

## 가연성물질의 인화점에 관한 연구

- 1. 순수성분 및 2성분계 혼합물

### A Study on Flash Points of Flammable Substances

- 1. Pure Substances and A Mixture of Binary System -

하 동 명\*      목 연 수\*\*      최 재 옥\*\*  
Ha, Dong-Myeong\* · Mok, Yun-Soo\*\* · Choi Jae-Wook\*\*

#### Abstract

The flash point is generally used as a hazardous index of fire and explosion of a flammable liquid. A classification of the flash points is important for the safe handling of flammable liquids such as solvent mixtures. The flash points of pure substances and solvent mixtures can be calculated with the appropriate use of the fundamental laws of Raoult, Dalton, Le Chatelier and activity coefficient models. In this study, experimentally determined lower and upper flash points were compared with the calculated values by using Raoult's law and van Laar equation. The flash points of pure substances were in agreement with the calculated values by vapor pressure and explosive limits. Also, the lower flash points of M.E.K.(methylethylketone)-toluene system were in agreement with the predicted values by Raoult's law, and the upper flash points were in agreement with the predicted values by van Laar equation. By means of this methodology, it is possible to evaluate reliability of experimental data of the flash points of the flammable mixtures.

*Key words* : flammable mixtures, flash point, explosive limits, Le Chatelier, activity coefficient

#### 국문 요약

인화점은 일반적으로 가연성액체의 화재 및 폭발의 위험지수로서 사용된다. 인화점의 구분은 혼합용제와 같은 가연성액체를 안전하게 취급하기 위해서 매우 중요하다. 순수성분 및 혼합용제의 인화점은 라울의 법칙, 달톤의 법칙, 르 샤틀리에 법칙 그리고 활동도계수 모델을 사용함으로써 계산할 수 있다. 본 연구에서는 가연성 2성분계인 메칠에칠케톤과 톨루엔계의 하부인화점과 상부인화점의 실험자료를 라울의 법칙과 van Laar식에 의해 계산된 값과 비교하였다. 순수물질의 실험자료는 증기압과 폭발한계에 의해 계산된 예측값과 일치하였다. 메칠에칠케톤과 톨루엔계의 하부인화점의 실험자료는 라울의 법칙에 의해 예측된 값과 일치하였고, 상부인화점의 실험자료는 van Laar식에 의해 예측된 값과 일치하였다. 따라서 제시한 방법론에 의해 가연성혼합용제의 인화점 실험자료의 신뢰도 평가가 가능하다.

\* 세명대학교 산업안전공학과 교수(www. chollian.net/~Hadm)

\*\* 부경대학교 안전공학과 교수

## 1. 서론

공정상에서 가연성물질의 생산, 처리, 수송, 저장시 취급 부주의로 화재 및 폭발이 야기될 수 있다. 따라서 가연성물질의 안전한 취급을 위해서는 인화점에 대한 지식이 필요하다. 인화점은 가연성액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로, 가연성액체 액면 가까이서 인화할 때 필요한 증기를 발산하는 액체의 최저온도로 정의된다. 인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나뉘며, 일반적으로 인화점이란 하부인화점을 말한다<sup>1)</sup>.

인화점 측정 방법으로는 Abel방식, Tag방식, Pensky-Martens방식, Cleveland개방식 그리고 Setaflash방식 등이 있으며, 일반적으로 인화점이 80°C 이하인 경우에는 Tag밀폐식을, 80°C 이상인 경우에는 Cleveland개방식을 사용하고 있다<sup>2)</sup>. 柳生昭三<sup>3,4)</sup>은 Tag밀폐식의 인화점 측정은 인화점 시험기의 증기농도가 지시 온도에서 포화농도에 도달하지 않고, 용기중에 균일농도가 되지 않으며, 시험불꽃의 위치가 용기의 상부에 있으므로 화염이 하향전파된다는 등의 원인으로 실제 하부인화점과의 사이에 오차가 발생한다고 지적하였다. 이 때문에 유통법의 인화점 측정 장치를 사용하는 것이 가연성액체의 기액평형 상태를 만족시키는 하부인화점과 상부인화점을 얻을 수 있다고 보고되고 있다. 이 방법은 증발관의 건조 증기를 유통시키기 때문에 유통법이라고 하며, 기존의 측정 방식들이 하부인화점만 측정할 수 있는데 비해 상부인화점도 측정할 수 있는 특징을 지니고 있다.

