KIGAS Vol.7, No.4, December, 2003
(Journal of the Korean Institute of Gas)

밀폐공간에서 파열면에 따른 가스폭발특성에 관한 연구

채 재 우* · †김 상 섭 · 조 영 도 · 장 기 현*
한국가스안전공사 가스안전시험연구원
*인하대학교 기계공학부
(2003년 9월 10일 접수, 2003년 12월 1일 채택)

A study on the characteristics of gas explosion with vent area

Jae Ou Chae* · Sang Sub Kim · Young Do Jo and Gi Hyun Jang*
*Dept. of Mechanical Engineering, Inha University
Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation
(Received 10 September 2003 ; Accepted 1 December 2003)

요 약

보통 가정이나 건물에서 화재 및 가스에 의한 사고 중에 가스의 폭발에 의한 사고는 폭발과 동시에 발생하는 압력 때문에 발생하는 건물의 붕괴로서 많은 인명피해 및 재산상의 손해를 가져온다.

이와 같은 2차적인 피해를 막기 위해 본 연구에서는 건물의 폭발시 발생하는 개구부의 크기 및 형태에 따른 모델을 선정하여 건물의 체적대비 개구부 면적에 따른 압력변화를 실험을 통하여 개구부의 면적 비를 도출하였으며, 개구부 형태에 따른 압력실험을 통하여 최소의 압력으로 피해을 막을 수 있는 모델을 선정하였다. 이를 이용하여 건물의 설계시 안전율을 고려하여 개구부의 면적 및 형태를 선정함으로써 2차 피해를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract - Accident occurred by gas explosion in house or building causes damage on lives and properties. To avoid secondary damage, this study drew area ratio of vent area with the experiment for pressure variation with vent area versus building volume by selection of model for different size and shapes of vent area generated by explosion. In addition, Appropriate model was chosen to predict the damage by minimum pressure with the experiment of opening are shapes. This model can prevent secondary damage with the selected vent area and shape to guarantee building safety.

Key words : gas explosion, vent area, building safety

1. 서 론

기상폭발은 가연성물질이나 산화제의 성질 및 공간의 상태에 크게 의존하며, 밀폐공간에서 가스폭발이 일어날 경우에는 그 공간을 구성하고 있는 벽면의 강도 등에 의해 폭발현상이 달라진다. 밀폐공간의 가로, 세로, 높이 중 임의의 두 방향 치수비가 1보다 극단적으로 다르지 않은 거주공간의 경우 공간내의 가연성 혼합기의 농도분포, 공간을 구성하고 있는 벽면 가운데 약한 부분의 강도 및 넓이, 개방되고 있는 창등의 개구부의 넓이 등의 상태가 폭발 특성에 대한 변수가 된다.

