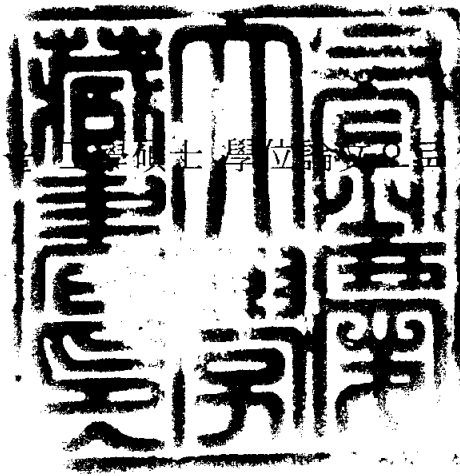


工學碩士 學位論文

압력 변화에 따른 도시가스의
폭발특성에 관한 연구

指導教授 崔 載 旭

이 論文은 工學碩士 學位論文으로 提出함



2004年 8月

釜慶大學校 産業大學院

安全工學科

朴 星 太

朴星太의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 6月

主 審 工學博士 李 來 雨



委 員 工學博士 睦 演 洙



委 員 工學博士 崔 載 旭



목 차

1. 서 론	1
2. 이론적 배경	3
2-1. 기체 혼합물의 상태 방정식	3
2-2. 폭발한계산소농도의 추산	6
2-2-1. 질소첨가시의 폭발한계산소농도	6
2-2-2. 계산값에 의한 폭발한계산소농도	11
3. 실험장치 및 방법	12
3-1. 실험시료	12
3-2. 실험장치	13
3-3. 실험방법	17
3-4. 폭발압력 및 폭발압력상승속도	19
4. 결과 및 고찰	22
4-1. 폭발범위와 폭발한계산소농도	22
4-2. 폭발압력	24
4-3. 최대폭발압력상승속도	35

5. 결 론 41

기 호 설 명 42

참 고 문 헌 43

Abstract 45

부 록 48

1. 서 론

기체연료는 중세기를 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 천연가스(LNG)로 교체됨에 따라 화재·폭발의 위험성이 적은 이점 때문에 그 수요가 급증하고 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 또한 증가하는 실정이다. 최근 한국가스안전공사에서 발표한 가스별 사고 추이에 대한 5년간의 통계자료에 따르면 LP가스와 다른 고압가스에 비해 도시가스의 사고율이 증가하는 추세를 보이고 있는 것으로 나타나고 있으며, 가스사고의 발생시에는 엄청난 인명피해와 함께 많은 재산 손실을 초래하는 것으로 나타났다.⁴⁾

가스폭발에 대한 위험성을 평가하기 위한 주요 특성으로서는 폭발하한계(lower explosive limit), 최대폭발압력(maximum explosion pressure), 폭발압력상승속도(explosion pressure rising ratio) 등이 있으며, 이러한 가스폭발의 연구사례로는 Kakutkina 등⁵⁾이 밀폐용기의 가스폭발에 관한 평가방법을 연구하였으며, Haneda

등⁶⁾은 고전압 영역에 대한 메탄의 점화한계에 관한 연구를 하였다. 또한 국내에서는 최 등⁷⁾이 도시가스의 폭발특성에 관한 기본적 연구결과가 있으나 사고사례나 실적에 비하여 아직도 관련연구가 많이 이루어지지 않고 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.

2. 이론적 배경

2-1. 기체 혼합물의 상태 방정식

두가지 이상으로 혼합되어 있는 기체 혼합물의 경우에 각 물질의 혼합조성비는 압력이나 부피에 의존하게 되며, 혼합 기체속에 들어있는 각 물질의 몰수의 합은 전체 혼합기체의 몰수가 되고, 각각의 몰수는 각 성분 기체의 농도, 즉 양을 나타낸다. 그러나 전체 혼합기체의 경우 일정압력에서 부피의 변화나 일정부피에서 각각의 압력이 변화하게 되면, 각 성분의 농도가 변화하게 되므로 물리화학적 조성을 나타내는 것은 몰분율의 형태로 표시하는 것이 더 편리하게 사용된다.

몰 분율 x_i 는 존재하는 모든 물질의 몰수의 합, $n_i = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$ 에 각 몰수를 나눈 것으로 식 (1)과 같으며, 혼합물 속에 존재한 모든 물질의 몰분율의 합은 1로서 식 (2)와 같다.

$$x_i = \frac{n_i}{n_i} \quad (1)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i = 1 \quad (2)$$

식 (2)에 의해 한 물질의 몰분율을 모르더라도, 나머지 물질들의 몰분율만 알면 그 혼합물질의 조성을 알 수 있고, 몰 분율 자체가 혼합기체의 부피, 압력 및 온도에 무관한 함수이기 때문에 보통 몰분율로 표시한다.

기체 혼합물에 대하여 각 성분을 이상기체로 가정하면, 이상기체의 법칙이 적용되며, 혼합기체의 상태방정식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$PV = n_i RT \quad (3)$$

여기서 절대온도 T 에서 부피가 V 인 용기 속에 몰수가 n_1, n_2, n_3 인 세 기체가 혼합되어 있다고 가정하면, $n_t = n_1 + n_2 + n_3$ 가 되고, 이 혼합기체의 압력은 식 (4)와 같이 구할 수 있으며,

$$P = \frac{n_i RT}{V} \quad (4)$$

각 성분에 대한 부분 압력을 구한다면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 = \frac{n_1 RT}{V}, P_2 = \frac{n_2 RT}{V}, P_3 = \frac{n_3 RT}{V} \quad (5)$$

여기서 식 (5)를 식 (4)에 적용시키면,

$$P_1 + P_2 + P_3 = (n_1 + n_2 + n_3) \frac{RT}{V} = n_t \frac{RT}{V} = P \quad (6)$$

이것은 일정온도에서 혼합기체가 나타내는 전체 압력은 그 성분 기체들의 부분 압력의 합과 같다는 것을 나타내고, Dalton의 분압법칙이라 한다.

분압 법칙은 혼합물 속에 들어있는 그 기체의 몰분율과 간단한 관계를 가지므로 식 (5)의 첫째항을 식 (4)로 나누어서 식 (1)에 적용시키면 식 (7)과 같이 된다.

$$\frac{P_1}{P} = \frac{n_1}{n_t} = x_1 \quad (7)$$

식 (7)은 일부의 기체 혼합물에만 국한되지 않고 모든 기체 혼합물에 대해서도 성립되며, 전체 압력과 몰분율만 알면 분압을 계산할 수 있으므로, 필요로 하는 화학조성의 농도를 만들 수가 있다.

2-2. 폭발한계산소농도의 추산

2-2-1. 질소첨가시의 폭발한계산소농도^{8),9)}

가연성가스 및 인화성액체를 취급하는 설비에서 화재·폭발을 예방하기 위하여 불활성가스를 첨가하여 혼합가스중의 산소농도를 어느 한계치 이하로 유지하면 화재·폭발의 발생을 예방할 수 있다. 이 한계의 산소농도를 폭발한계산소농도라 하며, 불활성가스로는 헬륨, 질소, 수증기, 이산화탄소 및 사염화탄소 등이 사용되나 실제적으로 산업현장에서는 질소를 많이 사용하고 있다.

질소첨가시의 한계산소농도를 추산하기 위하여 다음의 경험적 사실을 활용한다.

(가) 폭발범위도에 있어서 폭발범위의 형상은 거의 삼각형이다.

(나) 하한계 선은 공기-질소농도 선에 평행한 직선이다.

(다) 임계점은 거의 화학양론선상에 존재한다.

(라) 임계점은 하한계선과 화학양론선의 두 선상에 존재하므로, 이 두직선의 교점에서 구해진다.

(마) 임계점에 있어서 산소농도가 한계산소농도로 된다.

따라서 한계산소농도를 구하기 위하여 임계점의 위치를 결정하면 되고, 임계점은 하한계선과 양론선의 교점으로부터 구하면 된다. 이를 위해 삼각도를 사용하는 작도법도 가능하나 실용상에서는 직교좌표에 의한 계산법이 편리하다. 더욱이, 이 직교 좌표는 원점을 공기성분으로 하는 직각 삼각도를 사용하여 나타낸다.

Fig. 2의 XY좌표에서 하한계선은 $L_L(0, b)$ 을 통과하는 X축에 평행한 직선이며, 양론선은 $V_{st}(0, a)$ 와 $C(100, 0)$ 의 두 점을 통과하는 직선이므로 이들 방정식은 각각 다음과 같이 된다.

$$y = b \quad (8)$$

$$y = -\frac{a}{100}x + a \quad (9)$$

이 두 직선의 교점의 좌표는 연립방정식을 풀면 얻어지며 식 (8), (9)로부터

$$x = (1 - b/a) \times 100$$

즉, 임계점 L_3 의 좌표는 $[x = (1 - b/a) \times 100, b]$ 로 된다.

이와 같이 L_3 의 X좌표는 b/a 의 값으로 결정되는 것을 알 수 있다. 또한 L_3 에 있어서 3성분중의 산소농도는

$$\text{공기}(\%) = 100\% - [\text{가연성성분}(\%) + \text{질소}(\%)]$$

가 되고, 이로부터 식(10)에 의해 산소농도를 구할 수 있다.

$$\text{성분중의 산소}(\%) = \mathbf{[100 - [b + (1 - b/a) \times 100]]} \times 0.209 \quad (10)$$

한계산소농도를 공기-질소 2성분중의 농도로서 표시하는 것은 Fig. 1에 있어서 $A(0, 100)$ 와 $L_3[(1 - b/a) \times 100, b]$ 의 두 점을 통과하는 직선과 X축의 교점인 E점의 좌표를 구하면 된다.

$$y = \frac{-(100 - b)}{(1 - \frac{b}{a}) \times 100} x + 100 \quad (11)$$

$$y = 0 \quad (12)$$

식 (11), (12)로부터

$$x = \frac{(1 - \frac{b}{a}) \times 10^4}{100 - b}$$

따라서 E점의 산소농도는 식 (13)로부터 구해진다.

$$[100 - \frac{(1 - \frac{b}{a}) \times 10^4}{100 - b}] \times 0.209 = 2 \text{ 성분중의 산소}(\%) \quad (13)$$

Fig. 2는 식 (10)과 (13)의 한계산소농도의 관계를 나타내며, 계산치를 비교하면 하한계 L_1 의 값이 높을수록 양자의 차가 크나 하한계치가 비교적 작은 유기화합물에서는 일반적으로 무시할 수 있는 정도의 차이이다.

