



LP 가스의 폭발 현상 및 화염전파에 관한 연구

†최재욱 · 이동훈 · 김태근 · 민철웅 · 임우섭 · 최병식*

부경대학교 안전공학부, *부산대학교 화학공학과
(2007년 6월 1일 접수, 2007년 6월 21일 채택)

A Study on the Explosion Phenomenon and Flame Propagation of LP Gas

†Jae-Wook Choi · Dong-Hoon Lee · Tae-Gn Kim · Wong-Chul Min ·
Woo-Sub Lim · Byoung-Sik Choi*

Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
*Dept. of Chemical Engineering, Busan National University, Busan 609-735, Korea
(Received 1 June 2007, Accepted 21 June 2007)

요 약

LP 가스의 폭발현상 및 위험성을 평가하기 위하여, 산소농도변화와 LP 가스의 농도에 따른 혼합가스 조성을 변화시켜 실험을 행하였다. 산소농도 21%에서 LP 가스의 농도가 증가할수록 폭발하한계는 낮아졌으며, 최소산소농도(MOC, Minimum Oxygen Concentration)는 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar에서 각각 14.5%, 12.0%, 11.5%로 낮아졌다. 최대폭발압력은 압력이 증가할 경우 6.46 kg/cm², 9.41 kg/cm², 13.49 kg/cm²로 증가하였으며, LP 가스의 초기압력이 클수록 화염의 전파속도가 증가하였다.

Abstract – The explosion phenomenon and hazard estimate of LP gas, the study was examined into variation of oxygen concentration and LP gas concentration. As the result of experiment, the lower explosive limit was decreased as the increased at concentration of LP gas and 21% of oxygen concentration. Minimum oxygen concentration was 14.5%, 12.0%, 11.5% at 1.0, 1.5 and 2.0 bar respectively. And maximum explosion pressure was increased for 6.46 kg/cm², 9.41 kg/cm² and 13.49 kg/cm² according to increased of pressure. The speed of flame propagation was increased as the higher with initial pressure of LP gas.

Key words: LP gas concentration, Lower explosion limit, Minimum oxygen concentration, Maximum explosion pressure, Flame propagation

I. 서 론

화석연료는 황산화물이나 질소산화물 등의 유독 가스를 다량으로 배출하여 대기오염을 가속화시키고 있으며, 석유류는 산업현장에서 연료, 용제, 원료, 중간제품, 완제품으로 널리 사용될 뿐만 아니라 가정의 연료로도 사용되고 있다. 따라서 연소시 유독 가스가 적고 단위질량당 발열량이 큰 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas 이하: LPG)는 사용량의 증가에 따라 관련사고도 증가하고 있으며, 2005년에는 전체가스사고 건수 109건 중 LP 가스에 의한 사고가 88건이며, 최근

2006년도 상반기의 LP 가스사고로 인한 인명피해는 사망 1명, 중상 67명에 이르고 있다[1-4].

가스폭발의 경우에 건물의 내부 등 밀폐 공간 내에서의 폭발은 압력이 크게 상승하고 밀폐공간을 구성하는 벽면 등에 강력한 충격파를 줌으로서 개방공간에서 보다 밀폐공간에서 폭발이 발생할 경우 폭발압력에 의한 파괴효과는 더욱 증가한다[5].

폭발위험성을 평가하기 위한 주요 특성으로서는 폭발하한계(lower explosion limit), 최대폭발압력(maximum explosion pressure), 폭발압력상승속도(rate of explosion pressure rise) 등이 있으며, 이러한 가스폭발의 연구사례로는 국내에서는 오 등[6]이 가연성 가스에 대한 폭발 위험에 관한 연구를 하였으며, 최 등[7-9]이 도시가

