

도시가스의 폭발 특성에 관한 연구

최재욱[†] · 목연수 · 박승호*

부경대학교 안전공학과 · *현대 미포 조선 안전관리실
(2001. 10. 19. 접수 / 2001. 12. 12. 채택)

A Study on the Explosion Characteristics of City Gas

Jae-Wook Choi[†] · Yun-Soo Mok · Seung-Ho Park*

Department of Safety Engineering, Pukyong National University · *Hyundai Mipo Dockyard CO., LTD
(Received October 19, 2001 / Accepted December 12, 2001)

Abstract : Explosive characteristics of the city gas were determined by using the gas explosion apparatuses. The explosive range is determined between lower explosive limit of 5.0% and upper explosive limit of 15.3% at atmosphere and even though the oxygen concentration is decreased, lower explosive limit is not changed, but upper explosive limit is rapidly decreased. The minimum oxygen for combustion is determined 10%. The maximum explosion pressure is determined 5.72kgf/cm² and the maximum rate of explosion pressure rise is oxygen concentration of 12% to determined 160.12kgf/cm² · sec.

Key Words : lower explosive limit, maximum explosive pressure, rate of explosion pressure rise

1. 서 론

에너지원으로 연료를 연소시켜서 발생하는 열에너지를 가정생활이나 산업활동에 이용한 덕택으로 인류는 보다 윤택한 생활을 영위해 왔으나, 산업혁명 당시 사용된 화석연료는 연소시 황산화물이나 질소산화물 등 유독한 가스를 다량으로 배출하여 대기오염을 가속화시켰다. 그 후 기체연료가 개발되어 사용되어짐에 따라 화석연료의 연소공해물질은 줄어들게 되었으며, 그 중에서도 도시가스는 단위질량당 발열량이 크고 경제적으로 가격이 저렴하여 사용량이 매년 증가하는 추세를 나타내고 있다.¹⁾

특히 도시가스가 Naphtha를 분해하여 제조하는 부탄형 중심에서 청정연료인 천연가스(LNG)로 교체됨에 따라 화재·폭발의 위험성이 적은 이점 때문에 수요가 급증하고 있다.

이런 이유로 우리나라에서는 신도시나 대단지 아파트 건설시에 도시가스를 공급할 수 있는 설비를 갖추도록 장려하고 있다.²⁾ 그러나 가스의 취급미비

로 인한 사고는 인명피해와 함께 재산의 손실을 초래하기 때문에 가스폭발에 대한 위험성을 평가하기 위한 주요 특성으로서는 폭발하한계(lower explosive limit), 최대폭발압력(maximum explosion pressure), 폭발압력상승속도(rate of explosion pressure rise), 최소착화에너지(minimum ignition energy) 등이 있으며,^{3,4)} 이러한 가스폭발의 연구사례로는 Yusuke and Takashi⁵⁾가 액화천연가스의 확산모델에 있어서 유체역학 모델의 유효성에 관한 연구와 Haneda 등⁶⁾의 고전압 영역에 대한 메탄의 점화한계에 관한 연구가 있으며, 국내에서는 Bae 등⁷⁾이 농도불균일계 LPG-공기 혼합계에 대한 폭발특성을 연구한 바 있으나, 천연가스형 도시가스의 실제적인 위험성을 평가할 수 있는 특성치에 관한 연구자료는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 산업현장, 일반 음식점 및 가정에서 사용되고 있는 연료인 도시가스의 폭발특성을 파악하기 위하여 부산지역에 공급되고 있는 도시가스를 사용하여 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발범위 및 폭발한계산소농도를 측정하였으며, 가스누출에 의한 화재·폭발 사고의 예방을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
jwchoi@pknu.ac.kr

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험시료

본 실험에 사용된 도시가스는 부산도시가스(주)에서 샘플을 채취한 것으로 우리나라의 도시가스 공급현황은 평택기지와 인천기지에서 각 지역 도시가스 배관망을 통해 전국으로 공급하기 때문에 전 지역에 공급되는 도시가스의 물성은 동일하며, 물성치를 Table 1에 나타내었다.⁹⁾

