

## 저항을 이용한 프로판-공기 혼합가스의 점화한계 개선에 관한 연구

### A Study on the Improved Ignition Limit with Resistor for Propan-air Mixture Gas

이춘하<sup>†</sup> · 오종용 · 옥경재 · 지승욱\* · 이광식\* · 심광렬\*\*

Chun-Ha Lee<sup>†</sup> · Jong-Ryong Oh · Kyoung-Jea Ok · Seung-Wook Jee\* · Kwang-Sik Lee\* · Kwang-Ryul Shim\*\*

호서대학교 환경안전공학부, \*영남대학교 전자정보공학부, \*\*울산과학기술대학교 전기전자학부  
(2003. 11. 8. 접수/2004. 2. 4. 채택)

#### 요 약

본 논문은 IEC형 불꽃점화 시험장치를 이용하여 저압 유도회로의 최소 점화한계를 프로판-공기 5.25 Vol.%의 혼합 가스에 대하여 실험적으로 구하였으며, 또한 유도회로의 인덕턴스 L에 안전소자로서 저항을 병렬접속하였을 경우 프로판-공기 5.25 Vol.%의 혼합 가스에 대한 점화한계 개선효과를 고찰하였다. 그 결과, 최소 점화한계는 전류의 크기에 따라 좌우되었다. 또한, 전원으로로부터 공급되는 에너지는 인덕턴스에 우선 축적되고, 그 초과분의 에너지가 폭발성 가스의 점화원으로 작용하였다. 점화한계 개선효과는 인덕턴스가 300 mH일 때, 최고 330%의 개선효과가 나타났으며 인덕턴스가 클수록 점화한계 개선효과가 크게 나타났다. 또한 병렬로 접속한 저항의 크기가 적을수록 점화한계 개선 효과가 크다. 본 연구결과는 본질안전 방폭형 전기기기의 연구개발을 위한 기본자료로 활용할 수 있을 뿐만 아니라 이들 기기의 방폭 성능에 대한 시험자료로도 활용이 가능할 것으로 사료된다.

#### ABSTRACT

This paper describes the minimum ignition limits for propane-air 5.25 Vol.% mixture gases in low voltage inductive circuits. The improved effects on the ignition limit are studied by parallel safety components(resistors) for propane-air 5.25 Vol.% mixture gas in low voltage inductive circuits. The experimental devices used in this test are the IEC type spark ignition test apparatus. The minimum ignition limits are controlled by the values of current in inductive circuit. Energy supplied from electric source is first accumulated at the inductance, it's extra energy is working as ignition source of the explosive gas. The improved effects on the ignition limit are respectively obtained as the maximum rising rate of 330% by composing parallel circuits between inductance and resistor as compared with disconnecting inductance with the safety components. The more values of inductance increase the higher improved effects of ignition limit rise. The less values of resistor the higher improved effects of ignition limit rise. It is considered that the result can be used for not only data for researches and development of intrinsically safe explosion-proof machines which are applied equipment and detectors used in dangerous areas but also for datum for its equipment tests.

**Keywords** : Minimum ignition limits, Spark ignition test apparatus, Discharge spark, Inductive circuit, Improved effects, Safety components

#### 1. 서 론

폭발성 가스가 존재하거나 존재할 수 있는 위험장소에서 전기적 원인에 의한 폭발사고를 방지하기 위하여

는 내압, 안전증가 및 본질안전 등과 같은 방폭형 전기기기의 사용이 필수적이다.<sup>1)</sup>

이들 방폭형 전기기기 중에서 본질안전 방폭구조는 폭발위험장소에 설치되는 전기기기 및 배선의 어떤 부분에서 정상동작 및 사고시(단락, 지락, 단선 등)에 발생하는 불꽃, 아크, 과열이 주위에 있는 폭발성 가스의

