3성분계 인화성 혼합가스의 최소점화에너지 측정에 관한 연구

최 상 원

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
(2012. 10. 17. 접수 / 2013. 1. 15. 채택)

Measurement of Minimum Ignition Energy by Electrostatic Discharge for Flammable Ternary Gas Mixtures

Sang-Won Choi

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA
(Received October 17, 2012 / Accepted January 15, 2013)

Abstract : When flammable gases are mixed with air or oxygen in the explosion concentration range and are ignited by sufficiently large electrostatic discharge energy, they may explode causing severe disaster in workplace. The minimum ignition energy(MIE) of single gas-air mixtures has been already investigated by many research, but the MIE of mixtures of more than ternary gas mixture is not examined yet. The purpose of this study is to investigate the MIE of a ternary gas(methane, ethylene, hydrogen, propane) mixtures experimentally. The results of our experiment show that the ignition of a methane-ethylene-air, methane-hydrogen-air, methane-propane-air, ethylene-hydrogen-air, ethylene-propane-air and hydrogen-propane-air mixture due to electrostatic discharge energy primarily depends on that the mixture: the MIE decreases gradually with the increase of having the lower MIE than other mixture ratio in the normal atmospheric pressure.

Key Words : minimum ignition energy(MIE), ternary gas mixture

1. 서론

인화성 가스가 공기 또는 산소와 혼합되어 그 혼합조성이 폭발농도 범위 안에 있을 때 일정량 이상의 에너지를 가하면 점화가 되어 폭발을 일으키게 된다. 여기서 점화를 일으키는데 필요한 최소한의 에너지를 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy; 여기서는 간단히 MIE라 한다.)라 한다¹⁻⁴⁾. 정전기 등에 의한 고전압의 전기가 방전될 때 생기는 열에너지도 점화에너지로서 작용하게 된다.

방전은 기체의 절연파괴 현상으로서 그 방전경로의 형성은 전극의 구조, 전압의 인가방법, 기체의 압력 및 온도 등에 따라 다르고, 방전의 형태에 따라 열에너지의 발생도 판이하다⁵⁻⁸⁾. 그러므로 전기적인 양에서 점화에너지를 구할 경우 실험이 실시될 때의 여러 가지 조건들을 면밀히 조사·분석하여야 한다.

정전기가 방전할 때는 다음 식으로 주어지는 방전에너지를 방출한다⁶⁻⁹⁾.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \quad (1)$$

여기서, E 는 방전에너지 (J), C 는 정전용량 (F), V 는 대전 전압 (V), 그리고 Q 는 대전된 정전기량 (C)이다.

정전기가 갖고 있는 에너지는 방전 시에 여러 가지 형태를 통하여 외부로 방출된다. 대표적인 방전의 형태는 불꽃방전(Spark Discharge)으로서 이는 액체 또는 고체방전 도체 사이에서 흔히 일어나며, 매우 짧은 시간에 고밀도의 전류와 섬광을 동반하고 주변기체를 이온화 시킨다.

정전기 방전에 따른 점화능력을 평가하기 위해서는 이 방전에너지와 인화성 물질의 MIE를 비교하는 것이 필수적이다. 그러나 방전경로에 저항이 있으면 저장된 에너지의 일부분이 이 저항에서 소비되고 스파크 시간도 길어지게 되어 이들의 단순 비교는 유효하지 않을 경우도 있다.

그 동안 단일 인화성 가스인 경우에는 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 두 가지 이상의 인화성 가스가 동시에 존재하는 혼합가스의 MIE나, 점화메커니즘에 관한 연구는 아직까지 많이 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 두 가지 이상의 혼합가스의 MIE 측정 및 방법 등에 대하여 고찰하였다. 초기단계로서 측정장치를 고안하여 제작·설치하였으며, 에틸렌-메탄-공기, 에틸렌-수소-공기, 에틸렌-프로판-공기, 프로판-수소-공기, 메탄-프로판-공기, 메탄-수소-공기 혼합물에서의 가스농도 변화가 MIE에 미치는 영향에 대해서 실험을 통하여 측정하였다. 실험결과의 자료는 코크오브가스, 용해로 가스 등의 두 가지 이상의 혼합가스의 MIE 관리 및 대책에 적용할 수 있다.

