

경사진 금속봉을 가진 구형도파관과 동축선로의 접합구조 특성 계산

Calculation of the Performance about a Junction of Rectangular Waveguide to Coaxial Line with an Skewed Conducting Post

이상호·박익모·신철재

Sang-Ho Lee · Ikmo Park · Chull-Chai Shin

요 약

본 논문에서는 모드 매칭법과 일반 산란계수법을 이용하여 경사진 금속봉이 도파관내에 놓여 있을 때 반사 특성과 투과 특성을 구하였으며, 이 결과를 이용하여 동축선로와 도파관의 접합에 응용할 수 있도록 최적의 조건을 도출하였다. 여기서 반사특성은 기울기가 클수록 뚜렷하게 개선되어서 최소 -40 dB까지 감소하였고, 투과특성은 최적의 각도 45°에서 최대의 특성을 얻을 수 있었다. 또한, 이를 HFSS의 결과와 비교하였을 때 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

To determine the reflection and transmission performance of a rectangular waveguide with an skewed conducting post using the mode matching method and the generalized scattering method are presented in this paper. By this result, we determined the optimum condition of structure that the inner conductor of coaxial line feed into the waveguide at the junction part of waveguide to coaxial. Here, the reflection characteristics was decreased to the least -40 dB along growing the angle of skewed post and the transmission characteristics was the maximum value at 45° as the optimum angle of the angled post. And then the calculated data is in agreement with the result of HFSS.

I. 서 론

구형 도파관과 동축 선로 접합에는 불연속에 의한 모드의 트랜지션이 발생하게 되는데, 지금까지 이런 도파관내의 불연속 구조를 해석하기 위해 Green's 함수를 이용한 적분 방법^[1], Point 매칭을 이용한 모멘트법^[2] 그리고, 영상 원리를 이용한 영상법^[3] 등 다양한 방법이 이용되었으나, 이러한 방법들이 도파관의 불연속 구조에 적용될 경우 이론 정립 및 계산과정이 매우 복잡하고 난해해지며, 이렇게

계산된 결과값 또한 근사화 과정을 바탕으로 하여 오차가 크게 발생할 소지를 안고 있다. 그리고, 편리성 면에서는 등가회로 해석 방법을 많이 사용하나 근사화된 값을 가지고 계산하는 것은 정확성 측면에서 보면 단점을 안고 있다고 볼 수 있다. 반면에 모드 매칭법은 도파관 구조를 해석하기 위해서는 발생 모드를 고려하여서 정확성을 갖고 있으며, 구조에 유효한 모드만을 고려하므로써 계산시간 면에서 빠르다는 장점을 가지고 있다. 그리고, 도파관으로 이루어진 전체 부품의 특성 파라미터인 산란계

아주대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20000731-089

· 수정완료일자 : 2000년 9월 5일

수 행렬을 얻기 위해서 일반 산란 계수법을 결합하여서 전체적인 특성 파라미터를 효율적으로 구할 수 있다^{[4]-[6]}.

본 논문에서는 모드 매칭법과 일반 산란 계수법을 이용해 구형 도파관 내부에 원통 형태인 일정한 높이의 금속봉이 존재할 때 금속봉의 길이와 직경에 대해 정확하고 효율적으로 특성 파라미터를 계산하는 방법과 경사진 금속봉이 있을 때에 이를 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고, 다시 이들을 구형 도파관과 동축 선로 접합부 설계에 적용하여서 접합부의 전달 특성과 반사 손실들이 최적화될 수 있도록 다양한 각도를 가지는 접합부 동축 선로의 탐침 구조를 조사하였다.

이런 구형 도파관과 동축 선로 접합 구조는 많이 이용되고 있는 것이 사실이지만, 아직 그 구조설계가 까다롭고 가격이 매우 고가인 것이 사실이다. 따라서 이런 접합구조의 설계에 적합하고 편리한 방법을 제시하기 위한 것이며, 이 구조에 대한 최적 구조를 설계에 대한 과정을 연구하고자 하였다.

