

오토자일렌과 노말펜탄을 계의 최소자연발화온도 측정

하동명[†] · 이성진^{*}

세명대학교 보건안전공학과 · *세명대학교 교양학부
(2006. 6. 28. 접수 / 2006. 8. 14. 채택)

Measurement of Autoignition Temperature of o-Xylene+n-pentanol System

Ha Dong-Myeong[†] · Lee Sungjin^{*}

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University

^{*}Department of Liberal Arts and Science, Semyung University

(Received June 28, 2006 / Accepted August 14, 2006)

Abstract : An accurate knowledge of the AITs(autoignition temperatures) is important in developing appropriate prevention and control measures in industrial fire protection. The measurement of AITs are dependent upon many factors, namely initial temperature, pressure, vessel size, fuel/air stoichiometry, catalyst, concentration of vapor, ignition delay time. The values of the AITs used process safety are normally the lowest reported, to provide the greatest margin of safety. This study measured the AITs of o-xylene+n-pentanol system from ignition delay time by using ASTM E659-78 apparatus. The experimental AITs of o-xylene and n-pentanol were 480°C and 285°C, respectively. The experiment AITs of o-xylene+n-pentanol system were a good agreement with the calculated AITs by the proposed equations with a few A.A.D.(average absolute deviation).

Key Words : AITs(autoignition temperatures), ignition delay time, ASTM E659-78, process safety, o-xylene+n-pentanol system

1. 서 론

화재에서 자연발화(Autoignition 혹은 Spontaneous Ignition) 현상은 가연성혼합기체에 열 등의 형태로 에너지가 주어졌을 때 스스로 타기 시작하는 산화현상으로, 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화할 수 있는 최저온도를 최소자연발화온도(AIT, Autoignition Temperature)라고 한다. AIT는 실험 개시온도, 증기 농도, 용기 크기, 산소농도, 계의 압력, 촉매, 발화지연시간 등 다양한 실험 조건에 영향을 받는다. 따라서 공정 조건과 유사한 조건에서 측정하는 것이 바람직하다. 이와 같이 다양한 장치 및 조건에 의해서 실험이 이루어지고 있으므로 문헌들마다 다른 값들이 제시되고 있다¹⁾.

가연성 순수물질의 자연발화온도 연구로 Jackson²⁾은 ASTM Crucible-type을 변형한 장치를 이용하여

94개의 탄화수소와 15개에 대해 측정하였으며, Zabetakis 등³⁾은 ASTM Designation D 286-30 장치를 이용하여 탄화수소 위주로 측정하였다. Yagy⁴⁾는 자체 제작한 실험 장치를 이용하여 알코올화합물의 자연발화온도에 대해 실험 연구하였으며, Kong 등⁵⁾은 봄베(Bomb)를 이용하여 LPG인 프로판과 부탄의 자연발화온도를 측정하였다. Smyth 등⁶⁾은 짧은 발화시간을 이용 고온금속표면을 발화원으로 하여 탄화수소의 자연발화온도를 연구한 바 있다. Hshieh 등⁷⁾은 최근에 개발된 표준 장치인 ASTM E659-78 장치⁸⁾를 이용하여 반도체 공업에서 취급하고 있는 trichlorosilanes에 대한 자연발화온도를 측정하였다. 최근 Ha^{9,10)} 역시 ASTM E659-78 장치를 사용하여 알코올류와 산류에 대해 자연발화온도와 발화지연 시간을 측정하는 바 있듯이 다양한 장치와 조건에서 연구하고 있다.

그러나 공정에서 취급하는 혼합물은 수없이 많음에도 불구하고 연구가 거의 없는 편이다. 대표적 연구로 Zabetakis 등³⁾은 n-heptane과 iso-octane 혼합

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

물의 자연발화온도에 대한 실험적 연구를 하였으며, Cullis 등¹¹⁾은 n-decane과 2,2,5-trimethylhexane 혼합물의 자연발화온도를 연구하였다.

