Journal of the KNST

2023; Vol.6, No.3; pp. 227-234

ISSN: 2635-4926 https://doi.org/10.31818/JKNST.2023.09.6.3.227

Check for updates

Received: 2023/07/24
Revised: 2023/08/08
Accepted: 2023/09/04
Published: 2023/09/30

*Corresponding Author:
Joon-Won Lee
Tel: +82-2-828-7013
E-mail: joonwonlee@ssu.ac.kr

Abstract

화학공장은 공정 간의 연관성이 높고 각종 기술이 집약된 장치산업이기 때문에 유사 사고를 방지하기 위해서는 사고 원인을 분석할 때 직접적인 원인을 찾아 제거하는 순차적인 접근방법과 기술, 문화, 조직, 사회 등과 관련된 통합적인 시스템적 관점의 접근 필요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 반응기에서 용접작업 중 발생한 폭발 사고사례를 시스템적 사고분석기법(STAMP)을 이용하여 사고의 일차적인 원인과 조직 및 운영상의 문제점을 분석해보고자 한다.

Since chemical plants are highly related to processes and are a device industry where various technologies are concentrated, there is a growing need for a sequential approach to finding and removing direct causes when analyzing the cause of accidents and an integrated systematic perspective related to technology, culture, organization, and society. In this study, we would like to analyze the primary cause of the accident and organizational and operational problems using STAMP (Systematic Accident Analysis Technique) for explosion accidents that occurred during welding work in the reactor.

Keywords

화학 공장(Chemical Plants),
중대산업사고(Series Industrial Accident),
시스템적 사고분석(Systematic Accident Analysis),
위험성평가(Risk Assessment),
사고 예방(Accident Prevention)

사고분석기법 STAMP를 이용한 반응기 폭발사고 원인 분석에 관한 연구

A Study on the Cause Analysis of Reactor Explosion Using STAMP, a Systematic Cause of Accident Analysis Technique

김상중[1], 이준원[2*], 김병직[2], 박교식[2], 박창용[1], 강충상[1]

[1]숭실대학교대학원 안전보건융합공학과 박사과정
[2]숭실대학교대학원 안전보건융합공학과 교수

Sang Jung Kim[1], Joon-Won Lee[2*], Byungjick Kim[2], Kyoshik Park[2], Chang-Yong Park[1], Chung Sang Kang[1]

[1]Ph.D. candidate, Dept. of Safety & Health Convergence Engineering, Soongsil University
[2]Professor, Dept. of Safety & Health Convergence Engineering, Soongsil University

1. 서론

화학공장에서의 중대산업사고를 예방하기 위해 우리나라 산업안전보건법에 공정안전관리제도(PSM)가 도입된 지도 27년이 경과되었다. PSM 제도의 조기 정착 및 체계화를 위한 정부의 노력과 관련 사업장의 재해예방활동 결과로 중대산업사고 발생 건수는 대상사업장 수가 증가한 것에 비해 Fig. 1과 같이 점차 감소하고 있지만, 사고로 인한 피해는 타 산업에 미치는 영향까지 포함하여 더 커지고 있다. 특히 물을 많이 사용하는 특성상 울산·여수·서산·인천·군산 등 바다에 인접하여 밀집한 대형 화학산업단지와 그 외 하천에 연계되어 있는 공장들도 사고 시 화학물질 누출에 의한 해양 및 하천 오염을 일으킬 가능성이 높다.

또한, 시스템적 사고분석 기법은 사고예방을 위한 위험성평가에 매우 유용하기 때문에 탄약과 같은 위험물을 지속적으로 관리하고 취급하는 군부대에서 활용한다면 인명피해 방지 및 군 시설 보호차원에서 효과가 클 것이다. 따라서 사고를 예방하기 위해서는 사고의 근본원인을 분석하여 대책을 수립·이행하는 것이 매우 중요하다. 더불어 인적요인과 설비적요인 외에 사회·문화·기술적 요인을 포함한 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하는 경우가 증가하고 있으며,

