

광전지 조립 플랜트 실란 폭발 사례 분석

1. 들어가며

최근 솟구치는 에너지 가격으로 인해 재생 에너지원 개발 역시 속도를 더하고 있다. 재생 에너지원 중에서 태양전지라 불리기도 하는 광전지 모듈은 가장 큰 관심분야 중 하나이다. 광전지, 특히 실리콘 박막 기술에 기반한 광전지 모듈 조립공정은 반도체 조립공정과 매우 유사하다. 지금까지 반도체 산업은 일련의 대형 화재폭발 사고를 겪으며 방재대책에 대한 많은 경험을 축적했지만, 공정이 유사한 여타 산업의 경우에는 사정이 다르다. 대만의 경우 2001년과 2002년 비 화학 플랜트에서 발생한 화공 관련 사고 건수가 화학 플랜트에서 발생한 사고 건수의 거의 두 배에 달하고 있는데, 이들 사고의 대부분이 전기전자 등 기술 관련 산업체에서 발생한 것들이었다. 문제는 이러한 추세가 이후에도 지속되고 있다는 것이다.

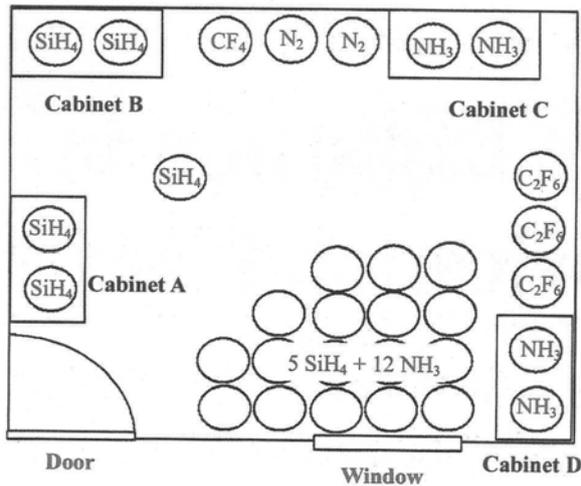
2. 사고 경위

2005년 11월 23일 11:20분 경, 대만 타이난에 소재한 한 광전지 조립 플랜트 내의 가스실 경계구역에서 커다란 폭발음과 함께 백색 연기가 피어올랐다. 11:31분, 폭발에 이은 화재가 가스실에 인접한 생산구역으로 확산되며 가스실에서 뿜어져 나오는 백갈색 연기가 더욱 짙어졌다. 플랜트 건물 내 방송을 통해 긴급 대피령이 내려졌고, 소방대가 도착할 때쯤엔 이미 2층과 3층에 위치한 청정실까지 불길의 번진 상태였다. 11:38분, 옥상에 있던 폴리프로필렌(PP) 가스 집진장치에서도 불길이 목격되었다. 13:45분, 대부분의 화재가 진압되었다. 화재로 인해 조립 플랜트의 청정실 일부가 훼손되었고, 부속시설인 가스실, 오수처리설비 및 가스 집진장치 등이 완전히 파괴되었다. 사고 직후 파악한 인명피해 집계 결과 1명의 근로자가 실종되었는데, 이후 구조대 조사 결과 실종자는 가스실 내에서 불에 타 숨진 것으로 확인되었다. 사고가 발생한 가스실에는 실란, 암모니아, 염화메탄류, 질소 등 모두 32개의 가스 실린더가 적재되어 있었다. 이들 실린더는 해당 가스들로 충전돼 있었고, 개중에는 배관에 연결돼 사용 중인 실린더도 있었다. 그림 1과 2는 사고 전후 가스실 내부의 모습이다. 화재에 노출된 실린더 중 다수에서 압력배출구가 녹아내려 가스가 새어나오고 있었다. 사망자의 시신을 건물 밖으로 옮기려 했으나 인근의 실란 실린더로 추측되는 실린더에서 지속된 잔염으로 인해 실패했고, 물을 뿌려 실린더를 냉각시키는 작업이 17:00까지 계속되었다.

