

철도시스템의 운영 서비스 성능 척도 산출에 관한 연구

A study on determining Operational Service Performance of Railway Systems

김명종*, 박문규**, 구정서***

Myung Jong Kim*, Mun Gyu Park**, Jeong Seo Koo***

초록: 철도시스템 엔지니어링은 운영에 대한 서비스효과성을 기반으로 개발되는 경향이 있다. 따라서 엔지니어링 과정에서는 운영 서비스 효과성척도를 RAMS 로 정의하고 이를 양적으로 산출하여 각 시스템 수명주기 단계에서 철저히 관리하는 하고 있다. 이는 철도시스템 구성요소의 구조적 성능을 운영목표와 운영환경에 최적화되도록 설계하는데 그 목적이 있다. 최근 국내외 철도산업 시장에서 시스템 RAMS 의 적용에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 대부분의 국내 철도산업에서 연구개발하는 철도시스템에 대하여 효과적으로 RAMS 성능을 적용하지 못하고 있다. 따라서 이 논문은 시스템 개발 초기단계에서 RAMS 적용 데이터가 부족한 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 유사시스템의 운영데이터를 통하여 발 시스템의 RAMS 성능을 산출하는 방법을 제시하고 있다.

주요어: 시스템 엔지니어링, RAMS 성능척도, 운영서비스 효과성, 유사시스템

1. 서론

RAMS 척도 (신뢰성, 가용성, 유지보수성 및 안전성)의 정량적 성능 결정은 시스템 엔지니어링 프로세스를 통하여 운영적 효과성(Operational Effectiveness)을 정의하여 물리적 제품의 고유한 성질(Inherent Property)로 통합하는 엔지니어링 관리의 한 분야이다. 이는 시스템 설계 • 개발단계에서 운영적 목표(철도서비스 목표)를 성공적으로 성취하고, 지속적으로 시스템 서비스 성능목표를 물리적 제품개발에 효과적으로 적용하기 위하여 수행된다.

최근 국내외 철도 관련 프로젝트의 대부분은 시스템 구성요소에 대하여 정량적 RAM 성능을 요구하고 있다. 따라서 최근 국내외 철도에서 운용 환경이나 서비스 목적에 최적화된 제품의 RAM 성능의 정량적 성취는 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 하지만 국내 철도 산업에서는 운영환경이나 서비스 조건에 적합한 정량적 RAM 성능을 효과적으로 산출하는 방법을 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 논문은 서비스 운영 가용도 목표를 기반으로 운영기관의 운영, 유지보수 및 로지스틱 지원 개념 분석을 통한 시스템 수준에서 RAM 성능을 계산하는 방법과 엔지니어된 유사시스템의 운영 데이터를 통하여 RAM 성능을 검증하는 방법에 대하여 제시한다.

최근 국내외 철도 관련 프로젝트의 대부분은 시스템 구성요소에 대하여 정량적 RAM 성능을 요구하고 있다. 따라서 최근 국내외 철도에서 운용 환경이나 서비스 목적에 최적화된 제품의 RAM 성능의 정량적 성취는 매우 중요한 이슈가 되고 있다.

†교신저자: 서울과학기술대학교 철도대학원 철도차량시스템공학과(kmj-85@hanmail.net)

* 서울과학기술대학교 철도대학원 철도차량시스템공학과(toffbak@hanmail.net)

** 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과(koojs@seoultech.ackr)

하지만 국내외 철도 산업은 운영환경이나 서비스 조건에 적합한 정량적 RAMS 성능을 효과적으로 산출하는 방법을 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 논문은 서비스 운영 가용도 목표를 기반으로 운영기관의 운영, 유지보수 및 로지스틱 지원 개념 분석을 통한 시스템 수준에서 RAM 성능을 계산하는 방법과 엔지니어된 유사시스템의 운영 데이터를 통하여 RAM 성능을 검증하는 방법에 대하여 제시한다.

