

폭발현상과 에너지변환

윤재건
한성대학교 산업시스템공학부

Explosion Phenomena and Energy Transformation

Jae-Kun Yoon
Hansung University, School of Industrial Systems Engineering

1. 서론

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 압력과 (blast wave)에 의한 것이고 건물이나 실내 파괴는 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 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, 폭발, 화염 및 파괴작용을 일으키는 현상. 이와 같이 일상적 의미의 폭발과 화학반응이 수반되는 폭발과는 한 자어에 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.

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.

본 글에서는 폭발현상의 분류를 시도하고, 이와 관련된 용어(terminology)들의 정의와 물리적 의미를 살펴보고자 한다. 또한 가스 폭발재해의 중요현 유형과 그 발생기구에서의 에너지 변환을 설명하고자 한다.

2. 폭발의 종류

폭발을 폭발에너지원으로 분류하면, 핵폭발, 물리적 폭발, 화학적 폭발, 기계적 폭발, 전기적 폭발로 분류하며, 폭발시 원인물질의 물리적 상태에 따라 분류하면, 기상(gas phase)폭발, 응상(condensed phase)폭발로 분류한다.

2-1. 혼합가스폭발

가연성가스와 공기(또는 산소)가 폭발범위내에 존재할 때 점화원이 주어지면 연소파의 전파에 의해서 폭발이 일어나는데 이를 일반적으로 “가스폭발”(혼합가스폭발)이라고 한다. Table 1은 주유가스의 폭발한계를 보이고 있다. 프로판의 폭발범위는 2.1~9.5%, 부탄의 폭발범위는 1.8~8.4%이다. LPG나 메탄은 수소나 아세틸렌에 비해 연소범위, 즉 폭발범위가 좁기 때문에 비교적 안전성이 높다고 할 수 있다.

일상에서의 폭발사고는 도시가스나 액화석유가스(프로

Table 1. Explosion Limits of the Gases

물질명	폭발한계(용량%)	
	하한계	상한계
아세틸렌	2.5	100
암모니아	15	28
일산화탄소	12.5	74
에탄	3.0	12.4
에틸렌	2.7	36
염화에틸렌	3.6	100
시아노화수소	5.6	40
수소	4.0	75
이황화탄소	1.3	50
부탄	1.8	8.4
프로판	2.1	9.5
브롬화메탄	10	15
메탄	5.0	15.0
황화수소	4.0	44

판, 부탄)의 누설에 의한 혼합가스의 폭발이 대부분을 차지한다. 이러한 혼합가스의 폭발은 유리창이나 가벼운 벽 등에는 손상을 입히더라도 건물의 기초 부분에는 아무런 영향을 미치지 못한다. 오히려 폭발과 함께 발생하는 화재에 의해서 많은 인명과 재산상의 피해를 보는 경우가 많다.

2-2. 분해폭발

에틸렌, 아세틸렌, 산화에틸렌 등은 불안정한 상태에서는 분해반응을 일으킨다. 이 때는 큰 발열을 동반하기 때문에 분해에 의해 생성된 가스가 열팽창되고 이때 생기는 압력상승과 이 압력의 방출이 일어나는데 이를 “분해폭발”이라고 한다. 분해폭발의 특징은 산소가 없어도 폭발이 일어나는 점이다. 예로 우리의 일상과 제일 밀접한 아세틸렌은 대기압하에서도 강력한 점화원에 의해서 분해폭발을 일으킬 수 있다. 15기압정도로 압축하면 분해폭발을 일으킬 수 있는 점화에너지가 혼합가스(가연성가스와 공기)의 점화에너지 만큼 작아진다. 그 결과로 압축액화가 금지되고, 용기 내에 다공물질을 채우고 아세틸이나 디메틸포름아미드 같은 용제를 침윤시킨 후 여기에 아세틸렌을 압축용해 시키는 기술이 개발되어 오늘까지 사용되고 있다. 따라서 아세틸렌 저장 용기에 충전 시에는 용제가 부족하지 않도록(기상 부분이 가능한 작게) 보충하여야 하며, 충전압력은 15℃에서 15kg/cm²이하로 하고, 충전후 24시간

이상 정치하여 충분히 용해시켜야 한다. 아세틸렌이 들어있는 용기의 취급 시에는 충격이 가해지지 않도록 조심하고, 사용할 때에는 절대 눕혀서 사용하지는 안된다.

