Journal of the Korean Vacuum Society
Vol. 5, No. 1, March 1996, pp. 85~92

헬리콘 플라즈마의 전기적 특성

윤석민 · 김정형 · 서상훈 · 장홍영

한국과학기술원 물리학과
(1995년 12월 7일 접수)

Electrical Characteristics of Helicon Wave plasmas

Seok-Min Yun, Jung-Hyung Kim, Sang-Hun Seo, and Hong-Young Chang

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701,Korea
(Received December 7, 1995)

요 약 – 7MH의 RF 주파수를 이용하여, 1 mTorr의 Ar 가스에서 발생시킨 헬리콘 플라즈마의 전기적 특성에 대하여 연구하였다. 자기장과 입력 전력을 바꾸어 가며 안테나의 전압과 전류 및 이 두 변수들간의 위상 차이를 측정하였으며, 동시에 전자 밀도를 측정하여 비교하였다. 이러한 값들로부터 플라즈마와 결합된 안테나의 저항(equivalent resistance), 리액턴스(equivalent reactance) 및 전력 효율을 계산하였다. 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. 전압과 전류의 위상 차이가 low-mode에서 헬리콘 모드로 변할 때 갑자기 감소하였다. 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.

Abstract – The external electrical characteristics of Helicon wave plasmas were measured over a wide range of RF power and magnetic field. External parameters, such as antenna voltage, current, phase shift, and internal parameter, electron density were measured at 7 MHz, 1 mTorr Ar discharge. The equivalent discharge resistance and reactance, and the power transfer efficiency were calculated through these measurements. There are a helicon mode which produces high density plasma by helicon wave and a low-mode which produces low density plasma by capacitive electric field. In case of the helicon mode, the antenna voltage and current were lower than those of the low-mode. The phase difference between voltage and current decreased suddenly at the transition point from the low-mode to the helicon mode. Equivalent resistance and power efficiency increased and reactance decreased suddenly at the transition point. These results mean that the power transferred to plasma and the mutual coupling between the antenna and plasma increase as the mode changes from the low-mode to the helicon mode.

1. 서 론

RF(Radio Frequency) 플라즈마 방전은 2가지 타입이 있다. 한가지 방법은 2개의 평행한 전극을 사용하는 Capacitively coupled discharge이고 다른 한가지 방법은 외부 안테나를 이용하는 Inductively coupled discharge이다. 고밀도의 플라즈마를 만드는 데에는 Capacitively coupled discharge보다 Inductively coupled discharge가 더 효과적이다. 이러한 Inductively coupled discharge 방법은 장비 특성에 따라 자기장을 걸어 주기도 하는 데, 헬리콘 플라즈마 발생 장치는 바로 이러한 장치 중의 하나이다. 헬리콘 플라즈마의 이론에 대한 연구는 1960년대부터 실행되어 왔다[1]. 처음으로 헬리콘 플라즈마를 실험적으로 발생시키고 그에 대한 연구를 행한 사람은 Boswell인데 그는 헬리콘 플라즈마가 다른 플라즈마원에 비해 매우 효율이 좋다는 사실을 밝혀 냈으며 그후 헬리

콘 플라즈마는 많은 분야에 응용되어 왔다[2-5]. 플라즈마 내에서 헬리콘파의 전파와 흡수에 관한 이론은 Chen이 제안하였는데, 그는 헬리콘 플라즈마원에서 헬리콘파 에너지의 높은 흡수율은 파와 전자간의 반응인 Landau damping에 의한 흡수에 기인한 것이라고 제안하였다[6-9]. 헬리콘파는 RF 안테나에서 발생되어 자기장 축을 따라 전파되면서 흡수된다.

헬리콘파의 플라즈마 특성들, 예를 들면 전자 온도나 밀도 또는 플라즈마 전위 등에 관한 연구는 많이 행해져 왔다[10-12]. 지금까지의 연구 결과 헬리콘 플라즈마의 특징은 매우 높은 이온화율과 그에 따른 높은 전자 밀도(약 $10^{13}cm^{-3}$) 그리고 상대적으로 낮은 전자 온도(약 5 eV)이다. 한편 헬리콘 플라즈마에서 헬리콘 모드는 임계 전력이나 임계 자기장 이상에서만 발생된다는 사실이 알려져 있다[8, 13]. 임계 자기장이나 출력 이하에서는 capacitive field가 지배적인 low-mode가 되는데 이 low-mode는 electrostatic 방전과 비슷한 특징을 갖는다[4].

