

# 영국 수소화분해장치의 폭발·화재 사고

1987년 3월 22일 오전 7시 경, 영국 BP Oil(Grangemouth) Refinery Ltd.의 수소화분해장치에서 발생한 폭발·화재사고로 인해 총 7,840만 달러의 재산피해를 입었다. 이 자료는 영국안전위생청(HSE)의 보고서에 근거하여 사고내용과 그 원인을 간략하게 정리한 것이다.

## 1. 정유공장 개요

사고가 발생한 정유공장은 스코틀랜드지방의 수도 에딘버러의 서쪽 약 30Km 거리에 위치한 Grangemouth 교외에 1920년부터 건설되었고, 연간 800만 톤의 원유를 처리하고 있다. 종업원은 약 1,200명이었고, 유지관리를 위한 협력회사의 종업원이 많을 때는 약 1,000여 명이 출입하고 있었다.

## 2. 발화플랜트 개요

### 2.1 수소화분해장치

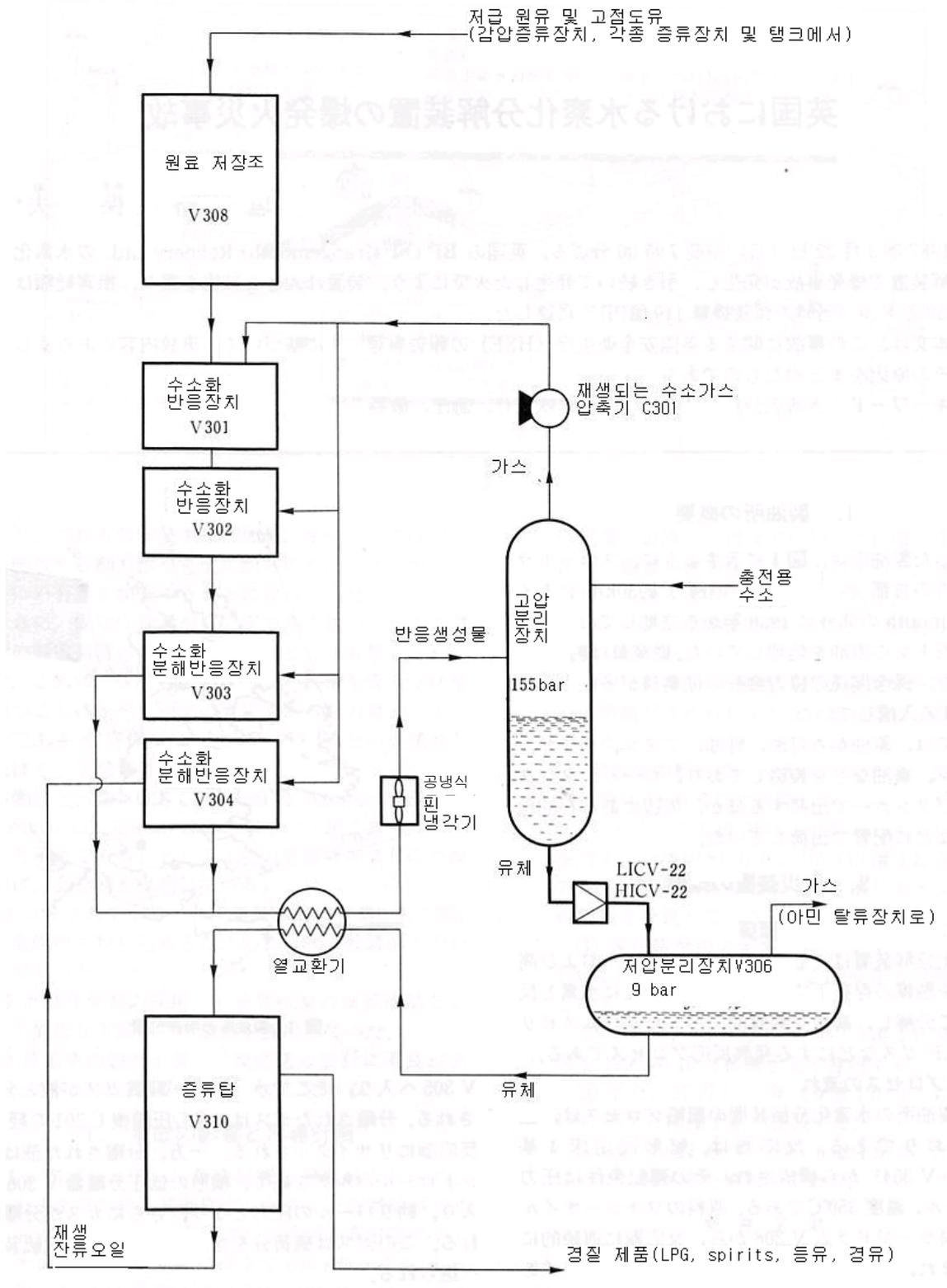
수소화분해장치는 저급의 원유 및 고점도유를 고온·고압 하에서 수소와 반응 및 분해시켜, 고급의 경질유, 석유 에테르 (petroleum ether; petroleum spirits; mineral spirits), LP 가스 등을 제조하는 발열반응공정이다.

