한 성능기준은 무엇인가?	기능 및 성능 기준
2	해당 기능이 어떻게 고장 나는가?	기능고장
3	고장의 원인은 무엇인가?	고장유형
4	고장발생으로 초래되는 사항은 무엇인가?	고장영향
5	고장이 발생시키는 문제는 무엇인가?	고장결과
6	고장을 예측하고 예방하기 위한 방법은 무엇인가?	사전작업 및 작업주기
7	사전작업이 적절하지 않을 때의 방안은 무엇인가?	기본조치

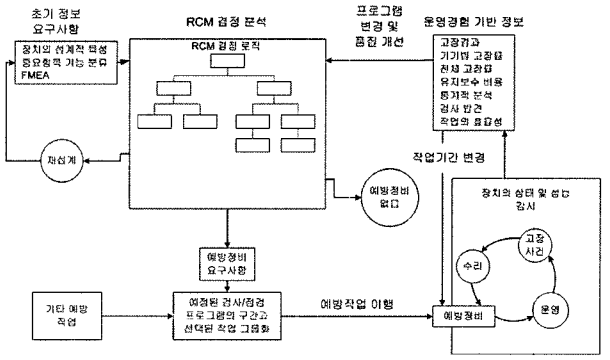

그림 3. RCM 적용절차

RCM 분석에 대한 전체 프로세스는 유지보수업무와 관련된 조직에서 수행하며, 신뢰성 데이터 및 고장 분석 업무는 시스템 전문가와 협의하여 수행된다.

2.3 RCM에서의 신뢰성, 안전성 역할

과거의 예방정비 업무는 경험에 의해 결정된 정비주기에 따라 예방정비가 수행되었다. 그러나 RCM측면의 예방정비 업무에서는 해당 정비주기의 결정이 시스템의 안전관련 기능실패의 치명도와 정확한 동작을 보장하는 신뢰도의 분석이 필수적이므로, 운영조건에 대한 고려가 반드시 수행되어야 한다.

따라서 그림 5의 RCM 기본 개념처럼, RCM의 핵심인 예방정비주기의 선정은 해당 시스템의 치명도 및 심각도와 관련한 안전성, 그리고 사고 발생확률과 관련한 신뢰성 분석을 통해 수립되어야 한다.

3.철도시스템의 신뢰성 및 안전성 분석 활동

3.1 철도시스템의 신뢰성 및 안전성 개념

1990년대 중반부터 유럽을 중심으로 철도분야에 대한 안전성 및 신뢰성과 관련한 표준이 제정되었으며, 이후 국제전기기술위원회(IEC)의 규정으로 확대되었다. 그림 6은 EN50126 및 IEC62278에서 정의하는 신뢰성, 가용성, 유지보수성 그리고 안전성에 대한 연관성을 나타내며, 그림 7은 14단계로 분류된 시스템 수명주기를 나타낸다[4,8].

그림 4. RCM 분석 절차

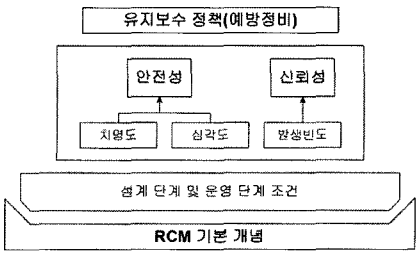

그림 5. RCM에서의 신뢰성 및 안전성 개념

3.2 안전성 분석에서 사용되는 FMECA

철도시스템에 대한 안전성 분석 활동은 그림 7처럼 14단계의 시스템 수명주기에 따라 수행[4,8]되지만, 본 논문에서는 RCM 업무와의 연관성을 고려하여 그림 8과 같이 정리한다.

안전성 분석 활동은 철도시스템 사업 초기에 제시되는 정량적인 안전성 목표를 만족하기 위해, 시스템 수명주기에 따라 발생 가능한 위험요인을 규명하고 정량적으로 분석한다.