화학물질은 순수물질로 사용되는 경우보다는 몇가지 순수물질이 섞인 혼합물질로 사용되는 경우가 대부분이다. 물질보건안전자료(MSDS, Material Safety Data Sheets) 제도가 의도하는 것은 화학물질을 안전하게 취

급함으로써 사고를 예방하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 MSDS는 혼합물 자체의 위험성 실험을 거쳐 평가되고 이를 바탕으로 작성하는 것이 원칙이다. 그러나 현실적으로 유해 위험성, 안전성 등의 제약 때문에 장기적이고 종합적 실험을 거쳐 정확하게 평가된 경우는 전세계적으로도 그리 많지 않으며, 특히 우리나라에서는 이에 대한 연구가 거의 없는 상태이다. 따라서 수많은 혼합용제를 사용하고 있는 대부분의 화학산업 현장에서는 이들 각각의 인화성혼합용제의 위험성을 판정하기는 그만큼 어려움이 있다.

본 연구에서는 산업 현장에서 많이 취급하는 순수물질 및 혼합용제의 하부인화점과 상부인화점을 유통법에 의해 측정하고, 실험자료의 신뢰성을 살펴보기 위해서 이상용액과 비이상용액 개념에 의한 이론값과 실험값을 비교 검토하였다. 제시한 방법론을 다른 여러 혼합용제의 실험자료의 신뢰성을 검증하는 새로운 방법으로 이용되고, 실험에서 얻은 실험자료를 이용하여 화재 및 폭발을 방지하는 기초자료로 제공하는데 그 목적이 있다.

## 2. 폭발한계와 증기압 관계에 의한 순수물질 및 혼합물의 인화점 예측

### 2-1. 인화점과 폭발한계

인화점이란 화재, 폭발 위험성을 나타내는 기준으로 공기중에서 액체를 가열할 때 액체 표면에 증기가 발생하여 그 증기가 착화원에 접근할 경우 인화되는 액체의 최저온도를 말한다. 즉, 인화점은 가연성물질의 증기압이 폭발하한계의 농도와 같을 때의 온도를 하부인화점이라 하고, 폭발상한계와 증기압이 만나는 점을 상부인화점이라 한다. 증기압과 폭발한계에 대한 순수가연성 액체의 인화점을 Fig. 1에 나타내었다.

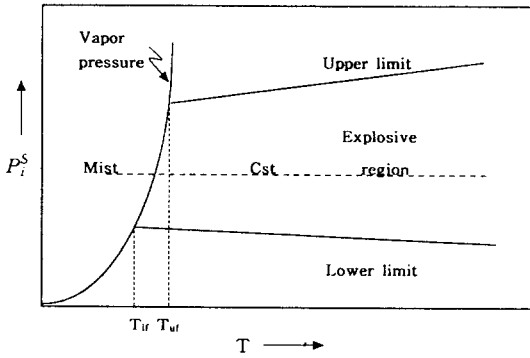


Fig. 1. Flammability diagram.

### 2-2. 순수물질의 인화점 예측

가연성순수물질의 하부인화점 및 상부인화점의 실험값과 이론값의 비교를 통하여 실험값의 신뢰성을 고찰할 수 있다. 이론값은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 폭발한계와 증기압이 만나는 점에서 예측할 수 있으며 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{P_i^s}{L_i} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{P_i^s}{U_i} = 1 \quad (2)$$

여기서  $P_i^s$ 는 포화증기압,  $L_i$ 는 폭발하한계 그리고  $U_i$ 는 폭발상한계이다.

### 2-3. 혼합용제의 인화점 예측

가연성혼합용제의 인화점은 이상용액인 경우 Raoult의 법칙을 이용하여 인화점을 예측할 수 있으며, 비이상용액에 대해서는 활동도계수를 계산한 후 이를 사용하여 예측이 가능하다.

