

과거의 사고를 반면교사로 화학사고 사례집



고용노동부

산업재해예방
안전보건공단



과거의 사고를 반면교사로

화학사고 사례집

일러두기

- '반면교사(反面教師)'란 다른 사람이나 사물의 부정적인 측면에서 도리어 가르침을 얻는다는 의미입니다. 이 책은 지난 화학사고 사례들을 통해 교훈을 얻어 앞으로의 사고를 예방하고자 하는 목적으로 제작되었습니다.
- 이 책은 고용노동부와 한국산업안전보건공단에서 조사한 화재·폭발 사고 중 유사 사고의 재발 방지와 산업 현장에서 안전의식을 고양하는 데 필요하다고 판단되는 사례를 선별해 작성되었습니다.
- 고용노동부와 한국산업안전보건공단의 조사 자료 등을 바탕으로 화재·폭발 사고 예방을 위해 독자가 쉽게 이해할 수 있도록 서술되었으며, 해당 사건에 대한 수사나 사법적 판단과는 무관함을 알려드립니다.

[목 차]

Prologue	작은 화재 하나도 엄청난 피해로 이어지는 화학사고	004
Part 1 주변 어디에나 존재하는 위험	Case 1 폭탄이 된 페드럼통 Note · 화재·폭발 현상에 대한 이해 · 사업장이 해야 할 화재·폭발 예방 조치 사항	013 022
Part 2 원·하청 간 의사소통 부족에 따른 위험	Case 2 산소 배관 밸브 작업이 이렇게 위험한지 몰랐다 Case 3 먼지가 폭발했다 Note · 안전보건 정보는 모두에게 공유되어야 한다 · 화학물질을 안전하게 취급하기 위한 물질안전보건자료(MSDS) 활용 방법 · 협력업체와 함께하는 안전보건 수칙	029 053 072
Part 3 정비·보수 과정에 도사리고 있는 위험	Case 4 보수 과정의 구멍 난 원칙이 두 사람의 죽음을 불렀다 Case 5 보수 작업의 기본 원칙을 지키지 않아서 생긴 인재(人災), 언제까지 계속될 것인가? Note · 화학공장 정비·보수 작업 시 안전 조치 사항	079 101 126

Part 4

지역 주민에 피해를 준
대형 화학사고

Case 6	133
시공부터 유지보수까지 총체적 부실이 지역의 재난을 불렀다	
Case 7	155
안일한 안전의식으로 반복되는 사고, 지역사회는 불안하다	
Note · 공정안전관리 12대 요소	178

Part 5

새로운 산업과
새로운 위험

Case 8	183
화염에 휩싸인 폐플라스틱 재활용 공장	
Case 9	201
이차전지, 편리함과 위험이 공존한다	
Case 10	215
음식물폐기물 처리장도 폭발 위험지대	
Note · 새로운 산업의 위험 특성과 안전 수칙	230

Appendix

화학설비 및 부속설비

238

[Prologue]

작은 사고 하나도 엄청난 피해로 이어지는 화학사고

리튬 일차전지 업체의 화재·폭발 사고가 말해주는 것

2024년 6월 24일 경기도 화성시에 있는 한 리튬 일차전지 업체에서 화재·폭발 사고가 발생했다. 무려 23명이 사망하고 8명이 부상을 당한 사고다.

리튬 배터리의 완제품 검수와 포장을 하던 작업장 안, 하나의 배터리에서 일어난 작은 불꽃이 화재를 일으켜 순식간에 그곳에 보관돼 있던 3만 5,000여 개의 원통형 배터리에 옮겨 붙었고 작업장과 복도는 연기와 불길로 가득 차버렸다.

첫 화재로 인한 폭발부터 3차 폭발까지 걸린 시간은 불과 28초. 그 폭발로 작업장 내 연기가 가득 차기까지는 겨우 42초가 걸렸다.

화재가 난 것을 알자마자 분말소화기로 소화를 하려 했지만 소용이 없었다. 리튬 일차전지는 화재의 위험성도 높지만, 포장된 배터리에는 소화 약제가 침투되기 어려워 사실상 소화기를 통한 대응이 어렵기 때문이다.

화재는 22시간 만에 겨우 진압됐지만 23명의 작업자가 목숨을 잃었다. 그리고 8명이 중경상을 입었다.

불과 1분도 안 되는 사이에 일어난 화재와 폭발이 가져온 참사였다. 아주 잠깐의 방심이나 작은 문제가 화재나 폭발로 이어지고 순식간에 어마어마한 피해를 낳았던 것이다.

구미 불화수소 누출 사고, 결코 잊지 말아야 할 최악의 화학사고

우리는 이미 최악의 화학사고를 경험한 바 있다. 2012년에 발생한 구미 불화수소 누출 사고다. 우리 역사상 가장 큰 피해를 낸 화학사고이자, 화학사고의 위험성을 전 국민에게 각인했던 사고. 그리고 결코 잊어서는 안 되는 사고다.

구미 불화수소 누출 사고는 2012년 구미에 소재한 OO글로벌에서 불화수소가 누출돼 지역 전체에 막대한 인명 피해 및 재산 피해를 낸 사고다. 당시 현장 근로자 5명이 사망했고, 화학 보호복을 입지 않은 채 사고 대응에 나섰던 경찰관과 소방관, 지자체 공무원과 주민 등 18명이 부상당했으며 총 1만 2,000여 명이 건강검진을 받아야 했다. 사고 이후에도 수년간, 주민들은 건강 이상을 호소했다.

뿐만 아니라 212ha(헥타르)에 달하는 토지와 농작물이 오염돼 농작물과 임산물 8,420t을 폐기 처분해야 했고, 불화수소에 노출된 가축 4,015마리가 기침과 콧물 증세에 사료 섭취를 거부하는 모습을 보이면서 1,870마리가 살처분됐다. 차량 1,954대가 부식되는 등의 피해를 보았고 인근 구미공단의 기업 81개 사도 오염 피해를 입어 피해보상액이 총 421억 원에 달했다.

불화수소는 반도체 마이크로칩 가공을 비롯해, 가죽 태닝, 알루미늄 생산 등 많은 산업 분야에서 사용되는 유독성 물질이다. 짧은 시간 노출돼도 인체에 치명적인 영향을 미쳐 사망에 이르게 하거나 장애를 남긴다. 체내로 흡수될 경우, 호흡기 점막을 해치고, 뼈를 손상하거나 신경계를 교란한다. 토양과 지하수 등을 오염시키고 농작물 피해도 유발한다.

전 세계 화학산업 분야에서 필수 불가결한 원료로 사용되고 있는 화학물질은 대부분 불화수소와 같은 유독물질이다. 생활의 편리함과 산업 발전을 위해 사용하고 있지만, 조금이라도 누출되면 대규모 화재와 폭발, 중독 사고로 이어질 수 있는 위험물질인 것이다. 1984년에 일어난 인도 보팔 지역의 메틸이소시아네이트(MIC) 누출 사고는 화학사고가 얼마나 무서운 것인지를 전 세계에 알렸다.

인도 보팔 사고, 화학사고의 위험을 전 세계에 각인시키다

1984년 12월 3일 인도 남부에 있는 미국계 기업 유니온카바이드사의 살충제공장에서 살충제의 원료로 사용되는 메틸이소시아네이트가 누출되면서 당일에만 공장 직원과 주민 등 3,800여 명이 사망했고, 3만여 명이 상해를 당했다. 학자들의 추정치는 이보다 훨씬 크다. 사고로 인해 2주간 8,000여 명이 사망했고, 중독으로 인해 고통에 시달리다 사망한 사람을 포함하면 사망이 1만 5,000명, 부상자도 16만 명에 이른다. 보팔시의 주민 70만 명 중의 4분의 1이 죽거나 부상을 당한 셈이다. 더욱 심각한 것은 남아 있는 독성으로 인해 30여 년이 지난 지금까지도 3세대 장애아들이 태어나고 있다는 것이다.

보팔 사고를 계기로 화학물질에 대한 경각심이 크게 높아졌지만, 이후로도 크고 작은 화학사고들은 계속되고 있다. 2014년엔 미국 듀폰사 소유 라포르테의 살충제공장에서 독성물질이 누출돼 4명의 근로자가 사망했고, 2015년 중국 텐진에서는 최대 규모의 화학물질 적재 창고에서 폭발 사고가 일어나 173명이 사망하고 798명이 부상했다. 2020년 레바논 베이루트에서는 6년간 쌓아놓고 방치한 질산암모늄이 폭발하면서 최소 135명이 숨지고, 5,000명 이상이 다쳤으며 30만 명 이상의 이재민이 발생했다.

화학산업은 건설에 막대한 시간과 비용이 소요되는 고도의 기술집약적 산업이다. 설계, 운전, 보수, 유지에 높은 수준의 전문성이 요구된다. 설계 단계부터 안전이 중요하게 강조되는 것은 물론이다. 하지만 사소한 설비 고장이나 조작 실수와 같은 단 한 번의 실수에도 사고가 발생해 엄청난 피해가 날 수 있는 위험이 상존하고 있다.

화학산업에서 취급하는 원료와 중간 제품, 최종 생산품은 모두 강력한 인화성이나 독성을 가진 물질이다. 때문에 사고가 한번 일어나면 공장 내의 근로자는 물론, 인근 주민의 인적 피해와 지역의 환경에까지 치명적이고 광범위한 영향을 미친다.

단 하나의 화학사고도 일어나지 않도록 하기 위하여

한국은 2012년 구미 불화수소 누출 사고 이후 화학사고에 대한 경각심이 높아지면서 각종 법 제도를 정비해 화학사고 예방을 위해 힘써 왔다. 2014년 9월 13일부터 「산업안전보건법」에 따른 공정안전보고서 제출 대상 규정량 화학물질이 기존 21종에서 51종으로 대폭 확대되는 등 화학물질 위험관리 제도가 강화되었으며, 2015년 1월부터 「화학물질관리법」, 「화학물질의 등록 및 평가에 관한 법률」 등 법 제도도 마련했다.

덕분에 화학사고는 줄어드는 추세이지만, 구미 불화수소 누출 사고 이후 12년이 지난 지금도 우리는 여전히 화학사고의 위험 속에 살고 있다. 2015년 연간 115건이던 화학사고 발생 건수는 2022년 67건으로 지속적으로 줄어들다 2023년엔 다시 115건으로 늘어났다. 발생 건수가 줄어들었다고 피해 규모와 화학사고의 위험성이 줄어든 것은 아니다. 화학사고의 특성상 단 한 건의 사고가 발생하더라도 그 피해가 심각할 수 있다는 것을 우리는 구미 불화수소 누출 사고와 인도 보팔 사고로부터 익히 배워왔다.

한국은 미국, 중국, 사우디아라비아에 이은 세계 4위 규모의 석유화학 대국이다. 화학산업은 1970년대 이후 한국의 경제발전을 견인해 왔고, 수출에도 막대한 기여를 해왔다. 앞으로 산업고도화에 따라 석유화학산업은 더욱 고도화될 것이고, 화학사고의 발생 양상은 더욱 다양해질 것이다. 심각한 사고에 대한 우려도 여전히 남아 있다.

우리가 할 수 있는 것은 단 한 건의 화학사고도 발생하지 않기 위해 안전에 만전을 기하는 것뿐이다. 경영자와 근로자 모두가 화학사고의 위험성에 대해 그 심각성을 확실하게 인지하고, 하루하루 모든 현장이 안전할 수 있도록 매일의 실천을 해 나가는 것이다. 이 사례집은 그 안전한 하루하루를 위한 하나의 초석이다.



주변 어디에나 존재하는 위험

Part 1



Case 1

폭탄이 된 페드럼통

Note

- 화재·폭발 현상에 대한 이해
- 사업장이 해야 할 화재·폭발 예방 조치 사항

achwaPaint

421 211(8)2211

dp CHE
Daer



Case 1

폭탄이 된 페드럼통

페드럼통 절단 중 폭발 사고

2020년 10월, 경기도에 있던 한 소규모 사업장에서 시너(Thinner)가 들어있던 페드럼통을 절단하던 근로자가 드럼통 폭발 사고로 사망하는 일이 발생했다. 드럼통은 내용물을 다 써 비어 있었고, 사고를 당한 근로자는 단지 그 드럼통에 용접기 토치로 구멍을 뚫으려 했을 뿐이었다. 하지만 드럼통은 마치 폭탄처럼 폭발해 버렸고, 입사한 지 불과 두 달째였던 외국인 근로자는 사망하고 말았다. 전국적으로 페드럼통을 절단하는 과정에서 수많은 폭발 사고가 발생한다. 페드럼통은 왜 폭발하는 것이며, 드럼통 폭발 사고를 막기 위해서는 무엇이 필요할까?

페드럼통에 구멍을 뚫었을 뿐인데

사망 사고로 이어진 페드럼통 폭발

2020년 10월 31일 오후 2시. 경기도 광주시에 소재한 S 기업에선 불과 두 달 전에 입사한 외국인 근로자 OO 씨가 이산화탄소 용접기 토치를 집어 들었다. 페드럼통에 구멍을 뚫기 위해서였다. 하지만 드럼통 옆면에 용접기 토치를 대고 불과 2초 후, 쿵 하는 소리와 함께 드럼통은 폭발해 날아올랐다.



페드럼통 폭발 후 현장의 모습

작업 중이던 OO 씨는 드럼통에 정면으로 맞았고 뒤통수를 바닥에 강하게 부딪히며 나가떨어졌다. 사고 발생 직후 동료들이 119에 신고해 병원에 옮겨졌지만 OO 씨는 한 시간 뒤인 오후 3시 10분경 사망하고 말았다. 사인은 뇌실질 출혈이었다.

이 회사는 건설 현장에서 사용하는 건설용 리프트 주변의 작업 발판이나, 리프트 출입구 측면의 안전 난간 등 철판 파이프를 제작하거나 보수하는 소규모 사업장이다. OO 씨는 평소 기계톱을 이용해서 파이프와 같은 자재들을 절단하는 업무를 하면서 청소나 정리 같은 기타 잡일들을 해 왔다.

토요일이었던 사고 당일, OO 씨는 오전 7시에 출근해 공장 내부 청소를 한 후, 6명의 동료들과 함께 할당된 파이프 절단 작업을 마친 상태였고, 사장인 오OO 씨가 페드럼통에 구멍을 뚫으라고 지시했다. 쓰고 남은 폐 철 자재를 드럼통에 넣어 옮겨야 하는데, 무거운 드럼통을 지게차에 실어 화물차에 올리고 내리려면 쉽게 들어 올릴 수 있는 줄걸이용 고리가 필요했기 때문이다.

페드럼통에 고리를 끼울 수 있는 구멍을 내기 위해 사장은 망치와 정으로 페드럼통에 구멍을 내는 법을 가르쳐 주었다. OO 씨는 배운 대로 망치와 정을 사용해 보았지만 구멍은 쉽게 뚫리지 않았다. 몇 차례를 해봐도 구멍이 뚫리지 않자, OO씨는 용접기 토치로 구멍을 뚫어야겠다고 생각했다.

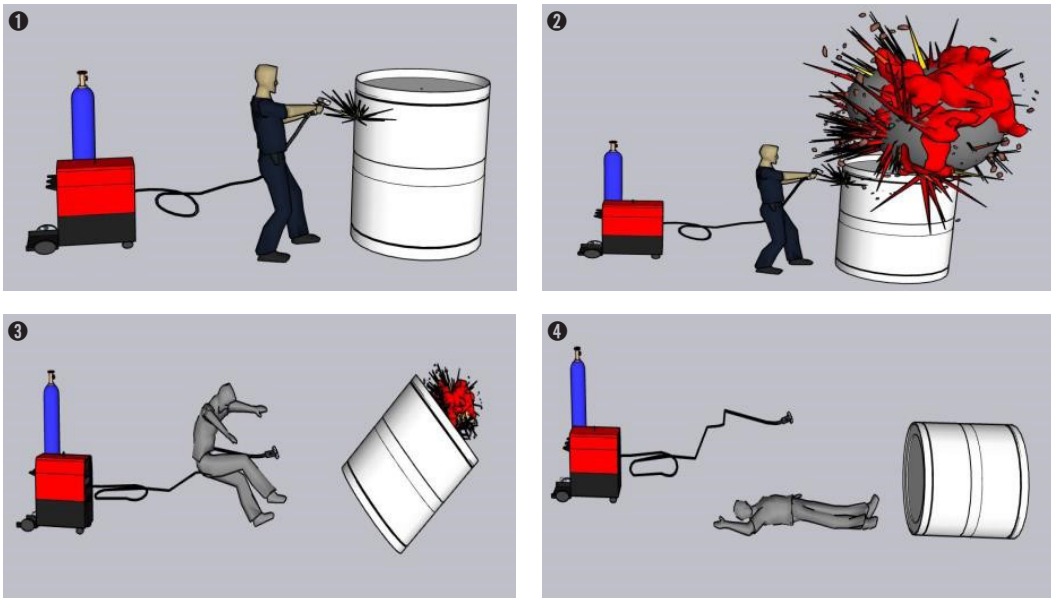
“OO 씨는 시너(Thinner) 드럼통 안의 물질이 위험하다는 것을 몰랐던 것 같고, 용접기를 사용하면 쉽게 구멍을 뚫을 수 있을 거라 스스로 생각하여 용접기를 사용한 것 같습니다.”

— S 기업 대표

토치를 대자마자 폭발이 일어났다

사고 후 공장 내 CCTV 영상으로 확인한 바에 따르면, 용접선 길이가 짧은 것을 확인한 OO 씨는 와이어 공급기와 드럼통을 용접기와 가까운 곳으로 옮긴다. 먼저 용접기 상태를 확인한 후 불티가 튀어 화재가 나지 않도록 주변을 정리까지 했다. 하지만 OO 씨가 토치를 들고 페드럼통에 구멍을 뚫기 시작하자마자 드럼통은 마치 폭탄처럼 폭발했다.

분명히 내용물을 다 쓴 페드럼통이었는데 이 드럼통은 왜 폭발했던 것일까?



페드럼통 폭발 사고 당시 상황

비어 있던 드럼통은 왜 폭발했을까?

페드럼통이 폭발하는 이유

화재와 폭발이 일어나기 위해서는 세 가지 요소가 갖춰져야 한다. 가연성 물질과 산소(공기), 그리고 점화원이다.

폭발이 발생한 드럼통은 원래 도장 작업을 할 때 도료의 희석제로 사용하는 속건 시너가 들어있던 통이었다. 내용물을 다 쓴 빈 통이었지만 드럼통 뚜껑에 달려 있는 주입구와 환기구가 모두 마개로 닫혀 있었기 때문에 드럼통 안에는 방출되지 못한 시너가 증기 형태로 밀폐돼 있었다. 속건 시너의 주원료는 톨루엔*이다. 그리고 톨루엔은 인화점이 4°C인 가연성 물질이다.

즉, 드럼통은 비어 있는 것처럼 보였지만, 실제로는 화재의 3요소 중 하나인 톨루엔 유증기라는 가연성 물질로 채워져 있었던 것이다. 거기에 내용물을 비우는 과정에서 공기 중의 산소가 공급됐고, 토치의 불꽃이 점화원 역할을 하면서 화재의 3요소가 갖춰져 순간적으로 폭발이 일어났던 것이다.

이 세 가지 요소 중 한 가지라도 갖춰지지 않았다면 폭발은 일어나지 않았을 것이다. 하지만 페드럼통을 완전히 세척하지 않아 가연성 물질이 남아있던 상태에서 점화원이 될 수 있는 토치를 사용해 구멍을 뚫는 작업을 함으로써 폭발이 일어날 수 있는 모든 요소를 갖추게 됐고, 사고가 발생했던 것이다.

페드럼통에 용접기 토치 같은 것으로 구멍을 뚫으면 폭발의 위험이 있다는 사실을 왜 몰랐던 것일까?

* 톨루엔(Toluene, C₆H₅CH₃): 인화점이 섭씨 4도인 인화성 물질로 페인트, 잉크, 접착제 등 제조에 사용된다.

아무도 가르쳐 주지 않았던 페드럼통의 위험성

페드럼통은 폭발 가능성이 높은 위험물이다. 대부분 시너나 가솔린 등의 인화성 물질이 담겨있었던 것이라, 외관상 비어 있는 것처럼 보이는 드럼통 안에도 미량의 인화성 액체가 남아있을 가능성이 높다. 그리고 아무리 적은 인화성 액체도 증기화 하여 점화원과 만나면 폭발로 이어지게 되기 때문이다.

그래서 모든 페드럼통은 완전히 세척한 후 폐기하거나 재활용하는 것이 원칙이다. 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 제240조에 따르면, 화재와 폭발의 위험성이 있는 인화성 액체를 보관했던 드럼통을 용접기 등으로 절단할 때에는 드럼통 내부를 깨끗이 세척한 후 물을 가득 채워 인화성 액체의 증기 등이 남아있지 않도록 완전히 제거한 후 절단을 하도록 되어있다.

가솔린이나 시너처럼 인화점이 낮은 액체는 물론이고, 윤활유나 절삭유 같이 인화점이 높은 인화성 액체도 벽면에 붙어있던 기름이 증발하면서 폭발이 일어날 수도 있기 때문에 더욱 철저히 세척을 해야 한다. 세척이 완전히 이뤄지지 않은 드럼통에 화기를 대는 것은 위험천만한 일인 것이다.

화기 사용 작업의 위험을 알았다더라면

하지만 입사한 지 겨우 2달 남짓, 한국말도 못 하고 작업도 익숙하지 않았을 OO 씨는 페드럼통에 용접기 등의 화기를 사용할 경우 폭발이 일어날 수도 있다는 사실을 알 수가 없었다. 그 위험성을 아무도 가르쳐 주지 않았기 때문이다.

해당 업체의 사장이나 관리자는 「산업안전보건법」에 따라 드럼통 속에 인화성 액체인 속건 시너가 들어있었고, 그것이 유해한 물질이며, 화기와 만나면 폭발이 일어날 수 있다는 사실을 사전에 교육했어야 한다. 하지만 그러

한 안전보건 교육은 시행되지 않았다.

페드럼통은 누구나 접근할 수 있는 곳, 어떤 화기도 쉽게 접할 수 있는 곳에 아무렇게나 방치돼 있었고, 어떤 위험성이 있는지도 알려주지 않은 채 세척되지 않은 드럼통에 구멍을 뚫으라는 지시를 내렸던 것이다.

또한 페드럼통에 구멍을 내는 작업은 원래 S 기업에서 정규적으로 하는 작업도 아니었다. 이렇게 작업 빈도가 적고, 불규칙한 작업에 대해서는 작업 전 위험성 평가를 실시하고 안전 대책을 수립한 후 작업이 이루어져야 한다. 하지만 그것 역시 지켜지지 않았다. 이번 폭발 사고는 지켜야 할 원칙들을 하나도 지키지 않아서 생긴 안타까운 사고였던 것이다.

“소규모 사업장으로 제가 직접 근로자의 안전 및 보건을 담당하고 있으나, 「산업안전보건법」에 대하여 모르는 사항이 많습니다.”

— S 기업 대표



페드럼통이 현장에서 사용되는 예

우리 주변 어디에나 폭발물이 있다

너무나 많은 페드럼통과 안전 불감증

이 사고를 주목해야 하는 이유는 유사한 사고가 너무나 많이 일어나고 있기 때문이다. 각종 인화성 물질이 담겨있던 페드럼통은 사업장의 업종과 규모에 관계없이 흔하게 사용되고 처리된다. 그리고 이번 사고와 똑같이 안전 기준을 지키지 않고 취급하다 폭발로 이어지는 사례들이 곳곳에서 발생하고 있다. 그리고 그 대부분이 사망사고 등 심각한 인명 피해로 이어졌다.

대기업인 B 기업에서도 고철 분리 작업 도중 전자 흡착기로 밀폐된 페드럼통을 옮기다 폭발이 일어났다. 작업 중이던 협력업체 직원 두 명이 현장에서 사망했고, 한 명은 크게 다쳐 병원으로 이송됐다.

울산 온산공단 내에 있는 한 자동차부품공장에서는 페드럼통 절단 작업 중 용접 불티가 튀면서 드럼통이 폭발해 직원 한 명이 화상을 입는 사고가 일어났고, 대구의 자동차부품공장에서도 똑같은 이유로 페드럼통이 폭발해 과편에 맞은 근로자 한 명이 사망했다.

화학물질 생산과 상관없는 고물상이나 재활용업체, 심지어 골프장과 폐차장, 도로공사 현장이나 선박 위, 농공단지의 페드럼통 수거업체에서도 사고는 발생한다. 한마디로 인화성 물질이 담겨 있었던 드럼통이 있는 곳은 어디든 사고가 발생해 왔다고 할 수 있을 정도다.

사고의 양상은 거의 비슷하다. 특별한 몇몇 사례를 제외하면 대부분이 페드럼통을 화기로 절단하다가 폭발이 발생한다. 페드럼통이 위험한 폭발물이 될 수 있음에도 안전 조치를 취하지 않은 채 점화원이 될 수 있는 용접기로 해체 작업을 하는 것이다.

소규모 영세사업장에 절실한 안전보건 교육

드럼통 사고를 막기 위해 가장 필요한 것은 무엇일까.

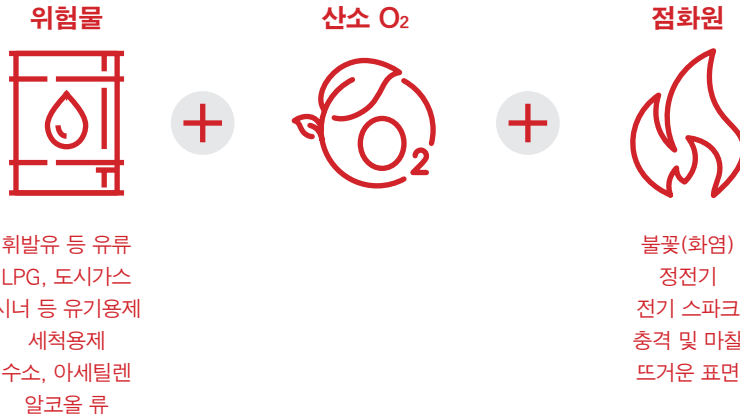
페드럼통이 인명을 앗아갈 정도로 위험하다는 것을 인지하는 것이 우선이다. 페드럼통이 화학물질 생산시설만큼이나 안전 수칙을 지키며 다뤄져야 할 위험한 대상이며 반드시 세척과 가스 배출이 완전히 이뤄진 상태에서 절단과 해체를 해야 한다는 것을 알고 교육해야 한다. 드럼통 사고가 발생하는 상당수의 현장이 영세사업장이라는 점에서 안전보건 교육의 필요성은 더욱 높아진다.

아무 곳에도 방치되어 있는, 그래서 간과하기 쉬운 페드럼통에도 화재·폭발의 위험성은 존재한다. 페드럼통은 우리 주변 어디에서나 존재하는 아주 작은 화학공장이다.

Note

화재·폭발 현상에 대한 이해

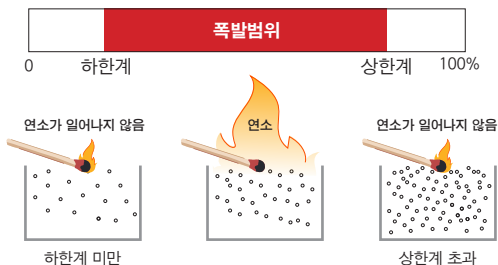
화재·폭발은 작업장 내 화재의 3요소(①가연물, ②산소공급원, ③점화원)가 존재하는 경우 발생한다.



가연물 생성 조건

작업장에서 가연성 가스나 인화성 액체를 제조, 취급, 저장하는 과정에서 취급설비의 결함 등에 의해 누출이 되면 가연성 가스 또는 인화성 액체의 증기가 공기(산소공급원)와 혼합되면서 폭발범위를 형성하게 된다.

폭발범위란? 공기와 혼합된 가연성 가스, 증기 또는 미스트는 특정범위 내에서만 폭발이 가능하다. 극히 적은 양이 존재하는 폭발 하한(LFL) 이하에서 혼합물은 농도가 너무 낮고, 매우 많은 양이 존재하는 폭발 상한(UFL) 이상에서는 농도가 너무 진하여 폭발이 발생할 수 없다. 따라서 폭발 하한과 상한 사이에서만 폭발이 가능한데 이러한 범위를 폭발범위라고 말하며 단위는 vol% 또는 g/m³으로 표시한다.



폭발범위는 물질마다 다른 특정치를 갖고 있으며 알려지지 않은 물질의 경우는 실험에 의하여 결정될 수 있다.

물질명	하한-상한(%)
1. 산화에틸렌	3.6~100
2. 디보란	1~99
3. 아세틸렌	2.5~80
4. 수소	4.1~74
5. 트리클로로에틸렌	12~40
6. 일산화탄소	12.5~74
7. 메틸클로포름	6.8~10.5
8. 카본디설파리드	1.25~44
9. 황화수소	4.3~45.5
10. 암모니아	15~28

물질명	하한-상한(%)
11. 에틸알콜	3.3~19
12. 아세톤	2.5~13
13. 메탄	5.3~14
14. 에탄	3.2~12.5
15. 프로판	2.4~9.5
16. 부탄	1.8~8.4
17. 펜탄	1.4~7.8
18. 벤젠	1.4~6.7
19. 톨루엔	1.3~6.7
20. 가솔린	1.4~6.2

※ 실제 작업장에서는 환기 조건에 따라 국부적으로 폭발위험 분위기가 조성될 수 있음

점화원

가연물이 생성된 장소에서 점화원이 존재하는 경우 화재·폭발이 발생하게 되는데 점화원으로는 기계적 충격이나 마찰, 스파크, 정전기, 용접 불티 등이 있다.

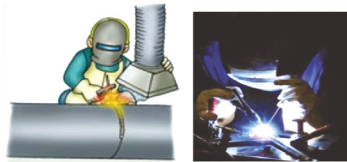
기계적 점화원(충격, 마찰)



전기적 점화원(스파크, 과열)



열적 점화원(용접 불티, 복사열)



전기적 점화원(정전기 방전 스파크)



사업장이 해야 할 화재·폭발 예방 조치 사항

화재의 3요소(가연물, 점화원, 산소) 중 1개 이상 공정과 작업 특성에 맞게 제거하거나 통제해야 한다.

1. 가연물 통제



작업 시작 전 가연물의 제거

- 작업 전 주변 가연물 여부 파악
- 작업장 주변 가연물을 제거하고 용기나 배관의 내용물을 안전하게 배출 및 세척

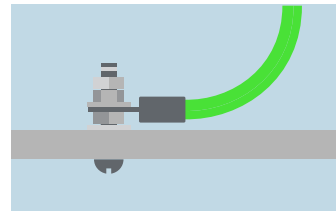
작업장 주변 가연성 가스 누출 여부 확인 및 필요 시 환기 실시

- 작업장 주변에 가연성 가스 누출 여부를 가스 감지 및 경보장치를 통해 확인하고 필요 시 환기 실시



화학설비 내 위험물 제거 시 조치사항

- 가연성 가스를 제거한 후 공기로 치환
- 용기나 배관의 내용물 이송 시 철제 호스를 사용하고 용기와 배관에는 접지를 실시
- 스파크가 발생하지 않는 방폭형 공구 사용



2. 점화원 통제

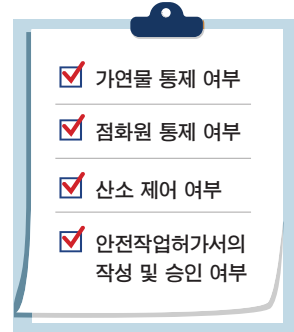
가연성 물질 등 주변에서 화기 작업 금지

- 스티로폼 등 가연성 물질 및 인화성 물질 취급설비(용기·배관 등) 주변이나 인화성 물질 취급 시 화기 작업을 금지



작업 전·중 안전 점검

- 작업 전 안전 점검(점화원 유무 확인)
- 작업허가서에 명시된 안전조건 조치사항 확인
- 작업 중 작업내용 변경 시 추가 위험에 대한 확인 및 대응

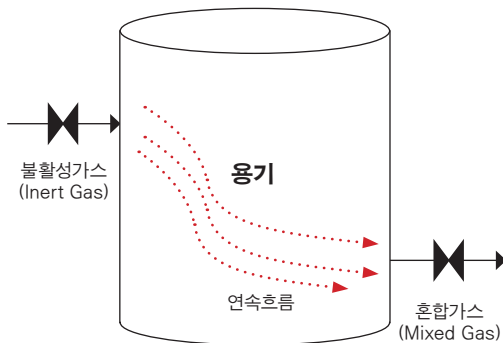


3. 산소 제어

밀폐용기 내부 불활성화*

- 용기 내부에 폭발분위기가 조성되지 않도록 질소 등과 같은 불활성가스로 대체

* 이 방법은 매우 효과적이거나 밀폐단위 공정에서만 적용이 가능



밀폐용기 내 공기 혼입 방지

- 맨홀, 호퍼, 밸브, 벤트 등이 개방되지 않도록 잠금조치 및 관리 철저
- 배관에 공기가 혼입되지 않도록 체크 밸브 등을 설치

산화제 혼입 방지

- 질산염, 금속산화물, 과산화수소, 염소 등을 취급하는 경우 산소가 발생하지 않도록 취급에 유의

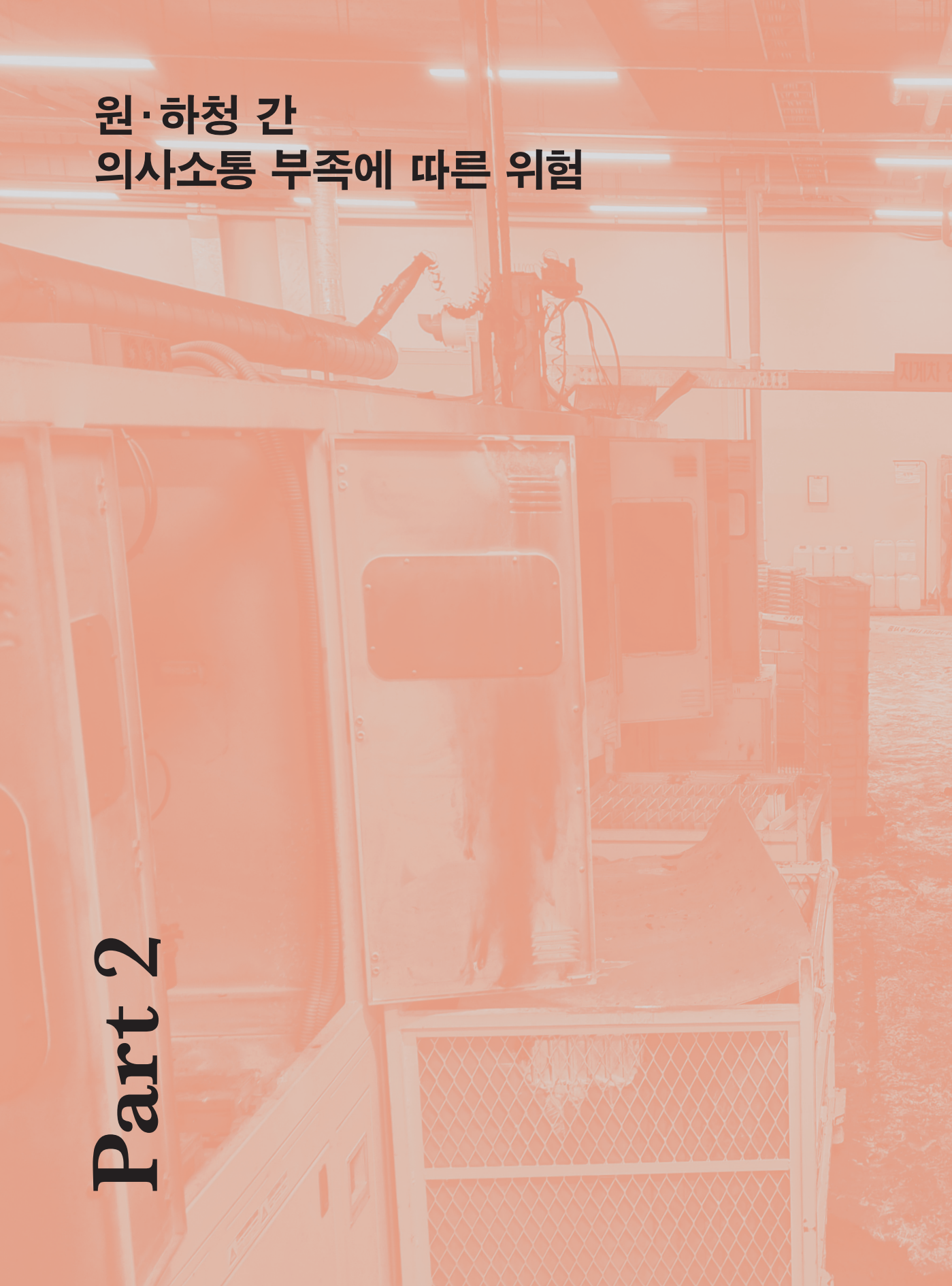
4. 안전작업허가서의 작성 및 승인

- 위험지역 내에서 설비 및 기기의 점검, 정비, 교체, 배관 연결 등의 작업을 수행하는 경우, 담당자가 사전에 안전작업허가서를 작성하여 위험 요소 및 안전 여부를 확인하고 책임자에게 승인받은 후 작업을 실시

* 안전작업허가 종류(예시): 화기 작업 허가, 방사선 사용 작업 허가, 밀폐공간 작업 허가, 굴착 작업 허가, 정전 작업 허가, 고소 및 중장비 작업 허가 등

원·하청 간 의사소통 부족에 따른 위험

Part 2



Case 2

산소 배관 밸브 작업이
이렇게 위험한지 몰랐다

Case 3

먼지가 폭발했다

Note

- 안전보건 정보는 모두에게 공유되어야 한다
- 화학물질을 안전하게 취급하기 위한 물질안전보건자료(MSDS) 활용 방법
- 협력업체와 함께하는 안전보건 수칙



Case 2

산소 배관 밸브 작업이 이렇게 위험한지 몰랐다

고압산소 배관 폭발 사고

2020년 11월, 국내 유수의 철강회사에서 폭발 사고가 일어났다. 철강 제조에 사용되는 산소 공급 배관의 밸브를 열다가 순식간에 화재와 폭발이 일어났고, 그 사고로 작업 중이던 세 명의 근로자가 목숨을 잃었다.

산소는 인간의 생존에 필수적인 물질이다. 하지만 매우 쉽게 폭발이 일어나는 위험물질이기도 하다. 그러나 이날 산소 배관 밸브 작업을 하다 목숨을 잃은 근로자들은 고압산소가 얼마나 위험한 물질인지, 또 고압산소 배관을 여는 밸브 작업이 얼마나 조심스럽게 이뤄져야 하는지 알지 못한 채 작업을 했고, 결국은 목숨을 잃고 말았다.

왜 위험과 가장 가까운 곳에서 일하는 현장 근로자들이 자신이 하는 작업의 위험성을 알지 못했던 것일까?

단지 산소 배관의 밸브를 열었을 뿐인데

예정에 없었던 근무를 했던 그날

2020년 11월 24일, Y 업체의 주임 정OO 씨는 부하직원인 김OO 씨와 함께 예정에 없던 출근길에 나섰다. 원래 이날은 정OO 씨의 근무일이 아니었다. 오늘 작업은 원래 다른 직원 담당이었지만 마침 그 직원이 코로나19 확진으로 인해 자가격리를 하게 된 상황이라 대신 근무를 하게 된 것이다. 정 주임이 일하는 Y 업체는 K 기업의 산소공장에서 점검과 보수, 밸브 개폐 업무 등을 담당하는 협력업체다.

K 기업은 우리나라에서 가장 큰 철강 회사 중의 하나다. 철광석 원석에서 순수한 철을 만들어내고, 그 철을 제련하고 압연해서 우리가 아는 철판과 같은 철강 제품을 생산해 낸다. 그 과정에 반드시 필요한 것이 바로 고압산소다.

그래서 K 기업 안에는 철광석을 녹이는 고로나 제강공장 외에도 산소를 만들어내는 산소공장이 16개나 있다. 산소공장에서 생산된 산소는 배관을 통해서 고로나 제강공장 등으로 보내지는데, 오늘 정주임은 그 배관에 산소를 공급하거나 차단하는 밸브의 개폐 작업을 하러 가는 것이다.

K 기업에 도착한 것이 오전 8시. 오늘 할 작업 내용에 관해 설명을 듣고, 작업할 위치를 배정받았다. Y 업체가 이 일을 도급받아 해온 것이 6년이나 됐고 정OO 씨도 산소공장 배관 밸브 작업을 한 적이 있었지만 오늘 주어진 일은 전에 없이 복잡했다.

19개나 되는 밸브를 열고 닫아야 하다니... 한 번도 해 본 적 없었던 복잡한 작업

오늘 일은 단순한 밸브 개폐 작업이 아니었다. 오늘은 16개의 산소공장 중 가장 먼저 지어진 1번부터 5번까지의 산소공장 철거에 앞서 노후 배관을 철거하는 날이었다. 1985년에 처음 설치됐으니, 35년이나 사용해 효율이 크게 떨어진 공장과 산소 배관을 철거하게 된 것이다.

오전에 회사 측이 설명했던 작업 내용에 따르면, 노후 배관을 철거하기 위해서 먼저 철거 예정 구간의 배관에 2개의 차단판을 설치해야 한다. 산소 배관은 각 플랜트와 공장 사이에 거미줄처럼 연결돼 있기 때문에 차단판을 설치하려면 연결된 산소 배관의 밸브 19개를 닫아야 하고, 배관이 철거되고 난 후에는 산소 공급을 위해 그 19개의 배관을 다시 여는 작업이 이뤄져야 했다.



사고 직후 소화 완료된 현장

이곳에서 근무한 이래 오늘처럼 많은 밸브를 열고 닫는 작업을 해본 적은 없었다. Y 업체는 1년에 대여섯 번 정도 밸브 개폐 작업을 했었고, 한 번 할 때에도 2, 3개의 밸브를 열고 닫는 것이 고작이었기 때문이다.

게다가 밸브마다 형태가 조금씩 다른데, 오늘 작업하는 밸브 중에는 한 번도 다뤄보지 않은 형태의 밸브도 있었다. 살짝 긴장은 됐지만 원래 K 기업 직원의 지시에 따라 밸브만 열고 닫으면 되는 단순한 작업이라 오늘도 그렇게만 하면 될 것이라 생각했던 정OO 씨였다.

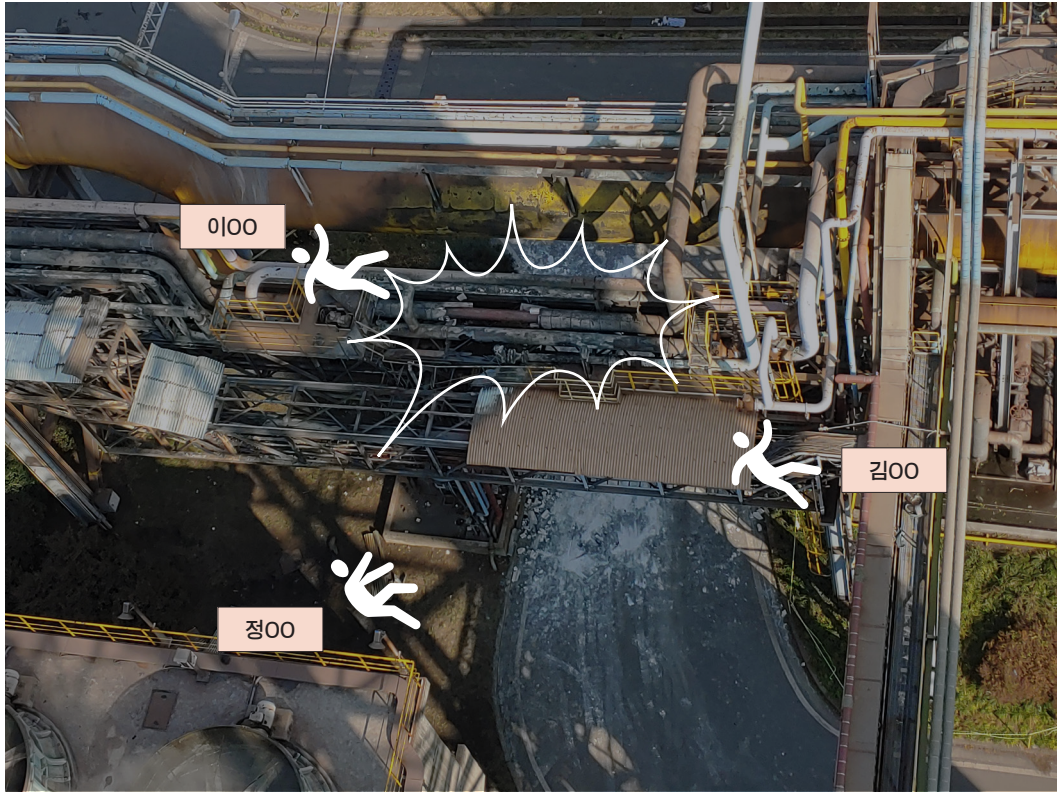
먼저 차단판 설치를 위해 연결된 밸브를 잠그는 작업이 시작됐다. 정OO 씨는 지시에 따라 밸브를 잠갔고, 곧이어 배관 내에 들어있던 산소를 배출하는 작업이 시작됐다. 질소를 투입해서 배관 속 산소를 완전히 제거하는 것이다.

그런데 뭔가 문제가 생긴 모양이었다. 산소가 배출되면 산소 농도를 측정했을 때 적어도 18% 이하의 수치가 나와야 하는데, 질소를 투입한 뒤에도 산소 농도는 67%로 높아도 한참 높았다.

차단한 밸브 중에 어딘가 새는 곳이 있다고 판단한 담당 부서는 상황 회의를 열어 의심스러운 위치의 차단 밸브를 선택해 확인을 하기로 했다. 새는 곳이 어디인지 소리도 들어보고, 밸브도 다시 조여보았지만, 산소가 누설되는 밸브를 찾을 수는 없었다. 산소를 배출시키기 위해 질소도 추가로 투입했지만 산소 농도는 계속해서 목표치를 웃돌았다.

산소 배관 밸브 개방과 함께 들려온 폭발음

오전 9시 43분경에 시작됐던 작업은 오후 3시 반이 되어도 마무리되지 않았다. 무엇보다 어디서 산소가 새고 있는지 파악조차 되지 않는 상황이었다. 이러면 배관 철거 작업을 할 수가 없다. 게다가 계속 산소 공급을 차단시키고 있으면 고로나 제강공장의 제품생산에도 차질이 빚어지게 된다.



사고 현장 전경(공동가대) 및 재해자 발견 위치



산소화재에 의한 손상된 질소 배관

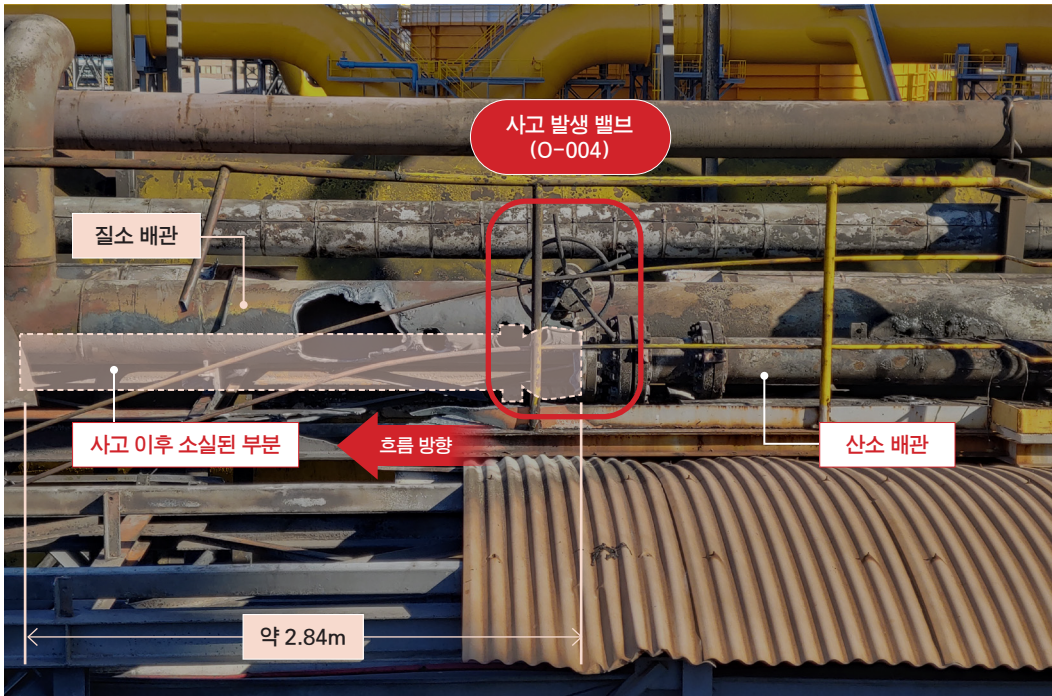


화재로 손상된 산소 배관 일부

오늘 내로 배관 철거 작업이 마무리되기 어렵다고 판단한 담당 부서에선 추후 재작업을 하기로 결정하고, 차단해 두었던 밸브를 원상 복구하기로 결정했다. 밸브의 원상 복구 지시가 떨어졌고 정OO 씨와 함께 있던 본사 직원 이OO 씨가 조종실에 무전으로 보고를 했다.

