

고주파 전기회로의 개폐불꽃에 의한 LPG-공기 혼합가스의 최소점화한계전압에 관한 연구

이 춘 하 · 김 재 옥 · 지 승 옥 · 송 현 직 · 이 광 식 · 이 동 인

호서대학교 안전공학부, *영남대학교 전기전자공학부

(1998년 11월 17일 접수, 1999년 1월 26일 채택)

A Study on the Minimum Ignition Limit Voltages for LPG-Air Mixtures by Discharge Sparks in Radio-frequency Circuits

Chun-ha Lee · Jae-ouk Kim · Sung-ouk Jee*
· Hun-jik Song* · Gang-sik Lee* · Dong-in Lee*

Div. of Safety Eng., Hoseo University.

*Div. of Electrical Eng., Yeungnam University

(Received 17 November 1998; Accepted 26 January 1999)

요 약

본 논문은 고주파 발생장치와 IEC형 불꽃점화 시험장치를 이용하여 라디오 주파수 범위내에서 발생하는 개폐불꽃에 의한 LPG-Air 5.25[Vol%]의 혼합가스에 대한 최소점화한계전압을 구하였다.

그 결과 LPG-Air 혼합가스는 주파수가 높을수록 최소점화한계전압도 높아졌으며, 특히 3[kHz]에서 10[kHz]사이에서 현저히 증가함을 알 수 있었다. 이는 3[kHz]까지는 1회의 방전에너지에 의해 점화가 발생되지만 3[kHz]이상에서는 2회이상의 방전에너지가 누적되어 점화가 일어남을 알 수 있었고 그 이유는 방전과 방전간의 휴지기간이 존재하므로써 생기는 에너지의 손실이 그 원인으로 생각된다.

본 연구결과는 가스가 존재하는 위험장소에서도 안전하게 사용될 수 있는 통신장비나 각종 탐지기 등에 응용될 수 있는 본질안전 방폭형 고주파 전기기기의 연구개발을 위한 기본자료로서 뿐만 아니라 이들 장비의 방폭성능에 대한 시험자료로도 활용가능할 것으로 사료된다.

Abstract - This paper describes the minimum ignition limit voltages for LPG-Air 5.25[Vol%] mixture gas by discharge sparks in radio-frequency limits using RF power supply and IEC type ignition spark apparatus.

As a result, the minimum ignition limit voltages is increased in proportional to the rate of increasing of frequency in LPG-Air mixture gas. Especially, the minimum ignition limit voltages increase remarkably between 3[kHz] and 10[kHz]. It is considered that ignition is caused by one discharge until 3[kHz] and, beyond 3[kHz] ignition is caused by more than two discharges. The reason is analyzed that energy loss is caused by existing pause interval between discharges.

It is considered that the result can be used for not only data for researches and development of intrinsically safe explosion-proof RF machines which are applied tele-equipments and detectors used in dangerous areas but also for datum for its equipment tests.

Key words : LPG-Air mixture gas, discharge sparks, RF power supply, IEC type ignition spark apparatus, the minimum ignition limit voltage

1. 서 론

최근 우리나라에서는 석유화학플랜트의 급격한 성장 및 LPG, LNG 등의 사용량이 증가함에 따라 가정, 사업장 등에서 폭발에 의한 크고 작은 사고들이 빈번히 발생하여 수많은 재산과 인명 피해를 가져오고 있어 이에 대한 대책이 절실히 요구되고 있다. 폭발사고의 주된 원인중 전기기기나 배선 등에서 발생하는 불꽃, 아크 또는 과열 등에 의한 폭발성 가스의 점화를 방지하기 위하여는 폭발성 가스가 존재하거나 존재할 우려가 있는 위험장소에서 사용되어도 점화원이 되지 않도록 구조상 및 회로상 특별히 설계된 방폭형 전기기기의 사용이 필수적으로 요구된다.