*Corresponding Author: Sang-Won Choi, Tel : +82-32-510-0795, E-mail : swchoi@kosha.net
Department of Safety Research, Occupational Safety and Health Research Institute, 478, Munemi-ro, Bupyeong-Gu, Incheon 403-711, Korea

2. 최소 점화에너지

2.1. MIE에 미치는 영향

용량성 불꽃방전은 유도성 불꽃방전과 비교하여 전류 값이 크고, 방전지속 시간이 훨씬 짧은 특징을 갖기 때문에 정전기방전과 같은 양상을 나타낸다. 이 때문에 용량성 불꽃방전에 의하여 구해진 점화에너지는 그대로 정전기 방전에 의한 점화성과 결부시키는 것이 가능하다⁹⁾.

정전기방전이 인화성 혼합기체를 점화시킬 수 있는지의 여부는 인화성 혼합기체의 성분 및 온도, 방전 에너지 및 분포 등에 달려 있다. 현장에서 가장 흔한 점화원은 절연 물로부터 생겨나는 전기스파크이며, 따라서 이 스파크가 점화에너지를 측정하는데 있어 가장 널리 쓰이고 있는 수단이 된다. 어떤 인화성 혼합물에 있어서 가장 낮은 점화에너지는 공기 중 농도의 함수로 된다.

에탄, 부탄과 같은 포화탄화수소 가스나 증기는 공기와의 혼합비가 최적일 때 불꽃방전에 의한 방출에너지가 0.25 mJ 이면 점화되며, 에틸렌, 아세틸렌과 같은 불포화탄화수소는 이보다 훨씬 낮은 에너지에서도 점화가 가능하다.

그러나 두 가지 이상의 인화성 물질이 섞여 있는 혼합기체의 경우, 각각의 물질 농도가 폭발하한계 이하일지라도 폭발성을 가질 수 있다. 예를 들어 분진에 가스가 혼합되면, 혼합된 가스의 함량이 폭발 하한계보다 크게 낮더라도 폭발이 일어날 위험성이 있다. 또한 공기 중의 산소농도가 증가할수록 점화에너지는 감소하여 폭발위험성이 커지게 된다.

2.1.1. 소염거리

소염길이보다 길 경우 화염은 전파되지 못하여 다른 쪽의 혼합기체를 인화시키지 못한다.

MIE는 에너지공급원의 기하학적 형상 및 공급속도와 방법에 따라 크게 영향을 받고, 소염거리는 좁은 통로부분의 기하학적 형상에 크게 의존하며 이 양자간에는 밀접한 관계가 있다.

MIE $E_{\min}$ 과 소염거리 d 사이에는 다음과 같은 관계가 있다¹⁰⁾.

$$E_{\min} \propto d^2 \quad (2)$$

2.1.2. 온도 및 압력에 의한 영향

일반적으로 MIE는 온도의 상승에 따라 현저하게 감소한다. 점화에너지의 온도변화를 나타낸 수치들은 대체적으로 다음 식을 따른다.

$$E_{ig} = C_e^{kT_0} \quad (3)$$

여기서 E_{ig} : 점화에너지, T_0 : 인화성 혼합기체의 초기온도, C 및 k : 인화성 물질에 따른 정수이다.

MIE의 압력 의존성은 다음 식으로 나타내어진다.

$$E_{ig} \cdot P^b = \text{일정} \quad (4)$$

여기서 P 는 압력이며, 대부분의 경우 $b \cong 2$ 이다.

2.1.3. 조성 및 첨가물에 의한 영향

MIE는 인화성 혼합기체의 농도에 따라서 현저하게 변화되어, 화학양론비(Stoichiometric Ratio) 근처에서 최소치를 갖고, 저농도측과 고농도측에서 무한대가 된다. 대개의 인화성 물질에서는 MIE는 화학양론비보다 인화성 물질이 약간 고농도인 쪽에서 나타난다.

