Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 29, No. 4, pp. 85-90, August 2014
Copyright@2014 by The Korean Society of Safety (pISSN 1738-3803) *All right reserved.*
http://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2014.29.4.085

MSDS 적정성을 위한 아세틱안하이드리드의 연소특성치 측정

하 동 명†

세명대학교 보건안전공학과

(2014. 4. 16. 접수 / 2014. 8. 4. 채택)

The Measurement of Combustible Properties of Acetic Anhydride for the Compatibility of MSDS

Dong-Myeong Ha†

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University

(Received April 16, 2014 / Accepted August 4, 2014)

Abstract : For the safe handling of acetic anhydride, this study was investigated the explosion limits of acetic anhydride in the reference data. And the lower flash points, upper flash points, and AITs(auto-ignition temperatures) by ignition delay time were experimented. The lower and upper explosion limits of acetic anhydride by the investigation of the literatures recommended 2.9 Vol% and 10.3 Vol.%, respectively. The lower flash point of acetic anhydride by using Setaflash closed-cup tester was experimented 49℃. The lower flash point acetic anhydride by using Tag and Cleveland open cup tester were experimented 55℃and 62℃, respectively. Also, this study measured relationship between the AITs and the ignition delay times by using ASTM E659 tester for acetic anhydride. The experimental AIT of acetic anhydride was 350℃.

Key Words : acetic anhydride, flash point, explosion limit, fire point, autoignition temperature(AIT)

1. 서 론

세계적으로 산업용 화학물질은 약 100,000종이 존재하고 있으며, 이 가운데 우리나라에서는 약 45,000여종이 사용되고 있다. 최근 산업현장에서 화학물질의 사용이 급증함에 따라 화재, 폭발 그리고 누출사고가 역시 증가하고 있으며, 이들 재해는 인명 사고뿐만 아니라 환경 피해로 인한 경제적 손실이 매우 크다. 따라서 화학물질의 안전관리 방안이 더욱 강구되어야 한다.

사업장에서 사용되고 있는 각종 화학물질은 잠재적 위험성이 크므로 보관, 수송 및 처리할 때 특별한 주의가 필요하다. 물질보건안전자료(MSDS; Material Safety Data Sheet)는 사업장의 근로자들에게 유해・위험 정보를 제공함으로서 사업장에서의 사고를 줄이는데 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 신뢰도가 낮은 MSDS는 근로자의 안전을 위협할 뿐만 아니라, 잘못된 정보의 전달은 중대사고로 이어질 우려가 있다. MSDS 가운데 연소특성치들로 인화점, 폭발한계, 최소자연발화온도, 연소열, 최소산소농도 등을 들 수 있다[1]. 기존의 연소특성치를 고찰해 보면, 과거 실험 장치에서 얻은 결과를 적용하거나, 한가지 문헌에서 인용된 자료를 최신화하지 않고 계속 사용하는 사례가 많다. 따라서 취급물질의 정확한 연소특성치의 사용은 산업안전에서 무엇 보다 중요하다.

인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나누고 있으며, 일반적으로 하부인화점을 인화점이라 한다. 인화점은 가연성 액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로써, 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 폭발한계를 실험하기 어려운 물질인 경우는 그 물질의 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

† Corresponding Author : Dong-Myeong Ha, Tel : +82-43-649-132, E-mail : hadm@semyung.ac.kr
Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, 65, Semyung-ro, Jecheon 390-711, Korea.

스스로 점화할 수 있는 최저온도를 최소자연발화온도(Autoignition Temperature, AIT)라고 한다[2].

본 연구에서는 유기합성제, 세룰로우즈전환제, 필름을 비롯한 코팅제, 플라스틱, 제약 등에 다양하게 사용되고 있는 아세틱안하이드리드의 인화점과 자연발화온도를 측정하여 기존의 자료와 비교하였고, 그리고 문헌들에 제시된 폭발한계의 타당성을 검토하기 위해서 측정된 인화점을 이용하여 폭발한계를 계산하였다. 본 연구에서 제시된 아세틱안하이드리드의 자료는 이를 취급하는 공정의 안전을 위해서 활용되기를 기대하며, 현재 사용되고 있는 아세틱안하이드리드의 MSDS의 적정성 및 최신화 연구에 도움을 주고자 한다.

