

가솔린탱크의 위험성평가를 위한 노말헵탄의 연소특성치 측정 및 고찰 Measurement and Investigation of Combustible Properties of n-Heptane for Risk Assessment of Gasoline Tank

하동명[†] · 정기신* · 이성진** · 조용선*** · 윤명오****

Dong-Myeong Ha[†] · Keesin Jeong* · Sung-Jin Lee** ·
Yong-Sun Cho*** · Myung-O Yoon****

세명대학교 보건안전공학과, *세명대학교 소방방재학과, **세명대학교 임상병리학과,
금성소방산업, *서울시립대학교 재난과학과
(2010. 9. 13. 접수/2010. 12. 10. 채택)

요 약

노말헵탄의 안전한 취급을 위해서 25°C에서 폭발한계와 폭발한계 온도의존성 그리고 하부인화점을 고찰하였다. 또한 발화지연시간에 의한 발화온도를 측정하였다. 공정의 안전을 위해서 노말헵탄의 폭발하한계는 1.0Vol%, 상한계는 7.0Vol%를 추천하였고, 하부인화점은 -4°C를 추천하였다. ASTM E659-78 장치를 사용하여 발화온도와 발화지연시간을 측정하였고, 여기서 측정된 최소자연발화온도는 225°C였다. 그리고 노말헵탄의 새로운 폭발한계 온도의존식을 제시하였으며, 제시된 식은 문헌값과 일치하였다.

ABSTRACT

For the safe handling of n-heptane, the explosion limit at 25°C, the temperature dependence of the explosion limits and the lower flash point were investigated. And AITs (auto-ignition temperatures) by ignition time delay for n-heptane were experimented. By using the literatures data, the lower and upper explosion limits of n-heptane recommended 1.0 Vol% and 7.0 Vol%, respectively. And the lower flash points of n-heptane recommended -4°C. This study measured relationship between the AITs and the ignition delay times by using ASTM E659-78 apparatus for n-heptane and the experimental AIT of n-hexane was 225°C. The new equation for predicting the temperature dependence of the explosion limits of n-heptane is proposed. The values calculated by the proposed equations were a good agreement with the literature data.

Key words : n-Heptane, Lower flash point, Explosion limit, Autoignition temperature (AIT), ASTM E659-78

1. 서 론

산업 현장에서 취급하고 있는 각종 화학물질은 잠재적 위험성이 크므로 보관, 수송 및 취급할 때 특별한 주의가 필요하고 있다. 시설 설계 시 정확하지 않은 잘못된 화재 및 폭발 자료를 사용함으로써 사고를 유발한 경우가 많다. 따라서 사업장에서 사용되고 있는 물질의 위험 특성 파악을 정확히 파악하는 것은 재해 예방에 가장 기본이 된다.¹⁾

산업현장에서 취급하고 있는 대부분의 물질의 유해·

위험 특성은 한국산업안전공단에서 제공하고 있는 MSDS(Material Safety Data Sheet)를 통해 얻을 수 있다. 또한 잘 알려진 D/B인 미국화학공회(DIPPR (Design Institute for Physical Property Data)를 비롯해 여러 D/B 및 Handbook 등에서도 확보할 수 있다. 특히 이들 D/B나 자료들에서 연소특성치는 각기 다른 값들이 제시되는 경우가 허다하다.²⁾

Jones 등³⁾은 Formic Acid 인화점의 신뢰도를 평가하기 위해 밀폐식 장치를 이용하여 인화점 측정연구를 하였고, Britton⁴⁾는 메탄의 폭발한계의 유용한 값을 제시하기 위해 그동안 연구된 수십 편의 문헌을 고찰하였다. 최근 Ha 등^{5,6)}은 사업장에서 가장 널리 사용되고

[†]E-mail: hadm@semyung.ac.kr

있는 메칠에칠케톤(MEK)과 톨루엔의 연소특성치 측정 및 고찰을 통해 유용한 화재 및 폭발 자료를 제공하였다.

