

축전 용량이 고려된 평판형 유도 결합 플라즈마 원의 등가회로 모델

김정미, 권득철, 윤남식
충북대학교

An equivalent Circuit Model of Transformer Coupled Plasma Source

Jeong-Mi Kim, D. C. Kwon, N. S. Yoon
Chungbuk National University

Abstract: In this work we develop an equivalent circuit model of TCP(transformer coupled plasma) source and investigate matching characteristic. The developed circuit model includes transmission line, standard-type impedance matching network and displacement current in the plasma source. The impedance of TCP is calculated by previously developed program for various source parameters and dependance of components of matching impedance on the value of source impedance is investigated.

1. 서 론

평판형 유도 결합 플라즈마(이하 TCP: Transformer Coupled Plasma)는 고밀도의 플라즈마를 상대적으로 간단한 기하학적 구조의 장치에서 발생시킬 수 있다는 장점 때문에 반도체 제작 및 디스플레이 제작 등을 비롯한 다양한 산업적인 응용 범위를 가지고 있다. 등가회로 모델의 연구는 장치 전반에 대한 시야를 제공하므로 매우 중요하다. 본 연구에서 고려된 평판형 유도 결합 플라즈마 원의 등가회로 모델은 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 표준형의 임피던스 매칭회로와 고주파 전송선[2~4]을 포함하고 있다. 플라즈마 밀도를 비롯한 플라즈마 변수의 변화에 따라 시스템을 매칭 시키는 가변소자의 값들의 의존성을 조사하였다.

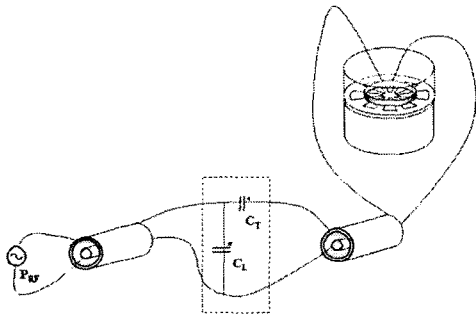


그림 1. 평판형 유도 결합 플라즈마 발생장치의 개략도

2. 본 론

이 장에서는 선행 연구[6]를 통해 계산된 플라즈마 발생장치의 임피던스 값에 RF sheath를 고려하여 계산한 커패시턴스 값을 더해 전체 등가회로를 구하고, 임피던스 매칭 특성을 조사하기 위해 필요한 식들에 대해 설명한다.

2.1. Plasma 등가 회로

그림 1에서 보인 바와 같이 power supply에서 발생되는 고주파는 전송선을 타고 임피던스 매칭 network를 통과한 뒤, 다시 전송선을 통해 플라즈마 발생장치로 전송된다. 이때 고려된 표준형 매칭 network는 loading 커패시터 C_L 과 tuning 커패시터 C_T 로 구성된다.

그림 1의 장치에 대한 본 연구에서 사용된 등가회로는 그림 2와 같다. 시스템에서 플라즈마 발생 장치에 최대 전력을 공급해 주기 위한 목적으로 전송선과 가변 커패시터를 포함한 시스템의 전체 임피던스(Z_{total})를 power supply의 내부 임피던스(R_0)와 일치시킴으로서 전력의 반사를 막는 것을 임피던스 매칭이라 한다[5].

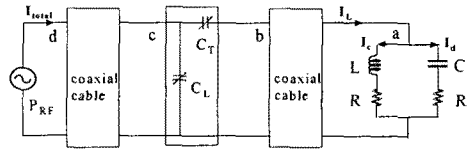


그림 2. 축전 용량이 고려된 평판형 유도 결합 플라즈마 발생장치의 등가회로

시스템의 전체 임피던스는 a, b, c, d 각 단자에서 순차적으로 임피던스를 합성하여 최종 단인 d단자에서의 합성 임피던스를 Z_{total} 로 결정한다. 이때 Z_{total} 은 C_L 과 C_T 의 함수가 되며, 복소 관계식 $R_0 = Z_{total}$ 를 만족시켜야 한다.

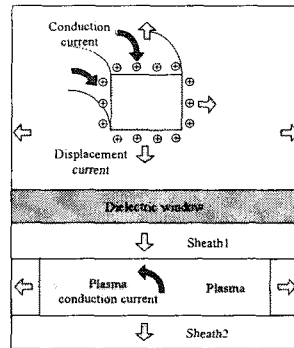


그림 3. 축전 용량이 고려된 평판형 유도 결합 플라즈마 발생장치에서의 전류 분포

이때 플라즈마 발생장치 내부에는 인덕터와 커패시터가 병렬로 연결되어 전도 전류와 변위 전류가 각각 흐르게 되는데, 이는 전원에서 공급된 전류가 안테나를 통해 흐르고, 안테나와 플라즈마 사이에 전위차를 발생시켜 도체 사이에 전기장을 형성하기 때문이다. 이로 인해 두 연체와 sheath에 변위 전류가 흐르게 되고 커패시터를 형성한다.

