

n-Butyl methacrylate(n-BMA)의 연소특성치의 측정 및 예측

하동명[†]

세명대학교 보건안전공학과
(2016. 3. 31. 접수 / 2016. 7. 19. 채택)

Measurement and Prediction of the Combustible Properties of n-Butyl methacrylate(n-BMA)

Dong-Myeong Ha[†]

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University

(Received March 31, 2016 / Accepted July 19, 2016)

Abstract : The combustible properties(flash point, explosion limit and autoignition temperature) are the important safety items which are considered in the typical MSDS(material safety data sheet). In this study, for the safe handling of n-butyl methacrylate(n-BMA) being used in various ways in the chemical industry, the flash point and the autoignition temperature(AIT) of n-butyl methacrylate was experimented. And, the lower explosion limit of n-butyl methacrylate was calculated by using the lower flash point obtained in the experiment. The flash points of n-butyl methacrylate by using the Setaflash and Pensky-Martens closed-cup testers measured 44°C and 51°C, respectively. The flash points of n-butyl methacrylate by using the Tag and Cleveland open cup testers are measured 53°C. The AIT of n-butyl methacrylate by ASTM 659E tester was measured as 295°C. The lower explosion limit by the measured flash point 44°C was calculated as 0.85 vol.%. It was possible to predict lower explosion limit by using the experimental flash point or flash point in the literature.

Key Words : n-Butyl methacrylate(n-BMA), safety handling, flash point, lower explosion limit, autoignition temperature (AIT), ASTM E659

1. 서론

화학물질을 취급하는 사업장에서는 수많은 유해·위험물질이 사용되고 있어 물질의 정확한 취급 경로 파악의 어려움과 화학물질의 사용 정보 부족으로 인해 안전관리의 사각지대가 발생하는 경우가 많다. 대부분의 화학공장은 본질적으로 화재 및 폭발 위험성이 높은 물질을 대량으로 다루기 때문에 철저한 안전관리가 필요하다. 이에 따라, 취급하는 물질의 연소특성치를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 대표적인 연소특성치로 인화점, 폭발한계, 최소자연발화온도 등이 있다¹⁾.

공정의 안전한 설계를 위해서 인화점의 정보는 무엇보다 중요하다. 인화점은 가연성 액체의 화재 및 폭발의 잠재적 위험성을 나타내는 물리·화학적 변수 가운데 하나이다. 인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나누고 있으며, 일반적으로 하부인화점을 인화점이라 한다. 인화점은 가연성액체의 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. 특히 폭발한계는 초기 온도, 초기 압력, 불활성가스의 농도, 화염전파 방향, 장치의 표준상태, 물리적 상태 등에 영향을 받으므로 문헌에 따라 다른 값들이 제시되고 있다. 또한 폭발한계를 실험하기 어려운 물질의 경우는 인화점을 사용하여 예측이 가능하다. 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 한다²⁾.

n-Butyl methacrylate(n-BMA)는 2-propenoic acid이라고도 하며, 유기합성물질로 페인트, 코팅, 토터 및 잉크, 고

[†] Corresponding Author : Dong-Myeong Ha , Tel : +82-43-649-1321, E-mail : hadm@semyung.ac.kr,
Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, 65, Semyung-ro, Jecheon city, Chungbuk 27136, Korea

분자재료 등으로 우리의 일상에서 자주 사용되는 제품들에 다양하게 사용되고 있으며, 가연성뿐만 아니라 독성을 지니고 있으므로 공정에서 안전하게 취급해야 한다. n-Butyl methacrylate는 다양하게 사용되고 있는 데도 불구하고 연소특성치는 문헌에 따라 다르게 제시되고 있다. 따라서 이를 취급하는 공정의 안전을 위해 연소특성치에 대한 이론 및 실험적 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 n-butyl methacrylate의 인화점과 최소자연발화온도를 측정하여 기존의 문헌들과 비교하였고, 폭발한계에 대해서는 여러 문헌에 제시된 자료의 타당성을 검토하기 위해 본 연구에서 측정된 인화점을 이용하여 계산하였다. 그리고 계산된 폭발한계를 문헌들과 비교 검토하였다. 본 연구에서 제시된 n-butyl methacrylate의 실험 자료와 연소특성의 예측방법은 이를 취급하는 공정에서 안전을 확보하기 위한 가이드 마련과 다른 가연성 물질의 MSDS(Material Safety Data Sheet)의 적정성 연구에 도움을 주고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 n-Butyl methacrylate의 물리적 및 연소특성

