

논문 98-7-3-05

중성입자 에너지 분석장치에서 전하교환용 탄소박막에 의한 수소원자의 에너지 손실특성

김 계령*, 김 완**, 이 용현*, 강 희동***

Energy Loss of Hydrogen Atom due to Charge Exchange in Neutral Particle Energy Analyzer

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

요 약

플라즈마의 이온온도를 측정하기 위하여 전하교환체로 탄소박막을 이용한 90° 원통형 중성입자 에너지 분석기를 설계·제작하였다. Duoplasmatron을 이용하여 에너지 0.5~3.0 keV 수소이온에 대해 장치의 에너지 교정 및 에너지 분해능을 조사하였다. 에너지에 따른 정전편향판 전압과의 관계는 $E_0(keV)=3.83V(kV)$ 였다. 에너지 분해능은 입사입자의 에너지가 3.0 keV 인 경우 약 2 %였으며, 에너지가 0.5 keV 일 때는 약 9 % 로 수소이온의 에너지가 증가함에 따라 향상되었다. 또한 전하교환체로 두께 0.5~2.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 사이의 탄소박막을 사용하여 입사 중성입자의 에너지와 탄소박막의 두께에 따른 에너지 교정, 에너지 손실 및 전하교환된 입자의 에너지 분해능을 측정하였다. 중성수소입자의 에너지(E_0)는 탄소박막의 두께($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)와 정전편향판 전압(kV)의 함수로 $E_0(keV)=(0.53d+4.4) \cdot V(kV)$ 였다. 중성입자의 손실 에너지는 0.5~3.0 keV 사이의 입사입자 에너지와 0.5~2.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 사이의 탄소박막 두께에 따라 0.23~0.89 keV 였다. 손실에너지는 중성수소입자의 에너지와 탄소박막 두께의 함수로 $\Delta E=(0.12d+0.27) \cdot E_0^{1/2}(keV)$ 였다. 전하가 교환된 입자의 에너지 분해능은 실험의 범위에서 7~35 % 였으며, 입사 중성입자의 에너지가 높을수록, 탄소박막의 두께가 얇을수록 향상되었다.

Abstract

A neutral particle energy analyzer, which has the carbon stripping foil and the 90° cylindrical electrostatic deflection plate, was designed and constructed for measuring of ion temperature in plasma. The energy calibration and energy resolution were studied in detail for a hydrogen ion at the 0.5~3.0 keV energy using a duoplasmatron ion source. An energy of hydrogen ion to the deflection plate voltage at the peak ion count rate could be fitted by the expression $E_0(keV)=3.83V(kV)$. The measured energy resolution, which was about 2 % at the energy of 3.0 keV and 9 % at the energy of 0.5keV, was better for the increased hydrogen ion energy. For the charge exchanged hydrogen atom due to the carbon stripping foil, the energy calibration, energy loss and resolution were measured to the 0.5~2.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ thickness of the carbon stripping foil. An energy of the charge exchanged hydrogen atom as a function of the deflection plate voltage and carbon foil thickness could be fitted by the expression $E_0(keV)=(0.53d+4.4) \cdot V(kV)$. The energy loss was 0.23~0.89 keV to the 0.5~2.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ carbon foil thickness and the 0.5~3.0 keV energy of the incident neutral hydrogen atom, it could be fitted by the expression $\Delta E=(0.12d+0.27) \cdot E_0^{1/2}(keV)$. The measured energy resolution for the neutral hydrogen atom, which was between 7 % and 35 % in this experiment region, was increased for the increasing neutral hydrogen atom energy and the decreasing carbon stripping foil thickness.

* 경북대학교 전자공학부(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 : 1998년4월 8일>

1. 서 론

핵융합 연구의 선진국에서는 양질의 플라즈마를 발
생하기 위하여 초고온 플라즈마의 온도, 밀도 등 각종

변수들을 시공간적으로 계측·분석할 수 있는 진단설비를 상호 결합하여 핵융합장치의 플라즈마 변수측정에 사용하고 있으며, 정확한 플라즈마 제어와 감시를 위하여 새로운 개념의 진단기술을 계속해서 개발하고 있다.

플라즈마를 제어하기 위해서는 플라즈마의 온도, 밀도, 성분, 에너지분포 등과 같은 플라즈마의 특성을 정확히 측정할 수 있어야 한다. 그리고 중요한 플라즈마 변수 중의 하나인 이온온도를 측정하는 방법으로는 플라즈마로부터 방출되는 방사선, 중이온빔 및 중성입자 등을 이용하는 방법들이 있으나 중성입자검출법^[1]이 간편하고 정확한 것으로 알려져 있다.