†주저자:jwchoi@pknu.ac.kr

스의 폭발 위험성에 대하여 평가한 바 있다. 국외에서는 Tsurumi[10]는 밀폐용기의 가스폭발에 관한 평가방법과 Ohsawa 등[11]의 고전압 영역에 대한 메탄의 점화한계에 관한 연구 등이 있으나, 국내에서 사용되는 LPG 폭발에 관한 화염전파에 대한 위험성의 연구 자료는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 산업현장, 일반 음식점 및 가정에서 널리 사용되는 연료인 LPG의 폭발특성을 파악하기 위하여 LPG를 시료로 각각 최대폭발압력, 폭발범위 및 폭발한계산소농도를 측정하였으며, 초고속카메라 측정법을 이용하여 폭발현상 및 폭발속도를 평가함으로써 화재·폭발 사고의 예방을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 실험장치 및 실험방법

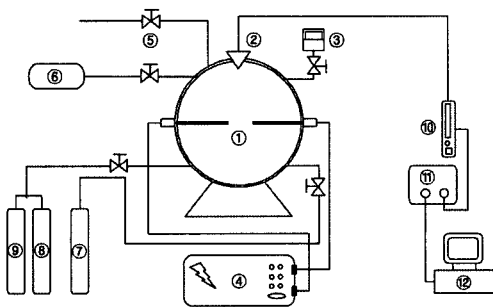
2.1. 폭발압력 및 폭발범위 측정

본 실험에서 LP 가스의 폭발특성을 측정하기 위한 장치로써 원통형의 용기 내에 혼합가스를 넣고 일정한 에너지로 점화시켜 화염이 전파되어 전체로 확산되는 전파법[12]을 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도로써, 원통형 폭발통의 규격은 외경 148 mm, 지름 105.4 mm, 용기체적 1.1 l이며 점화 인가시에 폭발상태 및 유무를 확인하기 위하여 전면부에 15 mm의 강화유리로 제작하였다. 또한 가스의 투입량을 조절하기 위해 디지털 압력계(PG-200-102G, Copal Electronic Co., Ltd.)를 장착하였고, 폭발시에 발생하는 압력은 압력센서(PE-30KF, Kyowa Electronic Co., Ltd.)로 측정하였다. 착화를 위한 에너지는 용기의 양끝에

점화전극을 연결하였고, 폭발시 발생하는 압력을 실시간으로 모니터링하여 수치화시킬 수 있도록 (주)엘텍인스루먼트에서 주문 제작된 프로그램 TPMeas.를 이용하였으며, 여기서 측정된 데이터를 가지고 최대폭발압력 및 폭발압력상승속도를 산출하였다.

가스폭발 현상을 촬영하기 위한 기법으로는 오목거울을 통해 폭발진행의 그림자를 촬영하는 Shadow 촬영기법을 사용하였다. Shadow 촬영기법은 자연광이 없는 상태에서 핀홀을 통과하는 광원을 통해 폭발진행의 그림자를 촬영하여 가연성 물질의 거동을 평가하였다.

Fig. 2는 Shadow 촬영기법을 이용하여 폭발현상을 측정하기 위한 카메라 배치도를 나타낸 것으로서 폭발현상을 촬영하기 위하여 초고속 카메라(V7.2, Pantom



- ① Explosion vessel
- ② Pressure sensor
- ③ Pressure gage
- ④ High voltage transformer
- ⑤ Vent valve
- ⑥ Vacuum pump
- ⑦ LPG bombe
- ⑧ Hydrogen bombe
- ⑨ Oxygen bombe
- ⑩ Amplifier
- ⑪ TC Terminal
- ⑫ Computer

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

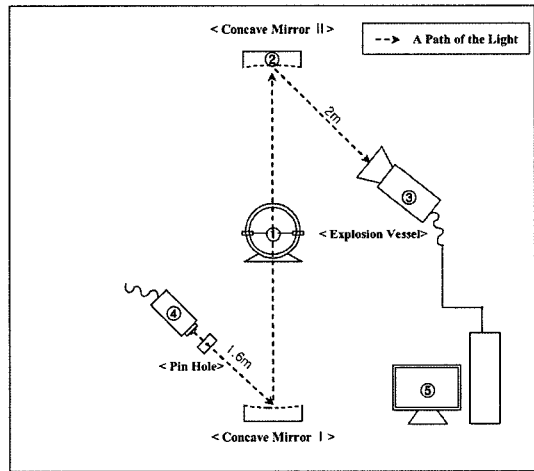


Fig. 2. Principle of shadow photographing techniques for explosion appearance.