“지금 차단했던 밸브를 원상 복구 조치하겠습니다.”

밸브를 다시 열라는 지시를 받은 정OO 씨는 지시대로 자신이 맡고 있던 13번 밸브를 열었다. 조종실에서는 그 밸브가 열리는 것을 확인했고 그것이 끝이었다. 정OO 씨가 열었던 13번 밸브는 배관과 함께 그대로 폭발해 버렸다. 단지 닫혀 있던 산소 배관 밸브를 다시 열었을 뿐인데 폭발이 일어났던 것이다.



사고 발생 밸브의 소실 부분

세 명의 목숨을 앗아간 폭발 사고

바로 그 시각 산소공장 주변에서 작업 중이던 K 기업의 또 다른 협력업체 직원 OO 씨는 엄청난 폭발음에 놀라 그쪽으로 고개를 돌렸다. 불과 30m 떨어져 있는 산소공장 쪽에서 시커먼 연기와 함께 불길의 치솟는 것이 보였다. 사고를 목격한 그는 곧바로 회사의 조종실에 무전으로 연락을 했다.

“사고가 난 것 같아요! 얼른 신고 좀 해 주세요!”

신고를 받은 하청업체 조종실 직원이 곧바로 방제센터에 연락했고 불과 몇 분이 지나지 않아 K 기업의 자체 소방대가 출동했다.

화재는 다행히 20분 만에 진압이 됐지만 불이 꺼진 작업 현장에서는 두 명이 심정지 상태로 발견이 됐다. 소방대원들이 2시간 동안이나 수색 작업을 벌인 끝에 나머지 한 명의 시신도 추가로 발견됐다.

13번 밸브의 개폐 작업을 담당했던 Y 업체의 정OO 씨와 부하직원, 그리고 함께 13번 밸브를 담당했던 K 기업 직원 이OO 씨 세 명이 모두 목숨을 잃은 것이다.

산소 배관은 왜 폭발했을까?

산소는 공기가 아니라 위험물질이다

사고 당일을 처음부터 되짚어봐도 특별히 사고가 날 만한 정황은 보이지 않았다. 단지 한동안 닫아 두었던 밸브를 돌려서 다시 연 것밖에는 없다. 이전에도 산소 배관 밸브의 개폐 작업은 여러 차례 진행해 왔고, 그것이 Y 업체의 업무였다. 그리고 배관의 밸브 작업은 본사 직원의 지시에 따라 열고 닫기만 하면 되는 단순한 작업이었다. 그런데 산소 배관은 왜 폭발했던 것일까.

산소는 공기 중에 21% 정도 함유되어 있는 흔한 물질이다. 다만 이것을 산업적으로 활용하려면 질소, 아르곤 등이 섞여 있는 공기에서 산소만 추출해 내는 과정을 거쳐야 한다. K 기업의 산소공장이 하는 일이 바로 이 작업이다.

K 기업에서 산소를 생산하는 공정을 살펴보면, 먼저 압축기로 공기를 압축한 후, 영하 200℃로 냉각시켜 순수한 액체 산소를 추출한다. 이것을 기화 장치로 보내 기화를 시키면 산소 가스가 만들어지고, 이 산소는 배관을 통해 각 공장에 공급된다.

문제는 배관을 통해 공급되는 산소가 고압 상태로 보내진다는 데 있다. 산소를 멀리 떨어져 있는 곳으로 보내야 하기 때문이기도 하고, 산소를 사용하는 플랜트의 용도에 맞게 활용할 수 있게 하기 위해서다.

그런데, 공기 중에 질소 등과 혼합되어 있으면 안전하고 유용한 물질인 산소가 고압의 상황에서는 쉽게 화재나 폭발을 일으킬 수 있는 위험물질이 된다.

그래서 고압산소 밸브의 개폐 작업을 할 때에는 차단 밸브를 개방하기 이전에 차단 밸브 앞뒤 배관의 압력이 같은지를 확인하게 되어있다. 만일 압력 차가 크다면 산소가 밀려 들어오는 속도가 빨라지고, 그로 인해 화재·폭발이 일어날 수도 있기 때문이다.

그 위험을 줄이기 위해서, 고압산소 배관에는 통상 차단 밸브 전·후단의 압력을 동일하게 해주는 균압 밸브가 추가로 달려 있다. 먼저 균압 밸브를 열어서 압력을 같게 만들어 준 뒤, 차단 밸브를 열어서 산소를 통과시키도록 돼 있는 것이다.

하지만 사고가 났던 배관에는 균압 밸브가 설치되어 있지 않았다. 균압 밸브 없이 차단 밸브를 열게 되면 산소의 압력이 높기 때문에 조금만 열어도 빠른 속도로 산소가 밀려 들어올 위험이 커진다.

결국 사고는 균압 밸브가 없는 상황에서 밸브를 다시 열면서, 고압의 산소가 빠른 속도로 비어있던 배관 안으로 밀려 들어왔고, 내부의 금속 입자가 충돌을 일으키면서 화재·폭발로 이어졌던 것이다.

일반탄소강 재질의 산소 배관은 화재에 취약한데...

사고가 난 산소 배관의 재질은 일반탄소강이었다. 일반탄소강 재질의 배관에서는 산소가 흐르는 속도가 일정 수준 이상이 되면 불꽃이 될 가능성이 훨씬 높다. 같은 속도로 산소가 흐를 경우 스테인리스강은 화재가 일어나지 않아도, 일반탄소강 재질의 배관에서는 화재가 일어날 가능성이 더 높아진다는 이야기다.

그래서 고압산소 배관의 경우, 스테인리스강 재질을 사용하는 것이 권고되기도 하고, 이미 스테인리스강 재질의 배관을 사용하는 곳도 있다. K 기업의 산소 배관 중에도 스테인리스강 재질의 배관이 없지 않았다. 하지만 사고가 난 배관은 일반탄소강 재질의 배관이었고, 사고가 났을 당시 이 일반탄소강 재질의 산소 배관을 통과했던 산소의 유속은 기준치를 훨씬 초과했을 것으로 보인다. 배관의 재질도 화재의 또 다른 원인이었던 것이다.



녹에 의해 갈색으로 변한 산소 배관 내부



손가락에 묻어나온 산소 배관 내부 부스러기

배관 안에는 화재를 일으킬 수 있는 철 부스러기가 남아있었다

일반탄소강 재질의 배관이라고 해서 모두 화재가 발생하지는 않는다. 화재가 발생하려면 필수적으로 가연성 물질과 불꽃을 만들어주는 점화원이 있어야 한다. 이번 사고에서 가연성 물질과 점화원은 무엇이었을까?

가장 유력한 것은 일반탄소강 재질의 배관 내에 남아있었던 철 부스러기 같은 금속 입자였다. 일반탄소강의 경우 배관이 오래되어 부식되거나 마모되면 그 부스러기들은 배관 안에 남아서 산소가 고압으로 밀려 들어올 때 점화원이 될 가능성이 높다. 남아있던 금속 입자가 충돌을 일으키면서 불꽃이 발생하고, 화재가 발생하는 것이다. 그래서 일반탄소강 재질의 배관은 산소의 유속이 높아지지 않도록 밸브 개폐 작업을 천천히 해야 한다.

실제로 사고가 발생한 배관의 내부에는 철 부스러기 같은 것이 상당수 남아있었다. 조사 결과에 따르면 사고 이후 남아있는 배관의 두께를 측정한 결과, 가장 많이 감소한 것이 52% 정도나 되어, 사고가 난 배관에는 적지 않은 양의 금속 입자와 유기물이 남아 있었고 그 상태에서 고속으로 산소가 흐르면서 눈 깜짝할 사이에 화재가 발생했던 것으로 보인다.

요약해 보면, 이번 사고는 상대적으로 화재의 가능성이 높은 일반탄소강 재질의 산소 배관이었고, 그 속에 철 부식물 등의 금속 입자가 남아있는 상태에서, 균압 밸브 없이 차단 밸브가 개방되면서 고압의 산소가 밀려 들어와 화재와 폭발이 일어난 것이었다.

그렇다면 사고를 막을 수 있는 방법은 없었을까?

이렇게 위험한 작업인지 아무도 알지 못했다?

균압 밸브만 설치돼 있었다

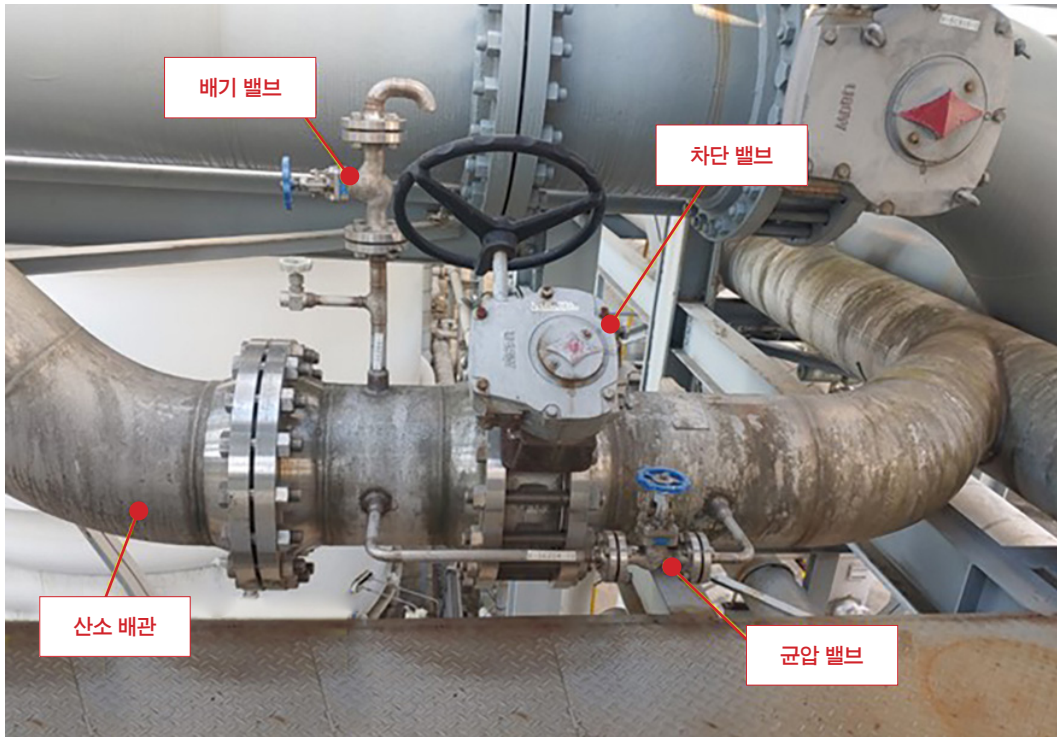
사고의 일차적인 원인은 차단해 두었던 밸브를 개방하면서 고압산소가 빠른 속도로 배관에 흘러들어왔기 때문으로 보인다. 만일 산소의 속도와 압력을 낮춰줄 균압 밸브가 설치돼 있었고, 균압 밸브로 압력이 조절된 상태에서 밸브를 열었다면 화재는 일어나지 않았을 것이다. 하지만 균압 밸브는 설치돼 있지 않았다. 이유는 무엇일까?

K 기업 16개의 산소공장에는 모두 48개의 균압 밸브가 설치돼 있다. 하지만 사고가 난 13번 밸브에 균압 밸브가 없었던 것처럼 K 기업의 모든 차단 밸브에 균압 밸브가 설치돼 있는 것은 아니다. 산소공장을 운영하는 다른 기업이 모든 수동 차단 밸브의 전·후단에 균압 밸브를 설치해 운영하고 있는 것과는 대조되는 모습이다.

국제적 기준을 보면 고압산소 배관에 균압 밸브를 설치해 운영하는 것은 기본이다.

국제표준*에 따르면, “산소 밸브를 개방할 경우에는 균압 밸브를 활용하여 산소 밸브 전·후의 동압 상태를 확인한 후 밸브를 서서히 개방하라”고 기술돼 있는데, 균압 밸브 설치를 아예 전제로 하고 있다는 걸 알 수 있다.

* 국제표준: 처리 산소 통기를 위한 밸브 개방 관련 국제표준(ASM, AIGA)



타 사업장 산소 배관에 설치된 균압 밸브

국내 철강회사 중 최고 규모를 자랑하는 K 기업에서 사고 방지를 위해 필수적인 균압 밸브가 왜 부분적으로만 설치되어 있을까? 사고 후 조사를 해 보니 K 기업 산소공장에는 균압 밸브 설치 기준이 명확하게 마련돼 있지 않았다. 즉 균압 밸브의 필요성을 명확하게 인지하고 있지 않았던 것으로 보인다.

사고 조사 과정에서 밝혀진 바에 따르면, 해당 산소공장 측은 균압 밸브의 역할을 단지 차단 밸브를 조작할 때 전·후단의 압력을 감소시켜 밸브 조작을 쉽게 만들어주는 것 정도로만 알고 있었다.

균압 밸브가 산소 배관 밸브 조작 시의 화재 및 폭발 위험성을 감소시켜 줄 필수적인 안전 장치라는 사실을 전혀 알지 못하고 있었던 것이다. 이런 상황에서 균압 밸브가 사고 배관에 설치되지 않았던 것은 어쩌면 당연한 결과였다.

밸브 개방의 원칙과 방법이라도 명확히 알려줬어야

균압 밸브가 설치되어 있지 않을 경우에 차단 밸브 조작은 어떻게 해야 하는 걸까?

밸브 조작과 관련해 K 기업의 작업표준에는 매우 간단히 기술돼 있다.

“산소 출구 밸브는 서서히 작동, 급격한 밸브 조작은 폭발 위험 야기”

‘서서히’라는 건 매우 주관적인 기준이다. 어느 정도로 돌려야 서서히라는 기준을 만족할 수 있을까. 작업자의 판단과 상황에 따라서 얼마든지 다른 속도를 적용할 수 있다. 이렇게 주관적인 해석이 가능한 규정은 규정이라 하기 어렵다.

또한 해당 기업의 작업절차서에는 “산소 통입을 위해 차단 밸브를 완전히 개방하기 이전, 차단 밸브 전·후단의 압력이 같음을 확인해야 한다”고 되어 있다. 즉, 비어있던 산소 배관 안에 다시 고압의 산소를 흐르게 할 때에는 산소가 들어오는 부위와 나가는 부위의 압력이 같은지 확인한 후 천천히 밸브를 열어야 한다는 것이다.

그렇다면 압력이 같다는 것은 어떻게 확인할 수 있을까. 압력계가 달려 있어야 한다. 하지만 사고가 난 배관에는 압력을 측정할 수 있는 장치도 없었고, 밸브를 여는 방법도 어느 정도의 속도로 어떻게 열어야 하는지 명확하게 규정돼 있지 않았다.

문서상으로 작업의 원칙이 없지는 않았지만, 정확한 실행의 방법이 명시되지 않은 채 위험한 산소 배관의 밸브 조작 작업은 현장 근로자들의 판단에 맡겨져 있다시피 했던 것이다. 결국 원칙은 없는 것과 마찬가지였다.

방호벽만 있었어도 참사는 막을 수 있었다

균압 밸브가 없어도 방호벽만 설치돼 있었다라면 세 사람이 사망하는 참사는 피할 수 있었다. 이 기업의 다른 산소 배관에는 차단 밸브 주변으로 방호벽이 설치되어 있는 곳이 적지 않게 있다. 방호벽이 설치된 곳은 방호벽 밖에서 차단 밸브를 조작할 수 있게 되어 있어, 화재나 폭발 같은 사고가 발생하더라도 인명 피해를 막을 수 있다.

하지만 이 기업의 모든 산소 배관 밸브 주변에 방호벽이 설치돼 있는 것은 아니었고, 이번에 사고가 발생한 13번 밸브 주변에도 방호벽은 없었다.

방호벽은 공장이 처음 지어진 1985년부터 2008년까지 공장이 새로 건설될 때 맞춰 설치돼 왔다. 그래서 1번 공장부터 14번 공장까지는 방호벽이 설치돼 있다. 하지만 2008년 이후에는 15번, 16번 공장이 새로 건설됐어도 방호벽 설치는 없었다.

2008년 이후 방호벽이 설치된 것은 단 한 차례, 2014년이였다. 2014년은 이번 사고와 똑같이 산소 배관 밸브를 조작하다 폭발 사고가 일어나 3명이 숨졌던 해다. 그때에도 부실한 안전 조치에 대한 문제 제기가 이어지면서 방호벽이 설치된 것으로 보인다. 방호벽이 설치는 됐지만 한 곳에만 추가 설치된 것을 보면 안전을 위해 방호벽의 필요성을 인지하고 설치를 한 것은 아니었던 듯하다.

K 기업 산소공장에는 이번 사고가 났을 때까지도 별도의 방호벽 설치 기준이 없었다. 그리고 또다시 인명 피해가 발생했다. 안전 장치로서 방호벽이 필수적이라는 인식은 여전히 없었던 것이다.



차단 밸브 주변 방호벽



방호벽 바깥쪽에 설치된 조작 핸들

사고로부터 배워야 할 것들

이번 사고를 통해 알게 된 개선점은 다음과 같다.

- 산소공장의 차단 밸브 전·후단엔 균압 밸브가 설치되어야 한다.
- 밸브 개폐 작업 시엔 어떻게 균압 조치를 할 것인지 구체적이고 정확한 매뉴얼이 있어야 한다.
- 일반탄소강 재질의 산소 배관은 화재가 발생할 가능성이 매우 높으니 관리를 철저하게 하거나 스테인리스 재질로 교체해 줘야 한다.
- 차단 밸브 주변에는 콘크리트 방호벽을 설치하고 방호벽 밖에서 밸브를 조작하게 함으로써 화재 및 폭발 사고가 났을 경우 근로자를 보호해야 한다.

하지만 더욱 중요한 것은 산소 배관 밸브 작업이 위험하다는 것을 아는 것이다. 산소 배관 밸브 작업은 단순히 차단 밸브를 열었다 닫는 것만으로도 화재와 폭발이 일어날 수 있고, 그 강도는 쇠로 만들어진 배관을 순식간에 폭발시키고, 사람의 목숨을 앗아갈 정도로 강력하다는 사실을 구성원 모두가 알아야 한다. 위험성을 정확히 알아야만 안전한 작업을 위한 절차와 작업 시스템이 바뀔 수 있기 때문이다. 그래야 균압 밸브와 방호벽을 어떤 기준으로 어떻게 설치할 것인지 기준이 마련되고 밸브 작업에 관련된 구체적인 작업표준과 매뉴얼도 마련될 수 있다.

우리가 사고에서 배워야 할 것은 앞으로 더 이상 사고가 일어나지 않도록 하는 실효성 있는 대책이다.

사고 방지는 위험의 실체를 아는 것에서 시작된다

2014년의 사고 이후 무엇이 달라졌는가?

사고 발생 6년 전인 2014년에도 K 기업 산소공장에서는 이번 사고와 똑같은 사고가 발생했었다. 새로 설치된 산소 배관을 시운전하는 과정에서, 산소 배관의 밸브를 열다가 화재가 발생해 작업 중이던 근로자 3명이 목숨을 잃은 사고였다.

단지 밸브를 열었을 뿐인데, 배관 내부에 남아있던 기름기가 고압의 산소에 의해 발화되어 화재와 폭발이 일어났고, 현장 근로자 3명이 사망했다. 이번 사고와 원인부터 결과까지 쌍둥이처럼 닮은 사고다.

사고 이후 바뀐 것은 없지 않았다. 방호벽 하나를 추가로 설치했고, 원래 K 기업에서 해오던 밸브 개폐 업무를 외주화했다. 그렇게 협력업체로 선정된 곳이 바로 Y 업체였다. 그리고 6년 만에 똑같은 사고가 발생해 협력업체 직원 두 명을 포함해 세 명의 근로자가 희생됐다. 방호벽 하나를 추가로 설치한 것을 제외하면 사고를 통해서 바뀐 것은 위험한 산소 배관 밸브 작업을 외주업체에 맡긴 것밖에 없었던 셈이다.

그 결과, 6년 전의 사고에서 문제로 드러난 것은 바뀌지 않았다. 당시와 똑같이 2020년의 작업자들도 산소 배관 밸브 작업의 위험성을 제대로 알지 못했고, 균압 조치 등 위험을 관리할 방법도 알지 못한 채 작업을 했다. 2014년이나 2020년이나 산소 배관 밸브 작업의 구체적인 매뉴얼은 없었다.

세 명의 목숨이 희생됐지만, 사고를 방지하기 위해 달라진 것은 없었던 것이다.

배워야 했던 것은

산소 배관 밸브 작업의 위험성이다

산소 배관 밸브를 열고 닫는 작업은 밸브를 돌리기만 하면 되는 극히 단순한 작업이다. 하지만 이 작업은 고압산소 취급 공정에서 가장 위험한 작업 중의 하나다. 밸브를 급속히 개폐할 경우엔 배관 내부에 남아있는 금속 입자에 충돌을 일으키거나, 유분과의 마찰로 화재가 발생할 수 있기 때문이다.

1985년에 설립된 K 기업은 지금까지 16개나 되는 산소공장을 보유하면서 30년이 넘게 산소를 생산해 왔다. 하지만 지금까지도 산소 작업의 위험성을 정확히 알지 못하고 있었다. 안전 운영의 가장 기본적인 요소를 빠트린 채 운영이 되고 있었던 것이다.

심지어 산소공장의 고위 관리자조차 이런 위험성을 모르는 상태였다. 산소 배관 균압 밸브의 역할을 밸브의 조작이 쉽도록 하기 위해서 필요한 것 정도로 잘못 알고 있었다. 그런 상황에서 운영 부서나 협력업체의 작업자들이 그 위험성을 알 수는 없었을 것이다.

취급 대상 물질과 그 물질의 취급 공정에 대한 위험성을 명확히 알지 못해서 빚어진 결과는 두 가지다. 명확한 작업 지침이 마련되지 않는다는 것과 작업자들이 본인이 하는 작업의 위험 관리 방법을 알 수 없다는 것이다.

K 기업 산소공장에는 산소 배관 관리 지침이 있다. 그리고 그 지침에 따라 어떻게 작업할 것인지 구체적인 작업계획서가 작성되게 된다. 하지만 이 산소 배관 관리 지침에는 균압 밸브가 어떤 역할을 하는지, 밸브 조작 작업은 어떤 위험성이 있는지 명시돼 있지 않았다. 위험을 방지하기 위한 안전 조치 역시 당연히 빠져 있었다.

그러다 보니 작업계획서 상에도 이같은 내용은 반영되지 않았고, 작업자들은 밸브 조작을 할 때 왜 압력을 맞춘 뒤 서서히 밸브를 열어야 하는지 알 수가 없었다. 사고는 산소 배관 밸브 작업이 얼마나 위험한 것인지 몰랐던 데서부터 시작됐던 것이다.

산소의 위험성 및 취급·저장 방법

유해·위험성

- 가열 시 용기가 폭발할 수 있음
- 누출물은 화재·폭발의 위험이 있음
- 타지는 않으나 연소를 도움
- 다른 가연성 물질과 접촉하여 화재를 일으킬 수 있음

취급·저장 방법

- 의류, 가연성 물질로부터 격리·보관
- 감압 밸브에 그리스와 오일이 묻지 않도록 할 것
- 압력을 가하거나, 자르거나, 용접, 납땜, 접합, 뚫기, 연마 또는 열에 폭로, 화염, 불꽃, 정전기 또는 다른 점화원에 폭로하지 말 것

산소 전문가 없는 산소공장

산소공장의 운전 매뉴얼은 영문판밖에 없었다

놀라운 것은 사고가 난 산소공장 자체에 한글로 된 운전 매뉴얼조차 없었다는 것이다. 산소공장과 같은 장치산업에서 안전 운전을 하려면 설계 자료나 운전 매뉴얼은 필수다. 공장 시스템이 어떻게 가동되는지 설계의 기준과 의도부터 시작해 설계에 반영된 산소공장의 위험성, 안전설계의 기준 등을 모두 이 운전 매뉴얼을 통해 알 수 있다.

하지만 애초에 이 산소공장은, 공장을 설계했던 프랑스와 일본의 회사로부터 완전한 운전 매뉴얼을 받지 못해 산소공장의 운전 매뉴얼을 일부만 가지고 있었고, 그마저도 영문으로 작성된 것밖에 존재하지 않았다. 또한 그 부분적인 영문 매뉴얼에는 반드시 반영되었어야 할 산소 배관 밸브 조작 시의 위험성 등 안전 관련 사항은 빠져 있었다. 결과적으로 이 공장은 30년 넘게 안전 운전 자료조차 없이 가동돼 왔던 셈이다.

그동안 공장의 운전과 유지 보수는 매뉴얼이 아니라 선임자들의 경험을 통해서만 전수되고 있었다. 그러다 보니 균압 밸브나 방호벽의 필요성과 역할을 제대로 알지 못했고, 산소 배관 밸브의 조작 방법을 그저 ‘급격히 조작하지 말 것’ 등으로 정의해, 작업자들에게 명확한 지침을 주지 못했다.

지금까지 이 산소공장에는 산소공장 전문가가 없었던 셈이다. 시간이 흘러 선임자들마저 퇴직하게 된다면 과연 어떤 결과가 빚어질까? 경험에 의한 전수는 시간의 경과에 따라 왜곡되거나 사라지기 쉽다. 이대로라면 앞으로 더 큰 사고가 발생해도 이상하지 않은 구조인 것이다.

안전 역량 강화는 기업의 미래가치다

사고 대책 비용은 안전 역량 강화에 투자되어야 한다

설계 자료와 운전 매뉴얼조차 없는 채 수십 년을 운행해 왔고, 사고 발생 이후에 근본적인 안전 대책이 마련되지 않았음에도 피해 규모가 이 정도에 그친 것은 단지 요행일 뿐이다. 하지만 앞으로도 이 같은 요행이 지속되리라고 장담할 수는 없다.

사고가 발생한 뒤 K 기업에선 앞으로 3년간 안전을 위해 1조 원 규모의 투자를 하겠다고 발표했다. K 기업은 지난 2018년에도 산소공장에서 협력업체 직원 4명이 질소가스에 중독돼 사망하는 등 여러 건의 안전사고가 발생하자, 사고 예방 대책으로 1조 1천 50억 원을 투자한다고 발표했었다. 그리고 3년이 지난 2020년에 그 예산은 1조 원가량이 집행된 상태였다. 안전 전문가를 외부에서 총원했고, 안전전략사무국도 신설했으며 사고가 발생할 경우 즉각 연락할 수 있는 스마트위치 제도를 도입했다. 그러나 그 이후에도 사고는 발생했고 또다시 근로자들이 목숨을 잃었다.

안전을 위한 비용은 집행되어야 한다. 분명한 것은 앞으로 집행될 1조 원은 정말로 필요한 곳에 사용돼 더 이상의 사고가 일어나지 않는 결과로 이어져야 한다는 것이다.

조사를 통해 드러났듯이 시급한 것은 회사 내부의 안전 역량을 강화하는 일이다.

안전 운영에 기본이 될 설계 자료와 운전 매뉴얼은 지금이라도 온전히 확보해야 한다. 그리고 반드시 한글로 쉽고 명확하게 작성해 누구나 읽고 활용할 수 있게 해야 한다.

산소의 위험성을 아는 것으로부터 시작해 공장 운영의 기술적인 부분을 담당하는 엔지니어들이 산소공장의 진정한 전문가가 될 수 있어야 하고, 그것이 위험성 평가나 작업 표준에 반영되어야 한다. 그리고 현장의 근로자들에게 구체적이고 명확한 지침으로 전달되어야 한다.

전 구성원이 각자의 영역에서 안전 전문가가 되고, 그 각각의 영역이 긴밀하게 협력하게 된다면, 것처럼 막대한 사고 예방 비용은 필요하지 않게 될 것이다. 그렇게만 된다면, 단순한 계산만으로도 지금까지 사용된 2조 원의 안전 비용은 기업의 더 나은 미래를 위해 투자될 수 있을 것이다. 사고 걱정 없는 안전한 현장이 구현되면서 일어나게 될 부가적인 가치는 두말할 나위가 없다. 안전 비용을 어디에 투자해야 할 것인가. 그것을 파악하는 것부터 변화는 시작돼야 한다.



Case 3

먼지가 폭발했다

알루미늄 분진폭발 사고

위험물을 다루는 화학공장이 아니었다. 단지 자동차 전자제어장치에 쓰이는 알루미늄 케이스나 밸브를 제작하는 자동차부품 제조공장이었다. 그런데 폭발이 일어났다.

폭발이 일어난 곳은 이 공장의 알루미늄 케이스 생산라인에 달려 있던 집진기. 알루미늄을 가공하는 과정에서 발생하는 알루미늄 분진이나 용접 흄(Fume: 용접 시에 발생하는 연기) 등을 빨아들여 모으는 장비다. 그 집진기의 바닥에 떨어져 있는 먼지를 청소하기 위해 진공청소기를 작동시켰을 뿐인데 갑자기 두 차례의 폭발이 발생했다. 그리고 현장에 있었던 세 사람 중 두 사람이 목숨을 잃었다. 살아남은 한 사람도 전신 3도 화상이라는 중상을 입었다.

집진기의 전원은 끈 상태였고, 집진기 주변에는 폭발이 일어날 위험물질이나 화기가 없었다고 했다. 집진기는 왜 폭발한 것일까?

어느 일요일의 대참사

흡입 덕트에 문제가 생겼다

2022년 12월 11일. 그날은 일요일이었다. 경기도 안산에 있는 자동차부품업체 E 기업에서 근무하는 양OO 과장은 출근을 했다. 평소 주말 근무는 거의 없다시피 했다. 근무는 평일 오전 8시부터 오후 5시까지로 잔업도 없었고 주말 근무도 없었다. 하지만 이날은 공장 설비에 문제가 생겨 하루라도 빨리 문제를 해결해야 했다.

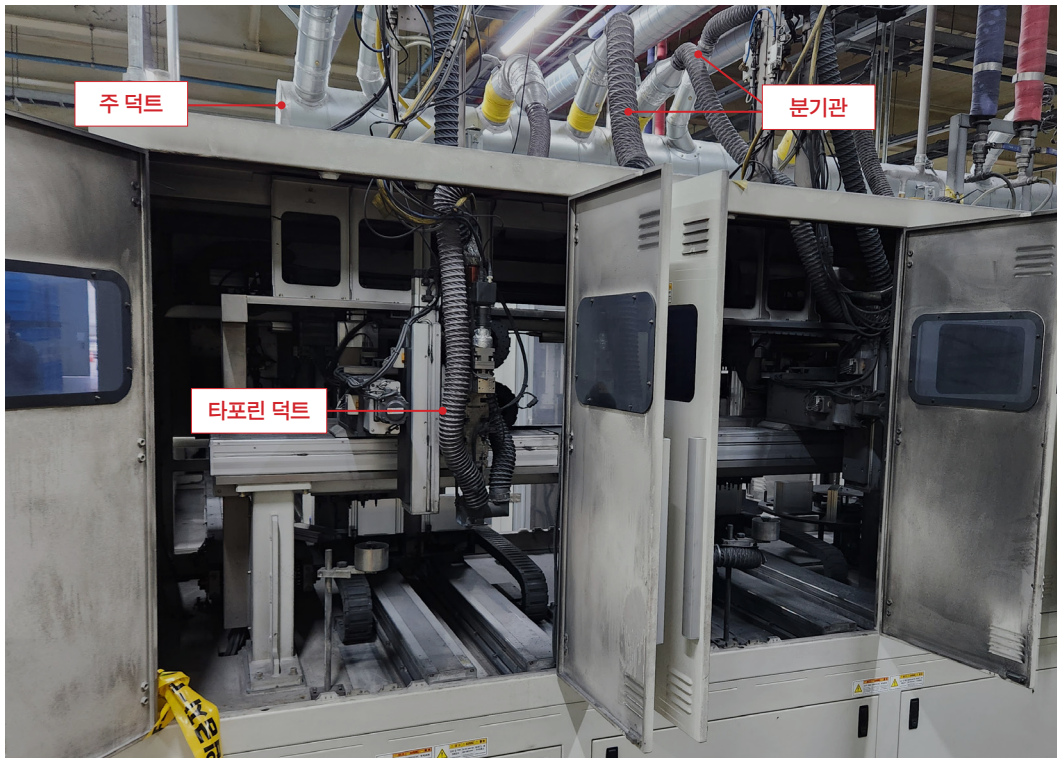
일요일이었지만 회사 1층에 있는 공장에는 작업자들이 오전 7시부터 출근해 작업 중이었다. 양OO 과장이 일하고 있는 E 기업 1층에는 협력업체인 D 업체가 입주해 있다. D 업체는 자동차 엔진에 들어가는 전자제어장치용 알루미늄 케이스와 밸브 등을 생산하는 업체다. E 기업은 공장 설비를 제공하면서 기술, 영업, 판매 등을 담당하고, 제품 생산과 조립은 전량 하청으로 이루어진다. 물량이 밀려들 때는 주말도 없이 공장을 가동해야 한다.

오늘 문제가 생긴 곳은 바로 이 D 업체의 생산설비였다. 토요일이었던 어제, 제품 생산 도중에 D 업체의 집진기 흡입 덕트가 용접 불티로 인해 타버린 것이다. 집진기의 흡입 덕트는 알루미늄 케이스를 가공할 때 생기는 알루미늄 분진, 즉 미세한 분말 형태의 알루미늄 가루나 용접할 때 발생하는 흠(Fume: 용접 시 발생하는 연기) 등을 빨아들이는 장비다. 덕트에 문제가 생긴 채 라인을 가동할 수는 없다. 하지만 만들어야 할 물량은 밀려 있었다. 양OO 과장

은 문제가 생긴 어제, 덕트 수리업체에 연락을 하고 오늘 출근을 한 것이다.

출근한 양OO 과장은 오전 10시경, D 업체의 이OO 과장을 만나 문제가 된 집진기를 둘러봤다. 이OO 과장은 D 업체의 생산관리 업무를 총괄하는 중간 관리자다.

토요일에 타버린 흡입 덕트는 알루미늄 자재에 레이저로 글자를 새겨넣는 레이저 피어싱 라인에 연결된 덕트였다. 레이저 용접 설비 내부에 설치된 분기관이 주 덕트로 연결되고, 주 덕트가 집진기로 연결돼 용접 과정에서 생긴 알루미늄 분진과 용접 흠을 포집하는 구조다.



집진기 설비 내부 모습

진공청소기로 바닥 청소를 시작하자마자 일어난 폭발

곧이어 덕트 수리업체의 안OO 대표가 회사에 도착했다. 안OO 대표는 처음 이 공장에 덕트를 제작해 납품한 업체의 대표다. 1년에 한 번 정도 집진기 필터를 교체해 주는데, 덕트 수리 건이 있을 때마다 D 업체는 이곳에 의뢰를 한다. 도착한 안OO 대표는 양 과장과 함께 레이저마킹 설비 내부에 설치된 덕트 점검을 시작했다. 그때까지 집진기 전원은 켜져 있었다.

“여기 집진기 전원이 켜져 있는데, 전원 좀 꺼주시겠어요?”

안 대표가 부탁해 양 과장이 전원을 껐고 안 대표와 양 과장, 이 과장 세 사람은 집진기 내부의 에어탱크실 안을 점검했다. 집진기를 점검할 때 먼저 하는 일은 필터실의 청소다. 그동안 덕트를 통해 흡입된 알루미늄 분진들이 필터실에 쌓여있다 날리고는 하기 때문이다.

이날도 역시 필터실 문을 약간 열자마자 알루미늄 분진이 훑날려 바닥에 떨어졌다.

“제가 청소기 가져올게요.”

이 과장이 근처에 놓여있던 진공청소기를 가져와 바닥을 청소했다. 이 때 필터실 문이 살짝 열려 있었고, 이 과장은 문을 조금 더 열어서 청소기로 먼지를 더 빨아들이려고 했다. 그 순간 ‘핑’ 하는 소리와 더불어 불꽃이 튀어나왔다. 그리고 몇 초 지나지 않아 집진기 근처에서 훨씬 더 큰 폭발이 발생했다.

119에 신고를 하고 화재는 곧 진압됐지만, 그 사고로 두 사람이 목숨을 잃었다. 그리고 나머지 한 사람은 전신 3도의 중화상을 입었다.

대체 무엇이 폭발했을까?

화재가 발생한 곳은 집진기 하부의 필터실

안OO 대표가 집진기의 전원을 꺼달라고 부탁했기 때문에 사고 발생 전에 집진기의 전원은 꺼져 있었다. 그리고 집진기 전원부에서 메인 전원까지는 접지선이 연결돼 있어 접지된 상태였다. 전기가 원인이 되어 폭발이 일어날 가능성은 없었던 것이다. 폭발이 발생한 집진기 주변에 교대 근무자가 사용하는 전기 히터가 있었지만, 사고 발생 4시간 전부터 전원은 꺼져 있었다. 그렇다면 폭발은 어떻게 일어났을까?

현장에 설치된 CCTV 영상에는 사고 발생 과정이 초 단위로 담겨 있다. 영상을 살펴보면 안OO 대표가 도착해 집진기 전원을 끄고 에어탱크실을 점검한 시간이 오전 10시 50분경. 집진기의 필터실 문을 열어서 진공청소기로 청소를 한 것이 10시 51분경이다. 그리고 불과 15초 후인 10시 51분 15초경에 집진기 주변에서 1차 폭발과 화재가 발생한다.

1차 폭발로 인한 불꽃이 보인 뒤 불과 0.2초 만에 2차 폭발이 일어난다. 2차 폭발은 1차 폭발에 비해 훨씬 커서 강렬한 화염을 동반한 화재가 발생했고, 집진기 주변이 완전히 불길에 휩싸인다.

화재와 폭발이 일어난 것은 집진기의 필터실이었다. 집진기는 크게 네 부분으로 나누어진다. 가장 상부에 있는 모터실, 가운데에 자리한 에어탱크실, 그리고 그 아래에 있는 필터실과 가장 아래에 있는 더스트박스(Dust Box)다.



10시 50분 점검 장면



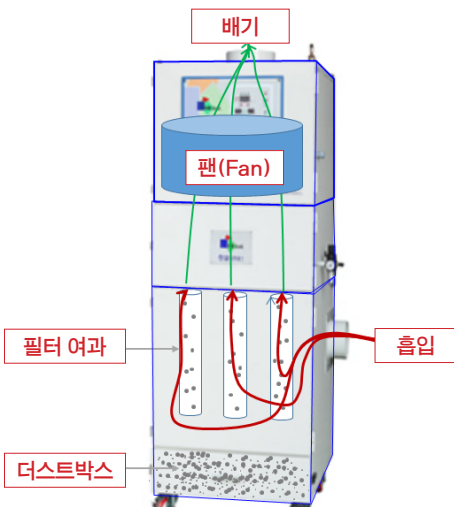
10시 51분 15초 1차 폭발



10시 51분 16초 2차 폭발

생산 공정에서 후드와 흡입 덕트로 빨아들인 알루미늄 먼지와 공기가 집진기로 들어오면 필터실에 장착된 필터를 거치면서 공기는 모터실의 팬에 의해 밖으로 내보내지고, 걸리진 알루미늄 분진은 필터실 가장 아래에 있는 더스트박스에 쌓이는 구조다.

사고 현장을 보면, 집진기의 가장 하부, 필터실 내외부에 집중적인 화재 흔적이 확인된다. 필터실 내부에는 카트리지 필터가 뼈대만 남아있었고, 더스트박스에는 산화된 알루미늄 분진과 소화수가 섞여서 고여있었다. 화재는 집진기 중에서도 필터실, 더스트박스에서 발생했다는 것을 알 수 있다.



집진기 작동방식



필터실 손상 흔적

알루미늄 분진은 폭발물이다

더스트박스에 쌓여 있던 것은 알루미늄 분진이다.

알루미늄 소재의 케이스를 생산하는 과정에는 다량의 알루미늄 분진과 용접 흠이 발생한다. 이것이 공정마다 있는 후드와 흡입 배관을 통해 집진기로 보내지는 구조다. 결국 그렇게 쌓여 있던 알루미늄 분진이 폭발했던 것이다.

많은 사람들이 폭발 사고라고 하면 가스폭발만을 생각한다. 하지만 가스 이외에 아주 미세한 가루 형태의 고체, 즉 분진도 폭발의 위험이 있고, 실제로 폭발 사고가 적지 않게 일어난다는 사실은 잘 알지 못한다.

분진(Dust)이란 공기 중에 떠다닐 수 있을 정도로 미세한 고체 입자로, 산소가 공급되는 상태에서 정전기 등의 불꽃과 만나면 화재를 일으키는 가연성 물질이다. 알루미늄 같은 금속뿐만 아니라 밀가루나 옥수수가루, 분유, 설탕 같은 곡물류, 목탄이나 종이 같은 목재류, 플라스틱 분진 등이 모두 일정 조건이 갖춰지면 폭발할 수 있는 가연성 분진이다. 쉽게 말하면 분말 상태에서 탈 수 있는 모든 먼지가 폭발할 수 있는 것이다. 그리고 분진에 의해 일어나는 폭발을 가스폭발과 구분해 분진폭발이라 한다.

그런데 먼지 같은 가루가 왜 폭발하는 것일까?

제분공장의 예를 들어보자, 밀을 빻아서 밀가루를 만들면 아주 미세한 밀가루 먼지가 많이 생겨난다. 그 미세한 먼지는 밀이나 입자가 상대적으로 큰 밀가루보다 훨씬 가볍고 표면적이 넓어 공기 중에 떠다니게 된다. 그 먼지는 표면적이 넓기 때문에 공기와의 접촉면도 넓어지게 되고, 바람 등의 이유로 빠른 속도로 움직이게 되면 서로 마찰하거나 충돌하면서 열이나 정전기가 발생하기 쉽다. 그것이 어떤 형태든 작은 불꽃으로 발화하게 되면 폭발이 일어나는 것이다.

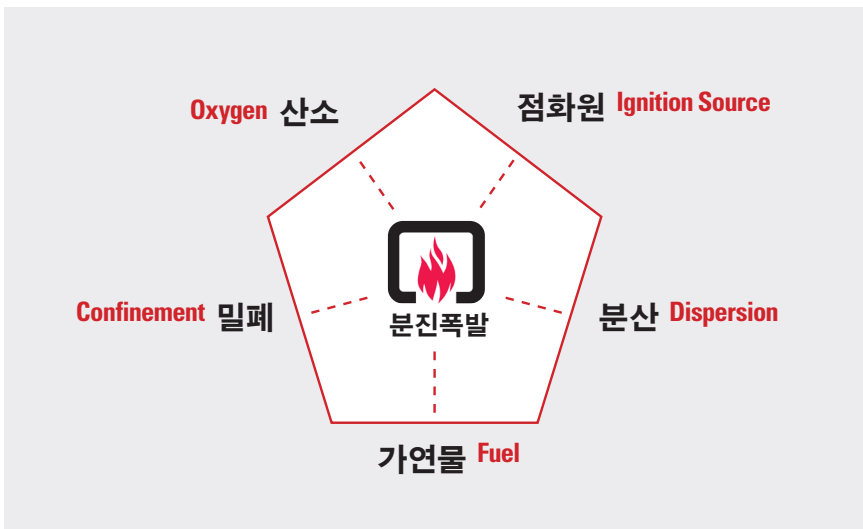
분진폭발은 이번 사고가 그랬듯이 1차 폭발이 일어나면 그 폭발의 힘이 주변에 가라앉은 분진을 부유시키고 연쇄적으로 폭발시키면서 훨씬 큰 2차 폭발로 이어지는 것이 특징이다.

알루미늄 분진은 여러 금속 중에서도 비중이 매우 작아 공기 중에 떠다닐 가능성이 높고, 낮은 온도에서도 쉽게 불이 붙을 수 있어 폭발의 위험성이 더 높다. 하지만 단지 쌓여있는 것만으로 폭발이 일어나지는 않는다.

분진폭발이 일어나기 위해서는 다섯 가지 요소가 충족돼야 한다. 화재의 3요소인 가연물, 산소, 점화원에 더해 분산과 밀폐라는 두 가지 조건이 더 갖춰져야 한다. 즉 밀폐된 공간이어야 하고, 그 공간 안에서 공기 중에 분진이 떠다니는 상태여야 한다는 것이다.

이번 사고의 경우, 가연물인 알루미늄 분진이 쌓여 있었고 공기 중에 노출돼 있었으니 산소도 공급되는 상황이었다. 집진기나 더스트박스가 모두 밀폐공간에 해당했고, 진공청소기를 가동했으니 바닥에 떨어져 있거나 더스트 박스에 쌓여 있던 분진이 공기 중에 떠다니고 있었을 가능성이 높았다. 분진폭발의 다섯 가지 요소 중에서 네 가지가 갖춰진 셈이다.

분진폭발이 일어날 수 있는 요소 중 하나 남은 것은 바로 점화원이다. 점화원은 무엇이었을까?



분진폭발의 다섯 가지 요소

불꽃을 일으킨 것은 진공청소기, 혹은 사람

사고 후 조사에 따르면 진공청소기의 외부에는 화재로 인한 손상의 흔적이 거의 없었다. 모터 역시 손상이 없었던 반면, 진공청소기에서 빨아들인 먼지를 모으는 먼지통, 집진통에는 손상의 흔적이 확연히 보였다.

청소기에는 2단의 집진통이 있는데, 아래쪽에 있는 1단 집진통의 탱크가 분리돼 바다에 떨어져 있었고, 2개의 탱크를 결합하는 클램프(Clamp)가 바깥 방향으로 휘어져 있었다. 1단 집진통 내부에서 무엇인가가 폭발해 그 압력으로 1단 집진통은 바닥으로 내려앉고, 위쪽의 집진통까지 압력이 더해져 클램프가 휘어진 듯한 모양새다. 그리고 5m 길이의 호스 중 70% 이상이 불에 녹아 찌그러들어 있었고 호스 내부엔 그을음이 가득했다.

무언가 집진통 내부에서 폭발한 것으로 보이는 흔적들이다.

사고 당시, 청소기로 바닥의 먼지를 청소하고 15초가량 지나서 1차 폭발이 발생했고, 1차 폭발이 발생한 지 불과 0.2초 만에 2차 폭발이 발생했다는 것을 생각해 보면, 청소기를 가동하면서 청소기의 호스 안으로 빨려 들어간 알루미늄 분진이 마찰이나 충돌에 의해 정전기가 발생했고, 그것이 집진통에 모여있던 알루미늄 분진을 태우면서 화재가 발생했을 가능성이 높았다.

접화원으로 또 하나의 가능성이 있는 것은 작업자들 자체다. 인체는 자체로 정전기를 축적할 수 있다. 작업자들이 청소를 하기 위해 집진기 내부 필터실 쪽으로 접근했을 때 작업자들의 몸이나 의복 등에서 발생한 정전기가 집진기 바닥에 쌓여 있던 알루미늄 분진에 접화원으로 작용해 화재를 일으켰을 수도 있는 것이다.



