

HOLLOW CATHODE DISCHARGE의 방전 특성 연구

✱
조 상무, 서 용운, 김 명제, 황 기웅
서울대학교 전기공학파

A study of the hollow cathode discharge

✱
S.M.Cho, Y.W.Seo, M.J.Kim, K.W.Whang
Seoul National University

Abstract

The characteristics of the hollow cathode discharge were investigated. Temperature distribution of the hollow cathode was investigated and I-V curves of the hollow cathode discharge were obtained. In this paper variables are chamber pressure, Ar gas flow rate injected through the cathode tube and the gap distance between cathode and anode. The inter electrode electron temperature and density were measured by Langmuir probe.

1. 서론

공동음극을 사용하는 hollow cathode discharge는 그 기하학적 모형때문에 공동음극의 내부에 plasma가 형성되고 이 plasma가 공동음극 내부 벽면과 상호작용을 한다. 이 상호작용은 음극벽의 extensive hot zone의 영역에서 일어나는데 hollow cathode에서 방출된 전자가 sheath 전위에 의해 가속받고 cathode를 빠져나오기 전까지 중성가스입자와 충돌을 해서 ionization을 시키고 여기서 발생된 ion이 cathode에 가속 충돌되어서 열전자를 방출시키는 mechanism에 의해 대전류를 공급한다. 방전의 효율과 적절한 동작을 위해서 cathode 재료는 Tantalum이고 가스로는 Argon의 경우가 가장 좋은 조합이라고 연구보고되었다. 밀도가 높고 아주 높은 이온화율을 갖는 매우 순수한 external plasma (음극 재료에 의한 오염이 적다)가 얻어지고 매우 높은 전류 밀도와 음극 온도에도 불구하고 상당히 긴 음극 수명이 보고되었다. (1) 이러한 hollow cathode discharge의 응용으로는 hollow cathode에서 나오는 열전자를 고온 열원으로 이용하는 ion plating 장치, hollow cathode discharge의 아주 밝은 빛을 이용하는 조명장치등이 실제로 이용되고 있다.

2. 실험 장치

그림1에 본실험을 위해 제작된 장치의 개략도가 나타나 있다. 진공 배기는 Roots pump와 Rotary pump에 의해 이루어지며 아르곤 가스는 thermal type mass flow controller에 의해 공급되고 전원 장치는 Diode나 Thyristor를 이용해서 교류를 정류시킨 DC전원으로 ignition용, glow에서 arc로의 전이, 또 arc를 유지시키는 세가지로 구성 되어 있다. 음극은 외경 8mm, 내경 6mm, 길이는 45mm의 Refractory Metal인 Ta Tube를 사용했고 양극은 50cc의 용량을 갖는 Cu로 제작했으며 이들은 각각 수냉되면서 동작한다.

