

평판형유도결합플라즈마의 임피던스특성 측정 및 수치해석

양일동\*, 이호준, 황기웅  
 서울대학교 전기공학과

Measurement and Numerical Analysis of  
 Impedance Characteristics of Planar ICP

Il-Dong Yang\*, Ho-Joon Lee, Ki-Woong Whang  
 Electrical Engineering Department, Seoul National University.

Abstract

The impedance characteristics of planar ICP have been measured and compared with the theoretical results obtained by the field equation. The resistance of the total impedance had a maximum point and the inductance decreased monotonically as the electron density increased from  $2.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$  to  $7 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$  and the pressure from 1mT to 50mT. The impedance characteristics were also dependent on the profile of the electron density. The effective collision frequency,  $\nu_{\text{eff}}$  was  $9.0 \times 10^6 \text{Hz}$  at 5mT and  $1.5 \times 10^7 \text{Hz}$  at 100mT. The effective collision frequency at 5mT was not so different from that at 100mT and it is due to the reduction of the discharge channel cross-section at high pressure. The estimated effective collision frequency from the simulation data was of the same order as the measured one.

1. 서론

ICP(Inductively Coupled Plasma)에서는 그림 1-a)와 같이 코일과 플라즈마가 자장을 통하여 상호유도결합되고 플라즈마는 RF회로의 부하로 작용하는데 이 부하는 플라즈마의 밀도와 온도, 밀도의 공간적 분포 등에 따라 변한다. 코일에 흐르는 전류와 전압을 측정하므로써 코일과 플라즈마를 포함한 전체 임피던스를 구할 수 있는데 전체 임피던스는 코일의 구조와 플라즈마변수에 의해 결정된다.

ICP는 그림 1-b)와 같이 코일이 변압기의 1차 코일로 작용하고 플라즈마가 변압기의 2차 코일로 작용하는 공심변압기로 동작할 수 있다. 인덕턴스  $L_2'$ 은 전자의 관성에 의한 인덕턴스  $L_e$ 와 전류경로에 의한 기하적 인덕턴스  $L_2$ 로 구성된다.  $L_2$ 는 상호인덕턴스  $M$ 으로 1차코일과 유도적으로 결합되고  $L_e$ 는 플라즈마 부하임피던스의 허수부로  $L_e = R_2/\omega$ 로 주어진다.

Solenoid 형태의 ICP에서는 축방향의 자장만 존재한다 가정하고 반경방향의 밀도 profile을 2차함수나 Bessel함수로 가정하여 반경방향에 대한 field equation을 풀어 외부에서 측정된 거시적 변수(V, I)와 플라즈마변수(Ne, Te, ve, density profile)와의 관계를 구할 수 있다. [1, 2, 3] 이 때 결합계수 k를 구하는 것이 중요한데 solenoid type ICP의

경우에는 geometry가 비교적 단순하기 때문에 k를 간단한 형태로 가정하여 외부변수와 플라즈마변수의 관계를 구할 수 있으나 planar type ICP의 경우에는 단순한 해석적 모델을 구하기가 어렵다.

본논문에서는 planar type ICP의 임피던스특성을 power, 압력의 변화에 따라 측정하고 수치해석으로 밀도와 압력, 밀도 profile 등에 따른 임피던스특성을 계산하여 실험결과와 비교하였다.

2. Planar ICP의 임피던스특성 측정

그림 1-c)는 코일과 플라즈마를 포함한 총임피던스와 matching network의 회로도이다.

부하에 걸리는  $V, I$ 와  $\cos\phi$ 를 측정하면  $R = Z\cos\phi$  과  $X = Z\sin\phi$  ( $Z = V/I$ ) 식을 이용하여 전체부하의 저항과 인덕턴스 성분을 구할 수 있다. 그러나, 본 실험에서는 matching 상태에서  $C_1$ 과  $C_2$ 의 값을 구한 후 식(1)과 식(2)을 이용하여 전체부하의 임피던스를 계산하는 방법을 사용하였다. 이 실험을 위하여 matching box는 capacitor의 위치를 표시할 수 있도록 제작되었다. 부하의 저항과 인덕턴스는 다음식으로부터 구할 수 있다.

$$R = \frac{R_0 C_1^2}{(C_1 + C_2)^2 + (\omega R_0 C_1 C_2)^2} \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 C_2} \left[ 1 - \frac{C_1(C_1 + C_2)}{(C_1 + C_2)^2 + (\omega R_0 C_1 C_2)^2} \right] \quad (2)$$

실험조건에서  $C_1$ 은 15pF에서 23.62pF까지 주로 power가 변하였고  $C_2$ 는 66.13pF에서 68.11pF까지(4회 코일) 주로 압력에 따라 변하였다.

