

과산화물에 의한 폭발사고



Contents



과산화물에 의한 폭발사고

I. 사고개요	4
II. 사업장 현황	6
III. 사고분석	11
IV. 사고발생 원인	20
V. 동종사고 예방대책	22
VI. 사고로부터 얻는 교훈	24
VII. 유사 사고사례 및 참고자료	29

용어 설명



디졸버(Dissolver)

고속으로 회전하는 임펠러를 이용하여 해당 물질을 혼합, 용해, 분산시키는 기계로서 분당 회전속도가 0~2,000RPM 정도로 고속회전 한다.



반응기(Reactor)

용기의 내부에서 원료인 액체 등이 유동하는 사이에 교반, 접촉, 가열 등에 의해 반응을 일으키는 설비이며 주로 밀폐 구조로 되어 있다.



물질안전보건자료(MSDS, Material Safety Data Sheet)

화학물질의 명칭, 성분, 함유량, 안전보건상의 취급주의 사항, 인체에 미치는 영향 등을 작성하여 화학물질을 취급하는 자에게 당해 화학물질에 관한 정보를 제공하기 위하여 작성된 자료를 말한다.



폭발성물질

물질자체의 화학반응에 의해 주위 환경에 손상을 줄 수 있는 온도·압력 및 속도를 가진 가스를 발생시키는 고체·액체 또는 혼합물을 말한다. 물질분류상의 그림문자는 로 표시한다.

□ 작 성

- 박승규 (안전보건공단 중대산업사고예방실)
- 우종운 (안전보건공단 중대산업사고예방실)
- 김남두 (안전보건공단 경기남부지도원 제조재해예방팀 팀장)

□ 검 토

- 김기영 (안전전문기관협의회, 안전보건공단 사고조사위원)
- 이재학 (한국산업기술대학교, 안전보건공단 사고조사위원)
- 이신재 (안전보건공단 기술이사)
- 이충호 (안전보건공단 중대산업사고예방실 실장)

『과산화물에 의한 폭발사고』 사례 연구

2013-중대산업-1201

발 행 일 : 2013년 11월 일
발 행 인 : 한국산업안전보건공단 이사장 백 현 기
발 행 처 : 한국산업안전보건공단 중대산업사고예방실
주 소 : 인천광역시 부평구 무네미로 478
전 화 : (032) 510-0848
F A X : (032) 512-8315
Homepage : <http://www.kosha.or.kr>

※ 무단 복사 및 복제하여 사용하는 것을 금지함

참고문헌

1. 유기과산화물의 혼합위험특성 연구, 안전보건연구원, 2003
2. 유기과산화물의 열분해특성, 산업안전보건연구원, 2002
3. 산업안전보건용어사전. 한국산업안전보건공단 ; 2006
4. 아미코트 사고조사 의견서 ; 한국산업안전보건공단, 2012
5. 화학공정안전 ; 이영순 외, 2006, 동화기술
6. KOSHA Guide E-47-2012 『가스 폭발위험장소의 설정 및 관리에 관한 기술지침』. 한국산업안전보건공단 ; 2012
7. KOSHA Guide P-89-2012 『회분식 공정의 안전운전지침』 한국산업안전보건공단 ; 2012
8. 방화방폭공학 ; 임태영 외, 2007, 선학출판사
9. 전문역량강화 「3S Program Step II 화학사고예방 기술지도 실무편」;한국산업안전보건공단 ; 2013

5

유기 과산화물

유기과산화물(Organic Peroxide)이란 2가의 -O-O- 구조를 포함하는 액체물질, 고체물질 또는 이들의 혼합물로서, 과산화수소의 수소원자 1개 또는 2개가 유기라디칼로 대체된 과산화수소 유도체로 볼 수 있다.

6

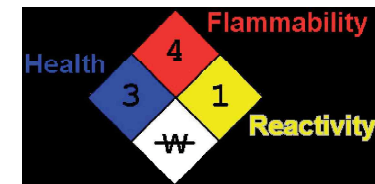
자기반응성 물질(Self-reactive substance)

자기반응성물질이란 산소의 관여가 없더라도 강한 발열 분해과정을 겪기 쉬우며 열역학적으로 불안정한 액체, 고체 또는 혼합물(폭발성물질, 유기과산화물 또는 산화성물질은 제외)을 의미한다.