지금까지 가연성혼합용제의 인화점 연구를 살펴보면, Johnston<sup>5)</sup>은 이상용액의 개념인 Raoult의 법칙을 이용하여 유기수용액(물과 에탄올)에 대한 인화점을 추산하는 식을 제시하였다. Thorne<sup>6)</sup>은 가연 및 난연성분으로 이루

어진 혼합물의 인화점 추산을 van Laar식과 Clausius-Clapeyron식으로부터 활동도계수를 계산하고 이를 이용하여 인화점을 추산한 바있다. Gmehling 등<sup>7)</sup>은 가연성 3성분계에 대해 그룹기여법(group contribution method)인 UNIFAC법을 이용하여 활동도계수를 계산하고, 이를 사용하여 인화점을 예측하여 문헌값과 비교하였다. Nakano<sup>8)</sup>는 에멀존(emulsion)화된 연료의 인화점 연구로, Gmehling 등<sup>7)</sup>이 제안한 방식과 큰 차이가 없으며 이 추산방법역시 활동도계수를 UNIFAC법을 이용하여 계산한 후 증기압을 계산하여 인화점을 추산하였다. 하 등<sup>9)</sup>은 가연성 3성분계 인화점에 대해 computer plotting을 통하여 인화점을 추산한 바있다.

2성분계이상 다성분계의 인화점은 순수성분의 인화점 예측 이론을 근거로하여 Le Chatelier 법칙을 이용하면 예측할 수 있다. 이 법칙을 각 물질의 분압과 폭발한계로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{L_i} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{U_i} = 1 \quad (4)$$

여기서  $P_i$ 는 부분압이다. 이상용액인 경우 Raoult의 법칙에 의해 부분압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = x_i P_i^s \quad (5)$$

비이상용액인 경우  $P_i$ 는 보정계수인 활동도계수( $\gamma_i$ )를 이용한 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$P_i = \gamma_i x_i P_i^s \quad (6)$$

또한 식 (3)과 (4)에 의한 혼합용제의 하부

인화점과 상부인화점을 예측하기 위해서 증기압 계산식은 널리 사용되는 Antoine식<sup>10)</sup>을 이용하였다.

인화점을 예측하기 위해서는 증기압에 대한 자료 뿐만아니라 폭발한계(연소한계)에 대한 지식도 필요하다. 폭발한계는 폭발하한계와 상한계로 나누어지며 이들은 온도, 압력, 산소의 농도, 불활성가스 등의 영향을 받는다. 일반적으로 폭발한계의 자료는 1기압, 25°C에서 가연성물질의 부피백분율로 제시된다.

폭발한계는 압력이 일정할 경우 온도가 증가하면 폭발범위가 변하므로 이에 관한 실험식을 Zabetakis<sup>11)</sup>는 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(t) = L_i(25) - 0.182(t - 25)/\Delta H_{ci} \quad (7)$$

$$U_i(t) = U_i(25) + 0.182(t - 25)/\Delta H_{ci} \quad (8)$$

여기서  $L_i(25)$ 는 1기압, 25°C에서의 폭발하한계,  $L_i(t)$ 는 온도변화에 따른 폭발하한계,  $U_i(25)$ 는 1기압, 25°C에서의 폭발상한계,  $U_i(t)$ 는 온도변화에 따른 폭발상한계 그리고  $\Delta H_{ci}$ 는 연소열이다.

비이상용액인 경우 van Laar을 이용하여 활동도계수를 계산하였으며, 이성분계 적용시 계산식은 다음과 같다.

$$\ln \gamma_1 = A_{12} \left( \frac{A_{21}x_2}{A_{12}x_1 + A_{21}x_2} \right)^2 \quad (9)$$

$$\ln \gamma_2 = A_{21} \left( \frac{A_{12}x_1}{A_{12}x_1 + A_{21}x_2} \right)^2 \quad (10)$$

여기서  $A_{12}$ 와  $A_{21}$ 는 van Laar 상수로서, 이들은 기액평형 자료가 있을 경우 이들 값들이 문헌에 제시되어 있다<sup>12)</sup>.

