

## 실내 LPG 누출시 폭발특성에 관한 연구

오 규 형 · 김 홍 · 김 상 섭\* · 조 영 도\* · 조 지 환\* · 오 신 규\*\*

호서대학교 안전공학부, \*한국가스안전공사, \*\*한국가스공사

(1999년 5월 6일 접수, 1999년 12월 23일 채택)

## A Study on the Vented Gas Explosion Characteristics of Indoor Leakage of the LPG

Kyu-hyung Oh · Hong Kim · Sang-sub Kim\*  
· Yoong-do Jo\* · Jee-whan Jo\* · Shin-kyu Oh\*\*

*Division of Safety Eng., Hoseo Univ., Baebang, Asan, Choongnam*

*\*Gas safety research center of Korea Gas Safety Cooperation, Daeya, Shihung, Kyunggi*

*\*\*Safety Research Lab. of Korea Gas Cooperation, Ildong, Ansan, Kyunggi*

*(Received 6 May 1999 ; Accepted 23 December 1999)*

### 요 약

본 연구에서는 연료로 많이 사용될 뿐 아니라 폭발사고도 많이 발생하는 액화석유가스(LPG)가 밀폐공간 내에 누출되어 가스폭발사고가 발생할 경우 폭발에 의한 피해발생 현상들의 예측과 위험성을 평가하고자 폭발시 개구부가 발생하는 가스폭발에 대한 폭발특성 측정 실험을 실시하였다.

실험장치의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 60 cm, 100 cm, 45 cm인 폭발통을 사용하였으며 건물 내 가스폭발시 유리창 등이 파열되어 개구부가 발생하는 현상과 유사하도록 폭발통의 한쪽 측면에는 격막을 설치하여 폭발시 파열되도록 하였다. 실험 변수로는 LPG의 농도, 점화위치, 폭발시 발생하는 파구의 면적, 파열면으로부터 거리, 및 파열면의 강도 등이며 연구결과, 폭발시 개구부가 생성되는 경우는 밀폐공간과는 달리 농도의 변화보다 파열면의 강도에 의해 폭발특성이 영향을 받으며 점화위치에 의한 폭발특성의 변화도 밀폐공간의 경우에 비해 크게 나타났다. 또한 파열면 개구부가 작을수록, 파열면의 강도가 클수록 파열압력(내부폭발압력)과 외부에 미치는 폭풍압력이 증가하였으며 파열면에서 멀어질수록 폭풍압력이 감소하는 현상들을 알 수 있었다.

**Abstracts** - A study on the vented gas explosion characteristics were carried out with the liquified petroleum gas(LPG) which is used in domestics and industries fuel. To evaluate a damage by gas explosion and to predict a explosion hazards, a series of experiment have been performed in the regular hexahedron vessel of 270ℓ.

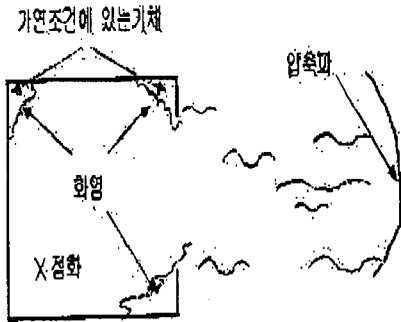
A side of the vessel was made to setting a polyester diaphragm which was ruptured by explosion to simulate an accidental explosion which ruptured the window by explosion. Experimental parameters were LPG concentration, ignition position, venting area, a strength of diaphragm which was ruptured and distances from venting. Experimental results showed that vented gas explosion pressure was more affected by the diaphragm strength than the gas concentration, and the vented gas explosion

pressure and blast wave pressure was increased with decreasing the venting area and increasing the strength of diaphragm. In this research we can find that a damage by vented explosion at the outside can be larger than the inside by blast wave pressure near the venting.

