

제조업 사업장 사내협력업체 사고사례의 시스템적 분석에 관한 연구

서동현* · 최이락* · 박장현** · 한우섭***

A Study on System-Based Accident Analysis : An Accident at In-house Subcontractor of a Manufacturing Company

Dong-Hyun Seo* · Yi-Rac Choi* · Jang-Hyun Park** · Ou-Sup Han***

Corresponding Author

Dong-Hyun Seo

Tel : +82-42-869-0332

E-mail : seodh93@kosha.or.kr

Received : April 6, 2022

Revised : August 31, 2022

Accepted : October 24, 2022

Abstract : In this study, an accident at an in-house maintenance subcontractor of a manufacturing company was analyzed using representative systemic analysis methods, and the results were compared to determine the socio-technical and organizational structure causal factors. Systemic accident analyses were performed using AcciMap, STAMP-CAST, and a method that utilizes work processing procedures. The causal factors derived from the three methods were classified according to HFACS classification criteria. AcciMap and STAMP-CAST analyses were able to derive legal problems and defects in organizational structure between the company and the subcontractors. The method that utilized the work processing procedures drew the most causal factors of the three methods but showed some limitations in deriving legal and facility-related problems. Most of the causal factors identified through the systemic methods could be classified according to the HFACS classification criteria, except for the legal and organizational structure matters. Socio-technical and organizational problems with a holistic perspective of the company and subcontractors could be found using systemic analysis methods. However, it is necessary to conduct analysis using various methods in order to derive more comprehensive measures to prevent accidents because each analysis method showed some limitations in the derivation or expression of some causal factors. The results of this study can be helpful in selecting and using an appropriate method for accident analysis.

Key Words : systematic accident analysis, AcciMap, STAMP-CAST, HFACS

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

사내하도급이란 “원사업주로부터 업무를 도급받거나 업무의 처리를 위탁한 사업주가 자신의 의무를 이행하기 위해 원사업주의 사업장에서 해당 업무를 수행하는 것”을 말한다¹⁾. 사내하도급은 경쟁력이 약한 사업을 외주화하여 경쟁 우위를 확보하기 위한 기업전략의 하나로 도입되었다²⁾. 그러나 기업 간 경쟁이 치열해지면서 사업장에서는 인건비의 절감 또는 직접적인 고용관계 회피를 목적으로 활용하고 있고, 최근에는 건설업과 제조업뿐만 아니라 서비스업 분야에서도 광범

위하게 활용되고 있다.²⁾ 고용노동부의 기업 고용형태 공시자료에 따르면 300인 이상 기업의 전체 근로자수 대비 소속 외 근로자수의 비율은 2018년 18.5%(901천 명), 2019년 18.1%(881천 명), 2020년 18.3%(913천 명) 수준을 보였다³⁻⁵⁾.

사내하도급에 따른 사내협력업체는 모기업으로부터 수시로 공기 단축 압력을 받고, 전체 공정의 일부분을 맡고 있어 전체 업무의 처리과정을 조망하면서 그 속에서 재해를 예방하기 위해 일의 순서나 흐름을 조정하기도 어렵다. 또한, 설비에 투자할 수 없기 때문에 모기업의 지원 없이는 안전한 작업환경을 조성하기 어렵고,

*한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 산업안전연구실 연구위원 (Occupational Safety Research Bureau, OSHRI, KOSHA)

**한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 산업안전연구실 과장 (Occupational Safety Research Bureau, OSHRI, KOSHA)

***한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 산업안전연구실 부장 (Occupational Safety Research Bureau, OSHRI, KOSHA)

모기업 근로자에 비해서 자신이 수행하는 일의 위험성에 대한 정확한 정보를 알기 어려운 경우가 많다⁶⁾. 이와 같은 이유로 모기업보다 사내협력업체에서 더 많은 사고가 발생하는 경우를 쉽게 찾아볼 수 있다. 2018년에 도입된 원·하청 산재 통합관리제에 따라 2020년에 고용노동부에서 발표한 협력업체 사업장의 사망사고 비중이 높은 모기업(원청) 사업장 11개의 사내협력업체는 총 6,470개소인 것으로 나타났다. 이 11개 모기업 사업장의 근로자는 92,276명, 사내협력업체 근로자는 84,519명이었는데, 모기업에서 1명, 사내협력업체에서 16명의 사고사망자가 발생한 것으로 나타났다⁷⁾.

사내협력업체에서 발생한 사고는 그 원인이 표면적 또는 기술적으로 단순해 보일 수 있지만, 사고의 이면을 살펴보면 앞에 언급한 것처럼 사업장 내외부적으로 여러 복잡한 관계가 연결되어 사고예방대책이 현장에서 제대로 적용되지 못하는 경우가 많다⁸⁾. 그 이유는 그동안 우리나라에서는 산업재해를 예방하기 위해서 산업안전공학을 기반으로 주로 기술적인 측면에서 접근하였고, 사내하도급의 등장과 같은 사회과학 영역의 측면에서 원인을 파악하거나 문제를 해결하려는 시도가 많지 않았기 때문인 것으로 볼 수 있다⁹⁾. 사회기술 시스템론에서는 사회와 기술은 서로 분리되어 존재할 수 없다고 보고 있다. 즉, 사회과학자들이 독립변수로 강조해 왔던 사회와 공학자들이 강조해왔던 기술이 하나의 사회기술시스템으로 존재한다고 보고 사회와 기술의 통합적 관점에서의 접근의 필요성을 강조하고 있다^{9,10)}. 따라서 사내협력업체에서 발생한 사고는 사회기술시스템(socio-technical systems)의 개념이 반영된 분석방법을 이용하여 시스템 전체적인 측면에서 원인을 분석하고 예방대책을 마련할 필요가 있다.

사고분석 방법은 선형적(Sequential) 모델에서 역학적(Epidemiological) 모델과 시스템적(Systemic) 모델로 발전해 왔다. 선형적 사고분석 모델은 시간의 흐름에 따라 연쇄적으로 발생하는 사건의 관점에서 사고를 설명하며, FMEA(Failure Mode Effects Analysis), ETA(Event Tree Analysis), FTA(Fault Tree Analysis) 등 여러 방법이 현재까지 많이 사용되고 있다¹¹⁾. 역학적 사고분석 모델은 시스템 내의 다양한 영향 요소들과 방어벽의 잠재적 결함들이 조합되어 사고가 발생한다고 보고 있으며, 스위스 치즈 모델(Swiss Cheese Model)이 대표적이고, 이 모델에서 HFACS(Human Factor Analysis and Class System)가 파생되었다¹²⁾. 시스템적 사고분석 모델은 시스템에 대한 부분적 이해를 넘어서 전체론적 관점에서 사회기술시스템(socio-technical systems)을 바라보고 내부의 복잡한 관계를 고려하여 사고를 분석해

야 한다고 하고 있으며¹³⁾, STAMP-CAST(System Theoretic Accident Model and Processes - Causal Analysis on Systems Theory), AcciMap, FRAM(Functional Resonance Analysis Method) 등이 대표적이다^{14,15)}.

이와 같은 분석방법의 흐름을 고려하면 사내협력업체에서 발생한 사고는 선형적 또는 역학적 모델을 이용한 분석방법보다는 AcciMap이나 STAMP-CAST와 같은 시스템적인 방법으로 분석할 필요가 있다. 이를 통해 모기업과 협력업체라는 사회구조적인 관계에서 발생한 문제점과 기술적인 문제점을 함께 도출하고, 그에 적합한 예방대책을 마련할 필요가 있다.

최근까지 AcciMap은 석유 및 가스¹⁶⁾, 항공우주¹⁷⁾, 야외활동^{18,19)}, 해운²⁰⁾ 분야에서 발생한 사고분석에 주로 적용되었고, STAMP-CAST는 항공우주^{21,22)}, 식품산업²³⁾, 야외활동¹⁹⁾, 금융²⁴⁾, 철도운송^{25,26)}, 의료기기제조 품질관리²⁷⁾, 보건의료^{28,29)}, 공정산업³⁰⁾, 해운³¹⁾, 석유 및 가스 시추^{32,33)} 등에 주로 사용되었다^{34,35)}. 국내에서 발생한 사고 중에서는 2014년에 발생한 세월호 사고를 STAMP-CAST³¹⁾, AcciMap²⁰⁾ 등의 사고분석방법을 이용하여 분석한 연구사례가 있다. 세월호 사고분석 연구에서는 사고의 원인을 기술적 문제와 함께 청해진해운, 한국선급, 해양경찰청, 한국해운조합 등이 포함된 사회기술적인 관점에서 분석하여 제시하였다³⁶⁾. 그러나 제조업 분야에서는 화학공장 이외에는 사고원인분석을 목적으로 시스템적 방법을 적용한 사례를 찾아보기 어렵고, 특히 제조업 사내협력업체에서 발생한 사고의 원인을 찾기 위해 시스템적 방법으로 분석한 사례는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 제조업의 사내협력업체에서 발생한 사고사례를 시스템적인 방법으로 분석하여 사회기술시스템의 통합적 관점에서 원인을 찾아 그 결과를 분석사례로 제시하고, 시스템적 분석방법을 이용한 분석결과가 기존의 분석결과와 어떠한 차이점이 있는지 비교해 보고자 하였다.

