

KSTAR 토카막 RF 안테나의 부하와 VSWR

한장민, 주명희, 최현정, 홍봉근

한국원자력연구소

요 약

KSTAR 토카막¹ 플라즈마의 전류구동을 위한 RF 안테나 설계시 최적 조건을 2차원 파동 코드와 안테나 모듈(module)을 이용하여 연구하였다. 최적 조건을 얻기 위해 플라즈마와 안테나 매개변수 각각에 대한 부하와 전압정재파비(VSWR)의 관계를 살펴보았다. 계산결과로부터, 송전선의 특성저항 $R_c=50\Omega$, 안테나 폴로이달(poloidal) 길이 $A_{pl}=1.0m$, 안테나 사이의 간격 $w_d=4^\circ$ 근처에서 최적의 안테나 조건을 갖음을 알 수 있었다.

1. 서 론

이번 연구의 주요 목적은 KSTAR 토카막 플라즈마의 전류구동을 위한 RF 안테나 제작의 최적 조건을 찾는 것이다. 이것은 물리적인 문제 뿐만 아니라 경제적인 문제와도 밀접한 관계를 갖고 있다.

KSTAR 토카막에서 고려하고 있는 안테나는 ICRF (ion cyclotron range of frequencies) 안테나이다. 이런 안테나는 비대칭적 파수 전력분포에 의해 전자에 운동량을 전달시킴으로서 전자에 의한 플라즈마 전류구동에 효율적이고 또한 대칭적 파수 출력 분포에 의해 이온을 가열시키는데 장점을 가진 장치이다. 전체 시스템은 RF원, 전송선, 위상조절기, 임피던스 정합기, 전류띠(current strap), 토카막벽(tokamak wall), 플라즈마 등으로 구성된다. 이들 시스템 설계와 관련지어 여기서 주로 관심을 갖고 논의할 매개변수는 부하 임피던스와 VSWR 이다. 전자는 전류구동 효율과 직접적으로 관련되어 있고, 후자는 안테나 제작시 경제성과 직접적인 관련이 있다. 효과적인 안테나 제작에 있어, 일반적으로 높은 부하 저항과 낮은 VSWR 값을 요구한다. 따라서 이번 연구에서 가장 중점을 두고 있는 것은 플라즈마가 물리적인 조건을 만족시켰다는 가정하에서 가장 높은 부하저항과 가장 낮은 VSWR 값을 갖는 안테나 조건을 찾는 것이다.

플라즈마 부분의 연구에 사용할 2차원 파동 코드는 TASKWM1²이고, 안테나 모듈은 본 연구자들에 의해 개발된 것을 사용하였다. 이번 연구에서 사용된 안테나 모형은 홈(recess)과

Faraday 차폐막이 없는 가장 간단한 형태이다. 연구 진행은 먼저 기준 인자들을 정하고 이들에 대한 플라즈마와 안테나 매개변수의 변화에 따른 특성 조사를 한 후 이들 계산 결과를 토대로 플라즈마 전류주동을 위해 필요한 최적의 안테나와 플라즈마 매개변수들을 결정한다. 여기서 연구되어진 주요 매개변수는 플라즈마 온도와 밀도, 안테나 플로이달 길이와 위상 그리고 송전선의 특성 저항 등이다.

II. 안테나 모형과 기본방정식

이번 연구에서 사용된 안테나 모형에서 자기장은 z -방향으로 일정한 값을 갖고 경계면(토카막 벽)은 완전도체라고 가정하였다. 플라즈마와 안테나 전류띠는 y -방향으로 균일하게 분포되어 있다고 한다. 따라서 부하 임피던스는 전류띠의 단위 길이당 값으로 주어진다. 플라즈마 밀도와 온도는 x -방향으로 임의 값을 갖는다. 위에서 설명한 안테나 모형이 그림 1에 나타나 있다.

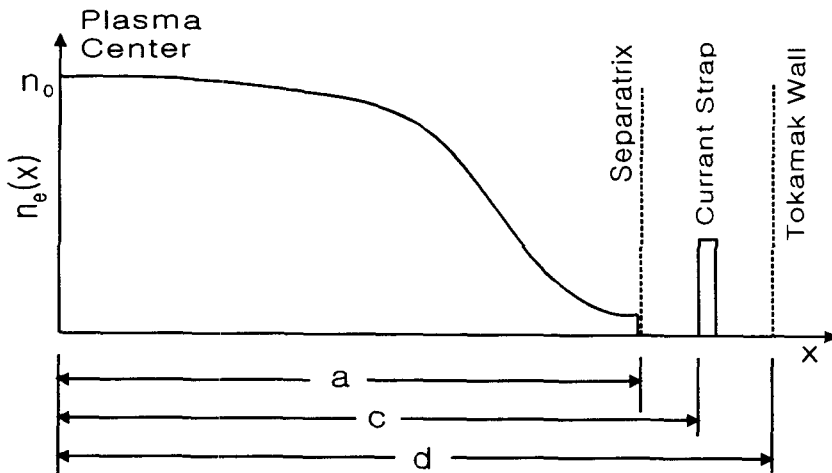


그림 1. KSTAR 토카막의 플라즈마-RF 안테나 모형에 대한 기하학적 매개변수.

