

큐멘(Cumene)의 연소특성치의 측정 및 예측

하동명[†]

세명대학교 보건안전공학과
27136 충북 제천시 세명로 65
(2015년 12월 10일 접수, 2016년 3월 24일 수정본 접수, 2016년 3월 31일 채택)

Measurement and Prediction of the Combustible Properties of Cumene

Dong-Myeong Ha[†]

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, 65, Semyeong-ro, Jecheon, Chungbuk, 27136, Korea
(Received 10 December 2015; Received in revised form 24 March 2016; accepted 31 March 2016)

요 약

공정의 안전을 위해서 취급물질의 정확한 연소특성치의 사용은 매우 중요하다. 화학산업에서 다양하게 사용되고 있는 큐멘의 안전한 취급을 위해서 인화점과 최소자연발화온도를 측정하였다. 폭발하한계는 실험에서 얻어진 하부인화점을 이용하여 계산하였다. 큐멘의 Setaflash 밀폐식은 31 °C, Pensky-Martens 밀폐식에서는 33 °C 그리고 Tag 개방식에서는 43 °C, Cleveland 개방식에서는 45 °C로 측정되었다. ASTM E659 장치에 의한 큐멘의 최소자연발화온도는 419 °C로 측정되었다. 측정된 하부인화점 31 °C에 의한 폭발하한계는 0.87 vol%로 계산되었다. 폭발하한계는 측정된 인화점이나 문헌에 제시된 인화점을 이용하여 예측가능함을 알 수 있었다.

Abstract – The usage of the correct combustion characteristic of the treated substance for the safety of the process is critical. For the safe handling of cumene being used in various ways in the chemical industry, the flash point and the autoignition temperature (AIT) of cumene was experimented. And, the lower explosion limit of cumene was calculated by using the lower flash point obtained in the experiment. The flash points of cumene by using the Setaflash and Pensky-Martens closed-cup testers measured 31 °C and 33 °C, respectively. The flash points of cumene by using the Tag and Cleveland open cup testers are measured 43 °C and 45 °C. The AIT of cumene by ASTM 659E tester was measured as 419 °C. The lower explosion limit by the measured flash point 31 °C was calculated as 0.87 vol%. It was possible to predict lower explosion limit by using the experimental flash point or flash point in the literature.

Key words: Cumene, Process Safety, Flammable Substance, Flash Point Tester, Lower Explosion limit, Autoignition Temperature (AIT), ASTM E659

1. 서 론

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, 폭발하한계, 최소자연발화온도 등이 있다[1].

공정의 안전한 설계를 위해서는 인화점에 대한 정보는 무엇보다 중요하다. 인화점은 가연성 액체의 화재 및 폭발의 잠재적 위험성을 나타내는 물리·화학적 변수이며, 액체의 화재 및 폭발 위험성을 특

정히 알려주는 매우 중요한 지표이다. 인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나누고 있으며, 일반적으로 하부인화점을 인화점이라 한다. 인화점은 가연성액체의 액면 가까이서 인화할 때 필요한 증기를 발산하는 액체의 최저온도로 정의하고 있다[1]. 폭발하한계는 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 폭발하한계는 초기 온도, 초기 압력, 불활성가스의 농도, 화염전파 방향, 장치의 표준상태, 물리적 상태 등에 의해 영향을 받으므로 실험방법에 따라 다른 값들이 측정되고 있다. 또한 폭발하한계를 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

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hadm@semyung.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한다[2].

큐멘(Cumene)은 이소프로필 벤젠(isopropyl benzene)이라고도 명명하며 핵심적인 유기 화학원료이다. 1960년대 전까지만 해도 큐멘은 항공기의 휘발유 첨가제로 사용되어 졌지만, 석유산업이 발전을 거듭하게 되면서 큐멘은 페놀과 아세톤을 만드는 주요 원료로 사용되고 있다. 현재 90% 이상의 큐멘이 페놀과 아세톤 제조에 사용되고, 나머지는 합성수지인 메틸페닐케톤(methyl phenyl ketone)과 메틸스티렌(methyl styrene) 제조에 사용된다. 이렇게 다양하게 사용되고 있는 데도 불구하고 큐멘의 연소특성치는 문헌에 따라 다르게 제시되고 있다. 따라서 이를 취급하는 공정의 안전을 확보하기 위해서는 이론적 및 실험적 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 큐멘의 인화점과 최소자연발화온도를 측정하여 기존의 문헌들과 비교하였고, 폭발한계에 대해서는 여러 문헌에 제시된 자료의 타당성을 검토하기 위해 본 연구에서 측정된 인화점을 이용하여 계산 후 폭발한계를 문헌들과 비교 검토하였다. 본 연구에서 제시된 큐멘의 실험자료와 연소특성의 예측방법은 이를 취급하는 공정에서 안전을 확보하기 위한 가이드 마련과 다른 가연성물질의 MSDS (Material Safety Data Sheet)의 적정성 연구에 도움을 주고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 큐멘의 물리적 및 연소특성

