

폭발현상과 연소

Explosion Phenomena & Combustion

윤 재 건
Jae-Kun. Yoon



윤 재 건
• 1958년 10월 13일생
• 추진공학에서의 연소현상
• 정회원, 국방과학연구소

1. 서 론

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. 폭발시에 발생하는 큰소리, 이른바 폭발음은 공기중을 전파하는 압력파(blast wave)에 의한 것이고, 건물이나 실내파괴는 그들의 내부압력 상승에 의한 것이다. 그러므로 폭발현상은 압력상승과 불가분하다고 생각해도 된다. 그렇지만 어느 정도의 시간에 어느 만큼의 압력에 달했을 때 폭발이라 할 수 있는가에 대해서는 명확한 정의가 없다.

국어 사전속의 폭발의 정의를 찾아보면 다음과 같다. 폭발(暴發): 갑작스럽게 터짐, 줄지에 벌어짐, 폭발(爆發): 급속한 화학반응에 의해 다

량의 gas와 열량이 발생해 급격히 용적을 증대하며, 폭발, 화염 및 파괴작용을 일으키는 현상. 이와같이 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.

본 글에서는 폭발 및 연소현상의 분류를 시도하고, 이와 관련된 용어(terminology)들의 정의와 물리적 의미를 살펴 보고자 한다. 또한 폭발재해의 중요한 유형과 그 발생 기구(mechanism)를 설명하고자 한다.

2. 폭발의 분류

폭발이란 일반적인 용어로도 많이 사용되지만, 전문용어로 취급하면 비가역 과정인 충격파를 어느 일정한 시간이상 지속시키는 현상으로 볼 수 있다. 충격파는 비가역 과정(irreversible process)이므로 계속 전파시키기 위해서는 지속적인 에너지의 공급이 필요하다. 이러한 공급에너지원에 따라서 폭발현상을 분류할 수 있다.

2.1 화학적 폭발(chemical explosion)

열적 폭발(thermal explosion) 현상이라고도 하며, 불안정한 화합물 또는 화약류(explosives)의 분해폭발이나 혼합가스(연료와 산화제)의 연소 폭발 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 반대방향이다. 저폭약(low explosives)이란 것은 이와 같이 폭연하는 물질을 뜻한다. 이런 것 들은 주로 추진제(propellants)로 사용되며, 완벽하게 밀폐되어 있지 않으면 그 폭발력은 낮다. 저폭약의 예로써는 화포 및 로켓용 추진제, 내연기관의 혼합기 등이다. 폭굉은 그 전파 속도가 1~10km/s에 이르며 항상 그 매질에서의 음속보다 빠르다. 폭굉이란 충격파를 유지하는 에너지를 화학반응으로 부터 얻는다. 연소생성물의 흐름방향이 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 폭연과가 전파되어 가면서 폭굉파로 천이할 수도 있다.

2.2 물리적 폭발(physical explosion)

과열액체의 증기폭발(vapour explosion)이라고도 하며, 응상(solid or liquid phase)에서 기상(gas phase)으로의 갑작스러운 상변화에 의한 폭발이며, 그 폭발 위력은 고폭약의 폭발에 못지 않다.

과열액체(overheated liquid)인 열수(130~200°C)로 채워져 있던 보일러가 단순한 기계적 폭발에 의해서 압력이 급격히 떨어지면 열수와 수 증기 간의 평형이 갑자기 무너져 열수는 과열 상태가 된다. 대기압 하에서는 이 온도의 열수가 존재할 수 없으므로 급격히 증발하여 물 전체가 거의 순간적으로 수증기로 변한다. 수백배로의

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 만들때 일어난다. 질은 황산에 물을 부었을 때 발생하는 폭발도 반응열에 의한 증기폭발로 해석되며, 해저화산의 폭발, 용융금속과 물이 접촉할 때의 폭발 등이 모두 이와 같은 원리로 발생한다.

2.3 기계적 폭발(mechanical explosion)

고압용기의 파열, 자동차 타이어의 파열 등이 이에 해당한다. 열유체공학에서 사용되는 충격파관(shock tube)은 이와 같은 기계적 폭발에 의해서 충격파를 발생시키는 장치이다.