중성입자검출법을 이용한 플라즈마 진단은 미국의 TFTR^[2], 일본의 JT-60U^[3], 유럽의 JET^[4] 등과 같은 대형의 토카막에서 뿐만 아니라 많은 중·소형 토카막에서 플라즈마의 이온온도를 측정하기 위해 이용되고 있다.

중성입자검출법은 플라즈마 내의 이온과 중성입자가 충돌하면서 공명전하교환반응^[5]에 의해 생성된 고속 중성입자^[6]의 에너지를 분석하는 방법이다. 플라즈마 내에서 생성된 고속 중성입자는 플라즈마 내의 이온의 정보를 간직하고 플라즈마를 이탈한다. 따라서 고속 중성입자를 이온화시켜서 에너지분포를 측정함으로써 플라즈마 이온온도를 측정할 수 있다.

중성입자 검출기에서 중성입자를 이온화시키기 위한 전하교환기에는 고체형^[7]과 기계형^[8]이 있다. 고체형은 기계형에 비해 별도의 진공배기장치가 필요하지 않고 장치를 소형화할 수 있고, 외부의 전자장을 쉽게 차단할 수 있으며, 전하교환효율이 높은 장점이 있다. 초창기의 고체형 전하교환기에는 은(Ag)박막을 주로 이용하였으나, 소련의 Yu. V. Gott에 의해 탄소박막이 처음으로 사용된 후 탄소박막은 비교적 넓은 면적의 박막제조가 가능하고 기계적 강도가 커서 많이 이용되고 있다^[9].

플라즈마 진단장치는 플라즈마 발생장치의 구조, 종류 또는 규모 등에 따라 그 형태와 특성이 다양하며, 측정하고자 하는 플라즈마 변수에 따라서 여러 가지 진단기술이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 고온 플라즈마의 이온온도를 측정하기 위하여 전하교환체로 탄소박막을 이용한 90° 원통형 중성입자 에너지 분석기를 설계·제작하였다. 입자원으로 duoplasmatron 이온원^[10]을 이용한 정전

가속기를 사용하여 수소이온의 에너지에 따라 최대계수율의 정전편향판 인가전압을 조사하여 중성입자 에너지 분석장치의 에너지 교정 및 에너지 분해능을 조사하였다. 또한 중성 수소입자의 에너지와 전하교환 탄소박막의 두께에 따른 에너지 손실 및 전하교환된 입자의 에너지 분포를 측정하여 중성입자 에너지분석기에서 중성 수소입자의 에너지 손실특성을 조사하였다.

II. 실험장치 및 실험방법

탄소박막에서 중성수소입자에 의한 에너지 손실특성을 조사하기 위한 실험장치는 그림 1과 같이 입자발생원인 이온가속기, 중성입자 에너지 분석기 및 자료수집장치로 구성하였다.

1. 이온빔 가속기

중성입자 에너지 분석기의 특성조사를 위하여 이온의 에너지를 알고 있는 입자원이 요구된다. 이 입자원인 이온빔 가속기는 그림 1과 같이 duoplasmatron 이온원, 이온빔을 제어하기 위한 이온광학 부품 및 이온원에서 인출된 수소이온빔 중 필요로 하는 이온빔만 분리하기 위한 질량분리전자석 등으로 구성되어 있다.

이온원은 수소분자를 방전시켜 플라즈마를 발생시킨 후 이온빔 인출전극에 전압을 인가하면 플라즈마로부터 이온빔이 인출된다. 이 이온원은 최대인출 전압이

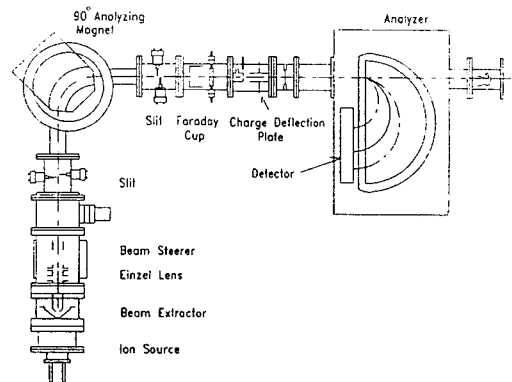


그림 1. 이온가속기와 중성입자 에너지 분석장치의 구성도.

Fig. 1. Schematic diagram of the ion accelerator and the neutral particle energy analyzer.

25 kV, 최대 인출전류는 약 15 mA 이며, 이온빔의 emittance^[10]가 낮아 이온빔을 수송하는 동안 손실이 적은 특성을 가지고 있어 저에너지 입자원으로 적합하다.

