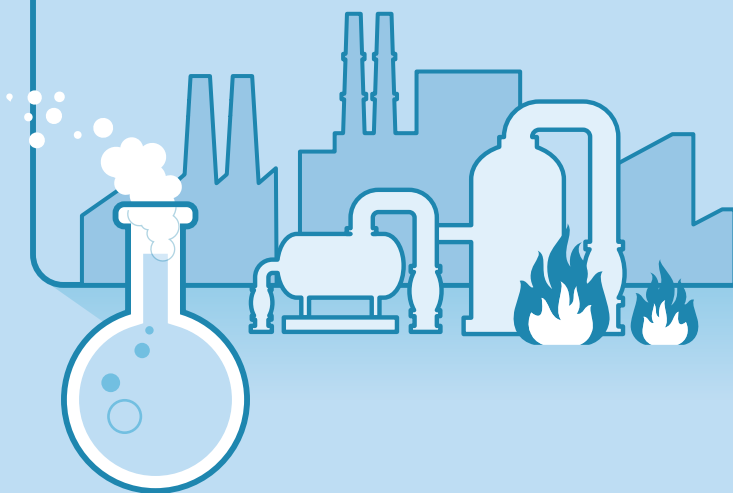


화학사고 사례연구

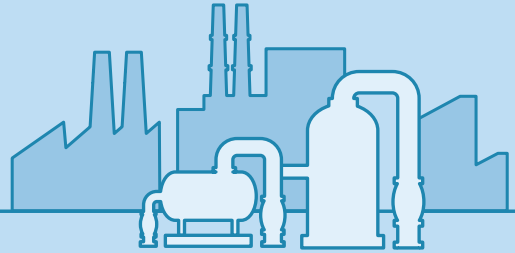
6
호

압축기 토출배관 신축이음
파단사고



CONTENTS





I. 사고개요	07
II. 사업장 현황	08
III. 사고분석	11
IV. 사고발생 원인	21
V. 동종사고 예방대책	23
VI. 사고로부터 얻은 교훈	25
VII. 유사 사고사례	27
VIII. 참고자료	28





01 납사(Naphtha)

- 원유를 상압 증류할 때 200 ~ 370 °C의 비점범위 30 ~ 170 °C 정도의 온도범위에서 얻어지며 증류 범위의 차이에 따라서 경질납사, 중질납사, 이들 양자를 포함하는 Whole range naphtha로 구분되며 석유화학공업의 출발원료이다.

02 NCC 공장

- 납사 분해 공장(Naphtha Cracking Center, NCC)은 원료인 납사를 가열(약 800 ~ 850 °C)하여 탄화수소를 열분해한 후 냉각, 압축, 분리 등의 과정을 거쳐 석유화학산업의 핵심 원료인 기초유분을 생산하는 공장으로 열분해 공정, 급냉 공정, 압축 공정, 정제 공정으로 구성되어 있다.
- NCC에서 생산되는 제품들의 구성비는 보통 에틸렌 31 %, 프로필렌 16 %, C₄유분 10 %(부타디엔 원료), LPG(벤젠/톨루엔/크실렌 원료) 14 %, 메탄·수소·LPG 등 기타제품이 29 % 정도를 차지하고 있다.

03 기초유분

- NCC 공장에서 생산되는 에틸렌, 프로필렌, C₄ 유분(Mixed C₄), 열분해 가솔린(RPG, Raw Pyrolysis Gasoline) 등의 총칭이다.

04 탄화수소

- 탄소(C)와 수소(H) 만으로 이뤄진 유기 화합물의 총칭이며 가장 간단한 탄화수소는 탄소 하나와 수소 넷으로 이뤄진 메탄(CH₄)이다.

05 열분해 공정

- 분해로(Fired Heater)를 약 800 ~ 850 °C 고온으로 가열하여 원료인 납사를 여러 성분의 탄화수소 화합물로 분리하고(분해가스), 분해로의 열로 고압증기를 생산하는 공정이다.

06 급냉 공정

- 열분해 공정에서 가열된 탄화수소화합물들의 반응을 억제하여 Coke, Tar 형성을 방지하고 후단 공정인 압축 공정의 부하를 낮추기 위해 급냉 타워(Quench Tower)에서 분해가스를 냉각하는 공정이다.

07 압축 공정

- 급냉 공정에서 냉각된 분해가스를 저온 고압으로 압축하여 정제공정으로 이송하는 공정이며 다단의 압축기로 구성되어 있다.

용어/설명

08 정제 공정

- 압축된 분해가스를 증류 조작을 통해 수소, 메탄, 에틸렌, 프로필렌, C4 Mixture 등으로 분리하여 기초유분을 생산하는 공정이다.

09 타이로드형 신축이음(Tie-Rod Expansion Joint)

- 신축이음은 증기나 가열된 가스와 같은 고온 물질을 전달하거나 배관의 움직임과 진동을 흡수하기 위해 배관에 설치하는 배관자재의 한 종류이며 사고가 발생한 신축이음은 신축이음 양쪽 끝에 벨로우즈가 하나씩 총 2개소가 설치되어 있다.
- 신축이음의 주요 구성품인 벨로우즈는 몇 개의 주름으로 이루어져 있고 각 주름 사이에는 벨로우즈의 강도 향상 및 응력이 균등하게 작용하도록 END RING이 설치되어 있고, 하부 끝단에는 보강링(REINFORCE RING)이 설치되어 파이프의 내부 압력, 축과 측면 편향을 어느 정도 수용 할 수 있게 설계 및 제작된다.
- 타이로드는 긴 철봉 모양을 하고 있으며 유체가 흐르는 방향으로 작용하는 힘을 벨로우즈와 나누어 받아 과도한 힘이 벨로우즈에 가해져 파단되는 것을 방지하는 역할을 하며 벨로우즈를 둘레로 복수 개를 설치한다.
- 신축이음 양끝 플랜지에 볼트로 타이로드를 연결하여 고정된 신축이음을 타이로드형 신축이음(이하 '신축이음'으로 표기)이라고 한다.

10 각도 변위(Angular movement)

- 중심축으로부터 일정 거리가 떨어진 위치에 있는 무게를 갖는 물체가 중심축을 기준으로 특정 속도로 움직이는 모습을 말하며 이때 물체에 힘(angular momentum)이 가해진다.

11 Seal Gas

- 기계 내부에 흐르는 유체의 압력이 높아지면 기계가 조립된 틈새로 내부 유체가 흘러나올 수 있으므로 이를 방지하기 위해 기계의 틈새에 채워 넣는 압축가스를 말한다.

12 RBI(Risk Based Inspection)

- 설비별로 위험도를 정량화하고, 그 결과에 따라 검사에 대한 우선순위, 방법, 주기 등을 차등 적용하는 검사 방법이다.



13 CUI(Corrosion Under Insulation)

- 보온재 하 부식이라 하고, 배관, 탱크 또는 장치에 시공된 보온재나 내화물 하부에서 발생하는 부식이다. 보온재 손상이나 불량한 시공이 수분의 유입 원인이 되어 부식을 발생시킨다.

14 CBM(Condition Based Maintenance)

- 사람에 의한 현장 점검 또는 계기류에 의한 설비의 상태를 측정을 통해 설비의 이상 징후를 조기에 발견하여 적합한 정비를 필요시 마다 수행하는 정비 방법이다.

15 PM(Preventive Maintenance)

- 설비 수명을 예측하여 일정 기간 설비에 따라 정해진 항목을 정비 또는 교체하여 설비의 고장을 예방하는 정비 방법이다.

16 TBM(Time Based Maintenance)

- 중요도가 높고 고장시 영향이 큰 기기에 적용하는 정비이며 해당 기기를 일정 시간 사용하게 되는 시점 마다 운전원에 의한 점검, 계기에 의한 감시, 정비요원에 의한 정비 등을 수행하는 정비 방법이다. (법적 정기 검사 등이 이에 해당함)

17 HP/MP/LP 압축기

- 압축기에 흡입되고 토출되는 유체의 압력 조건에 따라 HP(High Pressure, 약 10 bar_g 흡입, 약 45 bar_g 토출), MP(Middle Pressure, 약 3 bar_g 흡입, 약 10 bar_g 토출), LP(Low Pressure, 약 1 bar_g 흡입, 약 3 bar_g 토출)로 구분한다.

