

효과적인 PM 업무를 위한 RCM분석대상 시스템의 선정

The selection of RCM analysis system for efficient PM Tasks

김민호* 송기태** 백영구** 이기서*** 윤화현****
Kim, Min-ho Song, Kee-Tae Baek, Young-gu Lee, Key-Seo Yoon, Hwa-Hyun

ABSTRACT

Most operational organization and railway authority which conduct scheduled maintenance(SM) have carried out the preventive maintenance(PM) based on the information provided from supplier and manufacturer of railway system.

However these activities are far away from reality and low the efficiency, it is because an appropriate methods for system selection didn't take into account for improving maintenance efficiency. Therefore, the current SM tasks and maintenance activities lead to lots of spend on the cost and time. To solve the above problem, this thesis presents new approach methodology. This proposes the criteria for reliability centered maintenance(RCM) system selection through level of quantification of each parameter, i.e, frequency, severity and maintenance cost, etc. To do this, the field operation data and information of maintenance cost are essential.

As applying this methodology, we can look forward to improving efficiency of PM/SM, and reducing cost.

1. 서 론

최근 들어 유지보수에 대한 패러다임이 예전의 사후정비 차원에서 계획정비, 다시 예방정비 차원으로 변모해가는 모습을 볼 수가 있다. 이렇듯 점차 예방정비에 대한 관심이 커지는 것은 그만큼 예방정비에 대한 효율성이 크다고 볼 수 있다.

그 중에서도 요즘 사람들로부터 많은 관심을 받고 있는 것으로 RCM분석을 통한 예방정비업무가 있다. 그럼 여기서 먼저 RCM이란 무엇인가? 에 대해 짚고 넘어갈 필요가 있다. 간단하게 설명하자면 설비로 인한 큰 사고를 방지하기 위하여 작은 문제가 있을 때부터 조기에 경고하는 신뢰성 중심의 Maintenance solution이라고 볼 수가 있다.

RCM은 전체설비, Unit 단위의 설비 및 부품단위(예: 센서, 소자 등)로도 상태를 확인 할 수가 있으며, 잠재적인 문제를 사전에 인지 할 수 있다면 더욱 효과적으로 유지보수를 할 수 있으며, 뜻하지 않거나 계획되지 않은 설비의 정지 시간을 줄일 수 있게 된다. 또한 필요한 경우에만 정비를 하며, 불필요한 예방정비에 소요되는 시간과 비용의 소비를 줄일 수 있다. 따라서 비용 절감뿐만 아니라 설비의 가용도를 높일 수 있다.

* (주)마이크로트랙, RAMS 팀, 비회원

E-mail : sky007kmh@microtrack.co.kr

TEL : (02)2249-2382 FAX : (02)2249-2386

** (주)마이크로트랙, RAMS 팀

*** 광운대학교 정보제어 공학과, 교수

**** 서울특별시도시철도공사, 정비지원팀

이처럼 예방정비 차원에서 RCM분석은 여러 가지 차원에서 이점이 있었다. 하지만 기존의 RCM분석 과정에 있어서 시스템 선정에 대한 기준이 명확히 제시되어 있지 않다. 즉 시스템운영간의 단순한 고장발생 빈도와 복구되기까지의 소요비용, 운영정지 시간 등이 RCM선정시 우선적으로 고려하는 사항이었다. 기존의 방식은 이렇듯 빈도와 비용에 관하여서만 다루어왔었다. 이런 단순한 RCM선정 논리는 그 기능이 시스템에 미치는 치명도와 심각도를 생각해 보았을 때와 그로 인해 도출된 예방정비 업무가 실제 시스템에 적용 시 효율적이지 못한 점이 있다. 이에 본 연구에서는 좀 더 효과적이고, 실제현장에서 적용 타당한 예방정비 업무를 위하여 다음과 같은 세 가지 매개 변수를 활용하여, matrix(심각도, 고장발생빈도, 비용)측면에서 접근하여, 시스템 선정시 고려할 사항에 대하여 다음과 같은 방법론을 제시하려 한다.