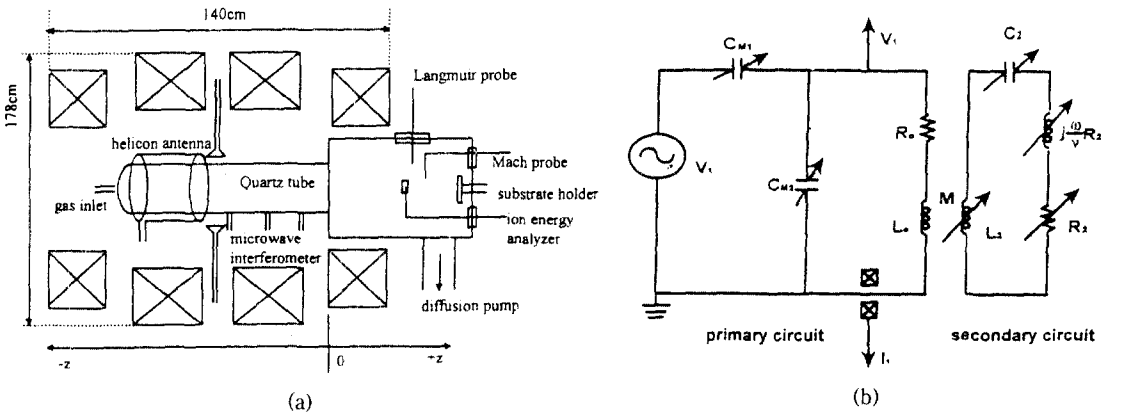
위와 같이 헬리콘 플라즈마의 플라즈마 변수에 관한 연구는 많이 되어 왔으나 헬리콘 플라즈마의 전기적 특성, 예를 들면 RF 출력을 플라즈마에 전달시켜 주는 안테나 양단에 걸리는 전압이나 여기에 흐르는 전류에 관한 연구 등은 아직 보고된 바가 거의 없다. 헬리콘 플라즈마의 전기적 특징 중 유일하게 알려진 것은 Boswell이 측정한 헬리콘 플라즈마 안테나 양단에 걸리는 전압을 측정한 데이터이다. 이 데이터에 의하면 헬리콘 플라즈마 장치에서 플라즈마 발생시 low-mode에서 헬리콘 모드로 변할 때 안테나 양단에 걸리는 전압이 약 $\frac{2}{3}$ 정도로 떨어진다. 한편 다른 RF 플라즈마 장치들, 다시 말에서 평행판 discharge나 inductive discharge의 경우에는 이들 플라즈마의 전기적 특성을 조사해 놓은 논문들이 있다[14-17].

이 연구에서는 헬리콘 플라즈마에서 안테나 양단에 걸리는 전압과 흐르는 전류 및 이들간의 위상 차를 측정하였다. 7MHz의 RF 전력을 100W에서 700W까지 플라즈마에 입력하였으며 압력은 1.0 mTorr를 유지하며 실험하였다. 자기장은 180 G에서 1100 G까지 변화시켜 가며 실험하였다. 입력 전력 및 자기장에 따라 전압과 전류를 측정하여 power factor를 계산하였으며, 또한 전압과 전류의 위상 차를 측정하여 power factor를 계산하여 앞의 값과 비교하여 보았다. 측정된 전압과 전류를 이용하여 플라즈마와 결합된 안테나의 저항과 리액턴스를 구하였으며 이를 바탕으로 플라즈마와 안테나간의 결합에 대해서 연구하였다.

2. 실험 장치

헬리콘 장비의 개략도를 그림 1(a)에 나타내었다. 7 MHz의 RF 출력이 출력장치로부터 matching network를 지나 Nagoya type III 안테나에 연속적으로 인가된다. 보통 RF 플라즈마 발생 실험은 13.56 MHz의 주파수에서 하는 것이 보통이나 7 MHz의 낮은 주파수에서 실험한 이유는 이 정도의 주파수에서 low-mode에서 헬리콘 모드로의 모드 변환을 뚜렷이 관찰할 수 있었기 때문이다. 안테나는 직경 10 cm의 석영 튜브 주위에 장착되어 있는데, 이 안테나로부터 m = 1 모드의 헬리콘파가 발생되어 플라즈마로 흡수되게 된다. 석영 튜브는 직경 30 cm의 stainless steel chamber에 연결되어 있고 이 chamber에 diffusion pump와 rotary pump가 연결되어 있다. 4개의 전자석 코일은 그림 1(a)에 나타낸 것과 같은 크기를 갖는다. 이 자석에 의한 자기장은 직경 30 cm, 길이 70 cm 인 부피에서 0.1% 이내로 균일하며 최대 1500 gauss의 세기를 낼 수 있다.

