

非均一磁場들 속에서 電極배치에 따른 저기압방전 특성

Low Pressure Discharge Characteristics on the Arrangement of Electrodes in Non-Uniform Magnetic Fields

朴 德 圭* · 板谷 良平**

(Duck-Kyu Park · Ryohei Itatane)

ABSTRACT

The V-I characteristics of low pressure discharges occurring between each of three kinds of anode and a fixed hot cathode in several bi-cusp magnetic fields are investigated. The results are different from those in non-magnetic fields as follows :

First, both breakdown and maintaining potentials of low pressure discharges in the fields are rather depend on the arrangement of the directions of magnetic lines of force and the directions between two electrodes than on the distance between two electrodes or the size of the electrodes.

Second, the maintaining potentials of the discharges in the fields are lower than those in the non-fields, and the electrical conductivity in the fields are better than those in the non-fields.

Third, the breakdown potentials in the fields when the direction of magnetic lines of force is perpendicular with the direction of discharging path between two electrodes are higher than those when the two directions are parallel with each other. But the maintaining potentials in the fields are shown the contrary phenomena with before. This results are particularly conspicuous as the separatrix of the fields pass across the discharging path between two electrodes.

1. 서 론

저기압방전에서 電子는 가장 가벼운 荷電粒子이므로 電離氣體를 생성시키거나, 전류를 흘리거나, 또는 공간전하를 增減시키는데 주요한 역할을 한다. 이들 電子의 운동은 그리 강하지 않는 자장에도 큰 영향을 받게 되고, 특히 비균일 자장 속에서는 자장의 공간적 기울기에 따른 추가수직력을 받게 되어서 방전개시전압, 두 전극사이의 방전유지전압 및 두 전극사이의 電位分布등에 변화를 준다.

Plasma confinement용 자장속에서 방전으로 생성된 플라즈마의 성질을 이해하기 위하여, 이와같은 비균일자장속에서 일어나는 방전특성을 조사해 보는 일은 무엇보다 기초적이고 소중한 과정이라 하겠다. 만일 plasma confinement용 자장의 구조와 그 자장속에서 방전특성과의 관계가 조사된다면, plasma confinement 용 'magnetic bottle'의 구성을 보다 구체적으로 논의할 수도 있겠다.

지금까지 전극사이의 방향과 橫방향으로 강한 균일자장을 걸어서 저기압방전 특성을 조사한 결과는 磁氣絶緣과 관련하여 몇가지 발표되고 있으며, 從방향 균일자장에 대한 그 영향도 조사하여 screw不安定性에 의한 異常 확산이 일어난다는 사실도 밝혀지고 있다.^{1) 2) 3) 4) 5)}

이와같이 지금까지 발표된 결과는 모두 균일자장

正 會 員: 慶北大 師大 物理科 副教授 · 工博
正 會 員: 日本 京都大 工學部 電子工學科 · 教授 · 工博
接受日字: 1987年 5月26日
1次修正: 1987年 9月2日
2次修正: 1987年 12月20日

속에서 電子운동과 관련된 방전현상을 조사한 것이다.

본 연구에서는 같은 간격으로 배열된 세동축원환 전류로 세 종류의 비균일자장인 二重커스프자장들을 형성시키고, 그 속에 크기가 배치가 다른 세 종류의 陽極을 설치하고 한 열음극과의 사이에 저기압방전을 일으켰을 때, 이들 자장들과 電極의 배치에 따른 방전의 V-I 특성을 방전개시전압과 방전유지전압들을 측정하여서 조사하였으므로 그 결과를 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 전극 및 코일의 배치는 그림1과 같다. 二重커스프자장은 그림1과 같이 배치된 코일에 전류를 흘려서 형성시킬 수 있다. 코일의 구성은 그림1에서와 같이 서로 같은 간격으로(8.6cm) 떨어진 세 개의 동축원환코일로 되어 있다. 코일은 외경이 3mm, 내경이 2mm인 銅파이프를 사용하여 원환코일을 감았는데, 이 원환코일들의 평균반지름은 7.5cm, 감은 수는 16회, 그리고 단면적은 1.2×1.2 cm²이다. 각코일은 지지틀 속에 감아 넣었고 각 지지

틀들은 SUS棒으로 지지하여서 코일사이의 간격을 일정하게 유지하고 전체 코일구성이 변형되지 않게 하였다. 코일에 전류를 공급하기 위하여 약 300 A (45 kw)까지 直流電流를 공급할 수 있는 전원장치를 만들었다. 또 중앙부코일의 지지틀 밖으로 플라즈마가 흘러다가 반대편 안쪽으로 다시 흘러 들어오는 출기를 방지하기 위하여 중앙부코일의 지지틀 양면에 얇은 SUS판을 그림1에서와 같이 설치하여 차폐판으로 하였다.

