



n-Propanol과 n-Octane 혼합물의 최소자연발화온도의 예측

†하동명

세명대학교 보건안전공학과
(2013년 3월 8일 접수, 2013년 4월 1일 수정, 2013년 4월 1일 채택)

Prediction of Autoignition Temperature of n-Propanol and n-Octane Mixture

†Dong-Myeong Ha

Dept. of Occupational Health and Safety Engineering., Semyung University, Jecheon
390-711, Korea

(Received March 8, 2012; Revised April 1, 2013; Accepted April 1, 2013)

요약

화재 및 폭발 방호를 위해서 문헌에서의 최소자연발화온도 값을 사용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서, n-Propanol+n-Octane 계의 최소자연발화온도는 ASTM E659 장치를 이용하여 발화지연시간으로부터 측정하였다. 2성분계를 구성하는 n-Propanol과 n-Octane의 측정된 최소자연발화온도는 각각 435°C 와 218°C 였다. 그리고 두 개의 2성분계에서 측정된 발화지연시간은 제시된 식에 의한 예측된 발화지연시간과 적은 평균절대오차에서 일치하였다.

Abstract - The lowest values of the AITs(Autoignition temperatures) in the literature were normally used fire and explosion protection. In this study, the AITs of n-Propanol+n-Octane system were measured from ignition delay time(time lag) by using ASTM E659 apparatus. The AITs of n-Propanol and n-Octane which constituted binary systems were 435°C and 218°C, respectively. The experimental ignition delay time of n-Propanol+n-Octane system were a good agreement with the calculated ignition delay time by the proposed equations with a few A.A.D.(average absolute deviation).

Key words : AITs(Autoignition temperatures), ignition delay time(time lag), ASTM E659, n-Propanol+n-Octane system

1. 서론

자연발화는 가연성혼합기체에 열 등의 형태로 에너지가 주어졌을 때 스스로 타기 시작하는 산화 현상으로, 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화할 수 있는 최저온도를 최소자연발화온도(자연발화온도, Autoignition Temperature(AIT))라고 한다. AIT는 실험 개시온도, 증기 농도, 용기 크기, 산소농도, 계의 압력, 촉매, 발화지연시간 등 다양한 실험 조건에 영향을 받는다. 따라서 유사한 조건에

서 측정하는 것이 바람직하다. 또한 AIT측정에 있어 기체와 액체 및 고체의 측정법이 다른 경우도 있으며, 온도를 미리 일정하게 정하여 실험하는 정온법과 온도를 올리면서 발화온도를 측정하는 승온법 등이 있다. 이와 같이 다양한 조건 및 장치에 의해서 실험하기 때문에 문헌들에서 다른 값들이 제시되고 있다[1].

자연발화온도 연구는 대부분 순수물질에 국한되어 연구되고 있으나, 화학산업에서는 순수물질 보다 혼합물을 취급하는 경우가 많다. 그럼에도 불구하고 혼합물의 자연발화온도 연구는 거의 없는 편이다. Cullis 등[3]은 n-Decane과 2,2,5-Trimethylhexane 계의 자연발화온도를 연구하였다. 최근 Ha 등[3,4]은

†Corresponding author:hadm@semyung.ac.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

o-Xylene과 n-Pentanol 계와 p-Xylene과 n-Butanol 계의 자연발화온도에 대해 실험적 연구를 하였다.

산업현장에서의 화재 방호(fire protection) 목적을 위해서는 작은 자연발화온도를 사용하는 것이 바람직하나, 문헌에 제시된 자료들은 대부분 과거 표준 장치 및 자체 제작된 장치 등을 사용해서 얻은 결과이므로 안전을 위해서 최근에 널리 사용되고 있는 표준 장치에 의한 결과를 얻을 필요가 있다.

