

노말프로판올과 아세트에씨드 계의 최소자연발화온도(AIT) 측정 및 예측

하동명*

세명대학교 보건안전공학과
(2017. 1. 17. 접수 / 2017. 3. 20. 수정 / 2017. 4. 12. 채택)

Measurement and Prediction of Autoignition Temperature(AIT) of n-Propanol and Acetic acid System

Dong-Myeong Ha*

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University
(Received January 17, 2017 / Revised March 20, 2017 / Accepted April 12, 2017)

Abstract : The autoignition temperature (AIT) is crucial combustible characteristics which need attention in chemical process that handle hazardous materials. The AIT, also to as minimum spontaneous ignition temperature(MSIT), is the lowest temperature of a hot surface at which the substance will spontaneously ignite without any obvious sources of ignition such as a spark or flame. The AIT may be used as combustion property to specify operating, storage, and materials handling procedures for process safety. This study measured the AITs of n-propanol+acetic acid system from ignition delay time(time lag) by using ASTM E659 apparatus. The AITs of n-propanol and acetic acid which constituted binary system were 435 °C and 212 °C, respectively. The experimental AITs of n-propanol+acetic acid system were a good agreement with the calculated AITs by the proposed equations with a few A.A.D.(average absolute deviation). In the case of n-propanol and acetic acid system, the minimum autoignition temperature behavior (MAITB), which is lower than the lower AIT, is shown among the two pure substances constituting the mixture.

Key Words : AIT(Autoignition temperature), chemical process, ignition delay time(time lag), ASTM E659, n-propanol and acetic acid system, minimum autoignition temperature behavior (MAITB)

1. 서론

현재 우리는 사업장이나 대학 및 연구소의 실험실 그리고 일상 등에서 사용하고 있는 물질은 약 5만 여종이 되며 그 가운데 약 6천 여종에 대한 위험특성평가가 이루어 졌을 뿐 나머지 물질에 대해서는 유해·위험성에 대한 연구가 진행되지 않고 있다. 특히 현장에서는 가연성혼합물의 사용이 대부분인데도 불구하고 이들에 대한 연소특성의 평가는 거의 진행되지 않고 있다. 따라서 최근에 도입된 GHS(Global Harmonized System of classification and labelling of chemicals)의 적용을 위한 혼합물의 MSDS(Material Safety Data Sheet)의 연소 특성 연구는 반드시 필요하다^{1,2)}.

사업장이나 실험실 등에서 생산이나 연구 목적으로 취급하는 물질 또는 사용 후 폐기물로 처리하고 있는

물질에 대해 부주의로 인해 사고가 발생하는 경우가 많은데, 이는 해당 물질의 정확한 연소특성치를 사용하지 않기 때문이다. 따라서 화학 공정의 안전한 운영을 위해서는 운전 중 발생하는 원료, 중간제품 및 완제품에 대한 정확한 MSDS의 연소특성치를 확보해야 한다. MSDS의 대표적인 화재 및 폭발 특성치로는 최소자연발화온도(AIT, autoignition temperature)를 들 수 있다^{3,4)}.

자연발화는 가연성액체가 높은 온도에서 증기로 발생되어 주위 공기와 혼합되어 있을 때 주위에 발화원 등의 형태로 열에너지가 주어진 때 스스로 타는 산화현상이다. 그리고 AIT는 자연발화 가운데 스스로 점화할 수 있는 최저온도로서, 여러 실험 인자에 의해서 측정값이 달라지므로 논문들에 따라 각기 다른 값들이 제시되는 경우가 많다⁵⁾.