2. 아세틱안하이드리드의 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. 아세틱안하이드리드의 물리적 특성은 요약하여 Table 1에 나타내었다[3].

2.2 아세틱안하이드리드의 연소특성

아세틱안하이드리드는 위험물안전관리법 제 4류위험물의 제 2석유류(비수용성액체, 지정수량 1000ℓ)이고, 유해화학물질 관리법에서는 미규정하고 있으나, 폐기물관리법에 의한 규제 지정폐기물로 지정 하고 있다. NFPA에서는 화재위험성은 2등급, 반응위험성은 1 등급 그리고 보건위험성은 2등급이다. 아세틱안하이드리드는 색상은 투명하고, 무색으로 초산 자극성 냄새를 가진 물질이다.

아세틱안하이드리드는 연소하는 동안 열분해 또는 연소에 의해 자극적이고 매우 유독한 가스가 발생될 수 있으며, 인화점이나 그 이상에서 폭발성 혼합물을 형성할 수 있다. 가연성 물질(나무, 종이, 기름, 의류 등)을 점화할 수 있고, 특히 에테르, 에탄올, 아세트산, 에틸 아세테이트, 벤젠, 글리세롤 그리고 붕산과 접촉 시 격렬한 반응을 한다. 또한 금속을 부식시켜 가연성 수소가스를 발생할 수 있고, 밀폐공간에 인화성 및 독성 가스가 축적될 수 있으므로 안전관리가 필요하다. 피해야할 발화원은 열, 스파크, 화염 그리고 고열 등이고, 가연성 물질(나무, 종이, 기름, 의류 등) 등과의 접촉을 피해야 한다. 증기는 공기보다 무거우므로 누출 시 원거리의 발화원으로 부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다.

소화약제로는 알코올포말, 이산화탄소, 물분무 등이 있으며, 질식 소화 시 건조한 모래 등을 사용할 수 있다. 저장 및 보관방법 은 점화원으로 부터 격리시킬 것 단단히 밀폐된 용기에 저장할 것 서늘하고 건조하며 통풍이 잘되는 곳에 저장해야 한다.

Table 1. Physical properties of acetic anhydride

Properties \ Component	Acetic anhydride
CAS number	1108-24-7-13
Molecular formula	$C_4H_6O_3$
Boiling point	139℃
Melting point	-73.1℃
Vapor pressure	0.680kPa(25℃)
Viscosity	0.843mPa·s(25℃)
Solubility(Water)	120g/L(20℃)
Critical temperature	333℃
Critical pressure	40 atm
Vapor density(Air=1)	3.5
Specipic gravity(Water=1)	1.08

3. 아세틱안하이드리드의 연소특성치의 분석

3.1 아세틱안하이드리드의 폭발한계

폭발한계는 온도, 압력, 산소농도, 불활성가스의 농도, 화염전파 방향, 장치의 표준상태, 물리적 상태 등에 영향을 받으므로 문헌에 따라 다른 값들이 제시되고 있다. 일반적으로 폭발한계는 점화원의 위치에 따라 값이 달라진다. 점화원이 하부에서 점화 후 화염이 위쪽으로 올라가는 상향전파인 경우 폭발하한계(LEL, Lower Explosion Limit)는 낮아지고, 폭발상한계(UEL, Upper Explosion Limit)는 높아져서 폭발범위는 넓어진다.

Table 2는 문헌들에 제시된 아세틱안하이드리드의 폭발한계를 정리하여 나타내었다. NFPA, Sigma, Ignition

Table 2. Comparison of explosion limits of acetic anhydride in air by several references

References	Explosion Limits [Vol.%]	
	Lower	Upper
NFPA[4]	2.7	10.3
Sigma[5]	2.7	10.3
Ignition[6]	2.7	10.3
Lange[7]	2.9	10.3
SAX[8]	2.9	10.3

에서는 폭발하한계는 2.7 Vol.%를 제시하고 있으며, Lange와 SAX는 2.9 Vol.%를 제시하고 있다. 아세틱안하이드리드의 폭발상한계는 모든 자료에서 10.3 Vol.%로서 한 문헌에서 인용된 것으로 본다. 그러나 폭발하한계는 문헌에 따라 0.2 Vol.%의 차이를 보이고 있다.

