

저항회로의 개폐불꽃에 의한 폭발성 가스의 점화한계에 관한 연구

이 춘 하

호서대학교 안전공학부
(1997년 10월 30일 접수, 1997년 11월 27일 채택)

A Study on The Ignition Limit of Flammable Gases by Discharge Spark of Resistive Circuit

Chun-Ha Lee

Devision of Safety Engineering, Hoseo University
(Received 30 October 1997; accepted 27 November 1997)

요 약

본 연구는 직류 저항회로의 개폐불꽃에 의한 폭발성 가스의 점화한계를 실험적으로 고찰하였다. 실험은 IEC형 불꽃점화 시험장치의 폭발용기에 폭발성 가스(메탄-공기, 프로판-공기, 에틸렌-공기, 수소-공기)를 각각 넣고 텅스텐 전극과 카드뮴 전극사이에서 발생하는 3,200회의 개폐불꽃에 의한 점화유무를 확인하르로서 점화한계를 구하였다. 또한 실험 장치의 점화감도교정을 실험한 후에 실시하르로서 실험의 정확성을 기하였다.

실험결과 최소 점화 전류값을 갖는 최소점화한계농도는 메탄-공기 8.3 [Vol%], 프로판-공기 5.25[Vol%], 에틸렌-공기 7.8[Vol%], 수소-공기 21[Vol%]로서 기존의 실험결과와 유사한 결과를 나타내었다. 또한 최소점화한계농도에서 전압과 최소점화전류와의 관계를 구한 결과 최소점화한계는 메탄, 프로판, 에틸렌, 수소가스의 순서로 낮아졌고, 점화전류의 크기는 전원전압의 크기와 반비례하고, 전극의 과열현상으로 인하여 전압 약 20[V]이하에서는 최소 점화전류가 2[A]를 넘으면서 심화한계곡선이 급격히 상승한다는 것 등을 알 수 있었다.

Abstract - This study measured the ignition limits of methane-air, propane-air, ethylene-air, and hydrogen-air mixture gases by discharge spark of D.C. power resistive circuit. The used experimental device is the IEC type spark ignition test apparatus, it consists of explosion chamber and supply-exhaust system of mixture gas. Mixture gases (methane-air, propane-air, ethylene-air, and hydrogen-air) were put into explosion chamber of IEC type spark ignition test apparatus, then it was confirmed whether ignition was made by 3,200 times of discharge spark between tungsten electrode and cadmium electrode. The ignition limits were found by increasing or decreasing the value of current. For the exact experiment, the ignition sensitivity was calibrated before and after the experiment in each condition.

The ignition limits were found by changing the value of concentration of each gas-air mixture in D.C. 24 [V] resistive circuit. As the result of experiment, it was found that the minimum ignition limit currents exist at the value of methane-air 8.3 [Vol%], propane-air 5.25 [Vol%], ethylene-air 7.8 [Vol%], and hydrogen-air 21 [Vol%] mixture gases. For each the minimum ignition concentration of gases, the relationships

between voltage and minimum ignition current were found.

The results are as follows.

- The minimum ignition limits are decreasing in the order of methane, propane, ethylene, and hydrogen.
- The value of ignition current is inversely proportional to the value of source voltage.
- The minimum ignition limit currents increase sharply at more than 2 [A]. The reason is caused by overheating the electrode.

Key words : mixture gas, D.C. power resistive circuit, discharge spark, IEC type spark ignition test apparatus, the minimum ignition limit current

1. 서 론

현재 국내에서는 가스의 소비증가와 함께 사고도 지속적으로 증가하는 추세로서 가스소비는 '92년 8,278천톤에서 '96년 15,535천톤으로 1.9배 증가한 반면 사고건수는 '92년 103건에서 '96년 577건으로 5.6배로 늘어났다.⁽¹⁾

가스사고중 사회적으로 큰 문제가 되고 있는 폭발사고의 원인은 여러 가지이지만 전기적 요인으로는 현장에 많이 설치되어 있는 전기기기나 배선 등에서 발생하는 불꽃, 아크 또는 과열 등이 있으며, 폭발성 가스가 존재하거나 존재할 수 있는 위험장소에서 전기적 원인에 의한 폭발사고를 방지하기 위하여는 방폭형 전기기기의 사용이 필수적이다.