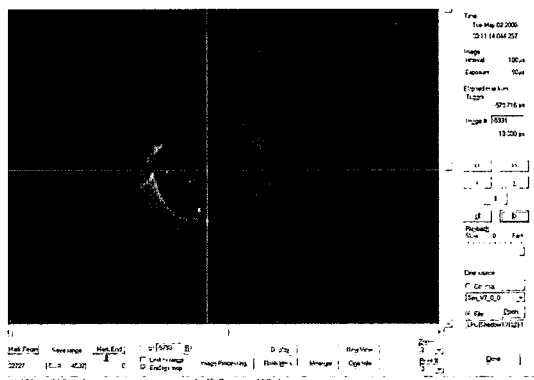


Photo 1. The explosion determined from the PANTOM-630 program.

Co., Ltd.)를 48만화소(Size 512×512)로 초당 10,000프레임 이상을 촬영할 수 있다.

장치에 사용된 광원은 정격용량이 250 W를 사용하였고, 고속카메라로 촬영된 영상은 컴퓨터에 저장하여 PANTOM-630을 이용하여 분석하였다. 가연성 물질의 화염전파에 대한 위험성 평가는 영상을 재생하여 시간의 변화에 따른 폭발현상을 관찰하고, 거리변화에 따라 폭발진행의 유동속도를 구하였다.

Photo 1은 초고속 카메라에 의하여 촬영된 가스의 유동상태와 폭발현상을 컴퓨터에 저장하여 PANTOM-630의 프로그램에 내장된 기능을 통해 폭발중심부에서 폭발경계면까지의 속도를 구할 수 있다. 즉, 폭발용기의 중심을 잡고 시간의 경과에 대한 전파 또는 폭발되는 길이를 구함으로써 위험성을 평가할 수 있다.

2.2. 실험방법

폭발실험의 경우에는 주변의 조건에 영향을 받기 때문에 이를 최소화시키기 위하여 온도와 습도를 일정하게 유지할 필요성이 있다. 따라서 본 실험에서는 정밀도의 최적화를 위해 온도 25±2°C, 습도 50±5%의 항온항습실에서 실험을 행하였다. 폭발특성을 측정하기 위한 실험순서는 다음과 같다.

- (1) 진공펌프를 이용하여 용기에 부착되어 있는 압력계의 수치가 -1.000 kgf/cm²-G가 될 때까지 진공을 실시한다.
- (2) 돌턴의 분압법칙을 이용하여 계산된 압력의 수치만큼 각각의 가스를 폭발통에 주입한다.
- (3) 폭발현상을 촬영하기 위한 고속카메라를 작동시킨다.
- (4) 점화플러그에 전원선을 연결한다.
- (5) 전원을 인가하고 폭발통의 전면부에 있는 강화유리를 통해 폭발유무를 확인한다.
- (6) 폭발시 TPMeas.상에 압력변화와 데이터를 컴퓨터에 저장한 후 분석한다.

III. 실험결과

3.1. LP 가스의 폭발한계

발범위의 정확한 측정은 가스폭발사고 방지대책의 가장 기본적인이고 중요한 사항이다.

Fig. 3은 LPG와 산소농도에 변화에 따른 폭발 특성을 나타낸 것으로서 산소농도 21%에서 압력이 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar로 변화됨에 따라 폭발한계는 2.3~9.5%, 2.2~11.0% 및 2.1~11.8%로 넓어진다는 것을

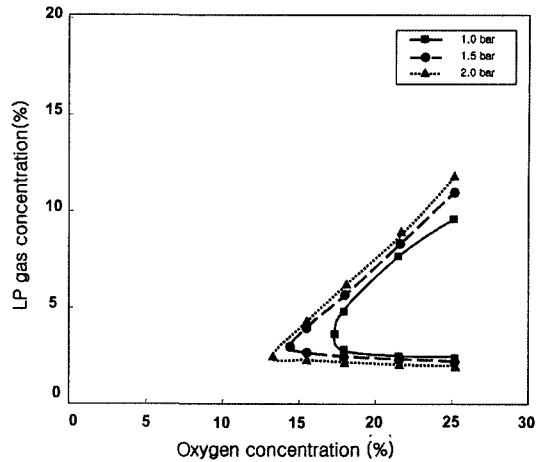


Fig. 3. Explosion behavior between LP gas and oxygen concentration variation.

