

# 2022년 화학사고 사례연구

드레인 작업 중 화재사고 사례연구



전남권(여수) 화학사고예방센터

4호 :



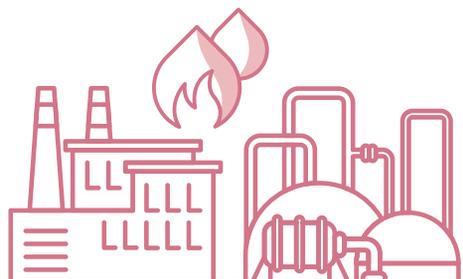
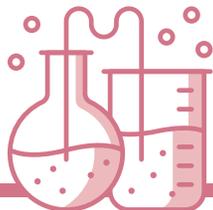
2022년

# 화학사고 사례연구

## CONTENTS

● 드레인 작업 중  
화재사고 사례연구

I.	사고개요	5
II.	사업장 현황	6
III.	사고분석	7
IV.	사고발생 원인	13
V.	동종사고 예방대책	14
VI.	사고로부터 얻은 교훈	15
VII.	유사 사고사례	16
VIII.	참고자료	19





## 용어설명

### 01 도전성(Conductivity)

- 도전성이라 함은 물체 내에서 전류가 잘 흐르는 정도를 말하며, 일반적으로 도전성 액체라 함은 도전율이  $1 \times 10^4 \text{pS/m}$  이상(또는 저항률  $1 \times 10^8 \Omega \text{m}$  이하)을 의미한다.

### 02 비도전성(Anti-conductivity)

- 도전율이  $1 \times 10^2 \text{pS/m}$  미만(또는 저항률  $1 \times 10^{10} \Omega \text{m}$  초과)인 것을 말한다.

### 03 본딩(Bonding)

- 둘 또는 그 이상의 도전성 물질이 같은 전위를 갖도록 도체로 접속하는 것을 말한다.

### 04 불활성 가스(Inert Gas)

- 비인화성 또는 비반응성 가스를 말하며, 시스템 내의 인화성 물질이 연소되지 않도록 주입하는 가스를 말한다.

### 05 제전

- 대전된 전하를 안전한 수준까지 방전시킨 상태를 말한다.

### 06 스플래쉬(Splash)

- 탱크 내부에 액체 주입시 정전기를 발생시키는 액체가 튀어 오르는 것을 말한다.

### 07 도전율

- 물질고유의 전류가 잘 흐르는 정도로 고유저항의 역수를 의미한다.

### 08 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy)

- 인화성 가스 및 증기 등을 연소시킬 수 있는 최소한의 에너지를 말한다.

### 09 완화시간

- 절연체에 발생한 정전기는 일정 장소에 축적한 후 점차 소멸되는 데 축적된 정전기가 초기값의 36.8%로 감소하는 시간을 의미한다.



## I. 사고개요

- 2022년 3월 2일(수) ○○○○사업장 배관 내 물질( $n$ -Hexane, 용매)을 비우기 위한 드레인 작업 중 화재가 발생하여 근무자가 화상을 입은 사고이다.



그림 1 화재 발생 용기

### 01 인명피해

- 작업자 1명 부상(2도 화상)

### 02 물적피해

- 드레인용기 및 접지클램프 손상



## II. 사업장 현황

☑ ○○○○사업장은 석유화학 제품인 HDPE 생산공장을 준공하여 가동 중에 있다.

### 01

### HDPE(High Density PolyEthylene) 공정

- HDPE는 단단하고 불투명한 소재로, 어린이 장난감, 산업용 파이프, 폐기물용 봉투, 생수 등 각종 음료를 담는 플라스틱 병뚜껑 등에 사용하는 원료이다.
- 에틸렌을 중합, 분리·건조, 이송·압출, 저장·포장 공정을 거쳐 생산되는 밀도가 0.95 이상인 합성 수지이다.
- 사고가 발생한 중합공정은 에틸렌을 노말헥산과 반응기 내에서 중합반응하는 공정이다.