가솔린은 노말옥탄($n-C_8H_{18}$), 이소옥탄($iso-C_8H_{18}$, 2,2,4-trimethylpentane), 노말헵탄($n-C_7H_{16}$), 노말헥산($n-C_6H_{14}$) 그리고 벤젠(C_6H_6) 등이 주요 성분이다. 이러한 각각의 화합물이 섞인 비율에 따라 휘발유 전체의 특성도 달라질 수 있다. 가솔린의 성분 중 하나로서 옥탄가 조절에 사용되고 있는 노말헵탄은 매우 빠르게 연소하여 엔진의 성능에 영향을 주고 있으나, 가솔린의 한 물질로 사용되고 있다. 옥탄가는 노말헵탄과 이소옥탄의 혼합비율 중 이소옥탄의 비율을 말하는데 예를 들면, 노말헵탄이 5%, 이소옥탄이 95% 함유되어 있다면 옥탄가는 95가 된다. 또한 노말헵탄은 인화성이 매우 강하고 연소 시 많은 열을 내며, 에탄올, 에테르, 클로로포름, 아세톤 등에 용해된다.

본 연구에서는 가솔린뿐만 아니라 산업현장의 다양한 곳에 사용되고 있는 노말헵탄에 대해 자연발화온도를 측정하여 기존의 자료들과 비교 고찰하였다. 그리고 노말헵탄의 폭발한계 및 인화점은 여러 문헌에 제시된 자료를 고찰하여 공정안전에 타당한 자료를 제시하고, 폭발한계의 온도 의존성에 대해서는 새로운 예측식을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 노말헵탄의 자료는 노말헵탄이 포함된 탱크의 소화설비 지침 마련과 MSDS의 최신화에 유용한 정보를 제공하는데 목적이 있다.

2. 노말헵탄의 연소특성치 선택 및 위험성

2.1 자료선택

각 국에서는 사업장에서 취급하는 유해·위험물질에 대한 안전한 취급, 처리, 수송 및 보관을 위해 MSDS 자료를 제공하고 있다. 그리고 많은 단체에서 발간한 자료와 논문들에서도 연소특성치를 제공하고 있다. 대표적으로 NFPA⁷⁾에는 NFPA 325M 코드에서 가연성가스, 액체 및 휘발성 고체 수 백 종의 특성치를 제시하고 있으며, 또한 SFPE에서 출간한 “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”⁸⁾와 “Ignition Handbook”⁹⁾에서는 약 500여종의 물질에 대해 연소특성치를 제시하고 있다. 특히 인화점은 Stephenson¹⁰⁾이 저술한 “Flash Points of Organic and Organometallic Compounds”에 다수의 물질에 대해 정리하고 있다.

2.2 노말헵탄의 반응성 및 연소특성

노말헵탄은 위험물안전관리법에서는 제4류위험물의 제 1석유류이고, 산업안전보건법에서는 작업환경측정

물질과 관리대상유해물질이다. 노말헵탄은 특이한 냄새를 지니고 휘발성이 강한 투명한 액체로서, 알코올, 에테르, 클로로포름, 아세톤, 유기용제 등에 잘 용해된다. 피해야할 발화원은 열, 화염, 스파크 및 기타점화원 등이 있다. 증기는 공기보다 무거우므로 누출 시 원거리의 발화원으로부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다. 또한 물질의 흐름과 교반에 의하여 폭발을 초래할 수 있는 정전기가 발생할 수도 있다. 염소산나트륨 등의 산화제, 할로젠, 가연성물질과 접촉을 피하고, 저장은 밀폐용기에 보관하고 환기가 잘되고 서늘하고 건조한 장소에 보관한다.

