

원자력용 대전류 이온원 개발을 위한 헬리콘 플라즈마원 특성 연구

엄규섭, 홍인석, 황용석
한국과학기술원 원자력공학과
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

헬리콘 플라즈마는 낮은 입력전력에서 높은 플라즈마 밀도를 얻을 수 있는, 지금까지 알려진 가장 효율적인 플라즈마 발생방법이다. 이러한 헬리콘 플라즈마의 특성을 이용하여 대전류의 이온원이 요구되는 원자력용 가속기의 이온원으로의 적용을 위한 연구를 수행하였다. 원자력용 가속기의 이온원으로서 요구되는 소형화된 헬리콘 플라즈마원을 개발하고, 플라즈마의 특성을 분석하였으며, 모의로 제작된 빔인출부를 통하여 이온 및 전자의 인출특성을 분석하였다.

1. 서론

헬리콘 플라즈마는 $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$ 의 Lower Hybrid 근방의 주파수 영역에서 자기장을 따라서 진행하는 헬리콘파에 의해서 발생한다고 알려져 있으며, 자장의 증가에 따라 플라즈마의 밀도가 비례하여 증가하여 10^{13} cm^{-3} 이상의 플라즈마 밀도를 얻을 수 있는 효율적인 플라즈마 발생방법으로 알려져 왔다.[1-4] 헬리콘 플라즈마의 경이적인 높은 밀도에 대한 이론적, 실험적 연구들이 수행되어 오고 있으나, 아직 명확한 플라즈마 발생기체에 대한 해석을 내리지는 못하고 있는 실정이다. 그 발생기체에 대한 규명이 미진함에도 높은 플라즈마 밀도가 발생하는 것을 이용하여 고밀도의 플라즈마원을 요구하는 다양한 분야에서의 응용이 가능하다.

원자력 분야에서 핵폐기물의 소멸처리 등에 이용될 가속기들은 대전류 이온원을 요구하고 있으며, 현재 양자 가속기 및 중이온 가속기의 이온원으로 아크방전 및 ECR 플라즈마 등의 이온원이 사용되고 있으나, 아크방전의 경우 낮은 플라즈마 밀도, 필라멘트의 수명 문제, 불순물의 함입 등의 결점이 있고, ECR 플라즈마의 경우 높은 자장밀도에 의한 에미턴스의 제약으로 인한 한계점을 보여주고 있다. 이에 비하여 헬리콘 플라즈마 이온원의 경우는 안테나를 플라즈마 발생부와 격리시킴으로써 발생된 플라즈마에 의한 안테나의 부식 및 불순물의 함입을 막고 적은 소모전력으로도 높은 이온밀도를 발생시킬 수 있고 낮은 축방향 인가자장으로 인하여 에미턴스를 낮출 수 있는 장점을 지녔다.[5]

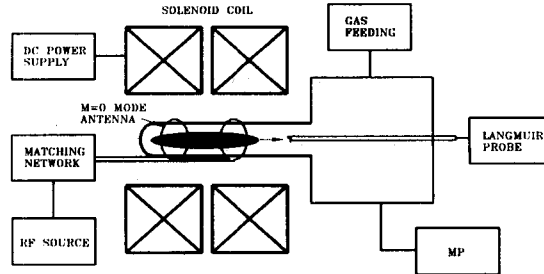


그림 1 헬리콘 플라즈마 시스템 개략도

2. 헬리콘 플라즈마 발생 시스템의 제작

헬리콘 플라즈마원은 그림 1과 같이 플라즈마 발생용기, 축방향 자장인가계, RF 안테나의 플라즈마 발생부와 임피던스 정합 시스템, RF 전원공급계 등으로 구성된다.

