



AcciMap과 정비보수절차를 이용한 화학공장 협력업체 화학사고 분석

†서동현 · 최이락 · 이한희 · 김천동

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

(2024년 7월 22일 접수, 2024년 11월28일 수정, 2024년 12월 16일 채택)

Analysis of Chemical Accidents Involving Subcontractors in Chemical Plants Using AcciMap and Maintenance and Repair Procedures

†Dong-Hyun Seo · Yi-Rac Choi · Han Hee Lee · Chun-Dong Kim

Occupational Safety & Health Research Institute, Ulsan 44427, Korea

(Received July 22, 2024; Revised November 28, 2024; Accepted December 16, 2024)

요약

화학공장의 협력업체 사고는 기술적, 관리적 문제점 외에도 원청과 협력업체 간의 관계에서 발생하는 문제점과 같은 사회구조적인 문제점이 원인으로 작용할 수 있다. 이에 본 연구에서는 화학공장에서 협력업체가 정비보수작업 중 발생한 화학사고의 원인을 사회기술시스템의 통합적 측면에서 분석하고 사고원인요소 간의 연결 관계를 파악하고자 하였다. 최근 5년간 국내의 공정안전관리 대상 사업장에서 협력업체가 정비보수작업을 수행하던 중 발생한 화학사고 21건을 분석 대상으로 선정하였다. AcciMap을 이용하여 계층별 사고원인요소를 파악하였고, 업무처리절차를 이용한 분석을 통해 각 업무단계에서의 사고원인요소를 분석하였다. 분석 결과 화학공장 협력업체 사고는 단순히 관리적, 기술적, 인적인 문제뿐만 아니라 간헐적으로 수행하는 정비보수작업이라는 특성과 원청과 협력업체라는 관계에서 발생하는 구조적인 문제점이 복합적으로 작용한 결과인 것으로 나타났다. 따라서, 협력업체의 사고를 예방하기 위해서는 사회적인 측면과 기술적인 측면을 모두 고려하여 사고원인을 분석하고 예방대책을 마련할 필요가 있다.

Abstract - Accidents involving subcontractors at chemical plants can be caused by not only technical and managerial issues but also socio-structural problems, such as those arising from the relationship between the company and the subcontractor(s). Therefore, this study aims to analyze the causes of chemical accidents that occurred during maintenance and repair work by subcontractors at chemical plants from an holistic socio-technical systems perspective and to identify the relationships between accident causal factors. Twenty-one accidents that occurred at domestic process safety management companies during maintenance and repair work over the past five years were analyzed. AcciMap was utilized to identify causal factors at each hierarchical level, and an procedure-based analysis was conducted to examine causal factors in each work stage. As a result, it was found that chemical plant subcontractor accidents were the result of complex interactions of not only management, technical, and human factors, but also structural problems that occurred due to the characteristics of maintenance and repair work that is performed intermittently and the relationship between the company and subcontractors. Therefore, in order to prevent subcontractor accidents, it is necessary to analyze accident causes and establish countermeasures considering both social and technical aspects.

Key words : accident analysis, acciMap, maintenance, subcontractor, chemical accident

†Corresponding author: seodh93@kosha.or.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

한국에서는 공정안전보고서 제출 대상 설비로부터 위험물질 누출, 화재 및 폭발 등으로 인하여 사업장 내의 근로자에게 즉시 피해를 주거나 사업장 인근 지역에 피해를 줄 수 있는 사고 중 산업안전보건법에 해당하는 사고를 중대산업사고로 구분하고 있다[1]. 최근 17년(2005년~2021년) 동안 중대산업사고로 인한 사망자 83명 중 36명이 정비보수작업 중에 발생한 것으로 나타났고, 이 중에서 협력업체 소속 근로자가 78%(28명)를 차지하는 것으로 보고되었다[2]. 사고 건수를 기준으로 보면 130건의 중대산업사고가 발생하였고, 이 중 44건은 정비보수작업, 58건은 정상운전 중에 발생한 것으로 나타났다[2].

사업장 자체적으로 정비보수작업을 하는 경우에는 작업자들이 공정 및 설비에 대한 안전보건정보를 가지고 작업에 임할 수 있지만, 협력업체는 원청의 지원이 없으면 정비 대상 기계나 설비의 위험정보와 작업 전에 필요한 안전조치 등을 잘 모를 수밖에 없다[3]. 특히, 사외 협력업체는 원청이 기계나 설비, 취급 물질의 위험정보를 제공하지 않거나 작업 전에 필요한 안전조치를 제대로 취하지 않으면 위험한 상황에 노출되기 쉽다. 또한, 화학공장의 정비보수작업 주기는 짧게는 수개월에서 길게는 1~5년의 주기로 수행되기 때문에[4] 협력업체 작업자에게는 더 익숙하지 않을 수 있으며, 계약기간 내에 정비보수를 마무리해야 하는 상황은 협력업체를 압박할 수도 있다. 이처럼 화학공장의 정비보수작업에서는 기술적, 관리적인 문제점 외에도 원청과 협력업체 간의 관계와 같은 사회구조적인 문제점이 사고의 원인으로 작용할 수 있다.

따라서 화학공장 협력업체의 정비보수작업 중에 발생한 사고는 원청 사업장과 협력업체를 하나의 시스템 범위 안에 포함하여 원인을 분석할 필요가 있다. 즉, “사회와 기술을 서로 연결된 하나의 통합시스템으로 보는 사회기술시스템”[5]이라는 관점에서 문제점을 찾고 해결 방안을 모색할 필요가 있다. 그러나 도미노 모델이나 스위스 치즈 모델을 이용하는 선형적 또는 역학적인 분석방법은 주로 사업장 내부의 문제를 다루기 때문에 사회 구조적인 문제점을 도출하기 어렵다. 이러한 기존 사고 모델의 한계 때문에 AcciMap (Accident Map)이나 STAMP(System-Theoretic Accident Model and Processes)와 같이 여러 사회기술시스템 수준에 걸쳐 요인들 사이의 관계를 모델링하는 사고분석모델이 등장했다[6][7].

AcciMap은 사회기술시스템에 기반을 둔 사고분석 방법으로 사고의 원인을 계층으로 구분하여 나타내고, 사고원인요소 간의 연결 관계나 상호작용을 파악

할 수 있다[6]. 이러한 사회기술시스템에 바탕을 둔 시스템적인 방법으로 사고를 분석하면 보다 체계적으로 사회와 기술의 통합적 측면에서 문제점을 찾을 수 있다[7].

