안전분야-기술자료
중예 2004- -

중대산업사고 사례집

2004. 12

한국산업안전공단

머 리 말

화학공장은 고도의 기술집약적 장치산업으로서 여러 종류의 화학물질의 원료·중간제·첨가제·용제 및 제품의 형태로 사용·취급 및 저장하고 있으며 이들 물질의 보유량이 많고 시스템이 복잡하여 위험물질의 누출 또는 화재·폭발과 같은 사고가 발생할 경우에는 공정내의 근로자뿐만 아니라 공장 인근의 주민 및 환경에까지 막대한 영향을 끼치고 있습니다.

또한 이로 인한 설비파손은 재산상의 매우 큰 손실을 가져오고 파손된 설비를 복구하는데 에 상당한 기간에 걸리므로 이와 관련된 산업에 필요한 원재료 수급 등에 차질을 가져와 국가 전체 경제에까지 커다란 영향을 미치는 경우도 많습니다.

이에 따라 국제노동기구(ILO)에서는 이와 같은 형태의 재해를 일반 산업재해와 구분하여 중대산업사고(Major Accident)라 하고, 그 정의를 산업활동을 하는 과정에서 비정상적인 상태의 결과로 인한 위험물질의 누출(Release), 화재(Fire), 폭발(Explosion) 등의 발생으로 단기간 또는 장기간에 걸쳐 그 영향이 사업장내의 근로자뿐만 아니라 인근 지역주민이나 환경에까지 미치는 사고라 규정하고 예방활동을 펼치고 있다.

본 사례집은 과거 9년간 국내에서 발생한 중대산업사고를 수집하여 사고에 대한 분석과 사고발생설비 및 사고원인 등을 규명하여 제시하고 있으며, 특히 2004년도에 발생한 국내 중대산업사고에 관한 사고내용을 상세히 분석하여 향후 동종의 중대산업사고를 방지하는데 활용되도록 소개하고 있습니다.

아무쪼록 본 사례집에 제시된 국내·외의 사고사례를 통하여 유사사고를 방지 할 수 있는 근본적인 원인 분석과 대책을 수립하여 중대산업사고 예방의 밑거름이 되었으면 합니다.

감사합니다.

2004년 12월

한국산업안전공단 이사장 김 용 달

목 차

1. 공정안전관리제도(Process Safety Management) ····· 1

1.1 PSM제도 도입 배경과 경과 ····· 1

1.2 PSM제도의 적용대상 ····· 1

1.1.1 PSM제도의 적용대상 ····· 1

1.1.2 공정안전보고서의 내용 ····· 2

1.3 PSM제도 시행효과 ····· 4

2. 국내중대산업사고 분석(1996년～2004년) ····· 7

2.1 2004년 중대산업사고사례 분석 ····· 7

2.2 1996년～2003년 중대산업사고사례 분석 ····· 12

3. 국내 중대산업사고 Case Study ····· 16

Case Study 1 열교환기 개조작업 중 폭발사고 ····· 16

Case Study 2 클로로술폰산 저장탱크 폭발사고 ····· 21

Case Study 3 불법휘발유 제조공장 화재·폭발사고 ····· 25

Case Study 4 원료저장탱크 청소작업 중 폭발사고 ····· 28

Case Study 5 합성섬유 원단코팅작업 중 건조기 폭발사고 ····· 33

Case Study 6 가스홀더 상부 레벨게이지 개조작업 중 폭발사고 ····· 36

Case Study 7 정제탱크 슬러리 제거작업 중 화재사고 ····· 41

Case Study 8 메틸알콜 저장탱크 파열사고 ····· 46

Case Study 9 유사휘발유 제조 중 화재사고 ····· 48

Case Study 10 반응기 내부 잔압에 의한 사망사고 ····· 52

Case Study 11 황제거 반응기 폭발사고 ····· 56

Case Study 12 탱크로리 폭발사고 ····· 63
Case Study 13 수소압축기 조작판넬 폭발사고 ····· 67

부록 Ⅰ 국내 중대산업사고 현황(1996년~2003년)

Ⅰ. 공정안전관리제도(Process Safety Management)

1.1 PSM제도 도입 배경과 경과

화학공장은 고도의 기술 집약적인 장치산업으로서 많은 종류의 유해·위험물질을 다량으로 취급하고 있으므로 유해·위험물질의 누출로 인한 화재·폭발·중독 등의 사고가 발생할 가능성이 항상 잠재하고 있으며 또한 실제 사고시에는 공장내의 근로자 뿐만아니라 인근 주민 및 주위 환경에 커다란 영향을 끼치게 되며 심한 경우에는 국가경제에도 막대한 피해를 줄 수도 있다.

이에 따라, 국제노동기구, 경제개발협력기구(OECD), 미국 및 유럽연합에서 유해·위험물질의 누출로 인한 화재·폭발·중독 등의 사고를 "중대산업사고"라 정의하고 이러한 사고를 미연에 예방하기 위하여 중대산업사고 예방을 국가의 책무로 하여 법제화하도록 요구하고 있으며 실제로 법제화하여 시행하고 있다.

이러한 국제적인 추세에 맞추어 국내에서도 법제화하기 위하여 노동부와 한국산업안전공단이 공동으로 '92년부터 사전분위기 조성 및 기반구축 등을 위한 세미나, 기술토론회 및 연구활동을 전개하여 '95년 1월 5일부로 개정된 산업안전보건법에 의하여 PSM제도가 '96년 1월 1일부터 시행되게 되어 사업장에서는 매 5년마다 공정안전보고서를 작성하여 노동부 장관에게 제출하고 관계 기관의 심사 및 확인을 받도록 법제화되었다. 2000년도에 규제완화 차원에서 정기적으로 작성·제출하도록 한 규정이 삭제되어 사업장에서 자율적으로 시행하도록 완화되었다.

1.2 PSM제도의 시행 현황

1.2.1 PSM제도의 적용대상

국내의 공정안전관리제도는 '95년 1월 5일에 개정·공포된 산업안전보건법 제49의2의 규정에 의하여 '96년 1월 1일부터 시행되었으며 이 법의 적용대상은 산업안전보건법 시행령 제33조의5에 규정되어 있다. 그 대상은 아래와 같은 업종에 관련된 사업장과 이외의 사업을 행하는 사업장의 경우에는 시행령 별표 10에서 규정하는 유해·위험물질을 규정수량 이상으로 취급하는 사업장으로서 유해·위험물질을 제조·취급·사용·저장하는 설비 및 당해 설

비의 운영에 관련된 일체의 공정설비를 포함하고 있다.

(1) 원유정제 처리업
(2) 달리 분류되지 아니한 석유정제 분해물 재 처리업
(3) 석유화학계 기초 유기화합물 제조업 또는 합성수지 제조업
(4) 질소질 비료제조업
(5) 복합비료제조업
(6) 농약제조업(원제제조에 한함)
(7) 화약 및 불꽃제품 제조업

1.2.2 공정안전보고서의 내용

중대산업사고를 예방하기 위하여는 사업장에 설치된 설비에 대하여

(1) 제조공정 관련 기술자료 및 도면을 체계화한 후
(2) 체계화된 기술자료 및 도면을 바탕으로 위험성 평가를 실시하여 필요한 조치를 하고,
(3) 안전운전절차・하도급관리기준을 설정하여 작업실수를 최소화하며,
(4) 각종 설비의 안전성을 완벽히 유지토록 설계, 설치, 운전 및 정비기준을 제도화하여 실행에 옮기고,
(5) 사고 발생 시를 대비하여 피해를 최소화하기 위한 비상조치계획을 수립하여 실천하는 것이다.
(6) 이외에도 각종 절차와 기준을 철저히 지킬 수 있도록 전 종업원을 대상으로 교육・훈련을 정기적으로 실시하고,
(7) 공정안전관리가 계획대로 추진되고 있는지 여부를 정기적인 자체 감사를 실시하여 개선하는 것 등이 체계적으로 이루어져야 한다.

사고를 예방하기 위해서는 단편적인 안전활동을 전개하는 것으로는 소기의 목적을 달성하기가 어려우므로 이와 같이 공정안의 모든 잠재위험요소를 찾아 제거하는 등의 보다 합리적이고 체계적이며 총체적인 종합 안전관리가 필요하다. 따라서 공정안전을 유지하기 위해서는 모든 구성원들이 공정 중의 위험을 찾아 그 위험이 어떤 경로에 의해 사고로 이어지며 또한 어떤 방법으로 위험을 제거하고 관리할 수 있을 것인가에 관한 지식이 있어야 하고, 안전운전 및 작업절차를 철저하게 준수하는 기본자세가 되어 있으며 모든

설비나 장치가 안전한 구조 및 성능을 가지고 있도록 설계나 시공이 되어야 하고, 이러한 지식・기술・능력이 구성원의 직무와 조화롭게 연결되게 하는 관리시스템이 있어야 하며 공정안전관리가 체계적으로 이행하기 위하여는 앞에서 말한 모든 행위가 문서화되어야 한다.

공정안전관리에 포함되어야 할 내용은 다음과 같다.

(1) 공정안전자료

공정안전자료는 사업장에서 취급・생산・저장하는 원료・제품 등의 위험성에 대한 자료 및 취급・생산・저장에 필요한 제조공정 및 설비에 관련된 모든 기술자료를 포함한다.

(2) 위험성 평가서 등

평가서에는 위험성 평가를 실시하고 그 결과에 대한 사고를 예방하고 피해를 최소화하기 위한 피해 최소화 대책 등이 포함되어야 한다.

(3) 안전운전 계획

설비를 안전하게 운전하는데 필요한 다음과 같은 서류 등이 포함되어야 한다.

- 안전운전지침서
- 설비점검・검사 및 보수계획, 유지계획 및 지침서
- 안전작업 허가지침
- 도급업체 안전관리계획
- 근로자 등 교육계획
- 가동 전 점검지침
- 변경요소 관리계획
- 자체검사 및 사고 조사계획
- 기타 안전운전에 필요한 사항

(4) 비상조치계획

사업장내에서 위험성 평가를 실시하여 개선대책을 세우고 안전운전계획에 따라 철저히 관리한다 하더라도 사고의 가능성은 항상 가지고 있다. 그러므로 만약의 사고에 대비한 가상사고 시나리오를 사업장 특성에 적합하도록 작성하여 정기적인 훈련을 실시하고 비상조치계획을 실행할 수 있도록 조직, 인력 및 장비 등이 조치되어야 한다.

1.3 PSM제도 시행효과

1) PSM 대상사업장의 재해 감소

PSM제도가 도입되어 시행된 이후의 재해 통계를 살펴보면 <표 1>에서 보는 바와 같이 재해자 및 사망자가 감소 추세이었으나 IMF 영향으로 '99년도 이후에는 재해자 및 사망자가 다시 증가되고 있다.

<표 1> 연도별 PSM 대상사업장 재해 현황

연도별	근로자수	재해자	사망자	사업장수	재해율(%)	사망만인율
1997	321,995	1917	57	357	0.60	1.77
1998	303,954	1147	31	389	0.38	1.02
1999	299,726	1328	35	436	0.44	1.17
2000	352,717	2249	63	493	0.64	1.79
2001	376,435	2221	59	588	0.59	1.57
2002	393,218	2909	67	642	0.74	1.70
2003	405,646	4570	77	704	1.13	1.90

PSM 대상 업종별/연도별 사망자 및 재해자 현황은 <표 2>와 같다

<표 2> PSM 대상 업종별 재해자 및 사망자 현황

연도	1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003	
구분	재해자	사망자	재해자	사망자	재해자	사망자	재해자	사망자	재해자	사망자	재해자	사망자	재해자	사망자
계	1917	57	1147	31	1328	35	2249	63	2221	59	2909	67	4570	77
화학업종	287	13	217	4	254	5	267	16	211	9	186	7	230	12
기타업종	1250	30	688	18	805	25	1292	32	1198	32	1362	35	2575	31
조선업종	380	14	242	9	269	5	690	15	812	18	1361	25	1765	34

참고로 <표 2>에서 기타업종 및 조선업종에서의 사망자 및 재해자는 대부분이 PSM 대상이 아닌 설비에서 일어난 것으로 추정된다.

또한 PSM 대상업종과 전산업에 대한 재해율 및 사망만인율은 <표 3>와 같다.

<표 3> PSM 대상사업장과 전산업의 재해율 사망만인율 현황

연도		1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003	
구분		재해율	사망만인율	재해율	사망만인율	재해율	사망만인율	재해율	사망만인율	재해율	사망만인율	재해율	사망만인율	재해율	사망만인율
계		0.60	1.77	0.38	1.02	0.44	1.17	0.64	1.79	0.59	1.57	0.74	1.70	1.13	1.90
PSM 대상	화학업종	0.53	2.39	0.42	0.77	0.42	0.82	0.53	3.18	0.42	1.79	0.36	1.36	0.51	2.63
	기타업종	0.61	1.64	0.37	1.07	0.45	1.25	0.66	1.55	0.62	1.53	0.79	1.75	1.21	1.81
전산업		0.81	3.33	0.68	2.92	0.74	3.08	0.73	2.67	0.77	2.60	0.77	2.46	0.77	2.76

2) 경제적인 효과

(1) 재보험 문제 해결

'91년부터 국내 정유, 석유화학공장에서 대형 사고가 빈발하여 영국의 시그나(Cigna)회사 등 외국 재보험사들의 국내 영업손실이 극심함에 따라 '94년부터 국내 회사의 재보험 가입을 거부하거나 보험 요율을 인상토록 요구한바 있는데

<표 4> 외국 재보험사 영업실정

년도	보험료(억원)	지불보험금(억원)	손해율(%)
'90	127	114	89
'91	186	288	155
'92	223	467	209

위와 같은 재보험 문제 때문에 한국석유화학공업협회로부터 공단이 개입하여 해결해 줄 것을 요청해옴에 따라(석화협(업) 제272호, '93.9.8) 공단은 2회에 걸쳐 시그나사와 회의를 실시하였고, 그 결과 공단이 제시한 사업추진 계획대로 실행된다면 시그나사의 요구사항을 만족할 수 있다는 결론을 얻었으며

* 시그나사의 요구조건

① 안전기준의 실행을 감독할 공식적인 독립기구 설립
② 종합적 중대산업사고예방(HOZOP 등) 체계 등 위험관리체계 정비

③ 국제적 안전기준(NFPA 등에)에 준하는 안전기준 도입 및 준수 의무화

'94년부터 PSM 기법을 국내에 보급하여 '96년부터 시행함에 따라 재보험사들의 요구가 충족되었고, 따라서 국내 재보험 가입 문제는 자동 해결되었으며 오히려 '96년부터는 외국 재보험사들이 국내 업체들에게 재보험 가입을 유도하기 위해 적극 활동중에 있고 대다수 국내 업체에서는 재보험사에게 보험요율 인하를 요청하고 있는 정도의 효과를 가져왔다.

(2) 가동정지 횟수 감소

연속공정으로 구성된 장치산업의 경우는 한 개의 설비가 고장을 일으켜도 제조공정 전체가 가동이 중지되는 특성을 갖고 있다. PSM 시행으로 가동중지 횟수가 현격히 감소된 것으로 보고되었다.

* A 사업장 경우 PSM 시행 이전에는 공정사고로 인하여 매년 5회이상 가동이 중단되었으나 PSM 시행 이후는 무사고를 달성하여 가동 중단이 전무하였음.

(3) 해외 플랜트 수출 능력 향상 및 외화 절감

PSM 시행으로 PSM의 핵심 요소인 위험성평가기법(HAZOP)이 국내에 자동적으로 보급하게 되는 효과를 가져오게 되었으며 이에 따라 국내 업체가 플랜트 수출시 외국 발주회사들이 요구하고 있는 위험성평가(HAZOP) 업무를 국내 기술진에 의해 처리할 수 있는 능력을 갖게되어 해외 플랜트 수주 능력이 향상되었고, PSM 시행 이전에 위험성평가 업무를 외국 회사에 용역을 주어 처리하던 것을 국내 기술진에 의해 수행할 수 있게 되어 PSM 시행으로 외화 절감 효과를 가져오게 되었으며, 부수적으로 고용을 증대하는 결과도 가져오게 되었다.

(4) 생산성 및 품질향상

PSM 시행 이후 사업장 설문조사('97. 7월) 결과 응답자의 83%가 기술자료의 체계 정립으로 기술이 향상되었고, 98%가 생산성 향상에 그리고 96%가 품질 향상에 기여하고 있다고 응답하여 PSM제도 시행으로 공정개선 기술 및 위험성평가 기술이 향상되어 안전성이 향상됨은 물론 동시에 생산성과 품질이 향상되어 경쟁력이 제고되고 있는 것으로 조사되었다.