2-3. 기계적 폭발

고압용기의 파열, 자동차 타이어의 파열 등이 이에 해당한다. 용기파열의 원인은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 용기재료의 부식이나 피로 등에 의해서 강도가 저하되어 단순한 파열사고를 일으키는 경우이고, 둘째는 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, 용기내의 내용적은 크게 변함이 없으므로 늘어나는 액이 있을 공간이 없어 늘어난 이 액은 늘어난 만큼 수축되면서 압력으로 바뀌게 된다. 열팽창율보다 압축율은 극히 작으므로 작은 온도상승에도 현저하게 압력이 상승한다. 따라서 액화가스를 충전 시에는 용기 내에 완전히 충전하지 않고 보통 10% 이상의 공간을 두는 데, 기상부의 이 공간은 액이 팽창될 수 있는 여유가 된다.

모든 압력용기는 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 충전 압력의 1.6 이상이다.

2-4. 물리적 폭발

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

과열액체(overheated liquid)인 열수(130~200℃)로 채워져 있던 보일러가 단순한 기계적 폭발에 의해서 압력이 급격히 떨어지면 열수와 수증기간의 평형이 갑자기 무너져 열수는 과열상태가 된다. 대기압 하에서는 이 온도의 열수가 존재할 수 없으므로 급격히 증발하여 물 전체가 거의 순간적으로 수증기로 변한다. 수백 배로의 갑작스러운 부피팽창은 큰 충격파를 동반한 대 폭발을 일으킨다.

이 밖에도 물이나 그 밖의 액체가 매우 뜨거운 물질(용융금속, 가열된 금속 또는 기름)에 접촉하여 갑작스럽게 많은 증기(vapor)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. 일반적으로 고압 하에 있어서 액상을 유지하고 있는 물질은 일정한 조건이 갖추어지면 모두 증기폭발을 일으킬 가능성을 지니고 있다.

2-5. 분진 폭발

분진이 폭발할 수 있다는 사실에 대한 인식은 탄진에 의한 탄광폭발에서부터 시작되었다. 그러나 다른 많은 분진류에 관해서는 먼 옛날부터 폭발재

해를 일으키고 있으면서도 일반에게는 의외로 그 위험성이 알려져 있지 않다. 분진폭발 재해는 발생이 매우 드물지만 최근처럼 분말금속공업, 플라스틱 공업, 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 점화에너지가 혼합가스 폭발에 비해 크다는 것이다.

2-6. 전기적 폭발

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 예로서는 천둥번개 현상이다.

3. 폭발에너지의 크기

연소는 산소와 가연성물질과의 결합에 의해 생성되는 급격한 산화반응으로 빛과 열만을 수반하는 반면에 폭발은 빛과 열 뿐 아니라 폭발을 동반한다. 가스연료의 경우에는 가령 폭발한계 내에 있을지라도 연료와 공기와의 공급이 연속적이고 연소속도가 일정할 경우 즉 정상연소에 있어서는 폭발이 발생하지 않는다. 이에 반하여 가연성가스가 공기 중에 누설하여 연소범위 내에 들어가는 혼합가스를 만들 경우 착화하면 연소는 그 혼합가스의 연소속도에 따른 빠르기로 혼합가스 전체에 전하여진다. 가스연료의 속도는 대단히 빨라서 순간적인 폭발현상을 나타내든지 연소하는 것이 보통이다. 그러나 개방된 대기 중에 있어서 가연성가스의 폭발력은 일반적으로 생각하고 있는 것만큼 강한 것은 아니다. 더욱이 밀폐된 실내에서는 만일의 사태에 대비하여 대기 중에 개구된 적당한 크기의 압력방출구를 설치해 두면 만일 폭발이 일어났다 하더라도 다소의 압력을 감소시킬 수 있다. 용기보관실 등의 지붕을 가벼운 불연재료로 설치하라는 이유는 만일 폭발이 일어났을 경우 압력의 방출구 역할을 할 수 있도록 하기 위함이다. 즉, 가장 약한 부분(용기보관실 지붕)으로 압력을 방출시키고자 함이다.

