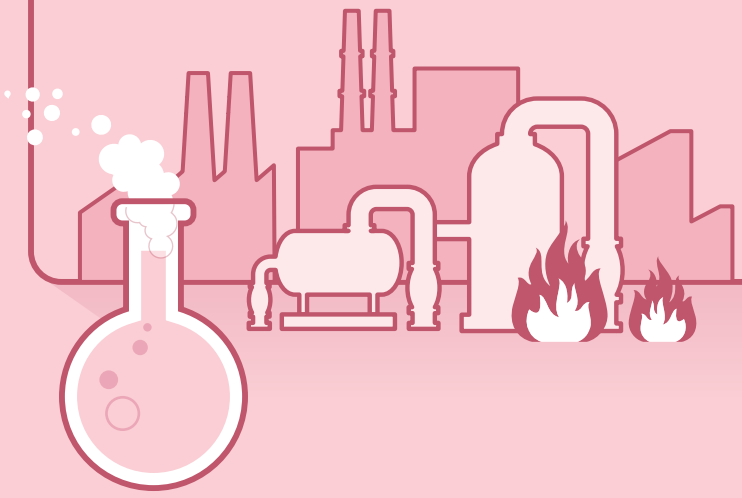
안전은 권리입니다

화학사고 사례연구

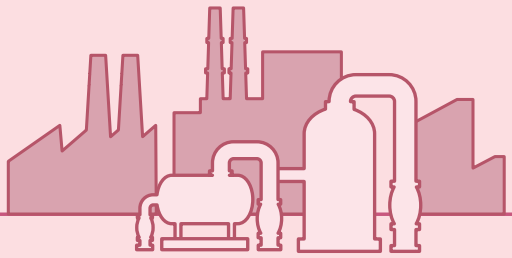
5호

반응기 소포제 투입배관 설치 용접작업 중 폭발사고



고용노동부
산업재해예방 안전보건공단

CONTENTS



Ⅰ. 사고개요 06

Ⅱ. 사업장 현황 07

Ⅲ. 사고분석 12

Ⅳ. 사고발생 원인 28

Ⅴ. 동종사고 예방대책 30

Ⅵ. 사고로부터 얻은 교훈 33

Ⅶ. 유사 사고사례 35

Ⅷ. 참고자료 36

용/어/설/명

01 소포제(消泡劑)

- 표면 장력(表面張力)을 내림으로써 액체를 휘저을 때 생기는 거품의 발생을 억제하는 물질로 실리콘, 유기인산염(有機燐酸鹽), 알코올 등을 말한다.

02 티그(TIG)용접

- 불활성아크용접의 일종으로, 아르곤(Ar), 헬륨(He)과 같은 불활성 가스를 실드가스로 사용하면서 비소모성 전극인 텅스텐 전극과 모재사이에서 발생시킨 아크열로 모재를 용융시켜 접합하는 용접법을 말한다.

03 EPS

- Expandable Poly Styrene의 약자로서 스티렌모노머(SM, Styrene Monomer)의 중합체에 발포제를 침투시켜 열(Steam)을 가할 때 발포제가 외기로 확산, 휘발되는 과정에서 발포되도록 제조된 발포 폴리스티렌 수지를 말한다.

04 발포제

- 고분자반응 중 기포를 형성하여 주는 물질로, 플라스틱이나 고무 등에 첨가하거나 또는 분해하여 기포를 만들어 내는 물질·화공약품 등을 총칭하는 개념이다.

05 현탁중합

- 물에 녹지 않는 단량체를 지름 0.1 ~ 5 mm 정도의 기름 방울로 하여 수중에 분산시켜 중합시키는 방법이다. 친유성의 개시제를 사용하며, 기름 방울을 안정화시키기 위한 분산제가 필요하다. 본질적으로는 펄크중합과 같은 메커니즘으로 중합하지만 중합열의 제거, 중합 후의 처리가 용이하다.

06 함침(含浸)

- 다공성(多孔性) 물체에 기체 또는 액체 상태의 물질을 침투시켜 그 물체의 특성을 사용 목적에 따라 개선하는 것을 말한다. 방부(防腐)·방습(防濕)·염색(染色) 및 가연성(可燃性)의 감소, 강성(剛性)과 절연내력(絕緣耐力)의 증대 등을 목적으로 한다.

07 가스크로마토그래피(GC, Gas Chromatography)

- 전처리한 시료를 운반가스에 의하여 크로마토 관내에 전개시켜, 분리되는 각 성분의 크로마토그램을 이용하여 목적 성분을 분석하는 방법으로 유기화합물의 정량 및 정성분석에 이용된다.

08 머무름시간(Retention Time)

- 설정된 조건에서 시료를 크로마토 관내에 주입시킨 후, 그 중의 어떤 성분이 검출되어 피크를 보일 때까지의 시간을 머무름시간(Retention Time)이라고 한다.

09 인화하한계(LEL, Lower Explosion Level)

- 점화원에 의하여 폭발을 일으킬 수 있는 폭발성 가스와 공기의 혼합가스 농도 범위의 한계값으로 그 하한값을 인화하한계(LEL), 상한값을 인화상한계(UEL)라 한다. 따라서 인화하한계는 가연성 가스 또는 증기가 공기중에서 점화원에 착화되어 화염이 전파되는 가연성 가스 및 증기의 최소농도를 말한다.

10 메커니컬실(Mechanical Seal)

- 축봉 장치의 하나로 정밀하게 두 부분이 다듬어진 금속면을 가볍게 압접한다. 한쪽은 고정시키고, 다른 한쪽은 축과 미끄럼 접촉하여 회전시켜 유체의 누설을 막는다. 마찰 손실이 적고 수명이 길어 펌프나 압축기 등 여러 기계에서 널리 사용되며, 기계 밀봉이라고도 한다.

Ⅰ 사고개요

2020년 3월 ○○○사업장 반응동 3층에서 협력업체 작업자 3명이 반응기 상부 6in 플랜지에 소포제 투입배관 연결을 위해 티그(TIG)용접 중 반응기 내부 유증기에 점화되어 폭발이 발생하여 급격한 화염전파에 의해 작업자 3명이 화상을 입고 병원치료 중 1명이 사망한 사고이다.

사진 1 사고발생 시 CCTV 화면 및 사고현장 반응기 상부

01 인명피해

- 사망 1명, 부상 2명

02 물적피해

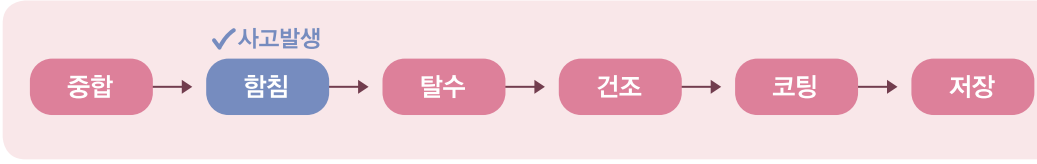
- 반응기 상부 덮개 탈락 및 보온재 손상

Ⅱ 사업장 현황

○○○사업장은 스티렌모노머(Styrene Monomer)를 주원료로 사용하여 발포제인 펜탄(Pentane)을 함침시킨 뒤 탈수·건조·코팅 공정을 통해 EPS(Expandable Poly Styrene: 발포폴리스티렌) 단열재를 생산하고 있다.

01 EPS 단열재 생산 공정

- EPS 단열재는 발포제인 펜탄(Pentane)을 폴리스티렌(Poly Styrene)에 투입하는 함침공정을 거쳐 생산하며 용도에 따라 일반용이나 난연용으로 구분하고 있다.
- 주요 제조공정 순서는



- **공정설명**

중 합	순수(Pure Water), 스티렌모노머(Styrene Monomer), 첨가제를 넣고 약 90 ℃에서 현탁중합
함 침 (사고발생)	**중합된 폴리스티렌(Poly Styrene)에 발포제(펜탄)를 함침 및 소포제를 투입하여 거품제거**
탈 수	원심 분리 과정을 통해 EPS 슬러리(Slurry) 중에 물 제거 공정
건 조	EPS 베드(Bead)를 제습된 공기를 이용하여 기류건조(32 ~ 34 ℃ 유지)
코 팅	난연성 향상을 위해 난연제를 EPS 베드(Bead)에 코팅
저 장	사일로(Silo)에 저장 후 수요처 용도에 따라 지대, 백(Bag) 등으로 포장

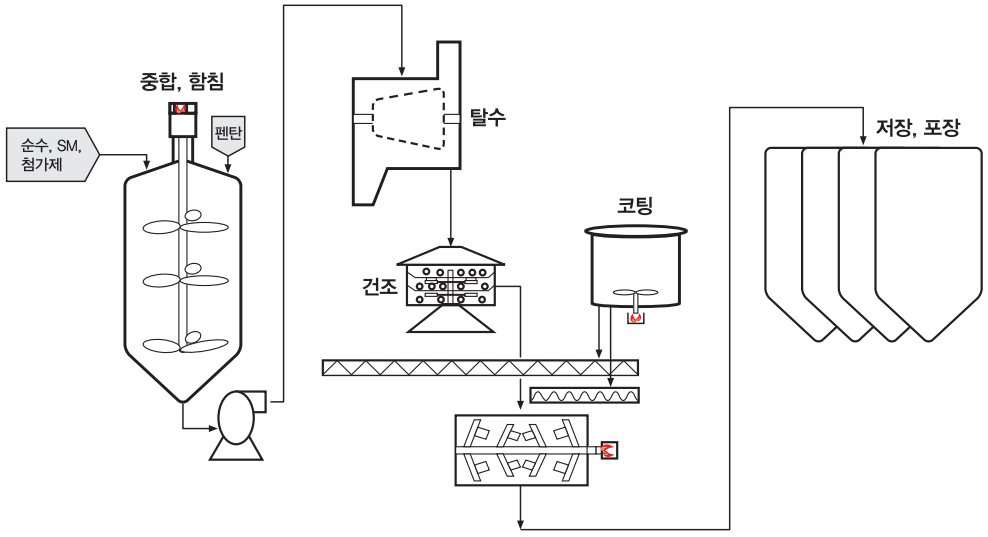


그림 1 EPS 생산 공정 흐름도

◦ EPS 중합반응식 및 함침

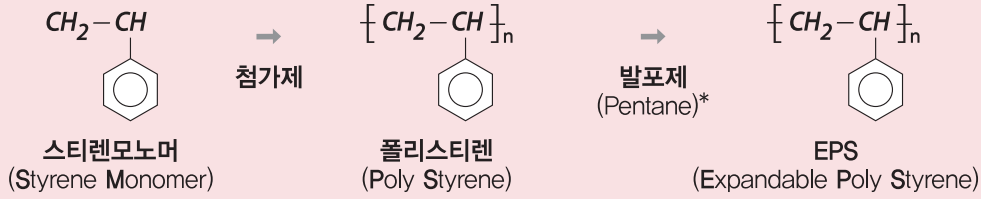


그림 2 EPS 생산 공정 흐름도

* 발포제(Pentane)는 중합반응에는 직접 참여하지 않으며, 폴리스티렌(Poly Styrene) 안에 침투하여 물체의 특성을 개선하는 기능을 함.

