



## 산소농도와 압력 변화에 따른 도시가스의 폭발특성

†최재욱 · 이인식\* · 박성태\*\*

부경대학교 안전공학부, \*(주)LG전자, \*\*(주)경동도시가스  
(2004년 12월 15일 접수, 2005년 2월 18일 채택)

## The Explosion Characteristics of City Gas on the Change of Oxygen Concentration and Pressure

†Jaе-Wook Choi · In-Sik Lee\* · Sung-Tae Park\*\*

Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

\*Group of Environment & Utility Administrative Service Team, Digital Display & Media Company, LG Electronics Inc., 191-1, Gongdan2-dong, Gumi-city, Gyoung Buk 730-903, Korea

\*\*KyungDong City Gas, 355-16, Yunam-dong, Book-Gu, Ulsan, Korea

(Received 15 December 2004, Accepted 18 February 2005)

### 요 약

도시가스의 폭발특성을 평가하기 위하여, 산소의 농도와 초기압력의 변화에 따라 실험을 행하였다. 이러한 실험을 행한 결과 산소농도가 낮아짐에 따라 폭발범위는 점차적으로 좁혀졌으며, 산소농도 12%에서 폭발한계산소농도를 구하였다. 도시가스의 초기압력이 증가함에 따라 폭발하한계가 약간 증가하였다. 또한 초기압력이 0~1.0 kgf/cm<sup>2</sup>·g로 변함에 따라 최대폭발압력은 6.3 kgf/cm<sup>2</sup>·g, 12.7 kgf/cm<sup>2</sup>·g를 구하였으며, 최대폭발압력상승속도는 245.63 kgf/cm<sup>2</sup>/s, 427.88 kgf/cm<sup>2</sup>/s를 구하였다.

**Abstract** – To examine the characteristics of the explosion of city gas, the concentration of oxygen was changed with the change of initial pressure. From the result of the experiment, as the concentration of oxygen was low, the explosion limit became narrow and the minimum concentration of oxygen for the explosion was 12%. Furthermore, As the increase of the initial pressure, explosion ranges were a little increased. And as the change of the initial pressure, the maximum explosion pressure were 6.3 kgf/cm<sup>2</sup>·g, 12.7 kgf/cm<sup>2</sup>·g and the maximum pressure rising velocity were 245.63 kgf/cm<sup>2</sup>/s, 427.88 kgf/cm<sup>2</sup>/s.

**Key words** : City gas, Explosion limit, Minimum oxygen concentration, Maximum explosion pressure, Decomposition

### I. 서 론

기체연료는 증세기를 전후해서 사용했던 석탄과 같은 화석연료에 비해 황산화물이나 질소산화물 등 유독성 물질의 발생이 매우 적은 편이며, 취급에 주의한다면 매우 편리하고 경제적인 에너지원으로 사용될 수 있다. 그 중에서도 도시가스는 단위질량당 발열량이 크고 가격이 저렴하기 때문에 사용량이 매년 증가하는 추세를 나타내고 있다[1,2].

특히 도시가스가 Naphtha를 분해하여 제조하는 부탄형 중심에서 청정연료인 천연가스로 교체됨에 따라 화재·폭발의 위험성이 적은 장점 때문에 그 수요가 급

증하고 있다. 이런 이유로 우리나라에서는 신도시나 대단지 아파트 건설시에 도시가스를 공급할 수 있는 설비를 갖추도록 장려하고 있다[3].

그러나 고체연료나 액체연료보다 취급에 각별한 주의를 기울여야 하는 기체연료는 사용량의 증가와 함께 사고율이 높은 실정이다. 최근 한국가스안전공사에서 발표한 가스별 사고 추이에 대한 5년간의 통계자료에 따르면 LP가스와 다른 고압가스에 비해 도시가스의 사고율이 증가하고 있으며, 가스사고의 발생시에는 엄청난 인명피해와 함께 많은 재산 손실을 초래하는 것으로 나타났다[4].

