

불균일 농도 LPG의 폭발 특성에 관한 연구 A Study on the LPG Explosion Characteristics of Non-uniform Concentration

오 규 형[†]

Kyu-Hyung Oh[†]

호서대학교 소방학과

(2003. 10. 2. 접수/2003. 12. 19. 채택)

요 약

가로, 세로, 높이가 각각 100 cm, 60 cm, 45 cm로 내용적이 270 l인 폭발 용기를 이용하여 불균일 농도 상태의 LPG-공기 혼합가스의 폭발특성을 측정하였다. 폭발은 vented-explosion과 closed explosion의 조건에서 실시하였다. 실험의 변수로는 점화원의 위치, 노즐직경 및 유속으로, 시료가스를 주입하는 노즐의 직경과 유속을 변화시키면서 용기 내에서의 불균일 혼합정도를 조절하였다. 폭발압력은 strain형 압력 센서를 사용하여 측정하였고 폭발화염의 거동은 비디오카메라로 측정하여 분석하였다. 실험결과 유속과 가스 주입 시간이 용기 내 가스 혼합에 중요한 요소임을 알 수 있었으며, 불균일 정도가 심화될 수록 폭발압력과 압력상승속도가 감소하였으나 용기 내 폭발화염의 체류시간은 크게 증가하였으며 이로 인하여 가스 폭발 후 화재로의 전이 위험성이 증가함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

LPG explosion characteristics in non-uniform concentration was investigated with a 270 liter explosion vessel of which the scale is 100 cm × 60 cm × 45 cm. Vented explosion and closed explosion system were used. Experimental parameter were position of ignition source, nozzle diameter and flow rate of gas. Non uniform concentration was controlled by the nozzle diameter and flow rate. Explosion pressure were measured with strain type pressure sensor and the flame behavior was pictured with the video camera. Based on this experimental result, it was found that the flow rate of gas and the duration of gas injection are important factor for mixing the gas in the vessel. And as the increase the non-uniformity of gas concentration, explosion pressure and pressure rise rate is decrease but the flame resident time in the vessel is increase. Therefore gas explosion to fire transition possibility will increase in non-uniform concentration gas explosion.

Keywords: Gas explosion, Fire transition, Non-uniform concentration

1. 서 론

산업 및 문화의 발전과 함께 생활의 편리성 뿐 아니라 기존의 석탄과 석유 연료들의 연소시 발생하는 배출물질로 인한 환경오염을 감소시키기 위한 정책에 의해 에너지원으로 사용되는 연료의 형태가 달라져 왔다.

국내에서도 산업 발전과 에너지 정책의 변화 등에 힘입어 최근 몇 년 사이 가연성 가스 연료의 사용이 급격히 증가하였다. 최근 가스 배관망을 통한 가스의

공급이 대도시 및 중소 도시까지 이루어지고 있고 배관망이 닿지 않는 곳에도 용기를 통한 가스 공급이 이루어져 가정연료의 상당부분이 가스연료로 대체되고 있는 실정이다.

가스연료의 사용에 따른 편리성과 환경오염의 감소는 우리에게 유익한 반면 가스의 누출과 이에 따른 폭발 및 화재 사고로 인명과 재산 손실을 가져왔다. 가스 사고에 대비한 기술의 발달과 안전의식의 향상 등으로 국내 가스 폭발 사고의 건수는 95년과 96년을 정점으로 감소하고 있는 경향을 보이고는 있으나 아직도 많은 사고들이 발생되고 있다. 사고통계에 따르면¹⁾ 98

[†]E-mail: khoh@office.hoseo.ac.kr

년부터 2002년까지 최근 5년간 사용 장소별 가스사고 현황으로 주택과 요식업소 등 최종 사용 장소에서의 사고가 60~70%를 차지하고 있으며, 또한 같은 기간에 발생한 가스 사고를 형태별로 분석한 결과 폭발 및 화재 사고가 전체 건수의 60~70%를 차지하고 있음을 볼 수 있는데 이를 피해액으로 환산하면 이보다 더 높은 비율을 차지하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 2002년을 기준으로 가스별 사고를 분석한 결과, 메탄이 주성분인 공기보다 가벼운 도시가스가 약 20%이고, 프로판이 주성분인 공기보다 무거운 LPG가 75% 이상으로 나타나 있다. LPG가 도시가스에 비하여 사고건수가 많은 것은 LPG가 공기보다 무거운 체류하는 원인도 있으나 공급 형태와 최종 사용처의 관리에도 많은 요인이 있는 것으로 볼 수 있다.¹⁾

