



라울의 법칙과 다중회귀분석법에 의한 n-Nonane+n-Decane+n-Tridecane 계의 인화점 계산

하동명 · †이성진*

세명대학교 보건안전공학과, *세명대학교 임상병리학과
(2017년 11월 8일 접수, 2018년 4월 9일 수정, 2018년 4월 10일 채택)

The Calculation of Flash Point for n-Nonane+n-Decane+n-Tridecane System by Raoult's Law and Multiple Regression Analysis

Dong-Myeong Ha · †Sungjin Lee*

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

*Dept. of Clinical Laboratory Science, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea
(Received November 8, 2017; Revised April 9, 2018; Accepted April 10, 2018)

요약

가연성 액체 혼합물의 화재와 폭발의 위험성을 규정하는 가장 중요한 성질 중 하나는 인화점이다. 본 논문에서는 삼성분계 액체 혼합물인, n-nonane+n-decane+n-tridecane 계의 인화점을 Seta flash 밀폐식 장치를 사용하여 측정하였다. 실험값은 라울의 법칙을 이용한 방법과 다중회귀분석법에 의해 계산된 값들과 비교되었다. 라울의 법칙에 의한 계산된 결과의 절대평균오차는 0.6℃이었다. 다중회귀분석법에 의해 계산된 결과의 절대평균오차는 0.4℃이었다. 절대평균오차에서 알 수 있듯이 다중회귀분석법에 의한 계산값이 라울의 법칙에 의한 계산값에 비해 측정값을 잘 모사하였다.

Abstract - The flash point is one of the most important properties to characterize fire and explosion hazard of flammable liquid mixture. In this paper, the flash points of ternary liquid mixture, n-nonane+n-decane+n-tridecane system, were measured using Seta flash closed cup tester. The measured values were compared with the calculated values using Raoult's law and multiple regression analysis. The absolute average errors(AAE) of the results calculated by Raoult's law is 0.6℃. The absolute average errors of the results calculated by multiple regression analysis is 0.4℃. As can be seen from AAE, the calculated values based on multiple regression analysis were found to be better than those based on Raoult's law.

Key words : flash point, Seta flash closed cup, n-nonane+n-decane+n-tridecane, Raoult's law, multiple regression analysis

1. 서론

인화점은 안전하게 가연성 액체를 취급하기 위해서 반드시 확보해야할 중요한 정보 중 하나이며

[1], 가연성 액체의 표면 위에 불꽃을 접근시켰을 때 인화가 발생하는 가장 낮은 온도이다[2].

1998년 10월, 서울시 대치동의 OO주유소에서 휘발유 저장탱크가 폭발하여, 저장탱크 내부의 청소 작업을 수행하던 작업자 4명이 심각한 화상을 입게 되었다. 혼합물인 휘발유는 인화점이 0℃ 미만으로 폭발 위험도가 매우 높은 물질이다. 당시 작업자들은

†Corresponding author:pappi68@hanmail.net
Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

청소 작업 중에 환풍기를 가동하지 않았고, 이는 탱크 바닥에 잔류한 휘발유 증기가 탱크 내부로 확산되는 주된 원인이 되었다. 그 후 정전기에 의해 발생한 불꽃은 폭발을 유발하였다. 이 사건에서 알 수 있듯이, 가연성 물질을 취급하는 작업자에게 인화점 정보를 제공하는 것은 매우 중요한 일이다[3].

혼합물인 휘발유를 구성하는 순수 성분에 대한 인화점은 Merck index, MSDS 등의 문헌에서 비교적 쉽게 확인할 수 있다. 그러나 혼합물의 인화점 자료는 매우 부족하며, 특히 삼성분계 혼합물의 인화점 정보는 문헌에 거의 존재하지 않는다. 이에 따라 본 연구에서는 삼성분계 액체 혼합물의 인화점 정보를 제공하고자 한다.