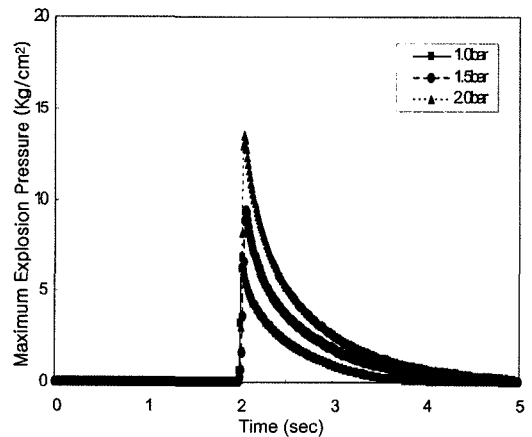


Fig. 4. Curve an behavior of time and pressurere for LP gas.

알 수 있었다. 또한 압력변화에 대한 산소농도가 감소함에 따라 하한계는 거의 변화가 없었으나 상한계는 급격하게 감소하였다.

연소범위내에서 공정안전을 확보하기 위한 연소에 필요한 최저산소농도(minimum oxygen concentration: M.O.C)는 대단히 중요하다. 따라서 압력변화에 대한 최저산소농도는 1 bar에서 14.5%, 1.5 bar에서 12%, 2.0 bar에서 11.5%를 구하였으며, 압력이 증가함 따라 M.O.C가 낮아지므로 가압상태에서는 산소의 농도가 낮음에도 불구하고 폭발이 발생되고 있으므로 공정운전중에 압력변화에 대한 위험성의 확보가 이루어져야 될 것으로 사료된다.

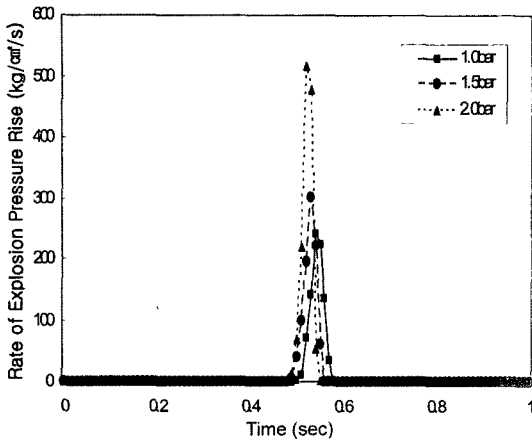


Fig. 5. Curve of time and explosion pressure rising velocity for LP gas.

3.2. LP 가스의 폭발압력

Fig. 4는 산소농도 21%, 시료농도 4%에서 초기압력을 변화시켜 최대폭발압력을 나타낸 것으로서, 초기압력이 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar로 증가할 경우 최대폭발압력은 6.46 kg/cm², 9.41 kg/cm², 13.49 kg/cm²로 증가하였다.

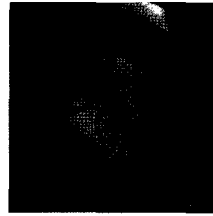
3.3. LP 가스의 폭발압력 상승속도

Fig. 5는 초기압력의 변화에 따른 폭발압력상승속도를 나타낸 것으로서 초기압력이 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar로 증가할 경우 폭발압력상승속도는 241.24 kg/cm²/s, 300.21 kg/cm²/s, 515.71 kg/cm²/s로 크게 증가하였다. 이는 초기압력이 증가할수록 용기 내 분자간의 충돌횟수가 증가하기 때문에 폭발압력상승속도가 상승하는 것으로 사료된다. 따라서 반응로의 초기압력이 높은 사업장에서는 반응기의 제작을 위한 재료 및 반응기의 두께 선정에 유의하여야 한다.