18 EJMA(Expansion Joint Manufacturers Association)

- EJMA는 금속 벨로우즈 신축이음 제조업체들로 구성된 조직이다. 1955년에 설립되어 품질 확장 조인트 설계 및 제조를 위한 일련의 표준을 만들고 유지하고 있으며 EJMA 표준은 금속 벨로우즈 팽창 조인트의 올바른 선택 및 적용을 위한 기준으로 전 세계적으로 사용되고 있다.

I 사고개요



2020년 3월 ○○○사업장 NCC공장 압축공정의 3단 분해가스 (탄화수소혼합물) 압축기(Process Gas Compressor)의 토출배관 신축이음(Expansion Joint, 20")이 파단되어 에틸렌, 프로필렌 등을 포함한 다량의 납사(Naphtha) 분해가스가 누출되고 대규모의 폭발·화재가 발생한 사고이다.

01

인명피해

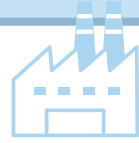
- 근로자 부상 00명
- 인근 주민 등 피해접수 00명

02

물적피해

- NCC 공장 압축 공정 가스압축기 및 배관 등

Ⅱ 사업장 현황



○○○사업장은 연간 100만톤의 에틸렌 생산능력을 갖추고 있는 석유화학공장이다.

01

NCC 공장

- 석유화학산업의 근간이 되는 석유제품인 Naphtha를 원료로 에틸렌, 프로필렌, 벤젠, 톨루엔 등 기초유분을 생산하는 공장이다.
- 주요 공정 흐름은 아래 [그림 1]과 같다.



• NCC 공장 개요

열분해 공정

원료인 납사를 약 800 ~ 850 °C 의 고온에서 열분해하여 여러 성분의 탄화수소 화합물 (분해가스)로 분리한다.

▶ 주요설비 : 분해로(Fired Heater)

급냉 공정

분해로에서 열분해된 분해가스를 급냉 타워에서 냉각한다.

▶ 주요설비 : 급냉탑(Quench Tower)

압축 공정 (사고발생)

냉각된 분해가스를 저온고압으로 압축한다.

▶ 주요설비 : 분해가스 압축기(Process Gas Compressor)

정제 공정

압축 건조된 분해가스로부터 수소, 메탄, 에틸렌, 프로필렌, C₄ Mixture 등을 생산한다.

▶ 주요설비 : Splitter 등 증류탑

II. 사업장 현황

02

사고 발생 공정(압축 공정)

- 급냉공정을 거친 분해가스를 5단으로 구성된 압축기에서 저온고압으로 압축하여, 정제공정으로 이송하고, 급냉공정에서 제거되지 않은 소량의 유수분은 각 압축기 전단 Drum에서 응축시킨다.
- 분해가스는 압축기에서 압축되는 정도에 따라 온도가 상승되는데 이를 다시 낮추기 위해 각 압축기 사이에는 열교환기가 설치되어 있으며 이번 사고는 분해가스 압축기 3단 토출배관에 설치된 신축이음에서 발생하였다.

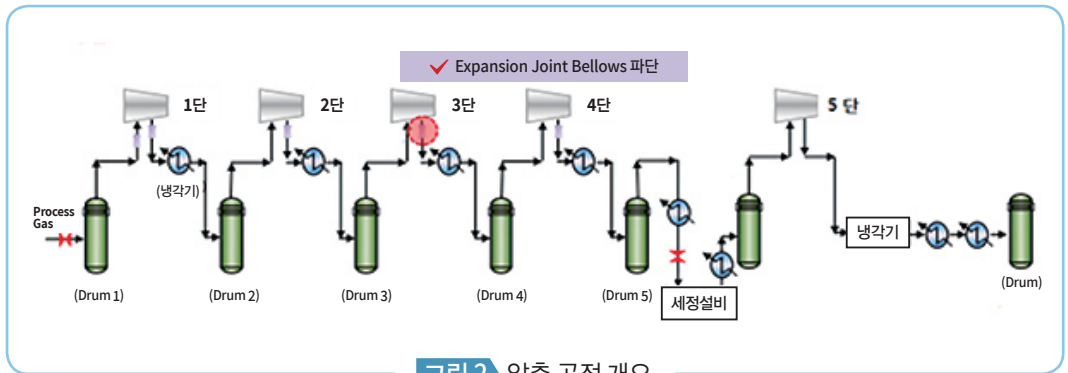


그림 2 압축 공정 개요

03

사고 발생 물질

① 분해가스

물질명	CAS No.	함량 (질량비)	폭발한계(%)		인화점 (°C)	발화점 (°C)	증기밀도 (공기=1)
			하한	상한			
에틸렌	74-85-1	33.1	2.7	36	—	450	0.97
프로필렌	115-07-1	16.2	2	11.1	-107	460	1.45
메탄	74-82-8	14.3	5	15	—	537	0.554
에탄	74-84-0	5.7	3	12.5	—	472	1.05
부타디엔	106-99-0	6.1	1.1	16.3	-76	414	1.9
이소부탄	115-11-7	2.6	1.8	9.6	-76.1	465	1.94
수소	1333-74-0	1.1	4	76	—	500	0.07
기타 (프로판 등)	-	20.9	-	-	-	-	-

표 1 사고발생 물질 조성

04

사고 발생 설비

① 신축이음

장치명	크기		설계조건		운전조건		사용 재질	
	길이 (mm)	지름 (mm)	압력 (bar _g)	온도 (°C)	압력 (bar _g)	온도 (°C)	벨로우즈	파이프
신축이음	2,500	500	26	90	12.5	70 ~ 80	INCONEL 600 (SB-168)	A106-B

표 2 신축이음 제원



사진 1 사고 발생 후 신축이음

② 분해가스 압축기

설비명	단수	형식	설계조건				사용 재질		
			흡입압력 (bar _g)	토출압력 (bar _g)	유량 (m ³ /h)	회전수 (rpm)	Case	본체	Impeller
분해가스 압축기 (PGC)	3	다단 원심형	6.64	12.79	58,820	5,524	A516 Gr.70	A216- WCB	STS630

표 3 분해가스 압축기 제원

Ⅲ 사고분석



01

사고 발생 장소

- 폭발이 발생한 장소는 NCC 공장 압축기동으로 3층으로 구성된 단독 구조물이며, 2층에 사고 발생 설비인 분해가스 압축기, 프로필렌 냉매 압축기, 에틸렌 냉매 압축기가 설치되어 있다.

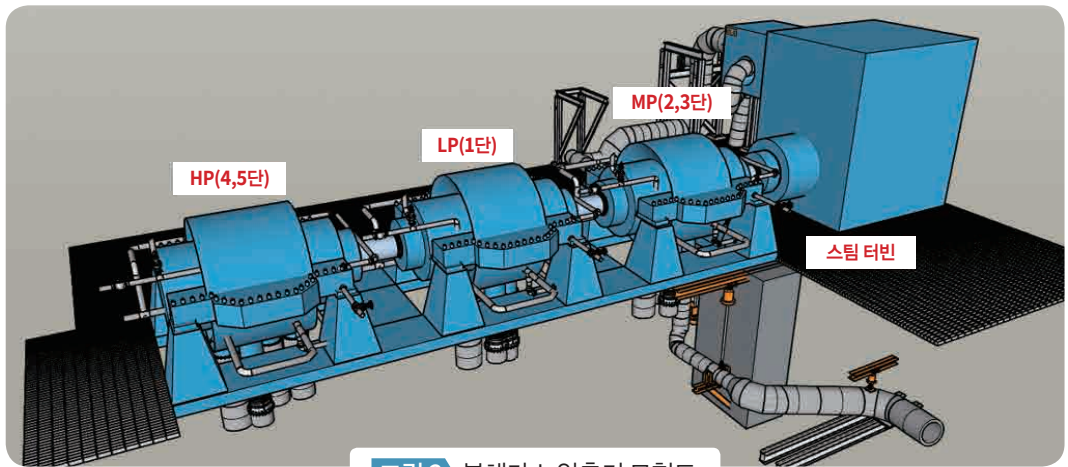


그림 3 분해가스 압축기 모형도

- 신축이음이 파단되어 분해가스가 누출된 신축이음은 분해가스 3단 압축기 토출배관과 연결된 신축이음이며, 이는 압축기동 2층 바로 하부에 설치되어 있다.