7

NFPA(National Fire Protection Association : 미국방화협회)지수

응급 상황에서 위험 물질에 대해 신속한 대응을 하기 위해 미국방화협회에서 만든 지수로서 인체유해성, 인화성, 반응성, 기타특성의 4가지로 구성된 다이아몬드 모양의 표시이다. 유해성은 직업병 및 중독, 인화성은 화재, 반응성은 폭발 위험과 관련이 있으며 0~4단계까지의 5단계로 위험을 구분한다. 숫자가 높을수록 위험하다.



I. 사고개요

본 사고사례는 2012년 6월 18일 오전 11시 25분경 경기도 화성시 소재 (주)○○코트의 접착제제조 작업장에서 과산화물에 의한 폭발사고가 발생하여 4명이 사망하고 9명이 부상하였으며, 사고공장은 전파되고 인근사업장도 유리창이 파손되는 등 폭발의 충격파와 비산물로 인한 피해가 발생한 사고를 대상으로 하였다.



[사진 1] 폭발사고가 발생한 접착제 제조공정 모습

VII. 유사 사고사례 및 참고자료

사고사례 1

MEK-PO사용 중 이상반응으로 탱크 폭발

발생일시	2000. 8. 24(목) 03:00
사고장소	전남 여수시 화치동 ○○○○○
피해내용	6명 사망, 19명 부상
사고내용	MEK-PO 공정에서 제품 출하를 위하여 MEK-PO를 중간 생성물 저장용기에서 제품 저장용기로 이송 중 이상 고온에 의한 MEK-PO의 급속 분해로 용기가 폭발
원인	반응후 MEK-PO 중간생성물을 즉시 적절히 중화처리하지 않고 교반하여 일정온도(80℃)를 초과하면 MEK-PO는 라디칼을 형성하면서 급속 분해하여 폭발하는 위험성이 있으나 중간생성물 저장용기에서 적절한 중화처리가 되지 않아 폭발

사고사례 2

미량의 유기과산화물 석출에 의한 저장탱크 폭발사고

발생일시	2006. 3. 28(화) 06:05
사고장소	울산시 남구 매암동 ○○화학
피해내용	1명 부상
사고내용	냉매제조공정의 원료인 1,1,1-트리클로로에탄을 저장하는 탱크에서 이상반응으로 추정되는 폭발사고가 발생하여 저장탱크 뚜껑이 30m 정도 비산하고 탱크의 Shell이 찢어지면서, 탱크 바로 곁에 있던 근로자가 폭발압력에 의해 옆의 배관에 두부를 부딪쳐 상처를 입는 재해가 발생
원인	1,1,1-트리클로로에탄 Sludge에 포함되어 있던 아주 미량의 유기과산화물이 석출되면서 공기와 접촉하여 건조해지는 과정에서 마찰에 의한 폭발이 발생

교훈 6

공정안전관리(PSM) 제도와 같은 공정에 대한 사전 안전성 확보수단을 마련하여야 한다.

사고 발생사업장은 위험물을 취급·저장하는 양이 적기 때문에 공정안전보고서 제출대상에서 제외된 사업장이었으나, 결과적으로 좋은 공정안전관리를 확보할 기회를 상실한 것과 마찬가지로 볼 수 있다. 공장을 설립하기전 공정안전보고서 제출 제도를 통하여 적절한 위험성평가와 안전운전체계가 준비되고 이러한 내용이 관련 기관의 심사, 확인을 거쳐 사업장 내에 정착되도록 했다면 사고의 위험은 훨씬 더 낮았을 것이고, 폭발사고는 발생하지 않을 수도 있었다. 사고 원인에 따른 예방대책 내용 거의 대부분이 공정안전제도에서 수행되고 있는 사항임을 고려한다면, 향후 공정안전보고서 제출대상이 확대되는 방향으로 대상물질과 규정수량을 조정해야 할 충분한 이유와 교훈을 얻었다고 본다.

■ (주)○○코트는 아크릴 모노머를 용제에 희석시켜 반응시킨 후 첨가제를 섞어 제품을 생산, 공급하는 중소기업이다.

■ 2012년 6월 18일 오전 11시 25분경 접착제 제조작업 중 폭발사고가 발생하여 4명이 사망하고 9명이 부상한 폭발 사고로, 부상자 중에는 인근 3개 공장의 근로자 5명이 포함되어 있다.

■ 언론보도에서는 사망자에 대해서 실종으로 보도되었을 정도로 폭발로 인한 영향에 의해 사망자 4명은 행체를 알아볼 수 없도록 비산되었으며 인근 150m 정도 떨어진 인근공장에서 신체 일부가 발견되기도 하였다.