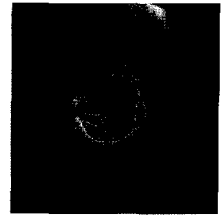
3.4. LP 가스의 전파속도

가연성 물질은 열전도, 분자확산, 화학반응을 원동력으로 하여 스스로 전파하는 성질을 가지고 있다. 화염의 전파속도는 가스의 유동 및 화염형상의 영향을 받기 때문에 화염대의 위치에 따라 측정방법을 달리하여야 한다. 일반적으로 화염을 직접촬영하거나 영사진 및 간접촬영법을 이용하지만 화염대의 중심에서 일어나는 화염의 거동 현상을 파악하는 것은 간접촬영법으로 측정하는 것이 정확도가 높다.

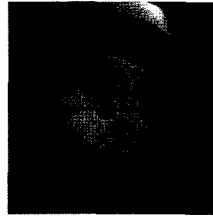
Photo 2는 초기압력이 1.0 bar일 경우 폭발현상을 촬영한 것으로서, 중심부로부터 5 mm 간격으로 속도를



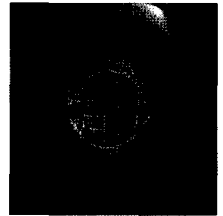
d : 5mm
s : 2.36m/s



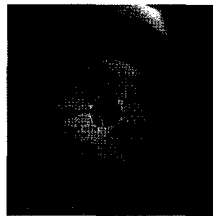
d : 30mm
s : 1.35m/s



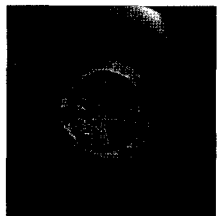
d : 10mm
s : 1.89m/s



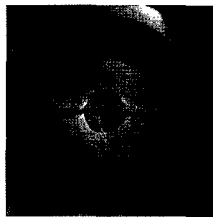
d : 35mm
s : 1.32m/s



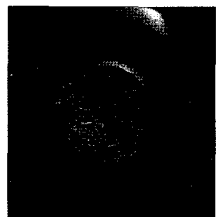
d : 15mm
s : 1.71m/s



d : 40mm
s : 1.29m/s



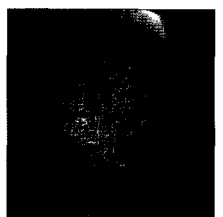
d : 20mm
s : 1.52m/s



d : 45mm
s : 1.19m/s



d : 25mm
s : 1.43m/s



d : 49mm
s : 1.02m/s

Photo 2. The explosion picture of LP gas at 1.0 bar

측정하였다. 가연성 가스가 착화원에 의하여 폭발이 발생되면 농도의 조성 과 압력에 따라서 폭발현상이 다르게 나타남으로 폭발용기 중심의 최초 5 mm에서 속

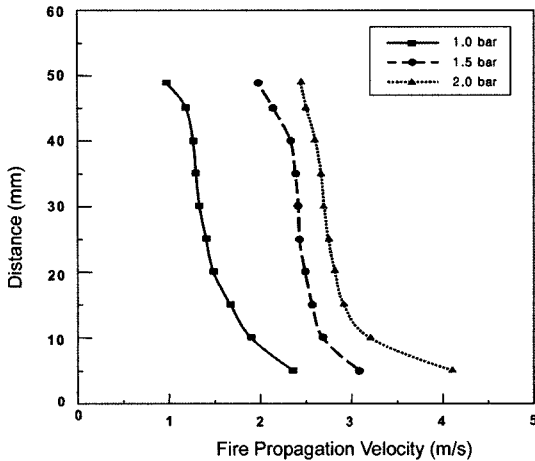


Fig. 6. Curve of flame propagation velocity and distance.