<sup>†</sup>E-mail: leecha@office.hoseo.ac.kr

점화한계 이하가 되도록 구성하는 원리이며 국내외에서 사용이 증가 추세에 있다.<sup>2,5)</sup>

따라서 전기회로의 회로정수를 적절히 선택하여 전압과 전류의 크기를 폭발성 가스의 점화한계 이하로 설계할 수 있는 전기·전자기기는 대부분 본질안전 방폭형 전기기기로 만들어질 수 있다. 그러나 저항회로에서 본질안전 방폭성을 갖추기 위해 저항을 크게 함으로써 전압 또는 전류의 어느 한쪽이나 양쪽이 작게 되었을 때 기기가 동작을 하지 않거나 정상동작을 하지 못하게 되는 경우에는 본질안전 방폭형 전기기기로 이용될 수 없는 기기라고 할 수 있다.

이와는 반대로 유도회로에서는 병렬 저항을 이용하여 기기의 통상적인 동작에는 거의 영향을 미치지 않으면서 단순히 회로에서 발생하는 점점간의 개폐불꽃, 배선의 단선 및 단락불꽃으로 인해 방출되는 방전에너지를 억제하여 불꽃을 소거해 줄으로써 폭발성 가스에의 점화를 방지 할 수 있는 안전소자의 적용이 가능하다.<sup>6,7)</sup> 즉, 본질안전 방폭의 관점에서 불꽃소거의 목적은 점점 등에서 발생하는 방전에너지 제어하여 폭발성 가스에 점화되지 않게끔 하는 것이다. 이때 본질안전 방폭이 대상으로 하는 불꽃은 단순히 개폐접점에서 발생하는 불꽃만이 아니라 통전 중인 배선의 단선이나 단락 등의 사고에 의한 불꽃을 포함하여 생각하여야 한다.

따라서, 본 논문에서는 본질안전 방폭형 전기기기의 유도회로에 적용할 수 있도록 하기 위하여 저압 유도성 전기회로에서 발생하는 개폐불꽃에 의하여 폭발성 가스에 점화되는 최소점화한계를 구하였다. 다음으로, 유도성 회로의 인덕턴스 L에 병렬로 안전소자를 접속한 회로에서의 점화한계 개선효과를 구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 개폐불꽃 발생장치는 지금까지 개발된 각종 실험장치 중에서 점화감도가 가장 우수하며 전극재질이 일반적인 IEC형 개폐불꽃 발생장치를 사용하였다.<sup>8)</sup>

이 시험장치는 크게 Fig. 1과 같은 불꽃 발생용의 전극부가 들어있는 폭발조와 소정의 가스농도를 가진 혼합가스의 공급 및 배기계통으로 크게 나눌 수 있다.

폭발조는 내용적이 약 250 cm<sup>3</sup>로서 플라스틱 뚜껑과 베이스 플레이트 및 기밀유지를 위한 패킹 등으로 구성되어 있으며 그 내부에 전극부가 들어있는데 양극은 직경 0.2 mm의 텅스텐(W)선으로서 정사각형의 금속판 네 모퉁이에 1개씩 고정되어 있고 음극은 폭 2 mm,

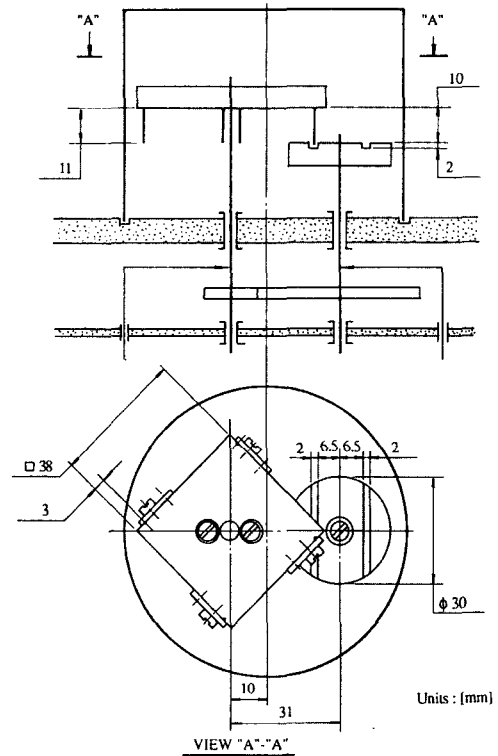


Fig. 1. Shape and size of electrode part.