2. RCM예방정비업무의 현장적용시의 문제점

그렇다면 지금까지 RCM분석을 통한 예방정비업무가 어떠한 이유에서 효율적이지 못하였던 것일까? 우선적으로 가져갈 원인으로는 계획정비 또는 시스템 전체에 대한 명확한 데이터가 제공되지 못하였기 때문이라고 볼 수 있다. 또한 다른 이유를 든다면 그것은 현업에서 얻어지는 고장정보가 명확하지 않다는 것을 들 수가 있다. 고장발생시 고장에 대한 데이터를 명시하거나, 또는 기록하게 되어있지만 상당부분에 대해서 제대로 명시되지 않거나, 기록되지 못하고 있는 실정이다. 그 이유로는 먼저 차량이나, 신호시스템, 또는 다른 시스템과 관련하여 정확하게 어떤 부분에 대한 고장인지를 알 수가 없다는 것이다. 어느 한 부분의 고장일지라도 다경로의 원인이 있을 수 있으므로 이에 대해서 명확히 원인을 밝힐 수가 없다. 이로 인하여 고장에 대한 직접적인 원인이 있음에도 불구하고, 다른 가시적인 원인에 대해서만 명시하게 되는 것이다. 이로 인하여 향후에 차량검수정보 시스템과 같은 유지보수 프로그램에 입력되어진 데이터도 마찬가지로 신뢰성 있는 데이터가 될 수 없었을 것이다. 또한 유지보수 프로그램의 입력 사항 중 실제 고장데이터와 맞지 않는 항목이 있을 수가 있다. 그런 상황이 발생할 경우에 입력할 사항에 대해서 구체적인 서술보다는 비슷한 고장 또는 원인 항목에 대해 기록하는 경우가 비일비재하다. 이와 같이 볼 때 고장발생시 또는 고장데이터 기록 중에 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 없으므로 이를 바탕으로 RCM분석과 더 나아가 예방정비 업무도 실제적인 효용가치가 떨어진다고 본다. 다음은 고장데이터 기록항목에 대한 예를 보여준다.

표 1. 서울도시철도공사 고장현황(06년)

NO	고장부품	고장유형	고장현상	고장위수	고장원인분류	고장원인	고장조치방법	검사종류	특기사항	장치3
1	인버터장치 - AIM(2차분)-GDU	인버터장치 불량	인버터상 고장	W상	재질불량	소자불량	교환	도착점검	-	GDU
2	인버터장치-A IM(2차분)-표 면온도센서	보조전원 장치불량	감지센서 불량	-	재질노후	오동작	재접속	도착점검	-	표면 온도센서
3	인버터장치- 절연접촉기 유닛	인버터장치 불량	투입불량	-	재질노후	오동작	청소	3일 검사	커넥터청소	-
4	인버터장치- 외부송풍기	인버터장치 불량	이음발생	-	재질불량	신규/기타	교환	도착점검	클램프필터 교환 후 이음사람짐	-

상기에서 보여지는 고장현황에 대한 기록방식에선 고장유형, 고장현상, 고장원인분류, 고장원인, 고장 조치방법 등에서의 분류항목이 명확하지가 않았다. 따라서 명확한 데이터를 얻기 위해선 제공사측의 정비업무 매뉴얼을 참고하여, 현업에서 검사 및 유지보수하시는 분들의 노하우(Know how)를 통하여 데이터에 대한 좀 더 명확한 분류가 있어야 할 것으로 판단된다. 명확하고 신뢰성 있는 데이터를 기반

으로 하였을 시 RCM분석을 위한 대상 시스템을 선정할 시에 좀 더 신뢰성 있는 시스템선정이 될 것으로 사료된다.

3. 매개변수의 Level을 통한 접근

3.1. 심각도에 따른 Level 분류

상기 절에 보여 지는 제공된 고장데이터와 현장에서 발생하는 고장데이터의 신뢰성부족으로 인해 RCM분석대상을 선정함에 있어서 부적합하다는 것을 알게 되었다. 본 절에서는 이와 같은 부적합한 시스템 선정 방법에 대해, 기준을 잡아 접근하려 한다. 시스템 선정에 있어서 비용적인 면과 고장이 발생하는 빈도수보다는 먼저 시스템에 미치는 영향 즉, 심각도에 대해서 먼저 고려하려 한다. 심각도에 대한 분류 기준은 EN50129 “철도응용 신호시스템을 위한 안전관리 전자시스템”의 SIL(안전도등급)에서 분류한 것을 참고하여 접근하려 한다. 다음 하단의 보여줄 것은 심각도에 대한 등급분류는 RCM분석대상 시스템선정 그래프에서 X좌표로 가져 갈 것이다.