분석된 위험요인들은 안전성 입증시험을 통해 최종적으로 안전성 목표와의 부합성을 검증한다. 안전성 분석과정에서

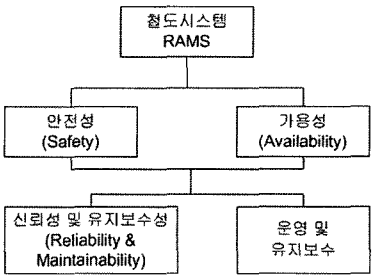

그림 6. 철도시스템의 신뢰성 및 안전성

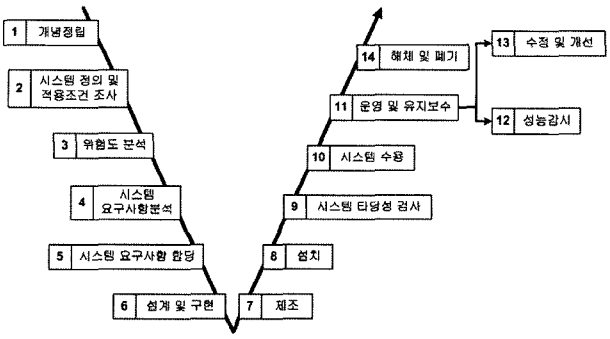

그림 7. EN50126에서 권고하는 시스템 수명 주기(14단계)

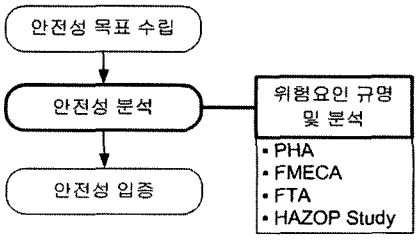

그림 8. 안전성 분석 절차

표 2. FMECA 양식

일련번호	대상항목	기능	고장유형 및 원인	고장영향		심각도	발생빈도	치명도(위험도)	고장검출방법	완화조치방법
				해당항목	상위항목					

심각도(Severity) : Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ [표 3참조]
발생빈도(Frequency) : A, B, C, D, E, F [표 4참조]
치명도 : 심각도 × 발생빈도 × 검출률
위험도(Risk) = 심각도 × 발생빈도 : I, U, T, N [표 5참조]

적용되는 방법론은 매우 다양하지만, 시스템 및 하부시스템에 대한 위험요인 규명 및 분석을 보다 용이하게 수행하는 방법이 FMECA이다.

FMECA는 고장모드를 중심으로 시스템의 위험요인을 분석하여 치명도의 정량적 할당이 가능하다. 표 2는 Mil-std-1629A에서 권고하는 FMECA 양식을 나타낸다[7].

표 3, 4, 5는 EN50126 및 IEC62278에서 권고하는 심각도, 발생빈도 및 위험도에 대한 정의이다.

표 2에서처럼 Mil-std-1629A에서 권고하는 FMECA양식은 분석대상에 따라 변경이 가능하며 신뢰성분석과 병행하여 치명도에 대한 계산을 RPN(Risk Priority Number)이라는 개념을 도입하여 1부터 1000사이의 수치로 정량화 한다.

RPN과 정량적인 접근법에 대한 기본 수식은 식 (1),(2)와 같다.

■ RPN

$$RPN = Severity \times Frequency \times Detection \quad (1)$$

■ 정량적인 접근방법

$$C_m = \beta \alpha \lambda_p t \quad (2)$$

β : 고장영향확률
α : 고장모드 비율
λ_p : 해당 부품 또는 시스템 고장율 예측값
t : 시간

정량적인 접근방법에서, β값은 분석자의 주관에 따라 그 값의 편차가 크기 때문에 적용하는 데에 어려움이 있다.

따라서 철도시스템에서는 안전성에 대한 정량적인 분석을 위해, 표 3, 4, 5에서 제시한 심각도, 발생빈도, 그리고 위험도를 기준으로 FMECA를 수행한다.

3.3 신뢰성 분석 활동

그림 7과 같이 14단계 시스템 수명주기에 따라 철도시스템에 대한 신뢰성 분석 활동이 수행되지만[4,8], RCM 업무와의 연관 관계를 고려하여 본 논문에서는 그림 9와 같이 정리한다.

신뢰성 분석 활동은 철도시스템 사업 초기에 제시되는 신뢰성 목표를 만족하기 위해, 설계 및 제작 단계에서 신뢰성 예측을 수행하며 최초 정의된 신뢰성 목표와의 부합성을 검증하기 위해 신뢰성 입증 시험을 수행한다.