RF 출력장치는 ENI 제품을 사용하였는데 (Model A1000 RF Amplifier) 최대 1 kW 까지 출력을 낼 수 있다. 출력장치에서 출력된 전력은 matching network를 지나 안테나에 인가되고 안테나와 플라즈마와의 결합에 의해서 플라즈마에 RF 출력이 전달되게 된다. 이것의 등가 회로를 그림 1(b)에 나타내었다. matching network에서의 손실을 최소화하기 위하여 matching network는 두 개의 capacitor만으로 구성하였는데 C_{M1}과 C_{M2}가 바로 그것이다. C_{M2}는 tunning capacitor를 나타내고 12-500 pF까지 변환되는 variable vacuum capacitor이며 C_{M1}은 loading capacitor를 나타내고 7-1000 pF까지 변환되는 variable vacuum capacitor 이다. 안테나는 전기 전도도를 좋게 하기 위하여



(a) (b)

그림 1. (a) 헬리콘 플라즈마 장치의 단면도, (b) rf 출력 장치 및 안테나와 플라즈마의 등가회로. primary circuit의 C_{M1}과 C_{M2}는 matching network이고 Ro 및 L_a는 안테나의 resistance 및 impedance를 의미한다. 여기에서 secondary circuit 부분은 플라즈마를 나타낸다.

구리판 위에 은 박막을 입혀 만들었으며, 그림 1(b)의 R_a와L_a로 표시된다. R_a는 7MHz에서 0.3 Ω 이고 L_a는 1.9 μH이다. 플라즈마 discharge 부분은 그림 1(b)의 secondary circuit에 해당한다. 플라즈마의 저항은 R_2, 플라즈마의 capacitance 성분은 C_2로 나타내었다. 플라즈마의 인덕턴스 L_2'은 2부분으로 나눌 수 있는데, 전자의 관성에 의한 인덕턴스는 $j\frac{w}{v}R_2$로 나타내었고 discharge current path에 의한 magnetic inductance는 L_2로 나타내었다. L_2는 상호 유도 계수 M을 통해 L_a와 결합된다.

안테나의 전압과 전류를 측정하기 위하여 전압 분류기와 Rogowski coil을 제작, 측정하였다. 이것들이 장치된 위치는 그림 1(b) primary circuit에 화살표로 나타나 있다. 전압 분류기와 Rogowski coil에서부터 나온 신호는 디지털 오실로스코프 (Model HP 54520A)를 통해서 peak-to-peak값을 각각 읽었으며, 또한 이 두 값의 위상 차를 측정하였다. 한편 RF 출력장치로부터 플라즈마와 결합된 안테나로 전달되는 전력을 측정하기 위하여 RF 출력과 matching network 사이의 power meter를 이용하여 forward power와 reflected power를 측정하였다. 이 때 측정된 전력은 rms(root mean square) 값이며 $\frac{P_{forward}}{P_{reflected}} < 0.1$가 되도록 matching을 맞추었다. matching network는 두 개의 capacitor로만 구성되어 있기 때문에 이 곳에서의 전력 흡수는 무시할 수 있다. 따라서 power meter로 읽은 forward power와 플라즈마를 발생시키는 discharge power는 같다고 가정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

모든 실험은 1.0 mTorr의 압력에서 행하였다.

그림 (2)는 자기장을 600 gauss로 고정시켜 놓고 forward power(P_f)를 바꾸어 가며 전자 밀도 측정한 것이다. 전자 밀도는 랑뮤어 탐침을 이용하여 측정하였다. 탐침의 측정 위치는 z = 28 cm이고 r = 2 cm이다. P_f = 300 W 근처에서 갑작스런 플라즈마 밀도의 증가가 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 P_f = 300 W 부근에서 매칭조건이 갑자기 변한 것으로 보아 임계 전력 300 W를 기준으로 그 미만에서는 low-mode가 그 이상에서는 헬리콘 모드가 존재하는 것으로 여겨진다. 헬리콘 플라즈마는 임계 전력과 자기장 이상에서만 발생하는데, 그 이유는 헬리콘 플라즈마는 전자 밀도가 충분히 높을 때에만 발생하기 때문이다. 헬리콘 플라즈마가 발생하면 전자 밀도(n_e), 자기장(B_o), 튜브반경(a), 그리고 주파수(ω는 다음 관계식을 만족한다[6].

$$\frac{B_o}{n_e} = \frac{e\mu_o a}{3.83} \times \frac{\omega}{k} \qquad (1)$$

여기에서 e는 기본전하량으로 1.6×10^{-19}C, μ_o는 투과상수이며 1.26×10^{-6} H/m 그리고 k는 $2\pi/\lambda$

