

폭발특성 및 피해조사

폭발은 가압된 상태가 대기상태와 평형을 이루는 순간으로서 화학적 또는 기계적인 잠재 에너지가 가스를 생성·방출하면서 운동에너지로 급격히 전환하는 것으로, 이 고압가스는 주변의 물질을 이동, 변경, 파괴하는 등의 기계적 작용을 한다.

폭발효과와 손상특징을 제어하는 요인에는 연료의 종류, 양, 용기나 구조물의 크기와 형태, 용기나 구조물의 재질과 강도, 환기 상태 등이 있다.

1. 폭발범위

가연성가스나 증기가 폭발하거나 연소할 때는 공기와 적당한 비율로 혼합되어야 한다. 즉, 혼합기의 조성이 일정한 범위 내에 있어야 폭발이 일어날 수 있고, 이 한계범위를 폭발범위라 한다. 그리고 가연성 가스나 증기농도의 비율이 가장 낮은 한계를 폭발하한계(LEL), 가장 높은 한계를 폭발상한계(UEL)라고 한다.

[그림 1]은 폭발한계와 온도의 관계를 모형적으로 나타낸 것으로 일반적으로 상한계 쪽이 온도상승에 따른 확대가 크다. 어느 정도의 고온에 달하면 자연발화하며 온도가 낮으면 응축이 시작되고 미립자(안개와 유사한)로 되어 한계의 개념이 확실치 않다. 이것은 미립자의 입도와 공간의 분포가 균일하지 못하여 온도측정이 곤란하기 때문이다.

여러 종류의 가연성가스가 혼합되어 있을 때 폭발한계를 계산하기 위해서는 르샤트리에의 법칙을 이용할 수 있는데 서로 유사한 성질의 가스 혼합물인 경우에는 잘 맞으나 H₂와 H₂S, CH₄와 H₂S 등은 실측값과 차이가 크다.

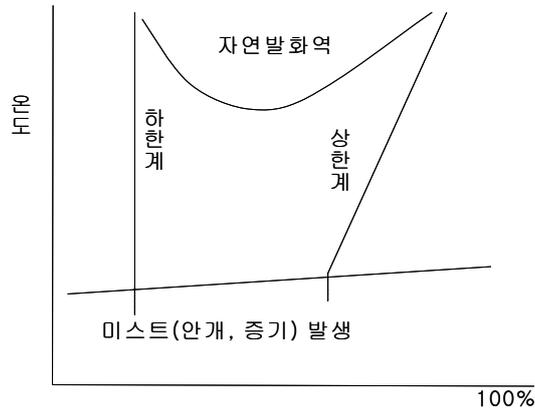
르샤트리에의 식은,

$$L = 100 / (n_1/L_1 + n_2/L_2 + n_3/L_3 + \dots)$$

L ; 혼합가스의 폭발하한계 (용적%)

L_i ; i번째의 성분의 폭발한계 (용적%)

n_i ; i번째의 성분의 농도 (용적%)로서 n₁+n₂+n₃+... = 100



[그림 1] 폭발한계에 대한 온도와 조성 관계

2. 폭발효과

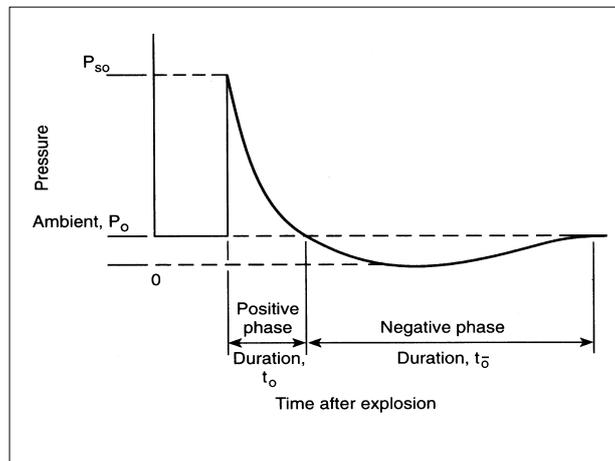
폭발의 형태에는 기계적 폭발, 화학적 폭발, 전기폭발, 핵폭발이 있으며, 폭발효과에는 폭발압력파효과, 파편효과, 열효과 및 지진효과가 있다.

