

直流 電壓에 의한 微小 眞空갭의 前驅放電 電界放出

(Prebreakdown Field Emission of Micrometric Vacuum Gaps under DC Voltage)

金正達* ·李世薰**
(Jung-Dal Kim · Sae-Hun Lee)

요 약

진공에서의 파괴는 파괴진구현상으로부터 개시되고, 파괴진구현상중에서 가장 중요한 과정은 Metallic Field Electron Emission과 Micro Discharge이다.

진공내에서 평등전계 갭의 전기적 파괴특성 중 전극에 흐르는 방전전구전류는 전계에 의존하고 Fowler Nordheim 식으로 나타낼 수 있다.

이 논문은 압력 760, 1.2×10^{-3} , 1.2×10^{-5} [torr]과 스테인레스 전극을 미소갭 20, 50, 75, 100(μm)으로 구성하여 방전전구전류에 대해서 실험적으로 연구했다.

전극갭과 압력변화에 따라 얻어진 I-V 특성곡선을 Fowler Nordheim의 전계방출 이론에 입각해서 분석한 결과, 진공중 미소갭의 전기적 파괴기구는 Metallic Field Electron Emission (M-FEE)에만 의존되었다.

Abstract

Vacuum breakdown is initiated by prebreakdown phenomena.

Among the most important prebreakdown phenomena, We can distinguish Metallic Field Electron Emission and Micro Discharge.

The electrical breakdown characteristics of uniform field gap in vacuum showed that the prebreakdown current flowing the electrodes was dependent on field and could be described by the Fowler Nordheim equation.

This paper gives an account of an experimental investigation of the prebreakdown current, microgaps 20, 50, 75, 100(μm) consisting of stainless steel electrodes at pressure 760, 1.2×10^{-3} , 1.2×10^{-5} [torr]

*正會員：慶南大學校 電氣工學科 教授
接受日字：1997年 4月 9日

**正會員：大元專門大學 電氣科 助教授

The I-V characteristic curves obtained for various gaps and pressure were analyzed according to Fowler-Nordheim field emission theory.

Finally, Electrical breakdown mechanism of microgap in vacuum is depend on metallic field electron emission(M-FEE).

1. 서 론

진공중에서 전기적 파괴에 대한 연구는 지난 30여년 전부터 꾸준히 연구되어져 오고 있다. 진공에서의 전기적 강도는 파괴전압으로 나타낼 수 있고, 진공내 전기적 파괴는 방전을 개시하는 초기 입자(particle)와 계속적으로 일어나는 질류 증폭 기구가 있어야만 가능하다. 또한, 지금까지 밝혀진 파괴기구는 전계에 의한 전자방출("Metallic" Field Electron Emission 이하 M-FEE라 함)에 의한 것과 미소방전(Microdischarge)에 의한 파괴로 해석되고 있다.

M-FEE는 0~2[mm] 범위의 미소갭에서, 미소방전은 10[mm]이상에서 성립되고 2~10[mm] 범위는 각각 또는 동시에 적용된다.¹⁾

M-FEE는 음극상에 비금속 오염물이나 음극 표면의 미소돌기로부터 전계에 의해 전자가 방출되고, 미소방전은 주기 0.1~100[ms], 주파수 0.1~100[s-1], 크기 0.01[A] 이하로 되는 전구 방전전류의 펄스로 제한되어진다.

진공갭 내의 전자는 고전계에서 냉음극 표면으로부터 방출될 수 있으며 이 방출현상을 자동 전자방출 또는 전계방출 이라고도 한다. 이 방출기구의 이론은 R.H. Fowler-Nordheim (1928)²⁾에 의해 정립되었으며, 진공중에서 평행평판 전극간의 방전전구전류는 전계변화에 의존하므로 F-N plot나 Log I-V 곡선(Schottky 곡선)이 직선적으로 나타나게 된다.

지금까지 많은 연구자들이 다각적인 방법으로 방전전구전류를 측정하여 이 이론과 일치하는지에 대하여 진공중 파괴기구를 분석해 오고 있다.

이와 관련된 연구로서는 음극표면에서 방출하는 M-FEE의 방출 위치, 이상화시킨 미소돌기에서 M-FEE 특성³⁾, 직류 여기에서 정·부극성 안정시의 파괴기구⁴⁾, 펄스전계 인가시 음극 및 양극 과정⁵⁾등에 관한 연구가 있으며, 미소방

전의 경우는 전극구성시 혼입된 미소 먼지입자나, 전극처리 과정에서 알루미늄이나 혹은 다이아몬드 페스트 입자가 전극간에 미량이지만 존재하게 되어 이로부터 파괴기구가 개시되는 것으로 이에 관한 연구는 입자의 비행현상, 하전입자 모양, 트리거 방전, 입자기화의 영향에 관한연구⁶⁾, 또한 이들 입자의 충돌속도, 이동현상, 운동에너지 등에 관한 연구⁷⁾가 있다.