2. 분석대상

2.1 분석대상 사고의 선정

분석대상은 모기업의 설비에서 사내협력업체가 정비보수 작업을 수행하다 발생한 추락사고로, 표면적으로는 사고원인이 명확하고 간단해 보이는 사고를 선정하였다. 이러한 유형의 사고사례는 비교적 쉽게 찾아볼 수 있고, 그 원인도 간단해 보이기 때문에 시스템적 사고분석방법으로 분석했을 때 기존의 분석결과와 어떠한 차이점이 있는지 비교가 용이할 것으로 판단되었다. 그리고 최근에 발생한 사고를 분석하여 결과를 제

시할 경우 법적 소송 등의 근거자료로 활용될 우려가 있어 비교적 과거에 발생한 사고를 분석대상으로 선정하였다.

2.2 분석대상 사고의 개요

201x년에 제조업 사업장 ○○○○의 협력업체 작업자가 금속표면처리기 설비 내부의 컨베이어 벨트 교체를 위해 설비 상부에서 덮개를 해체하던 중 천장크레인이 접근하자 이를 피하려다 약 1.5 m 아래에 있는 작업대로 떨어지는 사고가 발생했다. 그 결과 작업자는 흉·복부에 부상을 입었고 치료 중 사망하였다. 설비의 정비보수작업은 설비의 전원 차단, 설비 상부의 방호 덮개 해체, 설비 내부 컨베이어의 벨트 제거, 벨트 인입 후 조립, 벨트 장력 조정, 작업장 정리의 순서로 진행되는데, 사고는 설비 상부의 덮개를 해체하던 중에 발생하였다.

위 사고에 대한 재해조사의견서의 내용을 기반으로 사고의 원인을 정리하면 다음과 같이 5가지로 제시할 수 있다. 기계적 결함이나 방호장치의 결함은 없는 것으로 확인되었다.

- 1) 천장크레인 통과 시 천장크레인 거더와 금속표면처리설비 구조물 간에 작업자 끼임 또는 충돌 위험이 있었지만, 정비작업 구역 내에 천장크레인 접근 방지를 위한 운전정지 조치를 하지 않았다.
- 2) 천장크레인이 작업구역에 접근하는 것을 방지하기 위해 주행레일에 멈춤 장치(stopper)를 설치하지 않았다.
- 3) 정비작업 지휘자 및 감시자와 크레인 운전 작업 지휘자를 배치하지 않았다.
- 4) 천장크레인 운전자가 금속표면처리설비 상부에서 작업 중인 작업자를 인지하지 못하고 운전하여 크레인이 정비작업구역에 접근하였다.
- 5) 정비작업자의 떨어짐 방지를 위한 조치를 하지 않았다.

위 사고와 관련하여 금속표면처리설비와 천장크레인의 소유자는 모기업(원청)이었다. 그러나 금속표면처리설비의 정비작업은 정비보수 협력업체에서 수행하였고, 천장크레인 운전은 크레인 운전 협력업체에서 수행하였다.

3. 분석방법

재해조사의견서 및 추가 수집 자료를 기반으로 AcciMap, STAMP-CAST를 이용한 시스템적 사고원인분석과 업무처리절차를 이용한 사고원인분석을 수행하였

다. 이 세 가지 방법에서 도출된 사고원인을 HFACS-K³⁷⁾ 분류 기준에 따라 분류하고 그 결과를 비교하였으며, 사고예방대책은 별도로 도출하지 않았다. 각 분석방법에서 도출된 사고원인 중 다른 분석결과에 반영할 수 있는 사항은 상호 반영하였다. 분석방법의 개요 및 장단점과 세부내용은 다음과 같다.

3.1 AcciMap 분석

AcciMap은 복잡한 사회기술시스템에 대한 사전 예방적 위험관리 전략을 생성하기 위한 프로세스의 일부로 Rasmussen(1997)에 의해 개발되었다. AcciMap에서는 복잡한 사회기술시스템이 개인과 조직 및 관계자의 계층적인 구조로 구성되어 있다고 보고, 사고의 원인을 찾기 위해서는 사고가 발생한 현장을 포함하여 전체 시스템 간에 어떤 상호작용이 있었는지의 문제를 살펴봐야 한다고 되어있다^{14,38)}. AcciMap에서 제시하는 사회기술시스템의 계층 구조는 Fig. 1과 같이 정부(Government), 규제자/협회(Regulators / Associations), 사업장(Company), 관리자(Management), 직원(Staff), 작업(Work)으로 이루어져 있다. AcciMap 모델은 사고 발생에 기여한 원인(Causal Factors)을 연관성에 따라 계층별로 배열하는 방식으로 작성한다^{38,39)}. AcciMap 분석방법은 사회기술적 시스템의 모든 부분에 있는 요인들이 어떻게 사고에 영향을 주었는지 입증하는데 유용하지만 여러 인과 요인 간의 시계열 관계와 행위자 간에 잘못된 상호작용을 설명하기 어려운 단점이 있다⁴²⁾.

Branford 등³⁹⁾은 Fig. 1을 단순 및 표준화하여 Fig. 2와 같은 모형을 제안하였다. 본 연구에서는 사고원인을 모기업과 협력업체별로 구분하기 위하여 Fig. 2의 조직(Organisational) 부분을 모기업과 협력업체 2개사의 3개 영역으로 구분하여 모델을 작성하였다. 그리고

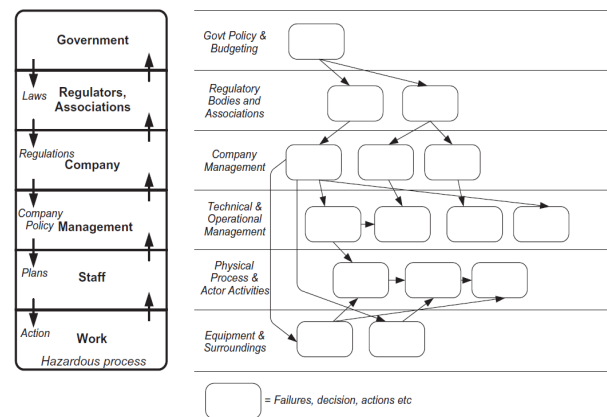


Fig. 1. Rasmussen's risk management framework and Accimap method¹⁹⁾.

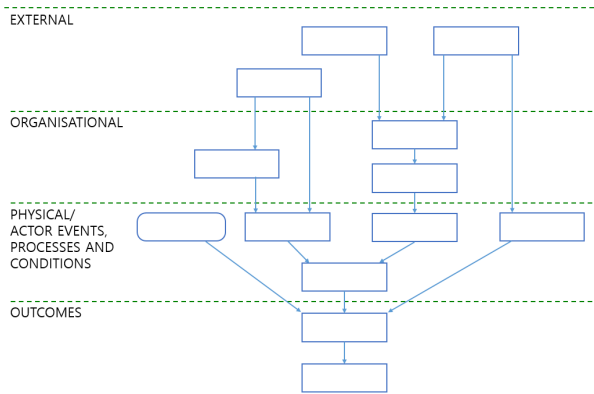


Fig. 2. The standardized AcciMap format³⁹⁾.

시스템적 분석방법의 비교연구³⁶⁾에서 AcciMap과 STAMP-CAST가 매우 다른 요인을 식별한다는 결과를 바탕으로 STAMP-CAST 분석과 업무처리절차를 이용한 분석을 통해 도출한 결과를 추가로 반영하여 분석을 완료하였다.

3.2 STAMP-CAST 분석

STAMP(System Theoretic Accident Model and Processes)는 Leveson이 2004년에 발표한 시스템 이론 기반의 사고원인분석을 위한 모델이다. STAMP에 있어서 사고는 상호 작용하는 시스템의 구성요소들 사이에서 시스템의 안전제약 사항(safety constraints)이 부적절하게 시행된 결과라는 개념을 사용하고 있다^{40,41)}. STAMP에서의 안전제약사항(safety constraints)은 환경적 또는 재정적인 조건, 규칙, 절차, 기술 설계, 장비 등이 될 수 있다^{40,41)}.

