

# 개방식 장치를 이용한 water+2-propanol 계의 인화점 측정 및 예측 The Measurement and Prediction of the Flash Points for the Water+2-Propanol System Using Open-Cup Apparatus

하동명<sup>†</sup> · 이성진\*

Dong-Myeong Ha<sup>†</sup> · Sung-Jin Lee\*

세명대학교 보건안전공학과, \*세명대학교 임상병리학과  
(2007. 3. 13. 접수/2007. 6. 20. 채택)

## 요 약

혼합물의 인화점에 대한 지식은 산업 현장에서 화재화재 예방 및 방호를 위해서 매우 중요하다. 본 연구에서는 water+2-propanol 계의 인화점을 Tag 개방식 장치(ASTM D1310-86)를 이용하여 측정하였다. 실험값은 Raoult의 법칙, Van Laar 모델식과 NRTL 모델식에 의해 계산된 값들과 비교되었다. 그 결과, Van Laar 모델식과 NRTL(non random two liquids) 모델식에 의한 예측값이 Raoult의 법칙에 의한 예측값 보다 실험값에 더욱 근접하였다. 이는 water+2-propanol 계와 같은 비이상용액의 활동도 계수값을, Van Laar 및 NRTL 모델식이 Raoult의 법칙보다 정확하게 계산하기 때문이다. 또한, Van Laar 모델식의 실험값에 대한 모사성이 NRTL 모델식의 그것 보다 우수하였다.

## ABSTRACT

The knowledge of the flash point of the mixtures is very important for prevention and protection of fire in the industrial field. The flash points for the water+2-propanol system were measured by using Tag open-cup apparatus(ASTM D1310-86). The experimental data were compared with the values calculated by the Raoult's law, the Van Laar equation and the NRTL(Non Random Two Liquids) equation. The calculated values based on the Van Laar and NRTL equations were found to be better than those based on the Raoult's law. It was concluded that Van Laar and NRTL equations were more effective than the Raoult' law at describing the activity coefficients for non-ideal solution such as the water+2-propanol system. And the predictive curve of the flash point prediction model based on the Van Laar equation described the experimentally-derived data more effectively than was the case when the prediction model was based upon the NRTL equation.

**Keywords :** Flash point, Tag open-cup apparatus, Water+2-Propanol system, Van Laar equation, NRTL equation

## 1. 서 론

인화점은 기체 또는 휘발성 액체에서 발생하는 증기가 공기와 섞여서 가연성 혼합기체를 형성하고, 여기에 불꽃을 가까이 했을 때 순간적으로 섬광을 내면서 인화되는 최저 온도로 정의된다. 인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 하부인화점을 인화점이라 한다.<sup>1)</sup>

인화점 측정 장치로는 ASTM D56의 Tag 밀폐식, ASTM D1310의 Tag 개방식, ASTM D92의 Cleveland

개방식, ASTM D93의 Pensky-Martens 밀폐식, ASTM D3278의 Setaflash 밀폐식, ASTM D3828의 Small Scale 밀폐식 장치 등이 있다.<sup>2)</sup> 또한, Yagy<sup>3)</sup>가 고안한 밀폐식 인화점 측정 장치가 있다. 이 가운데 ASTM D1310의 Tag 개방식 장치는 본 실험에서 사용된 장치로서 순수물질 및 혼합물의 하부 인화점을 효과적으로 측정할 수 있는 장점을 지니고 있다.

지금까지 발표된 밀폐식을 이용한 대표적인 인화점 연구를 살펴보면, Affens과 McLaren<sup>4)</sup>은 순수 탄화수소와 다성분계 혼합물의 인화점 예측에 관한 연구를 수행하였고, Wu와 Finkelman<sup>5)</sup>은 Setaflash 밀폐식 장치를 이용한 인화점 측정 및 예측에 관한 연구를 하였으

<sup>†</sup> E-mail: hadm@semyung.ac.kr(www.chollian.net/~hadm)

