ISSN 1229-800X The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64P, No. 4, pp. 220~230, 2015
http://dx.doi.org/10.5370/KIEEP.2015.64.4.220

철도차량시스템의 위험기반 RAMS 평가에 관한 연구

A Study on the Risk based RAMS Assessment for Railway Rolling Stock Systems

박 문 규* · 한 성 호†
(Mun-Gyu Park · Seong-Ho Han)

Abstract - Rolling stock RAMS is a field of engineering which integrates reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) characteristics into an inherent product design property through rolling stock system engineering process. It is implemented to achieve operational objectives successfully, and recently the RAMS has become a rapidly growing engineering discipline because it has a great potential to ensure safety and improve cost effectiveness. However, the Korean rolling stock industry has not yet implemented RAMS management in the rolling stock engineering process, despite the issue having been addressed since the introduction of the KTX. Thus, this paper discusses the processes, methods and techniques for RAMS assessment in three parts. Firstly, it outlines a process of the overall RAMS performance assessment for achieving technical RAMS design criteria. Secondly, it discusses a process for assessing the operational RAM and allocating the RAM. This paper also proposes a model for assessing safety-based risk management, which includes five analytic techniques for identifying the causes and consequences of a system failure. Finally, a case example is provided for the risk assessment of the pneumatic braking device.

Key Words : RAMS (reliability, availability, maintainability and safety), Rolling stock engineering, Risk management, Assessment, Allocation, Safety

1. 서 론

궤도와 차륜의 금속접촉에 의해 차량이 안내되는 현재와 같은 철도시스템의 형태는 19세기 영국에서 시작되었다. 이러한 철도의 운행방식은 항공이나 도로와 같은 다른 교통시스템에 비교하여 높은 운영적인 효과성을 가져왔다[1]. 이러한 철도의 장점은 높은 정시성, 안전성과 함께 철도산업의 급격한 성장을 가져왔었다. 하지만 도로와 항공 산업의 지속적 발전으로 다른 교통수단에 비해 문전 접근성이 떨어지는 단점으로 인해 급격한 쇠퇴기에 접어들지만 국가경제와 교통수단으로서의 철도역할의 중요성으로 인해 철도산업은 국유화되는 계기가 된다[2, 3].

하지만 국유화는 운영적인 측면에서 부정적 결과를 가져왔다. 급속히 변화하는 사회적 경제적 환경에 대한 유연성이 떨어졌고, 낮은 비용 효율성을 가져왔을 뿐만 아니라, 정시성과 같은 서비스 수준은 점점 낮아졌다[3]. 그러나 유럽을 중심으로 문제점을 개선하고, 다른 교통수단과의 경쟁적 장점을 확보하기 위해 새로운 전환점을 마련하였다. 이를 위하여 철도산업은 혁신적인 경영개선을 수행하고 최신기술을 적용하기 위하여 철도산업은 전반적인 구조변화를 수행하고 있다. 이러한 변화는 가용성과 안전성 개선을 위해 산업의 수평적 통합 및 수직적 분할을 통한 내외부 경쟁체제를 추가로 도입하였다[2].

안전성, 가용성 및 비용효과성의 향상은 국내외 철도산업의 중요한 사업적 이슈가 되고 있다. 대부분의 철도 프로젝트에서 이들에 대한 혁신적인 요구가 지속적으로 증가하고 있다[4]. 따라서 최근 유럽철도를 중심으로 새로운 엔지니어링 방법이 도입되고 안전한 서비스 목적을 달성하는데 집중하고 있다[5]. 시스템 엔지니어링을 통한 RAMS 성능관리는 이러한 목적을 위해 도입되었고, 교통수단으로서의 서비스에 영향을 미치는 위험요소를 효과적으로 개선하기 위해 엔지니어링 관리에 위험개념이 기본으로 적용되고 있다[2].

철도차량 RAMS는 계획된 교통서비스를 안전하게 성공적으로 제공하기 위하여, 시스템 엔지니어링 과정을 통하여 신뢰성, 가용성, 유지보수성, 가용성 특성을 시스템의 고유한 제품의 속성으로 통합하는 엔지니어링 방법이다[5]. 최근 RAMS는 철도서비스에 대한 정시성, 안전성은 물론 비용효과성을 동시에 달성할 수 있기 때문에 급격히 성장하고 있다. 이를 통하여 철도산업은 항공기나 도로교통과 같은 다른 교통 분야와의 경쟁력을 개선하고 있다. 그러므로 RAMS는 글로벌 철도 비즈니스에서 매우 중요한 이슈가 되고 있으며, 점진적으로 철도산업은 물론 대부분의 산업분야로 확대되고 있다[6].

유럽철도산업은 이미 철도시스템의 엔지니어링 프로세스에 RAMS 관리를 적용해 왔고, 많은 철도 프로젝트에서 시스템 엔지니어링 프로세스에 RAMS를 포함하기 위한 노력이 오랫동안 지속되어 왔다[7]. 하지만 단지 몇몇 국가들만이 이를 성공적으로 수행하고 있다. 이는 개별적인 프로젝트에 대한 엔지니어링 개념을 확립하고 이에 따르는 프로세스, 방법, 기술 및 도구를 비용 효과적으로 확립하는 것이

† Corresponding Author : Korean Railroad Research Institute, Korea
E-mail : shhan@krri.re.kr
* The Parks Ltd., Korea
접수일자 : 2015년 5월 30일
수정일자 : 2015년 8월 11일
최종완료 : 2015년 11월 2일

부족하기 때문이다[2]. 그러므로 이 논문에서는 시스템 엔지니어링 프로세스를 통하여 RAMS 관리를 효과적으로 통합하기 위한 평가방법을 유사시스템의 데이터 및 정보를 통해 체계적으로 제시하고자 한다.

2. RAMS 성능 평가모델의 개발

철도차량시스템의 동적인 특성은 계획된 서비스를 안전하고 성공적으로 달성하는데 있어 다른 철도시스템에 비해 훨씬 더 많은 잠재적인 위험에 노출되게 마련이다. 따라서 이들 잠재적인 위험으로 인해 철도차량시스템의 안전한 운행 기능들이 위협받게 된다. 따라서 시스템 안에 포함될 수 있는 가능한 모든 위험요소들은 개념설계단계에서부터 단계적으로 지속적으로 개선되어야 한다[9]. 이러한 위험평가는 RAMS 평가의 중요한 한 축이 될 뿐만 아니라 안전한 철도시스템의 기능을 확보하는데 있어 매우 중요하다. 그림 1은 위험기반 RAMS 평가 프로세스를 제시하였다.

철도차량시스템은 안전하게 교통서비스 임무를 성공적으로 달성하여야 한다. 이러한 성공적인 달성을 위해 운영 가용도 요구를 기반으로 제품의 신뢰도와 유지보수성이 설계에 효과적으로 적용되어야 한다[8]. 따라서 가용도의 평가는 앞서 언급된 위험 평가 결과를 효과적으로 반영하여 결정되어야 한다. 그림 1의 왼쪽 프로세스에 나타난 바와 같이 가용성 평가는 고객의 운영, 정비 및 정비지원성 개념에 적합하게 평가되어야 한다. 이때 평가에 적용되는 철도차량시스템의 운영 프로파일에 포함된 운행패턴에 포함된 시간적 요소들은 유사시스템의 데이터나 정보는 물론 전문가의 지식/의견 등을 통하여 결정되어야 한다.