지금까지 자연발화온도 연구 결과들을 종합해 보면 문헌에 따라 동일 물질에 대해 다른 자연발화온도 값들이 제시되고 있다. 따라서 화재 방호 목적을 위해서는 가장 작은 자연발화온도를 사용하는 것이 바람직하나, 문헌에 제시된 대부분의 자료들은 과거 표준 장치 및 자체 제작된 장치 등을 사용해서 얻은 결과이므로 안전을 위해서 최근에 고안된 표준 장치에 의한 결과를 얻은 필요가 있다. 또한 혼합물의 연구도 반드시 진행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 ASTM E659-78(Standard Test Method for Autoignition Temperature of Liquid Chemicals)장치를 사용하여 o-xylene+n-pentanol 계에 대한 자연발화온도를 측정하고자 한다. 우선 2 성분계를 구성하는 순수성분인 o-xylene, n-pentanol 계의 최소자연발화온도와 발화지연시간 관계를 측정하였으며, 측정된 최소자연발화온도를 과거 표준 장치를 사용하여 얻은 자료들과 비교 고찰하였다. 또한 o-xylene+n-pentanol 계에 대해 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하여 발화온도에 의한 발화지연시간을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 제시된 실험자료 및 예측 모델은 이들 물질을 생산, 취급, 처리, 수송 및 저장하는 공정에서 화재 방호 자료로 제공하고자 하며, 본 연구를 통해 다른 혼합물의 자연발화 연구에 이용하는데 목적이 있다.

2 자연발화이론 및 최소자연발화온도의 응용

2.1. 열발화 이론에 의한 자연발화온도와 발화지연시간

열발화 이론은 여러 문헌^{9,10)}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 나타내고자

한다. 계의 크기 변화와 발화임계 주위 온도 관계로 Frank-Kamenetskii 매개변수로 다음과 같이 사용한다.

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

여기서 x_0 는 시료의 특성 차원의 반이고, T_a 는 주위 온도, k 는 고체의 열전도율($Wm^{-1}K^{-1}$)이며, R 은 기체상수, ρ 는 밀도, Q 는 열량, E 는 활성화에너지, A 는 단면적이다.

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 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.

$$\ln t \approx a \left(\frac{1000}{T_{c0}} \right) + b \quad (2)$$

여기서 T_{c0} 는 초기온도, t 는 발화지연시간이다.

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

2.2. 최소자연발화온도의 적용

전기설비분야에서는 폭발성 가스가 전기기기의 고온 부분에 닿게 되면 발화, 폭발을 일으킬 위험이 있으므로 폭발성 가스의 발화온도를 기준으로 하여 기기의 온도 상승을 일정한 한도 내에 있도록 분류하는데 이용된다.

공정 장치분야에서는 화학공정의 반응용기에서 증류탑이나 열교환기의 유체는 때로 공기가 존재하는 곳에서 이들 유체의 최소자연발화온도 이상으로 과열되는 경우가 있다. 이 유체들의 누출사고로 이들이 공기와 접촉하자마자 자연스럽게 발화할 수 있다. 공정에서 취급하는 유체의 최소자연발화온도에 관한 지식은 화학공정의 위험성평가와 예방 방법을 강구하는데 도움을 줄 수 있다.

용제 취급 분야에서는 용제 증발 오븐(ovens)은 특정한 용제의 최소발화온도 이상으로 가열하는 경우가 있다. 이는 안전을 위해서 인화점이 높은 용제를 인화점이 낮은 용제로 치환할 때 발생하는 경우와 같다. 그러나 역설적으로 해석하면 발화점은 높아졌으나, 인화점이 낮아지므로 위험은 증가할 가능성이 있다. 일반적으로 대부분의 가연성용제의 경우 인화점이 낮은 경우 발화점은 높은 경향을 갖는다. 즉 인화점이 낮다는 것은 쉽게 증발하는 특성을 지니므로 열 축적이 잘 되지 않는다는 의미이다. 따라서 열 축적이 잘 안되므로 발화를 하기 위해서는 높은 온도가 필요하다.