가스폭발에 대한 위험성을 평가하기 위한 주요 특성으로서는 폭발하한계(lower explosion limit), 최대폭발압력(maximum explosion pressure), 폭발압력상승속도

†주저자:jwchoi@pknu.ac.kr

(explosion pressure rising velocity) 등이 있으며, 이러한 가스폭발의 연구사례로는 Kakutkina 등[5]이 밀폐용기의 가스폭발에 관한 평가방법을 연구하였으며, Haneda 등[6]은 고전압 영역에 대한 메탄의 점화한계에 관한 연구를 하였다. 또한 국내에서는 최 등[7]이 도시가스의 폭발특성에 관한 기본적인 연구결과만 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 산업현장, 음식점 및 가정에서 널리 사용되고 있는 도시가스의 폭발특성을 파악하기 위하여 초기압력 변화에 따른 도시가스의 폭발특성치를 구하고 폭발압력에 대한 위험성인 폭발압력의 변화거동과 최고폭발압력 및 최고폭발압력상승속도 등을 평가하여 가스누출로 인한 화재·폭발사고의 예방을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 실험장치 및 실험방법

### 2.1. 실험시료

본 실험에서 사용된 도시가스는 한국가스공사의 배관망을 통하여 울산직할시 및 양산지역에 공급되어(주)경동도시가스에서 관리하고 있는 시료를 사용하였으며, 그 성분표를 Table 1에 나타내었다. 또한 폭발한계 산소농도를 측정하기 위하여 (주)덕양가스에서 제조한 순도 99.99%의 산소농도 21%, 18%, 15%, 13% 및 12%의 혼합가스를 사용하였다.

Table 1. The composition of city gas.

Component	Concentration
Methane(CH <sub>4</sub> )	90.277%
Ethane(C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	6.203%
Propane(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2.315%
n-Butane(n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.545%
i-Butane(i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.476%
Nitrogen(N <sub>2</sub> )	0.159%
i-Pentane(i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.016%
n-Pentane(n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.005%

### 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

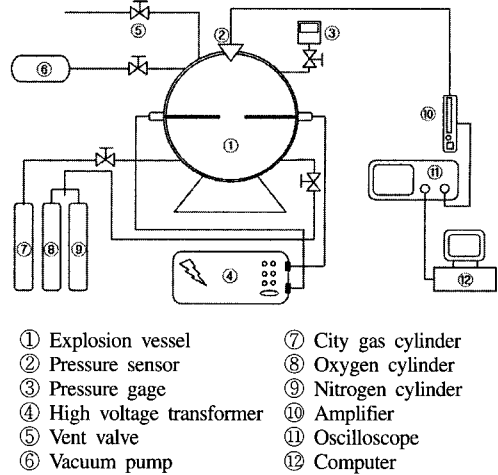


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

한계치를 결정하는 방법이다[8-10].

본 연구에 사용한 실험장치는 전파법을 개량한 장치로써 Fig. 1과 같다. 주요 구성도는 폭발통부, 진공부, 에너지 공급부, 폭발압력 측정·저장부로 구성되어 있다.

폭발통부에는 폭발통과 압력측정센서로 구성되어 있으며, 폭발통은 원통형으로 외경이 148 mm, 지름이 105.4 mm로서 용기의 체적이 1.1 l이며, 용기의 앞면은 직경 32 mm의 강화유리를 부착하여 용기내부의 폭발거동을 육안으로 확인할 수 있고, 불완전연소 시 발생하는 타르 등의 이물질질을 제거할 수 있도록 개폐가 가능한 구조로 하였으며, 그 외의 부분은 두께 21.3 mm의 Stainless steel로 제작하였다. 용기에는 가스주입시 농도를 확인할 수 있도록 디지털 압력게이지(PG-200-102G, Copal Electronics CO., LTD)를 부착하였으며, 폭발시에 압력 측정을 위해 용기 상부에 0~30 kgf/cm<sup>2</sup>까지 측정할 수 있는 압력센서(PE-30KF, Kyowa Electronics Co., LTD)를 부착하였다.

폭발통 양측부에는 전기에너지를 공급할 수 있도록 점화전극을 용기의 중앙부에 설치하였다. 또한 용기의 양측부에 3개의 가스주입밸브를 설치하여, 이들을 진공흡입구, 도시가스주입구, 산소·질소주입구로 이용하였다.

진공부는 진공펌프와 배기밸브로 구성되어 있고 에너지공급부는 점화원의 역할을 하는 부분으로서 용량방전형 콘덴서, 가스봉입형 고전압스위치, 방전제한저항, 무유도저항 등으로 구성되어 있다. 용량방전형 콘덴서는 설정된 전압을 충전하는 역할을 하며, 가스봉입형 고전압스위치는 고전압으로 충전된 콘덴서를 방전 회로측에 순간적으로 접속시키는 역할을 한다. 방전제

한저항은 착화지연시간의 역할을 하는 것으로, 저항의 크기에 따라 방전전극을 통해 방전되는 착화지연시간이 달라진다. 방전전극 2차측에는 무유도저항 2개가 장착되어 있는데 고주파 진동을 제어하기 위한 500Ω의 무유도저항과 전류 검출용의 무유도저항(50Ω)으로 사용하였으며, 접지선에 연결되어 있다.

