실내 가스 폭발시 폭발압력 방출에 관한 연구

오 규 형
호서대학교 소방학과
(2004. 9. 11. 접수 / 2005. 7. 29. 채택)

A Study on the Explosion Relief Venting in the Gas Explosion

Kyu-hyung Oh
Department of Fire Protection Engineering, Hoseo University
(Received September 11, 2004 / Accepted July 29, 2005)

Abstract : This study aims to find the safe vent area to prevent a destruction of building by gas explosion in a building. Explosion vessel which used in this experiment is 1/5 scale down model of simple livingroom, and its dimension is 100cm in length, 60cm in width and 45cm in height.
Liquified petroleum gas(LPG) was injected to the vessel to the concentration of 4.5vol%, and injection rate were varied in 1L/min or 4L/min. Gas mixture was ignited by the 10kV electric spark. For analysis the characteristics of vented explosion pressure according to the vent size and vent shape, its size and shape were varied. From the experiment, it was found that explosion pressure in the vented explosion was affected by the gas injection rate, vent area and vent shape. And the vent area to volume ratio(S/V) to prevent the building destruction by explosion pressure, it is recommended that the design of vent area happened by the explosion should be above 1/500cm in S/V. And if the vent area has complicate structure in same area, vented explosion pressure will be higher than a single vent, and possibility of building destruction will increase. Therefore to effectively vent the explosion pressure for protect a building and residents from the gas explosion hazards, the same vent area should have a singular and constant shape in the cross-sectional area of the vessel.
Key Words : explosion, explosion vent, explosion relief

1. 서 론

산업 발달과 생활수준 향상에 따라 취사용 및 난방용 연료로 가스 사용량이 크게 증가하였으며 이와 함께 가스사고 건수도 증가하였으며 이들 사고 중 약 50%가 가스누출에 의한 폭발과 화재사고인 것으로 알려졌다[1].

가스 폭발 사고는 밀폐된 공간 내에 가스가 누출된 후 임의의 점화원에 의하여 착화되어 폭발과 화재사고로 이어지고 있다. 가스 폭발 시는 폭발압력에 의한 건물의 붕괴 위험과 열에 의한 화재위험이 공존하고 있다[2]. 소규모 주택단지나 개인주택의 경우는 주로 LPG를 연료로 사용하고 있는데 특히 지하 공간에서 LPG를 사용하는 경우 공기보다 무거워 대기중에 확산되지 못하고 체류하고 있어 폭발위험이 더욱 크며 폭발시에는 폭발압력 방출구가 적기 때문에 심각한 위험과 피해를 초래할 수 있다. 이에 비해 천연가스(NG)는 공기보다 가벼워 LPG보다는 대기중으로 확산이 용이하지만 창문 등이 닫혀있는 공간이나 보일러실에서 폭발이 일어날 경우 피해는 심각한 상태가 된다. 그동안 화학공정 등에서 폭발압력에 의한 용기등의 파괴를 방지하기 위한 연구와[3,4] 건물에서의 폭압방출을 위한 연구들이 수행되어져 왔으며 밖으로 방출되는 폭풍압에 의한 피해에 대한 연구도[5~7] 수행되어져 왔으며 그 내용의 중심은 보호대상물의 강도와 압력방출장치의 개방압력을 결정해준 상태에서의 폭압방출 면적을 계산하기 위한 것들이었다[8].

본 연구에서는 폭발에너지는 폭발이 발생하는 공간의 크기에 따라 다르다는 관점에서 폭발발생시 파괴를 방지할 수 있는 방출면적을 파열시 생성되

khoh@office.hoseo.ac.kr

는 개구부의 면적 대비 폭발공간의 부피비를 변수로 문제를 해결할 수 있는 대안을 고찰하고자 하였다. 특히 실내 폭발시 폭발압력에 의해 건물이 붕괴되지 않도록 폭압 방출구의 크기를 결정하는데 필요한 기초 실험과 자료들을 도출하고자 하였다. 이러한 목표달성을 위해 주거공간의 거실을 1/5로 축소한 단순 모델로 폭발실험을 실시하여 개구부의 크기, 개구부의 형태 등에 따른 화염전파특성을 연구하였으며 폭발특성들을 측정하여 폭발 압력을 방출할 수 있는 창문 등의 크기와 면적 등 실제 건물설계에 적용할 수 있는 폭압방출면적을 제시하였다.

