

커플링이 고려된 KSTAR ICRF 안테나의 8포트 전송선 회로 모델링 및 측정 결과 비교

김선호* · 왕선정 · 황철규 · 곽종구

한국원자력연구원 핵융합공학기술개발부, 대전 305-353

(2009년 12월 10일 받음, 2010년 1월 12일 수정, 2010년 1월 22일 확정)

KSTAR ICRF 시스템에서 안테나 전류띠 간 커플링에 의한 전류띠의 전압, 전류 분포 변화와 전류띠 간 전력 전달에 의한 공명현상 그리고 전송선상의 이상 전압 분포 등을 예측하거나 분석하는 것은 그것의 안정적이고 신뢰성 있는 운전을 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 이러한 전류띠 간 커플링에 의한 현상들을 이해하기 위해 ICRF 안테나에서 측정된 S-parameter를 커플링이 고려된 8포트 전송선회로 모델에 적용하여 전류띠의 전송선 회로 모델을 완성하였다. 완성된 전송선 회로모델의 자체유도계수, 상호유도계수, 전기용량성 등은 전류띠의 유한한 길이로 인하여 2D 모델의 값보다 작은 것으로 나타났다. 커플링이 고려된 전류띠의 전송선 회로모델은 공명루프와 결합되어 있는 KSTAR ICRF 시스템의 운전에 활용될 것이다.

주제어 : ICRF 안테나, 커플링, 전송선 회로모델링, KSTAR

I. 서 론

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) ICRF 시스템은 30~60 MHz의 운전주파수를 가지며 최대 6 MW의 전력을 KSTAR 플라즈마에 입사하여 이온과 전자를 가열하고 전류를 구동하는 것이 목표이다 [1]. 현재 KSTAR 토카막에 설치되어 있는 ICRF (Ion Cyclotron Range Frequency) 안테나는 4 개의 전류띠와 8 개의 고주파 입력 포트가 구성되어 있다. 이는 전류띠의 전류 진폭과 위상을 조절하여 플라즈마의 가열과 전류구동 효율을 높이기 위한 것이다.

위와 같이 구성된 ICRF 안테나의 각각의 전류띠는 이상적으로 볼 때 독립적으로 작동되어야 한다. 그렇지만 전류띠 간 커플링에 의해 전류띠에 비대칭적인 전압 전류 분포가 나타나거나 전력이 플라즈마로 전달되는 라디에이션 (Radiation) 부하가 아닌 기생부하로 소모될 가능성이 있다. 따라서, 안테나 전류띠간 커플링에 의한 효과를 예측하거나 해석할 수 있는 전송선 회로 모델이 필요하다. 본 연구에서는 커플링이 고려된 8포트 전송선 회로 모델을 구성하고 안테나에서 측정된 S-Parameter를 이용하여 완성함으로써 ICRF 시스템 운전에 활용될 수 있도록 하였다.

I장 1절과 2절에서는 전송선 회로 모델링에 필요한 ICRF

안테나의 기하학적, 전기적 제원을 소개하고, II장에서는 안테나의 S-parameter 측정 방법 및 측정 데이터의 분석 결과를 기술하였다. III장에서는 커플링이 고려된 8포트 전송선 회로 모델과 S-parameter의 계산 방법을 제시하였다. IV장에서는 측정된 S-parameter와 회로모델의 S-parameter를 비교하여 안테나 전류띠의 전기적 특성 변수들을 결정하고 그 분석결과를 기술하였다. 마지막 V장에서는 연구내용을 정리하였다.

1. KSTAR ICRF 안테나의 기하학적 제원

Fig. 1은 KSTAR ICRF 안테나로 주요 구성부품인 전류띠, 진공전송선 등의 모습을 보여준다 [2]. KSTAR ICRF 안테나는 구리로 도금된 4개의 전류띠로 구성되어 있으며 각 전류띠의 끝에는 39 Ohm의 진공 전송선이 설치되어 있다. 여기서 4개의 전류띠를 구분하기 위해 안테나를 정면에서 보았을 때 좌측에서부터 1번부터 4번까지 전류띠에 번호를 부여하였다. 플라즈마를 대면하는 전류띠 각각의 길이는 667 mm로서 4개의 전류띠 모두 동일하고 진공전송선의 길이는 2,322 mm로서 이것 역시 4개의 전류띠 모두 동일하다. 안테나의 각 전류띠는 기계적 지지를 겸한 중앙의 접지를 기준으로 다시 상하로 나누어져 있으며 이는

* [전자우편] shkim95@kaeri.re.kr

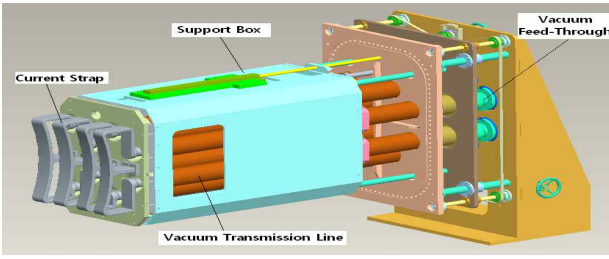


Figure 1. KSTAR ICRF Antenna.