따라서 본 연구에서는 화학공장에서 협력업체의 작업자가 정비보수작업을 수행하던 중 발생한 화학사고를 AcciMap을 이용하여 전체 시스템적 관점에서 분석하고, 정비보수 업무처리절차를 이용하여 시간의 흐름에 따른 사고원인요소와 그 상호 연결 관계를 분석하고자 하였다. 이를 통해 사회기술시스템 관점에서 화학공장 협력업체의 사고 원인과 그 해결 방안을 모색하고자 하였다.

II. 분석 대상 및 방법

2.1. 분석 대상

안전보건공단에서는 공정안전보고서 제출 대상 사업장에서 폭발, 화재, 화학물질 누출 사고 등 화학사고가 발생했을 때 사고를 조사하고 재해조사의견서를 작성하고 있다[8]. 본 연구에서는 최근 5년간(2017년 7월 ~ 2022년 12월) 국내의 공정안전관리(PSM, Process Safety Management) 대상 사업장에서 협력업체가 정비보수작업을 수행하던 중 발생한 화학사고 중에서 Table 1과 같이 21건의 사고를 선정하여 분석을 수행하였다. 협력업체 소속 직원이 포함되지 않고 원청 소속 직원만 부상 또는 사망한 사고는 분석 대상에서 제외하였다.

분석 대상 사고를 발생형태별로 구분하면 화재·폭발사고가 14건, 화학물질의 누출에 의한 접촉 또는 중독사고가 7건이었다.

2.2. 분석 방법

사고분석은 AcciMap을 이용한 방법과 정비보수업무 처리절차를 이용한 방법을 사용하였다. AcciMap은 사고원인요소들 간의 상호작용과 연결 관계를 파악하기 용이하지만[6], 각각의 사고원인요소들이 시간의 흐름에 따라 어떻게 사고 발생에 기여했는지를 파악하기는 어렵다. 이 때문에 AcciMap으로는 계층간에 사고원인요소가 어떻게 상호작용하고 연결되어 있는지를 분석하였고, 정비보수업무 처리절차를 이용하여 업무의 흐름에 따라 각 단계에서 어떠한 사고 기여 요인이 있었는지와 그 연결 관계를 분석하였다.

2.2.1. AcciMap 분석

AcciMap은 “Jens Rasmussen”이 1997년에 발표한 사고 분석 방법으로 복잡한 사회-기술 시스템이 개인과 조직 및 관계자의 계층적 구조로 구성되어 있다고

Table 1. Accident cases for analysis

No.	Year	Company Classification	Work	Accident type
1	201x	Subcontractor	Welding on pipes	Explosion
2	201x	Subcontractor	Attaching the cover after cleaning the heat exchanger	Leak & inhalation
3	201x	Subcontractor	Removing parts(strainer)	Leak & contact
4	201x	Subcontractor	Insulation work for heat exchanger	Fire
5	201x	Subcontractor	Disassembling separator	Fire & explosion
6	202x	Subcontractor	Replacing pipes	Poisoning
7	202x	Subcontractor	Replacing valves	Leak & contact
8	201x	Subcontractor	Welding on tank	Explosion
9	202x	Subcontractor	Welding on reactor pipes	Explosion
10	202x	Subcontractor	Cutting tank pipes	Explosion & fire
11	202x	Subcontractor	Leakage test after valve replacement	Leak & contact
12	202x	Sub-subcontractor	Cutting pipe flange fastening bolts	Fire
13	202x	Subcontractor	Dismantling pipe insulation	Leak & contact
14	202x	Subcontractor	Removing substances (clay) inside the container (filter)	Fire
15	202x	Subcontractor	Replacing the wire rope for lifting the agitator	Explosion
16	202x	Subcontractor	Welding for tank ventilation pipe replacement	Explosion & fire
17	202x	Subcontractor	Tightness test of heat exchanger	Explosion
18	202x	Subcontractor	Replacing valves and short pipes	Leak & contact
19	202x	Company, In-house subcontractor, External subcontractor	Replacing storage tank internal parts (form seal)	Fire
20	202x	Subcontractor	Valve inspection	Explosion & fire
21	202x	Subcontractor	Check for shutoff valve leaks	Explosion & fire

보고 있다[6][9]. AcciMap의 모델에서 제시하고 있는 계층 구조는 Fig. 1과 같이 정부(Government), 규제자/협회(Regulators, Associations), 회사(Company), 관리자(Management), 직원(Staff), 작업(Work)으로 이루어져 있다[6][10]. 이 모델에서는 안전을 각 계층 또는 수준 간의 상호작용으로부터 나타나는 속성으로 취급하고 있다[9][10]. 즉 사고가 발생하는 현장뿐만 아니라 전체 시스템 간에 어떠한 상호작용이 있었는지의 문제를 살펴봐야 한다는 것이다[6][11][13].

AcciMap은 복잡한 사회기술적 시스템의 모든 부분에 있는 요인들이 사고 발생에 어떻게 영향을 미쳤는지 나타내는 데 유용하고, 요인들의 연관성 도표를 작성하여 요인들이 어떻게 상호작용하는지를 나타낼 수 있다[12][14]. 이러한 방식으로 인과적 요인과 이들 간의 상호관계를 확인함으로써 시스템의 안전성을 개선하고 향후 유사한 사고 발생을 방지하기 위해 해결해야 할 문제 영역을 식별할 수 있다[9][10][14]. 또 한 전체 시스템 구조에서 사건의 전과를 시각화할 수

