

스티렌 모노머 화재폭발사고 피해예측 분석에 관한 연구

최형수*, 최민제**, 조규선***

호서대학교 일반대학원 안전행정공학과 석사과정*

호서대학교 일반대학원 안전행정공학과 박사**

호서대학교 일반대학원 안전행정공학과 교수***

A study on damage prediction analysis for styrene monomer fire explosion accidents

Hyung-Su Choi*, Min-Je Choi**, Guy-Sun Cho***

Master's course, Dept. of Safety and Public Administration Engineering, Graduate School of Hoseo University*

Ph.D., Dept. of Safety and Public Administration Engineering, Graduate School of Hoseo University**

Professor, Dept. of Safety and Public Administration Engineering, Graduate School of Hoseo University***

요약 본 연구는 석유 화학사 생산공장에 설치된 스티렌 모노머 저장 탱크의 화구(fireball)와 증기운 폭발(VCE)에 대한 최악의 시나리오를 선정하고 피해 예측 및 사고영향을 분석하였다. 혼합잔사유 저장 탱크의 주성분인 스티렌 모노머 이상중합반응 시 화구(fireball)와 증기운 폭발(VCE)로 인한 복사열과 과압의 영향 범위는 e-CA 사고 피해 예측 프로그램을 적용하여 정량 분석하였다. 복사열과 폭발 과압의 피해 영향 범위는 각 최대 반경 1,150m와 626m로 분석된다. 복사열 4kW/m²이 미치는 1,150m 이내 사람은 20초 동안 노출 시 피부가 부풀어 오를 수 있다. 폭발 과압 21kPa이 미치는 626m 이내 건축물은 철 구조물의 손상과 기초에서 이탈될 수 있고, 사람은 신체 부상할 수 있다. 화재, 폭발 또는 누출 사고 발생 시 복사열, 과압에 의한 사업장 내 근로자, 인근 주민 또는 주변 시설물 등의 위험 정도와 수용 여부 위험 기준을 판단하고, 취급 물질 유해·위험성 파악, 비상대응체계 구축, 개선 및 투자 활동 등을 통해 사업장 피해 최소화 대책을 수립하는 데 도움이 될 것으로 기대한다.

주제어 스티렌 모노머, 중합반응, 화구, 증기운 폭발, 복사열, 과압

Abstract This study selected the worst-case scenario for fireball and vapor cloud explosion (VCE) of a styrene monomer storage tank installed in a petrochemical production plant and performed damage prediction and accident impact analysis. The range of influence of radiant heat and overpressure due to fireball and vapor VCE during the abnormal polymerization reaction of styrene monomer, the main component of the mixed residue oil storage tank, was quantitatively analyzed by applying the e-CA accident damage prediction program. The damage impact areas of radiant heat and explosion overpressure are analyzed to have a maximum radius of 1,150m and 626m, respectively. People within 1,150m of radiant heat of 4kW/m² may have their skin swell when exposed to it for 20 seconds. In buildings within 626m, where an explosion overpressure of 21kPa is applied, steel structures may be damaged and separated from the foundation, and people may suffer physical injuries. In the event of a fire, explosion or leak, determine the risk standards such as the degree of risk and acceptability to workers in the workplace, nearby residents, or surrounding facilities due to radiant heat or overpressure, identify the hazards and risks of the materials handled, and establish an emergency response system. It is expected that it will be helpful in establishing measures to minimize damage to workplaces through improvement and investment activities.

Key Words Strene Monomer, Polymerization, fireball, Vapor Cloud Explosion, Radiant Heat, Overpressure

Received 03 Feb 2024, Revised 04 Apr 2024

Accepted 08 Apr 2024

Corresponding Author: Guy-Sun Cho
(Hoseo University)

Email: cho1395@hoseo.edu

ISSN: 2466-1139(Print)

ISSN: 2714-013X(Online)

© Industrial Promotion Institute. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

국내 화학물질 제조량은 '10년 289.1백만 톤에서 '18년 426.4백만 톤으로 47.3% 증가, 국내 화학물질 수입량은 '10년 2백만 톤에서 '18년 332.1백만 톤으로 43.7%가 증가, 국내 화학물질 수출량은 '10년 87.6백만 톤에서 '18년 120.2백만 톤으로 43.7%가 증가하였다[1]. 화학산업 발전에 따라 매년 화학물질 제조량, 수입량, 수출량이 증가하고 있으며, 이에 따른 화학사고 발생의 위험도와 잠재성이 증대되었다.