이러한 방폭형 전기기기 중에서 본질안전 방폭구조로 설계, 제작된 전기기기는 폭발위험장소에 설치되는 전기기기 및 배선의 어떠한 부분에서 발생하는 불꽃, 아크 또는 과열로 인하여 폭발성 가스가 점화되지 않도록 되어있으며, 선진국에서는 점차 이의 사용이 증가하고 있는 실정이다.^{[1]-[3]} 이와 같은 본질안전 방폭형 전기기기를 설계하고 개발하기 위해서는 전기회로에서 발생하는 불꽃, 아크 등에 의한 폭발성 가스에의 점화한계를 파악하는 것이 필수적으로 요구되고 있으나, 국내에서는 현재까지 이에 대한 연구가 극히 미진한 상태이다.

또한 전자기술의 발전과 함께 각종 탐지기나 항공·교통 무선표지, 유·무선 통신장비 등 고주파 전기회로를 갖는 전기기기 등이 증가하는 추세에 있으며, 또한 이들이 LPG 등 가연성 가스가 존재하는 장소에서도 사용되어질 수 있다.^[4] 이와같은 장소에서 사용되는 고주파 전기회로들은 점화위험성이 없도록 본질안전 방폭화하여야 하며, 이에 대한 연구의 일환으로써, 1970년 일본의 田中隆二가 “도선 인장 단선형”으로 개로시의 점화한계를 연구하였고^[5], 1975년 영국에서 Butcher 등이 도전성 구조물들이 수신안테나로 동작하므로 인하여 주위의 가연성 가스 등의 점화원으로 작용할 가능성을 서술하였으며^[6], 1981년 Burstow 등이 저항회로와 안테나로서 사용되는 구조물로부터의 점화위험성을 평가할 목적으로 점화한계를 보고하고 있고,^[7] 1993년 일본의 本山建雄도 IEC형 개폐불꽃 발생장치를 이용하여 저항성 회로에 대한 점화한계

를 수소가스에 대하여 구하였다.^[4]

그러므로, 본 연구에서는 현재 국내에서 청정 연료의 시대적 요청에 가장 적합한 것으로 판단되어 대중연료로 이용되고 있는 LPG에 대하여 고주파 전기회로의 개폐불꽃에 의한 점화한계를 명확히 함으로써, 본질안전 방폭형 고주파 전기기기의 설계시에 필요한 기본 자료를 제공하는 것을 목표로 하여, IEC(International Electrotechnical Commission) 79^{[1],[8],[9]}에서 채택하고 있는 IEC형 불꽃점화시험장치를 이용하고, 주파수 범위 1~1000[kHz], LPG-공기 5.25±0.25[vol.%]의 혼합가스에 대한 50[Ω] 저항회로에서의 최소점화한계전압을 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

고주파 방전불꽃에 의한 폭발성 가스에의 점화한계를 측정하기 위한 실험장치의 구성은 크게 시험회로부, 개폐불꽃 발생장치부 및 폭발성 가스 혼합공급장치부로 나눌 수 있다.

2.1.1 시험회로

개폐불꽃에 의한 점화한계를 구하는 기본적인 전기회로로서 저항회로, 유도회로 및 용량회로가 있다.

유도회로는 주파수의 증가와 함께 임피던스가 커지기 때문에 주파수와 점화한계의 관계를 구하기 위해서는 광대역 대응량의 전원이 필요하고, 용량회로는 고주파수의 영역에 있어서 콘덴서를 흐르는 전류가 많기 때문에 기초 데이터를 얻는 방법으로는 현실적이지 않다. 또한, 안테나의 역할을 하는 구조물로부터의 방전을 모의하는 회로로서 RLC의 직렬회로를 고려할 수 있지만, 공진시에 방전에너지가 가장 크기 때문에 저항회로가 많이 이용되어지고 있다.

한편, 고주파 전원에는 50Ω의 출력 임피던스를 가지는 회로가 많고, 또한 50Ω의 특성 임피던스를 갖는 케이블이 배선으로 많이 이용되고 있다.

따라서, 점화한계를 구하는 시험회로는 그림 1과 같은 50[Ω]의 저항회로로서 고주파 전원장치, 무유도 저항 및 IEC형 개폐불꽃 발생장치로 구성되어 있고, 이들 각각은 동축 케이블로 배선되어 있다.

또한, 고주파 전원장치는 발신기와 고주파 증

폭기로 구성되어 있고, 발신기의 출력(정현파 및 펄스)을 실험에 필요로 하는 전압까지 증폭하여 점화시험장치로 전력을 공급한다. 고주파 발신기는 Philips 사의 PM5131 Function Generator(0.1[Hz]~2000[kHz])를 사용하였으며, 증폭기의 사양은 표 1과 같다.

