

2-Ethylhexanoic Acid의 폭발위험성에 관한 연구

김원길 · 김정훈* · 최재욱*†

부산광역시 부산진소방서, *부경대학교 소방공학과

Explosion Risk of 2-Ethylhexanoic Acid

Won-Kil Kim · Jung-Hun Kim* · Jae-Wook Choi*†

Busanjin Fire Station of Busan

*Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong National Univ.

(Received August 5, 2015; Revised November 18, 2015; Accepted November 18, 2015)

요 약

2-Ethylhexanoic acid는 플라스틱의 충격보강제를 제조하는 물질로서 공정 중에 폭발위험성을 고찰하기 위하여 산소농도 변화에 따른 폭발범위, 폭발압력, 최대폭발압력상승속도를 실험한 결과 실험온도 100 °C에서, 산소농도 40~70%에서 폭발하한농도 3.2%를 구하였으며, 산소농도 21%에서 폭발하한 농도는 4.0%, 폭발상한 농도는 4.5%를 구하였다. 또한, 2-ethylhexanoic acid의 폭발압력은 산소농도 70%에서 1.4161 MPa의 최대폭발압력을 나타내었으며, 최대폭발압력상승속도를 구한 결과 산소농도 70%에서 62.692 MPa/s를 구하였다.

ABSTRACT

In order to examine the explosion risk of 2-ethylhexanoic acid, we experimentally studied the explosion limit, explosion pressure, and rate of increase of the explosion pressure at different oxygen concentrations. The lower explosion limit was 3.2% at a temperature of 100 °C, and the oxygen concentration was 40 to 70%. The upper explosion limit was 4.5% and the lower explosion limit was 4.0% at an oxygen concentration of 21%. The maximum explosion pressure of 2-ethylhexanoic acid was 1.4161 MPa at an oxygen concentration of 70%, and the rate of increase of the explosion pressure was 62.692 MPa/s at this concentration.

Keywords : Explosion limit, Explosion pressure, Rate of increase of explosion pressure

1. 서 론

화학공업의 발달로 새로운 화학물질의 개발과 합성 등으로 에너지 사용량이 증대되어 가연성 물질을 대량으로 수송, 저장하는 기회가 빈번해짐에 따라 가연성 물질에 의한 화재 · 폭발의 사고가 빈번하게 발생하고 있다.

폭발은 가연성물질(가스 및 증기)을 다루는 공정 설계 시 고려해야 할 중요한 변수로써, 발화원이 존재할 때 가연성가스와 공기가 혼합하여 일정농도 범위 내에서만 연소가 이루어지는 혼합범위를 말한다. 특히 폭발한계는 초기온도 등 여러 인자에 따라 영향을 받으므로 문헌에 따라 약간의 다른 값들이 제시되고 있다⁽¹⁾. 또한 가스 또는 가연성 액체에서 발생하는 증기폭발의 경우 폭발의 상태는 압력에너지를 축적상태에 따라 크게 달라진다. 예를 들면 개방공간에서 가연성 혼합기체가 형성되어 있을 때 착화

되면 누설규모가 작을 때는 압력파가 거의 생기지 않으면서 압력상승에 기인하는 피해는 거의 없다. 그러나 건물의 내부 등 밀폐공간 내에서의 폭발은 압력이 크게 상승할 뿐만 아니라 밀폐공간을 구성하는 벽면 등에 강력한 충격파를 주어 큰 피해가 발생된다. 또한 축적된 압력에너지가 압력파로서 외부로 방출됨으로서 인접한 건물, 설비 및 사람들에게 큰 피해를 준다. 따라서 개방영역에서 발생하는 폭발보다 밀폐된 영역에서 폭발이 발생할 경우 폭발압력에 의한 파괴 효과는 더욱 증가하게 된다⁽²⁻⁵⁾.

폭발 위험성을 평가하기 위한 주요 특성값으로 폭발하한계(lower explosive limit), 최대폭발압력(maximum explosion pressure), 폭발압력상승속도(rate of explosion pressure rise velocity), 최소착화에너지(minimum ignition energy) 등이 있으며, 위험성 물질에 관한 국외 연구사례로는 Aoyagi and Fujji⁽⁶⁾의 액화 천연가스의 확산 시뮬레

†Corresponding Author, E-Mail: jwchoi@pknu.ac.kr
TEL: +82-51-629-6470, FAX: +82-51-620-1516

ISSN: 1738-7167

DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.6.020>

이전에 있어서 유체역학 모델에 관한 연구와 화학물질의 리스크 관리에 있어서는 Ootshi⁽⁷⁾의 연구가 있다.

