

# 모드매칭법과 일반산란계수법을 이용한 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관의 산란 특성 해석

## Analysis of Scattering Characteristics of the Rectangular Waveguide with a Horizontal Conducting Post using Mode Matching Method and Generalized Scattering Method

김 원 기 · 김 상 태\* · 신 철 재

Won-Ki Kim · Sang-Tae Kim\* · Chull-Chai Shin

### 요 약

본 논문에서는 내부에 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관에 대하여 모드매칭법과 일반산란계수법을 사용하는 해석법을 제안하였고, 수평 금속봉의 반경 및 높이에 따른 구형 도파관의 산란 특성을 계산하였다. 제안된 방법에 의해 계산된 결과는 실험 결과 및 HFSS의 결과와 비교하여 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 해석법은 수평 금속봉을 사용하는 도파관 관련 부품의 설계에 쉽게 이용될 수 있다.

### Abstract

In this paper, we present the analysis method for a rectangular waveguide with the horizontal conducting post using mode matching method and generalized scattering method. Scattering characteristics of a rectangular waveguide with the horizontal conducting post according to radius and height of the post are simulated by the proposed method. The simulated results by proposed method show good agreement with the measured results and the HFSS's results. Proposed method are easily applied to the design of a waveguide component with horizontal conducting posts.

Key words : Mode Matching Method, Generalized Scattering Method, Horizontal Conducting Post

### I. 서 론

도파관을 사용한 부품의 제작에 있어 가장 많이 사용하고 있는 불연속 구조는 창, 원통형의 봉 등을 들 수 있다. 특히, 도파관 내에서 사용되는 원통형의 봉은 봉의 반경과 높이에 따라 도파관의 임피던스 변화가 가능하다는 장점이 있어 대전력을 견딜 수 있어야 하는 기지국용 도파관 필터, 트랜지션 등 통신 부품에 다양하게 이용되며 이에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 과거 원통형의 봉이 있는 도파관을 해석하기 위해 Green's 함수를 이용한 적분

방법<sup>[1]</sup>, Point 매칭을 이용한 모멘트법<sup>[2]</sup>, 영상 원리를 이용한 영상법<sup>[3]</sup> 등 다양한 방법이 이용되었으나, 이러한 방법은 해석의 복잡성, 긴 계산 시간 등의 단점이 있다. 반면에 모드매칭법은 도파관의 불연속에 의해 발생하는 유효 고차 모드만을 고려하여 계산하므로 정확한 결과, 간단한 해석과정, 빠른 계산 시간의 장점이 있다<sup>[4]-[6]</sup>.

현재 도파관 내부의 원통형 봉에 대한 해석은 봉의 구조, 구성 물질, 위치의 변화 등에 대하여 종합적으로 연구되고 있으나, 이러한 연구의 대부분은 도파관의 옆면에 수직한 봉<sup>[4]-[8]</sup>에 국한되어 있고,

아주대학교 전자공학부(School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

\*한국산업기술평가원(ITEP)

· 논문 번호 : 20040506-061

· 수정완료일자 : 2004년 6월 28일

수평한 봉에 대한 연구는 미비한 실정이다. 특히, 가변 길이의 금속봉의 경우 봉이 길이에 따라 도파관의 특성의 제어가 용이하여 현재 주로 연구하고 있는 구조이며, 수직한 금속봉의 경우 연구가 상당히 진행되어 다양한 부품의 설계 및 제작에 활용되고 있으나, 가변 길이의 수평 금속봉은 이러한 장점에도 불구하고 연구가 매우 미비하여 활용이 어려운 실정이다. 따라서, 가변 길이의 수평 금속봉의 특성에 대한 연구가 매우 필요하다.

구형 도파관의 수평 금속봉에 관한 연구에 있어, L. C. da Silva<sup>[9]</sup>는 구형 도파관의 윗면과 아래면에 동일한 구조의 수직 금속봉이 있는 구조, 구형 도파관의 양 옆면에 동일한 구조의 수평 금속봉이 있는 구조 그리고, 구형 도파관의 내부의 4면에 수직/수평한 금속봉이 위치하는 구조에 대하여 모멘트법을 사용한 해석법을 제안하였고, 실험을 통하여 결과의 타당성을 입증하였으나 해석 과정이 매우 복잡하며, 위의 세 가지 구조 중 수평 금속봉에 대한 해석의 경우 도파관의 양 옆면에 위치한 수평 금속봉의 반경과 높이가 같은 경우에만 적용 가능하다는 단점이 있다. M. Guglielmi<sup>[10]</sup>는 모멘트법에 기초한 Multi-mode network을 사용하여 Inductive와 Capacitive strip이 독립적으로 존재하는 평행판 도파관의 특성을 해석하는 방법을 제안하였으나, 가변의 길이를 갖는 금속봉의 해석에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 또한, Hashemi-Yeganeh<sup>[11]</sup>는 구형 도파관 내부에 존재하는 얇은 금속봉에 의한 전류분포를 모멘트법을 사용하여 해석하는 방법을 제안하였으나, 이 방법 역시 금속봉에 의한 전류의 해석과정이 매우 복잡하다는 단점을 갖는다.