2.1.4. 기타 인자에 의한 영향

MIE의 크기는 인화성 물질의 화학구조에 따라서도 다르다. 탄화수소의 점화에너지의 경우 $\text{Alkane} > \text{Alkene} > \text{Alkyne}$ 의 순으로 감소한다.

2.2. MIE의 측정방법

MIE는 전기의 불꽃방전 에너지를 이용하는 방법이 정밀도도 높고 재현성이 좋아 일반적으로 많이 사용되고 있다.

Fig. 1은 측정법의 원리를 나타내고 있다. 정전용량 C 인 커패시터에 서서히 충전하고, 그 양단의 전압이 불꽃방전 전극의 절연파괴전극 V_1 에 달하면 방전이 일어나게 된다. 방전 후의 전압은 V_2 가 되는데, 이때의 방전에너지 E 는 다음과 같이 주어진다.

$$E = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2) \quad (5)$$

점화의 유무에 의하여 최소점화에너지 $E_{\min}$ 이 결정된다. 이때 측정되는 점화에너지는 전극형상 및 전극간격에 의하여 영향을 받으므로 이들 인자 등을 변수로 하여 측정하여야 한다.

Fig. 1. Schematic diagram of MIE measurement.

3. 실험장치의 구성 및 실험방법

3.1. 실험장치 구성

MIE 측정장치의 전체 시스템은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 고전압 직류전원 공급기, 커패시터 박스, 가스공급장치, 가스혼합기 및 폭발통으로 구성되어 있다. 실험장치중 전기 시스템은 Fig. 4와 같으며 배선은 시스템에 걸맞도록 30 kV로 하였다. 커패시터와 접속되는 모든 접속부는 실링, 코팅 처리하여 고전압의 누설이 없도록 하였으며 시스템 전체는 접지를 하여 전원계통과 등전위를 갖도록 하였다. 10~30 pF의 경우는 표유용량/유도(Stray Capacitance/Inductance)에 문

Fig. 2. Photo of MIE measuring system.

Fig. 3. Total configuration of experimental set-up.

Fig. 4. Electric circuit of experimental set-up.

제가 있으므로 배선은 가능한 한 짧게 하였다^{11,12)}.

폭발용기는 아크릴제로 두께 10 mm, 내경 80 mm, 높이 250 mm를 사용하였다.

3.3. 실험방법

실험은 3.1절의 실험장치와 Table 1의 실험가스를 사용하였으며, MIE를 실험으로부터 구하여 산출하기 위한 가장 중요한 것은 커패시터의 용량과 배선라인의 표유 커패시턴스를 정확하게 측정하는 것이 무엇보다도 중요하기 때문에 본 실험에서는 Impedance/Gain-Phase Analyzer(model; HP4194, 측정범위; 10 fF~0.1 F)를 사용하여 측정하였다.

가스혼합 방법은 분압법을 이용하여 실험가스 메탄, 에틸렌, 수소 및 프로판 가스 중에서 상호 2종 가스를 일정 비율($\frac{B\text{가스}}{A\text{가스}}$ 비율 : 0%, 25%, 50%, 75%, 100%)로 공기와 혼합하여 넣었으며, 특히, 실험에서 원하는 일정 비율의 가스혼합비를 만든 다음 20분 이상을 방치하여 균일한 가스 혼합비가 형성되도록 하였다.

Table 1. Combustibility parameters of experimental gases

Items Gas	Flammable Limits(vol.%)		MIE (mJ)	Stoichiometric Mixture(vol. %)	Explosion Pressure at Stoichiometric Mixture(kgf/cm ²)	Ignition Temperature (°C)
	LEL	UEL				
Ethylene (C ₂ H ₄)	2.7	36.0	0.096	6.52	8.4 (8%)	425
Methane (CH ₄)	5.0	15.0	0.28	8.5	-	537
Hydrogen (H ₂)	4.0	75.6	0.019	28.0	7.1 (35%)	400
Propane (C ₃ H ₈)	2.1	9.5	0.25	5.2	6.7 (5%)	432

Fig. 5는 실험장치 및 배선회로의 각 부분에서 커패시턴스의 측정회로이며, Table 2는 이 때 측정한 커패시턴스 값을 나타낸 것이다.