본 연구에서는 ASTM E659(Standard Test Method for Autoignition Temperature of Liquid Chemicals)장치[3,4]를 사용하여 n-Propanol과 n-Octane의 혼합물에 대한 자연발화온도를 측정하였다. 2성분계를 측정하기 앞서 2성분계를 구성하는 n-Propanol과 n-Octane의 발화온도와 발화지연시간 관계를 측정하였으며, 측정된 최소발화온도를 문헌들에 제시된 값들과 비교 고찰하였다. 또한 n-Propanol과 n-Octane 계에 대해 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하여 발화온도에 의한 발화지연시간을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 제시된 실험자료 및 혼합물의 예측 모델은 이들 물질을 취급하는 공정에서 화재 및 폭발의 방호 자료로 제공하고자 한다.

II. 열발화 이론에 의한 자연발화온도와 발화지연시간

열발화 이론은 여러 문헌[3,4,5]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 가정한 Semenov이론이며, 다른 하나는 Semenov이론을 보강한 것으로 실제 착화는 계의 한 장소에서 온도 상승이 계속되면 이곳에 착화가 일어난다. 이러한 경우를 고려하여 비교적 간단한 모델을 이용하여 착화를 설명한 Frank-Kamenetskii 이론이다.

본 연구에서는 Frank-Kamenetskii 이론을 도입하여 발화온도와 발화지연시간의 관계를 나타내고자한다. 계의 크기 변화와 발화임계 주위 온도 관계로 Frank-Kamenetskii 매개변수는 다음과 같이 사용한다.

$$\delta = \frac{x_0^2 \rho A \exp(-\frac{E}{RT_a})}{k \frac{RT_a^2}{E}} \quad (1)$$

여기서 x_0 는 반응계수, T_a 는 주위온도이다. 활성화에너지(E)는 식(1)으로부터 얻는 대수온도

곡선 대 $1/T_a$ 의 관계를 이용하여 결정할 수 있다.

발화지연은 열 생성(발열화학반응)과 열 손실(액체연료의 증발)사이의 경쟁 때문에 절연물질 안에 가연성의 증발유체에 대한 특성을 갖는다. 따라서 Frank-Kamenetskii 방법과 비슷하게 발화지연시간과 초기온도 역수의 배치(Plot)를 이용한다.

이를 간략히 설명하면 다음과 같다. 일반적으로 실험에서 측정된 값들을 발화지연시간 $\ln t$ 와 초기온도의 관계로 표현할 수 있다.

$$\ln t \approx a \left(\frac{1000}{T G_0} \right) + b \quad (2)$$

따라서 식 (2)에서 발화지연시간과 초기발화온도의 관계에서 선형최소자승법 사용하여 매개변수인 a 와 b 를 결정할 수 있다.

III. 자연발화온도 실험

3.1. 실험장치 및 방법(ASTM E659)

본 실험에서는 액체 화학물질의 자연발화점 측정 장치로서 ASTM E659 장치를 사용하여 자연발화온도를 측정하였으며, 장치는 크게 Furnance, Temperature Controller, Thermocouple, Test Flask, Hypodermic Syringe, Mirror, Air Gun으로 구성되어 있다[3,4].

실험 방법은 기준 온도를 설정하고, 실험 장치를 가열하고, 설정온도에 도달하면 플라스크 내부에 주사기로 시료를 0.1 ml를 넣는다. 그리고 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 다시 온도를 설정한 후 10분전에 발화가 일어나면 설정 온도 보다 3 0°C 낮게 설정하고 3~5°C 혹은 10°C씩 증가시키면서 측정하며, 발화가 일어났을 때 시간과 온도를 기록한다.

3.2. 실험재료

본 실험에 사용된 시약은 n-Propanol은 Junsei (Japan) 그리고 n-Octane은 Lancaster(England)사로서 순도는 각각 99%의 시약을 사용하였으며, 혼합물의 발화온도 측정은 순수물질을 각각 다른 몰비(Mole Fraction)로 혼합하여 실험하였다.