II. 구형도파관 내부의 금속봉에 대한 산란계수

2-1 금속봉에 의한 필드

구형 도파관의 중앙에 금속봉이 위치하는 구조를 그림 1과 같이 나타내었다. 이때 구형 도파관내의 TE₁₀모드로 입사된 필드가 금속봉에 의해 그 형태가 변화하게 될 것이다. 이때 금속봉에 의한 필드 분포는 하나의 가상 경계면을 설정하여 방사형 도파관 영역 (I: $\rho \leq a, 0 \leq y \leq b$ II: $\rho \leq a_0, b_1 \leq y \leq b_2$)

과 구형 도파관 영역 ($WR_1, WR_2: \rho > a$)으로 나누어서 표현할 수 있으며, 상이한 필드 특성을 가진 이런 두 영역으로 나누어 필드를 해석하는 것이 이 구조에 대한 해를 거의 정확하게 구할 수 있는 것이다^{[7],[8]}.

방사형 도파관 영역 (I 과 II)에서의 횡면 방향의 전계(\vec{E}_{ct}^q)와 자계(\vec{H}_{ct}^q) 성분들은 다음과 같은 형태로 나타나게 된다^{[9],[10]}.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ct}^q(\rho, \phi, y) = & \sum_{\rho=s,c} \sum_n \sum_m \{ C_{nm}^{aqe} J_n(\beta_{\rho m}^{aqe} \rho) \\ & + D_{nm}^{aqe} Y_n(\beta_{\rho m}^{aqe} \rho) \} \vec{e}_{ctnm}^{aqe}(\rho, \phi, y) + \sum_{\rho=s,c} \sum_n \sum_m \\ & \cdot \{ C_{nm}^{aqh} J_n(\beta_{\rho m}^{aqh} \rho) + D_{nm}^{aqh} Y_n(\beta_{\rho m}^{aqh} \rho) \} \\ & \cdot | \beta_{\rho m}^{aqh} | \vec{e}_{ctnm}^{aqh}(\rho, \phi, y) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_{ct}^q(\rho, \phi, y) = & \sum_{\rho=s,c} \sum_n \sum_m \{ C_{nm}^{aqe} J_n(\beta_{\rho m}^{aqe} \rho) \\ & + D_{nm}^{aqe} Y_n(\beta_{\rho m}^{aqe} \rho) \} | \beta_{\rho m}^{aqe} | \vec{h}_{ctnm}^{aqe}(\rho, \phi, y) \\ & + \sum_{\rho=s,c} \sum_n \sum_m \{ C_{nm}^{aqh} J_n(\beta_{\rho m}^{aqh} \rho) + D_{nm}^{aqh} Y_n(\beta_{\rho m}^{aqh} \rho) \} \\ & \cdot \vec{h}_{ctnm}^{aqh}(\rho, \phi, y) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 윗첨자들 중에서 q (I, II)는 필드가 존재하는 각 영역을, 또한 e 와 h 는 TM(e-wave)과 TE(h-wave)의 고유 모드를 각각 의미하고, ρ 는 ϕ 방향의 고유모드의 함수가 \sin 과 \cos 함수인지를 나타낸다. 그리고, \vec{e}_{ctnm}^{aq} 와 \vec{h}_{ctnm}^{aq} 는 방사형 도파관 영역에 존재하는 특정한 고유 모드의 횡방향 전계와 자계들이며, J_n 와 Y_n 은 ρ 방향의 전파상수의 자승 ($\beta_{\rho m}^2 = \beta^2 - \beta_{ym}^2 \geq 0$)에 의해서 제1종과 2종의 Bessel 함수가 되고, $\beta_{\rho m}^2 < 0$ 의 경우는 제1종과 2종의 Modified Bessel 함수들로 나타나게 되며, J_n 와

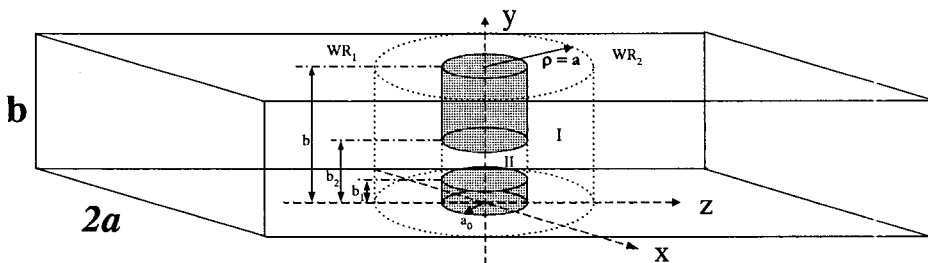


그림 1. 구형도파관의 중앙에 위치한 금속봉의 구조

Fig. 1. The structure of a conducting post in the center of rectangular waveguide.

