

반도체공업의 화재사고 분석

□ 반도체 공장의 사고통계

FM Global사가 발표한 1995년부터 2000년까지 반도체 공장의 사고는 빈도에 있어서 화재 23%, 케미컬 누출 18%, 서비스 중단 9%, 전기사고 14%, 도난 5%, 폭발 4%의 순서이며, 손해액 측면에서는 케미컬 누출 37%, 화재 20%, 서비스 중단 19%, 전기사고 7%의 순서를 나타내고 있다. 국내에서도 웨이퍼를 가공하는 반도체 공장은 삼성, 하이닉스, 동부, 페어차일드 등에 불과하며 전 세계적으로도 반도체 공장의 모수가 크지 않고 대형사고가 아닌 경우에는 외부로 알려지지 않은 경우가 많으므로 통계 숫자에 대하여 큰 의미를 부여하기는 어렵다고 판단되며 단지 참고사항일 뿐이다. 이러한 통계자료로부터 반도체 공장에서 화재, 케미컬누출, 전기사고 등이 주요 사고유형이라는 사실을 알 수 있다.(그림 참조)



그림. 반도체 공장 사고유형 및 손해액

한편 최근 몇 년간 보험사에 보고된 사고사례에 따르면 반도체 공장의 각 사고 유형에 대한 반도체 공장의 손해금액의 비중은 다음의 표와 같다.

이 통계를 보면 지난 수십 년 간 반도체 공장에서는 화재, 케미컬누출로 인한 손해가 상대적으로 많았음을 알 수 있다.

표. 반도체 Fab에서 사고 발생하여 청구된 손해액 비중

년도	1986-1996	1996-2000	2001-2004
매년 보고되는 사고 수	~23	~35	~26
화재	24%	20%	26%
케미컬 피해	51%	36%	9%
지진	n/a	n/a	32%
조업중단, 고장	n/a	22%	14%
스프링클러 누수		4%	4%
기타	25%	18%	15%

자료 : Rushbrook 반도체 세미나, 2008

□ 해외 주요 화재사고사례

(화재사례1) 심한 시설 손상을 유발한 웨트벤치 화재

1. 개요

Class 100 클린룸에서 집적 회로 제조가 진행 중이었으며, 10개의 웨트벤치에서는 도금, 마스크 청소 및 현상과 행굼 작업이 이루어지고 있었다. 도금 용액, 아세톤 및 이소프로필 알코올이 웨트벤치 플라스틱 삽입물 내의 전열기에 있는 유리 차단기 내에서 가열되었다. 연무 배기덕트 라인은 10~24 in.(254~610 mm)의 폴리프로필렌 구조이며 대기 중으로 직접 배기되었다. 이 시설은 정해진 시간에만 작업하며, 다른 시간에는 보통 사람이 없고, 자동 스프링클러설비도 없었다.

2. 화재상황

어느 날 저녁 순찰 중 한 경비원이 연무 배기설비에서 연기가 나오는 것을 발견하고는 제조구역으로 가 화재를 확인하고 소방서에 연락했다. 소방대원이 제조구역으로 들어와 웨트벤치의 화재를 발견하고 수동 소화기로 진화했다.

화재 및/또는 열로 인해 4개의 웨트벤치가 심하게 손상되었으며, 선반 근처의 5개의 VLF 후드가 열로 인해 변형되었다. 화재가 배기설비로 유도되었기 때문에 대부분의 폴리프로필렌 연무 배기덕트 라인이 심하게 손상되었다. 복층 빔 지붕의 합판 일부가 심하게 탔으며, 연기와 열에 의해 지붕 타일과 HEPA 필터 전체가 손상되었다. 화재가 발생한 제조구역의 주요 장치가 모두 연기에 오염되었다.

3. 원인 및 대책

화재 원인은 전열기를 가동 상태로 방치해서, 이로 인해 플라스틱 삽입물이 완전히 녹아 웨트벤치에 착화시킨 것이었다. 이 손실은 클린룸 내부와 가연성 연무 배기덕트 라인 내에 자동 스프링클러설비가 필요하다는 것을 보여주었다. 또한 전열기는 근무시간 외에는 "ON" 상태로 방치해서는 안 되며, 플라스틱 웨트벤치 내의 스테인레스 스틸 삽입물 안에 넣어두어야 한다.