따라서, 본 논문에서는 구형 도파관의 옆면에 수평한 가변 길이의 금속봉을 갖는 구형 도파관의 산란 특성을 모드매칭법을 사용하여 수치적으로 해석하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 다른 수치적 해석법에 비하여 계산 과정이 간단하며 일반 산란 계수법<sup>[12]</sup>과 연계하였을 때 다단의 불연속 구조에도 쉽게 적용할 수 있어 수평 금속봉을 임피던스 튜닝소자로 사용하는 도파관 트랜지션, 필터, 듀플렉서 등 이동/위성 통신 기지국의 도파관 관련 부품의 설계 및 해석에 용이하게 사용될 수 있다.

## II. 수평 금속봉이 있는 구형 도파관의 해석

### 2-1 수평 금속봉이 있는 구형 도파관의 전자계

구형 도파관의 옆면의 중앙에 수평한 금속봉이 위치하는 구조를 그림 1(a)에 나타내었다. 그림 1(a)의 구조를 모드매칭법으로 해석하기 위해서는 주어진 구조에 대하여 적절한 경계면을 설정하고 각 영역에서 전계와 자계를 유도한 후, 경계면에서 전계와 자계의 경계조건을 해석함으로써 계산할 수 있다<sup>[4]-[6]</sup>. 그림 1(b)와 (c)에 주어진 구조를 해석하기 위해 분할된 영역을 나타내었다.

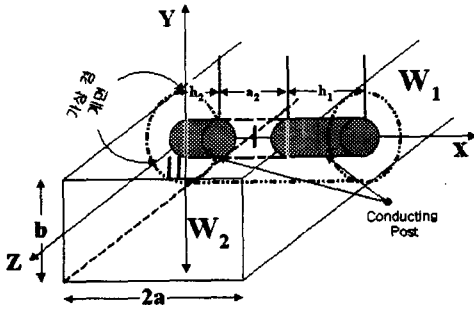
그림 1(b) 및 (c)에서 분할된 영역은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{방사형 도파관영역} & \begin{cases} \text{I:} & \rho \leq r_0, h_2 < x < 2*a - h_1 \\ \text{II:} & r_0 < \rho \leq b, 0 < x < 2*a \end{cases} \\ \text{구형 도파관영역} & \begin{cases} W_1: & \rho > b, 0 < x < 2*a, z < 0 \\ W_2: & \rho > b, 0 < x < 2*a, z > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

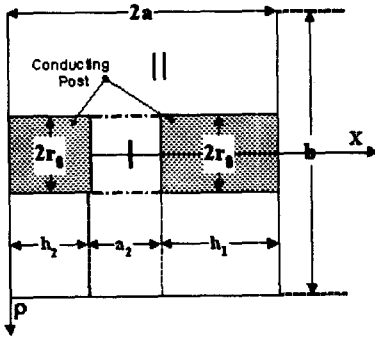
그림 1의 영역 I과 II에서 수평 금속봉에 의하여 산란되는 전자계는 수직 금속봉에 의한 전자계와 마찬가지로 평행판 방사형 도파관에서 원통 좌표계의 맥스웰 방정식에 의해 유도될 수 있다. 수직 금속봉에 의한 전자계와 수평 금속봉에 의한 전자계 유도 과정의 차이는 수직 금속봉에 의한 전자계가 원통 좌표계에서  $xz$  평면에 존재하는 두 평행판 내의  $y$  방향 전파방정식에 의해 유도되었으나<sup>[6],[13]-[15]</sup>, 수평 금속봉의 경우 원통 좌표계에서  $yz$  평면에 존재하는 두 평행판 내의  $x$  방향 전파방정식에 의하여 유도<sup>[9]</sup>된다는 것이다. 따라서, 방사형 도파관 영역에서 전계와 자계의 접선 방향 성분인  $E_{ct}$ 와  $H_{ct}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ct}^R(\rho, \phi, x) = & \sum_{\rho=s,c} \sum_n \sum_m [C_{nm}^{Rpe} J_n(\beta_m^{Re} \rho) \\ & + D_{nm}^{Rpe} Y_n(\beta_m^{Re} \rho)] \vec{e}_{ctnm}^{Rpe}(\rho, \phi, x) \\ & + \sum_{\rho=s,c} \sum_n \sum_m [C_{nm}^{Rph} J_n(\beta_m^{Re} \rho) \\ & + D_{nm}^{Rph} Y_n(\beta_m^{Re} \rho)] |\beta_m^{Re}| \vec{e}_{ctnm}^{Rph}(\rho, \phi, x) \end{aligned} \quad (2a)$$

