



工學博士 學位論文

프로필렌의 불활성기체 첨가에 따른 온도 및 압력의 변화에 대한 폭발 위험성 평가에 관한 연구



2021年 2月

釜慶大學校大學院

消防工學科

崔維庭

工學博士 學位論文

프로필렌의 불활성기체 첨가에 따른 온도 및 압력의 변화에 대한 폭발 위험성 평가에 관한 연구

指導教授:崔載旭

이 論文을 工學博士 學位論文으로 提出함

2021年 2月

III

ot

釜慶大學校大學院

消防工學科

崔維庭

崔維庭의 工學博士 學位論文을 認准함

2021年 2月 19日



목 차

1. 서 론	1
2. 이론적 배경	··· 5
2-1. 가스폭발의 이론	··· 5
2-2. 폭발범위에 영향을 주는 요소	6
2-3. 이상기체 상태방정식	8
2-4. Dalton의 압력 가산법칙	10
2-5. 가스의 폭연지수	13
2-6. 프로필렌과 불활성기체의 특성	14
2-6-1. 프로필렌의 특성	14
2-6-2. 불활성기체의 물리적 특성	16
3. 실험장치 및 실험방법	18
3-1. 실험시료	18
3-2. 실험장치	20
3-3. 실험방법	25
4. 실험결과 및 고찰	· 27
4-1. 질소 첨가에 대한 온도와 압력에 따른 폭발범위	· 27
4-1-1. 온도 25 ℃일 경우 압력의 변화에 따른 폭발범위	27

4-1-2. 온도 100 ℃일 경우	36
4-1-3. 온도 200 ℃일 경우	44
4-1-4. 동일한 온도에서 압력에 따른 폭발범위	52
4-2. 이산화탄소 첨가에 대한 온도와 압력에 따른 폭발범위	56
4-2-1. 온도 25 ℃일 경우 압력의 변화에 따른 폭발범위	56
4-2-2. 온도 100 ℃일 경우	64
4-2-3. 온도 200 ℃일 경우	72
4-2-4. 동일한 온도에서 압력에 따른 폭발범위	80
4-3. 질소와 이산화탄소 폭발범위 비교	84
4-4. 최소산소농도	88
4-4-1. 질소 첨가에 따른 영향	88
4-4-2. 이산화탄소 첨가에 따른 영향	91
4-5. 질소 첨가에 따른 폭발압력 및 압력상승속도	93
4-5-1. 폭발압력	93
4-5-2. 압력상승속도	102
4-6. 이산화탄소 첨가에 따른 폭발압력 및 압력상승속도]	111
4-6-1. 폭발압력]	111
4-6-2. 압력상승속도]	120

4-7. 가스의 폭연지수	129
4-7-1. 질소 첨가에 따른 영향	129
4-7-2. 이산화탄소 첨가에 따른 영향	134
5. 결 론	138
Nomenclature & Greek Letters	142
참고 문헌	143
Abstract	152
OVAL OF THE PARTY	

List of Figures

Fig.	1	1 Schematic diagram of propylene downstream 15				
Fig.	3. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for explosion					
	measurement ····· 23					
Fig.	3	Flow	chart of experiment method 26			
Fig.	4	The	relationship between oxygen concentration and propy-			
		lene	concentration at 25 $^\circ\!\!\!{\rm C}$ and 1.0 bar 29			
Fig.	5	The	relationship between oxygen concentration and propy-			
		lene	concentration at 25 $^{\circ}\!$			
Fig.	6	The	relationship between oxygen concentration and propy-			
		lene	concentration at 25 $^\circ\!$			
Fig.	7	The	relationship between oxygen concentration and propy-			
		lene	concentration at 25 $^\circ\!\mathrm{C}$ and 2.5 bar 35			
Fig.	8	The	relationship between oxygen concentration and propy-			
		lene	concentration at 100 $^\circ\!\! C$ and 1.0 bar			
Fig.	9	The	relationship between oxygen concentration and propy-			
		lene	concentration at 100 $^\circ\!\mathrm{C}$ and 1.5 bar			

Fig. 10 The relationship between oxygen concentration and propylene

- Fig. 11 The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 $\,^\circ\!\!{\rm C}$ and 2.5 bar ------ 43 Fig. 12 The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 $\,^\circ\!\!\mathrm{C}$ and 1.0 bar ------ 45 Fig. 13 The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 $\,^\circ\!\!{\rm C}$ and 1.5 bar ------ 47 Fig. 14 The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 2.0 bar 49 Fig. 15 The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 $\,^\circ\!\!\mathbb{C}$ and 2.5 bar ------ 51 Fig. 16 The relationship between oxygen concentration and propylene Fig. 17 The relationship between oxygen concentration and propylene Fig. 18 The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 $\,^\circ\!\mathrm{C}$ ------ 55
- Fig. 19 The relationship between oxygen concentration and propylene

concentration at 25 $\,^\circ\!\!\mathbb{C}$ and 1.0 bar ------ 57

- Fig. 20 The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 $^\circ\!\!C$ and 1.5 bar ------ 59

Fig. 28 The relationship between oxygen concentration and propy-

lene concentration at 200 $^\circ\!\!{\rm C}$ and 1.5 bar
Fig. 29 The relationship between oxygen concentration and propy-
lene concentration at 200 $^\circ\!\!\mathrm{C}$ and 2.0 bar 77
Fig. 30 The relationship between oxygen concentration and propy-
lene concentration at 200 $^\circ\!\!\mathrm{C}$ and 2.5 bar
Fig. 31 The relationship between oxygen concentration and propy-
lene concentration at 25 $^\circ C$
Fig. 32 The relationship between oxygen concentration and propy-
lene concentration at 100 $^\circ C$
Fig. 33 The relationship between oxygen concentration and propy-
lene concentration at 200 °C 83
Fig. 34 The comparison of the explosive range of nitrogen and car-
bon dioxide at 25 $^\circ\!$
Fig. 35 The comparison of the explosive range of nitrogen and car-
bon dioxide at 100 $^\circ\!\!{\rm C}$ 86
Fig. 36 The comparison of the explosive range of nitrogen and car-
bon dioxide at 200 $^\circ\!\mathrm{C}$ 87
Fig. 37 The relationship between the minimum oxygen concentration

- Fig. 42 The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 25
 °C. (a') 1.0 bar, (b') 1.5 bar, (c') 2.0 bar, (d') 2.5 bar 104
- Fig. 43 The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 100 °C. (a') 1.0 bar, (b') 1.5 bar, (c') 2.0 bar, (d') 2.5 bar

- Fig. 44 The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 200 °C. (a') 1.0 bar, (b') 1.5 bar, (c') 2.0 bar, (d') 2.5 bar ...
- Fig. 45 The relationship between explosion pressure of propylene and time according to oxygen concentrations at 25 °C. (a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar 113
 Fig. 46 The relationship between explosion pressure of propylene
 - and time according to oxygen concentrations at 100 $^\circ$ C. (a)
 - 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar 116
- Fig. 48 The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 25 °C. (a') 1.0 bar, (b') 1.5 bar, (c') 2.0 bar, (d') 2.5 bar 122

- Fig. 49 The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 100 °C. (a') 1.0 bar, (b') 1.5 bar, (c') 2.0 bar, (d') 2.5 bar ...
- Fig. 50 The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 200 °C. (a') 1.0 bar, (b') 1.5 bar, (c') 2.0 bar, (d') 2.5 bar …

Fig.	56	The	relatic	onship	be	twee	n	oxygen	conce	entration	and	gas
		deflag	gration	index	at	200	°C	•••••	•••••		•••••	137



List of Tables

Table 1	Characteristics	of 1	propylene	19
Table 2	Characteristics	of	pressure transducer	24



List of Photo

Photo 1 The picture of experimental apparatus for vapor explosion



1. 서 론

산업의 발달로 매년 많은 화학물질이 생성되고 있으며, 인간의 생활에 있어서 원유는 LPG, 가솔린, 등유, 경유, 중유, 윤활유, 아스팔트 등 다 양한 용도로 활용할 수 있어서 없어서는 안 되는 불가피한 에너지원이 다. 특히 석유는 가정 및 산업용 연료로서 주요 산업의 원재료를 생산 및 공급하여 각종 생활용품 등을 제조할 수 있다. 또한 석유화학 원료 인 나프타를 이용하여 에틸렌, 프로필렌, 벤젠, 톨루엔 등을 생산하고 이를 기초 유분으로 하여 석유화학제품을 생산한다¹⁻³⁾.

그 중 프로필렌은 석유화학제품에서 에틸렌 다음으로 가장 많이 사용 되는 탄화수소화합물로서, 2011년에는 6,054톤을 생산하였으며, 2018년 에는 8,395톤을 생산하였다. 7년 사이에 프로필렌의 생산은 급진적으로 증가하였으며, 많은 양을 국내에서 사용하거나 수출하고 있다⁴⁾.

프로필렌은 석유화학공정에서 첨가중합반응을 통하여 합성물질을 제 조하는 기초 원료로 사용되며, 대부분의 프로필렌 공정은 상온에서부터 200 ℃ 이상의 온도에서 이루어지고 있으므로 위험성이 대단히 높다⁵⁻⁷⁾. 2014년 8월 대만에서 발생된 사고는 가요슝 첸전구의 지하 공급관에 서 프로필렌의 가스누출로 인하여 폭발이 발생하였으며⁸⁾, 2020년 3월 충남 서산시 L케미칼 공장에서 에틸렌과 프로필렌을 생산하는 압축과 정 중에 사고가 발생하여 폭발이 발생하였다⁹⁾. 이처럼 프로필렌은 인화 성 가스로서 점화원이 존재하면 화재 및 폭발을 일으킬 위험이 있어 사 고 발생 시 피해가 막대하고, 중대 산업사고로 이어질 수 있다¹⁰⁻¹²⁾.

폭발은 가연성 가스와 조연성 가스의 혼합 기체가 존재할 때 항상 발생 하는 것은 아니며, 가연성 가스의 농도와 에너지 조건이 충족하였을 때 폭 발이 발생한다. 이때 폭발을 일으킬 수 있는 가연성 가스의 농도 범위를 폭 발한계라고 하며, 화염을 전파하기 위하여 필요한 최소한의 산소농도를 최 소산소농도(Minimum oxygen concentration; MOC)라고 정의한다¹³⁻¹⁵⁾. 또한 폭발압력과 폭발압력상승속도는 폭발이 얼마나 강하고 위험한지를 나타내는 지표로서 이때 가연성 혼합기의 폭발 중 가장 높은 압력을 최대 폭발압력이라 하고, 점화 후 최대압력까지의 도달시간을 폭발시간으로 정 의한다. 밀폐된 공간에서 가스 폭발이 발생하는 경우에 폭발 압력에 의하 여 공간 내벽에 충격파의 형태로 전달되어 심한 충격을 가하게 되고, 항복 점 이상이 될 경우 생겨난 파열면의 개구부를 통하여 폭발압력이 분출하 게 된다^{16,17)} 이러한 폭발압력을 방출하여 과압을 방지할 수 있도록 폭연지 수(Gas deflagration index; K_a)를 계산하여 방출구의 크기와 두께, 개수를 설계하는데 활용하여 안전상 중요한 지표로서 사용할 수 있다¹⁸⁻²²⁾.

폭발범위를 측정하는 방법은 두 가지로서 전파법과 버너법이 있으며, 전 파법은 구형 또는 원통형의 용기 내에 혼합가스를 넣어서 내부에서 점화 하여 화염이 전체에 퍼지는 한계의 조성을 결정하는 방법이다. 버너법은 버너 위에 화염이 형성되는 혼합기체 조성의 한계치를 결정하는 방법으로 큰 점화에너지를 사용하여야 하며, 물질에 따라 큰 용기를 사용해야 되는 단점이 있어 버너법보다 전파법이 안전의 목적으로 많이 사용되고 있다 ²³⁻²⁶⁾.

폭발을 예방하기 위하여 가연성 혼합가스에 불활성기체인 질소, 이산 화탄소, 아르곤 등을 첨가하여 가연성 혼합기의 농도를 희석하는 Inerting 과정을 통하여 폭발한계를 좁혀주거나, 화염을 전파하기 위하 여 최소한의 산소농도가 필요한데 연료의 농도와 관계없이 폭발이 되지 않는 산소농도 미만으로 감소시키면 화염이 전파하지 못하므로 폭발을 방지할 수 있다²⁷⁻³¹⁾.

폭발과 관련된 연구사례로 국내에서는 Choi 등³²⁻³⁵⁾은 불활성기체의 첨가량에 따른 프로필렌의 폭발 특성에 관한 연구를 하였으며, Ha 등³⁶⁾ 은 인화점, 자연발화 등 기존의 문헌값과 실험값을 비교하여 평가하였 다. Kim³⁷⁾은 옥탄가에 따른 가솔린의 폭발한계를 측정하였으며, Pyo³⁸⁾ 는 수소 취급 설비의 화재 폭발 안전성에 대하여 연구를 하였다. 외국에서는 Mitu 등³⁹⁾은 용기인 원통과 구에 따라 폭발특성에 관한 연구를 하였으며, Cui 등⁴⁰⁾은 가연성 혼합기의 점화에너지에 관한 연구 를 하였다. 또한 Song 등⁴¹⁾은 실린더 용기를 사용하여 폭발압력, 폭발 압력상승속도 등을 연구하였으며, Li⁴²⁾는 당량비에 따라 폭발압력상승속 도와 가스의 폭연지수에 대하여 측정하였다.