먼저 국외 사고사례를 살펴보면, 1984년 12월 2일 인도 보팔에 소재한 U사의 살충제 공장에서 일어난 사고로, 농약의 원료로 사용되는 아이소사이안화 메틸(Methyl isocyanate, MIC)이라는 반응성과 독성이 매우 높은 물질이 누출되어 인근 주민 약 2,800명이 사망하는 등 피해가 발생하였다[2]. 국내 사고사례를 살펴보면, 2012년 9월 27일 경북 구미시에 소재한 H사 야외 작업장 탱크에서 불화수소가 누출되어 사망 5명, 입원 치료 12명, 건강검진 7,162명, 농작물 237.9ha, 가축 3,209두, 차량 1,138대 막대한 피해가 발생하였다[3].

그리고 약 7년 후 2019년 5월 충남 000사업장 스티렌 모노머 생산공장 내 스티렌 모노머 정제공정 운전 방법 변경으로 인해 스티렌 모노머(약 89%)를 포함한 잔사유를 혼합잔사유 저장 탱크에 이송하여 저장하던 중 저장 탱크 내부에서 이상중합반응으로 인한 과압이 발생하여 저장 탱크 상부 비상 압력방출 맨홀로 스티렌 모노머 혼합물이 다량 누출되는 사고가 발생하였다.

공정 이상 현상으로 기존보다 고농도의 스티렌 모노머 혼합물을 고온(50~60°C) 상태로 저장 탱크 내 장기기간(약 6일) 보관하면서, 중합 방지제의 활성이 점점 소멸하고 자기중합반응이 가속화되어, 결국 중합반응열 축적으로 인한 스티렌 모노머의 폭주 중합반응이 발생하였다[4].

당시 스티렌 모노머 혼합물 이상중합반응으로 인한 누출사고 시 화구(fireball) 및 증기운 폭발(Vapor cloud explosion, VCE)이 발생하지는 않았지만, 스티렌 모노머 혼합물이 인근 지역으로 확산하여 다수 근로자와 인근 주민 약 3,600여 명이 병원 진료를 받아 인근 지역주민까지 피해를 보았다[4]. 누출사고 시

나리오에 대한 사고영향분석을 하고 비상대응체계를 수립하였다면 근로자와 지역주민 피해를 최소화할 수 있다.

본 연구는 2019년 5월 발생한 스티렌 모노머 혼합물 이상중합반응으로 인한 누출사고 시 영향 모델인 화구 및 증기운 폭발의 피해 영향 범위를 정량적으로 분석하고 비교하여, 피해 최소화를 위한 사고대응 및 비상대응체계를 제시하는 데 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 스티렌 모노머의 특성

스티렌 모노머(Styrene Monomer, SM)는 자극성 냄새가 나는 무색 또는 황색을 띠는 인화성액체로 폴리스티렌(PS) 수지, ABS 수지, 불포화 폴리에스테르 수지, 합성고무(SBR)의 원료 등 특정 고분자 화합물의 중합반응을 위한 모노머(Monomer, 단량체)로 사용된다[4].

〈표 1〉 스티렌 모노머 특성값

물질명 (CAS No)	분자 구조	끓는점	인화점	자연 발화점	폭발 범위	증기밀도 (공기=1)
Styrene (100-42-5)		146°C	31°C	480°C	0.9~ 6.8%	3.6

스티렌 모노머는 산업안전보건법에서는 인화성액체로, 위험물안전관리법에서는 제4류 인화성액체 제2 석유류(비수용성 액체)로 지정 수량이 규정되어 있으며, 지정 수량 이상을 취급할 경우 이에 따른 저장소, 취급소 등에 관한 사항을 법으로 규정하여 허가를 받게 되어 있다. 또한, 캐나다의 「Emergency Response Guidebook」에서는 스티렌 모노머(안정화된)의 UN number는 UN 2055이며 Guide number 128P로 P는 열이나 오염에 노출될 경우 격렬한 중합반응을 일으킬 수 있음을 의미한다[5].