2-1-1. 큐멘의 물리적 특성

큐멘뿐만 아니라 대부분의 화학물질은 취급 부주의로 인해 제조 공정 중 폐수에 의해 배출되기도 하고, 배출된 증기 흡입 시 신체에 큰 영향을 주는 유독성을 지니고 있다. 또한 불안정한 연소 특성을 갖고 있으므로 발화원에 의해 중대 사고로 전이되는 경우가 많다. 각 나라에서는 사업장에서 취급하는 유해 위험물질에 대한 안전한 취급, 처리, 수송 및 보관을 위해 MSDS 자료를 제공하고 있다. 그리고 많은 핸드북과 논문들에서도 큐멘의 물리적 특성치를 제공하고 있다. Table 1에 큐멘의 물리적 특성을 요약하여 나타내었다[3,4].

2-1-2. 큐멘의 연소특성

큐멘은 위험물안전관리법 제 4류위험물의 제 2석유류(수용성액체, 지정수량 1000 L)이고, 산업안전보건법은 노출기준설정물질, 폐기물관리법은 지정폐기물로 규정하고 있다. 그리고 GHS (Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)의

Table 1. Physical properties of cumene [3,4]

Properties	Component	Cumene
CAS number		98-82-8
Molecular formula		C ₉ H ₁₀
Boiling point		152.41 °C
Melting point		-96.01 °C
Vapor pressure		4.88 kPa (at 75 °C)
Viscosity		0.737 mPa·s (at 25 °C)
Solubility (Water)		0.0613 g/L (at 25 °C)
Critical temperature		358 °C
Critical pressure		3.209 Mpa
Vapor density (Air=1)		4.2
Specipic gravity (Water=1)		0.864 (at 20 °C)

인화성액체 분류기준에서는 Category 3(인화점 23~60 °C)에 해당하는 물질이며, NFPA (National Fire Protection Association)에서는 건강 위험성 2, 화재위험성 1, 반응위험성 1로 규정하고 있다.

큐멘의 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 동안 열분해 또는 연소에 의해 자극적이고 매우 유독한 가스가 발생할 수 있다. 피해야할 발화원은 열, 스파크, 화염, 고열 등이며, 증기는 공기보다 무거우므로 누출 시 원거리의 발화원으로 부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다.

소화약제로는 알코올 포말, 이산화탄소 또는 물분무를 사용하고, 질식소화 시 건조한 모래 또는 흙을 사용할 수 있다. 저장 및 보관방법은 차고 건조하며 통풍이 잘되는 곳에 저장해야 한다.

2-2. 큐멘의 연소특성치 분석

큐멘의 화재 및 폭발 특성치 분석을 위해서 KOSHA (Korea Occupational Safety and Health Agency) MSDS를 비롯해 문헌들에서 제시하고 있는 연소특성치들을 정리하여 Table 2에 나타내었다[5-14].

일반적으로 폭발한계는 점화원의 위치에 따라 값이 달라지는데, 일반적으로 폭발범위는 점화시 화염이 위쪽으로 올라가는 상황전파에서 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 Setflash와 Pensky-Martens방식이 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, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류 그리고 지연 시간 등 많은 인자에 의존한다.

