에너지공학, 제25권 제3호(2016)
Journal of Energy Engineering, Vol. 25, No. 3, pp.34~40(2016)
http://dx.doi.org/10.5855/ENERGY.2016.25.3.034

이소아밀알코올의 화재 및 폭발 특성치의 측정 및 예측

하동명†
세명대학교 보건안전공학과
(2016년 7월 22일 접수, 2016년 9월 6일 수정, 2016년 9월 19일 채택)

The Measurement and Prediction of the Fire and Explosion Properties of Isoamyl alcohol

Dongmyeong Ha†
Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University
(Received 22 July 2016, Revised 6 September 2016, Accepted 19 September 2016)

요 약

화학산업에서 다양하게 사용되고 있는 이소아밀알코올의 안전한 취급을 위해서 인화점과 최소자연발화온도를 측정하였다. 폭발하한계는 실험에서 얻어진 하부인화점을 이용하여 계산하였다, 이소아밀알코올의 Setaflash 밀폐식은 42 ℃, Pensky-Martens 밀폐식에서는 43 ℃ 그리고 Tag 개방식에서는 46 ℃, Cleveland 개방식에서는 54 ℃로 측정되었다. ASTM E659 장치에 의한 이소아밀알코올의 최소자연발화온도는 327 ℃로 측정되었다. 측정된 하부인화점 42 ℃에 의한 폭발하한계는 1.41 vol%로 계산되었다. 폭발한계는 측정된 인화점이나 문헌에 제시된 인화점을 이용하여 예측 가능함을 알 수 있었다.

주요어 : 이소아밀알코올, 공정안전, 연소특성치, 인화점, 폭발한계, 최소자연발화온도, ASTM E659

Abstract - For the safe handling of isoamyl alcohol being used in various ways in the chemical industry, the flash point and the autoignition temperature(AIT) of isoamyl alcohol was experimented. And, the lower explosion limit of isoamyl alcohol was calculated by using the lower flash point obtained in the experiment. The flash points of isoamyl alcohol by using the Setaflash and Pensky-Martens closed-cup testers measured 31 ℃ and 33 ℃, respectively. The flash points of isoamyl alcohol by using the Tag and Cleveland open cup testers are measured 43 ℃ and 45 ℃. The AIT of isoamyl alcohol by ASTM 659E tester was measured as 419 ℃. The lower explosion limit by the measured flash point 31 ℃ was calculated as 0.87 vol%. It was possible to predict lower explosion limit by using the experimental flash point or flash point in the literature.

Key words : isoamyl alcohol, process Safety, Fire and Explosion Properties , flash point, explosion limit, autoignition temperature (AIT), ASTM E659

1. 서 론

최근 화학산업의 사고 유형을 살펴보면 누출 뿐만아니라 화재 및 폭발 사고도 날로 증가하고 있다. 산업장에서 화재 및 폭발의 재해를 줄이기 위해서는 현장에서 취급하는 물질의 연소특성치를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 안전을 위한 연소특성치로는 인화점, 폭발한계, 최소자연발화온도 등이 있다[1].

인화점은 가연성액체의 잠재적 위험성을 나타내는 변수로서 안전기준을 마련하는데 중요한 지표가 된다. 인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나누고 있으며, 흔히

†To whom corresponding should be addressed.
Tel : +82-43-649-1321 E-mail : hadm@semyung.ac.kr

하부인화점을 인화점이라 한다. 인화점은 인화성액체의 액면 가까이서 인화할 때 필요한 증기를 발산하는 액체의 최저온도로 정의하고 있다[1]. 폭발한계는 인화성물질(가스 및 증기)을 다루는 공정에서 방폭 설계 시 중요한 변수로써, 발화원이 존재할 때 가연성가스와 공기가 혼합하여 일정 농도 범위 내에서만 연소가 이루어지는 혼합 범위를 말한다. 폭발한계는 온도, 압력, 불활성가스의 농도, 화염전파 방향, 장치의 표준상태, 물리적 상태 등에 영향을 받으므로써 문헌들 마다 다른 값들이 제시 되고 있다. 인화성물질의 폭발한계의 실험하기 어려운 경우는 측정된 인화점을 사용하여 폭발한계를 사용하고 있다. 자연발화(Autoignition 혹은 Spontaneous Ignition)는 가연성 혼합기체에 열 등의 형태로 에너지가 주어졌을 때 스스로 타기 시작하는 산화 현상으로, 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화할 수 있는 최저온도를 최소자연발화온도(Autoignition Temperature, AIT)라고 한다[2].

