

저압방전 불꽃에서 전극재질이 점화에너지에 미치는 영향

崔 相 源, 李 寬 珩, 文 正 基

한국산업안전공단 산업안전연구원 선임연구원, 기계전기연구실장, 한국기계연구원 책임연구원

Effect of Electrode Material on the Minimum Ignition Energy in Low-Voltage Spark Discharge

Sang-Won Choi, Gwan-Hyung Lee, Jung-Gi Moon

Industrial Safety Research Institute, Korea Industrial Safety Corporation, Korea Institute of Machinery and Metals

Abstract: In the hazardous areas where explosive gases, vapor or mists exist, electrical apparatus and installations must be of explosion-proof construction to prevent or limit the danger of the ignition of potentially explosive atmosphere. In Korea, nine types of protection have been specified in the government regulations at present: flameproof enclosure, pressurization, oil immersion, increased safety, intrinsic safety, non-incendive, sand filling, encapsulation, and special types. Among these types, the intrinsic safety has the construction which limit or by-pass igniting the electric energy using electronic devices. This type has lots of merits but at the same time requires a high-degree of technology. In this paper, we investigated several dominating factors which affect the minimum ignition energy; this energy plays a very important role in design and evaluation of the intrinsic safety type electrical apparatus. Electrode material, which is one of the most important factors, was intensively studied for the five sorts of material (Al, Cd, Mg, Sn, and Zn) with performing experiment in a low-voltage inductive circuit using IEC-type spark apparatus. The experimental results show that the minimum ignition energy of electrode material is varied: highest in Cd and lowest in Sn. We also confirmed the effect of electrode make-and-break speed and magnetic field magnitude.

발생되는 전기불꽃, 아크 또는 고온에 의하여 가연성 혼합물에 점화되지 않는 구조로 된 것을 말한다. 본질안전 방폭방식은 가연성 혼합물이 점화되어 폭발을 일으키는데에는 전기불꽃에 의해 어느 정도 최소한의 에너지가 주어질 필요가 있다는 개념을 근거로 하고 있다. 물론 전기불꽃에 의한 점화에도 열(熱)에 의한 점화와 진류에 의해 가열된 도체(Hot Wire)의 고온표면에 의한 점화도 있다. 다시말하면 단선이나 단락 등에 의해 전기회로 중에서 전기불꽃이 발생하여도 가연성 혼합물이 결코 점화되지 않는 경우에는 본질적으로 안전하다고 할 수 있다.

반면에 내압방폭구조는 방폭지역에서 점화원을 그대로 인정하여 이 점화원에 의해 용기내부에서 폭발이 발생하여도 충분한 강도를 가진 용기에 의해 주위의 가연성 혼합물에 인화되지 않도록 하는 방법에 비하여 본질안전 방폭구조 전기기기는 전자부품으로 방폭지역에 흐르는 전기에너지를 최소화시켜 주위의 가연성 혼합물을 점화시키는 점화능력이 없도록 하는 것이다.

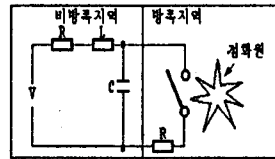


그림 1. 본질안전 방폭구조의 개념도

머 리 말

가연성 또는 폭발성가스·증기가 존재하는 위험장소 (이하 방폭지역이라 한다)에서 사용되는 전기기기는 이 기기가 운전중에 발생하는 에너지 (아크, 스파크, 고온표면 등)에 의해 가연성 또는 폭발성가스·증기 (이하 간단히 가연성 혼합물이라 한다)에 점화되지 않는 구조로 되어야 한다. 이러한 전기기기를 防爆構造 전기기이라 하는데, 현재 우리나라에서는 9종류 (耐壓, 壓力, 油入, 安全増, 本質安全, 非點火, 噴沙, 沙入 및 特殊)로 구분하고 있다. 이중 본질안전 (Intrinsic Safe) 방폭구조는 전자부품을 이용하여 가연성 혼합물을 점화시키는 전기에너지를 제한하거나 By-Pass시키는 방법으로서 여러가지 타 방폭구조에 비하여 장점이 많으나 동시에 고도의 기술을 요구하고 있다.

