

가스폭발은 어떻게 일어나는가

이 글은 일본의 “건축방재” ’92년 11월호에 게재된 것을 번역한 것으로 가연성 가스의 폭발에 관한 메카니즘을 소개하고 있다.

1. 머릿말

가스폭발이라 하면 큰 피해가 나는 비참한 사고라는 느낌을 갖는 사람이 많다. 확실히 그러한 것으로 건물 중에서 가스폭발이 일어나면, 창이 깨어져 유리가 비산하고, 벽, 천장, 바닥이 크게 굽거나 사람이 큰 부상을 당하거나 죽기조차 한다.

더욱이 발생한 압력파에 의해서 부근의 건물 창유리가 깨어지거나 폭발 후 화재에 이르는 것도 있다.

건물 중에서의 가스폭발은 가정용 연료로 사용되는 도시가스나 프로판 등의 가연성가스가 공기와 혼합한 후 불이 붙으면 일어난다.

가연성가스를 사용하면, 가스폭발의 위험이 있으므로 에너지원으로서 가연성가스를 다른 것으로 바꾸면 가스폭발은 일어나지 않을 것이다.

가연성가스를 석유로 바꾼 경우에 대해서 생각해 보자.

분명히 가스폭발은 일어나지 않을 것이지만, 건물 중에 석유를 비치하게 되어 화재의 위험이 크게 된다.

도시가스나 프로판의 공급시스템이 편리하고 취급상 용이함을 생각하면 석유로 바꾼다는 것이 좋다고는 할 수 없다.

또한, 전기로 바꾸는 것에 대해서 생각해 보자.

이 경우에도 가스폭발은 일어나지 않지만, 같은 량의 에너지에 대한 비용은 대폭으로 상승한다.

전기는 그 대부분이 석유 등을 연소시켜 얻으므로 전기를 열원으로 쓰게 된다면, 불필요하게 에너지를 변환시키므로 에너지의 불필요한 사용방법이라 할 수 있다.

이것은 CO₂를 불필요하게 방출하므로 환경을 고려하면 바람직한 것이 못된다.

이와 같이 건물 중에서 가연성가스를 사용하는 것은 특별한 경우를 제외하고 납득이 가며, 가연성가스를 어떻게 안전하게 사용하는가에 힘을 기울이는 것이 중요하다.

건물 중에서 가스폭발이 발생한 때의 피해는 그 건물의 구조나 각 부분의 강도에 따라 크게 좌우된다.

또한, 누설된 가연성가스가 체류하기 어려운 구조의 건물에서는 만일 가스 누설이 발생했을 때에 가연성가스가 체류하기 쉬운 구조의 건물보다도 가스폭발은 일어나기 어렵게 된다.

이와 같이 건물의 설계는 가스폭발의 발생이나 피해에 밀접한 관계가 있으므로 가스폭발의 발생 방어나 피해를 크지 않게 하기 위해서는 건물의 설계단계에서 가스폭발에 대해서 고려하여 두는 것이 필요하다.

설계단계에서 가스폭발에 대하여 고려하기 위해서는 가스 폭발이 어떻게 일어나는가 이해해 두어야 한다.

가스폭발현상은 많은 요인으로 인해 일어나는 복잡한 현상이며, 발생하는 장소, 가스의 종류, 농도 등에 따라 크게 다르지만, 여기서는 보통 건물내에서의 가스폭발에 대하여 건물의 설계시에 알고 있으면 도움이 될 것으로 생각되는 사항을 중심으로 해설한다.