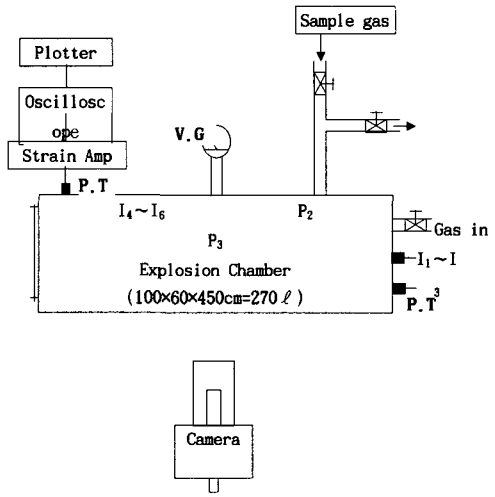
2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1은 폭발현상의 가시화 및 폭발특성 측정을 위한 전체 실험장치의 개략도로서 폭발실험용기의 크기는 가로 100cm 세로 60cm 높이 45cm로 부피는 270리터였다. 이는 바닥면적이 4m × 8m이고 높이가 약 2.3m 정도인 28~30평형 아파트의 거실 크기를 약 1/5로 축소한 형태이다. Fig. 2는 점화원 및 압력센서의 설치 위치를 나타낸 것으로 점화원의 위치는 가정에서 사용하는 전기 스위치 및 전열기 등의 위치를 고려하여 바닥면으로부터 5cm, 22.5cm, 40cm 높이로 하였다. 폭발압력을 측정하기 위한 압력센서의 높이는 용기 중간이 되도록 하였으며 뒷면의 가로방향 중간 정도(P_2)에 설치되도록 하였다. 점화원의 반대쪽 면은 폭발에 의해 개구부가 발생될 수 있도록 하였으며 이때 발생되는 개구부의 크기와 형태를 조절할 수 있도록 Table 1 및 Fig. 3과 같이 여러 가지 형태의 파열판을 사용하였다. 혼합가스의 점화원으로는 10kV의 점화용 변압기를 사용하였고 파열 압력은 strain type 압력센서를 사용하여 측정하였다. 폭발통의 전면은 폭발화염의 거동을 관찰할 수 있도록 투명한 폴리카보네이트로 된 관측창을 설치하였으며 파열면에 부착되는 격막은 graft 용지를 사용하여 가스폭발 압력에 의하여 쉽게 파열될 수 있도록 하였다. Table 1은 폭발 시 발생되는 파열면의 크기를 다르게 하기 위한 개구부의 크기들이고 Fig. 3은 파열 면적(1080cm^2)에 대한 용기부피의 비(S/V)가 1/400인 것에 대하여 상대적 위치 및 형태가 용기내 폭발 압력 방출에 어떤 영향을 미치는지 실험하기 위해 만든 개구부의 형태들이며 Table 2는 이에 대한 설명이다.

Table 1. The size of vent area and vent area to volume ratio

Vent size(cm)	60×45	54×40	45×36	40×27	27×20	13×10	10×9	7×6
Area(cm^2)	2700	2160	1620	1080	540	130	90	42
S/V(cm^{-1})	1/100	1/200	1/300	1/400	1/500	1/2000	1/3000	1/6400



I_1, I_2, I_3 : Ignition source
P.T : Pressure transducer
V.G : Vacuum gage

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

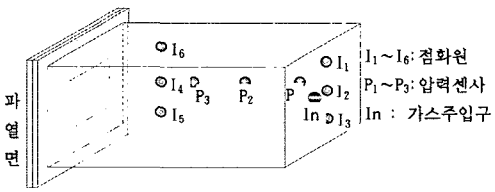


Fig. 2. Position of ignition sources and pressure sensors.