전극갭의 전자방출 현상에 관한 연구는 방출과정을 영상화하여 직접확인하거나 방출 위치를 직접 및 간접측정하고, 가스 방출, 광방출 스펙트럼, 전자방출 spectra 검출 등 다각적인 방법으로 접근하고 있다.

근래의 전구방전 전자방출에 관한 연구는 미소간격에서의 비금속 전계방출이나 에너지밴드 이론의 해석, 요소 해석, 스위칭 모델^{8, 9, 10)}에 관한 연구등 광범위하게 연구되어 지고 있지만 100[μm]이하 범위의 미소마이크로 갭에서의 연구는 거의 찾아 볼 수 없다.

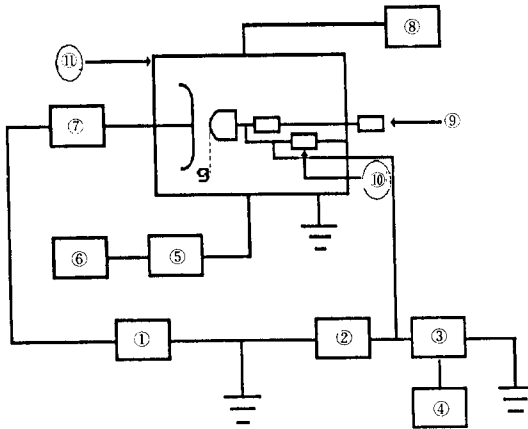
본 연구는 부극성 직류 여기 하에 있는 미소진공갭에서 인가전압과 진공도를 파라메타로 하여 측정된 방전전구전류를 이용하여 F-N plot, I-V 특성 곡선, Log I-V (schottky 곡선) 곡선을 그려 진공 중 미소갭에서의 파괴기구를 규명 해보고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험장치는 그림 1에 나타난 것과 같이 구성하였다.

실험에 사용한 여기전압원은 부극성 직류로 0~15[kV]이며 전류 제한 저항 200[MΩ]을 통하여 실험갭에 인가된다.

전극갭은 20, 50, 75, 100[μm]로 chamber 외부에 있는 마이크로미터로 조정되며 초기접촉상태의 확인은 실험 진공도가 완전히 유지되었을



- ① DC Power Supply [0~15kV]
- ② Keithley 610 C Electrometer [5×10^{-15} A]
- ③ Tektronix Oscilloscope [TDS 540, 1GS/s, 500MHz]
- ④ Printer
- ⑤ Rotary Pump
- ⑥ Turbo Pump
- ⑦ Current limit Resistor 200[M Ω]
- ⑧ Vacuum Gauge (Ionization Gauge)
- ⑨ Micrometer
- ⑩ Resister 50[Ω] [$1.2 \times 10^{-6} \sim 1.5$ bar]
- ⑪ Vacuum Chamber

그림 1. 실험장치의 구성
Fig. 1. Construction of the Experimental Apparatus

때 실시되고, 갭변경 때마다 디지털 멀티미터로 확인 하였다. 진공 chamber는 스테인레스 강으로 된 직경 28[cm] 중양에 현상관측용 창이 있으며, 진공은 Rotary pump와 Turbo pump가 사용되었으며, 진공도 측정은 이온계이지와 피라니계이지로 하였다.

전극재료는 스테인레스 강이며 평판전극은 지름 2.54[cm]이고 끝단은 0.63[cm]의 곡율을 가지며 대향 전극은 길이 2.0[cm], 전극 끝단은 지름 1.5[cm]의 원형이다. 미소 전극갭을 일정하게 만들기는 어떠한 형태의 전극 구성으로도 쉽지않고, 평등전계를 구성하기도 어려우므로 본 실험에서는 평판전극과 포탄형전극으로 대향시켜 그 영향을 최소화시켰다.

전극은 시험 전에 Al_2O_3 분말을 이용하여 표면처리 한 후 다이아몬드 페스트 0.25[μ m]로 딱아 최종적으로는 표면이 경면처리 되었으며, 비 이온화 수에 1시간 동안 초음파 세척하여 100[$^{\circ}$ C] 전기로에 24시간 건조하여 설치했다.