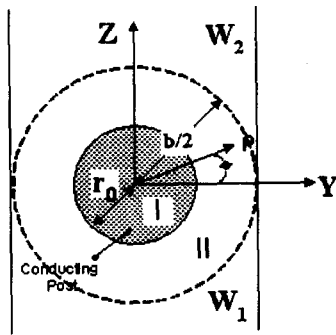
$$\begin{aligned} \vec{H}_{ct}^R(\rho, \phi, x) = & \sum_{\rho=s,c} \sum_n \sum_m [C_{nm}^{Rpe} J_n(\beta_m^{Re} \rho) \\ & + D_{nm}^{Rpe} Y_n(\beta_m^{Re} \rho)] \vec{h}_{ctnm}^{Rpe}(\rho, \phi, x) \\ & + \sum_{\rho=s,c} \sum_n \sum_m [C_{nm}^{Rph} J_n(\beta_m^{Re} \rho) \\ & + D_{nm}^{Rph} Y_n(\beta_m^{Re} \rho)] |\beta_m^{Re}| \vec{h}_{ctnm}^{Rph}(\rho, \phi, x) \end{aligned} \quad (2b)$$



(a) 전체 구조도  
(a) Full structure



(b) 정면도  
(b) Front view



(c) 윗면도  
(c) Top view

그림 1. 수평 금속봉이 존재하는 구형 도파관의 구조  
Fig. 1. The structure of a rectangular waveguide with the horizontal conducting post.

식 (2)에서  $R$ 은 I 또는 II인 영역을 표시하며,  $J_n$ 과  $Y_n$ 는  $\rho$  방향 전파상수에 의해서 결정되는 제 1종과 제2종의 Bessel 함수를 나타낸다.  $n$ 과  $m$ 은 각각  $\phi$ 와  $x$  방향으로의 모드수(mode number)를 뜻하고  $p$ 는  $\phi$  방향으로의 함수인  $\sin \phi$  ( $p=s$ )와  $\cos \phi$

( $p=c$ )를 뜻하고,  $\beta_m^R$ 은  $\rho$  방향 전파상수를 의미한다.  $e_{ctmm}$ 과  $h_{ctmm}$ 는 방사형 도파관에 존재하는  $TE_x(h)$ 와  $TM_x(e)$  모드의 접선방향 성분을 나타낸다.

구형 도파관 영역인  $W_R$  ( $\rho > b$ )에서 전계와 자계는 다음의 식과 같다<sup>[4],[6]</sup>.

$$\begin{Bmatrix} \vec{E}_{W_R}(x, y, z) \\ \vec{H}_{W_R}(x, y, z) \end{Bmatrix} = \sum_{q=TE, TM} \sum_l \sum_i \left[ \begin{Bmatrix} A_{li}^{W_1} \\ B_{li}^{W_1} \end{Bmatrix} \vec{e}_{W_1}^{qF} + \begin{Bmatrix} B_{li}^{W_2} \\ A_{li}^{W_2} \end{Bmatrix} \vec{e}_{W_2}^{qB} \right] \quad (3a)$$

$$\begin{Bmatrix} \vec{H}_{W_R}(x, y, z) \\ \vec{E}_{W_R}(x, y, z) \end{Bmatrix} = \sum_{q=TE, TM} \sum_l \sum_i \left[ \begin{Bmatrix} A_{li}^{W_1} \\ B_{li}^{W_1} \end{Bmatrix} \vec{h}_{W_1}^{qF} - \begin{Bmatrix} B_{li}^{W_2} \\ A_{li}^{W_2} \end{Bmatrix} \vec{h}_{W_2}^{qB} \right] \quad (3b)$$

식 (3)에서  $A_{li}^{W_i}$ 와  $B_{li}^{W_i}$ 는 영역  $W_R$ 에서 진행파와 반사파 성분의 크기이고,  $l$ 과  $i$ 는  $x$ 와  $y$  방향으로의 모드 수이다.  $F$ 는 진행파를  $B$ 는 반사파를 나타내며,  $q$ 는  $TE$  또는  $TM$  모드를 나타낸다.  $\vec{e}_{W_R}$ 와  $\vec{h}_{W_R}$ 는 구형 도파관에서  $z$  방향으로 전파하는 전계와 자계의 정상 모드이다.