### 2.2 공정 흐름

이 정유공장의 수소화분해장치의 개략적인 공정은 [그림 1]에 제시되어 있다. 반응장치는 4기(V 301~304)로 구성되어, 그 운전조건은 압력 155 bar (152 kg/cm<sup>2</sup>), 온도 350℃이다. 원료인 오일은 원료 저장소 V 308에서 반응장치에 연속적으로 공급되어, 체류량은 약 32,000 barrel [5,092kl]/일이며, 반응률은 60%이었다.

반응장치의 생성물은, 열교환기 및 공랭식 핀 냉각기에서 약 50℃까지 냉각된 다음, 고압분리장치 V 305에서 수소 및 경질 가스가 액체와 분리된다. 분리된 가스는 원심압축기 C301을 거쳐 반응장치에서 재생되며, 또한 분리된 액체는 제어밸브를 거쳐 횡형 저압분리장치 V 306에서 약 9 bar (8.83 kg/cm<sup>2</sup>)의 압력으로 가스가 분리되며, 유황 성분이 함유된 이 가스 분은 아민탈류장치로 이송된다.

저압분리장치 V 306을 거친 탈 가스액은 열교환기를 거쳐 증류탑 V310에서 등유, 가솔린, 나프타, LP 가스 등으로 분리되고, 남은 유분(油分)은 반응장치에서 재생된다.



[그림 1] 수소화분해장치 공정도

### 3. 사고발생 직전의 운전상황

- (1) 3월 13일(금)에 공장부지 외곽의 블로우다운(blowdown : 안전밸브에서 배관이나 장치 내의 기체 또는 액체를 방출하는 것) 설비에서 화재가 발생하여, 비상조치의 일환으로 수소화분해장치도 임시 운전 정지되었다.
- (2) 3월 21일(토)에 수소화분해장치의 운전이 재개되었으며, 밤 10시에 야간 근무조로 교대되었을 때, 체류량은 20,000 barrel [3,182kl](/일)이었으며, 운전 상태는 정상이었다.
- (3) 3월 22일(일) 오전 1시 30분 경, 경보가 계기실에 발하여졌고, 수소화분해장치는 자동적으로 운전 정지되었으며, 펌프, 압축기 등이 정지되고, 반응장치는 압력이 제거되었다. 이것은 반응장치의 반응온도가 이상고온(425℃ 이상)이 되었을 때, 원료유와 수소의 유입을 자동적으로 차단하는 장치(TCO) 중에 반응장치 V303에 설치된 장치가 작동한 결과로 판명되었다.
- (4) V303에서는 이상고온이 감지되지 않았으며, TCO가 오작동 했을 것으로 판단되었기 때문에, TCO 신호를 무시하고, 수소의 순환을 재개하였다.
- (5) 2시경 야간 근무 운전자는 장치를 통상 운전압력까지 상승시켜, 반응장치의 저부 온도를 가동에 대비해서 안정시키기 위한 작업을 개시했다.
- (6) 이 시점에서 발화하기까지 장치의 유입량이 zero인 대기(待機) 상태가 계속되었다. 이 동안에 재생 수소의 압축장치 C 301의 진동이 약간 높아진 것 이외에는 특별히 운전상의 문제가 되는 점은 없었다.
- (7) 6시 경에 근무조가 교체되었으며, 이때의 업무인수인계사항은 「① TCO가 갑자기 작동하여 장치가 긴급 정지했고, ② C 301에 진동이 있었으며, ③ 운전과장이 출근하기까지 물질을 유입하지 말고 대기상태를 계속하라」는 내용이었다.
- (8) 6시 45분부터 55분 동안 대부분의 운전자들은 계기실 건물 내의 식당으로 아침 식사를 하러 갔다.

