

## 옥탄가 변화에 따른 가솔린의 폭발한계 및 최소산소농도 측정

김원길 · 김정훈\* · 류종우\*\* · 최재욱\*\*\*,†

부경대학교 소방공학과  
48513 부산광역시 남구 용소로 45  
\*광명토탈엔지니어링  
47257 부산광역시 부산진구 서면문화로 43  
\*\*부산대학교 화학공학과  
46241 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2  
\*\*\*부경대학교 소방공학과  
48513 부산광역시 남구 용소로 45

(2017년 6월 11일 접수, 2017년 7월 14일 수정본 접수, 2017년 7월 18일 채택)

## The Measurement of the Explosion Limit and the Minimum Oxygen Concentration of Gasoline According to Variation in Octane Number

Won-Kil Kim, Jung-Hun Kim\*, Jong-Woo Ryu\*\* and Jae-Wook Choi\*\*\*,†

Department of Fire Protection Engineering, Graduate School, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea

\*Kwangmyung Total Engineering, 43, Seomyeonmunhwa-ro, Busanjin-gu, Busan, 47257, Korea

\*\*Department of Chemical Engineering, Graduate School, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea

\*\*\*Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea

(Received 11 June 2017; Received in revised form 14 July 2017; accepted 18 July 2017)

### 요 약

가솔린은 가정 및 차량, 선박, 산업용 에너지원으로 산업 전반에 널리 사용되고 있는 물질로서, 화재 및 폭발의 위험성이 매우 크다. 가솔린의 폭발위험성을 고찰하기 위하여 옥탄가에 따라 구분되는 PG, MG 및 RG를 시료로 하여 산소농도의 변화에 따른 폭발한계를 측정하였으며, 산소농도 21%인 공기 중의 폭발한계는 각각 1.5~10.9%, 1.4~8.1%, 1.3~7.6%를 구하였고, MOC를 측정한 결과 실험시료 모두 10.9%를 나타내었다. 본 연구를 통하여 실험에 의한 폭발한계의 측정값이 현재 통용되는 가솔린의 MSDS에 제시된 1.2%~7.6% 보다 넓은 폭발한계를 나타내고 있으므로 실험에 의한 측정치가 가솔린을 사용하는 공정에 있어서 화재 및 폭발을 방지하기 위한 중요한 기초자료가 될 것으로 사료된다.

**Abstract** – Gasoline is a widely used product as a source for energy in homes, the automotive industry, and for industrial power generation, and it is also a product with a high risk of fire and explosion. In this study, to examine the risk for explosion for gasoline, PG, MG and RG, which are categorized according to octane number, were used as test specimens to measure their explosion limit according changes in oxygen concentration. The explosion limit for 21% oxygen concentration in air were confirmed to be 1.5~10.9%, 1.4~8.1%, and 1.3~7.6%, respectively, and the MOC for each of the test sample were confirmed to be 10.9%. The explosion limit measured in the test performed in this study confirmed between a 1.2%~7.6% wider explosion limit for the currently accepted MSDS for gasoline, and therefore it is considered that the results of this study can provide significant reference for preventing fires and explosions for process used gasoline.

Key words: Explosion limit, Flammable limit, MOC (Minimum Oxygen Concentration)

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jwchoi@pknu.ac.kr

‡이 논문은 부경대학교 이재근 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

## 1. 서 론

산업의 발달은 많은 에너지 사용을 요구하게 되었고, 그로 인해 새로운 화학물질을 제조, 저장 및 취급하는 것이 증대되었으며, 화학 공업 또한 급격히 발전하고 있다. 많은 화학물질들이 가연성·폭발성을 가진 물질로서 이러한 물질을 사용하는 공정에서 기계적 결함, 인적 과오 등에 의해 가연성 물질과 주위의 공기가 혼합하여 가연성 혼합기를 형성하고 점화원이 존재 시 화재 및 폭발 사고로 이어져 큰 피해가 발생한다[1,2].