IV. 발화지연시간 및 혼합물의 최소자연발화온도의 예측 모델

4.1. 다중회귀분석

변수와 응답의 관계를 보다 정량적으로 표시하기

위해서 사용된 방법으로 수학과 통계학적인 방식에 의거해서 종속변수와 독립변수의 관계식을 구하는 방법을 다중회귀(Multiple Regression)이라 하며, 이 방법론은 그 동안 최적조건(Optimum Condition)을 구하는 방식 또는 최적화(Optimization)에 널리 이용되어 왔다. 변수들에 의한 화재 위험성 평가를 위한 상관관계를 나타낼 수 있는 추산 모델들 가운데 최적화된 예측 모델을 찾기 위해 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)을 이용하였다[4,6].

제시한 모델을 다항식의 일반적인 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$Y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + \dots + px^p + \dots \quad (3)$$

여기서 각 매개변수 a, b, c, d, e, \dots 을 추산하기 위해 최소화 방법을 이용하였다. 이 방법은 S.S.D.(Sum of Square of Deviation)을 구하기 위해 각 매개변수를 편미분하여 이를 영(Zero)으로 두어서 얻어지는 정규식(Normal Equation)의 해를 구하면 된다.

4.2. 자연발화온도에 의한 발화지연시간 예측 모델

대부분의 가연성 물질에 대해 자연발화온도와 발화지연시간 사이에서의 관계는 다음과 같은 선형 식을 사용하여 AIT에 의한 발화지연시간과의 관계를 고찰하였다[3,7].

$$\log\tau = \left(\frac{A}{T}\right) + B \quad (4)$$

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

본 연구에서는 실험에서 얻은 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 식 (5)를 사용하여 실험값과 예측값을 비교하였다.

$$\ln\tau = A + \left(\frac{E}{RT}\right) \left(= A + B\left(\frac{1}{T}\right)\right) \quad (5)$$

식 (4)를 이용하면 활성화 에너지(E, Activation Energy)도 계산이 가능하다.

실험에서 얻어진 자료를 회귀분석하여 최적화된 A와 B의 상수를 얻는다면 식(4)와 Semenov[8]가 제시한 식 (6)을 이용하여 활성화에너지를 얻을 수 있다.

$$\log\tau = \frac{52.55E}{T} + B \quad (6)$$

여기서 E는 활성화에너지(kJ/mol), B는 상수이다.

4.3. 혼합물의 최소자연발화온도 예측 모델

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 한다.

$$T_{AIT, MIX} = a + bX_1 \quad (7)$$

$$T_{AIT, MIX} = a + bX_1 + cX_1^2 \quad (8)$$

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

$$T_{AIT, MIX} = a + bX_1 + cX_1^2 + dX_1^3 \quad (9)$$

4.4. 문헌값과 추산값의 비교 방법

측정값과 예측값의 차이의 정도를 알기 위해서 A.A.D.(Average Absolute Deviation)을 사용하였다 [3,7].

$$A.A.D. = \sum \frac{|\tau_{est.} - \tau_{exp.}|}{N} \quad (10)$$

$$A.A.D. = \sum \frac{|AIT_{est.} - AIT_{exp.}|}{N} \quad (11)$$

여기서 $\tau_{est.}$ 는 예측된 발화지연시간, $\tau_{exp.}$ 는 실험에서 얻은 발화지연시간이고, $AIT_{est.}$ 는 예측된 자연발화온도, $AIT_{exp.}$ 는 실험에서 얻은 자연발화온도이며, 그리고 N은 자료수이다.

또한 측정값과 예측값의 통계 분석을 위해 표본 결정계수를 사용하였다.

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (12)$$

여기서 r^2 는 표본 결정계수, SSR은 회귀에 의한 제곱합(sum of squares due to regression), SST는 총 제곱합(total sum of squares)이다.

