

창립
40주년 학술대회
논문 87-H-20-6

진공공에서 전극표면상태가 전구전류 및 절연파괴전압에 미치는 영향

김두식^o 이동인 이광식 김인식
영남대학교 전기공학과* 경북개방대학 전기공학과

The Effect of Electrode Surface Condition on Prebreakdown
Current and Breakdown Voltage

Du-Sik Kim^o Dong-In Lee Keang-Sik Lee In-Sik Kim
Yeungnam University* Yeungnam University Yeungnam University Gyeong-Buk Open University

Abstract

The measurements of prebreakdown currents and breakdown voltages have been made for smooth, rough, protrusion plane parallel stainless steel electrodes in vacuum (10^{-5} torr), as a function of electrode separation, in the range 0.4~2.4mm using DC source (0~200KV). The prebreakdown currents of a each condition are found to be consistent with the Fowler-Nordheim field emission theory. The effect of the electrode surface condition on the local-field enhancement factors, prebreakdown currents, and on the breakdown voltages are shown. The breakdown mechanism of a small vacuum gap was ascertained as the field emission corresponding the F-N theory.

Therefore, these results suggest that the field emission currents following the electrode surface condition play a major role for initiation of DC breakdown.

1. 序論

진공간의 방전현상은 Roentge(1897)에 의해 처음으로 연구된 이래로 많은 학자들에 의하여 그 높은 절연성이 입증되어 왔다[1]. 특히 근래 진공차단기, X선관, 고압정류관, 송신관, Vacuum fuse, 핵융합장치등의 산업응용에 걸쳐 확대되고 있어 진공의 방전특성은 많은 흥미를 끌고 있다[1,2,3].

그러나 진공의 방전특성은 많은 요인에 의해 크게 영향을 받으므로 그 절연파괴기구에 관한 가설은 여러가지가 보고되고 있다. 그러한 가설은 전계방사에 의한 음극가열설 및 양극가열설, Clump 설, 입자고환설로 대별된다.

위의 가설중에서 절연파괴전압이 100KV이하인 미소갭에서는 음극가열설 및 양극가열설이 유력

하다[4,5,6]. 또한 절연파괴계시에 필수적인 전극 표면의 초기생성은 전계방사원 전구전류와 전극 표면상태의 상호작용과 밀접한 연관성이 있는 것으로 넓게 인식되어 있다[1,5,6]. 그러나 지금까지 보고된 자료들은 대부분 Smooth Electrodes의 연구결과이며, 전극표면이 거칠 때와 불기부에 의한 요철이 있을 때의 연구결과는 거의 없는 실정에 있다.

따라서 본 연구는 미소갭(0.4~2.4mm)에서 직류전압을 인가하여 음극표면상태가 절연파괴 전압과 전구전류에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험장치와 방법

(1) 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치로서 고전압발생 장치는 Pluse Electronic Engineering Co.의 Type HDV-200KV(DC+)를 사용했고, 고전압측정은 Hipotronics Co의 고압Probe(2000:1)와 동사의 Digital KiloVoltMeter를 사용했다. 또한 진공도는 Shimadzu Co.의 Rotary Pump와 Diffusion Pump를 사용하여 약 10^{-5} torr로 유지하였다. 전극은 직경40 [mm]의 Stainless Steel 근사Logowski전극을 사용했으며 본 실험의 전기적 회로는 그림1에 나타났다.

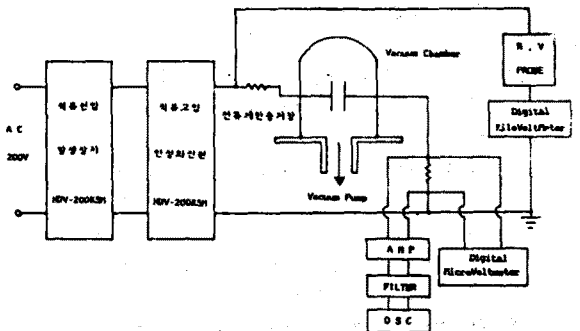


그림1. 전기회로

(2) 실험방법

전압은 2KV/sec 로 일정하게 상승시켰으며, 절연파괴전압은 다수의 Sparking을 행한후 절연파괴전압이 거의 포화되었을 때를 Conditioning 되었다고 인정하여 측정하였다. 또한 절연파괴시의 과도한 방전전류에 의한 전극의 손상을 막기 위해 진류제한용저항을 전압발생장치와 양극사이에 직렬접속했다. 그리고 음극의 표면상태는 첫째, Smooth Electrode(#1200) 둘째, Rough Electrode(#50) 셋째, 전극층상에 높이 500 μ m, 반지름500 μ m 인 반구를 부착한 Protrusion Electrode 를 각각 준비하여 사용하였다.