Table 1. Geometrical parameters of ICRF antenna.

Current Strap (Port)	Items	Length [mm]
1 (1,2) 3 (5,6)	STRAP	667
	STRAP to VTL (STVT)	320
	Vacuum Transmission Line (VTL)	2,322
2 (3,4) 4(7,8)	STRAP	667
	STRAP to VTL (STVT)	468
	Vacuum Transmission Line (VTL)	2,322

공명루프 상하 전송선 길이의 차가 반파장이 될 때 중앙에서 연속적인 전류 분포를 갖게된다. 플라즈마를 대면하는 전류띠의 끝에서 진공전송선 입구까지의 길이는 1번과 3번 전류띠의 경우 320 mm, 2번과 4번 전류띠의 경우 468 mm로 약 150 mm의 길이 차이가 있다. 이는 진공전송선 외경이 전류띠의 간격보다 크므로 그 길이를 다르게하여 공간적으로 진공전송선이 겹치는 문제를 해결하기 위한 것이다. 하지만 이 길이의 차이는 30~60 MHz에서 그 파장에 비하여 상당히 작기 때문에 무시할 수 있다. Table 1은 안테나의 기하학적 제원이다.

2. ICRF 안테나의 전기적 제원

KSTAR ICRF 안테나 전류띠의 전기적 특성은 자체유도계수와 상호유도계수 그리고 유효 전기용량으로 표현할 수 있다. Table 2의 전기적 제원은 안테나 설계를 위해 전류띠를 하나의 사각 단면을 가지는 무한한 길이의 도체로 가정한 2D 모델로부터 계산한 것이다. 유도계수는 벡터포텐셜에 대하여 Laplace 방정식을 이용하여 전류띠의 자기장 분포를 계산하고, 그 결과 얻어진 자장을 전류띠 둘레에 대하여 선적분하여 얻어지는 전류로부터 산출되었다. 전기용량은 공동내에 저장된 총에너지에 대한 인가한 전압의 제

Table 2. Electrical Parameters of ICRF antenna.

Strap	Electrical Parameters	Value
1, 4	Self Inductance [nH/m]	256
2, 3		259
12, 34	Mutual Inductance [nH/m]	21
23		20
13, 24		2.61
14		0.94
1, 4	Effective Capacitance [pF/m]	117
2, 3		117

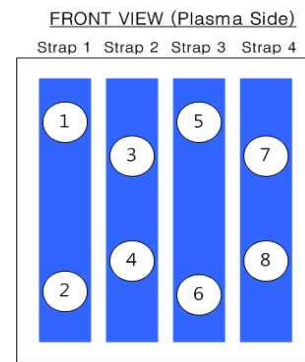


Figure 2. Port number of Antenna.

곱에 대한 비로 계산되었다 [2].

II. S-parameter의 측정과 분석

1. S-parameter의 측정

S-parameter는 임의의 두 포트간에 입력파와 출력파의 전압 비를 나타내는 것으로 두 포트간의 상호 커플링의 정도를 나타내는 물리량이다. 통상 수학적으로는 다음과 같이 나타낸다.

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0, k \neq j} \quad (1)$$

S-parameter의 측정은 HP 4396A Network analyzer를 이용하였다. 반사계수를 측정할 때는 측정포트를 제외한 나머지 7개 포트를 모두 50 Ohm으로 종단 처리하였고, 전달계수를 측정할 때는 측정하고자 하는 두 포트를 제외

한 나머지 6개 포트를 50 Ohm으로 종단 처리하였다. S-parameter의 구체적인 표기를 위하여 각 포트에 Fig. 2와 같이 일련번호를 부여하였다.

현재 안테나의 시스템은 모두 8개의 포트에 구성되어 있으므로 이에 따른 S-parameter는 다음과 같은 8×8 정방행렬로 표현할 수 있다.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{18} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{28} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{81} & S_{82} & \dots & S_{88} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2. 측정 결과 및 분석

2.1. Reciprocal 특성

능동 소자, 페라이트 또는 플라즈마가 아닌 일반적인 수동 소자의 S-parameter는 두 포트의 위치를 바꾸어 S-parameter를 측정하여도 그 값이 변하지 않는 reciprocal 특성을 나타낸다. 즉 S와 S^T는 같은 행렬이 된다. 현재의 안테나 시스템도 그러한 특성을 보이며 Fig. 3(a)와 3(b)는 S₁₈과 S₈₁, S₄₅와 S₅₄의 reciprocal 특성을 각각 보여준다.