그러나 폭발에 관하여 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고 프로필 렌의 폭발 위험성에 관한 연구는 부족한 실정이며, 기존의 문헌에는 온 도와 압력의 변화에 따른 폭발한계에 대하여 예측모델링을 통해 값을 제공하였다. 그러나 예측식을 통하여 얻는 값과 실험을 통하여 얻는 값 은 많은 차이를 보이고 있다⁴³⁻⁴⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 프로필렌을 원료로 하여 물질을 가공 및 제조하기 위한 초기 온도인 25 ℃와 100 ℃, 200 ℃에서 초기 압력인 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar 및 2.5 bar의 변화에 따라 불활성기체인 질소와 이산화탄소를 사용하여 폭발범위를 측정하고, 폭발이 발생되지 않는 최소산소농도를 측 정하였으며, 이를 바탕으로 폭발압력과 폭발압력상승속도를 구하였다. 또 한 최대폭발 압력상승속도와 용기의 체적을 통하여 가스의 폭연지수(Kg) 를 측정하여 프로필렌의 폭발특성을 파악함으로서 프로필렌을 사용하는 사업장의 화재 및 폭발 사고의 예방을 위한 자료를 제공하고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 가스폭발의 이론^{49,50)}

폭발은 화학반응에 관여하는 물질이 급격히 팽창하면서 열과 압력을 발생시키는 반응이다.

폭발은 연소를 거쳐 진행되므로 가연물, 산화제, 점화원이 존재하여야 폭발이 발생한다. 폭발이 발생하는 원인은 3가지로서 첫 번째는 화학적 발열반응에 의해서 발생하며, 두 번째는 상(phase)이 변할 때 발생한다. 세 번째는 발화원의 에너지에 의하여 용기가 가열되면 폭발이 발생한다. 폭발을 일으킬 수 있는 가연성 가스의 농도 범위를 폭발범위라 하며. 이때의 최소농도를 폭발 하한계(Lower explosion limit; LEL), 최대농도를 폭발 상한계(Upper explosion limit; UEL)라고 정의한다. 가연성 가스의 위험성은 폭발 하하계가 낮고, 폭발 상하계가 높을수록 폭발범위는 넓어 지므로 가연물에 대한 위험도는 증가한다. 또한 가연성 가스의 농도가 폭 발 하한계 미만에서는 산소의 농도가 높아도 가연물의 농도가 부족함으로 가연물의 입자간 거리가 멀어 연소가 지속되지 못한다. 폭발 상한계 초과 에서는 산소의 농도가 부족하여 가연물의 농도는 높아 가연물간 입자간 거리는 가까우나 산소부족으로 인하여 연소가 지속되지 못한다.

2-2. 폭발범위에 영향을 주는 요소^{51,52)}

폭발범위에 영향을 주는 인자는 온도, 압력, 용기의 크기와 모양, 점화 원, 산소, 가연물 등이 있다.

1) 온도 및 압력 : 온도 및 압력이 상승하면 폭발 하한계 값은 거의 변하지 않고, 폭발 상한계 값이 상승하여 폭발범위가 증가하므로 위험 성은 증가한다. 따라서 온도 및 압력이 증가하면 분자운동이 활발해져 분자가 용기의 내벽에 부딪히는 힘이 증가하게 된다. 이 때 발생하는 폭발압력이 용기의 내압을 초과하면 용기가 파괴된다.

2) 용기의 크기와 모양 : 가연성 가스를 저장 및 사용하는 용기의 크기 가 충분히 작거나 개방되어 있으면 가연성 혼합기가 폭발범위의 범위에 존재하더라도 압력파가 거의 생기지 않아 폭발은 발생하지 않으며, 착화 하더라도 화염을 전파하지 못하고 도중에 소멸된다. 그러나 밀폐공간에 서 폭발이 발생되면 압력이 크게 상승하고 강한 충격파를 주어 인명 및 재산 피해를 초래한다.

3) 점화원 : 가연성 혼합기가 폭발범위에 도달하기 위해서는 충분한 점 화에너지가 필요하다. 점화원의 종류로는 정전기 불꽃, 충격 및 마찰, 단 열압축 등이 있으며, 크게는 화학적, 전기적, 기계적 점화원으로 구분한다.

- 6 -

4) 산소 : 산소는 가연성 가스가 연소되는데 필요한 조연성 가스로서,
 산소의 농도가 증가할수록 폭발의 파괴력은 커진다.

5) 가연물의 입자 및 종류 : 연소 또는 폭발의 반응속도는 가연물의 표면적에 비례하므로 입자가 작을수록 표면적이 증가하여 폭발의 위력
이 증가한다. 또한 물질의 상에 따라 기체 > 액체> 고체 순으로 폭발
의 위력은 커진다.



2-3. 이상기체 상태방정식⁵³⁾

이상기체는 온도가 일정할 때 기체의 부피는 압력에 반비례 하고, 압 력이 일정할 때 절대온도에 비례하는 보일-샤를법칙과 동일온도와 압 력에서 일정량의 기체가 차지하는 부피는 기체 분자의 종류와 관계없이 항상 일정하다고 정의하는 아보가드로 법칙을 만족하는데 이때의 상관 관계를 나타내는 방정식을 이상기체 상태 방정식이라고 한다.

이상기체 방정식은 압력 P, 온도 T, 특정 기체상수를 R이라고 정의하 였을 때 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$Pv = RT \tag{1}$$

식 (1)에 비체적 v와 밀도 ρ의 관계인 식 (2)를 이용하면 식 (3)과 같 이 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{1}{\rho} \tag{2}$$

$$P = \rho RT$$

$$=\frac{mRT}{V}$$

$$=\frac{mR_uT}{VM}\tag{3}$$

이때 R은 일반기체상수를 R_u 를 몰 질량으로 나눠준 값을 의미하며, 몰수 n은 질량 m을 분자량 M으로 나눠준 값으로 정리할 수 있으므로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. $PV = nR_u T$ (4)II

st

2-4. Dalton의 압력 가산법칙⁵⁴⁻⁵⁸⁾

서로 다른 두 종류 이상의 기체가 일정한 온도와 부피를 가지는 용기 속에 혼합되어 있을 때 혼합된 기체의 전체 압력은 각 기체의 부분 압 력(분압)의 합과 같으며 기체 성분들은 독립적으로 전체 압력 또는 몰 수에 기여한다.

전체 혼합기체는 일정한 압력에서 부피가 변화하거나 일정한 부피에 서 각각 압력이 변화하면, 각 성분의 농도가 변하므로 물리화학적 조성 을 나타낼 때 대개 몰분율의 형태로 나타낸다.

몰분율은 혼합물의 구성을 나타내는 방법으로써, 각 성분의 몰수와 전 체 성분의 총 몰수와의 비를 뜻하며 각 성분의 몰수는 각 성분의 부분 압력에 비례한다.

몰분율을 x_i , 기체 성분의 각 몰수를 n_i 라고 할 때, x_i 는 n_i 를 전체 성 분의 몰수의 합인 $n_t = n_1 + n_2 + n_3 + \cdots$ 로 나눈 값으로써 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 혼합기체를 구성하는 전체성분의 몰분율 총합이 1로 써 식 (6)과 같다.

$$x_i = \frac{n_i}{n_t} \tag{5}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i = 1 \tag{6}$$

혼합기체를 이루는 각각의 물질을 모르는 경우에도 식 (5)를 이용하 여 혼합물질의 조성을 알 수 있다.

서로 다른 세 가지 기체의 몰수가 n_1 , n_2 , n_3 일 때 이 기체들이 특정 온도 T에서 부피가 V인 용기 속에 혼합 기체로 존재한다고 가정하면, 전체성분 몰수의 합은 $n_t = n_1 + n_2 + n_3$ 로 표현되고, 이상기체 상태방정 식을 이용하면 식 (7)을 통해 혼합 기체의 압력을 구할 수 있다.

$$P = \frac{n_t R_u T}{V} \tag{7}$$

혼합 기체를 이루는 각 성분의 부분 압력을 구하면 식 (8)과 같이 나 타낼 수 있으며,

$$P_1 = \frac{n_1 R_u T}{V}, \ P_2 = \frac{n_2 R_u T}{V}, \ P_3 = \frac{n_3 R_u T}{V}$$
(8)

여기서, 식 (8)을 식 (7)에 적용시키면, 식 (9)와 같이 된다.

=
$$n_t \frac{R_u T}{V}$$

= P (9)
식 (8)의 첫째 항을 식 (7)로 나누어 식 (5)에 적용하면 식 (10)과 같
이 나타난다.
 $\frac{P_1}{P} = \frac{n_1}{n_t} = x_1$ (10)

 $P_1 + P_2 + P_3 = (n_1 + n_2 + n_3) \frac{R_u T}{V}$

이를 통해 혼합 기체 각 성분의 전체 압력의 합은 혼합 기체 각 성분 의 전체 몰수의 합에 비례하는 것을 알 수 있다.

식 (10)은 특정 기체 혼합물뿐만 아니라 모든 기체 혼합물에도 적용 가능하며, 전체 압력과 혼합물을 구성하는 각각의 기체의 몰분율 값을 이용해 혼합물을 구성하고 있는 성분의 분압을 계산할 수 있으며, 구한 분압으로 화학조성 농도를 계산할 수 있다.

2-5. 가스의 폭연지수⁵⁹⁻⁶¹⁾

가연성 물질을 취급하거나 저장 중에는 폭발을 예방하기 위하여 적절 한 환기는 필수의 안전요소이다. 그러나 환기의 실패로 인하여 폭발의 분위기가 형성되어 밀폐공간에서 폭발이 발생할 경우에 대비하여 폭발 의 격렬함과 위험성을 나타내는 폭발압력, 폭발압력상승속도, 폭연지수 (Gas deflagration index; Kg)를 파악하는 것이 가장 중요하다.

그 중 폭연지수는 폭발의 압력을 방출하여 2차적 피해를 최소화하기 위하여 방출구의 크기와 두께, 개수를 설계하는데 사용할 수 있는 변수 로 활용된다.

가스의 폭연지수는 식 (11)과 같이 구할 수 있으며, 정확한 값은 실험 에 의하여 결정된다. 만약 실험값이 없는 경우에는 프로판의 Kg값 100 bar·m/sec를 기준으로 하여 기본연소속도(Fundamental burning velocity; S_u)로부터 유추할 수 있다.

여기서 $\left(rac{dp}{dt}
ight)_{
m max}$ 는 실험을 통하여 얻은 최대폭발 압력상승속도이며, V

는 폭발 반응기의 부피로서 용기의 체적으로 계산된다.

$$K_g = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \times V^{\frac{1}{3}}$$
(11)

2-6. 프로필렌과 불활성기체의 특성

2-6-1. 프로필렌의 특성

프로필렌은 원유의 분해과정에서 부산물로 생성되거나 납사를 분해설비 (Naphtha Cracking Center ; NCC)에 투입하여 기초유분으로 생산된다. 기초유분은 석유화학산업에서 제품을 만드는데 반드시 필요한 재료이며, 프로필렌의 경우 중합반응을 거쳐 폴리프로필렌을 생성하므로 플라스틱, 합성수지, 합성섬유, 합성고무 등의 제조 원료로 많이 사용되고 있다.

Fig. 1은 프로필렌을 이용하여 축합 및 중합반응을 거쳐 다양한 물질 을 생성하는 합성 계통도를 나타내었다⁶²⁾.

그러나 프로필렌의 경우 상온 및 상압에서 점화원이 없다면 화학적으 로 안정하나, 인화성가스이므로 점화원이 존재하면 화재 폭발의 위험이 있는 물질이다.



Fig. 1. Schematic diagram of propylene downstream.

2-6-2. 불활성기체의 물리적 특성

불활성화란 가연성 혼합가스에 화학반응을 일으키지 않는 불활성기체 를 주입하여 최소산소농도 이하로 낮게 하여 화염을 진행시키지 못하도 록 하는 공정이다.

불활성기체의 종류는 여러 가지가 있으나 가격이 저렴하고 구하기 쉬 운 장점이 있으므로 산업공정에서 많이 사용되는 질소와 이산화탄소를 본 연구에서 사용하였다.

1) 질소

질소는 무색, 무취의 불활성기체로서 가연성 가스를 취급하는 용기의 내부수리, 점검, 정비 등 잔존가스 제거를 위하여 퍼지 등 작업의 안전 을 위해 다양한 용도로 사용된다.

질소는 대기 중에 약 79%로서 가장 많은 비율로 존재하며, 비중은 0.966으로서 공기보다 가볍다. 또한 다른 불활성기체에 비하여 가격이 저렴하고 인체에 무해하여 불활성기체 중 가장 많이 사용된다. 2) 이산화탄소

이산화탄소는 상온, 상압에서 기체로 존재하며, 탄소의 최종 산화물로 서 연소반응을 더 이상 일으키지 않기 때문에 불활성기체로 많이 사용 되고 있다. 이산화탄소는 비중이 1.517로서 공기보다 무거우며, 다른 분 자에 비해 비중이 다소 높기 때문에 산소농도 저하에 따른 질식소화가 용이하고, 이산화탄소는 연소를 방해하므로 타 소화약제에 비해 심부화 재에도 적합하다.

그러나 이산화탄소의 경우 물질 자체로는 무독성이나, 누출 시 산소농 도의 저하로 인하여 질식의 위험과 인체에 생리적인 영향을 끼칠 수 있 는 위험이 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3-1. 실험시료

본 실험에서 사용된 프로필렌은 ㈜성광특수 가스에서 제조된 순도 99.9%인 가스를 사용하였으며, 불활성기체인 질소와 이산화탄소, 조연 성 가스인 산소는 ㈜천마산업 가스에서 제조된 순도 99.9%인 가스를 사용하였다.

