

프로필렌의 화재 및 폭발 위험성 평가를 위한 온도 200 °C에서 산소농도와 압력의 변화에 따른 실험적 연구

최유정 · 최재욱[†]

부경대학교 소방공학과

48513 부산광역시 남구 용소로 45

(2020년 2월 24일 접수, 2020년 4월 14일 수정본 접수, 2020년 4월 30일 채택)

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

Yu-Jung Choi and Jae-Wook Choi[†]

Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea
(Received 24 February 2020; Received in revised form 14 April 2020; accepted 30 April 2020)

요 약

프로필렌은 석유화학제품의 제조 시 기초 유분으로 산업 공정에서 널리 사용되고 있으며, 새로운 물질을 제조하기 위하여 200 °C 이상의 온도에서 합성되고 있다. 그러나 프로필렌은 인화성 가스로써 화재 및 폭발의 위험성이 존재하므로, 이를 방지하기 위하여 불활성 가스 중 가격이 저렴하고 공기 중 가장 많이 존재하는 질소를 주입하여 사용한다. 본 연구에서는 프로필렌-질소-산소를 사용하여 온도 200 °C에서 압력의 변화(0.10 MPa, 0.15 MPa, 0.20 MPa, 0.25 MPa)에 따른 실험적 연구를 수행하였다. 산소농도가 21%일 때 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 상승할수록 폭발 하한계는 2.2%에서 1.9%로 감소하였으며, 폭발 상한계는 14.8%에서 17.6%로 증가하였다. 또한 최소산소농도는 10.3%에서 10.0%로 감소하여 압력이 증가할수록 폭발 범위가 넓어져 위험성이 증가하였다. 폭발압력은 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 상승할수록 1.84 MPa에서 6.04 MPa로 증가하였으며, 최대 폭발압력상승속도는 90 MPa/s에서 298 MPa/s로 크게 증가하였다. 고온 및 고압에서는 폭발의 위험성이 증가하므로 프로필렌을 사용하는 사업장의 폭발사고 예방을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

Abstract – Propylene is widely used in petrochemical manufacturing at over 200 °C. However, since propylene is a flammable gas with fire and explosion risks, inert nitrogen is injected to prevent them. In this study, experiments were conducted using propylene-nitrogen-oxygen upon pressure changes at 200 °C. At 21% oxygen, as pressure increased from 0.10 MPa to 0.25 MPa, lower explosion limit (LEL) decreased from 2.2% to 1.9% while upper explosion limit (UEL) increased from 14.8% to 17.6%. In addition, minimum oxygen concentration (MOC) decreased from 10.3% to 10.0%, indicating higher risks with the expanded explosive range as pressure increased. With increase of pressure from 0.10 MPa to 0.25 MPa, explosion pressure increased from 1.84 MPa to 6.04 MPa, and the rate of rise of maximum explosion pressure increased drastically from 90 MPa/s to 298 MPa/s. It is hoped that these results can be used as basic data to prevent accidents in factories using propylene.

Key words: Propylene, Explosion limit, Minimum oxygen concentration, Explosion pressure, Pressure rise rate

1. 서 론

폭발은 급격한 부피의 증가와 함께 고온의 에너지와 가스를 방출하는 현상으로써 가연성 가스가 폭발할 수 있는 농도인 폭발한계에

서 발생되며, 폭발 하한계와 폭발 상한계 사이의 농도를 벗어나는 경우 점화원을 가해도 폭발하지 않는 특성을 가지고 있다[1-4].

불활성 가스 중 질소는 공기 중 약 79%의 비율로써 가장 많이 존재하고, 가격이 저렴하여 가연성 가스를 배출하기 위한 퍼지 과정 등 다양한 용도로 사용이 가능하며, 폭발사고를 예방하기 위하여 불활성 가스를 사용하여 가연성 가스의 폭발범위를 줄이는 것이 중요하다.

또한, 가연성 가스를 사용하는 공정상 취급의 부주의로 인하여 폭발이 발생하는 경우 밀폐 용기 내부의 폭발압력과 최대 폭발압력 상승속도를 실험적으로 구함으로써 안전장치인 방출구를 통해 가

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jwchoi@pknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

스를 분출하여 설비의 2차 피해를 예방할 수 있다[5-7].