2.2 상하 대칭성

1.1.1에서 설명하였듯이 KSTAR ICRF 안테나는 각 전류 띠가 중앙의 접지를 중심으로 상하가 대칭성을 띤 구조이

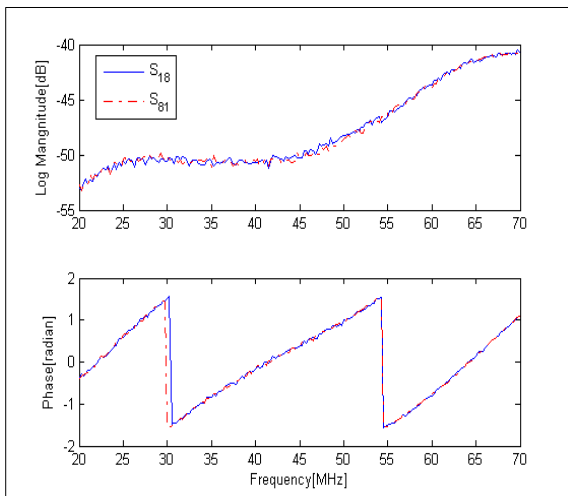


Figure 3(a). Reciprocal property (S₁₈/S₈₁).

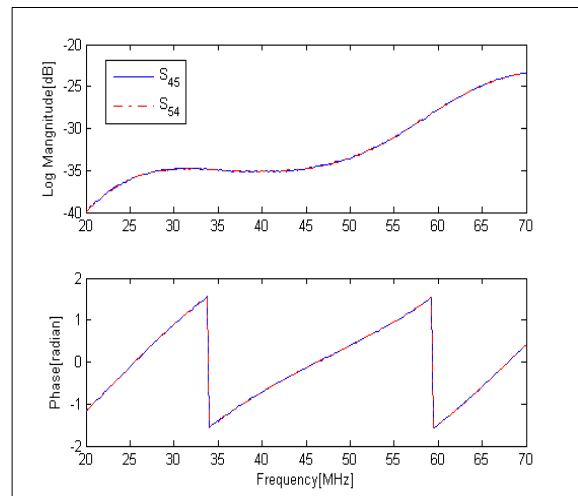


Figure 3(b). Reciprocal property (S₄₅/S₅₄).

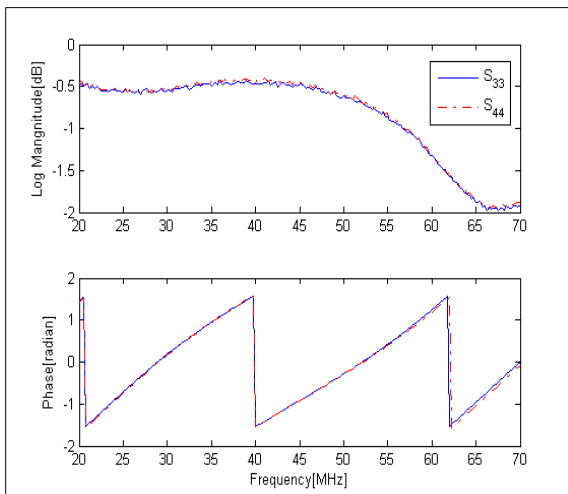


Figure 4(a). Top-Bottom Symmetry(S₃₃/S₄₄).

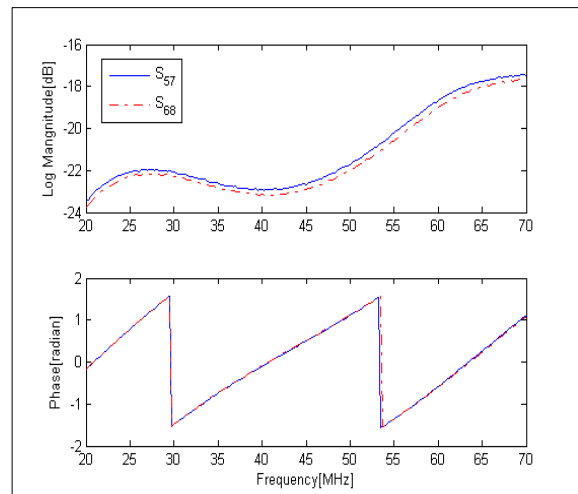


Figure 4(b). Top-Bottom Symmetry(S₅₇/S₆₈).

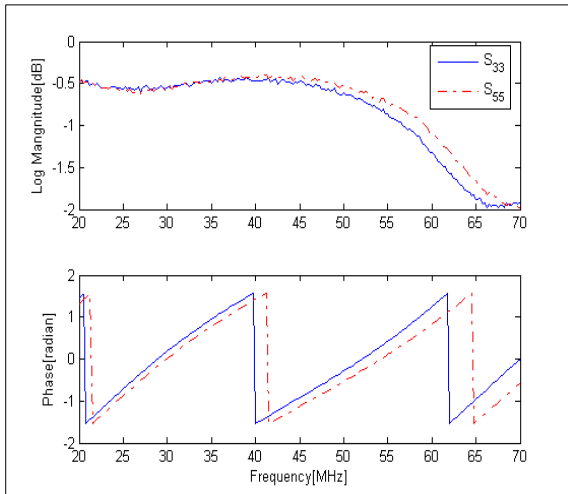


Figure 5(a). Left-Right Symmetry(S_{33}/S_{55}).