본 논문에서는 본질안전방폭구조의 전기기기에 대한 설계 및 평가시에 매우 중요한 최소 점화에너지(Minimum Ignition Energy; MIE)에 영향을 주는 요인들을 분석하였다. 또한, 가연성 혼합물을 점화시키는 최소 점화에너지의 영향을 알아보기 위하여 저압 유도성회로에서 전극의 재질별 (Al, Cd, Mg, Sn 및 Zn)로 IEC형 불꽃점화 실험장치에서 실험을 실시하였다. 아울러 전극의 개폐속도, 자장의 크기에 대한 영향을 확인하였으며, 불꽃 점화 실험장치에 대한 장·단점을 비교하였다.

1. 본질안전 방폭의 개념 및 평가

본질안전방폭의 개념

본질안전방폭구조란 정상시 및 사고시 (단선, 단락, 지락 등)에

또한, 이 방폭구조는 가장 위험도가 높은 0종 장소 (폭발성 분위기 생성률: 10^1 이상, 년간 체류시간: 100이상)에 사용할 수 있으며 내압방폭구조에 비하여 제품의 외관, 신뢰성 등에서 우수하기 때문에 가연성가스 측정·경보시스템, 계측기류, 센서류 및 특히 DSC (Distributed Control System)에 그 수요가 날로 증가되고 있는 실정이다.

평가의 중요성

일반적으로 본질안전 방폭성능을 취급하는 경우 기초적인 입장에서 이것을 규명하여 보면 다음 2가지로 나누어 생각할 수 있다.

- 본질안전방폭 전기회로에서 발생하는 개폐불꽃 특성
- 개폐불꽃에 의한 폭발성 가스로의 점화
- 이 양자에 관한 충분한 지식이 있다면 주어진 전기회로에서 발생하는 불꽃에 의해 가스로의 점화여부는 예측하는 것이 가능하다. 말하자면 실제의 전기회로에서 점화유무를 시험하지 않아도 그 본질안전 방폭성능을 판정할 수 있다. 그러나 아직 양자 모두가 Mechanism이 완전히 해명되어 있지 않고, 또한 전기회로도 종류가 수없이 많기 때문에 이를 위하여 점화유무의 최종적인 판단은 점화시험에 의존하는 것이 모든 나라들의 현실이다.

불꽃점화 실험장치

점화실험에 사용하는 개폐불꽃 (Make-and-Break Spark) 발생 장치는 기계적으로 작동하는 개폐전극을 사용하여 통전중 전기회

로를 개폐하여 이것에 의해 발생하는 방전불꽃이 가스로 점화되는가 여부를 실험하기 위한 것으로 본질안전 방폭전기회로·기기의 안전면에서 점점 개폐불꽃 및 배선·부품 등의 단선·단락사고 불꽃에 대하여 충분한 모의 실험에 사용된다. 불꽃점화 실험장치는 크게 수동조작식 개폐불꽃 발생장치와 자동식 개폐불꽃 발생장치로 나뉘며 전자로는 Wire Brush, 동선인장 단선형 및 Wheeler형 등이 있으며 후자로는 IEC형, Break-Flash형 및 Intermittent Break형 등이 있다.

이들의 장·단점으로는 Wire Brush형은 불규칙, 복잡한 불꽃을 발생시키나 재현성은 없고, 동선인장 단선형은 재현성은 우수하나 회로의 개로시만을 실험할 수 있으며, Wheeler형은 개폐속도가 빠르나 점점이 열화되기 쉽다. 반면에 IEC형은 직류, 교류 회로에 모두 이용할 수 있으며, Break-Flash형은 유도성회로에 적합하고, Intermittent Break형은 개폐속도가 늦기때문에 용량성 회로에 적합하다. 그림 2는 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 IEC형 불꽃점화 실험장치를 나타낸 것이다.