인화점 측정 장치는 크게 개방식과 밀폐식 장치로 분류할 수 있다[4]. 본 연구에서는 밀폐식 장치에 해당하는 Seta flash 장치를 사용하였다. Seta flash 장치는 2ml 정도의 미량으로 인화점을 측정할 수 있기에 타 장치에 비해 시약 비용을 낮출 수 있는 장점이 있다.

인화점을 실험에 의해 확보하는 경우, 인건비, 장치와 시약 구입비 등의 비용이 발생한다. 또한 독성이 있는 시약의 인화점 측정은 연구자의 안전 문제가 발생한다. 이와 같이 비용과 안전 문제를 극복하기 위한 대안으로 계산을 통해 인화점을 얻고자한 많은 연구자들이 있었다.

Wickey 등[5]은 다성분계 탄화수소 혼합물의 인화점을 계산하기 위해 액상을 이상용액으로 가정하여 경험식을 개발하였다.

Affens 등[6]은 기상은 이상기체로, 액상은 이상용액으로 가정하여, 경유와 휘발유의 인화점을 계산하는 방법을 개발하였다.

White 등[7]은 Affens 모델을 수정하여 항공연료로 사용되는 등유의 인화점을 계산하는 방법을 제시하였다.

Liaw 등[8]은 기상은 이상기체로 가정하고, 액체 혼합물의 비이상성을 반영하기 위해 활동도계수 모델인 Margules식, Wilson식, NRTL식과 UNIQUAC 식 등[9]을 이용하여, 가연성 액체 혼합물의 인화점을 계산하는 방법을 개발하였다.

Ha 등[10]은 활동도계수식의 이성분계 파라미터와 인화점 측정값을 상호 연관시켜 이성분계 혼합물의 인화점을 계산하는 방법을 개발하였다.

Catoire 등[11,12]은 가연성 액체 혼합물의 증기압, 평균 탄소수와 표준 증발 엔탈피를 독립변수로, 인화점 측정값을 종속변수로 지정하였다. 그리고 종속변수와 독립변수를 상호 연관시켜 가연성 혼합물의 인화점을 계산하는 방법을 개발하였다.

n-Nonane, n-decane과 n-tridecane은 휘발유 엔진을 사용하는 자동차의 주된 연료이며, 석유화학 산업의 매우 중요한 원료이기도 하다. 이와 같은 물질들을 안전하게 취급하기 위해서는 인화점 정보의 확보는 매우 중요하다.

이에 따라 n-nonane+n-decane+n-tridecane 계를 선정하여, seta flash 장치를 이용하여 인화점을 측정하였다. 또한 라울의 법칙[9]과 다중회귀분석법을 이용하여 인화점을 계산하였으며, 측정값과 각각 비교하였다.

2. 인화점 측정

인화점 측정에 사용한 시약들은, Alfa Aesar 사의 n-nonane(99.0%), n-decane(99.0%)과 Kanto 사의 n-tridecane(99.0%)이었다. 이들은 별도의 정제과정 없이 사용하였다.

미국의 Koehler 사의 Seta-flash 밀폐식 장치를 사용하였다. 이 장치는 시료컵(용량 2mL), 온도계, 온도 조절기, 불꽃 발생기, 불꽃 조절기, 등으로 구성되어 있다. 앞서 발표한 논문[13]에 기본 구조도는 제시되었다.

시약들을 각각 다른 물분율로 섞었으며, n-nonane+n-decane+n-tridecane 계의 인화점을 ASTM D3278[14,15] 규정에 따라 측정하였다.

3. 인화점 계산

3.1. 라울의 법칙에 의한 인화점 계산

인화성 혼합물의 액상을 이상용액으로, 기상은 이상기체로 가정하면, 기-액 상평형에 있는 i 성분에 대해 라울의 법칙을 적용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_i = \frac{x_i P_i^{sat}}{P} \quad (1)$$

또한 기-액 상평형 상태에서 i 성분의 기상 물분율(y_i)과 하부인화한계(L_i) 관계식은 르샤틀리에 [16]와 Liaw 등[17]에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^3 \frac{y_i}{L_i} = 1 \quad (2)$$

또한 L_i 는 Liaw 등[17]에 따르면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_i = \frac{P_i^{sat}}{P} \quad (3)$$

여기서 P_i^{sat} 는 i 성분의 인화점에서의 포화증기압, P 는 전체압력이다.

