

인적오류가 관여된 철도 사고의 체계적 분석을 위한 FRAM의 활용

최은비* · 함동한*

*전남대학교 산업공학과

A FRAM-based Systemic Investigation of a Rail Accident Involving Human Errors

Eun-Bi Choi* · Dong-Han Ham*

*Dept. of Industrial Engineering, Chonnam National University

Abstract

There has been a significant decline in the number of rail accidents in Korea since system safety management activities were introduced. Nonetheless, analyzing and preventing human error-related accidents is still an important issue in railway industry. As a railway system is increasingly automated and intelligent, the mechanism and process of an accident occurrence are more and more complicated. It is now essential to consider a variety of factors and their intricate interactions in the analysis of rail accidents. However, it has proved that traditional accident models and methods based on a linear cause-effect relationship are inadequate to analyze and to assess accidents in complex systems such as railway systems. In order to supplement the limitations of traditional safety methods, recently some systemic safety models and methods have been developed. Of those, FRAM(Functional Resonance Analysis Method) has been recognized as one of the most useful methods for analyzing accidents in complex systems. It reflects the concepts of performance adjustment and performance variability in a system, which are fundamental to understanding the processes of an accident in complex systems. This study aims to apply FRAM to the analysis of a rail accident involving human errors, which occurred recently in South Korea. Through the application of FRAM, we found that it can be a useful alternative to traditional methods in the analysis and assessment of accidents in complex systems. In addition, it was also found that FRAM can help analysts understand the interactions between functional elements of a system in a systematic manner.

Keywords : FRAM(Functional Resonance Analysis Method), Rail Accident, Systemic Model, Complex System Accident, Risk Analysis

1. 서론

철도 안전법이 제정된 2004년 이후 단순한 기술적 원인에 의한 국내 철도사고 발생 건수는 큰 폭으로 감소했으나 철도 시스템이 복잡해짐에 따라 안전사고관리에서 기술적 요인 외에 인적 요인 및 조직적 요인의 체계적 고려가 점점 중요해지고 있다[1]. 철도의 특성상 사고 발생 시 대규모로 인명피해를 초래할 수 있으며 단순한 인적요인이 대형사고로 연결될 가능성이 있어 인적오류가 관여된

사고의 효과적 대응은 여전히 철도 안전관리의 중요한 과제로 남아 있다[2].

다른 산업과 마찬가지로 정보기술이 철도 시스템에 적극 도입되면서 철도 시스템의 정보화, 자동화, 지능화 수준이 높아지면서 철도 시스템의 설계와 운영의 복잡도가 매우 증가했고, 철도 시스템도 복잡한 사회-기술적 시스템의 대표적인 사례가 되고 있다. 복잡한 시스템에서는 내부 요소들이 모두 정상적으로 작동하는 것처럼 보여도 요소 간의 상호작용에 의해 언제든지 예측할 수 없는 사고가

[†]이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: NRF-2019R1H1A2102103)

[†]Corresponding Author: Dong-Han Ham, Industrial Engineering, Chonnam National Univ., 77 Yongbong-ro, Buk-Gu, Gwangju, MP: 010-3417-4607, E-mail: donghan.ham@gmail.com

Received: February 18, 2020; Revision: March 14, 2020; Accepted: March 17, 2020

발생하며 한 분야의 결함이나 장애가 연쇄적 사고나 전체 시스템의 마비로 이어질 가능성이 있다[2,3]. 실제로 대형철도사고는 한 가지 원인보다 여러 개의 원인이 복합적인 방식으로 결합하여 발생하기 때문에 사고를 선형적 인과관계의 관점으로 바라보는 기존의 사고분석 방법으로는 사고를 체계적으로 분석하고 예방하는데 한계가 있다고 알려져 있다[1].

이러한 한계를 보완하기 위해 시스템적 사고를 적극 반영하는 사고분석 기법들이 최근에 개발되어 왔다[4,5]. 이 중에서 FRAM(Functional Resonance Analysis Method)이 여러 개념적 우수성으로 인해 철도시스템과 같은 복잡한 사회-기술적 시스템의 사고분석 및 위험성 평가에 적합한 기법중의 하나로 인식되고 있다[6-10]. 이에 본 연구는 FRAM을 활용해 실제 국내 철도사고를 분석함을 목적으로 한다. 이를 통해 FRAM의 응용 사례를 확보함과 동시에 기존의 사고분석 기법과 비교해 FRAM이 갖고 있는 개념적 장점을 확인하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 사고 분석 방법 개요

사고분석 방법은 일반적으로 3세대로 구분한다[4]. 이 방법들이 가정하고 있는 사고모델(accident model)에 기반해 세대별 구분을 하고 있다. 1세대 기법은 선형적 인과관계 모델(linear cause-effect model)에 기반한다. 이 모델은 사고에는 근본원인이 존재하고 선형적 인과관계에 따라 사고가 발생한다고 가정한다[7]. 도미노 모델과 FTA 모델이 대표적인 예로 근본원인을 찾아 제거하면 사고를 예방할 수 있다는 믿음을 갖고 있다. 그러나 선형적 모형의 한계가 분명해지고 인적요인 및 조직적 요인의 중요성이 강조되고 잠복적 사고원인 파악이 중요해지면서 2세대 기법이 등장하였다.

2세대 기법은 역병적 모델(epidemiological model)에 기반한다. 역병적 모델은 다양한 요인들이 복합적으로 작용해 사고가 발생한다는 관점이다. 스위스 모델이 대표적인 예라 할 수 있다. 이 모델은 잠재되어 있던 관리적 및 조직적 문제들이 작업자의 불안정한 행위와 결합해 사고가 발생한다는 관점으로 사고를 바라본다. 복잡한 사고를 분석하기에 선형적 모델보다 효과적이지만 여전히 선형적 인과관계를 가정하고 있어 요인들의 복잡한 상호작용을 분석함에 한계가 있다[4].