#### HDPE



그림 2 HDPE 공정 개략도



## Ⅲ. 사고분석

### 01

### 사고 발생 과정

#### 1) 작업 상황

표 1 | 사고발생 작업 현황

일시	작업 현황
3/2(수) 06:50	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장 패트롤</li> </ul>
07:15	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장 조업 실시</li> </ul>
08:35	<ul style="list-style-type: none"> <li>드레인 용기를 이동 대차 상부에 싣고 사고장소 도착 및 질소 퍼지 실시</li> </ul>
08:40	<ul style="list-style-type: none"> <li>드레인 작업 실시</li> </ul>
08:45	<ul style="list-style-type: none"> <li>드레인 용기에 노말헥산이 약 1/4정도 채워졌을 때 드레인 용기 내부로부터 화염 발생</li> <li>드레인 밸브 전단 볼밸브 차단</li> <li>무전기를 통해 화재상황 전파</li> </ul>
08:46	<ul style="list-style-type: none"> <li>자체 화재 진압 실시 후 화재 진압 완료</li> </ul>
09:10	<ul style="list-style-type: none"> <li>사내 응급처치 후 병원 이동</li> </ul>

※ 최초 화재 확인 후 1분 내 화재진압 완료

02

사고 발생 물질

1) 노말헥산(n-Hexane)

표 2 | 사고발생 대상물질

물질명	CAS No.	함량(%)	폭발한계(%)		인화점 (°C)	발화점 (°C)	증기압 (20°C)	전기전도도
			하한	상한				
노말헥산	110-54-3	100	1.5	7.5	-22°C	225°C	17kPa	1 x 10 <sup>-5</sup> pS/m

경고표지 그림문자



인화성 액체



수생환경 유해성(만성)



피부 부식성/피부 자극성  
심한 눈 손상성/눈 자극성  
특정표적장기 독성(1회)



생식독성  
특정표적장기 독성(반복)  
흡인 유해성

- 무색의 액체로 물에는 불용이나 에탄올 및 에테르 등 다른 유기용제에는 잘 녹는다.
- 증기는 공기보다 무겁고 지면에 깔려 폭발성 혼합가스를 만들기 쉬우며 인화성 물질로 분류된다.
- 인체에 유해하며 증기를 흡입하면 현기증, 감각마비 등의 증상이 일어난다.



03

사고 발생 설비

1) 용기

명 칭	내용물	크기	재질	기타
용기	노말hex산 (극소량의 파우더 포함)	내경 : 450mm 높이 : 680mm 용량 : 100L	냉연 탄소강 (아연도금)	용기 외부 도색

2) 배관

명 칭	명세	재질	설계압력(MPa)	설계온도(°C)
배관	내경 : 100mm 길이 : 약 23m	A312-TP304	2.5	80

04

사고 공정 설명

1) HDPE 생산 공정 계통도

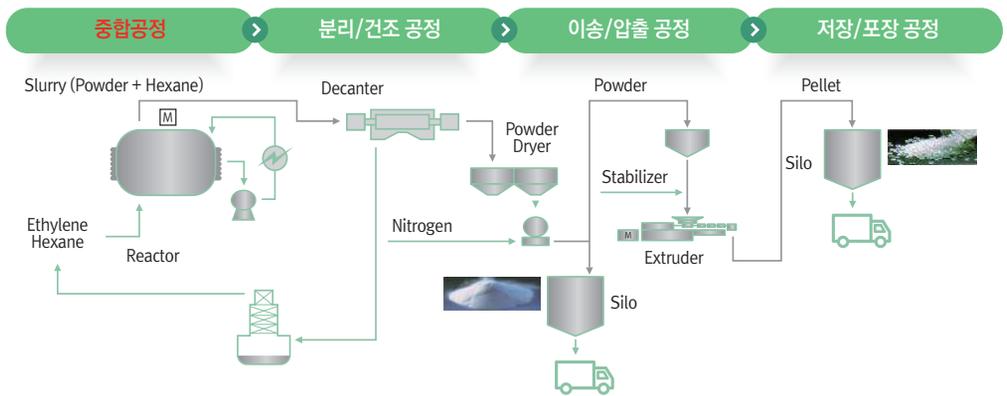


그림 3 생산 계통도

2) HDPE 생산 공정 설명

- 중합공정 : 에틸렌을 용매인 노말hex산과 반응기 내에서 중합반응하는 공정
- 분리·건조공정 : 반응된 Slurry(노말hex산+파우더)를 원심분리기에서 노말hex산과 Wet 파우더로 분리하고, Wet 파우더는 건조기에서 건조시켜 노말hex산을 제거하는 공정