손실액: P.D. \$870,000, B.I. \$2,700,000

(화재사례2) 화재로 인한 웨이퍼 스테퍼 손상

1. 개요

3,000 ft²(280 m²)의 Class 10 클린룸에서 포토리토타그래피 작업이 진행 중이었으며 웨이퍼 스테퍼가 있었다. 이 특수 스테퍼에는 환경 채임버 외함이 없었다. 모든 순환 팬 장치와 HEPA 필터 모듈 사이에 연기 감지기가 설치되었다. 이 감지기는 내부 팬 장치를 정지시키도록 인터록이 되어 있었지만 원격 경보를 발하지는 못했다.

2. 화재상황

한 직원이 외부 문에서 클린룸 구역으로 연기가 나오는 것을 발견하고 경비원에게 알렸으며, 경비원이 공공 소방서에 연락했다. 그런 후 직원은 다시 연기가 나는 구역으로 돌아가 실에 화염이 발생한 것을 확인하였다.

도착 30분 후 소방대는 직원들을 건물 내로 들어가도록 허가했다. 연기는 냄새가 낮지만 그 당시에는 보이지 않았다. 공급 및 순환팬은 가동되지 않았지만 연무 배기설비는 여전히 가동 중이었다. 클린룸 내의 스프링클러헤드는 작동되지 않았으며, 소화기도 사용되지 않았다.

몇몇 회로판, 배선 및 웨이퍼 스테퍼의 화강암 테이블 아래 플라스틱 회로판 홀더가 화재의 영향을 입었다. 화재시 약 2 lb(0.91 kg)의 플라스틱 물질이 연소된 것으로 추정되었다. 클린룸의 장치 및 표면에 두꺼운 그을음이 있었다. 화재 구역 인접한 곳에 있던 유사한 스테퍼는 연기로 인해 심하게 손상되어 교체해야 했다.

3. 원인 및 대책

화재 원인은 실제로 확인되지는 않았지만 전기로 추정되며, 과전류 상태였던 것

같다. 이 손실로, 조기경보를 발하고 연기오염을 막기 위해서는 감시형 신속 연기감지설비가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

손실액: P.D. \$1,400,000, B.I. \$170,000

(화재사례3) 실란가스 캐비닛 화재

1. 개요

콘크리트 블록 벽으로 시공된 20×30 ft(6.1×0.1 m) 차단실은 공정 가스를 클린룸 구역으로 분배시키는데 사용되고 있었으며, 실란 실린더는 12gauge 금속 가스 캐비닛에 배치되어 있었다. 이 캐비닛에는 정격 50~75 cfm(1.4~2.1 m³/min)의 기계적 환기설비가 설치되어 있었다. 이 환기설비를 300 cfm(8.5 m³/min)로 개량시키는 중이었다. 이 실린더에는 제한 오리피스가 장치되어 있었으며, 가스 캐비닛에는 자동 스프링클러설비가 설치되어 있었다.

2. 화재상황

해당 실린더는 사고 약 30분 전에 설치되었으며, 건물의 환기설비를 이용하여 캐비닛 임시 환기가 이루어지고 있었다. 낮 동안 개량된 환기설비가 가동되었지만 완전하지가 않았다.

그 구역에 있던 직원이 공정 가스 배분실에서 "핑"하는 소리가 나는 것을 들었다. 조사를 통해 캐비닛의 망입유리가 부서지고 문이 열렸으며 실린더 밸브에서 화재가 발생한 것을 발견하였다. 그 즉시 캐비닛 내부의 스프링클러헤드가 작동되어 화재를 실린더 헤드로 제한하였다.

공공 소방대가 신고를 받고 도착하였다. 화재는 오리피스에서 실란이 다 연소될 때까지 약 8시간 30분 동안 계속되었다. 실린더 집합관 연결부가 손상되어 실란 흐름을 차단할 수 없었다.