프로필렌은 석유화학산업에서 에틸렌 다음으로 가장 많이 사용되며, NCC (Naphtha Cracking Center), FCC (Fluid Catalytic Cracking), PDH (Propane Dehydrogenation) 공정을 거쳐 생성되는 부산물로써, 중합반응을 거쳐 폴리프로필렌, 산화프로필렌 등 다양한 물질을 생성한다. 그러나 프로필렌은 인화성 가스로서 온도가 높거나 압력이 높을 시 화재 및 폭발의 위험성이 증가하며, 공정의 온도가 200 °C 이상에서 물질을 합성하고, 고압에서 운전을 하므로 사업장의 폭발을 예방하기 위하여 정확한 데이터가 필요하다[8,9].

가연성 가스의 폭발에 대한 연구로 국외에서는 Yu 등[10]은 에틸렌과 에탄의 공기 혼합물을 사용하여 온도와 압력의 변화에 따라 폭발 상한계에 관한 연구를 하였으며, Giurcan 등 [11]은 프로판-공기 혼합물에 불활성 가스인 Ar, N₂, CO₂를 첨가하여 폭발압력, 폭발압력상승속도, 가스의 폭연지수를 측정하였다. Luo 등[12]은 20 L 인 밀폐된 용기를 사용하여 메탄-공기 혼합물의 폭발특성과 최대 불꽃 전파속도를 연구하였다.

국내에서는 Jo 등[13]은 가우스 분포 모델과 폭발 실험을 근거로 하여 메탄의 누출량을 예측하였으며, Choi 등[14]은 프로필렌에 불활성 가스인 이산화탄소를 사용하여 온도와 압력에 따른 폭발한계에 관한 연구를 하였다. 또한 Back 등[15]은 CFD 시뮬레이션을 통하여 수소, LPG, LNG에 대한 폭발특성을 비교하는 연구를 진행하였다.

화재 및 폭발은 온도, 압력, 가연물의 종류, 공기 혼합 비율 등에 영향을 받으며, 그 중 온도와 압력이 증가할 때 기체 분자의 충돌 횟수가 증가하여 반응속도가 빨라지므로 사업장의 피해가 크게 발생하여 기존의 실험 자료로는 폭발을 예방하기에 어려운 측면이 많다[16-19].

따라서, 본 연구에서는 질소를 사용하여 200 °C에서 압력의 변화에 따른 폭발한계, 최소산소농도, 폭발압력, 폭발압력상승속도를 구하였으며, 이를 통해 가스의 폭연지수(K_g)를 계산하여 제시함으로써 프로필렌 공정상의 폭발사고를 예방하기 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 이상기체 방정식[20]

이상기체 방정식은 압력(P), 부피(V), 몰 수(n) 및 온도(T)의 변수로서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$PV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1)$$

2-2. Dalton's와 Amagat's 법칙[21,22]

이상기체가 아닌 실제기체의 혼합물의 거동의 예측은 매우 복잡함으로 기체 혼합물의 상태방정식은 식 (2)인 Dalton's의 압력 가산 법칙과 식 (3)인 Amagat's 부피 가산 법칙을 통하여 가스 혼합물의 거동을 예측할 수 있다.

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$$V_t = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3)$$

실제 가스 혼합물의 경우, 이상기체 거동과의 편차를 설명하기 위해 식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 적용하면, 식 (4)와 같이 나타낼 수

있으며, 일정한 온도에서 동일한 부피의 기체 압력은 기체의 종류와 관계없이 기체 분자의 몰 수에 의해 결정된다.

혼합물 내 각 가스의 총 압력과 몰 분율을 알면 식 (4)를 통하여 혼합물 내 성분의 부분 압력을 계산할 수 있다.

$$\frac{P_i}{P_t} = \frac{V_i}{V_t} = \frac{n_i}{n_t} = y_i \quad (4)$$

3. 실험장치 및 실험방법

3-1. 실험시료

프로필렌은 나프타를 열분해하여 생성되는 부산물로써, 화학적 합성을 통하여 프로필렌 단량체가 중합반응을 거쳐 폴리프로필렌 등 석유화학제품의 제조에 기초 유분으로 많이 사용된다.