3세대 기법은 시스템적 모델(systemic model)에 기반한 시스템적 사고(systems thinking)를 적극 반영하고자

한다. 시스템적 기법은 여러 다양한 요인들이 예상하지 못한 비선형적인 방식으로 상호작용하면서 창발적 현상으로 사고가 발생한다는 관점을 갖고 있다[6, 10]. 시스템적 기법 중 FRAM은 새로운 안전 패러다임인 안전-II와 안전탄력성 공학(Resilience Engineering)의 개념과 원칙을 잘 반영해 현재 많은 관심의 대상이 되고 있다[11]. FRAM은 엄밀하게 말하면 복잡한 시스템의 기능적 모형화 기법이지만 이러한 모형을 활용해 사고분석 및 위험도 평가에 활용될 수 있어 안전기법으로 고려될 수 있다[6]. FRAM은 특히 시스템 내 다양한 요소의 기능적 상호작용을 바탕으로 전체주의적인 관점을 갖고 사고분석을 가능하게 한다는 점에서 철도시스템과 같은 복잡한 시스템의 안전사고 분석에 여러 장점을 갖고 있다고 알려져 있다. 이로부터 FRAM이 철도 분야의 안전성 향상에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단할 수 있다[10,11].

FRAM은 현재까지 여러 산업분야에서 사고분석 및 위험성평가를 위한 광범위하게 적용이 되어 왔다. 사고분석과 관련해 FRAM이 적용된 산업분야 중에서 대표적인 분야는 다음과 같다: 항공운항 및 항공관제[12-15], 철도[10,11], 헬스케어시스템[9,16-17], 선박해양[18, 19], 교육 및 제조업[20]. 현재까지 FRAM은 유럽을 중심으로 많이 연구되어 왔는데 유럽에서 상대적으로 항공 및 헬스케어 분야에서 사례연구를 많이 개발하다보니 이 분야에서의 연구가 상대적으로 많은 편이다.

FRAM을 단순히 사고분석을 위해 활용하는 수준을 넘어 FRAM의 이론적 우수성을 입증하고 그 실용성 확보를 제고하기 위한 연구도 현재 활발하게 진행되고 있다. 사고분석에서 FRAM의 이론적 우수성은 동일한 사고를 대상으로 사고분석이 이루어졌을 경우 기존 기법에 비해 분명하게 나타난다고 알려져 있다[7,8]. 특히 현대적 산업시스템의 사고분석에서 필수적으로 고려할 필요가 있는 기능 수행의 변동성 및 기능 간 비선형적 상호작용을 체계적으로 고려할 수 있게 해준다는 점에서 FRAM은 기존 사고분석 기법의 한계를 잘 극복해줄 수 있는 기법으로 인식되고 있다[9,20]. 또한 FRAM에서 잘 반영되어 있지 않은 시스템의 다양한 추상화 수준을 반영해 시스템을 더 종합적으로 바라볼 수 있도록 도와주는 기법의 제안도 이루어졌다[11]. FRAM을 개발한 Hollnagel은 FRAM 기반의 사고분석에서 기능 변동성의 정량적 접근은 큰 의미가 없다고 한다[6]. 그러나 일부에서는 기능의 변동성을 정량화하기 위해 몬테 카를로 시뮬레이션 같은 기법을 활용하려는 노력도 보이고 있다[14].

FRAM을 활용해 사고분석 및 위험성 평가와 같은 안전 분석에만 이용하는 것이 아니고 시스템 및 직무개선에 활용하는 사례도 많아지고 있다. 이는 앞서서도 기술했듯이 안전기법 이전에 시스템 기능 및 기능 간 상호작용에 초점

을 둔 시스템 모델링 기법이기에 때문에 가능하다. 직무 개선의 예로 FRAM을 이용해 병원 응급실의 직무 절차서와 현장에서의 의사 및 간호사들의 실제 직무 방식을 비교해 보다 작업자 중심적인 응급실 직무 절차서를 설계한 덴마크와 호주 병원의 사례를 들 수 있다[17]. 또한 복잡한 시스템에서 작업 수행도 향상훈련을 위해 활용되는 시뮬레이터의 개선을 위해 FRAM을 활용한 사례도 있다[10].

2.2 FRAM (기능공명 파급분석기법)

2.2.1 FRAM의 이론적 배경

기존의 안전패러다임인 안전-I에 기반한 사고분석 기법은 성공적 작업결과와 실패적인 작업결과(즉 사고)는 그 원인과 과정이 다르다는 이분법적(bimodality) 관점을 견지하고 있다[4,21]. 그런데 안전-II는 시스템의 성공적 운영을 위해 작업자가 수행도 조정을 하는 것은 필수적이며 이로 인해 수행도의 변동성이 생긴다는 사상을 반영한다[21]. 이러한 변동성은 소수의 실패의 원인이기도 하지만 동시에 다수의 성공의 원인이기도 함을 강조한다[5]. 즉 성공과 실패의 원인은 동일하고 다만 실패적 결과는 성공적 작업수행의 비정상적 결과로 인식할 필요가 있다는 것이다. FRAM은 이러한 사상을 잘 반영하고 있다[7]. 또한 시스템 기능들의 비선형적이고 복잡한 상호작용을 모형화하여 인적오류 및 사고가 발생하는 창발적 과정을 이해하고 예측하는데 도움을 준다[9].

복잡한 시스템에서 최근 발생하고 있는 안전사고를 보다 올바르게 이해하기 위해서는 개인 및 조직의 직무수행에서의 변동성은 불가피하다는 관점을 받아들일 필요가 있다[19, 21]. 또한 많은 안전사고가 시스템 구성요소의 단순한 고장이나 정상적 기능의 실패가 아닌 작업 수행 과정의 변동성 및 이 변동성의 비선형적 결합에 의한 변동성의 파급으로 인해 발생한다는 관점을 견지할 필요가 있다[7]. 안전-II와 안전탄력성 공학은 시스템이 복잡해지면서 사고를 선형적으로 바라보는 안전-I의 관점의 한계가 분명해지면서 대안으로 나타난 새로운 안전 철학이다. 안전-II는 시스템이 실패한 상황뿐 아니라 정상적으로 작동하는 시스템을 분석하여 시스템이 정상상태를 유지하는 원리를 이해하여 계속 정상적으로 작동함을 극대화하는 것이 필요하다는 것을 강조한다[7,21].