전구방전의 전류측정은 Keithley 610 C Elec-

trometer가 사용되었으며, Electrometer의 안정과 측정방법은 전압을 미소단계(~ 100 volt)씩 계단적으로 불안정한 전류가 나타날 때까지 상승시켜, 불안정 전류가 나타나면 5분간 기다린다. 그때까지 안정되지 않으면 전압을 다시 1단계 상승시켜 다시 5분간 기다린다. 그렇게 하여도 안정되지 않으면 전압을 Zero까지 감소시켜 1단계를 끝낸다. 이와 같은 단계를 반복하여 안정된 전류가 감지될 때 측정된 값만이 전구방전 전류치로 사용하였다.

만약 실험 초기에 예상전압보다 대단히 낮은 전압에서 불안정한 전류의 상태가 계속되면 이것은 전극, 특히 음극이 손상되었으므로 실험을 중단하고 전극을 다시 Polishing 하여 다음 실험을 하였다.

전구전류 측정값은 인가전압 상승시 측정된 값이며 이는 갭 파괴나 큰 전구전류 발생 이후의 측정값은 매우 크게 나타나기 때문이다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 양극이 평판 전극으로 구성된 경우

음극에 포탄형전극을 양극에 평판전극을 접속하여 갭간격을 20, 50, 75, 100 [μ m]로 변화시켰을 때 압력 760, 1.2×10^{-3} , 1.2×10^{-5} (torr)에서 인가 전압별로 측정된 방전전구전류를 사용하여 I-V곡선, F-N plot, Log I-V 곡선을 그려 미소갭에서의 방전전구현상을 알아보았다.

그림 2는 압력 760(torr)인 경우에 전극갭을 변화시켰을 때 방전전구전류의 변화를 I-V 곡선으로 나타낸 것이다.

이 압력 범위에서 미소갭의 경우 전구전류의 연속적 변화의 측정은 불가능하여 그림에서 보는 바와같이 $\sim 2.9 \times 10^{-12}$ [A]범위에서 갑자기 $1.0 \sim 1.4 \times 10^{-7}$ [A]로 증가되었다. 그러므로 이 측정값으로 나타나는 F-N plot나 Log I-V 곡선도 매우 불안정하여 나타낼 필요가 없다. 이러한 현상은 대기압 상태에서 혼입된 미소의 비금속 입자나 전극 표면에 부착된 불순물 등의 영향이 나타나기 때문이라 생각되며, M-FEE에 의한 파괴로 볼 수 없고 기중방전의 2차전자 방출

과정에 의한 파괴임이 분명하다.

그림 3은 압력 1.2×10^{-3} (torr)인 경우 갭 변화별로 측정된 방전전구전류를 사용하여 I-V 곡선을 그린것으로 그림 2와 비교해 보면 양호한 I-V 곡선이 되어진 것을 볼 수 있다. 특히 간격이 긴 50, 75, 100(μm)가 더욱 양호함을 나타낸다.

그림 4는 동일 데이터를 이용하여 그린 F-N plot로서 갭이 커 질수록 인가전압이 낮은 범위가 불안정하고 인가전압이 증가하면 안정되어 거

의 직선적으로 증가되는 것을 보여준다.

그림 5는 같은 데이터를 이용하여 그린 Log I-V 곡선으로 인가전압 증가에 따라 방전전구전류 증가는 포화하여 10^{-7} [A]에 근접한 후 파괴되었다. 그러나 20(μm)로 간격이 좁은 경우의 방전전구전류는 점진적인 상승을 나타내어 파괴되었으며, 10^{-10} [A] 이하 범위의 전구전류는 순간적으로 급상승하는 것으로 보아 2차전자 방출 과정에 의한 것임을 알 수 있다.

진공도가 높아짐에 따라 방전 전구전류의 측정

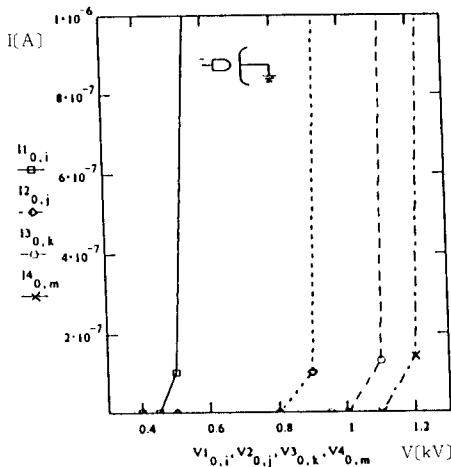


그림 2. I-V 특성곡선(760torr)
Fig. 2. I-V Characteristics.
Pressure=760(torr). Gap=20,50,75,100(μm)