방폭형 전기기기중에서 본질안전 방폭구조는 폭발위험장소에 설치되는 전기기기 및 배선의 어떤 부분에서 정상동작 및 사고시(단락, 지락, 단선 등)에 발생하는 불꽃, 아크, 과열이 주위에 있는 폭발성 가스에 점화 되지 않도록 한 구조로서, 회로의 전압과 전류를 폭발성 가스의 점화한계 이하가 되도록 구성하는 원리이며 국내 외에서 사용이 증가추세에 있다.⁽²⁾⁻⁽⁵⁾

본질안전 방폭 전기회로에 대한 연구는 1912년 영국의 South Wales 주에 있는 탄광에서 두 가닥의 나선을 합선시켜 경보를 발생하게 되는 신호장치가 원인이 되어 대형 가스 폭발사고가 일어나 광부 439명이 사망한 사고가 발생하면서 부터이며⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾, 선진 각국에서는 1960년대부터 본질안전 방폭구조의 전기기기에 대한 연구개발이 본격적으로 시작되었다.

이와 함께 Fenn, Lewis 등은 전기적인 불꽃에 의한 가스의 점화에 대한 물리·화학적인 특성에 대한 연구를 수행하였다.⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾ 또한, Bartels, 田中 등은 Breakflash No.3, Intermittent break apparatus, 동선인장단선형 등을 이용하여 점화한계에 대한 많은 보고가 있지만 주로 메탄가스를 대상으로 한 것이었으며⁽¹¹⁾⁻⁽¹²⁾, 현재 공업용으로

많이 이용되고 있는 수소가스 및 아세틸렌가스, 에너지원으로 널리 사용되고 있는 프로판가스에 대한 종합적인 연구는 미흡한 실정이다.

한편, 본질안전 방폭구조의 적용은 저전압 저전류에 의한 저에너지 회로의 전기설비에 한정되지만 실제로 기기를 설계하고 개발하기 위해서는 전기회로에서 발생하는 개폐불꽃에 의한 폭발성 가스의 점화한계를 알 필요가 있으나 국내에서는 현재 이에 대한 연구결과가 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 IEC(International Electrotechnical Commission)에서 규정한 불꽃 점화 시험장치를 이용하여 직류전원의 저항회로에 대한 폭발성 가스의 점화한계를 규명하는데 그 목적이 있다.

2. 실 험

2.1 실험장치

방전불꽃에 의한 폭발성 가스에의 점화한계를 측정하기 위한 실험장치구성은 주로 다음과 같은 시험설비로 구성된다.

- (1) 개폐불꽃 발생장치
- (2) 폭발성 가스 혼합공급장치
- (3) 시험회로를 구성하는 전원 및 부하

그림 1은 본 실험에 이용한 시험설비의 구성도이다.

2.1.1 개폐불꽃 발생장치

개폐불꽃 발생장치는 기계적으로 동작하는 개폐전극을 사용하여 통전중인 전기회로를 개폐할 때 발생하는 방전불꽃에 의한 가스 점화유무를 시험하는 장치로서 Wire brush형, 동선인장단선형, Break-flash No.3형, IEC형 등이 있다.

IEC형 불꽃점화 시험장치는 지금까지 개발된 각종 시험장치 중에서 점화강도가 가장 좋고 전극재질이 일반적인 것이며 구조가 단순하여 사용이 편리하므로 독일, 영국, 일본 기타 세계의 많은 나라에서 시험연구용으로 널리 사용되고 있다.