KTX 고속철도의 도입과 함께 철도시스템에 대한 RAMS 적용이 처음 소개되었고 일부 철도 프로젝트에 지속적으로 요구되어 왔으나, 국내 철도산업은 서비스 목표 및 운영환경에 적합한 RAMS 성능 척도는 물론 정량적 달성목표를 효과적으로 제시하지 못하고 있으며 또한 시스템 엔지니어링 프로세스에 효과적으로 통합하여 관리하지 못하고 있다. 그동안 국내 철도 산업은 RAMS 에 관련된 많은 정보나 데이터가 없는 점을 고려하여 운영적 개념을 통해 전체 RAM 성능 목표를 확인하고, 이를 기반으로 하부시스템에 할당하고 유사시스템의 RAMS 을 평가하고 이를 기반으로 설계 • 개발하는 시스템 제품의 RAMS 성능의 타당성을 검증하는 방법을 제시하였다.

2. RAM 척도의 정량적 성능 결정

2.1 RAM 척도의 성능 결정 프레임워크 모델

철도시스템의 RAMS 성능은 계획된 철도교통서비스 임무를 장기적인 측면에서 성공적이고 지속적으로 성취하기 위하여 결정한다. 또한 이 결정된 RAMS 성능을 통해 효과적으로 시스템 제품의 고유한 설계 속성으로 적용하고, 운영 및 유지보수단계에서 성능 관리를 위해 사용된다. 일반적으로 RAMS 성능은 철도시스템의 운영 • 서비스 목적에 의해 전체 시스템 수준의 RAMS 성능을 결정하고 이를 하위 시스템에 할당하는 방식으로 결정된다. 아래 Fig 1 은 전체 철도시스템의 운영적 RAMS 성능을 기반으로 RAMS 성능을 결정하는 방법을 시스템 엔지니어링 프로세스 단계에 적합하게 적용할 수 있도록 제시하였다.

Fig 1 과 같이 철도시스템에 대한 RAMS 성능은 운영적 목적을 기반으로 성취하고자 하는 목적에 따라 서비스 가용성 성능이 결정된다. 하지만 대부분의 철도에서 RAMS 성능은 서비스 신뢰성 성능 중심으로 수행되는 경우가 일반적이었다. 하지만 제시된 모델은 RAMS 에 대한 원리를 효과적으로 적용하기 위하여 서비스 가용성 성능을 기반으로 하부시스템의 RAMS 성능을 결정하는 방법을 적용하였다. 철도시스템의 운영가용성 성능은 그림에서 보는 바와 같이 전체 철도시스템의 성능에 의해 결정된다. 하지만, 서비스 단계에서 유지보수성 성능은 고려하지 않았다. 이때 운영 가용성 성능은 개발되는 시스템이 성취 가능한 범위에서 결정되어야 한다. 따라서 이때 사용되는 데이터는 이미 개발된 유사 시스템에서 획득한 자료를 사용하여 평가한다.

두번째는 운영적 가용성 성능 목표를 평가하는 과정이다. 이 단계는 계획된 운영형태와 관련된 시나리오, 즉 운영개념, 유지보수 개념 및 유지보수 지원개념을 분석하여 평가한다. 그림에서 보는 같이 운용가용성 성능의 적정성은 3 단계로 이뤄진다. 1 단계는 운영적 개념에 의해 운영가용성 성능을 결정하는 단계로 시스템의 전체 운영시간과 비운영시간의 비율에 의해 평가할 수 있다. 2 단계는 유지보수 및 유지보수 지원 정보를 활용하여 가용성 성능을 평가하는 단계로 시스템의 고유가용성과 성취가용성 성능을 평가할 수 있다. 마지막으로 3 단계는 앞서 철도시스템 단계에서 할당된 운용가용성 성능의 성취여부를 확인하는 단계이다.

Fig 1 의 모델에서 앞선 단계에서 확인된 가용성 성능은 시스템 신뢰성 및 유지보수성 성능을 결정하는데 적용된다. 이때 신뢰성과 유지보수성 성능은 발생 가능한 위험 평가의 결과에 따라 결정되고, 또한 두 성능은 적용되는 운영개념에 의해 트레이드오프 된다. 이와 같은 과정을 거쳐 결정된 RAM 성능은 다시 확인평가 과정을 거쳐 시스템 수준의 기본적인 RAMS 성능이 된다. 이와 같이 결정된 RAM 성능은 시스템 수준에서 하부시스템요소까지 RAMS 성능을 결정하는 기본적인 베이스라인이 되고 설계를 수행하는데 중요한 요소를 작용한다. 이러한 과정은 서브시스템 및 컴퓨터 수준의 RAMS 성능을 결정하는데도 동일하게 적용된다.