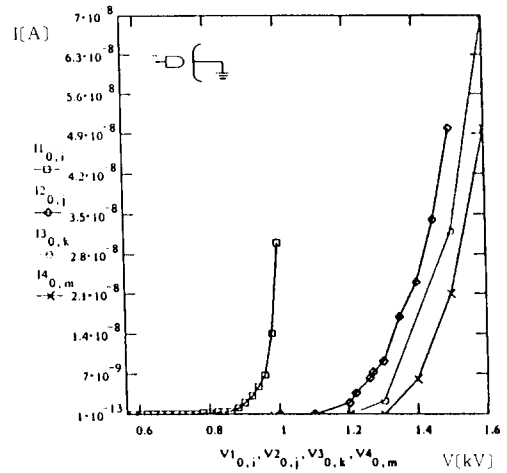


그림 3. I-V 특성곡선(10^{-3} torr)
Fig. 3. I-V Characteristics.
Pressure= 10^{-3} (torr) Gap=20,50,75,100(μm)

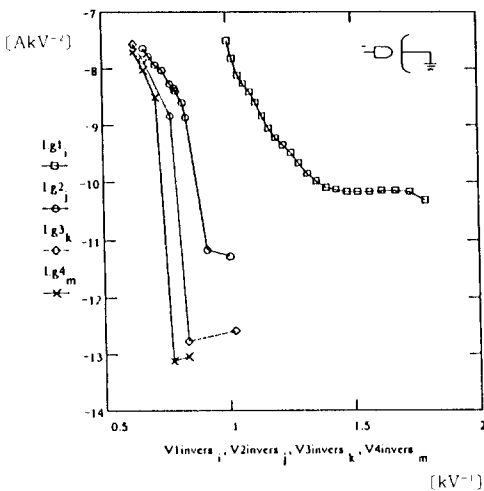


그림 4. Fowler-Nordheim 곡선(10^{-3} torr)
Fig. 4. Fowler-Nordheim Plot
Pressure= 10^{-3} (torr) Gap=20,50,75,100(μm)

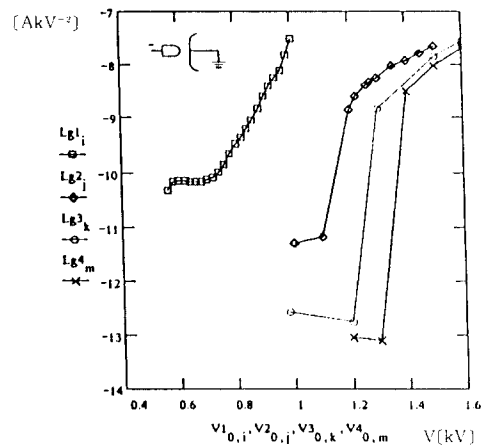


그림 5. Log I-V 특성곡선(10^{-3} torr)
Fig. 5. Log I-V Characteristics.
Pressure= 10^{-3} (torr) Gap=20,50,75,100(μm)

값이 안정되면서 전형적인 I-V곡선에 접근하지만 F-N plot나 Log I-V 곡선으로 보면 아직까지는 매우 불안정 하므로 진공중에 평동전계 갭에서의 방전과정으로 알려진 M-FEE에 의한 파괴과정은 아님을 알 수 있다.

그러나 진공도가 증가 함에 따라 측정값이 안정되므로 압력을 증가시켜 1.2×10^{-5} [torr]에서 방전전구전류를 측정하여 그 결과로 I-V곡선을 그려본 것이 그림 6이다.

그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 전형적인 I

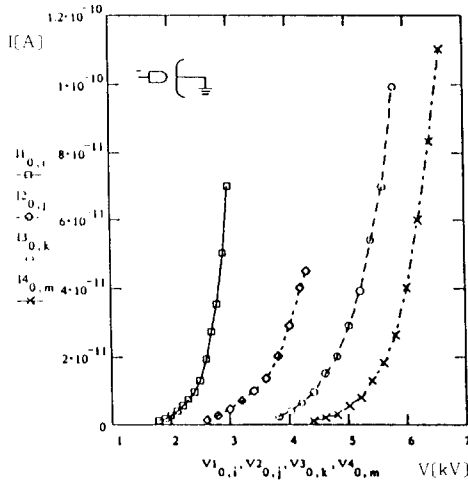


그림 6. I-V 특성곡선 (1.2×10^{-5} torr)
Fig. 6. I-V Characteristics.
Pressure = 1.2×10^{-5} [torr] Gap = 20, 50, 75, 100 [μm]

-V곡선을 나타내고 있으며 같은 데이터를 이용하여 그린 F-N plot가 그림 7이다. 그림에서 보여주는 것 처럼 실험된 갭 중 20[μm], 50[μm]에서 작은 스텝이 나타나고 있으나 다른 모든 갭에서 F-N plot가 직선으로 나타나고 있어 이 진공범위와 갭범위의 전기적 파괴기구는 M-FEE에 기인된다고 볼 수 있다.