■ 폭발의 압력에 의하여 (주)○○코트 공장동 및 생산설비가 전파되면서 판넬구조의 건물외벽은 잘게 부서져서 비산되고 200m 떨어진 다른 공장에서도 공장 유리가 파손되었으며, 260m 떨어진 공장에까지 폭발 시 발생한 파편이 비레 되었다.

■ 이 사고를 통해서 사업장에서 충분한 사전안전성 검토 없이 과산화물, 폭발성 물질 등을 사용하여 시험생산을 시도하거나 임의로 취급하는 등의 안전의식의 부재에 대해 경종을 울리게 되었으며, 위험한 화학물질을 어떻게 안전하게 다루어야 하는지에 대해 모두에게 일깨워주는 계기가 되었다.

II. 사업장 현황

(주)○○코트는 접착제와 첨가제류를 주로 생산하는 사업장으로서 2004년 화성시에 설립된 사업장으로서 2010년도에 지금의 공장으로 이전하였고 사고가 발생한 시점인 2012년 6월까지 8명의 근로자가 근무하고 있었다. (주)○○코트가 사고발생 장소의 공장으로 이전하기 전에는 (주)○○미디어라는 사업장이 소재하고 있었으며, 2008년 동 사업장에서의 화재사고 이후 공장을 재건축하여 2010년 2월 (주)○○코트에 양도하였다.



[사진 2] 사고발생 전 사업장내 접착제 제조과정

교훈 5

중소기업도 화학사고예방과 공정안전성을 위한 전문기술이 필요하다.

흔히 중소기업사업장의 작업조건이 열악하거나, 안전보건의 수준이 낮은 것을 당연시하는 경우가 있다. 그러나 사업장의 규모가 작다고 화학사고의 위험이 감소되는 것은 아니며, 하나의 사고가 사업장에 미치는 영향을 고려할 때 중소기업사업장은 보다 더 철저한 안전보건을 추구해야 할 필요가 있다. 이를 위해서는 중소기업도 화학물질과 공정위험을 충분히 제어할 수 있는 충분한 수준의 안전보건기술 확보가 필요하며, 자체적인 공정안전기술의 확보는 물론, 공단 등 외부 전문기관으로 부터의 기술적, 재정적 지원도 충분히 활용해야 한다고 판단된다.

교훈 2

화학사고 예방을 위한 좋은 안전보건관리는, 좋은 표준작업절차에서 확보된다.

화학물질은 물질특성과 취급조건에 따라 폭발하거나 화재를 일으키거나, 누출의 위험이 잠재되어 있으며, 이러한 위험을 통제하기 위한 표준작업절차가 없을 경우 어떤 결과를 초래할 수 있는지 이번사고가 잘 보여주고 있다. 화학물질 취급에 있어 물질 MSDS의 내용과 공정위험성 평가결과를 토대로 안전 보건사항이 반영된 좋은 표준작업절차가 준비되어, 교육되고, 시행되어야 사고를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

교훈 3

화학물질로 인한 사고는 인근사업장, 주민에게도 큰 손실을 초래한다.

이번 사고는 작은 용량의 화학물질취급과 관련된 사고임에도 불구하고 폭발의 결과 사업장 대부분 근로자가 사망 또는 중상의 상해를 입었으며, 공장이 완파되고, 인근사업장과 주민에게도 큰 손실을 초래하였다. 또한 지역사회에 있어서도 화학산업에 대한 큰 우려를 초래하였다. 사고의 빈도가 낮다고 하여 중대산업사고의 위험을 간과하지 말아야 하며, 평상시 중대산업사고 예방을 위한 노력을 소홀히 하지 않아야 된다는 것을 깨닫게 해 주었다.

교훈 4

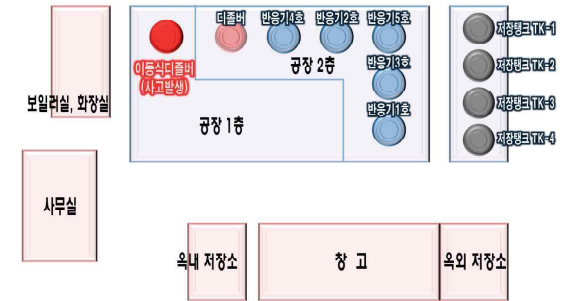
안전에 투자하는 비용은 재해로 인한 손실비용보다 훨씬 적게 소요된다.