Table 2에서 알 수 있듯이 큐멘의 폭발하한계에 대해 KOSHA MSDS, NFPA, Sigma 그리고 SAX에서는 0.9 vol%를 나타내고 있으며, CRC에서 1.0 vol%로 가장 높은 값을, Lange에서 0.8 vol%로 문헌에 따라 약 0.2 vol%의 차이를 보이고 있다. 또한 폭발상한계는 대부

Table 2. Comparison of explosion limit, flash point and AIT of cumene by several references [5-14]

References	LEL - UEL (vol%)	Flash point (°C)	AIT (°C)
KOSHA MSDS	0.9-6.5	31 (CC)	420
NFPA	0.9-6.5	36	424
Sigma	0.9-6.5	46	425
Ignition	0.88-6.5	36	467
Lange	0.8-0.6	39 (CC)	430
CRC	1.0-7.0	36	424
SFPE	0.88-6.5	-	425
SAX	0.9-6.5	44	424
Stephenson	-	36, 44, 46 (CC)	-
Zabetakis	-	-	428 (16 sec)
Hilado	-	-	456 (19 sec)

본의 문헌에서 6.5 vol%를 제시하고 있다. 인화점은 KOSHA MSDS에서 가장 낮은 31 °C를 제시하고 있으며, Sigma에서 가장 높은 값인 46 °C를 제시하므로 문헌에 따라 15 °C의 차이를 보이고 있다. 그리고 AIT는 420~467 °C로서 문헌에 따라 약 47 °C의 정도를 보이고 있다. 따라서 큐멘 취급하는 공정의 안전을 위해서는 정확한 연소특성치 파악이 필요하다.

3. 실험재료 및 측정장치

3-1. 재료

본 연구에서 사용한 큐멘(KANTO, 98%)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 사용하였다[15,16].

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.

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, 시험용 발생장치 등으로 구성되어 있으며, 부가장치로는 시료컵의 시료 수위를 조절할 수 있는 레벨수준 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 측정장치들의 용기 특성 및 시험방법을 요약하여 Table 3에 나타내었다. 그리고 각 장치에 의한 인화점 측정의 3회 혹은 5회를 실시하였으며, 3회에서 동일한 값으로 측정되면 이를 채택하였고, 만일 3회 측정에서 동일한 측정값이 되지 않은 경우는 5회까지 측정하여 3회 이상 동일하게 측정된 값을 채택하였다.

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

3-3. 자연발화온도 측정

자연발화점 측정은 ASTM E659 장치를 사용하였으며, 장치는 크게 로, 온도 조절기, 열전대, 플라스크, 주사기, 거울, 에어건 등으로 구성되어 있다[15,16].

실험 방법은 기준 온도를 설정하고, 실험 장치를 가열하고, 설정 온도에 도달하면 플라스크 내부에 주사기로 시료를 0.1 ml를 넣었다. 그리고 10분 동안 관찰 후 발화가 일어나지 않으면 다시 온도를 설정한 후 10분전에 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. 큐멘의 인화점에 의한 폭발한계 비교

Table 2에 제시된 큐멘의 폭발한계 자료를 검증하기 위해 Antoine 식을 사용하여 폭발한계를 계산하였는데, 사용된 Antoine 식은 다음과 같다[17].

$$\log P^f = 6.93666 - \frac{1460.793}{(t + 204.78)} \quad (1)$$

여기서, P^f는 증기압(mmHg)이고, t는 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 폭발한계를 결과를 Table 4에 나타내었다.

큐멘의 하부인화점의 경우, 밀폐식인 Setaflash에서는 31 °C, Pensky-Martens에서는 33 °C, 개방식인 Tag에서는 43 °C와 Cleveland에서는 45 °C로 측정되었다. 본 연구에서 Setaflash 장치에 의해 측정된 하부인화점 31 °C는 Table 2에 제시된 KOSHA MSDS의 값과 일치하며, 다른 문헌값들 보다는 5~15 °C 정도 낮게 측정되었다.

본 실험에서 얻은 하부인화점을 이용하여 폭발한계를 예측하였다. Setaflash 밀폐식에서 측정된 하부인화점 31 °C를 식 (1)에 적용한 결과 폭발한계는 0.87 vol%로 계산되었다. 계산된 폭발한계 0.87 vol%는 CRC를 제외하고는 문헌값들과 거의 일치하고 있다. 따

Table 4. Comparison of estimated lower explosion limits (LEL) by experimental lower flash points for cumene

Testers	Experimental lower flash points (°C)	Estimated LEL by lower flash points (vol%)
Setaflash (CC)	31	0.87
Pensky-Martens (OC)	33	0.97
Tag (OC)	43	1.70
Cleveland (OC)	45	1.89

라서 기존의 문헌값들 혹은 본 연구에서 예측한 값을 공정에 사용하는 것이 타당하다고 본다. 본 연구에서 측정된 인화점을 이용하여 제시된 폭발한계 예측값을 공정에 적용이 가능하며, 인화점에 의한 폭발한계 연구에도 이 결과를 활용할 수 있다.