2.1 폭발압력파 효과

물질이 폭발하면 다량의 가스를 생성하고, 이들 가스는 높은 속도로 팽창하여 폭발의 발생지점으로부터 바깥쪽으로 움직인다. 가스에 의해 움직인 공기는 주로 폭발과 관련 있는 손상 및 부상을 일으키는 압력파를 생성하고, 폭발압력파는 폭발의 발생지점에서 힘의 방향에 따른 양압단계와 부압단계의 두 가지 국면에서 일어난다.

1) 양압단계(Positive Phase)

팽창가스가 사고 발생장소로부터 멀리 움직이는 폭발 압력과 부분이며, 보통 부압단계보다 더 강력하고 압력손상의 대부분을 차지하고 있다. 부압단계는 확산단계(가스/증기) 폭발의 후기 폭발조사나 증거로 감지할 수 없을 수도 있다.(그림 2참조)



[그림 2] 시간에 대한 폭발압력 변화

2) 부압단계(Negative Phase)

양압단계의 급속한 팽창이 폭발 발생지점으로부터 바깥으로 움직일 때 주변을 에워싼 공기를 밀어내고, 압축·가열한다. 주위압력에 비해 상대적으로 낮은 공기 압력상태가 발생지점 중심부에 생기며, 양압단계가 사라질 때 생성된 부압단계인 낮은 공기 압력조건을 평형상태로 만들기 위해 공기는 발생지점으로 역류한다.

부압단계는 2차적인 손상을 일으킬 수 있고, 발생지역 쪽으로 물증을 이동시켜 발생지역을 숨길 수 있다. 부압단계는 보통 현저하게 적은 힘이지만 양압단계에 의해 이미 약해진 구조물을 무너지게 할 수 있다.

2.2 비산효과

비산물은 폭발 발생지로부터 먼 곳까지 큰 손상이나 부상자를 발생시킬 수 있으며, 전력선, 연료가스나 기타의 인화성 연료배관 또는 저장 컨테이너를 파괴할 수도 있다. 또한, 이로 인해 폭발 후 화재 규모나 심도가 증가할 것이며, 추가 폭발을 일으킨다. 폭발 시 바깥쪽으로 날아가는 거리는 비산물의 최초 방향에 크게 의존한다.

2.3 열효과

연소폭발은 연소 가스와 주변의 공기를 가열하는 많은 양의 열을 방출하며, 이 에너지는 근처의 가연물을 착화하거나 사람에게 화상을 입힐 수 있다.

폭발 후 발생하는 화재는 재산피해나 인명피해를 증가시키며, 조사과정을 복잡하게 만들고, 종종 폭발 또는 화재 중 어떤 것이 먼저 발생했는지를 판정하는데 혼란을 주게 된다.

폭발, 특히 가연성 증기에 의한 BLEVE의 열효과로는 화구(fireball)와 파이어 브랜드(firebrand)가 있다. 폭발시 또는 폭발 후 순간적으로 존재하는 화염 덩어리인 화구는 단기간 복사열을 방사하게 되며, 파이어 브랜드는 폭발시 고온 또는 연소 중인 파편을 비산하게 된다. 이러한 모든 효과는 폭발중심에서 멀리 떨어진 곳에 화재를 발생시킬 수 있다.

2.4 지진효과

폭발압력파가 팽창되고 큰 구조물의 손상된 부분이 땅에 떨어질 때 현저한 국부적인 지진이나 진동이 대지를 통해 전달될 수 있으며, 이 지진효과는 소규모 폭발의 경우 일반적으로 미미한 수준이지만, 구조물과 지하에 매설된 지원시설, 파이프라인, 탱크 또는 케이블에 추가적인 손상을 일으킬 수 있다.

