

폭발현상과 재해의 유형



글 · 윤재건 / 한성대학교 기계시스템공학과
부교수 · 가스기술사
e-mail · jkyoon@hansung.ac.kr

폭발사고는 순식간에 발생하여 폐허와 사상자만을 남긴다. 이 글에서는 폭발현상의 분류를 시도하고, 또한 폭발재해의 중요한 유형과 그 발생 기구(mechanism)를 살펴보고자 한다.

부천의 LPG충전소 폭발사고(1998. 9. 11.), 대구 지하철공사장 LPG 누설 폭발사고(1995. 4. 28.), 아현동 도시가스 밸브기지 폭발사고(1994. 12. 7.) 등은 세계적으로도 그 유래를 찾아보기 힘든 사고들이다. 가스의 소비가 늘어나면서 크고 작은 가스폭발사고 특히 대형사고의 위험성은 항상 주변에 상존하고 있다.

폭발현상(explosion phenomena)이 항상 연소(combustion)를 수반하는 것도 아니고, 연소현상이 항상 폭발적으로 일어나는 것이 아님에도 불구하고 많은 사람들은 폭발과 연소 사이에 밀접한 관계가 있는 것으로 생각하고 있다. 일반적으로 폭발이라고 하면 우선 큰 소리와 건물이나 실내의 파괴를 연상한다. 폭발 시에 발생하는 큰소리, 이른바 폭발음은 공기 중을 전파하는 압력파(blast wave)에 의한 것이고, 건물이나 실내파괴는 그들의 내부압력 상승에 의한 것이다. 그러므로 폭발현상은 압력상승과 불가분하다고 생각된다. 그렇지만 어느 정도의 시간에 어느 만큼의 압력에 달했을 때를 폭발이라 할 수 있는가에 대해서는 명확한 정의가 없다.

국어 사전 속의 폭발의 정의를 찾아보면 다음과 같다. “폭발(暴發) : 갑작스럽게 터짐, 줄지에 벌어짐, 폭발(爆發) : 급속한 화학반응에 의해 다량의 가스와 열량이 발생해 급격히 용적을 증대하며, 폭명, 화염 및 파괴작용

을 일으키는 현상” 이와 같이 일상적 의미의 폭발과 화학반응이 수반되는 폭발과는 한자어에 의해서만 구분이 된다. 폭발(暴發)은 영어의 explosion에 해당되고, 폭발(爆發)은 explosion의 한 유형인 화학적 폭발(chemical explosion)을 의미한다. 고무풍선의 폭발, 보일러의 폭발, 자동차 타이어의 펑크 등과 같이 화학반응(연소)을 수반하지 않는 폭발현상도 우리 주위에 많다.

일반적인 폭발을 전문용어로 설명하면 비가역 과정(irreversible process)인 충격파를 어느 일정한 시간 이상 지속시키는 현상으로 볼 수 있다. 충격파는 비가역 과정이므로 계속 전파시키기 위해서는 지속적인 에너지의 공급이 필요하다. 이러한 공급에너지원에 따라서 폭발현상을 분류하는 것이 일반적이다.

화학적 폭발

열적 폭발(thermal explosion)현상이라고도 하며, 불안정한 화합물 또는 화약류(explosives)의 분해폭발이나 혼합가스(연료와 산화제)의 연소폭발 등이 이에 속한다. 화학적 폭발은 다시 폭연(deflagration)과 폭굉(detonation)으로 구분할 수 있다. 폭연은 비교적 낮은 속도(100m/s 이내)로 전파되어 나가며, 연소생성물의 흐름방향은 연소파(combustion wave)의 진행방향과 반

대방향이다. 저폭약(low explosives)이란 것은 이와 같이 폭연 하는 물질을 뜻한다. 이런 것들은 주로 추진제(propellants)로 사용되며, 완벽하게 밀폐되어 있지 않으면 그 폭발력은 낮다. 저폭약의 예로서는 화포 및 로켓용 추진제, 내연기관의 혼합기 등을 들 수 있다. 폭굉은 그 전파 속도가 1~10km/s에 이르며 항상 그 매질에서의 음속보다 빠르다. 폭굉이란 충격파를 유지하는 에너지를 화학반응으로부터 얻는다. 연소생성물의 흐름 방향이 충격파의 흐름방향과 같으며, 일반적으로 높은 압력이 발생한다. 고폭약(high explosives)이란 이와 같이 폭굉이 일어나는 폭약을 뜻한다. 이러한 고폭약은 밀폐되지 않은 상태에서도 큰 폭발력을 갖는다. 또한 고폭약은 고유의 폭굉전파 속도를 갖는다. 약하게 점화되었을 경우 폭연하는 많은 물질들이 강하게 점화되면 폭굉을 일으킬 수 있다. 또한 폭연파가 전파되어 가면서 폭굉파로 천이할 수도 있다.