폭발에너지 측정·저장부는 오실로스코프(TDS 220, Tektronix), 앰플리파이어(DA-16A, Tokyo Sokki Kenkyujo) 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 폭발발생시 폭발통에 부착된 압력센서의 신호는 증폭기를 통해 증폭을 시켜 오실로스코프상에 파형이 나타나도록 하여 이것을 컴퓨터로 처리하여 수치화한 다음에 프로그램을 통하여 폭발압력 및 최대폭발압력상승속도를 계산할 수 있도록 구성하였다.

### 2.3. 실험방법

가스 폭발의 경우에는 온도와 습도에 따라서 폭발거동이 다르므로 실험의 재현성을 좋게 하기 위하여 온도 20±2°C, 습도 50±5%의 항온항습실에서 실험을 행하였다. 가스의 농도변화에 대한 실험을 수행하기 위하여 폭발통에 주입하는 산소, 질소는 순도 99.9%의 것을 사용하였으며, 폭발통내의 전극간극을 5 mm, 방전전압을 10 KV로 설정하여 다음의 순서에 의해 진행하였다.

- (1) 폭발통 내부를 진공펌프를 사용하여 상부에 설치된 압력계의 수치가 -1.000 kgf/cm<sup>2</sup>·g까지 진공을 만든다.
- (2) 기체 혼합물의 상태방정식으로 계산된 압력의 수치만큼 도시가스의 양을 가스주입구를 통해서 주입한다.
- (3) 산소는 산소 주입구를 통해 해당 압력만큼 폭발통에 주입한다.
- (4) 질소는 질소 주입구를 통해 해당 압력만큼 폭발통에 주입한다. 이때 질소 주입부의 밸브를 급격히 열어 폭발통 내부로 질소가 빠르게 유입되면서 내부에 난류를 형성시켜 시료가 잘 혼합될 수 있도록 한다.
- (5) 점화플러그에 전원을 연결한다.
- (6) 점화스위치를 작동시켜 폭발유무를 관찰한다.
- (7) 폭발시 오실로스코프상에 나타난 파형을 컴퓨터로 읽어 들여 저장한 다음 계산한다.

가스의 폭발한계를 결정하기 위하여 도시가스농도를 변화시켜 실험하였으며, 폭발하한과 상한의 부근에서는 0.1% 범위의 농도에서 3회 이상 실험하여 1회라도 폭발했을 때의 최소농도를 폭발하한계로 결정하였으며,

최대농도를 폭발상한계로 하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 폭발범위와 폭발한계산소농도

가스폭발의 경우에는 가연성 gas와 지연성 gas와 의 혼합상태에서 점화원이 가해진다고해서 항상 폭발이 일어나지는 않으나, 가연성 gas와 지연성 gas가 폭발가능한 농도범위 내에 있을 경우에만 폭발이 일어나고, 이 때의 범위를 폭발범위라 하며, 폭발범위의 정확한 측정은 가스폭발사고 방지대책의 가장 기본적인 중요 사항이다.

Fig. 2는 압력과 산소농도변화에 따른 도시가스의 폭발범위를 나타낸 것으로서 산소농도 변화에 따라서 게이지 압력을 0, 0.5, 1.0 및 1.5 kgf/cm<sup>2</sup>·g로 변화시켜 실험하였다.

0 kgf/cm<sup>2</sup>·g일 경우에 있어서 폭발하한계와 상한계는 4.9~15%를 구하였으며, 압력이 증가할수록 21% 산소농도에서 폭발하한계는 0.2% 감소하고, 상한계는 1.5% 증가하였다.

또한, 동일한 압력에서 산소농도의 변화에 따라서 폭발상한계와 하한계를 구한 결과 두 점이 일치되는 임계점을 구하였고, 그 이하의 산소농도에서는 폭발이 일어나지 않았다. 이 임계점에서의 산소농도를 폭발한계 산소농도라 하며, 본 실험에서는 산소농도가 동일한 12%의 폭발한계산소농도를 구하였다.