© 2023 Korea Society for Naval Science & Technology

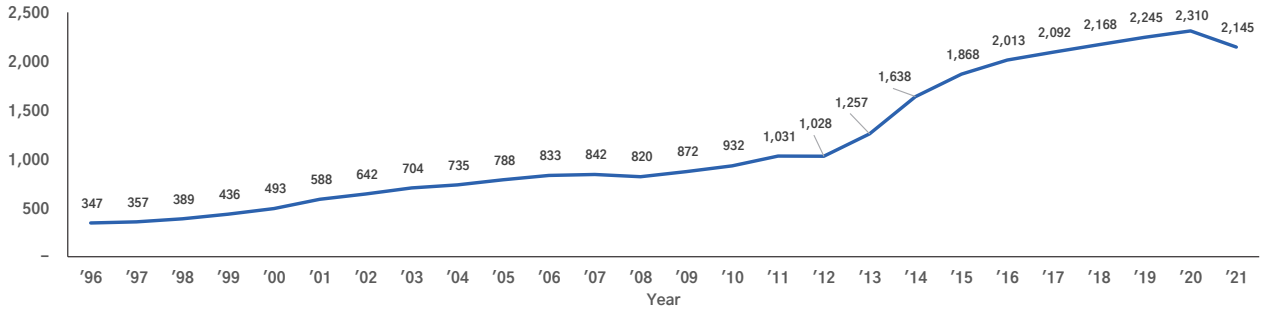
인간과 자동제어시스템 간의 복잡한 관계에서 발생하는 사고는 더욱 증가할 것으로 예상되므로 통합적인 시스템적 관점의 접근 필요성이 커지고 있다[1]. 이에 따라 국외 선진국에서는 시스템적 관점에서 통합적으로 사고를 분석하는 기법을 적용하고 있으나, 국내에서는 적용사례와 연구결과를 찾아보기 어려운 실정이나 최근 중대재해처벌법 도입으로 안전에 대한 관심도가 증가하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 시스템적 사고분석기법 중 최근 화학공장의 사고조사에 주로 사용되는 기법들의 특성을 파악하고, 매우 복잡한 화학공장 시스템에 적용하기 용이한 시스템적 사고분석 기법의 하나인 STAMP를 이용하여 화학공장의 반응기에서 용접작업 중 발생한 폭발 사고사례를 통해 사고의 일차적인 원인 및 조직·운영상의 문제점을 분석해 보고자 한다[2].

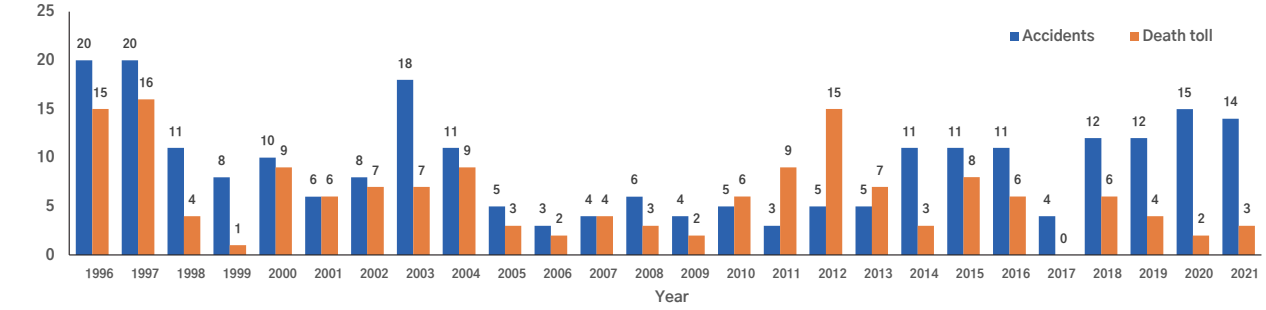
2. 연구 대상 및 방법

2.1 연구 대상

본 연구에서는 산업현장에서의 사고발생 시 적용하는 사고분석 기법들에 대한 관점의 변화를 Fig. 2와 같이 세대별로 구분하여 보고, 대표적인 특성들에 대해 알아보고자 한다.



(a) Number of workplaces subject to PSM by year



(b) The number of serious industrial accidents and the status of deaths

Fig. 1. Current status of PSM workplace and accident occurrence by year

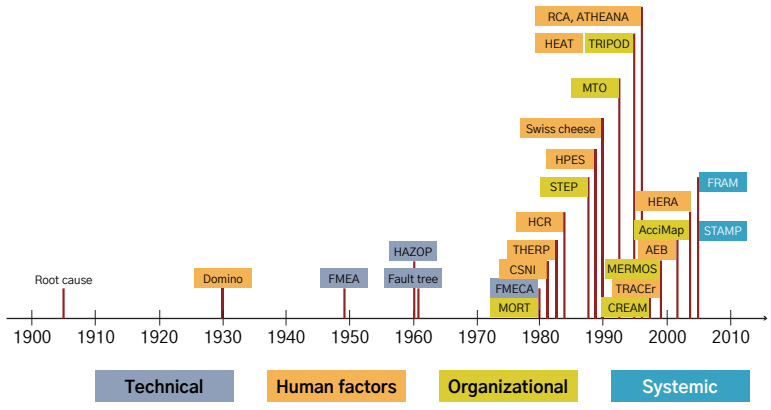


Fig. 2. Changes in accident analysis and risk assessment methods[9]

2.1.1 사고분석 관점의 변화 과정

제1세대인 선형적(linear) 사고 모델은 사고가 장비 고장이나 불안전한 행동으로 발생한다고 판단하는 것으로 여기에는 대표적인 도미노(Domino), 근본원인(Root Cause), 결함수(Fault Tree Analysis) 등과 같은 전통적 순차적(sequential) 원인-결과(cause-effect) 사고 모델이 있다. 제2세대인 역학적(epidemiological) 모델은 TMI 원자력 발전소 사고와 같은 인적인 오류가 사고 발생의 원인이라고 보는 것으로, 여기에는 THERP(Technique for Human Error Rate Prediction), CREAM(Cognitive Reliability and Error Analysis Method) 모델 등이 있다. 제3세대인 시스템적(systematic) 모델은 시스템 내의 다양한 영향 요소들과 방어벽의 잠재적 결함들이 조합되어 사고가 발생한다고 보는 것으로, STAMP(System Theoretic Accident Model and Processes), AcciMap, FRAM 모델 등이 있다[3-6].

