

MSDS (Material Safety Data Sheet)를 위한 벤질알코올 연소특성치의 측정 및 예측

하동명[†]

세명대학교 보건안전공학과
27136 충청북도 제천시 세명로 65
(2016년 11월 9일 접수, 2016년 12월 26일 수정본 접수, 2016년 12월 27일 채택)

The Measurement and Prediction of the Combustible Properties of Benzyl-Alcohol for MSDS (Material Safety Data Sheet)

Dong-Myeong Ha[†]

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, 65, Semyeong-ro, Jecheon-si, Chungbuk, 27136, Korea
(Received 9 November 2016; Received in revised form 26 December 2016; accepted 27 December 2016)

요 약

사업장에서 화재 및 폭발을 예방하기 위해서는 연소특성치로 인화점, 폭발한계, 최소자연발화온도 등을 들 수 있다. 화학공정의 안전을 위해서 취급 물질의 정확한 물질보건안전자료(MSDS)의 연소특성치 사용은 매우 중요하다. 화학산업에서 다양하게 사용되고 있는 벤질알코올의 안전한 취급을 위해서 인화점과 최소자연발화온도를 측정하였다. 벤질알코올의 폭발한계는 실험에서 얻어진 하부인화점을 이용하여 계산하였다. 벤질알코올의 Setaflash 밀폐식은 90 °C, Pensky-Martens 밀폐식에서는 93 °C 그리고 Tag 개방식에서는 97 °C, Cleveland 개방식에서는 100 °C로 측정되었다. ASTM E659 장치에 의한 측정된 벤질알코올의 최소자연발화온도는 408 °C로 측정되었다. Setaflash 밀폐식에 의해 측정된 벤질알코올의 하부인화점 90 °C의 폭발한계는 1.17 vol%로 계산되었다. 본 연구에서는 Setaflash 밀폐식에 의해 측정된 벤질알코올의 하부인화점을 이용하여 폭발한계의 예측이 가능하였다.

Abstract – The combustion properties for the prevention of the fire and explosion in the work place are flash point, explosion limit, autoignition temperature (AIT) etc.. The using of the corrective combustion properties of the MSDS (Material Safety Data Sheet) of the handling substance for the chemical process safety is very important. For the safe handling of benzyl alcohol which is widely used in the chemical industry, the flash point and the AIT were measured. And, the lower explosion limit (LEL) of benzyl alcohol was calculated by using the lower flash point which obtained in the experiment. The flash points of benzyl alcohol by using the Setaflash and Pensky-Martens closed-cup testers measured 90 °C and 93 °C, respectively. The flash points of benzyl alcohol by using the Tag and Cleveland open cup testers are measured 97 °C and 100 °C. The experimental AIT of benzyl alcohol by ASTM 659E tester was measured as 408 °C. The LEL of benzyl alcohol measured by Setaflash closed-cup apparatus was calculated as 1.17 vol% at 90 °C. In this study, it was possible to predict the LEL by using the lower flash point of benzyl alcohol which measured by Setaflash closed-cup tester.

Key words: MSDS (Material Safety Data Sheet), Benzyl-Alcohol, Process Safety, Combustion Properties, Flash Point, Lower Explosion Limit (LEL), Autoignition Temperature (AIT)

1. 서 론

화학물질을 취급하고 있는 사업장이나 연구기관 등에서는 이들 물질을 안전하게 취급하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재 사용되고 있는 화학물질들에 대한 올바른 취급, 처리, 수송 방법 등을 숙지하

지 않으면 안전성을 확보할 수 없다. 따라서 화학물질을 안전하게 사용하기 위해서는 취급 물질의 정보를 정확하게 알아야 한다. 특히 화학 산업에서의 화재 및 폭발의 예방하기 위해서 가연성물질의 정확한 연소특성치를 파악해야 한다. 화재 및 폭발에 관련된 여러 특성치가 있지만, 대표적인 연소특성치로 인화점, 폭발한계, 최소자연 발화온도 등을 들 수 있다[1,2].

