

KOSHA GUIDE

E - 182 - 2021

정전기에 의한 화재·폭발 재해조사에 대한
기술지침

2021. 12

한국산업안전보건공단

안전보건기술지침의 개요

- 작성자 : (전) 산업안전보건연구원 최상원
- 제·개정 경과
 - 2021년 9월 전기안전분야 제정위원회 심의(제정)
- 관련규격 및 자료
 - 정전기 핸드북, 일본정전기학회
 - 정전기안전, 동화기연, 2001년
- 관련법규·규칙·고시 등
 - 산업안전보건기준에 관한 규칙 제325조(정전기로 인한 화재·폭발 등 방지)
- 기술지침 적용 및 문의
 - 이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈페이지(www.kosha.or.kr)의 안전보건기술지침 소관분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.
 - 동 설명서 내에서 인용된 관련규격 및 자료, 법규 등에 관하여 최근 개정본이 있을 경우에는 해당 개정본의 내용을 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2021년 12월

제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

정전기에 의한 화재·폭발 재해조사에 대한 기술지침 개요

I. 제정 이유

석유화학공장 등 인화성 물질로 인한 화재·폭발 발생사업장에서 재해조사 시에 점화 원으로써 정전기로 특정하기 위해서 고려하여야 할 정전기적 파라미터 및 재해조사에 대한 기술적 사항을 제시함.

II. 제정(안)의 주요내용

1. 재해 사고 분석에 대한 일반 사항
2. 재해 분석 기법에 대한 기술적 사항
3. 재해 사례와 분석

III. 관련 법규 및 규격

- 산업안전보건기준에 관한 규칙 제325조(정전기로 인한 화재·폭발 등 방지)
- 정전기 핸드북, 일본정전기학회
- 정전기안전, 동화기연
- KOSHA GUIDE : 정전기 재해예방에 관한 기술지침

IV. 제정위원회 심의개요

- 제 안 자 : (전)산업안전보건연구원 최 상 원
- 심 의 일 : 2021년 09월 15일
- 심의위원 : 재적위원 13명 중 12명 참석(수정 후 찬성 12명)
- 주요 수정내용 : 단어 및 기타 자구 수정 등

정전기에 의한 화재·폭발 재해조사에 대한 기술지침

1. 목적

이 지침은 산업안전보건기준에 관한 규칙 제325조(정전기로 인한 화재·폭발 등 방지)에 따라 화재·폭발 발생사업장에서 재해조사 시에 점화원으로써 정전기로 규정하기 위해서 고려하여야 할 정전기적 파라미터 및 재해조사에 대한 기술적 사항을 정함을 목적으로 한다.

2. 적용범위

- (1) 이 지침은 인화성 가스·증기·가연성 분진의 폭발위험장소에서 정전기에 의해 발생하는 화재·폭발을 예방하기 위한 위험성 평가 및 그 대책에 적용한다.
- (2) 본 지침은 반도체산업 등과 같이 전기·전자기기에서 발생하는 정전기에 의한 장애를 찾아내고 예방대책을 세우는데 적용할 수 있다.

3. 용어의 정의

- (1) 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 안전보건기술지침의 “정전기 재해예방에 관한 기술지침”을 준용한다.
- (2) 그 밖에 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 이 지침에서 특별히 규정하는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙 및 안전보건규칙에서 정하는 바에 따른다.

4. 정전기 재해 분석에 대한 일반 사항

- (1) 정전기에 의한 재해는 재현성이 낮은 정전기의 대전을 전제로 하고 있어 그 발생은 확률적인 요소가 크다. 그중에서도 화재·폭발은 대전과 함께 방전 및 인화성 물질의 조건이 맞아야 발생하기 때문에 그 확률은 극히 낮다고 할 수 있다. 발생 확률이 낮다는 것은 안전 대책을 실시하지 않아도 거의 화재·폭발이 발생하지 않는다고 할 수 있지만, 통계적으로는 정전기에 의한 화재·폭발은 최근에 평균적으로 매년 70여 건이나 발생하고 있다. 이 때문에 정전기에 의한 화재·폭발은 발생 확률이 낮지만, 잠재 위험성이 큰 것으로 고려하여야 한다.
- (2) 정전기에 의한 재해를 방지하기 위해서는 먼저 그 잠재 위험성을 인식하는 것을 출발점으로 한다. 그 효과적인 수단은 과거의 재해 사례를 조사하는 것이다. 사례는 살아있는 교훈이며, 이를 분석하여 다른 생산 공정에서 재해 발생의 잠재 위험성을 부각시키는 경우도 있다. 유사 재해가 많은 것은 정전기 재해의 특징 중 하나이지만 그 방지에 대해서도 사례 분석이 유용하다는 것은 두말할 필요가 없다.
- (3) 재해의 잠재 위험성을 인식한 후 다음 단계는 생산 공정에 맞는 적절하고 효과적인 안전 대책을 실시하는 것이며, 그때도 사례 분석을 하면 재해 대책의 맹점이나 요점이 명확해지기 때문에 유용하다.
- (4) 이와같이 재해 사례 분석은 재해의 발생 방지를 위해 유용하지만 재해가 부정적인 이미지를 가지고 있기 때문에 좀처럼 사례가 공표되지 않는다는 문제가 있다. 재해 사례가 상세하게 보고되는 것은 사회적 영향이 큰 대규모 화재·폭발 등이고, 전문 연구자 등을 포함한 조사단에 의해 조사 보고서가 발표되는 경우이다. 물론 산업 현장에서 화재·폭발이 발생한 경우에는 관할 관청에 의해 재해 원인 조사가 이루어지나, 그 보고서는 대부분 비공개로 되어 있다. 예외적으로 재해를 일으킨 기업 등에서 전문 연구자 등에게 원인 규명을 위한 기술 상담이 있고, 실험 등의 조사가 행해진 경우 조건부이지만 조사 결과가 어떠한 형태로 공표되는 경우가 있다. 이러한 정보도 귀중한 자료가 되기 때문에 적극적으로 수집하고 활용하는 것이 바람직하다.

(5) 재해 사례를 효과적으로 살려 유사 재해 방지에 최대한 활용하기 위해서는 사례를 과학적으로 분석하는 것이 필요하다. 재해 사례의 과학적 분석 방법으로는 시스템 공학적 방법인 결함수분석(FTA; Fault Tree Analysis), 사건수분석(ETA; Event Tree Analysis) 등이 이용된다. FTA는 재해로부터 출발하여 그 원인이 된 요인을 추출하는 방법이다. ETA는 FTA와는 반대로 재해 원인에서 출발하여 체크포인트마다 성공과 실패를 나누면서 재해에 이르는 과정을 분석적으로 파악해 나가는 방법이다. 이러한 방법은 재해의 원인 규명 외에도 재해 발생 위험성의 사전 평가를 위해서도 사용된다.

(6) 정전기에 의한 재해는 크게 나누어 초보적 실수형과 관리 미비형으로 나눌 수 있다.

(가) 초보적 실수형은 접지 미비로 인해 금속 물체·인체·도전성 재료 등 정전기 유도경로상의 도체가 대전했기 때문에 일어나는 재해 등이며 접지 미비형이라고도 할 수 있다. 초보적인 실수형의 재해는 정전기의 잠재적 위험성 인식 부족이나 안전 교육의 소홀 등을 배경으로 하기 때문에 재래형 재해라고 한다. 이 형태의 재해 사례로는 다음과 같은 것들이 있다.

① 유기 용제와 석유 제품을 작업자가 개방 상태에서 취급할 때, 금속 용기, 여과에 사용하는 금속 물체 등의 접지를 소홀히 하였기 때문에 이로부터 발생한 스파크 방전이 점화원이 된 화재·폭발이 있고 과거로부터 있는 이런 종류의 재해는 아직도 많이 발생하고 있다.

② 분체를 취급할 때도 정전기 대책을 위해 사용한 도전성의 플렉시블 용기나 백 필터의 접지가 불완전했기 때문에 분진 폭발이나 화재가 발생하고 있다.

③ 그 외, 절연성 호스의 금속제 연결이나 보강 금속선의 접지를 앓았기 때문에 석유 탱크의 폭발과 분진 폭발을 일으킨 사례도 있다.

(나) 관리 미비형의 재해는 주로 절연물 등 대전성 물체가 대전하는 것에 의해 발생하는 재해 등이며 절연물 대전형이라고도 말할 수 있다. 절연물이 대

전하는 경우는 접지만으로는 대전을 방지할 수 없기 때문에 그 대전 관리가 문제가 된다. 이 유형은 또한 대전 관리 방법·기준이 거의 확립되어 있지만, 이것을 적극적으로 실행하지 않았기 때문에 재해가 발생한 것과 관리 방법·기준과 대책 방법이 정해져 있지 않기 때문에 관리할 수 없어 재해를 일으킨 것으로 나눌 수 있다. 전자는 관리 가능형, 후자는 대책 곤란형이라고도 할 수 있다.

- ① 관리 가능형의 재해의 구체적인 예는 과대 유속과 필터에 의해 현저하게 대전된 인화성 액체에서 일어나는 브러시 방전에 의한 점화, 도색공정과 인쇄 공정에서 제전기의 선정을 잘못하거나 그 보수·점검 미비에 의해 일어난 화재 등이 있다.
- ② 대책 곤란형의 재해 사례로는 인화성 액체·액화 기체가 고압에서 누설 분출했을 때의 점화, 절연성의 플렉시블 용기와 종이 포대에서 입자 크기가 미세한 분말을 반응기 등에 투입할 때의 점화, 글라스 라이닝 교반 용기의 연면 방전에 의한 편홀과 스태틱 마크의 발생 등이 있다.

5. 정전기 재해 분석기법에 대한 기술적 사항

재해의 분석은 발생 메커니즘을 해명하고 재발 방지, 유사 재해 예방을 도모하기 위해 실시한다. 여기에는 i) 개별 사례를 대상으로 상세하게 인과 관계를 분석하여 유용한 지식을 얻는다, ii) 다수의 사례를 서로 비교하고 경향을 조사하고 통계적인 분석을 하는 것이다.

5.1 재해 발생 메커니즘과 조사 항목

5.1.1 분석 방법 및 원인의 분류

- (1) 일반적으로 재해는 물리적 현상, 인간의 오류, 하드웨어 고장 또는 소프트웨어의 기능상 실패 등을 포함하는 바람직하지 않은 상태·현상이 쌓여 연쇄 메커

니즘에 의해 발생한다. 이러한 연쇄 메커니즘·재해의 원인을 분석하는 방법론으로 조사에서 얻은 사실을 축적하여 원인에서 결과에 대한 프로세스를 추정하는 귀납법과 반대로 결과에서 원인으로 거슬러 올라 논리적으로 재해 발생 메커니즘을 추정하는 연역법이 있다.

(2) 이상위험도분석(FMEA; Failure Mode and Effect Analysis) 및 ETA은 귀납적 방법이며, FTA은 연역적 기법의 대표이다. 이 방법들을 이용하면 재해 분석이 계통화되어 조사해야 할 요인을 철저히 밝혀내어 재해 원인의 간과를 막을 수 있다. 또한, 경우에 따라 귀납적·연역적 기법을 잘 다룰 필요가 있다.

(3) 또한, 재해의 원인을 분류·체계화해 정리하면 조사상의 간과를 방지하고 계통적인 조사의 실시를 돕는다. 원인은 사전 예측·인식의 여부에 따라, 또한 인과성의 계층 구조에 따라 다음과 같이 분류된다.

(가) 사전 예측·인식의 여부에 따라, i) 랜덤 하드웨어 고장, 랜덤 휴먼 에러, ii) 결정론적 원인 고장으로 분류할 수 있다. i)은 하드웨어의 다양한 열화 메커니즘 또는 조작·운전상의 인적 과오에서 기인하여 시간에 대해 무작위로 발생한다. ii)는 시스템의 설계, 운용상의 과오에서 기인한다. 사전 안전 해석의 미비에서 기인하는 안전 요구 사항의 과오, 하드웨어 설계·제조·설치상의 과오, 소프트웨어 설계·실시상의 과오 등이 여기에 포함된다. i)의 발생이 사전에 합리적인 정확도로 예측 가능한 반면 ii)는 사전에 예측할 수 없으며, 사후 조사에 의해 처음으로 그 존재를 알 수 있다. 분석은 사전에 예측·인식된 다양한 무작위 하드웨어 고장, 무작위 휴먼 에러에서 해당 재해의 메커니즘에 관여한 것을 식별하여 사전에 예측할 수 없었던 결정론적 원인 고장을 충분히 조사할 필요가 있다.

