



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

Propylene의 화염전파 현상과
폭발특성에 관한 연구



2007年 8月

釜慶大學校大學院

安全工學科

金 兌 根

工學碩士 學位論文

Propylene의 화염전파 현상과 폭발특성에 관한 연구

指導教授：崔 載 旭

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2006年 8月

釜慶大學校大學院

安全工學科

金 兌 根

金兌根의 工學碩士 學位論文을 認准함

2007年 6月



主 審 工學博士 李 來 雨 (인)

委 員 工學博士 李 東 勳 (인)

委 員 工學博士 崔 載 旭 (인)

목 차

Abstract	1
1. 서 론	4
2. 이 론	7
2-1 기체 혼합물의 상태방정식	7
2-2 폭발한계산소농도의 추산	10
2-2-1 폭발한계산소농도	10
2-2-2 계산 값에 의한 폭발한계산소농도	16
3. 실험장치 및 방법	17
3-1 실험장치	17
3-1-1 폭발한계 측정 장치	17
3-1-2 사진촬영법에 의한 폭발현상	22
3-1-2-1 직접 촬영법	22
3-1-2-2 Shadow 촬영법	25
3-2 실험방법	28
3-2-1 폭발한계 측정	28

3-2-2 폭발압력 및 폭발압력상승속도의 측정방법	30
3-2-3 사진촬영 방법	32
3-2-3-1 직접 촬영법	32
3-2-3-2 Shadow 촬영법	34
4. 결과 및 고찰	36
4-1 산소농도변화에 따른 폭발한계	36
4-2 압력변화에 따른 최대폭발압력	40
4-3 압력의 변화에 따른 폭발압력상승속도	44
4-4 사진촬영법에 의한 폭발현상	48
4-4-1 직접 촬영법	48
4-4-2 Shadow 촬영법	53
5. 결 론	57
기 호 설 명	59
참 고 문 헌	60
감사의 글	62

A Study on the Explosion Risk and Fire Transmission Situation of Propylene Gas

Tae-Geun Kim

*Dept. of Safety Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

To examine the characteristics on the explosion behavior of propylene gas, the experiment was done by changing oxygen concentration of oxygen was changed with the change of initial pressure. The result of experiment, we have obtained curve as behavior.

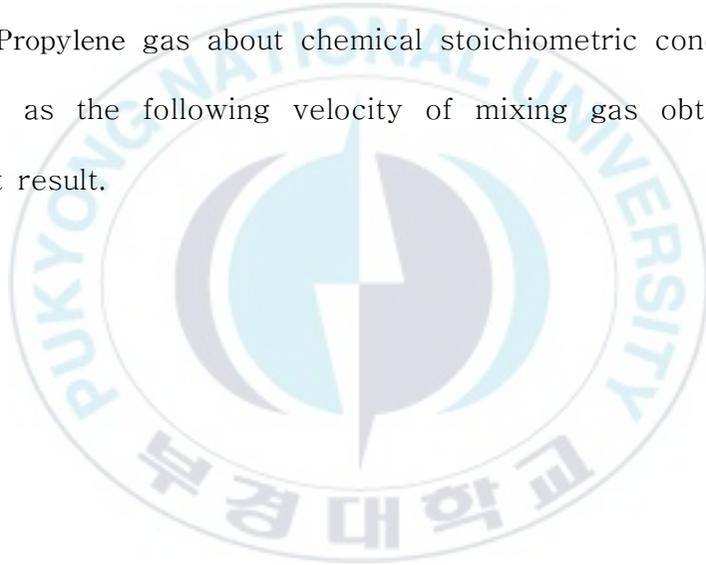
- 1) The explosion limit was different as the initial pressure of Propylene gas was changed; the explosion limits are 2.4~11.6%, 2.3~12.3% and 2.2~12.8% when the initial pressure of its are

1.0bar, 1.5bar and 2.0 bar.

- 2) Minimum oxygen concentration values of each concentration are 10.9%, 10.5% and 10.3% when the initial pressure was 1.0bar, 1.5bar and 2.0bar.
- 3) The maximum explosion pressure of Propylene gas are obtained 7.41bar, 11.47bar and 14.52bar at 5% Propylene gas when the initial pressure are 1.0bar, 1.5bar and 2.0bar.
- 4) The maximum explosion pressure rising rate of Propylene gas was 353.15bar/s, 598.46 bar/s and 794.78bar/s at the concentration of 5% of Propylene gas when the initial pressure are changed to 1.0bar, 1.5bar and 2.0bar.
- 5) As a result of direct picturing explosion phenomenon about Propylene gas, as the pressure increased the fire transmission are increased.
- 6) As a result of direct picturing explosion phenomenon about Propylene gas at equaling time, as the oxygen concentration

decreased the fire transmission are increased.

- 7) As a result of shadow picturing explosion phenomenon method about Propylene gas , as the pressure increased the following velocity of mixing gas are increased.
- 8) As a result of shadow picturing explosion phenomenon method about Propylene gas about chemical stoichiometric concentration at 5%, as the following velocity of mixing gas obtained the highest result.



1. 서 론

불은 우리 생활에서 없어서는 안 되는 도구가 되었고, 화염을 발생시키는 연료는 매우 중요한 수단이 되었다. 이러한 에너지원으로부터 발생하는 열에너지를 가정생활이나 산업활동에 이용하고 있으며, 산업혁명 당시 사용된 고체·액체 화석연료는 연소 시에 황산화물이나 질소산화물 등 유독한 가스를 다량으로 배출하여 대기오염을 가속화 시켰다. 그 후 기체연료가 개발되어 사용되어짐에 따라 연소에 의한 공해물질은 줄어들게 되었으며, 그 중에서도 도시가스는 단위질량당 발열량이 크고 경제적으로 가격이 저렴하여 그 사용량이 매년 증가하는 추세를 나타내었다.^{1),2)}

특히 도시가스가 파이프라인을 통하여 수요자에게 공급하는 연료가스로 LPG, LNG를 원료로 사용한다. 현재 우리나라의 일부 지역에서는 LPG+Air방식의 도시가스를 공급하고 있으나, 대부분 청정연료 천연가스(LNG)로 교체됨에 따라 보다 친환경적인 이점 때문에 그 수요가 급증하고 있다. 이런 이유로 우리나라에서는 신도시나 대단지 아파트건설 현장에서 도시가스를 공급할 수 있는 설비를 갖추고 있다.³⁾

그러나 고체연료나 액체연료 보다 취급 시에 각별한 주의를 기울여야 하는 기체연료는 원인별 사고현황을 분석하면(2006년 기준) 취급 부주의로 인한 사고가 전체 가스사고의 42%, 시설미비 30.4%, 공급자취급부주의 7.1%, 기타 20.5%를 차지하고 있다. 그 중 가스의 취급미비로 인한 사

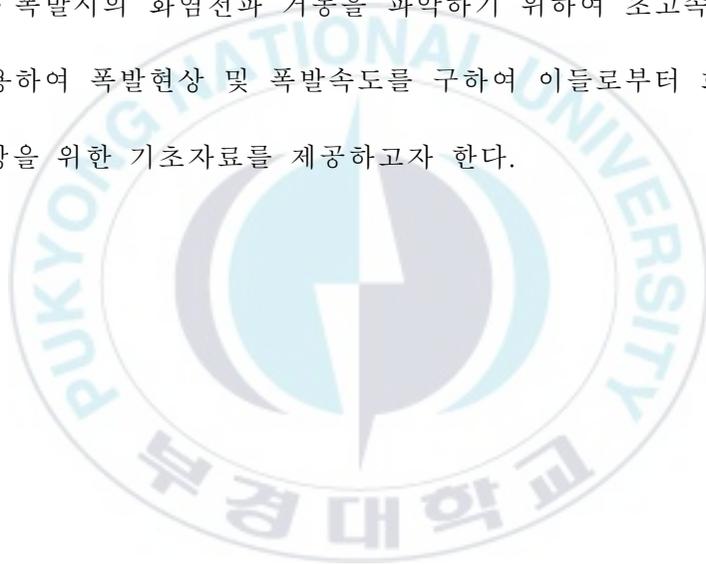
고로서 부산 사상구 감전동 ○○(주) 폭발사고, 서울 중구 신당동 찜질방 폭발사고, 대전 중구 목동 연립주택 화재사고 등을 들 수 있으며, 이들 사고는 인명피해와 함께 많은 재산 손실을 초래하였다.^{4),5)}

가스폭발에 의한 폭발상태는 압력에너지의 축적상태에 따라 크게 달라진다. 예를 들면 개방공간에서 가연성 혼합기체가 형성되어 있을 때 착화되면 누설규모가 작을 때는 압력파는 거의 생기지 않으며, 압력상승에 기인하는 피해는 거의 없다. 그러나 건물의 내부 등 밀폐 공간 내에서의 폭발은 압력이 크게 상승하고, 밀폐공간을 구성하는 벽면 등에 강력한 충격파를 주어 큰 피해를 발생시키며, 축적된 압력에너지가 압력파로서 외부로 방출됨으로써 인접한 건물, 설비 및 사람들에게 큰 피해를 준다. 개방공간에서보다 밀폐공간에서 폭발이 발생할 경우 폭발압력에 의한 파괴효과는 더욱 증가한다.^{6),7)}

폭발 위험성을 평가하기 위한 주요 특성으로서는 폭발하한계(lower explosive limit), 최대폭발압력(maximum explosion pressure), 폭발압력상승속도(rate of explosion pressure rise) 등이 있으며, 이러한 가스폭발의 연구사례로는 국내에서는 오 등⁸⁾이 가연성 가스에 대한 폭발 위험에 관한 연구를 하였으며, 최 등^{9)~11)}이 도시가스에 대한 폭발 위험성에 대하여 평가한 바 있다. 국외에서는 Tsurumi 등¹²⁾이 밀폐용기의 가스폭발에 관한 평가방법과 Ohsawa 등¹³⁾의 고진압 영역에 대한 메탄의 점화한계에 관한 연구 등이 있으나, 가스폭발시의 화염의 전파 거동에 관한 연구의 자

료는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 액화석유가스의 연료로 사용되고 있으며, 중합가솔린의 제조원료, 이소프로필 알코올, 아세톤, 프로필렌옥시드, 프로필렌글리콜, 알릴알코올, 글리세롤 등의 첨가·중합반응에 의한 합성물질을 제조하는 등 매우 광범위하게 사용되고 있는 Propylene을 시료로 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발범위 및 폭발한계산소농도를 측정하였다. 또한 화재·폭발시의 화염전파 거동을 파악하기 위하여 초고속카메라 측정법을 이용하여 폭발현상 및 폭발속도를 구하여 이들로부터 화재·폭발사고의 예방을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.



2. 이 론

2-1 기체 혼합물의 상대 방정식

두 가지 이상으로 혼합되어 있는 기체 혼합물의 경우에 각 물질의 혼합 조성비는 압력이나 부피에 의존하게 되며, 혼합기체 속에 들어있는 각 물질의 몰수의 합은 전체 혼합기체의 몰수가 되고, 각각의 몰수는 각 성분기체의 농도, 즉 양을 나타낸다. 그러나 전체 혼합기체의 경우에 일정압력에서 부피 변화나 일정부피에서 각각의 압력이 변화하게 되면 각 성분의 농도가 변하게 되므로 물리화학적 조성을 나타내는 것은 몰분율의 형태로 표시하는 것이 더욱 편리하게 사용된다. 여기에서 몰 분율 x_i 는 혼합되어 있는 각 물질의 몰수의 합이다.

$n_t = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$ 에서 각 몰수를 나누면 식 (1)과 같으며 혼합물 속에 존재하는 모든 물질의 몰분율의 합은 1로써 식 (2)와 같다.