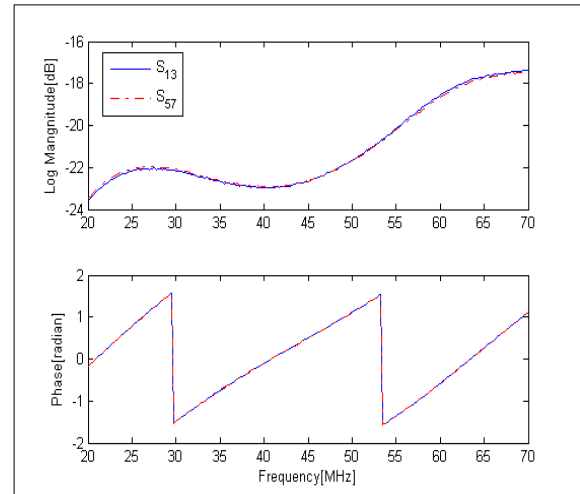


Figure 5(b). Left-Right Symmetry(S_{13}/S_{57}).

Table 3. Classification of S-parameters with respect to Scale.

Level	S- parameters
1	$S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{44}, S_{55}, S_{66}, S_{77}, S_{88}$
2	$S_{12}, S_{34}, S_{56}, S_{78}$
3	$S_{13}, S_{24}, S_{35}, S_{46}, S_{57}, S_{68}$
4	$S_{14}, S_{23}, S_{36}, S_{45}, S_{58}, S_{67}$
5	$S_{15}, S_{26}, S_{37}, S_{48}$
6	$S_{16}, S_{25}, S_{38}, S_{47}$
7	S_{17}, S_{28}
8	S_{18}, S_{27}

므로 전기적 특성을 나타내는 S-parameter 역시 상하의 대칭성을 가져야 한다. Fig. 4(a)와 4(b)는 S-parameter의 상하 대칭성을 잘 보여주는 측정 결과로서 나머지 모든 경우에 대해서도 이러한 상하 대칭성을 확인하였다.

2.3 좌우 대칭성

앞에서도 설명하였듯이 안테나의 4개의 전류띠는 모두 같은 길이의 플라즈마 대면 전류띠와 진공 전송선을 가지고 있지만 1번과 3번의 전류띠 끝에서 진공전송선까지의 길이가 2번과 4번의 길이보다 약 150 mm 정도 짧다. 그렇지만 이 길이는 KSTAR ICRF 안테나의 운전 주파수 범위가 30~60 MHz라는 것을 고려하면 그 주파수의 파장에 비하여 상당히 작은 거리이므로 무시할 수 있다. 물론 주파수가 커짐에 따라 그 효과가 점점 커질 것이므로 이에 따른 대칭성의 깨짐을 예측할 수 있다. Fig. 5(a)는 그러한 특성

을 잘 보여준다. 한편 Fig. 5(b)와 같이 완전히 일치하는 경우를 볼 수가 있는데 이는 두 커플링 포트간의 기하학적 배치가 동일하기 때문이다.

2.4 Scale 특성

앞에서 설명한 바와 같이 S-parameter는 두 포트간의 커플링을 표시하는 물리량으로 현 안테나 시스템에서는 8포트로 구성되어 64개의 구성성분을 갖는다. 따라서, 많은 수의 S-parameter 가운데서 그 크기를 비교하여 선택적으로 회로모델에 이용할 필요가 있다. Table 3은 S 행렬 각 성분의 크기를 8개의 level로 분류하여 나타낸 것이다. Table 3과 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 S-parameter의 상대적 크기는 두 포트간의 물리적 거리에 의해 주로 결정됨을 알 수 있다. 이는 두 도체간의 커플링은 상호유도계수에 의해 결정되고 상호유도계수는 두 도체간의 거리가 가까울수록 커지기 때문이다. Fig. 6(a)와 6(b)는 8개 level의 대표적인 S-parameter를 보여준다.

III. 전류띠에 대한 8포트 회로모델 및 S-parameter 계산

1. Coupling을 고려한 전송선 회로 모델

커플링이 고려된 전송선 모델은 기존의 전송선 모델에 각 전송선 간의 상호 커플링을 나타내는 상호유도계수를 도입하여 다음과 같은 전송선 방정식으로 기술할 수 있다 [2].