**Key words :** Vented gas explosion, Explosion, Explosion hazards, Blast wave.

## 1. 서 론

기상폭발은 가연성물질이나 산화제의 성질 및 공간의 상태에 크게 의존한다. 다음 Fig. 1은 기상 폭발의 공통된 주요 과정으로 각 과정에 대한 현상은 첫째 어떤 범위의 기상에 있어서 가연조건을 만족한 후 그 부분에서의 점화원에 의한 점화, 또는 열의 축적 등에 의해 점화원 없이 착화한다. 이러한 착화 과정을 거친 후 화염(연소파) 또는 폭발파가 전파하여 압력상승에 기인하는 파괴나 충격에 의한 피해가 발생한다. [1, 10]



**Fig. 1. Schematic phenomena of vented gas explosion**

이와 같이 기상폭발이 밀폐공간에서 일어날 경우에는 그 공간을 구성하고 있는 벽면의 강도 등에 의해 폭발현상이 달라지며 공간내의 가연성 혼합기의 농도분포, 공간을 구성하고 있는 벽면 가운데 약한 부분의 강도 및 넓이, 개방되고 있는 창외 개구부 넓이 등의 상태가 폭발특성에 대한 변수가 된다. [10] 가연성 가스의 농도는 가스가 누출 또는 발생하는 장소 부근에서는 높고 거기서 떨어진 곳에서는 그보다 낮다고 생각할 수 있다. 이런 상황에서 압력상승에 의해 공간을 구성하는 벽면의

일부가 파괴되어 파구가 생기고 파구의 발생에 의해 압력의 움직임이 대폭적으로 변하게 된다. [2]

일반 주택에서는 내부압력이 외부압력보다 0.1기압정도 상승했을 때 파괴가 일어나는 것으로 추정하고 있다. 압력은 면적당의 힘이며 0.1기압에서 1 m<sup>2</sup>당 1 ton의 힘을 받는다는 것을 생각하면 이 압력에서 주택의 창이나 문 때로는 바닥이나 천장이 파괴되는 것을 이해할 수 있다.

본 연구에서는 액화석유가스(LPG)가 가정의 주방이나 거실 등의 공간에서 누출되어 공기와 혼합되어 폭발되었을 때 폭발 압력의 거동과 폭발압력 등을 측정하기 위하여 가스폭발 사고와 유사한 현상을 재현하도록 폭발 실험용기의 한쪽 측면에 파열판을 부착하고, 점화원의 위치, 가스의 농도, 파열판의 강도, 파열판의 면적 등을 변수로 실험하였으며 이때 일어나는 여러 가지 폭발특성들을 측정하고 고찰하므로써 폭발에 의한 영향 평가와 피해현상들을 해석하고자 하였다. [3,4]

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

실험장치는 크게 폭발통 및 계측기 부분으로 나눌 수 있으며 폭발통은 가로x세로x높이가 각각 100x60x45 cm이며 부피가 270리터인 직육면체 용기로 앞면에는 폭발현상의 관측과 화염전파 현상을 촬영하기 위해 가로x세로가 각각 80x10 cm인 두께 15 mm의 투명 아크릴 관측창을 부착하였고 점화원을 위치를 변경하며 설치 하였다. 그리고 뒷면에는 폭발통의 진공용 밸브와 시료 주입용 밸브 및 폭발특성 측정을 위한 압력 센서를 설치하였다. 오른쪽 측면에도 시료가스 주입밸브와 압력 센서를 부착하였으며 반대편 왼쪽 측면에는 실내 가스폭발시 압력에 의해 유리창 등이 파열되는 현상과 유사하게 하기 위해 파열판을 설치하였다. 폭발통의 크기는 일반적인 가정의 거실이나 주방

크기에 비해 길이비로 1/5 (부피비로 1/125) 정도로 축소한 것이며 파열면의 면적은 거실의 유리창이나 창문 등의 크기를 고려하여 5종류로 하였으며 폭발용기 내용적(V) 및 내표면적(Si)에 대한 파열면의 넓이(S)비는 Table 1과 같다. [4]

실험장치의 개략적인 구성도는 Fig. 2와 같으며 압력센서(PT)는 strain type을 사용하였고 점화원은 압전소자를 이용한 점화기의 방전 불꽃을 이용하였다. 실험결과의 계측은 압력센서로부터 나온 신호를 strain amplifier를 통해 oscilloscope로 측정하였으며 plotter를 이용하여 출력하였다. [5] 측면에 사용된 파열판은 두께(t)가 각각 0.05, 0.1, 0.175 mm인 polyester 필름을 사용하였으며 이들의 인장강도는 각각 0.989 KN, 1.247 KN, 및 1.779 KN 이었다.

