

가연성 이성분계의 최소자연발화온도 거동(MAITB)

하동명[†] · 이성진^{*}

세명대학교 보건안전공학과 · *세명대학교 임상병리학과
(2008. 8. 28. 접수 / 2008. 11. 27. 채택)

Minimum Autoignition Temperature Behavior(MAITB) of the Flammable Binary Systems

Dong-Myeong Ha[†] · Sungjin Lee^{*}

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University

^{*}Department of Clinical Laboratory Science, Semyung University

(Received August 28, 2008 / Accepted November 27, 2008)

Abstract : The values of the AIT(Autoignition temperature) for fire and explosion protection are normally the lowest reported. The minimum autoignition temperature behavior(MAITB) of flammable liquid mixtures is exhibited when the AIT of mixture is below the AIT of the individual components. The MAITB is an interesting experimental features, which can be significant from the perspective of industrial safety. In this study, the AITs of m-xylene+n-butyric acid and ethylbenzene+n-butanol systems were measured using ASTM E659-78 apparatus. The AITs of m-xylene, n-butyric acid, ethylbenzene and n-butanol which constituted two binary systems were 587°C, 510°C, 475°C and 340°C respectively. The m-xylene+n-butyric acid system is exhibited MAITB at 0.3 mole fraction of m-xylene, and its minimum autoignition temperature was 460°C.

Key Words : AIT(autoignition temperatures), MAITB(minimum autoignition temperature behavior) ASTM E659-78, m-xylene+n-butyric acid system, ethylbenzene+n-butanol system

1. 서론

최근 화학물질의 사용 증가로 인해 화재 및 폭발 사고가 빈번히 발생되고 있다. 화학관련산업의 사업장에서 안전을 확보하기 위해 취급하는 물질의 연소특성치에 대한 정확한 정보가 필요하다. 특히 연소특성치 가운데 자연발화온도에 대한 관심이 커지고 있다.

자연발화(Autoignition)는 가연성 혼합기체에 열 등의 형태로 에너지가 주어졌을 때 스스로 타기 시작하는 산화반응 현상이다. 일반적으로 가연성물질이 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화할 수 있는 최저온도를 최소자연발화온도(AIT, Autoignition Temperature)라고 한다. AIT는 개시온도, 증기 농도, 용기크기, 산소농도, 계의 압력, 촉매, 발화지연시간 등 다양한 실험 조건에 영향을 받는다. 이와 같이 다양한 장치 및 조건에 의해서 실험

이 이루어지므로 문헌들 마다 다른 값들이 제시되고 있다¹⁾.

화학공정에서는 순수물질보다 혼합물질을 사용하는 경우가 대부분이다. 가연성 순수물질의 자연발화온도 연구는 많이 진행되고 있으나, 혼합물의 연구는 거의 없는 편이다. 지금까지 발표된 연구로 Zabetakis 등²⁾은 ASTM D 286-30을 변형한 장치를 사용하여 n-Heptane과 iso-Octane 혼합물의 자연발화온도에 대한 실험적 연구를 하였으며, Cullis 등³⁾은 n-Decane과 2,2,5-Trimethylhexane 혼합물에 대해 Pyrex 구형용기(550cm³)를 사용하여 자연발화온도를 측정하였다. 최근 Ha⁴⁾는 널리 사용되고 있는 ASTM E659-78(Standard Test Method for Autoignition Temperature of Liquid Chemicals)장치를 이용하여 o-xylene+n-pentanol계, ethylbenzene+n-hexanol계 그리고 ethylbenzene+n-propionic acid 계의 자연발화온도를 측정할 바 있다.

