

톨루엔의 위험성 평가를 위한 연소특성치 측정 및 고찰 Measurement and Investigation of Combustible Characteristics for Risk Assessment of Toluene

하동명[†] · 정기신*

Dong-Myeong Ha[†] · Keesin Jeong*

세명대학교 보건안전공학과, *세명대학교 소방방재학과
(2010. 1. 22. 접수/2010. 4. 9. 채택)

요 약

톨루엔의 안전한 취급을 위해서 25°C에서 폭발한계와 폭발한계 온도의존성을 고찰하였다. 또한 인화점과 최소발화온도를 측정하였다. 공정의 안전을 위해서 톨루엔의 폭발하한계는 1.13vol%, 상한계는 7.9vol%를 추천한다. 유통법에 의한 하부인화점은 5°C, 상부인화점은 40°C로 측정되었으며, Setaflash 장치에 의한 상부인화점은 41.5°C로 측정되었다. ASTM E659-78 장치에 최소자연발화온도는 547°C로 측정되었다. 그리고 톨루엔의 새로운 폭발한계 온도의존식을 제시하였으며, 제시한 온도의존식은 문헌값과 일치하였다.

ABSTRACT

For the safe handling of toluene, explosion limit at 25°C and the temperature dependence of the explosion limits were investigated. And flash point and AIT (Autoignition Temperature) for toluene were experimented. By using the literature data, the lower and upper explosion limits of toluene recommended 1.13 vol% and 7.9 vol%, respectively. In this study, measured the lower and upper flash points of toluene by air-blowing tester were 5°C and 40°C, respectively. And measured the upper flash points of toluene by Setaflash tester was 41.5°C. This study measured relationship between the AITs and the ignition delay times by using ASTM E659-78 apparatus for toluene, and the experimental AIT of toluene was 547°C. The new equations for predicting the temperature dependence of the explosion limits of toluene is proposed. The values calculated by the proposed equations were a good agreement with the literature data.

Key words : Toluene, Flash point, Explosion limit, AIT (Autoignition temperature), Setaflash tester

1. 서 론

화학산업은 타 산업에 비해 위험물질에 의한 보유 에너지가 크기 때문에 중대 재해 위험이 크며, 구조가 복잡하고 고도의 자동시스템으로 구성되어 있으며 공정, 전기, 기계, 제어 등 복합적인 분야로 구성 되어 있다. 또한 구성요소가 다양하며 각 요소마다 신뢰성 확보가 어렵고 운전, 검사, 보수 등에 고도의 숙련된 경험이 필요한 점 등을 들 수 있다. 따라서 복잡한 시스템에서 위험물의 누출 또는 화재 및 폭발과 같은 사고가 발생할 경우에는 공장 내의 근로자뿐만 아니라, 공

장 인근의 주민 및 환경에까지 막대한 영향을 끼치게 된다. 사고로 인한 재해를 줄이기 위해서는 공정에서 취급 물질의 연소특성치 파악은 안전 확보에 가장 중요한 문제이다.¹⁾

화학물질의 연소특성치들은 폭발한계, 인화점, 최소 자연발화점, 최소산소농도, 최소발화에너지, 연소열 등을 들 수 있으며, 연소특성치들은 위험물을 취급, 처리, 수송하는데 매우 중요하다.²⁾ 그럼에도 불구하고 연소특성치 자료는 충분하지 않다. 재해 예방의 중요성 인식하다면, 실험에 의해 확인하는 것이 바람직하나, 부득이 하게 실험하기 어려운 경우는 이론을 근거로 한 예측식을 사용하여 안전을 확보할 수도 있다. 또한 실제와 가까운 예측식을 사용할 수 있다면 상황에 따라

[†]E-mail: hadm@semyung.ac.kr

제한된 실험을 해야만 할 때 실험에서 얻어진 측정 결과의 신뢰성을 고찰하는데 큰 역할을 할 수 있다.

그동안 메탄을 비롯해 위험물에 대한 연소특성 연구는 꾸준히 진행되고 있다. 하³⁾는 방향족 가운데 가장 널리 사용되고 있는 벤젠에 대한 연소특성치 연구를 하였으며, Goethal 등⁴⁾은 톨루엔과 공기혼합물의 폭발한계에 대한 실험적 연구를 하였다. 그리고 하 등⁵⁾은 톨루엔과 MEK 혼합물의 하부와 상부인화점을 연구한 바 있다.