(나) 인과성 계층 구조의 분류 법에는 재해 원인을 그 물리 현상에 직접 관여하는 하드웨어, 소프트웨어, 인원 동작 등의 직접 원인, 그것을 발현시키는 안전 관리 또는 결정론적 원인 고장 등의 간접 원인, 그 뒤에 숨어있는 관리 체제상의 결함 등의 근본 원인으로 분류할 수 있다.

(3) 재해를 분석하고 해명된 직접 원인을 제거할 수 할 수 있다면 재발 방지에 도

움이 된다. 또한, 안전 관리, 결정론적 원인 고장 등 간접적 원인이 시정된다면 광범위한 유사 재해의 사전 억제에 도움이 된다. 게다가 근본 원인인 관리 체제의 결함으로까지 거슬러 올라가 개선하면 재해 전반의 예방을 도모할 수 있다. 어느 범위까지 재해의 억제를 목표로 하느냐에 따라 직접 원인, 간접 원인 그리고 근본 원인을 어디까지를 대상으로 해야 하는지가 결정된다.

- (4) 직접 원인을 식별하기 위한 지식은 현장의 보존과 기록에서 얻을 수 있다. 폭발이나 화재는 먼저 재해 후의 물적 상황에 기초하여 분석된다. 현장을 보존하고 분석용 물리적·조작·운전 상황의 객관적인 데이터를 수집하여야 한다. 관계자로부터 현장 청취 조사, 사후 면담 조사를 하여 행위를 배제한 재해 발생 상황의 시간 경과 정보를 수집해 분석한다. 필요에 따라 현장에서 재현 실험에 의한 확인, 실험실에서 모델·확인 실험도 필요하다. 특히 정전기 재해에서는 정전기가 진정한 원인인지 명확하지 않은 경우가 많으므로, 다른 원인도 조사하고 제거 방법 등을 구사하여 최종 판단을 할 필요도 있다.
- (5) 또한, 통상의 작업·운전 상황, 결정론적 원인 고장, 설계 시의 안전 요구 사항, 안전 요구 사항의 결정 방침, 관리 체제 등 관계자들과의 면담 및 서류·기록의 조사 때문에 재해의 간접 원인과 근본 원인을 조사한다.

5.1.2 조사 항목

(1) 직접 원인

재해 현상의 물리적 측면과 조작·운전 오류 등 인적 측면을 다각적으로 조사하고 직접 원인에 관계되는 데이터의 수집을 도모할 필요가 있다. 거기에는 다음과 같은 항목을 들 수 있다.

(가) 화재·폭발 등의 기점

장치·구조물의 굽음, 변형, 파괴, 손상 상태에서 파괴력의 작용 방향을 특정한다. 파편의 비산 상황을 조사하고 파편의 위치와 근원 위치를 연결하면 폭발의 기점 방향을 특정할 수 있다.

(나) 폭발 혼합 기체

우선 피해 규모, 파괴 상태 등 전반적 상황을 조사한다. 그다음 폭발 상황을 분석하기 위해 폭발 혼합기를 생성하고 있던 인화성 물질의 종류와 양, 지연성 가스의 종류, 혼합기에 의한 기체 상태의 공간 규모를 추정한다. 또한, 폭발 혼합기의 온도, 압력, 기류의 상황 등 기상 조건을 조사하고 정전기 방전이 점화원이 될 수 있었는지 판단을 한다. 이렇게 하여 인화성 물질의 특성¹⁾, 기체 상태의 공간·조건과 장치, 시설의 파괴 상황과의 정합성을 확인한다.

(다) 점화원이 된 대전 물체

대전 가능성이 있는 물체에 대해 도전을 등의 전기적 특성²⁾, 크기, 형상, 설치 위치를 조사한다. 또한, 그 물체의 주변 상황, 특히 접지 상태 및 접지체와 대전물체와의 위치 관계를 조사하면 정전기 방전이 점화원인지를 검토할 수 있다. 게다가 대전 물체에 특별한 대전 조건이 존재할 수 있었는지 조사하고 그 가능성이 있으면, 모델 실험 등을 통해 확인한다.

(라) 화재·폭발의 발생 시기

이것은 재해의 시계열 분석 안에서 중요한 의미를 갖는다. 화재·폭발 발생 시와 공정·조작의 연관을 상세하게 조사하면 화재·폭발에 필요한 폭발 환경이나 가연물의 생성 및 점화원의 존재 가능성을 검토할 수 있다. 재해는 정상 운전 시보다 공장의 시운전이나 종료 운전 시 및 보수·수리 시 등 비정상 운전 시에 많이 발생하는 경향이 있다. 재해 시의 공장 운전 상황을 포함하여 다양한 각도에서 정보를 관계자로부터 얻어 현장의 물리적 상황과도 정합시켜 화재·폭발의 발생 시기를 특정할 필요가 있다. 유도폭발 등에는 유도폭발을 첫 번째 폭발로 잘못 보지 않도록 주의한다.

(마) 인적 거동

피해자는 물론, 공장 운영자 및 보전 요원 등 관계자의 행동을 조사한다. 설명서대로 조작·운전 또는 보전을 하고 있었는지 평상시와 다른 조작·운전·보전이 있었는지 최초 이상 발생에서 재해 회피를 위해 어떠한 조작·행동을 했는지, 재해 발생 시 및 재해 발생 후 피해의 확대 방지로써 어떻게 대처했는지 등에 주목한다.

1) 안전보건기술지침 “정전기 재해예방에 관한 기술지침”을 참조한다.

2) 안전보건기술지침 “폭발위험장소에서의 정전기관련 물성 측정에 관한 기술지침”을 참조한다.

(바) 기타

정전기에 의한 재해는 기체 상태의 조건에도 크게 영향을 받기 때문에 재해 시의 기온과 습도를 현장에서 중점으로 두고 조사한다.

(2) 간접 원인

(가) 물리적 현상의 발생 요인

코드, 매뉴얼, 목록, 선례, 재해 사례, 사례 분석, 조사 등 전문적인 정보와 지식이 적절한가, 기준, 사양, 설계 등 시설의 기능과 효과는 충분한가, 보전(계획, 실시), 검사(계획, 실시), 감독(훈련·지원, 횡수, 책임자, 위험 예지, 임무 수행 등)은 충분했는지 등을 들 수 있다.

(나) 방호에 관한 요인

방호는 에너지원, 사람 또는 물체와 에너지원의 사이, 사람 또는 사물에서 행해진다. 게다가 시간과 공간을 분할에 의해서도 실현할 수 있다. 이러한 방호가 되어 있었는지, 유효했는지, 사용했는지, 실시되지 않은 경우는 그 이유 등을 조사한다.

(다) 위험 영역에 사람이 존재한 이유

사람이 재해를 입는 위험한 장소에 필요한지 또는 불필요하게 존재하고 있었는지를 조사한다. 필요해서 존재하는 경우에는 위험 회피 행동의 적부에 대해서도 조사한다. 불필요하게 존재하고 있었을 때는 그 이유를 조사한다.

(라) 피해 확대 억제 조치

2차 재해 방지 조치, 긴급 활동(소화 등) 구조 활동, 의료, 재활 계획과 실시 상황을 조사한다. 사업장과 소방 등 외부 관련 기관과의 관계를 조사한다.

(3) 근본 원인

(가) 정책, 작업 방식의 기준, 라인의 책임 체제, 직원의 책임 체제, 정보 전달 체제, 지시 계통, 안전 관리 체제, 예산, 위험 관리 체제 등의 항목을 조사하여 관리 시스템과 조직상의 요인 즉 근본 원인에 다가간다. 이 중 위험 관리 체제의 조사 항목은 허용 위험의 결정, 전문적인 정보 관리 체제, 잠

재적 위험 식별, 위험 해석(절차, 해석 방법, 데이터, 기록 등), 안전 계획(이념과 방침, 기술과 설명, 검사, 구성원, 기술 방법, 실시) 등으로 세분화된다.

(나) 또한 전문적인 정보 관리 체제의 조사 항목은 전문 지식의 획득 체제, 내부·외부 정보 전달(정보망, 조직) 체제, 감시·보고(안전 감시 계획, 위험원 찾아내기, 재해 정보, 위험상황 보고 제도, 제안 제도, 안전 순찰, 안전 감사, 건강 관리 등) 체제, 정보 수집과 해석(문제의 사전 목록, 통계 자료, 통계 해석, 구성원 능력) 체제, 위험 억제(시스템 설정, 안전 요구 사항, 사양, 예정된 변화의 제어법, 예상치 못한 변화의 제어법, 데이터와 방법의 갱신, 기록) 체제, 독립적인 감사와 심사 체제 및 문서(문서화) 체제 등으로 세분화된다.

5.2 재해 분석 사례

정전기가 관여된 재해로 탱크로리에 등유를 충전한 후, 2분간 정치 시간을 경과하여 충전용 파이프를 탱크에서 끌어 올리려고 했을 때, 갑자기 탱크 안에서 폭발로 인한 화재가 발생하여 작업자가 재해를 입은 사례가 있다.

5.2.1 재해 발생 상황과 조사 결과

- (1) 탱크 내에서 최초로 연소한 인화성 물질은 재해 전날 하역한 휘발유 증기이다.
- (2) 재해 시의 작업 절차와 작업 내용은 평상시와 다른 점은 없다.
- (3) 재해 시에는 그 근처에 담뱃불 등 불꽃 및 기계적 불꽃은 존재하지 않았다.
- (4) 파이프라인에서 순환 전류를 인지할 수 없었고, 화재 장소의 동력 기기, 조작반에서도 누전을 인지할 수 없었다.
- (5) 누전 차단 장치는 제대로 작동하고 있었다.

- (6) 기기, 탱크로리 등 대상물의 접지는 충분하였다.
- (7) 등유 및 인체(대전방지화 착용)의 대전 대책은 충분하고 모델 실험에서도 거의 대전은 인지하지 못하였다.
- (8) 작업자가 착용한 작업복 및 장갑은 세탁 직후의 오염되지 않은 것이다. 이러한 것은 정전기가 대전하기 쉽다. 그러나 대전방지화를 착용했기 때문에 모델 실험에서 인체는 100 V 정도만 대전 가능하였다.
- (9) 탱크로리는 신차이며, 탱크의 해치에는 도장이 이루어져 대전방지화를 착용한 경우에도 인체를 절연 상태로 하는 것이 가능하였다.

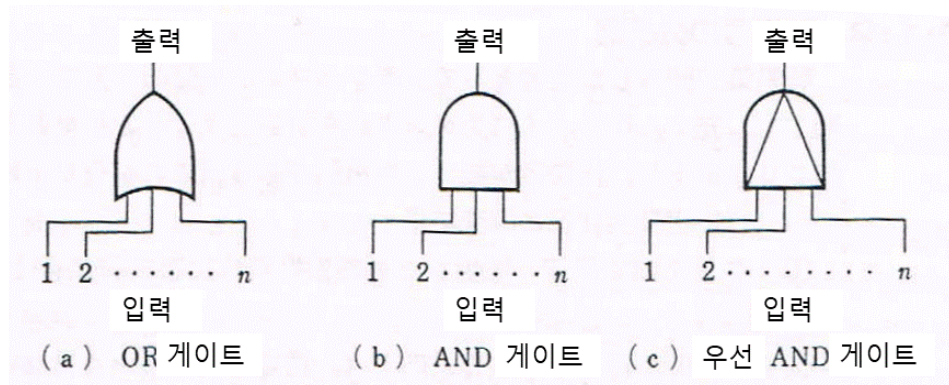
5.2.2 재해의 FTA

재해 분석에서 단편적으로 수집된 정보를 바탕으로 다양한 재해 발생 메커니즘에서 당해 재해 발생 메커니즘을 식별하고 재해 원인을 최종적으로 특정하지 않으면 안 된다. 탱크로리의 화재에 의해 작업자 1명이 화상을 입었던 앞의 재해에 대해 FTA를 실시한다.