본 연구에서도 ASTM E659-78장치를 사용하여 m-xylene+n-butyric acid계와 ethylbenzene+n-butanol

[†] To whom correspondence should be addressed.
hadm@semyung.ac.kr

계에 대한 자연발화온도를 측정하였다. 또한 이성분계들을 구성하는 순수 성분인 *m*-xylene, *n*-butyric acid, ethylbenzene 그리고 *n*-butanol의 최소자연발화온도와 발화지연시간을 측정하였으며, 측정된 최소자연발화온도를 다른 문헌에서 제시한 자료들과 비교 고찰하였다. 제시된 순수물질과 혼합물들의 실험 자료는 이들을 취급, 처리 및 생산하는 공정에서 화재의 방호 자료로 이용할 수 있으며, 다른 혼합물의 자연발화 연구에 응용할 수 있을 것이다.

2. 자연발화이론 및 자연발화온도의 적용

2.1. 열발화 이론에 의한 자연발화온도와 발화지연시간

열발화 이론은 여러 문헌⁴⁻⁶⁾에 소개 되었을 뿐만 아니라, 과거 순수물질 연구를 위해 열발화 이론을 전개한 바 있어 여기서는 간략히 소개한다.

일반적으로 열발화 이론은 두 가지로 대별할 수 있다. 하나는 발열과 방열의 관계를 정상상태라고 가정된 Semenov 이론이고 다른 하나는 Semenov 이론을 보강한 Frank-Kamenetskii 이론이다.

본 연구에서는 Frank-Kamenetskii 이론을 도입하여 발화온도와 발화지연시간의 관계를 나타내고자 한다. 계의 크기 변화와 발화임계 주위 온도 관계를 Frank-Kamenetskii 매개변수로 나타내면 다음과 같다.

$$\delta = \frac{x_0^2 Q_p A_e \exp\left(-\frac{E}{RT_a}\right)}{k \frac{RT_a^2}{E}} \quad (1)$$

여기서 x_0 는 시료의 특성 차원의 반이고, T_a 는 주위 온도이다.

활성화에너지(E)는 식 (1)으로부터 얻는 대수온도곡선 대 $1/T_a$ 의 관계를 이용하여 결정할 수 있다.

발화지연은 열 생성(발열화학반응)과 열 손실(액체연료의 증발)사이의 경쟁 때문에 생긴다. 따라서 Frank-Kamenetskii 방법과 비슷하게 발화지연시간과 초기온도 역수로 표현할 수 있는데, 이를 간략히 설명하면 다음과 같다.

일반적으로 실험에서 측정된 값들은 발화지연시간 $\ln t$ 와 초기온도의 관계로 표현할 수 있다.

$$\ln t \approx a \left(\frac{1000}{T_{G0}} \right) + b \quad (2)$$

따라서 식 (2)에서 선형 최소자승법 이용하여 발화지연시간과 초기발화온도를 만족하는 매개변수인 a 와 b 를 결정할 수 있다.

2.2. 최소자연발화온도의 적용

증류탑이나 열교환기의 유체는 공기가 존재하는 곳에서 유체의 최소자연발화온도 이상으로 과열되는 경우가 있다. 그 유체가 누출되어 공기와 접촉하면 자연스럽게 발화할 수 있다. 따라서 물질의 최소자연발화온도에 대한 지식은 화학공정의 위험성평가와 화재 및 폭발을 예방하는데 도움을 줄 수 있다.

2008년 후반부터 우리나라도 화학물질 분류·표시의 통일화(GHS, Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)체제를 도입하여 시행할 예정이다. 화학물질은 각종 위험성을 내포하고 있어 보관·운송 및 취급 중에는 특별한 주의가 요구되며, 특히 철도나 선박 등을 통해 위험물을 수송할 때 사고를 예방하기 위해서는 발화온도에 대한 정확한 정보가 필요하다.

일반적으로 발화온도에 대한 발화지연시간 연구에서 발화지연시간이 μsec 인 경우는 엔진의 연소 연구에 이용되며, 1~5sec는 공정의 안전 연구에 이용되고, 10sec 혹은 그 이상의 시간은 화재의 방호 목적에 적용되고 있다.

