

프로필렌의 공정안전 운전을 위한 CO₂ 첨가량에 따른 폭발범위 측정에 관한 연구

최유정¹, 허종만¹, 김정훈², 최재욱^{3*}

¹부경대학교 대학원 소방공학과, ²광명토탈엔지니어링, ³부경대학교 소방공학과

A Study on the Measurement of Explosion Range by CO₂ Addition for the Process Safety Operation of Propylene

Yu-Jung Choi¹, Jong-Man Heo¹, Jung-Hun Kim², Jae-Wook Choi^{3*}

¹Department of Fire Protection Engineering Graduate Student, Pukyong National University

²Kwangmyung Total Engineering

³Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University

요약 위험물질에 의한 제조물을 취급하는 설비와 시설은 대부분 고온, 고압으로 공정을 운전한다. 이로 인해 화재 폭발로 인한 위험성이 증대되고 있다. 특히, 폭발 사고는 석유·화학·가스설비 등 위험물 시설의 가장 주된 위험요인으로 작용하고 있으며, 그 중, 프로필렌은 석유화학 플랜트의 기초 원료 및 첨가 중합반응에 의한 합성물질을 제조하는 현장에서 많이 사용되고 있다. 산소농도의 변화에 대한 폭발범위를 구함으로써 프로필렌을 사용하는 사업장에서 발생 될 수 있는 폭발을 예방하기 위하여 불활성 가스인 CO₂를 이용하여 온도와 압력의 변화에 따라 산소농도의 변화에 대한 폭발 범위를 구하였다. 온도는 25 ℃, 100 ℃, 200 ℃로 변화시켜 측정하였으며, 용기 내 압력을 1.0 kgf/cm².G, 1.5 kgf/cm².G, 2.0 kgf/cm².G, 2.5 kgf/cm².G로 CO₂를 가압시켜 측정하였다. 폭발한계는 온도, 압력 및 산소농도와 관계가 있으며, 온도와 압력이 높아질수록 최소산소농도는 낮아지고, 산소농도가 낮아질수록 폭발범위는 좁아졌다. 또한, 최소산소농도 이하의 농도에서는 프로필렌의 증기와 점화원이 존재하여도 폭발이 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

Abstract Most facilities that manufacture products made from the hazardous materials operate at high temperatures and pressures. Therefore, there is a risk of fire explosion. In particular, an explosion accident is a major risk factor for facilities with hazardous materials, such as oil, chemical, and gas. Propylene is often used in sites producing basic raw materials and synthetic materials by addition polymerization at petrochemical plants. To prevent an explosion in the business using propylene, the explosion limit with the oxygen concentration was calculated according to the changes in temperature and pressure using an inert gas, carbon dioxide. In these measurements, the temperature was 25 ℃, 100 ℃, and 200 ℃ and the amount of carbon dioxide in the container was 1.0 kgf/cm².G, 1.5 kgf/cm².G, 2.0 kgf/cm².G, and 2.5 kgf/cm².G. The explosion limit was related to temperature, pressure, and oxygen concentration. The minimum oxygen concentration for an explosion decreased with increasing temperature and pressure. The range of explosion narrowed with decreasing oxygen concentration. In addition, no explosion occurred at concentrations below the minimum oxygen concentration, even with steam and an ignition source of propylene

Keywords : Propylene, Explosion Range, Carbon Dioxide, Temperature, Pressure, MOC(Minimum Oxygen Concentration)

*Corresponding Author : Jae-Wook Choi(Pukyong National Univ.)

email: jwchoi@pknu.ac.kr

Received April 24, 2019

Accepted July 5, 2019

Revised May 30, 2019

Published July 31, 2019

1. 서론

위험물질에 의한 제조물을 취급하는 설비와 시설들은 대부분 고온·고압으로 공정을 운전 한다. 공정운전 중에 사고에 의하여 화재·폭발로 인한 인명 피해와 물적 피해를 초래할 수 있다[1]. 특히, 폭발 사고는 석유화학가스설비 등 위험물 시설의 가장 주된 위험요인으로 작용하고 있으며, 한국가스안전공사에서 제공하는 가스사고 통계 자료를 살펴보면 2017년 가스 사고 121건 중 가스 폭발로 인한 사고가 34건으로 사고의 28 %를 점유하고 있으며, 2013년부터 2017년까지 5년간의 가스 사고 형태별로 분류 시 전체 602건 중 폭발에 의한 사고가 32건 (38.5 %)으로 가장 많았다[2].