또한 불활성가스가 탄산가스 또는 수증기의 경우에는 대부분 한계산소농도의 값이 질소의 경우보다 약간 높으므로 질소로서 구한 값을 이용하면 충분히 안전하다.

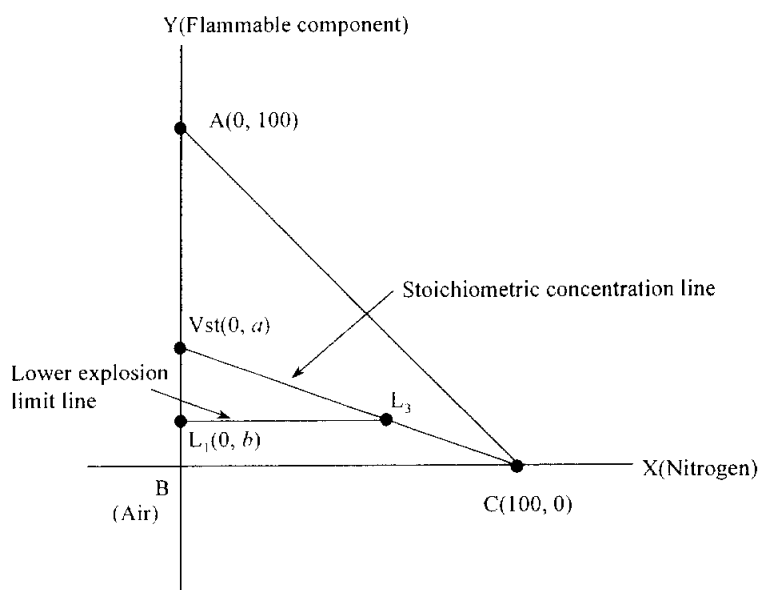


Fig. 1 Explosion range diagram of three-component system.

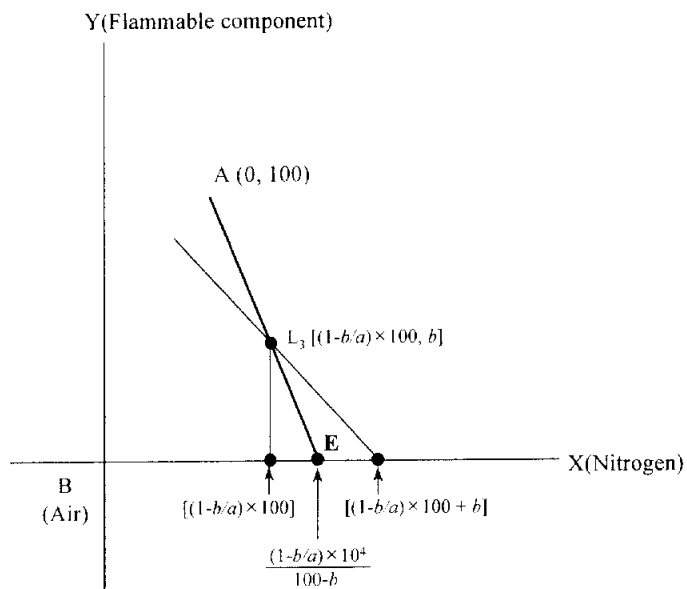


Fig. 2 Relationship between two kinds of critical oxygen concentration.

2-2-2. 계산값에 의한 폭발한계산소농도

폭발한계산소농도의 추산은 2-2-1에서와 같이 삼각도표를 이용하여 구하는 방법을 사용하기도 하고, 일반적으로 계산에 의해 편리하게 구하기 위해서는 가연성 가스 또는 인화성 액체의 폭발하한계와 그 물질의 완전연소 방정식을 이용하기도 한다. 이 방법은 폭발하한계에 있어서의 가스 및 증기를 완전연소 시키기 위해서는 산소농도가 얼마나 될 것인가를 계산하여 이를 연소에 필요한 최소산소농도(MOC, Minimum Oxygen for Combustion) 즉, 폭발한계산소농도라 하며 식 (14)와 같이 계산할 수 있다.¹⁰⁾

$$MOC = L_1 \times \text{화학양론적 산소 } mol\text{수} \quad (14)$$

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험시료

본 실험에서 사용된 도시는 한국가스공사의 기지에서 배관망을 통하여 울산 직할시 및 양산지역에 공급되고 있으며, 경동도시가스(주)에서 관리하고 있는 시료를 사용하였으며, 그 성분표를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The composition of city gas

Component	Concentration
Methane(CH_4)	90.277%
Ethane(C_2H_6)	6.203%
Propane(C_3H_8)	2.315%
n-Butane($\text{n-C}_4\text{H}_{10}$)	0.545%
i-Butane($\text{i-C}_4\text{H}_{10}$)	0.476%
Nitrogen(N_2)	0.159%
i-Pentane($\text{i-C}_5\text{H}_{12}$)	0.016%
n-Pentane($\text{n-C}_5\text{H}_{12}$)	0.005%

3-2. 실험장치

가스폭발한계를 측정하는 장치로서는 전파법과 버너법이 있으며, 이중에서 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.¹¹⁾

본 연구에 사용한 실험장치는 전파법을 개량한 장치로써 Fig. 3와 같다. 주요 구성부로는 폭발통부, 진공부, 에너지 공급부, 폭발압력 측정·저장부로 구성되어 있으며 Photo 1에 나타내었다.

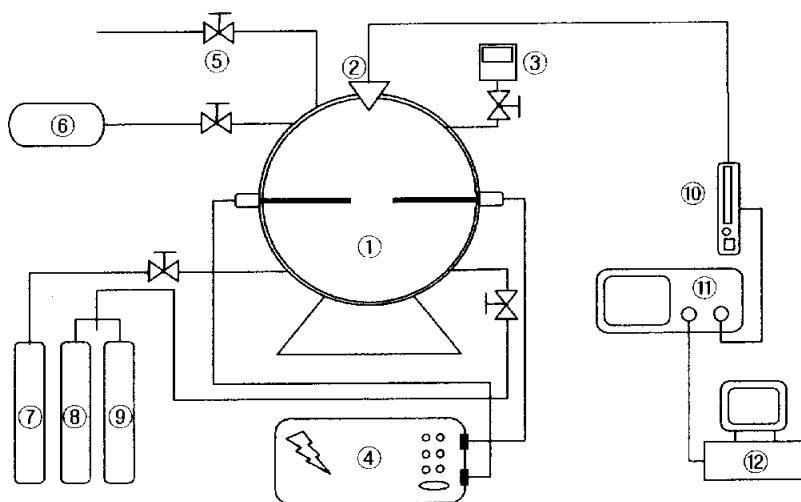
폭발통부에는 폭발통과 압력측정센서로 구성되어 있으며, 폭발통은 원통형으로 외경이 148mm, 지름이 105.4mm로서 용기의 체적이 1.1ℓ이며, 용기의 앞면은 직경 32mm의 강화유리를 부착하여 용기내부의 폭발 거동을 육안으로 확인할 수 있고, 불완전연소 시 발생하는 타르 등의 이물질들을 제거할 수 있도록 개폐가 가능한 구조로 하였다. 그 외의 부분은 두께 21.3mm의 Stainless steel로 제작하였다. 용기에는 가스주입시 농도를 확인할수 있도록 디지털 압력계(PG-200-102G, Copal Electronics CO., LTD)를 부착하였으며, 폭발시에 압력 측정을 위해 용기 상부에 0 ~ 30 kgf/cm²까지 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, 방전 제한저항, 무유도저항 등으로 구성되어 있다. 용량방전형 콘덴서는 설정된 전압을 충전하는 역할을 하며, 가스봉입형 고전압스witch는 고전압으로 충전된 콘덴서를 방전회로측에 순간적으로 접속시키는 역할을 한다. 방전제한 저항은 착화지연시간의 역할을 하는 것으로, 저항의 크기에 따라 방전전극을 통해 방전되는 착화지연시간이 달라진다. 방전전극 2차측에는 무유도저항 2개가 장치되어 있는데 고주파 진동을 제어하기 위한 500Ω의 무유도저항과 전류 검출용의 무유도저항(50Ω)을 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 신호를 증폭기를 통해 증폭을 시켜 오실로스코프상에 파형이 나타나도록 하여 이것을 컴퓨터로 처리하여 수치화한 다음에 프로그램을 통하여 폭발압력 및 최대폭발압력상승속도를 계산할 수 있도록 구성하였다.



- | | |
|----------------------------|-----------------|
| ① Explosion vessel | ⑦ City gas bomb |
| ② Pressure sensor | ⑧ Oxygen bomb |
| ③ Pressure gage | ⑨ Nitrogen bomb |
| ④ High voltage transformer | ⑩ Amplifier |
| ⑤ Vent valve | ⑪ Oscilloscope |
| ⑥ Vacuum pump | ⑫ Computer |

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.

