

논문 98-7-3-03

## 플라즈마 진단을 위한 이온에너지 분석장치의 제작 및 특성 조사

김계령\*, 김 완\*\*, 이용현\*, 강희동\*\*\*

Fabrication and Its Characteristics of Ion Energy Spectrometer for  
Diagnostics of Plasma

Kye Ryung Kim\*, Wan Kim\*\*, Yong Hyun Lee\*, Hee Dong Kang\*\*\*

## 요 약

플라즈마 이온온도를 측정하기 위해 정전평판형 이온에너지 분석기를 설계·제작하고 에너지 교정 및 에너지 분해능 등의 특성을 조사하였다. 일정한 검출기 위치에서 이온의 에너지에 따른 편향평판전압은 선형성을 보였으며, 53~103 mm 사이의 검출기 위치에서 이온에너지에 대한 최대편향평판전압의 기울기는 1.61~0.92로 검출기 위치의 증가에 따라 선형적으로 감소하였다. 본 실험 영역에서 에너지 분해능은 약 4.16~11.60%였으며, 검출기 위치 및 이온에너지의 증가에 따라 향상되었다. 상대적 검출효율은 검출기 위치의 증가에 따라 감소하였다.

제작된 분석기를 다목적 플라즈마 발생장치에 설치하여 DC 플라즈마의 이온에너지 스펙트럼을 측정하였다. 방전전압이 320 V, 전류가 0.17 A인 DC 플라즈마의 이온온도는 203~205 eV로 나타났으며 검출기의 위치에 따른 이온온도의 변화는 없었다. 검출기의 위치에 따른 에너지 분해능은 18~21%로 검출기 위치가 증가할수록 향상되었다.

## Abstract

An ion energy spectrometer which has the 45° parallel electrostatic deflection plate was designed and constructed for measuring ion temperature in high temperature plasma. The energy calibration and the energy resolution were studied in detail for a hydrogen ion at the 0.24~1.92 keV energy using electrostatic accelerator with a duoplasmatron ion source. The voltage of the deflection plate was linearly increased for the decreased ion detector position at the constant ion energy and decreased for the increased ion energy at the fixed ion detector position. The inclination of the deflection plate voltage to the ion energy was between 0.92 and 1.61, and linearly decreased for the increased the ion detector position. The measured energy resolution, which is 4.2% ~ 11.6% in this experiment region, was improved for the insreased ion dector position and ion energy. The relative efficiency was increased for the decreased the ion detector posotion. The ion energy spectrum of the DC plasma in the multi-purpose plasma generator was measured using this equipment. The ion temperature was 203-205 eV at the discharge voltage 320 V, discharge current 1.7 A.

\* 경북대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.)

\*\* 경북대학교 방사선과학연구소(Radiation Science Research Institute, Kyungpook Nat'l Univ.)

\*\*\* 경북대학교 물리학과(Dept. of Physics, Kyungpook Nat'l Univ.)

<접수일자 : 1998년 4월 8일>

## I. 서 론

핵융합로 및 고속증식로 등의 고온 플라즈마 발생장치를 이용한 실험에서 플라즈마를 정밀하게 제어하기 위해서 플라즈마의 이온온도, 전자의 밀도, 전자의 온

도 등과 같은 기본량과 이로부터 유도되는 유도량에 대한 특성의 정확한 이해와 측정은 필수적이다. 플라즈마 이온온도의 측정에는 EM wave scattering법, line radiation법<sup>[1],[2]</sup>, 전하교환중성입자검출법<sup>[3],[4],[5]</sup> 등이 주로 이용되고 있다. 중성입자검출법은 플라즈마에서 발생하는 고속중성입자를 이온화하여 에너지분포를 측정함으로써 플라즈마의 이온온도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 정확한 이온온도의 측정이 가능하여 플라즈마의 이온온도 측정에 많이 이용되고 있다.

