

아크릴릭산의 연소특성치의 신뢰성 연구

하동명[†]

세명대학교 보건안전공학과

(2015년 2월 16일 접수, 2015년 8월 5일 수정, 2015년 8월 10일 채택)

A Study on the Reliability of the Combustible Properties for Acrylic Acid

Dong-Myeong Ha[†]

Dept. of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University

(Received 16 February 2015, Revised 5 August 2015, Accepted 10 August 2015)

요 약

아크릴릭산 연소특성치의 신뢰도를 살펴보기 위해, 폭발한계에 대해서는 문헌을 통해 고찰하였고, 인화점과 발화 지연시간에 의한 발화온도를 측정하였다. 그 결과, Setaflash와 Pensky-Martens 밀폐식 장치에 의한 아크릴릭산의 하부인화점은 48 °C와 51 °C로 측정되었으며, Tag와 Cleveland 개방식에서는 56 °C로 측정되었다. ASTM E659 장치를 사용하여 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하였고, 아크릴릭산의 최소자연발화온도는 417 °C로 측정되었다. 측정된 하부인화점과 상부인화점에 의한 폭발한계는 2.2 Vol%, 상한계는 7.9 Vol%로 계산되었다.

주요어 : 아크릴릭산, 인화점장치, 폭발한계, 발화지연시간, 최소자연발화온도, 연소특성치신뢰도

Abstract - For the reliability of the combustible properties of acrylic acid, this study was investigated the explosion limits of acrylic acid in the reference data. The flash points and AITs(auto-ignition temperatures) by ignition delay time were experimented. The lower flash points of acrylic acid by using Setaflash and Pensky-Martens closed-cup testers were experimented in 48 °C and 51 °C, respectively. The lower flash points of acrylic acid by using Tag and Cleveland open cup testers were experimented in 56 °C. This study measured relationship between the AITs and the ignition delay times by using ASTM E659 tester for acrylic acid. The AIT of acrylic acid was experimented as 417 °C. The lower explosion limit(LEL) and the upper explosion limit(UEL) by the measured the lower flash point and the upper flash point of acrylic acid were calculated as 2.2 Vol% and 7.9 Vol%, respectively.

Key words : acrylic acid, flash point tester, explosion limit, ignition delay time, autoignition temperature (AIT), reliability of combustible properties

1. 서론

화학공장은 고도의 정밀한 기술이 요구되는 장치 산업으로써, 잠재적 위험요소가 많아서 이를 찾아내어 위험을 대처하기가 쉽지 않다. 공정에서 일단 사고가

나면 막대한 인적·물적 피해를 가져오는 중대 재해로 전개되는 경우가 많다. 따라서 현장 기술자들은 공정상에서 화재 및 폭발의 재해를 방지하기 위하여 취급 물질의 연소 특성치뿐만 아니라 재해를 줄이기 위한 절차의 개념을 정립해야 한다. 공정 안전을 위한 물질의 대표적인 연소특성치로 인화점, 폭발한계, 최소 자연발화온도 등을 들 수 있다[1].

인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나누고 있으며, 일반적으로 하부인화점을 인화점이라 한다. 인

[†]To whom corresponding should be addressed.

To whom corresponding should be addressed. Dept. of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, Jecheon 27136, Korea,
Tel : +82-43-649-1321, E-mail : hadm@semyung.ac.kr,

화점은 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 폭발한계는 초기 온도, 초기 압력, 불활성가스의 농도, 화염전파 방향, 장치의 표준상태, 물리적 상태 등에 영향을 받으므로 문헌에 따라 다른 값들이 제시되고 있다. 또한 폭발한계를 실험하기 어려운 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 한다[2].