* Corresponding Author : Dong-Myeong Ha , Tel : +82-43-649-1321, E-mail : hadm@semyung.ac.kr
Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, 65, Semyung-ro, Jecheon city, Chungbuk 27136, Korea

최근 가연성 혼합물의 AIT의 온도 측정과 예측 연구가 진행되고 있으며, 그 가운데, 노말프로판올과 노말데칸 혼합물 AIT의 실험적 연구를 연구하였으며⁶⁾, 또한 노말데칸과 아세틱에씨드 계의 AIT 연구에서 순수 성분인 데칸의 AIT 212°C보다 낮은 AIT의 거동을 연구를 하였다⁷⁾. 가연성 혼합물의 AIT연구를 위해서는 혼합물을 구성하는 각각의 순수물질의 AIT를 정확히 알고 있어야하므로 순수물질의 AIT 실험이 반드시 선행되어야 한다.

본 연구에서는 현장에서 널리 사용되고 있는 노말프로판올과 아세틱에씨드 계를 선정하였다. 2성분계 가운데 노말프로판올은 재료의 코팅, 페인트, 세척제, 광택제 및 금속탈유액 등에 첨가하며 산업용 접착제 재료에 사용하고 있다⁸⁾. 아세틱에씨드는 동의어로 식초산, 에탄산 그리고 초산이라고도 하며, 아세트산 섬유소, 아세트산비닐, 아세트산 무수물, 아세톤, 모노클로로아세트산 및 의약품 등의 제조 원료로 사용되고 있으며, 특히 섬유 가공 그리고 식품 조미료 등에 사용된다. 본 연구에서는 ASTM E659(Koehler사) 장치^{6,7)}를 이용하여 노말프로판올과 아세틱에씨드 혼합물의 5개 혼합조성에서 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하였으며, 또한 AIT를 측정하였다. 그리고 노말프로판올과 아세틱에씨드 계에서 5개의 혼합 조성외의 조성에서도 혼합물의 AIT를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 제시된 실험 자료 및 예측 방법론은 이들 물질을 취급, 처리, 수송하는 공정에서 안전을 확보하는 자료로 제시하고, 향후 MSDS의 가연성혼합물 자연발화 연구에 도움을 주고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 열발화 이론

발화는 연소가 시작하는 현상이며, 연소현상 가운데 주요한 한가지이다. 가연물질의 화학반응에서 발열에 따른 열 발생 속도와 외부로의 열 방출 속도를 비교함으로써 계(System)의 열적인 안전성을 고찰하여 발화를 설명하는 것이 열발화이론(Theory of Thermal Explosion)이다. 하나는 발열과 방열의 관계를 정상상태라고 가정 한 Semenov이론이며, 다른 하나는 Semenov이론을 보강한 Frank-Kamenetskii 이론이 있다⁶⁻⁸⁾.

계에서 가연성물질의 발화지연은 열 생성과 손실 사이에서 생기는 현상으로써 발화지연 시간과 온도의 관계를 유도할 수 있다. 일반적으로 실험에서 측정된 값들은 발화지연시간 $\ln t$ 와 초기온도의 관계를 선형적으로 표현할 수 있다. 즉, 온도가 높을수록 발화지연시간

이 짧아진다는 것이다⁹⁾.

$$\ln t \approx a \left(\frac{1}{T_0} \right) + b \quad (1)$$

따라서 식 (1)을 이용하여 실험에서 얻은 발화지연시간과 발화온도의 관계를 선형최소자승법(Least Square Method)을 사용하여 매개변수 a 와 b 를 결정할 수 있다. 특히 발화지연시간의 경우 1~5 sec는 공정안전에 연구되는 자료이며, 10 sec 이상은 화재 예방을 위해 사용되는 자료이다.

2.2 자연발화온도와 발화지연시간의 관계 및 활성화에너지

대부분의 가연성 물질에 대해 자연발화온도와 발화지연시간 사이에서의 관계는 식 (1)을 사용하여 고찰할 수 있다. 본 연구에서는 실험에서 얻은 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 식 (4)를 사용하여 실험에서 얻어진 발화온도에 대응하는 발화지연을 예측하여 실험의 발화지연시간과 비교하였다¹⁰⁾.

$$\ln \tau = A + \left(\frac{E}{RT} \right) \left(= A + B \left(\frac{1}{T} \right) \right) \quad (2)$$

여기서 τ 는 발화지연시간, T 는 발화온도[K], R 은 기체상수, E 는 활성화에너지 그리고 A 와 B 는 상수이다.