Liaw 등은 식 (2)에 식 (1)과 식 (3)에 대입하여 다음의 식을 제안하였다[18].

$$\frac{x_1 P_1^{sat}}{P_{1,fp}^{sat}} + \frac{x_2 P_2^{sat}}{P_{2,fp}^{sat}} + \frac{x_3 P_3^{sat}}{P_{3,fp}^{sat}} = 1 \quad (4)$$

식 (4)의 P_i^{sat} 과 P_i^{sat} 는 아래의 Antoine 식[9]에 의해 계산한다.

$$\log P_i^{sat} = A_i - \frac{B_i}{T + C_i} \quad (5)$$

여기서 A_i , B_i 및 C_i 는 i 성분의 Antoine 상수이며, T 의 단위는 섭씨온도(°C)이며, P_i^{sat} 의 단위는 mmHg이다. Antoine 상수는 문헌[19]에서 얻을 수 있으며, 본 논문의 n-nonane, n-decane과 n-tridecane의 Antoine 상수는 Table 1에 제시하였다.

식 (4)를 만족시키는 온도를 계산하였고, 그온도를 라울의 법칙에 의한 삼성분계 가연성 혼합물의 인화점으로 결정하였다.

3.2. 다중회귀분석법에 의한 인화점 예측

단일 성분의 인화점은 하부폭발한계, 정상 끓는점, 표준 증발 엔탈피, 평균 탄소수 등과 상관성이 있다[12,20].

이와 같은 상관성을 이용하여 Catoire 등[11,12]은 이성분계와 삼성분계 혼합물의 인화점을 예측하였다. 그들은 혼합물의 정상 끓는점, 표준 증발 엔탈피와 평균 탄소수를 계산하였으며, 이 값들을 혼합물의 인화점 측정값 과 상관시켜 인화점을 계산하였다.

본 논문에서는 삼성분계 혼합물의 인화점, 하부폭발한계, 정상 끓는점, 표준 증발 엔탈피 간의 상관성을 이용하여, 삼성분계 혼합물의 인화점을 계산하기 위해 다음과 같은 식을 제시한다.

$$FP_m = a \cdot L_m^b \cdot T_{nb,m}^c \cdot \Delta H_{vap,m}^d \quad (6)$$

여기서 FP_m 는 삼성분계 혼합물의 인화점, L_m 은 삼성분계 혼합물의 하부폭발한계, $T_{nb,m}$ 는 삼성

분계 혼합물의 정상 끓는점, $\Delta H_{vap,m}$ 는 삼성분계 혼합물의 표준 증발 엔탈피이다. 그리고 a , b , c , d 는 식 (6)에 제시된 각 물성치 간의 상관성을 이어주는 매개 변수들이다.

식 (6)의 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 관계식이 유도된다.

$$\log(FP_m) = \log(a) + b \cdot \log(L_m) + c \cdot \log(T_{nb,m}) + d \cdot \log(\Delta H_{vap,m}) \quad (7)$$

Ha[21]는 삼성분계 혼합물의 하부폭발한계의 온도의존성을 무시하고, 기상과 액상을 각각 이상기체와 이상용액으로 가정하여, 식 (7)의 하부폭발한계를 다음과 같이 제시하였다.

$$L_m = \frac{x_1 P_1^{sat} + x_2 P_2^{sat} + x_3 P_3^{sat}}{\frac{x_1 P_1^{sat}}{L_1} + \frac{x_2 P_2^{sat}}{L_2} + \frac{x_3 P_3^{sat}}{L_3}} \quad (8)$$

여기서 i 성분의 포화증기압(P_i^{sat})은 식 (5)에 의해 계산하였으며, L_1 , L_2 과 L_3 는 단일 성분의 하부인화한계로서 Table 2에 제시하였다.