깊이 2 mm인 2줄의 평행한 홈이 있는 카드뮴(Cd)의 원판으로 되어 있다.

텅스텐선이 고정되어 있는 금속판의 회전축과 카드뮴 원판전극의 회전축은 각각 80 rpm과 19.2 rpm의 속도로 서로 반대 방향으로 회전하며 양 중심축 사이에 시험회로를 접속하여 회전시키면 텅스텐선의 끝이 차례로 카드뮴의 표면과 접촉하면서 개폐불꽃이 발생한다.

양 전극(텅스텐선과 카드뮴 원판)의 상대적인 개폐속도는 텅스텐선이 카드뮴의 표면위를 이동중일때는 약 25 cm/sec이지만 텅스텐선이 카드뮴의 원주에서 떨어져 나갈때는 텅스텐선의 스프링 작용에 의하여 약 2,000 cm/sec에 이른다.

가스공급 및 배기계통에서는 5.25 Vol.%의 프로판-공기 혼합가스를 혼합조 내에 준비해 두고 폭발조를 진공펌프로 의해 진공상태로 한다. 그리고 혼합조와의 압력차이에 의해 혼합가스를 폭발조 내에 채워 넣어 점화가 되면 폭발압력 스위치에 의하여 전원이 차단됨과 동시에 수동으로 뚜껑을 열어서 배기시키도록 되어 있다.

한편, 폭발성 가스와 공기의 농도를 실험조건에 맞추기 위해 공기를 분압식으로 혼합탱크 내에 채운 후 균일하게 혼합하여 적외선식의 분석계를 이용하여 혼

합가스의 농도를 분석하였다.

**2.2 실험방법**

**2.2.1 점화한계 결정 방법**

IEC 60079-11(Intrinsic safety)에서는 직류회로의 본질안전 방폭성을 평가할 때, 불꽃발생회수를 극성을 바꾸어 각각 800회로 하여 총 1600회 이상으로 규정하고 있다. 그러므로 본 실험에서는 Data의 산란을 방지하기 위하여 임의의 회로조건을 설정하고 불꽃발생 장치의 전극간에 IEC 기준의 2배인 연속 3200회까지의 개폐불꽃을 발생시켜 프로판-공기 5.25 Vol.% 혼합가스에서의 점화유무를 확인하였다. 만일 가스에 점화를 일으켰을 경우에는 회로 전류만을 5% 감소시킨 상태에서 3,200회의 개폐불꽃 발생에 따른 가스에서의 점화유무를 시험하였고 점화가 일어나지 않았을 경우에는 이와 반대로 하였다.

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 개폐전극의 점화감도 교정을 실시하여 실험 중에 소정의 감도가 유지되고 있었다는 것을 확인하였다. 만일 시험전의 감도가 양호하더라도 실험직후의 감도가 불량임이 판명되었을 경우에는 측정 도중에 전극상태가 변화되었으므로 텅스텐선의 교환 조정을 실시하고 재측정하였다.

감도교정은 Fig. 2와 같은 교정회로에서 발생하는 1,600회 이내의 개폐불꽃이 프로판-공기 5.25 Vol.% 혼합가스에 대하여 65 mA의 전류에 점화되도록 하였으며 공급전압은 직류 24 V, 인덕턴스는 95 mH이다.

**2.2.3 실험**

안전소자에 의한 점화한계 개선효과를 쉽게 파악할 수 있도록 Fig. 3과 같이 안전소자 R이 없는 경우를 먼저 측정하고 다시, Fig. 4와 같이 유도회로의 인덕턴스에 병렬로 안전소자인 저항을 연결하고 프로판-공기 5.25 Vol.%의 혼합가스에서의 점화한계를 측정하였다.