2.2 각 단계에서의 임피던스 값들과 임피던스 매칭

a) TCP source에서의 임피던스

TCP 장치의 임피던스 결정에 중요한 역할을 하는 요소에는 플라즈마의 밀도(n_0), 전자 온도(T_e), 공급 전원의 주파수(f), 장치의 반경(R), 플라즈마의 두께(L_p) 등이 있다[6~10].

안테나와 플라즈마를 포함하는 임피던스 값은 안테나 전류 분포를 이용하여 Maxwell-Boltzmann 방정식의 해를 구한 뒤 계산되는데, 이때 플라즈마 장치의 임피던스 $Z_L (= R_L + jX_L)$ 은 위에 나열한 여러 가지 변수들의 함수로 표현된다[9]. 본 연구에서 사용된 장치의 저항과 인덕턴스 값들은 Yoon[6] 등의 연구 결과로 완성된 TCPH-code를 이용하여 계산하였다.

안테나에 흐르는 전도 전류가 플라즈마에 전기장을 가하여 sheath[1]에 변위 전류가 흐르면, 안테나와 플라즈마의 두 도체 사이에서 sheath는 절연체로서 커패시터를 형성하므로 플라즈마의 커패시턴스는 sheath의 유효 면적 S_{eff} 와 변위 전류 I_d 에 의해 다음과 같이 표현된다 [11].

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{2 \epsilon_d |I_d| + en\omega \epsilon_0 l_d S_{eff}}{en \omega^2 \epsilon_d \epsilon_0 (S_{eff})^2}$$

ϵ_d : 안테나와 sheath사이의 절연체의 유전율

ϵ_0 : 진공 상태 (sheath)의 유전율

ω : 주파수, I_d : 변위 전류

e : 전하량, n : 플라즈마 밀도

S_{eff} : 커패시터 유효 면적, l_d : 절연체의 두께

$$|I_d| = \sqrt{\left(\frac{AC+BD}{A^2+B^2}\right)^2 + \left(\frac{AD-BC}{A^2+B^2}\right)^2} = F(|I_d|) \quad (1)$$

$$A = X_L X_C + (X_{CL} + X_{CT})(X_L - X_C)$$

$$B = R_L(X_{CL} + X_{CT} + X_C)$$

$$C = X_{CL} X_L \quad D = R_L X_{CL}$$

커패시터의 저항 성분은 매우 작아 이번 연구에는 고려하지 않았다. 식 (1)은 $|I_d|$ 에 대한 비선형 방정식으로 해석적 해가 불가능하므로 Bisection method를 이용하여 해를 구하였다. 위와 같이 구한 플라즈마 장치의 임피던스는 Z_L 과 X_C 를 합성하여 $Z_s (= R_s + X_s)$ 로 나타낸다.

b) 전송 선로에서의 임피던스

플라즈마 장치의 임피던스를 전송선을 통과하여 본 임피던스 Z_b 는 다음과 같다[11].

$$Z_b = Z_0 \frac{Z_a \cos(\beta l) + j Z_0 \sin(\beta l)}{Z_0 \cos(\beta l) + j Z_a \sin(\beta l)} = R_b + j X_b \quad (2)$$

$$R_b = \frac{Z_0^2 R_a}{(Z_0 C - X_a S)^2 + (R_a S)^2}$$

$$X_b = \frac{Z_0^2 X_a (C^2 - S^2) - Z_0 C S(A)}{(Z_0 C - X_a S)^2 + (R_a S)^2}$$

$$C = \cos \beta l \quad S = \sin \beta l$$

$$A = (R_a^2 + X_a^2 + Z_0^2)$$

여기에서 β 는 입사파의 위상정수이고, l 은 전송선의 길이, Z_0 는 무한 전송선의 고유 임피던스이다.

c) 매칭 network에서의 임피던스

기본적으로 전송선을 통해 흐르는 장치의 리액턴스를 인덕턴스 성분으로 고려하였으므로 LC공진 특성에 의해

가변 터패시터 만을 사용한 표준형 network를 사용한다. Network의 등가 임피던스를 구해보면,

$$Z_C = \frac{1 + j\omega C_T [j\omega L_b + R_b]}{-\omega^2 C_T C_L R_b + j\omega [C_T + C_L - \omega^2 C_T C_L L_b]}$$

$$= R_C + X_C$$

와 같고 여기에서

$$R_C = \frac{R_b X_{CL}^2}{R_b^2 + [X_{CT} + X_{CL} - \omega L_b]^2}$$

$$X_C = -\frac{X_{CL} [(X_{CT} - \omega L_b)(X_{CT} + X_{CL} - \omega L_b) + R_b^2]}{R_b^2 + [X_{CT} + X_{CL} - \omega L_b]^2}$$

