

사이클로헥사논의 화재 및 폭발 특성치의 측정 및 고찰 The Measurement and Investigation of Fire and Explosion Characteristics of Cyclohexanone

하동명

Dong-Myeong Ha

세명대학교 보건안전공학과
(2011. 3. 30. 접수/2011. 8. 12. 채택)

요 약

사이클로헥사논의 안전한 취급을 위해서 25 °C에서 폭발한계를 고찰하였고, 실험장치를 이용하여 하부 인화점과 발화지연시간에 의한 발화온도를 측정하였다. 공정의 안전을 위해서 사이클로헥사논의 폭발한계는 1.1 Vol.%(100 °C), 상한계는 9.4 Vol.%를 추천하였고, 하부인화점은 밀폐계에서 42~43 °C와 개방식에서 49~51 °C로 측정되었다. ASTM E659-78 장치를 사용하여 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하였고, 여기서 측정된 최소자연발화온도는 415 °C였다.

ABSTRACT

For the safe handling of cyclohexanone, the explosion limits at 25 °C were investigated. The lower flash points and AITs (auto-ignition temperatures) by ignition time delay for cyclohexanone were experimented. By using the literatures data, the lower and upper explosion limits of cyclohexanone recommended 1.1 Vol.% (100 °C) and 9.4 Vol.%, respectively. The lower flash points of cyclohexanone were experimented 42~43 °C by using closed-cup tester and 49~51 °C by using open cup tester. This study measured relationship between the AITs and the ignition delay times by using ASTM E659-78 apparatus for cyclohexanone and the experimental AIT of cyclohexanone was 415 °C.

Key words : Cyclohexanone, Lower flash point, Explosion limit, Closed-cup tester, Autoignition temperature (AIT), ASTM E659-78

1. 서 론

산업현장에서 취급하고 있는 물질들의 연소 특성치는 MSDS(Material Safety Data Sheet)를 통해 얻을 수 있고, 잘 알려진 D/B인 미국화학공학회(DIPPR (Design Institute for Physical Property Data)을 비롯해 안전 관련 Handbook 등에서도 확보할 수 있다. 그러나 자료들에서 제시된 연소특성치는 각각 다른 값들이 제시되는 경우가 많다.¹⁾

인화점의 경우 Montemayor 등^{2,3)}은 노말데칸의 경우 Automatic와 Manual 장치로 측정한 결과 46.5~54 °C로 약 7.5 °C 차이를 나타냈으며, 노말펜탄올의 경우는 43~49 °C로 약 6 °C를 차이가 있다고 하였다. 또한 Jones

등⁴⁾은 Formic Acid, Glycerol, Ethylamine, Dimethylamine 등에 대해 자체 제작한 밀폐식 장치를 이용하여 인화점을 측정하여 기존의 문헌값과 비교하였다. Formic acid의 경우 기존 문헌들에서는 72 °C로 제시되고 있으나, 측정된 결과 45 °C로서 기존에 제시한 문헌값과 27 °C의 차이를 보이고 있다.

폭발한계 연구로 Britton⁵⁾는 메탄의 폭발한계의 유용한 값을 제시하기 위해 그동안 연구된 수십 편의 문헌을 고찰하였다. Ha 등⁶⁾은 크실렌 이성질체의 연소특성치 측정 및 고찰을 통해 유용한 화재 및 폭발 자료를 제공하였다.

또한 자연발화온도의 연구로는 Zabetakis 등⁷⁾은 ASTM D286-30 장치를 이용하여 탄화수소의 자연발화온도에 대한 실험적 연구를 하였고, Yagy⁸⁾는 자체 제작한 실험 장치를 이용하여 일부 알코올류 및 산류의 자연발

화온도를 측정하였다. Kong 등⁹⁾은 봄베형태의 장치를 이용하여 프로판과 부탄의 자연발화온도를 측정하였으며, Smyth 등¹⁰⁾은 고온금속표면을 발화원으로 탄화수소의 자연발화온도를 연구하였다. Hshieh 등¹¹⁾은 최근 널리 사용되고 있는 ASTM E659-78 장치를 이용하여 Trichlorosilanes에 대한 최소자연발화온도 측정을 연구하였으며, Ha¹²⁾도 ASTM E659-78 장치를 이용하여 산류와 실란계열 물질의 자연발화온도를 측정하여 기준의 자료와 비교하였다.