관내 또는 공간에 체류되어 있는 가연성 혼합가스가 연소범위내에 있을 때 이 혼합가스의 일부분에 화염이 있으면 이것은 인접한 부분의 미연소가스에 현저한 온도 상승을 일으키고 이 때문에 연소속도는 점점 가속되어 폭연이라는 현상이 일어난다.

조건에 따라서 이 화염의 속도는 음속을 초과하는 일정한 속도에 도달하게 되는데 이러한 현상을 폭굉이라고 한다. 폭굉속도는 가연성가스의 종류, 혼합가스의 종류, 혼합가스의 압력, 조성에 따라 일정한 값이 된다. 정상 연소속도는 일반적으로 0.03~10m/s 정도이고 폭굉의 연소속도는 1,000~3,500m/s 정도이다. 폭굉이 일어나면 충격파를 수반하므로 이 충격파에 의하여 일어나는 재해는 폭연에 의한 경우보다 크게된다.

3-1. TNT당량과 수율

폭약 TNT(Tri-nitrotoluence)에 대하여는 폭풍의 피크압이나 역적의 측정이 많이 되어 있고 신뢰성도 높다. Fig. 1에 거리에 따른 과압의 크기를 보이고 있다. 또한 Table 2에 과압의 크기에 따른 손상의 정도를 보이고 있다.

가스폭발에 대하여는 실험이 거의 없기 때문에 사고에 의한 가스폭발의 강도를 TNT 폭발과 비교하여 TNT 수율을 구하는 방법이 행해지고 있다. TNT 당량(최고) ... 어떤 가스폭발과 같은 에너지를 방출하는 TNT 중량(kg)

$$\text{즉 } (W_{int})_{\max} = \frac{\Delta H_C \times W_G}{1000}$$

여기서 ΔH_C 는 가스의 연소열(Kcal/kg). W_G 는 가스폭발량(kg), 1,000은 TNT의 폭발열(Kcal/kg)이다.

다음에는 TNT수율인데 에너지 발생량은 같아도 폭약과 가스와는 그 발생 속도 및 발생하는 공간의 크기가 현저하게 차이가 나기 때문에 TNT당량(최고)의 몇%가 실제의 가스폭발사고에 기여하는지를 TNT수율로서 주어지도록 한다.

$$\text{즉 } \eta_{TNT}(\%) \text{ (TNT수율)} = \frac{TNT \text{ 당량(사고)}}{TNT \text{ 당량(최고)}} \times 100$$

여기에서, TNT 당량(사고)...폭발의 폭풍피해와 같은 피해를 주는 TNT중량(kg)

지금까지의 많은 가스폭발사고의 폭풍피해를 조사한 결과 스틸렌, 부타디엔, 염화비닐의 대형사고에 대하여 0.3 ~ 4%, 프로판 배관으로부터의 대형사고에 대하여 7.5%, 이소부틸렌 탱크의 사고에 대하여는 10%로 추정하고 있다. 폭풍피해가 없는 경우에는 0%로 한다. 실험에서의 균일양론비혼합물의 전부를 폭발시키도록 한 경우에는 100%로 본다.

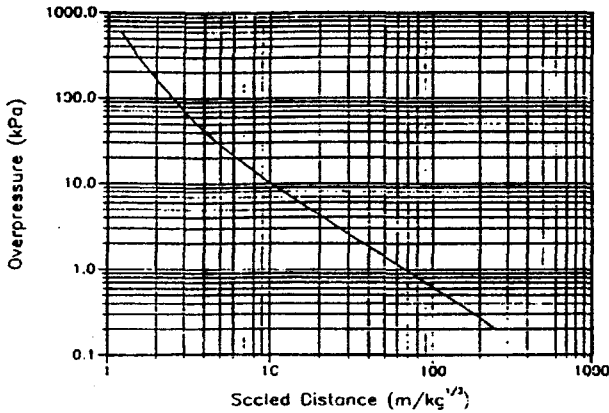
3-2. 증기운폭발(Unconfined Vapor Cloud Explosion)

대기 중에 대량의 가연성가스가 유출하거나 대량의 가연성액체가 유출하여 발생하는 가스, 증기가 공기와 혼합해서 가연성 혼합기체를 형성하고 발화원에 의해 발생하는 폭발을 “증기운폭발”이라고 한다.