2.2.2 FRAM의 분석 절차

FRAM은 정상적인 성공 상황에서 시스템의 기능과 상호작용을 분석하고 모델링해 실제 작업이 이루어지는 상황을 이해하는 기법이다. 실제 작업에서 발생 가능한 수행

변동성과 이의 파급효과를 분석해 수행 변동성을 관리하는데 유용한 정보를 제공한다. FRAM 모델링 과정은 통상 4단계로 구성된다[6]. 물론 FRAM 모델을 사고분석으로 이용할지 혹은 위험성평가 목적으로 이용할지 분석 목적을 우선적으로 명확하게 할 필요가 있지만 이 4단계가 핵심적 단계다.

■ 1단계: 모델링 대상의 시스템 기능을 파악하고 기술한다. 시스템에서 이루어지는 작업 혹은 활동을 의미하는 기능을 모두 파악한다. 기능은 실제적 작업에서 목적을 달성하기 위해 수행되어야 하는 수단이다. 파악한 기능을 <Table 1>에 나타난 6개의 측면으로 특성화한다. 한 기능의 출력(Outputs)은 다른 기능의 출력을 제외한 다른 5가지 측면(입력(Inputs), 자원(Resources), 시간(Time), 통제(Controls), 선행조건(Preconditions))에 연결된다. 이러한 관련성은 기능간 상호작용 분석의 기초가 된다.

■ 2단계: 각 기능의 잠재적 변동성을 추정하고 평가한다. 기능들을 기능 수행주체에 따라 기술적, 인적, 조직적 기능으로 구분하여 각 기능에 따른 시간 및 정확도에 관한 잠재적 출력 변동성을 평가한다. 보다 구체적인 실패 모드(예: 속도, 순서)로도 평가가 가능하지만 일반적으로 시간 및 정확도만을 이용해 분석한다. <Table 2>는 각 기능에서 나타날 수 있는 시간과 정확도에 대한 출력 변동성 종류를 보여주고 있다. 시간의 경우 제 시간(on time)을 제외한 다른 경우는 변동성이 있음을 의미한다. 정확도의 경우 정확함(precise)을 제외한 다른 경우는 변동성이 있음을 의미한다. 기능의 수행 주체가 기술, 인간, 조직일 때 시간 및 정확도의 변동성 종류의 가능성이 함께 나와 있다. 예를 들어 기술적으로 수행되는 기능이 시간 관점에서 '너무 이르게' 진행될 가능성은 거의 없음을 알 수 있다. 이런 점에서 일반적으로 수행 변동성은 기술적 기능에서는 나타나지 않고 인적 및 조직적 기능에서 나타난다고 가정할 수 있다.

■ 3단계: 각 기능의 잠재적 변동성은 기능공명의 개념으로 표현된다. 이러한 기능공명은 각 기능의 연결 관계에 기반해서 다양한 형태의 파급효과를 유발한다. 즉 변동성이 파급된다는 의미인데 이러한 변동성은 기능의 6개 측면을 중심으로 이루어지는 기능 간의 연결 관계에 따라 감소되기도 하고 유지되기도 하고 증폭되기도 한다. 예상치 못한 방식으로 이 증폭된 변동성이 특정 상황적 조건에서 사고를 일으킬 수 있는 것이다. 이러한 관점을 갖고 변동성의 파급효과를 분석하는 것이 3단계의 핵심이다.

■ 4단계: 분석되고 모델링된 FRAM 모델을 갖고 변동성을 감소하고 관리하기 위한 효과적인 방안을 모색한다. FRAM 모델을 이용해 사고분석을 하는 경우 모델에서 표현되는 기능의 변동성 및 파급경로를 바탕으로 사고의 발생 과정을 이해하고 위험성 평가를 하는 경우 변동성 및

〈Table 1〉 Six aspects characterizing a function

Aspect	Description
Inputs(I)	Things that a function processes or transforms or that start a function.
Outputs(O)	Results of a function, which are either an entity or a state of change.
Preconditions(P)	Conditions that must be satisfied before a function can be carried out.
Resources(R)	Things that a function needs when it is carried out or consumes to produce Outputs
Time(T)	Temporal aspects influencing the performance of a function.
Controls(C)	Aspects concerning with how function is supervised or controlled.

〈Table 2〉 Potential output variability with regard to time and precision

		Technological	Human	Organizational
Time	Too early	Unlikely	Possible (snap answer, serendipity)	Unlikely
	On time	Normal, Expected	Possible, should be typical	Likely
	Too late	Unlikely, but possible if software is involved	Possible, more likely than too early	Possible
	Not at all	Very unlikely (only in case of complete breakdown)	Possible, to a lesser degree	Possible
Precision	Precise	Normal, expected	Possible, but unlikely	Unlikely
	Acceptable	Unlikely	Typical	Possible
	Imprecise	Unlikely	Possible, likely	Likely

과급경로에 기반해 여러 잠재적 사고의 가능성을 가늠하고 그 발생 과정을 예측해 볼 수 있다. 이러한 사고분석 및 위험성 평가의 결과를 바탕으로 수행 변동성을 감소시키고 관리할 수 있는 기술적, 관리적, 조직적 방안을 마련한다.

3. 실제 사고사례 분석

본 연구는 2017년 9월 12일에 중앙선 원덕역→양평역 간에서 발생한 제 7882열차(시험운전열차)의 충돌사고를 FRAM을 활용해 분석하였다. 사고분석을 위해 필요한 기본 정보는 항공·철도사고조사위원회 철도사고 조사보고서(보고서 번호: ARAIB/R 2019-1)와 관련 뉴스를 통해 확보하였다.