폭발로 분리된 1단 탱크



호스 내부 그을음



분진폭발의 다섯 가지 요소가 갖춰졌다

무엇이 결정적인 점화원이었는지는 단정해 이야기할 수 없다. 점화원이 이 두 가지 중 무엇이었던 중요한 것은 이로써 분진폭발의 다섯 가지 요건이 모두 갖춰졌다는 것이다.

첫 번째인 가연물은 알루미늄 분진이었다. 집진기가 공기 중에 노출돼 있었기 때문에 두 번째인 산소도 충분히 공급되는 상황이었다. 세 번째 요소인 점화원은 진공청소기의 작동이나 인체로 인한 정전기로 추정된다. 네 번째인 분산의 요소는 진공청소기가 바닥 청소를 했을 때 깔려 있던 분진이 공기 중으로 떠올랐거나, 사고 직전까지 가동됐던 집진기 팬의 영향으로 공기 중에 분진이 떠다녔을 가능성이 충분했다. 집진기 내부가 부분적으로 밀폐돼 있기 때문에 다섯 번째 요소인 밀폐도 충족된다. 만일 진공청소기가 1차 폭발이 일어난 장소였다면, 진공청소기의 집진통도 밀폐공간에 해당한다.

결국 이번 사고는 가연성 물질인 알루미늄 분진이 쌓여 있던 밀폐공간, 집진기 내부에서 진공청소기를 가동하면서 알루미늄 분진이 부유하는 상태로 바뀌었고, 정전기에 의해 발화가 되면서 분진폭발이 일어났던 것이다. 어떻게 보면 전형적인 분진폭발의 하나였다.

분진폭발, 아무도 몰랐고 아무런 준비도 없었다

전원을 껐는데 왜 폭발했을까?

무지가 불러온 사고

사고가 난 뒤 E 기업과 D 업체 관계자들은 이구동성으로 이야기했다. 알루미늄 분진이 위험하다거나 폭발할 수 있다는 사실 자체를 몰랐다는 것이다. 사고가 나고 조사가 진행되기 전까지는 사고가 왜 일어났는지 원인조차 알지 못하고 있었다.

“차단기를 내려서 전원을 모두 차단했는데 왜 터졌는지 모르겠어요.”

— E 기업 담당자

“만약에 정전기 폭발이 원인이었다면, 사고가 나도 벌써 났어야 하는데, 2017년부터 여태까지 한 번도 문제가 없다가 이제 와서 사고가 나니 제 개인적인 생각으로는 도저히 모르겠습니다.”

— E 기업 관리자

전원만 차단하면 폭발은 일어나지 않는다고 잘못 알고 있었고, 심지어 사업장에서 알루미늄 분진이 발생한다는 사실 자체를 알지 못하고 있기도 했다.

“용접 공정이 있기 때문에 흠이 발생한다는 걸 알고는 있었지만, 그건 그냥 그을음이고 분진이라고 하면 분말이나 가루로 알고 있어서 분진이 별도로 발생하는지 몰랐습니다. 흠이 제품에 묻으면 불량이 되기 때문에 집진기도 그것 때문에 설치한 줄 알고 있었습니다.”

— E 기업 관리자

“알루미늄 분진의 위험성은 사실 몰랐는데 이번에 사고가 나고 나서 알았습니다.”

— D 업체 관리자

사실상 E 기업이나 협력업체인 D 업체 어느 누구도 분진폭발의 위험에 대해서 아는 사람은 없었다. 위험성을 몰랐으니, 대책이 있었을 리 만무했다. 폭발을 방지하기 위한 조치도 없었고, 근로자들을 상대로 한 교육도 이뤄지지 않았다. 업체 측에서도 제대로 된 폭발 방지 대책을 세우지 못했다는 것을 인정하고 있었다.

“알루미늄 분진을 취급하는 방법 등에 대해 교육을 실시한 적은 없었습니다. 사실 우리 사업장에서 가장 위험한 요소라고 판단한 것은 끼임 사고였기 때문에, 끼임 사고 위주로 교육을 많이 진행한 것으로 알고 있습니다.”

— E 기업 관리 담당

“정전기로 인한 폭발 가능성에 대해 인지를 하지 못했고, 폭발이 발생할 것이라고 애초에 생각하지도 못했기 때문에 정전기 방지 대책이 부족했던 것은 사실입니다.”

— E 기업 관리자

알루미늄 가공 작업을 하면서 매일같이 알루미늄 분진과 용접 흠이 발생하는 사업장이었음에도 불구하고 알루미늄 분진이 폭발을 일으킬 수 있다는 사실 자체를 몰랐던 무지함. 사고는 그 지점에서부터 출발했던 셈이다.

집진기의 청소와 환기만 잘해 두었더라도

만일 알루미늄 분진이 이처럼 큰 폭발 사고를 낼 수 있는 위험한 물질이라는 것을 알기만 했더라면, 사고는 너무나 쉽게 막을 수 있었다. 막대한 설비 투자나 거창한 시스템이 필요한 것도 아니었고, 많은 시간이나 인력이 소요되는 일도 아니었다.

분진폭발 사고를 방지하기 위한 방법은 간단하다. 분진폭발이 일어날 수 있는 환경을 없애면 된다. 일차적으로 중요한 것은 가연물인 알루미늄 분진을 제거하는 것이다. 폭발의 재료가 됐던 가연물, 알루미늄 분진이 쌓이지 않도록 자주 청소를 하고 집진기 내부에 환기를 해주었다면 폭발은 일어나지 않았을 것이다.

알루미늄 분진은 일정 정도 이상 쌓였을 때 폭발 위험이 훨씬 커진다. 그래서 알루미늄 분진이 발생하는 작업장에선 일정 기간마다 주기적으로 청소를 해주고 환기를 해주어야 한다. 하루에 한 번이든 한 주에 한 번이든 집진기의 더스트박스를 비워주고 청소를 해줘야 하는 것이다.

하지만 사고가 난 집진기에서 마지막으로 필터를 교체하고 더스트박스 청소를 한 것은 1년 4개월 전인 2021년 8월이었다.

“작업자들은 최하단층의 분진, 스크랩 등이 쌓인 통을 비우는 일을 합니다. 그 외에 필터 교체나 청소 등은 보통 해당 집진기 제작업체에서 필터를 교체하면서 청소를 같이 해줍니다.”

— E 기업 생산 관리자

통상 집진기의 청소와 필터 교체는 1년에 한 번 정도 집진기 제작업체인 안OO 대표가 왔을 때만 이루어졌다고 한다. 1년 4개월 정도의 기간 동안 집진기를 청소하지 않은 채 그대로 둔다면 알루미늄 분진은 얼마나 쌓이게 될까?

공장에는 똑같은 시기에 설치된 같은 모델의 집진기가 한 대 더 설치돼 있다. 청소나 필터 교체 시기도 똑같았기 때문에 사고 난 집진기와 남아있는 집진기, 두 대의 집진기에 쌓인 알루미늄 분진의 양은 비슷했을 것이다.

남아있는 집진기 내부를 확인한 결과 약 0.5cm에서 1cm의 분진이 쌓여 있었다. 그간의 연구에 따르면 폭발 위험이 상당히 높은 퇴적량이었다.

진공청소기가 분진폭발 안전 대책형 제품이었다면

알루미늄 분진이 제대로 청소되지 않은 채 쌓여 있었다 하더라도 폭발을 막을 수 있는 방법은 또 있었다. 분진폭발은 다섯 가지 요소 중 하나만 충족되지 않아도 일어나지 않기 때문이다. 다섯 가지 요소 중 밀폐와 산소라는 요소는 거의 고정불변이기 때문에 가연물의 제거 다음으로 중요한 것은 점화원의 제거다.

이번 사고의 경우, 알루미늄 분진이 있었다라도, 점화원으로 추정되는 진공청소기와 인체에 의한 정전기라는 요소를 제거하면 폭발을 막을 수 있었다는 이야기다.

사고가 난 업체가 사용했던 것은 일반적인 산업용 진공청소기였다. 하지만 일반적인 산업용 진공청소기가 아니라, 정전기를 발생시키지 않는 분진폭발 안전 대책형 진공청소기를 사용했다라면, 그리고 사람에 의한 정전기 발생과 발화를 막기 위해서 정전기 대전 방지용 안전화를 착용하고 제전복을 입은 채 집진기의 점검과 보수 작업을 했더라면 다른 조건이 모두 같았다 하더라도 폭발 가능성은 훨씬 낮았을 것이다. 점화원이 되었던 정전기를 애초에 차단할 수 있었기 때문이다.

사고가 난 후에야 갖췄던 제전복과 제전화

해당 기업은 사고가 난 뒤에야 제전복, 제전화 등 정전기 방지용 보호구를 비치하고, 분진 청소용 방폭청소기를 비치했다. 화재가 발생했을 때 위험도를 낮출 수 있는 탄산칼슘 공급장치도 설치하고, 불꽃 역류 방지용 댐퍼와 20kg짜리 대형 소화기를 설치했다.

소 잃고 외양간을 고친 것과 같은 일이었지만 그나마 다행스러운 일이다. 하지만 만일 조금만 더 일찍 이런 조치가 취해졌더라면 세 사람의 안타까운 희생이 없었을 것이기에 한편으론 너무나 아쉬운 일이었다.

흔히 사고로부터 배운다고 이야기하지만, 그보다 좋은 것은 사고가 발생하기 전에 미리 위험을 예상하고 대책을 마련하는 것이라는 걸 이번 사고를 통해서도 깨닫게 된다.



폭발·화재로 손상된 집진기

밀가루도 폭발한다

드물지 않은 분진폭발

널리 알려져 있지 않지만 분진폭발은 중세 때부터 지금까지 지속적으로 발생해온 흔한 폭발 사고다. 중세에서 근대에 이르기까지 유럽에서 종종 발생 하곤 했던 풍차 폭발 사고는 바로 풍차로 밀가루를 만들다가 일어난 분진폭발 사고였다.

분진폭발은 피해 규모도 가스폭발보다 크다. 1913년 6월 미국 뉴욕주 버펄로의 한 제분소에서 일어난 폭발 사고는 사망자 33명에 부상자 80여 명이라는 큰 인명 피해를 냈다. 1963년 11월, 일본 후쿠오카현에 있는 미쓰이미이케 탄광에서는 석탄 가루 분진에 의한 대폭발이 발생해 458명이 사망하고 839명이 부상했다. 일본 광업 역사상 최악의 참사로 기록된 사고다.

우리나라도 예외가 아니다. 1999년 9월 18일, 서울대학교 원자핵공학과 실험동에서 알루미늄 분진이 폭발하면서 대학원생 3명이 숨지고 12명이 부상하는 사고가 일어났다. 대학 연구실도 분진폭발의 위험에 대비하지 못했던 것이다.

2003년 12월에는 울산의 한 옥수수 저장 창고에서 노동자들이 작업을 마치고 담배를 피우려던 찰나, 공중에 흩날리던 옥수수 분진이 폭발하면서 7층 높이의 외벽이 파손된 사고가 일어났고, 2018년에는 당진 알루미늄 지주대 생산공장에서 집진기가 폭발해 작업자 2명이 화상을 입기도 했다. 같은 해 경기도 포천의 석탄화력발전소에서도 분진폭발 사고가 일어났다.

2000년부터 2019년까지 발생한 화재·폭발 중대재해사고 751건 중에 분진 관련은 31건에 달한다. 전체 중대재해사고의 4%가 분진 관련인 것이다. 사망자도 827명 중 32명으로 3.9%를 점하고 있다. 사고 발생 건수를 연도별로 살펴보면 분진과 관련된 사고가 지속적으로 증가하는 추세라는 것을 알 수 있다.

하지만 사고가 증가하는 것에 비해 분진폭발의 위험성에 대해서는 여전히 잘 알려져 있지 않다. 이번 사고 역시 그 위험성을 알지 못했기 때문에 일어난 사고라는 것을 생각하면 분진폭발의 위험성을 보다 널리 알리는 방법이 고안되어야 할 것으로 보인다.

분진폭발의 위험은 생각보다 가까운 곳에 있다

폭발이 일어날 수 있는 분진의 종류는 무척이나 다양하다. 알루미늄 같은 금속이나 석탄, 플라스틱 제품 외에도 밀가루와 설탕, 옥수수전분, 종이류, 톱밥 같은 목재류, 쌀겨나 세제, 심지어 집안의 먼지까지도 모두 폭발할 수 있다.

불에 탈 수 있는 물질이 아주 작고 가벼운 입자 상태로 공기 중에 퍼져 있다면 언제든지 폭발할 수 있는 것이 바로 분진폭발이다. 폭발의 장소도 규모가 큰 공장이나 탄광만이 아니라 목공소나 철공소, 제분소나 집안처럼 우리의 생활 가까운 곳에도 존재한다.

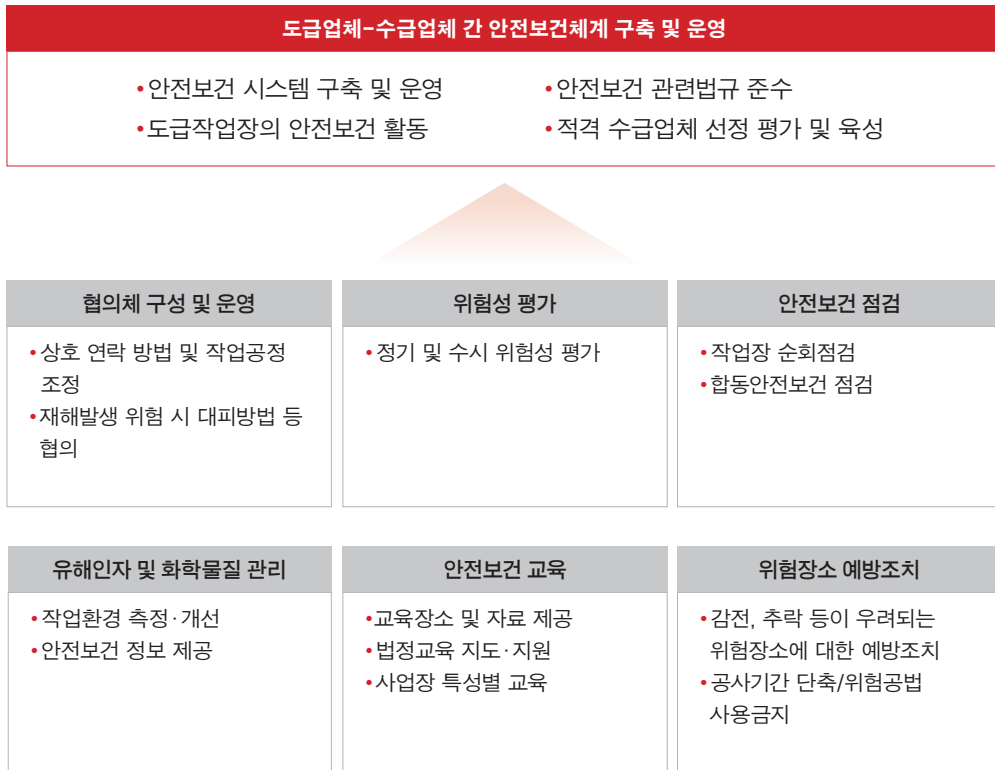
게다가 분진폭발은 불이 붙은 후 매우 짧은 시간 안에 폭발이 이루어지고 연쇄 폭발이 일어날 가능성이 높다. 사고가 일단 발생하면 피하기도 어렵고 피해 규모도 적지 않다. 가스폭발만큼이나 위험함에도 불구하고 그 위험성에 대한 인식은 가스폭발에 비해 훨씬 적다.

위험을 알지 못하면 피할 수도 없다. 그리고 알기만 한다면 가스폭발보다 훨씬 간단하고 쉽게 위험을 피할 수 있는 것이 바로 분진폭발이다. 분진폭발 사고를 방지하기 위한 노력은 내 곁에 존재하는 위험을 제대로 파악하는 데서부터 시작돼야 한다.

안전보건 정보는 모두에게 공유되어야 한다

도급사업의 수행 시 수급인 근로자의 안전을 위해서는 수급인의 협력을 이끌어내고 사업장의 위험 요소를 체계적으로 도출하여 개선하여야 한다. 이를 위해 다음과 같은 다양한 안전보건 활동이 유기적으로 수행될 수 있도록 시스템을 구축하여 운영하는 것이 바람직하다.

도급사업 안전보건 활동 구성요소



화학물질을 안전하게 취급하기 위한 물질안전보건자료(MSDS) 활용 방법

물질안전보건자료(MSDS, Material Safety Data Sheets)

화학물질에 관한 물리화학적 특성, 유해·위험성 정보, 독성에 관한 정보, 개인보호구 정보 등의 내용을 담은 자료를 말하며, 사업장은 물질안전보건자료의 정보를 활용하여 화학물질을 안전하게 취급해야 한다.

MSDS의 구성

- | | | | |
|--------------------|-------------------|----------------|----------------|
| 1. 화학제품과 회사에 관한 정보 | 5. 폭발, 화재 시 대처 방법 | 9. 물리화학적 특성 | 13. 폐기 시 주의사항 |
| 2. 유해성, 위험성 | 6. 누출 사고 시 대처 방법 | 10. 안전성 및 반응성 | 14. 운송에 필요한 정보 |
| 3. 구성성분의 명칭 및 함유량 | 7. 취급 및 저장 방법 | 11. 독성에 관한 정보 | 15. 법적 규제 현황 |
| 4. 응급조치 요령 | 8. 노출 방지 및 개인보호구 | 12. 환경에 미치는 영향 | 16. 그 밖의 참고사항 |

물질안전보건자료의 게시·경고표시

- 사업주는 취급 근로자가 쉽게 보거나 접근할 수 있는 장소에 각 화학 물질별로 물질안전보건자료를 항상 게시해야 한다.
- 사업주는 사업장에서 물질안전보건자료 대상물질을 담은 용기에 경고표시를 해야 한다.

* 게시 내용: 물리·화학적 특성, 독성에 관한 정보, 폭발·화재 시의 대처 방법, 응급조치 요령 등



화학물질 경고표시



- 명칭: 해당 대상화학물질의 명칭
- 그림문자: 화학물질의 분류에 따라 유해·위험의 내용을 나타내는 그림
- 신호어: 유해·위험의 심각성 정도에 따라 표시하는 "위험" 또는 "경고" 문구
- 유해·위험 문구: 화학물질의 분류에 따라 유해·위험을 알리는 문구
- 예방조치 문구: 화학물질에 노출되거나 부적절한 저장·취급 등으로 발생하는 유해·위험을 방지하기 위하여 알리는 주요 주의사항
- 공급자 정보: 대상화학물질의 제조자 또는 공급자의 이름 및 전화번호 등

물질안전보건자료 교육

사업주는 물질안전보건자료 대상물질 취급 근로자에게 교육을 실시해야 한다.

- | | |
|--------------------|----------------------------|
| • 화학물질의 명칭(또는 제품명) | • 적절한 보호구 |
| • 물리적 위험성 및 건강 유해성 | • 응급조치 요령 및 사고시 대처방법 |
| • 취급 시 주의사항 | • 물질안전보건자료 및 경고표지를 이해하는 방법 |



협력업체와 함께하는 안전보건 수칙



1. 안전보건 방침 명확화

최고경영자의 철학, 의지 등을 반영한 안전보건 방침을 수립하고 게시하여야 한다.



2. 안전보건 목표 및 활동 계획 수립

위험의 특성, 규모, 전년도 수준 등을 고려하여 안전보건 목표를 설정하여야 한다.



3. 안전보건 활동 모니터링

안전보건 목표의 달성 여부 및 활동 계획의 이행 여부를 주기적으로 측정하여야 한다.



4. 체계적인 안전보건 교육 및 훈련

조직의 계층, 위험 요인, 업무 또는 작업 특성을 고려한 교육훈련 계획을 수립하고 모든 근로자에게 위험성 평가 사항을 포함한 안전보건 제반의 정보를 전달하여야 한다.



5. 안전작업 허가제 운영

안전작업 허가 대상인 유해·위험 작업과 허가 절차를 수립하여 운영한다.



6. 도급작업 전 위험성 평가 실시

- 작업장에 제공되는 유해·위험시설 및 유해·위험물질
- 일상작업 및 수리·정비 등 비일상적인 작업, 비상조치 작업
- 교대작업, 야간작업, 장시간 근로 등에 대한 건강증진 방안
- 일시 고용, 외국인, 고령자 등 취약계층 근로자의 안전보건



7. 원청 보유 위험 기계·기구 및 설비의 안전성능 확보

위험 기계·기구 및 설비에 대한 점검, 정비 등의 관리 방법과 책임과 권한 및 업무 절차를 수립하여 운영하며, 법정검사 수검 및 방호조치를 구비하여야 한다.



8. 작업 시작 전 안전점검 및 조치

도급작업 공정별로 작업 전·중·후 안전점검을 실시한다. 화재·폭발, 질식, 붕괴 등 대형사고 예방 필수항목이 누락되지 않도록 점검하여야 하며, 안전점검으로 지적된 유해·위험 요인에 대한 조치를 이행하여야 한다.



9. 신호체계 및 연락체계

중량물 취급 작업, 밀폐공간 작업, 화재·폭발 위험 작업, 정전 및 활선 작업 등 신호체계가 필요한 유해·위험 작업의 종류와 신호방법을 결정하여야 한다. 수리·정비 작업 시 Lock-out/Tag-out을 운영한다. 도급인과 수급인 또는 수급업체 상호 간 다양한 연락체계를 구비하여 소통 채널을 운영한다.



10. 비상시 대피 및 피해 최소화 대책 운영

도급작업에서 발생될 가능성이 있는 화재·폭발, 질식 등의 안전사고 또는 천재지변 등의 피해유형별 비상대응계획을 수립한다.

정비·보수 과정에 도사리고 있는 위험

Part 3



Case 4

보수 과정의 구멍 난 원칙이
두 사람의 죽음을 불렀다

Case 5

보수 작업의 기본 원칙을
지키지 않아서 생긴 인재(人災),
언제까지 계속될 것인가?

Note

- 화학공장 정비·보수 작업 시 안전 조치 사항

P-T145



Case 4

보수 과정의 구멍 난 원칙이 두 사람의 죽음을 불렀다

화학물질 탱크 보수 중 화재 사고

톨루엔이 담겨 있던 대형 탱크에 화재가 발생했다. 보수 작업을 하기 위해 비워진 탱크로 들어갔던 두 사람의 일용직 근로자는 순식간에 덮친 화마에 목숨을 잃었다. 사고가 난 탱크는 작업을 하기 며칠 전부터 비워져 있었고, 작업 직전에도 물로 세척을 해 안전한 것으로 보였다. 대체 문제는 어디에 있었던 것일까?

원칙이 없는 것은 아니었다. 안전한 탱크 보수 작업을 하기 위해 지켜야 할 원칙들은 마련돼 있었다. 그럼에도 불구하고 사고가 난 이유는 그 원칙들이 제대로 지켜지지 않았기 때문이다. 원칙이 지켜질 수 있는 방법, 사고 없는 현장을 실현하기 위해 필요한 것은 무엇일까?

순식간에 덮친 화마

매번 불안한 마음으로 떠나는 출근길

2022년 4월 20일, 일용직 근로자로 일하고 있는 안OO 씨와 강OO 씨는 오늘도 아침 일찍 집을 나섰다. 오늘의 일터는 울산에 있는 화학공장인 B 기업. 두 사람은 B 기업의 탱크 보수를 전문으로 담당하는 협력업체인 D 업체의 일용직 근로자다. 일당으로 보수를 받지만 D 업체는 보수 작업이 있을 때마다 우선해서 두 사람을 부른다.

오늘 할 일은 화학물질을 저장하는 탱크 안에 부착돼 있는 폼실(Foam Seal)이라는 것을 제거하고 다시 설치하는 일이다. 폼실은 탱크 안의 위험물질이 바깥으로 새어 나오지 못하도록 부착된 부속품인데 정기적으로 교체를 해줘야 한다.

탱크의 크기는 작은 것이 1만 bbl(배럴) 규모. 지름이 13m, 높이가 아파트 4층 정도에 해당할 정도로 큰 탱크다. 탱크마다 저장된 화학물질의 종류는 다르지만 모두 조금만 누출돼도 화재나 폭발 사고가 발생할 수 있는 위험물질이 담겨있다는 공통점이 있다.

B 기업에는 그런 탱크가 100개가 넘기 때문에 한 달에도 두세 번씩 작업을 간다. 이 업체의 일을 한지 2년이 넘었지만 출근하는 두 사람은 오늘 하루도 사고 없이 일을 마치기를 바라면서 출근을 한다.



사고 발생 탱크의 화재 진압 후 모습

물 세척 완료, 가스 농도 0% 탱크 내 작업에 문제는 없어 보였는데...

두 사람이 현장에 도착한 것은 4월 20일 오전 10시경. 이날 작업할 탱크는 톨루엔이란 물질이 담겨 있던 탱크라고 했다. 톨루엔 탱크는 처음이다. 기름 냄새와 시너 냄새가 난다. 잘은 모르지만, 위험물질이기 때문에 조심해서 작업을 해야 한다는 사실 정도는 알고 있었다.

현장에선 또 다른 하청업체인 C 업체의 작업자들이 탱크의 물 세척 작업을 하고 있었다. 탱크 보수 작업을 할 때는 작업자가 들어가기 전에 탱크 내부를 물로 세척해 깨끗이 비워내는 것이 원칙이다. 그래야 탱크 안에서 안전하게 일을 할 수 있기 때문이다.

물 세척 작업이 끝나기를 기다리는 사이, D 업체의 이OO 대리는 밀폐공간 작업허가서를 받으러 본사인 B 기업의 담당 부서를 돌고 있었다. 허가서에서 가장 중요한 것은 탱크 내 가스 농도 측정 수치이다. 가스 농도는 0%. 작업을 개시할 수 있는 수치였다.

물 세척이 끝나고 이 대리가 허가서를 받아온 것은 10시 30분경, 두 사람은 드디어 탱크에 들어갈 준비를 했다. 혹시 남아있을지도 모를 유해가스를 내보내기 위해 환기팬을 가동하고, 보호장비를 착용했다.

통상 탱크 내부로 들어가려면, 안전장화와 안전모, 내화학복을 갖춰 입고 송기 마스크를 착용해야 한다. 내부에 남아있을지도 모르는 화학물질로부터 스스로를 보호하기 위해서다. 밀폐공간이니만큼 혹시 모를 사태에 대비해 산소농도측정기와 외부와 연결되는 무전기도 필수로 챙긴다. 4월이지만 장비를 착용하는 것만으로도 한껏 무거워진 몸에는 한여름 같은 열기가 솟아난다.

탱크 안은 조명시설 하나 없는 암흑 세상이다. 캄캄한 곳에서 작업하기 위해 밴드형 헤드랜턴을 안전모에 장착하고, 작업용 커터 칼까지 준비를 마친 두 사람은 10시 50분쯤 탱크 안으로 들어가 작업을 시작했다.

오전에 해야 할 작업은 탱크 벽면과 지붕 사이를 밀착시키고 있는 우레탄 폼실 부위에서 인벨롭(Envelop)이라 불리는 코팅재를 절단하는 일이다. 쉽게 이야기하자면 우레탄 폼에 코팅된 겉면을 잘라내는 일이라 생각하면 된다. 인벨롭을 잘라내고 속에 있는 우레탄 폼을 뜯어내 제거하는 것이 오늘의 작업이다. 오전엔 단순히 커터 칼로 코팅된 겉면을 잘라내면 되는 일이라 시간이 오래 걸리지는 않았다.

10분 뒤, 땀에 흠뻑 젖은 두 사람이 탱크 밖으로 나왔다. 그때 탱크 하단의 출입구에 맑은 액체가 흘러나오는 것이 보였다. 톨루엔이었다. 인벨롭을 잘라내면 우레탄 폼에 스며들었던 화학물질이 흘러나오는 경우가 왕왕 있었다. 톨루엔이 유출된 것을 확인한 D 업체의 이 대리와 C 업체의 장 대리가 다시 소방호스로 탱크 안쪽에 물을 뿌려 세척 작업을 했다.

세척을 끝내고 점심 식사를 한 후 다시 작업을 시작한 것은 오후 1시 5분경. 꺼 두었던 환기팬을 가동하고, 벗어두었던 보호복을 입은 두 사람은 1시 20분경에 탱크 안으로 들어갔다. 이번엔 인벨롭 안쪽에 있었던 우레탄 폼을 뜯어내 탱크 밖으로 빼내는 작업을 해야 한다.

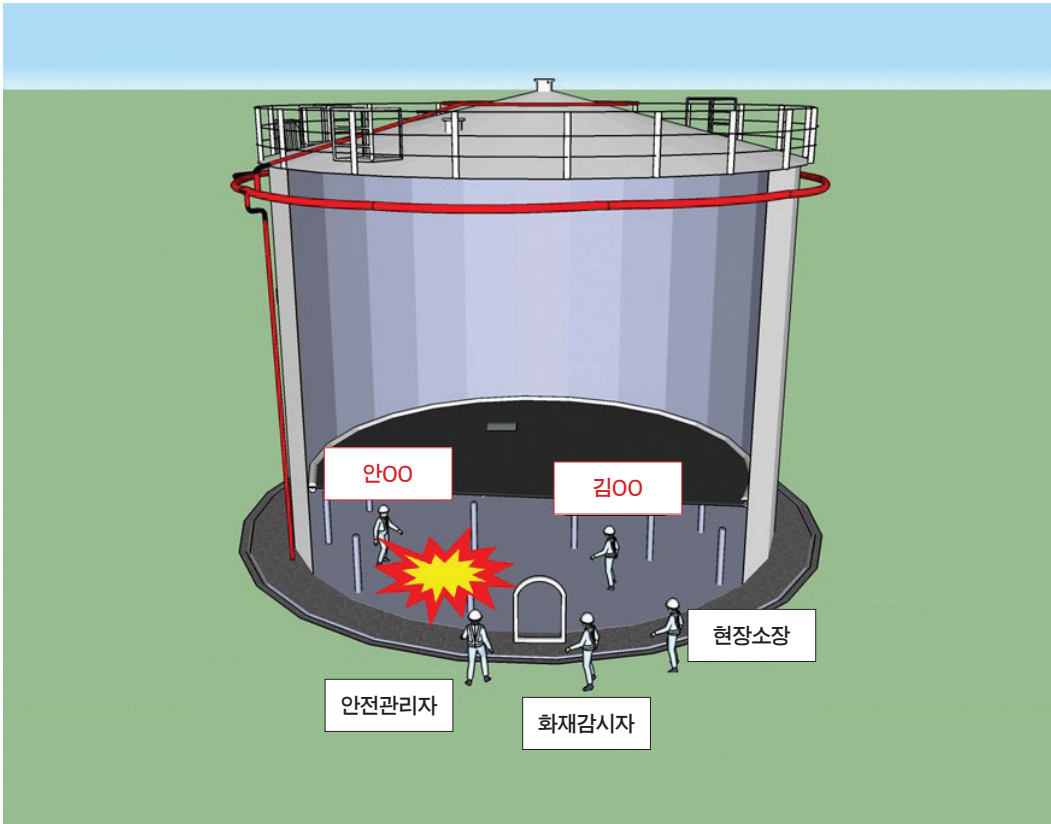
탱크에 들어간 지 10분 만에 일어난 화재 **그리고 마지막이 되어버린 출근길**

그렇게 두 사람이 탱크로 들어간 지 10분이 채 지나지 않은 오후 1시 28분경. 갑자기 탱크 하단 입구에서 불길이 확 솟으며 비명소리가 들렸다. 곧 이어 강 씨가 소리를 지르면서 뛰쳐나오는 것이 보였다. 옷에는 불이 붙어 활활 타고 있었다.

“한 명이 옷에 불이 붙은 채로 뛰어나와서 황급히 물을 뿌려서 불을 꺾습니다. 탱크 내부로 물을 뿌려서 연기가 어느 정도 걷히고 나서야 또 한 명의 근로자가 탱크 바깥에 쓰러져 있는 게 보여서 물을 뿌려주었습니다.”

— 파견업체 비상대기원

주변에 있던 다른 작업자가 급히 119에 연락을 했고 두 사람은 병원으로 옮겨졌다. 소방 차량 22대가 급파돼 화재도 10분 만에 진압됐다. 하지만 전신에 2, 3도의 중화상을 입은 두 사람은 다시 깨어나지 못했다. 한 명은 사고가 난 지 일주일도 채 되지 않은 4월 26일에, 다른 한 명은 한 달 가까이 화상으로 인한 고통을 겪다 5월 15일에 눈을 감았다. 결과적으로 이날은 두 사람에게겐 마지막 출근길이 되었던 것이다.



사고 발생 상황 개략도

세척과 환기를 마친 탱크에선 왜 화재가 일어났을까?

화학공장 탱크 보수 시의 첫 번째 원칙은 철저한 세척과 환기

화학공장의 탱크를 보수할 때는 엄격한 원칙과 절차가 정해져 있다. 탱크 안의 물질을 완전히 비운 뒤 세척과 충수, 환기를 해서 탱크 내에 유해가스가 완벽하게 제거된 상태를 만든 후에야 탱크 내에 들어갈 수 있다.

사고가 난 톨루엔 탱크도 원칙대로 준비가 진행됐다. 보수 작업 일주일 전인 4월 14일부터 탱크를 비웠고, 4월 15일부터는 가스 저감 장치를 가동해 남아있는 유해가스를 배출시켰다. 그리고 작업 당일인 4월 20일 오전에 마지막 물 살수 작업까지 마친 상태였다.

밀폐공간 작업허가서 상, 사고 당일 오전에 측정한 인화성 가스의 농도는 0%였다. 일반적으로 인화성 가스의 농도가 폭발하한 농도의 25% 이하인 경우에 탱크 내 작업이 가능하다. 오전 작업을 하면서 톨루엔 유출이 있었지만 그때도 역시 물 살수를 해서 세척을 했고 환기팬도 가동을 했다. 그런데 왜 화재가 났을까?

완전히 제거되지 않았던 톨루엔

톨루엔 탱크는 「위험물질안전관리법」상 11년에 한 번씩 정기 검사를 하도록 규정돼 있다. 사고가 난 탱크는 2026년에 정기 검사가 예정돼 있었지만, 다른 보수 작업이 필요해 정기 검사를 4년 앞당겨 진행한 것이었다.

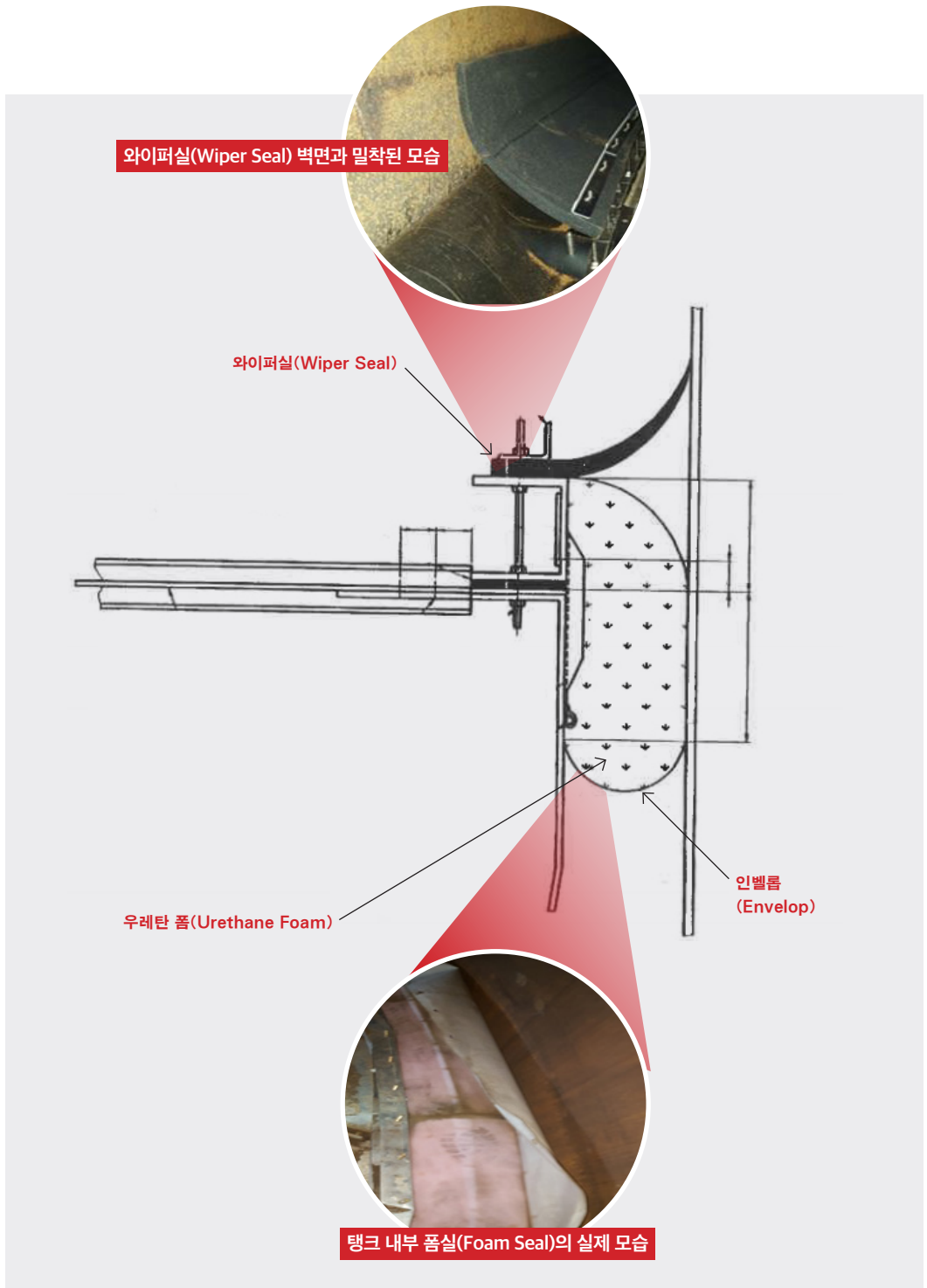
내부 부상형 탱크는 탱크 지붕이 상하로 움직이는 구조다. 그 움직임에 의한 마찰로 인벨롭이 손상되게 되면 탱크에 담겨 있던 톨루엔이 폼실 내부의 우레탄 폼에 스며들 수 있다. 오전에 인벨롭 커팅 작업이 끝난 뒤 탱크 밖으로 톨루엔이 흘러나왔던 것은 그렇게 스며들었던 톨루엔이 흘러나온 것이었다.

톨루엔이 유출된 후 작업자들은 외부에서 탱크 바닥으로 물을 쏟아 톨루엔을 세척했다. 하지만 바닥 살수는 우레탄에서 계속 흘러나오는 톨루엔이나 벽면에 묻어 있던 톨루엔 액체를 완전히 제거하기에는 턱없이 미흡한 조치였다.

사고 후 탱크 안에 남아있던 우레탄 폼에서도 톨루엔이 검출된 것을 보면, 사고 당시 탱크 내부에는 톨루엔 유증기가 적지 않게 있었을 것으로 추정된다. 인화성과 휘발성이 강한 톨루엔 증기에 정전기든, 스파크든 어떤 형태의 점화원이 더해진다면 언제든 화재와 폭발이 일어날 수 있는 위험한 상황이었던 것이다.



사고 발생 저장탱크의 모습



내부 지붕에 설치된 증기유출을 막는 시스템

환기팬 가동 시간은 불과 35분, 환기 시간은 충분했을까?

톨루엔 유증기가 남아있었다 하더라도 탱크 구석구석 남아 있는 유해가스를 충분한 환기로 날려버렸다면 화재는 일어나지 않았을지도 모른다. 환기는 충분히 되었을까?

톨루엔이 유출됐던 오전 11시 이후, 탱크 내부의 환기팬이 가동된 것은 총 35분이었다. 오전 11시에 가동했던 환기팬을 11시 20분경 점심 식사를 하러 가면서 켜고, 다시 현장에 돌아온 1시 5분부터 환기팬을 가동했다.

사고 이후 한 대학의 연구기관에서 시행했던 시뮬레이션 결과에 따르면 탱크 내부의 벽면과 중앙 부위에는 환기를 해도 가스가 제거되지 않는 데드존(Dead Zone)이 있는 것으로 드러났다. 특히 사고가 난 탱크처럼 거대한 내부 부상형 탱크의 경우엔 환기팬을 가동했다 하더라도 작업자들이 작업하던 높이에선 톨루엔 유증기가 정체돼 있었을 것으로 판단됐다. 결과적으로 사고 당시 환기 시간 35분은 톨루엔 가스를 날려버리기에 결코 충분한 시간이 아니었던 것이다.

점화원이 되었던 비방폭형 헤드랜턴

화재가 발생하려면 가연성 물질과 산소, 점화원 등 세 가지 요소가 갖춰져야 한다. 당시 상황을 보면, 탱크 내부에는 가연성 물질인 톨루엔 유증기가 있었고, 맨홀이 개방돼 산소도 공급되는 상황이었다. 점화원은 무엇이었을까?

사고 상황으로 다시 돌아가 보면, 오후 1시 20분경 오후 작업을 하기 위해 탱크로 들어갔던 두 사람은 금세 되돌아 나와 헤드랜턴을 교체하고 다시 탱크 안으로 들어갔다. 오전에 사용했던 헤드랜턴이 조도가 낮아 작업이 어려웠기 때문에 좀 더 밝은 휴대형 랜턴으로 교체했던 것이다.

문제는 오전에 사용했던 랜턴이 방폭형이었던데 반해 새로 가져간 랜턴

이 비방폭형이었다는 사실이다. 원칙적으로 탱크와 같은 밀폐공간 내에서는 인화성 가스에 의한 화재나 폭발 사고가 일어나지 않도록 공기작동식 공구나 방폭형 공구를 사용하도록 되어있다.

하지만 사용하는 공구가 방폭형인지 확인하는 절차는 없었다. 그리고 작업자들은 비방폭형 랜턴이 얼마나 위험한지 알지 못한 채 비방폭형 랜턴으로 작업을 했고, 그것은 점화원이 됐다. 사고 후 조사에 따르면 화재는 탱크 내부 작업 중 톨루엔의 유증기, 혹은 액체가 휴대형 랜턴의 전원부로 침투하여 전원 스위치 또는 배터리(리튬 이온 전지)의 단락(Short)으로 스파크가 일어나 발화된 것으로 추정됐다. 결국 이 비방폭형 헤드랜턴이 점화원이 됐던 것이다.

왜 이런 일이 발생했을까? 톨루엔 유출이 확인됐음에도 탱크 내부 세척은 철저히 이뤄지지 않았고, 톨루엔 유증기가 남아 있을 수 있는 상황에서 작업자들은 탱크로 들어갔다. 그리고 점화원이 될 수 있었던 비방폭형 랜턴도 아무런 제지 없이 사용돼 화재를 불러일으켰다. 문제는 과연 어디에 있었을까.



오전 작업 시 착용했던 방폭형 헤드랜턴



오후 입조 시 착용했던 비방폭형 랜턴

형식에 불과했던 원칙이 사고를 불렀다

‘철저한 세척’이란 원칙은 있었지만

화학공장 저장탱크의 검사, 보수 작업에는 수많은 위험 요인이 존재한다. 특히 사고가 발생한 내부 부상형 저장 탱크의 경우, 더욱 각별한 주의가 필요하다. 부상하는 지붕과 고정 지붕 사이에 폭발 분위기가 형성될 가능성이 높고, 화학물질의 유출 방지를 위해 설치한 폼실에는 톨루엔과 같은 가연 물질이 스며들어 있어 폼실 제거 작업을 하다가 톨루엔이 누출되는 경우에는 정전기 스파크나 랜턴의 전원만으로도 화재나 폭발 사고가 발생할 수 있기 때문이다.

B 기업 역시 이러한 위험을 알고 있었다. 사고를 방지하기 위한 원칙과 규정도 마련돼 있었다. 문제는 그 원칙이 현장에서 제대로 작동하지 않았다는 데 있다.

B 기업의 안전작업허가 절차서에 따르면 보수 등을 위해 탱크 내에서 작업을 할 때에는 밀폐공간 내부에 잔류하는 유해 위험물질을 철저히 제거해야 하고 작업을 시작하기 전과 작업 중에 환기를 실시하여 적정 공기 상태를 유지해야 한다고 되어 있다.

하지만 오전 작업 중 톨루엔이 유출됐을 때, 톨루엔이라는 유해 위험물질을 어떻게 철저히 제거할 것인지에 대해서는 구체적인 방법에 대한 지침도 없었고 그에 따른 지시도 없었다. 본사의 지침과 별도 지시가 없는 상태에서

‘철저한 세척’은 협력업체 현장 근로자의 판단에 맡겨져 있었고, 작업시간이 정해져 있는 상황에서 현장 근로자들은 탱크 외부에서 탱크 바닥으로 간단히 물을 쏘는 방식으로 세척을 했다. 탱크 보수 시의 원칙이었던 철저한 세척은 이루어지지 않았던 것이다. 이러한 조치는 그동안 관행적으로 이뤄져 왔던 일이었다.

“보통 폼실 코팅을 커팅하면 내부 유체가 나오기 때문에 클리닝을 하는 것은 당연한 절차입니다. 클리닝 작업 방법이나 단계에 대하여 관여하는 건 없습니다.”

— B 기업 담당자

“탱크의 클린아웃도어 밖에서 소방호스로 물을 뿌려주면 탱크 내부가 완전하게 클리닝 되는지는 알 수 없지만 일반적으로 항상 그렇게 해왔습니다.”

— D 업체 관계자

결과가 보여주듯 탱크 내부의 톨루엔 유증기는 간단한 물 세척만으로 제거되지 않았다. 탱크에 남아있는 유해·위험물질을 철저히 제거한 후에 적정 공기 상태가 유지되도록 해야 한다는 원칙은 관행으로 대체됐고, 그 결과는 화재 및 폭발과 안타까운 사망 사고였다.

가스 농도를 다시 측정하고

랜턴이 방폭형인지 점검만 제대로 했더라도

탱크 내부 세척이 제대로 되지 않았다 하더라도 사고를 막을 수 있는 방법은 있었다. 오후 작업 시 탱크 안으로 들어가기 전에 탱크 내부의 가스 농도만 다시 측정했다더라면 추가 세척이든, 작업 연기든 조치가 취해졌을 것이기 때문이다.

B 기업의 안전작업허가 절차서에 따르면 “작업 현장 상황이 변화했을 때 발급부서에서 작업을 중단하고 추가로 가스 측정을 수행하도록 한다”고 되어 있다.

사고 당일, 작업 중 툴루엔이 유출된 것은 작업 현장 상황의 변화에 해당한다. 원칙에 의하면 당연히 작업을 중단하고, 추가로 가스 농도를 측정했어야 한다. 하지만 가스 농도의 추가 측정은 이루어지지 않았다.

설령 툴루엔이 유출되지 않았다 할지라도 원칙적으로는 점심시간이 끝나고 오후 작업이 재개되었을 때도 무조건 가스 농도를 재측정했어야 했다.

안전작업허가 절차서에는 “탱크와 같은 밀폐공간 작업의 경우, 본사의 발급부서와 안전 담당 부서가 작업 시작 전, 점심 식사 후, 연장 작업 전, 가스 측정 및 결과치를 측정자 란에 기록하고 관리감독자가 서명”하도록 되어 있다. 반드시 복합 가스 측정기로 추가 측정하고 서명할 것도 강조하고 있다. 원칙대로라면 두 차례나 추가로 가스 측정을 했어야 한다.

그러나 실제 가스 농도는 오전에 한 차례 측정됐을 뿐 추가로 측정된 적이 없었다. 사고 후 조사에 따르면, 가스 농도는 오후 작업 시작 전에 다시 측정하지 않은 채 오전에 측정된 수치에 서명만 한 것으로 드러났다. 원칙은 있었으나 지켜지지 않았던 것이다.