인화점은 가연성물질의 잠재적 위험성을 나타내는 연소특성값이며, 취급물질의 안전 기준을 마련하는데 중요한 파라미터이다. 인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나눌 수 있으며, 일반적으로

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hadm@semyung.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하부인화점을 인화점이라고 한다. 폭발한계 역시 폭발하한계와 상한계로 나누어지며, 발화원이 존재할 때 가연성가스 및 증기가 공기와 혼합하여 특정 농도 범위 내에서만 연소가 이루어지는 범위를 말한다. 실험 조건에 따라 측정값에 영향을 받으므로 문헌들마다 다른 값들이 제시되고 있다. 취급 물질 가운데 폭발한계를 실험하기 어려운 경우는 측정된 인화점을 사용하여 계산할 수 있다. 최소자연발화온도(Autoignition Temperature, AIT)는 산화 현상에 의해 결정되는 측정값으로써 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화할 수 있는 최저온도라고 한다[3,4].

본 연구에서 선정한 벤질알코올(Benzyl-Alcohol)은 phenylcarbinol라고 하며, benzaldehyde를 출발물질로 하여 합성한다. 약한 방향향을 갖는 무색의 액체로서 공기에 닿아서 서서히 산화되어 벤즈알데히드에서 벤조산이 된다. 용도로는 향장품, 비누용 향료로서 이용되며, 또한 용제, 에스테르 원료로서도 사용되고 있다. 벤질알코올은 국소 마취성 및 방부성을 갖고 있기 때문에 근육 또는 피하 주사제의 조제 등에 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 벤질알코올의 하부인화점과 최소자연발화온도를 측정하여 기존의 문헌들에 제시된 값들과 비교하였고, 문헌들에 제시된 벤질알코올의 폭발하한계의 타당성을 검토하기 위해서는 측정된 하부인화점을 이용하여 폭발하한계를 계산한 후 기존 문헌값들과 비교하였다. 본 연구에서 측정된 벤질알코올의 인화점과 최소자연발화온도 그리고 폭발하한계의 예측 방법은 이를 취급하는 공정에서 방화 및 방폭 설계를 위한 가이드 마련과 MSDS (Material Safety Data Sheet)의 제시하고 있는 연소특성치의 개선에도 활용하고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 벤질알코올의 물리적 및 연소특성

화학산업에서는 유해·위험 물질이 많이 사용되고 있으며, 이를 사용한 후 폐액을 폐기물 업체에 위탁하여 처리하고, 소량인 경우는 공정에서 바로 처리하는 경우가 많다. 특히 처리 및 취급 시 배출된 증기는 주위의 발화원에 의해 화재 및 폭발을 유발할 수도 있으며, 독성을 지닌 물질은 인체에 큰 영향을 준다. 그리고 취급 물질들 가운데 불안정한 연소 특성을 갖고 있는 물질은 중대 사고로 전이되는 경우가 많다. 벤질알코올의 연소특성치를 조사하기 전에 물리적 특성을 요약하여 Table 1에 나타내었다[5-7].

벤질알코올은 위험물안전관리법 제4류위험물의 제3석유류(수용

성액체, 지정수량 1000L)이고, 산업안전보건법과 폐기물관리법에 특별히 규정하고 있지 않다. 그리고 GHS (Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)의 인화성액체 분류기준에서는 Category 4(인화점 60~93 °C)에 해당하는 물질이며, NFPA (National Fire Protection Association)에서는 보건위험성 2, 화재위험성 1, 반응위험성 0으로서 다른 가연성물질에 비해 반응성은 적은 편이다.

벤질알코올의 증기가 연소범위에 있을 때 는 발화원에 화재와 폭발을 발생할 수 있고, 가열시 용기가 폭발할 수 있다. 피해야할 발화원은 정전기, 전기불꽃, 화염, 고열 등이며, 증기는 공기보다 무거워서 누출될 경우 발화원에 의해 점화될 때 순식간으로 확산될 수 있다.