Catoire 등[12]의 제안에 따라, 식 (7)의 삼성분계 혼합물의 정상 끓는점($T_{nb,m}$)은 아래에서 제시된 목적함수(F)를 최소화시키는 온도로 결정하였다.

$$F = (x_1 P_1^{sat} + x_2 P_2^{sat} + x_3 P_3^{sat}) - 760 = (x_1 10^{(A_1 - \frac{B_1}{t + C_1})} + x_2 10^{(A_2 - \frac{B_2}{t + C_2})} + x_3 10^{(A_3 - \frac{B_3}{t + C_3})}) - 760 \quad (9)$$

여기서 A_i , B_i 와 C_i 는 성분 i 의 Antoine 상수이다.

Catoire 등[12]은 식 (7)에 제시된 이성분계 혼합물의 표준 증발 엔탈피($\Delta H_{vap,m}$)를 계산하기 위하여 Clausius-Clapeyron식[22]을 이용하였다.

액상은 이상용액으로 가정하였으며, 20°C, 30°C, 35°C에서의 이성분계 혼합물의 증기압은 아래의 식을 통해 계산하였다.

$$P = \sum_{i=1}^3 (x_i P_i^{sat}) \quad (10)$$

여기서 i 성분의 포화증기압(P_i^{sat})은 식 (5)에 의해 계산하였다.

식 (10)에 의해 계산한 온도에 따른 $\ln(P)$ 와 $\frac{1}{T(K)}$ 를 회귀 분석하여 기울기를 계산하였다. 그 기울기와 이성분계 혼합물의 표준 증발 엔탈피 간의 관계는 Clausius-Clapeyron식[22]에 따르면 다음과 같다.

$$\text{기울기} = \frac{-\Delta H_{vap,m}}{R} \quad (11)$$

여기서 R 은 기체상수이며 그 값은 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ 이다.

식 (8), 식 (9)과 식 (11)에 의해 각각 계산한 삼성분계 혼합물의 하부폭발한계(L_m), 정상 끓는점($T_{nb,m}$), 표준 증발 엔탈피($\Delta H_{vap,m}$)는 Table 2에 제시하였다.

식 (7)에 삼성분계 혼합물의 하부폭발한계(L_m), 정상 끓는점($T_{nb,m}$), 표준 증발 엔탈피($\Delta H_{vap,m}$)과 인화점 측정값을 대입하였다. 이들 값 간의 차이를 최소화시키는 식 (7)의 매개 성분, a, b, c, d 를 다중회귀분석법을 통해 계산하였다. 그 결과를 Table 3에 제시하였다.

이와 같은 방법을 통해 얻어진 식 (7)의 a, b, c, d 를 통해 삼성분계 혼합물의 조성에 따른 인화점을 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

n-Nonane+n-decane+n-tridecane계의 인화점을 Seta flash 밀폐식 장치를 사용하여 측정하였으며, 그 결과를 Table 4에 제시하였다. 성분 i 의 액상 몰분율은 x_i 로 표현했다.

본 연구의 라울의 법칙과 다중회귀분석법에 의한 계산 결과의 신뢰성을 검토하기 위해, absolute average error(AAE)[23]를 사용하였으며, Table 4에 제시하였다. 절대평균오차(AAE)는 인화점 계산값과 측정값 간의 일치 정도를 나타내는 척도로서 다음과 같다.

$$AAE = \sum_{i=1}^N \frac{|T_i^{\text{exp}} - T_i^{\text{cal}}|}{N} \quad (12)$$

여기서 T_i^{exp} 는 i 번째의 인화점 측정값, T_i^{cal} 는 i 번째의 인화점 계산치, N 은 측정치의 총 개수이다.