본 연구에서는 6,6-나일론의 원료인 아디프산이나 6-나일론의 원료인 카프로락탐의 합성원료이며, 나일론 제조의 중간체, 합성수지, 래커, 잉크, 페인트, 얼룩제거제, 가소제, 살충제 등의 제조에 사용되고 있는 사이클로헥사논에 대해 인화점과 자연발화온도를 측정하여 기존의 자료들과 비교 고찰하였다. 그리고 폭발한계는 여러 문헌에 제시된 자료를 고찰하여 공정안전에 타당한 자료를 제시하고, 폭발한계의 온도의존성에 대해서는 새로운 예측식을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 사이클로헥사논의 연소특성치는 이를 취급하는 공정에서 보다 정확한 자료를 사용함으로써 재해를 예방하는데 목적이 있다.

2. 사이클로헥사논의 연소특성치 선택 및 위험성

2.1 자료선택

NFPA¹³⁾에는 NFPA 325M 코드에서 가연성가스, 액체 및 휘발성 고체 수 백 종의 특성치를 제시하고 있으며, 또한 SFPE에서 출간한 “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”¹⁴⁾와 “Ignition Handbook”¹⁵⁾에서는 약 500여종의 물질에 대해 연소특성치를 제시하고 있다. 특히 인화점은 Stephenson¹⁶⁾의 “Flash Points of Organic and Organometallic Compounds”에 500여종의 물질에 대해 정리하고 있다.

2.2 사이클로헥사논의 반응성 및 연소특성

사이클로헥사논은 위험물안전관리법에서는 제 4류위험물의 제 2석유류, 산업안전보건법에서는 유기 용제 제 2종 그리고 유해화학물질관리법에서는 미규정으로 되어 있다. 사이클로헥사논은 투명하고, 무색 내지 옅은 황색 유성의 액체로서 유해한 냄새를 지니고 있으며, 아세톤, 벤젠, 에탄올, 에테르, 클로로포름 등 거의 모든 유기 용액에 녹는다. 피해야할 조건은 발화원은 열, 스파크, 불꽃 기타 점화원의 접촉을 피해야 하며, 질산과는 격렬한 반응을 한다. 그리고 플라스틱, 수지,

고무 등과도 반응한다.

소화약제로는 분말소화제, 아산화탄소, 물분무 또는 알코올-저항 포말을 사용하며, 대형 화재시 물분무, 안개 형태 또는 알코올-저항 포말을 사용한다. 저장은 밀폐용기에 보관하고 환기가 잘되고 서늘하고 건조한 장소에 보관한다.

3. 사이클로헥사논의 화재 및 폭발 특성치 분석

3.1 사이클로헥사논의 폭발한계와 폭발한계온도 의존성

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.

사이클로헥사논의 폭발하한계와 상한계에 대해 화염전파방향에 의한 폭발한계의 여러 값들과 구형폭발장치를 이용한 측정값들을 비교하여 Table 1에 나타내었다. 사이클로헥사논의 경우 NFPA 등¹³⁾에서 폭발하한계는 100 °C에서 1.1 Vol.%를 제시하고 있으며, 폭발상한계는 9.4 Vol.%를 제시하고 있다. 그러나 Ignition Handbook¹⁵⁾에서는 폭발상한계는 8.8 Vol.%를 제시하고 있다.