본 연구에서는 산업현장에서 2-Ethylhexanoic acid를 원료로 플라스틱의 충격보강제를 제조하는 공정에서는 온도가 높지만, 산업안전공단(KOSHA)에서 제공하는 Material Safety Data Sheet (MSDS)⁽⁸⁾에서는 이에 대한 정보가 제시되지 않고 있다. 따라서 실험온도는 산업현장에서 공정 운전 온도인 100 °C에서 측정함으로써 실제 2-Ethylhexanoic acid의 저장, 취급에 대한 위험성을 예측할 수 있으며, 산소농도 변화에 따른 최소산소농도를 구함으로써 화재·폭발의 방지가 가능하다. 또한 도료 및 희석제로 사용하는 경우에 화재·폭발에 대한 폭발특성을 파악하기 위하여 압력의 변화에 따른 폭발범위, 폭발한계산소농도, 폭발압력 및 폭발압력상승속도를 측정하였으며, 이들로부터 화재·폭발 사고의 예방을 위한 유용한 정보를 제공하고자 한다.

2. 이론^(9,10)

두 가지 이상 혼합되어 있는 기체 혼합물의 경우 각 물질의 혼합조성비는 압력이나 부피에 의존하게 되고, 혼합기체 속에 들어있는 각 물질의 몰수의 합은 전체 혼합기체의 몰수가 되고, 각각의 몰수는 각 성분 기체의 농도, 즉량을 나타낸다. 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.

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

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

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

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, $n_t = n_1 + n_2 + n_3$ 가 되고, 이 혼합기체의 압력은 식(4)와 같이 구할

수 있으며,

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

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.

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

이것은 일정온도에서 혼합기체가 나타내는 전체 압력은 그 성분 기체들의 부분 압력의 합과 같다는 것은 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.

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

식(7)은 일부의 기체 혼합물에만 국한되지 않고 모든 기체 혼합물에 대해서도 성립되며, 전체 압력과 몰분율만 알면 분압을 계산할 수 있으며, 필요로 하는 화학조성의 농도를 만들 수가 있다.

3 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험 시료

본 실험에서 사용된 실험물질은 (주)○○화학에서 제공한 시료를 사용하였으며, 주요 특성 치는 한국산업안전보건공단에서 제공하는 물질안전보건자료로서⁽⁸⁾ Table 1과 같으며, 실제 제공한 물질의 물성 값과 다를 수 있다.

Table 1. Characteristic of 2-Ethylhexanoic Acid

Chemical name	2-Ethylhexanoic acid
CAS NO.	149-57-5
Flash point	< 118 °C
Boiling point	227 °C
Melting point	-59 °C
Specific gravity	0.9 at 25 °C (H ₂ O = 1)
Vapor density	5 (air = 1)
Vapor pressure	4 mmHg at 20 °C
Auto ignition temperature	371 °C
Explosion range	0.8~6 vol%

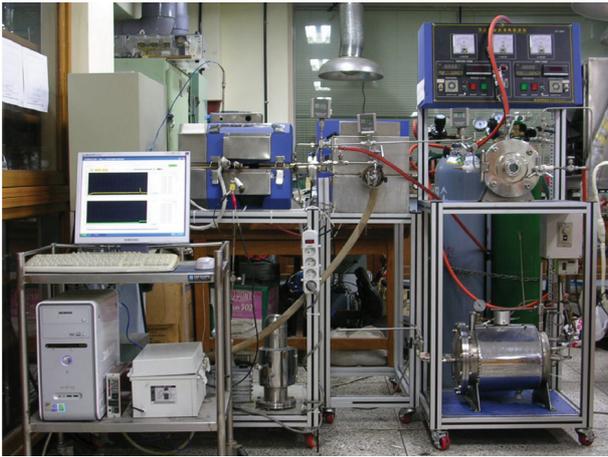


Photo 1. The picture of experimental apparatus for vapor explosion tester.