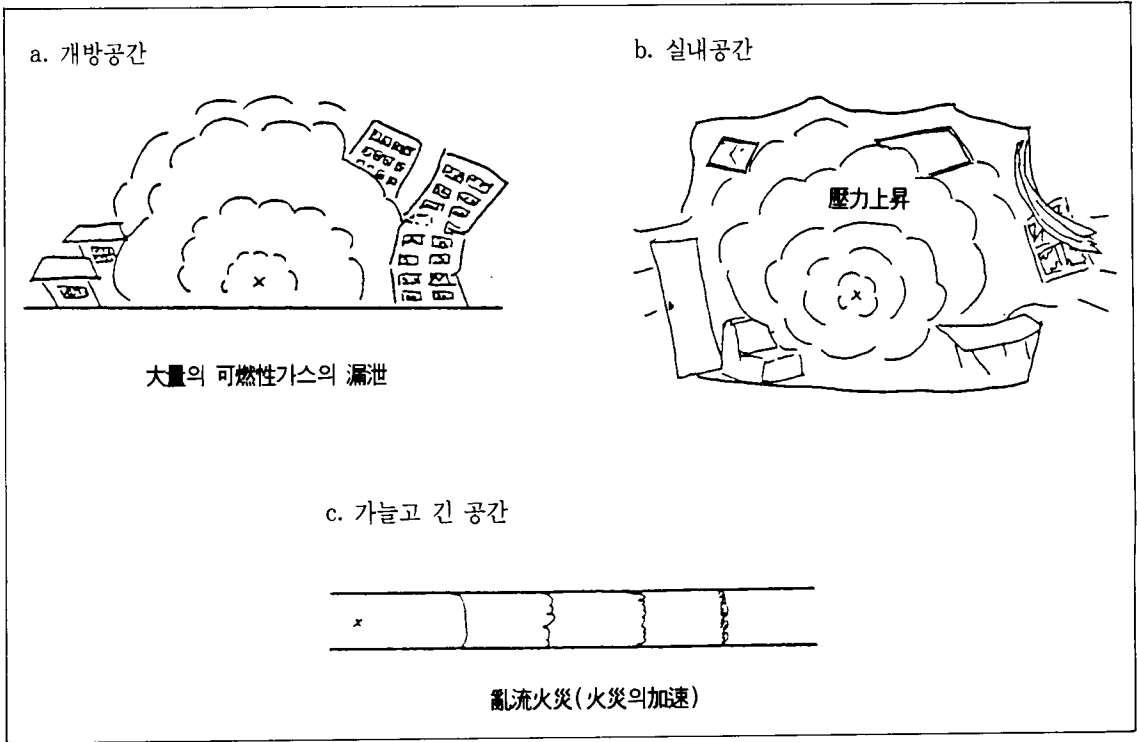
2. 건물 중에서의 가스폭발현상

가스폭발은 그 발생하는 장소의 형상에 따라 상당

히 다른 거동을 한다.

발생장소의 차이에 의한 가스폭발 거동의 차이를 그림1에 표시한다.

〈그림1〉 공간 형성에 의한 가스폭발 거동의 차이



우선 개방공간에서 가스폭발이 발생하는 경우 (그림1-a)로서, 이 경우에는 가연성가스가 빠져나가기 쉬워 농도가 상승하기 어렵다. 그러므로 특히 많은 가연성가스가 누설한 때에만 문제가 된다. 다만, 폭발이라는 현상이 일어날 때에는 많은 가연성가스나 폭발하기 쉬운 가연성가스가 누설된 경우이고, 특히 대규모의 폭발이 된다.

다음으로 주위가 둘러싸인 공간에서 가스폭발이 일어난 경우로서 이 때에는 가연성가스가 체류하기 쉬워 농도가 상승하기 쉽다. 또한, 착화 후 공간내의 압력도 상승한다.

보통의 방과 같이 종, 횡, 높이의 치수가 그다지

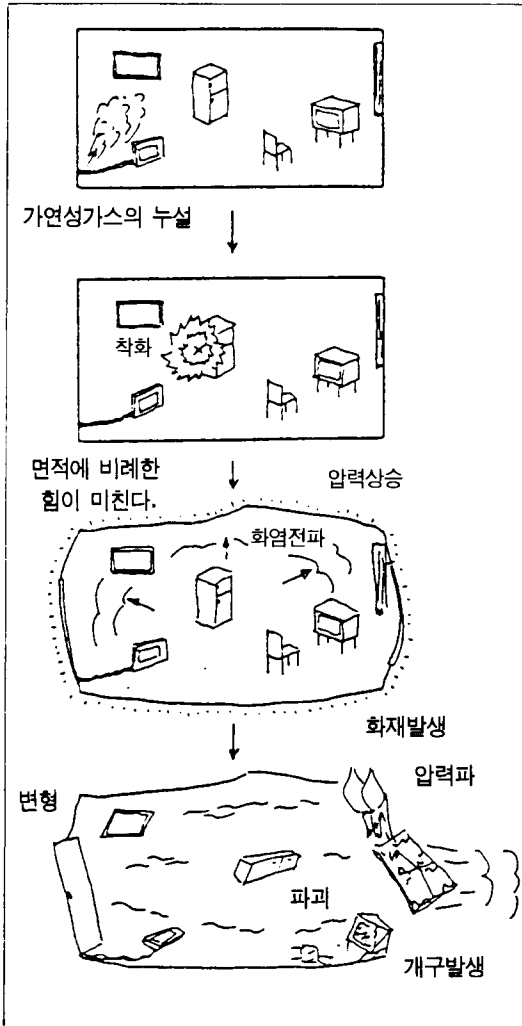
차이가 없는 경우(그림1-b)와 배관이나 덕트 속과 같이 좁고 긴 공간인 경우(그림1-c)라고 생각된다.