가연성가스 또는 가연성 액체에서 발생하는 증기 폭발의 경우 폭발상태는 압력에너지의 축적상태에 따라 크게 달라진다. 예를 들면 개방공간에서 가연성 혼합기체가 형성되어 있을 때 착화되면 누설 규모가 작을 때는 압력파가 거의 생기지 않으므로 압력상승에 기인하는 피해는 거의 없다. 그러나 건물의 내부 등 밀폐공간 내에서의 폭발은 압력이 크게 상승하고, 밀폐공간을 구성하는 벽면 등에 강력한 충격파를 주어 큰 피해를 발생시키고, 축적된 압력에너지가 압력파로서 외부로 방출됨으로써 인접한 건물, 설비 및 사람들에게 큰 피해를 준다. 개방영역에서 발생하는 폭발보다 밀폐된 영역에서 폭발이 발생할 경우 폭발압력에 의한 파괴효과는 더욱 증가한다[3-6].

이처럼 가연성 물질을 다루는 공정의 화재 및 폭발을 예방하기 위해서는 취급물질의 물리적, 화학적 특성치를 파악하는 것이 매우 중요하다[7]. 화재 및 폭발에 관한 물리·화학적 특성은 물질안전보건자료(Material Safety Data Sheet; MSDS)에 폭발한계(Explosive Limit), 인화점(Flash Point), 최소자연발화온도(Minimum Auto Ignition Temperature)가 제시되고 있다[8].

많은 연소 특성치들 중 폭발 한계는 폭발범위, 연소범위, 연소한계, 가연범위 및 가연한계라고도 하며, 가연성 가스가 폭발을 일으킬 수 있는 농도범위를 말한다. 가연성가스의 폭발한계에서 낮은 값을 폭발하한계(Lower Explosive Limit; LFL), 높은 쪽을 상한계(Upper Explosive Limit; UFL)라 하며 폭발한계는 일반적으로 산소농도가 증가할수록 넓어지고 감소할수록 좁아진다[9]. 산소의 양은 폭발한계에 영향을 미치며 특정 산소농도 이하에서는 폭발을 하지 않는다. 이때의 산소농도를 최소산소농도(Minimum Oxygen Concentration; MOC)라 하며 화재 및 폭발을 예방하기 위한 불활성화의 중요한 기초 자료로 활용된다[10-12].

가연성 물질의 화재 및 폭발을 방지하기 위해 폭발한계 및 MOC는 실험장치의 부재, 시간, 비용 등의 문제로 예측식에 의한 특성치가 많이 이용되며 이와 관련된 연구로는 Ha [13,14]는 연소열과 화학양론계수를 이용하여 많은 물질의 폭발한계를 예측하였다. 그러나 명확한 예방대책을 세우기 위해선 예측식을 사용하기 보단 실험을 통하여 측정하는 것이 유용하다. 이에 관한 연구로는 Boo [15]가 P-Xylene의 연소농도와 폭발위험성에 관한 연구를 하였고, Kim [16]은 유기용제의 자연발화 특성과 미소점화원에 의한 화재폭발에 관한 연구를 하였다.

본 연구의 시료물질인 가솔린은 가정뿐만 아니라 차량, 선박, 산업용 에너지원으로 널리 사용되고 있는 물질로서 그에 따른 폭발한계는 MSDS상에 1.2~7.6%로 나타나 있으나, 그 값이 예측식에 의한 값인지 실험에 의한 값인지는 명확하지 않으며 불활성화에 필요한 MOC에 대한 정보는 제시되어 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 가솔린의 옥탄가 변화에 따른 폭발특성을 파악하기 위하여 산소농도 변화에 따른 폭발한계를 측정함으로써 가솔린의 저장, 취급에 대한 위험성을 예측하고 MOC를 구함으로써

화재·폭발 사고의 예방을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

두 가지 이상 혼합되어 있는 기체 혼합물의 경우 각 물질의 혼합 조성비는 압력이나 부피에 의존하게 되고, 혼합 기체 속에 들어있는 각 물질의 몰수의 합은 전체 혼합기체의 몰수가 되고, 각각의 몰수는 각 성분 기체의 농도, 즉 양을 나타낸다[17]. 그러나 전체 혼합기체의 경우 일정압력에서 부피의 변화나 일정부피에서 각각의 압력이 변화하게 되면, 각 성분의 농도가 변화하게 되므로 물리화학적 조성을 나타내는 것은 몰분율의 형태로 표시하는 것이 더 편리하게 사용된다.