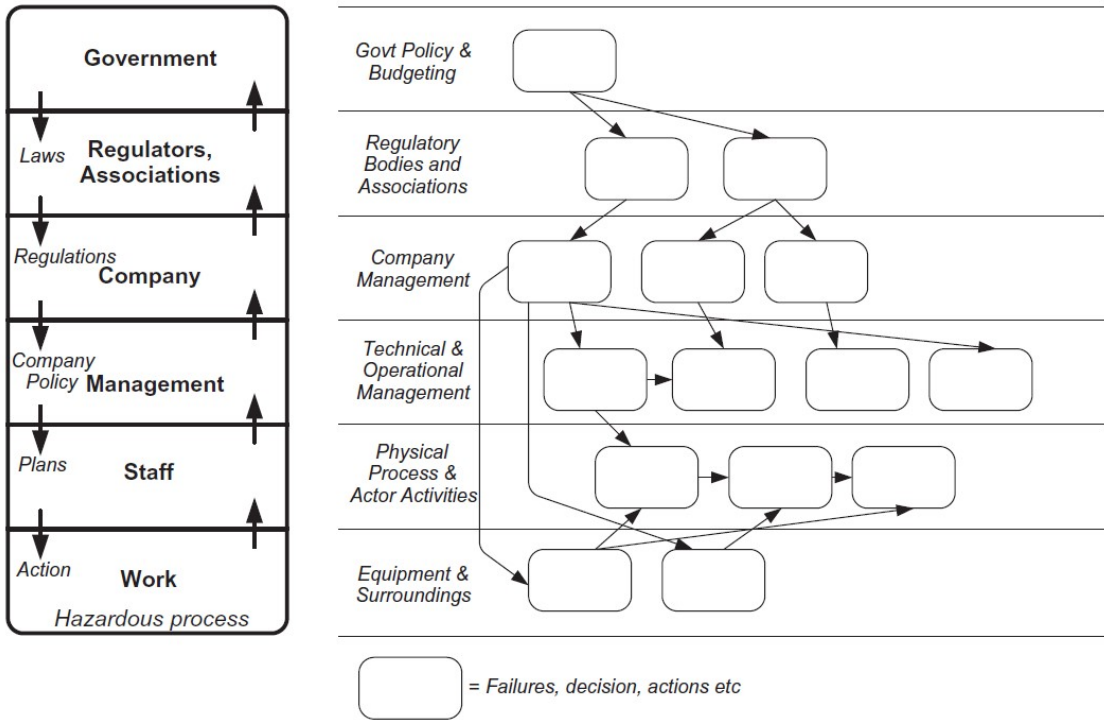


Fig. 1. Rasmussen's risk management framework and the associated AcciMap technique[6][16].

있으며 이는 상위 수준에서 안전에 대한 개입을 쉽게 할 수 있다[6][15].

AcciMap 분석을 위한 계층은 Fig. 1과 같이 6단계로 구분하였고, 회사의 경영 및 기술·운영 관리 부분은 원청과 협력업체로 영역을 구분하였다. 재해조사의견서 21건에 있는 내용을 검토하여 사고원인요소를 추출하고, 이를 6개의 계층으로 분류한 후에 유사한 사고원인요소는 합치거나 범주화하였다. 그리고 사고원인요소 간의 연결 관계를 파악하면서 보고서 내용을 바탕으로 추정이 가능한 사고원인요소를 추가하였다. 마지막으로 각각의 사고원인요소 간의 연결 관계를 나타낸 후 AcciMap을 완성하였다.

재해조사의견서는 사업장 내부의 문제점을 중심으로 작성되기 때문에 사업장 외부의 문제점은 실제로 확인할 수 있거나 재해조사의견서 내용을 통해 추정이 가능한 내용만을 기술하였다.

여러 재해조사의견서에서 사고의 원인 중 하나로 작업계획서, 위험성평가, 작업표준, 작업감독 등과 관련된 문제점을 반복적으로 언급하고 있었지만, 이 사항들이 원청 또는 협력업체 중 어느 곳에 해당하는지 명확하게 구분되어 있지 않은 경우가 있었다. 이 경우에는 연구자가 재해조사의견서 내용을 근거로 판단

하여 작성하였고, 구분이 모호한 항목은 원청과 협력업체 모두에 기술하였다.

추가로 AcciMap 작성 및 분석 과정에서 유사한 사고원인요소의 빈도수와 비율을 산출해 보고자 하였으나, 사고 21건의 조사자가 모두 다르고 사고 발생형태 및 유형도 차이가 있었기 때문에 일관적인 기준을 적용하여 사고원인요소의 빈도와 비율을 도출할 수 없었다. 또한, 재해조사의견서 외의 내용을 추가로 조사하기 어려웠기 때문에 사고원인요소의 출현 빈도와 비율은 산정하지 않았다.

2.2.2. 정비보수업무 처리 절차 분석

분석 대상 업무 범위는 정비보수계획을 수립하는 단계부터 정비보수작업을 수행하는 단계까지로 설정하였다. 정비보수업무 처리절차는 안전보건기술지침 [17]의 내용과 사업장 방문 조사 결과를 종합하여 작성하였다. 정비보수업무는 Table 2와 같이 계획수립, 입찰, 협력업체 평가, 계약, 작업계획서 작성, 위험성평가 및 작업절차서 작성, 작업 전 안전조치, 공정 및 물질안전보건정보 제공, 안전교육, 작업허가, 작업 전 안전회의, 정비보수작업 수행의 순서로 진행되는 것으로 나타났다.

사업장에 따라 일부 업무는 수행하지 않는 경우가 있었지만, 사고분석에 필요하다고 판단되는 업무단계는 포함하였다. 그리고 사업장별로 업무 처리 순서나 업무 수행 부서가 다른 경우도 있었는데, 이 부분은 연구자의 기준으로 작성하였다. 예를 들어, 공정 및 물질안전보건정보는 입찰 설명회에서 제공하기도 하였고, 제공 절차가 없는 곳도 있었다. 작업허가서는 정비부서에서 작성하는 경우와 협력업체에서 작성하는 경우가 있었다. 도급작업 허가와 같은 법적 의무사항은 해당되지 않는 사업장이 많았지만, 업무단계에 포함하였다. 위험성평가, 안전교육, 법적 절차 이행, 공정 및 물질안전보건정보 제공, 안전교육 등과 같이 수행 의무자가 산업안전보건법 또는 관련 규정에 명시된 경우는 해당 규정에 따라 작성하였다.

정비보수업무 처리 절차별 사고원인요소는 안전

보건공단의 재해조사의견서 내용을 분석하여 원청과 협력업체로 구분하여 세부 사항을 작성하였다. 재해조사의견서에 나타난 사고원인요소가 원청 또는 협력업체 중 어느 업체에 해당하는지 구분하기 모호한 것은 양쪽 모두에 기술하였다.