이와같이 Raoult의 법칙, Dalton의 법칙, Le Chatelier의 법칙 그리고 활동도계수 추산식 등을 사용하여 가연성물질의 인화점들을 예측할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3-1. 실험장치

장치는 냉동장치, 항온조, 폭발통(연소통) 등으로 구성되어 있다. 냉동장치는 항온조내의 온도를 -35°C까지 냉각시킬 수 있는 냉동기로서 냉매는 R-502를 사용하였고, 압축 냉각된 R-502의 냉매의 유량을 조절하여 냉각관 내의 압력을 조절함으로써 임의의 저온을 유지할 수 있도록 하였다.

항온조는 35cm×35cm×35cm의 크기로 내부에 냉각용 코일과 전열기를 설치하고, 단열이 완전히 되도록 제작하였으며, 액매(液媒)로는 50%의 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였다. 항온조 내의 가열은 2kW의 밀폐형 전열기를 사용하였고, 온도의 조절은 비례 전류제어 방식으로 하였다.

포화기로는 하부에 측정하고자 하는 혼합용제를 적당량을 넣고 증발관을 거쳐오는 혼합가스를 통과시켜, 혼합용제와의 접촉면적을 최대로 하기 위해 스테인레스 거즈를 충전하였다.

폭발통은 혼합용제와 접촉 면적을 최대로 하기 위해 스테인레스 거즈로 충전된 포화기를 통과한 포화증기를 항온조에서 등온시키고, 99.999%-Pt전극간에 아크방전을 일으켜 폭발이 일어나도록 하였다. 특히 고온하에서는 폭발통의 끝부분이 가열액매로부터 대기중에 노출되고 있기 때문에 관내의 냉각을 방지할 필요가 있다. 이를 위해 내경 5.0cm인 폭발통 상부 약 1/4을 2.6cm로 좁히고, 액매에서의 노출된 높이를 2.0cm이하로 제한하였으며, 이 부분을 피복된 전열선으로 항온조와 동일한 온도로 조정하여 주어진 온도에서 포화온도를 나타내는 혼합가스를 얻을 수 있도록 하였다.

#### 3-2. 실험재료

본 실험에서는 석유화학공업에서 널리 사용되고 있는 메틸에틸케톤과 톨루엔을 대상으로 하였으며, 각 시료는 순정화학(純正化學)주식

회사의 시약 1급(일본)을 사용하였다. 이들 시약을 각각 몰비(mole fraction)로 혼합하여 혼합용제를 만들어 실험에 사용하였다.

### 3-3. 실험방법

항온조를 설정한 온도에 이르게 한 후 장치를 항온조의 액매중에 설치하고, 송풍기로부터 나온 공기를 건조기로 통과시켜 건조공기로 한 후 외부에 있는 증발관의 시료 액체 중에 250~300 mL/min의 량으로 분출시켜 건조공기 중에 증기를 예비 포화시켰다. 이 증기를 더욱 정확히 포화시키기 위해 항온조내의 포화기를 통과시킨다.

이 조작을 15~20분 계속하면 연소관내에는 항온조의 설정온도에 해당하는 포화증기의 혼합가스로 채워진다. 여기서 공기의 분출을 중지하고 고압변압기로부터 Pt전극간에 아크방전을 시킨다. 이때 혼합가스가 폭발범위(연소범위)내에 있으면 화염이 폭발통내에 상승하고, 폭발이 격렬할 경우에는 폭음과 함께 폭발통의 실리콘 마개가 튀어 오르게 된다. 폭발한계 부근에 있어서의 화염전파의 판별은 화염이 최소로 되기 때문에 육안관찰과 폭발통내에 삽입한 열전대에 의한 온도 변화로 행하였다.

폭발한계 부근에서 항온조의 온도를 1°C 폭으로 변화시켜, 동일한 방법으로 실험조작을 반복하여 행한다. 이렇게하여 얻어진 화염전파 유무의 한계에 해당하는 항온조의 온도를 시료의 인화점으로 하였다.

## 4. 결과 및 고찰

그동안 우리의 연구는 가연성혼합용제에 대해 인화점을 측정하여 그 자료의 제시하는데 국한하였으나, 본 연구에서는 실험에서 얻어진 자료와 이론식에서 얻어진 추산값을 비교 검토하여 제시된 실험자료의 신뢰성을 고찰하였다.