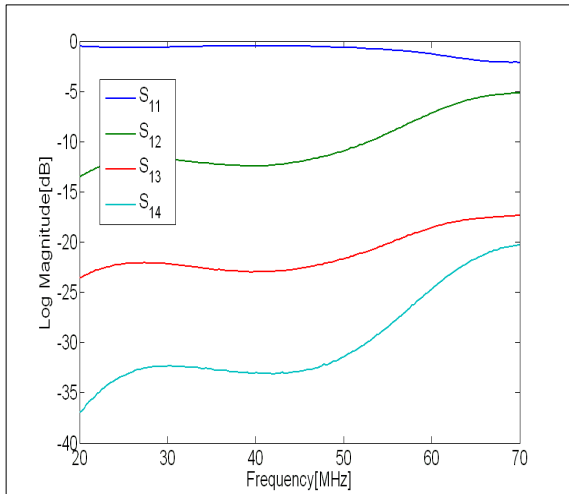


Figure 6(a). Scale of S₁₁/S₁₂/S₁₃/S₁₄.

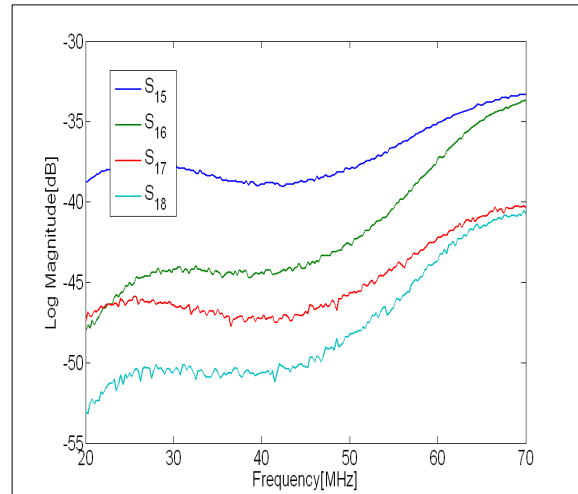


Figure 6(b). Scale of S₁₅/S₁₆/S₁₇/S₁₈.

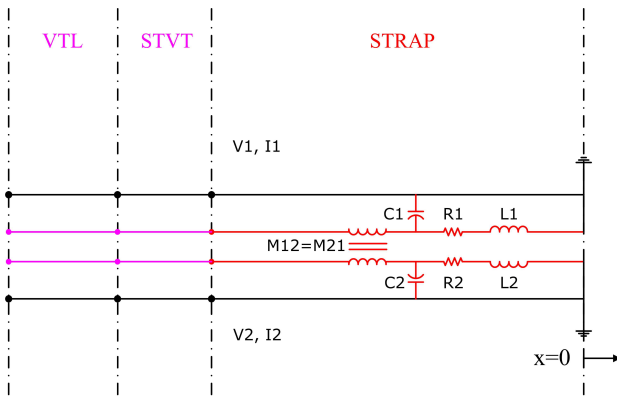


Figure 7. Two port Transmission Line model with coupling

$$\begin{cases} \frac{dV_i}{dx} = I_i R_i + j\omega \left(L_i I_i + \sum_{i \neq j} M_{ij} I_j \right), & i, j = 1, 2, 3, \dots, 8 \\ \frac{dI_i}{dx} = j\omega C_i V_i \end{cases} \quad (3)$$

여기서 R_i, L_i, C_i는 각각 i번째 포트에 연결에 전류피의 저항, 자체유도계수, 전기용량을 나타낸다. M_{ij}는 i와 j번째 포트에 연결된 전류피간 상호유도계수를 나타낸다. 논의의 편의를 위하여 여기에서는 간단히 두개의 포트만을 가정하여 설명하도록 한다. 두개의 포트에 대한 전송선의 회로도도 Fig. 7과 같다. 여기서 VTL은 진공전송선(Vacuum Transmission Line), STVT는 전류피와 진공전송선의 연결 부분(Strap To Vacuum Transmission Line)를 나타낸다.

그리고 회로모델을 행렬을 이용하여 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(R_1 + j\omega L_1) & -j\omega M_{12} \\ 0 & 0 & -j\omega M_{21} & -(R_2 + j\omega L_2) \\ -j\omega C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -j\omega C_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)는 4개의 변수에 대한 일차 연립 미분방정식으로서 식 (5)와 같은 해를 가진다.

$$\begin{bmatrix} V_1(x) \\ V_2(x) \\ I_1(x) \\ I_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\lambda_3 x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_4 x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 좌측항은 전압 전류 벡터, 우측항은 식 (4)의 정방행렬의 고유행렬, 고유값의 지수 행렬 그리고 미지 상수 벡터를 각각 나타낸다.

2. 회로모델을 이용한 S-parameter의 계산

III장 1절에서 설명된 전송선 회로 모델로부터 S-parameter를 계산하기 위해서 본 연구에서는 경계조건을 쉽게 설정할 수 있는 임피던스 행렬을 이용하였다. 임피던스 행렬은 여러 개의 포트를 가진 시스템에서 각 포트의 전압과 전류에 대한 비를 나타내는 행렬이다. 이는 두 입력 포트에 대하여 두 포트를 제외한 나머지 포트의 전류를 0으로 설정한 후 한 포트에 단위 전류를 설정하였을 때 다른 한 포트에 유기되는 전압을 이용하면 계산할 수 있다. 임피던스 행렬은 식 (6)과 같은 수식으로 표현되며

$$Z_{ij} = \left. \frac{V_i}{I_j} \right|_{I_k=0, k \neq j} = \left. \frac{V_i(d)}{I_j(d)} \right|_{I_k=0, k \neq j} \quad (6)$$

임피던스 행렬은 다음과 같은 행렬변환에 의하여 S-parameter로 변환할 수 있다 [3].

$$S = (Z + U)^{-1} (Z - U) \quad (7)$$

여기서 U는 단위행렬이다. 구체적인 계산순서는 다음과 같다.