물리적 폭발

응상(solid or liquid phase)에서 기상(gas phase)으로의 갑작스러운 상변화에 의한 폭발로서, 과열액체의 증기폭발(vapour explosion)이라고도 하며 보일러 내의 과열수의 폭발이 가장 좋은 예이다. 보일러 폭발의 위력은 고폭약의 폭발에 버금가는 파괴력을 보인다. 과열액체(overheated liquid)인 열수(130~200°C)로 채워져 있던 보일러가 단순한 기계적 파괴에 의해서 압력이 급격히 떨어지면 열수와 수증기간의 평형이 갑자기 무너져 열수는 과열 상태가 된다. 대기압 하에서는 이 온도의 열수가 존재할 수 없으므로 급격히 증발하여 물 전체가 거의 순간적으

로 수증기로 변한다. 수백 배로의 갑작스러운 부피팽창은 큰 충격파를 동반한 대폭발을 일으킨다. 이 밖에도 물이나 그 밖의 액체가 매우 뜨거운 물질(용융금속, 가열된 금속 또는 기름)에 접촉하여 갑작스럽게 많은 증기(vapour)를 만들 때 일어난다. 짙은 황산에 물을 부었을 때 발생하는 폭발도 반응열에 의한 증기폭발로 해석되며, 해저화산의 폭발, 용융금속과 물이 접촉할 때의 폭발 등이 모두 이와 같은 원리로 발생한다. 전자렌지에서 과열된 커피 잔의 물이 외부교란에 의해 폭발적으로 팽창하는 현상과 전자렌지에서 급속하게 과열된 달걀이 폭발하여 달걀껍질파편이 어린아이의 눈에 박힌 사고 등도 급격한 상변화에 의한 것이다.

기계적 폭발

안전장치가 고장난 고압용기의 파열, 자동차 타이어의 파열 등과 같이 구조물이 압력을 견디지 못하여 파열되어 갑작스러운 압력방출현상이 이에 해당한다. 열유체공학에서 사용되는 충격파관(shock tube)은 이와 같은 기계적 폭발에 의해서 충격파를 발생시키는 장치이다.

전기적 폭발

전기적인 에너지가 갑작스럽게 열에너지로 변환될 때의 현상이다. 가는 도선에 고전류를 흘리면 도선 폭발(wire explosion)현상이 발생한다. 이 현상은 전기신관 등에 이용되고 있으며, 전기퓨즈(fuse)의 끊어짐도 같은 원리이다. 일상에서 흔히 접하는 가장 좋은 예는 천등번개 현상이다.

핵 폭발

원자핵(atomic nuclei)의 분열(fission)이나 융합(fusion)으로부터 발생하는 질량손실에 의한 에너지의 급격한 방출현상이다.

이상과 같이 충격파를 지속시키는 에너지의 종류에 따른 폭발의 분류가 이해하기 쉬우나 실제 우리 주변에서 발생하는 폭발재해 중에는 두 가지 이상의 에너지가 동시에 또는 연속적으로 공급되면서 큰 피해를 일으킨다. 이와 같은 재해는 산업사회에서 피할 수 없는 일이라는 하나, 폭발재해를 예방하는 구체적 방법에 관한 지식과 기술의 부족에서 야기되는 것이 대부분이다. 자주 발생하는 폭발재해의 원인과 발생기구(mechanism)를 살펴보면 다음과 같다.

혼합가스의 폭발

연료가스가 공기나 산소와 적당한 비율로 혼합되어 있는 경우, 점화원에 의해 점화가 되면 연소파의 전파에 의해서 폭발이 발생한다. 연료가스가 공기와 혼합되어 있을 경우, 연소할 수 있는 농도 범위를 폭발한계라고 한다. 도시가스로 주로 공급되는 메탄의 경우는 공기 중에 5~15%이고, 용기로 일반 가정에 배달되는 프로판은 2.2~9.5%이다. 메탄과 프로판을 비교할 경우 조금만 누설되어도 폭발가능 범위에 들고 공기보다 무거워 누설시 아래쪽으로 가라앉는 프로판이 더 위험하다고 볼 수 있다. 일상에서의 폭발사고는 도시가스나 액화석유가스(프로판, 부탄)의 누설에 의한 혼합가스의 폭발이 대부분을 차지한다. 이러한 혼합가스의 폭발은 폭발에너지가 증기폭발이나 폭약의 폭발 등에 비해 작아 건물의 벽이나 유리창 등에는 큰 피해를 입히더라