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

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

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

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

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

$$PV = n_iRT \quad (3)$$

여기서 온도 T에서 부피가 V인 용기 속에 몰수가  $n_1, n_2, n_3$ 인 세 기체가 혼합되어 있다고 가정하면,  $n_i = n_1 + n_2 + n_3$ 가 되고, 이 혼합기체의 압력은 식 (4)와 같이 구할 수 있으며,

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

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

$$P_1 = \frac{n_1RT}{V}, P_2 = \frac{n_2RT}{V}, P_3 = \frac{n_3RT}{V} \quad (5)$$

여기서 식 (5)를 식 (4)에 적용시키면, 식 (6)이 된다.

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

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

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

$$\frac{P_1}{P} = \frac{n_1}{n_i} = x_i \quad (7)$$

식 (7)은 일부의 기체 혼합물에만 국한되지 않고 모든 기체 혼합물에

대해서도 성립되며, 전체 압력과 물분율만 알면 분압을 계산할 수 있으며, 필요로 하는 화학조성의 농도를 만들 수가 있다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3-1. 실험시료

본 실험에서 사용된 실험물질은 ㈜O-오일에서 제공한 시료를 사용하였으며, 연소의 위험성과 관련된 주요 특성치는 한국산업안전보건공단에서 제공하는 물질안전보건자료[18]로서 Table 1과 같으며, 실제 제공한 물질의 물성 값과 다를 수 있다.

가솔린은 옥탄가에 따라 다음과 같이 구분된다. 가장 널리 사용되는 보통 가솔린(Regular Gasoline; RG), 수출용으로 사용되는 미들 가솔린(Middle Gasoline; MG) 그리고 고가의 차량용 연료로 많이 사용되는 고급 가솔린(Premium Gasoline; PG)로 구분되며 실험에 사용된 각 가솔린 별 옥탄가는 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Physical properties of gasoline

Chemical name	Gasoline
CAS NO.	8006-61-9
Flash point	< -40 °C
Boiling point	32~210 °C
Melting point	-90.5~-95.4 °C
Specific gravity	0.7~0.8 (H <sub>2</sub> O=1)
Vapor density	3.0~4.0 (air=1)
Vapor pressure	304~684 mmHg
Auto ignition temperature	280~470 °C
Explosion range	1.2~7.6%

Table 2. Octane number of gasoline

PG	MG	RG
100.6	95.3	91.7

#### 3-2. 실험장치

가스폭발한계를 측정하는 장치로서는 전파법과 버너법이 있으며, 이중에서 전파법은 원통형 또는 구형의 용기 내에 혼합가스를 넣고 한쪽에서 점화하여 화염이 전체적으로 확산되는 한계조성을 결정하

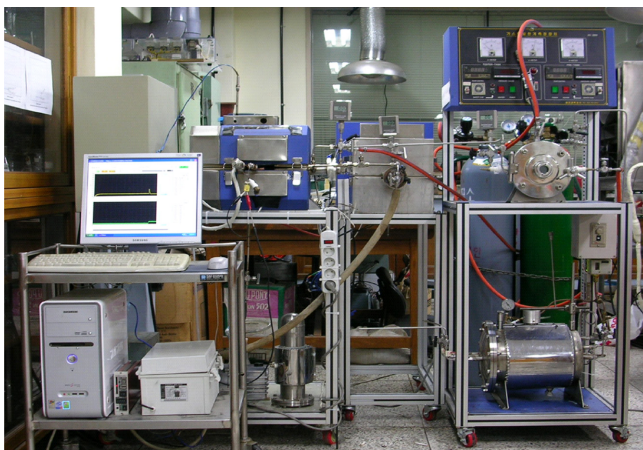


Photo 1. The picture of experimental apparatus for vapor explosion tester.

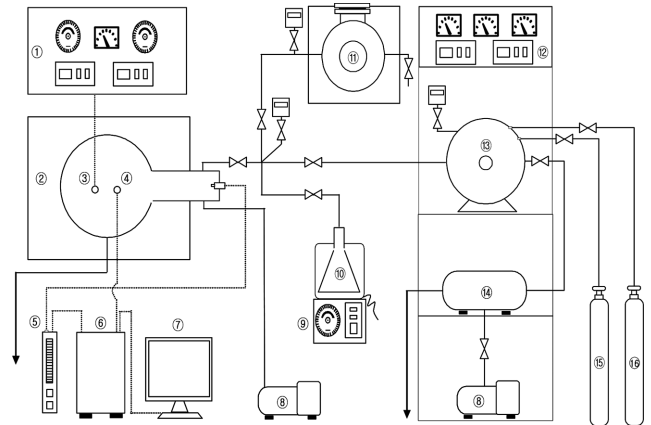


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for explosion measurement.