Table 1은 한국산업안전보건공단에서 제공하는 물질안전보건자료(Material Safety Data Sheet; MSDS)로서 프로필렌의 물리적·화학적 특성치를 나타내었다⁶³⁾.

Chemical name	Propylene		
Structural formula	C ₃ H ₆		
CAS No.	115-07-1		
Phase	Gas		
Color	Colorless		
Melting point	-185 ℃		
Boiling point	-48 °C		
Flash point	-107 ℃		
Explosion limit	$2.4 \sim 10.3 \%$		
Autoignition temperature	460 °C		
Vapor density	1.50 kg/m ³		
Specific gravity	0.5		
Molecular mass	42.03 g/mol		
C the second	HOLIN		

Table 1. Characteristics of propylene
3-2. 실험장치⁶⁴⁾

본 연구에 사용된 폭발장치는 전파법을 개량한 실험장치를 사용하였다. 가스폭발 장치의 사진은 Photo 1에 나타내었으며, 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

폭발시험 장치는 폭발용기, 에너지 공급부, 폭발 에너지 측정장치 및 저장부로 구성되어 있다.

폭발용기는 D tech에서 제작한 내용적이 1.1ℓ로서 외경이 148 mm, 지 름 105 mm이고, 설정온도를 일정하게 유지하기 위해 걸이 400 mm, 폭 300 mm, 높이 330 mm로 상부와 하부에는 각각의 1 kW의 히터를 설치하 여 제작 된 외함을 사용하였다. 폭발용기 내 온도를 일정하게 유지하기 위 하여 내부의 온도를 400 ℃까지 조절할 수 있는 온도제어장치를 사용하였 으며, 온도를 측정하기 위하여 Chromel-Alumet Thermocouple(O.D 1.0 mm)의 열전대를 사용하였다. 용기 내부의 압력 측정은 0~10 bar까지 측정 할 수 있는 Copal Electronics(Japan)의 PG-200-103GP-S와 가스의 주입 을 위하여 폭발용기 내부의 진공압을 확인할 수 있는 PG-200-102VP-S의 0~-1.0 bar 압력계를 설치하였으며, 가스의 주입은 NV2H-4T의 정밀조절 밸브를 사용하여 해당 압력만큼 가스를 주입하였다.

용기의 하부에는 가스의 진공 및 배출을 위하여 (주)우성에서 제작한

0.4 Pa의 TRP-12 진공펌프를 사용하였다.

에너지 공급부는 Kikusui에서 제작된 TOS 5101의 고전압 장치를 사용하여 10 kV의 전압으로 순간적인 점화에너지를 공급하였다.

폭발 에너지 측정 및 저장부에는 폭발 압력을 측정하기 위하여 압력 변환기(Kyowa, PE-30KF)를 사용하였으며, 압력 변환기의 특성은 Table 2에 나타내었다. 또한 폭발의 유무를 관찰하기 위하여 압력신호의 진폭 을 크게 증폭시키는 Tokyo Sokki Kenkyujo, DA-16A의 Amplifier를 사 용하였으며, Amplifier를 통해 증폭된 신호를 시각적으로 보여주는 Tektronix, TDS 3014(100 MHz, 1.25 GS/s)의 Oscilloscope를 통하여 폭 발의 유무를 판정하고, 이때 얻어진 파형을 컴퓨터에 저장하였다.



Photo 1. The picture of experimental apparatus for vapor explosion tester.





	Characteristics
Rated capacity	30 bar
Safe temperature	Attaching screw section : Max. 300 °C Wastewater : Max. 80 °C The diaphragm may come into contact with high-temperature gas with no problems.
Safe excitation	10 V AC or DC
Recommended excitation	1 to 5 V AC or DC
Input resistance Output resistance	350 Q ±2%
Safe overloads	130% (Static), 100% (Dynamic)
Natural frequencies approx.	21 kHz
A SI CH PL II	

Table 2. Characteristics of pressure transducer

3-3. 실험방법⁶⁵⁾

ASTM E 918-83의 규정에 따라 온도, 압력, 불활성기체의 종류에 따 른 프로필렌의 폭발 특성을 파악하기 위하여 Fig. 3과 같은 순서로 진 행하였다.

- 1) 온도제어장치를 통하여 폭발용기를 실험하고자 하는 온도인 25 ℃,
 100 ℃, 200 ℃로 가열한다.
- 2) 진공펌프를 사용하여 압력계의 수치가 -1.0 barg까지 진공으로 만 든다.
- 3) 돌턴의 압력 가산법칙을 통하여 분압을 계산하고, 정밀조절밸브를 통
 해 가스(프로필렌, 불활성기체, 산소)를 주입구에 주입한다.
- 4) 고전압장치를 작동시켜 폭발의 유무를 관찰하고 이때 압력은 Amplifier
 를 통해 Oscilloscope에 기록된다.
- 5) 시험은 같은 농도에서 10회 이상 반복 실험을 하여 이 중 1회라도 폭발 시 폭발로 간주하였으며, 이때의 최소농도를 하한계(Lower explosion limit; LEL), 최대농도를 상한계(Upper explosion limit; UEL)로 하였다.



Fig. 3. Flowchart of experiment method.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 질소 첨가에 대한 온도와 압력에 따른 폭발범위

4-1-1. 온도 25 ℃일 경우 압력의 변화에 따른 폭발범위

1) 압력이 1.0 bar일 경우

폭발이 발생하였을 경우에는 프로필렌의 농도를 낮추고 폭발이 되지 않았을 경우에는 프로필렌의 농도를 높이는 방법으로 실험을 하여 폭발 범위와 최소산소농도를 구하였다.

Fig. 4는 온도가 25 ℃, 압력이 1.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%의 조건에서 폭발범위는 하한계는 2.5%로 2.4% 이하에 서는 폭발하지 않았으며, 상한계는 13.5%로 13.6% 이상에서는 폭발하지 않았다.

산소농도 18%에서는 LEL은 2.8%, UEL 9.9%로 측정되었으며, 산소 농도 16%의 경우에는 하한계 2.8%, 상한계는 7.9%가 측정되었다.

또한, 산소농도 14%의 경우에는 LEL은 2.9%, UEL 5.9%로 측정되었으며, 산소농도 12%의 경우에는 LEL은 3.0%, UEL 4.1%로 측정되었다. 최소산소농도(Minimum Oxygen Concentration ; MOC)인 11.2 %에서 LEL 은 3.1%, UEL은 3.2%에서 폭발되었다.

산소농도가 감소할수록 하한계는 증가하고, 상한계는 급격하게 감소하여 폭발범위가 좁아지는 것으로 나타났으며, 최소산소농도 이하에서는 폭발이 발생하지 않았다. 이는 폭발 조건인 가연물과 산화제로 사용하는 산소가 일 정한 몰 비에서 혼합, 폭발하는데 반응에 필요한 산소의 양이 충분하지 않아 폭발범위가 감소하는 것으로 사료된다.





Fig. 4. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C and 1.0 bar.

2) 압력이 1.5 bar일 경우

Fig. 5는 온도가 25 ℃, 압력이 1.5 bar일 때 질소의 산소농도와 프로 필렌의 농도에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도가 21%에서 LEL은 2.5%, UEL은 13.8%를 구하였으며, 산소 농도 18%에서는 하한계는 2.7%, 상한계는 10.0%를 측정하였다. 산소농 도 16%의 하한계는 2.8%, 상한계는 8.0%를 나타내었으며, 산소농도를 더 줄여 14%에서의 LEL은 2.9%로 상승하였으며, UEL은 6.0%를 나타 내었다. 산소농도 12%의 하한계는 3.0%, 상한계는 4.2%를 측정하였으 며, 산소농도 11.5%에서는 LEL은 3.2%, UEL은 3.8%가 나타났다. 또한 산소농도 0.5% 줄인 최소산소농도인 11.0%에서는 LEL은 3.3%, UEL은 3.5%로 측정되었다.



Fig. 5. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C and 1.5 bar.

3) 압력이 2.0 bar일 경우

Fig. 6은 불활성기체인 질소를 사용하여 온도가 25 ℃, 압력이 2.0 bar 일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

공기 중에서 폭발범위는 폭발 하한계의 경우 2.5%, 폭발 상한계의 경 우 14.6%를 구하였다. 산소농도 18%에서는 LEL은 2.7%, UEL은 10.3% 를 측정하였으며, 산소농도 16%의 하한계는 2.8%, 상한계는 8.1%를 나 타내었다. 산소농도 14%에서의 LEL은 2.9%, UEL은 6.1% 측정되었으 며, 산소농도 12%에서의 LEL은 3.0%, UEL은 4.4%를 나타내었다. 산소 농도 11.5%에서 폭발 하한계는 3.1%, 폭발 상한계는 4.0%가 측정되었 으며, 최소산소농도(MOC)인 10.9%에서 하한계와 상한계가 동일하게 3.5%로 측정되었다.

or u



Fig. 6. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 ℃ and 2.0 bar.

4) 압력이 2.5 bar일 경우

Fig. 7은 온도가 25 ℃, 압력이 2.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 폭발과 비폭발로 나타내었다.

산소농도 21%에서 하한계는 2.5%, 상한계는 15.1%로 측정되었으며, 산소농도 18%에서는 LEL은 2.6%, UEL은 10.8%로 나타났다. 산소농도 16%에서는 LEL은 2.7%, UEL은 8.5%를 구하였으며, 산소농도 14%에 서는 하한계는 2.9%, 상한계는 6.3%가 측정되었다. 산소농도 12%에서 는 LEL은 3.0%, UEL은 4.5%가 나타났으며, 산소농도 11.5%에서 하한 계는 3.1%, 상한계는 4.1%로 측정되었으며, 최소산소농도인 10.8%에서 는 3.5%로 측정되었다.



Fig. 7. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C and 2.5 bar.

4-1-2. 온도 100 ℃일 경우

1) 압력이 1.0 bar일 경우

Fig. 8은 온도가 100 ℃, 압력이 1.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도가 21%에서 하한계는 2.4%, 상한계는 13.7%가 측정되었으며, 산 소농도 18%에서는 LEL은 2.7%, UEL은 10.3%로 나타났다. 산소농도 16% 에서 LEL은 2.7%, UEL은 8.0% 측정되었으며, 산소농도 14%에서는 하한계 는 2.8%, 상한계는 6.2%로 나타났다. 산소농도 12%에서는 LEL은 2.9%, UEL은 4.2%가 측정되었으며, 산소농도 11%에서 하한계는 3.0%, 상한계는 3.4%로 측정되었다. 또한 산소농도가 0.2% 줄인 10.8%에서 폭발범위는 3.2%로 산소농도가 감소할수록 폭발범위가 줄어드는 것으로 나타났다.

폭발 하한계 미만의 농도에서는 폭발이 발생하지 않는데 프로필렌의 농도가 낮을수록 가연물의 입자간 거리가 멀어져 에너지 전달률이 낮아 져 점화원을 통해 에너지가 공급되어도 연쇄반응을 일으키지 못해 폭발 이 발생되지 않는 것으로 사료된다. 이와 반대로 폭발 상한계 초과 농 도에서는 프로필렌의 농도가 증가하면 가연물 입자간 거리는 가깝게 되 는데 가연물이 연소하는데 필요한 산소 분자를 주변으로부터 취할 수 없는 상태가 되므로 폭발이 발생되지 않는 것으로 판단된다.



Fig. 8. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 °C and 1.0 bar.

2) 압력이 1.5 bar일 경우

Fig. 9는 온도가 100 ℃, 압력이 1.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 폭발과 비폭발로 나타내었다.

공기 중에서 폭발범위는 LEL의 경우 2.4%로 나타났으며, 2.3% 이하 의 농도에서는 폭발이 발생하지 않았으며, UEL의 경우 14.0%가 나타났 으며 14.1% 이상의 농도에서는 폭발하지 않았다. 산소농도 18%에서 하 한계는 2.7%, 상한계는 10.4% 측정되었으며, 산소농도 16%에서 LEL은 2.7%, UEL은 8.3% 측정되었다. 산소농도 14%에서 하한계는 2.8%, 상 한계는 6.3% 측정되었으며, 산소농도 12%에서 하한계는 2.8%, 상한계 는 4.4% 구하였다. 또한 산소농도 11%에서는 LEL은 2.9%, UEL은 3.6% 나타났으며, 산소농도 0.3% 줄어든 3.2%에서 3.3% 폭발범위를 측 정하였다.



Fig. 9. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 °C and 1.5 bar.

3) 압력이 2.0 bar일 경우

Fig. 10은 온도가 100 ℃, 압력이 2.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%에서 LEL의 경우에는 2.4%, UEL의 경우에는 15.2% 측 정되었으며, 산소농도 0.2% 줄어든 산소농도 18%에서 하한계는 2.5%, 상한계는 11.2% 나타났다. 산소농도 16%에서는 LEL의 경우에는 2.7%, UEL의 경우 8.5% 구하였으며, 산소농도 14%에서는 LEL의 경우 2.8%, UEL의 경우 6.4% 측정되었다. 산소농도 12%에서는 하한계는 2.8%, 상 한계는 4.7% 구하였으며, 산소농도 11%에서는 LEL의 경우 2.9%, UEL 의 경우 3.9% 측정되었다. 또한 최소산소농도 10.6%에서 3.3%의 폭발 범위를 구하였다.



Fig. 10. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 °C and 2.0 bar.

