

다계층·복합구조의 국내 조선소를 대상으로 한 시스템분석기법 적용 방안 연구

배계완*† · 김경환**

The Application of Systemic Analysis on Complex and Multi-layered Shipbuilding yard in Korea

Bae. Gye wan*† · Kyunghwan Kim**

†Corresponding Author

Bae. Gye wan
Tel : +82-52-703-0506
E-mail : bae5546@kosha.or.kr

Received : June 2, 2021
Revised : July 21, 2021
Accepted : August 24, 2021

Abstract : Korean industry has achieved dramatic growth in a short time through continuous technical innovations. However, safety consciousness and management have not kept pace with industry growth. The characteristics of industrial accidents in socio-technical systems have become so complicated that it has been challenging for safety professionals to implement effective preventive measures because it is difficult to determine what is happening in the complex workplace. Thus far, they have focused on technical improvements and the requirements of OSH regulations to avoid legal responsibility. Accordingly, this study has used the systemic analysis method to explain the emergence of something unexpected in complex and multi-layered business structures, which is usually related to the variabilities of humans and organizations. This study chose a shipyard where a few fatal accidents had occurred because the shipbuilding industry includes numerous variabilities, including obtaining orders, manpower supply, procurement, etc. Systemic analysis progressed using FRAM based on two accident cases related to the truss platform used in LNG vessels. The outcome shows that each function within the system has its variabilities and has become coupled or dependent on other functions, increasing the possibility of accidents. This analysis method can provide OSH professionals with practical techniques for explaining what is happening in a complex socio-technical system and how to take proper measures.

Key Words : socio-technical system, systemic analysis method, variability, FRAM

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

1.1 연구배경

국내 산업현장은 그 간 기술혁신 등을 통한 고도의 성장을 이룩해 왔으나 노동자 안전보건 의식·문화, 위험성 예측 및 관리 측면에서는 서구권에 비해 뒤쳐진 양상을 보이고 있다. 통계적으로 보면 2020년 산업재해로 인한 사고사망자수가 882명으로 정부의 산재사망 사고 절반감축목표에도 불가하고 증가추세¹⁾이며, 서구권의 안전선진국에 비해 약 4~10배에 해당하는 수치²⁾

를 나타내고 있다.

그리고 사망자수의 절반 이상이 건설업에서 발생하였고, 경기변동에 의한 수주물량의 영향 등으로 선박 건조 및 수리업에서 발생한 사고사망자수는 전년대비 약 2배(9→17명) 증가¹⁾하였다.

사고예방을 위한 전통적인 방법은 사고건수, 재해율 등 잘못되었던 것들(Things that go wrong)을 분석하여 측정가능토록 수치화하고 이를 예방(Prevention)하거나 회피(Avoidance)하는데 집중하는 것³⁾이다. 정부 또는 사업장 자체적으로 산재예방대책을 수립하는 경우

*한국산업안전보건공단 안전보건사업이사 (Korea Occupational Safety and Health Agency)

**한국산업안전보건공단 산업안전보건교육원 교수 (Korea Occupational Safety and Health Agency)

재해분석을 통해 목표를 설정하고, 불안정한 행동 등 유해위험요소들을 규제·통제하는 방향으로 진행되어 왔다. 하지만, 중대재해 등 사고발생 시 작성된 보고서 내용의 대부분이 기술적 결함, 산업안전보건법 위반 위주로 기술되어 있어 재발방지대책 수립 시에도 그에 따른 대책위주로 수립하고 있다. 그리고 국내 사업장의 사고조사 담당자들이 사고조사기법에 대한 이해의 부족 등으로 동종재해 재발방지를 위한 근본원인 파악에 어려움을 느끼고 있는 것도 하나의 원인으로 작용하고 있다⁴⁾.

정부의 산재감소절반 목표 발표이후 2018년 11월 태안화력발전소에서 발생한 비정규직 청년노동자 컨베이어벨트 끼임 사망사고로 인해 하청노동자의 작업환경문제, 위험의 외주화 등 구조적 문제에 대한 이슈화⁵⁾로 국민적 관심이 증대 되었다. 이에 따라 기존의 사고 예방 및 대응방식에 따른 한계를 극복하기 위해 국내에서 몇 차례 ‘안전 패러다임 전환’의 선언이 있었으나, 그 중요성을 강조하는 선언문에 그쳤으며, 해외의 시스템안전기법 등을 벤치마킹하여 국내 사업장에 적용하는 등 실질적인 전환의 노력은 미미한 수준²⁾이다.

특히, 조선업, 건설업 등 도급사업의 특징 중 하나인 원·하청 계약, 다단계 하도급 고용구조는 계약순위 최 하위 업체에 소속된 작업자의 안전 확보에 어려움을 야기하고 있으며, 여기에 더하여 원청 직영과 하청 작업자가 같은 장소에서 진행되는 혼재작업, 조선소에서 사용되는 골리앗크레인, 트랜스포터 등 대형장비를 사용한 중량물 취급 작업 등 복합적인 작업 상황에서 발생하고 있는 사고들을 예방하는데 기존의 안전관리 체계로는 한계에 직면해 있다.

1.2 시스템분석의 필요성

안전을 간단히 정의하면 ‘사고(Incidents or accidents)와 같이 원치 않는 결과가 일어나지 않는 상태’라고 할 수 있으며, 좀 더 구체적으로 기술하면 ‘안전이란 작업자, 대중 또는 환경에 악영향을 줄 수 있는 사건들(Events)이 허용 가능한 수준으로 낮추는 시스템적 특성을 말한다³⁾’. 그리고 안전관리의 중요한 수단 중 하나로서, 사업장내에 안전을 위협하는 ‘잘못되어진 것’을 발견하기 위해 사고분석을 실시한다. 사고분석의 목적은 사고발생 원인을 찾아내어 적절한 대책을 제시함으로써 동종재해 재발을 방지하는 것이라 할 수 있다. 하지만, 안전시설·방호장치 등 기술적인 접근과 법 위반 위주의 기존 사고조사체계로는 사고발생의 근본적인 원인을 도출하여 개선안을 제시하는데 한계가 있다⁵⁾.

안전에 대한 사람들의 인식은 인적·물적 피해를 동

반한 사고발생으로부터 강화⁶⁾되어 왔다. 그리고 동종재해 재발방지를 위해 사고의 직접원인 및 사고발생 메커니즘에 집중해 왔다. 1·2차 산업혁명때 증기엔진의 발명에 따른 기술 중심의 안전시대부터 출발하여 안전관리(Safety management)의 시대에 이르렀고, 지금은 기술·사람 및 조직의 복합체인 사회-기술시스템(Socio-technical system)이 점점 복잡·다양화되어 시스템 내에서 일어나고 있는 모든 일들을 다 이해할 수 없고, 이에 따라 안전관리도 매우 어려워지고 있다⁶⁾.

특히 조선업의 경우 다단계 하도급 구조, 원·하청 작업자들의 혼재작업, 골리앗크레인 등 대형장비를 사용한 중량물 취급 작업 등의 특성은 단기출력 작업자의 잦은 이직 등의 변동성(Variabilities)과 맞물려 안전관리를 더욱 어렵게 하고 있다⁵⁾.

그리고 이러한 다계층의 복합적인 시스템에서 일어나고 있는 크고 작은 사고들에 대해 기존 사고조사·분석체계는 적절한 예방대책을 제시할 수 없으므로, 안전선진국에서 활발히 진행되고 있는 시스템안전의 개념과 시스템분석기법에 대한 연구를 바탕으로 국내 사업장에 시스템분석기법을 실제적으로 적용함으로써 시스템 분석기법의 효과성을 입증하고자 한다.