2.1 S-parameter의 계산 순서

1) 경계 조건의 설정

해 (5)는 전압과 전류의 위치에 따른 분포를 나타내는 것으로 이로부터 임피던스 행렬을 알 수 있다. 하지만 해 (5)는 아직 계수들이 결정되지 않았으므로 이를 결정하기위해 먼저 경계조건을 설정해야 한다. 우선 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 전류띠의 중앙부분은 접지되어 있으므로 이로부터 두개의 전압 조건이 도출된다. 즉,

$$V_j(0) = 0, j = 1, 2 \quad (8)$$

한편 임피던스 행렬의 j열을 계산하기 위해서는 j번째 포트의 전류는 1로, 나머지 포트의 전류는 0으로 설정해야 한다. 이것의 경계조건은 식 (9)와 같다.

$$I_j(d) = 1, I_{k \neq j}(d) = 0, j = 1, 2 \quad (9)$$

2) 계수의 결정

1)의 경계 조건을 해 (5)에 대입하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\lambda_1 d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_2 d} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1(0) \\ V_2(0) \\ I_1(d) \\ I_2(d) \end{bmatrix} \quad (10)$$

3) 임피던스 행렬의 계산

해 (5)에 식 (10)의 계수를 대입하여 포트의 전압을 계산하면 이것이 곧 임피던스 행렬이 되는데 이는 입력 포트에 단위 전류를 설정하였기 때문이다. (10)을 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다. 전류는 계산이 올바르게 이뤄졌는지

확인할 수 있는 지표가 된다.

$$\begin{bmatrix} V_1(d) \\ V_2(d) \\ I_1(d) \\ I_2(d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 d} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\lambda_1 d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_2 d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\lambda_1 d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_2 d} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1(0) \\ V_2(0) \\ I_1(d) \\ I_2(d) \end{bmatrix} \quad (11)$$

j번째 포트에 단위 전류를 인가하였을 때 i번째 포트에 걸린 전압을 $V_{ij}(d)$ 라고 표기하면 임피던스 행렬은 식 (12)와 같이 표시된다.

$$Z = \begin{bmatrix} V_{11}(d) & V_{12}(d) \\ V_{21}(d) & V_{22}(d) \end{bmatrix} \quad (12)$$

4) S-parameter 행렬 계산

임피던스 Z 행렬이 계산되었으므로 마지막으로 식 (7)에 의하여 S-parameter 행렬을 계산하면 되는데 (12)의 임피던스 행렬은 규격화되어 있지 않으므로 이를 50 Ohm을 기준으로 규격화하여 식 (7)에 대입하여 계산하면 최종적인 50 Ohm 기준의 S-parameter를 얻을 수 있다.

5) S-parameter의 변환

4)에서 계산된 S-parameter는 Fig. 7에서 전류띠 끝을 기준면으로 하여 계산된 S-parameter이다. 따라서, 진공 전송선 끝에서 측정된 S-parameter와 비교를 위해서는 전류띠 끝에서 계산된 S-parameter를 진공전송선 끝을 기준면으로 하는 S-parameter로 변환하여야 한다. S-parameter의 기준면의 변화에 따른 변환은 식 (13)으로 가능하다 [2].

$$S' = RSR \quad \text{where, } R = \begin{bmatrix} e^{-j\theta_1} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta_2} \end{bmatrix}, \theta_i = \beta_i l_i \quad (13)$$

여기서 β_i, l_i 는 각각 포트 i에서 기준면의 변화를 주는 전송선의 전파상수와 길이를 각각 나타낸다.

IV. 회로모델의 전기적 변수 결정과 특성분석

II장에서 보여주었듯이 실제 측정된 S-parameter는 이론적으로 예측되는 상하 대칭이나, 좌우 대칭이 비교적 잘

성립하고 거리가 먼 전류띠 간의 커플링은 가까운 전류띠 간 커플링에 비하여 작으므로 무시할 수 있다. 따라서, S-parameter의 계산에 측정 결과의 특성을 그대로 활용하여 식 (14)와 (15)와 같은 가정을 적용한다.

