

아세톤의 화재 및 폭발 특성치 측정 및 고찰

하 동 명

세명대학교 보건안전공학과
(2010. 4. 20. 접수 / 2010. 7. 23. 채택)

The Measurement and Investigation of Fire and Explosion Properties for Acetone

Dong-Myeong Ha

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University
(Received April 20, 2010 / Accepted July 23, 2010)

Abstract : For the safe handling of acetone, the flash point, the explosion limit at 25°C and the temperature dependence of the explosion limits were investigated. And the AIT for acetone were experimented. By using the literatures data, the lower and upper explosion limits of acetone recommended 2.5 vol% and 13.0 vol%, respectively. In this study, the lower flash points of acetone recommended -20°C. This study was determined relationship between the AITs and the ignition delay times by using ASTM E659-78 apparatus for acetone, and the experimental AIT of acetone was 565°C. The new equations for predicting the temperature dependence of the explosion limits of acetone is proposed. The values calculated by the proposed equations were a good agreement with the literature data.

Key Words : acetone, flash point, explosion limit, autoignition temperature, safety handling

1. 서론

사업 현장에서 취급하고 있는 각종 화학물질은 대부분 위험성을 내포하고 있어 보관·운송 및 취급 중에는 특별한 주의가 필요하고 있다. 그러나 위험물 취급에 있어 잘못된 자료를 적용함으로써 대형 사고를 유발할 뿐만 아니라, 사고 시 적절한 대응 조치가 이루어 지지 않아 2차 및 3차 재해로 확산되는 경우가 많다. 따라서 화학 공정의 안전을 위해서는 취급하는 가연성물질의 연소 특성 파악을 정확히 파악하는 것이 무엇보다 중요하다¹⁾.

산업현장에서 취급하고 있는 대부분의 물질의 화재 및 폭발 특성치는 한국산업안전공단에서 제공하고 있는 MSDS(Material Safety Data Sheet)를 통해 얻을 수 있다. 또한 잘 알려진 D/B인 미국화학공학회 DIPPR(Design Institute for Physical Property Data)²⁾에서 화재 및 폭발 파라미터(Fire and Explosion Parameters)인 폭발하한계와 상한계, 인화점, 최소자연발화온도, 연소열의 자료를 얻을 수 있다. 그리고 최근에는 여러 NFPA³⁾와 SFPE^{4,5)}에서

발간한 Handbook 등에서도 많은 특성치를 확보할 수 있다.

가연성물질의 연소특성치 가운데 폭발한계의 연구로 Britton⁶⁾는 과거 200여 년 동안 연구된 메탄을 비롯해 가연성가스들에 대한 폭발하한계값을 고찰하였다. Abdel-Aal 등⁷⁾은 수소, 가솔린 그리고 메탄의 연소특성을 비교하여 수소를 기준으로 상대적 안전도를 하였다. 또한 하⁸⁻¹¹⁾는 메탄, 프로판, 수소 그리고 MEK의 연소특성치 측정 및 고찰을 통해 유용한 화재 및 폭발 자료를 제공하였다.

재해 예방의 중요성을 인식하면, 완전하지 않은 예측식을 사용하기보다는 실험에 의해 확인하는 것이 바람직하나, 부득이 하게 실험을 할 수 없는 경우는 기존의 자료를 사용하거나, 예측식을 사용하여 취급 물질에 대한 위험성평가가 가능하다. 실제와 가까운 예측식을 사용하는 것은 실험에 소요되는 시간, 노력 및 경비를 줄일 수 있으며, 그리고 제한된 실험을 할 수밖에 없는 경우 실험에서 얻어진 측정 결과의 신뢰성 고찰에 도움을 줄 수 있다¹¹⁾.

본 연구에서는 산업현장에서 중요한 용제로서 물과 알코올 등에 매우 잘 녹고, 플라스틱이나 셀

플로오스 도료 제작 및 유기 합성의 원료로 사용되는 있는 아세톤에 대해 자연발화온도를 측정하여 기존의 자료들과 비교 고찰하였다. 또한 아세톤의 인화점과 폭발한계는 여러 문헌에 제시된 자료를 고찰하여 공정안전에 타당한 자료를 제시하고, 폭발한계의 온도 의존성에 대해서는 새로운 예측식을 제시하였다. 또한 본 연구를 통해 MSDS DB의 최신화(up-date)에 유효한 정보를 제공함으로써 아세톤으로 인한 산업 재해예방 감소에 기여하고, 다른 화학물질의 위험성평가 방법론으로 활용하는데 목적이 있다.