아크릴로니트릴에 황산을 가하여 가수분해하여 만드는 아크릴릭산은 각종 에스테르의 원료, 섬유개질제, 고분자의 원료 등으로 다양하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 아크릴릭산의 연소특성치의 신뢰성 연구를 위해 인화점과 자연발화온도를 측정하여 기존의 자료와 비교하였다. 그리고 여러 문헌에 제시된 폭발한계의 신뢰성을 검토하기 위해 본 연구에서 측정된 인화점을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서 제시된 아크릴릭산의 자료는 이를 취급하는 공정에서 안전을 확보하는 지침 마련과 MSDS의 최신화에 유용한 정보를 제공하는데 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 아크릴릭산의 물리적 및 연소특성

2.1.1 아크릴릭산의 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. 아크릴릭산은 다른 이름으로 2-propenoic acid, acroreric acid, vinylformic acid 등으로 부르고 있으며, Table 1에 물리적 특성을 요약하여 나타내었다[3,4].

2.1.2 아크릴릭산의 연소특성

아크릴릭산은 위험물안전관리법 제 4류위험물의 제

2석유류(비수용성액체, 지정수량 2000 ℓ)이고, 산업안전보건법은 작업환경측정대상물질, 관리대상유해물질, 노출기준설정물질로 규정하고, 유해화학물질관리법은 사고대비물질로 규정하고 있다. NFPA에서는 건강위험성 2, 화재위험성 2로 규정하고 있다. 아크릴릭산은 상온에서 특유의 냄새가 나고 물, 벤젠, 글로로포름, 알코올, 에테르, 아세톤 등에 용해된다.

아크릴릭산은 연소하는 동안 자극적이고 매우 유독한 가스가 발생하며, 증기는 공기와 혼합할 때 점화원에 의해 폭발 위험성을 지니고 있다. 강산류 및 알칼리류와 혼합될 때는 격렬한 반응을 보이고 있으며, 충격, 마찰, 가열 등에 의해 발화될 수 있고, 특히 중합 반응을 일으킬 때는 증기압이 상승하여 폭발 위험성이 높다. 밀폐공간에 인화성 및 독성 가스가 축적될 수 있으므로 안전관리가 필요하다. 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, 질식소화시 건조한 모래 또는 흙을 사용할 수 있다. 저장 및 보관방법은 산화제, 강산류, 기폭제, 알칼리류 등과 격리하고, 차고 건조하며 통풍이 잘되는 곳에 저장해야 한다.

Table 1. Physical properties of acrylic acid

Properties	Component	Acrylic acid
CAS number		79-10-7
Molecular formula		C3H4O2
Boiling point		141 °C
Melting point		14 °C
Vapor pressure		413Pa(20 °C)
Viscosity		13cP(20 °C)
Solubility(Water)		100g/100ml(25 °C)
Critical temperature		343 °C
Critical pressure		52 °C
Vapor density(Air=1)		2.5
Specipic gravity(Water=1)		1.05
Evaporation rate(BuAc=1)		1

2.2 아크릴릭산의 연소특성치 분석

2.2.1 아크릴릭산의 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. Table 2에서는 아크릴릭산의 폭발한계에 대해 NFPA를 비롯해 현장에서 많이 적용하고 있는 문헌들과 KOSHA 자료를 정리하여 나타내었다. 아크릴릭산의 폭발하한계(LEL)는 NFPA를 비롯해 대부분의 문헌에서 2.4 Vol.%를 제시하고 있으며, Sigma에서는 2.0 Vol.%를 제시하고 있다. 아크릴릭산의 폭발상한계(UEL)의 경우 NFPA와 KOSHA에서는 8.0 Vol.%, Sigma에서는 13.7 Vol.%이고, Ignition에서는 20.2 Vol.%로써 다른 문헌값에 비해 큰 값을 제시하고 있으므로 자료의 신뢰도에 문제가 있다고 본다. 따라서 공정안전을 위해 이에 대한 고찰이 필요하다.