안테나 모형안에서 x -방향의 플라즈마 밀도 n 과 온도 T 는 다음과 같이 주어진다.

구간 $-a \leq x \leq a$ 에서

$$n(x) = n_0[1 - (x/a)^2] + \Delta n_0$$

와

$$T(x) = T_0[1 - (x/a)^2] + \Delta T_0.$$

위상차 $\delta\phi$ 를 갖는 4개의 안테나를 $x=c$ 인 점에 놓는다.

안테나 전류밀도 $J^A(z)$ 를 다음과 같이 주어진다.

$$J^A(x, z, t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} [J_1^A(z) + \sum_{k=2}^4 J_k^A(z) \exp(i(k-1)\delta\phi)] \times \delta(x-c) \exp(-i\omega t),$$

위 식에서 $J_k^A(z)$ 은 폭이 l_z 인 각각의 전류띠 내의 전류밀도이다.

각각의 안테나에 대한 부하 임피던스 $Z_i(i=1,2,3,4)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_1 = \frac{\int E_y J_1^A dz}{\left(\int J_1^A dz\right)^2}, \quad Z_k = \frac{\int E_y J_k^A \exp(i(k-1)\delta\phi) dz}{\left(\int J_1^A dz\right)^2} \quad (k=2,3,4)$$

부하 저항 R 과 리액턴스 X 는 부하 임피던스의 실수와 허수 부분이다. 여기서 E_y 는 전기장의 y -성분이다. 전체 부하 저항은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^4 R_k \right) |I^A|^2 = \frac{1}{2} R |I^A|^2,$$

여기서 I^A 는 전체 안테나 전류이다. VSWR 은 다음과 같이 정의된다.

$$VSWR = \frac{1+\gamma}{1-\gamma}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{(R_c - R_L)^2 + X_L^2}{(R_c + R_L)^2 + X_L^2}}, \quad Z_L = Z_{L_A},$$

여기서 R_c 는 송전선의 특성저항이고 L_A 안테나의 폴로이달 길이이다. 즉 VSWR 이 안테나와 송전선의 정합조건임을 보여준다.

III. 계산결과 및 해석

이번 연구에 사용된 KSTAR 토카막의 플라즈마와 안테나에 대한 기준 매개변수가 표 1에 주어져 있다.

플라즈마			안테나		
Major radius	R_0	1.8 m	Antenna radius	c	0.6 m
Minor radius	a	0.5 m	Antenna number	#	4
Elongation	κ	2.0	Antenna spacing	w_d	5°
Triangularity	δ	0.8	Antenna width	l_z	0.07 m
Plasma current	I_p	2.0 MA	Antenna poloidal length	A_{pl}	1 m
Toroidal field	B_0	3.5 T	Antenna input power	P_{in}	6MW
Central density	n_0	$10^{20} m^{-3}$	Wall radius	d	0.7 m
Temperature($T_e=T_i$)	T_0	10 keV	Characteristic resistance	R_c	50Ω
Edge density	$\Delta n_0/n_0$	0.1			
Edge temperature	$\Delta T_0/T_0$	0.05			
Frequency	f	38MHz			
D/H		0.95/0.05			

표 1. KSTAR 토카막의 플라즈마와 안테나에 대한 기준 매개변수

먼저 플라즈마 매개변수- 밀도와 온도-와 부하와 VSWR 사이의 상관 관계를 살펴 본다. 그림 2 는 플라즈마 전류밀도 n_0 의 변화에 따른 부하와 VSWR 의 변화를 보여준다. 그림 안에서 각 값 들은 4개의 안테나 사이의 위상차를 0° 부터 180° 까지 변화시킨 것 가운데 가장 큰 부하저항을 갖 는 값을 기준으로 선택한 것이다. 전류밀도가 증가함에 따라 부하 저항 R 과 역VSWR이 미소진동 을 하며 감소하고 있음을 보여준다. 이때 부하 리액턴스 X 는 거의 일정하게 유지된다. 그림에서 대체로 안테나 사이의 위상차가 70° 근처에서 최대 부하저항과 최소 VSWR 값을 가짐을 알 수 있 다. 한편 플라즈마 온도 T_0 변화에 따른 부하와 VSWR 의 변화가 거의 없음을 그림 3 으로부터 볼 수 있다. 대체로 안테나 사이의 위상차가 75° 근처에서 최대 부하저항과 최소 VSWR 값을 가 짐을 알 수 있다.

