# 고주파 스파크에 의한 가연성 혼합가스의 점화위험성에 관한 연구

崔 相 源, 李 寬 珩, 文 正 基
한국산업안전공단 산업안전연구원 선임연구원, 기전안전연구실장, 한국기계연구원 책임연구원

# A Study on the Ignition Hazard of Flammable Mixtures by Radio-Frequency Spark

Sang-Won Choi, Gwan-Hyung Lee, Jung-Gi Moon
Industrial Safety Research Institute, Korea Industrial Safety Corporation, Korea Institute of Machinery and Materials

***Abstract***:: With a progress of electrical and electronic technology, radio-frequency circuits including high frequency components are widely applied to various industrial installations. Some of them are used in hazardous locations where explosive or flammable gases exist. As a result, ignition of such gases may be induced by a spark discharge when the radio frequency circuits are switched on or off.

The purpose of this study is to investigate the ignition hazards of acetylene-air and ethylen-air mixtures experimentally based on the IEC 79-3 publication. In this experiment, we used a high frequency resistive circuit which consists of a co-axial cable, a 10 Ω, 20Ω, 30Ω, 40Ω or 50Ω resistor and a power amplifier with frequency range up to almost 1 MHz.

Experimental results show that the ignition of the acetylene-air and ethylen-air mixtures due to spark discharge depends primarily on the frequency of the power source in the resistive circuit: the minimum ignition voltage increases gradually with the increase of the frequency.

## 1. 머리말

전기·전자기술의 발달에 따라 최근 고주파 전기회로를 내장한 전기·전자기기가 증가하고 있으며, 이들이 가연성 혼합기체가 존재하는 장소 (이하 방폭지역이라 한다.)에서 사용될 경우 이 고주파 전기·전자기기에서 발생되는 고주파 스파크에 의한 점화폭발이 일어날 위험성이 있다.

본 연구에서는 고주파 전기회로 (특히 저항성)에서 발생되는 고주파에 대하여 주파수 변화에 따른 최소 점화에너지 즉 전압×전류를 측정하여 관련 고주파 전기·전자기기의 설계시 필요한 설계 Data를 구하였다. IEC (국제전기기술위원회)의 불꽃점화 실험장치를 이용하여 주파수를 60 Hz에서 고주파인 1 MHz 부근까지 변화시키면서 저항회로에서 아세틸렌과 에틸렌가스에 대하여 측정하였다.

또한 고주파 방사 (Radiation)에 의한 점화위험성을 고찰하고, 저항회로의 점화성위험성과 안테나로서 작용하는 금속성 구조물의 점화위험성을 비교·분석하였다.

## 2. 고주파에 의한 점화위험성 실험회로

고주파에 의한 점화위험성은 전기기기가 갖는 고주파 회로의 단선 또는 단락시에 발생하는 전기불꽃과 고주파 방사에 의해 방폭지역 구조물이 안테나로 작용하여 발생되는 전기불꽃에 대한 위험성으로 크게 나눌 수 있다. 고주파 방사에 의한 점화위험성 실험은 그림 1과 같이 안테나로 작용하는 수신구조물의 종류가 다양하기 때문에 이에 따른 전기적인 등가회로도 각각 달라 현장에서 일일이 측정한 Data를 사용하는 시뮬레이션 및 실험이 필요하다. 그러므로 실험조건을 충족시키기가 용이하지 않다.

고주파 방사에 의한 점화위험성은 전자파가 금속성 도체구조물과 충돌하여 전류를 야기시키는 무선주파수 (Radio Frequency)송신기에 의해 발생하며, 야기된 전류의 전폭은 송신된 신호의 파장 및 전자장의 파장에 관련된 구조물의 형상과 크기에 의존하게 된다. 정상적으로 접촉하고 있는 구조물의 부분이 순간적인 차단 또는 분리 (예; 진동 또는 보수시)될 때 만약 차단시에 야기된 전압 또는 전류가 충분히 크다면 스파크가 발생할 수 있다고 영국의 전자기기 기준 위원회 (Electronic Equipment Standards Committee)에서 보고하고 있다. 만일 이러한 상황이 방폭지역에서 발생된다면 위험상태가 초래될 수 있다. 그러나 점화가능성은 스파크가 가연성분위기를 점화시킬 수 있는 충분한 에너지를 방출하여야 하는 등 여러 가지 요인에 의존한다.