2. 사회변천에 따른 사고분석기법의 발전

안전에 대한 생각은 사회발전과 함께 진보⁶⁾되어 왔다. 20세기 이후 안전과 사고에 대한 이해방식에 따라 3개의 시대⁶⁾로 나뉘질 수 있다. 산업혁명에서 발명된 증기엔진 및 철도산업 확장시기의 기술의 시대(Age of technology), 1979년 미국 TMI 핵발전소 방사능 누출사고로 인해 인간-기계 시스템(Man-machine system)에서 인적요소의 중요성이 부각되었던 인적요소의 시대(Age of human factors), 그리고 1986년 우주선 챌린저호 폭발사건으로 인해 인적요소에 영향을 미치는 조직(Organization)에 대해 고려하기 시작했던 안전관리의 시대(Age of safety management)로 분류⁶⁾된다. 최근에는 안전 패러다임 전환의 개념을 제시하고 있는 레질리언스 개념이 도입되어 기존의 사고대응 시에 고려되지 않았던 작업자 개인, 기술 및 조직적인 요소들을 통합적으로 분석할 수 있는 시스템적 접근법들이 제시되고 있다⁷⁾.

사고분석모형 또한 산업의 변천과 고도화에 따라 발전⁸⁾되어왔다. 사고모형이란 조사자로 하여금 사고를 쉽게 이해할 수 있게 해주는 일종의 ‘틀’로서 산업의 발전과 함께 발생하는 사고의 양상 또한 복잡·다양화됨에 따라 사고모형도 발전해 왔다. 이러한 틀은 사고

를 이해하는데 큰 도움을 줄 수 있으나 사고발생과정을 과도하게 단순화 시키거나 한 가지 관점에 치우칠 수 있고 다른 요소를 배제할 수 있다. 그리고 하인드사이트(Hindsight), 확증편향 등 조사자가 가지고 있는 선입견(Bias)이 사고분석에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 주의가 요구⁸⁾된다.

사회발전과 함께 진화되어 온 사고모형을 다음과 같이 세 가지로 분류하여 설명할 수 있다.

2.1 사건순서모형 (Sequential modeling)

눈에 띄는 특정 순서로 벌어진 일련의 사건 또는 상황들이 자연스럽게 누적되어 사고가 발생하는 것으로 보는 단순선형모델(Simple linear modeling)이며, 1세대 모형⁸⁾이라고도 한다. 1931년 하인리히가 개발한 도미노 모형은 단순하고 선형적인 인과관계(Simple linear causality)를 잘 설명하고 있다. 하인리히 등은 사고가 사건이 순차적으로 파급되어 발생하는 것으로 간주하고 사고의 인과관계를 찾아내어 그 연결고리를 제거함으로써 사고를 예방할 수 있다고 주장하였다.

사건순서모형이 간단한 연속 사건에만 활용되는 것은 아니다. 사건발생 계통수 분석(Event Tree Analysis), 결함수 분석(Fault Tree Analysis) 등과 같이 여러 단계에 걸쳐 발생하거나 다양한 계층으로 나뉘는 사건에도 활용할 수 있다. 이 같은 순서 모형은 인과적 순서를 고려하고 도식으로 나타내기가 편리하며 이해하기도 쉽다는 점에서 매력적으로 다가온다. 본 모형에서 예기치 못한 사건은 순차적으로 발생한 결과가 축적되어 원치 않는 결과인 사고가 발생하는 것으로 본다.

이 순서모형은 인과관계가 확실해야 한다는 한계가 있다. 실제 사고에서는 기술적, 기계적 측면이 아니면 그와 같은 강력한 인과관계가 존재하는 경우는 드물기 때문이다. 다시 말해 장비고장의 경우 분석을 통해 실질적인 원인과 영향의 관계가 발견될 수도 있으나 사고의 인적 측면이나 조직적 측면에서는 그러한 인과관계가 지극히 약하게 발견된다.

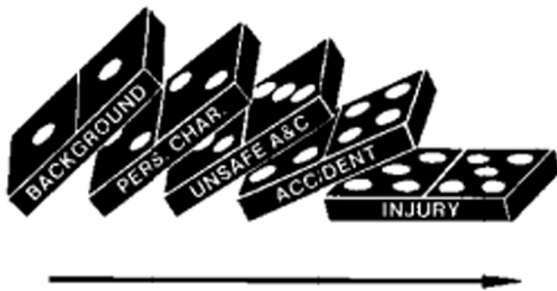


Fig. 1. Domino model (Heinrich).

2.2 역학모형 (Epidemiological modeling)

1970년대와 1980년대에는 산업발전과 함께 대형사고가 발생함에 따라 사고를 활성 요인(Active factors)과 잠재 요인(Latent factors)이 포함된 여러 요인들이 사고 시점에 동시에 존재 및 작용하면서 생긴 복합적인 결과로 보는 역학모형⁸⁾이 개발되었다.

역학모형에서 사고는 능동적 실패(안전에 해가 되는 행위)와 잠재적 여건(안전에 해가 되는 여건)이 결합되어 발생한 결과로 보며, 복합적인 선형 인과모형(Complex linear causality)으로서 2세대 모형⁸⁾이라고도 한다. 역학모형이라는 표현은 인체에 침입한 병원균이 안전에 해가 되는 행위로 인해 자극을 받기 전까지는 휴면상태로 잠복해 있다는 의학적인 은유에서 비롯되었으며, 대표적인 예로 1997년 제임스 리즌(James Reason)이 개발한 “스위스 치즈 모형”을 들 수 있다.

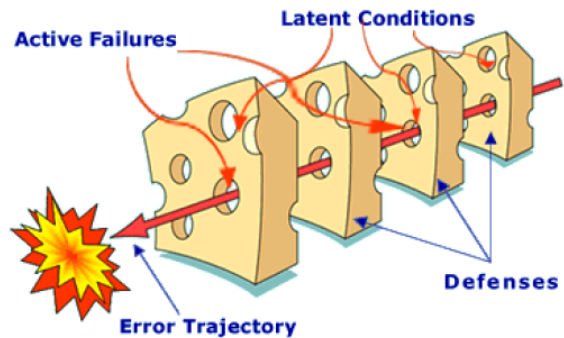


Fig. 2. Swiss cheese model (J. Reason).

Fig. 2와 같이 본 모형에서는 사고를 오래 전부터 존재했던 조직 내의 결함이 작업자의 능동적인 실패로 인해 촉발된 결과로 간주한다. 따라서 해당 실패에 조직이 얼마나 기여했는지에 중점을 두고, 인적실수(Human error)는 원인이 아닌 하나의 영향으로 여긴다. 그리고 본 모형에서 사고예방은 작업자가 속한 조직 내에 방호벽(Barrier)을 설치·강화함으로써 성취될 수 있다고 본다.

하지만 이러한 역학적 사고분석의 문제점은 사고의 책임을 돌릴 수 있는 특정 비난대상을 찾으려는 경향이 있다는 것이다. 사고발생 시 특정 비난대상을 찾는 것은 비효율적이고 비생산적이다. 왜냐하면 사람들이 실수에 대한 처벌이 두려워 상호 협력하려는 의지를 잃게 되고 이는 결국 일적실수 예방에 큰 장애물로 작용하기 때문이다⁹⁾.