02 사고 발생 물질

① 함침용 펜탄

물질명(제품명)		Cas NO.	폭발범위 (%)	인화점 (℃)	발화온도 (℃)	증기압 (mmHg)
함침용 펜탄*	n-펜탄	109-66-0	1.5 ~ 7.8	-40	260	399 (@ 18.5 ℃)
	iso-펜탄	78-78-4	1.4 ~ 7.6	-51	420	592 (@ 20.0 ℃)

* 함침용 펜탄의 구성성분은 노르말펜탄(n-펜탄) 45 ~ 55 %와 이소펜탄(iso-펜탄) 45 ~ 50 %임.

표 1 함침용 펜탄 구성성분

경고표지 그림문자

노르말펜탄 [n-펜탄]

인화성 액체 | 특정표적장기 독성 | 흡인 유해성

이소펜탄 [iso-펜탄]

인화성 액체 | 특정표적장기 독성 | 흡인 유해성 | 만성 수생환경유해성

◦ 주요 물리·화학적 특성

» 인화성 액체

» 가스 발생 시 공기와 폭발성 혼합물을 형성함

03 사고 발생 설비

1 반응기

명칭	명세(mm)	압력(Mpa)		온도(℃)		본체 재질	비고
		운전	설계	운전	설계		
반응기 (#1)	크 기 : 83.85 m^3 폭 : 3,600 높 이 : 9,096	1	1.4	130	150	STS304L	기존

표 2 사고 발생 반응기 주요사양

2 소포제 투입설비

명칭	명세(mm)	압력(Mpa)		온도(℃)		본체 재질	비고
		운전	설계	운전	설계		
소포제 투입설비	내 경 : 150 (6in) 스케줄 : SCH 40	1	1.5	130	150	STS304	신규설치

표 3 사고 발생 소포제 투입설비 주요사양

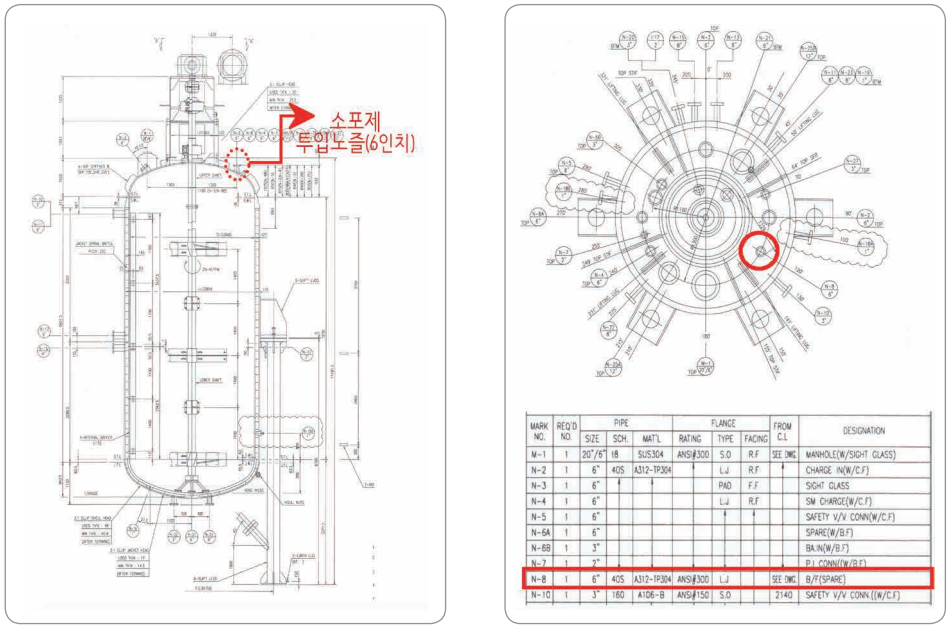


그림 3 사고 반응기 외형도 및 반응기 상부 소포제 투입노즐

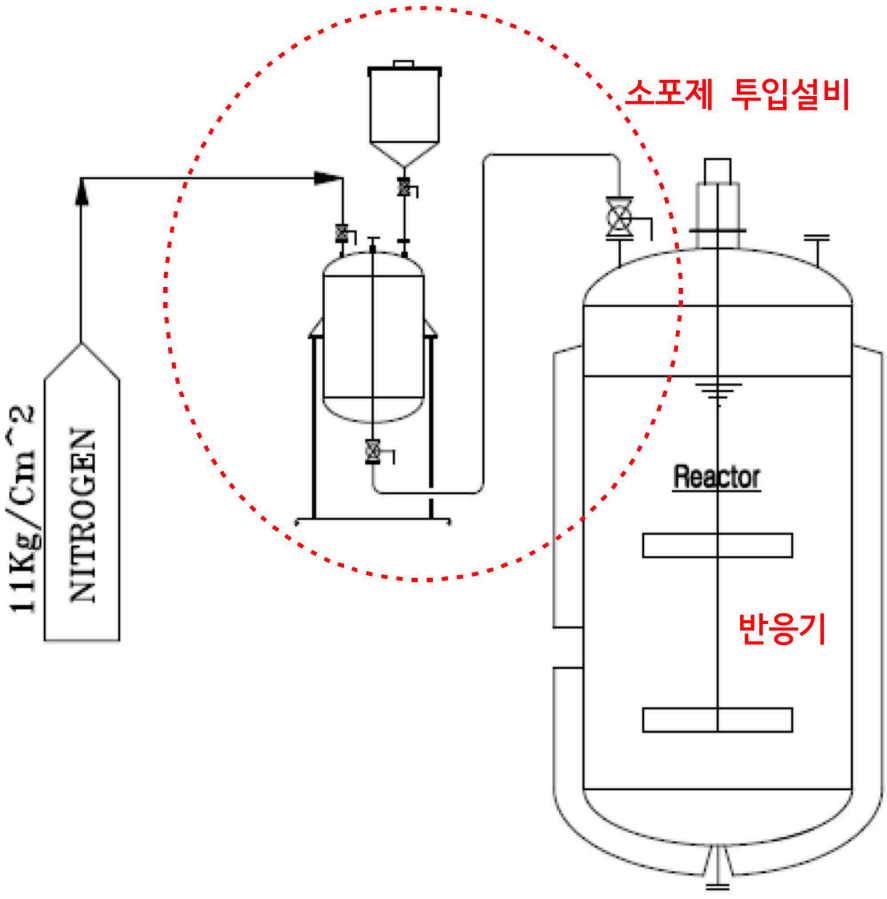


그림 4 사고발생 반응기 및 소포제 투입설비

* 포제 투입설비 및 배관(점선 구간) 신규 설치 목적은 소포제 투입시 반응기 내부 유증기 외부 확산 방지임.
- 기존 : 반응기 상부 6 in 노즐 플랜지 해체 ⇨ 작업자가 반응기에 소포제 직접 투입
- 변경 : 소포제 투입 준비 ⇨ 배관을 통한 질소 가압 ⇨ 반응기에 소포제 투입

Ⅲ 사고분석

01 사고 발생 과정

① 작업 상황

일 시	작업 현황
2020년 2월 ○○일	• 반응기(#1) 내부 EPS 스크랩을 제거 후 반응기(#1) 02월 ▽▽일까지 가동 (EPS 7회 생산)
2020년 2월 △△일	• 정기보수작업을 위해 전 공장 가동중지 실시
2020년 3월 ○○일	• 협력업체 작업자 3명이 소포제 투입 용기 및 배관 설치 관련 작업 시작 ※ 사고발생일 전날까지 1개소에 소포제 투입라인 설치 완료
2020년 3월 △△일	• 펜탄 이송펌프 후단부터 반응동 3층 펜탄 유량계까지 배관내부 드레인(Drain) 실시 • 펜탄 유량계에서 반응기 상부 자동밸브 구간은 드레인(Drain) 미실시
2020년 3월 □□일	• 에어(Air) 퍼지 및 Hot Water로 세척 1회 실시, 가연성가스 농도 측정 • 반응기(#1, 2, 3, 4) 교반기 및 메커니컬실(Mechanical Seal) 예방점검을 위한 입조작업 실시
2020년 3월 ◇◇일	• 작업자가 반응기(#1)와 소포제 투입배관을 연결하기 위해 티그(TIG)용접 시작 직후 폭발 발생 및 약 5분 뒤 119 구급차를 통해 재해자 3명 병원 후송 ※ 별도의 살수설비 및 소화설비를 사용하지 않고 화염발생 후 즉시 자연적으로 소화됨

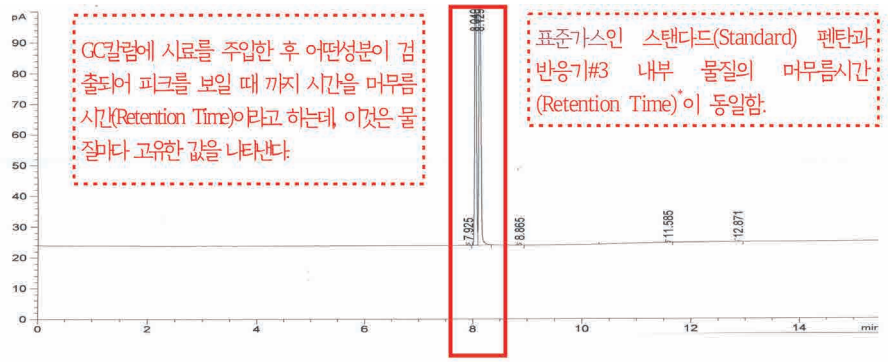
02 사고 원인 분석

① 펜탄 유입 가능성 확인

- 사고발생 반응기(#1)의 내부 가연물이 전소하여, 운전조건 및 조치상태(배관 내 펜탄 드레인 미실시)가 동일한 인근 반응기(#3) 내부에서 인화성가스를 확인하고 펜탄 유입 가능성에 초점을 맞추어 확인하였다. [사업장 자체 가스크로마토그래피(GC)분석 결과, 머무름시간(Retention Time)이 스탠다드(Standard) 펜탄과 동일한 것으로 확인됨.]

현장 측정일	반응기(#1)	반응기(#2)	반응기(#3)	반응기(#4)
3월 ◇◇일(사고일)	LEL 0 %	LEL 0 %	LEL 23 %	LEL 2 %
3월 ◈◈일	LEL 0 %	LEL 0 %	LEL 26 %	LEL 0 %
3월 ◎◎일	LEL 0 %	LEL 0 %	LEL 32 %	LEL 0 %

표 4 반응기 내부 인화성가스 측정 결과(상대적으로 반응기#3 내부 LEL값이 높아 모니터링)



External Standard Report

Sorted By : Signal
Calib. Data Modified : 2020-03-09 오후 4:37:42
Multiplier: : 30.2000
Dilution: : 1.0000
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: FID2 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Amount [PPM]	Grp	Name
8.049	BV	228.06601	1.07174	7381.71436		IC5
8.129	VB	279.78546	1.32210	1.11711e4		NC5
13.890		-	-	-		YHJ
Totals :				1.85528e4		

그림 5 반응기(#3) 내부유증기 가스크로마토그래피(GC) 분석결과

② 반응기 내부 EPS 스크랩에서 함침되어 있던 펜탄 방출 가능성 검토

◦ EPS Bead에는 5 ~ 7 %의 펜탄이 함침되어 있고 저장 과정 등에서 펜탄이 일부 방출되는 특징이 있어 반응기(#1) 내부에 고착된 EPS 스크랩에서 인화성가스가 방출 후 축적되었을 가능성이 있으나, 반응기 내부에 스크랩 고착량이 적고 사고설비에서는 스팀을 이용한 발포단계가 없기 때문에 펜탄 방출에 의한 유증기 축적 가능성은 낮았을 것으로 추정하였다.