2.2 스티렌 모노머의 위험성

스티렌 모노머는 자유라디칼, 양이온, 음이온 등의 다양한 개시제를 이용하여 중합될 수 있으며, 열에 의해서도 중합이 일어날 수 있다. 상온에서도 서서히 중합이 일어날 수 있으며, 온도가 증가할 경우 중합반응

은 더 빠르게 진행된다. 중합 시 발생하는 중합열은 16.7kcal/mol이며, 온도가 65°C 이상으로 올라가면 제어할 수 없는 폭주 중합반응이 일어날 수 있는 것으로 알려져 있다. 폭주 중합반응이 일어나면 온도는 스티렌 모노머의 끓는점(146°C) 이상으로 가열되어 압력이 상승하고 다량의 유증기가 분출되어 증기운 폭발이 일어나거나 중합된 고분자로 인해 통기관이 막히면서 탱크의 폭발이 일어날 수도 있다. 스티렌 모노머의 저장온도는 21°C(70°F) 이하로 유지하고, 용존 산소 함량을 15~20ppm으로 유지하면 중합화를 억제하는 데 도움이 된다[5,6].

2.3 복사열 및 과압의 위험 기준

사고피해예측 기법에 관한 기술지침은 화재, 폭발 발생 시 복사열과 과압의 위험기준을 제시한다[7]. 화재 발생 시 복사열에 의한 위험 또는 영향을 판단할 수 있는 기준은 5kW/m²(1,585Btu/hr/ft²)의 복사열이 미치는 거리로 한다. 폭발 발생 시 주변 기기 및 근로자 등에 미치는 영향을 판단할 수 있는 기준은 0.07kgf/cm² (6.9 kPa, 1psi)의 과압이 도달하는 거리로 한다. 복사열과 과압에 의한 영향은 각 <표 2>, <표 3>과 같고, 공정안전보고서의 피해예측에 주로 사용하는 값으로 정하였다[8].

<표 2> 복사열의 영향 판단표

복사열 강도		영향
Btu/hr/ft ²	kW/m ²	
11900	37.5	장치 및 설비가 손상됨
4000	12.5	목재 또는 플라스틱 튜브의 착화를 유도하는데 충분한 최소의 에너지
1300	4	20초 이내에 보호되지 않으면 통증을 느끼며 피부가 부풀어 오름

<표 3> 폭발 과압의 영향 판단표

과압		영향
kPa	psi	
7	1.0	주택의 일부 파손(복구 불가능), 고막파열
21	3	건축물의 철 구조물이 손상되며 기초에서 이탈, 신체 부상
70	10	대부분의 건축물 전파

3. 선행연구

지금까지 스티렌 모노머에 관한 선행연구를 살펴보면, ABS 중합공정 중 잔류 모노머 회수공정의 유틸리티 사용량 절감을 위한 공정의 개선을 제시하였다(봉주영 등, 2016)[9].

안전보건공단 산업안전보건연구원은 스티렌 모노머에 대한 열분석을 실시하여 열 안정성과 관련된 시험 결과를 통해 사고의 원인을 규명하고, 중합 위험성을 중심으로 저장 시 안전대책에 대한 자료를 제시하였다[5]. 스티렌 모노머 저장 탱크의 화구와 증기운 폭발에 대한 피해 예측 분석한 연구 사례는 없는 실정이다.

이러한 상황에서 본 연구는 복사열과 과압에 따른 피해 영향 범위를 그림 또는 위성 지도에서 쉽게 직관적으로 해석할 수 있도록 e-CA 피해 예측 프로그램을 통해 화재, 폭발 및 누출로 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고자 한다. e-CA 프로그램을 적용한 혼합잔사유 저장 탱크의 화구와 증기운 폭발에 따른 피해 예측 분석을 연구 목적으로 설정하였다. 화학사의 스티렌 모노머 저장 탱크 화재, 폭발 및 누출 시 피해예측범위를 예측하여 비상대응계획을 수립하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

4. 연구 방법

4.1 연구 대상

분석 대상은 사고대상설비인 용량 220m³ (ID 5,800 mm × L 8,550mm) 혼합잔사유 저장 탱크이며,



[그림 1] 혼합잔사유 저장 탱크(Mixed Residue Tank)
출처: 한국산업안전보건공단. (2020). 화학사고 사례연구 「스티렌 모노머(SM) 혼합물 누출사고.