그림 1은 시스템 RAMS 조건에 의해 시스템 구조를 설계하는 프로세스를 제안하였다. 시스템 구조의 작용에 의한 형태는 패턴과 사건으로 정의될 수 있다[8]. 따라서 그림 1의 프로세스는 운영패턴의 시간적 라인의 분석과 임무를 성공을 위협하는 요소의 사건에 대한 위험평가로 구성되어 있다. 이 프로세스는 또한 시스템 엔지니어링 과정에 효과적으로 통합될 수 있도록 시스템 엔지니어링 프로세스 단계와 동일한 프로세스를 구조화하였다. 또한 이 프로세스는 프로세스 결과의 적합성 지속적으로 확인하도록 구조화되었으며, 이 프로세스의 결과는 위험평가에 의해 통제되고 비용 효과성에 의해 트레이드오프 할 수 있도록 구조화하였다[6].

2.1 가용성 평가

그림 1에서 좌측부분은 가용도 평가를 위해 시스템 구조의 운용 가용성을 평가하여 운영 및 유지보수 등의 개념에 따른 시스템 구성요소의 신뢰성과 유지보수성 성능을 결정하는 것을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 개발하는 철도차량시스템의 운영가용성 요구는 전체시스템의 서비스 신뢰성과 유지보수성으로부터 결정되어야 한다[8]. 하지만 철도시스템에 대한 서비스 가용성과 유지보수성에 대한 개념이 확실히 적립되지 않았다. 따라서 일반적으로 서비스 신뢰성만 제시되고 철도차량시스템의 유지보수성은 별도로 주어지고 있다. 하지만 제시된 프로세스는 철도의 전체 RAMS 목표로부터 운영가용성 및 안전성 요구를 결정하도록 제안하였다.

가용성 평가를 위해서는 먼저 시스템 신뢰성과 유지보수에 의해 운영적인 가용성 요구가 결정되어야 하고 이 운영가용성은 고객에 의해 제시되는 운영, 정비 및 정비지원 개념에 의해 평가되면서 운영 가용성에 만족하도록 신뢰성 및 유지보수성을 결정하여야 한다. 아래 등식 (1)은 철도시스템의 서비스 가용성 목표로부터 철도차량시스템의 운영가용성 요구의 적절성 평가하는 식을 제시하고 있다. 운영가용성 성능(Ao)은 서비스 가용성 목표(As)와 이를 성취하기 위한 가능한 최대비용(n)과 최소비용(x), 즉 개발 가능한 최대 차량편성수와 최소 차량 편성수에 의해 결정된다[8].

$$A_s = \sum_{x}^{n} \binom{n}{x} A_0^x (1-A_0)^{n-x} \tag{1}$$

철도차량시스템의 운영 가용성 평가는 시스템 형태의 시간적 운행 프로파일 모델을 결정하는 것으로 시작된다. 아래 그림 2는 가용성 평가를 위해 제시된 철도차량 시스템 운행의 시간패턴 모델을 제안하였다[8]. 시스템의 운행 시간패턴모델은 동작시간(TUT)과 정지시간(TDT)으로 구분하고 이들을 각각 세분화하였다. 동작시간은 실제 운행시간(OT)과 운행 전 대기(ST1)와 운행 후 대기(ST2)로 정의하였고, 정지시간은 정비로 인한 정지시간(TMT)과 정비부품을 공급하기 위한 지연 정지시간(TALDT)로 정의하였다. 정비시간은 다시 임시정비(TCM)와 예방정비(TPM)로 정의하였고, 정비부품 지원시간은 행정시간(TADT)과 부품공급(배달) 지연시간(TLDT)으로 정의하여 모델링하였다.

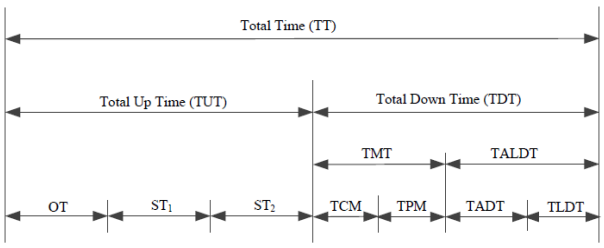

그림 1 철도차량의 운영프로화일

Fig. 1 Operational profiles of rolling stock

그림 2의 운행 프로파일 모델은 가용성을 산출하기 위한 수학적 모델을 결정하는데 적용된다. 가용성은 평가 목적에 따라 아래 등식과 같이 운용 가용성(Ao)을 중심으로 고유가용성(Ai)과 성취가용성(Aa)으로 구분 정의할 수 있다.

$$A_0 = \frac{TUT}{TUT + TDT} \tag{2}$$

$$A_i = \frac{TUT}{TUT + TCM} \tag{3}$$

$$A_a = \frac{TUT}{TUT + TCM + TPM} \tag{4}$$

신뢰성의 대표적인 척도는 고장사이의 평균시간(MTBF)에 의해 정의된다[11]. 등식 (5)에서 보는 봐와 같이 MTBF는 철도차량의 실질적인 운행시간과 부품의 지원시간으로부

