



아닐린의 연소특성치의 측정 및 예측에 관한 연구

†하동명

세명대학교 보건안전공학과
(2014년 7월 9일 접수, 2014년 8월 21일 수정, 2014년 8월 23일 채택)

The Study on Measurement and Prediction of Combustible Properties for Aniline

†Dong-Myeong Ha

Dept. of Occupational Health and Safety Engineering., Semyung University, Jecheon
390-711, Korea

(Received July 9, 2014; Revised August 21, 2014; Accepted August 23, 2014)

요 약

아닐린의 안전한 취급을 위해, 폭발한계는 문헌을 통해 고찰하였으며, 인화점과 발화지연시간에 의한 자연발화온도는 시험장치를 이용하여 측정하였다. 인화점의 경우 밀폐식 장치인 Setaflash와 Penski-Martens에 의한 하부인화점은 각각 66 °C와 73 °C로 측정되었으며, 개방식인 Tag와 Cleveland 에서는 각각 72 °C와 78 °C로 측정되었다. ASTM E659 장치를 사용하여 자연발화온도와 발화지연시간을 측정하였고, 최소 자연발화온도는 590 °C로 측정되었다. 아닐린의 측정된 인화점을 이용하여 폭발하한계와 상한계는 1.16 Vol.%와 8.36 Vol.%로 계산되었다.

Abstract - For the safe handling of aniline, this study was investigated the explosion limits of aniline in the reference data. And the lower flash points, upper flash points and AITs(auto-ignition temperatures) by ignition delay time were experimented. The lower flash point of aniline by using Setaflash and Penski-Martens closed-cup testers were experimented 66 °C and 73 °C, respectively. The lower flash point aniline by using Tag and Cleveland open cup testers were experimented 72 °C and 78 °C, respectively. Also, this study measured relationship between the AITs and the ignition delay times by using ASTM E659 tester for aniline. The experimental AIT of aniline was 590 °C. The calculated LEL and UEL by using the measured low flash point and upper flash point were 1.16 Vol.% and 8.36 Vol.%, respectively.

Key words : Safe handling, Aniline, Flash point, Explosion limit, ASTM E659, Autoignition temperature(AIT)

1. 서 론

사업장에서 사용되고 있는 각종 화학물질은 잠재적 위험성이 크므로 보관, 수송 및 처리할 때 특별한 주의를 필요로 하고 있다. 사업장에 제공되고 있는 물

질보건안전자료(MSDS; Material Safety Data Sheet)의 9번째 항인 물리화학적 특성의 정보는 사고를 줄이는데 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 신뢰도가 낮은 MSDS는 근로자 및 지역 주민의 안전을 위협할 뿐만 아니라, 잘못된 MSDS의 정보는 중대사고로 이어질 우려가 있다. 따라서 MSDS의 물리화학적 특성 가운데 정확한 화재 및 폭발 특성치의 사용은 공정안전에 가장 최우선이 되어야 한다. MSDS의 화

†Corresponding author:hadm@semyung.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

재 및 폭발 특성치들로 인화점, 폭발한계, 최소자연 발화온도, 연소열 등을 들 수 있다[1].

인화점은 하부인화점과 상부인화점으로 나누고 있으며, 일반적으로 하부인화점을 인화점이라 한다. 인화점은 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 농도 범위 내에서만 연소가 이루어지는 혼합범위를 말한다. 또한 폭발한계를 실험하기 어려운 경우는 인화점을 사용하여 예측이 가능하다. 자연발화는 가연성 혼합기체에 열 등의 형태로 에너지가 주어졌을 때 스스로 타기 시작하는 산화현상으로, 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화할 수 있는 최저 온도를 최소자연발화온도(Autoignition Temperature, AIT)라고 한다[2].