본 연구에서 선정된 이소아밀알코올(isoamyl alcohol)은 3-methy1-1-butanol, isobutyl carbinol 그리고 isopentyl alcohol이라고도 명명하며 핵심적인 유기 화학원료이다. 이소아밀알코올은 알코올발효 시 에탄올과 함께 소량 생산되는 물질로서 양조식품의 향기 성분 중에서 자주 검출된다. 또한 알칼리 금속류, 알칼리토 금속류에 대한 분석용 분리 추출제로도 사용된다.

본 연구에서는 이소아밀알코올의 인화점과 최소자연발화온도를 측정하여 기존의 문헌들과 비교하였고, 이소아밀알코올의 폭발한계에 대해서는 여러 문헌에 제시된 폭발한계 자료의 타당성을 검토하기 위해서 본 연구에서 측정된 인화점을 이용하여 폭발한계를 예측하고, 이를 기존 문헌들과 비교 검토하였다. 본 연구에서 측정된 이소아밀알코올의 실험 자료와 연소특성의 예측방법은 이소아밀알코올를 취급하는 공정에서 안전 설계를 위한 가이드 마련과 다른 가연성물질의 MSDS(Material Safety Data Sheet)의 적정성 연구에 도움을 주고자 한다.

Table 1. Physical properties of isoamyl alcohol[3,4]

Properties \ Component	Isoamyl alcohol
CAS number	123-51-3
Molecular formula	$C_5H_{12}O$
Boiling point	151.05 ℃
Melting point	-117.25 ℃
Vapor pressure	0.315Pa(at 25 ℃)
Viscosity	3.692mPa·s(at 25 ℃)
Solubility(Water)	25g/L(at 25 ℃)
Critical temperature	306 ℃
Vapor density(Air=1)	3.0
Specipic gravity(Water=1)	0.8129(at 15 ℃)

2. 이론적 배경

2.1 이소아밀알코올의 물리적 특성

대부분의 유해・위험 물질은 제조 공정에서 사용뿐만 아니라 이를 사용한 후 폐액으로 보관하거나 배출되기도 하고, 특히 배출된 액체의 증기는 화재 및 폭발을 할 수도 있으며, 유독성을 지닌 경우에는 인체에 큰 영향을 주기도 한다. 특히 불안정한 연소 특성을 갖고 있는 물질은 발화원에 의해 중대 사고로 전이되는 경우가 많다. 각 나라에서는 사업장의 재해를 예방하기 위해 취급하는 물질의 MSDS 자료를 제공하고 있다. 이소아밀알코올 역시 안전관련 기관에서 유해・위험성 정보를 제공하고 있으며, 많은 헨드북과 논문들에서도 물리적 특성치를 제공하고 있다. Table 1에 이소아밀알코올의 물리적 특성을 요약하여 나타내었다[3,4].

이소아밀알코올은 위험물안전관리법 제 4류위험물의 제 2석유류(수용성액체, 지정수량 1000L)이고, 산업안전보건법은 노출기준설정물질, 폐기물관리법은 지정폐기물로 규정하고 있다. 그리고 GHS(Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)의 인화성액체 분류기준에서는 Catagory 3(인화점 23 ~ 60℃)에 해당하는 물질이며, NFPA(National Fire Protection Association)에서는 건강위험성 1, 화재위험성 2, 반응위험성 0로서 반응성은 적은 편이다.

이소아밀알코올의 증기는 발화원에 화재와 폭발을 일으킬 수 있다. 인화점이나 그 이상에서 폭발성 혼합물을 형성할 수 있고, 가열시 용기가 폭발할 수 있다. 피해야할 발화원은 열, 스파크, 화염, 고열 등 이며, 증기는 공기보다 무거우므로 누출 시 원거리의 발화원으로 부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다. 소화약제로는 알코올 포말, 이산화탄소 또는 물분무를 사용하고, 질식소화 시 건조한 모래 또는 흙을 사용할 수 있다. 저장 및 보관방법은 차고 건조하며 통풍이 잘되는 곳에 저장해야 한다.

2.2 이소아밀알코올의 연소특성치 분석

이소아밀알코올의 연소특성치를 분석하기 위해서 KOSHA(Korea Occupational Safety and Health Agency)의 MSDS를 비롯해 문헌들에서 제시하고 있는 연소특성치들을 정리하여 Table 2에 나타내었다[5-15].