### 4. 사고발생 및 진화작업 상황

- (1) 7시에 맹렬한 폭발사고가 발생했다. 이 폭발은 30km 떨어진 장소에서도 폭발음이 들렸고, 몸으로도 그 충격이 느껴졌다.
- (2) 폭발사고의 중심부는 저압분리장치 V306이며, 본체가 파괴되어 산산 조각났고, 파편이 사방으로 흩어졌다. 분리장치에서 위험물이 흘러나와 증기운을 형성하였고, 주변의 발화원에 의해 착화되어 화구(fireball)가 발생했다.
- (3) 폭발사고가 발생했을 때, 플랜트 내에는 9명의 운전자가 있었고, 그중 2명이 계기실에서 근무하고 있었으며, 6명이 식당에서 아침 식사를 하던 중이었다. V306 로부터 37m 떨어져 있던 경량구조의 계기실 건물이 피해를 입었지만, 인명피해는 발생하지 않았고, 8명은 건물의 뒷문을 통해서 안전하게 피난했다. 나머지 1명은 플랜트 내의 옥외에 있었지만, 폭발중심에서 멀리 떨어져 있었기 때문에, 인명사고를 피할 수 있었다.
- (4) 폭발의 중심부 근처에 있었던 협력회사의 크레인 운전수 1명만 중상을 입었다.

- (5) 폭발사고 후 발생한 화재는 대규모로 확대되어, 화염의 높이가 90 m를 넘었다. 공공소방대와 정유공장의 자위소방대로부터 출동한 각종 소방차 23대, 물대포 31대, 소방대원에 의해 진화작업이 이루어졌다.
- (6) Grangemouth 지구의 중대 피해로 경계방위계획이 발동되었다. 경찰서, 소방서, 지방자치제 등의 대표 및 화재가 발생한 정유공장, 지구 내의 대규모 화학공장 등의 전문가로 구성된 재해대책위원회가 소집되어, 포소화약제의 보충, 소방장비의 조달 등에 노력을 기울였으며, 스코틀랜드 지방 등으로부터 포소화약제가 공급되었다.
- (7) 파열된 배관에서 누출된 오일이 배수로를 폐쇄시켰기 때문에, 진화작업 및 냉각에 사용된 물이 배수되지 못하고 체류하게 되어서 소화활동에 지장을 초래했다. 누출된 석유 에테르 (petroleum spirits)가 체류하는 물 위에 광범위하게 확산되어 폭발사고가 발생한 지 5시간 후에 착화되어서, 수소화분해장치에 관련된 기타 장치도 화염에 휩싸였다.
- (8) 소방대가 포막을 만들었지만, 포막이 때때로 깨져, 재 착화가 일어났지만, 공공소방대와 자위소방대의 필사적인 노력에 의해 화재는 제어되었고, 화재가 발생한 당일 저녁에 화재는 진화되었다. 소화 및 냉각에 사용된 소화용수는 약 3,500 m<sup>3</sup>에 달하였으며, 사용된 포소화약제의 양은 약 900 m<sup>3</sup>에 달했다.

## 5. 사고원인조사 결과

### 5.1 저압분리장치

- (1) V306의 설비 사양은 [표 1]에 제시되어 있으며, V306은 완전히 파열되어 파편이 주위로 비산되었지만, 이들 파편은 거의 전부 회수되었다.
- (2) 파편의 비산과 폭발로 인한 충격파 등에 의한 피해규모로부터 폭발력을 계산하였더니, TNT로 환산하여 약 90 kg 이라는 결과가 나왔다. V306의 파열은 과압에 의해 발생한 것임을 확인할 수 있었으며, 이론적으로 계산한 파열압력 50 bar (49.0 kg/cm<sup>2</sup>)와 거의 일치한 것으로 나타났다.