가연성순수물질의 하부인화점과 상부인화점의 실험값을 증기압과 폭발한계를 이용한 계산값과 비교하였다. 2성분계인 M.E.K. (methylethylketone)-toluene계의 인화점 실험자료가 이상용액과 비이상용액의 성질 가운데 어느 용액의 성질을 지니고 있는지를 살펴 보기 위해서 이상용액으로 가정한 경우 Raoult의 법칙을 적용하였고, 비이상용액인 경우에는 활동도계수를 이용한 예측식을 사용하였다.

실험자료의 신뢰성 고찰을 위해 비이상용액인 경우 활동도계수를 계산이 필요하며, 이를 위해 기액평형자료가 있어야 한다. 기액평형자료는 DECHEMA 문헌<sup>12)</sup>에서 얻었으며, van Laar식을 이용하여 활동도계수를 계산한 후 인화점을 예측하였다. Table 1에는 인화점 계산에 필요한 각 순수물질의 Antoine 상수<sup>12)</sup>, 폭발한계<sup>13)</sup> 그리고 연소열<sup>14)</sup>을 나타내었다. 가연성순수물질에 대한 실험값 및 문헌값(다른문헌에서 제시된 실험값)과 예측값을 비교하여 Table 2에 나타내었다. 여기서 본연구의 실험장치는 하부인화점과 상부인화점을 모두 측정할 수 있는 장치로써 2성분계를 구성하는 각 순수성분 4개에 대한 하부인화점 및 상부인화점의 측정 결과를 나타내었으며, 나머지 성분들에 대해서 하부인화점만 나타낸 것은 과거에 연구된<sup>9)</sup> 3성분계 인화점에서 3성분계를 구성하는 순수성분들의 인화점으로 하부인화점만 문헌에 제시되어 이를 나타낸 것이다.

하부인화점의 실험값과 추산식에 의해 얻어진 예측값의 평균 차이는 2.10°C이고, 나머지 제시된 문헌값과 예측값의 차이는 2.57°C로써 본 연구에서 얻어진 실험값과 문헌값을 이론식과 비교하였을 때 거의 비슷한 차이를 보여주고 있다.

또한 실험에서 얻어진 상부인화점의 실험값과 예측값을 비교한 결과 1.36°C의 차이로써 하부인화점의 차이보다 훨씬 작은 값을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 실험값들은 타당성이 있다고 본다.

Table 1. Antoine constants, flammability limits and heats of combustion for pure substances

Properties Components	A	B	C	LFL (Vol%)	UFL (Vol%)	$\Delta H_{ci}$
Butylacetate	7.02845	1368.50	204.000	1.38	7.6	3590.4
M.E.K.	7.06356	1261.34	221.969	2	11	2478.7
2-Propanol	8.87829	2010.33	252.636	2.5	12	2051.1
Toluene	6.95087	1342.31	219.187	1	7	3948.3
Ethanol	8.11220	1592.864	226.184	3.3	24.5	1409.4
Ethylacetate	7.10179	1244.951	217.881	3.1	16	2273.3
n-Heptane	6.89386	1264.37	216.640	1.1	7	4853.5
n-Octane	6.93142	1358.800	209.855	0.98	6.5	5512.0
n-Undecane	6.97220	1569.57	187.70	0.64	5.0	7487.4

Table 2. Comparison of experimental and calculated flash points by vapor pressure and explosive limits for pure substances

Flash Point(°C) Components	Lower Exp.	Calc.	Upper Exp.	Calc.
Butylacetate*	26	28.80	57	55.85
M.E.K.*	-5	-7.49	22	23.38
2-Propanol*	14	11.91	36	37.92
Toluene*	5	1.98	37	37.96
Ethanol**	13	11.21	-	-
Ethylacetate**	-4	-7.55	-	-
n-Heptane**	-4	-4.89	-	-
n-Octane**	13	14.41	-	-
n-Undecane**	65	62.02	-	-

\* Experimental data \*\* Reported data

Table 3. Comparison of experimental and calculated lower flash points by Raoult's law and van Laar equation for M.E.K.(X1)-toluene(X2) system