본 연구에 사용된 가스는 S 특수가스에서 제공한 순도 99.90%의 프로필렌과 C 산업가스에서 제공한 순도 99.99%의 질소와 산소를 사용하여 실험을 진행하였다.

3-2. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1에 나타내었으며, 실험장치는 폭발장치, 에너지 공급부, 저장부로 나뉜다.

폭발장치는 내용적이 1.1 L, 외경 148 mm, 지름 105 mm이며, 온도를 유지하기 위하여 외함(L 400 mm × W 300 mm × H 330 mm)이 방폭 구조로 된 폭발용기를 사용하였다. 용기의 상부에는 0~1000 kPa (PG-200-103GP-S)까지 측정이 가능한 Copal Electronics제 압력계와 -100 kPa ~ 0 kPa (PG-200-102VP-S)의 진공계를 설치하여 정밀밸브(NV2H-4T)를 이용하여 유량을 조절하여 분압을 확인하였다.

용기의 하부에는 가스 주입 및 배출을 위하여 0.4 Pa의 성능을 가진 진공펌프(TRP-12)를 설치하였다.

에너지 공급부는 0~10 kV까지 측정할 수 있는 고전압장치(TOS 5101, Kikusui)를 사용하여 AC 10 kV를 공급하였다.

에너지 저장부는 폭발된 압력신호를 증폭시켜 파형을 측정할 수 있는 Amplifier (Tokyo Sokki Kenkyujo, Da-16A)와 Oscilloscope (Tektronix, TDS 3014)를 사용하였다.

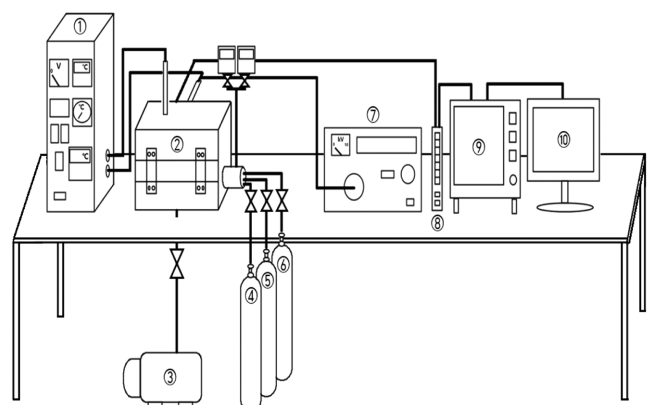


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for explosion measurement.

- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1. Control box | 6. Oxygen bombe |
| 2. Explosion vessel | 7. High voltage transformer |
| 3. Vacuum pump | 8. Amplifier |
| 4. Propylene bombe | 9. Oscilloscope |
| 5. Nitrogen bombe | 10. Computer |

3-3. 실험방법

폭발한계를 측정하기 위하여 ASTM E918-83[23]을 기반으로 다음과 같은 순서로 진행되었다.

1. 실험하려는 온도와 가스를 미리 준비하고, 폭발용기 내부를 진공펌프를 이용해 절대압력 -0.10 MPa인 진공상태로 만든다.
2. 가스의 양은 돌턴의 분압 법칙을 사용하여 폭발장치의 상부에 달린 진공계를 통해 해당 압력만큼 주입한다.
3. 가스의 혼합이 완료되면 점화스위치를 작동시켜, Amplifier를 통한 압력이 Oscilloscope에 기록되고, 폭발의 유무를 관찰한다.
4. 10회 이상 반복하여 1회라도 폭발 시 폭발로 간주하였으며, 폭발 시 최소 농도를 폭발 하한계로, 최대 농도를 폭발 상한계로 정의하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 200 °C에서 압력에 따른 폭발한계 및 최소산소농도

4-1-1. 폭발한계

Fig. 2에는 200 °C에서 압력이 0.10 MPa, 0.15 MPa, 0.20 MPa 및 0.25 MPa로 증가하였을 때 폭발한계를 측정하였다.

산소농도가 21%일 때 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 증가하였을 때 LEL (Lower Explosion Limit)은 2.2%에서 1.9%로 약간 감소하였으며, UEL (Upper Explosion Limit)은 14.8%에서 17.6%로 상당히 증가하였다.