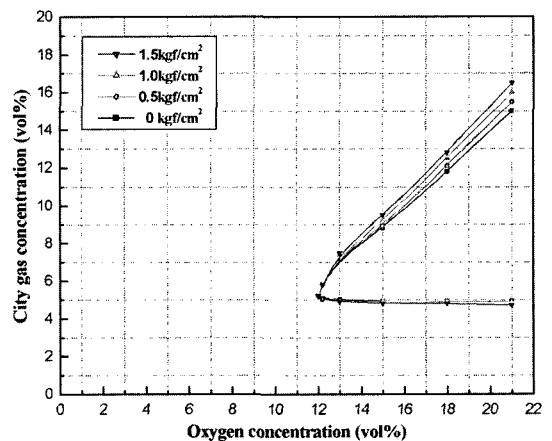


Fig. 2. Explosion behavior between city gas and oxygen concentration variation.

### 3.2. 폭발압력

가스폭발의 경우에 폭발압력은 안전대책을 강구하는

데 중요한 인자로서, 가스의 저장·취급시설 설비시에 내압능력과 방폭설비의 선정기준이 된다.

Fig. 3은 산소농도 21%에서 도시가스의 농도변화에 따른 폭발압력을 나타낸 것으로서, 압력이 변화함에 따라 폭발이 일어날 수 있는 최저한계농도인 폭발하한농도와 최대의 농도인 폭발상한농도를 구할 수 있었으며, 폭발에 따른 압력변화는 도시가스의 농도에 따라서 폭발의 압력변화가 크게 나타나고 있으며, 용기의 압력이 0 kgf/cm<sup>2</sup>·g일 경우 폭발하한 농도 4.9%에서 1.1 kgf/cm<sup>2</sup>·g의 폭발압력이 나타났고 도시가스의 농도가 9%까지 증가함에 따라 폭발압력도 증가하여 6.3 kgf/cm<sup>2</sup>·g의 최대폭발압력을 구하였다. 그러나 가스농도가 9%이상에서는 폭발압력이 차츰 감소하는 경향을 나타내었으며, 15%에서 0.7 kgf/cm<sup>2</sup>·g를 나타내었다. 이는 산소와 연료비의 조성이 양호한 화학양론조성의 부근

에서 최대폭발이 발생하고 도시가스의 농도가 희박하거나 고농도일 경우의 폭발압력이 높지 않는 것으로 생각된다. 또한 용기내의 초기압력이 증가할수록 폭발압력이 크게 증가하여 1.5 kgf/cm<sup>2</sup>·g일 경우에 16.7 kgf/cm<sup>2</sup>·g 높은 압력이 발생하였다.

또한 Fig. 4는 산소농도 15%일 경우에서의 결과로써 산소농도 21%의 경우보다 최대폭발압력이 7.7 kgf/cm<sup>2</sup>·g로 크게 감소하고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 산소농도가 감소할수록 폭발한계농도가 감소하였으며, 압력이 감소함에 따라 최대폭발압력이 감소하였다.

이는 일반적으로 폭발이 일어날 때 밀폐용기 내에서의 최대폭발압력은 초기압력, 기체의 몰수의 변화, 온도의 변화 등에 의존하므로 온도가 일정할 경우 최대폭발압력은 화학양론적인 농도에서 초기압력의 8배까지 상승하는 것에 거의 일치되고 있다[9].

Fig. 5는 용기내의 압력변화에 대한 폭발의 위험특성치를 평가하기 위하여 산소농도와 최대폭발압력과의 관계를 나타내었다. 산소농도가 증가할수록 최대폭발압력은 증가하고 있으며, 용기내의 압력이 증가할수록 최대폭발압력은 거의 비례적으로 증가하고 있다. 이는 산소농도가 증가할수록 연소하는데 필요한 산소의 농도가 충분하기 때문이고, 압력이 증가할수록 가연성기체인 도시가스와 산소분자의 유효충돌수가 높은 것에 기인되는 것으로 사료된다.

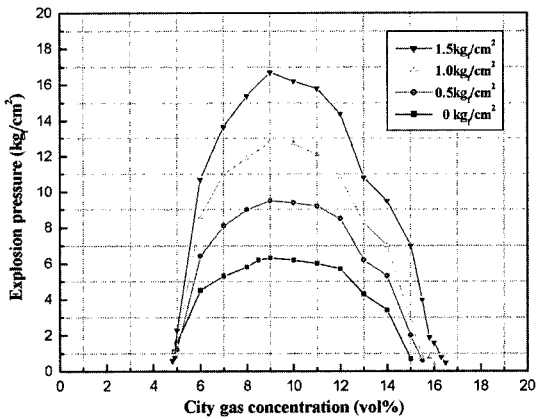


Fig. 3. Relation between city gas concentration and explosion pressure at 21% of oxygen concentration.