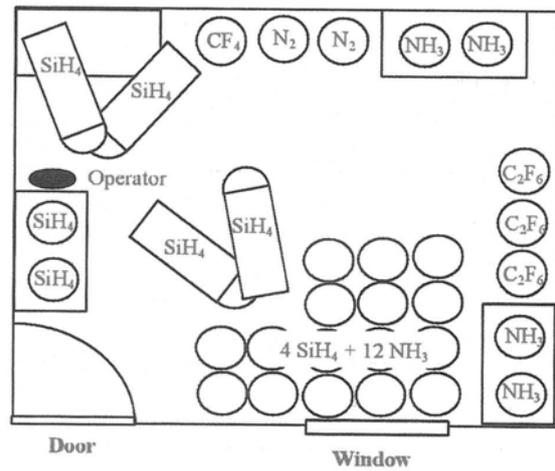
사고현장을 수습할 장비와 인력 등을 보유하고 있지 않던 가스 공급업체에서는 환경청에 사고 수습과 실린더 제거작업 등을 요청했다. 현장에 도착한 사고 수습반은 우선 열화상 카메라를 사용해 실린더의 온도를 확인해보고 실린더의 온도가 실온으로 내려갔는지를 체크했다. 이후 실란 실린더 모두를 잔염까지 완전히 소화된 옥외로 옮겼다. 하지만, 몇 시간 뒤 이들 실린더에서 다시 불꽃이 목격되자 불꽃이 완전 소멸될 때까지 물을 뿌려 실린더를 냉각시켰다.

암모니아 실린더의 바닥부분에 두꺼운 성애가 발생한 것이 목격되어 실린더 내부에 잔존하고 있는 상당량의 가스가 계속 누출되고 있음을 알게 되었다. 가스 누출 지점이 실린더의 압력배출구로 확인되었지만 현장에서 가스 누출을 차단하거나 하는 등의 비상조치를 강구하기가 불가능하자 실린더를 일단 옥외로 이동시켰다. 누출되고 있는 암모니아 가스의 배출을 촉진하기 위해 실린더를 거꾸로 물속에 집어넣어 물이 가스를 흡수하도록 한 다음 하수구를 통해 물을 흘려보냈다. 암모니아 실린더의 가스 배출작업은 다음날 02:00가 되어서야 마무리 되었다.

이날 14:00까지 가스실에 남아 있던 실란 실린더를 제거하는 작업이 계속되었다. 실란 누출로 인한 폭발사고를 방지하기 위해 원격 작동 절단기를 이용하여 실린더에 연결된 튜브를 절단하였다. 가스 실린더 모두를 안전지대로 이동시키고 잔류 가스를 배출하기까지 총 13시간 이상이 소요되었다. 다행히 더 이상의 인명피해는 발생하지 않았지만, 본 사고는 지난 30년간 타이완 산업시설에서 발생한 사고 중 단일 사고로는 최대 규모의 것으로 기록되었다.



[그림 1] 사고 전 가스실 배치도



[그림 2] 사고 후 가스실 배치도

3. 사고조사

3.1 현장검토

환경청과 과학단지관리청의 전문가들로 구성된 사고 조사반이 구성되어 조사작업을 주도했다. 본 사고와 유사한 사고를 취급해본 적이 없던 조사반은 실란 가스 사고와 관련한 사고기록, 관련 자료, 기준 및 사고보고서 등에 관해 외부 전문 기업으로부터 자문을 받았다. 지상층의 사고지점으로부터 건물 옥상에 위치한 배기가스 집진장치까지 면밀히 검토한 결과, 화재가 가스실에서 시작되었다는 것이 밝혀졌다.

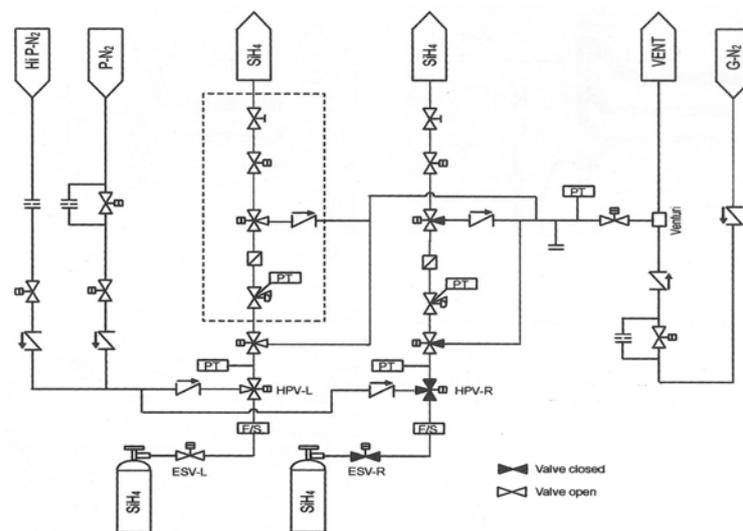
그림 1~2의 가스실 배치도에서 좌측 저장고를 저장고 A, 사용 중인 채로 바닥에 쓰러져 있는 실란 실린더가 포함된 좌측 더 안쪽의 저장고를 저장고 B라 한다. 총 6개의 실란 실린더 중 5개는 미사용 실린더였고 1개는 사용 중인 실린더였다. 또한, 가스실 내에는 12개의 미사용 암모니아 실린더가 있었다. 암모니아 실린더는 모두 체인으로 연결돼 있었으나 실란 실린더는 연결돼 있지 않았고, 2개의 실린더가 사고 당시 바닥으로 쓰러졌