폭발한계는 점화원의 위치에 따라 값이 달라지는데, 일반적으로 폭발범위는 점화 시 화염이 위쪽으로 올라가는 상향전파에서 폭발하한계(LEL, Lower explosion limit)는 낮고, 폭발상한계(UEL, Upper explosion limit)는 높아져서 폭발범위는 넓어지며, 또한 실험 조건에 따라 측정값이 달라진다. 인화점은 하부인화점(Lower flash point)과 상부인화점(Upper flash point)으로 구분한다. 인화점을 측정하는 방법은 밀폐식(Closed-cup, CC)과 개방식(Open cup, OC)이 있다. 밀폐식은 Setaflash와 Pensky-Martens방식이 있으며, 개방식은 Tag와 Cleveland방식 등을 들 수 있다. 인화점 역시 실험 장치 등에 의존하므로 문헌에 따라서 다른 값들이 제시되고 있다. 최소자연발화온도(AIT)는 다른 곳에 아무런 화원을 주지 않고 공기 속의 상온에서 주위로부터 발생되는 열로부터 가연물이 자발적으로 점화되는 최저온도로서. 실험 장치와 조건에 따라 다른 측정 값을 얻게 된다[2].

Table 2에서 알 수 있듯이 이소아밀알코올의 폭발하한계에 대해 KOSHA MSDS, NFPA, Sigma 그리고 SAX 등 대부분의 문헌에서는 1.2vol%를 나타내고 있으며, Ignition에서만 1.4vol%로 제시하고 있다. 문헌에 따라 약 0.2vol%의 차이를 보이고 있다. 또한 폭발상한계는 대부분의 문헌에서 9.0vol%를 제시하고 있으나, SFPE에서는 10.0vol%를 제시하고 있다. 밀폐식 인화점의 경우 NFPA 등에서 가장 낮은 43 ℃를 제시하고 있으며, Sigma에서 가장 높은 값인 46 ℃를 제시하므로 문헌에 따라 3 ℃의 차이를 보이고 있다. 개방식에서는 문헌에 따라 46 ℃와 56 ℃로 제시되고 있다. 그리고 AIT는 300 ~ 365 ℃로서 문헌에 따라 약 65 ℃의 정도를 보이고 있다. 따라서 이소아밀알코올 취급하는 공정의 안전을 위해서는 정확한 연소특성치 파악이 필요하다.

3. 실험재료 및 연소특성 측정 장치

3.1 재료

본 연구에서 사용한 이소아밀알코올(D.S.P. GR, DUkSAN, 순도 95%)은 별도의 정제과정을 거치지 않고 사용하였다.

3.2 인화점 측정

인화점은 여러 매개변수에 의해 영향을 받으며, 주요 변수로는 용기 형태, 시료량, 발화원, 온도 조절기, 주위 압력, 시료의 균일성, 실험자, 자료의 편차 등이 있다.

본 연구에서 Pensky-Martens와 Setaflash 밀폐식 그리고 Tag와 Cleveland 개방식 인화점 장치를 사용하였다[16,17].

그동안 여러 문헌들에서 인화점 측정에 대해 언급하였으므로 본 연구에서는 간략히 언급하고자 한다.

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, Test Cup 장치부, 교반부, 화염 공급부로 나눌 수 있다. Tag 개방식 장치는 가연성 액체의 인화점 및 연소점 측정이 가능한 장치로, 시료컵, 승온 다

Table 2. Comparison of explosion limit, flash point and AIT of isoamyl alcohol by several references[5-15]

References	LEL - UEL(vol%)	Flash point(℃)	AIT(℃)
KOSHA MSDS[5]	1.2 - 9.0	45	350
NFPA[6]	1.2 - 9.0	43	350
Sigma[7]	1.2 - 9.0	46	340
Ignition[8]	1.4 - 9.0	43	343
Lange[9]	1.2 - 9.0	45	350
Smallwood[10]	1.2 - 9.0	46	365
SFPE[11]	1.2 - 10.0	43(CC), 46(OC)	300
SAX[12]	1.2 - 9.0	-	-
Stephenson[13]	-	44,45(CC)51,56(OC)	-
Zabetakis[14]	-	-	347(13sec)
Yagyu[15]	-	-	340(15sec)

Table 3. Comparison of several flash point test methods

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 odinary liquids, the temperature of the specimen is increased at 5-6℃/min	ASTM D93
Tag open cup	5.3	5.0	70	The temperature of the specimen is increased at 1±0.25℃/min.	ASTM D1310
Cleveland open cup	6.4	3.4	80	The temperature of the specimen is increased at 5-6℃/min	ASTM D92

이얼, 수조, 시험염 발생장치 등으로 구성되어 있다. Cleveland 개방식 장치는 인화점 및 연소점을 측정하는 장치로, 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있다.