절차서 상으로는 본사뿐 아니라 협력업체도 작업 중, 일시 종료(휴식) 후, 작업을 실시하는 경우에 산소와 가연성가스 등 가스 농도를 측정하고 서명하도록 되어있다. 즉 오후 작업이 재개되기 전에 협력업체인 D 업체의 관리감독

자도 가스 농도를 측정하고 서명해야 했다.

하지만 D 업체는 아예 복합가스 농도측정기 자체를 보유하고 있지 않았다. 가지고 있던 것은 산소농도측정기 뿐이었고 당연히 가스 측정도 하지 않았다. 하지만 본사인 B 기업은 협력업체가 복합가스 농도측정기를 보유하고 있는지조차 점검하지 않았고 가스 농도 측정 여부도 확인하지 않았다.

점화원이 되었던 비방폭형 랜턴 역시 마찬가지였다. 원칙적으로 화재의 위험성이 높은 탱크 내 작업을 할 경우 비방폭형 랜턴은 가지고 가지 못하도록 정해져 있었지만, B 기업에선 작업자가 사용하는 장비가 방폭형인지의 여부를 철저히 확인하지 않았다.

안전한 작업과 사고 방지를 위한 원칙은 있었지만, 그것은 여러 단계에서 지켜지지 않았고, 결국 사고는 발생했다. 그리고 안타까운 두 생명이 희생됐던 것이다.



화재 진압 진행 중에 촬영된 CCTV 영상

원칙이 있더라도 현장은 관행을 따랐다

B 기업에는 분명히 위험을 방지하고 안전한 작업을 하기 위한 원칙이 있었다. 하지만 그 원칙은 지켜지지 않았다. 이유는 무엇일까? 각각의 원칙들이 지켜지도록 만드는 세부 지침과 구체적인 매뉴얼, 확인 절차가 부재했기 때문이다.

작업 중 톨루엔이 유출됐을 때, 탱크 내부의 유해 물질을 완전히 제거한다는 원칙은 있었지만 어떻게 세척할 것인지에 대한 구체적인 방법과 매뉴얼은 없었다.

만일 작업 중 유해 물질이 유출됐을 경우엔 처음 탱크에 입조할 때와 똑같이 내부 충수 또는 물 세척, 치환의 방법으로 위험물을 제거한다는 구체적인 지침이 마련되고 그것을 명확히 확인하는 절차가 정해져 있었다면 이번 같은 사고는 없었을 것이다.

탱크 내부의 철저한 환기라는 원칙도 마찬가지다. 이 원칙이 지켜지려면, 어느 정도 용량의 환기팬을 몇 분 동안 가동해야 한다는 명확한 기준이 있어야 했다. 그리고 그 기준을 지킬 수 있도록 충분한 작업시간이 확보돼 있어야 한다.

가스 농도 측정의 경우, 탱크 내부의 세척과 환기가 충분히 이루어졌는지 확인하기 위해 가스 농도 측정을 해야 한다는 원칙은 정해져 있었다. 하지만 정해진 기간에 가스 농도를 실제로 측정했는지 확인하는 2중 3중의 안전장치는 없었다.

가스 농도를 측정할 때는 반드시 탱크 내부로 들어가서, 데드존의 가스 체류 여부까지 확인하도록 구체적인 지침을 정하고, 그것을 재차 확인하는 절차와 관리 방법까지 마련돼 있었다면 이번처럼 가스 농도를 측정하지도 않은 채 서류상으로만 형식을 갖추는 일은 일어나지 않았을 것이다.

화재를 방지하기 위해 탱크 내에는 공기작동식 공구나 방폭형 장비만을 가지고 들어가야 한다는 원칙이 지켜지려면 입조 전에 협력업체가 사용하는

작업용 공구를 확인하는 절차와 관리 방법이 정해져 있어야 한다.

안전을 위한 원칙은 중요하다. 하지만 아무리 잘 설계된 원칙이 있다 하더라도 그것을 지키기 위한 세부 지침이 없고 확인하는 절차가 없다면, 그 원칙이 잘 지켜질 수 있을까? 이번 사고는 원칙이 지켜지도록 만드는 실천 방안, 확인을 위한 절차가 없는 원칙은 언제든 무너질 수 있는 모래성에 불과하다는 것을 여실히 보여주었다.

원칙을 지킬 수 있는 구체적인 지침과 매뉴얼이 없는 곳에 생겨나는 것은 관행이다. 통상, 일반적으로, 지금까지 그래왔으니 꼭 확인하지 않아도 된다는 근거 없는 믿음과 습관이다. 그런 세부적인 절차와 관리 방법이 없었음에도 불구하고 지금까지 사고가 없었던 것은 단지 우연에 불과하다. 그리고 지금까지 그래왔는데, 라는 그 안일한 마음의 끝에서 어느 날 갑자기 사고는 발생한다.

현장의 작업자들은 탱크 보수 작업의 위험성을 알지 못했다

설령 본사에서 관리 감독을 철저히 하지 못했다 할지라도, 실제 현장에서 일하는 작업자들이 작업의 위험성에 대해 충분히 숙지하고 있었다면 사고의 위험은 크게 줄어들었을 것이다.

만일 작업자들이 톨루엔이 얼마나 강한 휘발성과 인화성을 가진 물질인지 알고 있었고, 유출된 톨루엔이 언제든 작은 점화원과 만나 화재와 폭발을 일으킬 수 있다는 사실을 알고 있었다면 사고 당일의 행동은 크게 달라졌을 것이다.

몇 분간의 물 살수로 톨루엔이 완전히 제거되었다고 믿거나, 비방폭형 렌턴을 가지고 톨루엔이 유출됐던 탱크 내부로 들어가는 일은 없었을 것이다. 단지 조금 편하자고 자기 자신과 동료의 생명이 걸려 있는 위험한 일을 자청할 사람은 없을 것이기 때문이다.

작업자들이 참여하는 위험성평가만 제대로 되었다라도

그래서 마련된 것이 작업위험성평가다. 특히 이번과 같은 화학물질 저장 탱크의 보수 작업 시에는 작업과 직·간접적으로 연관된 부서의 구성원이 모두 참여하여 해당 작업에 대한 위험성평가를 실시하여 작업 과정 중 발생 가능한 위험을 통제하기 위한 절차를 마련하고, 그 실시 결과를 관련 근로자 모두에게 교육하도록 되어 있다.

하지만 작업 전 실시하는 작업위험성평가에 작업을 수행하는 D 업체는 평가자로 참여하지 않았다. 작업허가서 발행 전에 품질 교체 작업에 대해 위험성평가를 실시하고, 위험에 대비한 대책을 세웠어야 하지만 그것도 하지 않았다. 작업 전에는 현장에서 작업하는 작업자들에게 그 작업이 왜, 얼마나 위험한지에 대해 직접 교육하고 사고 발생 방지 대책 이행 여부를 확인했어야 하지만 그것 역시 이루어지지 않았다.

게다가 D 업체의 경우 톨루엔 탱크 보수는 처음이었다. 2년간 B 기업의 탱크 보수 작업을 해 왔지만, 다른 화학물질이 저장됐던 탱크였다. 톨루엔만의 특성을 확실히 교육했어야 하지만 작업자들은 톨루엔이 얼마나 강한 휘발성과 인화성을 가지고 있는지 알지 못한 채 작업을 수행했다.

“톨루엔이 피부에 닿으면 따갑고 냄새를 마시면 안 좋고, 암을 유발하는 물질이라는 정도로 알고 있습니다. 톨루엔이 인화성이 있다는 내용은 MSDS(물질안전보건자료)에서 본 것 같은데 그게 붙어 있을 수 있다는 뜻 아닌가요? 사실 잘 모르겠습니다. 톨루엔의 인화성이나, MSDS(물질안전보건자료)에 대해서 교육을 받은 적은 없습니다”

— D 업체 직원

방폭형 공구를 사용해야 하는 것은 알고 있지만 왜 그것이 필요한지도 정확히 알고 있지 않았다.

“탱크 상황에 따라서 다르지만, 4월 20일의 경우에는 비방폭구조의 랜턴을 사용하면 안 되었을 것 같습니다. 왜 비방폭구조의 랜턴을 쓰면 안 되는지는 모르겠습니다.”

— D 업체 직원

막연히 위험한 물질이라는 것 정도를 아는 것으로는 부족하다. 어떨 때 화재와 폭발이 발생하는지, 그래서 어떤 점을 각별히 조심해야 하는지, 현장에서 일하는 실제 작업자가 구체적이고 명확하게 알고 있어야 현장 상황에 맞춰 안전한 대응이 가능하다.

비단 B 기업뿐만 아니라, 많은 기업에서 협력업체에 대한 위험성평가와 교육에 적극적이지 않다. 설령 협력업체에 대해 교육이 이뤄진다고 하더라도 대부분이 일용직인 실제 현장의 작업자에게까지 교육이 이뤄지는 경우는 거의 없다고 할 수 있다.

그런 이유로 일용직 근로자들은 밀폐공간 내의 작업에 대한 위험성을 확실히 인식하지 못한 채 과거의 작업 습관대로 작업을 하는 경우가 많다. 그러다 부상을 당하거나 목숨을 잃게 되는 것이다. 바로 이번 사고의 경우처럼 말이다.

이번에 사고가 난 현장 역시 실제 탱크 내에서 작업한 두 사람은 일용직이었고, 사고가 났을 때 달려와 불을 끈 비상대기원도 파견직 관리 회사의 일용직 근로자였다. 현장에 본사의 정규직은 한 사람도 없었다. 위험성평가와 교육에 실제 현장의 작업자가 참여해야 하는 이유는 바로 여기에 있다.

원칙이 시스템화되고 습관으로 뿌리내리려면

또다시 발생한 어이없는 폭발 사고

사고가 났던 바로 그해 8월 31일 오후 3시 42분경. 같은 회사의 다른 공장에서 또다시 폭발 사고가 발생했다. 4월 20일, 협력업체의 일용직 근로자 두 명이 목숨을 잃었던 화재 사고가 발생한 지 불과 넉 달 후였다.

이번에는 합성수지 폴리머 재생 공정의 밸브 정비 과정에서 압력 과다로 폭발 사고가 발생한 것으로 추정됐다. 폭발 당시 굉음과 함께 검은 연기가 사망으로 퍼졌고, 울산공단 인근에 있는 아파트와 건물 등에서도 진동이 느껴질 정도로 충격이 컸다

이 사고로 인해 해당 B 기업의 근로자 4명과 협력업체의 근로자 3명 등 총 7명이 몸 전체의 80%에 화상을 입는 재해를 입었고, 이 중 한 명은 결국 사망하고 말았다. 4월의 사고보다 훨씬 피해 규모가 큰 폭발 사고였다.

안전의 원칙보다 강력했던 관행이란 법칙

그 벽을 넘어서야 사고는 예방할 수 있다

사망 사고가 일어났고, 얼마 지나지 않아 그 사업장에서 또다시 비슷한 유형의 사고가 난 이유는 무엇일까?

두 가지 해석이 가능하다. 해당 기업의 안전관리 시스템이 전반적으로

문제가 있었거나, 사고 발생 후 문제를 해결하려 했으나 짧은 시간 안에 바꾸기가 어려웠을 것이라는 해석이다.

4월의 사고 후, 해당 기업은 안전 점검을 위해 전반적인 정비에 나섰을 것이 분명하다. 하지만 곳곳에 구멍이 나 있는 원칙이나 절차는 물론, 기존의 관행에 익숙했던 구성원들의 안전의식은 하루아침에 바뀌지 않았을 것이다. 원칙이 물 흐르듯 자연스럽게 현장에서 지켜지려면, 반복해서 점검하고 확인해서 몸에 익히는 시간까지 더해져야 한다는 것이다.

익히 알고 있듯이 화학공장에서의 화재·폭발 사고는 대형 사고로 이어진다. 지역사회 전체에 영향을 미칠 수 있으며 인명 피해의 규모도 상당하다. 때문에 그 어떤 현장보다도 더 강력히, 단 하나의 사고도 발생하지 않도록, 단 한 명의 인명도 희생당하지 않도록 안전을 점검하고 또 점검한다는 철저한 원칙을 적용해야 한다.

지금 필요한 것은 그 원칙이 모든 작업 현장의 구석구석에 파고들어, 직접 현장에서 일하는 작업자까지 안전을 위한 원칙을 명확히 인지하고 작업할 수 있는 시스템이 뿌리내리는 일이다. 두 명의 일용직 근로자들이 목숨을 잃고 나서야 얻은 교훈은 반드시 변화로 이어져야 한다. 같은 형태의 사고가 더 이상 반복되어서는 안 되기 때문이다.



Case 5

보수 작업의 기본 원칙을 지키지 않아서 생긴 인재(人災), 언제까지 계속될 것인가?

저장탱크 상부 화기 작업 중 폭발 사고

2004년 4월, 전남의 한 석유화학 공단에 있는 A 기업에서 액체 유화 원료 저장 탱크가 폭발해 두 명의 작업자가 전신화상을 입었다. 작업자들이 탱크 안에 들어가 바닥의 찌꺼기를 걸레로 청소하던 중 탱크 내부에 있던 저장물질의 증기가 점화원에 의해 폭발한 사고였다. 조사 결과 저장탱크 안의 위험물질을 철저히 제거하지 않은 것으로 밝혀졌다. 그로부터 17년 후인 2021년 12월, A 기업에서 또 비슷한 폭발 사고가 발생했다. 이번에는 저장탱크 위에서 작업하다 폭발이 일어났다. 세 명의 근로자가 목숨을 잃은 사고. 대체 무엇이 문제였을까?

검은 연기와 시뻘건 화염이 삼킨 세 사람

2021년 12월 13일, 전남의 한 석유화학 공단에서 근무하는 박OO 씨의 일과는 여느 때와 별반 다르지 않았다. 솔벤트와 항공유 등을 생산하는 A 기업에서 공무팀 소속으로 일하고 있던 그는 점심 식사 후 옥외에 있는 위험물 탱크저장소로 향했다. A 기업에서는 원료와 제품을 저장하기 위해 총 73개의 저장탱크를 보유하고 있었는데, A~H까지 8개 지역에 나뉘어 설치돼 있었다. F 지역에 도착한 박OO 씨는 자신에게 주어진 도면을 확인하며 작업을 시작했다.

그런데 작업을 시작한 지 얼마 지나지 않은 오후 1시 36분경, 갑자기 폭탄이 터진 듯 굉음과 함께 진동이 느껴졌다. 바로 옆 E 지역에 있는 저장탱크가 폭발한 것이다. 다른 저장탱크에 가려서 처음에는 어떤 탱크가 폭발했는지 알 수 없었다. 다만 무엇인가 무너지는 소리가 들렸고, 주위로 정체를 알 수 없는 파편이 우수수 떨어졌다. 현장은 순식간에 아수라장이 됐다. 정신을 차리고 보니 다른 직원들이 화재를 진압하기 위해 달려오고 있었다. E 지역에서 시뻘건 화염과 함께 검은 연기가 솟구치고 있는 게 눈에 들어왔다. 폭발에 이어 화재가 난 것이다.

박OO 씨가 동료 직원들과 소방호스를 연결하고 화재를 진압하려고 하는데, ‘핑! 핑! 핑!’ E 지역에서 추가로 3차례의 폭발이 연쇄적으로 일어났다. 폭발의 위력이 엄청나다 보니 열기가 온몸으로 느껴졌다. 찢어진 배관과 밸브 조각들이 곳곳으로 날아가 박혔다. E 지역에는 총 10개의 저장탱크가 있



폭발과 화재가 발생한 옥외 위험물 탱크저장소



인접한 저장탱크까지 불이 옮겨붙어 폭발과 화재가 발생한 모습

어 자칫 더 큰 폭발과 화재로 이어질 수도 있는 아찔한 상황이었다. 누군가 위험하니 화재를 진압하지 말고 뒤로 빠지라고 소리쳤다. 사태를 파악한 박OO 씨는 동료들과 야적장 쪽으로 갔다가 회사 밖 주유소로 대피했다. 불은 인접한 4개의 저장탱크로 옮겨붙으며 검은 연기가 10km가량 떨어진 도심에서도 목격될 정도로 확대됐다.

드론까지 투입된 진화 작업

화재 신고를 접수한 소방당국은 대응 1단계를 발령해 진화 작업을 벌였다. 하지만 불이 난 저장탱크 안에 있는 화학물질이 인화성 액체였던 탓에 불길은 좀처럼 잡히지 않았다. 오후 2시 41분 대응 2단계가 발령됐다. 고성능 화학차와 무인방수탑차 등 장비 68대와 전남과 경남 소방관 등 506명이 투입돼 진화와 구조 작업을 벌였다. 검은 연기로 현장이 제대로 보이지 않자, 소방 무인 비행물체(드론)도 투입됐다. 연소 방향 등을 파악해 인근의 위험물 저장탱크로 불길이 번지는 것을 막기 위해서였다. 이처럼 총력을 벌인 끝에 화재 발생 3시간여 만인 오후 4시 43분경 큰불이 잡혔다. 4시 51분경 화재가 완전히 진압됐고, 5시 11분경에는 모든 경계령이 해제됐다.

**“산업단지 안에서 1년에 한 번씩은 큰 폭발 사고가
납니다. 이번 사고도 굉장히 컸는데, 2차 폭발하거나
불길이 번지지 않을까 우려했습니다.”**

— 진화 작업에 투입된 소방관

화재가 진압된 사고 현장은 포탄을 맞은 듯 처참했다. 원래의 모습은 온데간데없이 저장탱크는 까맣게 탄 내부를 적나라하게 드러냈고, 옛가락처럼 휘어지거나 힘없이 부서져 있는 구조물들은 사고 당시의 충격이 얼마나 컸

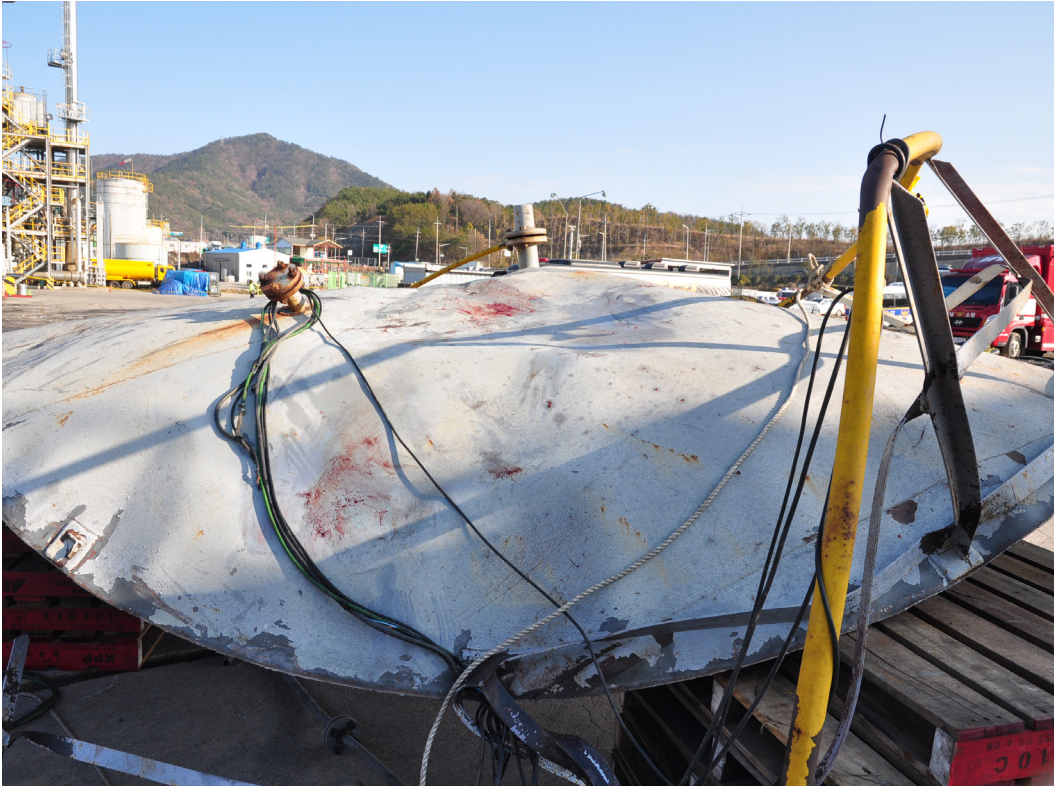
는지를 말없이 보여줬다. A 기업의 옥외 위험물 탱크저장소에 있던 저장탱크 73개 중 5개가 폭발했다.

무게 5t의 저장탱크 상판이 수십m를 튕겨 나갔으니 사람은...

사고로 저장탱크 위에서 작업 중이던 근로자 3명이 목숨을 잃었다. 순식간에 일어난 폭발로 대피할 겨를조차 없었던 이들의 마지막 모습은 참혹했다. 세 사람의 시신이 발견된 곳은 사고가 난 저장탱크 근처가 아니라 놀랍게도 50~110m가량 떨어져 있는 인근의 공장이었다. 심하게 훼손된 시신의 처참한 모습은 폭발 상황을 고스란히 전해 충격을 주었다.



화재가 진압된 옥외 위험물 탱크저장소



폭발로 인해 날아가버린 저장탱크 상판

폭발의 원인은 무엇이었을까?

폭발한 저장탱크 안에는 솔벤트 공정에서 생산된 제품인 이소파라핀 C(Isoparaffin C)*가 약 1/3 정도 있었던 것으로 밝혀졌다. 이소파라핀 C는 투명한 인화성 액체로 금속 세척제 등으로 사용된다. 대체 어쩌다가 이 저장탱크가 폭발하게 됐을까?

사고 당시 작업자 3명은 저장탱크 상부에서 휘발성 유증기를 회수하는 배관을 설치하고 있었다. 즉, 저장탱크 상부에 있는 통기관(탱크가 진공 또는 가압상태가 되지 않도록 대기로 개방된 배관)에서 배출되는 VOC(Volatile organic compound: 휘발성 유기화합물)를 처리하기 위해 후드식 배관을 설치하는 작업 중이었다. VOC는 대기 중으로 쉽게 증발하는 액체 또는 기체상 유기화합물의 총칭으로, 화재나 폭발의 위험성이 크다. 이 VOC 배관을 연결하는 과정에서 폭발이 일어났다.

폭발이 발생하려면 3가지의 요건이 충족되어야 한다. 가연물과 공기(산소), 그리고 점화원이 있어야 하는데, 인화성 가스나 인화성 액체와 같은 가연물이 혼합된 공기가 불꽃이나 정전기, 충격 및 마찰 등의 점화원과 접촉하는 순간 폭발이 발생한다.

이번 사고에서 맨 처음 폭발한 저장탱크의 경우, 탱크 내부와 통기관 주변은 이소파라핀 C 유증기라는 가연물과 공기(산소)에 의해 평상시에도 이미 폭발분위기가 형성된 상태였다. 여기에 그날, 그 시각, 어떤 점화원이 더해지면서 폭발이 일어났다. 따라서 사고 발생의 원인을 찾는 것은 점화원이 무엇이었던지를 찾는 데서부터 시작한다.

* 이소파라핀 C: 인화점이 섭씨 약 -6도로 페인트 희석제, 금속 세척제, 반응 개시제, 화장품 및 윤활유 등의 원료로 사용된다.



원래의 자리에서 떨어진 저장탱크 상판

이 정도는 관참을 것이다? 안일한 대처가 부른 사고

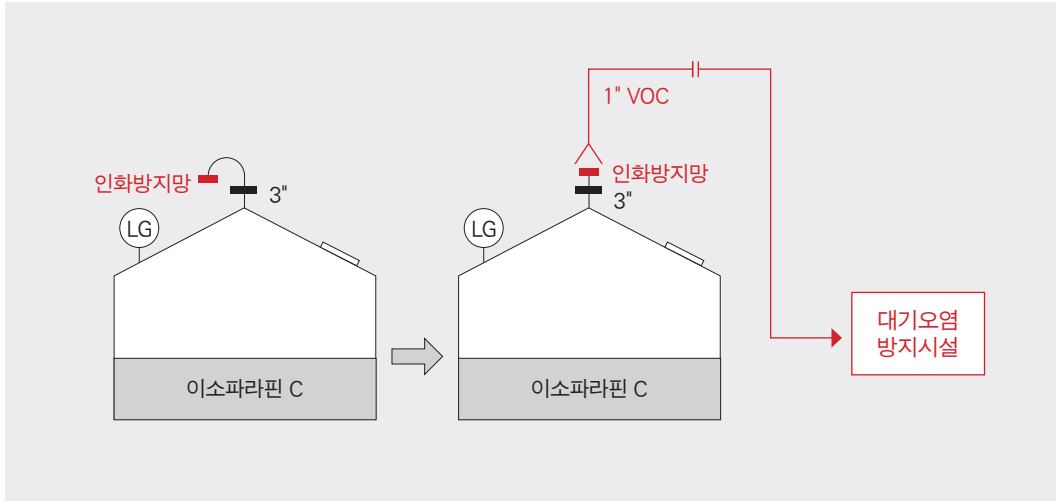
대체 왜 이런 사고가 일어났을까?

사고 발생 과정을 살펴보기 전에 먼저 사고가 난 VOC 처리 배관을 설치하게 된 배경을 이해할 필요가 있다.

「대기환경보전법」에 따라 사업주는 저장탱크의 통기관에서 배출되는 대기오염물질(VOC)의 농도를 측정해 결과를 제출해야 한다. 그동안 A 기업은 자가측정 면제기준(VOC 측정농도 200ppm 이하)을 충족해 결과 제출을 면제받아 왔다.

그런데 2021년 6월 30일자로 「대기환경보전법 시행규칙」이 일부개정됨에 따라 A 기업이 자가측정 의무사업장에 포함됐다. 이에 A 기업은 자가측정을 면제받기 위해 저장탱크에서 발생하는 VOC를 대기오염방지시설로 연결하는 작업을 진행했다.

A 기업은 2021년 말까지 개선하는 것을 목표로 삼고, 8월 말부터 12월 까지 총 39개의 탱크에 대해 VOC 처리 배관 연결 작업을 계획하고 진행 중이었다. 사고 당시 통합진도율은 90% 이상일 정도로 순조롭게 진행되는 듯 했다.



작업 대상 저장탱크의 작업 전·후 도식도

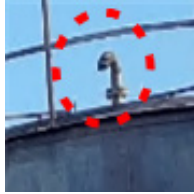
그렇다면 실제 작업은 어떻게 이뤄졌을까?

A 기업(원청업체)은 산단 플랜트(생산 시스템)에서 철구조물 관련 공사를 하는 B 업체(협력업체)와 연간 도급계약을 맺었다. 이에 따라 1년 동안 A 기업의 기계와 배관, 철골, 비계 등의 공사를 B 업체가 맡았다. 사고가 발생한 유증기 회수 배관 설치 작업을 할 때는 B 업체에서 작업반장을 포함해 7명의 근로자를 현장으로 보내면 A 기업의 공무팀에서 작업관리를 하는 방식으로 운영됐다. B 업체의 근로자 7명은 작업반장을 제외하고 3명씩 1조와 2조, 즉 2개 조로 나뉘어 일을 진행했다.

1조에 속해 현장에서 작업했던 근로자들에 의하면, 저장탱크 상부에 VOC 처리 배관을 설치하는 작업 순서는 다음과 같다.

대기오염물질 처리 배관 설치 작업 순서

① 통기관 분리



먼저 작업자 2~3명이 저장탱크 상부로 올라가서 작업자 1명은 중앙의 통기관을 수공구(스패너, 소켓 렌치 등)를 이용해 볼트 4개를 풀어 분리한다.

② 곡관부 절단



작업자 1명은 통기관을 맹판으로 덮고(또는 방염포 등으로 묶음), 곡관부를 저장탱크 아래로 가져가 바닥에서 그라인더로 절단한다.

③ 지지대 용접



저장탱크 상부에 있는 작업자 2명(배관사, 용접공)은 사전 제작한 배관을 상부로 끌어올려 안전 난간과 해당 배관을 U 볼트로 고정하기 위한 지지대 용접 작업을 실시한다.

④ 통기관 체결



절단 완료된 통기관을 저장탱크 상부로 가지고 올라가, 맹판을 치우고 그 위에 부착한 후 4개의 볼트를 수공구로 조인다.

⑤ 후드 설치



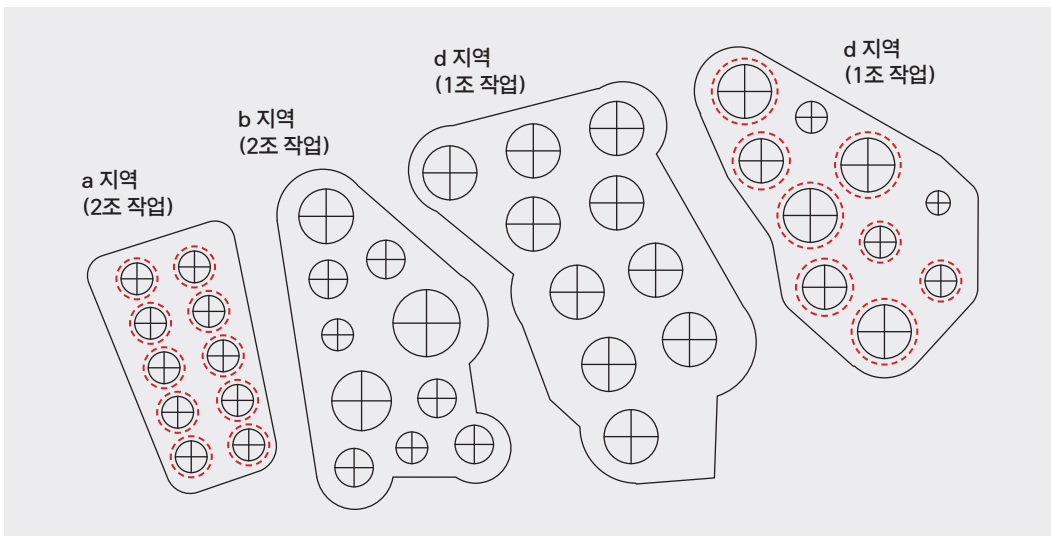
통기관 상부에 후드가 설치된 배관을 연결하고, U 볼트로 고정된 배관 플랜지에 체결한다.

폭발 위험 장소인 저장탱크 상부에서 화재 위험 작업을 시행

위의 작업 과정 중에서 ③이 문제가 됐다. 이소파라핀 C 유증기가 새어나오는 저장탱크 상부에서 지지대 용접 작업은 불꽃이 발생할 수 있고 불티가 비산될 수 있는 화재 위험 작업이다. 더군다나 용접 작업을 하기 위해서는 안전 난간의 페인트를 벗겨내야 하는데, 이 때문에 연마 작업까지 이뤄졌다고 했다.

하지만 A 기업 측의 주장은 달랐다. 위험물질인 저장탱크 내부의 인화성 액체를 제거하지 않고도 그 위에서 작업할 수 있는 나름의 방법을 강구했다는 것이다. 즉, 유증기가 발생하는 저장탱크 상부에서 배관 설치 작업이 이루어지지만, 배관을 사전에 따로 제작해서 저장탱크 상부의 작업 현장에서는 화기 사용 없이 볼트 조립만으로 설치하기 때문에 위험하지 않다는 것이다.

원청업체인 A 기업과 하청을 받아 작업했던 B 업체 근로자들의 주장이 극명하게 엇갈렸기에 고용노동부와 한국산업안전보건공단은 작업이 완료된 28개의 탱크를 전수 조사했다. 저장탱크 18개와 공정용기 10개가 대상이었



작업 완료된 저장탱크 18기의 지지대 용접 시공 표기(빨간색)

다. 조사 결과 모든 탱크 상부의 안전 난간에 지지대를 부착하기 위해 화재 위험 작업을 실시했던 사실이 확인됐다. 볼트를 조립하는 것만으로는 배관 지지대를 고정할 수 없어 채널에 U 볼트를 체결하고 채널과 안전 난간을 용접으로 고정한 것이다. 그 과정에서 연마 작업도 필수적으로 시행됐다. 살아 남은 1조와 재해가 발생한 2조의 작업 방법과 내용이 약간 다를 수는 있지만, 배관 지지대를 고정하기 위한 방법으로 용접과 연마 작업 등의 화재 위험 작업을 한 것은 기본적으로 같았다. 그동안 사고가 나지 않은 게 오히려 이상할 정도인 상황이었다.

똑같은 작업을 해왔는데 운이 좋아서 살아있다

1조의 조장 김OO 씨는 사고가 발생할 당시 바로 인근지역에 있었다. 저장탱크 하부에서 배관 절단 작업을 하고 있던 그는 눈앞에서 저장탱크가 산산조각 나고 불이 나는 것을 목격했다. 동료의 목숨을 잃는 참담한 사고를 겪으며 그는 자신에게 끔찍한 사고가 일어나지 않은 것에 대해 가슴을 쓸어내렸다.

**“이번 사고가 난 작업과 동일한 작업을 똑같이 진행했죠.
배관을 조립해서 저장탱크에 올려 설치하면서
서포트 지지대를 대주는 그런 작업이죠. 용접 작업이
들어갔습니다.”**

— 1조 조장

운이 좋아서 살아있다고 하면서도 일손을 잡지 못한 채 병원 치료를 받고 있는 또 다른 근로자도 있다. 대부분의 안전사고가 그렇듯 이번 사고도 시기의 문제였을 뿐, 예견된 인재(人災)였다.

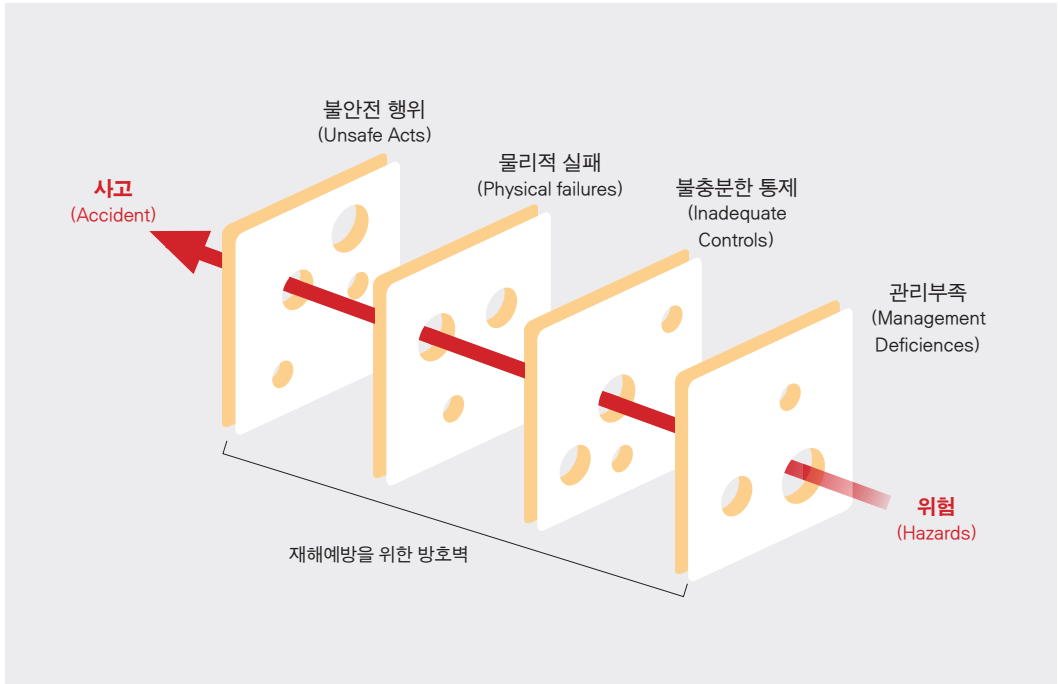
여러 겹의 안전장치에 뚫린 구멍이 겹쳐서 발생한 사고

사고 이후 현장 감식을 진행한 국립과학수사연구원은 보름 뒤, 폭발을 일으킨 최초의 점화원에 대해서 용접 또는 그라인더 작업이나 공구가 부딪힐 때 발생하는 스파크, 정전기 등 과학적으로 여러 가능성이 존재한다는 결론을 내렸다.

그렇다면 사고를 막을 수는 없었을까?

조사 결과 사고는 안전 관련 절차가 총체적으로 마비된 상황에서 일어났다. 이는 사고 발생의 원인을 분석하기 위해 고안된 스위스 치즈 모델(Swiss Cheese Model)로 설명하면 더욱 확실하게 드러난다.

스위스 치즈 모델은 다양한 요인이 복합적으로 작용해 사고가 발생하는 과정을 설명하는 이론으로, 사고를 유발할 수 있는 잠재적 가능성을 에멘탈 치즈의 구멍에 비유한다. 스위스를 대표하는 치즈 중 하나인 에멘탈 치즈는 슬라이스 치즈마다 구멍의 위치와 수가 제각각이다. 여러 장의 슬라이스 치즈를 겹치면 구멍이 가려질 수도 있지만, 구멍의 위치가 일치해서 여러 장을 관통하는 구멍이 생길 수도 있다. 스위스 치즈 모델에서 여러 장의 슬라이스 치즈는 사고 위험을 대비하는 안전 장치를 뜻하고, 치즈 구멍은 안전 장치의 불완전성으로 인해 존재하는 사고 발생의 잠재적 결함을 의미한다. 즉, 여러 겹의 방호장치가 있어도 슬라이스 치즈의 구멍이 겹치는 것처럼 다양한 위험 요인들이 동시에 존재하면 사고가 발생한다.



위험이 여러 방어 시스템을 침투해 가는 과정 (스위스 치즈 이론*)

이 이론을 이번 사고에 대입해 보면, 먼저 관리의 방호단계에서는 작업 계획서가 작성되어 있지 않았고 안전작업허가서의 작성 및 승인이 부적절했다. 통제의 방호단계에서는 협력업체에 대한 관리 감독이 부신했다. 물리적 방호단계에서는 저장탱크 통기관에 화염방지기가 설치돼 있지 않았으며, 위험물이 저장된 탱크 상부에서 화기 작업을 실시하는 등 불안정한 행동이 있었다. 이 모든 방호단계에 에멘탈 치즈처럼 구멍이 생겼고 이 구멍이 겹침으로써 결국 사고가 일어난 것이다.

* 스위스 치즈 이론(Swiss Cheese Model): 심리학자 제임스 리즌이 제시한 사고 분석 모델로, 조직 내 여러 방어막(스위스 치즈 조각)에 존재하는 결함(구멍)이 일렬로 겹쳐질 때 사고가 발생한다고 설명하고 있다. 이 이론에서는 한 가지 실수가 아닌 여러 요인의 결합으로 사고가 발생하며, 다층적 방어막의 중요성을 강조하고 있다. 안전 관리에서는 이러한 결함을 최소화하고 시스템적 오류를 찾아내는 것이 중요하다.

작업 방법 등을 명시한 작업계획서나 시방서를 작성해 공유했더라면...

그렇다면 이제부터 사고의 원인을 하나씩 제대로 짚어보자.

먼저 관리의 방호단계에서 뚫린 구멍이 있었다.

화학공장의 정비·보수작업 중 화재·폭발 사고가 지속적으로 발생함에 따라 중대산업사고 및 산업재해를 예방하기 위한 많은 안전보건기술지침이 제정돼 있다. 그중 ‘정비·보수 작업계획서 작성에 관한 기술지침’을 보면, 작업 전 주요 작업단계를 구분하고, 해당 단계에서의 위험성을 판단한 후, 발견된 위험을 제거하거나 최소화할 수 있는 방법으로 작업계획서를 작성해야 한다. 그리고 작성된 작업계획서는 해당 작업자와 관리감독자 등이 충분히 숙지할 수 있도록 사전에 교육을 실시해야 한다.

그런데 A 기업의 VOC 처리 배관 설치 작업에는 작업 대상인 저장탱크의 위험물 특성과 통기관의 탈부착 시 주의사항, 배관 설치를 위한 지지대 고정 방법 및 설치 위치 등 작업 전반에 걸친 사항을 정리한 작업계획서가 없었다. 작업 방법 등을 구체적으로 기록한 시방서도 없었다. 현장에서 작업한 협력업체 근로자들이 A 기업으로부터 제공받은 것은 작업도면(ISO 도면) 1장이 전부였다. 그뿐만 아니라 작업계획서에 대한 교육도 이뤄지지 않았기에 저장탱크 상부에서 화재 위험 작업을 하면서도 협력업체 근로자들은 작업과정에서 존재하는 위험을 알지 못했다.

작업허가서를 발급하기 전에

인화성 물질 제거 여부를 확인했더라면...

안전관리의 허점은 또 있었다. 안전작업허가에도 문제가 많았던 것이다.

작업허가서는 원청업체가 보수·정비를 맡긴 협력업체에 작업의 시간과 내용, 조건, 요구사항 등을 표시해 작업에 들어가기 전에 전달하는 문서로, 현장에 반드시 게시해야 한다.

A 기업의 안전작업허가 절차서의 허가서 작성 시 준수사항에 따르면, 화기 작업 시 허가팀의 사전 조치사항으로 인화성 물질 제거 여부를 확인한 후 작업허가서를 발급하게 돼 있다. 그러나 사고 당일 폭발 사고가 난 저장탱크 내부에 인화성 물질이 34%나 저장돼 있었음에도 불구하고, 현장에 게시된 작업허가서에는 이소파라핀 C를 비롯해 작업장 주위 20m 이내의 가연성 및 인화성 물질에 대한 제거 작업이 완료된 것으로 기록돼 있었다. 허가자가 작업사항을 검토하지 않고 저장탱크의 안전 조치 사항도 확인하지 않은 채 허가한 것이다.

이뿐만이 아니다. 작업허가서에는 작업 전인 오전 8시 5분에 측정한 작업 장소의 가스별 농도만 적혀 있었다. 당시 가연성 가스 농도는 0%, 산소 농도는 20.9%로 기록돼 있는데, 중간 휴식 및 점심 후 측정 기록 내용이 없었다.

또한 작업 전 실시한 가스 측정도 화재 위험 작업이 이루어지는 탱크 상부가 아니라 탱크 지역 주변(지상)에서 실시한 것으로, 작업 장소인 탱크 상부의 가연성 가스 누출 여부 등에 대한 측정은 이루어지지 않은 것으로 파악됐다.

화학물질이 탱크에 담겨있었고 유증기로 인한 폭발이 일어났다는 점에서 ‘가연성 가스 농도 0%’는 믿기 어렵다는 게 전문가의 분석이다. 이 때문에 작업허가서를 형식적으로 작성해 현장의 위험요인을 방치한 것 아니냐는 지적이 일었다.

화기 작업을 하는 협력업체 직원들에 대한 관리 감독을 철저히 했더라면...

통제의 방호단계에도 구멍이 있었다. 원청업체인 A 기업은 11월부터 진행 된 VOC 처리 배관 연결 작업에 대한 관리를 주로 협력업체인 B 기업의 작업 반장과 통화하는 방식으로 해왔다. 당연히 원청업체인 A 기업에서 작업 현장의 위험요인을 직접 점검하는 등 실질적인 현장 확인은 이뤄지지 않았다. 협력업체 직원들이 어떤 방식으로 작업하든 사실상 방치한 것이다.

폭발로 날아간 저장탱크 상판에서 용접선과 방화포 등이 발견된 사실로 미루어 볼 때, 작업자는 사전 제작한 배관연결부의 볼트 체결 외에 배관 지지대를 고정하기 위해 용접과 연마 등의 화기 작업을 했던 것으로 보인다.

협력업체인 B 기업의 근로자들이 작업계획과 다르게 저장탱크 상부에서 화재 위험 작업을 수행했으나 원청업체인 A 기업은 위험 작업을 금지하거나 사전 통제하지 않았다. 현장 관리 감독이 미흡했던 것이다.

저장탱크 통기관에 화염방지기를 설치했더라면...

물리적 방호단계에서 뚫린 구멍은 A 기업의 위험에 대한 불감증을 적나라하게 드러낸다. A 기업은 사고가 난 저장탱크에 보관하는 위험물을 바꾸고도 그에 걸맞은 관리를 하지 않았다. 저장탱크는 2011년 7월 설치 당시 「위험물안전관리법」상 ‘제4류 제3석유류’(인화점 70℃ 이상 200℃ 미만)로 완공 검사를 받았지만, 2017년 11월 인화 가능성이 더 큰 ‘제4류 제1석유류’(인화점 21℃ 미만)인 이소과라핀 C로 품목을 바꿨다. 이처럼 취급하는 화학물질이 변경되면 취급 물질 변경에 따른 위험요인 검토를 위해 공정안전보고서 안전운전계획의 변경관리절차에 따라 변경관리를 실시해야 한다. 하지만 A 기업은 이를 실시하지 않았다. 그 결과 ‘제4류 제1석유류’ 보관 시 외부의 화

염이 유입되지 않도록 여러 겹의 금속망으로 만들어진 화염방지기를 설치해야 하나, 사고 발생 시점까지 저장탱크 통기관에 한 겹으로 된 얇은 인화방지망만 설치한 상태로 사용 중이었다.

이소파라핀 C가 저장된 탱크 상부에서 화기 작업을 하지 않았더라면...

마지막으로 행위의 방호단계에서 뚫린 구멍은 치명적이었다. 이소파라핀 C와 같은 인화성 액체를 취급하는 저장탱크에서는 화재와 폭발에 대한 예방 조치가 필수적이다. 고용노동부의 「화기 작업 화재·폭발 예방 매뉴얼」에 의하면 인화성 물질을 취급하는 공정과 설비에서 정비·유지 보수는 화기 작업에 의한 화재·폭발 위험이 높은 작업이므로, 인화성 물질을 취급하는 설비나 배관 및 그 주변에서의 화기 작업은 가능한 한 피해야 한다고 규정하고 있다.

만약 불가피하게 화기 작업을 할 경우, 인근 배관 및 설비 내의 위험물질을 완전히 비우거나 연결배관을 해체하는 것이 바람직하고, 만일 완전히 비우거나 배관 해체가 어려울 경우에는 차단 밸브를 잠그고 작업 중 개방되지 않도록 잠금장치 등의 조치를 해야 한다. 또한 화기 작업 시작 전에 가스 농도를 확인했다고 할지라도 화기 작업의 불티, 열 혹은 복사열 등으로 인화성 증기가 발생할 수 있고, 배관 열림으로 가스가 유입되어 어느 순간 예고 없이 위험 상황이 초래될 수 있으므로 작업기간 중 연속적으로 가스 농도를 측정해 허용 농도 이하임을 확인해야 한다. 만일 가스 농도가 허용치를 넘어설 경우에는 즉각 작업을 중지하고 원인을 확인한 후 안전을 확보하고서 작업을 재개해야 한다고 적시하고 있다.

그러나 A 기업은 화재 예방에 필요한 작업절차를 수립하지도 않았고 불티 비산 등을 방지하기 위한 안전 조치를 취하지도 않았다.

사고가 난 저장탱크에는 당시 이소파라핀 C가 탱크 용적의 약 1/3 정도

나 저장돼 있었다. 인화성 물질뿐만 아니라 남아있는 유증기를 완전히 제거 하기 위해서는 3일 정도의 시간이 필요하다고 작업자들은 말한다. 그럼에도 A 기업은 고인화성 물질이 탱크에 저장돼 있는 상태에서 배관 설치 작업을 강행했다. 저장탱크 상부에서 화기 작업을 하지 않으니 괜찮을 것이라는 이유에서였다. 하지만 현장에서의 작업 상황상 근로자들은 화기 작업을 하지 않을 수 없었고 이는 돌이킬 수 없는 사고로 이어졌다. 사업주의 안전 불감증이 치명적인 결과를 낳은 것이다.

재해는 방심하는 사이에 고개를 들었다. 평소에 제대로 된 안전 조치를 취하지 않으면서 누적된 위험이 한순간에 ‘터진’ 것이다.

사고 이후 A 기업에 대한 특별근로감독이 실시된 결과, 법 위반 사항 389건이 적발됐다. 그중 사고 발생 장소에 대한 작업허가서의 가스 농도 측정 허위 작성 의혹이 사실로 드러났고, A 기업은 일부 가스 농도 측정을 하지 않은 것에 대해 과태료 부과 처분을 받았다. 또한 폭발 위험 장소에서 위험한 비방폭 전기·기계를 사용했을 뿐만 아니라, 위험한 업무를 하는 근로자라면 반드시 받아야 하는 특별안전교육도 없었던 것으로 파악됐다.