Table 1. Area vs volume ratio of rupture diaphragm and its size

Size(cm)	60x45	54x40	45x36	40x27	27x20
S/V(cm <sup>-1</sup> )	1/100	1/200	1/300	1/400	1/500
S/Si	10/100	8/100	6/100	4/100	2/100

## 2.2. 실험방법

실험방법은 다른 논문의 경우와 유사하며, [5] 그 순서는 폭발용기의 파열면에 파열용 필름을 고정시키고 진공펌프로 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 플라스틱 튜브에 채워진 시료가스를 용기 내에 흡입시키고 밸브를 열어 나머지 진공부분이 공기로 채워지도록 하였다. 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. 오실로스코프는 점화원의 스파크에 의해 동기되도록 하여 폭발용기에서 점화로부터 파열면의 파열에까지 걸리는 시간도 측정하였다. 아래의 실험결과들은 3회 또는 4회의 실험값에 대한 평균값이다.

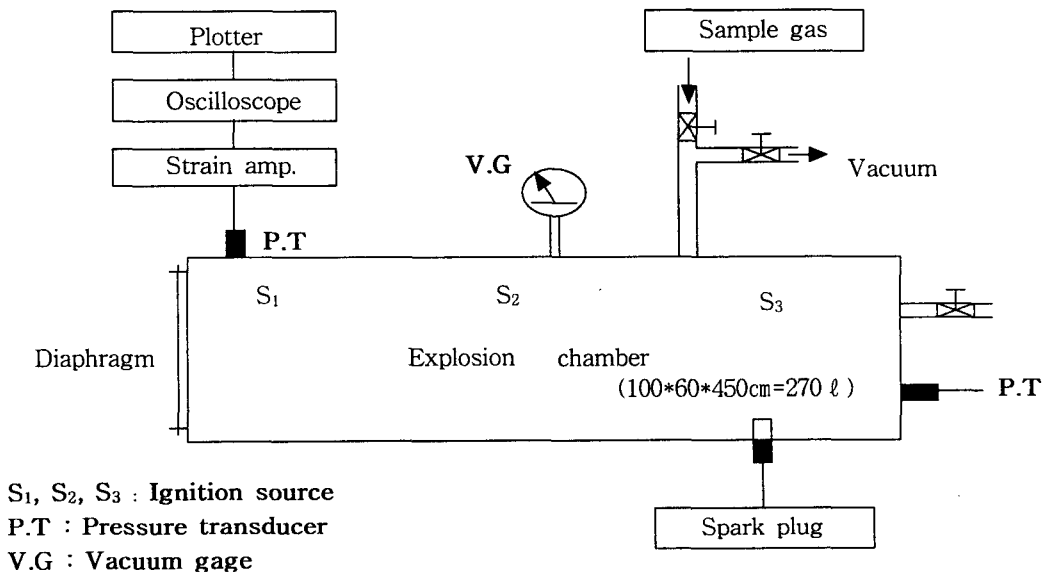


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 가연성 가스의 농도에 따른 폭발특성

Fig. 3과 Fig. 4는 LPG의 농도변화에 따른 폭발특성의 실험결과를 보여주고 있으며 이 결과들은 100  $\mu$ m polyester 필름을 파열판으로 사용하고 파열면적 대 폭발용기 부피비가 1/400 cm에서, 점화는 용기중앙 상부(S2)에서 점화시키고 측정한 결과이다. 실험은 각각의 농도에서 4회씩 실시하였다. Fig. 3에서 보여주는 것처럼 용기 내부에서 폭발압력은 LPG의 농도변화에 따라 큰 변화가 없었으며 완전밀폐 공간에서의 실험결과 [6] 와 비교할 때 매우 다른 특성을 보여주고 있는데 [5] 이는 폭발에 의해 파열면의 파열에 의해 개방공간의 형성될 때 폭발 공간에서의 압력은 공간내의 혼합가스의 농도보다 파열면의 파열강도에 의해 지배적인 영향을 받게 됨을 보여주는 결과이다.