본 연구에서는 그 동안의 가스사고 분석 결

†주저자 : sspeace@hanmail.net

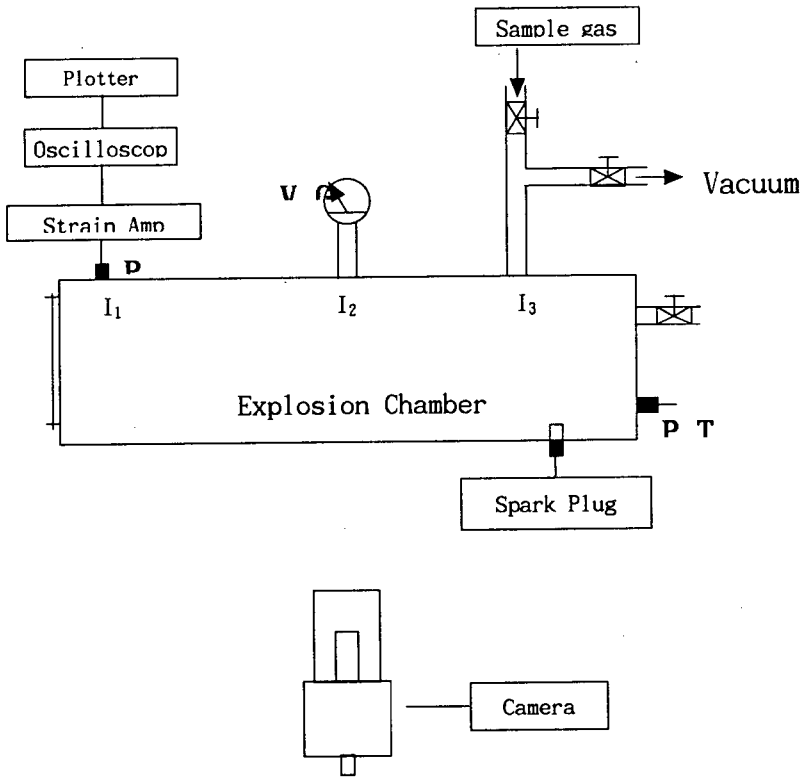
과로부터 현재 가스연료로 사용하고 있는 천연가스(NG)와 액화석유가스(LPG)등의 가스가 가정의 주방이나 거실 등의 공간에서 누출되어 공기와 혼합되어 폭발되었을때, 폭발 압력의 거동과 폭풍압력에 의한 파괴 현상 등과 유사한 현상을 만들기 위하여 폭발 통의 한쪽 측면에 파열판을 부착하고, 가스의 농도, 파열판의 강도, 파열판의 면적 등을 변수로 혼합가스 폭발 시험을 하여 이때 일어나는 여러 가지 폭발 특성들을 측정하고 고찰하므로 써 폭발에 의한 영향의 평가와 피해 현상들을 해석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

실험장치의 개략적인 구성도는 Fig. 1과 같으며 압력센서(PT)는 strain type을 사용하였으며 점화원은 압전소자를 이용한 점화기의 방전 불꽃을 이용하였다.

실험결과의 계측은 압력센서로부터 나온 신호를 strain amplifier를 통해 oscilloscope로 측정하였으며 plotter를 이용하여 출력하였다. 측면에 사용된 파열판은 두께가 각각 0.05, 0.1,



I_1, I_2, I_3 : Ignition source

P.T : Pressure transducer

V.G : Vacuum gage

Fig. 1 Experimental apparatus.

0.175mm인 polyester 필름을 사용하였으며 이들의 인장강도는 각각 0.989, 1.247, 1.779KN 이었다.

전파현상을 촬영할 수 있도록 전면을 투명한 폴리카보네이트로 하였고, 폭발용기의 개략도는 Fig. 1과 같다. 그리고 개구부의 크기 및 형태에 따른 폭발 특성을 실험하기 위해 8종류 외에 갤러리형 통풍구 형태 및 동일 개구부 면적에서 여러 가지 형태로 바뀌었을 때의 폭발 특성들을 실험하기 위해 파열 개구부 면적을 1080㎠(S/V=1/400㎝)인 7종류의 다른 형태를 제작하였다 .

Table 1. Size of vent area and ratio of area vs. volume.

개구부 크기 (㎝)	60x45	54x40	45x36	40x27	27x20	13x10	10x9	7x6
면적(㎠)	2700	2160	1620	1080	540	130	90	42
면적 대 부피비($㎝^{-1}$)	1/100	1/200	1/300	1/400	1/500	1/2000	1/3000	1/6400

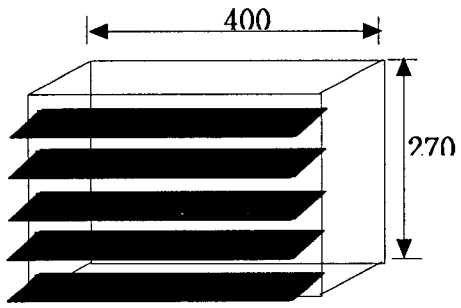


Fig. 2 갤러리 구형 개구부.