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

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

식 (2)에 의해 한 물질의 몰분율을 모르더라도, 나머지 물질들의 몰분율

만 알면 그 혼합물질의 조성을 알 수 있고, 물분율 자체가 혼합기체의 부피, 압력 및 온도에 무관한 함수이기 때문에 보통 물분율로 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 T에서 부피가 V인 용기 속에 몰수가 n_1, n_2, n_3 인 세 기체가 혼합되어 있다고 가정하면, $n_i = n_1 + n_2 + n_3$ 가 되고, 이 혼합기체의 압력은 식 (4)와 같이 구할 수 있으며,

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

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. 분압법칙은 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^{14),15)}

2-2-1 폭발한계산소농도

가연성가스 및 인화성액체를 취급하는 설비에서 화재·폭발을 예방하기 위하여 불활성가스를 첨가하여 혼합가스중의 산소농도를 일정 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 두 직선의 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. 이 직교 좌표는 원점을 공기성분으로 하는 직각 삼각도를

사용하여 나타낸다.

Fig. 1의 XY좌표에서 하한계선은 $L_1(0, b)$ 을 통과하는 X축에 평행한 직선이며, 양론선은 $C_{st}(0, a)$ 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) 과 (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 농도로써 표시하는 것은 Fig. 1에 있어서 A(0, 100)와 L₃[(1-b/a)×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)으로부터 구해진다.

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

Fig. 1과 2는 식 (10)과 (13)의 한계산소농도의 관계를 나타내며, 계산치를 비교하면 하한계 L₁의 값이 높을수록 양자의 차가 크나 하한계치가

비교적 낮은 유기화합물에서는 일반적으로 무시할 수 있는 정도의 차이다.

또한 불활성가스가 탄산가스 또는 수증기의 경우에는 대부분 한계산소농도의 값이 질소의 경우보다 약간 높으므로 질소를 사용하는 것이 적당하다.



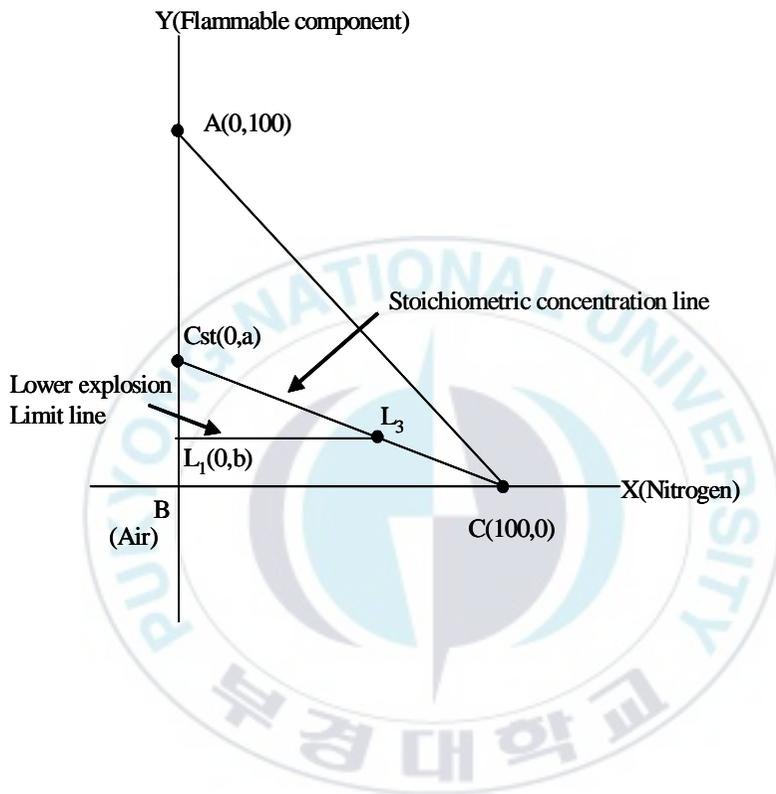


Fig. 1 Explosion range diagram of three-component system.

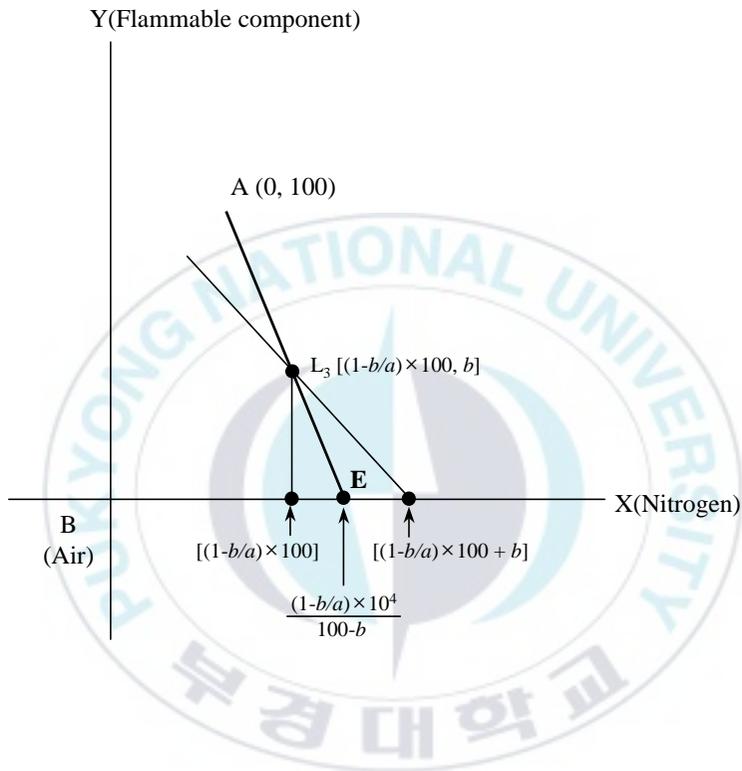


Fig. 2 Relationship between two kinds of critical oxygen concentration.

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.¹⁴⁾

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

3. 실험장치 및 방법

3-1 실험장치

3-1-1 폭발한계 측정 장치

가스폭발한계를 측정하는 장치로써는 전과법과 버너법이 있으며, 이 중에서 전과법은 원통형 또는 구형의 용기 내에 혼합가스를 넣고 한쪽에서 점화하여 화염이 전체로 확산되는 한계조성을 결정하는 방법이고, 버너법은 버너위에 안정된 화염이 가능한 혼합가스 조성의 한계치를 결정하는 방법이다.^{16),17)}

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

폭발통부는 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 시에 발생하는 타르 등의 이물질을 제거할 수 있도록 개폐가 가능한 구조로 하였다. 그 외의 부분은 두께 21.3mm의 스테인 레스로 제작하였다. 용기에는 가스주입 시 농도를 확인할 수 있도록 디지털 압력계(PG-200-102G, Copal Electronics CO., LTD)

를 부착하였으며, 폭발 시에 압력 측정을 위해 용기 상부에 0 ~ 30 kgf/cm²까지 측정할 수 있는 압력센서(PE-30KF, Kyowa Electronics Co., LTD)를 부착하였다.

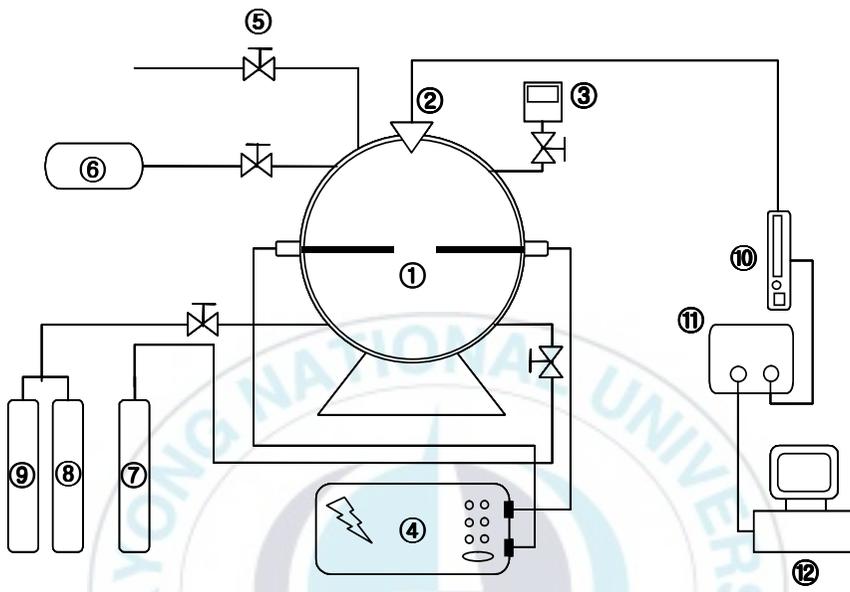
폭발통 양측부에는 전기에너지를 공급할 수 있도록 점화전극을 용기의 중앙부에 설치하였다. 또한, 용기의 양측부에 3개의 가스주입밸브를 설치하여 이들을 진공흡입구, 가스주입구, 산소·질소주입구로 이용하였다.

진공부는 진공펌프와 배기밸브로 구성되어 있고 에너지공급부는 점화원의 역할을 하는 부분으로써 용량방전형 콘덴서, 가스봉입형 고전압스위치, 방전제한저항, 무유도저항 등으로 구성되어 있다. 용량방전형 콘덴서는 설정된 전압을 충전하는 역할을 하며, 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 2개가 장치되어 있는데 고주파 진동을 제어하기 위한 500Ω의 무유도저항과 전류 검출용의 무유도저항(50Ω)을 사용하였으며, 접지선에 연결되어 있다.

폭발에너지 측정·저장부는 에너지 증폭기인 앰플리파이어(DA-16A, Tokyo Sokki Kenkyujo) 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 폭발발생시 발생하는 폭발압력은 (주)엘텍인스트루먼트에서 제작된

TPMeas를 통해 실시간으로 모니터링하고 수치화시킬 수 있다. 폭발통에 부착된 압력센서의 신호는 증폭기를 통해 증폭시킨 후 A/D 변환기를 통해 신호를 변환시키고, 변환된 수치는 압력변화 및 그 값을 데이터화시켜 컴퓨터에 저장된다. 이 데이터를 가지고 최대폭발압력과 폭발압력상승속도를 계산하였고, 최소착화에너지 측정 시에는 오실로스코프 상에 파형이 나타나도록 하여 이것을 컴퓨터로 처리하여 수치화한 다음에 프로그램을 통하여 최소착화에너지 값을 계산할 수 있도록 구성하였다.





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

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.



Photo 1 The picture of experimental apparatus.

3-1-2 사진촬영법에 의한 폭발현상

3-1-2-1 직접 촬영법

가스폭발 현상을 촬영하기 위한 기법으로는 화염을 촬영하기 위한 직접 촬영법과, 폭발 전 공기의 유동을 촬영하기 위한 Shadow촬영기법이 있다.

그중 직접촬영법은 자연광이 있는 상태에서 빛의 강약을 조리개로 조절하여 폭발 시에 발생하는 화염을 촬영하는 기법으로, 폭발 시에 화염의 형상과 화염전파 시간을 측정하기 위한 장치이다.

Fig. 4는 폭발현상을 직접 촬영하는 개략도를 나타내었으며, 폭발통 · 초고속카메라 · 데이터 저장장치 등을 Photo 2에 나타내었다. 초고속 카메라는 PANTOM사에서 만든 V7.2모델로, 48만화소의 사진을 초당 10,000 프레임(사이즈 크기 : 512×512)이상으로 촬영할 수 있는 카메라이다.