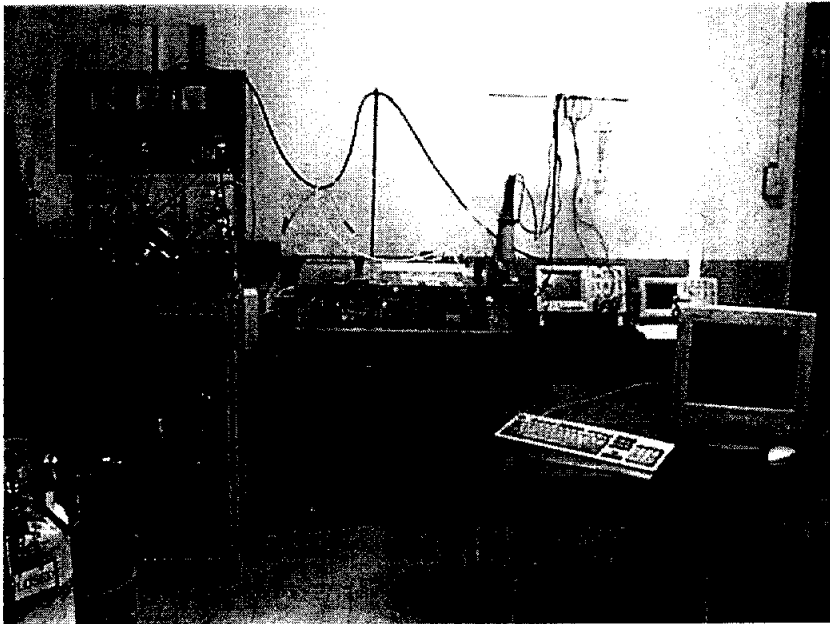


Photo 1. The picture of experimental apparatus.

3-3. 실험방법

가스 폭발의 경우에는 온도와 습도에 따라서 폭발거동이 다르므로 실험의 재현성을 좋게 하기 위하여 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 실험을 행하였다.¹²⁾ 가스의 농도변화에 대한 실험을 수행하기 위하여 폭발통에 주입하는 산소, 질소는 순도 99%의 것을 사용하였으며, 실험은 다음의 순서에 의해 진행하였다.

- (1) 폭발통 내부를 진공펌프를 사용하여 상부에 설치된 압력계의 수치가 $-1.000 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ (이하 모든 압력은 gage pressure임)까지 진공을 만든다.
- (2) 기체 혼합물의 상태방정식으로 계산된 압력의 수치만큼 도시가스의량을 가스주입구를 통해서 주입한다.
- (3) 산소를 산소 주입구를 통해 해당 압력만큼 폭발통에 주입한다.
- (4) 질소를 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 1%씩 변화시켜 실험하였으며, 폭발하한와 상한의 부근에서는 0.1%범위의 농도에서 3회이상 실험하여 1회라도 폭발했을 때의 최소농도를 폭발하한계로 최대농도를 폭발상한계로 하였다.

폭발한계산소농도를 측정하기 위하여 순도가 높은 산소와 질소를 미리 혼합한

21%, 18%, 15%, 13%, 12% 등의 혼합가스(제조회사 : (주)덕양가스, 순도 : 99.8%)를 사용하여 폭발범위를 측정하였으며, 폭발이 발생하는 최저농도를 폭발한계산소농도로 하였다.

3-4. 폭발압력 및 폭발압력상승속도

각 가스의 농도별로 폭발압력 및 폭발압력상승속도($\frac{dP}{dt}$)가 다르기 때문에 이를 측정하여 위험성평가를 하는 것이 대단히 중요하다. 폭발시에 압력센서로부터 측정된 압력은 증폭기에 의해서 증폭되어 오실로스코프에 기록된다. 여기서 시간의 변화에 따라서 폭발압력의 값을 확인할 수 있으며, 폭발압력상승의 최대값의 접선으로부터 기울기를 구할 수 있다. 여기에서 접선으로부터 구한 기울기가 폭발압력상승속도이고, 최대가 되는 점이 최대폭발압력상승속도이다.

Fig. 4에는 디지털 오실로스코프에 나타난 파형의 형상을 나타내었으며, Photo 2는 아날로그 형식의 오실로스코프상에 나타난 파형으로서 시간에 따른 폭발압력을 표시하였다.

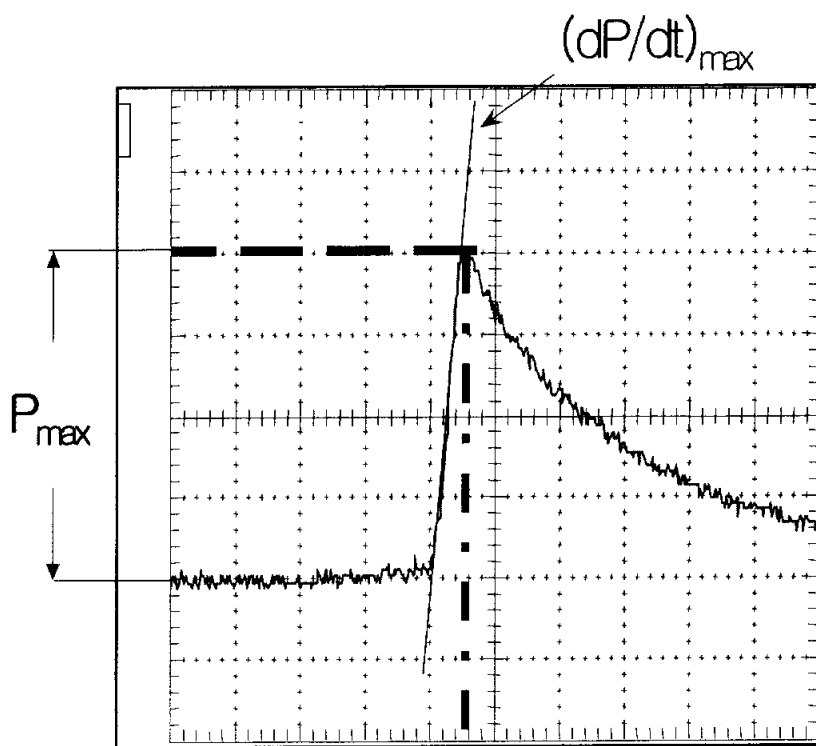


Fig. 4 The wave plotted from the digital oscilloscope.

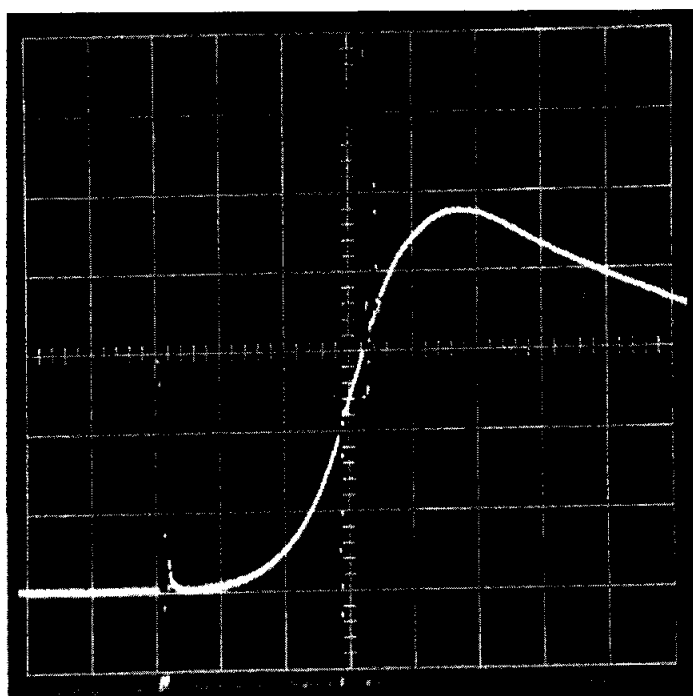


Photo 2. The wave plotted from the analogue oscilloscope.

4. 결과 및 고찰

4-1. 폭발범위와 폭발한계산소농도

가스폭발의 경우에는 가연성 gas와 지연성 gas와의 혼합상태에서 점화원이 가해진다고해서 항상 폭발이 일어나지는 않으나, 가연성 gas와 지연성 gas가 폭발 가능한 농도범위 내에 있을 경우에만 폭발이 일어나고, 이 때의 범위를 폭발범위라 하며, 폭발범위의 정확한 측정은 가스폭발사고 방지대책의 가장 기본적이며 중요한 사항이다.¹³⁾

Fig. 5는 압력과 산소농도변화에 따른 도시가스의 폭발범위를 나타낸 것으로서 산소농도 변화에 따라서 게이지 압력을 0, 0.5, 1.0, 1.5 kg/cm²로 변화(이하 압력변화라고 함)시켜 실험하였다.

0 kg/cm²일 경우에 있어서 폭발하한계와 상한계는 4.9~15%를 구하였으며, 0.5 kg/cm²에서의 폭발범위는 4.9~15.5%를 구하였다.

또한, 1.0 kg/cm²에서는 폭발하한계는 4.8%, 상한계는 16%를 구하였으며, 1.5 kg/cm²의 높은 압력에서의 폭발범위 4.7~16.5%를 구하였으며, 압력이 증가할수록 폭발하한계는 감소하고, 상한계는 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 폭발한계산소농도라 하며, 본 실험에서는 산소농도가 동일한 12%의 폭발한계산소농도를 구하였다.

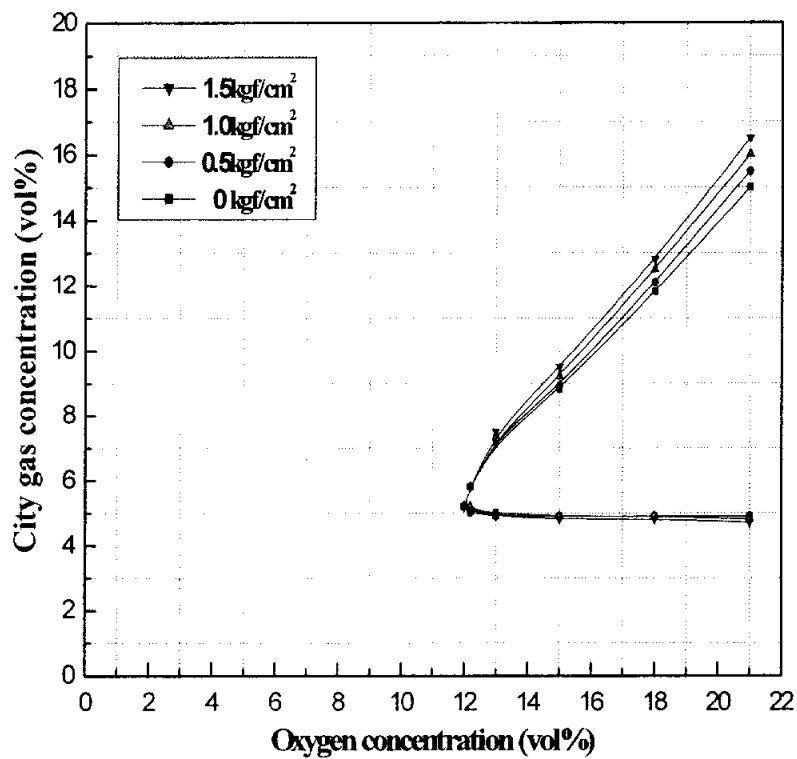


Fig. 5 Explosion behavior between city gas and oxygen concentration variation
in case of 4 kinds initial pressure.