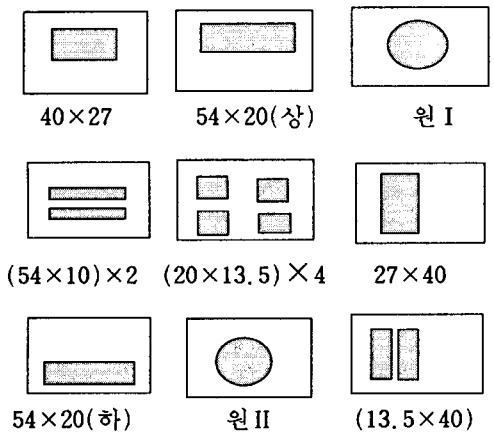


Fig. 3 동일면적, 다양한 형태의 개구부 (S/V=1/400㎝)

폭발 현상의 가시화와 장애물에 의한 폭발특성의 변화 및 개구부의 형태 등에 의한 폭발특성을 연구하기 위해 실험장치들을 설계 제작하였다. 폭발현상의 가시화를 위해서 270 ℓ 크기의 폭발 실험용기로 만들었으며, 폭발화염

Table 1은 개구부의 크기를 나타내며, Fig. 2는 갤러리형 통풍구이고 Fig. 3은 동일 면적 개구부에 대하여 여러 종류의 개구부를 만든 것들을 나타낸다.

2.2. 실험 방법

폭발실험을 하는 순서는 먼저 폭발용기의 파열면에 파열용 필름을 고정시키고 진공 펌프로 용기 내부를 어느 정도 진공으로 만든다. 실험 대상 가스를 폭발통의 부피에 대한 부피%를 계산하여 플라스틱 튜브에 담아둔다. 진공 게이지를 보면서 필요한 만큼 진공이 되면 시료 튜브에 채취한 시료가스를 용기 내에 흡입시키고 밸브를 열어두면 나머지 진공부분이 공기로 채워지게 되며 이때 진공에 의한 부압으로 공기가 흡입되면서 폭발용기 내부에는 난류가 생기고 이 난류에 의해 용기 내부에 흡입된 가연성 가스와 공기가 빠른 속도로 거의 균일한 상태로 혼합된다. 이와 같은 방법으로 폭발용기 내에 혼합가스의 농도를 실험에 필요한 조건으로 만들면 밸브를 닫고 3~5분 기다린 후에 점화시켰다. 점화원은 가스렌지 점화기인 압전식 전기 스파크 점화기를 사용하였다. 오실로스코프는 점화장치의 스파크에 의해 동기 되도록 하여 폭발용기에서 점화로부터 파열면의 파열에 까지 걸리는 시간도 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 2. 폭풍에 의한 피해 강도(clancey).

압력(psig)	피 해
0.1	° 유리창이 깨지는 일반적인 압력
0.3	° 「안전한계」(이 값 이하에서는 0.95의 확률로 큰 피해는 없다.)
0.4	° 건물의 작은 피해한계
0.7	° 집이 다소의 피해를 입는다.
1.0	° 살 수 없을 정도로 집의 일부가 파괴된다.
1.3	° 건물의 스틸제 플레임이 다소 구부러진다.
2	° 집의 벽 및 지붕이 일부 파괴된다.
3	° 스틸제플레임으로 지어진 건물이 파괴되고, 기초로부터 떨어진다.
4	° 유저조(油貯槽)가 파괴된다.
5	° 경량(輕量)건축물이 파괴다.
7	° 목재의 용역용(用役用)기둥이 절단된다.
8	° 집이 완전히 파괴된다.
9	° 화물차가 전복될 수 있다.
10	° 강화되어 있지 않은 두께 8~12in의 블록이 전단력에 의해 파손된다.
30~40	° 대부분의 건물이 붕괴된다. 중량기계(7000lb)가 이동돼서 파괴된다
100~120	° 폐가 손상되기 시작함
130~180	° 치명적 영향을 주기 시작함
200~250	° 사망가능성 50%임
300	° 사망가능성 100%