2.1.2 세대별 특성 분석

(1) Sequential model: 순차적 모형은 선형적 관점에서 이벤트가 순차적 파급을 거치면서 사고가 발생한다고 가정한다. 순차적 모형은 반복적이고 일률적인 단순 시스템에서의 조사 분석에 많이 활용되었는데, 어떤 안 좋은 사건을 근본 원인(root cause)으로 간주하고 일련의 문제를 일으키는 시작점으로 보며, 사고는 근본 원인의 결과로 간주하게 된다. 이러한 방식 때문에 원인과 결과의 관계는 선형적이고 결정론적이다. 순차적 모델에서는 사고를 예방하거나 재발 방지를 위해서 근본 원인을 차단하면 사고가 일어나지 않는다고 가정하게 된다[3-6].

(2) Epidemiological model: 역학적 모형에서 사고는 관련 요인과 행위자 간 상호작용의 산물로 묘사하고 있는데, 질병이 발생하고 전파되는 형태와 유사하다. 역학적 모형에서 사고는 잠복성(latent) 실패(오류)와 활동성(active) 실패(오류)가 복합되어 발생한다고 가정하는데, 이때 잠복 조건은 관리 방식이나 조직 문화 등이다. 역학적 모형은 조직요인이 현장과 불안전한 행동에 영향을 주는 전제 조건에 영향을 미쳐 불안전한 행동(에러와 위반)에 최종 영향을 준다고 가정한다. 즉 '조직요인'이 현장 '감독요인'에 영향을 주며, 현장 '감독요인'은 '개인 수행의 전제 조건'에 영향을 주고, '개인 수행의 전제 조건'은 '불안전한 행동'에 영향을 준다. 이런 잠복 조건의 실패(오류)는 행동 실패(오류)가 일어날 때 드러나기 때문에 예방적 안전관리를 하는데 제약이 있다. 역학적 모형에서의 사고유발 과정 또한 선형적 관점을 갖는다[3-6].

(3) Systemic model: 시스템 모형에서 사고는 시스템의 예측하지 못한 행동으로 나타나며, 국지적으로 볼 때는 괜찮은 행동이 시스템 전체의 불안전한 결과로 나타날 수 있다고 가정한다. 선형적 관점의 근본 원인을 제거하는 활동만으로는 사고의 재발을 막지 못하기 때문에, 시스템 전체의 약점을 찾는 접근방식이 필요하다고 전제한다. 시스템 모형에서 사고 발생 과정을 이해하기 위해서는 상호작용에 대한 피드백 루프(feedback loop)를 적용하고 이해하는 것이 중요하다[3-6].

2.1.3 시스템 관점의 사고모형

최근 사고모형에 관련된 연구 추이를 분석해 보면, Fig. 3와 같이 STAMP, AcciMap, HFACS, FRAM 순으로 많이 적용되고 있다. 2000년대 이후로는 역학적 모형과 시스템적 모형 방법이 대부분 사용되고 있으며, 여전히 일부 단순 시스템에서는 순차적 모형이 적용되고 있다.

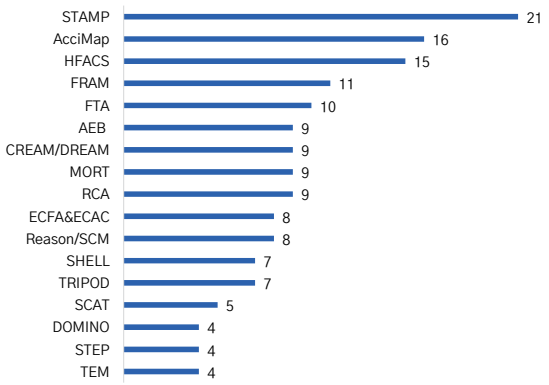


Fig. 3. Number of uses(references) by accident investigation analysis technique in research papers, etc. (1973-2015)[10]

최근 연구 경향을 보면 시스템적 모형에 의한 사고분석이 많이 이루어지는데, 이는 현대 사회가 시스템의 복잡성에 대응하는 사고분석 모형이 필요했기 때문이다. Perrow(1999)의 정상사고(normal accidents) 개념은 시스템안전 측면에서의 접근방법 필요성이 대두된 대표적인 사건이다. '정상사고'는 예측하거나 통제할 수 없는 복잡한 기술 간 상호작용에서 발생하는 피할 수 없는 사고로, 사람들은 많은 훈련과 높은 숙련도에도 불구하고 오류(과실)를 범하며, 조직의 실패가 기술의 실패보다 더 많은 경향을 보인다[3-6].