(1) FTA의 방법

- (가) 우선 재해의 마지막 단계를 가장 우선 사건으로 선정한다. 이를 잠재적 위험 식별이라고 한다. 다음으로, AND 게이트 또는 OR 게이트 등으로 불리는 논리 게이트를 사용하여 가장 우선 사건(게이트 출력)이 왜 발생했는지를 하위 상태·사건(게이트 입력)으로 전개한다. 게다가 그 하위 상태·사건(게이트 출력)은 게이트를 통해서 그 원인인 하위 상태·현상(게이트 입력)에 전개할 수 있다. 이렇게 순차적으로 원인을 거슬러 올라가 전개하고 최종적인 원인에 도착한 곳에서 FT 전개가 종료한다.
- (나) 논리 게이트와 그것에 대한 입력과 출력의 관계를 <그림 1>에 나타내었다. 입력 상태, 조건 또는 현상이고, 출력도 입력에 따라 상태, 조건 또는 현상이 된다. OR 게이트에서는 입력 1, 2, ..., n 중 적어도 하나가 발생 상태에

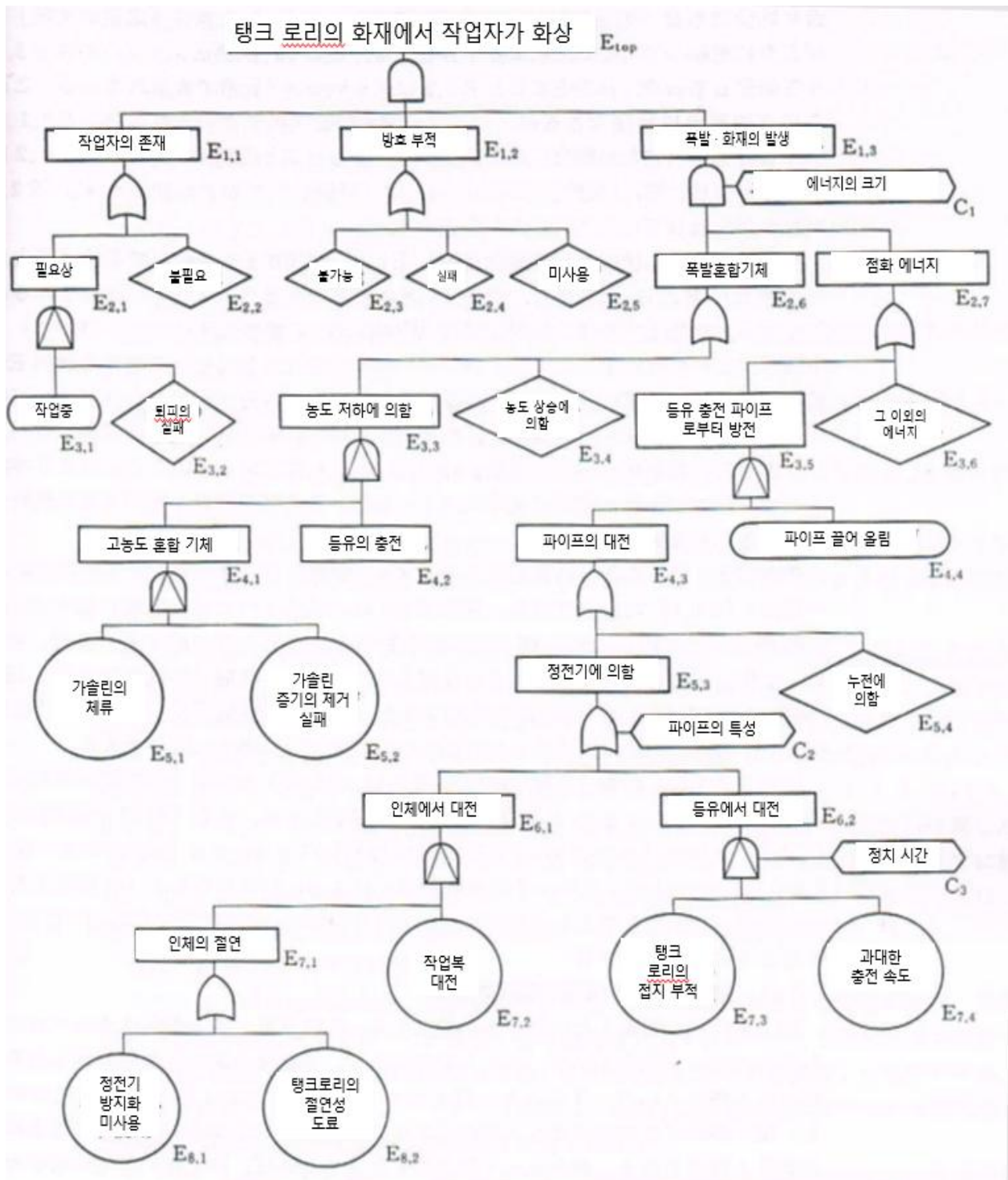
있을 때, 출력도 발생 상태에 있다. AND 게이트는 입력 1, 2, ..., n 모두 발생 상태일 때 출력도 발생 상태에 있다. 우선 AND 게이트에서는 가장 왼쪽의 입력에서 오른쪽으로 순차적으로 입력 1, 2, ..., $n-1$ 로 발생 상태가 되고, 각각 발생 상태를 유지하고 있을 때, 마지막 입력 n 이 발생하면 출력도 발생하는 논리를 나타낸다. 예상 가능한 상태, 조건 및 현상을 빠짐없이 기술하여 FT를 작성하면 광범위한 재해 발생 메커니즘을 간과없이 식별할 수 있다.



<그림 1> FT의 논리 게이트

(2) FT의 전개

(가) <그림 2>는 탱크로리 화재 발생의 FT이다. 가장 우선 사건 「탱크로리 화재로 작업자가 화상」(E_{top} : 사건이나 상태 식별 기호, 이하 동일)은 상태 「작업자의 존재」($E_{1,1}$)와 상태 「방호의 부적합」($E_{1,2}$) 및 「화재·폭발 발생」($E_{1,3}$)가 함께 발생하면 일어난다.



<그림 2> 탱크로리의 화재·폭발에 의한 재해 발생 FT

(나) 현상, 상태 및 조건의 통계량은 각각 빈도(회/시간) 및 확률로 주어지기 때

- 문에 입출력을 현상 및 상태로 구별하여 논리의 정합성을 도모한다.
- (다) 상태 $E_{1,1}$ 은 상태 「필요상 존재한다」($E_{2,1}$)과 「불필요하게 존재한다」($E_{2,2}$)의 경우로 구분할 수 있다.
- (라) 상태 $E_{2,1}$ 은 상태 「작업 중」($E_{3,1}$)과 조건 「대피의 실패」($E_{3,2}$)가 함께 발생하고 있는 것에 의해 이미 존재한다. 여기에서 상태 $E_{3,1}$ 은 조건 $E_{3,2}$ 에 선행하여 발생하고 있다.
- (마) 상태 $E_{2,2}$ 와 $E_{3,2}$ 는 마름모 기호로 표시되어있다. 이것은 또한 하위 현상에서 전개할 수 있지만, 여기에서는 전개를 정지하는 것을 의미한다. $E_{3,1}$ 상의 기호는 이 상태(또는 현상)가 업무 중이라는 것을 의미한다.
- (바) 상태 $E_{1,2}$ 는 조건 「불가능」($E_{2,3}$), 「실패」($E_{2,4}$) 또는 「준비되어 있지만 사용하지 않음」($E_{2,5}$) 중 하나가 발생함으로서 존재한다.
- (사) 현상 $E_{1,3}$ 은 상태 「폭발 혼합 기체」($E_{2,6}$)이 존재하는 조건하에서 현상 「점화 에너지의 방출」($E_{2,7}$)이 발생하여 조건 「에너지의 크기」(C_1)가 충족됨으로서 발생한다.
- (아) 상태 $E_{2,6}$ 은 상태 「폭발 상한계 이하의 농도 저하에 의함」($E_{3,3}$)과 「폭발 하한계 이상의 농도 상승에 의함」($E_{3,4}$)의 경우로 구분된다. 이 중 상태 $E_{3,3}$ 은 상태 「고농도 혼합 기체」($E_{4,1}$)의 조건에서 상태 「등유의 충전」($E_{4,2}$)이 발생함으로서 존재한다. 게다가 상태 $E_{4,1}$ 은 상태 「휴발유의 체류」($E_{5,1}$) 및 「회발유 증기 제거의 실패」($E_{5,2}$)와 함께 발생하고 있는 것에 의해 존재한다. 여기에서 원형으로 그려진 기호는 기본 입력으로 표기한 것이고 그 발생 확률·빈도 등 통계량이 알려진 것을 의미하고 있다.
- (자) 현상 $E_{2,7}$ 은 현상 「등유 충전 파이프에서 방전」($E_{3,5}$) 또는 「다른 에너지 방출」($E_{3,6}$)로 구분할 수 있다.
- (차) 현상 $E_{3,5}$ 은 상태 「파이프 대전」($E_{4,3}$) 조건하에서 현상 「파이프 인상」

(E_{4,4})이 발생함으로써 일어난다. 또한, 상태 E_{4,3}은 조건 「방전 가능한 특성을 가진 파이프」(C₂) 하에서 상태 「정전기에 의함」(E_{5,3})와 「누전에 의함」(E_{5,4})의 경우로 분류할 수 있다. 게다가 상태 E_{5,3}은 상태 「작업자의 인체에서」(E_{6,1})와 「충전한 등유에서」(E_{6,2})의 경우로 구분할 수 있다.

(카) 상태 E_{6,1}은 상태 「인체의 절연」(E_{7,1})의 조건하에서 상태 「작업복의 대전」(E_{7,2})가 발생함으로써 존재한다. 상태 E_{7,1}은 상태 「대전 방지화 미사용」(E_{8,1}) 또는 「탱크로리의 절연성 도료」(E_{8,2})에 의해 존재한다. 또한, 상태 E_{6,2}는 상태 「탱크로리 접지 부적합」(E_{7,3})의 발생 후 「등유 충전 속도가 과대」(E_{7,4})가 일어남과 동시에 발생하고 있을 때 조건 「정치 시간이 짧음」(C₃)이 충족됨으로써 존재한다.

(3) FTA에 의한 재해 원인 특정

(가) 가장 우선 현상은 기본 입력의 일부가 성립하면 발생한다. 가장 우선 사건을 발생시키는 기본 입력의 집합을 컷 집합이라고 한다. 컷 집합 속에서 필요 최소한의 기본 입력이 되는 집합을 작은 컷 집합이라고 한다. 즉 최소 컷 집합의 어떤 것 1개라도 기본 입력이 미성립이면 최고 현상이 그 최소 컷 집합에 의해서는 발생하지 않게 되기 때문에 이 도출은 재해 방지 대책 상 유용하다. 최소 컷 집합을 모두 구하면 재해의 발생에 필요한 최소한의 원인 조합의 모든 것을 얻을 수 있다.

(나) <그림 2>의 FT에서는 60개의 최소 컷 집합이 얻어진다. 매우 명백한 요인 「필요상」(E_{2,1})과 「사용하지 않음」(E_{2,5})를 각각 「작업자의 존재」(E_{1,1})과 「방호의 부적합」(E_{1,2})의 원인에 한정하면 다음 10개의 최소 컷 집합 K_i(i=1, 2, ..., 10)이 얻어진다.

$$K_1=\{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{5,1}, E_{5,2}, E_{4,2}, E_{4,4}, E_{8,1}, E_{7,2}, C_1, C_2\}$$

$$K_2=\{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{5,1}, E_{5,2}, E_{4,2}, E_{4,4}, E_{8,2}, E_{7,2}, C_1, C_2\}$$

$$K_3=\{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{5,1}, E_{5,2}, E_{4,2}, E_{4,4}, E_{7,3}, E_{7,4}, C_1, C_2, C_3\}$$

$$K_4=\{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{5,1}, E_{5,2}, E_{4,2}, E_{4,4}, E_{5,4}, C_1, C_2\}$$

$$K_5=\{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{5,1}, E_{5,2}, E_{4,2}, E_{3,6}, C_1\}$$

$$K_6 = \{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{3,4}, E_{4,4}, E_{8,1}, E_{7,2}, C_1, C_2\}$$

$$K_7 = \{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{3,4}, E_{4,4}, E_{8,2}, E_{7,2}, C_1, C_2\}$$

$$K_8 = \{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{3,4}, E_{4,4}, E_{7,3}, E_{7,4}, C_1, C_2, C_3\}$$

$$K_9 = \{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{3,4}, E_{4,4}, E_{5,4}, C_1, C_2\}$$

$$K_{10} = \{E_{3,1}, E_{3,2}, E_{2,5}, E_{3,4}, E_{3,6}, C_1, C_2\}$$

(다) 위의 10개 최소 컷 집합에서 다음과 같은 소거법을 통해 진정한 당해 재해 발생 메커니즘을 특정한다.

- ① 재해 조사에서 작업자의 대전방지화 착용이 밝혀졌기 때문에 「대전 방지화 미사용」($E_{8,1}$)을 포함한 최소 컷 K_1 및 K_6 는 기각된다.
- ② 탱크로리의 접지는 충분했기 때문에 $E_{7,3}$ 을 포함한 최소 컷 집합 K_3 과 K_8 은 기각된다.
- ③ 등유 충전 중에 발생한 재해에서 휘발유는 등유에 의해 희석되기 때문에 휘발유의 농도 상승은 없다. $E_{3,4}$ 를 포함한 최소 컷 집합 K_6 , K_7 , K_8 , K_9 및 K_{10} 이 기각된다.