다. 현장에서 바깥쪽으로 쓰러진 실란 실린더의 상황으로 볼 때, 사고 직전 저장고 B 근처로 옮겨졌다는 추측이 가능하다. 또 실린더 바닥부위에 성에가 덮여 있는 실린더는 암모니아 실린더이다. 우측에 위치한 다른 두 개의 저장고는 저장고 C 및 D로, 각각 2개씩의 암모니아 실린더가 저장되어 있었다.

심하게 훼손된 저장고 B의 측벽 중 한 곳에서 탈락된 실란 다기관이 발견되었다. 저장고 B의 출입문은 저장고 바로 앞 바닥 잔해 속에 묻혀 있었는데 유리부분만 파손된 상태였다. 2개의 실란 실린더는 짧은 호스관이 연결된 상태에서 저장고 밖으로 쓰러져 가스실 중간지점까지 굴렀지만 아직 저장고 배관에 연결돼 있었다. 사망자는 저장고 A 측벽에 벽을 대고 저장고 B를 마주한 채 바닥에 앉아 있는 자세로 발견되었다. 사망자는 개인보호장구를 착용하지 않은 상태였으며, 사고 당시 피난하려했던 흔적도 보이지 않았다. 저장고 A 측벽이 조금 훼손된 상태였다. 저장고 A 내에 있던 가스 실린더에는 약간의 화흔과 상당량의 백갈색 분진들이 쌓여 있는 것이 발견되었다.

가스 실린더 처리작업이 완료된 다음 가스실에 대한 정밀 조사를 진행하던 중 실린더 렌치 1개가 저장고 B 근처 바닥에서 발견되었다. 평상시 단단히 잠겨져 있어야 할 저장고 B의 잠금장치가 열린 채로 발견되었고, 열쇠 또한 열쇠함에 수납되어 있지 않았다.

사고반은 탈락된 실란 다기관에서 가스가 누출된 것인지를 파악하기 위해 저장고 B에서 발견된 다기관을 정밀 조사했다. 조사 결과 대부분 용접 밀봉된 연결부위에서 가스 누출이 시작된 것은 아니라는 결론을 얻었다. 그림 3은 다기관의 밸브 위치이다. 다기관 좌측 부위에 대한 점검이 끝나지 않았지만, 퍼지 배관에 연결된 여러 밸브가 개방된 것으로 볼 때, 질소 퍼지 및 진공 배기 작업 중이었던 것으로 추측되었다. 그러나 우측 다기관은 퍼지 배관에서 일탈되어 있었고, 실린더 인근의 고압밸브 및 비상차단밸브만 폐쇄된 채 공급 배관으로 연결되어 있었다. 따라서, 실란 가스가 이들 다기관 연결부위에서 누출된 것은 아니라는 사실이 명확해졌다. 만일 다기관에서 가스 누출이 시작된 것이라면, 작업원은 저장고 문을 개방하는 등의 조치를 취하기에 앞서 즉시 비상차단버튼을 눌러 모든 밸브를 폐쇄했을 것이기 때문이다.



[그림 3] 저장고 B 내의 다기관 밸브위치 (점선부분은 조사 전 제거 됨)

다음으로 실란 실린더 4개의 밸브와 연결부위를 조사했다. 연결부위는 모두 니켈 패킹 된 CGA 632였다. 저장고 B에 있던 2개의 실란 실린더의 바깥쪽 너트는 풀어진 반면, 저장고 A 실린더의 너트는 단단히 잠겨 있었다. 저장고 B 좌측 실린더의 CGA 연결부위와 패킹 안쪽에 상당량의 백색 분진이 쌓여있는 것이 발견되었다. 다른 연결부위 세 곳에 대한 조사 결과 백색 분진은 발견되지 않았고 갈색 분진만 간헐적으로 발견되었다. 좌측 실린더가 퍼지작업 중인 좌측 대기관에 연결된 것으로 미루어 실린더 교체작업이 진행 중이었다고 추측할 수 있었다. 저장고 B 인근에 쓰러진 실린더 또한 점검해보았다. 실린더의 캡은 새로 교체된 것이었지만 캡을 둘러싼 PEFE 밀봉상태는 약간 녹아내린 것을 제외한다면 매우 양호한 상태를 유지하고 있었다. 이와는 대조적으로, 미사용 실린더들의 밀봉은 모두 불에 타 재가 되어 있었다. 이는 바닥으로 넘어진 실란 실린더가 남아 있는 가스가 거의 없는 빈 실린더이며, 작업원이 폭발 사고가 발생하기 전에 저장고의 새로운 가스 실린더를 교체한 다음 저장고 근처에 빈 채로 놓아둔 것이라는 사실을 암시한다.