Mole fraction		Flash point (°C)		
X1	X2	Exp.	Raoult	van Laar
0.0	1.0	5.0	1.98	1.98
0.1	0.9	6.0	0.79	0.01
0.2	0.8	3.0	-0.33	-1.60
0.3	0.7	2.0	-1.39	-2.90
0.4	0.6	1.0	-2.40	-3.97
0.5	0.5	0	-3.35	-4.86
0.6	0.4	-1.0	-4.26	-5.61
0.7	0.3	-2.0	-5.13	-6.23
0.8	0.2	-3.0	-5.95	-6.74
0.9	0.1	-4.0	-6.74	-7.17
1.0	0.0	-5.0	-7.49	-7.49
A.A.D.		-	3.30	4.24

Table 4. Comparison of experimental and calculated upper flash points by Raoult's law and van Laar equation for M.E.K.(X1)-toluene(X2) system

Mole fraction		Flash point (°C)		
X1	X2	Exp.	Raoult	van Laar
0.0	1.0	37.0	37.74	37.74
0.1	0.9	35.0	35.83	34.70
0.2	0.8	34.0	34.07	32.29
0.3	0.7	33.0	32.42	30.34
0.4	0.6	31.0	30.89	28.75
0.5	0.5	27.0	29.44	27.43
0.6	0.4	26.0	28.09	26.32
0.7	0.3	24.0	26.81	25.39
0.8	0.2	24.0	25.60	24.60
0.9	0.1	23.0	24.46	23.93
1.0	0.0	22.0	23.38	23.38
A.A.D.		-	1.28	1.16

Table 3과 4에서는 M.E.K.-toluene계의 실험값과 이론식(Raoult식 및 van Laar식)에 의한 예측값을 비교하여 나타내었고, 실험값과 예측값의 차이의 정도를 알기위해 A.A.D. (average absolute deviation)를 사용하였다<sup>9,15)</sup>.

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

여기서  $t_{pred.}$ 는 예측식에 의해 추산된 인화점,  $t_{exp.}$ 는 실험에 의한 인화점 그리고  $N$ 는 자료수이다.

M.E.K.-toluene계에서 하부인화점의 경우에는 Raoult의 법칙에 의해 계산된 값과 실험값의 평균온도 차이가 3.3°C이며, 비이상용액의 개념에 의한 van Laar식에 의한 온도 차이는 4.24°C로써 Raoult의 법칙에 의해 계산된 결과와 일치하였다. 한편 상부인화점에서는 Raoult의 법칙에 의한 계산값과 실험값의 평균온도 차이가 1.28°C이며, van Laar식에 의해서는 1.16°C로써 van Laar식에 의한 계산결과와 일치함을 보여주고 있다. 우리가 제시한 실험값과 이론식에 의한 예측값의 차이는 다른 문헌에 제시된 실험값과 이론식에 의한 예측값의 차이보다 작은 결과를 보여주고 있다.

인화점 예측에 사용된 온도변화에 따른 폭발한계 계산식인  $L_i(t)$ 는  $L_i(25)$ 에 강하게 의존하므로  $L_i(25)$ 에 따라 계산 결과가 크게 영향을 받으며,  $L_i(25)$ 은 문헌에서 인용된 값이므로 정확한 값의 사용에 따라 예측 결과에 영향을 주는 것으로 본다.  $U_i(t)$ 도  $L_i(t)$ 와 마찬가지로  $U_i(25)$ 에 크게 의존한다. M.E.K.의 낮은 농도 경우 Raoult의 법칙에 잘 따르고, toluene의 농도가 낮은 경우 van Laar식에 보다 일치하고 있는데 이는 각 물질에 사용된  $U_i(25)$ 에 영향이 있는 것으로 사료되며, 또한 M.E.K. 경우 Antoine식의 사용에 있어서 적용온도 범위가 벗어난 범위에서 얻어진 증기압 자료이므로 이 역시 계산 결과에 약간의 영향이 있는 것으로 본다. 따라서 인화성 혼합용제의 위험성을 보다 정확히 예측하기 위해서는 활동도계수 추산식에 대한 연구와 증기압 계산식인 Antoine식 이외의 다른식에 대한 연구도 계속 이루어져야할 것으로 본다.