라울의 법칙을 활용한 식 (4)에 의한 인화점 계산값을 Table 4에 제시하였다. 또한 라울의 법칙에 의한

계산값과 측정값 간의 관계를 그림으로 표현하여 Fig. 1에 제시하였다. AAE와 그림에서 알 수 있듯이, 측정값을 라울의 법칙에 의한 계산 결과가 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

라울의 법칙은 액상을 이상용액으로 가정한 것이다. n-Nonane, n-decane과 n-tridecane은 동일한 알케인 작용기를 가지며, 탄소수가 각각 9개, 10개, 13개 정도로 입자 크기도 비슷한 탄화수소 화합물들이다. 따라서 서로 간 인력차이가 크지 않으므로, 이들 혼합물의 액상을 이상용액으로 가정한 라울의 법칙에 의해 계산한 인화점은 실험값에 근접할 수 있었다.

n-Nonane+n-decane+n-tridecane계에 대한 다중회귀분석법을 이용한 인화점 계산식은 다음과 같다.

$$\log(FP_m) = -4.46268 + 0.96137\log(LEL_m) + 2.22269\log(T_{nb,m}) + 0.75178\log(\Delta H_{vap,m}) \quad (13)$$

식 (13)에 의해 계산된 인화점을 Table 4에 제시하였다. 또한 측정값과 다중회귀분석법에 의한 계산값 간의 관계를 그림으로 나타내어 Fig. 2에 제시하였다. AAE와 그림에서 알 수 있듯이, 다중회귀분석법에 의한 계산값이 측정값을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

라울의 법칙을 활용하여 인화점을 계산한 결과, 계산값과 측정값 간의 절대평균오차는 0.6°C 이었으며, 다중회귀분석법에 의해 인화점을 계산한 결과, 절대평균오차는 0.4°C 이었다.

절대평균오차에서 확인되듯이, 다중회귀분석법에 의한 계산 방법이 라울의 법칙에 의한 방법 보다 비교적 실험값을 잘 모사한다고 판단할 수 있다. 따라서 다중회귀분석법에 의해 얻어진 식 (13)를 이용하면, 측정값이 없는 혼합물의 조성에서 라울의 법칙에 의한 방법에 비해 보다 정확한 인화점을 확보할 수 있다.

5. 결론

n-Nonane+n-decane+n-tridecane계의 인화점을 Seta flash 밀폐식 장치에 의해 측정하였다. 다중회귀분석법을 이용하여 인화점을 계산하였고, 그것을 라울의 법칙에 의한 계산값과 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 라울의 법칙에 의한 계산값과 측정값 간의 절대평균오차는 0.6°C 이었다. 다중회귀분석법에 의한 계산값과 측정값 간의 절대평균오차는 0.4°C 이었다.

Table 1. The Antoine coefficients of each component

Components	A	B	C
n-Nonane	6.93893	1431.82	202.11
n-Decane	6.94363	1495.17	193.858
n-Tridecane	7.00756	1690.67	174.22

Table 2. The calculated lower flammability limit (LEL_m), normal boiling point (T_{nb,m}) and standard enthalpy of vaporization (ΔH_{vap,m}) for n-nonane(1)+n-decane(2)+n-tridecane(3) system

Mole Fractions			Flash points (°C)		
x ₁	x ₂	x ₃	L _m (vol%)	T _{nb,m} (°C)	ΔH _{vap,m} (kJ/mol)
1.00	0.00	0.00	0.700	150.82	47.05
0.00	1.00	0.00	0.700	174.15	52.88
0.00	0.00	1.00	0.560	235.47	72.04
0.20	0.70	0.10	0.699	171.20	50.10
0.21	0.50	0.29	0.698	177.07	49.65
0.21	0.30	0.49	0.696	184.94	49.13
0.21	0.10	0.69	0.692	194.83	48.35
0.31	0.50	0.19	0.699	170.66	49.05
0.31	0.20	0.49	0.697	180.99	48.27
0.50	0.40	0.10	0.700	163.15	48.23
0.51	0.10	0.39	0.698	170.76	47.53
0.70	0.20	0.10	0.700	158.52	47.55

(2) 절대평균오차를 비교한 결과, 라울의 법칙에 의한 인화점 계산값에 비해 다중회귀분석법에 의한 계산값이 삼성분계 액체 혼합물의 인화점을 상대적으로 잘 묘사하였다.