2.2. 실험장치

가스폭발한계를 측정하는 장치로서는 전파법과 버너법이 있으며, 이 중에서 전파법은 원통형 또는 구형의 용기내에 혼합가스를 넣고 한쪽에서 점화하여 화염이 전체에 확산되는 한계조성을 결정하는 방법이고, 버너법은 버너위에 안정된 화염이 가능한 혼합가스 조성의 한계치를 결정하는 방법이다.⁹⁾

본 연구에 사용한 실험장치는 전파법을 개량한 장치로써 Fig. 1과 같다. 주요 구성부로는 폭발통부, 진공부, 에너지 공급부, 폭발압력 측정·저장부로 구성되어 있다. 폭발통부에는 폭발통과 압력측정센서로 구성되어 있으며, 폭발통은 원통형으로 폭이 105mm, 지름이 100mm로서 용기의 체적이 0.825 l 이며, 용기의 앞면과 뒷면에는 11mm 두께의 강화유리를 부착하여 용기내부의 폭발 유무를 육안으로 확인할 수 있도록 하였고, 그 외의 부분은 두께 6 mm의 Stainless steel로 제작하였다. 용기에는 가스주입시 농도를 확인할 수 있도록 디지털 압력계(PG-200-102G, Copal Electronics CO., LTD)를 부착하였으며, 폭발시에 압력 측정을 위해 용기 상부에는 0~30kgf/cm²까지 측정할 수 있는 압력센서(Kyowa company)를 부착하였다. 폭발통 양측에는 전기에너지를 공급할 수 있도록 점화전극(차량용, Bosch)을 용기의

중앙에 위치하도록 설치하였다. 또한, 용기에 3개의 가스주입밸브를 설치하여, 이들을 진공흡입구, 도시가스주입구, 산소·질소주입구로 이용하였다. 진공부는 진공펌프와 압력용기로 구성되어 있으며, 압력용기는 진공펌프의 작동시에 폭발통의 급격한 압력저하를 방지하기 위하여 폭발통과 진공펌프 사이에 설치하여 압력저하의 속도를 완하할 수 있도록 구성하였다. 에너지 공급부는 점화원의 역할을 하는 부분으로서 용량방전형 콘덴서, 가스봉입형 고전압스위치, 방전제한저항, 무유도저항 등으로 구성되어 있다. 용량방전형 콘덴서는 설정된 전압을 충전하는 역할을 하고, 가스봉입형 고전압스위치는 고전압으로 충전된 콘덴서를 방전회로측에 순간적으로 접속시키는 역할을 한다. 방전제한저항은 착화지연시간의 역할을 하는 것으로, 저항의 크기에 따라 방전전극을 통해 방전되는 착화지연시간이 달라진다. 방전전극 2차측에는 무유도저항 2개를 장착하고, 고주파진동을 제어하기 위한 500Ω의 무유도저항과 전류검출용의 무유도저항(50Ω)을 집지선에 연결하여 사용하였다. 폭발에너지 측정·저장부는 오실로스코프(TDS 380, Tektronix), 앰플리파이어(DA-16A, Tokyo Sokki Kenkyujo) 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 폭발의 경우 폭발통에 부착된 압력센서의 신호를 증폭기를 통해 증폭시켜 오실로스코프상에 파형을 나타나도록 하고, 이것을 컴퓨터로 읽어 들여서 수치화 하여 프로그램을 통하여 폭발압력 및 최대폭발압력 상승속도를 계산할 수 있도록 구성하였다.

Table 1. The composition of city gas

Component	Concentration
Methane (CH ₄)	89.23%
Ethane (C ₂ H ₆)	8.36%
Propane (C ₃ H ₈)	1.86%
n-Butane (n-C ₄ H ₁₀)	0.28%
i-Butane (i-C ₄ H ₁₀)	0.25%
Pentane (C ₅ H ₁₂)	0.02%