이는 기체의 반응에서 압력이 증가하면 기체의 부피는 감소하지만 입자의 수는 변하지 않으므로 단위부피당 입자 수가 증가하여 입자들 사이의 충돌횟수가 증가하고 반응속도가 빨라짐으로 폭발이 쉽게 일어날 수 있다.

또한, 폭발 하한계 미만의 농도에서는 폭발이 일어나지 않으며, 이는 프로필렌의 농도가 낮을수록 혼합기 내부에 가연물의 입자간 거리가 멀어지고, 에너지 전달률이 떨어지게 된다. 그 결과, 점화원을 통해 에너지를 줘도 연쇄반응을 일으키지 못하여 폭발이 발생 되지 않은 것으로 판단되며, 폭발 상한계의 초과 농도에서는

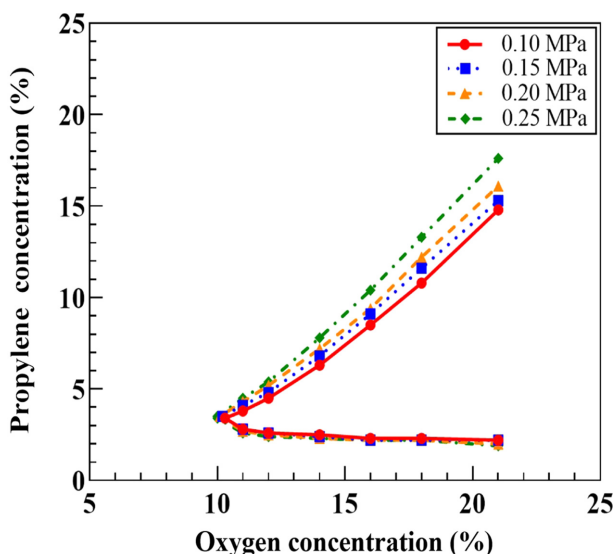


Fig. 2. Explosion limit; Relationship between oxygen concentrations and propylene concentrations according to pressure at 200 °C.

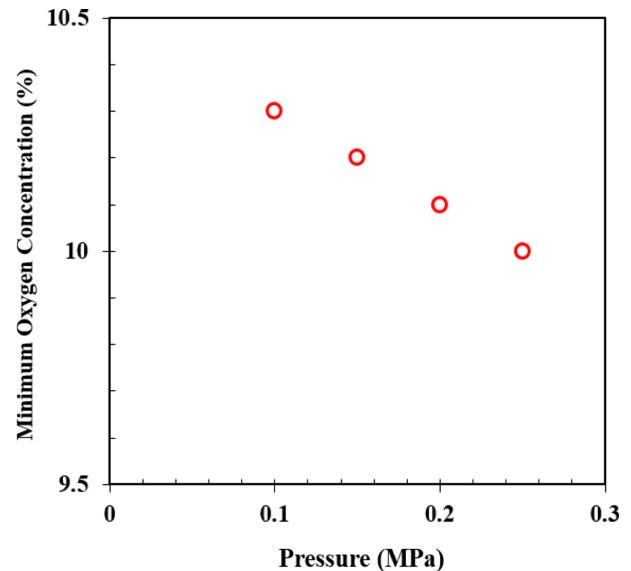


Fig. 3. Relation between minimal oxygen concentration and pressure.

프로필렌의 농도가 증가하면 가연물의 입자간 거리는 가깝게 되는 반면 가연물이 연소하는데 필요한 산소 분자를 주변으로부터 취할 수 없는 상태가 되므로 폭발이 발생 되지 않은 것으로 판단된다.

4-1-2. 최소산소농도

Fig. 3은 Fig. 2에서 측정된 폭발한계 중 최소산소농도를 나타내었다.

최소산소농도는 화염을 전파하기 위하여 필요한 최소한의 산소 농도로 정의한다. 최소산소농도는 가연물의 농도와는 무관하게 폭발을 방지할 수 있으며, 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 증가할수록 10.3%에서 0.1%씩 낮아져 0.25 MPa일 경우 10.0%로 감소하여 위험성이 높아졌다.