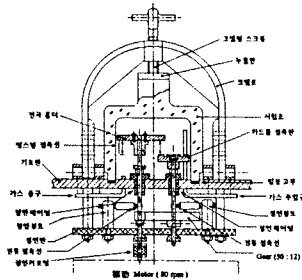


그림 2. IEC형 불꽃점화 실험장치

2. 저압방전회로 특성

전기회로의 부하가 다르면 거기서 발생하는 방전특성도 다르며, 그러하기 때문에 가스로의 점화한계도 다르게 된다. 본질안전방폭 전기회로를 설계하는 경우 전원전압의 크기나 부하전류의 크기에 대한 상한은 일반적으로 정해져 있지 않다. 이와 같은 상한을 정하는 것은 대상가스의 종류, 전압, 전류, 부하의 크기 등을 조합시킨 결과에 근거를 두기 때문이다.

회로의 개폐방전 불꽃에너지가 최소 점화에너지와 일치한다면 본질안전방폭 전기회로를 설계하는 모든 경우에 공학적으로 문제가 없다. 그러나 이와 같은 예는 현실적으로 대단히 드물다. 그러므로 본질안전 방폭기술상 최소 점화에너지는 참고치로서 취급하며, 이것에 消炎效果 (Quenching Effect)를 고려한 실용적인 점화한계가 중요한 설계기준으로 필요하다.

저압유도회로의 개폐불꽃에 의한 점화위험성

실제로 본질안전 방폭회로에서 많이 사용되는 것은 유도회로일 경우가 많다. 유도회로에서는 인덕턴스의 크기에 따라 전원전압의 크기가 점화한계에 중요한 요소로 되는 경우도 있고 거의 작용하지 않는 경우도 있다.

유도회로를 열 때의 방전은 아크방전, 고주파 간헐방전 (주로 인덕터와 불꽃발생장치의 부유정전용량에 기인) 및 글로우 방전이 발생한다. 반대로 회로를 닫을 때에는 단강적 방전에 의한 절연파괴가 일어나지만 전극이 기계적인 접촉을 하기 때문에 즉시 소멸된다.

저압유도회로의 방전불꽃은 회로가 닫힐 때보다는 회로가 열릴 때에 가스의 점화위험성이 더 크다. 정상상태시 회로에 흐르는 에너지는 $E = 1/2LI^2$ [J]이기 때문에 회로를 여는 경우의 방전특성은 주로 회로를 열기 전에 흐르던 전류의 크기에 의존한다. 이때의 회로전류는 전원과 인덕턴스 L에 축적된 電磁에너지 $1/2LI^2$ 에 의하여 공급된다.

용량회로의 개폐불꽃에 의한 점화위험성

용량회로의 방전은 콘덴서의 단락불꽃으로서 충전전압에 따라 일정한 전극 간격에서 절연파괴가 일어나게 되며, 이때 충전전압과 방전전류가 크면 아크방전이 발생한다. 용량회로에서 불꽃을 발생시킬 때에는 방전시키는 전극간의 거리를 가깝게 접근시켜야 한다. 발생하는 불꽃에너지의 대부분이 가스의 점화뿐만 아니라

전극의 가열에도 소비되어 최소 점화에너지가 상당히 커진다. 이것을 消炎作用이라고 한다.

용량회로에서는 개폐시의 점화 위험성은 회로를 열 때보다 닫을 때가 더 위험하다. 그러므로 폐로시만을 고려하여도 무방하다. 정상상태시에 콘덴서에 축적된 에너지는 $E = 1/2CV^2$ [J]이다.

저항회로의 개폐불꽃에 의한 점화위험성

저압 저항회로에서는 일반적으로 열 때와 닫을 때 모두에서 불꽃이 발생한다. 이들의 경우 불꽃에너지의 공급원은 전원이며, 점화전류의 크기는 전원전압의 크기에 좌우된다. 저항회로를 열 때의 방전은 아크방전이 발생하는 경우가 대부분이지만 경우에 따라서는 글로우방전이나 고주파 간헐방전이 발생하는 경우도 있다. 반대로 회로를 닫을 때에는 아크방전, 고주파 간헐방전 및 글로우방전이 발생하지만 양 전극이 접촉하면 즉시 소멸된다. 정상상태시 회로에 흐르는 에너지는 $E = 4.2 VI$ [J]이다.

3. 전극재질별 최소 점화에너지

최소점화에너지에 영향을 주는 요인들

폭발이 발생하는때까지의 점화현상의 개요는 다른 대부분의 연구결과에서 정성적으로 설명되어 있으나 실제의 점화에 있어서는 각종 요인이 독립적으로 관계한다. 이들을 크게 분류하여 보면 다음과 같이 전기회로, 불꽃발생전극 및 가스에 관한 인자로 나뉜다.