3. 전계방출이론

진공중에서 전계를 인가할 때 전극표면에 존재하는 미소돌기부산단에서 전계방출되는 전류밀도는 다음과 같은 Fowler-Nordheim 방정식에 의해 주어진다[1,6,9].

$$\frac{I}{V^2} = \frac{1.54 \times 10^{-6} A \phi^2}{d^2 v^2(y)} \exp \left\{ -\frac{6.83 \times 10^7 \phi^2 d v(y)}{V \beta} \right\} \dots (1)$$

여기서 V[V]는 인가전압, I[A]는 전구전류, β 는 음극표면에 존재하는 미소돌기부의 극부전계강화요소(local-field enhancement factor), $A[\text{cm}^2]$ 는 방사면적, $\phi[\text{eV}]$ 는 일함수이며, v, t 는 $y=3.79 \times 10^{-4} (\beta V^{1/2} / \phi d)^{2/3}$ 의 함수로서 거의 변하지 않으며 이미 도표화 되어 있다[9]. $\log_{10}(I/V^2)$ 대 $1/V$ 의 그래프는 다음과 같이 (-)기울기 M을 갖는 직선을 표시한다.

$$M = [-6.83 \times 10^7 \phi^2 d s(y)] / 2.303 \beta \dots (2)$$

여기서 $s(y)$ 는 거의 1에 접근함으로써 실제상황에서 $s(y)=1$ 에 두어도 관계가 없다. 그리하여 V-I 특성으로부터 F-N plot를 만들면 전계방출을 확인할 수 있으며, 그 F-N plot의 기울기 M을 구하면 전계승배계수 β 를 구할 수 있고, 또한 절연파괴시에 음극에서 극부적으로 증가된 전계 E_c 를 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$E_c = \beta V_b / d \dots (3)$$

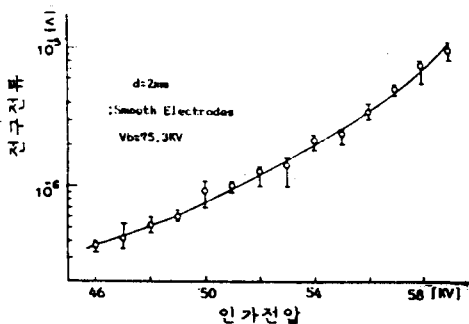


그림2. Smooth Electrodes에서 전구전류의 변화

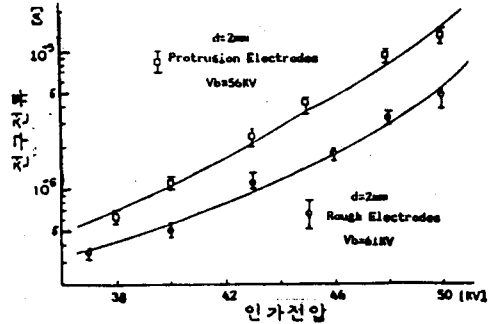


그림3. Rough, Smooth Electrodes에서 전구전류의 변화

4. 결과 및 고찰

(1) 전구전류의 변화

그림2,3은 각 전극표면상태에서 전압인가에 따른 전구전류의 변화를 나타낸다.

같은 극간거리($d=2\text{mm}$), 같은 인가전압(50KV)에서 Rough Electrodes는 Smooth Electrodes의 약5.2배 Protrusion Electrodes는 Smooth Electrodes의 약 13.9배 상승했다.

(2) Fowler-Nordheim plots

그림4,5,6은 각 전극표면상태에서 측정한 V-I 특성으로부터 구한 F-N plot이다.

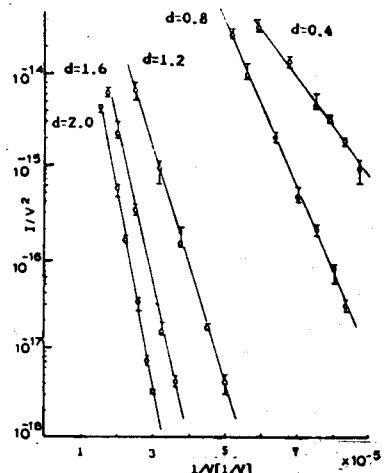


그림4. Smooth Electrodes의 F-N plots

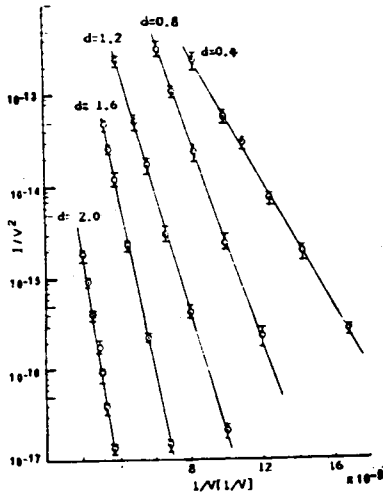


그림 5. Rough Electrodes의 F-N plots

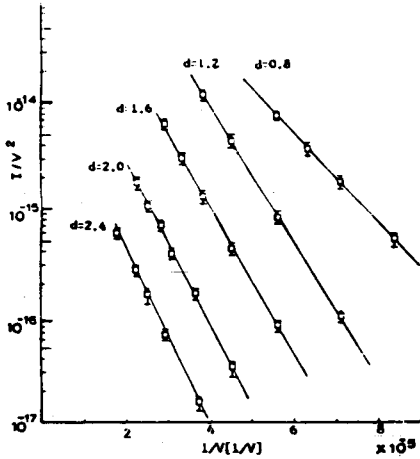


그림 6. Protrusion Electrodes의 F-N plots

그림 4, 5, 6에서 나타내어진 바와 같이 모든 전극간 거리에서 F-N plots는 (-) 기울기를 갖는 직선으로 나타나고 있다. 따라서 각 전극표면상태의 경우, 전계방출이론에서 설명한 바와 같이 F-N 이론에 따르는 전계방출에 의하여 절연파괴가 발생함을 제시하고 있다.