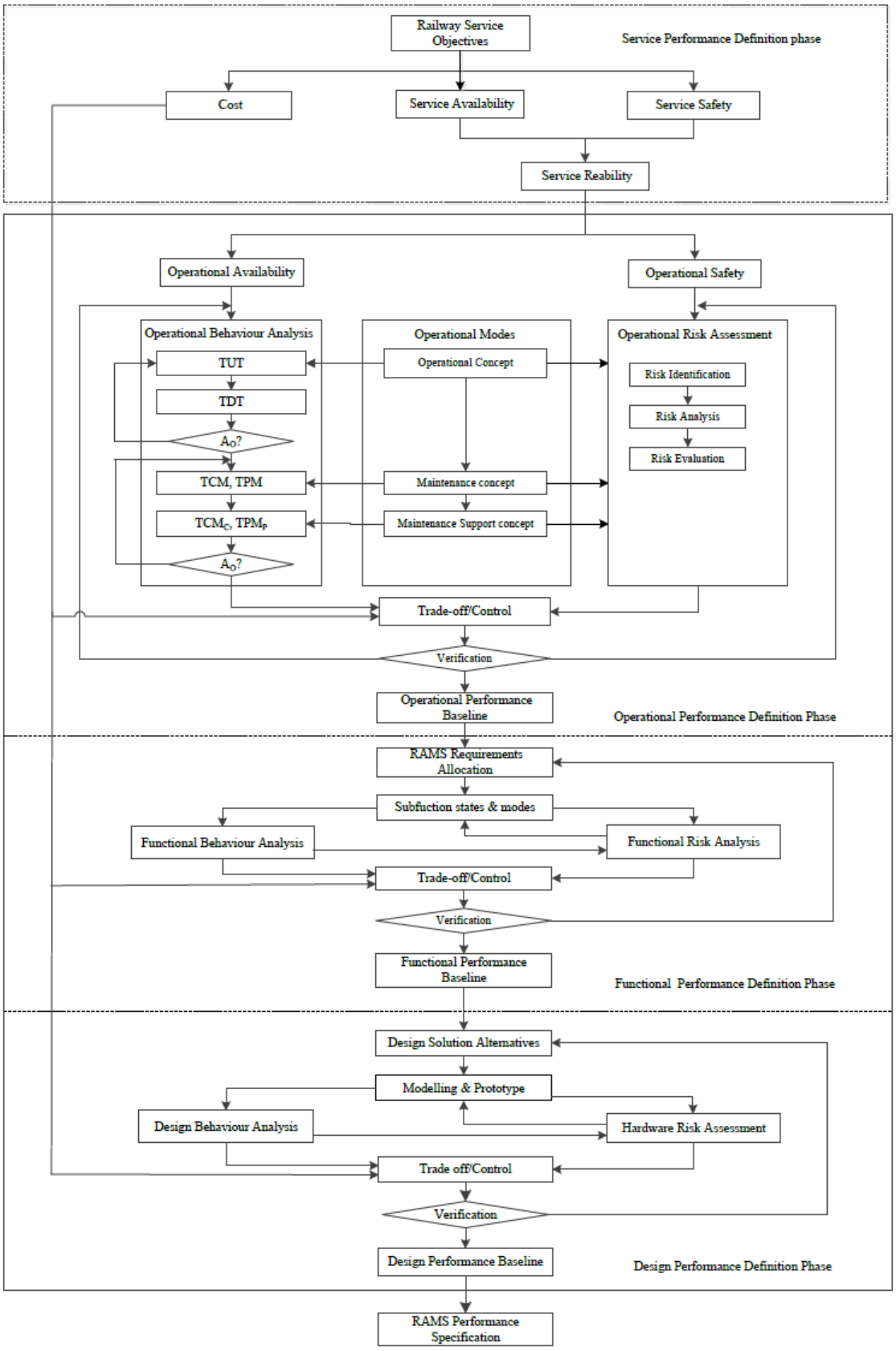

그림 2 철도차량 RAMS 평가 모델

Fig. 2 Rolling Stock RAMS Assessment Model

터 산출할 수 있도록 그림 2의 모델을 활용하여 모델링하였다[8].

$$TALDT = \frac{OT}{MTBF} \times ALDT \tag{5}$$

$$MTBF = \frac{OT \times ALDT}{(1 - A_o)\,TT - TMT} \tag{6}$$

유지보수성은 일반적으로 평균 수리시간(MTTR)과 유지보수율(MR)에 의해 아래 등식과 같이 정의될 수 있다[8].

$$MTTR = \frac{TCM \times OT}{MTBF} \tag{7}$$

$$MR = \frac{TCM + TPM}{OT} \tag{8}$$

가용성 평가는 운영 가용성을 중심으로 그림 1에 따라 절차에 의해 수행된다. 유사시스템의 데이터에 의해 평가된 신뢰성 및 유지보수성은 운영, 정비 및 정비지원 개념에 의해 적용될 수 있다. 또한 위험 평가결과에 의해 가용성 조정될 수 있다. 또한 평가결과는 요구사항에 적합하여야 하고 운영 가용성 성능은 기능에 적합하게 할당된다[11].

기능단계의 가용성은 시스템의 운영 가용성을 할당하는 것으로 시작한다[11]. 가용성 할당은 이 단계의 기본적인 프로세스 활동으로 유사시스템을 통해 개발하는 시스템의 상대적인 성능할당요소를 정의하고 할당매트릭스를 정의하는 방법을 제시하였다[12]. 평가요소와 범위는 개발되는 기능과 개발목적에 따라 정의할 수 있고, 평가는 엔지니어링 지식과 경험에 의해 수행될 수 있다[8]. 할당요소에 대한 평가범위는 20% 내외로 제시하였지만 개발하는 목적에 따라 범위를 정할 수 있다.

표 1 신리성 할당 요소

Table 1 Reliability Performance Allocation Factors

요소	평가 설명	평가범위
복잡성	시스템 복잡성은 시스템에 구성될 가능한 부품 수를 의미	0.8-1.2
중요성	시스템 중요성은 적용되는 엔지니어링 최신 기술임을 의미	0.8-1.2
운영 시간	운영시간은 전체 임무시간에 대한 실질적 운영시간을 의미	0.8-1.2
운영 환경	운영 환경은 실질 운영환경에 대한 영향의 심각성을 의미	0.8-1.2

표 2 유지보수성 할당 매트릭스

Table 2 Maintainability Performance Allocation Matrix

비교시스템		신뢰성 성능평가					
시스템	MTBF	복잡성	중요성	운영 시간	운영 환경	가중치	결과
Sub 1	TF1	R11	R12	R13	R14	$\prod_{i=1}^{4} R_{1j}$	$TF_1 \cdot \prod_{i=1}^{4} R_{1i}$
Sub n	TFn	Rn1	Rn2	Rn3	Rn4	$\prod_{i=1}^{4} R_{nj}$	$TF_n \cdot \prod_{i=1}^{4} R_{nj}$

$$MTBF_{sb} = \left[\frac{1}{\sum_{l=1}^{4} \left(\frac{1}{TF_i \cdot R_{ij}} \right)} \right] \tag{9}$$

시스템의 유지보수성 역시 앞서 신뢰성 할당방법과 같이 수행할 수 있다[8]. 등식 (10) 은 표 3의 유지보수성 평가요소와 표 4의 매트릭스를 통해 서브시스템의 가용성을 결정한다[12]. 유지보수성 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 상세히 제시하고 있다. 평가범위는 신뢰성과 같이 20%범위를 제안하였다[8].

표 3 유지보수성 할당요소

Table 3 Maintainability Performance Allocation Factors

평가 요소	평가요소 설명	평가 범위
접근성	접근성은 유지보수를 더욱 간편하게 수행하도록 하는 것을 의미	0.8-1.2
모듈화	모듈화는 유지보수 행동을 초기/다음단계로 쉽게 나누는 것을 의미	0.8-1.2
표준화	표준화는 다른 부품과 간단하게 교환할 수 있도록 하는 것을 의미	0.8-1.2

표 4 유지보수성 할당 매트릭스

Table 4 Maintainability Performance Allocation Matrix

비교시스템		유지보수성 성능 평가				
시스템	MTTR	접근성	모듈화	표준화	가중치	결과
Sub 1	TR1	M11	M12	M13	$\prod_{i=1}^{3} M_{1j}$	$TR_1 \cdot \prod_{i=1}^{3} M_{1i}$
Sub n	TRn	Mn1	Mn2	Mn3	$\prod_{i=1}^{3} M_{nj}$	$TR_n \cdot \prod_{i=1}^{3} M_{nj}$

$$MTTR_{sb} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{TF_i \cdot \prod_{j=1}^{3} R_{ij}} \cdot \frac{1}{TR_i \cdot \prod_{j=1}^{3} M_{ij}} \right)}{\sum_{i=1}^{1} \left(\frac{1}{TF_i \cdot \prod_{j=1}^{3} R_{ij}} \right)} \tag{10}$$

2.2 안전성 평가

가용성을 평가한 다음 안전성 설계를 위한 위험평가를 수행하여야 한다. 안전성 평가는 위험평가를 기반으로 한다[13]. 위험평가는 사람 또는 환경에 영향을 미치는 요소는 물론 서비스에 영향을 평가한다[8]. 철도차량시스템의 잠재적인 위험 평가는 그림 3에 제시된 봐와 같이 요구사항을 정의를 비롯하여 4개의 단계로 구성되었다. 이 프로세스는 고장 원인과 영향분석, 이들에 대한 시나리오 작성, 시나리오에 대한 원인과 영향에 대한 정량적 평가 방법을 적용되는 기술과 함께 제시하였다. 또한 부울 대수규칙을 통해 정확한 고장원인 요소를 확인하는 방법을 제시하였다[13].