3.2 폭발한계 및 폭발압력 측정 실험장치

가스폭발한계를 측정하는 장치로서는 전파법과 버너법이 있으며, 이 중에서 전파법은 원통형 또는 구형의 용기 내에 혼합가스를 넣고 한쪽에서 점화하여 화염이 전체적으로 확산되는 한계조성을 결정하는 방법이고, 버너법은 버너위에 안정된 화염이 가능한 혼합가스 조성의 한계치를 결정하는 방법이다^(9,10).

본 연구에 사용한 실험 장치는 전파법을 개량한 장치로

써 Photo 1에 나타내었으며, 그 개략도를 Figure 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 100KD 압력센서를 사용하였다. 폭발용기의 재질은 SUS 304를 사용하였으며, 용기내의 점화에너지를 공급하기 위하여 자동차용 점화플러그와 유사하게 특수 제작된 전극을 부착하였다. 폭발용기의 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⁽¹¹⁻¹³⁾.

3.3 실험방법

3.3.1 폭발한계 측정

가연성 증기의 농도 변화에 대한 실험을 행하기 위한 폭발용기에 주입하는 산소, 질소의 순도는 99.99%의 것을

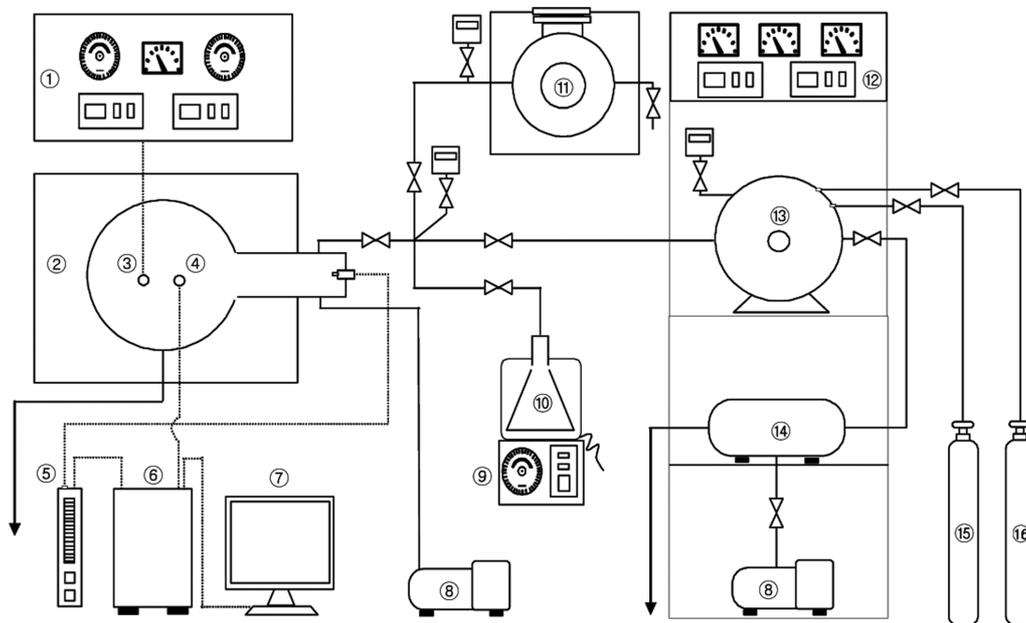


Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus for explosion measurement.

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

사용하였으며, 실험은 폭발용기탱크의 내부를 진공펌프를 사용하여 상부에 설치된 압력의 수치가 $-0.098557 \text{ MPa} \cdot \text{G}$ 까지 진공으로 만든다. 실험의 정확성을 기하기 위하여 용기는 소정의 온도로 가열시킨 후 기체 혼합물의 상태방정식으로 계산된 압력의 수치만큼 2-ethylhexanoic acid의 량을 주입구를 통해서 주입한다.

필요한 산소는 산소주입구를 통해 해당 압력만큼 주입하고, 질소를 질소주입구를 통해 질소주입부의 밸브를 급격히 열어 혼합조 내부로 질소가 빠르게 유입되면서 내부의 난류를 형성시켜 시료가 잘 혼합될 수 있도록 한다.

시료용기 내의 농도의 조성을 균일하게 하기 위하여 혼합탱크의 내부를 프로펠러형 교반기로 교반한 후 점화플러그에 전원을 연결하여, 점화스위치를 ON시켜 폭발유무를 관찰한다.

이 때 폭발 시 오실로스코프상에 나타난 전압과 전류치를 기록하고, 폭발시의 압력과 압력상승속도 등을 프로그램에 의한 데이터를 컴퓨터에 기록하고 저장한다.