고주파에 의한 점화위험성의 실험에 대해서는 Bittner, Burstow 등이 저항회로와 안테나로서 작용하는 구조물에서의 등가 LCR 회로로 점화위험성을 평가할 목적으로 점화한계를 보고한 바 있다. 또한, 일본에서는 도선인장 단선형에 의한 開路時의 점화한계를 발표하였다. 그러나 전자의 논문에서는 점화한계를 구하는 조건이 명확하지 않고, 후자는 開路時만을 중심으로 검토한 것이기 때문에 고주파 전기회로의 개폐불꽃에 의한 위험성을 평가하는데 충분하지 않다.

개폐불꽃에 의한 점화한계를 구하는 기본적인 전기회로로서 저항성회로, 용량성회로 및 유도성회로가 있다. 유도성회로는 주파수의 증가와 더불어 임피던스가 증가하기 때문에 주파수와 점화한계의 관계를 구하는 데에는 광대역 및 대용량의 전원이 필요하게 되어 기초 데이터를 얻는 방법으로서는 현실적이지 못하다. 용량성회로는 고주파수의 영역에서는 콘덴서를 흐르는 전류가 많고 전극이 열릴 때에 발생하는 전압은 일반적으로 저항회로보다도 작게 된다. 이 외에 안테나 역할을 하는 구조물에서의 방전을 시뮬레이션하는 회로로서 LCR (그림 2)의 직렬회로가 고려되고 있으나 공진시에 최고 방전에너지가 크게 되기 때문에 저항성회로가 많이 사용되고 있다. Burstow 등도 50Ω의 저항회로를 사용하여 기초적인 한계를 구하고 있다. 한편, 고주파 전원에는 50Ω의 출력 임피던스를 갖는 회로가 많으며 또한, 50Ω의 임피던스를 갖는 동축케이블을 배선으로 많이 이용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 보다 폭넓은 설계자료를 제공하고자 점화한계를 구하는 실험은 20, 30, 40 및 50Ω의 부하에서 실시하였다.