방전용 전극중 열음극은 BaO를 바른형광등용 필라멘트를 이용하였는데, 그 크기는 1.4×1.6 cm²이다. 이 음극에는 약 3A까지의 전류를 흘릴 수 있다. 방전용 양극은 그림1에 나타난 바와 같이 세 종류를 사용하였다. 그 하나는 코일구성 밖의 상하에 진공용기의 덮개와 반침으로 설치한 SUS 27의 금속도체부이고, (이하 '용기'라 함), 다른 하나는 양쪽 코일밖 각각 2cm씩 되는 곳에 코일축과 수직하게 설치한 스텐레스 스틸의 end plate 들(이하 'end plate 들'이라 함; 20×20 cm²)이며, 또 다른 하나는 직경이 2cm인 소형 스텐레스 스틸 원판(이하 '소원판'이라 함)이다. 이 소원판陽極은 실험중 자장속에서 그 위치를 변화시킬 수 있도록 하였다.

이와같은 음극과 양극 사이에서 일어나는 방전현상의 V-I 특성은 X-Y기록기에 직접 기록하여 측정하였다. 본 실험에서 사용한 기체는 아르곤으로 5×10 torr인 일정한 기압으로 계속 흘려주면서 실험을 실시하였다. 기체방전에는 0.5 kW에서 1.0 kW사이의 전압을 인가하였다.

3. 비균일자장 구성의 계산

본 실험에 사용한 비균일자장들은 그림1과 같이 세 동축원환코일에 전류를 흘려서 형성시켰다. 양쪽 원환코일에는 이들을 직렬로 연결하여 전류(I₁)를 같은 방향으로 흐르게 하고, 중앙 원환코일에 흐르는 전류(I₂)의 방향은 그것과 반대로 하여 그 크기를 변화시키면 비균일하고 다양한 二重커스프자장들을 얻을 수 있다. I₁은 가능한 일정한 값으로 고정시켜두고 I₂를 변화시키면서 이들의 비인 I₂/I₁(이하 '전류비'라 함)를 변화시켜 주면 선형heliotron자장구조로부터 울타리형(picket fence)자장까지 각종 축대칭 자장구조를 얻을 수 있다.

본 실험에서는 대표적인 세가지 자장구조 속에서 실험을 실시하였다. 이들 자장구조는 그림2에 나타나는데, (a)는 전류비(I₂/I₁)가 0.40일 경우의 선형hel-

