



농도 불균일 LPG-공기 혼합기체의 폭발특성

Explosion Characteristics of Nonhomogeneous LPG-Air Mixtures

배 정 일* · 김 영 수** · 서 용 칠*** · 신 창 섭****

J. I. Bae · Y. S. Kim · Y. C. Seo · C. S. Shin

ABSTRACT

The explosion characteristics of nonhomogeneous LPG-Air mixtures was measured in a cylindrical vessel and a pipe. The maximum explosion pressure, the maximum rate of explosion pressure rise, and the flame propagation velocity were measured and compared with that of homogeneous explosion by changing the effective factors on the explosion of nonhomogeneous mixtures such as pressure difference, effusion time and delay time.

Explosion was occurred even in the lower concentration than the lean flammability limit of mixture. The maximum explosion pressure was increased with increase of LPG concentration, however, the maximum explosion pressure rise was not in the nonhomogeneous explosion. And the flame propagation velocity was decreased with nonhomogeneity, however, the maximum explosion pressure was always above 0.7kg/cm^2 .

1. 서 론

가연성 가스가 공기와 폭발범위내로 혼합하는 경우, 착화원이 존재하게 되면 가스폭발을 일으켜 많은 인적·물적피해를 초래하게 된다. 일반적으로 가연성가스의 폭발범위는 상온·상압에서 가연성

가스-공기의 혼합기체가 균일한 경우 측정되고 있다¹⁾.

그러나 폭발을 일으키는 혼합기체의 폭발범위는 가연성 가스의 종류·온도·압력 및 착화원의 종류 뿐만 아니라 기체의 혼합정도에 따라서 다른 값을 나타낸다. 그리고 실제 가스 누출 사고시 가연성 가스의 농도 분포는 대부분 불균일 상태로서 이들

* 금성일렉트론(주)

** 충북대학교 대학원

*** 한국원자력 연구소

**** 충북대학교 산업안전공학과

의 폭발현상을 정확히 규명하기 위하여는 불균일상태에서의 폭발한계, 화염전파속도 및 폭발현상에 대한 체계적인 연구가 요구되고 있다. 지금까지 불균일계에 대한 연구발표는 매우 적은 실정이나, 平野등이 원관형 용기내에서 농도 불균일 혼합기체의 폭발특성에 대한 논문^{2),3)}을 발표한바 있어 본 연구에서는 이를 기초로 하였다.

본 연구에서는 연료 및 공업적으로 널리 사용되고 있는 LPG에 대하여, 공기중 불균일 상태에서의 폭발한한, 화염전파속도 및 폭발압력등 폭발특성을 측정하고, 농도불균일 혼합기체의 폭발현상을 이해하여, 가연성 가스의 누출이나 분출에 의한 가스 폭발사고의 방지를 위한 기술자료로서 활용할 수 있도록 하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

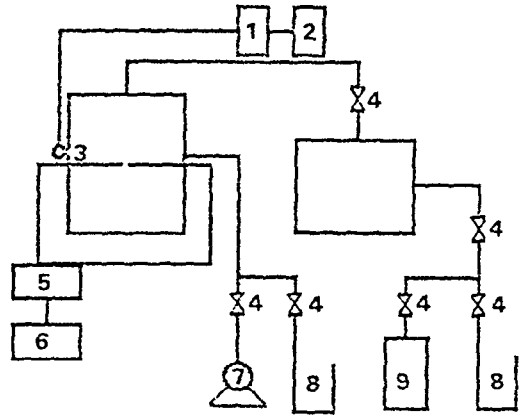
2.1 실험장치

본 연구에서는 두 종류의 실험장치를 사용하였으며 Fig. 1은 폭발용기로 내경 10cm, 높이 20cm의 강철제 원관형 밀폐용기를 사용한 경우이다. 상단부에서 시료가스인 LPG를 대기압 상태의 공기로 충전되어 있는 용기내로 주입하도록 하였으며, 이때 시료가스의 균일한 확산을 위하여 다공판을 분출구 상단에 부착하였다.

폭발용기에 주입되는 LPG는 프로판 97.3vol%, 부탄 2.1vol%, 에탄 0.6vol% 등으로 구성된 가스로서 마노메타와 metering valve를 사용하여 정량을 주입하도록 하였다.