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

3.3.2 폭발압력 및 압력상승속도 측정

각 가스의 농도에 따라 폭발압력 및 폭발압력상승속도 (dP/dt)가 다르기 때문에 이것을 측정하여 위험성 평가를 하는 것이 대단히 중요하다. 폭발 시에 압력센서로 부터 측정된 압력은 증폭기에 의해서 증폭하여 TPMeas에 기록된다. 여기서 시간의 변화에 따라서 폭발압력의 값을 확인할 수 있으며, 이 때 나타난 압력을 폭발의 압력으로 측정하였다. 또한 폭발압력상승속도는 하나의 가스 농도에서 측정된 폭발압력을 시간에 대한 압력의 변화 값을 이용하여 각각의 시간에 대한 피크를 구하였고, 이들 중에 가장 큰 값을 최대폭발압력상승 속도로 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 산소농도 변화에 따른 폭발범위

가연성 물질의 경우 가연성 증기와 지연성 가스와의 혼합 상태에서 점화원이 가해진다고 해서 항상 폭발이 일어나지는 않는다. 가연성 증기와 지연성 가스가 어떤 농도범위 내에 있을 경우에만 폭발이 일어나고, 이때의 범위를 폭발범위라 하며, 폭발범위의 정확한 측정은 가연성 증기의 폭발사고 방지 대책의 가장 기본적이고 중요한 사항이다. Figure 2는 폭발통과 시료용기의 온도를 50°C 로 유지하고, 산소의 농도를 20~70% 범위 내에서 10% 간격으로 실험을 실시하였다. 이것은 ○○화학에서 실제 사용되는 작업환경이 100°C 에서 공정운전을 하고 있으며, 산소농도의 변화는 물질을 제조하는 공정의 산소농도를 30~40%에서 반응시킴으로서 수율을 증대시키고 있다.

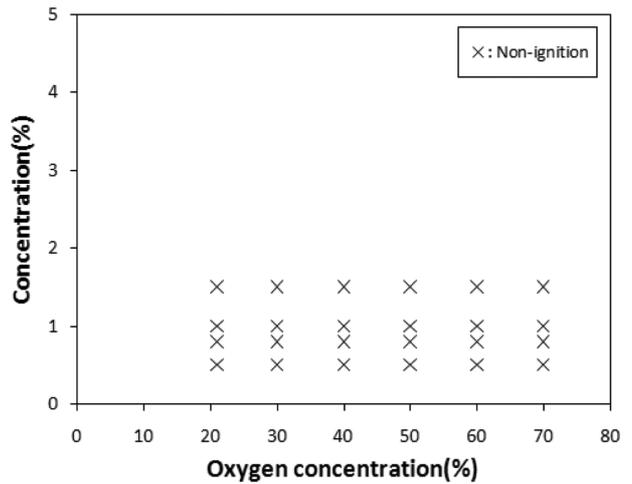


Figure 2. Relation between oxygen concentration and 2-ethylhexanoic acid concentration at 50°C .

실험을 위한 2-ethylhexanoic acid는 증기압이 매우 낮으므로 50°C 에서의 증기 발생은 0.8%의 농도인 경우 약 5~10분의 시간이 경과하였으며, 증기의 농도가 1.5%에서는 약 25~30분의 소요시간이 경과되었으며, 산소농도 변화에 따른 최대 증기의 농도 1.5% 이하에서 실험한 결과 폭발이 발생되지 않았다. 이것은 50°C 에서 유증기의 생성에 따른 위험성이 극히 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서, 2-ethylhexanoic acid는 증기압이 낮은 50°C 에서는 폭발범위의 농도가 되기까지는 많은 시간이 필요하였으며, 폭발하한계의 농도의 주입은 어려워 실제 공정 중의 온도인 100°C 에서 실험을 하였다.

