

폭발의 종류와 방폭구조물 설계 기준

Types of Explosions and Design Codes for Blast-resistant Structures



이 수 현*
Ree, Suhyun



김 상 희**
Kim, Sanghee



강 현 구***
Kang, Thomas H.-K.

1. 서론

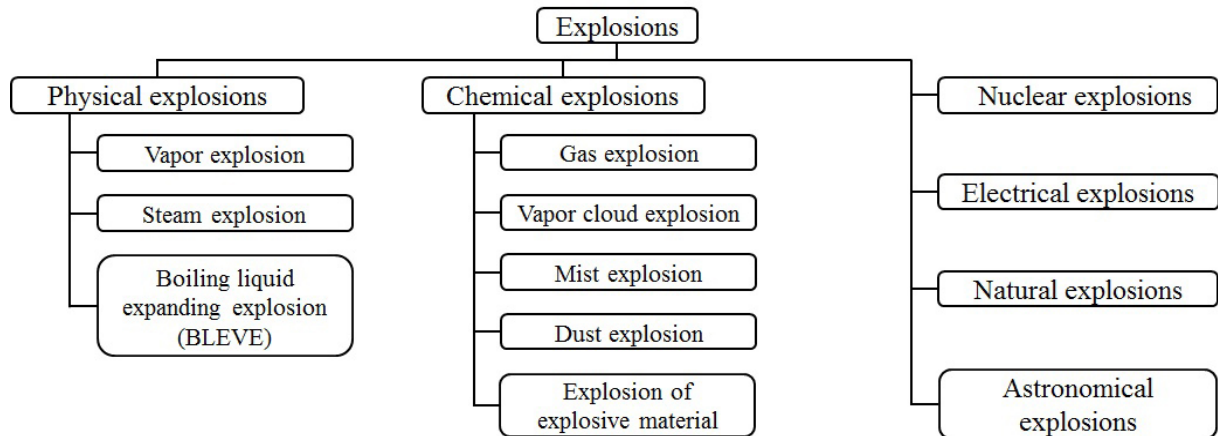
최근 7월에 안타까운 폭발사고가 발생하여 6명의 희생자가 발생하였다(Fig. 1). 최근 2013년도 조사에 따르면 대한민국에서 화재·폭발·파열 사고로 47명의 사망자가 발생하였다. 이보다 앞선 과거에도 굵직한 사고가 있었는데, 대표적으로 아현동 도시가스 폭발, 익산역 폭발사고, 대구 지하철공사장 가스폭발사고 등이 있었다. 이러한 사고를 살펴보면 폭발사고는 일상에서 빈번하게 발생하고 있다는 사실을 알 수 있다. 예전에는 폭발과 충격에 의한 재난 사건·사고는 테러나 전쟁에서 발생한다고 생각하였다. 하지만 산업집약·중심으로 발전한 대한민국에서 폭발사고는 전쟁과 테러보다는 주위에서 발생하는 부주의 및 안전관리 부실에 의한 경우가 보다 많아지고 있다.

인구밀집도가 높아지면서 작은 폭발사고에도 많은 인명피해가 발생한다. 앞으로 폭발사건 및 사고에 의한 물적피해와 인명피해를 최소화하기 위하여 폭발로부터 안전한 구조설계가 필요한 시점이다. 본 기사에서는 폭발의 종류에 대해 알아보고, 각 폭발에 대한 특징 및 참고 기준에 대하여 소개하고자 한다. 뿐만 아니라 폭발 발생 시 인명 및 재산 보호를 위한 방폭구조물 설계와 관련된 기준도 살펴보고자 한다.



〈Fig. 1〉 Scene of explosion accident (2015. 7)