3. 실험

3.1. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 장치는 최근에 고안된 액체 화학물질의 자연발화점 측정 장치로서 ASTM E659-78 장치를 사용하였으며, 장치는 크게 Furnance, Temperature Controller, Thermocouple, Test Flask, Hypodermic Syringe, Mirror, Air Gun 등으로 구성되어 있다^{9,10}.

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 시료를 0.1mL를 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 10분 전에 발화가 일어나면 기준 온도보다 30℃ 낮게 설정하고, 3~5℃ 혹은 10℃씩 증가시키면서 측정하였다.
- 7) 발화 시간을 2초 미만까지 측정한다.
- 8) 발화가 일어났을 때 시간과 온도를 기록한다.

3.2. 실험재료

본 실험에 사용된 시약은 o-xylene과 n-pentanol은 순정화학(純正化學) 주식회사(99%)의 시약을 사용하였으며, 혼합물의 발화온도 측정은 순수물질들 각각 다른 몰비(Mole Fraction)로 혼합하여 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 자연발화온도와 발화지연시간 예측 모델

지금까지 대부분의 가연성 물질에 대해 AIT와 발화지연시간 사이에서의 관계는 다음과 같은 선형식을 사용하여 AIT에 의한 발화지연시간과의 관계를 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 관계를 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)를 이용하면 활성화 에너지(E)를 계산할 수 있다.

AIT와 발화지연시간의 관계를 비선형(Non-linear) 형태로서 고찰할 필요가 있다고 판단되는 경우는 다음과 같은 예측 모델 형태로 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 혼합물인 o-xylene+n-pentanol계를 구성하는 2개의 순수물질에 대하여 최소자연발화점을 측정하였으며, 측정된 실험값을 기존의 문헌값들과 비교하여 Table 1에 나타내었다^{2,4,12-15}.

o-Xylene의 경우 실험값은 여러 문헌들과 비교하였을 때 약 15℃ 정도 높게 측정되었으며, Jackson 문헌값보다는 15℃ 정도 낮게 측정되었다. 본 실험에서 얻은 자료를 사용하여도 타당하다고 본다. 그

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

Compounds	AIT(°C)						
	This study	NFPA	Sigma	Hilado	Jackson	SFPE	Yagyu
o-Xylene	480	463	463.9	464	501.1	465	-
n-Pentanol	285	300	300	300	-	300	300

러나 n-pentanol의 경우에는 실험값은 문헌값과 15℃ 정도 낮게 측정되었으므로 사업장에서 안전을 확보하기 위해서는 기존 자료를 사용 것 보다 본 연구에서 제시한 자료를 사용하는 것이 바람직하다고 본다.

기존의 문헌에 제시된 자료들과 비교하였을 때 약간의 차이를 나타내는 것은 실험 장치에서 오는 차이로 볼 수 있으며, 과거에는 ASTM D-2155 장치로서 250mL의 삼각플라스틱용기에서 측정된 결과이며, Yagy의 문헌값은 고안한 장치에 200mL 용량의 삼각플라스틱을 사용한 결과이다. 또한, Jackson은 ASTM crucible-type 장치를 사용한 결과이다. 최근 고안된 ASTM E659-78 장치는 500mL의 둥근 플라스크에 의한 결과로서 기존 장치에서 얻은 결과와 차이가 있는 것으로 사료된다.