- 이송·압출공정 : 건조된 파우더를 기압시스템을 이용하여 압출공정으로 이송하여 압출기를 통해 Pellet 형태로 변환 후 Silo로 이송하거나 파우더 Silo로 이송하는 공정
- 저장·포장공정 : Pellet Silo와 파우더 Silo에 저장된 HDPE를 고객의 요구에 따라 Pellet 또는 파우더 형태로 포장하는 공정
- 금번 사고는 중합공정에서 1차, 2차 반응후에 Buffer 기능을 수행하는 후처리 공정으로 Slurry (노말렉산+파우더)를 이송하는 배관 내 물질을 비우는 과정에서 발생함.

05

사고 원인 분석

1) 정전기에 의한 발화 가능성

- (스플래쉬 필링) 공정 사고 발생 물질인 노말렉산은 도전율이  $1 \times 10^{-5} \text{pS/m}$ 로, 비전도성 액체로 분류됨. 재해자의 진술에 따르면 최초 발화지점은 드레인 용기 내부임. 드레인 노즐의 끝단과 용기의 액면간의 높이차가 있어, 드레인밸브를 개방하여 유체가 드레인 용기에 떨어질 때 낙차에 의해 난류 상태로 떨어짐. 상온에서 밀폐형 덮개가 설치되지 않은 용기에 채워 용기 내부는 충분한 양의 산소가 존재하고 스플래쉬 필링 과정에서 입자간의 충돌에 의해 전하가 발생하고 용기의 표면에 방전되었을 것으로 추정된다.

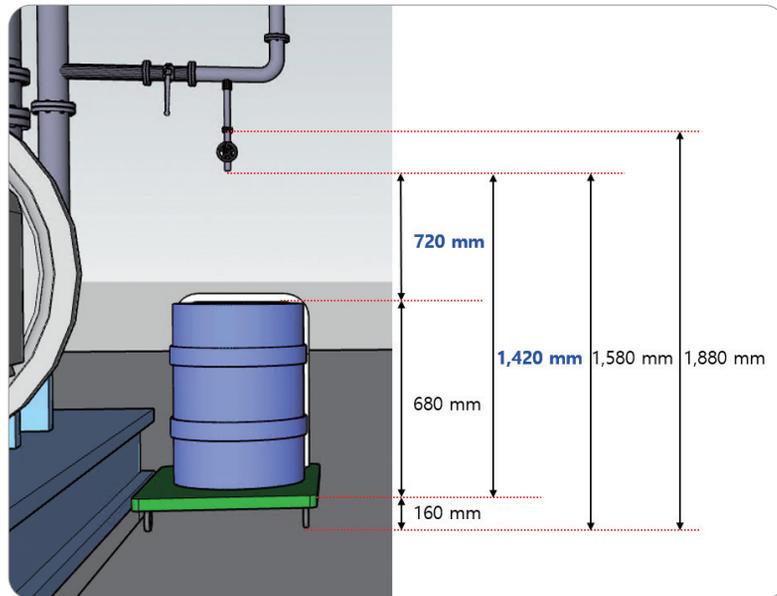


그림 4 드레인 위치와 용기 간 낙차



- (유동 대전) 사고발생 물질인 노말헥산이 정체되어 있던 배관은 플랜지 접합면 등의 양단을 본딩접지를 통하여 등전위로 구성하고 있으며, 저항 측정을 통해 전기적 연속성 유지를 확인하여 배관 내 유체의 흐름에 의한 정전기 발생 가능성은 낮은 것으로 추정된다.
- (인체 대전) 사고발생 당시 근무자의 근무복은 제전복을 착용하고 있었으며, 드레인 밸브 개방 후 화재가 시작 된 드레인 용기로부터 약 1 m 정도 이격한 상태로 드레인 작업을 주시하고 있어 인체 대전에 의한 방전이 점화원으로 작용하지 않은 것으로 추정된다.
- (접지상태) 노말헥산을 용기에 드레인 작업을 하면서 전하가 축적되는 위험을 줄이기 위해 접지하고, 전하가 축적되지 않도록 등전위 본딩하여야 한다. 현장 확인 시 화재 발생 용기와 드레인 배관, 공정 배관간의 등전위 본딩은 실시 하였으나, 용기의 별도 접지는 실시하지 않아 전하 축적이 추정된다.