화재 및 폭발 특성치의 신뢰도 연구로, Stephenson[3]은 각 문헌에 제시된 유기화합물과 유기금속 화합물의 인화점을 정리하였고, Montemayor 등[4]은 노말데칸, 노말안데칸, 노말테트라데칸 등에 대해 밀폐식과 개방식에 의한 인화점을 측정하여 비교하였다. Britton[5]은 메탄을 비롯해 3종의 탄화수소 가스에 대한 폭발한계의 신뢰도를 연구하였으며, Hilado 등[6]은 16종의 유기화합물의 AIT에 대해 4개의 문헌 값들을 비교 고찰하였다.

본 연구의 대상물질인 아닐린은 유기 합성공업의 가장 중요한 중간물의 하나이며, 많은 염료, 의약, 사진약 등의 원료로 사용되고 있으며, 또한 구두약, 향료의 제조 원료, 제초제, 살충제, 곰팡이 제거제의 원료 그리고 알루미늄, 크롬(III), 철(III), 납 등의 정량 시약으로 활용되고 있다. 최근에는 폴리우레탄 수지의 출발 원료로 대량으로 사용되고 있다. 본 연구에서 아닐린의 인화점과 자연발화온도를 측정하여 기존의 자료와 비교하였고, 폭발한계는 여러 문헌에 제시된 자료의 타당성을 검토하기 위해 측정된 인화점을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서 제시된 아닐린의 자료는 이를 취급하는 공정에서 안전을 확보하는 지침 마련과 MSDS의 최신화에 유용한 정보를 제공하는데 목적이 있다.

II. 이론적 배경

2.1. 아닐린의 물리적 및 연소특성

2.1.1. 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. 아닐린의 물리적 특성을 요약하여 Table 1에 나타내었다[7].

2.1.2. 아닐린의 연소특성

아닐린은 위험물안전관리법 제 4류위험물의 제 3 석유류(비수용성액체, 지정수량 2000 ℓ)이고, 산업 안전보건법은 작업환경측정대상물질과 특수건강진단대상물질로 규정하고, 유해화학물질관리법은 유독물, 폐기물관리법은 지정폐기물로 규정하고 있다. NFPA에서는 화재위험성은 2등급, 반응위험성은 0 등급 그리고 보건위험성은 3등급이다. 순수한 아닐린은 상온에서 특유의 냄새가 나고 무색투명한 액체 상태로 존재한다.

아닐린은 연소하는 동안 열분해 또는 연소에 의해 자극적이고 매우 유독한 가스가 발생될 수 있다. 고온에서 분해되어 독성가스를 생성할 수 있으며, 가열시 용기가 폭발할 수 있고, 증기는 공기와 혼합하여 폭발성 혼합물을 형성할 수 있다. 알칼리금속이나 알칼리토금속은 아닐린에 녹이면 수소가 발생하는 위험성을 갖고 있다. 일반적으로 금속과 접촉시 격렬한 반응을 한다. 밀폐공간에 인화성 및 독성 가스가 축적될 수 있으므로 안전관리가 필요하다. 피해야할 발화원은 열, 스파크, 화염 등 이고, 증기

Table 1. Physical properties of aniline

Properties	Component	Aniline
CAS number		62-53-3
Molecular formula		C ₆ H ₅ NH ₂
Boiling point		184.4°C
Melting point		-5.98°C
Vapor pressure		0.3mmHg(20°C), 1mmHg(34.8°C)
Viscosity		4.35cp(20°C)
Solubility(Water)		34g/1L(20°C)
Critical temperature		426°C
Critical pressure		48.9 atm
Critical volume		287cm ³ /mol
Vapor density(Air=1)		3.22
Specipic gravity(Water=1)		1.02171

는 공기보다 무거우므로 누출 시 원거리의 발화원으로 부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다.

소화약제로는 알코올 포말, 이산화탄소 또는 물 분무를 사용하고, 질식소화시 건조한 모래 또는 흙을 사용할 수 있다. 저장 및 보관방법은 용기가 비워진 후에도 제품 찌꺼기가 남아 있을 수 있으므로 예방 조치하고, 환기가 잘되는 곳에 단단히 밀폐하여 저장해야 한다.