부실한 하도급 관리와 위험에 노출된 협력업체 근로자들

사고로 숨진 세 명의 작업자는 모두 협력업체가 고용한 근로자였다. 이 때문에 부실한 하도급 관리에 대한 지적이 일었다.

원청업체인 A 기업의 협력업체 안전관리 절차서에 의하면, 협력업체 선정 시 안전작업 수행능력 및 안전작업계획 등을 제출 받아 평가하고, 협력업체 근로자에게 화재·폭발, 독성물질 누출 위험 등 작업과 관련된 정보 제공 및 사고 예방 교육을 실시해야 한다고 명시돼 있다. 그러나 원청업체인 A 기업은 협력업체인 B 기업으로부터 안전작업계획 등을 제출 받지 않았으며, 근로자에게 화재·폭발, 독성물질 누출 위험 등 작업과 관련된 정보 제공 및 사고 예방 교육을 실시하지 않았다.

이로 인해 협력업체 작업자들은 저장탱크 안에 들어있는 물질이 기름 같은 석유제품이라고만 알았을 뿐 정확한 물질의 특성을 알지 못했다. 이들은 심지어 작업내용조차 제대로 전달받지 못했던 것으로 확인됐다.

또한 인화성 물질을 저장·취급하는 설비에서 작업할 경우, 제전복이나 제전용구 등을 지급해 정전기 발생을 억제·제거하는 조치를 해야 하지만, 원청업체인 A 기업은 이런 조치를 취하지 않았다.

하청업체인 B 기업은 상시 근로자가 대표 외에 한 명뿐인 영세한 건설업체다. 산단 플랜트(생산 시스템)에서 철구조물 관련 공사 등을 해온 이 업체는 공사를 수주하면 일용직 근로자들과 근로계약을 맺어 일을 진행해왔다. 필요할 때만 일용직 근로자를 부르니 안전교육이나 관리는 부실할 수밖에 없었다.

보통 안전보건관리체계는 상시 인력을 중심으로 구축한다. 비정규직, 일용직 등 내일 없을 수도 있는 사람들을 체계 안에서 같이 고민하지 않는 게 현실이다. 따라서 원청업체 근로자보다는 하청업체 근로자가, 그리고 일용직 근로자가 위험에 더 취약하다. 안전 불감증과 개인의 부주의로 치부하기에는 구조적인 문제가 있다는 얘기다.

한국산업안전보건공단의 자료에 의하면, 최근 18년(2005년~2022년) 동안 발생한 중대산업사고의 사망자 89명 중 정비·보수작업 중에 발생한 사망자가 40명으로 가장 많았다. 그런데 이 사망자 중에는 협력업체 소속 근로자가 원청 소속 근로자보다 더 많은 것으로 보고됐다. 협력업체 작업자가 상대적으로 위험에 더 많이 노출돼 있는 것으로 볼 수 있다.

실제로 협력업체가 정비·보수 작업을 수행하는 경우, 대상 설비의 위험 정보 확인 및 위험성평가와 작업 전 안전 조치 등을 원청업체의 지원 없이는 제대로 수행할 수가 없다. 그러나 현실적으로 협력업체가 원청업체에게 적극적으로 안전 조치를 요구하기는 어려운 상황이다

폭우에 반지하 집이 먼저 잠기듯 위험한 곳에 영세 하청업체에서 일하는 일용직 근로자들이 있었다. 원청-하청 간 의사소통이 단절되면 위험 상황에 대한 대처를 어렵게 만들고, 안전관리의 사각지대를 만들면서 위험이 증폭된다.

사고 후 산단은?

사고로부터 교훈을 얻지 못한다면 사고는 반복될 수밖에 없다.

사고 후 해당 산단에는 사고 예방을 위해 중요공사 사전신고제가 도입됐다. 이는 불티를 유발하는 중요공사(용접·용단, 위험물 배관·볼트 교체, 그라인더·드릴 작업 등)를 할 경우, 관계자가 소방서에 작업 3일 전까지 공사계획서를 제출하면 소방서가 그에 따른 사전점검·순찰과 출동력 편성 등 사전대비에 나서는 제도다.

사전신고서를 제출하지 않아 화재가 발생할 경우, 「소방기본법」과 「위험물안전관리법」 등 관련 규정을 적용해 벌칙과 과태료를 부과한다.

하지만 저장탱크 폭발화재 사고로 3명의 근로자가 숨진 지 두 달이 채 지나지 않은 2022년 2월, 또다시 같은 산단에서 4명이 목숨을 잃었다. X 기업의 공장에서 열교환기 정비 과정 중 폭발이 일어나 작업자 4명이 숨지고 4명이 부상을 입는 사고가 발생한 것이다. 이들은 열교환기 청소 후 내부 압력을 높여 밀폐 여부를 확인하는 기밀시험 중이었는데, 무게 1t가량의 열교환기 임시 덮개가 내부 압력을 견디지 못하고 폭발해 근처에 있던 작업자 4명을 덮치면서 참사를 당했다.

산단 내 통합관제센터 설치

산단은 잦은 안전·환경 사고로 언제 터질지 모르는 ‘화약고’라는 불명예를 안고 있다. 이러한 산단의 각종 사고에 대응하기 위해 해당 산단 내에 디지털 환경·안전 통합관제센터(이하 통합관제센터)가 설치됐다.

2023년 10월 개소한 통합관제센터는 ▲사물인터넷(IoT) 기반의 환경·

안전 모니터링 시스템 구축 ▲GIS 기반 통합지리정보 시스템 구축 ▲지하시설물 데이터 정확도 개선을 통해 산단 내 지상 및 지하 시설물 관리 강화, 환경·안전 사고 예방과 대응 등 환경개선을 담당하고 있다.

통합관제센터 관계자는 센터가 각종 센서와 화재감시 CCTV를 통해 산단 내 사고를 사전 예측하고 조기 발견함으로써 신속 대응이 가능한 컨트롤 타워 역할을 하고, 화학배관, 전기, 가스 등 7대 유틸리티 배관 총 2,170km에 대해 3차원 통합지리정보시스템(3D GIS)을 구축함에 따라 산단 내 사고 예방과 피해 최소화에 기여할 것으로 기대하고 있다.

안전한 공장은 없고, 누구든지 실수할 수 있다

산업현장에는 어떤 형태로든 위험이 존재한다. 안전한 공장은 없다. 그렇기 때문에 어떻게 위험을 줄여서 안전을 확보하느냐가 중요하다. 개인의 노력과 의지만으로는 산업재해를 예방할 수 없다. '사람은 실수하고, 기계는 고장난다'는 사실을 인정하고, 안전보건관리체계를 만들어야 한다. 일하는 사람의 안전과 건강을 보호하기 위해, 기업 스스로 위험요인을 파악해 제거·대체 및 통제방안을 마련·이행하며, 이를 지속적으로 개선해야 한다.

또한 위험을 관리하는 데 있어서 안전보건관리체계 못지않게 중요한 것이 문화다. 규정과 감시만으로는 목적을 달성하지 못한다. 흔히 '열 사람이 한 도둑 못 잡는다'고 한다. 안전보건의 문제는 담당 부서만의 일이 아니라 사업장 내 모든 구성원의 일이라는 의식이 있어야 한다. 이는 협력업체 또한 예외가 아니다. '누구든지 실수할 수 있다'는 전제하에 체크 리스트를 만들어 철저히 점검해야 하는 것이다.

사고 이후 산단의 작업환경은 달라졌을까? 근로자와 산단 인근 지역 주민의 안전은 얼마나 확보됐을까? 최근에도 이어지고 있는 산업재해와 관련 지표들은 여전히 갈 길이 멀다는 사실을 보여주고 있다.



폭발로 인해 파손된 저장탱크

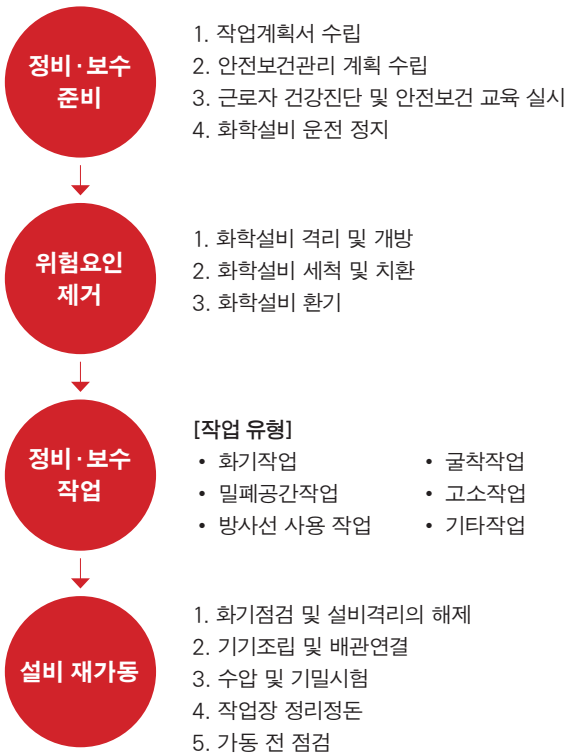
화학공장 정비·보수 작업 시 안전 조치 사항

화학공장 정비·보수작업이란?

- 화학설비 및 부속설비에 대한 자체감사 또는 점검결과 발견된 결함 및 고장에 대하여 보수를 하거나 주기적으로 행하는 예방적 조치로서의 부품의 교체 또는 수정작업 등 설비의 유지·관리에 관한 모든 작업을 말함
- 대정비(大整備): 단위공장의 가동을 중단(Shutdown)하고 정비하는 것으로서 TA(Turn Around), 오버홀(Overhaul) 등으로 불림

※ 유지·보수, 개(조)·보수, 정비 등 다양한 형태로 불리며, 통상 정비·보수 작업으로 칭함

정비·보수 작업 흐름도



정비·보수 준비

1. 작업계획서 작성

- 가. 정비·보수 작업계획 수립
(정비·보수 대상 설비 결정, 작업수행 업체 결정, 작업일정 조율 등)
- 나. 작업 종류별 위험성 평가
- 다. 작업절차서 작성
- 라. 작업지휘자(관리감독자) 지정

2. 안전보건관리계획서 작성

- 가. 위험성평가
- 나. 정비·보수 작업 안전보건 활동 계획
(정비·보수 준비, 실시, 재가동으로 구분하여 작성)
- 다. 안전장비 사전 점검 계획
- 라. 안전작업허가서 발행 및 승인 계획
- 마. 비상대응체계 등

3. 근로자 건강진단 및 안전보건 교육 실시

4. 화학설비 운전 정지

- 가. 운전 정지 및 중단상태의 확인
- 나. 내용물 배출
- 다. 청소준비(Cleaning)

위험요인 제거

화학설비 내부 출입 전 점검 사항

산소 농도가 18% 이상이고, 황화수소 농도가 10ppm 이하, 탄산가스농도 1.5% 미만, 일산화탄소 25ppm 미만인지 확인

1. 화학설비 격리 및 개방

- 가. 밸브 등의 잠금
- 나. 맹판 설치
- 다. 꼬리표 부착(위험꼬리표, 경고꼬리표, 스위치 개폐 확인카드 부착)
- 라. 개방

2. 화학설비 세척 및 치환

- 가. 물 세척
- 나. 스팀 세척
- 다. 화학 세척
- 라. 불활성 가스에 의한 치환

3. 화학설비 환기

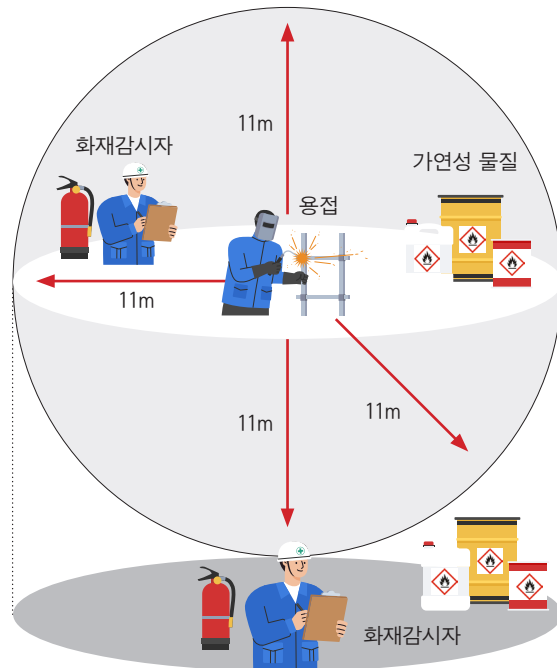
- 환기는 설비내의 인화성 가스를 폭발하한계 이하로 낮추고 산소 농도를 적정 수준으로 유지하기 위해 필요
- * 환기가 불충한 경우 인화성 가스에 의한 화재·폭발이 발생할 수 있고 산소 농도가 부족할 경우에는 질식 등으로 근로자가 사망할 수 있음

Note

정비·보수 작업 중 주요 위험작업 안전 조치 사항

1. 화기 작업 시 안전 조치 사항

- 작업구역 표시, 통행 및 출입 제한
- 화학설비에 인접하여 화기작업 수행 시 배관 및 설비 내의 위험물질을 완전히 비우고 세정
- 밸브 차단, 맹판 설치 시 차단하는 밸브에 밸브 잠금 표지 및 맹판 설치 표지 부착
- 밀폐공간 화기 작업 시 작업 전 밀폐공간 내 공기의 신선한 공기로 치환 (강제 환기 등)
- 이동식 소화기 등의 소화기구 비치
- 작업 전·중, 휴식 후 작업대상 기기 및 구역 내 인화성 물질 및 독성물질 가스 농도 측정
- 용접 불티 등이 인화성 물질에 번져 화재가 발생하지 않도록 불티 비산 방지 조치
- 화기 작업 감시자는 시작 전과 작업 중 현장에 입회하여 안전상태를 확인



2. 밀폐공간 작업 시 안전 조치 사항

- 출입 전 설비 내부 및 공정 물질 잔류 가능성을 확인하고 용기내부는 철저하게 세척
- 세척 후 인화성 물질 및 독성 물질 등의 가스 체류 여부 확인을 위해 가스 농도를 측정
- 세척한 후 산소농도를 측정하여 산소농도가 18% 이상 23.5% 미만일 때 용기 내의 출입을 허가
- 체류가스와 산소농도의 측정은 일정 시간을 두고 주기적으로 실시
- 밀폐공간 내 작업자와 외부 감시인 사이에 상시 연락을 취할 수 있도록 조치

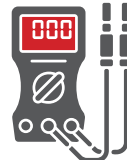
안전대책



환기 실시



공기호흡기 등
보호구 착용



인화성 가스
농도 측정



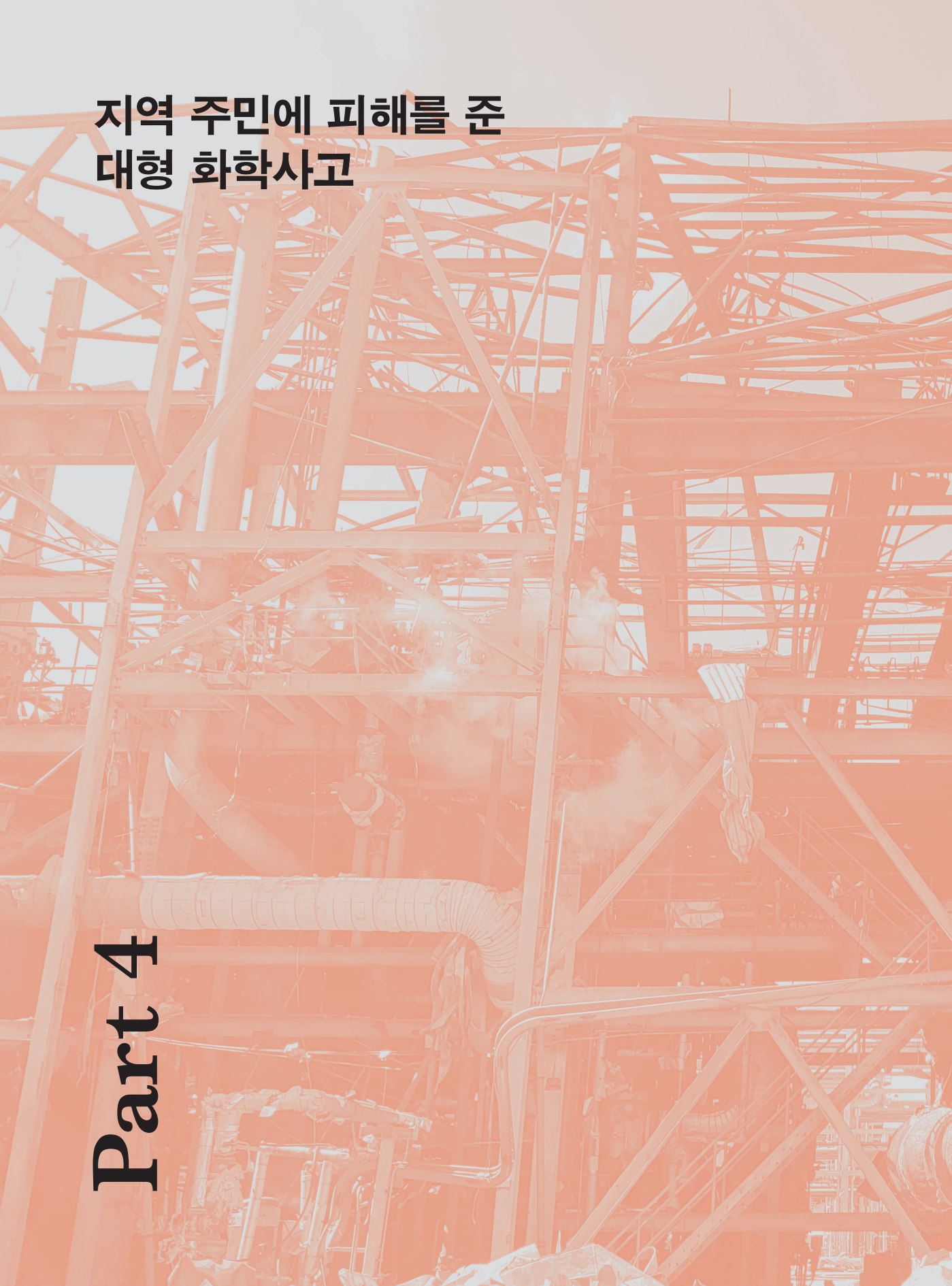
관계자 외
출입 금지

3. 전기차단 작업 시 안전 조치 사항

- 차단해야 할 기기의 현장 스위치는 현장 운전원이 직접 차단
- 주 차단 스위치, 기기 차단기, 시험전원 등은 사업장 전기 담당자가 직접 차단
- 전원이 완전히 차단되었음을 확인한 후 잠금장치와 고리표를 부착
- 잠금장치는 작업자 또는 전기 담당자가 보관
- 작업 완료 후 작업자 확인에 의해 작업 완료를 전기 담당자에게 알리고 통전
- 잠금장치와 고리표는 설치한 근로자가 직접 철거

지역 주민에 피해를 준 대형 화학사고

Part 4





Case 6

**시공부터 유지보수까지
총체적 부실이 지역의 재난을 불렀다**

Case 7

**안일한 안전의식으로 반복되는 사고,
지역사회는 불안하다**

Note

- 공정안전관리 12대 요소



Case 6

시공부터 유지보수까지 총체적 부실이 지역의 재난을 불렀다

화학공장 신축이음 파단 사고

2020년 3월 4일 새벽, 충청남도 서산시 대산읍에 있는 한 화학공장에서 폭발음과 함께 수십m나 되는 불기둥이 솟아올랐다. 주민들은 굉음과 진동에 놀라 거리로 뛰쳐나왔다. 유리창이 일제히 부서지면서 지붕이 내려앉았고 벽에는 금이 갔다. 집기가 쓰러지고 간판이 떨어져 나갔다. 폭발은 30km나 떨어진 태안에서도 느껴질 만큼 엄청났다. 폭발이 난 사고 현장은 초토화됐다. 다친 사람이 2,300여명, 건물 피해 등 재산 피해가 600여 건에 달했던 한 기업의 폭발 사고. 사고는 진정 막을 수 없었던 것일까?

서산 일대를 강타한 진동과 불길

전쟁이나 지진이 난 줄 알았는데

2020년 3월 4일 새벽 2시 58분. 충남 서산시 대산읍 대산공업단지에 서 가까운 독곶2리 이장은 새벽녘에 쿵 하는 소리가 나서 잠이 깼다. 이상하다. 날씨가 좋으니 천둥소리는 아닌데 하고 고개를 갸우뚱하는 순간, 두 번째 폭발음이 쿵 하고 들려왔다. 첫 번째 소리보다 훨씬 큰 폭발음. 밖으로 나가 보니 바로 앞 대산공단 쪽에서 굉음과 함께 수십m는 족히 돼 보이는 거대한 불기둥이 솟아오르는 것이 보였다.

**“폭발이 2번 정도 일어났어요, 1분 간격으로.
저는 북한이 미사일 쏜 줄 알고 뛰쳐나왔는데
이쪽 보니까 불꽃이 막 난리가 났더라고요.”**

— 독곶2리 이장

엄청난 진동이 몰아치면서 집이 흔들리고, 벽에 금이 가기 시작했다. 동시에 유리창이 깨지며 쏟아져 내렸다. 누군가는 지진이 일어난 줄 알고 속옷 바람으로 거리로 뛰쳐나오기도 했다.

“전쟁이 난 것처럼 아주 아수라장이었어요.
창문 파손은 물론이고, 조립식 주택 같은 데는 집이
다 무너지고. 새벽에 잠자다가 날벼락을 맞아서 피를
흘리며 뛰쳐나온 주민도 있었어요.”
— 독곶2리 마을 주민



폐허가 된 현장

폭발이 일어난 곳은 A 기업 대산공장.

이곳은 석유화학산업의 기초가 되는 석유제품인 납사를 주원료로 하여 에틸렌, 프로필렌, 벤젠, 톨루엔 등을 생산하는 공장이다. 연간 110만t의 에틸렌 생산능력을 보유하고 있다.

에틸렌 제품 생산과정에선 고도의 인화성을 가진 분해가스가 만들어진다. 만일 이 가스가 누출된다면 언제든지 대형 화재와 폭발이 일어날 가능성이 있는 곳이었다.

이날의 폭발은 납사를 분해, 냉각시켜 저온 압축을 하는 압축 공정의 한 시설에서 발생했다. 분해가스 압축기의 배관 토출부에 있는 신축이음이란 설비에서 가스가 누출되면서 원인을 알 수 없는 점화원에 의해 폭발이 발생한 것으로 추정됐다.

당시 사고 현장의 CCTV 화면을 보면 고요한 새벽 갑자기 공장에서 굉음과 함께 불길의 솟아오르며 순식간에 공장 안이 연기로 가득 찬다. 폭발 충격에 지진이라도 난 듯 CCTV 화면이 흔들리고 곧이어 다시 한번 큰 폭발이 발생한다.

그 충격으로 폭발이 일어난 압축기동은 완전히 파괴됐고, 방재실 등 곳곳의 시설이 무너지고 파손됐다. 폭발 사고는 A 기업뿐만 아니라, 공장에서 수km 떨어진 인근 지역까지 아수라장으로 만들었다.

화학공장의 사고는 피해 규모가 남다르다

공장 건너편 상가는 유리창이 모두 깨지고 간판과 천장, 외벽이 무너져 내렸다. 편의점 CCTV에는 지붕이 무너지면서 ATM기가 쓰러져 사람을 덮치는 장면이 고스란히 담겼다.

폭발의 강도가 얼마나 강했던지, 폭발로 떨어져 나간 설비의 파편이 300m 가까이 날아가 민가에 떨어졌고 A 기업에서 800m나 떨어진 공장도

파손될 정도였다. 1km 이내의 상가와 주택은 모두 벽과 천장이 무너지거나 유리창이 깨지는 등의 피해를 입었다.

폭발은 공장 인근의 대산읍은 물론이고 10km 떨어진 당진을 비롯하여 30km 떨어진 태안에서도 느껴질 만큼 엄청났다. 부상자도 속출했다. 폭발은 불과 1, 2분 사이에 한 지역을 마치 전쟁이나 지진이 난 것 같이 만들어 버렸던 것이다.

피해 접수 현황에 따르면 동산 201건, 부동산 440건의 피해가 발생했다. 편의점, 식당 등 수많은 건물들이 일부가 파손되거나 부서졌고, 피해가 복구되기까지 영업을 하지 못해 입은 피해도 컸다. 부상 등의 피해도 적지 않았다. 폭발로 인해 신체적 이상을 신고한 사람이 2,344명에 달했고, 농·수·축산물의 피해도 38건이 신고됐다.

한순간의 사고가 해당 공장뿐 아니라, 인근 지역의 재산과 인명 피해까지 발생시킨 것이다. 사고 이후 오랫동안 복구되지 못한 재산상의 피해, 신체적 피해까지 고려한다면, 피해 규모는 더욱 크게 늘어난다.



사고 당시 현장 인근 상가 가게들의 파손된 모습

아찔했던 순간

만일 심야시간대가 아니었다면, 화재가 조기 진압되지 않았더라면

사고 직후, 신고를 받고 출동한 소방당국이 즉시 대응 2단계를 발령하고 진화에 나서면서 사고 2시간 후인 새벽 5시 11분경에는 불길이 잡히기 시작했고, 오전 9시경에는 화재가 완전 진화됐다. 소방대원과 의용소방대원 등 무려 274명의 인원이 투입됐고, 펌프차 11대, 화학차 1대 등 66대의 장비가 동원됐다. 덕분에 화재는 조기에 진압됐고 다행히 추가 폭발이나 위험 물질 누출 가능성은 없는 것으로 보였다. 천만다행인 일이었다.

만일 화재가 조기 진압되지 않았더라면, 그리고 다른 시설물로 불길이 번지면서 추가 폭발이 일어나고 대규모 가스 누출로 이어졌다면 피해 규모는 천문학적으로 커졌을 것이다.

사고 시점이 새벽이었기에 인명 피해도 크지 않았다. 2명의 중상자가 발생했지만, 사망자는 없었다. 현장에 있던 A 기업 방재실 근로자 2명이 뇌출혈과 고막파열, 안면부 골절 등 중상을 입어 입원 치료를 받았고, 5명은 병원 치료 후 귀가했다. A 기업과 방재실을 함께 썼던 OO회사 대산공장에서도 20여 명의 피해자가 발생했다. 만일 새벽이 아니라 근무자들이 많았던 낮 시간이었다면, 얼마나 더 많은 사상자가 발생했을까? 아찔한 순간이었다.

거대한 폭발, 이상 징후는 보이지 않았다

사고 직전까지도 평소와 다름없었던 그날

A 기업 대산공장의 폭발 사고는 대체 어떻게 해서 일어난 것일까?

사고 당일로 돌아가 당시의 상황을 상세히 들여다보자.

사고 전날인 3월 2일 밤 23시, C조의 포맨(Foreman: 작업반장) 이OO 씨는 여느 때처럼 출근해서 교대근무를 시작했다. 근무자는 구OO 씨를 포함해 모두 5명. 사고의 조짐은 어디에도 보이지 않았다. 평상시와 다름없이 업무 일지를 작성하고 있던 그때, 방재실의 상황 모니터에서 가스 감지기의 알람 소리가 울렸고 동시에 수많은 알람이 떴다. 그리고 몇 초도 되지 않아 거대한 폭발음이 들렸다.

“사고 당시 너무 많이 알람이 발생했습니다. 제가 알기로는 가스 감지기의 알람이 먼저 울린 것 같습니다. 그리고 몇 초 되지 않아 폭발이 발생했어요.”

— 이OO. A 기업 대산공장 C조 포맨(작업반장)

비슷한 시각. 현장 순찰을 마치고 방재실 안으로 이동 중이던 현장 운전원 정OO 씨는 현장에서 이상한 소리가 난다는 이OO 주임의 다급한 무전을 받았다. 몸을 돌려서 방재실을 나서던 순간, 거대한 폭발음이 들렸다.

무전을 받고 폭발음이 들리기까지의 시간은 불과 10초에서 20초 정도밖에 되지 않았다.

“워낙 큰 폭발소리가 들려서 놀라고 두려웠지만, 밖으로 나가 자전거를 타고 현장에 갔어요. 현장에 도착하니 큰불이 나 있었어요.”

— 정OO. 현장 운전원

당시 근무자들의 일치된 증언처럼 사고 직전까지 공장에선 아무런 이상징후가 나타나지 않았다. CCTV 등 당시의 기록을 통해 재구성해 보면 새벽 2시 57분 49초경에 분해가스 압축 공정 운전이 이상이 발생한 데 이어 16초 뒤인 2시 58분 5초경에 가스 감지기의 알람이 발생했다. 알람이 뜨고 폭발 및 화재가 일어나기까지는 불과 12초밖에 걸리지 않았다. 아무런 이상이 보이지 않던 설비에서 어떻게 1분도 안 돼 이처럼 거대한 폭발이 일어나게 됐을까?

눈 깜짝할 사이에 거대한 폭발이 발생했던 이유는?

A 기업 대산공장의 에틸렌* 생산과정은 크게 4단계로 나뉜다.

첫 번째 공정은 원료인 납사를 800~850℃의 고온에서 열분해하는 열분해 공정이다. 그렇게 열 분해된 탄화수소 화합물을 두 번째 단계인 급랭 공정을 거쳐 탄화수소와 기타 가스로 분리해 낸다. 그 탄화수소를 세 번째 공정인 압축 공정에서 고압으로 압축하여 정제 공정으로 이동시키면, 최종 생산물인 에틸렌과 프로필렌 등이 생산되는 것이다.

조사 결과 문제가 발생한 곳은 세 번째 공정인 압축 공정의 분해 압축기에 달려 있는 토출 배관 부위였다. 압축 공정에는 분해가스 압축에 따른 온도상승을 피하기 위해 열교환기가 달려 있는데, 이 열교환기의 한 부분인 배관의 신축이음이 파손돼 분해가스의 일부가 누출된 것으로 추정됐다.

문제는 이 분해가스가 에틸렌, 프로필렌 등이 포함되어 있는 위험한 인화성 물질이라는 점이다. 이 가스가 누출되면서 원인미상의 점화원과 만나 거대한 화재와 폭발이 발생한 것이다.

화학사고가 다른 어떤 산업현장의 사고보다 무서운 이유는 이처럼 사전에 아무런 조짐이 보이지 않았더라도 순식간에 엄청난 규모의 사고가 발생할 수 있다는 점에 있다. 그럼 도대체 신축이음은 어떻게 해서 파손됐던 것일까? 파손을 방지할 수는 없었던 것일까?

* 에틸렌(Ethylene, C₂H₄): 인화점이 섭씨 -136도인 인화성 물질로 고분자물질 제조의 원료로 사용된다.

신축이음은 왜 찢어졌을까?

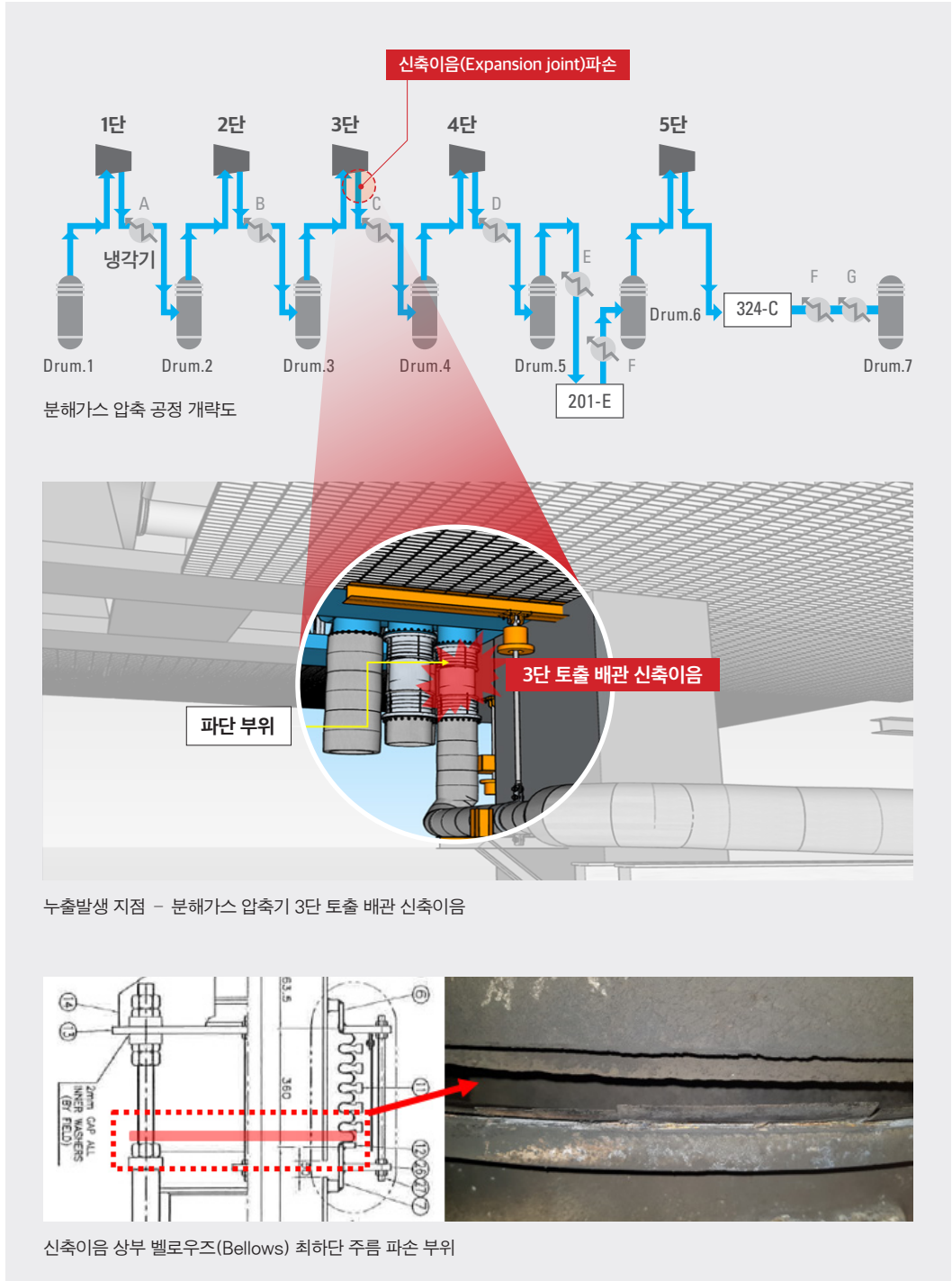
설계와 시공부터 내재해 있었던 문제

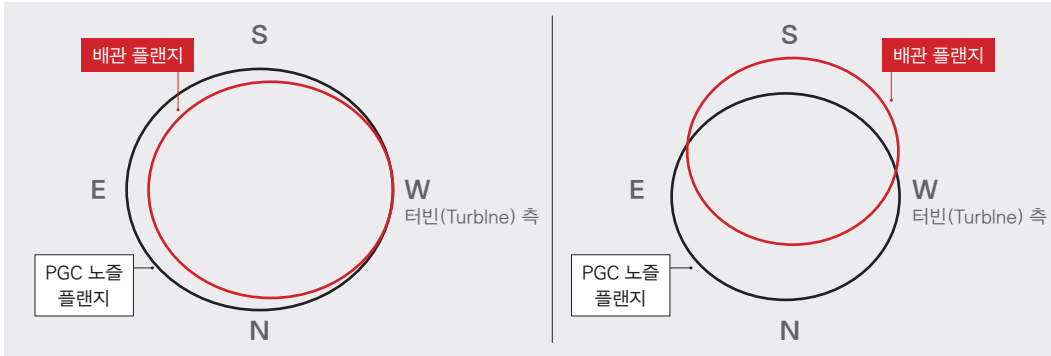
신축이음이란 압축기 배관의 이격이나 기계 진동을 흡수할 수 있도록 만들어진 배관 자재의 한 종류이다. 상하부에 주름 형태의 관이 달려 있어 배관의 변위를 수용하고 완충하는 역할을 한다.

사고가 난 신축이음은 공장이 건설됐던 1997년에 처음 설치돼 2008년 정비보수 할 때 신제품으로 교체 설치된 것이다. 최초에 연간 60만t 수준으로 설계됐던 분해가스 압축기를 2008년 94만t 수준으로 증설한 것이다. 설계대로라면 증설은 아무런 무리가 없었다. 하지만 이 신축이음은 교체된 지 12년 만에 갑자기 찢어지며 대형 폭발 사고가 일어났다. 이유는 무엇일까?

문제는 신축이음 설치 당시부터 있었던 것으로 드러났다. 신축이음이 새로 설치될 때 설겅값이 제대로 반영되지 않았던 것이다. 신축이음 설계 시에는 배관의 움직임과 진동 등에도 신축이음이 견딜 수 있도록 일정 정도의 설계 여유를 넣어주는데, 2008년 교체 시에는 그 마진폭이 반영되지 않은 채 설치가 됐던 것이다. 신축이음이 원래의 설계보다 배관의 응력을 견디는 폭이 작게 설치됐다는 의미다.

시공도 문제였다. 신축이음 연결부위의 볼트와 너트가 중심이 정확히 맞지 않은 상태에서 체결돼 있었다. 사고 후 파단된 신축이음 연결부위의 사진을 보면 연결부위의 한쪽이 과도하게 쏠려 있는 것을 확인할 수 있다.





배관과 신축이음 해체 전 정렬상태

배관과 신축이음 해체 후 정렬상태



분해가스 폭발 사고 후 압축기실 현장



중심이 맞지 않은 채 결합되어 신축이음의 한쪽 면에 지속적으로 힘이 가해졌다고 판단되는 부분이다.

마치 우리가 가구를 조립할 때 양쪽의 구멍이 정확히 맞지 않은 상태에서 억지로 당겨서 나사를 박았을 때와 같은 상황이었다. 이런 상태로 가구를 오래 사용하면 나사가 풀리거나 가구가 뒤틀려버리는 문제가 발생하는 것처럼, 무리한 체결로 스트레스가 가해진 상태에서 장기간 설비가 운행됐을 경우, 과도한 힘을 받았던 신축이음의 해당 부위가 찢어져 파단되는 현상이 발생할 수 있었다.

사고 후 조사에 따르면 배관의 이격과 진동을 완충해 주는 배관 지지

대도 이미 그 기능을 상실한 상태였다. 신축이음에는 더욱 과도한 스트레스가 지속적으로 가해졌을 것이다.

작은 오차에 시간이 누적되면서 사고는 발생했다

반영되지 않은 설겅값은 불과 12mm, 1cm가 조금 넘는 수치였다. 신축이음과 배관의 연결부위 정렬 불량도 볼트와 너트가 무리해서 체결될 수 있을 정도의 차이였다. 그리고 사고 직전까지도 이 설비들은 큰 문제없이 가동돼 왔다.

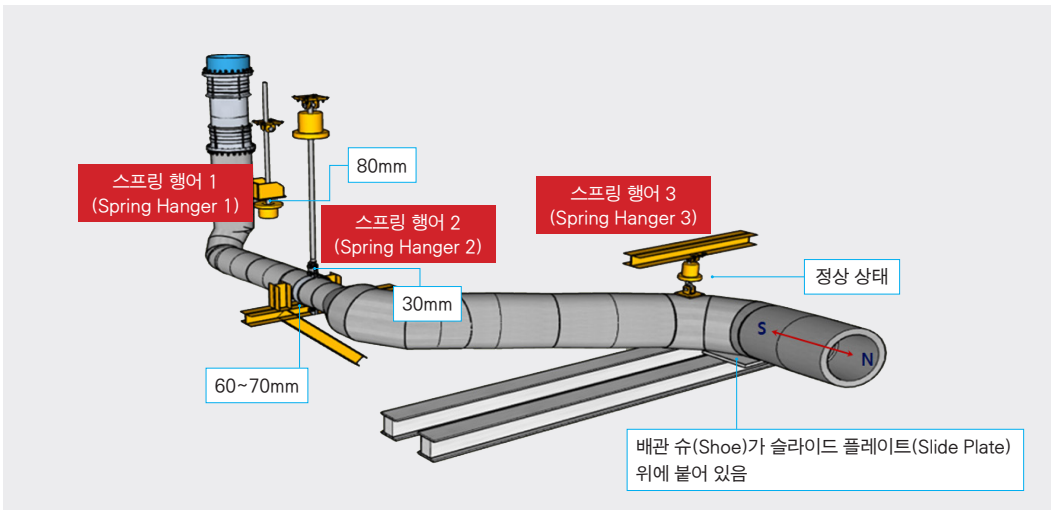
하지만 이 작은 차이가 12년이라는 시간과 결합되면서 한순간에 신축이음은 찢어져 버렸다. 흔히 피로파괴라고 불리는 현상이다.

3개월 간의 조사 결과, A 기업 대산공장의 화재·폭발 사고는 설계 및 시공 단계에 있었던 문제가, 장기간 운행되면서 신축이음의 주름관 부분에 지속적인 영향을 미쳤고, 피로에 의한 파단이 일어났을 것으로 추정됐다.

화학공장의 경우 아주 작은 오차와 시공의 오류도 거대한 폭발을 일으킬 수 있고, 지역 전체의 재난으로 이어진다는 것을 이번 사고는 여실히 보여주었다. 그렇다면, 설계와 시공의 문제를 미리 발견하고 대처할 수는 없었던 것일까?



압축기동에 설치된 고압의 스팀(Steam) 배관



사고 당시 배관의 지지 상태 모사도

사고는 안일함이 누적된 결과다

가동 전 점검만 제대로 되었더라도...

설령 설계와 시공에 문제가 있었더라도 가동 전 점검만 제대로 됐더라면 사고는 막을 수 있었다.

가동 전 점검이란 새로운 설비를 설치하거나, 공정 혹은 설비를 변경했을 때, 또한 공정이나 설비를 정비·보수를 한 경우에 공장의 안전 운전을 위하여 설비의 가동 전에 실시하는 안전 점검이다.

가동 전 점검을 할 때에는 새로운 설비가 기준대로 제작되고 설치되었는지를 비롯하여, 규정된 검사에 합격하였는지, 안전 장치와 자동제어 기능이 잘 작동하는지 등을 모두 점검하도록 되어있다.

만일 가동 전 점검이 제대로 이뤄졌더라면, 사고 발생 설비인 분해가스 압축기 배관이 무리하게 체결되지는 않았는지, 배관 지지대는 견고하게 설치되었는지 등 사고와 연결된 항목을 전부 점검할 수 있었을 것이다. 그때 문제를 발견하고 수정했다면, 아마도 사고는 발생하지 않았을 것이다.

하지만 신축이음 교체 설치 후 가동 전 점검에 대한 결과 보고서는 남아 있지 않았다. 사고 발생 직전인 2019년에 정기 보수 후에 실시된 가동 전 점검 결과가 남아있었지만 여기에도 신축이음에 대해서는 결함을 점검할 수 있는 항목이 없었다.

문제가 된 신축이음의 유격과 배관 연결 면의 정렬 문제가 사고 순간까지 보완되지 않은 것으로 보아, 적절한 가동 전 점검은 이루어지지 않은 것으로 보인다.

점검과 유지 보수만 제대로 이루어졌더라도

그 모든 문제에도 불구하고 사고를 막을 수 있었던 마지막 보루는 남아 있었다. 설계와 시공에 문제가 있었고, 가동 전 점검이 제대로 이루어지지 않았다 하더라도, 정기 점검만 정상적으로 이루어졌다면 신축이음의 이상은 미리 발견할 수 있었을 것이다.

하지만 사고 후 조사에서 이 신축이음에 대해서는 점검이나 정비 이력을 발견할 수 없었다. 원칙대로라면 압축기와 배관, 배관 부속품인 신축이음에 대해서는 수시검사, 정기 검사, 유지 보수 등이 이뤄져야 했으나, 그러한 기록은 없었다.

특히 문제의 신축이음에 대해서는 설비 점검 및 검사, 보수와 관련된 규정조차 수립되어 있지 않았다. 아예 정비의 대상에서 제외돼 있었던 건 아닌지 의심하게 되는 대목이다.

신축이음이 설치된 압축기동은 애당초 유지 관리도 쉽지 않은 구조였다. 신축이음과 배관 지지대는 압축기동의 2층, 지상10m 이상의 높이에 설치돼 있다. 하지만 그곳까지 올라가서 점검을 할 수 있는 사다리와 같은 구조물은 설치돼 있지 않았다. 공장 건설 당시부터 신축이음과 배관 지지대에는 접근하기 어려운 구조였던 것이다.

그런 구조였기 때문에 더더욱 신축이음에 대해서는 주기적으로 점검 계획을 수립해 실행했어야 한다. 그랬다면 접근을 위한 사다리도 설치됐을 것이고, 신축이음의 손상은 없는지, 신축이음과 배관 지지대는 적정 성능을 잘 유지하고 있는지를 확인함으로써 사고를 예방할 수 있었을 것이다. 하지

만 그 마지막 보루였던 정기 점검과 유지 보수마저 이루어지지 않은 채 사고는 발생하고 말았다.

하나하나의 문제는 크지 않아 보였지만

3개월간의 조사를 거쳐 추정되고 밝혀진 사고의 원인을 정리해 보면 다음과 같다.

- 신축이음 및 배관 증설 시 시공의 오류
- 설비 증설 당시 가동 전 점검 미흡
- 신축이음에 대한 정기 점검과 설비 유지 관리의 미 실시

화학사고는 특성상 현장이 화재와 폭발로 파괴되는 경우가 많기 때문에 사고 원인이 어느 것 하나라고 단정 짓기는 힘들다. 하지만 사고 후 조사에서 알 수 있었던 것은 결국 앞에서 열거한 이 모든 요인들이 복합적으로 영향을 주면서 신축이음이 파단됐고, 가스가 누출돼 화재와 폭발이 일어났다는 점이다.

3개월간 이 폭발 사고를 조사했던 기관은 여러 가지 복합적 요인 중에서 가장 중요했던 것은 안전 점검과 유지 보수였다고 강조했다. 만일 앞에서 드러났던 모든 문제가 존재했다 하더라도, 일상적인 안전 점검과 유지 보수 계획이 세워지고 그것이 이루어졌더라면 사고를 예방할 수 있었기 때문이다.

안전을 위한 원칙은 사소한 곳에서부터 확고히 지켜져야 한다

사고 발생 이후 대전지방고용노동청이 A 기업 대산공장을 대상으로 실시한 특별 안전보건 감독 결과 A 기업 대산공장에서는 수십 건의 산업안전보건법 위반 사항이 적발됐다.

이 하나하나의 위반 사항이 사고와 직결되었다고 이야기할 수는 없다. 어쩌면 사소한 문제들이었다고 할 수도 있다. 하지만 그것은 A 기업에 안전을 위한 확고한 원칙이 자리 잡지 않았다는 사실을 말해준다.

화학물질 생산공장의 경우, 설계와 시공, 관리에 이르기까지 철저한 안전의 확보는 아무리 강조해도 지나치지 않은 절대 기준이다. 유해·위험물질을 대량으로 취급하는 시설인 만큼 작은 위험물질의 누출도 대형 폭발과 화재로 이어질 가능성이 높기 때문이다.

사고의 예방은 이러한 특성을 모든 구성원이 인지하고, 안전이야말로 가장 먼저 지켜야 할 원칙이라는 점을 뺏속 깊이 인지하는 것으로부터 시작돼야 한다. 그리고 아무리 사소한 부분이라 할지라도 안전이란 원칙이 지켜질 수 있도록 확인하고 또 점검하는 실천이 동반돼야 한다.



사고 현장 화재 진화 모습

안전은 투자이고 사고는 비용이다

폭발 사고로 막대한 손실을 입은 A 기업

A 기업 대산공장의 폭발 사고는 지역사회에 커다란 피해를 안겼다. 하지만 정작 가장 큰 피해를 입은 것은 사고가 났던 A 기업이었다.