각 인화점 측정창치들의 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.

3.3 자연발화온도 측정

자연발화점 측정은 ASTM E659 장치를 사용하였으며, 장치는 크게 로, 온도 조절기, 열전대, 플라스크, 주사기, 거울, 에어건 등으로 구성되어 있다[16,17].

실험 방법은 기준 온도를 설정하고, 실험 장치를 가열하고, 설정온도에 도달하면 플라스크 내부에 주사기로 시료를 0.1ml를 넣었다. 그리고 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 다시 온도를 설정한 후 10분전에 발화가 일어나면 설정 온도 보다 30 ℃ 낮게 설정하고 3~5 ℃ 혹은 10 ℃씩 증가시키면서 측정하였고, 발화가 일어났을 때 시간과 온도를 기록하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 이소아밀알코올의 인화점에 의한 폭발한계 비교

Table 2에 제시된 이소아밀알코올의 폭발하한계 자료를 검증하기 위해 Antoine 식을 사용하여 폭발하한계를 계산하였는데, 사용된 Antoine 식은 다음과 같다[10].

$$\log P^f = 7.382 - \frac{1373.8}{(t+174.3)} \quad (1)$$

여기서, P^f는 증기압(mmHg)이고, t는 온도(℃)이다.

식 (1)을 이용하여 폭발한계를 예측할 수 있는데, Setaflash와 Pensky-Martens의 밀폐식(CC), Tag와 Cleveland의 개방식(OC)에 의해 얻어진 인화점을 이용하여 예측된 폭발하한계를 결과를 Table 4에 나타내었다.

이소아밀알코올의 하부인화점의 경우, 밀폐식인 Setaflash에서는 42 ℃, Pensky-Martens에서는 44 ℃, 개방식인 Tag에서는 46 ℃와 Cleveland에서는 54 ℃로 측정되었다. 본 연구에서 Setaflash 장치에 의해 측정된 하부인화점 42 ℃는 Table 2에 제시된 KOSHA MSDS, SFPE 그리고 Ignition의 43 ℃와 거의 일치하고 있다. 본 연구에서 측정된 Tag 개방식의 46 ℃는 SFPE의 문헌값과 일치하였다.

본 실험에서 얻은 하부인화점을 이용하여 폭발하한계를 예측하였다. Setaflash 밀폐식에서 측정된 하부인화점 42 ℃를 식 (1)에 적용한 결과 폭발하한계는 1.41vol%로 계산되었다. 계산된 폭발하한계 1.41vol%는 Ignition의 문헌값과 일치하고 있다. 따라서 기존의 문헌값들 혹은 본 연구에서 예측한 값을 공정에 사용하는 것이 타당하다고 본다. 본 연구에서 측정된 인화점을 이용하여 제시된 폭발한계 예측값을 공정에 적용이 가능하며, 인화점에 의한 폭발한계 연구에도 이 결과를 활용할 수 있다.

4.2 이소아밀알코올의 자연발화온도 고찰

본 실험에서는 기존 문헌[5-11]에서 가장 낮은 최소자연발화온도(AIT) 300 ℃를 근거로 270 ℃에서 실험한

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

Testers	Experimental lower flash points (℃)	Estimated LEL by lower flash points(vol%)
Setaflash(CC)	42	1.41
Pensky-Martens(OC)	43	1.51
Tag(OC)	46	1.84
Cleveland(OC)	54	3.05

결과 비발화가 되어, 다시 이 보다 30℃ 높인 300 ℃에서도 실험한 결과 역시 비발화 되었다. 다시 20 ℃상승 시킨 320 ℃에서 실험한 결과 비발화되어 다시 20 ℃ 상승시킨 340 ℃에서 실험한 결과 11.31sec 발화되어 1 ~ 2℃ 낮추어서 실험한 결과 327 ℃, 12.91sec에서 최소자연발화온도를 찾을 수 있었다.