3. 사고조사

3.1 현장보존

조사자의 첫 번째 임무는 폭발현장을 보존하는 것이다. 폭발원인조사를 처음으로 수행하

는 자는 그 구조물과 주변 지역에 대한 물리적 통제구역을 설정하고 유지해야만 한다. 폭발에 있어서의 결정적인 증거는 아주 사소한 것일 수도 있으며, 또한 지나가는 사람에 의해 뒤섞이거나 옮겨질 수도 있고, 인명 손상 방지를 위해 현장출입을 제한하고 현장으로부터 멀리 떨어져 있는 폭발파편을 만지지 못하도록 해야 한다.

1) 현장설정

중요한 폭발 파편조각이 아주 멀리 날아가거나 또는 근처의 건물이나 자동차 안으로 날아갈 수도 있기 때문에 사고현장의 외곽경계선은 가장 멀리서 발견된 파편조각 거리의 1.5배 정도로 설정해야 한다.

2) 배경자료 수집

조사를 시작하기 전에 사고관련 자료를 모두 수집한다. 사고현장과 설비나 관련 작업 설명, 사고를 유발한 작업 및 조건이 이에 속한다. 가연물과 산화제가 있었던 위치와 사고를 설명할 수 있는 어떤 특정 위험조건이 존재했는지를 확인할 필요가 있다.

증인의 진술, 정비기록, 운전일지, 매뉴얼, 날씨기록, 과거 사고기록 및 증거가 될 만한 기타 관련기록을 조사한다. 장치, 절차 및 운전 조건의 최근의 변경사항이 특히 중요할 수 있다. 건물이나 공정도면(PFD, P&ID)을 입수하면 현장의 문서화를 크게 개선시킬 수 있다.

3) 현장조사유형 결정

조사자는 우선 현장조사유형(나선형, 원형, 격자형)을 결정해야 한다. 현장은 외곽경계선으로부터 가장 큰 충격을 입은 지역에 이르기까지 조사되어야 하고, 폭발 중심지의 위치에 대한 최종결정은 현장의 모든 사항이 조사된 후에 이루어져야 한다.

실제 조사담당 인원은 현장의 크기, 피해 규모 및 사고의 복잡성에 좌우되지만, 조사책임자는 조사자의 수가 너무 많으면 역효과가 나타날 수 있다는 것을 명심해야 한다.

조사자는 적절한 절차에 따라 증거식별, 기록, 사진촬영, 위치표시 및 도표작성을 수행하고 증거의 위치는 분필, 스프레이 페인트, 깃발, 말뚝 등으로 표시한 후 사진을 찍고 꼬리표를 부착하여 안전한 장소로 옮긴다.

4) 폭발현장의 안전

폭발사고로부터 피해를 입은 구조물은 흔히 단순하게 불타버린 건물보다 구조적으로 훨씬 더 충격을 받게 된다. 복도, 벽, 천장, 지붕 또는 전체 건물의 붕괴 가능성이 훨씬 크므로 항상 고려되어야 한다. 연료가스나 분진폭발의 경우, 2차 폭발은 항상 있을 것으로 가정하고, 초기의 출동자는 그 가능성에 대하여 계속해서 경계할 필요가 있다. 누출되는 가스나 가연성 액체는 조사가 시작되기 전에 안전조치를 취할 필요가 있다.

3.2 최초 현장평가

일단 폭발현장이 설정되면, 조사자는 사고유형에 대한 최초의 평가를 실시해야 한다. 조사 중 언제라도 폭발물이나 폭발장치에 의해 폭발이 발생했다는 것이 확인되면 현장조사를 중

단하고 관할기관에 연락해야 한다. 폭발을 일으키는 물질에는 가연성 가스, 분진, 화약류를 비롯하여 화학물질이 있으며, 가연물이 존재하면 반응속도가 급격히 빨라지게 된다.