4) 압력이 2.5 bar일 경우

Fig. 11은 불활성기체인 질소를 사용하여 산소농도와 프로필렌의 농 도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

대기 중 산소농도인 21%에서 하한계는 2.4%, 상한계는 16.4% 측정되 었으며, 산소농도가 18%인 LEL은 2.4%, UEL은 11.6% 측정되었다. 산 소농도 0.2% 줄어든 16%에서는 하한계는 2.4%, 상한계는 9.0% 나타났 으며, 산소농도 14%에서는 LEL의 경우 2.5%, UEL의 경우 6.7% 구하 였다. 산소농도 12%에서 LEL의 경우 2.6%, UEL의 경우 4.8% 측정하 였으며, 산소농도 11%에서 하한계는 3.0%, 상한계는 4.8% 측정되었다. 또한 산소농도 10.5%인 최소산소농도는 3.3%에서 3.4%로 폭발범위를 구하였다.



Fig. 11. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 $^\circ\!\!C$ and 2.5 bar.

4-1-3. 온도 200 ℃일 경우

1) 압력이 1.0 bar일 경우

Fig. 12는 온도가 200 ℃, 압력이 1.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%에서는 하한계 2.2%, 상한계는 14.8%를 구하였으며, 산 소농도 18%에서는 하한계 2.3%, 상한계는 10.8% 측정하였다. 산소농도 16%에서 LEL의 경우에는 2.3%, UEL의 경우에는 8.5% 나타났으며, 산 소농도 14%에서는 LEL의 경우에는 2.5%, UEL의 경우에는 6.3% 측정 되었다. 산소농도 12%에서는 하한계는 2.6%, 상한계는 4.5% 구하였으 며, 산소농도 11%에서는 2.8%에서 3.8% 폭발범위를 구하였다. 또한 최 소산소농도인 10.3%에서는 3.4%인 폭발범위를 측정하였으며, 10.2% 이 하의 어떤 농도에서도 폭발하지 않는 것으로 나타났다.



Fig. 12. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 1.0 bar.

2) 압력이 1.5 bar일 경우

Fig. 13은 온도가 200 ℃, 압력이 1.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%에서 LEL의 경우 2.2%, UEL의 경우 15.3% 측정되었으 며, 산소농도 18%에서 하한계는 2.2%, 상한계는 11.6% 구하였다. 산소 농도 16%에서 LEL의 경우에는 산소농도 21%와 18%의 하한계와 동일 하게 2.2%로 나타났으며, UEL의 경우 9.1% 나타났다. 산소농도 14%에 서는 하한계는 2.4%, 상한계는 6.8% 구하였으며, 산소농도 12%에서는 LEL의 경우 2.6%, UEL의 경우 4.8% 나타났다. 또한 산소농도 11%에 서는 하한계는 2.8%, 상한계는 4.1% 측정하였으며, 최소산소농도의 폭 발범위는 3.5%로 나타났다.

\$



Fig. 13. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 1.5 bar.

3) 압력이 2.0 bar일 경우

Fig. 14는 온도가 200 ℃, 압력이 2.0 bar일 때 질소, 산소, 프로필렌을 사용하여 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내 었다.

산소농도가 21%일 때 하한계는 2.0%, 상한계는 16.1% 측정하였으며, 산소농도 18%에서는 LEL의 경우에는 2.2%, UEL의 경우에는 12.2% 나 타났다. 산소농도 16%에서는 하한계는 2.2%, 상한계는 9.4%를 구하였 으며, 산소농도 14%에서 LEL의 경우에는 2.3%, UEL의 경우에는 7.2% 로 나타났다. 산소농도 12%에서 하한계는 2.5%, 상한계는 5.2%를 측정 하였으며, 산소농도 11%에서는 LEL의 경우에는 2.7%, UEL의 경우에 는 4.3%로 나타났다. 또한 최소산소농도인 10.1%에서는 폭발범위 3.5% 를 구하였으며, 산소농도가 감소할수록 폭발범위가 줄어드는 것으로 나 타났다.



Fig. 14. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 2.0 bar.

4) 압력이 2.5 bar일 경우

Fig. 15는 온도가 200 ℃, 압력이 2.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도가 21%에서 LEL의 경우에는 1.9%, UEL의 경우에는 17.6% 가 나타났으며, 산소농도 18%에서는 하한계는 2.2%, 상한계는 13.3% 나타났다. 산소농도 16%에서는 하한계는 2.2%, 상한계는 10.4% 측정되 었으며, 산소농도 14%에서는 LEL의 경우에는 2.3%, UEL의 경우에는 7.8%를 구하였다. 산소농도 12%에서는 LEL의 경우에는 2.4%, UEL의 경우에는 5.4%가 측정되었으며, 산소농도 11%에서 하한계는 2.6%, 상 한계는 4.5%를 구하였다. 또한 최소산소농도인 10.0%에서 폭발범위는 3.4%에서 3.5%를 구하였다.

폭발의 위험성을 증가시키는 요인은 다양하지만 그 중 온도가 높아질 수록 분자들 간의 평균 운동에너지가 커지기 때문에 활성화 에너지 이 상의 에너지를 가진 분자 수가 많아지고 반응속도도 빨라진다. 이로 인 하여 온도가 증가하면 폭발 한계가 넓어지게 되어 위험성은 증가하게 된다.



Fig. 15. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 2.5 bar.

4-1-4. 동일한 온도에서의 압력에 따른 폭발범위

Fig. 16, 17 및 18은 불활성기체인 질소를 사용하여 온도가 각각 25 ℃, 100 ℃, 200 ℃일 때 압력(1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar)의 변화 에 따라 폭발범위를 나타낸 것이다.

동일한 온도에서 압력이 증가할수록 폭발범위는 증가하는데 이는 압 력이 상승하면 분자간의 평균거리가 짧아지고 분자의 유효충돌 횟수가 증가함에 따라 화염의 전달이 용이해져 폭발범위가 넓어지는 것으로 사 료된다.





Fig. 16. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C.



Fig. 17. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 ℃.



Fig. 18. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 ℃.
4-2. 이산화탄소 첨가에 대한 온도와 압력에 따른 폭발범위

4-2-1. 온도 25 ℃일 경우 압력의 변화에 따른 폭발범위

1) 압력이 1.0 bar일 때

Fig. 19는 불활성기체인 이산화탄소를 사용하여 온도가 25 ℃, 압력이 1.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나 타내었다.

산소농도가 21%일 때 하한계는 4.0%, 상한계는 11.1%를 측정하였으 며, 산소농도 18%에는 LEL의 경우 4.3%, UEL의 경우 7.6%가 나타났 다. 또한 산소농도 17%에는 LEL의 경우 4.8%, UEL의 경우 6.6%를 구 하였으며, 최소산소농도인 16.4%에서는 하한계는 5.6%, 상한계는 5.9% 를 측정하였다.

4



Fig. 19. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C and 1.0 bar.

2) 압력이 1.5 bar일 경우

Fig. 20은 온도가 25 ℃, 압력이 1.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도가 21%인 LEL의 경우 4.0%, UEL의 경우 11.5%가 측정되었 으며, 산소농도 18%에서는 하한계는 4.3%, 상한계는 8.0%로 나타났다. 또한 산소농도 17%에서는 LEL의 경우 4.7%, UEL의 경우 7.0%로 측정 되었으며, 최소산소농도인 16%에서는 폭발범위 5.7%에서 6.1%를 측정 하였다.





Fig. 20. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C and 1.5 bar.

3) 압력이 2.0 bar일 경우

Fig. 21은 온도가 25 ℃, 압력이 2.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도가 21%에서 하한계는 4.0%, 상한계는 12.6%가 나타났으며, 산소농도 0.3% 줄인 18%에서는 LEL의 경우 4.3%, UEL의 경우 8.4% 로 측정되었다. 산소농도 17%에서는 LEL의 경우 4.7%, UEL의 경우 7.3%를 측정하였으며, 산소농도 16%에서는 LEL의 경우 5.4%, UEL의 경우 6.4%가 나타났다. 또한 최소산소농도는 15.6%로서 하한계는 5.8%, 상한계는 6.2%를 측정하였다.



Fig. 21. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C and 2.0 bar.

4) 압력이 2.5 bar일 경우

Fig. 22는 이산화탄소, 산소, 프로필렌을 사용하여 온도가 25 ℃, 압력 이 2.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도가 21%일 때 LEL의 경우 4.0%, UEL의 경우 12.8%가 측정 되었으며, 산소농도 18%일 경우에는 하한계는 4.3%, 상한계는 8.7%를 구하였다. 산소농도 17%에서는 LEL의 경우 4.6%, UEL의 경우에는 7.5%를 측정하였으며, 산소농도 16%에서는 하한계는 5.2%, 상한계는 6.5%를 구하였다. 또한 최소산소농도는 0.6% 줄인 15.4%로서 폭발범위 는 5.7%에서 5.9%를 측정하였으며, 최소산소농도 미만의 농도에서는 폭 발이 발생되지 않았다.

or u

5



Fig. 22. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C and 2.5 bar.

4-2-2. 온도 100 ℃일 경우

1) 압력이 1.0 bar일 경우

Fig. 23은 온도가 100 ℃, 압력이 1.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%에서 하한계는 3.8%, 상한계는 11.9%로 나타났으며, 산 소농도 18%에서 LEL의 경우에는 4.3%, UEL의 경우에는 7.9% 구하였 다. 또한 산소농도 17%에서는 하한계는 4.7%, 상한계는 6.7%를 구하였 으며, 최소산소농도인 15.8%에서 폭발범위는 5.4%에서 5.6%를 측정하 였다.



Fig. 23. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 $^\circ\!C$ and 1.0 bar.

2) 압력이 1.5 bar일 경우

Fig. 24는 온도가 100 ℃, 압력이 1.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

대기 중의 산소농도인 21%일 때 폭발범위는 3.8%에서 12.4%였으며, 산소농도 18%에서는 LEL의 경우 4.2%, UEL의 경우 8.7%를 구하였다. 또한 산소농도 0.2% 줄인 16%에서는 LEL의 경우 4.6%, UEL의 경우 6.6%를 측정하였으며, 최소산소농도인 15.4%에서는 하한계는 5.3%, 상 한계는 5.5%로서 산소농도 15.3% 이하의 농도에서는 폭발하지 않는 것 으로 나타났다.



Fig. 24. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 °C and 1.5 bar.

3) 압력이 2.0 bar일 경우

Fig. 25는 온도가 100 ℃, 압력이 2.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%에서는 폭발 하한계는 3.8%, 폭발 상한계는 13.4%로 나 타났으며, 산소농도 18%에서는 LEL의 경우 4.2%, UEL의 경우 9.5%가 측정되었다. 산소농도 16%에서는 LEL의 경우 0.3% 증가된 4.5%, UEL 의 경우 2.6% 감소된 6.9%가 나타났다. 또한 산소농도 15%인 최소산소 농도는 LEL의 경우 4.8%, UEL의 경우 5.2%로 측정되었다.





Fig. 25. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 °C and 2.0 bar.

4) 압력이 2.5 bar일 경우

Fig. 26은 온도가 100 ℃, 압력이 2.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%에서 LEL의 경우 3.8%, UEL의 경우 13.6%를 구하였으 며, 산소농도 18%에서 LEL의 경우 4.0%, UEL의 경우 9.8%가 나타났 다. 산소농도 16%에서는 LEL의 경우 4.3%, UEL의 경우 7.3%로 측정 되었으며, 산소농도 15%에서는 LEL의 경우 4.5%, UEL의 경우 5.9%가 나타났다. 또한 최소산소농도인 14.8%에서는 폭발범위가 최소농도인 4.8%와 최대농도인 5.2%를 측정하였다.



Fig. 26. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 °C and 2.5 bar.

4-2-3. 온도 200 ℃일 경우

1) 압력이 1.0 bar일 경우

Fig. 27은 온도가 200 ℃, 압력이 1.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%에서 하한계는 3.7%, 상한계는 12.1%를 구하였으며, 산 소농도 18%에서 LEL의 경우 4.3%, UEL의 경우 8.2%를 측정하였다. 또한 산소농도 0.1% 줄인 17%에서는 LEL의 경우 4.5%, UEL의 경우 6.8%를 구하였으며, 최소산소농도인 15.6%에서는 LEL의 경우 4.8%, UEL의 경우 5.0%를 측정하였다.



Fig. 27. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 1.0 bar.

2) 압력이 1.5 bar일 경우

Fig. 28은 온도가 200 ℃, 압력이 1.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도가 21%일 때 LEL의 경우 3.7%, UEL의 경우 13.8%가 측정 되었으며, 산소농도가 18%일 때 LEL의 경우 4.2%, UEL의 경우 9.3% 에서 폭발하였다. 또한 산소농도 16%일 경우에는 LEL의 경우 4.5%, UEL의 경우 6.4%가 나타났으며, 최소산소농도 15.2%에서는 LEL의 경 우에는 4.8%에서 UEL의 경우에는 4.9%에서 폭발하였다.





Fig. 28. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 1.5 bar.

3) 압력이 2.0 bar일 경우

Fig. 29는 온도가 200 ℃, 압력이 2.0 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도가 21%일 때 하한계는 3.7%, 상한계는 15.2%에서 폭발하였으 며, 산소농도가 18%에서 LEL의 경우 4.1%, UEL의 경우에는 10.2%를 측정하였다. 또한 산소농도 0.2% 줄인 16%에서 폭발 하한계는 4.4%, 폭 발 상한계는 6.8%를 구하였으며, 산소농도 1.2% 줄인 14.8%에서 최소산 소농도를 측정하였으며, 4.7%에서 4.8% 폭발범위를 구하였다.