4-2. 폭발압력

가스폭발의 경우에 폭발압력은 안전대책을 강구하는데 중요한 인자로서, 가스의 저장·취급시설 설비시에 내압능력과 방폭설비의 산정기준이 된다. 본 실험에서는 폭발통내의 전극간극을 5mm로 하고, 방전전압을 10kV로 설정하여 실험을 행하였다.

도시가스의 압력이 0~1.5 kgf/cm² 에 있어서 산소의 농도값에 따라 폭발압력의 특성을 Table 2, 3, 4, 5에 나타내었다.

Table 2. The explosion pressure of city gas at 0 kg/cm²

oxygen concentration (%)	max. explosion pressure [kgf/cm ²]	explosion pressure at LEL [kgf/cm ²]	explosion pressure at UEL [kgf/cm ²]
21	6.3	1.1	0.7
18	5.8	0.5	0.8
15	4.8	0.4	0.6
13	3.5	1.3	1.5
12	0.5	-	-

Table 3. The explosion pressure of city gas at 0.5 kg/cm²

oxygen concentration (%)	max. explosion pressure [kgf/cm ²]	explosion pressure at LEL [kgf/cm ²]	explosion pressure at UEL [kgf/cm ²]
21	9.5	1.1	0.6
18	8.8	0.9	0.8
15	7.1	0.8	0.6
13	5.1	0.8	0.5
12	0.5	-	-

Table 4. The explosion pressure of city gas at 1.0 kg/cm²

oxygen concentration (%)	max. explosion pressure [kgf/cm ²]	explosion pressure at LEL [kgf/cm ²]	explosion pressure at UEL [kgf/cm ²]
21	12.8	0.5	0.4
18	11.8	0.7	0.5
15	9.3	0.8	0.6
13	6.6	0.5	0.5
12	0.6	–	–

Table 5. The explosion pressure of city gas at 1.5 kg/cm²

oxygen concentration (%)	max. explosion pressure [kgf/cm ²]	explosion pressure at LEL [kgf/cm ²]	explosion pressure at UEL [kgf/cm ²]
21	16.7	0.6	0.5
18	14.6	0.5	0.6
15	11.1	0.6	0.6
13	7.7	1.1	0.5
12	0.6	–	–

Fig. 6은 산소농도 21%에서 도시가스의 농도변화에 따른 폭발압력을 나타낸 것으로서, 압력이 변화함에 따라 폭발이 일어날 수 있는 최저한계농도인 폭발하한농도와 최대의 농도인 폭발상한농도를 구할 수 있었으며, 용기의 압력이 0.7 kgf/cm² 일 경우에 있어서 폭발한계농도는 4.9%~15%를 구하였다. 폭발에 따른 압력변화는 도시가스의 농도에 따라서 압력변화가 크게 나타나고 있으며, 폭발하한 농도에서 1.1 kgf/cm² 의 폭발압력이 도시가스의 농도가 9%까지 증가함에 따라 폭발압력은 증가하여 6.3 kgf/cm² 의 최대폭발압력을 구하였다. 그러나 가스농도가 9%이상에서는 폭발압력이 차츰 감소하는 경향을 나타내었으며, 15%에서 0.7 kgf/cm²를 나타내었다. 이는 산소와 연료비의 조성이 양호한 화학양론조성의 부근에서 최대폭발이 발생하고 도시가스의 농도가 희박하거나 고농도일 경우의 폭발압력이 높지 않는 것으로 생각된다. 또한 압력이 0.5 kgf/cm², 1.0 kgf/cm², 1.5 kgf/cm²로 증가할수록 폭발압력이 크게 증가하여 1.5 kgf/cm² 일 경우에 16.7 kgf/cm² 를 구하였다.

Fig.7는 산소농도 18%일 경우에서 용기내의 압력이 변할 경우에 도시가스의 농도변화에 따른 폭발압력을 나타내었다. 용기내의 압력이 증가할수록 폭발압력은 증가하였으며, 최대폭발압력은 0 kgf/cm²일 경우 5.8 kgf/cm²이었으며, 1.5 kgf/cm²에서 14.6 kgf/cm²를 구하였다.

또한 Fig.8과 Fig.9는 산소농도 15%와 13%일 경우에서의 결과로 최대폭발압력은 1.5 kgf/cm²에서 각각 11.1 kgf/cm² 과 7.7 kgf/cm²를 구하였다.

Fig.6, Fig.7, Fig.8 및 Fig.9에서 산소농도가 감소할수록 폭발한계농도가 감소하였으며, 압력이 감소함에 따라 최대폭발압력이 감소하였다. 이는 일반적으로 폭발이 일어날 때 밀폐용기 내에서의 최대폭발압력은 초기압력, 기체의 몰수의 변화, 온도

의 변화 등에 의존하므로 온도가 일정할 경우 최대폭발압력은 화학양론적인 농도에
서 초기압력의 8배까지 상승하는 것에 거의 일치되고 있다.

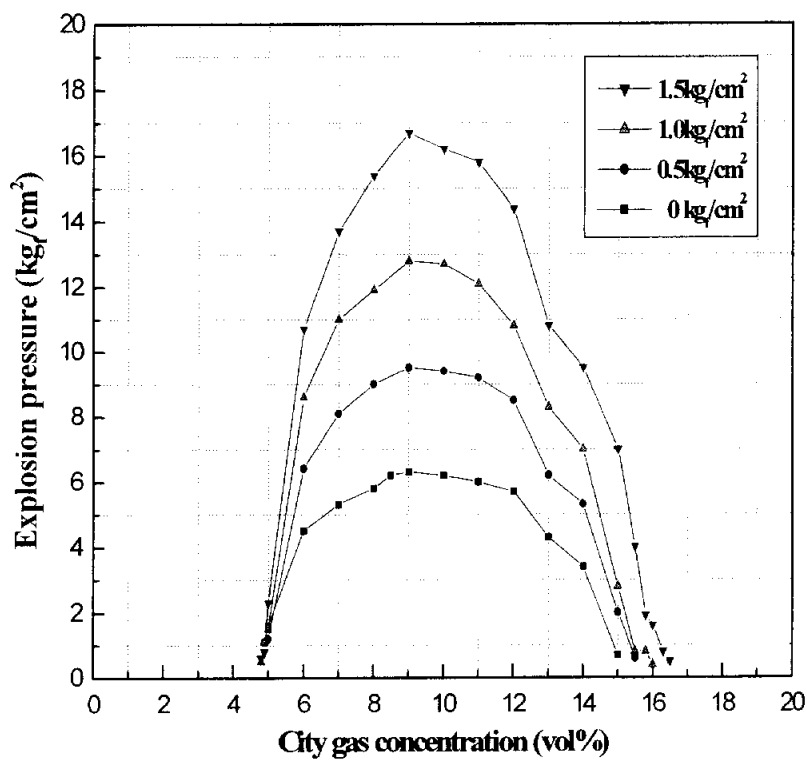


Fig. 6 Relation between city gas concentration and explosion pressure
at 21% of oxygen concentration.

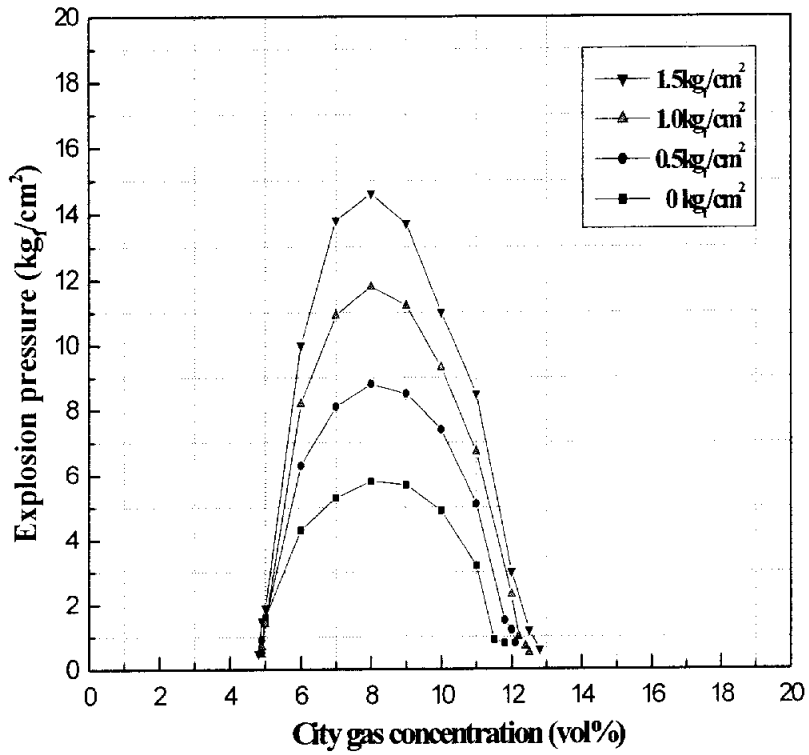


Fig. 7 Relation between city gas concentration and explosion pressure
at 18% of oxygen concentration.