A 기업은 폭발 사고로 인해 사고가 발생한 압축기동을 비롯한 여러 시설에 커다란 피해를 입었다. 게다가 사고로 인해 관련 공장 7곳의 가동이 멈춤으로써 막대한 경제적 손실이 발생했다.

사고가 난 공장에서 생산한 에틸렌은 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 등을 생산하는 기초 원료이고, 대산공장엔 그렇게 연결된 7개의 공장이 함께 있었다. 폭발 사고로 에틸렌 생산이 중단되면서 에틸렌을 원재료로 삼았던 이 7개 공장의 가동이 모두 중단됐던 것이다.

공장의 설비가 폭발할 경우, 설비의 구매와 제작, 설치까지의 시간은 최소한 6개월이 걸린다. 기초 소재 원료를 생산하는 석유화학 공장의 특성상 2, 3개월가량의 시험 운용 기간도 필수적이다. 실제 A 기업 대산공장의 재가동은 2020년이 거의 끝나가는 시점에 이루어졌다.

그 결과 A 기업의 2020년 상반기 매출은 전년 동기 대비 21.3% 감소한 5조 9,578억 원을 기록했고, 영업 손실은 530억 원을 기록하면서 적자로 전환했다. A 기업에 따르면 대산공장의 사고로 인한 기회비용과 일회성 손실 비용은 2,000억 원에 달했다. 피해를 입은 지역 주민에 대한 보상에도 적지

않은 비용이 들어갔다.

경제적 비용뿐 아니라, 생산, 수출 등에서 업계 최상위 수준이었던 A 기업의 이미지도 추락했다. 화학사 중 전통적인 환경 우등생으로 ESG(환경·사회·지배구조) 경영에 공을 들이며 비교적 높은 수준의 환경등급을 받아 왔던 이 기업은 사고 이후 등급이 크게 하락했다.

미리 지불한 안전 비용이 사고를 막는다

사고 원인으로 추정된 위험 요인을 모두 제거하려면 적지 않은 비용이 들었을 것이다. 안전 점검을 위한 시스템을 만드는 데에도 당연히 비용은 든다. 하지만 그 비용이 과연 사고로 인해 발생한 비용보다 크다고 할 수 있을까?

제방의 작은 구멍 하나가 둑을 무너뜨리듯이, 어느 한 곳이라도 안전이 무너지면 사고는 발생하게 된다. 그리고 그것은 막대한 비용으로 이어진다. 안전을 위한 시간과 돈은 비용이 아니라 손실을 막기 위한 투자이고, 그 투자를 하지 않아 발생하는 사고는 곧 엄청난 비용인 셈이다.

보다 좋은 경영성과를 내기 위해서라도, 안전 확보는 신념의 수준으로 지켜져야 한다. 그리고 신념은 마음으로부터 시작돼 시스템으로 완성되어야 한다. 형식적이고 표면적인 안전 수칙이 아니라, 경영자와 근로자가 마음으로부터 안전을 제1의 원칙으로 삼는 것. 그럴 때 설계단계에서부터 작은 부실들은 사라진다. 잘못된 설계와 시공을 점검하지 않은 채 넘어가거나, 설비가 안전하게 가동되고 있는지 정비할 수조차 없는 환경은 만들어지지 않는다.

마음으로부터 시작된, 안전을 위한 시스템.

사고 없는 현장은 그렇게 만들어진 결과물이다.



Case 7

안일한 안전의식으로 반복되는 사고, 지역사회는 불안하다

스티렌모노머(SM) 혼합물
대량 유출 사고

충남의 한 공장에서 유증기가 유출되는 사고가 일어났다. 그것도 두 차례나. 심한 악취를 풍기는 유증기는 바람을 타고 인근 마을까지 확산됐고, 유증기를 흡입한 사람들은 두통과 어지러움, 구토, 안구 통증 등의 증상을 보이며 고통에 시달렸다. 사고로 병원 진료를 받은 근로자와 주민의 진료 건수가 무려 3,600여 건에 이를 정도로 후유증은 컸다. 대체 그 공장에서 무슨 일이 있었던 것일까? 사고를 막을 수 있는 방법은 정말 없었던 것일까?

잇따른 화학물질 유출 사고, 지역사회를 뒤덮다

충남의 한 석유화학공단에서 근무하는 A 기업 소속 신OO 씨는 2019년 5월 17일 오후, 야간 근무를 위해 평소처럼 출근하고 있었다. 그런데 읍내에 접어들면서 이상한 냄새를 맡았다. 고무가 타는 것 같은 역한 냄새였다. 일대를 온통 뒤덮고 있는 악취는 바람의 방향에 따라 심해지기도 하고 약해지기도 했지만 쉽게 사라지지 않았다.

야간 근무하는 동안에도 냄새는 여전했다. 회사 지시로 방독면을 쓴 채 일한 그는 다음 날 아침 퇴근했다. 하지만 어지럽고 속이 매스꺼웠다. 급기야 구토를 하고 얼굴까지 따가워지자 병원에 간 그는 엑스레이를 찍고 혈액 검사와 소변검사를 한 후 수액을 맞고서 집으로 돌아왔다. 그가 맡은 냄새의 정체는 과연 무엇이였을까?

신OO 씨가 일하는 석유화학공단에는 내로라하는 국내 5대 대기업을 비롯해 70여 개 석유화학기업의 플랜트(생산 시스템)가 밀집해 있다. 이들 시설에서는 플라스틱의 원료인 합성수지와 에틸렌, 프로필렌 같은 석유화학 제품의 원료로 사용되는 고순도 유분 및 화성제품(정밀화학 중간재 등)을 생산한다. 공정상 고온, 고압의 과정이 많아 자칫 대형 사고가 발생할 위험이 적지 않은 곳이다.

화학물질을 담은 탱크의 폭발 가능성이 제기되다

5월 17일, 바로 그날도 사고가 일어났다.

신OO 씨가 야간 근무에 들어가기 불과 몇 시간 전인 오전 11시 45분경, 그가 일하는 작업장 옆에 있는 B 기업의 스티렌모노머(Styrene Monomer, 이하 SM)* 1공장 SM 정제 공정에서 갑자기 요란한 경보음이 울렸다. 가스감지기가 누출된 가스를 탐지한 것이다. 이에 현장을 확인하던 담당자는 화학물질 옥외 저장탱크에서 하얀 연기가 나오고 있는 것을 발견했다. 탱크 위쪽의 비상압력방출 장치에서 새어 나온 유증기였다. 순식간에 탱크 주변으로 기름방울과 화학물질이 퍼지고 악취도 진동했다. 비상 상황이였다. 5분 후 B 기업은 사내 방송을 통해 사고 주변의 작업을 중지하고 현장 작업자들은 대피할 것을 지시했다.

그로부터 10분 후인 12시경, 사고 탱크와 연결된 배관과 밸브가 차단됐고, B 기업의 자체 소방대가 출동했다. 소방대는 탱크 외벽에 물을 뿌리며 온도를 낮추는 조치를 취했다. 하지만 역부족이었다. 12시 23분, 탱크 위 맨홀에서 유증기가 솟구쳤다. 이번에는 붉은 색이었다. 붉은 유증기는 오후 1시 18분까지 총 4회에 걸쳐서 간헐적으로 분출됐는데, 짧게는 몇 초에서 길게는 몇 분동안이나 지속됐다. 현장에서는 화학물질의 유출 및 탱크 폭발 가능성이 제기되면서 긴장감이 높아갔다.

“(기름 냄새를) 맡으면 마스크걸고, 무서웠죠.

이게 터질 것 같은 느낌도 들었고...”

— 사고 목격자

* 스티렌모노머(Styrene Monomer, $C_6H_5CH=CH_2$): 인화점이 섭씨 -136도인 인화성 물질로 고분자물질 제조의 원료로 사용된다.



© 충남노동건강안전센터 세움터

분출된 스티렌모노머(SM)가 하늘로 치솟고 있는 모습



스티렌모노머(SM) 노출 최소화 조치

상황이 긴박하게 돌아가자 탱크 외벽에 물을 뿌리는 것만으로는 한계가 있다고 판단한 B 기업은 오후 1시 13분경, 폭발을 막기 위해 탱크 내부와 방유제 주변을 포소화약제(거품을 발생시켜 공기 중 산소를 차단해 불을 끄는 특수 소화용 물질)로 도포했다. 그런데 포소화약제를 탱크 내부로 주입하는 과정에서 탱크 안에 있던 화학물질이 다량 유출됐다. 탱크 내부로 주입된 소화약제가 안에 있던 물질과 화학반응을 일으켜 부피가 커졌고, 결과적으로 탱크 내부의 압력이 올라가면서 탱크 안에 있던 화학물질이 기화돼 탱크 밖으로 뿔어져 나온 것이다.

능장 신고에 2차 사고까지

B 기업은 사고 발생 50분 뒤인 12시 35분에야 소방서에 신고했고, 뒤늦게 출동한 소방당국과 합동방재센터가 방재 작업을 실시했다. 탱크 주변에서 작업 중이던 근로자 8명이 유증기를 흡입해 병원으로 긴급 후송됐다. 방재 작업이 진행되는 와중에도 탱크에서 나온 유증기는 바람을 타고 외부로 확산됐다. 당시 바람이 공단에서 마을 쪽으로 불고 있어서 악취가 주변 마을까지 퍼졌다. 오후 1시 28분, 해당 지자체는 읍내 마을방송을 통해 사고 소식을 알리며 주민들에게 외출 자제를 당부했고, 이어서 안내 문자를 발송했다.

**“식초 원액의 냄새를 맡았을 때의 수백 배 이상 되는
시큼한 악취가 눈과 코를 찌르기 시작하면서 숨을
제대로 쉴 수 없었습니다.”**

— 마을 이장

**“사고 당일 오후 2시쯤 버스정류장에 있던 사람들이
코를 막고 집으로 뛰는 모습이 꼭 전쟁 때 피신하는
모습 같았습니다.”**

— 마을 주민

유증기 발생 차단 작업이 완료된 것은 오후 2시 40분, 사고가 난 지 거의 3시간 만이었다.

하지만 공장은 물론 주변 마을까지 뒤덮은 불안한 상황은 그것으로 끝나지 않았다.

다음 날인 5월 18일 오전 3시 40분경, 2차 사고가 발생했다. 전날 유증기가 유출됐던 탱크 위쪽에서 또다시 하얀 유증기가 새어 나온 것이다. 당시 공장에 있던 B 기업의 야간 근무자들이 유증기 유출을 막기 위해 자체적으로 진압에 나섰는데, 이 과정에서 소화약제와 함께 탱크 안에 남아있던 잔존 물질이 추가로 분출됐다. 이로 인해 B 기업의 근무자들과 인근의 공장 직원 등 10여 명이 안구 통증과 구토, 마스크움 등을 호소하며 병원 치료를 받았다.

악취를 풍기는 화학물질의 정체

유증기를 흡입한 사람들은 개인에 따라 약간의 차이는 있지만 대부분 두통과 어지러움, 구토, 마스크움, 안구 통증 등의 증상을 호소했다. 유증기 속에 어떤 물질이 있기 때문일까? 비정상적으로 유출된 화학물질인 만큼 유해성에 관심이 쏠렸다.

사고 이후 화학물질안전원이 탱크의 잔재물을 분석한 결과, 유출된 물질은 주로 스티렌모노머와 기타 고분자 화합물로 밝혀졌다. SM은 합성고무 등의 원료로 사용되는 물질로, 무색에 자극성 냄새가 나는 인화성 액체다. SM이 점막과 눈, 피부로 흡수되면 전신에 유해한 영향을 끼칠 수 있는데, 심할 경우 혼수상태에 빠지거나 생식계에도 영향을 미칠 수 있다. 사고에서 알 수 있듯이 SM에 노출됐을 경우, 눈, 코, 호흡기관이 자극돼 두통과 어지러움, 안구 통증, 피부염, 구토 증상 등이 나타나며, 고농도의 SM 증기는 중독성 및 의식불명 또는 사망의 원인이 되는 마취 효과를 유발하기도 한다는 연구 결과가 있다.

사고로 인한 지역사회의 피해

두 차례의 사고로 인한 여파는 컸다. 사고가 발생한 B 기업은 물론 지역사회도 한동안 술렁거렸다.

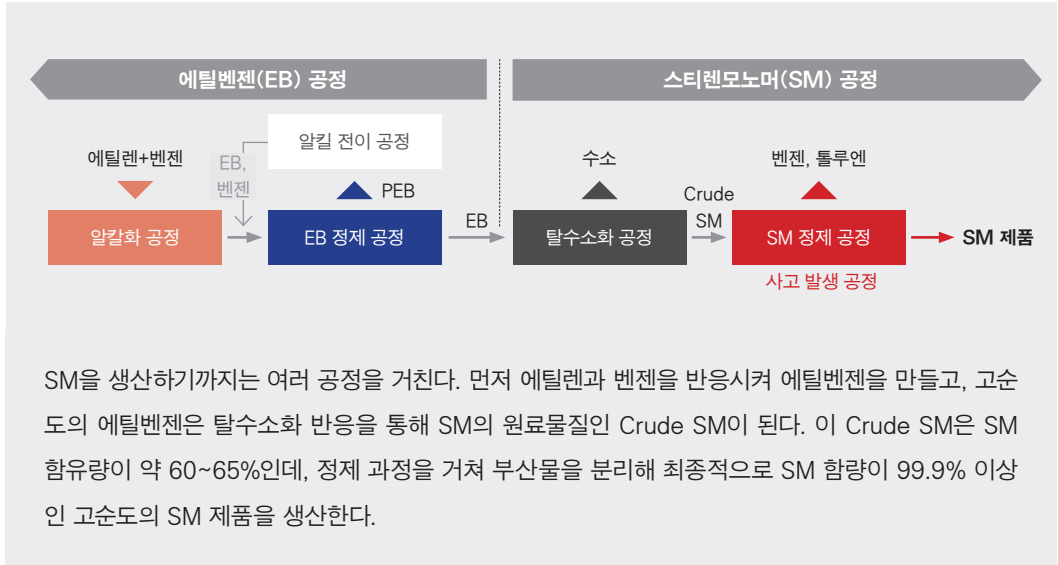
사고 후 두 달 가까이 이뤄진 관계기관의 합동조사에 따르면, 사고로 병원 진료를 받은 근로자와 주민의 진료 건수는 3,600여 건에 이르렀다. 또 내원한 환자의 소변 시료를 분석한 결과, 386건 중 8건이 근로자 생체노출 지표 기준치를 초과했다. 이러한 인적 피해에 더해 숙박업소와 음식점의 영업 손실, 염전 피해, 낙진에 의한 차량 피해, 양봉업 및 과실수 피해, 농업 손실 등 56건의 물질적 피해도 있었다. 이뿐만이 아니다. 지역 학생들은 이틀 동안 공부를 하지 못하고 불안에 떨었다. 학생들의 안전을 우려한 학교에서 하교 시간을 조정하고 수업을 취소해 학습권을 침해 받은 것이다.

설마 큰일 나겠어? 안전의식의 부재가 부른 사고

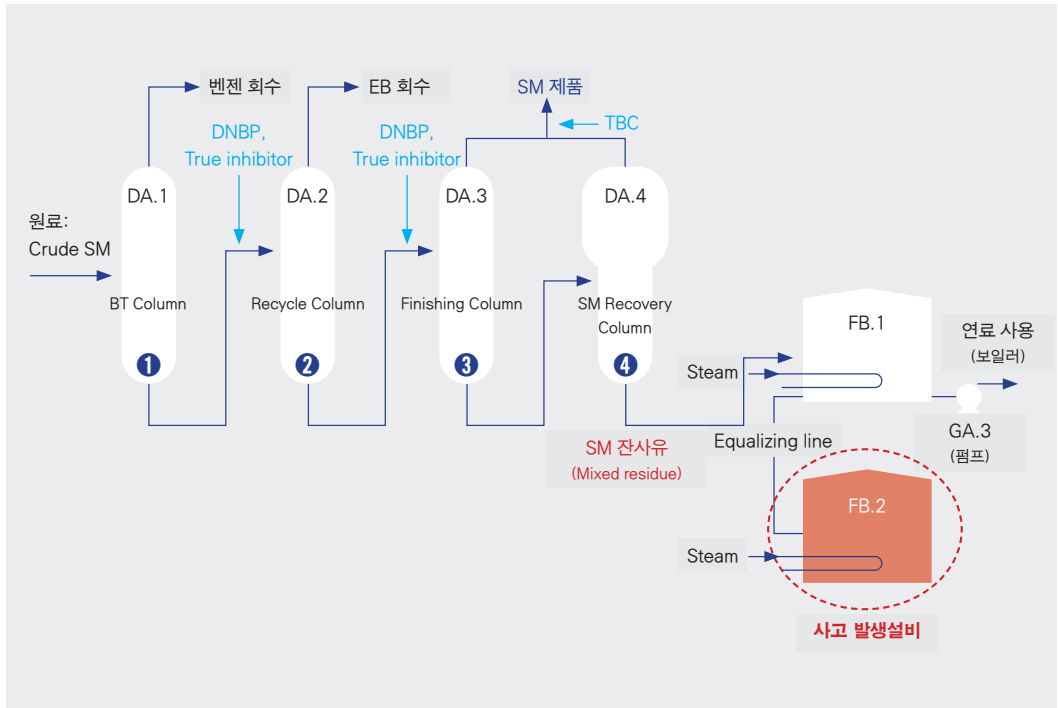
대체 왜 이런 사고가 일어났을까?

사고가 일어난 원인을 파악하기 위해서는 먼저 SM 생산 공정에 대한 이해가 필수적이다. SM은 에틸벤젠(EB) 공정을 거쳐 SM 공정에서 생산되는데, SM 공정은 탈수소화 반응공정과 SM 정제 공정으로 이루어져 있다. 그 중 SM 정제 공정에서 사고가 발생했다.

SM 정제 공정에는 4개의 증류탑이 있다. 탈수소화 반응을 거쳐 생성된 원료물질인 크루드 SM(Crude SM: 약 60~65% SM 함유)이 각각의 증류탑을 순차적으로 거치면서 끓는 점 차이에 의해 부산물을 분리하고, 최종적으로 고순도의 SM을 생산하는 구조다. 즉, 1, 2번 증류탑에서 각각 벤젠과 에틸벤젠을 회수하고, 3, 4번 증류탑 상부에서 고순도의 SM 제품을 생산하는데, 3번 증류탑 상부로 고순도 SM 제품의 대부분(약 94%)을 생산하고, 4번 증류탑 상부에서 나머지(약 6%)를 생산한다. 이 과정에서 정제되고 남은 찌꺼기 기름을 잔사유라고 하는데, 이는 혼합잔사유 저장탱크로 보내져서 보일러의 연료로 사용된다.



SM 생산공장 공정 개요



SM 정제 공정 흐름도

증류탑의 이상 징후를 파악하고도 계속 운전

그렇다면 사고 전 상황은 어땠을까?

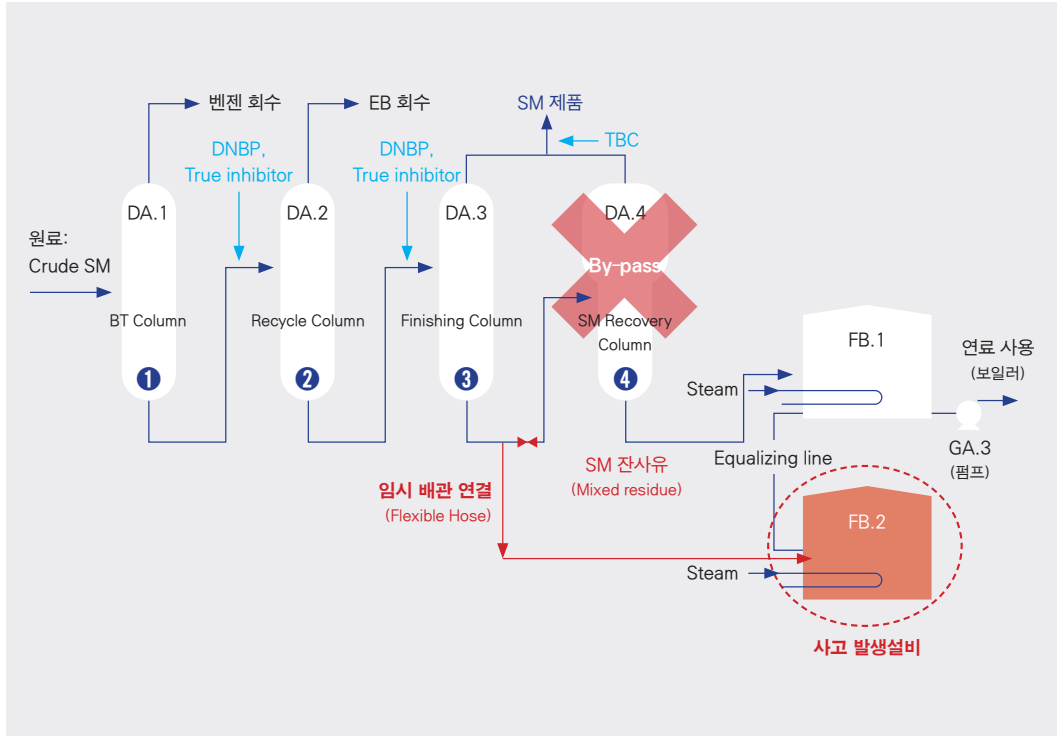
B 기업의 SM 1공장은 정기 보수를 완료한 후, 5월 5일부터 정상 운전을 시작했다. 그런데 5월 9일 오후 10시경, 정제 공정의 마지막 단계인 4번 증류탑의 내부 압력이 과도하게 높아지는 이상 현상이 발생했다. 하지만 B 기업 측은 이를 확인하고도 운전을 유지했다.

5월 10일, 내부 압력이 비정상적으로 높아진 4번 증류탑을 계속 운전하는 게 어렵다고 판단한 B 기업 측은 4번 증류탑을 우회하는 운전(바이패스, By-pass)을 하기로 결정하고, 다음 날인 5월 11일 12시경, 운전 방법을 변경해 실시했다. 즉, 3번 증류탑에서 4번 증류탑으로 공급되는 배관을 차단하고, 3번 증류탑의 하부와 사고가 발생한 저장탱크를 임시로 연결해, 3번 증류탑에서 배출되는 탑저액을 사고 저장탱크로 이송해 저장한 것이다.

고온에서 이상중합반응을 일으킬 수 있는 물질을 장기간 저장

정상 운전할 경우 4번 증류탑에서 배출되는 SM 혼합물은 SM 함량이 약 15% 정도인 데 반해, 3번 증류탑 하부의 탑저액 내 SM 함량은 약 89% 정도이다. 바이패스로 인해 평소보다 SM 함량이 훨씬 높은 고농도의 SM 혼합물(SM 함량 80~90%)이 혼합잔사유 저장탱크로 이송돼 저장되면서 사고의 발단이 됐다.

SM은 온도가 65℃ 이상 올라갈 경우, 제어할 수 없는 폭주 중합반응이 일어날 수 있다. 폭주 중합반응이 일어나면 온도는 SM의 끓는점(146℃) 이상으로 가열되어 압력이 상승하고 다량의 유증기가 분출되어 증기운 폭발이 일어나거나, 중합된 고분자로 인해 통기관이 막히면서 탱크가 폭발할 수도 있다. 하지만 사고가 난 저장탱크는 본래 목적상 SM 함량이 낮은 찌꺼기



4번 증류탑(DA.4) 바이패스 운영을 위해 3번 증류탑(DA.3) 하부에 임시 배관 연결



3번 증류탑(DA.3) 하부와 혼합잔사유 저장탱크를 임시 배관으로 연결한 모습과 임시 배관

기름인 잔사유를 모으는 탱크이기 때문에 온도를 낮게 유지할 수 있는 설비가 갖추어져 있지 않았다. 오히려 탱크 내 찌꺼기 기름이 굳는 것을 방지하기 위해 가열코일(Heating Coil)이 설치돼 있다.

엮친 데 덮친 격으로, SM 혼합물의 저장 기간마저 늘어나는 일이 발생했다. 사고가 난 탱크에 저장된 잔사유는 평소 동력팀의 보일러 연료로 사용됐다. 그런데 정기 보수 이후 가동 운전 중이던 보일러에 문제가 생겨 5월 15일 보일러 가동이 정지됐다. 이러한 이유로 연료 소모량이 줄어들어 잔사유가 저장탱크에 체류하는 시간이 평상시인 2~3일보다 늘어날 수밖에 없는 상황이 됐다. 하지만 B 기업 측은 이를 간과했다. 그 결과 SM을 다량 함유한 혼합물이 저장탱크 안에 6일이나 보관됐다.

결국 고온에서 장기간 보관 중이던 고농도의 SM 혼합물은 이상 중합반응을 일으켰고, 이로 인해 탱크 내부의 온도가 100℃ 이상으로 급상승하면서 내부 압력이 높아져, 대규모 SM 혼합물이 유출되는 사고가 일어났다.



사고 발생 설비, 혼합잔사유 저장탱크(Mixed Residue Tank, FB.2)

수차례의 판단 착오와 과실이 결국 사고를 낳았다

사고 이후 약 2달 동안 한국산업안전보건공단 등 관계기관이 사고에 대한 합동조사를 벌였다. 조사 결과, 사고의 원인은 저장탱크 내부에 있던 SM이 폭주 중합반응을 일으킬 수 있다는 위험성을 간과한 B 기업 측의 과실과, 보일러가 정상 가동되지 않은 상황이 맞물려서 발생한 것으로 밝혀졌다.

그렇다면 사고를 막을 수는 없었을까?

사고에 이르기까지는 여러 차례의 판단 착오와 과실이 있었다.

처음 이상 현상이 발생했을 때 운전을 중지하고 조치를 취했다더라...

대량의 화학물질을 다루는 공장이라면 공정을 중단하는 것은 쉽지 않은 일이다. 기계설비를 점검하고 재가동하기까지 막대한 경제적, 시간적 손실을 감수해야 하기 때문이다. 더군다나 여러 공정이 맞물려 돌아가는 시스템인 경우, 한 공정이 멈추면 연결된 공정에까지 영향을 미칠 수 있기 때문에 그 공정을 중단하기란 더욱 어려운 일이다. 그럼에도 불구하고 이상 현상이 발생했을 때 작업을 중지하고 즉시 조치를 취하는 것은 더 큰 손실을 막을 수 있는 최선의 방법이다. 사고가 일어난 후 수습하는 것보다 사고가 일어나지 않도록 미연에 방지하는 것이 더 쉽고 더 나은 방법이라는 사실을

모두가 알고 있다. 그러나 모두가 그것을 실행하지는 않는다.

B 기업의 경우도 그랬다.

만약 처음 4번 증류탑에서 내부 압력이 과도하게 높아지는 이상 현상이 발생했을 때, 운전을 중지하고 신속히 그 원인을 제거했다라면, 즉 증류탑 내부의 단(Tray)을 막는 고분자량의 화합물을 제거하는 조치를 취했다라면 사고는 발생하지 않았을 것이다. 하지만 B 기업 측은 이상 현상을 확인하고도 운전을 유지했다. 하루가 더 지나서야 더 이상 운전하는 것이 불가능하다고 판단하고 다른 조치를 취했는데, 그것이 결과적으로 사고로 이어졌다. 문제가 생겼을 때 공정을 중단하는 것은 결코 쉽지 않은 결정이다. 하지만 분명 사고를 막을 기회는 있었다.

공정안전관리(PSM: Process Safety Management)가 제대로 작동했다라면...

흔히 사고가 나면 원인 분석과 재발 방지 대책 등을 거론하면서 빠지지 않는 것 중에 법과 제도에 대한 개선 부분이 있다. 석유화학산업이 발전하고 고도화되면서 그동안 산업 현장에서 안전을 강화하기 위한 법과 제도도 더욱 촘촘하게 마련돼 왔다.

석유화학 공장 등의 장치산업의 경우는 시스템으로 구성된 연속 공정이기 때문에 한 번의 사고만으로도 엄청난 인적·물적 손실을 초래하게 된다. 이 때문에 개별기계·기구에 대한 점검 위주로 해오던 과거의 안전관리 방식에서 벗어나 제조 공정별로 위험성을 평가해 종합적인 안전대책을 수립해야 할 필요성이 높아지게 됐다.

이에 따라 우리나라는 1995년 중대산업사고를 예방하기 위해 「산업안전보건법」에 공정안전관리 제도를 도입해 1996년부터 적극 시행하고 있다. 이에 따라 석유화학 공장 등 유해·위험물질을 제조, 취급, 저장하는 설비를

보유한 사업장은 그 설비로부터 위험물질의 누출 및 화재·폭발 등으로 인한 중대산업사고를 예방하기 위해 ‘공정안전보고서’를 작성하고 제출해, 심사·확인받도록 하고 있다.

공정안전보고서를 작성하는 것은 단순한 서류작업 이상의 의미가 있다. 공정위험성을 평가하고 안전운전계획과 비상조치계획을 세우는 과정을 통해 잠재적인 위험 요소까지 예측하고 분석해 대책을 마련할 수 있다. 그럼으로써 사고를 예방하고 피해를 최소화할 수 있는 것이다.

B 기업도 당연히 공정안전보고서 제출 대상이다. 하지만 B 기업의 공정안전관리는 위기의 상황에서 제대로 작동하지 않았다. 정작 가장 필요한 순간에 절차대로 시행하지 않은 것이다.

임시배관을 설치하기 전에 변경에 따른 위험성을 파악하고 조치를 취했다라면...

공정안전관리에는 공정안전자료, 공정위험성평가, 비상조치계획, 그리고 안전운전계획의 9대 요소까지 총 12대 요소가 있다. 사고를 예방하기 위해서는 12가지 요소 모두가 중요하지만, 현장에서 일하는 사람들이 특히 중요하게 꼽는 것 중의 하나가 바로 변경요소관리다.

변경요소관리는 취급되는 화학물질이나 제조공정, 장치 및 설비의 주요 구조, 각종 운전 및 작업절차의 변경이 있는 경우, 이에 대한 사전 위험성을 검토해 위험요소를 제거하기 위한 절차에 따라 관리하는 것을 의미한다. 사소한 변경이라도 안전 운전에 커다란 영향을 미칠 수 있고, 자칫 화재·폭발이나 누출 등의 중대산업사고로 이어질 수도 있기 때문에 변경요소관리는 철저하게 이뤄져야 한다.

B 기업의 경우 임시 배관 설치의 변경요소관리 대상이다. 그러므로 배관을 설치하기 전에 변경발의서를 작성해 해당 작업에 대한 공정검토, 법규검

토, 변경관리위원회 개최, 승인 등의 절차를 마친 후 설치해야 했다. 하지만 B 기업은 이런 변경요소관리를 사전에 실시하지 않았다.

사고 전 상황을 날짜별로 따져 보면, 공정 운전 중 이상 현상이 발생한 4번 증류탑을 바이패스하기로 결정한 것은 5월 10일이었다. 그리고 다음 날인 5월 11일 오전에 임시 배관을 설치해, 고농도의 SM 혼합잔사유를 저장탱크로 이송하기 시작했다. B 기업은 임시 배관을 설치하고 SM 혼합잔사유의 이송 작업을 시작한 지 3일이 지난 5월 14일에서야 변경발의서를 작성했다. 다음 날 메모 결재를 받은 후, 사내 전산시스템에 변경요청서를 등록하고, 공정검토부서로 송부해 처리 진행 중이었다. 즉, 사고 당시 공정검토부서인 원료기술팀에서 임시 배관 설치에 대한 공정검토가 완료되지 않은 상태였다. 만약 공정검토를 통해 임시 배관을 설치한 후에 발생하는 잠재적인 유해·위험요인을 파악했다면, 이를 사전에 제거하거나 위험성을 낮추는 적절한 조치를 취할 수 있었을 것이다. 그랬다면 고농도의 SM 혼합잔사유가 온도를 낮게 유지할 수 있는 기능이 없는 저장탱크로 이송돼 장기 보관되는 일은 발생하지 않았을 것이고, 사고도 일어나지 않았을 것이다.

일터에는 어떤 형태로든 위험이 존재한다. 그렇기 때문에 안전하게 일하기 위해서는 거쳐야 하는 순서나 방법이 있다. 바로 절차다. 위험성이 존재하는 분주한 현장에서 절차는 그저 형식적인 이유로 있는 게 아니다. 절차를 거치면서 각 단계마다 위험성을 검토하고 분석하며 대책을 세워 안전을 꾀할 수 있다. 이것이 현장에서 절차를 지켜야 하는 중요한 이유다.

안전운전절차서의 내용에 없는 운전을 하지 않았더라면...

공정안전관리에 의하면 현장에서 설비를 가동하는 모든 사항은 절차화 하도록 하고 있다. 그리고 이를 절차서로 작성하도록 하고 있는데, 이게 바로 안전운전절차서다.

안전운전절차서는 공정운전 중에 발생할 수 있는 모든 경우를 대비해, 운전자가 안전하게 공장을 운전하는 데 필요한 모든 운전절차를 정해 놓은 운전지침서다. 안전운전절차서는 해당 공정에 운전 경험이 없는 운전원이라도 최소한의 지도나 다른 운전원의 도움을 받아 누구든지 그 절차에 의거해서 운전할 수 있도록 명확하고 구체적으로 작성할 것을 권고하고 있다. 혹시 발생할지도 모를 최악의 비상상황에서도 안전을 담보할 수 있도록 하기 위한 장치인 것이다.

SM 1공장 정제계의 안전운전절차서에는 ‘비상 시 운전이나 운전 범위를 벗어났을 경우’에 대한 조치 절차가 있다. 하지만 SM 정제 공정 4번 증류탑의 압력이 상승할 때 하부 온도의 상승을 방지하기 위한 안전 조치 내용은 언급돼 있으나, 4번 증류탑을 바이패스해 임시 배관을 설치한다는 내용은 포함돼 있지 않았다. ‘공정의 운전방법이나 작업방법을 일시적으로 변경하여 수행하는 임시 운전’에 대해서도 문서화된 안전운전절차서가 있어야 한다’는 안전운전절차서의 작성 원칙을 따르지 않은 것이다.

또한 혼합잔사유 저장탱크 운영에 관한 안전운전절차서의 ‘비상정지절차’에 대한 내용에는 사고가 난 저장탱크 내부에서 중합반응에 의한 발열이 발생하는 경우나 고농도의 SM 혼합물을 저장하는 경우 등은 포함돼 있지 않았다.

다시 강조하지만 현장에서는 절차에 따라 운전해야 한다. 또한 절차서의 내용에 없는 운전은 진행하지 않아야 한다. 하지만 B 기업은 절차서에 없는 운전을 실시했고, 그 결과는 사고로 이어졌다.

사고 이후 B 기업은 앞으로 혼합잔사유의 SM 농도가 20%를 초과할

때는 별도의 저장탱크로 이송하고, 혼합잔사유 저장탱크 내부의 SM 농도를 주 2회 분석해 관리하는 등 고농도의 SM이 혼합잔사유 저장탱크에 장기 보관되는 것을 막는 방안을 내놓았다. 사후 대책이지만 사실상 '사전에 있었어야 하는 대책'인 것이다.



유증기가 유출된 SM공장 옥외 저장탱크 지역

위험성평가를 더 면밀히 제대로 시행했더라면...

공정안전관리에서 중요한 것 중에 위험성평가도 빼놓을 수 없는 요소다. 위험성평가란, 사업장 내의 설비나 절차 등에 잠재돼 있는 유해·위험 요소를 자체적으로 파악하고 해당 요소의 위험성 수준을 결정해서, 스스로 위험을 감소시키기 위한 적절한 조치를 세우고 이를 실행하는 과정이다.

B 기업도 정기적으로 위험성평가를 시행했다. 하지만 사고를 예방하지는 못했다. 무엇이 문제였을까?

SM 1공장 SM 정제 공정에 대한 정기 위험성평가 시, 4번 증류탑 내부의 압력 상승이나 고분자량 화합물의 형성 및 오염에 의한 막힘(Fouling) 등 이상 현상 발생 가능성에 대한 내용은 평가되지 않았다. 과거에도 4번 증류탑에서 고분자량 화합물이 발생해 3번 증류탑 하부에서 SM 2공장 정제 공정으로 연결한 사레가 있음에도 불구하고, 이러한 내용이 평가되지 않은 것은 위험성평가가 과연 적절하게 실시됐는지 의구심을 갖게 한다.

또한 사고가 난 저장탱크에 대한 정기 위험성평가 시, 탱크 내부에서 발생 가능한 이상 중합반응이나, 고농도 SM 혼합물의 유입 가능성, 이상 온도 상승 등에 대한 내용도 평가되지 않았다.

해당 설비에 대한 위험성평가는 정기적으로 이루어졌다. 하지만 사고 현상과 대처에 대한 위험성평가는 이뤄지지 않았다. 그럼으로써 사고를 예방하고 피해를 최소화할 수 있는 기회를 놓쳤다. 위험성평가는 거주장스럽고 형식적인 서류작업이 아니라 실질적으로 안전을 위한 그물망 역할을 다 해야 한다. 그러려면 사업장 내에 존재하는 유해하거나 위험한 요소를 빠짐 없이 파악할 수 있도록 훨씬 더 촘촘하게 시행돼야 한다.

불안한 지역사회, 사고 후폭풍에 시달리다

사고 이후 공장 근처 마을 주민들과 석유화학공단에서 일하는 근로자 수백 명이 구토와 어지럼증을 호소하며 병원을 찾았다. 사고로 인한 충격과 불안 때문에 심리적 안정 차원에서 수액 주사를 맞는 사람도 많았다. 거의 재난 상황을 방불케 했다.

**“그때는 냄새로 악취는 물론 눈도 제대로 뜯 수 없는
상황이었어요. 우리 마을 바로 옆에서 이렇게 위험한
물질을 사용하는 공장이 돌아가는데 주민들은
아무것도 할 수 없는 게 답답하죠. 마을 주민들은
도대체 어떻게 살아가야 하느냐?”**

— 마을 주민

**“마을 인근에 각종 공장이 위치해 있는 상황에서 이번
사고가 일어나 주민들의 불안감이 더욱 커졌습니다.
정부가 공단 인근에 사는 주민들의 이주대책이라도
세워야 되는 것 아닌가 모르겠습니다.”**

— 마을 이장

그나마 입원 치료 환자가 단 한 명도 없는 게 불행 중 다행이었다. 하지만 만약 유출된 물질이 독성이 강한 것이었을 경우, 하마터면 대형 참사로 번질 수도 있는 일이었다.

사고 발생 시 소방서나 지자체 한 군데라도 즉시 신고를 했더라면...

화학사고 발생 시 해당 화학물질을 취급하는 자는 즉시 관할 지방자치단체, 지방환경관서, 국가경찰관서, 소방관서 또는 지방고용노동관서에 신고할 의무가 있다.

하지만 B 기업은 유증기가 유출되고 있는 사실을 처음 발견한 때로부터 무려 50분이 지난 12시 35분께에 가서야 관할 소방서에 신고했다. 심지어 다음날인 5월 18일 오전 3시 40분경에 발생한 두 번째 사고는 사고가 발생한 지 2시간이 지나서야 상황을 알렸다.

B 기업이 즉시 신고를 하지 않음에 따라 대응기관들이 현장에 늦게 도착했고, 이로 인해 일사불란한 현장지휘가 이뤄지지 못했다. 또한 인근 마을에 대한 사고 안내방송과 재난 안내문자 발송도 늦어졌다. 그 피해가 고스란히 주민들에게 돌아간 것은 말할 나위도 없다.

사고 이후 대전지방고용노동청은 B 기업과 협력업체에 대한 특별근로감독을 실시했다. 적발된 사항 중에는 매출 11조 원이 넘는 대형 사업장인 테도 추락위험 장소에 안전 난간을 설치하지 않는 등 기본적인 안전 조치조차 취하지 않은 사항도 포함돼 있어 충격을 줬다.

반복되는 사고로는 지속가능한 미래를 열 수 없다

B 기업은 5월 18일 “지역주민과 협력업체 여러분께 깊이 사과드린다”는 사과문을 인터넷 홈페이지에 게시했다. 대표이사 명의로 실은 사과문에서 B 기업은 전문기관의 정확한 진단을 받고 재발방지 대책을 마련하겠다고 밝혔다.

하지만 B 기업에서 사고가 발생한 것은 이번이 처음이 아니다. 같은 해 3월 25일 공단 내 BTX 공장에서 배관 내 이물질 제거 작업 중 유해 가스가 유출됐다. 또 4월 26일에도 나프타분해공정(NCC) 내 메탄가스 드럼을 정기 보수하던 중 잔류 가스가 폭발하면서 굉음이 나 작업자들이 긴급 대피하는 소동이 벌어지기도 했다.

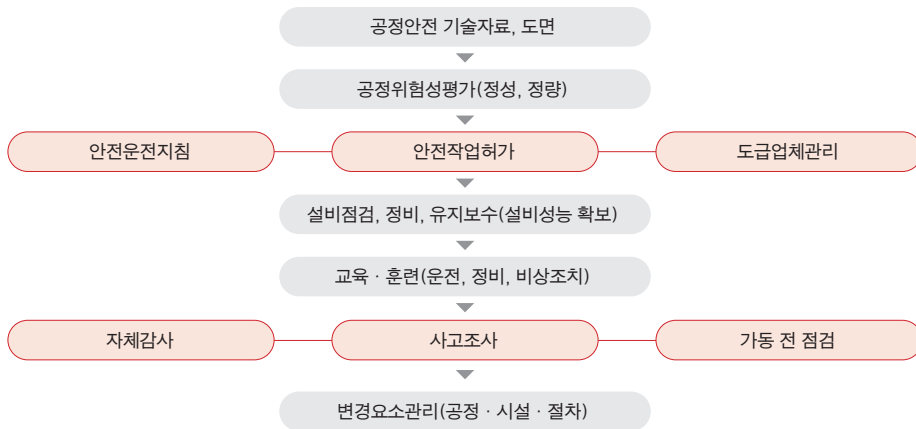
못 고친 것인가, 안 고친 것인가?

‘소 잃고 외양간 고친다’는 속담을 모르는 사람은 없을 것이다. 사고가 발생하고 나서야 문제를 해결한다는 뜻으로, 이미 일을 그르친 뒤에는 아무리 뉘우쳐 봤자 소용없다는 뜻도 담겨 있다. 하지만 소를 잃으면 외양간을 꼭 고쳐야 한다. 소를 한 마리만 키울 게 아니라면 말이다. 고통을 통해 깨닫고 배우는 게 있어야 성장하고 발전할 수 있다. 기업도 마찬가지다. 소를 잃고도 번번이 외양간을 고치지 않는다면 지속가능한 미래는 오지 않을지도 모른다.

공정안전관리 12대 요소

화학공장의 화재·폭발 및 위험물 누출 등 중대산업사고 예방을 위해 공정안전보고서를 심사·확인 및 평가·점검받는 제도

- 1 **공정안전자료** 공정안전자료의 주기적인 보완 및 체계적 관리
- 2 **공정위험성평가** 공정위험성평가 체제 구축 및 사후관리
- 3 **안전운전 지침** 안전운전절차 보완 및 준수
- 4 **설비점검·검사 및 유지·보수** 설비별 위험등급에 따른 효율적인 관리
- 5 **안전작업허가** 작업허가절차 준수
- 6 **도급업체 안전관리** 도급업체 선정 시 안전관리 수준 반영
- 7 **근로자 등 교육** 근로자(임직원)에 대해 실질적인 PSM교육
- 8 **가동전 점검** 유해·위험설비의 가동(시운전) 전 안전점검
- 9 **변경요소 관리** 설비 등 변경 시 변경관리절차 준수
- 10 **자체감사** 객관적인 자체감사 실시 및 사후조치
- 11 **공정사고 조사** 정확한 사고 원인규명 및 재발방지
- 12 **비상조치** 비상대응 시나리오 작성 및 주기적인 훈련



공정안전자료 1

공정안전자료의 주기적인 보완 및 체계적 관리



공정위험성평가 2

공정위험성평가 체제 구축 및 사후관리



안전운전 지침 3

안전운전절차 보완 및 준수



설비점검·검사 및 유지·보수 4

설비별 위험등급에 따른 효율적인 관리



안전작업허가 5

작업허가절차 준수



공정 안전 관리

도급업체 안전관리 6

도급업체 선정시 안전관리 수준 반영



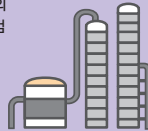
근로자 등 교육 7

근로자(임직원)에 대해 실질적인 PSM교육



가동전 점검 8

유해·위험설비의 가동전 안전점검



12대 요소

변경요소 관리 9

설비 등 변경 시 변경관리절차 준수



자체감사 10

객관적인 자체감사 실시 및 사후조치



공정사고 조사 11

정확한 사고원인규명 및 재발방지



비상조치 12

비상대응 시나리오 작성 및 주기적인 훈련



새로운 산업과 새로운 위험

Part 5



Case 8

**화염에 휩싸인
페플라ستيك 재활용 공장**

Case 9

**이차전지,
편리함과 위험이 공존한다**

Case 10

**음식물폐기물 처리장도
폭발 위험지대**

Note

- 새로운 산업의 위험 특성과 안전 수칙



Case 8

화염에 휩싸인 페플라스틱 재활용 공장

열분해유 유증기 누출 화재 사고

페플라스틱 재활용 공장에서 화재가 발생했다. 폐수를 제거하던 여섯 명의 근로자가 화상을 입고 병원으로 이송됐지만 그중 한 명은 끝내 목숨을 잃고 말았다. 재해자는 모두 외국인 근로자, 사고 장소는 페플라스틱을 열분해해서 기름을 생산하는 공장이었다. 새로운 산업으로 각광받고 있는 페플라스틱 열분해 공정에는 대체 어떤 위험이 도사리고 있었던 것일까?

화염에 휩싸인 사람들

2023년 2월 13일 오후 4시 45분경, 경북의 한 폐플라스틱 재활용 공장에서 불이 났다. 폐비닐과 폐플라스틱을 열분해해서 기름(열분해유)을 생산하는 A 기업의 공장이었다. 공장동 옆에 있는 여과실 문 앞에서 시작된 불은 순식간에 여과실 안팎으로 번졌다. 그야말로 눈 깜짝할 사이에 벌어진 사고였다.

불이 나자 여과실 앞에 있던 근로자 5명은 재빨리 근처로 대피했다. 얼굴과 손, 발에 크고 작은 화상을 입었지만 다행히 생명에는 지장이 없었다. 그런데 재해를 입은 사람은 이들만이 아니었다. 당시 여과실 안에 사람이 있었다. 30대의 외국인 근로자. 그가 화염에 휩싸인 채 여과실 밖으로 뛰쳐나왔다. 온몸에 불이 붙은 참혹한 모습이었다. 이를 본 다른 근로자들이 서둘러 소화기를 가져와서 그의 몸에 붙은 불을 꺾다.

화재 신고를 받은 소방당국은 사고 발생 9분 후인 4시 54분께 현장에 도착, 인력 60여 명과 소방차 등 장비 20여 대를 동원해 화재를 진압했다. 화상을 입은 근로자들은 신속히 병원으로 이송됐고 오후 5시 32분경 불은 완전히 꺼졌다. 하지만 여과실 안에 있다가 전신에 3도 화상을 입은 외국인 근로자는 2월 22일 결국 숨을 거두고 말았다.



페플라스틱 재활용 공장의 여과실에서 발생한 화재

바닥에 고인 폐수를 빼내다가 불이 났다

재해를 입은 이들은 여과실에 고인 폐수를 제거하던 중이었다. 여과실 안에 있는 유수 분리조(폐수에 들어있는 유분을 물에서 분리하기 위한 설비)의 폐수가 흘러넘쳐서 바닥에 고이자, 펌프를 이용해서 이를 밖으로 빼내다가 불이 났던 것이다.

**“물은 불이 안 붙는데 어떻게 불이 났는지
잘 모르겠습니다.”**

— 사고로 화상을 입은 근로자

이들이 빼내려고 했던 폐수에 어떤 성분이 있었기에 불이 붙었을까? 그리고 불이 시작된 이유는 과연 무엇이였을까?