- 전기회로에 관한 인자
전기회로에 관한 인자로는 전원의 종류 (직류, 교류, 주파수), 전압, 전류 및 부하 (유도성, 용량성, 저항성) 등이 있다.
- 불꽃발생 전극에 관한 인자
불꽃발생전극에 관한 인자로는 형상, 치수, 재질, 개폐속도, 개폐방식 및 극성 등이 있다.
- 가스에 관한 인자
가스에 관한 인자로는 종류, 농도, 희석가스의 종류, 기압 및 온도 등이 있다.

위에서 언급한 재인자가 조합되어 가스의 점화가 결정된다. 그러므로 가스 및 불꽃발생전극에 관한 인자가 일정하다면 점화한계는 전기회로에 의해 결정된다고 말할 수 있다. 본질안전 방폭전기회로로 되는 회로의 방전불꽃은 방전전극에 의한 소멸효과 (주로 전극의 기하학적 치수 및 개폐속도에 관계)를 받기 때문에 최소 점화에너지 이상의 방전에너지가 발생되지 않으면 점화는 일어나지 않는다. 그러므로 소멸효과를 고려한 점화한계가 필요하다.

실험장치의 구성

전극재질 (음극)에 따른 점화한계를 측정하기 위하여 그림 3(a)와 같이 실험장치를 구성하였으며 인덕터를 사용한 회로도는 그림 3(b)와 같다. 불꽃점화 실험장치는 그림 2의 IEC형을 사용하였으며 그 이유는 각종 불꽃점화 실험장치의 점화감도 (그림 5)를 비교해 보면 IEC형이 점화감도가 가장 우수하기 때문이다. 또한, 양극 전극으로 사용한 텅스텐 와이어는 단시간의 동작후에도 끝부분이 매우 잘 깨지는 성질을 갖고 있기때문에 그림 6과 같은 절단기를 이용하여 텅스텐 선을 절단한 후 전극으로 사용하였다.

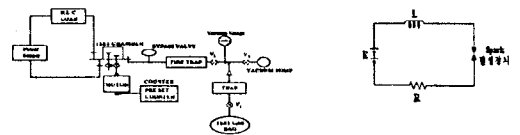


그림 3. 실험장치의 Block Diagram 및 인덕턴스 회로도
실험방법

불꽃점화실험은 그림 6의 Flow Chart에 의해 실시하였다. 실험에 사용된 가스는 Group II B의 대표가스인 에틸렌 (C₂H₄)가스

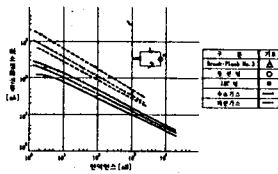
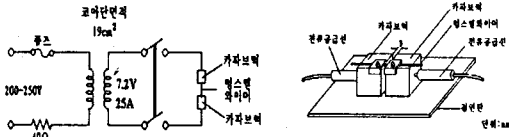


그림 4. 각종 불꽃점화 실험장치의 점화감도 비교



(a) 회로도

(b) 전극부 상세도

그림 5. Tungsten Wire Cutter의 회로도 및 전극부 상세도

7.8±0.5 Vol.% (이하 동일농도)를 사용하였으며 점화감도 교정은 Group II B의 경우 직류 24V, 공심 95mH의 유도성회로에 0.265A를 흘려 (Aging 운전 필요함) 실험장치를 400 회전시켰을 때 적어도 1회 폭발이 일어나도록 하였다.

또한, 불꽃점화실험 횟수 및 점화한계 계산은 점화가 발생하는 전압, 전류 또는 전력에서 5%씩 감소 또는 증가시켜 점화유무를 확인하였으며 극성을 바꾸어 각각 200회 회전시켜 점화유무를 확인하였다. 개폐불꽃이 가스에 점화되지 않는 전류치 (전압치)와 이 값 직전의 점화전류치 (전압치)의 평균값을 최소 점화전류치 (전압치) 즉 점화가 일어나지 않는 점과 점화가 일어나는 지점을 2로 나누어 최소 점화에너지를 구했다.