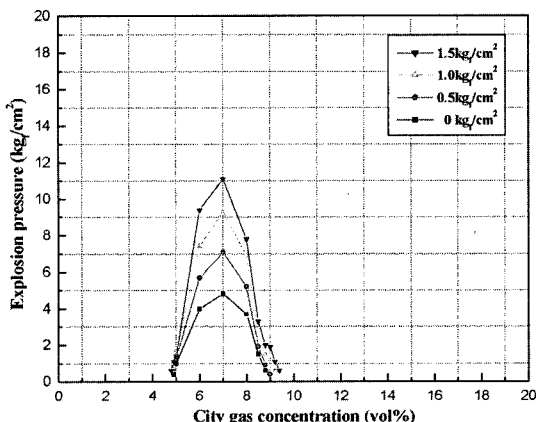


Fig. 4. Relation between city gas concentration and explosion pressure at 15% of oxygen concentration.

### 3.3. 폭발압력상승속도

Fig. 6과 7은 도시가스의 농도와 압력변화에 따른 폭발압력상승속도를 나타내었다.

Fig. 6은 대기압에서 산소농도 변화에 따른 폭발압력

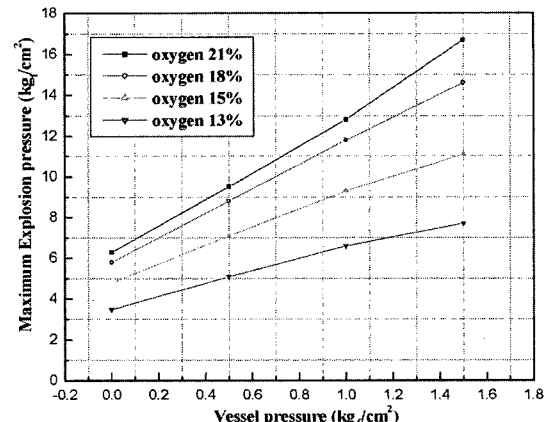


Fig. 5. Relation between initial pressure of the vessel and maximum explosion pressure.

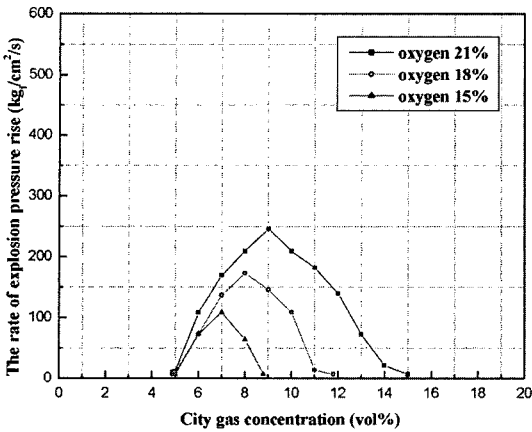


Fig. 6. Relation between city gas concentration and explosion pressure rising velocity at 0 kgf/cm<sup>2</sup> · g.

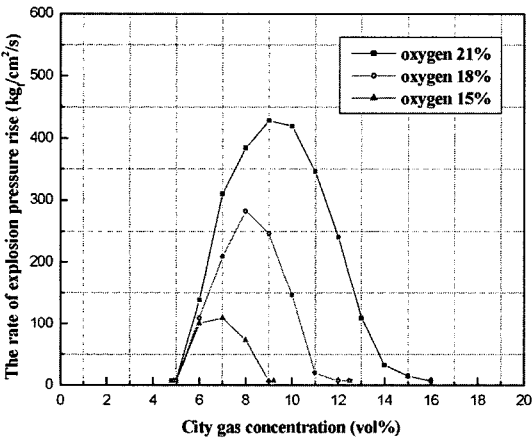


Fig. 7. Relation between city gas concentration and explosion pressure rising velocity at 1.0 kgf/cm<sup>2</sup> · g.

상승속도를 나타낸 것으로서 폭발압력과 같이 산소농도 21%, 18%, 15%에서 폭발하한농도와 상한농도에서 7.28 kgf/cm<sup>2</sup>/s의 동일한 폭발압력상승속도를 구하였으며, 도시가스의 농도가 증가함에 따라 폭발압력상승속도도 증가하였다.