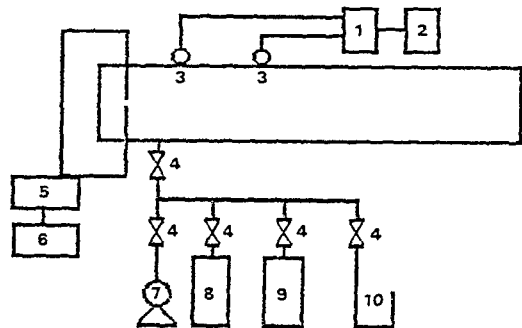
그리고 Fig. 2는 내경 10.6cm, 길이 1.5m의 파이프를 폭발용기로 사용한 경우로 파이프의 왼쪽 끝의 중심부와 상단부에서 대기압의 공기로 충전되어 있는 용기내로 LPG를 압축 실린더를 이용하여 주입하도록 하였다.

착화원으로는 1차 220V, 2차 15,000V의 전압용량을 가진 neon transducer를 사용하고 방전전극의 전극간의 길이는 0.1mm로 하였으며, 방전에너지 및 시료 공급시간, 착화시간 조절을 위하여 각각 타이머를 사용하였다. 그리고 explosion pressure measuring system과 flame speed measuring system을 사용하여 폭발압력과 화염전파속도를 각각 측정하고 분석하였다.



- 1. Oscilloscope
- 2. Plotter
- 3. Pressure Sensor
- 4. Metering Valve
- 5. Timer
- 6. Neon Transducer
- 7. Vacuum Pump
- 8. Manometer
- 9. LPG

Fig. 1 Schematic of cylindrical explosion vessel system



- 1. Oscilloscope
- 2. Plotter
- 3. Optical Sensor
- 4. Metering Valve
- 5. Timer
- 6. Neon Transducer
- 7. Vacuum Pump
- 8. LPG
- 9. Gas Chamber
- 10. Manometer

Fig. 2 Schematic of pipe type explosion vessel system

2.2 실험방법

실험은 원관형 용기의 경우 진공펌프로 내부를 진공으로 만든 후 폭발용기내는 공기를 대기압이

될 때 까지 공급하고, 보조용기에는 압력용기에 충전되어 있는 시료가스를 solenoid valve와 마노메타를 이용하여 정량을 주입시킨다.

폭발용기 내에서 농도 불균일 상태를 만들기 위하여 폭발용기와 보조용기 간의 압력차(압력차), 가스 분출시간(분출시간), 가스분출 종료후 착화까지의 지연시간(지연시간)을 변화시켰으며, 착화에 너지의 충분한 공급을 위하여 방전시간을 0.3sec로 하였다.

또한 혼합기체의 농도 불균일상태에서의 폭발하한 측정은 시간 경과에 따른 압력차를 측정하여 계산하였으며, 한 예로 시료가스농도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

실험 첫단계로 원관형 용기를 이용하여 시료 가스의 농도를 0.1vol% 간격으로 변화시켜가며 균일계에서의 폭발하한 및 폭발압력, 폭발압력상승속도를 측정하였다.

다음으로 압력차, 분출시간, 지연시간 그리고 시료주입위치 등을 변화시켜가며 불균일 상태에서의 폭발하한, 폭발압력, 폭발압력상승속도 등을 측정하였다.

실험 두번째 단계로 파이프형 용기에서 농도불균일 상태를 만든 경우 착화시간에 따른 폭발하한의 변화 및 화염전파속도를 측정하였다.

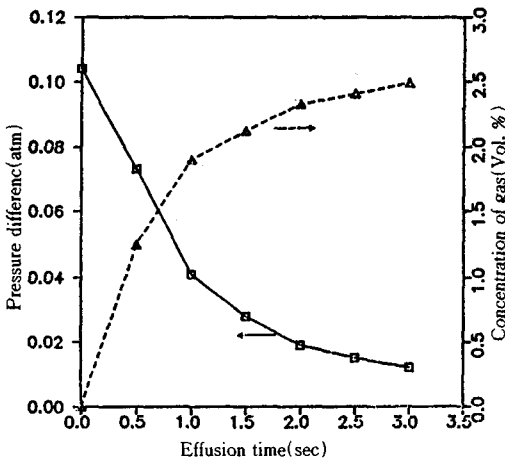


Fig. 3 Change of the pressure difference and concentration by effusion time

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균일계의 폭발한계

농도 균일상태 LPG의 상은, 상압에서의 폭발범위를 측정된 결과 원관형 용기에서는 2.6-9.5vol%를 나타냈고, 파이프형 용기는 2.7-9.5vol%를 나타냈다. LPG의 폭발한계에 대한 다른 연구자의 문헌치^{3,4)}와 비교하여 볼 때, Table 1에서와 같이 하한값이 약간 높은 수치이고 상한값은 일치하고 있다. 그리고 문헌치의 경우도 실험자에 따라 다른 값을 나타내고 있다.