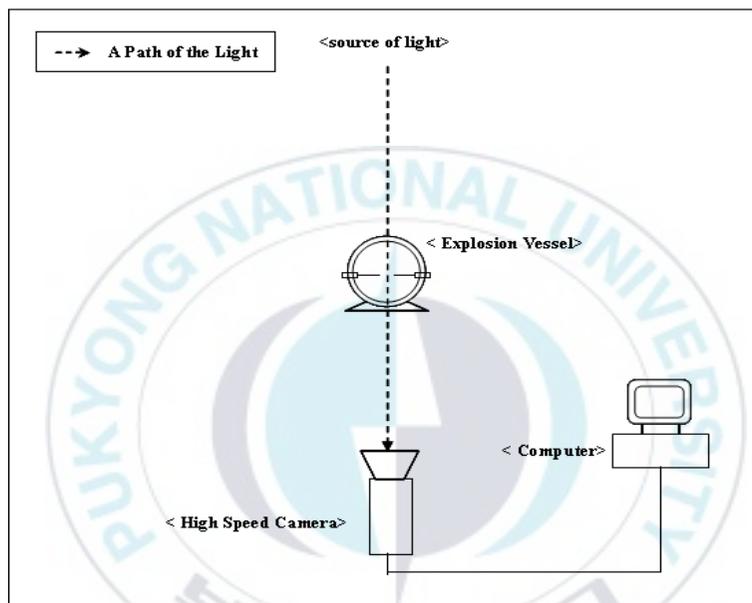


Fig. 4 The principle of direct photographing techniques for explosion appearance.



Photo 2 The picture of direct photographing techniques for explosion appearance.

3-1-2-2 Shadow 촬영법

Fig. 5와 Fig. 3은 Shadow촬영법의 장치 개략도와 장치사진이다. Shadow 촬영기법은 자연광이 없는 상태에서 인공의 광원 가운데 핀홀을 이용하여 광원의 일부를 오목거울을 이용하여 폭발 통에 통과시켜 폭발 시에 공기의 유동을 촬영하기 위한 기법이다.

초고속 카메라는 직접촬영에 사용한 카메라와 동일하고, 장치에 사용된 광원은 정격용량이 250W인 전등으로 앞쪽에 1mm의 핀홀을 달아 극히 제한된 파장의 광원만을 투과하도록 만들었다. 영상을 저장하는 컴퓨터에는 카메라 제조사에서 만든 PANTOM-630이라는 프로그램을 통하여 컴퓨터로 재생할 수 있어, 폭발현상 관찰 및 공기의 유동속도를 구할 수 있다. 또한 빛의 반사에 의한 촬영을 위하여, 두께3, 직경15cm의 오목거울 2개를 사용하였다.

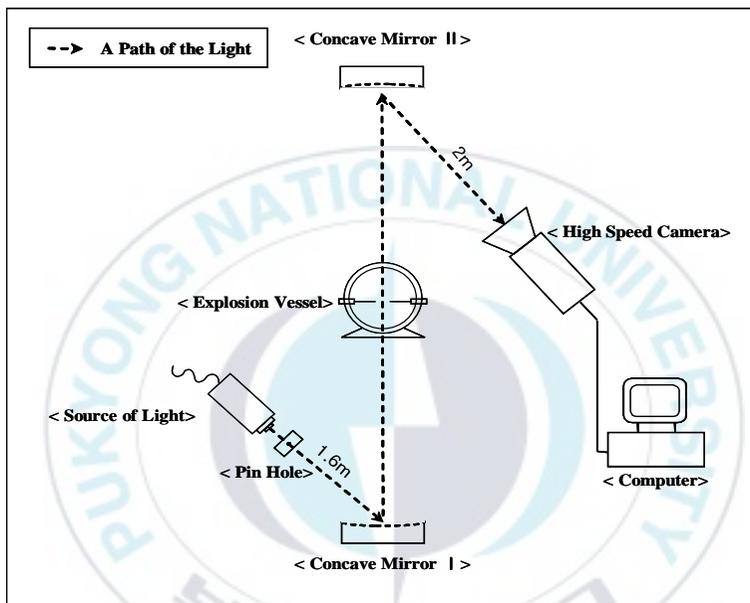


Fig. 5 The principle of shadow photographing techniques for explosion appearance.



Photo 3 The picture of shadow photographing techniques for explosion appearance.

3-2 실험방법

3-2-1 폭발한계 측정

가스 폭발의 경우에는 온도와 습도에 따라서 폭발거동이 다르므로 실험의 재현성을 높이기 위하여 온도 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$, 습도 $50\pm 5\%$ 의 항온·항습실에서 실험을 행하였다. 가스의 농도변화에 대한 실험을 수행하기 위하여 폭발통에 주입하는 산소, 질소는 순도 99%의 것을 사용하였으며, 실험은 다음의 순서에 의해 진행하였다.

- (1) 폭발통 내부는 진공펌프를 사용하여 상부에 설치된 압력계가 $-1.000\text{ kgf/cm}^2\text{.G}$ 까지 진공을 만든다.
- (2) 기체 혼합물의 상대방정식으로 계산된 압력의 수치만큼 시료의 양을 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) 폭발 시 온도와 압력으로 오실로스코프상에 나타난 파형을 컴퓨터로 읽어 들여 저장한 다음 계산한다.

가스의 폭발한계를 결정하기 위하여 시료농도를 3%씩 변화시켜 실험하

였으며, 폭발하한과 상한의 부근에서는 0.1%범위의 농도에서 3회 이상 실험하여 1회라도 폭발했을 때의 최소농도를 폭발하한계로 최대농도를 폭발상한계로 하였다.



3-2-2 폭발압력 및 폭발압력상승속도의 측정방법

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 TPMeas에 기록된다. 여기서 시간의 변화에 따라서 폭발압력의 값을 확인할 수 있으며, 시간에 대한 압력의 변화값을 통해 각각의 시간에 대한 폭발압력상승속도를 구하였고, 이들 중에 가장 큰 값이 최대폭발압력상승속도이다.

Fig. 6은 폭발시에 온도와 압력의 측정 장치를 통해 실시간으로 시간에 대한 압력변화를 파형으로 형상화되어 보여주는 예이며, 여기서 측정된 수치를 가지고 폭발압력과 폭발압력상승속도를 구하였다.

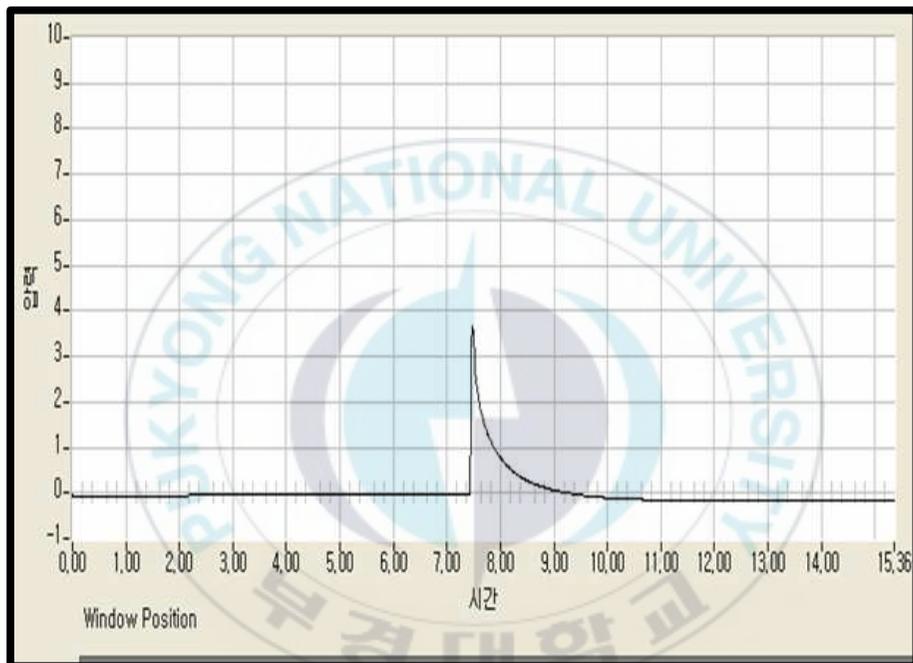


Fig. 6 The wave pattern of the temperature and pressure from the measurement program.

3-2-3 사진촬영 방법

3-2-3-1 직접 촬영법

초고속 카메라의 촬영에 영향을 미치는 요소로는 광원의 밝기, 셔터의 노출속도, 카메라의 프레임 수 조절 등이 있다. 직접촬영법이나, Shadow 촬영법에 따라 이 요소들은 변화되어야 하고 날씨에 따라서도 이러한 조건들은 영향을 받는다. 따라서 이상적인 촬영을 위해서는 이러한 조건들을 적절하게 변화시켜야 한다. 특히 직접촬영법은 자연광원을 사용하기 때문에 빛의 조도에 특별히 신경 써야 한다. 본 실험에서는 빛의 광원을 일정하게 하기 위해서 실험실에 블라인드를 친 후 실내조명을 이용하여 촬영을 하였다.

일정한 조명을 유지한 상태에서 시료 및 산소와 질소를 원하는 농도만큼 주입하고, 카메라를 촬영하기 위한 최적의 조건으로 조절한다. 실험의 준비가 완료되면, 점화와 동시에 PANTOM-630 프로그램을 가동하여 폭발시의 화염을 촬영한다. 폭발된 동영상은 프로그램을 통하여 다시 분석할 수 있으며, Fig. 7은 프로그램을 통하여 시간에 따른 화염전파 현상을 촬영하는 예를 나타내었다.

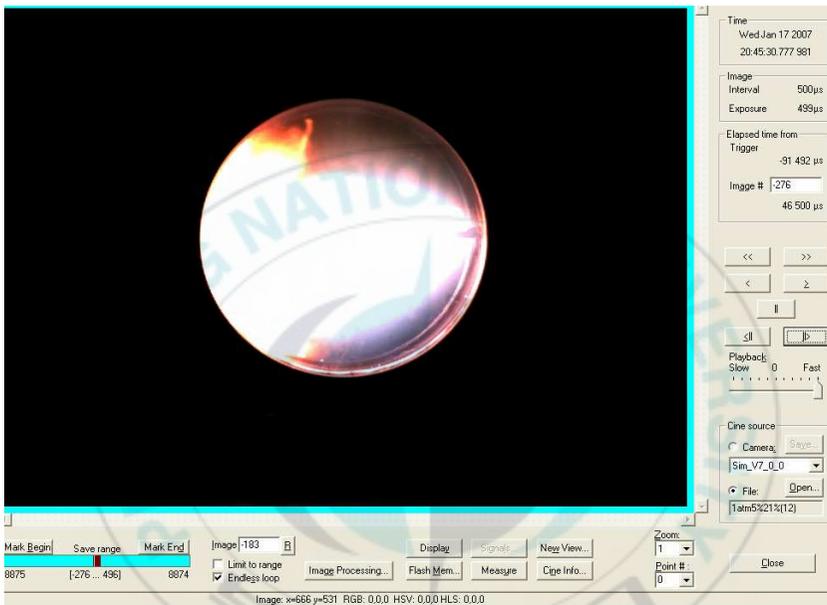


Fig.7 The explosion determined from the PANTOM-630 program.

(direct photographing techniques)

3-2-3-2 Shadow 촬영법

Shadow촬영법은 직접촬영법과 달리 주위의 광원을 모두 제거한 다음 핀홀을 이용하여 극히 제한된 파장의 빛만을 이용하여 촬영한다. 따라서 Shadow촬영법에서 주의해야 하는 부분은 주위의 광원을 효과적으로 차단하는 것이다. 본 실험에서는 광원을 원천적으로 봉쇄하기 위하여 실험실 주위의 창을 블라인드를 이용하여 빛을 차단하여, 실험의 효과를 극대화 하였다.