3.1 FRAM 기반 시스템 분석

사고 분석을 위해 모델링 대상이 되는 시스템의 범위를 설정하였다. 본 사고는 검증 계획 수립에 관한 시스템과 시설물 검증 실행 시스템이 결합된 시설물 검증 시스템과 시설물 개발을 위한 시스템이 결합되어 발생한 사고이다.

모델링 대상 시스템의 핵심기능(작업)을 체계적으로

도출하기 위해 계층적 작업분석(HTA: Hierarchical Task Analysis)기법을 이용해 직무분석을 실시하였다. 이를 통해 도출된 핵심기능들의 6가지 측면을 분석하고 각 기능 간 관련성을 파악하였다. 모델링의 주요 기능의 의미를 이해하는데 필요한 배경적 지식이 되는 배경기능 3개를 포함한 22개 기능을 도출하였다. 도출된 기능들을 6가지 측면을 이용해 특성화하고 변동성의 가능성을 분석하였다. 이 과정에서 기능들을 기술적, 인적, 조직적 기능으로 구분하고 각 기능별로 시간, 정확도에 관한 잠재적 출력 변동성을 평가해 정리하였다. 〈Table 3〉은 이 결과를 보여준다.

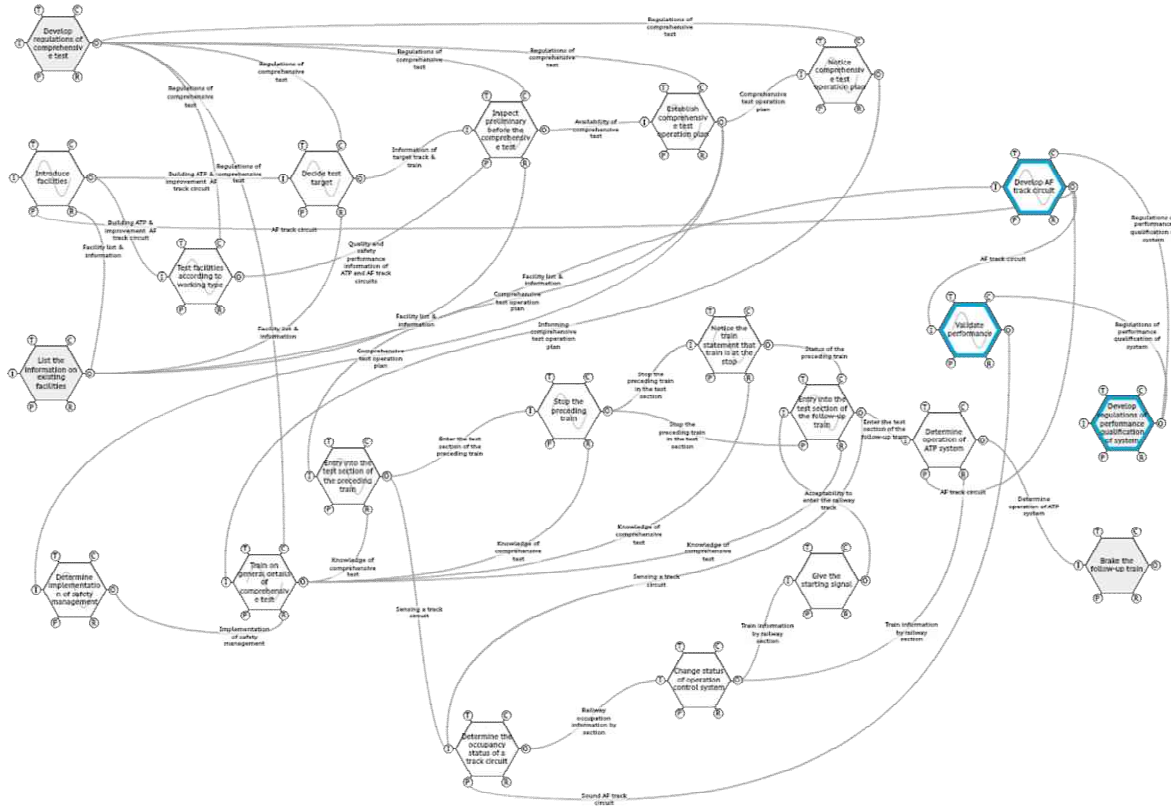
도출한 기능들은 FMV(FRAM Model Visualiser Pro)를 활용해 [Figure 1]과 같이 모델링하였다. 각 기능들은 분석의 편의를 위해 기능의 목적에 따라 시설물 검증 기능은 검은색, 시설물 개발 기능은 파란색으로 표현하였다. 기능의 목적은 철도시스템 운영에 관련된 기술서를 참조해 분류하였다. 기능을 특성화 할 때 각 기능의 6가지 측면을 정의하면 그 정의된 내용을 이용해 FMV가 자동적으로 기능 간 연결고리를 선으로 이어준다. 앞에서 FRAM의 분석절차 4단계에서 1단계를 설명할 때 한 기능의 출력을 제외한 다섯 측면은 다른 기능의 출력으로부터 나온다고 설명하였다. 예로 A 기능의 출력이 '점검 절차서'고 B 기능의 자원이 '점검 절차서'면 이 두 기능은 출력-자원의

