

# 개방식 장치를 이용한 가연성 2 성분계 혼합물의 인화점 및 연소점 측정 및 예측

하 동 명

세명대학교 보건안전공학과  
(2006. 12. 21. 접수 / 2007. 3. 2. 채택)

## Measurement and Prediction of the Flash Points and the Fire Points for the Flammable Binary Mixtures Using Open-cup Apparatus

Dong-Myeong Ha

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University  
(Received December 21, 2006 / Accepted March 2, 2007)

**Abstract** : The flash points and the fire points for the m-xylene+n-propionic acid and n-butanol+n-pentanol systems were measured by using Tag open-cup apparatus(ASTM D 1310-86). The experimental flash points of two binary systems were compared with the values calculated by the Raoult's law, Van Laar equation and Wilson equation. The calculated values based on the Raoult's law on m-xylene+n-propionic acid system were found to be better than those based on Van Laar and Wilson equations. The calculated values based on Van Laar equation on n-butanol+n-pentanol system were found to be better than those based on the Raoult's law and Wilson equation. The the fire points for the m-xylene+n-propionic acid system were about 7~8°C above the flash points. In the case of n-butanol+n-pentanol system, the flash points and the fire points had been found to be identical.

**Key Words** : flash point, fire point, tag open-cup apparatus, m-xylene+n-propionic acid system, n-butanol+n-pentanol system, The Raoult's law, Van Laar equation, Wilson equation

### 1. 서 론

인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나누고 있으며, 일반적으로 하부인화점을 인화점이라 한다. 인화점은 가연성 액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로써, 가연성액체의 액면 가까이서 인화할 때 필요한 증기를 발산하는 액체의 최저온도로 정의한다<sup>1)</sup>. 연소점은 석유화학산업에서 발생할 수 있는 액면 화재(pool fire) 예방을 위한 중요한 자료로써, 가연성 액체 표면에 시험염(pilot flame)을 접촉시켰을 때 5 초간 발염연소를 지속하는 액체의 온도를 말한다. 인화점은 여러 문헌에서 소개가 되고 있지만, 연소점에 관련된 문헌은 소수에 불과하다. 대부분의 문헌들에서는 연소점이 인화점보다 약간 높으며, 물질에 따라 약간의 차이는 있지만 인화점이 40°C 이하인 물질에서는 연소점이 인화점 보다 3~10°C 정도 높

다고 보고되고 있다<sup>2)</sup>.

특히 석유 탱크에서 화재가 발생하면 탱크화재로 되며, 지진이나 사고로 인해 석유류 탱크에서 석유류가 유출하여 방유제에 고인 후 착화하면 방유제 화재가 된다. 이와 같이 액면(pool) 상태에서의 화재를 통칭하여 액면화재라고 하며, 만일 화재가 발생 되면 매우 큰 피해를 초래하게 되는데 이를 예방하기 위해서는 연소점에 관한 지식이 반드시 필요하다.

개방식 장치를 이용한 인화점 연구로 Walsham<sup>3)</sup>은 Tag 개방식 장치를 이용한 인화점 예측 방법을 제시 하였으며, Ellis<sup>4)</sup> 역시 Tag 개방식 인화점 문헌의 자료를 이용하여 예측 방법을 연구하였다. White 등<sup>5)</sup>은 항공연료의 화염전파 연구를 위해 인화점과 연소점을 연구한 바 있다. 최근 Ha 등<sup>6)</sup>은 Tag 개방식 장치에 의한 n-propanol+n-decane 혼합물의 인화점 측정 및 예측 방법을 연구한 바 있다.

연소점은 대부분 순수물질에 국한되어 연구되고 있으며, Roberts 등<sup>7)</sup>은 7개의 순수물질에 대해 연소

점을 측정하여 화학양론에서 얻은 각 증기압의 관계를 고찰하였으며, Jones<sup>8)</sup>는 4개의 순수물질에 대한 증기압에 대한 1.5배 화학양론법칙을 제시한 바 있다. 최근 Ha 등<sup>9,10)</sup>은 개방식장치를 이용하여 알콜류의 연소점에서의 증기압에 대한 0.78배 화학양론법칙을 제시하였으며, 방향족탄화수소의 연소점에서의 증기압에 대한 1.23배 화학양론법칙을 제시하였다.