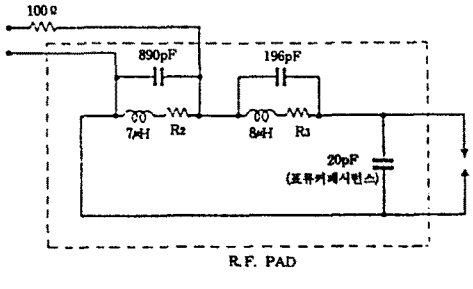



그림 1. 메타놀 탱크의 등가회로 예

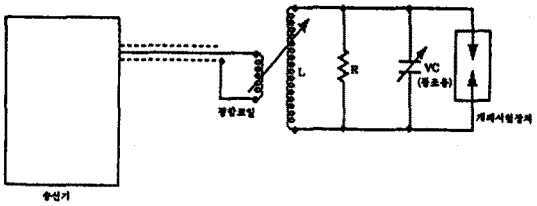



그림 2. LCR 동조회로 구성도

## 3. 대기압하에서의 고주파 스파크 방전

평등전계에 인가하는 전압을 직류 대신에 어떤 주파수를 가진 교류 전압이라고 하면, 스파크 방전전압 $V_s$는 어떻게 변하겠는가 하는 문제가 상당한 관심사이다. 가령 대기압하의 공기중에서 주파수를 파라메타로 하여 전극간격에서 측정한 스파크 방전전압 $V_s$는 그림 3과 같이 된다. 주파수가 낮은 전원 주파수인 50 ~ 60 Hz일 때에는 파고치가 직류전압과 동일하게 되지만, 주파수가 증가와 더불어 스파크 방전전압은 어느 정도 저하된다. 이와 같이 주파수 $f$와 더불어 $V_s$가 저하되는 현상을 설명하려면 正負의 雨 荷電粒子의 운동에 대하여 생각하면 된다. 낮은 $f$에서 증가시켜가면 우선 이온의 운동은 그 영향을 받는다. 이것은 양이온이 전자보다 질량이 무거우므로 즉시 방향을 바꾸어 전계에 따라 움직일 수 없기 때문이다.

이온의 이동속도를 $\mu_i$라 하면 전계 $E\cos\omega t$에서 움직이는 거리 $x$는 $v = \mu_i E\cos\omega t$를 적분하여 (1)식과 같이된다.

$$x = (\mu_i E/\omega)\sin\omega t \qquad (1)$$

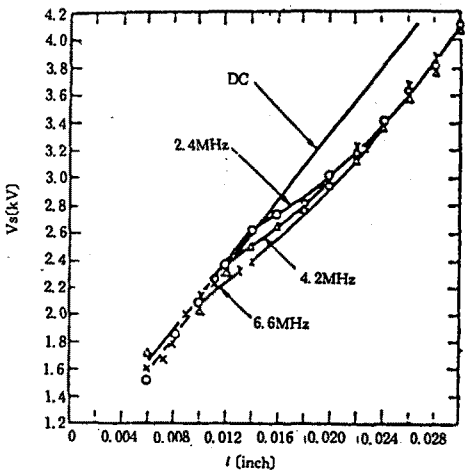



그림 3. 대기중의 고주파 스파크 방전전압 $V_s$와 전극간 거리 $\ell$의 관계

## 4. 실험장치의 구성

실험회로는 그림 4에 나타낸 바와 같이 고주파 전원, 50Ω (10Ω × 5)의 무유도 저항 (Non-Inductive Registor) 및 불꽃점화 실험장치로 구성되며 동축케이블로 배선하였다. 실험에 사용된 동축케이블은 3D2V 및 RG-58/U로 그 특성은 표 1과 같다.

본 실험장치는 영국의 Bradford 대학에서 실시한 장치와 유사하게 고주파 전원은 발진기와 고주파 증폭기로 구성되며 발진기의 출력 정현파를 실험에 필요로 하는 전압까지 증폭하여 점화 실험장치에 전력을 공급한다. 본 실험에 사용된 고주파 증폭기의 사양은 표 2에 나타나 있으며, 출력 임피던스는 작아서 저항회로의 실험용 전원으로서 적당하다. 또한 증폭기의 출력 파형은 왜형이 거의 나타나지 않았다.

50Ω의 저항은 리액턴스 성분의 영향을 가능한 한 작게 하기 위하여 수제형의 무유도 저항 (10Ω)을 5개 직렬연결하여 사용했다. 또한, 개개의 저항 사양은 주파수 대역이 DC~1000 MHz, 임피던스는 50Ω ±2% (10Ω±1%), 정격전력은 50W이다. IEC형 점화 실험장치 (IEC-Type Breakflash Apparatus)는 IEC Pub. 79-3에서 추천하고 있는 개폐불꽃의 점화 실험장치로서 아울러 우리 연구원에서 실시하고 있는 방폭성능 검정시험에도 사용하고 있다. 그 구조는 그림 5와 같다.

불꽃점화 실험장치가 IEC 규격에서 전극홈더 구동모터의 속도가 상용주파수에서 80 rpm이나 본 실험에서는 전극의 개폐속도를 높이기 위하여 우리 실험장치의 최대 회전수인 112 rpm으로 하였다.