2.3 체계적 모형 (Systemic modeling)

현대의 복잡한 사회구조에서 부분적으로는 괜찮은

행동이 다른 기능과의 상호작용에 의해 전체 시스템에서는 불안정한 결과를 낳을 수 있다. 체계적 모형은 이러한 현상을 설명할 수 있는 복합적인 비선형 모형(Complex non-linear modeling)으로서 3세대 모형⁸⁾이라고도 한다. 체계적 모형의 주된 이점은 사고에 영향을 준 미묘한 관계를 보다 완전하게 이해할 수 있게 해준다는 점이며, 이모형에서 사고는 시스템 내에 존재하는 정상적인 가변요소가 예기치 못한 조합을 이루었을 때 발생한다고 간주한다.

시스템 사고모형의 대표적인 예로는 Acci-Map, STAMP (System-Theoretic Accident Model & Processes), FRAM (Functional Resonance Analysis Method)이 있다. Acci-Map은 정부-규칙-사업장-경영진-작업장 등 계층(단계)간의 역학관계에 따른 영향요인 및 시간적 인과관계를 분석하고, 단계별 의사결정과정 및 필요정보흐름을 파악하는데 활용할 수 있다. FRAM은 시스템을 구성하고 있는 파트들의 합이 아닌 각 기능들(Functions) 간의 전체적인 결합으로 설명하고, 각 기능들의 변동성(Variability) 및 여러 기능들의 상호작용, 변동성의 파급에 의해 사고가 발생하는 것으로 간주한다⁹⁾. FRAM과 STAMP는 거의 모든 경우에 유사한 기능을 가지나 FRAM은 특정 모형을 가지고 있지 아니며 STAMP는 계층화된 모형을 가지고 있다.

3. 연구방법

다단계 하도급계약에 의해 같은 장소에서 소속이 다른 작업자들의 혼재작업 및 대형 장비를 사용한 중량물 취급 작업 진행 등의 특성을 지닌 다계층·복합구조의 국내사업장에서 최근 발생한 사고들에 대한 구조적 문제들을 논리적으로 도출함에 있어 부분의 합이 전체라는 환원주의적 접근방식인 FTA(Fault Tree Analysis), HAZOP (Hazard & Operability Analysis) 등 1세대 모형과 물리·관리적 방호벽의 작동성 유무를 파악하고 이를 강화시키는 2세대 모형의 접근방식은 효율적이지 않다.

다계층 사업장의 시스템적 문제들을 도출하기 위해서는 그 시스템을 구성하고 있는 기능들의 복합적인 상호작용과 사고에 미친 미묘한 관계들에 대한 해석이 필요하므로 3세대 모형(시스템 모형) 적용 방안을 모색하게 되었다. 그리고 현대의 복잡한 사회-기술시스템의 주요 구성요소인 MTO (Man, Technology and Organization), 즉 인력·기술 및 조직 중 인적요소와 이에 영향을 미치는 조직적 요소의 변동성이 상대적으로 크므로⁹⁾, 사업장에서 실제 발생하고 있는 현상들과

구성요소(MTO)들의 상호작용을 현실에 가깝게 가시적으로 표현할 수 있는 FRAM을 선택하여 재해발생 사업장 시스템 분석에 적용하였다.

3.1 연구대상

국내 모든 산업현장이 경기영향을 받았으나, 조선업은 선박수주물량에 따른 변동성이 매우 큰 업종으로서 저가수주, 인력수급 문제, 납기기한 준수 및 발주 선박의 다양성 등 무수한 변화요인들과 연계되어 있다. 이러한 변동성에 효과적으로 대응하기 위해 원청은 수주물량에 따라 선박생산의 상당부분을 협력업체에 의존하고 있으며, 협력업체 생산인력의 대부분은 다단계 하도급제도의 일종인 물량팀으로 구성되어 있다. 이로 인하여 원청 관리자 및 직영과 장·단기 협력업체의 관리자 및 물량팀 작업자들이 혼재되어 선박건조작업을 진행한다.

일반적인 선박제조공정은 ①강제절단·가공, ②소·중블록 조립, ③대블록 조립, ④선행도장 및 의장, ⑤블록도장, ⑥대블럭 상호조립, ⑦도크 탑재 및 조립, ⑧진수, ⑨안벽에서 마무리작업 순으로 진행된다. 이러한 선박제조과정에는 기술적인 측면도 상당부분 있으나, 노동집약적인 생산과정 특성상 인적·조직적 특성이 강하다. 이러한 인적·기술적·조직적 변동성은 시간(Timing)과 정확성(Precision)을 기준으로 측정할 수 있는데 일반적으로 변동의 크기는 인력(Man) > 조직(Organization) > 기술(Technology) 순⁹⁾이므로 조선업은 변동성이 매우 큰 산업이라고 할 수 있다. 그리고 수행작업의 상당부분이 중량물 취급 작업이고, 중량물 운반·이송 시 타워크레인, 폴리아크레인, 트랜스포터 등 대형장비가 사용된다.

조선업 경기변동, 원·하청 관리자 및 노동자의 혼재작업 및 중량물 제작·운반에 필요한 대형장비 사용 등 다계층 복합구조로서 인적·조직적 변동성과 위험성을 내포한 국내 조선소 중 최근 사망재해가 연속으로 발생한 ○○조선소를 대상으로 시스템 분석 적용방안을 연구하였다.

3.2 시스템 분석방법

시스템 관점에서 인적·조직적 변동성 및 상호작용에 의해 발생하는 사고는 시스템에 내재되어 있는 결함들을 역으로 추적할 수 있는 중요한 시발점이 될 수 있다. 그리고 조사기간 및 인력범위 내에서 재해발생 사업장 시스템 분석 적용방안을 제시하기 위해 사고를 기반으로 한 분석(Accident-based systemic analysis)을 진행하기로 하였다.

Table 1. The summary of two accident cases related to truss platform

The type of work	Damage	Accident overview
Assembling truss platform	1 fatality	Falling from height when stepping on a wooden platform which was not supported by steel square tube. The dead worker was adjusting the position of wooden platform after lifting and connecting a small truss unit to the main truss.
Dismantling truss platform	1 seriously injured	One of two foreign workers, who were carrying wooden platforms, was fallen through floor opening failing to recognize its existence, because the platforms were piled up on the opening.

그리고, 2020년 ○○조선소에서 발생한 여러 재해사례 중 최근 수주물량의 대부분을 차지하는 LNG선의 선창 내부마감작업용 트러스 발판 설치·해체 중 발생한 추락사고 2건을 대상으로 분석을 진행하였으며, 재해개요는 Table 1과 같다.

위 사고분석을 위한 시스템 모형으로는 수주물량, 인력수급 등 대·외적 영향요인과 원·하청 다단계 계약구조를 지닌 조선소에서 발생하고 있는 현상들을 실제에 가깝게 논리적으로 표현할 수 있는 FRAM을 사용하였다.

Hollnagel에 따르면, FRAM 관점에서 시스템이란 시스템을 구성하고 있는 파트(부서)들의 합이 아닌 각 기능들 간의 전체적인 결합을 말하며, FRAM 분석에서 사고는 사고의 각 요소를 양호-불량이라는 이분법적인 관점에서 벗어나, 시스템을 구성하는 여러 기능들의 상호작용 및 각 기능들 간의 변동성 파급에 의해 발생하는 것으로 보고 있다. Fig. 3의 FRAM 도표(육각형)는 시스템을 구성하는 하나의 기능을 나타내며, 각 기능들은 여섯 가지 모드(Aspects)를 지니고 있다⁹⁾.

