

밀폐공간에서 가스폭발에 의한 개구발생 후의 압력변화에 대한 해석

Analysis of the Pressure Behavior with the Partial Rupture in Closed Vessel During Gaseous Explosion

윤재건* · 조한창** · 신현동**

J.K. Yoon · H.C. Cho · H.D. Shin

(1999년 6월 3일 접수, 1999년 8월 12일 채택)

ABSTRACT

A numerical study on gaseous explosion was carried out to predict the transient pressure behavior with the partial rupture in confined vessels. Equations, assumptions and solutions for central ignition of premixed gases in closed spherical vessels are proposed with various equivalence ratios of gas fuel, as CH_4 and C_3H_8 , vent areas and vent opening pressures. Given vent opening pressure in a vessel, the magnitude of second peak pressure results from the vent areas and burning velocity, varied by equivalence ratio of gas fuel. In a living room of an apartment, the higher second peak pressure than the vent pressure is not appeared due to its large window areas. As vent opening pressure is higher, the larger damage by gaseous explosion is expected and the larger vent area is necessary for relieving the damage. In the same concentration, the gaseous explosion by propane rather than methane shows the larger damage due to its higher adiabatic flame temperature and equivalence ratio.

1. 서론

밀폐공간에 가연성가스 등이 유출되어 공기와 섞여 점화되면 가스폭발이 일어난다. 사용상의 편리함으로 가스연료의 사용이 늘어나는 것

에 비례하여 가스폭발의 발생빈도가 증가하고 있다. 가스폭발에 대한 연구는 대체로 가스폭발 과정에서의 압력상승과 갑작스런 개구부(開口部)의 발생에 따른 압력강하 등을 광범위하게 연구하였다^{1,2,3)}. 가스폭발에 의해 상승된 밀폐압

* 한성대학교 안전과학기술연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

력은 발생된 개구부에 의해 빠르게 하강하게 된다. 이때 개구부의 면적에 따라 하강하던 압력이 또다시 상승하여 개구발생압력보다 더 큰 2차 피크가 발생하는 등 여러 형태의 압력거동이 관측되는데, 이들 결과로부터 가스폭발에 따른 피해를 최소화할 수 있는 개구부의 설계조건을 찾을 수도 있다³⁾.

본 연구에서는 일반 가정에서 사용되는 LNG와 LPG의 주 연료인 메탄과 프로판이 공기와 혼합되어 착화되었을 때 상승되는 압력거동과 창외의 파열에 따라 발생하는 개구부 생성후의 압력거동을 수치적으로 개구면적에 따라 조사해보고자 한다. 이러한 과정을 통해 압력파(pressure wave)에 의해 발생할 수 있는 피해를 최소화할 수 있는 최소한의 개구면적을 얻어보고자 한다. 수치해석을 위한 수학적 모델은 기존의 전개방식을 사용하였으며, 실제 가정집의 거실크기와 비슷한 밀폐공간을 기준 조건으로 택하여 수치해석을 수행하였다.

2. 수치해석

가스폭발과정에 대한 해석을 위하여 다음의 가정을 하였다. 먼저 혼합기(mixture)는 밀폐공간내 균일하게 존재한다. 점화는 밀폐공간의 정중앙에서 발생하며, 구형모양의 층류예혼합화염(laminar premixed flame)이 미연가스방향으로 전파되며 그때 에너지손실은 무시된다. 밀폐공간내 압력은 모두 동일하며, 미연가스의 열역학적 특성은 등엔트로피과정으로 가정하였다¹⁾.

가스폭발을 해석하기 위해 먼저 밀폐공간내 질량과 부피를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$m_o = m_u + m_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_o = V_u + V_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 하첨자 "o"는 초기, "u"는 미연가스, 그리고 "b"는 연소가스를 의미한다. 위의 질량과 부피는 미연가스의 연소반응으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{dm_u}{dt} = - \frac{dm_b}{dt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dV_u}{dt} = - \frac{dV_b}{dt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 시간에 따른 미연가스의 질량변화(연소율)는 화염의 전파속도 즉, 연소속도(burning velocity), S_u 를 이용하여 정의할 수 있다.

$$\frac{dm_u}{dt} = - A_f \rho_u S_u \quad \dots\dots\dots (5)$$

이때 화염 면의 표면적, A_f 는 구(sphere)에서 $A_f = 4\pi r_b^2$ 으로 정의된다. 여기서 r_b 는 미연가스의 내부경계의 반경을 의미한다.