며, Gmehling과 Rassmussen<sup>6)</sup>은 가연성 삼성분계 혼합물을 그룹기여 모델식인 UNIFAC 식을 이용하여 인화점을 예측하였다. Hanley<sup>7)</sup>는 다성분계 밀폐식 인화점 계산을 위한 모델식을 제시하였으며, Mitchell 등<sup>8)</sup>은 산업 현장에서 많이 사용되는 아민계의 인화점을 측정하였고, Jones 등<sup>9)</sup>은 Formic Acid의 인화점 측정값에 대한 신뢰도를 평가하였다. Ha 등<sup>10)</sup>은 유통법을 이용한 2성분계 가연성 액체 혼합물의 하부 및 상부 인화점을 측정하였으며, 측정된 자료를 이용하여 인화점 예측 방법을 연구하였다. 최근 Ha 등<sup>11,12)</sup>은 Pensky-Martens 밀폐식 장치를 이용하여 가연성/가연성 혼합물과 가연성/난연성 혼합물의 인화점 측정 및 예측을 연구하였다. Liaw 등<sup>13)</sup>은 가연성 3성분계 인화점 예측 모델을 연구하였으며, Catoire 등<sup>14)</sup>은 가연성 혼합물의 인화점에 대한 실험 및 예측 방법을 연구하였다.

그동안 밀폐식에 의한 인화점 연구가 대부분이며, 개방식에 연구는 그리 많지 않은 편이다. 특히 개방식 인화점 가운데 가연성/난연성 혼합물의 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 그러나 지금까지 발표된 개방식을 이용한 인화점 연구로 Walsham<sup>15)</sup>은 Tag 개방식 장치를 이용한 인화점 예측 방법을 제시하였으며, Ellis<sup>16)</sup> 역시 Tag 개방식 인화점 문헌의 자료를 이용하여 예측 방법을 연구하였다. 최근 Ha 등<sup>17,18)</sup>은 Tag 개방식 장치에 의해 가연성/가연성 혼합물의 인화점을 측정하였으며, 용액열역학(solution thermodynamics) 개념을 도입하여 혼합물의 인화점 예측 방법을 연구한 바 있다. 산업현장에서는 화재 예방을 목적으로 가연성물질에 난연성물질을 첨가하는 경우가 있는데, 이럴 경우 실험 자료의 신뢰성을 평가하기 위해 이들 혼합물의 인화점에 관한 연구는 충분히 수행되어야 하나 그렇지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 난연성물질인 물(water)과 가연성물질인 2-프로판올(2-propanol)의 혼합물에 대해 Tag 개방식 장치를 이용하여 인화점을 측정하였고, 이를 이상용액 표현식인 Raoult의 법칙, 비이상용액 표현식인 Van Laar 모델식과 NRTL(non random two liquids) 모델식<sup>19)</sup>을 토대로 계산된 값과 비교하였다. 본 연구에서 얻은 자료는 화재 및 폭발을 방지하는 기초 자료로 제공하고자 하며, 가연성/난연성 혼합물의 인화점을 예측하는 방법론으로 활용되기를 기대한다.

## 2. 용액열역학 이론에 의한 가연성과 난연성 혼합물의 인화점 예측

가연성 혼합용액의 인화점 측정에 있어서 기-액 평

형 상태가 유지된다고 가정하면, 부분증기압은 수정된 Raoult의 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_i = p_i^0 \alpha_i = p_i^0 \gamma_i x_i \quad (1)$$

여기서,  $p_i$ 는  $i$  성분의 부분증기압[mmHg]이고,  $p_i^0$ 는  $i$  성분의 증기압[mmHg],  $\gamma_i$ 는  $i$  성분의 활동도계수,  $x_i$ 는  $i$  성분의 조성[mole fraction],  $\alpha_i$ 는  $i$  성분의 활동도이다.

또한, Clausius-Clapeyron 식을 이성분계에 적용하면 다음과 같이 표현된다.<sup>19)</sup>

$$d\left(\frac{\ln p_i}{dT}\right) = \frac{\Delta H_i}{(RT)^2} \quad (2)$$

식 (2)를 적분하면,

$$\ln\left(\frac{p_i}{p_{i,0}}\right) = \left[\frac{\Delta H_i}{R}\right] \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right] \quad (3)$$

이를 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\ln p_i = \ln(p_{i,0}^0) + \left[\frac{\Delta H_i}{R}\right] \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right] \quad (4)$$

식 (1)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\ln p_i = \ln(p_{i,0}^0 \alpha_i) + \left[\frac{\Delta H_i}{R}\right] \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right] \quad (5)$$

여기서,  $R$ 은 기체상수,  $p_{i,0}^0$ 는  $i$  성분의 표준증기압,  $\Delta H_i$ 는 혼합물의 인화점에서 예측된 증발엔탈피[kJ/mol],  $T_0$ 는 순수 가연성물질의 인화점[K],  $T$ 는 혼합물의 인화점[K]이 된다.