인화성혼합용액의 인화점 실험자료의 신뢰성 평가가 처음 시도됨으로써 앞으로 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 혼합용제의 실험자

료에 대한 신뢰성 평가의 방법론으로 사용될 수 있다고 본다. 앞으로 본 연구에서 제시한 방법론이 실험에서 조차 찾기 어려운 산업현장에서 취급하는 수많은 인화성혼합용제의 위험성 판정 기준인 인화점들을 예측할 수 있는 방법으로 이용되기를 기대한다.

## 5. 결론

가연성 순수물질 인화점에 대해 증기압과 폭발한계를 이용한 예측값과 실험값을 비교하였고, 또한 2성분계 액체혼합물 인화점의 실험값과 Raoult의 법칙, Dalton의 법칙, Le Chatelier의 법칙 그리고 활동도계수 추산식을 이용한 예측값을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 순수성분 4개의 인화점 실험자료와 5개의 문헌값을 증기압과 폭발한계를 이용한 예측값과 비교한 결과 실험자료는 평균 2.1 0°C의 차이를 보였으며, 문헌값들은 2.5 6°C의 차이를 나타내었다.
- (2) M.E.K.-toluene계에서 하부인화점의 실험 자료는 Raoult의 법칙에 의한 계산값과 일치하였고, 상부인화점은 van Laar식에 의한 계산값과 일치하였다.
- (3) 인화점 예측에 사용된 식에서 예측값은 폭발한계값에 큰 영향을 받는다.
- (4) M.E.K.-toluene계의 인화점 자료는 화학 공정설계에서 안전성을 확보하는데 기본적인 자료로 제공하였으며, 또한 제시된 방법론에 의해 실험자료를 평가할 수 있는 방도가 모색되었다.

## 감 사

본 연구는 1997년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구이므로 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 1) J.F. Griffiths and J.A. Barnard, "Flame and Combustion", 3rd ed., Blackie Academic & Professional(1995).
- 2) 이수경, 하동명, "최신화공안전공학", 동화기술(1997).
- 3) 柳生昭三, "引火溫度-爆發限界關界線圖", 安全工學, Vol. 24, No. 3, 152(1985).
- 4) 柳生昭三, "引火溫度-爆發限界關界線圖 (2)~(12)", 安全工學, Vol. 24, No. 5, 210(1985) ~ Vol. 26, No. 5, 299(1987).
- 5) J.C. Johnston, "Estimating Flash Point for Organic Aqueous Solution", Chem. Eng., Vol. 81, No. 25, 122(1974).
- 6) P.F. Thorne, "Flash Points of Mixtures of Flammable and Non-flammable Liquids", Fire and Materials, Vol. 1, 134(1977).
- 7) J. Gmehling and P. Rasmussen, "Flash Points of Flammable Liquid Mixtures Using UNIFAC", Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 21, No. 2, 186(1982).
- 8) Y. Nakano, "Estimation of Flash Point of Emulsified Fuels", J. of Japan Society for Safety Engineering, Vol. 29, No. 2, 77(1990).
- 9) 하동명, 김문갑, "가연성 3성분계에 대한 인화점 예측", 한국산업안전학회, Vol. 12, No. 3, 76(1997).
- 10) J.M. Smith and H.C. Van Ness, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 4th ed., McGraw-Hill(1987).
- 11) M.G. Zabetakis, "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Liquids", US Bureau of Mines. Bulletin 627(1965).
- 12) J. Gmehling, U. Onken and W. Arlt, "Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection, Vol. 1,



Part 1~Part 7”, Deutsche Gesellschaft für  
Chemisches Apparatewesen  
(DECHEMA) (1980).

- 13) R.E. Lenga and K.L. Votoupal, “The  
Sigma-Aldrich Library of Regulatory and  
Safety Data, Vol. I ~Vol. III”, Sigma  
Chemical Company and Aldrich Chemical  
Company Inc.(1993).
- 14) D.R. Lide, “CRC Handbook of Chemistry  
and Physics”, 75th ed., CRC Press(1994).
- 15) 하동명, 이수경, “과라핀족과 올레핀족 탄  
화수소 화합물의 폭발상한계 추산”, 한국화  
재·소방학회지, Vol. 10, No. 2, 13(1996).