이온원에서 인출된 수소이온빔에는 ¹H 뿐만 아니라, ²H 와 ³H 가 포함되어 있어 ¹H 만을 선택적으로 수송하기 위하여 90° 질량분리 전자석을 설치하였다. 이 전자석은 수평·수직 양면에 광학적 동집점 운전 (stigmatic operation)을 할 수 있도록 자극의 입·출구 축의 각도를 입사·방출 이온빔의 범선에 대하여 각각 26.5° 가 되도록 자극을 설치하였다. 이 전자석의 회전반경은 125 mm 이고, 회전각도는 90°, 자극 간격은 60 mm 이며 최대 자속밀도가 2312 gauss 로 에너지 28 keV의 수소이온빔을 분리할 수 있다.

2. 중성입자 에너지 분석기

중성입자 에너지 분석기는 플라즈마의 이온온도에 따라 적합한 형태를 선택하여야 한다. 본 연구에서는 저에너지 중성입자 에너지 분석에 적합한 90° 원통형 정전평판형 중성입자 에너지 분석기를 설계·제작하였다. 이 장치는 구조가 비교적 간단하고 유지·보수가 편리하며 분석기 내로 입사된 입자의 손실이 적어 저에너지 중성입자의 에너지 분석에 적합하며 대부분의 소형 플라즈마 장치의 이온온도 측정에 이용되고 있다.

질량분리 전자석에서 분리된 수소이온은 질량분리 전자석과 에너지 분석기 사이의 빔통로에서 잔류기체와의 충돌에 의해 비대칭 비공명(asymmetric nonresonant) 전하교환을 하여 중성 수소원자(neutral atom)가 된다. 중성 수소원자가 에너지 분석기에 입사하여 탄소박막을 통과하면서 이온화되어 전장이 인가된 원통형 정전평판 사이를 각각 다른 궤도반경을 가지고 통과한다. 이때 궤도반경은 이온의 에너지에 따라 달라지며 정전평판 양단에 인가한 전압 V 와 전하량이 Z 인 분석대상 이온의 에너지 E 의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$E = V \cdot Z / 2 \ln(b/a) \quad (1)$$

식(1)에서 a, b 는 각각 정전평판의 안쪽과 바깥쪽 반경이다. 원통형 정전평판 중성입자 에너지 분석기의 에너지 해상도 $\delta E/E$ 는

$$\frac{\delta E}{E} \approx \frac{\delta R}{R} \quad (2)$$

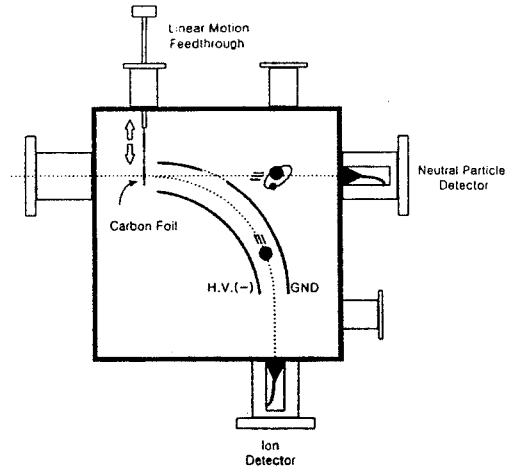


그림 2. 90° 원통 정전평판형 중성입자 에너지 분석 장치의 구성도

Fig. 2. Schematic diagram of the 90° cylindrical electrostatic plate type neutral particle energy analyzer.

로 주어지며, 여기서 R 은 $R=(a+b)/2$ 로 정전평판의 중앙 궤적이고, δR 은 정전평판의 간격이다^[11].

그림 2는 설계·제작한 중성입자 에너지 분석기의 개략도이다. 중성입자 에너지 분석기는 탄소박막 이송 장치, 에너지 분석을 위한 90° 원통형 정전평판, 하전 입자검출기 및 중성입자 에너지 분석기내로 입사하는 입자중 불필요한 이온을 제거하기 위한 편향전극으로 구성하였다.

중성입자 에너지 분석기내로 입사한 중성입자의 에너지를 분석하기 위해서는 중성입자를 이온화하여야 한다. 본 장치에서는 기체형에 비해 소형화가 가능하고 유지·보수가 용이한 장점이 있는 고체형 전하교환기 (stripping cell)를 설계·제작하여 설치하였다. 전하교환 물질로는 탄소박막을 사용하였으며, 2종류의 박막을 동시에 장착할 수 있도록 하였다. 또 탄소박막에 미세 구멍이 발생하지 않도록 하기 위하여 투과율이 90 % 인 니켈망을 탄소박막의 지지체로 사용하였다.