또한 식 (5)에서  $p_{i,0}^0$ 는 다음의 Antoine 식<sup>21)</sup>에 의해 계산할 수 있으며, Antoine 상수<sup>19)</sup>는 Table 1에 제시하였다.

$$p_{i,0}^0 = A_i - \frac{B_i}{t + C_i} \quad (6)$$

액상이 주위의 열에 의해 증기가 발생될 때 첨가제가 없는 상태에서 불꽃(flash)이 폭발하한계에서 발생하였다면, 가연성 성분의 부분증기압과 표준증기압의 관계는 다음과 같이 가정할 수 있다.

Table 1. Antoine constants for water and n-propanol

Components	Properties		
	A	B	C
Water	8.07131	1730.63	233.426
2-Propanol	8.87829	2010.330	252.636

$$p_2 = p_{2,0}^0 = \text{constant} \quad (7) \quad \text{같이 정리된다.}$$

여기서, 아래첨자 2는 가연성 성분을 나타낸다.

식 (7)을 식 (5)에 대입하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \left( \frac{R}{\Delta H_2} \right) (\ln \alpha_2) \quad (8)$$

식 (8)을 인화점 예측식으로 전개하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \left( \frac{R}{\Delta H_2} \right) (\ln \gamma_2 x_2) \quad (9)$$

본 연구에서는 식 (9)을 만족하는 혼합물의 인화점 (T)을 구할 경우, 활동도계수는 Van Laar 모델식과 NRTL 모델식을 각각 이용하여 계산하였으며, 우선 Van Laar의 활동도 계산식은 다음과 같다.

$$\ln \gamma_i = A_{ij} \left( \frac{A_{ji} x_j}{A_{ij} x_i + A_{ji} x_j} \right)^2 \quad (10)$$

여기서  $A_{12}$ 와  $A_{21}$ 는 Van Laar 상수으로써, 기액평형자료 (vapor-liquid equilibrium data)가 있는 경우에는 이들 값들이 문헌<sup>20)</sup>에 제시되고 있다.

NRTL의 활동도계수 계산식은 다음과 같다.

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^m \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{l=1}^m G_{li} x_l} + \sum_{j=1}^m \frac{x_j G_{ij}}{\sum_{l=1}^m G_{lj} x_l} \left( \tau_{ij} - \frac{\sum_{r=1}^m x_r \tau_{rj} G_{rj}}{\sum_{l=1}^m G_{lj} x_l} \right) \quad (11)$$

여기에서,  $\tau_{ji}$ 와  $G_{ji}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ji} = \frac{g_{ji} - g_{ii}}{RT}$$

$$G_{ji} = \exp(-\alpha_{ji} \tau_{ji}) \quad (\alpha_{ji} = \alpha_{ij})$$

이들 Van Laar 모델식과 NRTL 모델식의 이성분계 파라미터<sup>20)</sup>는 Table 2에 제시한다.

한편, 식 (9)에 Raoult의 법칙을 적용한다면, 다음과

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \left( \frac{R}{\Delta H_2} \right) (\ln x_2) \quad (12)$$

따라서, Raoult의 법칙에 근거한 혼합물의 인화점은 식 (12)를 만족하는 T에 해당한다.

또한, 혼합물의 인화점을 예측을 위해서는 혼합물의 증발엔탈피( $\Delta H_i$ )를 필요로 한다. 증발엔탈피는 온도의 함수로서 Watson 식<sup>19)</sup>을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta H_{v1} = \Delta H_{v2} \left( \frac{1 - T_{r2}}{1 - T_{r1}} \right)^n \quad (13)$$

여기서  $T_{r1}$ 은  $T_b/T_c$ 이고,  $T_{r2}$ 은  $T_f/T_c$ 이다. 이것을 식 (13)에 대입하면,

$$\Delta H_{vf} = \Delta H_{vb} \left( \frac{1 - \frac{T_f}{T_c}}{1 - \frac{T_b}{T_c}} \right)^n \quad (14)$$