미연가스가 등엔트로피과정으로 압축된다고 가정하였으므로 그 밀도는 이상기체상태방정식으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_u \bar{\gamma}_u = \text{constant} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho_u = \frac{p}{R_u T_u \sum (Y_i / M_i)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서 γ 는 비열비(specific heat ratio), R_u 는 기체상수(universal gas constant), Y_i 는 i 화합종의 질량분률(mass fraction), M_i 는 그 상태의 분자량을 의미한다.

밀폐공간내 혼합기가 착화되면 화염이 전파되면서 압력이 상승하게 되는데, 그 크기를 계산하기 위해서는 미연부분과 연소부분의 부피변화를 고려해야 한다. 미연부분의 감소되는 부피는 압력상승에 따른 부피감소와 연소에 따른 부피감소의 합이다. 즉,

$$\frac{dV_u}{dt} = \frac{V_u}{\bar{\gamma}_u p} \left(\frac{dp}{dt} \right) - \int_{A_i} S_u dA \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $\bar{\gamma}_u$ 는 미연부분의 기체평균 비열비이다. 한편 연소부분의 부피변화는 압력상승에 따른 부피감소와 연소에 의한 부피증가의 합으로 정의되는데, 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dV_b}{dt} = \frac{V_b}{\bar{\gamma}_b p} \left(\frac{dp}{dt} \right) - \int_{A_i} S_u \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right) dA \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서 연소부분의 기체평균 비열비, $\bar{\gamma}_b$ 는 아래와 같다⁴⁾.

$$\bar{\gamma}_b = \frac{\ln \left\{ (1/V_b) \int V_b^{\bar{\gamma}_b} dV_b \right\}}{\ln V_b} \quad \dots\dots\dots (10)$$

식(8)과 (9)를 이용하여 정리하면 밀폐공간내 압력은 다음과 같이 변동한다⁴⁾.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\bar{\gamma}_u p \left\{ \int_{A_i} S_u (\rho_u / \rho_b) dA - \int_{A_i} S_u dA \right\}}{V_o \{ 1 + (V_b / V_o) (\bar{\gamma}_u / \bar{\gamma}_b - 1) \}} \dots\dots\dots (11)$$

이때 화염면 전체에 걸쳐서 화염속도, S_u 가 일정하다면,

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\bar{\gamma}_u p S_u A_f (\rho_u / \rho_b - 1)}{V_o \{ 1 + (V_b / V_o) (\bar{\gamma}_u / \bar{\gamma}_b - 1) \}} \dots\dots\dots (12)$$

으로 정의할 수 있다. 실제 화염속도는 화염면에 걸쳐 동일할 수 없으며 또한 화염면의 크기를 정확히 얻는다는 것도 매우 어려운 문제이다. 그러나 문제를 단순화하기 위해서 압력변동의 해석에는 식(12)을 주로 사용한다.

식(11)으로 시간에 따라 증가하던 압력이 어느 수준을 초과하게 되면 밀폐공간의 약한 부분을 파열시키게 된다. 즉 일반 가정집에서는 유리창의 파열이 발생하게 된다. 일단 파열에 의해 개구부가 발생하였다면, 그곳으로 미연기체가 외부로 급속히 유출되면서 밀폐공간내 압력은 빠르게 하강하게 될 것이다. 정확한 압력하강을 얻기 위해서는 기본적으로 밀폐공간으로부터 유출되는 기체의 유속을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 외부 대기상태에서의 온도와 밀도, 그리고 압력을 T_a , ρ_a , p_a 라고 가정하면, 개구부로부터 유출되는 기체의 유속은 다음과 같이 결정할 수 있다. 즉 임계압력비(critical pressure ratio), $\bar{P}_c = (2/\gamma + 1)^{1/(\gamma-1)}$ 보다 p_a/p 이 크다면 음속(sonic)이상의 유속을 갖게 되며, 그보다 작으면 음속이하의 유속을 갖게 된다.

$$u_e = \sqrt{\left(\frac{2\gamma R_a T}{\gamma - 1} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\}} \text{ for } \bar{P}_c \leq p_a/p < 1 \dots\dots\dots (13)$$

$$u_e = \sqrt{\frac{2\gamma R_a T}{\gamma + 1}} \text{ for } p_a/p < \bar{P}_c \dots\dots\dots (14)$$