2.1 헬리콘 플라즈마 발생부

원자력용 가속기에 이용하기 위하여서는, 안테나의 모양에 따라 다양하게 존재하는 헬리콘 플라즈마 발생 모드중에서 자장방향의 축상에 플라즈마의 집속이 일어나는 $M=0$ 모드가 적합하다. 또한, 가속기용 이온원으로 이용되기 위해서는 소형화가 필수적으로 요구되므로 헬리콘 플라즈마 시스템을 구성하는 제반 요소들의 소형화가 뒤따라야 한다. Chen[6]의 실험에서 플라즈마 발생부가 소형화될 수 있음을 확인할 수 있다.

헬리콘 플라즈마의 발생을 위하여 직류전원의 세기에 따라 300~2000 Gauss의 균일한 축방향의 자장을 얻을 수 있는 솔레노이드 코일을 제작하였으며, 이온빔의 인출계에 직접적으로 부착될 수 있도록 소형으로 제작하였다. 아울러, 냉각계통 및 직류전원 공급계통을 추가적으로 필요로 하는 솔레노이드 자장인가 시스템을 영구자석을 이용하여 대체함으로써 자장인가 시스템의 간소화하였다. 플라즈마 발생용기의 경우 pyrex 튜브를 가공하여 외경 25 mm, 길이 200 mm의 크기로 양쪽에 각각 플라즈마 기체를 공급하고 진공배기를 할 수 있도록 제작하였다. RF 안테나의 경우 소형으로 제작된 솔레노이드 코일의 크기와 플라즈마 발생용기의 크기를 고려하여 $M=0$ 모드의 헬리콘 안테나를 직경 25 mm, 길이 80 mm의 크기로 제작하였다.

2.2 임피던스 정합

소형으로 설계된 헬리콘 플라즈마 발생부에 의하여 결정된 RF 안테나의 인덕턴스 및 저항값을 측정하고 정합방식에 따라 각각 계산한 결과, 안테나의 낮은 인덕턴스 값과 상대적으로 높은 저항값으로 인하여 변환형 임피던스 정합방식보다는 표준형 임피던스 정합방식이 유리함을 파악하였다. 또한, 표준형 임피던스 정합방식에서는 RF 주파수가 낮은 영역보다 높은 영역에서 플라즈마의 발생이 용이하므로 100 MHz의 RF 전원을 사용하여 플라즈마 발생을 위한 전원을 공급하였다.

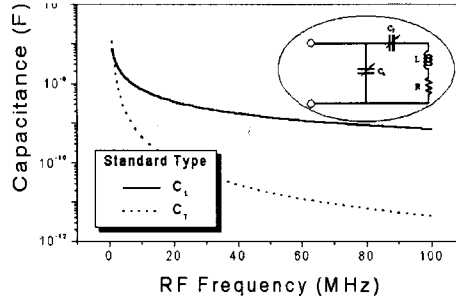
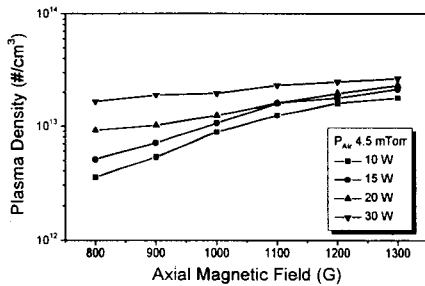


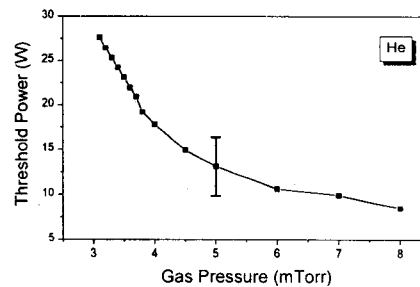
그림 2 주파수 변화에 따른 임피던스 정합값의 변화

3. 헬리콘 플라즈마 발생 실험

100 MHz 10~60 Watt의 RF 전원을 이용하여 약 10^{-3} Torr의 진공도에서 플라즈마 기체로 헬륨을 사용하여 헬리콘 플라즈마를 발생시켰으며, 축방향 자장은 500~1600 Gauss를 인가하였다. 축전결합에 의하여 초기 플라즈마가 발생하고 유도결합을 거쳐 헬리콘 모드의 연속적으로 플라즈마의 상태가 변화하는 것을 관찰할 수 있었고, 전기탐침법에 의하여 자장의 변화에 따라 플라즈마의 밀도가 선형적으로 비례하여 증가하는 것을 관찰함으로써 헬리콘 플라즈마의 발생을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 3 (a)축방향 자장변화에 따른 플라즈마 밀도 (b)압력변화에 따른 플라즈마상태의 변화