중성입자검출기는 전하교환박막, 에너지분석기, 하전입자검출기 등으로 구성되며, 정전평판형 이온에너지 분석기는 1970년대 초에 미국의 Oak Ridge 국립대학의 C.F.Barnett<sup>[6]</sup> 등에 의해 처음으로 개발되었으며, 같은 형태의 에너지분석기가 1970년대 후반 일본 원자력 연구소의 JFT-2 플라즈마 이온온도를 측정하기 위하여 Hiroshi<sup>[7]</sup> 등에 의해 연구되었다. 이들 정전평판형 에너지 분석기는 수십 eV~수백 eV 에너지의 이온을 검출하는데 이용되고 있다.

본 연구에서는 저에너지 이온 측정에 적합하고 에너지의 동시측정이 가능한 45° 평행평판형(45° parallel electrostatic plate type) 이온에너지분석기를 설계·제작하였다.

Duoplasmatron 이온원<sup>[8]</sup>을 이용하여 최대 2keV의 에너지를 가지는 수소이온들에 대해 제작된 이온에너지 분석기의 에너지 교정 및 에너지 분해능 등의 특성을 조사하였다. 또한 이 분석기를 이용하여 다목적 플라즈마 발생장치(기초과학지원연구소)의 DC 플라즈마 방전전압에 따른 이온온도를 조사하였다.

## II. 장치의 설계 및 제작

정전평판형 이온에너지 분석기에서 플라즈마에서 누설된 이온은 45° 정전평행평판형 에너지 분석기(45° parabolic parallel electrostatic plate type energy analyzer)를 통과하면 이온의 에너지에 따라 각각 다른 궤도로 하전입자검출기에 입사한다.

그림1과 같이 입사이온의 에너지를 E, 전하량을 q, 입사각도를  $\theta$ , 입사창과 검출기 사이의 거리(검출기의 위치)를  $X_0$ , 정전평판 양단 전압을  $V_d$ , 평판 사이의 간격을 d, 입사창과 출구창의 구경을 각각  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$  라 하면 수직방향 이동거리 y는 식(1)<sup>[9]</sup>로 주어지고, 이온의 수평방향 이동거리 x는 식(2)로 주어진다.

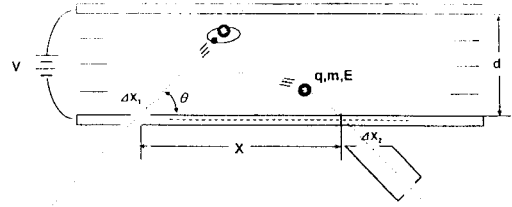


그림 1. 균일한 전장 하에서의 이온의 포물선 궤도.  
Fig. 1. Parabolic orbit of ion under the uniform electric field.

$$y = -\frac{qV_d}{4Ed \cos^2 \theta} x^2 + x \tan \theta \tag{1}$$

$$x = \frac{2Ed}{qV_d} \sin 2\theta \tag{2}$$

입사각  $\theta = 45^\circ$  일 때 최대 수평이동거리  $x_m$ 은 식(3)으로 주어지며

$$x_m = \frac{2Ed}{qV_d} \tag{3}$$

이 때 수직방향으로의 최대 이동거리는  $y_m$ 은 식(4)로 주어진다.

$$y_m = 0.25x_m \tag{4}$$

에너지분석기의 설계시 최대수평이동거리는 입사창으로부터 검출기까지의 최대거리로 주어진다. 따라서 에너지분석기의 편향평판간격은 검출기의 최대변위  $x_m$ 을 13cm로 할 때 최대수직이동거리  $y_m$ 이 3.25cm인 것을 고려하여 5cm로 결정하였다. 또한,  $y_m$ 에 비해 편향평판간격을 50%이상 여유있게 설계한 것은 정전평판의 가장자리 효과(fringing field effect)를 고려한 것이다.

입사각  $\theta = 45^\circ$  일 때, 각도의 미소변위에 대한 수평방향 이동거리 x의 변위는 입사이온의 에너지 E를  $E = qV_0$ 라 두면

$$dx/d\theta = 4(V_0/V_d) \cos 2\theta \tag{5}$$

로 주어진다. 출구창이 5mm $\phi$ 인 분석기에서 검출기를 6cm 위치에 두고 에너지가 1keV인 수소이온을 측정

할 때 식(5)에 의해 입사각이  $45^\circ \pm 3^\circ$  인 범위 내에서 입사하는 이온들은 이온검출기 내로 입사하게 된다. 에너지 분해능은

$$\begin{aligned} dE/E &= dV/V = dx/x = (\Delta x_1 + \Delta x_2)/X_0 \\ &= 2 \text{ slit width / slit separation} \end{aligned} \quad (6)$$

로 주어지며 에너지 분해능은 입·출구창의 크기와 검출기 위치의 함수로 주어진다.

