

노말에틸아닐린의 화재 및 폭발 특성치의 측정 및 예측

하동명[†]

세명대학교 보건안전공학과
27136 충북 제천시 세명로 65
(2018년 2월 20일 접수, 2018년 5월 14일 수정본 접수, 2018년 5월 16일 채택)

Measurement and Prediction of Fire and Explosion Properties of n-Ethylaniline

Dong-Myeong Ha[†]

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, 65, Semyeong-ro, Jecheon-si, Chungcheongbuk-do, 27136, Korea

(Received 20 February 2018; Received in revised form 14 May 2018; accepted 16 May 2018)

요 약

공정안전을 위해서는 산업현장에서 취급하는 가연성물질의 화재 및 폭발 특성치가 있어야 한다. 사업장에서 사고를 예방하기 위한 연소특성치로 인화점, 연소점, 전폭발한계, 최소자연발화온도 등을 들 수 있다. 그러나 물질보건안전자료(MSDS)에서 제시하고 있는 특성치는 문헌들에 따라 달리 제시되고 있는데, 가연성물질을 안전하게 처리, 수송, 취급하기 위해서는 정확한 연소특성치가 필요하다. 화학산업에서 중간제품, 고무약품 등의 원료로 다양하게 사용되고 있는 노말에틸아닐린을 선정하였다. 그리고 노말에틸아닐린 안전한 취급을 위해서 인화점, 연소점 그리고 최소자연발화온도를 측정하였다. 노말에틸아닐린의 폭발하한계는 실험에서 얻어진 하부인화점을 이용하여 계산하였다. 노말에틸아닐린의 Setaflash 밀폐식은 77 °C, Pensky-Martens 밀폐식에서는 82 °C 그리고 Tag 개방식에서는 85 °C, Cleveland 개방식에서는 92 °C로 측정되었다. ASTM E659 장치에 의한 측정된 노말에틸아닐린의 최소자연발화온도는 396 °C로 측정되었다. Setaflash 밀폐식에 의해 측정된 노말에틸아닐린의 하부인화점 77 °C에 의한 폭발하한계는 1.02 vol%로 계산되었다. 본 연구에서는 밀폐식에 의해 측정된 노말에틸아닐린의 하부인화점을 이용하여 폭발하한계의 예측이 가능하였다. 본 연구에서 제시된 노말에틸아닐린의 발화온도와 발화지연시간의 관계식은 노말에틸아닐린의 다른 발화온도에서도 발화지연시간의 예측이 가능해졌다.

Abstract – For process safety, fire and explosion characteristics of combustible materials handled at industrial fields must be available. The combustion properties for the prevention of the accidents in the work place are flash point, fire point, explosion limit, and autoignition temperature (AIT) etc.. However, the combustion properties suggested in the Material Safety Data Sheet (MSDS) are presented differently according to the literatures. The accurate combustion properties are necessary to safely treatment, transportation and handling of flammable substances. In the chemical industries, n-ethylaniline which is widely used as a raw material of intermediate products and rubber chemicals was selected. For safe handling of n-ethyl aniline, the flash point, the fire point and the AIT were measured. The lower explosion limit (LEL) of n-ethylaniline was calculated using the lower flash point obtained in the experiment. The flash points of n- ethylaniline by using the Setaflash and Pensky-Martens closed-cup testers measured 77 °C and 82 °C, respectively. The flash points of n-ethylaniline using the Tag and Cleveland open cup testers are measured 85 °C and 92 °C, respectively. The AIT of the measured n-ethyl aniline by the ASTM E659 apparatus was measured at 396 °C. The LEL of n-ethylaniline measured by Setaflash closed-cup tester at 77 °C was calculated to be 1.02 vol%. In this study, it was possible to predict the LEL by using the lower flash point of n-ethylaniline measured by closed-cup tester. The relationship between the ignition temperature and the ignition delay time of the n-ethylaniline proposed in this study makes it possible to predict the ignition delay time at different ignition temperatures.

Key words: Process safety, MSDS (Material Safety Data Sheet), n-Ethylaniline, Flammable substances, Explosion characteristics

[†]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.