※ 통상 반응기 내부 EPS 스크랩 제거는 1 ~ 2주 간격으로 실시하나 반응기(#1) 가동정지 전 내부 스크랩 제거 후 7회만 생산되어 내부에 스크랩 고착 양이 적었음.

※ 반응기(#1) 교반기 메커니컬실(Mechanical Seal) 정비를 위한 입조작업 시, 에어(Air)퍼지 실시로 내부 펜탄 제거됨.

Fire and explosion risks from pentane in expandable polystyrene(EPS)

Raw EPS contains a flammable gas, usually pentane. Pentane is extremely flammable. Its flash point is minus 50 ˚C and its boiling point 36 ˚C. It is heavier than air and odourless. As it is heavier than air the vapour given off can collect in low-lying areas or containers and create a persistent flammable atmosphere, which if ignited can cause a flash fire.

Some pentane is given off all the time the material is being stored and transported, and will even be released from finished products for a short while after manufacture.

출처 : 영국 안전보건청(HSE) 자료 일부 발췌

[참고자료] 펜탄 방출에 의한 유증기 축적 가능성 시사 자료

구분	EPS Bead	발포직 후	발포 24HR 후	성형직 후	성형 3일 후	성형 14일 후
구역	저장창고	사일로실	사일로실	성형실	저장실	저장실
wt %	6.3 %	5.0 %	4.0 %	2.6 %	1.9 %	0.9 %

표 5 스티로폼 공정에서 반응기 내부 펜탄 함량(Pentane Content by process of styropor)

출처 : EPS공정에서 발생하는 n-Pentane의 화재·폭발에 대한 위험성평가 및 위험성 완화대책에 관한 연구 (2018년 한국위험물학회지)

③ 펜탄 투입밸브 누설 시험

- 사고당시 함침용 펜탄 투입배관(유량계에서 반응기 상부 구간)의 수동밸브는 열려 있었으며, 자동밸브 누설(Leakage) 여부에 따라 반응기 내부로 펜탄 유입이 가능한 상태였고, 자동밸브를 취외 후 사업장에서 적용중인「ANSI/FCI 70-2 Class Ⅵ」기준에 따라 누설(Leakage) 테스트 결과, 1 $kg_f/㎠$ 공기로 가압한 상태에서 자동밸브 누설(Leakage)이 확인되었다.

  ※ 18페이지 [그림 7]「ANSI/FCI 70-2 Class Ⅵ」기준에서 2 in 배관은 3.5 Bar(3.5 $kg_f/㎠$) 테스트압력(테스트 유체 : 공기 또는 질소)에서 기포(Bubbles)가 분당 3개 이하일 경우에 누설(Leakage)이 없는 것으로 판단하나, 함침용 펜탄 자동밸브는 그보다 낮은 압력에서 수많은 기포가 발생함.

- 따라서, 자동밸브 누설(Leakage)로 함침용 펜탄 투입배관 내 잔류되어 있던 펜탄이 반응기 내부로 유입될 가능성이 높았을 것으로 추정되었다.

사진 2 사고당시 함침용 펜탄 투입배관 수동밸브 상태

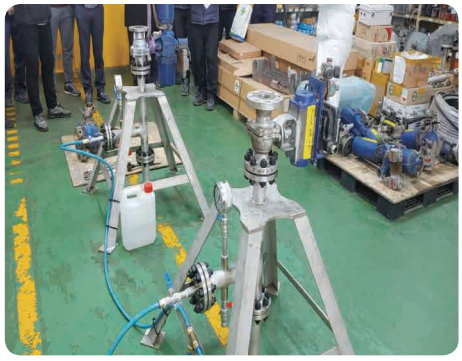


사진 3 누설 테스트 준비모습

사진 4 반응기(#1) 자동밸브(#1) 누설 모습

사진 5 반응기(#1) 자동밸브(#2) 누설 모습

구 분	함침용 펜탄 자동밸브		N-펜탄배관 자동밸브*	
	반응기(#1) 밸브(#1)	반응기(#1) 밸브(#2)	반응기(#1) 밸브(#3)	반응기(#1) 밸브(#4)
누설 발생여부	○	○	×	×

표 6 펜탄 자동밸브 누설(Leakage) 테스트 결과 및 적용조건

* 누설 테스트시 미사용 중인 노르말펜탄(n-펜탄) 배관 자동밸브도 취외 후 테스트 실시

Control Valve Seat Leakage Classification (ANSI/FCI 70-2-2006)

Leakage Class	Max. Seat Leakage	Test Medium	Test Pressures
I	#	#	None
II	0.5% of rated capacity	Air or water at 10-51 °C (50-125 °F)	3-4 bar (45-60 psig) or within +/- 5% of the maximum operating differential pressure, whichever is lower
III	0.1% of rated capacity	Air or water at 10-51 °C (50-125 °F)	3-4 bar (45-60 psig) or within ±5% of the maximum operating differential pressure, whichever is lower
IV	0.01% of rated capacity	Air or water at 10-51 °C (50-125 °F)	3-4 bar (45-60 psig) or within ±5% of the maximum operating differential pressure, whichever is lower
V	5x10-4 ml per minute of water per inch of seat diameter per psi differential	Clean Water at 10-52 °C (50-125 °F)	Within ± 5% maximum service pressure drop across the valve plug, not exceeding the maximum operating pressure at room temperature as determinate by ANSI B16.1, B16.5 or B16.34 or some lesser pressure by individual agreement.
	5x10-12 m3 per second of water per mm of seat diameter per bar differential	Clean Water at 10-52 °C (50-125 °F)	Within ± 5% maximum service pressure drop across the valve plug, not exceeding the maximum operating pressure at room temperature as determinate by ANSI B16.1, B16.5 or B16.34 or some lesser pressure by individual agreement.
	4.7 standard ml per minute of air per inch of orifice diameter	Air or Nitrogen at 10-52 °C (50-125 °F)	Inlet pressure of test medium shall be 3.5barg (50 psi). Leakage flow and pressure data shall be accurate to ± 10% of reading.
	11.1x10-6 standard m3 per hour of air per mm of orifice diameter	Air or Nitrogen at 10-52 °C (50-125 °F)	Inlet pressure of test medium shall be 3.5barg (50 psi). Leakage flow and pressure data shall be accurate to ± 10% of reading.
VI	The leak rate shall not exceed the values in Table 2	Air or Nitrogen at 10-52 °C (50-125 °F)	Pressure of the test medium shall be the maximum rated differential pressure across the valve plug or 3.5 bar (50 psig) whichever is the least.

Class VI Maximum seat Leakage Allowable (ANSI/FCI 70-2-2006)

Nominal Port Diameter and Leak Rate		Bubbles per Minute*	
Millimeters	Inches	ml per minute	Bubbles per minute
≤ 25	≤ 1	0.15	1**
38	1.5	0.30	2
51	2	0.45	3
64	2.5	0.60	4
76	3	0.90	6
102	4	1.70	11
152	6	4.00	27
203	8	6.75	45
250	10	11.1	-
300	12	16.0	-
350	14	21.6	-
400	16	28.4	-

* Bubbles per minute as tabulated are a suggested alternative based on a suitably calibrated measuring device, in this case, a 6 mm (0.25 in) O.D. x 1 mm (0.032 in) wall tube submerged in water to a depth of 3 to 6 mm (0.125 to 0.25 in).
The tube end shall be cut square and smooth with no chamfers of burrs and the tube axis shall be perpendicular to the surface of the water. Other apparatus may be constructed and the number of bubbles per minute may differ from those shown as long as they correctly indicate the flow in ml per minute.

** If the valve seat diameter differs by more than 2 mm (0.08 in) from one of the value listed, the leakage rate may be obtained by interpolation assuming that the leakage rate varies as the square of the seat diameter.

그림 6 자동밸브 누설테스트 기준(ANSI/FCI 70-2 Class Ⅳ)

4 점화원

- 소포제 투입배관 연결을 위해 티그(TIG)용접기를 사용하여 용접하는 순간 폭발이 발생했다는 진술과 CCTV 확인결과, 용접 불꽃이 점화원으로 작용하였을 것으로 보인다.

사진 6 사고장소에서 발견된 용접토치

사진 7 배관 연결작업시 사용한 티그(TIG) 용접기

5 산소 공급원

- 소반응기(#1) 상부 맨홀(20 in)이 체인블럭으로 약 2 ~ 3 ㎝ 들려 있고, 소포제 투입 노즐이 개방되어 있어 대기 중 공기가 산소 공급원으로 작용하였을 것으로 보인다.

사진 8 반응기 상부 맨홀(사고 전 조치상태)

사진 9 반응기 상부 소포제 노즐

6 결론

- 화재 및 폭발의 발생조건은 가연물, 점화원, 산소가 필요하며, 이 사고의 경우 함침용 펜탄 투입배관 자동밸브의 누설(Leakage)로 반응기 내부로 펜탄이 유입되어 가연물로 작용하였고, 티그(TIG)용접에 의한 불꽃이 점화원으로, 산소는 개방된 소포제 투입 노즐 및 반응기 상부 맨홀로 공급되었다고 볼 수 있다.

03 시스템적 사고분석

1 사고 원인 모델과 분석과정(STAMP, Systems - Theoretic Accident Model and Process)

- STAMP 모델은 Leneson이 2004년 발표한 모델로 과거의 순차적 사고 분석 기법의 한계를 보완하여 복잡하고 새로운 형태의 위험을 고려하여 사고를 시스템적으로 접근한 분석 방식이다.