Y_n 은 Bessel 함수의 도함수들을 나타낸다. 아래 첨자에서 n 과 m 은 횡방향의 ϕ 와 y 방향에 대한 고유 모드수를 나타낸다. 마지막으로, 이 구조가 가지는 경계 조건에 의해 y 방향의 전파상수(β_{ym}^n)는 $\beta_{ym}^n = \frac{m \cdot \pi}{b_2 - b_1}$ 와 $\beta_{ym}^l = \frac{m \cdot \pi}{b}$ 로 각각 나타나게 된다.

그리고, 구형 도파관내에서 순수한 구형 도파관 구조에 의해 결정된 고유 모드를 갖는 필드성분들을 갖는 WR_1 과 WR_2 영역에서는 구형 도파관의 양 포트에서 입사된 TE10모드에 의해서 각 고유 모드들이 갖는 반사파와 진행파의 조합된 다음과 같은 형태로 표현된다^[9].

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \vec{E}_{WR_1}(x, y, z) \\ \vec{E}_{WR_2}(x, y, z) \end{Bmatrix} &= \sum_{\nu=e,h} \sum_l \sum_i \left[\begin{Bmatrix} A_{li}^1 \\ B_{li}^2 \end{Bmatrix} \vec{e}_{WR}^{l\nu F} \right. \\ &+ \left. \begin{Bmatrix} B_{li}^1 \\ A_{li}^2 \end{Bmatrix} \vec{e}_{WR}^{l\nu B} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \vec{H}_{WR_1}(x, y, z) \\ \vec{H}_{WR_2}(x, y, z) \end{Bmatrix} &= \sum_{\nu=e,h} \sum_l \sum_i \left[\begin{Bmatrix} A_{li}^1 \\ B_{li}^2 \end{Bmatrix} \vec{h}_{WR}^{l\nu F} \right. \\ &- \left. \begin{Bmatrix} B_{li}^1 \\ A_{li}^2 \end{Bmatrix} \vec{h}_{WR}^{l\nu B} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, A^1 , A^2 , B^1 과 B^2 는 영역 WR_1 과 WR_2 에서의 진행파와 반사파 성분의 크기들이고, 윗첨자 F 는 순방향 파를, B 는 역방향 파를 나타내며, ν 는 h (TE 모드) 또는 e (TM 모드)를 나타낸다. 또한, l 과 i 는 x 와 y 방향에 대한 고유 모드수를 의미한다. 이때, 식 (3)과 (4)에서 직각 좌표계로 나타낸 구형 도파관내 고유 모드의 필드를 원통형 좌표계로 나타내면, 각 영역에서의 \vec{e}_{WR}^q 와 \vec{h}_{WR}^q 의 전개와 자계들은 다음과 같은 형태를 이루게 된다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \vec{e}_{WR}^{qF} \\ \vec{e}_{WR}^{qB} \end{Bmatrix} &= (\vec{y}_{yli}^{qWR} + \vec{\phi} e_{\phi li}^{qWR}) \cdot \exp^{\mp rz} = \\ &\{ \vec{y}_{yli}^{qWR} + \vec{\phi} (e_{xli}^{qWR} \cos \phi \mp e_{zli}^{qWR} \sin \phi) \} \cdot \exp^{\mp rz} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \vec{h}_{WR}^{qF} \\ \vec{h}_{WR}^{qB} \end{Bmatrix} &= \pm (\vec{y}h_{yli}^{qWR} + \vec{\phi} h_{\phi li}^{qWR}) \cdot \exp^{\mp rz} = \\ &\{ \vec{y}h_{yli}^{qWR} + \vec{\phi} (h_{xli}^{qWR} \cos \phi \mp h_{zli}^{qWR} \sin \phi) \} \cdot \exp^{\mp rz} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 각 방향에 대한 특정한 고유 모드를 가지

는 전개와 자계들은 e_{li}^{qWR} 와 h_{li}^{qWR} 로 표현하였고, γ 는 z 방향의 전파상수를 의미한다.