근로자 사망 4명, 부상 9명, 사업장 전체 파손, 인근사업장 파손 등에 대한 직접적인 손실과 이로 인한 사업기회의 손실 등 사고로 인한 해당 사업장의 인적, 물적 손실과 인접

1 시설현황

보유설비 및 사업장 배치도

사고가 발생한 접착제 제조공장에는 사고가 발생한 이동식 디졸버가 1층에 설치되어 있었으며, 2층에는 반응기 5기, 고정식 디졸버(Dissolver)가 설치되어 있었다.

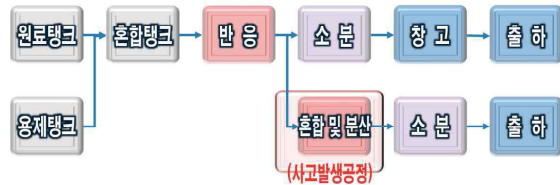


[그림 1] 사업장 배치도

2 사고과정

접착제 제조과정

접착제의 일반적인 공정은 원료 및 용제를 혼합시키고 반응기에서 반응 시킨 후 제품을 포장하고 출하한다. 생산하려는 제품특성에 따라 원료, 용제, 첨가제 등이 변경된다.



1) 재료입고

용제 및 원료를 옥외 저장탱크 및 옥내 창고에 보관한다.

2) 혼합

용제 및 원료를 계량하여 혼합탱크에서 혼합시킨다.

3) 반응

아크릴 모노머 등 원료를 용제에 희석하여 반응기에 투입하고 반응개시제를 투입한 다음 스티프로 승온하여 반응을 활성화시킨 후, 냉각수로 반응기 온도를 80~90℃로 조절하며 4시간 정도 반응시킨다.

- ① 원료 : 2-ethylhexyl acrylate, n-butyl acrylate
- ② 용제 : Toluene, Ethyl acetate
- ③ 반응개시제 : AIBN(아조비스이소부티로니트릴)

교훈 1

과산화물이나 폭발성 물질을 사용한 신제품 개발에는 제품의 사용에서부터 폐기까지 전과정을 걸쳐 확실한 위험성 검토와 안전성 확보가 필요하다.

이번 사고는 위험물질, 특히 과산화물질, 폭발성 물질을 사용하다 조건만 형성되면 큰 폭발이 유발되는 것을 보여주었다. 이와 같이 유기과산화물은 열이나 충격, 마찰뿐만 아니라 산, 염기 및 유기물과 같은 혼합/접촉금지 물질과의 반응에 의한 분해, 폭발의 용이성이나 위험성이 크게 증가하는 물질로서 새로운 화학제품을 개발에 사용될 경우 사전에 원료물질간의 상호 반응성에 대한 정량적인 위험성평가가 필수적인 물질이다. 또한 제조과정 중에 투입되는 원료물질과 반응결과 생성되는 물질과의 상호 반응성에 관한 자료는 반응온도, 반응압력, 교반속도 등과 같은 공정제어조건 수립에 반영되어야 한다.

사고 결과로 볼 때 도전성 코팅제와 같이 과산화물질을 원료로 하는 신제품의 개발 시에 있어 이러한 위험성이 충분히 파악되지 않았을 것으로 사료되며, 사고를 예방하기 위해서는 원료물질에 대한 충분한 MSDS 검토 및 유해 위험성 파악, 반응 메커니즘에 대한 조사, Lab - Bench - Pilot 규모의 실험 단계를 통한 적절한 위험성평가를 실시하고, 그 결과에 따라 적절한 안전운전계획 및 비상조치계획을 수립하는 것이 필요하다.

VI. 사고로부터 얻는 교훈

8명의 근로자가 근무하던 소규모 화학공장에서의 디졸버 폭발사고는 사업장 내 근로자중 4명 사망과 4명의 부상 등 전원의 상해 및 공장의 전파손실을 초래하였으며, 인근 사업장도 3개 사업장 5명의 근로자 부상 외에 건물, 유리창, 차량 등 많은 물적 피해를 초래하였다. 또한 동일한 위치에서 몇 년 전의 시차를 두고 사업장 이름을 달리하여 발생했던 사고와의 유사성으로 인하여 해당 지방공단뿐만 아니라 지역 전체에 있어 상당한 문제점을 야기하였다.

이번 사고 발생 후 대응에 걸쳐 많은 교훈을 얻을 수 있었다.