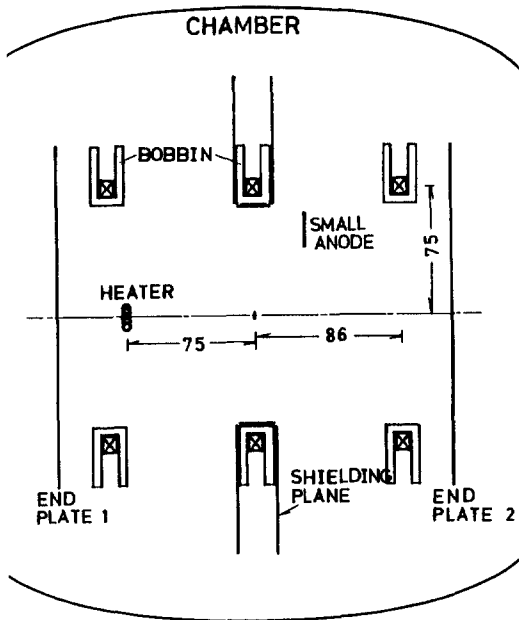
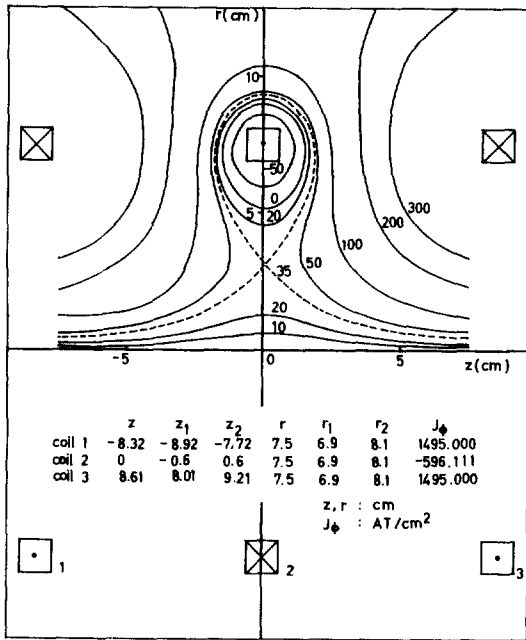
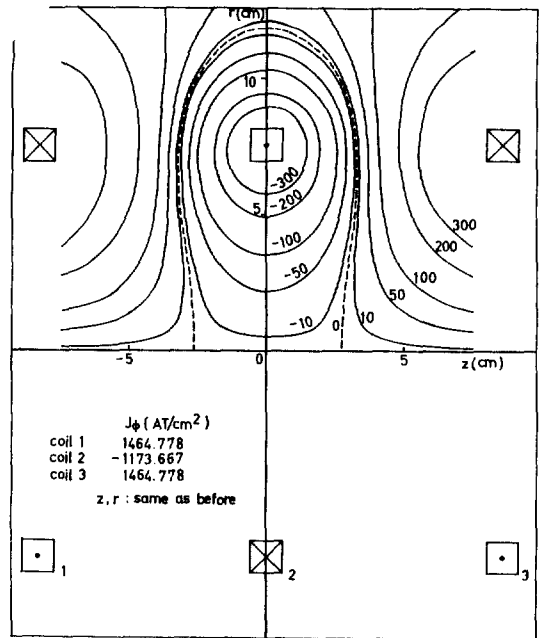


그림1. 이중 커스프 자장 구성을 위한 실험장치와 코일 배치

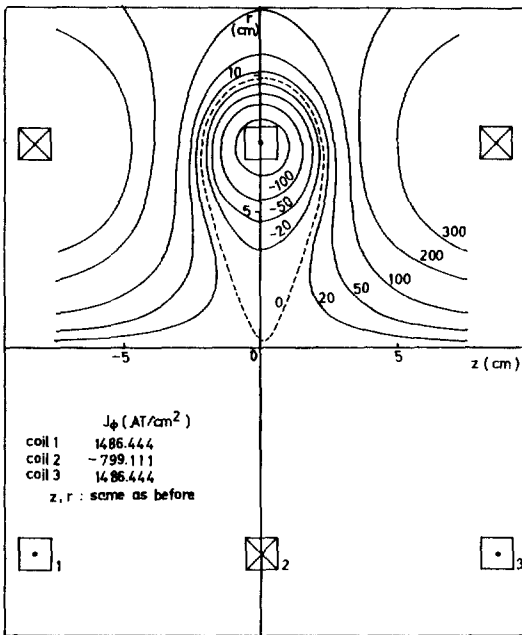
Fig.1. Arrangement of coils and other devices for bi-cusp fields



(a)



(c)



(b)

iotron 자장. (b)는 0.54일 경우의 ㄨ형(ㄨ는 러시아어 dzæ) 커스프자장, 그리고 (c)는 0.80일 경우의 울타리형 자장이다. 이들 자장구조는 모두 세 동축원환 전류에 의하여 형성될 수 있으므로 원환전류들에 의한 자기백터퍼텐셜

그림2. 계산한 이중 커스프 자장의 세가지 구조

(a) 선형헬리오톨론자장(b) ㄨ-형커스프자장
(c) 울타리형자장

Fig.2. Three structures of calculated bi-cusp magnetic fields

(a) a linear heliotron field (b) a ㄨ-type cusp field (c) a picket fence field

$$A_0 = \sum_i A_0^i(r, z, z_i, a_i, I_i)$$

$$= \frac{\mu}{\pi} \sum_i \frac{I_i}{k_i} \left(\frac{a_i}{r} \right)^{1/2} \left\{ \left(1 - \frac{k_i}{2} \right)^2 K(k_i) - E(k_i) \right\}$$

$$K_i^2 = \frac{4a_i r}{(r+a_i)^2 + (z-Z_i)^2}$$

을 이용하여 계산할 수 있다.⁶⁾ 여기서 I_i, a_i 그리고 z_i는 i번째 코일의 전류, 반경 그리고 z좌표를 각각 나타내고, K(k) 및 E(k)는 제 1종 타원적분 및 제 2종 타원적분을 나타낸다. i는 코일의 위치와 크기에 따라 번호를 부여할 수 있으므로, 원환코일이 놓인 곳의 r좌표범위(r₁→r₂)와 z좌표범위(z₁→z₂)에 걸쳐서 계산할 수 있다.