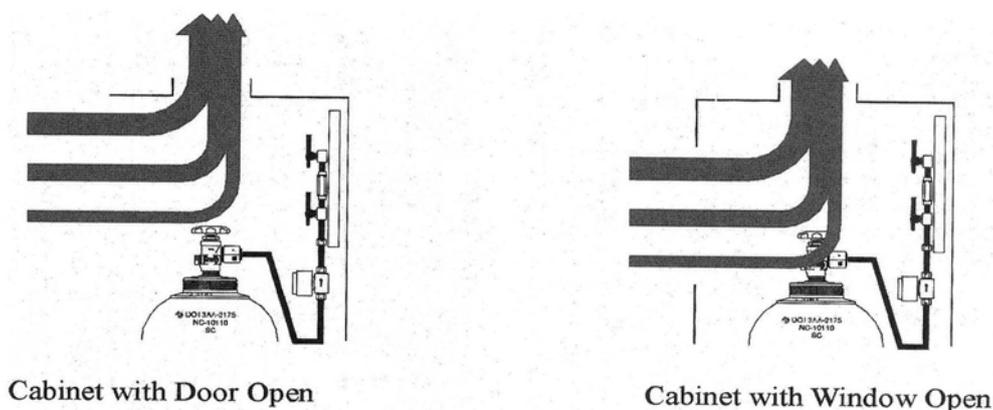
3.2 실란가스의 위험성 검토

실란은 대기에 노출되면 즉시 발화하는 자연발화성 가스로 잘 알려져 있다. 하지만, 그 발화특성은 매우 복잡해서 누출 조건과 주변 환경에 따라 다양한 형태를 띤다. FM이나 Intel사 등의 실험결과는 특정 조건하에서 실란이 누출될 경우 발화하지 않을 수도 있다는 사실을 보여준다. 타마니니 등은 농도 4.5 % 이하의 실란 혼합물은 준안정 상태를 유지하며 상당한 시차를 두고 서서히 발화한다는 것을 발견했다. 같은 조건에서 실란 농도를 최대 38 %까지 투여했을 때 발화 지연에 관한 시험자료도 확보되어 있다. 이 자료에 따르면, 실란 농도가 높아질수록 발화 지연 시간도 단축된다는 것을 알 수 있다. 저장고의 환기속도를 어느 정도 높은 수준(500 cfm, 14,158 lpm)으로 유지할 경우 폭발현상이 발생할 수도 있다. 실험에서는 저장고 내의 공기를 두 번 완전 교체한 다음 실란가스의 유동을 정지시켰더니 그로부터 불과 5초 만에 폭발현상이 나타났다. 적절한 방법으로 설계 및 시공되지 않은 저장고에 실란가스를 저장할 경우 폭발사고가 발생할 수도 있는 것이다.

사고현장의 실란 실린더에는 100 % 순수 실란가스가 충전돼 있었고 실린더 내부에는 유량제한오리피스(RFO)가 장착돼 있지 않았다. 본 사고의 경우 실제 가스 누출 과정이 어떻게 진행되었고 환경적인 장애 가능 요인이 무엇이었는지 명확하지 않기 때문에 지금까지 드러난 정황으로 발화 특성을 유추하기는 쉽지 않다. 그러나 사고가 난 가스 저장고의 환기속도가 FM 7-7, CGA P-32, NFPA-318, IFC-18 및 IFC-41 등의 기준과 타마니니 등이 권장하는 최소기준에도 현저히 미치지 못하는 것으로 밝혀졌다. 이들 기준에서는 가스 방출 시 환기중인 공기와 혼합될 때의 실란 농도의 평균값이 0.4 %를 초과하지 않아야 한다고 규정하고 있다. 이 정도의 농도를 유지하기 위해서는 반드시 유량제한오리피스(RFO)를 설치해야만 한다. 유량제한오리피스(RFO)가 장착되지 않은 1500 psig 실린더에서 실린더 밸브를 최대한 개방했을 때의 실란의 추정 유속은 2775 lpm에 이른다. 여기에 0.25 mm 크기의 유량제한오리피스(RFO)를 장착할 경우 실란의 유속은 통제 가능한 71 lpm 수준으로 감속되고, 이때 누출되는 실란 농도를 0.4 %까지 희석시키기 위해서는 17,750 lpm의 공기 유속이 필요하게 된다. 기준은 또한 저장고 내의 환기작업이 균등하

