

평판형 유도 결합 플라즈마 장치에 대한 Alternate type Impedance matching 회로 분석

이종규, 권득철, 유동훈, 윤남식, 김정형*, 신용현*
충북대학교, *표준과학연구원

Analysis of Impedance matching circuit for Planar-Type Inductively Coupled Plasma Device

Jong-Kyu Lee, D. C. Kwon, D. H. Yu, N. S. Yoon, J. H. Kim*, Y. H. Shin*
Chungbuk National University, *Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - 본 연구에서는 변압기형 플라즈마 전류 모델을 기초로 한 평판형 유도 결합 플라즈마 장치에 대한 회로를 분석하여 임피던스 매칭 특성을 조사하였다. 장치 임피던스는 collisional surface impedance를 기반으로 계산된 플라즈마 임피던스와 안테나 임피던스로 결정된다. 매칭 network에 사용된 회로는 Alternate-type의 회로이고, 매칭 소자인 C_T 와 C_L 은 임피던스 매칭 조건을 이용하여 계산하였다. 완전 매칭의 경우에는 C_T 와 C_L 을 플라즈마 변수들의 함수로 표현하여 의존성을 분석하고, 불완전 매칭의 경우에는 반사파에 대한 반사계수, 반사율을 계산하였다.

1. 서 론

평판형 유도 결합 플라즈마 장치는 외부 자기장이 없는 저압의 조건에서도 고밀도의 균일한 플라즈마를 발생시킬 수 있는 장점 때문에 반도체 제작 및 디스플레이 제작 등의 다양한 산업 분야에서 응용되고 있다. 등가회로에 대한 분석은 장치에 대한 전반적인 시야를 제공하므로 매우 중요하다. 본 연구에서 고려된 평판형 유도 결합 플라즈마 장치의 등가 회로는 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 고주파 전송선로와 Alternate-type의 임피던스 매칭 회로를 포함하고 있다. 플라즈마 임피던스는 collisional surface impedance를 기반으로 하여 계산된다 [1]. 플라즈마 밀도, 공급 전원의 주파수, 코일 반경, 그리고 충돌 주파수 등의 다양한 변수들의 변화에 따른 매칭 소자 값들의 의존성을 조사하였다.

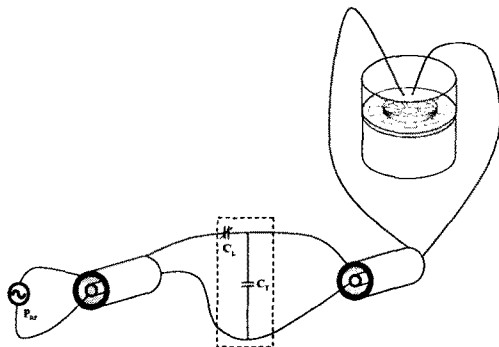


그림 1 평판형 유도 결합 플라즈마 장치의 개략도

2. 본 론

2.1 TCP 장치의 등가회로 모델

그림 2의 등가회로 모델에서 보인 바와 같이 power supply에서 발생된 고주파는 전송선로 임피던스 매칭

network을 통과한 뒤, 다시 전송선을 통해 플라즈마 발생 장치로 전송된다. 여기에서 임피던스 매칭 network는 매칭 소자를 포함한 장치의 전체 임피던스를 power supply의 내부 임피던스 R_0 와 일치시킴으로써 플라즈마 발생 장치 내로 공급되는 전력의 반사를 막는 역할을 한다.

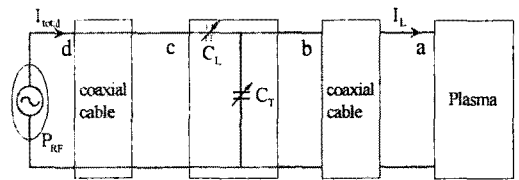


그림 2 평판형 유도 결합 플라즈마 장치의 등가회로

2.2 각 단계별 임피던스

2.2.1 TCP 장치의 임피던스

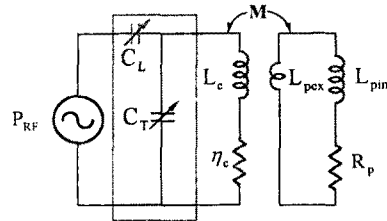


그림 3 변압기형 플라즈마 전류 모델

그림 3은 플라즈마 임피던스를 계산하는데 사용된 변압기형 플라즈마 전류 모델이고, Yoon[1,2]등의 결과를 인용하였다.