따라서 동일한 온도에서 압력이 증가하면 폭발범위가 증가함으로써 폭발 상한계 농도보다 20% 이상의 농도에서 공정을 운전하거나, 불활성 가스를 주입하여 폭발범위를 조정하여 안정성을 높일 수 있다.

4-2. 200 °C에서 압력에 따른 폭발압력 및 폭발압력상승속도

4-2-1. 폭발압력

Fig. 4에는 200 °C에서 프로필렌의 농도를 5%로 고정하고 압력을 0.10 MPa에서 0.25 MPa까지 변화시켜 측정된 폭발압력을 나타내었다.

a는 압력이 0.10 Mpa일 때를 나타내었으며, b는 압력이 0.15 MPa, c는 압력이 0.20 MPa, d는 압력이 0.25 MPa로 나타내었다.

폭발압력은 산소농도 21%일 때 시험 용기의 저장 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 증가할수록 폭발하였을 때 시험 용기의 내부 증가 압력이 1.84 MPa에서 6.04 MPa로 폭발압력이 3배 증가하였다.

압력이 증가할수록 최대 폭발압력이 증가하였으며, 이는 가연성 혼합기 안의 가연성 가스 전체 질량의 증가로 인하여 폭발압력이 증가하는 것으로 판단된다.

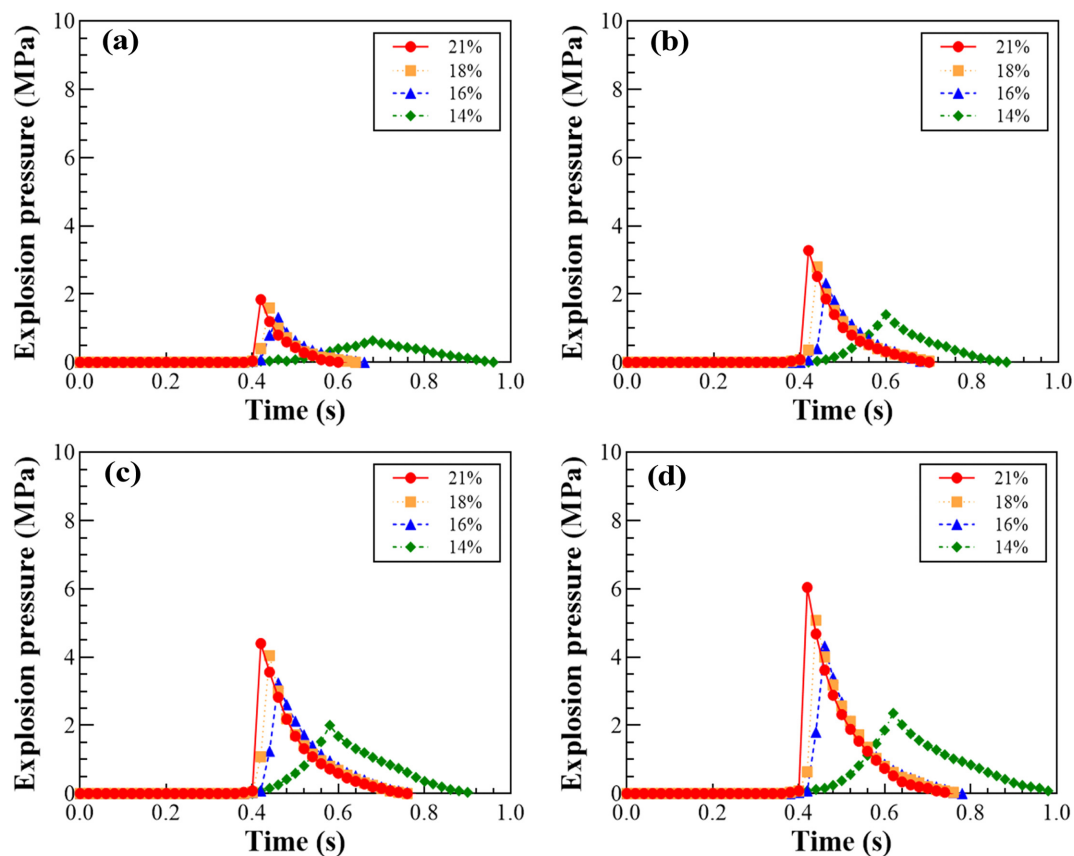


Fig. 4. Relationship between explosion pressure of propylene and time according to oxygen concentrations at 200 °C. (a) 0.10 MPa, (b) 0.15 MPa, (c) 0.20 MPa, (d) 0.25 MPa.