〈표 4〉 사고 발생 설비

명칭	용량	저장물질	압력(kPa)		온도(°C)	
			운전	설계	운전	설계
혼합잔사유 저장탱크 (연식 1990년)	220m ³ (ID 5,800mm × L 8,550mm)	잔사유 (SM 89% 함유)	ATM	-22~60 mmH ₂ O	55	-10~100

운전온도는 약 55°C이다. 혼합잔사유(정상 운전 시 스티렌 모노머 15% 함유)는 공정상 얻고자 하는 제품을 정제하고 남은 찌꺼기 기름 등이며, 부가가치가 낮은 잔사유는 주로 보일러, 건조설비 등의 열원으로 사용된다. 사고 당시 공정 이상 현상으로 고농도의 스티렌 모노머(약 89%) 혼합물을 고온 상태로 사고발생설비에 장기간 보관하였다.

4.2 기상 및 지형자료 입력 데이터

최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침에 따라 대기 온도 40°C, 풍속 1.5m/s, 습도 50%, 대기안정도 F, 표면 거칠기 도심 1m로 최악의 사고 시나리오를 입력하였다[10].

4.3 사고 시나리오

사고발생물질은 스티렌 모노머 함량 100%를 적용했다. 스티렌 모노머 생산공장에 설치된 혼합잔사유 저장탱크 내부에서 이상증합반응으로 인한 과압이 발생하여 저장탱크의 비상압력방출 맨홀(20")로부터 스티렌 모노머가 누출되어 방유제에 고였다. 스티렌 모노머는 정전기 스파크로 착화되어 액면 화재(Pool Fire)가 발생하고, 저장탱크 내부의 스티렌 모노머가 가열되어 비등액체 팽창증기폭발(BLEVE)이 발생하였다. 이때 스티렌 모노머가 증발하면서 증기로 되어 폭발과 화염이 발생하는 화구가 형성된다. 또한, 스티렌 모노머 유증기가 저장탱크에서 누출되면서 형성된 증기운이 발화원에 의하여 폭발되며, 이때 폭발에 의한 과압이 발생한다. 화구 및 증기운 폭발이 발생하였을 때 복사열(화염)과 과압(폭발) 피해에 대한 최악의 시나리오를 선정한다.

4.4 e-CA 사고피해 예측 프로그램

e-CA 프로그램은 한국산업안전보건공단에서 개발하였으며, 사고 시나리오에 대한 사고영향분석(피해예측) 프로그램이다. 화학물질 모델, 누출 모델, 화재·폭발 및 확산의 독성 영향평가 모델, 복사열·과압·독성농도에 대한 근로자 사망률 추정 등의 데이터를 설정하여 이용할 수 있다. 본 프로그램에 탑재되어 있지 않은 물질(가솔린, 경유, 등유 등)을 설정 또는 추가할 수 있고, 기본적으로 탑재된 물질은 밀도, 끓는점과 같이 온도, 압력에 따라 값이 변하는 종속변수 값을 추정할 수 있도록 설정되어 있다. 사용자 정의 물질은 사용자가 입력한 정보가 온도, 압력에 값이 변하지 않는 독립변수로 가정하여 사고영향분석을 수행하게 되어 있다[11].

5. 연구결과

5.1 화구 복사열(화염)

화구로 인한 복사열 산정 계산식은 아래 식과 같다[6].

$$Q = \tau_a \times E \times F_v \tag{1}$$

Q : 일정 지점에서의 복사열(kW/m²)

τ_a : 대기열전도도(무차원)

E : 표면 방사에너지(kJ/m².s)

F_v : 시계인자(View factor)

화구 직경 335~435m, 화구 중심 높이 251m, 화염 표면 열량 392kW/m²가 20초 동안 지속하는 결과가 나타났다. 사람은 20초 내 보호되지 않으면 통증을 느끼며 피부가 부풀어 오르는 복사열 4kW/m²인 지점의 거리는 1,150m, 목재 또는 플라스틱 튜브가 착화되는 복사열 12.5kW/m²인 지점의 거리는 620m, 장치 및 설비가 손상되는 복사열 37.5kW/m²인 지점의 거리는 245m로 분

석된다.