게 진행되어 누출된 실란가스가 어느 한 지점에 집적되지 않도록 요구하고 있다. 적절하게 설계 및 시공된 저장고의 환기속도는 점검창이 개방된 상태에서 실란 가스가 누출된 경우에도 이를 신속히 희석시킬 수 있는 정도이다. 적절하게 설치된 환기장치는 실린더 교체작업 중 가스 누출이 가장 우려되는 지점인 실린더 연결부위로 직접 공기를 유동시킨다. 이때 문을 개방하면 공기의 유동이 차단되고, 그림 4에서와 같이 차단된 공기는 저장고 상부로 이동하게 된다. 이 과정에서 공기의 흐름이 가장 절실한 부분인 실린더 연결부위에는 공기의 유동이 거의 미치지 못하게 된다.

그러므로, 최대 압력 10.4 MPa (1500 psig)로 실린더에서 방출된 가스가 지연된 발화소요 시간을 지나며 다발적인 자연발화(bulk autoignition)를 일으켜 폭발에 이르게 되었을 가능성이 농후하다.



[그림 4] 창문(문)이 개방된 저장고 내 공기 흐름도

본 폭발사고로 인한 손실의 규모가 어느 정도의 실란 누출량에 의해 발생할 수 있는 규모인지 구체적으로 실증하기 위해 TNT 폭발모델과 과압 측정용 프로빗 방정식을 도입하였다. 폭발지점으로부터 1m 이격 거리에 조작원이 서 있는 것으로 가정하고 폐출혈로 인한 조작원 사망 확률을 50%에 맞추기 위해서는 144,543 Pa.의 과압이 필요한 것으로 나타났다. 이 조건을 충족하기 위해 필요한 TNT 양은 39.4g으로, 이는 폭발 효율을 10%로 가정할 때 실란가스 29.6 표준 리터에 해당하는 값이다. 이 정도의 실란가스라면 저장고 내에서 수 초 만에 누출되어 집적될 수 있는 양이다.

3.3 폭발 원인

폭발사고 발생 이전의 정확한 사건 경위는 분명치 않다. 우선, 현장 관계자는 실린더 교체작업이 2인 1조로 진행되도록 규정된 바, 조작원이 단독으로 실란 실린더를 교체하지는 않았을 것이라고 주장했다. 또다른 조작원은 사고 시각 현장에 있지 않았는데, 점심거리를 사러 외출했던 것으로 나중에 밝혀졌다. 조사결과, 가스실 내에서 발견된 모든 물리적 증거들, 즉 (1) 여러 실란 다기관 중 하나가 질소 퍼지작업 중이었고, (2) 사용 완료된 실란 실린더가 저장고 인근에 놓여져 있었으며, (3) 해당 저장고 근처에서 렌치가 발견된 것으로 미루어 실린더 교체작업을 위해 조작원이 가스실에 출입했다는 것은 부정할 수 없는 사실인 것으로 판단된다.

실린더 교체작업은 사전 퍼지, 실린더 교체, 사후 퍼지, 누설 점검 및 공정 퍼지 (process purge) 순으로 진행된다. 먼저, 실린더의 밸브를 폐쇄한 후 연결된 다기관에 대해 질소 및 진공을 통한 사전 퍼지작업을 진행하여 관 내부에 잔류하는 실란가스를 희석 및 배출시킨다. 사전 퍼지가 완료되면, 연결관을 분리하고 저장고 문을 개방한 다음 실린더를 반출한다. 이어서 미사용 실린더를 부착하고 저장고 문을 닫는다. 그런 다음, 역시 질소와 진공을 이용하여 사후 퍼지작업을 실시함으로써 연결관 내에 잔류하는 공기와 분진을 배출시킨다. 이어 압력누설시험을 통해 연결관의 기밀성을 점검한다. 끝으로 저장고 출입문에 위치한 점검창을 통해 밸브를 개방한다. 공정 퍼지는 최종적으로 다기관에 순수 실란가스를 충전하는 작업이다. 이러한 실린더 교체작업은 통상 1시간 가량 소요된다. 절차서에 규정된 대로 작업을 진행한다면 실란가스 누출사고는 발생하지 않을 것이다. 다시 말해, 규정된 절차를 이행하지 않거나 기계적 결함을 발견하지 못한다면 사고를 피할 수 없는 것이다.