표 2. 심각도 수준의 등급분류

가혹도	레벨 분류	사고 정의
치명적인 위험	10	사망
	9	시스템손실
중대한 위험	8	가혹한 상해, 가혹한 직업병
	7	중요 시스템에 대한 피해
중요하지 않은 위험	6	경상, 작은 직업병
	5	중요하지 않은 시스템의 피해
사소한 위험	4	보다 더 작은 경상, 직업병
	3	사소한 시스템의 피해
안전과 관계없음	2	운영상에 안전과 관계없는 것
	1	안전과 관계가 없는 장치 및 구성요소의 피해

위에 분류된 항목을 바탕으로 RCM분석 대상의 심각도를 레벨별로 분류 시킬 수가 있을 것이다. 다음의 매개변수로 가져갈 것은 고장빈도와 고장이 난 후의 복구 시까지 드는 비용에 대해서 고려 해보아야한다.

3.2. 고장빈도수에 따른 Level 분류

기존의 RCM분석 대상의 선정에 있어서도 고장빈도와 고장시간 등이 고려되었으며, 이에 따른 비용 또한 간과 할 수 없기에 정량화를 통하여 분석대상 시스템을 선정하려 한다. 다음 표는 도시철도공사의 2006년도 고장현황에 대하여 건별로 정리한 것이다.

표 3. 서울시철도공사 2006년 5호선 전동차 시스템별 고장현황

고장시스템	고장건수	비고
ATC 불량	243건	-
컴퓨터장치 불량	1914건	06년도 고장건수최다
차체, 설비장치 불량	627건	-
전기장치 불량	689건	-
출입문 불량	1085건	-
인버터장치 불량	782건	RCM Casestudy실시
외부요인	3건	-
연결기장치 불량	9건	-
승객안내장치 불량	1154건	-
보조전원장치 불량	57건	-

구동장치 불량	1814건	-
공기조화장치 불량	626건	-
공기/제동장치 불량	618건	-
고전압장치	197건	-

상기 표에서 따르면 2006년도 고장현황 중 고장발생건수는 컴퓨터장치(1914건)가 가장 많은 것으로 나타났다. 하지만 현업에서의 RCM분석은 인버터 장치가 철도차량에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 판단하여 RCM분석 Case Study를 실시하였다. 이는 객관적인 자료를 바탕으로 분석대상 시스템이 선정된 것이 아니라, 현업에 있는 유지보수 담당자들의 주관적인 생각에 의해 선정됐다고, 생각할 수가 있을 것이다. 따라서 분석대상시스템을 선정하기 위해서 고장건수(빈도수)에 대하여 다음과 같이 가져가기로 한다. 전체고장건수 중 가장 많은 고장 건수와 가장 적은 고장건수의 범위를 정하여, 이를 통해 각 시스템의 고장건수에 대하여 몇 가지의 등급으로 나누어 줄 수가 있다. 따라서 표로 나타낸다면 다음과 같은 데이터가 나올 것이다.

표 4. 레벨별 고장건수 분류
(2006년도 서울시철도공사)

레벨	고장건수범위
1	2000~1801
2	1800~1601
3	1600~1401
4	1400~1201
5	1200~1001
6	1000~801
7	800~601
8	600~401
9	400~201
10	200~1

표 5. 고장건수별 등급분류(2006년도 서울시철도공사 지하철 5호선)

레벨	고장건수	고장시스템	비고
10	1914건	컴퓨터장치 불량	고장발생건수 최다
10	1814건	구동장치 불량	-
5	1154건	승객안내장치 불량	-
5	1085건	출입문 불량	-
7	782건	인버터장치 고장	RCM Casestudy실시
7	689건	전기장치 불량	-
7	627건	차체, 설비장치 불량	-
7	626건	공기조화장치 불량	-
7	618건	공기/제동장치 불량	-
9	243건	ATC 불량	-
10	197건	고전압장치	-
10	57건	보조전원장치	-
10	9건	연결기장치 불량	-
10	3건	외부요인	-

위의 표4와 5에서 얻어진 고장건수별 Level분류는 RCM분석대상 시스템 선정 그래프에 있어서 Y좌표 값으로 가져가기로 한다. 여기서는 고장건수별 Level 분류는 단순고장에 의한 건별로만 나누는 것이다. 비용이나 심각도에 대해선 고려하지 않았다.