Shadow촬영을 위해서는 극히 제한된 양의 빛을 효과적으로 폭발통으로부터 카메라에 전달하기 위해서 오목거울을 이용한다. 이때 거울의 위치가 중요하므로 정확한 거리를 설정하는 것이 대단히 중요하다.

촬영된 영상은 PANTOM사에서 개발한 자체 프로그램에 의해 영상으로 저장되고, 이 영상을 재생하여 시간의 변화에 따른 폭발현상을 관찰할 수 있으며, 시간에 따른 거리변화를 측정하여 공기의 유동속도를 구할 수 있다.

Fig. 8은 PANTOM-630 프로그램을 통하여 시간에 따른 공기유동의 변화를 주어 촬영한 결과를 나타낸 것으로서, 프로그램에 내장되어 있는 기능을 이용하여 중심부로부터 시간의 변화에 따른 공기의 유동의 형상을 구할 수 있다.

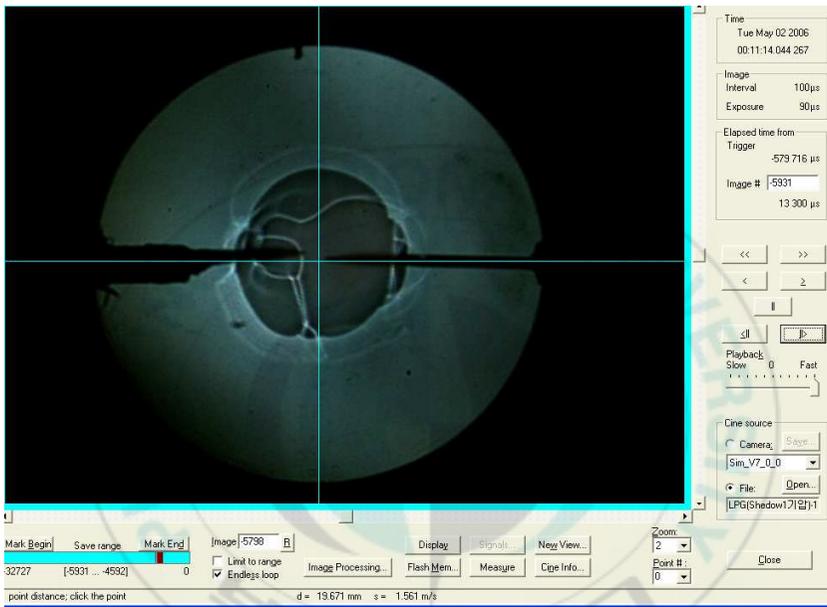


Fig.8 The explosion determined from the PANTOM-630 program.

(shadow photographing techniques)

4. 결과 및 고찰

4-1 산소농도변화에 따른 폭발한계

가연성 가스와 지연성 가스의 혼합 상태에서 점화원이 가해진다고 해서 항상 폭발이 일어나지는 않으나, 이 때 가연성 가스가 폭발범위 내에 있을 경우에는 폭발이 일어난다. 이러한 폭발범위의 정확한 측정은 가스폭발사고 방지대책의 가장 기본적이고 중요한 사항이다.

Fig. 9, 10, 11은 Propylene과 산소농도의 변화에 따른 폭발 특성치를 나타낸 것으로 산소농도 21%에서 압력이 1.0, 1.5, 2.0bar로 변화시켰을 때 폭발한계는 2.4~11.6%, 2.3~12.3%, 및 2.2~12.8%로 넓어진다는 것을 알 수 있었다.

또한 산소농도가 감소함에 따라 하한계는 거의 변화가 없었으나 상한계는 급격하게 감소하였으며, 연소에 필요한 최소산소농도(minimum oxygen concentration : M.O.C)는 1bar에서 10.9%, 1.5bar에서 10.5%, 2bar에서 10.3%를 구하였다. 따라서 압력이 증가함에 따라 M.O.C가 낮아지므로 가압상태에서는 산소농도에 대한 관리가 필요하다.

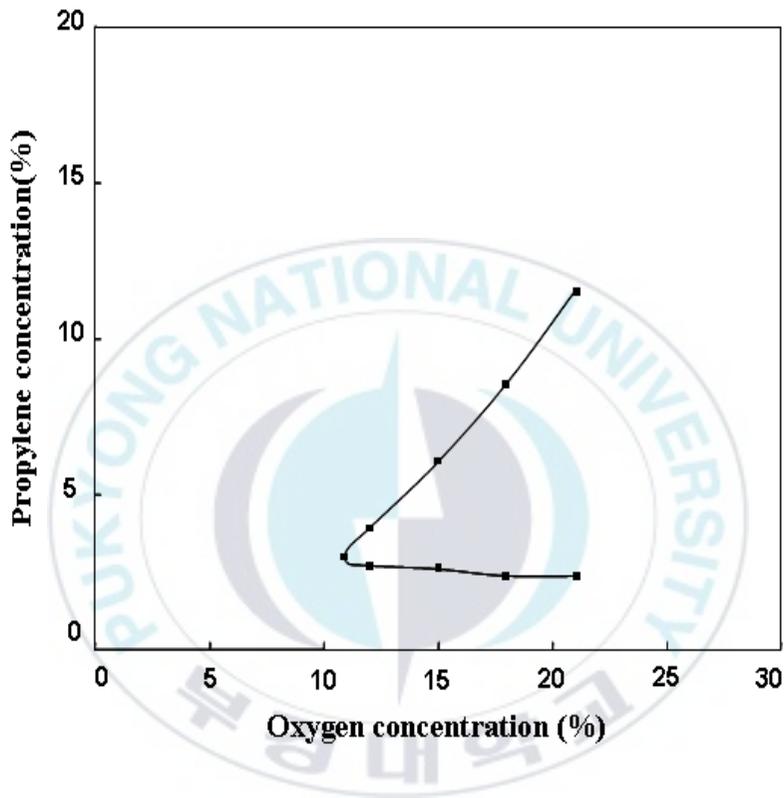


Fig. 9 Explosion behavior between propylene gas and oxygen concentration variation at 1.0bar.

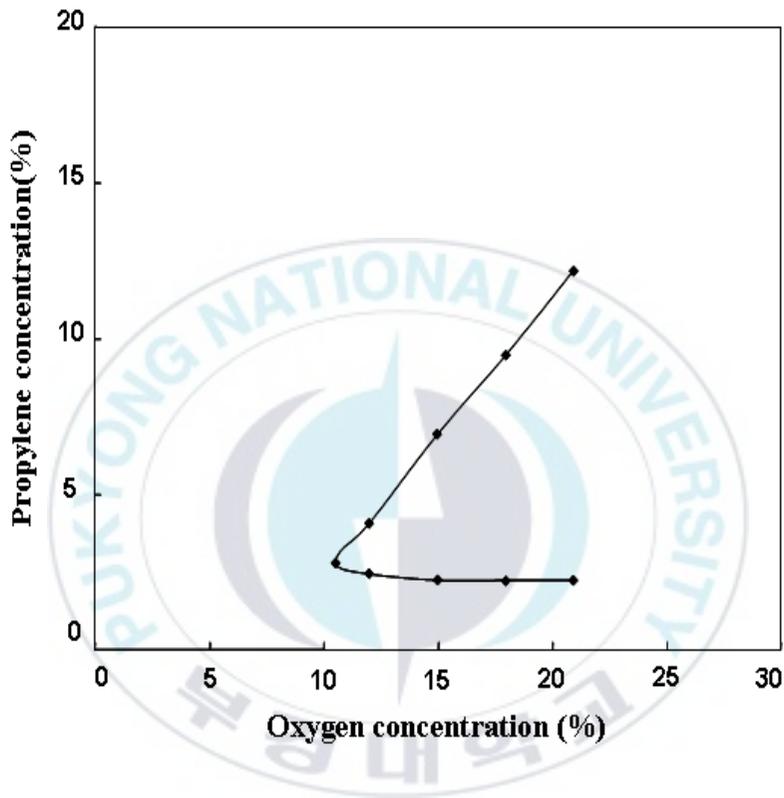


Fig. 10 Explosion behavior between propylene gas and oxygen concentration variation at 1.5bar.

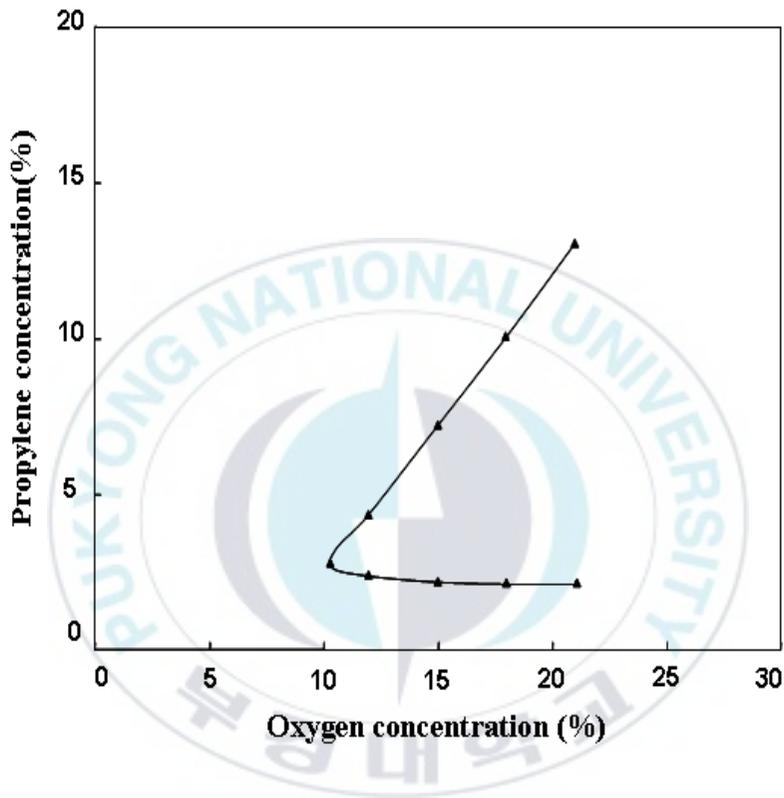


Fig. 11 Explosion behavior between propylene gas and oxygen concentration variation at 2.0bar.

4-2 압력변화에 따른 최대폭발압력

폭발압력은 가연성 물질을 다루는 공정에서 매우 중요한 특성이다. 가연물의 최대폭발압력에 따라 설계를 위한 용기의 두께가 달라지고, 기타 안전장치도 다르기 때문이다.

Fig. 12, 13, 14는 산소농도 21%, Propylene농도 5%에서 초기압력을 변화시켜 최대폭발 압력을 나타낸 것으로서, 초기압력이 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar로 변화함에 따라 최대폭발압력은 7.41bar, 11.47bar, 및 14.52bar 로 증가하였다. 이는 일반적으로 밀폐계에서 폭발이 일어날 때 초기압력, 기체의 몰수변화, 온도의 변화 등에 의존하기 때문에 압력이 증가할수록 최대폭발압력이 증가하는 것으로 사료된다..