증기운폭발이 발생하는 과정은 유출한 물질이 저장되어 있는 상태에 따라 달라지며 특히 압력과 온도에 따라 달라지므로 아래와 같이 분류한다.

- ① 상온, 상압에서 액체이며 인화점이 상온보다 낮은 물질(예: 가솔린)
- ② 상온, 가압하에서 액화되어 있는 물질(예: 액화프로판, 액화부탄 등)
- ③ 그 물질의 비점 이상의 온도로 있지만 가압상태에서 액화된 물질(예: 반응기내의 벤젠, 헥산 등)
- ④ 대기압하에서 저온으로 하여 액화된 물질(예: LNG)

①의 경우 유출한 액체는 지면으로부터 열이 공급되면 액면에서 연속적으로 증기를 발생하여 주위에 확산한다. ②, ③의 경우는 고압 하에서 기상과 액상의 평형상태에 있는 물질이 대기압하에 유출된 액체의 온도는 대기압의 비점까지 낮아진다. 이처럼 순간적으로 기화하는 현상을 Flash라고 한다. ④



의 경우는 LNG와 같이 아주 낮은 온도에 있는 저온액화가스가 유출하면 지면 및 주위의 열에 의해 급속한 비등을 일으킨다. 지면의 온도가 저하되면 증발속도는 저하 되지만 단시간에 대량의 가연성 증기운이 생긴다.

Figure 1. Correlation between overpressure and distance

TABLE 2. Damage Produced by Overpressure

Overpressure (psig)	Damage
0.03	Large glass windows which are already under strain broken.
0.04	Loud noise. Sonic boom glass failure.
0.15	Typical pressure for glass failure.
0.3	95% probability of no serious damage.
0.5-1	Large and small windows usually shattered.
0.7	Minor damage to house structures.
1	Partial demolition of houses, made uninhabitable.
1.3	Steel frame of clad building slightly distorted.
2-3	Non-reinforced concrete or cinder walls shattered.
2.3	Lower limit of serious structural damage.
3	Steel frame building distorted and pulled from foundations.
3-4	Rupture of oil storage tanks.
5	Wooden utility poles snapped.
5-7	Nearly complete destruction of houses.
7	Loaded train wagon overturned.
9	Loaded train boxcars completely demolished.
10	Probable total destruction of buildings.
300	Limit of crater lip.

3-3. BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)

프로판 등의 액화가스의 고압용기(탱크, 탱크로리 등) 등에 외부화재 발생 시 내부의 액체는 높은 증기압이 발생하고 액체가 없는 탱크의 상부는 화염으로 가열되어 연성파괴를 일으키고 커다란 파편이 된다.

탱크가 파괴되어 내부가 대기압이 되면 액화가스가 갑자기 끓어올라 이 팽창력으로 파편이 멀리 날아가게 되며, 또한 발생한 증기는 곧 발화하여 부력으로 상승해서 구형화염(FIRE BALL)을 형성한다. 이와 같이 액체가 비등하여 증기가 팽창하면서 폭발이 일어나는 현상을 BLEVE라고 한다.

BLEVE현상은 가압용기에 저장된 액체물질을 그 시점에서 기체와 액체가 평형을 이루고 있으며 외부화재에 의해서 가압용기가 열을 받게 되면 용기내의 액체는 가열되어 용기내의 압력이 높아진다. 이때 용기의 용접부위나 약한 부분이 파손되면 용기내의 압력이 순식간에 대기압까지 내려가게 되어 용기내의 평형상태가 깨져 액체는 급격한 상변화(액체→기체:돌비)에 의한 폭발현상이 발생하게 된다.