Table 1 Comparison of flammability limits of LPG-air mixtures

	Reference (vol. %)	Experiment (cylinder) (vol. %)	Experiment (Pipe) (vol. %)
Lower limit	2.4	2.6	2.7
Upper limit	9.5	9.5	9.5

3.2 불균일계에서의 폭발하한값

가연성 혼합가스의 불균일상태를 만드는 데는 여러가지 변수가 있는데, 본 실험에서는 분출시간, 압력차 및 지연시간을 변화시켜 불균일계의 폭발한계를 측정하였다.

불균일계의 폭발하한을 측정하기 위하여 파이프형 용기에서 가스분출 종료 후 점화까지의 지연시간을 변화하여 폭발실험을 수행한 결과는 Fig. 4와 같으며 폭발확률이 0.7인 경우와 0.2인 경우를 나타내고 있다. 균일계에서의 폭발하한값은 2.7vol% 이나 지연시간이 작아질수록, 즉 LPG 주입 후 점화시간까지의 시간이 짧아 농도 불균일 상태가 심할수록 폭발하한값은 낮아지는 것으로 나타났고 특히 폭발확률이 0.2의 등곡선은 2.33vol%에서도 폭발이 일어나는 것으로 나타났다.

한편 원통형 용기에서의 폭발하한에 대한 실험결과는 Fig. 5와 같으며, 여기서 실선은 균일계에서의 폭발한계로서 실선 오른쪽 영역이 폭발이 일어나는 부분이다. 그런데 불균일계의 경우 실선 왼쪽 영역에서도 폭발현상이 일어나고 있으며, 특히 지연시간이 작아질수록 폭이 넓어지는 경향을 나타내고 있어 불균일에 따른 폭발한계의 변화를 알 수 있다. 그러나 지연시간이 아주 작은 경우는 폭발이 일어나지 않았다.