III. 분석결과

분석 대상 사고의 정비보수작업 형태는 사내 협력업체가 수행하는 경우, 사외 협력업체가 수행하는 경우, 사내 및 사외 협력업체가 동시에 수행하는 경우 등 몇 가지 사례가 있었다. 그러나 사고분석 결과에는 이와 같은 작업 형태는 고려하지 않고 원청과 협력업체로 구분하여 나타내었다.

Table 2. An example of maintenance work procedures at a chemical plant

No.	Work stage		Performers
1	Establishment of maintenance plan		Company
2	Pre-bid meeting		Company → Subcontractor
3	Bidding		Subcontractor → Company
4	Evaluation of participating companies in the bid		Company → Subcontractor
5	Signing of contract for maintenance		Company ↔ Subcontractor
6	Carrying out legal proceedings (Contract approval of hazardous and dangerous work, etc.)		Company
7	Pre-survey and work plan creation		Subcontractor
8	Risk assessment		Company & Subcontractor
9	Establishment of work standards (procedures)		(Company) & Subcontractor
10	Implement of safety precautions		Company & Subcontractor
11	Providing process and material safety and health information		Company → Subcontractor
12	Education of safety and health	Implementation of safety and health education for workers	Subcontractor
		Confirmation of safety and health education for workers	Company → Subcontractor
		Safety alarm system operation and evacuation procedure training	Company → Subcontractor
13	Completion of PTW(permit to work) application form		Company or Subcontractor
14	Review and Approval of of PTW (Ensuring all safety considerations addressed)		Company & Subcontractor
15	Issuance of PTW		Company → Subcontractor
16	Pre-Job Briefing (Tool Box Meeting)		Company & Subcontractor
17	Work Execution and supervision		Company & Subcontractor

3.1. AcciMap 분석

Fig. 2에 분석 대상 21건의 사고에 대한 AcciMap 분석 결과를 나타내었다.

원청의 경영관리적 문제점은 정비보수계획 수립 시 충분한 작업시간 미확보, 적격 수급업체 선정을 위한 절차 미이행, 도급 승인 절차 누락, 설비 정비보수 주기 미준수 등이 있었다. 기술 및 운영 관리 관련 문제점은 작업계획서, 작업표준, 위험성평가, 안전보건교육, 안전보건정보 제공, 정비보수작업 감독, 설비관리 등과 관련된 내용이었다. 물리적인 업무 수행 과정의 문제점은 작업 전 안전조치, 작업허가서 승인 전 안전조치 확인, 작업허가서 승인 및 발급 관련 내용이 있었다. 원청 담당자 또는 작업자의 문제점은 작업표준 미준수, 업무 인수인계 미흡 등이 있었다.

협력업체의 경영관리적 문제점은 도출되지 않았으며, 기술 및 운영 관리 관련 문제점은 작업계획서, 작업표준, 위험성평가, 안전보건교육, 안전보건정보 제공, 정비보수작업 감독 등과 관련된 내용이었다. 물리적인 업무 수행 과정에서는 작업 전 안전조치, 작업 전 안전회의 등과 관련된 문제점이 있었다. 협력업체 작업자의 문제점은 작업표준 미준수, 부적절한 작업 방법으로 작업, 비방폭형 기기 및 공구 사용, 개인보호구 미착용 또는 착용 미흡, 작업 결과 부적정 등이 있었다.

기계·설비적 문제점은 기계설비의 균열이나 배관의 기울어짐 등이 있었고, 탱크나 배관 내부의 위험물질이 제대로 제거되지 않거나 환기가 미흡하여 설비 내부에 유해 위험물질이 남아있는 문제점이 있었다. 작업환경의 문제점으로는 작업공간 조도 미흡, 작업공간 협소 등이 있었다.

AcciMap 분석 결과에서 점선의 상자에 붉은색 글씨로 작성한 사고원인요소는 재해조사의견서에는 언급되어 있지 않지만 사고분석 과정에서 찾거나 추정된 것으로 이와 같은 내용의 관련 법이나 제도 개선을 통해 사고를 예방할 수 있을 것으로 판단되었다. 세부 내용은 다음과 같다.

- 1) 산업안전보건법에서 원청은 협력업체에게 작업 시작 전까지 안전보건정보를 제공하게 되어 있어 작업 직전에 제공받으면 위험성평가, 작업표준 작성 시 반영하기 어려움
- 2) 협력업체가 원청에게 작업 전 안전조치 내역에 대한 확인을 요청할 수 있는 법적 근거가 없음
- 3) 위험성평가 고시에서 도급 사업주와 수급 사업주가 각각 위험성평가를 실시하게 되어 있으나 원청이 협력업체를 지원하도록 하는 사항은 없음
- 4) 협력업체가 작업 전 원청이 수행한 안전조치 내

역을 확인할 수 있는 절차나 권한이 없음

- 5) 협력업체는 원청의 자료 제공 또는 지원이 없으면 단독으로 작업표준을 작성하기 어려움
- 6) 협력업체는 원청의 지원이 없으면 적절한 안전교육을 실시하기 어려움
- 7) 협력업체는 원청의 지원이 없으면 단독으로 위험성평가를 수행하기 어려움

AcciMap 분석 결과에서 붉은색 상자에 파란색 글자로 작성한 사고원인요소는 그 발생 이유나 원인을 재해조사의견서만으로는 파악하기 어려웠다. 이들에 대해서는 추가 조사 또는 분석이 필요할 것으로 판단되었다. 세부 내용은 다음과 같다.