### 2-2 수평 금속봉이 있는 구형 도파관의 산란 특성

구형 도파관 내부의 수평 금속봉에 의한 산란 계수는 금속봉이 존재하는 구형 도파관 내부의 전자계에 대한 경계조건과 모드직교성의 원리에 따라 계산할 수 있다<sup>[6]</sup>.

식 (2)와 (3)에 정의된 전계와 자계는  $\rho = r_0, b/2$ 인 면에서 다음의 경계조건을 만족한다.

$$E_{ct}^I - E_{ct}^{II} \Big|_{\rho=r_0} = 0 \quad (4a)$$

$$H_{ct}^I - H_{ct}^{II} \Big|_{\rho=r_0} = \begin{cases} \vec{J}_s^I & \text{도체 표면} \\ 0 & \text{그 외} \end{cases} \quad (4b)$$

$$\begin{aligned} E_{ct}^{II} (b/2, \phi, x) \\ = \delta_1 E_{W_1}(x, y, z) \Big|_{\rho=b/2} + \delta_2 E_{W_2}(x, y, z) \Big|_{\rho=b/2} \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} H_{ct}^{II} (b/2, \phi, x) \\ = \delta_1 H_{W_1}(x, y, z) \Big|_{\rho=b/2} + \delta_2 H_{W_2}(x, y, z) \Big|_{\rho=b/2} \end{aligned} \quad (5b)$$

여기서,  $\begin{cases} \delta_1=1 : \pi < \phi \leq 2\pi \\ \delta_1=0 : 0 < \phi \leq \pi \end{cases}$   $\begin{cases} \delta_2=0 : \pi < \phi \leq 2\pi \\ \delta_2=1 : 0 < \phi \leq \pi \end{cases}$  이다.

영역 I과 II간의 경계조건인 식 (4a)와 (4b)에 각각 영역 II 자계와 영역 I 전계로 외적을 취하면 경

계 조건은 모드직교성의 원리에 따라서 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$[[M_C]] [M_D] \begin{bmatrix} C^{\text{II}} \\ D^{\text{II}} \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

이때  $M_C$ 와  $M_D$ 는 영역 I, II의 전계와 자계에 모드 직교성의 원리가 적용된 정상모드간의 외적 관계를 나타내며,  $C^{\text{II}}$ 와  $D^{\text{II}}$ 는 영역 II의 정상 모드의 전계와 자계의 계수를 나타내는 서브행렬이다.

다음으로 방사형 도파관과 구형 도파관의 불연속 경계면인  $\rho = b/2$ 인 면에서 경계조건이 서로 다른 두 좌표계에서 정의되었으므로 직각좌표계를 원통좌표계로 변환한 후 모드매칭법이 적용되어야 한다. 따라서, 식 (5)에 정의된 구형 도파관 영역의 전계와 자계는 원통좌표계에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \vec{e}_{\hat{w}_i}^{qr} \\ \vec{h}_{\hat{w}_i}^{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}e^{\pm jk_z z} + \hat{\phi}(-e^{\pm jk_z z} \sin \phi \pm e^{\pm jk_z z} \cos \phi) \\ \hat{y}e^{\pm jk_z z} \end{bmatrix} \cdot e^{\mp jk_r \rho \sin \phi} \quad (7a)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{h}_{\hat{w}_i}^{qr} \\ \vec{e}_{\hat{w}_i}^{qr} \end{bmatrix} = \mp \begin{bmatrix} \hat{x}h^{\pm jk_z z} + \hat{\phi}(-h^{\pm jk_z z} \sin \phi \pm h^{\pm jk_z z} \cos \phi) \\ \hat{y}e^{\pm jk_z z} \end{bmatrix} \cdot e^{\mp jk_r \rho \sin \phi} \quad (7b)$$

여기서,  $y = \rho \cos \phi$ ,  $z = \rho \sin \phi$ ,  $x = x_0$ 이다.