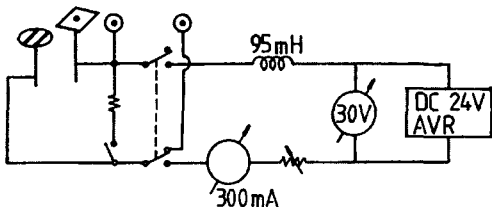


Fig. 2. Calibration circuit of ignition sensitivity.

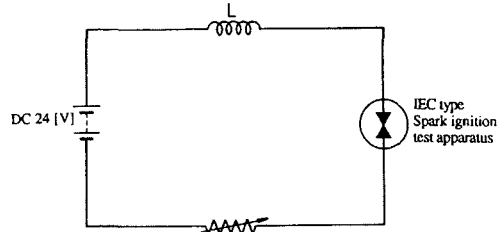


Fig. 3. Inductive circuit for spark ignition test.

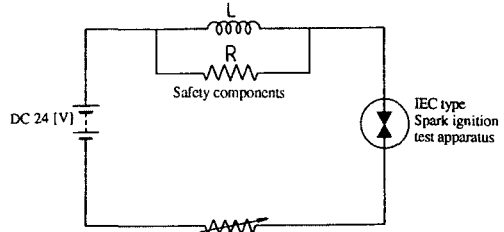


Fig. 4. Inductive circuit for improvement of ignition limit.

실험에 사용된 안전소자는 주변에서 흔히 볼 수 있는 탄소피막형 저항 1 kΩ, 2 kΩ, 3.9 kΩ, 8 kΩ, 20 kΩ 등이 사용되었다.

**3. 실험 결과 및 고찰**

**3.1 점화한계 실험**

Fig. 5는 프로판-공기 5.25 Vol.% 혼합가스에 대한 DC 24 V 유도성 회로에서의 점화한계를 구한 것이다.

실험 회로에서 인덕턴스가 1 mH 이상의 영역에서는 인덕턴스의 크기가 점화한계에 영향을 미치게 되지만 그 이하의 영역에서는 인덕턴스의 크기에 관계없이 최소 점화전류가 거의 일정하게 되었다. 1 mH 이하에서는 인덕턴스가 적으면 회로가 저항성을 띄게 되어 저항회로의 경우와 같은 방전형식을 보이게 되어, 전원으로 부터 공급되는 방전에너지에 의한 영향이 증대하기 때문에 전원전압의 크기에 좌우되는 것으로 생각된다.

또한 인덕턴스가 1 mH 이상에서는 인덕턴스 L의 값과 최소점화한계전류가 선형관계에 있으므로 다음 실험식 (1)로 나타내어질 수 있다.

$$\log I_m = -0.51 \log L - 1.58 \tag{1}$$

단,  $I_m$  : 최소점화전류[A]

$L$  : 인덕턴스 [H]

$\alpha, \beta$  : 상수

또한, Fig. 5의 점화한계 곡선에서 인덕턴스 L에 축적되는 에너지를  $W=1/2 LI^2$  식을 이용하여 1mH 이

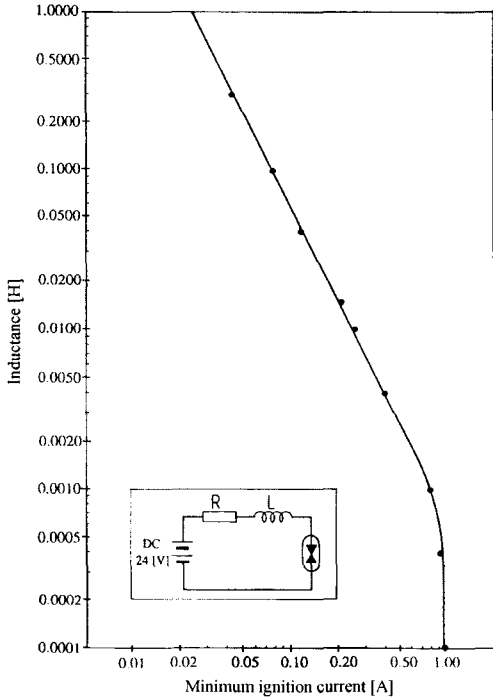


Fig. 5. Ignition limits of low voltage inductive circuit.