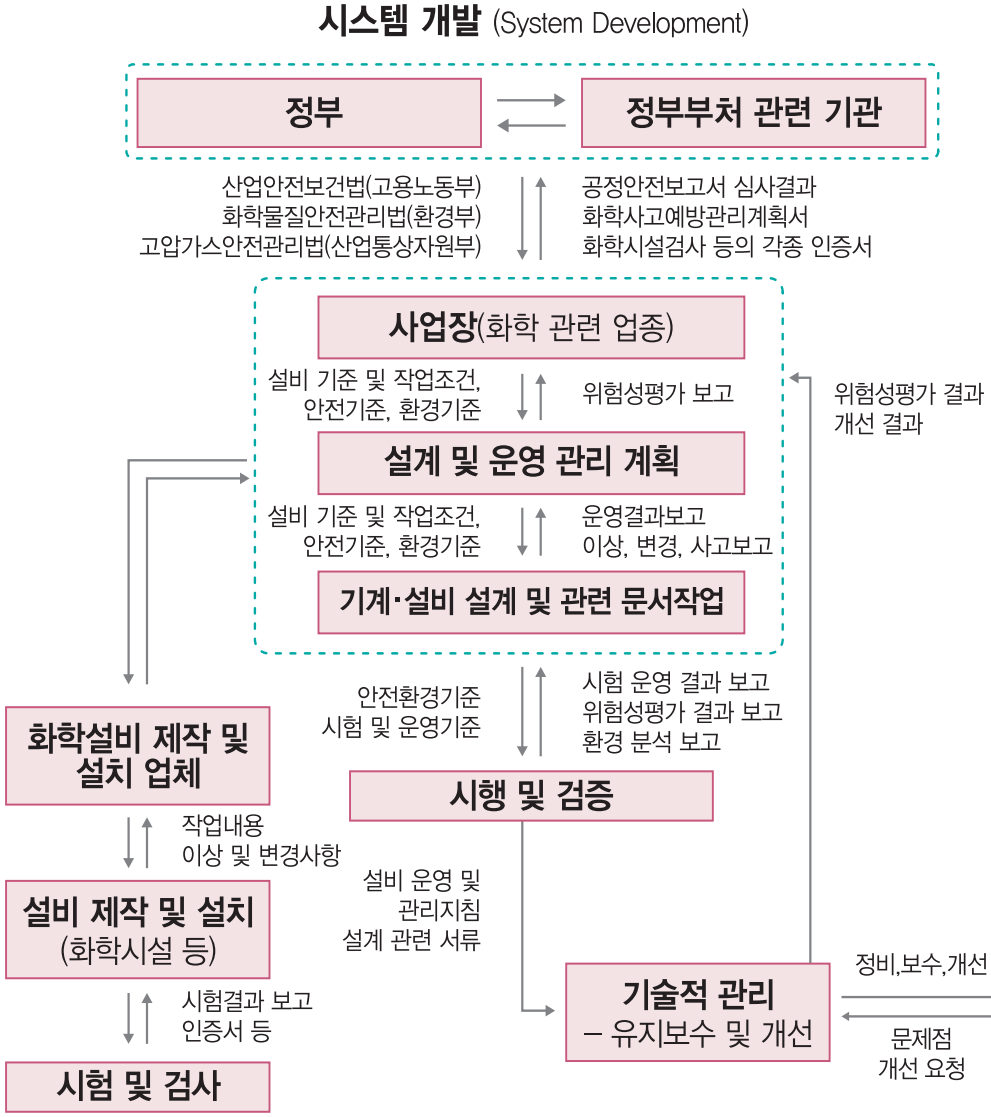
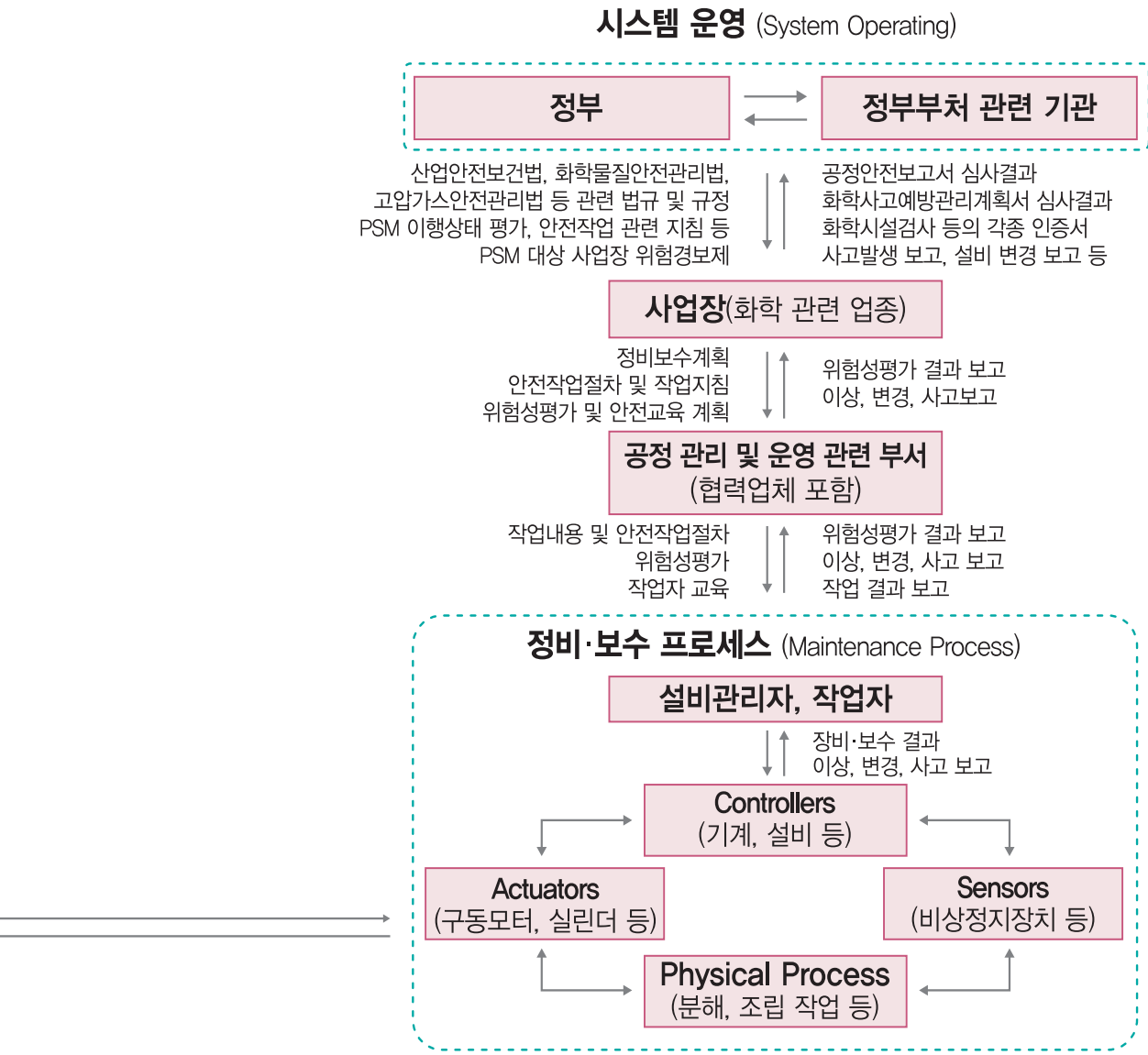


그림 7 자동밸브 누설테스트 기준(ANSI/FCI 70-2 Class Ⅳ)

◦ 기본적으로 STAMP 모델은 사고(Accidents)의 원인을 시스템 작동 실패(Failure)의 문제라기보다는 시스템 제어(Control)의 문제에서 비롯한다고 보고 있다. [그림7]에서는 STAMP 모델을 이용하여 화학공장의 일반적인 정비·보수작업 시스템의 제어구조(Control Structure)*를 나타내었다.

* [참고자료]PSM 대상 사업장에서 비일상 작업 시의 재해 조사 연구, 한국산업안전보건공단, 2019



- STAMP는 시스템적 이론을 적용하기 위한 “사고 인과 관계 모델(Accident Causality Model)”로 사용되는데, 이것은 “안전 컨트롤 스트럭처(Safety Control Structure)”를 가지고 문제에 대한 사회적, 기술적 측면을 모델링 할 수 있다. 그렇기 때문에 사고에 대한 시스템적 분석에 앞서 “안전 컨트롤 스트럭처”에 대한 이해가 필요하다.

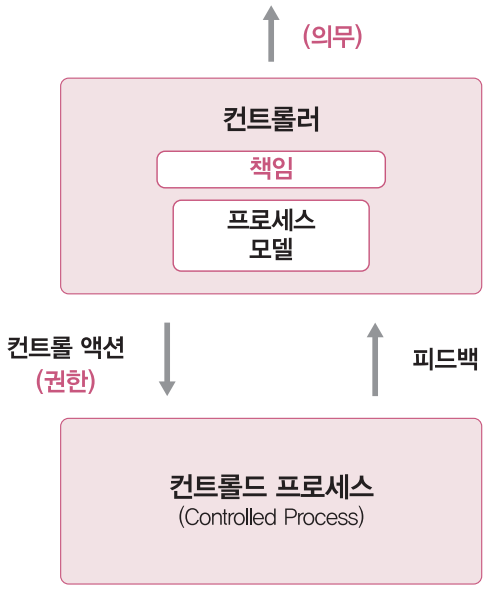


그림 8 STAMP 안전컨트롤 스트럭처(Safety Control Structure)

[그림 8]은 스트럭처의 기본적인 형태를 보여주며 컨트롤러는 컨트롤드 프로세스에 대해 컨트롤 액션(권한)을 행사하며 안전을 유지해야하는 상위 레벨로서의 책임을 만족시킨다. 이 컨트롤 액션(권한)은 전반적인 안전 정책, 표준 및 절차 등으로 컨트롤드 프로세스에 제공하고(아래 방향 화살표) 하위레벨인 컨트롤드 프로세스에게서 보고서 등의 다양한 유형의 보고서를 통해 그 효과를 피드백 받을 수 있다(위 방향 화살표). 피드백 정보는 “프로세스 모델”이라고 불리며(컨트롤러가 사람일 경우 “멘탈 모델”이라고 부름) 컨트롤러에 포함되어 있어 컨트롤러가 컨트롤 액션(권한)의 효과를 확인하고 다음에 무엇을 할지 결정할 수 있도록 한다. 피드백은 현재의 프로세스 모델(또는 멘탈 모델)에게 정보를 제공하며, 이 정보는 컨트롤러가 시스템을 효과적으로 작동시키기 위해 어떤 컨트롤 액션(권한)이 필요한지를 결정하는데 사용된다.

요약하자면, 사고(Accident)는 시스템 컴포넌트(사람, 조직, 기계 등)의 실패 때문에 발생하는 것이 아니라 “안전 컨트롤 스트럭처”가 시스템의 동작에 대한 제약사항(컨트롤드 액션(권한))을 유지할 수 없기 때문에 일어난다고 본다.

◦ CAST(Causal Analysis based on System Theory)는 STAMP 모델 등의 시스템 이론 기반의 원인분석방법으로 시스템관점에서 사고의 부적절한 제어(inadequate control)의 인과관계를 분석하는 구조화된 기술이다. 이런 STAMP 모델을 이용하여 시스템 관점에서 사고의 인과관계를 분석하는 구조화된 기법을 CAST(Causal Analysis Based on Systems Theory)라 하고, CAST는 다음 [그림 9]와 같이 5개의 파트로 구성되어 있다.

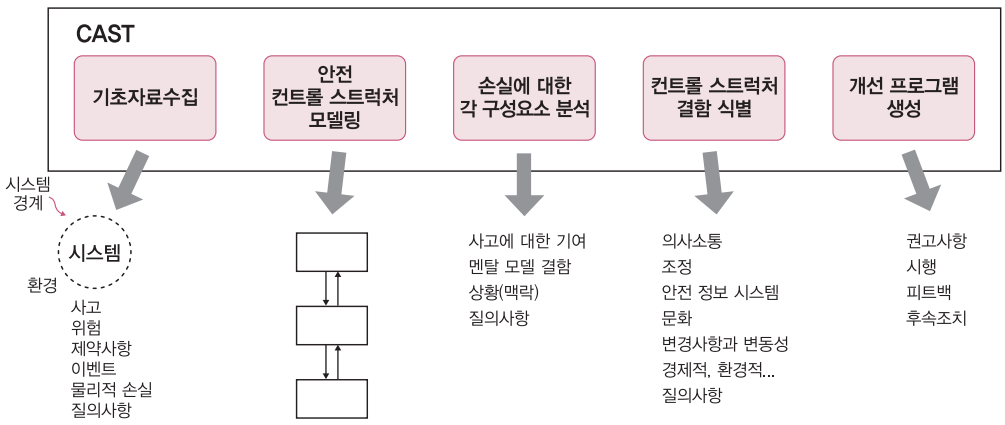


그림 9 CAST 분석절차에 따른 단계별 구성요소

◦ **CAST 분석의 기본 구성요소**(CAST HANDBOOK 내용 참조)

❶ 분석에 필요한 기초자료를 수집한다:

a. 관련된 시스템과 분석의 경계를 정의한다.

b. 손실 및 손실을 발생시킨 위험 상태를 설명한다.

c. 위험으로부터, 위험을 방지하는 데 필요한 시스템 수준의 안전 제약사항(시스템 안전 요구사항 및 제약사항)을 식별한다.

d. 판단이나 비난 없이 무슨 일(사건)이 일어났는지 설명한다. 왜 그런 일이 일어났는지 설명하기 위해 답변 받아야 할 질문들을 생성한다.

e. 물리적 장비와 컨트롤 측면의 물리적 손실, 관련된 위험을 예방하기 위한 물리적 설계 요구사항, 이러한 유형의 사고 예방을 위해 설계에 포함된 물리적 컨트롤(비상 및 안전 장비), 위험을 초래한 실패 및 안전하지 않은 상호작용, 사고를 예방할 수도 있었던 누락되었거나 부적절한 물리적 컨트롤, 이벤트에 영향을 미쳤던 모든 컨텍스트적 요인을 분석한다.