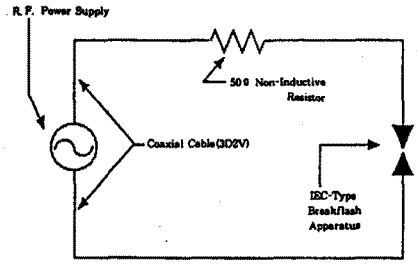



그림 4. 저항성 점화 실험회로

표 1. 동축 케이블의 특성표

| 특성 임피던스 | 50±2Ω (53±2Ω) |
|---|---|
| 표준 정전용량 | 100pF (93.5pF) |
| 표준 감쇄량 | 14(13)dB/km at 1MHz |

표 2. 고주파 증폭기의 주요 사양

| | |
|---|---|
| Output Voltage (Peak to Peak) at RL=25Ω | $150V_{p\text{-}p}$ (DC ~ 100 kHz)<br>$150V_{p\text{-}p}$ (DC ~ 500 kHz)<br>$150V_{p\text{-}p}$ (DC ~ 1 MHz) |
| Output Current (r.m.s.) | 2A ($5.66A_{p\text{-}p}$) (40Hz~500kHz)<br>±1.0A (DC~40Hz) |
| Output Impedance | 0.25Ω+0.8μH이하 |

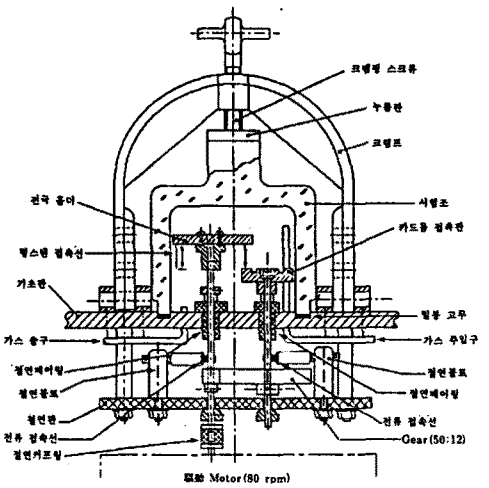



그림5. IEC형 불꽃점화 실험장치의 구조

## 5. 실험 방법

불꽃점화 실험은 IEC형과 거의 동일한 방법으로 실시하였다. 우선, 주파수 및 시험전압을 설정하고 아세틸렌-공기 혼합기체 (아세틸렌 가스 15±1% Vol.) 및 에틸렌-공기 혼합기체 (에틸렌 가스 7.8±0.5%

Vol.)를 그림 5의 플라스틱 용기에 넣어 시험전극을 회전시켜 소정의 회전수간에 혼합기체에 점화되는가 여부를 관측하여 점화된 최소의 전압을 구했다.

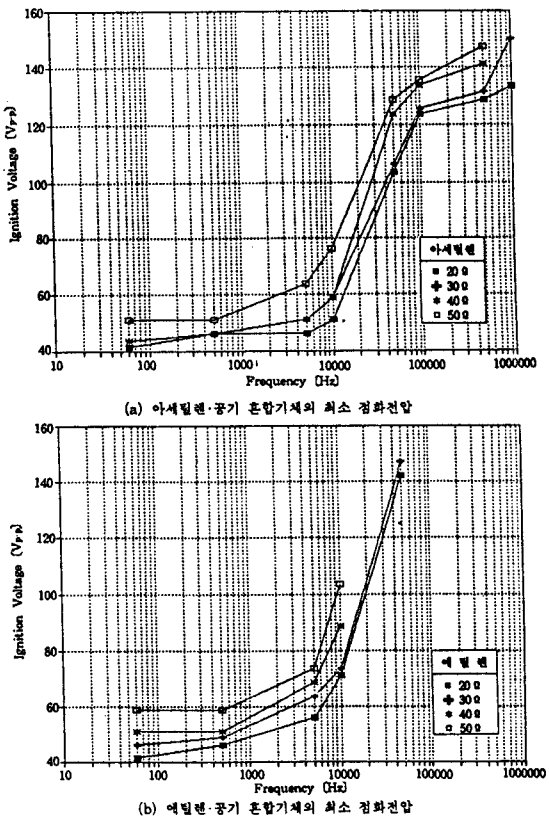
시험전압은 처음에 설정한 전압에서 $10V_{p-p}$ 씩 올리고 내려 점화된 경우에는 $2.5V_{p-p}$ 내리고 점화되지 않은 경우에는 $2.5V_{p-p}$ 올려 점화에서 비점화 또는 비점화에서 점화로 변화될 때까지 반복하였다. 1회 시험마다 전극유지판을 1000회 회전시켰으며, 전극의 개폐의 회수는 적어도 4000회를 넘도록 하였다. 아울러 시험전후에 실험장치의 감도교정은 IEC 규격에서 제시하는 방법을 따라 실시하였다.