[사진 13] 인근 사업장에 폭발 잔해물이 비산된 모습



[사진 3] 반응기(Reactor)



[사진 4] 디졸버(Dissolver)

4) 혼합 및 분산(사고발생 공정)

디졸버(Dissolver; 용해기)는 반응이 끝난 중간제품에 주문 요구에 따라 용제, 송진 및 첨가제를 넣고 균일하게 혼합시킨다.

- ① 운전 : 상온·상압
- ② 분당 회전속도 : 0~2,000RPM
- ③ 용기용량 : 미상

5) 소분, 포장 및 출하

디졸버(dissolver) 또는 반응기에서 생산한 제품을 금속 사각용기 또는 다른 규격용기에 소분하여 포장 후 출하한다.

③ 사용물질

주요 사용물질의 위험 특성

물질명	상태 (상온)	인화점 (°C)	발화점 (°C)	증기압 (mmHg)	NFPA지수			비고
					유해	화재	반응	
2-ethylhexyl acrylate	액체	82	252	0.178 (25°C)	2	2	2	원료
n-butyl acrylate	액체	36.5	267	3.375 (20°C)	3	2	2	원료
톨루엔	액체	4	480	28.4 (25°C)	2	3	0	용제
ethyl acetate	액체	-4	427	93.2 (25°C)	1	3	0	용제
과염소산리튬	분체 (백색)	해당 없음	자료 없음	해당 없음	2	0	0	산화성 물질
과산화벤조일 (BPO)	분체 (백색)	해당 없음	80	0.00005 (25°C)	2	4	4	폭발성 물질
아조비스이소부티 로니트릴(AIBN)	분체 (백색)	해당 없음	64	해당 없음	3	3	3	개시제

※ NFPA 반응지수 1 이상인 물질은 폭발을 유발할 수 있음.

3) 사고에 대비한 비상대응계획의 운영

폭발성물질이나 반응성물질 사용 시 예측하지 못한 규모의 사고가 발생할 수 있으므로, 사고 발생 시의 피해예측 평가 결과를 바탕으로 사고 시 충격과로부터 피해를 감소시키기 위한 대피거리의 설정, 차단벽의 설치, 인접사업장이나 유관 기관과의 비상연락망 확보 등 비상대응계획이 마련되어 운영되어야 한다.

대책 2

MSDS의 확보 및 활용

화학물질을 취급할 경우 공급자가 제공하는 MSDS는 물질의 취급 및 활용에 필요한 내용이 충분히 반영되어야 하며 근로자의 이해가 가능하도록 국문으로 작성되어 제공되어야 한다. 특히 BPO나 과산화리튬 등과 같이 상호 반응 위험성이 있거나 상호 혼합, 충격에 의한 폭발위험성이 높은 물질에 대해서는 MSDS를 확보하여 신제품 개발 시 필요한 위험성평가, 운전조건 확립, 비상조치계획 수립에 이용될 수 있도록 검토하여야 하고 MSDS에 포함된 물질 유해위험성 및 취급과 관련된 안전보건에 관한 내용은 근로자에게 교육되고, 필요한 안전보건조치가 확보된 후 작업이 시작되도록 하여야 한다.

V. 동종사고 예방대책

대책 ①

신제품 개발 시 취급되는 화학물질의 단계별 안전확보 방안 수립 후 작업

과산화물질, 폭발성물질, 반응성 물질 등 위험성이 높은 물질을 사용하여 신제품을 개발할 경우 반응조건에 대한 특성 평가, 공정제어 이탈에 대한 위험성 평가, 만일의 사고에 대한 피해예측 평가 등 충분한 위험성평가를 통하여 설비적 측면의 안전확보, 안전운전조건 및 작업표준의 설정, 만일의 사고에 대비한 작업자 안전확보 대책 등을 수립하여 종합적인 안전을 확보하는 것이 필요하다.

1) 유기과산화물 취급 시 설비적 안전대책의 확보

폭발성물질이나 반응성물질을 사용한 제품의 생산 시 반응 폭주나 폭발의 위험이 높으므로 반응특성위험성평가 결과를 토대로 반응 안정을 기하기 위한 충분한 냉각능력의 확보, 인화성분위기 제어를 위한 반응기내부 불활성화, 점화원제어를 위한 정전기 제거 등 설비의 기본적인 안전이 제품 개발 단계에서부터 확보되어야 한다.