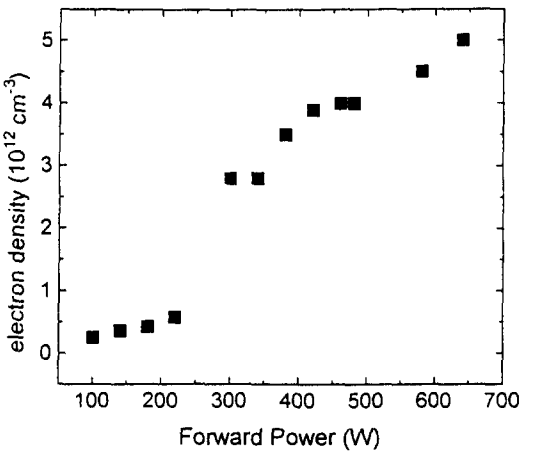


그림 2. B_o = 600 G에서 forward power에 따른 전자 밀도. 1 mTorr의 Ar 가스에서 실험. 약 300 W 근처에서 갑작스런 전자 밀도의 증가를 볼 수 있다.

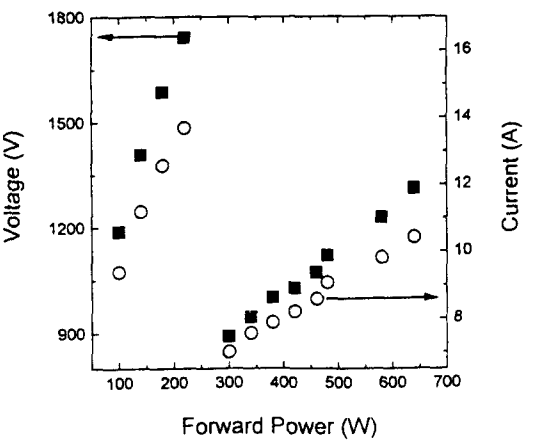


그림 3. B_o = 600 G에서 forward power에 따른 안테나의 전압(채워진 네모)과 저항(빈 원).

(λ는 헬리콘 파의 파장)이다.

어느 임계 전력 이상에서만 헬리콘 모드가 존재한다는 사실은 Chen[8]과 Shoji[13] 등이 보고한 바 있다. 임계 전력 이하의 영역은 capacitive field가 지배적인 low-mode 상태로 플라즈마가 존재하는데, low-mode는 electrostatic 방전과 비슷한 현상을 나타낸다고 보고된 바 있다[4, 12]. 그림 (3)은 같은 조건에서 안테나의 전압과 전류를 측정한 것이다. RF 출력을 증가시킴에 따라 임계 전력 300W 근처에서 전압과 전류가 급격히 감소하는 것을 알 수 있

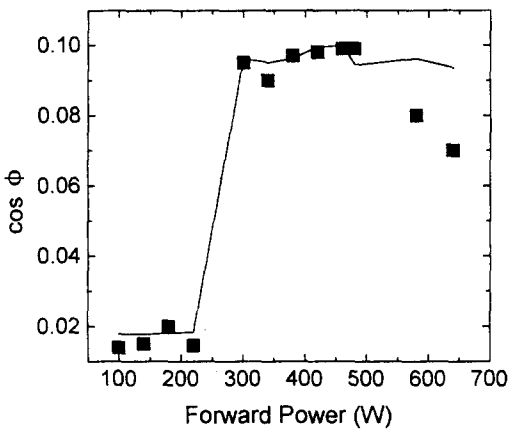


그림 4. B_o = 600 G에서 forward power에 따른 power factor.

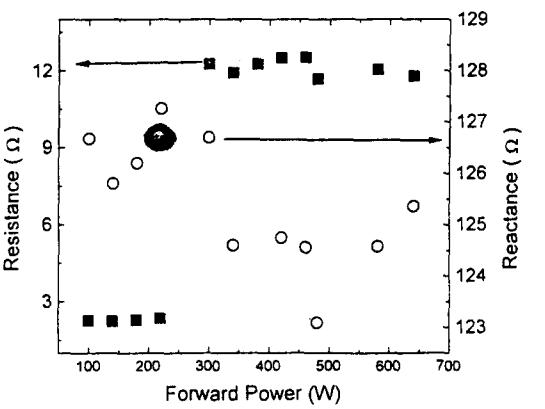


그림 5. B_o = 600 G에서 forward power에 따른 플라즈마와 결합된 안테나의 resistance(채워진 네모) 및 reactance(빈 원).