이다

d) 최종 단계에서의 임피던스

최종 단계에서 보는 임피던스(Z_D)는 매칭 단계에서의 임피던스 Z_C 를 전송선로를 통해 본 값으로서 임피던스 매칭 조건은 $Z_D = Z_0$ 이 되는데, 이때 전송선의 손실 전류와 기생 저항을 무시하면 매칭 조건일 때 전송선의 길이와 상관없이 $Z_{total} = Z_C$ 가 됨을 알 수 있으므로 식(2) C_L 과 C_T 의 소자 값에 따라 전체 시스템의 임피던스 매칭이 이루어진다.

2.3 임피던스 매칭일 때의 network 소자 값들의 결정

이상을 통해 임피던스가 매칭되기 위해서는 Z_C 가 공급되는 전원의 임피던스와 일치해야 함을 보였는데, 보통 전원의 임피던스는 내부 저항값(R_0)만을 가지므로 $Z_C = R_0$ 가 됨을 이용하여 C_L 과 C_T 의 값을 결정할 수 있다.

$$Z_C = \frac{X_{CT} X_{CL} - \omega L_b X_{CL} + j R_b X_{CL}}{-R_b + j(X_{CT} + X_{CL}) - j\omega L_b} = R_0 + j0$$

$$C_L = \frac{1}{\omega} \left(\frac{R_0 - R_b}{R_b R_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\omega R_0} \sqrt{\frac{R_0}{R_b} - 1}$$

$$C_T = \left(\omega^2 L_b - \frac{1 - \frac{R_b}{R_0}}{C_L} \right)^{-1}$$

3. 결과 분석

3.1 전송선과 파장의 길이의 비에 따른 리액턴스의 변화

이번 연구에서는 전송선을 통과한 임피던스를 유도 전계장 성분(ωL)으로 고려하고 있다. 즉, 임피던스의 리액턴스 값이 항상 양의 값을 가져야 하는데, 전송선을 통과한 임피던스를 계산하면 전송선과 파장의 길이의 비에 따라 리액턴스의 특성이 변하므로 이 조건에 만족하도록 βl 을 결정해 주어야 한다.

Load 임피던스와 βl 의 변화에 따라 리액턴스가 양의 구간에서 음의 구간으로 반복적으로 변하는데, 이것은 전송선과 파장의 길이의 비에 따라서 매칭 network의 구성 형태와 임피던스 매칭이 크게 영향 받을 수 있다는 것이다[13]. 따라서 본 연구에서 구한 커패시턴스들은 전송선의 이러한 특성을 고려하여 βl 이 0.1일 때를 기준으로 계산되었다.

3.2 축전 용량이 고려되었을 때와 고려되지 않았을 때 시스템 임피던스의 변화

그림 4와 5는 축전 용량이 고려되지 않았을 때와 고려되었을 때의 임피던스 특성 변화를 보이고 있다.

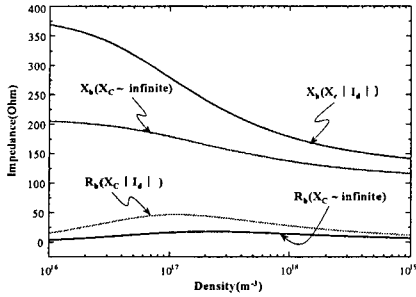


그림 4. 축전 용량을 고려했을 때 임피던스 변화

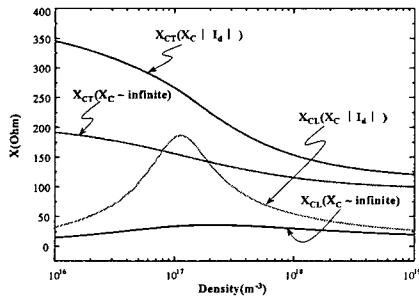


그림 5. 축전 용량을 고려했을 때 매칭 network의 변화

X_C 가 ∞ 이면 축전 용량이 고려되지 않은 상황과 같으므로 장치로 흐르는 전류는 모두 저항과 인덕터에만 흐른다. 이때는 그림 4와 같이 장치의 축전 용량이 고려되었을 때보다 시스템 임피던스가 작고 밀도 변화에 따른 변화율도 작다. 따라서 network의 매칭 소자 임피던스도 축전 용량을 고려했을 때 보다 작게 나타난다. 축전 용량을 고려했을 때 매칭 임피던스는 특정 밀도를 중심으로 변화율이 매우 급격하게 나타나고 있다.