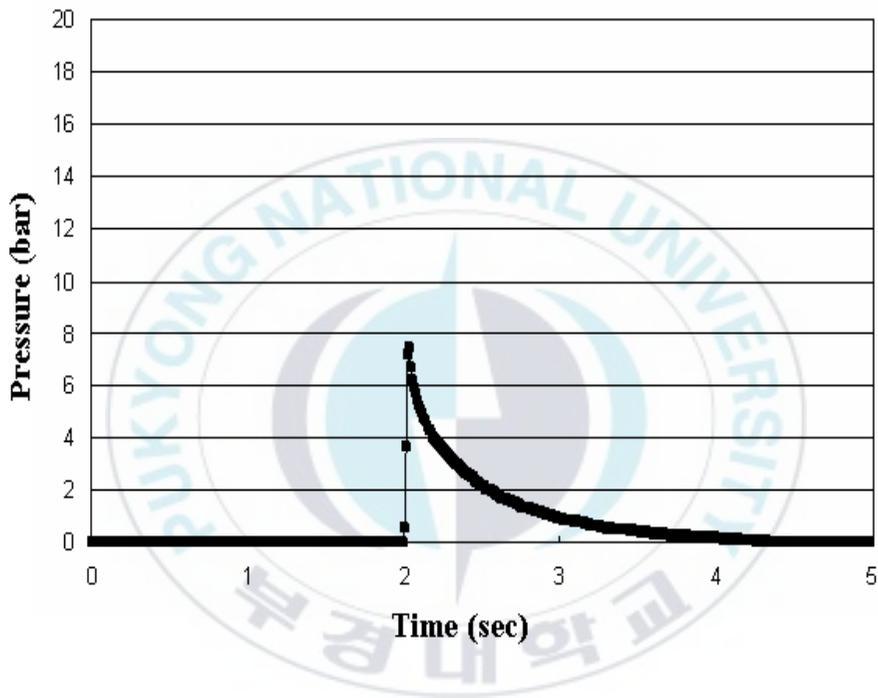


Fig. 12 Explosion pressure behavior of propylene gas at 1.0bar.

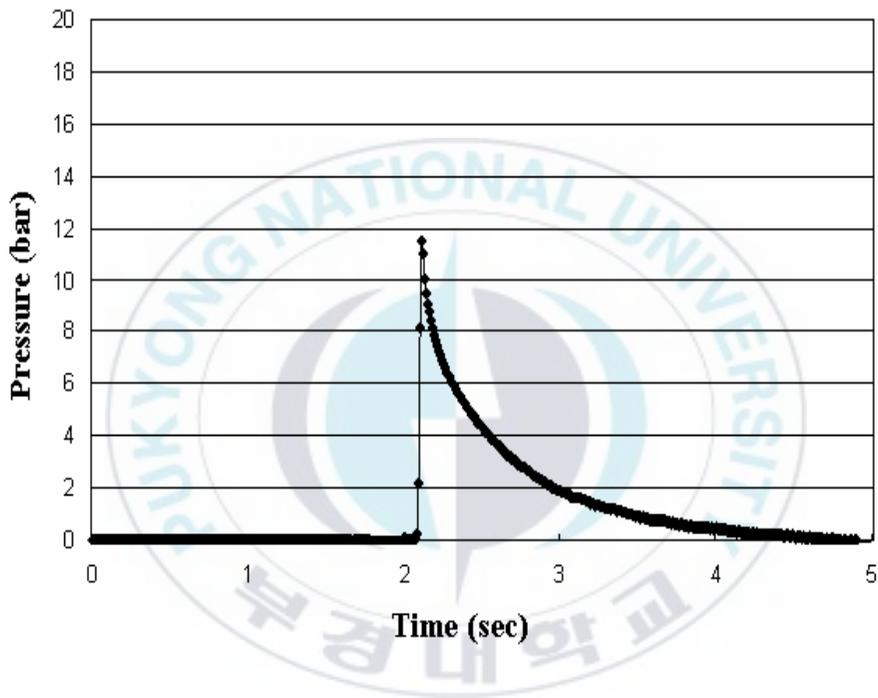


Fig. 13 Explosion pressure behavior of propylene gas at 1.5bar.

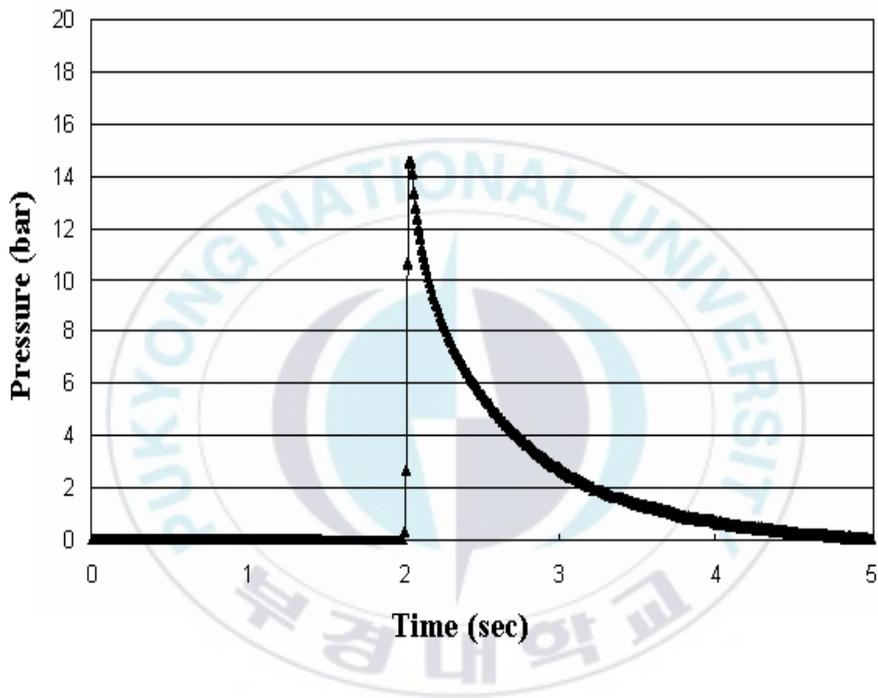


Fig. 14 Explosion pressure behavior of propylene gas at 2.0bar.

4-3 압력의 변화에 따른 폭발압력상승속도

Fig. 15, 16, 17은 초기압력의 변화에 따른 폭발압력상승속도를 나타낸 것으로써 초기압력이 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar로 증가함에 따라 폭발압력상승속도는 353.15bar/s, 598.46bar/s, 및 794.78bar/s로 증가함을 알 수 있었다. 이는 초기압력이 증가할수록 용기 내 분자간의 충돌횟수가 증가하기 때문에 폭발압력상승속도가 상승하는 것으로 사료된다.

따라서 반응기의 초기압력이 높은 사업장에서는 반응기의 제작을 위한 설계를 할 경우, 압력에 따른 재료 및 반응기의 두께 선정에 유의하여야 한다.



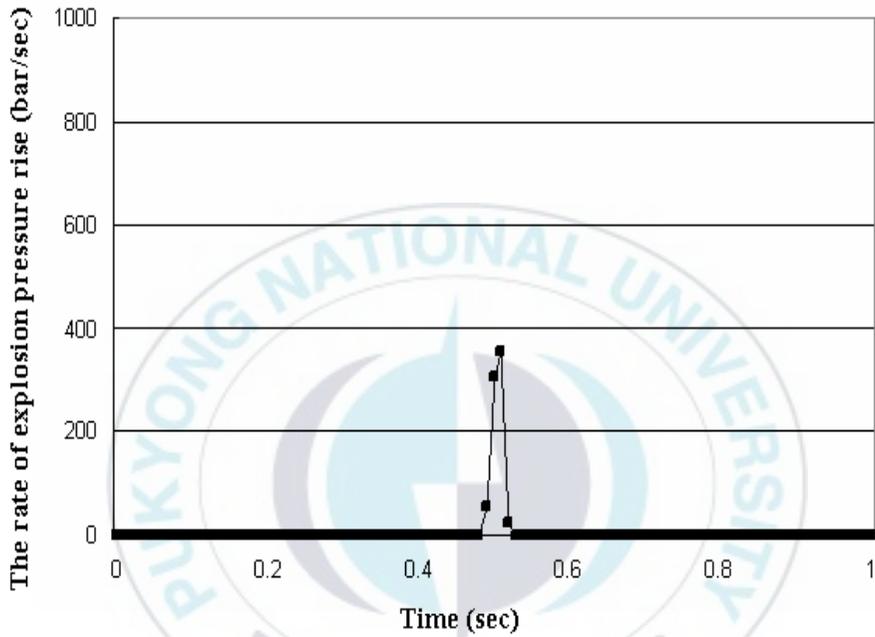


Fig. 15 Explosion pressure rising velocity rate of propylene gas at 1.0bar.

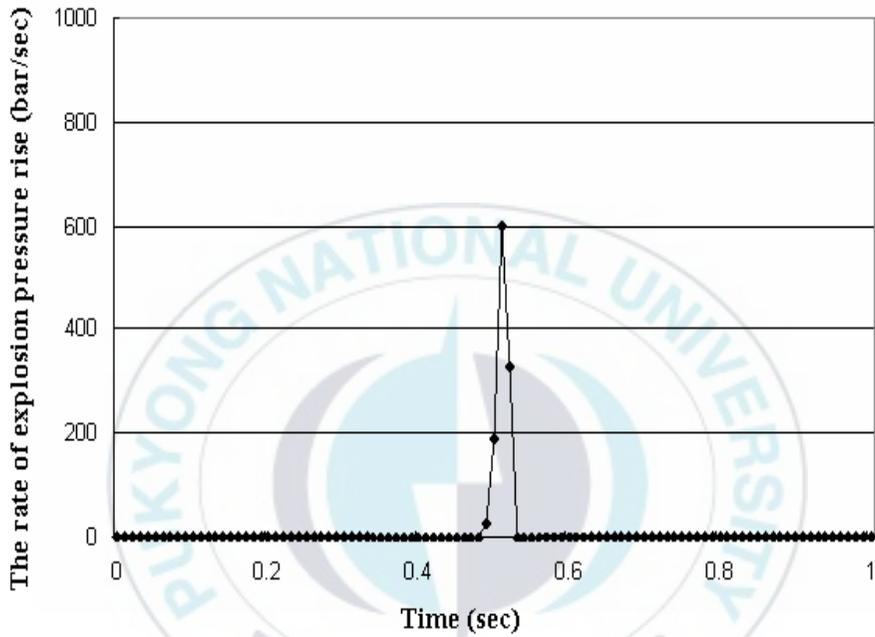


Fig. 16 Explosion pressure rising velocity rate of propylene gas at 1.5bar.

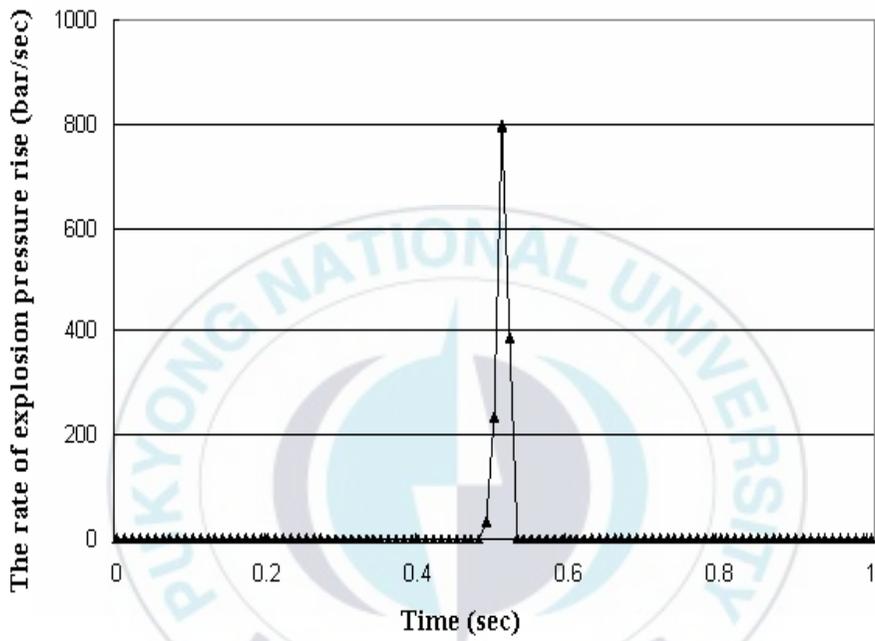


Fig. 17 Explosion pressure rising velocity rate of propylene gas at 2.0bar.