여기에서 가스 폭발이나 화재 사고의 대부분은 가스가 누출되어 공간내에 균일한 농도로 확산되기 전에 착화되어 발생하는 불균일 농도 혼합가스의 폭발 형태를 이루게 된다.^{1,3)}

그동안 균일 농도에서의 가스 폭발 특성에 대하여는 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔으며⁴⁾ 정량적인 해석을 겸한 이론적, 실험적 결과들이 많이 확보되어 있으나 사고 폭발과 같은 불균일 농도에서의 폭발 특성에 대한 연구는 연구 결과의 해석 및 적용이 어렵기 때문에 연구 자료들을 찾아보기가 힘들다.^{5,6)}

따라서 본 연구에서는 이러한 배경들을 바탕으로 LPG를 시료로 사용하여 가스 주입구 노즐의 직경과 주입 가스량을 변화 시키면서 불균일 농도 상황을 만들고, 밀폐 또는 파열면이 발생하는 조건에서의 폭발 실험을 통하여 불균일 농도 상태에서의 가스 폭발 특성을 정성적으로 고찰하고 이러한 특성들이 이차적으로 가져올 수 있는 화재로의 전이 위험성을 예측하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 폭발통과 계측 장비들로 구성되어 있으며 개략적인 구성도는 Fig. 1과 같다. 폭발통의 크기는 가로 세로 높이가 각각 100 cm, 60 cm, 45 cm로서 소형 아파트의 거실 크기를 길이 단위로 약 1/5로 축소한 형태로 하였다. 폭발통의 정면은 폭발화염의 전파과정을 가시화하고 화염의 거동을 관찰하기 위해 투명 폴리카보네이트로 창을 만들었으며 뒷면에는 압력 센서와 진공펌프를 부착할 수 있도록 하였고 우측면에는 점화원과 시료가스 주입 노즐을 부착하도록 만들었다. 그리고 좌측면에는 파열판을 부착하거나 철판으로

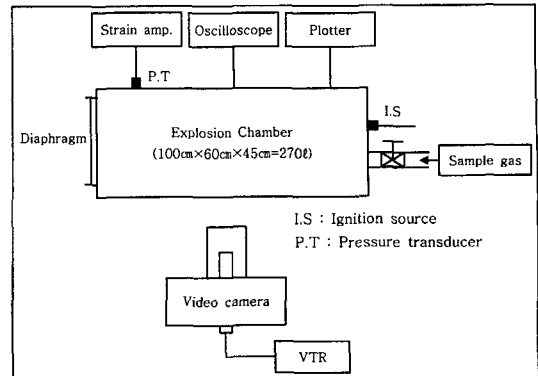


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

밀폐시킬 수 있도록 하였다.