3.3.1 신뢰성 예측

신뢰성 예측은 해당시스템의 구성을 신뢰성 블록 다이어그

표 3. 심각도(Severity) 수준 정의

심각도 수준	분류	사람이나 환경에 미치는 결과
치명적인 위험요인	Ⅰ	환경 재해 혹은 다중의 심각한 손상 혹은 중대한 손상
중대한 위험요인	Ⅱ	국지적 환경 재해 혹은 심각한 손상 혹은 중대한 손상
중대하지 않은 위험요인	Ⅲ	환경의 경미한 손상 혹은 심각한 위험
사소한 위험요인	Ⅳ	일어날 가능성이 적은 경미한 손상

표 4. 발생 빈도(Frequency) 수준 정의

발생빈도수준	분류	고장 발생 빈도 정의
빈번한 발생	A	수차례 발생 가능(일 기준)
가능성 있는 발생	B	수차례 발생 가능(월 기준)
종종 발생	C	수차례 발생 가능(연 기준)
발생가능성이 미약	D	수차례 발생 가능(시스템 수명 주기)
발생가능성이 거의 없음	E	거의 발생하지 않음
발생가능성이 존재할 수 없음	F	발생하지 않음

표 5. 위험도(Risk) 수준 정의

		심각도 수준			
		치명적인 위험요인	중대한 위험요인	중대하지 않은 위험요인	사소한 위험요인
발생빈도 수준	빈번한 발생	I	I	I	T
	가능성 있는 발생	I	U	U	T
	종종 발생	I	U	T	N
	발생가능성이 미약	U	T	N	N
	발생가능성이 거의 없음	U	T	N	N
	발생가능성이 존재할 수 없음	T	N	N	N

I : 허용불가능, U : 원하지 않음, T : 허용가능, N : 무시해도 좋음

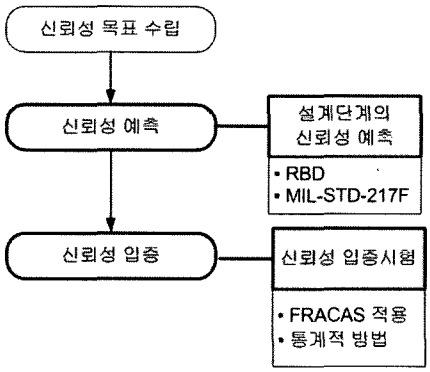

그림 9. 신뢰성 분석 절차

램으로 재 정의하고, 장치 제작사나 미국방부에서 규정하는 고장율에 따라 시스템에 대한 신뢰도를 산출한다.

일반적으로 신뢰성 예측에 있어서 고장율의 정의를 지수함수 형태로 식 (3)과 같이 가정하면, 신뢰성 블록 다이어그램에서 도출되는 직병렬 구성에 따른 고장률 산출 기본 수식은 식 (4),(5)와 같다[3].

■ 지수 분포에 따른 신뢰도 함수

$$R(t)=e^{-\lambda t} \tag{3}$$

λ: 고장율

t: 시간

■ 직렬 구성에 따른 고장율 산출

$$\lambda_S=\lambda_1+\lambda_2+\ldots+\lambda_n \tag{4}$$

n: 직렬 구성 개수

■ 병렬 구성에 따른 고장율 산출

$$\lambda_{\frac{(n-q)}{n}}=\frac{\lambda}{\sum_{i=n-q}^{n}\frac{1}{i}} \tag{5}$$

n: 병렬 구성 개수

q: 병렬 구성에서 가동 중인 총 항목의 개수

3.3.2 신뢰성 입증

철도 시스템 사업 초기에 정의된 신뢰성 목표와의 부합성을 검증하기 위해, 시운전 및 운영 단계에서 신뢰성 입증시험을 아래와 같은 절차로 수행한다.

■ 시험 대상 및 기간 정의

■ 시험 조건의 가정

■ FRACAS를 통한 고장데이터 수집

■ 통계적 방법을 통한 신뢰성 입증

신뢰성 입증시험 기간 동안 수집된 고장데이터를 근거로 통계적 방법을 통한 신뢰성 입증이 수행되며, 일반적으로 적용되는 통계적인 방법은 Weibull, Chi-Square이다[1].

■ Weibull 분포

Weibull 분포는 수집된 고장데이터를 근거로 해당 장치나 시스템의 수명을 구하기 위해 사용된다. 고장 데이터의 분포를 분석하여, 관련된 모수를 산출한다. 기본 수식은 (6),(7)과 같다.

$$R(t)=\exp\left[-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^{\beta}\right] \tag{6}$$

$R(t)$: 신뢰도 함수

β : 형상모수(Shape Parameter)

η : 척도모수(Scale Parameter)

δ : 위치모수(Location Parameter)

식 (6)에서 산출된 모수를 근거로 식 (7)와 같이 평균고장시간(MTTF :Mean Time To Fail)을 산출한다.

$$MTTF=\delta+\eta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{7}$$

Γ: 감마함수(Gamma)