나머지 분석의 목표는 손실을 허용하는 안전 컨트롤 스트럭처의 한계를 파악하고 향후 이를 강화 하는 방법을 도출하는 것이다.

❷ 이러한 위험 유형에 대한 기존의 안전 컨트롤 스트럭처를 모델링한다.

❸ 컨트롤 스트럭처의 구성요소를 조사하여 손실 방지에 효과가 없었던 이유를 파악한다: 컨트롤 스트럭처의 가장 아래에서 시작하여 사고에서 각 구성요소가 수행한 역할과 동작에 대한 설명(그들이 한 일과 그 당시에 왜 옳다고 생각했는지)을 제시한다.

❹ 손실에 기여한 컨트롤 스트럭처의 결함을 전체의 관점(종합적인 시스템적 요인)에서 식별한다. 시스템적 요인은 시스템 컨트롤 스트럭처 구성요소 각각에 분포되어 있다.

❺ 향후 유사한 손실을 방지하기 위해 컨트롤 스트럭처에 대한 변경 권고사항을 작성한다. 가능하면 전체적인 리스크 관리 프로그램의 일부로서 이 위험에 대한 지속적인 개선 프로그램을 설계한다.

◦ 각 단계가 엄격해야하거나 절차를 순서대로 따라야 하는 것은 아니지만, “1. 기초자료를 수집”하고 “2. 안전 컨트롤 스트럭처를 모델링” 하는 것을 우선 수행하는 것을 권장한다. 각 파트는 조사 전반에 걸쳐 진행될 수 있는데 조사 과정에서 더 많은 것을 알게 됨에 따라 분석이 재검토되고 결과가 바뀌거나 빈 곳이 채워진다. 이후 더 많은 것을 배우면서 각 단계에서 질문이 발생된다. 이 질문들은 조사자가 사고로 이어졌던 일련의 이벤트에서 손실 발생 이유를 심도 있게 설명하기 위해 무엇을 더 알아야 하는지 결정하는데 도움이 될 것이며, 이런 이벤트 발생 이유를 파악하는 것이 CAST의 목표이기도 하다. 조사 막바지의 목표는 모든 질문에 대답하거나 일부 질문은 대답할 수 없는 질문이라고 판단하는 것이다. 질문에 대한 답은 발생된 이벤트에 대한 “이유(why’s)”를 제공할 것이다.

◦ CAST 분석기법을 이용할 때 주의사항은 사후확신편향(Hindsight bia)*을 철저히 배제하고, 각 이벤트에서 작업자 또는 운영자가 실패했다거나 “했어야만 했다”와 같이 비난 가득한 단어를 사용해서는 안 된다. 원인 분석의 목표는 미래의 손실을 방지하기 위해 손실로부터 배우는 것이지, 비난할 누군가 또는 어떤 것을 찾는 것이 아니다. 단순히 하드웨어나 담당자가 무엇을 했는지, 무엇을 하지 않았는지에 대해 설명하면 된다.

* 사후확신편향(Hindsight bia): 어떤 일의 결과를 알고 나면 처음부터 그 일을 예상하고 있었다고 믿는 경향성

◦ 금번 사고의 분석기법으로 위에서 설명한 STAMP CAST를 활용하였는데, 사고조사 보고서의 기초자료를 바탕으로 안전 컨트롤 스트럭처를 모형화 한 다음, 제어구조의 구성요소별 문제점 등을 파악하여 권고사항을 작성해 보았다.

○ 분석과정은 “CAST HANDBOOK(2019, Nancy Leveson-MIT)”에서 제시한 분석 절차를 거쳤으며, 일부 파악할 수 없었던 부분은 작성자의 추정(또는 가정)을 일부 포함하여 작성하였으므로, 사실과 다른 부분이 있을 수 있다.

가) 안전 컨트롤 스트럭처(Safety Control Structure) 모형화

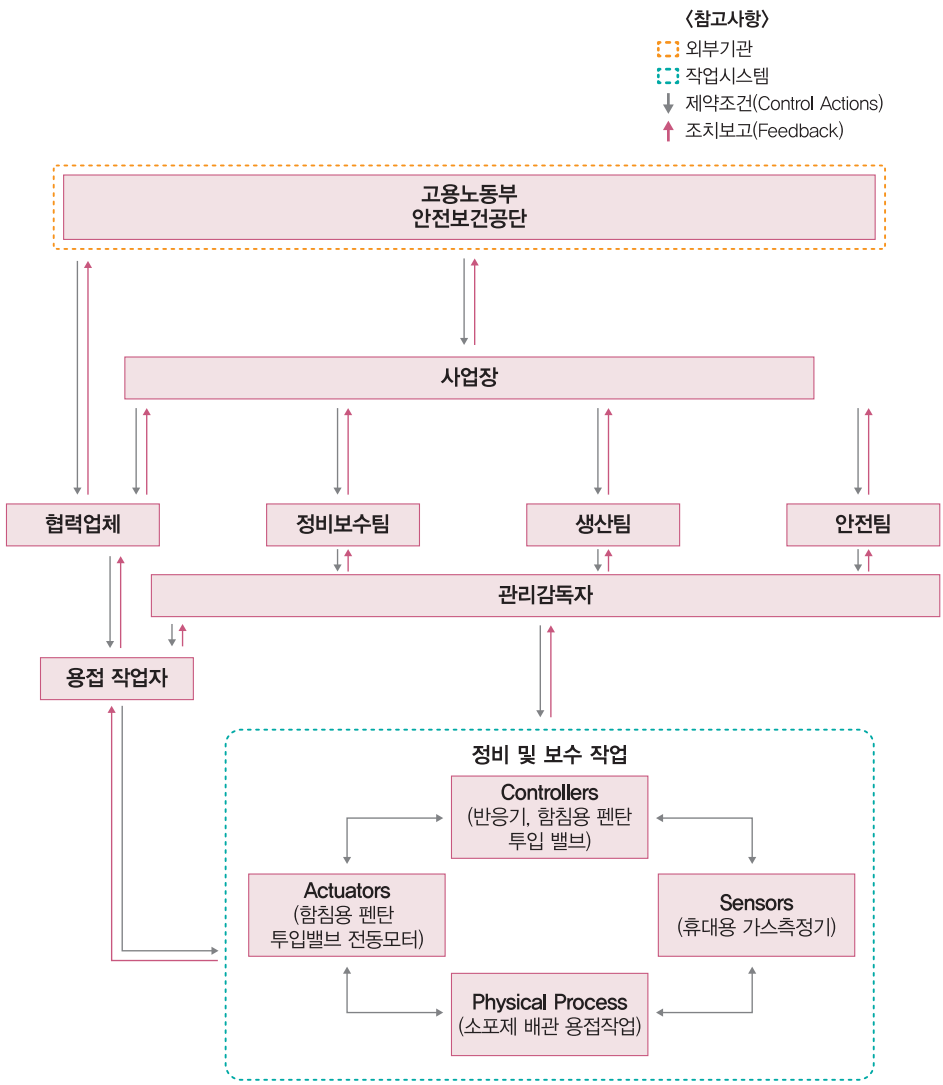


그림 10 정비 및 보수 작업 관련 안전제어구조 모형

나) 제어구조 하단부터 구성요소별 문제검 파악, 결함 식별, 권고사항 작성

a) 정비 및 보수 작업

▶ **제약조건 및 안전요구사항**

- 반응기 내 폴리스티렌 및 함침용 펜탄 제거, 퍼지 등 환기하고 맹판작업하여 반응기와 분리시켜야함
- 반응기로 투입되는 함침용 펜탄 공급밸브는 PSM 설비등급에 따라 주기적으로 상태를 확인해야함
- 화재감시자 및 화재발생 시 소화할 수 있는 소화기가 배치되어야함.

▶ **부적절한 결정 및 컨트롤 액션**

- 작업당일 휴대용 가스측정기로 용접작업 반응기 내부 인화성가스농도 측정 미실시
- 용접작업 반응기 맹판 미체결로 펜탄 투입배관과 상호 분리되지 않음

▶ **상황(맥락)**

- 반응기 내부 거품제거를 위해 소포제 배관 설치 용접작업이 이루어짐

▶ **설비 모델 결함**

- 반응기 내 펜탄 투입밸브 누설(leakage)

▶ **권고 사항**

- 반응기 내 인화성 물질 투입밸브의 PSM 설비 등급에 따른 주기적인 점검 상태 파악 및 누설여부 확인하여 밸브에 꼬리표(Tag.) 형식으로 부착하여 관리
- 화기작업 사전 인화성 가스 농도값이 기재되어야 작업허가서가 발행될 수 있도록 신청서에 양식 추가 및 작업 개시 직전 주기적인 측정
- 인화성 물질 투입 배관은 용접 작업 반응기와 분리하여 맹판 체결 실시

b) 용접 작업자

▶ **제약조건 및 안전요구사항**

- 작업대상 설비 및 취급물질의 위험성에 대해 파악해야함
- 안전작업절차 및 위험성평가 조치결과에 따라 작업 수행해야함
- 관리감독자의 지시에 따라야함

▶ **부적절한 결정 및 컨트롤 액션**

- 인화성 물질 투입밸브 점검 기록 실시 여부 및 현재상태 미확인
- 사고 발생 반응기 인화성 가스 농도 측정 미실시
- 함침용 펜탄 투입밸브 폐쇄 후 맹판 미체결

▶ **상황(맥락)**

- 전날 동일한 인근 반응기에 용접작업을 실시하였고 사고 반응기 용접작업을 실시함

▶ **멘탈 모델 결함**

- 함침용 펜탄 투입밸브 누설을 간과하고 맹판작업 및 인화성 가스 측정을 미실시하고 작업을 시작함

▶ **권고 사항**

- 작업자는 안전작업절차 및 위험성평가 지침, 결과를 반드시 준수

c) 관리감독자

▶ **제약조건 및 안전요구사항**

- 작업내용에 대한 안전 관련 사항 숙지해야함
- 작업 위험성평가 실시에 따른 평가지침, 위험요인, 개선사항 등을 확인해야함
- 안전작업허가서 발행 관련 내용 확인해야함
- 협력업체 작업자가 안전작업절차서 및 안전규정을 준수하는지 감독해야함