[표 1] 물성 및 종류에 따른 폭발특성

특성	공기보다 가벼움	공기보다 무거움	액체 증기	분진	폭발물	BLEVE
낮은 등급 손상	3	4	4	2	2	2
높은 등급 손상	2	1	1	2	3	2
2차 폭발	3	3	2	4	0	0
가스/증기/분진	3	2	2	2	0	2
포켓						0
폭연(a)	4	4	4	4	1	4(b)
폭굉	1	1	1	1	4	1(b)
지하 이동	2	2	2	0	0	0
BLEVE(f)	2	3	5	0	0	5
폭발 후 화재	3	3	4	3	1	3
폭발 전 화재	2	2	2	3	2	4
분화구 폭발	0(c)	0(c)	0(c)	0	4(d)	2
최소점화에너지 (mJ) (e)	0.17~0.25	0.17~0.25	0.25	10~40	(e)	(f)

0: never, 1: seldom, 2: Sometimes 3: Often 4: Nearly always, 5: Always

- a 폭연은 특정 조건하에서 폭굉으로 전이될 수 있다.
- b 밀폐된 용기가 파열되는 경우 압력파가 초음속까지 허용될 수 있다.
- c 가스 및 증기가 소형 용기 안에 갇혀 있다면, 폭발 분화구를 발생할 수 있고, 폭발 시 충분히 압축 또는 파괴시킬 수 있다.
- d 모든 고성능 폭발물 및 일부 저성능 폭발물이 폭발 시 재료는 충분히 압축 또는 파괴시킬 수 있는 경우, 분화구 형성 폭발을 발생할 것이다.
- e 발화에너지는 매우 다양하다. 최신의 고성능 폭발물은 발화에 민감하지 않도록 설계되어 있다. 폭굉 에너지는 최소 발화에너지보다 9배 이상 크다.
- f BLEVE는 연소 폭발이 아니며, 발화를 필요로 하지 않는다.

연료에 따른 폭발특성을 비교하여 [표 1]에 나타내었으며, 이러한 자료는 최초 조사 평가를 통해 어떤 종류의 폭발이나 연료를 포함시키거나 배제하는데 도움을 줄 수 있다.

1) 폭발 또는 화재 식별

최초평가의 첫 번째 업무는 사고가 화재, 폭발 또는 양자 모두 인지를 결정하고 또 어

편 것이 먼저 일어났는지를 결정하는 것이다. 조사자는 벽, 복도, 천장, 문과 창문, 지붕 기타 구조부재, 못, 나사, 설비배관, 패널 및 상자 등의 위치 이동과 부풀음을 포함하여 구조물 내에 존재하는 과압상태에 관한 증거를 찾아내야 한다. 집중된 붕괴와 압력손상은 응축단계폭발임을 보여준다. 조사자는 구조물과 그 구성요소에 대해 열에 의한 충격의 특성과 정도를 찾아내어 평가해야 하며, 또한 그것이 단지 화재 하나에만 기인하는 것인지를 판정해야 한다.

2) 높은 등급 또는 낮은 등급손상

조사자는 손상의 특성이 높은 등급손상을 나타내는지 아니면 낮은 등급손상을 지적하는지를 결정하여야 하며, 이것은 관련된 연료의 혼합물, 종류 및 양을 분류하는데 도움이 될 것이다.

3) 분화구 형성 또는 미 형성 폭발

조사자는 분화구가 형성되었는지 아닌지를 결정해야 하며, 이와 관련된 예상 연료의 종류를 분류하는 데 도움을 줄 것이다.

4) 폭발종류 식별

조사자는 관련된 폭발의 종류(기계적 폭발, 연소폭발, 화학반응, BLEVE, VCE 등)를 식별해야 한다.

5) 일반 연료종류의 식별

조사자는 설비 시설, 특히 연료가스, 가연성 분진 원료 또는 액체 등의 위치와 상태를 확인함으로써 어떤 종류의 연료가 폭발현장에서 이용되었는가를 식별해야 하고, 공기보다 가볍거나 무거운 가스, 액체 증기, 분진, 폭발물, 백드래프트, BLEVE 등의 전형적인 손상유형과 대조하여 손상특성을 분석해야 한다.