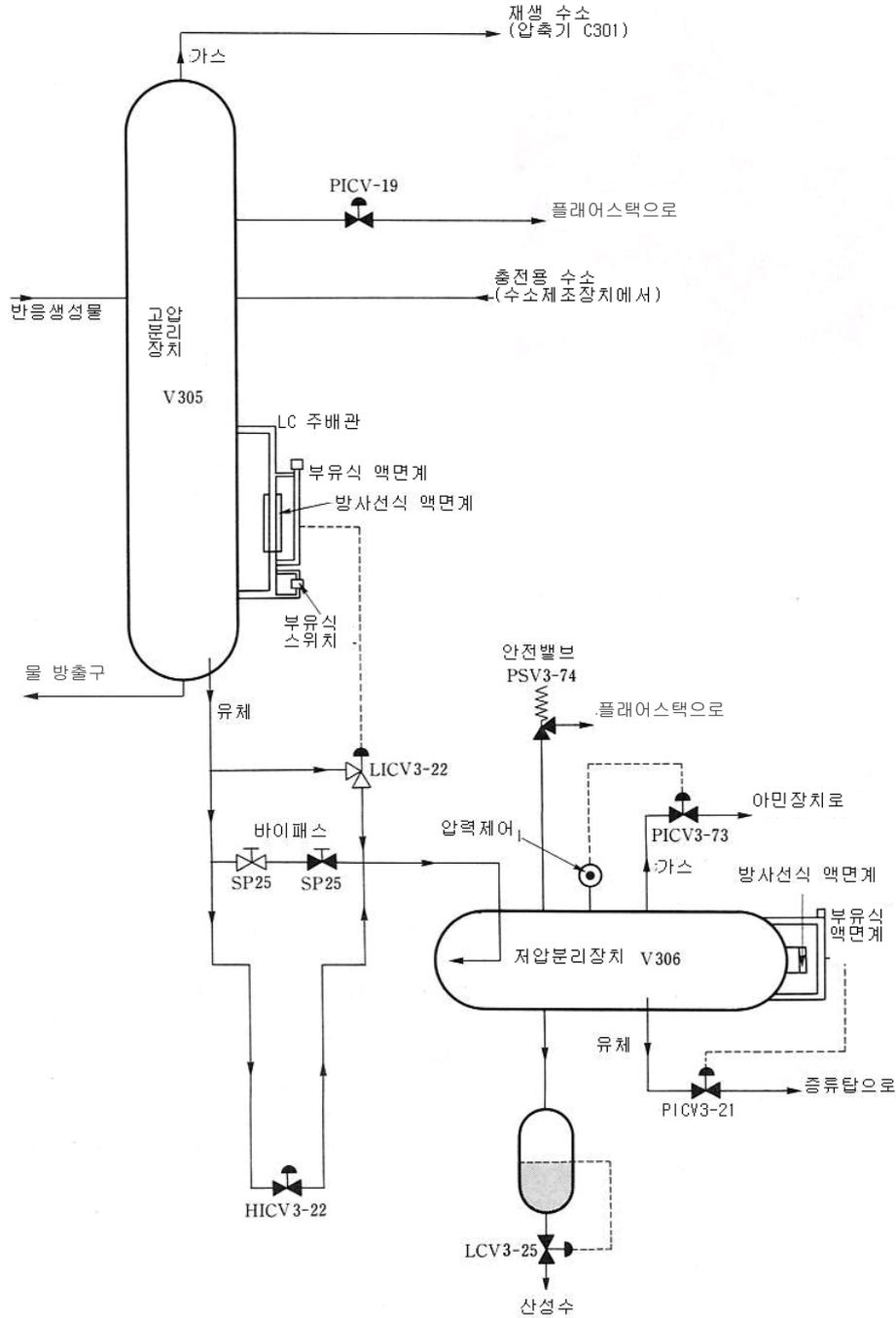
[표 1] 저압분리장치인 V360의 사양

설계압력	10.7 bar (10.5 kg/cm <sup>2</sup> )	운전압력	9 bar (8.8 kg/cm <sup>2</sup> )
내압압력	21.6 bar (21.2 kg/cm <sup>2</sup> )	운전온도	43 °C
전장	9.1 m	액체 용량	33 m <sup>3</sup>
직경	3.05 m	가스 용량	33 m <sup>3</sup>
동판두께	18 mm	액체 비중	0.85
중량	20 톤	평균분자량	15