$$Z_m \cong 6\pi \left(\frac{R_c}{R} \right)^3 Z_s \tag{1}$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}} (1+i), \quad \sigma = \frac{\epsilon_0 \omega_p^2}{\nu + i\omega} \tag{2}$$

여기에서 Z_s 는 collisional surface impedance, R_c 는 안테나 반경, R 은 chamber의 반경, σ 는 플라즈마의 AC 전도도, μ_0 와 ϵ_0 는 각각 진공에서의 투자율과 유전율, ν 는 충돌 주파수, ω_p 는 플라즈마 주파수로서, $\omega_p = \sqrt{ne^2/m\epsilon_0}$ 이다[3]. 안테나 코일의 자기 인덕턴스 L_c 은 1 turn, 1A의 조건에서 안테나에 채교하는 자기장을 타원적분한 값으로 계산하고[1] 상호 인덕턴스 M 은 안테나와 플라즈마 표면을 원형 루프로 가정하여 해석적인

식으로 계산하였다[4].

$$\eta_c \cong \frac{1}{\sigma} \frac{\pi R_c}{\delta(a+b)} \quad (3)$$

안테나 코일의 저항 η_c 는 (3)식으로 계산이 되고, 여기에서 σ 는 안테나 코일의 전도도, a 와 b 는 각각 코일 단면의 폭과 높이, δ 는 표피 두께이다. 위에서 계산된 collisional surface impedance Z_s 를 플라즈마 임피던스의 근사식에 대입하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$R_p = R_c + \frac{Z_{pi}^{re}(\omega M)^2}{(Z_{pi}^{re})^2 + (Z_{pi}^{im} + \omega L_{px})^2} \quad (4)$$

$$X_p = \omega L_c - \frac{(\omega M)^2(Z_{pi}^{im} + \omega L_{px})}{(Z_{pi}^{re})^2 + (Z_{pi}^{im} + \omega L_{px})^2} \quad (5)$$

2.2.2 고주파 전송 선로에서의 임피던스

고주파 전송선로를 통과해 본 임피던스 $Z_b(=R_b+jX_b)$ 는 다음과 같다[5].

$$R_b = \frac{Z_0^2 R_a}{(Z_0 \cos \beta - X_a \sin \beta)^2 + (R_a \sin \beta)^2} \quad (6)$$

$$X_b = \frac{Z_0^2 X_a (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) - Z_0 \sin 2\beta (R_a^2 + X_a^2 - Z_0^2)}{(Z_0 \cos \beta - X_a \sin \beta)^2 + (R_a \sin \beta)^2} \quad (7)$$

여기에서 β 는 입사파의 위상정수, l 은 전송선로의 길이, Z_0 는 무한한 전송선로의 특성 임피던스이다[5].

2.2.3 매칭 network에서의 임피던스

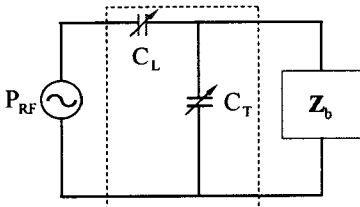


그림 4 Alternate-type 매칭 회로

매칭 network를 통해 본 등가 임피던스를 power supply의 내부 저항 R_0 와 일치시켜 매칭 조건을 만족하면 매칭 소자 C_T 와 C_L 의 값이 결정된다.

$$C_T = \frac{1 - R_b R_0}{\omega X_b \pm \sqrt{R_b^2 (R_b^2 + X_b^2) - R_b^2}} \quad (8)$$

$$C_L = \frac{R_b}{\omega R_0 [X_b - \omega C_T X_b^2 - \omega C_T R_b^2]} \quad (9)$$

이 때 C_T 와 C_L 은 장치 및 플라즈마 변수의 함수로 표현하여 의존성을 분석할 수 있다.

$$C_T(R_c, \nu, \omega/2\pi, n) \quad (10)$$

$$C_L(R_c, \nu, \omega/2\pi, n) \quad (11)$$

여기에서 R_c 는 안테나 코일의 반경, ν 는 충돌 주파수, $\omega/2\pi$ 는 RF 주파수, n 은 전자의 밀도이다.