2. 아세톤의 연소특성치 선택 및 위험성

2.1. 자료선택

각 국은 사업장에서 취급하는 유해·위험물질에 대한 안전한 취급, 처리, 수송 및 보관을 위해 MSDS 자료를 제공하고 있다. 사업장에서 발생될 수 있는 그리고 재해를 예방하기 위해 관련 기관 및 단체들에서도 많은 유해·위험성 자료들을 제공하고 있다. NFPA³⁾는 NFPA 325M 코드에서 가연성가스, 액체 및 휘발성 고체 등 수 백 종의 특성치를 제시하고 있으며, 또한 SFPE^{4,5)}는 “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”와 “Ignition Handbook” 두 종에서 약 500여종의 물질에 대한 화재 및 폭발 특성치를 제시하고 있다. 그리고 UN에서는 육상과 해상 수송안전을 위해 물리적 및 화재·폭발 위험성의 경우 UN IMDG(United Nations International Maritime Dangerous Goods) 및 UNRTDG(United Nations Recommendations on the Transport of Dangerous Goods) 등의 자료를 제공하고 있다¹¹⁾.

2.2. 아세톤의 화재 및 폭발 위험성

투명하고 무색의 휘발성 액체인 아세톤은 알코올, 에테르, 벤젠, 클로로포름 등에 잘 용해되고, 열 및 불꽃에 노출 시 화재 위험성 크다. 증기는 공기보다 무거우며 먼 거리를 이동하여 점화원에 도달할 후 역화될 수 있으며, 증기와 공기 혼합물은 폭발성과 독성을 지니고 있다. 반응성은 상온 및 상압에서 안정되며, 증기에는 열, 스파크, 불꽃 또는 기타 점화원과 접촉을 피해야하고, 산, 아민, 할로젠, 산화제 등과 접촉을 피해야 한다. 그리고 브로모포름과 클로로포름과는 염기 존재 시 급격히 반응하며, 헥사클로로멜라민, 과산화수소 그리고 질산과는 발화 및 폭발 가능성이 있다.

3. 아세톤의 화재·폭발 안전 특성치 분석

3.1. 아세톤의 폭발한계와 폭발한계온도 의존성

3.1.1. 화염전파 방향에 따른 폭발한계

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. 그러나 화염이 위에서 아래쪽으로 내려가는 하향전파에서 폭발하한계는 높아지고, 폭발상한계는 낮아서 폭발범위는 좁아진다. 수평전파에서는 중간값을 나타낸다.

아세톤의 폭발하한계와 상한계에 대해 화염전파 방향에 의한 폭발한계의 여러 값들과 구형폭발장치를 이용한 측정값들을 비교하여 Table 1에 나타내었다^{1,12)}.

아세톤의 폭발하한계와 상한계에 대해 CRC¹³⁾에서는 3~13Vol%, SFPE⁴⁾에서는 2.6~12.8Vol%로 제시하고 있다.

3.1.2. 폭발한계의 온도 의존성

화학물질을 취급하는 공정에서는 일반적으로 표준상태에서 운전하는 경우보다 고온이나 고압에서

Table 1. Explosion limits by means of the direction of flame propagation for acetone in air

Vessel state	Direction of propagation	Tube[cm or L]		Explosion Limits [vol%]		
		Diameter	Length	Lower	Upper	
Confined tube	Upwards	10.2	96	2.55	12.8	
		10.0	75	2.15	9.7	
		7.5	150	2.89	11.8	
		5.0	150	2.20	9.5	
		5.0	10	2.7	12.6	
		2.5	60	2.30	7.5	
	Horizontal	10.0	75	2.20	9.5	
		7.5	150	2.92	11.9	
		5.0	150	2.25	9.3	
		2.5	150	2.40	6.7	
		Downwards	10.0	75	2.35	8.5
			7.5	150	2.93	8.6
	5.0		150	2.40	8.3	
	2.5		60	2.75	6.5	
	2.5		150	3.15	8.25	
Vertical tube	U.S. Bureau of Mines	1.5m	2.6	13.0		

운전하는 경우가 많다. 일반적으로 계의 온도가 증가할 경우 폭발하한계는 작아지고, 폭발상한계는 커져서 폭발범위가 넓어진다.

