

## 이소부틸알코올(IBA)의 연소특성치 측정에 의한 MSDS의 적정성 연구

†하동명

세명대학교 보건안전공학과  
(2014년 4월 22일 접수, 2014년 6월 18일 수정, 2014년 6월 27일 채택)

### The Study on the Compatibility of MSDS by Means of Measurement of Combustible Properties for Isobutylalcohol(IBA)

†Dong-Myeong Ha

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

(Received April 22, 2014; Revised June 18, 2014; Accepted June 27, 2014)

#### 요 약

이소부틸알코올의 안전한 취급을 위해, 폭발한계는 문헌을 통해 고찰하였으며, 인화점과 발화지연시간에 의한 자연발화온도는 장치를 이용하여 측정하였다. 공정에서는 이소부틸알코올의 폭발한계는 1.7 Vol.% 그리고 상한계는 10.9 Vol.%가 사용되고 있다. 인화점의 경우 밀폐식 장치인 Setaflash와 Penski-Martens에 의한 하부인화점은 각각 25 °C와 30 °C로 측정되었으며, 개방식인 Tag와 Cleveland 에서는 각각 36 °C와 39 °C로 측정되었다. ASTM E659 장치를 사용하여 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하였고, 이소부틸알코올의 최소자연발화온도는 400 °C로 측정되었다.

**Abstract** - For the safe handling of isobutylalcohol(IBA), this study was investigated the explosion limits of isobutylalcohol in the reference data. And the lower flash points, upper flash points and AITs(auto-ignition temperatures) by ignition delay time were experimented. By using the literatures data, the lower and upper explosion limits of isobutylalcohol recommended 1.7 Vol% and 10.9 Vol.%, respectively. The lower flash point of isobutylalcohol by using Setaflash and Penski-Martens closed-cup testers were experimented 25 °C and 30°C, respectively. The lower flash point isobutylalcohol by using Tag and Cleveland open cup testers were experimented 36 °C and 39 °C, respectively. Also, this study measured relationship between the AITs and the ignition delay times by using ASTM E659 tester for isobutylalcohol. The experimental AIT of isobutylalcohol was 400 °C.

**Key words** : Isobutylalcohol(IBA), Flash point, Explosion limit, Autoignition temperature(AIT)

#### I. 서 론

화학산업에서 위험성을 줄이기 위해서는 유해·위험물질을 취급하는 제조 공정 및 설비를 대상으로

화재, 폭발 그리고 누출 등의 잠재적 위험들을 도출하고, 잠재적 위험들이 실제 사고로 전이될 가능성에 대한 공정의 개선 방안을 찾는 것이 중요하다. 개선 방안 가운데 하나가 공정에서 취급·저장하는 원료, 부원료, 첨가제, 촉매, 중간생성물, 완제품 등의 체계적이고 정확한 물질보건안전자료(MSDS; Material Safety Data Sheet)를 정리하는 것이다. MSDS는 사업

†Corresponding author:hadm@semyung.ac.kr,  
Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

장의 근로자들에게 유해·위험 정보를 제공함으로써 사업장에서의 사고를 줄이는데 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 신뢰도가 낮은 MSDS는 근로자의 안전을 위협하고, 잘못된 정보를 사용하므로써 중대사고로 이어질 우려가 있다. 따라서 정확한 MSDS의 사용은 사업자의 안전 확보에 최우선이 되어야 한다. MSDS의 16개 항목 9번째 항목의 물리적 및 화학적 특성에서 연소특성치들로는 인화점, 폭발한계, 최소자연발화온도 등을 들 수 있다[1].

인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나누고 있으며, 일반적으로 하부인화점을 인화점이라 한다. 인화점은 가연성 액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로써, 인화성액체의 액면 가까이서 인화할 때 필요한 증기를 발산하는 액체의 최저온도로 정의한다. 폭발한계는 가연성물질(가스 및 증기)을 다루는 공정 설계 시 고려해야 할 중요한 변수로써, 발화원이 존재할 때 가연성가스와 공기가 혼합하여 일정 농도범위 내에서만 연소가 이루어지는 혼합범위를 말한다. 자연발화(Autoignition 혹은 Spontaneous Ignition)는 가연성 혼합기체에 열 등의 형태로 에너지가 주어졌을 때 스스로 타기 시작하는 산화현상으로, 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화할 수 있는 최저온도를 최소자연발화온도(Autoignition Temperature, AIT)라고 한다[2].