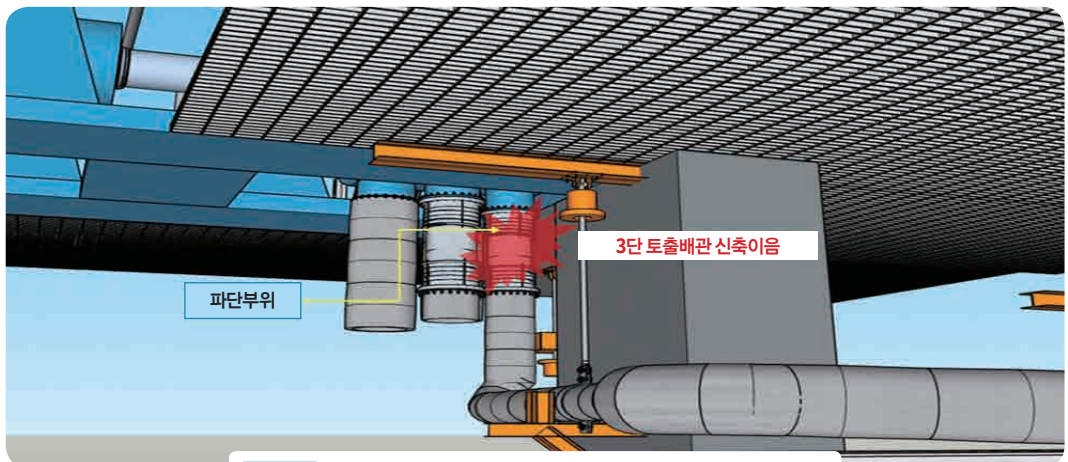


그림 4 분해가스 3단 압축기 하부 신축이음 연결부 모형도

02

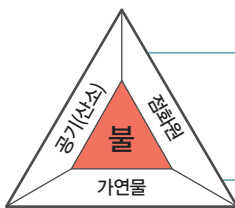
사고 발생 과정

① 작업상황

일시	작업 현황
2020년 03월 00일 02:57:49	• 분해가스 압축기 진동 경보 발생
02:57:53	• 4단 압축기 흡입 압력 감소
02:57:55	• 3단 압축기 토출 유량 감소
02:57:57	• 4단 압축기 토출 유량 감소
02:58:05	• 분해가스 압축기 인근 가스감지기 누출 경보 발생
02:58:17	• 분해가스 폭발 및 화재 발생
02:58:21	• 프로필렌 냉매 압축기 및 에틸렌 냉매 압축기 과다 진동으로 인한 가동 정지
02:58:59	• 분해가스 압축기 과다 진동으로 인한 가동 정지 • NCC 공장 전체 가동 정지
09:00:00	• 화재 진압 완료

03

폭발·화재 원인 분석



폭발·화재가 발생하기 위해서는 가연물(폭발 위험분위기를 형성하는 인화성물질), 점화원, 공기(산소)가 공존해야 하므로 이를 기준으로 다음과 같이 추정하였다.

① 가연물

- 아래의 사고 발생 경위 및 현장 설비 상태를 근거로 분해가스 3단 압축기 토출배관에 설치된 신축 이음이 파단되며 대기 중으로 누출된 인화성 가스인 분해가스가 가연물로 작용하였을 것으로 추정한다.
 - » 폭발·화재가 발생하기 전에 4단 압축기 흡입 압력의 저하, 3단 압축기 및 4단 압축기의 토출 압력 저하 발생
 - » 분해가스 압축기 인근의 가스감지기의 경보 발생
 - » 폭발·화재로 인해 1단, 2단, 3단 압축기의 파손이 정도가 크고, 이격되어 있는 4단, 5단 압축기는 상대적으로 온전한 상태

III. 사고분석

- » 프로필렌 압축기와 에틸렌 냉매 압축기도 그을림 등 화재의 직접적인 영향을 받은 모습은 보이지 않고 단순 폭발 압력에 의한 계기, 설비 손상만 발생
- » 사고 발생 현장에서 분해가스를 이송하는 3단 압축기 토출배관 신축이음의 파단 확인
- » 분해가스 압축기의 Seal Gas 공급 유량 및 압력은 정상운전 조건으로 유지되고 있어, 신축이음의 벨로우즈 파단 전에 압축기 Seal 파손이 먼저 발생하였을 가능성은 낮음

② 공기(산소)

- 압축기동 2층에 존재하는 대기 중에 섞여 있는 산소가 신축이음 파단 부분에서 누출된 분해가스와 섞여 폭발분위기를 형성하였을 것으로 추정한다.

③ 점화원

- 점화원에 대하여 아래와 같이 검토한 결과 분해가스의 고온 표면 접촉, 금속 충돌, 정전기(분출대전 및 방전) 등이 복합적인 점화원으로 작용하였을 것으로 추정된다.

고온 표면 접촉에 의한 자연발화 가능성

- » 분해가스 압축기는 고온·고압의 스팀을 구동원으로 사용하였고 초고압스팀 배관의 고온 표면이 외부로 노출되는 것을 방지하고자 보온재를 설치하였으나 플랜지 연결부는 누설 유무를 용이하게 관찰하고자 보온재를 설치하지 않았다.
- » 분해가스 압축기의 제작사와 용량이 유사한 타 사의 분해가스 압축기 스팀배관 플랜지 연결부의 실측 온도가 452.6 °C로 측정되었으며 이는 누출된 분해가스의 구성 성분 중 에틸렌, 부타디엔의 자연발화 온도를 상회하는 온도이므로 분해가스가 스팀배관 플랜지에 접촉하였을 경우 자연 발화하였을 가능성이 있다.

금속 충돌에 의한 점화원 발생 가능성

- » 현장 훼손상태가 심해 점화흔적을 확인할 수 없으나 폭발로 인해 파손된 상부 벨로우즈 커버가 타이로드에 부딪치거나 기타 철재 자재들이 서로 충돌하며 스파크를 발생시켜 점화원으로 작용하였을 가능성이 있다.

정전기

- » 파단된 벨로우즈에서 분해가스 분출시 분해가스 내에 분진, 미스트 등이 혼입된 경우 정전기 대전이 가능하고 분해가스 누출 압력이 높아 벨로우즈 파단부위 중 돌출부에 분출대전을 쌓아 이로 인해 정전기가 발생되고 대기 중으로 방전되며 점화원으로 작용하였을 가능성이 있다.

전기기계기구에 의한 점화원 발생 가능성

- » 사고조사 당시 현장에 설치된 각종 센서류, 동력기계, 설비 제어반을 확인결과 해당 지역에 적합한 방폭설비가 설치되어 있어 비방폭설비에 의한 점화원 발생 가능성은 낮다.
- » 분해가스 누출이 시작되어 폭발이 발생하기 전에 까지 배전반 차단기 개방이나 보호계전기 동작과 같은 전기적 이상 상황이 발생하지는 않은 것으로 미루어보아 지락, 단락 등과 같은 전기적 사고에 의한 점화원 발생 가능성은 낮다.

04

신축이음 파단 원인

- 인화성가스인 분해가스를 대기로 누출시킨 신축이음 파단원인에 대하여 아래와 같이 분석한 결과 신축이음의 점검·정비·검사 미흡, 신축이음 설계 및 시공 미흡, 가동 전 점검 미흡, 공정위험성평가 미흡 등이 복합적으로 작용하여 신축이음이 파단되었을 것으로 추정된다.

① 분해가스 압축기 토출배관 신축이음의 파단 형태

- 분해가스 3단 압축기 토출 배관에 설치된 신축이음의 상부 벨로우즈 주름 중 가장 아래에 위치한 주름이 원주 방향으로 완전히 파단되었다.
- 원형 벨로우즈 단면을 360°로 구분하여 표현하면, 벨로우즈의 덮개가 0°방향과 180°방향으로 파단되어 타이로드에 부딪혔으며, Cover의 손상상태는 0° 방향이 가장 심하였고 하부 벨로우즈 Cover는 손상되지 않고 부착되어 있다.