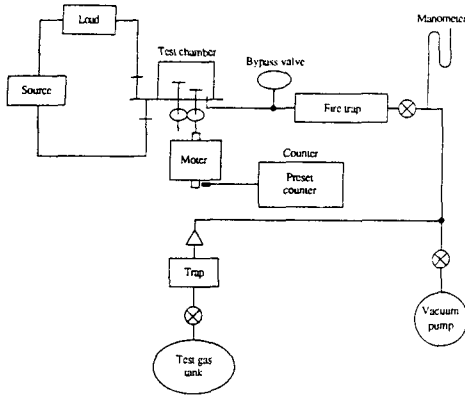


Fig. 1 Schematic diagram of ignition test apparatus for explosive gas

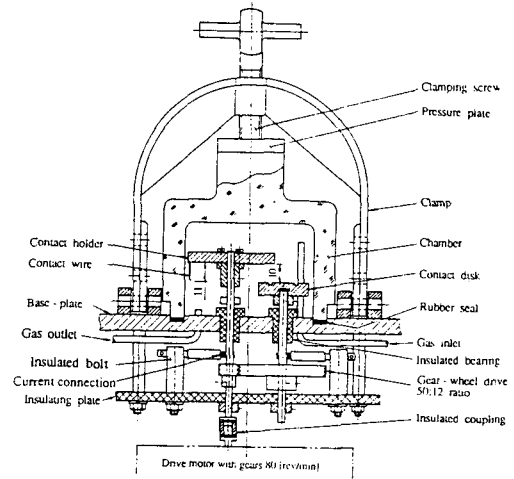


Fig. 2 Detail diagram of explosion chamber

본 실험에 사용한 IEC형 불꽃점화 시험장치는 IEC Publication 79-3(Spark test apparatus for intrinsically-safe circuit)에 규정되어 있는 것으로 불꽃 발생용의 전극부가 들어 있는 그림 2와 같은 폭발용기와 소정의 가스농도를 가진 혼합 가스의 공급 및 배기계통으로 크게 나눌 수 있다.

폭발용기는 내용적이 약 250 [cm³]로서 플라스틱 뚜껑과 베이스 플레이트 및 기밀유지를 위한 패킹 등으로 구성되어 있으며, 그 내부에 전극부가 들어 있는데 양극은 직경 0.2 [mm]의 텅스텐선(W)으로서 정사각형의 금속판 네 모퉁이에 1개씩 고정되어 있고 음극은 2줄의 평행한 홈(폭 2 [mm], 깊이 2 [mm])이 있는 카드뮴(Cd)의 원판으로 되어 있다.

텅스텐선이 고정되어 있는 금속판의 회전축과 카드뮴 원판전극의 회전축은 각각 80 [rpm]과 19.2 [rpm]의 속도로 반대 방향으로 회전하며, 양 중심축 사이에 시험회로를 접속하여 회전시키면 텅스텐선의 끝이 차례로 카드뮴의 표면과 접촉하면서 개폐불꽃이 발생한다.

텅스텐선은 그 끝이 카드뮴 원판에 있는 홈의 중간까지 오도록 고정되어 있으므로 전극의 회전축이 회전중일 때는 텅스텐선은 먼저 카드뮴 원판의 원주부와 접촉하여 그 상태로 카드뮴 원판의 표면과 텅스텐선의 끝은 서로 접촉을 유지하다가 홈이 있는 곳에서 일단 서로 떨어진 후 다시 접촉한다. 이후 계속 회전하면 카드뮴의 원주의 어디에선가 서로 떨어져 버린다.

양 전극(텅스텐선과 카드뮴 원판)의 상대적인 개폐속도는 텅스텐선이 카드뮴의 표면위를 이동중일때는 약 25 [cm/sec]이지만 텅스텐선이 카드뮴의 원주에서 떨어져 나갈때는 텅스텐선의

스프링 작용에 의하여 약 2,000 [cm/sec]에 이른다. 가스공급 및 배기계통에서는 특정 농도의 혼합가스를 혼합조내에 준비해 두고 폭발용기를 진공펌프에 의해 진공상태로 한다. 그리고 혼합조와의 압력차이에 의해 혼합가스를 폭발용기 내에 채워 넣어 점화가 되면 폭발압력 스위치에 의하여 전원이 차단됨과 동시에 수동으로 뚜껑을 열어 배기덕트를 통해 배기시키도록 되어 있다.

2.1.2 폭발성 가스 혼합공급장치

폭발성 가스와 공기의 농도를 실험조건에 맞추기 위해 공기를 분압식으로 혼합탱크 내에 채운후 균일하게 혼합하여 수소가스는 열전도율식의 분석계로 메탄, 프로판, 에틸렌가스는 적외선식의 분석계를 이용하여 혼합가스의 농도를 분석하였으며, 농도 분석계의 사양은 표 1과 같다.

2.1.3 시험 전기회로

시험 전기회로는 전원 및 부하로 구성되며 점화한계 측정을 위한 회로는 그림 3에 나타낸 것으로서 전원은 직류를 이용하였다. 이는 실제로 현장에서 사용되고 있는 제어회로, 계측회로 등에서 본질안전 방폭 전기회로로 이용되고 있는 것은 수십 [V] 이하의 직류회로가 대단히 많이 사용되고 있어 저압 직류전원에 대한 점화한계를 구하는 것이 실용적일 것으로 생각되기 때문이다.