축대칭자장계에서 자기면을 나타내는 방정식은

$$rA_\theta(r, z) = \text{const.} \quad (2)$$

로 쓸 수 있다.⁷⁾ 그림2의 구조들은 각 그림 아래에 표시한 코일들의 좌표(r, z)와 코일에 흐르는 전류를

코일단면으로 나눈 전류밀도($J\phi$)를 이 (2)식에 대입하여 컴퓨터에 의하여 계산한 자기면들의 구성을 나타낸 것 들로서, 축대칭구조이므로 r-z면의 반면만 나타내었다. 각 곡선들은 rA₀의 값이 같은 점들을 모두 연결하여서 얻은 자기면이고, 그 값은 각 곡선 위의 숫자로 나타내었으며, 점선으로 된 자기면은 각각 세파라트릭스(separatrix)이다.

본 실험에 사용한 단위는 실험장치에 적합한 실용 단위제를 채용하여서 좌표인 r이나 z의 단위는 'cm'로, 전류밀도 $J\phi$ 의 단위는 AT/cm²로 하였다.

본 실험장치에서 형성되는 자장이 컴퓨터로 계산한 그림2의 그것과 얼마나 잘 일치하는가를 알아보기 위하여 코일에 전류를 흘려서 자장을 형성하고, 그 속에 홀(Hall) 소자자속계(Walker Scientific K-7108-18)로 그 자장을 측정해 보았다. 그 결과 직접 측정한 자장과 계산한 자장이 각 공간위치에서 5% 정도의 오차 이내에서 잘 일치함을 확인하였다.⁸⁾ 이들 자장구조에서 최대자속밀도는 약 200G 정도이고, 최소자속밀도는 약 10G이었다.

속에서 한 고정된 음극과 세 종류의 양극사이에서 일어나는 저기압방전의 V-I특성변화를 측정 한 것이다. 양극으로 그림1에 나타낸 바와 같이 용기, end plate 들, 그리고 소원판을 사용했을 때, 각 경우의 V-I특성변화는 각각 그림3의 (a), (b), (c)와 같다. 실험은 아르곤 기압 5×10^{-4} torr, 음극의 필라멘트전류 1.7A로 일정하게 유지하여 실시하였다. 발생한 플라즈마는 단탐침법으로 측정하였는데 그 온도와 밀도는 각각 5~11eV, 10^{14} cm⁻³이었다.

그림3에서 알 수 있는 바와 같이 세 자장속에서 일어난 방전의 V-I특성은 자장이 없을 경우의 그것과 아주 다르다. 그림3의 (a)는 陽極으로서 용기를 사용한 결과로, 실선은 각각 세 자장속의 방전특성이고 점선은 자장이 없을 때의 그 특성이다. 방전개시 전압은 자장속의 그 값들이 자장이 없을 경우의 값들보다 높은 반면에, 방전유지전압은 반대로 자장속의 그 값들이 자장이 없을 경우의 값들보다 낮다. 또 자장속에서 방전개시전압은 그림속에서 •표로 나타내어 보았는데, 전류비(I_2/I_1)가 작을수록 그 값이 높고,

