

# 대형 폭발사고의 예방대책

## A Prevention Policy of Significant Explosion Accidents



글 / 車 淳 哲  
(Char, Soon Chu)

화공안전기술사/화학장치설비기술사/화학공장설계기술사/소방기술사,  
가스기술사, 산업안전지도사, 기술사사무소차스텍이앤씨㈜ 대표,  
한국기술사회 이사/홍보위원.  
E-mail: sc@charstech.com

### 1. 머리말

**지난 4월 22일 발생한 북한의 통천역 폭발사고로 인하여 사망자수 150여명, 부상자수는 1,300여명에 달하는 엄청난 재해가 발생하였다고 전해지고 있다.**

통천역을 중심으로 반경 500m 파일이 완파되었으며, 폭발 영향권도 4km에 달하였고 반경 500m 안에는 역사와 학교 및 4-5층 규모의 아파트가 다수 있었기에 피해 규모가 더욱 컸다고 알려 졌다.

1990년대 들어 우리나라도 심대한 대형 재난사고를 당하였다. 성수대교 붕괴(1994), 대구지하철 공사장 가스폭발(1995), 삼풍백화점 붕괴(1995), 대구지하철 화재(2003) 등 잇따른 대형 참사는 우리의 위기관리 현실을 되돌아보게 하였고, 국민들은 언제 발생할지 모를 재난에 대한 불안감으로 그 어느 때보다 안전한 나라에 대한 열망이 강한 것이 사실이다.

우리나라의 2003년 산업재해현황을 살펴보면, 산업재해자수는 약 9만5천명으로 전년대비 16% 증가하였고 이 중 사망자수는 2천9백여명으로 전년대비 12% 증가하였으며, 경제적 손실 추정액은 12조4천억원으로 전년대비 2조3천억원 증가하였는데 이는 노사분규로 인한 생산 차질액 2조5천억원의 약 5배에 달하는 엄청난 액수이다. 이에 다음과 같이 폭발의 상세한 사항을 기술하고 대형 폭발사고의 예방대책을 제안하고자 한다.

### 2. 폭발의 정의

① 폭발은 연소의 한 형태로서 격렬한 연소를 의미하며

- ② 폭발의 3요소는 가연물, 산화제(산소), 점화원이다.
- ③ 반응의 전파속도는 매우 빠르면서도 순간적인 에너지를 발생하여
- ④ 현저하게 온도가 증대되는 동시에 빛과 열을 수반한다.
- ⑤ 순간적으로 화학에너지가 열에너지 또는 기계에너지로 변환되어 사망으로 전달되는 거대한 에너지의 순간적인 발산현상이다.
- ⑥ 압력의 급격한 개방 또는 발생으로 인해 급속히 폭음을 발생하며 팽창 또는 파열하는 현상이다.

### 3. 폭발의 원인

- ① 연소반응 : 열의 발생속도가 방열속도를 능가하는 비정상연소
- ② 발화 및 가연조건 : 발화에 필요한 에너지가 주어졌을 때, 또는 발화에 충분할 정도로 온도가 상승되었을 때, 또한 기체상태가 폭발범위 내의 농도, 압력, 온도로 되었을 때 발생한다.
- ③ 예혼합 화염과 그 전파 : 기상폭발을 일으키는 압력의 상승은 가연조건에 있는 기상 중에 연속적으로 화염이 전파되므로 일어난다. 이 때 가연성 기체와 지연성 기체는 미리 혼합되어 혼합기를 형성하며, 이 혼합기는 연소범위 내에 있게 됨으로써 화염이 전파될 때 예혼합 화염이 형성된다.
- ④ 화염의 가속 : 일정압력 하에서 전파속도가 증대하면 격심한 연소가 진행되며, 나아가서 폭발현상이 발생한다.

#### 4. 폭발의 성립조건

- ① 자연조건의 성립 : 개방공간 또는 밀폐공간에서의 가연성 혼합기의 형성
- ② 발화
  - ㉞ 발화 온도 이상의 온도
  - ㉟ 최소발화에너지 이상의 에너지
  - ㊱ 온도 상승을 지배하는 발화원의 특성
- ③ 화염의 전파와 압력의 움직임
  - ㉞ 화염의 가속에 따라 압축파는 계속 발생하며 화염 전방으로 전달
  - ㉟ 뒤에서 전파되는 압축파의 속도가 선행하는 파의 속도보다 커져 압축파의 증폭이 발생
  - ㊱ 화염의 가속이 현저하게 클 경우 증폭된 강한 압축파가 충격파로 변화되어 폭발의 전형적인 형태인 폭굉으로 전이

#### 5. 폭발의 종류와 형식

##### 1) 개요

폭발을 공정별로 분류하면 핵폭발, 물리적 폭발, 화학적 폭발 및 물리적 폭발과 화학적 폭발의 병립에 의한 폭발 등으로 분류하고 있으며, 대부분의 경우 폭발이 발생할 때의 원인물질의 물리적 상태에 따라서 기상폭발과 응상폭발로 분류하고 있다.