가스 폭발의 경우 폭발의 위험성은 압력에너지의 상태에 따라 크게 달라지는데, 개방공간에서 가연성 혼합기체가 존재 시 착화하면 압력파는 거의 생기지 않으며, 압력 상승에 의한 피해는 거의 없다. 그러나 건물 내부 등 밀폐공간에서의 폭발은 압력이 크게 상승하고, 벽면 등에 강한 충격파를 주어 벽면의 전도 및 파괴를 발생시키며, 압력에너지가 압력파로서 외부로 방출되어 인접한 건물, 설비 및 인명에 피해를 준다[3-5].

많은 연소 특성치 중 폭발한계는 가연성 가스가 폭발할 수 있는 농도범위로서 가연성 가스의 폭발한계에서 낮은 쪽을 폭발하한계(Lower Explosion Limit; LEL), 높은 쪽을 폭발상한계(Upper Explosion Limit; UEL)라 하며, 폭발한계는 통상적으로 산소농도가 증가하면 넓어지고 감소하면 좁아진다.

산소의 농도는 폭발한계에 영향을 끼치며 특정한 산소농도 이하에서는 폭발하지 않는다. 이 지점에서의 산소농도를 최소산소농도(Minimum Oxygen Concentration; MOC)라고 하며 화재 및 폭발을 방지하기 위한 불활성화로서 활용된다[6-7].

폭발과 관련된 연구사례로는 Oh 등[8]이 가연성 가스의 폭발특성에 관하여 연구를 하였고, Choi 등[9]은 산소농도와 압력 변화에 따른 도시가스의 폭발특성을 분석하여 폭발범위를 구하였다. 또한, Tsurumi 등[10]은 프로판과 수소의 공기와의 혼합물의 최대 소멸지름에 관하여 연구하였으며, Ohsawa 등[11]은 메탄-산소 혼합물에서 스파크 점화의 스펙트럼 측정에 관한 연구를 하였다.

따라서 본 연구에서는 합성원료 및 화학제품을 생산하는 산업인 석유화학 플랜트의 기초 원료로 사용된다[12-13]. 현재 물질안전보건자료(MSDS)에서 제공하는 프로필렌의 가연성 한계농도의 값인 2.4 % ~ 10.3 %는 질소의

분위기에 의한 폭발범위이다. 따라서 본 연구에서는 프로필렌을 사용하여 불활성 물질인 CO₂에 의한 폭발한계농도를 구함으로써 불활성 가스인 질소와 비교 검토하고자 한다.

또한 산소농도의 변화에 따른 폭발한계를 구함으로써 폭발이 발생되지 않는 최소산소농도(MOC)를 구하였으며, 온도와 압력의 변화에 따른 가연성한계농도를 측정함으로써 프로필렌을 저장하거나 취급하는 산업현장에서 화재·폭발 사고를 예방할 수 있는 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경[14]

일반적으로 가스폭발은 Dalton의 분압법칙을 적용하는 것이 바람직하다. 일정 온도에서 혼합기체의 전체 압력은 구성되어 있는 기체들의 부분 압력의 합한 값과 같다는 것을 나타낸다.