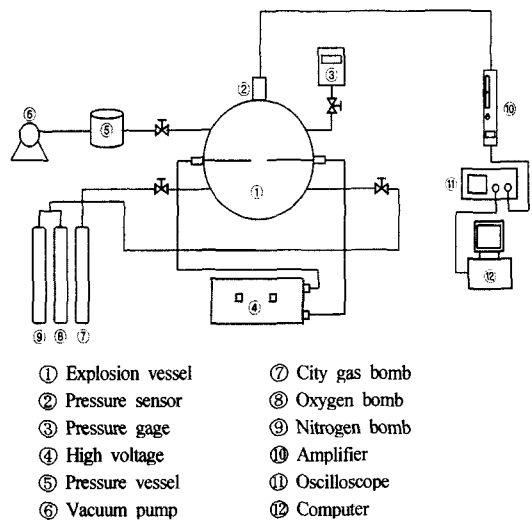


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

2.3. 실험방법

가스 폭발의 경우 온도와 습도에 따라서 폭발의 상태가 다르므로 실험의 재현성을 좋게 하기 위하여 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 실험을 행하였다. 가스의 농도 변화에 대한 실험을 행하기 위한 폭발통에 주입하는 산소, 질소는 순도 99%의 것을 사용하였으며, 폭발통 내부는 진공펌프를 사용하여 상부에 설치된 압력계의 수치가 -1.000kg/cm^2 까지 진공으로 만든다. 농도의 설정은 두 가지 이상 혼합되어 있는 기체 혼합물의 경우 각 물질의 혼합조성비는 압력이나 부피에 의존하게 되며, 혼합기체속에 들어있는 각 물질의 몰수의 합은 전체 혼합기체의 몰수가 되며, 각각의 몰수는 각 성분 기체의 농도를 나타낸다. 그러나 전체 혼합기체의 경우 일정압력에서 부피의 변화나 일정부피에서 각각의 압력이 변화하게 되며, 각 성분의 농도가 변화하게 되므로 물리화학적 조성을 나타내는 것은 몰분율의 형태로 표시하는 것이 더 편리하게 사용된다. 따라서 기체 혼합물에 대하여 각 성분을 이상기체로 가정하면, 이상기체의 법칙을 적용할 수 있으며 혼합기체에 대한 압력을 구할 수 있다. 이들 혼합기체는 모든 기체 혼합물에 대해서도 성립되고, 전체 압력과 몰분율을 알면 분압을 계산할 수 있으므로 실험에 필요한 화학조성의 농도를 만들 수가 있으며, 기체 혼합물의 상태방정식으로 계산된 압력의 수치만 큼 도시가스의 랑을 가스주입구를 통해서 주입하고, 산소와 질소는 산소주입구와 질소주입구로 해당 압력만큼 폭발통에 주입한다. 이때 산소를 먼저 주입하고, 질소는 주입부의 밸브를 급격히 열어 폭발통 내부로 질소가 빠르게 유입되면서 내부에 난류를 형성시켜 시료가 잘 혼합될 수 있도록 한다. 폭발실험을 위하여 점화플러그에 전원을 연결한 후 점화스위치를 ON시켜 폭발유무를 관찰하고, 폭발시 오실로스코프상에 나타난 파형을 컴퓨터(program : wavestar)로 읽어 들여 저장한 다음 프로그램에 의해 계산한다.

도시가스농도의 변화에 따른 실험은 폭발하한, 상한 및 최대폭발압력을 나타내는 농도부근에서는 도시가스 농도를 0.25%씩 변화시켜 실험하였으며, 폭발범위에서는 농도를 1%씩 변화시켜 실험을 행하였다. 또한 폭발하한과 상한은 같은 농도에서 10회 이상 실험하여 1회라도 폭발할 때의 최소·최대 농도를 폭발하한계와 상한계로 하였다. 폭발한계산소농도를 측정하기 위하여 순도가 높은 산소와 질

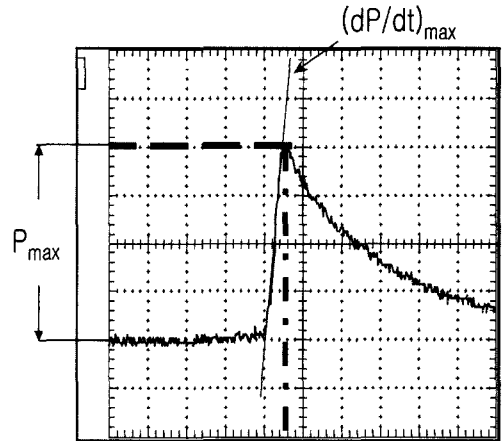


Fig. 2. The wave plotted from the digital oscilloscope

소를 미리 혼합한 18%, 15%, 12%, 10%의 혼합가스((주)덕양가스, 순도 : 99.8%)를 사용하여 폭발범위를 측정하였으며, 폭발이 발생하는 최저농도를 폭발한계산소농도로 하였다.