(라) 결국, 잔존하는 최소 컷 집합은 $K_2 = \{\underline{E_{3,1}}, \underline{E_{3,2}}, E_{2,5}, \underline{E_{5,1}}, \underline{E_{5,2}}, \underline{E_{4,2}}, E_{4,4}, \underline{E_{8,2}}, \underline{E_{7,2}}, C_1, C_2\}$ 뿐이다. 여기에서 이중 밑줄을 친 입력은 이중 밑줄에서 왼쪽에서 시계열적으로 발생하는 것을 고려하여 최소 컷 집합 K_2 는 다음과 같은 재해 시나리오로 표현할 수 있다.

- ① 탱크로리에서 작업자가 전날의 휘발유가 남아 있는 탱크($E_{5,1}$)를 제거하지 않고($E_{5,2}$) 등유를 탱크에 충전한 결과($E_{3,1}$, $E_{4,2}$) 탱크로리의 절연성 도료 때문에($E_{8,2}$) 인체가 절연하고 작업복이 대전하였다($E_{7,2}$).
- ② 이때, 등유 충전 파이프(C_2)를 끌어 올린 결과($E_{4,4}$) 파이프에 방전해($E_{3,5}$), 폭발 하한계에서 농도가 저하하고 있던 폭발 혼합 기체($E_{2,6}$)에 점화(C_1), 화재·폭발이 발생하여($E_{1,3}$) 피할 사이도 없이($E_{3,2}$) 작업자가 재해를 입었다(E_{top}).

(4) PTA에 의한 위험성 추정

(가) 위험은 재해 잠재 위험, 재해의 발생 빈도, 및 재해로 인한 위해의 성질·심각도의 3요소 조합이다. 이 재해의 잠재적 위험은 E_{top} 즉 탱크로리의 화재로 인한 작업자의 재해이다. 위해의 성질은 화상, 그 심각도는 1명의 중상이나 사망이다. 위험을 추정하기 위해서는 위험의 3요소 중 남은 재해 발생 빈도 즉 재해 발생 횟수의 단위 시간당 통계적 기대치를 추정하면 된다. 여기서, $\text{Exp} \{ \}$ 및 $\text{Pr} \{ \}$ 을 각각 $\{ \}$ 의 단위 시간당 발생 횟수의 통계적 기대치 및 확률로 한다.

(나) 최소 컷 집합에 의해

$$\begin{aligned} \text{Exp} \{K_2\} &= \text{Exp}\{E_{3,1} \cap E_{3,2} \cap E_{2,5} \cap E_{5,1} \cap E_{5,2} \cap E_{4,2} \cap E_{4,4} \cap E_{8,2} \cap E_{7,2} \cap C_1 \cap C_2\} \\ &= \text{Pr}\{E_{3,1} \cap E_{3,2} \cap E_{2,5} \cap E_{5,1} \cap E_{5,2} \cap E_{4,2} \cap E_{8,2} \cap E_{7,2} \cap C_1 \cap C_2 | E_{4,4}\} \cdot \text{Exp}\{E_{4,4}\} \quad (\text{식 } 1) \end{aligned}$$

기본 입력은 서로 독립적이다. 그러면 (식 1)은

$$\text{Exp} \{K_2\} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9 \cdot P_{10} \cdot n \quad (\text{식 } 2)$$

여기에서

$$P_1 = \text{Pr}\{E_{3,1} | E_{4,4}\}, P_2 = \text{Pr}\{E_{3,2} | E_{4,4}\}, \dots, P_{10} = \text{Pr}\{C_2 | E_{4,4}\} \quad n = \text{Exp} \{E_{4,4}\} \quad (\text{식 } 3)$$

이다. 게다가 확률과 빈도를

$$P_1 = P_2 = P_3 = 1, P_4 = P_5 = 1 \times 10^{-1}, P_6 = 5 \times 10^{-1}, P_7 = 1 \times 10^{-1}, P_8 = 1 \times 10^{-2}, P_9 = 1 \times 10^{-1}, P_{10} = 1 \times 10^{-1}$$

$n = 1$ [회/일]로 상정한다면 $\text{Exp} \{K_2\} = 5 \times 10^{-8}$ [회/일]을 얻을 수 있다.

(다) 즉 탱크로리 1대·연간 당 약 2×10^{-6} [회/대·년]의 당해 재해 발생 회수의 통계적 기대치가 얻어진다.

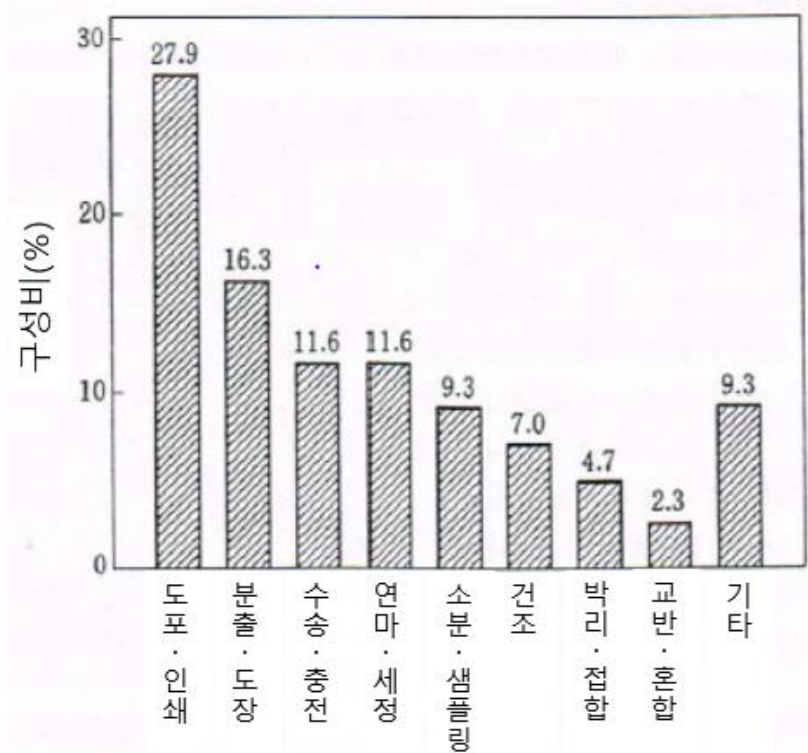
(라) 당해 재해 대책으로서 휘발유 증기 제거 작업의 철저, 절연성 도료의 개선, 작업복의 대전 방지, 등유 충전 파이프 특성의 개량 등을 고안할 수 있다. 그것들은 확률 P_5 , P_7 , P_8 , 및 P_{10} 에 영향을 주어 그 효과가 (식 2)에 의해 평가할 수 있다.

6. 정전기 재해 사례와 분석

- (1) 정전기는 물체가 접촉, 파괴 등 어떠한 물리적 작용을 받았을 때 발생한다. 따라서 생산 현장뿐만 아니라 일상생활의 다양한 장면에서 만나는 익숙한 현상이다. 게다가 그 에너지는 상용 전력과는 비교가 되지 않을 정도로 작고 전격과 방전음 등 약간 불쾌한 자극을 인체에 미칠 수는 있어도 생명에 위협을 미치는 것은 아니기 때문에 그다지 문제가 될 것은 없는 것처럼 느낄 것이다.
- (2) 이와같이 익숙하고 사소한 현상이라는 인식이나 반대로 정전기 대책을 경시하는 태도로 이어지고 있는 것은 아닐까라고 생각된다. 왜냐하면, 일반 공정에 관해서는 정전기 대책은 거의 확립되어 있음에도 불구하고, 정전기에서 기인하는 화재·폭발 재해의 발생 건수는 최근 결코 감소 추세에 있다고는 말할 수 없으며, 내용적으로도 유사한 공정으로 반복 사고가 발생하고 있기 때문이다.
- (3) 과거부터 현재에 이르기까지 정전기로 인한 재해에서 가장 중요한 것은 인화성 물질을 취급하는 공정에서의 화재·폭발 사고이다. 따라서 주의해야 할 공정은 한정되어있다.
- (4) 예를 들어, 각종 제조업에서 이를 정리하면 <표 1>과 같이 된다. 또한, 각 공정별 발생 건수 비를 비교한 결과가 <그림 3>이다. 각 공정의 총수가 불분명하기 때문에 발생 확률에 차이가 있는지 없는지는 불분명하지만, 단순히 건수로 비교하는 한 유기 용제 등의 인화성 액체가 증기가 되어, 이에 어떠한 원인으로 발생한 정전기 방전에 의해 점화된 예가 현저하다. 또한, 수송·충전 또는 건조라는 공정에서는 부유한 분체에 점화·폭발을 많이 볼 수 있다.

<표 1> 산업 종별로 본 점화 화재·폭발의 발생하기 쉬운 공정

산업종별	점화 화재·폭발 일어나기 쉬운 공정
펄프·종이·종이 가공품 제조업	종이의 용제 처리, 인쇄 공정
출판·인쇄업	감기·풀기·인쇄 공정
화학 공업	고분자 물질, 용제·분립체 원재료의 취급
석유·석탄 제품 제조업	탱크로리, 탱크차에 싣기, 액체 분출, 시료 채취, 검척 공정
금속 제품 제조업	금속분의 집진, 도장 공정
일반 기계 기구 제조업	플라스틱 연삭 시 먼지 집진 공정
전기 기계 기구 제조업	용제를 사용해서 세정, 용제의 옮겨 담기 공정
수송용 기계 기구 제조업	휘발유, 경유 플라스틱 배관 수송 공정
그 외의 제조업	용제 도포, 필름 감기·풀기



<그림 3> 점화 폭발·재해 건수의 발생 공정별 비교

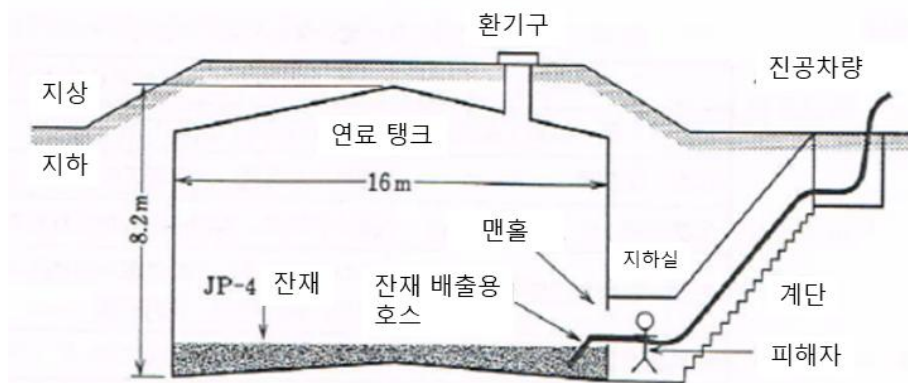
<부록> 정전기로 인한 재해 사례

1. 액체 취급 시 재해 사례

1.1 제트 연료 저장 탱크의 잔재 배출 작업 시 폭발 재해

(1) 재해 개요

<그림 1>과 같은 반지하식의 항공기용 연료 저장 탱크(용량 1500 kl)에서 측정 장치의 수리·점검 작업을 수행하기 위해 사전에 탱크를 비우려고 맨홀에서 호스를 넣고 탱크 바닥에 쌓인 진흙과 물을 포함하는 잔재를 진공차량으로 빨아올리는데 돌연 탱크 내부에서 폭발이 발생, 맨홀 부근에서 작업을 하고 있던 작업자 중 4명이 피난하지 못해 화상을 입고, 그중 3명이 사망하였다.



<그림 1> 제트 연료 탱크 구조

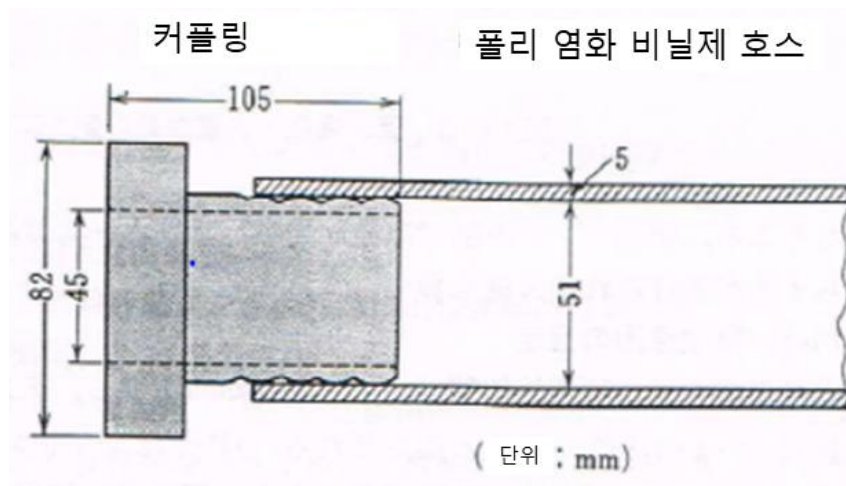
(2) 사고 원인의 추정

(가) 이 재해는 인화성 물질은 슬러지에서 증발해 탱크 바닥에 체류하고 있던 제트 연료 JP-4의 증기로 추정된다. JP-4는 휘발유를 주성분으로 하고, 대전 방지제가 혼합되어 있는 일반적인 항공기 연료이다. 사고 당시 사용된 JP-4와 유사한 것에 대해 실측한 결과, 도전율 1.2×10^{-10} S/m, 최소 점화

에너지 약 1 mJ이었다.

