

비정상 작업에서 발생한 중대산업사고 분석을 통한 FRAM의 PSM 활용 방안에 관한 연구

김영관 · 정진우[†]

서울과학기술대학교 안전공학과
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232
(2023년 11월 5일 접수, 2023년 12월 12일 수정본 접수, 2024년 1월 19일 채택)

A Study on the Application of FRAM to PSM through the Analysis of Serious Industrial Accident in Non-routine Work

Young-Gwan Kim and Jin-Woo Jung[†]

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology Gongneung-ro,
Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

(Received 5 November 2023; Received in revised from 12 December 2023; Accepted 19 January 2024)

요 약

복잡한 화학공정을 관리하기 위한 목적으로 도입된 공정안전관리(PSM: process safety management)제도는 그간 화학사고 예방에 기여해 왔으나, 최근에는 그 한계를 드러내고 있다. 최근 중대산업사고가 증가하고 있으며 특히 2020년 이후 비정상 작업에서 중대산업사고가 급증하였다. 효과적인 PSM 운영 방안이 필요한 시점이다. 본 연구에서는 비선형적이고 복잡한 상호작용을 모형화하여 인적오류 및 사고 발생 과정을 이해하고 예측하는데 유용한 기법인 기능공명 분석기법(FRAM: Functional Resonance Analysis Method)을 활용하여 비정상 작업에서 발생한 사고 사례를 분석하고 나아가 일반적인 PSM 비정상 작업 수행 과정에 대한 분석을 수행함으로써, PSM 운영 과정에서 FRAM이 효과적으로 활용될 수 있음을 검토하였다.

Abstract – PSM(process safety management), introduced for the purpose of managing complex chemical processes, has contributed to the prevention of chemical accidents, but has recently revealed its limitations. Recently, major industrial accidents have increased, and in particular, Serious Industrial Accidents have increased rapidly in non-routine works since 2020. It is time for an effective PSM operation plan. This study examined that FRAM can be effectively used in the PSM operation process by using FRAM (Functional Resonance Analysis Method), a useful technique for understanding and predicting human error and accident occurrence processes by modeling nonlinear and complex interactions, to analyze accident cases that occurred in non-routine works, and to further analyze the process of performing general PSM non-routine works.

Key words: Korean, Chemical, Engineering, PSM, Process safety management, FRAM, Non-routine work, Serious industrial accidents

1. 서 론

오늘날 급격한 기술발전과 사회적 변화로 인해 산업 현장의 위험도 이전과 비교할 수 없을 정도로 복잡하고 다양해지고 있다. 이러한 위험성을 통제하기 위해 안전관리에 있어서도 시스템적 관리의

필요성이 요구되고 있다.

이러한 추세에 따라 국내에서도 복잡하고 다양한 위험성을 내포하고 있는 화학산업의 생산공정에 대한 시스템적 안전관리를 위해 1995년 산업안전보건법을 개정하여 공정안전관리(PSM: process safety management)제도를 도입하였고[1,2], 이후 PSM은 국내 화학사고 예방에 기여해 왔다[3]. 그러나 2014년 이후 사고 발생 추이를 살펴보면, 중대산업사고가 증가하는 추세이다.

사고의 재발을 방지하기 위한 효과적인 대책을 마련하기 위해서는 재해 발생 상황을 다각도로 분석하여 재해의 원인과 문제점을 정확히 파악하는 것이 중요하다[4]. 그럼에도 불구하고 그간 PSM 공정

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jjjw35@hanmail.net

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.

에서 발생한 중대산업사고에 대한 한국안전보건공단(KOSHA: Korea Occupational Safety & Health Agency)의 공식적인 사고조사보고서는 대부분 단순 인과관계 분석에 그치고 있다.

최근 KOSHA의 일부 사고조사보고서에서는 기존의 인과관계 분석에 대하여 보조적인 추가 분석 수단으로 AcciMap 기법 등을 사용하기도 했다. 비록 보조적 분석이긴 하나 의미가 있는 분석이었다. 왜냐하면, AcciMap 기법은 시스템에서 위치별 사고원인에 기여한 의사 결정자 간의 관계를 매핑하여 사고를 분석하는 기법[5]으로 시스템 접근 방식을 사고 분석에 도입하였기 때문이다.

사고 분석에 있어 시스템적 접근 방식은 기존의 선형적 사고 분석방법의 한계를 보완하기 위해 시스템적 사고를 적극적으로 반영하는 사고 분석 기법으로 최근에 개발되었다[6]. 사고 분석에 있어 시스템적 접근 방식으로는 AcciMap, 시스템 이론적 사고 모델링 및 프로세스 모델(STAMP: System Theoretic Accident Model and Processes), 기능공명분석기법(FRAM: Functional Resonance Analysis Method) 등이 있다[7].

이 중 FRAM은 가변적인 작업 환경, 외부 환경, 자원의 제약 등을 반영하여 작업 방식을 지속적으로 조정해야 하는 복잡한 사회 기술 시스템(socio-technical system)을 모델링하여 분석하는 기법이다[8]. 복잡한 시스템이 본질적으로 변동성에 의해 특징지어진다는 전제에서 시작하며, 변동성을 제거하려고 하는 대신 시스템 전체에 어떻게 나타나고 전파되는지를 이해하는 것을 목표로 한다. 특히, 다른 분석기법에 비해 고유한 변동성과 상호의존성을 포함한 시스템의 복잡성을 나타내는 데 뛰어나며, 전통적인 선형 원인 및 결과 모델을 넘어 변동성이 어떻게 결합하고 새로운 결과를 만들 수 있는지에 대한 분석을 가능하게 한다[9].

이러한 FRAM의 특성은 복잡한 화학공정을 체계적으로 관리하는 통합관리시스템인 PSM [10]에도 활용의 여지가 많을 것으로 보인다. 그러나 아직 KOSHA의 중대산업사고 분석의 사고조사보고서에는 FRAM을 사용한 예는 없다. 개별적으로 중대산업사고를 대상

으로 FRAM을 활용한 분석을 사용한 연구가 있으나[11,12], 대부분 연구가 FRAM을 개별 화학사고 분석에 대한 적용 가능성에 한정되어 있다. PSM 운영 과정으로의 확대 적용 가능성에 대한 연구는 미흡하다.