좁고 긴 공간인 경우에는 조건에 따라서는 Detonation(충격파를 동반하는 연소)으로 전이하여 큰 파괴력을 나타내므로 주의를 요한다.

본 해설에서는 보통 건물인 1실을 가정하였다. 그림1-b의 형상을 염두에 두고 진행한다.

가스폭발은 어떠한 과정을 거쳐 일어나는가를 image하기 위해 어떤 건물의 1실에서 가스폭발이 일어난 것으로 가정한다.〈그림2 참조〉

〈그림2〉 가스폭발의 과정



우선 처음에 도시가스나 프로판 등의 가연성가스가 누설하고, 누설된 가연성가스가 공기와 혼합하여 가연성 혼합기가 된다.

예를 들면, 가스 개폐장치와 호스의 연결부가 느슨해진 때나 가스렌지의 불이 냄비에서 끓어 넘친 국물에 의해서 꺼져버린 때에 가스 누설이 생긴다.

다음으로 可燃性 混合氣에서의 착화가 일어난다.

예를 들면, 의류 등의 마찰에 의해 발생하는 정전기나 전등 스위치의 전기 스파크 등에 의해 착화한다.

착화가 일어나면, 화염이 可燃性 混合氣中을 연소

확대되어 간다. 이에 의해서 기체의 체적은 수배로 팽창되지만, 실내에서는 팽창된 기체가 빠져 나갈 장소가 없으므로 압력이 상승한다.

가스폭발에 의한 피해의 대부분은 이 압력상승에 의해서 발생한다.

압력상승에 의해 방의 벽, 바닥, 천장, 창 등에 힘이 미치고 각 부분이 변형하거나 파괴되기도 한다.

보통 가장 강도가 낮은 창 등이 파괴 개구부가 된다.

개구부가 생기면 그 곳에서 실내의 기체가 유출되어 실내의 압력은 하강한다. 창이 파괴되어 개구부가 생겼는가에 관계없이 벽, 바닥, 천장 등이 크게 변형하는 일이 자주 있다.

이것은 압력상승에 의해 생기는 힘이 힘을 받는 면의 면적에 비례한 크기가 되고 또한, 방 전체의 면에 가해진다는 성질을 갖고 있기 때문이다.

예를 들면, 창유리가 파괴될 때의 압력상승은 0.1 기압 정도이지만, 0.1기압의 기압상승에 의해 걸리는 힘을 고려하면, 1m²의 면에 1톤, 4m²의 면에는 약 4톤의 하중이 가해진다.

그렇지만 이 힘은 바닥만이 아니라 전체 부분에 걸리고, 벽에는 횡방향으로, 천장에는 아래에서 윗 방향으로 힘이 걸리게 된다.

이것은 보통 생각하지 않은 방향에서의 힘이므로 예상외의 변형이 일어나는 것도 많으며 또한, 개구부로 기체가 유출되기 때문에 물체가 비산하거나 압력파가 생기기도 하여 부근의 건물 등에 피해를 미치는 경우도 있다.

또한, 실내에 타기 쉬운 물건이 있는 경우에는 화재가 발생하여 피해가 커질 수도 있다.

가스폭발이 일어나는 과정은 대개 다음과 같다.