Ⅱ. 국내 중대산업사고 사고분석(1996년～2004년도)

2.1 2004년도 중대산업사고사례 분석

2004년도에 총 24건의 사회적 물의를 빚은 중대산업사고로 인하여 사망 24명, 부상 23명이 발생하였다. 표는 각각의 중대산업사고에 대한 요약이다.

<표 5> 2004년도 중대산업사고 사례

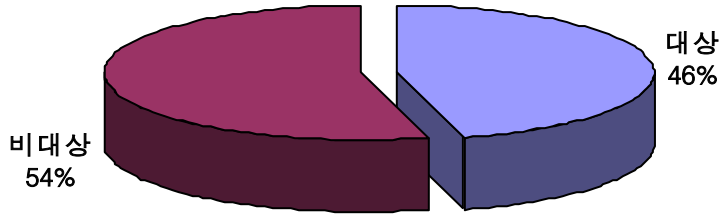
연번	발생 일자	사업장명	PSM 대상 여부	사고개요	피해정도		사고 원인
					사망 (명)	부상 (명)	
계		24개사			24	23	
1	‘04.1.13	○○산업(주)	비대상	열교환기 개조작업을 위해 절단작업을 하는 과정에서 폭발사고가 발생	3		안전작업허가 절차 미준수
2	‘04.1.14	○○화학(주)	비대상	클로로 슬폰산 저장탱크 상부 용단 작업중 폭발	1		안전작업허가 절차 미준수
3	‘04.1.25	○○화학(주)	비대상	공장 내 화재가 발생			설비유지관리 불량
4	04.1.29	○○산업(주)	대상	아크릴 생산공장 곤포작업장 화재(화재발생 공정은 비대상임)			유지보수 및 점검절차 미준수
5	‘04.2.8	○○○(주)	비대상	폴리스티렌 pellets을 사이로로 하역하던 중 벌크로리 폭발	1		설계오류/설비 불량
6	‘04.3.9	○○케미칼(주)	비대상	신나 이송중 점화원에 의해 화재 폭발		1	안전작업허가 절차 미준수
7	‘04.4.1	○○(주)	비대상	방청제 주원료가 담긴 드럼통 덮개를 개방 상태로 방치하여 인화성 증기가 누출되어 화재 폭발		3	설비유지관리 불량
8	‘04.4.8	무허가등록업체	비대상	불법휘발유를 포장하기 위해 주유기를 캔 내부에 삽입하는 순간 축적된 정전기 등에 의한 화재	1	4	안전장치 미설치
9	‘04.4.9	○○산업(주)	비대상	원료저장탱크 내부 바닥의 슬러지를 청소하던 중 폭발	1	1	안전작업허가 절차미준수

연번	발생 일자	사업장명	PSM 대상 여부	사고개요	피해정도		사고원인
					사망 (명)	부상 (명)	
10	'04.4. 10	○○(주)	비대상	합성섬유 원단 코팅 중 건조기 내부에서 폭발	1	2	안전운전절차 미준수
11	'04. 4. 22	○○(주)	비대상	수소탱크 내부 용접작업 중 폭발사고	3		안전작업 허가절차 미준수
12	'04. 4. 23	○○(주)	비대상	안료 중간체 생산공정에서 공장 천정을 철거하던 중 화재			안전작업 허가절차 미준수
13	'04. 4. 27	○○(주)	대상	탱크내부 청소작업 중 점화원에 의해 화재 폭발	1	1	안전작업 허가절차 미준수
14	'04.5. 25	(주)○○	비대상	메틸알콜 저장탱크 지지철물 설치작업 중 용접불꽃에 의한 탱크 내부에서 폭발	2		안전작업 허가절차 미준수
15	'04.5. 30	○○화학(주)	대상	반응기의 원료투입배관의 일부인 테플론재질의 Flexible Hose가 파열되어 배관내 유체인 PF5, HCl, HF등이 누출되면서 대기중으로 확산			설계오류/ 설비불량
16	'04.6. 6	무허가등록업체	비대상	유사휘발유 제조중 실화에 의한 화재사고	2	1	안전작업 허가절차 미준수
17	'04.6. 18	○○화학(주)	대상	내부의 Sample 중 반응기 맨홀 뚜껑이 내부 잔압에 의해 뚜껑이 열리면서 가슴에 충격 사망	1		안전작업 허가절차 미준수
18	'04.7. 25	(주)○○실업	비대상	저장탱크(질산) 액위계 하단밸브의 고무패킹 열화에 의한 누출사고			설비유지관리불량
19	'04.8. 25	○○석유화학(주)	대상	이물질을 제거하는 공정(KLP PLANT)에서 황제거 반응기의 촉매 교체 준비 작업 중 폭발	1	1	안전작업허가절차미준수

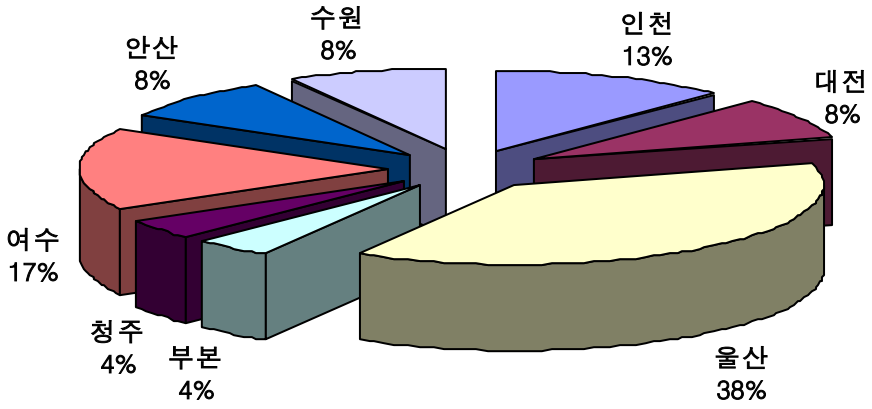
연번	발생 일자	사업장명	PSM 대상 여부	사고개요	피해정도		사고원인
					사망 (명)	부상 (명)	
20	‘04.8. 29	○○(주)	비대상	유류저장탱크 내부 청소작업중 조명등의 스파크에 의한 화재폭발	1		안전작업 허가절차 미준수
21	‘04. 9. 5	○○(주)	대상	육상 출하 개시를 위하여 탱크로리 유창의 해치(Hatch)를 여는 순간 유창 내에 축적된 증기가 정전기에 의해 폭발	1	1	안전작업 허가절차 미준수
22	‘04. 9. 20	○○(주)	대상	폴리프로필렌(P.P)공정내 압축기 인입측의 퍼지 라인(내부 가스 치환용 질소배관)을 통해 누설된 수소가스가 조작판넬 내부에 들어가 스위치 조작에 의한 전기 스파크로 순간적인 폭발	2		변경관리 미실시
23	‘04. 9. 30	○○에너지(주)	대상	폐유저장탱크에서의 이송작업 중 폭발	2	3	안전작업 허가절차 미준수
24	‘04.10. 20	○○(주)	대상	밸브 교체작업을 하던 중 미치환된 인화성증기에 의한 화재·폭발		5	안전작업 허가절차 미준수

사고대상 및 주요 원인을 분석하여 보면,

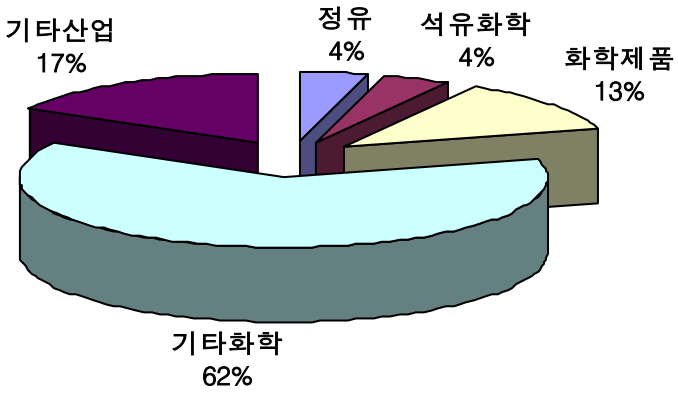
○ PSM대상이 11건, 비대상이 13건으로 중소화학공장인 PSM 비대상 사업장에서의 사고가 증가 추세에 있음.



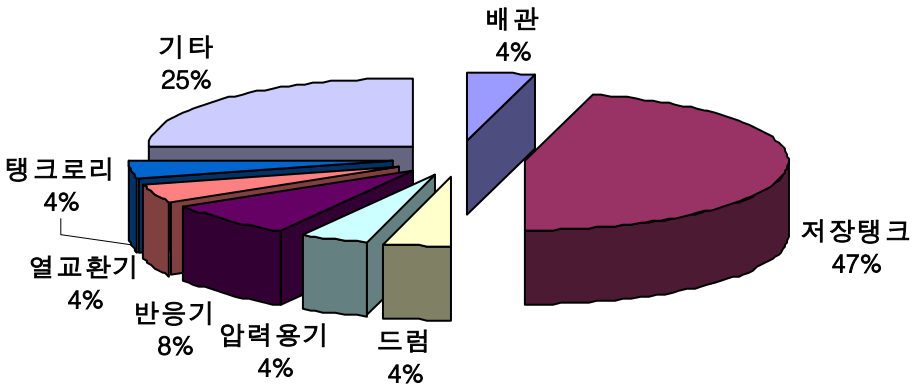
○ 지역별형태는 울산〉 여수〉 인천으로 대규모 화학공장이 밀집한 지역에 중대산업사고가 집중함.



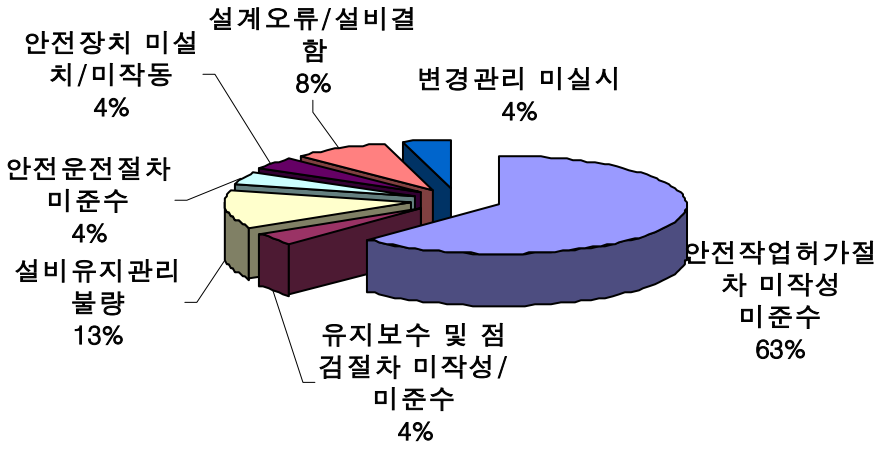
○ 업종별 형태는 기타화학〉 기타산업 순으로 PSM 대상사업장보다는 중소규모 화학공장에서 사고가 많이 발생함.



○ 사고형태는 대부분 폭발이며, 기인물은 주로 저장탱크, 반응기에서 발생하였으며 주로 밀폐공간에서의 정비·보수 시 화재·폭발사고가 많이 발생하였음.



○ 사고원인은 안전작업허가절차 미준수, 설비유지관리 불량 등에 주로 기인함.



2.2 1996년~2003년 중대산업사고사례 분석

<표 6>에서는 전체 중대산업사고의 업종별 발생건수를 보여주고 있으며 기타화학제품제조업, 정유, 석유화학제품제조업 순으로 사고발생건수가 큰 것으로 나타났다. 하지만 연도별 추이로 보면 화학제품제조업의 사고발생건수가 크게 증가되고 있다.

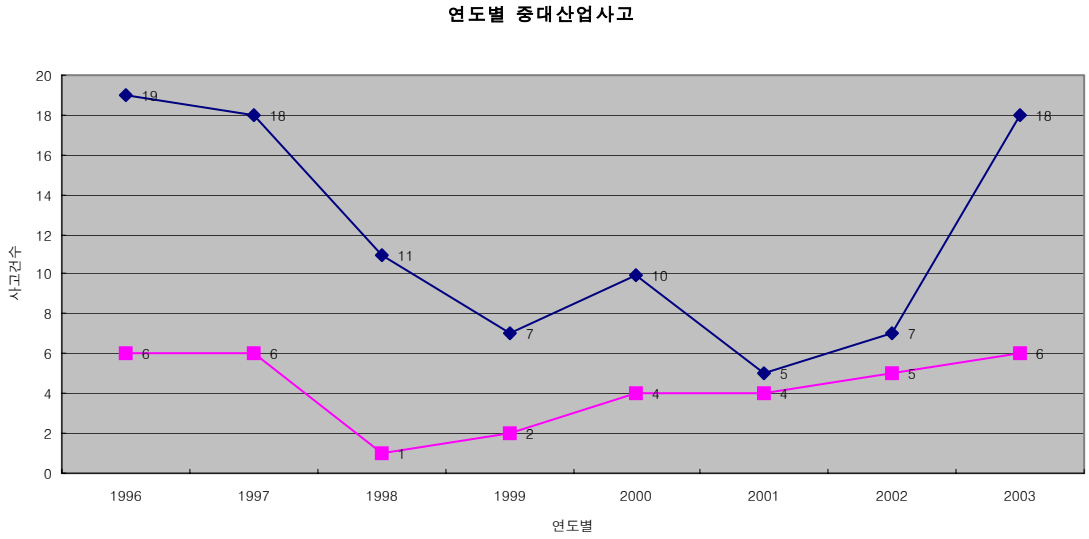
<표 6> 연도별, 업종별 중대산업사고발생현황(건수)

구분	계	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03
계	129	25	24	12	9	14	9	12	24
정유	23	7	6		6	1			3
석유화학	22	4	4	5		5	4	1	3
정밀화학	11	2	1	2	1		3	1	1
도시가스/LPG	1								1
화약	13	3	1	1			1	1	6
화학제품	17				1	1		8	7
기타화학	33	6	7	3	1	6	4	6	
조선업	3	1	2						
기타산업	10	2	3	1		1		1	2

사고로 인한 PSM 대상 사업장과 비대상사업장의 연도별 사고발생 추이를 분석하면 <표 7>와 같다. 전체적으로는 PSM대상사업장의 중대산업사고 발생건수가 비대상사업장에 비해 약 3배정도로 중대산업사고가 발생한 것으로 나타나고 있다. 특히 2003년도에는 PSM 대상사업장의 중대산업사고가 2002년 7건에 비해 18건으로 급격히 증가되고 있다.

<표 7> PSM대상/비대상의 사고발생현황(건수)

구분	계	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03
계	129	25	24	12	9	14	9	12	24
대상	95	19	18	11	7	10	5	7	18
비대상	34	6	6	1	2	4	4	5	6



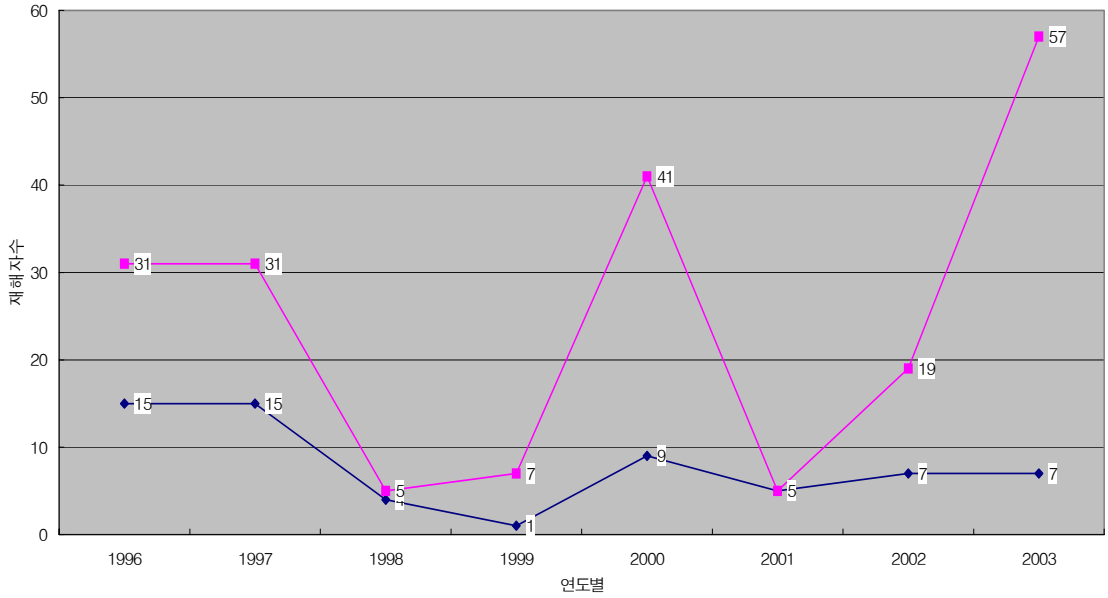
PSM대상사업장/비대상사업장의 재해자 및 사망자 발생 현황은 <표 8>과 같이 <표 7>의 발생건수에 비례하여 재해자·사망자도 PSM 대상사업장이 259명으로 비대상사업장에 비해 약 0.7배정도 재해율 및 사망 만인율이 높은 것으로 나타났으며 특히 2003년도에는 재해자수가 PSM 대상사업장이 64명으로 비대상사업장에 비해 약 4배정도 증가한 것으로 나타났다.