불균일 농도를 만들기 위해 LPG를 노즐을 통해 폭발통기 내에 직접 주입하였으며 불균일 정도를 다르게 하기 위하여 노즐 직경을 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm의 5종류로 하였고, 가스 주입속도는 1분에 각각 1l, 2l, 3l, 4l의 종류로 변화시키면서 실험하였다. 시료로 사용된 LPG는 분자량이 44 g/mole로 공기보다 무거운 프로판이 97% 이상인 것을 사용하였고, LPG의 주입량은 적산 유량계를 이용하여 농도 4.5 vol%에 상당하는 양을 주입하였는데 이는 완전 혼합시 최대 폭발압력을 나타내는 농도에 해당된다. 점화원의 위치는 가정에서 점화원이 될 가능성이 있는 전기 콘센트 및 스위치 등을 고려하여 용기의 바닥으로부터 각각 5 cm(B), 22 cm(C), 40 cm(A)로 변화시키면서 용기 내 주입된 가스의 확산상태와 점화위치에 따른 폭발특성의 변화 등을 측정하였다. 파열면이 발생하는 조건에서 파열면의 크기는 가로 세로가 40 cm x 20 cm이며 파열면은 약간 강도가 있는 아크지를 사용하였다. 밀폐조건의 실험을 할 경우는 이 측면 판을 철판으로 교체하였다. 시료가스의 주입은 니들밸브와 압력조정기를 통해 실험에 맞는 유량으로 조절되면 적산유량계를 거쳐 용기에 주입하였으며 주입시 뒷면 좌측 상부에 있는 밸브를 개방하여 용기 내 압력상승을 방지하였으며 일정량 가스주입이 끝나면 모든 밸브를 잠그고 1분 경과 후에 점화시켰다. 점화원은 10 KV의 점화용 변압기의 방전 불꽃을 사용하였으며 이 에너지는 연소범위 내의 모든 농도의 혼합 가스를 착화시키기에는 충분한 크기이다. 실험은 대기압 실온 조건에서 실시하였으며 실온은 20±3°C 정도였다. 실험 결과는 용기 뒷면 중앙에 설치된 strain형 압력센서를 이용한 폭발특성의 측정과, 용기 전면에 설치된 카메라를 이용하여 폭발

화염의 거동을 30 fps로 촬영하여 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 노즐 직경에 따른 폭발 특성

용기 내부로 주입되는 가스의 흐름은 주입구의 직경이나 유속과 압력 등에 따라 영향을 받고 이에 따라 내부에서 농도구배를 만들 것으로 예측할 수 있으며 농도 구배에 따라 폭발 특성에 영향을 미칠 것이다. 다음 Table 1은 앞에서 설명한 노즐의 직경과 가스 주입 유량에 따라 노즐에서의 가스 유속을 계산한 것이다. 유속이 낮은 경우는 용기내부에서의 혼합은 가스의 분자운동에 의존하게 될 것이고 유속이 빠른 경우는 가스의 흐름이 가스혼합에 지배적일 것이다. 즉 노즐의 직경이 큰 경우가 작은 경우에 비해 농도의 불균일 정도가 심하게 될 것이다.

다음 Fig. 2는 폭발 용기의 좌측면을 아트지로 밀폐하여 폭발시 압력에 의해 개구부가 발생되는 경우

Table 1. Flow velocity of gas according to the variation of nozzle diameter and flow rate

Nozzle diameter (mm)	Injection speed (l/min)	Flow velocity in nozzle (m/s)
2	1	5.31
	2	10.62
	3	15.93
	4	21.24
4	1	1.33
	2	2.66
	3	3.98
	4	5.31
6	1	.59
	2	1.18
	3	1.77
	4	2.36
8	1	0.33
	2	0.66
	3	1.0
	4	1.33
10	1	0.21
	2	0.42
	3	0.63
	4	0.85

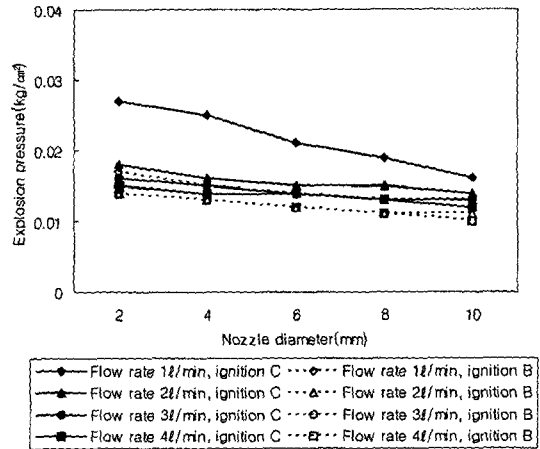


Fig. 2. Explosion pressure of non-uniform concentration LPG-air mixture according to the variation of nozzle diameter in vented explosion.