그림 8은 동일 데이터로 그린 Log I-V 곡선으로 대체적으로 각 갭별 전압 증가에 따른 방전전구전류의 증가는 선형적이다. 그러나 갭이 커

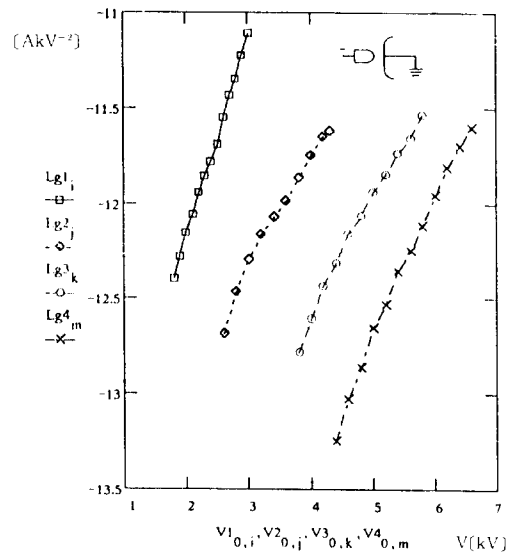


그림 8. Log I-V 특성곡선 (1.2×10^{-5} torr)
Fig. 8. Log I-V Characteristics.
Pressure = 1.2×10^{-5} [torr] Gap = 20, 50, 75, 100 [μm]

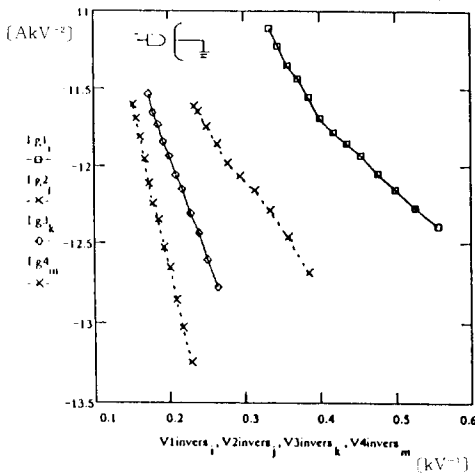


그림 7. Fowler-Nordheim 특성곡선 (1.2×10^{-5} torr)
Fig. 7. Fowler-Nordheim Plot.
Pressure = 1.2×10^{-5} [torr] Gap = 20, 50, 75, 100 [μm]

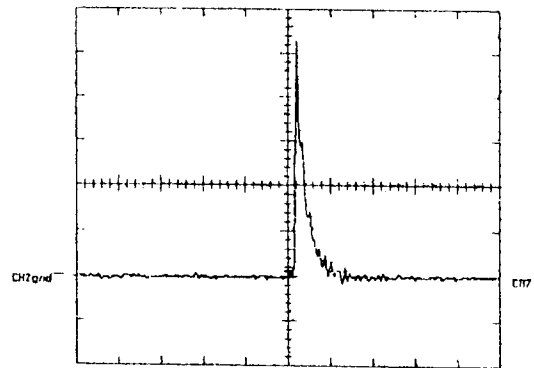


그림 9. 전구파괴 전류 펄스
Fig. 9. Prebreakdown Current Pulse
g : 200 [μm] V : 7 [kV]

져 갭간 전계가 강해지면 다소 데이터가 산포하고 선형성을 벗어나려는 경향이 있다. 본 실험범위 이상에서 종종 측정 불안정이 나타났다. 전극갭 200(μm), 인가 전압 7(kV)일 때 오실로스코프로 포착한 방전전구전류의 펄스를 그림 9에 나타냈다.

이 그림의 펄스로 보아 마이크로 방전으로 발생된 것이 분명하므로 이 범위 이상의 갭에서의 실험은 각별히 M-FEE에 의한것과 미소방전에 의한것 중 어디에 속하는가 하는 점에 유의할 필요성이 있다.