〈표 5〉 화구 피해 예측 결과(e-CA)

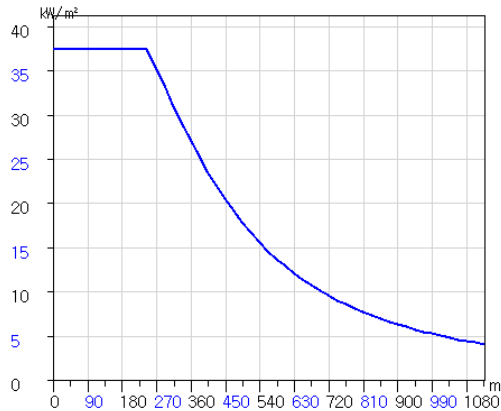
폭발 총량(kg)	192,110	화염 표면 열량(kW/m ²)	392
화구 초기직경(m)	435	화구 최대직경(m)	335
화구 중심높이(m)	251	화구 지속시간(s)	20

〈표 6〉 화구 피해 영향 분석 결과(e-CA)

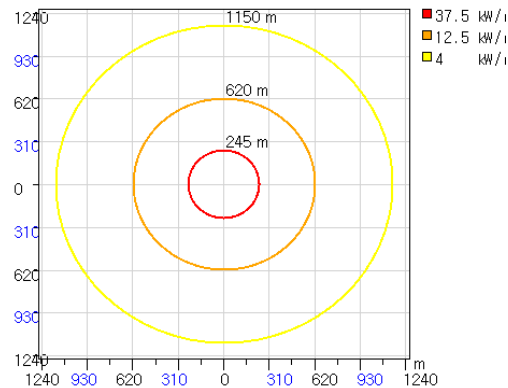
복사열 기준 (kW/m ²)	거리 (m)	Xs (m)	τ_a (tau)	뷰팩터 (Fv)	치사율 (%)	이도 화상 (%)	일도 화상 (%)
37.5	245	184	0.6024	0.1588	99.0	100.0	100.0
12.5	620	502	0.5503	0.0580	5.7	12.3	99.0
4	1150	1010	0.5167	0.0197	0.0	0.0	1.5



〔그림 4〕 화구 복사열의 피해 영향 범위(Google Earth)



〔그림 2〕 화구 영향평가 결과 Profile



〔그림 3〕 화구 영향평가 결과 Contour

5.2 증기운 과압(폭발)

증기운 폭발 시 거리에 따른 폭발압력이 인체 및 주변 시설물에 미치는 영향을 예측한다[7].

증기운 폭발 예측에는 TNT 당량 모델이 사용되며, TNT 당량 산출과 환산 거리(Scaled distance) 산출 계산식은 아래 식과 같다.

$$W = \frac{\mu \times M \times Ec}{2000} \quad (2)$$

W : TNT 당량(kg 또는 lb)

μ : 폭발 수율 계수(0.1 사용)

M : 누출된 인화성 가스 또는 인화성액체의 양 (kg 또는 lb)

Ec : 폭발을 일으킨 물질의 연소열 (kJ/kg 또는 Btu/lb)

$$ZG = RG/W^{1/3} \quad (3)$$

ZG : 환산 거리(m/kg^{1/3} 또는 ft/lb^{1/3}) A

RG : 사고지점으로부터 거리(m 또는 ft)

W : TNT 당량 (kg 또는 lb)

폭발 총량은 192,110kg, 폭발효율 3%이며, 대부분 건축물(구조물)이 전파되는 폭발 과압 70kPa의 거리는 249m, 건축물의 철 구조물이 손상되며, 기초에서 이탈, 신체 부상하는 폭발 과압 21kPa의 거리는 626m로 분석되었다.