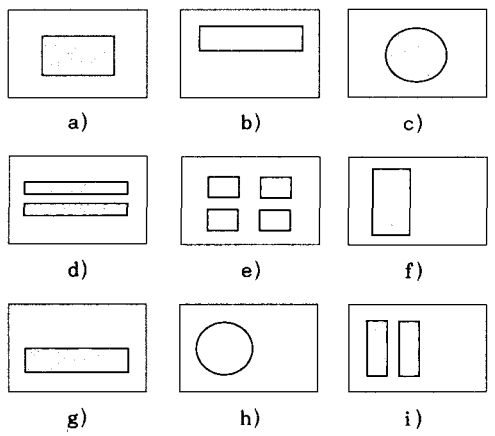


Fig. 3. Various shape of vent in same vent area(1080cm^2 : S/V = 1/400cm).

Table 2. Vent size and location

No.	Vent area(cm)/ea	Location of vent
a	40*27	center
b	54*20	upper
c	circle	center
d	50*10/2	center, 2 part
e	20*13.5/4	center, 4 part
f	27*40	left
g	54*20	lower
h	circle	left
i	13.5*40/2	left

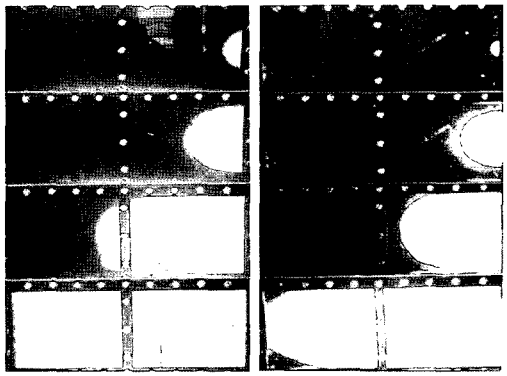
2.2. 실험 방법

개구부 크기나 형태에 따른 폭발특성을 측정하기 위해서는 270L용기의 파열면을 종이로 막고 직경 2mm의 노즐을 사용하여 폭발 용기의 부피에 대하여 약 4.5%에 해당되는 LPG의 부피를 각각 4L/min 또는 1L/min의 속도로 용기 내에 주입시키고 약 1분 대기 후 Fig. 2의 우측면의 중간 높이 점화원(I_2)을 이용하여 폭발시켰다. 폭발될 때 화염의 거동은 비디오카메라로 기록하였고 폭발 압력은 오시로스코프를 이용하여 측정하였다. 가스가 주입되는 동안 파열면 근처의 밸브를 열어 내부의 압력상승을 방지하였으며 이때 약간의 LPG도 외부로 유출되어 실제 가스의 농도는 4.5% 보다는 낮아지게 된다. 가스 주입이 완료되면 밸브를 잠그고 내부 혼합기체의 유동이 안정될 수 있도록 약 1분간 대기후 착화시키도록 하였는데 2mm 노즐을 사용한 이유는 일반 가정에 사용되는 가스호스의 직경이 8~10mm로 폭발용기의 크기를 거실 크기의 1/5 정도로 축소한 것에 비례하여 선택하였고, 실제 사고시 가스가 누출되면서 불균일 농도가 되는 상황과 유사한 상황을 만들어 실험하였다. 개구부의 크기나 형태가 바뀔 때마다 파열면이 있는 부분을 교체하면서 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파열면 개구부 크기에 따른 폭발화염 전파특성

어떤 공간 내에서 가스 폭발이 발생할 경우 폭발압력에 의하여 창문 등의 약한 부분이 파열되어 개구부가 형성되고 내부의 폭발압력이 방출되며 이 방출구의 크기에 따라 내부 폭발압력의 감소 속도 및 열기류의 체류시간에 따라 피해정도가 다르게



(a) 1L/min (b) 4L/min

Fig. 4. Propagation of explosion flame according to injection rate.
(Nozzle diameter:2mm, 30fps, vent size: 54cm*40cm).