Table 2. Comparison of explosion limits of acrylic acid in air by several references

References	Explosion Limits [Vol.%]	
	Lower	Upper
NFPA[5]	2.4	8.0
Sigma[6]	2.0	13.7
Ignition[7]	2.4	20.2
KOSHA[8]	2.4	8.0

2.2.2 아크릴릭산의 인화점

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

Table 3에서는 아크릴릭산의 하부인화점을 정리하여 나타내었다. 특히 아크릴릭산은 다른 순수물질에 비해 문헌에 제시된 인화점의 편차가 큰 물질이다. 가장 적은 값은 Ignition에서 48 °C를 제시하고 있으며, 가장 큰 값은 개방식 측정값으로 Lange에서는 68 °C를 제시하고 있다. 자료를 분석한 결과 밀폐식의 경우 문헌에 따라 6 °C의 차이를 보이고 있으며, 개방식은 문헌에 따라 18 °C의 차이를 보이고 있다. 따라서 아크릴릭산의 공정안전을 위해서는 인화점의 고찰은 반드시 필요하다.

2.2.3 아크릴릭산의 최소자연발화온도

자연발화온도는 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류, 지연시간 등에 의존한다. 아닐린의 최소자연발화온도(AIT)를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 가장 작은 AIT는 KOSHA에서 제시한 값으로 360 °C이고, 가장 높은 값은 Ignition에서 438 °C를 제시하고 있다. 가장 높은 AIT와 값과 낮은 AIT는 약 68 °C의 차이를 보이고 있으므로 AIT에 대한 신뢰성 평가가 필요하다.

Table 3. The lower flash point of several reported data for acrylic acid

Compound	Flash points [°C]						
	NFPA [5]	Sigma [6]	Ignition [7]	Lange [9]	SAX [10]	Flick [11]	KOSHA [8]
Acrylic acid	50(OC)	54.4	48	68(OC)	54.4	50(OC)	54

Table 4. The autoignition temperature of several reported data for acrylic acid

Compound	AITs[°C]			
	NFPA [5]	Sigma [6]	Ignition [7]	KOSHA [8]
Acrylic acid	418	396	438	360

Table 5. 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 or 4	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

3. 실험 재료 및 장치

3.1 재료

본 연구에서 사용한 acrylic acid(Wako, 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. 측정 장치의 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, 전원 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 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 5에 나타내었다.

3.3 자연발화온도 측정

자연발화점 측정은 ASTM E659 장치를 사용하였으며, 장치는 크게 로, 온도 조절기, 열전대, 플라스크, 주사기, 거울, 에어건 등으로 구성되어 있다[12].

실험 방법은 기준 온도를 설정하고, 실험 장치를 가열하고, 설정온도에 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 인화점에 의한 폭발한계 비교

Table 2의 폭발한계 자료를 검토한 결과 실험장치의

크기나 모양 그리고 화염전파방향에 따라 폭발한계가 변화함을 알 수 있다. 그 동안 공정에서 안전을 위해 폭발하한계는 2.4 Vol.%와 상한계는 8.0 vol.%를 사용하는 것이 타당하다고 본다.

아크릴릭산의 폭발한계의 자료를 검증하기 위해 Antoine 식을 사용하여 폭발하한계를 산출하였는데, 사용된 Antoine 식은 다음과 같다[13].

$$\log P^f = 8.68508 - \frac{2409.25}{(t+274.87)} \quad (1)$$

여기서, P^f 는 증기압(mmHg)이고, t 는 온도(°C)이다.

식 (1)을 이용하여 폭발한계를 예측할 수 있는데, Setaflash와 Pensky-Martens 밀폐식, Tag와 Cleveland 개방식에 의해 얻어진 인화점을 이용하여 폭발한계를 결과를 Table 6에 나타내었다.

아크릴릭산의 하부인화점의 경우, 밀폐식인 Setaflash에서는 48 °C, Pensky-Martens에서는 51 °C, 개방식인 Tag와 Cleveland에서는 56 °C로 측정되었다. 본 연구에서 Setaflash 장치에 의해 측정된 하부인화점 48 °C는 Table 3에 제시된 Ignition과 동일한 값을 보이고, 있으며, 기존 자료보다는 2~6 °C 정도 낮게 측정되었다.