지금까지 연구된 폭발한계의 온도의존성을 살펴보면, Zabetakis 등¹⁴⁾은 Burgess-Wheeler 법칙을 이용하여 탄화수소의 폭발한계 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

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

또한 Zabetakis는 폭발하한계에서의 온도의존성을 고찰하기 위해 연소열, 폭발한계, 비열 그리고 폭발하한계에서의 화염온도 1,300℃라 가정하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25} [1 - 7.8 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (2)$$

Hustad 등¹⁵⁾은 탄화수소화합물의 폭발한계의 온도의존식을 다음과 같이 제시하였다.

$$L_i(t) = L_{25} [1 - 0.00085(t - 25)] \quad (3)$$

Ha¹⁶⁾는 4개의 식을 평균하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

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

최근에 Cashdollar¹⁷⁾은 다음과 같은 Burgess-Wheeler 식을 수정하여 고온에서의 폭발한계를 예측하는 식을 제시하였다.

$$C_T = C_{T_0} \left(\frac{273 + T_0}{273 + T} \right) [1 - 0.000072(T - T_0)] \quad (5)$$

여기서 C_T 는 온도 T 에서 질량농도[g/m³]에 의한 폭발하한계, C_{T_0} 는 온도 T_0 에서 폭발하한계, 온도는 ℃이다.

3.2. 아세톤의 인화점

인화점은 가연성액체의 화재 위험성을 나타내는 지표로, 하부인화점(Lower Flash Point)과 상부인화

Table 2. The flash point of several reported data for acetone

Compound	Flash point [°C]				
	NFPA	Sigma	SFPE	CRC	Lange
Acetone	-20	-17.2	-18(C.C.), -9(O.C.)	-20	-18(C.C.)

점(Upper Flash Point)으로 나뉘며, 일반적으로 인화점이란 하부인화점을 말한다. 인화점 측정 방법으로는 Tag방식, Pensky-Martens방식, Cleveland개방식, Abel방식 그리고 Setaflash방식 등이 있으며, 장치에 따라 다른 값을 갖는다. 아세톤에 대해 여러 문헌에서 얻은 인화점 자료를 정리하여 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 C.C.(Closed Cup)는 밀폐식, O.C.(Open Cup)는 개방식 장치이다.

3.3. 아세톤의 최소자연발화온도

자연발화온도는 다른 곳에 아무런 화원을 주지 않고 공기 속의 상온에서 주위로부터 발생하는 열로부터 가연물이 자발적으로 점화되는 온도를 말한다. 자연발화온도는 연료의 구조, 개시온도, 화학양론비, 용기의 크기, 촉매, 유속, 가연속도, 가열원의 종류 그리고 지연시간 등 많은 인자에 의존한다. 아세톤에 대해 NFPA Handbook을 비롯하여 여러 문헌 등에서 제시되고 있는 최소자연발화온도를 정리하여 Table 3에 나타내었다.

4. 아세톤의 화재 및 폭발 특성치 측정 및 고찰

4.1. 아세톤의 인화점

문헌들에서 제시된 아세톤의 하부인화점은 약 -17~ -20℃로 큰 차이를 보이지 않고 있으므로 약 -20℃를 사용하는 것이 바람직하다.

4.2. 아세톤의 폭발한계

폭발한계의 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 3vol%를, 상한계는 약 13vol%를 많이 인용하였다. 그러나 최근 문헌을 검토한 결과

Table 3. The autoignition temperature of several reported data for acetone

Compound	AITs[°C]						
	NFPA ³⁾	Sigma ¹⁸⁾	Sheldon ¹⁹⁾	SFPE ⁴⁾	CRC ¹³⁾	Scott ²⁰⁾	Marsdon ²¹⁾
Acetone	465	465	535	505	465	561	600

공정의 안전을 위해서는 하한계 2.5vol%, 상한계 약 13vol%를 추천한다.

아세톤의 폭발하한계의 자료들을 검증하기 위해 Antoine 식²²⁾을 사용하여 폭발하한계를 계산하였는데, 사용된 Antoine 식은 다음과 같다.

$$\log P^f = 7.11714 - \frac{1210.595}{(t + 229.664)} \quad (6)$$

여기서, P^f 는 증기압(mmHg)이고, t 는 온도(°C)이다.

식 (6)에 인화점 -20°C를 적용하면 폭발하한계는 약 2.89Vol%로서, 본 연구에서 추천 자료를 활용하여 공정에 적용하여도 될 것으로 본다.

4.2. 아세톤의 폭발하한계와 온도의 관계식

본 연구에서는 아세톤의 폭발하한계와 온도의 관계를 제시한 문헌 자료²³⁾를 이용하여 기존의 추산식에 의한 예측값과 새로운 추산식에 의한 예측값을 비교 고찰하였다. 본 연구에서 문헌 자료를 이용하여 얻은 새로운 추산식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25} [1.0024 - 1.4737 \times 10^{-4}(t - 25)] \quad (7)$$

식 (7)에 의한 추산값과 지금까지 널리 사용되고 있는 Zabetakis가 제시한 식 (2)에 의한 추산값을 문헌값과 비교하여 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서 제시한 식이 기존에 제시한 식보다 문헌값과 일치함을 보여주고 있다. 따라서 고온에서 아세톤을 사용하는 공정에서는 식 (7)을 사용하여 안전을 확보하는 것이 타당하다고 본다.