1. 서 론

화학기술자들은 사업장에서 화재 및 폭발의 재해를 방지하기 위해 취급물질의 화재 및 폭발 특성치, 공정의 특성 그리고 재해를 줄이기 위한 경감 대책을 알고 있어야 한다. 그러나 산업현장의 재해 가운데 가연성 취급 물질에 대한 연소특성치를 정확히 이해하지 못해서 생기는 사례가 너무나 많다. 따라서 인명 안전과 설비 보존을 위해서는 사업장에서 취급하고 있는 위험물질의 연소특성치의 파악이 무엇보다 중요하다. 위험에 관련된 연소특성치는 수 없이 많지만 가장 대표적으로 인화점, 연소점, 폭발한계, 최소자연발화온도, 연소열, 최소발화에너지 등을 들 수 있다[1,2].

인화점은 하부 및 상부인화점으로 구분되며, 특히 하부인화점은 소방법, 산업안전보건법, GHS (Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals) 등에서 취급물질의 위험특성을 구분하는데 지표로 사용되고 있다. 하부인화점은 가연물을 가열할 때 나온 가연성 증기가 연소(폭발)범위 하한에 달하는 최저온도로 정의하고 있으며, 연소점(fire point)은 인화 이후 화염이 5초 이상 지속시킬 수 있는 온도로서 위험물에 따라 인화점과 차이가 있다. 폭발한계는 가연성가스(혹은 증기)가 발생하는 공정에서 재해를 예방하기 위한 특성치로서, 가연성가스 혹은 증기가 공기와 혼합되었을 경우 어느 일정온도 범위에서 폭발하고 그 이하나 그 이상에서는 폭발하지 않는 데 이 범위를 폭발한계라고 한다. 폭발한계는 다른 연소특성치보다 실험이 어려운 경우가 많으며, 이런 경우에는 인화점을 이용하여 폭발한계의 예측이 가능하다. 자연발화온도는 가연혼합기의 온도를 차츰 높여가면 외부로부터 불꽃이나 화염 등이 가까이 접근하지 않더라도 발화하게 되는데 그때의 최저온도를 최소자연발화온도(Autoignition Temperature, AIT)라 한다[2,3].

인화점의 연구로 Mitchell 등[4]은 노말부틸아민과 사이크로헥실아민의 경우 문헌에 따라 약 11 K 차이가 있음을 조사하였고, Chen 등[5]은 가연성액체의 AIT 평가에서 문헌들에 제시된 AIT를 고찰한 결과 2-Butanone은 문헌에 따라 약 110 K 이상의 차이가 있음을 확인하였다. Peper 등[6]은 산업현장에서 널리 사용되고 있는 Phenol은 문헌에 따라 약 110 K 차이가 있음을 보고하였다. Britton [7]은 메탄에서 노말부탄까지 폭발한계의 기존 자료들을 분석한 결과 문헌들 마다 차이가 있음을 파악하고, 공정 안전을 위해서 제시한 자료의 충분한 고찰이 필요하다고 하였다. 특히 공정에서 사용되고 있는 혼합물의 연소특성치 연구를 위해서는 순수물질의 정확한 특성치 연구가 반드시 이루어져야 한다.

본 연구에서는 에틸알코올에 아닐린을 원료로 여러 단계의 반응을 거쳐서 만드는 노말에틸아닐린(n-Ethylaniline)을 선정하였고, 동의어로 ethylphenylamine 혹은 n-ethylaminobenzene 이라고 한다. 노말에틸아닐린은 아닐린냄새와 비슷하고 알코올 및 대부분의 유기용매에는 녹으나 물과 에테르 등에는 녹지 않는다. 그리고 노말에틸아닐린은 아조염료 및 트리페닐메탄계 염료의 중간체로 주로 이용되고 있으며, 트리페닐메탄계, 아조계 염료의 중간체, 고무약품 등의 원료로 사용되고 있다. 특히 노말에틸아닐린은 고온(300 °C)과 고압(100 기압)에서 만들어지므로 취급 시 주의를 반드시 기울여야 한다.