본 실험을 통해 o-xylene과 n-pentanol에 대하여 자연발화온도와 발화지연시간을 측정할 결과를 이용하여 최적화를 한 결과 다음과 같은 관계식을 얻었다.

o-Xylene :

$$\ln\tau = 16.34056 - 39545.14839\left(\frac{1}{T}\right) + 2.23294 \times 10^7\left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (6)$$

n-Pentanol :

$$\ln\tau = 61.095149 - 88014.767807\left(\frac{1}{T}\right) + 3.17452 \times 10^7\left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (7)$$

o-Xylene과 n-pentanol의 경우는 선형모델 보다는 비선형 모델에 일치하는 것으로 나타나고 있다. 지금까지는 일반적으로 발화지연시간과 발화온도의 관계는 선형적으로 표현되어 왔으나, 본 연구 결과로 보아 선형에 국한된 연구 범위를 벗어나서 비선형에 대한 연구도 계속 이루어져야 할 것으로 본다.

4.3. o-Xylene+n-pentanol계의 자연발화온도 고찰

4.3.1. o-Xylene(0.7)+n-pentanol(0.3)계의 자연발화온도

본 실험에서의 실내온도는 16℃, 습도는 15%였고, 422℃에서 3번의 실험결과 발화가 일어나지 않았으며, 2℃~3℃씩 상승시켜 결과 425℃에서 최초 발화가 시작되었으며, 그때 발화지연시간은 5.74sec였다. 이를 기점으로 5℃ 혹은 10℃씩 상승시켰으며, 최소발화온도 근처에서는 1℃ 간격으로 발화지연시간을 측정할 결과 520℃에서 1.74sec에 발화하였다.

Table 2. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for o-xylene(0.7)+n-pentanol(0.3) system

No.	T[K]	$\tau_{exp.}[s]$	$\ln\tau_{exp.}$	Linear($\tau_{test.}$)	Non-linear($\tau_{test.}$)
1	698.15	5.74	1.747459	5.68	5.88
2	703.15	5.31	1.669592	5.32	5.67
3	713.15	4.02	1.391282	4.69	5.23
4	743.15	3.89	1.358409	3.28	3.83
5	753.15	3.15	1.147402	2.93	3.39
6	773.15	2.53	0.928219	2.36	2.60
7	783.15	2.00	0.693147	2.13	2.26
8	793.15	1.74	0.488580	1.92	1.94
A.A.P.E.	-	-	-	8.02	9.51
A.A.D.	-	-	-	0.26	0.32

제시한 실험 자료를 이용하여 발화온도에 의한 발화지연시간의 관계를 선형 형태인 식 (4)과 비선형 형태인 식 (5)으로 나타내면 다음과 같다.

$$\ln\tau = -7.297302 + 6306.719\left(\frac{1}{T}\right) \quad (8)$$

$$\ln\tau = -39.75 + 54592\left(\frac{1}{T}\right) - 1.787494 \times 10^7\left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)에 의한 예측값들을 실험값과 비교하여 Table 2에 나타내었다.

선형 식에 의한 예측값과 실험값 사이의 결정계수는 0.937이고, 평균시간차이는 0.26sec였으며, 비선형 식의 결정계수는 0.862이고, 평균시간차이는 0.32 sec였다. 따라서 선형식이나, 비선형식에 의한 예측 결과는 큰 차이가 없지만, 선형 식에 의한 예측값은 실험값과 더 일치하고 있다.

4.3.2. o-Xylene(0.5)+n-pentanol(0.5)계의 자연발화온도

본 실험에서의 실내온도는 11℃, 습도는 15%였고, 330℃에서 3번의 실험결과 발화가 일어나지 않았으며, 2℃~3℃씩 상승시킨 결과 332℃에서 최초 발화가 시작되었으며, 그 때 발화지연시간은 6.59sec였다. 이를 기점으로 5℃ 혹은 10℃씩 상승시켰으며, 최소발화온도 근처에서는 1℃ 간격으로 발화지연시간을 측정할 결과 450℃에서 1.78sec에 발화하였다.

제시한 실험 자료를 이용하여 발화온도에 의한 발화지연시간의 관계를 선형 형태인 식 (4)과 비선형 형태인 식 (5)으로 나타내면 다음과 같다.