이에 본 연구에서는 비정상 작업(non-routine work) 중 발생한 중대산업사고에 대해 FRAM으로 사고원인을 분석해보고, 나아가 일반적인 비정상 작업(non-routine work) 수행 과정에 대해 FRAM으로 PSM 12요소간 상호 작용 관계를 분석함으로써 PSM 사고조사 및 제도 운영 과정에서 FRAM의 활용 가능성에 대해 검토하고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 공정안전관리(PSM: Process Safety Management) 제도

「중대산업사고 예방센터 운영규정 고용노동부예규(제204호, 2023. 4. 28.)」에서는 PSM을 중대산업사고를 야기할 가능성이 있는 공정·설비들을 체계적이고 지속적으로 관리하기 위해 사업주가 잠재된 사고의 위험요인을 사전에 발굴·제거하여 중대산업사고를 체계적으로 예방하는 제도라고 정의하고 있다. 즉, PSM 제도란 유해·위험물질의 화재·폭발, 누출 등으로 인한 사고를 예방하기 위하여 해당 유해·위험물질의 취급, 사용 또는 저장 등과 관련된 모든 공정에 대해 잠재된 위험성에 대한 시스템적 안전관리 활동이다[13].

국내 PSM은 기본적으로 미국의 PSM의 체계를 따르고 있지만, PSM 보고서의 작성에 관한 전반적인 내용을 규정하고 있는 「공정안전보고서의 제출·심사·확인 및 이행상태평가 등에 관한 규정(고용노동부고시 제2023-21호, 2023. 5. 30.)」에 의하면 Table 1과 같이 12 요소로 구성되어 있다. 미국 PSM은 Table 2와 같이 근로자 참여(employee participation)를 PSM 구성요소로 명시적으로 규정하여 13개의 요소로 구성되어 있고 안전작업허가 대상을 화기 작업(hot work)에 한정하고 있다[14]는 점에서 국내 PSM과 일부 차이

Table 1. PSM 12 Elements

No. Categories	Contents
1 Process Safety Information	Types and quantities of hazardous and harmfulness chemicals, list of hazardous and harmfulness chemicals, list and specification of hazardous and harmfulness equipments and facilities, Process Flow Diagram, Utility Flow Diagram, Piping and instrumentation Diagram, layout of buildings and facilities, explosive hazardous area and zone, safety design manufacturing and installation instructions, etc.
2 Process Risk Assessment	Process risk assessment report job risk analysis
3 Operating Procedures	First test operation, normal operation, emergency operation, normal operation stop, emergency suspension, operation starts after maintenance, procedures for action if out of range, properties of hazardous chemicals, personal protective equipment guidelines and procedures for exposure to hazardous chemicals, etc.
4 Mechanical Integrity	Equipments and facilities maintenance class inspection, maintenance, etc.
5 Work Permit	General hazard work permission, hot work permission, permission to enter and exit confined spaces, permission to use radiation, etc
6 Contractors	Business owner's obligation, contractor's obligation, safety work plan
7 Training	Trainees, types of education, establishment of an educational plan, the implementation of education, evaluation and follow-up management of education
8 Pre-Startup Safety Review	Composition of the inspection team, inspection timing, preparation of checklist, inspection report, processing of inspection results
9 Management of Change	Principles of MOC, normal procedure, emergency procedures, organizing the change management committee, review items at the time of change, etc.
10 Compliance Audits	Audit plan, composition of the audit team, audit implementation, audit and correction, documentation, etc
11 Incident Investigation	Composition of process accident investigation team, report, action
12 Emergency Planning and Response	Establishment of emergency action plan, emergency evacuation plan, issuance of an emergency, composition of an emergency action committee, conducting and coordinating emergency training, Public Relations plan, etc.

Table 2. PSM compliance audit category[15]

No.	Categories
1	Safety management and employee involvement
2	Process safety information
3	Process hazard evaluation
4	Operating procedures and practices
5	Mechanical integrity: Maintenance procedures
6	Work permit procedures
7	Safety management of contractors
8	Employee training and education of process & operation
9	Pre-startup safety procedures
10	Management of change
11	Internal audit
12	Incidents investigation
13	Emergency preparedness

가 있다.

그러나 이러한 차이에도 불구하고 PSM의 운영에 있어 PSM 각 요소가 개별적으로 존재하는 것이 아니라 일련의 프로세스(process)로 이해되어야 하고[14], 상호 독립적이 아니라 긴밀한 상호 작용 속에 공정관리가 되어야 한다는 점에서는 차이가 없다. 국내 PSM 제도에서도 12개 요소는 각 요소는 상호 유기적으로 연계되어 작동하도록 되어 있다[1].

2-1. 기능공명분석기법(FRAM: Functional Resonance Analysis Method)

2-1-1. 안전-II(Safety-II)를 기반으로 하는 FRAM

급격한 기술의 발달과 복잡한 환경에 대응하여 기존의 선형적 사고 분석방법의 한계를 보완하기 위해 시스템적 사고를 적극적으로 반영하는 사고분석 기법들이 최근에 개발되어 왔다[6]. 시스템을 통합적으로 분석하기 위한 방법으로 AcciMap, STAMP, FRAM 등의 사고 분석 기법이 개발되어 사용[11]되고 있다. 그러나 국내에는 아직 적용 사례가 많지 않고, 그 중에서도 FRAM의 사례가 가장 적다[16].

FRAM은 E. Hollnagel이 개발한 기법이다. Hollnagel은 안전 패러다임을 안전-I(safety-I)과 안전-II(safety-II)로 분류한다. 기존의 안전-I에 기반한 사고분석 기법은 이분법적(bimodality) 관점에서 작업의 성공과 실패는 그 원인과 과정이 다르다고 본다. 반면, 안전-II는 성공과 실패의 원인은 다르지 않고 다만 그 과정에서 발생하는 변동성의 정도의 차이로 설명한다. 이러한 사상을 반영한 분석 기법이 FRAM이다[17,18].

시스템 분석 기법으로 가장 최근에 개발되고 해외에서는 가장 많이 활용되고 있는 기법 중 하나인 FRAM[7,19]은 시스템 기능의 비선형적이고 복잡한 상호작용을 모형화하여 인적오류 및 사고가 발생하는 창발적 과정을 이해하고 예측하는 데 도움을 준다[20]. FRAM은 설계된 작업(WAI: work-as-imagined)이 아닌 시스템이 실제로 실행되었거나 실행된 작업(WAD: work-as-done)을 설명하며, 중요한 변동성과 결함을 사전 예방적 또는 사후적으로 조사하는 데도 활용할 수 있다[7]. 특히, 복잡한 시스템에서 상호 작용하는 기능 네트워크를 파악하여 실패의 원인뿐만 아니라 성공의 원인에 대한 통찰력을 얻을 수 있다[21]는 점은 다른 분석기법과는 차별화된 요소이다.