3. 실험

3.1. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 장치는 최근에 널리 사용되고 있는 ASTM E659-78장치를 사용하였으며, 장치는 크게 Furnance, Temperature Controller, Thermocouple, Test Flask, Hypodermic Syringe, Mirror, Air Gun 등으로 구성되어 있다⁷⁻⁹⁾.

본 연구에서의 실험 방법은 ASTM E659-78 규정에 맞추어 실험하였다.

- 1) 실내 온도, 기압, 시간, 습도를 기록한다.
- 2) 기준 온도를 설정하고, 실험 장치를 가열한다.
- 3) 설정된 온도에 도달하면 플라스크 내부에 피하주사기로 시료(0.1mL)를 넣는다.
- 4) 시료를 넣는 순간 Timer 작동한다.
- 5) 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 비 발화로 간주하고 플라스크를 에어건으로 청소 후 다시 실험을 준비한다.
- 6) 만일 10분전에 발화가 일어나면 발화된 온도보다 30℃ 낮게 설정하고, 3~5℃ 혹은 10℃

씩 증가시키면서 측정한다.

- 7) 발화 시간을 2초미만 까지 측정한다.
- 8) 발화가 일어났을 때 시간과 온도를 기록한다.

3.2. 실험재료

실험에 사용된 시약인 m-xylene, n-butyric acid, ethylbenzene 그리고 n-butanol은 순정화학(純正化學) 주식회사(99%)의 시약을 사용하였으며, 혼합물의 발화온도 측정을 위해서 순수물질을 각각 다른 몰비(Mole Fraction)로 혼합하여 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 자연발화온도와 발화지연시간 예측 모델

지금까지 대부분의 가연성물질에 대해 AIT와 발화지연시간 사이에서의 관계는 다음과 같은 선형식을 사용하여 고찰하였다.

$$\log\tau = \left(\frac{A}{T}\right) + B \quad (3)$$

여기서 τ 는 발화지연시간, T 는 자연발화온도[K], 그리고 A 와 B 는 상수이다.

본 연구에서는 실험에서 얻은 발화온도와 발화지연시간의 관계가 선형(Linear) 형태로 표현될 경우 다음과 같이 나타내었고,

$$\ln\tau = A + \left(\frac{E}{RT}\right) \left(= A + B\left(\frac{1}{T}\right)\right) \quad (4)$$

식 (4)을 이용하면 활성화에너지(E)를 계산할 수 있다.

AIT와 발화지연시간의 관계를 비선형(Non-linear) 형태로서 고찰할 필요가 있다고 판단되는 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\tau = A + B\left(\frac{1}{T}\right) + C\left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (5)$$

4.2. 순수물질의 최소자연발화온도 고찰

본 연구에서 두 개의 이성분계 혼합물인 m-xylene+n-butyric acid 계와 ethylbenzene+n-butanol 계를 구성하는 4개의 순수물질에 대하여 최소자연 발화온도를 측정하였으며, 측정된 실험값을 기존의 문헌값 및 KOSHA의 MSDS와 비교하여 Table 1에 나타내었다.¹⁰⁻¹⁶⁾

Table 1. Comparison of autoignition temperatures(AIT) between experimental data and several reported data for pure substances

Compounds	AITs(°C)							
	This study	NFPA	Sigma	Hilado	Jackson	SFPE	Scott (KOSHA)	
m-Xylene	587	527	-	528	563	530	-	527
n-Butyric acid	510	443	440	452	450	-	552	452
Ethylbenzene	475	432	432	432	460	430	477	432
n-Butanol	340	343	343	359	-	-	345	-

Table 1에 인용된 문헌들 가운데, Jackson과 Scott는 용기의 용량이 250mL로서 ASTM286을 변형한 장치를 사용하여 측정된 값이고, NFPA, Sigma, Hilado, SFPE 그리고 MSDS는 문헌들을 인용하여 제시한 값들이다.