화재 진압 후 여과실 전경

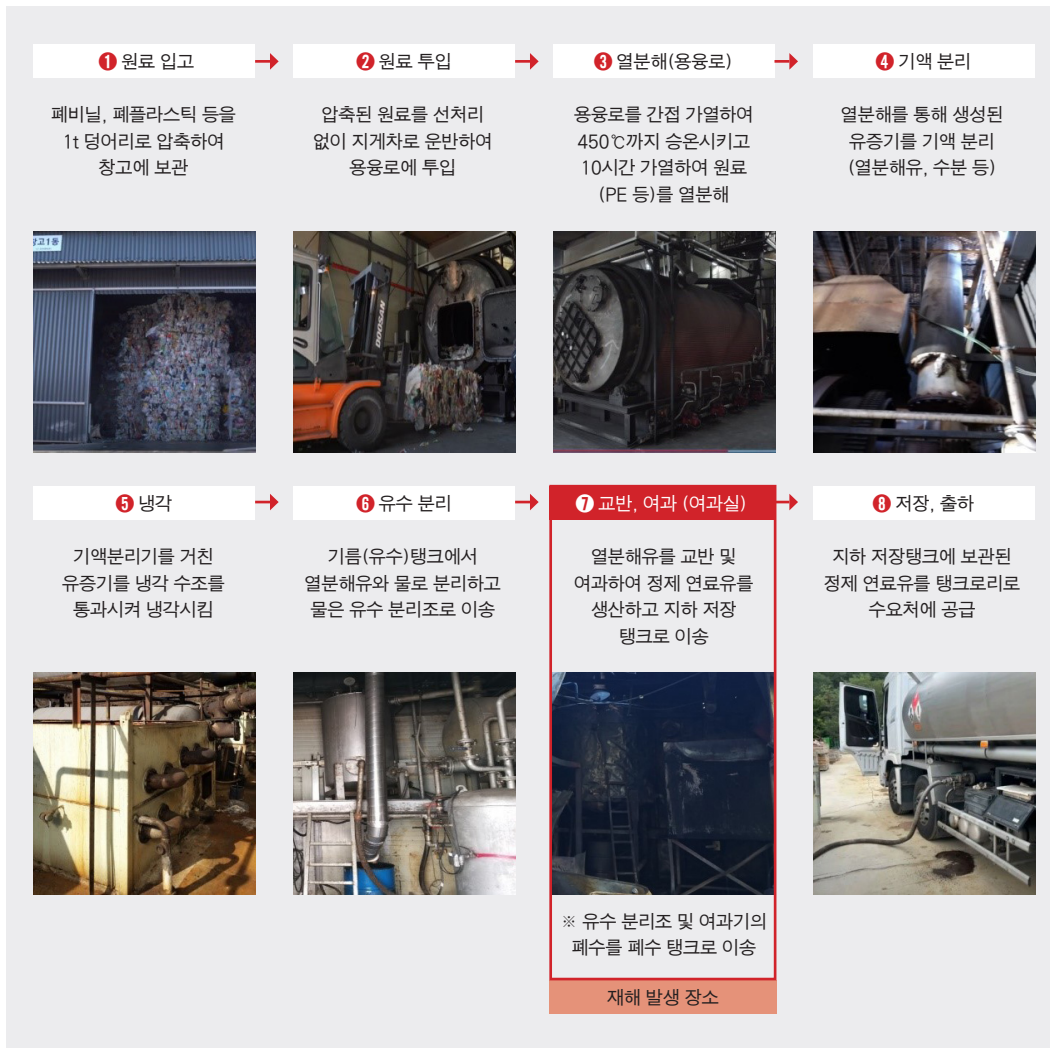
열분해유가 뭐길래?

사고가 일어난 원인을 파악하기 위해서는 먼저 A 기업에서 생산하는 열분해유란 무엇인지, 그리고 열분해유의 생산 공정은 어떻게 이뤄지는지 이해할 필요가 있다.

폐플라스틱의 재활용 기술은 크게 3가지로 나뉜다. 폐플라스틱을 분류, 분쇄, 용융해 다시 플라스틱을 만들거나 재생 원료로 사용하는 물질 재활용, 소각해서 열에너지로 사용하는 열적 재활용, 그리고 화학적 처리를 통해 원료물질이나 액체 및 고체연료로 전환하는 화학적 재활용이 있다.

A 기업이 생산하는 열분해유는 화학적 재활용에 해당하는 것으로, 폐플라스틱을 열분해해서 생산한 기름이다. 폐플라스틱의 열분해란, 약 350℃~450℃ 사이의 무산소 조건에서 플라스틱을 가열 용융시켜 분해해 기름으로 변환하는 것이다. 열분해를 이용하면 플라스틱으로부터 등유나 경유와 유사한 연료로 사용할 수 있는 액상 오일과 석유화학공장의 원료로 사용할 수 있는 나프타(Naphtha)까지도 생산할 수 있다. 또한 열분해 방식으로 폐플라스틱을 처리하면 소각 대비 최대 61%의 이산화탄소 배출을 절감할 수 있으며, 생산된 열분해유로 플라스틱을 생산할 때는 석유 이용 대비 85% 이상의 이산화탄소 감축 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

이에 환경부에서는 2030년까지 폐플라스틱의 열분해 처리 비중을 10%까지 높이겠다는 정책을 발표했고, 산업통상자원부에서는 석유화학 분야의 탄소중립 대응 방안으로 폐플라스틱의 열분해 기술을 선정했다. 2019년 설립된 A 기업은 이러한 추세에 맞춰 사업 규모를 확장하며 대기업 등에 열분해유를 납품해 왔다.

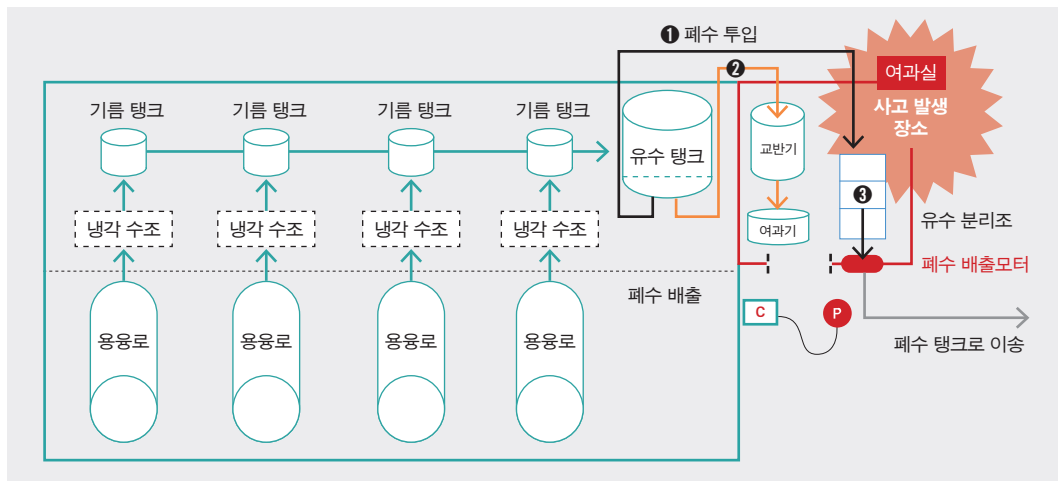


열분해유 생산 공정

A 기업은 페비닐과 폐플라스틱을 선별·압축해서 무산소 열분해 공정을 거친 후 냉각 및 세정 과정을 거쳐 열분해유를 생산한다. 그중 열분해 이후 공정을 좀 더 자세히 살펴보면, 냉각 과정을 거친 기름+물+가스는 가스 세정 단계를 거친 후 유수 탱크에서 기름(열분해유)과 폐수로 분리되고, 이 기름(열분해유)은 여과실에서 교반 및 여과의 후처리를 통해 정제 열분해유가 된다.

사고는 후처리를 하는 여과실에서 발생했다. 여과실은 공장동 측면에 있는 단독 공간으로, 그 안에는 교반기와 여과기, 그리고 유수 분리조가 설치돼 있었다.

사고와 관련된 설비는 유수 분리조인데, 이전 단계인 유수 탱크에서 기름(열분해유)과 분리된 폐수가 유체 밀도에 의해 자체 압력으로 여과실의 유수 분리조로 이송돼 온다. 기름(열분해유)과 수분은 오랜 시간 동안 일정한 곳에 놓아두면 밀도 차에 의해 상하층으로 나뉘어 각각 분리될 수 있다. 하지만 용융로에서 혼합된 상태로 냉각 수조로 배출되는 공정 특성상 단시간 내에 100% 분리가 이루어지지 않는다는 것이다. 그렇기 때문에 유수 분리조로 이송되는 폐수에는 소량의 기름 성분이 있을 수 있다.



공정 흐름도

이런 이유로 유수 분리조 안으로 기름 성분이 섞인 폐수가 이송돼 오고 설치된 액위계를 통해 일정량 이상 폐수가 찬 것을 확인하면, 작업자는 유수 탱크의 송출 밸브를 잠근 후 폐수 위에 떠 있는 기름 성분을 플라스틱 바가지로 떠서 폐유통에 넣었다. 그리고 나서 유수 분리조 밑에 있는 폐수 이송 펌프를 가동하면 폐수는 배관을 통해 지하 폐수 탱크로 가는 구조로 이루어져 있었다.

사고 당일의 재구성

그렇다면 사고가 나던 날, 여과실에서는 대체 무슨 일이 있었을까?

그날 오후 4시 이후 상황을 되짚어보면 이렇다.

오후 4시 13분경, 여과실의 유수 분리조 밑에 설치된 폐수 이송 펌프가 작동하지 않았다.

오후 4시 21분경, 여과실 담당자인 염OO 씨가 유수 분리조의 폐수가 넘친 것을 확인하고 공장장에게 전화해 이 사실을 알렸다. 공장장은 여과실 담당인 천OO 씨, 염OO 씨 외에 4명의 작업자에게 폐수 제거 작업을 지원하라고 지시했다. 이에 천OO 씨는 위험물 제조소 뒤편 창고에서 펌프 1과 엑셀파이프(XL Pipe: 온수 온돌용, 산업용, 위생 급수용으로 사용되는 PE 배관)를 운반해 여과실에 갖다 놓았다.

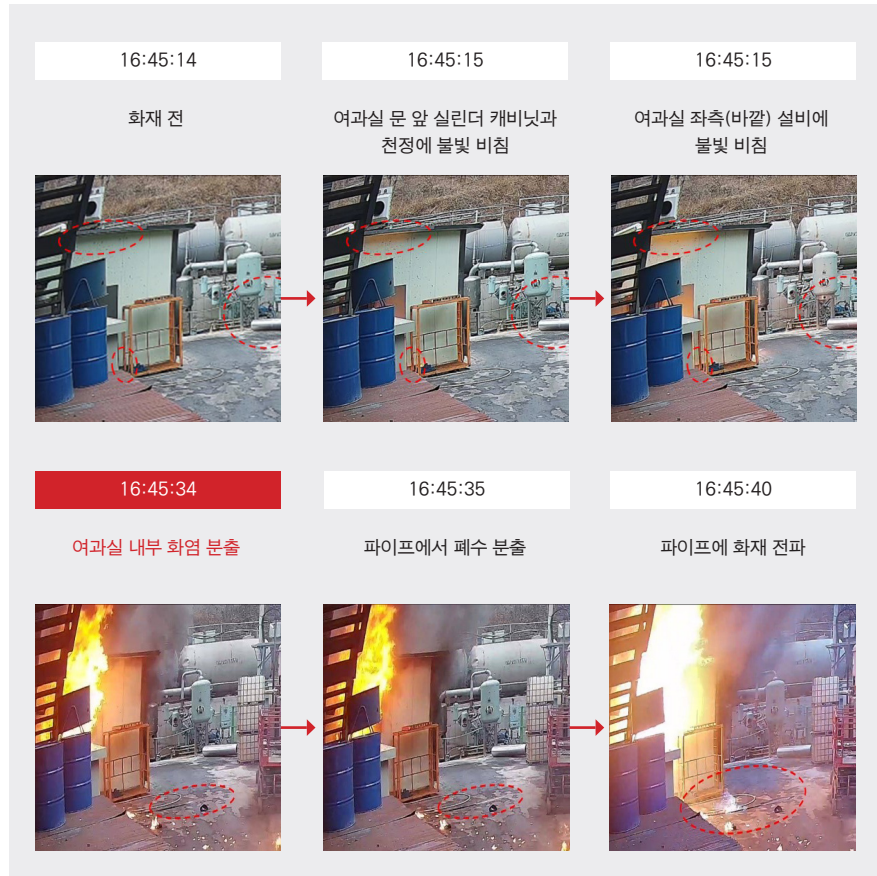
오후 4시 29분경, 천OO 씨와 염OO 씨가 엑셀파이프를 정리하고 펌프1을 여과실 앞문 앞에 설치했다. 펌프1 흡입 측 엑셀파이프는 여과실 우측 구석 집수조에 던져 놓고 토출 측 엑셀파이프는 여과실 앞문 좌측의 드럼에 연결했다. 나머지 4명은 폐수 제거 작업을 돕기 위해 대기했다.

오후 4시 45분경, 염OO 씨가 여과실 앞문 앞에 설치된 콘센트에 펌프1의 전선 플러그를 연결했고, 펌프를 가동한 지 얼마 지나지 않아 불이 났다.

화재가 처음 시작된 곳은 어디인가?

불이 워낙 순식간에 확산된 터라 현장에 있던 재해자들조차 처음 화재가 시작된 곳이 어디인지 알지 못했다. CCTV 분석을 통해 발화 지점과 이후 화재가 어떻게 진행됐는지 당시 상황을 파악할 수 있었다.

처음 화재가 시작된 곳은 여과실 안이 아니었다. 여과실 입구의 실린더 캐비닛 구조물과 여과실 문 바깥 천장으로 불빛이 비치는 것을 볼 때, 불은 여과실 문 앞에서 시작됐다. 그리고 나서 약 0.1초 후 여과실 내부에도 화재가 시작됐다.



시간 순서별 CCTV 화면

여과실의 앞, 측면 문 바깥으로 화염이 뿜어져 나온 후 여과실 내부에서만 화재가 진행됐다. 이를 통해 유증기는 여과실 내부에서만 발생해 연소 범위를 형성하고 있었으며 외부로 흘러나와 있었을 가능성은 크지 않다고 볼 수 있다. 여과실의 화재가 시작되고 여과실 앞쪽 엑셀파이프를 통해 폐수가 분출되기 시작하는데, 약 5초 후 폐수가 뿜어져 나오는 파이프가 화재가 확산됐다.

불이 난 이유는 무엇인가?

화재가 발생하려면 3가지 요소 즉, 가연물(연료)과 점화원, 공기(산소)가 있어야 한다.

먼저 가연물을 살펴보면, 유수 분리조에서 흘러 넘친 폐수의 기름 성분은 A 기업이 생산하는 열분해유와 동일한 성질을 갖는다. A 기업은 3개월에 한 번씩 한국석유관리원에 의뢰해 생산 제품의 성분 분석을 실시하고 있는데, 2022년에 실시한 총 4회의 시험 결과 A 기업에서 생산하는 열분해유는 30℃~39.5℃ 범위의 인화점을 갖는 것으로 확인됐다. 이처럼 인화점이 일정하지 않은 이유는 입고되는 원료(폐플라스틱)에 따라서 생산되는 제품의 인화점이 달라지기 때문이다.

열분해료를 거친 열분해유는 냉각수를 사용해 냉각과정을 거치므로 인화점 이상으로 유지됐을 가능성을 배제할 수 없으며, 사고 당일에 충분히 냉각되지 못했거나 인화점이 낮은 열분해유가 생산됐을 가능성도 있다. 이로 인해 인화성 유증기가 발생해 여과실 내에 화재위험분위기를 형성했을 것으로 추정된다.

다음으로 점화원이 무엇이었는지를 살펴보면, 여과실 앞쪽 펌프 1에 전기를 공급하기 위해 펌프1 옆에 꽂음접속기(통명: 3구 멀티탭)를 놓았는데, 사고 이후 펌프1의 전원 플러그부 조사 결과 플러그 도체 측면에서 기름 약



펌프1 전원 플러그부의 용융흔

2.8mm의 커다란 용융흔(Large Arc bead: 녹은 흔적)이 발견됐다. 전기적 용융흔은 화재 원인 판정에 있어서 결정적인 증거로 작용하는 중요한 요소 중 하나다. 이로써 콧음접속기에 펌프1의 전원 플러그를 콧음에 전기가 공급된 시점 또는 그로부터 수초 이내 시점에서 발생한 스파크에 의해 유증기가 점화된 것으로 추정할 수 있다.

마지막으로 유증기가 흘러 넘친 곳은 앞쪽과 옆쪽 방화문이 개방된 여과실이었기 때문에 외부 공기가 내부에 충분히 유입돼 있었다. 즉, 공기가 화재의 산소 공급원으로 작용했던 것이다.

사고를 피할 수 있는 기회는 여러 차례 있었다

그렇다면 사고를 막을 수는 없었을까?

단순해 보이는 사고이지만 안전 장치를 마련해 사고를 피할 수 있는 기회는 여러 차례 있었다.

유수 분리조의 수위를 관리하는 장치가 있었다더라면...

유수 분리조는 폐수를 받는 탱크(용량 7,000L)인데 윗부분은 개방된 구조였다. 작업자들이 유수 분리조 안의 상태를 육안으로 확인해 폐수 위에 떠 있는 기름 성분을 플라스틱 바가지로 떠내기 위해 별도의 뚜껑 없이 운영됐다.

문제는 유수 분리조 안의 폐수 수위가 높아졌을 때 넘치지 않도록 관리할 수 있는 장치가 없었다는 점이다. 작업자들에 의하면 사고 이전에도 여과실의 펌프가 고장나 폐수가 넘친 적이 있었다. 폐수의 양이 적을 때는 기름걸레로 닦아냈고, 폐수의 양이 많을 때는 펌프를 이용해서 물을 빼냈다. 근원적으로 유수 분리조의 폐수가 넘치지 않도록 관리하는 장치를 마련하지 않고 너무나도 안일하게 대응했던 것이다.

유수 분리조에 폐수가 일정 수위 이상 찼을 때 설비를 비우거나 유수 분리조로 공급되는 폐수의 흐름을 차단할 수 있는 시스템이 있었다면, 인화성 기름 성분을 포함한 폐수가 흘러 넘치면서 인화성 유증기가 주변 점화원에 노출되는 일은 없었을 것이다.

사고 이후 A 기업은 유수 분리조의 용량을 증설했고, 유수 분리조에 폐수의 레벨 센서와 레벨 게이지를 달아서 용량의 80% 이상 폐수가 차면 유입이 차단되도록 조치를 취했다.



화재 진압 후 여과실 내부



사고 후 여과실 외부에 놓인 유수 분리조

인화성 물질에 의한 화재·폭발 위험성을 인식하고

교육했다더라면...

A 기업은 폐수에 인화성 액체인 열분해유가 일부 포함돼 있음에도 불구하고 폐수를 담는 유수 분리조를 인화성 물질 취급설비로 관리하지 않았다. 또 유수 분리조와 여과기 등에서 유증기가 발생할 수 있다는 사실을 알면서도 여과실을 가스폭발 위험장소로 설정하지 않았다. 심지어 2022년 11월 위험성평가를 실시할 때도 여과실에 대해서는 특별한 위험성이 없다고 판단해 실시하지 않았다.

이뿐만이 아니다. 위험물 취급에 대한 적절한 교육이 이뤄지지 않아 작업자들이 기름 성분이 포함된 폐수를 제거할 때 화재가 발생할 수 있다는 위험성을 인지하지 못했다.

만약 A 기업에서 생산하는 열분해유와 생산 공정에서 발생하는 인화성 물질에 의한 화재·폭발의 위험성을 정확히 인식했다더라면, 그래서 위험물을 취급하는 데 대한 교육을 철저히 실시하고 화재위험이 발생할 수 있는 물질이나 작업으로부터 근로자를 보호할 수 있도록 공정을 설명하며 작업 절차에 대한 교육을 확실히 했더라면, 비극적인 사고는 발생하지 않았을 수도 있다.

공장을 가동하기 전에

법적 의무사항을 검토했다더라면...

A 기업은 2022년 7월부터 열분해유 제조 설비를 가동했다. 인화성 액체를 제조·취급·저장하는 설비를 보유한 사업장이지만 공정안전보고서를 작성하지 않았다. A 기업의 대표이사에 의하면, 사업계획에 대해 지자체로부터 승인을 받을 때도 공정안전관리제도에 대한 설명이 없었고, 열분해유협

회에서도 기존에 공정안전보고서를 제출해 심사를 받은 업체가 없다 보니, 공정안전보고서를 작성해서 심사를 받아야 한다는 사실 자체를 알지 못했다고 했다. 안전 관련 법규에 대한 지식과 정보가 부족했던 것이다.

최근 폐플라스틱 열분해 사업장이 증가하면서 「산업안전보건법」에 따른 공정안전보고서 및 유해방지계획서의 대상인지 여부를 모르고 설치되는 경우가 있다.

또한, 폐플라스틱 열분해 설비의 안전장치 미설치, 공정관리 미흡, 열분해가스 누출 등의 원인으로 인한 화재·폭발 사고가 다수 발생하고 있지만 관련 업계의 안전 실태는 명확하게 파악되지 않고 있는 실정이다. 이는 폐플라스틱 열분해 사업과 같이 새로운 산업으로 등장한 업종의 안전관리가 아직 체계적으로 이루어지지 못하고 있다는 사실을 보여주는 단적인 사례다.

사고가 난 후 공정안전관리 적용 대상이라는 사실을 알게 된 A 기업은 바로 컨설팅 업체와 계약을 체결했고, 안전관리 체계를 세우며 공정안전보고서를 작성해 제출했다. 그리고 약 4개월 후인 2023년 6월, 공정안전보고서 심사 결과 ‘조건부 적정’ 즉, 보고서의 심사 기준을 대부분 충족하고 있으나 부분적인 보완이 필요하다는 통보를 받았다.

신산업일수록 위험에 대한 감수성을 높여야 한다

전 세계적으로 ESG(환경·사회·지배구조) 경영이 확산되면서 기업 운영에 있어서 친환경이 필수인 시대가 됐다. 특히 기후변화에 대한 대응으로 2050년 탄소중립 달성이 목표가 되면서 순환경제의 일환인 폐플라스틱 재활용 사업은 더욱 인기가 높아지고 있다.

폐플라스틱 재활용 사업 중 최근 주목받고 있는 열분해 사업은 현재 상업화 초기 단계다. 한국산업안전보건공단의 연구보고서에 의하면, 2022년 기준으로 국내 폐플라스틱 열분해 사업장은 20여 개이며, 사업장의 근로자 수는 대부분 20인 미만으로 영세한 수준이다. 소규모 사업장이고 운영기간이 짧은 탓에 체계적인 안전관리가 이뤄지지 못하고 있는 경우가 많다. 실제로 2017년부터 2021년까지 5년간 폐플라스틱 열분해 사업장에서 16건의 화재·폭발 사고가 발생한 것으로 파악됐다. 여러 건의 사고가 발생한 사업장이 있는 점을 고려하더라도 사업장 수가 20여 개 수준인 것을 감안하면, 다른 산업에 비해 상대적으로 사고 발생 비율이 높은 것이다.

더욱 심각한 문제는 열분해 사업이 영세한 신산업 분야인 만큼 내국인을 고용하지 못해 외국인 근로자의 고용 비율이 높고, 이로 인해 중대재해 발생 가능성이 더 크다는 점이다. A 기업의 경우 근로자 수는 총 28명인데, 그 중 외국인 근로자는 10여 명에 이른다. 이번 사고로 사망한 근로자와 부상을 입은 5명 모두 외국인 근로자였다. 외국인 근로자는 낯선 환경과 언어 소통의 어려움 등으로 재해예방 지식을 습득하는 데 한계가 있다. 그러므로

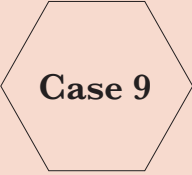
외국인 근로자의 근무 현장 실태를 파악해 그들의 눈높이에 맞는 안전보건 교육을 실시하고 안전문화를 확산시키기 위한 활동을 전개하는 등 사업장 내에서 한층 정교함을 발휘해야 할 필요가 있다. 세상에 소중하지 않은 목숨, 안타깝지 않은 죽음은 없기 때문이다.

현재 정부 정책이 폐플라스틱 열분해 사업을 확대하는 방향으로 진행되고 있기 때문에 앞으로 신규 사업장 수는 더 증가할 것으로 예상된다. 신규 사업장은 설비 운영 경험과 지식이 부족하기 때문에 사고에 노출되기 쉽다. 따라서 이들 사업장의 안전을 확보하기 위한 사업장 안전 조치 사항이 필요하다.



페플라스틱 재활용 공장의 페플라스틱 원료 보관 상태





Case 9

이차전지, 편리함과 위험이 공존한다

망간 용해조에서 발생한 수소 폭발 사고

이차전지 소재 관련 공장에서 폭발 사고가 일어났다. 작업 중 발생한 수소가 폭발해 두 명의 근로자가 화상을 입는 등 돌이킬 수 없는 상처를 입었다. 얼핏 보면 뜻밖에 일어난 불행한 일로 볼 수도 있는 재해. 그런데 이 사고는 정말로 예측 불가능 것이었을까? 적어도 사고를 예방할 방법은 있었다. 차세대 먹거리 산업으로 주목받고 있는 이차전지 산업 생태계의 안전 문제를 짚어본다.

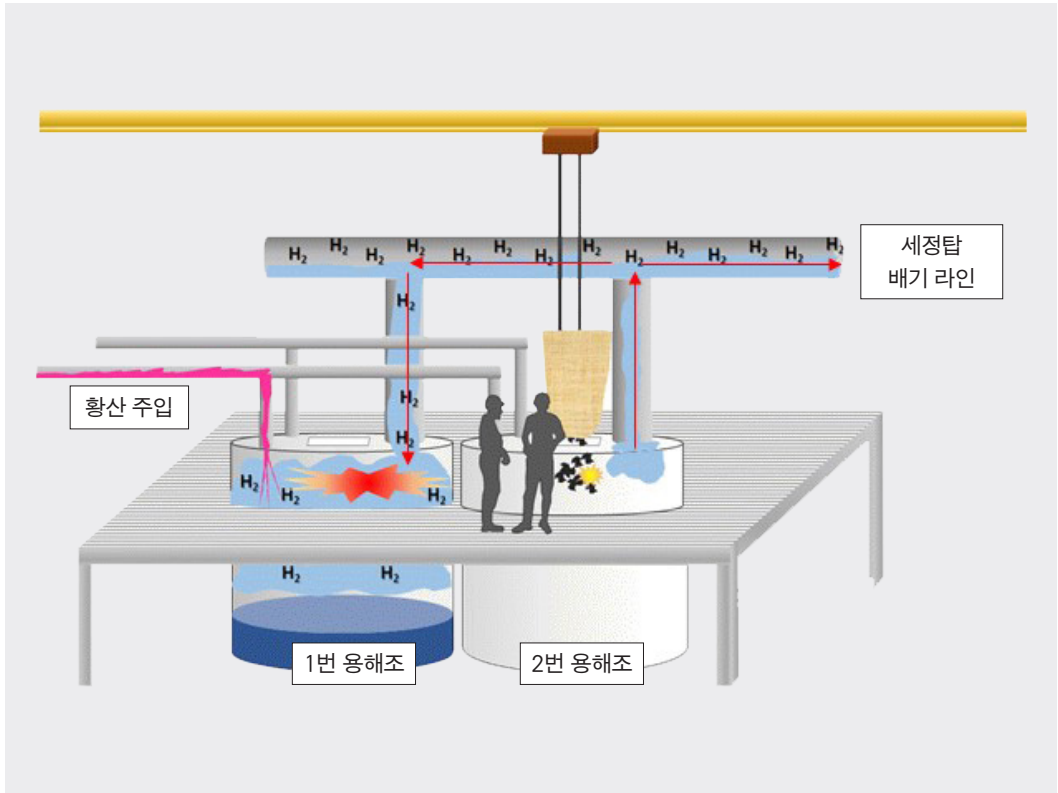
황산을 뒤집어쓰다

망간을 투입하던 중 옆의 용해조에서

폭발이 일어났다

2019년 7월 2일, 충북의 첨단산업단지에서 근무하는 천OO 씨는 오전 8시에 출근했다. 이차전지의 양극재용 전구체를 생산하는 A 기업에서 제조 팀 소속 기사로 일하고 있던 그는 전날부터 새로운 공정에서 일하게 된 터였다. 그 때문에 작업시간보다 일찍 출근해서 현장 정리를 하며 새로운 환경에 적응하려고 했다. 천 씨가 새로 일하게 된 공정은 용해 공정으로, 전구체 반응에 필요한 원재료를 용해하는 곳이다. 용해 공정은 니켈(Ni)과 망간(Mn)과 코발트(Co) 용해 공정으로 나뉘는데, 그날은 망간 용해 공정에서 작업을 시작할 차례였다.

용해 공정은 2인 1조로 작업을 진행했다. 그런 이유로 동료인 김OO 씨가 도착한 9시에 두 사람은 작업을 시작했다. 망간 용해 공정에는 2개의 망간 용해조(용질이 용매 속으로 확산돼 섞이게 하는 장치)가 있었다. 두 사람은 안쪽에 있는 1번 용해조에 크레인을 이용해서 망간 2t을 넣은 후, 연수 펌프의 조작 스위치를 눌러 연수 4,000L가 투입되도록 세팅했다. 연수 투입이 완료되자 망간과 연수의 투입량을 확인하기 위해 막대기를 집어넣어 수위를 측정했다. 그렇게 용해조의 수위를 확인한 후에는 황산 펌프의 조작 스위치를 눌러 황산 300L가 투입되도록 설정하고 현장을 정리했다.



사고 발생 당시 상황도

9시 30분경, 이번에는 1번 용해조 옆에 있는 2번 용해조에 망간을 넣기 시작했다. 그런데 망간을 넣기 시작한 지 5분여가 지났을 무렵, 갑자기 2번 용해조 내부에서 불꽃이 보임과 동시에 옆에서 ‘핑’ 하는 소리가 났다. 옆에 있는 1번 용해조에서 폭발이 발생한 것이었다. 폭발의 충격으로 1번 용해조의 황산 유입 배관이 파열되면서 파편이 튀고 황산이 쏟아졌다. 강한 산성을 띠는 황산은 한 방울만 튀어도 옷을 뚫고 피부까지 닿아 심각한 화상을 일으킬 수 있는 급성 독성물질이다. 황산이 몸으로 튕 것을 감지한 두 사람은 재빨리 뛰어나가 긴급 샤워시설에서 몸을 씻었다.

폭발 소리를 듣고 동료 작업자들이 뛰어왔다. 1번 용해조에서 화염이 치솟고 있었다. 곧바로 소화기를 이용해 진압하기 시작했지만 불은 쉽게 사그라지지 않았다. PVC 배관 등에 화염이 옮겨붙으면서 화재는 계속됐다. 9시 42분경, 옥내 소화전의 호스를 이용해 물을 뿌리자 점차 화염이 잦아들기 시작했다. 3분 뒤인 9시 45분경, 드디어 화염이 제거됐다. 하지만 물은 계속 뿌렸고, 9시 49분경 신고를 받은 소방차가 도착해 현장을 정리했다. 재해를 입은 두 사람은 인근 병원으로 이송됐는데, 천OO 씨는 몸통 및 양팔에 3도 화상과 안면부에 2도 화상을 입었고, 김OO 씨는 두피에 열상과 양팔에 3도 화상을 입고 입원 치료를 받았다.

2번 용해조에 망간을 넣고 있었는데 왜 옆에 있는 1번 용해조에서 폭발이 일어났을까? 그리고 폭발을 일으킨 것은 과연 무엇이였을까?

용해조는 왜 폭발했을까?

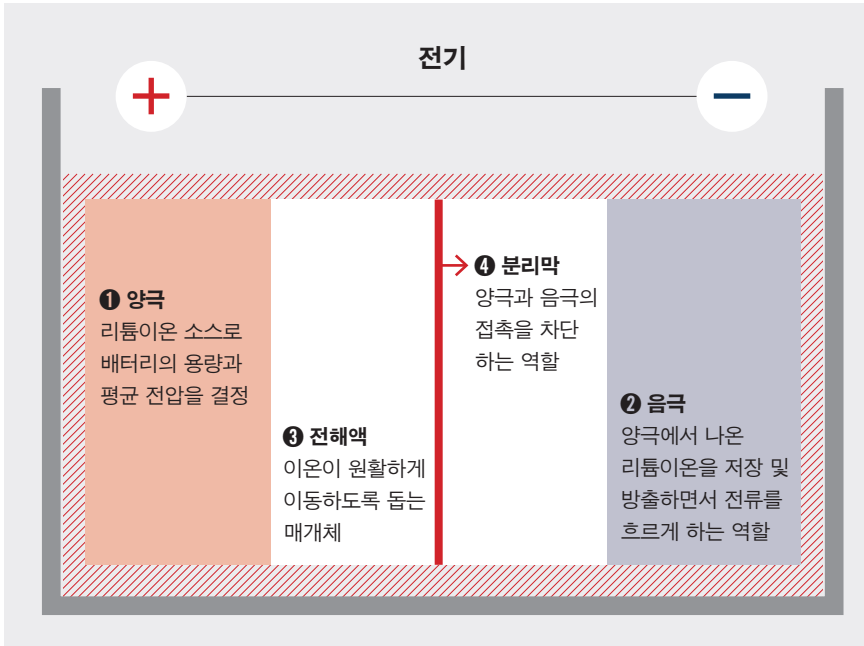
이차전지의 양극재용 전구체란?

사고가 일어난 원인을 파악하기 위해서는 먼저 A 기업에서 생산하는 이차전지의 양극재용 전구체란 무엇인지, 그리고 전구체의 생산 공정은 어떻게 이뤄지는지 이해할 필요가 있다.

세계 각국의 에너지 패러다임이 급격하게 바뀌면서 이차전지 산업은 차세대 먹거리 산업으로 주목받고 있다. 이차전지는 일회용인 일차전지와 달리 충전을 통해 재사용할 수 있는 전지다. 스마트폰과 노트북 같은 IT 기기는 물론 전기자동차와 에너지저장시스템(ESS) 등에 이미 널리 사용되고 있다.

현재 사용되고 있는 주류 이차전지는 리튬이온 전지인데, 기본적으로 리튬이온이 양극재와 음극재 사이를 이동하는 화학적 반응으로 전기를 생산하는 원리다. 이때 양극과 음극 사이에서 리튬이온의 이동통로 역할을 해 주는 물질인 전해액과, 양극과 음극이 닿지 않고 전해액에 다른 물질이 침범하지 않도록 방어해주는 분리막이 필요하다. 그래서 양극재, 음극재, 전해액, 분리막을 리튬이온 전지의 4대 구성요소라고 한다. 이 4대 구성요소 중의 하나인 양극재의 전(前) 물질이 바로 전구체다. 전구체란 어떤 화학반응을 통해 A라는 물질을 만들 때, 최종 물질인 A가 되기 바로 이전 단계의 물질을 의미한다. 즉, 이차전지의 양극재용 전구체란 양극재가 되기 이전, 양

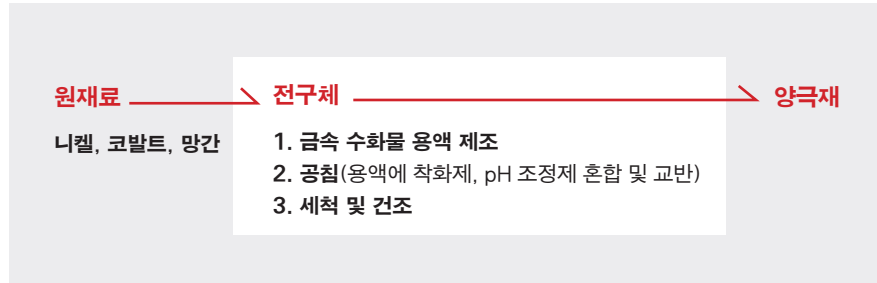
극재의 원료가 되는 물질을 뜻한다. 전구체는 이차전지의 특성을 결정하며 리튬과 결합해 양극재가 된다.



리튬이온 전지의 구조

전구체는 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn), 알루미늄(Al) 등의 금속을 사용해서 만드는데, 여러 가지 조합으로 만들 수 있다. 그중 A 기업이 만드는 것은 NCM 전구체*로, 니켈과 코발트, 망간을 주원료로 한다. NCM 전구체의 제조 과정은 우선 니켈, 코발트, 망간을 황산 등의 강산 용액에 용해시켜 금속 용액을 만든다. 만들어진 금속 용액을 혼합해 혼합 금속 용액을 만들고, 이 용액에 황산암모늄, 수산화나트륨 등을 혼합 및 교반하면 반응과 응집이 이뤄지면서 침전하게 된다. 이렇게 침전된 물질을 세척하고 건조하면 전구체가 완성된다.

* NCM 전구체(NCM Precursor): 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn)으로 이루어진, 양극재가 생성되기 이전 단계의 물질



NCM 전구체 제조 공정

사고는 첫 공정인 용해 공정 중 망간을 용해하는 과정에서 일어났다. 대체 무엇이 잘못된 것일까?

폭발을 일으킨 것은 무엇인가?

화재 및 폭발이 일어나기 위해서는 3가지 요소가 충족돼야 한다. 즉, 가연물과 점화원 그리고 공기(산소)가 필요하다.

먼저 가연물을 살펴보면, 1번 용해조에 투입된 망간(Mn)과 황산(H₂SO₄)의 반응에 의해 수소(H₂)가 발생했다. 수소는 인화성 가스로 폭발 범위가 매우 넓으며, 공기와 혼합되면 폭발과 함께 화재를 동반할 수 있는 물질이다. 망간과 황산의 반응으로 발생한 수소는 용해조 내부에 폭발분위기를 형성할 수 있는 충분한 양이 체류한 것으로 추정된다.

망간(Mn) 용해 화학식



- 황산(300L) 및 망간(2t) 투입량과 용해 시간(약 5분)을 고려하면 수소 발생량은 약 10.3m³로 추정된다.

다음으로 점화원이 무엇이었는지를 살펴보면, 사고가 발생한 1번 용해조에 인접해 있는 2번 용해조에 망간을 톤 백(Ton Bag: 1t 이상을 담을 수 있는 대형 마대)으로 투입하는 과정에서 망간 칩(Flake)의 충돌에 의해 스파크가 발생해 점화됐을 가능성이 있다.

사고 당시 2번 용해조에서 망간 투입 작업을 진행했던 작업자 천OO씨는 2번 용해조 맨홀부로 화염이 방출돼 눈썹과 머리카락을 태웠다고 진술했다. 또 사고 후 사업장에서 망간 칩(Flake) 낙하 시 점화원으로 작동 가능한 원인이 있는지 실험한 결과, 낙하할 때 충돌에 의해 상당한 스파크가 발생하는 것으로 확인됐다.

그러므로 2번 용해조에 투입 중이던 망간 칩의 금속 마찰이 점화원이 돼 2번 용해조에서 최초로 점화됐고, 이후 덕트를 통해 연소가 진행된 것으로 추정할 수 있다.

그런데 의문점은 남는다. 1번 용해조에서 발생한 수소와 2번 용해조의 점화원은 어떻게 만났을까? 사고가 일어난 중요한 원인 중 하나가 바로 여기에 있다.

사고를 막을 수는 없었을까?

세정탑(스크러버)을 적절한 주기로 점검하고 관리했더라면...

사고로 1번 용해조의 뚜껑이 탈락했고, 배기 덕트가 날아갔으며, 세정탑(스크러버, Scrubber) 본체가 파손됐다. 그중 세정탑에서 사고의 원인을 규명하는 데 결정적인 단서가 발견됐다. 세정탑은 액체를 이용해서 가스 속에 부유하는 고체 또는 액체 입자를 포집하고 정화하는 장치다. 용해조에서 수소와 황산 증기가 발생하면 세정탑에서는 황산 증기를 처리하고 수소는 외부로 배출한다. 그러나 사고 후 파손된 세정탑의 내부를 확인한 결과, 충전재 및 충전재를 지지하는 철망에 찌꺼기(슬러지)가 심하게 끼어 있고 배기 라인의 대부분이 막혀 있는 상태였다. 배기 효율이 현저하게 저하돼 용해조에서 발생한 수소가 정상적으로 세정탑을 통해 배출될 수 없는 상황 이었던 것이다.

A 기업은 공정안전보고서 작성 지침 중 '설비 점검 검사 및 유지 보수 계획'에 따라 세정탑이 정상 기능을 유지하도록 주기적으로 점검해 세정탑의 상태(덕트 막힘, 충전재 막힘 등)를 확인해야 했다. 하지만 그렇게 하지 않았다. A 기업이 세정탑의 내부를 점검하고 찌꺼기(슬러지)가 심하게 발생한 충전재를 교체한 것은 2016년 말이 마지막이었다.



사고 당시 폭발로 파손된 세정탑(스크러버)



세정탑(스크러버) 내부 충진재 지지 철망과 충진재



찌꺼기가 끼어있는 세정탑(스크러버) 내부 충진재

A 기업이 설치한 세정탑의 용량은 2019년 3월 증설분을 포함한 용량 계산서를 확인한 결과 1, 2번 두 용해조에서 발생한 수소를 배출하기에 충분했다. 그러므로 만약 세정탑 내부에 있는 충진재의 상태를 적정한 주기로 점검해서 발생하는 수소를 충분히 배출할 수 있도록 세정탑을 관리했다면, 1번 용해조에서 생성된 수소가 용해조 내부와 배기 덕트 내에 체류하면서 덕트로 연결된 2번 용해조로 확산돼 폭발분위기를 형성하는 일은 없었을 것이다.

용해조에서 발생하는 수소의 위험성을 정확히 인식하고 대책을 세웠더라면...

A 기업의 공정안전보고서 공정안전자료에는 망간 용해 공정에서 수소가 발생한다는 사실을 설명하고 있었다. 하지만 이에 대한 위험성평가 및 예방대책은 수립하지 않았다. 안전운전절차서에도 수소 발생에 대한 위험요인을 반영하지 않아 작업자들이 위험성을 인식하지 못했다.

용해조에서 발생하는 수소는 인화성 가스로 발생량 및 환기량을 고려해 용해조 내부 및 주변 장소에 대해 폭발위험장소로 선정하는 것을 검토할 필요가 있었다. 또 용해 공정의 작업을 시작하기 전 또는 작업 중에 수소 발생에 따른 위험성(수소의 체류 위험, 마찰에너지 위험)을 반영해 안전운전절차서를 작성하고 이행할 필요가 있었다. 하지만 이 모두가 이뤄지지 않았고 그 결과는 사고로 이어졌다.

사고 이후 A 기업은 사고 공정에 대한 전문가의 의견을 토대로 작업 방법을 개선하고 작업 매뉴얼을 보완하는 등 시스템에 대한 보완 개선 작업을 진행했다. 그 내용은 다음과 같다.

먼저 망간을 투입하면서 발생할 수 있는 스파크를 방지하기 위해 작업 표준을 바꿨다. 즉, 물을 먼저 투입하고 망간을 투입한 후 황산을 투입해 충돌에 의한 스파크가 발생하지 않는 작업 방법으로 변경한 것이다. 또 세정탑 내의 충전재 크기를 키워 찌꺼기(슬러지)에 의한 막힘을 최소화할 수 있도록 하고, 충전재 막힘 확인용 차압계를 설치해 주기적으로 막힘을 확인할 수 있도록 하는 등 세정탑이 적절한 성능을 유지할 수 있도록 관리 방법을 강화했다. 그리고 덕트에 풍속계를 설치해 풍속이 유지되고 있는지 확인할 수 있도록 하고, 이상 시 알람이 울릴 수 있도록 했다.

신산업 분야에서도 안전은 타협의 대상이 아니다

리튬이온 전지의 제조 과정에 잠재된 위험성

이차전지 산업이 지난 몇 년간 가파르게 성장해 온 데다 우리나라 배터리 제조업체 3사가 배터리 제조 강국화를 이끌면서 관련 생태계도 발달하고 있다. 정부 또한 탄소배출 감축 및 차세대 먹거리 산업으로 주목받고 있는 이차전지 산업 육성을 위해 2023년도 특화단지 4곳(청주·새만금·포항·울산)을 지정해 광물 가공부터 소재, 셀(배터리의 기초 단위), 재활용까지 국내 이차전지 산업의 밸류체인을 완결하고, 전고체·리튬황 등 차세대 이차전지 개발을 강화하기 위한 기반 구축을 목표로 하고 있다.

하지만 빛이 있으면 어둠도 있기 마련이다. 리튬이온 전지의 광범위한 사용과 대응량화에 따라 스마트폰 배터리 발화 사고와 전기차 화재 등 다수의 화재 사고가 발생하고 있다. 이로 인해 리튬이온 전지의 화재 위험성, 즉 열폭주(Thermal Runaway)와 재발화(Reignition)라는 독특한 화재 특성이 널리 알려지게 됐다.

이처럼 소비자가 사용하는 최종 제품에서 일어나는 사고뿐만 아니라 리튬이온 전지의 생산과 보관·취급하는 과정에도 여러 가지 위험성이 잠재돼 있다. 양극재와 음극재의 생산 과정 중 건조 공정 등에서 사용하는 인화성 물질 및 가연성 분진의 화재·폭발 위험성, 그리고 인화성 액체인 전해액의 생산 및 사용 과정에도 화재·폭발의 위험성이 있다.

실제로 이차전지 관련 사업장에서 사고가 잇따르고 있다. 2019년 12월 충북에 있는 한 분리막용 필름 제조 공장에서는 배관 작업을 하던 작업자 2명이 화학물질을 흡입해 병원으로 이송됐으나 결국 1명이 사망했는가 하면, 2022년 1월 충북에 있는 한 양극재 생산공장에서는 열매유 보일러의 팽창 탱크 2기가 폭발하면서 화재가 발생해 1명이 숨지고 3명이 다쳤다. 또 2023년 12월 충남에 있는 한 음극재 제조 사업장에서는 원료 저장고를 청소하던 중 내부에 저장돼 있던 실리콘파우더가 폭발하면서 화재로 이어져 3명이 숨지고 1명이 다쳤다.

사고를 막을 방법은 없을까? ‘어려울수록 기본으로 돌아가라’는 말이 있다. 위기상황을 대비할 묘책은 결국 기본에 충실한 것이다. 이차전지 산업처럼 새롭게 대두되는 분야에 있어서도 위험에 대응하는 가장 확실한 방법은 원칙을 지키는 것이다. 설비 유지관리를 철저히 하고, 근로자로 하여금 사용하는 화학물질 및 부산물의 정보를 정확하게 인식할 수 있도록 하며, 위험성을 반영한 안전운전절차서를 작성해 작업자가 안전하게 작업할 수 있도록 하는 것 등은 기본 중의 기본이다. 더불어 신산업 분야일수록 위험에 대한 감수성을 높일 수 있는 안전문화를 조성하는 게 중요하다. 근로자들이 산업 현장에서 기계, 설비, 장치 등에 어떠한 위험이 숨어있는지 알고, 주변 환경에 대해서도 위험을 느끼고 인지해야 한다. 안전을 위해서라면 과민하게 반응하고 적극적으로 대응하는 게 낫다. 아무리 미래 먹거리라 할지라도 안전과 사람의 목숨보다 중요하지는 않기 때문이다.



Case 10

음식물폐기물 처리장도 폭발 위험지대

바이오가스 폭발 사고

2021년 6월, 경상남도의 한 음식물폐기물 처리시설에서 가스폭발 사고가 발생했다. 사고는 음식물폐기물을 분해하는 소화조에서 발생했다. 소화조에는 폐기물이 잘 분해될 수 있도록 미생물과 고루 섞어주고 저어주는 교반기라는 장비가 있다. 그 교반기의 와이어가 끊어져서 새것으로 교체하는 공사를 하던 중에 폭발 사고가 일어난 것이다.