다. 그림 (4)의 실선으로 표시된 데이터는 아래의 식 (1)을 이용해 그림 (2)의 측정값들로부터 power factor(cos ϕ)를 계산한 것이다.

$$P = \frac{1}{2} IV\cos\phi \qquad (2)$$

(여기에서 I와 V는 각각 측정된 전류와 전압을 나타내며, P는 forward power를 나타낸다).

그리고 그림 (4)의 점으로 표시된 데이터는 전압과 전류의 위상차(ϕ)를 오실로스프로 측정하여 power factor(ϕ)를 계산한 것이다. 임계 전력을 지나면서 전압과 전류의 위상 차이는 약 88.8°에서 약 84.8°로 갑자기 감소하였다. 결과적으로 그림

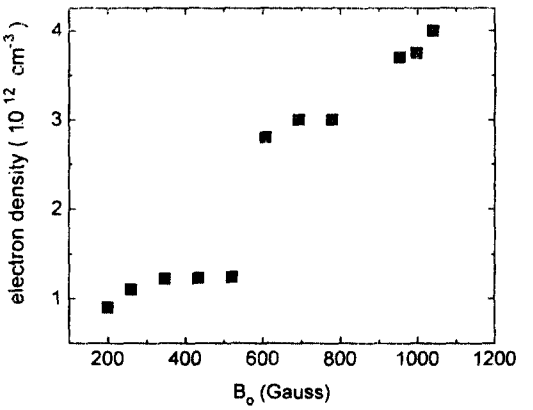


그림 6. forward power = 300 W에서 자기장에 따른 전자 밀도. 1 mTorr의 Ar 가스에서 실험.

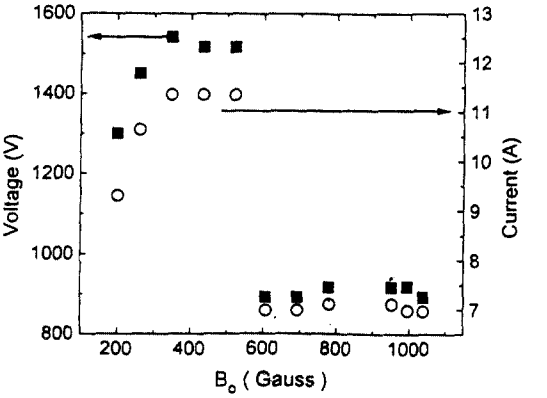


그림 7. forward power = 300 W에서 자기장에 따른 안테나의 전압(채워진 네모)과 전류(빈 원).

(4)에 나타낸 것과 같이 power factor가 임계 전력 근처에서 갑자기 증가하게 된다. 한편 플라즈마와 결합된 안테나의 저항과 리액턴스는 다음 식으로 표현되는데, 이 두 식을 이용하여 플라즈마와 결합된 안테나의 저항과 리액턴스를 forward power에 따라 계산하여 그림 (5)에 나타내었다.

$$R = \frac{V}{I}\cos\phi(\text{저항}) \qquad (3)$$

$$X = \frac{V}{I}\sin\phi(\text{리액턴스}) \qquad (4)$$

저항은 임계 전력에서 갑자기 증가함을 보이고 있고 리액턴스는 임계 전력에서 갑자기 감소함을 보이고 있다. 안테나 자체의 저항 R_0는 입력 전력에 관계없이 일정하므로 플라즈마와 결합된 안테나의 저항이 증가한다는 사실은 플라즈마로 전달되는 전력이 증가한다는 것을 말해 준다. 한편 안테나 자체의 리액턴스 역시 일정하므로 플라즈마와 결합된 안테나의 리액턴스가 감소한다는 사실은 플라즈마와 안테나간의 상호 결합이 더욱 좋아진다는 사실을 나타낸다.