여기서 R_u 은 기체상수(R_u/M), M 은 유출되는 기체의 평균분자량, T 는 밀폐공간내의 온도이다. 파열로부터 연소가스가 분출되면 유출밀도의 평가가 어려워지고 또 흠어짐이 발생하는 등 압력움직임을 예측할 때 화염면의 왜곡이 심하고 또한 그에 따른 열역학적 특성이 변동할 수 있으나, 본 연구에서는 이러한 것을 모두 무시

하고 발생하는 개구부가 밀폐공간에 균일하게 존재한다고 가정하고 해석하였다.

개구부로의 기체유출을 고려한 밀폐공간내 압력변동은 식(12)을 정리하면 얻을 수 있다.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\bar{\gamma}_u p S_u A_f (\rho_u / \rho_b - 1) - \bar{\gamma}_u u_e A_c p (\rho_a / \rho_u)}{V_o \{ 1 + (V_b / V_o) (\bar{\gamma}_u / \bar{\gamma}_b - 1) \}} \dots\dots\dots (15)$$

여기서 A_c 는 기체가 유출될 수 있는 순수 단면적으로 실제 개구부의 단면적, A_v 에 유량계수(discharge coefficient), C_d 를 곱한 값으로 정의된다.

밀폐공간내 기체질량은 개구발생에 따른 기체 유출에 따라 아래와 같이 감소하게 된다.

$$m_u(t) = m_o - m_b - \int_0^t \rho_a A_c u_e dt \dots\dots\dots (16)$$

일단 본 연구에서는 파열되는 개구부가 화염면을 왜곡시키지 않게 밀폐공간내 전체에 골고루 퍼져 있고 이에 따라 완전 연소상태가 아닌 상황에서는 모두 미연가스만이 유출된다고 가정하고 계산하였다. 만약 연소가스가 배출되는 것은 큰 고려사항이 되지 않을 것이다. 왜냐하면 보통 그러한 경우는 미연가스가 거의 연소되어 압력이 계속 저하되는 상황이기 때문이다.

본 연구에서는 일반 가정집은 물론 일반적인 밀폐공간에서의 가스폭발과정을 해석해 보았다. 일단 밀폐공간은 구(sphere)로 한정하였다. 왜냐하면 구가 아닌 덕트(duct)와 같은 일반 공간에서는 화염의 전파과정에서 화염면의 왜곡이 심각하게 발생할 수 있고 밀폐공간내 압력의 불균형 등이 발생하는 등 정확한 해석이 불가능하기 때문이다. 또한 정성적인 가스폭발의 특성파악에는 별무리가 없을 것으로 판단되기 때문이다. 구의 정 중앙에서 임의의 점화원에 의해 혼합기가 착화되면, 화염은 화염전파속도에 따라 직경이 증가하게 된다.

$$r_b = \int_0^t S_u dt \dots\dots\dots (17)$$

이때 밀폐공간의 반경이 R 이라면, 미연가스의 밀도, ρ_u 를 계산할 수 있다.

$$\rho_u = \frac{3m_u}{4\pi(R^3 - r_b^3)} \dots\dots\dots (18)$$

수치해석은 반응물(reactant)와 생성물(product)

의 여러 물성치를 이용하여 각 시각에서의 압력에 따른 층류화염속도를 계산하고 이를 가지고 화염면의 크기를 계산하여 식(12)에 대입하여 각 시각에서의 압력을 계산하고 개구발생압력이상에서는 혼합기의 유출속도를 계산하고 미연혼합기의 잔류량과 식(15)를 사용하여 그때의 압력을 계산하였다. 이때 각 수식들은 2차 룬지쿠타방법(second order Runge-Kutta method)⁵⁾으로 풀이하였으며, 채택된 시간간격은 그 신뢰성을 인정할 수 있는 1×10^{-4} sec이었다.