본 실험에서 얻은 하부인화점을 적용하는 경우 폭발하한계를 예측한 결과, Setaflash 밀폐식에서 얻은 하부인화점 48 °C와 상부인화점 74 °C를 식(1)에 적용하여 계산한 결과 폭발하한계는 2.2 Vol% 그리고 상한계는 7.9 Vol.%로 계산되었다. 계산된 폭발하한계 2.2 Vol%는 기존의 문헌값인 2.0 ~ 2.4 Vol.%의 중간 값을 보이고 있으며, 폭발상한계는 7.9 Vol%로서 NFPA와 KOSHA 문헌값과 비슷한 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 인화점을 이용한 폭발한계 예측값은 공정 안전에 활용이 가능하다고 본다.

4.2 아크릴릭산의 자연발화온도 고찰

본 실험에서는 기존의 자료를 근거로 370 °C에서 실험한 결과 발화가 되지 않았으며, 또한 30 °C를 상승시킨 400 °C에서도 비발화하였다. 다시 30 °C를 상승시킨 430 °C에서 실험한 결과 11.69sec에서 발화하여 2~5 °C로 낮추면서 실험한 결과 417 °C, 17.53sec에서 최소자연발화온도를 찾을 수 있었다. 최소자연발화온도 417 °C를 기점으로 5 °C 혹은 10 °C 씩 상승시켜 발화지연시간을 측정한 결과 440 °C에서는 9.69sec, 450 °C에서는 6.403 sec, 460 °C에서는 4.78sec, 470 °C에서는 3.91sec 그리고 480 °C에서는 1.81sec에서 발화하였다. 아크릴릭산의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험한 결과를 Table 7에 나타내었다.

본 연구에서 아크릴릭산의 최소자연발화온도가 417 °C로 측정됨에 따라 NFPA에서 제시한 418 °C와 같은 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 제시한 최소자연발화온도를 공정에 적용하는 것이 타당하다고 본다.

일반적으로 공정안전을 위해서 AIT도 중요하지만, 방호시스템에서는 발화지연시간을 5~10sec를 적용하는 경우가 있다. 아크릴릭산의 방호시스템에 적용하기 위해서, 발화지연시간과 발화온도의 관계를 Arrhenius 형태 식을 이용한 최적화된 식은 다음과 같다.

$$\ln \tau = -20.98 + 16472.38 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

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

$$\log \tau = -9.11 + 7153.88 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

Table 6. Comparison of estimated lower and upper explosion limits(LEL, UEL) with experimental lower and upper flash points for acrylic acid

Testers	Experimental flash points (°C)		Estimated explosion limits (Vol.%)	
	Lower	Upper	Lower	Upper
Setaflash (CC)	48	74	2.2	7.9
Pensky-Martens (CC)	51	-	2.6	-
Tag (OC)	56	-	3.3	-
Cleveland (OC)	56	-	3.3	-

Table 7. Comparison of experimental and calculated ignition delay time by the AIT for acrylic acid

No.	T[K]	$\tau_{exp.}[s]$	$\ln\tau_{exp.}$	$\tau_{est.}(Eq. 3)$
1	690.15	17.53	2.86391	17.93
2	692.15	14.18	2.65183	16.73
3	703.15	11.69	2.45873	11.53
4	713.15	9.69	2.27109	8.30
5	723.15	6.40	1.85630	6.03
6	733.15	4.78	1.56444	4.42
7	743.15	3.91	1.36354	3.27
8	753.15	1.81	0.59333	2.43
A.A.D.	-	-	-	0.81