Table 1. Comparison of Explosion Limits of Cyclohexanone in Air by Several References

References	Explosion Limits [vol%]	
	Lower	Upper
NFPA ¹³⁾	1.1(100 °C)	9.4
Sigma ¹⁷⁾	1.1(100 °C)	9.4
Ignition Handbook ¹⁵⁾	1.1	8.8
SAX ¹⁸⁾	1.1	-
Yagy ¹⁹⁾	1.1(100 °C)	-

3.2 폭발한계의 온도의존성

폭발한계의 온도의존성을 살펴보면, 계의 온도가 증가할 경우 폭발하한계는 작아지고, 폭발상한계는 커져서 폭발범위가 넓어진다. 이는 온도가 증가함에 따라 분자간의 운동이 활발하여 폭발이 용이하기 때문이다.

Zabetakis 등²⁰⁾은 Burgess-Wheeler 법칙을 이용하여 탄화수소의 폭발한계 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

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

Hustad 등²¹⁾은 탄화수소화합물의 폭발한계의 온도의 존식을 다음과 같이 제시하였다.

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

Ha²²⁾는 기존의 폭발하한계 온도의존식을 고찰하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

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

Cashdollar²³⁾은 다음과 같은 Burgess-Wheeler식을 수정하여 고온에서의 폭발한계를 예측하는 식을 제시하였다.

$$C_T = C_{T_0} \left(\frac{273 + T_0}{273 + T} \right) [1 - 0.000072(T - T_0)] \quad (4)$$

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.

3.2 사이클로헥사논의 인화점

인화점은 가연성액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로, 액체의 표면에서 발생한 증기 농도가 공기 중 연소 하한농도가 될 수 있는 가장 낮은 액체 온도를 말한다. 인화점은 하부인화점(Lower Flash Point)과 상부인화점(Upper Flash Point)으로 구분한다. 인화점을 결정하는데 사용되는 측정 방법은 몇 가지 있다. 가장 일반적으로 사용되는 측정법은 밀폐식(Closed-cup, C.C.)과 개방식(Open Cup, O.C.)이 있다. 밀폐식은 Pensky-Martens 방식과 Setafash 방식이 있으며, 개방식은 Tag 방식과 Cleveland 방식 등을 들 수 있다. Table 2에 사이클로헥사논의 하부 인화점을 정리하여 나타내었다.

3.3 사이클로헥사논의 최소자연발화온도

자연발화온도는 다른 곳에 아무런 화원을 주지 않고 공기 속의 상온에서 주위로부터 발생하는 열로부터 가연물이 자발적으로 점화되는 온도를 말한다. 자연발화

온도는 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류 그리고 지연 시간 등 많은 인자에 의존한다. 사이클로헥사논에 대해 NFPA Handbook을 비롯하여 여러 문헌 등에서 제시되고 있는 최소자연발화온도를 정리하여 Table 3에 나타내었다.

4. 연소특성 실험

4.1 실험재료

본 연구에서 사용한 사이클로헥사논은 Junsei사의 시료로서 별도의 정제과정을 거치지 않고 사용한다.

4.2 실험장치

4.2.1 인화점 측정 장치

인화점 측정은 여러 매개변수에 의해 영향을 받는다. 영향을 주는 변수로는 용기형태, 시료량, 발화원, 온도 조절기, 주위압력, 시료의 균일성, 실험자, 자료의 편차 등이 있다.

본 연구에서 사용된 장치의 Pensky-Martens과 Setafash 밀폐식 그리고 Tag와 Cleveland 개방식의 구성 요소를 간략히 소개한다.⁶⁾

Pensky-Martens 밀폐식 장치는 몸체부, Test Cup 장치부, 교반부, 화염 공급부로 나눌 수 있다. 몸체부는 가열공기조, 전원 개폐기, 전열 조절기, 투구관 등으로 구성되어 있다. Test Cup 장치부의 Cup은 용량이 100 ml 정도이며, 재질은 열전도도가 높은 구리로 되어 있고, Test Cup Handle, 온도계 삽입구, Test Cup 상부 개폐기 손잡이로 구성되어 있다. 교반부는 교반기, 굴곡축, 140~150회/min을 교반하는 전동기로 구성되어 있다.