Table 4. Comparison of A.A.D. of the LEL with temperature variation using several correlation for acetone

No.	Temp.(°C)	LEL	Eqn.(2)	Eqn.(7)
1	25	2.67	2.67	2.68
2	100	2.40	2.53	2.39
3	200	2.00	2.33	2.00
A.A.D.	-	-	0.12	0.01

4.3. 아세톤의 최소자연발화온도 고찰

4.3.1. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 장치는 액체 화학물질의 자연 발화점 측정 장치로서 ASTM E659-78를 사용하였고, 장치는 Furnance, Temperature Controller, Thermocouple, Test Flask, Hypodermic Syringe, Mirror, Air

Gun으로 나눌 수 있다²²⁾. 실험 방법은 ASTM E659-78 규정에 맞게 진행하였으며, 발화지연시간을 2 초까지 측정하였는데, 이는 발화지연시간과 발화 온도의 관계를 이용하여 활성화에너지(Activation Energy)를 계산할 수 있기 때문이다.

4.3.2. 아세톤의 자연발화온도 고찰

아세톤의 최소자연발화온도에 대해 여러 문헌을 고찰한 결과 NFPA와 Sigma에서는 465°C로 가장 낮은 값을 제시하고 있고, Marsdon은 600°C로 가장 높은 값을 제시하고 있으며, 이들의 차이는 135°C 정도가 된다. 따라서 공정 안전을 위해서는 보다 많은 실험적 연구가 필요하다.

본 연구에서 아세톤의 발화지연시간과 발화온도를 ASTM E659-78 장치를 이용하여 측정하였다.

본 실험에서는 563°C에서 3번의 측정하였으나 발화가 일어나지 않았으며, 2°C 상승시켜 565°C에서 실험한 결과 비교적 짧은 시간인 11.589sec에서 발화가 시작되어 5-10°C 상승시켜 실험한 결과 660°C에서 1.89sec에 발화하였다. 측정된 최소자연발화온도 565°C로서 Scott가 제시한 561°C과 거의 일치하였다.

본 실험에서 얻은 자연발화온도와 발화지연시간의 자료를 이용하여 회귀분석(Regression)한 결과 다음과 같은 예측식을 제시할 수 있다.

$$\ln \tau = -14.57483 + 14276.88 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (8)$$

식 (8)에 의한 예측된 발화지연시간들을 실험값과 비교하여 Table 5와 Fig. 1에 나타내었다. 또한 식 (8)에 의한 예측값과 실험값 사이의 결정계수 (R^2)는 0.97로서 실험값과 일치하고 있다.

Table 5. Comparison of experimental and calculated delay time by autoignition temperature for acetone

No.	t[°C]	T[K]	τ_{exp} [s]	$\ln \tau_{exp}$	τ_{pred} (Eq. 8)
1	565	838.15	10.92	2.3906	11.69
2	580	853.15	9.10	2.2083	8.67
3	590	863.15	7.72	2.0438	7.14
4	600	873.15	6.42	1.8594	5.91
5	610	883.15	4.09	1.4085	4.91
6	650	923.15	2.77	1.0188	2.44
7	660	933.15	1.89	0.6366	2.06
A.A.P.E.					9.80
A.A.D.					0.52

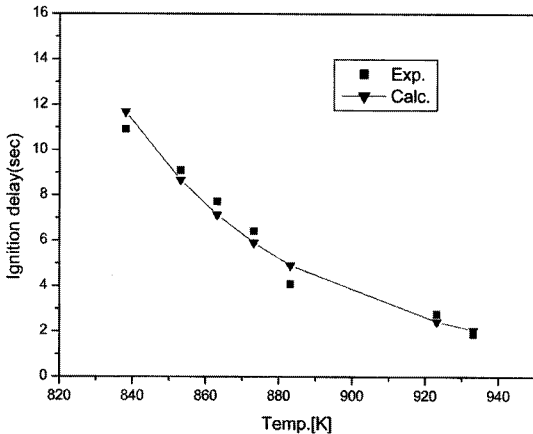


Fig. 1. A comparison between the experimental and calculated delay times by ignition temperatures for acetone.