위의 방법으로 구한 R, L값의 입력전력과 압력에 따른 변화를 그림 2-a)와 그림 2-b)에 도시하였다. 입력전력(power)이나 압력이 증가하면 R값은 증가하고 L값은 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다. L값은 큰 변화가 없으므로, R값이 증가하면  $Q(\omega/LR)$ 값이 줄어들어 matching 범위가 더 넓어지고 안정되어 진다. 그림 2-c)는 100mT에서의 power에 따른 임피던스 특성을 도시한 것이다. Power가 증가함에 따라 R값이 증가하다 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. R값이 최대가 될 때 전력전달효율이 최대가 되는 데 이것은 유도성결합플라즈마의 일반적인 전력전달특성이다.

플라즈마를 켜지 않은 상태에서 matching조건으로부터 코일의 임피던스를 측정하였다. 측정된 코일의 저항과 인덕턴스는 각각 0.36Ω과 2.05μH이었다. 측정한 코일의 저항값과 그림 2에 도시된 저항값을 이용하여 전력전달효율을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\eta_p = (R - R_c)/R = 1 - R_c/R \quad (3)$$

위의 식으로 구한 전력전달효율은 전력과 압력의 변화에 따라 80-90%정도 변화하였다. 이것은 코일과 matching 회로에서 10-20%정도의 전력이 소모된 것을 의미하는데 전력전달 효율을 더 높이기 위해서는 코일과, matching회로에서 capacitor간을 연결하기 위해 사용하는 도선으로 전도성이 우수한 재료를 사용해야 한다. 본 실험에서는 무산소동을 사용하였는데, RF전류는 skin effect에 의해 도체의 표면에만 흐르므로 표면이 온도급된 도선을 사용하면 전력전달효율을 더 높일 수 있다.

플라즈마가 켜져 있지 않은 상태에서는 코일주변에 있는 요소들이 부하로써 작용하기 때문에 위의 측정된 저항값과 인덕턴스값에는 이러한 오차가 포함될 수 있다.

### 3. 수치해석을 이용한 Planar ICP의 임피던스특성분석

Planar ICP의 경우에는 간단한 해석적 모델을 구하기 어렵기 때문에 수치해석을 이용하여 Planar ICP의 임피던스특성을 해석하였다. 플라즈마를 complex conductivity  $\sigma$  를 갖는 도체로 보고 전기장은  $E_0$  성분만 존재한다고 가정하면 풀어야 할 Maxwell 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\nabla^2 \vec{E}_1 - j\omega^2 \vec{E}_1 = j\omega^2 \vec{E}_0 \quad (4)$$

$$(a^2 = \sigma/\mu\omega)$$

$$\sigma = \frac{N_0 f(r,z) e^2}{m_e} \frac{1}{v_m + j\omega} \quad (5)$$

$$f(r,z) = (1 - (r/R_0)^{sr})^{tr} \times (1 - |z/\sqrt{2}|^{sz})^{tz} \quad (6)$$

여기서  $E_0$ 는 코일에 의해서 발생하는 전기장이고  $E_1$ 은 플라즈마나 챔버벽의 반응에 의해 생기는 전기장의 세기이다. 전체 전기장의 세기는  $E = E_0 + E_1$ 으로 주어진다.  $E_0$ 는 elliptic integral의 근사식으로 구한 벡터포텐셜 A로부터 계산하고 식(4)를 FDM을 사용하여 풀었다. 코일과 챔버는 모두 완전도체라 가정하였다. 플라즈마의 도전성은 식(5)로 주어지는데 여기에서  $N_0$ 는 해석영역중심에서의 전자밀도이고  $f(r,z)$ 는 밀도profile함수로 식(6)으로 주어진다. sr, tr, sz, tz는 밀도profile을 조정하는 parameter들이다.  $v_m$ 은 충돌주파수로 압력에 대해서는  $5.86 \times P[\text{mT}] \times 10^6$  Hz로 계산하였다.