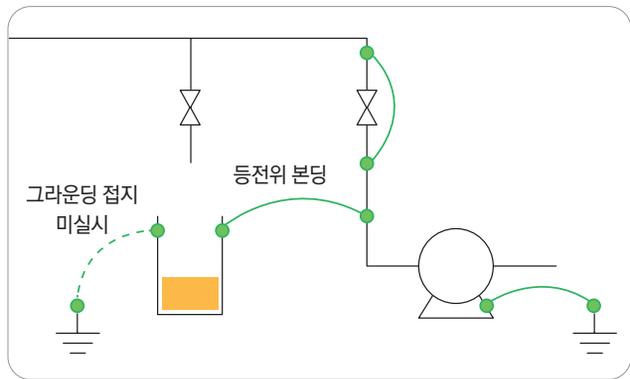


그림 5 설비의 접지 및 본딩 구성

## 2) 외부의 점화원에 의한 화재 가능성

- 사고발생 장소에는 CCTV가 없었으며, 인위적인 점화의 흔적을 발견하지 못함. 또한 인근에 설치된 전기기계·기구들은 모두 방폭형으로 설치되어 있었으며, 방폭성능을 적정하게 유지하고 있는 것을 확인함.

## 3) 산소 및 가연물(인화성 액체)에 의한 폭발위험 분위기 형성

- 사고발생 6일 전 드레인 구간에 노말헥산을 이용하여 5분 동안 클리닝 작업을 실시하고 사고 전 질소를 이용하여 5분 동안 퍼지함. 하지만 해당 배관이 대부분 상부로 향하고 있고 블라인드 위치 등 데드존(Dead Zone)에 의해 배관 내 노말헥산이 잔류한 것으로 추정된다. 드레인 작업을 옥외의 개방된 용기에 실시하여 다량의 노말헥산 유증기와 산소가 상시 접촉할 수 있는 상태(폭발위험분위기)로 추정된다.

## 4) 결론

- 이번 사고의 경우 사고 발생 형태, 사고 발생 공정 조건, 사고 발생 물질 등을 검토한 결과 드레인 과정에서 노말헥산 입자간의 충돌에 의해 전하가 발생하고 용기표면에 방전되어 발화했다고 분석된다.



## 사고근본원인분석(RCA:Root Cause Analysis)

- 사고 발생에 대한 직·간접 원인 등을 종합하면 드레인 작업에 대한 위험성 파악 미흡, 정전기가 발생 관리 미흡 등으로 인하여 사고가 발생한 것으로 추정된다.

단계	사고원인 1	사고원인 2	사고원인 3
1. 결함내용 분류	물질결함	운전결함	기술결함
2. 관련 조직	설계부서	생산부서	설계부서
3. 결함 종류	설계	운전	설계
4. 결함 대분류	위험성평가	안전운전절차	설계시방
5. 결함 중분류	드레인 물질에 의한 위험성평가 미실시	불완전한 절차서	부적절한 설비의 구조
6. 결함 소분류	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 드레인 후 정체되어 생성될 수 있는 인화성 물질 발생 가능성 미검토</li> <li>· 드레인 작업 중 스플래쉬 필링에 의한 화재 위험성 미검토</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 인화성 물질을 대기에 개방된 상태에 드레인 할 경우에 대한 별도 작업 방법(사전 안전 조치 사항, 안전 작업 방법)이 없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 비도전성액체를 드레인 시 낙차가 있도록 설계 하여 인화성 물질의 유증기가 공기와 폭발분위기를 형성함</li> </ul>



## IV. 사고발생 원인

### 원인 1

#### 스플래시 필링

- 용매인 노말헥산은 비전도성 액체로 스플래시 필링 과정에서 정전기가 발생하기 때문에 액체에 주입구의 배관직경 2배 이상 잠길 때까지 인입속도를 1 m/s 이하로 유지하여 정전하가 축적되는 것을 예방하고 정지 시간을 두어 정전하가 해소될 수 있는 시간을 확보하여야 하나, 스플래시 필링 작업을 통해 유체가 흐르도록 하여 인화성 액체의 마찰·분출·충돌에 의해 대전된 정전기 방전에 의해 사고가 발생하였다.