## 6. 실험 결과

그림 6에 각 실험마다의 점화된 최소 피크-피크전압을 나타내었다. 이들 최소전압은 60Hz, 500Hz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, 100kHz, 500kHz 및 1MHz에 대하여 얻은 Data를 혼합가스별, 대상부하별로 기록하였다. 그림은 점화된 전압 중에서 가장 낮은 전압을 연결시킨 것이며 이후 이것을 최소 점화전압으로 하였다.

불꽃점화실험장치의 회전수를 될 수 있는 한 무한히 크게 하면 좋으나 이는 실험시간의 과다한 소요와 더불어 혼합기체의 불균일을 초래하기 때문에 한정시킬 수밖에 없었다. 본 실험장치의 회전수의 감소에 따른 최소 점화전압의 편차는 $\pm 2.5V_{p-p}$이다.

그림 7에 최소 점화전압 및 20, 30, 40, 50Ω에서 주파수별로 텅스텐선 전극과 카드뮴 원판 전극간을 단락시킨 때의 전류 및 그때의 전원전압과 전류의 비를 나타내었다. 이 비는 임피던스에 해당하나 리액턴스 성분이 충분히 작기 때문에 저항과 같다. 또한, 전류 및 저항은 측정시마다 미소하게 변화하기 때문에 대표적인 값으로 나타내었다. 이 변화는 주로 사용한 점화 실험장치의 축과 축받이간의 접촉저항 및 전극과 전극사이의 접촉저항의 변화에 기인하는 것으로 추정된다. 전압과 전류의 비는 마찬가지 원인에 의해 설정된 저항치보다도 큰 값을 나타내고 있다.




(a) 아세틸렌-공기 혼합기체의 최소 점화전압

(b) 에틸렌-공기 혼합기체의 최소 점화전압

그림 6. 최소 점화전압의 측정결과

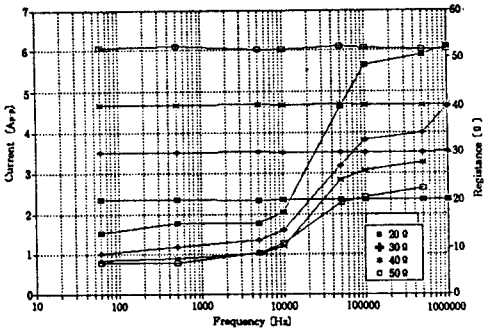



그림 7. 전극 단락시의 전압 및 전류와 회로저항

## 6. 실험결과의 검토

### 직류와 고주파 교류의 점화한계 비교

교류의 경우는 반 사이클마다 방전이 소멸한다. 전극이 열릴 때 교류파형의 위상에 의해 방전에너지도 다르며 최대로 되는 것은 교류의 최대치에서 전극을 여는 경우이다. 지금 정현파 교류의 최대치 및 실효치를 $I_m$ 및 $I$로 하여 주파수를 $f$로 나타내고, 위상차를 영으로 하면 $I$는 식 (2)와 같다.