2.2.4 불완전 매칭일 경우의 반사파 계산

플라즈마의 비선형적 특성 때문에 대부분의 경우에 이상적인 매칭이 이루어지지 않는다. 그러므로 불완전 매칭 상황일 때의 반사계수 Γ 와 반사율 ν 를 계산하는 것이 중요하다.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{z_L - 0}{z_L + 0}, z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = r + jx \quad (12)$$

$$\nu = |\Gamma|^2 = \left| \frac{z_L - 0}{z_L + 0} \right|^2 \quad (13)$$

여기에서 Z_L 은 시스템의 전체 임피던스이고, z_L 은 전체 임피던스를 전송선의 특성 임피던스 Z_0 로 정규화 한 값이다[5]. r 이 일정하고 x 만 변한다면 반사계수는 r -line의 특성을 보이게 되어 Smith 도표[6]에서 일정 r -원의 형태를 이룬다. x 가 일정하고 r 만 변한다면 x -line이라는 특성을 보이게 되어 Smith 도표에서 일정 x -원의 형태를 이룬다.

2.3 결과

2.3.1 완전 매칭

매칭 소자 C_T 와 C_L 은 식 (10), (11)과 같이 여러 장치 및 플라즈마 변수의 함수이고 선행 연구[7]를 통해 의존성을 알아 보았다.

$$X_T = \frac{1}{\omega C_T}, X_L = \frac{1}{\omega C_L} \quad (14)$$

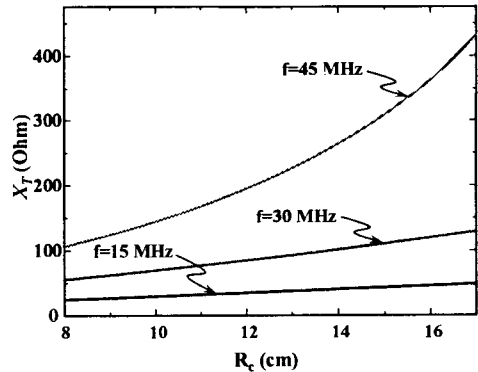


그림 5 X_T 의 주파수에 따른 안테나 반경 의존성

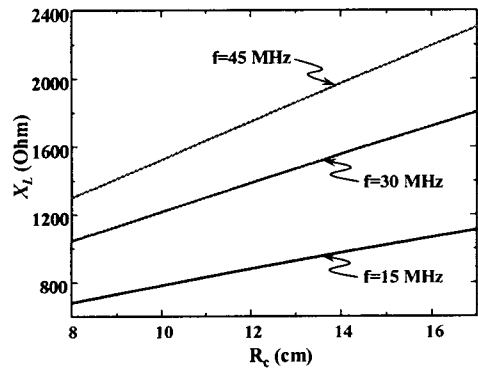


그림 6 X_L 의 주파수에 따른 안테나 반경 의존성

그림 5와 6은 XT와 XL의 여러 주파수에 따른 안테나 반경의 의존성을 나타낸 것이다. XT는 안테나 반경이 커짐에 따라 주파수에 대한 의존성이 증가하고, XL은 안테나 반경과 공급 주파수 모두에 비례하여 증가한다.

2.3.2 불완전 매칭

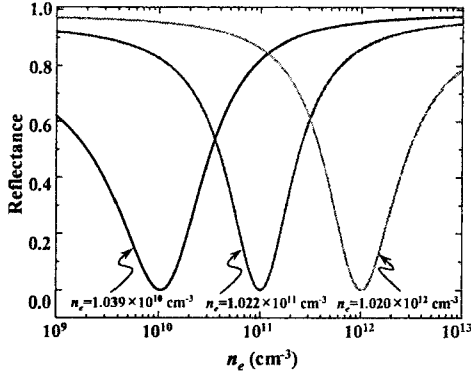


그림 7 불완전 매칭일 경우의 반사율

그림 7은 불완전 매칭일 경우에서의 반사율로써 특정 밀도에서만 반사율이 0이 되어 파워를 흡수하는 특성을 보이고 있다.