2.2 연구방법

Fig. 3에서 알 수 있듯 최근 산업현장에서 가장 많이 이용되고 있는 시스템적 사고분석 기법 중 STAMP (System Theoretic Accident Model and Processes) 모델의 특성에 대해 알아보고, 이를 화학공장 반응기에서 용접작업 중 발생한 화재폭발 사고조사에 적용함으로써 기존의 순차적인 사고조사 기법과 차이점에 대해 연구해 보고자 한다.

2.2.1 STAMP와 CAST 개념

STAMP 모델은 사고 원인 모델과 분석과정으로 시스템 복잡성과 연계성 증가, 새로운 유형의 위험 발생, 과학기술의 급속한 변화, 안전에 대한 공공의 인식 및 규제의 변화, 사고 특성의 변화 등 과거의 순차적 사고분석기법들이 가지고 있는 한계점을 극복하기 위하여 Levesson이 2004년에 발표한 분석기법이다[3-6].

STAMP에서 사고는 설계(design), 개발(development) 및 운영(operation) 단계에서 상호 영향을 미치는 시스템의 구성요소 간 안전제약 조건을 부적합하게 이행한 결과라는 개념을 도입하고 있다. 즉, 각 계층에서 안전제약의 부적절한 집행(통제 행동), 통제 행동의 부적절한 실행, 피드백이 부적절하거나 놓침, 상황(context), 정신 모델 결함(mental model flaw), 협조(coordination)와 같은 6가지 관점/용어에서 사고 원인을 기술한다. 또한, 안전을 실패(failure)의 예방 문제가 아닌 제어(control)의 문제로 보고 있으며, 제약조건(constraints)은 환경적 또는 재정적 조건, 규칙(regulation), 절차(procedure), 기술, 설계(design) 등이 될 수 있다[1].

CAST(Causal Analysis on System Theory)는 시스템 이론 기반의 원인 분석방법으로 시스템 관점에서 사고 인과관계를 분석하는 구조화된(structured) 기술이다. CAST는 조사기법이 아닌 분석방법으로 CAST 분석을 수행하면 조사가 진행됨에 따라 손실이 발생한 이유에 대한 포괄적인 설명을 작성하고, 향후 관련 사고를 예방하기 위한 권고사항을 공식화하는 데 도움을 주기 위한 조사 중에 어떤 질문에 답해야 하고 어떤 정보를 수집해야 하는지 식별하는 데 도움이 된다[6]. 정리하면, STAMP는 분석방법이 아니고 사고가 어떻게 발생했는지에 대한 모델 또는 가정들의 집합이라 할 수 있으며, CAST는 시스템 이론에 기초한 원인 분석방법으로 STAMP를 사용하고 있다[7].

STAMP에서는 사고의 원인을 "손실을 막지 못한 안전제어구조(safety control structure)"로 정의하고 있기 때문에, 사고조사의 목표는 안전제어구조가 훼손되어있는(violated) 안전 제한 조건을 시행할 수 없는 이유를 식별하고, 향후 관련 손실을 방지하기 위해 제어구조에 어떤 변경이 필요한지 결정하는 것이다[2].

STAMP 모델의 기본 제어구조는 Fig. 4와 같이 시스템 개발(system development) 구조 및 시스템 운영(system operation) 구조를 포함하고 있으며, 각 제어구조는 계층(hierarchy)으로 구성되어 있다. 상위 구조에서는 안전정책(policy), 표준(standard), 절차(procedure) 등을 결정하고, 하위 구조에서는 정책이나 절차를 실제로 수행하는 역할을 한다. 또한, 시스템의 구성요소를 계층별로 나타낸 후 상위 레벨의 결정사항과 하위레벨의 피드백을 표시하는 방식으로 시스템을 모형화한다. Fig. 4는 STAMP의 일반적인 사회-기술제어 모델을 나타내고 있다[2].

STAMP는 상향식이 아닌 하향식이므로 복잡한 시스템에 적용할 수 있고, 사고의 원인이 되는 소프트웨어, 사람, 조직(organization), 안전문화(safety culture) 등을 모두 포함하고 있어, 이러한 사항들을 다른 방법으로 별도로 다루지 않아도 되는 장점이 있다[2].

2.2.2 STAMP 분석방법 및 절차

STAMP를 이용하여 사고를 분석하는 순서는 "CAST Handbook"에서 제시한 내용을 아래와 같이 정리하였으며, Fig. 5에는 CAST의 구성요소 및 분석 절차를 나타냈다[8].