3. 노말헵탄의 화재 및 폭발 특성치 분석

3.1 노말헵탄의 폭발한계와 폭발한계온도 의존성

3.1.1 화염전파 방향에 따른 폭발한계

폭발한계는 점화원의 위치에 따라 값이 달라지는데, 일반적으로 폭발범위는 점화시 화염이 위쪽으로 올라가는 상향전파에서 폭발하한계(LEL, Lower Explosion Limit)는 낮고, 폭발상한계(UEL, Upper Explosion Limit)는 높아져서 폭발범위는 넓어진다.

노말헵탄의 폭발하한계와 상한계에 대해 화염전파 방향에 의한 폭발한계의 여러 값들과 구형폭발장치를 이용한 측정값들을 비교하여 Table 1에 나타내었다. 노말헵탄의 폭발하한계와 상한계에 대해 CRC¹¹⁾에서는 1~7Vol%, SFPE⁸⁾에서는 1.2~6.7Vol%로 제시하고 있다.

Table 1. Comparison of Explosion Limits of n-Heptane in Air by Several References

References	Tube [cm or L]		Explosion Limits [vol%]	
	Diameter	Length	Lower	Upper
NFPA ⁷⁾	-	-	1.05	6.7
Sigma ¹²⁾	-	-	1.1	7.0
SFPE ⁸⁾	-	-	1.2	6.7
CRC ¹¹⁾	-	-	1.0	7.0
Lange ¹³⁾	-	-	1.05	6.7
Ignition handbook ⁹⁾	-	-	1.05	6.7
Yagyu ¹⁴⁾	5.0	150	1.1	6.7
	5.3	-	1.26	-
	5.7	120	1.05	-
	-	-	1.0	6.0
	20L		1.0	-

Table 2. The Flash Point of Several Reported Data for n-Heptane

Compound	Flash Points [°C]						
	NFPA ⁷⁾	Sigma ¹²⁾	SFPE ⁸⁾	CRC ¹¹⁾	Lange ¹³⁾	Ignition ⁹⁾	Kirk-Othmer ¹⁸⁾
n-Heptane	-4	-1.1	-4	-4	-4	-4	4

Table 3. The Autoignition Temperature of Several Reported Data for n-Heptane

Compound	AITs [°C]												
	NFPA ⁷⁾	Sigma ¹²⁾	Sheldon ¹⁸⁾	SFPE ⁸⁾	CRC ¹¹⁾	Ignition ⁹⁾	Scott ²⁰⁾	Jackson ²¹⁾	Zabetakis ²²⁾	Hilado ²³⁾	Swart ²⁴⁾	Frank ²⁵⁾	Smyth* ²⁶⁾
n-Heptane	204	312	215	204	204	223	230	247	223	223	250	250	915 ± 10

**Hot Surface (Nickel)

3.1.2 폭발한계의 온도의존성

화학물질을 취급하는 공정에서는 일반적으로 표준상태에서 운전하는 경우보다 고온이나 고압에서 운전하는 경우가 많다. 일반적으로 계의 온도가 증가할 경우 폭발하한계는 작아지고, 폭발상한계는 커져서 폭발범위가 넓어진다.

지금까지 연구된 폭발한계의 온도의존성을 살펴보면, Zabetakis 등¹⁵⁾은 폭발하한계에서의 온도의존성을 고찰하기 위해 연소열, 폭발한계, 비열 그리고 폭발하한계에서의 화염온도를 1300°C라는 가정하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 7.8 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (1)$$

Hustad 등¹⁶⁾은 탄화수소화합물의 폭발한계의 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 0.00085(t - 25)] \quad (2)$$

Ha¹⁷⁾는 4개의 식을 평균하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 7.69 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (3)$$

3.2 노말헵탄의 인화점

인화점은 가연성액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로, 하부인화점(Lower Flash Point)과 상부인화점(Upper Flash Point)으로 나뉘며, 일반적으로 인화점이란 하부인화점을 말한다. 인화점 측정 방법으로는 Tag방식, Pensky-Martens방식, Cleveland개방식, Abel방식 그리고 Setaflash방식 등이 있으며, 장치에 따라 다른 값을 갖는다. 노말헵탄에 대해 여러 문헌에서 얻은 인화점 자료를 정리하여 Table 2에 나타내었다.