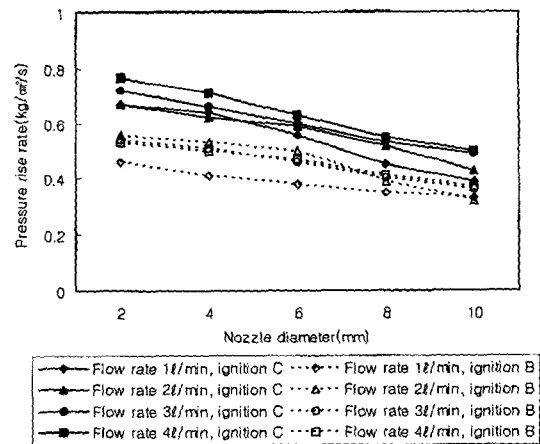


Fig. 3. Pressure rise rate of non-uniform concentration LPG-air mixture according to the variation of nozzle diameter in vented explosion.

(vented explosion)에 대하여 노즐 직경에 따른 폭발압력을 나타낸 것으로 노즐의 직경이 증가할 수록 폭발압력이 감소하고 있으며 점화위치가 중간 높이(C:실선)인 경우가 바닥부분(B:점선)에 있을 때보다 높은 것으로 나타남을 볼 수 있다. 이는 앞에서 설명한 것처럼 노즐의 직경이 증가할수록 용기 내에서의 혼합이 불균일하게 되어 착화가 지연되거나 연소시간이 길어지기 때문이다. 또한 Fig. 3은 폭발압력 상승 속도를 나타낸 것으로 폭발압력과 같은 경향을 보이고 있으며 점화 위치에 따른 차이를 분명하게 보여주고 있는데 이는

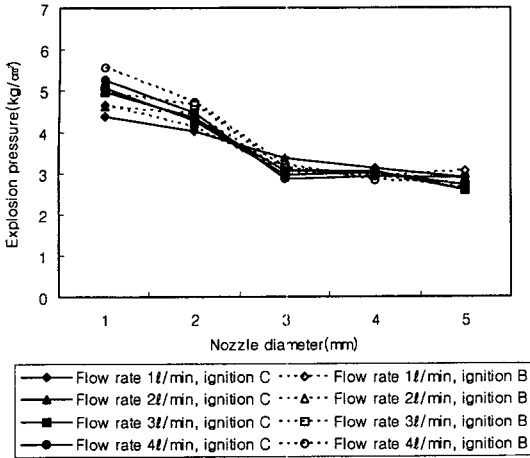


Fig. 4. Explosion pressure of non-uniform concentration LPG-air mixture according to the variation of nozzle diameter in closed vessel.

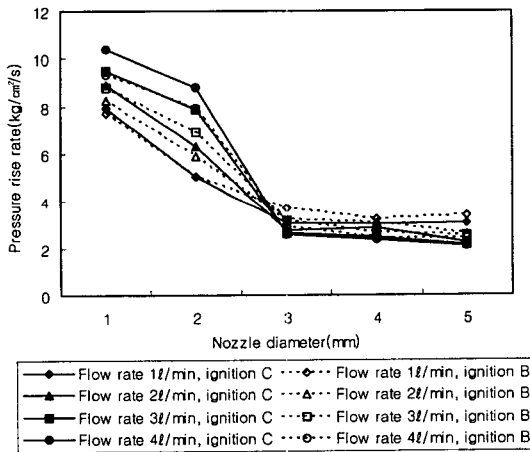


Fig. 5. Pressure rise rate of non-uniform concentration LPG-air mixture according to the variation of nozzle diameter in closed vessel.

시료가스가 공기보다 무거워 용기 아래 부분에 농도가 높은 불균일 상태를 형성하고 있는 것으로 사료된다. Fig. 2와 Fig. 3의 측정 결과에서 폭발압력과 압력상승 속도의 절대적인 값은 큰 의미가 없으며 정성적인 경향성을 나타낸 것으로, 파열면의 강도에 따라 그 값은 달라진다.