마지막으로 식 (5)의 전계와 자계의 경계조건에 영역 II의 자계와 전계로 외적을 취하면 식 (5)는 모드직교성의 원리에 따라 다음의 행렬로 나타내게 된다.

$$\begin{bmatrix} C^{\text{II}} \\ D^{\text{II}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_C^{W_i F}] & [T_C^{W_i B}] \\ [T_D^{W_i F}] & [T_D^{W_i B}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{W_i} \\ A^{W_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [T_C^{W_i B}] & [T_C^{W_i F}] \\ [T_D^{W_i B}] & [T_D^{W_i F}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B^{W_i} \\ B^{W_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $F$ 와  $B$ 는 진행파와 반사파를,  $A^{W_i}$ 와  $B^{W_i}$  진행파와 반사파의 크기를 나타내는 벡터이고,  $T_C^{W_i}$ 와  $T_D^{W_i}$ 는 영역 II와  $W_R$  간의 전계와 자계의 외적 관계를 나타낸다.

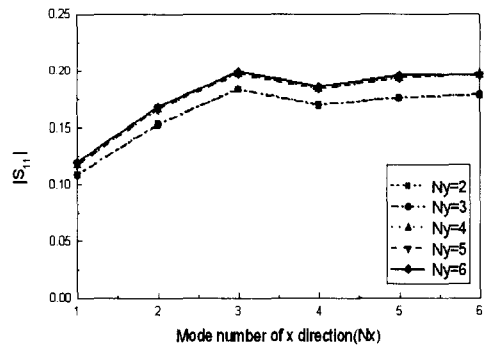
따라서, 식 (6)과 (8)을 정리하여 진행파 A와 반사파 B의 형태로 표현하면 수평 금속봉에 의한 산란계수를 구할 수 있다.

$$[B] = [S][A] \quad (9)$$

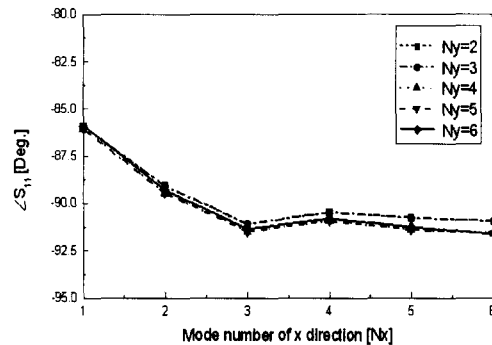
### III. 해석결과 및 분석

그림 2에 본 논문에서 제시한 방법의 모드 수에 따른 산란계수의 수렴도 나타내었다. 사용한 구형 도파관은 WR90이며  $f=10$  GHz,  $h_1=8$  mm,  $h_2=0$  mm,  $r_0=3.175$  mm라 가정하였다. 여기서,  $N_x$ 와  $N_y$ 는 각각  $x$ 와  $y$  방향으로의 모드 수를 의미하며, 방사형 도파관 영역에서  $N_x=m$ 이며  $N_y=n$ 이고 구형도파관 영역에서는  $N_x=l$ ,  $N_y=i$ 가 된다. 그림 2의 결과로부터  $N_x=5$ ,  $N_y=4$  이상이면 산란계수가 거의 수렴하고 있으며,  $N_x=6$ 과  $N_y=5$  이상에서는 산란계수 값의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는  $N_x$ 와  $N_y$ 는 각각 6과 5로 하였다.

본 논문에서 제안한 방법으로 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관의 주파수 변화에 따른 산란계수를 계산하였고 계산 결과는 Silva<sup>[9]</sup>의 실험결과 및 HFSS에 의한 결과와 비교하여 그림 3에 나타내었다. 해석한 구조는 구형 도파관의 크기(2a×b)가 45.8