3.3 노말헵탄의 최소자연발화온도

발화온도는 다른 곳에 아무런 화원을 주지 않고 공기 속의 상온에서 주위로부터 발생하는 열로부터 가연물이 자발적으로 점화되는 온도를 말한다. 자연발화온도는 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류 그리고 지연시간 등 많은 인자에 의존한다. 노말헵탄에 대해 NFPA Handbook을 비롯하여 여러 문헌 등에서 제시되고 있는 최소자연발화온도를 정리하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 Smyth는 니켈금속 표면을 발화원으로 사용하여 얻은 발화온도이다.

4. 노말헵탄의 화재 및 폭발 특성치 측정 및 고찰

4.1 노말헵탄의 인화점

문헌들에서 제시된 노말헵탄의 밀폐식 장치에 의한 하부인화점은 약 -4~4°C로 큰 차이를 보이고 있다. 대부분의 문헌에서는 -4°C를 제시하고 있으나, Sigma에서는 -1.1°C 그리고 Kirk-Othmer는 4°C로서 차이를 보이고 있다. 그러나 대부분의 문헌에서 제시한 -4°C를 사용하여 안전을 확보하는 것이 타당하다고 본다.

4.2 노말헵탄의 폭발한계

폭발한계의 자료를 검토한 결과 실험장치의 크기나 모양 그리고 화염전파방향에 따라 달라진다는 사실은 Table 1에서 알 수 있었다. 그 동안 공정에서 안전을 위해 폭발하한계의 자료는 하한계는 1.1vol%를, 상한계는 약 6.7vol%를 많이 인용하였다. 그러나 최근 문헌을 검토한 결과 공정의 안전을 위해서는 하한계 1.0Vol%, 상한계 약 7.0Vol%를 추천한다.

노말헵탄의 폭발하한계의 자료를 검증하기 위해

Antoine 식²⁷⁾을 사용하여 폭발하한계를 계산하였는데, 사용된 Antoine 식은 다음과 같다.

$$\log P^f = 6.89386 - \frac{1264.37}{(t + 216.64)} \quad (4)$$

여기서, P^f는 증기압(mmHg)이고, t는 온도(°C)이다.

식(4)을 이용하여 폭발하한계를 예측할 수 있는데, 인화점 -4°C를 적용하는 경우 폭발하한계는 약 1.17Vol%로 계산되었고, Simga에서 제시한 -1.1°C를 적용한 경우 폭발하한계는 1.41Vol%로서 Table 1에 제시된 폭발하한계 값들 보다 조금 높게 계산되었다. 따라서 인화점을 -4°C를 적용할 경우 Table 1에 제시된 폭발하한계의 중간값으로 인화점을 이용한 증기압 식에 의한 폭발하한계 예측이 가능함을 알 수 있다.

4.3 노말헵탄의 폭발하한계 온도의존식

본 연구에서는 노말헵탄의 폭발하한계와 온도의 관계를 제시한 문헌 자료를 이용하여 기존의 추산식에 의한 예측값과 새로운 추산식에 의한 예측값을 비교 고찰하였다. 본 연구에서 문헌 자료를 이용하여 얻은 새로운 추산식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25}[1.055 - 5.645 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (5)$$

식(5)에 의한 추산값과 지금까지 널리 사용되고 있는 Zabetakis가 제시한 식(1)에 의한 추산값을 문헌값과 비교하여 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서 제시한 식이 기존에 제시한 식보다 문헌값과 일치함을 보여주고 있다. 따라서 고온에서 노말헵탄을 사용하는 공정에서는 식(5)을 사용하여 안전을 확보하는 것이 타당하다고 본다.