3.1. 개구부 크기에 따른 폭발 특성

개구부 크기에 따른 폭발특성을 측정하기 위하여 270ℓ 용기의 파열면을 종이로 막고 직경 2㎜의 노즐을 사용하여 각각 4ℓ/min와 1ℓ/min의 속도로 LPG를 용기 내에 주입시키고 약 1분 대기 후 우측면의 중간 높이 점화원(I_2)을 이용하여 폭발시켰다.

개구부의 크기는 부피에 대한 개구부 면적의 비가 1/200㎝에서 1/7000㎝ 사이에서 7종류에 대하여 실험하였으며 가스를 주입하는 동안 가스의 유출과 유동을 방지하기 위해 개구부는 그라프트 종이로 막았다. 폭발에 의하여 종이는 파열되었으며 종이는 강도가 약하기 때문에 파열될 때의 압력에 큰 영향은 주지 않았을 것으로 보인다. 다음 Fig. 4는 개구부 크기에 따른 폭발압력 측정결과로 S/V가 1/500㎝까지는 폭발압력이 10^{-2}kg/㎠ 정도로 작았으나 S/V가 1/2000㎝ 이하로 작아지면서 폭발압력은 크게 상승하기 시작하였다.

또한 가스주입속도가 4ℓ/min인 경우와 1ℓ/min인 경우를 비교해 보면 주입속도가 큰 경우가 폭발압력이 항상 높게 나타났다. 이러한 결과는 주입속도가 큰 경우가 용기 내에 주입되면서 난류를 크게 하여 주입속도가 적은 것에 비해 균일한 농도로 혼합되기 때문인 것으로 생각된다.

다음 Table 2는 clancey에 의해 도출된 폭풍압에 대한 피해 강도를 나타낸 것으로 약 0.02 kg/㎠ 이상 되면 일반적으로 유리창이 깨지기 약 0.07kg/㎠ 정도 되면 주거공간이 살 수 없을 정도로 파괴되며 0.2kg/㎠ 정도 되면 블록이나 벽돌로 쌓을 것이 파괴되게 됨을 보며 주고 있다. Fig. 4의 실험 결과와 Table 2를 비교해 보면 가스 누출 속도가 4ℓ/min인 경우에는 S/V가 1/500㎝ 이상일 경우는 유리창의 파손을 예측할 수 있으며 S/V가 1/2000㎝이하일 경우는 콘크리트 건물의 파괴가 가능하게 됨을 예측할 수 있으며, 가스 누출속도가 1ℓ/min인 경우에 대하여 비교하더라도 S/V가 1/2000㎝ 이하가 되면 건물의 파괴나 붕괴 등

의 위험을 예측할 수 있다.

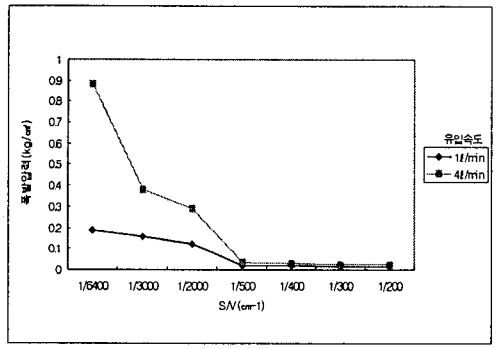


Fig. 4 개구부 크기에 따른 폭발압력 (불균일 농도, 가스주입량:10.8ℓ (4%상당농도)).