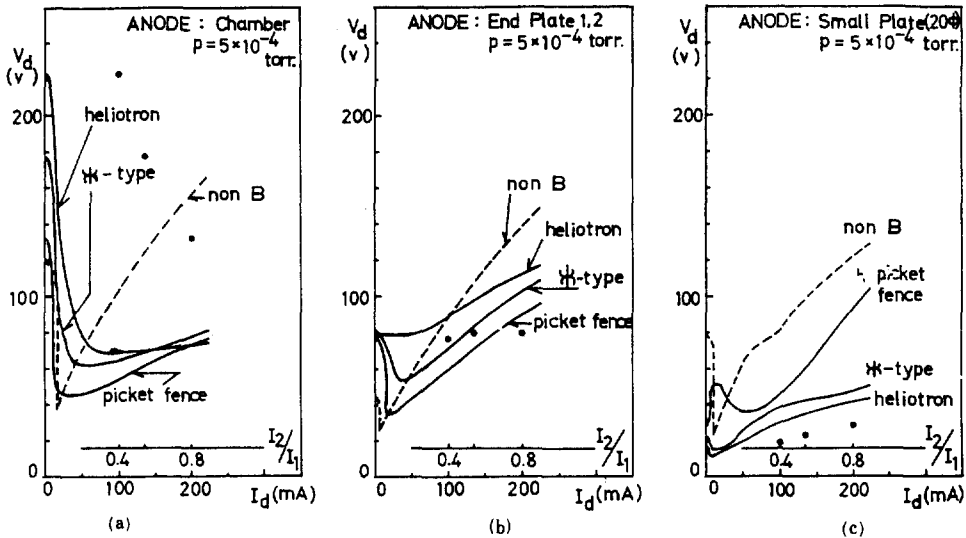


그림3. 양극으로 (a)용기 (b)end plate 1,2 그리고 (c) 소원판을 각각 사용했을 때 자장 종류에 따른 방전 특성 변화

Fig.3. Discharge characteristics according to the kinds of magnetic field as an anode:(a) chamber, (b) end plate 1,2 and (c) small circular plate are used.

4. 실험결과 및 고찰

앞절에서 사술한 세가지 자장속에서 발생시킨 방전의 V-I특성은 그림3과 같다. 이 결과는 그 자장들

방전유지전압도 같은 경향을 나타낸다. 즉 선형heliotron 자장속에서 그 값이 가장 높고 울타리형자장에서 가장 낮다.

양극으로 두 end plate들을 사용하였을 때의 방전

특성은 그림3의 (b)와 같은데, 방전개시 전압은 자장의 종류에 관계없이 거의 같았으며, 그 값은 자장이 없을 경우의 약 2배정도가 된다. 방전유지전압은 그 반대로 자장이 없을 경우보다 오히려 낮으며 전류비 (I_2/I_1)가 작을수록 높다. 이 경향은 용기를 양극으로 했을 때의 결과와 비슷하나 방전전류에 대한 방전유지전압의 변화율은 더 큼을 알 수 있다.

또 다른 陽極인 소원판을 사용했을 때의 방전특성 결과를 그림3의 (c)에 나타내는데, 이 소원판은 그림 1에 나타낸바와 같이 $r=3.0\text{cm}$, $z=-1.0\text{cm}$ 에 두고, 앞과 같은 음극과의 사이에 방전을 일으켰다. 이 경우에는 자장속에서 방전개시전압이 자장이 없을 경우의 그 값보다 훨씬 낮고, 자장속에서 그 값은 서로 비슷하나 전류비(I_2/I_1)가 작을수록 낮고, 그, 전류비가 증가함에 따라 약간씩 증가함을 알 수 있다. 방전유지전압도 방전개시전압의 경우와 비슷한 경향을 나타내어서 앞의 두 양극을 사용했을 때의 결과와는 반대인 경향을 나타낸다.

이상의 세가지 경우를 종합하여 서로 비교해 보면 다음과 같다. 동일한 자장속에서 용기를 陽極으로 사용했을 경우가 방전개시전압이 가장 높고, 그 다음이 end plate들, 그리고 소원판의 순서이고, 자장이 없을 경우에는 그 순서가 용기, 소원판 그리고 end plate들로 되어 있다. 또 동일한 자장속에서 방전유지전압은 양극으로 end plate들, 용기, 그리고 소원판의 순으로 차차 낮아짐을 알 수 있다.

양극으로 용기를 사용하였을 경우에는 그림1에서

와 같이 이 용기의 도체면이 자장의 z축과 거의 평행하기 때문에 이 양극과 z축상 $z=-7.5\text{cm}$ 인 곳에 놓인 열음극과의 사이에서 방전을 일으켰을 때, 자장이 선형 heliotron이면 전자플라즈마는 주로 z방향으로 흐르고 r방향으로는 거의 흐르지 않게 된다. 따라서 선형heliotron 자장에서는 이 두 전극사이에는 방전이 일어나기 힘들다. 그림2의 (a)에 나타낸 자장구조를 살펴보면 음극에서 출발한 電子들은 자장의 separatrix를 가로질러서 건너가기가 힘들기 때문에 r-방향으로는 거의 흐를 수 없음을 알 수 있다. 따라서 이 경우에는 방전개시전압이 높게 된다고 생각된다. 전류비(I_2/I_1)가 커짐에 따라서 자장은 점차 울타리형 구조로 변화하면서 자장의 separatrix들은 점점 r-방향과 평행해져 가고 음극에서 출발한 전자들이 r-방향으로 차차 많이 흐를 수 있게 된다. 그래서 전류비(I_2/I_1)가 증가함에 따라서 방전은 쉽게 일어날 수 있게 되어서 방전개시전압은 낮아지게 된다.