▶ **부적절한 결정 및 컨트롤 액션**

- 협력업체의 작업 위험성평가 지침 미확인 및 평가결과 검토 미흡
- 협력업체 작업자에게 함침용 펜탄에 대한 화재·폭발 위험성 미고지

▶ **상황(맥락)**

- 생산팀에서 관리감독자에게 반응기 내부 물질이 모두 배출되었고 환기실시 하였음을 고지하였음
- 작업 시작 며칠 전 관리감독자는 반응기 내부 및 외부 인화성 가스 농도 측정을 실시하고 이상없음을 확인

▶ **멘탈 모델 결함**

- 작업 당일 인화성 가스 농도 측정을 실시하지 않음
- 협력업체 작업자에게 함침용 펜탄에 대한 물질안전교육을 누락함
- 함침용 펜탄 투입 밸브가 정상적으로 닫혀있고 믿고 누설에 대한 가능성 배제

▶ **권고 사항**

- 협력업체 작업자에게 작업대상을 포함하여 작업반경 내에 있는 유해위험물질에 대한 교육 실시
- 화기작업 사전 인화성 가스 농도 측정 및 작업 개시 직전 주기적인 측정을 실시하여 결과를 안전팀에 보고 후 작업개시
- 밸브 및 계측기 등의 주기적인 점검 상태를 파악하여 설비의 정상적인 작동 신뢰성 확보

d) 안전팀

▶ **제약조건 및 안전요구사항**

- 위험성평가 규정 및 절차서 등을 포함한 안전보건규정 작성 및 제공
- 사고사례, 위험성평가 등의 내용을 포함한 안전교육 실시
- 부서별 위험성평가 수행 시 지원 및 참여
- 위험성평가를 포함한 안전관리시스템의 정상 작동 여부 확인 및 점검
- 공장의 안전 감독
- 협력업체 안전관리
- 안전작업허가서 승인

▶ **부적절한 결정 및 컨트롤 액션**

- 협력업체와에 금번 작업에 대한 위험성평가 결과 논의 미실시

- 생산팀의 PSM 설비 등급에 따른 점검 주기 준수 여부 미확인
- 작업 당일 반응기 내·외부 인화성 가스농도 측정 기록 계획 미수립
- 협력업체 작업자에 대한 물질안전교육이 주원료인 스티렌모노머에 대해서만 이루어졌고 이와 동일한 인화성 물질인 펜탄에 대해서는 교육 미실시
- 작업위험성평가 지침에 작업 전 밸브 맹판설치 및 가스농도 측정에 대한 내용이 있었지만 평가결과에 반영하지 않았음

▶ **조직 결함**

- 매일 용접 작업개시 전 관리감독자와 생산팀이 안전팀에 작업허가서 발행요청을 하여 공장장까지 결재가 이루어졌어야 하지만 그 과정을 누락시킴으로써 관리감독자의 현장 안정성확보에 대한 피드백 정보를 얻지 못함

▶ **권고 사항**

- 화재·폭발 및 밀폐공간 등의 위험작업과 관련한 작업 진행 과정을 세부적으로 확인할 수 있는 시스템 마련
- 맹판설치 및 밸브 마감조치, 가스농도측정 등 안전 확보에 필요한 사전활동 등이 안전작업계획서에 반영되어 있는지 확인

e) 사업장

▶ **제약조건 및 안전요구사항**

- 업무와 관련된 모든 노동자의 건강 및 안전을 보장
- 안전정책 수립(본사, 공장, 연구소 등) 및 안전관리시스템 구축
- 안전관리시스템 및 안전정책의 준수 여부 및 효과성 확인
- 본사, 연구소, 공장 안전관리시스템의 일관성 유지 및 이행 여부 확인
- 본사, 연구소, 공장 등을 위한 광범위한 안전 정보 시스템의 구축 및 업데이트
- 사고에서 얻은 교훈 등에 대해 각 공장 및 연구소 간에 의사소통
- 사고 발생 시 사람과 주변 환경에 미치는 영향 완화
- 공장이 위치한 국가의 정부 규정 준수
- 안전팀의 역할 및 활동 감독
- 협력업체에 적절한 안전교육 제공

▶ **부적절한 결정 및 컨트롤 액션**

- 시간적으로 촉박한 정비보수 일정 수립
- 협력업체와에 금번 작업에 대한 안전정보 공유 부족

▶ **조직 결함**

- 협력업체에 대한 안전 배려 부족
- 작업자의 안전보다 작업일정을 중요시하는 조직 문화

▶ **권고 사항**

- 정비보수작업에 대한 명확한 안전관리체계 구축
- 공정안전관리 시스템이 정상적으로 운영될 수 있도록 관리
- 직원의 안전을 고려하여 작업일정을 탄력적으로 조정할 수 있는 문화 구축
- 타회사 및 과거 사고로부터 교훈을 얻을 수 있는 시스템 구축 및 운영

f) 고용노동부 및 안전보건공단

▶ **제약조건 및 안전요구사항**

- 근로자를 보호하기 위한 산업안전보건법의 집행과 사업장 감독
- 심사 및 감독을 통해 안전 관련 중요 공정의 개선 유도
- 사고의 근본적인 원인 조사 및 파악된 취약점의 개선 확인
- 공정안전관리 시스템 등 안전관리시스템의 정상 작동 여부 확인
- 사업장의 시험 운전, 정비·보수 등 위험 작업에 관심

▶ **부적절한 결정 및 컨트롤 액션**

- 공정안전관리 시스템의 정상적 운영에 대한 검토보다는 PSM 대상 공정에 대한 법 위반사항 확인 위주로 감독업무 수행

▶ **조직 결함**

- PSM 이행상태평가 및 심사·확인의 이원화로 PSM 사업장에 대한 설비상태 파악이 어렵고 운영단계에서 사업장의 실시간 정비현황을 위험경보제 체크리스트 작성만으로 파악하기엔 역부족

▶ **권고 사항**

- 사업장의 정보공유 시스템이 잘 작동될 수 있는 방향으로 제도 운영
- 안전관리시스템이 정상작동(PDCA) 될 수 있는 사항 중심으로 PSM 제도 운영
- 사업장의 안전역량을 강화할 수 있는 방향으로 제도 개선 및 운영
- 사업장의 정비보수 작업에 대해 점검 또는 감독할 수 있는 제도 운영
- PSM 사업장 위험작업에 대한 위험경보제 신청 시스템을 개선하여 안전작업계획서 작성 등을 손쉽고 빠르게 할 수 있도록 유도

Ⅳ 사고발생 원인

원인 01

화재·폭발 예방 시스템 미비

○ STAMP 분석을 통해 얻은 손실에 대한 시스템적 결함(설비 결함, 멘탈 모델 결함, 조직 결함 등)과 상황(맥락)들을 종합해 볼 때, 용접작업을 시작하기 전 화재·폭발 예방조치가 미흡하였던 것을 시스템적 원인으로 분석해 보면 다음과 같다.

» 정비 및 보수 작업에서의 설비 결함 요인

- 반응기에 접속된 펜탄 투입밸브는 PSM 설비 등급에 따라 주기적으로 점검을 실시하고 그 결과를 기록·관리하게 되어 있었지만, 점검을 실시하지 않았다. PSM 설비관리지침에 따라 점검시스템(컨트롤 액션)은 갖춰져 있으나 점검결과 보고자의 피드백이 이루어지지 않았다.

» 용접작업자 및 관리감독자의 멘탈 모델 결함 요인

- 관리감독자는 용접작업 당일 반응기 내부 가스농도측정을 실시해야하나, 사고발생 며칠 전 가스농도 측정을 실시한 결과 이상이 없었고, 상부 맨홀 개방상태로 환기가 충분히 되고 있었다고 판단하여 용접작업 당일 가스농도 측정을 실시하지 않았다. 또한, 매일 발행해야하는 화재·폭발 작업허가서 양식에도 용접작업 당일 반응기 내부 가스농도 측정값 기재항목이 없었으며 작업허가서가 용접당일 발행되었는지도 불분명했다.

» 생산팀 및 안전팀의 업무범위에서의 조직 결함 요인

- 일반적으로 위험물질 공급 차단, 드레인, 맹판설치 및 세척작업은 발주처에서 실시하여 안전상태를 확보한 후 협력업체가 용접 등 설비 점검·보수작업을 하고 있으나, 이를 협력업체가 하도록 함으로써 안전확보의 문제점을 내재하는 시스템을 갖추고 있고, 안전팀은 관리감독자와 생산팀으로부터 용접 작업개시 전 가스농도측정, 맹판체결이 되었는지 확인하고 작업허가서 발행요청을 받아 공장장 결재를 득한 뒤 용접 작업이 이루어져야 했지만, 안전팀의 작업승인은 작업허가서가 접수되어야 검토하는 수동적인 시스템적 절차 문제를 내포하고 있었다.

원인 02

함침용 펜탄 투입배관 드레인(Drain) 및 맹판 체결 미실시

- 반응기 상부에 3중(수동밸브-자동밸브-자동밸브 순)으로 밸브가 설치되어 있어 배관내 잔류 펜탄 드레인(Drain) 작업 시 밸브 누설(Leakage)이 발생하지 않을 것으로 판단하여 반응동 3층 펜탄 유량계부터 반응기 상부 자동밸브 구간은 드레인 및 퍼지, 맹판 체결을 미실시 하였다.

원인 03

화기작업허가 절차 미준수

- 사내 규정에 따라 방폭지역 또는 위험장소에서 화기사용 작업 전에 작업 대상기기 및 작업 구역 내에서 가연성물질의 가스농도를 측정하고 측정사항을 화기작업허가서에 기록하여야 하나, 사고당일 해당 항목에 대한 확인조치가 누락된 상태에서 작업이 진행되었다.

원인 04

위험성평가 내용 미준수

- 협력업체에서 작성한 작업위험성 평가표의 작업구분에는 배관재 교체작업, 고소작업, 화기작업으로 구분되어 있고 각 작업에 대한 주요 작업절차에 밸브 잠금 및 맹판 설치, 가스 및 산소 농도 측정이 포함되어 있었으나 작업위험성 평가표의 주요 작업절차에 대한 현재안전조치 반영상태를 확인하지 않고 작업을 실시하였다.

Ⅴ 동종사고 예방대책

대책 01

화재·폭발 예방 시스템 보완

○ STAMP 분석을 통해 얻은 손실에 대한 결함(설비 결함, 멘탈 모델 결함, 조직 결함 등)을 해결하기 위한 전체적인 시스템관점에서의 권장사항을 정리해보면 다음과 같다.

» 설비 결함에 대한 권고 사항

- 화재·폭발 관련 설비 및 계측기 등에 점검 및 교정 주기에 대한 꼬리표(Tag)를 달아 언제 점검이 실시되었고 다음 점검주기는 언제인지 기재하여 관리하여 작업 전 누구나 확인가능하게 개방적으로 관리함으로써 컨트롤러에 대한 피드백 정보가 현장에서 자연스럽게 확인될 수 있도록 하고, 펜탄 등의 인화성 물질의 밸브 점검 항목에 밸브 누설 테스트를 추가하여 밸브 밀폐에 대한 안전성을 확보한다.