- 1) 원청이 설비 변경관리를 누락한 이유
- 2) 원청 설비의 제작 및 설치가 미흡했던 이유
- 3) 정비보수를 위한 충분한 작업시간을 확보하지 못한 이유
- 4) 작업표준을 작성하지 않거나 미흡하게 작성했던 이유
- 5) 원청이 설비의 정비 및 관리를 미흡하게 했던 이유
- 6) 원청이 작업계획서를 작성하지 않거나 제대로 공유하지 않았던 이유
- 7) 원청이 적격 수급업체 선정 절차를 이행하지 않은 이유
- 8) 원청이 도급 승인 절차를 누락한 이유
- 9) 원청이 설비에 대한 정비보수 주기를 준수하지 않은 이유
- 10) 원청과 협력업체의 의사소통이 미흡했던 이유
- 11) 협력업체에게 안전보건정보를 제공하지 않거나 미흡하게 제공했던 이유
- 12) 협력업체에 대한 위험성평가 지원 및 검토가 미흡하거나 유해·위험요인 파악 및 검토가 미흡했던 이유
- 13) 협력업체에 대한 교육지원, 경보체계 운영, 대피방법 훈련 등이 미흡했던 이유
- 14) 협력업체가 작업계획서를 작성하지 않거나 작업계획서를 작성한 후 제대로 공유하지 않은 이유
- 15) 협력업체가 작업표준을 작성하지 않거나 미흡하게 작성한 이유
- 16) 협력업체가 위험성평가를 실시하지 않거나 유해·위험요인 파악 및 검토를 제대로 수행하지 않은 이유
- 17) 협력업체의 유해·위험 요인에 대한 안전대책 마련 및 시행이 미흡했던 이유
- 18) 협력업체가 위험성평가 결과에 따른 안전조치 확인을 하지 않은 이유

3.2 정비보수업무 절차 분석

Table 2의 화학공장의 정비보수절차를 기준으로 분석 대상 21건의 사고에 대해 사고원인요소를 원청과 협력업체로 구분하여 Table 3에 정리하였다. 지면 관계상 세부 내용은 생략하였다. 정비보수업무 수행 단계별 주요 사고원인요소는 다음과 같다.

정비보수계획 수립, 협력업체 평가와 관련하여 정비보수계획 수립 미흡 및 적격 수급업체 선정 절차 미이행이 사고원인요소로 제시된 사례가 있었다. 입찰과정이나 정비보수 계약과 관련해서는 사고원인요소가 보고되지는 않았다.

사전 조사 및 작업계획서와 관련하여 원청에서 작업계획서를 작성하지 않거나 작업계획서를 공유하지 않는 경우가 있었고, 협력업체가 작성한 작업계획서를 제대로 검토하지 않은 것이 사고 발생에 영향을 미친 사례도 있었다. 협력업체가 작업계획서를 작성하지 않거나 작성하였더라도 미흡한 부분이 있었고, 작업계획서를 근로자들에게 공유하지 않은 사례가 있었다.

위험성평가와 관련하여 원청에서는 협력업체 위험성평가 지원 및 검토 미흡, 유해·위험요인 파악 및 검토 미흡, 유해·위험요인에 대한 안전대책 마련 미흡 등의 사례가 있었다. 협력업체에서는 위험성평가를 실시하지 않거나 유해·위험요인 파악 및 검토가 미흡한 경우가 있었고, 유해·위험요인에 대한 안전대책 마련이 미흡하거나 위험성평가 결과에 따른 안전조치를 하지 않고 작업을 수행하는 경우가 있었던 것으로 나타났다. 이와 같이 위험성평가와 관련된 많은 내용이 정비보수작업을 직접 수행해야 하는 협력업체에 해당하는 것으로 나타났다.

작업표준(작업절차서)과 관련된 문제점으로 원청에서는 작업표준을 작성하지 않거나 미흡하게 작성한 경우가 있는 것으로 나타났고, 협력업체에서도 작업표준(작업절차서)을 작성하지 않거나 작업표준 작성성이 미흡한 경우가 있었다.

작업 전 안전조치 및 작업허가서 승인과 관련된 문제점 대부분은 원청에 해당하는 것으로 나타났고, 이와 관련된 사고원인요소로는 유해·위험물질 제거 또는 제거 미흡, 유해·위험물질 취급 배관 차단 조치 미실시, 비계 또는 작업 발판 미흡, 기밀테스트 관련 안전조치 미흡, 꼬리표(LOTO) 미부착, 작업허가서 미발행 또는 발급 절차 미준수 등이 있는 것으로 나타났다.

정비보수작업 감독과 관련하여 원청이 협력업체 작업에 대한 관리감독을 제대로 이행하지 않거나 관리감독자의 업무 수행이 미흡한 경우가 있는 것으로 나타났다. 실제 작업 수행 중에는 작업표준 미준수, 작업에 부적절한 공구 및 보호구 사용 등의 사고원인요소가 있는 것으로 나타났다.

기계설비 및 작업환경의 문제점으로 설비 제작 및 설치 미흡, 설비 변경관리 누락, 설비의 정비보수 주기 미준수, 설비 정비 및 관리 미흡, 설비 자체의 결함 등이 있는 것으로 나타났는데 이러한 문제점 대부분은 정비보수작업을 수행하기 이전에 발생한 것으로 볼 수 있었다.

추가로 작업 중 의사소통과 관련하여 원청과 협력업체 간의 의사소통 미흡과 업무 인수인계 미흡이 사고 발생에 영향을 미친 요인 중 하나인 것으로 나타났다. 작업환경과 관련된 문제점으로는 협소한 작업공간, 작업장의 낮은 조도 등이 있었다.

Table 3. Identification of accident causal factors through chemical plant maintenance procedure analysis

No.	Work stage	Causal factors	
		Company	Subcontractor
1	Establishment of maintenance plan	•Inadequate maintenance planning (short work period)	-
2	Pre-bid meeting	-	-
3	Bidding	-	-
4	Evaluation of participating companies in the bid	•Failure to follow the procedure for selecting qualified subcontractors	-
5	Signing of contract for maintenance	-	-

Table 3. continue

No.	Work stage	Causal factors	
		Company	Subcontractor
6	Carrying out legal proceedings	<ul style="list-style-type: none"> •Omission of the subcontracting approval procedure 	-
7	Pre-survey and work plan creation	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to prepare a work plan •Failure of the company to review the subcontractor's work plan •Inadequate sharing of the work plan 	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to prepare a work plan •Inadequate preparation of a work plan •Inadequate sharing of the work plan
8	Risk assessment	<ul style="list-style-type: none"> •Inadequate support and review of the subcontractor's risk assessment •Inadequate identification and review of hazardous and dangerous factors •Inadequate safety measures for hazardous and dangerous factors 	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to conduct a hazard assessment •Inadequate identification and review of hazardous and dangerous factors •Inadequate safety measures for hazardous and dangerous factors •Failure to verify safety measures based on the hazard assessment results
9	Establishment of work standards (procedures)	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to prepare a work standard (work procedure) •Inadequate preparation of a work standard (work procedure) 	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to prepare a work standard (work procedure) •Inadequate preparation of a work standard (work procedure)
10	Implement of safety precautions	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to remove hazardous and dangerous substances •Inadequate measures for the removal of hazardous and dangerous substances •Failure to block the handling pipes for hazardous and dangerous substances •Inadequate scaffolds or work platforms •Inadequate safety measures for leak tests •No fire extinguishers available •Failure to implement Lockout/Tagout (LOTO) 	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to implement pre-work safety measures •No fire extinguishers available •Failure to implement Lockout/Tagout (LOTO)
11	Providing process and material safety and health information	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to provide safety and health information to subcontractors •Inadequate provision of safety and health information to subcontractors 	-
12	Education of safety and health	<ul style="list-style-type: none"> •Inadequate support and verification of education results for subcontractors •Inadequate training on the operation of the alarm system and evacuation procedures 	<ul style="list-style-type: none"> •Inadequate safety and health education for workers •Failure to provide special safety and health education
13	Completion of PTW application form	-	-