3.3. 비용에 따른 Level 분류

기존의 RCM분석대상선정에 있어서도 비용적인 측면에서의 접근이 중요하게 인식되어졌다. 그에 따라 비용적인 측면을 간과할 수 없기에 고장이 발생하는 시스템과 그 부품의 제공가격 및 그 고장 부품으로 인한 운영지연시간, 그리고 고장발생시 부터 복구시까지 지출되는 총비용을 산술적 계산을 통하여, Level별로 분류를 할 것이다. 이를 통하여 RCM분석대상시스템 선정에 있어, 기존의 단순한 데이터를 통한 비용비교, 또한 이를 통한 시스템선정의 오류를 지적하려 한다. 예를 들어 다음과 같은 상황이 있을 수가 있다. 고장을 거의 100% 예방하거나 혹은 고장발생시 가능한 한 빨리 수리하여 생산기준을 만족시킨다 해도 다른 기준에서 보면 비효율적인 부분이 있을 것이다. 장비가 고장 났을 때 가능한 한 빨리 수리하기 위해서는 유지보수인원을 많이 배치해야 한다. 고장은 우발적으로 발생하므로 유지보수인원은 최대수요에 맞추어 배치해야 할 필요가 있으나 최대수요기간이 아닐 때에는 자동적으로 과도한 노동력의 손실에 의해서 노무관리의 효율은 떨어질 것이다. 또한 완전 수리가 가능한 장비손실 계획 일정까지 그 장비가 만족스런 성능을 발휘하기 위해 어떤 임시조치를 해주어야 할 것이다. 이러한 임시조치는 일반적으로 위험도를 증가시켜서 그로 인해 안전기준을 저하시킬 것이다. 또한 잠정적인 임시수리를 시작할 수 있도록 교체부품의 재고를 초과 운영한다면 비용을 크게 증가시켜서 비용관리 면에서 볼 때 효율은 떨어진다. 이와 마찬가지로 만일 어느 한 기준을 최대로 만족시킨다 해도 나머지 기준에 대해서는 비효율적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 생각해 볼 수 있다.

최근까지는 효율을 높이기 위해 여러 기준들을 잘 절충하고 조화시켜서 어떤 결정을 내리기보다는 의사결정에 을 갖는 관리자의 경험이나 직관에 크게 좌우되었고 정성적인 균형기법정도가 사용되어왔을 뿐이다. 그러나 요즘 들어 “총비용”을 기준으로 사용하는 체계적인 접근방법은 관리자로 하여금 전통적인 여러 기준들을 잘 조화시킬 수 있도록 도와준다. 그러므로 관리자는 정확한 자료를 이용하여 계속적으로 문제를 검토 평가해야만 여러 기준에 따라 효율성을 높일 수 있을 것이다. 이와 같이하여 시스템에 고장이 나면 직접 및 간접경비가 발생된다. 설비의 한 부품이 고장 나면 곧바로 관련 부품의 고장원인이 되는 경우가 많아서 관련 부품의 고장 발생을 촉진시킨다. 이러한 고장파급효과를 측정하기란 어렵고 때로는 불가능하지만 이런 효과가 존재한다는 것은 사실이다. 이러한 고장의 파급효과는 수학적인 고장분석에서는 가끔 무시되기 때문에 그 결과 부품에 대한 이론적인 시스템고장률과 시스템이력 혹은 표본자료로부터 결정된 실제 고장률 사이에는 상당한 오차가 있다.

시스템의 다른 부품에 고장파급효과를 미치는 이외에도 생산체계의 고장은 가끔 가동 중에 있는 재료를 파손시키거나 고장의 특성에 따라서는 사람에게 위험을 초래한다. 또는 생산일정에 혼란이 일어나 다른 설비와 관련 인원의 효율을 떨어뜨려서 그 결과 운용비가 증가될 것이다. 이 이외에도, 고장이 나면 필수적으로 부품의 교체 혹은 수리를 해야 하고 만일 교체부품의 재고가 없다면 설비의 비가동시간이 길어져서 관련 설비에 미치는 영향까지 고려할 때 비용에 대한 역효과는 아주 클 것이다. 교체를 위한 총비용을 산출하기 위해서는 자원과 고장기간이 화폐단위로 환산되어야한다.