두 가지 이상의 기체가 혼합된 기체 혼합물의 경우 각각의 물질의 혼합조성비는 압력이나 부피에 의존하고, 혼합 기체에 들어있는 물질들의 몰수의 합은 총 혼합기체의 몰수가 되고, 각각의 몰수는 해당하는 성분 기체의 농도, 즉 양을 나타낸다. 그러나 총 혼합기체는 일정 압력에서 부피의 변화 또는 일정 부피에서 각각의 압력이 변화하면, 각 성분의 농도가 변화하므로 물리화학적 조성을 나타낼 때 몰분율의 형태로 나타내는 것이 더 간편하게 사용된다.

몰분율 x_i 는 각 몰수 n_i 에 대하여 존재하는 모든 물질의 몰수의 합, $n_t = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$ 을 나눈 것으로 식 (1)과 같으며, 혼합물 속에 존재한 모든 물질은 몰분율의 합으로서 식 (2)와 같다.

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

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

혼합물 속에 존재하는 물질의 몰분율을 알지 못하는 경우에도 식 (2)를 이용하면 혼합물질 조성을 파악할 수 있다. 몰분율은 혼합기체의 온도, 압력, 부피에 영향을 받지 않기 때문에 몰분율로만 표현한다.

기체 혼합물에 대해 각각의 성분을 이상기체로 가정할 때, 이상기체 법칙이 적용되고, 혼합기체의 상태방정식은 식 (3)으로 표현된다.

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

몰수가 n_1, n_2, n_3 인 세 기체가 특정 온도 T에서 부피 V인 용기 속에 혼합되어 존재한다 가정하면 $n_t = n_1 + n_2 + n_3$ 로 표현되고, 이상기체 방정식을 사용하면 식 (4)로 혼합기체 압력을 구할 수 있다.

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

각각의 혼합기체에 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, 식 (6)이 된다.

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

$$= n_t \frac{RT}{V} = P$$

Dalton의 분압 법칙은 혼합물을 이루는 각각의 기체의 몰분율과 관계가 있다. 식 (5)의 첫째 항을 식 (4)로 나누어서 식 (1)에 대입하면 식 (7)과 같이 나타난다.

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

식 (7)은 일부 기체 혼합물에 한정되지 않고 모든 기체 혼합물에도 적용되며, 전체 압력과 혼합물을 이루는 각각의 기체의 몰분율만 알면 분압을 계산할 수 있으며, 분압을 이용하면 얻고자 하는 화학조성농도를 만들 수가 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험시료

본 실험에서 사용된 시료는 순도 99.6 %인 프로필렌과 유니온 가스에서 구입한 순도 99.99 %인 CO₂와 O₂를 사용했으며, 연소 특성에 관련된 특성치는 Table 1과 같다. 이는 한국산업안전보건공단에서 제공하는 물질안전보건자료로써, 실제 제공한 물질의 물성값과 다를 수 있다.

Table 1. Characteristics of propylene[15]

Chemical name	Propylene
Structural formula	C ₃ H ₆
Phase	Gas
Flash point	-107 °C
Autoignition temperature	460 °C
Molecular weight	42.03
Specific gravity	0.5
Upper explosive limit	10.3 %
Lower explosion limit	2.4 %

3.2 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치는 전파법을 개량한 장치로써 Fig. 1에 나타내었으며, 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

폭발시험 장치는 내부 용적이 1.1 l로서 용기 내 온도와 압력을 측정하기 위해 열전대 온도계는 Chromel-Alumel Thermocouple(O.D 1.0 mm)를 사용하였고, 압력센서는 Kyowa제 PGM 100KD를, 온도계 Kyowa제 PGM 100KD를 사용하였다. 폭발용기는 SUS 304를 사용하여 만들었으며, 용기 내에 점화에너지 공급하는 장치로 차량용 점화플러그와 비슷하게 특수 제작한 전극을 부착하였다. 폭발용기의 가열로는 0~800 °C까지 가열이 가능한 전기로를 이용하였고, 오실로스코프에 나타나는 압력 피크치의 변화를 통해 연소 및 폭발의 유무를 판정 하였다. 또한, 용기 하단부에 진공이 가능한 Vacuum pump를 사용하여 용기 내부를 -1.000 kgf/cm².G인 진공상태로 만들었다. 이 과정을 통해 용기 내부의 공기와 미연소 가스를 효과적으로 제거하였다. 그 후, Dalton의 분압 법칙을 이용해 필요한 화학농도 만큼의 시료를 투입하였으며, 99.99 %의 CO₂와 O₂를 계산식에 의해 산출된 양만큼 폭발용기에 투입하였다[16].