(나) 한편 점화원은 공구류에 의한 기계적 불꽃과 조명등의 전기 설비에서 스파크의 가능성이 검토되었지만, 확증은 얻지 못했다. 그 외에, 슬러지의 배출 작업에 사용된 호스의 대전에 의한 정전기 스파크의 가능성도 도출되고 이것에 대해서는 다음과 같은 관련 실험이 시행되었다.

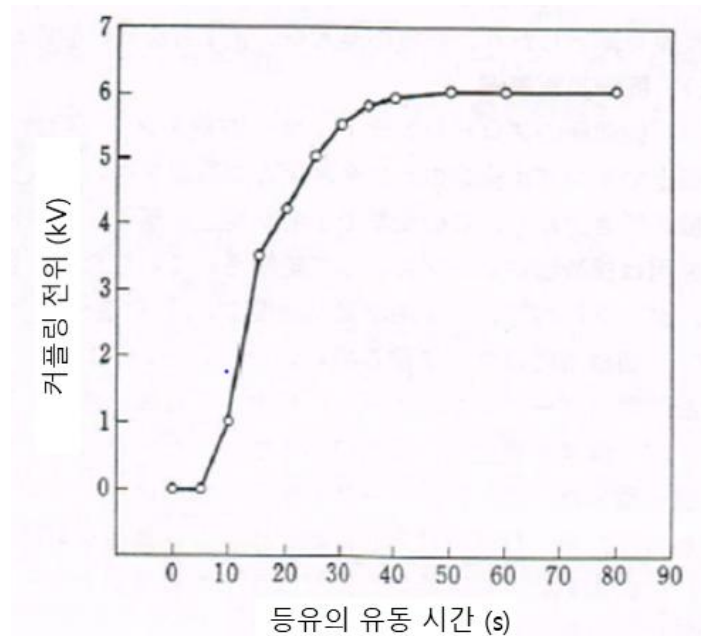
- ① <그림 2>는 사고 발생 시에 사용되고 있던 흡입용 호스의 단면도이다. 호스의 소재는 폴리 염화비닐이며, 절연 저항계(메가)에 의한 측정에서는 표면 및 체적 저항은 10^{12} Ω 이상이였다. 커플링 쇠 장식은 황동제였다.



<그림 2> 잔재 배출에 사용된 진공 호스의 구조

- ② 잔재 흡인 작업 시에는 쇠 장식을 호스 끝에 설치한 상태에서 탱크의 바닥 부근까지 호스 선단을 가까이 대었다. 그래서 호스 및 커플링이 액체의 흡인으로 어느 정도 대전하는지를 확인하기 위해 비슷한 호스 및 커플링을 사용하여 등유를 수송할 때의 대전 전위를 측정했다.
- ③ <그림 3>은 커플링의 전위 상승을 나타내는 것이다. 수송 개시부터 전위는 급격히 상승하고 약 30초 후에 6 kV에 도달해 이후 거의 일정하게 되었다. 호스의 경우에도 마찬가지로 전위가 상승하고 최고 7 kV에 도

달하였다.



<그림 3> 호스에 설치한 황동제 커플링의 전위 상승

- ④ 이상의 실험에서 금속제 커플링은 절연성 호스와 거의 같은 전위가 되는 것이 확인되었다. JP-4의 경우에는 도전율이 등유보다 약간 낮기 때문에, 완전히 똑같은 대전 특성을 나타낸다는 보장은 없지만, 사고 당시는 진공을 이용하여 고속으로 흡인하고 있었던 것, 그리고 흡입 물이 액체 뿐만 아니라 불순물(잔재)을 포함하고, 한편 공기도 동시에 빨아들이고 있었다는 증언도 있기 때문에 본 실험에서 얻어진 값과 동일한 정도의 전위가 될 가능성이 있다. 커플링만의 정전 용량은 47 pF이었으므로, 대전 전위가 6 kV라고 하면 이와 접지체 사이에서 발생하는 스파크 방전의 방전 에너지는 계산상 0.85 mJ이며, 이것은 앞에서 말한 JP-4의 최소 점화 에너지에 거의 일치하는 값이다. 실제로, 커플링의 배치 및 흡인 조건에 따라 정전 용량과 대전 전위는 크게 변화하기 때문에 최소 점화 에너지를 초과하는 방전이 발생할 확률은 낮지 않다고 추정된다.

(다) 결론적으로, 잔재의 진공 흡인에 따라 호스 및 커플링이 대전해 커플링에서 어떤 접지체(예를 들어 탱크 벽)를 향해 스파크 방전이 발생하여 폭발 가

능한 농도로 되어 있던 JP-4 증기에 점화한 것으로 추정된다.

(3) 동종 재해 방지 대책의 요점

(가) 호스 대전 방지

휘발유 등 석유계의 인화성 액체는 저항이 크기 때문에 배관·호스 등으로 수송하는 경우에는 유동 대전에 대한 대책이 필요하다. 이 재해처럼 이동식 호스를 사용하는 경우에는 도전성 고무 호스 또는 금속선을 내장하는 호스를 이용하여 도전 부분 및 금속선 커플링과 함께 접지해 호스 및 커플링 양측의 전위 상승을 방지하여야 한다.

(나) 인화성 분위기의 제거

휘발성 인화성 액체를 취급할 때는 액체 상태와 공기의 흐름에 따라 항상 증기의 농도가 변화하고 있기 때문에 종종 폭발 위험 분위기가 형성되고 있다는 인식이 필요하다. 따라서 증기 농도가 충분히 떨어질 때까지 환기를 하는 등 인화성 분위기의 제거한 후 현장에 작업자를 배치하는 등의 작업 절차를 하여야 한다.

(다) 잔재 배출 시의 배려

장기간 사용한 탱크에는 녹, 진흙, 물 등의 불순물이 침전해 있는 경우가 많다. 일반적으로 액체에 이물질이 혼재해 있는 경우에는 정전기 발생이 증가하는 것으로 알려져 있기 때문에 유속을 낮추거나 공기의 혼입을 방지하는 등의 배려가 필요하다.

(4) 동종 재해 사례

(가) 제조소 프로펜 사합체 저장 탱크(용량 1500 kl, 사고 시 833 kl 들이)의 덮개 위에서 샘플 검사를 위해 금속제 채취기를 사용해 빼내는 작업 중 갑자기 폭발해 탱크의 덮개가 공중에 떠 이 충격으로 1명이 지상으로 낙하해 중상, 1명이 굴러 넘어져 가벼운 부상을 입었다. 원인은 채취기가 로프에 의해 절연되어 있었기 때문에, 대전된 채취기에서 방전에 의해 탱크 기체 상태의 밀봉용 수소(순도 70 %)에 점화한 것으로 추정된다.

(나) 유조소 내의 로리 적재장에서 탱크로리(최대 적재량 14 kl)의 운전자가 급유 장치(로딩 암)를 사용하여 등유를 주입하고 있었는데, 주입 개시 직후에

탱크 안에서 폭발이 발생하고 급유구에서 분출된 화염에 의해 탱크로리 위에서 작업 중인 3명이 화상을 입었다. 이 탱크로리의 이전 화물은 휘발유였지만, 배기하지 않았기 때문에, 등유를 주입했을 때 휘발유 증기가 등유에 흡수되어 폭발 가능한 농도가 되어, 이 증기에 주입 시 등유에 발생한 정전기와 로딩 암 사이에서 발생한 방전 때문에 점화한 것으로 추정된다.

(다) 드럼형 분쇄기(직경 수 cm의 알루미늄 공으로 분쇄하는 볼밀 장치)의 원료 투입구에서 금속제 로더를 이용하여 폴리 탱크(20 l)의 크실렌을 흘려 넣었는데, 한 통을 주입 완료하고 두 통째를 흘려 넣기 시작했을 때, 밀 안에서 폭발이 발생, 투입구에서 불기 시작한 화염에 의해 작업자가 화상을 입었다. 원인은 로더가 절연되어 있었기 때문에 크실렌 주입과 함께 대전하여 방전을 발생, 크실렌 증기가 점화한 것으로 추정된다.

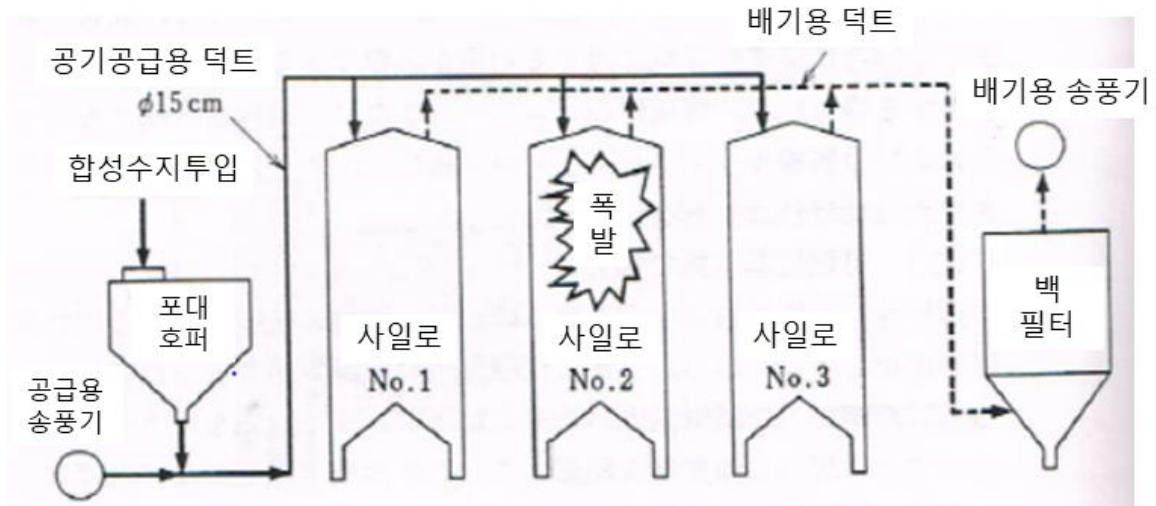
2. 분체 취급 시 재해 사례

2.1 분체의 공기 수송에 의해 사일로 공급 시 분진 폭발

(1) 재해의 개요

(가) 이 재해는 <그림 4>와 같은 플라스틱 성형품의 원료가 되는 플레이크 형 합성수지의 공기 수송 계통에서 원료 수용·공급용 사일로 3개 중 1개에서 발생한 분진 폭발 재해이다.

(나) 사고를 일으킨 사일로는 직경 3.5 m, 몸통 길이 10 m, 저장 용량 100 m³의 수직 원통형의 스테인리스제 사일로이다. 사고 발생 시에는 이를 직경 15 cm의 금속 배관을 통해 약 24 m³/min의 공기 유량으로 사일로 맨 윗부분부터 수용하였다. 수용 개시부터 약 14분 후, 약 1.5 t의 원료를 이송했을 때에 사일로 안에서 분진 폭발이 발생하였다. 당시 주위 기온은 21.5 ℃, 상대 습도는 50 %이었다.



