

원통형 랑뮤어 프로브에서의 플라즈마 전위와 부유 전위의 플라즈마 밀도 의존성 연구

정진욱, 이원기
한양대학교 공과대학 전기공학과

Experimental investigation on the dependence of the difference between plasma potential and floating potential on plasma density in cylindrical Langmuir probes

ChinWook Chung, WonKi Lee
Dept. of Electrical Engineering, HanYang University, Seoul, Korea

Abstract - 최근 F. F. Chen에 의하면[F.F. Chen and D. Arnush, Phys. Plasmas, 8, 5051(2001)], 원통형 랑뮤어 탐침의 경우 플라즈마 전위와 부유 전위의 차 (ΔV_{pf}) 가 상수가 아니며 플라즈마 밀도에 따라 달라지고 밀도가 아주 높은 경우 즉 쉬스가 탐침의 반경보다 아주 얇은 경우에는 ΔV_{pf} 는 평면 탐침과 같이 상수가 된다는 것을 이론적으로 보였다. 이에 본 연구에서는 아르곤 유도 결합 플라즈마에서 원통형 랑뮤어 탐침을 사용하여 F. F. Chen의 이론적인 결과를 실험으로 검증하였으며 F.F. Chen의 이론적인 결과와 잘 일치하였다.

1. 서 론

플라즈마 변수를 측정하는 가장 일반적인 방법으로 랑뮤어 탐침이 사용되고 있다. 랑뮤어 탐침 중에서도 단일 랑뮤어 탐침의 경우 거의 모든 전기적인 플라즈마 변수들을 측정할 수 있어 가장 널리 사용되고 있다. 플라즈마 전위는 플라즈마 내의 전기장을 알 수 있는 양으로 이온이 가속되는 에너지와 관계되는 양이다. 일반적으로 플라즈마 전위와 부유(floating) 전위차는 부유 전극 또는 부유 벽으로 입사하는 이온이 얻게 되는 에너지가 되므로 플라즈마의 이온이 표면으로 입사할 때 가지는 에너지를 가늠할 수 있는 중요한 물리량이다.

평면 랑뮤어 탐침의 경우 플라즈마 전위와 부유 전위차는 전자 온도에만 비례하는 양으로 비례상수는 약 5.2이다[1]. 대부분의 경우 유한크기의 쉬스(sheath) 때문에 평면 탐침이라고 해도 무한 평면 프로브 이론을 적용할 수가 없고 큰 평면 탐침은 플라즈마에 섭동을 많이 줄 수 있기 때문에 원통형 탐침을 사용하게 된다. 원통형 탐침의 경우에도 플라즈마 전위와 부유 전위차를 앞의 평면 탐침과 동일한 경우로 생각하여 전자 온도에만 의존한다고 생각해 왔다.

2. 본 론

2.1 원통형 랑뮤어 탐침 이론

평면 탐침에서와 달리 원통형 탐침의 이온 전류 수집 면적은 쉬스의 반지름에 따라 달라지는데 쉬스 반지름은 밀도와 플라즈마 전위와 탐침전위 차에 의존하므로 사전에 알 수 없다. 따라서 부유 전위를 알기 위해서는 쉬스 모델을 세우고 수치적으로 풀어야 한다. 최근 F. F. Chen에 의해 원통형 탐침에서의 수정 Allen-Boyd-Reynolds(ABR) 이론이 만들어졌는데 다음과 같다[1].

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right) = J \eta^{-1/2} - \xi e^{-\eta} \quad (1)$$

여기에서 $\eta = eV/kT_e$ 과 $\xi = r/\lambda_D$ 로 정규화된(normalized) 전위와 정규화된 반경이며 λ_D 는 디바이 길이이다. 그리고 정규화된 이온 전류 J 는 다음과 같이 정의된다.

$$J = \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \frac{I_i}{n_0} \frac{1}{\lambda_D c_s} \quad (2)$$

c_s 는 이온의 붐(Bohm) 속도이다. 모르는 J 를 미리 가정하여 모든 ξ 에 대하여 적분하면 $\eta(J, \xi)$ 를 얻게 되고 따라서 J 값을 변화시키면 $J-\eta$ 곡선을 얻게 된다.

탐침이 부유 전위에 있을 조건은 다음과 같은데 가정된 J 에 대한 부유 탐침의 반경 ξ_b 는 탐침 표면에서 전자 전류와 이온전류를 같다고 하는 조건에서 구할 수 있다. 전자 전류는 다음과 같다.

$$I_e = 2\pi R_p n_0 v_u e^{-\eta} \quad (3)$$

식(3)을 식(4)에 대입하여 η_f 에 대해서 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\eta_f = \ln \left[\frac{\xi_b}{J} \left(\frac{M}{4\pi m} \right)^{1/2} \right] \quad (4)$$

식(1)을 적당히 적분하여 전위 분포인 $\eta = \eta(J, \xi)$ 를 구하고 식(4)와 연립하여 풀면 주어진 J 에 대한 η_f 과 ξ_b 를 구하게 되고 $\eta_f = \eta_f(\xi_b)$ 도 얻게 된다.

