

Seta Flash 밀폐식 장치를 이용한 n-Propanol+n-Hexanol계와 n-Butanol+n-Hexanol계의 인화점 측정

하동명* · 이성진**†

Flash Point Measurement of n-Propanol+n-Hexanol and n-Butanol+n-Hexanol Systems Using Seta Flash Closed Cup Tester

Dong-Myeong Ha* · Sungjin Lee**†

†Corresponding Author

Sungjin Lee

Tel : +82-43-649-1286

E-mail : pappi68@hanmail.net

Received : October 10, 2018

Revised : November 15, 2018

Accepted : December 18, 2018

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Flash point is the important indicator to determine fire and explosion hazards of liquid solutions. In this study, flash points of n-propanol+n-hexanol and n-butanol+n-hexanol systems were obtained by Seta flash tester. The methods based on UNIFAC equation and multiple regression analysis were used to calculate flash point. The calculated flash point was compared with the experimental flash point. Absolute average errors of flash points calculated by UNIFAC equation are 2.9°C and 0.6°C for n-propanol+n-hexanol and n-butanol+n-hexanol, respectively. Absolute average errors of flash points calculated by multiple regression analysis are 0.5°C and 0.2°C for n-propanol+n-hexanol and n-butanol+n-hexanol, respectively. As can be seen from AAE, the values calculated by multiple regression analysis are noticed to be better than the values by the method based on UNIFAC equation.

Key Words : flash point, Seta flash, UNIFAC, multiple regression analysis, n-propanol+n-hexanol, n-butanol+n-hexanol

1. 서론

액체의 화재와 폭발 위험성의 중요 지표 중 하나는 인화점이다¹⁾. 인화점은, 액체 표면에서 발생된 기체에 점화원을 접근시킬 때 불꽃이 발생하는 최소 온도로 정의할 수 있다²⁾.

2018년 4월 인천시 가좌동에서, 알코올 혼합물을 취급하는 OO화학 공장에서 대형 화재가 발생하였다. OO 화학 공장 2개 동과 인근 도금공장 6개 동, 차량 17대를 태웠으며, 화재를 진압하는 과정에서 소방관 1명이 부상을 당했다. 총 재산피해 규모는 23억 원에 달하였다. 알코올 혼합물은 화재 위험성이 매우 높은 물질들이다. 당시 OO화학 공장의 작업자가 알코올류를 용기로 옮겨 담는 과정에서 화재가 발생한 것으로 알려졌다. 따라서 알코올 혼합물을 취급하는 작업자에게 인화점 정보를 알려 주는 것은, 화재 방지를 위해 매우

중요하다³⁾.

단일 성분의 인화점 정보는 각종 문헌에서 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 예로 national fire protection association (NFPA), material safety data sheet (MSDS) 등의 문헌이 있다.

그러나 이성분계 혼합물의 인화점 정보를 얻는 것은 쉽지 않다. 여러 조성을 가진 혼합물들의 인화점을 측정하기에 많은 시간과 비용이 발생하기 때문이다⁴⁾. 이에 따라 이성분계 혼합물의 인화점을 실험이 아닌 계산에 의해 얻고자 하는 연구자들이 있었다⁵⁾.

사슬형 알케인들로 이루어진 혼합물의 인화점을 계산하는 모델을 Affens 등⁶⁾은 개발하였다. 이 모델은 이상용액에 가까운 액체 용액인 경우 효과적으로 인화점을 예측할 수 있다. 그러나 비이상성 액체 용액인 경우 적용할 수 없다는 문제점이 있다.

Hanley⁷⁾는 하부폭발한계, 연소열과 액체 용액의 비

*세명대학교 보건안전공학과 교수 (Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University)

**세명대학교 임상병리학과 교수 (Department of Clinical Laboratory Science, Semyung University)

이상성을 반영하는 Margules 식⁸⁾을 사용한 계산 방법을 고안하였다. 이는 비이상성 액체 용액의 인화점을 효과적으로 계산할 수 있으나, Margules 식의 이성분계 파라미터가 없는 경우 인화점을 계산할 수 없다는 한계가 있다.