① 가연성 혼합기의 형성

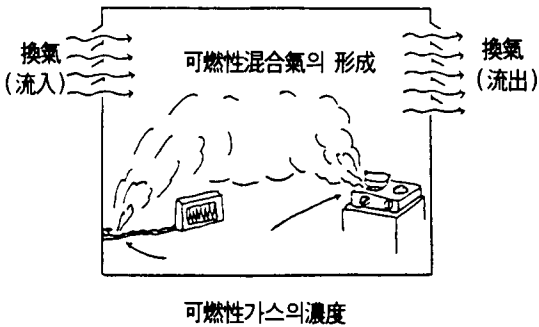
가스폭발이 발생하기 위해서는 우선 도시가스나 프로판 등의 가연성가스와 공기가 혼합하여 가연성 혼합기가 형성되지 않으면 안된다.

여기서는 실내에서 어떻게 가연성 혼합기가 형성되는가에 대하여 기술한다.

물론 가연성 혼합기의 형성을 막기 위해서는 가연성 가스를 누설치 않도록 하는 것이 제일이고, 그를 위해서는 설비나 가스의 관리에 힘을 기울이는 것이 중요한 것은 말할 필요도 없다.

그림3에 표시하는 바와 같이 어떤 방에서 가스개폐밸브와 호스의 연결부에서 가연성 가스가 누설된 경우를 생각해 보자.

〈그림3〉 실내에서의 가연성 혼합기의 형성상황



누설된 가스는 流動이나 擴散에 의해 퍼져가고, 공기와 가연성가스 농도의, 일반적인 변화를 알기 위해서는 단순한 경우에 대해서 방에서 평균농도의 변화를 식으로 표시한다.

가연성가스가 일정속도 Q로 누설되고, 실내에 일정한 환기가 된다면, 방에서 가연성가스의 평균농도 X_t 의 시간변화는 아래 식으로 표시된다.

$$X_t = (Q/V_n) [1 - \exp(-nt)] X_{f0}$$

Q : 가연성가스의 누설유량

V : 방의 용적, n : 환기량(유출량 기준)

t : 가스누설 개시로부터 경과시간

X_{f0} : 누설된 가스 중의 가연성가스 농도

여기서 환기율 n은 방에서의 기체 유출량을 방의 용적으로 나눈 것이고, 방에서의 기체가 단위시간에 몇회 바뀌는가를 표시하는 값이다.

이 식에서 가연성가스 평균농도의 시간변화를 산출하여 그림4에 표시한다.

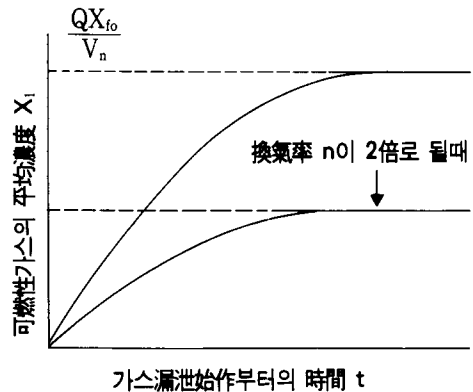
이것을 보면, 평균농도는 처음에는 빠르게 상승하지만 그 후는 일정치에 근접하여 간다. 이 일정치는 $QX_{f0}/(Vn)$ 로 되는 환기율 n가 2배로 되면 2분의 1이 된다.

또한, 시간 t의 계수는 -n라고 되어 있으므로 농도상승에 요하는 시간은 환기율 n에 의존한다.

이와 같이 가연성 혼합기의 형성에는 방의 구조와 밀접한 관계가 있는 환기가 큰 영향을 준다.

예를 들면, 환기율이 2배로 된 경우에 대해서 그림4에 표시한다. 이 경우 농도의 상승속도 및 최종 도달농도가 낮게 억제되는 것을 알 수 있다.

〈그림4〉 가연성가스의 평균농도의 시간변화



실제로 천연가스와 같이 공기보다 가벼운 것이 누설하면 농도가 높은 혼합기는 윗쪽에 머물기 쉽고, 프로판과 같이 공기보다 무거운 것이 누설하면 아랫쪽에 머물기 쉬운 것과 같이 실내의 농도는 불균일하게 되므로 농도 분포나 그 변화의 모양은 매우 복잡하다.

② 착화

가연성 혼합기에 불이 붙으면 가스폭발이 개시된다.