Figure 3은 폭발통과 시료용기의 온도를 100°C 로 유지한 상태에서 압력 0.1471 MPa일 경우에 있어서 산소농도 변화에 따른 2-ethylhexanoic acid의 폭발범위를 나타낸 것으로서, 산소농도 21%에서 폭발하한 농도는 4.0%, 폭발상한 농도는 4.5%를 구하였다. 제품을 생산하기 위한 수

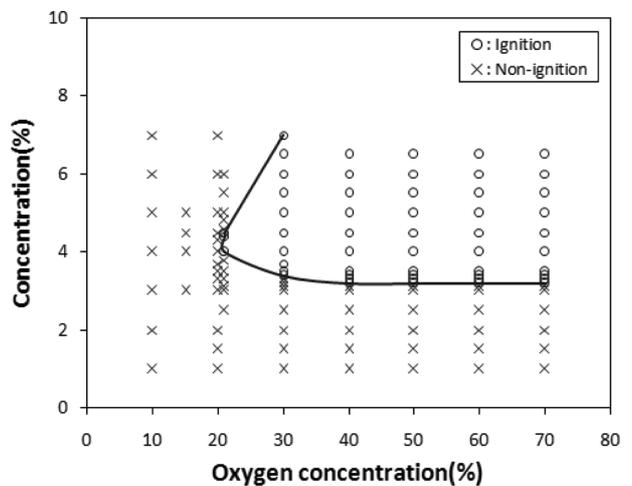


Figure 3. Relation between oxygen concentration and 2-ethylhexanoic acid concentration at 100°C .

율의 증가를 위하여 산소농도를 증가시킬 경우에, 산소 농도 30%에서 하한계농도 3.4%를 구하였으며 산소농도 40~70%에서는 동일하게 폭발하한농도 3.2%를 구하였다. 따라서 산소농도를 증가시킬 경우에 하한계가 0.6%~0.8% 낮아짐으로서 위험성은 훨씬 높아지는 것으로 나타났다. 또한 산소농도 30%에서도 온도 100 °C에서 2-ethylhexanoic acid의 증기가 7% 이하에서만 생성되기 때문에 폭발하한계는 구할 수 있었지만 폭발상한계는 구할 수가 없었다.

일반적으로 가연성 물질의 위험성을 판단하는 것은 폭발하한 농도와 한계산소 농도가 대단히 중요함으로서 2-ethylhexanoic acid의 물질은 산소농도 70% 이하에서는 폭발하한농도 3.2%를 구하였으며, 산소농도 21%에서 peak 치(한계산소농도)를 구하였다.

4.2 폭발압력

가연성 물질의 폭발에 있어서 폭발압력은 안전대책을 강구하는데 중요한 인자로서, 가연성가스 및 액체의 저장, 취급시설, 설비 시에 내압능력과 방폭설비의 산정기준이 된다.

본 실험에서는 폭발통내의 전극 간극을 5 mm 내외로 하고 전압을 13 kv로 설정하여 실험을 실시하였다.

Figure 4는 위험성 물질을 저장, 취급할 경우에 일반적으로 폭발하한계가 대단히 중요함으로 이에 대한 공정의 위험성을 파악하기 위하여, 산소농도 20~70%의 범위에서 폭발하한계 부근에서 최대폭발압력을 구하여 나타낸 것으로서, 폭발에 따른 압력의 변화는 산소의 농도가 증가할수록 증가하였으며, 산소농도 20~40%로 증가할 경우 폭발압력의 변화는 크지 않았지만, 50~60%의 산소농도에서는 폭발압력의 변화가 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 2-ethylhexanoic acid의 산소농도가 50~60%에서 산소와 연료비의 조성이 양호하기 때문에 최대폭발압력이 증가하는 것으로 사료된다. 또한 산소농도 70%에서는 산소농도

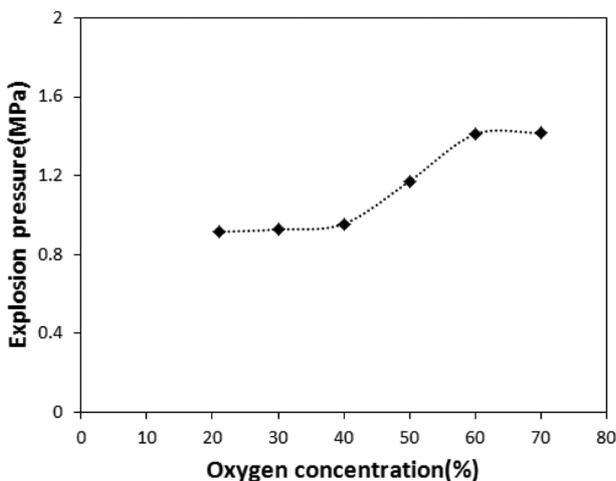


Figure 4. Relation between oxygen concentration and maximum explosion pressure.