3. 원인 및 대책

분배 배관으로 연결되는 실린더의 연결부가 부적절해 실란이 유출되었다. 연결부의 이음나사 때문에 가스가 연결부에서 누출된 것 같은 흔적이 있었다.

이 손실로, 클린룸에서 멀리 떨어진 차단실에 위험한 가스를 담고 있는 가스 캐비닛을 배치해야 하며, 자동 실린더 차단밸브를 사용해야 한다는 것을 보여주었다. 서비스 복도에서 이 사고가 발생했다면 재산 손실 및 기업휴지 비용이 상당했을 것이다.

손실액: P.D. \$36,000, B.I. \$68,000

(화재사례4) 실란에 의한 연무 배기덕트 라인 내의 진공펌프 오일 착화

1. 개요

이 시설은 실리콘 웨이퍼 집적회로 제조 관련 시설이었으며, 저압 화학 증기 석출(LPCVD) 공정을 통해 웨이퍼에 실리콘을 석출시키는 중이었다.

석출을 위해 실란이 유입되는 동안 탄화수소 펌프 오일을 사용하는 진공펌프가 로 관을 진공상태로 만들었다. 진공 배기장치는 섬유유리 강화 플라스틱(FRP) 연무 배기덕트 라인에 연결되었다. 12 in.(305 mm) 이상의 모든 덕트라인에는 자동 스프링클러설비가 설치되었다.

2. 화재상황

순찰도중 한 경비원이 LPCVD 로 근처의 연무 배기덕트 라인의 화재를 발견하였다. 잠시 후 소방대가 도착하였으며, 덕트라인 내부에 5개의 스프링클러헤드가 작동하여 덕트 화재를 진화시킨 것을 발견하였다.

3. 원인 및 대책

이 화재의 원인은 비반응 실란이 진공설비를 통해 연료 배기덕트 라인으로 흘러 들어가 덕트 내부의 가연성 진공펌프 오일 잔류물을 착화시킨 때문이었다.

이 손실로, 불연성 진공펌프 오일로 교체하거나 가연성 오일이 연무 배기설비 덕트라인으로 들어가는 것을 방지하기 위해 오일 미스트 분리기를 설치해야 한다는 것을 알게 되었다.

손실액: P.D. \$38,000, B.I. \$130,000

(화재사례5) 전열기로 인한 플라스틱 웨트벤치 착화

1. 개요

습식 에칭 플라스틱 웨트벤치는 Class 10,000 웨이퍼 제조실 또는 "웨이퍼 제조" 클린룸의 마스크 제조 구역에 배치되어 있었다. 스테인레스 스틸 삽입물에 있는 두개의 전열기는 불연성 액체 가열에 사용되었다. 개별 전열기에는 벤치 앞에 회전 손잡이가 있는 제어기가 있으며, 꺼짐 위치로부터 다단계로 최대 온도 정격이 910°F(488°C)인 높은 위치까지 회전된다. 또한 손잡이는 꺼짐 위치에서 반대방향의 최고 위치로 직접 전환될 수 있으며, 표시등이 설치되어 전열기가 켜져 있을 때는 보이도록 되어 있었다.

2. 화재상황

새벽녘에 스프링클러 방출 경보가 수신되었으며, 잠시 후 소방대가 도착하였다. 플랜트 직원이 건물을 수색하여 습식 에칭 플라스틱 작업 벤치 위에서 2개의 스프링클러헤드가 작동 중인 것을 발견하였다. 이 두 스프링클러헤드 작동을 유발한 화재는 이미 진화되었다.

알루미늄 연무 배기덕트가 손상되지 않고 연기를 배기했기 때문에 연기 손상은 적었지만, 바닥을 통해 물이 떨어져 컴퓨터 장치를 적셔, 지하에 수손이 발생했다.

3. 원인 및 대책

마지막 근무조가 작업을 끝낸 후에도 전열기가 켜져 있었다. 전열기에 연결된 온도 제어기의 "켜짐" 표시기 조명이 적절히 가동되지 않은 것으로 밝혀졌다. 화재 원인은 전열기 배선의 단락 또는 전열기 과열로, 이로 인해 배선 절연부가 파손되어 전열기 배선이 단락되었다.