본 연구에서는 발암성 때문에 기술된 첨가제로는 제한되었지만 화학 공정에서 용해제, 염료, 폭약, 살충제 원료뿐만 아니라 중요한 용매인 톨루엔⁶⁾에 대해 유통법을 이용하여 하부 및 상부인화점을, Setaflash 장치에 의해 상부인화점을 측정하였다. 그리고 ASTM E659-78 장치를 사용하여 자연발화온도를 측정하였으며, 폭발한계의 온도의존식을 제시하였다. 제시된 자료들은 톨루엔을 취급하는 산업 현장에서 안전을 확보할 수 있는 자료로 이용하는데 목적이 있다.

2. 톨루엔의 연소특성치 고찰을 위한 자료 분석

2.1 연소특성치 고찰을 위한 자료

산업현장에서 취급하고 있는 대부분의 물질의 화재 및 폭발 특성치는 한국산업안전보건공단⁷⁾에서 제공하고 있는 MSDS(Material Safety Data Sheet)를 통해 얻을 수 있다. 또한 잘 알려진 D/B인 미국화학공학회 DIPPR(Design Institute for Physical Property Data)⁸⁾의 환경, 안전, 보건 특성치(Properties in the Environmental, Safety and Health Database)에서 화재 및 폭발 파라미터(Fire and Explosion Parameters)에서 폭발한계와 상한계, 인화점, 최소발화온도, 연소열의 자료를 얻을 수 있다. 최근에는 NFPA,⁹⁾ SFPE,¹⁰⁾ Sigma¹¹⁾ 등에서도 많은 자료들을 얻을 수 있다.

2.2 화염전파 방향에 따른 폭발한계

가연성혼합가스의 폭발한계는 초기온도, 초기압력, 산소농도, 연소열, 분자량, 발화원의 특성, 불활성가스의 비, 측정용기의 크기, 혼합기체의 물리적 상태, 화염전파방향 등에 영향을 받는다. 또한 폭발한계는 점화원의 위치에 따라 값이 달라지는데, 일반적으로 폭발범위는 점화시 화염이 위쪽으로 올라가는 상향전파에서 폭발하한계(LEL, Lower Explosion Limit)는 낮아지고, 폭발상한계(UEL, Upper Explosion Limit)는 높아져서 폭발범위는 넓어진다. 그러나 화염이 위에서 아래쪽으로 내려가는 하향전파에서 폭발하한계는 높아지

고, 폭발상한계는 낮아져서 폭발범위는 줄어든다. 수평전파에서는 중간값을 나타낸다.

톨루엔의 폭발하한계와 상한계에 대해 화염전파방향에 의한 폭발한계의 여러 값들과 구형폭발장치를 이용한 측정값들을 비교하여 Table 1에 나타내었다.^{12,13)}

Table 1. Explosive Limits by Means of the Direction of Flame Propagation for Toluene in Air

Vessel State	Direction of Propagation	Tube [cm or L]		Explosion Limits [vol%]	
		Diameter	Length	Lower	Upper
Confined Tube	Upwards	30.6	39	1.17	-
		10.2	96	1.27	-
		10.0	-	1.27	6.75
		7.5	150	1.27	-
		5.0	150	1.31	6.75
		2.5	25	1.3	7.0
	Horizontal	7.5	150	1.28	-
		5.0	150	1.30	5.80
	Downwards	7.5	150	1.28	-
		5.0	150	1.32	4.6
Sphere	Upwards	20L		1.20	7.1
	Downwards			1.28	4.0
Vertical Tube	Upwards (DIN 51649)	6.0	30	1.13	7.9

2.3 기존의 폭발한계의 온도의존식

화학물질을 취급하는 공정에서는 일반적으로 표준상태에서 운전하는 경우보다 고온이나 고압에서 운전하는 경우가 많다. 따라서 폭발한계의 온도 의존성에 관한 연구는 중요하다. 폭발한계는 계의 온도가 증가할 경우 폭발하한계는 작아지고, 폭발상한계는 커져서 폭발범위가 넓어진다.