도 건물의 기초 부분에는 아무런 영향을 미치지 못한다. 오히려 폭발과 함께 발생하는 화재에 의해서 많은 인명과 재산상의 피해를 보는 경우가 많다. 그러나 대구 지하철공사장 폭발사고와 같이 복공판으로 밀폐된 아주 넓은 공간에 대량의 가스가 누설되고 점화된다면 상황이 달라질 수 있다. 밀폐된 공간에서 점화되어 전파하는 연소파는 초기에는 폭연이었지만 진행하면서 압력이 높아지고 전파속도가 가속되면서 음속을 넘어 폭굉으로 발달할 경우 그 피해는 예상을 뛰어 넘는 결과를 가져올 수 있다. 하수관에 누설된 도시가스의 폭발, 대규모 화학공장의 배관 내에서의 폭발과 탄광의 갱도에서 발생하는 폭발이 엄청난 피해를 가져오는 것을 이와 같은 폭굉으로의 천이현상(DDT : Deflagration to Detonation Transition)으로 설명할 수 있다.

단일 가스의 분해폭발

상당히 많은 사람들이 산소-아세틸렌 용접을 직접 해 보았거나, 하는 것을 본 경험을 가지고 있을 것이다. 그렇지만 아세틸렌(C_2H_2)



지하철 공사장 LPG누설 폭발사고 모습(1995. 4., 대구) : 가스배관의 파손으로 누설된 대량의 LPG가 크고 밀폐된 공간에서 혼합가스 폭발이 일어난 경우 폭굉(detonation)으로 천이되어 큰 피해를 야기한다.

이 분해 폭발성을 가진 매우 불안정하고 위험한 가스임을 인식하고 있지는 못할 것이다. 일반적으로 그 생성열이 양(positive)인 기체는 분해에 의해 상당한 열이 나고, 조건에 따라서는 점화하면 분해화염을 전파시킬 수 있다. 즉 분해열이 20~30kcal/mol 정도의 물질은 분해화염을 유지할 수가 있으며, 그 이상의 분해열을 갖는 가스는 폭발이 심해져서 폭굉(detonation)이 되는 수가 있다. 분해폭발은 고압에서 일어나기 쉽고, 압력을 낮추어 가면 화염의 전파가 어렵게 된다.

분해폭발성을 가진 가스 중에서 공업적으로 중요한 것은 아세틸렌, 모노비닐 아세틸렌($C_2H(NH_2)$), 메틸아세틸렌($C_2H(CH_3)$), 에틸렌(C_2H_4), 프로필렌(C_3H_6), 질소산화물(N_2O , NO , NO_2), 에틸렌옥시드(C_2H_4O) 등이다. 우리의 일상과 제일 밀접한 아세틸렌은 대기압 하에서도 강력한 점화원에 의해서 분해폭발을 일으킬 수 있다. 15기압 정도로 압축하며 분해폭발을 일으킬 수 있는 점화에너지가 혼합가스(가연성가스와 공기)의 점화에너지만큼 작아진다. 그 결과로 압축액화가 금지되고, 용기 내에 다공물질을 채우고 아세톤이나 디메틸포름아미드 같은 용제를 침윤시킨 후 여기에 아세틸렌을 압축용해 시키는 기

술이 개발되어 오늘까지 사용되고 있다. 따라서 아세틸렌 저장 용기에 충전 시에는 용제가 부족하지 않도록(기상 부분이 가능한 작게) 보충하여야 하며, 충전 압력은 15°C에서 15 kg/cm² 이하로 하고, 충전 후 24시간 이상 정지하여 충분히 용해시켜야 한다. 아세틸렌이 들어있는 용기의 취급 시에는 충격이 가해지지 않도록 조심하고, 사용 시에는 절대 닦아서 사용해서는 아니 된다.