도는 각각 2.36 m/s, 3.09 m/s, 4.12 m/s를 나타내었다. 이와 같이 초기압력이 증가함에 있어서 폭발진행속도는 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 동일 체적의 용기 내에 존재하는 가연성 물질이 연소 후 더 많은 생성물을 발생시킴으로서 상대적인 입자의 수가 증가하기 때문에 화염의 진행속도가 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 6은 압력을 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar로 변화시켜 간접촬영법에 의하여 폭발용기의 중심으로부터 화염의 전파속도를 측정된 결과로서 착화 후 초기에는 화염이 전파되는 속도가 빠르게 진행되었으나, 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 LP 가스에 착화 후에 전극, 용기의 표면으로 열의 방산에 의하여 가연물의 유동도가 서서히 느려지는 것으로 사료된다.

V. 결 론

LP 가스의 폭발특성을 고찰하기 위하여 초기압력변화와 산소농도를 변화시켰을 때의 폭발범위, 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도를 구하고, 이에 따른 폭발시 화염전파 현상을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 산소농도 21%에서 초기압력을 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar로 변화시켰을 경우 폭발범위는 각각 2.3~9.5%, 2.2~11%, 2.1~11.8%를 구하였다.
- 2) 산소농도가 감소함에 따라 폭발하한은 거의 변화가 없으나, 폭발상한은 급격하게 감소하였으며, 최저산소농도는 초기압력 1.0 bar에서 14.5%, 1.5 bar에서

12.0%, 2 bar에서 11.5%를 구하였다.

3) 최대폭발압력은 초기압력이 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar로 증가할 경우 6.46 kg/cm², 9.41 kg/cm², 13.49 kg/cm²를 나타냈다.

4) 최대폭발압력상승속도는 초기압력이 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar로 증가할 경우 241.24 kg/cm²/s, 300.21 kg/cm²/s, 515.71 kg/cm²/s를 나타냈다.

5) 압력변화에 대한 폭발현상을 촬영한 결과 초기압력이 증가함에 있어서 화염전파속도가 증가하였으며, 초기압력 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar일 때, 중심부로부터 5 mm인 지점에서 각각 2.36 m/s, 3.09 m/s, 4.12 m/s를 구하였다.

6) 동일한 압력에서 거리에 대한 유동속도는 전극의 중심에서 용기의 표면으로 진행됨에 따라 느리게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단에서 시행한 지역혁신인력양성사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 小林清志, 荒木信辛, 牧野敦, “燃燒工學”, 理工學社, pp.1-24, (1988)
- [2] 에너지 경제 연구원, “21세기 에너지부분의 여건변화 및 중장기정책 연구”, (2001)
- [3] 한국가스안전공사, “가스사고연감”, (2007)
- [4] 한국가스안전공사, “가스사고 예방사례집”, (2007)
- [5] 平野橋右, “가스爆發豫防技術”, 海文堂, pp.2-3, (1983)
- [6] 오규형, 김한석, 이춘하, “可燃性 가스의 爆發特性에 관한 研究”, 한국산업안전학회지, 7(3), 66-72, (1992)
- [7] 최재욱, 목연수, 박승호, “도시가스의 폭발 특성에 관한 연구”, 한국산업안전학회지, 16(4), 109-114, (2001)
- [8] 최재욱, 민철웅, 임우섭, 이병철, 김동규, “표면열처리용 변성가스의 위험성에 관한 연구”, 한국산업안전학회지, 9(3), 9-14, (2005)
- [9] 최재욱, 이인식, 박성태, “산소농도와 압력변화에 따른 도시가스의 폭발특성”, 한국가스학회지, 9(1), 38-43, (2005)
- [10] Tsurumi, H., “Study on Maximum Safe Gaps with ProPane/Hydrogen with Air Mixtures”, Research Report of the Research Institute of Industrial Safety,

RIIS-RR-24-1, pp.1-9, (1975)

[11] Ohsawa, A. and K. Ishikawa, "Spectroscopic Measurements of a Spark Ignition in Methane-Oxygen

Mixture", Research Report of the Research Institute of Industrial Safety, NIIS-RR-99, pp.79-86, (2000)

[12] 安全工學協會, "防爆工學", 海文堂, pp39-40, (1986)