

이성분계 혼합물의 하부 인화점에 의한 이슬점 예측

하동명 · 이성진*

세명대학교 보건안전공학과 · *세명대학교 임상병리학과
(2017. 8. 1. 접수 / 2017. 8. 21. 수정 / 2017. 10. 17. 채택)

Dew Point Prediction by Lower Flash Points of Binary Mixtures

Dong-Myeong Ha · Sungjin Lee*

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University

*Department of Clinical Laboratory Science, Semyung University

(Received August 1, 2017 / Revised August 21, 2017 / Accepted October 17, 2017)

Abstract : Vapor-liquid equilibrium calculation is required to properly design and operation of distillation process. The general calculation method is to use binary interaction parameter. Lower flash points of cyclohexanol+aniline and cyclohexanol+cyclohexanone were measured by using Seta-flash closed cup apparatus. The measured flash points were compared with those calculated by the method based on Raoult's law and the optimization method using Wilson equation. The absolute average errors(A.A.E.) of the results calculated by Raoult's law are 0.25°C and 1.07°C for cyclohexanol+aniline and cyclohexanol+cyclohexanone, respectively. The absolute average errors of the results calculated by the optimization method are 0.22°C and 0.65°C for cyclohexanol+aniline and cyclohexanol+cyclohexanone, respectively. As can be seen from A.A.E., the calculated values based on the optimization method were found to be better than those based on the Raoult's law. The binary interaction parameters calculated by the optimization method are used to predict the dew points of cyclohexanol+aniline and cyclohexanol+cyclohexanone. The A.A.E. for these mixtures show that there is an acceptable agreement between experimental and calculated dew points.

Key Words : lower flash point, seta-flash closed cup, wilson, optimization method, dew point

1. 서론

액체의 인화점은 화재 및 폭발의 위험도를 결정하는 중요한 특성치이며, 인화점이 낮을수록 그 위험도는 높아진다¹⁾.

인화점은, 불꽃을 액체의 표면 위에 접근시켰을 때 인화가 발생하는 최저 온도를 지칭한다²⁾. 인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 분류되며, 인화점은 일반적으로 하부인화점을 의미한다³⁾.

액체의 안전한 취급을 위해 인화점 정보를 확보하기 위한 많은 연구들이 있었다.

Satyanarayana 등⁴⁾은 측정된 인화점을 끓는점 및 비중과 상관시킨 경험식을 개발하여, 단일 성분으로 구성된 유기화합물의 인화점을 계산하였다.

Patil⁵⁾은 인화점과 정상끓는점을 상관시켜 얻어진 경험식을 개발하여, 순수 물질의 인화점을 예측하였다.

Catoire 등^{6,7)}은 실험을 통해 얻은 인화점과, 탄소수,

표준증발엔탈피, 증기압 간의 상관관계를 연결시킨 경험식을 개발하였으며, 이 경험식을 통해 가연성 액체 혼합물의 인화점을 계산하였다.

Affens 등⁸⁾은 기상은 이상기체로 액상은 이상용액으로 가정하여, 노말 알케인 성분의 액체 혼합물의 인화점을 효과적으로 계산하는 방법을 제시하였다.

White 등⁹⁾은 최소인화한계가 온도에 의존하지 않고 가정한 인화점 예측 방법을 개발하여, 항공연료 혼합물의 인화점을 계산하였다.

Liaw 등¹⁰⁾은 액체 혼합물의 비이상성을 반영하기 위하여 활동도계수 식을 적용한 예측 방법을 개발하여, 가연성 이성분계 혼합물의 인화점을 계산하였다.

Lee와 Ha¹¹⁾는 비가연성 성분인 물이 포함된 이성분계 액체 혼합물의 인화점을 계산하였다. 이들은 활동도계수 식을 이용하여 액상의 비이상성을 인화점 계산 과정에 반영하였다.

기-액 상평형 상태에서, 압력과 기상 물분율을 알고

* Corresponding Author : Sungjin Lee, Tel : 043-649-1286, E-mail : pappi68@hanmail.net
Department of Clinical Laboratory Science, Semyung University, 65 Semyung-ro, Jecheon City, Chungbuk 27136, Korea

있을 때 이슬점에서의 온도와 액상 몰분율을 계산하기 위한 다양한 방법이 있다¹²⁾.