6) 폭발지점 결정

폭발지점은 가장 손상이 큰 지점으로 확인하며, 때로는 분화구 폭발의 경우 분화구나 기타 심한 손상이 집중된 지역을 포함할 수도 있다. 연료-공기의 혼합기폭발의 경우 폭발지점은 밀폐공간이나 실내일수도 있다.

7) 연료원 및 폭발종류 결정

조사자는 지원설비의 사용 특히 연료가스, 공정 부산물인 분진 또는 발화성 액체의 위치와 상태를 확인하여 어떤 종류의 연료가 폭발에 이용되었는지를 확인한다.

8) 발화원 결정

조사자가 발화원을 확인하기란 매우 어렵다. 연료-공기 혼합기가 관련된 경우 고온표면, 전기아크, 정전기, 나화, 스파크, 화학물질 등과 같은 잠재적 원인에 대한 조사를 실시한다. 폭발물이 사용된 경우 발화원은 폭발버관이나 다른 꽃불장치일 수 있다. 때로는 전선과 장치부품이 잔존하게 된다.

3.3 정밀 현장평가

최초의 현장평가로부터 일반 정보를 확보한 조사자는 폭발손상과 잔해에 관한 보다 상세한 연구를 해야 하고, 모든 화재사고조사에서와 같이 조사자는 자신이 조사 및 발견한 자료를 정확히 기록, 사진촬영, 도표와 지도를 작성해야 한다.

1) 폭발로 인한 피해형태 식별

조사자는 특정 폭발이나 과압손상에 관해서 상세한 조사와 분석을 실시해야하고, 손상을 입은 품목은 폭발압력파(양압/부압단계), 비산물 충격, 열, 지진효과 중의 하나 또는 그 이상에 의해서 영향 받은 것인지를 식별해야 한다.

조사자는 산산 조각난 것인가, 굽혀진 것인가, 부러진 것인가 또는 평평한 것인가에 따라 손상의 종류를 검사하고 분류해야 하며, 또한 그 형상의 변화를 찾아야 한다. 폭굉 중심지로부터 멀리 떨어져 있으면 압력상승은 상당히 완화되고 그 영향도 폭연의 영향과 유사하지만, 반면에 폭굉 중심지에 가까이 있는 물질은 균열과 파괴(현상)를 나타낸다.

조사자는 특정한 폭발이나 과압손상을 면밀히 조사·분석해야 하고, 손상된 부품은 폭발압력파, 비산물, 열 및 지면 충격 등 하나 이상의 폭발손상효과의 영향을 받았는지 확인해야 한다.

폭발로부터 구조적 손상을 평가하는 것은 매우 복잡하다는 것에 주목해야 하며, 밀폐구조의 강도뿐만 아니라 최대압력과 폭발충격에 관한 충분한 조치가 필요하다. 일반적으로 비강화목재 패널, 주름진 스틸 패널 또는 조적 벽과 같은 가벼운 구조재를 파괴시키려면 $0.07\sim 0.14\text{kg/cm}^2(1\sim 2\text{psi})$ 의 최대 과압이 필요하다는 것을 알 수 있다. 이와 비교하여 특히 탄성이 높은 스틸 등은 구조 설계를 강화한 경우 훨씬 높은 과압에 견딜 수 있다.

2) 폭발 전·후의 화재손상 식별

화재나 열 손상은 이미 발생한 화재나 폭발의 열효과에 기인한 것으로 파악하여야 하며, 중심지로부터 멀리 날아간 파편은 그것이 불에 탄 것인지 여부를 결정할 수 있도록 조사해야 한다. 불에 탄 특성이 있는 파편은 화재가 폭발보다 선행했다는 것을 나타낸다.

