

한빛 자기거울 장치의 고주파 가열 시스템에 대한 등가회로 모델 정립 및 정합 특성 분석

이종규, 윤남식, 박병호*
 충북대학교, 한국기초과학지원연구원*

Establishment of an Equivalent Circuit Model and Analysis of Impedance Matching Characteristics of RF-Heating System in Hanbit Magnetic Mirror Device

Jong-Kyu Lee, Nam-Sik Yoon and Byeong-Ho Park*
 Chungbuk National University, Korea Basic Science Institute*

Abstract : 한빛 자기거울 장치는 고온 플라즈마 물성을 연구하기 위한 장치로서 플라즈마 밀도 형성을 위한 slot 형 안테나 고주파 가열 시스템이 중앙 진공용기에 설치되어 있다. 본 연구에서는 이러한 고주파 전송선로, 임피던스 정합 network, 장치 임피던스를 포함하는 한빛 장치의 고주파 가열 시스템에 대하여 기존에 정립된 고주파 가열 이론[1]을 기반으로 하여 이론적인 해석만으로 구성된 회로모델을 완성하였다. 임피던스 정합 소자 값들은 임피던스 정합 조건으로 결정함으로써 다양한 장치 및 플라즈마 변수들의 함수로 표현하여 그 의존성을 조사하였다.

Key Words : 자기거울 장치, 등가회로 모델, 임피던스 정합, 고주파 전송선로

1. 서론

한빛 장치는 자장에 의한 플라즈마의 밀폐를 이용하는 단순 자기거울 플라즈마 장치이며 핵융합 플라즈마 조건에 근접하는 고온 플라즈마 밀폐의 연구나 플라즈마 가열 기술의 개발 등과 같은 기초 물성 및 응용 분야에 관한 연구 등에 그 목적을 두고 있다. 본 연구에서는 한빛 장치의 전체 시스템 중에서 전자가열 효과가 큰 이유로 플라즈마 발생용으로 이용되고 있는 slot 형 안테나(그림 1) 고주파 가열 시스템에 대한 등가회로를 정립하고 그 정합 특성을 분석하고자 한다.

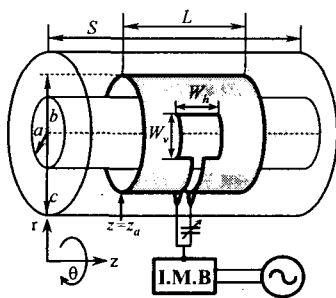


그림 1. slot 형 안테나

이러한 전체 장치에 대한 등가회로를 구성하여 이론적으로 장치의 정합 특성을 이해하기 위해서는 플라즈마와 slot 형 안테나를 포함한 반응기의 임피던스 값(Z_L)이 계산 가능하여야 하며, 이러한 복잡한 고주파 가열 시스템의 임피던스 값을 계산하는 것은 일반적인 준정적 회로이론의 범주를 벗어나는 것으로 본 연구에서는 선행 연구[1]의

결과를 이용한다. 전원 단에서 바라본 부하는 플라즈마와 slot 형 안테나를 포함하는 복소 임피던스이기 때문에 전원 측과 부하 측 사이에 별도의 임피던스 정합 network가 삽입되어야 한다. 이 때 정합 회로의 소자 값들은 임피던스 정합 조건에 의해 결정되며, 여러 장치 및 플라즈마 변수들의 함수로 표현하여 그 의존성을 분석하였다.

2. 본론

본 연구에서 고려한 한빛 장치의 정합회로는 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같으며 그 형태로 봤을 때 통상적으로 널리 사용되는 standard-type[2]이며 부하 커패시터 C_L , 조정 커패시터 C_T , 조정 인덕터 L_T 로 이루어져 있다.

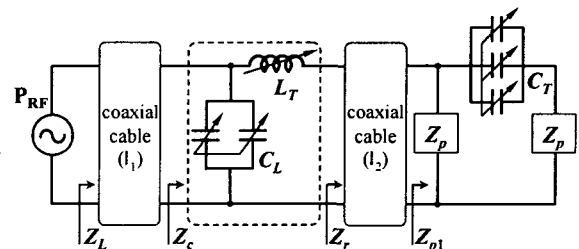


그림 2. slot 형 안테나에 대한 등가회로

2.1 완전 정합 조건의 경우

그림 2는 slot 형 안테나에 대한 전체 등가회로로서 장치 쪽 동축케이블의 길이 l_2 는 특정 목적의 경우를 제외하고는 항상 0이고 완전 정합 조건의 경우 전원공급기 쪽 동축케이블의 길이 l_1 은 길이에 상관없이 무한한 전송선로

의 특성 임피던스 Z_0 가 되어 회로 상에서의 의미가 없으므로 고려하지 않았다.