陽極으로 end plate들을 사용하였을 경우에는, 그림1에서 알 수 있는바와 같이 end plate 1과 열음극이 서로 가까이(2.8cm)에 있고 이 두 전극사이에는 그림2와 같은 세 가지 자장속에서 모두 공통적으로 z-축 방향의 강한 자장이 형성되어 있으므로 방전이 일어나기 쉬워서 방전개시전압은 세자장속에서 거의 같은 값을 가진다.

陽極으로 소원판을 사용하였을 때, 방전특성은 이 소원판의 위치가 음극에서 방출된 1차電子 beam이 자장에 따라 뻗쳐있는 beam위에 놓이느냐 아니냐에

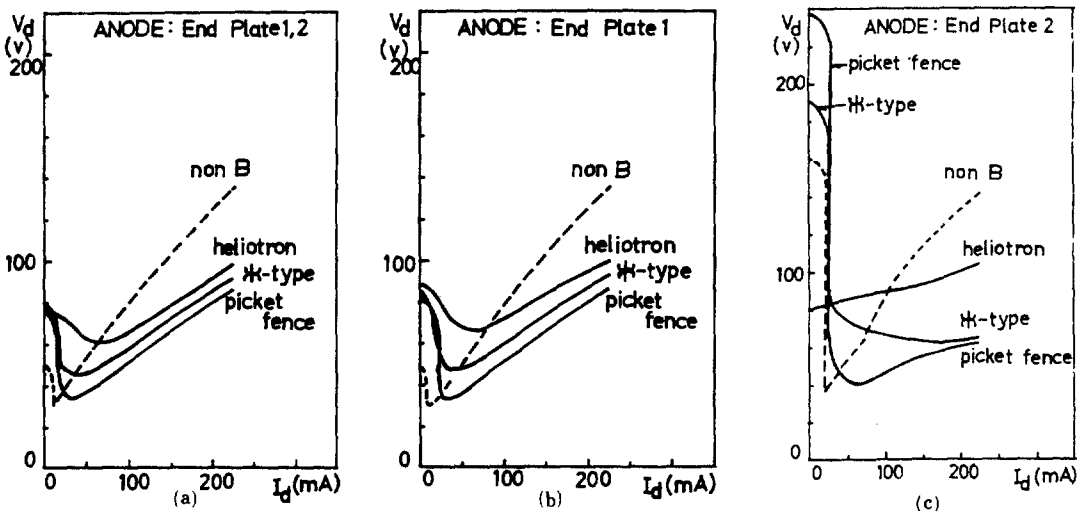


그림4. 양극으로 end plate의 종류에 따른 방전 특성 변화 (a) end plate 1,2 (b) end plate 1 (c) end plate 2
 Fig.4. The V-I characteristics depend on the kinds of end plate as an anode: (a) end plate 1,2 (b) end plate 1 (c) end plate 2

따라서 크게 달라진다. 다시 말하여 음극을 통과한 자장의 자력선이 소원판 陽極을 얼마만큼 걸쳐서 지나가느냐에 따라서 달라진다. 이 경우에 방전의 방전 개시전압과 방전유지전압을 변화시키는 또 한 가지 요인은 자장의 separatrix가 두 전극 사이를 갈라 놓느냐 그렇지 않느냐에 따라서도 방전특성이 크게 달라진다. 이들 소원판 陽極의 위치에 따른 방전특성변화에 대한 결과는 다음 기회에 자세하게 발표하기로 한다.