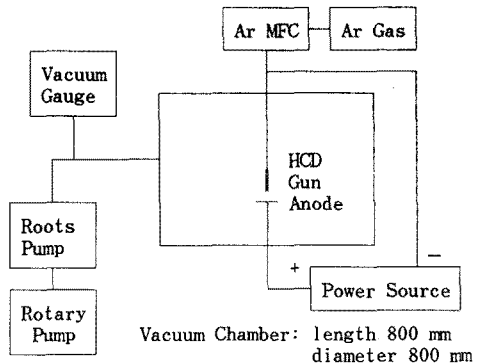


그림 1. Hollow Cathode Discharge System

3. 음극벽면의 온도분포

그림2에는 cathode상에서 최대온도가 되는 위치가 압력에 따라 변하는 것을 보여주고 있다. 온도 측정은 optical pyrometer에 의해 측정되었다. 압력이 증가함에 따라 최대온도를 나타내는 부분이 cathode끝 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 압력을 일정하게 유지하면서 flow rate를 증가시킬 경우에도 같은 현상을 관측할 수 있다. 이런 현상의 원인은 cathode tube내의 중성가스입자의 압력이 최대온도를 나타내는 지점을 결정짓는 변수이기 때문이라 생각할 수 있다. cathode tube 내로 흐르는 가스의 flow rate나 cathode tube 끝부분의 압력 (chamber 압력)에 따라 tube 내의 압력은 tube를 따라 변한다. (pressure gradient가 있다) 그리고 최대온도는 이런 압력이 여러 실험 조건들과 연관되어 어떤 optimum value에 해당되는 곳에서 나타난다. 이런 optimum value에 대한 추정값은 수 Torr 정도이다. (1) 위의 추정값은 cathode tube 내에서 ionized된 ion들이 sheath voltage에 의해 가속되어 cathode 벽면과 충돌하여 cathode를 가열시켜 열전자를 방출시켜야 하는데 이 ion을 만들어 주는 것이 벽에서 튀어나온 전자들이 중성 입자와 충돌하는 것이므로 fast electron이 hollow cathode 내부에서 많은 ionization을 시킬 수 있도록 me an free path가 충분히 짧아야 한다는 조건에서 나온 추정값이다. 그림2에서 보여진 최대온도점이 이동하는 현상은 4에서 보여질 I-V curve의 특성과 밀접한 관계가 있다.

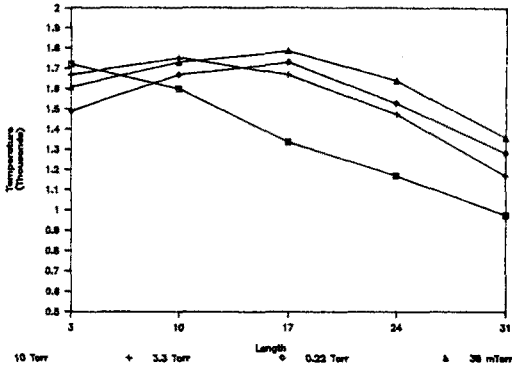


그림 2. Temperature profile at Ar: 120 sccm, 110 A

4. I-V curve에 있어서 chamber pressure와 Ar flow rate의 영향

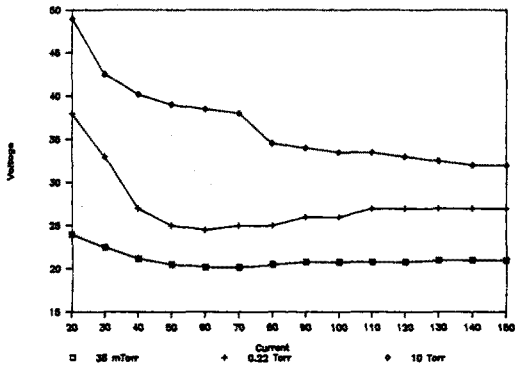


그림 3. Chamber pressure에 따른 I-V Curve

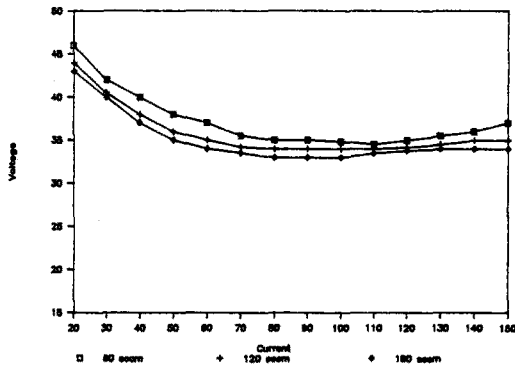


그림 4. Flow rate에 따른 I-V Curve

그림3에는 flow rate를 고정시키고 chamber pressure의 변화에 따른 I-V curve가 나타나 있고 그림4에는 chamber pressure를 고정시키고 Ar flow rate를 변화시키며 얻은 I-V curve가 그려져 있다. 두그림에서 압력을 증가시키거나 flow rate를 증가시키면 방전유지전압이 감소함을 볼 수 있다. 이는 cathode tube 내부에 존재하는 plasma에 기인하는 것이라 생각된다.