Fig. 29. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 2.0 bar.

4) 압력이 2.5 bar일 경우

Fig. 30은 온도가 200 ℃, 압력이 2.5 bar일 때 산소농도와 프로필렌의 농도 변화에 따른 폭발범위를 나타내었다.

산소농도 21%에서 하한계의 경우에는 3.7%, 상한계의 경우 15.6%를 측정하였으며, 산소농도 18%에서는 4.0%, UEL의 경우 11.1%에서 폭발 하였다. 또한 산소농도 16%에서 하한계의 경우 4.4%, 상한계의 경우 7.4%를 구하였으며, 최소산소농도인 14.6%에서 LEL의 경우 4.7%, UEL 의 경우 4.8%를 측정하였다.





Fig. 30. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 °C and 2.5 bar.

4-2-4. 동일한 온도에서의 압력에 따른 폭발범위

Fig. 31, 32 및 33은 이산화탄소를 사용하여 온도가 각각 25 ℃, 100 ℃, 200 ℃일 때 압력이 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar의 변화에 따 라 폭발범위를 나타낸 것이다.

질소와 동일하게 동일한 온도에서 압력이 증가할수록 분자의 유효충 돌 횟수가 증가함에 따라 화염의 전달이 용이해져 폭발범위가 넓어져 압력이 상승할수록 위험성이 증가하였다.





Fig. 31. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 25 °C.



Fig. 32. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 100 ℃.



Fig. 33. The relationship between oxygen concentration and propylene concentration at 200 ℃.

4-3. 질소와 이산화탄소 폭발범위 비교

가연성 가스와 조연성 가스가 일정한 비율로 혼합된 가연성 혼합기에 서는 점화원이 존재하면 폭발이 발생한다.

이때 폭발을 방지하기 위하여 불활성기체인 질소와 이산화탄소를 혼 합하여 폭발범위를 줄여줄 수 있으며 불활성기체의 비율이 커지면 폭발 범위는 좁아지게 된다.

Fig. 34, Fig. 35 및 Fig. 36은 각각 온도가 25 ℃, 100 ℃, 200 ℃에서 압력이 1 bar일 때 질소와 이산화탄소의 폭발범위를 함께 나타내었다.

Fig. 34는 온도 25 ℃, 압력 1 bar에서 폭발범위를 측정하였을 경우 산소농도 21%를 기준으로 보았을 때 질소는 하한계 2.5%, 상한계 13.5%가 측정되었으며, 이산화탄소는 하한계 4%에서 상한계 11.1%로서 이산화탄소를 첨가하였을 때 폭발범위가 더 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 비열이 큰 불활성기체일수록 열량의 흡수가 크므로 폭발범위선상 에 있어 일정한 최저화염 온도를 유지하기 위한 조성이 필요하다.

가스의 비열 대소는 분자 중 원자의 수에 따라 구분되므로 질소인 2 원자 분자보다 3원자 분자인 이산화탄소의 원자 수가 더 많으므로 이산 화탄소의 희석효과가 증가하게 되므로 이산화탄소를 첨가하였을 때 폭 발 범위가 더 줄어드는 것으로 나타났다⁶⁶⁾.



Fig. 34. The comparison of the explosive range of nitrogen and carbon dioxide at 25 °C.



Fig. 35. The comparison of the explosive range of nitrogen and carbon dioxide at 100 $^{\circ}$ C.



Fig. 36. The comparison of the explosive range of nitrogen and carbon dioxide at 200 °C.

4-4. 최소산소농도

4-4-1. 질소 첨가에 따른 영향

화염을 전파하기 위하여 최소한의 산소농도가 요구되는데 이를 최소 산소농도(Minimum oxygen concentration; MOC)라고 정의하며, 최소산 소농도는 공기와 가연물 중 산소의 부피를 나타낸다.

Fig. 37은 불활성기체인 질소와 프로필렌, 산소를 사용하여 온도와 압 력에 따라 최소산소농도의 변화에 대한 경향성을 나타내었다.

온도가 25 ℃일 때 압력이 1.0 bar, 1.5 bar 2.0 bar 및 2.5 bar일 때 최 소산소농도는 각각 11.2%, 11.0%, 10.9%, 10.8% 측정되었으며, 최소산소 농도 미만에서는 가연물의 어떤 농도에서도 폭발이 발생하지 않았다.

온도가 100 ℃일 때 최소산소농도는 1.0 bar일 때 10.8 %, 1.5 bar일 때 0.1% 줄어든 10.6%, 2.0 bar일 때 10.6%, 2.5 bar일 때 10.5% 나타났다.

온도가 200 ℃일 때 최소산소농도는 1.0 bar일 때 10.3 %, 1.5 bar일 때 0.1% 줄어든 10.2%, 2.0 bar일 때 10.1%, 2.5 bar일 때 10.0% 구하였다.

동일한 온도에서 압력이 증가할수록 또는 동일한 압력에서 온도가 증 가할수록 최소산소농도는 감소하였다. 최소산소농도가 감소한다는 것은 공정상의 위험성이 더 커진다는 것을 의미한다. 이는 동일한 온도나 압 력의 조건에서 압력 또는 온도가 높아지면 폭발용기 내부에 있는 분자 들의 충돌횟수가 증가하여 온도나 압력에 영향을 받는 반응속도가 빨라 지기 때문이다.





Fig. 37. The relationship between minimum oxygen concentration and temperature when using nitrogen.

4-4-2. 이산화탄소 첨가에 따른 영향

Fig. 38은 이산화탄소를 사용하여 온도(25 ℃, 100 ℃, 200 ℃)와 압력 (1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar)에 따른 최소산소농도의 변화를 나타 내었다.

온도가 25 ℃일 때 최소산소농도는 1.0 bar일 때 16.4%, 1.5 bar일 때 16.0%, 2.0 bar일 때 15.6%, 2.5 bar일 때 15.4%를 구하였다.

온도가 100 ℃일 때 최소산소농도는 압력이 1.0 bar에서 0.5 bar씩 상 승하여 15.8%에서 0.4%씩 감소하여 15.4%, 15.0 %였으며, 압력이 2.5 bar일 때 14.8%를 나타내었다.

온도가 200 ℃일 때 압력이 1.0 bar일 때 최소산소농도는 15.6%, 1.5
bar일 때 15.2%, 2.0 bar일 때 14.8%, 2.5 bar일 때 14.6%를 측정하였다.
최소산소농도는 동일한 온도에서 압력이 증가할수록 또는 동일한 압
력에서 온도가 증가할수록 감소하였다. 최소산소농도는 가연성 가스의
농도와 관계없이 산소 농도를 감소시키는 것만으로도 화재 및 폭발을
예방할 수 있으므로 중요한 인자이다.


Fig. 38. The relationship between minimum oxygen concentration and temperature when using carbon dioxide.

4-5. 질소 첨가에 따른 폭발압력 및 압력상승속도

4-5-1. 폭발압력

1) 온도가 25 ℃일 때

불활성기체 중 질소와 프로필렌, 산소를 사용하여 폭발압력을 측정하 였으며, 프로필렌의 농도는 5%를 기준으로 0.02초 단위로 측정하였다.

Fig. 39는 온도가 25 ℃일 때 산소농도에 따라 시간과 폭발압력의 관 계를 나타내었으며, (a)는 압력이 1.0 bar, (b)는 1.5 bar, (c)는 2.0 bar, (d)는 2.5 bar일 때 압력의 변화에 따라 프로필렌의 폭발압력을 나타내 었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발압력은 5.29 bar이며, 산소농도가 18%일 때 4.76 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 가 16%일 때 최대폭발압력은 3.54 bar이며, 산소농도가 14%일 때 최대 폭발압력은 1.00 bar를 측정하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발압력은 8.48 bar이며, 산소농도가 18%일 때 최대폭발압력은 7.65 bar를 나타내었다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발압력은 5.90 bar이며, 산소농도 14%에 서는 최대폭발압력 1.15 bar를 구하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도가 21%일 때 최대폭발압력은 11.68 bar

이며, 산소농도가 18%일 때 최대폭발압력은 10.54 bar를 측정하였다. 또한 산소농도가 16%일 때 최대폭발압력은 8.86 bar이며, 산소농도가 14%일 때 최대폭발압력은 1.26 bar를 구하였다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도가 21%일 때 최대폭발압력은 15.86 bar 이며, 산소농도 18%일 때 최대폭발압력은 13.50 bar가 나타났다. 또한 산소농도 16%일 때 최대폭발압력은 10.69 bar이며, 산소농도 14%에서 최대폭발압력은 1.26 bar를 측정하였다.

압력이 1.0 bar에서 2.5 bar로 증가할수록 가연성 혼합기 안의 가연성 가스 전체 질량의 증가로 인하여 최대폭발압력이 증가하며, 동일한 압 력에서 산소농도가 21%에서 14%로 감소할수록 폭발압력이 낮아지는 형상을 보이는데 이것은 산소농도가 줄어들수록 연료와 반응하는 산소 량이 줄어들기 때문에 가연성 물질의 혼합 양이 줄어들기 때문에 폭발 압력이 낮게 측정되는 것으로 사료되다.



Fig. 39. The relationship between explosion pressure of propylene and time according to oxygen concentrations at 25 °C.
(a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

2) 온도가 100 ℃일 때

Fig. 40은 온도가 100 ℃일 때 산소농도에 따라 시간과 폭발압력의 관계를 압력의 변화에 따라 나타내었으며, (a), (b), (c), (d)는 압력이 각각 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발압력은 4.53 bar이며, 산소농도가 18%에서는 4.00 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 16%일 때 최대폭발압력은 3.24 bar이며, 산소농도가 14%에서는 1.26 bar를 구하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 7.65 bar 이며, 산소농도가 18%에서는 6.51 bar를 구하였다. 또한 산소농도가 16%일 때 최대폭발압력은 5.52 bar이며, 산소농도가 14%에서는 1.64 bar를 측정하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 10.54 bar 이며, 산소농도가 18%에서는 9.62 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발압력은 7.57 bar이며, 산소농도 14%에서는 2.10 bar를 나타내었다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력 13.73 bar이 며, 산소농도가 18%에서는 12.06 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 16% 에서 최대폭발압력은 9.40 bar이며, 산소농도 14%에서는 4.23 bar를 측 정하였다.





Fig. 40. The relationship between explosion pressure of propylene and time according to oxygen concentrations at 100 °C.(a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

3) 온도가 200 ℃일 때

Fig. 41은 온도가 200 ℃일 때 프로필렌의 폭발압력을 나타내었으며,
(a)는 압력이 1.0 bar, (b)는 1.5 bar, (c)는 2.0 bar, (d)는 2.5 bar의 실
험에 대한 결과를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 3.54 bar 이며, 산소농도가 18%에서는 3.09 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발압력은 2.56 bar이며, 산소농도 14%에서는 1.26 bar를 측정하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 6.28 bar 이며, 산소농도가 18%에서는 5.37 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발압력은 4.46 bar이며, 산소농도 14%에서는 2.10 bar를 나타내었다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 8.41 bar 이며, 산소농도가 18%일 때 최대폭발압력은 7.72 bar를 구하였다. 또한 산소농도가 16%일 때 최대폭발압력은 6.20 bar이며, 산소농도가 14%에 서는 2.94 bar를 구하였다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발압력은 11.52 bar를 구하였으며, 산소농도가 18%에서는 9.70 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 16%일 때 최대폭발압력은 8.26 bar이며, 산소농도가 14%일 때 최대폭발압력은 4.53 bar를 구하였다.

동일한 압력에서 온도가 증가하면 폭발압력이 낮아진다. 이것은 기체 의 온도가 증가하면 점성이 높아짐에 따라 분자의 운동량이 증가함으로 서 분자 사이의 마찰력이 증가하기 때문이다⁶⁷⁾.





Fig. 41. The relationship between explosion pressure of propylene and time according to oxygen concentrations at 200 °C.
(a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

4-5-2. 압력상승속도

1) 온도가 25 ℃일 때

Fig. 42는 온도가 25 ℃일 때 시간과 폭발압력상승속도 (dp/dt)에 대한
결과를 압력의 변화에 따라 나타내었다. (a'), (b'), (c'), (d')는 압력이 각
각 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar일 때 결과를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도 는 239 bar/s로 측정되었으며, 산소농도가 18%일 때 220 bar/s를 구하 였다. 또한 산소농도 16%일 때 최대폭발 압력상승속도는 113 bar/s를 구하였으며, 산소농도 14%일 때 8 bar/s를 측정하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도 는 418 bar/s를 구하였으며, 산소농도가 18%일 때 372 bar/s를 구하였 다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발 압력상승속도는 281 bar/s를 측정 하였으며, 산소농도 14%에서는 8 bar/s를 구하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도 는 578 bar/s를 구하였으며, 산소농도가 18%일 때 521 bar/s를 측정하 였다. 또한 산소농도가 16%일 때 최대폭발 압력상승속도는 422 bar/s를 구하였으며, 산소농도 14%일 때 8 bar/s를 구하였다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도

는 787 bar/s를 구하였으며, 산소농도 18%일 때 638 bar/s를 측정하였 다. 또한 산소농도 16%일 때 최대폭발 압력상승속도는 445 bar/s를 구 하였으며, 산소농도 14%에서 8 bar/s를 측정하였다.