2-2. 벤질알코올의 연소특성치 분석

각 국에서는 사업장, 연구소 그리고 학교 실험실 등에서 유해·위험물질을 취급하는 종사자들의 안전과 보건을 위해서 MSDS 자료를 제공하고 있다. 우리나라에서 한국산업안전보건공단(KOSHA), 환경부의 화학물질안전원의 화학물질정보시스템 그리고 국민안전처의 위험물정보관리시스템 등에서 제공하고 있다. 그러나 우리나라뿐만 아니라 각 국에서 제공되는 MSDS에 제시된 연소특성값들이 서로 상이한 경우가 많다.

본 연구에서 여러 연소특성치 가운데 대표적인 특성치인 인화점, 폭발한계, 최소자연발화온도 등으로 한정하였다.

인화점의 측정 방법은 밀폐식(Closed-cup, CC)과 개방식(Open Cup, OC)이 있다. 널리 사용되고 있는 밀폐식으로는 Setaflash와 Pensky-Martens방식이 있으며, 개방식은 Tag와 Cleveland방식 등이 있다. 최근 폭발한계의 측정은 20L 구형 장치를 사용하고 있으며, 점화원의 위치와 장치의 크기 등 측정 조건에 따라 측정값이 달라진다. 최소자연발화온도(AIT)는 역시 장치의 특성 및 실험 조건에 따라 다른 측정값을 얻게 된다[2,4].

본 연구에서 벤질알코올의 정확한 연소특성치를 분석하기 위해서 KOSHA (Korea Occupational Safety and Health Agency)의 MSDS를 비롯해 문헌들에서 제시하고 있는 연소특성치들을 정리하여 Table 2에 나타내었다[7-15].

Table 2에서 알 수 있듯이 벤질알코올의 인화점은 KOSHA MSDS, NFPA에서 가장 낮은 93 °C, Stephenson에서 가장 높은 값인 104.4 °C(OC)를 제시하고 있으며, 문헌에 따라 약 11 °C의 차이를 보이고 있다. AIT는 문헌에 따라 428 °C와 436 °C로서 약 8 °C의 정도를 보이고 있으며, 이는 두 개의 문헌에서 다른 문헌들이 인용

Table 1. Physical properties of benzyl alcohol

Properties	Component	Benzyl alcohol
CAS number		100-51-6
Molecular formula		C ₇ H ₈ O
Boiling point		204.7 °C
Melting point		-15.3 °C
Vapor pressure		0.015 Pa (at 25 °C)
Viscosity		5.474 mPa·s (at 25 °C)
Solubility (Water)		42.9 g/L (at 25 °C)
Critical temperature		442 °C
Critical pressure		4.3 Mpa
Vapor density (Air=1)		3.72
Specipic gravity (Water=1)		1.043 (at 20 °C)

Table 2. Comparison of explosion limits, flash points and AITs of benzyl alcohol by several references

References	Flash points (°C)	AITs (°C)	LEL-UEL (vol%)
KOSHA MSDS [8]	93	436	1.3-13.0
NFPA [9]	93	436	-
Sigma [10]	100.6	436	-
Ignition [11]	94	428	1.7-15.0
SAX [7]	100.6	436	-
Lange [12]	100	436	-
Stephenson [13]	93.3, 96(CC) 104.4(OC)	-	-
Hilado [14]	-	436	-
Scott [15]	-	428	-

한 것으로 본다. 폭발하한계에 대해 KOSHA MSDS에서 하한계는 1.3 vol% 그리고 Ignition에서는 1.7 vol%로 0.4 vol%의 차이를 보이고 있으며, 폭발상한계는 문헌에 따라 약 2.0 vol%의 차이를 보이고 있다. 따라서 산업현장에서 널리 사용되고 있는 벤질알코올을 취급하는 공정의 안전을 위해서는 정확한 연소특성치 파악이 필요하다.