<표 8> PSM대상/비대상의 재해자·사망자현황(명)

재해자	계	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03
계	442	59	77	47	15	115	14	36	79
대상	259	46	46	9	8	50	10	26	64
비대상	182	13	31	38	7	65	3	10	15

사망자	계	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03
계	95	18	22	5	3	15	8	11	13
대상	63	15	15	4	1	9	5	7	7
비대상	32	3	7	1	2	6	3	4	6

피해현황



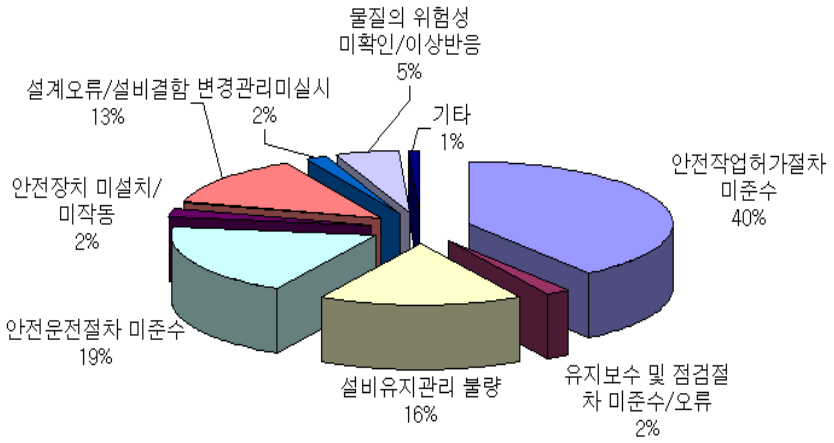
<표 9>에서는 중대산업사고 발생원인별 분석으로 전체적으로 사고발생원인 결과 안전작업허가절차 미준수(45건), 운전절차미준수(26건), 설비유지관리불량(22건)으로 대부분 인적오류에서 사고가 60%이상 발생한 것으로 나타났다.

PSM 대상 사업장에서의 사고원인은 안전작업 허가절차 미준수가 40%로 안전운전절차미준수가 19%, 설비유지관리 불량이 16%로 점유하고 있다.

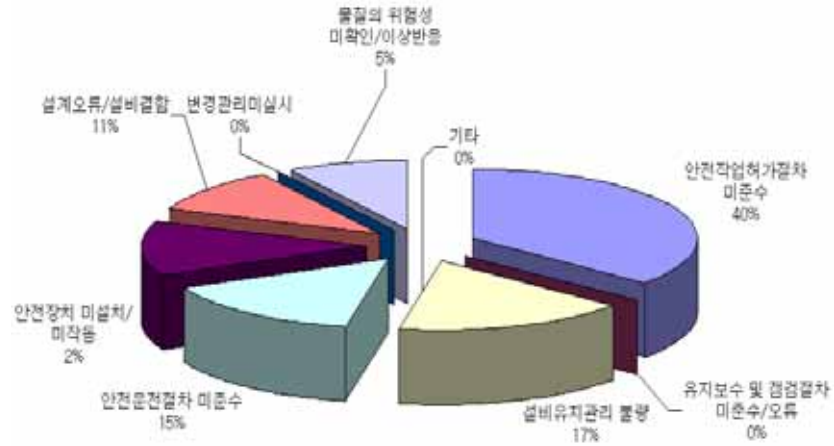
PSM 비대상 사업장에서는 안전작업허가절차미준수가 40%, 설비유지관리 불량이 17%를 차지하며, 안전운전절차 미준수 15%나 점유하고 있다.

<표 9> 사고원인별 현황(건수)

원 인	계	PSM 대상	PSM 비대상
계	129	94	35
안전작업 허가절차 미 준수	45	34	11
유지보수 및 점검절차 미 준수/오류	1	1	-
설비 유지관리 불량	22	17	5
운전절차 미준수	26	20	6
안전장치 미설치/미작동	7	2	5
설계오류/설비결함	17	13	4
변경관리 미실시	1	1	-
물질의 위험성 미확인/이상반응	9	5	4
기타	1	1	-



<PSM 대상>



<PSM 비대상>

Ⅲ. 국내 중대산업사고

열교환기 개조작업 중 폭발사고

1. 사고개요

2004. 1. 13 10:50분경 울산의 ○○산업(주) 폐수증발농축건조시설의 열교환기 개조작업을 위해 절단작업을 하는 과정에서 폭발사고가 발생하여 3명이 사망한 사고임.

2. 사고물질의 특성

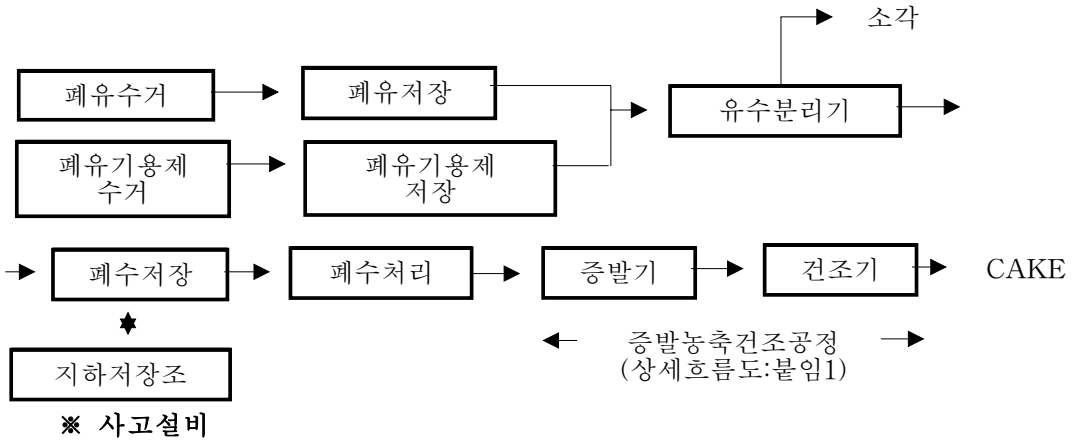
가. 물리적 반응

o 폐유기용제

- 물 : 90~95%
- 유기용제류 : 5~10%

3. 사고발생공정 및 운전상황

가. 재해발생공정



- 폐유/폐기물를 수거하여 저장탱크에 각각 저장후 유수분리기를 통하여 유분은 분리하여 소각 처리함.

- 유수분리기에서 나온 폐수는 폐수저장조 또는 증발농축건조공정의 지하저장조(열교환기의 하단에 지하저장조 개구부가 있음)에 저장 후 폐수처리장에서 화학적 처리 후 증발농축건조공정으로 이송함.
  ・유수분리기에서 유기용제 등이 완전히 제거되지 않을 경우 공정 및 지하저장조에 유기용제 등이 유입될 수 있으며 지하저장조에서는 물과 층분리가 되어 상부에 유기용제가 존재할 수 있음
- 증발농축건조공정에서 증발농축건조공정을 거쳐 수분을 제거한 후 최종적으로 슬러지는 CAKE 상태로 위탁 처리함.

나. 운전상황

- 증발농축건조공정의 일부분인 열교환기의 Scaling 작업을 용이하게 하기 위하여 Horizontal Type으로 설치되어 있는 열교환기(3기)를 Vertical Type으로 개조하기 위해 공정내부의 폐수를 제거함.
- 열교환기의 연결 배관을 제거하고 산소절단기를 사용하여 배관 및 부속설비 절단작업을 진행함.

4. 사고원인 분석

o 화재・폭발이 발생하기 위해서는 가연성물질, 산소 그리고 점화원이 동시에 공존하여야 함.

o 본 사고 발생시 산소절단기를 사용하여 절단 작업을 실시하고 있었으므로 절단시 불꽃의 비산이 점화원으로 작용할 수 있음.

o 따라서 인화성물질이 존재할 경우 화재・폭발이 발생하므로 폭발사고가 발생한 것으로 판단하면 가연성물질이 지하저장조 또는 공정내에 존재한 것으로 추정됨.
  - 본 공정은 폐수를 농축하는 공정으로 정상운전시는 인화성물질이 존재하지 않지만 유수분리기에서 유기용제를 정상적으로 제거하지 않고 지하저장조로 유입될 경우 가연성물질이 지하저장조 및 공정내로 유입될 수 있음

o 추정1 : 열교환기 분리작업시 가연성물질 누출
  - 열교환기 분리작업시 누출된 가연성물질이 정체된 상태에서 절단작업시 발생하는 나화 또는 불꽃의 비산에 의해 화재・폭발이 발생한 것으

로 추정됨

o **추정2 : 지하저장조로 불꽃이 비산되어 폭발**

- 응축수 회수배관의 절단작업시 불꽃이 지하저장소로 비산되어 지하저장소에서 폭발사고가 발생하고 이로 인해 지하저장조 덮개가 비산된 것으로 추정됨

o **본 사고는 열교환기를 분리하기 위한 절단작업을 진행하는 과정에서 폭발사고가 발생한 것으로 추정되므로 "추정2"가 가능성이 높은 것으로 판단됨.**

5. 사고방지 대책

o **인화성물질 있는 장소에서 화기 등의 사용금지**

- 인화성물질, 가연성가스 등이 존재하여 화재·폭발이 발생할 우려가 있는 장소에서는 나화 또는 불꽃이 발생할 수 있는 산소절단기 등을 사용하지 않도록 하여야 함.

o **개조·수리 등의 작업시 안전조치 철저**

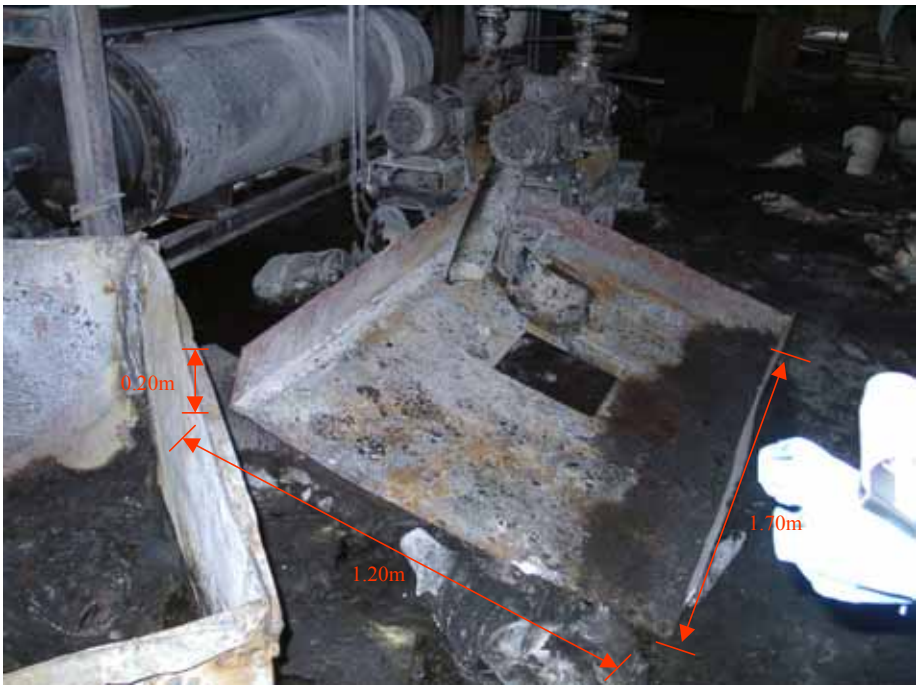
- 화기작업 전에는 인화성물질의 존재여부를 확인하고 화재·폭발을 예방하기 위해 인화성물질을 제거하는 등 안전상의 조치를 취한 후 작업을 실시할 수 있도록 하여야 하며, 작업중에는 작업지역 주변의 인화성물질 증기 농도를 수시로 측정하여 안전성이 확보된 지 여부를 지속적으로 감시할 수 있도록 하여야 함.

o **정기적인 인화성물질 증기농도 측정**

- 유수분리기에서 인화성물질이 분리되지 않고 지하저장조로 유입될 경우 물과 층 분리가 되어 상부에 인화성물질이 존재하고 하부에 물이 존재함.
- 따라서 지하 저장조에서 폐수를 공정으로 이송할 경우 하부 폐수만 이송되고 상부의 인화성물질은 지하저장설비에 정체될 수 있으므로 정기적으로 지하저장조의 인화성물질 증기농도를 측정하여 화재·폭발을 예방할 수 있도록 하여야 함.

□ 관련사진

<사진 1> 개구부 턱의 높이



<사진 2> 개구부 덮개

<사진 3> 폭발사고가 발생한 폐수증발농축건조실

클로로술폰산 저장탱크 폭발사고

1. 사고개요

2004. 1. 14 안산 소재의 (주)○○화학의 클로로술폰산 저장탱크 상부 용단 작업 중 폭발사고가 발생하여 1명 사망함.

2. 사고물질의 특성

○ 클로로술폰산

* 부식성, 반응성 물질로서 강력한 흡수성이 있음
* 수분 및 대부분의 금속과 반응하여 수소, 가연성 가스 발생
* 수분 또는 대기중의 수분과 접촉하여 염산 및 황산 흄 발생

3. 사고발생공정 및 운전상황

가. 재해발생공정

사고 발생공정은 Ammonium Lauryl Sulfate(계면활성제)제조 공정에 사용되는 원료인 클로로술폰산(Chloro Sulfonic Acid)저장탱크로써, 이를 폐기 처분하기 위하여 사전 탱크 내부를 확인하기 위하여 저장탱크의 경판과 동판 사이의 용접부위에 대하여 아크용접기로 용단작업을 하는중 폭발이 발생하여 저장탱크의 지붕은 사고 지점으로부터 바닷가 쪽으로 약 50 m가량 비산되었음.

4. 사고원인 분석

4.1 클로로 슬폰산 저장탱크내의 가연성 가스발생원인

O 3년전 사용 중지된 클로로 슬폰산 저장탱크의 상부노즐 등을 통하여 탱크 내부로 유입된 빗물 또는 대기중의 습기와 소량의 클로로 슬폰산이 저장탱크 내부에서 반응하여 수소 또는 가연성 가스가 방출되어 탱크내부에 체류하고 있었으며

O 더욱이 사고 전날의 탱크 세정을 위하여 주입한 물, 스팀이 저장탱크 내부의 잔여 클로로 슬폰산과 반응하여 수소 또는 가연성 가스가 방출되어 탱크내부에 체류하고 있었을 것으로 판단됨

*** 탱크 지붕 중앙에 65A 벤트 노즐(밀폐형 배관으로 스크라버와 연결되어 발생되는 염산 흄 등을 처리)이 설치되어 있으나 발생된 가연성 가스가 완전히 탱크외부로 배출되지는 못하고 탱크 내부에 체류하고 있었을 것으로 판단됨**

4.2 점화원

O 사고 당일 재해자가 탱크 폐기전 탱크내부를 확인하기 위하여 용단작업(저장탱크의 경판과 동판 사이의 용접부위에 대하여 용단 작업을 하였을 것으로 추정됨)을 수행하였으며 이 과정중 발생한 용단 불꽃이 용단부위를 통하여 들어가 탱크 내부에 체류하고 있는 가연성가스에 점화되어 폭발이 발생한 것으로 판단됨

5. 사고방지 대책

■ 관리적 측면

가. 안전작업허가서 발행
위험물질 저장탱크 등에서의 화기 작업 등을 수행하는 경우에는 구두가 아닌 안전작업허가서를 반드시 발행하고 이 절차에 준하여 작업을 하도록 하여야 할 것임.