일반적으로 24평에서 34평형 정도의 아파트 구조에서 주방과 거실이 함께 되어 있는 경우 공간의 크기는 높이가 약 2.5m, 가로 세로가 각각 8×4m 정도이고 베란다 쪽의 대형 유리문의 크기는 높이가 2.2m 넓이가 약 3m 정도가 된다. 이 경우 유리창을 파열 개구면으로 가정하고 거실 공간에 대한 유리창의 면적 비를 계산하면 S/V≅1/12.12m=1/1212㎝이 된다.
따라서 Fig. 4의 결과와 비교하면 가스누출속도가 1ℓ/min일 경우는 약 0.05kg/㎠ 정도가 되고 4ℓ/min 일 경우는 약 0.121kg/㎠정도가 된다.

Table 2로부터 이 정도의 압력이면 유리창의 파괴는 물론 창틀이 파괴되고 벽돌이나 블록으로 쌓은 것들이 일부 파괴될 수 있으나 콘크리트 구조물의 경우는 비교적 견딜 수 있다.

또한 지하나 반지하같은 경우는 소형주택으로 전체적인 넓이도 작지만 개구부가 될 수 있는 창문 등의 넓이가 적어 S/V 값이 매우 작아지게 된다. 예를 들어 15평형의 지하 주택의 경우 거실의 크기를 절반 정도로 하고 높이는 2.5m 정도라고 할 경우 가스가 누출되어 폭발분위기가 형성되는 공간의 부피는 적어도 60㎥ 정도가 되지만 개구부가 될 수 있는 것을 출입문과 약간의 창문을 합해 약 3㎡으로 하면 이때 S/V는 약 1/2000㎝이 되며 실험결과의 Fig. 28과 비교할 때 폭발 압력은 0.12~0.29kg/㎠이 되어 무근 건물 및 강판건물의 파괴압력이상이 되며 철근 기둥은 어느 정도 견딜 수 있으나 천장이나 바닥면 등이 붕괴 될 수 있다. 즉 폭발압력을 받는 천장의 크기를 4m×6m=24㎡이라고 하면 1.2kg/㎠에 의해 받는 전체 압력은 약 28ton 정도의 동압을 받게 되기 때문에 천장의 붕괴와 함께 건물의 기둥까지 붕괴되며 건물전체의 붕괴로 이어질 수 있다.

폭발압력의 실험결과와 Table 2 및 NFPA 68을 근거로 위에서 설명한 두 종류의 건물의 거실 공간에 대한 붕괴 방지를 위한 폭발압력 방출구(vent area)의 크기를 계산하고 방출구 면적을 폭발공간의 부피로 나눈 S/V 비로 환산한 결과와를 비교 검토해 보겠다
앞에서 설명한 두 건물은 시멘트 철근 구조로 되어 있으며 Table 2-8로부터 약 3-4psi(0.2-0.27kg/cm^2) 의 압력까지는 견딜 수 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 NFPA 68의 6장 고강도 밀폐공간에 대한 폭발압 방출구 크기 계산방법을 적용하여 구할 수 있다.
NFPA 68 의 6장에서 방출구의 면적을 결정하는데 사용할 수 있는 방정식은 다음과 같다

$$Av = a(V)^b e^{c(Ps)} (\mathrm{Pr})^d$$

여기서 Ps는 방출구의 파열 또는 폭압 방출문이 개방될 때의 압력(bar)이고 Pr은 폭발압력이 발생하는 동안 밀폐공간 내에서 발생된 최대 압력으로 구조물의 가장 약한 부분이 견딜 수 있는 최대 압력이고 V는 밀폐공간의 부피이고 e는 자연대수이며 a, b, c, d 는 방출구 계산 방정식의 가스별 정수로 다음 표 3와 같다.

Table 3. 폭발압력 방출구 계산 방정식 관련 정수.