2-2 산란계수 유도

앞절에서 언급한 고유한 필드 속성이 형성되는 영역들의 불연속 경계지점에서 경계조건을 정의할 수 있을 것이다. 이때에 방사형 도파관 영역내에서의 두 불연속 I과 II의 경계 영역 ($\rho=r_0$)과 방사형 도파관과 구형 도파관 불연속의 경계 영역 ($\rho=a$)들로 두 개의 불연속 경계 지점이 존재한다. 여기서, 방사형 도파관 내에서 불연속 경계지점에 의한 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ct}^I - \vec{E}_{ct}^II \Big|_{\rho=r_0} &= 0 \\ \vec{H}_{ct}^I - \vec{H}_{ct}^II \Big|_{\rho=r_0} &= \begin{cases} \vec{J}_s & \text{도체표면} \\ 0 & \text{그 외} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

방사형과 구형 도파관 불연속 경계 지점에 의한 경계 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ct}^I(\rho, \phi, y) \Big|_{\rho=a} &= \{ \delta_\omega^1 \cdot \vec{E}_{RW_1}(x, y, z) + \\ &\delta_\omega^2 \cdot \vec{E}_{RW_2}(x, y, z) \} \Big|_{\rho=a} \\ \vec{H}_{ct}^I(\rho, \phi, y) \Big|_{\rho=a} &= \{ \delta_\omega^1 \cdot \vec{H}_{RW_1}(x, y, z) + \\ &\delta_\omega^2 \cdot \vec{H}_{RW_2}(x, y, z) \} \Big|_{\rho=a} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$\delta_\omega^1 = \begin{cases} 1 & \frac{\pi}{2} < \phi \leq \frac{3}{2}\pi \\ 0 & -\frac{\pi}{2} < \phi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases},$$

$$\delta_\omega^2 = \begin{cases} 0 & \frac{\pi}{2} < \phi \leq \frac{3}{2}\pi \\ 1 & -\frac{\pi}{2} < \phi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

그리고, 식 (7)과 (8)에 모드 정합법을 적용하여서 각 고유 모드에 대한 내적 행렬식을 얻을 수 있다. 먼저, 식 (7)에서 방사형 도파관 불연속 조건에 의해 고유 모드 C^I 와 D^I 에 관계 행렬식은 다음과 같이 나타나게 된다^{[9],[10]}.

$$[[M_C^I][M_D^I]] \begin{bmatrix} C^I \\ D^I \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

그리고, 식 (8)에서 방사형 도파관과 구형 도파관

의 불연속 조건에 의한 고유 모드 C^I, D^I, A^I, A^2, B^1 과 B^2 에 의한 관계 행렬식은 다음과 같이 나타나게 된다^[9].

$$\begin{bmatrix} C^I \\ D^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_C^{1F}] & [M_C^{2B}] \\ [M_B^{1F}] & [M_B^{2B}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [M_C^{1B}] & [M_C^{2F}] \\ [M_B^{1B}] & [M_B^{2F}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이렇게 얻어진 식 (9)와 (10)의 관계식을 통해서 그림 1의 구조에 대한 일반 산란 계수 행렬식을 식 (11)과 같은 형태로 얻을 수 있게 된다^[9].

$$\begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \end{bmatrix} = [S^W] \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [S_{11}^W] & [S_{12}^W] \\ [S_{21}^W] & [S_{22}^W] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

따라서 식 (11)을 통해서 얻어진 $[S^W]$ 는 구형 도파관내에 금속봉이 있는 불연속 구조에서 모든 고유 모드에 대한 산란계수 행렬이 된다^{[9][10]}.

III. 경사진 금속봉을 가진 도파관의 해석

그림 2와 같이 경사진 금속봉 구조는 3D 해석법을 적용하여 해를 구해야 하는 구조이지만, 모드 정합법과 일반 산란 계수 행렬법의 도파관 구조에서의 효율성과 해의 정확성을 이 구조에 확장하여 적용코자 경사진 금속봉을 매우 작은 크기의 금속봉들이 일련적으로 배열되어 있는 것으로 근사화 하였다.