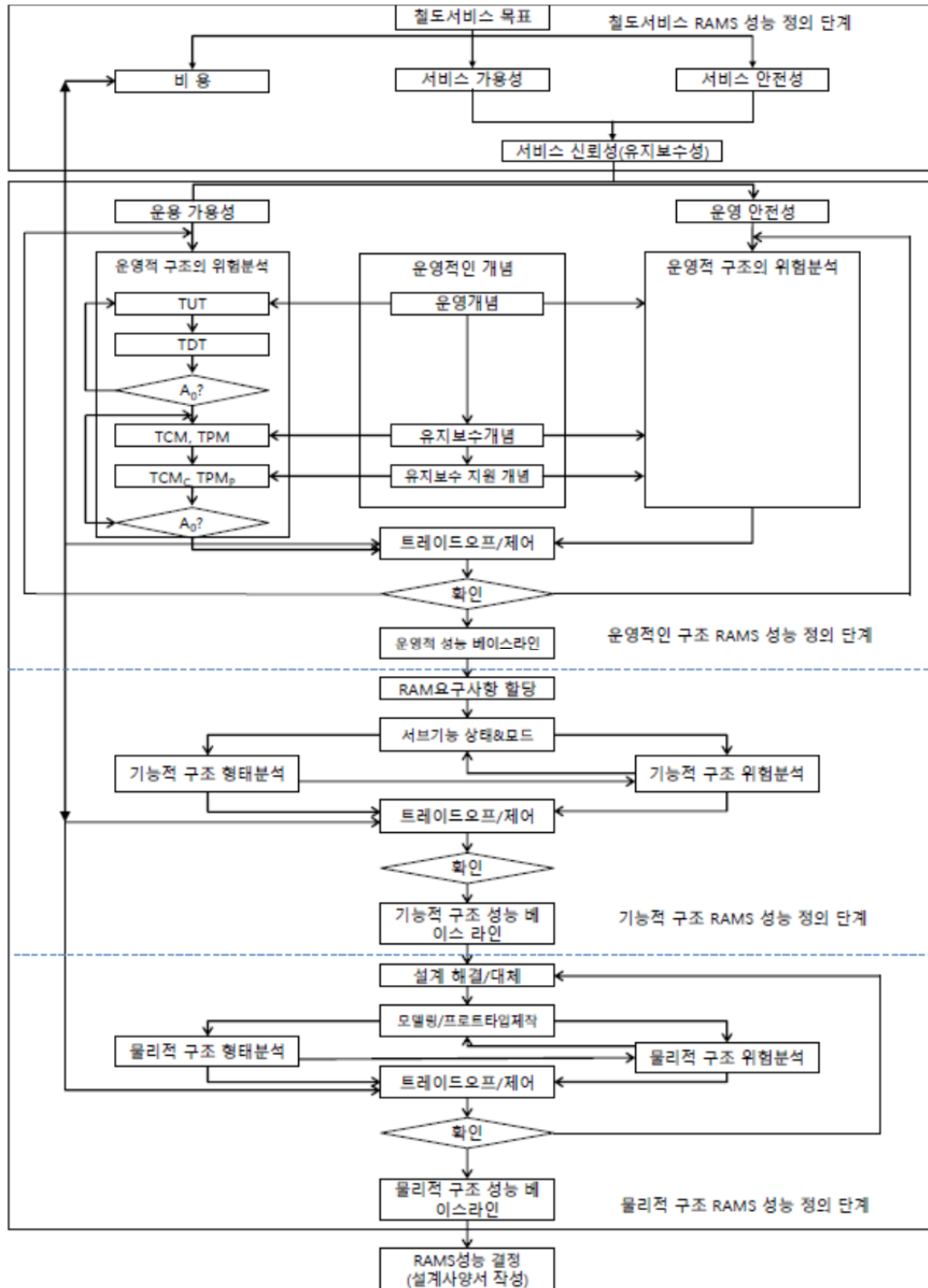


Fig 1. RAMS 성능 결정 프레임워크 모델

2.2. RAMS 척도의 성능 결정을 위한 수학적 모델

2.2.1 가용성 수학적 모델

앞서 프레임워크 모델에서 운영, 유지보수 및 유지보수 지원계획에 따라 다양한 가용성 성능을 평가하는 방법을 설명하였다. 이와 같이 결정된 시스템의 운용적 가용성 성능은 계획된 운영, 유지보수 및 유지보수 지원개념에 의해 성취 가능한 성능인지 확인하여야, 시스템이 수행할 수 있는 고유가용성 성능과 실질적인 성취가용성 성능을 평가하여야 한다.