나. 안전교육
위험작업을 수행하기 전 반드시 작업자에 저장취급하고 있는 물질에 대한 위험성, 폐기 처분 방법 등 제반안전 사항에 대하여 사전교육을 실시하여야 할 것임.

■ 설비적 측면

가. 저장탱크 재질

클로로 슬폰산은 주철, 황동, 청동 및 대부분의 비철금속에 대하여 부식성을 갖고 있으므로, 가급적이면 Glass Lined Steel 재질의 용기를 사용하는 것이 바람직함.

나. 저장탱크 노즐

저장탱크에 설치된 모든 노즐에 대하여 용접을 실시하여 저장탱크의 내부를 검사 또는 보수하기 위하여는 화기등을 사용한 용단작업이 불가피함. 따라서 모든 노즐 부위는 용접이 아닌 볼팅에 의한 플렌지 방식으로 하여야 함.

다. 질소 밀봉

클로로 슬폰산은 흡수성이 강하며 대부분의 금속, 물 또는 대기중의 수분을 흡수하여 수소, 가연성 가스 등을 발생시키므로 저장탱크에 질소 밀봉 시설을 설치하여 대기중의 공기가 탱크 내부로 유입되지 않도록 조치하여야 함.

라. 기타

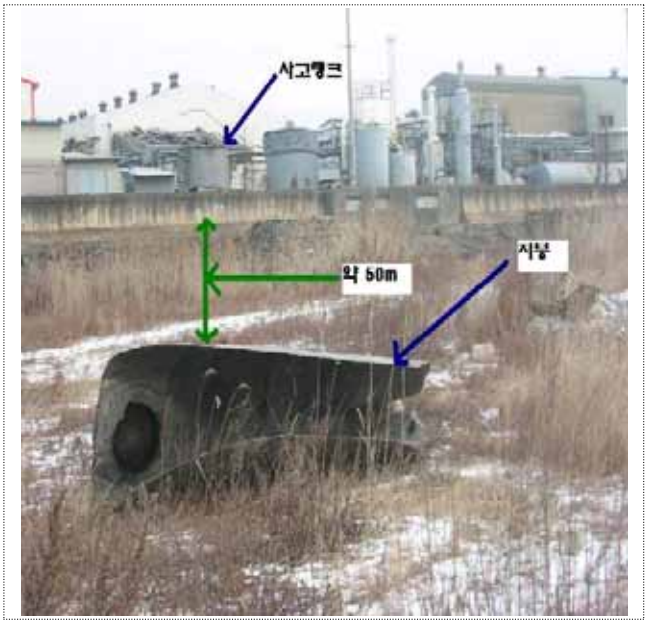
(1) 탱크 내부를 세정하는 경우에는 반드시 질소 등을 이용하여 탱크 내부에 남아 있는 클로로 슬폰산을 제거한 후

(2) 세정작업중 발생할 수 있는 가연성 가스가 모두 벤트되도록 모든 탱크의 노즐 등을 개방하고

(3) 물/스팀으로 완전히 세정하여 탱크내부에 클로로 슬폰산, 수소 등의 가연성 가스가 체류하지 않도록 세정하여야 함.

(4) 가연성 가스측정기를 이용하여 탱크 내부의 가연성 가스농도를 측정하여 안전하다고 판단되는 경우 탱크내부로 들어가거나 또는 화기 작업 등을 수행하여야 함.

□ 관련사진

	사진1 사고탱크 내부모습
	사진2 사고탱크와 지붕

불법휘발유 제조공장 화재·폭발사고

1. 사고개요

2004. 4. 8 16:00분경 무허가등록업체 불법휘발유 제조공장 화재・폭발 발생으로 5명 중화상 당한 사고임.

2. 사고물질

불법 휘발유 제조 원료로 사용되는 신나, 톨루엔, 메틸알콜 저장용기(이동용, 용량 약 1.5 m3)로 추정됨.

- 이동용 원료(신나, 톨루엔, 메틸알콜)를 저장하는 지역에서 최초 점화되어 주변의 불법 휘발유 제품 캔(용량 18리터), 불법휘발유 혼합 탱크, 원료(혼합) 이송 펌프, 제품 포장 펌프 및 공장동 건물 2동으로 화재가 확산.

* 현장 확인 결과 원료(신나, 톨루엔, 메틸 알콜) 저장용기를 저장하는 지역에 있는 이동용 원료 저장용기 보호를 위한 외부 금속 케이스의 손상이 심한 것으로 보아 최초 화재는 이동용 원료(신나, 톨루엔, 메틸 알콜) 저장용기를 저장하는 지역에서 발생한 것으로 추정됨.

3. 사고발생공정 및 운전상황

- 원료를 실은 5톤 트럭 도착/ 공장의 한 구역에 이동용 원료저장용기 하치.
- 전동 지게차로 이동용 원료저장용기를 혼합탱크 옆으로 옮긴 후, Flexible Hose를 이용하여 각 이동용 원료저장용기와 원료 주입배관(Manifold)을 연결
- 원료 이송용 펌프를 가동하여 혼합탱크에 원료 이송 후 펌프를 이용하여 원료 혼합
- 제품포장용 펌프를 이용하여 제품 캔에 포장출고

4. 사고원인 분석

O 이동용 원료저장용기를 옮기는 작업중 전동지게차고장으로 전원인 밧데리 확인 또는 교체중 밧데리가 폭발하거나 또는 스파크 발생으로 주변의 솔벤트에 점화되어 화재 발생.
 * 전동지게차의 밧데리 덮개가 내부 충격으로 일부 열려 있었음.

O 원료취급시 또는 작업 도중 작업자가 담배를 피우기 위하여 라이터 등을 사용하는 순간 주변의 솔벤트에 점화되어 화재 발생

O 원료 이송 펌프 또는 제품포장용 펌프 등전기 기기 및 설비는 방폭형이 아닌 일반형으로서, 이들 전기 기기 및 설비에서 발생한 스파크에 의하여 주변의 솔벤트에 점화되어 화재·폭발 발생

O 아크용접기 또는 산소용접기 등을 사용하여 배관 또는 설비 개조를 위한 용접 작업중 발생한 용접 불꽃이 주변의 솔벤트에 점화되어 화재·폭발 발생

5. 사고방지 대책

- 불법휘발유 제조금지
- 무허가 무등록 공장의 설립 금지

□ 관련사진

	사진1 공장 전경 - 공장 2동 중 공장1동은 완파
	사진2 제품저장 캔(용량 18리터)

원료저장탱크 청소작업 중 폭발

1. 사고개요

2004. 4. 9(금) 오전 10:30분경 전남 여수시 소재 ○○산업(주)에서 원료저장탱크(FB-302) 내부 바닥의 슬러지(Sludge)를 걸레로 청소하던 중 탱크내부에 체류되어있던 저장물질의 증기가 점화원에 의해 폭발하여 작업자 2명이 화상 등의 재해를 입음.

2. 사고물질의 특성

가. 물리적 반응

구 분	Light Polymer
분자식	C12H26
폭발한계	0.6 % (LEL)
인화점	26 ℃
발화점	203 ℃
증기압	3 mmHg@20℃

※ Light Polymer는 N-도데칸(42-52%), C16(23-27%), C8(15-20%), C16(5-16%)로 구성되어 있는 혼합물질임.

나. 기인물

※ 사고발생 설비(Light Polymer 원료 저장탱크)

- 크기 : ID 6,500 × TL 5,800 (mm)
- 재질 : A283-C 탄소강(두께 6mm)
- 운전온도/압력 : AMB / ATM
- 설계온도/압력 : 60℃ / 250mmAq
- 맨홀갯수 : 2개(Shell), 2개(Roof)
- 연결배관 : Inlet 2″, Outlet 4″

3. 사고발생공정 및 운전상황

- 사고당일(4월 9일) FB-302 탱크내부의 LP 용액을 배출시킨 후,

- 탱크내부의 잔류 LP를 면 걸레 및 쓰레받기를 사용하여 탱크바닥 Sump로 모은 후, 철 양동이(20L)에 담아 외부로 배출하였으며,

- 마지막으로, 탱크바닥에 미량 남아있던 찌꺼기(Sludge)를 제거하기 위해 면 걸레로 탱크바닥을 닦아내던 중,

- 폭발이 발생됨(1명이 입조하여 걸레청소 작업하고, 1명은 맨홀 밖에서 작업 중이었음)

4. 사고원인 분석

□ 직접원인

o 공기(산소)

사고발생 탱크(FB-302)의 본체 및 상부맨홀을 통해 대기중의 공기가 내부로 유입되어 산소가 공급됨.

o 가연물 (FB-302 내부의 LP 및 Sludge)

- 탱크내부의 LP 용액을 배출시킨 후 잔류하고 있던 LP 및 Sludge의 증기가 배출되지 못하고 체류하고 있었을 가능성이 있음.
  ※ 탱크내부를 강제 퍼지(Purge)하지 않고 상·하부의 맨홀(20“)을 열어 자연환기만을 실시하였기 때문에 탱크내부의 효과적인 퍼지가 이루어지지 않았을 것임.

- LP 증기압이 3mmHg@20℃로 낮아 휘발량은 작으나, 격벽으로 분리된 FB-302 우측 저장탱크에 저장되어 있던 LP가 증발하여 청소중이던 저장탱크 좌측부분으로 넘어갈 가능성이 있음.

o 점화원

① 금속의 충돌에 의한 불꽃

탱크바닥 청소작업에 사용된 철 양동이가 불꽃을 발생시킬 수는 있으나 청소작업 중 불꽃을 발생시킬 수 있는 충격을 주기는 어려우며, 현장검증결과 철 양동이에는 점화원으로서의 화염흔적을 발견할 수 없었음.

② 휴대용랜턴

작업시 사용한 랜턴이 점화원으로 작용할 수 있으나, 사고당시 랜턴이 켜져 있었다는 피재자 진술과 청소작업 중 스위치를 동작시킬 이유가 없었으므로, 이로 인한 점화가능성은 낮음

③ 정전기

- 현장확인 결과, 초기점화장소는 탱크바닥의 Sump 주변으로 보이며, 이곳은 맨홀입구에 가깝게 위치하고 있어, LP증기의 폭발하한(0.6%)을 넘어서 폭발하기 쉬운 농도에 있었던 것으로 추정되며,

- 에폭시코팅된 탱크바닥면과 폴리에스테르가 일부 함유된 면걸레의 상호 마찰에 의해 발생한 정전기가 에폭시코팅 표면에 축적되어, 작업자 또는 청소 도구 등에 순간방전 됨으로서 점화원으로 작용하였을 가능성이 높음.

□ 간접원인

o 탱크내부 퍼지 미흡

탱크내부가 격벽으로 분리되어 있는 경우에는 탱크내부에 저장된 위험물질을 모두 배출시켜야 하나, 격벽으로 분리된 탱크우측의 LP는 배출시키지 않고 탱크 상·하부 맨홀을 개방하여 자연환기만을 실시하므로써, 작업초기에는 LP농도가 폭발하한에 미달하여 안전할 수도 있으나, 작업을 진행하는 동안 잔류 LP 및 찌꺼기(Sludge)에 함유된 LP증기가 지속적으로 발생하여 폭발하한치(0.6%)를 초과한 것으로 추정됨.

o 가스측정 미실시 및 안전작업허가서 기재 누락

사고발생 탱크(FB-302)의 LP 농도가 폭발하한치 0.6%를 쉽게 초과할 수 있으나, 안전작업허가서에는 탱크내부의 산소농도(21%)값만 기록하였고 가연성가스는 측정 및 기록된 내용이 없음.

o 작업지시서의 물질안전정보 제공미흡

작업지시 전 사고발생 물질인 LP에 대한 물질안전정보의 제공이 미흡하여 작업자가 폭발의 위험성 및 정전기에 의한 점화 가능성을 인지하지 못하였던 것으로 추정됨.

5. 사고방지 대책

o 탱크내의 위험물질 제거 철저(퍼지 철저 및 퍼지방법 개선)

탱크내부가 격벽으로 분리된 경우에는 내부에 저장된 위험물질을 모두 배출시켜야 하며, 입조작업 전에는 강제 송풍과 배풍을 동시에 실시하여 탱크내부의 폭발성 분위기를 완전히 제거하고, 가연성가스 농도를 측정하여 안전한 지를 확인한 후 작업을 실시하여야 함.

o 가스농도측정 철저

탱크내 입조작업등 위험작업을 수행할 경우에는 작업전, 작업중 수시로 가연성가스 농도, 산소농도를 측정하여 기록하여야 하며, 보호구 착용상태, 방폭설비 성능유지 여부 등을 확인하여야 함.

o 방폭구조의 렌턴 사용

LP증기와 같은 가연성 증기가 체류할 가능성이 있는 곳에서 사용되는 휴대용렌턴은 방폭성능을 갖춘 것을 사용하여야 함.

o 작업지시서의 물질안전정보 제공

작업시작전 작업지시서에 취급물질(LP)에 대한 물질안전보건정보를 제공하여 작업자가 폭발의 위험성 및 정전기에 의한 점화 가능성을 인지할 수 있도록 하여야 함.

o 제전복 착용

가연성가스, 인화성물질을 취급하는 공장내에서 착용하는 작업복은 제전사가

들어 있는 제전복으로 하여 근로자 인체에 축적되어 있는 정전기가 위험전위 이하로 상시 방전되도록 하여야 함

□ 관련사진

<사진 1> 파열된 LP 원료탱크 상부

<사진 2> 탱크내부의 발화 추정지역

합성섬유 원단코팅 작업 중 건조기 폭발

1. 사고개요

2004년 4월 10일 17시 7분경 경기도 평택시 소재 (주)○○ 평택공장에서 신제품인 고무코팅 원단을 생산하기 위하여 합성섬유 원단에 톨루엔에 용해된 NBR고무 용액을 코팅하던 중 도포한 원단을 건조하는 건조기 내부에서 폭발이 발생하여 1명이 사망하고 2명이 화상을 당한 사고임.

2. 사고물질 및 설비의 특성

○ 건조기 사양 : 폭 2m, 길이 15m 간접가열 방식으로 LPG연료를 사용하여 버너에서 나오는 열원으로 공기를 가열하여 가열된 공기가 건조기 내부의 노즐을 통하여 코팅원단의 상부에 공급되어 원단에 포함된 용제를 증발시키는 구조임

○ 코팅 원단 : 나일론 계열의 합성섬유이며 원단을 감을 때 정전기가 많이 발생하는 소재(공장장 진술내용)임

3. 사고발생공정 및 운전상황

- 톨루엔에 NBR고무를 용해하여 코팅액을 제조하였으며 코팅액을 도포할 합성섬유 원단을 접합하는 등 작업준비를 완료함

- 건조기에 부착된 LPG 버너를 가동하여 건조기 내부온도를 150℃로 유지함(설정온도 150 ℃)

- 원단 코팅작업을 실시 중 건조기 내부가 폭발하여 1명이 사망하고 2명이 화상을 당함

4. 사고원인 분석

□ 건조로 설비 부적절

- 톨루엔 등 인화성이 강한 위험물을 건조하는 건조기는 폭발구(폭발방산구)를 설치하여 내부 폭발시 폭발구를 통하여 과압이 해소되도록 하여야 하나 폭발구가 미설치됨

- 위험물을 건조하는 건조기는 내부에서 발생하는 위험물 증기 등이 건조기 내부에 체류하지 않도록 국소배기시설 등을 통하여 안전한 지역으로 배출하여야 하나 사고 발생 건조기 내부에 톨루엔 증기가 체류하여 폭발하였음으로 판단해 볼 때 배기용량이 부족하거나 가동상태가 불량하였을 것으로 추정됨

□ 점화원 관리 부적절

- 코팅작업 전 코팅할 원단을 접합하고 되감는 작업(리와인딩작업)을 실시할 때 정전기가 과다하게 발생한다는 사실을 감지하였음에도 불구하고 내부에 구리 소재로 된 롤만 설치하고 발생된 정전기가 충분히 제거되는지 확인하지 않은 상태에서 작업을 수행함

- 건조기 입구의 전기패널 및 전기기계기구가 비방폭형 구조의 설비로서 여기서 발생한 스파크 등이 점화원을 제공하였을 가능성이 있음

□ 관련사진

사진 1. 건조기 전경

사진 2 . 건조기 세부사진

가스홀더 상부 레벨게이지 개조작업중 폭발사고

1. 사고개요

2004년 4월 22일 15:00경 울산시 소재 (주)○○ 울산공장의 솔비톨 제조공정의 수소 Gas Holder(50㎥) 상부 레벨게이지 개조작업중 용접불꽃에 의한 폭발사고로 협력업체((주)○○) 직원 3명이 사망한 사고임.