2.2. 아닐린의 연소특성치 분석

2.2.1. 아닐린의 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 아닐린의 폭발

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

References	Explosion Limits [Vol.%]	
	Lower	Upper
NFPA[8]	1.3	11.0
SFPE[9]	1.2	8.3
Sigma[10]	1.3	11.0
Ignition[11]	1.2	8.3
Lange[12]	1.3	-
SAX[13]	1.3	-
KOSHA[14]	1.3	11.0

한계에 대해 NFPA를 비롯해 현장에서 많이 적용하고 있는 문헌들과 KOSHA 자료를 정리하여 나타내었다. 아닐린의 폭발하한계(LEL)는 NFPA를 비롯해 대부분의 문헌에서 1.3 Vol.%를 제시하고 있으며, SFPE와 Ignition에서는 1.2 Vol.%를 제시하고 있다. 아닐린의 폭발상한계(UEL)의 경우 NFPA, Sigma 그리고 KOSHA에서는 11.0 Vol.%, SFPE와 Ignition에서는 8.3 Vol.%로서 약 2.7 Vol.%의 차이를 보이고 있다.

2.2.2 아닐린의 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 Setflash 등이 있으며, 개방식(OC, Open Cup)은 Tag와 Cleveland 등이 있다[2].

Table 3에서는 아닐린의 하부인화점을 정리하여 나타내었다. 밀폐식 장치에서 가장 낮은 값은 NFPA 등에서 70 °C이고, SFPE와 Fluka는 76 °C를 제시하였다. 밀폐식의 경우 문헌에 따라 6 °C의 차이를 보이고 있다. 개방식은 SFPE에서 91 °C로서 밀폐식 보다 약 20 °C 정도 높게 제시하고 있으므로 아닐린의 공정 안전을 위해서는 인화점의 고찰은 반드시 필요하다.

2.2.3. 아닐린의 최소자연발화온도

자연발화온도는 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류, 지연시간 등에 의존한다. 아닐린의 최소자연발화온도를 정리하여 Table 4에 나타내었다. NFPA, Hilado 그리고 KOSHA 등 대부분의 문헌에서는 615

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

Compound	Flash points [°C]							
	NFPA [8]	SFPE [9]	Sigma [10]	Ignition [11]	Lange [12]	SAX [13]	Fluka [15]	KOSHA [14]
Aniline	70	76(CC), 91(OC)	70	70	70(CC)	70(CC)	76(CC)	70

Table 4. The autoignition temperature of several reported data for aniline

Compound	AITs[°C]									
	NFPA [8]	SFPE [9]	Sigma [10]	Ignition [11]	Lange [12]	SAX [13]	Hilado [16]	Scott [17]	Zabetakis [18]	KOSHA [14]
Aniline	615	617	615	530	615	615	615	530	617	615

℃로 제시하고 있으며, Ignition과 Scott는 530 ℃를 제시하고 있다. 가장 높은 값과 낮은 값은 약 85 ℃의 차이를 보이므로 이에 대한 신뢰성 평가가 필요한 물질이라고 판단된다. 안전을 고려한 최적의 공정설계를 위해서는 정확한 AIT의 실험적 연구가 필요하다.

III. 실험장치

3.1. 실험재료

본 연구에서 사용한 아닐린(Deajung, 99%)의 시료는 별도의 정제과정을 거치지 않고 사용한다.

3.2. 실험장치

3.2.1. 인화점 측정 장치

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 사용된 장치인 Setaflash와 Pensky-Martens 밀폐식 및 Tag와 Cleveland 개방식의 구성요소를 간략히 정리하면 다음과 같다[19].

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, 전열 조절기 등으로 구성되어 있다. 시료 장치부는 시료컵, 온도계 삽입구, 시료컵 상부 개폐기 손잡이로 구성되어 있다. 화염 공급부는 화염 접근장치, 연료통, 화염 조절기, 가스관, 가

스 안전밸브 등으로 구성되어 있다.