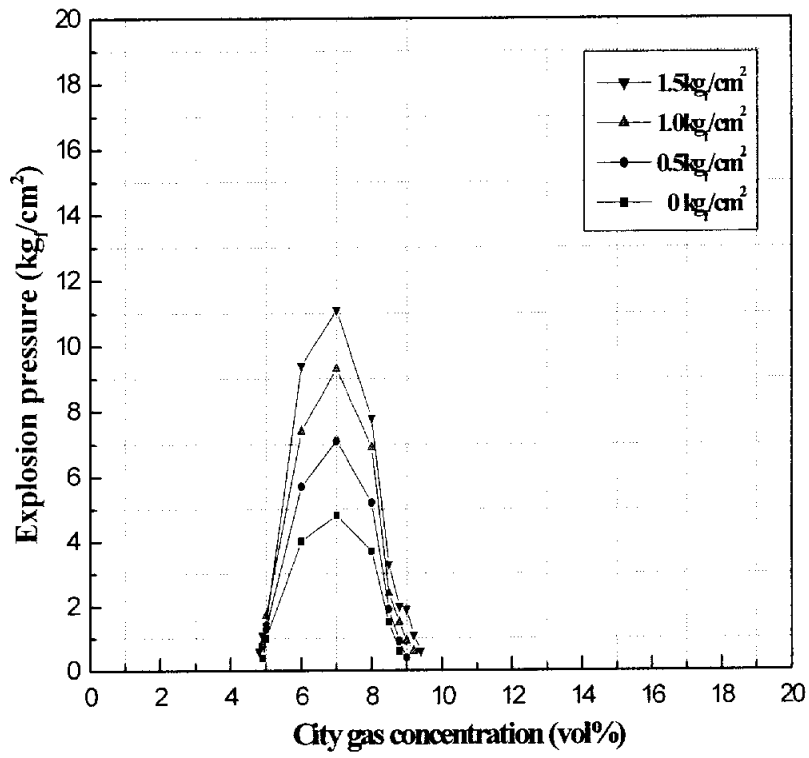


Fig. 8 Relation between city gas concentration and explosion pressure
at 15% of oxygen concentration.

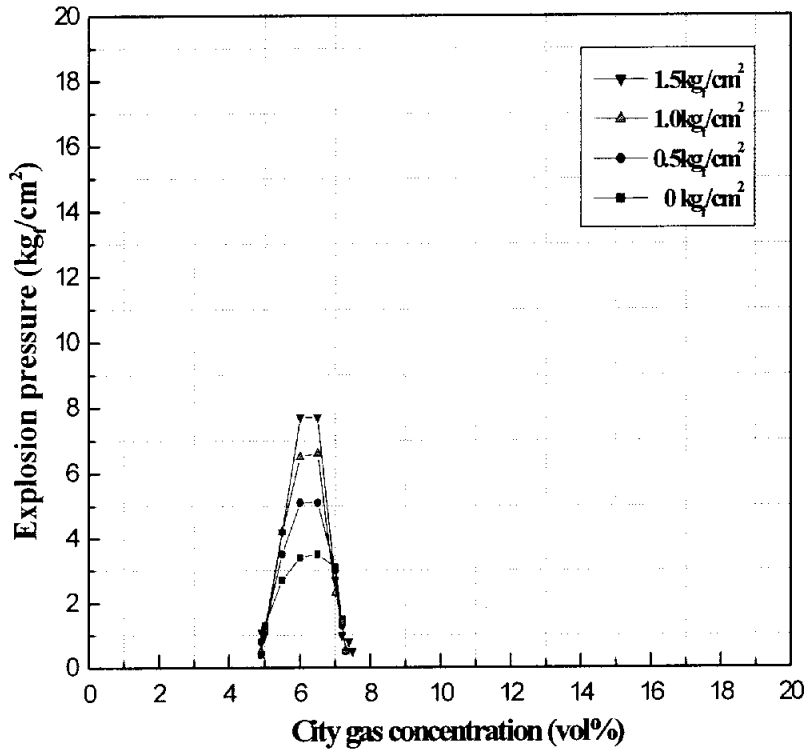


Fig. 9 Relation between city gas concentration and explosion pressure
at 13% of oxygen concentration.

Fig. 10은 용기내의 압력을 변화시키면서 폭발시켰을 경우에 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 산소의 농도가 충분하기 때문이고, 압력이 증가할수록 가연성기체인 도시가스와 산소분자의 유효충돌수가 높은 것에 기인되는 것으로 사료된다.

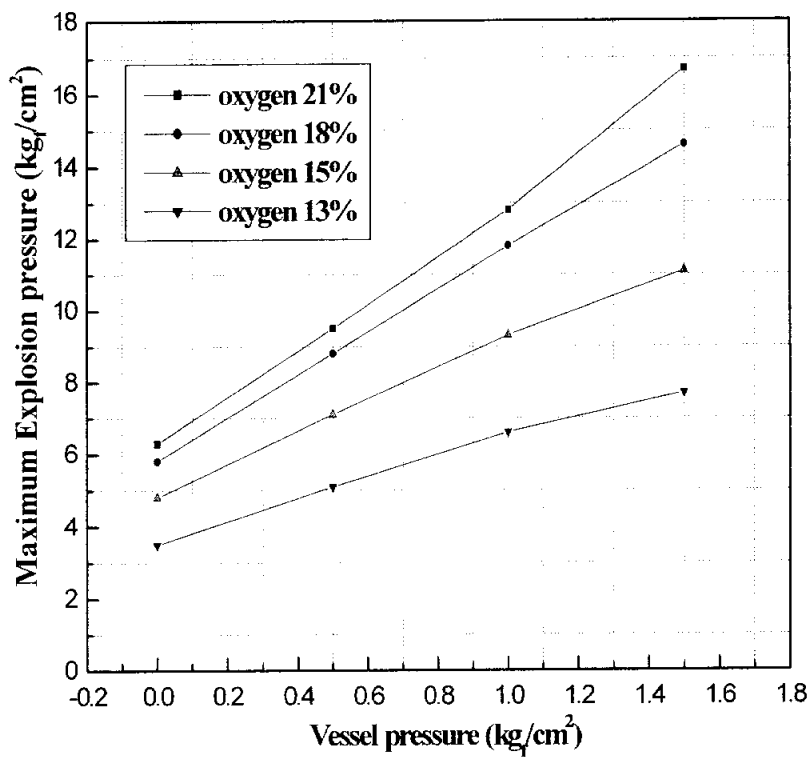


Fig. 10 Relation between initial pressure of the vessel and maximum explosion pressure in case of 4 kinds oxygen concentration.

4-3. 최대폭발압력상승속도

Fig. 11, 12, 13 및 14는 도시가스의 농도와 압력변화에 따른 폭발압력상승속도를 나타낸 것으로서 폭발통내의 전극간극을 5mm, 방전전압을 10kV로 설정하여 실험을 행하였다.

Fig. 11는 대기압에서 산소농도 변화에 따른 폭발압력 상승속도를 나타낸 것으로서 폭발압력과 같이 산소농도 21%, 18%, 15%에서 폭발하한농도와 상한농도에서 $7.28 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 의 동일한 폭발압력상승속도를 구하였으며, 도시가스의 농도가 증가함에 따라 폭발압력상승속도도 증가하였다.

산소농도 15%일 경우에서 도시가스 농도 7%부근에서 $109.27 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 의 최대 폭발압력상승속도를 나타내었으며, 18%의 산소농도에서는 도시가스의 농도가 8%에서 $173.08 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 을 나타내었다. 또한 산소농도 21%의 경우에는 도시가스의 농도가 9%에서 최대폭발압력상승속도 $245.63 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 를 구하였다.

Fig.12는 산소농도를 15%, 18%, 21%를 변화시키고, 용기내의 압력을 $0.5 \text{ kg}_t/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ 로 했을 경우 최대폭발압력상승속도를 구하였다. 산소농도 15%일 경우 $109.27 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 를 구하였으며, 18%의 산소농도에서는 $209.35 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$, 21%의 산소농도에 따라 $354.90 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 의 최대폭발압력상승속도를 구하였다.

Fig.13는 용기내의 압력이 $1.0 \text{ kg}_t/\text{cm}^2$ 인 경우에 최대폭발압력상승속도를 나타낸 것으로서 산소농도 15%, 18%, 21%에서 각각 $109.27 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$, $282.34 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 및 $427.88 \text{ kg}_t/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 를 구하였다.

Fig.14에는 $1.5 \text{ kg}_t/\text{cm}^2$ 에서 산소농도 변화에 따른 폭발압력상승속도를 나타낸 것으로서 폭발압력상승속도는 폭발압력과 같이 산소농도 21%, 18%, 15%에서 폭발하

한농도에서는 $7.28 \text{ kg}_L/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 의 동일한 값을 각각 구하였고, 도시가스의 농도가 증가함에 따라 폭발압력상승속도도 증가하였다. 또한, 도시가스농도 9%, 8%, 7%에서는 각각 $564.69 \text{ kg}_L/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$, $346.15 \text{ kg}_L/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$, $136.8 \text{ kg}_L/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 의 최대폭발압력상승속도를 구하였다.

Fig.11, 12, 13 및 14에서 산소의 농도가 증가 할수록 최대폭발압력상승속도가 증가하였으며, 용기내의 초기압력이 증가 할수록 급격하게 증가하였다. 이는 하한계와 상한계의 범위내에서 산소의 농도가 증가 할수록 연소 및 폭발이 용이한 상태의 조성으로 되기 쉽고, 용기내의 초기압력이 증가 할수록 분자간의 충돌횟수가 증가하기 때문에 최대폭발압력상승속도가 증가하는 것으로 사료된다.