액상과 기상의 특성을 상태방정식만으로 계산하는 방법이 있으며, 액상의 특성은 활동도계수 식으로 기상의 특성은 상태방정식을 이용하여 계산하는 방법도 있으며, 저압 조건 하에서 수정된 라울의 법칙¹³⁾을 적용하여 기상은 이상기체로 가정하고 액상의 특성은 Wilson¹⁴⁾, UNIQUAC¹³⁾ 식 등을 이용하여 계산하는 방법도 있다¹²⁾.

이성분계 혼합물의 이슬점을 계산하기 위해서는 이성분계 파라미터가 필요하다. 이를 얻기 위한 일반적인 방법은, 기-액 상평형 실험 데이터와 모델식의 이성분계 파라미터를 상관시켜 최적화된 이성분계 파라미터를 계산하는 방법이다.

본 연구에서는 이슬점을 계산하기 위한 이성분계 파라미터를 기-액 상평형 데이터가 아닌 측정된 인화점에 의해 확보하고자 한다.

실험시스템으로 cyclohexanol+aniline 계와 cyclohexanol+cyclohexanone 계를 선정하였다. Aniline은 염료, 의약품, 향료 등을 제조하기 위한 원료로 사용되고 있으며, cyclohexanol은 aniline의 용매로 사용될 수 있다. 또한 Cyclohexanone과 cyclohexanol은 아디프산과 카프로락탐의 원료로 사용되는 중요 물질들이다.

선정된 이성분계 혼합물의 인화점은 Seta-flash 밀폐식 장치에 의해 측정되었다. 실험값을 라울의 법칙에 의해 예측한 인화점과, Wilson 식을 이용한 최적화 기법에 의해 계산한 인화점과 각각 비교하였다.

또한 측정된 인화점에 의해 Wilson 식의 이성분계 파라미터를 계산하였으며, 이를 이용해 이슬점에서의 온도와 액상 몰분율을 각각 계산하였다.

2. 인화점 측정

Cyclohexanol(99.0%)과 aniline(99.0%)는 Junsei 사에서, cyclohexanone(99.0%)은 Samchun 사에서 각각 구입하였으며, 별도의 정제 과정 없이 사용하였다.

미국 Koehler 사에서 제조한 Seta-flash 밀폐식 장치를 사용하여 cyclohexanol+aniline 계와 cyclohexanol+cyclohexanone 계의 인화점을 측정하였다. 측정 장치는 시료컵(용량 2 ml), 시간 조절기, 시험염 조절기, 시험염 공급부, 온도계 그리고 온도 조절기 등으로 구성되어 있다. 이 장치의 구조도는 기존에 발표한 논문¹⁵⁾에 제시되어 있다.

각각 다른 몰분율로 시약들을 혼합하였으며, ASTM D3278¹⁶⁾의 규정에 따라 인화점을 측정하였다.

3. 인화점과 이슬점 예측

3.1 라울의 법칙에 의한 인화점 예측

기상을 이상기체로, 액상을 이상용액으로 가정하면, i성분의 기-액 상평형 상태를 아래와 같은 라울의 법칙으로 표시할 수 있다.

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

여기서 y_i 는 i성분의 기상 몰분율, x_i 는 i성분의 액상 몰분율, P_i^{sat} 는 i성분의 포화증기압, P 는 전체압력이다.

성분 i의 하부인화한계(LFL_i)는 다음과 같다.

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

여기서 $P_{i,fp}^{sat}$ 는 인화점에서의 i성분의 포화증기압이다.

Le Chatelier¹⁷⁾는 가연성 이성분계 혼합물의 인화점을 다음의 식을 만족하는 온도로 정의하였다.

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

Liaw 등¹⁰⁾의 제안에 의해, 식 (1)과 식 (2)를 식 (3)에 삽입하면 다음의 식이 유도된다.

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

아래의 Antoine 식¹³⁾에 의해 P_i^{sat} 와 $P_{i,fp}^{sat}$ 는 계산할 수 있다.

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

여기서 $t(^{\circ}C)$ 는 섭씨 온도이고, 압력 단위는 mmHg 이며, A_i , B_i 와 C_i 는 성분 i의 Antoine 상수로서 문헌¹⁸⁾에서 확보할 수 있다.

식 (4)를 만족하는 온도를 계산하였으며, 그 온도를 인화점으로 결정하였다¹⁰⁾.