CAST(Causal Analysis on Systems Theory)는 시스템 이론 기반의 원인 분석방법으로 시스템의 관점에서 사고의 인과관계를 분석하는 구조화된 기술로 볼 수 있다⁴¹⁾. STAMP는 분석방법이 아니고 어떻게 사고가 발생하는지에 대한 모델 또는 가정들의 집합이라고 할 수 있고, CAST는 시스템 이론에 기초한 사고원인분석 방법으로 STAMP를 사용하고 있다⁴¹⁾.

STAMP 모델의 기본 제어구조는 시스템 개발 및 운영 구조를 포함하고 있으며, 각 제어구조는 계층으로 구성되어 있다. 상위 계층에서는 안전정책, 표준, 절차 등을 결정하고, 하위 계층에서는 정책이나 절차를 실제로 수행하는 역할을 한다. 시스템 내에서 실제로 동작하는 제어구조나 운영절차도 하위 계층에 포함되어 있다. STAMP 모델은 시스템의 구성요소를 계층별로 나타낸 후 상위레벨의 결정사항과 하위레벨의 피드백을 표시하는 방식으로 작성한다^{40,41)}. STAMP는 하향식이므로 매우 복잡한 시스템에도 적용이 가능하고,

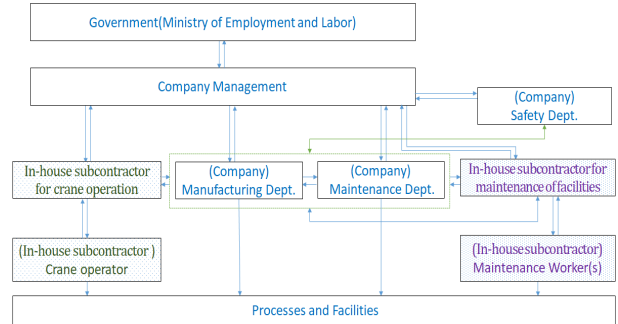


Fig. 3. The safety control structure of the company and the subcontractors.

사고나 손실의 원인이 되는 소프트웨어, 사람, 조직, 안전문화 등을 모두 포함하여 분석할 수 있는 장점이 있다. 그러나 외부의 혼란이나 뜻밖의 사건에 의한 영향을 설명하는 기능이 부족한 단점이 있고⁴²⁾, 시계열 관계를 설명하기 어려운 부분이 있다.

본 연구에서의 STAMP-CAST 분석은 Fig. 3과 같이 모기업의 생산, 정비, 안전부서와 협력업체를 구분하여 작성한 모델을 기반으로 수행하였다. 사회기술시스템 측면에서 사고원인분석이 가능하도록 분석대상 시스템 범위에는 정부, 모기업(관리, 생산, 정비, 안전부서)과 협력업체 2개소의 관리부서와 작업자, 생산공정 및 설비 등이 포함되어 있다. 사고가 발생한 설비와 크레인인 설치 후 상당한 시간이 경과하였기 때문에 설비의 설계 및 개발과 관련된 부분에 대한 분석은 생략하였다. 그리고 AcciMap 분석과 같이 AcciMap 분석과 업무처리절차를 이용한 분석에서 도출된 결과를 STAMP-CAST 분석결과에 추가로 반영하는 과정을 통해 분석을 완료하였다.

3.3 업무처리절차를 이용한 분석

업무처리절차를 이용한 분석 방법은 사업장에서 수행하는 업무처리절차를 파악하여 사고 발생과 관련된 업무처리절차를 다이어그램으로 작성한 후 업무의 흐름에 따라 업체 및 부서별로 수행한 업무내용을 파악하고, 업무수행 관련 오류와 문제점이 무엇인지 기술하도록 하고 있다. 그리고 각 업무의 다음 단계로 넘어가는 과정에서 부서와 업체별로 어떠한 오류와 문제점이 있었는지 파악하고 그 내용을 기술하는 순서로 분석이 진행된다⁴³⁾. 이 방법은 시간의 흐름에 따른 순차적인 분석과 시스템적인 분석을 동시에 수행할 수 있는 장점이 있다. AcciMap과 STAMP-CAST 분석에서는 시계열적인 관계에 대한 설명이 어렵다. STAMP 모델에서 개발 및 운영과 같은 업무단계를 포함한 분석은 가능하지만 세부적으로 업무를 구분하기는 어렵기 때

문에 업무처리과정에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하기 어려운 문제점이 있다⁴²⁾. 따라서 일부 연구자⁴³⁾가 업무처리과정에 따른 분석의 필요성을 느껴, 업무처리 절차를 이용한 분석방법을 제안하였지만 아직 학계에 정식으로 제안되지는 않았다.

업무처리절차를 이용한 분석에 필요한 업무절차는 모기업의 절차를 참고하여 일반화 과정을 거쳐 작성하였고, 분석범위는 사업장 내부에서 진행되는 정비작업요청에 따른 작업계획 수립부터 사고가 발생한 업무까지로 설정하고 분석을 수행하였다. 그리고 AcciMap과 STAMP-CAST 분석결과를 추가로 반영하여 분석을 완료하였다.

사고분석을 위해 설정한 금속표면처리설비 정비업무 처리절차와 범위는 다음과 같다.

- 1) 기준 및 작업표준 작성·관리: 정비보수작업에 필요한 작업표준을 작성하고 관리(협력업체)
- 2) 위험성평가: 작업 전 위험성평가를 수행하고 위험요인 제거 및 개선(협력업체)
- 3) 정비작업요청: 모기업 운전부서 또는 생산조업 협력업체에서 모기업 정비부서에 정비작업 요청
- 4) 작업계획 수립 및 승인: 작업검토 후 소요자원(자재, 일정, 인원 등)을 확정하고, 작업 계획 수립 (모기업 정비부서)
- 5) 작업일정수립: 모기업의 생산부서와 정비부서가 협의하여 작업일정 수립
- 6) 협력업체에 작업할당: 모기업에서 적합한 정비보수 협력업체에 작업 할당
- 7) 현장 수리 회의: 작업수행 전에 작업에 필요한 조치, 작업공정(계획), 안전사항, 준비자재, 장비 투입계획 등 결정(모기업+정비보수 협력업체)
- 8) 인원 배정: 작업투입 인원 배정(정비보수 협력업체)
- 9) 작업감독자 지정: 작업에 필요한 감독자 지정(모기업, 협력업체)
- 10) 작업 전 안전조치: 작업수행 전에 필요한 안전조치 실시(모기업, 협력업체)
- 11) 안전작업허가서 작성: 작업에 필요한 사전 안전조치, 위험요인, 작업자 정보 등을 포함하여 안전작업허가서 작성(정비보수 협력업체)
- 12) 안전작업허가서 승인: 사전 안전조치 등을 확인한 후 작업 승인(모기업→협력업체)
- 13) 작업 전 교육, 회의: 작업시작 전에 작업 관련 위험성과 안전교육 등 수행(모기업, 협력업체)
- 14) 작업 실시: 정비보수 작업 실시(정비보수 협력업체)
- 15) 작업현장 감독: 작업현장에 대해 감독 실시(모기업, 협력업체)

16) 작업완료 및 평가: 작업완료 후 작업결과에 대한 평가 및 분석(모기업)

3.4 HFACS를 이용한 사고원인 분류

HFACS(Human Factors Analysis and Classification System)는 Reason의 스위스 치즈 모델을 기초로 하여 인적요인 분류체계를 구체화 시킨 역학적인 사고분석 모델로써 미국 해군과 해병대의 항공사고 데이터를 사용하여 인적요인 중심의 사고분석을 위해 Shappell과 Wiegmann이 2001년에 제안하였다^{44,45)}. HFACS는 조직의 영향, 불안정한 감독, 불안정한 행동의 전제조건, 불안정한 행동 등 4가지 수준의 실패를 바탕으로 사고를 설명하고 있다³⁷⁾. 임재근 등³⁷⁾은 항공기 사고조사를 위한 HFACS를 그대로 우리나라 산업현장에 적용하여 사용하기에는 그 활용에 한계가 있는 것으로 보고, 제조업의 인적오류 관련 사고분석을 위한 HFACS-K를 개발하여 발표하였다.