계산에 사용된 기초데이터는 Table 1과 같다. 구의 크기는 일반 가정집의 거실 크기와 비슷한 체적을 구로 환산하여 적용하였다. 개구발생압력, P_v 는 압력파(pressure wave)에 의해 유리창이 파열되는 압력을 적용하였다. 밀폐공간을 구라고 가정한 점과 정 중앙에서의 착화, 그리고 개구발생 후 균일한 화염면에 대한 가정 등은 실제 밀폐공간에서의 가스폭발과 큰 차이가 있지만, 대략적인 압력변동과 그 특성을 파악하는 데는 별무리가 없을 것이라 판단된다.

Table 1 Input data of the base case for the computations

R=3.29m (height 3m×width 5m×length 10m)	
$p_0=101$ kpa	$T_0=300$ K
$\gamma_{air}=1.3797$	$P_v=2000$ pa

미연가스가 점화되면, 화염은 층류화염속도, S_u 로 전파된다. 층류화염속도를 엄밀하게 나타내면 연료의 종류, 온도, 압력 그리고 당량비의 함수로 정의된다⁶⁾. 여기서 압력에 따른 층류화염속도는 $S_L=S_0 (p/p_0)^{0.2}$ 으로 정의된다. 이때 메탄은 $n=1.0$, 프로판의 경우는 $n=1.4$ 가 적용할 수 있다.

본 연구에서 사용된 기상연료는 도시가스(L-NG)의 주성분인 메탄과 연료특성비교를 위하여 LPG의 주성분인 프로판을 채택하였는데 프로판에 대한 정보는 수치결과에서 언급하도록 하겠다. 기준조건에서 메탄의 당량비에 따른 층류화염속도⁶⁾와 단열화염온도 등은 Table 2와 같으며, 층류화염속도이외 데이터는 화학평형코드인 CEC-71(Chemical Equilibrium Code-71)을 실행시켜 얻은 결과를 사용하였다. CEC 코드⁷⁾는 반

응물이 반응에 의해 평형상태에 도달되었을 때의 생성물조성, 온도, 비열, 그리고 분자량 등을 계산할 수 있다.

Table 2 Input data with the equivalence ratio of methane

equivalence ratio	laminar burning velocity, S_0 (cm/s)	adiabatic flame temperature (K)	specific heat (kJ/kg)	molecular weight
0.6 (5.7% CH ₄)	18	1665	1.2688	28.1
0.8	28	1997	1.2372	27.8
1.0	40.5	2227	1.1856	27.4
1.2	37	2138	1.2409	26.4
1.4	17.5	1981	1.2679	25.3
1.6 (15.0% CH ₄)	12	1833	1.2842	24.4

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 메탄의 당량비 0.8에서 개구면적의 크기에 따른 압력거동을 도시한 것이다. 개구부가 없는 경우에는 15.63초에 폭발이 종결되며 열손실이 없기 때문에 최고압력은 0.80Mpa으로 일정하게 유지된다. 그러나 밀폐공간에 창이 있다면, 창은 압력파에 의해 파열되어 미연 혼합기가 유출되는 개구부가 된다. 이때 창과 같은 개구부가 발생하는 압력을 1차 피크라고 정의할 수 있다. 개구부가 존재하는 경우는 약 1.5초에 창의 파열압력인 2000pa에 도달되고 창의 파열 후에는 빠르게 압력이 저하된다. 그러나 화염면은 계속적으로 증가되기 때문에 밀폐공간내 압력이 또다시 상승하지만 미연혼합기가 모두 배출되거나 연소될 때까지 상승되는데 그때의 최고압력을 2차 피크라 정의할 수 있다. 2차 피크 후에는 연소가스가 개구부를 통해 배출되기만 하므로 밀폐공간내 압력이 빠르게 하강하게 된다. 이러한 가스폭발과정은 밀폐공간의 크기와 화염전파속도에 지배되겠지만 본 연구에서는 대략 7초 정도가 소요되었다.

Fig. 2는 Fig. 1의 조건에서 미연가스의 유출속도, u_c 와 초기 미연가스의 부피에 대한 연소된

가스의 부피비를 도시한 것이다. 개구부가 발생한 후에 미연가스가 유출되는데 식(13), (14)에서 보는 바와 같이 개구면적이 적고 밀폐공간의 압력이 높을수록 빠른 속도로 유출된다. 초기 미연가스의 부피에 대한 연소된 가스의 부피비는 개구면적에 거의 영향을 받지 않았으며, 시간에 따라 증가되거나 가스폭발이 종결되어도 연소된 부분은 전체의 26% 정도였다. 즉 74% 정도의 미연혼합기가 개구부를 통해 연소되지 않고 그대로 유출된다.