방전전압 V는 cathode fall Vc, interelectrode의 전압 Vi, anode fall Va의 3부분으로 구성되어진다.

$$V = V_c + V_i + V_a$$

$$= V_o + E_c l + E_i L + V_a$$

V_o: minimum cathode fall

E_c: cathode tube 내에서의 전계

l : internal plasma가 침투해간 거리

E_i: interelectrode의 전계

L : interelectrode의 거리

로 나타낼 수 있다.

V_o는 cathode의 재질, 기하학적 모형, 직경등에 의해 결정되고 V_a는 anode의 재질, 모양등에 따라 결정되는 상수값으로 볼 수 있다.

압력이나 flow rate를 변화시킬 때 변하는 양은 E_cl과 E_iL인데 E_i와 E_c의 경우에 E_c가 훨씬 큰 값이고 또한 L을 변화시키지 않았으므로 E_iL의 변화량을 무시하고 설명할 수 있다.

l은 plasma가 cathode tube 내부로 침투해간 거리로 원통형 공동음극의 기하학적인 모습때문에 그 정확한 값을 얻을 수는 없다.

그러나 cathode tube 내의 plasma는 cathode의 최대온도 부분과 판재가 깊은 것으로 생각되고 따라서 l의 어떤 기준점으로 최대온도 지점을 생각할 수 있다. 이와 같은 가정하에 flow rate와 압력이 I-V curve에 끼치는 영향을 분석하면 flow rate와 압력의 증가가 l의 감소로 가져오고 l의 감소에 따라 E_cl의 양이 작아져서 전체 방전유지 전압이 감소한다고 설명할 수 있다.

5. Interelectrode의 전계 E_i

cathode와 anode 사이의 간격을 증가시키며 같은 전류값에 대한 전압값은 예상했던대로 증가했다. Table 1에 각 압력에서 각 전류에 대한 interelectrode의 전계 E_i가 수록되었다.

(Table 1에서 얻어진 값들은 electrode gap의 변화는, 단지 $V = V_c + E_i L + V_a$ 에서 E_iL의 값에만 영향을 준다고 가정하고 얻은 값이다)

	75 mTorr	2 Torr	10 Torr
30 A	0.2	1.2	3.3
70 A	0.8	1.5	2.2
110 A	1.7	1.3	1.9
150 A	3.2	1.3	1.2

Table 1. Interelectrode electric field at Ar: 120 sccm, E_i: V/cm

Table1을 보면 30A, 70A의 저전류대역에서 압력이 증가함에 따라 전계 E_i가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 압력이 증가함에 따라 radial diffusion이 많이 생기고 이에 따라 recombination이 많이 생기기 때문에 이를 상쇄시키기위해 더 큰 전계가 필요하기 때문이고 높은 전류에서는 (150 A) 압력이 증가하면서 오히려 전계가 감소하는데 이 것은 어느 정도의 전자밀도 이상에서는 위에서 설명한 것과 같이 recombination 효과를 상쇄하기 위한 큰 전계의 필요 없이도 원하는 전류를 흘릴 수 있기 때문이라 생각된다 이와 같은 가정은 Table 1과 Table 2를 비교해 보면 7.5×10^{-2} Torr에서 전류가 증가함에 따라 전계가 증가하고 2 Torr에서는 전류변화와 거의 상관 없이 전계가 일정하고 10 Torr에서는 30 A의 전계가 150 A의 전계보다 큰 값을 가지는 것도 잘 설명해준다.

6. External plasma

cathode와 anode 사이에 생성되는 plasma의 전자 온도, 밀도등을 Langmuir probe method로 측정했다. beam의 중심을 측정하기 위하여 본 실험실에서 만든 Digital Langmuir probe method로 실험을 수행했다. 이에대한 결과를 Table 2에 표시했다.

	60 mTorr	0.25Torr	1.5 Torr
50 A	7.96 eV 2.9×10^{12}	6.61 eV 2.2×10^{13}	6.64 eV 7.4×10^{13}
100 A	7.21 eV 1.8×10^{13}	9.57 eV 2.6×10^{13}	4.5 eV 1.8×10^{14}
150 A	6.61 eV 3.1×10^{13}	7.0 eV 4.2×10^{13}	4.7 eV 1.6×10^{14}

Table 2. Electron temperature and density at r=0 cm, Ar:120 sccm

Table 2를 보면 전류의 증가에 따라서 전자밀도가 증가하고 압력증가에 대해서도 같은 결과를 얻었다. External plasma의 radial profile을 얻은 결과가 그림 5와 그림 6에 나타나있다.