위에서 $X_{CL} = 1/(\omega C_L)$, $X_{CT} = 1/(\omega C_T)$ 이다.

3.4 플라즈마 장치 내에서의 전류의 흐름

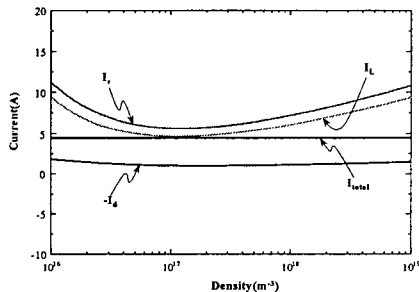


그림 6. 전송선을 통과한 입사 전류와 플라즈마 발생장치 내부에서의 전류 흐름

전원에서 주어지는 전류 I_{total} 이 매칭 단자를 지나 전송선(그림 2.(b)단)을 통과한 후 전류 I_L 에 흐르고 이 전류가 플라즈마 장치 내에서 컨덕턴스 성분을 통해 흐르는 변위 전류 I_d 와 인덕턴스와 저항 성분을 통해 흐르는 전도 전류 I_c 로 나뉘어 흐를 때 전류의 흐름은 그림 6과 같다. 이 상황에서 커패시턴스 성분을 통해 흐르는 변위 전류 I_d 는 (-)방향이 되어 인덕턴스 성분에 전류를 공급하

고 있음을 볼 수 있다.

4. 결론

밀도 변화를 중심으로 축전 용량이 고려된 평판형 유도 결합 플라즈마 발생장치의 매칭 특성을 살펴보았다. 본 연구에서 고려된 축전 성분 X_C 는 변위 전류 I_d 의 근사적 모델을 이용해 계산된 값으로 이후 포와송 방정식을 풀어 보다 정밀한 커패시턴스 값을 이용하는 모델이 완성될 것이다. 또한 주파수와 온도 등 다른 여러 변수를 변화시켰을 때의 임피던스 매칭 특성을 조사하고, 이번 연구에서는 고려하지 않았던 sheath 저항이나 선로의 기생 저항의 영향을 조사하는 계산이 진행 중이다.

*이 연구는 표준과학연구원의 진공기반기술 구축사업의 지원을 받아 수행되었음

[참고 문헌]

- [1] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing" (Wiley, New York, 1994)
- [2] R. J. Shul and S. J. Pearton, "Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques" (Verlag, Heidelberg, 2000)
- [3] D. M. Manos and D. L. Flamm, "Plasma Etching" (Academic, London, 1989)
- [4] S. M. Rossenagel, J. J. Coumo and W. D. Westwood, "Handbook of Plasma Processing Technology" (Noyes, New Jersey, 1990)
- [5] O. A. Popov, "High Density Plasma Sources" (Noyes, New Jersey, 1995)
- [6] N. S. Yoon, S. M. Hwang and D. I. Choi, "Two-dimensional non-local heating theory of planar-type inductively coupled plasma discharge", Phys. Rev. E, vol.55, no.6, pp 7536-7549 (1997.6)
- [7] N. S. Yoon, B. C. Kim, J. G. Yang and S. M. Hwang, "A Theoretical Formula of E- and H-discharge Transition Power in a TCP-discharge", IEEE Trans. Plasma Sci. vol.26, no.2, pp190-197 (1998.4)
- [8] N. S. Yoon and S. M. Hwang, "A theoretical Formula of Transition Power of E- and H-discharge Based on the Transformer Circuit Modal in TCP-discharge", J. Korea phys. soc. vol.55, pp657-660 (1997.6)
- [9] N. S. Yoon, J. H. Han, S. M. Hwang and D. I. Choi, "Two-dimensional electron heating of inductively coupled discharge", J. Korea phys. Soc. vol.32, ppS196-S200 (1997.8)
- [10] J. G. Yang, N. S. Yoon, B. C. Kim, J. H. Choi, G. S. Lee and S. M. Hwang, "Power Absorption Characteristic of Inductively Coupled Plasma Discharge", IEEE Trans. Plasma Sci. vol.27, no.3 (1999.6)
- [11] W. H. Hayt, "Engineering Electromagnetics" (McGraw Hill, 1989)
- [12] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, "Numerical Recipes in Fortran" (Cambridge University, New York, 1994)
- [13] J. M. Kim, D. C. Kwon, N. S. Yoon, "Equivalent Circuit Model of Transformer Coupled Plasma Source" 2002년도 대한전기학회 충북지부 춘계학술대회 논문집. 6. (2002)