에너지 분석기는 90° 휨각을 갖는 원통형 정전평판으로 제작하였으며, 전하교환기를 통과하면서 이온화된 수소입자를 에너지에 따라 다른 회전반경을 갖도록 하는 역할을 한다. 에너지 분석기의 편향판간 거리는 분석대상입자의 에너지와 인가전압과의 관계를 결정하는 주요한 변수이다. 본 장치에서는 검출대상 에너지

범위를 0~5 keV 로 정하고 편향판의 내·외경을 각각 95 mm, 112 mm 로 설계하였다. 편향판의 높이는 편향판의 fringing field에 의해 분석대상 입자의 궤도반경이 달라지는 것을 방지하기 위하여 50 mm 로 설계하였다. 정전편향판의 내부는 입사입자에 의해 발생하는 떠돌이 광자(stray photon)의 계수를 방지하기 위하여 흑염처리를 하였다. 또한 외부 정전편향판에는 분석기를 광학적으로 정렬하기 위하여 빔라인과 일치하도록 개구를 설치하고 투과율이 90 % 인 니켈망을 부착하였다.

또한 입사입자의 진행 방향과 같은 방향 및 정전 편향판의 중앙 궤도와 일치하도록 에너지 분석기 진공함 외부에 하전입자 검출기인 디지털 방식의 channeltron (Gallieo Electro-Optics, model 4839)를 설치하여 에너지 분석기에 입사하는 중성입자와 탄소박막에 의해 전하교환된 이온을 측정할 수 있도록 하였다.

3. 중성입자 에너지 분석기 전원 및 신호처리

제작된 장치의 정전편향판 전원 및 신호처리 구성도는 그림 3과 같다. 이 장치에는 전하가 교환된 입자를

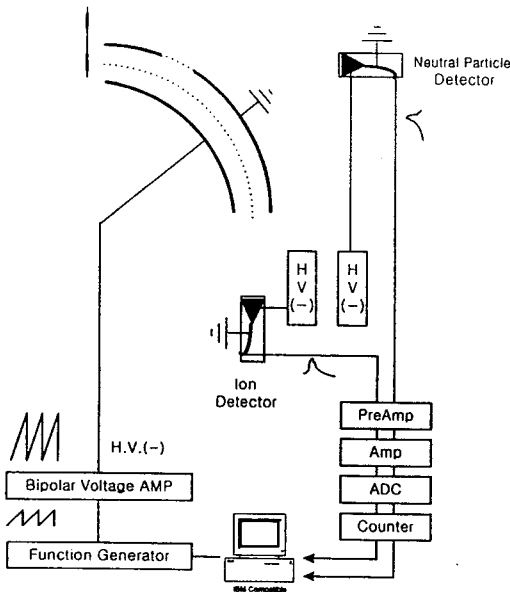


그림 3. 중성입자 에너지 분석장치의 전원 및 신호처리계통 구성도.

Fig. 3. Schematic diagram of the power supply and the data acquisition system for the neutral particle energy analyzer.

편향시키기 위한 전원과 하전입자 검출기의 바이어스 전원이 필요하다. 정전편향판 전원은 파형합성기(function synthesizer, NF Instrument 1915)와 전압증폭장치(KEPCO, BOP1000D)로 구성하였고, 하전입자 검출기의 바이어스 전원은 최대 전압이 ±3 kV인 직류전원(EG & G ORTEC, 456)을 사용하였다.

신호처리계는 오름시간(rising time)이 1GHz인 전치증폭기(EG & G ORTEC, 9306), 분광증폭기(EG & G ORTEC, 672), ADC와 계수기로 구성된 다중계수기(multichannel scaler)로 구성하였다.

4. 실험방법

탄소박막에 의한 수소원자의 에너지 손실특성을 조사하기 위해서는 먼저 이온원으로부터 수소이온을 인출하여야 한다. 수소이온빔의 인출은 이온원 진공함의 진공도를 3×10^{-6} torr 이하가 되도록 진공배기 한 후 진공함의 진공도가 1×10^{-5} torr 가 되도록 이온원 방전함 내부에 수소기체를 주입하고 기체방전을 일으켜 플라즈마를 발생시킨다. 이온원의 인출전극에 전압을 인가하여 수소이온을 인출한 후 질량분리 전자석으로 ^1H 이온만 분리하여 에너지 분석기로 입사시킨다. 질량분리된 수소이온은 질량분리 전자석과 에너지 분석기 사이의 잔류기체와 비공명 비대칭 전하교환 반응을 하여 에너지 손실이 없는 중성 수소원자가 된다.

에너지 분석기의 에너지 교정은 분석기 전단에서 이온을 제거하지 않은 에너지 0.5~3 keV 의 수소빔을 에너지 분석기에 입사시킨 후 정전편향판의 전압을 초당 1 V 씩 증가시키면서 하전입자 검출기로부터 나오는 이온계수율을 측정하여 에너지 스펙트럼을 구하고, 측정된 스펙트럼을 Gaussian Fitting하여 각각의 에너지에 따른 봉우리 전압(peak voltage)을 결정하여 정전편향판 전압에 따른 에너지를 교정하였다. 또한 에너지 스펙트럼으로부터 에너지 분해능을 조사하였다.