본 연구에서는 HFACS를 이용한 분석은 별도로 수행하지 않고, AcciMap, STAMP-CAST, 업무처리절차를 이용한 분석을 통해 도출된 사고원인을 HFACS-K에서 제시한 분류기준에 따라 분류하였다. 이를 통해 HFACS를 이용하여 분석을 수행하는 경우 어느 수준까지 사고원인을 도출할 수 있을지 예상해 보고자 하였다. Table 1에는 본 연구에서 사용한 HFACS-K의 분류기준을 나타내었다. 사업장별로 원인을 명확히 구분하기 위하여 사고원인을 모기업과 협력업체(2개사)로 구분하여 제시하였다.

Table 1. The taxonomy of HFACS-K³⁶⁾

First Order	Second and Third Order	
Organizational influences	Resource management	
	Organizational climate	
	Organizational process	
Unsafe supervision	Inadequate supervision	
	Planned inappropriate operations	
	Failed to correct problem	
Preconditions for unsafe acts	Environmental factors	Physical Environment
		Technical Environment
	Substandard conditions of operators	Adverse mental states
		Adverse physiological states
Substandard practices of operators	Physical and mental disorders	
	Resource mismanagement	
Unsafe acts	Errors	Personal readiness
		Decision errors
		Skill-Based errors
	Violations	Perceptual error
		Routine
	Exceptional	

3.5 분석결과 비교

각 분석방법을 통해 도출된 결과를 비교하기 위하여 AcciMap 분석결과에서 나타난 사고원인에 번호를 부여하고, 다른 분석결과와의 비교를 위한 기준으로 설정하였다. 그리고 STAMP-CAST 방법을 통해 작성한 모델의 구성요소별로 사고원인을 표에 배열한 후 재해 조사의견서에서 언급한 사고원인, 업무처리절차를 이용한 분석에서 도출된 사고원인과 HFACS-K 분류기준을 통해 분류가 가능한 것으로 확인된 사고원인에 대해 “√”로 표시하여 비교표를 작성하고 그 차이를 분석하였다. 또한, 전체적인 측면에서 각 분석방법에 따른 분석결과와의 차이점에 대해서도 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

사고와 관련된 모기업의 정비, 생산, 안전부서와 정비보수 협력업체 및 생산 협력업체 등에 대하여 AcciMap과 STAMP-CAST를 이용한 시스템적 분석과 업무처리절차를 이용한 분석결과를 정리하였다. 그리고 각 분석결과에서 도출된 사고원인을 HFACS-K 분류기준에 따라 분류하고 그 결과를 서로 비교한 결과는 다음과 같다.

4.1 AcciMap 분석

AcciMap을 이용하여 사고원인을 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 분석결과와 계층구조는 외부(External) 조직(노동부), 사업장 내부 조직(모기업 및 협력업체 2개사), 협력업체의 작업자, 물리적 환경 등으로 구성되어 있다. AcciMap의 기본 사회기술시스템 모델에는 규제자나 협회 등이 포함되어 있지만, 이와 관련된 사고원인은 도출되지 않았다. 전체적으로는 모기업의 결정이나 행위가 협력업체에 많은 영향을 미친 것으로 나타났다.

사업장 외부적인 부분에 있어서는 파견근로자 보호 등에 관한 법률과 산업안전보건법 관련 내용이 분석결과에 나타나 있다. 이전 연구에서 모기업에서 사내협력업체 노동자를 대상으로 산재예방교육을 하거나 산재예방시설을 설치할 경우 파견법을 위반하는 “불법파견”의 문제가 발생할 수 있을 것으로 지적한 사례가 있다⁷⁾. Fig. 4의 분석결과에서는 사내협력업체에서 작업절차서를 작성하고 위험성평가를 수행할 때 모기업의 지원이 소극적인 것으로 나타나 있다. 사내협력업체에서 작업절차서를 작성하고 위험성평가를 수행할 때에는 업무나 시설 관련 정보에 제한적으로 접근할 수밖에 없기 때문에 모기업의 지원이나 협력이 반

드시 필요하다. 따라서 이와 관련된 법적 개선이 필요할 것으로 판단되었다. 그리고 사고 발생 당시의 산업안전보건법에는 도급인(모기업)이 수급업체의 일정을 조정하고 안전조치를 확인할 의무가 없는 것으로 확인되었다. 참고로, 이와 관련된 산업안전보건법 조항은 2021년 11월에 시행되었다.

사업장 내부 조직과 관련해서는 모기업의 협력업체에 대한 제한적인 지원 및 작업 감독 미흡, 협력업체 자체적으로 작업절차서 작성 및 위험성평가 수행, 작업 전 안전조치 요구 절차 및 방법의 불명확, 작업허가서 검토 시스템 미흡, 작업 전 교육 및 회의 운영 미흡 등의 문제점이 정비보수 및 크레인 운전 협력업체에 직접 또는 간접적으로 영향을 미친 것으로 나타나 있다. 그 영향으로 정비보수 협력업체는 모기업과의 계약에 따라 시간적 압박을 받으면서 형식적으로 위험성평가를 수행하고, 정비작업 지휘자를 배치하지 않았으며, 작업 전 안전조치를 취하지 않는 문제점으로 이어진 것으로 나타났다. 그리고 크레인 운전 협력업체에 설비 정비작업 진행 사실이 제대로 전달되지 않아 정비작업 중 크레인을 운전하는 상황이 발생했다.

전체 사회기술시스템 관점에서 보면 법적 문제점, 사업장 조직 각각의 문제점과 작업자와 설비의 문제점이 복잡하게 연결되어 있으며, 모기업과 협력업체라는 구조적인 관계에서 나타나는 문제를 사고원인으로 제시한 것을 확인할 수 있다. 그러나 분석결과에서 정비보수 계획 및 작업지시서에 일반적인 안전조치 내용만 포함된 이유, 작업 전 안전교육 및 회의 운영 미흡 이유, 크레인 하부와 설비 사이의 간격이 좁은 이유 등에 대해서는 추가 조사를 통해 그 원인을 확인할 필요가 있을 것으로 판단되었다. 그리고 분석결과는 시간 흐름에 따라 사고원인을 제시하기에는 한계가 있었다.

4.2 STAMP-CAST 분석

STAMP-CAST를 이용한 사고원인분석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 분석결과는 정부, 모기업의 경영진, 생산부서, 정비부서, 안전부서와 크레인 운전 협력업체, 정비보수 협력업체, 각 협력업체의 작업자, 생산공정 및 설비 등으로 정리되어 있다. 분석결과에서 STAMP-CAST 분석방법⁴¹⁾에서 제시하는 시스템 구성요소별 안전 관련 책임(Safety related responsibilities)은 나타나지 않았고, 불안정한 결정과 행동(unsafe decisions and control), 결정의 배경(context), 시스템 모델의 결함(model flaw) 등을 통합하여 사고원인으로 제시하고 있다. 세부 분석결과는 AcciMap의 내용과 같다.