Tag 개방식 장치는 가연성 액체의 인화점 및 연소점 측정이 가능한 장치로, 시료컵, 승온 다이얼, 수조, 시험엽 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.

3.2.2. 자연발화온도 측정장치(ASTM E659)

본 실험에서는 액체 화학물질의 자연발화점 측정 장치로서 ASTM E659-78 장치를 사용하여 자연발화온도를 측정하였으며, 장치는 크게 Furnance, Temperature Controller, Thermocouple, Test Flask, Hypodermic Syringe, Mirror, Air Gun으로 구성되어 있다[19].

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 온도 보다 30℃ 낮게 설정하고 3~5 ℃ 혹은 10 ℃씩 증가시키면서 측정하며, 발화가 일어났을 때 시간과 온도를 기록한다.

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

IV. 결과 및 고찰

4.1. 측정된 인화점에 의한 폭발한계의 비교 고찰

본 연구에서 인화점 장치를 이용하여 아닐린의 하부인화점을 측정된 결과, 밀폐식인 Setaflash는 66 °C, Pensky-Martens는 73 °C로 측정되었으며, 개방식인 Tag는 72 °C, Cleveland는 78 °C로 측정되었다. Setaflash에 의한 상부인화점은 104 °C로 측정되었다.

아닐린의 폭발한계의 자료를 검토한 결과 하한계는 1.2 Vol.% 혹은 1.3 Vol.% 그리고 상한계는 8.3 Vol.%와 11.3 Vol.%를 인용하였다.

아닐린의 폭발한계의 자료의 신뢰성을 검증하기 위해 Antoine 식[20]을 사용하여 폭발한계를 계산할 수 있다.

$$\ln P^f = 16.67483 - \frac{3857.52}{(T - 73.15)} \quad (1)$$

여기서, P^f 는 증기압(mmHg)이고, T는 온도(K)이다.

Setaflash와 Pensky-Martens 밀폐식 그리고 Tag와 Cleveland 개방식에 의해 얻어진 인화점을 이용하여 식 (1)에 의한 폭발하한계와 상한계의 계산값을 Table 6에 나타내었다.

Setaflash 밀폐식에 의해 측정된 하부인화점 66 °C를 적용하는 경우 폭발하한계는 약 1.16 Vol.%로 계산되었고, 상부인화점 104 °C에 의한 폭발상한계는 8.36 Vol.%로 계산되었다. Table 6에 제시된 폭발하한계의 신뢰도는 높다고 판단되며, 상한계는 SFPE와 Ignition의 문헌값인 8.3 Vol.%와 비슷한 결과를 얻었다. 측정된 인화점이나 문헌에 제시된 인화점을 이용하여 폭발한계의 예측이 가능함을 알 수 있다.

4.2. 아닐린의 자연발화온도와 발화지연시간

아닐린의 최소자연발화온도는 문헌에 따라 530 °C~ 617 °C로 제시되고 있다. 따라서 본 실험에서는

초기설정온도를 500 °C로 하여 실험한 결과 비발화되어, 다시 30 °C를 상승 시켜 530 °C에서 실험한 결과 역시 비발화되었다. 다시 30 °C 상승시킨 560 °C에서도 비발화가 되어서, 30 °C 상승시킨 590 °C에서 실험한 결과 2.98 sec에서는 발화되었다. 다시 10 °C 낮춘 580 °C에서 실험한 결과 비발화되어, 다시 2~5 °C 상승시켜 실험한 결과 590 °C에서 최소발화온도를 찾았다. 이를 기점으로 5 °C 혹은 10 °C 씩 상승시켜 발화지연시간을 측정된 결과 600 °C에서는 2.42sec, 620 °C에서는 2.01sec 그리고 630 °C에서는 1.27sec에서 발화하였다.