본 연구의 대상물질인 이소부틸알코올(IBA)은 석유화학산업과 기술 분야 등에 다양하게 사용되는 알코올류이다. 이소부틸알코올은 프로필렌을 원료로 하는 옥소법이나 레페법에 의한 합성, 프로페인과 뷰테인의 공기산화에 의해서도 얻을 수 있으며, 메탄올 합성 때의 부산물로서도 얻는다. 유기합성에 시작 물질로서 사용될 뿐 아니라 화학반응에서 용제로도 사용된다. 또한 과일에센스용의 에스터 합성원료, 페인트·니스, 인조향료제조, 도료, 가솔린대체재료, 자동차의 윤활유 첨가제 등으로 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나 이소부틸알코올에 대한 연소특성치는 문헌에 따라 다양하게 제시되어 있어 공정안전을 위해서는 정확한 연소특성치의 고찰이 필요하다. 본 연구에서 이소부틸알코올의 인화점과 자연발화온도를 측정하여 기존의 자료와 비교하였고, 폭발한계에 대해서는 여러 문헌에 제시된 자료의 타당성을 검토하기 위해 본 연구에서 측정된 인화점을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서 제시된 이소부틸알코올의 자료는 이를 취급하는 공정에서 안전을 확보하는 지침 마련에 도움을 주고, 기존의 MSDS에 제시된 연소특성치의 신뢰도 평가에도 유용한 정보를 제공하는데 목적이 있다.

## II. 이소부틸알코올의 물리적 및 연소특성

### 2.1. 물리적 특성

각 국에서는 사업장에서 취급하는 유해·위험물질에 대한 안전한 취급, 처리, 수송 및 보관을 위해 MSDS 자료를 제공하고 있다. 그리고 많은 단체에서 발간한 자료와 논문들에서도 물리적 특성치를 제공하고 있다. 이소부틸알코올의 물리적 특성은 요약하여 Table 1에 나타내었다[3].

### 2.2. 이소부틸알코올의 연소특성

이소부틸알코올은 위험물안전관리법 제 4류위험물의 제 2석유류(비수용성액체, 지정수량 1000 ℓ)이고, 산업안전보건법은 작업환경측정대상물질(측정주기 : 6개월), 관리대상유해물질, 특수건강진단대상물질(진단주기 : 12개월) 등으로 규정하고 있다. NFPA에서는 화재위험성은 3등급, 반응위험성은 0 등급 그리고 보건위험성은 1등급이다. 이소부틸알코올은 물에는 약간 녹고 에테르에는 쉽게 녹는다. 독특한 냄새가 나는 무색의 가연성 액체이며 알코올의 한 종류이다.

이소부틸알코올은 화재 및 폭발을 일으킬 수 있으며, 인화점이나 그 이상에서 폭발성 혼합물을 형성할 수 있다. 가열시 용기가 폭발할 수 있다. 피해야할 발화원은 열, 스파크, 화염, 고열 등 이고, 증기는 공기

Table 1. Physical properties of isobutylalcohol

Properties	Component	Isobutylalcohol
CAS number		78-83-1
Molecular formula		C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O
Boiling point		108°C
Melting point		-108°C
Vapor pressure		1.39kPa(25°C), 75.4kPa(100°C)
Viscosity		4.312mPas
Solubility(Water)		87g/L(20°C)
Critical temperature		274.63°C
Critical pressure		4.3MPa
Critical volume		273cm <sup>3</sup> /mol
Vapor density(Air=1)		2.55
Specific gravity(Water=1)		0.8018

보다 무거우므로 누출 시 원거리의 발화원으로 부터 접화되어 순식간에 확산될 수 있다. 분해 및 연소 시 자극성, 부식성, 독성 가스 등이 배출되므로 안전관리가 필요하다.

소화약제로는 이산화탄소 또는 물분무를 사용하고, 질식소화 시 건조한 모래 또는 흙을 사용할 수 있다. 저장 및 보관방법은 용기가 비워진 후에도 제품 찌꺼기가 남아 있을 수 있으므로 모든 MSDS의 라벨을 부착하여 사고 예방을 조치하고, 환기가 잘 되는 곳에 단단히 밀폐하여 저장해야 한다.

### III. 이소부틸알코올의 연소특성치 분석

#### 3.1. 이소부틸알코올의 폭발한계

폭발한계는 온도, 압력, 산소농도, 불활성가스의 농도, 화염전파 방향, 장치의 표준상태, 물리적 상태 등에 영향을 받으므로 문헌에 따라 다른 값들이 제시되고 있다. 또한 폭발한계를 실험하기 어려운 경우는 인화점을 이용하여 예측이 가능하다.