예를 들어, 아무리 많은 가연성 혼합기가 형성되어도 착화가 일어나지 않으면 가스폭발은 일어나지 않는다.

가연성 혼합기에 라이터 불꽃이나 담배불을 가까

이 한다거나 가연성 혼합기 중에서 전기 스파크를 튀게 하는 것으로 착화는 일어난다.

착화는 가연성가스의 농도가 아주 낮거나 높아도 일어나지 않는다. 가연성가스의 농도가 특히 높을 때 착화가 일어나지 않는다는 것은 이상하게 들릴지 모르나 이것은 연소에 필요한 산소가 부족하기 때문에 착화될 수 없다.

예를 들면, 도시가스의 공급 배관 중에는 늘 가연성가스가 존재하고 있으나 거기서는 폭발은 일어나지 않는다. 이것은 배관내에는 거의 공기가 없고 착화가능한 상한치 이상의 가연성가스 농도로 되어 있기 때문에 거기서는 가스폭발이 발생할 위험이 없기 때문이다.

착화가 일어나는 가연성가스 농도의 범위를 표1에 표시한다.

〈표1〉 연속범위

가연성물질	대 공 기	
	하한계(vol%)	상한계(vol%)
수 소	4.0	75.0
一酸化炭素	12.5	74.0
메 탄	5.0	15.0
프 로 판	2.1	9.5
에 탄 율	3.3	19.0
옥 탄	1.0	6.5
아 세 틸 렌	2.5	100.0

농도범위의 저농도 측의 한계를 연소하한계, 고농도 측의 한계를 연소상한계라 부른다.

연소하한계 이하의 농도나 연소상한계 이상의 농도에서는 착화가 일어나지 않아 폭발은 발생치 않는다.

앞 절에서 실내에서 가스가 누설된 때의 가연성가스의 농도변화에 대해서 기술하였으나 이 경우에는 농도가 점점 높아져 연소범위에 들어가므로 연소하한계의 농도값에 주의할 필요가 있다.

③ 화염전파와 압력의 거동

착화가 일어나면 가연성 혼합기 중을 화염이 전해지기 시작한다. 화염이 가연성 혼합기 중을 전파하면, 실내의 압력상승이 일어난다.

농도가 균일하여 유동이 없는 가연성 혼합기 중에서는 화염은 球相으로 전파하여 간다. 그 경우의 실내의 압력상승은 대개 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{P-P_0}{P_0} = \frac{CS_1^3 t^3}{V}$$

P : 실내의 압력 P₀ : 초기압력,
 C : 정수 S₁ : 연소속도
 t : 착화에서의 경과시간 V : 실내의 용적
 이와 같이 실내의 압력은 착화로부터 경과시간의 3승에 비례하여 상승한다. 실내의 압력이 상승하면 방의 벽, 창, 바닥, 천장에 힘이 걸려 변형을 일으킨다.

0.1기압의 압력상승으로 1m²당 1톤, 0.2기압에서는 2톤의 하중에 상당하는 힘이 걸린다.

압력의 변화를 알면, 각 부분에 어떠한 힘이 걸리는가를 알 수 있다.

압력이 상승하면, 먼저 창 등 강도가 제일 약한 부분이 파괴되어 개구부가 생긴다.

후술하는 바와 같이 파괴를 일으키는 압력은 압력의 상승 속도에 따라 변화한다. 개구부가 생기면, 그곳으로 실내의 기체가 유출하고, 실내의 압력은 급격히 감소한다.