2-1-2. FRAM 원리와 분석 방법

FRAM은 실제 일상의 활동의 본질에 초점을 두고 있다. 실패와 성공의 동등성(equivalence of failures and successes), 대략적인 조정(approximate adjustments), 발현(emergence) 및 기능 공명(functional resonance) 등 4가지 통합 원칙을 기반으로 하고 시스템의 기능이 비선형적이라는 점을 인정한다. FRAM은 고장 시나리오에 대한 분석보다는 구성 요소의 작동 방식을 살펴보고 시스템의 목적을 달성하는 데 필요한 기능을 설명하는 데 중점을 두고 있다[22,23].

FRAM 분석은 일반적으로 4단계로 이루어진다. 1단계는 ‘시스템의 기능 도출 및 특성화’ 단계이다. 여기서 기능이란 시스템에서 이루어지는 작업 또는 활동으로, WAI가 아닌 WAD와 관련된 것이다. 도출된 기능은 입력(Input), 출력(Output), 전제조건(Precondition), 자원(Resources), 제어(Control), 시간(Time) 등 6가지 측면을 활용하여 특성화한다[24]. 2단계는 ‘기능의 변동성 파악’ 단계이다. 변동성 파악에서 중요한 점은 각 기능의 출력으로 인한 변동성이 다른 기능의 변동성에 어떤 영향을 주는가에 달려있다. 3단계는 ‘기능 변동성의 파급효과 분석’ 단계이다. 여기서는 기능 변동성의 전이(spread) 가능성을 파악하고, 시스템이 변동성을 관리할 수 있는 능력을 상실하게 되는 상황을 분석한다. 그리고 마지막 4단계는 ‘기능 변동성에 기반한 대응방안 모색’하는 단계이다. 이 단계에서 FRAM은 대응 전략으로 감시(monitoring)와 완화(dampening)를 제안한다[25].

2-1-2. PSM에 FRAM의 활용 가능성

시스템적 사고 분석기법에는 앞서 언급한 AcciMap, STAMP, FRAM 등이 대표적이다. AcciMap은 Rasmussen이 발표한 모델이며 사건(행위 및 결정)의 인과 흐름을 보여주는 특정 사고 시나리오를 그래픽으로 표현한다[5,26]. 정부(Government), 규제자(Regulators, Associations), 회사(Company), 경영자(M.anagement), 관리자 및 직원(Staff), 작업(Work) 등 6개의 조직 수준에서의 실패가 어떻게 조직 사고에 영향을 끼쳤는지를 밝히는 데 유용하다[26]. 그러나, 현재 사용 지침이 부족하여 연구 전반에 걸쳐 모델의 접근성과 일관성의 신뢰성에 영향을 주고 있다[27,28].

STAMP는 Leveson이 발표했다. 시스템 구성 요소 간의 상호 작용과 작업 시스템 전반에 걸쳐 사용되는 제어 메커니즘에 초점을 맞춘 제약 기반 모델이다. STAMP는 사고를 안전과 관련된 제약 조건의 부적절한 통제에 기인하는 것으로 간주한다. STAMP는 시스템의 전체 제어구조에 걸친 고장과 그 구조와 사고를 초래한 제어 실패 간의 상호작용을 보여 준다[29,30]. 설계 및 운영 단계 등에서 시스템 안전 제어 부족이 사고에 미치는 영향을 분석할 수 있다[29].

FRAM은 시스템의 일상적인 운영 상황을 표현할 수 있고, 동일한 사고가 다양한 원인에 의해 다양한 방식으로 발생할 수 있음을 보여준다. 특히, 시스템의 구조적 측면 외에 기능적 측면을 고려할 수 있다는 점[23]을 고려한다면, PSM의 운영 과정에서는 AcciMap이나 STAMP보다 FRAM이 활용 가능성이 크다. PSM 12요소는 상호 독립적이거나 순차적으로 수행되어 업무가 수행되는 것이 아니라, 각 요소가 기능적으로 긴밀한 상호 작용을 통해서 서로 영향을 주면서 공정관리가 이루어지도록 되어 있기 때문이다.

3. 비정상 작업에서 발생한 중대산업사고 사례 분석

3-1. 중대산업사고 현황

중대산업사고에 대해 「중대산업사고 예방센터 운영규정[고용노동부예규 제204호, 2023. 4. 28.]」에서는 「산업안전보건법」 제44조에 따른 공정안전보고서 제출 대상 설비로부터 위험물질 누출, 화재 및 폭발 등으로 인하여 사업장 내의 근로자에게 즉시 피해를 주거나 사업장 인근 지역에 피해를 줄 수 있는 사고로서 「산업안전보건법 시행령」 제43조제3항에 해당하는 누출·화재·폭발 사고라고 정의하고 있다. 같은 규정에서 제9조에서는 화학사고를 대상설비, 대상물질, 사고유형, 피해정도 4가지 판단기준에 의해 “중대산업사고”, “중대한 결함”, “그 밖의 화학사고”로 분류하고, 중대산업사고는 4가지 기준을 모두 충족하는 사고라고 한다.

본 연구에서는 고용노동부의 중대산업사고 통계와 KOSHA에서 작성한 중대산업사고보고서를 토대로 사고 통계 및 사례 분석을 수행하였다. 2014년 3월 12일 산업안전보건법 시행령 별표 10의 개정으로 적용범위 및 PSM 대상 물질이 확대된 이후부터 2022년 말까지 발생한 중대산업사고 총 108건의 연도별 발생 현황은 Fig. 1과 같다. 고용노동부 중대산업사고 통계 중 사고조사보고서 등에서 피해자가 발생하지 않은 것으로 확인된 1건(2015년 발생)에 대해 본 연구에서는 「중대산업사고 예방센터 운영규정」의 정의에 따라 중대산업사고 통계에서 제외하였다.

전체 중대산업사고 중 비정상 작업(non-routine work)에서 발생한 사고는 37건으로 34.5%에 해당한다. 그러나 Fig. 1에 나타난 바와 같이 2019년 이후 비정상 작업에서의 사고 발생이 급격히 증가하였다.