Zabetakis 등¹⁴⁾은 Burgess-Wheeler 법칙을 이용하여 탄화수소의 폭발한계 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 7.21 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (1)$$

또한 Zabetakis는 폭발하한계에서의 온도의존성을 고찰하기 위해 연소열, 폭발한계, 비열 그리고 폭발하한계에서의 화염온도 1300°C라는 가정하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 7.8 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (2)$$

Hustad 등¹⁵⁾은 탄화수소화합물의 폭발한계의 온도의 존식을 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 0.00085(t - 25)] \quad (3)$$

하¹⁶⁾는 4개의 식을 평균하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

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

Cashdollar¹⁷⁾은 다음과 같은 Burgess-Wheeler식을 수정하여 고온에서의 폭발한계를 예측하는 식을 제시하였다.

$$C_T = C_{T_0} \left(\frac{273 + T_0}{273 + T} \right) [1 - 0.000072(T - T_0)] \quad (5)$$

여기서 C_T 는 온도 T 에서 질량농도 $[g/m^3]$ 에 의한 폭발하한계, C_{T_0} 는 온도 T_0 에서 폭발하한계, 온도는 °C이다.

2.3 톨루엔의 인화점

인화점은 하부인화점(Lower Flash Point)과 상부인화점(Upper Flash Point)으로 나누어진다. 인화점 측정 방법으로는 Abel방식, Tag방식, Pensky-Martens방식, Cleveland개방식 그리고 Setaflash방식 등이 있으며, 장치에 따라 다른 값을 갖는다. Table 2에 각 문헌에 제시된 인화점 자료를 나타내었으며, CC는 밀폐식(Closed-Cup), OC는 개방식(Open Cup) 그리고 TCC는 Tag 밀폐식 장치를 의미한다.

2.4 톨루엔의 최소자연발화온도

자연발화온도는 다른 곳에 아무런 화원을 주지 않고 공기 속의 상온에서 주위로부터 발생하는 열로부터 가연물이 자발적으로 점화되는 온도를 말한다. 자연발화온도는 많은 인자에 즉 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도,

가열원의 종류 그리고 지연시간 등에 의존한다. 그 동안 제시된 톨루엔의 최소자연발화온도를 정리하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에 제시된 최소자연발화온도는 가연물에 모든 열면을 설치하여 측정된 값들이다.

3. 톨루엔의 화재 및 폭발 특성치의 측정 및 고찰

3.1 톨루엔의 폭발한계

폭발한계의 자료를 검토한 결과 실험장치의 크기나 모양 그리고 화염점과방향에 따라 달라진다는 사실은 Table 1에서 알 수 있었다. 그 동안 공정에서 안전을 위해 폭발하한계의 자료를 인용하고 있는데 하한계는 1.17vol% 혹은 1.20vol%를, 상한계는 7.0vol%를 많이 인용하였다. 그러나 최근 문헌을 검토한 결과 공정의 안전을 위해서는 하한계 1.13vol%, 상한계 7.9vol%를 사용하는 것이 바람직하다.

3.2 톨루엔의 폭발한계 온도의존식

본 연구에서는 톨루엔의 폭발하한계와 온도의 관계를 제시한 문헌 자료²⁴⁾를 회귀분석¹⁶⁾하여 기존의 추산식에 의한 예측값과 새로운 추산식에 의한 예측값을 비교 고찰하였다. 본 연구에서 문헌 자료를 이용하여 얻은 새로운 추산식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25}[0.9730 - 1.3899 \times 10^{-3}(t - 25)] \quad (6)$$

식 (6)에 의한 추산값과 지금까지 널리 사용되고 있는 Zabetakis가 제시한 식 (2)에 의한 추산값을 문헌값²⁴⁾

Table 2. The Lower Flash Point of Several Reported Data for Toluene

Compound	Flash Points [°C]				
	NFPA ⁹⁾	SFPE ¹⁰⁾	Sigma ¹¹⁾	CRC ¹⁸⁾	Lange ¹⁹⁾
Toluene	4	4(CC), 7(OC)	4.44	4	4(TCC)