**Table 2.** Comparison of explosion limits of isobutylalcohol in air by several references

References	Explosion Limits [Vol.%]	
	Lower	Upper
NFPA	1.7	10.6
SFPE	1.7	-
Sigma	1.7	10.6
Ignition	1.7	11.0
Lange	1.2	10.9
SAX	1.2	10.9
CRC	2.0	11.0
KOSHA	1.7	10.9

이소부틸알코올의 폭발하한계는 Table 2에 알 수 있듯이 Lange와 SAX에서 가장 낮은 1.2 Vol.%를 제시하고 있으며, CRC에서는 가장 높은 2.0 Vol.%로서 약 0.8 Vol.%의 차이를 보이고 있다[4-11]. 그리고 폭발상한계는 NFPA와 Sigma에서 가장 낮은 10.6 Vol.%, 그리고 대부분의 문헌에서는 약 11 Vol.%로서 약 0.4 Vol.%의 차이를 보이고 있다. 따라서 사업장의 안전을 위해서는 타당한 폭발한계 값을 사용하는 것이 중요하다.

#### 3.2. 이소부틸알코올의 인화점

인화점은 가연성액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로서 하부인화점과 상부인화점으로 나눌 수 있다. 인화점의 측정 변수로는 용기형태, 시료량, 발화원, 온도조절기, 주위압력, 시료의 균일성 등을 들 수 있다. 측정 방법으로 밀폐식(CC)은 Pensky-Martens과 Setaflash 등이 있으며, 개방식(OC)은 Tag와 Cleveland 등이 있다.

Table 3에서는 이소부틸알코올의 하부인화점을 정리하여 나타내었다[4-12]. 가장 낮은 값을 나타내고 있는 NFPA, SFPE 그리고 KOSHA 등은 28 °C를 제시하고 있고, Sigma와 Lange에서는 37 °C를 제시하고 있는데, 이는 개방식 장치에 의한 인화점으로 판단된다. 그 이유는 Flick의 문헌에서 39 °C를 제시하면서 개방식 장치를 표시했기 때문이다. 그러나 Table 3에서 알 수 있듯이 하나의 문헌에 제시된 인화점을 타 문헌들이 그대로 인용한 것으로 판단되며, 제시된 인화점은 과거에 측정된 자료로서 최근의 장치에 의한 인화점 측정이 필요하다고 사료된다. 정확한 인화점의 사용은 화재의 예방 및 방호에 중요한 부분으로서 문헌 및 실험적 고찰의 연구가 필요하다.

#### 3.3 이소부틸알코올의 최소자연발화온도

자연발화온도는 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류, 지연시간, 실험자 등 많은 인자에 의존한다. 이소

**Table 3.** The lower flash point of several reported data for isobutylalcohol

Compound	Flash points [°C]								
	NFPA	SFPE	Sigma	Ignition	Lange	SAX	CRC	Flick	KOSHA
Isobutylalcohol	28	28	37.2	28	37	28	28	39(OC)	28(CC)

**Table 4.** The autoignition temperature of several reported data for isobutylalcohol

Compound	AITs[°C]									
	NFPA	SFPE	Sigma	Ignition	Lange	SAX	CRC	Hilado	Yagyū	KOSHA
Isobutylalcohol	415	405	434	427	427	427	415	427	405	415

부틸알코올의 최소자연발화온도를 정리하여 Table 4에 나타내었다[4-11,13,14].

이소부틸알코올의 최소자연발화온도의 경우 가장 낮은 값을 나타내고 있는 SFPE와 Yagyu 등은 405 °C (발화지연시간 22 sec)를 제시하고 있고, 가장 높은 값으로는 Sigma에서 434°C를 제시하고 있다. 가장 높은 AIT와 낮은 AIT은 약 30 °C의 차이를 보이므로 신뢰도 평가가 필요한 물질이라고 판단된다. 안전을 고려한 최적의 공정설계를 위해서는 정확한 AIT의 실험적 연구가 필요하다.

#### IV. 연소특성 실험장치

##### 4.1. 실험재료

본 연구에서 사용한 이소부틸알코올(Kanto, 99%)의 시료는 별도의 정제과정을 거치지 않고 사용한다.