(1) 분석에 필요한 기초자료를 수립하는 단계로서 ① 관련된 시스템과 분석의 경계를 정의, ② 손실(사고)과 손실을 초래한 위험한 상태를 설명, ③ 위험 방지에 필요한 시스템 수준의 안전 제약사항 식별(시스템안전 요구사항 및 제약), ④ 결론을 내리거나 비난하지 않고 무슨 일(사건)이 일어났는지 설명, ⑤ 물리적 손실, 설계 요구사항, 위험을 초래한 불안전한 상호작용 등 사고에 영향을 미치는 모든 상황적 요인을 분석.

(2) 앞에 언급된 종류의 위험과 관련하여 현재의 안전제어구조를 모형화.

(3) 제어구조의 구성요소를 조사하여 손실(사고)방지에 효과가 없었던 이유를 파악. 제어구조의 하단부터 시작하여 각 구성요소가 사고에 기여한 역할과 동작에 관해 설명.

(4) 전체 제어구조에서 손실(사고)에 기여한 결함 식별. 시스템적 요인은 개별 시스템 제어구조의 구성요소를 포함.

(5) 향후 유사한 손실을 방지하기 위해 제어구조 변경에 대한 권고사항을 작성. 가능하면 위험에 대한 지속적인 개선 프로그램을 설계.

2.2.3 STAMP 적용사례

STAMP를 이용하여 사고를 분석한 Leveson[6] MIT 교수가 CAST Handbook의 참고문헌에 제시한 연구결과 및 논문을 보면 STAMP를 이용한 분석은 항공, 화학공장, 해운, 철도 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

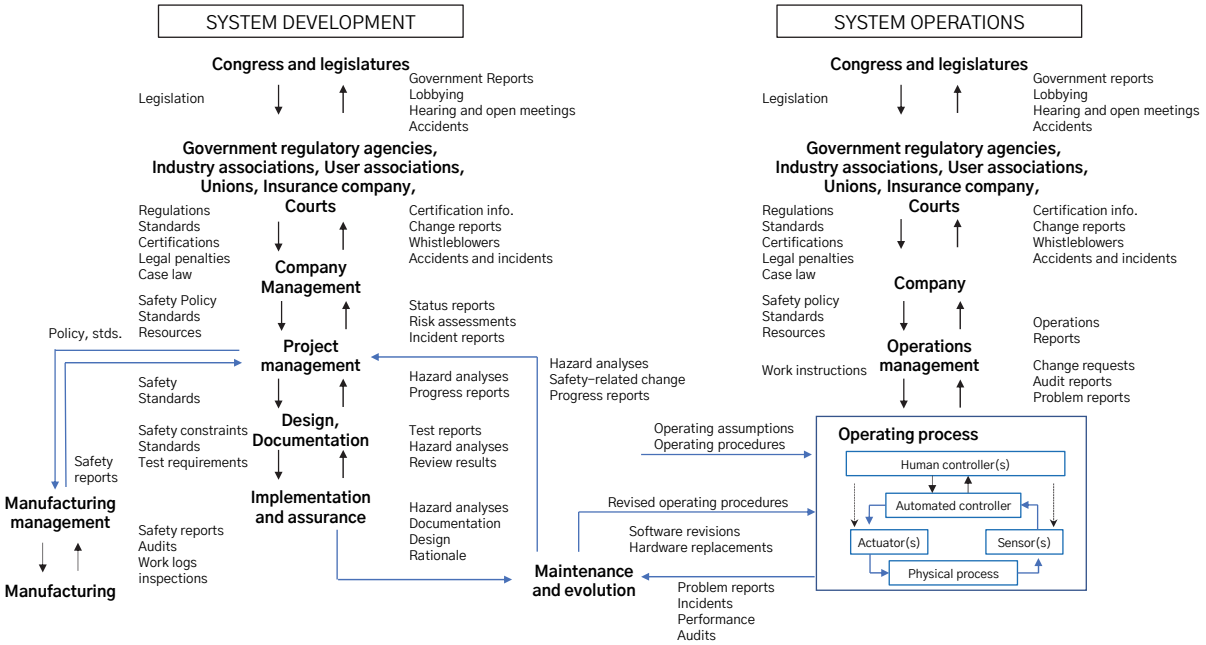


Fig. 4. Typical socio-technical control model of STAMP[2]