2.1.1 n-Butyl methacrylate의 물리적 특성

대부분의 유해·화학물질은 취급 부주의로 인해 제조 공정 중 폐수에 의해 배출되기도 하고, 배출된 증기를 흡입 시 신체에 큰 영향을 주는 유독성을 지니고 있으며, 또한 연소 특성을 갖고 있으므로 발화원에 의해 중대 사고로 전이 되는 경우가 많다. 각국에서는 사업장에서 취급하는 유해·위험물질에 대한 안전한 취급, 처리, 수송 및 보관을 위해 MSDS 자료를 제공하고 있다. Table 1에 n-butyl methacrylate의 물리적 특성을 요약하여 나타내었다³⁻⁵⁾.

2.1.2 n-Butyl methacrylate의 연소특성

n-Butyl methacrylate은 위험물안전관리법 제 4류위험

Table 1. Physical properties of n-butyl methacrylate

Properties	Component	n-Butyl methacrylate
CAS number		97-88-1
Molecular formula		C ₈ H ₁₄ O ₂
Boiling point		163 °C
Melting point		-50 °C
Vapor pressure		4.41 kPa(at 75 °C)
Viscosity		0.857 CP(at 25 °C)
Vapor density(Air=1)		4.9(at 25 °C)
Specipic gravity(Water=1)		0.889(at 25 °C)

물의 제 2석유류(수용성액체, 지정수량 1000L)이고, 산업 안전보건법은 인화성물질과 발암성물질 그리고 폐기물 안전관리법에 의한 규제는 해당이 되지 않는다. 그리고 GHS(Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)의 인화성액체 분류기준에서는 Category 3(인화점 23~60 °C)에 해당하는 물질이며, NFPA(National Fire Protection Association)에서는 건강위험성 2, 화재위험성 2, 반응위험성 0로 규정하고 있다.

n-Butyl methacrylate의 증기는 점화원에 발화될 수 있고, 인화성 액체 및 증기는 화재와 폭발을 일으킬 수 있다. 인화점이나 그 이상에서 폭발성 혼합물을 형성할 수 있고, 가열시 용기가 폭발할 수 있다. 연소하는 자극성 및 유독성 증기뿐만 아니라 일산화탄소, 이산화탄소를 발생시킨다. 안전한 저장을 위해서는 열, 스파크, 화염 그리고 고열로부터 멀리해야하고, 용기가 잘 되는 곳에 단단히 밀폐하여 저장하며, 환기가 잘 되는 곳에 보관하고 저온으로 유지해야한다. 증기는 공기보다 무거우므로 누출 시 원거리의 발화원으로 부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다.

소화약제로는 알콜포말, 이산화탄소 또는 물분무를 사용할 수 있으며, 질식소화시 건조한 모래 또는 흙을 사용할 수 있다.

2.2 n-Butyl methacrylate의 연소특성치 분석

n-Butyl methacrylate의 화재 및 폭발 특성치 분석을 위해서 KOSHA(Korea Occupational Safety and Health Agency) MSDS를 비롯해 문헌들에서 제시하고 있는 연소특성치들을 정리하여 Table 2에 나타내었다⁵⁻¹⁰⁾.

일반적으로 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 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 Setafish와 Pensky-Martens 방식이 있으며, 개방식은 Tag와 Cleveland방식 등을 들 수 있다. 인화점 역시 실험 장치와 조건 등에 의존하므로 문헌에 따라 다른 값들이 제시되고 있다.