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

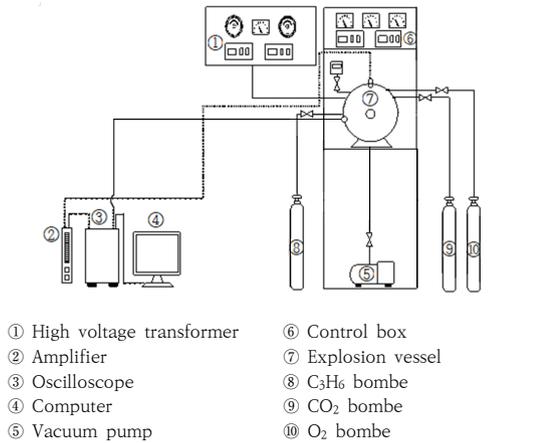


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for explosion measurement

3.3 실험방법

- (1) 폭발용기 내부는 진공펌프를 사용하여 상부에 설치된 압력의 수치가 -1.000 kgf/cm^2 까지 진공으로 만든다.
- (2) 소정의 온도로 가열시킨다.
- (3) 기체 혼합물의 상태방정식으로 계산된 압력의 수치만큼 프로필렌의 양을 주입구를 통해서 주입한다.
- (4) O_2 를 O_2 주입구를 통해 해당 압력만큼 주입한다.
- (5) CO_2 를 CO_2 주입구를 통해 해당 압력만큼 주입한다. 이때 CO_2 주입부의 밸브를 급격히 열어 혼합조 내부로 CO_2 가 빠르게 유입되면서 폭발용기 내부에 난류를 형성시켜 시료가 잘 혼합될 수 있도록 한다.
- (6) 점화플러그에 전원을 연결한 후, 점화스위치를 ON시켜 폭발 유·무를 관찰한다.
- (7) 폭발 시 오실로스코프상에 나타난 파형을 통하여 시험물질의 폭발하한과 상한은 같은 농도에서 5회 이상 실험하였다. 1회라도 폭발할 때의 최소농도를 폭발 하한계로 정의하였으며, 최대농도를 폭발 상한계로 정의하였다[17].

4. 실험결과 및 고찰

4.1 온도와 압력에 따른 폭발한계

Table 2에는 프로필렌의 폭발 위험성을 평가하기 위하여 불활성 가스인 CO_2 의 주입량에 따라서 폭발한계를

측정하고 최소산소농도를 측정함으로써 공정안전 운전을 위한 실험결과를 구하였다.

Fig. 3은 CO_2 를 사용하여 온도가 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 때, 압력을 1.0 kgf/cm^2 .G, 1.5 kgf/cm^2 .G, 2.0 kgf/cm^2 .G 및 2.5 kgf/cm^2 .G로 다르게 하여 폭발한계를 측정하였다. 산소농도 21 %의 공기 중에서 폭발한계는 압력이 1.0 kgf/cm^2 .G일 때 LEL의 경우 4 %, UEL의 경우 11.1 %를 구하였으며, 압력이 1.5 kgf/cm^2 .G일 때 LEL의 경우 4 %, UEL의 경우 11.5 %를 구하였다. 또한 2.0 kgf/cm^2 .G일 때, LEL의 경우 4 %, UEL의 경우 12.6 %를 측정하였으며, 압력이 2.5 kgf/cm^2 .G일 때는 LEL의 경우 4 %, UEL의 경우 12.8 %를 구하였다. 따라서 압력이 1.0 kgf/cm^2 .G에서 2.5 kgf/cm^2 .G로 증가할수록 하한계는 변화가 없었으나, 상한계는 11.1 %에서 12.8 %로 증가하였다. 이것은 탄화수소계에서 압력이 증가하면 하한계는 변화가 없으나 상한계는 압력이 증가에 따라 증가하는 것과 일치된다[18].