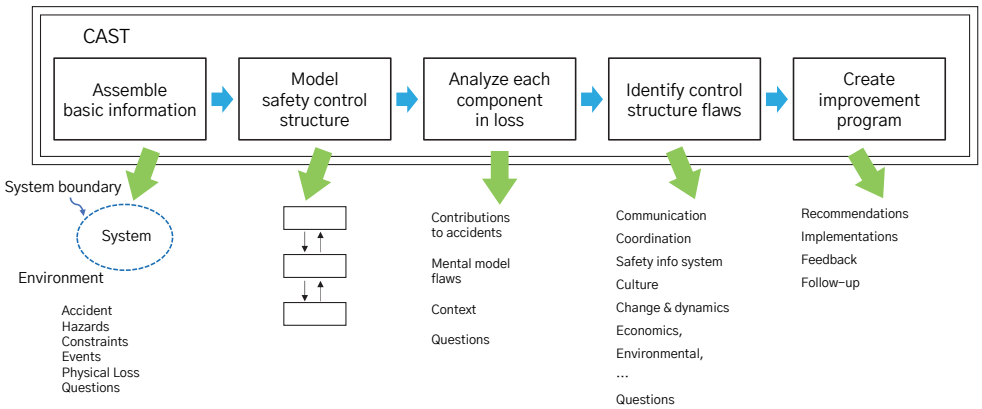


Fig. 5. Analysis procedures and step-by-step components of CAST[7]

2.3 STAMP를 이용한 사고분석

2.3.1 사고개요

분석대상 사고는 A사 ○○공장에서 반응기 spare nozzle에 용접작업을 하는 과정에서 폭발이 발생하여 근로자 1명이 사망하고 2명이 화상을 입었으며 설비와 구조물이 일부 파손된 재해이다.

2.3.2 사고 발생 공정

사고가 발생한 공정은 중합, 함침, 탈수, 건조, 코팅, 저장 순으로 진행되며 세부 내용은 다음과 같다.

(1) 중합: 순수(pure water), styrene monomer, 첨가제를 넣고 약 90 ℃에서 현탁중합.
(2) 함침: 중합된 poly styrene에 발포제(펜탄)를 함침하고 소포제를 투입하여 거품 제거.
(3) 탈수: 원심 분리 과정을 통해 EPS slurry의 물을 제거하는 공정.
(4) 건조: EPS bead를 제습된 공기를 이용하여 기류건조하는 공정(32 ℃ - 34 ℃유지).
(5) 코팅: 난연성 향상을 위해 난연제를 EPS bead에 코팅하는 공정.
(6) 저장: Silo에 저장 후 수요처 용도에 따라 지대, bag 등으로 포장.

2.3.3 사고발생 물질 및 설비

사고 발생 물질은 원료로 styrene monomer를 사용하였으며, 발포제인 펜탄은 반응기 상부의 노즐을 통해 공급되었다. 반응기의 용량은 83.85 m^3이며, 운전온도는 130 ℃, 운전압력은 10 kgf/cm^2이다.

2.3.4 사고 발생원인 추정

(1) 폭발이 발생한 직접적인 원인을 살펴보면, 이 사고는 반응기의 spare nozzle에 소포제 자동투입 설비를 설치하기 위해 nozzle에 용접을 하는 순간 내부에 있던 펜탄과 공기의 혼합가스가 폭발한 사고이다. 사고 발생물질인 펜탄은 중합된 폴리스티렌(PS) 수지가 expandable polystyrene의 성질을 갖도록 함침용으로 사용하며 반응기 상부 배관을 통해 공급되고, 함침이 완료되면 펜탄 공급배관에 설치된 2개의 자동밸브가 차단되도록 운전하고 있다. 소포제 투입설비를 설치하기 위해 사고 발생 3일 전 펜탄 공급펌프 후단부터 펜탄 유량계까지 배관 내부에 drain을 실시하고 펜탄 유량계에서 반응기 상부 자동밸브 구간은 drain을 미실시하였으며, 사고 발생 2일 전 사고 반응기 내부에서 교반기 및 mechanical seal 예방점검을 위해 air purge 및 가연성가스 농도 측정 후 입조작업을 실시하였다. 2일 후 재해 당일은 반응기의 air purge와 가스농도 측정을 하지 않은 상태에서 용접작업을 실시하였다. 가연물을 확인하기 위해 사고 반응기와 같은 용도로 사용하는 반응기 4대 중 1대에서 펜탄의 농도가 LEL 23 % - 32 %로 잔류하고 있음을 가연성가스 농도 측정기와 GC(gas chromatography)를 사용하여 확인하였다. 따라서 펜탄 공급배관 내 잔류 가스가 반응기 내부로 투입될 가능성을 확인해보기 위해 자동조절밸브의 leak test를 실시한 결과 [ANSI/FCI 70-2 Class VI] 기준에서 2인치 배관은 3.5 Bar (3.5 kgf/cm^2) 테스트압력(테스트 유체: 공기 또는 질소)에서 bubble이 분당 3개 이하일 경우에 leakage가 없는 것으로 판단하나, 사고가 발생한 ISO-펜탄 자동밸브는 그보다 낮은 압력인 1.0 kgf/cm^2에서 수많은 기포가 발생하였으므로, 자동밸브 leakage로 ISO-펜탄 투입배관 내 잔류해 있던 펜탄이 반응기 내부로 유입될 가능성이 높았을 것으로 추정하였다. 산화제인 공기는 반응기 상부 20인치 맨홀과 소포제 노즐이 개방되어 있어 잔류한 펜탄과 가연성 혼합가스가 형성되어 있었고, 점화원은 소포제 투입배관 연결을 위해 사용한 알곤용접기의 용접불꽃으로 판단했다.