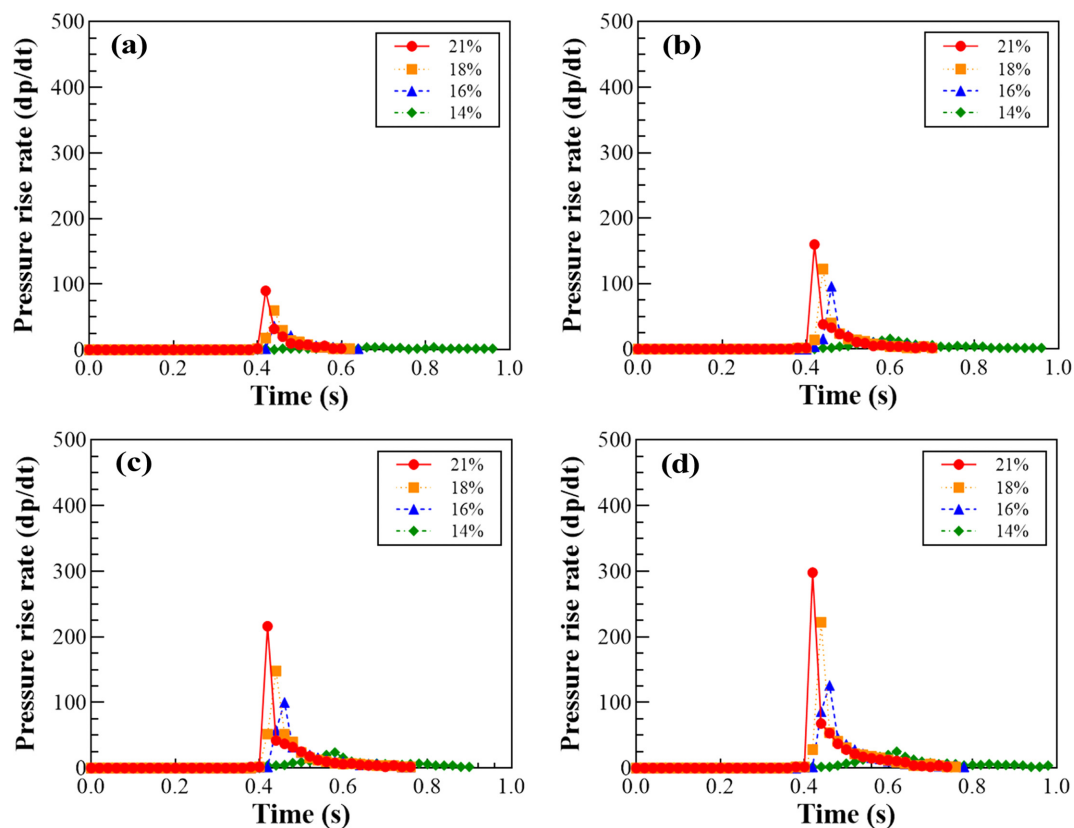


Fig. 5. Relationship between explosion pressure rise rate of propylene and time according to oxygen concentrations at 200 °C. (a) 0.10 MPa, (b) 0.15 MPa, (c) 0.20 MPa, (d) 0.25 MPa.

Table 1. K_g : Gas deflagration index according to the pressure at 200 °C

Pressure [MPa] O ₂ [%]	K_g [m·MPa/s]			
	0.10 MPa	0.15 MPa	0.20 MPa	0.25 MPa
21.0	9.29	16.52	22.30	30.76
18.0	6.19	12.59	15.29	22.92
16.0	3.72	9.91	10.32	13.01

4-2-2. 폭발압력상승속도

Fig. 5에서 a'-d'는 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa일 때 측정된 폭발압력상승속도를 나타내었다.