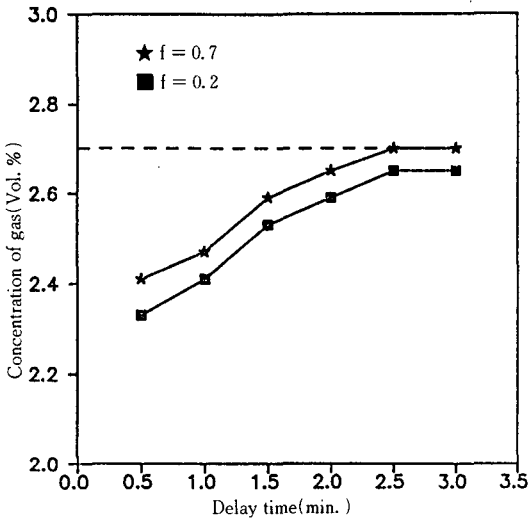


Fig. 4 Flammability limit of nonhomogenous mixtures in pipe

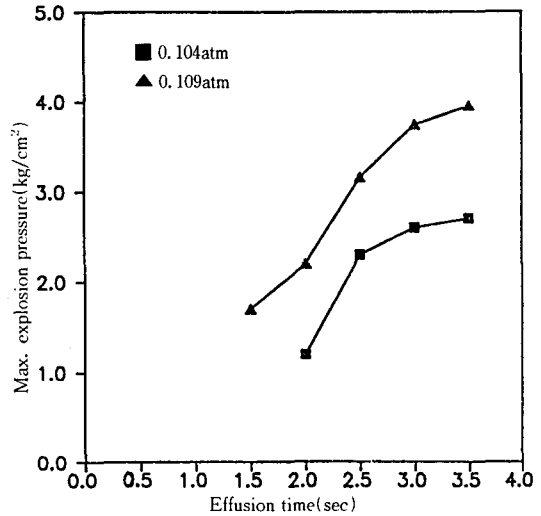


Fig. 6 Variation of max. explosion pressure with effusion time

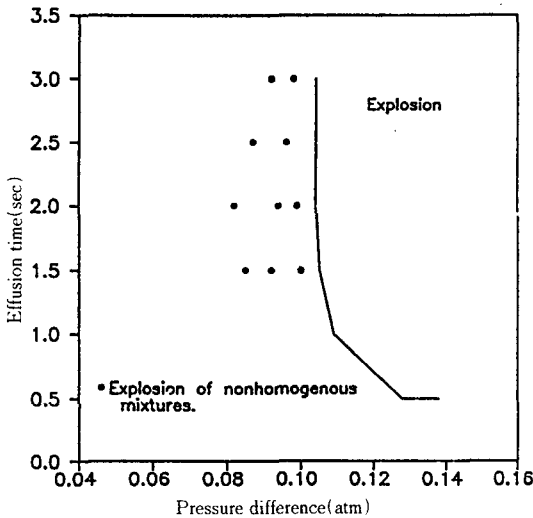


Fig. 5 Flammability limit of nonhomogenous mixtures in cylinder

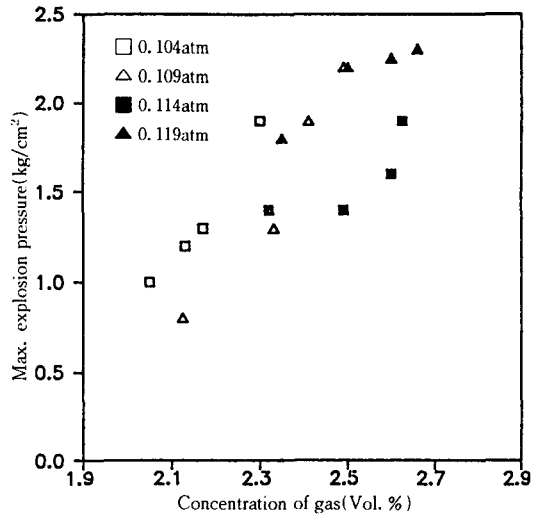


Fig. 7 Effect of concentration on max. explosion pressure

3.3 불균일계에서의 최대폭발압력 및 폭발압력 상승속도

Fig. 6은 지연시간 2.0sec에서 가스 분출시간에 따른 최대폭발압력의 변화를 나타낸 것으로 분출시간의 증가에 따라 최대폭발압력이 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 농도불균일의 경우도 용

기내에 들어간 가연물질의 양의 증가에 따라 최대폭발압력이 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있으며 분출시간이 긴 경우 증가폭이 줄어들고 있어 보조용기에서 폭발용기로 공급되는 LPG의 양이 시간경과에 따라 줄어드는 것과 직접 관련이 있는 것을 알 수 있다.

그리고 불균일상태에서 주입된 LPG의 농도에

따른 최대폭발압력을 나타낸 것이 Fig. 7로서 여기서 실험값의 변동치가 크게 나타나고 있어 불균일계의 특징을 나타내고 있으나 전체적인 경향은 농도증가에 따라 폭발압력이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 농도불균일이 심한 경우에도 최대폭발압력은 최소 0.7kg/cm^2 이상을 나타내고 있어 누출사고시 불균일이 심한 경우에도 폭발위력을 크게 미칠수 있는 것을 알 수 있다.

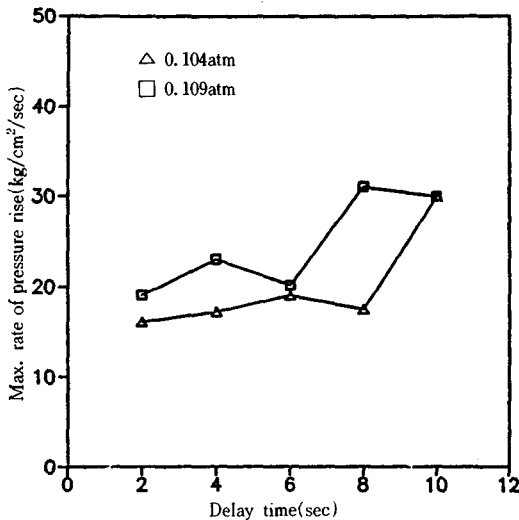


Fig. 8 Max rate of explosion pressure rise with delay time

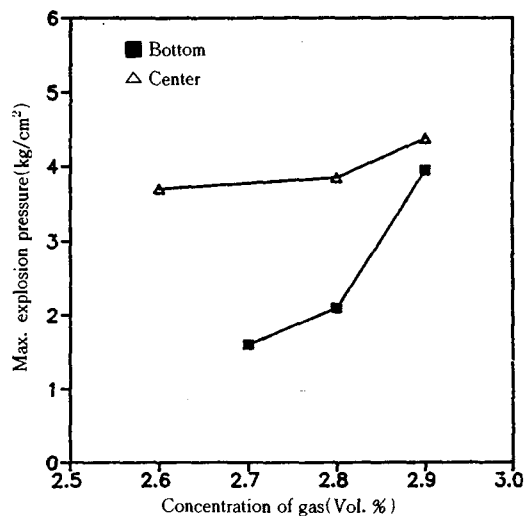


Fig. 9 Effect of effusion position on explosion pressure

Fig. 8은 가스분출 후 착화까지의 지연시간에 따른 최대폭발압력상승속도를 나타낸 것으로 이때 분출시간은 3.0sec이었다. 이 경우 최대폭발압력과는 달리 아주 불규칙한 값을 나타내고 있어 불균일계에서의 특징으로 최대 폭발압력상승 속도가 불규칙성을 알 수 있다.