그림 3-a)는 5mT, 10mT와 50mT에서 전자밀도변화에 대한 총임피던스의 변화를 도시한 것이다. 밀도가 증가함에 따라 저항값이 증가하다 다시 감소하고 인덕턴스는 계속 감소함을 볼 수 있다. 압력이 높아지면서 저항값도 증가를 하는데 이는 유효충돌주파수의 증가로 전력이 더 효율적으로 전달되기 때문이다. 그림 3-b)는 압력에 따른 임피던스의 변화를 균일한 밀도 profile과 parabolic profile에 대해 도시한 것이다. 균일한 경우에는 profile함수, 즉 식(6)에서 sr=tr=sz=tz=0으로 하고 parabolic의 경우에는 sr=2, tr=1, sz=2, tz=1로 한 것이다. 저항값은 압

력이 증가함에 따라 최대가 되는 점이 존재하고 인덕턴스는 계속증가한다. Parabolic profile의 경우가 저항값이 더 큰데 이는 skin depth의 증가로 power가 플라즈마내로 더 침투할 수 있기 때문이라 사료된다. 그림 3-c)는 Langmuir probe로 측정한 밀도 profile을 이용하여 전자 밀도에 대한 저항의 변화를 나타낸다. 밀도profile은 power에 따라 큰 변화가 없는 것으로 가정하였다. 그림에서 사각형 점들은 probe실험에서 구한 저항값을 나타낸다. 그림 상에서  $v_{eff}/\omega \approx 0.11$  이고 이는  $v_{eff} \approx 9.0 \times 10^6$  Hz에 해당한다. 측정된 임피던스특성으로부터 계산한 유효충돌주파수는  $v_{eff} \approx 3.4 \times 10^6$  Hz로 더 낮은 값이 나왔는데 이는 코일의 저항값을 측정할 때 주변요소들이 부하로 작용하여 코일의 저항값이 높게 측정되었기 때문이라 사료된다. 그림 2-c)의 경우에 전력전달효율이 최대가 되는 점에서 구한 유효충돌주파수는  $v_{eff} \approx 1.5 \times 10^7$  Hz로 증성입자와의 충돌주파수에 비해 대단히 낮은 값인데 이것은 skin depth가 작아짐에 따라 방전채널의 감소로 전력전달의 효율이 낮아짐을 의미한다. 이것은 그림 3-b)의 경향과 잘 일치하고 있다.[4,5,6]

### 4. 결 론

Planar ICP의 전기적특성을 power와 압력의 변화에 따라 측정하였다. 플라즈마를 도체로보고 밀도와 압력의 변화에 따라 임피던스의 변화를 FDM을 써서 수치해석하였다. 저압방전은 넓은 방전전류범위에 대해 플라즈마내의 전기장의 세기가 거의 일정하고 플라즈마 밀도는 방전전류와 power에 비례한다. Power가 증가하면 플라즈마밀도가 증가하여 skin depth가 작아지고 방전채널의 단면적이 줄어든다. 또, 플라즈마밀도가 증가하면 플라즈마내로 침투하는 자장의 감소로 결합계수가 감소하게 된다. 유효충돌주파수는 밀도, 압력, 증성입자충돌주파수, 방전채널등에 의존하는 값으로 전력전달의 효율을 나타낸다 볼 수 있다. 실험과 수치해석결과에서 Power와 압력에 대해 전력전달이 최대가 되는 점이 존재하고 이 점에서 matching이 가장 안정됨을 볼 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] B B Henrikson, D R Keefer and M H Clarkson, J.Appl.Phys. 42,5460 (1971)
- [2] J W Denneman, J.Phys.D:Appl. Phys. 23,293 (1990)
- [3] G G Lister and M Cox, Plasma Sources Sci. Technol. 1, 67 (1992)
- [4] R B Piejak, V A Godyak and B M Alexandrovich, Plasma Sources Sci. Technol. 1, 179 (1992)
- [5] V A Godyak, R B Piejak and B M Alexandrovich, Plasma Sources Sci. Technol. 3, 169 (1994)
- [6] M M Tuner, Phys. Rev. Lett. 71, 1844 (1993)