본 연구에서는 ASTM D 1310<sup>11)</sup>의 Tag식 개방계 장치를 이용하여 가연성 혼합물인 m-xylene+ n-propionic acid 계와 n-butanol+n-pentanol계에 대해 인화점과 연소점을 측정하였고, 측정된 인화점의 경우는 용액 열역학(solution thermodynamics)의 개념을 이용하여 Raoult의 법칙, 활동도계수 계산식인 Van Laar식과 Wilson식을 이용한 계산값과 비교 검토하였다. 여기서, 얻은 자료는 화재 및 폭발을 방지하는 자료로 제공하고자 하며, 제시된 혼합물의 인화점 예측하는 방법은 다른 혼합물의 인화점을 연구하는데 활용되기를 기대한다. 또한 순수물질 및 혼합물질의 연소점 자료는 액면 화재의 예방 자료로 이용하는데 있다.

## 2. 개방식 장치에 의한 2성분계 인화점 예측 모델 전개

가연성 혼합용제의 Tag식 개방계 인화점은 이상 용액(ideal solution)인 경우 Raoult의 법칙을 이용하여 예측할 수 있으며, 비이상용액(non-ideal solution)에 대해서는 활동도계수(activity coefficient) 모델을 이용하여 예측할 수 있다.

다성분계(multicomponent system)의 가연성 증기와 공기의 혼합물에 대한 Le Chatelier의 법칙은 다음과 같이 전개된다<sup>12)</sup>.

$$\sum_{i=1}^N \frac{y_i}{LFL_i} = 1 \quad (1)$$

여기서  $y_i$ 는  $i$  성분의 기상조성,  $LFL_i$ 는 순수성분  $i$ 의 폭발하한계이다.

인화점의 정의로부터  $LFL_i$ 는 인화점의 포화증기압( $P_{i,jp}^{sat}$ )과 관계있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LFL_i = \frac{P_{i,jp}^{sat}}{P} \quad (2)$$

여기서  $P$ 는 대기압이다.

기상 조성  $y_i$ 는 기액평형(VLE, vapor-liquid equilibrium)으로부터 유도할 수 있다.

혼합물의 모든 조성에 대해, 같은 온도와 압력에서 기상과 액상 사이의 평형조건에서는 다음과 같이 표현된다<sup>13)</sup>.

$$y_i \Phi_i P = x_i \gamma_i f_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

낮은 압력에서 기상은 이상기체에 접근되므로, 기상에서의 퓨게시티 계수( $\Phi_i$ , fugacity coefficient)는 1로 볼 수 있다.

$$\Phi_i = 1 \quad (4)$$

그리고 계의 온도와 압력에서 순수성분  $i$ 의 퓨게시티( $f_i$ )는 다음과 같이 간략히 될 수 있다.

$$f_i \cong P_i^{sat} \quad (5)$$

여기서  $P_i^{sat}$ 는  $i$ 성분의 포화증기압이다.

따라서 기액평형 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i P = x_i \gamma_i P_i^{sat} \quad (6)$$

혹은

$$y_i = \frac{x_i \gamma_i P_i^{sat}}{P} \quad (7)$$

식 (2)와 식 (7)을 식 (1) 대입하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i \gamma_i P_i^{sat}}{P_{i,jp}^{sat}} = \frac{x_1 \gamma_1 P_1^{sat}}{P_{1,jp}^{sat}} + \frac{x_2 \gamma_2 P_2^{sat}}{P_{2,jp}^{sat}} = 1 \quad (8)$$