산소농도 21%에서 압력이 1.0 bar일 때 239 bar/s를 구하였으며, 2.5 bar일 때 787 bar/s를 구하였다. 이는 초기압력이 증가할수록 용기 내의 기체 분자간의 충돌횟수가 증가하기 때문에 최대폭발 압력상승속도가 증가하였다. 따라서 초기 압력이 높은 사업장에서는 가스 용기의 설계 시 두께 및 재료 선정에 유의하여야 한다.





Fig. 42. The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 25 °C. (a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

2) 온도가 100 ℃일 때

Fig. 43에서 (a'), (b'), (c'), (d')는 압력이 각각 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar일 때 시간과 프로필렌의 폭발압력상승속도에 대한 결과를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도 는 217 bar/s를 구하였으며, 산소농도가 18%에서는 160 bar/s를 측정하 였다. 또한 산소농도 16%일 때 최대폭발 압력상승속도는 103 bar/s를 측정하였으며, 산소농도가 14%에서는 8 bar/s를 구하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 376 bar/s를 측정하였으며, 산소농도가 18%에서는 315 bar/s를 구하였 다. 또한 산소농도가 16%일 때 최대폭발 압력상승속도는 239 bar/s이 며, 산소농도가 14%에서는 10 bar/s를 구하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 524 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 456 bar/s를 측정하였다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발 압력상승속도는 338 bar/s를 구하였으며, 산소농도 14%에서는 11 bar/s를 나타내었다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 676 bar/s이며, 산소농도가 18%일 때 최대폭발 압력상승속도는 540 bar/s를 구하였다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발 압력상승속도는 407 bar/s이며, 산소농도 14%에서 최대폭발 압력상승속도는 29 bar/s를 측정하였다.





Fig. 43. The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 100 ℃. (a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

3) 온도가 200 ℃일 때

Fig. 44는 온도가 200 ℃일 때 프로필렌의 폭발압력상승속도에 대한 결과를 나타내었으며, (a'), (b'), (c'), (d')는 압력이 각각 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar일 때 실험 결과를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 171 bar/s를 구하였으며, 산소농도가 18%에서는 114 bar/s를 측정하였 다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발 압력상승속도는 68 bar/s를 나타 내었으며, 산소농도 14%에서는 8 bar/s를 측정하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 304 bar/s를 구하였으며, 산소농도가 18%에서는 232 bar/s를 측정하였 다. 또한 산소농도 16%에서 최대폭발 압력상승속도는 173 bar/s를 구하 였으며, 산소농도 14%에서는 30 bar/s를 나타내었다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 410 bar/s를 측정하였으며, 산소농도가 18%일 때 최대폭발 압력상승속 도는 281 bar/s를 구하였다. 또한 산소농도가 16%일 때 최대폭발 압력 상승속도는 190 bar/s이며, 산소농도가 14%에서는 46 bar/s를 구하였다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도 는 566 bar/s를 구하였으며, 산소농도가 18%에서는 422 bar/s를 측정하 였다. 또한 산소농도 16%일 때 최대폭발 압력상승속도는 239 bar/s를 측정하였으며, 산소농도가 14%에서는 47 bar/s를 구하였다.

최대폭발 압력상승속도는 산소농도 21%에서 압력이 1.0 bar일 때 171 bar/s를 구하였으며, 2.5 bar일 때 566 bar/s를 구하였다. 이는 초기압력 이 증가할수록 인명 및 재산상의 2차적 피해를 증가시킬 수 있다.





Fig. 44. The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 200 ℃. (a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

4-6. 이산화탄소 첨가에 따른 폭발압력 및 압력상승속도

4-6-1. 폭발압력

1) 온도가 25 ℃일 때

Fig. 45는 불활성기체인 이산화탄소와 산소, 프로필렌을 사용하여 시 간과 폭발압력의 관계를 나타내었으며, (a), (b), (c), (d)는 압력이 각각 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar일 때 압력의 변화에 따른 결과를 나 타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발압력은 2.40 bar이며, 산소농도가 18%에서는 1.83 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 17%일 때 최대폭발압력은 1.19 bar를 측정하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 3.92 bar 이며, 산소농도가 18%일 때 최대폭발압력은 3.62 bar를 구하였다. 또한 산소농도가 17%일 때 최대폭발압력은 2.67 bar를 측정하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 5.98 bar 이며, 산소농도가 18%에서는 4.61 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 17%에서 최대폭발압력 4.00 bar를 구하였다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 8.26 bar 이며, 산소농도가 18%일 때 최대폭발압력은 6.51 bar를 구하였다. 또한 산소농도 17%에서 최대폭발압력은 5.98 bar를 나타내었다.

최대폭발압력은 산소농도 21%에서 압력이 1.0 bar일 때 2.40 bar를 구하였으며, 2.5 bar일 때 8.26 bar를 구하였다. 이것은 초기 압력이 증 가함에 따라 기체 분자간의 충돌횟수가 많아져 프로필렌의 폭발압력이 높게 측정되는 것으로 사료된다.





Fig. 45. The relationship between explosion pressure of propylene and time according to oxygen concentrations at 25 °C.
(a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

2) 온도가 100 ℃일 때

Fig. 46은 온도가 100 ℃일 때 압력 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar 의 변화에 따라 프로필렌의 폭발압력을 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발압력은 1.87 bar이며, 산소농도가 18%일 때 1.11 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 가 17%일 때 최대폭발압력은 0.96 bar이며, 산소농도 16%에서는 0.73 bar를 측정하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 3.54 bar이 며, 산소농도가 18%에서는 3.01 bar를 구하였다. 또한 산소농도가 17% 일 때 최대폭발압력은 2.29 bar이며, 산소농도 16%일 경우 1.42 bar를 측정하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 4.99 bar이 며, 산소농도가 18%에서는 4.38 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 17% 에서 최대폭발압력은 3.62 bar이며, 산소농도가 16%에서는 3.09 bar를 측정하였다. 산소농도 15%에서 최대폭발압력은 1.64 bar를 구하였다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 6.66 bar 이며, 산소농도가 18%에서는 5.90 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 17%에서 최대폭발압력은 4.65 bar이며, 산소농도가 16%일 때 최대폭발 압력은 4.08 bar를 측정하였다. 산소농도 15%에서 최대폭발압력은 3.16 bar이며, 산소농도 14.8%일 때 최대폭발압력은 1.42 bar를 측정하였다.





Fig. 46. The relationship between explosion pressure of propylene and time according to oxygen concentrations at 100 °C.(a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

3) 온도가 200 ℃일 때

Fig. 47은 온도가 200 ℃일 때 압력이 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar일 때 불활성기체 중 이산화탄소를 사용하였을 때 시간과 프로필렌 의 폭발압력의 관계에 대한 결과를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발압력은 1.64 bar이며, 산소농도가 18%에서는 0.85 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 17%일 때 최대폭발압력은 0.73 bar이며, 산소농도가 16%일 경우 0.47 bar를 구하였다. 산소농도 15.6%일 때 최대폭발압력은 0.35 bar를 측정 하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 3.47 bar 이며, 산소농도가 18%에서는 1.61 bar를 구하였다. 또한 산소농도가 17%일 때 최대폭발압력은 1.23 bar이며, 산소농도가 16%일 경우 0.85 bar를 구하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 4.08 bar이 며, 산소농도가 18%에서는 2.78 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 17% 에서 최대폭발압력은 2.44 bar이며, 산소농도 16%에서는 1.42 bar를 나 타내었다. 산소농도 15%일 때 최대폭발압력은 0.73 bar를 측정하였다. 압력이 2.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발압력은 5.14 bar이 며, 산소농도가 18%에서는 4.00 bar를 측정하였다. 또한 산소농도 17% 에서 최대폭발압력은 3.16 bar이며, 산소농도 16%에서는 1.68 bar를 나 타내었다. 산소농도 15%일 때 최대폭발압력은 1.11 bar를 측정하였다.





Fig. 47. The relationship between explosion pressure of propylene and time according to oxygen concentrations at 200 °C.
(a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

4-6-2. 압력상승속도

1) 온도가 25 ℃일 때

Fig. 48은 불활성기체인 이산화탄소와 산소, 프로필렌을 사용하여 시 간의 변화에 따른 압력의 순간변화율 $\left(\frac{dp}{dt}
ight)$ 을 측정하였으며, (a')는 1.0 bar, (b')는 1.5 bar, (c')는 2.0 bar, (d')는 2.5 bar일 때 압력의 변화에 따른 시간과 폭발압력상승속도에 대한 결과를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 46 bar/s를 구하였으며, 산소농도가 18%에서는 32 bar/s를 측정하였다. 또 한 산소농도 17%일 때 최대폭발 압력상승속도는 23 bar/s를 측정하였다. 압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 114 bar/s이며, 산소농도가 16%에서는 72 bar/s를 구하였다. 또한 산소

농도가 17%일 때 최대폭발 압력상승속도는 38 bar/s를 측정하였다. 압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 137 bar/s를 구하였으며, 산소농도가 18%에서는 114 bar/s를 측정하였다. 또한 산소농도 17%에서 최대폭발 압력상승속도는 65 bar/s를 구하였다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 182 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 152 bar/s를 측정하였다. 또한 산소농도 17%에서 최대폭발 압력상승속도는 120 bar/s를 나타내었다. 또한 동일한 압력에서 산소농도가 증가할수록 최대폭발압력까지의 도달시 간이 짧아진다. 이는 압력 용기의 내벽에서 화염면으로 반사되는 압력파 때문 이며, 폭발과 동시에 화염 전파면은 기체 분자의 충돌 횟수가 증가하므로 화 학적 반응을 가속화됨으로 인하여 짧아지는 것으로 판단된다.





Fig. 48. The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 25 °C. (a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

2) 온도가 100 ℃일 때

Fig. 49는 온도가 100 ℃일 때 프로필렌의 폭발압력상승속도에 대한 결과를 나타내었으며, (a'), (b'), (c'), (d')는 압력이 각각 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar일 때 실험에 대한 결과를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도 는 38 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 23 bar/s를 측정하였다. 또한 산소농도 17%일 때 최대폭발 압력상승속도는 21 bar/s이며, 산소농도 16%에서는 15 bar/s를 측정하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 93 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 57 bar/s를 구하였다. 또한 산소농 도가 17%일 때 최대폭발 압력상승속도는 36 bar/s이며, 산소농도 16% 에서는 19 bar/s를 측정하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 118 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 97 bar/s를 측정하였다. 또한 산 소농도 17%에서 최대폭발 압력상승속도는 61 bar/s를 구하였으며, 산소 농도가 16%에서는 51 bar/s를 측정하였다. 최소산소농도인 15%에서 최 대폭발 압력상승속도는 23 bar/s를 나타내었다.

압력이 2.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는

152 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 122 bar/s를 측정하였다. 또한 산소농도 17%에서 최대폭발 압력상승속도는 80 bar/s이며, 산소농도가 16%에서는 68 bar/s를 나타내었다. 산소농도 15%에서 최대폭발 압력상 승속도는 42 bar/s이며, 최소산소농도인 14.8%에서는 19 bar/s를 측정 하였다.





Fig. 49. The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 100 °C. (a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

3) 온도가 200 ℃일 때

Fig. 50은 온도가 200 ℃일 때 (a'), (b'), (c'), (d')의 압력이 각각 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar, 2.5 bar의 변화에 따라 프로필렌의 폭발압력상승 속도에 대한 결과를 나타내었다.

압력이 1.0 bar일 때 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도 는 36 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 17 bar/s를 측정하였다. 또한 산소농도 17%일 때 최대폭발 압력상승속도는 13 bar/s이며, 산소농도가 16%에서는 8 bar/s를 구하였다. 최소산소농도인 15.6%일 때 최대폭발 압력상승속도는 6 bar/s를 측정하였다.

압력이 1.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 87 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 44 bar/s를 구하였다. 또한 산소 농도가 17%일 때 최대폭발 압력상승속도는 21 bar/s이며, 산소농도가 16%에서는 15 bar/s를 구하였다.

압력이 2.0 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 114 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 67 bar/s를 측정하였다. 또한 산 소농도 17%에서 최대폭발 압력상승속도는 44 bar/s이며, 산소농도 16% 에서는 19 bar/s를 나타내었다. 산소농도 15%일 때 최대폭발 압력상승 속도는 11 bar/s를 측정하였다. 압력이 2.5 bar일 때 산소농도 21%일 경우 최대폭발 압력상승속도는 141 bar/s이며, 산소농도가 18%에서는 93 bar/s를 측정하였다. 또한 산 소농도 17%에서 최대폭발 압력상승속도는 55 bar/s이며, 산소농도 16% 에서는 25 bar/s를 측정하였다. 산소농도 15%일 때 최대폭발 압력상승 속도는 15 bar/s를 측정하였다.




Fig. 50. The relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 200 °C. (a) 1.0 bar, (b) 1.5 bar, (c) 2.0 bar, (d) 2.5 bar.

4-7. 가스의 폭연지수

4-7-1. 질소 첨가에 따른 영향

Fig. 51, Fig. 52, Fig. 53은 온도가 각각 25 ℃, 100 ℃, 200 ℃일 때 산소농도와 가스의 폭연지수(Gas deflagration index)에 관한 관계를 압력 의 변화에 따라 나타내었다.

가스의 폭연지수는 밀폐공간에서의 방출구의 크기와 두께, 개수를 설 계하는데 활용되며, 밀폐용기 중 가연성 혼합기가 폭발할 때 최대폭발 압력상승속도와 용기의 체적으로부터 얻을 수 있으며, 식 (12)와 같이 계산된다.

여기서 $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ 는 실험을 통하여 얻은 최대폭발 압력상승속도이며, V 는 용기의 체적(0.0011 m³)이다.