<그림 4> 사일로에서 분진 폭발

(2) 재해 원인의 추정

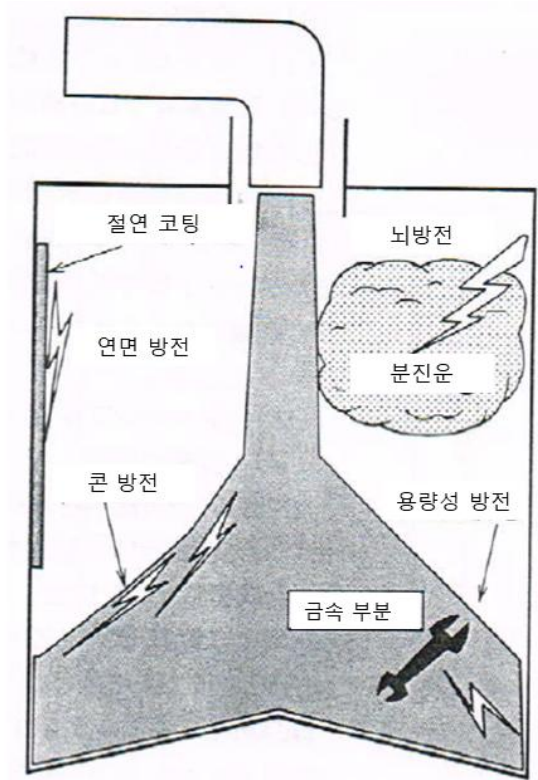
(가) 공기 수송하고 있던 합성수지는 운송 전에는 플레이크 형(입경 0.7~2 mm 정도)이며, 이 상태에서는 분진 폭발을 일으키지는 않는다. 그러나 이 수지는 비교적 약해 공기 수송 시에 관벽과의 충돌 등에 의해 쉽게 파괴되고, 입경 20 μm 정도의 분진이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 게다가 이 분진은 사일로의 벽면에 두꺼운 층이 되어 퇴적하지만, 종종 한꺼번에 무너져 내릴 수 있으며, 이 경우에는 사일로 내의 공간에 고농도(수백 g/m^3)의 분진 구름을 형성하는 것이 확인되었다. 또한, 수지 분말은 체적 저항률이 $10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ 정도이고, 매우 절연성이 높은 것이었다.

(나) <표 1>에 나타낸 바와 같이, 분체의 공기 수송은 분체의 취급 작업 중에서도 특히 정전기의 발생이 많은 것으로 알려져 있으며, 이 재해조사에서도 실물의 금속제 통을 대전시키는 실험을 통해 공기 중에 비산하는 먼지는 약 20 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 으로 대전되는 것이 확인되었다.

<표 1> 분체의 취급 방법과 대전량의 관계

작업공정	비교 전하 ($\mu\text{C/kg}$)
체질	$10^{-5} \sim 10^{-3}$
투입	$10^{-3} \sim 10^{-1}$
스크루 컨베이어	$10^{-2} \sim 10$
분쇄	$10^{-1} \sim 10$
공기 수송	$10 \sim 10^2$

(다) 사일로 내부에서 분진운에 점화할 가능성이 있는 정전기 방전은 <그림 5>에 나타낸 바와 같이 i) 대전된 분진이 공간 전하운을 만들어 벽면에서 공간을 향해 절연 파괴가 일어나 방전하는 뇌 방전, ii) 퇴적된 분체의 표면에서 발생하는 콘 방전, iii) 사일로의 벽면이 플라스틱이나 유리 등 비도전성 물질로 코팅되어있는 경우에 그 표면에서 발생하는 브러시 방전과 연면 방전, iv) 사일로 안에 놓인 절연 된 금속 물체가 대전하여 부근의 접지체 등과의 사이에서 방전하는 용량성 방전의 4종류가 주된 것으로 들 수 있다.



<그림 5> 사일로 안에서 일어날 가능성이 있는 정전기 방전

(라) 이들 방전에서 이번 재해의 원인이 될 수 있는 것은 뇌 방전과 콘 방전이 다. 뇌 방전은 그 발생 조건으로서 사일로의 직경이 3 m 이상 또는 공간 용적이 60 m^3 이상인 것이 필요하지만, 이번 사고에서는 사고 발생 시 사일로의 90 %는 공간이며, 또한 직경도 3.5 m이기 때문에 이 조건은 충족되고 있다. 한편, 콘 방전은 저항률이 높고 또한 입경 1~10 mm 정도의 비교적 거친 분말이 빠르게 퇴적한 경우에 발생하기 쉽고, 이론적으로는 직경 1m의 구형에 퇴적한 경우 $0.01 \text{ } \mu\text{C/kg}$ 정도 이상의 전하를 가지고 있으면 발생하는 것으로 알려져 있고 이것도 이번 재해의 원인이 되었을 가능성이 있다. 따라서 이번 재해의 발생 상황은 다음과 같았다고 추정된다.

- ① 공기 수송에 의해 대전한 알맹이 모양의 수지 분말이 사일로에 보내졌다.
- ② 수지 분말의 일부는 파괴에 의해 수십 μm 이하의 분진이 되어 사일로

벽면에 퇴적했지만, 분체면이 설정 하한 이하까지 저하한 것이 계기가 되어 한꺼번에 무너져 내려 사일로의 공간에 가득 찼다.

- ③ 이때, 분진운에서 뇌 방전 또는 이미 퇴적된 알맹이 모양의 수지 표면에
서 콘 방전이 발생하고 이것이 점화원이 되어 분진이 폭발하였다.

(3) 동종 재해 방지 대책

(가) 불활성 가스에 의한 치환

고농도의 분진운 등 인화성 분위기의 형성이 불가피할 경우에는 질소 등의 불활성 가스를 송급함으로써 산소 농도를 낮춰 점화하기 어려운 상태로 한다.

(나) 대전량의 제한

분체의 공기 수송의 경우에는 일반적으로 확립된 정전기의 발생 방지책은 없지만, 정전기의 주된 발생 요인이 분체와 배관과의 충돌이기 때문에 유속을 제한하는 것, 배관을 가능한 한 구부러진 관이 적어지도록 배치하여 어느 정도 전하의 발생량을 억제하는 것이 가능하다.

(다) 대규모 공간의 방지

대형 사일로처럼 매우 큰 공간을 가진 시설에서의 분체 취급 시에는 가능한 한 기체 상태의 공간이 적어지도록 운용(예를 들어, 항상 가득 찬 상태에서 사용하기 등)을 도모한다.

(라) 동종 재해 사례

① 폴리에틸렌 조립 공장에서 펠릿을 반제품 사일로로 공기 수송 중 사일로가 폭발하였다. 이 사일로에서 청소가 되어 있지 않았기 때문에, 퇴적된 폴리에틸렌 분말이 벗겨 떨어졌을 때 분진 구름이 형성되어 정전기 방전이 점화원이 되어 폭발하였다고 추정된다.

② 항구의 부두에 신설된 사일로 군(53개 곡물용 철제 사일로를 집합)에 맥아(밀을 볶은 것)를 반입하자 그중 하나에서 폭발이 발생, 집합 사일로 전체에 걸친 한 장의 천장 철판의 거의 2/3가 말려 올라 파편이 지상에 떨어졌다, 공기 수송 시

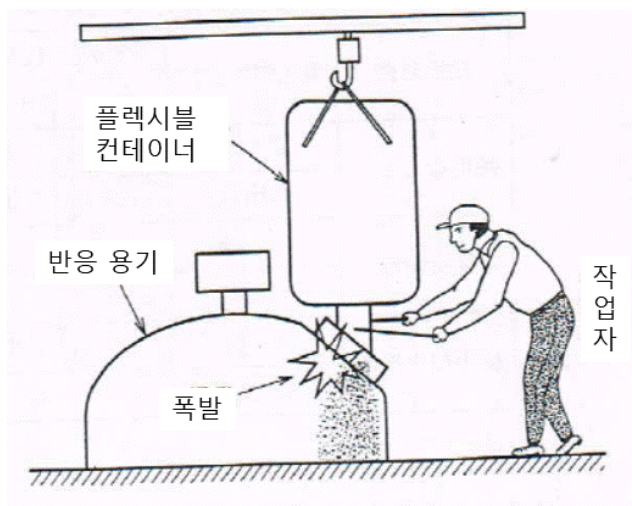
에 파괴되어 생긴 맥아 분진 구름에 정전기 방전이 점화원이 되어 폭발하였다고 추정된다.

2.2 플렉시블 컨테이너에 의한 분체 원료 투입 시의 폭발 재해

(1) 재해의 개요

(가) 이 건은 합성수지를 제조하는 화학 공장에서 발생한 폭발 재해이다. 재해가 발생한 것은 일종의 합성수지를 제조하기 위한 반응 공정(배치 프로세스)이며, 반응 용기(스테인리스 스틸, 용량 15 m³)에 용제(알코올)를 적당량 넣고 그 후 반응 용기 상부의 맨홀부터 여러 종류의 분체 및 액체의 원재료를 순차적으로 넣어 교반·용해시키면서 반응을 일으키는 것이다.

(나) 폭발은 <그림 6>과 같이, 호이스트에 매단 플렉시블 용기(용량 500 kg)에서 가연성 분체 원료를 투입하던 중에 맨홀 부근에서 발생하였다. 이 폭발로 작업자 2명이 심한 화상을 입었다. 당시의 날씨는 흐림, 기온 약 4 °C, 상대 습도는 약 63 %이었다.

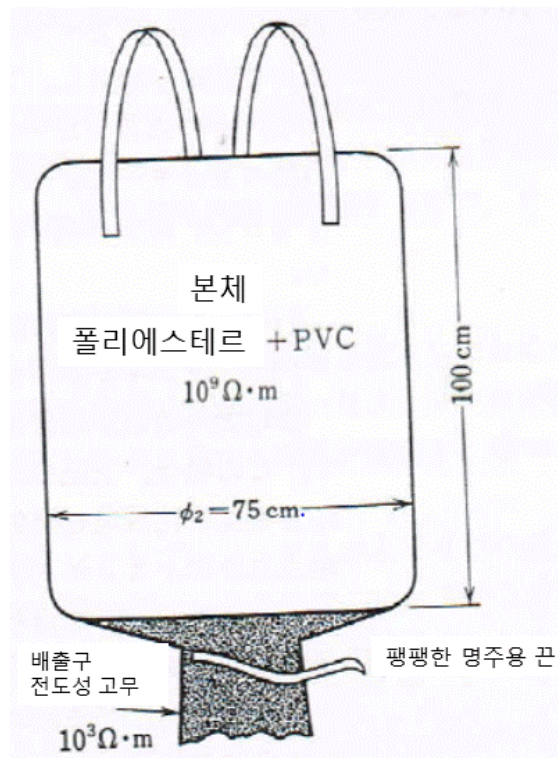


<그림 6> 플렉시블 컨테이너에 의한 분체 투입 시 폭발 재해

(2) 재해 원인의 추정

(가) 폭발한 것은 분체 원료 또는 분체 원료와 알코올 증기의 혼합물이었다. 또한, 점화원으로는 폭발이 맨홀 주변에서 발생한 것, 부근의 전기기기(스위치, 전동기 등 모든 방폭 구조)는 점화원이 된 흔적은 없었던 점, 담배 등의 화기도 없었던 점으로부터 원료 분체 투입 시에 분체와의 마찰에 의해 플렉시블 컨테이너가 대전, 맨홀과의 사이에서 방전이 발생하여 점화원이 될 가능성이 높다고 추정된다.

(나) 이하, 이 근거를 원인 규명을 위해 행해진 실험 결과를 바탕으로 설명한다. 이번 재해에서 사용된 플렉시블 용기는 <그림 7>에 나타난 것과 같은 형상이며, 본체의 재질은 폴리에스테르 기포에 PVC를 양면에 코팅한 것으로 배출구에는 도전성 고무 피복포가 사용되었고 또한 매달기 위한 로프는 합성 섬유제이다.



<그림 7> 플렉시블 컨테이너의 구조

(다) 재질의 체적 저항률의 측정 결과는 본체가 $10^{10} \Omega \cdot m$, 배출구가 $10^3 \Omega \cdot m$ 의

순서이었다. 이 결과로부터 본체는 절연성이 그다지 높지 않은 부도체, 배출구는 도체로 간주될 수 있지만, 실제로 어떤 전기적 성질이 있는지를 보기 위해 플렉시블 용기를 몇 가지 종류의 접지 조건에서 고전압의 인가 또는 코로나 방전에 의해 대전시킨 후 전위 감쇠의 정도를 측정했다.

(라) 측정 결과를 반감 시간(전위가 초기 값의 절반이 될 때까지의 시간)을 이용하여 정리한 것이 <표 2>이다. 이 결과에서 접지되지 않은 경우는 물론 있지만 본체를 접지한 경우에도 상당한 반감 시간을 필요로 하는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 원료 본체의 배출에 수십 초를 필요로 한다고 가정하면, 본체를 접지하여도 배출하는 동안 전위는 상승해 나간다. 한편, 도체인 배출구를 접지함으로 인해 본체의 대전도 상당히 억제할 수 있음을 알 수 있다(또한, 재해 발생 시에는 플렉시블 컨테이너의 접지는 전혀 이뤄지지 않았다).

<표 2> 전압 인가에 의한 대전 전위 및 반감 시간

접지 조건	전압 인가 부위	대전 전위 (V)		반감 시간 (초)	
		본체	배출구	본체	배출구
미 접지	본체	6.6.	7.4	$>10^3$	$>10^3$
	배출구	7.8	7.0	$>10^3$	$>10^3$
본체를 접지	본체	6.0	5.8	71	9
	배출구	7.5	8.4	68	51
배출구를 접지	본체	1.0	0.3	13	6
	배출구	0	0	-	-

(마) 다음 배출구와 그 바로 아래에 놓인 금속판(1 m 각도) 사이의 정전 용량을 측정한 결과가 <표 3>이다. 여기에서 정전기 방전 발생 시의 정전 용량을 60 pF, 대전 전위를 10 kV라고 하면, 방전 에너지는 계산상 3 mJ 정도가 된다. 이 값은 대부분의 인화성 가스·증기를 점화시키기에 충분한 것이다.