Table 2. Experiment result of explosion limit(at $25 \text{ }^\circ\text{C}$)

Propylene O_2 [%]	1.0 kgf/cm^2 .G	1.5 kgf/cm^2 .G	2.0 kgf/cm^2 .G	2.5 kgf/cm^2 .G
	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]
21	4~11.1	4~11.5	4~12.6	4~12.8
18	4.3~7.6	4.3~8	4.3~8.4	4.3~8.7
17	4.8~6.6	4.7~7	4.7~7.3	4.6~7.5
16.4	5.6~5.9 (MOC)			
16	-	5.7~6.1 (MOC)	5.4~6.4	5.2~6.5
15.6	-	-	5.8~6.2 (MOC)	
15.4	-	-		5.7~5.9 (MOC)

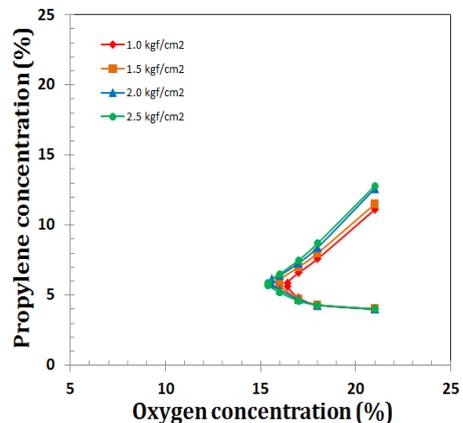


Fig. 3. Relation between oxygen concentration and propylene concentration(at $25 \text{ }^\circ\text{C}$)

Fig. 4에는 온도가 100 ℃일 경우 산소농도 변화에 따른 폭발범위의 곡선과 압력의 변화에 대한 폭발한계를 측정하였다. 동일한 압력에서 산소농도가 감소할수록 하한계는 약간 상승하였으나, 상한계는 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 가연물과 산소는 일정한 몰비에 서 혼합, 폭발하는데 산소농도가 줄어드는 경우 산소의 양이 충분하지 않아 불완전한 연소반응이 일어나기 때문에 폭발한계가 감소하는 것으로 사료된다[19].

Table 3에는 Fig. 4의 실험결과를 나타낸 것으로서 압력이 1.0 kgf/cm².G일 경우 산소농도가 감소할수록 폭발 하한계가 3.8 %에서 5.4 %로 증가하고, 폭발 상한계는 11.9 %에서 5.6 %로 감소함으로써 폭발 위험성이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

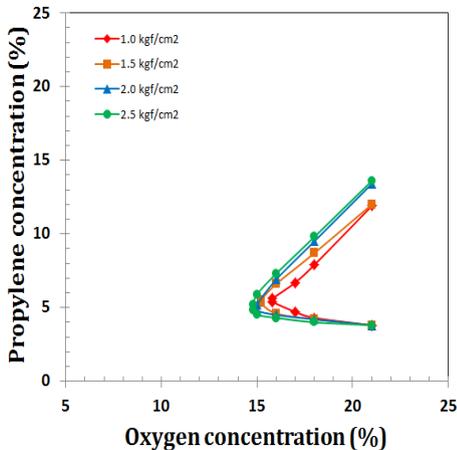


Fig. 4. Relation between oxygen concentration and propylene concentration(at 100 ℃)

Table 3. Experiment result of explosion limit(at 100 ℃)

Propylene O ₂ [%]	1.0 kgf/cm ² .G	1.5 kgf/cm ² .G	2.0 kgf/cm ² .G	2.5 kgf/cm ² .G
	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]
21	3.8~11.9	3.8~12.4	3.8~13.4	3.8~13.6
18	4.3~7.9	4.2~8.7	4.2~9.5	4~9.8
17	4.7~6.7			
16		4.6~6.6	4.5~6.9	4.3~7.3
15.8	5.4~5.6 (MOC)			
15.4	-	5.3~5.5 (MOC)		
15			4.8~5.2 (MOC)	
14.8				4.8~5.2 (MOC)