식 (2)를 이용하면 활성화에너지(E)의 계산이 가능하다. 활성화에너지(E)를 계산하기 위해서는 화재 및 폭발 연구 분야에서 널리 사용되고 있는 Semenov식으로 계산하였다¹¹⁾.

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + B \quad (3)$$

2.3 혼합물의 최소자연발화온도 예측 모델

본 연구에서는 순수물질인 경우는 발화온도에 따른 발화지연시간의 관계를 분석하고, 혼합물에서는 조성 변화에 의한 AIT의 관계를 분석하기 위해서 다중회귀 분석에 의한 최소자승법을 사용하였다. 다중회귀분석은 변수와 응답의 관계를 보다 정량적으로 나타내기 위한 방법으로 종속변수와 독립변수의 관계식을 구하는 방법이다^{7,12)}.

본 연구에서 얻은 측정값을 분석한 결과, 조성 변화에 따른 최소자연발화온도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 조성에 의한 최소자연발화온도 예측 모델을 제시할 수 있다고 판단되어 다음과 같은 모델을 제시하여 최적화 된 예측 모델을 찾고자 한다¹³⁾.

$$T_{AIT, MX} = a + bX_1 + cX_1^2$$

(or $T_{AIT, MX} = aX_1 + bX_2 + cX_1X_2$) (4)

$$T_{AIT, MX} = a + bX_1 + cX_1^2 + dX_1^3$$
 (5)

$$T_{AIT, MX} = a + bX_1 + cX_1^2 + dX_1^3 + eX_1^4$$
 (6)

2.4 실험값과 예측값의 비교 방법

측정값과 예측값의 차이의 정도를 분석하기 위해서 절대평균오차(A.A.D., Average Absolute Deviation)와 결정계수(r^2)를 사용하였다¹³⁾.

$$A.A.D. = \sum \frac{|AIT_{est.} - AIT_{exp.}|}{N}$$
 (7)

$$r^2 = \left(\frac{SSR}{SST} \right)$$
 (8)

여기서 $AIT_{est.}$ 는 예측된 자연발화온도, $AIT_{exp.}$ 는 실험에서 얻은 자연발화온도이며, N 은 자료수, r^2 은 결정계수, SSR 은 회귀에 의한 제곱합(Sum of Squares due to Regression), SST 는 SSR 과 잔차에 의한 제곱합(Sum of Squares due to Residual Error)의 합이다¹³⁾.

3. 최소자연발화온도 실험 재료 및 방법

3.1 재료

본 실험에 사용된 시약 가운데 노말프로판올은 Carl Erba(Italy)제조사로 순도 99.5%, 아세틱에씨드는 Kanto (Japan)의 순도는 99.7%의 시약을 이용하였으며, 5개의 혼합 조성의 AIT를 실험하기 위해 순수물질을 각 각 다른 몰비(Mole Fraction)로 혼합하여 실험하였다.

3.2 장치 및 측정 방법

본 실험에서는 가연성액체 혼합물의 AIT뿐만 아니라 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하기 위해서 ASTM E659(Koehler 사)를 사용하였고, 장치는 온도조절기, 열전대, 플라스크, 거울 등으로 구성되어 있다. 혼합물의 경우 실험방법은 혼합물을 구성하는 물질들 가운데 가장 낮은 물질의 AIT를 근거로 실험온도를 설정하고, 실험 장치를 가열한다. 그리고 설정 온도에 도달하면 플라스크 내부에 주사기로 시료를 0.1 ml를 넣는다. 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 다시 온도를 설정한 시료를 넣은 후 10분 내에 발화가 일어나면, 측정된 발화온도 보다 30℃ 낮게 설정하고, 1~

2℃씩 증가시키면서 AIT를 찾은 후 이를 근거로 5~10℃씩 증가시켜 발화온도와 시간을 기록한다^{6,7)}.