탄소박막에 의한 수소원자의 에너지 손실특성을 조사하기 위하여 정전편향판 전단에 탄소박막을 위치시키고 분석기 전단의 이온 제거전극에 전압을 인가하여 이온을 제거하여 중성입자만 분석기를 통과시켰다. 탄소박막을 통과한 중성입자중 일부가 전하교환반응을 하여 이온화되며, 이 과정에서 에너지의 손실이 일어난다. 여기에 정전편향판의 전압에 따른 전하교환된 이온의 에너지 스펙트럼을 측정하여 봉우리 전압을 결정한 후 에너지 교정곡선과 비교하여 입사 중성수소원자의

에너지와 탄소박막의 두께에 따른 손실 에너지를 분석하였다. 또한 측정된 에너지 스펙트럼으로부터 에너지 손실에 따른 분해능 특성을 분석하였다. 이 실험과정에서 중성입자 에너지 분석기내의 진공도를 2×10^{-6} torr 이하로 유지시켜 탄소박막의 오염과 이온 검출기의 오동작을 방지하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 에너지 교정

그림 4는 이온을 에너지 분석기에 입사시키고 전하교환 박막이 없는 경우 이온의 에너지와 전압최대 계수율을 나타내는 정전편향판 전압과의 관계로 선형적으로 잘 만족한다. 그림에서 측정값은 다음 식으로 나타냈다.

$$E_o(keV) = 3.83V(keV) \quad (3)$$

이 식은 이론적인 식 (1)과 오차범위 10 % 내에서 잘 일치한다. 실험과 이론식 (1)과의 오차는 제작된 정전편향판의 곡률 측정오차와 정전편향판의 fringing field의 영향에 의한 것이다. 정전편향판의 곡률 a, b 의 측정오차는 식 (1)의 $\ln(a/b)$ 값에 영향을 미친다. 예로 곡률 b 의 측정오차가 1 % 라면 $\ln(a/b)$ 값은 약 9 %의 변한다. 따라서 제작한 정전편향판의 정확한 곡률 측정이 요구된다.

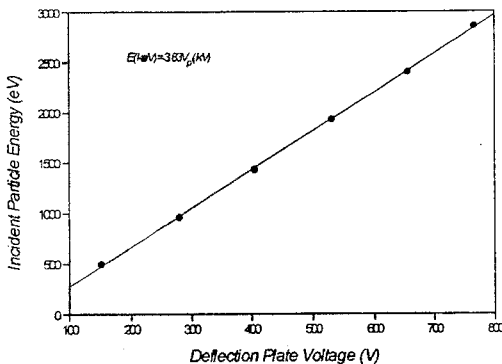


그림 4. 수소이온에 대한 중성입자 에너지 분석기의 에너지 교정곡선.

Fig. 4. Energy calibration curve of the neutral particle energy analyzer for hydrogen ion.

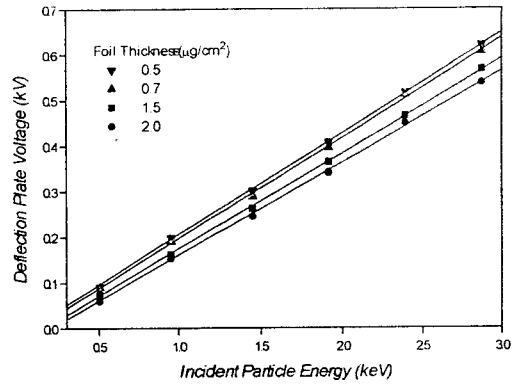


그림 5. 중성 수소입자에 대한 중성입자 에너지 분석기의 에너지 교정곡선.

Fig. 5. Energy calibration curve of the neutral particle energy analyzer for neutralized hydrogen atom.

그림 5는 에너지 분석기 진단에서 이온을 제거하고 중성 수소원자만 입사시켜 탄소박막 두께 0.5, 1, 1.5, 2 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 에 대한 입사 중성입자 에너지와 최대계수율이 측정되는 정전편향판 전압과의 관계 즉, 중성입자 에너지 분석기의 에너지 교정을 나타낸 그림이다. 실험한 수소입자 에너지 영역에서 탄소박막의 두께 0.5, 1, 1.5, 2 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 에 대한 에너지 교정은

$$E_o(keV) = 4.51V(keV) + 0.08 \quad : \quad 0.5\mu\text{g}/\text{cm}^2$$

$$E_o(keV) = 4.61V(keV) + 0.07 \quad : \quad 0.7\mu\text{g}/\text{cm}^2$$

$$E_o(keV) = 4.78V(keV) + 0.17 \quad : \quad 1.5\mu\text{g}/\text{cm}^2$$

$$E_o(keV) = 4.96V(keV) + 0.20 \quad : \quad 2.0\mu\text{g}/\text{cm}^2$$

로 주어졌다.