4.4 노말헵탄의 최소자연발화온도 측정 및 고찰

4.4.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 장치는 액체 화학물질의 자연발화

점 측정 장치로서 ASTM E659-78 장치를 사용하였다.²⁸⁾ 장치는 로, 온도조절기, 열전대, 시험플라스크, 피하주사기, 거울, 에어건 등으로 구성되어 있다. 재료는 Lancaster(England)의 순도 99%를 사용하였다.

실험 방법은 우선 실내 온도, 기압, 시간, 습도를 기록하였다. 기준 온도를 설정하고, 실험 장치를 가열하였다. 설정된 온도에 도달하면 플라스크 내부에 피하주사기로 시료를 0.1ml를 넣고 Timer 작동하였다. 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 비 발화로 간주하고 플라스크를 에어건으로 청소 후 다시 실험을 준비하였다 만일 10분 전에 발화가 일어나면 기준 온도 보다 30°C 낮게 설정하고, 3~5°C 혹은 10°C 씩 증가시키면서 측정하였다. 발화 시간을 2초 미만까지 측정하였다. 발화지연시간을 2초까지 측정하였는데, 이는 발화지연시간과 발화온도의 관계를 이용하여 활성화에너지(Activation Energy)를 계산할 수 있기 때문이다.

4.4.2 노말헵탄의 자연발화온도에 의한 발화지연 시간 고찰

노말헵탄의 발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험한 결과를 Table 5에 나타내었다.

본 실험에서 얻은 최소자연발화온도를 공정안전을 위해 이용되고 있는 대표적 문헌값들과 비교하였다. 노말헵탄의 최소자연발화온도에 대해 NFPA 325M에서는 204°C, SFPE handbook은 215°C, Sigma handbook은 312°C, Hilado와 Clark는 223°C, Jackson은 247°C, Swart는 250°C를 제시하고 있다. 이들 문헌을 고찰하면 최소자연발화온도는 204~312°C로 약 110°C의 차이를 보이고 있으므로 자료의 신뢰성 고찰을 위해 측정 연구가 필요하다.

본 실험에서 초기설정온도를 250°C로 하여 실험한 결과 발화 14.63sec에서는 발화가 일어나서, 초기온도 보다 30°C 낮게 220°C에서 다시 실험한 결과 발화가 일어나지 않았다. 따라서 5°C 상승 시킨 225°C에서 실험한 결과 71.65sec에서 발화가 시작되었고, 이를 기점으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화지연시간을 측정한 결과 285°C에서 1.06sec에 발화하였다.

제시한 실험 자료를 Arrhenius 형태 식을 이용한 예측식은 다음과 같다.

$$\ln \tau = - 31.18 + 17645.88 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (6)$$

식(6)을 logτ와 (1/T)의 관계로 다시 표현하면 다음과

Table 4. Comparison of A.A.D. of the LEL with Temperature Variation Using Several Correlation for n-Heptane

No.	Temp. (°C)	LEL	Eqn. (1)	Eqn. (5)
1	26	1.05	1.05	1.06
2	100	1.02	0.99	1.01
3	150	0.99	0.95	0.98
4	200	0.95	0.91	0.96
A.A.D.	-	-	0.03	0.01

같다.

$$\log \tau = -13.54 + 7662.79 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

식(7)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 5와 Figure 1에 나타내었다. 추산값과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.D.(Average Absolute Deviation)을 사용하였다.²⁸⁾

$$\text{A.A.D.} = \sum \frac{|\tau_{\text{est.}} - \tau_{\text{exp.}}|}{N} \quad (8)$$

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

Table 5. Comparison of Experimental and Calculated Ignition Delay Time by the AIT for n-Heptane

No.	T [K]	$\tau_{\text{exp.}}$ [s]	$\ln \tau_{\text{exp.}}$	$\tau_{\text{est.}}$ (Eq. 7)
1	498.15	71.65	4.27179	69.61
2	508.15	33.37	3.50766	34.67
3	518.15	17.77	2.87751	17.74
4	523.15	14.63	2.66445	12.81
5	528.15	8.17	2.10047	9.31
6	533.15	6.16	1.81808	6.80
7	538.15	4.25	1.44692	5.00
8	543.15	4.15	1.42311	3.70
9	548.15	3.61	1.28371	2.75
10	553.15	2.71	0.99695	2.06
11	558.15	1.06	0.05827	1.54
A.A.D.				0.90