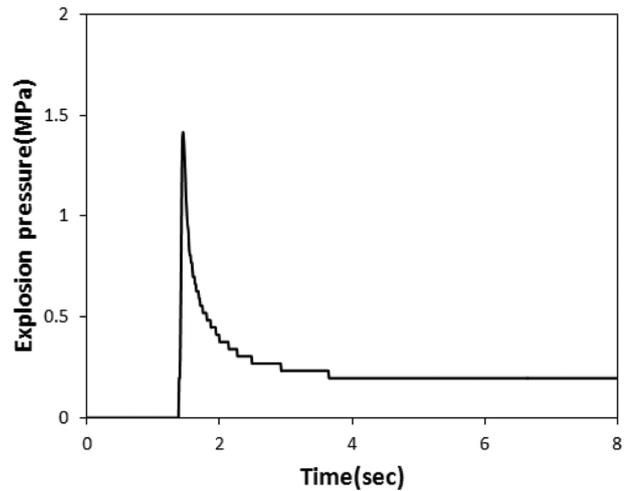


Figure 5. Relation between time variation and maximum explosion pressure at oxygen concentration at 70%.

60%일 경우와 유사하게 나타났으며, 산소농도 60% 이상에서도 화학반응에 필요한 화학양론 조성이 양호한 것으로 생각된다.

Figure 5는 산소농도 70%일 경우에 있어서 폭발이 일어났을 때, 시간의 변화에 따라서 최대 폭발압력을 나타낸 것으로서 1.4164 MPa를 구하였다.

4.3 폭발압력 상승속도

Figure 6은 Figure 4의 산소농도 20~70%의 변화에 대한 최대폭발 압력을 각 산소 농도에서 폭발이 발생하였을 경우 폭발압력 상승속도를 나타내었다. Figure 4의 폭발압력과 동일하게 산소 농도가 증가할수록 폭발압력 상승속도도 증가하였다.

이는 용기내의 폭발압력이 증가할수록 분자간의 충돌횟수가 증가하기 때문에 최대폭발압력 상승속도가 증가하는

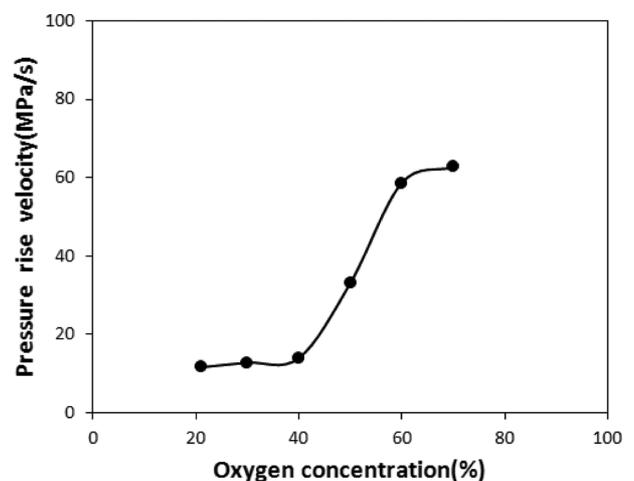


Figure 6. Relation between oxygen concentration and rate of explosion pressure rise velocity.

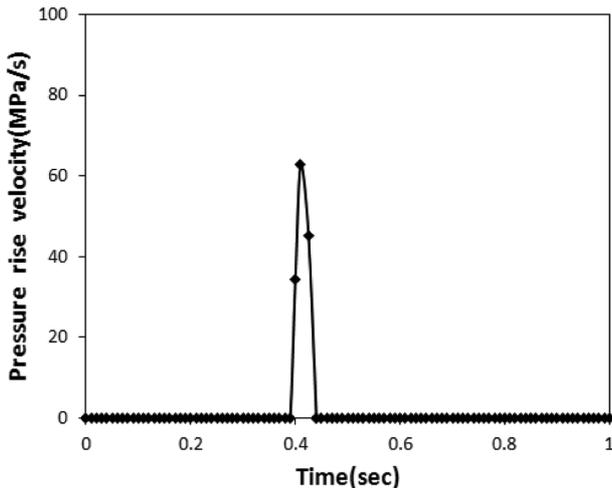


Figure 7. Relation between time variation and rate of explosion pressure rise velocity at oxygen concentration at 70%.