2.4. 폭발압력 및 폭발압력상승속도

Fig. 2는 디지털 오실로스코프에 나타난 파형의 형상으로 가로축은 시간을 나타내고, 세로축은 폭발압력을 나타낸 것으로서 파형의 최저점과 최고점과의 차이가 폭발압력을 나타낸다. 이 파형에서 접선의 기울기가 폭발압력상승속도이며, 그 중에서 최대가 되는 것이 최대폭발압력상승속도이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폭발범위와 폭발한계산소농도

가스폭발의 경우 가연성 가스와 지연성 가스와의 혼합상태에서 점화원이 가해진다고 해서 항상 폭발이 일어나지는 않으나, 가연성 가스와 지연성 가스가 어떤 농도범위내에 있을 경우에만 폭발이 일어나고, 이때의 범위를 폭발범위라 하며, 폭발범위의 정확한 측정은 가스폭발사고 방지대책의 가장 기본적인 사항이다.

Fig. 3은 산소농도 변화에 따른 도시가스의 폭발범위를 나타낸 것으로서 산소농도 21%에서는 폭발하한농도는 5%, 폭발상한농도는 15.25%이며 어떤 산소농도에서 폭발상한계와 하한계가 일치하는 임계점을 구하였으며, 그 이하의 산소농도에서는 폭발이 일어나지 않았다. 이 임계점에서의 산소농도를 폭발

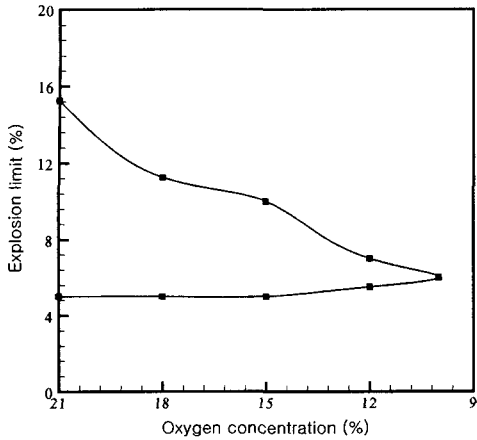


Fig. 3. Relation between the change of oxygen concentration and explosion limits

한계산소농도라 하며, 본 실험에서는 산소농도 10%에서 폭발한계산소농도를 구하였다.

Fig. 4는 실험으로 구한 폭발한계산소농도와 추산식에 의해 계산한 폭발한계산소농도를 비교한 것으로 실험으로 구한 폭발한계산소농도는 10%, 추산식으로 계산된 폭발한계산소농도는 10.75%로서 추산식에 의한 경우보다 실험에 의한 값이 낮게 나타났다. 그러므로 폭발한계산소농도를 관리할 때 추산식에 의해 구해진 값을 사용할 수도 있으나, 본 실험의 결과에 의하면 더 낮은 농도에서 한계산소농도가 나타나므로 실험에 의해 구해진 값을 사용하여 폭발예방대책을 강구하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. Fig. 4의 추산값은 Zabetakis가 제시한 폭발

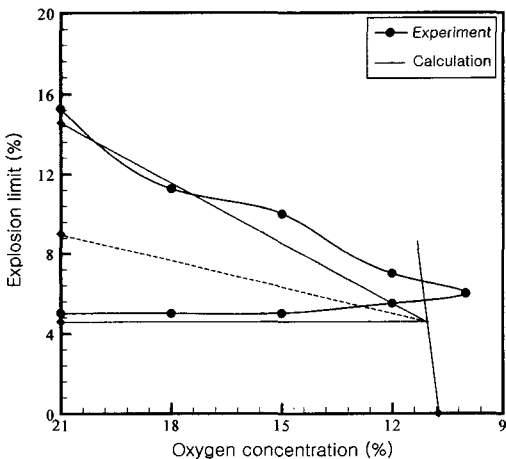


Fig. 4. Relation between the change of oxygen concentration and explosion limits

한계치¹⁰⁾로부터 도시가스 성분의 각각의 값을 찾아서 Le Chatelier 식에 대입하여 하한계 4.58%와 상한계 14.52%의 폭발범위를 구하고, 그 값으로부터 추산식을 이용하여 폭발한계산소농도 10.75%를 구하였다.