##### 2) 기상(氣相)폭발

기상폭발에는 가스폭발(혼합가스폭발), 분무폭발, 분진폭발, 가스의 분해폭발 등이 포함된다.

- ① 가스폭발 : 수소, 일산화탄소, 메탄, 프로판, 아세틸렌 등의 가연성 가스와 지연성 가스(공기 또는 산소)와의 혼합기체에서 발생한다.
- ② 분무폭발 : 공기 중에 분출된 가연성 액체의 미세한 액적이 무상으로 되어 공기 중에 부유하고 있을 때 발생한다.
- ③ 분진폭발 : 미분탄, 소맥분, 플라스틱의 분말 같은 가연성의 고체가 미분말로 되어 공기 중에 현탁하여 있을 때 발생한다.
- ④ 증기운폭발 : 다량의 가연성 가스 또는 기화하기 쉬운 가연성 액체가 지표면에 유출되어 다량의 혼합기체가 형성되어 폭발이 일어난 경우에 발생한다.

- ⑤ 분해폭발 : 분해폭발은 가스폭발의 특수한 경우로서 분해폭발을 일으키는 가스를 분해폭발성가스라고 부르고 있으나 그 대부분이 가연성 가스로서 공기가 혼재할 때는 가스폭발의 위험도 겸한다.

##### 3) 응상(凝相)폭발

- ① 수증기폭발(과열액체의 증기폭발) : 폭발사고로서 대표적인 응상폭발은 수증기폭발이다. 용융금속이나 slug같은 고온물질이 물속에 투입되었을 때에 그 고온 물질이 갖는 열이 저온의 물에 짧은 시간에 전달되면 일시적으로 물은 과열상태로 되고 조건에 따라서는 순간적으로 급격하게 비등하고, 이때에 발생하는 상변화(액상 → 기상)로 폭발현상이 나타난다. 또한 보일러의 관체가 어떤 사고에 의하여 일부분이라도 파손되면 대기압 하에서의 비점 이상으로 과열되어 평형상태에 있던 물(액상)이 순간적으로 대기압으로 방출됨으로써 평형상태가 파괴되고 이때에 발생하는 상변화로 폭발현상을 나타내는 경우가 있다.
- ② 증기폭발 : 저온액화가스(LPG, LNG 등)가 사고로 인해 물 위에 분출되었을 때에는 조건에 따라서는 급격한 기화에 동반하는 비등현상을 나타내는 것으로 액상(液相)에서 기상으로의 급격한 상변화에 의한 폭발현상에 수증기폭발을 포함시켜 증기폭발이라고 부른다. 증기폭발이라는 단어로는 그 의미를 정확히 전달하기 어렵기 때문에 미국에서는 최근 Rapid Phase Transition(RPT : 급속 상변화)라고 하기도 한다.
- ③ 고상(固相)간의 전이에 의한 폭발 : 증기폭발은 액상과 기상간의 상변화가 급격히 일어난 때의 현상이나 고체인 무정형 안티몬이 동일한 고상의 안티몬으로 전이할 때에 발열함으로써 주위의 공기가 팽창하여 폭발현상을 나타낸다.
- ④ 전선폭발 : 고상에서 급격히 액상을 거쳐 기상으로 전이할 때 폭발현상이 일어난다. 알루미늄제 전선에 한도 이상의 대전류가 흘러 순식간에 전선이 가열되고 용융과 기화가 급속하게 진행되어 폭풍을 일으켜 피해를 주는 경우도 있다.