용기폭발

용기폭발의 원인은 여러가지가 있는데, 첫째는 용기재료의 부식이나 피로 등에 의해서 강도가 저하되어 단순한 파열사고를 일으키는 경우이다. 압력용기의 파열에 대하여 매우 흥미로운 자료를 1983년 Smith & Warwick이 발표하였다. 20,000여 개의 압력용기의 310,000 vessel-years 동안 대형 파열이 12회 있었는데 이 중에서 용기 자체의 결함에 의한 파열은 2회였다. 따라서 용기의 파열률은 6.5×10^{-6} /vessel-yrs이다. 이는 100만 개의 사용 중인 용기 중에서 6개 내지 7개가 매년 폭발할 수 있음을 뜻한다. 이는 일반적인 수용가능 위험의 크기인 100만 분의 일보다는 큰 값이지만 압력용기를 위험한 시설의 일종으로 취급하고 있는 것치고는 파열가능성이 매우 적다.

두 번째는 액화가스의 과충전에 의한 경우이다. 액화가스의 대부분은 온도상승에 따른 액의 체적팽창이 현저하게 크다. 만일 용기 내에 액화가스를 100% 충전시켜 충전하면 외부의 온도가 상승함에 따라 액체가 팽창하고, 용기 내의 내용적은 크게 변함이 없으므로 늘어나는 액이 있을 공간이 없어 늘어난 액은 늘어난 만큼 수축되면서 압력으로 바



지붕에 박힌 지하철 공사장의 복공판(1995. 4., 대구) : 폭굉으로 천이된 가스폭발의 위력이 얼마나 큰지는 공사장의 철제 복공판의 비산된 위치로 짐작할 수 있다.

뀌게 된다. 열팽창률보다 압축률은 극히 작으므로 작은 온도상승에도 현저하게 압력이 상승한다. 따라서 액화가스를 충전 시에는 용기 내에 완전히 충전하지 않고 보통 10% 이상의 공간을 두는데, 기상부의 이 공간은 액이 팽창할 수 있는 여유가 된다.

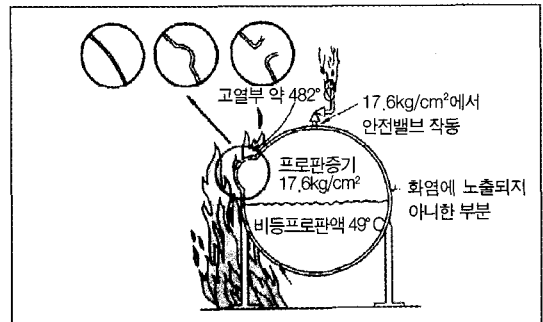
또 다른 용기폭발의 원인은 혼합가스용기의 폭발이다. 연구개발용이나 측정기기의 보정용 등의 목적으로 혼합가스가 제조되어 사용되는 경우가 많이 늘어났다. 혼합가스의 성분 중에 연료성분과 산화제성분이 공존하는 경우 외부의 충격이나 자연발화에 의해 실제로 용기파열사고가 발생한다. 특히 연료와 산화제성분의 혼합정도가 폭발범위를 벗어나 있다 하여도 오랫동안 사용 않고 보관하거나 가스를 혼합 주입하는 순간에는 국부적으로 농도가 폭발범위에 들 수 있고 고압의 혼합가스의 점화에 요구되는 에너지의 양은 극히 적기 때문에 거의 자연적으로 발생한다. 실험실에서 사용 중에 또는 혼합가스의 제조 및 취급 중에 드물게 발생하고 있다.



LPG충전소 폭발 시의 Fire Ball(1998. 9., 경기도 부천시): 탱크로리에서 지하 저장탱크로 LPG하역작업 중에 발생한 화재에 의해 탱크로리가 폭발하였다. 이러한 대형폭발 와중에도 지하 저장탱크가 무사하였다는 것은 LPG충전소의 가장 큰 위험이 지하 저장탱크가 아니라 탱크로리를 보여 준다.

증기 폭발

물리적 폭발에서 설명하였듯이 응상에서 기상으로의 갑작스러운 상변화에 의한 폭발로서 보일러의 폭발 등이 좋은 예이다. 일반적으로 고압에서 액상을 유지하고 있는 물질은 일정한 조건(갑작스런 압력강하)이 갖추어지면 모두 증기폭발을 일으킬 가능성을 지니고 있다. 석유 및 액화석유가스 저장 탱크의 화재 시 경험되는 최악의 경우는 BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)현상이라고 하는데, 이는 증기폭발을 동반한 현상이다. 부천 LPG 탱크로리의 폭발과 같이 외부화재에 의해 저장탱크가 가열되고 탱크의 상부가 국부적인 가열에 의해 파열할 경우 내부의 과열된 액체는 증기폭발을 일으키고, 증기폭발에 의해 확산된 가연성 가스와 분무는 넓은 범위에 확산되어 혼합가스 폭발과 함께 대형 Fire Ball을 야기할 수 있다. 일반적으로 개방된 지역에서의 혼합가스의 폭발현상은 폭연파(deflagration