» 멘탈 모델 결함에 대한 권고 사항

- 관리감독자는 매일 이루어지는 화재·폭발 작업에 대한 작업허가서에 가스측정농도 및 인화성 물질 투입배관의 분리 상태 등의 내용확인 항목을 추가하여 화재·폭발 작업개시 전 작업승인이 이루어질 수 있도록 시스템적 절차를 보완한다.

» 조직 결함에 대한 권고 사항

- 안전팀은 화재·폭발 작업기간을 확인하여 작업이 없을 때에도 관리감독자 및 생산팀 으로부터 보고를 받고, 생산팀 또는 관리감독자로부터 매일 작업이 이루어지기 전 작업허가서에 가스농도 측정 및 인화성 물질 투입배관의 분리 등에 대한 현장 조치가 관련부서에 의해 완료되었는지 확인한 다음 작업허가서 승인을 진행하도록 한다.

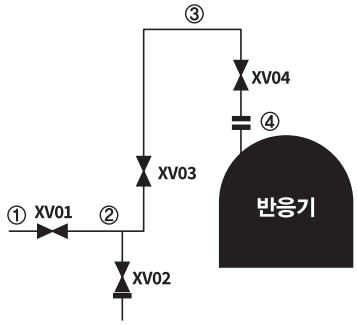
대책
02

용접작업 전 배관 내부 잔류물 제거 및 막음조치

- 밸브는 내부시트 불량, 이물질 등에 의해 누설될 수 있기 때문에 내부 드레인 작업에 대한 표준을 마련하여 치환 및 퍼지하고, 드레인이 되지 않는 배관 구간에 대해서는 드레인 노즐을 설치하는 등 충분히 드레인이 될 수 있는 구조로 실시한 다음, 반응기 등 다른 화학설비 및 부속설비와 연결된 부분에는 맹판설치("KOSHA Guide D-56-2016 맹판 설치 및 제거에 관한 기술지침" 참조), 배관 분리 등을 통하여 공급물질을 격리시킨 상태에서 화기작업을 실시하여야 한다.
- 예시) 밸브 드레인 및 맹판체결 순서

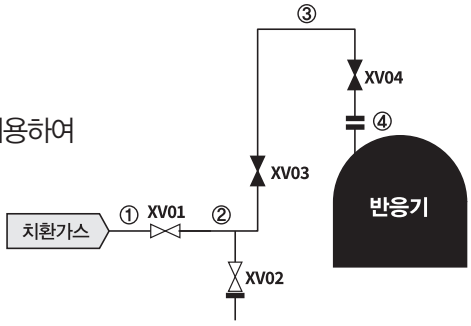
① 구간 드레인

- 각 밸브들이 잠겨있는 상태에서 ①구간 드레인을 실시한다.



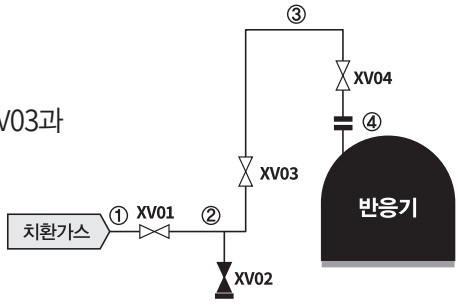
② 구간 드레인

- 치환가스를 주입하면서 XV02 드레인밸브를 이용하여 ②구간 드레인을 실시한다.



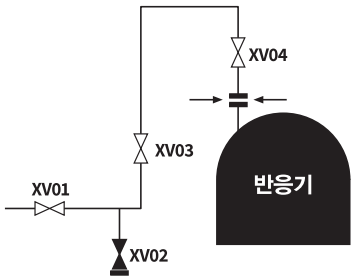
③ 구간, ④ 구간 드레인

- 드레인밸브 XV02를 닫고, 치환가스 압력하에 XV03과 XV04를 순서대로 개방하여 배출을 실시한다.



⑤ 맹판 체결 준비

- 배관 내 치환이 충분히 이루어지고 반응기 내 LEL 농도계를 통해 물질 검출이 안되었을 때 화살표 부위 맹판체결을 위한 분리작업을 실시한다.



⑥ 맹판 체결 실시

- 물질 투입 배관을 분리하고 반응기 쪽 플렌지에 맹판 체결을 실시한다.

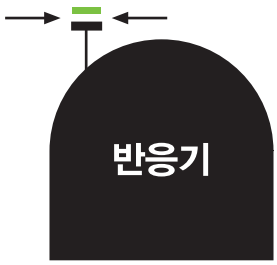


그림 11 반응기 연결배관 드레인 및 맹판체결 순서(예시)

대책 03 화기를 사용하는 화재위험작업 허가절차 준수

◦ 방폭지역이나 가연성물질이 있는 장소 등 위험장소에서 화재위험작업을 실시할 경우에는 다음 각 호 사항이 준수될 수 있도록 조치 및 확인 후 작업허가서를 발행하여야 한다.

① 작업준비 및 작업절차 수립
② 작업장내 위험물의 사용·보관현황파악
③ 화기작업에 따른 인근 가연성물질에 대한 방호조치 및 소화기구 비치
④ 용접불티 비산방지조치
⑤ 인화성액체의 증기 및 인화성가스 측정, 환기 등의 조치
⑥ 작업근로자에 대한 화재예방 및 피난교육 등 비상조치

대책 04 위험성평가 내용 이행여부 관리

◦ 작업허가서 발급자는 사내 안전작업 허가규정에 따라 위험성평가 결과 및 추가적인 안전조치 반영여부를 확인 후 발급되도록 관리하여야 한다.

Ⅵ 사고로부터 얻은 교훈

「반응기 소포제 투입배관 설치 용접작업 중 폭발사고」로부터 얻은 교훈은 다음과 같다.

교훈 01

화기작업 전 연소의 3소요는 반드시 기억한다!

- 연소의 3가지 요소란 가연물, 산소 공급원, 점화원으로 볼 수 있는데, 화기작업 전 반드시 이 3요소의 통제 가능여부를 확실하게 할 필요가 있다.
- 용접작업의 경우 대기상태에서 작업을 실시해야하고 불꽃을 수반하기에 산소 공급원과 점화원은 직접적인 통제가 불가능하다. 하지만 이번사고에 직접적인 영향을 미친 인화성물질인 펜탄은 맹판처리로 가연물 격리 후 작업이 가능하였고, 반응기 내에 충분한 환기로 인화하한(LEL)을 유지하여 점화원과 산소 공급원이 존재해도 화재·폭발 없이 용접작업이 가능할 수 있었다. 즉, 연소의 3가지 요소 중 2가지를 통제할 수 없는 상황에서 1가지(가연물)는 더욱 더 철저하게 관리해야한다는 것을 명심해야한다.

교훈 02

끝날 때까지 끝난 게 아니다!

- 작업허가서 발행 전 작업현장 주변과 반응기 내부에 인화성가스 농도 측정 및 환기를 실시하였다.
- 하지만 이러한 조치는 작업 시작일 며칠 전에 수행하였고, 정작 작업 시작일에는 반응기 개방으로 환기가 충분할 것이라는 판단 하에 인화성가스 농도를 측정하지 않았다고 한다. 인화성물질을 사용하는 설비에서의 용접작업은 작업이 끝날 때까지 설비내부 인화성 가스 체류여부를 휴대용 가스측정기로 주기적으로 확인할 필요가 있고, 작업이 끝나고 나서도 용접부위가 점화원으로 작용하지 않게 충분히 안정될 때까지 밸브개방을 서둘러서는 안된다.

교훈
03

위험성평가를 PDCA 사이클로 관리하자!

- 위험성평가는 사업장 스스로 작업 전 유해·위험요인에 대한 실태를 파악하고 이를 평가하여 감소대책을 수립한 뒤 실행하도록 마련된 제도이다.

- 모든 유해·위험작업이라는 집을 짓기 위한 토대는 위험성평가라고 할 수 있을 정도로 그 영향력은 절대적이다. 하지만 무사고로 이어지는 하루하루를 지내다 보면 나도 모르게 위험요인을 놓쳐버리는 경우가 많고 반복되는 작업 일수록 아무 일 없을 것이라는 무사안일주의가 행동을 지배하게 된다. 이런 현상을 예방하기 위해서 위험성평가는 PDCA(Plan, 계획 ⇨ Do, 실천 ⇨ Check, 확인 ⇨ Action, 환류) 사이클로 관리되어야 한다.

- 이번사고와 이 사이클을 대조해 보자면, 인화성 물질을 채웠던 반응기 용접작업 전 분명히 위험성평가에는 화재·폭발 위험요인이 평가항목으로 명시(Plan)되어 있었고, 환기 및 인화성가스 측정(Do) 이라는 안전활동을 전개했다. 하지만 며칠전부터 개방된 용기에 의해 당연하다는 듯이 작업개시 전 인화성가스 농도를 측정하지 않고 별다른 현장확인(Check) 없이 용접이 시작되어 PDCA 사이클의 CA 사이클이 이루어지지 않았다. 분명 작업당일 용접작업 배관 내부에서 인화성가스 밸브 누설여부를 확인(Check)하였다면 밸브의 이상유무까지 점검하는 환류(Action)활동까지 이어질 수 있었을 것이다.

Ⅶ 유사 사고사례

01 배관 지지대 용접 작업 중 폭발 사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2019년 10월
사고장소	경남 울산시 소재 화학공장
피해내용	2명 부상
사고내용	• 울산시 남구 소재 화학공장에서 위험물 옥외탱크저장소 내 인화성물질 저장탱크 외벽에서 외주 협력업체 직원이 물 분무 소화설비 설치를 위한 배관 지지대 용접 작업 중 고온에 의해 탱크 내 잔류하던 인화성증기가 탱크 내부에서 폭발이 발생하여 근로자 2명이 부상한 사고임

02 드레인 밸브 설치 용접 작업 중 폭발 사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2017년 8월
사고장소	경남 양산시 소재 화학공장
피해내용	2명 부상
사고내용	• 경남 양산시 소재 화학공장에서 에탄올 워셔액 60 ton 탱크 이설을 완료하고 물 배관에 드레인 밸브 설치를 위해 용접기로 구멍을 뚫던 중 폭발이 발생하여 2명이 부상을 당하고 저장탱크 상부 및 사무실 유리창 일부가 파손된 사고임

03 배관 연결 용접작업 중 폭발 사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2011년 7월
사고장소	서울특별시 소재 공사현장
피해내용	2명 사망
사고내용	• ○○공장 신축공사 현장에서 기계장치공사 협력업체 소속 근로자 2인이 위험물 저장탱크 상부(높이 6 m)에서 배관 연결 및 용접작업 중 탱크 내부에 잔류하고 있던 인화성 물질(톨루엔 추정)이 폭발하면서 덮개와 함께 날아가 1명은 지상바닥, 1명은 공장 지붕으로 추락하여 사망한 재해임

Ⅷ 참고자료

01 산업안전보건법, 고용노동부; 2021

02 산업안전보건용어사전, 한국산업안전보건공단; 2006

03 중대산업사고 조사의견서, 한국산업안전보건공단; 2010~2020

04 위험성평가 지침해설서-한국산업안전보건공단, 2020

05 Fire and explosion risks from pentane in expandable polystyrene, 영국 안전보건청(HSE), 2015

06 ANSI/FCI 70-2 Class Ⅵ Control Valve Seat Leakage Classification, 2006

07 PSM 대상 사업장에서 비일상 작업 시의 재해 조사 연구, 한국산업안전보건공단, 2019

08 CAST HANDBOOK: How to Learn More from Incidents and Accidents, Nancy G. Leveson, 2019

09 https://kr.wikipedia.org, 위키백과

10 https://www.konetic.or.kr, 국가환경산업기술정보시스템

11 https://languages.oup.com/google-dictionary-ko, Oxford Languages

12 https://terms.naver.com, 네이버 지식백과

안전은 권리입니다

반응기 소포제 투입배관 설치 용접작업 중 폭발 사고

반응기 소포제 투입배관 설치 용접작업 중 폭발 사고사례(2020. 3.)