세 명의 작업자가 소화조 꼭대기에서 작업을 하고 있었고, 작업이 순조롭게 진행돼 공사를 마무리하던 중이었다. 그런데 그 순간 갑자기 소화조가 폭발해 버렸고 세 사람은 날아든 콘크리트 파편으로 인해 부상을 입었다. 음식물폐기물 처리시설에서 가스폭발 사고가 일어난 원인은 무엇일까. 가스폭발 사고를 방지하기 위해서 필요한 것은 무엇일까?

폭발해 버린 소화조

공공 음식물폐기물 처리시설의 교반기 와이어 교체 공사 하던 날

2021년 6월 29일. 경상남도 소재 S 업체의 대표를 포함한 세 명의 작업자는 A 공공 음식물폐기물 처리시설에 하자보수를 하러 갔다. 지난해 보수 공사를 했던 A 공공 음식물폐기물 처리시설의 소화조 교반기의 인양용 와이어가 끊어졌다는 것이다.

소화조는 음식물쓰레기, 가축 분뇨, 하수 및 산업 슬러지(찌꺼기) 등 유기성 폐자원을 무산소 상태에서 분해하는 시설이다.

소화조에서는 슬러지(찌꺼기)에 미생물을 넣어 분해를 시킨다. 교반기는 소화조 안에 들어있는 장치인데, 찌꺼기와 미생물을 잘 섞어서 바닥에 가라앉지 않도록 저어주는 도구다. 그래야 슬러지의 온도가 일정하게 유지되면서 분해가 잘 되는 것이다.

소화조가 직경 20m에 높이가 10m나 되는 엄청난 크기이다 보니 교반기도 그만큼 크다. 그 교반기를 들어 올렸다 내렸다 하기 위해서 소화조 꼭대기에는 인양기가 설치돼 있다. 인양기와 교반기는 와이어로 연결돼 있는데, 그 와이어가 끊어진 것이다.

와이어를 신품으로 교체하려면 일단 소화조 안에 있는 교반기를 꺼내놓아야 한다. 세 사람은 환기팬 2개와 교체할 새 와이어 하나, 교반기를 들어 올릴 수 있는 레버블록(Lever Block: 무거운 물건을 고정해 주거나 끌어 올

릴 수 있도록 해주는 도구), 기타 공구를 챙겨 들고 소화조 위로 올라갔다.

공사를 위해서 소화조로 슬러지가 들어오는 유입 밸브와 소화조 내에서 생성되는 가스를 배출하는 배출 밸브는 미리 잠가놓은 상태였다.

소화조 꼭대기로 올라간 작업자들은 먼저 소화조 위에 있는 맨홀을 개방했다. 흙, 악취가 올라온다. 음식물찌꺼기를 대량으로 모아놓은 곳이니 상상을 초월하는 악취가 코를 찌른다. 얼른 이동식 송풍기 2개를 이용해 맨홀 안쪽으로 바람을 불어넣었다. 환기를 하기 위해서다. 그리고 소화조의 인양기에 레버블록을 연결해 소화조 안에 들어있던 교반기를 밖으로 끄집어 올렸다. 와이어는 끊어졌지만, 교반기가 유압식이라 유압 호스를 잡고 끌어올릴 수가 있다.



소화조 상부에 설치돼 있는 교반기 인양용 장치들

9시 조금 넘어서 시작한 작업인데 교반기를 끌어 올리니 어느새 오후 4시였다. 이제 끊어진 와이어를 해체한 뒤, 새 와이어를 달아서 교반기를 소화조 안으로 넣는 작업이 남았다. 이미 시간이 늦었으니 내일 해야 하는 일이다.

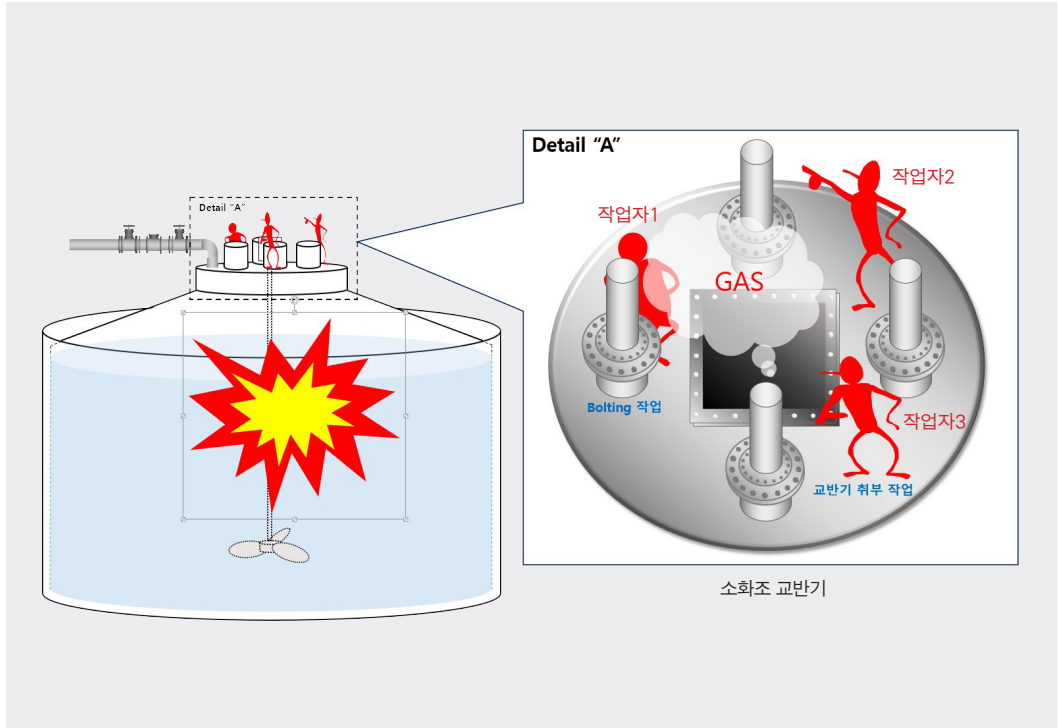
작업이 끝날 무렵 갑자기 들려온 폭발음, 그리고 날아온 콘크리트 파편

다음 날 오전 9시 30분. 세 사람은 다시 소화조 위로 올라갔다. 끊어진 와이어를 해체하고 새 와이어로 교체하는 작업이 계속됐다. 열려 있는 맨홀에선 계속 악취가 올라왔다. 작업이 대강 마무리된 것은 오후 4시 30분경.

S 업체의 대표가 레버블록을 사용하여 새로운 와이어를 장착한 교반기를 소화조 안으로 내리기 시작했다. 교반기를 다 내리고 나면 작업은 끝이다.

그 시각 나머지 두 명의 직원은 소화조 위에서 주변 정리를 하고 있었다. 작업을 위해 해체해 두었던 장치들도 원상복구를 시키고 정리 정돈을 한다. 그중 한 명은 인양기 지지대에 달려있는 워터트랩(Water Trap: 물이나 불순물이 들어가지 못하도록 막아주는 장치) 덮개를 다시 달아놓기 위해 볼트를 체결하던 중이었다.

전동 임팩트 드라이버를 사용해서 볼트를 체결하던 중 갑자기 훅 하고 불이 빨리 들어가는 소리가 들리더니 순간적으로 뜨거운 열기가 밀려 들어왔다. 멀리 떨어진 주변에서도 '슈웅' 하는 소리가 한동안 들려왔을 정도였다고 했다.



사고 상황 발생 개략도

세 사람이 뜨거운 열기에 놀라 옆으로 피신하는 찰나, 소화조에 덮여있던 콘크리트 뚜껑이 폭발해 날아가는 것이 보였다. 동시에 세 사람 쪽으로 콘크리트 파편이 날아들었다.

다행히 세 사람은 머리 쪽과 발에 찰과상을 입는 정도의 가벼운 부상을 입는 것에 그쳤지만 폭발한 소화조의 파편이 50m 떨어진 곳에서 발견됐을 정도로 큰 폭발이었다.

만일 신속하게 대피하지 못했더라면, 혹시 폭발이 더 컸다면, 더 큰 사고로 이어졌을 수도 있는 위험한 순간이었다.

음식물폐기물을 처리하는 소화조도 가스폭발 위험지대다

음식물폐기물 처리장에서 가스폭발 사고가 일어난 이유는?

음식물폐기물 처리시설은 말 그대로 음식물폐기물을 처리하는 곳이다. 그런 곳에서 왜 폭발이 일어났을까? 한마디로 이야기하자면 음식물 찌꺼기를 처리하는 과정에서 가스가 발생했고 그 가스가 폭발했기 때문이다.

사고가 일어났던 소화조에서 슬러지를 처리하는 과정을 살펴보자.

먼저 음식물폐기물에서 수분을 빼낸 찌꺼기, 곧 슬러지들을 소화조에 넣는다.

그 슬러지는 탄수화물과 단백질, 지방 등이 뒤섞인 유기물의 혼합체다. 여기에 그것을 분해하는 미생물을 투입하고, 37℃ 정도의 적절한 온도를 유지해 준다. 그 상태에서 교반기로 계속 휘저어 미생물과 슬러지가 잘 섞이게 해주면, 미생물이 슬러지의 유기물을 먹이삼아 소화를 시키면서 슬러지가 분해된다.

이런 분해 과정을 거치면 슬러지의 양도 줄어들고 환경을 오염시키는 유기물도 줄어들게 되는 것이다. 그리고 그 과정의 부산물로 발생하는 것이 메탄과 이산화탄소, 황화수소 등이 혼합된 가스다.

소화조에서 슬러지를 분해하는 과정은 사람이 음식을 먹고 소화하는 것과 똑같은 원리다. 사람이 음식을 먹으면 소화기관에서 소화 효소 등으로 음식을 분해하고, 그 과정에서 가스와 대변이 만들어지는 것처럼,

음식물폐기물을 소화시켜 가스를 발생시키는 것이다. 그래서 설비의 이름도 소화조이고 이곳에서 발생하는 가스도 소화가스라고 한다.

소화조 내에는 인화성 가스인 메탄가스가 남아 있었다

중요한 것은 이때 발생하는 소화가스의 주성분이 메탄가스*라는 것이다. 메탄이 70~80%가량이고 이산화탄소와 황화수소 등이 나머지를 차지한다. 소화가스의 대부분을 차지하는 메탄은 대표적인 인화성 가스이자 천연가스의 주요 성분이다.

우리가 도시가스로 사용하고 있는 것이 바로 천연가스이니, 음식물폐기물 처리시설의 소화조에서는 도시가스와 유사한 가스가 발생하고 있었던 셈이다.

실제로 소화조에서 발생한 가스에서 황화수소 성분을 제거하면 도시가스나 석탄발전소의 연료로 사용할 수 있는 바이오가스가 된다.

그렇기 때문에 소화조와 관련된 작업을 할 때는 내용물을 완전히 비우고, 철저한 환기를 해서 가스를 배출시킨 뒤에 작업을 해야 하고, 작업 전이나 작업 중에 가스 농도를 측정해야 한다.

그 원칙은 과연 잘 지켜졌을까? 사고 당시 소화조 내에는 75% 정도의 슬러지가 남아있는 상태였다. 내용물이 완전히 비워져 있지 않았다는 이야기다. 그리고 때는 6월 말. 특별히 가온 시설을 작동하지 않더라도 기온이 높아 소화조 속의 온도는 미생물이 슬러지를 분해시키기 적절한 온도가 유지되고 있었다.

게다가 와이어를 교체하기 위해 슬러지가 소화조에서 발생한 가스를 탈황시설로 옮겨주는 배출 밸브는 잠가놓은 상태였다. 결국 소화조 내에는 지속적으로 메탄가스가 발생해 머물러 있었던 셈이다. 그리고 이루어졌어야 할 별도의 가스 배출 작업과 가스 농도 측정은 이루어지지 않았다.

* 메탄가스(Methane, CH₄): 천연가스(Natural gas)의 주요 성분으로 난방이나 발전소 연료 등으로 사용된다.

사고 전날, 교반기를 꺼내기 위해 맨홀을 개방해 두었지만, 맨홀의 크기는 사방 80cm 정도에 불과해 지속적으로 발생하고 있던 메탄가스를 배출시키기에는 충분하지 않았다. 소화조에는 소화가스를 배출시킬 수 있는 호스도 달려있었지만 이것 역시 직경이 2cm 정도 되는 가느다란 호스로, 메탄가스를 충분히 배출시키기엔 턱없이 부족했다.

결과적으로 메탄가스가 지속적으로 발생하는 가운데 맨홀이 열려있었기 때문에, 오히려 맨홀 부근은 누출된 메탄가스가 공기와 섞여 가스폭발이 일어나기 충분한 조건이 마련돼 있었던 것으로 보인다.

메탄가스에 불을 붙인 것은

그렇다면, 메탄가스가 폭발하게끔 만든 점화원은 무엇이였을까?

당시 상황을 다시 돌아보면, S 업체의 대표가 수리가 끝난 교반기와 와이어를 소화조 안으로 내리고 있었고, 나머지 두 사람의 작업자는 주변 정리를 하고 있었다. 그중의 한 명은 인양기에 달려 있던 워터트랩을 원상 복구하기 위해 볼트를 체결하고 있었다.

그때 사용한 것이 전동 임팩트 드라이버이었다. 그리고 그 드라이버는 불꽃이 발생하지 않도록 특별히 제조된 폭발 방지형 드라이버가 아니라, 쉽게 불꽃이 일어날 수 있는 보통의 전동 드라이버였다.

드라이버의 취급설명서에도 해당 제품을 인화성 가스나 액체 주변에서 사용하지 말 것을 당부하고 있었지만, 작업자들은 현장에 인화성 가스가 발생하고 있는지도 인지하지 못한 상태였다.

결국 위험천만했던 이번 사고는 이러한 요인들이 복합적으로 작용하면서 발생했던 것이다.

소화조가 완전히 비워지지 않아 소화조에서는 계속 메탄가스가 방출되고 있던 상황이었고, 공사를 위해 현장인 소화조 상부의 맨홀을 열어 놓았기 때문에 가스폭발의 위험이 존재하고 있었다. 그런 가운데, 전기적으로 불꽃을 일으킬 수 있었던 전동 임팩트 드라이버를 사용함으로써 불이 났겨져 소화조가 폭발하게 된 것이다.



폭발 후 소화조 상부



교반기 인양장치가 설치되어 있고, 소화조 상부의 맨홀이 개방되어 있는 현장 사진

폭발은 손쉽게 막을 수 있었다

소화조가 가스 탱크와 마찬가지로라는 것을 명확히 알았다면

음식물폐기물 처리시설의 소화조는 인화성 가스나 인화성 액체를 보관하는 시설은 아니다. 그러나 실제로는 화학공장의 저장탱크와 마찬가지로 위험한 시설이다. 인화성 가스인 메탄가스가 만들어지는 곳이라 화재와 폭발의 위험이 똑같이 존재하기 때문이다. 그래서 소화조에서 작업을 할 때는 화학공장에서 탱크 작업을 할 때와 똑같은 안전 수칙이 적용돼야 한다.

구체적으로 이야기하면, 소화조의 교반기 와이어 교체 작업은 소화조 내부에 들어있는 교반기를 상부 맨홀을 통해서 끌어올려야 하는 작업이므로, 소화조 내에서 발생하고 있는 메탄가스가 누출할 위험이 존재하는 작업이었다.

따라서 작업 전에 반드시 소화조 안의 내용물인 슬러지를 완전히 비우고, 철저히 환기를 하여 소화조 내에 가스가 남아있지 않은 상태에서 작업을 해야 했다. 작업 전과 작업 중에 가스 농도도 반드시 측정해야 했다.

하지만 이번 작업에서는 소화조를 비우지도 않았고, 가스 배출을 하지도 않았다. 가스 농도가 어느 정도인지 측정하지도 않았다. 작업 전 이루어진 조치는 6월 28일, 첫 작업이 시작되기 직전에 사고가 발생한 소화조의 슬러지 유입 밸브와 가스 방출 밸브를 잠갔던 것이 유일했다. 해당 사업장에는 지켜져야 했던 안전 수칙이 지켜졌는지를 확인할 수 있는 어떠한 절차

도 마련돼 있지 않았고 당연히 안전을 위한 조치도 취해지지 않았다.

안전한 작업을 위해 원칙대로 소화조 내의 슬러지를 완전히 비우려면 많은 시간과 노력, 비용이 발생할 것이다. 환기 등을 통해서 소화조 내의 가스를 완전히 제거하려면 더 많은 시간과 비용이 발생한다. 하지만 그것이 안전 조치를 취하지 않은 이유가 될 수는 없다.

만일 이 작업의 위험성을 확실하게 인지하고 있었다라면 적어도 가스 농도 측정이라도 해야 했다. 그랬다면 가스 농도가 위험한 수준이라는 것을 알 수 있었을 것이고, 그 상태에서 작업을 계속할 수는 없었을 것이다. 결국 근본적인 문제는 작업의 위험성을 인지하지 못하고 안이하게 대처한 데에 있었던 셈이다.

비방폭형 전동 임팩트 드라이버를 점검만 했더라도

사고를 막을 수 있었던 또 한 가지의 손쉬운 방법이 있었다. 점화원이 되었던 전동 임팩트 드라이버가 방폭형인지를 확인하는 것이다. 모든 조건이 사고 당일과 똑같았다 하더라도, 전동 임팩트 드라이버가 방폭형이었다면 사고는 일어나지 않았을 것이기 때문이다.

모든 화재와 폭발은 가연물과 공기, 점화원 세 가지 요소가 모두 갖춰졌을 때 일어난다. 어느 한 가지의 조건이라도 충족되지 않는다면 화재나 폭발은 일어나지 않는다. 이번 경우에도 점화원이 되었던 전동 임팩트 드라이버가 방폭형이었다면 점화원이 사라지기 때문에 화재는 일어나지 않게 된다.

하지만 작업자들은 전동 드라이버가 방폭형이어야 한다는 사실을 잘 알지 못했고, 그것을 확인하고 제어하는 절차도 존재하지 않았다. 그 간단하고 비용도 들지 않는 안전 수칙을 지키지 않았기 때문에 사고는 발생했던 것이다.

지피지기면 백전백승, 위험을 알아야 사고를 막을 수 있다

이번 사고에서도 알 수 있듯이 화재와 폭발 사고를 막기 위해서는 엄청난 장비와 시스템이 필요한 것이 아니다. 마지막 보루가 되는 한 번의 경계심, 한 번의 확인 절차만 지키더라도, 사고는 방지할 수 있다.

그러기 위해서 가장 먼저 이루어져야 할 것은 위험이 어디에 어떤 방식으로 존재하는지를 아는 것이다. 소화조라는 것이 자칫하면 화재와 폭발이 발생할 수도 있는, 그래서 인명을 상하게 할 수도 있는 위험한 시설이라는 사실을 확실히 알아야 한다. 그래야 위험을 피할 방법을 찾을 수 있다.

사고를 방지하기 위해서는 단 하나의 방법만 존재하는 것이 아니다. 사고 방지와 안전을 위한 절차에는 여러 가지의 단계가 있고, 그 중의 어느



소화조에서 만들어진 메탄가스를 보관하는 탱크



한 단계에서라도 수칙이 지켜진다면 사고는 막을 수 있다.

이번 사고에도 여러 단계, 여러 번의 '만일'이 존재했다. 만일 처음부터 소화조를 완전히 비웠더라면, 만일 가스 배출과 환기를 철저히 해서 남아있는 가스가 없도록 했더라면, 그마저도 안 했다면 가스 농도 측정이라도 해서 위험한 상황인지를 확인하기만 했더라면. 마지막으로, 만일 작업자들에게 작업 현장의 공구가 방폭형이어야 한다는 걸 주의시키고 직접 확인만 했더라면, 사고는 일어나지 않았다.

경영자는 그 각각의 단계가 일상적으로 지켜지도록 시스템을 만들어야 할 것이고, 중간관리자들은 이 수칙들이 지켜지는지 재차 확인해야 한다. 그리고 일선의 근로자들은 스스로 작업환경이 안전한지 확인하고 정해진 수칙을 지켜야 한다.

각자의 영역에서 확인하고 지켜야 할 일을 해 나갈 때 사고 없는 현장은 만들어질 것이다.

바이오가스의 시대, 폭발 사고는 계속되고 있다

오폐수·폐기물 처리시설 폭발 사고 경계령이 내려졌다

지난 2022년 6월, 고용노동부는 오폐수·폐기물 처리시설 작업 중 화재와 폭발 사고 증가에 따른 경보 발령을 내리고 폐기물 처리, 용접, 용단 등의 작업을 할 때 안전 수칙 준수를 강력히 당부했다. 정화조나 분뇨 처리 작업, 폐수, 액상폐기물 탱크 보수 작업 중에 화재와 폭발 사고가 크게 증가했기 때문이다.

2015년부터 2022년까지 7년 동안에만 32건의 사고가 발생해서 52명이 사망했다. 2021년 6월에 발생했던 A 음식물폐기물 처리시설의 사고처럼 사망사고가 아닌 사례는 포함되지 않은 수치다.

그중 가장 많은 사고와 사망자가 발생한 곳은 오폐수·폐기물 처리시설이었다. 모두 18건의 사고가 발생해 30명이 사망했다. 전체 사망자의 57.7%에 달하는 수치다.

오폐수·폐기물 처리시설이란 A 음식물폐기물 처리시설과 같은 음식물 폐기물 처리시설을 비롯해 자원화 시설, 사업장 내의 오수·폐수, 폐기물 처리시설, 침전조 등이 해당한다. 그 밖에도 아파트 등의 정화조나 하수관로, 저장탱크 등에서도 사고가 빈발했다.

모두 메탄가스가 발생하는 곳이다. 그리고 대부분의 사고는 어김없이 안전 수칙을 지키지 않아 일어났다. 오폐수가 저장된 탱크의 상부는 메탄,

황화수소 등 인화성 가스가 상존하는 곳임에도 불구하고, 슬리지 같은 가연물을 제거하지 않거나 적절한 환기 조치를 취하지 않아 사고가 일어났다. 작업 전이나 작업 중에 가스 농도 측정도 이루어지지 않았다.

늘어나는 바이오가스 생산시설, 강조되어야 할 것은 안전

최근 음식물폐기물 처리장, 축산 분뇨 처리장 등은 바이오가스의 생산 시설로 더욱 주목받고 있다. 신재생 에너지의 하나로 바이오가스를 더욱 적극적으로 활용해 나가려 하기 때문이다. 정부에서는 2026년까지 바이오가스 시설을 140개 이상으로 확대하고 가스 생산량을 연간 5억m³ 수준으로 늘려갈 예정이다. 국내 도시가스 공급량의 2%에 해당하는 수준이다.

그렇게 된다면 음식물폐기물 처리시설은 음식물쓰레기를 처리하는 곳만이 아니라, 가스를 생산하고 공급하는 시설로 진화하게 된다. 음식물폐기물류 처리장이나 축산 분뇨 처리장도 마찬가지다.

다가오는 바이오가스의 시대, 함께 만들어가야 할 것은 화재와 폭발 사고의 위험이 없는 안전한 현장이다. 가스의 생산 및 보관 시설에는 생산과 처리, 유지, 보수 모든 단계에서 폭발의 위험이 존재하기 때문이다.

그래서 모든 현장에서 잊지 말아야 할 것, 가장 먼저 생각해야 할 것은 안전이다.

언제나 안전조치는 필수적으로 취해야 하고 안전이 확보되지 않은 곳에서는 작업하지 말아야 한다.

새로운 산업의 위험 특성과 안전 수칙 폐플라스틱 열분해, 이차전지, 바이오가스

정부의 친환경 정책과 함께 새로운 에너지 자원과 산업이 크게 성장하고 있다. 폐플라스틱 열분해, 이차전지, 바이오가스 등은 이러한 신산업의 대표적인 예로 친환경적이고 지속가능한 에너지솔루션으로 주목받고 있다. 전기차 시장의 성장과 함께 이차전지의 수요는 급증하고 있고 바이오가스와 폐플라스틱 열분해 산업은 자원 리사이클링 정책과 더불어 입지를 강화하고 있다.

신산업의 급격한 성장으로 인해 새로운 위험에 대한 대책 마련도 시급하다. 이차전지는 제조 과정에서 사용되는 리튬 등 화학물질의 위험성이 있다. 바이오가스는 메탄과 같은 가연성 가스를 포함하고 있어 화재·폭발의 위험이 크고, 폐플라스틱 열분해 산업은 인화성 액체 등으로 인한 화재·폭발의 위험이 있다. 이러한 신산업의 위험관리를 통해 안전하고 지속가능한 성장을 도모해야 한다.

폐플라스틱 열분해

플라스틱 폐기물 문제가 국제사회의 환경적 위험 요인으로 부상하고 있다. 플라스틱을 생산, 사용, 폐기하는 과정에서 다량의 온실가스가 배출되고 있고, 탄소중립 목표 달성을 위해 폐플라스틱 처리가 온실가스 감축 해결 방안으로 모색되었다. 2021년 폐플라스틱 열분해 처리 비중을 0.1%에서 2025년도 3.6%, 2030년도 10%까지 높이겠다는 '폐플라스틱 열분해 활성화 방안(2021년)'을 발표했다.

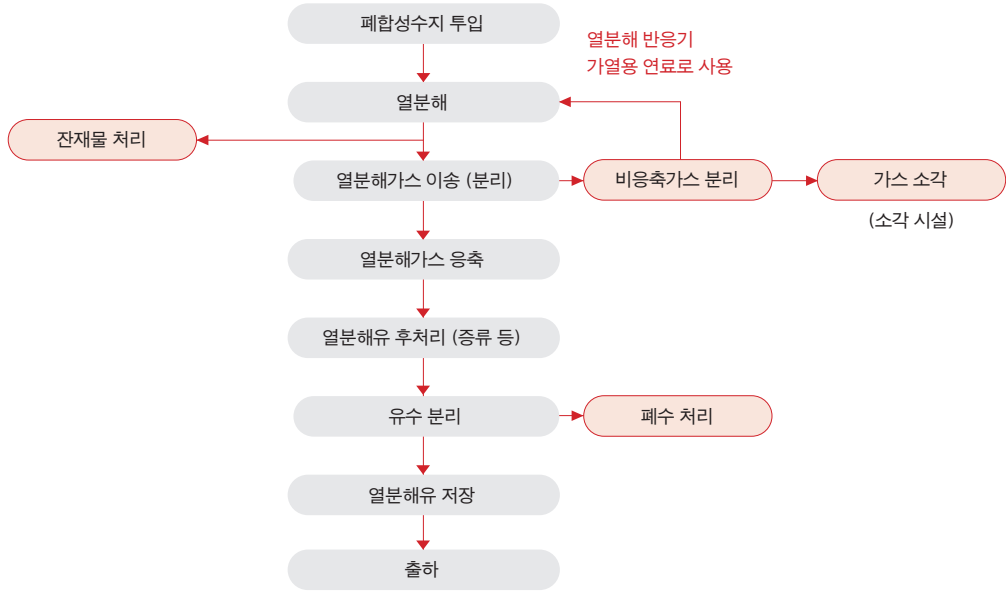
열분해 공정 개요

폐플라스틱을 무산소 또는 저산소에서 고온으로 가열하여 가스, 액체 오일, 탄화물(Char, Cokes 등)로 변환시키는 화학적 분해반응. 열분해 반응기, 가열기, 응축기, 저장탱크 등으로 구성됨.

열분해 공정의 위험성

- 열분해 반응기를 가열하기 위한 가열기의 연료(LPG, 등유 등)에 의한 화재·폭발
- HDPE, LDPE, PP 및 PS의 열분해 과정에서 발생하는 열분해 가스는 주로 메탄(CH₄), 에틸렌(C₂H₄) 및 부타디엔(C₄H₆)과 같은 인화성 물질이며, PC, PET 및 PVC의 열분해 시에는 인화성 물질의 형성과 함께 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO)와 같은 가스를 생성하여 질식·중독 위험도 상존
- 폐플라스틱의 열분해 반응 완료 후 남은 고형 잔재물은 대부분 탄소 함유량이 높기 때문에 분진폭발 위험성도 있음

- 열분해 된 탄화수소가 가열된 철이나 니켈이 함유된 반응기 내벽에 접촉해 수소가 분리되고 탄소 입자가 반응기 내벽에 침착되면서 코크층이 형성되는 코킹현상이 발생하면 코크층의 두께가 두꺼워지면서 반응기 파열의 원인이 될 수 있음



사고사례

발생년도	사고개요	재해자
2021	페플라스틱 열분해 반응기 내부압력 상승으로 반응기 전면 커버 고정볼트 파단되어 누출된 열분해 증기 및 가스 점화되어 화재	사망 2명
2021	열분해유 제조공정에서 원심분리기에 열분해유를 투입하여 시운전 중 화재·폭발	사망 1명
2020	열분해 반응기에 폐기를 투입 위해 커버를 개방하는 순간 화재	부상 3명

〈페플라스틱 열분해 산업의 안전수칙〉

- ① 열분해로의 압력상승 방지를 위한 주기적 배관 청소
- ② 가스누출 방지를 위해 정기적 설비 점검
- ③ 열분해로의 문을 개방하기 전 반드시 열분해로 냉각 실시
- ④ 소화설비 설치, 비상대피로 확보·유지, 비상대피훈련 실시

Note

이차전지

정부는 탄소배출 감축 및 차세대 먹거리 산업으로 주목받고 있는 이차전지 산업 육성을 위해 2023년도 특화단지 4곳(청주·새만금·포항·울산)을 지정하여 광물 가공부터 소재, 셀, 재활용까지 국내 이차전지 밸류체인을 완결하고, 전고체·리튬황 등 차세대 이차전지 개발 강화를 위한 기반 구축을 목표로 하고 있다.

[국가첨단전략산업 특화단지]

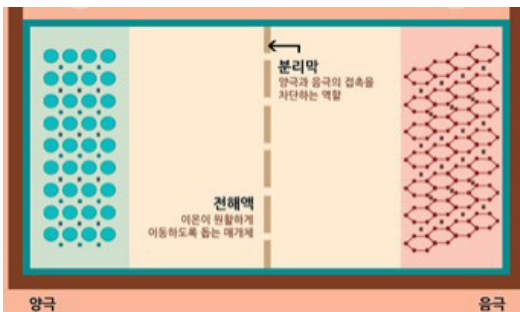
지역	주요내용	민간투자	기간
청주	리튬황·원통형 등 미래 이차전지 혁신거점	4.2조 원	~ 26년
포항	국내 최대 양극재 생산거점(연 70만 톤 이상)	12.1조 원	~ 27년
새만금	핵심광물가공 및 리사이클링 전초기지	6.4조 원	~ 27년
울산	이차전지 포트폴리오(LFP, 전고체 등) 다변화 거점	7.4조 원	~ 30년

(자료: 산업부)

이차전지 구성

- 이차전지는 일회용인 일차전지와 달리 충전을 통해 반영구적으로 사용할 수 있는 전지로, 양극과 음극의 전압 차이를 통해 전기를 생성 및 저장
- 기본 단위인 셀은 양극재, 음극재, 전해액 및 분리막으로 구성

이차전지(셀)의 구조



출처: 삼성SDI

이차전지 소재별 기능 및 구성물질

소재	기능	구성 물질
양극재	용량	리튬, 메탈 (니켈, 망간, 코발트, 알루미늄)
음극재	수명	흑연, 실리콘
전해액	안정성 등	전해질염, 용매, 첨가제
분리막	안정성	폴리에틸렌, 폴리프로필렌

이차전지 산업 위험성

- 리튬이온 배터리의 열폭주(Thermal Runaway)* 및 재발화(Reignition)**
 - * 배터리 셀의 자기 발열로 인한 급격한 온도 상승
 - ** 화재 후 화염이 진압된 후 재연소되는 현상
- 음극재 및 양극재 생산 중 건조공정 등에서의 인화성 물질 및 가연성 분진의 화재·폭발
- 인화성 액체인 전해액(DMC, DEC 등) 생산 및 사용 과정에서의 화재·폭발
 - ※ DMC(Di-methyl carbonate), DEC(Di-ethyl carbonate)

사고사례

발생년도	사고개요	재해자
2023	작업장 내 사이클로 점검 중 내부에 저장되어 있던 원료(실리콘파우더)에서 화재·폭발 발생	사망 3명, 부상 1명
2022	청주 소재 양극재 생산공장의 열매모일러 팽창 탱크 2기 폭발·화재	사망 1명, 부상 3명
2019	오창과학단지 내 이차전지 필름 제조 공정에서 배관 작업 중 화학물질 흡입	부상 2명

(이차전지 제조 산업의 안전수칙)

- ① 부식성 물질, 독성물질 등 물질 특성에 적합한 취급 및 관리 방안에 대해 근로자 교육
- ② 위험물질에 대한 위험성을 파악하고, 별도 저장·보관 등 안전 관리 방안 수립
- ③ 양극재, 전해액 등 취급하는 화학물질 외부 누출 및 수분에 접촉하지 않도록 유지·관리하고, 작업 시 개인보호구 착용
- ④ 소화설비 설치, 비상대피로 확보·유지, 비상대피훈련 실시

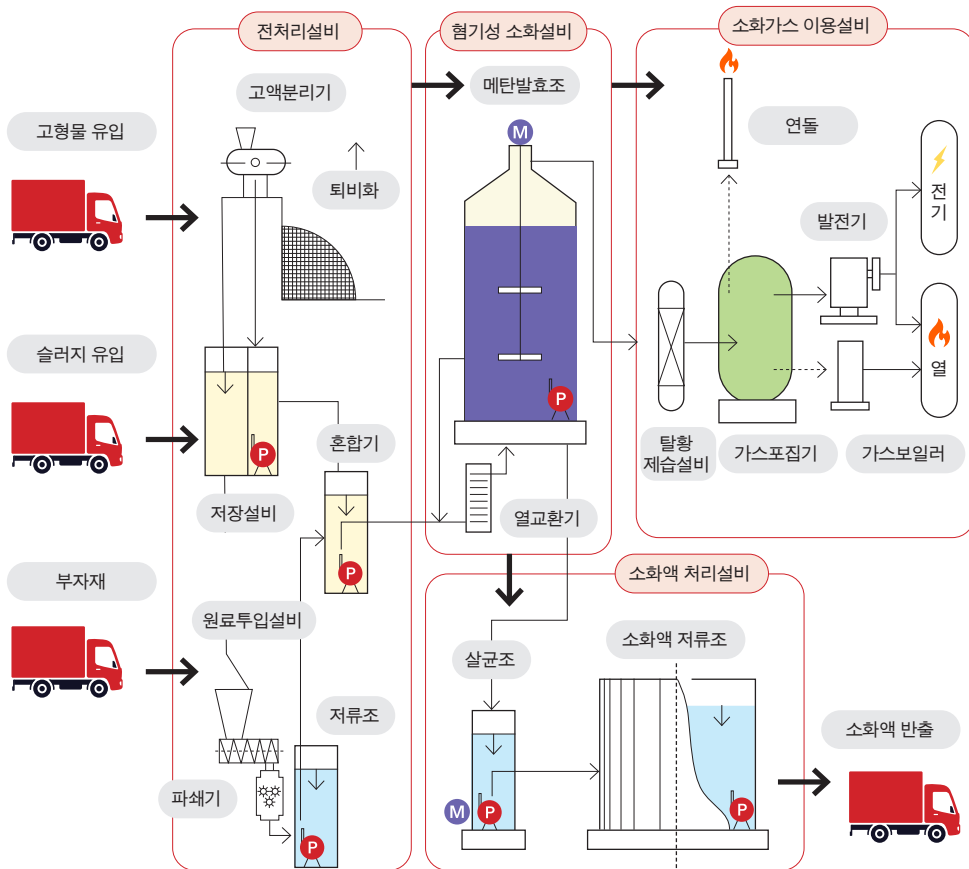
Note

바이오가스

환경부는 '23년도 「유기성 폐자원을 이용한 바이오가스의 생산 및 이용 촉진법」 제정하여 유기성 폐자원의 에너지 확대를 목표로 '26년까지 바이오가스 생산시설에 국고를 우선 지원해 전국 110개 소 시설을 계획하고 있다. 지자체는 수거한 유기성 폐자원으로 생산할 수 있는 바이오가스 최대량을 기준으로 '25년도 50%, '35년도 60%, '40년도 70%, '45년도 80% 생산을 목표로 하고 있다.

바이오가스 공정

- 음식물쓰레기, 가축 분뇨, 하수 및 산업 슬러지 등 유기성 폐자원에서 발생하는 가스를 말함
- 주로 무산소 상태에서 유기물을 분해하는 혐기 성소화 방식으로 생산됨



바이오가스화 시설의 모식도 (출처: 강준구 외, 유기성폐자원의 바이오가스화를 위한 적정 운영방안 연구, 2012)



바이오가스 위험성

바이오가스의 주성분은 메탄(53~70%)과 이산화탄소(30~47%)이며 미량의 황화수소, 암모니아, 일산화탄소를 포함하여 화재·폭발 및 중독 위험이 높음

사고사례

발생년도	사고개요	재해자
2022	음식물쓰레기 바이오가스 전환시설에서 용접작업 중 폭발	사망 1명
2021	하수슬러지 발효공정 소화조 상부에서 교반기 인양용 와이어로프 교체작업 중 폭발	부상 3명

〈바이오가스 산업의 안전수칙〉

- ① 밀폐공간, 슬러지 저류조 등에서 작업 전 설비에 환기 및 가스농도 측정
- ② 바이오가스 취급설비 주변에서 화기 작업 시 내용물 배출 확인 후 실시
- ③ 인화성 가스가 체류할 수 있는 공간에서 전기기계·기구 사용 시 적합한 성능의 방폭구조 전기기계·기구 사용
- ④ 소화설비 설치, 비상대피로 확보·유지, 비상대피훈련 실시

The background of the page is a photograph of an industrial chemical plant, featuring complex piping, metal structures, and a staircase. The entire image is overlaid with a semi-transparent orange color. The text is centered on the page.

Appendix

화학설비 및 부속설비

화학설비 및 부속설비

화학설비란?

- 화합물을 물리적·화학적으로 처리하는 반응, 혼합, 분리, 저장, 계량, 열교환, 성형, 가공, 분체 취급, 이송, 압축 등에 필요한 장치, 기계·기구 및 설비를 말함
- 특성 : 다량의 위험물(인화성 액체, 인화성 가스)을 취급하고, 고온 저온 및 고압의 운전조건으로 사고 발생 시 화재·폭발·누출 등으로 피해 규모가 매우 큼

주요 화학설비

- 반응 또는 혼합장치: 반응기, 혼합기 등
- 분리장치: 증류탑, 흡수탑, 추출탑, 감압탑 등
- 저장 및 계량 설비: 저장 탱크, 계량 탱크, 호퍼, 사일로 등
- 열교환기: 응축기, 냉각기, 가열기, 증발기 등
- 점화기를 직접 사용하는 열교환기: 고로, 가열로, 보일러 등
- 이송 및 압축설비: 펌프, 압축기, 이젝터 등
- 부속설비
 - 이송 관련 설비: 배관, 밸브, 관, 부속류 등
 - 자동제어설비: 온도계, 압력계, 유량계 등
 - 비상조치 관련 설비: 안전 밸브, 파열판, 긴급차단 밸브, 긴급방출 밸브 등
 - 가스누출감지 경보설비
 - 폐가스 처리설비: 세정탑, 벤트스택, 플레어스택 등
 - 분진 처리설비: 사이클론, 백필터, 전기집진기 등

〈특수화학설비-「산업안전보건기준에 관한 규칙」 제273조〉

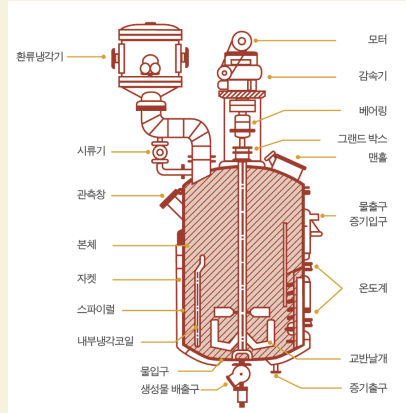
위험물, 기준량 이상 제조 또는 취급

- | | |
|--|---------------------------|
| ① 발열반응장치 | ④ 이상화학반응장치 |
| ② 분리장치(증류탑 등) | ⑤ 고온(350℃), 고압(980kPa) 설비 |
| ③ 가열물질온도가 가열되는 물질의 분해온도 또는 발화점보다 높은 설비 | ⑥ 가열로 또는 가열기 |

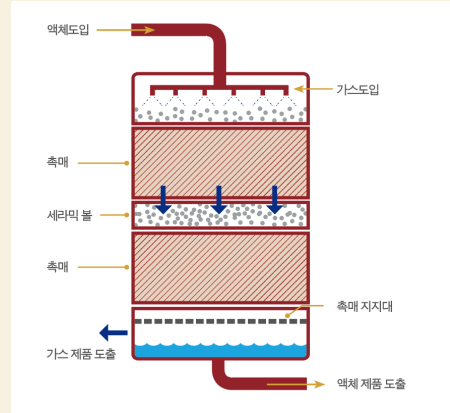
① 반응기(Reactor)

2종 이상의 물질을 반응시켜 다른 물질을 만드는 설비

- 유형: 회분식 반응기, 연속식 반응기



회분식 반응기



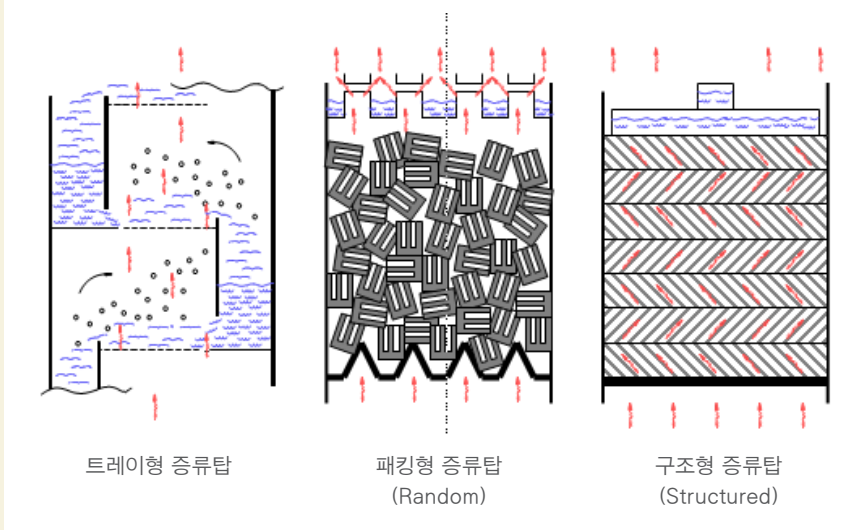
연속식 반응기



반응기 및 열교환기 등 부속설비가 설치된 현장 모습

② 증류탑(Distillation Tower)

끓는 점의 차이를 이용하여 물질을 추출하는 설비



실제 현장에 설치된 증류탑의 모습

③ 저장탱크(Storage Tank)

원료, 제품 등을 상압 또는 압력 저장하는 탱크

예) 상압탱크, 압력용기(탱크), 볼탱크, 사일로



상압저장탱크



압력저장탱크(볼탱크)



압력저장탱크(수평형 저장탱크)



사일로

④ 열교환기(Heat Exchanger)

두 개의 유체 간에 열을 주고받도록 설계된 설비

• 종류: 응축기, 증발기, 가열기, 냉각기



팬형 열교환기



튜브형 열교환기

5 가열로(Heater)

발생시킨 열로 내부에 물질을 가열하는 장치



원유 가열로



진공 가열로



가열로가 설치된 모습

6 펌프(Pump)

압력을 이용하여 배관을 통해 유체를 이송하는 기계

- 유형: 터보형 펌프, 용적형 펌프



원심 펌프



수직형 펌프

⑦ 압축기(Compressor)

기체를 압축시켜 압력을 변환하거나 이송하는 장치



압축기 및 부속설비

⑧ 배관 및 개스킷(Gasket)

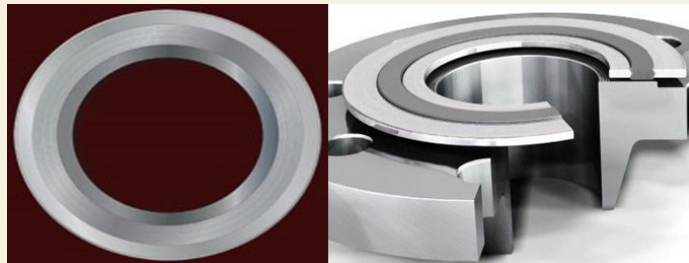
유체의 이송 통로 및 유체가 누설되지 않도록 기밀을 유지하는 부속설비



배관



비석면 개스킷



금속 개스킷

스파이럴 개스킷(Spiral Wound Gasket)

9 밸브(Valve)

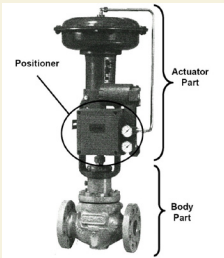
배관에서 유체가 흐르는 양을 조절하는 장치



밸브가 설치된 배관 모습(게이트 밸브)

10 조절 밸브

압력, 온도, 유량, 액위 등을 조절하기 위해 유체의 흐름을 자동으로 조절하거나 차단하는 장치



공기구동형 조절 밸브 구조 전기작동식 조절 밸브

공기구동형 조절 밸브가 설치된 모습

11 안전 밸브/파열판

- 안전 밸브: 과압 방지를 위해 정해진 압력 이상에서 밸브가 열리는 장치
- 파열판: 설정압력에 도달하면 유체가 분출하도록 파열되는 얇은 판



안전 밸브(레버식)



파열판

⑫ 가스누출감지 경보기

인화성 가스 또는 인화성 액체의 증기, 급성 독성물질, 산소 등의 농도를 측정하여 화재, 폭발, 중독 및 질식 재해를 방지하는 부속설비

- 경보 설정치
 - 인화성 가스 또는 인화성 액체의 증기: LEL(폭발 하한계)의 25% 이하
 - 급성 독성물질: TWA(시간가중 평균노출 기준) 이하
 - 산소: 18~23.5%



감지기 수신부



가연성 가스 감지기



산소·독성가스 감지기

⑬ 플레어스택(Flare Stack)

공정에서 배출되는 가스를 안전하게 소각시켜 대기 중으로 방출하는 설비

- 구성: 플레어헤더, 녹아웃드럼, 밀봉드럼 등



현장에 설치된 플레어스택의 모습

『과거의 사고를 반면교사로 - 화학사고 사례집』

발간에 도움을 주신 분들



고용노동부

산업안전보건본부장 김중윤

산재예방감독정책관 최태호

화학사고예방과 이지윤 과장
신백우 서기관
김성도 주무관
최원영 전문위원

산재예방

안전보건공단



전문기술실

정선식 실장
류재민 부장
오상규 차장
최영택 차장
최창열 차장
윤필상 과장
오동준 과장
김재중 과장

『과거의 사고를 반면교사로 - 화학사고 사례집』
발간에 도움을 주신 모든 분께
감사의 말씀을 드립니다.

e-Book 바로가기



과거의 사고를 반면교사로 - 화학사고 사례집

발행일 2024년 10월
발행인 김문수, 안종주
발행처 고용노동부, 한국산업안전보건공단
작가 김주영, 김성화
제작 대행 큐라인(02-2279-2209)

2024-전문기술실-429



『과거의 사고를 반면교사로 - 화학사고 사례집』은 ‘공공누리’ 출처표시-상업적 이용금지-변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다. 또한 『과거의 사고를 반면교사로 - 화학사고 사례집』에 실린 삽화, 기사는 저작권법의 보호를 받습니다.

우리가 할 수 있는 것은 단 한 건의 화학사고도 발생하지 않기 위해 안전에 만전을 기하는 것뿐이다. 경영자와 근로자 모두가 화학사고의 위험성에 대해 그 심각성을 확실하게 인지하고, 하루하루 모든 현장이 안전할 수 있도록 매일의 실천을 해 나가는 것이다. 이 사례집은 그 안전한 하루하루를 위한 하나의 초석이다.