$$I = I_m \sin 2\pi ft \tag{2}$$

교류 반파 사이에 $I$가 $I_m$의 95% 사이에 도달하는 시간 $T_0$를 계산하면 다음과 같다. 즉, $T = 1/f$로 놓으면

$$T_0 = 2[\frac{T}{4} - \sin^{-1}(\frac{0.95}{2\pi f})] \fallingdotseq 0.1T \tag{3}$$

그러므로 정현파 교류의 경우에는 10회중 1회만이 최대치의 부근에서 열릴 기회가 존재한다. 방전불꽃에 의한 가스점화가 확률법칙을 받는 것으로 하면 직류와 같은 최대치의 교류에 의한 점화위험성은 약 1/10이라고 말할 수 있다.

### 개폐시에 발생하는 방전에너지의 계산

전극사이에 개폐속도, 주파수 및 전압변화를 주어 방전전압을 관측한 결과 최소 점화전압 또는 기타의 전압 및 다른 주파수에서도 거의 동일한 파형이 관측되었다. 또한 전극이 열릴 때의 전극속도는 주로 텅스텐선 전극의 탄력작용에 의해 결정되며, 전극이 닫힐 때는 텅스텐선 전극의 이동속도가 늦기 때문에 방전의 개시 및 종료는 주로 전극간의 전압변화에 의해 방전형상이 결정된다.

개폐불꽃은 아크를 수반하는 방전이기 때문에 방전에너지 $E_a$는 방전전류 $I_a$와 아크전압 $V_a$의 곱의 시간 적분으로 구한다. 여기서 방전을 반파장 사이에 일어나는 1회 방전으로 한정하여 $t_1$을 아크 개시시간, $t_2$를 아크 종료시간으로 놓으면 방전에너지는 다음 식으로 표현된다.

$$E_a = \int_{t_1}^{t_2} V_a \, I_a \, dt \tag{4}$$

$V_a$로서 방전전압 파형에서 측정한 값을 사용한다. 아크전압의 평균은 주파수에 의존하지 않고 $10V_{p-p}$ 부근의 값을 나타내고 있다.

$I_a$는 아크전압과 같이 측정하는 것은 곤란하며 이 경우 아크전압을 근거로 다음 (5)식에 의해 산출할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 페라이트 자성체를 사용한 홀 센서로 측정하여 비교하였다. 계산시 여기서 $V_m \sin 2\pi ft$는 전원전압, $R$은 전극을 단락시킨 때의 회로저항으로 한다.

$$I_a = \frac{(V_m \cdot \sin 2\pi ft - V_a)}{R} \tag{5}$$

방전 지속시간 $T_d$는 전극간 전압이 아크전압 이상으로 되면 반파장 이내의 시간으로 가정하여 식 (6)과 같이된다. 또한, 방전전압 파형은 실험에서 측정한 바 방전의 개시시점에서의 아크전압은 종료에서의

아크전압과 다르기 때문에 식 (6)은 지속시간의 최대는 아니며 이와 근사한 값으로 된다.

$$T_d = t_1 - t_2 = [\frac{1}{2\pi f}(\pi - 2\sin^{-1}(\frac{V_a}{V_m})] \quad (6)$$

여기서, $t_1 = \frac{1}{2\pi f}\sin^{-1}(\frac{V_a}{V_m})$ ; $t_2 = \frac{1}{2\pi f} - t_1$

식 (6)에 아크전압의 평균 ($10V_{p-p}$)를 대입하면 지속시간의 계산값을 구할 수다. 지속시간은 개폐시간에 의해 크게 달라지므로 (즉 전극유지판의 개폐속도 증가) 측정값은 대략값에 지나지 않으나 계산치에 근사한 값임을 알 수 있었다.