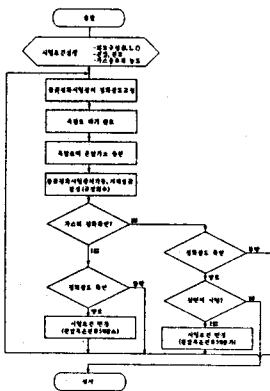


그림 6. 불꽃점화 실험 Flow Chart

실험결과 및 고찰

· 기존 점화에너지의 Data 확인

IEC형 불꽃점화 실험장치로 이미 알려진 최소 점화에너지를 대상가스별, 회로별로 확인하였으며, 그림 7은 에틸렌가스, 인덕턴스회로에서 최소 점화에너지를 측정하여 IEC 규격에서 제시한 데이터와 비교한 것이다. 제작한 IEC형 불꽃점화 실험장치는 우선 그 감도가 IEC 규정에 만족하고 있음을 확인하였으며, 또한, 이미 IEC규격에서 밝혀진 대상 가스별, 회로별로 구한 최소 점화에너지가 본 실험장치를 사용하여도 근사값에 도달함을 알 수 있었다. 특히 유도성회로, 에틸렌가스 및 카드뮴전극을 사용하여 실험한 결과 인덕턴스 100mH 이하에서는 IEC 규격의 최소 점화데이터보다도 점화감도가 우수하였다.

· 전극재질에 따른 최소 점화에너지의 영향

전극재질에 따른 최소 점화에너지의 영향을 알아보기 위하여 사용한 음극의 재질은 카드뮴, 아연, 알루미늄, 주석 및 마그네슘이다. 인가전압은 직류 24V를 공급하였고, 대상가스는 에틸렌, 인

덕턴스는 표 1을 사용하여 측정하였으며 그 결과는 그림 8과 같다.

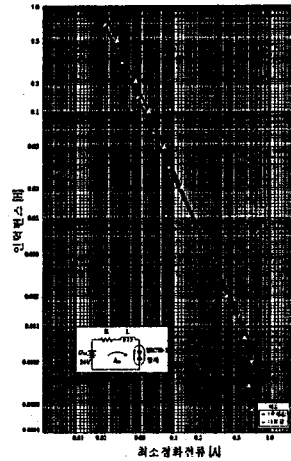


그림 7. 최소점화에너지 비교

표 1. 공심코일의 종류 및 정수

인덕턴스	100 μH	1mH	4mH	10mH	40mH	100mH	1 H
직류저항 (Ω)	0.133	0.640	2.340	2.055	8.045	7.665	60.36

전극재질에 따른 최소 점화에너지의 실험결과 가장 큰 결과로는 실험에 사용한 음극재질이 그림 8과 같이 카드뮴, 아연, 마그네슘, 알루미늄, 주석 순으로 최소 점화에너지가 커짐을 알 수 있었다. 즉 100mH 이상에서는 아크발생이 없는 것으로 간주되며 방전에너지는 음극재질에 의존하지 않으나, 인덕턴스가 작게 되면 점화전류가 크게 되어 음극재질에 의해 방전에너지가 좌우되는 것으로 생각된다. 그러므로 음극재질의 영향이 크게 나타난 것으로 생각된다. 또한, 실험중 다음과 같은 현상을 알 수 있었다.

- 동일 음극 전극에서 회로에 흐르는 전류가 같을 때 저항회로보다 인덕터회로에서 더 큰 과전압이 발생하였으며, 이로 인하여 인덕턴스회로가 저항회로보다 최소 점화에너지가 작다는 것을 알 수 있다. (그림 9 및 10)
 - 카드뮴 전극에서 발생하는 과전압이 주석전극에서보다 더 작았고, 그 발생빈도도 적었으나 과도상태의 전류파형은 그 반대이었다. (그림 9 및 11)
 - 전극의 재질에 따른 최소 점화에너지의 영향을 전기적 파형으로 분석은 곤란하였으며 표 2에서 알 수 있듯이 음극재질의 물리적 상전 주 비등점과 열기전력에서 기인된다고 생각된다.
 - DC 24V, 1H, 70mA에서 실험중 개폐불꽃의 크기를 육안(배율기 10:1 및 Video Camera 사용)으로 관찰한 결과 불꽃의 크기 및 밝기가 카드뮴이 주석보다 더 크고 밝았다. (그림 12)
- 이것은 아크 지속시간이 큰 재질일 수록 최소 점화에너지가 작아지는 것으로 생각되기 때문에 향후 불꽃의 크기, 형상, 소멸시간 등을 가시화하기 위한 계측방법을 강구하여야 한다.