될 수 있다. 개구부의 크기에 따른 화염전파 특성을 살펴보기 위해 Table 2와 같이 개구부 크기를 변화시키면서 이에 따른 화염전파 현상을 실험하였다. LPG는 폭발용기의 부피에 대하여 4.5%에 상당하는 12.15L를 각각 1L/min 또는 4L/min으로 주입한 후 점화하여 폭발화염이 전파되는 현상을 30fps로 촬영하여 분석하였다. 다음 Fig. 4는 파열면이 54cm × 40cm인 경우 가스 주입 속도에 따른 폭발화염 전파현상을 나타낸 것이다. 사진 a)와 b)에서 화염전파 속도는 큰 차이를 보이지 않고 있는데 이는 a)의 경우 주입시간이 길어서 혼합이 되었고, b)는 주입 속도가 커서 난류 발생으로 혼합이 된 상태여서 두 경우 비슷한 정도로 확산되었기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 뒤에 설명되는 폭발 압력에서는 4L/min으로 주입한 경우가 폭발압력이 높은 결과를 보여주고 있어 주입시간이 긴 경우보다 주입속도가 빠른 경우에 혼합이 잘 이루어지는 것으로 보인다.

개구부의 크기가 다른 경우의 실험을 분석한 결과 개구부가 적을수록 파열면의 개구부가 발생되는 시간이 길어지며 또 개구부를 통해 폭발 연소된 고온의 가스가 방출되는 방출시간이 길어지기 때문에 폭발화염전파속도가 늦은 것으로 판단된다. 가스 주입시 개구부를 밀폐시킨 그라프트 용지는 폭발압력에 의해 쉽게 파열되었으며 폭발압력의 상승에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 이 파열면은 점화된 후 약 90~120ms 후에 파열되며 이 때 화염은 점화원으로부터 약 30~40cm 진행하였을 때로 폭발통의 약 1/3 정도 화염이 진행된 때이다. 따라서 화염 전파속도는 개구부의 크기에 따

라 폭발통 내부의 가스 방출 속도와 이에 따른 저항 등에 의하여 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 동일한 재질의 격막을 파열면으로 사용할 경우 개구부가 적을수록 파열면이 견디는 힘이 커지기 때문에 폭발에 의한 파열 압력이 높고 또한 개구부 발생시 외부에 미치는 폭풍압력도 크게 됨을 알 수 있었다. 본 실험에서 나타난 바와 개구부가 적을 경우 화염전파속도가 늦으면 폭발공간 내에 화염의 체류시간이 길어지기 때문에 이런 경우는 폭발에 의하여 실내와 실외가 모두 폭발에 의한 피해가 커지게 됨을 예측할 수 있다.

3.2. 개구부 크기에 따른 폭발압력

개구부의 크기에 따른 폭발 압력도 부피에 대한 개구부 면적의 비(S/V)가 1/200cm에서 1/6400cm 사이에서 7종류에 대하여 실험하였다. LPG를 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. 5는 개구부 크기에 따른 폭발압력 측정결과로 S/V가 1/500cm까지는 폭발압력이 10^{-2} kg/cm^3 정도로 작았으나 S/V가 1/2000cm 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.

Clancey에 의해 도출된 폭풍압에 의한 피해 정도를 보면 약 0.02kg/cm^2 이상 되면 일반적으로 유리창이 깨지고, 약 0.07kg/cm^2 정도 되면 주거공간이 살 수 없을 정도로 파괴되며 0.2kg/cm^2 정도 되면 블록이나 벽돌로 쌓은 것이 파괴되게 됨을 나타내고 있다. Fig. 5의 실험 결과와 Clancey의 연구 결과를 비교해 보면 가스 누출 속도가 4L/min인 경우에는 S/V가 1/500cm 이상일 경우는 유리창의 파손을 예측할 수 있다. 또한 S/V가 1/2000cm이하일 경우는 콘크리트 건물의 파괴가 가능하게 됨을 예측할 수 있으며 가스 누출속도가 1L/min인 경우에 대하여 비교하더라도 S/V가 1/2000cm 이하가 되면 건물의 파괴나 붕괴 등의 위험을 예측할 수 있다.