다음으로 P_f = 300 W로 고정시켜 놓고 자기장을 180 gauss에서 1100 gauss까지 바꾸어 가며 같은 실험을 하였다. 그림 (6)은 자기장 (B_0)에 따라 전자 밀도를 측정한 것이다. 이것을 식 (1)과 비교하여 보면, $B_0 < 600$ gauss 범위에서는 플라즈마 밀도가 너무 낮아서 헬리콘 파의 분산식을 만족하지 못하는 반면 B_0가 600 gauss가 되는 지점부터 헬리콘 파의 분산식을 만족시키고 있음을 알 수 있다. B_0가 600 gauss지점에서부터 전자 밀도가 갑자기 증가한다는 사실에서 이 곳이 low-mode에서 헬리콘 모드로 변환되는 지점인 것을 알 수 있다. 이때 forward power를 400 W 정도로 놓으면 임계 자기장은 300 gauss정도로 낮아진다. 그림 (7)은 자기장에 따라 안테나의 전압과 전류를 측정한 것이다. 400-600 gauss 의 영역은 capacitive field가 지배적인 low-mode의 영역이며, 600 gauss이상은 헬리콘 모드인 것을 알 수 있다. low-mode에서 헬리콘 모드로 변함에 따라 전압과 전류가 급격히 감소함을 알 수 있다. low-mode에서 보다 자기장을 더 낮추어 200 gauss 정도의 낮은 자기장 영역으로 가면 전압과 전류가 감소하는 것을 알 수 있는 데 이곳부터 Helicon-ECR 모드로 전환되는 것으로 생각된다. 실제로 자기장을 100 gauss 정도로 낮춤에 따라 ECR 모드의 영향으로 전자 밀도가 약간 증가하는 것을 관찰하였다. 헬리콘-ECR 모드에 대한 가능성은 Chen 이 제시하였는데, 그의 이론에 의하면 $\omega = \omega_c k_{\parallel}/k$일 때 헬리콘-ECR 모드가 존재하게 된다[8]. 여기에서 $k_{\parallel} = \pi/L_a$(L_a는 안테나 길이) 이고 $k_{\perp} \approx k \approx 3.83/a$이다. 이와같은 관계를 이용하여 7 MHz일 때 헬리콘-ECR 모드가 일어날 수 있는 자기장을 계산해보면, 약 40 gauss 정도가 나오는 데 실제 실험에서는 계산된 자기장보다 더 큰 자기장에서 헬리콘-ECR 모드가 관찰된다는 보고들이 있다. 그 이유는 헬리콘 안테나가 발생시킬 수 있는 헬리콘 파의 파장이 여러 값을 가질 수 있

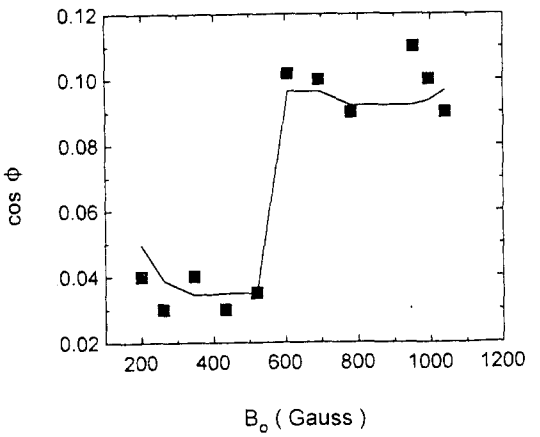


그림 8. forward power = 300 W에서 자기장에 따른 power factor.

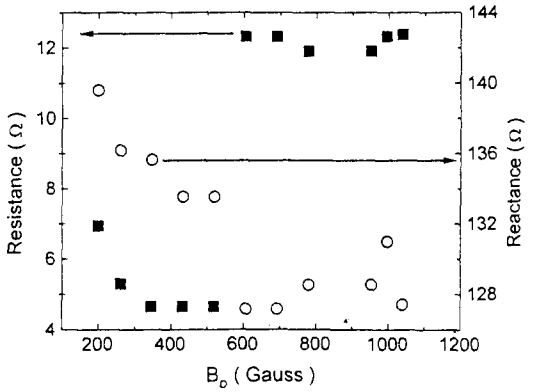


그림 9. forward power = 300 W에서 자기장에 따른 플라즈마와 결합된 안테나의 resistance(채워진 네모) 및 reactance(빈 원).

다는 사실과 도플러 효과가 고밀도 플라즈마에서는 두드러지게 나타난다는 사실에 기인한다[9].

그림 (8)의 실선 데이터는 식 (1)을 이용하여 power factor(cosϕ)를 계산한 것이며, 점으로 표시한 데이터는 전압과 전류의 위상 차를 직접 측정하여 power factor를 계산한 것이다. 임계 자기장을 지나면서 이 값이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 플라즈마와 결합된 안테나의 자기장에 따른 저항과 리액턴스를 계산하여 그림 (9)에 나타내었다. 저항은 임계 자기장에서 갑자기 증가하고 리액턴스는 감소함을 알 수 있다. 안테나 자체의 저항과 리액턴스는 자기장에 관계없이 일정하므로 플라즈마와 결합된 안테나의 저항이 증가한다는 사실은 플라즈마로 전달되는 전력이 증가한다는 사실을 말해 주며, 플라즈마와 결합된 안테나의 리액턴스가 감소한다는 사실은 플라즈마와 안테나간에 상호 결합이 더욱 좋아진다는 것을 의미한다[18].