Setafash 밀폐식 장치는 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있다. 몸체부는 가열공기조, 전원 개폐기, 전열 조절기 등으로 구성되어 있다. 시료

Table 2. The Flash Point of Several Reported Data for Cyclohexanone

Compound	Flash Points [°C]					
	NFPA ¹³⁾	Sigma ¹⁷⁾	Ignition ¹⁵⁾	SAX ¹⁸⁾	Kirk-Othmer ²⁴⁾	Aldrich ²⁵⁾
Cyclohexanone	44	46.7	46	43.9	46(C.C), 54(O.C.)	46.7

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

Compound	AITs [°C]						
	NFPA ¹³⁾	Sigma ¹⁷⁾	Ignition ¹⁵⁾	SAX ¹⁸⁾	Zabetakis ⁷⁾	Hilado ²⁶⁾	Sheldon ²⁷⁾
Cyclohexanone	420	420	420	420	420	420	419

Table 4. 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	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

장치부는 4 ml 용량의 시료컵, 온도계 삽입구, 시료컵 상부 개폐기 손잡이로 구성되어 있다. 화염 공급부는 화염접근장치(Flame Exposure Device), 연료통, 화염 조절기, 가스관, 가스 안전 밸브 등으로 구성되어 있다.

Tag 개방식 장치는 가연성 액체의 인화점 및 연소점 측정이 가능한 장치로서, 구성은 시료컵, 승온 다이얼, 수조, 시험염 발생 장치 등으로 구성되어 있으며, 부가 장치로는 시료 컵의 시료 수위를 조절할 수 있는 레벨수준 유지장치(Level Device)가 있다.

Cleveland 개방식 장치는 인화점 및 연소점을 측정하는 장치로서, 몸체부, 시료컵 장치부, 화염 공급부로 크게 나눌 수 있다. 몸체부는 가열공기조, 전원 개폐기, 전열 조절기 등으로 구성되어 있다. 시료장치부의 시료컵의 용량은 80 ml 정도이며, 재질은 열전도도가 높은 구리이며, 시료컵 조절기, 온도계 삽입구, 시료컵 상부 개폐기 손잡이로 구성되어 있다. 화염 공급부는 화염접근장치, 연료통, 화염 조절기, 가스관, 가스 안전밸브 등으로 구성되어 있다.

각 인화점 측정 장치들의 용기 특성 및 시험 방법을 요약하여 Table 4에 나타내었다.

4.2.2 자연발화온도 측정장치(ASTM E659)

본 실험에서는 액체 화학물질의 자연발화점 측정 장치로서 ASTM E659 장치를 사용하여 자연발화온도를 측정하였으며, 장치는 로, 온도조절기, 열전대, 시험플라스크, 주사기, 거울, 에어건 등으로 구성되어 있다.

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 온도보다 30 °C 낮게 설정

하고 3~5 °C 혹은 10 °C씩 증가시키면서 측정하며, 발화가 일어났을 때 시간과 온도를 기록한다.

5. 결과 및 고찰

5.1 측정된 인화점에 의한 폭발하한계 비교

사이클로헥사논의 폭발하한계 자료를 검토한 결과 실험장치의 크기나 모양 그리고 화염점파방향에 따라 달라진다는 사실은 Table 1에서 알 수 있었다. 그 동안 공정에서 안전을 위해 폭발하한계의 자료를 인용하고 있는데 하한계는 1.1(100 °C) Vol.%와 상한계는 8.8 Vol.%를 많이 인용하였다.

사이클로헥사논의 폭발하한계의 자료를 검증하기 위해 Antoine 식²⁸⁾을 사용하여 폭발하한계를 계산하였는데, 사용된 Antoine 식은 다음과 같다.

$$\log P^f = 7.4705 - \frac{1832.2}{(t + 244.2)} \quad (5)$$

여기서, P^f 는 증기압(mmHg)이고, t 는 온도(°C)이다.