##### 4.2. 실험장치

###### 4.2.1. 인화점 측정 장치

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

본 연구에서 사용된 장치인 Setaflash와 Pensky-Martens 밀폐식 그리고 Tag와 Cleveland 개방식의 구성 요소를 간략히 정리하면 다음과 같다[15].

Pensky-Martens 밀폐식 장치는 몸체부, Test Cup 장치부, 교반부, 화염 공급부로 나눌 수 있다. Test Cup 장치부의 Cup의 재질은 열전도도가 높은 구리로 되어 있고, Test Cup Handle, 온도계 삽입구, Test Cup 상부 개폐기 손잡이로 구성되어 있다.

Setaflash 밀폐식 장치는 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있다. 몸체부는 가열공

기조, 전원 개폐기, 전열 조절기 등으로 구성되어 있다. 시료 장치부는 시료컵, 온도계 삽입구, 시료컵 상부 개폐기 손잡이로 구성되어 있다. 화염 공급부는 화염 접근장치, 연료통, 화염 조절기, 가스관, 가스 안전밸브 등으로 구성되어 있다.

Tag 개방식 장치는 가연성 액체의 인화점 및 연소점 측정이 가능한 장치로, 시료컵, 승온 다이얼, 수조, 시험염 발생장치 등으로 구성되어 있으며, 부가장치로는 시료컵의 시료 수위를 조절할 수 있는 레벨수준 유지장치가 있다.

Cleveland 개방식 장치는 인화점 및 연소점을 측정하는 장치로, 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있다. 시료 장치부의 시료컵, 시료컵 조절기, 온도계 삽입구, 시료컵 상부 개폐기 손잡이로 구성되어 있다. 화염 공급부는 화염 접근장치, 연료통, 화염 조절기, 가스관, 가스 안전밸브 등으로 구성되어 있다.

각 인화점 측정장치들의 용기 특성 및 시험방법을 요약하여 Table 5에 나타내었다.

###### 4.2.2. 자연발화온도 측정장치(ASTM E659-78)

본 실험에서는 액체 화학물질의 자연발화점 측정 장치로서 ASTM E659 장치를 사용하여 자연발화온도를 측정하였으며, 장치는 크게 Furnance, Temperature Controller, Thermocouple, Test Flask, Hypodermic Syringe, Mirror, Air Gun 등으로 구성되어 있다[15].

실험 방법은 기준 온도를 설정하였고, 실험 장치를 가열하고, 설정온도에 도달하면 플라스크 내부에 주사기로 시료를 0.1 ml를 넣었다. 그리고 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 다시 온도를 설정한 후 10분전에 발화가 일어나면 설정 온도 보다 30°C

**Table 5.** Comparison of several flash point test methods

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

낮게 설정하고 3~5 °C 혹은 10 °C씩 증가시키면서 측정하였고, 발화가 일어났을 때 시간과 온도를 기록하였다.

## V. 결과 및 고찰

### 5.1. 측정된 인화점에 의한 폭발한계의 비교

본 연구에서 인화점 장치를 이용하여 이소부틸알코올의 하부인화점을 측정된 결과, 밀폐식인 Setaflash는 25 °C, Pensky-Martens는 30 °C로 측정되었으며, 개방식인 Tag는 36 °C, Cleveland는 39 °C로 측정되었다. 그리고 Setaflash에 의한 상부인화점은 53 °C로 측정되었다. Setaflash 밀폐식에 의한 측정값인 25 °C는 기존의 문헌에서 제시한 28 °C 보다는 3 °C 낮게 측정되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 자료를 공정에 이용하는 것이 안전에 타당하다고 본다. 또한 Cleveland 개방식 장치에서 얻은 39 °C는 Flick의 39 °C와 일치하므로 본 실험의 신뢰도는 높다고 판단된다.

이소부틸알코올의 폭발한계의 자료를 검토한 결과, 폭발하한계는 1.7 Vol.% 그리고 폭발상한계는 약 11 Vol.%를 많이 인용하고 있다. 이소부틸알코올의 폭발한계 자료의 신뢰성을 검증하기 위해 Antoine 식[16]을 사용하여 폭발한계를 계산할 수 있다.

$$\log P^f = 8.53516 - \frac{1950.94}{(t + 237.147)} \quad (1)$$

여기서,  $P^f$ 는 증기압(mmHg)이고,  $t$ 는 온도(°C)이다.

Setaflash와 Pensky-Martens 밀폐식 그리고 Tag와 Cleveland 개방식에 의해 얻어진 인화점을 이용하여 식 (1)에 의한 폭발하한계와 상한계의 계산값을 Table 6에 나타내었다.