3.2 아세틱안하이드리드의 인화점

인화점은 가연성액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로서 하부인화점과 상부인화점으로 나눌 수 있다. 인화점 측정의 매개변수(Parameter)로는 용기형태, 시료량, 발화원, 온도조절기, 주위압력, 시료의 균일성 등이 있다. 측정방법으로 밀폐식(CC)은 Pensky-Martens과 Setaflash 등이 있으며, 개방식(OC)은 Tag와 Cleveland 등이 있다[2].

Table 3에서는 아세틱안하이드리드의 하부인화점을 정리하여 나타내었다. NFPA와 Fluka에서는 49℃이고, Sigma 등에서는 54℃로서 문헌에 따라 약 5℃의 차이를 보이므로 공정안전을 위해서는 인화점의 실험적 연구가 필요하다.

3.3 아세틱안하이드리드의 최소자연발화온도

자연발화온도는 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류, 지연시간 등 많은 인자에 의존한다. 아세틱안하이드리드의 최소자연발화온도를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 아세틱안하이드리드의 최소자연발화온도 경우 NFPA와 Hilado 등은 316℃로 가장 낮은 값을 제시하고 있으며, Ignition, Lange 그리고 SAX는 약 390℃로 가장 높은 값을 제시하였다. 가장 높은 값과 낮은 값은 약 75℃의 차이를 보이므로 MSDS의 적성성에 관한 연구가 필요하다.

Table 3. The lower flash point of several reported data for acetic anhydride

Compound	Flash points [℃]					
	NFPA[4]	Sigma[5]	Iginition[6]	Lange[7]	SAX[8]	Fluka[9]
Acetic anhydride	49	54.4	54	54(CC)	54	49

4. 연소특성 실험장치

4.1 실험재료

본 연구에서 사용한 아세틱안하이드리드(Yakuri, 96%)의 시료는 별도의 정제과정을 거치지 않고 사용한다.

4.2 실험장치

4.2.1 인화점 측정 창치

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 사용된 장치인 Setaflash와 Pensky-Martens 밀폐식 그리고 Tag와 Cleveland 개방식의 구성 요소를 간략히 정리하면 다음과 같다[12].

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 가열공기조, 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 레벨수준의 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 측정창치들의 용기 특성 및 시험방법을

Table 4. The autoignition temperature of several reported data for acetic anhydride

Compound	AITs[℃]						
	NFPA[4]	Sigma[5]	Ignition[6]	Lange[7]	SAX[8]	Hilado[10]	Scott[11]
Acetic anhydride	316	332	392	390	390	316	392

Table 5. Comparison of several flash point test methods

Test methods	Test vessel diameter(cm)	Test vessel depth(cm)	Test vessel volume(ml)	Heating methods
ASTM D93 Pensky-Martens closed-cup	5.085	5.6	100	For odinary liquids, the temperature of the specimen is increased at 5-6℃/min
ASTM D3278 Setaflash closed-cup	5.0	1.0	2	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±0.2 5℃/min.
ASTM D92 Cleveland open cup	6.4	3.4	80	The temperature of the specimen is increased at 5-6℃ /min

요약하여 Table 5에 나타내었다.

4.2.2 자연발화온도 측정장치(ASTM E659-78)

본 실험에서는 액체 화학물질의 자연발화점 측정 장치로서 ASTM E659-78 장치를 사용하여 자연발화온도를 측정하였으며, 장치는 크게 Furnance, Temperature Controller, Thermocouple, Test Flask, Hypodermic Syringe, Mirror, Air Gun으로 구성되어 있다[12].