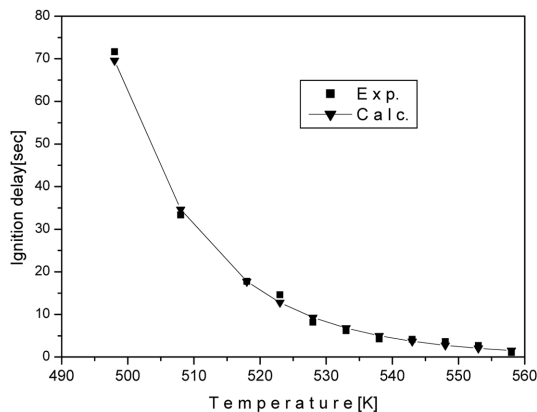


Figure 1. A comparison between the experimental and calculated delay times for n-heptane.

한국화재소방학회 논문지, 제24권 제6호, 2010년

$\tau_{\text{exp.}}$ 는 실험값이며, 그리고 N은 자료수이다.

식(7)에 의한 예측값과 실험값 사이의 평균절대오차는 0.9초이며, 결정계수(R^2)는 0.997로서 실험값과 일치하고 있다. 일반적으로 Semenov²⁹⁾가 제시한 식(7)을 이용하면 활성화에너지(Activation Energy)를 얻을 수 있다.

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + B \quad (9)$$

식(7)을 식(9)에 대입하여 계산된 활성화에너지(E)는 145.82kJ/mol이다.

또한 본 실험에서 얻은 최소자연발화 온도가 기존의 문헌에 제시된 자료들과 비교하였을 때 약간의 차이를 나타내는 것은 실험 장치에서 오는 차이로 볼 수 있다. 이는 과거에 사용된 ASTM D-2155 장치는 250ml의 삼각플라스크 용기로 측정하였고, 때로는 자체 제작한 장치를 이용한 측정 결과이며, Jackson은 ASTM crucible-type 장치를 사용하였다. 최근 고안된 ASTM E659-78 장치는 500ml의 둥근 플라스크에 의한 결과로서 기존 장치에서 얻은 결과와 차이가 있는 것으로 사료된다. 특히 과거 ASTM 장치에 의한 발화온도는 5분(300초)의 발화지연시간을 기준으로 측정되어 제시하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 노말헵탄의 화재 및 폭발 특성치 가운데 최소자연발화온도(AIT)는 ASTM E659-78을 사용하여 측정하였고, 폭발한계와 인화점을 여러 문헌들과 비교 고찰하였다. 그리고 폭발한계의 온도의존성에 대한 새로운 예측식을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 노말헵탄의 폭발한계와 인화점을 고찰한 결과, 폭발하한계는 1.0Vol%, 상한계는 약 7.0Vol% 그리고 인화점은 -4°C 를 사용하는 것이 바람직하다.
- 2) 증기압 식을 이용한 노말헵탄의 폭발하한계 예측값은 밀폐식 인화점인 -4°C 를 적용하는 경우 폭발하한계는 약 1.17Vol%로 계산되었다.
- 3) 노말헵탄의 새로운 폭발한계 온도의존식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25}[1.055 - 5.645 \times 10^{-4}(t - 25)]$$

- 4) 노말헵탄의 최소자연발화온도는 225°C 로 측정되었다.

- 5) 노말헵탄의 발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\log \tau = -13.54 + 7662.79 \left(\frac{1}{T} \right)$$

6) Semenov식을 이용하여 계산된 노말헵탄의 활성화 에너지(E)는 145.82kJ/mol이었다.