LPG 저장탱크에서의 BLEVE 발생 Mechanism : 외부화재에 의해 탱크의 하부는 프로판의 비등에 의해 비교적 낮은 온도를 유지하나 상부의 기상부에서는 국부적으로 온도가 상승하여 부분적인 파열이 생기고, 이 파열을 통하여 탱크 내부의 압력이 급격히 낮아지면서 비등하고 있던 프로판이 순간적으로 한꺼번에 기화하면서 대규모 증기폭발을 일으키고, 주위의 공기와 혼합되면서 점화되어 Fire Ball을 발생시킨다.

wave)를 넘지 않으나, 대규모로 확산되어 있을 경우에는 폭연파가 폭발파(detonation wave)로 천이 되어 큰 폭발력을 낼 수 있다.

분진폭발

분진이 폭발할 수 있다는 사실에 대한 인식은 탄진(炭塵)에 의한 탄광폭발에서부터 시작되었다. 그러나 다른 많은 분진류에 관해서는 먼 옛날부터 폭발재해를 일으키고 있으면서도 일반에게는 의외로 그 위험성이 알려져 있지 않다. 분진폭발 재해는 발생이 매우 드물지만 최근처럼 분말금속공업, 플라스틱공업, 유기합성공업, 사료공업 등과 같이 원료와 제품을 분체로 다루는 공정이 많아지고 확대되는 경향은 분진폭발의 잠재 위험성을 증대시키고 있다. 분진폭발의 발생기구나 재해의 정도는 혼합가스 폭발의 경우와 매우 유사하다. 차이가 있다면 발화에 필요한 점화에너지가 혼합가스 폭발에 비해 크다는 것이다.

폭발은 그 급격한 압력상승의 결과로서 파괴작용을 유발하고 폭음을 내며, 고온의 폭발생성물을 방출하여 화재를 병발시키는 일이 많다. 이 같은 파괴, 폭음, 고열 등은 어느 것이나 폭발의 결과로서 어떤 조건 하에 폭발현



도심의 주택가 인도에 설치된 간이주유소(로마, 이탈리아) : 위험시설에 대한 설치기준을 적용할 경우 이와 같은 형태의 주유소는 한국에서는 불가능하다. 위험과 경제성은 항상 상반되는 기준이며, 결국 어느 정도의 위험을 감수하고 얼마의 경제적 이익을 볼 것인가는 사회 구성원 전체의 어떤 공감대가 필요하며, 안전공학의 많은 이론과 계산은 이런 공감대 형성에 중요한 역할을 한다.

상에 수반되어 나타나는 것이다. 폭발이 일어나더라도 파괴나 폭음이 생기지 않는 경우도 있고, 또 증기폭발의 직접적 생성물은 고온이 아닌 것이 특징이다. 폭발현상을 분류하고, 폭발재해의 유형을 간략히 살펴보았다. 실제 많은 경우는 이러한 폭발현상이 연속적으로 일어나거나 병발하여 큰 재해를 야기한다. 예를 들면 액화 석유가스 용기폭발의 경우, 과충전, 외부의 충격 또는 화재에 의해 저장용기가 파괴되고, 용기 안의 잔존 액체가 증기 폭발인 2차 폭발이 일어나고, 다시 3차적으로 대기 중에 방출된 액체의 증기 및 액적이 혼합가스 폭발이나 분무폭발을 일으켜 재해의 규모를 확대시킨다. 일단 폭발사고가 발생하면, 순식간에 피해가 발생하고 뒤에는 폐허와 사상자만을 남기게 된다. 따라서 방폭대책으로는 다른 어떤 대책보다도 폭발을 사전에 예방하는 대책이 가장 중요하고, 폭발재해를 예방하기 위해서는 폭발현상의 원인과 그 발생기구나 특성에 대한 철저한 이해가 요구된다.



분진폭발 후의 곡물저장 사일로(1977. 12., Westwood LA, U.S.A.) 곡물을 사일로 상부로 실어 나르는 엘리베이터에서 발생한 폭발이 사일로 전체로 확대되었다. 가연성 분말이 공기 중에 부유하고 있을 경우 혼합가스 폭발과 똑 같은 상황이 일어날 수 있다.