여기서 고장에 대한 비용을 산출할 시에 고장 난 시스템수리비용이 비용한도보다 적게 추정되면 최소 수리되고, 수리비용이 비용한도보다 많게 추정되면 고장 난 시스템은 새로운 시스템으로 교체된다, 최소 수리에는 고장 난 시스템을 작동상태로 복구하기 위해 필요한 작업만이 관여된다. 즉, 부품 또는 어셈블리 단위의 구입비용에 대한 자료를 세분화하는 데에는 현실적으로 한계가 있기 때문이다. 따라서 총수명주기비용은 획득비용과 운영 및 유지보수 비용 즉 기대비용 측면에서 생각해 보아야 할 것이다.

$$\text{총수명주기비용} = \text{획득비용} + \text{운영 및 유지보수 비용(기대비용)}$$

산출된 기대비용을 통하여, 실제 시스템에 도입하는데 있어서의 초기투자비용과 기대비용과의 비율을 고려하여, 비용면에서의 레벨분류를 해줄 수가 있다. 다음은 초기투자 비용과 기대비용과의 비율에 레벨 분류이다. 비용적인 측면에서 운영 중에 발생하는 고장과 그 고장을 수리, 시스템 복구시까지의 필요 비용을 기대비용 이라 명시한다. 단 시스템에 대한 초기투자비용 및 그에 따른 기반비용, 고장발생시에서 복구시까지의 비용에 대한 데이터가 없다면, 심각도 및 고장 발생빈도만을 가지고, RCM분석

대상을 선정할 수가 있을 것이다. 하지만 두 가지 파라미터만을 이용한다면 시스템선정에 대한 신뢰성은 다소 떨어질 수가 있다. 다음은 유지보수 비용에 따른 레벨분류에 관한 표이다.

표 6. 유지보수비용에 따른 레벨분류

초기투자비용 : 기대비용	Level 분류	비고
10:10이상	10	예방정비, 계획정비보다는 시스템 재설계 및 다른 시스템으로 대체하는 것이 타당함.
10:9	9	RCM분석을 통한 예방정비
10:8	8	RCM분석을 통한 예방정비
10:7	7	계획정비
10:6	6	계획정비
10:5	5	계획정비
10:4	4	계획정비
10:3	3	사후정비
10:2	2	사후정비
10:1	1	사후정비

위에 분류한 초기투자비용 대비 유지보수비용에 대한 등급은 RCM분석대상 선정시스템의 그래프에 있어서 Z좌표로 나타낸다.

4. 분석시스템의 선정

분석시스템의 선정에 있어서 매개변수로 가져가려 하는 것은 상기 절에서와 같이 Level별로 분류를 해보았다. 이를 통하여 RCM분석을 위한 시스템을 선정하려 한다. 선정 방법은 다음과 같은 그래프를 통하여 설명할 수가 있다.

3절에서 언급하였던 심각도, 빈도, 비용에 관하여 각각을 매개변수화 하여 Level별로 분류하였다. Level별로 분류된 항목은 그래프에 명시된 각각의 좌표에 적용시킬 수가 있다. 그리하여 세 개의 좌표를 연결하는 사각형의 상자로 나타낼 수가 있다. 이때 이 상자가 위치해 있는 부분에 따라 RCM분석을 실시해야하는지 아니라면, 계획정비나, 사후정비로 처리할 수가 있을 것인지에 대해 판단할 수가 있다. 또는 상기에 레벨별로 분류된 항목에 대하여,

$$(\text{심각도}) * (\text{빈도}) * (\text{비용}) = 1000$$

이러한 수식을 통하여 해당 시스템에 적합한 유지 보수 계획 및 방법을 제시하여 줄 수가 있다.

표 7.레벨분류별에 따른 시스템 적용

NO	산출 데이터의 범위	Level 범위	시스템 적용방법	비고
1	1000~800	10~9	RCM분석 실시(예방정비업무)	심각도를 우선 고려하여 적용
2	799~300	8~4	계획정비	빈도수를 우선 고려하여 적용
3	299~0	3~1	사후정비	비용을 우선 고려하여 적용

아래의 그림1, 2는 상기 표에 따라 분류되어진 산출 데이터 범위와 그에 따른 RCM분석 대상시스템에 대한 시스템 적용방법을 등급별로 분류하여 나타낸 것이다.