정합 소자의 값을 결정하기 위해 부하 커패시터 C_L 를 전원 쪽으로, 조정 인덕터 L_T 를 부하 임피던스 쪽으로 포함시킨 후 각각을 $Z_A(=R_A-jX_A)$, $Z_B(=R_B-jX_B)$ 로 정리하면 다음과 같고,

$$R_A = \frac{R_0 X_{CL}^2}{R_0^2 + X_{CL}^2}, \quad X_A = \frac{R_0^2 X_{CL}}{R_0^2 + X_{CL}^2} \quad (1)$$

$$R_B = R_{pl}, \quad X_B = -(X_{pl} + Y_T) \quad (2)$$

공액 정합 조건(Congugate matching condition)[3]을 적용하여 아래 식으로 정리할 수 있다.

$$X_{CL} = \sqrt{\frac{R_0^2 R_{pl}}{R_0 - R_{pl}}} \quad (3)$$

$$Y_T = \frac{R_0^2 X_{CL}}{R_0^2 + X_{CL}^2} - X_{pl} \quad (4)$$

식 (1)-(4)의 R_0 는 공급 전원 측의 내부 임피던스이고, R_{pl} 과 X_{pl} 은 각각 Z_{pl} 의 실수부와 허수부, $X_{CL}=1/\omega C_L$, $Y_T=\omega L_T$ 이다.

2.2 결과

계산에 가정된 기본 조건은 $a=17$ cm, $b=19.6$ cm, $c=30$ cm, $S=448$ cm, $L=59.2$ cm, $z_a=154.3$ cm, $W_h=39.4$ cm, $W_v=13.6$ cm, $\omega/2\pi=3.5$ MHz, $T_e=20$ eV, $T_i=100$ eV, $C_T=3900$ pF이며 여기에서 ω 는 공급 주파수, T_e 는 전자 온도, T_i 는 이온 온도이다.

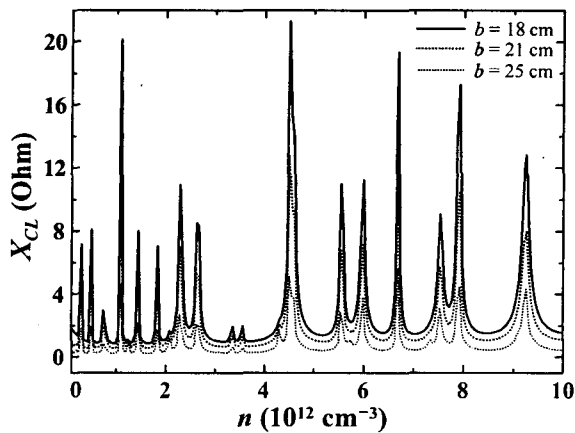


그림 3. slot 형 안테나의 반경에 따른 X_{CL} 의 밀도 의존성

그림 3과 4는 완전 정합 조건의 경우 정합 소자 값인 X_{CL} 과 Y_T 의 밀도 의존성을 slot 형 안테나의 반경에 대해

비교한 결과로서, 각 정합 소자들이 밀도 변화에 대해 매우 급격한 값의 변화를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 실제 정합 실험을 할 때 적은 밀도 변화에서도 조건에 맞는 정합 소자의 가변이 신속히 이루어져야함을 의미한다.

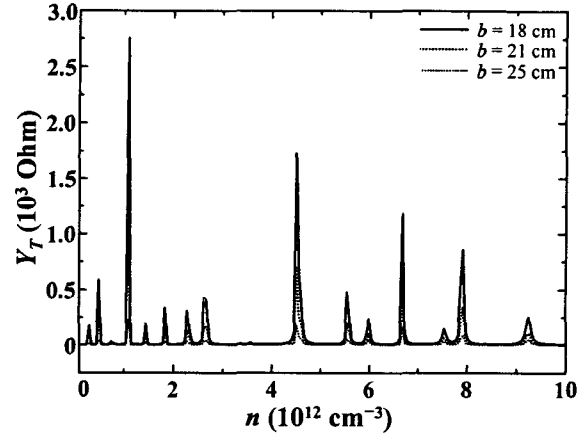


그림 4. slot 형 안테나의 반경에 따른 Y_T 의 밀도 의존성

3. 결론

본 연구에서는 이론적으로 분석하기 어려운 시스템의 작동 과정을 이해하기 위하여 기존에 정립된 고주파 가열 이론[1]을 기반으로 한 임피던스 계산을 이용하여 한빛 장치에 대한 등가회로 모델을 정립하고 정합회로에 대한 정합 특성을 분석하였다. 이론적으로 계산된 결과는 정합 소자 값이 적은 밀도 변화에서도 신속한 가변을 해야함을 시사하고 있으며, 이는 실험과의 비교를 통해 실제 정합 시 정합 소자들이 조건 변화에 따른 신속한 가변이 이루어지는지 등에 대한 검증이 필요하다. 또한 상기의 결과들은 완전 정합 조건만을 가정한 경우이고 불완전 정합의 경우에는 전원공급기 쪽 동축케이블의 길이가 달라짐에 따라 Z_L 과 Z_c 의 차이가 매우 클 수 있으므로 장치변수와 동축케이블의 길이를 동시에 고려해야 하며 아울러 반사 계수 Γ 와 반사율 γ 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

참고 문헌

- [1] B. H. Park, N. S. Yoon and D. I. Choi, "The Heating Characteristics of Helical Antenna for Magnetic Mirror Discharge in Comparison with a Slot Antenna", *Trans. on Fus. Tech.* Vol. 39, pp. 245-248, 2002.
- [2] 이종규, 권득철, 유동훈, 윤남식, "평판형 유도결합 플라즈마 원의 등가회로 모델 정립", *전기학회논문지*, 제 54권, 제 5호, pp. 218-223, 2005.
- [3] Y. Sun, J. K. Fidler, "Design method for impedance matching networks", *IEE Proc. -Circuits Devices Syst.* vol. 143, 186, 1996.