- |                                    |                                 |
|------------------------------------|---------------------------------|
| 1. High voltage transformer        | 9. Temperature control system   |
| 2. Explosion vessel                | 10. Sample generator            |
| 3. Ignition electrode              | 11. E.O vapor generator         |
| 4. Thermocouple                    | 12. Control box                 |
| 5. Amplifier                       | 13. Air mixing chamber          |
| 6. A/D converter & Signal terminal | 14. Spare sample mixing chamber |
| 7. TPMeasure system                | 15. N <sub>2</sub> bombe        |
| 8. Vacuum pump                     | 16. O <sub>2</sub> bombe        |

는 방법이고, 버너법은 버너위에 안정된 화염이 가능한 혼합가스 조성의 한계치를 결정하는 방법이다[19].

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

폭발시험 장치는 내부의 용적이 1.1 L로서 용기내의 온도와 압력의 측정을 위하여 Chromel-Alumel Thermocouple (O.D 1.0 mm)의 열전대 온도계와 Kyowa제 PGM 100 KD 압력센서를 사용하였다. 폭발발생기의 재질은 SUS 304를 사용하였으며, 용기내의 점화에너지를 공급하기 위하여 자동차용 점화플러그와 유사하게 특수 제작된 전극을 부착하였다. 폭발발생기의 가열로는 0~800 °C까지 가열이 가능한 전기로를 제작하였고, 폭발 및 연소의 유무를 판정하기 위하여 증폭기를 거쳐 온도·압력측정 프로그램에 의하여 모니터에서 온도 및 압력의 변화를 확인하고, 컴퓨터에 Data를 저장할 수 있도록 하였다. 또한 폭발용기 내에 시험하고자하는 가스의 조성을 정밀하게 하기 위해서 용기내의 공기 및 미연소 가스의 배출은 -0.098066 ~ -0.098557 MPa.G까지 진공이 가능한 Vacuum pump를 사용하여 진공상태로 만들고, 필요한 농도만큼의 시료를 1차적으로 투입하였으며, 산소의 조성은 질소, 산소가스를 계산식에 의해 폭발용기에 투입되도록 하였다.

#### 3-3. 실험방법

가연성 증기의 농도 변화에 대한 실험을 행하기 위한 폭발발생기에 주입하는 산소, 질소의 순도는 99.99%의 것을 사용하였으며, 실험은 다음의 순서에 의해 진행하였다[20].

(1) 폭발용기탱크 내부를 진공펌프를 사용하여 상부에 설치된 압력의 수치가 -0.098557 MPa.G까지 진공으로 만든다.

(2) 기체 혼합물의 상태방정식으로 계산된 압력의 수치만큼 가솔린의 량을 주입구를 통해서 주입한다.

(3) 산소를 산소주입구를 통해 해당 압력만큼 주입한다.

(4) 질소를 질소주입구를 통해 해당 압력만큼 주입한다. 이때 질소 주입부의 밸브를 급격히 열어 혼합조 내부로 질소가 빠르게 유입되면서 내부의 난류를 형성시켜 시료가 잘 혼합될 수 있도록 한다.

(5) 농도의 조성을 균일하게 하기 위하여 혼합탱크의 내부를 프로펠러형 교반기로 교반한다.

(6) 점화플러그에 전원을 연결한다.

(7) 점화스위치를 ON시켜 폭발유무를 관찰한다.

(8) 폭발시 오실로스코프상에 나타난 전압과 전류치를 기록한다.

(9) 폭발시의 압력과 압력상승속도 등을 프로그램에 의한 데이터를 컴퓨터에 기록·저장한다.