사진 2 신축이음의 방향별 파단 형태

III. 사고분석

- 상부 벨로우즈 주름 중 가장 아래에 위치한 주름의 최고 돌출부(Crest)가 원주 방향으로 전체 파단되었고 직각방향으로 다수의 균열이 있는 것으로 미루어보아 벨로우즈 최초 균열의 발생부분은 0° 방향 Crest 부근이며, 원주방향 좌우로 균열이 확장되며 벨로우즈가 찢어졌을 것으로 추정된다.

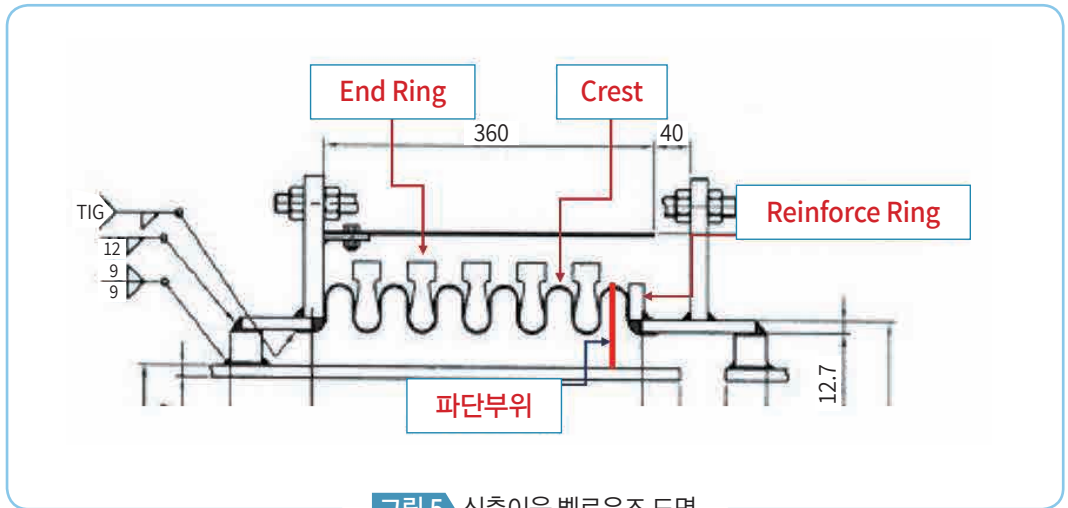


그림 5 신축이음 벨로우즈 도면

② 설계·제작·시공에 의한 신축이음 파단 원인 분석

- 제작사 설계에서 제시된 적정 유격 범위를 벗어나게 타이로드가 설치되어 타이로드가 벨로우즈에 가해지는 응력을 충분히 나누어 받지 못했을 것으로 추정되며 이로 인해 상부 벨로우즈 주름 중 가장 아래 주름의 0° 방향, 180° 방향 부근에 분해가스 압축기 자체진동(Mechanical Vibration), 유체이송 진동(Flow Induced Vibration), 배관의 변위 등으로 인해 발생한 인장 응력과 압축응력이 가해져 축 방향 기준의 각도 모멘트(Angular Moment)가 발생하고 피로가 누적되어 신축이음 파단에 영향을 주었을 것으로 추정된다.
- 분해가스 3단 압축기 토출 노즐과 연결된 배관 플랜지의 볼트를 해체하기 전과 후의 편차를 측정하여 상하 간격, 좌우 정렬을 확인한 결과, 볼트 해체 후 배관 플랜지가 정렬 기준치를 초과하여 어긋나 있음을 확인 할 수 있어 신축이음 파단에 영향을 주었을 것으로 추정된다.

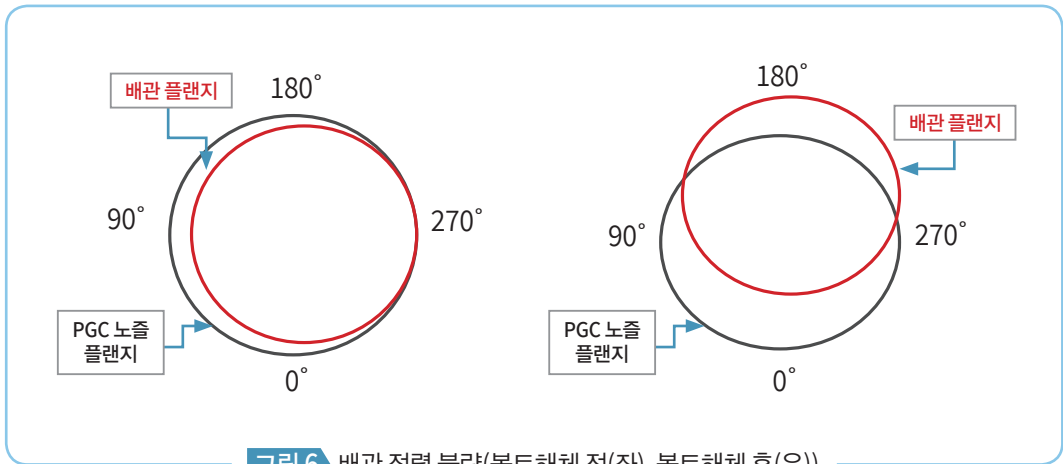


그림 6 배관 정렬 불량(볼트해체 전(좌), 볼트해체 후(우))

③ 설비의 점검·정비·검사 등 유지보수에 의한 신축이음 파단 원인 분석

- 사고발생 관련 설비인 분해가스 압축기, 배관, 배관 부속품인 신축이음을 대상으로 설비점검·정비 등 유지보수의 적정성을 검토한 결과, 압축기, 배관, 전기, 계장 설비에 대하여는 계획하여 담당 부서를 지정하여 유지보수를 실시하고 있으나, 신축이음의 경우에는 유지보수 활동 이력을 확인할 수 없었다.
- 배관과 신축이음에 부여된 중요도 등급의 정비방식은 운전원에 의해 수행되는 상태기반보전 (Condition Based Maintenance, CBM)방식이나 점검·정비 실시 여부를 확인 할 수 있는 근거는 부족하였다.
- 설비검사는 연간 검사계획을 수립하여 해당연도에 수행할 RBI대상, CUI대상 및 PM 대상을 선정 하여 배관에 대한 검사를 수행하고 있으나, 신축이음은 검사 대상에 포함되어 있지 않았다.
- 이와 같이, 배관 및 신축이음에 대한 유지보수 활동이 미흡하여 분해가스 압축기 3단 배출배관을 지지하는 스프링형식 배관지지대 2개소의 기능 상실, 신축이음의 유격 및 뒤틀림이 점검·정비·검사 등을 통해 제때에 유지보수되지 않은 채 장기간 운영되었고 이는 신축이음의 파단의 원인으로 작용하였을 것으로 추정된다.

① 공정위험성평가

- 압축공정의 최초 위험성평가는 위험과 운전분석(HAZOP)기법으로 실시하였으나 분해가스 압축기 3단 토출배관 ~ 4단 인입배관까지의 구간에 대한 위험성평가가 누락되었다.
- 정기 공정위험성평가는 K-PSR 기법을 활용해 실시하였으나 신축이음에서 발생 가능한 누출유형 및 화재·폭발 위험성에 대해서는 평가되지 않았다.
- 공정사고를 예방하기 위한 중요 활동인 위험성평가가 적절하게 실시되지 않아 위험의 도출, 위험 발생의 빈도 또는 강도를 낮추는 안전조치 수립 등이 미흡하여 신축이음이 파단사고의 원인이 되었을 것으로 추정된다.