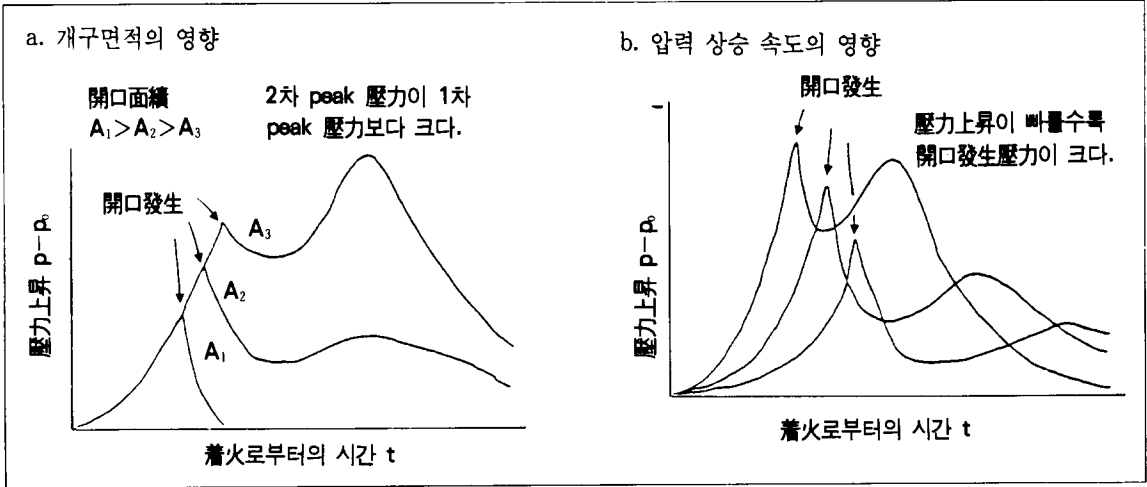
그림5에 개구부가 생긴 경우의 실내의 압력변동을 표시하였다.

그림5-a에는 여러 면적의 개구부에 대한 압력변동을 표시하였다.

개구부가 생긴 후 압력은 감소하지만, 그 후 다시 압력이 상승하여 2번째의 압력 peak를 형성하고 있다.

2번째의 압력 peak는 실내에 남아 있는 가연성 혼합기의 연소와 개구부에서의 기체 유출의 balance에 의해서 결정된다.

〈그림5〉 가스폭발시의 실내의 압력변동



개구부 면적이 작다고 할 때에는 그 곳에서의 기체 유출량은 적게 되므로 2번째의 peak압력은 크게 된다. 경우에 따라서는 2번째의 peak압력이 1번째의 peak압력(개구부의 파괴압력)보다 크게 되는 것이 있다.

이 경우에는 파괴하는 부분의 파괴압력이 실내 압력의 최대치로 된다고 생각해서는 안되기 때문이다.

건물의 설계시부터 강도가 약한 부분을 만들어 넣어 최고압력을 조절하도록 할 때에는 개구부의 면적을 어느 정도 크게 잡는 것에 주의가 필요하다.

그림5-b에는 가연성 혼합기의 종류와 농도가 다르고 압력 상승 속도가 다를 때의 실내 압력변동을 표시한다.

압력 상승 속도가 클수록 파괴가 일어나는 압력이 크게 되는 것을 알 수 있다.

이것은 비틀림이 어느 크기가 된 때에 파괴가 생기는가 하면 압력 상승 속도가 큰 쪽이, 그 크기의 비틀림에 달할 때의 압력이 될때 파괴 하는 것이다.

가스폭발이라고 하는 빠른 현상에 있어서 파괴를 고려할 때에는 재료의 동적인 파괴 특성을 고려할 필요가 있기 때문이다.

④ 화염면의 흠어짐의 영향

농도가 균일하여 유동이 없는 가연성 혼합기 중에서 가스폭발이 발생한 경우에는 전달되어 가는 화염은 매끄러운 면으로 된다. 그러나 실제 폭발에서는 가스배관의 균열 등에서 가연성가스가 분출하여 가연성 혼합기가 형성되기 때문에 농도는 불균일하게 되어 기체에는 유동이 있는 것이 보통이다.

가스폭발이 농도 불균일이나 유동이 있는 공간에서 발생하면 전파하는 화염면에 많은 요철 즉, 흠어짐이 생긴다.

화염면에 흠어짐이 생기면 화염면의 면적이 증대하여 가연성 혼합기를 연소하는 속도가 증대하기 때문에 압력의 상승 속도가 크게 되어 문제가 된다.

결국 앞 절에서 기술한 바와 같이 압력 상승 속도가 크게 되면 파괴를 일으키는 압력이 상승하며, 가스 폭발중의 최대 도달압력이 크게 되어 발생하는 피해도 크게 되기 때문이다.

또한, 화염면의 흠어짐은 다른 요인에 의해서도 발생한다.

예를 들면, 전파하는 화염에 압력파를 작용시키면 화염면에 급속하게 흠어짐이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것에 대해서 모형실험을 한 결과를 그림6에 표시한다.