Table 3. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for *o*-xylene(0.5)+*n*-pentanol(0.5) system

No.	T[K]	$\tau_{exp.}[s]$	$\ln\tau_{exp.}$	Linear($\tau_{est.}$)	non-Linear($\tau_{est.}$)
1	605.15	6.95	1.938742	6.14	7.14
2	608.15	6.69	1.900614	5.91	6.68
3	613.15	5.89	1.773256	5.55	6.01
4	623.15	4.92	1.593309	4.92	4.95
5	633.15	3.71	1.311032	4.37	4.18
6	643.15	3.34	1.205971	3.89	3.61
7	653.15	3.10	1.131402	3.49	3.18
8	673.15	2.53	0.928219	2.83	2.61
9	703.15	2.41	0.879627	2.11	2.17
10	713.15	2.10	0.741937	1.92	2.09
11	723.15	1.78	0.576613	1.75	2.04
A.A.P.E.	-	-	-	10.07	5.20
A.A.D.	-	-	-	0.39	0.16

$$\ln\tau = -25.13062 + 22556\left(\frac{1}{T}\right) \quad (10)$$

$$\ln\tau = 25.57813 - 36896\left(\frac{1}{T}\right) + 1.368064 \times 10^7 \left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에 의한 예측값들을 실험값과 비교하여 Table 3에 나타내었다.

선형의 형태인 식에 의한 결정계수는 0.928이고, 평균시간차이는 0.39sec였으며, 비선형 식의 의한 결정계수가 0.986이고, 평균시간차이는 0.16sec로서 비선형 식의 의한 예측값은 실험값과 거의 일치하고 있다.

4.3.3. *o*-Xylene(0.3)+*n*-pentanol(0.7)계의 자연발화 온도

본 실험에서의 실내온도는 12℃, 습도는 20%였고, 312℃에서 3번의 실험결과 발화가 일어나지 않았으며, 2℃~3℃씩 상승시킨 결과 315℃에서 최초 발화가 시작되었으며, 그때 발화지연시간은 17.89sec였다. 이를 기점으로 5℃ 혹은 10℃씩 상승시켰으며, 최소발화온도 근처에서는 1℃ 간격으로 발화지연시간을 측정한 결과 400℃에서 1.63sec에 발화하였다.

제시한 실험 자료를 이용하여 발화온도에 의한 발화지연시간의 관계를 선형 형태인 식 (4)과 비선형 형태인 식 (5)으로 나타내면 다음과 같다.

$$\ln\tau = -25.61414 + 23537.25\left(\frac{1}{T}\right) \quad (12)$$

Table 4. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for *o*-xylene(0.3)+*n*-pentanol(0.7) system

No.	T[K]	$\tau_{exp.}[s]$	$\ln\tau_{exp.}$	Linear($\tau_{est.}$)	non-Linear($\tau_{est.}$)
1	588.15	17.89	2.884242	15.87	14.12
2	593.15	13.98	2.637628	13.58	11.57
3	603.15	9.44	2.244956	10.01	7.99
4	623.15	5.03	1.615420	5.60	4.24
5	633.15	3.95	1.373716	4.25	3.24
6	643.15	3.08	1.124930	3.25	2.54
7	653.15	2.54	0.932164	2.51	2.05
8	663.15	2.09	0.737164	1.95	1.69
9	673.15	1.63	0.488580	1.53	1.43
A.A.P.E.	-	-	-	6.55	17.22
A.A.D.	-	-	-	0.48	1.19

$$\ln\tau = 63.125 - 129024\left(\frac{1}{T}\right) + 6.592922 \times 10^7 \left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (13)$$

식 (12)과 식 (13)에 의한 예측값들을 실험값과 비교하여 Table 4에 나타내었다.