본 연구에서는 노말에틸아닐린의 하부인화점과 AIT를 측정하여 기존의 자료들과 비교하였으며, 연소점은 새로운 자료로 제시하였다. 본 연구에서 측정된 하부인화점을 이용하여 계산한 폭발한계를

기준에 제시된 값들과 비교 고찰하였다. 제시된 노말에틸아닐린의 실험 자료와 폭발한계에 예측값은 이를 사용하는 공정에서 안전을 확보하는데 활용되기를 기대하며, 다른 가연성물질의 위험성 평가와 현재 사용되고 있는 MSDS (Material Safety Data Sheet)의 개선에 도움을 주고자 한다.

2. 노말에틸아닐린의 위험성평가를 위한 물리적 및 연소특성치 분석

2-1. 노말에틸아닐린의 물리적 특성

산업현장에서 중간 재료로 널리 이용되고 있는 노말에틸아닐린의 물리적 특성치를 Table 1에 나타내었다[8,9].

각 국은 제공하고 있는 유해 위험물질에 대한 MSDS (material safety data sheet)의 연소특성치는 최근에 실험에서 얻은 측정값과 다른 경우가 많다. 이는 물질에 대한 과거의 장치로 부터 측정된 연소특성치를 그대로 사용하는 이유가 될 수 있다.

노말에틸아닐린은 산업안전보건법에 의한 규제에 의해 작업환경 측정대상물질, 관리대상유해물질, 특수건강진단대상물질, 노출기준 설정물질이며, 화학물질관리법에서는 유독물질, 위험물안전관리법은 제4류위험물의 제3석유류(비수용성액체, 지정수량 2000 L), 폐기물관리법은 지정폐기물 등으로 규제하고 있는 위험성뿐만 아니라 유해성도 큰 물질이다. GHS의 인화성액체 분류기준에서는 Category 4 (인화점 60~93 °C)에 해당하는 물질이며, NFPA (National Fire Protection Association)에서는 보건위험성 3, 화재위험성 2, 반응위험성 0으로서 다른 가연성물질에 비해 화재위험성은 크나, 반응성은 적은 편이다.

노말에틸아닐린은 상온에서 인화의 위험성은 없으나, 가열하면 연소위험성이 커진다. 주로 고온 공정에서 사용됨으로 주의가 반드시 필요하다. 연소하면서 질소산화물, 아닐린 등의 유독성가스를 발생시킨다. 그리고 공기 또는 햇빛에 의해 분해될 수 있고 산화제 등 여러물질과 반응을 한다. 따라서 고온, 강산화제 등과 접촉을 피하고 공기에 노출되지 않도록 해야 한다.

노말에틸아닐린의 증기는 공기보다 약 4.2배 정도 무거우므로 누출을 방지하기 위한 방폭 조치를 강구해야 하고, 소화약제로는 물 분무, 이산화탄소, 건조분말, 폼 등을 사용할 수 있다.

2-2. 노말에틸아닐린의 화재 및 폭발 특성치의 분석

공정 상에서 가연성물질을 취급할 때는 해당 물질에 대한 정확한

Table 1. Physical properties of n-ethylaniline

Properties	Component	
		n-Ethylaniline
CAS number		103-69-5
Molecular formula		C ₈ H ₁₁ N
Boiling point		204.5 °C
Melting point		-60 °C
Vapor pressure		1 mmHg (at 38.5 °C)
Viscosity		2.047mPa·s (at 25 °C)
Solubility (Water)		0.0241g/L (at 25 °C)
Critical temperature		425 °C
Vapor density (Air=1)		4.18
Specipic gravity (Water=1)		0.958 (at 20 °C)

Table 2. Comparison of flash points, AITs and explosion limits of n-ethylaniline by several references

References	Flash points (°C)	AITs (°C)	LEL - UEL (vol%)
KOSHA MSDS [10]	85 (OC)	480	1.6~9.5
Sigma [11]	85	-	1.6~9.5
NFPA [12]	85 (OC)	-	-
SAX [13]	85	-	-
Lange [14]	85	-	-
Stephenson [15]	85 (OC)	-	-

연소특성치를 측정하여 사용하거나, 측정이 어려운 경우는 문헌에 제시된 정확한 자료를 이용해야 재해를 예방할 수 있다. 그러나 문헌에 제시된 자료가 충분히 검증되지 않는 경우가 많고, 제시되었다고 하더라도 자료들마다 각기 다른 값들을 나타내고 있는 물질들이 많다. 따라서 취급 물질의 정확한 화재 및 폭발 특성치의 연구는 공정안전에서 가장 중요하다[1,2].