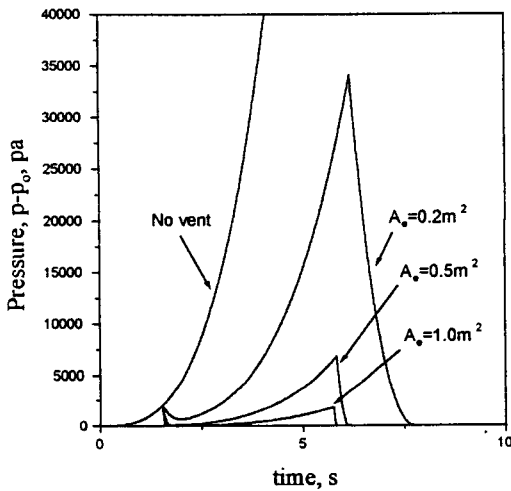


Fig. 1 Effect of vent area on pressure history at $\phi = 0.8$ of CH_4

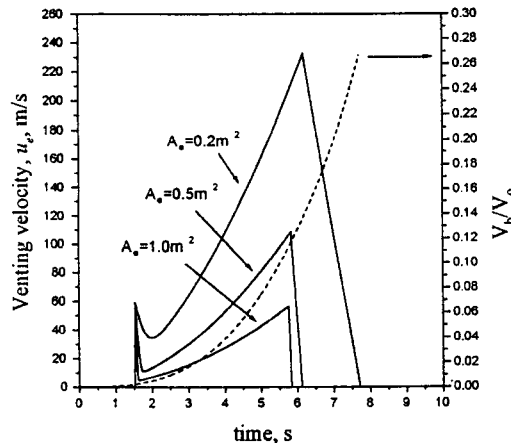


Fig. 2 Effect of vent area on venting velocity and ratio of burned volume to initial volume of mixture

Fig. 1과 2로부터 개구부의 존재는 일단 가스 폭발의 의한 피해를 줄여주며, 과도한 개구면적은 2차 피크의 발생을 억제하였다. 이러한 경향은 기존의 연구결과와 동일하다⁴⁾. 2차 피크의 감소는 가스폭발에 따른 이차 피해를 감소시킬 수 있다는 의미이므로 개구면적이 증가할수록 그 피해를 감소시킬 수 있다. 또한 일반 아파트와 같은 공간에서는 최소한 창 면적이 $1.0m^2$ 이상이므로 2차 피크에 따른 피해를 고려하지 않아도 될 것으로 사료된다.

식(15)에서 오른쪽항의 분자에서 첫 번째항과 두 번째항의 크기를 비교했을 때 양의 값을 갖으면 압력은 상승되지만 두 번째항이 크면 압력이 하강하게 된다. 그런데 첫 번째항은 화염면의 증가에 따라 증가되면 두 번째항은 크게 변화되지 않는다. 이에 따라 어느정도 구간의 개구부면적에서 2차피크가 1차피크보다 증가될 수 있다.

Fig. 3은 메탄의 당량비에 따른 압력거동을 도시한 것이다. 이때 사용된 1차 피크, 즉 개구 발생압력은 $2000pa$ 이고 개구면적은 $0.5m^2$ 이다. Fig. 3에서 당량비에 의해 결정되는 화염속도가 상승하는 압력의 기울기를 지배하였다. 즉 빠른 화염속도를 갖는 당량비에서보다 빠른 시간에 1차 피크에 도달하였으며, 2차 피크가 1차 피크보다 큰 경우도 발생하였다. 이에 따라 당량비 1.0에서 가장 빨리 개구부가 발생하고 가장 큰 2차 피크가 발생하는데 그 크기는 가옥이 일부 파괴되는 수준으로 컸다⁴⁾.