식 (5)을 이용하여 폭발하한계를 예측할 수 있는데, Pensky-Martens과 Setaflash 밀폐식, Tag와 Cleveland 개방식에 의해 얻어진 인화점을 이용하여 폭발하한계의 계산 결과를 Table 5에 나타내었다.

사이클로헥사논의 하부인화점을 측정값은 밀폐식에서는 42 °C와 43 °C로, 개방식에서는 49 °C와 51 °C로 측정되었다. 기존 자료는 밀폐식 경우 44~47 °C, 개방식은 54 °C이다. 그러나 본 실험에서는 기존의 값보다 약 2 °C 정도 낮게 측정되었다. 이는 기존에는 Pensky-Martens를 이용하여 측정되었으나, 최근에는 기액평형 상태에서 측정할 수 있는 Setaflash 장치에서 측정된 값이므로 기존 자료와 차이가 있다고 본다.

Table 5. Comparison of Estimated Lower Explosiom Limits (LEL) by Experimental Lower Flash Point for Cyclohexanone

Apparatus	Experimental Lower Flash Point (°C)	Estimated Lower Explosiom Limits (LEL) (Vol.%)
Setaflash	42	1.54
Pensky-Martens	43	1.62
Tag	51	2.42
Cleveland	49	2.19

본 실험에서 얻은 하부 인화점을 적용하는 경우 폭발하한계를 예측한 결과 밀폐식에서 얻은 실험값 42°C는 약 1.54 Vol.%로 계산되었고, 개방식에서 얻은 51°C는 2.19 Vol.%로 예측되었다. 기존의 폭발하한계의 제시값은 100°C에서 얻은 값이므로 본 연구에서 제시한 상온에서의 폭발하한계값은 공정에 활용이 가능하다.

4.2 사이클로헥사논의 폭발하한계 온도의존식

본 연구에서는 사이클로헥사논의 폭발하한계와 온도의 관계를 제시한 문헌 자료²⁹⁾를 이용하여 기존의 추산식에 의한 예측값과 새로운 추산식에 의한 예측값을 비교 고찰하였다. 본 연구에서 문헌 자료를 이용하여 회귀분석²²⁾하여 최적화된 새로운 추산식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = 1.1930 - 1.2771 \times 10^{-3}(t - 25) \quad (6)$$

식 (6)에 의한 추산값을 문헌값과 비교하여 Table 6에 나타내었다. 문헌값과 예측값은 일치하였으며, 식 (6)에 의한 25°C에서의 폭발하한계는 약 1.19 Vol.%로 예측되었다. 따라서 고온에서 사이클로헥사논을 사용하는 공정에서는 식 (6)을 사용하여 안전을 확보하는 것이 타당하다고 본다.

4.3 사이클로헥사논의 자연발화온도 고찰

본 실험 결과를 고찰하기 위해 여러 문헌에 제시된

Table 6. Comparison of A.A.D. of the LEL with Temperature Variation Using Several Correlation for Cyclohexanone

No.	Temp. (°C)	LEL	Eqn.(6)
1	100	1.10	1.1
2	200	0.96	0.97
3	225	0.94	0.94
4	250	0.91	0.91
A.A.D.	-	-	0.01

자연발화온도와 비교하였다. 많은 문헌에서 자연발화온도를 제시되고 있으나, 공정 안전을 위해 널리 사용되고 있는 대표적인 문헌을 이용하여 본 실험 결과와 비교하였다. 사이클로헥사논의 최소자연발화온도는 NFPA, Sigma, Ignition, SAX 등에서 420°C로 제시되고 있으며, Sheldon은 419°C로 제시되고 있다.

그러나 본 실험에서 초기설정온도를 440°C로 하여 실험한 결과 발화 13.98 sec에서는 발화가 일어나서, 초기온도보다 30°C 낮게 410°C에서 다시 실험한 결과 발화가 일어나지 않았다. 따라서 1~2°C 상승시킨 415°C에서 실험한 결과 19.65 sec에서 발화가 시작되었고, 이를 기점으로 5°C 혹은 10°C씩 상승시켜 발화지연시간을 측정한 결과 540°C에서 1.72 sec에 발화하였다. 최소발화온도는 기존의 자료보다 5°C 정도 낮게 측정되었다.