여기서  $\Delta H_{vf}$ 은 인화점 온도에서의 증발엔탈피 [KJ/mol]이고,  $\Delta H_{vb}$ 는 정상끓는점에서의 증발엔탈피 [KJ/mol]이고,  $T_b$ 는 정상끓는점 [K]이고,  $T_c$ 는 임계 온도 [K]이고,  $T_f$ 는 인화점 [K]이고,  $n$ 은 0.375 또는 0.38이다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

본 장치는 혼합물의 인화점 측정에 효과적인 장치로서 널리 사용되고 있으며, Fig. 1에 제시하였다. 실험 절차는 ASTM D1310-86(Standard Test Method for Flash Point and Fire Point of Liquids by Tag Open-cup Apparatus)의 규정을 준수했다.<sup>17,18)</sup>

실험에 사용한 태그 개방식 측정 장치는 크게 시료 컵(sample cup), 온도조절기(temperature controller), 물 항온조(water bath), 시험염 발생 장치(test flame device), 온도계(thermometer), 배수로(overflow path) 등으로 구성되어 있으며, 부가 장치로는 시료컵의 시료 수위를 조절할 수 있는 레벨 게이지(level gauge)가 있다.

Table 2. The binary parameters of the Van Laar and NRTL equations for the water+2-propanol systems

System	Van Laar		NRTL*		
	$A_{12}$	$A_{21}$	$A_{12}$	$A_{21}$	$\alpha_{12}$
Water+2-propanol	1.0937	2.4807	1642.6737	306.7771	0.4915

\*NRTL :  $A_{12} = g_{12} - g_{11}$ ,  $A_{21} = g_{21} - g_{22}$  [cal/mol]

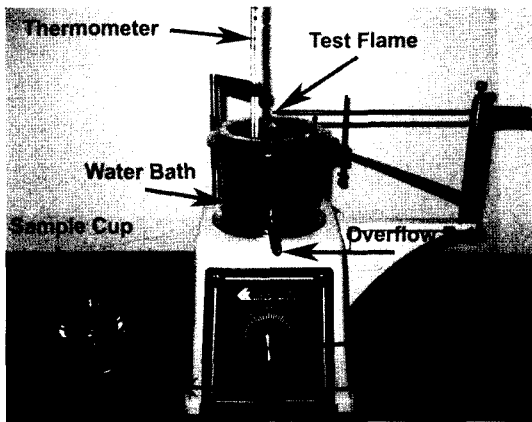


Fig. 1. Photograph of the experimental apparatus.

### 3.2 실험시약

물은 J.T Baker 사의 증류수를 사용하였고, 2-프로판올은 KANTO 회사(99.5%)의 시약을 사용하였으며, 각 시약은 별도의 정제과정을 거치지 않았다. 이들 시약을 각각 다른 몰비(mole fraction)로 혼합하여 실험에 사용하였다.

### 3.3 실험방법

본 연구에서의 실험은 ASTM D1310-86의 규정에 따라 진행했으며, 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 시약을 각각 실험하고자 하는 몰비(mole fraction)로 혼합하였다.
- 2) 혼합물 시료 70 ml를 시료컵에 넣고, 예측 인화점보다 약 20°C 낮은 온도부터 가열하였다.
- 3) 온도는 1±0.25°C/min의 속도로 상승되도록 조절하였다.
- 4) 온도가 0.5°C 증가할 때마다 시험염을 가연성 액체 표면에 1초 동안 접근시켰다.
- 5) 불꽃이 발생하는 최초의 온도를 하부 인화점으로 결정하였다.
- 6) 이와같은 과정을 여러번 반복하여 최적값을 선정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 실험에서 얻어진 water+2-propanol 계의 인화점 측정값을 이론식에 의한 예측값과 비교 검토하였다. water+2-propanol 계의 인화점 자료가 이상용액과 비이상용액의 성질 가운데 어느 용액의 성질을 지니고 있는지 살펴보기 위해서 이상용액으로 가정할 경우 Raoult의 법칙을 적용하였고, 비이상용액인 경우

Table 3. The comparison of the experimental and calculated flash points by the Raoult's law, Van Laar equation and NRTL equation for the water(X<sub>1</sub>)+2-propanol(X<sub>2</sub>) system