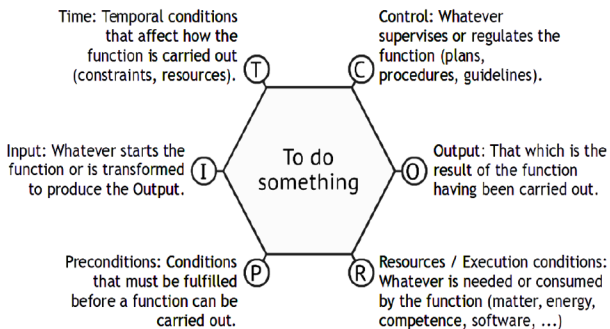


Fig. 3. A hexagon representing a function and 6 aspects.

- O (Output) : 기능에서의 결과
- I (Input) : 기능의 시작, 기능 기본상태의 결정

- P (Precondition) : 기능시작의 선결조건 또는 수행조건
- R (Resource) : 기능수행에 필요한 자원, 인적·물적·지식자원 등 양적 공급
- C (Control) : 기능 수행을 감독하거나 조절하는 규제적 영향 입력
- T (Time) : 시간적 관계의 조건과 제약

그리고 시스템을 구성하고 있는 각 기능들의 6가지 모드 설정을 통해 여러 기능간의 관계를 모델화할 수 있는데, 예를 들어 Fig. 4와 같이 Function A의 Output이 Function B의 Input이 되며 동시에 Function C에겐 Precondition이 된다. 그리고 Function A가 가지고 있는 변동성은 기능 간의 연결에 의해 Function B와 C에게 파급되며, Function B와 C의 자체 변동성과 중첩되어 증폭된다⁹⁾.

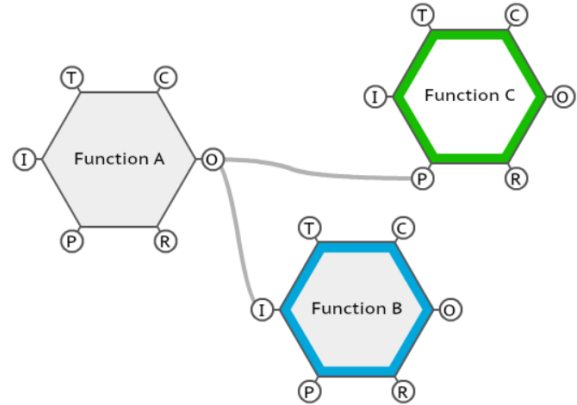


Fig. 4. The example of FRAM model.

4. 시스템 분석 사례

대내·외적 그리고 인적·조직적 변동성이 크며, 최근 중대재해가 연속 발생한 ○○조선소를 대상으로 시스템 분석을 진행함에 있어 최근 수주물량의 대부분을 차지하는 LNG선의 선창 내부마감작업용 트러스 발판 (Fig. 5) 설치·해체 중 발생한 추락재해 2건(Table 1)에 대해 FRAM 분석을 진행하였다.

분석순서는 첫째 현장조사, 자료수집 및 관계자 인터뷰 등을 통해 사실분석과 필요 정보들을 수집하였고, 둘째 이를 토대로 시스템을 구성하는 기능들 및 각 기능별 여섯 가지 모드 도출을 통해 FRAM 모델을 구축하였으며, 마지막으로 구축된 FRAM 모델 토대로 시스템 전체적인 관점에서 사고와 관련된 각 기능들의 상호작용 및 사고요인들의 영향·파급 등 재해발생 원인 분석을 진행하였다.

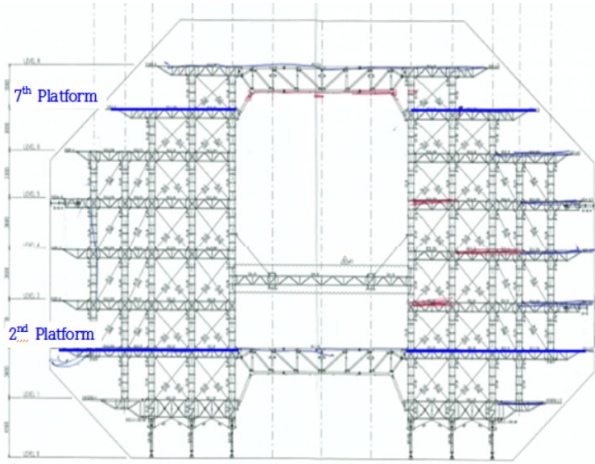


Fig. 5. A cross section of truss platform.

4.1 사실분석 (Factual Analysis)

4.1.1 선박제조 과정상의 조직적 특성

LNG선 제조관련 관계자 면담결과 생산라인은 오랜 기간에 걸쳐 파트별, 기능별 및 원·하청 간 사업장 자체 시스템을 이루어 업무를 수행(Self-organized performance) 해온 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 매뉴얼에 의한 업무수행(Rule-based performance)이 아닌 일선 작업자들의 축적된 기술·경험을 바탕으로 한 업무수행 특성이 강하다. 그리고 비정형적이고, 복잡한 선박제조업무 특성에 따라 인력양성방법 또한 직·조·반장의 주관 하에 도제식 훈련으로 기능공들의 전문성이 길러지고 있다. 그리고 원청 직원의 신규발령 후 업무를 습득하는 과정 역시 비슷한 형태를 띠고 있다.

이러한 자체 조직화(Self-organization), 도제식 인력양성 등에 의한 업무수행구조는 최근 물량변동, 수주감소로 인한 낮은 임금, 높은 이직률에 따른 신규채용 등의 인적변동성에 취약할 수밖에 없다.

생산현장의 주요 작업절차서로는 작업표준(Standard Operating Procedure)과 표준작업지도서가 있다. 작업표준은 해당 생산에 관련되는 계획, 작업절차, 각 순서별 방법 및 안전조치 등이 구체적으로 명시되어 있으나, 조선업 경기변동 및 조직개편에 따른 업데이트 미실시 등으로 인해 활용도는 매우 낮은 편이다. 표준작업지도서는 편의상 작업절차, 작업지시 및 위험성평가를 한페이지에 작성하여 20년 넘게 사용한 형식으로서 내용이 많고 구성이 복잡하여 가독성이 떨어진다. 주로 연 1회 정기 위험성평가 시 그리고 사고발생 후 내용보완 등 개정이 이뤄진다. 작업표준과 표준작업지도서는 생산라인에서 작성되나, 안전전문가에 의한 검토는 이뤄지지 않는다.

4.1.2 생산부서(Line)의 안전관리 작동성

원청 생산관리의 초점은 선박 납기일 준수를 위한 공정·품질관리에 맞춰져 있다. 이를 위해 부서장은 관련부서 및 협력업체 공정회의, 작업조정 등 업무를 수행하며, 부서원들은 각각 LNG선 6개호선 씩 맡아 생산현장에서 발로 뛰며 민원사항 등 문제점 파악 및 조율, 공정관리 업무를 수행하고 있다. 원청 관리직원들은 현장을 돌며 안전관리 측면에서 일정업무를 수행한다고 볼 수 있겠으나, 안전관련 역할과 책임(Roles & responsibilities) 이 명확하지 않다. 그리고 트러스 조립·철거 관련 원청 관리자 3명 중 2명이 금년도에 배치되었으며, 업무습득에만 4-6개월 정도 소요되므로 신규발령 시 관리상의 공백이 예상된다.