그림 3 (a)에서와 같이 10~30 Watt의 낮은 입력전력에 대하여서도 자장의 증가에 따라서 10^{13} cm^{-3} 의 높은 밀도의 플라즈마가 발생하였고, 압력의 변화에 따라서 그림 3 (b)와 같이 특정한 입력전력에서 플라즈마의 상태가 급격히 변하는 것을 관찰하였다. 이때, 압력을 증가시키면 플라즈마 상태의 변화는 소실되어 관찰되지 않게 되었고 압력을 감소시킬수록 헬리콘 플라즈마의 발생이 힘들어 지는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 헬리콘 플라즈마가 발생하기 위해서는 일정한 크기 이상의 입력전력이 필요하다는 것을 나타내고, 압력이 어느 정도 이상에서는 충돌에 의한 효과가 커짐으로 인하여 헬리콘 모드가 상대적으로 소실되는 것으로 분석된다. 낮은 압력 조건에서 헬리콘 플라즈마의 발생이 어려워지는 것은 아

직 명확한 설명은 힘들지만, 중성입자의 밀도감소로 인한 헬리콘파에 의하여 가속된 전자와 중성입자간의 충돌영향이 감소한 원인으로 추측된다.

4. 헬리콘 플라즈마에서의 빔인출 특성

4.1 빔인출계의 구성

그림 4와 같이 간단한 구조의 빔인출계를 구성하여 최고 5 kV의 직류전원을 공급하여 이온 및 전자의 전류를 측정하였고 축방향 자장인가계로써 1.5 kG의 영구자석을 이용하여 시스템을 간소화하였다. 플라즈마 발생기체로 헬륨기체를 공급하여 압력을 0.4~10 mTorr에서 조절하였고, 10~30 Watt의 입력전력을 공급하여 플라즈마를 발생시켰다.

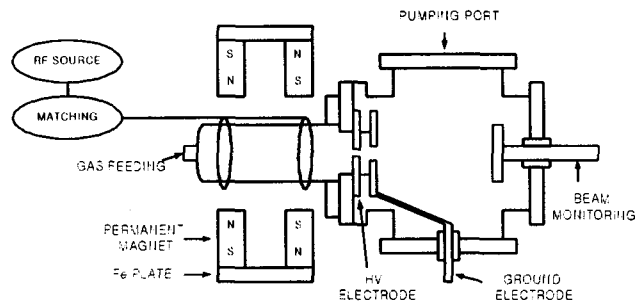
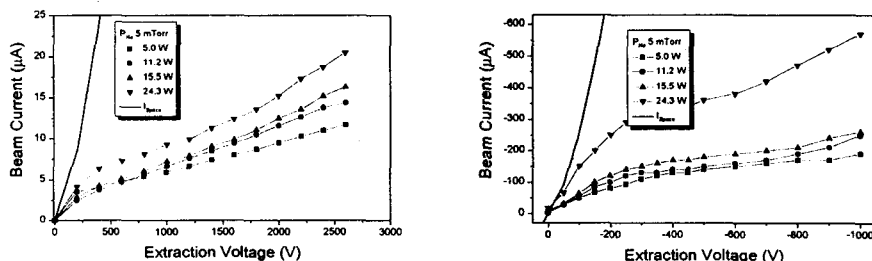