따라서 본 연구에서는 검출대상이온의 에너지 범위 및 검출기의 이동범위 등을 고려하여 정전평판 간격을 5cm, 입사각을  $45^\circ$ , 입·출구의 개구(aperture)를 5mm $\phi$ 로 결정하였다.

제작한 이온에너지분석기 및 전원구성은 그림2와 같다. 진공함의 크기는 가로 35cm, 세로 35cm, 높이 22cm이며,  $45^\circ$  정전평판은 진공함과 전기적인 절연이 되도록 하였다. 입·출구의 개구는 정전평판과  $45^\circ$  가 되도록 하였고, 입사하는 이온빔의 통과단면이 5mm $\phi$ 가 되도록 제작하였다. 출구측 정전평판은 이온 검출을 위해 길이 12cm, 높이 3cm인 창을 만들고 등전위면을 형성하기 위하여 투과율이 90%이상인 니켈망을 진공용접착제로 평판 표면에 부착하였다. 그리고 정전평판 내부에는 가장자리효과(fringing field effect)를 줄이고 등전위면이 형성되도록 두께가 3mm인 3개의 등전위 전극을 9mm 등간격으로 설치하였다.

입사이온은 에너지 분석기 내에서 이온에너지와 평

판양단에 인가된 전압에 따라 식(1)과 같이 각각 다른 궤도로 운동한다. 따라서 이 이온을 검출하기 위해서 입자검출기인 Channeltron(Galileo, 4821G)을 접지정전평판 끝단에 설치하였다. 검출기의 위치변화에 따른 에너지 분해능 및 상대적 검출효율 등을 조사하기 위하여 검출기의 위치를 입사창의 위치를 기준으로 3cm~13cm까지 외부에서 조절이 가능한 선형이송장치를 설치하였다. Channeltron은 SIMS, ISS, AES, ESCA, x-ray spectrometer 등에서 널리 이용되고 있는 하전 입자검출기로 신호 대 잡음비가 작고 dynode 표면이 안정되어 있어 대기 중 노출에 의한 특성 변화가 거의 없고, 동작에 요구되는 전력이 작은 장점이 있다. 일반적으로 Channeltron의 저항은  $10^8 \sim 10^9 \Omega$ , 이득은  $10^7 \sim 10^{10}$ , 최대 바이어스 전압은  $\pm 3kV$ 이다. 바이어스 전압의 인가시 방전에 의한 검출기의 손상을 방지하기 위하여 진공도를  $10^{-6}$  torr 이하가 되도록 유지하여야 하며, 전압인가에 따른 검출기의 수명 단축과 검출대상 이온빔의 양 등을 고려하여 검출기의 최적 바이어스 전압을  $-2.5kV$ 로 결정하였다.

진공배기장치는 Channeltron 사용에 따른 분석기 내부의 진공도 유지를 위하여 배기속도가 230 l/sec인 터보분자펌프를 이용하였다. 진공계이지는 T-형 연결관으로 진공함에 부착하여 진공도 측정시 게이지 내부에서 발생하는 방전에 의한 검출기의 오동작을 최소화하도록 하였다. 본 실험에서는 분석기 내부의 진공도를  $4 \times 10^{-7}$  torr 이하가 되도록 하였다.

그림2는 정전평판전원 및 자료수집장치의 구성도이다. 그림2와 같이 정전평판전원 전원은 파형발생기(function generator)와 고전압 증폭기(high voltage amplifier)로 구성하여 이온 검출기 위치를 고정시켜 두고 정전평판양단에 인가되는 전압을 최대 1kV까지 연속적으로 변화시키면서 이온을 계수하여 이온 에너지 스펙트럼을 측정할 수 있도록 하였다.