(12)

온도가 25 ℃, 산소농도 21%일 경우 압력이 1.0 bar일 때 24.71 bar·m/s, 압력이 2.5 bar일 때 81.20 bar·m/s이었다. 동일한 산소 농도 의 경우 압력이 증가함에 따라 Kg 값이 증가하였으며, 1.0 bar의 경우 산소의 농도 21%에서 16%로 감소할수록 폭연지수가 24.71 bar·m/s에서 0.78 bar·m/s로 크게 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 산소의 농도가 21%에서는 가연성 물질인 프로필렌과 반응성 이 좋기 때문에 가스 폭연지수가 높아 위험성이 크다. 그러나 산소농도 가 16%일 경우에는 산소의 농도가 부족하여 가연성 물질의 농도가 높 아 가연성 물질의 입자간 거리는 가까우나 산소의 부족으로 인하여 반 응성이 낮아 가스 폭연지수가 낮게 나타나고 있다.





Fig. 51. Relation between oxygen concentration and gas deflagration index at 25 ℃.



Fig. 52. Relation between oxygen concentration and gas deflagration index at 100 $^{\circ}$ C.



Fig. 53. Relation between oxygen concentration and gas deflagration index at 200 °C.

4-7-2. 이산화탄소 첨가에 따른 영향

Fig. 54, Fig. 55, Fig. 56은 온도가 각각 25 ℃, 100 ℃, 200 ℃일 때 불활성기체인 이산화탄소를 사용하여 산소농도에 따른 압력의 변화에 따라 가스의 폭연지수(Gas deflagration index)를 나타내었다.

가스의 폭발지수는 밀폐용기 중 가연성 혼합기가 폭발할 때 최대폭발 압력상승속도와 용기의 체적으로부터 얻을 수 있으며, 식 (13)과 같이 계산된다.

$$K_g = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \times V^{\frac{1}{3}}$$
(13)

여기서 $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ 는 실험을 통하여 얻은 최대폭발 압력상승속도이며, V 는 용기의 체적(0.0011 m³)이다.

온도가 25 ℃, 산소농도 21%일 경우 압력이 1.0 bar일 때 4.71 bar·m/s, 압력이 2.5 bar일 때 18.83 bar·m/s이었다. 동일한 산소 농도 의 경우 압력이 증가함에 따라 Kg 값이 증가하였으며, 산소의 농도가 감소할수록 Kg 값이 감소하였다.



Fig. 54. Relation between oxygen concentration and gas deflagration index at 25 ℃.



Fig. 55. Relation between oxygen concentration and gas deflagration index at 100 $^{\circ}$ C.



Fig. 56. Relation between oxygen concentration and gas deflagration index at 200 ℃.

5. 결 론

프로필렌의 불활성기체(질소, 이산화탄소)의 첨가에 따른 온도 및 압 력의 변화에 대한 폭발 위험성을 평가하기 위하여 폭발범위와 최소산소 농도를 측정하였으며, 이를 통하여 폭발의 위험 정도를 나타내는 지표 인 폭발 압력과 폭발압력상승속도를 구하였다. 또한 가스 폭발의 피해 를 최소화하기 위하여 폭연지수를 구함으로써 방출구의 크기와 개수를 예측할 수 있는 지수를 제시하였다.

- (1) 온도가 25 ℃, 압력이 1.0 bar, 불활성기체로 질소를 사용하였을 때 폭발범위를 측정한 결과 산소농도 21%일 때 하한계는 2.5%, 상한계 는 13.5%를 구하였으며, 동일한 온도와 동일한 산소의 농도일 경우 압력이 2.5 bar로 상승하였을 때 하한계는 2.5%, 상한계는 15.1%로 압력이 상승할수록 하한계는 변하지 않았으나, 상한계는 크게 상승 하는 것으로 나타났다.
- (2) 압력 1.0 bar에서 질소를 사용하였을 경우 산소농도가 21%에서 온 도가 25 ℃에서 200 ℃로 상승할수록 하한계는 2.5%에서 2.2%로 낮 아졌으며, 상한계는 13.5%에서 14.8%로 온도가 상승할수록 폭발범 위가 넓어졌다.

- (3) 온도 25 ℃이고, 압력이 1.0 bar에서 불활성기체인 이산화탄소를 사용하여 폭발범위를 측정한 결과 산소농도 21%일 때 하한계는 4.0%, 상한계는 11.1%를 구하였으며, 압력이 2.5 bar로 상승하였을 때는 하한계 4.0%, 상한계는 12.8%를 측정하였으며, 압력이 상승할수록 하한계는 변하지 않았으나, 상한계는 상승하는 것으로 나타났다.
- (4) 불활성기체인 이산화탄소를 사용하여 동일한 압력인 1.0 bar에서 산 소농도가 21%일 경우 온도가 25 ℃에서 200 ℃로 상승할수록 하한 계는 4.0%에서 3.7%로 하한계는 낮아졌으며, 상한계는 11.1%에서 12.1%로 높아져 온도가 상승할수록 폭발범위가 넓어졌다.
- (5) 불활성기체인 질소 또는 이산화탄소를 사용하였을 때 최소산소농도
 는 동일한 온도에서 압력을 상승시키거나 동일한 압력에서 온도를
 상승시켰을 때 최소산소농도는 낮아져 위험성이 증가하였다.
- (6) 불활성기체인 질소 또는 이산화탄소를 사용하여 폭발범위를 비교하 였을 때 질소의 폭발범위가 더 넓게 나타났다. 이는 비열이 큰 불활 성기체일수록 열량의 흡수가 더 크기 때문이다. 또한 이산화탄소의 첨가량이 질소보다 적어도 최소산소농도(MOC)가 낮게 나타남으로 서 희석효과가 크게 나타났다.

- (7) 질소를 사용하여 온도 25 ℃, 산소농도가 21%일 경우 최대폭발압력 을 구한 결과 압력 1.0 bar에서 5.29 bar로, 2.5 bar에서 15.86 bar를 측정하였다. 또한 온도가 100 ℃에서는 압력 1.0 bar일 때 4.53 bar, 압력이 2.5 bar일 때 13.73 bar를 구하였다. 온도가 200 ℃일 경우 압 력이 1.0 bar일 때 3.54 bar를, 압력이 2.5 bar일 때 11.52 bar를 구하 였다.
- (8) 질소를 사용하여 온도 25 ℃, 산소농도가 21%일 경우 최대폭발 압 력상승속도를 구한 결과 압력 1.0 bar에서 239 bar/s로, 2.5 bar에서 787 bar/s를 측정하였다. 또한 온도가 100 ℃에서는 압력 1.0 bar에 서 최대폭발 압력상승속도는 217 bar/s를, 2.5 bar일 때 676 bar/s를 구하였다. 온도가 200 ℃일 경우 압력이 1.0 bar에서 171 bar/s를, 2.5 bar로 상승할 때 556 bar/s를 구하였다.
- (9) 이산화탄소를 사용하여 온도 25 ℃, 산소농도가 21%일 경우 최대폭 발압력을 구한 결과 압력 1.0 bar에서 2.40 bar로, 2.5 bar에서 8.26 bar를 측정하였다. 또한 온도가 100 ℃에서는 압력 1.0 bar일 때 1.87 bar, 2.5 bar일 때 6.66 bar를 구하였다. 온도가 200 ℃일 경우 압력이 1.0 bar일 때 1.64 bar를, 2.5 bar일 때 5.14 bar를 구하였다.

- (10) 이산화탄소를 사용하여 온도 25 ℃, 산소농도가 21%일 경우 최대 폭발 압력상승속도를 구한 결과 압력 1.0 bar에서 46 bar/s로, 2.5 bar에서 182 bar/s를 구하였다. 또한 온도가 100 ℃에서는 압력 1.0 bar에서 최대폭발 압력상승속도는 38 bar/s를, 2.5 bar일 때 152 bar/s를 구하였다. 온도가 200 ℃일 경우 압력이 1.0 bar에서 36 bar/s를, 2.5 bar로 상승할 때 141 bar/s를 구하였다.
- (11) 최대폭발 압력상승속도와 용기의 체적을 통하여 구한 가스의 폭연 지수는 질소일 경우 온도가 25 ℃, 압력 1.0 bar, 산소농도 21%에 서 24.71 bar·m/s를 구하였으며, 밀폐공간에서의 방출구의 크기와 두께, 개수를 설계하는데 활용할 수 있다.

A 1

Nomenclature & Greek Letters

v	:	Specific volume	$[m^3/kg]$
Р	:	Absolute pressure	[kPa]
V	:	Volume	[m ³]
R	:	Gas constant	[kPa·m ³ /kg·K]
R_u	:	Universal gas constant	$[kPa \cdot m^3/kmol \cdot K]$
Т	:	Absolute temperature	[K]
n	:	Number of moles	[kmol]
М	:	Molecular mass	[kg/kmol]
m	:	Mass	[kg]
n_i	:	Mole of component	[mol]
n_t	:	Total mole of all components	[mol]
x_i	:	Mole fraction of component i	[-]
K_{g}	:	Gas deflagration index	[m·bar/s]
$\frac{dp}{dt}$:	Pressure rise rate	[bar/s]
ρ	:	Density	$[kg/m^3]$

참고 문헌

- (1) 박정환, "석유화학공업", 동화기술, pp. 10-13, 2015.
- (2) Y. Minbo and Y. Fengqi, "Process Modeling and Analysis of Manufacturing Pathways for Producing Ethylene and Propylene from Wet Shale Gas and Naphtha", Computer Aided Chemical Engineering 40, pp. 361–366, 2017.
- (3) H. C. Parka and M. K. Patel, "Naphtha Storage Fraction and GHG Emissions in the Korean Petrochemical Industry", Energy & Environment, Vol. 29, No. 6, pp. 919–937, 2018.
- (4) 한국석유화학협회, 석유화학산업 연간통계자료, http://www.kpia.or.kr/index.php/year_sugub.
- (5) M. Mitu and E. Brandes, "Influence of Pressure, Temperature and Vessel Volume on Explosion Characteristics of Ethanol/Air Mixtures in Closed Spherical Vessels", Fuel, Vol. 203, pp. 460 -468, 2017.
- (6) S. Chen, H. Shen, Q. Zhu and D. Liang, "Effect of Initial Temperature and Initial Pressure on Vapor Explosion Characteristics of Nitro-Thinner", J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 61, pp. 298 - 304, 2019.
- (7) 주형기, "화학물질 취급안전과 사고예방을 위한 MSDS(물질안전보

건자료) 정보의 실효성에 관한 연구", 세종대학교 정책과학대학원 석사학위논문, pp. 8-9, 2014.

- (8) 연합뉴스, "대만 가스폭발 때 프로필렌 성분 기준치 200배", https:// news.naver.com/main/read.nhn?mode=104&oid=001&aid=0007048300(2020. 12. 10).
- (9) SBS CNBC, "서산 롯데케미칼, 공장서 폭발사고...31명의 인명피해 발생", https://cnbc.sbs.co.kr/article/10000975168?division=NAVER(2020.
 12. 10).
- (10) G. Tomlin, D. M. Johnson, P. Cronin, H. N. Phylaktou and G. E. Andrews, "The Effect of Vent Size and Congestion in Large-Scale Vented Natural Gas/Air Explosions", J. Loss Prev. Proc., Vol. 35, pp. 169–181, 2015.
- (11) Y. J. Yun and D. J. Park, "A Study on the Development of Assessment Index for Catastrophic Incident Warning Sign at Refinery and Petrochemical Plants", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 57, No. 5, pp. 637–651, 2019.
- (12) 박상용, 한규성, 김희수, 양한승, 김현중, "바이오복합재료 제조 공 정시 제조온도 및 시간에 의한 영향 평가", 한국목재공학회, Vol. 33, No. 1, pp. 29-37, 2005.
- (13) D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, 3rd ed. Pearson Education", Inc., Boston, pp. 225–260, 2011.

- (14) S. Kundu, J. Zanganeh and B. Moghtaderi "A Review on Understanding Explosions from Methane - Air Mixture", J. Loss Prevent. Proc., Vol. 40, pp. 507 - 523, 2016.
- (15) 이해평, 박영주 "연소공학", 화수목, p. 40, 2015.
- (16) H. S. Kim, W. K. Kim, Y. J. Choi, J. H. Kim and J. W. Choi, "A Study on the Ignition Characteristics of Gasoline due to Variation in Octane Number", J. of the Korean Society of Safety, Vol. 33, No. 2, 2018.
- (17) 이승훈, "화재과학", 동화기술, pp. 283-291, 2017.
- (18) 이태성, "DME-LPG 혼합연료의 폭발 특성에 관한 연구", 서울산업대 학교 석사학위논문, pp. 10-13, 2018.
- (19) D. Razus, C. Movileanua and D. Oancea, "The Rate of Pressure Rise of Gaseous Propylene - Air Explosions", J. Hazardous Materials, Vol. 139, No. 1, pp. 1 - 8, 2007.
- (20) BS EN 14994, "Gas Explosion Venting Protective Systems", British Standards Institute, London, UK, 2007.
- (21) NFPA 68, "Standard on Explosion Protection by Deflagration Vending", National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2018.
- (22) Y. Koshiba, T. Nishida, N. Morita and H. Ohtani, "Explosion

Behavior of n-Alkane/Nitrous Oxide Mixtures", Process Safety Environmental Protection, Vol. 98, pp. 11 - 15, 2015.

(23) 최재욱, 전성균, "소방안전공학", 화수목, pp. 257-258, 2018.