1) scale 특성에 따라 :

$$M_{15} = M_{16} = M_{17} = M_{18} = 0 \quad (14)$$

2) 상하 그리고 좌우 대칭성에 따라 :

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 = P_7 = P_8 \\ P_3 &= P_4 = P_5 = P_6, P = L, R, C \\ M_{12} &= M_{78}, M_{34} = M_{56} \\ M_{13} &= M_{24} = M_{57} = M_{68}, M_{35} = M_{46} \\ M_{14} &= M_{23} = M_{58} = M_{67}, M_{36} = M_{45} \end{aligned} \quad (15)$$

회로 모델의 전류띠에 대한 전기적 특성 변수 R, L, C 그리고 M은 Table 2의 값을 초기값으로 설정한 후 그 값을 조금씩 바꿔가면서 실제 측정된 S-parameter와 비교하여 결정하였다. 전류띠 상하의 상호유도계수 초기값은 전류띠를 2D의 무한한 길이의 도체로 가정하여 구할 수 없으므로 측정된 S-parameter의 상대적 크기를 이용하였다. Fig. 8(a)는 바깥쪽 전류띠 1번과 2번 전류띠의 주요 S-parameter인 S₁₁, S₁₂ 그리고 S₁₃의 측정값(초록 실선)과 계산값(파란 점선)을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 8(b)는 2번과 3번 전류띠의 주요 S-parameter인 S₃₃, S₃₄ 그리고 S₃₅를

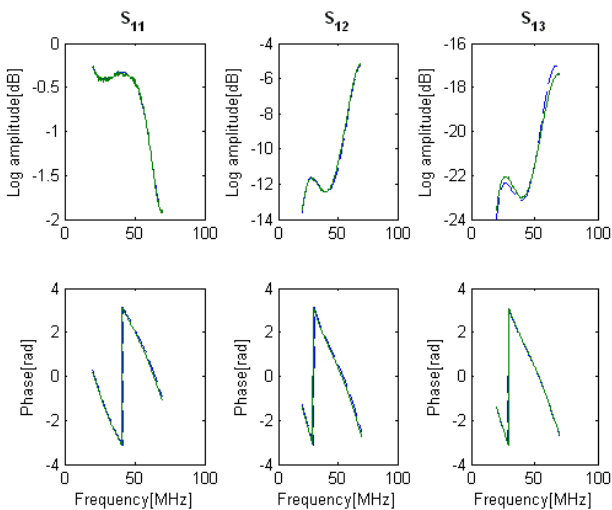


Figure 8(a). Comparison of measurement (solid) and calculation (dash) of S₁₁, S₁₂, S₁₃.

비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 가장 큰 level을 나타내는 S-parameter인 S₁₁과 S₃₃ 그리고 다음 level의 S₁₂와 S₃₄의 크기와 위상은 측정과 계산이 잘 일치한다. 그 다음 레벨의 S₁₃과 S₃₅는 그 크기가 조금 차이를 볼 수 있는데 이는 고려되지 않은 상호 유도 계수인 M₁₅, M₁₆, M₁₇, M₁₈ 등 때문이다. 측정된 S-parameter와 회로모델로부터 계산한 S-parameter를 비교하여 결정된 R, L, C 그리고 M의 값은 Table 4에 있다.

R은 매우 작은 값으로 S-parameter의 결정에 큰 영향을 미치지 않으므로 여기서는 50 Ohm 진공전송선에서 이

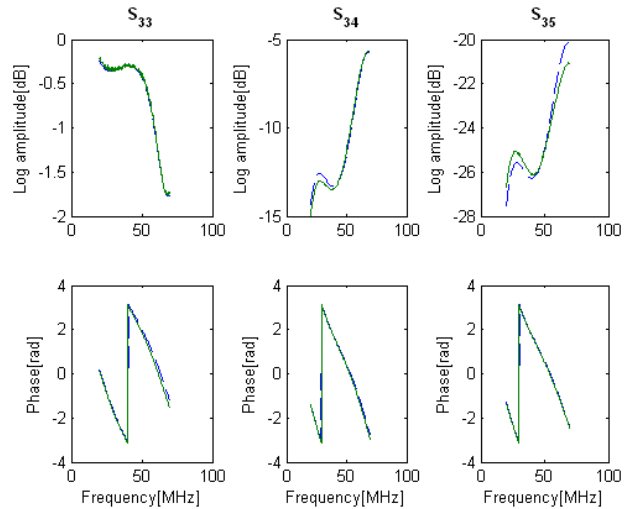


Figure 8(b). Comparison of measurement (solid) and calculation (dash) of S₃₃, S₃₄, S₃₅.

Table 4. Electrical parameters determined by comparison of S-parameters.