#### 6. 폭발의 거동에 영향을 주는 변수

- ① 주위의 온도

- ② 주위의 압력
- ③ 폭발성 물질의 조성
- ④ 폭발성 물질의 물리적 성질
- ⑤ 착화원의 성질 : 형태, 에너지, 지속시간
- ⑥ 주위의 기하학적 조건 : 개방 또는 밀폐
- ⑦ 가연성 물질의 양
- ⑧ 가연성 물질의 유동상태 : 난류
- ⑨ 착화지연시간
- ⑩ 가연성 물질이 방출되는 속도

**7. 폭발 보호방법**

**1) 봉쇄(Containment)**

봉쇄에 의한 폭발보호란, 폭발이 일어날 수 있는 장치나 건물이 폭발 시 발생하는 압력에 견디도록 충분히 강하게 만드는 것으로, 밀폐용기, 방폭벽(Blast Walls), 차단물(Barricades), 방폭큐비클을 설치하여 공정장치를 보호한다.

**2) 차단(Isolation)**

차단에 의한 폭발보호란, 폭발이 다른 곳으로 전파될 때 자동적으로 고속 차단할 수 있는 설비를 말하며, 매우 빨리 검지하는 설비와 밸브를 차단시키는 설비로 구성된다.

**3) 불꽃방지기(Flame Arrester)**

불꽃방지기는 불꽃이 인화성 가스나 증기-공기혼합물로의 전파를 예방하는 설비이다.

불꽃방지기에는 가스나 증기가 통과할 수 있는 좁은 틈을 가진 망이 설치되어 있으며, 이 망은 너무 좁아 불꽃은 통과시키지 않는다. 만약 불꽃이 불꽃방지기 내로 들어올 경우 작은 불꽃으로 세분화되어 곧 소화된다.

**4) 폭발억제(Explosion Suppression)**

폭발억제설비의 원리는 파괴적인 압력이 발달하기 전에 인화성분위기 내로 소화약제를 고속으로 분사하는 것이다.

자동폭발억제설비는 보통폭발개시 후 수 초 이내에 작동한다. 이런 설비는 폭넓게 사용되며 대표적으로 저장탱크, 석탄분쇄기, 사일로 및 화학반응기 등에 이용된다.

**5) 폭발배출(Explosion Venting)**

- ① 폭발을 적절하게 배출하기 위해서는 위험한 작업이나 장치는 옥외, 작은 별도의 건물 또는 건물 내의 내압력벽으로 구획된 부분에 위치시킨다.
- ② 폭발위험이 있는 장치는 최상층에 위치시키고 배출구

를 설치한다.

- ③ 건물이나 공장용기에서의 폭발배출은 보통 파열판넬(Blowout Panel)을 사용하며 벽체의 강도보다 약하게 한다.
- ④ 배출구 면적의 비율은 NFPA No.68이 이용된다.

**6) 안전거리(Safety Distance)**

폭발이 발생하더라도 중대 피해를 입지 않도록 안전거리 확보가 요구된다. 안전거리 평가는 발생하는 압력파의 강도, 복사열의 정도, 비산물의 도달거리 예측 등 공학적인 검토가 필요하다.

**8. 폭발대책으로서의 안전설계**

**1) 예방대책(Preventive System)**

- ① 가연조건의 성립 저지 : 연소범위 내의 혼합기 형성 저지 목적
- ② 발화의 저지 : 발화원 대책

**2) 긴급대책(Active Fire Protection System)**

- ① 이상의 발견 : ㉠ 압력센서 ㉡ 온도센서 ㉢ 농도센서
- ② 경보 : ㉣ 경보의 필요성 ㉤ 경보의 시기 ㉥ 경보방법 및 내용 ㉦ 경보의 효과

**③ 폭발저지**

- ㉧ 환기속도 증대로 가연성 혼합기 형성의 방지
- ㉨ 불활성기체 도입으로 공간 내 농도 조건 변화
- ㉩ 소화제 살포로 발화하더라도 화염 전파 방지
- ④ 피난 : 긴급대책 수립에 관계없는 사람은 안전한 곳으로 피난, panic 방지, 피난순서 및 경로 지정

**3) 방호대책(Passive Fire Protection System)**

사고발생 경우 피해를 줄이기 위해 설치하는 시스템이 방호시스템이다.