Fig. 2는 비정상 작업에서 발생한 중대산업사고를 사고조사보고서의 내용을 기준으로 발생 원인을 PSM 12요소별로 분류하였다. 분류 기준인 Table 3은 「공정안전보고서의 제출·심사·확인 및 이행상태평가 등에 관한 규정」, KOSHA의 PSM 관련 기술지침, 「공정안전보고서 작성예시집」[31]의 내용에 따라 작성하였다. 이때 비정상 작업(non-routine work) 중 발생한 사고에는 정비, 보수 작업, 화학설비와 그 부속설비의 개조·수리 및 청소 등을 위하여 해당 설비를 분해하거나 해당 설비의 내부에서 작업, 기계 이상을 찾기 위한 작업 등 일상적인 공정 운전 작업 외의 작업, 장비 보수를 위한 준비작업 등에서 발생한 사고를 포함하였다. 그러나, 점검 정비를 위한 정상적인 설비 가동 중지 작업(설비 분해 작업이 수반되는 경우는 제외) 중 발생한 사고는 제외하였다.

PSM 12요소 별로 사고원인과 관련된 요소는 작업허가(Work Permit) 34건, 설비유지관리(Mechanical Integrity) 30건, 공정위험성평가(Process Risk Assessment) 28건 등이다. 즉, 비정상 작업에서 작업허가, 설비유지관리, 공정위험성평가 요소의 부적절한 수행이 사고의 주요 원인으로 확인되었다.

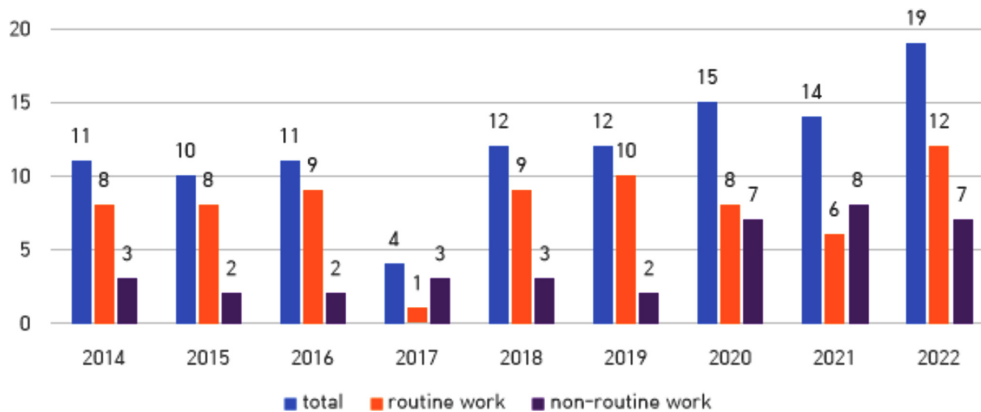


Fig. 1. Status of Serious Industrial Accident (2014-2022).

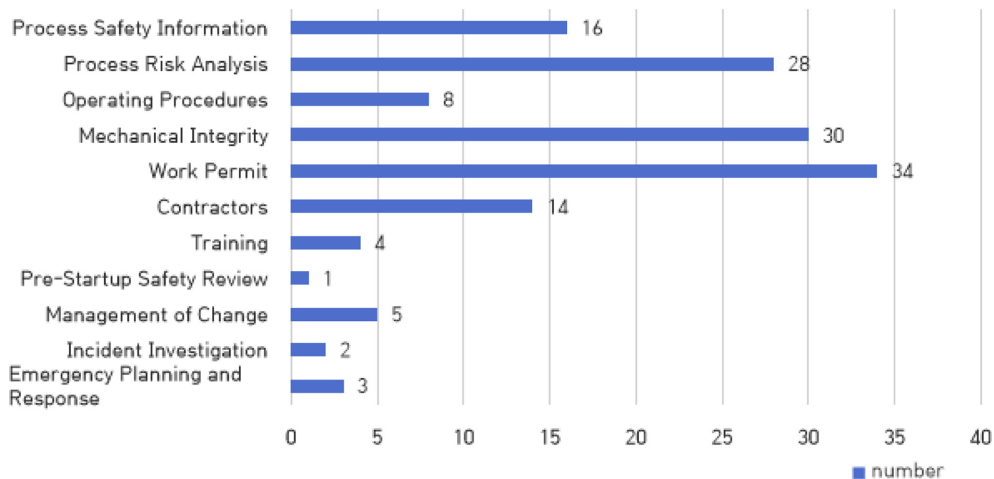


Fig. 2. Classification of causes by PSM 12 elements (2014-2020).

Table 3. Classification Criteria for Causes of Accidents by PSM 12 elements

Process Safety Information	Design defect
	Harmfulness of chemicals
	Explosive hazardous area and zone
	Ground resistance management
	Installation of a gas leak detector
Process Risk Assessment	Flame arrester
	Wash facility
	Risk assessment
Operating Procedures	Job risk analysis
	Hazard identification
Mechanical Integrity	Emergency shut-down, emergency operation
	Work handover
	Maintenance procedures
Work Permit	Health working program for confined spaces
	Equipments and facilities maintenance class
	Check & maintenance
	Safety measures before work (gas concentration detection machine & equipment Grounding, pipe drain & discharge, etc.)
	Work permit issue
Contractors	Designating work supervisor
	Wear protective equipment during maintenance work
	Explosion-proof tool use
Training	Contractor supervision
	Provide risk information
Pre-Startup Safety Review	Contractor Training
	Pre-work Training
Management of Change	MSDS education
	Pre-startup safety review skip and operation
Incident Investigation	MOC procedure skip
	Missing accident reporting procedure
Emergency Planning and Response	Not share a accident case
	Emergency evacuation route
	Emergency measures for exposure to dangerous chemicals

그리고 2014년 이후 발생한 중대산업사고 총 108건에 대한 사고 원인 분석에 사용된 기법을 살펴보면, 모든 사고의 분석은 기본적으로 특별한 분석기법을 사용하지 않고 인과관계에 의한 분석을 수행한 후 추가적으로 RCA(root cause analysis) 기법을 사용한 경우가 54건, Fault Tree 기법을 사용한 경우가 1건, AcciMap 기법을 사용한 경우가 9건이었다.

3-2. 비정상 작업에서의 발생한 중대산업사고의 FRAM 분석

3-2-1. 분석대상 선정

본 연구에서는 원청에서 직접 수행하는 소규모 정비·보수 작업 중 발생한 중대산업사고를 분석대상으로 선정하였다. 인화성 물질 이송 배관의 Y-Strainer 청소 작업 중 발생한 화재사고를 분석하였다. 이러한 사고는 PSM 공정에서 흔히 발생하는 비일상 작업에서 발생할 수 있는 유형으로 현장에서 PSM 12요소가 실제 어떻게 상호 작동하고 있는지를 확인할 수 있는 일반적인 사례라고 판단하였다. 참고로 비정상 작업 중 발생한 중대산업사고 37건 중 화재 또는 화재·폭발 사고 13건, 폭발 사고 11건, 누출 사고 13건이었다.