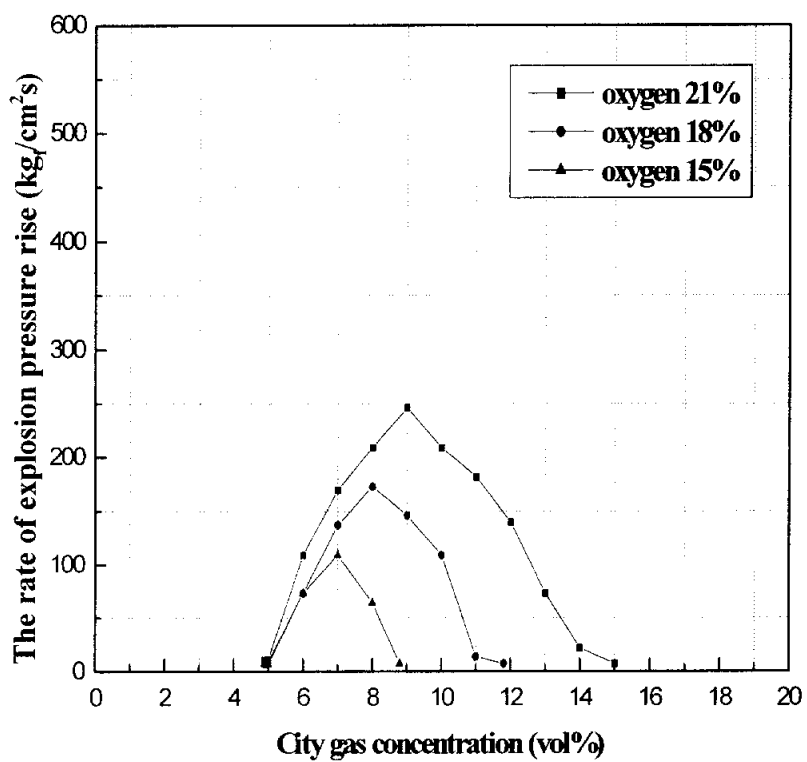


Fig. 11 Relation between city gas concentration and explosion pressure rising ratio at 0 kg/cm².

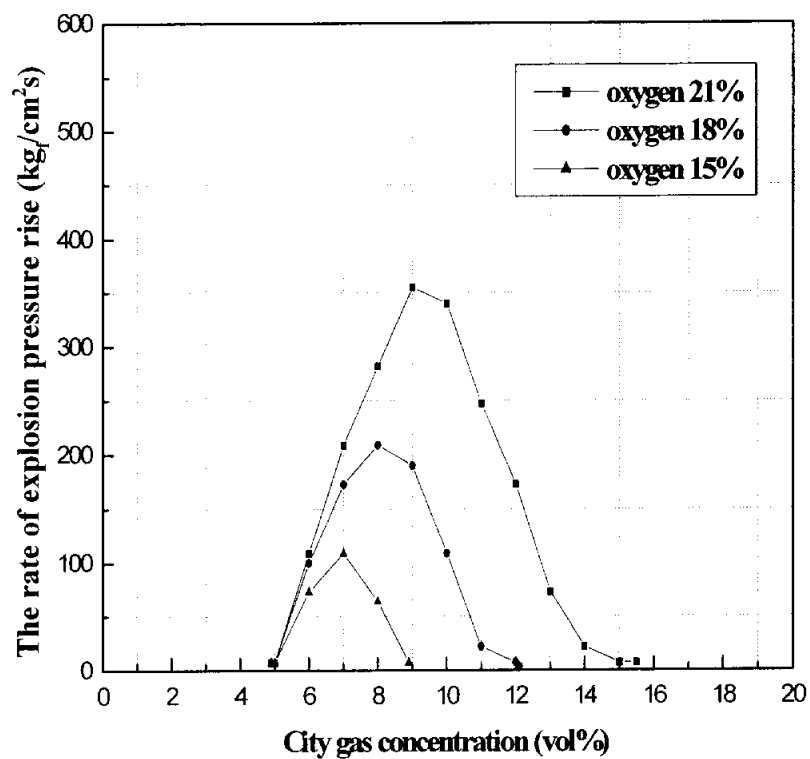


Fig. 12 Relation between city gas concentration and explosion pressure rising ratio at 0.5 kg/cm².

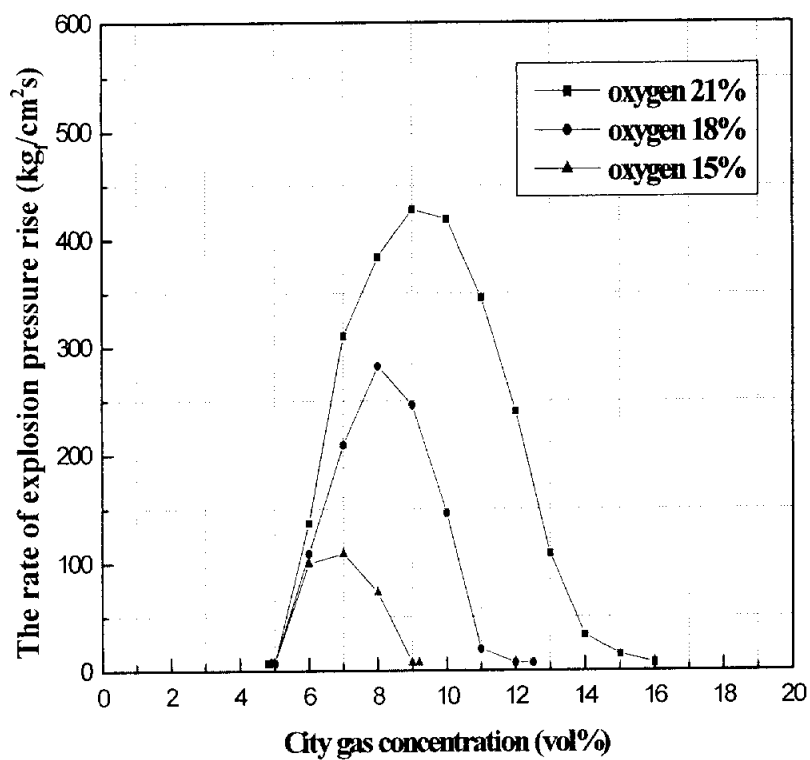


Fig. 13 Relation between city gas concentration and explosion pressure rising ratio at 1.0 kg_t/cm³.

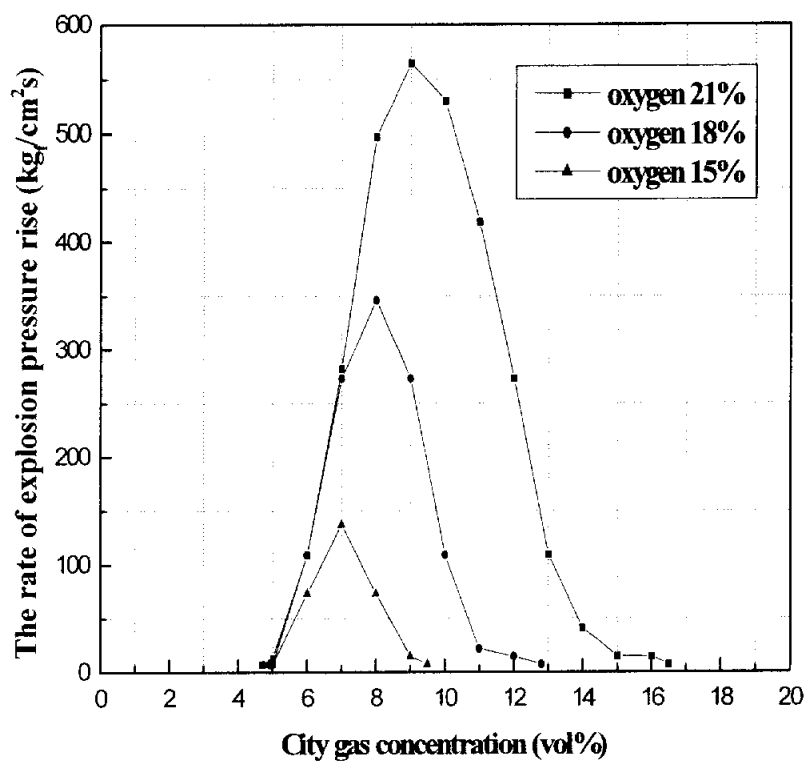


Fig. 14 Relation between city gas concentration and explosion pressure rising ratio at 1.5 kg/cm².

5. 결론

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

- 1) 산소농도 21%에서 도시가스의 초기압력을 0, 0.5, 1.0, 1.5 kgf/cm^2 로 변화시키면서 조사한 폭발한계범위는 각각 4.9~15%, 4.9~15.5%, 4.8~16%, 4.7~16.5%로 나타났다.
- 2) 산소농도가 감소함에 따라 폭발하한 농도는 거의 변화가 없으나, 폭발상한농도는 급격히 감소하는 경향을 나타내었으며, 폭발한계산소농도 12%를 구하였다.
- 3) 도시가스의 최대폭발압력은 용기내의 초기압력 0, 0.5, 1.0, 1.5 kgf/cm^2 에 있어서 각각 6.3, 9.4, 12.7, 16.7 kgf/cm^2 를 구하였다.
- 4) 최대폭발압력상승속도는 초기압력의 변화를 0, 0.5, 1.0, 1.5 kgf/cm^2 로 함에 따라 9%의 농도에서 245.63 $\text{kgf/cm}^2 \cdot \text{sec}$, 354.90 $\text{kgf/cm}^2 \cdot \text{sec}$, 427.88 $\text{kgf/cm}^2 \cdot \text{sec}$, 564.69 $\text{kgf/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 를 구하였다.

기호설명

n_i : mole	[-]
x_i : mole ratio	[%]
P : pressure	[mmHg]
T : absolute temperature	[K]
a, a', b : constant	[-]
L_1 : lower explosive limit	[%]
V_{st} : stoichiometric vapor concentration	[vol%]
MOC : minimum oxygen for combustion	[vol%]
U_1 : upper explosive limit	[%]

참고문헌

- 1) 小林清志, 荒木信幸, 牧野敦, 燃焼工學, 理工學社, pp.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.
- 5) N. A. Kakutkina, A. A. Korzhavin, V. S. Babkin, V. V. Zamashchikov, and A. A. Pleslov, “Scale Modeling of Gas Explosions in Closed Vessels, Combustion”, Explosion and Shock Waves, Vol.32, No.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點火限界”, 安全工學, Vol.28, No.3, 1989.
- 7) 최 등, “도시가스의 폭발 특성에 관한 연구”, 한국산업안전학회지, Vol. 16, No 4, pp.109~114, 2001.
- 8) K. Koide and K. Ohtaguchi, “A Method for Estimating Flash Points of Organic Compounds from Molecular Structures”, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.24, No.2, 1991.
- 9) G. Gündüz, J. Stickling and R. Rennhack, “Experimental Determination and Simulation of Explosion Limits of Benzene-Inert Gas-Air Mixtures”, Chem. Eng. Technol., 18, pp403-408, 1995.
- 10) 목연수, 조태제, 전성균, 유용호, 화학안전공학, 동화기술, pp.200-201,

pp.205-210, pp.219-221, 1994.