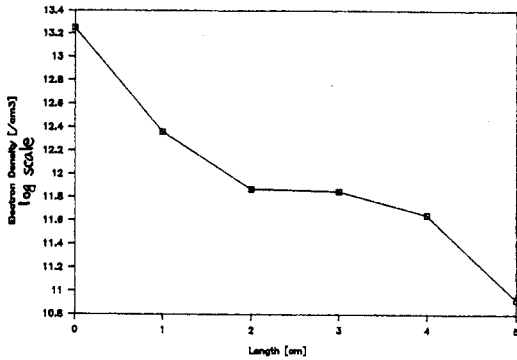


그림 5. Ne의 r에 대한 profile

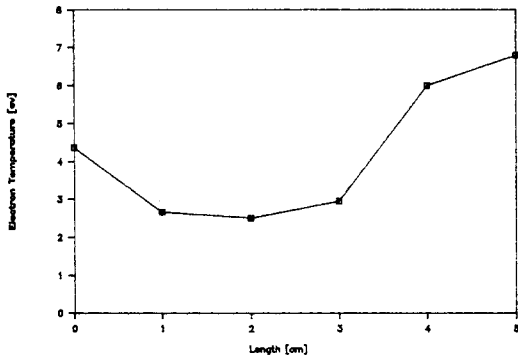


그림 6. Te의 r에 대한 profile

그림 5를 보면 방전의 중심에서 멀어질수록 전자 밀도는 감소하고 그림 6을 보면 r=2 cm를 중심으로 전자온도가 증가하는데 이 것은 cathode에서 anode로 향하는 beam과 beam외부의 plasma가 다르기 때문인 것 같다. beam은 눈으로 보기에 그 직경이 2 내지 3cm 정도인데 beam 외부의 plasma

는 압력이 낮기 때문에 mean free path가 길어서 충돌이 별로 없는 plasma이다. 따라서 r이 증가함에 따라 전자온도가 증가하는 모습을 보이고 beam 내의 plasma의 경우는 cathode와 anode사이의 전기장에 의해 전자들이 속도를 얻으므로 beam 중심으로 갈수록 전자온도가 증가하는 모습을 나타내는 것으로 생각된다.

7. 결론

본 논문에서는 진공 증착 장치에서의 고온열원, 조명등에서 이용되는 hollow cathode discharge의 방전특성을 연구했다. chamber 압력과 flow rate의 증가에 따라 방전유지 전압이 감소되고 cathode와 anode 사이의 gap의 증가가 방전유지 전압을 증가시키는 현상을 얻었고 이에 대한 해석을 시도했다. 음극의 최대온도를 나타내는 부분이 방전전압의 결정에 있어 중요한 변수임을 알 수 있었고 external plasma의 전자 온도, 밀도, radial profile등이 구해졌다. hollow cathode discharge의 완전한 이해를 위해서는 방전특성에 있어 가장 중요한 부분을 차지하는 cathode tube 내의 내부 plasma에 대한 깊은 연구가 수행되어야 할 것이다.

8. 참고 문헌

1. L.M.Lidisky, S.D.Rothleder, D.J.Rose, S. Yoshikawa, C.Michelson, and R.J.Mackin, Highiy ionized hollow cathode discharge. J.Appl.Phys.33.2490 (1962)
2. J.S.Luce, Intense gaseous discharges, Proc.Int.Conf.Peaceful Uses At. Energy, 2nd,1958,p 31 (1958)
3. A.D.White, New hollow cathode glow discharge, J.Appl.Phys.30 (1959)
4. C.M.Ferreira, J.L.Delcroix, Theory of the hollow cathode arc, J.Appl.Phys.49 (1978)