이 손실을 통해 명확히 표시된 "꺼짐" 위치에서 정지되는 온도 제어 손잡이가 필요하며, 비 근무시간에는 반드시 전열기를 꺼야 한다는 것을 알 수 있었다.

손실액: P.D. \$111,000, B.I. \$9,000

(화재사례6) 진공펌프 폭발

1. 개요

Class 100 클린룸에서 ASIC(Application Specific Integrated Circuits)장치가 행해지고 있었으며, 인접한 서비스 복도에 배치된 공정 진공펌프를 사용해 한 통로에서 플라즈마 에칭 작업을 하고 있었다. 펌프는 일반 탄화수소 오일을 사용하였다. 산소 서비스(즉, 산소 플라즈마)와 관련된 펌프에는 질소 불활성화 설비가 설치되었다. 펌프 배기장치는 주 연무 배기 집합 덕트에 연결된 4 in.(102 mm) schedule 80 PVC 배관에 연결되어 있었다. 서비스 복도에 많은 공정 가스 및 급수 라인이 배치되어 있었다.

2. 화재상황

어느 이른 아침 서비스 복도에서 큰 폭발이 발생했다. 정비 직원이 이 구역에 들어가 바닥에 퍼진 오일막이 물을 덮고 있는 것을 발견하였다. 한 직원이 산소 플라즈마 에칭기에 공급되는 진공 펌프가 분리되어 날아간 것을 알았다. 가스

및 급수 라인이 차단되었으며, 즉시 물과 손상부 청소를 시작했다.

Schedule 80 PVC 배관 약 40 ft(12.2 m)도 파괴되었다. 펌프 용기와 PVC 배관 파편이 직경 ¼ in.(6.4 mm) 스테인레스 스틸 공정 가스 및 D.I.수라인 여러 개를 파손시켰으며, 비산 파편으로 인해 세 개의 벽 패널이 손상되었다. 펌프에서 진공펌프 오일이 누출되어 38개의 천장 타일을 손상시켰다. 약 20개의 공정 작업 웨이퍼가 사용할 수 없을 만큼 손상되었다.

3. 원인 및 대책

가장 가능성이 높은 원인은 진공펌프로의 질소 불활성화 공급설비의 차단으로 인해 산소 존재 하에 탄화수소 진공펌프 오일과 고온이 결합되어 펌프 폭발을 가져온 것으로 보인다.

이 손실로, 공정 장치에서 산소를 제거할 때는(즉 플라즈마 에칭) 불활성 합성 오일을 사용할 필요가 있다는 것을 알 수 있었다.

손실액 P.D. \$27,000, B.I. \$1,000

(화재사례7) 진공펌프 오일 역류로 인한 로 튜브 화재

1. 개요

이 반도체 제조시설은 서로 다른 세 제조 구역 중 한 곳에서 다양한 크기의 웨이퍼의 집적회로를 생산한다. 이 구역 중 한 곳은 8개의 확산/CVD 로가 있는 Class 1000 클린룸이다. 이 로 중 하나에는 4개의 튜브가 있으며 위쪽의 두 튜브는 폴리실리콘 석출에, 그리고 아래쪽 두 튜브는 질화실리콘 석출에 사용된다.

2. 화재상황

초저녁에, 이 시설에 두 번의 전압 변동이 생겼으며, 30분 후 약 1분 간격으로 추가로 3번의 전압 변동이 발생했다. 이렇게 전압이 변동되는 경우에는 많은 제조 장비가 자동으로 가동 정지되게 된다. 이 사고 시, 전압 변동이 멈춘 후 장비조작자가 바쁘게 장치를 복구하다 A-뱅크 로의 아래쪽 No. 4 튜브의 화재를 발견하고 비상대응팀과 소방서에 신속하게 연락을 하였다. 비상팀이 할론 소화기를 사용해 화재를 튜브 내로 제한시켰다. 화재가 진화된 후 조작자가 로를 검사하여 튜브 No. 4에서 진공펌프 오일 잔류물을 찾아내었다.

3. 원인 및 대책

화재로 석영튜브, 튜브 적재 및 하역문, 가열 부품 및 근처 배선이 심하게 손상되었으며, 공정중인 일부 작업뿐만 아니라 HEPA 필터와 프리필터가 화재로 인해 오염되었다.