철도시스템의 운영 가용성 평가는 시스템 운영 프로파일 모델을 결정하는 것으로 시작된다. 따라서 아래 Fig 2 는 운용가용성 성능을 비롯한 다양한 가용성 평가를 위해 가능한 철도시스템 운용의 운영프로파일 모델을 제시하였다. 그림과 같이 시스템의 운영 프로파일은 동작시간(TUT)과 정지시간(TDT)으로 구분하고 이들을 각각 세분화하였다. 동작시간은 실제 운영시간(OT)과 운영전 대기(ST₁)와 운영 후 대기(ST₂)로 정의하였고, 정지시간은 정비로 인한 정지시간 (TMT)과 정비부품을 공급지연 정지시간(TALDT)로 구분하였다. 정비시간은 임시정비(TCM)와 예방정비(TPM)로 구분하였고, 정비부품 지원시간은 행정처리지연시간(TADT)과 부품공급지연시간(TLDT)으로 정의하여 모델을 구성하였다.

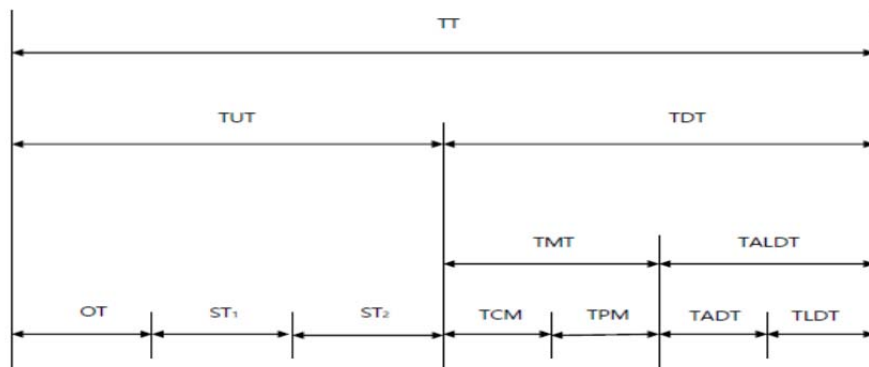


Fig 2. 운용적 프로파일 모델(Operational Profile Model)

Fig 2 는 운영 프로파일 모델은 RAMS 성능 수학적 모델을 결정하는데 적용된다. 가용성 성능은 평가하는 목적에 따라 운영적인 가용성(A₀)를 중심으로 고유가용성(A_i)과 성취가용성(A_α)으로 구분하여 정의할 수 있다. 이들에 대한 수학적 모델은 등식 (1), (2) 그리고 (3)와 같이 정의할 수 있다. 이 들은 앞서 Fig 1 의 모델에서 제시된 순서에 따라 아래 식을 적용할 수 있다.

$$A_0 = \frac{TUT}{TUT + TDT} \quad (1)$$

$$A_i = \frac{TUT}{TUT + TCM} \quad (2)$$

$$A_\alpha = \frac{TUT}{TUT + TCM + TPM} \quad (3)$$

2.2.2. 신뢰성 수학적 모델

다음은 신뢰성을 평가하기 위한 수학적 모델을 제시하여야 한다. 신뢰성의 대표적인 척도는 고장 사이의 평균시간(MTBF)에 의해 정의된다. 아래 등식 (4)에서 보는 바와 같이 MTBF 는 철도시스템의 실질적인 운영시간과 유지보수 지원시간 데이터에 의해 결정할 수 있다. 등식 (4)는 Fig 2 의 모델을 활용하여 등식 (5)과 같은 신뢰성을 정의할 수 있다.

$$TALDT = \frac{OT}{MTBF} \times ALDT \quad (4)$$

$$MTBF = \frac{OT \times ALDT}{(1 - A_0)TT - TMT} \quad (5)$$

2.2.3. 유지보수성 수학적 모델

또한 유지보수성 성능 평가를 수행할 수 있는 수학적 모델을 제시하였다. 유지보수성 성능은 일반적으로 평균 수리시간(MTTR)과 유지보수율(MR)에 의해 나타낼 수 있다. 먼저 유지보수성 성능은 Fig 2 의 운영 프로파일 모델에 의해 등식 (6)과 같이 정의될 수 있다. 또한 유지보수율은 등식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$MTTR = \frac{TCM \times OT}{MTBF} \quad (6)$$

$$MR = \frac{TCM + TPM}{OT} \quad (7)$$

이 같이 정의된 시스템의 가용성에 의해 할당된 신뢰성과 유지보수성 성능은 시스템에 필요한 기능적 및 물리적 구성요소에 적합하게 할당되어야 한다. 이때 신뢰성 및 유지보수성 할당방법은 엔지니어링 과정에서 중요한 이슈가 된다.