그림 3은 다양한 분석기술의 결합을 요구하는 위험평가 프로세스를 설명하고 있다. 위험 파라미터 및 매트릭스 정

의단계는 통계적 분석기술을 통해 고장데이터를 분석하여 파라미터 및 매트릭스의 인덱스 및 순위를 정의한다. 위험확인단계에서는 고장모드영향분석(FMEA)를 통해 고장영향와 원인을 확인하고, 이에 대하여 고장사건분석(ETA)기술을 통해 고장영향 시나리오를 작성하고, 고장트리분석(FTA)기술을 통해 고장원인 시나리오를 작성한다. 고장분석단계에서는 먼저 부울 대수규칙을 이용 고장원인에 대한 시나리오를 최소단위로 단순화하여 각 고장요소의 고장률 또는 고장확률을 통해 정상 고장에 대한 양적인 평가를 수행하고, 또한 이 결과를 고장영향 시나리오에 적용하여 양적인 평가를 수행하도록 프로세스를 모델링하였다.

FMEA는 위험도 평가를 위해 매우 유용한 기술로 상세한 위험분석을 위해 효과적으로 사용할 수 있는 기술이다[14]. 이 FMEA는 철도차량의 가능한 모든 잠재적인 고장모드를 확인하고 이 고장모드의 원인과 영향을 분석하는데 매우 적절한 기술이다. 그러나 이는 규모가 크고 많은 기능의 복잡한 시스템과 안전기능을 포함하는 시스템의 위험도 평가에서는 보완적으로 다른 기술의 결합할 필요가 있다. 즉 시스템에 대한 위험을 일으킬 수 있는 결함이나 약점을 판단하기 위한 시스템 요소들의 상세한 관계와 이를 논리적 표현이고 수량적 표현할 수 있도록 보완되어야 한다[15]. FTA와 ETA는 이를 보완하기 매우 적절한 기술들이다[8].

FTA는 시스템의 위험을 일으킬 수 있는 고장원인을 효과적으로 추적할 수 있는 기술이다. 이 기술은 논리적이고 그래픽적인 방법을 통해 트리구조를 구성하여 고장메커니즘을 제공하고 또한 이들 고장트리 구조를 부울 대수 규칙을 적용하여 고장원인 효과적으로 최소단위 그룹으로 단순화하여 최소컷셋(MCS)을 제공한다. 따라서 이 기술은 위험을 일으키는 고장원인을 구조적으로 모델링하고 양적으로 평가하는데 매우 유용한 기술이다. 특히 안전에 관련된 위험을 일으키는 단독고장원인을 확인하는데 있어 매우 유용하다[14]. 이 정보는 안전에 관련된 부가적인 설계와 유지보수를 설계하는데 매우 유용한 기술이다[8].

제안된 위험평가모델은 요구사항정의단계로 시작된다. 이 단계는 타당성 조사를 통하여 위험평가에 필요한 요소를 포함하고 위험에 대한 설계 및 인수조건을 포함하여야 한다[11]. 위험에 관련된 요구사항은 시스템 엔지니링 프로세스와 적절히 통합될 수 있도록 시스템의 각 단계에 대한 요구사항이 포함되어야 한다. 요구사항에 포함될 요소는 다음과 같다. (1) 설계에서 위험설계에 대한 제한사항; (2) 운영적인 시나리오 및 운영적인 효과성 척도; (3) 시스템 경계, 운영환경 및 수명주기 프로세스; (4) 결정적 확률적 RAMS 요구사항; (5) 안전에 대한 인수조건.

프로세스의 다음단계는 위험 파라미터와 매트릭스를 정의하는 단계로 위험평가에 필요한 데이터나 정보를 수집하고 이에 대한 통계적 분석 및 경험적 지식을 통해 파라미터와 매트릭스의 인덱스 범위와 순위를 결정한다. 데이터와 정보는 유사시스템의 과거 데이터 및 시험데이터를 수집하고, 필요시 전문가 지식, 다른 정보원으로부터 수집한다. 수집되는 데이터나 정보는 시스템의 과거 장애나 사고로부터 가능한 위험을 정확하게 이해하고 이를 확인하기 위한 것이다. 또한 정보와 지식을 수집하고 분석하기 위하여 많은 분석 기술이 적용될 수 있다. 예를 들면 통계적 데이터 분석, 정보분석, 경험적 노하우 분석, 엔지니어링 분석, 개념적 지도 분석 등을 들 수 있다[13].

위험 파라미터는 고장모드의 심각도를 분류하기 위한 인덱스와 순위를 정의하고, 또한 고장모드의 발생빈도에 대한 인덱스 및 순위를 결정한다. 또한 이들을 결합하여 고장모드의 위험도 순위를 결정하기 위한 매트릭스를 정의한다. 아래 표 5는 고장모드의 심각도를 분류하기 위한 인덱스와 순위를 결정하는 방법을 자세히 설명하고 있다. 고장이 미치는 영향에 대한 결과는 사람, 환경, 서비스에 대하여 필요에 따라 결정하여 분석할 수 있다. 이는 고장데이터와 운영목적에 따라 선택될 수 있다.

표 5 고장심각도 파라미터

Table 5 Failure Severity Parameters

구분	수준	사람 또는 환경에 대한 영향	서비스 영향
Catastrophic	4	다수 사망 and/or 다수 심각한 부상 and/or 환경에 대한 심각한 침해	전체 시스템 고장
Critical	3	한사람 사망 and/or 심각한 부상 and/or 환경에 대한 중요한 침해	주요 서브시스템의 고장
Marginal	2	가벼운 부상 and/or 환경에 대한 중요한 위협	심각한 시스템 손상
Insignificant	1	가능한 가벼운 부상	가벼운 시스템 손상

표 6은 위험을 일으키는 고장모드의 발생빈도에 대한 파라미터를 정의하는 방법을 제시하고 있다. 발생빈도에 대한 인덱스는 수집된 데이터에 따라 정성적 정량적으로 정의할 수 있다. 아래 제시된 정성적 인덱스에 대한 설명과 연간 고장 발생빈도에 의한 분류를 설명하고 있다[14].

표 6 고장 빈도 파라미터

Table 6 Failure Frequency Parameters

구분	수준	설명	빈도/연간
Frequent	6	자주 일어날 것 같고 지속적으로 경험될 것 같다.	≥ 100
Probable	5	다수 일어날 것 같고 자주 일어날 수 있다.	$100 < to \leq 1$
Occasional	4	몇 번 일어날 수 있고 몇 번 일어날 수 있을 것으로 기대된다.	$1 < to \leq 10^{-2}$
Remote	3	시스템 수명기간 동안 때때로 일어날 수 있을 것 같고 논리적일 일어날 수 있을 것으로 기대된다.	$10^{-2} < to \leq 10^{-4}$
Impossible	2	일어날 것 같고 가능하지만 예외적으로 일어날 수 있을 것으로 가정될 수 있다.	$10^{-4} < to \leq 10^{-6}$
Incredible	1	극히 예외적으로 일어날 것 같고 거의 일어나지 않을 것으로 가장할 수 있다.	$< 10^{-6}$

위험평가 매트릭스는 먼저 위험도에 대한 순위를 그림 3과 같이 위험에 대한 설계 및 인수조건을 분류하고, 이를 기반으로 심각도와 발생빈도를 결합하는 형태로 아래 표 8과 같이 구조화한다. 이 위험도는 정량적으로 정의하여 위험도 순위가 정량적으로 정의될 수 있도록 할 수 있다. 안전과 아주 밀접한 관련이 있는 장치의 경우 이러한 방법으로 SIL 순위를 결정하기도 한다[10].