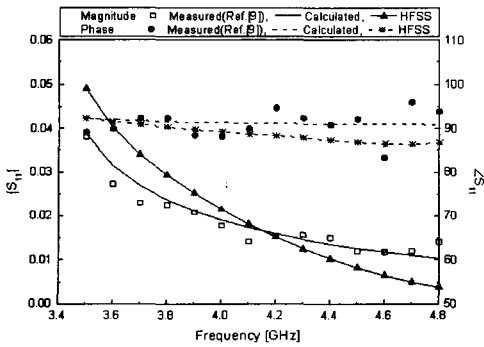


(a) 크기  
(a) Magnitude

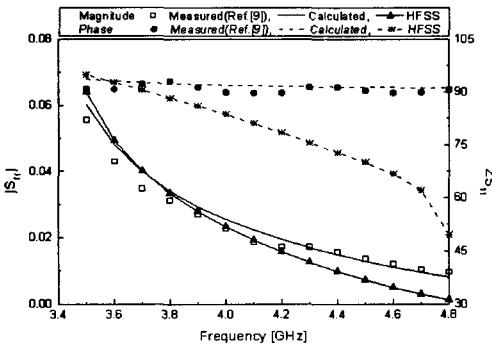


(b) 위상  
(b) Phase

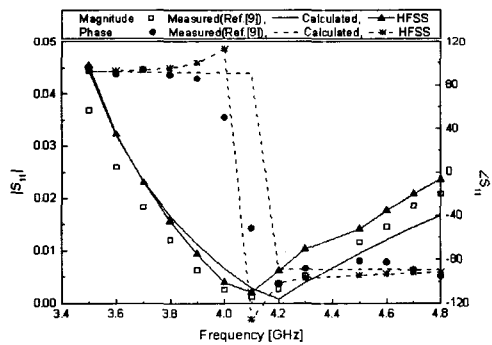
그림 2. 산란계수의 수렴도  
Fig. 2. The convergence of S-parameter.



(a)  $h = 5 \text{ mm}$



(b)  $h = 10 \text{ mm}$



(c)  $h = 15 \text{ mm}$

그림 3. 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관의 반사계수의 크기와 위상

Fig. 3. Magnitude and phase of the reflection coefficient of a rectangular waveguide with the horizontal conducting post.

mm×45.8 mm이며, 금속봉의 반경  $r_0$ 는 3.17 mm이고, 높이는  $h_1$ 과  $h_2$ 가  $h$ 로 같으며 각각 5 mm, 10 mm, 15 mm로 하였다.

그림 3으로부터 본 논문에서 제안한 방법에 의한 결과는 Silva<sup>[9]</sup>의 실험 결과와는 매우 잘 일치하나,

HFSS에 의한 결과와 약간의 오차를 보임을 알 수 있다. 그러나, 이러한 오차는 (a)와 (b)의 경우 반사계수의 크기가 0.05 이하, (b)의 경우 0.06로 매우 작은 값이기 때문에 상대적으로 커 보이는 것이다. 실제 HFSS에 의한 결과와 해석결과 및 실험결과와의 오차는 0.01 이하로 매우 작은 값을 알 수 있다. 또한 dB 스케일로 변환하였을 때 세 결과는 모두 1 dB 이내의 오차 범위에서 일치함을 알 수 있다.

그림 3은 구형 도파관의 양 옆면의 중앙에 동일한 반경과 높이의 금속봉이 존재하는 구조에 대한 결과이다. 그러나, 일반적으로 이러한 구조보다는 한 개의 금속봉과 튜닝을 위한 스크류를 사용하고 있다. 또한, 그림 3의 구조를 제안한 Silva<sup>[9]</sup>의 해석법의 경우 단일 구조의 해석은 적합하지 않다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 해석법을 사용하여 한 개의 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관의 산란 특성을 금속봉의 높이와 반경에 따라 해석하였고 그 결과를 HFSS에 의한 결과와 비교하였다. 여기서, 구형 도파관은 모두 WR90으로 하였다.

그림 4는 수평 금속봉의 높이 변화에 따른 구형 도파관의 반사 특성을 나타낸다. 수평 금속봉의 반경( $r_0$ )은 3.175 mm이며, 높이  $h_2 = h$ 이며,  $h_1$ 은 0으로 하였다.

그림 4에서 제안된 방법에 의한 결과와 HFSS에 의한 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, 구형 도파관의 반사계수는 금속봉의 높이에 비례하여 증

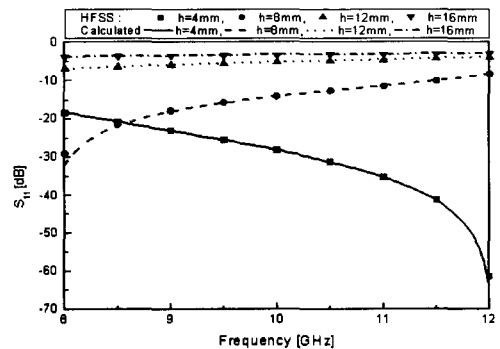


그림 4. 금속봉의 높이에 따른 구형 도파관의 반사 특성

Fig. 4. Reflection characteristic of a rectangular waveguide according to height of the conducting post.