3-2-2. FRAM을 활용한 사고 분석

- 사고개요

XX년 11월 주말 야간 시간대에 OOO공장의 PSM 설비인 중합 공정의 벤젠 회수 펌프의 토출측에서 정상 압력 보다 낮은 이상 압력이 감지되었다. 작업자들이 현장 점검을 실시한 결과, 벤젠 회수 탱크와 벤젠 회수펌프 사이의 Y-Strainer가 이물질로 인하여 막힌 것을 확인하였다. 이에 Y-Strainer 정비 작업을 실시하게 되었다.

배관에 내용물(벤젠+물)이 있는 상태에서 Y-Strainer 하부 덮개를 전동 임팩트 렌치로 해체하는 중 내용물(인화성이 있는 물질인 벤젠)이 작업장 바닥에 누출되었으나, 별도 조치 없이 계속 작업을 진행하였다. 내부망을 탈착하여 청소 후 전동 임팩트 렌치로 Y-Strainer 재조립하는 작업 중 화재 발생하여 작업 중이던 근로자 1명이 화상 재해를 입었다.

- Y-Strainer 정비 작업 관련 기능 도출

분석에 필요한 기본 자료는 KOSHA의 재해조사의견서, 고용노동부의 해당 사고의 수사 관련 자료(수사결과보고서, 의견서, 진술서 등), 사고 조사 참여자 및 작업자 면담 등을 통해 수집하였다.

수집한 자료에서 WAD를 바탕으로 기능(function)을 도출하고 변동성을 파악하여 Table 4와 같이 정리하였다. 분석 대상인 Y-Strainer 정비 작업에서는 시간(time)은 변동성에 별 영향을 주지 않았고, 정확성(precision)이 크게 영향을 미쳤다. 사고와 관련된 거의 모든 기능에서 수행 과정의 정확성(precision)에서 변동성이 발생하였다. 관련된 대부분 기능이 부정확하게 수행되었다. 이러한 기능들의 부정확한 수행으로 인한 변동성이 사고와 관련되어 있음을 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

- Y-Strainer 정비 작업 모델링(modeling) 및 현상화(instantiation), 사고 사례 분석

Table 4와 같이 도출된 기능을 바탕으로 FMV Pro (FRAM Model Visualiser Pro) ver 2.2 프로그램을 사용 모델링 작업을 수행하였다. 이후 실제 사고 사례 분석을 통해 FRAM 모델을 Fig. 3과 같이 현상화하였다. Fig. 3에서 푸른색과 붉은색으로 표시된 기능은 사고 조사보고서에서 사고 발생 원인으로 확인된 기능이다. 특히 붉은색 기능은 사고 발생(화재 발생)의 직접적 원인이다. 드레인(drain) 작업에서 인화성 물질은 적절히 조치하지 않아 바닥에 흥건하게 방치된 상태에서 비방폭 공구를 사용하여 작업하던 중 사고가 발생했기 때문이다.

기존의 인과관계에 의한 원인 규명에 초점을 두는 선형적 인과관계 분석에서는 해당 원인을 통제하면 사고를 막을 수 있는 것처럼 해석되지만, FRAM 분석에 의하면 특정의 한 기능을 아무리 성실히 수행하더라도 입력(input), 전제조건(resources) 등에 해당하는 기능에 변동성이 발생하면 사고를 예방하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 인과관계를 바탕으로 한 선형적 분석을 수행한 재해조사의견서에 따르면, 사고 발생 원인으로 지목된 작업 전 교육 등이 적절히 수행된다면 사고가 발생하지 않았을 것이라는 결론을 내릴 수 있다. 그러나, FRAM 분석에 의하면 Fig. 3에 보여지는 바와 같이 작업 전 교육 등을 충실히 수행하였다고 하더라도 교육의 전제조건(precondition)에 해당하는 폭발위험장소 설정, 위험성평가, 정비작업절차서 등이 적절히 수행되지 않았다면, 즉, 전제조건에 해당하는 기능에서 변동성이 크게 발생한다면, 사고를 예방하기는 어렵다는 것을 확인할 수 있다. 교육의 내용이 안전한 작업 수행에 필요한 내

Table 4. Functions and possible output variability of the accident

No.	Function	Actor	Possible Output Variability	Description
1	Request to check the pressure on the discharge side of the benzene recovery pump	Organization	Time-Not at all Precision-Precise	Background function
2	Plan a Y-Strainer cleanup	Organization	Time-Not at all Precision-Precise	
3	Set up an explosive hazardous area and zone	Organization	Time-On time Precision-Imprecise	Not set up an explosive hazardous area and zone
4	Perform risk assessment	Organization	Time-On time Precision-Imprecise	Not enough risk assessment for explosion hazard area and zone
5	Prepare safety maintenance procedures	Organization	Time-On time Precision-Imprecise	Improperly include risk assessment results
6	Issue Work Permit	Organization	Time-On time Precision-Imprecise	Improper Hot Work Permit
7	Provide safety training and education	Organization	Time-On time Precision-Imprecise	Not enough MSDS Training
8	Supervise the work	Human	Time-On time Precision-Imprecise	Not appoint Supervisor
9	Use appropriate tool & Wear protective gear	Human	Time-Imprecise Precision-Imprecise	Not wear protective gear
10	Shut down the facilities	Human	Time-On time Precision-Precise	
11	Perform LOTO(Lock-Out, Tag-Out)	Human	Time-On time Precision-Precise	
12	Drain a pipe	Human	Time-On time Precision-Imprecise	Not check for removal, cleaning, and residual
13	Detect gas concentration	Human	Time-On time Precision-Imprecise	Not detect gas concentration
13	Clean the Y-Strainer	Human	Time-Too early Precision-Imprecise	Not appropriate in performing tasks
14	Perform Pre-Startup Safety Review & Complete the work	Organization	Time-On time Precision-Acceptable	

용을 적절히 포함하고 있지 않기 때문이다.

이와 같이 사고 조사에서 FRAM을 사용한다면, 복잡한 시스템에서 사고나 재해를 예방하기 위해서 원인(기능) 간의 상호의존성, 각 원인(기능)의 잠재적인 변동성과 이들의 결합 관계를 이해할 수 있을 것이다. 이러한 이해는 사고를 예방하기 위해 PSM 12 요소의 변동성을 어떻게 감시(*monitoring*)와 완화(*dampening*)해야 할 것인가에 대한 해결책을 모색하는 데 도움을 줄 수 있을 것이다.