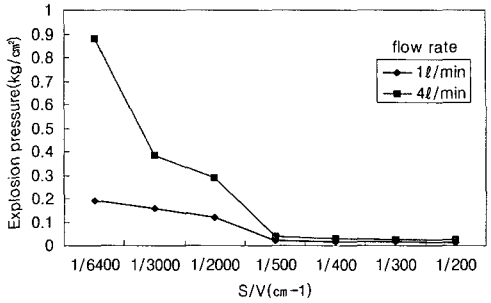


Fig. 5. Explosion pressure according to vent area.

거실 부분의 크기가 가로 세로가 각각 8×4m 정도이고 높이가 약 2.5m인 31평 아파트의 발코니 쪽 대형 유리문의 크기가 높이 2.2m 넓이 약 3m 정도인 유리창인 경우 이 유리면을 파열 개구면으로 가정하고 이 공간에 대한 유리창의 면적비를 계산하면 S/V≅1/12.12m = 1/1212cm이 된다.

따라서 Clancey의 연구결과와 비교하면 가스누출속도가 1L/min일 경우는 약 0.05kg/cm^2 정도가 되고 4L/min 일 경우는 약 0.121kg/cm^{2}정도가 되는데 이정도의 압력이면 유리창의 파괴는 물론 창틀이 파괴되고 벽돌이나 블록으로 쌓은 것들이 일부 파괴될 수 있으나 콘크리트 구조물의 경우는 비교적 견딜 수 있다.

또한 지하나 반지하 같은 공간에서는 개구부가 될 수 있는 창문 등의 넓이가 적어 S/V 값이 매우 작아지게 된다. 예를 들어 15평형의 지하 주택의 경우 거실의 바닥면적을 24m^2 정도로 하고 높이는 2.5m 정도라고 할 경우 가스가 누출되어 폭발 분위기가 형성되는 공간의 부피는 약 60m^3 정도이다. 이곳에서 가스 폭발이 발생할 경우 개구부가 될 수 있는 것은 출입문과 약간의 창문을 합해 약 3m^{2}라고 하면 S/V는 약 1/2000cm이 되고 이때 내부의 폭발압력은 0.12~0.29kg/cm^{2}이 된다. Clancey의 연구결과와 비교할 때 이 압력은 철근이 없는 건물 및 강판건물의 파괴압력보다 높게 되어 철근 기둥은 어느 정도 견딜 수 있으나 천장이나 바닥면 등이 붕괴를 예측할 수 있다. 즉 폭발압력을 받는 천장의 크기를 4m×6m = 24m^{2}이라고 하면 0.12kg/cm^{2}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 NFPA 68 및 Clancey의 연구결과 등을 근거로 위에서 설명한 두 종류의 건물의 공간에 대한 붕괴 방지를 위한 폭발압력 방출

구(vent area)의 크기를 계산하고 방출구 면적을 폭발공간의 부피로 나눈 S/V 비로 환산한 결과와를 비교 검토해 보겠다. 철골조 또는 시멘트 철근 구조로 되어 있는 건물의 경우 Clancy의 연구결과와 비교하면 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 폭발압력 방출구 크기 계산방법을 적용하였으며, 방정식은 다음과 같다[5].

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

여기서 Ps는 방출구의 파열 또는 폭발압력을 방출하는 문이 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, d는 방출구 계산 방정식의 가스별 정수로 다음 Table 3과 같다.

위에서 예를 들어 설명한 건물의 경우 유리창이 파열되면서 개구부를 형성하여 폭발압력 방출구의 역할을 하므로 유리창 파열 압력이 Ps 값이 되며 Clancy의 연구로부터 유리창이 깨지는 압력이 1psi (0.07kg/cm^2)이므로 Ps=0.07이 되고 철근콘크리트 건물의 경우 4psi(0.27kg/cm^2)까지 견딜 수 있으므로 Pr = 0.27이 된다. 가스별 정수값 a, b, c, d의 값은 Table 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 8×4×2.5m인 경우 공간의 부피가 80m^{3}이므로 위 식에 각 값들을 대입하여 정리하면

$$Av = 0.105\times(80)^{0.77}\times(2.718)^{1.23x0.07}\times(0.27)^{-0.823}=9.816m^2$$