일반적으로 인화점은 밀폐식(Closed-cup, CC)과 개방식(Open cup, OC) 장치에 의해 측정되며, 실험값은 재료의 순도 등 여러 변수에 의해 달라질 수 있다. 밀폐식은 Setafash와 Pensky-Martens 등이 있으며, 개방식으로는 Tag와 Cleveland 등을 들 수 있으며, 개방식 장치는 연소점의 측정이 가능하다. 폭발한계는 하한계(LEL)와 상한계(UEL)으로 구분되며 실험값 실험조건 및 방법 등에 의해 각기 다른 값을 갖기 때문에 문헌에 따라 다른 값들이 제시되는 경우가 많다. AIT도 역시 순도, 시료량 등 여러 조건에 따라 상당히 다른 값들로 측정된 사례가 많다[2].

노말에틸아닐린의 연소특성치의 평가를 위해서 인화점, 연소점 그리고 AIT를 측정하기에 앞서 기존 문헌들에 제시된 특성치의 파악이 필요하여 한국산업안전보건공단(KOSHA)의 MSDS를 비롯해 여러 문헌들에서 제시한 자료를 정리하여 Table 2에 나타내었다 [10-15].

노말에틸아닐린의 인화점은 KOSHA의 MSDS를 비롯해 지금까지 제시된 모든 문헌에서 동일하게 85°C를 제시하고 있는데 이는 한 문헌에서 그대로 인용된 것으로 보인다. 그리고 AIT는 유일하게 KOSHA의 MSDS에서 480°C로 제시하고 있으며, 폭발한계는 KOSHA의 MSDS와 Sigma에서 동일한 값을 제시하고 있는데 이 역시 한 문헌에서 인용된 것으로 판단된다.

노말에틸아닐린의 경우 다른 가연성물질에 비해 연소특성치의 자료가 적게 제시되었을 뿐만 아니라 하나의 문헌에서 인용하여 사용된 것으로 보이기 때문에 노말에틸아닐린을 사용하는 공정에서 안전한 관리를 위해서는 실험적 연구가 필요하다고 본다.

3. 실험재료 및 측정 장치

3-1. 재료

본 연구에서 사용된 노말에틸아닐린(TCI, 99%, Japan)은 별도의 정제 과정없이 사용하였다.

3-2. 인화점과 연소점 측정

노말에틸아닐린의 인화점은 밀폐식인 Setafash (ASTM D3278)와 Pensky-Martens (ASTM D93), 개방식인 Tag (ASTM D1310)와 Cleveland (ASTM D92)를 사용하였다. 연소점은 Tag와 Cleveland

개방식을 이용하였으며, 이들 장치의 사진 및 구조 등은 그동안 여러 문헌들에서 제시하였다[16].

각 장치에 의한 인화점과 연소점의 측정은 3회 혹은 5회를 실시하였다. 3회 동안 동일한 값으로 측정되면 그대로 채택하였고, 만일 3회 측정에서 동일한 측정값이 되지 않은 경우는 5회까지 측정하여 3회 이상 동일하게 측정된 값을 채택하였다[16].

3-3. 자연발화온도와 발화지연시간 측정

노말에틸아닐린의 발화온도와 발화지연시간 그리고 AIT의 측정은 ASTM E659를 사용하였으며, 발화지연시간에 1 sec대 까지 측정하였다. 이는 발화온도와 지연시간의 관계를 이용하여 활성화에너지를 계산하기 위해서이다. 장치는 크게 로, 온도 조절기, 열전대, 플라스크, 주사기, 거울, 에어건 등으로 구성되었으며, 실험은 ASTM 규정에 따라 측정하였다[16].

4. 결과 및 고찰

4-1. 노말에틸아닐린의 인화점과 연소점 측정 그리고 하부인화점에 의한 폭발하한계의 계산

밀폐식(CC)인 Setafash과 Pensky-Martens를 사용하여 인화점을 측정하였고, 개방식(OC)인 Tag와 Cleveland을 이용하여 인화점과 연소점을 측정하였다. 측정된 인화점과 연소점을 이용하여 계산된 폭발하한계를 Table 3에 나타내었다.