* 서울대학교 건축학과, 석사과정
** 서울대학교 건축학과, 박사과정
*** 정회원-서울대학교 건축학과, 교수



〈Fig. 2〉 Classification of explosions in accordance with explosion cause

2. 폭발의 정의 및 분류

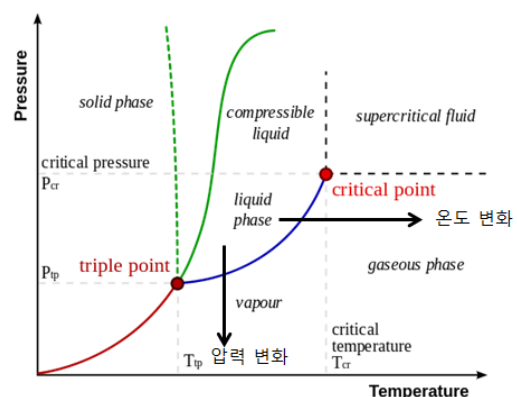
폭발에 대한 정확한 정의는 분야에 따라 다르지만 일반적으로 다양한 원인으로 인하여 갑작스럽게 압력이 증가하여 주변 기체 부피가 증가하는 현상을 이른다. 반응 전파속도가 빠르고 대부분 빛과 열을 수반한다. 압력이 급격하게 증가하기 때문에 폭발음이 발생하고 기체가 팽창하거나 파열한다. 폭발은 1) 폭발 원인 물질의 물리적 상태, 2) 폭발 물질, 3) 폭발 원인, 4) 폭발 프로세스 등에 따라 나눌 수 있다. 〈Fig. 2〉에서처럼 폭발을 원인에 따라 구분하면 크게 물리적 폭발(physical explosion)과 화학적 폭발(chemical explosion)로 구분한다. 추가적으로 핵폭발(nuclear explosion)과 전기 폭발(electrical explosion)도 분류체계에 포함한다. 이 외에도 화산 폭발과 같은 자연에서 발생하는 폭발(natural explosion)이나 초신성 폭발과 같이 우주에서 발생하는 폭발(astronomical explosion)도 있지만 이들은 방폭설계에서 고려하지는 않으므로 본 기사에서는 따로 다루지 않도록 한다.

2.1 물리적 폭발

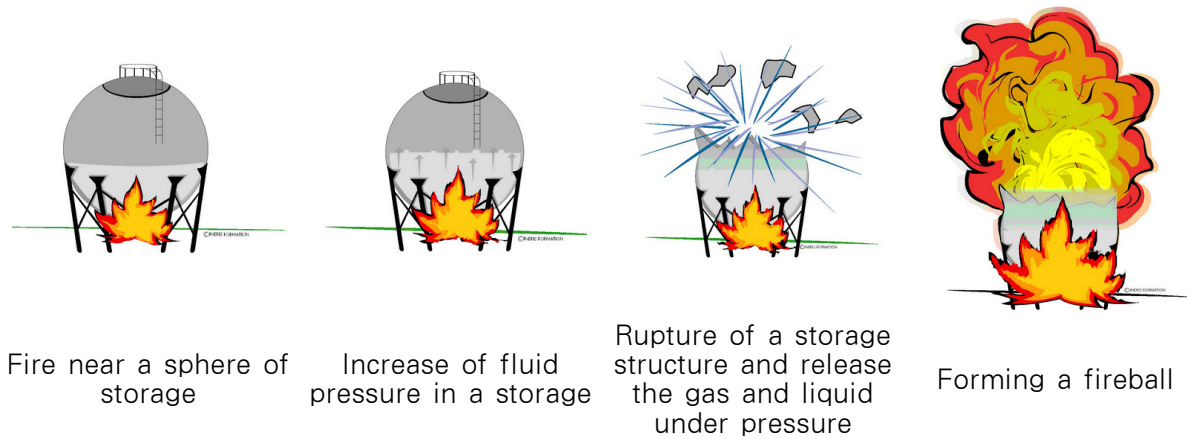
물리적 폭발은 원소간 화학적 반응 없이 물리적 반응으로 인해 발생하는 폭발이다. 물리적 폭발은 증기 폭발(vapor explosion 혹은 rapid phase

transition), 수증기 폭발(steam explosion), 비등 액체 팽창증기폭발(BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)로 분류된다.

증기 폭발이란 액체를 급속하게 가열하거나 주변 압력이 감소하는 경우 액체 내부에서 기포가 생성되며 증발하는 비등현상에 의해 발생하는 폭발이다 〈Fig. 3〉. 증기 폭발이라는 용어가 정확한 의미를 충분히 전달하지 못하기 때문에 미국에서는 RPT (Rapid Phase Transition, 급속 상변화)라고 표기하는 경우도 있다. 비등현상에 의해 액체가 급격히 기화하면 기체 부피가 증가하게 되는데, 이로 인해 압력이 증가하여 폭발이 발생한다. 폭발 과정 중에 착화가 별도로 필요하지 않으므로 화염 발생은 없으나 가연성 가스가 기화한 경우 가스폭발이 발생할 수도 있다.