다음 Fig. 4와 Fig. 5는 폭발시켰을 때 개구부가 발생되지 않는 밀폐공간에서의 불균일 농도시 폭발 특성이다. 개구부가 발생하는 경우와 같은 경향으로 노즐의 직경이 증가할수록 폭발압력과 압력상승속도가 감

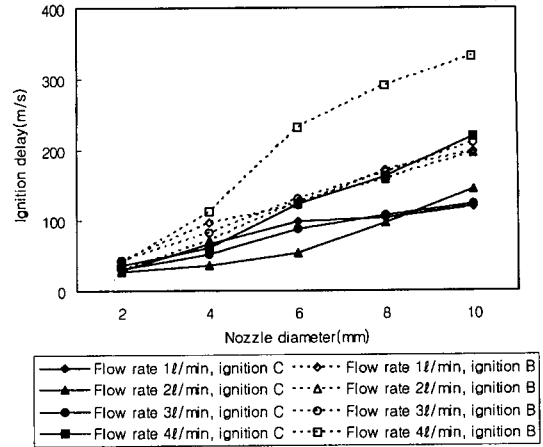


Fig. 6. Ignition delay time of non-uniform concentration LPG-air mixture according to the variation of nozzle diameter in vented explosion.

소하는 현상을 나타내고 있다. 본 실험 용기에서 LPG의 농도가 4.5 vol%로 균일하게 혼합된 경우^{2,3)} 폭발압력은 7~8 kg/cm²이고 압력상승속도는 20~30 kg/cm²/s인 것과 비교하면 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. 특히 압력 상승 속도의 경우 균일농도에서의 값보다 1/3~1/10 이하로 낮아지고 연소반응 시간은 크게 길어져 용기 내에 화염의 체류시간이 길어짐을 볼 수 있는데 이러한 현상들은 불균일 농도 폭발시 화재로의 전이 위험성의 증가 원인이 된다. Fig. 4와 Fig. 5에서 노즐 직경이 6 mm 이상에서 폭발압력과 압력 상승 속도가 급격히 낮아지는 것을 보여주는데 이는 용기내 주입된 가스의 유속이 낮아 주로 분자운동에 의해 확산, 혼합되어 불균일이 심해졌기 때문인 것으로 사료된다.

또한 Fig. 2와 Fig. 3에서 점선과 실선은 점화원의 위치로 실선은 용기 중간 높이이고 점선은 용기의 바닥에서 5 cm 높이로서 바닥 부분에서 착화시 폭발압력의 압력 상승속도가 낮은 것을 볼 수 있는데 이는 LPG가 공기보다 무거워 아랫부분에 체류되며 불균일 정도가 심한 현상 때문으로 생각된다. Fig. 6은 폭발 용기의 좌측면을 아트지로 밀폐하여 폭발 시 압력에 의해 개구부가 발생하는 경우(vented explosion)에 스파크의 발생으로부터 착화될 때까지의 착화 지연 시간으로 노즐의 직경이 증가할수록 지연시간이 길어짐을 볼 수 있는데 이는 농도 불균일에 원인이 있는 것으로 판단된다. 또한 점화원의 위치가 아래 부분(B)에 있을 때가 중간지점(C)보다 길어지는 것도 LPG의 밀도가 공기보다 크기 때문에 아래 부분에 불균일 정도가 심

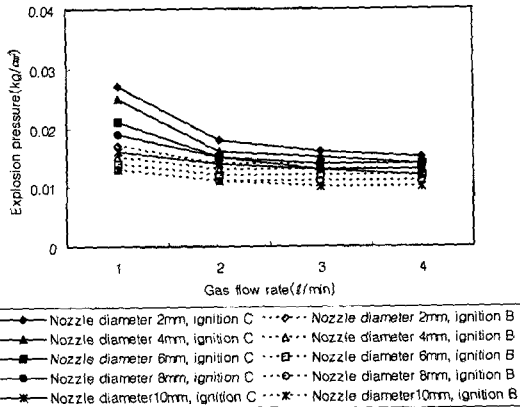


Fig. 7. Explosion pressure of non-uniform concentration LPG-air mixture according to the variation of flow rate in vented explosion.