표 7 위험도 파라미터
Table 7 Risk Level Parameters

구분	위험도	위험도 조치
Intolerable	4	위험은 당연히 제거되어야 한다.
Undesirable	3	위험을 축소할 없을 때 동의하에 받아들일 수 있다.
Tolerable	2	위험의 적합한 통제와 동의와 더불어 받아들일 수 있다.
Negligible	1	위험은 어떤 동의 없이 받아들일 수 있다.

표 8 위험도 평가 매트릭스
Table 8 Risk Evaluation Matrix

고장빈도		고장의 위험도			
Frequent	6	Undesirable	Intolerable	Intolerable	Intolerable
Probable	5	Tolerable	Undesirable	Intolerable	Intolerable
Occasional	4	Tolerable	Undesirable	Undesirable	Intolerable
Remote	3	Negligible	Tolerable	Undesirable	Undesirable
Improbable	2	Negligible	Negligible	Tolerable	Tolerable
Incredible	1	Negligible	Negligible	Negligible	Negligible
		1	2	3	4
		Insignificant	Marginal	Critical	Catastrophic
		고장심각도			

위험확인단계는 고장모드를 확인하고 이 고장모드의 영향과 원인을 분석하고 시나리오 모델을 작성하는 단계이다. 고장모드의 원인과 영향은 시스템 단계에 따라 귀납 및 연역적으로 FMEA 기술을 적용하여 확인한다. 확인된 고장영향은 ETA분석 기술을 적용하여 시나리오 모델을 작성한다.

또한 ETA 시나리오의 각 단계에 따른 고장원인을 FTA 기술에 의해 시나리오를 모델링한다[8]. 그림 4는 ETA 분석 모델을 보여주고 있다. 이 ETA 모델은 안전가이드 장치를 포함한 시스템의 분석에 적합하다[5, 17]. 또한 이 시나리오는 고장에 의한 초기 사건으로부터 설치된 안전 가이드장치의 고장에 따라 시스템에 미치는 영향를 단계적으로 평가할 수 있다[8]. 하나의 고장모드에 의해 다양한 고장영향에 의해 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

고장모드의 발생 원인에 대한 시나리오는 2단계로 작성한다[8]. 먼저 피쉬본 다이어그램을 통해 하나의 고장에 영향을 미치는 고장원인을 확인하고 분류한다[5]. 고장원인은 먼저 고장원인을 주요 원인별로 분류하고 이들에 대한 주원인과 세부원인으로 구분하여 다이어그램을 완성하다. 피쉬본 다이어그램은 고장원인의 단계적 구조를 논리적으로 표현하기 위하여 FTA기술을 적용한다[5]. FTA기술은 AND와 OR의 논리 게이트를 활용하여 하나의 고장결과에 대하여 트리구조로 나타낸다. 이 FTA에 의해 표현된 트리구조는 ETA 시나리오 모델의 각 사건에 적용하여 고장모드의 원인과 결과에 대한 시나리오를 완성한다[18].

그림 3은 고장모드에 의해 발생된 고장영향에 대하여 FTA기술에 의해 트리구조로 표현하는 방법을 설명하고 있다[19]. FTA분석은 세 가지로 분류하여 분석할 수 있다. 주고장은 구조트리 안에 포함된 부품의 고유한 특성에 의해 발생한 고장을 의미한다. 2차 고장은 설계범위 밖의 부품에 의해 고장이 발생되는 고장을 의미한다. 마지막으로 명령고장은 설계 범위에 있는 부품의 부적합한 운영에 발생된 고장을 위미한다. 이러한 고장에 이르는 시스템 단계별 메커니즘은 AND 또는 OR게이트의 논리적 심벌을 연결하여 표현할 수 있다.

위험분석단계는 앞서 위험확인단계에서 완료한 고장모드에 대한 고장원인 시나리오를 단순화하고 양적으로 평가하여 고장결과에 대한 가능성을 확률적으로 분석하는 것을 의미한다. 그림 3에 제시된 바와 같이 먼저 고장발생빈도에 대한 수준을 제시하여야 한다. 이를 위하여 먼저 MCS를 표현하기 위하여 FTA구조를 최소 고장그룹으로 단순화하고 이들을 양적으로 평가하여야 한다. MCS에 의한 트리구조를 단순하게 표현하기 위해서는 부울 대수규칙을 적용한다[19]. 부울 대수규칙에 의해 고장트리구조를 단순화하는 방법을 제시하기 위하여 그림 3의 하나의 예시된 구조를 통해 설명한다.

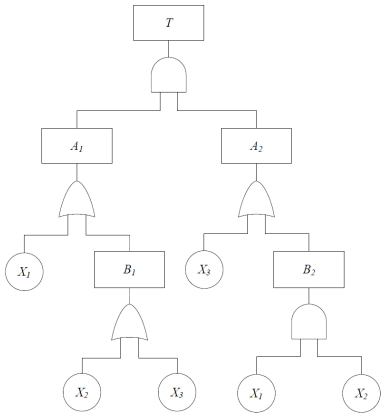

그림 3 고장트리 단순화의 예
Fig. 3 An Example for simplification of a Fault Tree

그림 3의 고장트리구조의 상호관계는 아래 등식 (11)에서 (15)와 같이 5가지 수학적 모델로 표현할 수 있다.

$$T = A_1 \bullet A_2 \tag{11}$$
$$A_1 = X_1 + B_1 \tag{12}$$
$$B_1 = X_2 + X_3 \tag{13}$$
$$A_2 = X_3 + B_2 \tag{14}$$
$$B_2 = X_1 \bullet X_2 \tag{15}$$

먼저 위 정상고장(T)에 대하여 먼저 등식 (12), (14)를 적용하여 등식 (16)과 같이 표현될 수 있다.

$$T=(X_1+B_1)\cdot(X_3+B_2)$$
$$=(X_1\cdot X_3)+(B_1\cdot X_3)+(B_2\cdot X_1)+(B_1\cdot B_2) \quad (16)$$

위 등식 (16)의 B1을 등식 (13)으로 치환하면 등식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T=(X_1\cdot X_3)+(X_2+X_3)\cdot X_3+(B_2\cdot X_1)+(X_2+X_3)\cdot B_2$$
$$=X_1\cdot X_3+X_2\cdot X_3+X_3\cdot X_3+B_2\cdot X_1+B_2\cdot X_2+B_2\cdot X_3 \quad (17)$$

등식 (17)은 아래와 같이 부울 대수의 독립법칙을 적용하면 등식 (18)과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$X_1\cdot X_3+X_2\cdot X_3+X_3\cdot X_3+B_2\cdot X_3=X_3$$
$$T=X_3+B_2\cdot X_1+B_2\cdot X_2 \quad (18)$$

등식 (18)의 B2에 등식 (15)를 적용하고, 이에 대하여 아래와 같이 흡수법칙을 적용하면 등식 (20)이 된다.

$$T=X_3+(X_1\cdot X_2)\cdot X_1+(X_1\cdot X_2)\cdot X_2 \quad (19)$$
$$(X_1\cdot X_2)\cdot X_1=X_1\cdot X_2$$
$$T=X_3+(X_1\cdot X_2)+(X_1\cdot X_2) \quad (20)$$

등식 (20)에 대해서 아래와 같이 흡수법칙을 적용하면 등식(21)과 같이 간단하게 표현된다.

$$(X_1\cdot X_2)+(X_1\cdot X_2)=X_1\cdot X_2$$
$$T=X_1\cdot X_2+X_3 \quad (21)$$

등식 (21)에서 X_1, X_2, X_3은 고장의 최소고장원인으로 MCS라 한다. 등식 (21)에서 "$X_1\cdot X_2$" 표현은 X_1과 X_2가 동시에 고장 났을 때 정상사건(T)가 발생하므로 "이중 포인트 고장"이라 하고, X_3은 단독고장에 의해 정상고장이 발생하므로 "단독 포인트 고장"이라 한다. 단독 포인트 고장의 경우 안전장치로 분류할 수 있고 안전가이드장치의 추가설치를 고려할 수 있다. 또한 유지보수에서 특별관리 절차를 마련할 수 있다. 등식 (21)은 그림 4와 같이 표현된다.