〈그림6〉 압력파의 효과(모형실험결과)

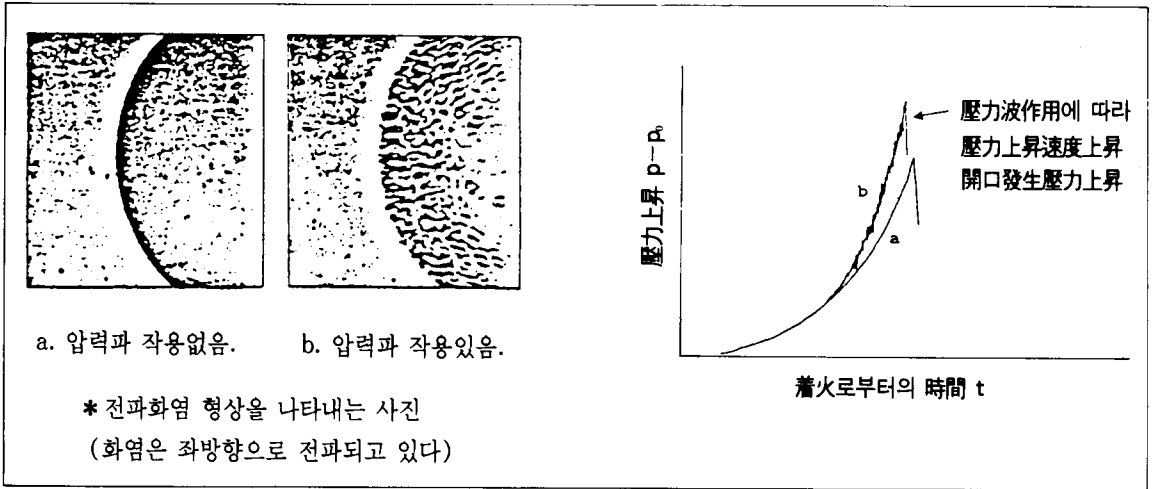


그림6에는 전파화염에 압력파를 작용시킬 때와 시키지 않을 때의 압력변동을 표시한다. 압력파가 작용하면, 화염면에 많은 흠어짐이 생기는 것을 사진에서 알 수 있다.

또한, 화염면에 흠어짐이 생기면 압력 상승 속도가 크게 되어 개구부가 파괴하는 압력도 상승하는 것을 알 수 있다.

별도의 실험에 있어서 방의 내벽에 흡음재를 붙이면 실내를 전파하는 압력파를 흡수하므로 압력파에 의한 화염면의 흠어짐이 억제되어 흡음재를 붙이지 않은 경우보다도 압력 상승 속도가 작게 된다고 하는 결과도 보고되어 있다.

3. 맺는 말

이상 기술한 바와 같이 가스폭발 발생의 난이도나 발생시의 피해의 크기는 건물의 구조에 크게 좌우된다.

건물을 설계할 때에 미리 가스폭발 발생까지를 고려하는 것은 가연성가스를 취급하는 공장건물 등에서 미리 가스폭발이 발생하는 위험을 강하게 인식하는 경우를 제외하고는 어려울지도 모른다.

그러나 가능하면 설계시부터 여러가지 위험을 염두에 두고 안전을 위한 배려가 된 건물을 세우는 것이 바람직하다. ㉞

미니정보

燃焼 가스(Fire gas)

“燃焼 가스”란 燃焼生成物 가운데 氣體로 된 것을 일컫는다. 大部分의 可燃性 物質은 炭素를 包含하고 있고, 이 炭素가 타서 空氣 供給이 充分하면 二酸化炭素(CO_2)가 되고 空氣 供給이 부족하면 毒性이 큰 一酸化炭素(CO)가 된다. 또한 物質이 타면 黃化水素(H_2S), 二酸化黃(亞黃酸가스 SO_2), 암모니아(NH_3), 시안화水素(HCN), 一酸化 혹은 二酸化窒素, 포스겐($COCl_2$), 化水素(HCl) 등이 燃焼 gas에 包含되어 發生한다. 燃焼 gas의 種類는 여러 가지 要因에 의하여 달라지는데 그 가운데 重要한 것은 燃焼 物質의 組成, 燃焼에 供給되는 空氣量, 溫度가 있다.