그림 4 영구자석을 이용한 헬리콘 플라즈마 이온원 인출 시스템

4.2 이온 및 전자의 빔인출 실험

빔인출계의 양극에 직류전원을 양의 방향으로 음의 방향으로 각각 인가하여 이온 및 전자를 인출하여 빔의 전류를 측정하였다. 이온의 인출 특성은 인출전압이 인가되지 않았을 때 관찰되는 헬리콘 플라즈마에 의해서 가속된 전자의 전류를 보상하여 도시한 그림 5에서 나타낸 바와 같이 플라즈마 입력전력에 따라서 일정한 압력조건에서 입력전력의 증가와 인출전압의 증가에 따라서 인출빔의 전류가 증가함을 볼 수 있다. 이것은 플라즈마 발생용기와



(a)

(b)

그림 5 입력전력에 따른 (a)이온 및 (b)전자 인출

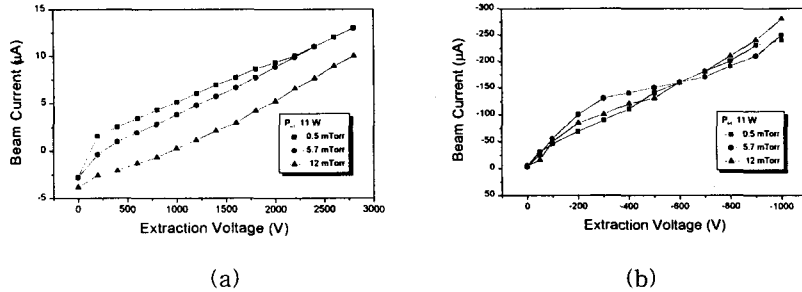


그림 6 진공용기의 압력에 따른 (a)이온 및 (b)전자 인출

빔인출부간의 차등배기가 이루어지지 못한 상태에서 수행된 모의 실험결과로써, 그림 6에서 나타난 압력의 변화에 따른 인출전류의 경향성을 통하여 분석하면, 중성입자에 의한 충돌영향으로 인하여 이온전류의 경우 전자전류에 비하여 낮은 값을 보여주고 있으나, 빔인출부의 압력조절에 의하여 중성입자와의 충돌원인을 제거함으로써 인출전류를 늘릴 수 있을 것으로 분석된다.

5. 결론

기존에 알려진 헬리콘 플라즈마의 발생법과는 달리 100 MHz의 높은 주파수에서도 헬리콘 플라즈마가 발생됨을 확인할 수 있었을 뿐만아니라, 수십 와트의 낮은 입력전압에서도 높은 밀도의 플라즈마를 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 높은 주파수, 낮은 입력전력의 조건에서의 고밀도 플라즈마의 발생에 대한 고찰은 아직은 충분하지 못하지만, 가속기의 대전류 이온원으로써 요구되는 소형화, 고밀도화, 저에미턴스화를 충족시킬 수 있다는 가능성을 확인할 수 있다. 헬리콘 플라즈마 이온원은 RF 안테나가 플라즈마 발생용기의 외부에 위치함으로 해서 아크방전이 지니는 필라멘트의 수명문제를 근원적으로 해결하여 지속적으로 안정된 운전을 수행할 수 있을 것으로 예상되며, 인출빔 특성분석을 통하여 플라즈마 발생용기와 빔인출계의 차등배기를 통하여 중성입자와의 충돌에 의한 빔전류의 감소현상을 개선함으로써 높은 이온전류를 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Boswell R W *Plasma Phys. Control. Fusion* **26** 1147 1984
- [2] Chen F F *Plasma Phys. Control. Fusion* **33** 339 1991
- [3] Shamrai K P, Taranov V B *Physics Lett. A* **204** 139 1995
- [4] Shoji et al *Plasma Source Sci. Technol.* **2** 5 1993
- [5] Hwang Y S, Hong I S, Eom G S *Rev. Sci. Instr.* **69** 1344 1998
- [6] Chen F F *Phys. Plasmas* **3** 1783 1996