4. 결과 및 고찰

4.1 순수물질의 최소자연발화온도 고찰

4.1.1 노말프로판올의 최소자연발화온도

본 실험에서는 기존 자료^{14,15)}의 AIT 440℃를 근거로 하여 초기온도를 450℃로 실험한 결과 10.41 sec에서 발화가 일어나서, 초기온도 보다 30℃ 낮게 420℃에서 다시 실험한 결과 비발화되어, 1~2℃ 씩 상승 시켜 실험한 결과 435℃, 18.33 sec에서 AIT를 찾았다⁶⁾.

활성화에너지(E)를 계산하기 위해서 $\log\tau$ 와 $(1/T)$ 의 관계로 나타내면 다음과 같다.

$$\log\tau = -10.5286 + 8335 \left(\frac{1}{T} \right)$$
 (9)

그러나 Hilado는 다음과 같은 식을 제시하였다¹⁶⁾.

$$\log\tau = -8.615 + 6940 \left(\frac{1}{T} \right)$$
 (10)

식 (9)를 식(3)에 대입하면 활성화에너지는 159 kJ/mole로 계산되었으며, Hialdo가 제시한 식 (10)에 의한 활성화에너지는 132.06 kJ/mol로 계산되었다.

4.1.2 아세틱에씨드의 최소자연발화온도

본 실험에서는 아세틱에씨드의 기존 문헌^{17,18)}에 제시된 AIT 463℃를 근거로 초기설정온도를 450℃, 480℃ 그리고 510℃에서 3번의 실험결과 비발화되어, 500℃에서 1~2℃씩 상승시킨 결과 512℃, 80.57 sec에서 AIT를 찾았다⁵⁾.

$$\log\tau = -8.04 + 6949.27 \left(\frac{1}{T} \right)$$
 (11)

식 (11)을 식(3)에 적용한 결과 활성화에너지는 159 kJ/mole로 계산되었다.

4.2 노말프로판올과 아세틱에씨드 혼합물의 자연발화온도 고찰

4.2.1 노말프로판올(0.9)+아세틱에씨드(0.1) 계의 자연발화온도 측정

실험에서는 얻은 노말프로판올의 최소자연발화온도(AIT) 435℃를 근거로 400℃에서 실험한 결과 비발화

가 되어, 30°C 상승시킨 430°C에서 11.09 sec에 발화되었다. 다시 20°C 낮춘 410°C에서 실험한 결과 30.71 sec에서 발화되어 1~2°C씩 내리면서 실험한 결과 404°C, 35.56 sec에서 AIT를 찾을 수 있었다. AIT 404°C를 기준으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도를 측정할 결과, 405°C에서는 31.0 sec, 450°C에서는 7.44 sec, 470°C에서는 4.62 sec, 480°C에서는 3.44 sec, 490°C에서는 2.56 sec 그리고 500°C에서는 1.86 sec에 발화하였다.

4.2.2 노말프로판올(0.7)+아세틱에씨드(0.3) 계의 자연발화온도 측정

노말프로판올(0.9)+아세틱에씨드(0.1) 계의 AIT 404°C를 근거로, 400°C에서 실험한 결과 발화가 되지 않아, 30°C 상승시켜 430°C에서 실험한 결과 21.67 sec에서 발화가 일어났다. 다시 20°C 낮춘 410°C에서 실험한 결과 비발화되어, 1~2°C씩 상승시켜 실험한 결과 416°C, 26.84 sec에서 AIT를 찾을 수 있었다. AIT 416°C를 기준으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도를 측정할 결과, 420°C에서는 26.67 sec, 450°C에서는 7.87 sec, 470°C에서는 5.03 sec, 490°C에서는 2.69 sec, 510°C에서는 2.56 sec 그리고 520°C에서는 1.48 sec에 발화하였다.