Liaw 등⁹⁾은 이성분계 혼합물의 인화점을 계산하기 위해 수정된 라울의 법칙⁸⁾과 르 샤틀리에의 법칙¹⁰⁾을 이용한 방법을 개발하였다. 그들은 여러 종류의 활동도계수 식을 사용하여 비이상성 액체 용액의 인화점을 효율적으로 계산하였다. 그러나 이 계산 모델은 활동도계수 식의 이성분계 파라미터가 없는 경우 인화점을 예측할 수 없다는 한계가 있다.

n-Propanol, n-butanol과 n-hexanol은 석탄에 의해 합성된 혼합 알코올의 주된 구성 성분들이다. 혼합 알코올은 고갈 위기의 석유를 대체할 수 있는 유망한 에너지원으로서¹¹⁾, 자동차 엔진의 연료로 사용 가능하다. 또한 n-propanol, n-butanol과 n-hexanol은 차세대 에너지원으로 유력한 바이오매스의 주된 성분들이다. 이들은 제약, 페인트, 화장품 산업 등에서 주된 용매로서 사용되고 있으며, 천연 물질의 추출용매로도 사용되고 있다.

n-Propanol, n-butanol과 n-hexanol을 사용하고 연구하는 산업 현장의 안전을 위해서 인화점 데이터를 얻는 것은 매우 중요하다. 그러나 현재까지 이와 관련한 데이터를 확보하는 것은 쉽지 않으며, 특히 혼합물의 인화점에 대한 정보는 매우 부족하다.

이에 따라 본 논문에서는 n-propanol+n-hexanol계와 n-butanol+n-hexanol계를 선택하여 인화점 정보를 얻고자 하였다.

Seta flash 측정 장치로 인화점을 측정하였다. 또한 두 가지 방법으로 인화점을 예측하였다.

첫째는 활동도계수를 UNIFAC 식⁸⁾으로 계산하여 인화점을 예측하였다¹²⁾. 이 방법은 Affens 등의 모델과 달리 비이상성 액체 용액에 적용할 수 있으며, 상평형 데이터로부터 구해진 이성분계 파라미터가 없는 경우에도 인화점을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

둘째는 다중회귀분석법을 이용하여 인화점을 예측하였다. 이 방법은 하부폭발한계, 정상 끓는점, 평균 탄소수와 인화점 실험값과의 연관성을 이용하여 구한 경험식을 토대로, 인화점을 계산하는 방법이다. 이는 앞서 제시한 모델들과는 다르게, 비이상성 액체 용액과 이성분계 파라미터가 없는 이성분계에도 적용할 수 있는 방법이다.

이 두 방법의 공통점은 비이상성 액체 용액인 경우와 이성분계 파라미터가 존재하지 않을 경우에도 인화점의 계산이 가능하다는 점이다. 본 연구에서는 두 방

법에 의해 계산한 인화점을 실험값과 비교하여, 본 연구에서 제시한 다중회귀분석법에 의한 계산 방법의 신뢰성을 확인하고자 하였다.

2. 인화점 측정

CARLO 사를 통해 n-Propanol(99.0%)을 구입하였으며, n-butanol(99.0%)과 n-hexanol(99.0%)은 ACROS사와 Crown Guaranteed Reagents사에서 구입하였다.

미국 Koehler사에서 구입한 Seta flash 밀폐식 장치를 이용해 인화점을 측정하였으며, 기본적인 구조도는 이미 발표된 논문¹³⁾에 제시되어 있다. 시약들을 다양한 물분율로 섞은 후, ASTM D1310-86¹⁴⁾에 제시된 다음과 같은 방법에 의해 인화점을 측정하였다.

- 1) 각 성분들을 다양한 물분율로 혼합하였다.
- 2) 액체 혼합물에서 2 ml를 채취하여 이를 시료컵에 넣었다. 예측되는 인화점 보다 대략 20°C 정도 낮은 온도부터 액체 혼합물의 온도를 상승시켰다. 1.0°C/min의 속도로 온도가 증가되도록 조절하였다.
- 3) 조금씩 온도가 상승할 때마다 불꽃을 액체 혼합물의 표면에 1초 간 접근시켰다.
- 4) 인화가 최초로 발생한 온도를 인화점으로 결정하였다.