3. 실험재료 및 측정장치

3-1. 재료

본 연구에서 사용한 벤질알코올(Junsei, 99%, Japan)은 별도의 정제과정을 거치지 않고 사용하였다.

3-2. 인화점 측정

본 연구에서 Pensky-Martens와 Setaflash 밀폐식 그리고 Tag와 Cleveland 개방식 인화점 장치를 사용하였다. 그동안 여러 문헌들에서 인화점 구조 및 측정 방법에 대해서 언급하였으므로 간략히 설명한다.

Setaflash 밀폐식 장치는 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있다. 몸체부는 가열공기조, 전원 개폐기, 전열 조절기 등으로 구성되어 있다. Pensky-Martens 밀폐식 장치는 몸체부, 실험 용기 장치부, 교반부, 화염 공급부로 나눌 수 있다. Tag 개방식 장치는 가연성 액체의 인화점 및 연소점 측정이 가능한 장치로, 시료컵, 승온 다이얼, 수조, 시험염 발생장치 등으로 구성되어 있다. Cleveland 개방식 장치는 인화점 및 연소점을 측정하는 장치로, 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있다[16,17].

각 인화점 측정장치들의 용기 특성 및 시험방법을 요약하여 Table 3에 나타내었다. 그리고 각 장치에 의한 인화점 측정의 3회 혹은 5회를 실시하였으며, 3회에서 동일한 값으로 측정되면 이를 채택하였고, 만일 3회 측정에서 동일한 측정값이 되지 않은 경우는 5회까지 측정하여 3회 이상 동일하게 측정된 값을 채택하였다[16,17].

3-3. 자연발화온도 측정

벤질알코올의 최소자연발화온도를 측정하기 최근까지 널리 사용되고 있는 ASTM E659 장치를 사용하였다. 측정 방법은 기존의 제시된 문헌값들을 참조하여 기준 온도를 설정하고, 실험 장치를 가열하며, 설정온도에 도달하면 플라스크 내부에 주사기로 시료를 0.1 ml를 넣었다. 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 다시 온도를 설정한 후 10분 전에 발화가 일어나면 발화된 온도 보다 30 °C 낮게 설정하고 실험하면서 진행하면서 2~5 °C 혹은 10 °C 씩 증가시켜 측정하면서 자연발화 시간과 발화온도를 기록하였다[2,17].

4. 결과 및 고찰

4-1. 측정된 하부인화점에 의한 폭발하한계 예측

Table 2에 제시된 벤질알코올의 폭발하한계 자료의 타당성을 검토하기 위해서 증기압 추산식인 Antoine 식을 사용하여 계산하였으며, Antoine 식은 다음과 같다[18].

$$\log P^f = 7.24084 - \frac{1638.405}{(t + 170.371)} \quad (1)$$

여기서, P^f 는 증기압(mmHg)이고, t 는 온도(°C)이다.

식 (1)을 이용하여 측정된 인화점을 대입하여 폭발하한계를 예측할 수 있다. 본 연구에서 사용된 Setaflash와 Pensky-Martens의 밀폐식(CC), Tag와 Cleveland의 개방식(OC)에 의한 측정된 하부인화점을 Table 4에 나타내었다.

벤질알코올의 하부인화점의 경우, 밀폐식인 Setaflash에서는 90 °C, Pensky-Martens에서는 93 °C, 개방식인 Tag에서는 97 °C와 Cleveland에서는 100 °C로 측정되었다. 본 연구에서 Setaflash 장치에 의해 측정된 하부인화점 90 °C는 Table 2에 가장 낮게 제시된 KOSHA MSDS와 NFPA의 93 °C 보다는 3 °C 낮게 측정되었으며, Cleveland 개방식에서 측정된 100 °C는 Sigma, SAX, Lange의 문헌값과 일치하였다.

본 실험에서 얻은 하부인화점을 이용하여 계산된 폭발하한계 값을 역시 Table 4에 나타내었다. Setaflash 밀폐식에서 측정된 하부인화점 90 °C를 식 (1)에 적용한 결과 폭발하한계는 1.17 vol%로 계산되었다. 예측된 폭발하한계 1.17 vol%는 KOSHA MSDS에서 제시한 1.3 vol% 보다는 0.13 vol% 낮게 계산되었다.