자료수집장치는 전치증폭기(preamp)와 계수기로 구성하였다. 자료수집장치에서는 전치증폭기를 이용해 검출기와 신호 처리 장치간의 온저항정합(impedance matching)이 되도록 하여 이온검출기 신호의 정확한 계수가 이루어지도록 하였다. 사용한 전치증폭기(Stanford, SR240)는 4개의 채널을 가지고 Rise/Fall time 1.2 ns, 채널당 증폭률 5배, 대역폭(bandwidth) 300 MHz, 입력범위(input range)는  $\pm 200 mV$ 이다. 전치증폭기를 거친 신호는 증폭기(amplifier)에 의해 다시 증폭되어야 하나, 본 실험에서는 전치증폭기를 거친 신

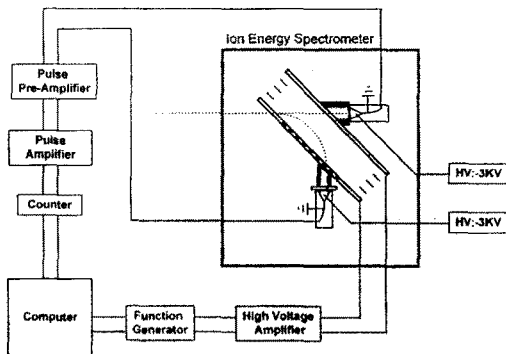


그림 2. 이온에너지분석기의 전원 및 자료수집 계통 구성도.

Fig. 2. Schematic diagram of power supply for energy spectrometer and data acquisition system.

호의 전압 파고가 수백 mV로 충분히 높아서 생략했다. 신호의 계수는 주파수 200 MHz인 계수기를 사용했으며, 계수기의 판별준위(discrimination level)을 -50 mV로 설정하였다. 계수기의 게이트 시간은 컴퓨터를 이용해 소프트웨어적으로 조절하였으며, 이 때 계수기의 특성상 0.1초의 절대적 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 실험에서는 이를 고려해 게이트 시간을 1초로 설정하여 약10%의 계수시간오차가 발생하였다.

### III. 실험방법

본 실험에서는 입자원으로 최대 3keV까지의 단색 수소이온빔 인출이 가능한 duoplasmatron 이온원을 사용하였다. 이온원의 후단에 Einzel lens와 beam steerer 등의 빔집속장치와 90° 질량분리 전자석을 연결하여 수소이온만을 선별하여 에너지분석기로 입사시켰다. 이온에너지분석기의 에너지교정 및 에너지 분해능을 조사하기 위하여 일정 이온에너지에 대해서 검출기 위치를 달리하며 편향평판 양단 전압에 따른 계수치를 측정하여 에너지 스펙트럼을 구하였다.

다목적 플라즈마 발생장치(기초과학지원연구소)의 이온온도 측정을 위한 실험장치 구성도는 그림3과 같다. 다목적 플라즈마 발생장치에 이온 에너지 분석기를 설치시 플라즈마 발생시 생겨나는 진공도의 저하에 의한 이온에너지분석기에의 영향을 최소화하여 이온검출기인 Channeltron의 손상을 막고, 입사빔의 양을 조절하기 위하여 직경이 2 mm이고 길이가 60 mm인 collimator를

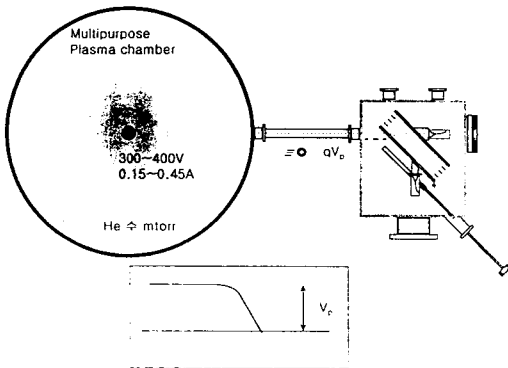


그림 3. 다목적 플라즈마 발생장치에서의 플라즈마 진단을 위한 장치 구성도.

Fig. 3. Schematic diagram of the equipment for measurement of DC plasma.