또한, 회로에 사용된 전류제한 저항 R은 인덕턴스 성분의 영향을 배제하기 위하여 무유도 가변저항기를 사용하였으며 전원으로 사용한 전원부의 사양은 표 2와 같다.

Table 1 Specification of gas analyzer meters

구분	수소가스용	메탄, 에틸렌, 프로판 가스용
형식	열전도율식 내압 방폭구조	적외선식 통풍 내압 방폭구조
측정범위	0~100 [Vol.%]	메탄: 0~20 [Vol.%] 에틸렌: 0~15 [Vol.%] 프로판: 0~10 [Vol.%]
측정정밀도	F. S. ± 2 [%]	F. S. ± 2 [%]
출력신호	DC 0~5[mA] DC 4~20[mA] DC 0~16[mA] DC 0~1[A]	DC 0~5[mA]
전원	AC 100[V](± 10 [%]) $\times 60$ [Hz] $\times 2\phi$	AC 100[V](± 10 [%]) $\times 60$ [Hz] $\times 2\phi$
허용온도 범위	0~40[$^{\circ}$ C]	0~40[$^{\circ}$ C]

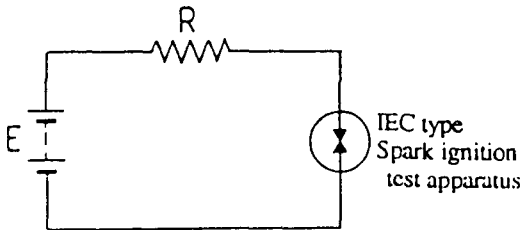


Fig. 3 Circuits of spark ignition test

2.2 실험방법

2.2.1 점화한계 결정방법

점화한계를 결정하기 위한 일반적인 규칙은 없으나 IEC 79-11 (Construction and test of intrinsically-safe and associated apparatus)에서 직류회로의 본질안전 방폭성을 평가할 때의 불꽃발생회수는 극성을 바꾸어 각각 800회 이상으로 규정하고 있다. 그러므로 본 실험에서는 Data의 산란을 방지하기 위하여 임의의 회로조건을 설정하고 불꽃발생 장치의 전극간에 연속 3,200회까지의 개폐불꽃을 발생시켜 대상으로 하는 폭발성 가스에의 점화유무를 확인하였다. 만일 가스에 점화를 일으켰을 경우에는 회로전류만을 5 [%] 감소시킨 상태에서 3,200회의 개폐불꽃 발생에 따른 가스에의 점화유무를 시험하였고 점화가 일어나지 않았을 경우에는 이와 반대로 하였다.

Table 2 Specification of power source

구분	DC Power Supply-1	DC Power Supply-2
입력	AC 110/220 [V] 50/60 [Hz]	AC 110/220 [V] 50/60 [Hz]
출력	DC 0~30 [V], 0~5 [A]	DC 0~500 [V], 0~1 [A]
맥동	0.03 [%]이하	0.03 [%]이하
방식	정전류	정전류

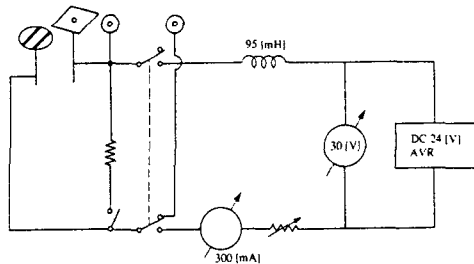


Fig. 4 Calibration circuit of ignition sensitivity

이상과 같은 과정을 반복하여 점화한계는 3,200회의 개폐불꽃으로도 가스에 점화되지 않은 전류값과 이 값 직전의 점화된 전류값의 평균을 점화한계값으로 정하였다.

2.2.2 점화감도 교정

각 회로 조건에서 점화한계를 측정하기 전후에 개폐 전극의 점화감도 교정을 실시하여 실험중에 소정의 감도가 유지되고 있었다는 것을 확인하였다. 만일 시험전의 감도가 양호하더라도 실험직후의 감도가 불량임이 판명되었을 경우에는 측정 도중에 전극상태가 변화되었으므로 텅스텐선의 교환 조정을 실시하고 재측정하였다.