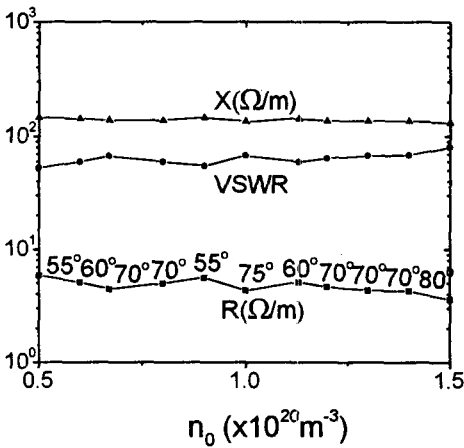


그림 2. 플라즈마 밀도 변화에 따른 부하와 VSWR

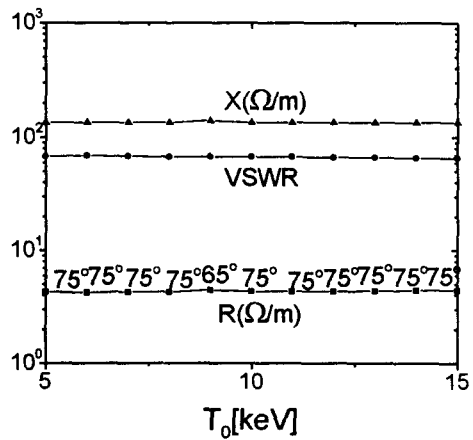


그림 3. 플라즈마 온도 변화에 따른 부하와 VSWR

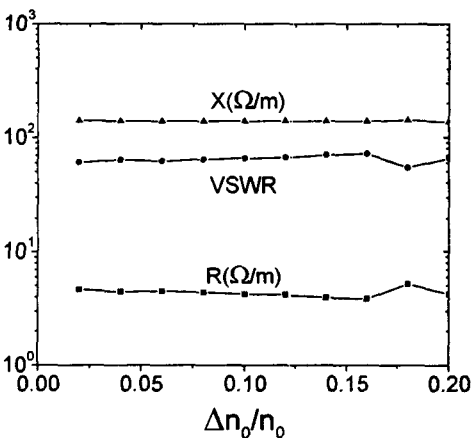


그림 4. 플라즈마 밀도비 변화에 따른 부하와 VSWR

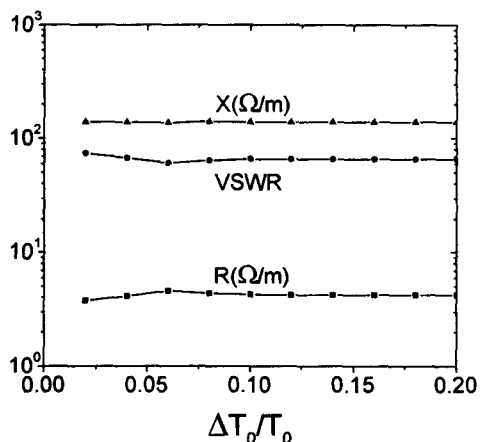


그림 5. 플라즈마 온도비 변화에 따른 부하와 VSWR

그림 4 는 플라즈마 전류밀도비(플라즈마 언저리/중심) 의 변화에 따른 부하와 VSWR 의 변화를 보여준다. 그림 4 와 5 에서 안테나 사이의 위상차는 70° 로 고정시켰다. 전류밀도비가 증가함에 따라 부하 저항 R 과 역VSWR이 선형적으로 0.16까지 감소하고 있음을 보여준다. 이때 부하 리액턴스 X 는 거의 일정하게 유지된다. 한편 플라즈마 온도비(플라즈마 언저리/중심) 변화에 따른 부하와 VSWR 의 변화가 0.06 이후 거의 없음을 그림 5 로부터 볼 수 있다.

이번에는 안테나 매개변수-송전선의 특성저항, 안테나 폴로이달 길이, 안테나 위치-와 부하와 VSWR 사이의 상관 관계를 살펴 본다. 그림 6, 7, 8 에서 안테나 사이의 위상차는 70° 로 고정시켰다. 그림 6 은 송전선의 특성저항 R_c 의 변화에 따른 VSWR 의 변화를 보여준다. 전류밀도가 증가함에 따라 VSWR이 점차 감소하다가 50Ω 근처에서 최소값을 갖고 다시 증가함을 보여준다.