무유도 저항은 리액턴스분이 거의 없으며 열에 강하고 온도의 변화에 따른 저항값의 변화가 적은 망간선을 이용하여 제작된 것으로 임피던스가 50[Ω], 정격전력이 1[kW]이다.

Table 1. Main specification of high frequency amplifier

주파수 대역	0 ~ 1000[kHz]
최대출력전압(V _{pp})	500[V]
최대출력전류	5[A]
내부임피던스	50[Ω]

2.1.2 개폐불꽃 발생장치

개폐불꽃 발생장치는 IEC형 불꽃점화 시험장치로 그림 2와 같은 불꽃 발생용의 전극부가 들어있는 폭발조와 소정의 가스농도를 가진 혼합가스의 공급 및 배기계통으로 구성되어 있다.

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

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.

양 전극(텅스텐선과 카드뮴 원판)의 상대적인 개폐속도는 텅스텐선이 카드뮴의 표면위를 이동 중일때는 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 폭발조 내에 준비해 두고 폭발조를 진공펌프에 의해 진공상태로 한다. 그리고 혼합조

와의 압력차이에 의해 혼합가스를 폭발조 내에 채워 넣어 점화가 되면 폭발압력 스위치에 의하여 전원이 차단됨과 동시에 수동으로 뚜껑을 열어서 배기시키도록 되어 있다.

2.1.3 폭발성 가스 혼합공급장치

실험에 필요한 농도의 폭발성 가스를 조제하기 위해 공기를 분압식으로 혼합탱크 내에 채우고 폭발성 가스를 균일하게 혼합한 후, 적외선식의 분석계를 이용하여 혼합가스의 농도를 분석하였다.

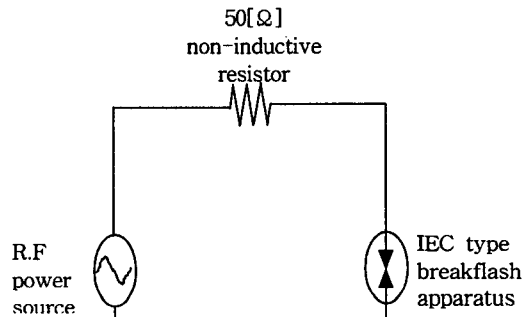


Fig. 1. Circuits of spark ignition test

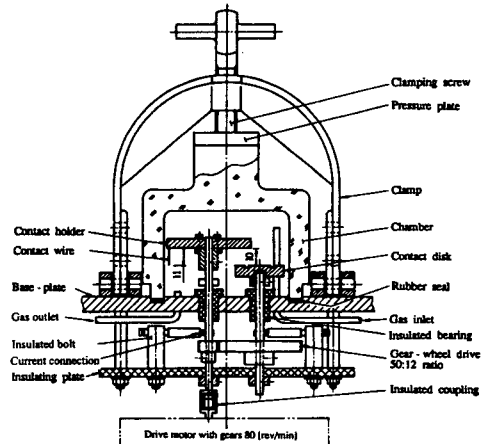


Fig. 2. Detail diagram of explosion chamber

2.2. 실험방법

2.2.1 점화한계 결정방법

점화한계를 결정하기 위한 일반적인 규칙은

없으나 IEC에서 교류회로의 본질안전 방폭성을 평가할 때의 개폐불꽃 발생회수는 4000회 이상으로 규정하고 있다. 그러나 본 실험에서는 고주파 전원에 의하여 전압이 주기적으로 변화하므로 최대치 부근에서 개폐할 수 있는 방전기회의 감소를 충분히 보충하기 위하여 임의의 회로 조건을 설정하고 불꽃발생 장치의 전극간에 연속 12000회까지의 개폐불꽃을 발생시켜 폭발조내에 주입되어 있는 대상 폭발성 가스에의 점화유무를 확인하였다. 만일 가스에 점화를 일으켰을 경우에는 회로전압을 5[%] 감소시킨 상태에서 12000회의 개폐불꽃 발생에 따른 가스에의 점화유무를 시험하였고 점화가 일어나지 않았을 경우에는 이와 반대로 하였다.