3. 인화점 예측

3.1 UNIFAC 식을 이용한 인화점 예측

이성분계 혼합물의 하부폭발한계(lower explosive limit)와 기체상 물분율과의 관계식은 Le Chatelie¹⁰⁾에 따르면, 다음과 같다.

$$\frac{y_1}{LEL_1} + \frac{y_2}{LEL_2} = 1 \quad (1)$$

여기서 y 는 기상 물분율, $LEL(\text{vol}\%)$ 은 하부폭발한계이며, 아래 첨자 1, 2는 각각의 순수 성분을 의미한다.

성분 i 의 하부폭발한계는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 P 는 전체 압력이며, $P_{i,fp}^{sat}$ 는 성분 i 의 인화점에서 포화증기압이다.

기-액 상평형 상태는 비교적 낮은 압력 조건 하에서, 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = \frac{x_i \gamma_i P_i^{sat}}{P} \quad (3)$$

여기서 x_i 는 성분 i 의 액상 몰분율, γ_i 는 성분 i 의 활동도계수, P_i^{sat} 는 성분 i 의 포화증기압이다.

Liaw 등⁹⁾의 제안을 받아들여, 식 (1) 속에 식 (2), 식 (3)을 각각 대입하면 다음의 식이 성립된다.

$$\frac{x_1 \gamma_1 P_1^{sat}}{P_{1,fp}^{sat}} + \frac{x_2 \gamma_2 P_2^{sat}}{P_{2,fp}^{sat}} = 1 \quad (4)$$

식 (4)에서 γ_i 는 그룹기여모델인 UNIFAC 식에 의해 계산하였다.

P_i^{sat} 과 $P_{i,fp}^{sat}$ 은 아래의 Antoine 식⁸⁾으로 계산한다.

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

여기서 t 는 온도(°C)이며 A_i , B_i 와 C_i 는 성분 i 의 Antoine 상수들이다. 순수 성분들의 Antoine 상수는 기존 문헌¹⁵⁾에서 확보하였으며 Table 1에 제시한다.

Table 1. Antoine coefficients of pure components

| Components \ Properties | A | B | C |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| n-Propanol | 8.37895 | 1788.02 | 227.438 |
| n-Butanol | 7.8380 | 1558.19 | 196.881 |
| n-Hexanol | 7.9058 | 1819.57 | 295.00 |

식 (4)를 아래와 같이 변환하였으며, 목적함수(F_1)를 최소화시키는 온도를 계산하였으며, 그것을 UNIFAC 식에 의한 인화점으로 결정하였다.

$$F_1 = ABS\left(\frac{x_1 \gamma_1 P_1^{sat}}{P_{1,fp}^{sat}} + \frac{x_2 \gamma_2 P_2^{sat}}{P_{2,fp}^{sat}} - 1\right) \quad (6)$$

여기서 ABS 는 절대값을 의미한다.

3.2 다중회귀분석법을 이용한 인화점 예측

인화점은 하부폭발한계, 정상 끓는점, 탄소수, 표준 증발엔탈피 등과 깊은 연관성이 있다¹⁶⁻¹⁷⁾.

본 연구에서는 하부폭발한계, 정상 끓는점, 평균 탄소수와 인화점과의 연관성을 이용하여, 인화점을 계산할 수 있는 다음의 식을 제안한다.

$$FP_m = a \cdot LEL_m^b \cdot T_{nb,m}^c \cdot n^d \quad (7)$$

여기서 FP_m , LEL_m , $T_{nb,m}$ 과 n 은 각각 이성분계 혼합물의 인화점, 하부폭발한계, 정상 끓는점과 평균 탄소수이다. a , b , c , d 는 각 변수 간의 상관성을 연결하는 파라미터들이다.