- (24) 安全工學協會, "爆發", 海文堂, pp. 27-28, 1983.
- (25) 柳生昭三, "發火溫度の測定データ", 技術ノート, Vol. 11, No. 2, pp. 238-241, 1972.
- (26) 김영문, "유기용제의 자연발화 특성과 미소점화원에 의한 화재폭발 에 관한 연구", 부경대학교 석사학위논문, p. 7, 2014.
- (27) L. Q. Wang, H. H. Ma and Z. W. Shen, "Explosion Characteristics of H₂/N₂O and CH₄/N₂O Diluted with N₂", Fuel, Vol. 260, 116355, 2020.
- (28) D. Chen, Y. Yao and Y. Deng, "The Influence of N₂/CO₂ Blends on the Explosion Characteristics of Stoichiometric Methane - Air Mixture", Process Safety Progress, Vol. 38, No. 2, pp. 1–5, 2019.
- (29) B. Zhang, G. Xiu and C. Bai, "Explosion Characteristics of Argon/Nitrogen Diluted Natural Gas - Air Mixtures", Fuel, Vol. 124, pp. 125 - 132, 2014.
- (30) A. Abdelkhalik, E. Askar, D. Markus, E. Brandes and I. El-sayed, M. Hassan, M. Nour and T. Stolz, "Explosion Regions of Propane, Isopropanol, Acetone, and Methyl Acetate/Inert Gas/Air Mixtures", J. Loss Prevent. Proc., Vol. 43, pp. 669–675, 2016.

- (31) M. G. Zabetakis, A. L. Furno and G. W. Jones, "Minimum Spontaneous Ignition Temperature of Combustible in Air", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 46, No. 10, pp. 2173–2178, 1954.
- (32) Y. J. Choi and J. W. Choi, "Effects of Inert Gas Addition, Oxygen Concentration, and Pressure on Explosion Characteristics of Propylene", J. Korean Chemical Engineering, Vol. 38, No. 2, pp. 337–341, 2021.
- (33) Y. J. Choi and J. W. Choi, "Experimental Study on the Changes in the Oxygen Concentration and the Pressure at Temperature of 200 °C for the Assessment of the Risks of Fire and Explosion of Propylene", J. Korean Chemical Engineering Research, Vol. 58, No. 3, pp. 356–361, 2020.
- (34) Y. J. Choi, J. M. Heo, J. H. Kim and J. W. Choi, "A Study on the Measurement of Explosion Range by CO₂ Addition for the Process Safety Operation of Propylene", J. of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 20, No. 7, pp. 599–606, 2019.
- (35) Y. J. Choi and J. W. Choi, "The Influence of Pressure, Temperature, and Addition of CO₂ on the Explosion Risk", J. Korean Chemical Engineering Research, Vol. 58, No. 4, pp. 610–617, 2020.
- (36) D. M. Ha, "A Study on the Fire and Explosion Properties of m-Cresol", Korean J. Hazardous Materials, Vol. 5, No. 2, pp. 105–110, 2018.

- (37) 김원길, "옥탄가 변화에 따른 가솔린의 폭발특성과 자연발화에 관 한 연구", 부경대학교 박사학위논문, pp. 58-97, 2018.
- (38) 표돈용, "수소 취급설비의 화재·폭발 안전성평가 연구", 울산대학교 석사학위논문, pp. 35-56, 2018.
- (39) M. Mitu, V. Giurcan, D. Razus, M. Prodan and D. Oancea, "Propagation Indices of Methane–Air Explosions in Closed Vessels", J. Loss Prevent. Proc., Vol. 47, pp. 110–119, 2017.
- (40) G. Cui, Z. Li, C. Yang, Z. Zhou and J. Li, "Experimental Study of Minimum Ignition Energy of Methane - Air Mixtures at Low Temperatures and Elevated Pressures", Energy & Fuels, Vol. 30, No. 8, pp. 6738-6744, 2016.
- (41) X. Song, H. Su, L. Xie, B. Li, Y. Cao and Y. Wang, "Experimental Investigations of the Ignition Delay Time, Initial Ignition Energy and Lower Explosion Limit of Zirconium Powder Clouds in a 20 L Cylindrical Vessel", Process Safety and Environmental Protection, pp. 1–11, 2019.
- (42) F. S. Li, G. X. Li and Z. Y. Sun, "Explosion Behaviour of 30% Hydrogen/70% Methane-Blended Fuels in a Weak Turbulent Environment", Energies, Vol. 10, No. 7, pp. 915–930, 2017.
- (43) D. Mathieu, "Power Law Expressions for Predicting Lower and Upper Flammability Limit Temperatures", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 52, No. 26, pp. 9317–9322, 2013.

- (44) D. M. Ha, "Prediction of Explosion Limits of Aldehydes Using Chemical Stoichiometric Coefficients and Heats of Combustion", J. Korean Institute for Gas, Vol. 19, No. 2, pp. 5–11, 2015.
- (45) W. Xu, W. Wu and Y. Lin, "Numerical Method and Simplified Analytical Model for Predicting the Blast Load in a Partially Confined Chamber", Computers & Mathematics with Applications, Vol. 76, No. 2, pp. 284–314, 2018.
- (46) Z. R. Wang, L. Ni, X. Liu, J. C. Jiang and R. Wang, "Effects of N₂/CO₂ on Explosion Characteristics of Methane and Air Mixture", J. Loss Prevent. Proc., Vol. 31, pp. 10–15, 2014.
- (47) J. Cao, L. Ding, Y. Pan and J. Zhao, "Lower Explosion Limits Measurements and Prediction for Binary Liquid Mixtures", IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., Vol. 585, pp. 1–11, 2019.
- (48) X. Wan, Q. Zhang and S. L. Shen, "Theoretical Estimation of the Lower Flammability Limit of Fuel-Air Mixtures at Elevated Temperatures and Pressures", J. Loss Prevent. Proc., Vol. 36, pp. 13-19, 2015.
- (49) H. Groh, "Explosion Protection", Butterworth-Heinemann, pp. 2–5, 2003.
- (50) J. A. Kent, Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology, Springer, pp. 65–69, 2013.

(51) 이해평, 박영주 "연소공학", 화수목, pp. 256-258, 2015.

- (52) D. K. Pritchard, "Literature Review: Explosion Hazards Associated with Nanopowders", Health & Safety Laboratory, pp. 10–12, 2004.
- (53) Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications 4 Edition in SI units", Mc Graw-Hill, New York, pp. 40–42, 2019.
- (54) Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Thermodynamics An Engineering Approach 8 Edition", Mc Graw-Hill, New York, pp. 702–705, 2014.
- (55) E. Rathakrishnan and "Fundamentals of Engineering Thermodynamics 2 Edition. Prentice-Hall of India Private Limited", Eastern Economy Edition, New Delhi, pp. 207–209, 2005.
- (56) X. T. Yan and Y. Xu, "Chemical Vapour Deposition: An Integrated Engineering Design for Advanced Materials", 1st ed, Springer, London, pp. 29–31, 2010.
- (57) Y. D. Jo, "A Study on Physicochemical Characteristics of Hydrogen Gas Explosion", J. of the Korean Institute of Gas, Vol. 16, No. 1, pp. 8–14, 2012.
- (58) S. K. Kan, Y. G. Kim and Y. D. Cho, "Safety Evaluation of Gas Facility Ventilation and Explosion by CFD Simulation", The Korean Institute of Gas, p. 76, 2016.
- (59) 한국산업안전보건공단, "가스폭발 예방을 위한 폭연 방출구 설치에 관한 기술지침", KOSHA Guide-49-2012, pp. 1-25, 2012.

- (60) 이수경, 엄종호, 오규형, 최재욱, 백종배, 하동명, "최신가스 안전공 학", 동화기술, pp. 202-203, 2012.
- (61) 박정환, "석유화학공업", 동화기술, p. 183, 2015.
- (62) 인세진, 오인석, 최돈묵, 이창우, "소화약제화학", 화수목, p. 190, 2015.
- (63) KOSHA, "Material Safety Data Sheet of Propylene", http://msds.kosha.or.kr, 2019.
- (64) 최재욱, "소방화학실험", 화수목, pp. 42-47, 2018.
- (65) American Society for Testing and Materials, "ASTM E918 83: Standard Practice for Determining Limits of Flammability of Chemicals at Elevated Temperature and Pressure", West Conshohocken, PA, 2011.
- (66) 최재욱, 전성균, "소방안전공학", 화수목, pp. 207-208, 2018.
- (67) F. M. White, "Viscous Fluid Flow", McGraw-Hill, pp. 25-31, 2006.

Assessment of the Explosion Risk of Propylene according to the Changes in Temperature and Pressure upon Addition of the Inert Gas

Yu-Jung Choi

Dept. of Fire Protection Engineering, Graduate School, Pukyong National University

Abstract

In order to assess the risk of propylene according to the changes in temperature and pressure, the explosion range and the minimum oxygen concentration were measured using nitrogen and carbon dioxide as inert gases, and through these, the explosion pressure and the explosion pressure rise rate, which are the indices of the risk of explosion, were derived. In addition, to minimize the damage of gas explosion, an index that allows predicting the size and number of outlets by deriving the deflagration index was presented.

- (1) At the temperature of 25 °C and the pressure of 1.0 bar in nitrogen as an inert gas, the explosion range was 2.5% as the lower limit and 13.5% as the upper limit at the oxygen concentration of 21%, and if the pressure was increased to 2.5 bar at the same temperature and oxygen concentration, the lower limit was 2.5% and the upper limit 15.1%. This indicated that the lower limit was unchanged while the upper limit rose substantially when the pressure was increasing.
- (2) At the pressure of 1.0 bar in nitrogen, the increase of temperature from 25 °C to 200 °C decreased the lower limit from 2.5% to 2.2% and increased the upper limit from 13.5% to 14.8%, which indicated the increase in temperature widened the explosion range.
- (3) At the temperature of 25 °C and the pressure of 1.0 bar, the measurement of the explosion rate using carbon dioxide as an inert gas showed that the lower limit was 4.0% and the upper limit 11.1% at the oxygen concentration of 21%. When the pressure was increased to 2.5 bar, the lower limit was 4.0% and the upper limit 12.8%, which indicated that the upper limit rose

while the lower limit was unchanged when pressure was increased.

- (4) At the pressure of 1.0 bar in carbon dioxide as an inert gas, the increase of temperature from 25 °C to 200 °C decreased the lower limit from 4.0% to 3.7% and increased the upper limit from 11.1% to 12.1% at the oxygen concentration of 21%, which indicated that the explosion range was widened if temperature increased.
- (5) When using inert gas nitrogen or carbon dioxide, the minimum oxygen concentration decreased if pressure was increased at the same temperature or temperature was increased at the same pressure, which indicated the increased risk.
- (6) When the explosion range was compared using inert gas nitrogen or carbon dioxide, the explosion range in nitrogen was wider. This is because an inert gas with the greater specific heat would absorb more calories. In addition, although the amount of added carbon dioxide was less than that of nitrogen, a large dilution effect was caused by the low minimum oxygen concentration(MOC).

- (7) At the temperature of 25 °C and the oxygen concentration of 21% in nitrogen, the maximum explosion pressure was 5.29 bar at the pressure of 1.0 bar, and 15.86 bar at the pressure of 2.5 bar. Furthermore, at 100 °C, the maximum explosion pressure was measured to be 4.53 bar at the pressure of 1.0 bar, and 13.73 bar at the pressure of 2.5 bar. At 200 °C, it was measured to be 3.54 bar at the pressure of 1.0 bar, and 11.52 bar at the pressure of 2.5 bar.
- (8) At the temperature of 25 °C and the oxygen concentration of 21% in nitrogen, the maximum explosion pressure rise rate was 239 bar/s at the pressure of 1.0 bar, and 787 bar/s at the pressure of 2.5 bar. In addition, at 100 °C, the maximum explosion pressure rise rate was measured to be 217 bar/s at the pressure of 1.0 bar, and 676 bar/s at the pressure of 2.5 bar. At 200 °C, it was measured to be 171 bar/s at the pressure of 1.0 bar, and 556 bar/s at the pressure of 2.5 bar.
- (9) At the temperature of 25 °C and the oxygen concentration of 21% in carbon dioxide, the maximum explosion pressure was 2.40 bar at the pressure of 1.0 bar, and 8.26 bar at the pressure

of 2.5 bar. Furthermore, at 100 $^{\circ}$ C, the maximum explosion pressure was measured to be 1.87 bar at the pressure of 1.0 bar, and 6.66 bar at the pressure of 2.5 bar. At 200 $^{\circ}$ C, it was measured to be 1.64 bar at the pressure of 1.0 bar, and 5.14 bar at the pressure of 2.5 bar.

- (10) At the temperature of 25 °C and the oxygen concentration of 21% in carbon dioxide, the maximum explosion pressure rise rate was 46 bar/s at the pressure of 1.0 bar, and 182 bar/s at the pressure of 2.5 bar. In addition, at 100 °C, the maximum explosion pressure rise rate was measured to be 38 bar/s at the pressure of 1.0 bar, and 152 bar/s at the pressure of 2.5 bar. At 200 °C, it was measured to be 36 bar/s at the pressure of 1.0 bar, and 141 bar/s at the pressure of 2.5 bar.
- (11) The deflagration index of the gas obtained through the maximum explosion pressure rise rate and the volume of the container was 24.71 bar·m/s at the temperature of 25 °C, the pressure of 1.0 bar and the oxygen concentration of 21% in nitrogen, which can be used to design the size, thickness, and number of outlets in an enclosed space.