이상과 같은 과정을 반복하여 점화한계는 12000회의 개폐불꽃으로도 가스에 점화되지 않은 전압값과 이 값 직전의 점화된 전압값의 평균을 최소점화전압값으로 정하였다.

또한, 각 회로 조건에서 점화한계를 측정하기 전후에 개폐 전극의 점화감도 교정을 실시하여 실험중에 소정의 감도가 유지되고 있었다는 것을 확인하였다.

2.2.2 폭발성 가스

최소 점화한계곡선을 구하기 위하여 대상으로 한 폭발성 가스는 폭발범위 내에서도 최소 점화한계 농도에 해당하는 LPG-공기 5.25 ± 0.25[vol.%]의 혼합가스이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 최소점화한계전압

LPG-공기 5.25[vol.%]의 혼합가스에 대하여 전원 주파수 1~1000[kHz] 범위에서 구한 최소점화한계 전압은 그림 3과 같이 주파수가 높을수록 최소점화한계전압은 높게 나타났다.

또한, 그림 4에 최소점화한계에 있어서 텅스텐 선전극과 카드뮴 원판전극간을 단락했을 때의 전류 및 그때의 전원전압과 전류의 비 즉 회로저항을 나타냈다. 이 비는 임피던스에 상당하지만 리액턴스분이 충분히 작기때문에 저항으로 간주했다. 즉, 전류와 저항은 측정때 마다 미세하게 변화하므로 대표적인 값으로 표시하였다. 이 변화는 주로 사용한 불꽃점화시험장치의 축과 배어링간의 접촉저항의 변화에 기인한다고 생각된다. 또, 전압과 전류의 비는 동일한 원인으로 부터 설정한 저항치 50Ω 보다도 약간 큰 값을 나타내고 있다.

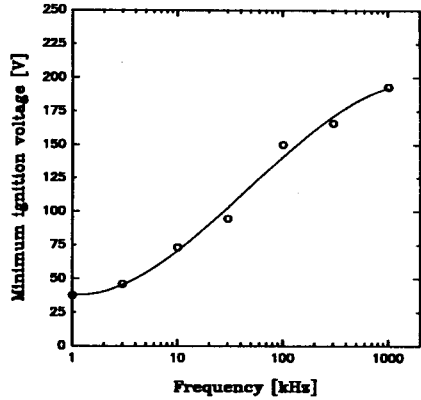


Fig. 3. Minimum ignition voltage of LPG-air 5.25[vol.%]

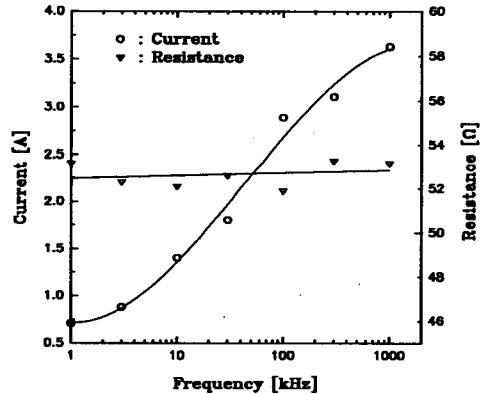


Fig. 4 Short-circuit current and circuit resistance of R.F. circuit at the minimum ignition limit voltage

3.2. 불꽃점화시험장치의 개폐시에 발생하는 방전

그림 5는 IEC형 불꽃점화 시험장치의 전극간에서 관측된 방전전압파형의 한 예이다. 전극간에 인가한 전압은 그림 3의 50[kHz] 때의 최소점화전압이고, 다른 주파수에 있어서도 거의 같은 파형이 관측되고 있다. 관측된 전압파형으로부터 개폐불꽃의 특징을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 1~1000[kHz]의 개폐불꽃은 폭발성 가스에 점화를 일으킬 수 있는 아크를 동반하는 방전이다.

- 2) 개로와 폐로의 경우에 있어서도 아크전압은 거의 같은 값을 나타낸다.
- 3) 주파수가 낮은 경우에는 개로 또는 폐로에 있어서 연속하는 방전의 회수는 개로시 보다도 폐로시에 많지만, 주파수가 높아지면 양자의 차는 거의 없어진다.