여기서 E_o 는 입사 수소입자의 에너지이고, V 는 정전편향판 전압이다. 위의 정전편향판 전압과 입사에너지에 대한 식을 탄소박막 두께를 고려한 일반식으로 표현하면 에너지 교정식은 다음과 같이 선형적으로 주어진다.

$$E_o = (0.534d + 4.4)V(keV)$$

따라서 본 실험영역의 에너지 및 전하교환 박막두께에서 구하여진 교정식으로 실제 고온 플라즈마 이온측정에 적용할 수 있다.

2. 평균 에너지 손실

그림 6은 에너지가 3.0 keV 이고 이온이 제거되지 않은 수소빔이 두께 1 μg/cm²의 탄소박막을 일부는 통과하고 일부는 통과하지 않은 경우 정전편향판 전압에 따른 계수율을 측정 한 전형적인 에너지 스펙트럼이다.

그림에서와 같이 탄소박막에서 전하교환반응을 한 입자는 에너지 손실이 일어나 최대 계수율의 정전편향판 전압이 이동하게 되며, 또한 에너지 분포도 넓어지게 되어 에너지 분해능도 감소한다.

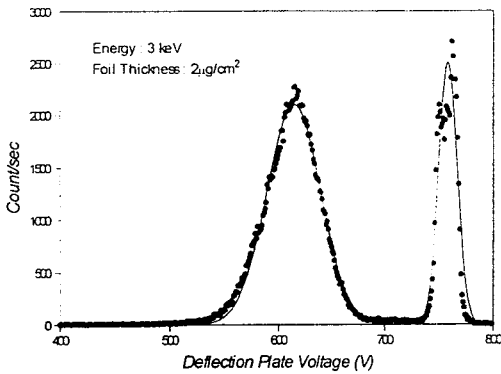


그림 6. 중성입자 에너지 분석장치의 전형적인 스펙트럼.

Fig. 6. Typical spectrum of the neutral particle energy analyzer.

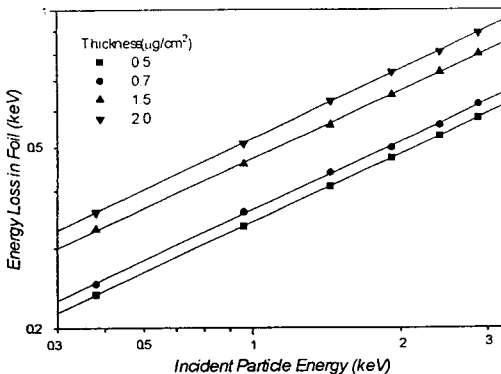


그림 7. 입사 중성입자의 에너지에 따른 에너지 손실.
Fig. 7. Energy loss according to incident neutral particle energy for the various thickness of carbon foils.

중성입자가 탄소박막을 통과할 때 에너지 손실, ΔE는 박막이 있을 때와 없을 때의 최대계수율의 정전편향판 전압의 차이로 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta E = 3.83(V_{no\ foil} - V_{foil}) \tag{4}$$

탄소박막의 두께별로 에너지 스펙트럼을 측정하여 입사입자의 에너지에 따른 평균 손실에너지를 위 식으로 계산하여 그림 7에 나타내었다. 단위길이당 에너지손실의 증가량은 본 실험의 영역에서 입자의 속도 v에 비례한다면 전체 에너지 손실량, ΔE는 다음 식으로 나타낼 수 있다¹²⁾.

$$\Delta E = A \cdot E_0^{1/2} (keV) \tag{5}$$

여기서 A는 상수, E₀는 입사입자의 에너지(keV)이다. 측정 한 손실 에너지를 위 식으로 나타내면 각각의 탄소박막의 두께에 따라 상수 A는 3.35 × 10⁻¹, 3.56 × 10⁻¹, 4.60 × 10⁻¹, 5.15 × 10⁻¹ (keV^{-1/2})로 주어진다. 이 상수를 박막의 두께를 함수로 나타내면 A = (0.12d + 0.27)로 주어진다. 따라서 에너지 손실량을 탄소박막의 두께 d(μg/cm²)로 나타내면 식(6)으로 주어진다.

$$\Delta E = (0.12d + 0.27) \cdot E_0^{1/2} (keV) \tag{6}$$

그리고 입사입자 에너지에 대한 손실 에너지의 비는 입사입자의 에너지의 증가에 따라 감소하였으며, 탄소박막의 두께가 0.5 μg/cm² 이고 입사입자의 에너지가 0.5 keV에서 3.0 keV로 증가할 때 이 비는 약 47%에서 19%로 감소하였다.