(3) 여러가지 전극표면상태에서 전계증배계수
그림 4, 5, 6의 직선의 기울기를 구한후 식(2)에 대입하면, 극간거리의 함수로서 전계증배계수를 구할 수 있다. 여기서 Stainless Steel의 Work Function은 4.4eV이다. 그 결과를 그림 7에 나타냈다.

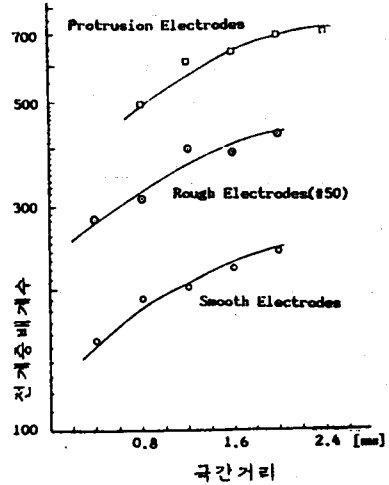


그림 7. 여러가지 전극표면상태에서 전계증배계수

위의 결과로부터 극간거리가 커지면 전계증배계수가 커짐을 알 수 있으며, 같은 결과가 Implus 전압인가 때도 보고되고 있다[7,9].

(4) 여러가지 전극표면상태에서 절연파괴전압
모든 결과는 전극을 충분히 Conditioning한후 얻은 값이다.

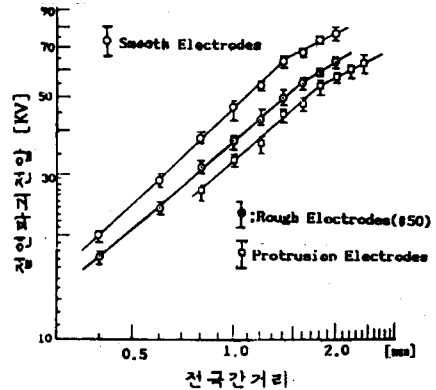


그림 8. 여러가지 전극표면상태에서 절연파괴전압

같은 극간거리(d=2mm)에서 Rough Electrodes의 절연파괴전압은 Smooth Electrodes의 약 81%, Protrusion Electrodes의 절연파괴전압은 Smooth Electrodes의 약 72%이다.

5. 결 론

- 전극표면상태가 거칠수록 전구전류는 현저히 증가하였다.
- 전극표면에 요철이 있을 경우의 F-N plots 는 전계방출이론과 일치하고 있으므로, 미소갭의 절연파괴Mechanism 은 F-N 이론에 따르는 전계방출임을 확인할 수 있었다.
- 전계증배계수는 $d=2mm$ 에서 Rough Electrodes가 Smooth Electrodes의 약1.8 배, Protrusion Electrodes 가 Smooth Electrodes 의 약2.9 배 증가하였다. 그러므로 전극표면의 요철상태는 절연내력에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.
- 이상에서 방전제특성 가운데 전극의 표면상태에 따르는 전구전류는 상당히 중요한 요소임을 알 수 있었다.

[参 考 文 献]

- 1) G.Farral, 'Electrical Breakdown in Vacuum,' IEEE Trans.on.Elect.Insul., Vol.EI-20, No.5, PP. 815-838, 1985.
- 2) 鶴田浩一, '真空絶縁破壊と電界放出電流および放電電流が兩電極に及ぼす効果,' 日本電氣學會論文誌A, Vol.103, PP.17-24, 昭58-1
- 3) 日本電氣學會編, '放電ハンドブック,' 電氣學會, 1982.
- 4) D.K.Davies, 'The Initiation of Electrical Breakdown in Vacuum-A review,' J.Vac.Sci. Technol., Vol.10, PP.115-121, 1973.
- 5) T.Ubusmi, 'Cathode-and Anode Electrical Breakdown in Vacuum,' J.Appl.Phys., Vol.38, PP.2989-2997, 1967.
- 6) 鶴田浩一, '前驅電流測定による真空イパルス放電検討,' 日本電氣學會誌A, Vol.98, PP.135-142, 昭53-3
- 7) K.Trusta, 'Prebreakdown Field Emission Current and Breakdown Mechanism of a small Vacuum Gap,' IEEE Trans.on.Elet.Insul., Vol.18, PP.204-208, 1983.
- 8) J.M.Laffery, 'Vacuum Arcs, Theory and Application,' A willey-Interscience Publication, 1979.
- 9) K.Trusta, 'Impulse Breakdown Fields of Short Vacuum Gaps,' IEEE Trans.on.Elec. Insul., Vol. EI-22, No.1, PP.77-79, 1987.