V. 결과 및 고찰

5.1. 순수물질의 최소자연발화온도 고찰

5.1.1. 노말프로판올의 자연발화온도

최소자연발화점과 발화지연시간의 관계를 실험하여 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 그러나 본 실험에서는 430℃에서는 발화가 일어나지 않았으며, 435℃에서부터 발화가 발생되었는데 그때 발화시간은 18.33 sec였다. 발화시작 온도를 기점으로 온도를 5℃ 혹은 10℃ 상승시켜 발화지연시간을 측정 한 결과 500℃에서 1.85 sec에 발화하였다.

제시한 실험에서 얻은 발화온도와 발화지연 자료를 식 (5)을 이용하여 발화온도 의한 발화지연시간을 회귀분석한 결과 예측식은 식 (13)과 같다.

$$\ln\tau = -24.2659 + 19191\left(\frac{1}{T}\right) \quad (13)$$

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

$$\log\tau = -10.5286 + 8335\left(\frac{1}{T}\right) \quad (14)$$

Semenov가 제시한 식 (6)을 식 (14)에 대입한 결과 활성화에너지는 약 159kJ/mole이 된다.

Table 1은 실험값과 식 (13)에 의한 예측된 발화지연시간을 나타내었다. 실험값과 예측값의 평균오차는 0.59 sec, 결정계수(r^2)는 0.98로서 예측값과 실험값의 모사성은 크게 나타났다.

5.1.2. 노말 옥탄의 자연발화온도

노말옥탄의 최소자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험하여 그결과를 Table 2에 나타내었다. 본 실험에서 초기설정온도를 240℃로 하여 실험한 결과 발화 14.98 sec에서는 발화가 일어나서, 초기온도 보다 30℃ 낮은 210℃에서 다시 실험한 결과 발화가 일어나지 않았으며, 다시 5℃ 상승 시킨 215℃에서 역시 발화가 일어나지 않았다. 따라서 3℃ 상승 시켜 218℃에서 실험한 결과 61.35 sec에서 발화가 시작되었고, 이를 기점으로 5℃ 혹은 10℃ 씩 상승시켜 발화지연시간을 측정 한 결과 285℃에서 1.50sec에 발화하였다.

제시한 실험에서 얻은 발화온도와 발화지연 자료를 식 (6)을 이용하여 발화온도 의한 발화지연시간을 회귀분석한 결과 예측식은 식 (15)와 같다.

$$\ln\tau = -27.1999 + 15368\left(\frac{1}{T}\right) \quad (15)$$

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

$$\log\tau = -11.8128 + 6674\left(\frac{1}{T}\right) \quad (16)$$

Semenov가 제시한 식 (6)을 식 (16)에 대입한 결과 활성화에너지(E)는 약 127kJ/mole이 된다.

Table 2은 실험값과 식 (15)에 의한 예측된 발화지연시간을 나타내었다. 실험값과 예측값의 평균오차는 2.27 sec, 결정계수(r^2)는 0.98로서 예측값과 실험

Table 1. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for n-propanol

No.	T[K]	$\tau_{exp.}[s]$	$\ln \tau_{exp.}$	$\tau_{pred.}(Eqn.13)$
1	708.15	18.33	2.90854	17.02
2	713.15	12.17	2.49897	14.07
3	723.15	10.41	2.34277	9.70
4	743.15	5.07	1.62334	4.75
5	758.15	3.19	1.16002	3.37
6	763.15	2.34	0.85015	2.41
7	768.15	1.97	0.67803	2.05
8	773.15	1.85	0.61519	1.74
AAD	-	-	-	0.59