본 실험에서 m-xylene의 AIT는 587°C로 측정되었는데, 여러 문헌 값과 비교하였을 때 약 25~60°C 정도 높게 나타났다. n-Butyric acid는 510°C로서 NFPA와 Hilado 문헌보다는 높게 측정되었으나, Scott 자료에 비해 42°C 낮게 측정되었으므로 이에 대한 검토가 필요하다. Ethylbenzene은 475°C로서 대체로 다른 문헌값에 비해 약 15~40°C 정도 높게 측정되었으나, Scott 자료와는 일치하였다. 그리고 n-butanol은 340°C로서 기존의 문헌값보다 약 3°C 정도 낮게 측정되었다. 또한 n-butanol의 자연발화온도 값은 MSDS에 존재하지 않은 자료이므로 이는 공정 안전에 중요한 자료로 이용될 수 있다고 본다.

본 연구에서 m-xylene과 n-butyric acid, ethylbenzene 그리고 n-butanol에 대해 자연발화온도와 발화지연시간을 측정할 값을 이용하여 최적화를 시도한 결과 다음과 같은 관계식을 얻었다.

m-Xylene :

$$\ln\tau = -11.583 + 1000.174\left(\frac{1}{T}\right) + 9.745 \times 10^7\left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (6)$$

n-Butyric acid : $\ln\tau = -32.779 + 27221.25\left(\frac{1}{T}\right)$ (7)

Ethylbenzene :

$$\ln\tau = 90.142 - 155997.598\left(\frac{1}{T}\right) + 6.762 \times 10^7\left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (8)$$

n-Butanol :

$$\ln\tau = 22.992 - 37288.512\left(\frac{1}{T}\right) + 1.534 \times 10^7\left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (9)$$

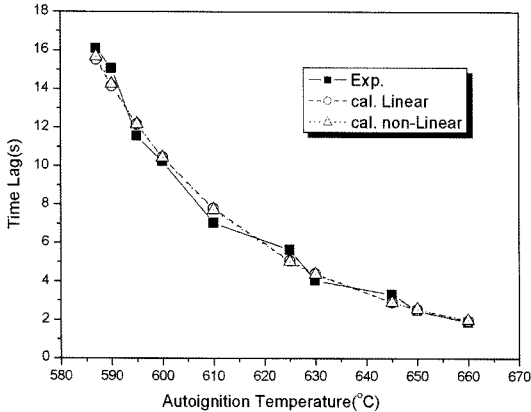


Fig. 1. Comparison of experimental and predicted the AITs for m-xylene system.

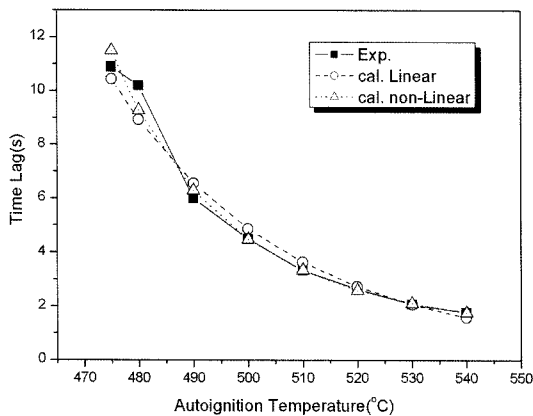


Fig. 2. Comparison of experimental and predicted the AITs for ethylbenzene system.

4개의 물질 가운데 m-xylene과 ethylbenzene에 대해 제시한 모델에 의한 예측값과 실험값을 비교하여 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

m-Xylene, ethylbenzene 그리고 n-butanol 경우는 선형모델보다는 비선형 모델에 일치하는 것으로 나타나고 있으며, n-butyric acid는 선형 모델과 일치하고 있다. 지금까지 일반적으로 발화지연시간과 발화온도의 관계는 선형적으로 표현되어 왔으나, 본 연구 결과로 보아 선형에 국한된 연구 범위를 벗어나서 비선형에 대한 연구도 계속되어야 할 것으로 본다.