아닐린의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계를 실험한 결과를 Table 7에 나타내었다. 본 연구에서 아닐린의 최소자연발화온도가 590 °C로 기존의 문헌들의 중간값 정도로 측정되었다. 기존의 자료는 실험 장치뿐만 아니라 시약에 따라 다른 값들이 제시되므로 따라서 본 연구에서 측정된 AIT를 공정 안전을 위해 사용이 가능하다고 본다.

실험에서 측정된 발화온도와 발화시간의 관계를 고찰하기 위해 선형식인 Arrhenius 형태로 최적화하여 다음과 같은 식을 제시한다.

$$\ln \tau = -15.94 + 14713.13 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

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

$$\log \tau = -6.92 + 7238.65 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

식 (3)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 7과 Figure 1에 나타내었다. 추산값과 문헌값의 차이의 정도를 알기 위해 A.A.D.(Average Absolute Deviation)와 상관계수(r)를 사용하였다[21].

Table 6. Estimated explosion limits by experimental flash points for aniline

Testers	Experimental (°C)		Estimated(LEL) (Vo.1%)	
	Lower flash points	Upper flash points	by Lower flash points	by Upper flash points
Setaflash(CC)	66	104	1.16	8.36
Pensky-Martens(CC)	73	-	1.68	-
Tag(OC)	72	-	1.59	-
Cleveland(OC)	78	-	2.16	-

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

No.	T[K]	$\tau_{exp.}[s]$	$\ln \tau$	$\tau_{est.}(Eq. 3)$
1	863	2.98	1.09192	3.03
2	873	2.42	0.88377	2.49
3	893	2.01	0.69813	1.71
4	903	1.27	0.23902	1.42
A.A.D.	-			0.14

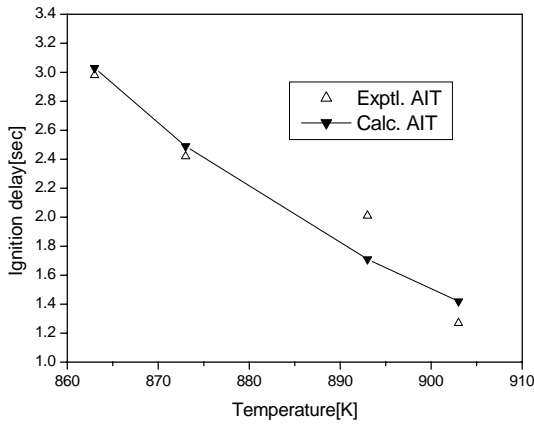


Figure 1. A comparison between the experimental and calculated delay times for aniline.

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

$$r = \left(\frac{SSR}{SST} \right)^{1/2} \quad (5)$$

여기서 $\tau_{est.}$ 는 추산식에 의해 추산된 발화지연시간이고, $\tau_{exp.}$ 는 실험값이며, N은 자료수, r은 상관계수, 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 0.14sec이고, 상관계수(r)는 0.92로서 실험값과의 모사성은 크다.

활성화에너지(E)는 Semenov[22]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 137.75 kJ/mol이다.

V. 결론

본 연구에서는 아닐린의 연소특성 가운데 인화점과 최소자연발화온도(AIT)를 측정하였고, 폭발한계는 여러 문헌들과 비교 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아닐린의 폭발한계를 고찰한 결과, 폭발하한계는 1.2 Vol.% 혹은 1.3 Vol.%, 상한계는 8.3 Vol.%와 11.0 Vol.%가 사용되고 있다.

2) 아닐린의 하부인화점을 측정된 결과, 밀폐식인 Setaflash는 66 °C, Pensky-Martens는 73 °C로 측정되었고, 개방식인 Tag는 72 °C, Cleveland는 78 °C로 측정되었다. 그리고 Setaflash에 의한 상부인화점은 104 °C로 측정되었다.