Table 2. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for n-octane

No.	T[K]	$\tau_{exp.}[s]$	$\ln \tau_{exp.}$	$\tau_{est.}(Eqn.15)$
1	491.15	61.35	4.11660	61.99
2	493.15	61.33	4.11627	54.59
3	498.15	47.63	3.86346	39.91
4	503.15	27.15	3.30138	29.36
5	513.15	14.98	2.70672	16.18
6	523.15	5.97	1.78675	9.12
7	533.15	5.69	1.73871	5.25
8	543.15	3.59	1.27815	3.09
9	548.15	2.45	0.89609	2.39
10	558.15	1.50	0.40547	1.44
A.A.D.	-	-	-	2.27

Table 3. Comparison of autoignition temperatures(AIT) between experimental data and several reported data for pure substances

Compounds	AITs(°C)											
	This study	NFPA	Sigma	SFPE	Ignition	SAX	Jackson	Hilado	Scott	Zabetakis	Lange	CRC
n-Propanol	435	412	440	440	439	440	-	435	439	-	440	-
n-Octane	218	206	220	220	220	220	240	206	218	220	220	206

험값의 모사성은 크게 나타났다.

5.1.3. 순수물질의 자연발화온도 비교

본 연구에서는 이성분계인 n-Propanol+ n-Octane 계를 구성하는 순수물질에 대하여 최소자연발화온도를 측정하였으며, 측정된 실험값을 기존 문헌값들 [9-19]과 비교하여 Table 3에 나타내었다. n-Propanol의 실험값 435°C로서 NFPA의 문헌값 412°C와는 23°C의 차이를 보이고 있으나, Sigma, SFPE, Ignition, SAX 문헌보다는 5°C 낮게 측정되었다. n-Octane의 경우 218°C로 측정되어 NFPA와 Hilado의 문헌값보다 12°C높게 측정되었으나, 나머지 문헌값보다는 약 2°C~32°C낮게 측정되었다.

5.2. n-Propanol + n-Octane 계의 자연발화온도 고찰

5.2.1. n-Propanol(0.3)+ n-Octane(0.7)

본 실험에서는 Table 3과 같이 n-Octane의 순수

물질 자연발화온도를 고려하여 250 °C에서 실험하여 50.64 sec에 발화가 되어 온도를 10 °C내린 240 °C에 실험을 하였으나 발화가 일어나지 않았다. 5°C 상승시킨 245 °C에서는 65.8 9sec에 발화가 되어, 최소자연발화온도를 찾기 위해 2°C내린 243°C에는 발화가 되지 않았다. 최소자연발화온도인 245 °C를 시작점으로 하여 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화온도를 측정한 결과, 290°C에서 5.33 sec, 300 °C에서 3.25 sec 그리고 310 °C에서 2.45 sec에 발화하였다.

5.2.2. n-Propanol(0.5)+ n-Octane(0.5)

본 실험에서는 260 °C에서 발화가 일어나지 않아서 10°C상승시킨 270°C에 실험을 진행하여 30.27sec에 발화점을 찾아냈다. 최소자연발화온도를 찾기 위해 5°C내린 265°C에서는 40.31 sec에 발화가 되어 다시 2°C내린 263°C, 37.43sec에서 최소자연발화온도를 찾아냈다. 최소자연발화온도인 263°C를 기점으로 온도를 5°C 혹은 10°C 상승시켜 발화지연시간을

Table 4. The experimental and the predicted AITs for n-propanol+n-octane system

Mole fractions		AITs(°C)		
X ₁	X ₂	Exp.	Eqn.(17)	Eqn.(18)
0	1	218	220	218
0.3	0.7	245	238	244
0.5	0.5	263	270	271
0.7	0.3	330	319	314
0.9	0.1	365	384	382
1	0	435	423	427
A.A.D.		-	9.76	8.23

측정한 결과 300°C에서 6.1 6sec, 310°C에서 4.02 sec, 330°C에서 2.99sec에 발화하였다.