4.2.3 노말프로판올(0.5)+아세틱에씨드(0.5) 계의 자연발화온도 측정

노말프로판올(0.7)+아세틱에씨드(0.3) 계의 416°C를 근거로 실험을 하였다. 아세틱에씨드의 조성이 증가함으로써 AIT가 증가하는 현상을 보이고 있다. 따라서 416°C보다 높은 420°C에서 실험한 결과 발화가 되지 않아, 20°C 상승시켜 440°C에서 실험한 결과 9.50 sec에서 발화되어 다시 10°C 낮춘 430°C에서 실험한 결과 10.53 sec에서 발화되어 1~2°C씩 내려 실험한 결과 428°C, 20.06 sec에서 AIT를 찾을 수 있었다. AIT 428°C를 기준으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도를 측정할 결과, 450°C에서는 5.47 sec, 460°C에서는 4.35 sec, 470°C에서는 4.12 sec, 480°C에서는 2.81 sec 그리고 490°C에서는 1.96 sec에 발화하였다.

4.2.4 노말프로판올(0.3)+아세틱에씨드(0.7) 계의 자연발화온도 측정

노말프로판올(0.5)+아세틱에씨드(0.5) 계의 AIT 428°C를 근거로, 430°C에서 실험한 결과 발화가 되지 않아, 30°C 상승시켜 460°C에서 실험한 결과 7.75 sec에서 발화가 일어났다. 다시 10°C 낮춘 450°C에서 실험한 결과 9.36 sec에서 발화되었다. 다시 1~2°C씩 낮추어 실험한 결과 440°C, 11.53 sec에서 AIT를 찾을 수 있었다. AIT 440°C를 기준으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화

온도를 측정할 결과, 455°C에서는 8.44 sec, 470°C에서는 7.18 sec, 490°C에서는 4.53 sec, 510°C에서는 2.69 sec 그리고 520°C에서는 1.38 sec에 발화하였다.

4.2.5 노말프로판올(0.1)+아세틱에씨드(0.9) 계의 자연발화온도 측정

노말프로판올(0.3)+아세틱에씨드(0.7) 계의 AIT 440°C를 근거로, 20°C 상승시킨 460°C에서는 비발화되어 다시 20°C 상승시킨 480°C에서 실험한 결과 9.03 sec에서 발화가 일어났다. 다시 10°C 낮춘 470°C에서 실험한 결과 비발화되었다. 다시 1~2°C씩 상승시켜 실험한 결과 477°C, 12.38 sec에서 AIT를 찾을 수 있었다. 478°C에서는 9.49 sec에 발화되었다. AIT 477°C를 기준으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도를 측정할 결과, 490°C에서는 7.93 sec, 500°C에서는 5.28 sec, 510°C에서는 4.91 sec, 520°C에서는 3.47 sec, 530°C에서는 2.97 sec 그리고 540°C에서는 1.76 sec에 발화하였다.

4.2.6 노말프로판올과 아세틱에씨드 계의 최소자연발화온도 예측 및 최소자연발화온도 거동(MAITB) 분석

본 실험에서 얻어진 측정값을 분석한 결과, 아세틱에씨드의 AIT 512°C이므로 노말프로판올의 조성이 작고 아세틱에씨드의 조성이 증가할수록 혼합물의 AIT는 당연히 증가할 것으로 판단되었다. 그러나 프로판올의 조성 0.9에서는 순수한 프로판올의 AIT 435°C보다 훨씬 낮은 404°C에서 측정되었다. 이후 아세틱에씨드의 조성이 증가함으로써 AIT는 증가하고 있으나, 프로판올의 조성이 0.7 근처에서 순수한 프로판올 AIT 435°C와 비슷한 측정값을 보이고 있다.

노말프로판올과 아세틱에씨드 계의 경우 계를 구성하는 두 개의 순수물질 가운데 낮은 AIT 보다 낮게 측정된 최소자연발화온도거동(MAITB, Minimum Autoignition Temperature Behavior)⁶⁾을 보이고 있다.