그림 8은 일정한 입사입자 에너지에 대해 탄소박막의 두께에 따른 에너지 손실특성을 나타낸 것이다. 탄소박막의 두께에 따른 손실에너지는 식 (6)에서와 같이 두께의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 그러나 에너지에 따라 손실량 증가폭이 변하는 것은 질량분리전자석 후단과 중성입자 에너지분석기의 입자 검출기 사이의 이온광학적 중심과 기하학적 중심의 불이치와 실험중 이온원 운전변수의 불안정으로 인하여 플라즈마 방출면의 형상이 변하여 인출이온빔의 이온광학적 특성이 변화한 영향인 것으로 보여진다.

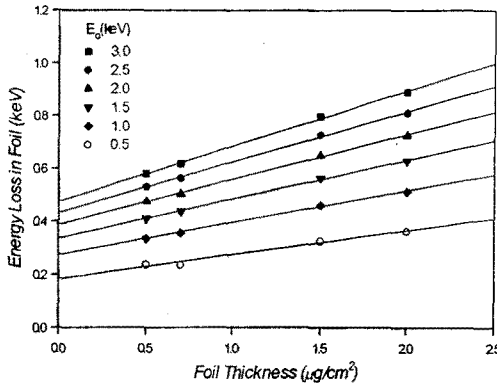


그림 8. 탄소박막의 두께에 따른 에너지 손실.
Fig. 8. Energy loss according to the thickness of the carbon foils.

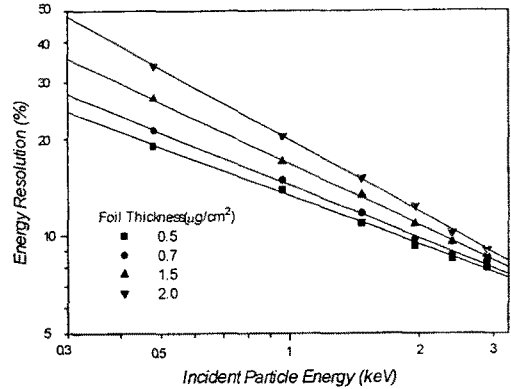


그림 10. 중성 수소원자의 에너지 분해능.
Fig. 10. Energy resolution for the neutralized hydrogen atom.

3. 에너지 분해능

그림 9에 이온빔을 에너지 분석기에 입사한 경우의 입사이온의 에너지에 따른 분해능을 나타내었다. 그림에서 점선으로 표시된 것은 장치설계시 고려한 분해능이다. 에너지 분해능 $\delta E/E$ 는 식 (2)로 주어지며, δR 는 입자검출기 전면에 슬릿을 설치하여 제어할 수 있다.

수소이온에 대한 에너지 분해능은 입사입자의 에너지가 3.0 keV 인 경우 약 2 % 였으며, 에너지가 0.5 keV 일때는 약 9 % 로 에너지의 감소에 따라 증가하였다. 그림에서 점선은 정전편향판의 곡률반경과 입자검출기 전단에 설치한 슬릿의 반경으로 식 (2)로 계산

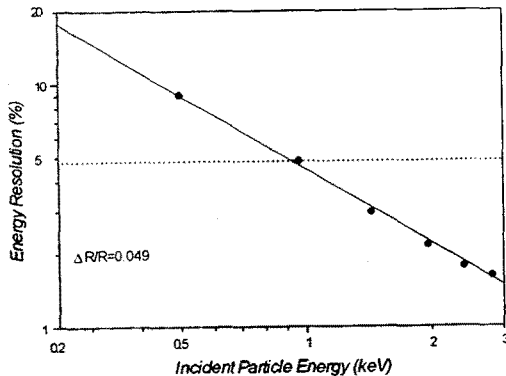


그림 9. 수소이온에 대한 에너지 분석장치의 분해능
Fig. 9. Energy resolution of the energy analyzer for the hydrogen ion.

산한 값이다. 약 1 keV 이상의 에너지에서는 이론 값보다 높은 에너지 분해능을 나타내었다. 그러나 1 keV 이하의 에너지에서는 분해능이 설계치보다 나빠지는 경향을 보였다. 이것은 정전편향판의 fringing field, 저 에너지 입자가 입자에너지 분석장치까지 수송되는 동안 잔류기체와의 충돌 및 인출 이온빔의 에너지 분포의 불안정에 의한 영향으로 보여진다.

그림 10에 전하가 교환된 입자의 분해능을 탄소박막의 두께별로 입사 중성입자의 에너지에 따라 나타내었다. 에너지 분해능은 에너지가 높을수록, 탄소박막의 두께가 얇을수록 향상되었다. 이것은 탄소박막에서 입자의 에너지와 두께에 따라 에너지 스트래글링 (straggling)이 달라지기 때문이다.