가하나, 일정한 높이(12 mm) 이상이 되면 도파관의 반사계수의 변화가 작아지고 있다. 이는 일정한 높이 이상이 되면 금속봉에 의한 도파관의 등가 임피던스가 일정한 값으로 수렴되어 일정한 높이 이상의 금속봉이 도파관의 특성 변화에 미치는 영향은 거의 동일함을 의미한다. 또한, 금속봉의 높이가 4 mm 이하로 낮은 경우 수평 금속봉이 도파관의 특성 변화에 거의 영향을 주지 않기 때문에 구형 도파관이 고역통과 필터로 동작하는 것과 같이 주파수 증가에 따라 반사계수의 크기가 감소하는 형태를 취하나, 금속봉의 높이가 높아지면 금속봉이 도파관의 특성 변화에 미치는 영향은 커지게 되며, 그 형태는 주파수에 따라 마사계수가 증가하는 형태를 띄게 됨을 알 수 있다.

그림 5는 금속봉의 반경에 따른 구형 도파관의 반사 특성 변화를 나타낸다. 수평 금속봉의 높이  $h_2 = h$ 는 12 mm,  $h_1$ 은 0으로 하였다.

그림 5에서도 제안된 해석법에 의한 결과와 HFSS에 의한 결과는 매우 잘 일치하고 있다. 또한 구형 도파관의 반사 계수는 금속봉의 반지름에 비례하여 증가됨을 알 수 있다. 즉, 금속봉의 반경이 커지면 도파관 내부의 불연속 구조가 증가하는 것이며 이는 도파관의 반사 계수가 커지게 됨을 의미한다.

도파관 내부에 사용하는 금속봉은 원하는 산란 특성을 얻기 위해 일반적으로 다단으로 구성하여 사용한다. 본 논문에서 제시한 방법과 일반 산란 계수법을 사용하여 2개의 수평 금속봉을 갖는 구형 도파

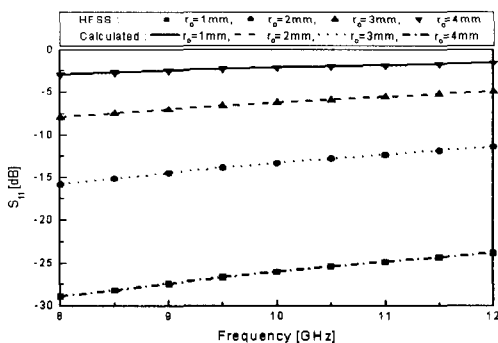


그림 5. 금속봉의 반경에 따른 구형 도파관의 반사 특성  
Fig. 5. Reflection characteristic of a rectangular waveguide according to radius of the conducting post.

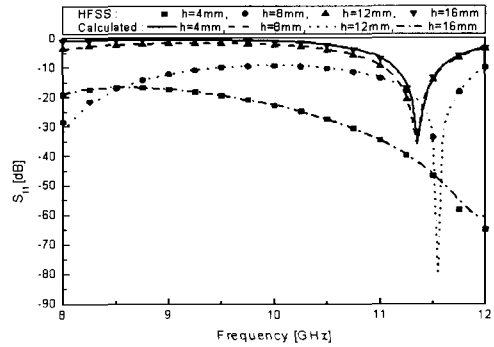


그림 6. 2개의 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관의 반사 특성  
Fig. 6. Reflection characteristic of a rectangular waveguide with two horizontal conducting posts.

관의 산란 특성을 해석하였고 그 결과를 HFSS와 비교하여 그림 6에 나타내었다. 여기서, 첫 번째 금속봉의 높이( $h_2$ )를  $h_A$ , 반경을  $r_A$ , 두 번째 금속봉의 높이( $h_2$ )를  $h_B$ , 반경을  $r_B$ 라 할 때  $r_A = r_B = r = 3.175$  mm,  $h_A = h_B = h$ 로 같으며, 두 금속봉 모두  $h_1$ 은 0으로 하였고, 금속봉 간의 거리  $l$ 이라 할 때  $l = 22.86$  mm로 가정하였다.

그림 6의 결과로부터 제안된 방법에 의한 해석 결과와 HFSS에 의한 결과는 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 두 결과 간에 약간의 오차가 발생한 곳은 반사계수의 크기가  $-50$  dB 이하로 매우 작은 곳으로 실제 크기는 거의 동일하였다.