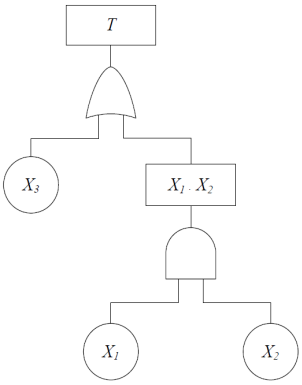

그림 4 그림 3을 단순화한 고장트리
Fig. 4 Equivalent Fault Tree Simplified from Fig. 3

고장트리에 대한 단순화가 완료되면 고장트리구조를 통해 표현된 MCS의 고장률 또는 고장확률에 의해 정상고장 (T)에 대한 고장률이나 고장확률을 구할 수 있다. MCS의 고장률 또는 신뢰성에 의해 정상고장을 수량화하는 방법을 수학적 모델을 통해 제시하였다. 등식 (22)과 (24)는 직렬구조의 고장트리구조를 갖는 시스템의 고장률을 산출하는 절차를 나타낸다. 신뢰성 R_i를 갖는 부품이 직렬구조 즉 "AND 게이트로 구성되면 시스템의 신뢰성(R_s)과 고장률(F_s)은 아래의 등식을 이용하여 산출할 수 있다[17].

$$R_s(t)=\prod_{i=1}^{n}R_i(t) \quad (22)$$
$$F(t)=1-R(t)\text{이므로}$$
$$F_s(t)=1-\prod_{i=1}^{n}(1-F_i(t)) \quad (23)$$

또한 신뢰성 R_i을 갖는 부품이 병렬구조 즉 "OR 게이트"로 구성될 때 시스템 신뢰성(R_p) 및 고장률(F_p)을 아래 등식 (24)와 (25)에 의해 산출할 수 있다[17].

$$R_p(t)=1-\prod_{i=1}^{n}(1-R_i(t)) \quad (24)$$
$$F_p(t)=\prod_{i=1}^{n}F_i(t) \quad (25)$$

단순화된 고장트리구조에 대한 양적인 평가가 완료되면 ETA 기술로 표현된 고장결과 시나리오에 적용하여 고장결과에 시나리오의 각 사건의 성공과 고장 패스에 대한 확률이나 고장률을 구할 수 있다. FTA와 ETA 시나리오 모델을 결합하여 고장결과에 대하여 양적으로 표현하는 방법을 그림 5와 같이 제시한다.

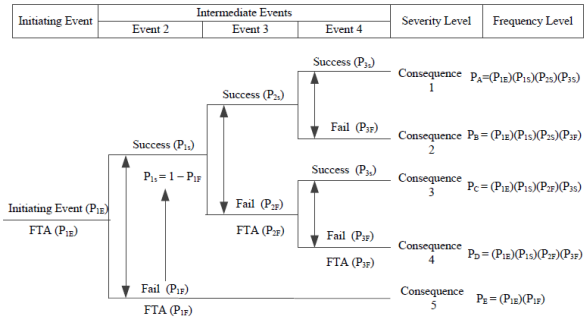

그림 5 고장영향을 수량화하기 위한 ETA분석
Fig. 5 ETA analysis for quantifying failure consequences

이와 같이 분석된 결과는 표 1에서 표 4에 적용하여 심각도에 대한 정성적 정량적 인덱스와 순위를 결정하여 위험도를 결정한다. 이 위험도 순위는 표 3에 적용하여 안전도에 대한 설계조건 및 인수조건을 결정한다. 이는 그림 3의 위험 매트릭스 평가단계에 포함되어 있다. 이와 같이 제안된 절차에 따라 분석기술을 적용하면 효과적이고 간편하게 위험도를 결정할 수 있다. 최근 시스템이 더욱 복잡해짐에 따

라 최근에는 퍼지로직을 적용하여 위험을 더욱 세분하여 수많은 부품에 대하여 전체적으로 순위를 결정할 수 있다[13].

3. 공압제동 제어장치의 RAMS 평가 사례

제동장치는 지상신호장치나 기관사의 제동요구가 있을 때마다 차량의 속도를 낮추거나, 정거장에서 정차하는 역할을 수행하는 안전장치의 하나이다[21]. 제동장치는 기계, 전기, 및 공압 제동장치 등 매우 다양하다. 하지만 공압제동은 정차가 요구되어 전기제동이 소멸될 때 작용하며 차량 또는 외부의 위급한 상황에서 상용 만제동을 체결하거나 비상제동을 체결한다. 이를 제어하는 장치를 공압제동 제어장치(PBU)라 한다[22]. 이 공압제동 제어장치는 안전장치의 하나로 위험평가를 통해 위험성 및 신뢰성을 확인할 수 있다. 그림 6은 공압제동 제어장치의 구조를 설명하고 있다.

위 그림과 같이 공압제동 제어장치는 공기필터(AF)를 비롯하여 8개의 부품으로 구성되어 있다. 이들 구성장치의 기능을 살펴보면, 전기제어장치(ECU)는 차량전체의 공기 제동력을 제어한다. 전자공압변화 제어밸브(EPV)는 제동실린더의 압력을 제어한다. 부하밸브(LV)는 차량 안에 승차한 승객들의 하중을 측정하는 장치이고, 압력감지 유니트(PSU)는 차량 내 승객의 부하 및 공기제동실린더의 압력을 검지하는 장치이다. 또한 오일 분리기(OS)는 제동관의 공기 중에 있는 습기나 오일 성분을 분리하여 제거하는 장치이다. 자동배수변(ADV)장치는 주공기통 압력공기에 포함된 습기나 오일을 분리하여 배출하는 장치이다. 마지막으로 댐퍼밸브(DV)는 제동실린더의 공기압을 조절하여 차륜의 마모를 방지하는 장치이다. 표 9는 현장에서 수집한 데이터를 분석한 결과를 보여준다[22].