그리고 생산부서에 안전순찰요원으로 구성된 안전팀을 부서 직속으로 편제하여 각 작업장 안전순찰업무를 수행토록 하고 있다. 안전순찰요원들은 생산부서에서 전산에 등재한 작업허가리스트(Permit to Work List)를 가지고 맡은 구역의 점검·순찰업무를 수행하게 된다. 순찰요원들은 조선 생산 전 공정을 위험작업으로 간주하여 매일 자신들이 정한 경로를 따라 순찰업무를 수행한다. 현장점검·순찰완료 후에는 각 작업장별 주요 우수 또는 불량사례의 개선 전·후를 작성하여 전산에 게시한다.

Permit to Work는 대면허가 및 전산허가로 구분되며, 대면허가는 생산부서 직원이 매일 오후 3시경 순찰부스를 방문하여 PTW 담당 안전순찰요원에게 제출하고 작업허가를 취득하여 해당 작업장에 작업허가서를 게시한 후 작업을 진행하는 방식이다. 하지만, 대면허가 대상에 고소작업은 포함되어 있지 않으며, 순찰과정에서 안전순찰요원들이 대면작업을 우선적으로 확인하나, 해당 작업 시종을 상시 모니터링 하는 것은 아니다. 그리고 야간작업의 경우 야간순찰조(13명)에 의해 점검·순찰이 이뤄지며, 주말인 경우 평일 대비 약 12~1/3 정도의 인원만 출역하여 점검·순찰업무를 수행하므로 주말·야간작업에 대한 모니터링 기능이 상대적으로 취약하다.

4.2 FRAM 분석

4.2.1 FRAM 분석의 관점

FRAM은 사고와 관련된 사업장 시스템을 전체적인 관점에서 분석하는 기법으로서 분석대상 시스템의 구성 기능들을 선평(호선별 확정 스케줄) - 블록 공정도 - 트러스 공정회의 - 트러스 조립 - 트러스 철거 등으로 나눈 후 각 기능별 변동성을 파악하고, 그 기능들 간의 상호작용에 의해 변동성이 파급(Resonance)되고

중첩(Coupling)되어 일어나는 시스템적 취약성을 분석하는데 주안점을 두고 있다.

그리고 이러한 사업장 시스템 분석결과를 토대로 변동성의 여파를 완화(Dampening) 시키고 모니터링 대상 기능들을 제시하는 대책을 도출할 수 있게 되는데, 이는 기존의 방식인 사고의 각 요소들에 대해 양호-불량으로 나누는 이분법적 접근 및 원인도출 방법과는 차별화된 접근법이다.

4.2.2 기능의 분류 및 기능별 모드 도출

분석 대상인 LNG선 트러스발판 조립·철거작업 관련 기능들을 Table 2와 같이 35개 기능으로 분류하였다.

Table 2. The functions related to truss platform

- Master schedule	- Schedule for ship blocks
- Bidding for truss platforms	- Contract
- Suspension of work(weather condition)	- Meeting for scheduling
- Procurement	- Work Plan(subcontractor)
- Assembling small units	- Lifting & connecting small units
- Tower Crane	- Assembling large units
- Installing electrical equipments	- Installing shaft & duct
- Work procedures	- Standard Operating Procedure
- Risk Assessment	- Transporting large units to PE
- Transporter(vehicle)	- Transporting Large units to a LNG ship in the dock
- Gantry Crane(Goliath)	

- Assembling truss platform in the Dock	- Installing bottom block in the dock
- Assistance to CCS work	- Launching a LNG ship to a quay wall
- Supervision of contractor	- Side Opening, Installing platforms
- Dismantling electrical equipments	- Dismantling shaft & duct
- Shipowner inspection	- Dismantling truss platforms
- Human resources(recruitment)	- Safety patrol
- Classifying & transferring materials	- OSH training

그리고 Table 2의 35개 기능들 각각에 대해 6가지 모드를 도출하였다. Table 3과 4는 위 35개 기능들 중에서 Meeting for Schedule 기능과 Work Plan 기능에 대한 6가지 모드를 도출한 결과를 정리한 표이다.

Table 3. FRAM representation of <Meeting for Schedule>

Name of function	Meeting for Schedule
Description	Meeting between contractor & sub-contractor for truss platform assembly or dismantling schedule
Aspect	Description of aspect
Input	Contracting / Suspension of work
Output	The schedule for truss platforms' assembly & dismantling
Precondition	Not described initially
Resource	Schedule for ship blocks
Time	Not described initially
Control	Not described initially

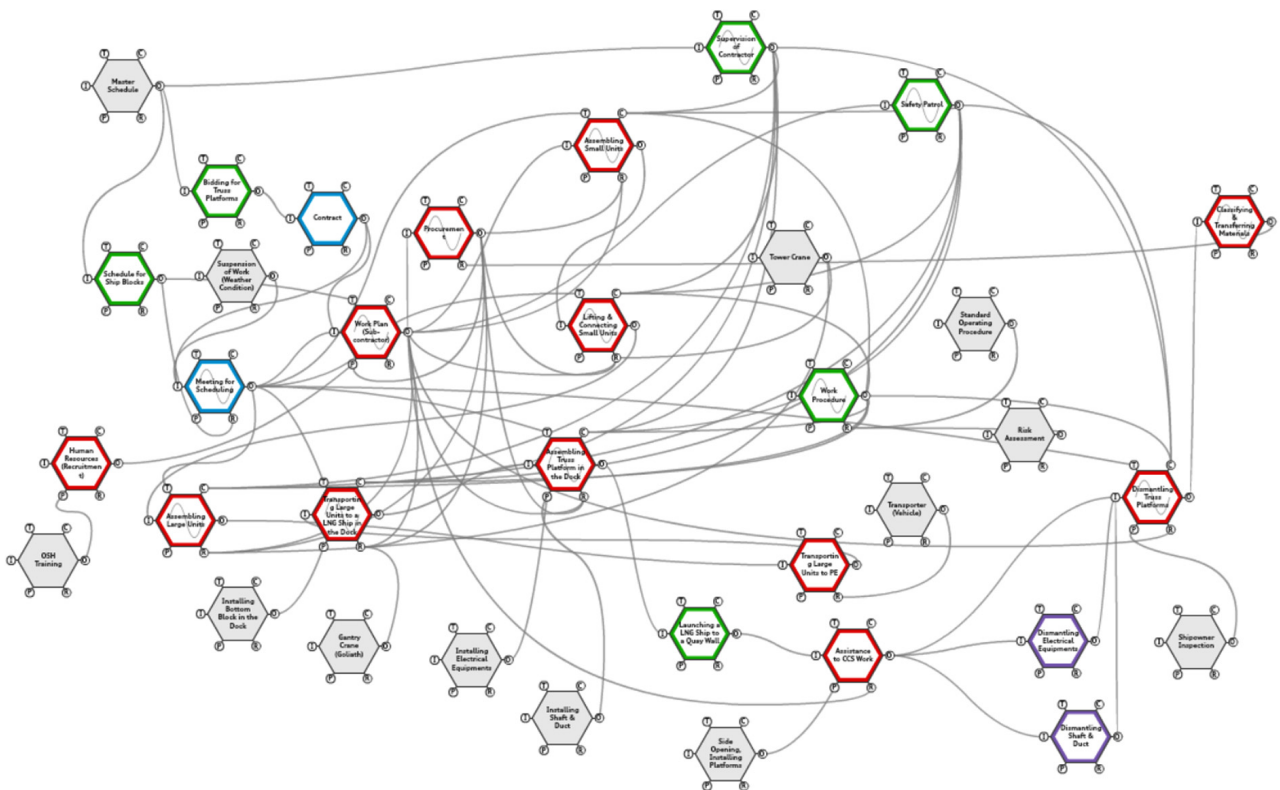


Fig. 6. The FRAM model for the truss platform cases.