2.4 전기적 폭발(electrical explosion)

전기적인 에너지가 갑작스럽게 열에너지로 변환될 때의 현상이다. 가는 도선에 고전류를 흘리면 도선폭발(wire explosion) 현상이 발생한다. 이 현상은 전기신관 등에 이용되고 있으며, 전기퓨즈(fuse)의 끊어짐도 같은 원리이다. 가장 좋은 예로써는 천둥번개 현상이다.

2.5 핵 폭발(nuclear explosion)

원자핵(atomic nuclei)의 분열(fission)이나 융합(fusion)으로 부터 발생하는 에너지의 급격한 방출현상이다.

3. 폭발재해의 유형

오늘도 우리 주변에선 폭발재해가 발생하고 있다. 이와 같은 재해는 산업사회에서 피할 수 없는 일이라는 하나, 폭발재해를 예방하는 구체적 방법에 관한 지식과 기술의 부족에서 야기되는 것이 대부분이다. 자주 발생하는 폭발재해를 원인으로 구분하여 발생기구(mechanism)와 특성을 살펴보고자 한다.

3.1 혼합가스의 폭발

연료가스가 공기나 산소와 적당한 비율로 혼

합되어 있는 경우, 점화원에 의해 점화가 되면 연소파의 전파에 의해서 폭발이 발생한다. 연소가스가 공기와 혼합되어 있을 경우, 연소할 수 있는 농도 범위를 폭발한계라고 한다. 표 1에 대표적인 가스의 폭발한계를 보였다. 일상에서의 폭발사고는 도시가스나 액화석유가스(프로판, 부탄)의 누설에 의한 혼합가스의 폭발이 대부분을 차지한다. 이러한 혼합 가스의 폭발은 유리창이나 가벼운 벽등에는 손상을 입히더라도 건물의 기초 부분에는 아무런 영향을 미치지 못한다. 오히려 폭발과 함께 발생하는 화재에 의해서 많은 인명과 재산상의 피해를 보는 경우가 많다.

가연성 가스의 법적인 정의는 다음과 같다.

- (1) 폭발한계의 하한이 10% 이하
- (2) 폭발한계의 하한과 상한의 차가 20% 이상

따라서 대형냉동기에 많이 사용되는 암모니아 가스는 법규상으로는 가연성가스가 아니지만, 누설되었을 경우 암모니아의 폭발성뿐 아니라 독성에 의해 매우 심각한 피해를 입을 수 있다.

표 1 주유가스의 폭발한계

가 스	폭발한계 (%)
C ₂ H ₂	2.5~81
H ₂	4.0~75
NH ₃	15~28
CO	12.5~74
C ₃ H ₈	2.2~9.5
C ₄ H ₁₀	1.9~8.5

3.2 단일가스의 분해폭발

상당히 많은 사람들이 산소-아세틸렌 용접을 직접 해 보았거나, 하는 것을 본 경험을 갖고 있을 것이다. 그렇지만 아세틸렌(C₂H₂)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 분해열을 전파시킬 수 있다. 즉 분해열이 20~30kcal/mol

정도의 물질은 분해열을 유지할 수가 있으며, 그 이상의 분해열을 갖는 가스는 폭발이 심해져서 폭굉(detonation)이 되는 수가 있다. 분해폭발은 고압에서 일어나기 쉽고, 압력을 낮추어 가면 화염이 전파하지 않는다.

분해폭발성을 가진 가스중에서 공업적으로 중요한 것은 아세틸렌, 모노비닐 아세틸렌(C₂H(NH₂)), 메틸아세틸렌(C₂H(CH₃)), 에틸렌(C₂H₄), 프로필렌(C₃H₆), 질소산화물(N₂O, NO, NO₂), 에틸렌옥시드(C₂H₄O)등 이다. 우리의 일상과 제일 밀접한 아세틸렌은 대기압하에서도 강력한 점화원에 의해서 분해폭발을 일으킬 수 있다. 15기압 정도로 압축하면 분해폭발을 일으킬 수 있는 점화에너지가 혼합가스(가연성가스와 공기)의 점화에너지 만큼 작아진다. 그 결과로 압축액화가 금지되고, 용기내에 다공물질을 채우고 아세톤이나 디메틸포름아미드 같은 용제를 칠윤시킨 후 여기에 아세틸렌을 압축용해 시키는 기술이 개발되어 오늘까지 사용되고 있다. 따라서 아세틸렌 저장 용기에 충전시에는 용제가 부족하지 않도록(기상 부분이 가능한 작게) 보충하여야 하며, 충전 압력은 15°C에서 15kg/cm²이하로 하고, 충전후 24시간 이상 정지하여 충분히 용해시켜야 한다. 아세틸렌이 들어있는 용기의 취급시에는 충격이 가해지지 않도록 조심하고, 사용시에는 절대 닦아서 사용해서는 안된다.