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

No.	Temp.(°C)	LEL	Eqn.(2)	Eqn.(6)
1	25	1.17	1.17	1.14
2	100	0.99	1.11	1.02
3	200	0.82	1.02	0.85
4	300	0.72	0.94	0.69
A.A.D.	-	-	0.135	0.030

Table 3. The Autoignition Temperature of Several Reported Data for Toluene

Compound	AIT [°C]						
	NFPA ⁹⁾	SFPE ¹⁰⁾	Sigma ¹¹⁾	Hilado ²⁰⁾	Jackson ²¹⁾	Egolf ²²⁾	Swarts ²³⁾
Toluene	480	480	536.1	482	567.8	536	635

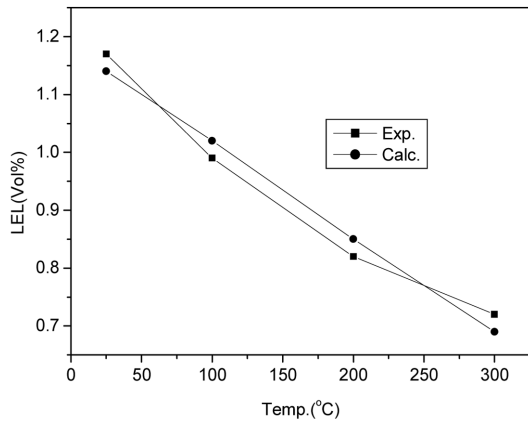


Figure 1. Temperature dependence of lower explosion limit for toluene.

과 비교하여 Table 4와 Figure 1에 나타내었다. 본 연구에서 제시한 식이 기존에 제시한 식보다 문헌값과 일치함을 보여주고 있다. 따라서 고온에서 톨루엔을 사용하는 공정에서는 식 (6)을 사용하여 안전을 확보하는 것이 타당하다고 본다.

3.3 톨루엔의 인화점 측정 및 고찰

3.3.1 인화점 실험장치

본 실험에 유통법⁵⁾에 의해 하부와 상부인화점을 측정하였고, Setaflash 밀폐식 장치를 이용하여 상부인화점을 측정하였다.

유통법 장치는 냉동장치, 항온조, 폭발통(연소통) 등으로 구성되어 있으며, 냉동장치는 항온조내의 온도를 -35°C까지 냉각시킬 수 있는 냉동기로서 냉매는 R-502를 사용하였고, 항온조는 35cm × 35cm × 35cm의 크기로 내부에 냉각용 코일과 전열기를 설치하고, 단열이 완전히 되도록 제작하였으며, 액매(液媒)로는 50%의 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였다. 폭발통은 충전된 포화기를 통과한 포화증기를 항온조에서 등온시키고, 99.999%-Pt전극간에 아크방전을 일으켜 폭발이 일어나도록 하였다.

Setaflash 밀폐식 장치는 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있으며, 몸체부는 가열공기조, 전원 개폐기, 전열 조절기 등으로 구성되어 있고, 시료 장치부는 4ml 용량의 시료컵, 온도계 삽입구, 시료컵 상부 개폐기 손잡이로 구성되어 있다. 그리고 화염 공급부는 화염접근장치(Flame Exposure Device), 연료통, 화염 조절기, 가스관, 가스 안전밸브 등으로 구성되어 있다.

3.3.2 인화점 고찰

유통법에 의한 톨루엔의 하부인화점은 5°C, 상부인화점은 40°C로 측정되었고, Setaflash 밀폐식 장치에 의한 상부인화점은 41.5°C로 측정되었다. Table 2에서 알 수 있듯이 문헌들에 제시된 톨루엔의 하부인화점은 4°C~7°C로 약 3°C의 차이를 보이고 있으므로 본 연구에서 측정된 자료는 안전의 목적으로 사용이 가능하다. 그리고 상부인화점은 최신 자료로 제시하며, 이를 이용할 경우 폭발상한계 예측도 가능하다.

3.4 톨루엔의 최소자연발화온도 측정 및 고찰

3.4.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 장치는 액체 화학물질의 자연발화점은 ASTM E659-78(Standard Test Method for Autoignition Temperature of Liquid Chemicals)에서 규정하고 있는 장치를 사용하였고, 장치는 Furnance, Temperature Controller, Thermocouple, Test Flask, Hypodermic Syringe, Mirror, Air Gun으로 나눌 수 있다.⁶⁾ 실험 방법은 ASTM 규정에 따라 진행하였다.