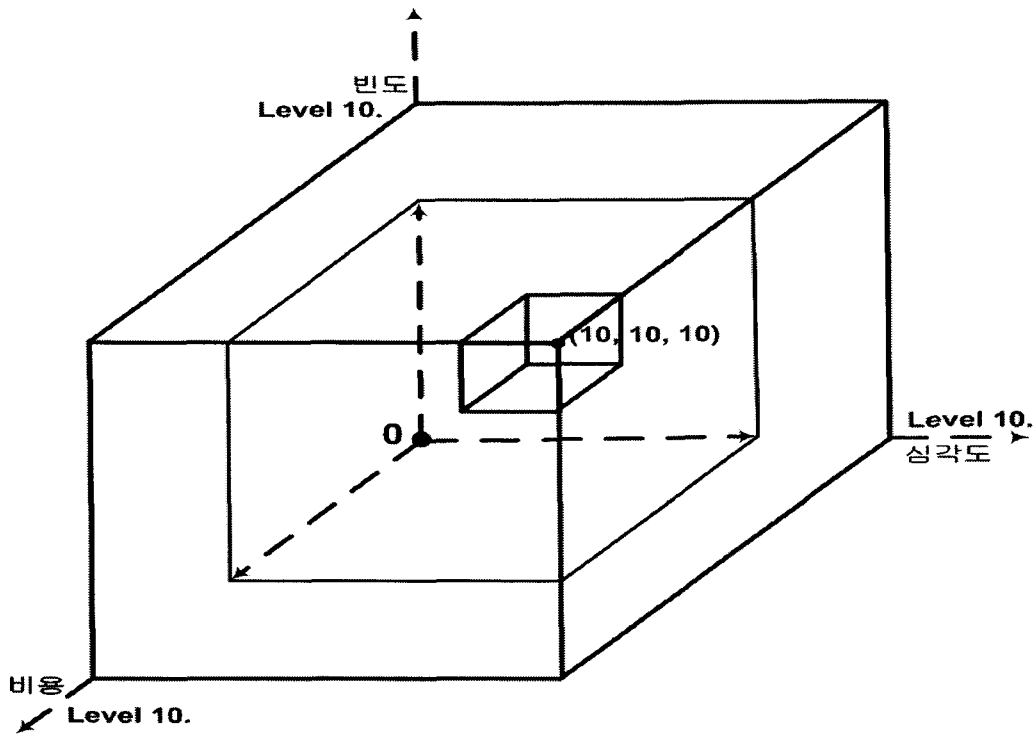


그림 1. RCM 분석대상 시스템의 Level분류

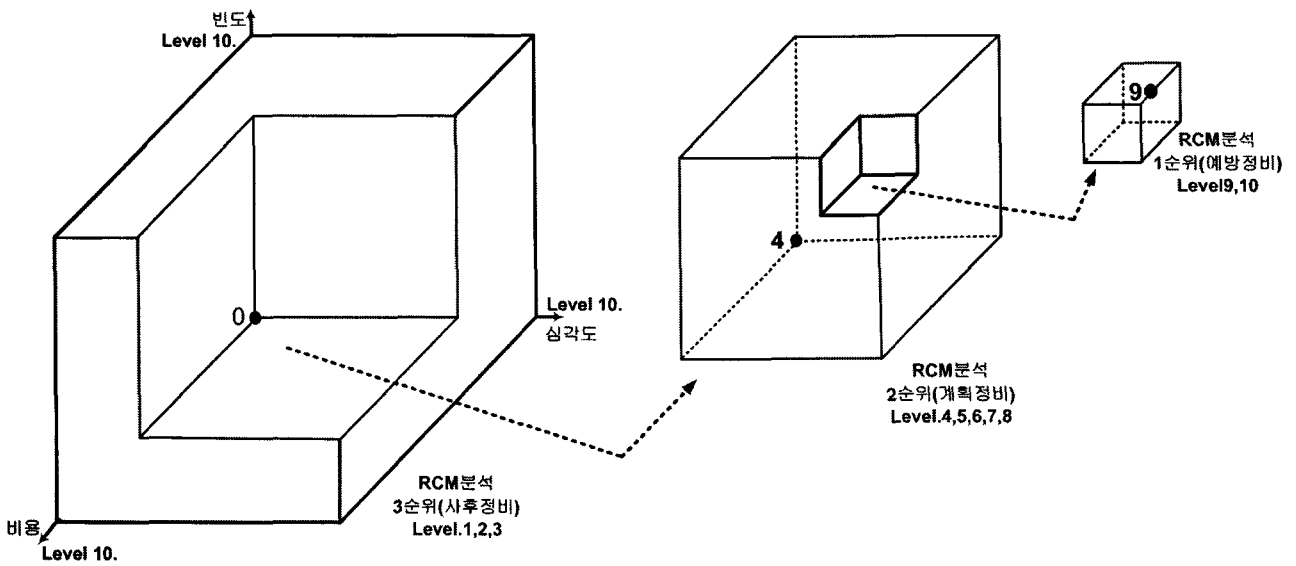


그림 2. 시스템선정의 Level별 분류

5. 결론

5.1 기대효과

RCM분석 예방정비 업무를 통하여 운영상의 고장발생 빈도를 줄일 수 있음이 일반적으로 증명된다. 적어도 RCM분석 예방정비 업무는 운영상의 고장발생 빈도가 증가하는 것을 제어하기도 한다. RCM분석 예방정비 업무가 원숙한 단계에 이를 경우, 해외의 연구사례에 의하면 반복적인 Maintenance 활동을 통하여 유지보수 비용을 40%에서 70%를 절감하였다고 한다. 반복적인 이 활동의 상당부분은 필요가 없기에 취소되기도 하고 또한, 일부는 상태감시 활동이 대신하기도 한다. 보수, 정비 관련 서비스를 외

부에 용역을 주는 경우가 많은데, 유지보수 시스템은 경제적이고 합리적인 용역계약을 지원한다. 첫째는, 반복되는 시간지향형 보수 활동을 최소화 할 수 있기 때문이고, 둘째는, 고장원인 및 결과 분석에 바탕을 두고 긴급보수 지침을 작성하여 시행함으로써 가장 경제적으로 관리할 수 있기 때문이다. 따라서 이와 같은 효과와 효율성을 가져가기 위해서는 분석대상 시스템을 결정하는데 있어서 신중하게 고려하여야 할 것이다. 이에 본 논문에서 언급한 내용을 바탕으로 RCM분석 대상시스템을 정량적인 Level 분류를 통하여 접근하게 된다면, 차후에 RCM분석을 시스템 적용 시에 좀 더 효과적일 것으로 기대된다. 또한, 유지 보수에 관한 방법 중 시스템에 타당한 예방정비, 계획정비, 사후정비에 대해 적절히 적용할 수 있을 것이라고 본다. 따라서 필요 없는 분석과정, 적절하지 정비방법으로 인한 비용 손실을 최대한 줄일 수 있을 것이다.

5.2. 결론 및 향후방안제시