이상용액인 경우 활동도계수( $\gamma_i$ )는 1이 되므로, 식 (8)은 다음 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i P_i^{sat}}{P_{i,jp}^{sat}} = \frac{x_1 P_1^{sat}}{P_{1,jp}^{sat}} + \frac{x_2 P_2^{sat}}{P_{2,jp}^{sat}} = 1 \quad (9)$$

인화점을 계산하기 위해 순수성분  $i$ 에 대해 온도 변화에 따른 포화 증기압력은 Antoine식을 사용하여 예측할 수 있다<sup>14)</sup>.

$$\log P_i^{sat} = A_i - \frac{B_i}{T + C_i} \quad (10)$$

여기서  $A_i$ ,  $B_i$  그리고  $C_i$ 는 Antonine 상수이고,  $T$ 는 온도(°C)이다.

따라서 이상용액의 개념을 적용할 경우에는 Raoult의 법칙을 사용하며, 비이상용액의 경우에는 Van Laar식<sup>15)</sup>과 Wilson 식<sup>15)</sup>을 이용하여 활동도계수를 계산할 수 있다. 인화점 예측 이론을 2성분계 혼합물에 적용하기 위해 활동도 계산식인 Van Laar식과 Wilson 식을 간략히 소개하면 다음과 같다.

Van Laar식의 활동도계수 식은 다음과 같다.

$$\ln \gamma_1 = A_{12} \left( \frac{A_{21} x_2}{A_{12} x_1 + A_{21} x_2} \right)^2 \quad (11)$$

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

여기서  $A_{12}$ 와  $A_{21}$ 는 상호작용 파라미터로서, 문헌<sup>15)</sup>에서 찾을 수 있다.

또한 2 성분계 및 다성분계 적용 시 Wilson식을 이용하여 활동도계수를 추산할 수 있는데, 2 성분계에 적용하기 위한 활동도계수 추산식은 다음과 같다.

$$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + A_{12} x_2) + x_2 \left( \frac{A_{12}}{x_1 + A_{12} x_2} - \frac{A_{21}}{A_{21} x_1 + x_2} \right) \quad (13)$$

$$\ln \gamma_2 = -\ln(x_2 + A_{21} x_1) - x_1 \left( \frac{A_{12}}{x_1 + A_{12} x_2} - \frac{A_{21}}{A_{21} x_1 + x_2} \right) \quad (14)$$

이들 식에서 2성분계인 경우는  $A_{12}$ 와  $A_{21}$  두 개의 매개변수가 필요하며, 이 매개변수의 일반식은 다음과 같고,

$$A_{ij} = \frac{v_j}{v_i} \exp \left[ -\frac{(\lambda_{ij} - \lambda_{ii})}{RT} \right] \quad (15)$$

식 (2)를 2성분계에 적용하면 다음과 같다.

$$A_{12} = \frac{v_2}{v_1} \exp \left[ -\frac{(\lambda_{12} - \lambda_{11})}{RT} \right] \quad (16)$$

여기서  $\lambda_{12} - \lambda_{11}$ 는 Wilson 상수로써 기액평형자료<sup>15)</sup>가 있는 경우 이 값들이 제시되고 있다.

### 3. 실험

#### 3.1. 실험장치 및 방법

본 장치는 가연성 혼합물의 개방계 인화점 측정이 가능한 장치로서 많이 사용되고 있으며, 실험절차는 ASTM D 1310-86(Standard Test Method for Flash Point and Fire Point of Liquids by Tag Open-cup Apparatus)에 규정되어 있다<sup>11)</sup>.

장치는 크게 시료컵, 승온 다이얼, 수조, 시험염 발생 장치 등으로 구성되어 있으며, 부가 장치로는 시료컵의 시료 수위를 조절할 수 있는 레벨수준 유지장치(level device)가 있다.