노말에틸아닐린은 Setafash에서는 77°C, Pensky-Martens는 82°C로 측정되었다. Tag는 85°C 그리고 Cleveland에서는 92°C로 측정되었고, Tag에서 인화점과 연소점은 동일하였고, Cleveland의 연소점은 101°C로 측정되었다.

본 연구에서 Setafash로 측정된 하부인화점 77°C는 Table 2에 제시된 개방식 인화점보다 8°C 낮게 측정되었으며, Tag 개방식에서 측정된 85°C는 기존의 문헌값과 일치하였다. 따라서 공정안전을 위해서는 Setafash의 측정값인 77°C를 활용하는 것이 타당하다고 판단된다.

측정된 인화점과 연소점에 의한 폭발한계를 계산하기 위해 Antoine 식을 사용하였다[14].

$$\log P^f = 7.4228 - \frac{1903.4}{(t + 214.3)} \quad (1)$$

여기서, P^f 는 증기압(mmHg)이고, t 는 온도(°C)이다.

Setafash에 의해 측정된 하부인화점 77°C를 식 (1)에 대입한 결과 폭발하한계는 1.02 vol%로 계산되었다. Table 2에 제시된 KOSHA의 MSDS와 Sigma의 문헌값인 1.6 vol% 보다 약 0.58 vol% 낮게 계산되었다. 따라서 기존에 제시한 폭발하한계의 자료는 재평가가 필요하다고 본다. Tag와 Cleveland에서 측정된 연소점의 폭발하한계는 각각 1.52 vol%와 3.20 vol%로 계산되었다.

그리고 노말에틸아닐린은 고온인 300°C에서 운전을 하고 있으므로 폭발하한계의 기존에 제시된 값보다는 낮은 폭발하한계를 갖게 된다. 따라서 300°C에서 폭발하한계는 온도의존식을 이용하여 계산한 후 이를 공정에 적용해야 할 것으로 본다. 일반적으로 폭발하한계의 온도의존식은 Zabetakis [17]가 제시한 식을 사용하고 있으며, 식은 다음과 같다.

Table 3. Comparison of estimated lower explosion limits (LEL) by experimental lower flash points and fire points for n-ethylaniline

Testers	Experiment (°C)		Estimation(vol%)	
	Lower flash points	Fire points	LEL by lower flash points (vol%)	LEL by fire points (vol%)
Setaflash (CC)	77	-	1.02	-
Pensky-Martens (CC)	82	-	1.31	-
Tag (OC)	85	85	1.52	1.52
Cleveland (OC)	92	101	2.31	3.20

$$L_i(t) = L_{25}[1 - 7.21 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (2)$$

KOSHA의 MSDS와 Sigma에서 제시한 폭발하한계 1.6 vol%을 식 (2)에 300 °C를 적용한 결과 1.28 vol%로 기존에 25 °C에서 제시한 값보다 약 0.3 vol% 낮게 계산되었다. 따라서 고온의 공정에서 안전을 확보하기 위해서는 온도의존성에 대한 폭발하한계를 고찰하여 방폭 설계를 해야 한다.

본 연구에서 제시한 인화점 자료와 측정된 하부인화점에 의한 폭발하한계의 계산 방법 그리고 다른 가연성물질의 폭발하한계의 온도의존성에 대한 연구에 도움을 줄 것으로 본다. 또한 본 연구에서 제시한 노말에틸아닐린의 연소점은 저장 탱크의 누출사고의 방호 목적으로 화재 방호에 활용할 수 있다.