### 5.2 고압분리장치 및 저압분리장치 주위의 밸브류

- (1) [그림 2]에서 제시되어 있는 것과 같이 V 305의 하부에서의 흐름은 통상 2개로 분리되어 한쪽은 자동/원격 수동의 LICV3-22로 통하고, 다른 쪽은 원격수동의 HICV3-22를

통해, V306으로 유입되도록 설치되어 있었다.



[그림 2] 고압 및 저압 분리장치의 제어계통

- (2) 사고 후 조사한 바와 같이 HICV3-22는 내부에 오일이 남아있었으나 LICV 3-22의 내부에는 아무것도 없었으며, 가스가 배출된 흔적이 있었다.
- (3) 바이패스 밸브 SP25는 한쪽 끝은 차단되어 있었고, 다른 쪽이 개방된 상태였다.
- (4) LICV 3-22의 유량특성은 물을 사용해서 측정했다. 측정결과를 이용하여 V305에서 압력 155 bar (152.0 kg/cm<sup>2</sup>)의 수소가 유입되는 경우 안전밸브가 작동하기 때문에, V306이 설계과열압력 50bar (49.0 kg/cm<sup>2</sup>)에 도달할 것인지 여부를 컴퓨터로 계산하였다.

계산결과로부터, [표 2]에서와 같이, LICV 3-22의 개방도가 40% 이상이라면, V306은 파열되는 것으로 확인되었다.

- (5) LICV3-22는 당일 6시 이후 수동으로 3회 이상 개폐되었던 것으로 운전일지에서 확인되었으며, 또 운전과장으로부터, “사고 직후 계기실에 들어갔을 때 LICV3-22는 수동 모드로 전체 개방되었다”라는 보고가 있었다.

[표 2] LICV3-22 개방도와 파열압력 50 bar에 도달 소요시간과의 관계

LICV3-22 개방도	V306 최고압력	V306 압력이 50bar에 도달하는 데 소요되는 시간
30 %	35 bar (34.3 kg/cm <sup>2</sup> )	50 bar (49.0 kg/cm <sup>2</sup> )에 도달하지 않음
38 %	48 bar (47.1 kg/cm <sup>2</sup> )	50 bar (49.0 kg/cm <sup>2</sup> )에 도달하지 않음
40 %	53 bar (52.0 kg/cm <sup>2</sup> )	108 초
60 %	-	35 초
80 %	-	25 초
100 %	-	22 초

### 5.3 과압방지대책

- (1) V305의 LC 주배관(header)에는 튜브형 부유식 (float-type) 액면계와 방사선식 액면계 2개가 설치되어 있었고, 이들 계기의 데이터는 계기실에 전송되어 각각 기록되도록 구성되어 있었다.

부유식 액면계에서의 신호는 LICV3-22의 입력 신호가 되어, 액면이 20% (저장량 16.8 m<sup>3</sup>) 이하로 되면 액면 저위 경보장치 및 표시장치가 작동하도록 설치되어 있었다고 한다. 방사선식 액면계는 지시기능만 있고 제어 및 경보 기능은 없었으며, 측정범위도 부유식의 4분의 1 정도밖에 되지 않는다.

- (2) 부유식 액면계는 LC 주배관에서의 취출관이 가늘기 때문에 막히기 쉽고, 오동작이 때때로 발생되기 때문에, 운전자는 방사선식 액면계에 의존하는 경향이 있었다.

- (3) V305의 주배관에는 부유식 액면계의 직하방에 액면 저저위 검지용 부유식 스위치 2개가 설치되어 있었다. 이러한 스위치가 작동하면, 계기실에 설치되어 있는 경보장치와 표시장치가 작동하고, 계기실에 경보를 발하고 및 표시등의 점등과 동시에 LICV3-22 및 HICV-22가 자동적으로 작동되어 전부 폐쇄되도록 설계되어 있었다.