Setaflash 밀폐식에 의해 측정된 하부인화점 25 °C를 적용하는 경우 폭발하한계는 약 1.63 Vol.%로 계산되었고, 상부인화점 53 °C에 의한 폭발상한계는

8.45 Vol.%로 계산되었다. 본 연구에서 계산된 폭발하한계 1.63 Vol.%는 NFPA와 SFPE 등의 문헌값인 1.7 Vol.%와 비슷한 결과를 보였으며, 계산된 폭발상한계 8.45 Vol.%는 기존의 문헌값인 11 Vol.% 보다 낮게 계산되었다. 측정된 하부인화점을 이용하여 폭발하한계의 예측이 가능함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법을 사용하여 폭발한계를 예측할 수 있으며, 공정 안전 설계에 이용이 가능하다고 본다.

### 5.2. 이소부틸알코올의 자연발화온도 고찰

이소부틸알코올의 최소자연발화온도는 문헌[4-11, 13, 14]에 따라 405 °C~434 °C로 제시되고 있다. 따라서 본 실험에서는 초기설정온도를 360 °C로 하여 실험한 결과 비발화되어, 다시 30 °C를 상승시켜 390 °C에서 실험한 결과 역시 비발화되었다. 다시 30 °C 상승시킨 420 °C에서 실험한 결과 9.44sec에서 발화되었다. 최소발화온도를 찾기위해서 2~5 °C 낮추어서 실험한 결과 400 °C에서 최소발화온도를 찾았다. 이를 기점으로 5°C 혹은 10°C 씩 상승시켜 발화지연시간을 측정한 결과 430 °C에서는 7.31sec, 440 °C에서는 6.50 sec, 450 °C에서는 5.10sec, 480 °C에서는 2.59 sec, 490 °C에서는 2.41sec 그리고 500 °C에서는 1.97sec에서 발화하였다.

이소부틸알코올의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험한 결과를 Table 7에 나타내었다. 본 연구에서 측정된 최소자연발화온도인 400 °C는 현재 많이 인용하고 있는 427 °C 보다는 약 30 °C 낮은 온도로 측정되었으며, Yagyu의 405 °C(22 sec)와 비슷한 결과로서, 공정에서는 본 연구에서 측정된 최소자연발화온도 400 °C를 사용하는 것이 타당하다고 본다.

실험에서 측정된 발화온도와 발화시간의 관계를 고찰하기 위해 선형식인 Arrhenius 형태로 최적화하여 다음과 같은 식을 제시한다.

$$\ln \tau = -15.87 + 12706.945 \left( \frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

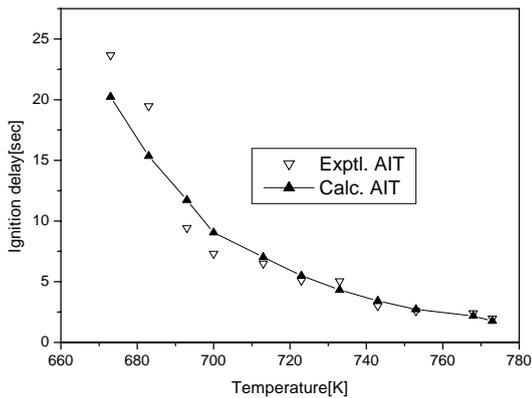
**Table 6.** Estimated explosion limits by experimental flash points for isobutylalcohol

Testers	Experimental (°C)		Estimated(LEL) (Vol%)	
	Lower flash points	Upper flash points	by Lower flash points	by Upper flash points
Setaflash(CC)	25	53	1.63	8.45
Pensky-Martens(CC)	30	-	1.98	-
Tag(OC)	36	-	3.25	-
Cleveland(OC)	39	-	3.89	-

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

$$\log\tau = -6.89 + 5518.57\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

식 (3)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 7과 Figure 1에 나타내었다. 추산값



**Figure 1.** A comparison between the experimental and calculated delay times for isobutylalcohol.

과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.D.(Average Absolute Deviation) 와 상관계수(r)를 사용하였다[17].

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

$$r = \left(\frac{SSR}{SST}\right)^{1/2} \quad (5)$$

여기서  $\tau_{est.}$ 는 추산식에 의해 추산된 발화지연시간이고,  $\tau_{exp.}$ 는 실험값이며, N은 자료수, r은 상관계수, 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 (4)에 의한 예측값과 실험값 사이의 평균절대 오차는 1.29sec이며, 상관계수(r)는 0.96로서 실험값과의 모사성은 크다.