<Table 3> Functions and possible output variability of the accident

No.	Function	Actor	Possible Output Variability	Ect.
1	Develop regulations of performance qualification of system	Organization		Background function
2	Develop AF track circuit	Human	Time - Too late Precision - Imprecise	
3	Validate performance	Human	Time - Not at all Precision - Acceptable	
4	Introduce facilities	Organization	Time - Too late Precision - Imprecise	
5	Test facilities according to working type	Human	Time - Too late Precision - Acceptable	
6	Decide test target	Human	Time - On time Precision - Acceptable	
7	Inspect preliminary before the comprehensive test	Human	Time - Too late Precision - Acceptable	
8	Establish comprehensive test operation plan	Human	Time - Too late Precision - Imprecise	
9	Notice comprehensive test operation plan	Human	Time - Too late Precision - Acceptable	
10	Determine implementation of safety management	Human	Time - Too late Precision - Imprecise	
11	Train on general details of comprehensive test	Human	Time - On time Precision - Acceptable	
12	Entry into the test section of the preceding train	Human	Time - On time Precision - Acceptable	
13	Determine the occupancy status of a track circuit	Technology	Time - On time Precision - Precise	
14	Change status of operation control system	Technology	Time - On time Precision - Precise	
15	Stop the preceding train	Human	Time - On time Precision - Acceptable	
16	Notice the train statement that train is at the stop	Human	Time - On time Precision - Imprecise	
17	Give the starting signal	Technology	Time - On time Precision - Precise	
18	Entry into the test section of the follow-up train	Human	Time - On time Precision - Acceptable	
19	Determine operation of ATP system	Technology	Time - On time Precision - Precise	
20	Brake the follow-up train	Technology		Background function
21	Develop regulations of comprehensive test	Organization		Background function
22	List the information on existing facilities	Human		Background function

관점에서 연결된다. FRAM 모델에서 각 기능은 육각형의 형태로 표현되고 각 기능의 6가지 측면은 이 육각형의 꼭짓점에서 작은 원의 형태로 표현된다. 또한 기능 내에서

파형(wave) 그림이 있는 기능과 그렇지 않은 기능이 있다. 파형 그림이 있는 기능은 이 기능 수행 과정에서 잠재적 변동성이 존재함을 의미한다.



[Figure 1] FRAM model of trial running train

3.2 사고 사례 분석

FRAM 모델을 기반으로 사고를 이해하기 위해 사고 시나리오 분석을 수행하고 FRAM 모델을 현상화(Instantiation)하였다. FRAM 모델이 특정 시나리오를 반영해 기능의 수행 순서 등이 표현되는 과정을 현상화라 할 수 있다. <Table 4>는 해당사고에서 발생한 출력 요인의 고장 모드, 원인 그리고 발생 순서를 보여주고 있다. 예를 들어 AF케도회로 개발 기능은 성능 품질 조건을 만족하지 않는 AF케도회로를 개발했기 때문에 정확도가 부정확한 수행 변동성이 나타났다고 분석하였다. [Figure 2]는 이러한 현상화 결과를 보여준다. [Figure 2]는 해당 변동성이 하류기능(특정 시나리오에서 순서적으로 후에 수행되는 기능)에 영향을 미쳤다고 판단되는 상류기능(특정 시나리오에서 순서적으로 전에 수행되는 기능)을 색상을 구분해 보여준다. 보라색으로 표시된 기능은 변동성이 발생하였으나 사고에 영향을 주지 않는다고 판단된 기능이다. 붉은색으로 표시된 기능은 그 변동성이 사고에 영향을 준다고 판단된 기능을 의미한다.