### 원인 2

#### 개방형 용기 사용으로 인한 폭발분위기 형성

- 인화성 물질을 취급할 때 다량의 인화성 미스트, 증기 등이 발생될 우려가 있는 경우 공기와 접촉하지 못하도록 불활성화 조치가 되어있는 밀폐된 형태의 용기를 사용하여 폭발위험분위기 발생을 억제하여야 하나 불활성화 조치가 되지 않은 개방형 용기를 사용하여 화재 사고가 발생하였다.

### 원인 3

#### 접지 미흡으로 인한 정전기 축적

- 배관 및 펌프 등 도전체 간의 등전위 본딩 접지를 실시하여 장치 및 배관 상의 정전기 발생은 다소 억제가 되었으나, 드레인 용기의 접지는 미실시하여 축적된 전하가 해소되지 않은 상태로 작업하여 정전기 방전에 의해 사고가 발생하였다.



## V. 동종사고 예방대책

### 대책 1

#### 정전기 발생 억제 조치

- 상부 주입 방식의 경우 스플래쉬 필링이 되지 않도록 물방울이 튀기는 충전방식과 상향 분사를 억제하기 위해 침액 파이프(Dip Pipe)를 사용하여 액체의 튀는 현상을 최소화하고, 배관의 끝단을 45° 컷 팁 (Cut Tip) 또는 티를 적용하여 액체의 흐름을 수평으로 전환시킨다.
- 충전 초기단계에서의 와류를 줄이기 위해 유속을 제한하되, 그 유속은 액위가 인입 파이프 직경의 2배로 될 때까지 1m/s를 넘지 않도록 한다.

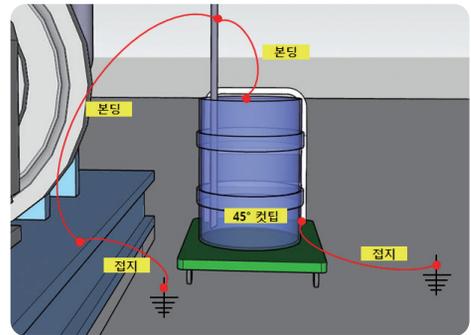


그림 6 이상적인 접지 및 본딩 구성

### 대책 2

#### 화재 · 폭발(위험)분위기 제거

- 대기에 개방된 형태로 인화성 액체를 취급하여 인화성 증기와 공기의 혼합으로 인해 화재 · 폭발 분위기가 쉽게 형성될 수 있는 용기의 구조가 사고의 근본 원인 중 하나이다.
- 인화성 액체 취급설비는 설비 내부의 인화성 증기가 작업장으로 누출되지 못하도록 드레인 회수배관 또는 덮개를 설치하고 인화성 액체를 취급하는 작업 중에 용기 내부를 질소 등을 이용하여 불활성 분위기를 유지하여 화재 · 폭발 위험을 예방해야 한다.

### 대책 3

#### 안전작업절차 개선

- 생성된 전하가 축적되는 위험을 줄이기 위해 각 설비(펌프, 용기 등)를 충분한 굵기의 접지선으로 접지를 실시하고, 전하가 축적되더라도 전위차가 발생하지 않도록 모든 도전성 설비(배관, 용기, 펌프 등)를 본딩하여 전체적으로 설비의 접지 및 본딩이 양호한 상태에서 대전된 전하가 완전히 소멸되기 위한 완화시간(노말렉산의 경우 100초) 이상 확보 후 작업을 진행해야 한다.



## VI. 사고로부터 얻은 교훈

☑ 드레인 작업 중 화재사고로부터 얻은 교훈은 다음과 같다.