Fig. 3에서 혼합기의 당량비에 따른 화염속도에 따라 압력거동이 결정되며, 2차 피크의 크기를 개구발생압력보다 낮게 조절하기 위해서는 당량비에 따라 개구면적을 결정해야 함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 개구발생압력보다 2차 피크가 작게 되는 개구면적을 화염속도에 대한 초기 혼합기의 부피 비에 따라 도시한 것이다. 개구발생압력보다 2차 피크가 작게 조절하기 위해 필요한 개구면적은 임의의 밀폐공간에 대하여 화염속도에 대한 초기 혼합기의 부피비(V_0/S_0)에 지수함수적으로 감소하였다. 즉 화염속도가 빠른 경우에는 Fig. 3에서 본 바와 같이 큰 개구면적이 필

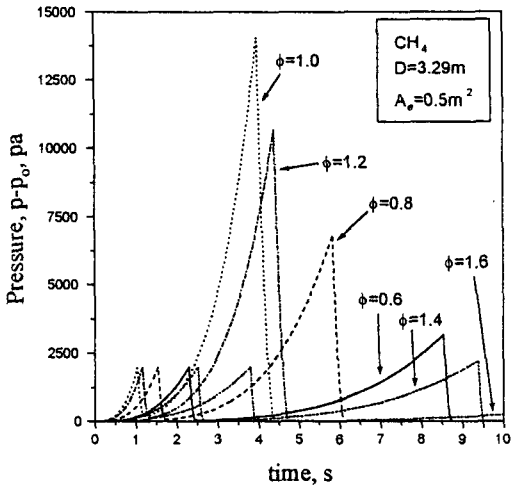


Fig. 3 Effect of equivalence ratio on pressure history

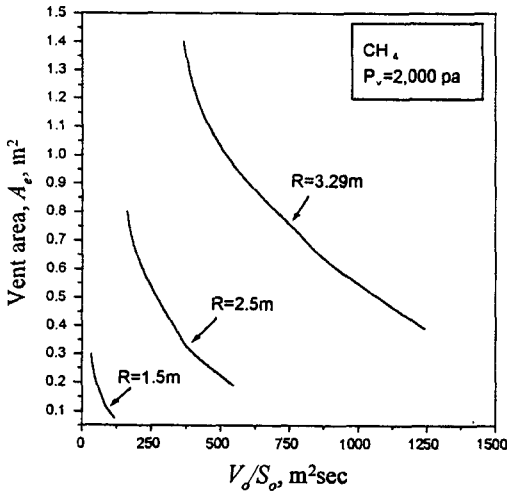


Fig. 4 Effect of initial volume to laminar burning velocity on required vent area for the lower second peak pressure than the first one

요하였다. R=3.29m의 밀폐공간에서는 메탄에 의한 가스폭발인 경우 2000pa의 1차 피크보다 낮은 2차 피크를 유도하기 위해서는 최소한 1.4 m²의 개구면적이 필요하였다. 화염속도는 당량비 1.0부근에서 가장 빠르기 때문에 그 경우에서의 개구면적이 설계인자가 되어야 한다. 위의 결과는 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 일반 아파트의 거실에 있는 창의 면적보다 월등히 작은

값이기 때문에 일반 아파트에서는 크게 고려하지 않아도 될 것이라 판단되지만 일반적인 산업설비나 지하실과 같은 밀폐공간에서는 중요한 인자가 될 수 있을 것이라 사료된다.

초기혼합기의 부피는 R³에 비례하지만 화염속도는 일정하기 때문에 화염속도에 대한 초기혼합기의 부피비는 구의 반경에 따라 급격히 증가하게 된다. 그렇지만 2차 피크를 1차 피크보다 작게 하기 위한 개구면적은 하나의 밀폐공간에 대하여 동일한 경향, 즉 V₀/S₀에 대하여 지수함수적으로 감소하며, 밀폐공간의 크기가 작을수록 적은 개구면적이 필요하였다.

Fig. 5는 메탄의 당량비가 1.0인 경우 개구부의 파열압력에 따른 압력거동을 도시한 것이다. 이때 사용된 개구발생압력은 2000pa, 6900pa, 그리고 40000pa들이었다. 6900pa는 가옥의 일부가 파괴되어 주거불능이 되는 조건이며, 40000pa는 가옥 거의 대부분이 완전히 넘어져 무너지는 조건의 중간값이다. Fig. 1에서 본 바와 같이 초기의 압력상승곡선은 개구발생때까지는 모두 동일하지만, 개구발생시간은 개구발생압력의 증가에 의해 지연되었다. 개구발생이후에 하강하던 압력이 모두 다시 상승하여 2차 피크를 이루었다. 개구발생압력이 증가하면 가스폭발에 의한 피해가 더욱 증가되고 6900pa에서처럼 2차 피크가