3.2. 폭발압력

가스폭발의 경우 폭발압력은 안전대책을 강구하는데 중요한 인자로서, 가스의 저장·취급시설 설비시에 내압능력과 방폭설비의 산정기준이 된다. 본 실험에서는 폭발통내의 전극간극을 5mm, 방전전압을 23kV로 설정하여 실험을 행하였으며, 각 산소농도에 있어서 최대폭발압력 및 폭발하한농도(lower explosive limit)와 폭발상한농도(upper explosive limit)에서의 폭발압력을 측정하여 Table 2에 나타내었다.

Fig. 5는 산소농도 21%에서 도시가스의 농도변화에 따른 폭발압력을 나타낸 것으로서, 폭발이 일어날 수 있는 최저한계의 농도인 폭발하한농도에서는 폭발압력이 1.26kgf/cm²으로 나타났으며, 도시가스의 농도가 증가함에 따라 폭발압력이 증가하였고, 12%

Table 2. The explosion pressure of city gas

Oxygen concentration (%)	21	18	15	12	10
Max. explosion pressure [kgf/cm ²]	5.72	5.06	3.71	2.94	1.97
Explosion pressure at LEL [kgf/cm ²]	1.26	1.32	1.41	1.47	-
Explosion pressure at UEL [kgf/cm ²]	3.62	3.20	2.54	2.17	-

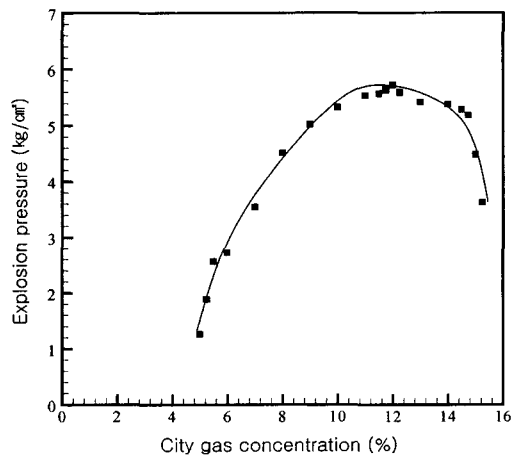


Fig. 5. Relation between the city gas concentration and the explosion pressure(O₂ : 21%)

의 농도에서 5.72kgf/cm^2 의 최대폭발압력을 나타내었다. 그러나 12% 이상의 농도에서는 점차적으로 감소하여 폭발상한농도에서는 3.62kgf/cm^2 의 압력으로 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8에는 산소의 농도를 18%, 15% 및 12%에서 도시가스의 농도변화에 대한 폭발압력의 관계를 나타내었다. Fig. 6에서 도시가스의 폭발하한농도인 5%에서 1.32kgf/cm^2 의 최저폭발압력을 나타내었고, 농도가 증가함에 따라 폭발압력이 서서히 증가하여 9.75%에서 5.06kgf/cm^2 의 최대폭발압력을 나타내었으며, 9.75% 이상의 농도에서는 폭발압력이 서서히 감소하여 11.25%에서 3.21kgf/cm^2 의 압력을 나타내었다. Fig. 7에서 도시가스의 폭발하한농도인 5%에서 1.41kgf/cm^2 의 최저폭발압력을 나타내었고, 농도가 증가함에 따라 폭발압력이 서서히 증가하여 8.25%에서 3.71kgf/cm^2 의 최대폭발압력을 나타내었으며, 8.25% 이상의 농도에서는 폭발압력이 서서히 감소하여 10%에서 2.54kgf/cm^2 의 압력을 나타내었다. Fig. 8에서 도시가스의 폭발하한농도인 5.5%에서 1.47kgf/cm^2 의 최저폭발압력을 나타내었고, 농도가 증가함에 따라 폭발압력이 서서히 증가하여 6.25%에서 2.94kgf/cm^2 의 최대폭발압력을 나타내었으며, 6.25% 이상의 농도에서는 폭발압력이 서서히 감소하여 7%에서 2.17kgf/cm^2 의 압력을 나타내었다. Fig. 5~8에서 산소농도가 감소함에 따라 최대폭발압력을 나타내는 도시가스의 농도가 점차 낮아짐을 알 수 있다. 이는 도시가스가 연소하는데 필요한 산소의 농도가 적어지면서 폭발범위가 좁아지고, 이에 따른 화학양