본 연구에서 측정된 인화점 90 °C를 공정에 사용하는 것이 타당하며, 하부인화점을 이용하여 계산된 폭발하한계 1.17 vol%는 방폭 공정의 안전을 위해 적용하는 것에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서 측정된 하부인화점을 적용하여 폭발하한계의 예측이 가능해짐으로써, 인화점에 의한 폭발하한계 예측은 다른 가연성증기에 적용할 수 있다고 본다.

4-2. 벤질알코올의 자연발화온도 측정 및 고찰

벤질알코올의 새로운 최소자연발화온도(AIT)를 찾기 위해서

Table 4. Comparison of estimated lower explosion limits (LEL) by experimental lower flash points for benzyl alcohol

Testers	Experimental lower flash points (°C)	Estimated LEL by lower flash points (vol%)
Setaflash (CC)	90	1.17
Pensky-Martens (CC)	93	1.24
Tag (OC)	97	1.71
Cleveland (OC)	100	2.00

Table 3. Comparison of several flash point test methods [16,17]

Test methods	Test vessel diameter (cm)	Test vessel depth (cm)	Test vessel volume (ml)	Heating method	ASTM designation
Setaflash closed-cup	5.0	1.0	2 or 4	Sample cup is electrically heated or chilled and sample temperature is kept constant	ASTM D3278
Pensky-Martens closed-cup	5.085	5.6	100	For ordinary liquids, the temperature of the specimen is increased at 5~6 °C/min	ASTM D93
Tag open cup	5.3	5.0	70	The temperature of the specimen is increased at 1±0.25 °C/min	ASTM D1310
Cleveland open cup	6.4	3.4	80	The temperature of the specimen is increased at 5~6 °C/min	ASTM D92

Table 5. Comparison of experimental and predicted ignition delay time by the AIT for benzyl alcohol

No.	T (K)	τ_{exp} (s)	$\ln\tau_{exp}$	τ_{est} (Eq. 3)
1	681	39.97	3.68813	32.41
2	682	34.10	3.52930	31.16
3	693	25.53	3.23985	20.34
4	713	6.97	1.94162	9.69
5	723	4.75	1.55814	6.78
6	733	3.59	1.27815	4.81
7	743	3.13	1.14103	3.44
8	753	2.83	1.04028	2.48
9	763	2.13	0.75612	1.80
10	773	1.69	0.52473	1.32
A.A.D.	-	-	-	2.30

Table 2에서 제시된 기존 문헌들[7-15]에서 가장 낮은 AIT 428 °C를 근거로 390 °C에서 최초 실험한 결과 비발화가 되어, 다시 이 보다 30 °C 높은 420 °C에서 실험한 결과 25.53 sec에서 발화되었다. 다시 20 °C 낮은 400 °C에서 실험한 결과 비발화되어 1~2 °C 상승시켜서 실험한 결과 408 °C, 39.97 sec에서 AIT를 찾을 수 있었다.

벤질알코올의 측정된 AIT 408 °C를 시작 온도로 하여 10~20 °C 상승시켜 실험한 결과 440 °C에서는 6.97 sec, 450 °C에서는 4.75 sec, 460 °C에서는 3.59 sec, 470 °C에서는 3.13 sec, 480 °C에서는 2.83 sec, 490 °C에서는 2.13 sec 그리고 500 °C 1.69 sec에서 발화하였다. 벤질알코올의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험한 결과를 Table 5에 나타내었다.

본 연구에서 측정된 벤질알코올의 AIT 408 °C는 Table 2에 제시된 기존의 문헌값들 가운데 가장 낮은 값인 Ignition [11]에서 제시한 428 °C 보다는 20 °C 낮게 측정되었으며, 벤질알코올을 운전하는 공정의 안전을 위해서는 AIT 408 °C를 사용하여 재해 예방 시스템을 구축하는 것이 타당하다고 본다.