Fig. 5와 Table 4에는 온도가 200 ℃일 경우 압력이 1.0 kgf/cm².G, 1.5 kgf/cm².G, 2.0 kgf/cm².G, 2.5 kgf/cm².G로 증가하였을 때 폭발한계를 측정하였다. 온도 200 ℃에서도 25 ℃와 100 ℃에서와 동일하게 폭발 하한계와 상한계가 유사한 폭발범위를 나타내었다.

Fig. 3, 4 및 5에서 온도가 증가할수록 하한계는 큰 변화가 없으나, 상한계는 증가하였다. 이것은 온도가 증가하면 가연성 물질의 반응성이 활발함으로써 폭발범위가 증가하는 것으로 사료된다.

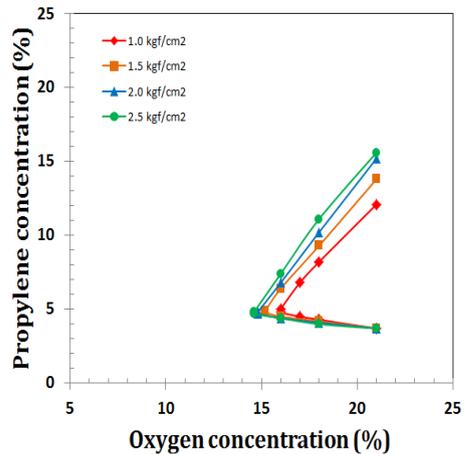


Fig. 5. Relation between oxygen concentration and propylene concentration(at 200 ℃)

Table 4. Experiment result of explosion limit(at 200 ℃)

Propylene O ₂ [%]	1.0 kgf/cm ² .G	1.5 kgf/cm ² .G	2.0 kgf/cm ² .G	2.5 kgf/cm ² .G
	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]	LEL~UEL[%]
21	3.7~12.1	3.7~13.8	3.7~15.2	3.7~15.6
18	4.3~8.2	4.2~9.3	4.1~10.2	4.0~11.1
17	4.5~6.8	4.5~6.4		
16			4.4~6.8	4.4~7.4
15.6	4.8~5.0 (MOC)			
15.2	-	4.8~4.9 (MOC)		
14.8			4.7~4.8 (MOC)	
14.6				4.7~4.8 (MOC)

4.2 최소산소농도

연소반응을 통해 생성되는 화염이 확산되기 위해서는 최소한의 산소농도가 필요하며, 연소반응으로 인한 폭발

및 화재는 연료의 농도에 의존하지 않고 산소농도의 조절만으로도 억제할 수 있다. 따라서 최소산소농도는 공정 안전 운전을 위한 안전성 확보에 있어 중요한 자료로 사용된다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6의 실험결과에서 구한 온도와 압력의 변화에 따른 최소산소농도를 Fig. 6에 나타내었으며, 온도 변화에 따른 최소산소농도를 나타내었으며, 온도가 증가할수록 최소산소농도가 감소하였다. 이것은 시료의 반응성이 활발하여 산소와 결합이 용이하기 때문에 낮아지는 것으로 판단된다.

또한 동일한 온도에서 압력이 1.0 kgf/cm².G에서 2.5 kgf/cm².G로 증가할수록 최소산소농도가 감소하였다. 이것은 압력이 증가하면 기체의 부피는 감소하나 입자 수는 변하지 않으므로, 단위 부피당 입자수가 증가하여 반응속도가 빨라지기 때문이다[20].