2. 사고물질의 특성

가. 솔비톨의 물리·화학적 반응

○ 분자량 : 182.12

○ 인화점 : 283℃

○ 용도 : 자연계에 광범위하게 존재하며 특히 과실류(1～2%), 해조류 등에 다양 함유되어 있으며 상쾌한 청량감과 치약, 수산물, 식품, 의약품 등의 원료 및 첨가제로 사용됨

나. 기인물

(1) 설비명 : 수소 Gas Holder

○ 용도 : 저압의 수소를 저장하기 위해 Holder하부에 물을 채우고 (Water seal) 상부에 수소를 저장하는 설비

○ Holder 지름 : (하부. 5,350㎜), (상부. 4,850㎜)

(2) 물질명 : 수소

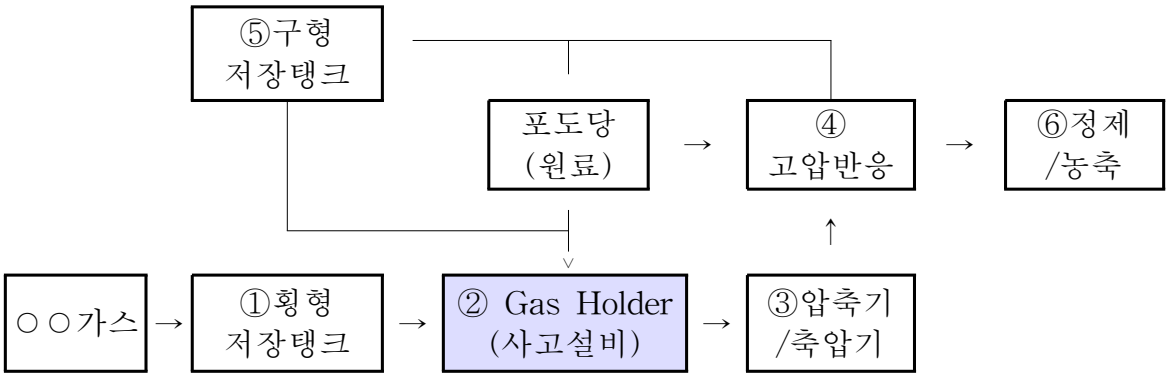
○ 분자량 : 2

○ 폭발하한계/상한계 : 4.0/74.2(부피%)

○ 가스비중 : 0.06952

3. 사고발생공정 및 운전상황

가. 공정흐름도



① ○○가스에서 수소를 공급받아 횡형 저장탱크에 저장함

② 횡형저장탱크와 반응 후 미반응 수소를 Gas Holder에 저장함**(사고발생설비)**

③ 수소를 고압(80㎏/㎠)으로 반응기에 투입함

④ 니켈촉매에서 포도당과 수소를 반응시켜 솔비톨을 생성시키고(운전온도 : 120℃, 운전압력:50~90㎏/㎠) 미반응 수소는 구형탱크 또는 Gas Holder에 저장함

⑤ 구형저장탱크에서 저장한 수소를 Gas Holder로 공급함

⑥ 니켈촉매는 반응물과 분리하고, 반응액은 알카리처리(미반응 포도당 처리), 활성탄 흡착(불순물, 색깔, 냄새 등 제거) 및 이온교환정제(중금속 성분과 색깔 제거) 등을 거쳐 농축하고 성형, 분쇄 및 건조하여 포장함

4. 사고원인 분석

○ 가연성가스가 체류하고 있는 Gas Holder에서 용접 실시

- 수소 Gas Holder의 부자식 레벨게이지를 개조하기 위하여 Gas Holder 상부에서 용접작업시 폭발사고를 예방하기 위해 Gas Holder 내부를 질소로 치환작업 등을 실시하였으나 가연성가스를 완전히 제거하지 못한 상태에서 용접작업을 실시함

○ 화학설비와 그 부속설비 개조시 안전관리 소홀

- 수소 Gas Holder의 레벨게이지를 개조하기 위해 작업을 실시할 때에는 작업장 및 그 주변의 가연성가스의 농도를 수시로 측정하고 작업책임자를 정하여 당해 작업을 지휘하도록 하여야 하나 이를 소홀히 함
- 수소 Gas Holder에서 화기작업시에는 가연성가스가 유입되지 않도록 인·출입배관 플랜지 사이에 맹판을 설치하여야 하나 이를 설치하지 않는 등 안전관리상의 조치를 소홀히 함

○ 안전작업허가 및 작업표준 작성·준수상태 불량

- 수소 Gas Holder의 레벨게이지 개조작업에 대해서 위험장소 작업허가서를 작업 당일에 발행하지 않고 작업 전일에 발행하였으며 작업허가서 발행시 가장 핵심적인 점검항목인 가연성가스 농도 측정 항목이 누락되는 등 안전작업허가 절차서 준수가 불량함
- 가연성가스 감지기에 대한 검·교정이 이루어지지 않았으며 이를 관리할 수 있는 담당자가 지정되어 있지 않고 치환작업에 대한 작업표준이 현장에서 시행하는 방법과 상이하는 등 안전작업표준서의 작성 및 준수가 지극히 불량함

○ P&ID 등 공정도면 관리상태 결여

- 설비, 배관 등의 치환작업 및 점검·수리·보수·운전시 사용할 수 있도록 배관, 밸브, 압력용기, 필터류, 각종 계장·계기류 등의 현장와 일치하는 P&ID를 작성하여 사용할 수 있도록 하여야 하나 이를 실시하지 않았음

5. 사고방지 대책

○ 가연성가스가 체류할 가능성이 있는 장소에서 화기 작업시 안전조치 철저

- 가연성가스 등이 존재할 가능성이 있는 곳에서 화기작업을 실시하기 위해 질소 등 불활성가스로 치환할 경우 불활성가스 공급량 및 치환횟수는 가연성가스의 폭발하한치를 초과하지 않도록 충분히 이루어져야 하며 치환을 실시한 후 가연성가스농도를 측정하여 안전성이 확보된 상태에서 화기작업을 실시하여야 함

○ **화학설비와 그 부속설비 개조·보수 및 수리시 안전관리 철저**

- 수소 등 가연성가스를 취급하는 화학설비와 그 부속설비를 개조·보수 및 수리시에는 작업장 및 그 주변의 가연성가스농도를 수시로 측정하여 안전성이 확보된 지 여부를 지속적으로 감시할 수 있도록 하여야 함
- 작업책임자를 정하여 당해 작업을 지휘·감독하도록 하고 당해 작업방법 및 순서를 정하여 작업전에 관계 근로자에게 교육을 실시하여야 함
- 가연성가스를 취급하는 배관, 용기 등에 대해 작업을 실시할 경우는 가연성가스 유입을 방지하기 위해 플랜지 사이에 맹판 설치 등 안전조치를 철저히 하여야 함

○ **안전작업 및 작업표준서 보완 및 준수**

- 화기작업, 밀폐공간작업 등에 대한 안전작업허가서를 발행할 경우는 가연성가스 농도 및 산소농도 측정항목을 추가하고 작업시간이 8시간을 경과할 시에는 작업허가서를 재발행 받고 작업을 수행할 수 있도록 표준서를 보완하며, 이를 준수할 수 있도록 하여야 함
- 가연성가스 감지기는 담당자를 지정하여 관리할 수 있도록 하고 정기적으로 검·교정을 실시하여 그 기능을 항상 유지할 수 있도록 하여야 함
- 각종 표준서 중 현재 시행하는 방법과 상이한 것은 관련 표준서를 개정하고 관련 근로자들에게 교육을 실시하여 이를 준수할 수 있도록 하여야 함

○ **P&ID 등 공정도면 관리 철저**

- 설비, 배관 등의 치환작업, 점검·수리·보수시 사용할 수 있도록 배관, 밸브, 압력용기, 필터류, 각종계장·계기류 등을 포함시킨 P&ID를 작성하여 관리할 수 있도록 하여야 하며, 변경시에는 지속적으로 Up-date하여 최신의 도면을 확보할 수 있도록 하여야 함

□ 관련사진

<사진 1> 폭발사고가 발생한 수소 Gas Holder

<사진 2> 수소 Gas Holder Vent 배관의 차단밸브

정제탱크 슬러리 제거작업 중 화재사고

1. 사고개요

2004.4.27 오후 9시 45분경 대전시 소재 (주)○○ CMC 제조설비의 정제공정에서 CMC 제조공정의 정제탱크내부 슬러리 제거를 위해 탱크내부에 들어가 작업중 정제탱크 내부의 메탄올이 맨홀상부에서 탱크내부를 비추던 조명등의 배선 인입구로부터 발생한 전기스파크에 점화되어 화재가 발생하여 탱크내부에서 작업중이던 작업자 1명이 화상 및 탱크내 산소부족으로 사망하고 탱크외부의 작업자1명이 부상을 입은 사고임.

2. 사고 물질의 특성

가. 메틸 알콜의 물리·화학적 반응

- 인화점: 52 F (11 C) (CC)
- 폭발하한선: 6.0%
- 폭발상한선: 36.0%
- 발화점: 385 ℃
- 분자량: 32.04
- 증기 밀도(공기=1): 1.11
- 비중(물=1): 0.7914
- 물 용해도: 수용성

나. 기인물

- 명칭 : 정제탱크
- 용량 : 20 ㎥
- 규격 : ID 3200x2938 H
- 재질 : KS D 3576(SUS 304)
- 운전압력 : 상압
- 운전온도 : 상온
- 내용물 : CMC + 메탄올

3. 사고발생공정 및 운전상황

가. 재해발생공정

o 사고당일 정제작업중 정제탱크의 하부로부터 다음 건조공정으로 이송되는 배관(50A)의 막힘현상이 발생하여 작업자가 막힘 제거 작업실시.

o 작업전 공기치환을 위한 송기팬을 설치하였으나 실제 사용되지 않았으며 작업자는 공기관식 호흡마스크를 착용후 맨홀을 통하여 정제탱크에 들어가고 다른 3인의 작업자은 정제조 상부에서 작업을 보조함.

o 작업중 정제탱크 내부의 조명확보를 위하여 방폭조명등을 맨홀에 매달아 사용하였으며 작업시작시 조명등의 깜박거림과 함께 스파크가 발생하고 곧바로 탱크내부에 화재가 발생함.

※ 방폭조명등 사양 : 220V, 100W, 방폭형식 : ExdIIBT4(내압방폭), 남북전기, 방폭검정품

4. 사고원인 분석

(1) 공정안전보고서 내용 미준수

- 회사내 공정안전보고서에 명시된 안전작업허가를 받지 않고 제한공간 출입작업이 이루어졌음

(2) 인화성물질의 제거 및 환기 부족

- 인화성물질인 메탄올이 체류하는 탱크내부 작업시 내부의 인화성물질을 완전히 배출·제거하지 않아 인화성증기가 탱크내부에 체류하게 되었으며

- 인화성증기가 체류된 상태에서 작업전에 충분한 환기조치를 취하지 않아 탱크내부에 폭발분위기가 형성됨.

(3) 가스검지 미실시

- 인화성물질이 체류할 가능성이 매우 높은 상태에서 폭발분위기의 형성을 파악하기 위한 가스검지조치를 하지 않고 작업을 실시함.

(4) 전기기계기구의 부적절한 설치 및 사용

- 사고발생시 사용한 조명등은 고정식으로 설치, 사용하는 기기를 사용조건이 맞지 않는 이동식으로 사용하여 기기의 결함을 초래함.

(5) 방폭기기의 유지관리 미비

- 내압형 방폭기기의 배선연결시 금속전선관을 사용하여 견고하게 설치하여야 하나 임의의 방법으로 전원선을 연결함으로서 전선의 절연이 파손되고 방폭기능을 상실하게 됨.

(6) 배선 절연피복의 안전조치 미비

- 이동전선을 사용함에 있어 절연피복의 손상에 대한 적절한 예방 및 점검이 이루어지지 않아 절연이 손상된 전선으로부터 스파크가 발생하고 점화원이 제공됨

(7) 이상상태 발생시 구조기구 비치 및 응급조치 미비

- 질식 및 폭발위험이 높은 탱크내 작업을 실시함에 있어 비상시에 근로자를 구조할 기구가 없어 구조대가 올 때까지 작업자가 탱크내에 방치됨에 따라 사망사고에 이르게 됨.

5. 사고방지 대책

(1) 공정안전보고서 내용 준수

- 제한공간출입시 공정안전보고서에 따른 안전작업허가를 받고 관련 허가내용에 따라 필요한 안전조치를 취하여야 함.

(2) 작업전 인화성물질의 제거 및 환기

- 인화성물질인 메탄올이 체류하는 탱크내부 작업시 공정수 등을 이용하여 내부의 인화성물질을 완전히 세척 및 배출하고

- 작업전에 충분한 통풍 또는 환기조치를 통하여 탱크내부의 폭발분위기를 제거 하여야 함.

(3) 작업전 가스검지 실시 또는 경보장치 설치

- 화학설비의 탱크내부 작업시 탱크내에 인화성증기가 체류물질이 체류할 가능성이 매우 높으므로 탱크 입조전 및 정기적으로 가스검지를 실시하거나 경보장치를 설치하여 수시로 인화성증기의 체류여부를 확인하여야 함.

(4) 사용조건에 맞는 전기기계기구의 사용

- 전기기계·기구의 설치시 제조자의 제품설명서나 사양에서 정하는 조건에 따라 설치 및 사용하여야 함.

(5) 방폭기기의 선정·설치 및 기능유지

- 방폭지역내의 이동식 조명이 필요한 경우 이동식으로 설계된 전등이나 랜턴을 사용하여야 하며 방폭전선의 배선도 방폭기능을 유지할 수 있도록 설치, 유지하여야 함.

(6) 배선 절연피복의 안전조치

- 이동전선을 사용함에 있어 작업전 또는 정기적으로 절연피복의 손상여부에 대한 점검을 실시하여 손상된 전선은 보수 및 교체하여야 함.

(7) 입조작업시 비상조치 계획 수립

- 질식 및 화재사고의 위험이 높은 위험물 취급 탱크내 작업을 실시해야 할 경우 작업전 안전절차외에 이동식 공기호흡기 및 구명대의 준비 등 작업자 구출에 필요한 기구를 준비하고 이에 필요한 비상조치계획을 시행하여야 함.

□ 관련사진

사진1. 사고발생 정제탱크 상부에서 본모습

사진2. 사고발생 정제탱크 하단에서 본 모습

메틸알콜 저장탱크 파열사고

1. 사고개요

2004. 5. 25 13:30 분경 경기도 안성시 소재 (주)○○ 공장 메틸알콜 저장탱크의 탱크내부에서 폭발이 발생하여 근로자 2명이 사망한 사고임.

2. 사고물질의 특성

가. 물리적 반응

○ 메틸알콜 저장탱크

- 형태 : 원형 돔 탱크
- 용량 : 22,500ℓ
- 제원 : 직경 3m x 높이 3m
- 재질 : STS 304(두께 4mm)

3. 사고원인 분석

- 메틸알콜은 인화점이 11℃ 인 인화성 액체로 인화점이 38℃ 미만인 저장탱크 통기관에는 역화방지기를 설치하여야 하나 사고발생 메틸알콜 저장탱크 통기관에는 인화방지망만 설치되어있는 상태로 역화방지기능이 미흡하였을 것으로 추정됨
- 인화성 유류 등을 취급하던 탱크 등의 용접, 용단작업시 미리 내부를 세척하거나 불활성 가스로 탱크내부가스를 치환하는 등 화재·폭발을 예방하기 위한 조치를 취한 후가 아니면 화기를 사용하거나 불꽃을 발생시키는 작업을 금하여야 하나 이를 소홀히 함.

4. 사고방지 대책

■ 안전작업허가 절차 철저 준수

- 위험물질 사용·보유 설비에 대한 화기작업시 내부의 가연성가스·인화성 증기를 폭발한계 이하가 될 때까지 철저히 퍼지한 후 작업에 임해야 할 것임.