Fig. 4의 폭발압력 상승속도는 당량농도에 가까운 농도에서 높고 폭발한계 농도쪽으로 농도가 높아지거나 낮아지면 낮아지게 되는데 이는 압력 상승속도는 폭발압력을 혼합가스가 폭발하여 최대 폭발압력에 도달한 때까지 걸리는 시간으로 나눈 값으로 폭발압력 상승속도는 혼합가스의 연소속도와 상관이 있음을 보여주고 있다. 즉 당량농도 부근에서는 연소속도와 화염전파속도가 크고 폭발한계 농도쪽으로 농도가 높아지거나 낮아지면 연소속도와 화염전파속도가 낮아지기 때문이다.

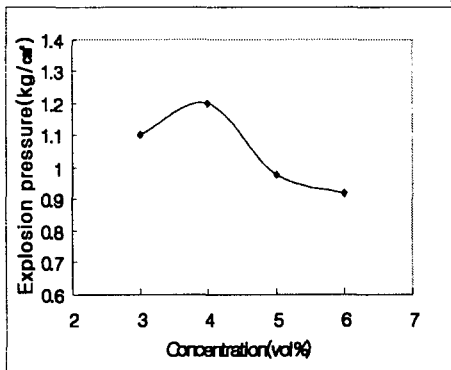


Fig. 3. Effect of concentration on vented gas explosion pressure of LPG-air mixture (diaphragm thickness (t)=0.1mm, s/v=1/400cm ignition at center of S2)

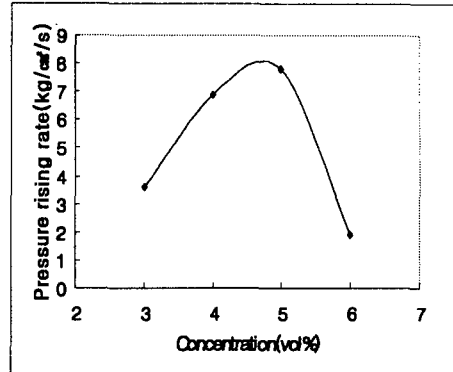


Fig. 4. Effect of concentration on vented gas explosion pressure rising rate of LPG-air mixture ( t = 0.1mm, s/v=1/400cm, ignition at center of S2)

#### 3.2. 점화 위치변화에 따른 폭발특성

밀폐용기 내에서는 점화원의 위치에 따라 폭발특성의 변화가 거의 없었으나 [5] 폭발에 의해 파열면이 발생하는 경우의 점화위치에 따라 폭발 특성에 약간의 변화가 있었으며 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

점화위치는 S<sub>1</sub>이 파열면에서 20 cm, S<sub>2</sub>는 50 cm, S<sub>3</sub>는 80 cm가 떨어져 있으며 용기 바닥면에서 32 cm의 높이에 있다. 전극의 길이는 S<sub>1</sub>과 S<sub>3</sub>가 5 cm, S<sub>2</sub>는 30 cm이었다.

혼합가스의 농도는 4%의 LPG로 하였으며 파열면적은 S/V가 1/400이고, 파열판의 두께는 100 $\mu$ m인 것을 사용하였다. Fig. 5와 Fig. 6에서 보여주고 있는 것처럼 점화위치가 중앙에 있을 경우가 다른 두 곳의 경우보다 파열압력과 압력 상승속도가 높았으며, 파열 시간이 짧은 경향을 알 수 있었다. 이러한 현상은 점화원을 중심으로 화염이 각 방향으로 같은 속도로 전파된다고 할 때 용기 중심부에서 점화되는 경우가 혼합가스의 연소시간이 짧기 때문이며 이로 인하여 폭발압력 상승속도가 빨라지는 것으로 판단된다.