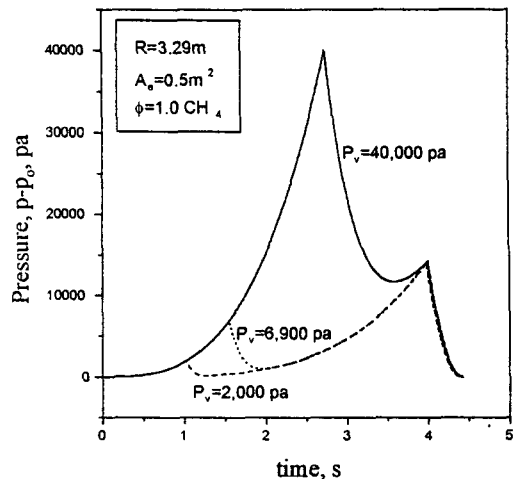


Fig. 5 Effect of vent opening pressure on pressure history

또다시 크게 발생할 수 있다. 이러한 경우는 발파된 가옥인 또한번의 압력파에 의해 완파될 수도 있기 때문에 중대한 피해를 야기할 수도 있다. 이에 따라 개구발생압력이 증가되면 개구면적을 상대적으로 증가시켜야 1차 피크보다 작은 2차 피크를 유도할 수 있을 것이다.

Fig. 5에서 압력이 상승되어 발생하는 2차 피크의 발생시기와 크기는 개구발생압력의 크기에 무관하게 거의 같았다. 이는 Fig. 2에서 본 바와 같이 배기되는 미연가스의 양이 비슷하고 화염속도가 비슷하기 때문이라 사료되며, 개구발생압력 2000pa과 6900pa에서 하강된 압력이 또다시 상승할 때 그 곡선이 같은 것으로부터 확인할 수 있다. 이를 좀 더 확대하면 40000pa에 개구부가 발생할 때 압력이 하강하고 또다시 상승할 때 위의 두 곡선과 같아질 것이다. 만약 밀폐공간의 크기가 더욱 크다면 새 조건에서의 압력상승곡선은 동일할 것이라 유추할 수 있다.

Fig. 6은 도시가스의 주성분인 메탄과 LPG의 주성분인 프로판이 공기에 대하여 동일한 부피비로 혼합되어 있을 때의 압력거동을 도시한 것이다. 이때 개구발생압력은 2000pa, 그리고 개구면적은 1.0m²으로 정의하였다. 두 기상연료의 농도는 5.7%를 채택하였으며, 그때 메탄의 당량비는 0.6이며 프로판의 당량비는 층류화염속도가 25cm/s인 1.5이다. 프로판의 화염속도가 메탄의 경우에 비하여 빠르기 때문에 보다 빨리 1차 피크에 도달한 후 압력이 하강하였다. 프로판의 경우는 2차 피크가 1차 피크보다 크지만 메탄의 경우는 1차 피크보다 작았다. 이러한 경향은 같은 농도라도 연료에 따라 당량비의 차이가 있기 때문이다. 연료의 특성, 즉 단열화염온도와 화염속도등은 당량비의 함수이며 농도의 함수로 정의되지 않는다. 연료의 가연한계(flammability limits)는 프로판이 당량비 0.56(2.1%)에서 2.5(9.5%)까지이며, 메탄이 당량비 0.53(5%)에서 1.6(15%)까지이다. 즉 메탄은 프로판에 비해 높은 농도에서 착화되며 비교적 넓은 조건에서 연소된다. 프로판은 그 농도가 비록 낮더라도 착화가 가능하며 빠른 화염속도와 높은 단열화염온도를 갖는다. 이에 따라 동일농도에서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 프로판이 메탄에 비해 큰

피해를 줄 수 있다. 그러나 6%이상의 농도비에서 메탄의 단열화염온도와 층류화염속도가 빨라지기 때문에 더 큰 피해를 주게 된다.