빔라인에 설치하였다. 또한 플라즈마 발생장치와의 분리시 각각 진공함의 진공도 유지를 위하여 2개의 게이트 밸브를 collimator의 양쪽 끝에 설치하였다. 플라즈마 발생시 에너지 분석기 내부의 진공도는 약  $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-6}$  torr를 유지하였다. DC 방전기체로는 헬륨을 사용하였고 방전전압은 320V, 방전시 기체압력은 2 mtorr로 하여 플라즈마로부터 발생하는 이온의 에너지 스펙트럼을 측정하여 다목적 플라즈마 발생장치의 플라즈마 발생조건에 따른 이온온도를 분석하였다.

### IV. 결과 및 고찰

#### (1) 분석기의 특성

그림4는 에너지가 0.24, 0.48, 0.72, 0.96, 1.44, 1.92 keV인 수소이온에 대해 검출기의 위치를 53 mm에서 103 mm까지 10 mm의 간격으로 변화시키면서 편향평판 양단의 전압에 따른 에너지 스펙트럼을 측정하여 최대계수치가 나타나는 편향평판 전압과 이온에너지와의 관계를 나타낸 그림이다. 편향평판형 에너지분석기에서 이온에너지  $E [keV]$ 에 대한 편향평판전압  $V_d [kV]$ 는 식(2)으로부터

$$V_d = \left( \frac{2 d \sin 2\theta}{qx} \right) E = A E \quad (7)$$

로 주어진다. 그림4의 측정결과를 이용하여 식(6)으로 검출기의 위치에 따른 비례상수  $A$ 를 구하면 표2와 같

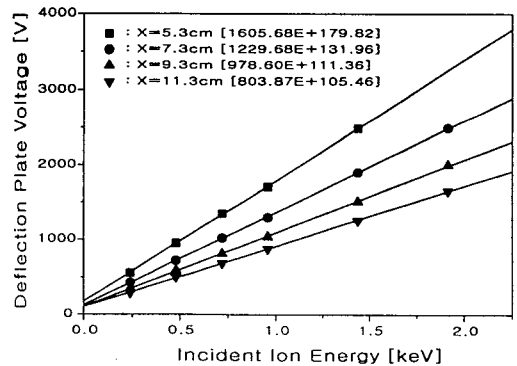


그림 4. 수소이온에 대한 이온에너지 분석기의 에너지 교정곡선.

Fig. 4. Energy calibration curve of the ion energy spectrometer for hydrogen ion.

표 2. 정전평판형 이온에너지 분석기의 특성.

$X_0$ (mm)	A ( $=2d/X_0$ )	dE/E (=dV/V) (%)			
		E=0.24keV	E=0.49keV	E=0.92keV	E=1.42keV
53	1.61	11.60	11.12	10.49	9.58
63	1.40	9.78	9.23	8.55	7.79
73	1.23	8.71	8.23	7.47	6.63
83	1.09	7.72	7.19	6.43	5.68
103	0.92	6.35	5.79	5.04	4.16

다. 검출기의 위치가 53 mm에서 103 mm까지 증가함에 따라 비례상수 A는 1.61에서 0.92까지 선형적으로 감소하였다.

그림5는 에너지가 0.24, 0.49, 0.92, 1.42 keV인 수소 이온에 대해 검출기의 위치를 53 mm에서 103 mm까지 10 mm간격으로 증가시키면서 측정된 검출기의 위치에 따른 에너지분해능이다. 표2에 각각의 측정결과를 나타내었으며, 에너지가 0.24 keV인 수소이온의 경우 검출기의 위치가 53 mm에서 103 mm로 증가함에 따라 에너지분해능은 11.60%에서 6.35%로 향상되었다.

검출기의 위치를 각각 53, 63, 73, 83, 103 mm로 고

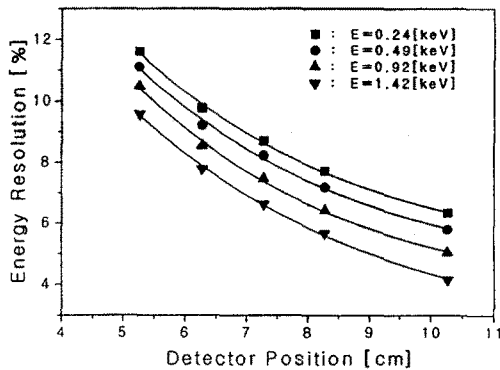


그림 5. 검출기의 위치에 따른 이온에너지 분석기의 에너지 분해능.