3.2 음극이 평판 전극으로 구성된 경우

전극을 서로 교환하여 평판전극을 음극측에 연결하고 같은 실험 조건으로 방전전구전류를 측정하여 전구전류가 전극의 형태에따라 어떠한 변화가 있는가 또한 방전과정을 설명하는데 있어서 어떠한 전극구성이 좋은가에 대하여 알아보았다.

압력 760(torr)에서 갭과 인가전압을 파라메타로 하여 구한 방전전구전류를 사용하여 I-V 곡선으로 그린 것이 그림 10 이다.

이 그림의 I-V 곡선을 그림 2와 비교해 볼 때 대기압 정도에도 전형적인 형태에 가깝게 나타나고 있어 전극구성은 음극에 평판전극을 구성하는 방법이 좋은 것으로 나타났다. 그러나, 전 범위

에 걸쳐 불안정한 특성을 나타내고 있으므로 파괴 메커니즘은 전계에 의한 전자 방출이 아님을 보여주므로 F-N plot 나 Log I-V곡선은 더욱 산포될것이므로 나타낼 필요가 없다.

진공도 1.2×10^{-6} (torr)의 상태에서 음극을 평판전극으로 하고 전극갭과 인가전압을 파라메타로 하여 얻은 방전전구전류로 I-V곡선을 그린 것이 그림 11이다. 곡선이 전 실험 범위에서 안정되고 이상적인 I-V특성 곡선을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

F-N plot에서 선형적인 영역은 방전전구전류가 전계방출 전자에 기인하고 도중에 스텝이나 점프가 발생하는 것은 발생전류의 갑작스러운 변화로 새로운 전자방출의 추가적 발생을 의미한다. 100(μm) 이하의 범위에서 본실험에서는 스텝이나 점프는 거의 나타나지 않았다. 실험과정의 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ [A] 범위에서는 간혹 점프가 있었지만 이는 Electrometer의 배율 변화에 의한 계측기 오차로 판명되었다.

그림 12는 같은 데이터를 사용하여 F-N plot 한 그림인데, 전 범위에 걸쳐 직선으로 나타나므로 전계에 의한 전자방출에 의한 방전 전전기구임을 알 수 있다. 그림 13은 Log I-V곡선으로 전 실험 갭에서 인가전압 증가에 의한 파괴 전구전류가 또한 직선적인 증가를 보이므로 냉음극

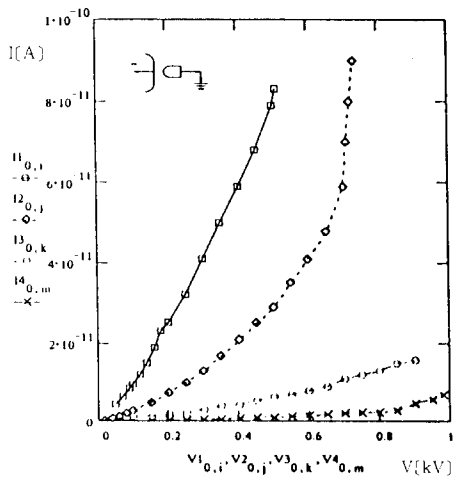


그림 10. I-V 특성곡선(760torr)
Fig. 10. I-V Characteristics.
Pressure = 760(mmHg)
Gap = 20, 50, 75, 100(μm)

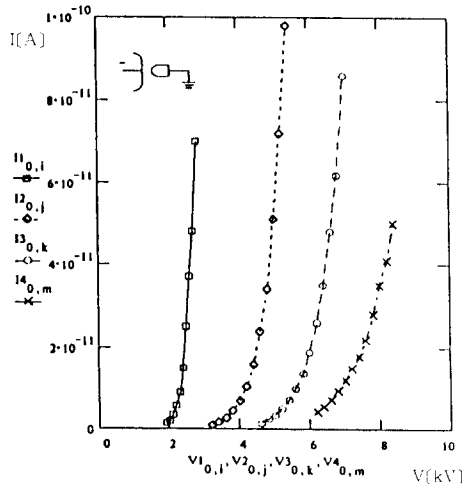


그림 11. I-V 특성곡선(1.2×10^{-6} torr)
Fig. 11. I-V Characteristics.
Pressure = 1.2×10^{-6} (torr)
Gap = 20, 50, 75, 100(μm)