진공펌프 오일이 고온 석영튜브로 역류되면서 No. 4 튜브에 화재를 유발했다. 이 손실로, 진공펌프와 역류가 가능한 모든 확산로의 석영튜브 사이에 역류 방지 장치를 설치할 필요가 있음을 알게 되었다.

손실액: P.D. \$190,000, B.I. \$234,000

(화재사례8) 냉각수 누수로 손상된 클린룸 및 전자빔 노출 설비

1. 개요

이 설비는 통신 산업용 집적회로 연구 및 개발 활동과 관련되어 있었다. 이 건물은 2층이었으며, 덕트라인, 공조설비 등에 사용되는 2개의 중층과 공조설비용 팬트하우스로 이루어져 있었다. 건물 한쪽 코너에는 12×37 ft(3.7×11.3 m) 전자빔 구획실이 있었다. 이 구획실 내부는 전자빔 장치, 여기에 관련된 전자장치와 케이블 및 통기 덕트라인용 유틸리티 부의 3개 부문으로 나누어져 있었다. 전자빔 노출설비는 설치 중이었으며, 사고 발생 당시에는 가동되지 않았다.

전자빔 구획실의 각 부문에는 개별 공조설비가 가동 중이었으며, 공조장치는 구획실 위의 중층에 있었다. 전자부문에 공급되는 공조장치 No.3은 비상 모드에서 12~20%의 에틸렌글리콜과 80~88%의 냉각수 혼합물 또는 비음용수에서만 가동한다. 공조장치에는 배출 피트로 연결되는 배수배관이 장치된 응축팬이 있었으며, 비음용수 공급 배관은 동일한 응축팬 배수 배관으로 연결되어 있었다.

2. 화재상황

이 시설의 전기적 정비 작업은 정지되었으며, 전자빔 구획실에는 조명이 없었다. 이 구역에는 임의로 사람들이 출입했으며, 사고 발생일 이른 아침에 이상한 냄새가 나는 것을 발견했다. 그날 저녁, 한 기술자가 냉각수 압력 강하를 발견하고, 이 설비가 누수된다고 확신했다. 안전 감시인이 전자빔 구획실로 와서, 바닥에 냉각수가 고여 있으며, 천장, 조명기구 및 벽을 따라 물이 떨어지고 있음을 발견했다. 냉각수 누수는 HEPA 필터 모듈, 아래층의 케이블 및 연결부, 전자빔 장치 및 관련 전자장치에 영향을 주었다.

3. 원인 및 대책

이 손실의 원인은 냉각수가 공조장치 No.3 응축팬에서 과류되어 전자빔 구획실 손상을 유발한 것이었다. 따라서 응축팬 배수설비를 변경하고, 비음용수 냉각 배수 라인에 연결되지 않고 배수구로 배출하도록 권장되었다.

이 손실로, 클린룸 위에 급수배관 및 피팅의 수를 감소시켜, 누수 시 수손을 방지하도록 할 필요가 있음을 알게 되었다.

P.D. \$149,000, B.I. \$332,000

(화재사례9) 대만 Winbond 화재

1. 개요

일시: 1996년 10월 14일

화재발생장소: CVD Machine

피해 장소: 지원설비 지역, 클린룸 오염



[화재 현장 사진]

2. 화재상황

클린룸 옆에 있는 지원시설 지역에 위치한 CVD(화학증기증착)설비에서 화재 발생하여, 이 화재에서 발생한 연기 및 유독가스가 클린룸에 유입되었다. 손실 중 일부는 재물보험에 가입되어 있어 보상받을 수 있었다. 많은 종류의 값비싼 생

산설비가 화학적으로 강력한 가스와 쌓인 물질들 때문에 효과적인 오염제거 방법이 아주 중요함을 부각시켰다.