(2) 점검·정비·유지관리 지침 및 이행, 작업절차, 관리체계에 미흡한 지점이 있었다. 첫째, PSM의 점검·정비·유지관리 지침(KOSHA Guide P-93-2012)에 의하면 설비의 중요도에 따라 등급을 분류하고 등급에 따라 점검·정비 등을 실시하도록 하고 있으나, 특별관리가 요구되는 자동조절밸브를 3등급으로 분류하고 있으며, 규정에는

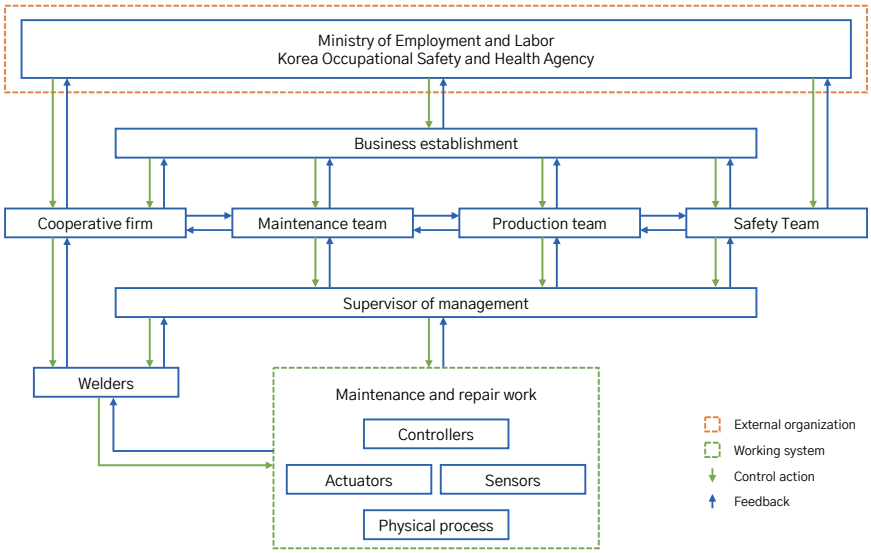


Fig. 6. Safety control structure model for test operation

연간 점검·정비를 하도록 하고 있으나 8년 동안 실시하지 않았다. 둘째, 화재폭발 위험이 있는 장소에서 작업 시 가스농도측정 및 환기 등의 조치를 하도록 하고 있으나 사고 발생 당일 이러한 작업절차를 준수하지 않았다. 또한 사내 화재감시자는 안전작업허가규정에 따라 방폭지역 또는 위험장소에서 화기사용 작업 전에 작업대상기기 및 작업 구역 내에서 가연성 물질 및 독성물질의 가스농도를 측정하고 측정사항을 화기작업허가서에 기록하여야 하나 사고 당일 해당 항목에 대한 확인조치가 누락된 상태에서 작업이 진행되었다. 셋째, 취급물질에 대한 안전보건정보를 제공하지 않은 것도 하나의 원인이 되었다. 제품의 원료 물질인 styrene monomer에 대한 자료만 제공하고 펜탄에 대한 자료는 제공하지 않았다. 넷째, 위험성 평가 결과 배관교체 작업, 화기작업 시에는 밸브 잠금 및 맹판 설치, 가스 및 산소농도 측정이 포함되어 있으나 작업 위험성 평가표의 주요 작업절차에 대한 현재 안전조치의 반영 상태에 대한 확인 없이 작업을 실시하였다.

3. 연구결과

A사의 안전제어구조를 모형화하여 Fig. 6와 같이 나타냈다. 안전제어구조 모델은 생산팀, 정비보수팀, 안전환경팀, 협력업체 및 정비보수 작업자, 관리감독자, 회사 경영자, 고용노동부와 안전보건공단으로 구성된다. 생산설비의 정기보수나 설비 개선을 위한 정비보수 협력업체는 회사 경영진이 생산팀과 정비보수팀의 의견과 협력업체 안전작업계획서를 평가하여 선정하고 계약한다. 경영진은 사업장 안전확보를 위한 방침을 정하고 안전과 보건에 대한 기본계획을 수립하고 시행하며, 국가기관인 고용노동부와 안전보건공단은 사고예방 활동을 벌이고 사고 발생 시 조사를 통해 근본 원인을 분석하여 동종재해를 줄이는 역할을 수행한다.

Fig. 6의 모형화 결과를 보면 각 단계별로 많은 부서와 인력이 관여하고 있었음을 알 수 있으며, 각 단계의 안전확보를 위해서는 안전환경팀을 중심으로 정비보수팀과 생산팀 그리고 현장 관리감독자, 정비보수 협력업체와의 정보교류가 중요한 것으로 판단되었다.