산소농도 15%일 경우에서 도시가스 농도 7% 부근에서 109.27 kgf/cm<sup>2</sup>/s의 최대폭발압력상승속도를 나타내었으며, 18%의 산소농도에서는 가스의 농도가 8%에서 173.08 kgf/cm<sup>2</sup>/s를 나타내었다. 또한 산소농도 21%의 경우에는 가스의 농도가 9%에서 최대폭발압력상승속도 245.63 kgf/cm<sup>2</sup>/s를 구하였다.

Fig. 7은 용기내의 압력이 1.0 kgf/cm<sup>2</sup> · g인 경우에 최대폭발압력상승속도를 나타낸 것으로서 산소농도 15%, 18%, 21%로 증가함에 따라 각각 109.27 kgf/cm<sup>2</sup>/s,

282.34 kgf/cm<sup>2</sup>/s 및 427.88 kgf/cm<sup>2</sup>/s를 구하였다.

Fig. 6과 7에서 산소의 농도가 증가할수록 최대폭발압력상승속도가 증가하였으며, 용기내의 초기압력이 증가할수록 급격하게 증가하였다. 이는 하한계와 상한계의 범위 내에서 산소의 농도가 증가할수록 연소 및 폭발이 용이한 상태의 조성으로 되기 쉽고, 용기내의 초기압력이 증가할수록 분자간의 충돌횟수가 증가하기 때문에 최대폭발압력상승속도가 증가하는 것으로 사료된다.

#### IV. 결 론

도시가스의 폭발특성을 고찰하기 위하여 초기압력변화와 공존하는 산소농도를 변화시키면서 폭발거동에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 산소농도 21%의 상압에서 폭발하한계범위로 4.9~15%를 구하였다.
- 2) 산소농도가 감소함에 따라 폭발하한 농도는 거의 변화가 없으나, 폭발상한농도는 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 동일한 압력에서 산소농도 변화에 따른 폭발하한계와 상한계가 일치하는 임계점인 한계산소농도 12%를 구하였다.
- 4) 도시가스의 최대폭발압력은 용기내의 초기압력 0 kgf/cm<sup>2</sup> · g, 1.0 kgf/cm<sup>2</sup> · g에 있어서 각각 6.3 kgf/cm<sup>2</sup> · g, 12.7 kgf/cm<sup>2</sup> · g를 구하였다.
- 5) 최대폭발압력상승속도는 초기압력의 변화를 0 kgf/cm<sup>2</sup> · g, 1.0 kgf/cm<sup>2</sup> · g로 증가함에 따라 증가하였으며, 9%의 농도에서 245.63 kgf/cm<sup>2</sup>/sec, 427.88 kgf/cm<sup>2</sup>/sec를 구하였다.

따라서 도시가스가 공간내의 누출량에 따라 피해정도가 크게 다를 것으로 사료되며 가스의 취급 시 주의가 요망된다.

#### 참고문헌

- [1] 小林清志, 荒木信幸, 牧野敦, 燃燒工學, 理工學社, 1-24, (1988)
- [2] 에너지 경제 연구원, <http://www.keei.re.kr>, “21세기 에너지부문의 여건변화 및 중장기정책 연구”, (2001)
- [3] 대한민국, “청정연료 등의 사용에 관한 고시”, 환경부고시 99-100호
- [4] 한국가스안전공사, <http://www.kgs.or.kr>, 가스통계, (2004)
- [5] N. A. Kakutkina, A. A. Korzhavin, V. S. Babkin, V. V. Zamashchikov, and A. A. Pleslov, “Scale Modeling

산소농도와 압력 변화에 따른 도시가스의 폭발특성

- of Gas Explosions in Closed Vessels, Combustion, Explosion and Shock Waves”, **32**(6), (1996)
- [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点火限界”, *安全工学*, **28**(3), (1989)
- [7] 최재욱, 목연수, 박승호, “도시가스의 폭발 특성에 관한 연구”, *한국산업안전학회지*, **16**(4), 109-114, (2001)
- [8] 安全工学協會, 防爆工学, 海文堂, 39-40, (1983)
- [9] F. T. Bodurha, *Industrial Explosion Prevention and Protection*, McGraw-Hill, 19-22, (1980)
- [10] 近藤重雄, 浦野洋吉, 岩阪雅二, 堀口貞茲, 徳橋和明, “ $AH_n$ 水素化物ガスの爆発下限界温度と結合解離エネルギー”, *安全工学*, **25**(5), 258-264, (1986)