〈Fig. 3〉 Cause of boiling



〈Fig. 4〉 Process of BLEVE¹⁾

수증기 폭발은 물에 의하여 증기 폭발이 발생하는 경우로 고온물질이 물속에 투입되거나(열이동형 증기폭발) 대기압보다 높은 압력에서 과열된 물이 순간적으로 대기압으로 방출되어 평형상태가 파괴되는 경우(평형파괴형 증기폭발) 발생한다. 평형파괴형 증기폭발은 보일러 관체가 파손되는 경우 발생하기도 한다.

비등액체 팽창증기폭발(BLEVE)이란 고압 액화가스를 담고 있는 가스용기가 파괴된 경우 용기 내 액체가 급격히 기화하면서 발생하는 물리적 폭발이다. 화구나 가스 폭발 등 화학적 폭발로 이어지는 경우가 많다. 비등액체 팽창 증기 폭발이나 평형파괴형 증기 폭발과 같은 물리적 폭발로 인하여 액화가스 저장탱크가 과열되면 내부 가열된 액화가스가 급속히 유출되면서 화구(fireball)를 형성한다〈Fig. 4〉. 압력파, 화구, 용기 파손, 내부 액체 인화 등의 원인이 된다.

2.2 화학적 폭발

화학적 폭발은 화학적 반응에 의해 폭발이 발생하는 경우로 가스 폭발(gas explosion), 증기운 폭발(vapor cloud explosion or unconfined vapor cloud explosion), 분무 폭발(mist explosion), 분진 폭발(dust explosion), 불안전 물질 폭발(explosion of explosive material)이 여기에 속한다.

가스폭발이란, 기체가 빠르게 반응할 때 반응열에 의하여 주변 기체가 팽창하면서 발생시킨 열과 압력으로 인하여 발생한 폭발 현상이다. 도시나 화학공장에서 가장 많이 발생하는 폭발재해 중 하나로 주로 가연성 가스와 지연성 가스 혼합기체에서 발생한다〈Fig. 5〉. 가스 폭발이 주변에 미치는 영향은 주변 환경 개폐 정도(confinement), 장애물 밀도(obstacle density)와 같은 지리적 조건뿐만 아니라 환기 정도(ventilation), 발화 시간(ignition), 연료 반응성(fuel reactivity), 주변 온도(temperature) 등 다양한 요인에 따라 정도가 달라지므로 가스 폭발 영향 평가 시 다양한 조건에 대한 고려가 필요하다.



〈Fig. 5〉 Gas explosion accident in Ahyeon-dong (1994)

증기운 폭발(VCE or UVCE)은 가스 폭발의 일종으로 지표면에 유출된 가연성 가스나 기화하기 쉬

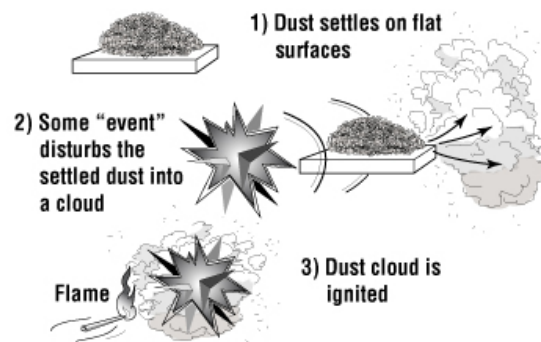
운 가연성 액체가 분산과 확산을 통해 증기운을 형성하고, 그 증기운이 점화하여 발생하는 폭발이다. 증기운 크기에 따라 피해 정도가 달라지며, 화학공정에서 가장 위험하고 파괴적인 폭발이다. 주변에 장애물(obstacle)이 존재하는 경우, 장애물 주변에 난류(turbulence)가 발생한다. 이로 인해 연소 비율, 그리고 난류와 유속이 증가한다. 이러한 증폭피드백(positive feedback)이 진행되면서 폭발에 의한 피해 역시 증가한다. 난류 외에도 증기운 농도에 따라 화염속도(flame velocity)가 달라진다.

분무 폭발은 가연성 액체가 공기중에 누출되어 가스-공기와의 부유 상태 혼합물을 형성하여 발생하는 폭발이다. 분무(mist)는 일반적인 인화점보다 낮은 온도에서 폭발 가능하며, 고압의 유압설비가 일부 파손되어 분출하는 경우 발생한다. 분무 폭발에 대한 연구가 제한적이고 발생 메커니즘 역시 정확히 규명되지 않았다. 유사 현상으로는 박막 폭굉(film detonation)이 있다.