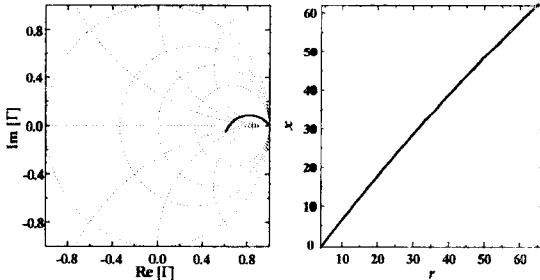


그림 8 r-x line 특성의 반사계수

그림 8은 밀도가 변하고 $C_T=4.487 \times 10^{-10} F$, $C_L=2.270 \times 10^{-11} F$ 일 때의 반사계수와 z-plane에 사영한 결과로 r과 x가 서로 같은 비율로 변하는 r-x line의 특성을 보이고 있다.

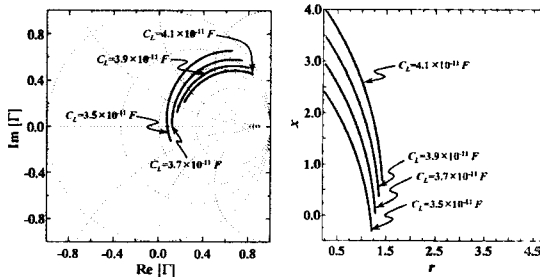


그림 9 r-line 특성의 반사계수

그림 9는 밀도 변화에서 $C_T=4.325 \times 10^{-10} F$ 이고 C_L 이 증가할 때의 반사계수로써 이상적인 r-line에서 약간 벗어나는 특성을 보이고 있다. 그렇기 때문에 반사계수의 형태가 반경이 일정한 r원이 아닌 호의 형태를 이루고 있다.

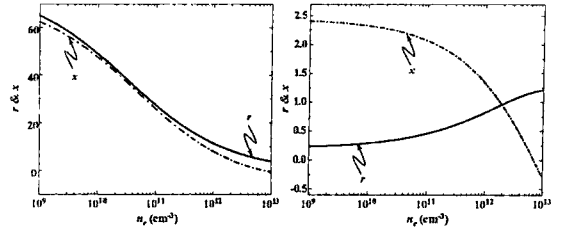


그림 10 밀도에 따른 r과 x의 변화

그림 10은 그림 9, 10의 상황일 때의 r과 x의 변화 정도를 보이고 있다. 왼쪽 그림은 그림 8의 상황으로써, r과 x가 서로 같은 비율로 변화하고 있다. 오른쪽 그림은 그림 9의 상황으로써, r이 x에 비해 상대적으로 일정한 변화를 보이고 있다.

3. 결 론

변압기형 플라즈마 전류 모델을 기초로 한 평판형 유도 결합 플라즈마 장치에 대한 회로를 분석하여 근사된 장치 임피던스를 계산하였으며, 장치 및 플라즈마 변수들의 변화에 따른 임피던스 매칭 특성을 조사하였고, 불완전 매칭일 경우에 반사계수와 반사율을 계산하였다. 후속 연구에서는 2차원 Heating 모델[8]을 기반으로 하여 보다 정확한 임피던스를 계산하는 연구가 진행될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 특정 연구개발 과제인 진공기술기반 구축 사업의 지원으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] N. S. Yoon, S. S. Kim, C. S. Chang and Duk In Choi, "A Self Consistent Zero Dimensional Modeling of a Transformer Coupled Discharge", Journal of the Korean Physical Society 28, 172, 1995
- [2] John David Jackson, "Classical Electrodynamics", John Wiley & Sons, Inc, 355, 1999
- [3] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharge And Materials Processing", A Willey Interscience Publication, 92, 1994
- [4] Heinz E. Knoepfel, "Magnetic Field", A Willey Interscience Publication, 123, 2000
- [5] William H. Hayt, Jr. John A. Buck " Engineering Electromagnetics", McGraw-Hill, 441, 2001
- [6] P. H. Smith, Transmission-Line Calculator, Electronics, vol. 12, PP. 29-31, Jan. 1939.
- [7] J. K. Lee, D. C. Kwon, D. H. Yu, N. S. Yoon, J. H. Kim, Y. H. Shin, "Analysis of Equivalent Circuit of Planar-Type Inductively Coupled Plasma Device based on the Transformer Circuit Model of Plasma Current", 2004년도 대한전기학회 춘계지회 춘계학술대회 논문집, 17, 2004
- [8] N. S. Yoon, S. M. Hwang and Duk In Choi, "Two Dimensional Non local Heating Theory of Planar-type Inductively Coupled Plasma Discharge", Physical Review E, vol. 55, no. 6, 1997