3.4.2 톨루엔의 자연발화온도 고찰

톨루엔의 경우 NFPA 325M,⁹⁾ SFPE Handbook¹⁰⁾ 그리고 Hilado 등²⁰⁾에서는 약 480°C로 제시하였으며, Sigma¹¹⁾와 Egolf 등²²⁾는 536°C, Jackson²¹⁾은 568°C 그리고 Swarts 등²⁰⁾은 635°C로 제시하고 있다. 따라서 문헌들에 따라 약 155°C의 차이를 보이고 있다.

본 실험에서는 초기설정온도를 570°C로 하여 실험한 결과 발화 21.27sec에서는 발화가 일어나서, 초기온도 보다 30°C 낮게 540°C에서 다시 실험한 결과 발화가 일어나지 않았다. 따라서 5°C 상승시킨 545°C에서도 발화가 일어나지 않아 다시 2°C 상승시킨 547°C에서 실험한 결과 39.18sec에서 발화가 시작되었고, 이를 기점으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화지연시간을 측정한 결과 665°C에서 1.77sec에 발화하였다.

실험에서 얻은 자료를 이용하여 다중회귀분석을 통해 발화온도에 의한 발화지연시간의 관계식을 나타내면 다음과 같다.

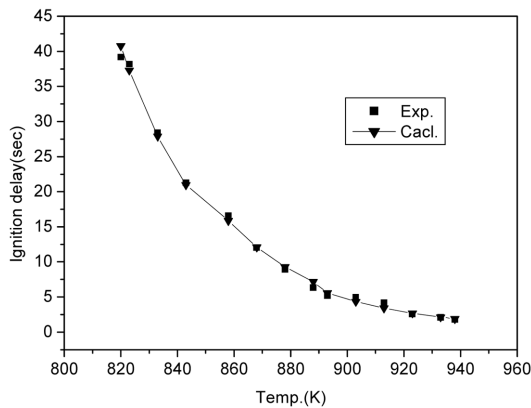
$$\ln \tau = -20.6571 + 19982 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

일반적으로 Semenov가 제시한 식 (8)을 이용하면 활성화에너지(Activation Energy)를 얻을 수 있다.

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + B \quad (8)$$

Table 5. Comparison of Experimental and Calculated Ignition Delay Time by the AIT for Toluene

No.	T [K]	$\tau_{exp.}$ [s]	$\ln\tau_{exp.}$	$\tau_{est.}$ (Eq. 7)
1	820.15	39.18	3.66817	40.76
2	823.15	38.18	3.64231	37.30
3	833.15	28.39	3.34604	27.87
4	843.15	21.27	3.05730	20.97
5	858.15	16.57	2.80760	15.88
6	868.15	12.02	2.48657	12.11
7	878.15	8.91	2.18717	9.29
8	888.15	6.31	1.84214	7.17
9	893.15	5.18	1.64481	5.56
10	903.15	4.94	1.59737	4.34
11	913.15	4.15	1.42311	3.41
12	923.15	2.56	0.94001	2.69
13	933.15	2.10	0.74194	2.13
14	938.15	1.77	0.57098	1.90
A.A.P.E.	-	-	-	5.98
A.A.D.	-	-	-	0.52

**Figure 2.** A comparison between experimental and calculated ignition delays times for toluene.

식 (7)을 식 (8)에 대입하여 계산된 활성화에너지(E)는 165kJ/mol이다.

Table 5에는 식 (7)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 나타내었으며, Figure 2에는 발화지연시간과 온도의 경향을 쉽게 볼 수 있도록 나타내었다.