AIT 327 ℃기점으로 10 ~ 20 ℃ 상승시켜 실험한 결과 350 ℃에서는 8.06sec, 360 ℃에서는 6.64sec , 370 ℃에서는 5.50sec, 380℃에서는 4.48sec, 390 ℃에서는 4.19sec, 400 ℃에서는 3.58sec, 410 ℃에서는 3.58sec, 430 ℃에서는 2.75sec, 460 ℃에서는 2.50sec 그리고 460 ℃에서는 1.43sec에서 발화하였다. 이소아밀알코올의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험한 결과를 Table 5에 나타내었다.

본 연구에서 측정된 이소아밀알코올의 최소자연발화온도 327 ℃는 Table 2에 제시된 기존의 문헌값들 가운데 가장 낮은 값인 SFPE의 300 ℃보다는 27 ℃ 높게 측정되었으며, 문헌값 들 가운데 가장 높은 값인 Smallwood의 365 ℃보다는 38 ℃ 낮게 측정되었다. 본 연구에서 측정된 AIT 327 ℃는 기존의 문헌값들의 중간값 정도로서 측정된 값의 신뢰성은 높다고 판단되며, 이소아밀알코올 공정에서 안전을 위한 AIT는 약 330 ℃ 사용하여 공정의 방호시스템 구축에 적용하는 것이 타당하다고 본다.

Table 5에 제시된 자연발화온도와 발화지연시간의 실험 자료를 Arrhenius 형태 식으로 회귀분석을 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$\ln\tau = -8.23 + 6442\left(\frac{1}{T}\right) \tag{2}$$

Table 5. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for isoamyl alcohol

No.	T[K]	τ exp.[s]	lnτ exp.	τ est..(Eq. 3)
1	600	12.91	2.55800	12.25
2	613	11.31	2.42569	9.75
3	623	8.06	2.08691	8.24
4	633	6.64	1.89311	7.00
5	643	5.50	1.70475	5.97
6	653	4.48	1.49962	5.13
7	663	4.19	1.43270	4.42
8	673	3.58	1.27536	3.82
9	683	3.53	1.26130	3.32
10	703	2.75	1.01160	2.54
11	723	2.50	0.91629	1.97
12	733	1.48	0.39204	1.75
A.A.D.	-	-	-	0.46

식 (2)을 logτ와 $\left(\frac{1}{T}\right)$의 관계로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\log\tau = -3.57 + 2797.73\left(\frac{1}{T}\right) \tag{3}$$

식 (3)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 5와 Figure 1에 나타내었다. 예측값과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.D.(Average Absolute Deviation)와 결정계수(r^2)를 사용하였다[18].

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

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

여기서 $\tau_{est.}$는 추산식에 의해 추산된 발화지연시간이고, $\tau_{exp.}$는 실험값이며, N은 자료수, r^2은 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.

식 (3)에 의한 예측값과 실험값 사이의 평균절대오차는 0.46sec, 결정계수(r^2)는 0.97로서 실험값은 계산값과

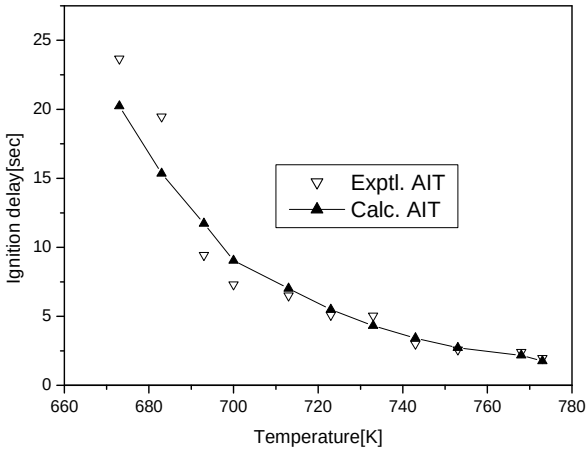

Figure 1. A comparison between the experimental and calculated delay times for isoamyl alcohol.

모사성이 크게 나타나고 있다.

활성화에너지(E)의 계산은 Semenov[19]가 제시한 식 (6)을 이용하면 가능하다.

$$\log\tau = \frac{52.55E}{T} + B \tag{6}$$

식 (3)을 식 (6)에 대입하여 계산된 활성화에너지는 53.45 kJ/mol이다.