〈표 7〉 증기운 폭발(VCE) 피해 예측 결과(e-CA)

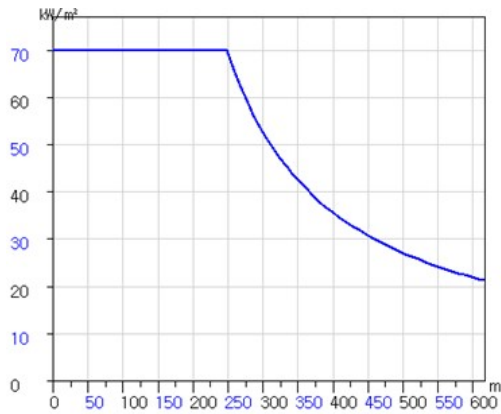
폭발총량	폭발모델	폭발효율
192,110kg	TNT	3%

〈표 8〉 VCE 피해 영향 분석 결과(e-CA)

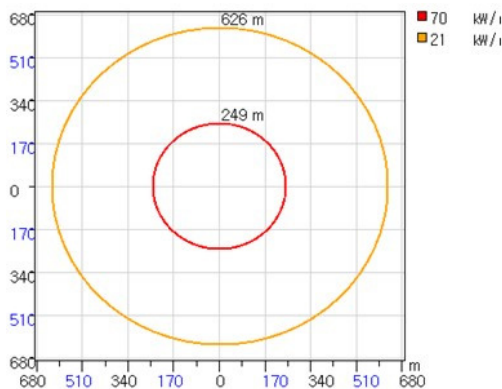
과압기준 (kPa)	거리 (m)	사망 (%)	고막파열 (%)	구조물 손상 (%)	유리파손 (%)
70	249	0.0	82.0	100.0	100.0
21	626	0.0	8.0	59.7	100.0



〔그림 7〕 VCE 과압의 피해 영향 범위(Google Earth)



〔그림 5〕 증기운 폭발(VCE) 영향평가 결과 Profile



〔그림 6〕 VCE 영향평가 결과 Profile

6. 결론

본 연구는 스티렌 모노머가 이상중합반응으로 인해 화구, 증기운 폭발이 발생하였을 때 복사열(화염)과 과압(폭발) 피해에 대한 최악의 시나리오를 선정하고 피해 예측 및 사고 영향 분석을 하였다. 이를 사업장 피해 최소화 대책 수립에 적용하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다[12,13].

첫째, 공정 내 취급 물질에 대한 유해·위험성을 파악해야 한다. 스티렌 모노머는 자기중합반응 시 많은 열을 방출하고, 이때 발생한 열은 중합반응의 속도를 가속화하여 이상중합반응 현상을 일으킨다. 공정 내 취급 물질이 갖고 있는 유해·위험성을 사전에 면밀히 검토하여 운전 방법, 대응 절차를 고려했다면 사고를 방지할 수 있다. 화학 공정 내 취급 물질의 유해·위험성을 파악하고 공정 운전 절차 수립하는 것이 필수적으로 선행되어야 한다.

둘째, 화재·폭발사고에 대비한 비상대응체계를 검토한다. 대량 인화성액체의 저장 지역에서 화재사고가 발생한 경우 2차, 3차 피해 방지대책에 관한 설비적 측면 대책을 수립한다. 누출된 위험물이 넓게 퍼져 큰 풀(Pool)이 형성되지 않도록 방유제를 설치할 수 있다. 복사열 차단을 위해 수막 설치하거나 방수층 등의 소화설비를 조작하여 위험물 저장장소를 냉각한다. 화재 또는 폭발의 점화원이 될 수 있는 전동기 등의 인근 설비 가동을 정지한다.