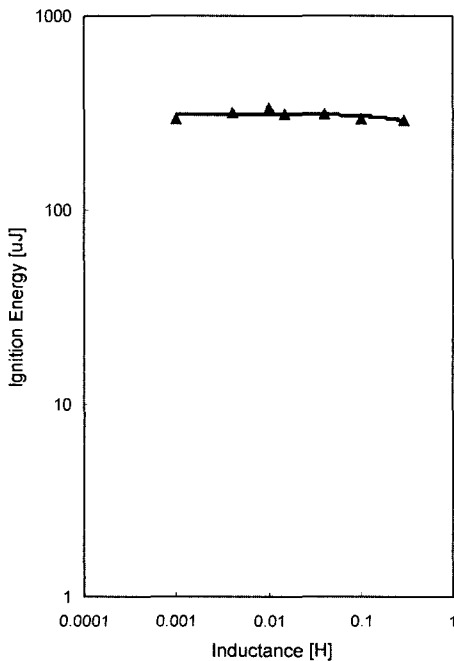


Fig. 6. Storage Energy of Inductance.

상의 영역에서 구하여 보면,  $L=0.02$ 일 때  $I=0.18$ 이 되어  $W=1/2 \times 0.02 \times 0.18^2 \approx 317 \mu J$ 이 된다. 이상과 같은 방법으로 축적에너지를 구하여 보면 Fig. 6과 같이 인덕턴스 값과 무관하게 317  $\mu J$ 의 일정한 값을 보인다.

이는, 유도성 회로의 경우 전원으로부터 공급되는 에너지가 “전류가 흐르려고 하면 전류를 흘리지 않으려고 하고, 전류가 흐르지 않으려고 하면 흘리려는 인덕턴스 고유의 성질로 인해” 인덕턴스에 우선 축적되고, 그 초과분의 에너지가 폭발성 가스의 점화원으로 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2 점화한계 개선 실험

저항 1 k $\Omega$ , 2 k $\Omega$ , 3.9 k $\Omega$ , 8 k $\Omega$ , 20 k $\Omega$ 을 Fig. 4와 같이 인덕턴스 L에 각각 병렬로 접속하였을 경우의 최소 점화한계 개선효과를 Fig. 7에 나타내었으며, Fig. 7에서 점선은 병렬저항이 없을 때의 점화한계값이다.

Fig. 7에서 병렬 저항을 연결하였을 경우 점화한계가 전반적으로 상승하였음을 알 수 있으며, 특히 인덕턴스가 수십 [mH] 이상에서부터 점화한계 개선효과가 현저히 높아졌고, 회로의 인덕턴스가 클수록 또한 병렬저항이 작을수록 점화한계가 높아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에서 IEC형 불꽃점화 시험장치를 스위치 S로

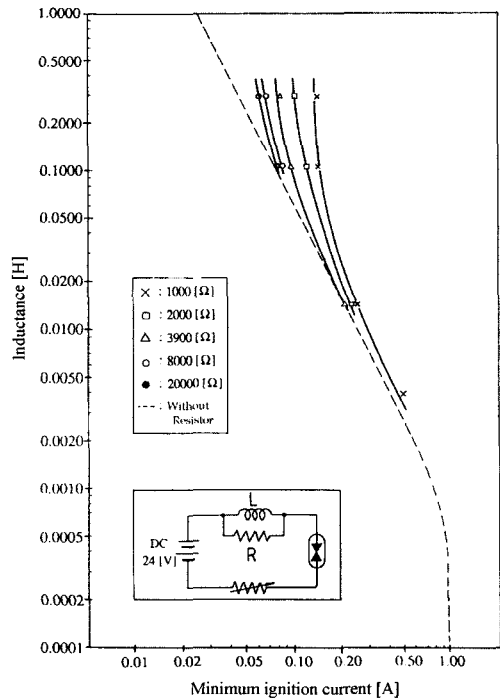


Fig. 7. Improvement effect of ignition limits.