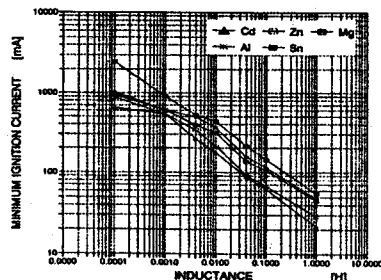


그림 8. 전극별 최소 점화에너지의 측정결과

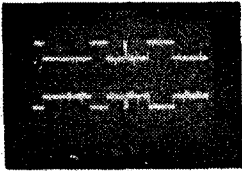


그림 9. 관측파형
(지향성회로, 카드뮴전극)

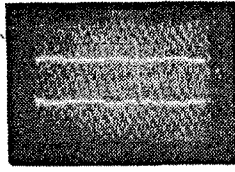


그림 10. 관측파형
(유도성회로, 카드뮴전극)

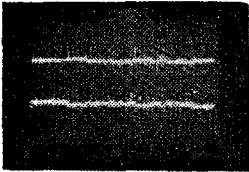
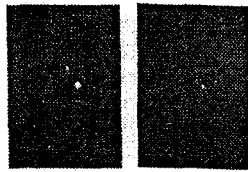


그림 11. 관측파형
(유도성회로, 주석전극)



(a) 카드뮴전극 (b) 주석전극
그림 12. 개폐불꽃의 크기 비교

표 2. 실험에 사용한 음극 전극의 물리적 성질

물성	지향률	지향률의 온도 계수	열기전력	비중	열팽창 계수	용융점	비등점
카드뮴	7.5	0.0038	+0.92	8.65	29.8	320.9	767
아연	6.10	0.0037	+0.77	7.14	33	419.43	906
마그네슘	4.46	0.004	+0.42	1.74	25.6	651	1,110
알루미늄	2.62	0.0039	+0.38	2.7	23.03	660.0	2,060
주석	11.4	0.0042	+0.45	7.35	20	231.85	2,270

· 개폐속도에 따른 최소 점화에너지의 영향

유도성회로의 차단시 변화하는 전류변화를 di/dt 의 측정은 고성능의 오실로스코프가 없으면 곤란하고 또한, 이를 변화시키는 장치를 만드는 것도 어렵다. 회로차단시 유기되는 역기전력 $e = -L di/dt$ [V]이므로 동일 인덕턴스에서 차단시의 전류변화율을 증가시키므로써 (즉 차단속도를 증가시키면) 최소 점화전류를 낮출 수 있으나 본 실험장치는 속도변화에 한계가 있다. 외국의 경우 동일 실험장치에서 속도변화를 준 것이 아니고 각각의 속도 특성을 갖는 실험장치로 실험을 하였다.

본 연구에서는 전기에너지의 개폐속도에 따른 최소 점화에너지에 대한 영향을 알아보기 위하여 IEC형 불꽃점화 실험장치의 텀스텐 전극의 회전속도를 4에서 112rpm까지 조정하면서 점화유무를 확인하였으며, 그 결과는 표 3과 같다. 실험가스는 에틸렌, 음극전극은 카드뮴 (Cd), 부하는 4mH 및 265mA에서 측정하였다.

일반적으로 전기에너지의 차단속도를 증가시키면 소멸효과가 감소되어 최소 점화에너지가 커지며, 차단속도를 감소시키면 소멸효과가 증가 되어, 높은 인덕턴스에서는 $L di/dt$ 전압이 감소되고 최소 점화에너지도 감소된다 [5]. 또한, 낮은 인덕턴스에서 점화메카니즘은 단락아크로부터 전달된 점화에너지에 의존하기 때문에 차단속도를 감소시키므로써 가연성 혼합물에 대해 전달된 에너지에 대한 이용 가능한 시간이 증가한다. 따라서 점화전류에 요구된 에너지는 감소한다.