식 (7)에 의한 예측값과 실험값 사이의 결정계수는 0.997로서 예측값은 실험값과 일치하였다. 본 연구에서 측정된 AIT는 547°C로서 문헌에 제시된 자료들과 비

교하였을 때 최소값인 NFPA 보다는 약 67°C 높고 측정되었으며, 최대값인 Swarts 보다는 88°C 정도 낮게 나타내고 있다. 문헌에 제시된 값들은 250ml의 삼각플라스크용기로 측정하는 ASTM D-2155 장치 및 자체 제작에 의해서 얻은 결과이고, 본 연구에서는 500ml의 둥근 플라스크를 사용한 ASTM E659-78 장치에서 얻은 값이므로 차이가 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

톨루엔의 인화점은 유통법에 의해 하부 및 상부인화점을, Setaflash 장치에 의해 상부인화점을 측정하였으며, 최소자연발화온도(AIT)는 ASTM E659-78을 사용하여 측정하였고, 그리고 폭발한계의 온도의존성에 대한 새로운 예측식을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폭발한계의 문헌을 고찰한 결과 안전 위해서는 톨루엔의 폭발하한계는 1.20vol%, 상한계는 7.1vol%를 추천한다.
- 2) 톨루엔의 새로운 폭발하한계 온도의존식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25}[0.9730 - 1.3899 \times 10^{-3}(t - 25)]$$

- 3) 유통법에 의해 측정된 하부인화점은 5°C, 상부인화점은 40°C, Setaflash 밀폐식 장치에 의한 상부인화점은 41.5°C로 측정되었다.

- 4) ASTM E659-78 장치에 의한 AIT는 547°C로 측정되었으며, 실험에서 얻은 AIT와 발화지연시간의 관계식은 다음과 같다.

$$\ln \tau = -20.6571 + 19982 \left(\frac{1}{T} \right)$$

- 5) Semenov식을 이용하여 계산된 톨루엔의 활성화에너지(E)는 165kJ/mol이다.

참고문헌

1. F.P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Vol.2, 2nd ed., Butterworth-Heinemann(1996).
2. V. Babrauskas, "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, SFPE(2003).
3. 하동명, "벤젠의 위험성 평가를 위한 연소특성치 고찰", 한국안전학회지, Vol.24, No.5, pp.28-33(2009).
4. M. Gothal, et. al, "Experimental Study of Flammability Limits of Toluene-air Mixtures at Elevated Pressure and Temperature", J. Hazardous Materials Vol/ A 70, pp.93-104(1999).

5. 하동명, 목연수, 최재욱, “2성분계 가연성액체 혼합물의 인화점”, 한국화학공학회지, Vol.37, No.2, pp.146-150(1999).
6. 하동명, “톨루엔 연소특성치의 신뢰성 분석”, 한국안전학회, 추계학술발표논문집, pp.70-73(2009).
7. Korea Occupational Safety & Health Agency, <http://www.kosha.net/members/login.jsp>
8. 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).
9. NFPA, “Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids”, NFPA 325M, NFPA (1991).
10. SFPE, “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, 2nd ed., SFPE (1995).
11. 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).
12. 柳生昭三: “蒸氣の爆發限界”, 安全工學協會(1979).
13. L.G. Britton, “Two Hundred Years of Flammable Limits”, Process Safety Progress, Vol.21, No.1, pp.1-11(2002).
14. G.M. Zabetakis, “Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors”, US Bureau of Mines, Bulletin(1965).
15. 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).
16. 하동명, “파라핀족 탄화수소의 폭발한계의 온도의존성예측”, 한국산업안전학회지, Vol.15, No.3, pp.71-77(2000).
17. K.L. Cashdollar, et al., “Flammability of Methane, Propane, and Hydrogen Gases”, J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.13, No.3-5, pp.327-340(2000).
18. D.R. Lide, “CRC Handbook of Chemistry and Physics”, 75th ed., CRC Press(1994).
19. A.D. John, “Lange’s Handbook of Chemistry”, 4th ed., McGraw-Hill, Inc.(1992).
20. C.J. Hilado and S.W. Clark, “Autoignition Temperature of Organic Chemicals”, Chemical Engineering, Vol.4, pp.75-80(1972).
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. L.M. Egolf and P.C. Jurs, “Estimation of Autoignition Temperature of Hydrocarbons, Alcohols and Ester from Molecular Structure”, Ind. Eng. Chem. Res., Vol.31, pp.1798-1807(1992).
23. D.E. Swarts and M. Orchin, “Spontaneous Ignition Temperature of Hydrocarbons”, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.49, No.3, pp.432-36(1957).
24. PE. Cote, “Fire Protection Handbook”, 17th ed., NFPA, Quincy, Massachusetts(1991).