여기서, 근사화된 금속봉의 미소 분할체들은 중심에 위치한 금속봉에서 중심축이 y 축과 z 축상에서 일정 거리의 차이만이 있다. 그리고, 이 구조에 모드 정합법을 적용할 때 y 축상의 변화에는 방법상의 차이는 없으며, z 축의 이동만이 차이를 가지게 되는 것이다. 이때 앞 절에서 방사형 도파관의 해를 유도한 방법에서 부가적으로 금속봉의 중심축이 일정한 위치로 축을 이동시키는 방법을 적용함으로써, 이 구조에 대한 새로운 전계와 자계의 수식으로 해를 유도할 필요는 없게 된다.

왜냐하면, 그림 3과 같이 구형 도파관에서 전체 좌표축(ρ, ϕ, y)에서나 금속봉이 있는 국부 좌표축(ρ_1, ϕ_1, y_1)에서의 금속봉 외부의 필드들은 맥스웰

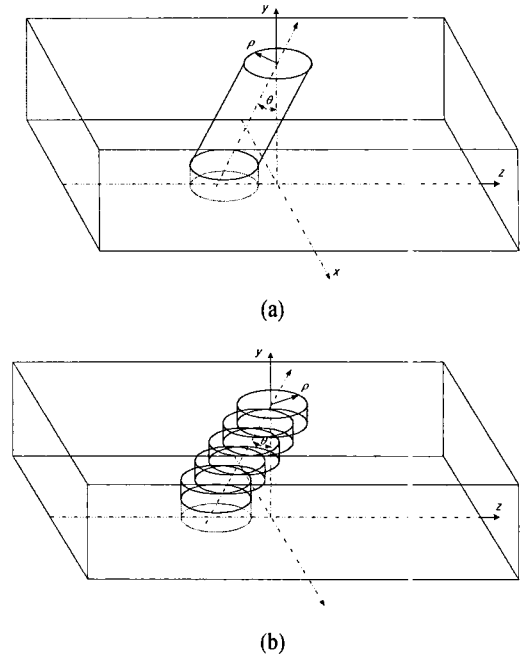


그림 2. (a) 구형도파관의 경사진 금속봉의 구조
(b) 근사화된 경사진 금속봉의 구조
Fig. 2. (a) The structure of a skewed conducting post in the rectangular waveguide
(b) The structure of a skewed conducting post by approximation.

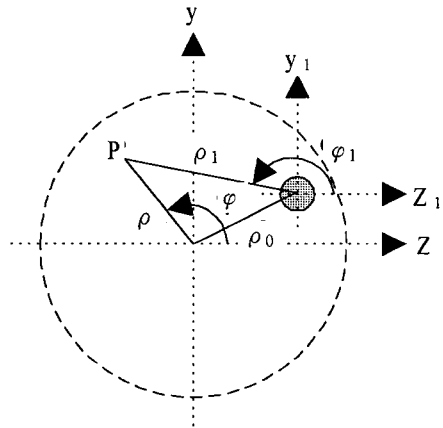


그림 3. 금속봉이 중심축 상에서 떨어져 있는 구조
Fig. 3. The structure of an off-centered conducting post.

방정식의 유일성에 의해서 고유 모드들에 의해서 속성의 변화없이 나타나게 될 것이기 때문이다. 따

라서, 이런 유일성은 다음과 같은 수식을 필드에서 성립시키게 되며^[18],

$$\begin{aligned} & \sum_{\rho=s,c} \sum_n a_{nm}^{pe} \vec{E}_{ym}^{pe}(\rho_1, \varphi_1, y) \\ &= \sum_{\rho=s,c} \sum_n b_{nm}^{pe} \vec{E}_{ym}^{pe}(\rho, \varphi, y) \\ & \cdot a_{0m}^{ce} Z_0(\beta_m^e \rho_1) \\ &+ \sum_{\rho=s,c} \sum_{n=1}^{\infty} a_{nm}^{pe} Z_n(\beta_m^e \rho_1) \Phi_n^{pe}(\varphi_1) \\ &= b_{0m}^{ce} Z_0(\beta_m^e \rho_1) \\ &+ \sum_{\rho=s,c} \sum_{n=1}^{\infty} b_{nm}^{pe} Z_n(\beta_m^e \rho) \Phi_n^{pe}(\varphi) \quad (12) \end{aligned}$$