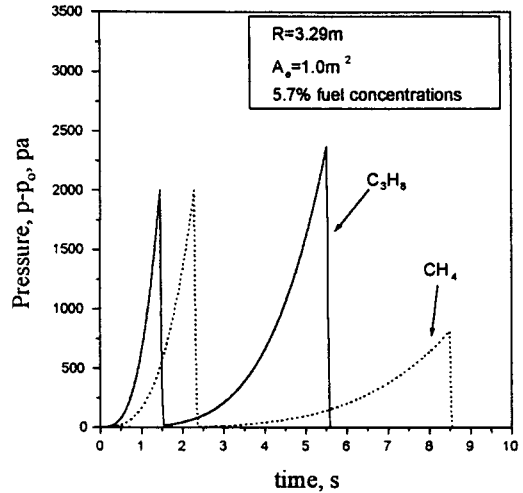


Fig. 6 Effect of gas fuel on pressure history

Fig. 6으로부터 가스폭발에서 개구면적의 크기는 연료종류에 따라 조절되어야 하며, 메탄과 프로판의 전반적인 화염속도는 당량비에 대하여 거의 비슷하기 때문에 큰 차이는 발생하지 않을 것으로 사료된다.

위의 결과들은 실제 가스폭발과 다른 조건들, 즉 가스폭발이 일어나는 밀폐공간의 형태와 착화방법, 개구발생압력과 개구면적, 그리고 개구발생후의 화염면에 대한 가정 등을 채택하였다. 여기서 밀폐공간의 형태나 개구발생 후의 가스 유출과 그에 따른 화염면의 변형 등은 수치해의 정확도에도 상당한 영향을 줄 것이라 사료되지만, 그 전반적인 경향은 동일할 것으로 사료된다.

개구면적, 밀폐공간의 부피, 연소속도, 그리고 개구발생압력 등에 의해 2차 피크의 압력이 얻어질 수 있다. 하나의 고정된 밀폐공간이 존재하고 폭발하는 기상연료의 종류를 알고 있다면, 2차 피크는 개구발생압력과 개구면적의 크기만으로 제어가 가능하다.

4. 결 론

밀폐공간내에서의 가스폭발에 대한 기본적인 수치해석을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 밀폐공간내 가스폭발에 의한 압력거동의 경향은 개구부의 면적에 의해 지배된다. 1차 피크가 주어진다면 2차 피크의 생성과 크기는 개구면적의 함수로 정의되며, 일반 아파트에서는 큰 창 면적에 의해 2차 피크의 발생이 불가능하다. 연료의 당량비에 의해 결정되는 증류화염속도를 고려하여 개구면적을 조절해야 하며 이는 밀폐공간의 크기에 영향을 받는다.
- 2) 동일한 개구면적을 갖더라도 개구부의 발생 압력(1차 피크)에 따라 압력거동은 큰 차이를 보였다. 1차 피크가 높을수록 큰 피해가 예측되기 때문에 낮은 압력에서 개구발생을 유도하는 것이 좋지만 1차 피크에 관계없이 2차 피크의 크기와 발생시기는 동일함에 따라 큰 개구면적이 요구됨을 알 수 있었다. V_0/S_0 에 대하여 1차 피크보다 적은 2차 피크를 위한 개구면적은 지수함수적으로 감소하였다.
- 3) 메탄과 프로판의 연료의 농도에 따른 비교에서, 낮은 농도에서도 프로판의 당량비가 높고, 또한 증류화염속도가 커서 같은 농도에서는 메탄보다는 큰 피해를 주지만 당량비에 따른 비교에서는 큰 차이가 없을 것으로 사료된다.

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 신진교수과제(과제번호 1997-003-E00021) 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) D. Bradley and A. Mitcheson, "The venting of gaseous explosions in spherical vessels. I-Theory", *Combustion and flame*, Vol. 32, pp. 221~236, 1978.
- 2) D. Bradley and A. Mitcheson, "The venting of gaseous explosions in spherical vessels. II-Theory and experiment", *Combustion and flame*, Vol. 32, pp. 237~255, 1978.
- 3) D. Bradley and A. Mitcheson, "Mathematical solutions for explosions in spherical vessels", *Combustion and flame*, Vol. 26, pp. 201~217, 1976.
- 4) 김영대, 정용준, 가스폭발예방기술, 도서출판 세화, pp. 118~137, 1991.
- 5) W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, pp. 710~714, 1992.
- 6) I. Glassman, *Combustion*, Academic press, pp. 155~170, 1996.
- 7) K.K. Kuo, *Principles of Combustion*, A Wiley-Interscience Publication, pp. 99~104, 1986.