3) Setaflash에 의해 측정된 하부인화점 66 °C와 상부인화점 104 °C를 증기압 식에 이용하여 계산된 폭발하한계는 1.16 Vol.%, 상한계는 8.36 Vol.%였다.

4) 측정된 아닐린의 최소자연발화온도는 590 °C로서 기존의 문헌값인 530 °C~ 617 °C의 중간값으로 측정되었다.

5) 아닐린의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\log \tau = -6.92 + 7238.65 \left(\frac{1}{T} \right)$$

6) Semenov식을 이용하여 계산된 아닐린의 활성화에너지(E)는 137.75 kJ/mol이다.

7) 아닐린은 위험물안전관리법에서 제4류위험물의 제 3석유류로 지정되어 있으나, 본 연구에서 인화점이 66 °C로 측정됨에 따라 위험물 분류에 대한 재검토가 필요하다.

참고문헌

- [1] Lees, F.P., *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 2, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, (1996)
- [2] Bjerketvedt, D., J.R. Bakke and K. van Wingerden, "Gas Explosion Handbook", *J. of Hazardous Materials*, **52**, 1-150, (1997)
- [3] Stephson, R.M. *Flash Points of Organic and Organometallic Compounds*, Elsevier Science Publishing Co. Inc., (1987)
- [4] Montemayor, R.E., J.E. Rogerson, J.C. Colbert and S.B. Schiller, "Reference Verification Fluids for Flash point Determination", *J. of Testing and Evaluation*, **27**(6), 423-427, (1999)
- [5] Britton, L.G., "Two Hundred Years of Flammable Limits", *Process Safety Progress*, **21**(1), 1-11, (2002)
- [6] Hilado, C.J. and S.W. Clark, "Discrepancies and Correlations of Reported Autoignition Temperatures", *Fire Technology*, **8**, 218-227, (1972)
- [7] Lide, D.R., *Handbook Chemistry and Physics*, 76th ed., CRC Press, (1996)
- [8] NFPA, *Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids*, NFPA 325M, National Fire Protection Association, (1991)
- [9] SFPE, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd ed., Society of Fire Protection Engineers, (1995)
- [10] 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)
- [11] Babrauskas, V., *Ignition Handbook*, Fire Science Publishers, Society of Fire Protection Engineers, (2003)
- [12] Dean, J.A., *Lange's Handbook of Chemistry*, 14th ed. McGraw-Hill, (1992)
- [13] Lewis, R.J., *SAX's dangerous Properties of Industrial Materials*, 11th ed., John Wiley & Son, Inc., New Jersey, (2004)
- [14] KOSHA, /www.kosha.or.kr/msds/msdsMain.do?menuId=69
- [15] Fluka Chemie AG., Catalog 1986-87, CH-9470, Bucks/Switzerland.
- [16] Hilado, C.J. and S.W. Clark, "Autoignition Temperature of Organic Chemicals", *Chemical Engineering*, **4**, 75-80, (1972)
- [17] Scott, G.S., G.W. Jones and F.E. Scott, "Determination of Ignition Temperature of Combustible Liquids and Gases", *Analytical Chemistry*, **20**(3), 238-241, (1948).
- [18] Zabetakis, M.G., A.L. Furno and G.W. Jones, "Minimum Spontaneous Ignition Temperature of Combustibles in Air", *Industrial and Engineering Chemistry*, **46**(10), 2173-2178, (1954)
- [19] Ha, D.M., "The Evaluation of Hazard by Measurement of Combustible Characteristics of n-Tetradecane", *J. of the Korean Society of Safety*, **27**(5), 70-76, (2012)
- [20] Gmehing, J., Onken, U., and Arlt, W., *Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection*, Deutsche Gesellschaft fur Chemisches Apparatewesen, (1980)
- [21] Ha, D.M., "The Measurement of Combustible Characteristics of n-Undecane", *J. of the Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, **27**(2), 11-17, (2013)
- [22] Semenov, N. N., *Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity*, Vol. 2, Princeton University Press, Princeton, N.J., (1959)