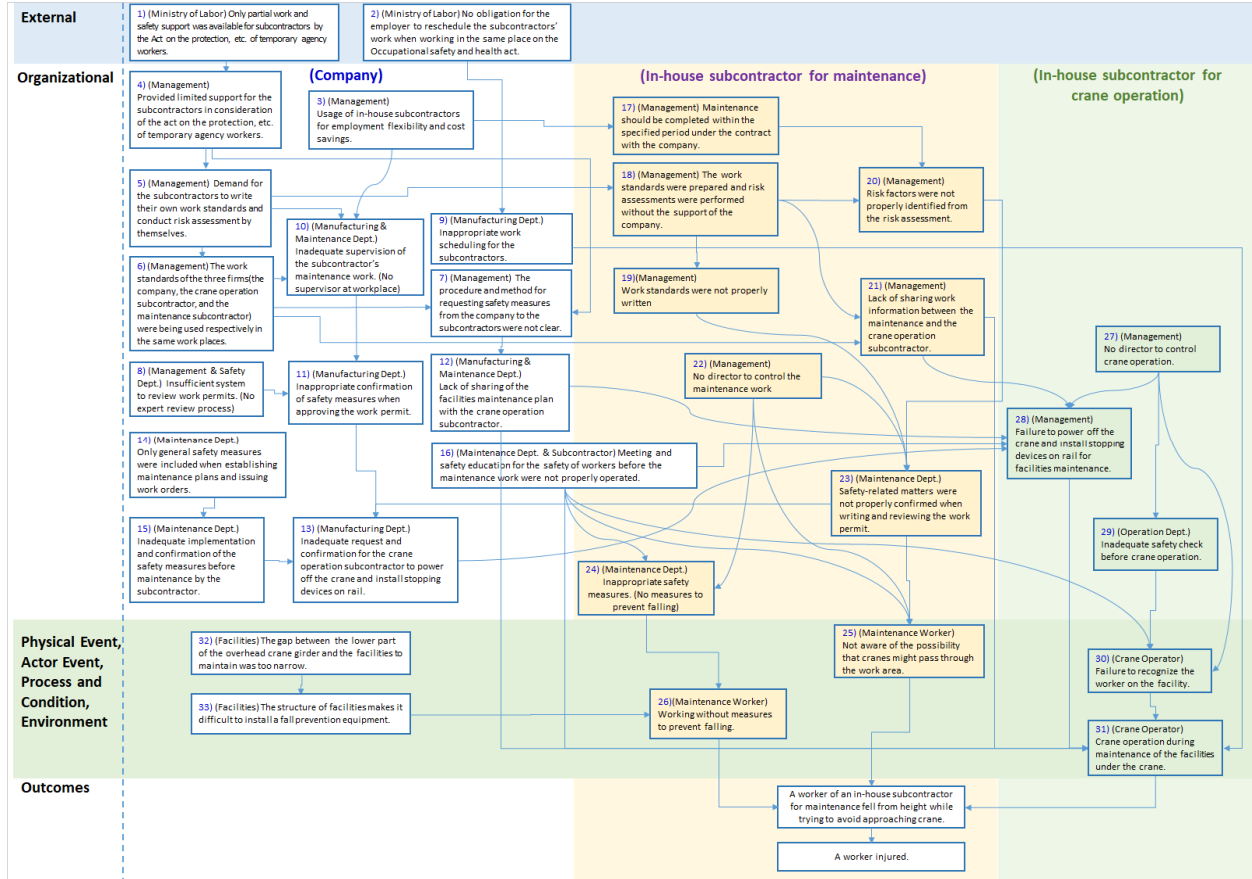


Fig. 4. AcciMap of the subcontractor worker's accident.

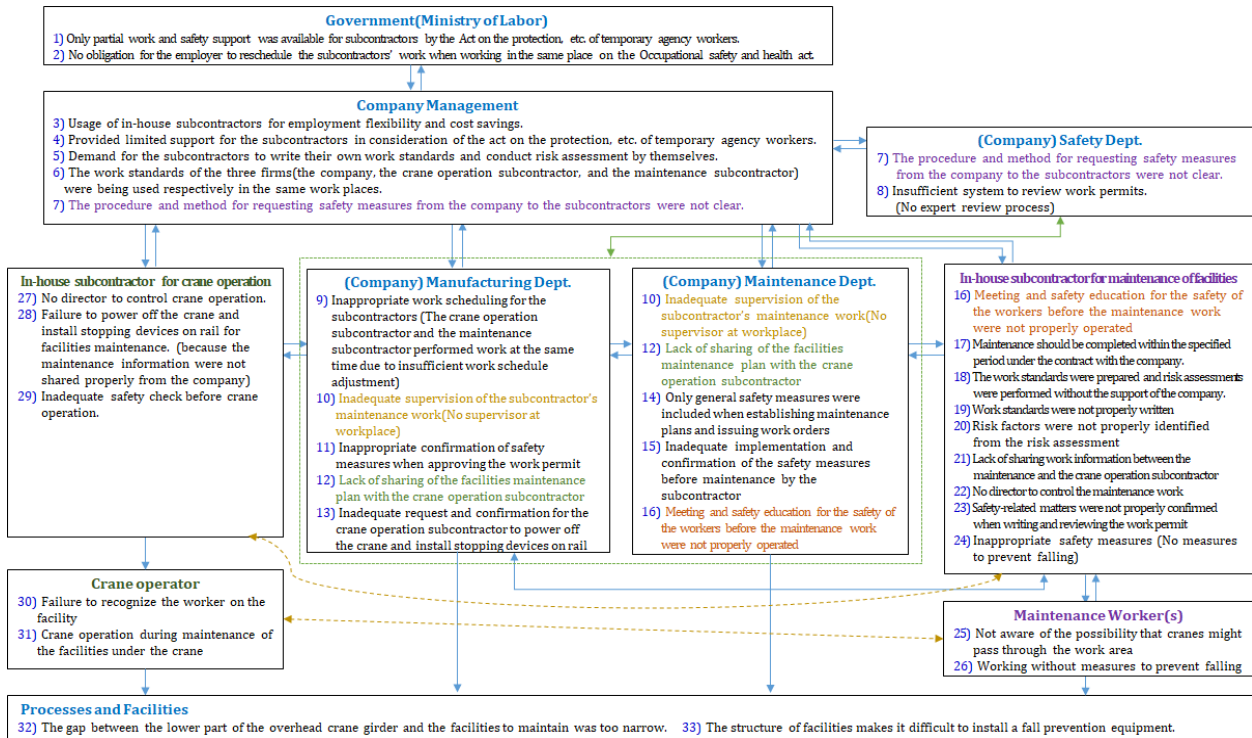


Fig. 5. The summary of STAMP-CAST analysis results.

사회기술시스템 관점에서 보면 STAMP-CAST 분석 결과는 시스템 구성요소별로 문제점이 제시되어 있다. 그리고 사고원인 중 7), 10), 12), 16) 항목은 2개의 부서(또는 업체)에 모두 포함되어 있다. 이처럼 STAMP-CAST 분석결과에서는 조직별로 문제점을 나타내고 안전관련 책임 및 결정 배경 등도 추가로 나타낼 수 있기 때문에 다른 분석방법보다 각 조직별로 개선방안을 마련하기 위한 자료로 활용하기에 유리할 것으로 판단되었다. 그러나 AcciMap의 분석의 한계점과 같이 STAMP-CAST 분석에서도 전체적인 업무의 흐름에 따른 사고의 원인을 제시하기에는 한계가 있었다.

4.3 업무처리절차를 이용한 분석

앞에 제시한 업무처리절차를 이용하여 업무의 흐름에 따라 업무단계별로 사고에 기여한 요인을 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 분석결과는 정비업무를 수행하기 전과 수행 중으로 구분하고, 각 업무 단계별로 모기업과 협력업체를 구분하여 수행업무, 담당부서(또는 담당자), 사고원인을 제시하였다. 업무처리절차에 따라 수행했어야 하지만 수행하지 않은 업무나 절차는 점선으로 표시하였다. 업무처리 일자 및 시간 항목은 사업장 정보보호를 고려하여 그림에는 표기하지 않았다. 그리고 모기업과 정비담당 사내협력업체가 참여하는 현장 수리 회의와 작업관리자나 지휘자의 지령 등과 같은 일부 업무는 관련 자료를 확인할 수 없었다.

분석결과를 보면 협력업체가 정비보수를 수행하기 위한 각 업무단계별로 모기업과 협력업체 간에 서로 상호작용하면서 진행되고 유기적으로 연결되어 있음을 알 수 있다. 그리고 AcciMap과 STAMP-CAST에서 구성요소 및 계층별로 제시되어 있는 사고원인들이 업무의 단계별로 어떻게 연결되어 사고의 발현으로 이어지는지 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다.

정비보수작업 중 발생한 사고는 설비적인 문제점보다는 사전 안전조치 미흡, 의사소통 부족, 작업절차 미준수 등과 관련된 문제점이 사고원인으로 작용하는 경우가 많기 때문에 사업장 내부적으로는 업무처리절차를 이용한 분석이 오히려 더 효과적인 분석방법이 될 수 있을 것으로 판단되었고, 업무단계별로 계획 또는 작업절차서와 비교하여 어떠한 변동성이 있었는지와 그에 따른 파급효과를 확인할 수 있을 것으로 판단되었다. 그러나 분석결과에 법적인 문제점과 같은 사업장 외부적인 원인과 설비적인 문제점은 제시되어 있지 않기 때문에 이 방법으로 사회기술시스템에 대한 분석

을 수행하기 위해서는 분석대상 범위를 사업장 외부까지 확장하고, 설비적인 문제점 기술에 대한 부분을 보완할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

4.4 HFACS를 이용한 사고원인 분류

시스템적 사고분석 방법과 역학적인 사고분석 방법을 비교하기 위해 AcciMap, STAMP-CAST, 업무처리절차를 이용한 분석을 통해 도출한 사고원인을 HFACS-K 분류표를 이용하여 Table 2와 같이 나타내었다.