셋째, 화재·폭발 또는 누출 대표 사고 시나리오에 대한 사고 영향 분석을 하나 이상 반드시 실시해야 한다. 최악의 사고 시나리오는 화재·폭발 또는 누출을

일으킨 지점으로부터 끝점 거리가 가장 먼 가상 사고를 말한다. 본 연구 결과를 통해 화구 복사열 $4kW/m^2$ 의 피해 영향 범위 1,150m 이내의 지역주민은 복사열로 통증을 느끼는 것으로 분석되었다. 사고 발생 시 지역주민 피해를 최소화하기 위해 효과적인 대주민 홍보 방안을 강구하여 관할 공공기관 및 인근 사업장과 협조하고 대주민 홍보 수준 및 이해정도에 관해 평가한다. 필요시 주민 홍보계획을 보완한다.

e-CA뿐만 아니라 KORA, PHAST, ALOHA 등 최적의 사고 피해 예측 프로그램을 통해 최악 및 대안의 시나리오 사고 영향을 분석하고, 피해 최소화 대책 마련, 개선 및 투자 활동, 화학물질 유해·위험성 파악 철저, 비상 대응 계획 수립 및 비상 대응 훈련 등을 실시하여 중대 산업사고를 예방할 수 있을 것이라 기대한다.

본 연구는 스티렌 모노머의 화구, 증기운 폭발이 발생하였을 때 최악의 시나리오에 따른 피해 예측 및 사고 영향 분석에 중점을 두었으며, 피해 최소화 대책 수립에 대한 방향을 제시하였다. 사고사례 중 하나의 표본을 선정하여 연구를 진행하였기 때문에 본 연구 결과만으로 타 화학사의 스티렌 모노머 저장 탱크 운영 관리를 일반화하기는 어렵다. 향후, 스티렌 모노머의 특성과 위험성을 고려한 저장 및 관리 실태를 조사하여, 화학사의 특성에 적합한 안전대책에 관한 연구가 필요하다. 또한, 화학사는 스티렌 모노머의 특성 및 위험성에 대한 안전대책과 관리 방법에 관심을 가질 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] 환경부 화학물질안전원(2021). '18년도 화학물질 통계 조사결과.
- [2] 한국산업안전보건공단(2000). 중대산업사고 사례집.
- [3] 한국산업안전보건공단(2013). 불화수소 누출사고 사례 연구.
- [4] 한국산업안전보건공단(2020). 화학사고 사례연구 「스티렌 모노머(SM)」 혼합물 누출사고.
- [5] 한국산업안전보건공단(2016). 화학물질 위험성평가 보고서 스티렌 모노머의 열적 위험성평가.
- [6] 한국산업안전보건공단(2019). 스티렌 모노머(SM) 안전 가이드.
- [7] 한국산업안전보건공단(2021). 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE P-102-2021).
- [8] 한국산업안전보건공단(2020). 2020년 공정안전보고서 작성예시집.
- [9] 봉주영·나수진·이광순(2017). 유틸리티 절감을 위한 미반응 스티렌 모노머 회수공정의 설계, 한국화학학회, Vol.55, No.1, pp. 54-59.
- [10] 한국산업안전보건공단(2020). 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE P-107-2021).
- [11] 한국산업안전보건공단(2018). 사고영향분석(CA) Tool 설명서.
- [12] 고용노동부 고시(2023). 공정안전보고서의 제출·심사 확인 및 이행상태평가 등에 관한 규정.
- [13] 한국산업안전보건공단(2023). 비상조치계획 수립에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE P-101-2023).

최 형 수 (Choi, Hyung-Su)



- 2021년 2월: 호서대학교 대학원 안전 행정공학과 석사과정
- 2015년 2월~현재: 고용노동부 근로 감독관
- 관심분야: 건설안전, 화공안전, 전기 안전
- E-mail: chsgoodup@hanmail.net

최 민 제 (Choi, Min-Je)



- 2023년 8월: 호서대학교 대학원 안전 행정공학 박사
- 2017년 9월~현재: 금양그린파워(주) 한화토탈에너지스 현장안전보건팀 부장
- 관심분야: 화학사고, 건설안전, 위험 성평가
- E-mail : hyejun0305@daum.net

조 규 선 (Cho, Guy-Sun)



- 2020년 8월: 송실대학교 대학원 안전 보건융합공학 박사
- 2018년 3월~현재: 호서대학교 안전 행정공학과 교수
- 관심분야: 공정안전, 안전보건경영시스템, 로봇안전, 위험성평가
- E-mail: cho1395@hoseo.edu