4-4 사진촬영법에 의한 폭발현상

4-4-1 직접 촬영법

가연성 가스가 착화원에 의하여 폭발되면, 농도의 조성과 압력에 따라서 화염의 전파현상이 다르게 나타난다.

Photo 4는 초기압력이 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar로 변할 때, Propylene의 농도가 5%이고, 산소농도 21%에서 점화 후 지연시간이 각각 20,000 μ s, 40,000 μ s, 60,000 μ s에 도달했을 때, 폭발현상을 촬영한 것으로서 1.0bar에서 40,000 μ s 이후에는 화염이 소멸되고 있으나, 1.5bar, 2.0bar에서는 60,000 μ s까지 화염의 전파가 강하게 나타나고 있다. 이는 압력이 증가할수록 용기 내에 연소 가능한 농도가 충분하기 때문에 폭발강도가 늦게 나타나는 것으로 사료된다.

Photo 5는 초기압력이 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar로 변할 때, Propylene의 농도 5%일 경우 산소농도 18%에서 지연시간을 각각 50,000 μ s, 100,000 μ s, 150,000 μ s로 했을 때, 폭발현상을 촬영한 것으로서 동일한 지연시간에서 압력이 증가할수록 화염의 강도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 산소의 농도가 연소에 필요한 화학양론 조성의 농도가 되기 때문이고, 산소의 농도가 낮을 경우에는 산소의 부족으로 화염의 전파가 어렵기 때문으로 사료된다.

Photo 6은 초기압력이 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar로 변할 때, Propylene의 농도 5%에서 산소의 농도를 21, 18, 15%로 변화시켜, 70,000 μ s에 도달하였

을 경우 촬영한 결과로써 산소의 농도가 높을수록 화염의 연소현상이 뚜렷하게 나타났다. 또한 동일한 산소의 농도일 경우에 있어서 압력이 증가할수록 화염의 전파가 강하게 나타나고 있다. 이는 압력이 증가함에 따라 연소가 가능한 농도가 충분하기 때문으로 사료된다.



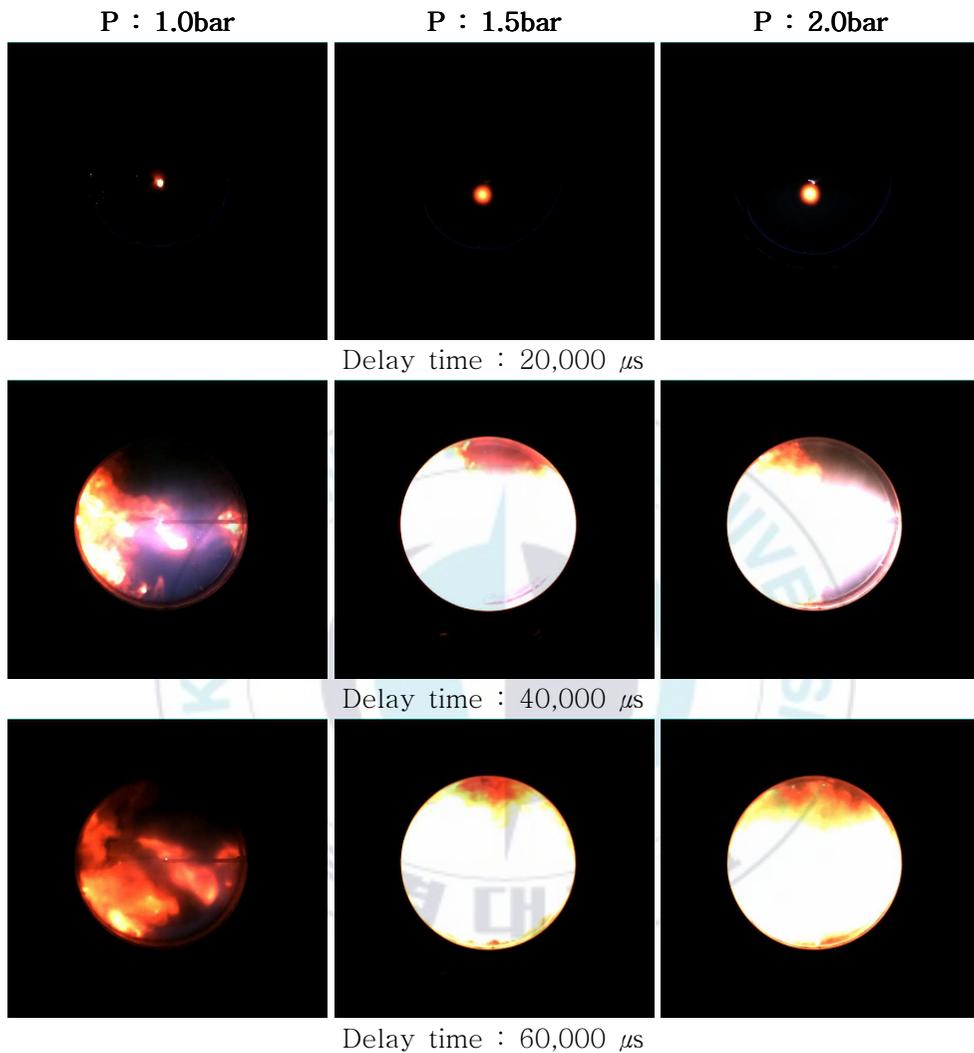


Photo 4 The explosion picture of 5% propylene gas and 21% oxygen gas at 1.0, 1.5, 2.0bar.

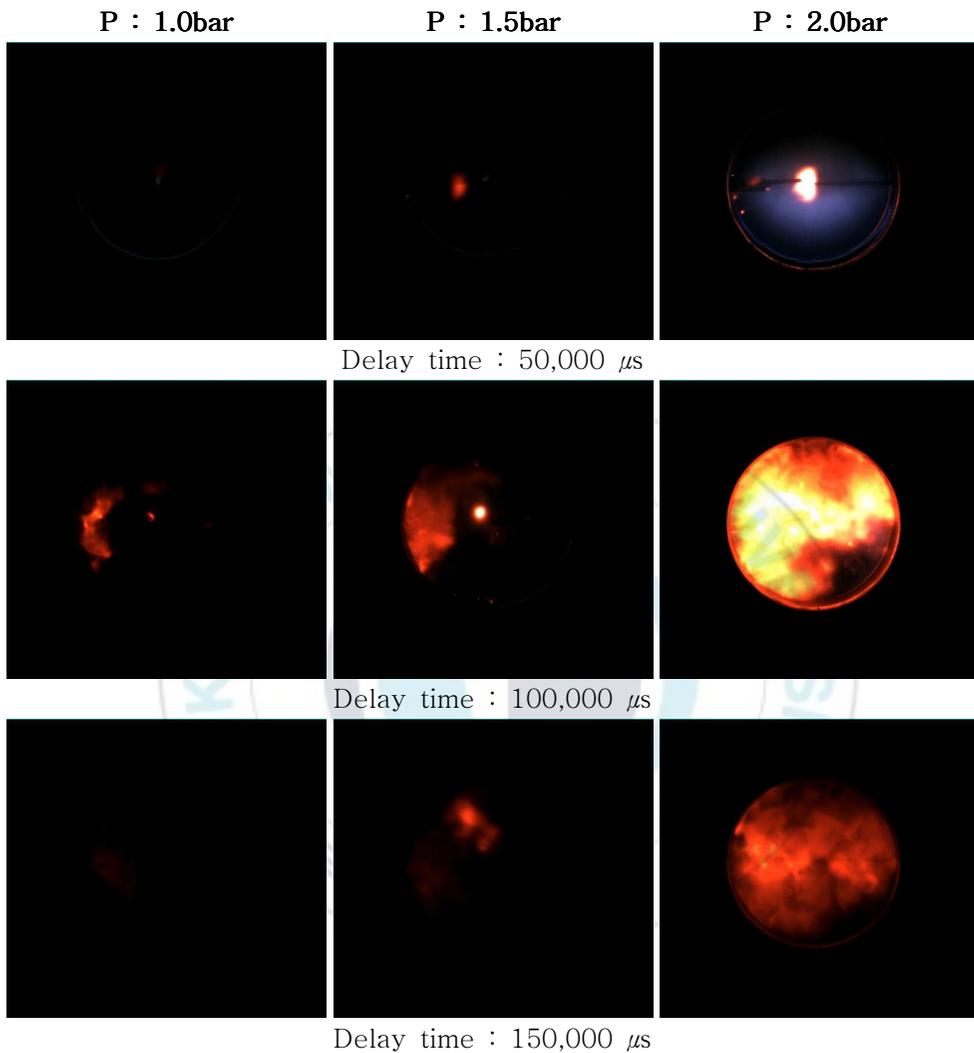


Photo 5 The explosion picture of 5% propylene gas and 18% oxygen gas at 1.0, 1.5, 2.0bar.

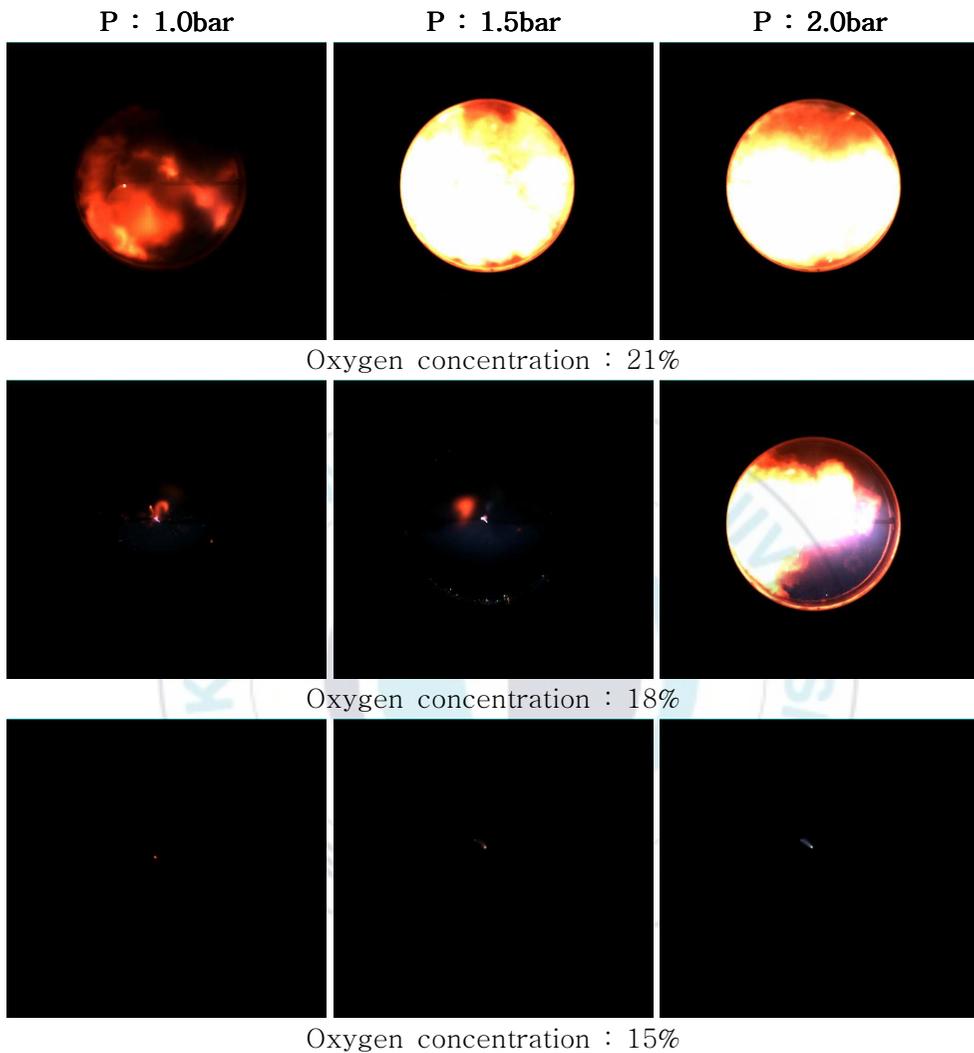


Photo 6 The explosion picture of 5% propylene gas and 70,000 μ s delay time at 1.0, 1.5, 2.0bar.