따라서 폭발이 일어나는 공간에서 점화원이 어느 한 쪽에 치우쳐 있는 경우보다는 중심부에서 점화될 때 폭발의 위험성이 더욱 커지는 것을 예상할 수 있었다. [7]

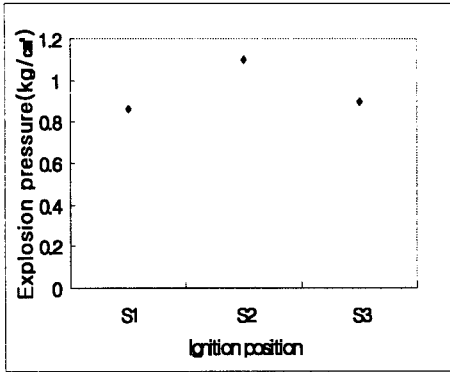


Fig. 5. Effect of ignition position on vented gas explosion pressure of LPG-air mixture (LPG 4%,  $s/v=1/400\text{cm}$ ,  $t=0.1\text{mm}$ )

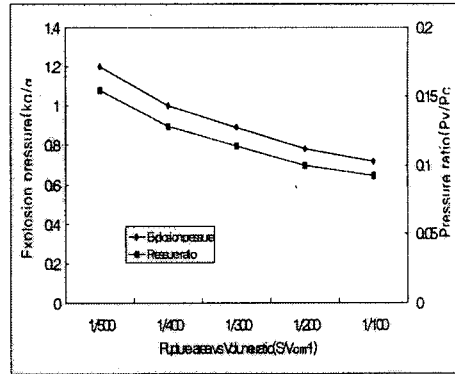


Fig. 7. Effect of rupture diaphragm area on vented gas explosion pressure of LPG-air mixture (LPG 4%,  $t=0.1\text{mm}$ , ignition at center of S2)

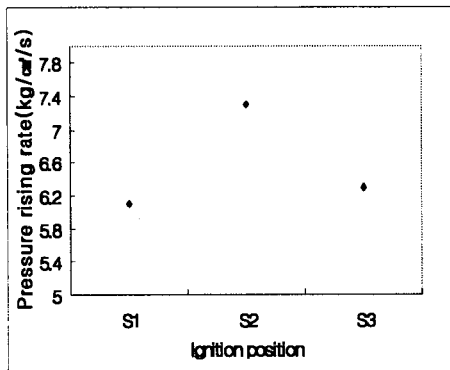


Fig. 6. Effect of ignition position on vented gas explosion pressure rising rate of LPG-air mixture (LPG 4%,  $s/v=1/400\text{cm}$ ,  $t=0.1\text{mm}$ )

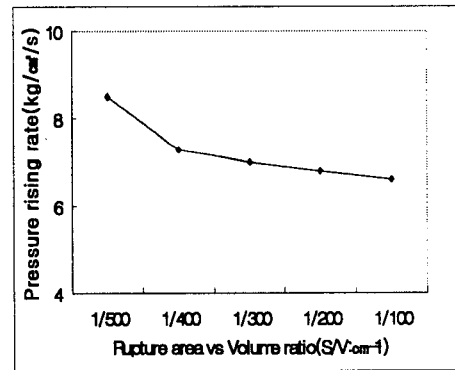


Fig. 8. Effect of rupture diaphragm area on vented gas explosion pressure rising rate of LPG-air mixture (LPG 4%,  $t=0.1\text{mm}$ , ignition at center of S2)

### 3.3. 파열면의 면적에 따른 폭발특성

건물마다 창문의 구조나 면적들이 다르고, 이와 함께 가스폭발 사고시 실내의 피해정도도 크게 달라지게 될 것을 예상하여 파열면적의 변화에 따른 폭발특성의 변화를 고찰하였다. 가스농도는 LPG가 4%이고, 파열판의 두께는 100 $\mu\text{m}$ , 그리고 점화원의 위치는 중심부 S2에 설치하였다. 파열면적은 폭발용기의 부피에 대한 비로서 S/V로 표시하였으며 이들의 면적과 크기는 Table 1에 나타내었다. 일반적으로 국내 아파트에서 24평형 및 31평형은 창문면적에 대한 거실의 부피비(S/V)가 약 1/100cm 정도이며 개인 주택이나 반 지하건물 같은 경우에는 S/V가 1/100 cm 이하인 것으로 되어 있다.