3.3 위험성 평가

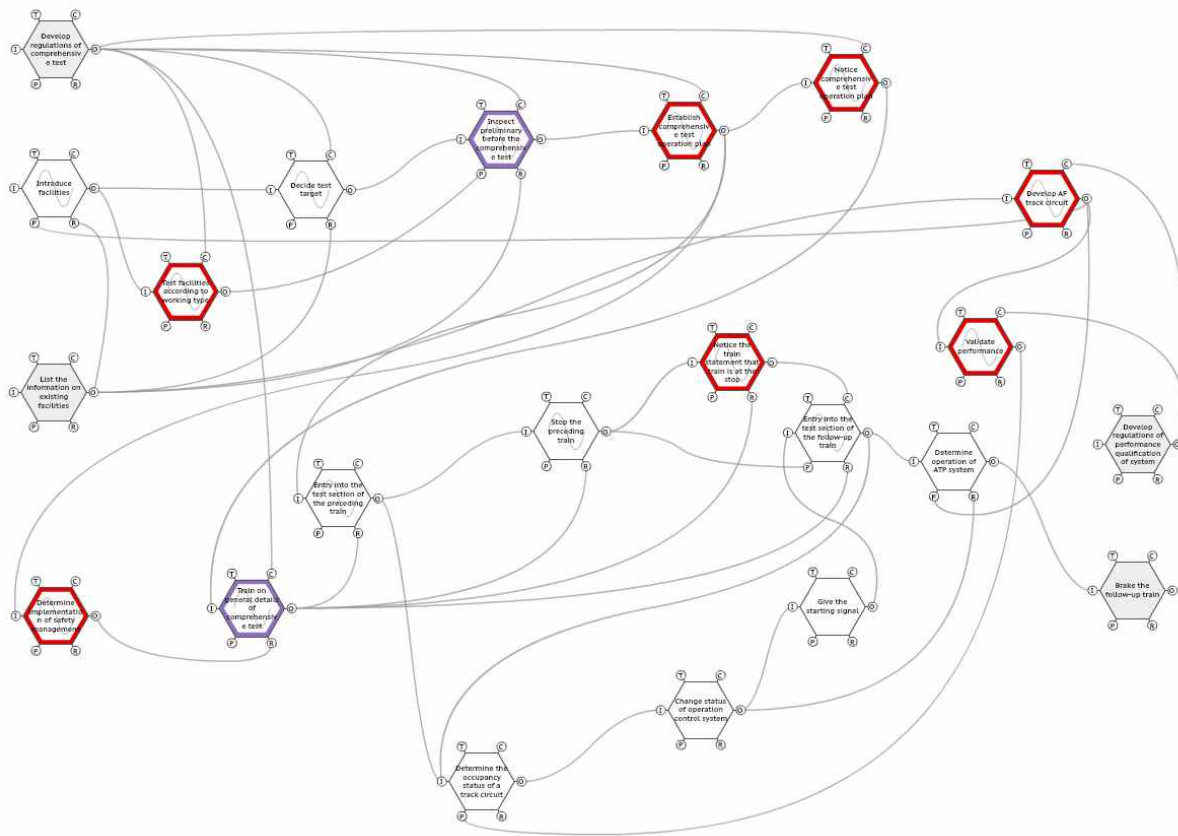
변동성 개념에 기반해 시스템에서 발생 가능한 기능공

명과 이에 관련된 발생 가능한 사고 시나리오를 예측하였다. 예측한 시나리오는 <Table 4>의 형태와 같이 각각 발생 가능한 변동성과 예상 출력 변동성의 정도를 도출하였다. 이를 통해 변동성이 발생할 가능성이 크고 하류 기능에 영향을 줄 가능성이 큰 기능을 중심으로 대응 방안을 도출하였다. FRAM에서는 변동성을 제거, 방지, 방어/보호, 촉진하는 네 가지 대응 전략과 감시, 완충/완화하는 두 가지 추가 대응 전략을 제시하고 있다[6]. 또한 인적오류는 개인적 요인과 더불어 외부적 요인인 직무 절차서의 결함, 부적절한 훈련 및 교육시스템, 부적절한 행동 규율, 의사소통 상의 문제 등 적절하지 못한 작업 상황에 의해서도 영향을 받아 발생할 수 있다. 따라서 사고를 시스템적 관점으로 분석하면 사고의 원인은 개인적인 요인이 아닌 환경적 요인과 시스템적 요인으로 이루어져 시스템적으로 대응하는 전략이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 시스템적 관점과 FRAM의 대응 전략에 기반하여 사고대응 전략을 제시하였다.

<Table 5>는 변동성을 제거하거나 감시하는 대응 전략을 중심으로 도출한 시운전 시스템 변동성 대응 전략을 보여주고 있다. 변동성 제거 대응 전략은 기술적 및 비기술적 방안을 활용해 기능의 내부 변동성을 감소시키는 대안으로 종합시험운행 사전점검 규정 강화, 종합시험운행계획 수립 규정 강화, 공중별 시험 규정 구체화, AF케도회로

<Table 4> List of functions and their variability related to the accident

Function	Output Variability	Description	Order
Develop AF track circuit	Precision - Imprecise	Developing AF track circuit not satisfying the performance quality	2
Validate performance	Time - Not at all	Not implementing the performance validation	3
Test facilities according to working type	Precision - Imprecise	Reviewing the document instead of actual facilities test according to working type	5
Inspect preliminary before the comprehensive test	Precision - Acceptable	Deciding to run the comprehensive test even though it shouldn't be	7
Establish comprehensive test operation plan	Precision - Imprecise	Not determining the role of the comprehensive test team and the maximum speed of trial running train	8
Notice comprehensive test operation plan	Time - Too late	Notifying plan later than the specified time	9
Determine implementation of safety management	Precision - Imprecise	Not determining boarding location and the number of people that board on train	10
Train on general details of comprehensive test	Precision - Acceptable	Not making a list of safety training attendance register	11
Notice the train statement that train is at the stop	Precision - Imprecise	Failing to communicate properly using KT powertel instead of radio telephone	16



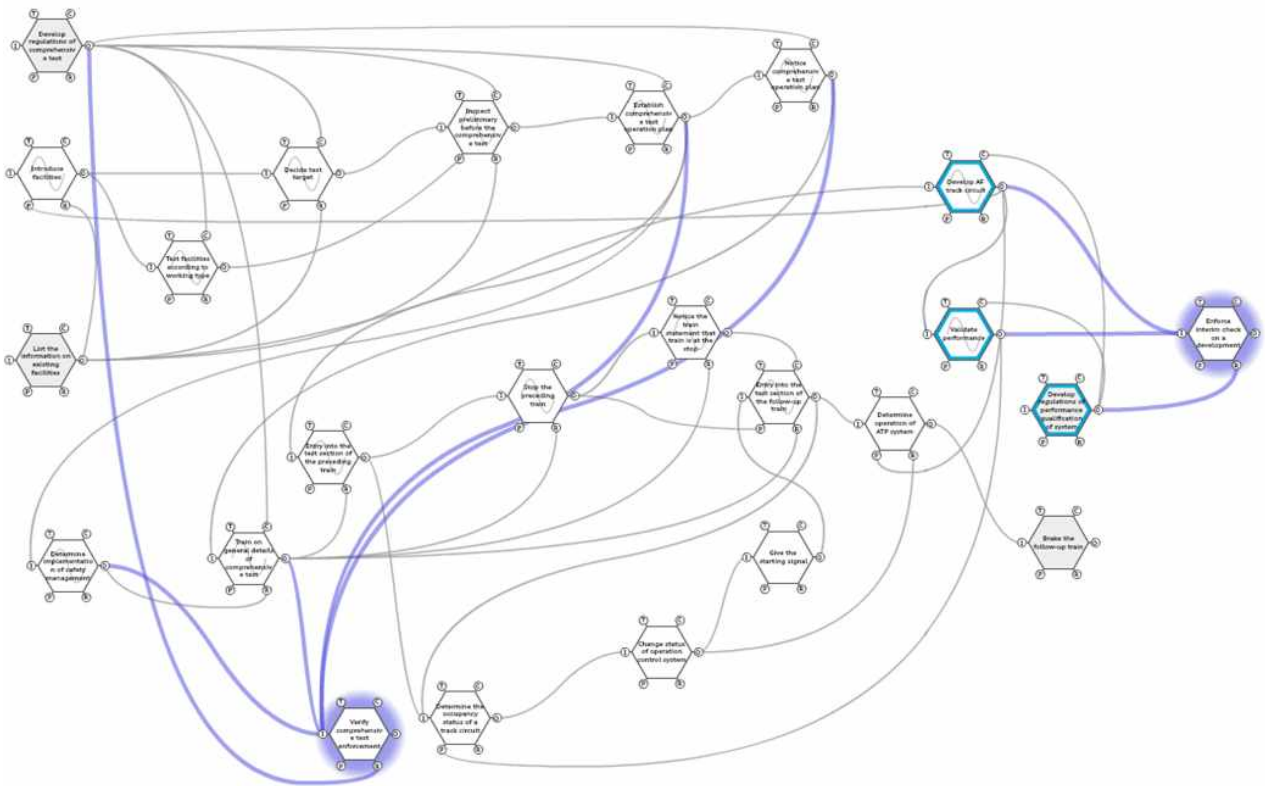
[Figure 2] Instantiation of the FRAM model for the accident