가스종류	a	b	c	d
메 탄	0.105	0.770	1.230	-0.823
프 로 판	0.148	0.703	0.942	-0.671
수 소	0.279	0.680	0.755	-0.393
석탄가스	0.150	0.695	1.380	-0.707

위에서 예를 들어 설명한 건물의 경우 유리창이 파열되면서 개구부를 형성하여 폭압 방출구의 역할을 하므로 유리창 파열 압력이 Ps 값이 되며 Table 2로부터 유리창이 깨지는 압력이 1psi(0.07kg/cm^2)이므로 Ps=0.07이 되고 철근콘크리트 건물의 경우 4psi(0.27kg/cm^2)까

지 견딜 수 있으므로 Pr= 0.27이 된다 가스별 정수값 a, b, c, d의 값은 다음 표 3과 같으며 폭발공간의 부피는 각각 $80m^3$ 과 $60m^3$ 으로 하여 계산한다. 또한 위의 식을 적용하기 위해서는 Ps값은 Pr보다 0.05bar 이상 낮아야 하는데 앞에서 정의된 값들을 고려할 때 이 식의 적용이 타당하였다.

먼저 가스의 종류가 NG인 경우는 주성분이 메탄이므로 Table 3에서 메탄에 대한 상수들을 적용하여 계산하였다.

1) 거실 크기가 가로, 세로, 높이가 각각 8x4x2.5m인 경우 공간의 부피가 $80m^3$이므로 위 식에 각 값들을 대입하여 정리하면

$$Av= 0.105x(80)^{0.77}x(2.718)^{1.23x0.07}x(o.27)^{-0.823}$$
$$=9.816m^3$$

2) 거실 크기가 $60m^3$인 지하 건물의 거실에 대하여는

$$Av= 0.105x(60)^{0.77}x(2.718)^{1.23x0.07}x(o.27)^{-0.823}$$
$$=7.845m^3$$

다음에는 가연성 가스가 LPG인 경우에 대하여 폭발압력 방출구 크기를 계산해보면,

3) 거실 공간의 부피가 $80m^3$인 경우

$$Av= 0.148(80)^{0.703}x(2.718)^{0.942x0.07}x(0.27)^{-0.671}$$
$$=8.285m^3$$

4) 거실 공간의 크기가 $60m^3$인 지하 건물의 경우

$$Av= 0.148(60)^{0.703}x(2.718)^{0.942x0.07}x(0.27)^{-0.671}$$
$$=6.768m^3$$

위 4가지의 경우에 대하여 폭발압력 방출구의 면적을 폭발공간의 부피에 대한 비 S/V로 표시하면 1)의 경우는 1/1227cm이고, 2) 의 경우는 1/1307cm이며, 3)의 경우는 1/1035cm이고 4)의 경우는 1/1128cm 가 된다. 4가지 경우 모두 S/V 값이 1/1000cm 에서 1/1300cm 사이로서 안전율을 고려할 경우 건물의 붕괴를 방지하기 위한 개구부(폭발압력 방출구) 면적은 1/500cm 이상이 되도록 설계하는 것이 적당하다고 생각할 수 있다.

3.2. 개구부의 위치 및 형태에 따른 폭발 특성

개구부의 면적이 동일하여도 그 형태나 위치에 따라 폭발에 의해 개구부가 발생되면서 폭발 용기내의 가스 방출속도가 달라지게 되므로 이때 폭발압력은 달라지게 될 것이다. 실제로 건물구조의 경우 폭발압력으로부터 구조물을 방호하기 위해서 창문이나 벤트의 구조를 결정하는데 참고 자료가 될 수 있을 것이다.