3.3 용기폭발

용기폭발의 원인은 크게 두가지로 분류할 수 있다. 첫째는 용기재료의 부식이나 피로등에 의해서 강도가 저하되어 단순한 파열사고를 일으키는 경우이고, 두번째는 액화가스의 과충전에 의한 경우이다. 액화가스의 대부분은 온도상승에 따른 액의 체적팽창이 현저하게 크다. 만일 용기내에 액화가스를 100% 충전시켜 충전하면 외부의 온도가 상승함에 따라 액체가 팽창하고, 용기내의 내용적은 크게 변함이 없으므로 늘어나는 액이 있을 공간이 없어 늘어난 이 액은 늘어난 만큼 수축 되면서 압력으로 바뀌게 된다. 열팽창율보다 압축율은 극히 작으므로 작은 온도상승에도 현저하게 압력이 상승한다. 따라서

액화가스를 충전시에는 용기내에 완전히 충전하지 않고 보통 10% 이상의 공간을 두는데, 기상부의 이 공간은 액이 팽창될 수 있는 여유가 된다.

모든 압력용기는 Fig.1과 같은 원리의 안전변(safety device)을 갖고 있다. 작은 용기의 경우에는 보통 용기밸브 몸체에 일체형으로 만들어져 있다. 안전변 작동압력은 용기 내압 시험압력의 0.8이하이고, 내압시험압력은 용기의 최고 충전압력의 1.6이상이다.

3.4 증기 폭발

물리적 폭발에서 설명하였듯이 응상에서 기상으로의 갑작스러운 상변화에 의한 폭발로써, 보일러의 2차 폭발 등이 좋은 예이다. 일반적으로 고압하에 있어서 액상을 유지하고 있는 물질은 일정한 조건이 갖추어지면 모두 증기폭발을 일으킬 가능성을 지니고 있다. 석유저장 탱크의 화재시 경험되는 최악의 경우는 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)현상이라고 하는데, 이는 증기폭발을 동반한 현상이다. 증기폭발에 의해 확산된 가연성 기체와 분무는 넓은 범위에 확산되어 혼합가스 폭발을 야기할 수 있다. 일반적으로 개방된 지역에서의 혼합가스의 폭발현상은 폭연파(deflagration wave)를 넘지 않으나, 대규모로 확산되어 있을 경우에는 폭연파가 폭발파(detonation wave)로 천이되어 큰 폭발력을 낼 수 있다.

3.5 분진폭발

분진이 폭발할 수 있다는 사실에 대한 인식은 탄진(炭塵)에 의한 탄광폭발에서 부터 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 거의 유사하다. 차이가 있다면 발화에 필요한

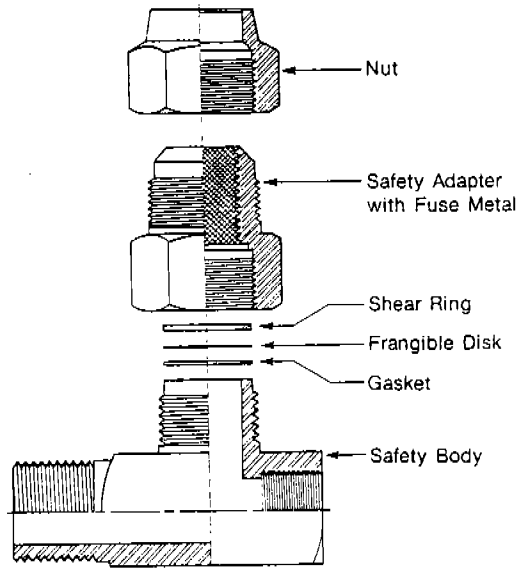
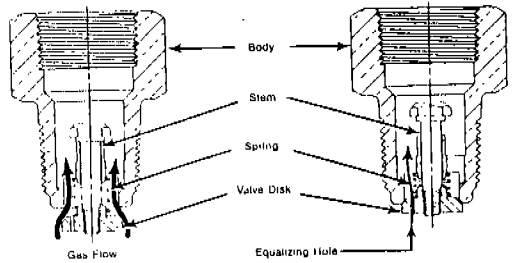


Fig.1 Combination rupture disk/fusible plug device(Type CG-4 or CG-5) made up of independent parts.