2) 거실 크기가 60m^{3}인 지하 건물의 거실에 대하여는

$$Av = 0.105\times(60)^{0.77}\times(2.718)^{1.23x0.07}\times(0.27)^{-0.823}=7.845m^2$$

또 가연성 가스가 LPG인 경우에 대하여 폭발압력 방출구 크기를 계산해 보면

3) 거실 공간의 부피가 80m^{3}인 경우

$$Av = 0.148(80)^{0.703}\times(2.718)^{0.942x0.07}\times(0.27)^{-0.671}=8.285m^2$$

4) 거실 공간의 크기가 60m^{3}인 지하 건물의 경우

$$Av = 0.148(60)^{0.703}\times(2.718)^{0.942x0.07}\times(0.27)^{-0.671}=6.768m^2$$

위 4가지의 경우에 대한 계산 결과와 이때의 폭발압력 방출구의 면적을 폭발공간의 부피에 대한 비 S/V로 표시하여 정리하면 Table 4와 같다. Table 4에서 보는 바와 같이 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.

3.3. 개구부의 위치 및 형태에 따른 폭발압력 방출특성

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

Table 3. A gas constant for calculation of vent area

Gases	a	b	c	d
Methane	0.105	0.770	1.230	-0.823
Propane	0.148	0.703	0.942	-0.671
Hydrogen	0.279	0.680	0.755	-0.393
Coal gas	0.150	0.695	1.380	-0.707

Table 4. Calculated vent area and vent area to volume ratio

Gas	Space volume (m^3)	Calculated vent area(m^2)	Vent area to volume ratio (s/v :cm^{-1})
Natural gas	80	9.816	1/1227
	60	7.845	1/1307
L P G	80	8.285	1/1035
	60	6.768	1/1128

본 절에서는 개구부의 면적이 1080cm^{2}인 경우 즉 S/V = 1/400cm를 선정하여 Fig. 3과 같이 여러 가지 모양의 개구부 형태를 만들어 폭발에 의해 파열면의 개구부가 생성되는 경우 폭발압력을 측정하였다. Fig. 6은 실험결과 측정된 폭발압력으로 개구부 형태는 Table 2의 번호에 따른 것과 같고 Fig.3의 a)와 같이 개구부의 형태가 화염이 진행되는 방향의 단면과 유사한 세로/가로 비가 약 0.7이고, 중앙부분에 있는 경우가 폭발압력이 가장 낮고 Fig. 3의 b)와 같이 한개로 된 파열면이 폭발통의 상부로 치우쳐 있을 때가 다음으로 낮았다. 또한 Fig. 3의 c)와 같이 중간 부분에 원형인 경우, Fig. 3의 d)와 같이 가로54 × 세로10cm를 중간부분에 2개를 만든 경우 등 파열면이 아래쪽이나 한쪽으로 치우친 경우와 e)와 같이 여러 개로 나누어진 경우의 순으로 폭발압력이 높아짐을 보여주고 있다. 이 실험결과로부터 용기 부피에 대한 파열면적비 s/v 가 동일하더라도 개구부 형태가 화염 진행방향의 단면과 유사하고 중앙부분에 단일 개구부인 경우가 폭발압력이 가장 낮게 되는 이유는 폭발통내에 폭발압력에 의해 가스가 밖으로 방출될 때 화염단면은 화염 진행방향의 단면과 같은 기하학적 형태를 갖기 때문에 방출되는 가스의 저항이 가장 작아지는 것으로 생각된다. 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.