의 점유상태를 파악할 수 있는 기차 내부 인터페이스 구축, 운행 중 선형열차 상태 확인 방안 개발, 열차무선전화 통화 품질 개선을 도출하였다. 변동성 감시 대응 전략은 새로운 기능을 추가해 기존 기능과 연결하여 기능공명(수

행 변동성)을 줄이기 위해 AF궤도회로 개발 중간점검, 종합시험운행 시행사항 검증을 도출하였다. [Figure 3]은 대응 전략을 기존 시스템에 추가했을 때 미치는 영향을 보여준다. 상단의 보라색 기능은 AF궤도회로 개발 중간점검

<Table 5> Response strategy for managing variability based on FRAM

Remedies for Safety	Strategies
Elimination	<ul style="list-style-type: none"> - Supplementing the regulation of preliminary inspection before the comprehensive test - Supplementing the regulation of establishing comprehensive test operation plan - Clarifying the regulation of facility test in relation to working type - Establishing an internal interface to check the occupancy status of a track circuit - Developing a way to check the status of preceding train while train is running - Improving the quality of radio telephone
Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> - Enforcing interim check on a development - Verifying comprehensive test enforcement



[Figure 3] FRAM model including the response strategy

검을, 하단의 보라색 기능은 종합시험운행 시행사항 검증 을 나타낸다. 보라색 선은 각 기능이 다른 기능과 연결되고 있는 상태를 보여준다.

4. 결론

철도 안전관리 도입과 기술의 발전으로 기술적 원인에 의한 철도사고는 감소하고 있지만 인적오류가 관여된 사고의 효과적 대응은 여전히 철도 안전관리의 큰 과제이다. 또한 철도 시스템은 점차 복잡해져 여러 요인이 시스템적 상호작용에 따라 결합되고 확산되어 사고로 이어질 가능성이 있다. 이러한 사고를 체계적으로 이해하고 예방하기

위해서는 시스템적 사고 기반의 사고분석 및 위험성 평가가 필요하다.

본 연구는 국내의 실제 철도사고 사례를 FRAM을 활용하여 분석하였다. FRAM을 기반으로 관심의 대상이 되는 시스템의 22가지 기능을 도출하였다 각 기능의 수행 변동성을 파악하고 변동성 및 이의 파급효과 관점에서 사고 상황을 분석하였다. 또한 실제 발생했던 사고분석과는 별도로 위험성평가를 위해 예상 시나리오 분석을 통해 발생 가능한 사고 시나리오를 예측하고 예상 출력 변동 및 변동성 파급효과를 분석해 이를 바탕으로 변동성을 관리하기 위한 대응 전략을 도출하였다.

실제로 대형철도사고는 한 가지 원인보다 여러 개의 다양한 원인이 복합적인 방식으로 결합하여 발생하는 경우

가 빈번하다. 그런데 선형적 인과관계에 기반한 전통적인 사고기법은 이러한 복합적 사고를 분석하기에 분명한 한계점이 있는 것이 사실이다. 전통적인 사고분석 기법은 사고가 발생하는 특정 방식을 가정하고 있는 사고모형(Accident Model)을 가정하고, 이에 기반해 사고를 분석하도록 지원한다. 전통적 사고분석 기법이 가정하고 있는 것이 선형적 인과관계의 사고모형이다. 그러나 원인으로부터 결과의 추론은 그 완전성 및 논리성이 보장되지만 결과로부터 원인으로서의 추론은 완전성을 보장할 수 없다. 결과에 영향을 미치는 원인이 다수 존재할 수 있고 영향을 주는 방식도 다양할 수 있기 때문에 그러하다. 그래서 실제 사고의 발생 양식과는 다르게 선형적 인과관계 모형에 실제 사고발생을 끼워 맞추는 부작용이 있었던 것이 사실이다. 이로 인해 사후확증편향을 갖는 것이 기존 사고분석의 약점으로 지적되어 왔었다. 그런데 FRAM에 기반한 사고분석이 갖는 가장 큰 장점은 특정 사고모형을 가정하지 않고 시스템의 기능 간 상호작용에 초점을 두고 사고가 발생한 실제 상황 그대로 해석하면서 가급적 사고(결과)에 영향을 준 원인들과 영향 방식을 다양하게 진단할 수 있도록 도와준다는 점이다. 이는 본 논문의 사례연구에서도 경험할 수 있었던 부분이다.

또한 전통적 기법은 성공과 실패의 양분법적 철학을 견지하고 있다. 이 관점이 선형적 인과관계와 함께 이용되면서 근본원인에 대한 맹신이 있었고 근본원인을 개선하거나 제거하면 동일한 혹은 유사한 사고가 발생하지 않는다는 믿음이 있었다. 이러한 맹신을 극복하기 위해 나온 개념이 기능(직무) 수행의 변동성이고 FRAM은 이러한 개념을 반영하고 있는 사고분석 기법이다. 본 논문의 사례연구에서도 FRAM을 이용해 변동성 관점에서 사고발생 과정을 이해할 수 있는 여건을 마련할 수 있었다. 이런 점은 기존 사고분석 기법에서는 찾아볼 수 없는 장점이라 할 수 있다.