Fig. 5. Energy resolution of the ion energy spectrometer according to the detector position.

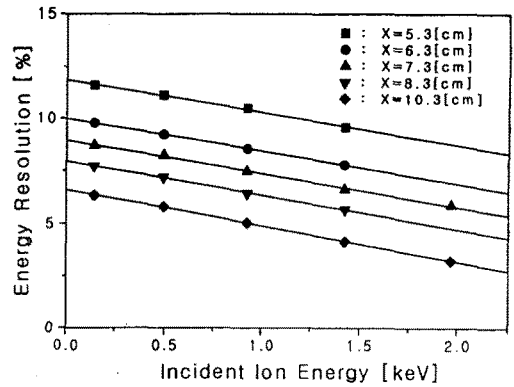


그림 6. 수소 이온의 에너지에 따른 이온에너지 분석기의 에너지 분해능.

Fig. 6. Energy resolution of the ion energy spectrometer according to the hydrogen ion energy.

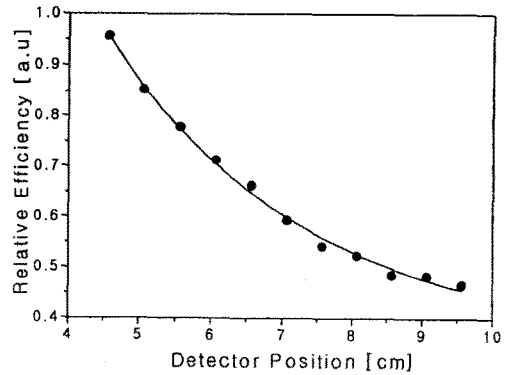


그림 7. 검출기의 위치에 따른 상대검출효율.

Fig. 7. Relative efficiency according to the detector position.

정시켜두고 입사이온에너지를 0.24~1.42 keV로 변화시키면서 에너지분해능을 측정된 결과는 그림6과 같다. 검출기의 위치가 103 mm일 때 입사이온에너지가 0.24 keV에서 1.92 keV로 증가함에 따라 에너지분해능은 6.35%에서 4.16%로 향상되었다.

그림5, 그림6 및 표2에서와 같이 검출기의 위치 및 입사이온에너지에 따른 에너지분해능은 분석기 설계시 계산된 이론치에 비해 78% 이상 향상되었다. 이것은 분석기 제작시 에너지 분해능 향상을 위해 검출기 전단에 추가로 설치한 5 mm $\phi$  슬릿의 영향인 것으로 판단된다.

그림7은 검출기의 위치를 30 mm에서 110 mm까지 5 mm 간격으로 변화시키면서 측정 위치에 대한 상대적 검출효율을 나타낸 그림이다. 검출기의 상대검출효율은 검출기의 위치 증가에 따라 지수함수적으로 감소하였다.

(2) 다목적 플라즈마 발생장치의 이온에너지 분석

다목적 플라즈마 발생장치에서 DC 플라즈마를 발생시켰을 때 누설되는 이온의 에너지는 플라즈마 퍼텐셜  $V_p$  (≒DC 바이어스 전압)과 같다. 여기서, 이온의 전하를  $q$ 라 하면 이온의 에너지는  $qV_p$ 가 된다.  $qV_p$ 의 에너지를 가지고 전하량의 변화없이 에너지 분석기로 입사된 이온에 의해 최대계수치가 나타나는 편향평판전압은 입사각  $\theta$ 가  $45^\circ$  일 때  $2V_p d/X$ 이다. 편향평판의 전압은  $V_p$ 에 의존하게 되므로 최대계수치를 나타내는 편향평판전압으로부터 플라즈마 퍼텐셜을 구할 수 있다.