여기서 시험물질의 폭발하한과 상한은 같은 농도에서 3회 이상 실험하여 1회라도 폭발할 때의 최소농도를 폭발하한계로, 최대농도를 폭발상한계로 하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 산소농도에 따른 폭발 한계

가연성 물질의 경우 가연성 증기와 지연성 가스와의 혼합상태에서 점화원이 가해진다고 해서 항상 폭발이 일어나지는 않는다. 가연성 증기와 지연성 가스가 어떤 농도 범위 내에 있을 경우에만 폭발이 일어나고, 이 때의 범위를 폭발한계라 하며 폭발한계의 정확한 측정은 가연성 증기의 폭발사고 방지 대책의 가장 기본적인 중요한 사항이다[21].

Fig. 2는 PG를 산소농도 24%에서 3% 간격으로 줄여 가며 측정한 폭발한계를 나타낸 것으로서, 산소농도 21%의 공기 중에서 폭발한계는 LFL의 경우 1.5%, UFL의 경우 8.5%를 구하였다. 산소농도 18%에서는 LFL 1.5%, UFL은 6.6%를 측정하였으며, 산소농도 15%의 LFL은 1.5%, UFL은 5.4%를 나타내었다. 산소농도를 더 줄여 12%에서의 LFL은 1.6%로 소폭 상승하였으며 UFL은 3.6%를 나타내었다. 산소농도를 증가시켜 24%의 산소에서 LFL은 1.5%로 변화가 없었으나 UFL은 11.5%로 증가하였다.

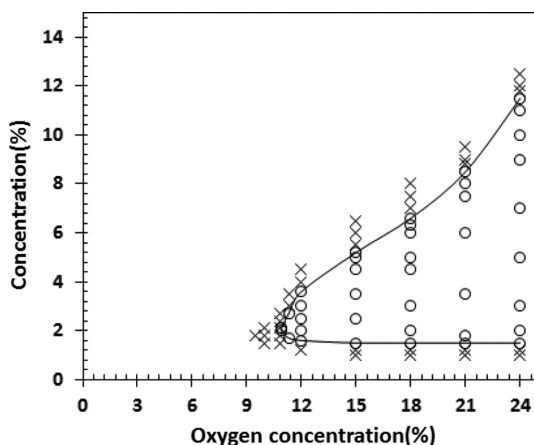


Fig. 2. Relation between oxygen concentration and PG concentration.

Fig. 3, 4는 각각 MG 및 RG 산소농도의 변화에 따른 폭발한계를 나타낸 것으로 산소농도가 증가할수록 LFL은 큰 변화가 없으나, UFL은 크게 증가하여 폭발한계가 넓어진다는 것을 알 수 있었으며, 각 시료물질의 산소농도의 변화에 따른 폭발한계 측정결과를 Table 3에 나타내었다.

실험결과 산소농도가 감소할수록 폭발한계의 범위가 좁아지며 최소 산소농도 이하에서는 폭발을 일으키지 않았다. 이는 폭발은 급격한 연소반응 현상으로 가연물과 산소와의 물 비가 적정해야만 폭발이 발생된다. 산소농도가 줄어들 경우 가연물과 산소가 불완전한 연소반응이 일어나기 때문에 폭발한계는 줄어드는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 산소농도 변화에 따른 각 시료별 UFL을 비교한 그래프로서 옥탄가가 증가할수록 LFL의 변화는 크지 않았으나 UFL은 증가하여 폭발한계가 넓어지는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 실험에 의한 폭발한계의 측정값이 현재 통용되는 가솔린의 MSDS에 제시된 1.2%~7.6%보다 넓은 폭발한계를 나타내므로 본 실험의 측정치가 가솔린을 사용하는 공정에 있어 화재 및 폭발을 방지하기 위한 기초자료가 될 것으로 사료된다.

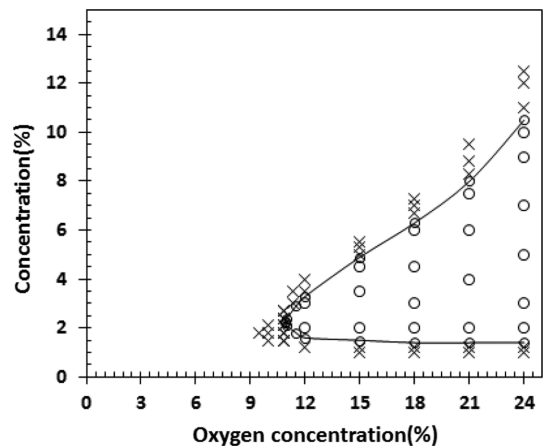


Fig. 3. Relation between oxygen concentration and MG concentration.