■ Chi-Square 분포(단측신뢰구간, 정시중단 시험)

Chi-Square는 최초 정의된 신뢰도 목표와 요구조건이 고장데이터 분석을 통해 산출된 평균 고장 시간과의 부합유무를 검증하는 방법이다. 기본 수식은 식(8)과 같다.

$$\hat{\theta}\geq\frac{2T}{\chi^2(\alpha,2r+2)} \tag{8}$$

$\hat{\theta}$: 평균수명

T : 총 시험 시간

(T = n*h, n: 시료 수, h = 시험 시간)

α : 유의수준(신뢰수준=100*(1- α))

r : 고장 개수

4. 철도시스템 RCM 적용을 위한 신뢰성 및 안전성 활동 방안

IEC62278에서는 그림 7에서 제시한 철도시스템 수명주기 중 4단계에 해당하는 시스템 요구사항 분석단계에서 RCM을 고려하여 신뢰성 및 안전성 분석활동을 수행하도록 권고하고 있다[8]. 그러나 일반적인 RCM에서는 유지보수업무의 효율성, 즉 유지보수절차를 강조하여 수행되기 때문에, 본 논문 2장에서 언급된 RCM 업무절차와 3장에서 소개된 철도시스템 신뢰성 및 안전성 분석업무 절차사이에는 단계별 업무 차이가 존재한다.

이러한 단계별 업무차이에도 불구하고, 철도시스템에 대한

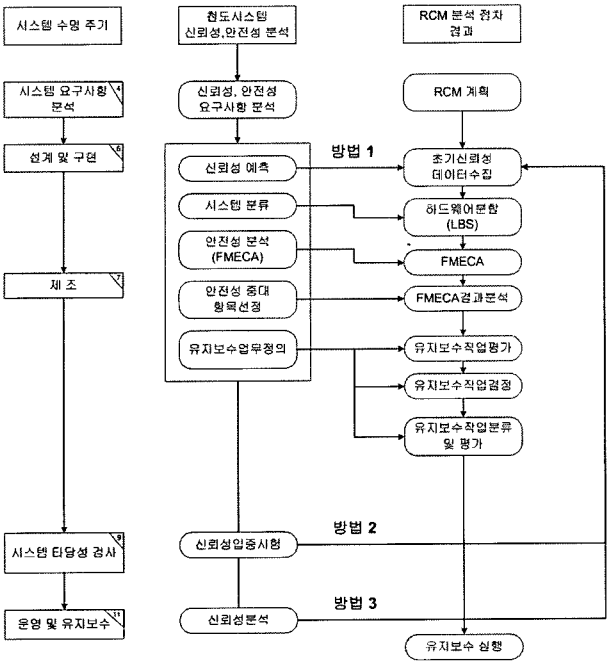

그림 10. 통합 절차

신뢰성 및 안전성의 중요성을 고려한다면 두 절차간의 교류업무(tradeoff)는 불가피하다. 따라서 철도시스템 RCM 도입을 위해, 신뢰성 및 안전성에 대한 기본 개념을 공유하여 통합된 절차를 마련한다면, 기존 일반 산업체에서 적용된 RCM을 개선시킬 수 있다. 본 논문에서 제시하는 통합된 절차 방안은 그림 10과 같다.

이는 철도시스템 신뢰성 및 안전성 분석 활동을 기준으로 3.2에서 언급된 FMECA를 통해 해당 시스템에 대한 고장 특성을 규명하고, 안전성에 치명적인 장치나 시스템을 도출한다. 또한 3.3에서 언급된 신뢰성 예측 및 입증 방법을 통해, 다음과 같이 3가지 방법으로 RCM의 적용이 가능하다.

- 방법 1 : 신뢰성 예측 데이터를 RCM 신뢰성 데이터로 사용.
- 방법 2 : 신뢰성 입증 데이터를 RCM 신뢰성 데이터로 사용
- 방법 3 : 운영을 통해 도출된 신뢰성 데이터를 RCM 신뢰성 데이터로 사용

상기 제시되는 3가지 방법을 기반으로, RCM을 도입하고자하는 철도시스템의 특성에 따라 다음과 같이 적용이 가능하다.

4.1 기존 철도 시스템에 RCM 도입

기존에 운행되는 철도시스템의 경우는 신뢰성 및 안전성 분석이 수행되지 않았다. 따라서 RCM 도입과 관련한 사업 추진비용을 고려한다면, 기존 철도시스템에 대한 신뢰성 및 안전성 분석을 RCM과 병행하여 추진하는 것보다는 RCM 분석 측면만을 고려하여 수행하는 것이 효과적이다. RCM 도입 가능한 방안은 표 6과 같다.