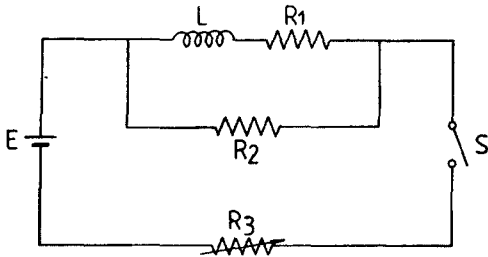


Fig. 8. Connection circuit of shunt resistance.

놓고, 코일의 직렬 저항을  $R_1$ , 병렬 저항을  $R_2$ , 전류조  
정저항을  $R_3$ 로 하여 다시 그리면 Fig. 8과 같이 된다.

Fig. 8에서 스위치 S를 개로한 순간에 방전불꽃이 발  
생하지 않는 것으로 가정하였을 때  $L, R_1, R_2$ 로 된 폐  
회로에 흐르는 전류를  $i$ 라고 하면 Kirchhoff의 전압법  
칙에 의해 다음과 같이 된다.

$$L \frac{di}{dt} + (R_1 + R_2)i = 0 \tag{2}$$

초기조건으로는  $t=0$ 에서  $i = I_0$ 라고 하면

$$i = I_0 e^{-\frac{t}{T}} \tag{3}$$

단,

$$I_0 = \frac{R_2}{R_1 R_2 + R_3(R_1 + R_2)} E$$

$$\frac{3E}{R_1 + R_3} E \quad (\because R_2 \gg R_1)$$

$$T = \frac{L}{R_1 + R_2} \tag{4}$$

따라서 점접을 개로한 순간의 코일 양단의 단자전압  
 $E_L$ 은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$E_L = -L \frac{di}{dt}$$

$$= \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_3} E e^{-\frac{t}{T}}$$

$$= \frac{R_2}{R_3} E e^{-\frac{t}{T}} \tag{5}$$

식 (5)에서 병렬저항  $R_2$ 의 저항값이 작을수록  $E_L$ 의  
값이 작아지면서 스위치 S에 걸리는 전압이 작아지므  
로 점화한계가 상승하게 됨을 알 수 있다.

또한, 상기와 같은 조건에서 스위치 S를 개로하였을  
때 폐회로에서 소비되는 에너지  $W$ 를 구하면

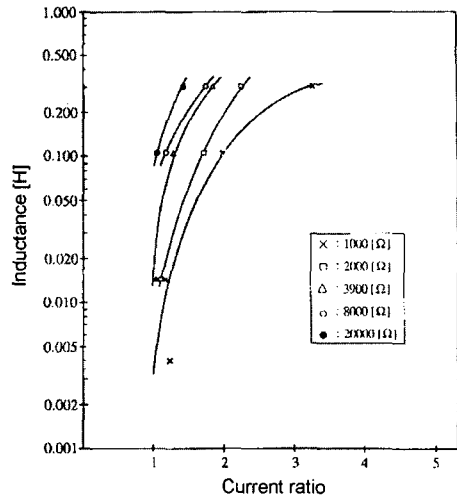


Fig. 9. Improvement effect of ignition limits (current ratio  
for shunt resistance).

$$W = \int_0^\infty i^2 (R_1 + R_2) dt$$

$$= \frac{1}{2} \frac{L R_2^2 E^2}{[R_1 R_2 + R_3(R_1 + R_2)]^2} \tag{6}$$

$$\frac{3E}{2(R_1 + R_3)^2} \quad (\because R_2 \gg R_1) \tag{7}$$

$$= \frac{1}{2} L I_0^2 \tag{8}$$

이 되어, 스위치 S를 열기 전 인덕턴스 L에 축적되어  
있는 전자에너지와 같아짐을 알 수 있다. 또한 식 (6)  
에서 병렬저항  $R_2$ 의 저항값이 작을수록 코일에 흐르는  
전류가 작아지므로 코일에 축적되는 전자에너지도 작  
아지면서 점화한계가 상승하게 됨을 알 수 있다.