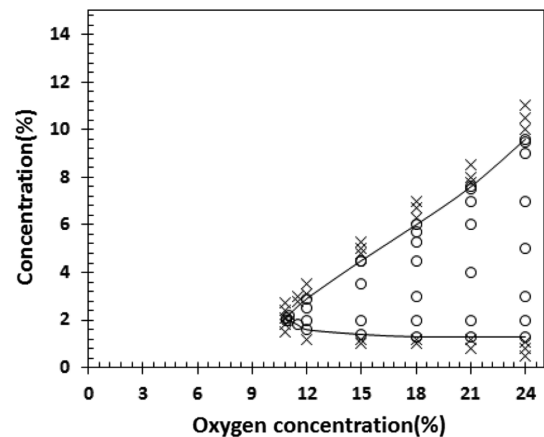


Fig. 4. Relation between oxygen concentration and RG concentration.

Table 3. Experiment result of flammable limit

Gasoline O <sub>2</sub> [%]	PG	MG	RG
	LFL~UFL [%]	LFL~UFL [%]	LFL~UFL [%]
24	1.5~11.5	1.4~10.5	1.3~9.6
21	1.5~8.5	1.4~8.1	1.3~7.6
18	1.5~6.6	1.4~6.3	1.3~6
15	1.5~5.2	1.4~4.9	1.3~4.5
12	1.6~3.6	1.6~3.3	1.3~2.9
11	2~2.1	2.1~2.4	1.3~2.2
10.9	2~2.1	2.3~2.2	1.3~2.1

#### 4.2. 최소산소농도

가연성 증기가 점화원에 의해 화재 및 폭발 일으키기 위해선 최소한의 산소농도가 필요하다. 최소산소농도는 화재 및 폭발 방지의 유용한 기준이 되며 불활성화에 기초자료가 된다.

불활성화(Inerting)란 가연성 혼합가스에 불활성 가스를 주입하여 연소를 위한 최소산소농도 이하로 낮게 하는 공정이다.

실험 결과 옥탄가의 변화에 따라 최소산소농도의 변화는 없었으며, PG, MG, RG 모두 10.9%의 최소산소농도를 구하였고, 10.9%미만의 산소농도에서는 가연성증기와 점화원이 있더라도 화재 및 폭발사고가 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

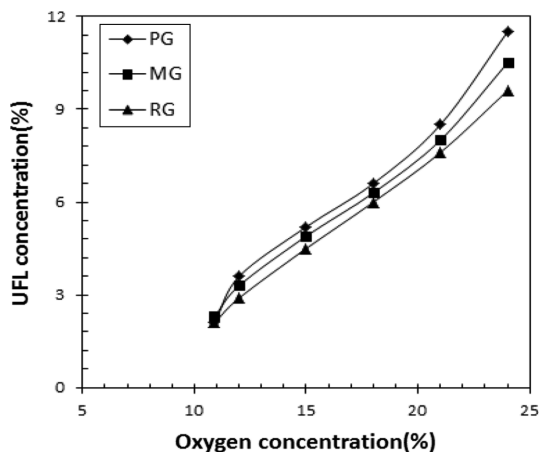


Fig. 5. Relation between oxygen concentration and UFL concentration.

### 5. 결 론

가솔린의 폭발위험성을 고찰하기 위하여 전파법을 개량한 실험장치를 사용하여 산소농도의 변화에 따른 폭발범위를 구하였으며, 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 폭발한계는 산소농도와 상관관계가 있으며 산소농도가 낮을수록 폭발한계도 좁아진다.
- (2) 산소농도 21%인 공기 중의 PG의 폭발한계는 1.5~10.9%를 구하였고, MG 및 RG 는 각각 1.4~8.1%, 1.3~7.6%를 구하였다.
- (3) 가솔린의 옥탄가가 증가할수록 LFL의 변화는 크지 않았으나, UFL은 증가하여 폭발한계가 넓어진다.
- (4) 산소농도를 줄여가며 폭발한계를 측정할 결과 MOC는 10.9%를 측정하였고, 이 농도 미만에서는 가연성증기와 점화원이 존재하더라도 폭발이 발생되지 않는 것을 알 수 있다.