감도 교정은 그림 4와 같은 교정회로에서 발생하는 1,600회 이내의 개폐불꽃이 표 3과 같은 교정가스 및 전류에 점화되도록 하였으며 공급 전압은 직류 24 [V], 인덕턴스는 95 [mH]이다.

2.2.3 폭발성 가스

최소 점화한계곡선을 구하기 위한 폭발성 가스는 IEC 79-11의 본질안전 방폭전기기기를 시험할 때 기기의 등급에 따른 대표적인 불꽃점화 시험가스인 메탄, 프로판, 에틸렌 및 수소가스를 대상으로 하였으며, 가스별 특성은 표 4와 같다.

Table 3 Calibration gas and current for ignition sensitivity

교 정 가 스		교정전류 [mA]
종 류	농도 [Vol%]	
메탄-공기혼합가스	8.3	110
프로판-공기혼합가스	5.25	100
에틸렌-공기혼합가스	7.8	65
수소-공기혼합가스	21	30

Table 4 Specification of gases

구분 가스	분자식	폭발한계 [Vol%]		당량농도 [Vol%]
		하한	상한	
메 탄	CH ₄	5.0	15	9.5
프로판	C ₃ H ₈	2.1	9.5	4.03
에틸렌	C ₂ H ₄	2.7	36	6.54
수 소	H ₂	4.0	75	29.58

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가스의 농도와 점화한계

그림 5는 전압 24 [V]인 저항회로에서 메탄, 프로판, 에틸렌 및 수소가스를 대상으로 하여 가스와 공기의 혼합비를 변화시켜 가면서 농도에 따른 점화한계전류의 관계를 구한 것이다.

가스별, 농도별로 점화한계가 다르게 나타나고 있으며 폭발하한계나 폭발상한계에 가까운 농도일수록 큰 전류가 필요하지만 어느 농도에서는 이 전류값이 최소가 된다. 최소점화에너지는 이론적으로 완전연소조건인 당량농도에서는 최소값을 가져야 하지만 실험결과 실제로 최소전류값을 갖는 농도는 수소가스 21[Vol%],

메탄가스 8.3 [Vol%]로서 당량농도보다 약간 낮고 프로판가스 5.25 [Vol%], 에틸렌가스 7.8 [Vol%]로서 당량농도보다 약간 높게 나타났으며 기존의 실험결과와 유사한 결과를 나타내었다. 이러한 현상은 당량농도에서는 폭발시 가연성 가스가 분자해리 등에 의해 완전연소 되지 못하기 때문이며 이보다 조금 높거나 낮은 농도에서 공기중의 산소와 가연성 가스가 완전연소 반응을 일으킬 수 있는 조건이 되기 때문인 것으로 생각된다.

그림 6~9는 각 가스별로 농도를 다르게 하였을때의 점화한계 전압과 전류의 관계를 구한 것이다. 일반적으로 저항회로에서는 개로할때와 폐로할때 각각 방전불꽃이 발생하게 되는데 에너지의 공급원은 전원이므로 점화전류의 크기는 전원전압의 대소에 따라 좌우되고, 가스의 농도에 따라 점화에너지가 다르다는 것을 알 수 있다.

3.2 가스별 최소점화한계

그림 10은 3.1의 결과에서 각 가스별로 최소 점화한계를 나타내는 곡선을 취해 모은 것으로 최소점화한계는 메탄, 프로판, 에틸렌, 수소가스의 순서로 낮아지면서 최소점화전류는 가스별로 차가 있고, 상대적으로는 에틸렌의 곡선이 메탄과 수소가스의 거의 중간에 위치한다는 것을 알 수 있다. 또한 전원전압의 크기가 점화한계에 영향을 미치는 것으로 보이지만 전원전압이 높으면 점화전류는 작아지면서 불꽃발생전극의 개폐시에 발생하는 방전지속시간이 길어지므로 점화에너지는 전압에 상관없이 거의 일정할 것으로 생각된다.