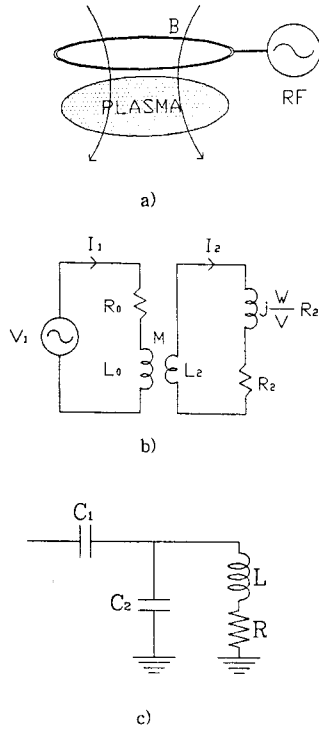


그림 1 a) 유도성결합플라즈마 b) 변압기동기회로  
 c) Matching network와 총임피던스회로  
 Fig.1 a) Inductively Coupled Plasma, b) equivalent transformer circuit of ICP, c) circuit of matching network & total load.

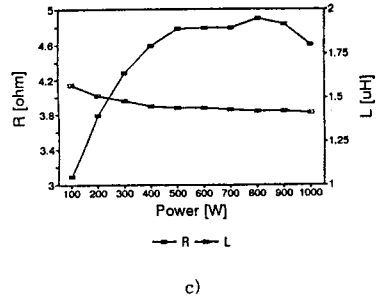
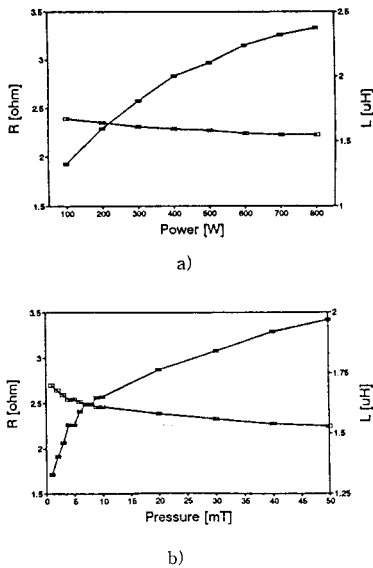


그림 2 임피던스특성측정, Ar plasma, 4회 코일  $\phi=170$  mm  
 a) 입력전력의존성, 5mT, c) 100mT, b) 압력의존성, 200W  
 Fig.2 Impedance characteristics, Ar plasma, 4 turn coil,  $\phi=170$ mm. Dependence on a) power at 5mT, c) at 100mT, b) dependence on pressure at 200W.

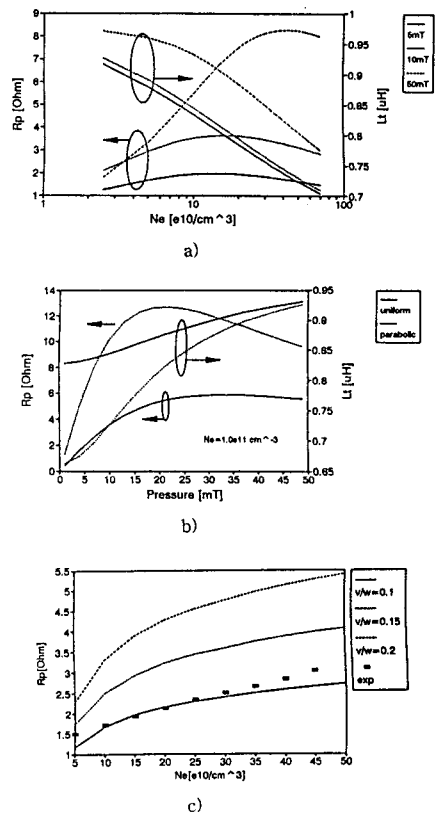


그림 3 수치해석한 임피던스특성  
 a) 밀도의존성 b) 압력의존성 c) 충돌주파수의존성  
 Fig.3 Results of numerical analysis. Dependence on a) power, b) pressure, c) collision frequency.