분류결과를 보면 세 개의 분석방법을 통해 도출된 대부분의 사고원인 대부분을 HFACS-K의 분류기준에 따라 분류할 수 있었다. 분류된 사고원인은 일부를 제외하고 대부분 조직의 영향과 불안정한 감독으로 구분되었다. 그러나 법적인 문제점, 3개 사업장의 작업표준이 같은 공간에서 동시에 운용됨에 따라 나타난 문제점, 작업허가서 검토 시스템이 미흡한 문제점 등은 HFACS-K 분류기준에 따라 분류하기에 모호한 부분이 있었다. 이 문제점들은 사업장 외부에서 기인하였거나 모기업과 협력업체 간의 구조적 관계에서 발생하는 원인으로 볼 수 있는데, HFACS가 인적요인을 중심으로 사고원인을 분석하기 위해 개발된 방법이기 때문인 나타난 결과로 사료되었다.

따라서 HFACS를 이용하여 사고의 원인을 분석하는 경우에는 모기업과 협력업체 이외의 외부적인 요인과 모기업과 협력업체 간의 구조적 관계에서 발생하는 문제점을 도출하기 위해서는 별도의 방법으로 추가 분석이 필요할 것으로 판단되었다. 그리고 Table 2와 같이 도출된 사고원인을 HFACS의 분류기준에 따라 분류한 결과와 HFACS를 이용하여 사고원인을 분석한 결과가 다르게 나타날 수 있다. 따라서 HFACS를 이용하여 사고의 원인을 분석하여 Table 2에 제시된 결과와 유사한 수준으로 사고원인을 도출할 수 있는지는 연구자(또는 전문가)의 실제 분석을 통해 검증할 필요가 있을 것으로 사료되었다.

4.5 분석 결과 비교

AcciMap과 STAMP-CAST, 업무처리절차 이용한 분석방법에 따른 사고원인 도출 결과와 HFACS 분류기준에 따른 사고원인 분류 결과 및 재해조사위원회의 언급된 사고원인을 Table 3에 나타내었다. AcciMap과 STAMP-CAST 방법은 서로 보완적인 역할을 하면서 각 방법을 통해 도출된 사고의 원인을 서로 반영하는 것이 가능했으므로, 도출된 사고의 원인이 동일한 것으로 나타났고, 다른 방법은 도출 결과에 차이를 보였다.

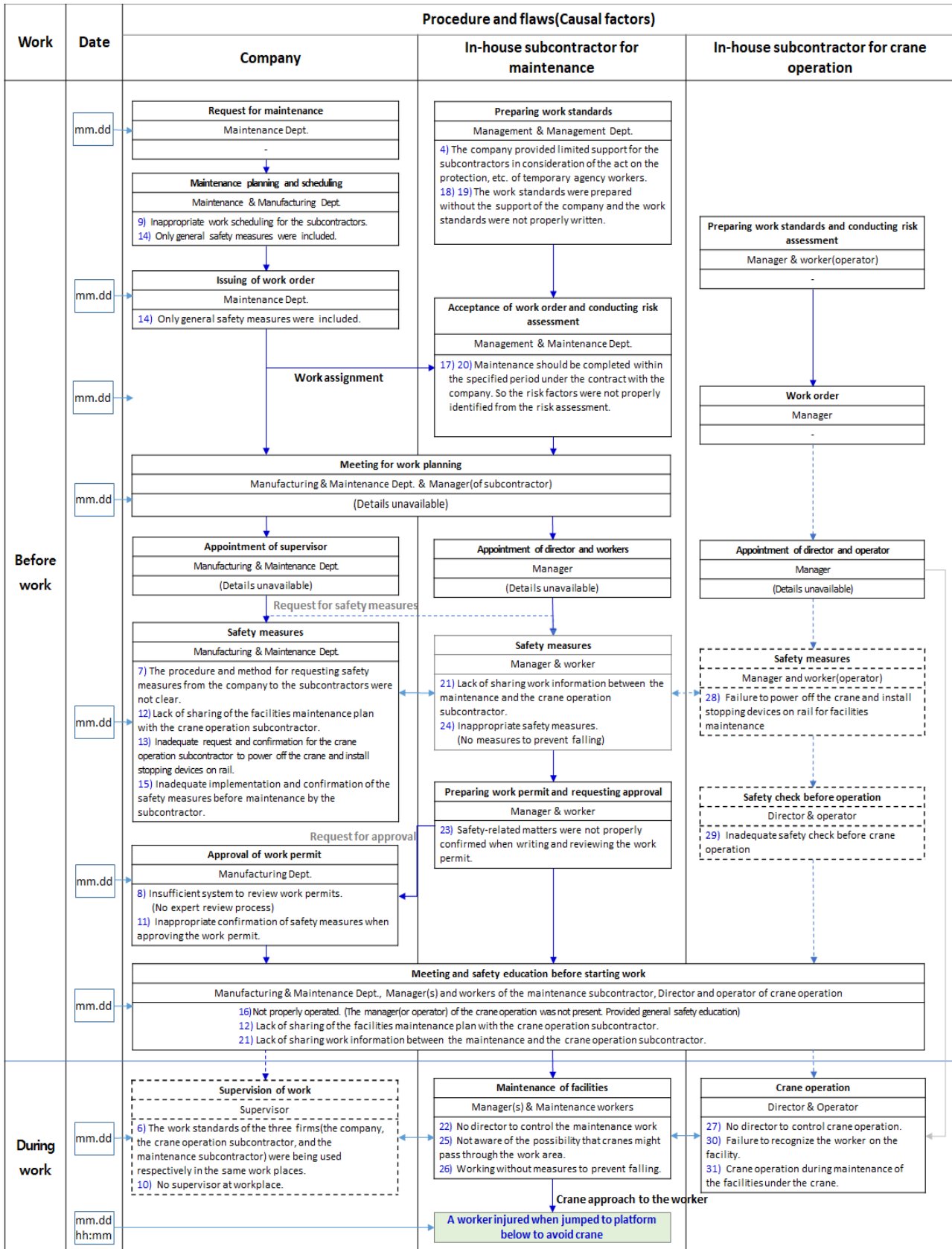


Fig. 6. Work processing procedure for maintenance and the causal factors.

Table 2. Classification of the causal factors of the accident by HFACS framework

Classification		Causal factors			
		Company	In-house subcontractor for facilities maintenance	In-house subcontractor for crane operation	
Organizational Influences	Resource Management	3) Usage of in-house subcontractors for employment flexibility and cost savings.	N/A	N/A	
	Organizational Climate	4) Provided limited support for the subcontractors in consideration of the act on the protection, etc. of temporary agency workers. 5) Demand for the subcontractors to write their own work standards and conduct risk assessment by themselves.	17) Maintenance should be completed within the specified period under the contract with the company.	N/A	
	Organizational Process	7) The procedure and method for requesting safety measures from the company to the subcontractors were not clear.	18) The work standards was prepared and a risk assessment was performed without the support of the company.	N/A	
Unsafe Supervision	Inadequate Supervision	10) Inadequate supervision of the subcontractor's maintenance work. (No supervisor at workplace)	22) No director to control the maintenance work.	27) No director to control crane operation.	
	Planned Inappropriate Operations	9) Inappropriate work scheduling for the subcontractors. 11) Inappropriate confirmation of safety measures when approving the work permit. 12) Lack of sharing of the facilities maintenance plan with the crane operation subcontractor. 13) Inadequate request and confirmation for the crane operation subcontractor to power off the crane and install stopping devices on rail. 15) Inadequate implementation and confirmation of the safety measures before maintenance by the subcontractor.	19) Work standards were not properly written. 20) Risk factors were not properly identified from the risk assessment. 21) Lack of sharing work information between the maintenance and the crane operation subcontractor. 23) Safety-related matters were not properly confirmed when writing and reviewing the work permit. 24) Inappropriate safety measures. (No measures to prevent falling)	28) Failure to power off the crane and install stopping devices on rail for facilities maintenance (because the maintenance information were not shared properly from the company).	
	Failed to Correct Problem	N/A	N/A	N/A	
	Supervisory Violations	14) Only general safety measures were included when establishing maintenance plans and issuing work orders. 16) Meeting and safety education for the safety of the workers before the maintenance work were not properly operated.	16) Meeting and safety education for the safety of workers before the maintenance work were not properly operated.	29) Inadequate safety check before crane operation.	
Preconditions for Unsafe Acts	Environmental Factors	Physical Environment	32) The gap between the lower part of the overhead crane girder and the facilities to maintain was too narrow.	N/A	
		Technical Environment	33) The structure of facilities makes it difficult to install a fall prevention equipment.	N/A	
	Substandard Conditions of Operators	N/A	N/A	N/A	
	Substandard Practices of Operators	N/A	N/A	N/A	
Unsafe Acts	Errors	Decision Errors	N/A	N/A	
		Skill-Based Errors	N/A	N/A	
		Perceptual Error	N/A	25) Not aware of the possibility that cranes might pass through the work area. 30) Failure to recognize the worker on the facility.	
	Violations	Routine	N/A	26) Working without measures to prevent falling.	N/A
		Exceptional	N/A	N/A	31) Crane operation during maintenance of the facilities under the crane.