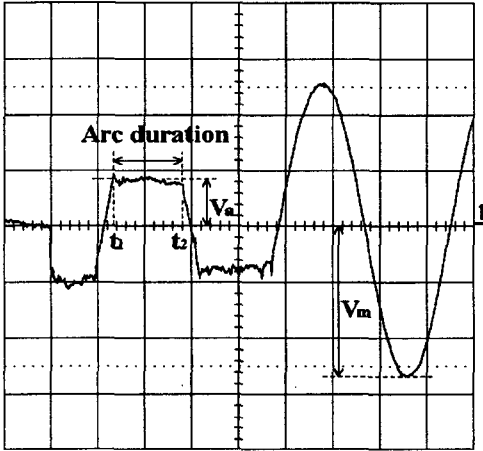


Fig. 5. Discharge voltage waveform (5[μs/div], 20[V/div])

3.3. 개폐점점 간의 방전에 의한 방전에너지 산출

개폐불꽃은 아크를 동반하는 방전이므로 방전 에너지 E_a 는 방전전류 I_a 와 아크전압 V_a 의 곱의 시간적분으로부터 구한다. 여기서, 방전을 반파장 사이에 일어나는 일회의 방전으로 한정하고, t_1 을 아크 개시시간, t_2 를 아크 종료시간으로 하면 방전의 전력량은 (1)식으로 표시된다.

$$E_a = \int_{t_1}^{t_2} V_a \cdot I_a dt \quad (1)$$

식(1)의 V_a 는 그림 1과 같은 방전전압파형으로부터 측정하는 값이다.

I_a 는 아크 전압을 기초로 식(2)에 따라 산출한다. 단, $V_m \cdot \sin 2\pi ft$ 는 전원의 전압, R 은 전극을 단락했을 때의 회로의 저항이다.

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

방전지속시간 T_d 는, 전극간의 전압이 아크전압 이상으로 되는 반파장 이내의 시간으로 가정

하면, 식(3)과 같이 된다.

$$T_d = t_2 - t_1 \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2\pi f} \left(\pi - 2\sin^{-1} \frac{V_a}{V_m} \right)$$

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

$$t_2 = \frac{1}{2f} - t_1$$

식(1), (2), (3)으로부터 반파장 사이에 일어나는 1회의 방전으로 발생하는 방전에너지 E_a 와 주파수의 관계를 구하면 식(4)로 표시된다.

$$E_a = \int_{t_2}^{t_1} V_a \cdot I_a dt$$

$$= \frac{V_a}{R} \left(\frac{V_m}{2\pi f} (\cos 2\pi ft_1 - \cos 2\pi ft_2) - V_a \cdot T_d \right)$$

$$= \frac{V_a}{R} \left(\frac{V_m}{\pi f} \sqrt{1 - \left(\frac{V_a}{V_m} \right)^2} - V_a \cdot T_d \right) \quad (4)$$

3.4. 방전에너지의 추정과 LPG-공기 혼합가스에서의 점화

실험에 의하여 측정된 아크전압의 평균 V_a 를 12.8[V], 회로저항의 평균 R 을 52.7[Ω], 그리고, V_m 을 그림 3의 최소점화전압으로 하여, 식 (4)로부터 구한 값을 그림 6에 나타내었다.

LPG-공기 혼합가스에서는 점화에 요하는 시간(ignition induction time)이 100[μs] 정도로서 알려져 있고,⁷⁾ 하나의 방전 지속시간이 이 시간보다 긴 경우에는 그 방전으로 발생한 에너지에 의하여, 짧은 경우에는 이 시간내에 생기는 몇 개의 방전에 의한 에너지의 축적에 의하여 점화를 발생시키게 되므로

- 1) 1, 3[kHz]에서 반주기 동안의 시간이 100 [μs] 이상이기 때문에 혼합가스에서의 점화는 1회의 방전에너지에 의하여 발생한 것으로 생각된다. 따라서 그림 6의 1, 3 [kHz]의 값은 본 실험장치에 있어서 점화시에 소비된 최소의 방전 에너지를 나타낸다.
- 2) 10[kHz] 이상에서는 반주기 동안의 시간이 100[μs] 이하이기 때문에 점화에는 2회 이상의 방전 에너지가 관계하고 있다고 예상된다. 따라서 10[kHz]에서의 최소점화전압

이 3[kHz]의 약 1.6배로 급격한 상승을 초래하는 것은 방전과 방전간의 휴지기간에 있어서의 에너지 손실이 원인으로 생각된다.