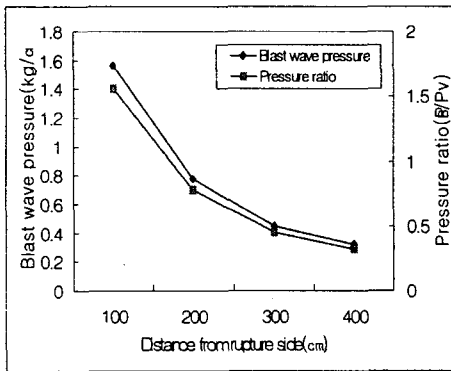
Fig. 7과 Fig. 8은 LPG-공기 혼합기에 대한 실험결과로서 파열면적의 증가와 함께 파열압력 및 압력 상승속도가 감소하고 있음을 나타내고 있으며, 파열될 때까지의 시간도 감소함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 동일한 파열판에서 파열면의 면적이 증가할수록 파열면 전체가 받는 압력은 면적의 증가와 함께 증가하기 때문에 파열면적이 증가할수록 낮은 압력에서 파열되는 것이다. 한편 Fig. 7에 동일 농도 조건의 밀폐공간에서의 폭발압력( $P_c$ )에 대한 파열면 발생시의 폭발압력( $P_v$ )의 비로 나타낸 결과에서 그 값은 0.092에서 0.154로 낮지만 시멘트 구조물들이 약 0.2 - 0.6 Kg/cm<sup>2</sup>의 폭

발압력에 파괴되는 것과 비교하면 폭발압력에 의한 건물의 붕괴를 피하기 위해서는 폭발 시 개구부의 역할을 하는 창문의 면적이 공간의 부피에 대한 비로 1/100cm 이상이 되어야 할 것으로 판단된다.

**3.4. 파열면으로부터 거리에 따른 폭풍압력**

밀폐공간에서 폭발이 일어나고 폭발압력에 의해 개구부가 발생할 경우 폭발압력은 순간적으로 개구부를 통해 방출되며 이 방출되는 압력을 폭풍압력이라 한다. [1,8,9]

본 실험에서는 파열면적대 부피비(S/V)가 1/400 cm이고 파열판의 두께가 100 $\mu$ m인 경우 4% LPG-공기 혼합가스의 폭발에 대한 거리별 폭풍압력을 측정하였다. 실험결과는 Fig. 9와 같이 파열면으로부터 거리에 따라 폭풍압력이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있었다. 또한 S/V 가 1/400cm 일 때 내부의 폭발압력(Pv)과 폭풍압력(PB)과의 비를 볼 때 파열면으로부터 약 2m 거리까지는 폭풍압력이 내부 압력보다 높은 것을 나타내고 있다. 따라서 파열면 가까이 있는 경우는 내부보다 외부에서 피해가 더 크게됨을 확인할 수 있었다.

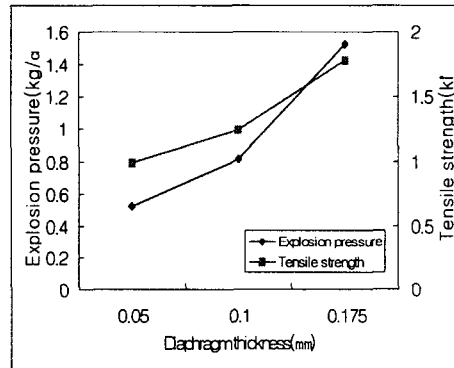


**Fig. 9. Variation of blast wave pressure of LPG-air mixture with the distance from the vent (LPG 4%, s/v=1/400cm, t=0.1mm)**

**3.5. 파열판의 강도에 따른 폭발특성**

파열면의 면적에 따라 폭발특성이 달라지는 현상을 앞에서 설명하였는데 파열면의 강도가 달라지면 파열면이 폭발압력에 대항하여 파열압력이 달라지게 될 것이다. [10] 또한 이에 따라 용기 외부의 폭풍압력도 달라지게 될 것

이다. [1,3] 여기서는 2-1에서 인장실험을 한 3 종류의 polyester 필름을 사용하여 파열판의 강도가 폭발특성에 미치는 영향을 실험하였다. 파열면의 면적은 S/V가 1/300 cm이었고, 접화 위치는 용기 중심부분에 위치하였으며 4% LPG-공기 혼합기를 대상으로 실험하였다. Fig. 10에는 파열판의 두께변화에 따른 파열압력의 변화를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 파열판의 두께가 두꺼울수록, 즉 파열면의 인장강도가 클수록 내부 폭발압력도 증가하므로 폭발사고시 피해를 최소화하기 위해서는 폭풍압력에 견딜 수 있는 강도를 갖는 구조로 하든지 아니면 폭발압력이 가능한 빠른 시간에, 낮은 압력에서 폭발압력이 방출될 수 있도록 하는 것이 피해를 줄일 수 있는 방법이 됨을 알 수 있었다.