Electrical parameters		Value
Resistance [mOhm/m]	R ₁ ~ R ₈	6.3
Self Inductance [nH/m]	L ₁ , L ₂ , L ₇ , L ₈	192
	L ₃ , L ₄ , L ₅ , L ₆	135
Capacitance [pF/m]	C ₁ , C ₂ , C ₇ , C ₈	129
	C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₆	82
Mutual Inductance [nH/m]	M ₁₂ , M ₇₈ (Lev.2)	75
	M ₃₄ , M ₅₆ (Lev.2)	69
	M ₁₃ , M ₂₄ , M ₅₇ , M ₆₈ (Lev.3)	23
	M ₃₅ , M ₄₆ (Lev.3)	15.3
	M ₁₄ , M ₂₃ , M ₅₈ , M ₆₇ (Lev.4)	7.7
	M ₃₆ , M ₄₅ (Lev.4)	3.7

론적으로 계산된 값인 6.3 mOhm/m으로 하였다. 자체 유도 계수의 평균은 164 nH/m로서 2D 모델로 계산된 Table 2의 평균 자체유도계수인 258 nH/m보다 작은 값을 가지는데 이는 유한한 길이의 직선 도체의 자체유도계수가 무한한 길이를 가정한 직선 도체의 자체유도계수보다 작기 때문이다. 한편 전류띠의 평균 유효 용량성은 106 pF/m로서 모델로 계산된 Table 2의 117 pF/m보다 작는데 이것 역시 유한한 길이의 전류띠에 기인한 것이다.

Level 2의 상호 유도 계수인 M_{12} , M_{34} 는 각각 75, 69 nH/m로 계산되었으며 level 3, level 4의 상호유도계수 M_{13} , M_{35} 와 M_{14} , M_{36} 은 각각 23 nH/m, 15.3 nH/m와 7.7nH/m, 3.7nH/m로 계산되었다. 같은 level 3의 상호유도계수 M_{13} 이 M_{35} 보다 그리고 같은 level 4의 M_{14} 가 M_{36} 보다 비교적 큰 값을 가지는 것은 Faraday Shield의 냉각관 설치를 위해 안쪽의 2번 3번 전류띠의 거리가 바깥쪽의 1번, 2번 또는 3번, 4번의 전류띠간 거리보다 멀게 제작되었기 때문이다. 전체적으로 볼때, 측정된 S-parameter에서 포트간 S-parameter가 클수록 상호유도 계수가 클 것으로 예측할 수 있듯이 S-parameter의 level이 높을수록 계산된 상호 유도 계수가 크게 나타났다.

V. 결론

실험적으로 S-parameter를 측정, 분석하여 안테나 전류띠의 기하학적 배치에 따른 상하, 좌우 대칭성을 확인하였으며 커플링의 정도를 나타내는 S-parameter의 상대적 크기를 분류하였다. 이를 바탕으로 커플링이 고려된 8포트 회로모델에 level 4까지의 커플링을 고려하고 상하, 좌우 대칭의 특성을 이용하여 S-parameter를 계산하였다. 그

리고 이를 실제 측정된 S-parameter와 비교하여 회로모델의 전기적 특성 변수들을 결정하였다. 결정된 전기적 특성변수들은 2D 모델로 계산된 전기적 특성 변수와 비교하여 작은 값을 가지는 것으로 나타났으며 2D 모델로 계산되지 않은 전류띠 상하간의 상호유도계수도 결정할 수 있었다. 이렇게 완성된 커플링이 고려된 8포트 전송선 회로모델은 KSTAR ICRF 운전에 있어 중요한 전류띠의 전압, 전류 분포의 계산이나 전류띠간 전력 전달에 의한 공명현상 그리고 전송선상의 이상 전압 분포 등을 예측하거나 분석하는데 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 2009년 ICRF를 이용한 가열 및 전류구동 연구 프로젝트 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B.G. Hong, Y.D. Bae, C.K. Hwang, J.G. Kwak, M.H. Ju, D.W. Swain, P.M. Ryan, and B.W. Riermer, Proceedings of the 20th SOFT 1, 303(1998).
- [2] 배영덕, 황철규, 홍봉근, 윤재성, 왕선정, "KSTAR ICH 안테나 공학 설계 및 제작"에 관한 기술 보고서, 한국원자력연구원(1999).
- [3] D. M. Pozar, MICROWAVE ENGINEERING, second edition (John Wiley & Sons, 1998), p. 199.

8-port Coupled Transmission Line Modeling of KSATR ICRF Antenna and Comparison with Measurement

S. H. Kim*, S. J. Wang, C. K. Hwang, and J. G. Kwak

Nuclear Fusion Research Laboratory, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353

(Received December 10, 2009, Revised January 12, 2010, Accepted January 22, 2010)

It is very important to predict and analyze the change of voltage and current distribution of current strap, abnormal voltage distribution of transmission line and resonance phenomenon by coupling between current straps for more stable operation of ICRF system. In this study, to understand those phenomena by coupling, 8-port coupled transmission line model is completed by applying S-parameter measured in the prototype KSTAR ICRF antenna to the model. The determined self-inductance, mutual-inductance and capacitance of antenna straps are shown to be lower than that calculated from 2D approximate model due to finite length of strap. The coupled transmission line model of current strap will be utilized to the operation of ICRF system of KSTAR in the future.

Keywords : ICRF antenna, Coupling, Transmission line modeling, KSTAR

* [E-mail] shkim95@kaeri.re.kr