실험방법은 ASTM D 1310-86의 규격에 따라 실험하였으며, 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 시약을 각각 실험하고자 하는 몰비(mole fraction)로 혼합하였다.
- 2) 시료 70mL를 시료컵에 넣고, 예측 인화점보다 약 20°C 낮은 온도부터 가열하였다.
- 3) 승온속도를 1±0.25°C/min가 되도록 조절하였다.
- 4) 온도가 0.5°C 증가할 때마다 시험염을 가연성 액체 표면에 1초 동안 접근시켰다.
- 5) 불꽃이 발생하는 온도를 인화점으로 하였으며, 동일한 실험을 반복하였을 때 인화점 판정에 있어서의 재현성은 좋은 결과를 나타내었다.
- 6) 발화지속시간이 5초 이상일 때의 온도를 연소점으로 기록하였으며, 동일한 실험을 반복하였을 때 연소점 판정에서 재현성은 좋은 결과를 나타내었다.

#### 3.2. 실험시약

본 실험에서는 산업현장에서 널리 사용되고 있는 m-xylene, n-propionic acid, n-propanol, n-butanol를 대상으로 하였다. m-Xylene과 n-propionic acid는 Acros사(99%), n-butanol과 n-pentanol은 Junsei사(99%)의 시약을 사용하였고, 각 시약은 별도의 정제과정을 거치지 않았다.

### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 실험에서 얻어진 측정값과 이론식에서 얻어진 예측값을 비교 검토하였다.

m-Xylene+n-propionic acid계와 n-butanol+n-pentanol계의 개방식 인화점 실험 자료가 이상용액과 비이상용액의 성질 가운데 어느 용액의 성질을 지니고 있는지 살펴보기 위해서 이상용액으로 가정할 경우

**Table 1.** Antoine constants for m-xylene, n-propionic acid, n-butanol and n-pentanol

Components	Constants		
	A	B	C
m-Xylene	7.00908	1462.266	215.11
n-Propionic acid	7.99064	1929.300	236.43
n-Butanol	7.8380	1558.19	196.881
n-Pentanol	7.39824	1435.570	179.798

Raoult의 법칙을 적용하였고, 비이상용액인 경우에는 활동도계수를 이용한 예측식을 사용하였다.

실험 자료의 신뢰성 고찰을 위해 비이상용액인 경우 활동도계수의 계산이 필요하며, 이 계산을 위해 기액평형 자료가 있어야 한다. m-Xylene+n-propionic acid계와 n-butanol+n-pentanol 계의 기액평형 자료는 DECHEMA 문헌<sup>14)</sup>에서 얻었으며, Van Laar식과 Wilson식을 이용하여 활동도계수를 계산한 후 인화점을 예측하였다. Table 1에는 인화점 계산에 필요한 각 순수물질의 Antoine 상수를, Table 2에는 Van Laar와 Wilson 상수를 나타내었다<sup>15,16)</sup>.

Table 3과 4에서는 실험값과 이론식(Raoult의 법칙, Van Laar식 및 Wilson식)에 의한 예측값을 비교하여 나타내었고, 실험값과 예측값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.P.E.(average absolute percent error)와 A.A.D.(average absolute deviation)를 사용하였고, 또한 통계 분석을 위해 표준편차와 표준결정계수를 사용하였다<sup>10,17)</sup>.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{n - 1}} \quad (17)$$

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (18)$$

여기서 S는 표준편차,  $y_i$ 는 표본,  $\bar{y}_i$ 는 표본평균, n은 표본개수,  $r^2$ 는 표본 결정계수, SSR은 회귀에 의한 제곱합(sum of squares due to regression), SST는 SSR과 잔차에 의한 제곱합(sum of squares due to residual errors)의 합이다.

실험값과 Raoult의 법칙 및 Van Laar식에 의한 예측값을 비교한 결과를 보다 쉽게 볼 수 있도록 Fig. 1과 2에 나타내었다.