제시한 실험 자료를 선형적인 Arrhenius 형태 식과 비선형 형태 식을 이용한 최적화된 식은 다음과 같다.

$$\ln \tau = -13.19 + 11252.03 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

식 (7)을 $\log \tau$ 와 $(1/T)$ 의 관계로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\log \tau = -5.73 + 4886.24 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (8)$$

식 (8)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 7와 Figure 1에 나타내었다. 추산값과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.D.(Average Absolute

Table 7. Comparison of Experimental and Calculated Ignition Delay Time by the AIT for Cyclohexanone

No.	T [K]	$\tau_{exp.}$ [s]	$\ln \tau_{exp.}$	$\tau_{est.}$ (Eq. 7)
1	688	19.65	2.97808	23.57
2	713	13.98	2.63763	13.29
3	723	11.96	2.48156	10.68
4	733	8.95	2.19165	8.64
5	743	7.37	1.99742	7.02
6	753	6.37	1.85160	5.75
7	773	3.57	1.27251	3.91
8	793	2.65	0.97456	2.71
9	803	2.38	0.86710	2.27
10	813	1.72	0.51232	1.91
A.A.D.	-	-	-	0.79

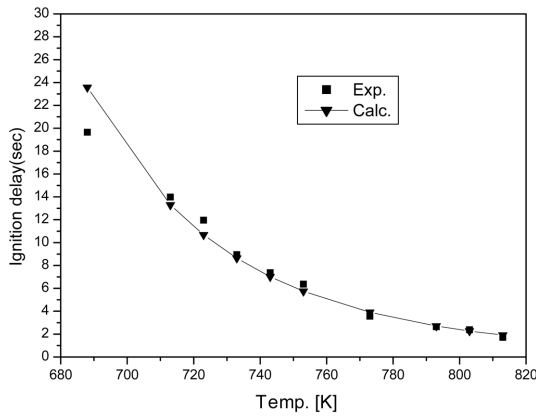


Figure 1. A comparison between the experimental and calculated delay times for cyclohexanone.

Deviation)을 사용하였다.²²⁾

$$A.A.D. = \sum \frac{|\tau_{\text{ext.}} - \tau_{\text{exp.}}|}{N} \quad (9)$$

여기서 $\tau_{\text{est.}}$ 는 추산식에 의해 추산된 발화지연시간이고, $\tau_{\text{exp.}}$ 는 실험값이며, 그리고 N은 자료수이다.

식 (7)에 의한 예측값과 실험값 사이의 평균절대오차는 0.79 sec이며, 결정계수(R^2)는 0.95로서 실험값과 일치하고 있다. 일반적으로 Semenov³⁰⁾가 제시한 식 (10)을 이용하면 활성화에너지(E, Activation Energy)를 얻을 수 있다.

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + B \quad (10)$$

식 (8)을 식 (10)에 대입하여 계산된 활성화에너지는 92.98 kJ/mol이다.

5. 결 론

본 연구에서는 사이클로헥사논의 화재 및 폭발 특성치 가운데 인화점과 최소자연발화온도(AIT)를 측정하였고, 폭발하한계는 여러 문헌들과 비교 고찰하였으며, 폭발하한계의 새로운 온도 의존식을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 사이클로헥사논의 폭발하한계를 고찰한 결과, 폭발하한계는 100 °C에서 1.1 Vol.%, 상한계는 약 9.4 Vol.%를 사용하는 것이 타당하다.
- 2) 폭발하한계의 새로운 온도 추산 식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = 1.1930 - 1.2771 \times 10^{-3}(t - 25)$$

3) 밀폐식에 의한 인화점은 42 °C, 개방식에 의한 인화점은 51 °C로 측정되었다.