11) 安全工学協會, 防爆工学, 海文堂, pp.39-40, 1983.

12) F. T. Bodurha, Industrial Explosion Prevention and Protection, McGraw-Hill, pp.19-22, 1980.

13) 近藤重雄, 浦野洋吉, 岩阪雅二, 堀口貞茲, 徳僑和明, " 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, Vol.25, No.5, pp.258-264, 1986.

A Study on the Explosion Characteristics of City Gas on the Change of Pressure

Sung-Tae Park

Dept. of Safety Engineering, Graduate School of Industry,

Pukyong National University

Abstract

To examine the characteristics of the explosion of city gas, the concentration of oxygen was changed with the change of initial pressure and as the result of the experiment, the following conclusions were made;

- 1) At the concentration of 21% of oxygen, the explosion limit was different as the initial pressure of city gas was changed; the explosion limit was 4.9~15%, 4.9~15.5%, 4.8~16% and 4.7~16.5% when the initial pressure was 0, 0.5, 1.0, and 1.5 kg_f/cm².
- 2) As the concentration of oxygen decreased the lower explosive limit showed a mere change, but the upper explosive limit showed a rapid decrease. The

minimum concentration of oxygen for the explosion of city gas was 12% at every pressure.

- 3) The maximum explosion pressure of city gas was 6.3, 9.4, 12.7, 16.7 kg_f/cm² at concentration of 9% of city gas when the initial pressure was 0, 0.5, 1.0, 1.5 kg_f/cm².
- 4) The maximum explosion pressure rising ratio of city gas was 245.63, 354.90, 427.88, 564.69 kg_f/cm² · sec at the concentration of 9% of city gas when the initial pressure was changed to 0, 0.5, 1.0, 1.5 kg_f/cm².

감사의 글

학문의 길은 그야말로 끝이 없다고 합니다. 느즈막히 놓았던 책을 가까이 하
기란 참으로 어려웠습니다. 중도에 포기를 할까하는 생각도 여러번 들었습니다
만 그 동안 주변에서 도와주신 고마우신 지인들 덕분에 이렇게 조그마한 결실을
맺게 되어 무한한 감회와 북받쳐 오르는 감정을 억누를 수가 없습니다. 2년여
세월이 주마등처럼 스쳐 지나갑니다.

이 논문이 있기까지 그야말로 각별한 관심과 지도를 아끼지 않고 끝까지 이끌
어주신 최재욱 지도교수님께 진심으로 머리숙여 감사드립니다. 아울러 그 동안
학문적 조언과 지도편달을 하여 주신 목연수 교수님, 이내우 교수님, 이동훈 교
수님, 박외철 교수님, 장성록 교수님, 권오현 교수님께도 무한한 감사의 말씀을
올립니다. 그리고 화공안전실험실의 여러 선후배 여러분들과 특히 임우섭 군과
이인식 군의 열과 성을 다한 협조에 대해서는 진심어린 감사를 드립니다.

그리고 2년여 동안 학업으로 인한 공백을 매워주신 경동도시가스 임직원 및
지금 제가 몸담고 있는 지역관리소의 직원들에게도 감사의 뜻을 전합니다.

학업을 수행하는 기간 동안 학업을 핑계로 가정사에 소홀함을 묵묵히 참아주
고 이해를 아끼지 않고 힘을 다해준 사랑하는 아내 정숙과 아들 재약이와 딸 재
희에게도 영광스런 마음으로 감사함을 전하고 싶습니다.

끝으로 도움을 주신 많은 분들께 진심어린 마음으로 다시 한번 머리숙여 감사
드립니다.

2004년 6월

박 성 태

부 록

Table 1. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 21%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	84	16	100	0	×
2	84.8	15.2	100	0	×
3	84.9	15.1	100	0	×
4	85	15	100	0	○
5	86	14	100	0	○
6	87	13	100	0	○
7	88	12	100	0	○
8	89	11	100	0	○
9	90	10	100	0	○
10	91	9	100	0	○
11	91.5	8.5	100	0	○
12	92	8	100	0	○
13	93	7	100	0	○
14	94	6	100	0	○
15	95	5	100	0	○
16	95.1	4.9	100	0	○
17	95.2	4.8	100	0	×
18	95.3	4.7	100	0	×
19	95.4	4.6	100	0	×

○: explosion

×: non explosion

Table 2. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 21%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	84	16	100	0.5	×
2	84.3	15.7	100	0.5	×
3	84.4	15.6	100	0.5	×
4	84.5	15.5	100	0.5	○
5	85	15	100	0.5	○
6	86	14	100	0.5	○
7	87	13	100	0.5	○
8	88	12	100	0.5	○
9	89	11	100	0.5	○
10	90	10	100	0.5	○
11	91	9	100	0.5	○
12	92	8	100	0.5	○
13	93	7	100	0.5	○
14	94	6	100	0.5	○
15	95	5	100	0.5	○
16	95.1	4.9	100	0.5	○
17	95.2	4.8	100	0.5	×
18	95.3	4.7	100	0.5	×
19	95.4	4.6	100	0.5	×

Table 3. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 21%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	83.5	16.5	100	1.0	×
2	83.8	16.2	100	1.0	×
3	83.9	16.1	100	1.0	×
4	84	16	100	1.0	○
5	84.2	15.8	100	1.0	○
6	84.5	15.5	100	1.0	○
7	85	15	100	1.0	○
8	86	14	100	1.0	○
9	87	13	100	1.0	○
10	88	12	100	1.0	○
11	89	11	100	1.0	○
12	90	10	100	1.0	○
13	91	9	100	1.0	○
14	92	8	100	1.0	○
15	93	7	100	1.0	○
16	94	6	100	1.0	○
17	95	5	100	1.0	○
18	95.1	4.9	100	1.0	○
19	95.2	4.8	100	1.0	○
20	95.3	4.7	100	1.0	×
21	95.4	4.6	100	1.0	×

Table 4. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 21%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	83.3	16.7	100	1.5	×
2	83.4	16.6	100	1.5	×
3	83.5	16.5	100	1.5	○
4	83.7	16.3	100	1.5	○
5	84	16	100	1.5	○
6	84.2	15.8	100	1.5	○
7	84.5	15.5	100	1.5	○
8	85	15	100	1.5	○
9	86	14	100	1.5	○
10	87	13	100	1.5	○
11	88	12	100	1.5	○
12	89	11	100	1.5	○
13	90	10	100	1.5	○
14	91	9	100	1.5	○
15	92	8	100	1.5	○
16	93	7	100	1.5	○
17	94	6	100	1.5	○
18	95	5	100	1.5	○
19	95.1	4.9	100	1.5	○
20	95.2	4.8	100	1.5	○
21	95.3	4.7	100	1.5	○
22	95.4	4.6	100	1.5	×
23	95.5	4.5	100	1.5	×

Table 5. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 18%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	88	12	100	0	×
2	88.1	11.9	100	0	×
3	88.2	11.8	100	0	○
4	89	11	100	0	○
5	90	10	100	0	○
6	91	9	100	0	○
7	92	8	100	0	○
8	93	7	100	0	○
9	94	6	100	0	○
10	95	5	100	0	○
11	95.1	4.9	100	0	○
12	95.2	4.8	100	0	×
13	95.3	4.7	100	0	×
14	95.4	4.6	100	0	×

Table 6. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 18%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	87	13	100	0.5	×
2	87.4	12.6	100	0.5	×
3	87.8	12.2	100	0.5	×
4	87.9	12.1	100	0.5	○
5	88	12	100	0.5	○
6	88.2	11.8	100	0.5	○
7	89	11	100	0.5	○
8	90	10	100	0.5	○
9	91	9	100	0.5	○
10	92	8	100	0.5	○
11	93	7	100	0.5	○
12	94	6	100	0.5	○
13	95	5	100	0.5	○
14	95.1	4.9	100	0.5	○
15	95.2	4.8	100	0.5	×
16	95.3	4.7	100	0.3	×

Table 7. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 18%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	87	13	100	1.0	×
2	87.3	12.7	100	1.0	×
3	87.4	12.6	100	1.0	×
4	87.5	12.5	100	1.0	○
5	87.6	12.4	100	1.0	○
6	87.8	12.2	100	1.0	○
7	87.5	12.5	100	1.0	○
8	88.2	11.8	100	1.0	○
9	88	12	100	1.0	○
10	89	11	100	1.0	○
11	90	10	100	1.0	○
12	91	9	100	1.0	○
13	92	8	100	1.0	○
14	93	7	100	1.0	○
15	94	6	100	1.0	○
16	95	5	100	1.0	○
17	95.1	4.9	100	1.0	○
18	95.2	4.8	100	1.0	×
19	95.3	4.7	100	1.0	×
20	95.4	4.6	100	1.0	×

Table 8. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 18%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	86.5	13.5	100	1.5	×
2	87	13	100	1.5	×
3	87.1	12.9	100	1.5	×
4	87.2	12.8	100	1.5	○
5	87.5	12.5	100	1.5	○
6	88	12	100	1.5	○
7	89	11	100	1.5	○
8	90	10	100	1.5	○
9	91	9	100	1.5	○
10	92	8	100	1.5	○
11	93	7	100	1.5	○
12	94	6	100	1.5	○
13	95	5	100	1.5	○
14	95.1	4.9	100	1.5	○
15	95.2	4.8	100	1.5	○
16	95.3	4.7	100	1.5	×
17	95.4	4.6	100	1.5	×