손실액 : 1억 8000만 달러(재물보험 55%, 조립보험 45%)

(화재사례 10) UICC 화재

1. 일시 : 1997년 10월 3일

2. 화재상황

폴리프로필렌 파이프 보수작업 중에 발생한 불이 배출 환기 설비를 통해 다른 지역까지 퍼져 공장 내 모든 구역으로 확산되었다. 화재는 36시간 동안 계속되었다. 이 사고는 반도체 공업이 가지고 있는 엄청난 잠재적 손실액, 아주 복잡한 손실 완화 수단, 복잡한 해결 방법에 대해 보여주고 있다.

3. 손실액 : 350만 달러(조립보험 25%, 재물보험 75%)



[사고 현장 사진]

(화재사례11) 실란가스 누출로 인한 폭발사고

1. 개요

- 일시: 2005년 11월 23일 (수) 11시 30분경
- 장소: 대만 M社
- 원인: 실란가스 누출에 의한 화재폭발
- 피해: 인명피해 - 직원 1명 사망, 소방관 10명 피부 상해 (HF누출)

재산피해 - 약 42백만(NT) (약 13억원 예상)

복구기간 - 3개월 추정

2. 사고 개요

- 실란가스 누출 알람 발생함 (2번 실린더의 누설 경보 확인)
- 실란 누출 후 즉시 화재 발생하지 않았음 (추정)
- 운전자가 캐비닛 문을 여는 순간 누출 실란과 공기 유입에 의해 캐비닛 폭발함(운전자 사망)
- 점화원(실린더 접속 전선 등) 및 실란에 의한 화재 발생
- 폭발시 주변 다른 실란과 암모니아로 확산
- 케미컬 저장실내 HF 누설
- 1시간 동안 화재 지속 후 소방대에 의해 진화
- 클린룸의 일부가 직접 화재 피해를 입고, 전 클린룸 지역에 연기손 및 수손

3. 문제점 및 교훈

- 클린룸 내 스프링클러 미설치 (사고업체 클린룸 Class 100,000수준)
- 실란가스가 누출되더라도 바로 인화하지 않을 수도 있으므로 이에 대한 대비 필요
(방폭형 전기시설, 캐비닛 스프링클러, 캐비닛 및 룸 환기 등)
- 누출된 실란가스가 인화하지 않고 체류하고 있다가 폭발하는 경우, 주변 시설로의 피해 전파를 최소화하기 위하여 인화성/자기발화성 가스를 취급하는 Room에는 DLC (Damage Limiting Construction)가 반영되어야 함.

(화재사례12) 공장 가동 중 생산라인 화재 사고

1. 사고개요

'03년 12월 P社 프랑스 공장 Diffusion Furnace 공정에서 화재가 발생하여 생산 장비 및 제공품 건물이 소손됨. Wafer, 장비, 건물 전소로 화염 및 연기 피해가 발생하였으며 약 7,200억원 (재물: 1,900억 / 기업휴지: 5,300억)의 재산 피해가 발생함

2. 사고 대처 경위

- 12. 03 (금) 09:14 화재 발생.
09:15 연기감지 (Air Sampling 감지기 아닌 일반감지기)

09:20 소방차 도착 (화재 후 6분 이내 도착)

09:25 duct, scrubber 로 확산

오후 지붕 붕괴

- 12. 04 (토) 10:00 화재 진화

3. 사고원인

1950년 신축된 노후된 Fab으로 5" wafer 가공 라인으로 확산 공정(Diffusion Furnace:웨이퍼 표면에 800~1,200도의 고온 열에너지를 이용하여 불순물 원자를 웨이퍼 표면내부로 주입시켜 불순물층이 형성되도록 하는 공정)에서 화재 발생 추정

4. 문제점 및 교훈

- 클린룸 내 스프링클러 미설치 및 일반 감지기 사용 (클린룸용 공기 흡입식 감지기 미설치) 대처가 지연
- 가연 덕트 사용으로 인한 연소확대로 화염, 연기 확산에 의한 추가 피해 발생함
- 기업휴지 I 피해 금액이 재물손실 피해 금액보다 최대 3배 이상

※ 흑백 인쇄로 인하여 잘 보이지 않는 도표는 협회 홈페이지(kfpa.or.kr)에 로그인 후 지식창고 - 발간자료 - 위험관리정보에서 PDF로 확인 가능합니다.