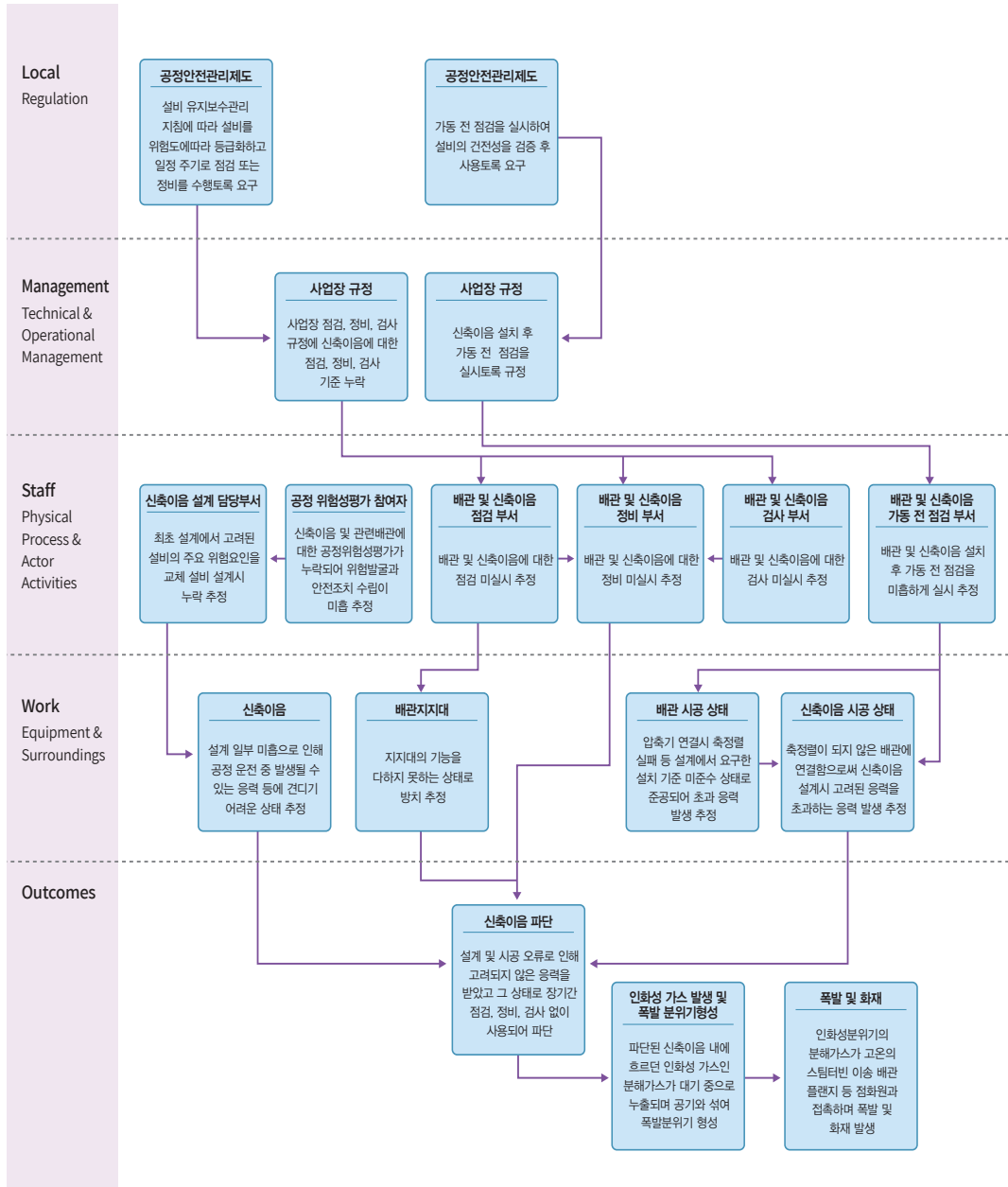
② 가동 전 점검

- 신규 설비의 설치, 설비의 교체, 설비의 정비, 1개월 이상 운전 정지했던 설비를 재가동하기 전에는 설비가 정상 가동하기에 적절한 상태인지를 확인하기 위해 가동 전 점검을 실시하여야 한다.
- 사고 발생 설비인 분해가스 압축기의 가동 전 점검 규정에는 배관의 응력제거 여부, 배관의 지지대 견고 설치 여부, 배관 접속이 무리하게 진행되어 응력발생 예상여부, 배관지지대가 설계에 맞게 견고하게 설치되어 있는지 여부 등을 점검하도록 되어 있다.
- 신축이음 교체 설치 후 실시한 가동 전 점검의 결과 보고서가 남아있지 않아 적정 실시여부를 확인하기 어려우나, 실제 설치되었던 배관의 플랜지 정렬불량, 신축이음의 타이로드 유격 조정 불량, 스프링형식 배관지지대의 기능 상실 등이 보완되지 않은 것으로 미루어보아 신축이음 설치 후 가동 전 점검을 미흡하게 했을 가능성이 있다.
- 사고가 발생하기 직전 년도에 실시한 정기보수 완료 후 NCC 공정의 장치설비, 계장기기 등을 대상으로 가동 전 점검을 실시하였으나 당시 실시한 배관설비의 가동 전 점검 항목에 신축이음에 대한 결함 여부를 점검할 수 있는 항목이 없었으며, 실제 가동 전 점검 수행 시에도 배관설비에 대한 가동 전 점검이 실시되지 않았다.
- 미흡한 가동 전 점검으로 인해 분해가스 압축설비 배관 및 신축이음의 시공 결함이 수정되지 않은 채 설비가 가동되게 되었고 이는 신축이음이 파단사고의 원인이 되었을 것으로 추정된다.

06

시스템적 사고분석 및 사고영향분석

1 시스템적 사고분석(사고지도(Accimap) 모델)



III. 사고분석

② 사고영향분석

- 분석을 위해 사용된 피해예측 프로그램은 DNV GL에서 개발한 Phast 8.11v 프로그램으로 초기 누출 단계로부터 인화성/독성 가스 확산, 제트/풀 화재 영향, 폭발 과압 영향까지 잠재적인 사고의 전개 과정을 예측 검토할 수 있다.
- 사고 발생 당시 기상조건은 풍속 4.3 m/s, 풍향 서남서(WSW), 온도 2.6 °C로 나타났으며, 대기 안정도는 안정한 수준의 “F” 등급의 대기안정도를 적용하였다.
- 누출물질은 에틸렌, 프로필렌 등의 혼합물인 NCC 분해가스의 구성성분을 적용하였다.
- 누출원은 분해가스 압축기 3단 토출 측 신축이음 파단면으로, 원주 방향으로 파손되었으나, 시간에 따른 파단 진행 여부, 정확한 파단 면적을 유추하기 어려워 이를 통한 누출면적을 특정할 수 없었다.
- 사고발생 당시 공정운전 기록을 바탕으로, 최초로 분해가스 압축기 3단 토출 유량이 감소한 시점 ("02:57:49")으로부터 폭발이 발생한 시점("02:58:17")까지 28초 동안 분해가스 압축기 3단 토출 유량 변화를 통해, 정상 운전 시 흐름 유량 대비 누출된 분해가스의 양을 추정하였다.
- KOSHA Guide ‘사고피해예측 기법에 관한 기술지침(P-102-2012)’에 따라 폭발 과압에 따른 주변 피해 영향을 판단하였다.

영 향 과 압			피해영향
kPa	psi	bar	
0.15	0.02	0.0015	소음 발생
0.2	0.03	0.002	유리창 일부 파손
0.3	0.04	0.003	큰 소음 발생
1	0.15	0.01	유리파열 압력
2	0.3	0.02	집의 지붕과 유리창의 10 % 파손
3	0.4	0.03	구조물의 가벼운 손상
3.5 - 7	0.5 - 1.0	0.035 - 0.07	유리창이 부서지며 일부 창틀이 파손
5	0.7	0.05	주택의 구조물 파손
7	1	0.07	주택의 일부 파손(복구불가능), 고막파열
9	1.3	0.09	철구조물이 약간 손상
15	2	0.15	주택의 벽과 지붕이 약간 파손
15 - 20	02월 ○○일	0.15 - 0.20	비강화콘크리트 벽 파손
16	2.3	0.16	구조물이 심하게 손상되기 시작
18	2.5	0.18	주택의 블록이 50 %정도 파손
21	3	0.21	건축물의 철구조물이 손상되며 기초에서 이탈, 신체부상
20 - 28	03월 ○○일	0.2 - 0.28	지지대가 없는 철제 건축물 또는 기름 저장 탱크 파손
30	4	0.3	공장건물의 파손
35	5	0.35	나무 기둥이 부러짐
35 - 50	05월 ○○일	0.35 - 0.5	주택의 완파
50	7	0.5	집 실은 화물차가 전복
50 - 55	07월 ○○일	0.5 - 0.55	두께 20 - 30 cm 의 벽돌벽이 붕괴
60	9	0.6	대형 화물차의 전파
70	10	0.7	대부분의 건축물 전파
81	11	0.81	건축물 전파