그러나 실험결과 IEC 규격에서 제시한 80rpm에서와 동일한 현상을 나타냈으며 본 실험장치의 개폐속도 범위내에서는 큰 변화가 없었다. 본 실험에서의 개폐속도가 충분히 빠르지 않았기 때문으로 추정된다.

표 3. 개폐속도에 따른 최소 점화에너지의 영향에 대한 실험결과

회전수 (rpm)	점화 유무	비고
4	무	매 실험마다
40	무	텀스텐 전극
80	무	반을 200회
100	무	진시켰음.
112	무	

· 자장에 의한 최소 점화에너지의 영향

자장에 의한 최소 점화에너지의 영향을 알아보기 위하여 영구 자석의 자속밀도를 0.65kG에서 5.9kG까지 변화시키면서 불꽃점화 실험장치의 전극 주위에 접근시켰으나 점화에너지에 영향을 주지 못하였으며, 또한 전기적인 파형을 분석하여도 자속에 대한 영향은 없었다. 추후 실험방법에 대한 새로운 고찰이 있어야 된다고 본다.

4. 결론

본 논문에서는 본질안전방폭구조 전기회로의 정상시 및 사고시에 발생하는 전기에너지에 의한 가연성 혼합물로의 점화에너지들을 고찰하였다. 유도성회로에서의 전극재질, 개폐속도 및 자장이 최소 점화에너지에 미치는 영향을 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 에틸렌가스 및 유도성회로에서 실험에 사용한 음극재질은 카드뮴, 아연, 마그네슘, 알루미늄, 주석 순으로 최소 점화에너지가 증가함을 알 수 있었으며, 이는 사용한 전극의 금속재질의 물리적 성질 (비등점, 열기전력)에 관계되는 것으로 비등점이 큰 재질일수록 최소 점화에너지가 작았다. 실험 결과를 본질 안전회로 및 관련 회로의 인쇄회로 (PCB)나 배선시에 전선의 재료선정 등에 적용하면 안전측면에서 매우 유용하리라 생각된다. 또한, 본질안전회로 설계시 필요로 하는 금속재질의 종류 및 성분에 따른 실질적인 최소 점화에너지를 구하였다.

- 개폐속도에 따른 최소 점화에너지의 영향을 알아보기 위하여 불꽃점화 실험장치의 텀스텐 전극의 회전수를 4 ~ 112rpm 범위에서 가변시켰으나 최소 점화에너지의 변화를 가져오지 못하였다. 향후 개폐속도를 본 실험에서 실시한 최고 속도보다도 빠른 범위에서 실시하여 좀더 명확한 데이터를 구할 필요가 있다.

- 자장에 의한 최소 점화에너지의 영향을 알아보기 위하여 영구 자석의 자속밀도를 0.65kG에서 5.9kG까지 변화시키면서 불꽃점화 실험장치의 전극 주위에 접근시켰으나 점화에너지에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 이는 실험방법을 개선하여 계속 고찰하여야 할 향후 과제로 남기고자 한다.

參考 文獻

1. 산업안전연구원, 본질안전 방폭기기의 평가 및 사용안전에 관한 연구, 연구보고서 기전연 94-7-9, 1994. 12.
2. H. G. Bass, Intrinsic Safety Instrumentation for Flammable Atmospheres, Quartermaine House, U.K., 1984.
3. Robin Garside, Intrinsically Safe Instrumentation: a Guide, Urwin Brothers Ltd., U.K., 1982.
4. Richard J. Buschart, Electrical and Instrumentation Safety for Chemical Processes, 1991.
5. Ernest C. Magison, Electrical Instruments in Hazardous Locations, Instrument Society of America, 1980.
6. IEC Pub. 79-11, BS 5345 Part 4.
7. 대광서림, 전기공학 핸드북, 1977년.
8. 최상원, 이관형, 문정기, "비점화 (Non-Incendive)형 방폭 전기기기의 성능평가 및 평가방법", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1994. 7.
9. E.K. Greenwald, Electrical Hazards and Accidents, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.