플라즈마에 흡수된 전력을 P_2라고 정의하면 P_2는 다음 식으로 표시된다[18].

$$P_2 = I^2(R - R_o) \tag{5}$$

여기에서 R과 I는 플라즈마와 결합된 안테나의 저항 값과 안테나에 흐르는 전류를 나타내고 R_o는 안테나 자체의 저항을 나타낸다. 한편 플라즈마와 결합된 안테나에 입력되는 전력을 P로 나타내면, 전력 효율(η)은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\eta = \frac{P_2}{P} \tag{6}$$

위에서 측정한 전류(I)와 저항(R)을 바탕으로 forward power에 대한 전력 효율을 계산하여 그림 (10)에 나타내었다. 임계 전력에서 이 값이 갑자기 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 자기장에 따른 전력 효율을 그림 (11)에 나타내었다. 임계 자기장 근처에서 이 값이 갑자기 증가함을 알 수 있다. 임계 자기장인 600 gauss 미만에서는 이 값이 갑자기 줄어들었다가 200 gauss 근처에서는 다시 늘어나는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 앞에서도 언급한 것과 같이 ECR 모드의 영향 때문인 것으로 보인다. 한편 우리 실험 장치에서 기존에 측정된 전자 밀도(약 5eV)와 아르곤에 대한 전자와-원자간의 산란 단면적을 이용하여 전자-원자간의 충돌주파수(ν_{en})를 계산해 보면 1 mTorr에서 $\nu_{en} \approx 2.2\times 10^5\ s^{-1}$의 값을 갖는다. 충돌 가열 방식의 경우 전력 효율 η는 다음 식으로 표시될 수 있는 데[18]:

$$\eta \le \eta_{max} = \left(1 + \left(\frac{4}{\nu_{en}}\frac{R_0}{L_o}\right)\right)^{-1} = 0.24 \tag{7}$$

이 식에 의하면 우리 시스템에서 실험적으로 구한 η가 충돌 가열 방식을 가정하고 구한 η보다 훨씬 큰 값을 갖는다는 사실을 알 수 있다. 따라서 헬리콘 플라즈마에서는 충돌 가열 방식 외에 비충돌 가열 방식이 있어, ν_{eff}(effective electron-atom

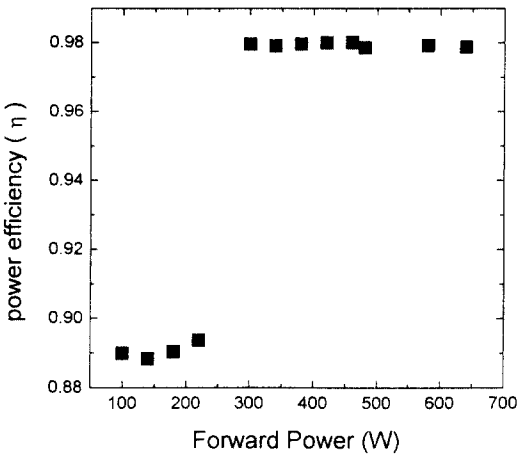


그림 10. B_o = 600 G에서 forward power에 따른 전력 효율.

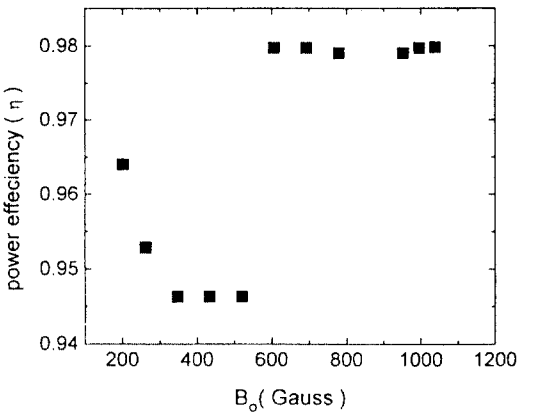


그림 11. forward power = 300 W에서 자기장에 따른 전력 효율.

collision frequency) > ν_{en}이 되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