■ 안전교육 철저

- 보유·사용 위험물질에 대한 화재·폭발위험성을 주지시키고
- 작업전 안전작업절차를 철저히 준수토록 교육시켜야 함.

□ 관련사진

[사진1]. 사고 발생 공장 전경

[사진2]. 폭발 후 전도된 메틸알콜 탱크

유사휘발유 제조 중 화재사고

1. 사고개요

2004년 6월 6일(일) 오전 06 : 32 분경 충남 소재 (구)○○기업에서 유사휘발유를 제조하던 중 작업장내에 화재가 발생하여 2명이 사망하고 1명이 부상당한 사고임.

2. 사고물질의 특성

가. 물리적 반응

□ 화학물질명 : 유사휘발유(솔벤트 및 톨루엔 혼합)
□ CAS No. : 1330-20-7 / 108-88-3
□ 보 유 량 : 44㎥(22 ㎥탱크 2기)

<솔벤트>
- 인화점: 25 ℃이하
- 폭발하한치: 1.0%
- 폭발상한치: 7.0%
- 발화점: 464-529 ℃
- 분자량: 106.16
- 증기 밀도(공기=1): 3.7
- 비중(물=1): 0.86-0.90
- 물 용해도: 0.00003%

<톨루엔>
- 인화점: 4 ℃이하
- 폭발하한치: 1.0%
- 폭발상한치: 7.1%
- 발화점: 480 ℃
- 분자량: 92.14
- 증기 밀도(공기=1): 3.14
- 비중(물=1): 0.8669
- 물 용해도: 0.05%

나. 기인물

□ 옥내저장 탱크
1) 22,000ℓ : 2기
※ (지름 약 3.2M, 높이 약 3.7M ⇒ 약 29,000ℓ의 용량임)
2) 16,000ℓ 1기

□ 건축물 구조
- 샌드위치 패널(EPS) 구조의 벽체 및 지붕
- 조명등 설치

3. 사고발생공정 및 운전상황

가. 재해발생공정

원료(톨루엔, 솔벤트) - 혼합 - 포장

※ 당해 사업장에서는 솔벤트와 톨루엔을 6 : 4 의 비율로 혼합하여 유사휘발유를 제조하고 혼합이 완료된 제품(유사휘발유)을 분배용기를 거쳐 18ℓ 금속캔에 소분하여 판매하였음.

4. 사고원인 분석

(1) 인화성물질 이송중 담배 등 화기사용에 의한 점화

탱크로리로부터 저장탱크로 인화성물질을 이송중 담배 등 화기를 사용하였으며 부주의로 인하여 담배 등의 화기가 유증기 및 바닥에 고여있던 인화성물질에 접촉하여 점화가 이루어져 화재·폭발하였을 가능성이 있음.

(2) 포장 펌프를 이용한 인화성물질 이송중 정전기 발생

이송배관의 굵기가 작고(3inch) 배관의 본딩 및 용기접지가 되어 있지 않아 제품이송시 배관 및 용기마찰로 이송제품에 정전기가 축적된 상태에서 정전기로 인한 스파크가 용기 또는 제품 주입구 근처의 인화성증기에 인화하여 화재가 발생하였을 가능성이 있음.

(3) 비방폭형 전기설비(모터) 사용에 의한 점화

저장탱크부터 소분기로 유사휘발유를 이송하는 과정중 포장용 모터-펌프의 정지 및 재기동 과정중 발생한 전기스파크가 바닥에 누출되어

있는 유사휘발유의 증기에 접촉하여 점화가 이루어져 화재·폭발하였을 가능성이 있음.

5. 사고방지 대책

(1) 인화성물질 취급시 화기 제한

인화성이 높은 위험물질을 제조·운반·저장·사용하는 장소에서는 담배 등 불꽃으로 인하여 점화원이 될 수 있는 화기를 사용하지 않아야 함.

(2) 정전기로 인한 화재 폭발 방지

위험물을 탱크로리·탱크차 및 드럼 등 위험물저장설비에 이송하는 경우 정전기에 의한 화재 또는 폭발 등의 위험이 발생할 우려가 있는 때에는 이송에 관계된 배관 및 차량의 모든 금속제 부분을 전기적으로 연속성이 있도록 본딩하고 정전기 접지를 실시하여 축적된 정전기가 신속히 제전되도록 하여야 함.

(3) 폭발위험장소에서 사용하는 전기기계기구의 방폭화

인화성액체를 제조·취급 또는 사용함에 따라 화재 및 폭발의 위험이 있는 장소에서 사용하는 펌프, 전등 등 전기기계·기구는 방폭성능을 가진 방폭구조 전기기계·기구를 선정 및 사용하여야 함.

□ 관련 사진

사진 1. 사고 발생 현장 전경 (전면)

사진 2. 사고 발생 현장 전경 (저장탱크)

반응기 내부 잔압에 의한 사망사고

1. 사고개요

2004.6.18. 12:12경 여수시 소재 (주)○○화학 여수공장 MBS#2 공장에서 반응기(RE-5551A)의 반응이 종료되어 내부의 분석시료(Sample)를 채취하고자 반응기 맨홀 덮개를 열던 중 내부 잔압에 의해 덮개가 순간적으로 열리면서 근로자가 사망한 재해임.

2. 사고설비의 특성

가. 기인물

○ 반응기 및 맨홀 덮개 재원(기인물)
- 반응기 : 5,630mm Height * 3,500mm Dia.
- 맨홀 덮개(Hinge Type) : 650mm Dia. * 5mm Thk.(약130Kg)

3. 사고원인 분석

■ 직접원인

○ 화학설비 분해시 내부 압력제거 미흡
- 반응기 및 화학설비에 대하여 분해작업 시에는 내부의 압력이 완전히 제거됨을 압력게이지를 통하여 확인 후 분해작업을 실시하여야 하나 내부의 압력이 완전 제거되지 못하고 반응기 내부에 압력이 남아있는 상태에서 시료채취를 위하여 맨홀 덮개 해체를 실시함

■ 간접원인

○ 반응기에 설치된 압력계 위치 부적절
- 반응기는 10시간 정도의 반응 완료 후 시료 채취를 위하여 수시로 맨홀 덮

개를 여는 설비이므로 현장에 설치된 압력계가 작업위치에서 보이도록 설치되어야하나 반대편에 설치되어 덮개해체작업 시작 시 압력확인에 어려움이 있음

○ 작업원의 맨홀 덮개해체 방법 미흡

- 각종 맨홀 등의 크램프 또는 볼트 해체시에는 내부에 남아있을 수 있는 위험물의 비산 및 압력방출을 위하여 전체 크램프중 일부를 해체하여 쇄기 등을 이용, 위험물의 배출, 압력 존재여부를 확인 후 압력방출과정을 거쳐 전체의 크램프를 해체하여야 하나, 힌지의 반대편에 설치된 크램프 1개만 잠겨진 상태를 유지시키고 나머지 크램프를 해체하였음. 이로 인해 남아있던 1개의 크램프를 해체하던 중 나사산의 접촉면이 내부압력을 견디지 못하고 파손되어 맨홀이 순간적으로 열린 것으로 판단됨

○ 작업원의 작업절차 미숙지

- 내부 압력을 모두 배출시키고 반드시 조정실 운전자로부터 맨홀 덮개 개방 지시를 받은후 열도록 되어 있는 작업 절차서 상의 내용을 작업원에게 주지시키고 절차서에 따라 작업을 실시하여야 하나 작업원이 절차서의 내용을 정확히 숙지하지 못한 것으로 판단됨

4. 사고방지 대책

○ 반응기의 압력배출상태 이중확인

- 반응기의 반응 완료 후 반응기 내부의 압력을 제거하게 되면 압력이 대기압과 동일하게 균압이 되었는지를 조정실과 현장에서 각각 확인하고, 확인결과 두 곳 모두에서 균압이 확인된 후 맨홀 덮개를 개방하도록 하여야 함

○ 반응기에 설치된 압력계 위치조정

- 반응기는 수시로 덮개를 개방하는 설비이므로 현장에 설치된 압력계는 맨홀 덮개 개방작업 위치에서 보이도록 설치함이 바람직함

○ 화학설비 분해작업에 대한 교육

- 전문적인 정비인원이 아닌 일반 공정 운전원에 대하여서도 기본적인 설비 분해작업등에 대한 교육을 통하여 위험물질의 비산에 의한 피해방지 및 급격한 압력 방출에 대비할 수 있도록 적절한 교육 실시

○ 작업원의 작업별 작업절차 숙지

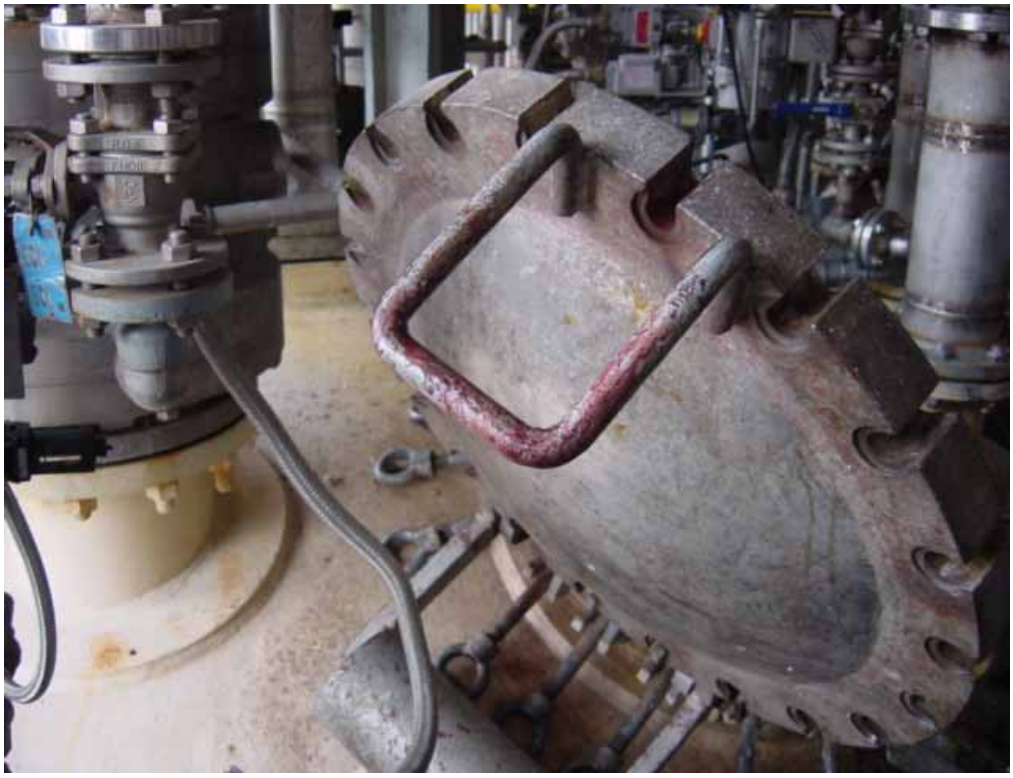
- 작업원이 해당작업을 실시할 때에는 작업방법 및 작업 중 발생할 수 있는 위험 등에 대하여 작성 및 근로자에게 주지시키고 정해진 작업절차서에 따라 작업을 실시하여야 함

○ 압력배출 배관수동개방

- 조정실에서 원격으로 반응기 내의 압력을 배출하는 배출밸브(PRCV-5551)에 설치된 우회배관(By-Pass Line)에 설치된 수동밸브를 반응기 맨홀 덮개 개방 전에 개방시킴으로서 반응기 내부의 압력을 확실하게 제거할 수 있음 (작업절차서 상에는 명시되어 있으나 실제 지켜지지 않음)

■ 관련사진

〔사진1〕 사고가 발생된 반응기의 맨홀 및 덮개



[사진 2] 가해물인 맨홀 덮개의 손잡이

황제거 반응기 폭발사고

1. 사고개요

2004. 8. 25, 17:00경에 전남 여수 소재의 ○○석유화학(주) 부타디엔공장 KLP공정에서 황제거반응기의 촉매 교체 준비작업으로 스팀 퍼지를 실시하던 중 부타디엔 과산화물의 자기분해 반응으로 반응기가 폭발하여 1명 사망, 1명 부상한 사고임.

2. 사고물질의 특성

가. 물리적 반응

○ 부타디엔 과산화물의 물리·화학적 특성

- 산소·공기, 산소화합물(산화철 등)이 PPM 단위로 존재하여도 부타디엔이 산소와 반응하여 Polymer성 Peroxide를 형성함
- 부타디엔 과산화물은 충격이나 열에 의해 자연발화하거나 분해반응을 일으킴
- Polymer Peroxide가 계의 온도상승으로 분해하면 Aldehyde가 형성되고 분해열은 320kcal/kg이며, 또한 Aldehyde는 중합을 일으키거나 추가 분해되며 추가적인 발열반응으로 닫혀진 계(System)에서는 압력상승으로 폭발함
- 폭속은 TNT(폭속:6,800m/s, 폭발열 : 1,000kcal/kg, 발생압력 : 66,200atm;밀도가 1.5kg/l인 경우)의 1/10정도이나, 최고압력 도달시간은 1/100초로 TNT 정도 혹은 그 이상의 힘으로 폭발함
- 분해율은 60℃에서 0.57~0.93%/h, 100℃에서 20~30%/h, 120~130℃에서 폭발적인 분해가 일어남

나. 기인물

□ 황제거 반응기(B-DC904)

o 용량 : 20.55m^3

- 직경 : 1,900mm

- 길이 : 6,600mm

o 설계

- 운전압력 : 6Kg/cm^{2}G, 설계압력 : 12.5Kg/cm^{2}G/F.V
- 운전온도 : 35℃, 설계온도 : 65℃

o 사용재질 : A516-70

o 비파괴검사율 : 20%

o 후열처리 유무 : NO

□ 예열기(B-EA901)

o 용량 : 16.4m^3(490kcal/h)

o 설계

- Shell(Condensate)
  운전압력 : 5.85Kg/cm^{2}G, 설계압력 : 9.6Kg/cm^{2}G/F.V
  운전온도 : 95/60℃, 설계온도 : 120℃
- Tube(Hydrocarbon)
  운전압력 : 5.77Kg/cm^{2}G, 설계압력 : 12.5Kg/cm^{2}G/F.V
  운전온도 : 10/35℃, 설계온도 : 65℃

o 재질 : A106-B

o 비파괴검사율 : SPOT

o 후열처리 유무 : NO

3. 사고발생공정 및 운전상황

가. 재해발생공정

① 사고발생공정은 부타디엔공장의 수첨반응기에서 촉매에 독으로 작용하는 황(S)성분을 제거하기 위하여 설치한 황제거 반응기(Sulfer Removal Reactor : B-DC904) 임.

② 황제거 반응기(B-DC904)의 황제거 성능이 저하되어, 반응기 내부에 충전된 촉매 (G-132D)를 교체하기 위해 공정을 정지시킨후, 반응기를 우회운전(By-pass Operation) 하는 중이었음.

③ 황제거 반응기에서 촉매층에 있는 C4유분을 배출시킨후, 잔류 탄화수소를 제거하기 위하여 질소퍼지를 실시하고, 스팀으로 추가 퍼지하기 위해 5시간 정도 스팀을 공급하던 중 반응기가 폭발함.

4. 사고원인 분석

■ 부타디엔 과산화물의 폭발 (추정되는 주원인)

(1) 기인물상 원인

○ 부타디엔 과산화물의 자기분해반응

- 반응기 내부에 축적되어 있던 불안정한 상태의 부타디엔 과산화물이 탄화수소 제거를 위해 공급된 스팀의 온도(147℃)에 의해 자기분해반응을 일으킨 것으로 추정됨

가. 기인물

- 원료인 부타디엔은 온도가 35℃이상에서 PPM 단위의 미량의 산소나 공기, 산화철(녹)과 접촉되는 조건에서 불안정한 부타디엔 과산화물이 생성됨.
- 이번 사고공정은 반응기 전단에 100℃의 스팀 응축수로 원료인 부타디엔을 가열시키는 예열기(Preheater : B-EA901)가 있어 부타디엔 과산화물이 생성된 것으로 추정 (일반적으로 부타디엔 공정상 생성되고 있음)
- 예열기에서 생성된 부타디엔 과산화물류가 반응기의 촉매층이나 촉매상부에 축적된 것으로 추정됨.