4-2. 큐멘의 자연발화온도 고찰

본 실험에서는 기존의 최소자연발화온도(AIT) 420 °C를 근거로 390 °C에서 실험한 결과 비발화가 되어, 다시 이 보다 30 °C 높은 420 °C에서도 실험한 결과 37.72 sec 발화되어 다시 10 °C 낮춘 410 °C에서 실험한 결과 비발화되었다. 410 °C 기점으로 1~2 °C 상승시켜 실험한 결과 419 °C, 57.53 sec에서 최소자연발화온도를 찾을 수 있었다. 최소자연발화온도를 시작으로 440 °C에서는 20.81 sec, 460 °C에서는 7.25 sec, 470 °C에서는 5.87 sec, 480 °C에서는 4.05 sec, 490 °C에서는 3.56 sec, 500 °C에서는 2.94 sec, 510 °C에서는 2.31 sec 그리고 520 °C에서는 1.84 sec에서 발화하였다. 큐멘의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험한 결과를 Table 5에 나타내었다.

본 연구에서 측정된 큐멘의 최소자연발화온도 419 °C는 Table 2에 제시된 기존의 문헌값 들 가운데 가장 낮은 값인 KOSHA MSDS의 420 °C와 비슷한 결과로서 본 연구에서 측정된 값의 신뢰성은 높다고 판단되며, 큐멘 공정에서 안전을 위한 AIT는 약 420 °C 사용하여 공정의 방호시스템 구축에 적용하는 것이 타당하다고 본다.

Table 5에 제시된 자연발화온도와 발화지연시간의 실험 자료를 Arrhenius 형태 식으로 회귀분석을 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$\ln \tau = -22.31 + 18020.56 \left(\frac{1}{T} \right) \tag{2}$$

식 (2)을 logτ와 (1/T)의 관계로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\log \tau = -9.69 + 7826.25 \left(\frac{1}{T} \right) \tag{3}$$

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 사용하였다 [18,19].

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

Table 5. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for cumene

No.	T [K]	$\tau_{exp.}$ [s]	$\ln \tau_{exp.}$	$\tau_{est.}$ (Eq. 3)
1	692	57.53	4.05231	41.74
2	693	37.72	3.63019	40.20
3	713	20.81	3.03543	19.39
4	733	7.25	1.98100	9.73
5	743	5.87	1.76985	6.99
6	753	4.05	1.39872	5.06
7	763	3.56	1.26976	3.70
8	773	2.94	1.07841	2.73
9	783	2.31	0.87325	2.02
10	793	1.84	0.60977	1.51
A.A.D.	-	-	-	2.53

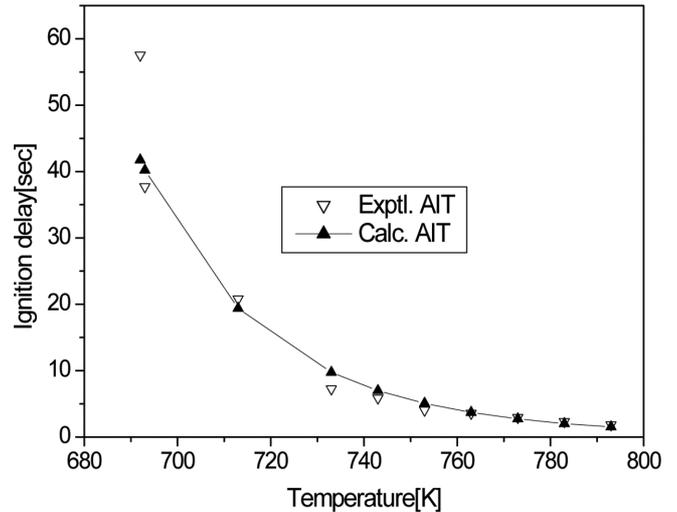


Fig. 1. A comparison between the experimental and calculated delay times for cumene.

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

여기서 $\tau_{est.}$ 는 추산식에 의해 추산된 발화지연시간이고, $\tau_{exp.}$ 는 실험 값이며, 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 2.53 sec, 결정계수(r^2)는 0.92로서 실험값은 계산값과 모사성이 있다고 본다.

활성화에너지(E)의 계산은 Semenov[20]가 제시한 식 (6)을 이용하면 가능하다.