표 4 ▶ 폭발 과압에 의한 피해 영향

구 분	내 용	
폭발량(kg)	1,174	
폭발 모델	TNO Multi Energy Explosion	
폭발 과압 영향 범위 (bar @ m)	0.01 bar	1682.61 m
	0.03 bar	620.79 m
	0.05 bar	391.78 m
	0.07 bar	292.12 m

표 5 폭발 과압 영향분석 결과

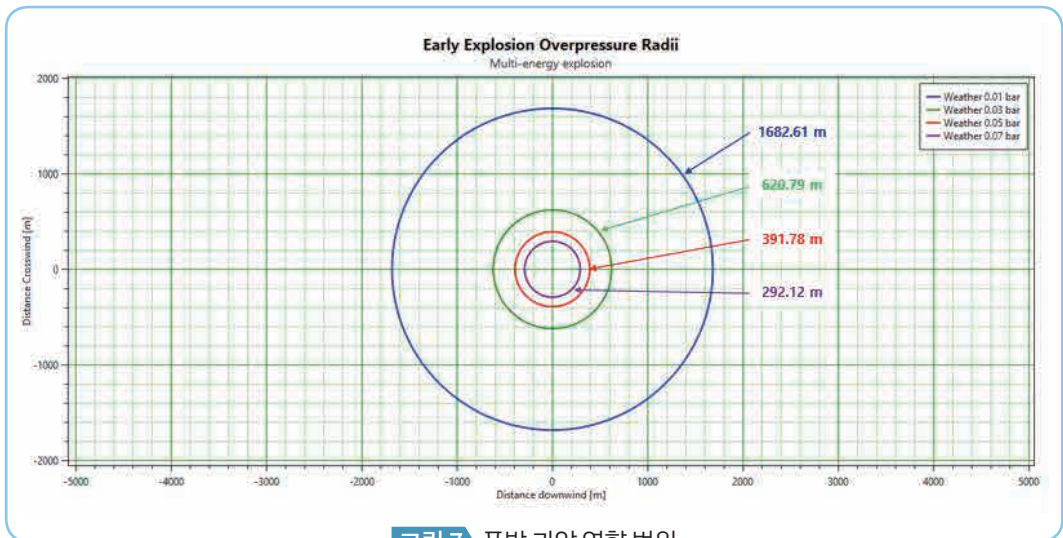


그림 7 폭발 과압 영향 범위

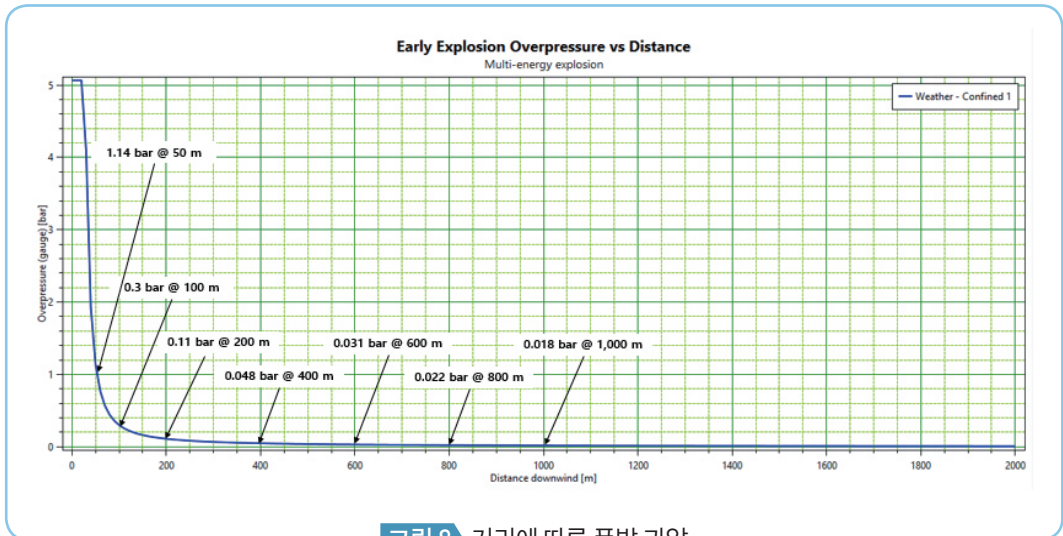


그림 8 거리에 따른 폭발 과압



IV 사고발생 원인

사고 후 현장조사시 확인된 벨로우즈의 파손부위 및 형태, 타이로드 및 스프링식 배관지지대의 설치상태, 유지관리실태 등을 고려하였을 때, 벨로우즈의 파단 원인은 아래 원인이 복합적으로 작용하였을 것으로 사료된다.

원인 01

점검·정비 등 설비 유지·관리 미흡 추정

- 분해가스 압축기 3단 토출배관의 신축이음과 배관지지대에 대한 점검·정비·검사 규정이 수립되어 있지 않고 신축이음과 배관지지대는 점검이 어려운 위치(압축기 바닥 아래, 지상 10 m 이상)에 설치되어 있어, 신축이음이 설계기준에 맞게 정상 설치되었는지, 배관지지대가 정상적으로 작동 하는지 점검·정비·검사 등 유지·보수 활동이 적정하게 수행되지 못하였다.
- 적정하게 수행되지 못한 설비의 점검·정비·검사 등 유지·보수 활동이 설계범위를 초과하는 변위와 응력을 받는 상태로 장기간 운영되어온 신축이음 파단의 원인이 되었을 것으로 추정된다.

원인 02

설계 및 시공 미흡 추정

- 축 방향 기준의 각도 변위(Angular Movement)와 비틀림 변위(Torsional Movement), 라이선서 권고치를 미반영한 설계는 벨로우즈의 적정 기능 저하 요인으로 작용하였을 가능성이 있다.
- 신축이음의 현장 설치시 신축이음 타이로드 유격 조정 불량, 분해가스 압축기와 신축이음의 연결 플랜지 정렬 불량 등 설치 미흡으로 인해 상부 벨로우즈의 주름 중 가장 아래에 위치한 주름에는 축 방향 기준의 각도 변위와 비틀림 변위가 발생하여 신축이음 파단의 원인이 되었을 것으로 추정 된다.

원인
03

설비의 가동 전 점검 미흡

- 설비의 설치 후에는 가동 전 점검을 지침에 따라 각 항목별로 누락 없이 적합하게 실시하여야 하나, 사고 후 현장상태(배관 플랜지 정렬불량, 타이로드 유격 조정 불량, 배관지지대 기능 상실 등)로 보아 가동 전 점검보고서에는 적합으로 체크하고 현장 확인을 소홀히 하였을 가능성이 있는 것으로 추정된다.

원인
04

공정위험성평가 실시 미흡

- 분해가스 압축기 3단 토출배관은 반복적인 진동, 변위 등이 발생하여 신축이음 등 배관연결 설비에서 위험물 누출위험이 높으나 관련 위험성평가가 실시되지 않았으며, 정기 위험성평가에서도 신축이음에서 누출, 파단위험 등과 관련한 위험성평가가 실시되지 않는 등 사고 설비에 대한 공정 위험성평가가 미흡하게 실시되어 위험에 대한 안전조치 수립이 미흡하였을 것으로 추정된다.

V 동종사고 예방대책



대책 01

설비의 점검·정비·검사 등 유지보수 활동 철저

- 분해가스 압축기의 회전력과 고압 유체의 이동에 따른 진동, 변위 등이 발생할 수 있는 위치에 설치된 신축이음은 연결부 또는 신축이음 자체의 파단으로 인한 유해·위험물질의 누출위험이 상당한 설비이므로 신축이음의 손상 및 노후화여부, 신축이음과 배관의 안전 운전을 위해 설치한 배관 지지대의 적정 성능 유지여부 등을 주기적으로 점검하고 정비 할 수 있도록 점검·검사·정비 규정을 제정해야 한다.
- 수립된 설비의 점검·정비·검사 규정에 따라 설비를 유지·보수하도록 점검·검사·정비 담당부서를 지정하여야 하며 담당 부서는 점검·정비를 철저히 수행하고 그 결과를 정비계획에 반영하여 설비의 건전성이 유지되도록 하여야 하며 점검·검사·정비가 용이하지 않은 설비는 TBM을 통해 설비를 주기적으로 교체하여 설비의 건전성을 유지하여야 한다.
- 아래 [표 6]에 기재된 검사 항목은 EJMA 기술규격 등에서 추천하는 요건이나 지속 적인 공정의 안전운전을 위해서는 신축이음의 형태 및 설계조건, 운영 조건을 고려하여 검사 항목의 적정 여부를 사용자 스스로 판단하여 적용하여야 하고 EJMA standards, 한국산업표준 등 기술규격을 참조 하여 필요한 추가 검사 항목을 사업장에 적합하도록 추가 수립하는 활동이 필수적으로 요구된다.
- 또한, 검사 주기는 사용자 마다 공정 조건이 상이하므로 신축이음이 설치된 공정의 설계 및 운영 조건 및 가혹도, 중요도를 고려하여 사용자 스스로 결정하여야 한다.