End plate들을 陽極으로 사용하였을 경우에 방전 개시전압이 자장의 종류에 관계없이 거의 같게 나타나는 현상을 보다 자세하게 조사하여 보기 위하여 그림1에 나타낸 end plate 1과 end plate 2를 각기 따로 陽極으로하여 방전시켰을 때의 방전특성을 둘 다 양극으로 했을 때의 결과와 서로 비교하여 그림4에 나타내어 보았다. 그림4의 (a)는 陽極으로 兩end plate 모두를, (b)는 end plate 1만을, (c)는 end plate 2만을 사용하였을 때, 방전의 V-I 특성을 각각 나타내는데, 세 경우의 결과를 서로 비교해봄으로서 end plate 1의 영향이 크음을 알 수 있다. End plate 1만을 陽極으로 사용하였을 경우의 방전의 V-I 특성은 兩end plate들을 陽極으로 사용하였을 경우의 그 결과와 거의 같은 사실을 알 수 있고, 이 결과들은 end plate 2만을 陽極으로 했을 경우의 결과와는 상당한 차이가 있다. 따라서 end plate들을 陽極으로 한 방전에서는 end plate 1의 영향이 아주 크음을 알 수 있고, 이때 방전개시전압은 자장구조에 관계없이 그 값이 일정함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 등간격인 세 동축원환코일에 양쪽 코일에 흐르는 전류(I_1)와 중앙코일에 흐르는 전류(I_2)의 세기비(I_2/I_1)를 변화시키면서 형성되는 비균일 자장들속에서 크기와 배치가 다른 세 종류의 陽極과 한 고정된 熱음극과의 사이에 저기압방전을 일으켜서 그 특성을 측정했을 때, 자장이 없을 경우의 방전특성과는 다른 성질을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자장속에서 저기압방전의 V-I 특성은 자장이 없을 때의 그것과는 상당한 차이가 있다. 기압을 일정하게 했을 때 방전개시전압이나 방전유지전압이 두 전극사이의 간격이나 전극의 크기에 의존하기 보다, 오히려 자력선이 두 전극을 연결하느냐 아니냐에 크게 의존한다.

(2) 자장속에서 방전유지전압은 일반적으로 자장

이 없을 경우보다 낮고, 방전전압에 대한 방전전류의 비인 전기전도도 자장속일 경우가 자장이 없을 경우보다 크다.

(3) 자장들의 자력선 방향이 전극사이의 방전경로와 횡방향일 경우가 종방향일 경우보다 방전개시전압이 높아서 방전이 일어나기는 어려우나, 일단 방전이 개시되면 방전유지전압은 오히려 낮아지며 전리기체의 전기저항도 작아진다. 특히 자장구성의 separatrix가 두 전극사이를 가로 질러가면 그 효과가 더욱 커진다.

(4) 자장구조속에서 두 전극이 같은 자력선위에 놓고 전극간의 간격이 짧으면, 또 다른 陽極의 존재에 관계없이 방전특성은 이 두 전극에 의한 효과가 거의 지배한다.

이상의 결과는 핵융합장치용 plasma confinement 자장과 플라즈마거동과의 상관관계를 밝혀보려는 시도에 대한 기초연구로서 핵융합장치를 설계하고 제작하는데 도움을 주고자 했다. 소원판陽極의 각 자장속의 위치에 따른 방전특성에 관한 조사는 다음 기회에 발표하기로 한다.

REFERENCE

- 1) R Miller, N.Rostoker and I. Nebenzahl; "Magnetic Insulation", Bull. Am. Phys. Soc., vol.17, p.1007, 1972
- 2) V.S.Voronin and A.N.Levdev; "Coaxial High-Voltage Diode with Magnetic Insulation", Sov. Phys.-Tech. Phys., Vol.18, pp.1627-1631, June, 1974
- 3) K.D.Bergeron and J.W.Poukey; "Relativistic Space-Charge Flow in a Magnetic Field", Appl. Phys. Lett., Vol.27, pp.58-60, July, 1975
- 4) F.C.Hoh and B.Lehnert; "Screw Instability of a Plasma Column", Phys. Rev. Lett., Vol.7, pp.75-76, August, 1961
- 5) T.Kaneda; "The Axial Electric Field of a Positive Column in a Transverse Magnetic Field", J.Phys. D: Appl.Phys., Vol.11, pp.279-282, 1978
- 6) J.D.Jackson; "Classical Electrodynamics", John Wiley & Sons, pp. 177-179, 1962
- 7) A.I.Morozov and L.S.Solovev; "Rev.of Plasma Phys. Vol. II", Consultants Bureau, pp.21-32, 1966
- 8) D.K.Park; "Low Pressure Discharges and Plasma Properties in Complex Magnetic Fields Related with Plasma Confinement"(Dr. thesis), Kyoto Univ., pp.43-45, 1979)