방전전극에서 발생하는 방전전압은 정전용량의 C_1 및 C_2 에 의해 나누어 인가되므로 에너지 산출식은 아래 식에 의하여 구하였다.

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{2} CV^2 \\
 &= \frac{1}{2} C(V_1^2 - V_2^2) \\
 &= \frac{1}{2} (C_1 + C_2) \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2} \times V_1 \right]^2 (\text{J})
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, E =방전에너지(J), C =용량(F), V =인가전압(kV), C_1 =충전회로 용량(F), C_2 =방전회로 용량(F), V_1 =인가전압(kV) 및 V_2 =방전 후의 전압(kV)이다.

식 (6)에 의해 구한 전극의 전압은 오실로스코프로 방전파형을 관측하여 그 전압 등을 확인, 검토하였다.

인화성 가스의 MIE 측정의 실험은 Fig. 6과 같은 순서로 실시하였으나, 본 실험에서는 폭발압력 측정, 온도 측

Fig. 5. Measuring circuit of capacitance.

Table 2. Capacitors and stray capacitance value

Conditions C(pF)	C_m	$C_m+C_s+C_h$	$C_h=C_2$	$C_m+C_s=C_1$	$\frac{C_1}{C_1+C_2}$	$\frac{C_1^2}{C_1+C_2}$
10	13	56	29	27	0.482	13.018
30	34	72	29	43	0.597	25.67
100	106	135	29	106	0.785	83.21
300	315	340	29	311	0.914	284.3
1000	1020	1030	29	1001	0.9718	972.8

정 및 화염전파 속도측정은 실시하지 않고 단순히 점화유무만을 확인하였다. 점화의 판정은 관측창을 통하여 점화된 화염이 용기 전면으로 전파되는 현상이 관찰된 경우에 폭발로 판정하였다.

Fig. 6. Flow chart of MIE experimental.

3.3. 측정지점의 결정방법

실험을 위한 측정지점의 결정방법은 실험 목적상 여러 가지 방법이 있겠으나 여기서는 다음 Fig. 7과 같은 방법으로 측정지점을 결정하였다.

EUL : Explosion Upper Limit (vol. %)
 ELL : Explosion Lower Limit (vol. %)
 MIE : Minimum Ignition Energy of Single Gas (vol. %)
 Point 1 : 1/2 (EUL + MIE)
 Point 6 : 1/2 (Point 1 + MIE)

Fig. 7. Decision of measuring points.

4. 실험결과 및 분석

본 실험에서 에틸렌-메탄-공기, 에틸렌-수소-공기, 에틸렌-프로판-공기, 프로판-수소-공기, 메탄-프로판-공기, 메탄-수소-공기의 3성분계 인화성 혼합물에서의 MIE를 측정한 결과는 Fig. 8과 같이 나타났다.

실험 결과 중 단일 가스에서의 MIE 값은 이미 관련자료에서 측정한 값과 일치하지만 커패시터의 용량에 따라서 인화성 가스의 MIE의 변화가 크게 나타나므로 정확한 값을 얻기 위해서는 소용량의 커패시터(예를 들면 5 pF 등)가 필요하고 이 용량을 적절히 조합하는 것이 중요하다.

Fig. 8로부터 실험결과를 정리, 요약하면 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

1) 단일가스일 때 메탄가스는 8.3 vol.%, 에틸렌가스는 6.5 vol.%, 수소가스는 28 vol.%, 프로판가스는 5.2 vol.%에서 MIE가 발생되는 것으로 측정되었다.

2) 3성분계 혼합물에서 단일가스일 때의 MIE 값이 낮은 쪽의 가스혼합비가 증가할수록 MIE는 감소하였다.

3) 아울러 단일가스일 때의 폭발범위가 넓을수록 3성분계 혼합물에서도 이들 가스의 비율이 증가할수록 폭발범위는 넓어진다(Fig. 8 (b), (d), (F)).

4) Capacitor 및 Stray Capacitance는 MIE 값의 신뢰성에 큰 영향을 미친다.