3.2 최적화 기법에 의한 인화점 계산

기상은 이상기체로 가정하고 액상의 비이상성을 고

려하면, i성분의 기-액 상평형 상태는 다음과 같은 수정된 라울의 법칙으로 표현된다.

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

여기서 γ_i 는 i성분의 액상 활동도 계수이다.

Liaw 등¹⁰⁾의 제안에 따라, 식 (3)에 식 (2)와 식 (6)를 대입하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{x_1 \gamma_1 P_1^{sat}}{P_{1,fp}^{sat}} + \frac{x_2 \gamma_2 P_2^{sat}}{P_{2,fp}^{sat}} = 1 \quad (7)$$

식 (7)에서 활동도계수인 γ_i 는 Wilson 식에 의해 계산할 수 있다.

이성분계 파라미터와 인화점을 구하기 위해 설정한 목적함수(F)는 다음과 같다¹⁹⁾.

$$F = \sum_{i=1}^N |T_{i,fp}^{exp} - T_{i,fp}^{cal}| \quad (8)$$

여기서 N은 측정된 인화점의 총 개수, $T_{i,fp}^{exp}$ 는 인화점 측정치, $T_{i,fp}^{cal}$ 는 식 (7)을 만족하는 인화점 계산치이다.

또한 Wilson 식의 이성분계 파라미터인 A_{12} 와 A_{21} 는 다음과 같다.

$$A_{12} = \lambda_{12} - \lambda_{11}, \quad A_{21} = \lambda_{21} - \lambda_{22} \quad (\text{cal/mol}) \quad (9)$$

위 식의 A_{12} 와 A_{21} 의 초기치를 임의로 설정하였으며, SIMPLEX 방법²⁰⁾에 따라 그 초기치를 변화시켰고, 그 순간마다 식 (7)을 만족하는 온도가 계산되었다. 목적함수가 최저치가 되었을 때의 이성분계 파라미터를 구하였으며, 그때의 온도를 인화점으로 결정하였다.

3.3 이슬점 예측

다음의 두 방법에 의해 이슬점을 예측할 수 있다²¹⁾.

- 1) DEW P : y_i 와 T 가 주어질 때, x_i 와 P 계산
- 2) DEW T : y_i 와 P 가 주어질 때, x_i 와 T 계산

여기서 $T(^{\circ}\text{C})$ 는 기-액 상평형 상태에 있는 혼합물의 온도이다.

본 논문에서는 이슬점을 계산하기 위해 “DEW T”의 방법을 사용하였다.

기상은 이상기체로 가정하고 액상의 비이상성을 고려하면, 수정된 라울의 법칙에 의해 기-액 상평형 상태는 식 (6)과 같이 표현된다.

식 (6)의 활동도계수인 γ_i 는 Wilson 식에 의해 구해졌으며, “3.1절”의 방법으로 구해진 이성분계 파라미터가 사용되었다. 식 (6)의 y_i 와 P 는 문헌¹⁸⁾에서 얻었으며, P_i^{sat} 는 식 (5)에 의해 계산되었다.

문헌²¹⁾에서 제시한 알고리즘에 의해 “DEW T” 계산이 수행되었다.

4. 결과 및 고찰

Seta-flash 밀폐식 장치를 사용하여 인화점을 측정된 결과를 Table 1~2와 Fig. 1~2에 제시하였다.

그림에서 알 수 있듯이, cyclohexanol+aniline 계에서는 cyclohexanol의 몰분율이 증가할수록 혼합물의 인화점이 감소하는 경향을 보였으며, cyclohexanol+cyclohexanone 계에서는 cyclohexanol의 몰분율이 증가할수록 혼합물의 인화점이 감소하는 경향을 보였다. 또한 본 연구의 이성분계 혼합물들은 최소인화점 현상(minimum flash point behaviour)을 보이지 않았다. 최소인화점 현상은 혼합물을 구성하는 순수 성분의 인화점 중 가장 작은 값 보다 혼합물의 특정 조성에서의 인화점이 낮아진 현상을 의미한다²²⁾. 따라서 본 연구의 이성분계 혼합물들의 화재 및 폭발의 위험도는, 상대적으로 낮은 인화점을 가진 순수 성분 보다 높아질 가능성이 없는 것으로 판단된다.

Raoult의 법칙과 최적화 기법에 의해 인화점을 계산하였으며, 그 결과를 Table 1~2와 Fig. 1~2에 각각 제시하였다.