또한, Fig. 7에서 병렬저항을 연결하였을 때와 연결  
하지 않았을 때의 최소 점화전류비를 횡축으로 하여  
다시 그리면 Fig. 9와 같이 된다. Fig. 9에서 인덕턴스  
가 300 mH일 때 최고 330%의 점화한계 개선효과가  
나타났으며, 인덕턴스가 클수록 효과가 크다는 것을 알  
수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 저압직류 유도회로의 인덕턴스 L에  
기기의 통상적인 작동에는 영향을 미치지 않으면서 단  
순히 회로에서 발생하는 방전에너지지를 억제하여 주는

안전소자로서 주변에서 쉽게 구할 수 있는 탄소피막형 저항을 병렬접속하였을 경우의 점화한계를 구함으로써 최소점화한계가 개선되는 것을 실험적으로 구하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 저항을 병렬로 접속한 경우, 수십 [mH] 이상의 인덕턴스 값을 가지는 영역에서 점화한계 개선 효과가 나타나기 시작하였으며 그 이하의 영역에서는 효과가 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다.

(2) 점화한계 개선 효과는 병렬로 접속한 저항의 크기가 적을수록 효과가 크다. 이는 병렬 접속 저항의 크기가 작을수록 코일에 흐르는 전류를 적게하고 코일에 축적되는 전자에너지도 줄어들음으로써 점화 한계가 상승하는 것으로 사료된다.

(3) 저항 병렬 접속의 경우 인덕턴스가 300 mH일 때 최고 330%의 점화한계 개선효과가 나타났고, 인덕턴스가 클수록 점화한계 개선효과가 크다는 것을 알 수 있다.

(4) 저압 유도회로의 점화한계는 전류의 크기에 의존하지만 인덕턴스가 1 mH 이하의 영역에서는 인덕턴스의 크기에 관계없이 최소 점화전류가 거의 일정하였다.

(5) 반대로, 1 mH 이상의 영역에서는 최소 점화전류  $I_m$ 과 인덕턴스  $L$ 의 관계를  $\log I_m = -0.51 \log L - 1.58$ 의 실험식으로 유도할 수 있었다.

(6) 인덕턴스에 축적되는 에너지가 317  $\mu$ J이 될 때까지는 폭발성 가스의 점화가 일어나지 않았으며, 이는 인덕턴스 고유의 성질로 인해 전원으로 부터 공급된 에너지가 인덕턴스에 우선적으로 축적되고, 그 초과분의

에너지가 폭발성 가스의 점화원으로 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구결과는 유도회로를 가지는 본질안전 방폭형 전기기기의 연구개발을 위한 기본 자료로서 활용할 수 있을 뿐만 아니라 이들 기기의 방폭성능에 대한 시험 자료로도 활용이 가능할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 이춘하 외, "저항회로의 개폐불꽃에 의한 폭발성 가스의 점화한계에 관한 연구", KIGAS Vol. 1, No. 1, December(1997).
2. IEC 60079-0, "Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres-Part 0: General Requirements" (2000).
3. IEC 60079-11, "Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres-Part 2 : Intrinsic Safety"(1999).
4. 이춘하 외, "방폭시험 평가방안에 관한 연구(I)", 한국기계연구소, UCN199-1328 · D(1990).
5. 이춘하 외, "방폭시험 평가방안에 관한 연구(II)", 한국기계연구소, UCN234-1481 · D(1991).
6. 이춘하, "본질안전 방폭 전기회로의 점화한계에 관한 연구", 박사학위논문, 영남대학교(1995).
7. 田中隆二, "低壓直流誘導回路の開離火花による爆發性ガス蒸氣の點火限界", 産業安全研究所, RIIS-RR-17-6, (1969).
8. IEC 60079-3, "Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres-Part 3: Spark-test Apparatus for Intrinsically-safe Circuits"(1990).