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

5. 결과 및 고찰

5.1 측정된 인화점에 의한 폭발한계의 비교 고찰

본 연구에서 인화점 장치를 이용하여 아세틱안하이드리드의 하부인화점을 측정한 결과, 밀폐식인 Setaflash는 49℃, Pensky-Martens는 53℃로 측정되었으며, 개방식인 Tag는 55℃, Cleveland는 62℃로 측정되었다. 그리고 Setaflash에 의한 상부인화점은 71℃로 측정되었다.

아세틱안하이드리드의 폭발한계의 자료를 검토한 결과 하한계는 2.7 Vol.% 혹은 2.9 Vol.% 그리고 상한계는 10.3 Vol.%를 많이 인용하였다.

아세틱안하이드리드의 폭발하한계의 자료를 검증하기 위해 Antoine 식[13]을 사용하여 폭발하한계를 계산할 수 있다.

$$\ln P^f = 16.3983 - \frac{3287.56}{(T - 75.11)} \quad (1)$$

여기서, P^f는 증기압(mmHg)이고, T는 온도(K)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 49℃를 적용하는 경우 폭발하한계는 약 2.89 Vol.%로 계산되었고, 상부인화점 71℃를 적용한 경우 8.59 Vol.%로 계산되었다. Table 2에 제시된 폭발하한계의 신뢰도는 높다고 판단되며, 상한계는 문헌값보다 약 1.7 Vol% 낮게 계산되므로써 이에 대한 검토가 필요하다고 판단된다. 측정된 인화점이나 문헌에 제시된 인화점을 이용하여 폭발한계의 예측이 가능하다.

Table 6. Estimated explosion limits by experimental flash points for acetic anhydride

Testers	Experimental (℃)		Estimated(LEL) (Vol%)	
	Lower flash points	Upper flash points	by Lower flash points	by Upper flash points
Setaflash(CC)	49	71	2.89	8.59
Pensky-Martens(CC)	53	-	3.58	-
Tag(OC)	55	-	3.97	-
Cleveland(OC)	62	-	5.63	-

5.2 아세틱안하이드리드의 자연발화온도 고찰

아세틱안하이드리드의 최소자연발화온도(AIT)는 문헌[4-8]에 따라 316℃~ 392℃로 제시되고 있다. 따라서 본 실험에서는 초기설정온도를 300℃로 하여 실험한 결과 비발화되어, 다시 30℃를 상승 시켜 330℃에서 실험한 결과 역시 비발화되었다. 또 다시 30℃ 상승시킨 360℃에서 실험한 결과 7.81 sec에서 발화되었다. 다시 20℃ 낮춘 340℃에서 실험한 결과 비발화되어 다시 2~5℃ 상승시켜 실험한 결과 350℃, 8.36sec에서 최소자연발화온도를 찾았다. 이를 기점으로 5℃ 혹은 10℃씩 상승시켜 발화지연시간을 측정한 결과 385℃에서는 4.39sec, 400℃에서는 3.12sec, 410℃에서는 2.06sec 그리고 420℃에서는 1.66sec에서 발화하였다.

아세틱안하이드리드의 자연발화온도와 발화지연시

간의 관계를 실험한 결과를 Table 7에 나타내었다. 본 연구에서 아세틱안하이드리드의 최소자연발화온도가 350℃로서 기존의 문헌들의 중간값 정도로 측정되었다. 따라서 측정된 AIT를 공정에 사용하는 것도 타당하다고 본다.

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

$$\ln\tau = -15.17 + 10913.69\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2)$$

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

$$\log\tau = -6.59 + 4739.77\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

식 (3)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 7과 Figure 1에 나타내었다. 추산값과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.D.(Average Absolute Deviation)와 상관계수(r)를 사용하였다[12].

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

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

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 (3)에 의한 예측값과 실험값 사이의 평균절대오차는 0.39sec이며, 상관계수(r)는 0.96으로서 실험값과의 모사성은 크다.