앞서 설명한 바와 같이 RCM분석 대상시스템 선정에 있어, 기존의 논리대로 시스템을 선정시 많은 문제점이 있었다. 이와 같은 문제점을 간과한 채로 분석대상 시스템을 선정하게 된다면, 차후에 도출될 예방정비 업무도 효율성이 떨어질 것이다. 그와 더불어 RCM분석이 필요하지 않은 시스템에 대한 잘못된 적용으로 인한 비용손실도 가져오게 될 것이다. 따라서 RCM분석 대상시스템을 선정시에는 상기 절에서 언급한 심각도, 빈도, 비용측면에 대한 레벨분류를 실시하여야 할 것이며, 이들에 대한 Level 분류에는 시스템에 발생하는 고장이나, 기타 여러 가지 항목에 대한 신뢰성 있는 데이터가 뒷받침 되어야 할 것이다. 기존의 입수되는 또는 제공사에서 제공되는 고장항목에 대한 명확한 명시방법과 기록방안에 대하여 고려되어야 할 것이며 향후에는 이를 위하여 기록 또는 축적되는 고장데이터의 정확성과 신뢰성을 보증하기 위한 지속적인 연구도 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 공학박사 박경수 저(1999년), “신뢰도 및 보진공학”, 영지문화사
2. Anthony M.(Mac) Smith, Glenn R. Hinchcliffe. (2002) “RCM-GATEWAY TO MAINTENANCE WORLD CLASS”
3. IEC 60300-3-11 Dependability Management Part 3-11: “어플리케이션 지침서 - 신뢰성 중심 유지보수”
4. EN50129 “철도응용 신호시스템을 위한 안전관리 전자시스템”
5. 이호용, 박기준, 안태기, 김길동, 한석윤, 이승일(2003) “도시철도유지보수체계 시스템의 RAMS에 대한 연구”, 철도학회논문
6. “RCM 설비 예방진단 선진국현황”, 에너지 경제신문 (2003/11)
7. 장주수, 육창희, “RAM 분석을 기반으로 한 수명주기비용 분석”, 철도학회논문