선형 식에 의한 예측값과 실험값 사이의 결정계수는 0.982이고, 평균시간차이는 0.48sec였으며, 비선형 식의 결정계수는 0.913이고, 평균시간차이는 1.19sec였다. 따라서 선형 식에 의한 예측값은 실험값과 더 일치하고 있다.

4.3.4. *o*-Xylene(0.1)+*n*-pentanol(0.9)계의 자연발화온도

본 실험에서의 실내온도는 14℃, 습도는 25%였고, 305℃에서 3번의 실험결과 발화가 일어나지 않았으며, 2℃~3℃씩 상승시킨 결과 308℃에서 최초 발화가 일어났으며, 발화시간은 33.90sec였다. 이를 기점으로 5℃ 혹은 10℃씩 상승시켰으며, 최소발화온도 근처에서는 1℃ 간격으로 발화지연시간을 측정한 결과 390℃에서 1.84sec에 발화하였다.

제시한 실험 자료를 이용하여 발화온도에 의한 발화지연시간의 관계를 선형 형태인 식 (4)과 비선형 형태인 식 (5)으로 나타내면 다음과 같다.

$$\ln\tau = -19.84107 + 13443.63\left(\frac{1}{T}\right) \quad (14)$$

$$\ln\tau = 76.5625 - 106304\left(\frac{1}{T}\right) + 3.699507 \times 10^7 \left(\frac{1}{T}\right)^2 \quad (15)$$

식 (14)과 식 (15)에 의한 예측값들을 실험값과 비교하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for *o*-xylene(0.1)+*n*-pentanol(0.9) system

No.	T[K]	τ_{exp} [s]	$\ln\tau_{exp}$	Linear(τ_{est})	non-Linear(τ_{est})
1	581.15	33.90	3.523415	26.89	24.07
2	583.15	29.37	3.379974	24.84	21.29
3	593.15	15.57	2.745346	16.84	12.11
4	603.15	9.24	2.223542	11.56	7.44
5	613.15	6.47	1.867176	8.04	4.92
6	623.15	5.13	1.635106	5.66	3.46
7	643.15	2.76	1.015231	2.89	2.04
8	653.15	2.29	0.828552	2.09	1.69
9	663.15	1.84	0.609766	1.54	1.47
A.A.P.E.	-	-	-	14.82	25.21
A.A.D.	-	-	-	1.98	3.12

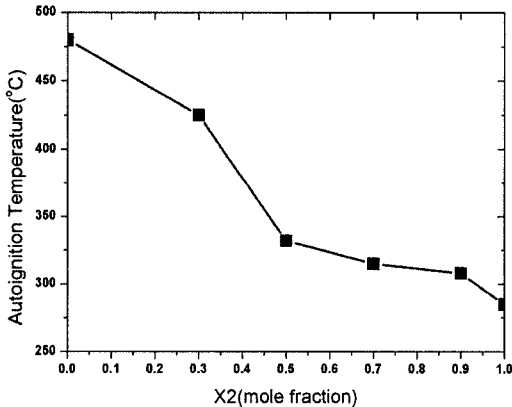


Fig. 1. Experimental AIT of *o*-xylene(X1)+*n*-pentanol(X2) system.

선형 식에 의한 예측값과 실험값 사이의 결정계수는 0.932이고, 평균시간차이는 1.98sec였으며, 비선형 식의 결정계수는 0.842이고, 평균시간차이는 3.12 sec였다. 따라서 선형 식에 의한 예측값은 실험값과 더 일치하고 있다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 *o*-xylene+*n*-pentanol계의 AIT는 이상용액의 특성보다 낮은 온도를 보이고 있으며, 특히 *n*-pentanol의 조성이 1~0.5에서는 작은 온도 변화를 보이다가 0.5 조성 이후에서는 급격한 증가를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 자료를 이용하여 산업현장에서 안전을 확보할 수 있는 자료로 이용할 수 있다고 본다.