양변에 로그를 취하여 식 (7)을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\log(FP_m) = \log(a) + b \cdot \log(LEL_m) + c \cdot \log(T_{nb,m}) + d \cdot \log(n) \quad (8)$$

식 (8)의 LEL_m 은 Ha¹⁸⁾의 제안에 따라 아래의 식으로 계산하였다.

$$LEL_m = \frac{x_1 \cdot P_1^{sat} + x_2 \cdot P_2^{sat}}{\frac{x_1 \cdot P_1^{sat}}{LEL_1} + \frac{x_2 \cdot P_2^{sat}}{LEL_2}} \quad (9)$$

여기서 P_i^{sat} 은 Antoine 식에 의해 계산하였다. LEL_1 과 LEL_2 는 성분 1과 2의 하부폭발한계이며, 그 값들은 기존 문헌¹⁹⁾에서 얻었으며 Table 2와 Table 3에 제시하였다.

액상을 이상용액으로 가정하고, Catoire 등¹⁶⁾의 제안에 따라 식 (8)의 $T_{nb,m}$ 은 다음의 목적함수(F_2)를 최소화시키는 온도로 결정하였다.

$$F_2 = (x_1 \cdot P_1^{sat} + x_2 \cdot P_2^{sat}) - 760 \quad (10)$$

식 (8)에 제시된 n 은, Catoire 등¹⁶⁾의 제안에 의하면 다음과 같이 정의된다.

$$n = \sum_{i=1}^2 (y_i \cdot n_i) \quad (11)$$

여기서 y_i 는 성분 i 의 기상 몰분율이며, n_i 는 성분 i 의 탄소수이다.

식 (11)의 y_i 는, 이성분계 혼합물의 기체상을 이상기체로, 액체상을 이상용액으로 가정하면 아래와 같은 식에 의해 계산된다.

$$y_i = \frac{x_i \cdot P_i^{sat}}{\sum_1^2 (x_i \cdot P_i^{sat})} \quad (12)$$

식 (12)를 식 (11)에 대입하여 n을 계산하였다.

위와 같은 방법으로 계산한 LEL_m , n과 $T_{nb,m}$ 을 식 (8)에 넣어 인화점을 계산하였다. 그 계산값과 인화점 측정값과의 차이를 가장 작게 하는 식 (8)의 파라미터들을 결정하였다. 이와 같은 방법으로 결정한 식 (8)의 파라미터를 이용해 각 조성에 따른 인화점을 계산하였다.

4. 결과와 고찰

n-Propanol+n-hexanol과 n-butanol+n-hexanol계의 인화점을 측정하여 Table 4와 Table 5에, 그리고 Fig. 1과 Fig. 2에 그 결과를 제시하였다.

n-Propanol+n-hexanol과 n-butanol+n-hexanol계는 각각 n-propanol과 n-butanol의 몰분율이 커질수록 인화점이 감소하는 경향을 보였으므로, 최소인화점 혹은 최대인화점 현상을 나타내지 않았다.

식 (9), (10)과 (11)에 의해 계산한 각 조성에 따른 LEL_m , $T_{nb,m}$ 과 n은 Table 2와 Table 3에 제시하였으며, 이 값들을 이용하여 얻어진 다중회귀분석법에 의한 인화점 계산식은 다음과 같다.

n-Propanol+n-hexanol system :

$$\log(FP_m) = 9.04261 - 17.87332 \cdot \log(LEL_m) + 3.11024 \cdot \log(T_{nb,m}) - 16.28508 \cdot \log(n) \quad (13)$$

n-Butanol+n-hexanol system :

$$\log(FP_m) = 26.14587 - 40.88646 \cdot \log(LEL_m) + 3.15941 \cdot \log(T_{nb,m}) - 36.06344 \cdot \log(n) \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)에 따라 계산한 인화점과 UNIFAC

Table 2. Estimated lower explosive limit(LEL_m), normal boiling point($T_{nb,m}$) and average number of carbon atoms(n) for n-propanol(1)+n-hexanol(2) system

| Mole Fraction | | $LEL_m(\text{vol}\%)$ | $T_{nb,m}(\text{°C})$ | n |
|---------------|-------|-----------------------|-----------------------|------|
| x_1 | x_2 | | | |
| 1.000 | 0.000 | 2.20 | 97.20 | 3.00 |
| 0.900 | 0.100 | 2.19 | 100.20 | 3.02 |
| 0.700 | 0.300 | 2.16 | 105.96 | 3.07 |
| 0.500 | 0.500 | 2.11 | 113.52 | 3.16 |
| 0.300 | 0.700 | 1.99 | 124.29 | 3.37 |
| 0.101 | 0.899 | 1.67 | 141.91 | 4.14 |
| 0.000 | 1.000 | 1.20 | 157.55 | 6.00 |