산소농도 21%에서 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 압력이 증가할수록 90 MPa/s에서 298 MPa/s가 측정되었으며, 압력이 상승할수록 약 3배의 폭발압력상승속도가 증가하였다.

또한 동일한 압력에서 산소농도가 증가할수록 최대 폭발압력까지의 도달시간이 짧아진다. 이는 압력 용기의 내벽에서 화염면으로 반사되는 압력과 때문이며, 폭발과 동시에 화염 전파면은 기체 분자의 충돌 횟수가 증가하므로 화학적 반응을 가속화됨으로 인하여 짧아지는 것으로 판단된다.

4-2-3. 가스의 폭연지수(K_g)

Table 1은 200 °C에서 압력에 따른 K_g 를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 최대 폭발압력상승속도와 용기의 크기의 함수로서 실험을 통하여 얻어지는 $(dp/dt)_{max}$ 인 최대 폭발압력상승속도와 V인 용기의 부피(0.0011 m³)를 활용하여 계산된다.

산소농도 21%일 때, 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 증가할수록 9.29 m·MPa/s에서 30.76 m·MPa/s로 측정하였다. 이를 통하여 방출구의 크기를 설계하는데 활용될 수 있으며, 폭발의 격렬한 정도를 나타내어 폭발의 위험성을 예측할 수 있다.

$$K_g = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} \times V^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

5. 결 론

프로필렌의 화재 및 폭발의 위험성을 파악하기 위하여 질소 사용하여 온도 200 °C에서 압력의 변화에 따라 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 산소농도 21%일 때 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 상승할수록 하한계는 2.2%에서 1.9%로 감소하였으며, 상한계는 14.8%에서 17.6%로 증가하였다. 압력이 상승할수록 폭발한계는 넓어지므로, 프로필렌에 대한 위험성은 증가하였다.

(2) 최소산소농도는 0.10 MPa일 때 10.3%였으나, 0.25 MPa일 때 10.0%로 감소하였다. 화염을 전파하기 위하여 최소한의 산소가 필요한데 가연물 농도와 관계없이 최소산소농도를 파악하는 것만으로도 폭발을 방지할 수 있다.

(3) 폭발압력은 산소농도가 21%일 때 압력이 0.10 MPa일 때는 1.84 MPa였으나, 0.25 MPa일 때는 6.04 MPa로 측정되었다. 폭발압력상승속도는 압력이 0.10 MPa일 때는 90 MPa/s였으나 0.25 MPa일 때는 298 MPa/s로 압력에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

(4) 최대 폭발압력상승속도와 용기의 체적을 통하여 K_g 를 구하였으며, 산소농도 21%일 때 압력이 0.10 MPa에서 0.25 MPa로 상승

할수록 3배 증가하였다. 이를 바탕으로 방출구의 크기, 두께 등 안전장치를 설계하는데 사용할 수 있는 자료를 제공하였다.

Nomenclature

P	: Absolute pressure [kPa]
V	: Volume [m ³]
R	: Gas constant [kPa·m ³ /kg·K]
T	: Absolute temperature [K]
n	: Number of moles [kmol]
M	: Molecular mass [kg/kmol]
m	: Mass [kg]
n _i	: Mole of component [mol]
n _t	: Total mole of all components [mol]
V _i	: Volume of component [m ³]
V _t	: Total volume of all components [m ³]
P _i	: Partial pressure of component [kPa]
P _t	: Total pressure of all components [kPa]
K_g	: Gas deflagration index [m·MPa/s]
$\frac{dp}{dt}$: Pressure rise rate [MPa/s]