4.3. m-Xylene+n-butyric acid 계의 자연발화 온도 고찰

4.3.1. m-Xylene(0.3)+n-butyric acid (0.7)계의 자연발화온도

본 실험에서는 450°C에서 3번의 실험을 했으나

발화가 일어나지 않았다. 455°C와 457°C 까지 상승시켜 측정하였으나 발화되지 않았으며, 460°C에서 최초자연발화온도를 찾을 수 있었다. 그때 발화지연시간은 25.02sec였다. 이를 시작점으로 하여 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도를 측정한 결과, 480°C에서 11.44sec, 500°C에서 5.04sec 그리고 560°C에서 1.94sec에 발화하였다.

4.3.2. m-Xylene(0.5)+n-butyric acid (0.5)계의 자연발화온도

500°C에서 3번의 실험을 했으나 발화가 일어나지 않았으며, 2~3°C씩 상승시킨 결과 510°C에서 최초 발화가 시작되었으며, 그 때 발화지연시간은 16.93sec였다. 이를 기점으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도와 발화지연시간을 측정한 결과 530°C에서는 9.77sec, 550°C에서는 4.86sec, 570°C에서는 3.11sec 그리고 600°C에서 1.95sec였다.

4.3.3. m-Xylene(0.7)+n-butyric acid (0.3)계의 자연발화온도

500°C에서 3번의 실험을 했으나 발화가 일어나지 않았으며, 577°C에서 실험한 결과 5.49sec 후 최초 발화가 발생하였다, 이후 온도를 3°C상승시킨 580°C에서는 4.95sec에서 발화하였으며, 600°C에서는 3.69sec 그리고 630°C에서 1.53sec에 발화하였다. 이 혼합물의 조성에서는 다른 혼합물의 조성보다 짧은 시간에 발화하는 특성을 보이고 있다.

4.3.4. m-Xylene+n-butyric acid계의 최소자연발화온도 거동(MAITB)

m-Xylene+n-butyric acid계의 최소자연발화온도 거동을 고찰하기 위해 각각의 혼합조성에서 얻은 최소자연발화온도를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 m-xylene+n-butyric acid계의 경우 m-xylene의 조성이 0.3에서 두 순수물질의 자연발화온도(n-butyric acid의 AIT는 510°C)보다 낮은 460°C를 나타내고 있다. 이 조성에서 혼합물을 구성하는 두 개의 순수물질의 AIT 보다 낮게 측정된 최소자연발화온도거동(MAITB, Minimum Autoignition Temperature Behavior)을 보이고 있다.

일반적으로 화학공정에서 혼합물을 취급할 때 공정 안전을 목적으로 자료를 활용하는 경우 혼합물 가운데 낮은 순수물질의 연소특성치를 활용하고 있는 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서 제시한 자료는 m-Xylene과 n-butyric acid를 취급하는 공정에서 매우 중요한 자료로서 활용될 수 있다.

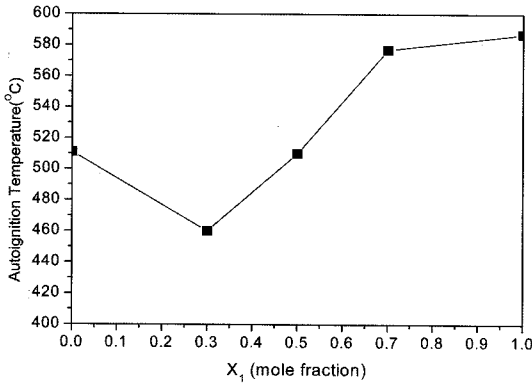


Fig. 3. AIT of m-Xylene(X1)+n-butylric acid(X2) system.