Table 3. Estimated lower explosive limit(LEL_m), normal boiling point($T_{nb,m}$) and average number of carbon atoms(n) for n-butanol(1)+n-hexanol(2) system

| Mole Fraction | | $LEL_m(\text{vol}\%)$ | $T_{nb,m}(\text{°C})$ | n |
|---------------|-------|-----------------------|-----------------------|------|
| x_1 | x_2 | | | |
| 1.000 | 0.000 | 1.70 | 117.73 | 4.00 |
| 0.900 | 0.100 | 1.69 | 119.63 | 4.04 |
| 0.700 | 0.300 | 1.65 | 124.65 | 4.13 |
| 0.500 | 0.500 | 1.60 | 130.86 | 4.29 |
| 0.300 | 0.700 | 1.52 | 138.86 | 4.58 |
| 0.103 | 0.897 | 1.36 | 149.62 | 5.22 |
| 0.000 | 1.000 | 1.20 | 157.55 | 6.00 |

Table 4. Estimated and measured flash points for n-propanol(1)+n-hexanol(2)

| Mole Fraction | | Flash point(°C) | | |
|---------------|-------|-----------------|--------|------------------------------|
| x_1 | x_2 | Exp. | UNIFAC | Multiple Regression Analysis |
| 1.000 | 0.000 | 21.0 | - | 21.6 |
| 0.900 | 0.100 | 24.0 | 22.4 | 23.6 |
| 0.700 | 0.300 | 28.0 | 25.3 | 27.4 |
| 0.500 | 0.500 | 33.0 | 29.3 | 32.7 |
| 0.300 | 0.700 | 39.0 | 35.6 | 40.1 |
| 0.101 | 0.899 | 51.0 | 47.8 | 50.5 |
| 0.000 | 1.000 | 61.5 | - | 61.6 |
| AAE (°C) | | - | 2.9 | 0.5 |

Table 5. Estimated and measured flash points for n-butanol(1)+n-hexanol(2)

| Mole Fraction | | Flash point(°C) | | |
|---------------|-------|-----------------|--------|------------------------------|
| x_1 | x_2 | Exp. | UNIFAC | Multiple Regression Analysis |
| 1.000 | 0.000 | 36.0 | - | 35.8 |
| 0.900 | 0.100 | 37.0 | 37.2 | 37.0 |
| 0.700 | 0.300 | 40.0 | 40.1 | 40.3 |
| 0.500 | 0.500 | 44.0 | 43.6 | 44.1 |
| 0.300 | 0.700 | 49.0 | 48.5 | 48.5 |
| 0.103 | 0.897 | 54.0 | 55.7 | 54.3 |
| 0.000 | 1.000 | 61.5 | - | 61.4 |
| AAE (°C) | | - | 0.6 | 0.2 |

식에 의해 예측한 인화점을 Table 4와 Table 5에, 그리고 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 제시하였다.

계산한 인화점의 신뢰도를 평가하기 위해서 절대평균오차(absolute average error)²⁰⁾를 사용하였으며, 다음과 같다.

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

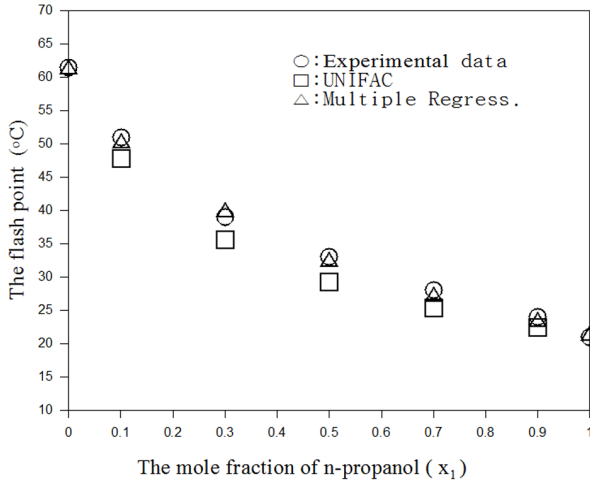


Fig. 1. Comparison of experimental flash points with calculated flash points for n-propanol(1)+n-hexanol(2) system.