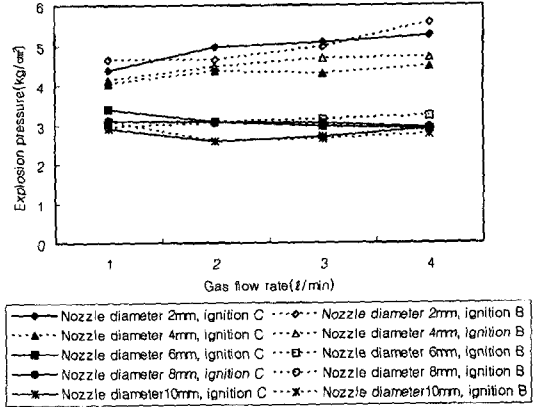


Fig. 8. Explosion pressure of non-uniform concentration LPG-air mixture according to the variation of flow rate in closed vessel.

하기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 결과는 밀폐 상태의 불균일 농도 실험에서도 유사한 결과를 나타내었다.

3.2 유속에 따른 폭발특성

용기 내부로 주입되는 가연성 가스가 공기와 혼합되는 상태는 가스의 분자량과 밀도 등 물리적인 특성과 유체의 흐름속도 등에 따라 영향을 받는다.

Fig. 7은 폭발 용기의 좌측면을 아트지로 밀폐하여 폭발 시 압력에 의해 개구부가 발생하는 경우(vented explosion)에 시료가스의 용기내 주입속도에 따른 폭발 압력을 측정된 것으로 유속의 증가에 따라 폭발 압력이 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이는 동일한 노즐 직경에서 유속이 증가하는 경우 노즐 내에서의 빠른 유속으로 유체운동에 의한 확산효과가 있는 반면 시료가스 주입시간이 짧아져 용기내부에 불균일 농도의 정도가 심해졌기 때문으로 생각된다. 한편 Fig. 8은 Fig. 4와 동일한 밀폐조건에서 유속에 따른 폭발 압력으로 노즐직경이 2mm와 4mm인 경우 유속증가와 함께 폭발압력이 증가하는 경향을 보였고 노즐 직경이 6mm에서 10mm인 경우에는 시료가스 주입 속도의 증가에 따라 폭발압력이 약간 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 노즐직경이 작은 경우 노즐직경이 큰 경우에 비하여 시료가스의 주입시간이 길어져 보다 많은 확산 혼합이 이루어 졌기 때문으로 생각된다.

노즐 직경에 따른 폭발특성의 변화와 가스의 주입유량에 따른 폭발특성 측정 결과의 비교를 통해 알 수 있는 것은 가연성가스의 누출에 의한 공기와의 혼합과 폭발 과정에서 누출가스의 유속이 큰 경우는 빠른 속도로 혼합이 진행되어 폭발 위험성이 커지게 되며, 가

스의 혼합속도에 영향을 미치는 주된 요소는 가스의 주입속도 즉 유속과 주입시간 임을 알 수 있었다.

3.3 불균일 농도 폭발시 화재전이 위험성

Fig. 2와 Fig. 4 및 Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 불균일 농도에서 폭발시 폭발압력이나 폭발압력 상승속도는 균일 농도 폭발시와 비교하여 낮기 때문에 폭발압력에 의한 물리적 파괴현상은 감소될 수는 있으나 Fig. 8의 밀폐상태에서의 폭발은 비록 불균일 농도 상태라 하더라도 폭발 압력이 건물의 파괴 한계치인 0.6~0.8 kg/cm² 보다⁴⁾ 훨씬 높아 파괴의 위험성은 여전히 존재함을 알 수 있다.