### 감 사

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

### Reference

1. Kim, W. K., Kim, J. H. and Choi, J. W., "Explosion Risk of 2-Ethylhexanoic Acid," *Fire Science and Engineering*, **29**(6), 20-25(2015).

2. Choi, I. G., Cho, I. K., Mok, Y. S., Lee, D. H., Choi, J. W. and Ha, D. M., "The Measurement of Minimum Ignition Energy and Explosion Limit for Pine Tree Dust," *J. Korean Institute of Gas*, **2**(2), 55-60(1998).
3. Choi, J. W., Mok, Y. S. and Park, S. H., "A Study on the Explosion Characteristics of City Gas," *J. Korean Society of Safety*, **16**(3), 109-114(2001).
4. Lim, W. S., Mok, Y. S. and Choi, J. W., "A Study on the Effect of Humidity and Temperature of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose Dust," *J. Korean Society of Safety*, **19**(3), 65-69(2004).
5. Oh, S. and Yeo, Y. K., "Optimal Operation of Motor/Turbine Processes in Utility Plant," *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(3), 234-241(2007).
6. Park, H. J., Choi, J. W. and Kim, S. D., "A Study on the Features of the Velocity Distribution and the Static Pressure Distribution of Oil on a Low-velocity Piston," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(4), 450-456(2010).
7. Ha, D. M., "Prediction of Explosion Limits of Ethers by Using Heats of Combustion and Stoichiometric Coefficients," *J. Korean Institute of Gas*, **15**(4), 44-50(2011).
8. Meyer, E., "Chemistry of Hazardous Materials," 2nd ed., *Prentice-Hall*, 33-73(1990).
9. Lee, H. P., Son, K. H., Kim, D. W., Song, Y. H. and Kim, S. W., "Combustion Engineering," *Hwasumok*, 256-258 (2015).
10. Ha, D. M. and Jeong, K. S., "Prediction of Minimum Oxygen Concentration(MOC) of Hydrocarbons and Halogenated Hydrocarbons," *Fire Science and Engineering*, **19**(2), 1-7(2005).
11. Park, S. M., "Explosion Prevention and Inerting," *Fire Science and Engineering*, **2**(3), 40-42(2001).
12. Ha, D. M., Choi, Y. C. and Lee, S. J., "A Study on Minimum Oxygen Concentration (MOC) for Explosion Prevention," *Fire Science and Engineering*, **2003**(4), 236-241(2003).
13. Ha, D. M., "Prediction of Explosion Limits of Aldehydes Using Chemical Stoichiometric Coefficients and Heats of Combustions," *J. Korean Institute of Gas*, **19**(2), 5-11(2015).
14. Ha, D. M., "Prediction of Explosion Limits of Organic Acids Using Chemical Stoichiometric Coefficients and Heats of Combustion," *Fire Science and Engineering*, **27**(3), 47-51(2013).
15. Boo, T. S., "A Study on the Combustion Concentration and Explosion Risk of P-Xylene," Dept. of Fire Protection Engineering, Graduate School of Industry, *Pukyong National University*, 6-10(2015).
16. Kim, Y. M., "A Study on the Fire and Explosion by the Small Ignition of Organic Solvent," Dept. of Fire Protection Engineering, Graduate School, *Pukyong National University*, 3-5(2014).
17. Jang, W. S., "A Study on the Explosion Risk of LP Gas," Dept. of Safety Engineering, Graduate School of Industry, *Pukyong National University*, 4-6(2006).
18. MSDS, <http://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetailGet.do>, *KOSHA*.
19. Kim, J. H., "A Study on the Explosion Risk of 2-Ethylhexanoic Acid," Dept. of Fire Protection Engineering, Graduate School of Industry, *Pukyong National University*, 7-17(2013).
20. Mizutani, T. and Matsui, H., "Decomposition Flame Propagation Properties of Ozone/Oxygen Mixtures," Research Reports of the National Institute of Industrial Safety, *NIIS-RR-2000*(2001).
21. Kim, T. G., "A Study on the Explosion Risk and Fire Transmission Situation of Propylene Gas," Dept. of Safety Engineering, Graduate School, *Pukyong National University*, 33-36(2007).