본 절에서는 개구부의 크기가 40×27=1080㎠인 경우 즉 S/V=1/400㎝를 선정하여 여러 가지 모양의 개구부 형태를 만들어 폭발에 의해 파열면의 개구부가 생성되는 경우 폭발압력을 측정하였다. 개구부의 형태는 앞의 그림 3과 같으며 LPG를 직경 2㎜의 노즐을 이용하여 1ℓ/min의 속도와 4ℓ/min의 속도로 주입하였다. Fig. 5는 실험결과 측정된 폭발압력으로 개구부의 형태가 파열면 반대쪽 벽면의 형태와 유사한 가로 세로가 각각 40×27㎝인 경우가 폭발압력이 가장 낮고 가로와 세로가 각각 54×20㎝인 것이 폭발통의 상부쪽으로 치우쳐 있을 때가 다음으로 낮으며, 중간 부분에 원형의 개구부 일 경우, 가로54×세로10㎝를 중간부분에 2개를 만든 경우, 가로20×세로13.5㎝ 개구부를 중앙부분에 4개 만든 경우, 가로27×세로40㎝인 경우, 가로54×세로20㎝을 아래 면으로 치우친 경우, 원형을 대각선 방향으로 치우치게 한 경우와 가로13.5×세로40㎝ 2개를 한쪽으로 치우치게 한 경우의 순으로 폭발압력이 높아짐을 보여주고 있는데 이 실험결과로부터 개구부 형태가 파열면 반대쪽 벽면과 유사한 형상인 경우가 폭발압력이 가장 낮게 되는 이유는 폭발통내에 폭발압력에 의해 가스가 밖으로 방출될 경우 화염단면은 벽면과 같은 기하학적 형태를 갖기 때문에 벽면과 유사한 형태의 개구부 일 경우 방출되는 가스의 저항이 가장 작으며 또 방출구 면적이 적은 여러 개로 나누어질 경우 한 개로 된 경우보다 저항이 커져서 내부 폭발압력이 높아짐을 알 수 있으며 개구부가 중앙 부분보다 다른 쪽으로 치우쳐진 위치가 될 경우 방출에 따른 저항이 증가하여 내부 폭발압력이 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

한편 Fig. 2의 갤러리형 통풍구를 개구부에 설치하고 폭발압력측정 실험을 하여 통풍구에

장애물이 없는 경우와 있는 경우의 차이점을 고찰하였다.

실험조건은 앞에서 설명한 것과 같으며 실험결과 갤러리형 통풍구를 설치하였을 경우 폭발압력이 1ℓ/min의 주입속도에서는 0.09kg/㎠이었고 4ℓ/min의 주입속도일 때는 0.113kg/㎠으로 개구부에 장애물이 없는 경우에 비해서 압력이 크게 상승하였는데 이는 통풍구의 빗살이 45%로 되어 있어 폭발후 가스의 방출에 크게 저항을 일으키는 요소로 작용하였기 때문으로 해석되며 농도가 균일에 가까워 연소속도가 커질수록 저항에 의한 압력상승효과가 증가하게 됨을 예측할 수 있었다. 따라서 건물에서 폭압 방출구를 두거나 유리창 등이 폭발압력에 의해 파열되어 개구부가 발생되도록 할 경우에는 가능하면 한 개의 개구부가 되도록 하고, 중앙부분에 화염전파방향의 반대쪽 벽면 또는 화염의 단면의 형상과 같은 모양으로 해주는 것이 폭발압력을 낮출 수 있는 방법이 될 것으로 생각된다.

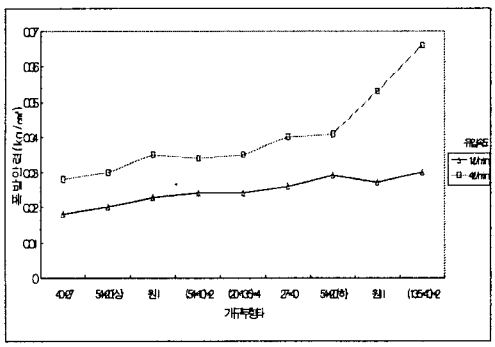


Fig. 5 개구부 형태에 따른 폭발압력.
(노즐직경:2㎜, LPG:4%상당농도)