(a) Open Position (Normal) (b) "Slugged"

Fig.2 Excess flow check valve

점화에너지가 혼합가스 폭발에 비해 크다는 것이다.

4. 가스연료자동차에서의 폭발위험성

내연기관에서 상업적으로 사용할 수 있는 가스연료는 액화석유가스(LPG)와 압축천연가스(Compressed Natural Gas)이다. 국내의 경우, 액화석유 가스는 택시와 승합차에의 이용이 활발히 이루어져 왔고 근자에 와서 압축천연가스를 도

서비스 등에 이용하는 방법이 거론되고 있다.

고압 가스 용기의 경우에는 2가지의 안전장치가 사용되고 있다. 하나는 Fig.1과 같은 안전밸브이고, 또 하나는 Fig.2와 같은 과류방지밸브(excess flow check valve)이다. 이것은 배관의 연결부등이 파손되어 연료가 과도하게 흐르게 되면 밸브가 닫혀 고압가스의 유출을 방지하는 안전장치이다. (a)가 정상상태이고, 연료가 비정상적으로 과도히 흐르게 되면 스프링의 반발력보다 밸브 디스크(valve disk)를 미는 힘이 더 크게 되어 (b)와 같은 형태로 흐름을 막게 된다.

액화석유가스의 경우에는 최악의 경우 3단계 폭발을 경험할 수 있다. 과충전이나 외부의 충격, 또는 화재등에 의한 국소적인 가열 등에 의한 용기폭발(기계적 폭발)과 용기안의 잔존액체가 증기폭발(물리적 폭발)인 2차 폭발이 일어나고, 다시 3차적으로 대기중에 방출된 액체의 증기 및 액적이 혼합가스 폭발이나 분무폭발을 일으킬 수 있다.

압축천연가스의 경우에는 용기폭발과 혼합가스폭발을 경험할 수 있다. 기체상태로 저장되므로 파괴력이 큰 증기폭발의 위험성이 없고, 공기보다 가벼워 방출후에는 대기중에 쉽게 확산되므로 전체적인 위험의 정도는 액화석유가스에 비해 적다고 사료된다. 그러나 압축액화가 되지 않으므로 액화석유가스에 비해 상대적으로 용기내의 저장압력이 매우 높다.(2,000~3,000psi)

5. 맺음말

폭발은 그 급격한 압력상승의 결과로서 파괴작용을 유발하고 폭음을 내며, 고온의 폭발생성물을 방출하여 화재를 병발시키는 일이 많다. 이같은 파괴, 폭음, 고열 등은 어느 것이나 폭발의 결과로서 어떤 조건하에 폭발현상에 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 용기 폭발의 경우, 과충전이나 외부의 충격에 의한 용기폭발에 의해 저장용기가 파괴되면, 용기안의 잔존 액체가 증기 폭발인 2차 폭발이 일어나고, 다시 3차적으로 대기중에 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 발생기구 및 특성에 대한 철저한 이해가 선결되어야 한다.

후 기

본 원고의 방향과 내용에 대하여 좋은 지적을 해주신 한국과학기술원 백승욱 교수와 육군사관학교 이희각 교수께 감사드리고, 자동차 관련 자료를 보내주신 현대자동차 한태식 과장, 쌍용자동차 이수원 과장께 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 한국노동문제연구원편, 안전관리총람, 1977, 성원안전연구소
2. R. W. King and J. Magid, Industrial Hazard and Safety Handbook, pp.401-440, 1980, Butterworth Inc.
3. 김영대, 정용준 역, 가스폭발예방기술, 1991, 도서출판 세화
4. Compressed Gas Association, Handbook of Compressed Gases, 1990, Van Nostrand Reinhold