5.2.3. n-Propanol(0.7) + n-Octane(0.3)

본 실험에서는 320 °C에서 발화가 일어나지 않아서 10 °C상승시킨 330 °C에 실험을 진행하여 4.95 sec에 발화점을 찾아냈다. 최소자연발화온도를 찾기 위해 5°C내린 325 °C에서 발화가 되지 않아 2 °C상승시킨 327 °C에 실험을 하였으나 역시 발화가 되지 않았다. 최소자연발화온도인 330°C를 기점으로 온도를 5 °C 혹은 10 °C 상승시켜 발화지연시간을 측정할 결과 370°C에서 2.56 sec, 380°C에서 2.20 sec, 390°C에서, 1.67 sec에 발화하였다.

5.2.4. n-Propanol(0.9) + n-Octane(0.1)

본 실험에서는 360 °C에서 발화가 일어나지 않아서 10 °C상승시킨 370 °C에 실험을 진행하여 10.42 sec에 발화점을 찾아냈다. 최소자연발화온도를 찾기 위해 5°C내린 365 °C에서는 11.99 sec에 발화가 되어 2 °C내린 363 °C에 실험을 하였으나 발화가 되지 않았다. 최소자연발화온도인 365 °C를 기점으로 온도를 5 °C 혹은 10 °C 상승시켜 발화지연시간을 측정할 결과 380 °C에서 8.54 sec, 500°C에서 2.61sec, 510 °C에서 1.76 sec에 발화하였다.

5.2.5. n-Propanol + n-Octane 계의 자연발화온도

본 연구에서 얻은 측정값을 분석한 결과 조성 변화에 따른 최소자연발화온도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 조성에 의한 최소자연발화온도 예측 모델을 제시할 수 있다고 판단되어, 식 (7)과 식 (8)을 회귀분석한 결과 다음과 같은 최적화된 식을 얻었다.

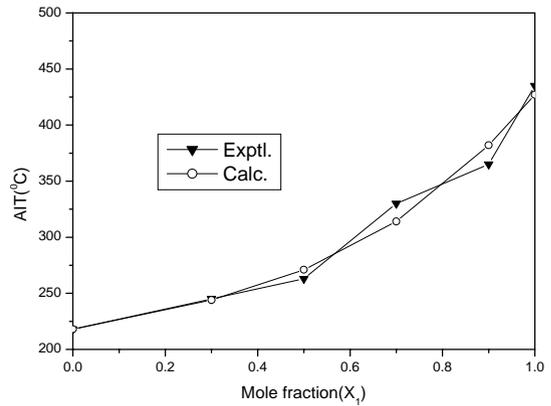


Figure 1. Comparison of AIT prediction curves with experimental data for n-propanol (X₁)+n-octane(X₂) system.

$$T_{AIT,MIX} = 220.19 - 1.21X_1 + 204.16X_1^2 \quad (17)$$

$$T_{AIT,MIX} = 217.79 + 81.91X_1 - 29.91X_1^2 + 157.31X_1^3 \quad (18)$$

n-Propanol+n-Octane계 에서 각각의 혼합조성에서 얻은 최소자연발화온도 실험값을 예측식에 의한 예측값과 비교하여 Table 4와 Figure 1에 나타내었다. 본 연구에서 제시한 식 (18)에 의한 예측값의 결정계수(r²)는 0.98이고, 평균온도차이는 8.23°C로서 실험값과 모사성이 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 식을 이용하여 다른 조성에서의 최소자연발화온도 예측이 가능해 졌다.

VI. 결 론

본 연구는 자연발화온도 측정 장치(ASTM E659)를 사용하여 n-Propanol 과 n-Octane 혼합물의 자연발화온도를 측정하였다. 혼합물을 구성하는 n-Propanol 과 n-Octane의 최소자연발화온도를 측정하여 문헌값들과 비교 고찰하였고, 각 물질의 활성화에너지도 계산하였다. 또한 n-Propanol+n-Octane 계의 조성변화에 따른 최소자연발화온도를 예측할 수 모델을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이성분계를 구성하는 순수물질의 최소자연발화온도를 측정한 결과, n-Propanol은 435 °C로서 기존 자료 보다 약 5 °C 낮게 측정되었고, n-Octane은 218 °C로서 기존 자료보다 2 °C 낮게 측정되었다.

