

헬리콘 플라즈마의 전기적 특성

윤식민, 김정형, 서상훈, 장홍영.

한국과학기술원 물리학과, 플라즈마 연구실.

헬리콘 플라즈마 장치는 RF를 이용하는 플라즈마 장치로서 차세대 반도체 공정 장치로 주목을 받고 있는 장치이다. 헬리콘 플라즈마 장치의 장점은 비교적 낮은 자기장(약 200 G)과 낮은 RF 출력(약 1 kW)으로도 높은 플라즈마 밀도($\approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)를 얻을 수 있다는 것이다. Chen[1]은 헬리콘 플라즈마의 높은 밀도가 란다우 감쇄에 의한 높은 플라즈마 발생 효율에 기인한다고 주장했다.

헬리콘 플라즈마에 대한 특성 연구는 Boswell, Shoji, Chen 등에 의해서 활발히 진행되어 왔다. 이들의 연구 방향은 전자 밀도, 전자 온도, 이온 에너지 등 주로 플라즈마의 내부 변수들을 측정하는데 초점이 맞추어져 있었다. 이들의 연구 결과 헬리콘 플라즈마를 발생시키기 위해서는 어느 임계 자기장과 출력 이상이 필요하다는 사실이 알려졌다. 이 임계점 이하에서는 헬리콘 플라즈마가 발생되지 못하고 capacitive field가 우세한 low-mode 상태로 플라즈마가 존재한다는 사실이 알려져 있다.[2] 플라즈마 발생 효율은 low-mode일 때보다 헬리콘 모드일 때 훨씬 우세하다.[2]

헬리콘 플라즈마의 전기적 특성에 대한 유일한 데이터는 Boswell이 측정한 안테나 양단에 걸리는 전압의 측정값이다. 이 데이터에 의하면 low-mode에서 헬리콘 모드로 변할 때 안테나 양단에 걸리는 전압이 약 $\frac{2}{3}$ 정도로 감소한다.

이번 보고서에서는 입력출력(P) 및 안테나 양단에 걸리는 전압(V)과 전류(I)를 측정하고 이를 바탕으로 power factor($\cos \phi$) 및 플라즈마와 결합된 안테나의 저항(R)과 리액턴스(X) 그리고 출력 효율(η)을 다음 식에 따라 계산하였다. 여기에서 전압과 전류는 amplitude 값이고 입력출력은 root mean square 값이다.

$$P = \frac{1}{2} IV \cos \phi, \quad R = \frac{V}{I} \cos \phi, \quad X = \frac{V}{I} \sin \phi,$$

$$\eta = \frac{I^2(R - R_0)}{P} \quad (R_0 \text{는 안테나 자체의 저항})$$

자기장은 100-1000 Gauss, RF 출력은 100-900 W의 범위에서 실험하였다. 축전기로 구성된 전압 분류기를 이용하여 전압을, Rogowski 코일을 이용하여 전류를 측정하였고 동시에 전자 밀도를 측정하여 비교하였다. 한편 안테나의 길이를 변화시켜가며 플라즈마 발생효율을 비교하여 보았다.

실험 결과 고밀도의 플라즈마를 형성하는 헬리콘 모드와 capacitive electric field에 의해서 낮은 밀도의 플라즈마를 형성시키는 low-mode가 존재함을 확인하였다. 헬리콘 모드의 경우 안테나의 전압과 전류 값이 low-mode에 비해 낮았다. power factor가 low-mode에서 헬리콘 모드로 변할 때 갑자기 증가하였다. 이 때 플라즈마와 결합된 안테나의 저항과 전력 효율은 증가하였으며 리액턴스는 감소하였다. 이것은 low-mode에서 헬리콘 모드로 변할 때 안테나와 플라즈마와의 결합은 좋아지고 플라즈마로 입력되는 전력은 증가함을 의미한다. 한편 안테나의 길이에 따라 출력효율이 달라짐을 관찰

하였고 안테나 길이의 최적조건을 찾아내었다.

[1] F. F. Chen, Plasma Phys. Contr. Fusion vol 33, 339 (1991)

[2] A. J. Perry, D. Vender and R. W. Boswell, J. Vac. Sci. Technol. vol B9, 310 (1991)