이런 수식에서부터 Bessel 함수의 덧셈 이론^[16]에 의해서 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있으며,

$$\begin{aligned} Z_{n'}(\beta_m^e \rho_1) \Phi_{n'}^{pe}(\phi) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tau_n \Lambda_n(\beta_m^e \rho_0) \\ & \cdot Z_{n'+n}(\beta_m^e \rho) \Phi_n^{pe}(\phi - \phi_0) \quad (13) \end{aligned}$$

여기서,

$$\Lambda_n(\beta_m^e \rho_0) = \begin{cases} J_n(\beta_m^e \rho_0) & \text{if } Z_{n'} \in \{J_{n'}, Y_{n'}\} \\ J_n(|\beta_m^e| \rho_0) & \text{if } Z_{n'} \in \{J_{n'}, Y_{n'}\} \end{cases} \quad (14)$$

$$\tau_n = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_{n'} \in \{J_{n'}, Y_{n'}, K_{n'}\} \\ (-1)^n & \text{if } Z_{n'} \in \{I_{n'}\} \end{cases} \quad (15)$$

이러한 관계식을 식(12)에 대입하여서 정리하면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} b_m^{ce} \\ b_m^{se} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_{cc}^e] [T_{cs}^e] \\ [T_{sc}^e] [T_{ss}^e] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_m^{ce} \\ a_m^{se} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$(T_{cc}^e)_{0n'} = \tau_n \delta_{n'} \Lambda_{n'}(\beta_m^e \rho_0) \cos(n' \varphi_0) \quad (17-a)$$

$$\begin{aligned} (T_{cc}^e)_{nn'} &= \tau_{n-n'} \{ \Lambda_{n-n'}(\beta_m^e \rho_0) \cos(n-n') \varphi_0 \\ &+ \delta_{n'} \Lambda_{n+n'}(\beta_m^e \rho_0) \cos(n'+n) \varphi_0 \} \quad (17-b) \end{aligned}$$

$$(T_{cs}^e)_{0n'} = \tau_n \delta_{n'} \Lambda_{n'}(\beta_m^e \rho_0) \sin(n' \varphi_0) \quad (17-c)$$

$$\begin{aligned} (T_{cs}^e)_{nn'} &= \tau_{n-n'} \{ -\Lambda_{n-n'}(\beta_m^e \rho_0) \sin(n-n') \varphi_0 \\ &+ \delta_{n'} \Lambda_{n+n'}(\beta_m^e \rho_0) \sin(n+n') \varphi_0 \} \quad (17-d) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (T_{sc}^e)_{nn'} &= \tau_{n-n'} \{ \Lambda_{n-n'}(\beta_m^e \rho_0) \sin(n-n') \varphi_0 \\ &+ \delta_{n'} \Lambda_{n+n'}(\beta_m^e \rho_0) \sin(n+n') \varphi_0 \} \quad (17-e) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (T_{ss}^e)_{nn'} &= \tau_{n-n'} \{ \Lambda_{n-n'}(\beta_m^e \rho_0) \cos(n-n') \varphi_0 \\ &- \delta_{n'} \Lambda_{n+n'}(\beta_m^e \rho_0) \cos(n+n') \varphi_0 \} \quad (17-f) \end{aligned}$$

여기서,

$$\delta_{n'} = \begin{cases} (-1)^{n'} & \text{if } Z_{n'} \in \{J_{n'}, Y_{n'}\} \\ 1 & \text{if } Z_{n'} \in \{I_{n'}, K_{n'}\} \end{cases} \quad (18)$$

그리고, 여기서 TE모드에 대해서 아래와 같이 매우 유사한 형태를 가지게 된다.

$$\begin{bmatrix} b_m^{ch} \\ -b_m^{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_{cc}^h] [T_{cs}^h] \\ [T_{sc}^h] [T_{ss}^h] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_m^{ch} \\ -a_m^{sh} \end{bmatrix} \quad (19)$$