식 (4), (5) 및 (6)으로부터 반파장 간에 일어나는 1회 방전에서 발생하는 방전 에너지 $E_a$와 주파수의 관계를 구하면 식 (7)로 표현된다.

$$E_a = \int_{t_1}^{t_2} V_a I_a dt = (\frac{V_a}{R})[\frac{V_m}{2\pi f}(\cos 2\pi f t_1 - \cos 2\pi f t_2) - V_a T_d] \quad (7)$$

### 방전 에너지의 추정과 혼합기체로의 점화

앞의 검토로부터 $V_a$를 아크전압의 평균 ($10V_{p-p}$), $R$을 회로의 평균 저항 (51.92Ω, 40.20Ω, 30.20Ω 및 20.17Ω) 그리고 $V_m$을 그림 6의 최소 점화전압으로 하여 식 (7)로부터 1회 방전에서 발생하는 에너지를 구하면 그림 8과 같이 된다. 아세틸렌-공기 혼합기체에서는 점화에 필요로 하는 시간 (Ignition Induction Time 또는 Thermal Initiation Time)은 약 20 ㎲, 에틸렌-공기 혼합기체에서는 약 40 ㎲라고 알려져 있다. 한번의 방전마다 지속시간이 이 시간보다 긴 경우에는 그 방전에서 발생한 에너지가, 짧은 경우에는 이 시간 내에 발생한 몇 개의 방전에 의한 에너지의 합이 점화를 평가하기 위한 기본으로 된다.

10 kHz 이하에서의 반파장은 20 ㎲이상이기 때문에 혼합기체의 점화는 1회의 방전 에너지에서 발생한 것으로 되며, 50 kHz 이상에서는 반파장이 20 ㎲이하로 되기 때문에 점화에는 2회 이상의 방전이 관계된다고 추정된다.

한편 500, 1000 kHz에서는 1회 방전마다의 에너지가 아세틸렌-공기 혼합기체의 최소 점화에너지 (약 18 μJ) 이하로 되며, 분명히 2회 이상의 방전 에너지가 가산된 것으로 추정된다.

역시 에틸렌-공기 혼합기체에서는 50, 100, 및 1000 kHz에서 1회마다의 에너지가 최소 점화에너지 (약 100 μJ) 이하로 되며, 아세틸렌-공기 혼합기체와 같이 2회 이상의 방전에너지가 가산된다고 할 수 있다. 또한, 최소 점화전압이 10 kHz에서 50 kHz 사이에서 급상승하는 것은 방전과 방전사이의 휴지기간에서 에너지의 손실이 원인이라고 추정되나 이에 대한 규명이 필요하다.

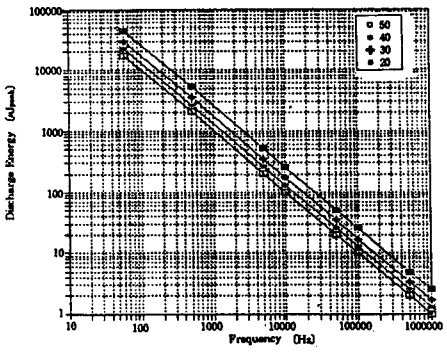



그림 8. 최소 점화전압에서 방전에너지의 추정치

## 7. 맺음말

1 MHz까지의 고주파 및 10, 20, 30, 40, 50Ω 저항회로의 개폐불꽃에 의한 아세틸렌-공기 및 에틸렌-공기 혼합기체의 최소 점화전압을 실험에 의하여 구하였다. 이 실험에 근거하여 점화위험성을 고찰하면 다음과 같다.

(1) 아세틸렌-공기 및 에틸렌-공기 혼합기체에서는 주파수가 높게 됨에 따라 점화전압은 크게 되나 1 kHz 이하의 범위에서는 점화에 필요한 전압은 거의 동일하였다.

(2) 고주파 회로에 인가되는 동일전압과 동일부하에서 개폐불꽃을 관측한 결과 주파수가 증가할 수록 개폐불꽃의 크기는 작아졌다.