2) 적절한 안전운전지침의 확보

공정제어 위험성평가를 토대로 적절한 운전온도 및 압력 제어, 온도 과상승시의 반응억제제 투입시점, 만일의 이상 반응에서의 대피시점이 사전에 지정되어 있어야 한다. 또한 이러한 내용은 안전운전지침에 반영되고 작업자에게 충분히 교육 및 훈련되어야 한다.

III. 사고분석

① 사고발생과 경과

1) 사고발생 전

사고발생 당일인 2012년 6월 18일 오전 8시에 생산부장 등 2명의 근로자가 출근 후 공장동 1층에 있는 이동식 디졸버(Dissolver)를 이용, 톨루엔과 송진, 수지 등을 혼합하여 첨가제를 생산하였다.

9시에 정상 출근한 3명이 합류하여 생산된 첨가제를 창고동으로 운반 후 금속사각용기에 소포장하였다. 소포장을 마친 후 약 30분 정도 휴식을 취하고 오전 11시경 다시 공장동으로 이동하여 생산부장의 지시로 다음날 생산 및 제품출고가 이루어질 수 있도록 정리정돈 및 작업준비를 하였다.

2) 사고발생

생산부장은 작업지시 후 화장실에서 금속제질의 주걱(반응기의 내부에 붙어있는 반응물을 제거하는 기구)을 정비하고 있었고 직원 중 한명은 공장동 2층에서 다음날 생산에 사용할 용매 및 용제를 계량하고 있었다.

11:15분경 기술이사가 공장동으로 들어와 공장 내에서 정리정돈을 하던 직원들과 함께 이동식 디졸버(Dissolver)에 흰색 분말 등 여러 물질을 투입하는 것이 2층에서 작업 중인 직원에 의해 목격되었다.

11:25분경 굉음과 함께 폭발이 일어났으며 그 후 화재가 일어났다.

3) 사고발생 후

디젤버를 사용한 혼합작업에 참가한 4명은 폭발의 영향으로 형체를 찾기 어려울 정도로 비산되어 즉사하였고 사업장 내 근로자 4명 및 인근 사업장 1명은 중상을 입었다.



[사진 5] 폭발 및 화재로 소실된 공장내부



[사진 6] 맨홀설치작업

원인 ③

취급물질의 특성과 안전보건에 대한 이해부족

디젤버를 이용하여 작업 시 취급물질의 특성 및 위험성에 대하여 충분히 알고 있었다면 위험하게 작업을 하지 않았을 것이다. 사고발생 후 관계자와 면담 시 물질의 유해·위험성에 대하여 잘 알고 있지 못하였으며, 사업장에서 확보하여 사용 중인 MSDS 중 상당수가 외국어로 되어있고 국문본이 없는 경우도 많았다. 특히 사고와 관련한 추정물질인 AIBN, 과염소산 리튬 등도 국문자료가 제시되지 않은 점으로 미루어 보아 대부분 작업자들은 물질특성과 안전보건에 대한 충분한 교육을 받지 못했을 것으로 추정된다.

원인 ④

신제품 개발에 따른 작업표준과 매뉴얼의 부재

새로운 제품의 개발 및 생산에 있어 안전을 확보하기 위한 절차와 운전방법이 포함된 작업표준이나 매뉴얼이 없었으며, 이러한 안전운전절차의 불비가 사고와 관련이 있다.

원인 ⑤

원료포장의 유사성으로 인한 작업오류

원료 중 분체로 취급되는 과염소산리튬, BPO, AIBN은 위험성 및 용도가 다르나 외형(흰색분말) 및 포장(비닐) 방법이 유사하여, 이의 저장 및 취급에 있어 포장에 명확하게 표시되어 있지 않거나 소분하여 사용하는 과정에서 표시오류시 잘못된 물질이 투입될 수 있었다. 특히 과염소산리튬대신 폭발성물질인 BPO이 투입되었을 경우 사고가 발생하였을 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

IV. 사고발생 원인

원인 ①

과산화물질 및 폭발성물질의 사용으로 발생한 열적에너지에 의한 폭발사고

도전성 코팅제를 개발할 목적으로 과염소산 리튬, 폭발성 물질인 BPO 등의 위험물질을 사용하여 작업하다 충격이나 열적에너지 상승에 의한 폭발에 의해 사고가 발생한 것으로 판단된다.