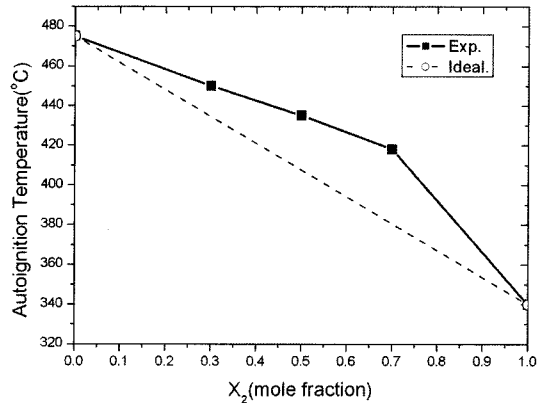


Fig. 4. AIT of ethylbenzene+n-butanol system.

4.4. Ethylbenzene+n-butanol계의 자연발화온도 고찰

4.4.1. Ethylbenzene(0.3)+n-butanol(0.7) 계의 자연발화온도

360°C에서 3번의 실험을 했으나 발화가 발생하지 않았다. 400°C, 410°C 그리고 415°C까지 상승시켜 측정한 결과 발화가 발생하지 않았으며, 다시 3°C 상승시킨 418°C에서 최초자연발화온도를 찾을 수 있었으며, 그때 발화지연시간은 12.85sec였다. 이를 시작점으로 하여 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도와 발화지연시간을 측정한 결과, 430°C에서 8.09 sec, 450°C에서 6.07sec, 470°C에서 3.68°C 그리고 490°C에서 1.81sec에 발화하였다.

4.4.2. Ethylbenzene(0.5)+n-butanol(0.5) 계의 자연발화온도

Ethylbenzene(0.3) + n-Butanol(0.7)의 자료를 근거로 420°C에서 3번의 실험을 했으나 발화가 일어나지 않았다. 그 후 430°C와 432°C까지 상승시켜 측정한 결과 발화가 되지 않았으며, 다시 3°C 상승시킨 435°C에서 최초자연발화온도를 찾을 수 있었다. 발화지연시간은 18.41sec였다. 이 후 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도를 측정한 결과, 450°C에서 9.46sec, 470°C에서 5.31sec, 500°C에서 2.38sec 그리고 510°C에서 1.60sec에 발화하였다.

4.4.3. Ethylbenzene(0.7)+n-butanol(0.3) 계의 자연발화온도

Ethylbenzene(0.5) + n-Butanol(0.5)의 자료를 근거로 400°C에서 3번의 실험을 했으나 발화가 일어나지 않았다. 그 후 420°C에서 447°C까지 상승시켜 측정한 결과 발화가 되지 않았으며, 다시 3°C 상승시킨 450°C에서 최초자연발화온도를 찾을 수 있었으

며, 그때 발화지연시간은 19.97sec였다. 이를 시작점으로 하여 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도와 발화지연시간을 측정한 결과, 460°C에서 9.57sec, 480°C에서 4.73sec, 500°C에서 2.95sec 그리고 520°C에서 1.70sec였다.

4.4.4. Ethylbenzene+n-butanol계의 자연발화온도

Ethylbenzene+n-Butanol계에서 각각의 혼합조성에서 얻은 최소자연발화온도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 ethylbenzene+n-butanol계는 최소자연발화온도거동(MAITB)을 보이지 않는다. 따라서 두 혼합물 가운데 낮은 AIT를 갖는 순수물질의 AIT를 안전 자료로 사용하여도 될 것으로 본다.

5. 결론

본 연구에서는 ASTM E659-78 장치를 이용하여 가연성 혼합물인 m-xylene+n-butylric acid 계와 ethylbenzene+n-butanol 계에 대해 AIT를 측정하였다. 우선 이성분계를 구성하는 순수물질인 m-xylene, n-butylric acid, ethylbenzene, 그리고 n-butanol의 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하였으며, 또한 두개의 혼합물에 대해 자연발화온도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) m-Xylene, n-butylric acid, ethylbenzene, 그리고 n-butanol의 최소자연발화온도는 각각 587°C과 510°C, 475°C, 340°C로 측정되었다.

2) n-Butanol은 기존의 문헌값보다 약 3°C 정도 낮게 측정되었으며, 공단의 MSDS의 자료에서는 자연발화온도가 제시되어 있지 않으므로 본 연구에

서 제시한 자료값은 공정안전에 중요한 자료로 이용될 수 있다.