과압조건의 가장 일반적인 증거는 구조물의 창문으로부터 어느 정도의 거리를 날아가 떨어진 창유리일 것이다. 창유리나 기타 구조물 파편 조각에 남아 있는 스모크나 검댕의 잔류물은 폭발이 약간의 시간을 두고 화재에 뒤따랐다는 것을 보여주는 반면, 구조물로부터 멀리 날아가 떨어진 깨끗한 유리나 파편 조각은 화재에 앞선 폭발을 나타내 준다. 녹았다가 재 응고된 파편의 흐름방향은 조사자에게 열에 노출되었을 당시 그 파편의 위치와 상태를 말해준다.

3) 증거물의 위치 파악 및 식별

조사자는 다양한 증거물의 위치를 파악 및 식별하고, 주석을 달고, 등록하고, 사진 찍고, 꼬리표를 부착해야 한다.

폭발의 추진 특성 때문에 조사자는 중요한 증거 조각이 폭발된 건축물의 외부, 폭발된 구조물의 벽이나 다른 구조부재 사이, 근처에 있는 식물 위 또는 속, 부근의 구조물이나 차량의 내부나 이러한 인접 구조물의 틈새 등 광범위하게 다양한 지역에서 발견될 수도 있음을 고려해야 한다.

폭발물 사고나 탱크, 장치, 설비의 폭발과 관련된 사고의 경우에 있어서 중요한 파편 증거 조각은 희생자의 신체를 뚫고 들어가거나 그의 의복 속에 들어 있을 수도 있다.

폭발에서 부상당한 모든 사람의 의복은 검사와 분석을 위해서 확보되어야 하며, 조사자는 부상자에 대해 사진을 찍고 치료와 수술을 하는 동안에 희생자의 몸에서 꺼낸 물질이 보존되도록 해야 한다.

조사자는 손상을 받거나 이동된 벽, 천장, 복도, 지붕, 기초, 기둥, 문, 창문, 인도, 차도, 집안 뜰 등의 구조부재의 상태와 위치에 관해서 기록해야 한다.

또한, 손상을 받거나 이동된 가구, 시설, 난방 및 주방 설비, 제조설비, 희생자의 의복과 개인 소지품 등의 건물 수용물의 상태와 위치에 관해서 기록해야 한다.

조사자는 손상을 받거나 이동된 연료가스 계량기와 정압기, 연료가스 배관과 탱크, 전기함/계량기, 전선관 및 전선, 연료탱크, 폭발장치의 부품 또는 연료용기 등의 지원설비의 상태와 위치에 관해서 기록해야 한다.

4) 힘 벡터 식별

벽을 파괴하는데 필요한 힘은 단순히 그것을 옮기거나 이동시키는데 필요한 힘보다 훨씬 크다는 것을 고려한다.

창유리와 유사한 파편의 다양한 비산방향과 거리를 기록하고 도표로 작성 및 사진을 찍어 둔다. 크고 더 많은 비산물은 그것을 비산시키는데 필요한 힘을 비교하기 위해 측정 및 평가한다. 중요한 모든 조각의 위치는 다양한 비산물의 궤도를 재구성할 수 있도록 해주기 때문에 폭발현장 도표 상에 거리와 방향에 대한 주석과 함께 기록해야 한다.

4. 결론

폭발로 인한 피해는 화재와 달리 과압에 의한 피해가 있으나 그 조사과정은 폭발 발생 지점을 확인하고 연료원과 발화원을 조사하여 상호 연관성을 분석하는 것이 기초가 되고 있다는 점에서 화재사고와 유사하다.

한편, 폭발사고가 나타나기 전에 화재가 나타나는 경우와 폭발 후 화재가 발생하는 경우와 같이 폭발과 화재는 상호 연결되어 나타나는 경우가 많으며, 순간적으로 화염이 확산되기 때문에 피해가 커지는 특성이 있다. 그러나 물질의 특성, 점화에너지원과 같은 발생원 및 환기, 위험물질의 보관과 같은 적정한 관리가 이루어지면 충분히 예방할 수 있게 된다. 

작성 : 고객센터팀 차장 김인태