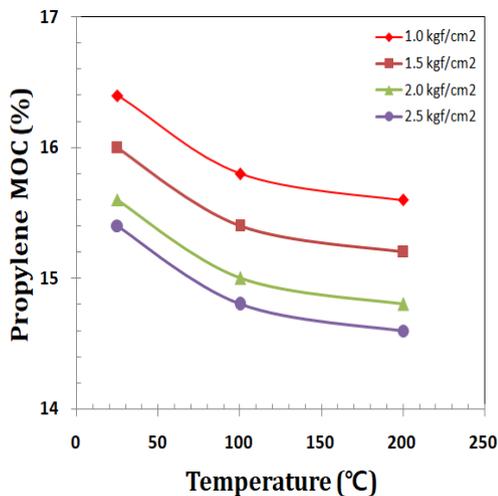


Fig. 6. Relation between oxygen concentration and temperature

5. 결론

석유화학 공정에서 기초 원료 및 첨가 중합반응에 의한 합성물질을 제조하는 원료로 사용되는 프로필렌의 공정 안전 운전을 위한 폭발범위 및 최소산소농도를 구하기 위하여 불활성 가스인 CO₂를 사용하여 산소의 농도를 변화시켜, 전파법을 개량한 시험장치를 사용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폭발한계는 온도, 압력 및 산소농도와 관계가 있으

며, 온도와 압력이 높아질수록 MOC는 낮아지고, 산소농도가 낮아질수록 폭발범위는 좁아졌다.

- 2) 온도가 25 °C에서 압력이 1.0 kgf/cm².G일 때 MOC는 16.4 %이고 1.5 kgf/cm².G일 때 16 %, 2.0 kgf/cm².G일 때 15.6 % 및 2.5 kgf/cm².G 일 때 15.4 %로서 압력이 증가할수록 최소농도가 낮아지고, MOC 이하의 농도에서는 프로필렌의 증기와 점화원이 존재하더라도 폭발이 발생 되지 않는 것을 알 수 있다.
- 3) 동일한 온도와 압력에서 산소농도가 감소할수록 하한계는 약간 상승하였으나, 상한계는 급격하게 감소한다. 이는 폭발범위가 줄어드는 것을 나타내고, 결과적으로 산소농도가 감소할수록 폭발의 위험성이 줄어든다.
- 4) 온도와 압력의 변화에 따른 최소산소농도는 온도가 증가할수록 감소되었으며, 동일한 온도에서 압력이 1.0 kgf/cm².G에서 2.5 kgf/cm².G로 증가할수록 최소산소농도가 낮아졌다.

References

- [1] E. H. Son, *Experiment Investigations on the Characteristics of Explosion Mitigations by Changing the Internal Concentration and Thickness of Multi Layered Water Gel Barriers*, Master's thesis, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea, pp.3, 2013.
- [2] Accident Association of 2017, Korea Gas Safety Corporation, Korea, pp.74.
- [3] S. H. Park, *Experimental Studies for a Natural Gas Explosion in partially Confined Space*, Master's thesis, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea, pp.3, 2003.
- [4] K. H. Oh, "A Study on the LPG Explosion Characteristics of Non-uniform Concentration", *Fire Science and Engineering*, Vol.17, No.4, pp.111-116, Dec. 2003.
- [5] D. M. Ha, "Appropriateness of MSDS by Means of the Measurement of Combustible Properties of Anisole", *Fire Science and Engineering*, Vol.29, No.2, pp.20-24, Apr. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.2.020>
- [6] D. M. Ha, K. H. Kim, "A Study of Minimum Autoignition Temperature Behavior(MAITB) of Benzene and n-Hexane Mixture", *Fire Science and Engineering*, Vol.27, No.1, pp.8-13, Feb. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.1.008>
- [7] J. W. Choi, "A Study on the Spontaneous Ignition

Characteristics and Ignition Temperature Estimation of Activated Carbon", *Journal of KIIS*, Vol.9, No.3, pp.74-81, Sep. 1994.