교훈  
1

정전기 점화원에 대한 위험성 평가는 사고예방의 기본

- 위험성평가는 정상적인 공정 가동 중에 발생 가능한 공정 위험성평가와 일상작업 및 정기보수 작업 등 모든 작업에 대한 위험성을 도출하는 작업 위험성평가로 구분할 수 있다.
- 특히 금번 사고와 같이 드레인 작업은 인화성 액체를 취급하는 일상 작업으로 드레인 중 유동대전, 분출대전, 충돌대전 등 다양한 형태의 정전기가 발생되고 이는 점화원으로 작용하여 화재, 폭발이 발생 될 수 있으므로 다양한 관점에서 화재·폭발 위험성을 검토해야 한다.

교훈  
2

부적절한 설비 구조는 사고의 원인이다.

- 대기에 개방된 형태로 인화성 액체를 취급하여 인화성 증기와 공기의 혼합으로 인해 화재·폭발 분위기가 쉽게 형성될 수 있는 용기의 구조가 사고의 근본 원인 중 하나이다.
- 모든 인화성 액체 취급설비는 설비 내부의 인화성 증기가 누출되지 못하도록 덮개를 설치하고 인화성 액체를 취급하는 작업 중에 내부를 질소 등으로 치환하여 불활성 분위기를 유지하여 화재·폭발 위험을 예방해야 한다.
- 스플래시 필링에 의한 정전기 발생 사고 예방을 위해 침액 파이프(Dip Pipe)를 사용하여 액체의 튀는 현상을 최소화하고 배관의 끝단을 45° 컷 팁 또는 티를 적용하여 액체의 흐름을 제한시켜 정전기에 의한 화재·폭발 위험을 예방해야 한다.



## VII. 유사 사고사례

### 01 계량작업 중 화재사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2015년 5월
사고장소	전남 소재 화학공장
피해내용	1명 부상
사고내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>산업용 테이프 생산공장에서 톨루엔 계량 작업 중 화재가 발생한 사고임</li> </ul>

### 02 여과·세척 중 화재 사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2016년 1월
사고장소	충청북도 소재 의약품원료 제조 공장
피해내용	1명 사망
사고내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>합성·추출 공정을 거쳐 결정화된 농축액을 여과·세척하는 작업 중 정전기로 추정되는 화재가 발생한 사고임</li> </ul>



## 03

## 용매분리작업 중 화재사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2017년 1월
사고장소	경상남도 소재 합성염료, 유연제 제조 공장
피해내용	설비 일부 손상
사고내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OLED 디스플레이용 소재를 생산하는 반응공정에서 누체 여과기를 통해 제품 분리 작업 중 여과기에 남아있던 제품과 미량의 용매에 원인 미상의 점화원에 의해 화재가 발생한 사고임</li> </ul>

## 04

## 여과기 화재·폭발 사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2018년 11월
사고장소	강원도 소재 의약품원료 제조 공장
피해내용	1명 부상, 여과기 일부파손
사고내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 여과기 성능 시험 중 여과기에서 임시로 사용한 메탄올 혼합물의 유증기가 정전기로 추정되는 점화원에 의해 폭발하고 화재가 발생한 사고임</li> </ul>

05

원심분리기 화재사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2019년 2월
사고장소	경기도 소재 의약품원료 제조 공장
피해내용	제조동 일부 소실
사고내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>의약품원료 제조공정에서 결정화단계 후 원심분리기에서 인화성 액체의 분리 중 여액받이통에서 화재가 발생한 사고임</li> </ul>

06

여과·세척 중 화재 사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2020년 3월
사고장소	경기도 소재 의약품 공장
피해내용	1명 부상
사고내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>제품과 용제를 여과막으로 거르는 여과 작업 중 정전기로 추정되는 화재가 발생한 사고임</li> </ul>



---

## VIII. 참고자료

---

- 1 산업안전보건법, 고용노동부; 2022
- 2 고용노동부고시 제2020-51호 정전기재해 예방을 위한 기술상의 지침
- 3 KOSHA Guide E-171-2018 스플래쉬 필링으로 인한 정전기 화재사고 예방에 관한 기술지침
- 4 KOSHA Guide E-188-2021 정전기 재해예방에 관한 기술지침



# 드레인 작업 중 화재사고



※ 본 사례는 국내에서 발생한 화학사고에 대하여 안전보건공단에서 동종사고의 재발방지를 위하여 관련 사업장에 무료로 배포하오니 근로자에게 충분히 교육하여 동종사고가 발생하지 않도록 안전을 기하여 주시기 바랍니다.