Table 3. continue

No.	Work stage		Causal factors		
			Company	Subcontractor	
14	Review and Approval of of PTW (Ensuring all safety considerations addressed)		<ul style="list-style-type: none"> •Failure to measure gas concentration or flammable vapor concentration •Measuring gas concentration or flammable vapor concentration by an improper method •Failure to confirm the status of valve isolation and blind plate installation •Inadequate confirmation of the status of hazardous substance removal •Inadequate confirmation of the completion of LOTO •Inadequate confirmation of the wearing of protective equipment •Failure to confirm the adequacy of fire extinguisher placement •Failure to confirm the adequacy of the risk assessment 	-	
15	Issuance of PTW		<ul style="list-style-type: none"> •Failure to issue a work permit •Issuance of a work permit different from the actual work •Non-compliance with the procedure (method) for issuing work permits 		
16	Pre-Job Briefing (Tool Box Meeting)			<ul style="list-style-type: none"> •Inadequate worker awareness of job-related hazards due to pre-job briefing focused on work instructions 	
17	Work supervision		<ul style="list-style-type: none"> •Failure to supervise the work of subcontractors •Inadequate supervision of the work of subcontractors 	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to perform supervisor duties •Inadequate performance of supervisor duties 	
	Work Execution	Work procedure and method	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to comply with work standards (work procedures) •Asking subcontractor’s employees to do the company’s work 	<ul style="list-style-type: none"> •Failure to comply with work standards (work procedures) •Improper methods and results for maintenance and repair work •Use of non-explosion-proof equipment and tools •Change of planned work method •Non-wearing or inadequate wearing of personal protective equipment (PPE) 	
		Machine and facility, work environment	<ul style="list-style-type: none"> •Confined work space •Inadequate equipment manufacturing •Failure to manage equipment changes •Inadequate equipment maintenance and management 	<ul style="list-style-type: none"> •Inadequate lighting in the workplace •Inadequate equipment installation •Non-compliance with maintenance and repair cycles •Equipment defects and problems 	<ul style="list-style-type: none"> •Inadequate removal and ventilation of hazardous substances inside tanks
		Communication	<ul style="list-style-type: none"> •Inadequate communication between the company and subcontractors •Inadequate handover of work 	<ul style="list-style-type: none"> •Inadequate communication between the company and subcontractors 	

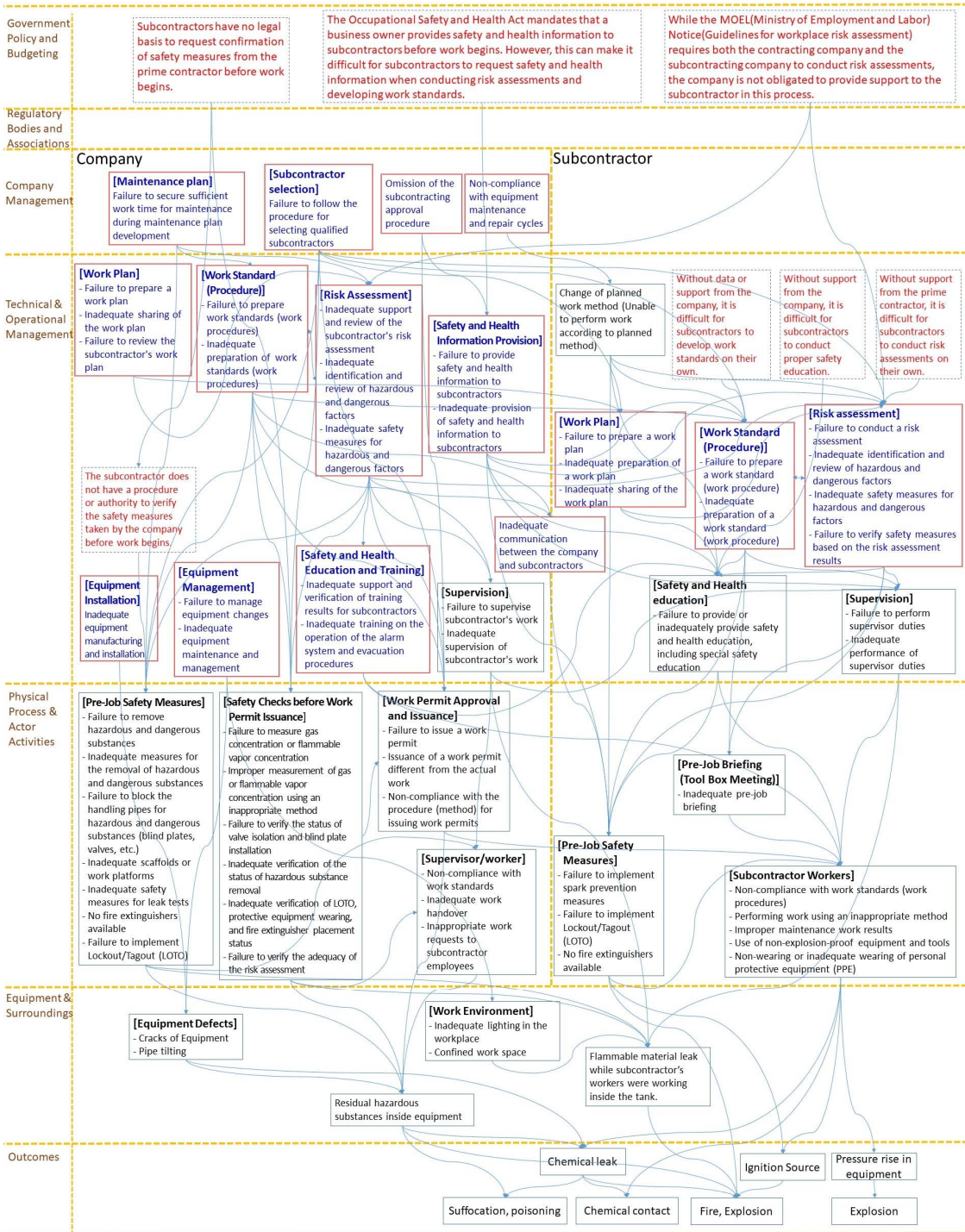


Fig. 2. AcciMap analysis results of chemical accidents during maintenance of chemical plants.