(3) 아세틸렌-공기 및 에틸렌-공기 혼합기체에서는 점화에 필요로 하는 시간은 20 ㎲정도이기 때문에 10 kHz까지는 1회 방전에 의해 점화가 발생한다. 또한, 50 kHz 이상에서는 20㎲이내에 발생한 2회 이상의 방전이 점화에 관계한다.

(4) 100 kHz 이상의 주파수에서는 전류가 0으로 될 때에도 전극의 냉각이 충분하게 진행되지 않으므로 전극간에서 방전의 재발생 조건이 유지되어 방전에너지를 증대시키는 영향이 나타난다.

(5) 약 100 kHz 이상의 고주파 전기회로의 점화위험성 평가를 위하여 점화확률을 1에 가깝도록 하기 위해서는 불꽃점화 실험장치의 회전수를 수천 rpm으로 변화시켜 개폐속도를 증가시킬 필요가 있으며, 이때의 최소 점화전압은 본 실험의 결과보다도 높을 것으로 예상된다. 아울러 고주파의 표피효과에 의한 손실의 방지를 위한 대책도 필요하다.

## 참고 문헌


[1] 最新 電子用語辭典, 電子技術社, 1980.

[2] 東明社, 放電·高電壓工學, 1993.

[3] 산업안전연구원, 본질안전 방폭기기의 평가 및 사용안전에 관한 연구, 연구보고서 기전연 94-7-9, 1994. 1.

[4] 최상원, 이관형, 문정기, "저압방전 불꽃에서 전극재질이 점화에너지에 미치는 영향", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1394~1397, 1995. 7.

[5] 田中隆二, 本質安全防爆電氣回路に關する基礎的研究, 勞動省産業安全研究所, 1970.

[6] A J Maddocks, "The ignition of flammable atmospheres by radio frequency initiated sparks", ERA Technology Limited,

[7] H. G. Bass, Intrinsic Safety Instrumentation for Flammable Atmospheres, Quartermaine House., U.K, 1984.

[8] Robin Garside, Intrinsically Safe Instrumentation: a Guide, Unwin Brothers Ltd., U.K, 1982.

[9] BS 6656, Prevention of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation, 1986.

[10] 澤 孝一郎 他, "接點開離時の間歇アーク發生に及ぼす氣壓の影響", 電氣學會論文誌 A, 97卷 9號, 1977. 9.

[11] G H Butcher, P S Excell and D F Howson, "THE IGNITION HAZARD DUE TO RADIATION FROM RADIO TRANSMITTERS", 1975.

[12] P. S. Excell and A. J. Maddocks, "GAIN, EFFECTIVE APERTURE AND EFFICIENCY OF INDUSTRIAL STRUCTURES ACTING AS ELECTRICALLY-SMALL LOOP ANTENNAS", 1984.

[13] A J Maddocks, "THE IGNITION OF FLAMMABLE ATMOSPHERES BY RADIO FREQUENCY INITIATED SPARKS", 1992.

[14] J. L. J. ROSENFELD, D. C. STRACHAN, P. S. TROMANS, and P. A. SEARSON, "Experiments on the incendivity of radio_frequency, breakflash discharges(1.8-21 MHz c.w.)", The Radio and Electronic Engineers, Vol. 51, No. 4, 1881. 4.

[15] M. M. ATALLA, "Arcing of Electrical Contacts in Telephone Switching Circuits", THE BELLSYSTEM TECHNICAL JOURNAL, 1953. 11.

[16] D. P. HOWSON, P. S. EXCELL, and G. H. BUTCHER, "Ignition of flammable gas/air mixtures by sparks from 2 MHz and 9MHz sources", The Radio and Electronic Engineers, Vol. 51, No. 4, 1881. 4.

[17] S.S.J. Roberston, and R.J. Loveland, "Radio-frequency ignition hazards: a review", IEE PROC., Vol. 128., Pt. A, No. 9, 1981. 12.