식 (4)와 식 (7)의 P_i^{sat} 와 $P_{i,fp}^{sat}$ 를 계산하기 위해 필요한 Antoine 상수는 문헌자료¹⁸⁾에서 확보하여 Table 3에 제시하였으며, “3.2”절에서 제시한 최적화 기법에

Table 1. The experimental and calculated flash points for the cyclohexanol(1)+aniline(2) system

Mole fractions		Flash points ($^{\circ}\text{C}$)		
x_1	x_2	Exp.	Raoult's law	Wilson
1.000	0.000	60.0	-	-
0.900	0.100	61.0	60.52	60.59
0.699	0.301	62.0	61.62	61.79
0.500	0.500	63.0	62.77	62.99
0.300	0.700	64.0	64.00	64.20
0.125	0.875	65.0	65.14	65.26
0.000	1.000	66.0	-	-
A.A.E.		-	0.25	0.22

Table 2. The experimental and the calculated flash points for the cyclohexanol(1)+cyclohexanone(2) system

Mole fractions		Flash points (°C)		
x_1	x_2	Exp.	Raoult's law	Wilson
1.000	0.000	60.0	-	-
0.899	0.101	57.0	57.48	56.83
0.701	0.299	53.0	53.12	51.72
0.500	0.500	47.0	49.35	47.74
0.300	0.700	44.0	46.11	44.81
0.101	0.899	43.0	43.30	42.77
0.000	1.000	42.0	-	-
A.A.E.		-	1.07	0.65

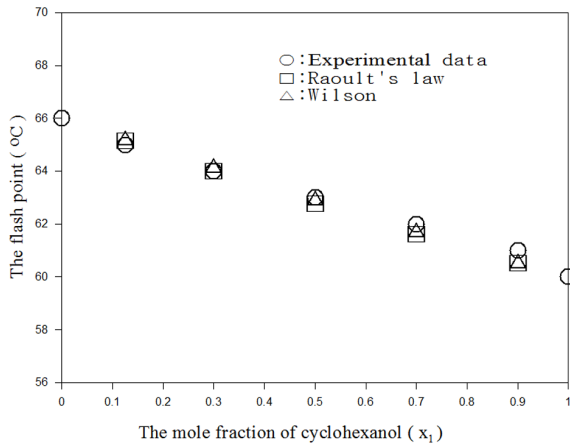


Fig. 1. The comparison of calculated flash points with experimental flash points for the cyclohexanol(1)+aniline(2) system.

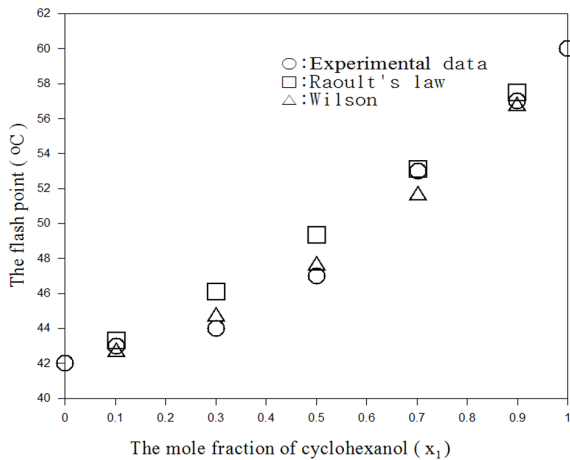


Fig. 2. The comparison of calculated flash points with experimental flash points for the cyclohexanol(1)+cyclohexanone(2) system.

Table 3. The antoine coefficients of each component

Components	A	B	C
Cyclohexanol	8.3534	2258.560	251.624
Aniline	7.4644	1840.790	216.923
Cyclohexanone	7.4705	1832.200	244.200

의해 식 (8)의 목적함수를 최소화시킨 Wilson 식의 이성분계 파라미터는 Table 4에 제시하였다.

Table 1~2에 제시한 A.A.E.(average absolute error)²³⁻²⁵는 측정치와 계산치 간의 절대평균오차이며 측정치에 대한 계산치의 접근성의 정도를 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$A.A.E. = \sum_{i=1}^N \frac{|ED_i - CD_i|}{N} \quad (10)$$

여기서 N 은 측정치의 총 개수, ED_i 는 i 번째 측정치, CD_i 는 i 번째 계산치이다.