최소자연발화온도(AIT)는 다른 곳에 아무런 화원을 주지 않고 공기 속의 상온에서 주위로부터 발생하는 열로부터 가연물이 자발적으로 점화되는 최저온도를 말한다. AIT는 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용

Table 2. Comparison of explosion limit, flash point and AIT of n-butyl methacrylate by several references

References	LEL - UEL(vol%)	Flash point(°C)	AIT(°C)
KOSHA MSDS ⁶⁾	1.0 - 8.0	50	290
NFPA ⁷⁾	-	52(OC)	-
Sigma ⁸⁾	2.0 - 8.0	-	295
Lange ⁹⁾	-	49	-
Ignition ⁹⁾	2.0 - 8.0	41	-
Stephenson ¹⁰⁾	-	41, 50, 54(CC) 52, 66(OC)	-

기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류 그리고 지연시간 등 많은 인자에 의존한다.

Table 2에서 알 수 있듯이 n-butyl methacrylate의 폭발 하한계에 대해 KOSHA MSDS⁶⁾는 낮은 값인 1.0 vol% 그리고 Sigma⁸⁾와 Ignition⁹⁾에서는 2.0 vol%로서 문헌에 따라 약 1.0 vol%의 큰 차이를 보이고 있으며, 상한계는 문헌들^{6,8,9)}에서 동일하게 8.0 vol%를 제시하고 있다. 인화점은 경우는 밀폐식에서 41~54°C, 개방식에서 52~66°C로 제시되어 있는데, 밀폐식과 개방식 모두 큰 차이를 보이고 있다. 최소자연발화온도(AIT)는 KOSHA MSDS에서는 290°C 그리고 Sigma에서는 295°C로 비슷한 값을 제시하고 있다. n-Butyl methacrylate는 산업 현장에서 널리 사용되고 있는데도 불구하고 문헌에 제시된 연소특성치가 적게 제시되고 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 정확한 연소특성치의 평가가 필요하다고 본다.

3. 실험재료 및 측정장치

3.1 재료

본 연구에서 사용한 n-butyl methacrylate(Junsei, 99.5%)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 사용하였다¹¹⁾.

Setaflash 밀폐식 장치는 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있다. 몸체부는 가열공기조, 전원 개폐기, 전원 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.

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.

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 유지 장치가 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 3에 나타내었다.

3.3 자연발화온도 측정

자연발화점 측정은 ASTM E659 장치를 사용하였으며, 장치는 크게 로, 온도 조절기, 열전대, 플라스틱, 주사기, 거울, 에어건 등으로 구성되어 있다¹²⁾.

실험 방법은 기준 온도를 설정하고, 실험 장치를 가

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 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

열하고, 설정온도에 도달하면 플라스크 내부에 주사기로 시료를 0.1 ml를 넣었다. 그리고 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 다시 온도를 설정한 후 10분 전에 발화가 일어나면 설정 온도 보다 30°C 낮게 설정하고 3~5°C 혹은 10°C씩 증가시키면서 측정하였고, 발화가 일어났을 때 시간과 온도를 기록하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 n-Butyl methacrylate의 인화점에 의한 폭발한계 비교

Table 2에 제시된 n-butyl methacrylate의 폭발하한계 자료를 검증하기 위해 Antoine 식을 사용하여 폭발하한계를 계산하였는데, 사용된 Antoine 식은 다음과 같다¹³⁾.

$$\log P^f = 7.50907 - \frac{1828.716}{(t+230)} \quad (1)$$

여기서, P^f 는 증기압(mmHg)이고, t 는 온도(°C)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.

n-Butyl methacrylate의 하부인화점의 경우, 밀폐식인 Setaflash에서는 44°C, Pensky-Martens에서는 51°C, 개방식인 Tag와 Cleveland에서는 53°C로 측정되었다. 본 연구에서 Setaflash 장치에 의해 측정된 하부인화점 44°C는 Table 2에 제시된 KOSHA MSDS의 인화점 50°C 보다는 6°C 낮게 측정되었으며, Tag와 Cleveland에서 측정된 53°C는 기존의 문헌과 비슷한 결과를 보였다.

본 실험에서 얻은 하부인화점을 이용하여 폭발하한계를 예측하였다. Setaflash 밀폐식에서 측정된 하부인화점 44°C를 식 (1)에 적용한 결과 폭발하한계는 0.85 vol%로 계산되었으며, 문헌값에서 제시된 1.0 vol%보다는 약 0.15 vol% 낮게 계산되었다. 인화점의 경우는 기존 자료를 활용하는 것보다 본 연구에서 제시한 값을 이용하는 것이 공정 안전에 타당하다고 판단된다.