※ 또 하나의 부타디엔 생성원인으로, 반응기 내부에 들어있던 C4 혼합유분액을 배출시키고 질소를 공급하여 잔류 탄화수소를 제거할 때, 질소중에 포함된 미량의 산소가 부타디엔과 반응하여 부타디엔 과산화물을 생성 시킬 수 있으나, 질소 중 산소농도가 낮아 가능성은 희박함.

나. 점화원

- 부타디엔 과산화물은 불안정하여 온도가 높을 경우 별도 점화원 없이도 자기분해반응을 일으켜 자연 발화됨.
  이번 사고 반응기에서는, 자기분해 반응에 필요한 활성화 에너지는 탄화수소 제거를 위해 공급된 147℃의 고온 스팀으로 추정할 수 있

음

다. 산소

- 산소는 폭발에 반드시 필요한 요소의 하나는 아니나, 사고발생 주원인 물질로 추정되는 부타디엔 과산화물류는 자체에 산소를 포함하고 있을 뿐 만 아니라 자기분해 반응에 의해서도 폭발이 가능함

(2) 작업상 직접원인

○ 설계조건을 벗어난 작업수행

- 반응기(B-DC904)의 설계온도는 65℃이나, 이보다 2배 이상의 높은 온도를 가진 147℃ 스팀을 장시간 사용하여 탄화수소 제거작업을 실시함으로써, 반응기의 내부온도는 스팀온도와 동일한 147℃이었을 것으로 추정.

※ 공정 특허 제공사인 UOP에서 제시한 내용에는 질소에 의한 탄화수소 제거작업은 있으나, 고온의 스팀에 의한 탄화수소 제거작업에 대하여는 언급이 없음.

- 반응기(B-DC904)의 잔류 탄화수소를 제거하기 위하여 스팀 사용여부에 대한 질의를 공정 특허 제공사인 UOP에 하지 않고, 반응기 촉매제조사에만 문의한 후, 고온의 스팀을 사용하여 작업함

(3) 추정폭발상황

- 촉매층에 축적된 부타디엔 과산화물이 폭발 2시간전부터 반응기에 공급된 고온의 스팀에 의하여 자기분해 반응이 진행되다가 최대 활성화 단계에서 반응기 압력이 급상승하여 폭발한 것으로 추정됨.

※ 상기 상황은 운전실에서 회수한 DCS상 온도 기록지에 따르면 폭발 1분전 까지는 온도상승이 완만하게 진행되다가 분해 반응률이 급격히 증가한 폭발 1분전부터 반응기 내부온도가, 공급된 스팀 온도를 급격하게 초과한 것으로 나타나고 있어, 추정 폭발상황과 매우 일치하고 있음.

■ 기타 추정 가능한 원인

(1) Copper Acetylides의 폭발

- 원료중에 유입되는 0.8%정도의 아세틸렌성분(Methyl Acetylene, Vinyl Acetylene 등)이 수분 존재하에 촉매성분에 일부 포함된 구리와 반응하여 Acetylides를 형성하고 축적되어 있다가, 스팀퍼지시 스팀의 온도에 의해 폭발할 가능성이 잠재되어 있음.
- Copper Acetylides물질은 폭발성 물질로서 폭발특성상 폭발시 부타디엔 과산화물과 같이 자기분해반응에 의한 온도상승이 지속적으로 일어나지 않고 순간 폭발하므로, 수집된 온도기록지의 온도상승 곡선으로 보아 (완만히 상승하다가 급격한 폭발에 이름) Copper Acetylides 물질에 의한 폭발가능성은 적은 것으로 추정됨

(2) 수증기 폭발(물리적 폭발)

- 황회수 반응기의 승온과정(스팀으로 승온시킴)중 호스연결 잘못으로 다량의 물이 공급되어, 촉매층에 축적된 열에 의해 수증기 폭발이 있어날 수 있으나,
- 폭발 직전의 촉매층 온도가 162℃로서, 발생될 수 있는 스팀의 압력은 6.7Kg/cm^2G 정도이며, 이 압력은 반응기 설계압력 12.5Kg/cm^2G에 미달되므로 이로 인한 폭발 가능성은 희박함.

(3) 공기와 혼합된 탄화수소의 폭발

- 황회수 반응기의 내부 승온과정에서 다량의 공기 유입으로 촉매층에 부착된 탄화수소와 위험분위기를 형성한 후, 촉매에 의한 급격한 산화반응으로 폭발할 수도 있으나,
- 일반적으로 탄화수소 기체/증기가 공기와 혼합된 후 폭발할 때는 최초 압력의 9~10배 정도로 압력상승(NFPA 69참조)이 일어남.(적정혼합비일 경우) 그러나 이때도 반응기의 안전계수까지를 고려한 파열압력까지는 미치지 못하므로 가능성이 희박함.

(4) C4 유분의 비정상적인 혼입에 의한 폭발

- 황회수 반응기의 승온 과정 중 공정물질인 C4혼합 유분이 비정상적인 배관계통을 통해 유입되고 액상의 C4유분이 상변화를 일으켜 압력이 상승될 수 있으나,
- 유입가능 부위에는 맹판이 삽입되어 있어 C4혼합 유분의 혼입은

불가능함

(5) 반응기의 재질결함

- 반응기의 재질이 제작상의 국부적인 결함이나 온도상승에 따른 인장강도의 증가 등에 의한 파열 등을 고려해 볼 수 있으나,
- 반응기는 1년 동안 운전되는 과정에서 6.0Kg/cm^2G로 운전되었으며, 스팀 퍼지 시 공급된 스팀의 압력 3.5Kg/cm^2G보다 높기 때문에 제작결함에 의해 파열될 가능성은 없음.

5. 사고방지 대책

가. 스팀퍼지 금지

- 부타디엔 과산화물의 형성이 예상되는 부위에 대해서는 스팀퍼지를 하지 않도록 기술기준 및 운전 절차서에 명시하고, 해당 근로자들에 대해서는 위험성에 대해 교육 실시

나. 예열기(Preheater : B-EA901)의 열원 변경

- B-EA901의 열원인 스팀 응축수보다 온도가 낮은 열원으로 교체하여 부타디엔 과산화물 생성을 최소화해야 함. (필요시 예열기의 전열면적을 확대 검토)

다. 부타디엔 과산화물의 위험성에 대한 교육 실시

- 부타디엔 과산화물의 생성조건 및 위험성 등에 대해 해당 관계자 및 근로자들에게 교육 실시

□ 관련사진

〔사진1〕 반응기 폭발 후 옆 용기에서 화재가 발생한 모습

〔사진2〕 반응기 폭발 후 주변설비 파손 모습

탱크로리 폭발사고

1. 사고개요

2004년 9월 5일 오전 07시 10분경 부산시 소재 ○○(주) 부산물류센터 휘발유 육상 출하대에서 탱크로리 유창의 해치(Hatch)를 여는 과정에서 탱크에서 폭발이 발생하여 작업중인 운전기사 1명이 사망하고, 인근 다른 탱크로리 운전기사 1명이 부상을 입은 사고임.

2. 사고물질의 특성

가. 물리적 반응

※ 휘발유의 물리·화학적 특성

- 인화점 : -40℃
- 발화점 : 약 300℃
- 폭발하한 : 1.1 vol%
- 폭발상한 : 7.6 vol %

※ 탱크로리 내 정확한 잔량의 확인은 어려우나 5개의 유창 전체가 약 300ℓ정도이므로 1개의 유창에는 약 60ℓ정도로 사료됨.

나. 기인물

o 탱크로리 제원

- 길이 : 9,825mm
- 너비 : 2,490mm
- 높이 : 3,230mm
- 최대적재량 : 16,000kg
- 재질 : 알루미늄
- 두께 : 5mm

o 탱크로리는 기존에 Top Loading 방식이었으나 휘발성 유기화합물(VOC) 회수 관련 규정에 의거 Bottom Loading 방식이 추가 설치되어 있음.

3. 사고발생공정 및 운전상황

가. 재해발생공정

○ 유창 내에 휘발유 유증기가 존재하고 있는 상태에서 1번 유창의 해치(Hatch)를 탱크로리 기사가 인력으로 개방하면서 작업자나 증기 분출로 대전된 정전기 또는 해치 금속부의 기계적 충격에 의한 스파크, Over filling Sensor에서 발생된 전기적 스파크 등의 점화원에 의해 탱크 내에 있는 휘발유 증기에 인화되어 탱크로리가 폭발된 것으로 추정됨.

4. 사고원인 분석

□ 가연성 물질 조사

(1) 탱크로리는 사고 전날인 9.4(토) 3회의 출하 작업을 실시하였으나, 위의 작업 및 자료를 분석해 보면 3회의 작업 완료 후 탱크로리 내에는 휘발유가 존재하고, 이중 일부가 증기(Vapor) 상태로 내부는 폭발 위험 분위기였을 것으로 추정됨.

□ 점화원 조사

(1) 인체 또는 의복의 정전기에 의한 점화 가능성

(2) 해치 커버(Hatch Cover)의 누출 증기에 의한 정전기 가능성

(3) 차량용 계측 설비에 의한 점화 가능성

- 사고가 발생한 탱크로리의 유창(5개) 각각의 Hatch에는 Bottom Loading 방식에 대비한 Over filling Sensor가 (24V 전원) 부착 되어 있음.
- Over filling Sensor가 작동하는 상태에서 작업자가 Hatch Cover를 여는 순간 Sensor에 의한 점화 가능성은 있으나, Top Loading 방식으로 충전할 때는 Bottom Loading 설비의 작동을 중지하므로 동 계측기 사용 가능성은 적고, 동 계측기의 방폭은 본질안전구조로 제작되어 있으나 Sensor의 배선 결함으로 인한 점화 가능성은 있을 것으로 추정됨.

(4) 차량용 접지 클램프의 접지 미실시로 인한 점화 가능성

- ○○(주) 부산물류센터는 접지를 해야지만 출하되는 인터록 시스템

으로 차량에 접지를 하지 않으면 Pump가 작동을 하지 않는 구조로, 사고 조사 당시는 접지 클램프가 탱크로리에서 탈락된 상태로 접지 정상 상태 여부는 조사 할 수가 없었음.
(충유 전 준비 작업표준에도 명기되어 있음)

(5) 해치 개방 시 기계적 스파크에 의한 점화 가능성

- 탱크로리 기사가 출하 작업을 위해 1번 유창의 해치를 여는 과정에서 해치가 갑자기 원위치로 닫히면서 기계적 충격에 의한 스파크에 의한 점화 가능성은 있을 것으로 추정됨.

□ 기타 조사

o VOC 규제로 인한 휘발유 회수 설비(Breather Valve)의 설비 결함

- ○○(주) 회사 관계자가 전하는 목격자의 진술에 의하면 폭발음이 나기 전 1번 유창의 Hatch Cover를 여는 순간 '쐐'하는 소리가 들린 뒤 폭발했다고 하며 이를 유추해 보면 탱크로리 내의 압력이 걸린 것으로 사료되는 데 이런 경우에는 비상용 안전장치가 정상 동작하지 않아 내부의 증기 축적에 의해 압력이 발생할 것으로 판단됨.

(탱크로리 유창 덮개에는 과압, 진공 방지용 비상 안전장치가 설치됨 : 설정압력(진공: 0.3PSI, 압력: 1.0 PSI)

5. 사고방지 대책

○ 충유 작업 시 관리 감독 철저

- 운전기사가 충유작업절차를 준수하고 안전장구를 착용하는지 여부를 지속적으로 관리 감독해야 함.

○ 탱크로리에 대한 세부 정밀 조사가 필요함

- 사고 발생한 탱크로리는 VOC관련 규정에 의거 기존 Top Loading 방식에 Bottom Loading 방식이 추가되어 Over filling Sensor 등의 전기 작동 설비 자체의 안전성에 대한 외부 전문기관의 정밀 조사가 필요하며 개조된 탱크로리의 안전성을 확보하기위한 제도적보완이 필요함.

○ **탱크로리 기사의 안전작업표준에 대한 교육**

- Loading 방식이 복수로 되어 있고, 작업 시 항상 화재 폭발 위험이 상존하므로 작업표준에 대한 반복 교육이 요망됨.

(2중 방식의 개조 차량에 대한 작업표준 제정 및 교육이 필요함)

□ **관련사진**

(사진1) 폭발사고가 발생한 탱크로리의 후면

(사진2) 폭발로 유창내의 칸막이가 날아가 버린 탱크내부

수소압축기 조작판넬 폭발사고

1. 사고개요

2004. 9. 20(월), 08:05경에 ○○(주) 울산 합성수지공장 P.P공정내 수소 Compressor용 압력방폭구조의 판넬에서 Compressor 가동을 위한 작업을 수행중 Compressor 인입측에 설치된 질소 Purge 라인을 통해 수소가 전기판넬로 유입되어 내부에서 폭발분위기를 형성하여 판넬 내의 전기 스파크로 인해 폭발이 발생하여 판넬앞에서 작업하던 작업자 2명이 판넬 덮개에 맞아 사망한 사고임.

2. 사고물질의 특성

○ 물리적 반응

구분	물질명	CAS NO.	폭발범위	위험유해성	물리화학적 특성
1	질소(N_2)	7727-37-9	-	NFPA등급 화재=0	- 무색, 무취 - 분자량 : 28
2	수소(H_2)	1333-74-0	폭발하한 : 4.0% 폭발상한 : 75%	NFPA등급 화재=4	

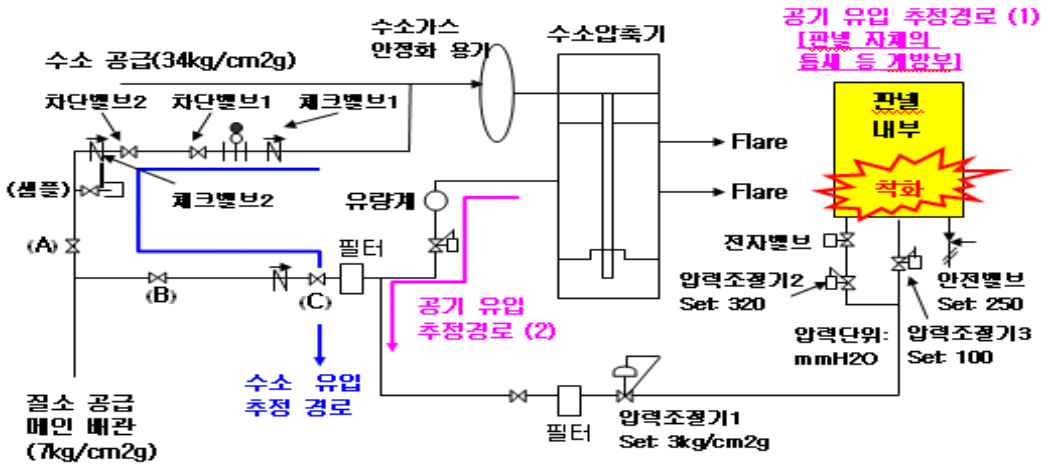
○ 화학적 반응

- 연소반응식 : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$
- H2의 폭발하한 : 4.0%(Vol.)
- 최소산소농도(Minimum Oxygen Concentration; M.O.C) 계산 :
  MOC = 1/2*4% = 2%(Vol.)

*** 폭발이 발생하기 위해서는 최소산소농도가 체적기준으로 2%가 필요함.**

3. 사고발생공정 및 운전상황

가. 사고발생 주변 공정흐름도



나. 사고설비

○ 압력방폭구조의 전기판넬(수소 압축기(PPC-3702C)용)

- 외곽 사이즈 : 1,000*1,000*600 (mm^3)
- 설계압력 : 500mmH_2O
- 사용재질 : STS304
- 과압방지장치의 설정압력 : 250mmH_2O
- 전기판넬 내의 압력경보설정치
- 고압경보 : 300mmH_2O
- 저압경보 : 30mmH_2O
- 압력방폭구조 판넬 덮개
  - 사이즈 : 3t*1,000*1,000 (mm)
  - 무 게 : 약 60kg(부착물 포함)
- 방폭전기기계기구 성능검정 여부 : 성능검정 미실시

○ 압력방폭구조용 질소공급설비

- 메인 공급압력 및 배관 사이즈 : 7kg/cm^2 * 1/2“
- 1차 압력조절기(RV1) 설정압력 : 3kg/cm^2

- 2차 압력조절기(RV3)의 설정압력 : 100mmH_2O(정상운전용)
  · 정상운전시 최소 유입 질소유량 : 14N ℓ/min
- 2차 압력조절기(RV2)의 설정압력 : 320mmH_2O(내부치환용)
- 내부치환시 최소 유입 유량 : 380N ℓ/min

다. 사고당시의 운전상태

○ 사고발생된 판넬과 관련된 PPC-3702C 수소 압축기를 가동중지하고, PPC-3702B 수소 압축기로 변경 운전함.