5. 결 론

본 연구에서는 핵심적인 유기 화학원료인 이소아밀알코올의 연소특성치들 가운데 인화점과 최소자연발화온도(AIT)를 측정하여 기존 문헌들과 비교하였고, 또한 측정된 하부인화점을 이용하여 폭발하한계를 계산한 결과를 기존 문헌들에 제시된 값들과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Setaflash 밀폐식에 의한 인화점은 42 ℃, Pensky-Marten 밀폐식은 43 ℃, Tag 개방식은 46 ℃ 그리고 Cleveland 개방식은 54 ℃로 측정되었다.

2) Setaflash 장치에 의한 하부인화점 42 ℃를 이용하여 계산된 폭발하한계는 1.41vol%로서, Ignition Handbook에 제시된 1.40vol%와 일치하였으며, 다름 문헌들보다는 약 0.2vol% 높게 계산되었다.

3) 본 연구에서 측정된 이소아밀알코올의 최소자연발화온도 327 ℃는 기존의 문헌값들 가운데 가장 낮은 값인 SFPE의 300 ℃보다는 27 ℃ 높은 측정값이며, 다른 문헌값들과는 약 25 ~ 40 ℃게 낮게 측정되었다.

4) 이소아밀알코올의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\ln\tau = -8.23 + 6442\left(\frac{1}{T}\right)$$

5) Semenov식을 이용한 이소아밀알코올의 활성화에너지(E)는 53.45 kJ/mol로 계산되었다.

6) 본 연구에서 제시된 이소아밀알코올의 연소특성 실험자료와 예측 방법은 이를 취급 또는 폐기하는 공정에서 안전을 확보하기 위한 가이드 마련에 도움을 줄 것으로 본다.

7) 본 연구에서 제시한 방법인 측정된 인화점을 이용한 폭발한계 예측은 다른 가연성 물질의 폭발한계 연구에도 도움을 줄 수 있다.

References

1. Lees, F.P. :“Loss Prevention in the Process Industries”, Vol. 2, 2nd ed., Butterworth-Heinemann(1996).
2. Drysdale, D. :“ An Introduction to Fire Dynamics”, 2nd ed., Jone Wiley & Sons, (1998)
3. Lide, D.R. : "Handbook Chemistry and Physics", 76th ed., CRC Press, (1996)
4. Perry, R.H. and Green, D.W. : " Perry's Chemical Engineer's Handbook", 7th ed., McGraw-Hill, (1997)
5. KOSHA : www.kosha.or.kr/msds/msdsMain.do?menuId=69
6. NFPA : "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, National Fire Protection Association, (1991)
7. 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)
8. Babrauskas, V. ; "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, Society of Fire Protection Engineers, (2003)
9. Dean, J. A. : "Lange's Handbook of Chemistry", 14th ed. McGraw-Hill, (1992)
10. Smallwood, I. M. : “ Handbook Organic Solvent Properties”, Arnord, A member of the Hodder Headline Group, (1996)

11. Kanury, A. M. : “ SFPE Handbook of Fire Protection Engineering -Capter 8 -”, 2nd ed., Society of Fire Protection Engineers, (1995)
12. Lewis, R.J. : "SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials", 11th ed., John Wiley & Son, Inc., New Jersey, (2004)
13. Stephenson, S. M. : “Flash Points of Organic and Organometallic Compounds”, Elsevier, (1987)
14. Zabetakis, M. G., Furno, A. L. and Jones, G. W. : " Minimum Spontaneous Ignition Temperature of Combustibles in Air", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 46, No. 10, pp. 2173-2178, (1954)
15. Yagyu, S. : " Systematization of Spontaneous Ignition Temperatures of Organic Compounds (1st Report)", Research Report of the Research, Institute of Industrial Safety, RR-26-5, Japan, (1978)
16. Ha, D. M. : “The Measurement of Combustible Characteristics of n-Undecane", J. of the Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 27, No. 2, pp. 11-17, (2013)
17. Ha, D. M. :“The Measurement and Prediction of Combustible of Dimethylacetamide(DMAc)“, Korean Chem. Eng. Res., Vol. 53, No. 5, pp. 553-556, (2014)
18. Ha, D. M. :“ The Measurement and Prediction of the Combustible Properties of Propionic Anhydride”, J. of the Korean Institute of Gas, Vol. 20, No. 3, pp. 66-72, (2016)
19. Semenov, N.N : "Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2", Princeton University Press, Princeton, N.J., (1959)