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + B \tag{6}$$

식 (3)을 식 (6)에 대입하여 계산된 활성화에너지는 148.93 kJ/mol이다.

5. 결 론

본 연구에서는 큐멘의 연소특성치들 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 31 °C, Pensky-Martens 밀폐식은 33 °C, Tag 개방식은 43 °C 그리고 Cleveland 개방식은 45 °C로 측정되었다.

(2) Setaflash 장치에 의한 하부인화점 31 °C를 이용하여 계산된 폭발한계는 0.87 vol%로서, 문헌들에 제시된 가장 낮은 값인 0.8 vol% 보다는 약간 높게 계산되었지만 대부분의 문헌에 제시된 약 0.9 vol%와 비슷한 결과를 보였다.

(3) 본 연구에서 측정된 큐멘은 최소자연발화온도 419 °C는 기존의 문헌값들 가운데 가장 낮은 값을 제시한 KOSHA MSDS의 420 °C와 같은 결과로 측정되었다.

(4) 큐멘의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\ln \tau = -22.31 + 18020.56 \left(\frac{1}{T} \right)$$

(5) Semenov식을 이용한 큐멘의 활성화에너지(E)는 148.93 kJ/mol로 계산되었다.

(6) 본 연구에서 제시된 큐멘의 연소특성 실험자료와 예측 방법을 이를 취급 또는 폐기하는 공정에서 안전을 확보하기 위한 가이드 마련에 도움을 줄 것으로 본다.

(7) 본 연구에서 제시한 측정된 인화점에 의한 폭발한계 예측 방법을 활용하여 다른 가연성 물질의 폭발한계 연구에도 도움을 줄 수 있다.

References

1. Crowl, D. A. and Louvar, J. F., Chemical Process Safety : Fundamentals with application, 3rd ed., *Prentice Hall*(2011).
2. Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 2, 2nd ed., *Butterworth-Heinemann*(1996).
3. Perry, R. H. and Green, D. W., Perry's Chemical Engineer's Handbook, 7th ed., *McGraw-Hill* (1997).
4. Lide, D. R., Handbook Chemistry and Physics, 76th ed., *CRC Press*(1996).
5. KOSHA, <http://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetail.do>.
6. NFPA, Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids, NFPA 325M, *NFPA*(1991).
7. Lenga, R. E. and Votoupal, K. L., The Sigma Aldrich Library of Regulatory and Safety Data, Volume I, *Sigma Chemical Company and Aldrich Chemical Company Inc.*(1993).
8. Babrauskas, V., Ignition Handbook, *Fire Science Publishers, SFPE* (2003).
9. Dean, J. A., Lange's Handbook of Chemistry, 14th ed. *McGraw-Hill*(1992).
10. SFPE, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., *Society of Fire Protection Engineers*(1995).
11. Lewis, R. J., SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials, 11th ed., *John Wiley & Son, Inc.*(2004).
12. Stephenson, S. M., Flash Points of Organic and Organometallic Compounds, *Elsevier*(1987).
13. Zabetakis, M. G., Furno, A. L. and Jones, G. W., "Minimum Spontaneous Ignition Temperature of Combustibles in Air," *Industrial and Engineering Chemistry*, **46**(10), 2173-2178(1954).
14. Hilado, C. J. and Clark, S. W., "Autoignition Temperature of Organic Chemicals," *Chemical Engineering*, **4**, 75-80(1972)
15. Ha, D. M., "The Measurement and Prediction of Combustible Properties of Dimethylacetamide (DMAC)," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(5), 553-556(2014).
16. Ha, D. M., Fire Protection Engineering Handbook, *Korean Society of Fire Protection Engineers*(2012).
17. Gmehing, J., Onken, U., and Arlt, W., Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection, *Deutsche Gesellschaft fur Chemisches Apparatewesen*(1980).
18. Ha, D. M., "The Measurement of Combustible Characteristics of n-Undecane," *J. Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, **27**(2), 11-17(2013).
19. Cho, S. J., Shin, J. S., Choi, S. H., Lee, E. S. and Park, S. J., "Optimization Study for Pressure Swing Distillation Process for the Mixture of Isobutyl-Acetate and Isobutyl-Alcohol System," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(3), 307-313(2014).
20. Semenov, N. N., Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2, *Princeton University Press, Princeton, N.J.*(1959).