검사 대상	검사 내용	검사 주기
Bellows	두께 검사 - 핀홀 유무 - 두께 변화 유무	사용자 결정
	변형 여부 - 표면 주름(비틀림) 발생 여부 * 주름(비틀림) 발생한 경우 벨로우즈 필히 교체 - 표면 찌김, 찌그러짐 발생 여부	사용자 결정
Tie-rods (or Hinges)	손상, 변형 여부 - 외관, 조임 상태 등	사용자 결정
Rings (or lugs)	균열 여부 - 비파괴를 통한 초기 균열 확인	사용자 결정
	외관 손상, 변형 여부	사용자 결정
Support	외관 손상, 변형, 고정 상태 등	사용자 결정

표 6 신축이음의 검사 항목

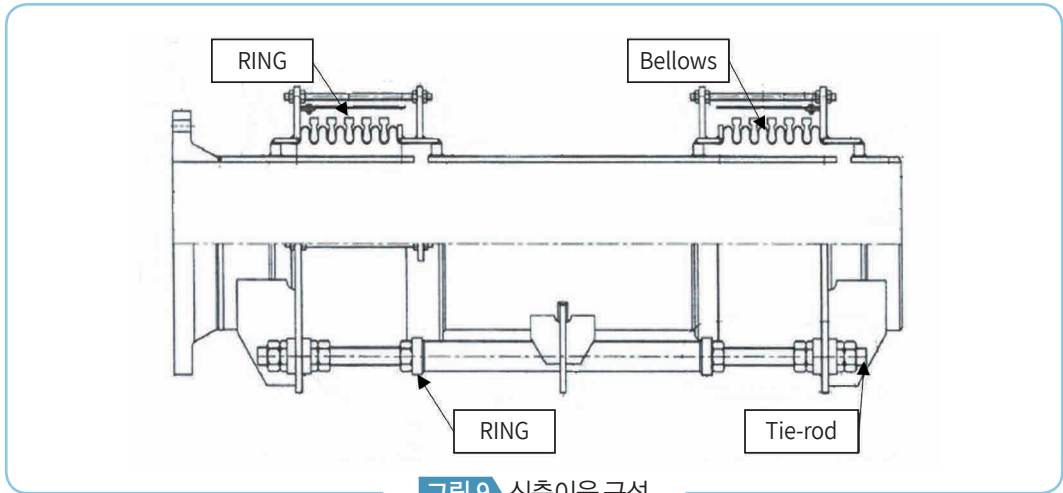


그림 9 신축이음 구성

대책 02

공정위험성평가를 통한 설비의 안전 설계 철저

- 설비의 교체 설치시에는 라이선서의 설계조건 및 안전사용을 위해 필요한 사항들을 빠짐없이 확보·검토하여야 하며, 최초 설치시의 설계 조건에서 고려하지 못한 유해·위험요인 발굴 및 이에 대한 안전조치 수립 여부를 철저한 공정 위험성평가 통해 확인하고 필요시 발굴된 유해·위험요인을 제거 또는 감소시킬 수 있는 추가적인 안전조치를 도출하고 설계에 반영하여야 한다.
- 설계자는 이를 설계에 적극 반영하여 공정 운전 조건 및 위험 조건에 적합하게 설비가 제작될 수 있도록 설비를 설계하여야 한다.
- 신축이음은 적정 관리가 되지 않거나 설치 오류가 발생하는 경우 파손의 위험이 일반 배관보다 높아 파단에 의한 위험물 대량 누출 위험이 있으므로, 배관의 응력해석 등을 통해 신축이음의 설치 개소를 최소화하고 배관의 설치 구조에 따른 최적의 위치에 설치되도록 설계 하여야 한다.
- 위험물 누출이 발생할 가능성이 있고 구조적으로 취약한 설비(신축이음 등)는 주기적으로 그 상태를 점검하고 이상 상태를 정비할 수 있도록 설비의 설치 위치를 선정하거나 점검을 위한 접근 통로 및 발판 등을 건축물 설계시 반영하여야 한다.

대책 03

설비의 적정 시공 및 가동 전 점검 철저

- 설비의 설치 전에 설비 설치 가이드 (Installation Guide) 및 가동 전 점검표의 작성 여부를 확인 하고 시공사는 설치 가이드에서 요구하는 오차범위 이내로 설비를 설치하여야 한다.
- 설비의 설치가 끝난 후에는 설치 가이드 및 가동전 점검표에 따라 설비가 안전하게 설치되었는지 사업주 및 시공사 합동으로 가동 전 점검을 철저히 하여 설비의 안전 설치 완료 여부를 확인한 후 설비를 가동하여야 한다.

Ⅵ 사고로부터 얻은 교훈



「분해가스 압축기 배관 신축이음 파단 후 폭발·화재사고」로부터 얻은 교훈은 다음과 같다.

교훈 01

점검, 정비 없는 화학설비 및 부속설비의 사용은 사고의 원인이다!

- 화학설비 및 부속설비를 수년간 사용하였음에도 단 한 차례도 점검, 정비를 하지 않아 신축이음의 이상여부를 사전에 파악하지 못하였다.
- 모든 화학설비 및 부속설비는 공정운전 과정 중에 발생하는 응력, 공정에서 취급하는 물질 및 부산물에 의한 부식, 쌓임, 막힘, 끼임 등으로 인한 위험이 축적될 수 있다.
- 이런 위험을 사전에 발견하고 위험 발생 가능성을 낮추기 위해 필요한 활동이 화학설비 및 부속설비의 주기적인 점검, 정비활동이다.
- 화학설비 및 부속설비의 점검, 정비를 수행하기 위해서는 화학설비 및 부속설비의 이상 상황이 유발 할 수 있는 안전적 측면의 위험과 경제적 측면의 위험을 모두 고려하여 화학설비 및 부속설비 별로 설비의 등급을 부여하여야 한다.
- 부여된 설비의 등급에 따라 점검의 주기와 예방정비, 예측정비, 고장정비 등 필요한 정비의 종류를 결정한 후 점검, 정비 계획을 수립하고 계획에 따라 실시한 점검, 정비 결과는 기기이력카드에 기록하여 관리하여야 한다.
- 이러한 화학설비의 점검, 정비, 기록관리 활동을 통해 화학설비 및 부속설비의 위험 상태를 파악하고 예측하여 위험에 미리 대응하는 것이 사고예방의 방법이라 할 수 있다.

교훈
02

화학설비 및 부속설비의 적정 설계·시공은 사고예방의 시작이다!

- 화학설비의 부속설비 설계시에는 작용하는 모든 요소를 고려하여 설계하여야 하고, 설계시와 동일하게 현장에서 시공되어야 하나, 설계, 시공시에 오류가 발생된 것으로 추정되었다.
- 따라서 설계자는 화학설비 및 부속설비가 설치될 공정의 온도·압력·유량 등 공정 유체 흐름 조건 외에도 화학설비 및 부속설비 자체가 갖고 있는 근본적인 취약점, 설비의 전·후에 설치된 시설과의 상호 영향, 설비가 설치될 때 있을 수 있는 설치 오차 등을 전반적으로 고려하여 화학설비 및 부속설비를 설계하여야 한다.
- 시공자는 화학설비 및 부속설비를 현장에 설치할 때에는 사전에 설치 가이드를 숙지하여 설치 가이드의 요구사항에 맞게 시공해야하며 설치가 완료된 이후에 사업주와 시공자가 설치 가이드에 맞게 화학설비 및 부속설비가 설치되었는지 필히 점검하여야 한다.
- 화학설비 및 부속설비 설계·시공의 개선을 통하여 유해·위험 요인 발생 가능성을 낮추는 것이 공정 사고예방의 방법이라 할 수 있다.