Table 4. FRAM representation of <Work Plan(Sub-contractor)>

Name of function	Work Plan(Sub-contractor)
Description	Planning for truss platforms' assembly or dismantling based on the schedule for ship blocks, human resources, procurement and weather condition
Aspect	Description of aspect
Input	Contracting / The schedule for truss platforms' assembly & dismantling
Output	Manpower input / Application for material / Work plan / Application for work permit
Precondition	Human resource / Procurement
Resource	Not described initially
Time	Schedule for ship blocks
Control	Not described initially

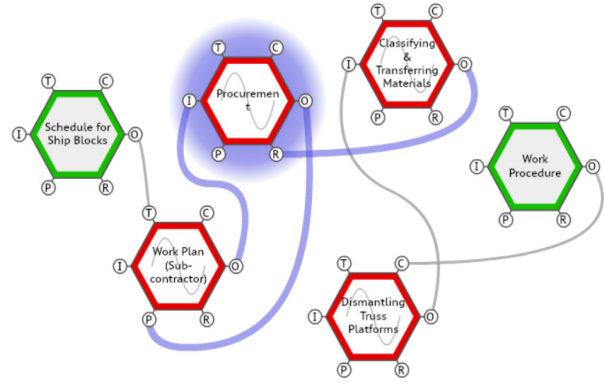


Fig. 7. The instantiation of procurement.

4.2.3 FRAM 모델 구축 및 분석

LNG선 내부 작업용 트리스발판 조립·철거작업과 관련된 35개의 기능과 각 기능들이 지니는 6가지 모드들의 상호 연결을 통해 Fig. 6과 같이 기능들 간의 상호연계성을 나타내는 FRAM 모델을 구축하였다. FRAM 모델 구축의 목적은 사고 관련 사업장 시스템 내에서 일어나고 있는 현상들을 시스템 전체적인 관점에서 편견 없이 파악하기 위해서이다.

FRAM 분석은 구축된 FRAM 모델을 바탕으로 진행되며, 분석방법은 우선 FRAM 모델을 구성하고 있는 각 기능별 변동성을 분석한 후 그 변동성이 기능들 간의 상호연계성에 의해 어떻게 파급·중첩되어 사고에 영향을 미쳤는지를 파악하는 것이다. Fig. 7의 Procurement 기능을 살펴보면, 적정 자재가 계획한 날짜에 정확히 도착하는지에 대한 변동성을 내포하고 있다. 그리고 이 변동성은 Classifying & Transferring Materials 기능과 연계(Output→Resource)되어 있는데 이 기능 또한 유사한 형태의 트리스 자재들 중 요구자재를 정확히 분류하여 운반되는지에 대한 변동성을 가지고 있다. 그리고 이 기능 역시 Dismantling Truss Platform기능과 연계(Output→Input) 되어 있는데 그 이유는 트리스 해체작업장에서 해체·분류되어 적재된 자재 그대로 창고에 보관되기 때문이다. 해체 시에 자재를 잘못 분류하여 적재·보관하게 되면 자재조달 시 적재되어 있는 자재종류를 육안으로 확인하기가 곤란하므로, 조립작업장의 요구자재가 아닌 다른 자재가 전달되는 문제가 발생되며 이는 공기 지연의 요인으로 작용하게 된다. Work Procedure 기능은 Dismantling Truss Platforms기능에 연결(Output→Control)되어 있으며, 위와 같은 오류 발생 방지를 위한 대책이 절차상에 반영되었는지를 확인하는 것 또한 중요하다. Fig. 7의 경우를 정리해 보면 트리스 해체작업 시 자재 분류 및 적재의 변동성이 창고에서 필요자

재를 찾아내어 운반하는 기능의 변동성에 영향을 주게 되고, 이는 요구 자재를 요청시기에 해당 작업장소로 조달해주는 기능의 변동성에 영향을 미치게 된다. 그리고 단계별 작업을 수행함에 있어 관련 작업절차 내용의 적정성과 작동성을 파악하는 것도 필요하다. 이와 같이 FRAM 모델 분석에 있어 각 기능들의 변동성을 파악한 후 그 변동성이 다른 기능들에게 어떻게 파급·중첩되는지 파악하는 것이 중요하다.

그리고 Fig. 8의 협력업체의 Work Plan 기능의 변동성을 분석해 보면, 원청과 계약체결(Contract) 후 블록 공정도에 따른 LNG선 트리스 조립·해체일정(Meeting for Scheduling)을 토대로 작업계획을 수립하게 된다. 이때 날씨영향 등으로 일정기간 작업을 중지(Suspension of Work)하게 되면 작업일정 변경으로 인력수급(Human Resources) 및 자재조달(Procurement)에 그 변동성이 파급되며, 그로 인해 신규 채용자 투입, 주말작업 등 안전관리 상의 변동성 야기 및 트리스 조립 등 후속공정 일정 등에 영향을 미치게 된다.

1·2세대 사고모형에서는 사고로 이어지는 사건들의 시간적 또는 인과관계 순서로 도표화하여 사고분석을 진행한다. 하지만 실제 작업장에서는 사건들이 동시에 그리고 복합적으로 작용하는 경우가 많은데 FRAM 모델은 이와 같은 실제 현상들을 모델화함으로써 논리적인 설명을 가능하게 한다. 하지만 FRAM은 사고모형이라기 보다는 조사자가 모델을 구축해 나가는 것으로서 조사자의 경험과 지식에 따라 그 분석결과에 상당한 차이가 발생할 수 있다. 그리고 FRAM 기능의 6가지 모드에 대한 논리적 근거 역시 제시되어 있지 않다⁶⁾.

참고로 FRAM 모델 구성 시 기능별 수행 주체를 쉽게 구별하기 위해 색상을 부여하였다. Fig. 8의 경우 협력업체 수행기능은 빨간색으로, 원청 수행기능은 녹색 그리고 원청과 협력업체 상호기능은 파란색으로 표기하였다.

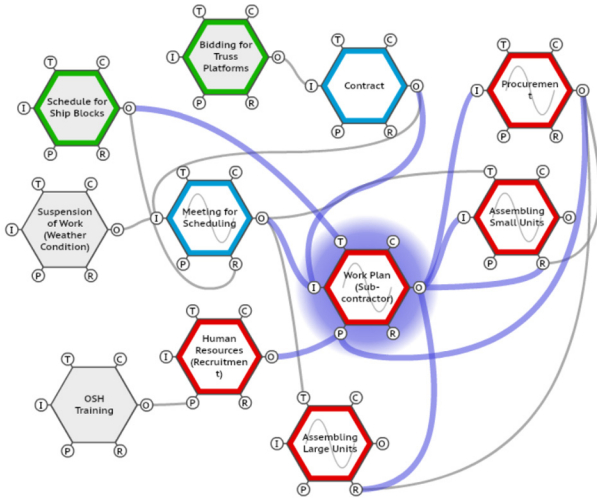


Fig. 8. The instantiation of work plan(Sub-contractor).

4.3 FRAM 분석결과

FRAM 모델을 구성하는 각 기능의 변동성 및 기능 간의 변동성 파급에 의한 사업장 시스템의 취약성 등의 분석결과를 다음과 같이 정리하였다.