측정된 자연발화온도와 발화지연시간의 실험 자료 근거로 Arrhenius 식 이용하여 최소자승법(Least Square Method)을 적용한 결과 다음과 같은 최적화된 식을 얻었다.

$$\ln \tau = -23.423 + 18320.75 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

식 (2)을 $\log \tau$ 와 $(1/T)$ 의 관계로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\log \tau = -10.17 + 7956.62 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

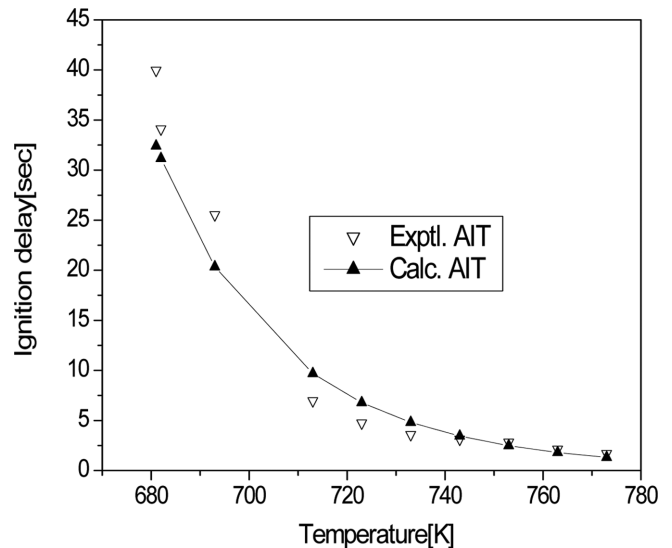
식 (3)에 의한 예측된 발화지연시간들을 측정값과 비교하여 Table 5와 Fig. 1에 나타내었다.

예측값과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 평균절대오차(A.A.D., Average Absolute Deviation)와 결정계수(r^2)를 사용하였다[16,19].

$$A.A.D = \sum \frac{|\tau_{est.} - \tau_{exp.}|}{N} \quad (4)$$

$$r^2 = \left(\frac{SSR}{SST} \right) \quad (5)$$

여기서 $\tau_{est.}$ 는 추산식에 의해 추산된 발화지연시간이고, $\tau_{exp.}$ 는 실험

**Fig. 1. A comparison between the experimental and predicted delay times of benzyl alcohol.**

값이며, N은 자료수, r^2 은 결정계수, SSR은 회귀에 의한 제곱합(Sum of Squares due to Regression), SST는 SSR과 잔차에 의한 제곱합(Sum of Squares due to Residual Error)의 합이다[16].

식 (3)에 의한 예측값과 측정값의 A.A.D.는 2.30 sec, 결정계수(r^2)는 0.95로서 측정값과 예측값은 모사성이 크게 나타났다.

활성화에너지(E)를 계산하기 위해서는 연소 분야에서 널리 사용되고 있는 Semenov식을 이용하여 계산하였다[20].

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + E \quad (6)$$

식 (3)을 식 (6)에 적용한 결과 벤질알코올의 활성화에너지는 151.41 kJ/mol로 계산되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 핵심적인 유기화학 원료인 벤질알코올의 연소특성치를 가운데 하부인화점과 최소자연발화온도(AIT)를 측정하여 문헌 제시된 값들과 비교하였으며, 또한 측정된 하부인화점에 대해 증기압 식을 이용하여 폭발하한계를 추산한 결과를 문헌값과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Setaflash 밀폐식에 의한 하부인화점은 90 °C, Pensky-Marten 밀폐식은 93 °C, Tag 개방식은 97 °C 그리고 Cleveland 개방식은 100 °C로 측정되었다.

(2) Setaflash 장치에 의해 측정된 하부인화점 90 °C를 이용하여 계산된 폭발하한계는 1.17 vol%로서, KOSHA MSDS에 제시된 1.3 vol% 보다는 약 0.13 vol% 낮게 계산되었다.