Table 4. Comparison of estimated lower explosion limits(LEL) by experimental lower flash points for n-butyl methacrylate

Testers	Experimental lower flash points(°C)	Estimated LEL by lower flash points(vol%)
Setaflash(CC)	44	0.85
Pensky-Martens(CC)	51	1.32
Tag(OC)	53	1.47
Cleveland(OC)	53	1.47

또한 본 연구에서 인화점을 이용한 폭발한계 예측값을 공정에 적용하는 방안과 인화점에 의한 폭발한계 연구의 활용에 가능해졌다.

4.2 n-Butyl methacrylate의 자연발화온도 고찰

본 실험에서는 기존 문헌^{6,8)}의 최소자연발화온도(AIT) 290°C를 근거로 250°C에서 실험한 결과 비발화가 되어, 이 보다 30°C 높은 270°C에서도 비발화되었다. 다시 30°C를 높은 300°C에서 실험한 결과 14.76 sec 발화되어 다시 1~2°C 낮추어 실험한 결과 295°C, 18.65 sec에서 최소자연발화온도를 찾을 수 있었다. 최소자연발화온도를 시작으로 297°C에서는 15.90 sec, 310°C에서는 8.79 sec, 320°C에서는 6.50 sec, 330°C에서는 4.40 sec, 340°C에서는 4.17 sec, 350°C에서는 3.33 sec, 370°C에서는 2.37 sec 그리고 390°C에서는 1.73 sec에서 발화하였다. n-Butyl methacrylate의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험한 결과를 Table 5에 나타내었다.

본 연구에서 측정된 n-butyl methacrylate의 최소자연발화온도 295°C는 Table 2에 제시된 기존의 문헌값들인 290~295°C와 비슷한 결과로서 본 연구에서 측정된 값의 신뢰성은 높다고 판단되며, n-Butyl methacrylate 공정에서 안전을 위한 AIT는 약 290°C 사용하여 공정의 방호시스템 구축에 적용하는 것이 타당하다고 본다.

Table 5에 제시된 자연발화온도와 발화지연시간의 실험 자료를 Arrhenius 형태 식으로 회귀분석하여 최적화된 관계식을 얻었다.

$$\ln \tau = -13.77 + 9369.84 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

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

$$\log \tau = -5.98 + 4069.28 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

식 (3)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 5와 Fig. 1에 나타내었다. 예측값과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.D.(Average Absolute Deviation)와 결정계수(r^2)를 사용하였다¹⁴⁾.

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

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

여기서 τ_{est} 는 추산식에 의해 추산된 발화지연시간이고, τ_{exp} 는 실험값이며, 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.

식 (3)에 의한 예측값과 실험값 사이의 평균절대오차는 1.13 sec, 결정계수(r^2)는 0.94로서 실험값은 계산값과 모사성이 크다고 본다.

활성화에너지(E)의 계산은 Semenov¹⁵⁾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 77.45 kJ/mol이다.

Table 5. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for n-butyl methacrylate

No.	T[K]	τ_{exp} [s]	$\ln \tau_{exp}$	τ_{est} .(Eq. 3)
1	568	18.65	2.92585	15.15
2	570	15.90	2.76632	14.30
3	573	14.76	2.69192	13.12
4	583	8.79	2.17361	9.14
5	593	6.50	1.87180	7.56
6	603	4.40	1.48160	5.82
7	613	4.17	1.42792	4.52
8	623	3.33	1.20297	3.53
9	643	2.37	0.86289	2.21
10	663	1.73	0.54812	1.43
A.A.D.	-	-	-	1.13