4.2. 노말에틸아닐린의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계 및 활성화에너지의 계산

노말에틸아닐린의 AIT를 유일하게 제시한 KOSHA의 MSDS 460 °C를 근거로 실험을 하였다. 460 °C보다 30 °C 낮은 430 °C에서 실험한 결과 2.89 sec에서 발화되어, 다시 30 °C 낮은 400 °C에서 실험한 결과 5.15 sec에서 발화되었다. 다시 30 °C 낮은 370 °C에서 실험했을 때 비발화되어 다시 10 °C 상승시켜 실험하였으나 역시 비발화되었다. 380 °C를 근거로 1~2 °C 상승시켜 실험한 결과 AIT 396 °C에서 7.47 sec를 찾았다. 이를 근거로 5~10 °C 상승시켜 실험한 결과 410 °C에서는 4.57 sec, 420 °C에서는 3.66 sec 그리고 440 °C에서는 1.12 sec에 발화하였다. 노말에틸아닐린의 자연발화온도와 발화지연시간을 Table 4에 나타내었다.

본 연구에서 측정된 노말에틸아닐린의 AIT 396 °C는 KOSHA의 MSDS 460 °C 보다 무려 64 °C 낮게 측정되었으므로 이를 취급하는 공정에서는 본 연구 자료를 근거로 새로운 방호 시스템을 구축해야 할 것으로 본다.

노말에틸아닐린의 활성화에너지(E, activation energy)는 실험의 발화온도와 발화지연시간을 이용하여 회귀분석을 통해서 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\log \tau = -10.12 + 7351.70 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

Table 4. Comparison of experimental and predicted ignition delay time by the AIT for n-ethylaniline

No.	T [K]	τ_{exp} [s]	$\ln \tau_{exp}$	τ_{est} (Eq. 3)
1	669	7.47	2.01089	7.35
2	673	5.15	1.63899	6.32
3	683	4.57	1.51951	4.38
4	693	3.66	1.29746	3.07
5	703	2.89	1.06126	2.16
6	713	1.12	0.11333	1.54
A.A.D.	-	-	-	0.54

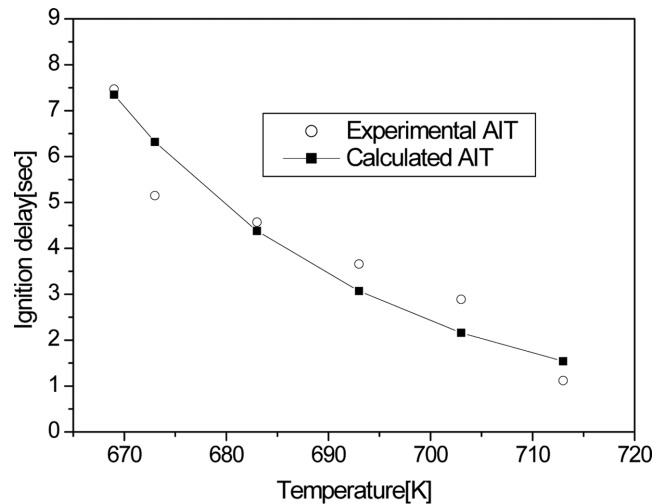


Fig. 1. Comparison between the experimental and calculated ignition delay times of n-ethylaniline.

여기서 τ 는 발화지연시간이고, T는 발화지연시간에서의 발화온도 [K]이다.

측정된 발화지연시간과 식 (3)에 의해 예측된 발화지연시간을 비교하여 Table 4와 Fig. 1에 나타내었다.

본 연구에서 제시한 식 (3)을 이용하여 실험에서 얻지 못한 다른 발화온도에서 발화지연시간의 예측이 가능해졌다. 제시된 식을 활용하여 공정안전 및 화재 방호에 적용할 수 있다.

발화지연시간 측정값과 계산값의 차이는 평균절대오차(AAE, Average Absolute Error)와 결정계수(r^2)를 사용하였다[2,18].

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

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

여기서 τ_{est} 는 발화지연시간 계산값, τ_{exp} 는 측정값, N은 자료수 그리고 r^2 은 결정계수이다[16].

식 (2)에 의한 계산값과 실험값의 AAE는 0.54 sec, 결정계수는 0.89로서 실험값과 예측값은 모사성이 나타나고 있다.

활성화에너지(E)를 계산하기 위해서 화재 및 폭발 분야에서 많이 적용하는 Semenov가 제시한 식을 사용하였다[19].