Table 3. The parameters of equation (7) for n-nonane(1)+n-decane(2)+n-tridecane(3) system

System	log(a)	b	c	d
n-nonane+ n-decane+ n-tridecane	-4.46268	0.96137	2.22269	0.75178

Table 4. The experimental and calculated flash points for n-nonane(1)+n-decane(2)+n-tridecane(3) system

Mole Fractions			Flash points (°C)		
x ₁	x ₂	x ₃	Exp.	Raoult's law	Empirical
1.00	0.00	0.00	31.0	-	30.8
0.00	1.00	0.00	46.0	-	46.2
0.00	0.00	1.00	92.0	-	92.0
0.20	0.70	0.10	43.0	43.2	42.7
0.21	0.50	0.29	45.0	45.9	45.6
0.21	0.30	0.49	50.0	49.6	49.7
0.21	0.10	0.69	55.0	54.6	54.8
0.31	0.50	0.19	43.0	42.3	41.7
0.31	0.20	0.49	46.0	46.9	46.8
0.50	0.40	0.10	37.0	38.0	37.3
0.51	0.10	0.39	41.0	41.0	40.7
0.70	0.20	0.10	34.0	35.2	34.6
AAE				0.6	0.4

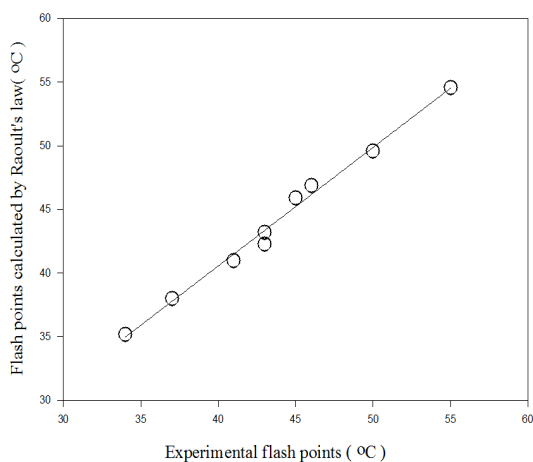


Fig. 1. The comparison of calculated flash points by Raoult's law with experimental flash points.

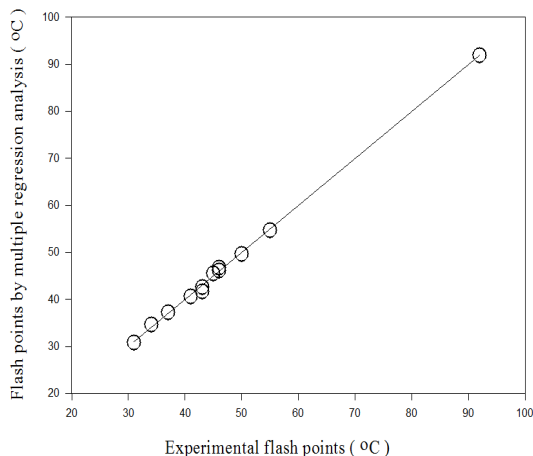


Fig. 2. The comparison of calculated flash points by multiple regression analysis with experimental flash points.