IV. 고 찰

AcciMap 분석은 정비보수업무 중 발생한 사고의 원인요소가 전체적으로 어떻게 연결되어 있는지 확인하기 쉬운 장점이 있었으나 업무의 흐름은 파악하기 쉽지 않았다. 작업절차분석은 정비보수업무 단계별로 각 단계에서 원청과 협력업체에 어떠한 문제점이 있었는지 확인하기 쉬운 장점이 있었으나 전체적인 측면에서 각 원인이 어떻게 연결되어 있는지 파악하기는 어려웠다. 따라서 두 분석 방법을 통해 상호 보완적인 결과를 얻을 수 있었다.

AcciMap 분석 결과에서 원청과 협력업체의 관계를 보면 원청의 설비에 대한 변경관리 누락, 설비의 제작 및 설치 미흡, 설비의 결합 등 원청에서 제대로 설비를 관리하지 않아 나타난 문제점이 협력업체의 사고 발생에 영향을 미친 것으로 나타났다. 또한, 원청에서 작성하는 작업계획서, 작업표준, 위험성평가, 안전보건교육, 작업감독 등의 업무가 협력업체에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

원청에서 수행해야 하는 작업 전 안전조치와 작업허가서 승인 및 발급과 관련된 사항은 사고에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 또한 원청 직원이 작업표준을 준수하지 않거나, 원청 직원 간의 업무 인수인계가 미흡한 경우에도 협력업체의 사고의 원인으로 작용할 수 있는 것으로 나타났다. 원청이 협력업체에게 제공하는 안전보건정보는 협력업체의 작업계획서, 작업표준, 위험성평가, 안전보건교육, 작업 전 안전조치 등과 관련이 있는 것으로 나타났다.

정비보수업무 단계별 분석 결과에서 정비보수 계획 작성, 적격 수급업체 선정을 위한 협력업체 평가, 작업 전 안전조치, 작업허가서 승인 전 안전조치 확인, 작업허가서 승인 및 발급 등과 공정 및 물질 관련 안전보건정보 제공 등은 원청의 문제에 가까운 것으로 분석되었다. 그리고 원청의 기계설비에 대한 정비 주기 미준수, 설비 변경관리 누락, 설비 정비 및 관리 미흡 등의 사항도 협력업체에서 발생한 사고의 원인요소 중 하나가 되었다. 이러한 사항들은 실제 정비보수작업 수행과는 관계가 적은 사항으로 관리적인 문제 이전의 경영적인 문제라고도 볼 수 있으며, 원청의 잘못된 결정이나 행위가 협력업체로 전가되어 협력업체 직원의 사고로 이어졌다고 볼 수 있다.

화학공장에서는 수개월 또는 수년마다 간헐적으로 수행하는 대규모 정비보수작업을 위해 추가로 인력을 고용하기 어렵기 때문에 많은 곳에서 협력업체를 통해 정비보수를 수행하고 있다[3][4]. 협력업체는 정해진 계약기간 내에 화학공장의 정비보수를 마무리하기 위해서 계약직과 일용직 근로자를 사용할 수

밖에 없다. 협력업체가 고용한 계약직과 일용직 근로자들은 지식과 경험이 부족한 경우가 많아 적절한 작업절차 및 방법(작업표준), 적절한 보호구 착용법, 적절한 공구가 무엇인지 모르고 작업하는 사례도 있었다. 이들은 근무기간이 짧아서 작업에 필요한 안전보건교육 이수, 위험성평가 참여, 작업절차서 숙지 후 작업 등이 어려울 수 있는 것으로 판단되었다.

여러 의견서에서 반복적으로 제시된 사고원인요소는 작업 전 설비 내부의 유해·위험물질 미제거 또는 제거 미흡, 작업표준 미작성 및 미준수, 위험성평가 미수행 및 안전조치 미흡, 맹판 미설치, 밸브 미차단, 가스농도 미측정, 작업자 교육 미흡, 부적절한 공구 사용, 보호구 미착용 등과 관련된 내용이었다. 그러나 이러한 사고원인요소 중 부적절한 공구 사용 및 보호구 미착용 관련 사항 등을 제외하고는 협력업체 단독으로 조치하기 어려운 사항들이 대부분이었다.

이처럼 협력업체가 정비보수작업을 수행하던 중 발생한 사고를 시스템 통합적인 측면에서 보면 사회구조적인 문제와 기술적, 관리적, 인적 문제가 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 볼 수 있다. 즉, 사고원인요소 그 자체가 하나가 사고원인으로 작용하기 보다는 여러 요인이 서로 연결되어 상호작용하고 있는 것으로 나타났다. 그중에서 원청과 협력업체의 관계를 고려하여 다음과 같은 개선 방안을 제안할 수 있다.