3-2-3. FRAM을 활용한 PSM 비정상 작업의 취약점 분석
위 사고 사례에서 확인된 기능을 Table 3의 분류 기준에 따라 PSM 12요소로 분류하여 Table 5로 정리하였다.

이를 바탕으로 비정상 작업에 관련된 PSM 12요소 FRAM으로 분석하여 현상화하면 Fig. 4와 같다.

이러한 분석을 통해, 비정상 작업인 정비 작업의 적절한 수행에는 근로자 안전작업허가서(*Work Permit*), 정비보수작업절차서(*Mechanical*

Table 5. Function classification by psm12 elements

No.	Function	PSM 12 Elements
1	Request to check the pressure on the discharge side of the benzene recovery pump	Operating Procedures
2	Plan a Y-Strainer cleanup	Mechanical Integrity
3	Set up an explosive hazardous area and zone	Process Safety Information
4	Perform risk assessment	Risk Assessment
5	Prepare safety maintenance procedures	Mechanical Integrity
6	Issue Work Permit	Work Permit
7	Provide safety training and education	Training
8	Supervise the work	Work Permit
9	Use appropriate tool & Wear protective gear	Work Permit
10	Shut down the facilities	Work Permit
11	Perform LOTO(Lock-Out, Tag-Out)	Work Permit
12	Drain a pipe	Work Permit
13	Detect gas concentration	Work Permit
13	Clean the Y-Strainer	Work Permit
14	Perform Pre-Startup Safety Review & Complete the work	Pre-Startup Safety Review

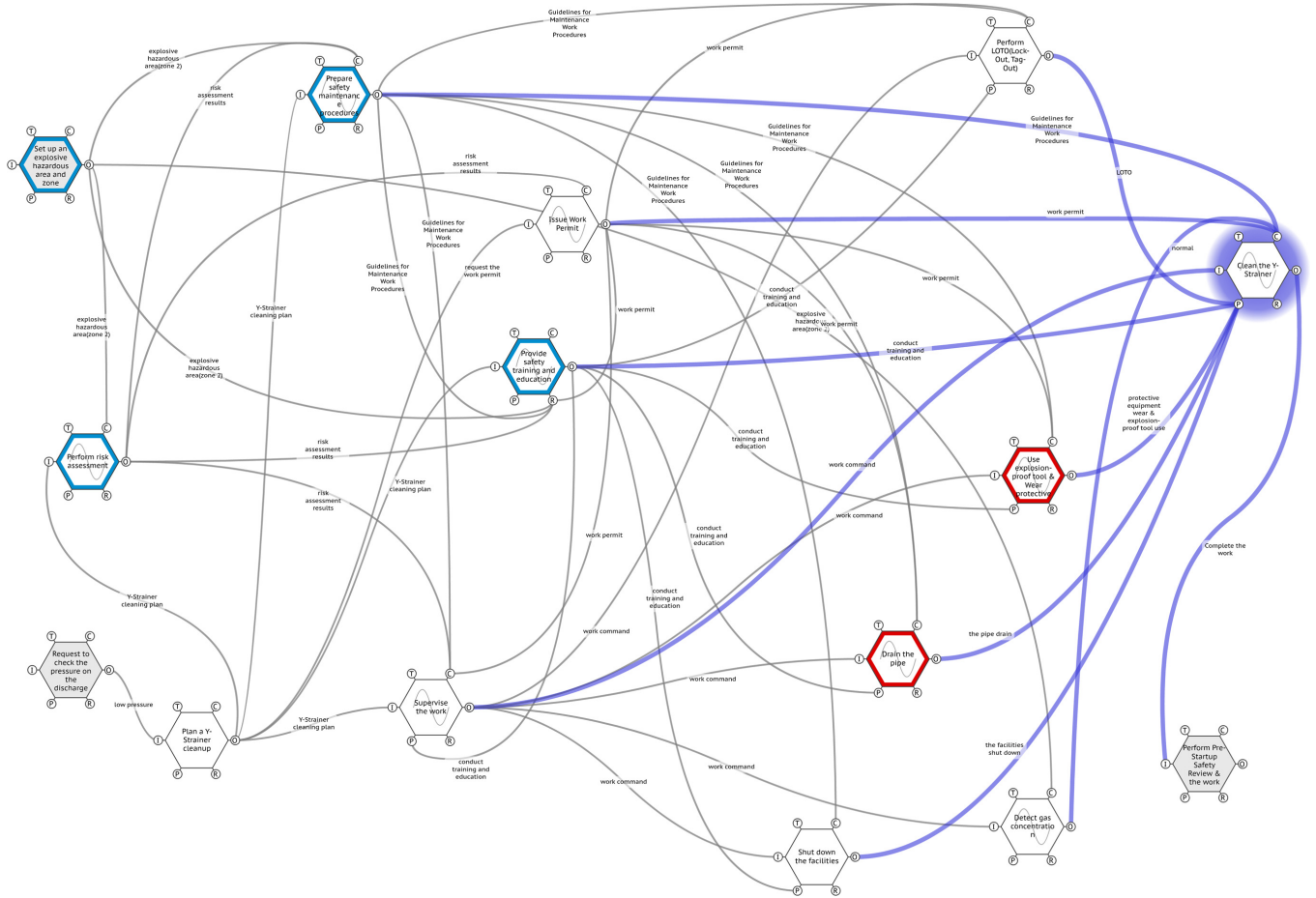


Fig. 3. FRAM model of Y-Strainer maintenance work.