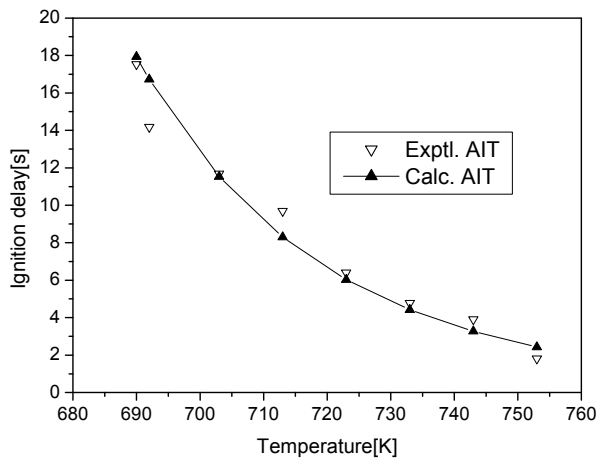


Figure 1. A comparison between the experimental and calculated delay times for acrylic acid.

식 (3)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 7과 Figure 1에 나타내었다. 예측값과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.D.(Average Absolute Deviation)와 상관계수(r^2)를 사용하였다[14].

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

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

여기서 $\tau_{est.}$ 는 추산식에 의해 추산된 발화지연시간 이고, $\tau_{exp.}$ 는 실험값이며, 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 0.81sec, 결정계수는 0.95로서 실험값과 모사성이 크게 나타나고 있다.

활성화에너지(E)의 계산은 Semenov[15]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 136.13 kJ/mol이다.

5. 결론

본 연구에서는 아크릴릭산의 연소특성치들의 신뢰도를 살펴보기 위해서 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 48 °C, Pensky-Martens 밀폐식은 51 °C, Tag와 Cleveland 개방식은 56 °C로 측정되었다.
- 2) Setaflash 장치에 의한 하부인화점 48 °C와 상부인화점 74 °C에 대해 증기압 식을 이용하여 계산된 폭발하한계는 2.2 Vol.%, 상한계는 7.9 Vol.%로서, NFPA와 KOSHA의 MSDS와 비슷한 결과를 얻었다.

- 3) 측정된 아크릴릭산의 최소자연발화온도는 417 °C 는 NFPA의 418 °C와 동일하였다.
- 4) 아크릴릭산의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\log \tau = -9.11 + 7153.88 \left(\frac{1}{T} \right)$$
- 5) Semenov식을 이용하여 계산된 아크릴릭산의 활성화에너지(E)는 136.13 kJ/mol이다.

References

1. Crowl, D.A. and Louvar, J.F. : "Chemical Process Safety Fundamentals with Application", 2nd ed., Pearson Education Inc., (2002)
2. Lees, F.P. : "Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 2, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, (1996)
3. Lide, D.R. : "Handbook Chemistry and Physics", 76th ed., CRC Press, (1996)
4. Perry, R.H. and Green, D.W. : "Perry's Chemical Engineer's Handbook", 7th ed., McGraw-Hill, (1997)
5. NFPA : "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, National Fire Protection Association, (1991)
6. Lenga, R.E and Votoupal, K.L. : "The Sigma Aldrich Library of Regulatory and Safety Data, Volume I ~ III", Sigma Chemical Company and Aldrich Chemical Company Inc., (1993)
7. Babrauskas, V. ; "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, Society of Fire Protection Engineers, (2003)
8. KOSHA : www.kosha.or.kr/msds/msdsMain.do?menuId=69
9. Dean, J.A. : "Lange's Handbook of Chemistry", 14th ed. McGraw-Hill, (1992)
10. Lewis, R.J. : "SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials", 11th ed., John Wiley & Son, Inc., New Jersey, (2004)
11. Flick, E. W. : "Industrial Solvent Handbook", 3rd. ed., Noyes, Data Corp., Park Ridge, New Jersey, (1985)
12. Ha, D.M. : "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. Gmehing, J., Onken, U., and Arlt, W. : "Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection", Deutsche Gesellschaft fur Chemisches Apparatewesen, (1980)
14. Ha, D.M. : "The Measurement of Combustible Characteristics of n-Undecane", J. of the Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 27, No. 2, pp.11-17, (2013)
15. Semenov, N.N : "Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2", Princeton University Press, Princeton, N.J., (1959)