그러나 사고조사를 통해서 확인한 결과 정비보수팀과 협력업체, 생산팀과 관리감독자, 관리감독자와 협력업체 작업자 간에 정보교류가 잘 이뤄지지 않았으며, 특히 인화성물질을 취급하는 반응기의 용접작업 시에는 상호 교차(cross) 체크 등의 정보공유가 중요한데 이러한 정보공유와 기본적인 안전작업절차 준수가 이뤄지지 않은 것이 사고의 근본 원인으로 작용하였다.

4. 결론 및 제언

화학공장은 단순한 화학물질 혼합공정에서부터 새로운 제품 생산을 위해 다양한 신규 화학물질을 대량으로 취급하므로, 설비부터 운전조건이 매우 복잡한

공정에 이르기까지 안전을 확보하고 유사 사고를 예방하기 위한 체계적인 활동은 더욱 강조될 것이다. 특히, 화학공장과 같이 공정 간의 연관성이 높고 각종 기술이 집약된 장치산업에서 유사 사고를 예방하는 것은 인적·물적피해를 최소화할 뿐만 아니라 오염물질 누출로부터 해양이나 하천을 보호할 수 있기 때문에, 사고 원인을 분석할 때 직접적인 원인을 찾아 제거하는 순차적인 접근방법과 통합적인 시스템적 관점의 접근이 현시점에서 반드시 적용되어야 한다.

또한, 군부대의 인력구조상 탄약과 같은 위험물에 대한 전문가인 간부와 비전문가인 병사들 간의 전문성 및 경험의 차이에서 발생할 수 있는 위험요인들로부터 체계적으로 안전을 확보하려면, 시스템적인 위험성 평가의 도입과 아울러 사고 발생 시 근본적인 원인을 분석하기 위한 시스템적인 사고조사기법의 도입이 적극적으로 검토되어야 한다.

N. G. Leveson의 "Cast Handbook"에 등장하는 '무고한 사람들이 목숨을 잃는 사고는 비극적이다. 그러나 그것으로부터 배우지 않는 것이 더 비극적이다'라는 문구는 사업장의 안전을 책임져야 하는 모든 관계자들이 마음 깊이 새겨야 한다.

사업장의 안전을 확보하기 위해서는 경영진의 안전방침과 그에 따른 기본계획을 근본으로 한 각 팀 간의 정보교류와 정확한 피드백 활동, 협력업체와의 의사소통 및 안전작업절차 준수 등이 더욱 중요하게 작용할 것으로 판단되었다. 시스템 분석기법인 STAMP를 이용하면 시스템 구성요소별 문제점과 상호관계 및 의사소통, 피드백의 문제점을 파악함으로써 산업안전보건법, 고용노동부, 안전보건공단, 사업주(경영층), 기술 및 시스템 운영관리자, 생산 시스템, 작업자 등 전체적인 측면에서 통합적인 접근이 가능하고, CAST 분석을 이용하면 시스템 전체의 구성 요소별로 사고를 예방하기 위한 대안 제시가 가능할 것이다.

참고문헌

[1] C. C. Koo and J. W. Choi, "A Study for Fire and Explosion Prevention of Internal Floating Roof Tank," Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 1, pp. 1-5, (2019).
[2] N. Leveson, "A New Accident Model for Engineering Safe Systems," Safety Science, Vol. 42, No. 4, pp. 237-270, (2004).
[3] D. H. Ka, "The Application of Functional Resonance Analysis Method for Analysis of Complex System Accidents," Master's degree thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp. 1-16, (2017).
[4] S. J. Lee, H. G. Lee, D. I. Shin, " Analysis of the Effectiveness and Feasibility of Accident Analysis Police for Construction Safety from the Perspective of System Safety," Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 19, No. 1, pp. 146-160, (2023).
[5] J. Y. Yang, "A Review of Resilience Engineering," Safety and Health Report (KOSHA), Vol. 13, No. 1, pp. 14-23, (2019).
[6] J. Y. Yang, J. C. Ko, S. J. Lee, J. S. Im and Y. N. Kim, "A Study for the Transition of the Industria Safety Paradigm," Korea Occupational Safety and Health Agency, Occupational Safety and Health Research Institute (2019).
[7] N. G. Leveson, "CAST HANDBOOK: How to Learn from Incidents and Accidents," Massachusetts of Technology (2019).
[8] C. C. Koo, D. H. Seo and P.h. Lee, "Analysis of Explosion Accidents in a Chemical Plant Using STAMP, a Systematic Cause-and-effect Analysis Technique," Fire Science and Engineering, Vol. 35, No. 5, pp. 17-23, (2021).
[9] EUROCONTROL, "A White Paper Resilience Engineering for ATM," (2009).
[10] Wienen et al. "Accident Anaysis Methods and Models - a Systematic Literature Review," (2017).