**Table 2.** Parameters of Van Laar and Wilson equations for each mixture systems

Systems	Parameters	Van Laar		Wilson			
		A <sub>12</sub>	A <sub>21</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>21</sub>	$v_1^L(X_1)$	$v_2^L(X_2)$
m-Xylene(X <sub>1</sub> )+n-propionic acid(X <sub>2</sub> )		0.7888	1.2835	-322.9745	1402.7793	123.47	74.98
n-Butanol(X <sub>1</sub> )+n-pentanol(X <sub>2</sub> )		0.1066	16249.6825	-516.3424	10414.6034	91.97	108.63

**Table 3.** Comparison of the experimental and calculated flash points for m-xylene(X<sub>1</sub>)+n-propionic acid(X<sub>2</sub>) system

Mole fraction		Flash points (°C)	Fire points (°C)	Raoult's law	Van Laar	Wilson
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>					
1.000	0.000	33.5	42.5	33.50	33.50	33.50
0.900	0.100	36.0	46.0	34.95	33.92	33.50
0.700	0.300	38.0	47.0	38.27	35.16	34.48
0.509	0.491	42.0	49.0	42.14	36.96	36.31
0.300	0.700	43.0	51.0	47.53	40.81	40.36
0.099	0.901	47.5	51.5	54.53	49.54	49.33
0.000	1.000	59.0	65.0	59.00	59.00	59.00
A.A.P.E.		-	-	4.19	4.95	5.68
A.A.D.		-	-	1.86	2.03	2.31

**Table 4.** Comparison of the experimental and calculated flash points for n-butanol(X<sub>1</sub>)+n-pentanol(X<sub>2</sub>) system

Mole fraction		Flash points (°C)	Fire points (°C)	Raoult's law	Van Laar	Wilson
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>					
1.000	0.000	42.0	42.0	42.50	42.50	42.50
0.909	0.091	39.0	39.0	43.23	41.61	41.97
0.703	0.297	42.0	42.0	45.00	43.58	43.46
0.499	0.501	44.0	44.0	46.97	45.81	45.86
0.298	0.702	47.0	47.0	49.15	48.36	48.59
0.095	0.905	52.5	52.5	51.68	51.38	51.54
0.000	1.000	53.0	53.0	53.00	53.00	53.00
A.A.P.E.		-	-	4.21	2.61	2.74
A.A.D.		-	-	1.81	1.14	1.19

m-Xylene+n-propionic acid계에 대한 개방식에 대해 Raoult의 법칙에 의해 계산된 값과 실험값은 A.A.P.E.가 4.19%이고, 평균온도 차이가 1.86°C이며, Van Laar식에 의해 계산된 값과 실험값은 A.A.P.E.가 4.95%이고, 평균온도 차이가 2.03°C이다. 또한 Wilson식에 의해 계산된 값과 실험값은 A.A.P.E.가 5.68%이고, 평균온도 차이가 2.31°C이다. 따라서 Raoult의 법칙에 의해 계산된 값이 다른 계산된 값보다 실험값에 더 일치하였으며, 이때의 표준편차는 3.06°C, 결정계수( $r^2$ )는 0.924로 나타났다.

n-Butanol+n-pentanol계에 대한 개방식에 대해 Raoult의 법칙에 의해 계산된 값과 실험값은 A.A.P.E.가 4.21%이고, 평균온도 차이가 1.81°C이며, Van Laar식에 의해 계산된 값과 실험값은 A.A.P.E.가 2.61%이고, 평균온도 차이가 1.14°C이다. 또한 Wilson식에 의해 계산된 값과 실험값은 A.A.P.E.가 2.74%

이고, 평균온도 차이가 1.19°C이다. 따라서 Van Laar 식에 의해 계산된 값이 다른 계산된 값보다 실험값에 더 일치하였으며, 이때의 표준편차는 1.63°C, 결정계수( $r^2$ )는 0.902로 나타났다. 특히 n-butanol+n-pentanol계는 경우 n-butanol의 조성이 0.9 부근에서 두 성분 가운데 인화점이 낮은 성분인 n-butanol의 인화점 42°C 보다 낮은 39°C의 인화점을 나타내는 최소 인화점 거동(MFPB : minimum flash point behavior)의 특성을 보이고 있다. 따라서 제시된 인화점 자료는 n-butanol+n-pentanol계를 취급하는 공정에서 중요한 자료가 된다.