활성화에너지(E)는 Semenov[18]가 제시한 식 (6)을 이용하면 가능하다.

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

식 (3)을 식 (6)에 대입하여 계산된 활성화에너지는 105.02 kJ/mol이다.

**Table 7.** Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for isobutylalcohol

No.	T[K]	$\tau_{exp.}$ [s]	$\ln\tau$	$\tau_{est.}$ (Eq. 3)
1	673.15	23.66	3.1638	20.23
2	683.15	19.47	2.9689	15.35
3	693.15	9.44	2.2450	11.73
4	700.15	7.31	1.9892	9.04
5	713.15	6.50	1.8718	7.02
6	723.15	5.10	1.6292	5.49
7	733.15	5.04	1.6174	4.32
8	743.15	3.00	1.0986	3.42
9	753.15	2.59	0.9517	2.72
10	768.15	2.41	0.8796	2.18
11	773.15	1.97	0.6780	1.76
A.A.D.	-	-	-	1.29

## VI. 결 론

본 연구에서는 이소부틸알코올의 연소특성 가운데 인화점과 최소자연발화온도(AIT)를 측정하였고, 폭발한계는 여러 문헌들과 비교 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이소부틸알코올의 폭발한계를 고찰한 결과, 하한계는 1.7 Vol.% 혹은 11 Vol.%를 많이 사용되고 있다.

2) 이소부틸알코올의 하부인화점을 측정한 결과, 밀폐식인 Setaflash는 25℃, Pensky-Martens는 30℃로 측정되었으며, 개방식인 Tag는 36℃, Cleveland는 39℃로 측정되었다. 그리고 Setaflash에 의한 상부인화점은 53℃로 측정되었다. Setaflash는 하부인화점 25℃는 기존 문헌값보다 약 3℃ 낮게 측정되었다.

3) Setaflash에 의해 측정된 하부인화점 25℃와 상부인화점 53℃를 증기압 식에 이용하여 계산된 폭발하한계는 1.63 Vol.%, 상한계는 8.45 Vol.%였다. 측정된 하부인화점이나 문헌에 제시된 인화점을 이용하여 폭발하한계의 예측이 가능해 졌다.

4) 측정된 이소부틸알코올의 최소자연발화온도는 400℃로서 기존의 문헌값 AIT인 427℃보다 약 30℃ 낮게 측정되어 새로운 공정 안전을 위한 연소특성치로 사용되어야 한다.

5) 이소부틸알코올의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\log \tau = -6.89 + 5518.57 \left( \frac{1}{T} \right)$$

6) Semenov식을 이용하여 계산된 이소부틸알코올의 활성화에너지(E)는 105.02 kJ/mol이다.

## 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] NFPA, *Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids*, NFPA 325M, National Fire Protection Association, (1991)

[5] SFPE, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd ed., Society of Fire Protection Engineers, (1995)

[6] 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)

[7] Babrauskas, V., *Ignition Handbook*, Fire Science Publishers, Society of Fire Protection Engineers, (2003)

[8] Dean, J.A., *Lange's Handbook of Chemistry*, 14th ed. McGraw-Hill, (1992)

[9] Lewis, R.J., *SAX's dangerous Properties of Industrial Materials*, 11th ed., John Wiley & Son, Inc., New Jersey, (2004)

[10] Lide, D.R., *Handbook Chemistry and Physics*, 76th ed., CRC Press, (1996)

[11] KOSHA, /www.kosha.or.kr/msds/msdsMain.do?menuId=69

[12] Flick, E.W., *Industrial Solvent Handbook*, 3rd ed., Noyes, Data Corp., Park Ridge, N.J., (1985)

[13] Hilado. C.J. and S.W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", *Chemica Engineering*, 4, 75-80, (1972)

[14] Yagyū, 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.

[15] Ha, D.M., "The Measurement of Fire and Explosion Properties of n-Pentadecane", *J. of the Korean Society of Safety*, 28, 4, pp. 53-57, (2013)

[16] Gmehing, J., Onken, U., and Arlt, W., *Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection*, Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, (1980)

[17] Ha, D.M., "Risk Assessment by means of Measurement of Combustible Characteristics for n-Noanol", *J. of the Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, 26, 2, pp. 84-89, (2012)

[18] Semenov, N.N., *Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity*, Vol. 2, Princeton University Press, Princeton, N.J., (1959)