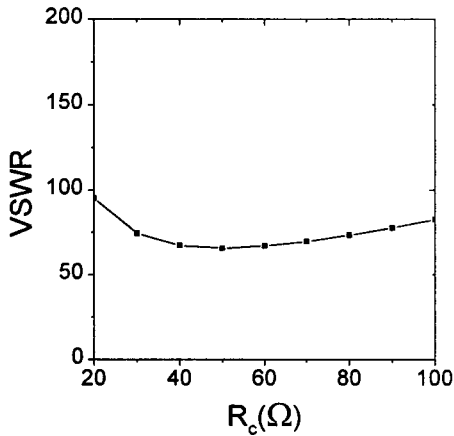


그림 6. 송전선의 특성저항 변화에 따른 VSWR

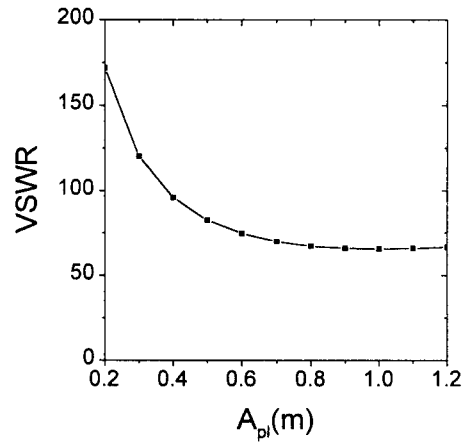


그림 7. 안테나 폴로이달 길이 변화에 따른 VSWR

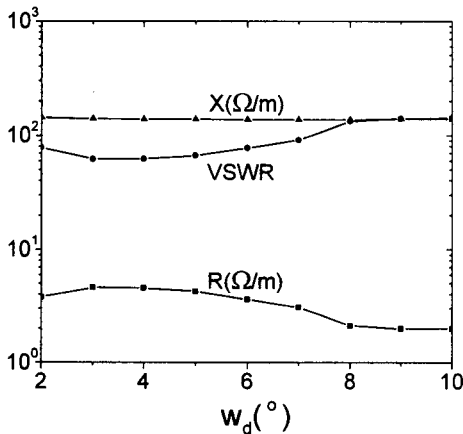


그림 8. 안테나 사이의 간격 변화에 따른 부하와 VSWR

한편 안테나 플로이달 길이 A_p 변화에 따른 VSWR의 변화가 0.9까지 감소하다가 그 이후 거의 일정함을 그림 7로부터 볼 수 있다. 대체로 안테나 플로이달 길이가 1.0 근처에서 최소 VSWR 값을 가짐을 알 수 있다. 그림 8은 안테나 사이의 간격 변화에 따른 부하와 VSWR의 변화를 보여준다. 안테나 간격이 증가함에 따라 부하 저항 R 과 역VSWR이 증가하다가 4° 이후 8° 까지 감소한 후 거의 일정해 짐을 보여준다. 이때 부하 리액턴스 X 는 거의 일정하게 유지된다. 그림으로부터 최적의 안테나 간격이 4° 근처임을 알 수 있다.

IV. 결 론

2차원 파동 코드와 안테나 모듈을 사용하여 KSTAR 토카막 플라즈마의 전류구동을 위한 RF안테나 제작시 최적조건에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과 플라즈마 매개변수 변화에 따른 부하와 VSWR값이 대체로 안정된 값을 갖고 있음을 볼 수 있었다. 송전선의 특성저항 $R_c=50\Omega$, 안테나 플로이달(poloidal) 길이 $A_p=1.0m$, 안테나 사이의 간격 $w_d=4^\circ$ 근처에서 최적의 안테나 조건을 갖음을 알 수 있었다. 수치계산으로부터 부하저항값이 다소 낮게 나왔는데 이것은 송전선의 전압 조건에 나쁜 영향을 준다. 따라서 앞으로 좀더 높은 부하저항값을 얻기위한 연구를 수행하고자 한다. 더불어 VSWR 값을 보다 낮게 하는 연구를 수행함으로써 경제성 있는 안테나 제작에 도움을 주고자 한다. 그리고 플라즈마 가열시 최적의 안테나 조건도 찾을 계획이다. 또한 보다 정확한 계산 결과를 얻기 위해서 홈(recess) 안에 안테나가 들어가 있는 안테나 모형에 대한 연구를 3차원 안테나 코드를 이용하여 연구하고자 한다.

참고문헌

1. G.S. Lee et al., Bull. Ame. Phys. Soc. 41, 1439 (1996).
2. Kiyotaka Hamamatsu et al., Japan. J. Appl. Phys. 26, 1525 (1987).