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

사고개요

2020년 3월 ○○○사업장 반응동 3층에서 협력업체 작업자 3명이 반응기 상부 6 in 플랜지에 소포제 투입배관 연결을 위해티그(TIG)용접 중 반응기 내부 유증기에 점화되어 폭발이 발생하여 급격한 화염전파에 의해 작업자 3명이 화상을 입고 병원치료 중 1명이 사망한 사고임.

▶ 사고발생 시 CCTV 화면 및 사고현장 반응기 상부

사고발생공정 및 물질

- 폭발사고는 EPS 단열재 제조공정 중 함침공정에 소포제 투입배관을 용접설치 하는 작업 중 발생하였음.
- **EPS 단열재 주요 제조공정 순서**

중합 → ✓사고발생 함침 → 탈수 → 건조 → 코팅 → 저장

- **사고발생물질**

사고원인물질인 함침용 펜탄(Pentane)은 폴리스티렌(Poly Styrene)에 투입됨.

물질명 (제품명)		Cas NO.	폭발범위 (%)	인화점 (℃)	발화온도 (℃)	증기압 (mmHg)
함침용 펜탄*	n-펜탄	109-66-0	1.5 ~ 7.8	-40	260	399 (@ 18.5 ℃)
	iso-펜탄	78-78-4	1.4 ~ 7.6	-51	420	592 (@ 20.0 ℃)

*함침용 펜탄의 구성성분은 노르말펜탄(n-Pentane) 45~55%와 이소펜탄(iso-Pentane) 45~50%임.

고용노동부 산업재해예방 안전보건공단

반응기 소포제 투입배관 설치 용접작업 중 폭발 사고

사고발생원인

○ 화재·폭발 예방 시스템 미비

- STAMP 분석을 통해 얻은 손실에 대한 시스템적 결함(설비 결함, 멘탈 모델 결함, 조직 결함 등)과 상황(맥락)들을 종합해 볼 때, 용접작업을 시작하기 전 화재·폭발 예방조치가 미흡하였던 것을 시스템적 원인으로 분석해 보면 다음과 같음.

›› 정비 및 보수 작업에서의 설비 결함 요인

• 반응기에 접속된 펜탄 투입밸브는 PSM 설비 등급에 따라 주기적으로 점검을 실시하고 그 결과를 기록·관리하게 되어 있었지만, 점검을 실시하지 않았다. PSM 설비관리지침에 따라 점검시스템(컨트롤 액션)은 갖춰져 있으나 점검결과 보고자의 피드백이 이루어지지 않았음.

›› 용접작업자 및 관리감독자의 멘탈 모델 결함 요인

· 관리감독자는 용접작업 당일 반응기 내부 가스농도측정을 실시해야하나, 사고발생 며칠 전 가스농도 측정을 실시한 결과 이상이 없었고, 상부 맨홀 개방상태로 환기가 충분히 되고 있었다고 판단하여 용접작업 당일 가스농도 측정을 실시하지 않았다. 또한, 매일 발행해야하는 화재·폭발 작업허가서 양식에도 용접작업 당일 반응기 내부 가스농도 측정값 기재항목이 없었으며 작업허가서가 용접당일 발행되었는지도 불분명했음.

›› 생산팀 및 안전팀의 업무범위에서의 조직 결함 요인

· 일반적으로 위험물질 공급 차단, 드레인, 맹판설치 및 세척작업은 발주처에서 실시하여 안전상태를 확보한 후 협력업체가 용접 등 설비 점검·보수작업을 하고 있으나, 이를 협력업체가 하도록 함으로써 안전확보의 문제점을 내재하는 시스템을 갖추고 있고, 안전팀은 관리감독자와 생산팀으로부터 용접 작업개시 전 가스농도측정, 맹판 체결이 되었는지 확인하고 작업허가서 발행요청을 받아 공장장 결재를 득한 뒤 용접 작업이 이루어져야 했지만, 안전팀의 작업승인은 작업허가서가 접수되어야 검토하는 수동적인 시스템적 절차 문제를 내포하고 있었음.

○ 함침용 펜탄 투입배관 드레인(Drain) 및 맹판 체결 미실시

- 반응기 상부에 3중(수동밸브-자동밸브-자동밸브 순)으로 밸브가 설치되어 있어 배관 내 잔류 펜탄 드레인(Drain) 작업 시 밸브 누설(Leakage)이 발생하지 않을 것으로 판단하여 반응동 3층 펜탄 유량계부터 반응기 상부 자동밸브 구간은 드레인 및 퍼지, 맹판 체결을 미실시 하였음.

○ 화기작업허가 절차 미준수

- 사내 규정에 따라 방폭지역 또는 위험장소에서 화기사용 작업 전에 작업 대상기기 및 작업 구역 내에서 가연성물질의 가스농도를 측정하고 측정사항을 화기작업허가서에 기록하여야 하나, 사고당일 해당 항목에 대한 확인조치가 누락된 상태에서 작업이 진행되었음.

○ 위험성평가 내용 미준수

- 협력업체에서 작성한 작업위험성 평가표의 작업구분에는 배관재 교체작업, 고소작업, 화기작업으로 구분되어 있고 각 작업에 대한 주요 작업절차에 밸브 잠금 및 맹판 설치, 가스 및 산소 농도측정이 포함되어 있었으나, 작업위험성 평가표의 주요 작업절차에 대한 현재안전조치 반영상태를 확인하지 않고 작업을 실시함.

고용노동부 산업재해예방 안전보건공단

반응기 소포제 투입배관 설치 용접작업 중 폭발 사고

동종사고 예방대책

○ 화재·폭발 예방 시스템 미비

- STAMP 분석을 통해 얻은 손실에 대한 결함(설비 결함, 멘탈 모델 결함, 조직 결함 등)을 해결하기 위한 전체적인 시스템관점에서의 권장사항을 정리해보면 다음과 같음.

›› 설비 결함에 대한 권고 사항

- 화재·폭발 관련 설비 및 계측기 등에 점검 및 교정 주기에 대한 꼬리표(Tag)를 달아 언제 점검이 실시되었고 다음 점검주기는 언제인지 기재하여 관리하여 작업 전 누구나 확인가능하게 개방적으로 관리함으로써 컨트롤러에 대한 피드백 정보가 현장에서 자연스럽게 확인될 수 있도록 하고, 펜탄 등의 인화성 물질의 밸브 점검 항목에 밸브 누설 테스트를 추가하여 밸브 밀폐에 대한 안전성을 확보 하여야 함.

›› 멘탈 모델 결함에 대한 권고 사항

- 관리감독자는 매일 이루어지는 화재·폭발 작업에 대한 작업허가서에 가스측정농도 및 인화성 물질 투입배관의 분리 상태 등의 내용확인 항목을 추가하여 화재·폭발 작업개시 전 작업승인이 이루어질 수 있도록 시스템적 절차를 보완 하여야 함.

›› 조직 결함에 대한 권고 사항

- 안전팀은 화재·폭발 작업기간을 확인하여 작업이 없을 때에도 관리감독자 및 생산팀 으로부터 보고를 받고, 생산팀 또는 관리감독자로부터 매일 작업이 이루어지기 전 작업허가서에 가스농도측정 및 인화성 물질 투입배관의 분리 등에 대한 현장 조치가 관련부서에 의해 완료되었는지 확인한 다음 작업허가서 승인을 진행하도록 하여야 함.

○ 용접작업 전 배관 내부 잔류물 제거 및 막음조치

- 밸브는 내부시트 불량, 이물질 등에 의해 누설될 수 있기 때문에 내부 물질을 드레인 및 퍼지하고 반응기 등 다른 화학설비 및 부속설비와 연결된 부분에는 맹판설치, 배관 분리 등을 통하여 격리시킨 상태에서 화기작업을 실시하여야 함.

○ 화기를 사용하는 화재위험작업 허가절차 준수

- 방폭지역이나 가연성물질이 있는 장소 등 위험장소에서 화재위험작업을 실시할 경우에는 다음 각 호 사항이 준수될 수 있도록 조치 및 확인 후 작업허가서를 발행하여야 함.

① 작업준비 및 작업절차 수립
② 작업장내 위험물의 사용·보관현황파악
③ 화기작업에 따른 인근 가연성물질에 대한 방호조치 및 소화기구 비치
④ 용접불티 비산방지조치
⑤ 인화성액체의 증기 및 인화성가스 측정, 환기 등의 조치
⑥ 작업근로자에 대한 화재예방 및 피난교육 등 비상조치

○ 위험성평가 내용 미준수

- 안전작업허가서 발급자는 사내 안전작업 허가규정에 따라 위험성평가 결과 및 추가적인 안전조치 반영 여부를 확인 후 발급되도록 관리하여야 함.

고용노동부 산업재해예방 안전보건공단

OPEN 공공누리 공공저작물 자유이용허락

작 성

김 상 중 [안전보건공단 전북지역본부 화학사고예방센터(익산)]
여 운 성 [안전보건공단 전북지역본부 화학사고예방센터(익산)]
김 경 민 [안전보건공단 전북지역본부 화학사고예방센터(익산)]
최 승 철 [안전보건공단 전북지역본부 화학사고예방센터(익산)]
심 재 훈 [안전보건공단 전북지역본부 화학사고예방센터(익산)]

검 토

서 찬 석 [안전보건공단 중대산업사고예방실]
임 지 표 [안전보건공단 중대산업사고예방실 공정안전부]
강 성 광 [안전보건공단 중앙사고조사단]
윤 영 호 [안전보건공단 중앙사고조사단]
김 상 중 [안전보건공단 전북지역본부 화학사고예방센터(익산)]
구 채 칠 [안전보건공단 경북지역본부 화학사고예방센터(구미)]
황 성 훈 [안전보건공단 대전세종광역본부 광역조사센터(대전)]

「반응기 소포제 투입배관 설치 용접작업 중 폭발사고」사례 연구

2021-중대산업사고예방실-316

발행일	2021년 6월
발행인	한국산업안전보건공단 이사장 박두용
발행처	한국산업안전보건공단 중대산업사고예방실
주 소	울산광역시 중구 종가로 400
전 화	(052) 703-0500
홈페이지	http://www.kosha.or.kr

※ 무단 복사 및 복제하여 사용하는 것을 금지함

2021-중대산업사고예방실-316

OPEN 출처표시 상업용금지 변경금지
공공누리 공공저작물 자유이용허락

5호

화학사고 사례연구

반응기 소포제 투입배관 설치 용접작업 중 폭발사고

산업재해예방
안전보건공단

울산광역시 중구 종가로 400(성안동)
고객만족센터 Tel. 052-703-0500 / 1644-4544