## 사고개요

- 2022년 3월 2일(수) ○○○○사업장에 배관 내 물질(n-Hexane, 용매)을 비우기 위한 드레인 작업 중 화재가 발생하여 근무자가 화상을 입은 사고이다.



그림 1 화재가 발생한 용기와 관련 설비



## 사고발생과정 및 물질

- HDPE의 중합 후 현탁액(Suspension) 배관의 자동밸브 고장 수리를 위한 사전 드레인 작업 중 노말헥산(용매) 입자간의 충돌에 의해 전하가 발생하고 용기표면에 방전되어 발화추정되는 사고임

### HDPE

- 1 중합
- 2 이송
- 3 압출
- 4 저장
- 5 포장

# 드레인 작업 중 화재사고

## 사고발생물질

물질명	CAS No.	함량(%)	폭발한계(%)		인화점 (°C)	발화점 (°C)	증기압 (20°C)	전기전도도
			하한	상한				
노말hexan	110-54-3	100	1.5	7.5	-22°C	225°C	17kPa	1 x 10 <sup>-5</sup> pS/m

## 사고발생원인

- 스플래쉬 필링
  - 노말hexan(비도전성 액체)을 스플래쉬 필링 과정에서 입자간의 충돌에 의해 전하가 발생하고 용기 표면에 방전하여 화재가 발생함
- 화재·폭발위험 분위기 형성
  - 클리닝 및 퍼지작업을 실시하였지만 해당 배관이 대부분 상부로 향하고 있고 블라인드 등 데드존(Dead Zone)에 노말hexan이 잔류해 있고, 드레인 작업을 옥외의 개방된 용기에 실시하여 다량의 노말hexan 유증기와 산소가 상시 접촉할 수 있는 상태로 화재·폭발위험 분위기가 형성되었음

## 동종사고 예방대책

- 정전기 발생 억제
  - 상부 주입 방식의 경우 스플래쉬 필링이 되지 않도록 물방울이 튀기는 충전방식과 상향 분사를 억제하기위해 침액 파이프(Dip Pipe)를 사용하여 액체의 튀는 현상을 최소화하고, 배관의 끝단을 45° 컷 팁(Cut Tip) 또는 티를 적용하여 액체의 흐름을 수평으로 전환시켜야 한다.
- 화재·폭발 분위기 제거
  - 인화성 액체 취급설비는 설비 내부의 인화성 증기가 작업장으로 누출되지 못하도록 드레인 회수배관 또는 덮개를 설치하고 인화성 액체를 취급하는 작업 중에 용기 내부를 질소 등을 이용하여 불활성 분위기를 유지하여 화재·폭발 위험을 예방해야 한다.
- 안전작업절차 개선
  - 생성된 전하가 축적되는 위험을 줄이기 위해 각 설비를 충분한 굵기의 접지선으로 접지를 실시하고, 전하가 축적 되더라도 전위차가 발생하지 않도록 모든 도전성 설비(배관, 용기, 펌프 등)를 본딩하여 전체적으로 설비의 접지 및 본딩이 양호한 상태에서 대전된 전하가 완전히 소멸되기 위한 완화시간(노말hexan의 경우 100초) 이상 확보 후 작업을 진행해야 한다.

## 작성

**안영준**(안전보건공단 전남동부지사 화학사고예방센터(여수))

**이태형**(안전보건공단 전남동부지사 화학사고예방센터(여수))

**최재섭**(안전보건공단 전남동부지사 화학사고예방센터(여수))

## 검토

안전보건공단 중대산업사고예방실 공정안전부

2022-중대산업사고예방실-271

# 「드레인 작업 중 화재사고」 사례 연구

**발행일** 2022년 6월

**발행인** 한국산업안전보건공단 이사장 안종주

**발행처** 한국산업안전보건공단 중대산업사고예방실

**주소** 울산광역시 중구 종가로 400

**전화** (052) 703-0605

**팩스** (052) 703-0312

**홈페이지** <http://www.kosha.or.kr>

※ 무단 복사 및 복제하여 사용하는 것을 금지함



# 2022년 화학사고 사례연구

**4호** : 드레인 작업 중  
화재사고 사례연구