참고문헌

1. F.P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Vol 2, 2nd ed., Butterworth-Heinemann(1996).
2. A.A. Kline, C.R. Szydluk, T.N. Rogers, and M.E. Mullins, "An Overview of Compiling, Critically Evaluating, and Delivering Reliable property Data AIChE DIPPER Project 911 and 912", Fluid Phase Equilibria, Vol.150-151, pp.421-428(1998).
3. J.C. Jones and J. Godefroy, "A Reappraisal of the Flash Point of Formic Acid", J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.15, pp.241-243(2002).
4. L.G. Britton, "Two Hundred Years of Flammable Limits", Process Safety Progress, Vol.12, No.1, pp.1-11(2002).
5. D.M. Ha, "The Compatibility of MSDS through the Investigation of the Combustible Properties for MEK", J. of the Korean Society of Safety, Vol.23, No.3, pp.36-41(2008).
6. D.M. Ha and K. Jeong, "Measurement and Investigation of Combustible Characteristics for Risk Assessment of Toluene", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.24, No.2, pp.76-81(2010).
7. NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, NFPA(1991).
8. SFPE, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 2nd ed., SFPE(1995).
9. V. Babrauskas, "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, SFPE(2003).
10. S.M. Stephenson, "Flash Points of Organic and Organometallic Compounds", Elsevier(1987).
11. D.R. Lide, "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 75th ed., CRC Press(1994).
12. J.A. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry", 14th Ed. McGraw-Hill(1992).
13. 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).
14. 柳生昭三, 助爽の丘産三諡S, 安全工学協會(1979).
15. G.M. Zabetakis, "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors", US Bureau of Mines, Bulletin(1965).
16. J.E. Hustad and O.K. Sonju, "Experimental Studies of Lower Flammability Limits of Gases and Mixtures of Gases at Elevated Temperature", Combustion and Flame, Vol.71, pp.283-294(1988).
17. D.M. Ha, "Prediction of Temperature Dependence of Lower Explosive Limits for Paraffinic Hydrocarbons", J. of the Korean Institute for Industrial Safety, Vol.15, No.3, pp.71-77(2000).
18. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Ed., John Wiley and Sons Inc.(1978).
19. M. Sheldon, "Understanding Auto-ignition Temperature", Fire Engineering J., June, pp.27-32 (1984).
20. 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).
21. J.L. Jackson, "Spontaneous Ignition Temperature - Commercial Fluids and Pure Hydrocarbons-", Industrial and Engineering Chemistry, Vol.43, No.12, pp.2869-2870(1951).
22. M.G. Zabetakis, A.L. Furno, and G.W. Jones, "Minimum Spontaneous Ignition Temperature of Combustibles in Air", Industrial and Engineering Chemistry, Vol.46, No.10, pp.2173-2178(1954).
23. C.J. Hilado and S.W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", Chemica Engineering, Vol.4, pp.75-80(1972).
24. D.E Swarts and M. Orchin, "Spontaneous Ignition Temperature of Hydrocarbons", Industrial and Engineering Chemistry, Vol.49, No.3, pp.432-36 (1957).
25. C.E. Frank and A.U. Blackham, "Spontaneous Ignition of Organic Compounds", Industrial and Engineering Chemistry, Vol.44, No.4, pp.862-867 (1952).
26. K.C. Smyth and N.P. Bryner, "Short-Duration Autoignition Temperature Measurement for Hydrocarbon fuels Near Heated Metal Surfaces", Combustion Sci. and Tech., Vol.126, pp.225-253(1997).
27. J. Gmehing, U. Onken, and W. Arlt, "Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection", DECHEMA(1980).
28. D.M. Ha, "Relationship between Autoignition Temperature(AIT) and Ignition Delay Time for Acids", T. of the Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.18, No.2, pp.27-33(2004).
29. N.N. Semenov, "Some Problems in Chemical kinetics and Reactivity, Vol.2", Princeton University Press, princeton, N.J.(1959).