혼합 조성 변화에 의한 AIT 예측 모델을 제시할 수 있다고 판단되어, 식 (4)에서 식 (6)을 최소자승법에 의해 회귀분석한 결과 다음과 같은 최적화된 식을 얻었다.

$$T_{AIT, MX} = 507.42 - 266.40X_1 + 185.85X_1^2 \quad (12)$$

$$T_{AIT, MX} = 507.66 - 271.756X_1 + 200.44X_1^2 - 9.75X_1^3 \quad (13)$$

$$T_{AIT, MX} = 513.78 - 545X_1 + 1606.75X_1^2 - 2276X_1^3 + 1133.5X_1^4 \quad (14)$$

노말프로판올과 아세틱에씨드 계의 혼합조성에서 얻

Table 1. Experimental and predicted AITs of n-propanol and acetic acid mixture

Mole fractions		AITs(°C)			
X ₁	X ₂	Exp.	Eqn.(12)	Eqn.(13)	Eqn.(14)
1	0	435	427	427	433
0.9	0.1	404	418	418	409
0.7	0.3	416	412	413	411
0.5	0.5	428	421	421	429
0.3	0.7	440	444	444	443
0.1	0.9	477	483	483	473
0	1	512	507	508	514
A.A.D.		-	6.87	6.79	3.09

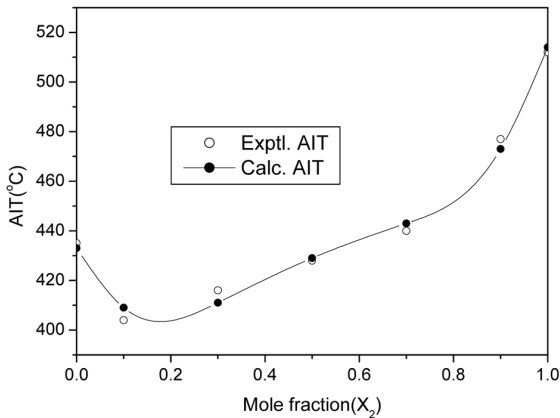


Fig. 1. Comparison of AIT prediction curves with experimental data for n-propanol and acetic acid mixture.

은 AIT의 실험값과 예측식을 비교하여 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서 제시한 식 (14)에 의한 예측값은 실험값의 결정계수(r^2)가 0.99로서 모사성이 크게 나타나고 있다. 따라서 식 (14)를 이용하여 혼합물의 전반적인 조성에서의 AIT의 예측이 가능해졌다.

일반적으로 화학공정에서 가연성 혼합물을 취급하는 경우 혼합물을 구성하는 순수물질 가운데 낮은 연소특성치를 활용하고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 자료는 노말프로판올과 아세트에씨드 계를 취급하는 공정에서 매우 중요한 자료로서 활용될 수 있다.

5. 결론

본 연구는 자연발화온도 측정 장치(ASTM E659)를 사용하여 노말프로판올과 아세트에씨드 계의 자연발화온도와 발화지연시간 그리고 최소자연발화온도(AIT)를 측정하였다. 노말프로판올과 아세트에씨드 계를 구성하는 순수물질의 AIT는 기존 측정값을 활용하였고^{6,7)}, 노말프로판올과 아세트에씨드 계의 5개의 혼합조성

에서 AIT를 측정하였다. 측정된 혼합물의 AIT를 이용하여 다른 조성에서도 AIT를 예측할 수 있는 모델을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이성분계를 구성하는 순수물질인 노말프로판올과 아세트에씨드의 최소자연발화온도는 각각 435°C와 512°C로 측정되었다.

2) 노말프로판올과 아세트에씨드 계에서 조성 변화에 의한 AIT를 측정한 결과, 노말프로판올(0.9)+아세트에씨드(0.1) 계에서는 404°C, 노말프로판올(0.7)+아세트에씨드(0.3) 계에서는 416°C, 노말프로판올(0.5)+아세트에씨드(0.5) 계에서는 428°C, 노말프로판올(0.3)+아세트에씨드(0.7) 계에서는 440°C, 노말프로판올(0.1)+아세트에씨드(0.9) 계에서는 477°C로 측정되었다.