○ PPC-3702C 압축기는 정비계획에 따라 내부 밸브 2개를 교체하기 위해 압축기 실린더 블록과 연결된 플레어 라인상에 블라인드(Blind)를 삽입하고, 역류방지를 위해 실린더 블록 부위에 연결된 Purge 라인은 차단하고, 압축기 인입측의 퍼지 라인을 통해 질소 (7kg/㎠)로 가압하여 퍼지를 실시함.

※ 이 때 퍼지를 완료한 후 Purge 라인상의 차단밸브(3개소)를 모두 개방상태로 두었거나, 누설되는 밸브 1개를 차단하였을 가능성이 있음.(앞의 수소유입경로 추정 항목을 참조)

○ P.P 제품 변경을 위해 기존 사용하던 압축기(PPC-3702B) 대신 PPC-3702C(사고발생 판넬의 압축기)로 변경운전을 위한 준비작업을 수행함.

※ PPC-3702C 압축기 운전을 위해서는 해당 판넬 내부가 양압이 유지되어야 하므로 양압용 질소 라인상의 모든 밸브를 개방하여 질소를 공급함. 이 때 압축기 인입측 퍼지 라인을 통해 Leak 된 수소가 기존 질소라인의 질소와 함께 전기 판넬로 유입되기 시작하여 시간이 경과함에 따라 판넬 내부의 수소농도가 증가함.

○ 압축기 인입측 퍼지 라인을 통해 유입된 수소가 폭발하한농도인 4%(Vol.) 이상까지 도달하여 폭발분위기를 형성함.(사고발생후

약 7시간 지난 후 질소 공급배관에서 분석한 수소농도는 5.5%로 파악됨)

다. 사고관련설비의 피해상태 확인

○ 현장의 파손된 용기, 펌프, 배관 등의 형상을 조사결과 사고 현장에 남아있는 설비중 반응기(V-506/507)는 외부충격으로 찌그러졌을뿐 반응기 내부폭발의 흔적은 없었음.

○ 중간생성물저장조(V-509) 및 제품저장조(V-511)는 액면계 LI-501 및 LI-505가 부착된 채 현장에 전도되어 있었음.

6. 사고원인 분석

가) 원인추정

1) 수소에 의한 폭발가능성

(가) 연소 3요소에 기초한 가능성 검토

압축기 인입측 부분에 연결된 퍼지 라인의 체크 밸브 등의 누설에 의해 수소가 판넬 내부의 양압용으로 설치된 질소 라인으로 역류되어 판넬 내부에 폭발 분위기를 형성한 상태에서 전기 스위치 등을 조작하여 폭발이 발생할 가능성으로 연소물질, 점화원, 산소유입에 대한 사항을 항목별로 검토한 결과는 아래와 같다.

① 연소물질(수소)

폭발의 원인이 된 수소는 압축기 인입측(압력 34~35 kg/cm2, 99.9%의 수소) 퍼지 라인을 통해 체크밸브 2개의 누설, 차단밸브 1개 누설 및 차단밸브 2개 개방 또는 불확실한 잠금 등으로 인해 압력방폭구조의 판넬 내부의 양압용으로 사용하는 질소 라인으로 역류하여 판넬 내부에 체류하여 폭발농도를 형성함.

※ 사고 발생후 15:00 및 17:20경에 체크밸브 2개 및 차단밸브 2개를 지난 질소 퍼지 라인에서 성분 분석한 결과 각각 수소농도가 5.4% 및 2.84%로 나타나 수소의 유입사실이 확인됨.

(17:20분경에 분석한 결과 농도가 낮은 원인으로는 1차 샘플링시 밸브 개방에 의한 농도 저하 등에 의한 것으로 추정됨)

② 점화원

전기판넬이 압력방폭구조이므로, 판넬 내부의 전기설비는 대부분 비방폭형이기 때문에 판넬 내에서 접점을 갖는 스위치 등의 작동시 스파크가 발생됨.

③ 산소의 유입(추정)

9월 15일(수) 수소 압축기(PPC-3702C) 인입측의 밸브 2개를 교체하기 위해 압축기 인입측 퍼지 라인을 통해 질소 퍼지를 실시할 때 퍼지 시간 단축 등을 위해 인접한 지점의 전기판넬 양압용 질소 라인의 밸브를 차단할 가능성이 있으며, 이 경우에 판넬 내에 잔류하고 있던 질소는 판넬의 예비 노즐 또는 전선관 인입부 등의 개방부를 통해 빠져 나가고 대신 판넬 내부에 대기중의 산소가 유입할 수 있고, 압축기(PPC-3702C)를 재가동하는 9월 20일(월) 아침까지 그 상태를 유지하였을 가능성이 있음.

(나) 현장에 나타난 결과에 기초한 가능성 검토

① 판넬 덮개(무게 약 60kg)가 폭발압에 의해 비산되어 수평으로 3.7m 지점의 설비에 심한 충격흔적을 남겼고,

② 충격흔적지점을 판넬의 원래 위치와 비교하면 수직방향으로는 각도상 약 1.4° 아래(3.7m 지점에서 약 6cm 아래)로 거의 수평에 가깝게 비산하였고, 또한 판넬 외부에 덮개를 여닫기 위해 부착한 장석에 의해 비산 방향이 거의 바뀌

지 않은 채(약 3° 정도만 장석 설치지점으로 치우침) 장석을 파손시키면서 비산되었고,

③ 전기판넬의 벽면 6면중 형강에 의해 견고하게 지지된 밑면에는 약간의 굽힘현상이 있는 반면 나머지 모든 면에는 순간적인 과압에 의한 과도한 벌어짐 현상발생 및 내부의 브라켓의 Tag 용접부가 대부분 파손되었고,

④ 덮개를 체결하고 있던 볼트(M5*12개, STS304 재질) 모두 및 외부 장석까지 동시에 파단되었고,

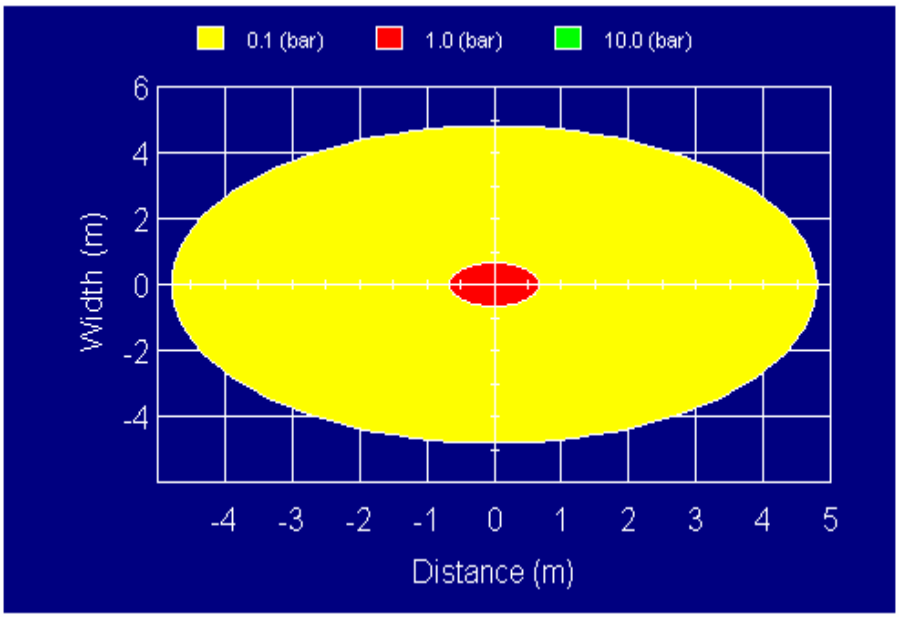
⑤ 판넬 하부의 양측 강판을 지지하던 체결볼트가 폭발시의 과압에 의하여 대부분 전단파괴된 점 등을 고려할 때 조작판넬 내부에 폭발이 발생한 것 외에는 설명할 수 없음.

(다) 폭발모델 프로그램 수행 결과에 의한 가능성 검토

전기판넬 내부에서 폭발이 일어날 경우 얼마나 큰 과압이 발생될 수 있는지를 아래의 조건에서 피해예측 프로그램을 이용하여 예측한 결과 폭발이 최초 발생된 지점에서 반경 0.2m되는 지점의 압력은 7kg/cm2으로 나타나 내부수소 폭발의 가능성을 뒷받침함.

[내부 폭발압력 계산]

- 내부 체적 : 0.6㎥ (1000*1000*600)
- 수소 농도 : 5.4%(배관에서 분석한 농도를 기준으로 적용함)
- 수소 체류량 : 0.028㎥(안전밸브 설정압력 250mmH2O를 기준으로 계산함)
- 프로그램 종류: Safer
- 폭발모델 : 밀폐계 폭발
- 실시결과 : 반경 0.2m 지점에서 폭발압력 7kg/cm2



(라) 발생소음수준에 기초한 가능성 검토

사고발생시 소음발생 수준은 약 100m 이상 떨어진 제어실 및 약 200m 정도 떨어진 안전과 사무실까지 크게 들릴 정도여서 폭발음을 듣고 직원들이 달려간 사실을 고려할 때 사고발생장소와 제어실 사이에 송풍기 및 압축기 등 고소음설비가 위치하고 또한 거리가 멀기 때문에 폭발에 의한 소음으로만 설명될 수 있음.

2) 질소 과압에 의한 폭발가능성

사고가 일어난 압력방폭구조의 판넬은 양압용으로 공급하는 질소가 압력조절기 2개에 의해 1차 7kg/㎠에서 3kg/㎠로, 2차 3kg/㎠에서 100mmH_2O로 감압되어 판넬 내부가 100mmH_2O 이상이 되도록 유지하는 구조이나, 판넬 내부 양압이 유지되지 않을 경우 현장에서 2차 감압밸브를 개방하게 되면 최대 3kg/㎠의 질소가 판넬에 공급되어 내부에 과압이 걸려 판넬이 파열될 가능성도 있으나 아래와 같은 사유로 가능성이 희박한 것으로 사료됨.

(가) 판넬 자체의 제작 상태에 기초한 가능성 검토

판넬의 덮개 체결 볼트(M5*P0.8*12) 12개가 동시에 파단될 때

까지 판넬이 기밀을 유지하고, 안전밸브가 고장나서 작동이 되지 않는다는 가정 아래 판넬 내부에 얼마의 압력이 걸리는지를 계산하면 아래와 같이 약 1.05kg/cm2로 나타나지만, 이 경우는 다음과 같은 사유로 배제될 수 있다.

[내부 압력 계산]

- 체결 볼트 : M5*P0.8*12개 (골지름 d=4.134 mm)
- 볼트(STS304재질)의 인장강도(S) : 53 kg/㎟
- 판넬 내부 가스 작용면적(A) : 90*90(cm*cm)
- 볼트 동시 파단당시의 내부압력 : P (kg/cm2)

※ 계산식 : 내부압력*작용면적=볼트의 인장강도*볼트 단면적*12개

P*90*90 = 53*3.14/4*(4.134*4.134)*12

상기식에서 내부압력 P를 구하면,

P = 1.05 kg/cm2 이다.

① 판넬은 500mmH2O 기준으로 설계되었기 때문에 플랜지면의 체결볼트 사이의 간격 및 플랜지 두께 때문에 1/2“ 질소 라인을 통해 서서히 가압시에는 볼트 사이의 플랜지면이 벌어지고, 판넬 하부의 전선관 인입부의 틈새 등을 통한 누설로 인해 도무지 높은 압력을 얻을 수 없다.

② 과압방지장치가 250mmH2O로 설정되어 있어 과압방지장치가 정상작동시 1/2“ 사이즈의 질소 공급라인을 통한 질소 가압으로는 해당압력에 도달하기가 어렵다.

③ 또한 사고발생 후에도 예비전선관에 기밀유지용으로 부착한 테이프가 남아 있었는데, 서서히 가압할 경우 테이프는 탈락되는 것이 정상이기 때문에 가능성이 없다.

④ 기타 폭발시 검토했던 현상들이 모두 해당없는 증거로 작용된다.

(나) 현장에 나타난 사실에 기초한 가능성 검토

① 볼트의 파단은 동시에 파단되지 않고 체결상태에 따라 강도적으로 약한 볼트가 우선적으로 파단되기 때문에 몇 개의 볼트가 파단되면 내부의 압력이 대부분 해소되기 때문에 판넬 덮개가 멀리 비래하기가 어렵고, 또한 볼트가 모두 파단되더라도 외부에 있는 장석 때문에 판넬의 비래방향은 장석이 설치된 방향쪽으로 비래하거나, 장석에 의해 매달려 있을 가능성이 높은 데 실제로는 거의 정면으로 비래하여 가능성이 거의 없다.

② 압력이 서서히 가해져 파단되는 현상이 있을 경우 과압방지장치가 작동하면서 동시에 덮개 체결볼트가 파단되는 현상은 확률적으로 발생하기가 거의 어렵다.

③ 과압방지장치가 완전히 손상(파손)된 상태로 남아 있는 상황을 고려하면 급격한 과압이 발생된 사실을 뒷받침한다.

나) 결 론

상기 이유로 인하여 조작판넬 내부에 수소가 유입되어 폭발분위기를 형성한 상태에서 스위치 조작시 발생한 전기스파크가 점화원으로 작용하여 폭발이 일어난 것으로 판단됨.

7. 사고방지 대책

가. 공정안전보고서의 변경요소관리 등 철저

- 공정안전보고서의 변경요소관리에 해당되는 작업에 대해서는 변경요소관리, 위험성평가, 공정안전보고서에 자료 추가 등록, 안전운전절차서 작성, 근로자 교육, 가동전 점검 등을 철저히 수행하여야 함

나. 질소 배관 및 조작판넬 등 수정

- 압축기 인입측 퍼지용 질소 배관상의 블라인드는 차단밸브 후단에 설치하여 블라인드를 운전중에 설치되도록 하고, 조작 판넬의 양압유지용 질소 배관과 분리하여 설치하는 것이 필요하며, 또한 질소 라인 대신 다른 압축기의 경우처럼 계장용 공기를 공급하는 방안 검토도 필요하며,

- H_2 Compressor 실린더 블록 Purge 질소배관상에 차단밸브를 설치하여 필요시에 사용할 수 있도록 하여 항상 조작판넬 양압유지용 질소는 공급될 수 있도록 수정이 필요하고,

- 조작판넬 상부에는 브리더 밸브(설정압력: 200mmH_2O)를 설치하여 판넬 내부치환 작업시 질소 및 분진 등을 배출할 수 있도록 하는 방안이 권장됨.

다. 방폭전기기계기구의 성능검정 실시

- 폭발위험장소내에 설치하는 전기기계기구는 성능검정을 받아 합격한 제품을 설치하여야 함.

라. 설비유지관리 및 작업전 점검 강화

- 압축기 등 설비를 수리·보수 후 가동 전에 압축기 및 각종 밸브 개방 또는 잠긴 상태, 각종 계기 관련 부속설비에 대해서 이상유무 및 주기적인 누설여부 등에 대한 점검 강화가 필요함

마. 사고원인을 파악할 수 있는 기록장치 설치

- 사고발생전에 일어난 상황을 주조정실에서 파악하여 조치하는데 필요함 사후에 원인파악에 도움이 되는 설비의 운전 상태를 기록할 수 있는 기록장치 설치가 필요함.

□ 관련사진

〔사진1〕 폭발사고가 발생한 전기판넬 모습

〔사진2〕 폭발 후 충돌로 손상된 판넬 덮개
(약 3.7m 지점의 설비와 충돌되어 손상된 모습)

본 자료에 관하여 궁금한 사항은 한국산업안전공단 중대산업사고예방실로 문의하시기 바랍니다.

(전화 : 032-5100-681~688, 팩스 : 032-512-8315)
※ 담당자 : 중대산업사고예방실장 김기영, 기술위원 임대식

본 자료는 한국산업안전공단의 사전 허가 없이는 무단으로 복사하거나 판매할 수 없습니다.

중대산업사고 사례집

발행일 : 2004년 12월
발행인 : 김 용 달
발행처 : 한국산업안전공단 중대산업사고예방실
인천광역시 부평구 구산동 34-4
전화 : 032)5100-690