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + B \quad (6)$$

본 연구에서 얻은 식 (3)과 식 (5)의 관계를 통해 활성화에너지는 139.90 kJ/mol로 계산되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 아조염료 및 트리페닐메탄계 염료, 트리페닐메탄계, 아조계 염료의 중간체 그리고 고무약품 등의 원료로 사용되고 있는 노말에틸아닐린의 하부인화점, 연소점 그리고 최소자연발화온도(AIT)를 측정하여 기존 제시된 자료들과 비교하였으며, 측정된 하부인화점 그리고 연소점을 이용하여 폭발하한계를 계산하였다.

(1) 밀폐식 측정 장치인 Setaflash의 하부인화점은 77 °C 이고, Pensky-Marten은 82 °C, 개방식 장치인 Tag는 85 °C 그리고 Cleveland는 92 °C로 측정되었다.

(2) Tag에 의한 연소점은 인화점과 동일하였으나, Cleveland 개방식에 의한 연소점은 101 °C로 측정되었다.

(3) Setaflash에 의한 하부인화점 77 °C를 이용하여 계산된 폭발하한계는 1.02 vol%로서, 기존의 문헌값인 1.6 vol%보다 낮게 계산되었다.

(4) 노말에틸아닐린은 고온인 300 °C에서 운전을 하고 있으므로 폭발하한계의 온도의존성을 적용하여 운전을 해야 한다.

(5) 노말에틸아닐린의 최소자연발화온도는 397 °C로서 기존에 제시된 460 °C보다 약 60 °C 낮게 측정되었다.

(6) Semenov식을 이용한 노말에틸아닐린의 활성화에너지(E)는 139.90 kJ/mol로 계산되었다.

(7) 본 연구에서 측정된 발화온도와 발화지연시간의 관계식을 이용하여 실험에서 얻지 못한 다른 발화온도에서의 발화지연시간의 예측이 가능해졌다.

감 사

이 논문은 2017년 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

Reference

- Kim, W. K., Kim, J. H., Ryu, J. W. and Choi, J. W., "The Measurement of the Explosion and the Minimum Oxygen Concentration of Gasoline According to Variation in Octane Number," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(5), 618-622(2017).
- Ha, D. M., "The Measurement and Prediction of Combustible of Dimethylacetamide (DMAc)," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(5), 553-556(2014).
- Ha, D. M., "The Measurement and Prediction of the Combustible Properties of Propionic Anhydride," *J. Korean Institute Gas*, **20**(3), 66-72(2016).
- Mitchell, J. W., Vratsanos, M. S., Hanley, B. F. and Parekh, V. S., "Experimental Flash Point of Industrial Amines," *J. Chem. Eng. Data.*, **44**, 209-211(1999).
- Chen, C. C. and Hsieh, Y. C., "Effect Of Experimental Conditions on Measuring Auto-ignition Temperature of Liquid Chemicals," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**(12), 5925-5932(2010).
- Peper, S., Dohrman, R. and Konejung, K., "Methods for the Prediction of Thermodynamics Properties of Polyurethane Raw Materials Mixture," *Fluid Phase Equilibria*, **424**, 137-151(2016).
- Britton, L. G., "Two Hundred Years of Flammable Limits," *Process Safety Progress*, **21**(1), 1-11(2002).
- Lide, D. R., *Handbook Chemistry and Physics*, 76th ed., *CRC Press*(1996).
- Perry, R. H. and Green, D. W., *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, 7th ed., *McGraw-Hill*(1997).
- KOSHA, <http://msds.kosha.or.kr/kcic/msdsdetail.do>.
- 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).
- NFPA, *Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids, NFPA 325M, National Fire Protection Association*(1991).
- Lewis, R. J., *SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials*, 11th ed., *John Wiley & Son, Inc.*(2004).
- Dean, J. A., *Lange's Handbook of Chemistry*, 14th ed. *McGraw-Hill*(1992).
- Stephenson, S. M., *Flash Points of Organic and Organometallic Compounds*, *Elsevier*(1987).
- Ha, D. M., "Measurement and Prediction of Fire and Explosion Characteristics of n-Butylacetate," *J. Korean Society of Safety*, **32**(5), 25-31(2017).
- Zabetakis, G. M., "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors," *US Bureau of Mines, Bulletin*(1965).
- 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).
- Semenov, N. N., *Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity*, Vol. 2, *Princeton University Press, Princeton, N.J.*(1959).