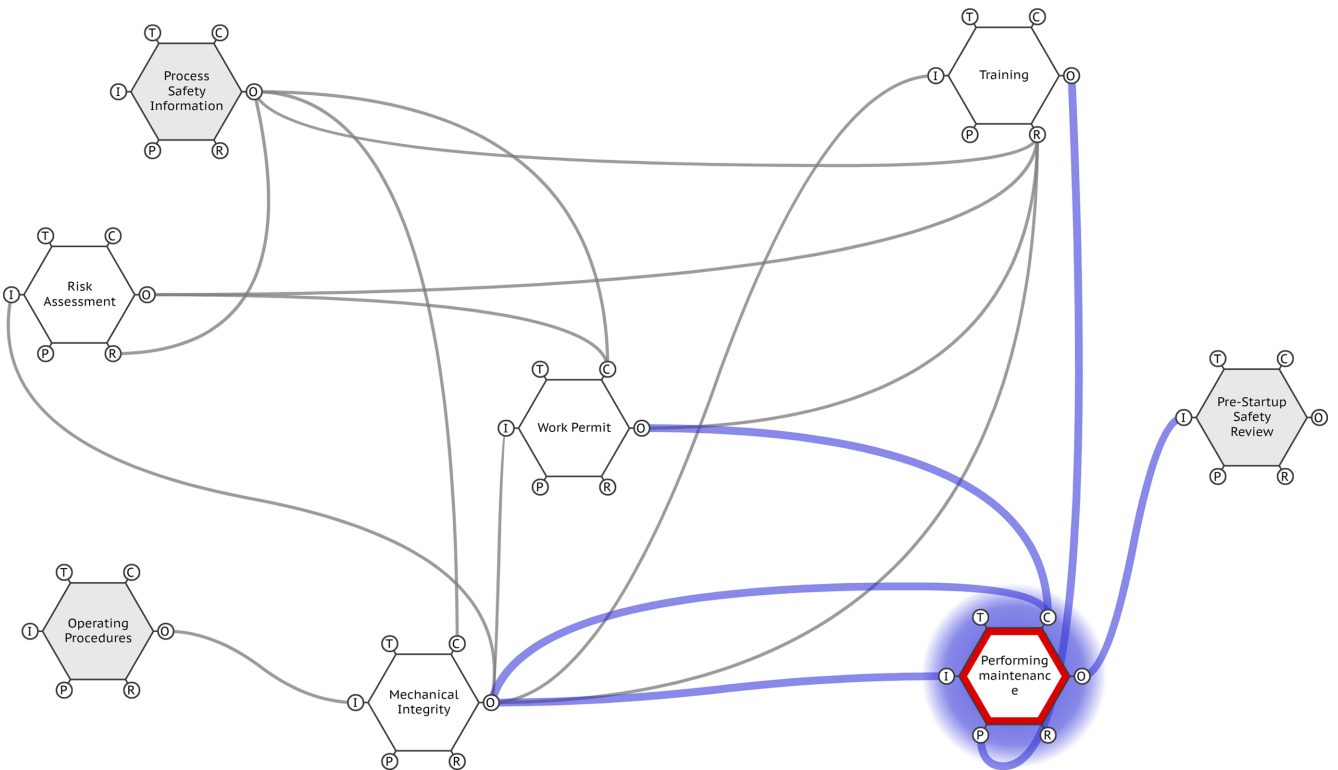


Fig. 4. FRAM model of an accident that occurred in an informal work.

Integrity), 교육(Training)이 직접 관련되어 있고, 따라서 직접적으로 관련된 요소들의 작업이 적절하게 수행될 수 있는지 여부는 직접적으로 관련되어 있는 요소(기능)의 변동성 통제뿐만 아니라, 공정안전자료(Process Safety Information), 위험성평가(Risk Assessment), 안전운전절차서(Operating Procedures) 등 기능적으로 상호 관련된 다른 요소(기능)들의 변동성도 적절히 통제할 수 있느냐에 달려있음을 확인할 수 있었다.

PSM 비정상 작업의 수행에 있어 FRAM을 활용한다면, PSM 12 요소가 어떻게 연결되어 있고 상호 작용하고 있는지를 전체 시스템의 측면에서 조망할 수 있게 해 줄 것이다. 그리고 하나의 요소(기능)에서 발생한 변동성이 전체 공정 과정에 미치는 영향과 상호작용을 이해하는 데 도움을 주어 효과적인 공정안전관리 방안을 모색하는 데도 유용할 것이다.

4. 고찰 및 결론

본 연구에서는 FRAM을 사용하여 PSM 비정상 작업을 분석함으로써, PSM에 FRAM의 활용 가능성을 검토하였다. 최근 중대산업 사고 발생이 증가하고 있는 PSM 비정상 작업에서 발생한 사고 중 하나의 사례를 분석하였고, 나아가 PSM 비정상 작업 과정에 대해서도 분석하여 FRAM의 유용성을 살펴보았다.

FRAM을 통한 개별 사고 사례 분석으로 비정상 작업에서 PSM 12요소가 어떻게 서로 기능적으로 상호작용하는지 확인할 수 있었다. 비정상 작업 수행과 직접 관련된 PSM 요소의 변동성은 그에 선행하여 수행되어야 할 PSM 다른 요소의 변동성에 영향을 받는다. 선행 요소는 또 다른 요소와 상호작용하고, 결국 PSM 12요소 모두 기능적인 측면에서 상호 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

이러한 맥락에서 중대산업사고의 사고 분석에 FRAM을 활용하면 단순한 선형적 사고 분석을 통한 인과 관계 파악 및 책임 소재 규명에서 벗어나, PSM 12요소가 모두 다양한 측면에서 다양한 방식으로 사고 예방에 중요한 역할을 수행하고 있음을 확인할 수 있고, 따라서 기능적으로 연계하여 관리할 때 사고 예방에 효과적임을 알 수 있었다.

또한 FRAM으로 비정상적 작업의 수행 과정을 분석하고 관리한다면, 시스템 전체의 측면에서 PSM 이행 과정을 조망하면서 변동성의 상호 작용을 확인하여 안전 관리상 취약점을 사전에 발견할 수 있다. 특히, 향후 FRAM의 원리의 하나인 실패와 성공의 동등성(equivalence of failures and successes)의 원리를 적극적으로 활용한다면, PSM 이행상태 진단 및 개선에도 많은 통찰을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 FRAM의 특성상 기능 분석이 임의적으로 이루어질 가능성이 크다는 점과 복잡한 작업의 경우 기능의 수가 많아지게 되면 분석 결과가 복잡해져 활용도가 떨어질 수 있다는 한계가 있다[12]. 또한 공간적·시간적 상호 의존관계를 명확하게 설명할 수 없는 단점이 있다[11].

PSM은 복잡한 화학공장을 관리하기 위한 유용한 안전관리 기법으로 그간 국내 화학사고 예방에 적지 않은 기여해왔다. 그러나 최근 사고 현황에서 나타난 바와 같이 PSM 제도가 화학사고 예방에 한계를 보이고 있다. 효율적인 운영 방법을 찾아야 할 시기가 온 것이다.

FRAM은 비선형적이고 복잡한 상호작용을 모형화하여 인적오류

및 사고가 발생하는 창발적 과정을 이해하고 예측하는 데 효과적인 분석기법이다. 본 연구에서는 이러한 점이 PSM 운영 과정에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 향후 PSM 제도 효율적 운영과 나아가 제도 개선에 FRAM을 적극 활용하는 계기가 되기를 바란다.