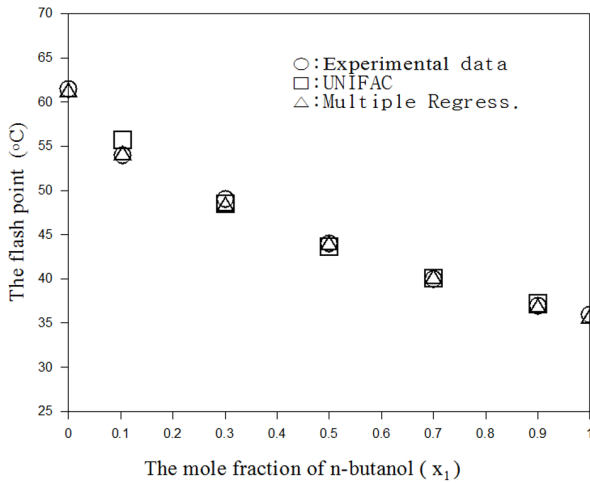


Fig. 2. Comparison of experimental flash points with calculated flash points for n-butanol(1)+n-hexanol(2) system.

여기서 AAE 는 절대평균오차, T_i^{exp} 는 i 번째 인화점 측정값, T_i^{cal} 는 i 번째 인화점 계산값, N 은 측정값의 총 개수이다.

UNIFAC 식을 사용하여 인화점을 계산했을 때, n-propanol+n-hexanol계는 계산값과 측정값과의 절대평균오차는 2.9°C 이었으며, n-butanol+ n-hexanol계의 절대평균오차는 0.6°C 이었다.

본 연구에서 제시한 다중회귀분석법으로 인화점을 계산했을 때, n-propanol+n-hexanol계는 계산값과 측정값과의 절대평균오차는 0.5°C 이었으며, n-butanol+ n-hexanol계의 절대평균오차는 0.2°C 이었다.

절대평균오차를 비교한 결과, 다중회귀분석법이 UNIFAC 식에 의한 방법에 비해 상대적으로 실험값에

보다 근접한 예측 결과를 나타내었다.

따라서 본 연구에서 제시한 다중회귀분석법에 의해 구해진 식 (13)과 식 (14)를 사용한다면, 인화점 실험값이 없는 새로운 조성의 이성분계 혼합물의 인화점을 UNIFAC 식에 의한 계산 방법에 비해 보다 정확하게 예측할 수 있다.

5. 결론

n-Propanol+n-hexanol계와 n-butanol+n-hexanol계의 인화점을 측정하였다. 최소인화점 혹은 최대인화점 현상은 발생하지 않았다.

또한 본 연구에서는 하부폭발한계, 정상 끓는점과 평균 탄소수를 인화점 측정값과 연관시킨 다중회귀분석법을 제안하였으며, 이 방법을 통해 인화점을 계산하였다. 그리고 그 계산 결과를, UNIFAC 식에 의한 계산 결과와 비교하였다.

계산 방법의 신뢰도를 나타내는 절대평균오차를 상호 비교한 결과, UNIFAC 식에 의한 계산 방법에 비해 본 연구에서 제시한 다중회귀분석법이 이성분계 혼합물의 인화점을 보다 정확하게 예측하였다.

따라서 본 연구의 다중회귀분석법을 이용하면 측정값이 없는 새로운 조성에 대한 인화점을 UNIFAC 식에 의한 방법에 비해 보다 정확히 계산할 수 있다.

감사의 글: 이 논문은 2018학년도 세명대학교 교내 학술연구비 지원에 의한 연구임.