불균일상태에서 원통형 용기속의 점화위치에 따른 폭발압력의 영향을 측정기 위하여 점화봉을 중앙과 상단, 하단등 세지점으로 변동시키며 실험하였다. Fig. 9는 그 실험결과를 나타낸 것으로 중심에서 점화시킨 경우 항상 높은 폭발압력을 나타내었으며 하단 점화시 낮은농도에서는 폭발이 일어나지 않았다. 그리고 상당부 점화시에서는 중심부와 하단부의 경우와는 달리 폭발현상이 전혀 일어나지 않았다.

3.4 불균일계의 화염전파속도

파이프형 용기에서 농도 불균일상태가 화염전파속도에 미치는 영향을 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 가스분출후 착화까지의 지연시간에 따른 화염전파속도를 측정하였으며 처음 지연시간이 길어짐에 따라 화염전파속도가 급격히 증가하였으며 이것은 지연시간의 증가에 따라 최대폭발압력이 증가하는 것과 같은 현상으로 해석할수 있다. 그러나 2.0분 이상인 경우는 오히려 감소하는 현상을 보이고 있어 파이프내에서 불균일상태가 균일상태로 전

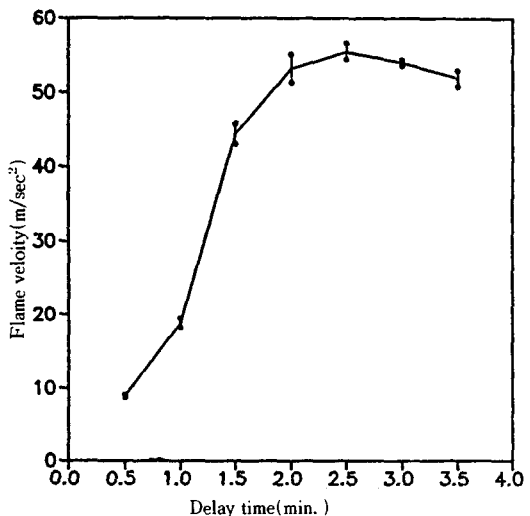


Fig. 10 Effect of delay time on flame velocity

이해가는 과정으로 해석할 수 있다.

4. 결 론

LPG-공기 불균일계의 폭발한계 및 폭발특성에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폭발용기내로 가스분출 후 착화까지의 지연시간이 짧은 경우, 즉 용기내의 농도 불균일 상태가 심한 경우는 균일계의 하한값보다 훨씬 낮은 농도에서도 폭발이 일어났으며 이 경우 지연시간이 짧을수록 더 낮은 농도에서 폭발하였다.
- 2) 농도 불균일계의 최대폭발압력은 지연시간이 일정한 경우 폭발용기내에 주입된 LPG양의 증가에 따라 증가하였으나 최대 폭발압력상승 속도는 불규칙한 변화를 나타내고 있어 이들을 불균일계 폭발의 특징으로 들 수 있다.
- 3) 폭발 용기내의 농도 불균일이 심한 경우 화염전파속도는 아주 느린값을 나타내고 있으며 농도가 균일해질수록 증가하는 것으로 나타나, 지연시간 증가에 따라 최대 폭발압력이 증가하는것

과 같은 현상임을 알 수 있다.

- 4) 농도불균일이 심한 경우에도 최대폭발압력은 0.7kg/cm² 이상의 폭발위력을 나타낸다.

참 고 문 헌

- 1) Zabetakis, M. G., "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors", U. S. Bur. Mines Bull. 627, pp.20~42, 1965.
- 2) 平野敏右外 2人., "濃度こう配のある可燃性混合氣の爆發壓力", 安全工學, Vol.18, No.1, pp.28~33, 1979.
- 3) 平野敏右外 3人., "濃度不均一混合氣の爆發", 安全工學, Vol.19, No.5, pp.266~271, 1980.
- 4) 柳生昭三 "ガスおよび蒸氣の爆發限界", 安全工學協會, pp.63~70, 1979.
- 5) 德橋和明外 4人., "AHn 水素化合物 ガスの爆發下限界温度と結合解離エネルギー", 安全工學, Vol.25, No.5, pp.258~264, 1986.