Mole fractions		Flash points (°C)			
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Exp.	Raoult	Van Laar	NRTL
0.9480	0.0520	41.00	78.89	33.07	28.21
0.9000	0.1000	31.00	60.72	28.21	26.43
0.7000	0.3000	27.00	36.97	25.58	25.98
0.4990	0.5010	23.00	27.71	23.81	23.64
0.3030	0.6970	21.00	22.19	21.15	20.90
0.1090	0.8910	18.50	18.28	18.18	18.13
0.0000	1.0000	16.50	-	-	-
A.A.D		-	13.95	2.24	2.78
A.A.P.E.		-	42.09	6.59	7.86

에는 활동도계수를 이용한 예측식을 사용하였다. 예측 방편론은 2절에 이미 제시하였다.

실험자료의 신뢰성 고찰을 위해 비이상용액인 경우 활동도계수의 계산이 필요하며, 이 계산을 위해 기액 평형 자료가 있어야 한다. 기액평형 자료는 DECHEMA 문헌<sup>20)</sup>에서 얻었으며, Van Laar 식과 NRTL 식을 이용하여 활동도계수를 계산한 후 인화점을 예측하였다.

Table 3에서는 실험값과 이론식(Raoult의 법칙, Van Laar 모델식 및 NRTL 모델식)에 의한 계산값을 비교하여 나타내었고, 실험값과 계산값의 차이를 알기 위해 다음의 A.A.D.(Average Absolute Deviation) 값과 A.A.P.E.(Average Absolute Percent Error)를 이용하였다.<sup>21)</sup>

$$A.A.D. = \sum_{i=1}^N \frac{|T_i^{cal} - T_i^{exp}|}{N} \quad (15)$$

$$A.A.P.E. = \sum_{i=1}^N \frac{|T_i^{cal} - T_i^{exp}|}{T_i^{exp}} \times 100 \quad (16)$$

여기서, T<sup>cal</sup>는 모델식에 의해 추산된 인화점, T<sup>exp</sup>는 실험값, N은 자료수이다.

실험값과 각 모델식에 의한 예측값을 비교한 결과를 보다 쉽게 볼 수 있도록 Fig. 2에 나타내었다.

Table 3에서 알 수 있듯이, Raoult의 법칙에 근거한 계산값과 실험값의 A.A.P.E.는 42.09%이고 평균 온도 차이(A.A.D.)는 13.95°C이며, Van Laar 모델식에 의한 계산값과 실험값의 A.A.P.E.는 6.59%이고 평균 온도 차이는 2.24°C이다. 또한, 실험값과 NRTL 모델식에 의한 계산값의 A.A.P.E.는 7.86%이고 평균 온도 차이는

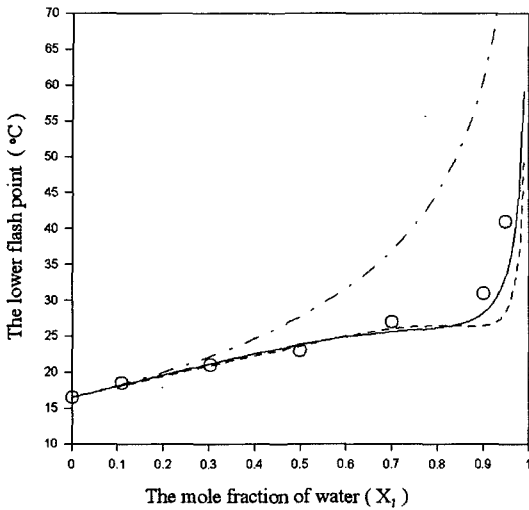


Fig. 2. The comparison of the experimental flash points and the estimated flash points for water( $X_1$ )+2-propanol( $X_2$ ) system: The calculated values based on the Raoult's law (-----): The calculated values based on the Van Laar equation (—): The calculated values based on the NRTL equation (- - -): The experimental lower flash points by this work (O O).

2.78°C이다.