2) n-Propanol과 n-Octane의 활성화에너지(E)는 각각 159kJ/mol와 127kJ/mol로 계산되었다.

3) n-Propanol+n-Octane계에서 최소자연발화온도를 측정한 결과, n-Propanol(0.3)+n-Octane(0.7)에서는 245°C, n-Propanol(0.5)+n-Octane(0.5)에서는 263°C, n-Propanol(0.7)+n-Octane(0.3)에서는 330°C, n-Propanol(0.9)+ n-Octane(0.1)에서는 365°C로 측정되었다.

4) 본 연구에서 얻은 측정값을 분석한 결과 조성 변화에 따른 최소자연발화온도가 증가하는 경향을 보이고 있으므로 조성에 의한 최소자연발화온도 예측 모델을 제시할 수 있다고 판단되어 다음과 같은 최적화 된 추산 모델을 제시하고자 한다.

$$T_{AIT, MIX} = 217.79 + 81.91X_1 - 29.91X_1^2 + 157.31X_1^3$$

여기서 X_1 은 n-Propanol의 조성이다.

참고문헌

[1] Crowl, D.A. and J. F. Louvar, Chemical Process Safety Fundamentals with Application, 2nd ed., Pearson Education Inc., (2002)

[2] Cullis, C.F. and C.D. Foster, "Studies of the Spontaneous Ignition in the Air of Binary Hydrocarbon Mixtures", Combustion and Flame, 23, 347-356, (1974)

[3] Ha, D.M. and S.J. Lee, "Measurement of Autoignition Temperature of o-Xylene+n-Pentanol System", J. of the Korean Society of Safety, 21(4), 66-72, (2006)

[4] Ha, D.M., "Investigation of Combustible Properties of Binary Systems for Risk Assessment of Equipment of Hazard Materials Storage",

Semyung Univ. 2011-2-170, Semyung Univ., (2011)

[5] Goldfrab, I. and A. Zinoviev, "A Study of Delay Spontaneous Insulation Fires", Physics Letter, 311, 491-500, (2003)

[6] Box, G.E.P. and N.R. Draper, Empirical Model-Building and Response Surface, John Wiley and Sons, Inc., (1987)

[7] Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 2nd ed., John Wiley & Sons, (1998)

[8] Semenov, N.N., Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2, Princeton University

[9] NFPA, Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids, NFPA 325M, NFPA, (1991)

[10] Lenga, R.E. 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)

[11] Kanury, A.M., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering ; Ignition of Liquid Fuels, 2nd ed., SFPE, (1995)

[12] Babrauskas, V., Ignition Handbook, Fire Science Publishers, SFPE (2003)

[13] Lewis, R.J., SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials, 11th ed., John Wiley & Son, Inc., N.J., (2004)

[14] Jackson, J.L., "Spontaneous Ignition Temperature -Commercial Fluids and Pure Hydrocarbons-", Industrial and Engineering Chemistry, 43(12), 2869-2870, (1951)

[15] Hilado, C.J. and S.W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", Chemical Engineering, 4, 75-80, (1972)

[16] Scott, G.S., G.W. Jones and F.E. Scott, "Determination of Ignition Temperature of Combustible Liquids and Gases", Analytical Chemistry, 20(3), 238-241, (1948)

[17] Zabetakis, M.G., A.L. Furno and G.W. Jones, "Minimum Spontaneous Ignition Temperature of Combustibles in Air", Industrial and Engineering Chemistry, 46(10), 2173-2178, (1954)

[18] Dean, J.A., Lange's Handbook of Chemistry, 14th ed., McGraw Hill, (1992)

[19] Lide, D. R., Handbook Chemistry and Physics, 76th ed., CRC Press, (1996)