3.4. 점화 위치변화에 따른 폭발특성

밀폐용기 내에서는 점화원의 위치에 따라 폭발특성의 변화가 거의 없었으나 폭발에 의해 파열면이 발생하는 경우의 점화위치에 따라 폭발 특성에 약간의 변화가 있었으며, 점화위치가 중앙에 있을 경우가 다른 두 곳의 경우보다 파열압력과 압력 상승속도가 높았으며, 파열시간이 짧은 경향을 알 수 있었다. 이러한 현상은 점화원을 중심으로 화염이 각 방향으로 같은 속도로 전파된다고 할 때 용기 중심부에서 점화되는 경우 용기내 혼합가스의 연소시간이 짧고 폭발압력상승이 빠르기 때문이며 폭발이 일어나는 공간에서 점화원이 어느한 쪽에 치우쳐 있는 경우보다는 중심부분에서 점화될 때 폭발위험성이 더욱 커지는 것을 예상할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 가정이나 가스 저장시설등에서 폭발 사고가 발생할 경우 폭발압력에 의해 폭발이 발생하는 공간은 물론 폭발압력의 방출에 의해 외부에도 큰 피해를 가져오는 현상을 분석하기 위하여 연료가스로 가장 많이 사용되는 LPG와 NG를 시료가스로 하여 여러 가지 상황에서 폭발특성을 실험하므로서 실내가스 폭발시 일어나는 현상 및 실내·외에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

폭발용기에 파열판을 설치하여 폭발이 일어날 경우 개구부가 발생하는 실험을 통하여 폭발시 파열이 일어나는 경우에 폭발이 발생하는 공간에서의 폭발압력은 가스의 농도보다는 파열되는 면의 강도에 의존함을 알 수 있었으며, 연구결과 부피대비 개구부의 면적은 안전율을 고려할 경우 건물의 붕괴를 방지하기 위한 개구부(폭발압력 방출구)면적은 1/500cm 이상이 되도록 설계하는 것이 적당하다고 생각하며, 폭발압력에 의해 파열되어 개구부가 발생되도록 할 경우에는 가능하면 1개의 개구부가 되도록 하고, 중앙부분에 화염전파방향의 반대쪽 벽면 또는 화염의 단면의 형상과 같은 모양으로 해주는 것이 폭발압력을 낮출 수 있는 방법이 될 것으로 사려된다.

점화원의 위치가 파열압력에 미치는 영향은 적었으나 중심부분에서 점화할 경우 연소시간이 짧아지고 압력이 약간 짧아지는 경향을 보였다. 또한 파열면의 면적이 작아질 경우 파열압력이 커지고 따라서 폭발공간내의 피해도 증가하게 됨을 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Dag Bjerketvedt, et al, "Gas explosion handbook", Elsevier Science, (1997)

[2] Jan Roar Bakke and Bjorn H. Hjertager, "The effect of explosion venting in empty vessel", Int. J for Numerical method in engineering. Vol24-140, (1987)

[3] R. K. Eckhoff, et al, "Venting of turbulent gas explosion in $50m^3$ chamber", Fire safety journal, 7, (1984)

[4] Kees van Wingerden, "Prediction of blast overpressures generated by vapour cloud effects in direct surroundings of installations protected by dust explosion venting explosion venting", J. Loss Prev. Process Ind. Vol.6, No.4, (1993)

[5] Kees van Wingerden, "Prediction of blast overpressures generated by vapour cloud explosions occurring in the vicinity of control rooms", 32nd Loss Preventi- on Symposium Building Design for explosion Hazards. (1998)

[6] Kees Van Wingerden, Prediction of the strength of blast waves in the surroundings of vented offshore mo-dules, unpublished paper.

[7] 박금식, 최성락, "화염. 폭발 및 연소현상", 형설 출판사, (1979)

[8] 정용준 역, "가스폭발 예방기술", 세화, (1985)

[9] 안전공학협회, 폭발, 해문당(1983) 가스 21, 4, pp34, (1984)