Table 7. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for acetic anhydride

No.	T[K]	$\tau_{exp.}$[s]	lnτ	$\tau_{est.}$.(Eq. 3)
1	623.15	8.46	2.13535	9.55
2	633.15	7.81	2.05540	7.88
3	643.15	6.71	1.90360	6.03
4	658.15	4.39	1.47933	4.09
5	673.15	3.12	1.13783	2.82
6	683.15	2.06	0.72271	2.23
7	693.15	1.66	0.50680	1.77
A.A.D.	-	-	-	0.39

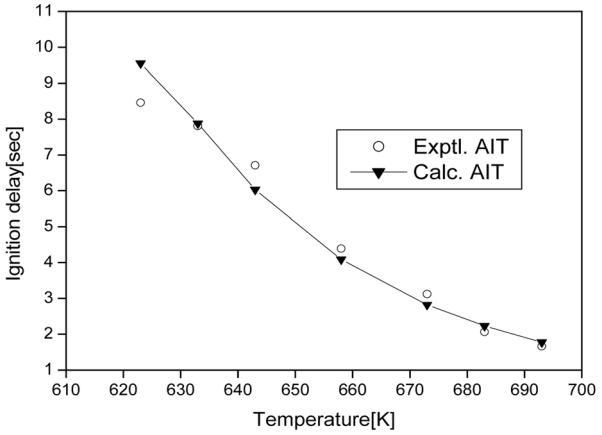

Fig. 1. A comparison between the experimental and calculated delay times for acetic anhydride.

활성화에너지(E)는 Semenov[14]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 90.20 kJ/mol이다.

6. 결 론

본 연구에서는 아세틱안하이드리드의 인화점과 최소자연발화온도(AIT)를 측정하였고, 폭발한계는 측정된 인화점을 이용하여 계산하였다. 제시한 방법론을 이용하여 아세틱안하이드리드의 MSDS의 적성성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아세틱안하이드리드의 폭발한계를 고찰한 결과, 폭발하한계는 2.7 Vol.% 혹은 2.9 Vol.%, 상한계는 10.3 Vol.%가 사용되고 있다.

2) 아세틱안하이드리드의 하부인화점을 측정한 결과, 밀폐식인 Setaflash는 49℃, Pensky-Martens는 53℃로 측정되었으며, 개방식인 Tag는 55℃, Cleveland는 62℃로 측정되었다. 그리고 Setaflash에 의한 상부인화점은 71℃로 측정되었다.

3) Setaflash에 의해 측정된 하부인화점 49℃와 상부인화점 71℃를 증기압 식에 이용하여 계산된 폭발하한계는 2.89 Vol.%, 상한계는 8.59 Vol.%였다. 인화점에 의한 폭발한계 예측이 가능하다.

4) 측정된 아세틱안하이드리드의 최소자연발화온도는 350℃는 기존의 문헌값의 중간값으로서 공정에 사

용하는 것이 타당하다고 본다.

5) 아세틱안하이드리드의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\log\tau = -6.59 + 4739.77\left(\frac{1}{T}\right)$$

6) Semenov식을 이용하여 계산된 아세틱안하이드리드의 활성화에너지(E)는 90.2 kJ/mol이다.

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) D.R. Lide, “Handbook Chemistry and Physics”, 76th ed., CRC Press, 1996.
4) NFPA, “Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids”, NFPA 325M, NFPA, 1991.
5) 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.
6) V. Babrauskas, “Ignition Handbook”, Fire Science Publishers, SFPE, 2003.
7) J.A. Dean, “Lange's handbook of Chemistry”, 14th ed. McGraw-Hill, 1992.
8) R.J. Lewis, “SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials”, 11th ed., John Wiley & Son, Inc., N.J., 2004
9) Fluka Chemie AG., Catalog 1986-87, CH-9470, Bucks/ Switzerland.
10) C.J. Hilado and S.W. Clark, “Autoignition Temperature of Organic Chemicals”, Chemica Engineering, Vol. 4, pp.75-80, 1972.
11) G.S. Scott, G.W. Jones and F.E. Scott, “Determination of Ignition Temperature of Combustible Liquids and Gases”, Analytical Chemistry, Vol. 20, No.3, pp. 238-241, 1948.
12) 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.
13) J. Gmehing, U. Onken and W. Arlt, “Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection”, DECHEMA, 1980.
14) N.N. Semenov, “Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2”, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1959.