References

1. Lee, J. Y., et al., "Improvement Plan of Implementing Condition Assessment in Process Safety Management (PSM) System," *Journal of the Korean Society of Safety*, **31**(4), 27-34(2016).
2. Jang, Namjin, et al. "The Role of Process Systems Engineering for Sustainability in the Chemical Industries," *Korean Chemical Engineering Research* **51**(2), 221-225(2013).
3. In Jae Shin, "The Effective Control of Major Industrial Accidents by the Major Industrial Accident Prevention Centers (MAPC) Through the Process Safety Management (PSM) Grading System in Korea," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **26**(4), 803-814(2013).
4. Jung, J.-W., *Safety management 4th*, GyoMoonSa. 61(2023).
5. Rasmussen, Jens., "Risk Management in a Dynamic Society: a Modelling Problem," *Safety Science*, **27**(2-3), 183-213(1997).
6. Hollnagel, Erik and Orjan Goteman, "The Functional Resonance Accident Model," *Proceedings of Cognitive System Engineering in Process Plant* **2004**, 155-161(2004).
7. Patriarca, Riccardo, Johan Bergström, and Giulio Di Gravio., "Defining the Functional Resonance Analysis Space: Combining Abstraction Hierarchy and FRAM," *Reliability Engineering & System Safety*, **165**, 34-46(2017).
8. Clay-Williams, Robyn, Jeanette Hounsgaard, and Erik Hollnagel., "Where the Rubber Meets the Road: Using FRAM to Align Work-as-imagined with Work-as-done When Implementing Clinical Guidelines," *Implementation Science*, **10**(1), 1-8(2015).
9. França, Josué Eduardo Maia, et al., "Analyzing Organizational Gaps in Process Accidents with FRAM: The Case of the Imperial Sugar refinery explosion (2008)," *9th CCPS Latin American Conference on Process Safety* **2022**, 394-405(2022).
10. Kim, Y. S. and Park, D. J., "A Development of Facility Web Program for Small and Medium-Sized PSM Workplaces," *Korean Chem. Eng. Res.*, **60**(3), 334-346(2022).
11. Koo, C.-C., Seo, D.-H. and Kim, T.-H., "Chemical Plant Explosion Accident (cause) Analysis Using AcciMap and FRAM," *Fire Science and Engineering*, **35**(5), 59-65(2021).
12. Seo, D.-H., Choi, Y.-R. and Han, O.-S., "Analysis of a Fire Accident during a Batch Reactor Cleaning with AcciMap, STAMP and FRAM," *Journal of the Korean Society of Safety*, **36**(4), 62-70(2021).
13. Seol, M.-S., "A Study on Implications for the Prevention of Major Industrial Accidents Based on the Causes and Statistic of Major Industrial Accidents," *Korean Journal of Hazardous Materials* **10**(2), 97-106(2022).
14. OSHA., *Process Safety Management OSHA 3132*, 2000(Reprinted).
15. Kang, M.-J., Lee, Y.-S. and Kwon, H.-M., "A Study on the Development of Safety Performance Index in Chemical Industry," *Journal of the Korean Society of Safety*, **23**(6), 57-61(2008).
16. Dohyung Kee, "Review and Comparison of Systemic Accident Analysis Techniques based on Literature Survey," *Journal of the*

- Ergonomics Society of Korea*, **40**(1), 55-63(2021).
17. Hollnagel Erik., Safety-I and safety-II: the past and future of safety management. CRC press(2018).
 18. Ham, D.-H., "Safety-II and Resilience Engineering in a Nutshell: An Introductory Guide to Their Concepts and Methods," *Safety and Health at Work*, **12**(1), 10-19(2021).
 19. Patriarca, Riccardo, et al. "Framing the FRAM: A Literature Review on the Functional Resonance Analysis Method," *Safety Science* **129**, 104827(2020).
 20. Choi, E.-B. and Ham, D.-H., "A FRAM-Based Systemic Investigation of a Rail Accident involving Human Errors," *Journal of the Korea Safety Management & Science*, **22**(1), 23-32(2020).
 21. Furniss, Dominic, Paul Curzon, and Ann Blandford. "Using FRAM Beyond Safety: a Case Study to Explore How Sociotechnical Systems Can Flourish or Stall," *Theoretical Issues in Ergonomics Science* **17**(5-6), 507-532(2016).
 22. Hollnagel, Erik., FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems. Crc Press, (2017).
 23. Seo, D.-H., Han, O.-S. and Cho, Y.-R., "A Study on Systematic Cause Analysis of Fire and Explosion Accident Cases in Chemical Plants," OSHRI, KOSHA. 33-43(2020).
 24. França, Josué Eduardo Maia, and Erik Hollnagel. "Recognition and Analysis of Human Factors and Non-technical Skills Using the Functional Resonance Analysis Method-FRAM," *Anais do Congresso Internacional de Conhecimento e Inovação-ciki*. **1**(1), (2019).
 25. Yoon, W. C. and Yang, J. Y., "A Study for Change the Tional Safety and Health Paradigm," OSHRI, KOSHA. 67-80(2019).
 26. Underwood, Peter, and Patrick Waterson. "A Critical Review of the STAMP, FRAM and Accimap Systemic Accident Analysis Models," *Advances in Human Aspects of Road and Rail Transportation January* **2016**, 385-394(2012).
 27. Branford, Kate, Andrew Hopkins, and Neelam Naikar. "Guidelines for AcciMap Analysis," Learning from high reliability organisations. CCH Australia Ltd(2009).
 28. Salmon, Paul, *et al.* "Systems-based Accident Analysis in the Led Outdoor Activity Domain: Application and Evaluation of a Risk Management Framework," *Ergonomics* **53**(8), 927-939((2010)).
 29. Leveson, Nancy. "A New Accident Model for Engineering Safer Systems," *Safety Science* **42**(4), 237-270(2004).
 30. Salmon, Paul M., Miranda Cornelissen, and Margaret J. Trotter. "Systems-based Accident Analysis Methods: A Comparison of Accimap, HFACS, and STAMP," *Safety Science* **50**(4), 1158-1170 (2012).
 31. KOSHA., Example process safety report preparation(2020).

Authors

Young-Gwan Kim: Phd Student, Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea; obelisk1024@gmail.com

Jin-Woo Jung: Professor, Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea; jjjw35@hanmail.net