교훈
03

내실 있는 공정위험성 평가는 사고예방의 시작이다!

- 「산업안전보건법」과 관련 시행령, 시행규칙 및 「산업안전보건기준에 관한 규칙」에 많은 안전·보건 준수사항이 구체적으로 기재되어 있음에도 불구하고 「위험성평가」 실시라는 법조항을 두어 사업주 스스로 사업장에서 발생 될 수 있는 위험을 찾아 허용 가능여부를 평가하고 그 결과에 따라 필요시 추가 안전조치를 수립하도록 하고 있다.
- 이는 단순히 법에 명시된 사항을 준수하는 것으로는 사업장에 내재된 위험에 의한 사고를 모두 예방하기에는 부족하므로 사업장의 위험성평가를 통한 안전조치 수립 과정이 사고를 예방하는데 필수적인 활동이라는 것을 말한다.
- 위험성평가는 공정 위험성평가와, 일상 작업과 정기보수작업 등 모든 작업에 대한 위험성을 도출해내는 작업 위험성평가로 구분된다.
- 공정(또는 작업)위험성평가지에는 공정(또는 작업)에 대하여 이해도가 높은 각 분야별 담당자, 설계자, 시공자, 작업자 등이 참여하여 공정(또는 작업) 중 평가에서 누락되는 부분이 없도록 다양한 관점에서 위험성을 검토하는 것이 중요하다.

VII 유사 사고사례



01

신축이음 연결부 누출사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2016년 7월
사고장소	충청도 소재 화학공장
피해내용	설비 파손
사고내용	반응기 하부에 설치된 신축이음의 연결부에 부식 등 기계적인 결함으로 인해 틈새가 발생하여 내부 화학물질이 누출되고 화재가 발생한 사고임

02

신축이음 파손에 의한 누출사고

구분	사고사례 내용
발생일시	2018년 4월
사고장소	대전광역시 소재 위험물 보관소
피해내용	설비 파손
사고내용	탱크 출하배관 신축이음이 기계적인 결함으로 파손되어 내부 화학물질이 누출된 사고임



VIII 참고자료

01

산업안전보건법, 고용노동부; 2021

02

산업안전보건용어사전, 한국산업안전보건공단; 2006

03

중대산업사고 조사의견서; 2010 ~ 2020

04

DNVGL Phast v8.11 Technical Document

05

안전보건공단 산업안전보건연구원 연구보고서
「화학물질의 폭발사고 피해예측 및 적용방안 연구」(2015)

06

KOSHA Guide P-102-2013 사고피해예측 기법에 관한 기술지침

07

KOSHA Guide P-107-2020 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한
기술지침

08

KS B 1536 「벨로우즈형 신축 관 이음」; 2019

09

EJMA standards 9th edition; 2008

압축기 토출배관 신축이음 파단 사고

압축기 토출배관 신축이음 파단 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 NCC공장 압축공정의 3단 분해가스 (탄화수소혼합물) 압축기(Process Gas Compressor)의 토출배관 신축이음(Expansion Joint, 20")이 파단되어 에틸렌, 프로필렌 등을 포함한 다량의 납사(Naphtha) 분해가스가 누출되고 대규모의 폭발·화재가 발생한 사고임.

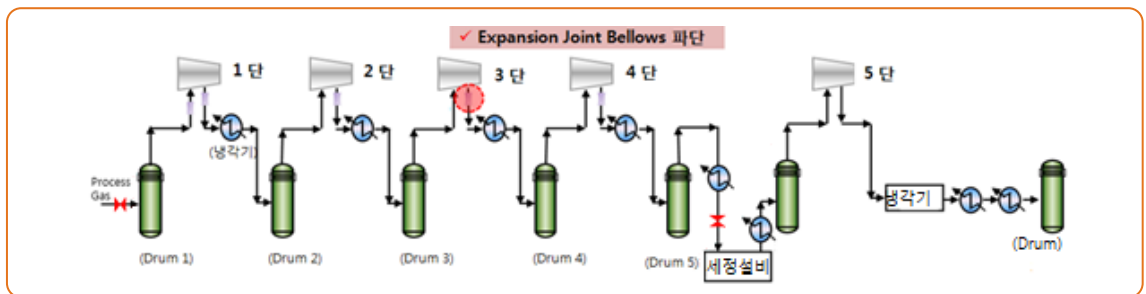


▶ 파단된 신축이음



사고발생공정 및 물질

- 납사 분해 공장(NCC)의 분해가스를 저온고압으로 압축하는 압축공정의 3단 압축기 토출 배관에 설치된 신축이음(20")이 파단되며 발생함.



○ 사고발생물질 (분해가스)

물질명	Cas NO.	함량 (질량비)	폭발한계(%)		인화점 (°C)	발화점 (°C)	증기밀도 (공기=1)
			하한	상한			
에틸렌	74-85-1	33.1	2.7	36	—	450	0.97
프로필렌	115-07-1	16.2	2	11.1	-107	460	1.45
메탄	74-82-8	14.3	5	15	—	537	0.554
기타(에탄, 부타디엔 등)	—	36.4	—	—	—	—	—

압축기 토출배관 신축이음 파단 사고

압축기 토출배관 신축이음 파단 사고사례 (2020.3.)



사고발생원인



○ 화학설비 및 부속설비의 유지보수 관리 미흡 추정

- 신축이음을 설치한 이후 신축이음에 대한 점검·정비·검사 실시가 미흡하여 설계 범위를 벗어나는 응력이 가해지는 채로 장기간 운영된 것으로 추정됨.

○ 화학설비 및 부속설비의 설계·시공 미흡 추정

- 기술선 (Licensor)에서 권고하는 설계 사양이 교체설치 신축이음 설계시 일부 미반영
- 설치 후 교체 설치된 신축이음 설계를 초과하는 응력이 가해졌을 것으로 추정됨.

○ 화학설비 및 부속설비의 가동 전 점검 미흡 추정

- 신축이음과 배관의 정렬상태, 신축이음 설치 상태에 대한 가동전 점검이 미흡한 것으로 추정됨.

○ 공정위험성평가 실시 미흡 추정

- 신축이음과 배관의 정렬상태, 신축이음 설치 상태에 대한 가동전 점검이 미흡한 것으로 추정됨.



동종사고 예방대책



○ 화학설비 및 부속설비의 점검·정비·검사 등 유지보수 활동 철저

- 설비의 손상 및 노후화여부, 설비의 안전 운전을 위해 설치한 부속설비 등을 주기적으로 점검을 할 수 있도록 점검·검사·정비 규정을 제정하고 그 규정에 따라 설비의 점검·정비를 철저히 수행하고 그 결과를 정비계획에 반영하여 설비의 건전성이 유지되도록 하여야 함.

○ 화학설비 및 부속설비의 안전 설계·시공 내실화

- 기술선 (Licensor) 또는 제작사의 설계 사양, 관련 규격 (Code, Guide, Specification 등)을 빠짐 없이 반영하여 설계 및 시공 되도록 관리하여야 함.

○ 화학설비 및 부속설비의 가동 전 점검 철저

- 화학설비의 부속설비 설치가 끝난 후에는 사업주 및 시공사 합동 가동 전 점을 통해 안전 설치 완료 여부를 확인한 후 설비를 가동하여야 함.

○ 공정위험성평가 실시 철저

- 화학설비 및 부속설비는 위험물질 누출로 인한 화재·폭발 위험이 높으므로 유해·위험 요인을 파악하고 위험성을 추정, 결정하여 적절한 감소 대책을 수립·실행하는 등의 공정위험성평가 활동을 내실 있게 실시하여 사업장의 안전보건을 확보하여야 함.



고용노동부

산업재해예방

안전보건공단



작 성

이 준 연 [안전보건공단 충남지역본부 화학사고예방센터(서산)]
강 기 완 [안전보건공단 충남지역본부 화학사고예방센터(서산)]
봉 원 우 [안전보건공단 충남지역본부 화학사고예방센터(서산)]

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)]

「압축기 토출배관 신축이음 파단사고」 사례연구

2021-중대산업사고예방실-321

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

화학사고 사례연구

6호

압축기 토출배관 신축이음
파단사고