- 1) 원청은 정비보수 계획수립 시 협력업체에게 충분한 작업 시간을 확보해 줄 필요가 있다.
- 2) 원청은 계약 전 또는 작업계획서 수립 전에 협력업체에 안전보건정보를 제공하도록 할 필요가 있다.
- 3) 원청은 협력업체와 계약 전에 협력업체가 제출한 안전관리계획서를 평가할 필요가 있다.
- 4) 원청은 협력업체와 계약 단계에서 작업계획서를 제출받아 확인하고 검토한 후 보완하도록 요구할 필요가 있다.
- 5) 원청은 협력업체와 계약 시 작업표준을 작성하여 제공하거나 협력업체의 작업표준 작성을 지원할 필요가 있다.
- 6) 원청은 협력업체에 대한 교육, 위험성평가, 작업 전 안전회의, 의사소통과 관련된 절차 및 방법을 마련하여 협력업체를 지원할 필요가 있고, 협력업체는 이러한 사항들을 내실 있게 추진할 필요가 있다.
- 7) 원청은 정비보수작업 수행 전에 정해진 절차 및 방법에 따라 안전조치를 할 필요가 있고, 협력업체는 원청이 수행한 안전조치 내역과 그 적정성 여부를 작업 전 원청과 함께 확인할 필요가 있다.
- 8) 원청과 협력업체는 소속 직원에게 작업표준 준

수에 대한 철저히 교육하고 감독할 필요가 있다.

- 9) 협력업체가 계획된 작업 방법을 변경하는 경우 작업표준, 위험성평가, 작업허가를 재검토할 필요가 있다.

V. 결론

본 연구에서는 화학공장에서 협력업체의 정비보수작업 중 발생한 화학사고의 원인을 사회기술시스템의 통합적 측면에서 분석하고 사고원인요소 간의 연결 관계를 파악하고자 하였다. 이를 위해 AcciMap과 업무처리절차를 이용한 분석을 수행하였다. AcciMap 분석 결과는 원청의 문제가 어떻게 협력업체로 이어지고 상위 계층의 문제가 어떻게 하위 계층으로 이어지는지 보여주었고, 업무처리절차를 이용한 분석 결과는 업무단계별 문제점을 원청과 협력업체로 구분하여 보여주었다. 그리고 이를 바탕으로 원청과 협력업체가 수행해야 할 방안을 제안하였다.

화학공장에서 협력업체가 정비보수작업을 수행하던 중 발생한 사고는 단순히 관리적, 기술적, 인적인 문제뿐만 아니라 간헐적으로 수행하는 정비보수작업이라는 특성과 원청과 협력업체라는 관계에서 협력업체가 가진 구조적인 문제점 등이 복합적으로 작용하여 나타난 결과라고 볼 수 있었다. 이에 따라 화학공장에서 협력업체를 통해 정비보수작업을 수행하는 경우에 사고를 예방하기 위해서는 인적·기술적·관리적 측면 외에 원청의 협력업체를 고려한 정비보수 계획수립과 안전보건정보 제공, 협력업체가 작성한 안전관리계획서 및 작업계획서에 대한 검토와 확인, 작업표준·위험성평가·안전보건교육에 있어서 원청의 협력업체 지원과 협력업체의 실행, 원청과 협력업체의 의사소통, 협력업체의 작업방법 변경에 대한 원청의 확인 등 원청과 협력업체의 관계에서 나타날 수 있는 사회구조적 측면의 개선방안도 필요함을 도출하였다.

다만, 분석 대상 사고가 발생한 지 상당한 기간이 지났기 때문에 현장 방문 조사와 재해자 또는 재해 조사자에 대한 면담을 수행하지는 못하고 재해조사의 견서에 의존하여 분석을 수행한 것은 본 연구의 한계라고 할 수 있다.

사 사

본 연구는 2023년 산업안전보건연구원의 재원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Occupational Safety and Health Act, (2023)
- [2] Korea Occupational Safety and Health Agency, Major Accident Prevention Bureau, Accident prevention through analysis of major industrial accidents(unpublished), (2022)
- [3] Korea Occupational Safety and Health Agency, The goal for the number of accidental deaths during chemical plant maintenance work is zero, Monthly Safety and Health, 2019(7), 26-31, (2019)
- [4] Yoo, B. T., Oh, N. K., Kim D. J., and Lee, S. M., Examining the appropriateness of the safety valve installation target and operation test cycle and recommending an improvement plan, Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA, (2022)
- [5] Kim, S. J., and Son, J. Y., Urban issues and digital information technology in socio-technical system perspective: Focusing on disaster prevention(ISSN 979-11-962807-2-7), Seoul Digital Foundation, 11-12, (2017)
- [6] Rasmussen, J., "Risk Management in a Dynamic Society: A Modelling Problem", Safety Science 27 (2-3), 183-213, (doi:10.1016/S0925-7535(97) 00052-0), (1997)
- [7] Leveson, N. G., "A New Accident Model for Engineering Safer Systems", Safety Science, 42(4), 237-270, (2004)
- [8] Korea Occupational Safety and Health Agency, 2024 business plan implementation guidelines, (2024)
- [9] Seo, D. H., Han O. S., and Choi, Y. R., A Study on the Systematic Cause Analysis of Fire and Explosion Accidents in Chemical Plants, OSHRI, KOSHA, (2020)
- [10] Seo, D. H., Bae, G. W., 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), 1-9, (2021)
- [11] Seo, D. H., Lee, G. W., Han, O. S., Choi, Y. R., and Seo, D. W., Investigation on the Accidents Cases during Unusual Work, Utilizing Accident Cases at PSM Chemical Plants, OSHRI, KOSHA, (2019)
- [12] Seo, D. H., Choi, Y. R., Park, J. H., and Han, O. S., "A Study on System Based Accident Analysis: An Accident at In-house Subcontractor of a Manufacturing Company", Journal of the Korean Society

- of Safety*, 37(5), 42-55, (2022)
- [13] Grant E., Salmon, P. M., Stevens, N. J., Goode, N., and Read, G. J., “Back to the future: What do accident causation models tell us about accident prediction?”, *Safety Science*, 104, 99-109, (2018)
- [14] Branford, K., Naikar, N. and Hopkins, A., Learning from High Reliability Organisations. Chapter 10: Guidelines for AcciMap Analysis, CCH, 193-212, (2009)
- [15] Underwood, P., and Waterson, P., “A critical review of the STAMP, FRAM and AcciMap Systemic Accident Analysis Models”, *Advances in Human Aspects of Road and Rail Transportation*. CRC Press, 385-394, (2012)
- [16] Salmon P. M., Cornelissen, M., and Trotter, M. J., “Systems-based Accident Analysis Methods: A Comparison of Accimap, HFACS, and STAMP”, *Safety Science*, 50, 1158-1170, (2012)
- [17] Korea Occupational Safety and Health Agency, Technical guidelines for safety and health for chemical plant renovation work (KOSHA Guide, C-109-2017), (2017)