따라서, 활동도계수 모델식인 Van Laar 식과 NRTL 식이 이상용액 모델인 Raoult의 법칙에 의한 예측값 보다 실험값에 더욱 접근할 수 있음을 확인하였다. 이는 water+2-propanol 계와 같은 비이상용액의 활동도 계수 값을, Van Laar 및 NRTL 모델식이 Raoult의 법칙보다 정확하게 계산하기 때문이다. 또한, Van Laar 모델식의 실험값에 대한 모사성이 NRTL 모델식의 그것 보다 우수함을 확인하였다. 특히 2-프로판올의 조성이 0.9까지는 실험값과 Van Laar 모델식에 의한 계산값이 거의 일치하고 있다. 또한, 순수물질인 2-프로판올의 인화점이 16.5°C로 측정되었다. 2-프로판올의 경우 다른 문헌들<sup>22-24)</sup>에서 개방식 인화점으로 14.4°C와 17.2°C로 제시되고 있으므로 본 연구에서 측정된 인화점 값이 타당하다고 사료된다. 그 이유는 본 연구에서 측정된 인화점 값과 문헌값들이 약간의 차이를 보이는 것은 개방식 장치 특성들에서 오는 차이이기 때문이다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 인화점은 물의 몰분율 0.9까지는 완만한 증가를 보였지만, 0.9 이상에서는 급속한 증가를 보여주고 있다. 이는 water+2-propanol 계를 취급하는 공정에서 화재 및 폭발을 방지하는 중요한 자료로 이용될 것이라 사료된다.

본 연구에서 제시한 예측 방법론을 통해 산업현장에

서 다양하게 사용되고 있는 여러 가연성/난연성 혼합물의 인화점 예측이 가능해 졌으므로, 혼합물을 취급하는 공정에서 안전(화재예방)을 확보하기 위해 이용되기를 기대한다.

## 5. 결 론

Tag 개방식 장치를 이용하여 난연성/가연성 혼합물인 water+2-propanol 계의 인화점을 측정하였고, 측정된 값과 액체 혼합열역학(liquid mixture thermodynamics) 개념에 의한 계산값을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2-프로판올의 인화점은 16.5°C로 측정되었다.

(2) Water+2-propanol 계에서, Raoult의 법칙에 근거한 계산값과 실험값의 A.A.P.E.는 42.09%이고 평균 온도 차이(A.A.D.)는 13.95°C이며, Van Laar 모델식에 의한 계산값과 실험값의 A.A.P.E.는 6.59%이고 평균 온도 차이는 2.24°C이다. 또한, 실험값과 NRTL 모델식에 의한 계산값의 A.A.P.E.는 7.86%이고 평균 온도 차이는 2.78°C이다.

(3) Water+2-propanol 계에서의 인화점은 물의 몰분율이 0.9까지는 완만한 증가를 보였지만, 0.9 이상에서는 급속한 증가를 보여주고 있다.

(4) 가연성과 난연성의 2성분계 혼합물에 대한 개방계 인화점 예측 모델을 전개하였다.

(5) Water+2-propanol 계의 개방식 인화점 자료는 산업현장에서 취급, 저장, 수송에 있어 안전성을 확보하는데 중요한 자료로 제공되었다.

## 사용기호

$A_{ij}$  : the binary parameter of the NRTL equation or Van Laar equation

$N$  : the number of data

$\Delta H_i$ : the enthalpy of vaporization at the flash point(kJ/mol)

$p_i$  : the partial vapor pressure of  $i$  component (mmHg)

$p_i^0$  : the vapor pressure of  $i$  component (mmHg)

$p_{i,0}^0$ : the saturated vapor pressure of  $i$  component at  $T_0$

$R$  : the gas constant, 8.314( J/mole/K)

$T$  : the flash point of the liquid mixture(K)

$T_0$  : the flash point of pure flammable component(K)

$T_{est.}$ : the estimated flash point of the liquid mixture(K)

$T_{exp.}$ : the experimental flash point of the liquid mixture (K)

- $x_i$  : the mole fraction of i component
- $\chi_1$  : the mole fraction of 1 component(water)
- $\chi_2$  : the mole fraction of 2 component(2-propanol)
- $\alpha_i$  : the activity of i component
- $\gamma_i$  : the activity coefficient of i component