Cyclohexanol+aniline 계의 경우, 라울의 법칙에 의한 인화점 계산치와 측정치 간의 절대평균오차는 0.25°C이었으며, 최적화 기법에 의한 인화점 계산치와 측정치 간의 절대 평균 오차는 0.22°C이었다. Cyclohexanol+cyclohexanone 계에서 라울의 법칙을 이용한 인화점 계산치와 측정치 간의 절대평균오차는 1.07°C이었으며, 최적화 기법에 의한 인화점 계산치와 측정치 간의 절대평균오차는 0.65°C이었다.

절대평균오차에서 확인할 수 있듯이, 라울의 법칙에 의한 계산치 보다 최적화 기법의 계산치가 측정치에 다소 근접하였다.

Table 4. The optimized binary parameters of Wilson equations for each binary system

Systems	Parameters	Wilson	
		A_{12}	A_{21}
Cyclohexanol(1)+aniline(2)		-208.1355	186.0650
Cyclohexanol(1)+cyclohexanone(2)		927.8370	-391.3793

Table 5. The experimental and calculated data for the cyclohexanol(1)+aniline(2) system

Experimental data ¹⁸⁾			Wilson	
T^{exp} (°C)	x_1	y_1	T^{cal}	x_1^{cal}
182.5	0.035	0.079	183.2	0.043
180.0	0.088	0.181	181.3	0.103
173.2	0.276	0.446	175.8	0.294
170.8	0.355	0.536	173.8	0.373
168.6	0.444	0.608	172.0	0.444
167.1	0.508	0.662	170.7	0.502
164.6	0.682	0.790	167.4	0.658
163.1	0.807	0.873	165.0	0.777
161.8	0.917	0.945	162.9	0.897
A.A.E.			2.3	0.016

Table 6. The experimental and calculated data for the cyclohexanol(1)+cyclohexanone(2) system

Experimental data ¹⁸⁾			Wilson	
T ^{exp} (°C)	x ₁	y ₁	T ^{cal}	x ₁ ^{cal}
104.6	0.987	0.980	103.6	0.990
102.8	0.886	0.820	101.4	0.890
101.6	0.835	0.724	100.0	0.836
99.4	0.715	0.567	97.6	0.716
96.4	0.501	0.375	94.7	0.527
95.2	0.415	0.290	93.6	0.422
92.8	0.199	0.135	92.0	0.193
92.0	0.101	0.068	91.5	0.088
91.2	0.078	0.051	91.3	0.063
91.0	0.055	0.034	91.1	0.040
A.A.E.			1.1	0.010

이슬점의 온도와 액상 몰분율의 계산 결과는 Table 5~6에 각각 제시하였다. 이슬점 계산을 위한 Wilson 식의 이성분계 파라미터는 Table 4에서 제시된 값을 사용하였다.

Cyclohexanol+aniline 계에서, 이슬점 온도의 절대평균 오차는 2.3°C이었으며, 이슬점에서의 액상 몰분율의 절대평균오차는 0.016이었다. Cyclohexanol+cyclohexanone 계의 경우, 이슬점 온도의 절대평균오차는 1.1°C이었으며, 이슬점에서 액상 몰분율의 절대평균오차는 0.010이었다.

절대평균오차에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 제시한 이슬점 계산치가 비교적 측정치를 잘 모사함을 확인할 수 있다.

5. 결론

Seta-flash 밀폐식 장치를 사용하여 가연성 이성분계 혼합물의 인화점을 측정하였다.

라울의 법칙과 최적화 기법에 의해 각각 인화점을 예측하였다. 두 방법에 의한 인화점 계산치와 측정치 간 차이를 절대평균오차에 의해 비교했을 때, 최적화 기법에 의한 계산치가 측정치에 보다 근접하였다.

최적화 기법에 의해 계산한 Wilson식의 이성분계 파라미터를 이용하여 이슬점 온도와 액상 몰분율을 계산하였다. Cyclohexanol+aniline 계에서 이슬점 온도의 절대평균 오차는 2.3°C이었고, 이슬점에서의 액상 몰분율의 절대평균오차는 0.016이었다. Cyclohexanol+cyclohexanone 계에서 이슬점 온도의 절대평균오차는 1.1°C이었으며, 이슬점에서의 액상 몰분율의 절대평균오차는 0.010이었다.

절대평균오차에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 제시한 이슬점 계산치가 비교적 측정치를 잘 모사함을 확인할 수 있었다.