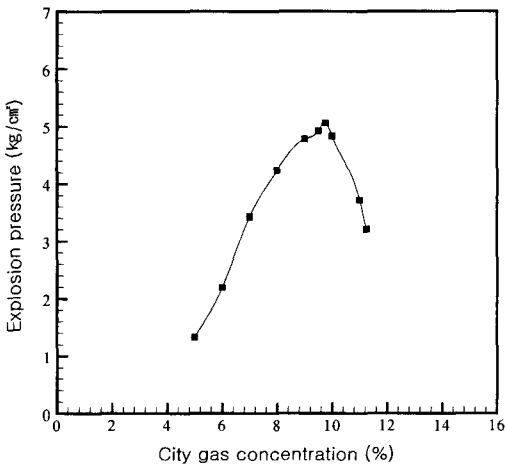


Fig. 6. Relation between the city gas concentration and the explosion pressure(O₂ : 18%)

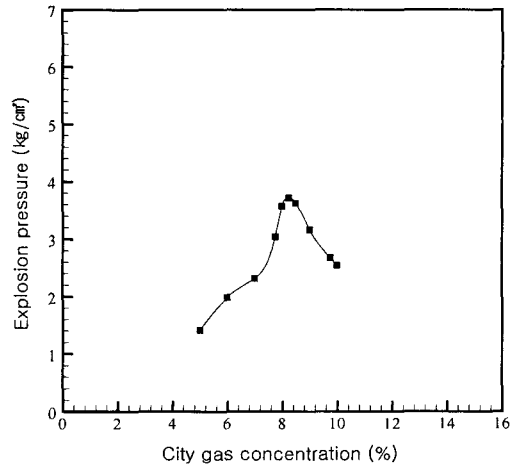


Fig. 7. Relation between the city gas concentration and the explosion pressure

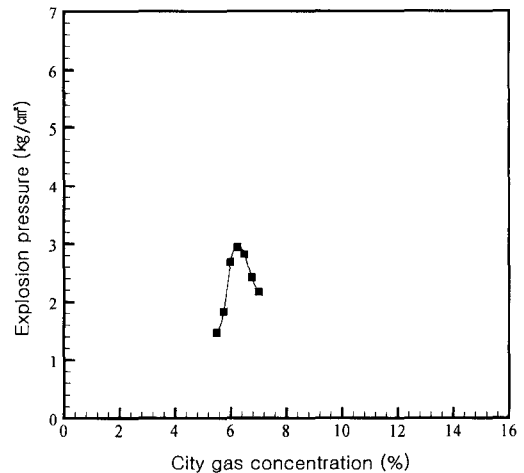


Fig. 8. Relation between the city gas concentration and the explosion pressure(O₂ : 12%)

론농도도 적어짐에 기인된 것으로 사료된다.

Fig. 9는 산소농도 변화에 따른 폭발압력을 나타낸 것으로서 각 산소농도에서 최저폭발압력과 최대폭발압력의 값을 도시한 것이다. 이는 산소농도가 감소함에 따라 최저폭발압력은 거의 변화가 없는 반면, 최대폭발압력은 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 산소농도의 감소에 따라 최대폭발압력이 급격하게 감소하다가 산소농도 10%에서는 최저폭발압력과 최대폭발압력이 만나는 임계점을 찾을 수 있었으며, 산소농도변화에 따른 폭발범위와 동일한 형태를 나타낼 수 있다. 이 임계점 이하에서는 폭발이 일어나지 않으며,

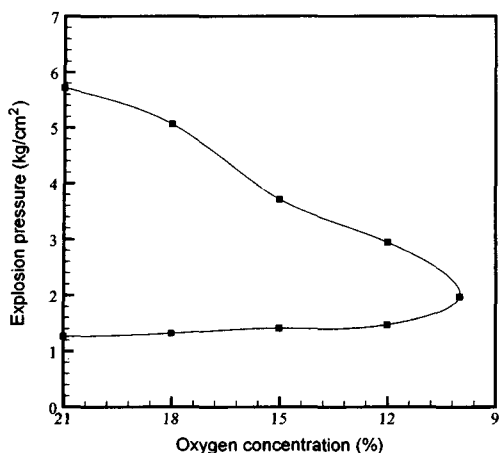


Fig. 9. Relation between the oxygen concentration and the explosion pressure

최대폭발압력의 급격한 감소 현상은 가연성 기체인 도시가스와 산소분자의 유효충돌수에 기인된 것으로 생각된다.