것으로 사료된다. 또한 Figure 7은 산소농도 70%일 경우에 있어서 시간변화에 대한 폭발압력상승속도를 나타낸 것으로서, 최대폭발압력상승속도는 62.692 MPa를 구하였으며, 공정의 안전운전을 위한 장치의 설계를 위한 재료 및 두께 등을 산정하는데 필요한 자료가 될 것으로 사료된다.

5. 결 론

2-Ethylhexanoic acid의 폭발위험성을 고찰하기 위하여 전 파법을 개량한 실험장치를 사용하여, 산소농도 변화에 따른 폭발범위를 구하였으며, 이들로 부터 폭발압력과 폭발압력 상승속도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 2-Ethylhexanoic acid는 증기압이 낮아 50 °C에서는 폭발범위의 농도가 되기까지는 불가능하였으며, 실제 공정 중의 온도인 100 °C에서의 폭발범위는, 산소농도 40~70%에서 폭발하한농도 3.2%를 구하였다.

2) 실험온도 100 °C에서 산소농도 21%일 경우 2-ethylhexanoic acid의 폭발하한 농도는 4.0%, 폭발상한 농도는 4.5%를 구하였다.

3) 2-Ethylhexanoic acid의 폭발압력은 산소농도 20~40%로 증가할 경우 폭발압력의 변화는 크지 않았으며, 50~60%의 산소농도에서는 폭발압력의 변화가 상승하여 산소농도 70%에서 1.4161 MPa의 최대 폭발압력을 나타내었다.

4) 2-Ethylhexanoic acid의 폭발압력상승속도는 산소농도가 증가할수록 증가하였으며, 산소농도 70%에서 최대 폭발압력상승속도 62.692 MPa/s를 구하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술 연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

1. D. M. Ha, "Appropriateness of MSDS by Means of the Measurement of Combustible Properties of Anisole", *Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 29, No. 2, pp. 20-24 (2015).
2. D. M. Ha, Y. S. Mok and J. W. Choi, "A Study on Flash Point of Flammable Substances", *Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 13, No. 1, pp. 11-19 (1999).
3. J. W. Choi, "A Study on the Extinction Concentration of Inert Gas for Extinction Performance Estimation of Kerosene", *Journal of the KOSOS*, Vol. 22, No. 3, pp. 34-38 (2007).
4. W. S. Lim and J. W. Choi, "Thermal Stability and Critical Ignition Temperature of RPP", *Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 22, No. 1, p. 99104 (2008).
5. W. S. Lim and J. W. Choi, "Measurements of Flame Temperature and Radiation Heat Flux from Pool Fire withy Petroleum Diesel Fuel", *Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 21, No. 3, pp. 78-83 (2007).
6. Y. Aoyagi and T. Fujji, "Evaluation of CFD Model SIGMET-J as LNG Evaporation and Gas Dispersion Model", *Journal of Japan Society for Safety Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 15-21 (2001).
7. S. Otoshi "Risk Management and Risk Communication of Chemicals", *Journal of Japan Society for Safety Engineering*, Vol. 42, No. 1, pp. 44-50 (2003).
8. KOSHA, /www.kosha.or.kr/chemical Information Guide KE-13740, CAS No. 149-57-5 (2014).
9. I. G. Choi, I. K. Cho, Y. S. Mok, D. H. Lee, J. W. Choi and D. H. Ha, "The Measurement of Minimum Ignition Energy and Explosion Limit for Pine Tree Dust", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 2, No. 2, pp. 55-60 (1998).
10. W. S. Chang, "A Study on the Explosion Risk of LP Gas", Dept. of Safety Engineering, Graduate School of Industry, Pukyong National University, pp. 4-6 (2006).
11. Y. M. Kim, "A Study on the Fire and Explosion by the Small Ignition Source and Characteristics of Spontaneous Ignition of Organic Solvent", Dept. of Fire Protection Engineering, Graduate School of Industry, Pukyong National University, pp. 3-5 (2014).
12. W. S. Lim, Y. S. Mok and J. W. Choi, "Ignition Temperature of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose Dust Cloud", *APSS*, pp. 97-100 (2003).
13. T. S. Boo, "A Study on the Combustion Concentration and Explosion Risk of P-Xylene", Dept. of Fire Protection Engineering, Graduate School of Industry, Pukyong National University, pp. 6-10 (2015).