또한, 전압이 약 20 [V]이하에서는 모든 가스의 최소점화전류가 2 [A]를 넘으면서 급격히 상승하였다. 이러한 현상은 IEC형 불꽃점화시험

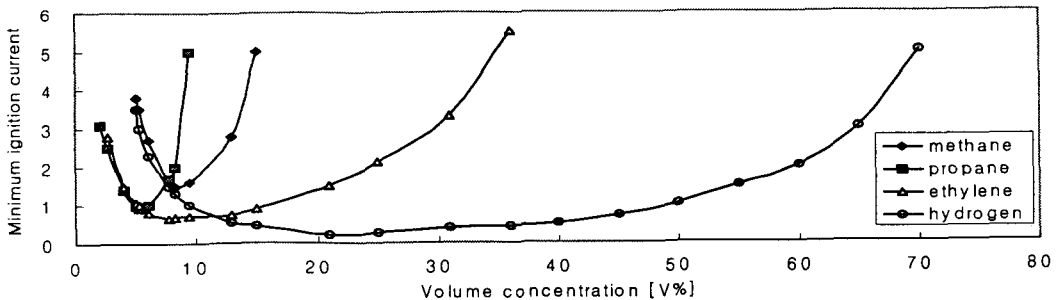


Fig. 5 The Relation between gas concentration and minimum ignition current (DC 24 [V] Resistive circuit)

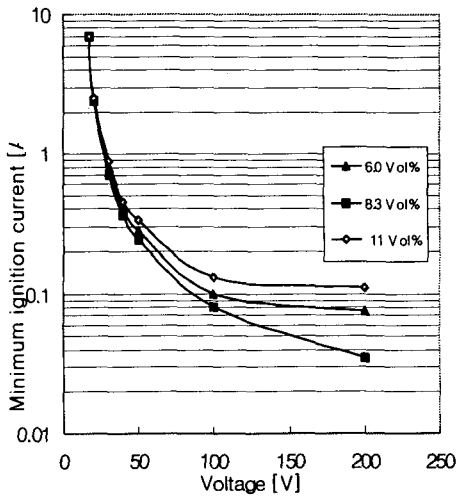


Fig. 6 The relation between gas concentration

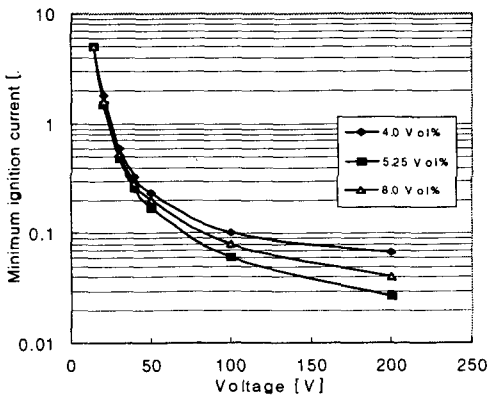


Fig. 7 The relation between gas concentration and minimum ignition (methane gas) and minimum ignition (propane gas)

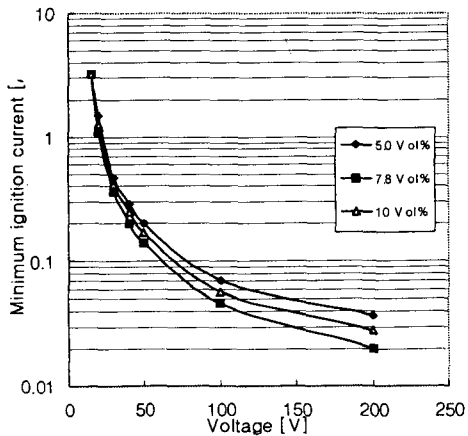


Fig. 8 The relation between gas concentration

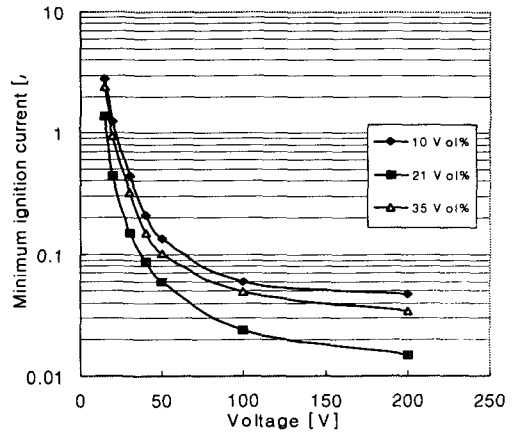


Fig. 9 The relation between gas concentration and minimum ignition (ethylene gas) and minimum ignition (hydrogen gas)