표 6. 기존철도시스템에 RCM 도입 시 적용방안

방안	철도시스템 신뢰성 및 안전성 분석	RCM 분석	방법1	방법2	방법3	운영데이터 (신뢰성) 유무
1	×	×	○	×	×	×
2	×	×	×	×	×	×
3	×	×	○	×	○	○

RCM 적용 효율성 : 방안 3>방안 2>방안 1

표 7. RCM을 고려하지 않은 철도시스템 구축 시 적용방안

방안	철도시스템 신뢰성 및 안전성 분석	RCM 분석	방법1	방법2	방법3	운영데이터 (신뢰성) 유무
1	○	×	○	○	×	×
2	○	×	○	○	○	○

RCM 적용 효율성 : 방안 2>방안 1

표 8. RCM을 고려한 철도시스템 구축 시 적용방안

방안	철도시스템 신뢰성 및 안전성 분석	RCM 분석	방법1	방법2	방법3	운영데이터 (신뢰성) 유무
1	○	○	○	○	×	×
2	○	○	○	○	○	○

RCM 적용 효율성 : 방안 2>방안 1

4.2 RCM을 고려하지 않은 철도시스템 구축

철도시스템에 대한 신뢰성 및 안전성 분석이 진행 중이거나 완료된 경우는 신뢰성 및 안전성 분석결과와 RCM분석 절차를 병행하여 수행이 가능하다. RCM 도입 가능한 방안은 표 7과 같다.

4.3 RCM을 고려한 철도시스템 구축

철도시스템 사업 초기에 이미 RCM 도입을 고려한 경우, 그림 10에서 정의한 통합된 절차를 통해 신뢰성 및 안전성 분석 결과를 반영한 RCM구축이 가능하다. 안전성 분석 및 신뢰성 예측 결과를 참조하여 예방정비의 최초 주기를 정의하고, 안전성 및 신뢰성 입증시험 결과와 운영 결과를 반영하여 가장 효율적인 RCM 적용이 가능하다. RCM 도입 가능한 방안은 표 8과 같다.

5. 결 론

본 논문에서는 철도시스템 RCM 도입을 위해, 철도 시스템에서 권고하는 신뢰성 및 안전성 분석활동과 일반적인 RCM 활동을 고려한 통합된 절차 및 방안에 대해 연구하였다. 철도시스템과 같은 인프라 사업에서의 유지보수업무에 대한 중요성을 자산관리체계 측면에서 소개하였고, 효율적인 유지보수 업무를 위한 RCM 개념 및 적용절차를 연구하였다.

본 연구를 통해 IEC62278에서 권고하는 RCM의 연계성을 도출할 수 있었고, 신뢰성 및 안전성이라는 공통적인 개념에 입각한 통합된 절차를 도출하였다. 또한 현재 국내 철도시스템에 대한 신뢰성 및 안전성 분석 활동의 실정을 고려하여 통합된 절차에 따른 방안들을 도출하였다.

향후 본 연구를 통해 도출된 방안을 근거로, 철도사업 추진 초기에 신뢰성 및 안전성 분석 활동을 RCM 도입과 병행하여 추진하고 현실적인 방안을 지속적으로 연구한다면, 국내 철도시스템에 대한 신뢰성 향상 및 자산관리에 상당한 효과가 발생할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. Barlow, R.E and Proschan,F (1975) "Statistical Theory of Reliability and Life Testing".
2. IEEE Committee Report (1993) "Impact of Maintenance Strategy on Reliability"
3. Reliability Analysis Center, RAC (1995) "Reliability Toolkit : Commercial Practices Edition"
4. CENELEC Standard (1997). "Railway Applications-The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability, Safety (RAMS)", pp.12-22, 25-58.
5. John Moubray (1997), "Reliability-Centered Maintenance, RCM II", pp.1-16.
6. SAE JA1011 (1999). "Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes", pp.8-15.
7. Mil-std-1629A(2000), "Procedures For Performing a Failure Mode, Effects, Criticality Analysis" pp.Task 101,102.
8. IEC Standard (2002). "Railway Applications-Specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability, Safety (RAMS)" pp.93-95.
9. NAVAIR 00-25-403 (2003), "Guidelines for the NAVAL AVIATION Reliability-Centered Maintenance Process"