4) 증기압 식을 이용한 사이클로헥사논의 폭발하한계 예측값은 밀폐식 인화점인 42 °C를 적용한 경우 폭발하한계는 약 1.54 Vol.%로 계산되었다.

5) 사이클로헥사논의 최소자연발화온도는 415 °C로 측정되었다.

6) 사이클로헥사논의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\log \tau = -5.73 + 4886.24 \left(\frac{1}{T} \right)$$

7) Semenov식에 의한 사이클로헥사논의 활성화에너지(E)는 92.98 kJ/mol이었다.

참고문헌

1. A.A. Kline, C.R. Szydlak, 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).
2. R.E. Montemayor, J.E. Rogerson, J.C. Colbert, and S.B. Schiller, "Reference Verification Fluids for Flash point Determination", J. of Testing and Evaluation, Vol.27, No.6, pp.423-427(1999).
3. R.E. Montemayor, M.A. Collier, and G.G. Lazarczyk, "Precision and Equivalence of Automatic and Manual Flash Point Apparatus", J. of Testing and Evaluation, Vol.30, No.1, pp.74-84(2002).
4. 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).
5. L.G. Britton, "Two Hundred Years of Flammable Limits", Process Safety Progress, Vol.12, No.1, pp.1-11(2002).
6. D.M. Ha and S.J. Lee "Measurement of Falsh Points and Autoignition Temperatures for Xylene Isomers", J. of the Korean Institute of Gas, Vol.13, No.2, pp.40-45(2009).
7. 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).
8. S. Yagyu, "Systematization of Spontaneous Ignition Temperature of Organic Compounds -Spontaneous Ignition Temperature of Alkyl Alcohols-", Research Report of the Research Institute of Industrial Safety (RIIS-RR-26-5), Japan(1978).

9. D. Kong, R.K. Eckhoff, and F. Alfert, "Auto-ignition of CH₄/air, C₃H₈/air, CH₄/C₃H₈/air and CH₄/CO₂/air Using 1L Ignition Bomb", J. of Hazardous Materials, Vol.40, pp.68-84(1995).
10. 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).
11. F-Y. Hshieh, D.B. Hirsh, and J.H. Willams, "Autoignition Temperature of Trichlorosilanes", Fire and Materials, Vol.26, pp.289-290(2002).
12. D.M. Ha, "Characteristics of Auto-ignition for Trichlorosilane and Dichlorosilane-Trichlorosilane Mixtures", J. of the Korean Institute of Gas, Vol.14, No.4, pp.24-30(2010).
13. NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, NFPA (1991).
14. SFPE, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 2nd ed., SFPE(1995).
15. V. Babrauskas, "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, SFPE(2003).
16. S.M. Stephenson, "Flash Points of Organic and Organometallic Compounds", Elsevier(1987).
17. 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).
18. R.J. Lewis, "Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials", 11th ed., John Wiley & son, Inc., New Jersey(2004).
19. 柳生昭三, "蒸氣の爆發限界", 安全工學協會(1979).
20. G.M. Zabetakis, "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors", US Bureau of Mines, Bulletin(1965).
21. 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).
22. 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).
23. K.L. Cashdollar et al., "Flammability of Methane, Propane, and Hydrogen Gases", J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.13, pp.327-340(2000).
24. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd ed., John Wiley and Sons Inc.(1978).
25. Aldrich Catalog of fine Chemicals, Aldrich Chemical Co., Inc., Milwaukee, Wisconsin(1986-1987).
26. C.J. Hilado and S.W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", Chemical Engineering, Vol.4, pp.75-80(1972).
27. M. Sheldon, "Understanding Auto-ignition Temperature", Fire Engineering J., June, pp.27-32(1984).
28. J. Gmehing, U. Onken, and W. Arlt, "Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection", DECHEMA(1980).
29. A.E. Cote and J.L. Linville, "Fire Protection Handbook", 4th, ed. NFPA, Quincy, Massachusetts(2002).
30. N.N. Semenov, "Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol.2", Princeton University Press, Princeton, N.J.(1959).