(3) 본 연구에서 측정된 벤질알코올의 최소자연발화온도 408 °C는 기존의 문헌값들 가운데 가장 낮은 428 °C 보다는 20 °C 낮게 측정되었다. 따라서 벤질알코올의 공정 안전을 위한 방화 설계에 새로운 기준을 마련해야 한다.

(4) 벤질알코올의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\log \tau = -10.17 + 7956.62 \left(\frac{1}{T} \right)$$

(5) Semenov식을 이용한 벤질알코올의 활성화에너지(E)는 151.41 kJ/mol로 계산되었다.

(6) 본 연구에서 측정된 하부인화점을 이용한 폭발하한계 예측방법론은 다른 가연성물질의 폭발하한계 예측이 가능해 졌다.

(7) 벤질알코올은 GHS 인화성액체 분류 기준에서 Category 4(인화점 60~93 °C)에 해당하는 물질이다. 그러나 본 연구의 개방식 장치에서 97 °C와 100 °C로 측정됨으로서 GHS 분류의 Category 4에 포함하는 것에 대한 재검토가 필요하다.

References

1. Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 2, 2nd ed., *Butterworth-Heinemann*(1996).
2. Ha, D. M., "A Study on the Appropriateness of the Combustible Properties of MSDS for o-Cresol," *J. of the Korean Society of Safety*, **30**(2), 21-26(2015).
3. Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 2nd ed., *Jone Wiley & Sons*(1998).
4. Ha, D. M., "The Study on Measurement and Prediction of the Combustible Properties for Aniline," *J. of the Korean Institute of Gas*, **18**(4), 44-50(2014).
5. Lide, D. R., Handbook Chemistry and Physics, 76th ed., *CRC Press*(1996).
6. Perry, R. H. and Green, D. W., Perry's Chemical Engineer's Handbook, 7th ed., *McGraw-Hill*(1997).
7. Lewis, R. J., SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials, 11th ed., *John Wiley & Son, Inc.*(2004).
8. KOSHA, <http://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetail.do>.
9. NFPA, Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids, NFPA 325M, *National Fire Protection Association*(1991).
10. Lenga, R. E and Votoupal, K. L., The Sigma Aldrich Library of Regulatory and Safety Data, Volume I-III, *Sigma Chemical Company and Aldrich Chemical Company Inc.*(1993).
11. Babrauskas, V. and I. Handbook, *Fire Science Publishers, Society of Fire Protection Engineers*(2003).
12. Dean, J. A., Lange's Handbook of Chemistry, 14th ed. *McGraw-Hill*(1992).
13. Stephenson, S. M., Flash Points of Organic and Organometallic Compounds, *Elsevier*(1987).
14. Hilado, C. J. and Clark, S. W., "Autoignition Temperature of Organic Chemicals," *Chemical Engineering*, **4**, 75-80(1972).
15. Scott, G. S. Jones, G. W. and Scott, F. E., "Determination of Ignition Temperature of Combustible Liquids and Gases," *Analytical Chemistry*, **20**(3), 238-241(1948).
16. Ha, D. M., "The Measurement and Prediction of the Combustible Properties of Propionic Anhydride," *J. of the Korean Institute of Gas*, **20**(3), 66-72(2016).
17. Ha, D. M., "The Measurement and Prediction of Combustible of Dimethylacetamide (DMAc)," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(5), 553-556(2015).
18. Gmehing, J., Onken U. and Arlt, W., Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection, Vol. 1, Part1-Part7, *DECHEMA*(1980).
19. Cho, S. J., Shin, J. S., Choi, S. H., Lee, E. S. and Park, S. J., "Optimization Study for Pressure Swing Distillation Process for the Mixture of Isobutyl-Acetate and Isobutyl-Alcohol System," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(3), 307-313(2014).
20. Semenov, N. N., Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2, *Princeton University Press, Princeton, N.J.*(1959).