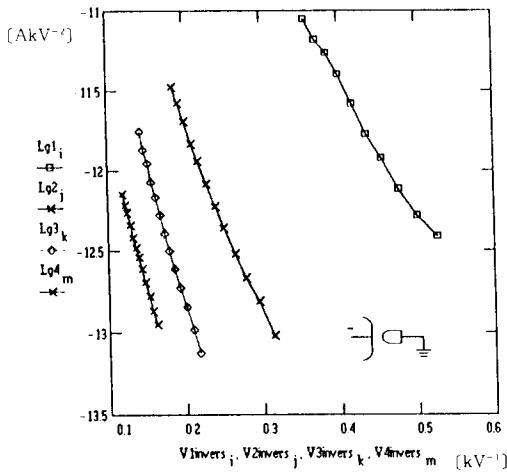


그림 12. Fowler-Nordheim 곡선 (1.2×10^{-5} torr)
 Fig. 12. Fowler-Nordheim Plot
 Pressure = 1.2×10^{-5} [torr]
 Gap = 20, 50, 75, 100 [μm]

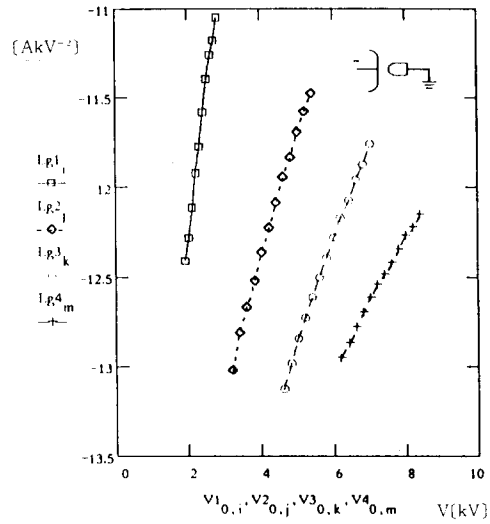


그림 13. Log I-V 특성곡선 (1.2×10^{-5} torr)
 Fig. 13. Log I-V Characteristics
 Pressure = 1.2×10^{-5} [torr]
 Gap = 20, 50, 75, 100 [μm]

전계방출에 의해 발생된 전자에 의해 파괴가 진전됨을 명확히 입증한다.

전극구성 형태에 관계없이 진공도가 높은 1.2×10^{-5} [torr]에서의 결과가 전계에 의한 전자방출 메카니즘임을 보여주고 있다. 이러한 결과는 진공상태에서 측정기 안정이 용이하며, 비금속 입자 혹은 금속 증기 등 측정을 불안정하게 만드는 제반 요인이 나타나지 않아 전구전류 측정이 안정되어 명확한 데이터를 제공하기 때문이라 생각된다.

진공도 1.2×10^{-5} [torr]에서 전극 구성별로 실험된 2가지 경우(그림 6과 그림 11)을 비교해보면 I-V곡선의 특성변화는 유사하지만 음극에 평판전극을 설치한 경우가 더욱 전형적인 I-V 특성을 나타내고, F-N plot의 직선성이 확실하며 Log I-V곡선에서 전압 증가에 따른 전구전류 증가가 비례적이므로 좋은 전극구성 방법임을 보여준다. 결과적으로 진공 중에 평등전극으로 구성된 마이크로 갭에서 직류전압에 의한 파괴기구는 전계 방출전자에 의해 진전되어 지는 것이 명확하다.

3.3 진공중 파괴전압과 전극 구성과의 관계

표 1은 각 실험에서 측정된 파괴전압을 나타

낸다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 760 [torr]에서의 파괴전압은 음극에 평판전극을 구성한 경우가 다소 낮지만 거의 비슷함을 보여 준다. 그러나, 1.2×10^{-5} [torr]의 진공 상태에서는 음극이 평판전극으로 구성된 경우의 파괴전압이 다소 높게 됨을 볼 수 있다.

전극구성의 형태에 따라 초기전자가 방출되는 전극의 면적이 달라지면 방전 개시전압 및 방전 전구전류의 값이 변화하는데 이 요인은 전계강도, 전자방출 면적, 비금속 박막등 불순물의 출현 때문이다.

압력 760 [torr]에서 음극에 평판전극이 구성된 경우 파괴전압이 다소 낮게 되는 이유는 전극면적이 넓으므로 음극에서의 초기전자방출이 용이하며 불순물의 출현과 비산등에 의해 방전 진전기구가 신속하게 형성되기 때문이라고 생각된다.

진공도가 1.2×10^{-5} [torr]에서는 반대로 음극에 평판전극이 있는 경우의 파괴전압이 높게 되는데, 그 이유는 진공도 증가로 불순물의 영향이 배제되고 방전기구가 충돌전리에 의한 2차과정보다는 전계 형성에 의한 전자방출 과정이 보다 강하게 나타나기 때문이라 생각된다.