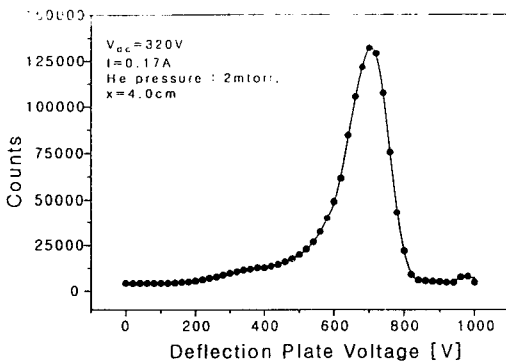


그림 8. DC 플라즈마의 에너지 스펙트럼.

Fig. 8. Energy spectrum of DC plasma.

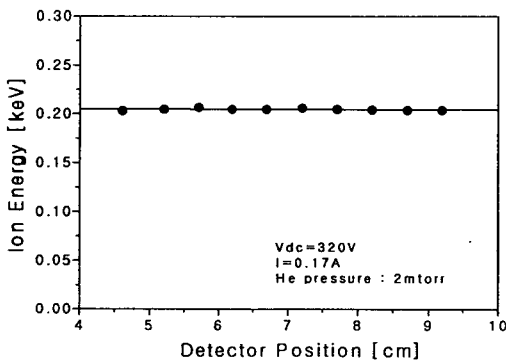


그림 9. 검출기 위치에 따른 피크에너지.

Fig. 9. Peak energy according to the detector position.

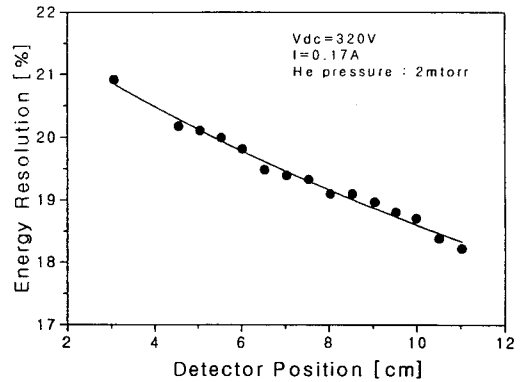


그림 10. DC 플라즈마에서의 검출기 위치에 따른 에너지 분해능.

Fig. 10. Energy resolution of DC plasma according to the detector position.

그림8은 방전전압이 320V, 전류가 0.17A인 DC 플라즈마로부터 누설되는 이온에 대해 검출기를 4cm 위치에 두고 측정한 에너지 스펙트럼이다. 그림8에서와 같이 최대계수치가 나타나는 편향평판전압 이하의 영역에서 계수치가 나타나는 것은 플라즈마로부터 누설되는 이온들이 플라즈마 내를 통과하면서 중성입자와의 충돌 및 전하교환 반응에 의해 에너지를 잃게되어 플라즈마 퍼텐셜보다 낮은 에너지를 가지고 분석기 내로 입사하게 되기 때문인 것으로 판단된다.

그림9는 검출기의 위치를 30mm에서 110mm까지 변화시키면서 DC 플라즈마로부터 누설되는 이온의 에너지 스펙트럼을 측정하여 검출기의 위치와 편향평판전압에 대응하는 이온 에너지를 나타낸 것이다. 그림9와 같이 이온 에너지는 검출기의 위치에 관계없이 일정하게 나타났다. 측정 위치에 따른 이온에너지는 203~205eV로 플라즈마의 DC 방전전압 320V보다 64% 이상 낮았다. 이온에너지가 DC 방전전압보다 낮은 것은 플라즈마발생장치에서 생겨나는 sheath<sup>[10]</sup>의 영향이다.

DC 방전전압이 320V일 때 검출기의 위치에 따른 에너지 분해능은 그림10과 같았다. 검출기의 위치를 30mm에서 110mm로 증가시키에 따라 에너지분해능은 20.9%에서 18.2%로 향상되었다.