4-4-2 Shadow 촬영법

Photo 7은 초기압력이 1.0, 1.5, 2.0bar로 변할 때, Propylene의 농도 5% 일 경우 산소농도 21%에서 점화 후 지연시간을 각각 20,000, 40,000, 60,000 μ s로 했을 때, Shadow방법을 이용하여 기체의 유동을 촬영한 것으로써 동일한 지연시간에서 압력이 증가할수록 시료와 산소의 혼합물질의 유동속도가 증가하는 것으로 나타났다.

Photo 8은 초기압력이 1.0, 1.5, 2.0bar로 변할 때, Propylene의 농도 5%에서 산소의 농도를 21%, 18% 및 15%로 변화시켜 25,000 μ s에서의 촬영결과로써 동일한 농도에서는 압력이 증가할수록 유동속도가 빠르게 나타났으며, 산소의 농도가 감소할수록 현저하게 감소하였다. 이는 압력이 증가할 경우 연소 가능한 농도가 충분하고, 산소의 농도가 감소할수록 연소가 어렵기 때문에 유동도가 떨어지는 것으로 사료된다.

Photo 9는 초기압력이 1.0, 1.5, 2.0bar로 변할 때, Propylene의 농도를 각각 2.5, 5.0, 7.5%로 변화시켜 산소농도 21%, 지연시간을 25,000 μ s에서 Shadow방법을 이용하여 촬영한 결과로써 화학양론농도 근처에서 공기의 유동속도가 최대로 나타났으며 하한계와 상한계로 접근할수록 유동속도가 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 하한계 부근에서는 propylene의 농도가 낮고, 상한계 부근에서는 propylene의 농도가 높기 때문에 작아지는 것으로 사료된다.

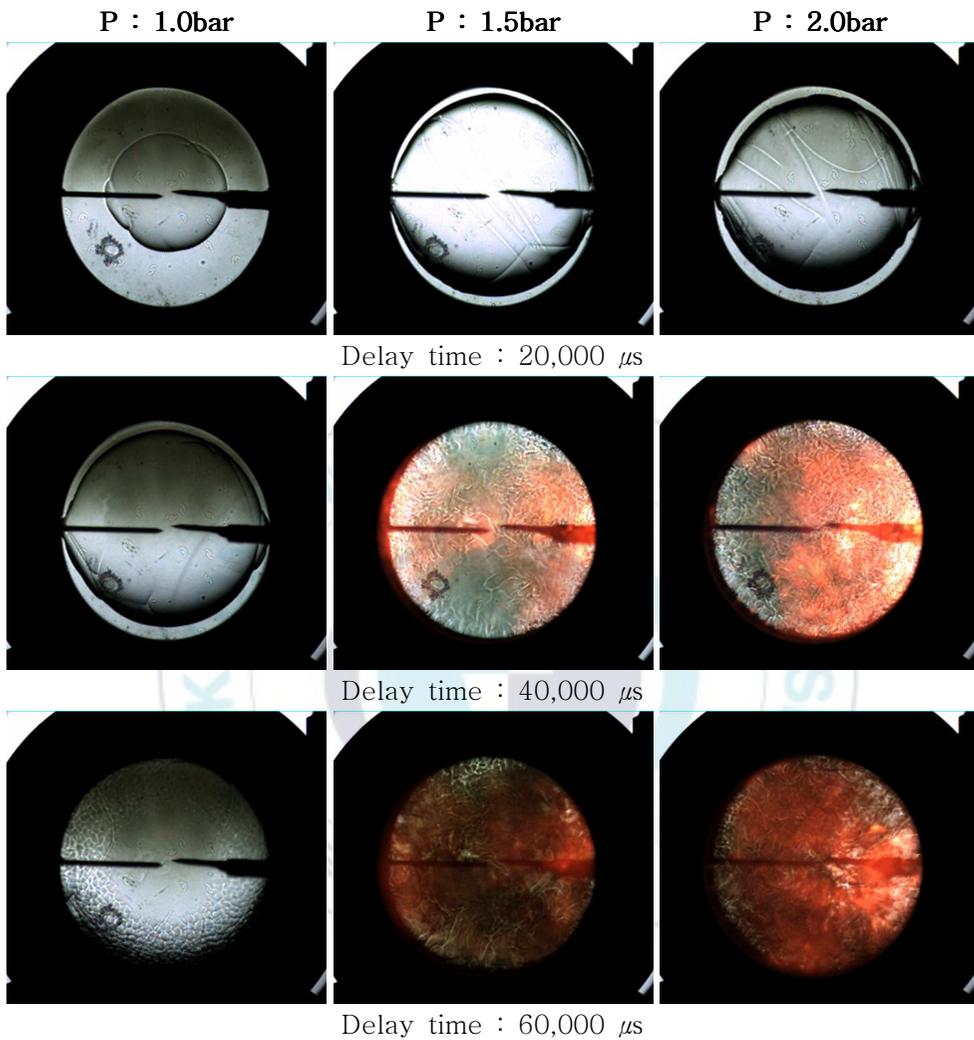


Photo 7 The explosion picture of 5% propylene gas and 21% oxygen gas at 1.0, 1.5, 2.0bar. (Shadow)

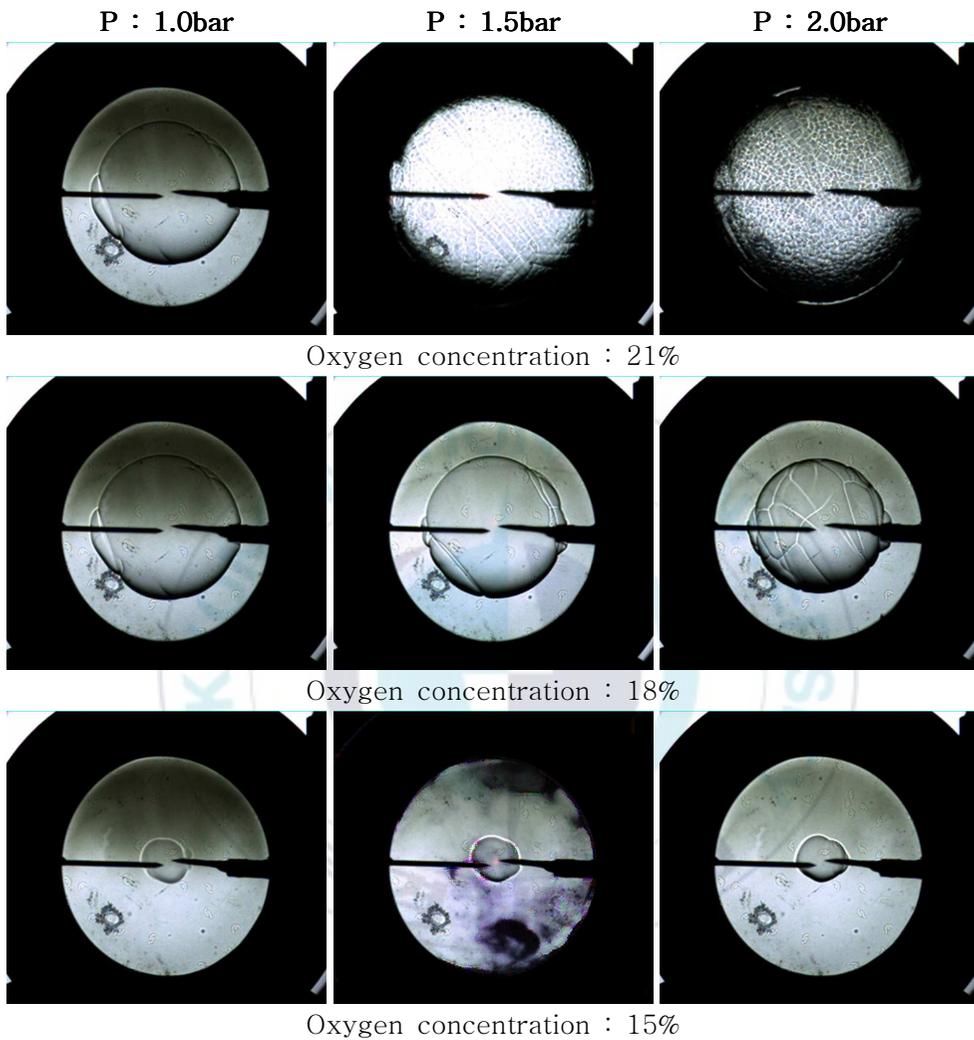


Photo 8 The explosion picture of 5% propylene gas and 25,000 μ s delay time at 1.0, 1.5, 2.0bar. (Shadow)

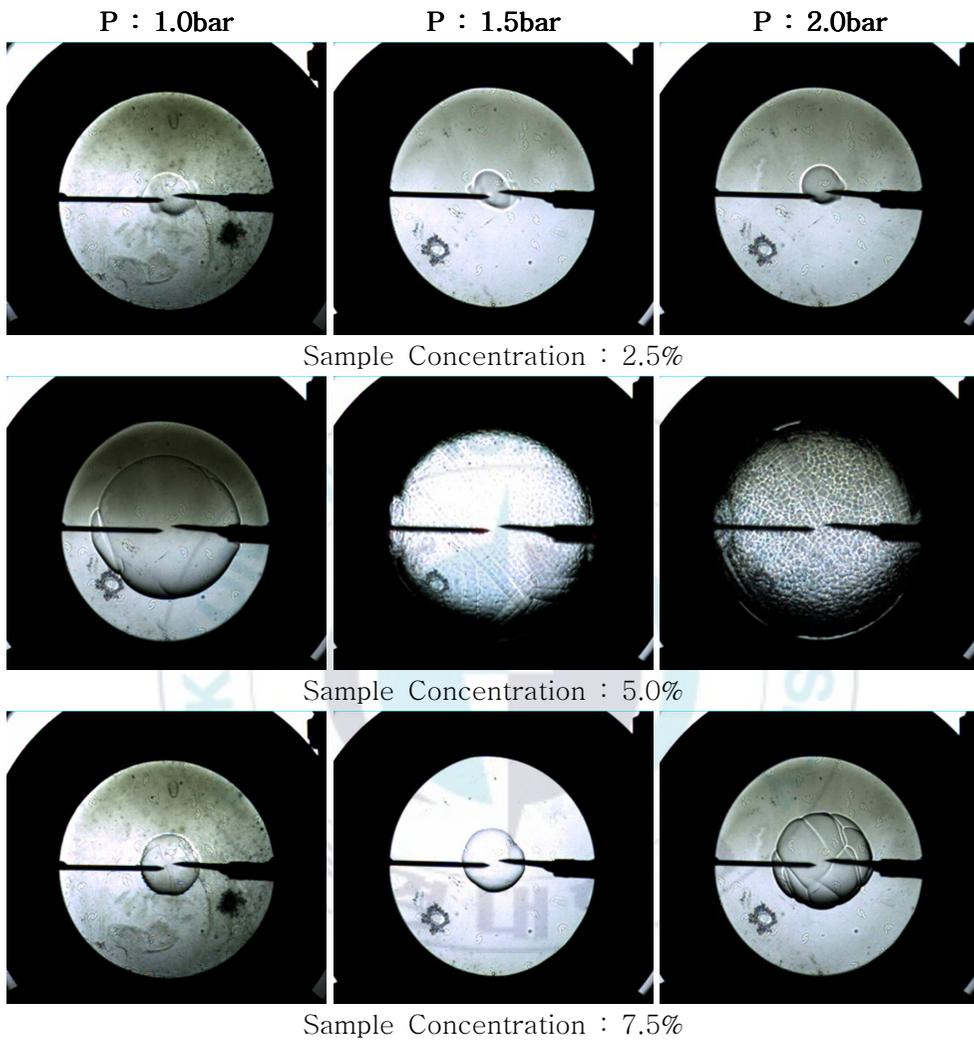


Photo 9 The explosion picture of propylene gas of 21% oxygen gas and 25,000 μ s delay time at 1.0, 1.5, 2.0bar. (Shadow)