액화가스저장탱크 지역의 화재 발생시 저장탱크가 가열되어 탱크내 액체가 급격히 증발하여 탱크내 압력이 저장탱크의 설계압력을 초과하여 탱크가 폭발하는 형태이다. BLEVE 의 경우에는 대부분 탱크 내 체적이 200배 정도로 증대되어 압력이 급격하게 증가하므로 탱크에 설치된 안전 밸브 (Rupture Disk, Vent Stack, Relief Valve)가 아무리 잘 되어 있어도 소용없다.

또한 불연성 물질의 저장탱크(예; 물탱크)는 BLEVE발생 후 다른 2차적인 위험 조건이 계속 일어나지 않으나 인화성 액체 저장탱크는 BLEVE와 동시에 Fire ball이 형성되므로 그 위험성이 증대된다.

3-4 고압용기폭발

40 l, 15MPa의 질소용기가 압력을 이기지 못하여 파열할 경우

$$\begin{aligned}
 W_e &= \int_1^2 p \, dV \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-\gamma} \\
 &= \frac{p_1 - p_2}{1-\gamma} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \\
 &= \frac{150 \text{ atm} \cdot 40 \text{ l}}{1.4-1} \left[1 - \left(\frac{1}{150} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} \right] \\
 &= 11416 \text{ l} \cdot \text{atm} \\
 &= 275 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

$$TNT_{eq} = 275025 / 1120 \text{ gm TNT} = 0.245 \text{ kg TNT}$$

이 값은 TNT_{eq}으로 환산하면 약 0.245 kg TNT와 맞먹는다. 이 경우 10m 떨어진 곳에서의 Δp = 0.86 psi 이고 20m 떨어진 곳에서의 Δp = 0.32 psi 이다.

4. 결론

많은 폭발현상이 급격한 화학적 에너지의 변환에 의해서 발생한다. 폭발재해를 예방하기 위해서는 폭발의 물리적인 발생기구와 폭발로 야기되는 제 현상에 대한 이해가 필요하다. 더욱이 과거의 폭발사고의 사례를 충분히 검토하여 재발을 방지하기 위한 실제적인 대책을 강구해야 한다.

본 글에서는 폭발현상에 대한 이해를 돕기 위하여 폭발의 물리적인 발생기구와 폭발의 특성을 소개하였다. 특히 가스안전과 관련된 몇 가지 전형적인 폭발의 형태에 대하여는 그 피해예측을 시도하였다. 이러한 피해예측은 경험적인 계산 식에 의해서 가능하나 계산 식의 수정과 보정은 현재도 많은 연구자들에 의해서 진행되고 있다.

참고문헌

1. D. A. Crowl & J. F. Louvar, "Chemical Process Safety ; Fundamentals with Application" Prentice Hall, 1990
2. 유석기, LPG 및 도시가스 실무핸드북, 구민사, 1996.
3. 윤재건, "고압가스를 상용하는 시험설비의 안전관리론," 제6차 유도무기(기체/발사대분야) 학술대회 논문집, 국방과학연구소, 1996. 9. 12 pp.204-208
4. 중대산업사고예방, 한국산업안전공단, 화학 95-2-69, 1995.8
5. ILO 중대사고예방매뉴얼, 한국산업안전공단, 화학 96-1-19, 1996
6. 한국노동문제연구원편, 안전관리총람, 1977, 성원안전연구소
7. R. W. King and J. Magid, Industrial Hazard and Safety Handbook, pp.401-440, 1980, Butterworth Inc.
8. 김영대, 정용준 역, 가스폭발예방기술, 1991, 도서출판 새화
9. Compressed Gas Association, Handbook of Compressed Gases, 1990, Van Nostrand Reinhold
10. 김희동, 폭발현상과 방제대책(I), 대한기계학회지 1997. 11월호. pp. 60~70.
11. 김희동, 폭발현상과 방제대책(II), 대한기계학회지 1997. 12월호. pp. 82~90.