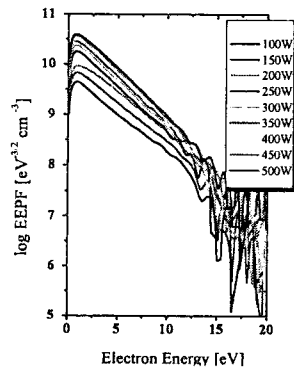


그림 1. 10mTorr 아르곤에서 파워에 따른 전자에너지 분포함수 변화.

2.2. 실험

1 tum 안테나를 사용하는 13.56 MHz의 유도 결합 플라즈마를 사용하였으며 가스는 아르곤이며 작동 압력은 10mTorr에서 수행하였다. 플라즈마 밀도와 온도는 단일 랑뮤어 탐침을 사용하여 측정된 전자 에너지 분포함수를 적분하여 구하였으며 플라즈마 전위와 부유 전위는 탐침의 I-V 곡선에서 구하였다[2]. 10mTorr 아르곤 압력에서 안테나에 인가하는 파워를 바꿔가면서 플라즈마 밀도와 온도 그리고 플라즈마 전위와 부유 전위를 측정하였다.

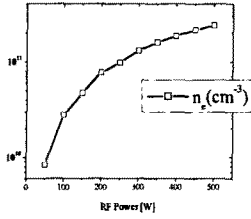


그림 2. 파워에 따른 플라즈마 밀도

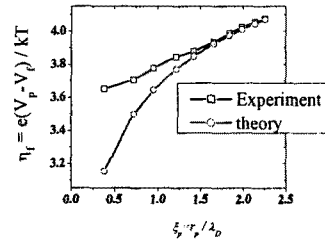


그림 3. 실험값과 이론값의 비교

2.2 실험결과

그림 1은 10mTorr 아르곤에서의 전자 에너지 분포함수를 입력 파워에 따라 나타낸 것이다. 여기서 전자 온도는 전자 에너지 분포함수의 기울기의 역수에 비례하는데 그림 1에서 보면 파워에 따라 전자 온도가 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 다단계 이온화에 의한 것으로 생각된다. 전체적으로 보면 전자에너지 분포함수는 아르곤의 이온화 에너지까지는 맥스웰 분포임이 알 수 있으며 그 이상 에너지에서는 전자 온도는 더 낮아지고 있음을 볼 수 있다. 밀도가 증가하면 즉 파워가 증가했을 때는 전자-전자 충돌에 의해 전자 에너지 분포함수가 이온화 이상 에너지에서나 그 이상 에너지에서나 거의 동일한 단일 온도를 갖는 전자 에너지 분포로 바뀌고 있음을 주목해야 할 것이다. 그림 2는 그림 1에서의 구한 전자 에너지 분포함수에서 구한 플라즈마 밀도를 나타낸 것인데 입력 RF 파워에 플라즈마 밀도가 거의 비례함을 알 수 있다.

그림 3에는 그림 1에서 구한 플라즈마 전위와 부유전위차를 전자 온도를 나눈 값과 Chen의 이론[1]으로 구한 값을 동시에 나타냈다. ξ_p 가 큰 경우 즉 밀도가 높은 경우는 실험값과 이론값이 거의 일치해가는 것을 알 수 있는데 이는 파워가 높을수록 전자 에너지 분포함수는 하나의 온도를 갖는 맥스웰 분포에 가까워지기 때문이다.

3. 결 론

원통형 램뮤어 탐침의 플라즈마 전위와 부유 전위의 차를 플라즈마 밀도에 대한 의존성을 실험으로 확인하였으며 플라즈마의 전자 에너지 분포함수가 맥스웰 분포에 가까워질수록 실험값이 이론값과 잘 일치하였다. 이는 이론이 맥스웰 분포를 가정하였기 때문이다.

[참 고 문 헌]

- [1] F.F.Chen and D. Arnush, "The floating potential of cylindrical Langmuir probe, Phys. Plasmas, 8, 5051,2001.
- [2] ChinWook Chung, S. S. Kim and H. Y. Chang, "Experimental measurement of the EEDF in radio frequency ECR inductive discharge", Phys. Rev. E, 69, 016406, 2004.