사고조사를 통해 드러난 주요 내용 중 하나는 좌측 실린더 밸브 연결구 개스킷에서 백색 분말이 검출되었다는 것이다. 당시 사용 중이던 다른 3개의 실린더 연결구에서는 백색 분말이 발견되지 않았다. 백색 분말이 검출되었다는 것은 실란가스 주입 전에 연결구와 관에서 공기를 제거하기 위한 퍼지작업이 진행되지 않았다는 것을 의미한다. 실란 다기관으로부터 실린더 연결구로 공기가 유입될 가능성은 거의 없다. 따라서, 실란이 주입되기 이전에, 즉 실린더 교체작업이 끝나고 사후 퍼지작업이 시작되기까지의 간격 동안 공기가 이미 유입되었을 가능성이 큰 것이다. 결론적으로, 조작원이 사후 퍼지작업과 가스누설시험을 실시하지 않은 채 실린더의 밸브를 개방했을 것이라는 추측이 가능해진다. 실린더 연결부위의 결함으로 인해 가스가 누출되었고 가스배출설비의 용량 또한 충분치 않았을 것이라는 처음의 가설은 실란가스의 지연된 발화 및 폭발현상을 통해 검증되었는데, 발화 및 폭발소요시간이 지체되는 것은 고압의 실린더 방출압력과 실란-공기의 혼합비가 고르지 못할 경우 발생하는 현상이다. 만일, 실린더가 저압상태였다면 순식간에 발화했을 것이다.

사고로 인한 손해 양태를 보더라도 저장고 출입문이 개방된 상태에서 폭발이 일어났다는 점은 확실해 보인다. 앞서 살펴본 바와 같이, 이러한 과압상태는 상당히 중요한 의미를 갖는데, 이는 정반대의 대처지점으로부터 오른쪽으로 약간 비켜난 지점에서 실린더가 발견된 이유를 말해주기 때문이다. 덧붙여, 만일 출입문이 잠김 상태로 닫혀 있었다면 문이 심하게 휘어졌거나 하는 등의 압력으로 인한 손상 흔적이 발견되었을 것인데, 출입문과 잠금장치 모두에서 이러한 흔적을 발견할 수 없었다. 피해 정도로 볼 때 폭발의 규모는 상당한 것이었다. 좌측 실린더가 바닥에 쓰러진 것은 실린더 바로 뒤에서 발생한 폭발로 인해 저장고 안에 있던 실린더가 실린더 바닥으로부터 먼저 뒤집어졌다는 것을 말해준다. 우측에 있던 실린더는 저장고 밖으로 수 십 센티미터 정도 날아가 떨어졌다. 2개의 실린더 모두 실린더가 넘어지며 팽팽히 당겨진 연결 튜브로 인해 멀리 날아가지 못했다. 사고가 발생한 저장고 B의 우측면 접합부분이 떨어져나갔다. 이로 인해 인접 질소 다기관이 흔들거렸고 질소 실린더 고리가 탈락되었다. 좌측과 후면은 가스실 벽면에 단단히 지지된 터라 손상을 거의 입지 않았고, 아마도 사고로 인한 과압이 오히려 저장고 전면으로 역류해 피해를 더 키운 것으로 보인다. 후면 벽에 용접되어 있던 가스 패널과 실린더 받침은 실린더가 밖으로 날아가며 발생한 충격으로 저장고 벽 속으로 밀려들어갔다. 여러

개의 실린더를 묶고 있던 연결체인이 화재로 인해 녹아버리고, 우측 실린더 비상차단밸브함과 우측 밸브 핸들 모두 물리적 충격의 여파로 인해 사라져버렸다. 저장고 A 및 B의 주 배기덕트는 완전히 파괴된 반면, 가지배관은 약간 휘어진 상태였다. 폭발의 충격으로 사고 조작원은 저장고 A와 벽 쪽으로 밀려났다.