<표 3> 배출구의 정전 용량

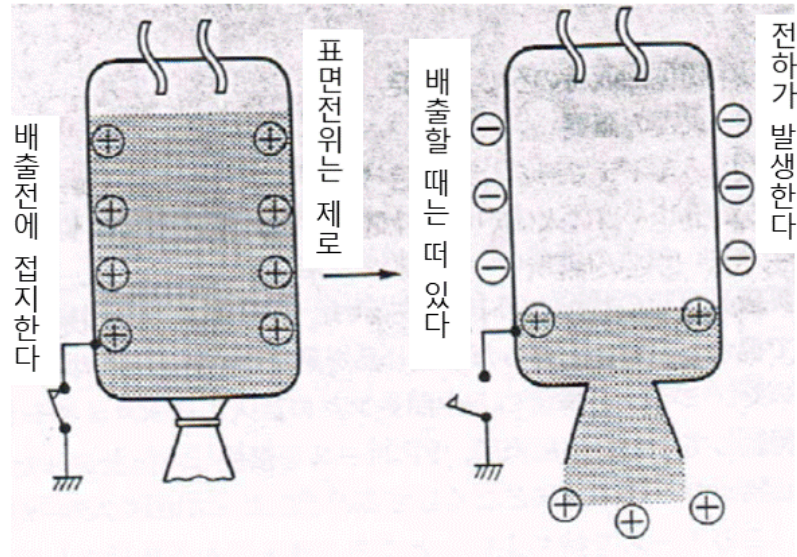
바닥에서의 거리 (cm)	정 전 용량 (pF)
1	56
5	48
10	43
20	38
30	38

(바) 위의 실험 결과로부터 플렉시블 컨테이너에서 분체 원료를 배출할 때 플렉시블 컨테이너가 대전하여 접지되지 않은 배출구(도체)와 맨홀(도체) 사이에서 스파크가 발생하고 알코올 증기에 점화, 더욱이 알코올 증기가 연소할 때 열에너지에 의해 인화성 분체 원료에도 인화되어 분진 폭발을 일으킬 가능성이 높다.

(3) 동종 재해 방지 대책

(가) 플렉시블 컨테이너의 접지

- ① 정전기 대책을 위해 도전성 재료를 이용한 플렉시블 컨테이너가 시판되고 있다. 그러나 이 경우 위의 예에서 알 수 있듯이, 접지를 하지 않은 경우에는 오히려 점화성이 큰 스파크 방전이 발생할 우려가 생긴다. 따라서 도전성 로프를 이용하여 접지된 호이스트에 매달 것인지, 또는 별도의 접지선을 뒤에 연결하는 등 도전성 부분의 접지를 확실하게 하여야 한다.
- ② 접지와 관련하여 자주 보는 잘못된 취급의 구체적인 예를 <그림 8>에 나타내었다. 이것은 대전된 분체를 도전성의 플렉시블 컨테이너에 담은 후에 컨테이너 본체를 접지하여 일단 표면 전위를 제로로 한 후 접지선을 분리 해버리는 것이다. 이것으로 내부의 분체는 전하를 가지고 있기 때문에, 분체를 배출했을 때 본체가 반대 극성으로 대전해 버리고 결국 접지를 전혀 하지 않은 것과 같은 결과가 되어 버린다.



<그림 8> 플렉시블 컨테이너의 잘못된 접지 방법

- ③ 더욱이 플렉시블 컨테이너가 절연성인 경우에는 대전 전위가 20~30 kV 이상이 되면 최소 점화 에너지가 0.1~1 mJ의 인화성 물질을 점화시키는 브러시 방전이 발생한 가능성이 있고 또한, 인체 등 부근의 절연된 도체를 유도 대전시키는 것 등의 위험성이 발생하므로 인화성 분체의 취급에 사용해서는 안 된다.

(나) 인체의 대전 방지

정전기 방전이 우려되는 작업장에서는 정전기 신발 및 정전기 방지 작업복을 착용하여야 한다. 이 경우 작업 바닥도 정전기 방지 사양이어야 한다(작업장 전체가 정전기 방지 바닥일 필요는 없고 투입 작업을 하는 장소에 접지된 철판을 깔 정도면 충분).

(다) 인화성 분위기의 제거

정전기 방전 등 점화원이 존재해도 인화성 분위기가 없으면 화재·폭발은 발생하지 않는다. 점화 위험성이 높은 분체를 다룰 때에는 불활성 가스에 의한 봉인 및 제거 등의 조치를 한다. 또한, 충분한 환기 및 집진하는 것은 점화 위험성을 경감하기 때문에 개방형 환경에서 효과적인 방법이다.

(4) 동종 재해 사례

(가) 사진 필름에 도포하는 약품을 제조하는 반응 용기에 인화성 분체를 투입한 결과 맨홀 부근에서 폭발이 일어났다. 원인은 전날 반응 용기의 세정에 사용된 메탄올이 증기로 잔류하고 있는 곳에, 분체 투입 시에 대전한 비닐 포대에서 방전이 발생하여 점화한 것으로 추정된다.

(나) 발포 스티폴 원료의 합성수지 알갱이(Beads)를 플렉시블 컨테이너에서 사일로에 투입 작업 중 사일로에서 폭발해 화재가 났다. 알갱이에 발포제로 포함된 부탄가스가 빠져나가 사일로 내에 체류하고 플렉시블 컨테이너에서 정전기 방전으로 점화한 것으로 추정된다.

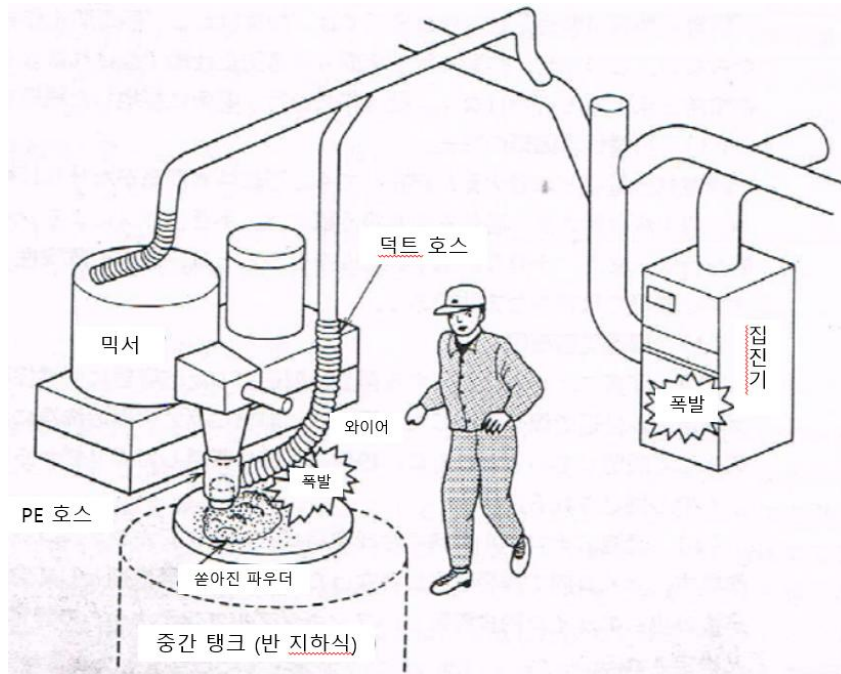
(다) 플라스틱용 안정제를 제조하기 위해 반응 용기에 미리 공업용 휘발유를 넣고 이후 플렉시블 컨테이너에서 분체 원료를 투입하던 중에 맨홀에서 화염이 분출했다. 가솔린의 증기가 플렉시블 컨테이너에서 정전기 방전으로 점화한 것으로 추정된다.

2.3 분체 회수 시의 분진 폭발

(1) 재해의 개요

(가) 이 재해는 믹서로 혼합한 수지 파우더를 믹서에서 배출하는 중에 일부가 마루에 낙하·비산하여 발생한 분진운에 인체로부터 정전기 방전이 점화하여 분진 폭발이 발생하고 작업자 1명이 화상을 입고 부근 장비의 일부에 손해를 끼친 것이다.

(나) 재해 발생 시의 상황을 <그림 9>에 나타낸다. 작업자는 합성수지 파우더와 탄소를 믹서로 혼합하여 만들어진 완성품을 아래층에 설치된 중간 탱크에 낙하시키는 작업 중에 있었다.



<그림 9> 비산한 수지 파우더 분진의 폭발 사고

(다) 믹서의 배출구와 중간 탱크의 주입구는 폴리에틸렌(PE) 필름을 통 모양으로 하여 연결되어 있었다. 사고 당시 PE 호스를 연결하고 완성된 파우더를 중간 탱크로 낙하시키기 시작하자 얼마 지나지 않아 이 PE 호스에 파우더가 막혀 떨어지지 않게 되어 이 호스를 들어 올리자 주입구에서 빠져버려 대량(약 25 kg)의 파우더가 중간 탱크의 뚜껑 위에 내려 쌓이는 동시에 일부가 공중으로 날아올랐다.

(라) 퇴적된 파우더를 제거하려고 한쪽 무릎을 꿇은 자세에서 일어나 몇 초 후에 폭발이 발생했다. 그 후 화염은 집진 호스를 통해 근처의 집진기로도 전파해 내부 필터 등이 소손되었다. 다행히 다른 작업자의 협력으로 소화 활동이 신속하게 진행되었기 때문에 연소를 막을 수 있었다.

(2) 재해 원인의 추정

(가) 화재 발생 장소는 작업자가 있었던 믹서의 배출구 부근 및 집진기내 뿐이며 부근에 점화원이 되는 전기 스파크 발생이나 나화의 존재는 생각할 수

없었던 점에서 정전기 방전이 점화원이라고 추정된다.

(나) 이 때문에 정전기의 대전 특성을 중심으로 현장 실험이 시행되어 아래와 같은 것이 판명되었다.

- ① 작업자의 마루의 누설 저항은 $5 \times 10^6 \Omega$ 정도이었다.
- ② 사고 당시와 같은 신발을 신은 작업자의 누설 저항은 $2 \times 10^9 \Omega$ 이고 대전하기 쉬운 상황이었다.
- ③ 믹서에서 배출된 분말을 폴리 염화 비닐제 집진 호스로 흡인하였을 때 이 호스의 표면 전위는 $-15 \sim -17 \text{ kV}$ 가 되었다.
- ④ 집진 호스에 감겨있는 와이어 부분에 피복 외부에서 접지 금속 구를 접촉한 결과, 강한 스파크 방전이 발생하였다(그때의 방전 전하량은 $-2 \mu\text{C}$ 이상).

(다) 이상의 실험 결과 및 관계자의 의견을 종합하면 이 재해는 다음과 같은 경과로 발생한 것이라고 추정된다.

- ① 중간 탱크 뚜껑 위에 대량의 파우더가 쏟아졌을 때 그 일부가 공중으로 날아 올라가 주변에 고농도의 분진 구름을 형성하였다.
- ② 공중으로 날아 올라간 파우더는 강하게 대전하고 그것을 흡입한 분진용 덕트 호스도 와이어가 접지 불량으로 대전되었다.
- ③ 그리고 작업자가 일어섰을 때 덕트 호스에 접근, 호스 와이어의 부분과 인체와의 사이에서 스파크 방전이 발생하여 폭발하한농도(약 50 g/m^3) 이상에 달한 분진운에 점화되었다.
- ④ 그때의 화염은 덕트 호스를 통해 집진기에도 도달해 집진기 내부에 형성되어 있던 분진운에 점화해 폭발시켰다.

(3) 동종 재해 방지 대책

(가) 분체의 부유 방지

분체가 마루에 쏟아져도 그대로 퇴적되어있는 동안은 큰 위험성은 없지만, 그것이 공중으로 날아오르는 상태가 되면 가연성 분진운을 형성하기 때문에 신중하게 회수 작업할 필요가 있다.

(나) 비 접지 금속의 발견과 접지의 권고

이번 사례에서는 수지성 덕트 호스 안에 보강용으로 설치된 와이어 대전이 점화성 방전 발생의 원인이 될 가능성이 높다. 이와 같이 숨겨진 비 접지 금속이 없는지 신중하게 조사하고 만약 있으면 확실하게 접지하여야 한다.