따라서 건물에서 폭압 방출구를 두거나 유리창 등이 폭발압력에 의해 파열되어 개구부가 발생되도록 할 경우에는 가능하면 한 개의 개구부가 되도록 하는 것이 바람직하다. 그리고 방출구는 화염전파방향의 반대쪽 벽면 또는 화염의 단면의 형상과 같은 모양으로 발생되도록 해주는 것이 폭발압력을 낮출 수 있는 방법이 될 것으로 판단된다. 추후 유리창의 크기 및 두께에 따른 폭발 실험을 수행하므로서 폭발압력에 의한 건물의 파괴를 방지하기 위한 폭발압력 방출구의 크기 설정에 대한 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

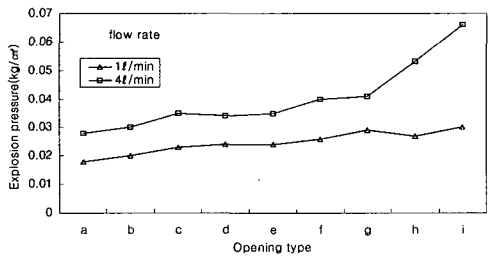


Fig. 6. Explosion pressure according to vent shape.

4. 결 론

지금까지의 실내 가스 누출 시 폭발특성에 관한 실험적 연구를 통하여 밀폐 및 반 밀폐 공간에서 가스의 주입속도, 폭발압력 방출구의 크기와 형태 등에 따른 화염전파현상과 폭발특성들을 고찰하였으며, 실험 결과들로부터 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 화염전파 현상을 고속 촬영하고 분석한 결과를 통하여 화염전파속도에 영향을 미치는 중요한 요소는 가스 누출 공간에서의 혼합정도이며 장애물 존재 시는 난류의 생성으로 연소속도를 빠르게 하여 화염전파속도를 가속시키는 효과가 있다.

2) 폭발에 의한 파구가 생성되고 이 파구가 가스 방출구가 될 때 파구의 크기가 작을수록 폭발공간의 폭발압력과 외부에 미치는 폭풍압력이 클 뿐 아니라 내부에 화염이 존재하는 시간이 길어져 가스 폭발 사고 시 더 큰 피해 요인이 될 수 있다.

3) 파구의 기하학적인 형태도 내부 폭발압력에 영향을 미치는 요인이 되며 단일의 개구부가 화염단면 형태의 중간 부분에 위치할 경우 폭발압력 방출에 저항이 적어 내부압력을 최소화할 수 있으며, 건물의 붕괴를 방지하기 위한 개구부의 크기는 개구부의 면적 대 부피비가 적어도 1/500cm 이상 되어야 할 것이다.

참고문헌

1) 한국가스안전공사, 가스사고 편람, 2003.
2) T. Hirano 외, "Explosion Pressure of Combustible Gaseous Mixtures with Concentration Gradient", Safety Eng. Vol. 18. No. 1, pp. 28~36, 1979.
3) L.Friedel, S. Korfmann, "Predictive Accuracy of Simplified Vent Area Sizing Methods for the Case of Thermal Runaway Reactions", J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 13, pp. 125~152, 2000.

4) O. Koper, F. Westphal, "Database-supported Documentation and Verification of Pressure Relief Device Design in Chemical Plant", J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 16, pp. 73~79, 2003.
5) Kees van Wingerden, "Prediction of Blast Overpressure Generated by Vapour Cloud effects in Direct Surroundings of Installations Protected by Dust Explosion Venting", J. Loss Prevention in Process Industries. Vol. 6, No. 4 pp. 241~249, 1993.
6) Kees Van Wingerden, O R Hansen, R Teigland, "Prediction of the Strength of Blast Waves in the Surroundings of Vented Offshore Modules", unpublished paper.
7) D.Crowhurst, S.Colwell, D.P.Hoare, M Bensilum, "The Characteristics of Explosion Pressure Measured Around Complex Structure Near Vented Dust Explosion", preprint for 7th Int. Symp. on Hazards, 1996.
8) NFPA 68, "Guide for Venting of Deflagrations", 1984.
9) Wolfgang Lenckel, Willi Nastol, Nikolas Zarzalis, "Influence of Turbulence on Transient Premixed Flame Propagation Inside Closed Vessels", Chem. Eng, Technol. 12, pp. 226~233, 1989.
10) Dag Bjerketvedt, Kees Van Wingerden,Jan Roar Bakke, "Gas explosion handbook", pp. 40~65, Elsevier Science, 1997.