3.3. 최대폭발압력상승속도

Fig. 10은 도시가스의 농도에 따른 폭발압력상승속도를 나타낸 것으로서 폭발통내의 전극간극을 5 mm, 방전전압을 23kV로 설정하여 실험을 행하였다. 폭발압력상승속도는 폭발압력과 같이 폭발하한농도에서는 4.83kgf/cm²·sec이고, 도시가스의 농도가 증가함에 따라 폭발압력상승속도도 증가하였으며, 도시가스농도 12%에서는 160.12kgf/cm²·sec의 최대폭발압력상승속도를 나타내었다. 또한 도시가스의 농

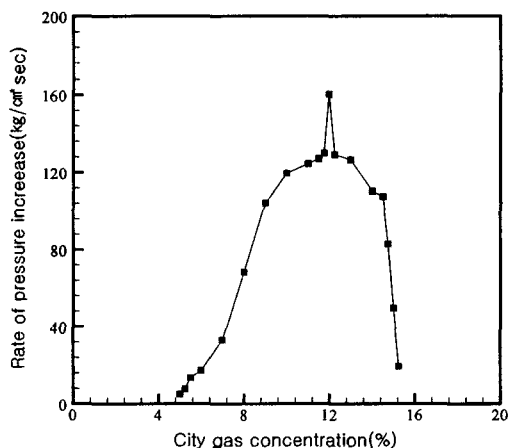


Fig. 10. Relation between the city gas concentration and the rate of explosion pressure rise

도가 12% 이상에서는 점차적으로 감소하여 폭발상한농도에서는 19.39kgf/cm²·sec로 나타났다.

4. 결 론

도시가스의 폭발특성을 고찰하기 위하여 부산지방에 공급되는 도시가스를 사용하여 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 산소농도 21%에서 폭발범위는 하한계 5.0%, 상한계 15.3%를 구하였다.
- 2) 산소농도가 감소함에 따라 폭발하한농도는 거의 변화가 없으나, 폭발상한농도는 급격히 감소하는 경향을 나타내었으며, 폭발한계산소농도 10%를 구하였다.
- 3) 폭발한계산소농도는 실험으로 구한 값이 추산식에 의한 값보다 약간 낮게 나타났다.
- 4) 화학양론농도 부근에서의 최대폭발압력은 5.72 kgf/cm² 측정되었다.
- 5) 최대폭발압력상승속도는 12%의 산소농도에서 160.12kgf/cm²·sec로 측정되었다.

참고문헌

- 1) 小林清志, 荒木信辛, 牧野敦, 燃焼工学, 理工學社, pp. 1~24, 1988.
- 2) 대한민국, "청정연료 등의 사용에 관한 고시," 환경부고시 99~100호.
- 3) 平野橋右, 가스爆發豫防技術, 海文堂, pp. 2~3, 1983.
- 4) 오규형, 김한석, 이춘하, "可燃性 가스의爆發特性에 관한 研究" 산업안전학회지, Vol. 7, No. 3, pp. 66~72, 1992.
- 5) A. Yusuke and F. Takashi, "Evaluation of CFD Model(Sigmat-J) as LNG Evaporation and Gas Dispersion Model," Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 40, No. 1, pp. 15~21, 2001.
- 6) 羽田博憲, 高橋保盛, 木山保, 皿田滋, 鍋谷弘, "高電壓領域におけるメタンの點火限界," 安全工学, Vol. 28, No. 3, pp. 132~138, 1989.
- 7) 배정일, 김영수, 서용칠, 신창섭, "농도 불균일 LPG-공기 혼합기체의 폭발특성," 산업안전학회지, Vol. 8, No. 4, pp. 114~119, 1993.
- 8) 이수경, 오규형, 정기철, 최재욱, 백종배, 김래현, 가스안전공학, 동화기술, pp. 125~129, 1999.
- 9) 安全工学協會, 防爆工学, 海文堂, pp. 39~40, 1983.
- 10) M. G. Zabetakis, "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors," Bureau of Mines, pp. 15~16, 1968.