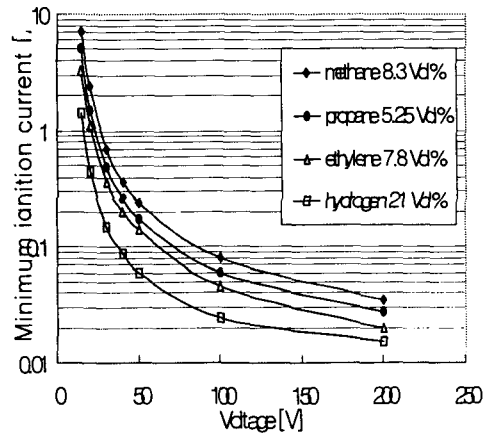


Fig. 10 Ignition limits of low voltage resistive circuit

장치는 약 2 [A]를 넘으면 텅스텐선 전극이 과열되므로 2 [A]를 넘는 경우는 순수한 방전불꽃에 따른 점화한계가 아니고 전극의 과열현상이 포함된 점화한계로 판단된다.

본질안전 방폭전기회로를 설계할 경우 전압과 전류의 크기에 대한 상한값은 대상가스의 종류, 전압, 전류 및 부하의 크기 등에 따라 결정되지만 저항회로에서는 안전율을 고려하여 전압은 200 [V]이하, 전류는 2 [A]이하가 적당한 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 저항회로의 개폐 불꽃에 의한

점화한계를 메탄, 프로판, 에틸렌 및 수소가스를 대상으로 하여 실험적으로 고찰하였으며 실험한 내용과 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 또한, 본 결과는 본질안전방폭형 전기기기의 설계에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

1. 최소점화한계는 메탄, 프로판, 에틸렌, 수소가스의 순서로 낮아지면서 상대적으로는 에틸렌 가스가 메탄과 수소가스의 거의 중간에 위치한다는 것을 알 수 있다.

2. 저항회로의 개폐불꽃 에너지의 공급원은 전원이므로 점화전류의 크기는 전원전압의 크기와 반비례적인 현상을 나타낸다.

3. 점화한계는 전압 약 20 [V]이하의 영역에서는 최소점화전류가 2 [A]를 넘으면서 점화한계 곡선이 급격히 상승하였으며, 이 경우에는 순수한 개폐불꽃에 따른 점화한계가 아니고 전극 과열 현상이 포함된 점화한계이므로 본질안전 방폭전기회로에 사용되어지는 도선은 회로전류에 비례하여 충분한 굵기의 전선을 사용하여야 할 것으로 생각된다.

4. 본질안전 방폭전기회로를 설계 및 제작할 경우 저항회로에서는 전압은 200 [V]이하, 전류는 2 [A]이하의 범위가 되도록 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

감사의 글

본 논문은 호서대학교 공업기술연구소 연구비로 수행하였음.

참고문헌

- 이철중, " '97가스안전관리대책", 가스안전, 1997/1·2·3, pp. 12-15, (1997).
- IEC 79-0, "Electrical apparatus for explosive gas atmospheres-Part 0 : Gener requirements", (1983).
- IEC 79-11, "Electrical apparatus for explosive gas atmospheres-Part 2 : Intrinsic safety", (1983).
- 이춘하 외, "방폭시험 평가방안에 관한 연구 (I)", 한국 기계연구소, UCN1 99-1328·D, (1990).
- 이춘하 외, "방폭시험 평가방안에 관한 연구 (II)", 한국 기계연구소, UCN2 34-1481·D, (1991).
- Magison and Ernest C., "Intrinsic safety", Instrument Society of America, Printed in the United States of America, pp. 66-71, (1984).
- 田中隆二, "本質安全 防爆電氣 回路に關する 基礎的研究", 産業安全研究所, (昭和 45).
- Fenn. J. B., "Lean Flammability Limit and Minimum Spark Ignition Energy", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 43, No. 11, pp. 2865-2869, (1951).
- Lewis, B. and G. van Elbe, "Combustion, Flames and Explosion of Gases", 2nd ed., Academic, New York, Chapter V, (1961).
- 田中隆二, 坂主勝弘, "プロパン, エチレン及び水素の爆發特性の比較", 産業安全研究所, RIIS-RR-85-1, (1985).
- Bartels. A. L., "Ignition Energies of Methane-Air Mixtures as a Function of Electrical Discharge Type", IEE Conference Publication No. 134, London, pp. 148-152, (1975).
- 田中隆二, "銅線切斷法による放電火花のメタン點火限界についての研究", 産業安全研究所, RIIS-RR-14-3, (1966).