5. 결 론

Propylene의 폭발특성과 화염전파 현상을 고찰하기 위하여 초기압력 변화와 산소 농도를 변화시켜 폭발한계, 폭발압력 및 사진촬영 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

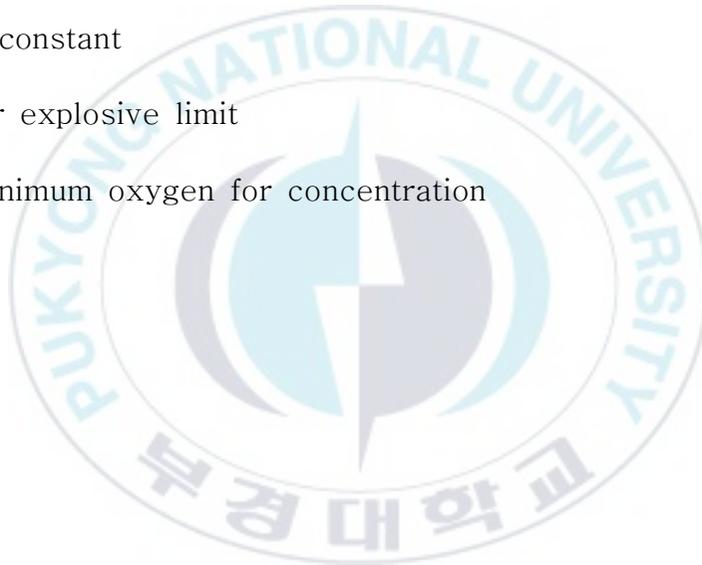
- 1) 산소농도 21%에서 초기압력을 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar로 변화시켰을 경우 폭발범위는 각각 2.4~11.6%, 2.3~12.3% 및 2.2~12.8%를 구하였으며, 압력이 증가함에 따라 폭발범위가 넓어졌다.
- 2) 산소농도가 감소함에 따라 폭발하한은 거의 변화가 없으나, 폭발상한은 급격하게 감소하였으며, M.O.C는 초기압력 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar에서 각각 10.9%, 10.5%, 10.3%를 구하였다.
- 3) 최대폭발압력은 초기압력이 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar로 변화함에 따라 각각 7.41bar, 11.47bar 및 14.52bar로 나타났다.
- 4) 최대폭발압력상승속도는 초기압력이 1.0bar, 1.5bar 및 2.0bar에서 353.15bar/s, 598.46bar/s 및 794.78bar/s를 구하였다.
- 5) 직접촬영법에 의한 폭발현상은 동일한 지연시간일 경우 압력이 증가할수록 화염의 전파가 높게 나타났다.
- 6) 직접촬영법에 의한 동일한 지연시간에서 산소의 농도가 감소함에 따라 화염의 전파가 감소하였다.

- 7) Shadow촬영법에 의한 기체의 유동현상은 압력이 증가할수록 유동속도가 증가하였다.
- 8) Shadow촬영법에 의한 동일한 압력에서 화학양론 부근인 5%에서 유동속도가 최대로 나타났으며, 하한계와 상한계로 접근할수록 낮아졌다.



기호설명

n_i : mole	[-]
x_i : mole ratio	[%]
P : pressure	[mmHg]
T : absolute temperature	[K]
a, a', b : constant	[-]
L_1 : lower explosive limit	[%]
MOC : minimum oxygen for concentration	[vol%]



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) 에너지 경제 연구원, <http://www.keei.re.kr>, 21세기 에너지부분의 여건 변화 및 중장기정책 연구, 2001.
- 3) 대한민국, "청정연료등의 사용에 관한 고시", 환경부고시 99-100호.
- 4) 한국가스안전공사, <http://www.kgs.or.kr>, 가스통계, 2006.
- 5) 한국가스안전공사, 99년가스사고연감, 광명기획, pp.15~169, 2000.
- 6) M.P. Houben, H.C. de Lange and A.A. Van Steenhoven, "Tar Reduction Through Partial Combustion of Fuel Gas", Fuel, Vol 84, Issues 7~8, pp.817~824, 2005.
- 7) 平野橋右, 가스爆發豫防技術, 海文堂, pp.2~3, 1983.
- 8) 오규형, 김한석, 이춘하, "可燃性 가스의 爆發特性에 관한 研究", 한국산업 안전학회지, Vol.7, No.3, pp.66~72, 1992.
- 9) 최재욱, 목연수, 박승호, "도시가스의 폭발 특성에 관한 연구", 한국산업 안전학회지, Vol.16, No.4, pp.109~114, 2001.
- 10) 최재욱, 민철웅, 임우섭, 이병철, 김동규, "표면열처리용 변성가스의 위험성에 관한 연구", 한국산업안전학회지, Vol.9, No.3, pp.9~14, 2005.
- 11) 최재욱, 이인식, 박성태, "산소농도와 압력변화에 따른 도시가스의 폭

- 발특성”, 한국가스학회지, Vol.9, No.1, pp.38~43, 2005.
- 12) H. Tsurumi, “Syudy 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.
- 13) A. Ohsawa 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.
- 14) 목연수, 조태제, 전성균, 유용호, 화학안전공학, 동화기술, pp.200~221, 1994.
- 15) 이수경, 오규형, 정기철, 최재욱, 백종배, 김래현, 가스안전공학, 동화기술, pp.125~129, 1999.
- 16) 安全工學協會, 防爆工學, 海文堂, pp.39~40, 1983.
- 17) 近藤重雄, 浦野洋吉, 岩阪雅二, 堀口貞茲, 德僑和明, “ AH_n 水素化物ガスの爆發下限界溫度と結合解離エネルギー”, 安全工學, Vol.25, No.5, pp.258~264, 1986.

*A Study on the Explosion Risk and Fire
Transmission Situation
of Propylene Gas*

Tae-Geun Kim

*Dept. of Safety Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

To examine the characteristics on the explosion behavior of propylene gas, the experiment was done by changing oxygen concentration of oxygen was changed with the change of initial pressure. The result of experiment, we have obtained curve as behavior.

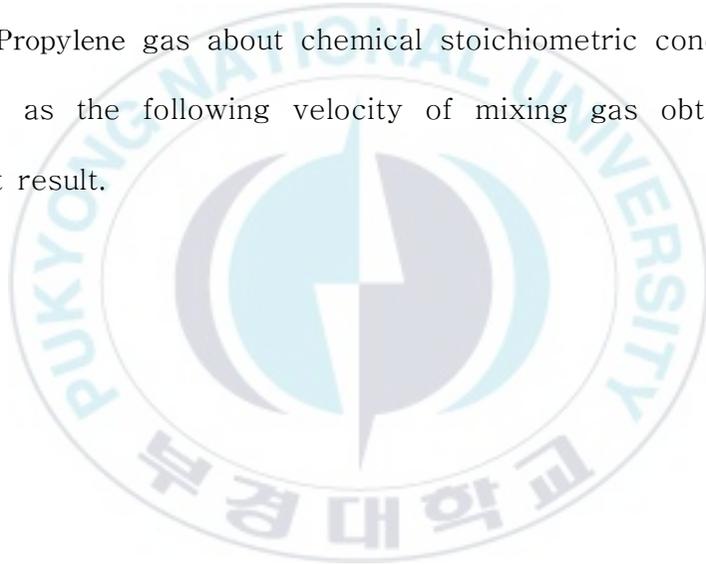
- 1) The explosion limit was different as the initial pressure of Propylene gas was changed; the explosion limits are 2.4~11.6%, 2.3~12.3% and 2.2~12.8% when the initial pressure of its are

1.0bar, 1.5bar and 2.0 bar.

- 2) Minimum oxygen concentration values of each concentration are 10.9%, 10.5% and 10.3% when the initial pressure was 1.0bar, 1.5bar and 2.0bar.
- 3) The maximum explosion pressure of Propylene gas are obtained 7.41bar, 11.47bar and 14.52bar at 5% Propylene gas when the initial pressure are 1.0bar, 1.5bar and 2.0bar.
- 4) The maximum explosion pressure rising rate of Propylene gas was 353.15bar/s, 598.46 bar/s and 794.78bar/s at the concentration of 5% of Propylene gas when the initial pressure are changed to 1.0bar, 1.5bar and 2.0bar.
- 5) As a result of direct picturing explosion phenomenon about Propylene gas, as the pressure increased the fire transmission are increased.
- 6) As a result of direct picturing explosion phenomenon about Propylene gas at equaling time, as the oxygen concentration

decreased the fire transmission are increased.

- 7) As a result of shadow picturing explosion phenomenon method about Propylene gas , as the pressure increased the following velocity of mixing gas are increased.
- 8) As a result of shadow picturing explosion phenomenon method about Propylene gas about chemical stoichiometric concentration at 5%, as the following velocity of mixing gas obtained the highest result.



감사의 글

본 논문이 완성되기까지 부족한 저를 사랑의 마음으로 지도해 주시고, 수없이 다듬어 주시고, 용기를 북돋아 주신 최재욱 지도교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

그리고, 논문의 마지막 수정까지 격려와 조언을 주시고, 애써주신 이내우 교수님, 이동훈 교수님께 진심어린 감사를 드리며, 학문의 부족함을 가르침으로 베풀어 주신 목연수 총장님, 장성록 교수님, 박외철 교수님, 권오현 교수님 그리고 이의주 교수님께도 감사의 뜻을 전합니다.

본 논문을 위해 물심양면 도와주신 임우섭 박사님과 이종빈 선생님, 고경찬 선생님, 배동철 선생님, 윤유성 선생님, 강지웅 선생님, 정필훈 선생님, 조기현 선배님, 박경국 선배님, 이인식 형에게도 감사의 마음을 전합니다. 또 바쁜 와중에도 실험할 때 옆에서 많이 도와주었던 김원주, 민철웅, 황윤한 그리고 화공안전실험실의 여러 후배들에게도 감사의 말을 전합니다.

그리고 내가 학업을 할 수 있도록 오랜 시간 말없이 지켜보고 언제나 힘이 되어준 우리 가족들과 절친한 친구인 성철이, 성근이, 정민이, 명수 와도 기쁜 마음을 같이 하고 싶으며, 이 논문이 있기까지 저를 도와주신 모든 분들께 다시 한번 고개숙여 감사의 뜻을 전합니다.

보다 더 멋진 모습으로 여러분의 은혜에 보답하겠습니다. 감사합니다!

2007년 7월

김 태 근