분진 폭발은 공기 중에 잘 혼합되어 있는 분진이 에너지를 받아 분해되면서 발생한 열과 압력이 분진을 전체로 전이되어 갑자기 연소·폭발하는 현상이다²⁾ (Fig. 6). 분진 폭발은 과거 탄광에서 주로 발생하였으나, 최근 곡물과 연료 저장설비나 금속공장, 식료품 공장, 제약 공장 등 여러 분야에서도 발생한다. 분진 폭발 요소에는 가연물(fuel), 발화(ignition), 개폐정도(confinement), 분산(dispersion), 산소(oxygen)가 있으며, 이를 통틀어 분진 폭발 오각형(dust explosion pentagon)이라고 부른다. 가스폭발에 비해 연소속도나 폭발압력이 작으나 연소시간이 길고 발생에너지가 크기 때문에 파괴력과 연소정도가 크다. 분진 폭발 발생 시 분출가스로 인해 분진이 여러 방향으로 비산하면서 다른 화염전파기구를 형성하는데, 이런 경우 2차, 3차 분진폭발이 발생하기 때문에 폭발 피해가 증가한다.

불안정 물질 폭발이란 불안정한 물질이 자체 분해 반응열이나 외부에서 가해지는 미소 충격이나

가열에 의하여 물질 자체가 발열, 분해되어 폭발하는 현상이다. 분자 내에 탄소(혹은 질소) 이중결합 및 삼중결합, 산소결합, 탄소-질소 결합 등 분해에 에너지가 큰 결합을 포함하고 있다. 고체 자기반응성 물질(solid explosives)이 폭발하는 것을 고체 폭발이라 한다. 고체폭발은 기체상태 혼합물보다 분자간 거리가 가까워서 물질의 단위 체적당 발열량이 크다. 발열속도가 매우 빨라 가스폭발에 비해 폭발위력이 대단히 크다.



(Fig. 6) Process of dust explosion³⁾

3. 국내외 방폭구조물 설계 기준

3.1 국내 방폭구조물 설계 관련 기준

아직 국내에는 군사적 목적을 제외하고는 방폭구조물 설계 및 방호 성능 검증과 관련 기준은 전무한 상황이다. 국방부에서 제공하는 국방·군사 시설기준, 방호구조물 설계기준, 화생방 방호시설 설계·지침이 유일한 참고 기준이다⁴⁾. ‘국방부 제정 방호구조물 설계기준은 미 국방부 설계 기준인 ‘Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons (TM-5-855-1)’ 내용을 기반으로 작성된 기준으로 비핵무기에 의한 폭풍효과, 설계하중 산정, 구조해석 방법 및 동적응답 산정 방법 등에 대하여 비교적 자세히 규정하고 있다⁵⁾. 한편 ‘산업안전 기준법 제 27조’에서는 화학공장 위험요인 및 주 제어동(main control building) 위치 등에 대해 규정하고 있으나 민간 분야에 사용되는 시설을 위한

〈Table 1〉 Scale of explosion, blast load, & analysis used in global plant industry⁶⁾

Sort	Scale of explosion	Blast load	Analysis
API	Distance from explosion : 100 ft TNT equivalency : 1 tonf	-	-
CIA	3 Grades in accordance with degree of risk Grade I - Distance from explosion : 100 ft TNT equivalency : 1 tonf	Wall : 17.5 tonf/m ² during 20 ms or 3.2 ft/m ² during 100 ms Slab : 7.0 tonf/m ² (20 ms) or 2.1 tonf/m ² (100 ms)	Equivalent static analysis
BECHTEL	Distance from explosion : 200 ft TNT equivalency : 1 tonf or Distance from explosion : 100 ft TNT equivalency : 0.13 tonf	Wall : 4.52 tonf/m ² Slab : 2.1 tonf/m ²	Equivalent static analysis
LUMMUS	-	Appropriate blast load : 2.1 tonf/m ² Static additional load : 0.7 tonf/m ²	-
BP	Recommend blast risk assessment through cost-effectiveness analysis and dynamic analysis	Wall : 17.5 tonf/m ² or 3.2 tonf/m ² Slab : 7 tonf/m ² or 2.1 tonf/m ²	Equivalent static analysis or Dynamic analysis

기술적 방폭 기준은 없는 실정이다.

3.2 국외 방폭 기준

대부분 폭발 관련 연구가 군사관련 기관에서 수행되는 우리나라와 달리 미국에서는 미 국방부(Department of the Army, Navy, or Air Force) 뿐만 아니라 민간단체인 ASCE (American Society of Civil Engineers) 역시 주도적으로 기준을 제시하고, 관련 연구를 수행하고 있다.