출입문은 사용 완료된 실린더를 새 것으로 교체할 때만 개방하도록 되어 있었다. 또한 실린더 교체 후에는 출입문을 닫고 사후 퍼지작업을 수행하도록 규정되어 있었다. 저장고 출입문이 개방돼 있고 연결구에서 백색 분말이 발견된 점으로 볼 때, 새로운 실린더를 장착한 시점부터 사후 퍼지작업을 실시한 시점 사이에 가스가 누출된 것으로 추측된다. 당시 조작원의 해당 직무 경력은 약 4개월 정도로 아직 미숙한 상태라 할 것이다. 따라서, 작업 대상 실린더가 실란가스 용기라는 사실을 망각한 채, 단순히 실린더를 장착하고 밸브를 개방했을 가능성이 크다. 실란 대기관에 대한 누설시험 결과를 보면, 좌측 실린더는 질소 퍼지작업 중이었고 우측 실린더의 경우 비상차단밸브와 고압공급밸브가 폐쇄된 상태에서 공급 배관에 연결돼 있었다. 사고가 발생하기 전에 이들 실린더는 모두 저압상태였고, 조작원이 동료가 부재한 상황에서 서둘러 실린더 교체작업을 진행했던 것으로 보여진다.

상기 조사결과를 바탕으로, 아래와 같이 사고경위를 가정해본다.

- 사고가 발생한 2개의 실린더에서 압력이 떨어지자 실란 공급이 차단됐다.
- 조작원은 동료가 부재한 상태에서 타의 또는 자의로 실린더를 교체했다.
- 실린더 밸브 연결작업 중에 조작원이 실수를 저질렀다.
- 실린더 밸브에 접근하기 위해 조작원이 점검창 대신 출입문을 개방했다.
- 조작원이 사후 퍼지작업과 실린더 밸브 연결부에 대한 가스누설시험을 실시하지 않은 채 실린더 밸브를 개방했고, 이는 곧 가스 누출, 발화 지연 및 폭발로 이어졌다.
- 조작원이 폭발 충격으로 치명상을 입었거나 의식을 잃고 쓰러졌다. 동시에 2개의 실린더 모두 저장고 밖으로 튕겨져 나갔다.
- 실린더 CGA 632 연결부에서 새어나오고 있던 실란가스가 자연발화되어 벽과 조작원을 화염으로 뒤덮었다.(직경 2 m 정도의 벽면이 화염으로 손상을 입었다)
- 화염과 열기가 인근 실란 실린더 쪽으로 확산되며 더 많은 실린더에서 가스가 누출되자 화염은 더욱 거세졌고 사고 규모도 대형화되었다.

3.4 화재의 확산

본 사고의 두드러진 특징 가운데 하나는 화재가 어떻게 그토록 짧은 시간 안에 발화지점인 가스실로부터 생산구역으로까지 확대될 수 있었는가 하는 점이다. 폭발로 인해 완파된 가스실 창문이 1차적인 화재 확산 경로로 작용했음이 드러났다. 창문 근처 바깥쪽 벽면에 고정돼 있는 빈 실린더에 화재의 충격으로 발생한 흔적들이 선명하게 남아 있었다. 창문을 통해 확산된 화재는 가스실 우측면 인근에 위치한 폐기용 황산을 저장하는 플라스틱 탱크로 번졌고, 플라스틱 탱크를 집어삼킨 화세는 더욱 강성해졌다. 화염은 계속해서, 가스실 천장을 관통해 가스실 좌측면 인근의 PP(폴리프로필렌) 폼 배기덕트로 연결된 플라스틱 폐수배관을 타고 번져갔다. 이 덕트는 화재가 지상층과 그 상층에 위치한 조립공정을 거쳐 궁극적으로 지붕에 위치한 PP 폼 집진장치까지 확산되는 통로 역할을 수행

했다. PP 배기덕트 구성요소 중 유일하게 남아 있는 것은 덕트 받침대뿐이다. 인화성이 매우 강한 PP 덕트 화재로 인해 1990년대 반도체산업은 심각한 타격을 입었다. 본 사고는 PP 덕트를 통해서도 인화성, 비인화성 여부를 가리지 않고 어떠한 가스도 운반해서는 안 된다는 사실을 여실히 보여주고 있다. PP 덕트의 인화성은 모든 종류의 화원에 대단히 민감하게 반응하며 화재로 인한 피해를 한층 더 악화시킨다.

4. 사고의 교훈

본 사고의 경우 적절한 질소 압력시험을 실시하지 않은 상태에서 발생한 밸브 접속부위의 결함이 그 원인으로 지적될 가능성이 크지만, 이 외에도 우리가 교훈으로 삼아야 할 사항들이 여러 가지 있다. 다음은 본 사고가 우리에게 던져주는 시사점을 관리 및 운영, 시설 등의 설계 세 부분으로 나누어 요약한 것이다.