Table 3. Comparison of the causal factors derived by accident analysis methods

System Components	Causal Factors	Analysis Method*				
		AIR	AM SC	WFA	HF	
Government and Law	1) No obligation for the employer to reschedule the subcontractors' work on Occupational safety and health act when working in the same place		√			
	2) Only partial work and safety support was available for subcontractors by the Act on the protection, etc. of temporary agency workers		√			
Company	Management	3) Usage of in-house subcontractors for employment flexibility and cost savings		√		√
		4) Provided limited support for the subcontractors in consideration of the act on the protection, etc. of temporary agency workers		√	√	√
		5) Demand for the subcontractors to write their own work standards and conduct risk assessment by themselves		√		√
		6) The work standards of the three firms(the company, the crane operation subcontractor, and the maintenance subcontractor) were being used respectively in the same work places.		√	√	
		7) The procedure and method for requesting safety measures from the company to the subcontractors were not clear.		√	√	√
	Safety Department	7) The procedure and method for requesting safety measures from the company to the subcontractors were not clear.		√	√	√
		8) Insufficient system to review work permits(No expert review process)		√	√	
	Manufacturing Department	9) Inappropriate work scheduling for the subcontractors (The crane operation subcontractor and the maintenance subcontractor performed work at the same time due to insufficient work schedule adjustment)		√	√	√
		10) Inadequate supervision of the subcontractor's maintenance work (No supervisor at workplace)	√	√	√	√
		11) Inappropriate confirmation of safety measures when approving the work permit		√	√	√
		12) Lack of sharing of the facilities maintenance plan with the crane operation subcontractor		√	√	√
		13) Inadequate request and confirmation for the crane operation subcontractor to power off the crane and install stopping devices on rail		√	√	√
	Maintenance Department	10) Inadequate supervision of the subcontractor's maintenance work (No supervisor at workplace)	√	√	√	√
		12) Lack of sharing of the facilities maintenance plan with the crane operation subcontractor		√	√	√
		14) Only general safety measures were included when establishing maintenance plans and issuing work orders		√	√	√
		15) Inadequate implementation and confirmation of the safety measures before maintenance by the subcontractor	√	√	√	√
	16) Meeting and safety education for the safety of the workers before the maintenance work were not properly operated.		√	√	√	
In-house subcontractor for maintenance of facilities	Management	16) Meeting and safety education for the safety of the workers before the maintenance work were not properly operated.		√	√	√
		17) Maintenance should be completed within the specified period under the contract with the company.		√	√	√
		18) The work standards were prepared and risk assessments were performed without the support of the company.		√	√	√
		19) Work standards were not properly written		√	√	√
		20) Risk factors were not properly identified from the risk assessment		√	√	√
		21) Lack of sharing work information between the maintenance and the crane operation subcontractor.	√	√	√	√
		22) No director to control the maintenance work	√	√	√	√
	23) Safety-related matters were not properly confirmed when writing and reviewing the work permit		√	√	√	
	Worker(s)	24) Inappropriate safety measures (No measures to prevent falling)	√	√	√	√
		25) Not aware of the possibility that cranes might pass through the work area	√	√	√	√
26) Working without measures to prevent falling		√	√	√	√	
In-house subcontractor for crane operation	Management	27) No director to control crane operation	√	√	√	√
		28) Failure to power off the crane and install stopping devices on rail for facilities maintenance (because the maintenance information were not shared properly from the company)	√	√	√	√
	worker (Operator)	29) Inadequate safety check before crane operation		√	√	√
		30) Failure to recognize the worker on the facility	√	√	√	√
Processes and Facilities		31) Crane operation during maintenance of the facilities under the crane	√	√	√	√
		32) The gap between the lower part of the overhead crane girder and the facilities to maintain was too narrow.	√	√		√
		33) The structure of facilities makes it difficult to install a fall prevention equipment.	√	√		√

*AIR: Accident Investigation Report, AM: AcciMap, SC: STAMP-CAST, WFA: Work processing procedures Analysis, HF: HFACS

AcciMap과 STAMP-CAST에서 도출된 결과를 기준으로 보면, 기존에 제시된 사고원인은 사고와 직접적으로 연관되는 정비보수 및 크레인 운전 협력업체를 중심으로 제시되어 있고, 모기업과 관련된 부분은 상대적으로 적은 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 기존 보고서에 사회기술시스템 개념을 반영되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

분석결과에서 법적인 문제점은 AcciMap과 STAMP-CAST에서만 제시한 것으로 나타나 있다. 업무처리절차를 이용한 방법은 분석대상 범위가 사업장 내에서 수행되는 업무로 범위를 설정되었기 때문에 법적인 문제점과 같은 외부적인 요인도출에 한계를 보였다. 따라서 향후 이러한 외부적인 원인을 도출할 수 있도록 분석방법을 보완할 필요가 있을 것으로 판단되었다. HFACS를 이용한 사고원인 분류에서는 시스템적 사고 분석을 통해 파악된 대부분의 사고원인을 분류기준에 따라 분류할 수 있었지만, 법적인 내용과 모기업과 협력업체 간의 구조적인 관계로 인해 발생하는 문제, 작업허가서 검토 시스템의 문제는 HFACS의 분류기준으로 분류하기 어려웠다.

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 및 Table 2에 제시된 각 분석방법에 따른 사고원인 분석결과는 서로 다른 특성을 보였다. AcciMap에서는 사고원인들이 사고발생에 어떻게 영향을 미쳤는지 인과관계가 잘 나타나 있고, STAMP-CAST 분석에서는 시스템 구성요소 각각의 문제점과 그 관계에 따른 문제점을 보여줄 수 있었다. 업무처리절차를 이용한 분석은 조직간 각 업무의 연관성과 업무의 진행 단계에서 어떤 문제점이 있고, 어떻게 이어지고 있는지 보여주고 있다. HFACS를 이용한 분류결과는 대부분 사고원인이 사업장 조직 내부에 잠재해 있는 문제점인 것을 나타내고 있다.

사회기술적인 관점에서 분석결과를 보면 AcciMap과 STAMP-CAST 분석은 법적, 조직적, 기술적 측면 등 사회기술시스템 전체적인 측면에서 문제점을 제시할 수 있었지만, 업무처리절차를 이용한 분석방법과 HFACS 분석은 사업장 외부적인 문제점 파악과 제시에 한계를 보였다.

5. 결론

제조업 사업장의 정비보수 사내협력업체의 작업자가 설비의 보수 중 접근하는 천장크레인을 피하려다 추락한 사고에 대해 기존의 분석결과를 검토하고, 시스템적인 분석방법을 이용하여 사고원인을 분석하였다. 이 사고는 표면적으로는 원인이 간단해 보이지만,

모기업과 협력업체의 복합적인 문제들이 사고원인으로 작용하였고 사고와 관련된 많은 요인들이 모기업과 관련 있는 것으로 나타났다. 따라서 협력업체에서 발생한 사고는 모기업의 관련 부서와 관련 협력업체를 모두를 분석대상에 포함시켜 사회기술시스템적인 관점에서 원인을 분석하고, 사고예방대책을 마련할 필요가 있다. 그러나 각 분석방법별로 사고원인의 도출이나 표현에 일부 한계를 보였기 때문에 하나의 방법만을 이용하기보다는 여러 가지 분석방법을 동시에 적용하여 사고원인을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 제조업 협력업체에서 발생한 사고사례에 대한 시스템적 분석 및 비교 결과는 다른 연구자가 사회기술적 관점에서 협력업체의 사고원인분석에 적합한 분석방법을 선정하고 활용하는데 도움을 분석의 방향성을 제시했다는 점에서 본 연구에 의미를 부여할 수 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 이 한 건의 사고원인 분석결과를 통해 사내협력업체와 관련된 모든 사회기술적인 문제점을 파악할 수는 없기 때문에 앞으로 제조업뿐만 아니라 전체 산업을 대상으로 사회기술적인 측면에서 사고원인을 분석하기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사고원인 분석과는 별개로 본 연구의 연구진이 사고조사 과정에 참여하지 않았고, 사고가 발생 후 상당한 시간이 지났기 때문에 추가 조사를 통한 자료 수집에 한계가 있었다. 따라서 재해조사의견서를 포함한 제한된 자료만으로 사고원인분석을 수행하고 결과를 도출한 것은 이 본 연구의 한계점으로 볼 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 연구진이 실제 사고조사 과정에 참여하여 사고원인을 분석한다면 더 내실 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

References

- 1) Economic and Social Development Commission. Progress of discussion by the Labor Market Advancement Committee, 2011.
- 2) H. Jung, In the Era of One Million in-house Subcontractors, the Problems and Policy Alternatives, Labor Review, Korea Labor Institute, 2017.
- 3) Ministry of Employment and Labor, Announcement Results of 2018 Employment type, 2018.
- 4) Ministry of Employment and Labor, Announcement Results of 2019 Employment type, 2019.
- 5) Ministry of Employment and Labor. Announcement Results of 2020 Employment type, 2020.