### 참고문헌

1. F.P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries Vol. 1", 2nd ed., Oxford Butterworth-Heinemann (1996).
2. R.C. Lance, A.I. Barnard, and J.E. Hooyman, "Measurement of Flash Points, Apparatus, Methodology, Applications", J. of Hazardous Materials, Vol. 3, pp.107-119(1979).
3. S. Yagyu, "Diagram Relationship Between the Flash Point and Flammability Limit", J. of Japan Society for Safety Engineering, Vol. 24, No. 3, pp.152-158(1985).
4. W.A. Affens and G.W. McLaren, "Flammability Properties of Hydrocarbon Solutions in Air", J. of Chem. Eng. Data, Vol. 17, No. 4, pp.482-488 (1972).
5. D.T. Wu and R. Finkelmen, "A Mathematical Model for the Prediction Closed Cup Flash Points", American Chemical Society, Division of Organic Coatings and Plastics Chemistry, pp.61-67(1978).
6. J. Gmehling and P. Rasmussen, "Flash Points of Flammable Liquid Mixtures Using UNIFAC", Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 21, No. 2, pp.186-188 (1982).
7. B.F. Hanley, "A Model for the Calculation and the Verification of Closed Flash Points Multicomponent Mixtures", Process Safety Progress, Vol. 17, No. 2, pp.86-97(1998).
8. J.W. Mitchell *et al.*, "Experimental Flash Points of Industrial Amines", J. of Chem. Eng. Data, Vol. 44, No. 2, pp.209-211(1999).
9. J.C. Jones and J. Godefroy, "A Reappraisal of the Flash Point of Formic Acid", J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 15, No. 3, pp.245-247(2002).
10. D.M. Ha, Y.S. Mok, and J.W. Choi, "Flash Points of a Flammable Liquid Mixture of Binary System", HWAHAK KONGHAK, Vol. 37, No. 2, pp.146-150(1999).
11. D.M. Ha, Y.C. Choi, and S.J. Lee, "The Lower Flash Point of the n-Butanol+n-Decane System", T. of Korean Institute of Fire & Eng., Vol. 17, No. 2, pp.50-55(2003).
12. D.M. Ha, Y.C. Choi, J.G. Han, S.J. Lee, and S.K. Lee, "Measurement and Estimation of the Lower Flash Points of Binary Systems Containing Non-flammable Component by Closed Cup Tester", Proceedings of the Sixth Asia-Oceania Symposium of Fire Science and Technology, pp.394-399, Daegu, Korea(2004).
13. H.J. Liaw, C.L. Tang, and J.S. Lai : "A Model for Predicting the Flash Point of Ternary Flammable solution of Liquid", Combustion and Flame, Vol. 138, pp.308-319(2004).
14. L. Catoire, S. Paulmier and V. Nauder : "Experimental Determination and Estimation of Closed Cup Flash Points of Mixtures of Flammable Solvent", Process Safety Progress, Vol. 25, No. 1, pp.33-39(2006).
15. J.G. Walsham, "Prediction of Flash Points for Solvent Mixtures", Advan. Chem. Ser. Publ. 73 Ser. 124, American Chemical Society, Washington, DC, pp.56-59(1973).
16. W.H. Ellis, "Solvent Flash Points-Expected and Unexpected-", J. of Coating Technology, Vol. 48, pp.44-57(1976).
17. D.M. Ha, "Measurement and Prediction of the Lower Flash Point for n-Propanol+n-Decane System Using the Tag Open-Cup Tester", J. of the Korean Society of Safety Vol. 20, No. 2, pp.162-168(2005).
18. D.M. Ha, S.J. Lee, and Y.H. Song, "Measurement and Prediction of the Flash Point for the Flammable Binary Mixtures using Tag Open-Cup Apparatus", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 43, No. 1, pp.181-185(2005).
19. C.R. Reid, J.M. Prausnitz, and B.E. Poling, "The Properties of Gases and Liquids", 4th ed., McGraw-Hill(1988).
20. J. Gmehing, U. Onken, and W. Arlt, "Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection", Vol. 1, Part1-Part7, DECHEMA(1980).
21. D.M. Ha, "A Study on Explosive Limits of Flammable Materials", J. of the Korean Institute for Industrial Safety, Vol. 16, No. 4, pp.103-108(2001).
22. R.M. Stephenson, "Flash Points of Organic and Organometallic Compounds", Elsevier(1987).
23. NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, NFPA(1991).
24. D.R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics", 76th ed., CRC Press, Boca Raton(1995).