원인 ②

과산화물질, 폭발성물질 취급에 있어 위험성평가를 통한 대책 수립미비

과산화물질, 폭발성물질 등 반응성이 매우 높은 물질을 원료로 한 새로운 제품을 개발 시에는 사고발생의 위험이 크므로 반응특성에 대한 물성실험을 통하여 정확한 위험성 평가가 실시되어야 하나, 그러한 평가를 통하지 않고 생산과 작업이 시도된 것으로 추정된다.

BPO 등 폭발성물질은 아주 작은 충격이나 에너지에도 쉽게 폭발하며, 폭발성물질로 분류되지 않았지만 반응성이 높은 다른 물질들도 충격이나 화학반응, 온도상승에 의해 폭발할 수 있다.

이러한 물질의 혼합과 반응에 있어서는 물리적인 충격 요인의 제어, 정전기제거, 온도제어 및 산소유입 방지 등 발생할 수 있는 모든 충격과 에너지에 대한 방지수단이 필요하나, 이를 위한 설비나 제어수단이 충분하지 않은 상태에서 작업이 실시되었다.



[사진 7] 폭발의 충격파로 파인 바닥 및 디젤버 잔해



[사진 8] 공장동 옆 옥외저장탱크의 파손

2 사고 발생 원인추정

1) 폭발 기인물

폭발 기인물을 파악하기 위하여 조사된 내용은 다음과 같다.

(1) 디젤버의 잔해물 및 디젤버가 있던 바닥의 상태

사고가 발생한 디젤버용기는 조각조각 분리되어 비산되었으며, 디젤버가 위치해 있던 시멘트 바닥은 폭발의 충격파로 거의 20cm 이상 구덩이(Crater) 형태로 파여졌다. (사진 6, 7 참조)

(2) 디젤버 주위의 구조물에 대한 파손정도 및 형상

디젤버 주위의 철제 구조물은 구조물이 찢어질 정도의 파괴흔이 남아 있었으며, 파괴모양과 위치로 보아 디젤버 파편으로 인하여 파손된 것으로 파악되었다.



[사진 9] 디젤버 부근 형강의 찢긴 모습

(3) 정전기 에너지로 인한 화재 가능성

사고발생 사업장은 인화성 용제를 다량 취급하고 있었으며 이러한 용제가 디젤버에 투입되고, 임펠러로 유체를 혼합하는 과정에서 날과 유체의 마찰로 상당한 정전기가 축적되어 어느 순간 방전됨으로 인한 화재의 가능성도 배제할 수 없다. 디젤버 특성상 질소 퍼지는 하지 않는 것으로 판단되며, 시설물 파손으로 디젤버의 국소배기설비의 설치여부 및 정전기 제거용 접지여부는 확인할 수 없었지만, 접지 및 국소배기가 불량하였을 경우 정전기를 점화원으로 한 화재 및 폭발 가능성도 높다고 할 수 있다.

※ 주요 기인물의 물리·화학적 특성

물질명	물리·화학적 특성
과염소산 리튬	1. 반응성 : 다른 가연성 물질과 접촉하여 화재를 일으킬 수 있음, 일부는 탄화수소(연료)와 폭발적으로 반응함. 열이나 오염으로 폭발할 수 있음, 일부는 화재나 가열시 폭발적으로 분해할 수 있음. 건조 후 잔여물은 산화제로 작용할 수 있음
	2. 피해야 할 물질 : 가연성 물질(나무, 종이, 기름 등)
	3. 열분해생성물 : 자극성, 부식성, 독성가스
	4. 열, 화염, 기타 스파크를 피할 것
과산화벤조일 (BPO)	1. 반응성 : 106℃이상으로 가열하면 폭발적으로 분해될 수 있음, 충격, 마찰 또는 열에 노출되면 폭발할 수 있음
	2. 열분해생성물 : 탄소산화물
	3. 혼합금지물질 : 산, 가연성물질, 아민 등
	4. 열, 화염, 기타 스파크를 피할 것
아조비스이소부티로 니트릴 (AIBN)	1. 반응성 : 50℃이상으로 가열하면 폭발적으로 분해될 수 있음, 밀폐용기는 격렬하게 파괴될 수 있음
	2. 열분해생성물 : 시안화물, 질소산화물 등
	3. 혼합금지물질 : 산, 염기, 가연성물질, 산화제 등
	4. 열, 화염, 기타 스파크를 피할 것

디졸버는 용기 상부가 개방된 형태로 상압으로 운전되는 설비이므로 단순한 유증기의 폭발에 의해서는 용기가 파괴되거나 구덩이가 형성되지 않는다. 그럼에도 불구하고 디졸버 하부의 시멘트 바닥이 파인 점, 용기가 명함만하게 조각된 형태로 파괴되어 비산된 점, 인접 철재 구조물이 디졸버 방향으로 부터의 비산물에 의해 파손된 점, 주변공장의 넓은 지역에 폭발로 인한 영향을 미친 점으로 볼 때 인화성물질에 의한 화재발생으로 보기는 어려운 것으로 판단된다.