- 6) C. Park, In-house subcontracting and industrial Safety, Labor Review, Korea Labor Institute. 2016.
- 7) Ministry of Employment and Labor, Announcement of the Company List according to Integrated Occupational Accident Management System for a Primary Company and the Subcontractors (Press release), 2020.
- 8) C. Park, J. Park, K. Kim, J. Kim, H. Jeon, S. Noh, J. Park and K. Hwang, In-house Subcontracting and Industrial Safety-Focused on Manufacturing, Korea Labor Institute, 2015.
- 9) W. Song, Socio-technical System Theory and Policy Significance, Issue & Policy 60, Science and Technology Policy Institute, 2012.
- 10) F. W. Geels, “From Sectoral Systems of Innovation to Socio-technical Systems: Insights about Dynamics and Change from Sociology and Institutional Theory” Research Policy, Vol. 33. Issues 6-7, pp. 897-920, 2004.
- 11) N. Leveson, “A New Accident Model for Engineering Safer Systems”, Safety Science, Vol. 42, Issue 4, pp. 237-270, 2004.
- 12) J. Yang, J. Ko, S. Lee, J. Lim and Y. Kim, Establishing Systemic Strategy to Introduce Innovative Safety Concepts and Methods, OSHRI, KOSHA, 2019.
- 13) A. Yousefi, M.R. Hernandez and V. L. Peña, Systemic Accident Analysis Models: A Comparison Study between Accimap, FRAM, and STAMP. AIChE. Process Safety Progress, Vol. 38, No. 2, 2018. <https://doi.org/10.1002/prs.12002>
- 14) E. Grant, P. M. Salmon, N. J. Stevens, N. Goode and G. J. Read, “Back to the Future: What do Accident Causation Models Tell us about Accident Prediction?”, Safety Science, Vol. 104, pp. 99-109, 2018.
- 15) D. Seo, G. Bae, Y. Choi and O. Han “Analysis of a Fire Accident during a Batch Reactor Cleaning with AcciMap, STAMP and FRAM”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 4, pp. 1-39. 2021.
- 16) A. Hopkins, Lessons from Longford: The Esso Gas Plant Explosion, CCH, Sydney, 2000.
- 17) C. W. Johnson and I.M. de Almeida, An Investigation into the Loss of the Brazilian Space Programme’s Launch Vehicle VLS-1 V03“, Safety Science, Vol. 46, Issue 1, pp. 38-53, 2008.
- 18) P. M. Salmon, A. Williamson, M.G. Lenne, E. Mitsopoulos, and C.M. Rudin-Brown, “Systems-based Accident Analysis in the Led Outdoor Activity Domain: Application and Evaluation of a Risk Management Framework”, Ergonomics, Vol. 53, Issue 8, pp. 927-939, 2010.
- 19) P. M. Salmon, M. Cornelissen and M. J. Trotter, “Systems-based Accident Analysis Methods- A comparison of Accimap, HFACS, and STAMP”, Safety Science, Vol. 50, pp. 1158-1170, 2012.
- 20) S. Lee, Y. B. Moh, M. Tabibzadeh, and N. Meshkati, “Applying the AcciMap Methodology to Investigate the Tragic Sewol Ferry Accident in South Korea”, Applied Ergonomics, Vol. 59, pp. 517-525, 2017.
- 21) C. W. Johnson and C. M. Holloway, “The ESA/NASA SOHO Mission Interruption: Using the STAMP Accident Analysis Technique for a Software Related ‘Mishap’ ”, Softw: Pract Exp, Vol. 33, Issue 12, pp. 1177-1198, 2003.
- 22) A. J. Ball, Identification of Leading Indicators for Producibility Risk in Early-stage Aerospace Product Development, Massachusetts Institute of Technology, 2015.
- 23) D. Helferich John, A Systems Approach to food Accident Analysis, PhD thesis, 2011.
- 24) M. B. Spencer, Engineering Financial Safety: A System-theoretic Case Study from the Financial Crisis, PhD thesis, 2012.
- 25) M. Ouyang, L. Hong, M. Yu, Q. Fei, STAMP-based analysis on the railway accident and accident spreading: Taking the China–Jiaoji railway accident for example, Safety Science, Vol. 48, pp. 544–555, 2010.
- 26) A. Dong, Application of CAST and STPA to Railroad Safety In China, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- 27) T. Li, Systems Theoretic Accident Model and Process Application: Quality Control in Medical Device Manufacturing, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2013.
- 28) M. O’Neil, Application of CAST to Hospital Adverse Events, Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- 29) N. Leveson, A. Samost, S. Dekker, S. Finkelstein and J. Raman, “Systems Approach to Analyzing and Preventing Hospital Adverse Events”, J. Patient Saf., 2006. DOI: 10.1097/PTS.0000000000000263.
- 30) M. Rodriguez and I. Diaz, “System Theory Based Hazard Analysis Applied to the Process Industry”, Int. J. Reliab. Saf., Vol. 10, pp. 72-86, 2016.
- 31) Y. Kwon, System Theoretic Safety Analysis of the Sewol-

- Ho Ferry Accident in South Korea, Degree of Master of Science, MIT, 2016.
- 32) X. Meng, G. Chen, J. Shi, G. Zhu, and Y. Zhu, "STAMP-based Analysis of Deepwater Well Control Safety", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 55, pp. 41-52, 2018.
 - 33) S. F. Budde, Modeling Blowouts during Drilling Using STAMP and STPA, Degree of Master of Science, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
 - 34) A. Yousefi et al., "Systemic Accident Analysis Models: A Comparison Study between AcciMap, FRAM, STAM", *Process Safety Progress*, Vol. 38, Issue 2, 2018.
 - 35) A. Hulme, N. A. Stanton, G. H. Walker, P. Waterson and P. M. Salmon, "What do Applications of Systems Thinking Accident Analysis Methods Tell us about Accident Causation? A Systematic Review of Applications between 1990 and 2018", *Safety Science*, Vol. 117, pp. 164-183, 2019.
 - 36) A. P. Goncalves Filho, G. T. Jun and P. Waterson, "Four Studies, Two Methods, One Accident – An Examination of the Reliability and Validity of Accimap and STAMP for Accident Analysis", *Safety Science*, Vol. 113, pp. 310-317, 2019.
 - 37) J. Lim, J. Choi, T. Kang, B. Kim and D. Ham, "HFACS-K: A Method for Analyzing Human Error-Related Accidents in Manufacturing Systems: Development and Case Study", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 35, No. 4, pp. 64-73, 2020.
 - 38) J. Rasmussen, "Risk Management in a Dynamic Society: A Modelling Problem", *Safety Science*, Vol. 27, No. 2-3, pp. 183-213, 1997.
 - 39) K. Brandford, N. Naikar and A. Hopkins, "Learning from High Reliability Organizations. Chapter: Guidelines for AcciMap Analysis", CCH, pp. 193-212, 2009.
 - 40) N. Leveson, "A New Accident Model for Engineering Safer Systems", *Safety Science*, Vol. 42, No. 4, pp. 237-270, 2004.
 - 41) N. Leveson, *CAST HANDBOOK: How to Learn More from Incidents and Accidents*, 2019.
 - 42) D. Seo and O. Han, Y. Choi, A Study on the Systematic Cause Analysis of Fire and Explosion Accidents in Chemical Plants, OSHRI, 2020.
 - 43) D. Seo, O. Han, Y. Choi and J. Park. A System Theoretical Analysis Study on the Structure and Accidents of Subcontractors in Chemical Plants, OSHRI, 2021.
 - 44) S. A. Shappell and D. A. Wiegmann, *The Human Factors Analysis and Classification System-HFACS*, Technical Report, pp. 2-8, 2000.
 - 45) J. K. Choi and B. H. Kwon, "The Introduction and Operation of HFACS(The Human Factors Analysis and Classification System)", *The KJAsEM*, Vol.25, No. 2, pp. 37-42, 2015.