3) m-Xylene+n-butyric acid계의 다음 혼합 조성에서 자연발화온도는, m-xylene(0.3)+n-butyric acid(0.7)에서는 460℃, m-xylene(0.5)+n-butyric acid(0.5)에서는 510℃, m-xylene(0.7)+n-butyric acid(0.3)에서는 577℃로 측정되었으며, m-xylene의 조성이 0.3에서 두 개의 순수물질 가운데 낮은 최소자연발화온도인 m-xylene의 AIT 보다 50℃ 낮은 460℃로 측정된 최소자연발화온도거동(MAITB, Minimum Autoignition Temperature Behavior)을 보이고 있다.

4) Ethylbenzene+n-butanol계 다음 혼합 조성에서 자연발화온도는, ethylbenzene(0.3)+n-butanol(0.7)에서는 418℃, ethylbenzene(0.5)+n-butanol(0.5)에서는 435℃, ethylbenzene(0.7)+n-butanol(0.3)에서는 450℃로 측정되었다.

참고문헌

- 1) V. Babrauskas, "Ignition : A Century of Research and an Assessment of Our Current Status", J. of Fire Protection Engineering, Vol. 17, August, pp. 165 ~ 183, 2007.
- 2) M.G. Zabetakis, A.L. Furno and G.W. Jones, "Minimum Spontaneous Ignition Temperature of Combustibles in Air", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 46, No. 10, pp.2173 ~ 2178, 1954.
- 3) C.F. Cullis and C.D. Foster, "Studies of the Spontaneous Ignition in the Air of Binary Hydrocarbon Mixtures", Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 347 ~ 356, 1974.
- 4) D.M. Ha and S.J. Lee, "Measurement of Autoignition Temperature of o-Xylene+n-pentanol System", J. of the Korean Society of Safety, Vol. 21, No. 4, pp. 66 ~ 72, 2006.
- 5) D.M. Ha and S.J. Lee, "Measurement of Autoignition Temperature of Ethylbenzene+n-hexanol and Ethylbenzene+n-propionic acid Systems", T. of the Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 21, No. 3, pp. 33 ~ 40, 2007.
- 6) D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", 2nd ed., Jone Wiley & Sons, 1998.
- 7) ASTM, "Test Method E659-78(2000) Standard Test Method for Autoignition Temperature of Liquid Chemicals", American Society for Testing Materials, Philadelphia, PA(1994).
- 8) F-Y. Hshieh, D.B. Hirsh and J.H. Willams, "Autoignition Temperature of Trichlorosilanes", Fire and Materials, Vol. 26, pp.289 ~ 290, 2002.
- 9) D.M. Ha, "Measurement and Prediction of Autoignition Temperature(AIT) of Flammable Substances - Methanol and Ethanol -", J. of the Korean Society of Safety, Vol. 19, No. 2, pp.54 ~ 60, 2004.
- 10) NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile solids", NFPA 325M, NFPA, 1991.
- 11) R.E. Lenga and K.L. Votoupal, "The Sigma Aldrich Library of Regulatory and Safety Data, Volume I ~ III", Sigma Chemical Company and Aldrich Chemical Company Inc., 1993.
- 12) C.J. Hilado and S.W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", Chemical Engineering, Vol. 4, pp. 75 ~ 80, 1972.
- 13) J.L. Jackson, "Spontaneous Ignition Temperature", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 43, No. 12, pp. 2869 ~ 2870, 1951.
- 14) A.M. Kanury, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering ; Ignition of Liquid Fuels", 2nd ed., SFPE, 1995.
- 15) G.S. Scott, G.W. Jones and F.E. Scott, "Determination of Ignition Temperature of Combustible Liquids and Gases", Analytical Chemistry, Vol. 20, No. 3, pp. 238 ~ 241, 1948.
- 16) KOSHA, <http://www.kosha.net/members/login.jsp>