4.1 관리부분

- 안전과 생산의 우선순위 문제

사고가 난 플랜트에서 안전이 최우선 과제는 아니었던 것 같다. 광전지 시장이 급속히 성장하자 본 플랜트는 매우 신속하게 생산라인을 구축했다. 현장에서 사망한 조작원은 생산라인의 요구를 충족시키기 위해 실린더 교체 지침을 무시한 채 실린더를 교체하도록 지시받았다. 안전문제는 결코 생산라인의 요구와 타협할 수 있는 문제가 아니다.

- 안전불감증

광전지산업의 근로자는 반도체산업의 근로자가 체감하고 있는 만큼 실란의 성질 및 그 취급에 내재한 위험성에 대해 잘 알지 못한다.

- 가스 공급자의 안전정보 제공 미흡

물질안전성데이터시트(MSDS)를 제외한다면, 가스 공급자가 실란 고유의 위험성에 대해 사용자에게 제공할만한 정보를 보유하고 있지 않았다.

- 가스 공급자의 체계적인 대응방안 미흡

사고가 발생하자 가스 공급자는 충분한 기본자료를 제공하지도 못했고, 책임있는 사고처리 태도도 보여주지 못했다. 때문에 외부 전문가로 구성된 대책반이 기술적 지원이 거의 없는 상태에서 사고처리를 주도해야 했다.

- 플랜트 자체의 비상대응계획 부재

사고가 난 플랜트는 비상시 가스 누출 사고를 대비한 대책도 마련하지 않았고 이와 관련한 훈련도 실시하지 않았다. 이는 사고 당시 비상구호장비가 부재한 점 그리고 종업원들이 사고 초기 또는 사고 정리 단계에서 대책없이 허둥거린 점 등에서 명백히 드러났다.

4.2 운영부분

- 가스 저장고 배기용량 불충분

불충분한 배기용량 및 유량제한오리피스(RFO)의 부재로 인해 누출된 실란가스가 순식간에 발화하기 보다는 서서히 집적되어 폭발현상에 이르게 되었다.

- 자동 실린더 밸브의 부재
자동 작동 실린더 밸브가 설치돼 있었다면 작업원이 임의로 밸브를 개방하는 일이 불가능했을 것이므로, 본 사고를 사전에 예방하거나 화재로 인한 막대한 손실을 현저히 줄일 수 있었을 것이다. 자동 실린더 밸브의 부재는 또한 작업원이 가스누설시험을 생략하게 된 원인으로도 작용했다.
- 부적절한 분리보관
가스가 충전된 다량의 실린더가 아무런 보호장치 없이 가스 사용구역 내에 보관돼 있었으며, 화재는 이들 실린더를 통해 가스실 외부로 확산되었다.
- 작업절차의 준수
실린더 교체작업지침서는 반드시 2인 1조로 실린더를 교체하도록 규정하고 있으나, 사고 당시 작업자 단독으로 작업을 강행했던 것으로 밝혀졌다.
- 개인용 보호장구 미착용
사망한 작업원은 개인용 보호장구를 착용하지 않은 상태였다. 적절한 보호장구를 착용했다면 사망 사고는 발생하지 않을 수도 있었을 것이다.

4.3 시설 등의 설계부분

- 스프링클러설비 미설치
가스실과 저장고 모두 스프링클러설비가 설치돼 있지 않았다. 스프링클러가 설치돼 있었다면, 실린더를 냉각시켜 가스누출을 예방함으로써 화재가 성장하는 것을 억제할 수 있었을 것이다.
- 불충분한 이격거리
가스실과 조립 플랜트 사이의 이격거리가 충분하지 못해 불길이 조립 플랜트로 쉽게 확산될 수 있었다.
- 부적절한 배관 등의 배치
가스실을 관통하는 폐수배관이 화재확산의 통로로 작용했다.
- 인화성 덕트
인화성 PP 배기덕트를 사용함으로써 궁극적으로 조립 플랜트까지 화재가 확산되는 결과를 초래했다.

위에서 우리는 실리콘 박막 광전지 모듈 조립 플랜트에서 발생한 폭발 및 그로 인한 화재사고 조사 내용과 더불어 화재의 확산 및 사고 처리 부분까지 구체적으로 살펴보았다. 또한 본 사고를 통해 우리가 보완해야 할 문제와 관련, 관리 및 운영, 시설 등의 설계 분야로 구분해 알아보았다. 우리는 본 사고의 교훈을 통해 미래에 있을지도 모를 유사 사고를 예방하고, 안전한 실린더가스 사용방법에 대한 연구활동이 활성화되기를 기원한다.

출처 : Process Safety Progress (Vol. 25, No. 3; 2006년 9월호)

번역 : 기술지원부 과장 강영은