2.3 RAMS 성능 할당 수학적 모델

2.3.1 신뢰성 할당 모델

물리적 시스템 구조에 대한 RAMS 할당은 시스템 RAMS 성능을 기능적 구조에 할당하는 것으로 시작한다. RAMS 성능을 할당하는 것은 이 단계의 기본적인 프로세스 활동이다. 따라서 이미 엔지니어링된 유사시스템을 통해 개발하는 시스템의 상대적인 RAMS 성능할당을 정의한다. 또한 할당하는 방법으로 매트릭스를 정의하였다. 아래 Table 1 은 이미 개발된 유사시스템을 기반으로 개발하려는 시스템의 RAMS 성능을 상대적으로 평가하기 위한 매트릭스이다. 이 매트릭스의 평가요소는 개발되는 시스템의 기능에 따라 정의될 수 있으며, 평가 범위는 개발목적에 따라 범위로 정의할 수 있다. 또한 이러한 범위 내에서 상대적인 값의 결정은 전문적인 엔지니어링 지식과 경험을 가진 전문가에 의해 평가될 수 있다.

< Table 1> 신뢰성 할당 결정 평가요소

평가요소	평가요소 설명	평가범위
시스템 복잡성	시스템에 구성될 가능한 부품 수를 적용한다	0.8-1.2
시스템 중요성	적용되는 기술수준의 정도를 의미한다.	0.8-1.2
시스템 운영시간	전체 임무시간에 대한 실질적 운영시간을 적용한다.	0.8-1.2
시스템 운영환경	실질 운영환경에 미치는 심각성을 적용한다.	0.8-1.2

이와 같이 평가요소에 대한 각각의 평가된 값은 아래 Table 2 에 적용하여 전체적인 비중 평가값(TFi)을 정하고 이를 이미 개발된 유사시스템의 의해 신뢰성 (MTBF)값에 적용하여 평가된 값은 전체 서브시스템의 신뢰성 성능값을 통하여 전체적인 시스템의 신뢰성 (MTBFs)성능을 등식 (8)를 통하여 확인한다. Table 2 는 이미 개발된 유사시스템의 시스템 평가요소에 대하여 개발하는 시스템의 값을 결정하는 방법을 제시하고 있다. 시스템 구성요소 에 대한 각각의 신뢰성 평가는 20% 내외로 제시하였다. 하지만 평가범위는 개발하는 시스템의 개념과 기능적 특성에 따라 임의적으로 범위를 조정할 수 있다.

<Table 2> 신뢰성 할당 매트릭스

비교시스템		신뢰성 성능평가 요소					
서브 시스템	MTBF	시스템 복잡성	시스템 중요성	운영시간	운영환경	가중치	결과
Sub 1	TF_1	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	$\prod_{i=1}^4 R_{1i}$	$TF_1 \cdot \prod_{i=1}^4 R_{1i}$
...							
Sub n	TF_n	R_{n1}	R_{n2}	R_{n3}	R_{n4}	$\prod_{i=1}^4 R_{ni}$	$TF_n \cdot \prod_{i=1}^4 R_{ni}$

$$MTBF_s = \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{TF_i \cdot R_{ij}} \right)} \right] \quad (8)$$