따라서 기-액 상평형 데이터를 확보할 수 없는 경우에, 인화점 측정치에 의한 이슬점 예측 방법이 효과적인 수단으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글: 이 논문은 2016학년도 세명대학교 교내 학술연구비 지원에 의한 연구임.

References

- 1) A. Haghtalab, J.Y. Seyf, and Y. Mansouri, "Flash Point Prediction of the Binary and Ternary Systems using the Different Local Composition Activity Coefficient Models", *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 415, pp. 58-63, 2016.
- 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) E. Meyer, "Chemistry of Hazardous Material", 2nd ed., Prentice-Hall, 1990.
- 4) K. Satyanarayana and M.C. Katati, "Note : Correlation of Flash Points", *Fire and Materials*, Vol. 15, pp. 97-102, 1991.
- 5) G.S. Patil, "Estimation of Flash Point", *Fire and Materials*, Vol. 12, pp. 127-132, 1988.
- 6) L. Caoire, S. Paulmier, and V. Naudet, "Experimental Determination and Estimation of Closed Cup Flash Points of Mixtures of Flammable Solvents", *Process Saf. Prog.*, Vol. 25, No. 1, pp. 33-39, 2006.
- 7) L. Caoire, S. Paulmier, and V. Naudet, "Estimation of Closed Cup Flash Points of Combustible Solvent Blends", *J. Phy. Chem. Ref. Data*, Vol.35, No. 1, pp. 9-14, 2006.
- 8) 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.
- 9) D. White, C.L. Beyler, C. Fulper, and J. Leonard, "Flame spread on aviation fuels", *Fire Saf. J.*, Vol. 28, pp. 1-31, 1997.
- 10) 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.
- 11) S.J. Lee and D.M. Ha, "The Lower Flash Points of Binary Systems Containing Non-Flammable Component", *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 20, No. 5, pp. 799-802, 2003.
- 12) D.M. Ha and S.J. Lee, "Bubble Point Calculation using

- Experimental Flash Points of Binary Solutions”, *KIGAS*, Vol. 31, No. 6, pp. 39-44, 2016.
- 13) B.E. Poling, J.M. Prausnitz, and J.P. O’Connell, “The Properties of Gases and Liquids”, 5th Ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
 - 14) G. M. Wilson, “Vapor Liquid Equilibrium. XI. A New Expression for the Excess Free Energy of Mixing”, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 86, pp. 127-130, 1964.
 - 15) D.M. Ha and S.J. Lee, “The Flash Point Measurement for Binary Flammable Mixture”, *KIGAS*, Vol 18, No. 5, pp. 60-65, 2014.
 - 16) American Society for Testing Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 06.01, 1999.
 - 17) Le Chatelier, “Estimation of Firedamp by Flammability limits”, *Ann. Minnes*, Vol. 19, pp. 388-392, 1891.
 - 18) J. Gmehing, U. Onken and W. Arlt, “Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection”, 1, Part1-Part7, DECHEMA, 1980.
 - 19) D.M. Ha and S.J. Lee, “Prediction and Measurement of the Lower Flash Points for Flammable Binary Solutions by Using a Setaflash Closed Cup Tester”, *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 28, No. 5, pp. 1161-1165, 2011.
 - 20) J.L. Kuester and J.H. Mize, “Optimization Techniques with Fortran”, McGraw-Hill, New York, 1973.
 - 21) J.M. Smith and N.C. Van Ness, “Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics”, McGraw-Hill, New York, 1975.
 - 22) M. Vidal, W.J. Rogers, and M.S. Mannan, “Prediction of Minimum Flash Behaviour for Binary Mixtures”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 84, pp. 1-9, 2006.
 - 23) J. Lim, S. Jang, H. Kim, H.K. Cho, and M.S. Shin, “Solubility of Triclocarban in Pure Alkanols at Different Temperatures”, *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 30, No. 1, pp. 181-186, 2013.
 - 24) D.M. Ha and S.J. Lee, “Flash Point Calculation for n-Octane+n-Decane and n-Octane+n-Dodecane by UNIFAC Group Contribution Model”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol 30, No. 4, pp. 86-91, 2015.
 - 25) D.M. Ha and S.J. Lee, “Bubble Point Calculation using Experimental Flash Points of Binary Solutions”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol 31, No. 6, pp. 39-44, 2016.