일반적으로 Semenov²⁴⁾가 제시한 식 (8)을 이용하면 활성화에너지(Activation Energy)를 얻을 수 있다. Semenov는 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\log \tau = \frac{52.55E}{T} + B \quad (9)$$

식 (8)을 식 (9)에 대입하여 계산된 활성화에너지 (E)는 112kJ/mol이다.

5. 결론

본 연구에서는 MSDS DB에 유효한 정보를 제공하고, 산업 재해예방 감소위해 아세톤의 화재 및 폭발 특성치 가운데 최소자연발화온도(AIT)는 ASTM E659-78을 사용하여 측정하였고, 폭발한계와 인화점은 여러 문헌들과 비교 고찰하였다. 그리고 폭발한계의 온도의존성에 대한 새로운 예측식을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폭발한계의 문헌을 고찰한 결과 안전 위해서는 아세톤의 폭발하한계는 2.5vol%, 상한계는 약 13vol% 그리고 인화점은 -20℃를 사용하는 것이 바람직하다.

2) 증기압 식을 이용한 아세톤의 폭발하한계 예측값은 약 2.89Vol%로 계산되었다.

3) 아세톤의 새로운 폭발한계 온도의존식은 다음과 같다.

$$L_i(t) = L_{25} [1.0024 - 1.4737 \times 10^{-4}(t - 25)]$$

4) 아세톤의 최소자연발화점 565℃로 측정되었으며, Scott가 제시한 561℃과 거의 일치하였다.

5) 아세톤의 자연발화온도와 발화지연시간의 관계는 다음과 같다.

$$\ln \tau = -14.57483 + 14276.88 \left(\frac{1}{T} \right)$$

6) Semenov식을 이용하여 계산된 아세톤의 활성화에너지(E)는 112kJ/mol이다.

참고문헌

- 1) F.P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 2, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 1996.
- 2) A.A. Kline, C.R. Szydluk, 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.
- 3) NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, NFPA, 1991.
- 4) SFPE, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 2nd ed., SFPE, 1995.
- 5) V. Babrauskas, "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, SFPE, 2003.
- 6) L.G. Britton, "Two Hundred Years of Flammable Limits", Process Safety Progress, Vol. 21, No. 1, pp. 1~11, 2002.
- 7) H.K. Abdel-Aal et al., "A New Approach to Utilize Hydrogen as a Safe Fuel", International J. of Hydrogen Energy, Vol. 30, pp. 1511~1515, 2005.
- 8) 하동명, "메탄의 화재 및 폭발 위험성평가", 한국가스학회지, 제9권, 제2호, pp. 1~7, 2005.
- 9) 하동명, "프로판가스의 화재 및 폭발 특성치에 관한 연구", 한국가스학회지, 제10권, 제2호, pp. 33~39, 2006.
- 10) 하동명, "안전한 수소 이용을 위한 연소특성치 고찰", 한국가스학회지, 제12권, 제2호, pp. 1~6, 2008.
- 11) 하동명, "MEK의 연소특성 고찰을 통한 MSDS의 적정성", 한국안전학회지, 제23권, 제3호, pp. 36~41, 2008.
- 12) 柳生昭三, "蒸氣の爆發限界", 安全工學協會, 1979.
- 13) D.R. Lide, "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 75th ed., CRC Press, 1994.
- 14) G.M. Zabetakis, "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors", US Bureau of Mines, Bulletin, 1965.
- 15) 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.
- 16) 하동명, “파라핀족 탄화수소의 폭발한계의 온도 의존성 예측”, 한국안전학회지, 제15권, 제3호, pp. 71~77, 2000.
 - 17) K.L Cashdollar, “Overview of Dust Explosibility Characteristics”, J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 13, No. 3-5, pp. 183~199, 2000.
 - 18) 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.
 - 19) M. Sheldon, “Understanding Auto-ignition Temperature”, Fire Engineering J., June, pp. 27~32, 1984.
 - 20) G.S. Scott, G.W. Jones and F.E. Scott, “Determination of Ignition Temperature of Combustible Liquids and Gases”, Analytical Chemistry, Vol. 20, No.3, pp. 238~241, 1948.
 - 21) C. Marsdon, “Solvent Guide”, 2nd, ed., London, Cleavor-Hume, 1963.
 - 22) J. Gmehing, U. Onken and W. Arlt, “Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection”, 1, Part 1-7, DECHEMA, 1980.
 - 23) P.E. Cote, “Fire Protection Handbook”, 17th ed., NFPA, Quincy, Massachusetts, 1991.
 - 24) N.N. Semenov, “Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Vol. 2”, Princeton University Press, princeton, N.J., 1959.