- 3) 한편, 30, 100, 300, 1000 [kHz]에서는 1회 방전 당의 에너지가 LPG-공기혼합 가스의 최소점화에너지(약 280[μJ]) 이하이므로, 2회 이상의 방전에너지가 가산된다고 생각된다.

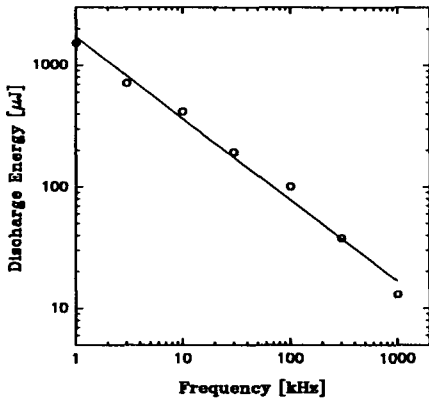


Fig. 6. Discharge energy vs frequency in 50[Ω] resistive R.F. circuit at the minimum ignition voltage

4. 결 론

본 연구에서는 고주파(1~1000[kHz]), 50[Ω] 저항회로의 개폐불꽃에 의한 LPG-공기 5.25±0.25[vol.%) 혼합가스의 최소점화한계전압을 실험적으로 구하였고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) LPG-공기 혼합가스에서는 주파수가 높을수록 최소점화한계전압은 높아진다.
- 2) 점화에 요하는 시간(ignition induction time)은 100[μs] 정도이기 때문에 3[kHz]까지는 1회의 방전에 의해 점화가 발생되지만 10[kHz]부터는 100[μs] 이내에 발생한 2회 이상의 방전이 점화에 관계하였다. 주파수가 높아질수록 반주기 동안의 방전에너지는 작아진다.
- 3) 10[kHz]에서의 최소 점화전압이 3[kHz]의 약 1.6배로 급격히 상승되는 것은 방전과 방전간의 휴지기간에 있어서 에너지의 손실이 원인으로 생각된다.

- 4) 한편, 고주파 전기회로에서는 표피효과에 의한 손실을 방지하기 위하여 가는 선이 이용되지만, 개폐불꽃에 의한 가는 선은 연소, 폭발을 동반하므로 그것에 대한 점화위험성을 고려할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 1) IEC 79-11, "Electrical apparatus for explosive gas atmospheres-Part 2 : Intrinsic safety", 1991.
- 2) 이춘하 외, "방폭시험 평가방안에 관한 연구 (I)", 한국 기계연구소, UCN199-1328·D, 1990.
- 3) 이춘하 외, "방폭시험 평가방안에 관한 연구 (II)", 한국 기계연구소, UCN234-1481·D, 1991.
- 4) 本山建雄, "高周波電氣回路の開閉火花による水素·空氣混合氣體の點火危險性", 산업안전연구소연구보고, RIIS-RR-92, 1993.
- 5) 田中降二, "本質安全防爆電氣回路に關する基礎的研究", 박사학위논문, 産業安全研究所, pp. 92-100, 昭和 45(1970).
- 6) G. H. Butcher, P. S. Excell, D. P. Howson, "The ignition hazard due to radiation from radio transmitters", IEE conference publication, No. 134, pp. 143-147, 1975.
- 7) D. J. Burstow, R. J. Loveland, R. Tomlinson, "Radio frequency ignition hazards", The Radio and Electronic Engineer, Vol. 51, No. 4, pp. 151-169, April 1981.
- 8) IEC 79-1, "Electrical apparatus for explosive gas atmospheres-Part 1 : Construction and verification test of flameproof enclosures of electrical apparatus", 1990.
- 9) IEC 79-3, "Electrical apparatus for explosive gas atmospheres-Part 3 : Spark-test apparatus for intrinsically-safe circuits", 1990.