m-Xylene의 인화점과 연소점은 각각 33.5°C와 42.5°C였으며, n-propionic acid의 인화점과 연소점은 각각 59.0°C와 65.0°C였다. 그러나 n-butanol은 인화점과 연소점은 동일하게 42°C로 나타났으며, n-pentanol 역시 인화점과 연소점은 동일하게 53°C로 나타났다. 또한 인화점과 연소점이 동일한 값이 측정되었는데 알코올류에 대한 인화점과 연소점 연구<sup>9)</sup>에서 알 수 있듯이 알코올류가 다른 물질에 비해 분자간의 인력이 큰 수소결합(hydrogen bond)과 휘발성 때문인 것으로 사료된다.

본 연구에서 얻은 혼합물 인화점의 실험값을 문헌값과 비교한 결과 약 1~2°C 차이를 보이므로, 제시된 예측 방법론을 이용하여 다른 혼합물의 인화점 실험 자료의 신뢰성 평가 도움을 줄 수 있다고 본다. 또한 실험에서 얻고자하는 하는 측정값의 경우 제시한 방법론을 사용하여 실험에서 소요되는 시간, 경비, 노력 등을 줄일 수 있을 것으로 본다. 특히 n-butanol+n-pentanol계의 경우 최소인화점거동(MFPB)을 보이는 계로서 용액열역학이론(solution

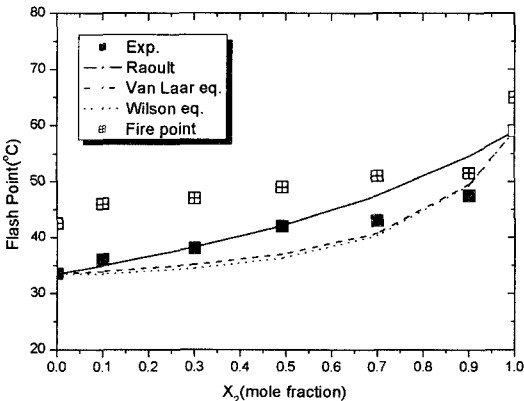


Fig. 1. Comparison of experimental and predicted lower flash points for m-xylene( $X_1$ )+n-propionic acid( $X_2$ ) system.

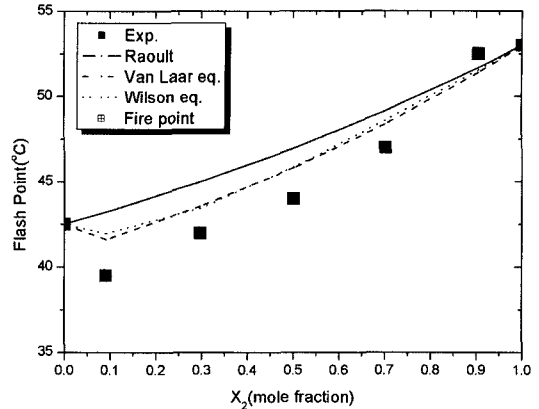


Fig. 2. Comparison of experimental and predicted lower flash points for n-butanol( $X_1$ )+n-pentanol( $X_2$ ) system.

thermodynamics theory)을 이용하여 MFPB를 예측할 수 있게 됨에 따라 혼합물을 취급하는 공정에서 안전을 확보하는데 큰 의미가 있다고 본다.

## 5. 결론

가연성 2성분계인 m-xylene+n-propionic acid계와 n-butanol+n-pentanol계에 대해 Tag식 개방식 장치를 이용하여 인화점과 연소점을 측정하였으며, 측정된 인화점은 용액열역학개념에 의한 계산값과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) m-Xylene의 인화점과 연소점은 각각 33.5°C와 42.5°C였으며, n-propionic acid의 인화점과 연소점은 각각 59.0°C와 65.0°C였다. 그러나 n-butanol은 인화점과 연소점은 동일하게 42°C로 나타났으며, n-pentanol 역시 인화점과 연소점은 동일하게 53°C로 나타났다.