4.3.1 트러스 자재조달의 변동성

트러스 조립과 철거업체가 상이하어 조립업체에서 필요자재를 신청하는 경우 희망일보다 1~2일정도 늦게 조달되는 경향이 있다. 그리고 자재가 1,300여종으로 형태가 비슷하여 필요자재가 잘못 배송되는 사례가 종종 발생한다. 자재 야적장이 작업장으로부터 약 30 km 떨어진 곳에 위치하여 자재조달이 지연되거나 잘못 배송되는 경우 선박 납기일 준수를 위한 공정관리에 부담요인으로 작용하게 된다.

그리고 필요자재 조달문제는 후행공정인 트러스 발판 철거과정에서 종류별로 정확히 분류하여 반출하는 작업과 연계되어 있으므로 철거-분류·적재-반출-창고보관-조달 과정의 체계성 확보가 필요할 것으로 판단된다.

4.3.2 기상여건의 변동성

육외에서 진행되는 트러스 조립작업은 날씨영향을 직접적으로 받게 되며, 태풍 및 높은 파고 발생 시 도크 및 안벽의 LNG선 내부 작업 또한 중지되어 공기지연요인으로 작용하게 된다.

4.3.3 협력업체 작업계획의 변동성

블록 공정도를 근거로 원청 주관 하에 협력업체와 공정회의 후 정해진 생산일정에 따라 협력업체는 소장 및 직·반장의 협의를 거쳐 필요인력 투입 및 자재조

달 계획 등을 수립·실행하게 된다. 하지만, 날씨영향·자재조달지연 등으로 작업이 지연되거나, 경기변동에 따른 선박수주물량 과다 등 변화요인이 발생하는 경우 현재 진행 중인 LNG선 13척의 납기일정을 맞추기 위한 필요 인력 수급, 자재 구입 등 조달방안 강구, 주말작업 진행 등 계획변경이 필요하게 되며, 이 과정에서 기능에 따른 작업배치 오류, 교육·훈련 및 정보 전달 부족 등 변동성 발생가능성이 높아진다.

4.3.4 인력운영의 변동성

트러스 조립·철거작업은 협력업체에서만 진행하며 협력업체 생산인력의 대부분은 물량팀으로 구성되어 있다. 이는 업체입장에서 경기변동에 의한 선박수주물량에 따라 탄력적인 인력조달을 가능하게 한다. 하지만, 기상여건, 물량과다 등 공기축박요인에 의해 주말작업 및 추가인력투입이 필요한 경우, 최근 조선업 경기불황에 따른 낮은 급여 및 기능공 부족 등으로 인해 미숙련, 외국인 근로자들을 채용하게 되며, 이들을 작업 배치하는 과정에서 필요정보 미전달, 의사소통 오류 등의 문제점 발생 가능성이 있다.

4.3.5 트러스 조립 작업의 변동성

위에서 언급한 변화요인에 의해 공사가 지연되는 경우 신규인력을 투입하거나 주말작업 등을 진행할 가능성이 있다. 그리고 익숙하지 않은 작업환경, 피로도 등 취약한 상황에서 위험환경에 노출되는 경우 사고발생 가능성은 증가하게 된다.

육외 트러스 조립장에서 소모듈 인양에 따른 발판(합판) 수평이동을 조정하는 작업, LNG선 내부 대모듈 연결 및 Steel Deck 설치 등 고소작업 진행과정에서 작업자 위치 및 자세에 따른 추락방지조치 미흡 등의 변동성이 존재한다. 그리고 소모듈 양중 및 탑재 시 타워크레인 운전 및 신호, 트랜스포터를 이용한 대모듈 운반, 골리앗 크레인을 이용한 대모듈 인양 및 설치 등 대형장비를 사용한 중량물 취급작업에서 장비운전 및 신호, 작업위치 변동성에 따른 위험성이 있다.

4.3.6 트러스 철거작업의 변동성

트러스 철거작업 역시 기상여건 등 공기지연요인에 따른 신규인력투입, 주말작업 등의 변동성이 크다. 특히 트러스 철거 전에 반드시 선주검사가 선행되어야 하는데, 총 8단으로 구성된 트러스 구조물에서 각 단별로 선주검사 실시 및 통과 후 철거작업이 가능하게 된다. 선주검사 일정이 지연되거나 검사과정에서 마감재 등에 결함이 발견되어 하자보수가 필요한 경우 공기지

연은 불가피 하다.

그리고 트러스 철거 전에 환기설비(덕트) 및 전기설비 철거작업이 선행되어야 하는데, 타 협력업체에 의해 수행되므로 작업완료 후 작업상의 위험요소 존재 및 해당정보가 전달되지 못할 가능성이 있다. 트러스 조립작업과 마찬가지로 철거작업 또한 고소작업 및 원치 등을 이용한 중량물 취급 작업이 수행되므로 작업자의 위치·자세, 장비 운전 및 신호에 따른 변동성이 존재한다.

4.3.7 원청 생산부서 관리감독의 변동성

부서장을 제외한 트러스 조립·해체 담당 원청 직원 3명 중 2명이 해당부서 근무경력 2년 미만이며, 그 중 한명은 최근에 발령이 나서 업무숙달 중에 있었다. 업무숙달 소요기간(4-6개월)을 고려할 때 잦은 인사발령은 관리감독 상의 공백을 초래할 수 있다. 원청 직원 업무의 상당부분은 납기일 준수를 위한 공정관리에 초점이 맞춰져 있다. 이를 위해 개인별로 LNG 6개 호선씩 맡아 현장을 직접 돌며 작업진행상태 확인, 문제점 파악 및 조율 등 업무를 수행하는 반면 안전관리상의 책임과 역할에 대해서는 명확히 규정되어있지 않다. 그리고 작업표준 및 표준작업지도서 작동성을 위한 원청 직원의 역할은 미미한 수준이다.

4.3.8 원청 안전점검·순찰의 변동성

점검 중요도가 높은 PTW 대면허가 대상에 추락사고가 발생한 트러스 조립·철거작업은 포함되어 있지 않다. 안전순찰요원들은 선박제조과정에서의 모든 공정들을 위험작업으로 간주하여 매일 일정경로를 따라 점검·순찰업무를 수행하나, 위험작업 특정시점 및 장소에 대한 상시점검·감독 기능은 없다. 트러스 조립·철거 중 발생한 추락사고 2건 모두 주말에 발생하였으나, 주말 안전순찰요원 수는 평일 대비 약 1/2~1/3 수준으로써 담당하는 순찰면적이 넓어지게 되어 그 효과는 상대적으로 낮아지게 된다. 그리고 보호구, 안전시설 및 작업자 불안정한 행동 위주의 순찰활동을 전개하고 표준작업지도서 등 작업절차 준수여부 점검 기능은 미흡하다.

4.3.9 기능공명 (Functional Resonance)

[트러스 조립과정에서 발판 조정 중 추락·사망사고] 공기축박 등에 의한 주말작업 - 주말 관리감독 및 순찰기능 약화 - 형식적인 작업절차 - 고소작업 안전조치 미실시 - 인적실수(Human error)가 복합적으로 작용하여 사고가 발생한 것으로 추정된다.

소모들을 타워크레인으로 인양하는 과정에서 발판(합판)이 수평 이동하여 소모들 탑재 후 합판을 조정하기 위해 작업자들은 연결부 합판 아래 거치해 둔 사각파이프를 꺼내 지렛대로 사용하였고 재해자는 이동 중 이를 인지하지 못하고 사각파이프가 없는 합판 위를 밟아 떨어지는 사고가 발생하였다.

사고당시 재해자는 안전대를 부착설비에 체결하지 않은 상태였고 하부에는 추락방지망 또한 설치되어 있지 않았다. 주말인 관계로 사고발생 작업위치에 관리감독자와 안전순찰요원은 없었으며, 표준작업지도서에는 사각파이프의 작업도구 사용 등에 대한 내용은 명시되어 있지 않았다.