3) 프로판올의 조성 0.9에서는 순수한 프로판올의 AIT 435°C보다 훨씬 낮은 404°C에서 측정되었다. 이후 아세트에씨드의 조성이 증가함으로 AIT는 증가하고 있으나, 프로판올의 조성이 0.7 근처에서 순수한 프로판올의 AIT 435°C와 비슷한 측정값을 보였다.

4) 노말프로판올과 아세트에씨드 혼합물의 경우 계를 구성하는 순수물질 가운데 낮은 AIT 보다 낮게 측정된 최소자연발화온도거동(MAITB, Minimum Autoignition Temperature Behavior)을 나타내었다.

5) 노말프로판올+아세트에씨드 계에서 조성 변화에 의한 최소자연발화온도를 예측식은 다음과 같다.

$$T_{AIT,MIX} = 513.78 - 545.X_1 + 1606.75.X_1^2 - 2276.X_1^3 + 1133.5.X_1^4$$

여기서 X_1 은 아세트에씨드의 조성이다.

감사의 글: 이 논문은 2016년 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

References

- 1) F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries Vol. 1", 2nd ed., Oxford Butterworth-Heinemann, 1996.
- 2) S. Peper, R. Dom and K. Konejung, "Methods for the Prediction of Thermodynamics Properties of Polyurethane Raw materials Mixture", Fluid Phase Equilibria, Vol. 424, pp. 137-151, 2016.
- 3) D. M. Ha, "The Measurement and Prediction of Combustible of Dimethylacetamide(DMAc)", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 53, No. 5, pp. 553-556, 2014.
- 4) T. N. G. Borhani, A. Afzali and M. Bagheri, "QSPR Estimation of the Auto-ignition Temperature for Pure Hydrocarbons",

- Process Safety and Environment Protection, Vol/ 103, pp. 115-125, 2016.
- 5) V. Babrauskas, "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, SFPE, 2003.
 - 6) D. M. Ha, "Measurement and Prediction of Autoignition Temperature of n-Propanol+n-Decane Mixture", J. of Korean Society of Safety, Vol. 29, No. 3, pp. 55-61, 2014.
 - 7) D. M. Ha, "Minimum Autoignition Temperature Behavior (MAITB) of n-Decane and Acetic acid Mixture", J. of Korean Society of Safety, Vol. 28, No. 2, pp. 49-54, 2013.
 - 8) F. A. Williams, "Combustion Theory", Addison-Wesley Publishing Company, 1985.
 - 9) I. Goldfrab and A. Zinoviev, "A Study of Delay Spontaneous Insulation Fires", Physics Letter, A 311, pp. 491-500, 2003.
 - 10) C.J. Hilado and S.W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", Chemical Engineering, Vol. 4, pp.75-80, 1972.
 - 11) N.N. Semenov, "Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2", Princeton University Press, Princeton, N.J., 1959.
 - 12) G.E.P. Box. and N.R. Draper, "Empirical Model-Building and Response Surface", John Wiley and Sons, Inc., 1987.
 - 13) D.M. Ha, "Measurement of Prediction Autoignition Temperature of Propionic Acid 3-Hexanone", Fire Sci. Eng., Vol. 28, No. 4, pp. 44-49, 2014.
 - 14) A.M. Kanury, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering : Ignition of Liquid Fuels", 2nd ed., SFPE, 1995.
 - 15) R.J. Lewis, "SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials", 11th ed., John Wiley & Son, Inc., N.J., 2004.
 - 16) C.J. Hilado and S.W. Clark, "Discrepancies and Correlation of Reported Autoignition Temperatures", Fire Technology, Vol. 8, pp. 218-227, 1972.
 - 17) NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, NFPA, 1991.
 - 18) J. A. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry", 14th ed. McGraw-Hill, 1992.