2.3.2. 유지보수성 할당 모델

시스템의 유지보수성 성능을 하부시스템에 할당하는 방법은 앞서 신뢰성 할당방법과 같이 평가요소와 매트릭스를 개발하여 유사시스템과의 비교를 통해 결정할 수 있다. 아래 등식 (9)은 Table 3 의 유지보수성 평가요소와 Table 4 의 매트릭스를 통해 서브시스템의 RAM 성능을 결정하는 것을 보여준다. 유지보수성을 할당하기 위한 평가요소는 필요에 따라 다양하게 선택할 수 있다. 예를 들면 복잡성, 중요성, 유지보수시간 등으로 필요에 따라 확대할 수 있다. 이는 유럽의 철도차량규격(EN 50126-3)에 유지보수성 특성에 대하여 상세히 제시하고 있다. 이 평가요소는 평가 매트릭스를 통해 가중치를 결정하고 이를 등식 (9)에 적용하여 유지보수성 성능으로 결정할 수 있다. 또한 평가범위는 20%범위를 제안하였다. 하지만 신뢰성 성능평가에서 언급된 것처럼 개발하는 시스템의 특성에 따라 범위를 조정할 수 있다.

<Table 3> 유지보수성 성능 할당 평가요소

평가요소	평가요소 설명	평가범위
접근성	유지보수를 더욱 간편하게 수행할 수 있는 정도를 평가한다	0.8-1.2
모듈화	유지보수 행동이 단계적으로 효과적으로 구분하는 정도를 평가한다.	0.8-1.2
표준화	다른 부품과 간단하게 교환할 수 있도록 하는 정도를 평가한다.	0.8-1.2

<Table 4> 유지보수성 성능 할당 매트릭스

비교시스템		유지보수성 성능 할당 매트릭스				
서브시스템	MTTR	접근성	모듈화	표준화	가중치	결과
Sub 1	TR_1	M_{11}	M_{12}	M_{13}	$\prod_{i=1}^3 M_{1j}$	$TR_1 \cdot \prod_{i=1}^3 M_{1j}$
Sub n	TR_n	M_{n1}	M_{n2}	M_{n3}	$\prod_{i=1}^3 M_{nj}$	$TR_n \cdot \prod_{i=1}^3 M_{nj}$

$$MTTR_{sb} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{TR_i \cdot \prod_{j=1}^3 R_{ij}} \cdot \frac{1}{TR_i \cdot \prod_{j=1}^3 M_{ij}} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{TR_i \cdot \prod_{j=1}^3 R_{ij}} \right)} \quad (9)$$

3. 결론

이 논문에서는 철도시스템을 개발할 때 운영적인 개념을 통해 시스템 수준의 RAMS 성능을 결정하고 이 값에 의해 할당된 서브시스템의 RAMS 성능을 이미 개발된 유사시스템의 RAMS 데이터의 평가 통해 산출하여 개발하는 시스템의 RAMS 성능 달성을 결정하는 방법을 제시하였다. 시스템 엔지니어링 과정에서 RAMS 성능 적용의 필요성을 제시하면서, 철도시스템의 운영, 유지보수, 유지보수지원 개념을 통해 운영, 고유 및 성취가 용도를 산출하는 방식을 제시하였다 또한 이 가용성 성능을 운영 가용성 성능으로 할당되고 이들은 다시 유사시스템의 분석을 통해 검증하고 확정하는 방법을 제시하였다 이때 결정된 RAMS 성능은 기능 및 구조 단계에 따라 하위시스템의 RAMS 성능을 결정하고 이들은 다시 하위 시스템 제품들의 RAMS 성능에 비교되어 평가하는 것을 제시하였다. 제시된 방법은 일반적으로 시스템 수준에서 철도시스템 고객이 하나의 시스템의 대략적인 RAMS 성능을 결정할 때 효과적으로 적용할 수 있다. 또한 제품의 공급자가 새로운 개념의 철도시스템을 개발할 때 매우 효과적으로 적용할 수 있다.

참고문헌

- [1] Bonnett, C. F. (2005). Practical railway engineering, World Scientific
- [2] Profillidis, V. A. (2007). Railway management and engineering, Ashgate Publishing, Ltd.
- [3] M. Park, M. An & F. Schemid (2009). A methodology for rolling stock RAM target setting. 2009 10th Railway Engineering London Conference.
- [4] M. Park, M. An (2010) 철도시스템 엔지니어링에 RAM 관리를 적용하기 모델의 개발. 10 회 철도학회 컨퍼런스 pp 2179~2194
- [5] M. Park (2013). RAMS management of Railway systems - Integration of RAMS Management into Systems Engineering.
- [6] IEC 62278(1999). 철도차량 RAMS 사양 및 검증. 유럽표준규격
- [7] EN 50126-3(2007). 철도차량 RAMS 에 대한 EN 50126 의 적용. 유럽표준규격