- ① 압력상승의 억제 : 방압시스템은 충분한 속도로 기체를 방출시킬 수 있어야 한다. 예로 버스팅디스크, 폭발물, 취약벽
- ② 화염 및 폭굉파의 확대 저지 : 폭굉중단형 폭굉억지기, 건식 역화방지, 소화제 살포장치

- ③ 내폭벽과 안전거리
  - ㉓ 폭발 발생 가능성 있는 설비 부근에 구조물이나 사람의 배치가 필요할 때 내폭벽 설치
  - ㉔ 폭발이 발생하더라도 중대 피해를 입지 않는 거리가 안전거리
- ④ 방화벽
- ⑤ 방화구획화
- ⑥ Fire Stopping

## 9. 폭발 제어방식의 기본 개념과 방호시스템

### 1) 폭발제어방식의 기본 개념

#### ① 위험한 환경의 제어(불활성화)

인화성 혼합물을 비가연성으로 만들 수 있는 환경으로 전환 등 불활성 기체를 투입하여 인화성 혼합물 형성의 방지 → 산소 농도를 MOC 이하로 낮춘다.

대부분 인화성 가스의 MOC는 10%, 분진은 8% 정도, 이상 사태를 고려하여 불활성화에 필요한 산소 농도는 MOC 보다 4% 이상 낮게 유지해야 함.

#### ② 발화원의 제거

모든 발화원의 제거는 어려우나 정전기는 반드시 제거해야 한다.

#### ③ 방폭기기화

폭발이 발생할 수 있는 곳에 불꽃이나 폭발에 견디거나 발생시키지 않는 전기장치 설치 → 본질안전방폭구조 등

### 2) 폭발방호대책의 진행방법

Fail Safe를 기본으로 복잡하지 않은 연구법 채용

- ① 가연성가스·증기의 위험성 검토
- ② 폭발 방호대상의 결정
- ③ 폭발의 위력과 피해정도의 예측
- ④ 폭발화염의 전파 확대와 압력 상승의 방지(피해의 국한화)
- ⑤ 폭발에 의한 피해의 확대방지(주변 환경에 대한 방호)

## 10. 맷음말

**대형 폭발사고의 예방을 위한 계획·설계·시공·유지·운영·평가·진단·조사·조치 등 문제를 수행하고 해결함에 있어 반드시 기술사가 법규에 의거 참여되어야 할 것이다.**

상기에서와 같이 폭발의 정의에서부터 폭발의 원인, 폭발의 성립조건, 폭발의 종류와 형식, 폭발의 거동에 영향을 주는 변수, 폭발 보호방법, 폭발대책으로서의 안전설계, 폭발 제어방식의 기본개념과 방호시스템에 대하여 살펴 보았다.

그런데, 안전(safety)은 선진국에서와 같이 손실방지(loss prevention)라는 개념에서 출발하여 원가에 포함하여야 하는 패러다임의 전환이 필요하다. 즉, 안전(safety) 대신에 손실방지(loss prevention)라는 단어로 대체하여야 한다.

그리고, 국민 대다수가 사용하는 공공시설물에 대하여는 단순히 설계·시공·유지·운영에서 나아가 좀 더 체계적이고도 시스템적으로 접근하여 위험성평가(Hazard Evaluation) 혹은 진단(Diagnosis) 그리고 비상조치(Emergency Response, Emergency Preparedness)를 포함하는 시스템 적용을 제안하는 바이다.

예를 들면, 고속철의 전기스파크로 인하여 주변의 충전소나 탱크로리 등에게 영향을 끼칠 수 있는 화재·폭발위험성에 대하여도 위험성평가(Hazard Evaluation)를 수행하여야 할 것이다. 이 경우에 위험성평가(Hazard Evaluation) 혹은 진단(Diagnosis)은 사업주가 아닌 반드시 제3자(The 3rd Party)에 의해 수행되어야 함을 의미한다.

또 하나의 중요한 제언은 미국방화협회(NFPA: National Fire Protection Association)의 Life Safety Code 101과 같이 우리도 인명안전코드를 제정하고 이를 적용하여야 할 것이다. 무엇보다도 우리의 인명이 가장 귀중하므로!

또한, 대형 폭발사고의 예방을 위한 계획·설계·시공·유지·운영·평가·진단·조사·조치 등 이러한 문제를 수행하고 해결함에 있어 반드시 기술사가 법규에 의거 참여되어야 할 것이다. 특히 미국의 화재폭발조사관(CFEI, Certified Fire & Explosion Investigator)과 같이 전문직 기술사에 의거하여 대형 화재·폭발 조사가 수행되고 법정 참여까지 이루어져야 한다.

마지막으로 인명재해를 감소시키기 위해서는 손실방지(loss prevention)라는 패러다임의 전환과 아울러 철저하게 절차와 규정을 준수하여야 하며 이는 가정에서부터 출발함을 환기하고자 한다.

(원고 접수일 2004. 5. 15)