IV. 결 론

고온 플라즈마의 이온온도를 측정하기 위하여 전하교환체로 탄소박막을 이용한 90° 원통형 중성입자 에너지 분석기를 설계·제작하였다. 이온원으로 duoplasmatron 을 이용한 정전가속기를 사용하여 0.5~3.0 keV 수소이온에 대해 장치의 에너지 교정 및 에너지 분해능을 조사하였다. 또한 전하교환체로 두께 0.5~2.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 사이의 탄소박막을 사용하여 입사 중성입자의 에너지와 탄소박막의 두께에 따른 에너지 교정, 에너지 손실 및 전하교환된 입자의 에너지 분해능을 조사하였다.

수소이온의 경우 에너지에 따른 정전편향판 전압과

의 관계는 $E_d(keV)=3.83V(kV)$ 로 주어졌다. 또 에너지 분해능은 입사입자의 에너지가 3.0 keV 인 경우 약 2 % 였으며, 에너지가 0.5 keV 일 때는 약 9 % 로 에너지가 감소함에 따라 증가하였다. 약 1 keV 이상의 에너지에서는 이론값보다 높은 에너지 분해능을 나타냈으나 1 keV 이하의 에너지에서는 분해능이 설계치보다 나빠지는 경향을 보였다.

수소중성입자가 탄소박막에서 전하교환을 할 경우 입자의 에너지, 정전편향판의 전압 및 탄소박막 두께와의 관계는 본 연구의 실험영역에서 $E_o(keV)=(0.53d+4.4)V(kV)$ 였다.

탄소박막에서 중성입자의 에너지 손실은 0.5~3.0 keV 사이의 입사에너지 및 $0.5 \sim 2 \mu g/cm^2$ 사이의 전하교환체 두께에 따라 0.23~0.89 keV였으며, 두께와 에너지의 증가에 따라 증가하였다. 손실에너지는 중성 수소입자의 에너지와 탄소박막 두께의 함수로 $\Delta E = (0.12d + 0.27) \cdot E_o^{1/2}(keV)$ 였다.

전하가 교환된 입자의 에너지 분해능은 본 실험의 범위에서 7~35 % 사이였으며, 입사 중성입자의 에너지가 높을수록, 탄소박막의 두께가 얇을수록 향상되었다. 탄소박막의 두께별로 입사 중성입자의 에너지에 따라 전하가 교환된 입자의 에너지 분해능은 에너지가 높을수록, 탄소박막의 두께가 얇을수록 향상되었다. 이것은 탄소박막내에서 입자의 에너지와 두께에 따라 에너지 스트레클링이 달라지기 때문이다.

따라서 본 연구결과인 중성입자 에너지 분석장치와 탄소박막의 에너지 손실특성 자료는 실제 핵융합 장치의 플라즈마 이온온도 측정에 적용할 수 있으며, 앞으로 개발될 여러 형태의 고온 플라즈마 발생장치의 플라즈마 진단에 이용될 것으로 기대된다.

감사의 글

※ 본 연구는 한국원자력연구소 및 기초과학지원연구소의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] V. V. Afrosimov and I. P. Glakkovskii, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, Vol. 12, pp. 1135-1141, 1967
- [2] R. K. Kaita, S. L. Davis and S. S. Medley, *Princeton Plasma Physics Laboratory Report*, PPPL-1493, 1978
- [3] K. Hayashi, K. Hashimoto and H. Yamato, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 56, No. 3, pp.359-363, 1985
- [4] R. Bartiromo, G. Bracco, M. Butsati, G. Grosso, S. Mantovani, B. Tilia and V. Zanza, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 58, No. 5, pp.788-795, 1987
- [5] C. R. Parsons and S. S. Medley, *Plasma Phys.*, Vol. 16, pp. 267-273, 1974
- [6] I. H. Hutchison, *Principle of Plasma Diagnostics*, Cambridge Univ. Press, 1987
- [7] Yu. V. Gott and G. Tel'kovskii, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, Vol. 9, pp 1628-1636, 1965
- [8] H. Tawara, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, Vol. 22, No. 6, pp. 491-561, 1978
- [9] Yu. V. Gott and A. G. Motlich, *Nucl. Instrum. and Meth.*, Vol. 155, pp. 443-447, 1978
- [10] 강 희동, 최 병호, *새물리*, Vol. 26, No. 6, pp. 563-568, 1986
- [11] H. P. Eubank, T. D. Wilkerson, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 34, pp. 12, 1963
- [12] P. Beisersdrofer, A. L. Roquemore and R. Kaita, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 58, No. 11, pp. 2092-2098, 1987

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.