References

- 1) L. Y. Phoon, A. A. Mustaffa, H. Hashim, and R. Mat, "A Review of Flash Point Prediction Models for Flammable Liquid Mixtures", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 53, pp. 12553-12565, 2014.
- 2) J. R. Rowley, D. K. Freeman, R. L. Rowley, J. L. Oscarson, N. F. Giles and W. V. Wilding, "Flash Point : Evaluation, Experimentation and Estimation", Int J Themophys, Vol. 31, pp. 875-887, 2010.
- 3) D. A. Crowl and J. F. Louver, "Chemical Process Safety Fundamentals with Applications", Prentice-Hall, 1990.
- 4) S. Y. Kim and B. S. Lee, "Multivariate Statistical Analysis and Prediction for the Flash Points of Binary Systems Using Physical Properties of Pure Substances", KIGAS, Vol. 11, No. 3, pp. 13-18, 2007.
- 5) D. M. Ha and S. J. Lee, "Dew Point Prediction by Lower Flash Points of Binary Mixtures", J. Korean Soc. Saf., Vol.

- 32, No. 6, pp. 34-39, 2017.
- 6) W. A. Affens and G. W. McLaren, "Flammability Properties of Hydrocarbon Solutions in Air", *J. of Chem. Ind. Eng. Chem. & Eng. Data*, Vol. 17, No. 4, pp. 482-488, 1972.
 - 7) B. Hanley, "A Model for the Calculation and the Verification of Closed Cup Flash Points for Multicomponent Mixtures", *Process Saf. Prog.*, Vol. 17, No. 2, pp. 86-97, 1998.
 - 8) B. E. Poling, J. M. Prausnitz, and J. P. O'Connell, "The Properties of Gases and Liquids", 5th Ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
 - 9) H. J. Liaw, Y. H. Lee, C. L. Tang, H. H. Hsu, and J. H. Liu, "A Mathematical Model for Predicting the Flash Point of Binary Solutions", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 15, pp. 429-438, 2002.
 - 10) H. L. Chatelier, "Estimation of Firedamp by Flammability Limits", *Ann. Minnes.*, Vol. 19, No. 8, pp. 388-395, 1891.
 - 11) J. Wang and Z. H. Bao, "Investigation on Vapor-Liquid Equilibrium for 2-Propanol + 1-Butanol + 1-Pentanol at 101.3 kPa", *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 341, pp. 30-34, 2013.
 - 12) H. J. Liaw, V. Gerbaud, and Y. H. Li, "Prediction of Miscible Mixtures Flash-Point from UNIFAC Group Contribution Method", *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 300, pp. 70-82, 2013.
 - 13) D. M. Ha and S. J. Lee, "The Measurement and Prediction of Maximum Flash Point Behavior for Binary Solution", *Fire Sci. Eng.*, Vol. 27, No. 5, pp. 1-5, 2013.
 - 14) In 2011 Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Methods for Flash Point of Liquids by Tag Open-Cup Apparatus (ASTM D1310)", West Conshohocken, PA, 2007.
 - 15) J. Gmehing, U. Onken, and W. Arlt, "Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection", Vol. 1, Part1-Part7, DECHEMA, 1980.
 - 16) L. Caoire, S. Paulmier, and V. Naudet, "Estimation of Closed Cup Flash Points of Combustible Solvent Blends",
 - 17) S. Y. Kim, B. S. Lee, C.B. Chung, and S. H. Choi, "Prediction of Flash Point of Binary Systems by Using Multivariate Statistical Analysis", *KIGAS*, Vol. 10, No. 4, pp. 29-33, 2006.
 - 18) D. M. Ha and S. J. Lee, "Prediction of Lower Explosive Limits of Binary Liquid Mixtures by Means of Solution Thermodynamics", *KIGAS*, Vol. 13, No. 5, pp. 20-24, 2009.
 - 19) D. M. Ha, "Prediction of Explosive Limits by Using Flash Points for Alcohol Compounds", *Theories and Applications of Chemical Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 3023, 2001.
 - 20) D. M. Ha and S. J. Lee, "The Measurement and Estimation of Lower Flash Points for the n-Propanol+ Acetic acid and n-Propanol+n-Propionic acid Systems", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 22, No. 4, pp. 37-42, 2007.