Fig. 8. Measured result of MIE.

5. 결론

에틸렌-메탄-공기, 에틸렌-수소-공기, 에틸렌-프로판-공기, 프로판-수소-공기, 메탄-프로판-공기 및 메탄-수소-공기의 3성분계 인화성 혼합물에서의 MIE를 측정한 결과를 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 단일가스일 때 메탄가스는 8.3 vol.%, 에틸렌가스는 6.5 vol.%, 수소가스는 28 vol.%, 프로판가스는 5.2 vol.%에서 MIE가 발생하였다.

2) 단일가스일 때의 MIE 값이 낮은 쪽의 가스혼합비가 증가할수록 3성분계 혼합물에서 MIE는 감소하였다.

3) 단일가스일 때의 폭발범위가 넓을수록 3성분계 혼합물에서도 이들 가스의 비율이 증가할수록 폭발범위는 넓어진다.

실험결과의 자료는 코크오브가스, 용해로 가스 등의 두 가지 이상의 혼합가스의 MIE 관리 및 대책에 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 실험의 측정지점을 바꾸어 폭발상한계 및 하한계 부근에서 MIE 및 폭발범위의 확대 등에 대한 영향도 확인하여야 할 과제이다.

References

- 1) National Fire Protection Association(NFPA) 77; Recommendation Practice on Static Electricity, 2000.
- 2) IEC 61241-2-3: Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Test methods for determining minimum ignition energy of dust/air mixtures, 2003.
- 3) IEC60079-0 Electrical apparatus for explosive gas atmospheres - General requirements, 2001.
- 4) Sang-Won Choi and Atsushi Ohsawa, "A Study on Minimum Ignition Energy by Controlled Discharge Energy", pp. 36~39, Vol. 22, No. 1, The Korean Society of Safety. 2007.
- 5) Jae-Hee Chung, Duck-Chool Lee, Yasuyuki Tabata and Tsutomu Kodama, "A Study on the Minimum Ignition Energy Measurement of Flammable Gas Mixtures", '95 Fall Conference of The Korea Institute of Industrial Safety, pp. 3-36~3-40, 1995. 10.
- 6) Kyoontae Moon, Jaehee Chung, Mizuki Yamaguma and Kwangseok Choi, "Influence of Electrostatic Discharge Circuit Parameters on the Minimum Ignition Energy of Suspended Dust Clouds", pp. 22~26, Vol. 25, No. 5, The Korean Society of Safety. 2010.
- 7) Dong-Hoon Lee and Han-Suk Park, "A Study of Measurement of Minimum Ignition Energy for Pine Tree Dust on Electrostatic Discharge", pp. 74~79, Vol. 13, No. 3, The Korea Institute of Industrial Safety, 1998.
- 8) G. S. Choi, J. H. Joung, M. H. Hwang, I. S. Woo, Y. S. Mok, C. S. Choi, M. Yamaguma, T. Kodama and W. L. Cheung, "Effects of the Powder Agglomeration on Vibrating Minimum ignition Energy Measurement System for Powder", pp. 48~53, Vol. 14, No. 3, The Korea Institute of Industrial Safety, 1999.
- 9) Recommended Practice for Protection against Hazards arising out of Static Electricity in General Industries, Research Institute of Industrial Safety of Japan, ISSN 0911-8063, 1988. 3.
- 10) B. Lewis and von G. Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, Academic Press, N. Y., 1961.
- 11) S. W. Choi, G. H. Lee, J. H. Chung, D. C. Lee, Y. Tabata, T. Kodama and K. Nishimura, "A Study on the Minimum Ignition Energy Measurement of Flammable Gas Mixtures Due to Electrostatic Discharge", '96 Fall Conference of The Korea Institute of Industrial Safety, pp.121~126, 1996. 11.
- 12) Gwan-Hyung Lee, Sang-Won Choi, Jae-Hee Chung and Duck-Chool Lee, "Electrostatic Discharge and the Minimum Ignition Energy Measurement of Three-Component Flammable Gas Mixtures", KIEE '97 Annual Summer Conference, pp. 1819~1823, 1997. 7.