위의 결과들로부터 본 논문에서 제안한 방법은 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관의 해석에 용이하게 사용할 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 가변 길이의 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관을 모드 매칭법과 일반 산란 계수법을 사용하여 해석하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법의 경우 구형 도파관의 산란 계수는  $N_x = 6$ ,  $N_y = 5$  이상이면 수렴하였고, Silva<sup>[9]</sup>에 의해 제시된 구조를 본 논문에서 제안한 방법에 의해 해석하였을 때, 해석한 결과는 Silva<sup>[9]</sup>에 의한 실험 결과 및 HFSS에 의한 결과와 비교하여 잘 일치하였다. 또한 일반적으로 응용 가능한 구조인 한 개의 수평 금속봉의 반경 및 높이에 따른 구형 도파관의 산란 특성

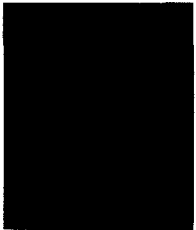
에 대한 해석 결과와 다단 구조인 2개의 수평 금속봉을 갖는 구형 도파관의 산란 특성을 해석한 결과는 HFSS에 의한 결과와 매우 잘 일치하였다. 위의 결과들에 대한 비교에서 발생한 약간의 오차는 산란 계수의 값이 -50 dB 이하의 매우 작은 경우에만 국한되어 있어 제안된 해석 방법이 매우 정확함을 보였다.

본 논문에서 제시한 방법은 옆면에 수평한 금속봉을 갖는 구형 도파관의 해석이 용이하며, 일반 산란 계수법과 연계하였을 때 다단의 수평 금속봉이 있는 구조에도 적용 가능하므로 임피던스의 튜닝 요소로 수평 금속봉을 사용하는 구형 도파관의 설계 및 제작에 효과적으로 이용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. S. Omar, K. Schüneman, "Scattering by material and conducting bodies inside wave-guides", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-34, pp. 266-271, Feb. 1986.
- [2] E. D. Nielsen, "Scattering by a cylindrical post of complex permittivity in a waveguide", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-17, pp. 148-153, Mar. 1969.
- [3] G. Cicconi, C. Rosatelli, "Solutions of the vector wave equation for inhomogeneous dielectric cylinders-scattering in waveguide", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-25, pp. 885-892, Nov. 1977.
- [4] R. Gesche, N. Lochel, "Scattering by a lossy dielectric cylinder in rectangular waveguide", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 36, pp. 137-144, Jan. 1988.
- [5] X. P. Liang, K. A. Zaki, "Modeling of cylindrical dielectric resonators in rectangular waveguide and cavities", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, pp. 2174-2181, Dec. 1993.
- [6] H. W. Yao, K. A. Zaki, A. E. Atia and R. Hershtig, "Full wave modeling of conducting posts in rectangular waveguides and its application to slot coupled combline filter", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 2824-2830, Dec. 1995.
- [7] S. W. Chen, K. A. Zaki, "Dielectric ring resonators loaded in waveguide and substrate", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, pp. 2069-2076, Dec. 1991.
- [8] D. Kajfez, P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Norwood, MA: Artech House, 1986.
- [9] O. M. C. P. Filho, L. C. da Silva, "Scattering matrix of cylindrical posts centered on the walls of rectangular waveguides", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-42, pp. 1198-1206, Jul. 1994.
- [10] M. Guglielmi, G. Gheri, "Multimode network representation of multiple inductive and capacitive obstacles in parallel plate waveguides", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-42, pp. 1046-1051, Jun. 1994.
- [11] S. Hashemi-Yeganeh, C. R. Birtcher, "Numerical and experimental studies of current distributions on thin metallic posts inside rectangular waveguides", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-42, pp. 1063-1068, Jun. 1994.
- [12] A. S. Omar, K. Schunemann, "Transmission matrix representation of finline discontinuities", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-33, pp. 765-770, Sep. 1985.
- [13] 김원기, 이진택, 설용태, 신철재, "2개의 원통 도체로 구성된 봉이 있는 구형 도파관의 산란 특성", 한국통신학회 논문지, 7(11), pp. 1046-1054, 2002년 11월.
- [14] 이상호, 박익모, 신철재, "경사진 금속봉을 가진 구형 도파관과 동축 선로의 접합구조 특성 계산", 한국전자과학회 논문지, 11(7), pp. 1271-1281, 2000년 10월.
- [15] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Son Inc., 1989.

김 원 기



1995년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
1997년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
1999년 3월~2004년 2월: 호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구센터 연구원

1997년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계 및 해석, 초고주파 통신부품 개발, EMI/EMC, 전파전파 등

신 철 재



1964년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1968년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1983년 3월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
1967년~1970년: 동양공업전문대학교수

1970년~1977년: 광운대학교 교수  
1986년~1987년: Florida University 객원교수  
1977년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계 및 해석, 초고주파 통신부품 개발 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 전파전파 등

김 상 태



1985년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
1987년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
2001년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)  
1984년 12월~1985년 8월: 대우중공업(주) 연구소

1991년 3월~현재: 한국산업기술평가원 선임연구원  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계 및 해석, 초고주파 통신부품 개발, EMI/EMC, 전파전파 등