[트러스 철거과정에서 발판 반출작업 중 추락·중상해 사고] 태풍 등 날씨영향으로 공기지연에 따른 주말작업 - 주말 관리감독 및 순찰기능 약화 - 타 협력업체에 의해 환기설비(덕트) 철거작업 선행 - 형식적인 작업절차 - 외국인근로자 투입 후 정보공유 부족 및 의사소통 문제가 복합적으로 작용하여 사고가 발생한 것으로 추정된다.

환기설비(덕트) 철거작업은 타 협력업체에 의해 트러스 철거 전에 선행되었다. 덕트 철거 후 발생한 개구부(900×900 mm)에 덕트 철거업체 작업자들은 합판 2장을 덮고 그 위에 한글로 개구부임을 표기하였으나, 트러스 철거에 투입된 외국인 작업자들은 읽을 수 없었으며, 그 위에 다른 합판 및 부수자재가 쌓여있어 개구부임을 알아보기 힘든 상태였다.

외국인근로자에게 해당 위험요인에 대한 정보가 사전에 공유되지 않았고, 표지 또한 한글로 표기되어 있는 등 의사소통 문제가 발생하였으며, 주말의 느슨한 감시체제와 형식적인 표준작업자도서는 이러한 인적실수에 대한 방호벽 역할을 하지 못했다.

5. 결론 및 고찰

국내 산업현장은 기술혁신 등을 통해 단기간 고도의 성장을 이룩해 왔으나, 안전관리시스템, 안전의식과 안전문화 수준은 상대적으로 미흡하며, 기술 중심적인 예방활동과 법규제·처벌의 회피에 집중해 왔다. 안전선진국에 비해 높은 재해율, 사고 등을 대비하기 위해 사업장에서는 안전시설 확충, 안전순찰요원 증대 등 기존의 알고 있는 방식들을 더욱 강화해 온 반면, 사고 발생 형태는 그 상당수가 조직의 관리시스템 결함에 따른 인적실수(Human error)에 기인한 사고로서 기업의 기존 안전관리범주를 벗어나는 양상을 보이고 있다. 분석대상인 ○○조선소의 경우 각 작업장별로 제품

생산에 필요한 팀이 조직되고 작업절차·매뉴얼이 비치되어 있으나, 일선 작업장에서는 작업절차에 포함되지 않은 변화요인들이 선행되어 당초 계획과 다르게 진행되는 경우가 많고, 오랜 시간 동안 형성된 사업장 문화에 따른 도제식 훈련 등 자체 조직화된 업무수행 (Self-organized performance)으로 인하여 안전 관리자들은 복잡한 사회-기술 시스템의 일선작업과정 중에 일어나는 모든 일들을 다 파악하기가 현실적으로 어렵게 된다. 그리고 Hollnagel의 효율-안전의 절충성(ETTO: Efficiency Thoroughness Trade Off) 이론과 같이 효율로 치우친 의사결정으로 인해 안전이 위협받고 있는 사례가 종종 발생하고 있다.

따라서 본 연구에서는 다단계 하도급에 의해 소속이 다른 작업자들의 혼재작업과 대형장비 및 중량물 취급작업 등이 복합적으로 수행되고 있는 ○○조선소를 대상으로 하여, 작업장 일선에서 실제 일어나고 있는 현상들을 파악·분석할 수 있는 시스템 분석기법 (FRAM)을 활용한 사고기반 시스템분석 적용 사례를 제시하였다.

사고발생 공종인 LNG선 내부 마감작업용 트러스발판 설치·해체 공종에 대한 FRAM 분석결과 안전시설 미설치, 안전표지 미부착 등 기술적·표면적 문제 외에도, 자재조달·기상여건의 변동성에 따른 선박납기 일정 촉박, 그리고 납기일 준수를 위한 인력운영의 변동성 및 주말작업 진행에 따른 원청의 모니터링, 관리감독 기능의 미흡 등 선행된 여러 변동성들이 상호연계 및 증폭되고 이로 인한 관리시스템 상의 취약성들로 인해 사고발생 가능성이 증가했음을 확인할 수 있었다.

이는 산안법 위반, 기술적인 문제 중심으로 진행되고 있는 기존의 산업재해조사내용과 차별화된 접근법으로서 작업장에서 실제 일어나고 있는 현상들을 모델화 하여 전체적·통합적인 관점에서 접근할 수 있게 해 준다. FRAM의 관점에서 시스템은 기능들의 결합체로써, 기술·사람 및 조직 각 기능의 변동성과 각 기능의 변동성들의 파급·중첩에 따른 기능공명에 의해 시스템의 취약성이 발현(Emergence)되고 사고의 가능성은 증가하게 된다. 시스템 관점은 그 간 우리의 뇌리 속에 형성된 양호-불량의 이분법적 관점에서 벗어나, 기술·사람 및 조직의 결합체인 사회-기술시스템 내에서 실제로 무슨 일이 일어날 수 있는지 설명해 줄 수 있으며, 발현 가능한 여러 변동성들에 의한 시스템적 취약성을 어떻게 제어하고 모니터링 해야 하는지 실제

적인 대책 수립을 가능하게 해준다. 그러므로 본 연구에서 입증된 시스템분석의 효과성을 근거로 시스템안전 분야는 국내 안전전문가들이 더욱 참여·연구하고 확대되어야 할 영역임에는 분명하다.

하지만, FRAM은 사고모형이라기 보다는 사고모형을 구축하는데 사용되어지는 기초 도구의 성격에 가깝다. 이는 각 사고별로 일어난 현상들을 다른 사고모형보다 실제에 더 가깝게 구현해 낼 수 있는 장점이 있는 반면, 조사자의 지식과 경험에 대한 의존도가 높으며 많은 시간과 노력이 소요된다. 따라서 모든 사고에 범용되기보다는 사고요인이 복잡하게 얽혀있는 시스템의 특정 사고분석 등에 더 적합할 것으로 판단된다.

References

- 1) Ministry of Employment and Labor, Industrial Accident Statistics in 2020, 2021.
- 2) W. C. Yoon, D. H. Ham and D. H. Back, "The Study on OSH Policies in Preparation for Occupational Safety & Health Paradigm Shifts", Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, pp. 1-3, 2019.
- 3) E. Hollnagel, "The ETTO Principle: Efficiency-Thoroughness Trade-Off", CRC Press, pp. 7-17, 2009.
- 4) J. B. Kwon and Y. G. Kwon, "Incident Investigator's Perspectives on Incident Investigations Conducted in Korea Industry", J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 2. pp. 58-67, 2021.
- 5) Citizen Participation Investigation Committee on Major Industrial Accident in Shipbuilding Industry, Accidents Investigation Report, 2018.
- 6) E. Hollnagel, "Safety vs. Safety II", Dorset Press, pp. 21-36, 2013.
- 7) J. Y. Park, J. T. Kim, S. H. Lee and J. H. Kim, "Development of a Quantitative Resilience Model for Severe Accident Response Organizations of Nuclear Power Plants: Application of AHP Method", J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, No. 1. pp. 116-129, 2020.
- 8) U. S. Department of Energy, "Accident and Operational Safety Analysis Vol. I: Accident Analysis Techniques", pp. 1-2, 1-19, 2012.
- 9) E. Hollnagel, "FRAM: the Functional Resonance Analysis Method Modelling Complex Socio-technical Systems", Dorset Press, pp. 12-18, 21-31, 39-60, 63-75, 2013.