**Fig. 10. Variation of explosion pressure of LPG-air mixture according to the rupture diaphragm thickness (LPG 4%, s/v=1/400cm, t=0.1mm)**

**4. 결 론**

본 연구에서는 가정이나 가스 저장시설 등에서 폭발사고가 발생할 경우 폭발압력에 의해 폭발이 발생하는 공간은 물론 폭발압력의 방출에 의해 외부에도 큰 피해를 가져오는 현상을 분석하기 위하여 가정용 연료로 많이 사용되는 LPG를 시료가스로 하여 여러 가지 상황에서 폭발특성을 실험하므로써 실내 가스폭발시 일어나는 현상 및 실내, 외에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

폭발용기에 파열판을 설치하여 폭발이 일어

날 경우 개구부가 발생하는 실험을 통하여 폭발시 파열이 일어나는 경우에 폭발이 발생하는 공간에서의 폭발압력은 가스의 농도보다는 파열되는 면의 강도에 의존함을 알 수 있었으며 점화원의 위치가 파열압력에 미치는 영향은 적었으나 중심부분에서 점화할 경우 연소시간이 짧아지고 압력 상승속도가 증가하여 점화후 파열면이 파열되는데 까지 걸리는 시간이 약간 짧아지는 경향을 보였다. 또한 파열면의 면적이 작아질 경우 파열압력이 커지고 따라서 폭발공간내의 피해도 증가하게 됨을 알 수 있었고 파열면으로부터 방출되는 폭발압력에 의한 폭풍압력은 파열압력에 비례하여 증가하며, 파열면의 면적이 작을수록 폭풍압력은 증가하였다. 또 파열면의 강도가 크고 파열압력이 높은 경우 파열면 가까이에서는 내부 압력보다 높은 폭풍압력을 경험하게되어 폭발이 일어나는 공간의 조건에 따라서 내부보다 오히려 외부의 피해가 커질 경우도 발생하게 됨을 알 수 있었다. 그러나 파열면으로부터 거리가 멀어짐에 따라 폭풍압력은 급격히 감소하여 먼 거리에 있는 경우에는 피해가 적게됨 확인할 수 있었고 또 안전거리의 도출도 가능함을 알 수 있었다.

### 감 사

본 연구는 한국가스공사와 한국가스안전공사의 연구비 지원으로 수행되었음에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Dag Bjerkedvedt., Jan Roar., Kees van Wingerden, "Gas explosion handbook", Elsevier Science, (1997).

2. T. Hirano, "가스爆發 豫防技術", 海文堂, (1983).

3. W. E. Baker., P.A. Cox., P.S. Westine., J.J. Kulesz., R.A. Strehlow, "Explosion hazards and evaluation", Elsevier Science, (1983).

4. 오규형, 김홍, 조영도, 김상섭., "실내 가스 폭발현상 및 실내.외 영향 분석", 호서대학교 연구보고서, (1998).

5. 오규형, 김홍. 유주현., "가스혼합물의 폭발 압력과 연소열의 상관관계 연구", 한국가스학회지 Vol. 1, No. 1(Dec. 1997)

6. Haruhiko Itagaki, "Gas explosion of methane-air mixtures in a closed vessel", Kogyo Kayaku, Vol. 50, No. 3, (1989).

7. 오규형, "내압방폭을 위한 Safe Gap의 측정에 관한 연구", 한국가스학회지 Vol. 1, No. 1, (1997).

8. Kees van Wingerden, "Prediction of blast overpressures generated by vapour cloud explosions occuring in the vicinity of control rooms", 32nd Loss Prevention Symposium, (1998).

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

10. NFPA 68, "Guide for venting of deflagration", NFPA, (1984).