- [8] K. H. Oh, H. S. Kim, C. H. Lee, "A Study on the Explosion Characteristics of Flammable Gases", *The Korean Society of Safety*, Vol.7, No.3, pp.66-72, Sep. 1992.
- [9] J. W. Choi, I. S. Lee, S. T. Park, "The Explosion Characteristics of City Gas on the Change of Oxygen Concentration and Pressure", *The Korean Institute for Gas*, Vol.9, No.1, pp.38-43, Feb. 2005.
- [10] H. Tsurumi, Study on Maximum Safe Gaps with Propane/Hydrogen with Air Mixture, Research Report, Ministry of labour, Japan, pp.1-9.
- [11] A. Ohsawa, K. Ishikawa, Spectroscopic Measurements of a Spark Ignition in Methane-Oxygen Mixture, Research Report, Ministry of labour, Japan, pp.79-86.
- [12] D. Y. Choi, *A Study on Carbon Emissions and Reduction Plan of Natural Gas Plants*, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, pp.9, 2013.
- [13] T. G. Kim, *A Study on the Explosion Risk and Fire Transmission Situation of Propylene Gas*, Master's thesis, Pukyong National University, Busan, Korea, pp.3, 2007.
- [14] B. C. Lee, A Study on the Explosion Characteristics of Converted Gas for Surface Heating Treatment, Master's thesis, Pukyong National University, Busan, Korea, pp.12-14, 2005.
- [15] MSDS, <http://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetailGet.do>, KOSHA.
- [16] T. Mizutani, H. Matsui, "Decomposition Flame Propagation Properties of Ozone/Oxygen Mixtures", *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.14, No.6, pp.559-565, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(01\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(01)00040-7)
- [17] J. H. Kim, A Study on the Explosion Risk of 2-Ethylhexanoic Acid, Master's thesis, Pukyong National University, Busan, Korea, pp.17-18, 2013.
- [18] D. M. Ha, "An Analytical Evaluation of Fire and Explosion Characteristics of Ethylene", *Fire Science and Engineering*, Vol.23, No.5, pp.53-54, Oct. 2009.
- [19] W. K. Kim, J. H. Kim, J. W. Ryu, J. W. Choi, "The Measurement of the Explosion Limit and the Minimum Oxygen Concentration of Gasoline According to Variation in Octane Number", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol.55, No.5, pp.621, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9713/kcer.2017.55.5.618>
- [20] H. P. Lee, Y. J. Park, *Combustion Engineering*, p.9-10, Hwasoomok, 2015.

최 유 정(Yu-Jung Choi)

[정회원]



- 2017년 2월 : 부경대학교 일반대학원 소방공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 : 부경대학교 일반대학원 소방공학과 (박사 수료)
- 2018년 9월 : 부경대학교 소방공학과 시간강사

<관심분야>

자연발화, 화재폭발, 가스안전

허 종 만(Jong-Man Heo)

[정회원]



- 2011년 8월 : 부산대학교 행정대학원 행정학과 (행정학석사)
- 2019년 6월 : 부경대학교 일반대학원 소방공학과 (박사 과정)
- 1990년 10월 ~ 현재 : 부산소방본부 기장소방서 소방행정과장

<관심분야>

위험물질, 가스폭발

김 정 훈(Jung-Hun Kim)

[정회원]



- 2013년 2월 : 부경대학교 소방공학과 (공학석사)
- 2016년 8월 : 부경대학교 소방공학과 (공학박사)
- 2015년 8월 ~ 현재 : (주) 광명토탈 엔지니어링 소방설계부 이사
- 2016년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 소방공학과 겸임교수

<관심분야>

자연발화, 가스폭발, 성능위주소방설계

최 재 욱(Jae-Wook Choi)

[정회원]



- 1989년 2월 : 동아대학교 화학공학
학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 동아대학교 화학공학
학과 (공학박사)
- 1999년 1월 ~ 2000년 1월 : 일본
산업안전연구소 객원교수
- 1997년 3월 ~ 현재 : 부경대학교
소방공학과 교수

〈관심분야〉

위험물질, 가스안전, 화재폭발