REFERENCES

- [1] Moghadam, A.Z., Rafiei, A., and Khalili, T., "Assessing Prediction Models on Calculating the Flash Point of Organic Acid, Ketone and Alcohol Mixtures", *Fluid Phase Equilibria*, **316**, 117-121, (2012)
- [2] Phoon, L.Y., Mustafa, A.A., Hashim, H., and Mat, R., "A Review of Flash Point Prediction Models for Flammable Liquid Mixtures", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**, 12553-12565, (2014)
- [3] Crowl, D.A., and Louver, J.F., "Chemical process Safety Fundamentals with Applications", Prentice-Hall, (1990)
- [4] Lance, R.C., Barnard, A.J., and Hooyman, J.E., "Measurement of Flash Points : Apparatus, Methodology, Applications", *J. of Hazardous Materials*, **3**, 107-119, (1979)
- [5] Whickey, R., and Chittenden, D., "Flash Points of Blend Correlated", *Hydrocarbon Process*, **42(6)**, 157-158, (1963)
- [6] Affens, W.A., and McLaren, G.W., "Flammability Properties of Hydrocarbon Solutions in Air", *J. of Chem. Ind. Eng. Chem. & Eng. Data*, **17(4)**, 482-488, (1972)
- [7] White, D. and Beyler, C.L., "Flame Spread on Aviation Fuels", *Fire Saf. J.*, **28(1)**, 1-31, (1997)
- [8] Liaw, H.J., Chen, C.T., Cheng, C.C., and Yang, Y.T., "A Mathematical Model for Predicting the Flash Point of Binary Solution", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**, 429-438, (2002)
- [9] Reid, C.R., Prausnitz, J.M., and Poling, B.E., *The Properties of Gases and Liquids*, 4th Edition., McGraw-Hill, New York, (1998)
- [10] Ha, D.M. and Lee, S.J., "The Estimation of Lower Flash Point for n-Pentanol+n-Propionic Acid and n-Pentanol+n-Butyric Acid Systems Using Optimization Method", *KIGAS*, **11(4)**, 73-78, (2007)
- [11] Cairo, L., Paulmier, S., and Naudet, V., "Experimental Determination and Estimation of Closed Cup Flash Points of Mixtures of Flammable Solvents", *Process Saf. Prog.*, **25(1)**, 33-39, (2006)
- [12] Cairo, L., Paulmier, S., and Naudet, V., "Estimation of Closed Cup Flash Points of Combustible Solvent Blends", *J. Phy. Chem. Ref. Data*, **35(1)**, 9-14, (2006)
- [13] Ha, D.M., and Lee, S.J., "The Measurement and Prediction of Maximum Flash Point Behavior for Binary Solution", *Fire Sci. Eng.*, **27(5)**, 1-5, (2013)
- [14] Ha, D.M., and Lee, S.J., "The Flash Point Measurement for Binary Flammable Mixture",

- KIGAS, **18**(5), 60-65, (2014)
- [15] American Society for Testing Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. **06.01**, (1999)
- [16] Le Chatelier, "Estimation of Firedamp by Flammability limits", *Ann. Minnes*, **19**, 388-392, (1891)
- [17] Liaw, H.J., Chen, C.T., Cheng, C.C., and Yang, Y.T., "A Mathematical Model for Predicting the Flash Point of Binary Solution", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**, 429-438, (2002)
- [18] Liaw, H.J., Tang, C.L., and Lai, J.S., "A Model for Predicting the Flash Point of Ternary Flammable Solutions of Liquid", *Combust Flame*, **138**, 308-319, (2004)
- [19] Gmehing, J., Onken, U., and Arlt, W., *Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection*, **1**, Part1-Part7, DECHEMA, (1980)
- [20] Kim, S.Y., Lee, B.S., Chung, C.B., and Choi, S.H., "Prediction of Flash Point of Binary Systems by Using Multivariate Statistical Analysis", *KIGAS*, **10**(4), 29-33, (2006)
- [21] Ha, D.M., and Lee, S.J., "Prediction of Lower Explosive Limits of Binary Liquid Mixtures by Means of Solution Thermodynamics", *KIGAS*, **13**(5), 20-24, (2009)
- [22] Vidal, M., Rogers, W.J., Holste, J.C., and Mannan, M.S., "A Review of Estimation Methods for Flash Points and Flammability Limits", *Process Safety Progress*, **23**(1), 47-55, (2004)
- [23] Ha, D.M., and Lee, S.J., "The Measurement and Estimation of Lower Flash Points for the n-Propanol+Acetic acid and n-Propanol+n-Propionic acid Systems", *J. of the Korean Society of Safety*, **22**(4), 37-42 (2007)