압력 10^{-5} [torr] 갭 100 [μm] 이하에서 평균 DC파괴 강도는 100 [V/ μm]이다.

표 1. 파괴전압
Table 1. Breakdown Voltage

Polarity pressure [torr]	-		-	
	Gap[μm]	Bd[kV]	Gap[μm]	Bd[kV]
760	20	0.59	20	0.51
	50	0.8	50	0.74
	75	1.2	75	0.9
	100	1.9	100	0.98
1.2×10^{-4}	20	1.5	20	1.6
	50	2.2	50	2.4
	75	2.6	75	2.8
	100	3.0	100	3.3
1.2×10^{-5}	20	3.3	20	3.9
	50	5.0	50	6.4
	75	7.6	75	8.0
	100	8.8	100	9.8

4. 결 론

평등전계를 형성하는 전극구성은 스테인레스 강으로 된 평판전극과 포탄형전극을 100(μm)이하 단갭으로 구성하고 진공중에서 압력과 인가전압을 파라메타로 하여 방전전류의 변화를 측정하여 I-V곡선과 F-N plot, Log I-V곡선을 그려 결과를 분석해 본 결과

1. 진공중 미소갭에서의 파괴는 전계에 의한 전자방출 기구에 따른다.
2. 진공도가 높고 평판 전극이 음극으로 구성된 때가 가장 우수한 결과를 제공한다.
3. 압력 760(torr)에서는 음극에 평판 전극이 있는 경우의 파괴전압이 낮지만 1.2×10^{-5} (torr)에서는 오히려 높게 나타났다.
4. 10^{-5} (torr) 100(μm)이하 갭의 평균 DC 파괴전압은 100(V/ μm)로 높게 나타났다.

향후 이 실험을 기준으로 하여 투명 전도막에 이용되는 도전층 재료 ITO(Indium Thin Oxide)막의 미소갭에서의 전도전류 특성에 관한 연구를 시도하고자 한다.

참 고 문 헌

1) G. M. Kassirov and G. A. Mesyato, "Breakdown Mechanism of Short Vacuum Gaps". Soviet Physics, Technical Physics, Vol. 9, No. 8, pp. 1141~1144, 1965.

2) R.H. Fowler and L. Northem, "Electron Emission in Intense Electric Fields", proc. Roy. SOC, 199A, pp. 173~181, 1928.

3) R.V. Latham, "Prebreakdown Electron Emission", IEEE. Trans. Elec. Ins Vol. EI-18 No. 3, pp. 194~203, 1983.

4) K. Tsurata "Prebreakdown. Field Emission Current and Breakdown Mechanism of a Small Vacuum Gap." IEEE. Trans. Elec. Ins. Vol. EI-18 No. 3, pp. 204~208, 1983.

5) A.V. Batrakov et al, "The effect of Pulsed Electron beam Treatment of Electrode on Vacuum Breakdown." IEEE. Trans. Elec. Ins. Vol. 2 No. 2, pp. 237~242, 1995.

6) W.Ziomek and H.Moscicka-Grzesiak, "Relation of Breakdown Voltage and Pre-breakdown Microdischarge Parameters in Vacuum." IEEE. Trans. Elec. Ins. Vol. 28 No. 4, pp. 481~487, 1993.

7) B.Mgzurek et al, "X-ray Emission Accompanying Cathode Microdischarge." IEEE. Trans. Elec. Ins. Vol. 28 No. 4, pp. 488~493, 1993.

8) A.S. Denholm, "The Electrical Breakdown of Small Gaps in Vacuum." Can. J. Phys. Vol. 36, pp. 476~493, 1958.

9) R.V. Latham, "High voltage Vacuum insulation. The physical basis." Academic press, London, 1981.

10) T.S. Sudarshan, "X-ray Emission and Prebreakdown Currents in plan and Dielectric Bridged Vacuum Gaps under D.C Excitation." IEEE. Trans. Elec. Ins. Vol. 23 No. 2, pp. 231~241, 1988.

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 정 달(金正達)

1947년 1월 6일 생. 1970년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 중앙대학교 대학원 졸업 (박사). 1995~1996년 미국 South Carolina 대 방문교수. 현재 경남대학교 공과대 전기전자공학부 교수.



이 세 훈(李世薰)

1955년 8월 15일 생. 1982년 숭실대학교 전기공학과 졸. 1987년 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업 (석사). 1995년 경남대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 대원전문대학 전기과 조교수.