그림 6의 고장트리구조를 수학적으로 표현하면 등식 (26)에서 (32)와 같이 나타낼 수 있다. 이들 수학적 모델에 부울대수법칙을 적용하여 MCS표현으로 전환하면 등식 (33)과 같이 표현된다. 이를 다시 고장트리구조로 나타내면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

그림 7에서 보는 봐와 같이 공압제동 제어장치에 의한 시스템 고장 결과는 9개의 MCS에 의해 발생할 수 있으며, 이중에서 단독고장을 일으키는 MCS은 모두 6개이고, 두 개의 더블고장을 일으키는 MCS은 3개로 확인되었다.

$$T = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 \tag{26}$$

$$A_1 = X_1 + X_2 \tag{27}$$

$$A_2 = X_3 \cdot X_4 \tag{28}$$

$$A_3 = X_5 \cdot X_6 \tag{29}$$

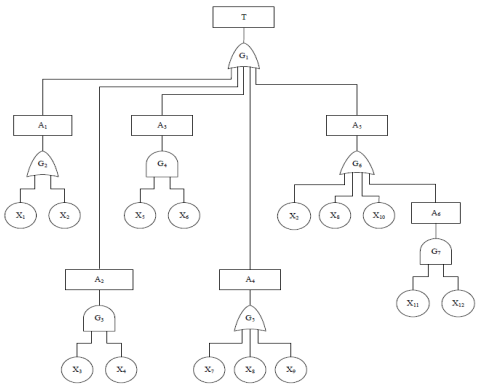

그림 7 PBU의 FTA분석
Fig. 7 FTA Analysis of PBU

표 9 FMEA 분석
Table 9 FMEA Analysis

코드	부품	고장원인			고장영향			
		고장원인		심벌	고장결과	심각도	고장률	고장빈도
P-1	AF	에어필터 불량		X_1	기능손실	2	2.2×10^{-6}	3
P-2		자동배수장치 불량		X_2	기능손실	2	1.8×10^{-6}	3
P-3	LV	LV 압력변화		X_3	기능손실	2	2.0×10^{-6}	3
P-4		LV 단락		X_4	기능손실	2	2.2×10^{-6}	3
P-5	PSU	PSU 감지불량		X_5	기능손실	2	3.0×10^{-6}	3
P-6		PSU 단락		X_6	기능손실	2	2.8×10^{-6}	3
P-7	ECU	ECU 고장		X_7	기능축소	3	2.3×10^{-6}	3
P-8		통신에러		X_8	기능축소	3	4.6×10^{-6}	3
P-9		전원공급장치 에러		X_9	기능축소	3	2.3×10^{-6}	3
P-2	EPV	자동배수장치 불량		X_2	기능손실	2	1.8×10^{-6}	3
P-10		압력센서 불량		X_{10}	기능손실	2	5.8×10^{-6}	3
P-8		통신불량		X_8	기능축소	3	4.6×10^{-6}	3
P-11		EPV 불량	EPV 누기	X_{11}	기능축소	3	4.0×10^{-6}	3
P-12			EPV이물질	X_{12}	기능축소	3	5.4×10^{-6}	3

$$A_4 = X_7 + X_8 + X_9 \tag{30}$$

$$A_5 = X_2 + X_8 + X_{10} + A_6 \tag{31}$$

$$A_6 = X_{11} \cdot X_{12} \tag{32}$$

$$\begin{aligned} T &= (X_1 + X_2) + (X_3 \cdot X_4) + (X_5 \cdot X_6) + (X_7 + X_8 + X_9) + (X_2 + X_8 + X_{10}) + A_6 \\ &= X_1 + X_2 + (X_3 \cdot X_4) + (X_5 \cdot X_6) + (X_7 + X_8 + X_9) + X_{10} + (X_{11} \cdot X_{12}) \end{aligned} \tag{33}$$

그림 8을 활용하여 시스템 및 각 부품의 고장률을 산출하기 위하여 아래 등식 (34)에서 (39)와 같은 수학적 모델을 마련하였다.

$$F(A_1) = 1 - (1 - F(X_1)) \cdot (1 - F(X_2)) \tag{34}$$

$$F(A_2) = F(X_3) \cdot F(X_4) \tag{35}$$

$$F(A_3) = F(X_5) \cdot F(X_6) \tag{36}$$

$$F(A_4) = 1 - (1 - F(X_7)) \cdot (1 - F(X_8) \cdot (1 - F(X_9)) \tag{37}$$

$$F(A_5) = 1 - (1 - F(X_{10})) \cdot (1 - F(X_6)) \tag{38}$$

$$F(A_6) = F(X_{11}) \cdot F(X_{12}) \tag{39}$$

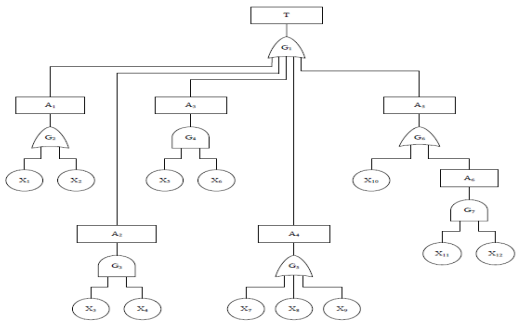

그림 8 그림 7을 단순화한 고장트리
Fig. 8 Fault-tree simplified from Fig. 7

그림 8을 활용하여 각 부품의 고장률을 산출하기 위하여 아래 등식 (34)에서 (39)과 같이 수학적 모델을 마련하였다. 이 같은 고장률 평가를 통하여 아래 표 10과 같이 표 5에서 표 8을 적용하여 위험평가를 수행하였다.

표 10 부품의 위험도 평가결과
Table 10 Risk Assessment of Components

부품명	트리 표현	고장률	발생 빈도	심각도	위험도
AF	A_1	4.00×10^{-06}	3	2	2
LV	A_2	4.40×10^{-12}	1	2	1
PSU	A_3	8.40×10^{-12}	1	2	1
ECU	A_4	9.20×10^{-06}	3	3	2
EPV	A_5	5.08×10^{-06}	3	3	2

그림 12의 트리구조를 등식 (40)과 같이 수학적 모델을 정의하여 고장률을 산출하였고, 표 11과 같이 시스템의 위험도와 신뢰성을 평가하였다. 또한 등식 (41)과 같이 신뢰성 수학적 모델을 정의하여 공압제동 제어장치의 신뢰성을 산출하였다[8]. 표 11은 위험과 신뢰성 평가의 결과를 설명하고 있다.

$$F(T) = 1 - (1 - F(A_1)) \cdot (1 - F(A_2)) \cdot (1 - F(A_3)) \cdot (1 - F(A_4)) \tag{40}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{F(T)} \tag{41}$$

표 11 PBU 위험도 및 신뢰도 평가
Table 11 Risk & Reliability Assessment of PBU

장치	고장율	발생 빈도	심각도	위험 수준	신뢰성 (MTBF)	
					km	hour
PBU	1.90×10^{-05}	2	3	2	52,632	1,754

4. 결 론

이 논문은 철도차량시스템 개념설계단계에서 시스템 운영목적 및 유사시스템의 데이터 및 정보를 통하여 구조적 RAMS 설계조건을 확립하기 위한 RAMS 평가 프로세스, 방법, 및 기술을 제시하였다. 이 프로세스는 가용성 및 안전성 평가 프로세스로 구성되었으며, 가용성 프로세스는 운영가용성 요구사항에 대한 운영, 정비, 및 정비지원 개념과의 적합성을 평가하도록 되어 구조화하였으며, 안전평가 프로세스는 위험평가를 기반으로 시스템의 구성요소들의 잠재적인 위험요소를 확인하고 평가하도록 구조화하였다. 또한 가용성 평가결과는 가용성 성능을 기반으로 신뢰성 및 유지보수성이 트레이드오프 할 수 있도록 모델링 하였고, 위험평가결과에 의해 통제를 받도록 구조화하여 제안하였다.

RAMS 평가 프로세스는 시스템 엔지니어링 프로세스에 효과적으로 통합되도록 구조화하였다. 따라서 시스템 엔지니어링 프로세스의 요구사항 정의, 기능적 아키텍처 정의 및 구조적 디자인 구조를 결정하는 단계에 따라 프로세스를 구조화하였다. 또한 요구사항 정의는 전체적인 철도시스템의 서비스 목표로부터 철도차량시스템의 운영 가용도 및 서비스 목표를 결정하도록 제안하였다. 기능적 구조의 RAMS 성능은 서브기능의 상태와 모드에 따른 시간적 운행 패턴과 사건에 따라 RAM 성능을 할당하도록 제시하였다. 또한 마지막으로 물리적 디자인 구조의 RAMS 성능은 동일한 구조의 유사시스템에 기능 및 구조에 적합한 대체품에 의한 프로타입 또는 모델링하여 이를 시험평가하여 시스템 통합성을 평가하도록 제시하였다.