References

- Liu, S., Gao, X. and Zhang, S., "Self-adaptive Chaotic Local Search Particle Swarm Optimization for Propylene Explosion Region Parameter Identification", *The 31th Chinese Control and Decision Conference(CCDC) IEEE*, 1702-1707(2019).
- Crowl, D. A. and Louvar, J. F., "Chemical Process Safety: Fundamentals with Application", *Pearson Education International*, Boston, 225-260(2011).
- Korzyński, M. D. and Dincă, M., "Oxidative Dehydrogenation of Propane on the Realm of Metal-Organic Framework", *ACS Central Science*, 10-12(2017).
- Kim, W. K., Kim, H. H., Ryu, J. W. and Choi, J. W., "The Measurement of the Explosion Limit and the Minimum Oxygen Concentration of Gasoline According to Variation in Octane Number", *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(5), 618-622(2017).
- NFPA 68, "Guide for Venting Deflagrations", *National Fire Protection*(1998).
- NFPA 68, "Standard on Explosion Protection by Deflagrations Vending", *Quincy, MA*(2013).
- Lee, C. J. and Kim, L. H., "Characteristics of Dust Explosion in Dioctyl Terephthalic Acid Manufacturing Process", *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(6), 790-803(2019).
- Mathieu, D., "Power Low Expressions for Predicting Lower and Upper Flammability Limit Temperature", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **52**(26), 9317-9322(2013).
- Razus, D., Oancea, D. and Ionescu, N. I., "Burning Velocity Determination by Spherical Bomb Technique. Part II. Application to Gaseous Propylene-air Mixtures of Various Compositions, Pressure and Temperatures", *Rev. Rou. Chim.*, **45**, 319-330(2000).
- Yu, X., Yan, X., Ji, W., Luo, C., Yao, F. and Yu, J., "Effect of Superambient Conditions on the Upper Explosion Limit of Ethane/oxygen and Ethylene/oxygen Mixtures", *J. Loss Prevention in*

- the Process Industries*, **59**, 100-105(2019).
11. Giurcan, V., Mitu, M., Razus, D. and Oancea, D., "Influence of Inert Additives on Smallscale Closed Vessel Explosions of Propaneair Mixture", *Fire Safety J.*, **111**, 102939(2020).
 12. Luo, Z., Liu, L., Cheng, F., Wang, T., Su, B., Zhang, J., Gao, S. and Wang, C., "Effects of a Carbon Monoxide-dominant Gas Mixture on the Explosion and Flame Propagation Behaviors of Methane in Air", *J. Loss Prevention in the Process Industries*, **58**, 8-16(2019).
 13. Jo, Y. D., "Estimate Minimum Amount of Methane for Explosion in a Confined Space", *J. Korean Institute of Gas*, **21**(4), 1-5(2017).
 14. Choi, Y. J., Heo, J. M., Kim, J. H. and Choi, J. W., "A Study on the Measurement of Explosion Range by CO₂ Addition for the Process Safety Operation of Propylene", *J. Korea Academia Industrial Cooperation Society*, **20**(7), 599-606(2019).
 15. Beak, J. H., Lee, H. J. and Jang, C. B., "A Methodology for Determination of the Safety Distance in Chemical Plants using CFD Modeling", *J. Korean Society of Safety*, **31**(3), 162-167(2016).
 16. Zhang, B., Xiu, G. and Bai, C., "Explosion Characteristics of Argon/nitrogen Diluted Natural Gas-air Mixtures", *Fuel*, **124**, 125-132(2014).
 17. Chen, S., Chen, H., Zhu, Q. and Liang, D., "Effect of Initial Temperature and Initial Pressure on vapor Explosion Characteristics of Nitro Thinner", *J. Loss Prevention in the Process Industries*, **61**, 298-304(2019).
 18. Razus, D., Brinzea, V., Mitu, M. and Oancea, D., "Temperature and Pressure Influence on Explosion Pressures of Closed Vessel Propaneair Deflagrations", *J. Hazardous Materials*, **174**, 548-555(2010).
 19. Ha, D. M., "Measurement and Prediction of Fire and Explosion Properties of n-Ethylaniline", *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(4), 474-478(2018).
 20. Leffler, W. L., Natural Gas Liquids: A Nontechnical Guide, *PennWell Books*, Tulsa, Oklahoma, USA, 112-115(2014).
 21. Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M., Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications 4 edition in SI units, *Mc Graw-Hill*, New York, 40-42(2019).
 22. Yan, X. T. and Xu, Y., Chemical Vapour Deposition: An Integrated Engineering Design for Advanced Materials, *Springer*, London, 29-30(2010).
 23. ASTM E918-83, Standard Practice for Determining Limits of Flammability of Chemicals at Elevated Temperature and Pressure, PA: ASTM International(2011).