본 연구에서는 전통적 사고분석의 한계를 보완할 수 있는 시스템적 사고분석 기법인 FRAM을 실제 철도사고 사례에 적용해 FRAM의 응용사례를 확보함과 동시에 철도 산업에서의 FRAM 적용 가능성을 확인했다는 점에서 의의가 있다 할 수 있다. 그러나 철도 산업에서의 활용성을 더 높이기 위해서는 다양한 철도 상황에서의 사고를 대상으로 보다 많은 사례연구가 필요할 것으로 판단한다. 또한 다른 모델링 기법과 마찬가지로 FRAM 모델의 질은 시스템 이해 및 분석의 질에 비례한다. 그러나 본 연구는 철도 분야 전문가와의 인터뷰와 같은 현장 연구 없이 사고 보고서 및 철도시스템 문헌을 중심으로 시스템 및 사고 분석이 진행된 한계점이 있다. 추후 보다 신뢰성 높은 FRAM 모델 구축을 위해 이런 부분은 보완될 필요가 있다.

FRAM의 실용성을 높이기 위해 여러 사례연구 외에 다

양한 연구 노력이 향후 필요할 것으로 기대한다. 특히 사고분석에서 시스템의 추상화 수준을 고려하는 것이 필요할 수도 있는데 FRAM은 이러한 부분을 반영하고 있지 않다. 따라서 시스템 기능의 추상화 수준을 구분해 모델링할 수 있는 방법을 고안하는 것이 필요할 것이다. 또한 산업별 시스템적 특징을 반영해 FRAM의 산업별 세부 적용 지침을 개발하는 것도 앞으로 필요할 것으로 판단된다. 실제로 FRAM을 적용하는데 어려움을 겪는 부분 중의 하나가 기능을 도출하고 분석하는 과정이다. 이러한 과정을 지원하기 위해 간편하면서 효과적인 기능 도출 및 분석 기법을 마련하는 것도 향후 필요한 연구라 할 수 있다.

5. References

- [1] S. Kwak(2018), Railway safety management system, KS book.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Thrid comprehensive plan for railway system.
- [3] C. Perrow(1999), Normal Accidents: Living with High Risk Technologies, Princeton University Press.
- [4] H. Hollnagel(2002), "Understanding accidents—from root causes to performance variability." Proceedings of the IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants:1-6.
- [5] E. Hollnagel, O. Goteman(2004), "The Functional Resonance Accident Model." Proceedings of cognitive systems engineering in process plant: 155-161.
- [6] H. Hollnagel(2012), FRAM : the Functional Resonance Analysis Method. Farnham, UK: Ashgate.
- [7] P. Underwood, P. Waterson(2013), Accident analysis models and methods: guidance for safety professionals, Loughborough University.
- [8] I. A. Herrera, R. Woltjer(2010), "Comparing a multi-linear (STEP) and systemic (FRAM) method for accident analysis." Reliability Engineering and System Safety, 95:1269-1275.
- [9] D. C. Raben, B. Viskum, K. L. Mikkelsen, J. Hounsgaard, S. B. Bogh, E. Hollnagel(2018), "Application of a non-linear model to understand healthcare processes: Using the functional resonance analysis method on a case study of the early detection of sepsis." Reliability Engineering and System

- Safety, 177:1-11.
- [10] F. Belmonte, W. Schoen, L. Heurley, R. Capel(2011), "Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: An application to railway traffic supervision." Reliability Engineering and System Safety, 96:237-249.
- [11] R. Patriarca, J. Bergström, G. Di Gravio(2017), "Defining the functional resonance analysis space: Combining Abstraction Hierarchy and FRAM." Reliability Engineering and System Safety, 165: 34-46.
- [12] E. Hollnagel, S. Pruchnicki, R. Woltjer, S. Etcher(2008), "Analysis of Comair flight with the functional resonance accident model." Proceedings of the 8th International Symposium of the Australian Aviation Psychology Association.
- [13] P. V. R. Carvalho(2011), "The use of functional resonance analysis method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience." Reliability Engineering and System Safety, 96:1482-1498.
- [14] R. Patriarca(2017), "A Monte Carlo evolution of the functional resonance analysis method (FRAM) to assess performance variability in complex systems." Safety Science, 91:49-60.
- [15] R. Patriarca, G. D. Pinto(2018), "FRAM for systemic accident analysis: A matrix representation of functional resonance." International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 25(1): 1850001.
- [16] P. Wachs, T. A. Saurin(2018), "Modelling interactions between procedures and resilience skills." Applied Ergonomics, 68:328-337.
- [17] R. Clay-Williams, J. Hounsgaard, E. Hollnagel (2015), "Where the rubber meets the road: Using FRAM to align work-as-imagined with work-as-done when implementing clinical guidelines." Implementation Science, 10:125.
- [18] J. Lee, H. Chung(2018), "A new methodology for accident analysis with human and system interaction based on FRAM: Case studies in maritime domain." Safety Science, 109:57-66.
- [19] M. V. C. Auguilera, B. B. Fonseca, T. K. Ferris, M. C. R. Vidal, P. V. R. Carvalho(2016), "Modelling performance variabilities in oil spill response to improve system resilience." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 41:18-30.
- [20] T. A. Saurin, R. Patriarca(2020), "A taxonomy of interactions in socio-technical systems: A functional perspective." Applied Ergonomics, 82:102980.
- [21] H. Hollnagel(2012), Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management. Farnham, UK: Ashgate.

저자 소개



최 은 비

현재 전남대학교 산업공학과 재학 중.
관심 연구 분야는 시스템안전공학, 인간공학,
인간-컴퓨터 상호작용 등.
주 소: 광주광역시 북구 용봉로 77 전남대학교
공과대학 산업공학과



함 동 한

현재 전남대학교 산업공학과 교수 및 AI융
합대학 부학장. 인하대 산업공학과 공학사,
KAIST 산업공학과 공학석사 및 공학박사를
취득하였음. 2001~2005년 ETRI 선임연구
원 재직. 2005~2012년 영국 미들섹스대학교
공학 및 정보과학부 중신연구중심교원 재직.
연구 분야는 인지시스템공학, 지식서비스공학,
서비스과학, 인간-컴퓨터 상호작용, UX 기반
제품 및 기술혁신, 시스템 안전공학 등
주 소: 광주광역시 북구 용봉로 77 전남대학교
공과대학 산업공학과