(다) 집진기 필터 대전 방지

전기 청소기나 백 필터 등의 집진 장치를 사용한 경우 필터가 대전하여 방전이 발생해 내부의 분진이 폭발할 경우가 있다. 가연성 분체를 대상으로 하는 집진 장치에는 대전 방지 필터를 사용하여야 한다.

(4) 동종 재해 사례

(가) 프린트 배선 재료가 되는 전해 동박을 제조하는 공장에서 티타늄제 전착물의 표면을 연마할 때 발생하는 티타늄 분말을 모으기 위해 사용했던 집진 장치의 청소 작업을 하기 위해 집진기의 앞뚜껑을 제거하여 필터에 부착되어있는 티타늄 분말을 전기 청소기를 이용하여 빨아들였을 때, 분진기 내부에서 폭발이 발생, 작업자 2명이 화상으로 사망하였다. 폭발의 원인은 티타늄 분말을 전기 청소기로 흡인했을 때 정전기 발생에 의한 것으로 추정됐다.

(나) 플라스틱 제조 공장의 레진 제조 시설에서 합성수지의 특수 등급 제품을 생산하고 있었는데, 제품을 저장하는 사일로 군의 하나에서 분진 폭발이 발생해 사일로 1개(직경 4.8 m, 높이 14 m)가 넘어졌다. 원인은 넘어진 사일리에 부설되어있는 백 필터 9개 중 1개가 내부 프레임이 절연 상태가 되어 정전기가 쌓여 방전되고 그 방전 스파크에 의해 분진이 점화한 것이라

고 추정된다. 그리고 이 백 필터 안에서 작은 폭발이 역화되어 사일로 안에 부착 퇴적되어있던 수지 가루를 공중으로 날아 올려 분진 폭발이 발생했다고 추정된다.

- (다) 마그네슘과 알루미늄 합금의 거친 입자를 미세 분말로 하는 공장에서 불 밀식 분쇄기 부근에 실수로 쏟아진 분체를 전기 청소기로 흡인 작업하던 중에 청소기가 폭발하였다. 또한, 그 화염이 호스 안으로 역화되어 분쇄기 내에 들어가 그 기계의 호퍼가 폭발하여 파괴, 작업자가 날아가 사망하였다. 점화원은 청소기의 필터에 부착된 분진의 박리 방전 스파크로 추정된다.

3. 기체 취급 시 장·재해 사례

3.1 LPG 분출 시 폭발 재해

(1) 재해 개요

가스 충전소에서 프로판 가스를 대기 중에 방출하던 중에 발생한 화재 재해이다. 사고 발생 시의 작업 상황을 <그림 10>에 나타내었다. 프로판 20 kg 용기에 5 kg 정도 과충전이 되었기 때문에 작업자는 방출구를 바닥을 향해 밸브를 열었다. 이때 프로판은 일부가 액체 상태 그대로 분출하였다. 2~3초 후 방출구 부근에서 프로판에 점화해 불이 타오르고 이 작업자는 화상을 입었다. 화염은 그 후 소화 활동에도 상관없이 확대되고 충전소뿐만 아니라 인근 시설에도 큰 피해를 가져왔다. 당시의 기온은 23 °C, 습도 33 %이었다.

(2) 재해 원인의 추정

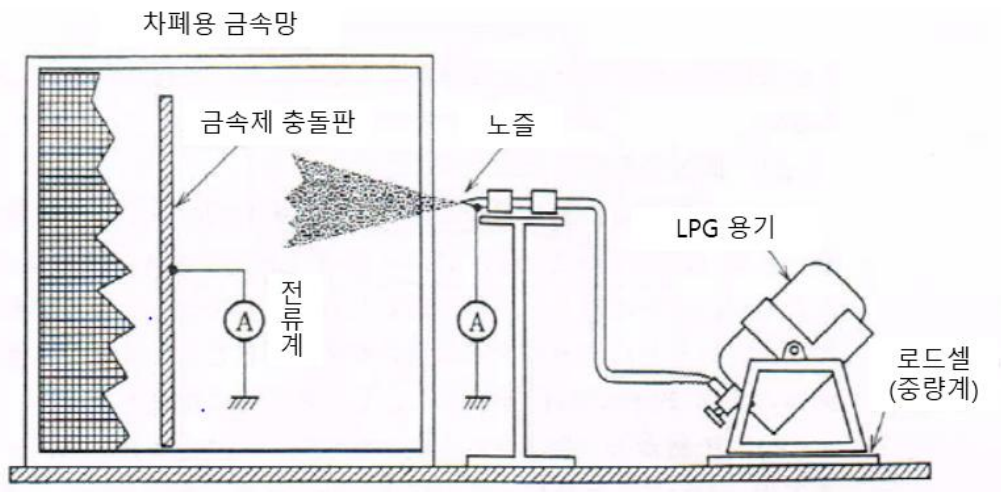
부근에 전혀 점화원이 될 만한 것이 없었던 것으로 기체, 액체 혼합 상태에서 방출된 프로판 및 용기의 대전에 의한 정전기 방전이 점화원이라고 생각된다. 이 추정을 뒷받침하는 실험 결과를 아래와 같다.

- (가) <그림 11>은 LPG 용기의 분출 대전 실험 장치의 개요이다. 이 장치는 LPG 용기의 설치 각도를 가변할 수 있게 되어 있으며, 이 각도를 조절함

으로써 기체, 액체 및 기체, 액체 혼합 상태에서 LPG 분출이 가능하다. 또한, 실드용 철망 내부에는 금속제 충돌판이 설치되어 있어 LPG가 이와 충돌했을 때의 정전기 발생을 측정하는 것도 가능하다.



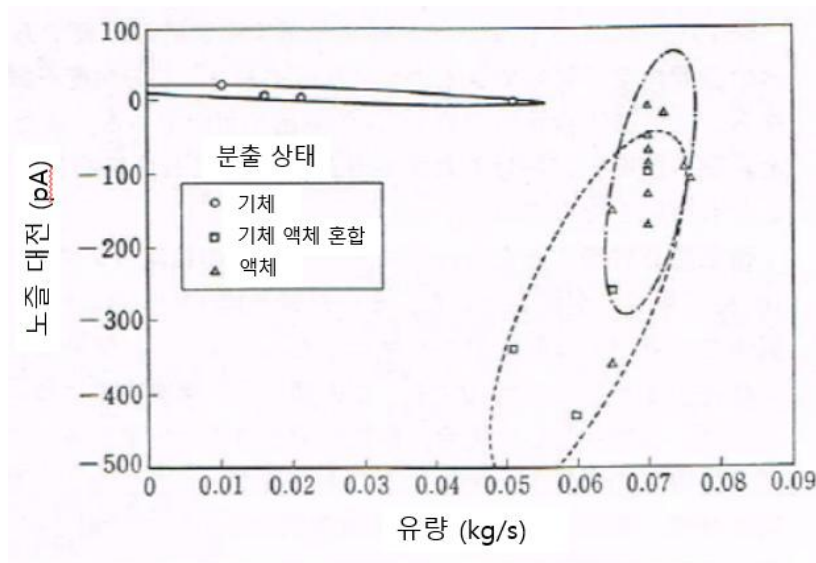
<그림 10> 프로판 분출 대전에 의한 점화 사고



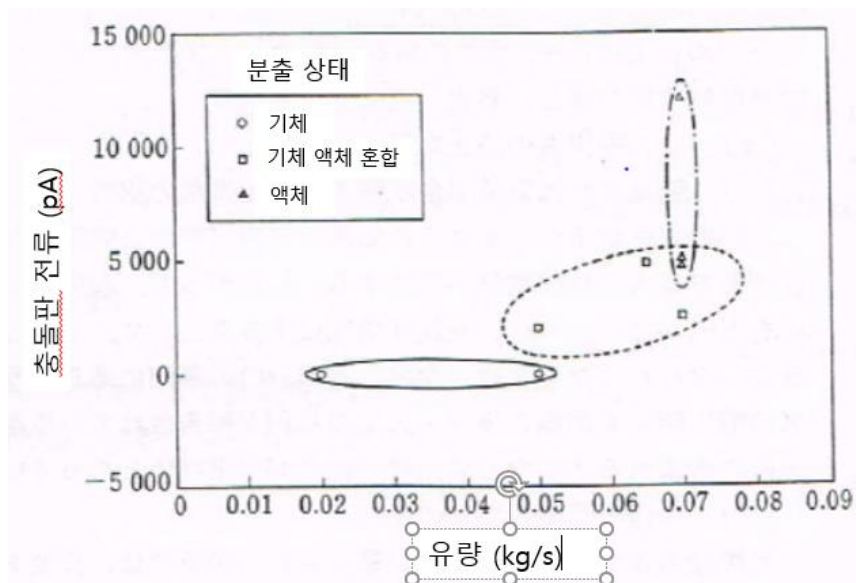
<그림 11> LPG 분출 대전 실험 장치의 개요

(나) 대전량을 평가하기 위해 노즐과 대지 사이의 전(노즐 전류), 충돌판과 대지 사이의 전류(충돌판 전류)를 측정하였다. 그 결과를 <그림 12> 및 <그림 13>에 나타내었다. 이에 따르면 기체의 분출에서는 정전기의 발생은 거의 없지만 기체, 액체 혼합 상태, 액체 상태로 변화함에 따라 발생량이 급격히

증가한다. 이 경향은 충돌 대전에 대해서도 마찬가지이다. 다른 실험에 의하면, 상태가 동일한 경우, 단위 시간당 방출량이 많을수록, 그리고 충돌의 세기가 강할수록 정전기 발생량이 증가하는 것이 확인되었다. 또한, 절연 상태의 용기에 LPG를 충돌시켜 대전한 용기와 접지 금속 구 사이에서 방전을 일으키자 LPG에 점화하는 것도 확인되었다.



<그림 12> 분출 상태와 노즐 전류의 관계



<그림 13> 분출 상태와 충돌판 전류의 관계

(다) 이상의 실험 결과에서 알 수 있듯이, 이 재해는 배출구를 아래로 하였기 때문에, 액체 또는 기체, 액체 혼합 상태가 된 LPG가 분출하여 대전하고 또한 용기에는 이 용기가 접지되어 있지 않기 때문에 LPG와 반대 극성인 전하가 축적해 작업자와 용기 사이 또는 LPG와 용기 사이에서 정전기 방전이 발생하여 점화된 것으로 추정된다.

(3) 동종 재해 방지 대책

(가) 액체 또는 기체, 액체 혼합 상태에서의 분출 대전 인식

위의 실험 결과에서 알 수 있듯이 기체에서 분출 대전은 문제가 되지 않지만, 액체 또는 기체, 액체 혼합 상태에서는 큰 정전기가 발생한다. 따라서 액화 가스 등을 방출할 때에는 노즐을 위로하여 가능한 기체로 방출되도록 하여야 한다, 또한, 아래 (4) (다)의 사례에 있는 것과 같이, 수소 등 인화성 압축가스의 분출 시에도 같은 화재·폭발 사고 사례가 보고되고 있지만, 이러한 경우는 분출 가스 중에 포함되는 녹 등의 고형 불순물이 대전 물체로 되어 있다.

(나) 주변의 도전성 물체 접지

인화성 액체 등의 분출 대전이 우려되는 장소에서는 작업자는 물론 용기 배관 및 부근의 기기류 등을 접지함으로써 이들이 대전되지 않도록 하여야 한다.

(4) 동종 재해 사례

(가) 수소를 정제하여 용기에 충전하는 사업장의 충전 작업장에서 충전 완료의 거들(운송용 집결 용기, 용기 20개를 집결한 것)을 분리 작업하였으나 용기 중 하나가 충전되지 않았던 것이 확인되어 다시 충전 작업을 시행하려고 거들의 메인 밸브를 열었는데, 이미 도관이 분리돼 있었기 때문에 밸브로부터 수소(약 184기압)가 분출하여 잠시 후 폭발·불이 타올라 작업자가 화상을 입었다.

(나) 천연가스와 산소로부터 생성하는 수소와 일산화탄소를 원료로 메탄올을 합성하는 공정에서 반응 탑에서 나온 합성 가스(수소 78 %, 일산화탄소 11 %, 메탄올 4 %, 그 외 이산화탄소, 메탄, 수증기 등 300기압 110 ℃ 가스)

를 냉각하는 냉각기 배관의 밴드부에 균열이 생겨 가스가 분출하여 폭발하였다.

(다) 합성수지의 제조 공정에서 반응 후 용매(노말헥산)를 회수하는 배관이 불순물로 막혀 중간 플랜지를 개방하여 배관 말단에서 압축 질소를 공급하자 플랜지에서 노말헥산을 포함하는 잔액이 대량으로 안개 모양으로 퍼지기 시작한 직후 점화되어 화재가 발생되었다.