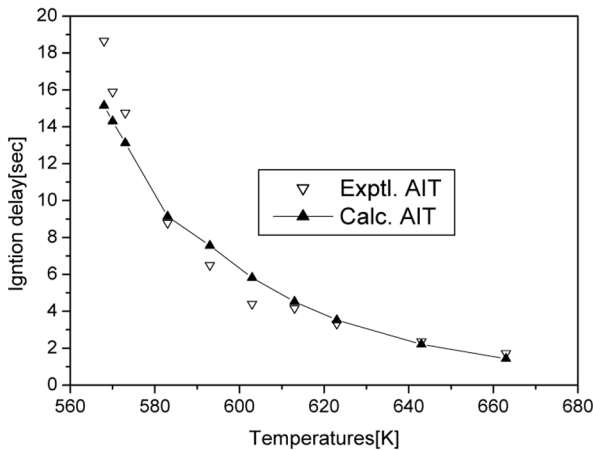


Fig. 1. A comparison between the experimental and calculated delay times for n-butyl methacrylate.

5. 결론

본 연구에서는 n-butyl methacrylate(n-BMA)의 연소 특성치들 가운데 인화점과 최소자연발화온도(AIT)를 측정하여 기존 문헌들과 비교하였고, 또한 측정된 인화점을 이용하여 폭발한계를 계산한 결과를 문헌에 제시된 값들과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Setaflash 밀폐식에 의한 인화점은 44°C, Pensky-Martens 밀폐식은 51°C, Tag와 Cleveland 개방식은 53°C로 측정되었다.

2) Setaflash 장치에 의한 하부인화점 44°C를 이용하여 계산된 폭발한계는 0.85 vol%로서, 문헌들에 제시된 가장 낮은 값인 1.0 vol%보다는 0.15 vol% 낮게 계산되었다.

3) 본 연구에서 측정된 n-butyl methacrylate은 최소자연발화온도 295°C는 기존의 문헌값들 KOSHA MSDS의 290°C와 Sigma-Aldrich의 295°C와 비슷한 결과를 보였다.

4) n-Butyl methacrylate의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\ln \tau = -13.77 + 9369.84 \left(\frac{1}{T} \right)$$

5) Semenov식을 이용한 n-butyl methacrylate의 활성화에너지(E)는 77.45 kJ/mol로 계산되었다.

6) 본 연구에서 제시된 n-butyl methacrylate의 실험 자료와 연소특성치의 예측 방법은 이를 취급하는 공정에서 안전을 확보하기 위한 가이드 마련에 기준이 될 것으로 보며, 인화점에 의한 폭발한계 예측 방법을 활용하여 다른 가연성 물질의 폭발한계 연구에도 기대한다.

References

- 1) D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety Fundamentals with Application", 2nd ed., Pearson Education Inc., 2002.
- 2) F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 2, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 1996.
- 3) R. H. Perry and D.W. Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 7th ed., McGraw-Hill, 1997.
- 4) D. R. Lide, "Handbook Chemistry and Physics", 76th ed., CRC Press, 1996.
- 5) J. A. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry", 14th ed. McGraw-Hill, 1992.
- 6) KOSHA, /www.kosha.or.kr/msds/msdsMain.do?menuId=69
- 7) NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid,

- Gases, and Volatile Solids”, NFPA 325M, NFPA, 1991.
- 8) R. E Lenga. and K. L. Votoupal, “The Sigma Aldrich Library of Regulatory and Safety Data, Volume I ~III”, Sigma Chemical Company and Aldrich Chemical Company Inc., 1993.
 - 9) V. Babrauskas, “Ignition Handbook”, Fire Science Publishers, SFPE, 2003.
 - 10) R. M. Stephson, “Flash Points of Organic and Orgamometallic Compounds”, Elsevier Science Publishing Co. Inc., 1987.
 - 11) D. M. Ha, “The Measurement of Fire and Explosion Properties of n-Pentadecane”, J. of the Korean Society of Safety, Vol. 28, No. 4, pp. 53-57, 2013.
 - 12) D. M. Ha, “Prediction of Autoignition Temperature of n-Propanol and n-Octane Mixture”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 17, No. 2, pp. 21-27, 2013.
 - 13) J. Gmehing, U. Onken and W. Arlt, “Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection”, DECHEMA, 1980.
 - 14) G. E. P. Box and N. R. Draper : “Empirical Model-Building and Response Surface”, John Wiley and ons, Inc., 1987.
 - 15) N. N. Semenov, “Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2”, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1959.