V. 결 론

플라즈마 이온온도를 측정하기 위해 정전평판형 이

이온에너지 분석기를 설계·제작하고 에너지교정 및 에너지 분해능 등의 특성을 조사하였다. 일정한 검출기 위치에서 이온의 에너지에 따른 편향평판전압은 선형성을 보였으며, 일정한 이온에너지에 대해 검출기 위치에 따른 최대편향평판전압도 선형성을 보였다. 본 실험 영역에서 에너지분해능은 약 4.16~11.60%였으며, 설계시 고려한 변수들에 의한 계산치에 비해 78% 이상 향상되었다. 이것은 검출기 전단에 추가로 설치한 슬릿(5mm $\phi$ )의 영향인 것으로 판단된다. 에너지 분해능은 검출기 위치 및 이온에너지의 증가에 따라 향상되었고, 상대적 검출효율은 검출기 위치의 증가에 따라 감소하였다.

제작된 분석기를 다목적 플라즈마 발생장치에 설치하여 DC 플라즈마의 이온에너지 스펙트럼을 측정하였다. 방전전압이 320V, 전류가 0.17A인 DC 플라즈마로부터 누설되는 이온에 대한 이온에너지는 203~205eV로 나타났으며 검출기의 위치에 따른 이온온도의 변화는 없었다.

본 연구의 결과로 볼 때, 설계·제작한 에너지 분석기는 DC 플라즈마의 이온온도 측정에 적용할 수 있으며, 본 장치에 전하교환박막을 설치하면 RF 플라즈마 발생장치나 토카막과 같은 플라즈마가 가두어진 장치의 플라즈마의 이온온도를 측정하는 중성입자검출기로도 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 감사의 글

※ 본 연구는 기초과학지원연구소의 「한빛」 이용자 육성 프로그램 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] Dolan, "Fusion research", Pergamon press, 1982.
- [2] 박덕규, "플라즈마 및 핵융합 물리학", 1985.
- [3] Yu.V.Gott and A.G.Motlich, "Comparative characteristics of atomic particle stripping analyzers with solid and gases target", Nucl. Instr. and Meth., 155, pp. 443~447, 1978.
- [4] S.L.Davis, S.S.medley and M.B.Brusati, Princeton Plasma Physics Laboratory Report PPPL-1478, 1979.

- [5] K.Hayashi, K.Hashimoto and H.Y.Yamato, "Charge exchange neutral particle mass and energy analyzer for the JT-60 tokamak", Rev. Sci. Instrum., Vol. 56, No. 3, pp. 788~195, 1987.
- [6] C.F.barnett, J.A.Ray, "A calibrated neutral atom spectrometer for measuring plasma ion temperatures in the 0.165- to 10-keV energy region", Nuclear Fusion, Vol.12, 1972.
- [7] Hiroshi Takeuchi, Akimasa Funahashi, Koki Takahashi, Hirofumi Shirakata and Syukuro Yano, "A 10-channel neutral particle energy analyzer for measurement of ion temperatures on tokamak plasmas", Japanese J. of Appl. Phys., Vol.16, No.1, pp139~147 1977.
- [8] 강희동, 최병호, 새물리, Vol. 26, No. 6, pp. 563~568, 1986
- [9] G.A.Harrower, "Measurement of electron energies by deflection in a uniform electric field", The Review of Scientific Instr., Vol.36, No.9, pp850~854 1955.
- [10] W.D.Davis and T.A.Vanderslice, Phy. Rev., 131, 219 1963.

---

 著 者 紹 介
 

---

## 김 계 령

『센서학회지 제6권 제4호』, 논문 97-6-4-06, p297 참조.  
 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정.



## 김 완

1958년 생. 1982년 경북대학교 물리학과 졸업(이학사), 1984년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사), 1997년 부경대학교 대학원 졸업(이학박사), 1984년~1986년 삼성전관주식회사 연구원, 1986년~1997년 한국원자력연구소 연구원, 1997년~현재 경북대 방사선과학연구소 연구원. 주관심분야 : 이온원, 가속기, 플라즈마 진단기술, 방사선검출기.

## 이 용 현

『센서학회지 제1권 제1호』, 논문 92-08, p67 참조.  
 현재 경북대학교 전자·전기공학부 교수.

## 강 희 동

『센서학회지 제1권 제1호』, 논문 92-07, p59 참조.  
 현재 경북대학교 자연과학대학 물리학과 교수.