과거 미 국방부에서 제시한 ‘Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (TM 5-1300)’은 가장 널리 알려진 방폭구조물 설계기준 및 시공지침이다. 가장 광범위한 내용을 담고 있는 TM 5-1300은 방폭설계 개요, 폭발 및 폭발 하중(blast load), 파편하중 등 각종 하중 산정 방법, 동적구조 해석 원리, RC 및 강구조 설계뿐만 아니라 각종 시설 방폭설계 기준, 시공 지침 등 자세한 내용을 포함하고 있다.

최근 미 국방성에서는 최근 육·해·공군 기준을 통합하여 통합시설 기준(UFC: Unified Facilities Criteria) 제정작업을 2002년부터 시행하였고 2008년 최초의 완성본을 제시하였다. 이는 육군(TM: Technical Manual), 해군(Navy Criteria Manuals: MIL-HDBK and DM) 및 공군(Airforce Manual: AFM and AFR)에서 사용해오던 기준을 총망라한 내용으로 십만 페이지가 넘는 분량으로 이루어져 있다. 통합시설 기준은 기존에 널리 사용되던 TM 5-1300에 있던 내용과 함께 매뉴얼과 기술자료(technical paper)를 함께 제시하고 있다. 이는 미 국방성에서 사용하는 유일한 방호기준으로 총 4개 시리즈 중 UFC 3-340-01(舊 TM 5-585-1)과 같이 일부 특정 무기효과에 관한 부분을 제외하고는 일반인 역시 접근이 가능하다.

ASCE에서는 석유화학 프로세스 플랜트 공장에 있는 시설물 방폭 설계를 위하여 ‘Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities’

을 제시하였다. 이는 일반적인 방폭 기준과 달리 구조물 용도 및 중요도에 따라 손상 정도(damage level)를 높음(high), 중간(medium), 낮음(low) 3가지로 구분하고 각각에 대하여 설계 한계값을 제안하였다. 그 외에도 주 제어동 위치 설정, 설계, 시공 및 위험도 평가(risk analysis)에 대하여 서술하고 있다.

플랜트 공장 방폭 기준과 관련해서 별도 산업 기준이 존재하지 않기 때문에 BECHTEL, BP 등 우수 엔지니어링 회사는 'Siting and Construction of New Control Houses for Chemical Manufacturing Plants (SG-22, CMA: Chemical Manufacturing Association, 1978)', 'An Approach to the Categorization of Process Plant Hazard and Control Building Designs (CIA: Chemical Industries Association, 1992)', 'Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects (ASCE Manual 42)', TM 5-1300을 참고하여 자체 방폭설계 시방서를 보유하고 있다. <Table 1>은 유명 해외 석유화학 회사에서 사용하는 폭발 하중 및 해석 방법을 요약한 것이다.

그 외에도 AIChE(American Institute of Chemical Engineers), CCPS(Center for Chemical Process Safety), API(American Petroleum Institute) 등 다양한 기관에서 폭발 및 방폭 설계 기술에 관하여 연구를 진행하고 있다.

4. 결 언

본 기사에서는 폭발 원인에 따라 분류된 폭발의 종류와 방폭구조물 기준에 대해 다루었다. 계속되는 폭발사고에도 여전히 산업현장에서는 폭발사고에 대비한 엄밀한 방폭구조물 설계기준 적용이 미흡하다. 앞으로 폭발 위험성이 높은 건물, 시설 등에는 방폭구조물 관련 기준 및 시행령을 선진국 수준으로 적용하여 안전사고에 대비하고 극단상황에서도 구조물의 붕괴는 최소한 막아야 할 것이다.

References

1. <http://www.mementodumaire.net>
2. Choi, Y. S., "A Study of Dust Explosion and Protection," Journal of Gyeongbuk Fire Service Academy, Vol. 5, 2001, pp.105-127.
3. <http://www.ccohs.ca>
4. Jung, S. J., "Building Design for Blast Resistance," Magazine of the Korean Structural Engineers Association, Vol. 16 No. 1, 2009, pp.60-65.
5. Kim, S., "Protective Design and Blast Resistant Structures," Community Magazine of College of Engineering, Seoul National University, No. 95, 2014, pp.26-31.
6. Lee, S. and Lee, J., "Building Design for Blast Resistance," Review of Architecture and Building Science, Vol. 45, No. 10, 2001, pp.58-62.