Table 9. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 15%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	90.6	9.4	100	0	×
2	90.8	9.2	100	0	×
3	91	9	100	0	×
4	91.2	8.8	100	0	○
5	91.5	8.5	100	0	○
6	92	8	100	0	○
7	93	7	100	0	○
8	94	6	100	0	○
9	95	5	100	0	○
10	95.1	4.9	100	0	○
11	95.2	4.8	100	0	×
12	95.3	4.7	100	0	×

Table 10. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 15%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	90.8	9.2	100	0.5	×
2	91	9	100	0.5	×
3	91.1	8.9	100	0.5	○
4	91.2	8.8	100	0.5	○
5	91.5	8.5	100	0.5	○
6	92	8	100	0.5	○
7	93	7	100	0.5	○
8	94	6	100	0.5	○
9	95	5	100	0.5	○
10	95.1	4.9	100	0.5	○
11	95.2	4.8	100	0.5	×
12	95.3	4.7	100	0.5	×

Table 11. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 15%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	90.5	9.5	100	1.0	×
2	90.6	9.4	100	1.0	×
3	90.8	9.2	100	1.0	○
4	91	9	100	1.0	○
5	91.2	8.8	100	1.0	○
6	91.5	8.5	100	1.0	○
7	92	8	100	1.0	○
8	93	7	100	1.0	○
9	94	6	100	1.0	○
10	95	5	100	1.0	○
11	95.1	4.9	100	1.0	○
12	95.2	4.8	100	1.0	×
13	95.3	4.7	100	1.0	×

Table 12. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 15%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	90	10	100	1.5	×
2	90.2	9.8	100	1.5	×
3	90.4	9.6	100	1.5	×
4	90.5	9.5	100	1.5	○
5	90.6	9.4	100	1.5	○
6	90.8	9.2	100	1.5	○
7	91	9	100	1.5	○
8	91.2	8.8	100	1.5	○
9	91.5	8.5	100	1.5	○
10	92	8	100	1.5	○
11	93	7	100	1.5	○
12	94	6	100	1.5	○
13	95	5	100	1.5	○
14	95.1	4.9	100	1.5	○
15	95.2	4.8	100	1.5	○
16	95.3	4.7	100	1.5	×
17	95.4	4.6	100	1.5	×

Table 13. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 13%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	92.5	7.5	100	0	×
2	92.6	7.4	100	0	×
3	92.7	7.3	100	0	×
4	92.8	7.2	100	0	○
5	93	7	100	0	○
6	93.5	6.5	100	0	○
7	94	6	100	0	○
8	94.5	5.5	100	0	○
9	95	5	100	0	○
10	95.1	4.9	100	0	×
11	95.2	4.8	100	0	×

Table 14. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 13%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	92.4	7.6	100	0.5	×
2	92.6	7.4	100	0.5	×
3	92.7	7.3	100	0.5	○
4	92.8	7.2	100	0.5	○
5	93	7	100	0.5	○
6	93.5	6.5	100	0.5	○
7	94	6	100	0.5	○
8	94.5	5.5	100	0.5	○
9	95	5	100	0.5	○
10	95.1	4.9	100	0.5	○
11	95.2	4.8	100	0.5	×
12	95.3	4.7	100	0.5	×

Table 15. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 13%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	92.4	7.6	100	1.0	×
2	92.6	7.4	100	1.0	×
3	92.7	7.3	100	1.0	○
4	92.8	7.2	100	1.0	○
5	93	7	100	1.0	○
6	93.5	6.5	100	1.0	○
7	94	6	100	1.0	○
8	94.5	5.5	100	1.0	○
9	95	5	100	1.0	○
10	95.1	4.9	100	1.0	○
11	95.2	4.8	100	1.0	×
12	95.3	4.7	100	1.0	×

Table 16. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 13%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	92	8	100	1.5	×
2	92.3	7.7	100	1.5	×
3	92.5	7.5	100	1.5	○
4	92.6	7.4	100	1.5	○
5	92.8	7.2	100	1.5	○
6	93	7	100	1.5	○
7	93.5	6.5	100	1.5	○
8	94	6	100	1.5	○
9	94.5	5.5	100	1.5	○
10	95	5	100	1.5	○
11	95.1	4.9	100	1.5	○
12	95.2	4.8	100	1.5	×
13	95.3	4.7	100	1.5	×

Table 17. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 12.2%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	93.6	6.4	100	0	×
2	93.8	6.2	100	0	×
3	93.9	6.1	100	0	×
4	94	6	100	0	×
5	94.2	5.8	100	0	○
6	94.4	5.6	100	0	○
7	94.6	5.4	100	0	○
8	94.8	5.2	100	0	○
9	94.9	5.1	100	0	○
10	95	5	100	0	×
11	95.1	4.9	100	0	×
12	95.2	4.8	100	0	×

Table 18. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 12.2%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94	6	100	0.5	×
2	94.1	5.9	100	0.5	×
3	94.2	5.8	100	0.5	○
4	94.4	5.6	100	0.5	○
5	94.6	5.4	100	0.5	○
6	94.8	5.2	100	0.5	○
7	94.9	5.1	100	0.5	○
8	95	5	100	0.5	○
9	95.1	4.9	100	0.5	×
10	95.2	4.8	100	0.5	×

Table 19. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 12.2%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94	6	100	1.0	×
2	94.1	5.9	100	1.0	×
3	94.2	5.8	100	1.0	○
4	94.4	5.6	100	1.0	○
5	94.6	5.4	100	1.0	○
6	94.8	5.2	100	1.0	○
7	94.9	5.1	100	1.0	×
8	95	5	100	1.0	×

Table 20. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 12.2%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94	6	100	1.5	×
2	94.1	5.9	100	1.5	×
3	94.2	5.8	100	1.5	○
4	94.4	5.6	100	1.5	○
5	94.6	5.4	100	1.5	○
6	94.8	5.2	100	1.5	○
7	94.9	5.1	100	1.5	○
8	95	5	100	1.5	×
9	95.1	4.9	100	1.5	×
10	95.2	4.8	100	1.5	×

Table 21. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 12%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.6	5.4	100	0	×
2	94.7	5.3	100	0	×
3	94.8	5.2	100	0	○
4	94.9	5.1	100	0	×
5	95	5	100	0	×

Table 22. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 12%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.6	5.4	100	0.5	×
2	94.7	5.3	100	0.5	×
3	94.8	5.2	100	0.5	○
4	94.9	5.1	100	0.5	×
5	95	5	100	0.5	×

Table 23. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 12%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.6	5.4	100	1.0	×
2	94.7	5.3	100	1.0	×
3	94.8	5.2	100	1.0	○
4	94.9	5.1	100	1.0	×
5	95	5	100	1.0	×

Table 24. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 12%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.6	5.4	100	1.5	×
2	94.7	5.3	100	1.5	×
3	94.8	5.2	100	1.5	○
4	94.9	5.1	100	1.5	×
5	95	5	100	1.5	×

Table 25. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 11.9%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	0	×
2	94.6	5.4	100	0	×
3	94.7	5.3	100	0	×
4	94.8	5.2	100	0	×
5	94.9	5.1	100	0	×
6	95	5	100	0	×
7	95.2	4.8	100	0	×

Table 26. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 11.9%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	0.5	×
2	94.6	5.4	100	0.5	×
3	94.7	5.3	100	0.5	×
4	94.8	5.2	100	0.5	×
5	94.9	5.1	100	0.5	×
6	95	5	100	0.5	×
7	95.2	4.8	100	0.5	×

Table 27. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 11.9%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	1.0	×
2	94.6	5.4	100	1.0	×
3	94.7	5.3	100	1.0	×
4	94.8	5.2	100	1.0	×
5	94.9	5.1	100	1.0	×
6	95	5	100	1.0	×
7	95.2	4.8	100	1.0	×

Table 28. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 11.9%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	1.5	×
2	94.6	5.4	100	1.5	×
3	94.7	5.3	100	1.5	×
4	94.8	5.2	100	1.5	×
5	94.9	5.1	100	1.5	×
6	95	5	100	1.5	×
7	95.2	4.8	100	1.5	×

Table 29. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 11.8%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	0	×
2	94.6	5.4	100	0	×
3	94.8	5.2	100	0	×
4	95	5	100	0	×
5	95.2	4.8	100	0	×

Table 30. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 11.8%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	0.5	×
2	94.6	5.4	100	0.5	×
3	94.8	5.2	100	0.5	×
4	95	5	100	0.5	×
5	95.2	4.8	100	0.5	×

Table 31. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 11.8%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	1.0	×
2	94.6	5.4	100	1.0	×
3	94.8	5.2	100	1.0	×
4	95	5	100	1.0	×
5	95.2	4.8	100	1.0	×

Table 32. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 11.8%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	1.5	×
2	94.6	5.4	100	1.5	×
3	94.8	5.2	100	1.5	×
4	95	5	100	1.5	×
5	95.2	4.8	100	1.5	×

Table 33. 압력 0 kgf/cm² 및 산소농도 11%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	0	×
2	94.5	5.5	100	0	×
3	94.6	5.4	100	0	×
4	94.8	5.2	100	0	×
5	94.9	5.1	100	0	×
6	95	5	100	0	×

Table 34. 압력 0.5 kgf/cm² 및 산소농도 11%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	0.5	×
2	94.6	5.4	100	0.5	×
3	94.8	5.2	100	0.5	×
4	95	5	100	0.5	×

Table 35. 압력 1.0 kgf/cm² 및 산소농도 11%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	1.0	×
2	94.6	5.4	100	1.0	×
3	94.8	5.2	100	1.0	×
4	95	5	100	1.0	×

Table 36. 압력 1.5 kgf/cm² 및 산소농도 11%에서 폭발한계농도

exp.No.	N ₂ +O ₂ (vol%)	city gas(vol%)	total	test pressure	results
1	94.4	5.6	100	1.5	×
2	94.6	5.4	100	1.5	×
3	94.8	5.2	100	1.5	×
4	95	5	100	1.5	×