따라서 도전성 코팅제를 개발하기 위해 디졸버 내에 BPO 및 과염소산 리튬을 투입하여 작업하다가 다음 중 하나 이상의 원인에 의하여 반응성 물질이 열적, 물리적 충격을 받게 되고 그 에너지에 의해 폭발이 발생된 것으로 추정된다.

(1) 디졸버 내부 온도상승

디졸버의 회전속도는 2000RPM까지 가능하며, 회전시의 마찰 열이나 투입된 화학물질간의 반응으로 온도가 점차 상승되었을 경우 폭발을 유발할 수 있다. AIBN은 50℃ 이상에서 분해가 가속(Self Accelerating)되고, BPO는 106℃에서 폭발적으로 분해되므로 이러한 온도상승으로 인한 폭발은 설득력이 있다.

(2) 디졸버 회전날과 디졸버 케이스의 충돌

사업장에서 사용되는 디졸버는 용기를 고정하지 않은 상태로 사용되는 형식으로 파악되었으며, 용기 유동의 위험을 전혀 배제할 수는 없다. 디졸버 용기의 고정 부적절로 회전날이 회전하는 상태에서 회전부와 용기의 충돌 시 상당한 충격에너지가 제공되고 충분한 폭발원이 될 수 있다.



[사진 10] R2 반응기의 찢긴 모습

(3) 디졸버 파편의 비산거리 및 인근사업장 파손정도

디졸버의 파편은 현장에서 최대 260m까지 떨어진 지역에서 발견되었으며 200m 정도 이격된 사업장의 유리창도 파손되었다.



[사진 11] 폭발장소와 비산물 발견장소의 이격거리



[사진 12] 현장에서부터 260m 거리에서 발견된 디졸버 파편

(4) 사고당일 사용되었을 기인물질의 추정

사고현장이 모두 파손 및 소실되고, 사고관련 당사자들이 모두 사망하여 정확히 어떤 작업이 시도되고, 어떤 화학물질이 사용되었는지 단언할 수는 없지만 현장에 있었던 작업자의 진술과 사고발생 후 파악한 화학물질 구매자료를 확인한 결과 사고 당일에는 평소 생산하던 점착제 외에 새로운 물질을 사용한 신규제품의 시험생산이 시작된 것을 파악할 수 있었다.

평상시 사업장 내에서는 원료로 사용되는 폭발성물질인 BPO 외에 반응성이 높은 AIBN, n-Butyl Acrylate 등을 취급하고 있었으며, 이러한 물질들은 쉽게 폭발·분해하거나, 충격이나 열을 가하면 폭발하거나, 화학물질과 격렬하게 반응하는 물질들로서 사고당시 이러한 물질들이 사용되었을 것으로 추정된다.

특히 폭발성물질로 분류되는 과산화벤조일(BPO)은 유기과산화물로서 폭발적으로 반응할 수 있으므로 서서히 소량씩 반응상태에 따라 투입되어야 하나, 목격된 바와 같이 최초 다량 투입된 물질에 포함되어 있을 경우 폭발에 기여했을 가능성이 높다.

또한 사고발생 전일, 사업장 원료납품업체 관계자와 사고당시 생산에 참여한 기술이사와의 대화 과정에서 사고당일 도전성 코팅제를 개발하겠다는 기술이사의 언급이 있었고 평소 사용되는 원료가 아닌 도전성 코팅제의 원료로 사용되는 과염소산리튬을 화공약품상으로 구매한 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 사고 당시 디졸버에서의 작업은 BPO 및 과염소산리튬 등의 과산화물을 사용하여 도전성 코팅제를 개발하려던 과정이었던 것으로 판단된다.

2) 혼합 중 물질의 폭발유발 요인

사업장에서 취급하던 물질 중 폭발성물질인 BPO, 과산화물인 과염소산리튬, 반응성 물질인 AIBN 등이 디졸버에서 혼합되는 과정에서 폭발을 유발할 만큼 충격이나 열이 가해졌을 요인은 다음과 같이 추정할 수 있다.