헬리콘 파를 이용하여 고밀도의 플라즈마를 생성하고 이의 전기적 특성에 대하여 연구하였다. 실험 결과 임계 전력과 임계 자기장이 존재하여 그 이하에서는 capacitive field가 지배적인 low-mode가 존재하고 그 이상에서는 헬리콘 모드가 존재한다는 사실을 확인하였다. 이 두 모드에 대해서 안테나의 전압과 전류를 측정, 비교하였다. 헬리콘 모드에서는 low-mode에 비해서 상대적으로 전압과 전류 값이 낮았다. 한편 전압과 전류의 위상 차이를 측정하여 power factor를 계산하였다. 보통, inductive plasma discharge의 경우 전압과 전류의 위상 차이는 약 87°정도를 갖는다고 알려져 있다. 헬리콘 플라즈마의 경우에도 이와 비슷한 값이 관찰되었다. 오실로스코프에서 읽은 전압과 전류의 위상 차이는 low-mode에서 헬리콘 모드로 변할 때 약 88.8°에서 약 84.8°로 감소하였다. 따라서 power factor가 low-mode에서 헬리콘 모드로 변할 때 급격히 증가하게 된다. 이렇게 구한 power factor와 식 (1)을 이용해서 구한 power factor를 비교하여 보았는데 잘 맞는 결과가 나왔다.

측정한 전압과 전류 값을 이용하여 플라즈마와 결합된 안테나의 저항과 리액턴스를 계산하였다. 임계 자기장 및 임계 전력을 지나면서 저항은 갑자기 증가하는 경향을 보였고 리액턴스는 갑자기 감소하는 경향을 보였다. 안테나 자체의 저항과 리액턴스는 입력 출력이나 자기장과는 무관하므로 저항의 증가는 플라즈마로 입력되어지는 전력의 증가를 의미하고 리액턴스의 감소는 플라즈마와 안테나 사이의 결합이 좋아짐을 의미한다. 다시 말해서 low-mode에서 보다 헬리콘 모드일 때 플라즈마로 전달되어지는 전력은 증가하고 결합 또한 좋아짐을 알 수 있다.

전력 효율을 $\frac{P_2}{P} = \frac{I^2(R-R_o)}{P}$와 같이 정의하여 low-mode일 때와 헬리콘 모드일 때의 값을 비교하였다. low-mode에서 헬리콘 모드로 변할 때 이 값이 갑자기 증가함을 알 수 있었다. 측정된 전력 효율과 충돌 가열 방식을 가정하고 구한 전력 효율을 비교해 보면 측정된 전력 효율이 훨씬 큰 값을 갖는 것을 알 수 있는 데, 이로 미루어 보아 헬리콘 플라즈마의 경우, 충돌 가열 방식보다 훨씬 효과적인 가열 방식이 있다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국전자통신연구소의 연구비 지원으로 이루어 졌으므로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. J. P. Klozenberg, B. Mcnamara and P. C.

Thonemann, J. Fluid. Mech **21**, 545 (1965).
2. R. W. Boswell, Phys. Lett. **33A**, 457 (1970).
3. R. W. Boswell, Plasma Phys. Contr. Fusion **26**, 1147 (1984).
4. A. J. Perry, D. Vender and R. W. Boswell, J. Vac. Sci. Technol. **B9**, 310 (1991).
5. A. J. Perry and R. W. Boswell, Appl. Phys. Lett. **55**, 148 (1989).
6. F. F. Chen, Plasma Phys. Contr. Fusion **33**, 339 (1991).
7. F. F. Chen, Plasma Sources Sci. Technol. **3**, 49 (1994).
8. F. F. Chen, J. Vac. Sci. Technol, **A10**, 1389 (1992).
9. F. F. Chen and C. D. Decker, Plasma Phys. Contr. Fusion **34**, 635 (1992).
10. A. Komori, T. Shoji, K. Miyamoto, J. Kawai and Y. Kawai, Phys,. Fluids. **B3**, 893 (1991).
11. 김정형, 송선규, 장홍영. 응용물리 **7**, 59 (1994).
12. 김정형, 서상훈, 장홍영. 한국진공학회지. **4**, 201 (1995).
13. T. Shoji, Y. Sakawa, S. Nakazawa, K. Kadota and T. Sato, Plasma Sources Sci. Technol. **2**, 5 (1993).
14. Valery A. Godyak, Robert B.Piejak, and Benjamin M. Alexandrovich, IEEE Transactions on plasma science, **19**, 660 (1991).
15. Piejak R B, Godyak V A and Alexandrovich B M Plasma Sources Sci, Instrum. **61**, 2401 (1992).
16. Godyak V A, Piejak R B and Alexandrovich B M, Rev. Sci. Instrum. **61**, 2401 (1990).
17. Godyak V A and Piejak R B 1990 J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 3833 (1990).
18. Godyak V A, R B Piejak and B M Alexandrovich, Plasma Sources Sci. Technol. **3**, 169 (1994).
19. B. M. Harvey and C. N. Lashmore-Davies, Phys. Fluids, **B5**, 3864 (1993).