RAMS 평가의 한 부분으로 가용성 평가방법에 대하여 언급하였다. 가용성 평가는 운영가용성 목표를 기반으로 운영, 정비 및 정비지원 개념에 대하여 유사시스템에서 획득한 데이터와 정보를 통해 평가하는 방법을 제시하였다. RAM평가를 위해 운행 프로파일의 시간적 모델과 수학적 모델을 제시하였다. 이를 통해 확립된 RAM 성능은 필요에 따라 트레이드오프 되거나 위험성 평가결과에 의해 통제되어 서브시스템에 할당된다. 따라서 이 신뢰성 및 유지보수성 성능을 할당하기 위하여 평가요소, 평가매트릭스 및 평가를 위한 수학적 모델을 제시하였다. 평가요소는 개발하는 시스템에 따라 결정될 수 있으며, 엔지니어링 지식과 경험에 의해서 평가하도록 하였다. 이때 평가범위 역시 시스템에 따라 그

범위를 결정할 수 있다. 이 논문에서는 신뢰성과 유지보수성에 대하여 각각 20%의 평가범위를 제안하였다.

이 논문은 위험평가를 기반으로 한 안전성 평가방법을 제시하였다. 이는 철도차량시스템의 운행형태에서 발생할 수 있는 위험요소를 효과적으로 제거하거나 축소할 수 있도록 프로세스를 구조화하였다. 이러한 위험평가는 앞서 제시된 가용성 평가와 통합적으로 수행할 수 있도록 제시되었다. 먼저 위험평가를 요구사항에 대하여 언급하였고, 이어서 유사시스템의 데이터를 통해 위험 파라미터 및 매트릭스를 정의하는 방법을 제시하였다. 또한 위험을 확인방법으로 FMEA를 통해 고장모드의 원인과 결과를 분석하는 방법을 제시하였고, 이 분석데이터를 ETA 및 FTA를 통해 고장시나리오를 작성하는 방법을 제시하였고, 이를 부울 대수규칙을 적용하여 MCS로 단순화하여 양적인 평가를 수행하는 방법을 제시하였다.

공압제동 제어장치는 안전하고 정확한 속도제어 및 정차를 수행하는 차량의 안전장치로 높은 수준의 신뢰성 및 안전성을 요구한다. 따라서 마지막으로 이 논문에서는 철도차량의 공압제동 제어장치의 위험 및 신뢰성평가를 통해 앞서 제시된 가용성 및 안전성 평가의 유효성을 제시하였다. 안전성 평가를 통해 공압제동 제어장치의 고장률, 고장심각도, 위험도 및 신뢰성 성능을 확인하였다. 결론적으로 이 논문은 철도차량의 연구개발 초기단계에서 시스템의 개념을 확립하고 유사시스템의 정보 및 데이터 평가를 기술적 RAMS 설계조건 및 인수조건을 확립하기 위한 방법을 제시하였다. 지금까지 언급된 프로세스, 방법 및 기술을 효율적으로 적용하기 위하여 시스템 엔지니어링 및 RAMS를 적극도입하고, 데이터를 효과적으로 관리하는 적극적인 노력이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원[과제번호 13RTRP- B067961-01]에 의해 수행되었습니다.

References

[1] Bonnett, C. F., “Practical railway engineering, World Scientific.” 2005.

[2] Profillidis, V. A. “Railway management and engineering”, Ashgate Publishing, Ltd. 2007.

[3] Cantos, P. & Campos, J., “Recent changes in the global rail industry: facing the challenge of increased flexibility.” 2005.

[4] EN 60300-3-1, “Dependability Management - Part 3-1: Analysis Techniques for Dependability - Guide on Methodology”, London: British Standards Institution (BSI), 2004.

[5] EN 50126-1, “Railway applications - The Specification and Demonstration Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1: Basic Requirements and Generic Process”, London: British Standards Institution (BSI), (1999.

[6] Elphick, J., “Railway Systems Engineering Why is Water Wet? *In:* Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2010)”, IET Professional Development Course on, 2010. IET, 250-270, 2010.

[7] Hwang, J.-G. & Jo, H.-J., “RAMS management and assessment of railway signaling system through RAM and safety activities”, *In:* Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008.

[8] M-G, Park, “RAMS management of Railway systems - Integration of RAMS Management into Systems Engineering”, University of Birmingham, 2013.

[9] EN 31010, “Risk Management - Risk Assessment Techniques”, London: British Standards Institution (BSI). 2008

[10] Jung, I, S., “Study on the Setting-up & Demonstration of RAMS requirements in Rolling Stock”, Seoul National University of Science and Technology, 2009.

[11] EN 50129, “Railway Applications - Communication, Signalling and Processing Systems - Safety related Electronic Systems for Signalling”, London: British Standards Institution (BSI), 2003. Seong-Phil Eo, S.-J. K. a. D.-Y. K. (2010). Establishing RAM Requirement based on BCS model for weapon Systems. Korean Weapon Technical Institution, Vol.1, pp.67-76.

[13] An, M., “A review of design and maintenance for railway safety - the current status and future aspects in the UK railway industry”, World Journal of Engineering, Vol.2 (3), pp.10-22, 2005.

[14] EN 60812, “Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)”, London: British Standards Institution (BSI), 2006.

[15] Bitsch, F., “Process Model for the Development of System Requirements Specifications for Railway Systems”, 2003.

[16] EN 50128, “Railway Applications - Communication, Signalling and Processing Systems - Software for Railway Control and Protection Systems”, London: British Standards Institution (BSI), 2009.

[17] EN 61025, “Fault tree analysis (FTA)” London: British Standards Institution (BSI), 2007.

[18] EN 62502, “Analysis techniques for dependability Event Tree Analysis”, London: British Standards Institution (BSI), 2009.

[19] Ericson, C. A., “Hazard analysis techniques for system safety”, Wiley-Interscience, International Conference on, 2008. IEEE, 892-895, 2005.

[20] EN 50126-2, “Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 3: Guide to the Application of EN 50126-1 for Safety, 2007.

[21] Ting, T. Yue, L. Tao-Tao, Z., Hai-Long, J. & Hai, S., “FTA and FMEA of braking system based on relex 2009. *In:* Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM), 2011 International Conference on, 2011. IEEE, 106-112, 2011.

[22] Kim, J. “The Study on FTA of Full Service Brake Equipments for Making Safety about Rolling Stock System”, Korea: Seoul National University of Science & Technology, 2008.

저 자 소 개

박 문 규 (朴 文 圭)

서울과학기술대학교 기계공학 학사, 서울시립대학교 전기공학 석사, 영국 버밍엄대학교에서 시스템 엔지니어링 박사학위를 받았다. 한국철도공사, 서울도시철공사에서 근무하였으며, ㈜ 팍스의 대표로 시스템 엔지니어링 서비스를 제공한다.

한 성 호 (韓 成 浩)

한국철도기술연구원 수석연구원으로 근무하며 국가 R&D로서 도시철도 표준화 전동차 시스템, 기존선 고속화 시스템, 고속철도 차량시스템 등 전기철도 시스템 엔지니어링 전반에 걸친 설계검증, 시험평가기술을 수행하였다.

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.