또한 가스 폭발화염에 의한 화재로의 전이에 영향을 미치는 중요한 요소는 폭발화염에 의한 가연물로의 열 전달이다. 폭발화염으로부터 가연성 물체로의 열전달에 따른 가연성 고체의 온도 상승과 이에 따른 착화의 가능성은 열의 전달속도 및 전달량, 비열, 열전도율을 비롯한 가연성 물질의 성질에 의존한다.^{7,8)}

폭발화염의 온도는 약 1700~2000°C 정도로 불균일 농도에서 폭발시 화염의 온도는 균일 농도에 비하여 약간 낮을 수 있으나 불완전 연소에 의한 탄소의 영향 등으로 복사열 전달량이 많으며 또한 고온의 화염이 폭발공간에서 머무르는 시간이 길기 때문에 가연성 물체로의 열유입량이 증가하여 착화의 위험성이 높아진다.

Fig. 9는 노즐직경에 따른 용기내 화염의 체류시간을 측정된 것으로 노즐직경이 증가할수록 유속이 느려지고 그에 따라 용기 내 불균일 정도가 심해져 폭발압력이 낮아진 반면 용기 내 화염의 체류시간이 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 화염으로부터의 복사열 및

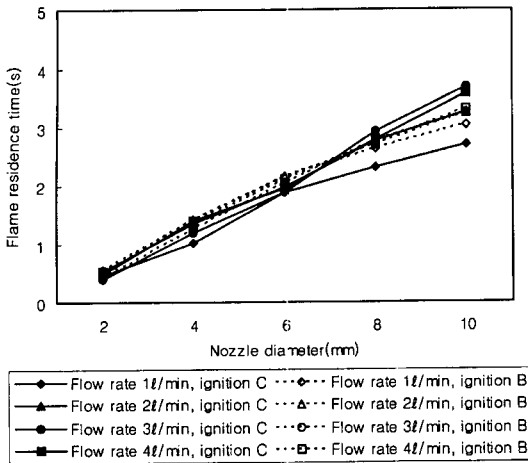


Fig. 9. Explosion flame residence time in the vessel according to the variation of nozzle diameter in vented explosion.

대류에 의한 가연물로의 열전달량이 증가하게 됨을 나타내며 이로 인하여 불균일 농도 가스 폭발 시 폭발 후 화재로의 전이 가능성이 높아지게 됨을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 불균일 혼합가스의 폭발실험으로 실험값의 편차가 크기 때문에 일관성 있는 결과를 얻기는 어려웠으나 실험적인 연구를 통해서 어떤 공간내에 가스가 누출될 경우 내부 가스의 혼합정도는 누출구의 크기 및 누출속도에 따라서 영향을 받게 되며 누출속도

가 작은 경우는 유체 역학적인 운동에 의한 확산보다 누출가스의 밀도 등 물리적 성질 등에 의해 영향을 받게 됨을 알 수 있었다. 또한 누출가스의 폭발특성 실험결과 불균일 정도가 클수록 폭발압력 및 압력상승속도는 낮아지게 되지만 밀폐된 공간 내에서 폭발이 될 경우는 폭발압력이 약 3 kg/cm^2 이상이 되어 여전히 건물을 파괴할 만큼의 위험성을 갖고 있었다. 불균일이 심한 경우 화염의 체류시간이 증가하여 폭발화염의 복사열에 의한 폭발 후 화재로의 전이 위험성은 증가하게 됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- 2002 가스사고 연감, 한국가스안전공사(2002).
- 오규형, "실내가스폭발현상 및 실내·외 영향 분석", 호서대학교 연구보고서(1998. 6).
- 오규형, "실내가스누출 및 폭발특성에 관한 연구", 호서대학교 연구보고서(1999. 7).
- Kees van Wingerden, "Gas Explosion Handbook", Elsevier Science(1997).
- Michiko Harayama, "Explosion of combustible Gaseous Mixtures with Non-uniform Concentration", 안전공학, Vol. 19, No. 5(1980).
- 배정일, "농도 불균일 LPG-공기 혼합 기체의 폭발특성", 한국산업안전학회지, 제8권, 제4호(1993).
- 정용대 역, "가스폭발 예방기술, 세화출판사(1985).
- Tsuruda. T. and T. Hirano, "Heat Transfer in Fire and Combustion System", ASME HTD Vol. 45 (1985).
- 이성은, "가스폭발 후 화재 전이현상 및 화재방지에 관한 연구", 호서대학교 학위논문(2001).