2) m-Xylene+n-propionic acid계에 대한 개방식 인화점 측정값을 Raoult의 법칙에 의해 계산된 값과 실험값의 평균온도 차이가 1.86°C이며, Van Laar식에 의해 계산된 값과 실험값의 평균온도 차이가 2.03°C이다. 또한 Wilson식에 의해 계산된 값과 실험값의, 평균온도 차이가 2.31°C이다.

3) n-Butanol+n-pentanol계에 대한 개방식 인화점 측정값을 Raoult의 법칙에 의해 계산된 값과 실험값의 평균온도 차이가 1.81°C이며, Van Laar식에 의해 계산된 값과 실험값의 평균온도 차이가 1.14°C이다. 또한 Wilson식에 의해 계산된 값과 실험값의 평균온도 차이가 1.19°C이다. 특히 n-butanol의 조성이 0.9 부근에서 n-butanol의 인화점보다 낮은 인화

점이 나타나는 최소 인화점 거동(MFPB : minimum flash point behavior)의 특성을 보이고 있다.

4) m-Xylene+n-propionic acid계에 대해 개방식 인화점과 연소점을 측정된 결과, 연소점이 인화점 보다 평균 7.6℃정도 높게 측정되었으며, n-butanol+n-pentanol계의 인화점과 연소점은 동일하였다.

### 참고문헌

- 1) F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries Vol. 1", 2nd ed., Oxford Butterworth-Heinemann, 1996.
- 2) V. Babrauskas, "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, SFPE, 2003.
- 3) 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.
- 4) W. H. Ellis, "Solvent Flash Points -Expected and Unexpected-", J. of Coating Technology, Vol. 48, pp. 44~57, 1976.
- 5) D. White et. al, "Flame Spread on Aviation Fuels", Fire Safety Journal, Vol. 28, pp. 1~31, 1997.
- 6) 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.
- 7) A. F. Roberts and B. W. Quince, "A Limiting Condition for the Burning of Flammable Liquids", combustion and flame, Vol. 20, pp. 245~251, 1973.
- 8) J. C. Jones, "A Means of Calculating the Fire Points of Organic Compounds", J. of Fire Sciences, Vol. 19, pp. 62~68, 2003.
- 9) D. M. Ha, S. J. Lee and Y. H. Song, "Measurement of Fire Point and Flash Point for Alcohols using Tag Open-Cup Apparatus", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 19, No. 4, pp. 69~73, 2004.
- 10) D. M. Ha and J. G. Han, "Prediction and Measurement of Flash Point and Fire Point of Aromatic Hydrocarbons", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 9, No. 3, pp. 21~26, 2005.
- 11) R. C. Lance, A. J. Barnard and J. E. Hooyman, "Measurement of Flash Points : Apparatus, Applications", J. of Hazardous Materials, Vol. 3, pp. 107~119, 1979.
- 12) M. Vidal, W. J. Rogers, J. C. Holste, and M. S. Mannan, "A Review of Estimation Methods for Flash Points and Flammability Limits", Process Safety Progress, Vol. 23, No. 1, pp. 47~55, 2004.
- 13) J. M. Smith and H. C. Van Ness, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 4th ed., McGraw-Hill, New York, NY, 1987.
- 14) C. R. Reid, J. M. Prausnitz and B. E. Poling, "The Properties of Gases and Liquids", 4th ed., McGraw-Hill, New York, NY, 1988.
- 15) 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.
- 16) J. A. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry", 15th ed., McGraw-Hill, 1999.
- 17) D. G. Kleinbaum, L. L. Kupper and K. E. Muller, "Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods", 2nd ed., PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1988.