사고 후 조사에서, LICV-3-22의 작동 회로는 5년 전부터 계기실 내에서 선로가 노출되어 있었고, HICV3-22의 작동장치도 1년 전에 문제점이 발생되어 바이패스 결선되어 있었던 것으로 확인되었다. 계기실의 액면 저저위 경보회로는 정상으로, 경보를 발하도록 설치되어 있었지만, 표시등은 단선된 상태이었다.

- (4) 가동 시에는, 경보장치 및 가동 장치의 점검이 통상적으로 이루어지도록 되어 있었으나, 상기 부유식 스위치 등을 포함해 수개가 체크리스트에서 누락되어 있었다.

부유식 스위치는 장기간 사용이 불가능한 상태에 있었고, 운전자 및 유지관리 담당자의 일부는 스위치를 불필요한 것으로 여겨, 새로운 담당자에게도 그렇게 교육하고 있었다.

- (5) V306에는 압력 기록계가 없었고, 압력상승에 따른 경보 및 작동 장치도 설치되어 있지 않았다. 사고전후의 아민장치의 압력기록에는 변동이 없었으며, V306의 가스 출구 밸브 PICV3-73은 발화 시 전부 폐쇄되어 있던 것으로 확인되었다.
- (6) V306에는 안전밸브 1개가 설치되어 있었으며, 안전밸브의 설계기준은 압력제어장치 고장이나 화재 시 열기의 침입, V305에서 가스의 누설 등에 대해서는 고려되지는 않았다. 이 안전밸브는 V306의 과열 직전에 작동하고 있었던 것이 확인되었다.

## 6. 사고 원인

상기의 조사결과로부터, 화재의 원인은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 수소화분해장치는 TCO가 야간에 작동한 후, 수소순환을 재확인하고, 충전대기상태를 계속하고 있었는데, 이 사이에 고압분리장치 V305와 저압분리장치 V306과의 사이에 있었던 액면제어밸브 LICV 3-22를 수동 조작하여 전부 개방했기 때문에 V305의 액면이 저하되었고, 분리장치 내의 155 bar (152.0 kg/cm<sup>2</sup>)의 고압가스가 누설되었다.
- (2) V306의 출구측 밸브는 모두 닫혀 있어, 안전밸브의 용량으로는 누설된 가스에 대응할 수 없었기 때문에, V306 내의 압력은 단기간에 과열압력 50bar (49.0 kg/cm<sup>2</sup>)에 도달하여, 본체가 과열하기에 이르렀다.
- (3) V305에는 액면 저저위에 대응하는 부유식 스위치가 설치되어 있었지만, LICV3-22 및 HICV3-22를 기동시키는 전기회로의 결선이 외부로 노출되어 있어, LICV3-22의 긴급 차단이 행해졌고, V305에서 V306으로의 가스 누설을 방지할 수 없었다.
- (4) 가동용 부유식 스위치는 장기간 사용이 불가능한 상태이었다. 이러한 현황 하에서는 사람의 실수 또는 액면제어장치의 고장에 의해 V306 과압상태가 되는 위험성이 항상 있었고, 특히 LICV3-22를 수동 조작하는 경우 그 위험성이 최대가 될 것이라는 것을 관계자가 인식하지 못하였다.

## 7. 사고 교훈

이 사고에서 얻은 교훈은 다음과 같다.

- (1) 현존 제조 플랜트 내의 저압장치에 대해, 고압장치에서 가스가 누설될 위험성이 없는지 HAZOP 연구 등을 실시하여, 설비 및 운영조직 양면에서 검토하는 것이 필요하다.
- (2) 가동 장치 또는 경보 장치를 떼어내거나 철거할 때에는 안전상 문제가 없는지 충분히 사전 평가함과 동시에, 문서에 의해 운전부문 및 관계부문의 관리책임자의 승낙을 얻는 것이 필요하다.
- (3) 제조 플랜트의 배수설비에 대해서 타당성 검토를 실시하고, 만일 화재나 폭발사고가 발생했을 경우, 진화작업에 사용되는 다량의 소화용수를 처리하기에 충분한 용량인지를 확인할 필요가 있다.

---

참고문헌 : 火災爆發事故事例集 (일본안전공학협회 2002년)