5. 결론

본 연구는 최근 표준 장치로 사용되고 있는 ASTM

E659-78를 사용하여 2성분계 혼합물에 대한 자연 발화온도를 측정하였다. 우선 2성분계를 구성하는 순수성분인 *o*-xylene과 *n*-pentanol의 자연발화온도와 발화지연시간 관계를 측정하였으며, 측정된 자료를 과거 표준 장치를 사용하여 얻은 결과와 비교 고찰하였고, 혼합물인 *o*-xylene+*n*-pentanol 계에 대해 자연 발화온도와 발화지연시간을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 순수물질 2개의 최소자연발화온도를 측정한 결과 *o*-xylene은 480°C 그리고 *n*-pentanol은 285°C로 나타났다. 특히 *n*-pentanol의 경우 측정값은 기존의 문헌값 보다 15°C 정도 낮게 측정되었으므로 안전을 위해서는 기존 자료를 사용 것 보다 본 연구에서 제시한 자료를 사용하는 것이 타당하다.

2) 혼합물인 *o*-xylene+*n*-pentanol계에서 측정된 최소자연발화온도의 경우 *o*-xylene(0.7)+*n*-pentanol(0.3)에서는 425°C, *o*-xylene(0.5)+*n*-pentanol(0.5)에서는 332°C, *o*-xylene(0.3)+*n*-pentanol (0.7)에서는 315°C 그리고 *o*-xylene(0.1)+*n*-pentanol(0.9)에서는 308°C로 나타났다.

3) 지금까지는 일반적으로 발화지연시간과 발화온도의 관계는 선형적으로 표현되어 왔으나, 본 연구 결과로 보아 선형에 국한된 연구 범위를 벗어나서 비선형 예측식에 대한 연구도 계속 이루어져야 한다.

참고문헌

- 1) E. Meyer, "Chemistry of Hazardous Materials", 2nd ed., Prentice-Hall, 1990.
- 2) J. L. Jackson, "Spontaneous Ignition Temperature", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 43, No. 12, pp. 2869~2870, 1951.
- 3) 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.
- 4) S. Yagy, "Systematization of Spontaneous Ignition temperature of Organic Compounds -Spontaneous Ignition temperature of Alkyl Alcohols-", Research Report of the Research Institute of Industrial Safety(RIIS-RR-26-5), Japan, 1978.
- 5) D. King, R. K. Eckhoff and F. Alfert, "Auto-ignition of CH₄/air, C₃H₈/air, CH₄/C₃H₈/air and CH₄/CO₂/air using 1L Ignition Bomb", J. of Hazardous

- Materials, Vol. 40, pp. 68~84, 1995.
- 6) K. C. Smyth and N. P. Bryner, "Short-Duration Autoignition Temperature Measurement for Hydrocarbon fuels Near Heated Metal Surfaces", *Combustion Sci. and Tech.*, Vol. 126, pp. 225~253, 1997.
 - 7) F-Y. Hshieh, D. B. Hirsh and J. H. Willams, "Autoignition Temperature of Trichlorosilanes", *Fire and Materials*, Vol. 26, pp. 289~290, 2002.
 - 8) ASTM, "Test Method E659-78(2000) Standard Test Method for Autoignition Temperature of Liquid Chemicals", American Society for Testing Materials, Philadelphia, PA, 1994.
 - 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) D. M. Ha, "Relationship between Autoignition Temperature(AIT) and Ignition Delay Time for Acids", *T. of the Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 18, No. 2, pp. 27~33, 2004.
 - 11) 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.
 - 12) C. J. Hilado and S. W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", *Chemical Engineering*, Vol. 4, pp. 75~80, 1972.
 - 13) NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile solids", NFPA 325M, NFPA, 1991.
 - 14) 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.
 - 15) A. M. Kanury, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering ; Ignition of Liquid Fuels", 2nd ed., SFPE, 1995.