또한 $[T^h]$ 는 윗첨자 e 가 h 로만 대치시키면 같은 $[T^e]$ 에서 같은 수식을 얻을 수 있다. 결과적으로 국부 좌표계(ρ_1, φ_1, y)로 나타낸 식 (9)을 변환 행렬 $[T_R]$ 을 사용하여 아래의 수식과 같은 도파관 좌표계(ρ, φ, y)의 형태의 행렬로 변환되어 질 수 있다.

$$[[M'_C][M'_D]][T_R] \begin{bmatrix} C^I \\ D^I \end{bmatrix} = 0 \quad (20)$$

여기서, $[T_R]$ 행렬은 고유 모드들의 배열의 형태에 따라서 $[F^h]^{-1}$, $[F^e]^{-1}$ 와 0 원소값들로 이루어지는 행렬이 될 것이다. 그리고, 금속봉이 중심에 있으면 두 개의 좌표계가 동일하게 되므로써 단위 행렬로써 나타나야 할 것이다.

앞에서 나타낸 그림 2(b)에서와 같이 경사진 금속봉을 일련하게 작은 미소의 수직 금속봉으로 근사화한 구조에서 각 단에 존재하는 고유 모드들은 그림 4와 같이 나타낼 수 있을 것이다. 그리고, 이들은

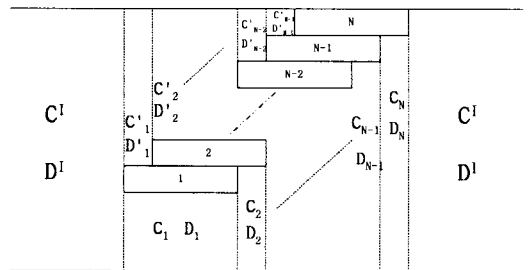


그림 4. 측면상에서 바라본 근사화된 사면 금속봉에 있는 고유 모드들

Fig. 4. The eigen modes in skewed conducting post by approximation viewed in the side view.

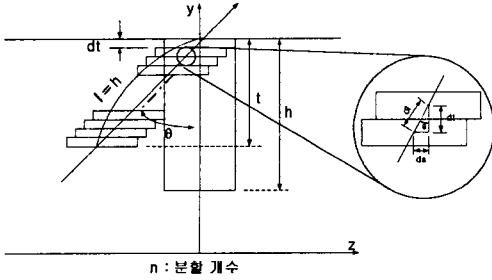


그림 5. 근사화된 사면 금속봉
Fig. 5. The approximated skewed conducting post.

이미 앞절에서 언급한 수직 금속봉의 불연속 경계 지점에서의 입사와 반사를 나타내는 행렬식 식 (9) 및 식 (20)과 매우 유사한 형태로 인접 영역간의 고유 모드들이 관계를 가지게 된다.

일련의 미소 금속봉에 대한 행렬식을 계산하기 위해서는 미소 금속봉의 중심점의 위치와 두께들을 알아야 할 것이다. 여기서, 수직상의 금속봉의 높이 (h)가 일정한 상태에서 경사진 형태로 금속봉을 근사화할 때에 경사진 각도와 높이를 기준으로 분할 개수(n)를 어떠한 정도로 결정하느냐에 따라서 미소 금속봉의 두께와 경사진 방향으로의 중심축 이동 거리를 결정할 수 있다. 이러한 상태의 구조를 그림 5에 도시하였는데, 중심 이동점을 다음과 같이 계산할 수 있다.

여기서, 수직 금속봉의 높이는 h이고, 이것이 경사를 이룰 때에는 $l=h$ 가 되어야 할 것이다. 이때에 y축상에 나타나는 높이는 $t=h\cos\theta$ 가 될 것이다. 이때에 분할 개수 N이 주어지면, 사면 금속봉의 미소 두께 및 수직미소 이동거리는 $dt = \frac{h}{N} \cos\theta$ 가 되고, 수평미소 이동거리는 $ds = dt \tan\theta = \frac{h}{N} \cos\theta \cdot \tan\theta = \frac{h}{N} \sin\theta$ 로 나타나게 된다. 따라서, 전단의 미소수직 금속봉 중심점 (y_i, z_i)에서 다음의 미소 금속봉 중심점은 ($y_i - dt, z_i - ds$)로 미소 이동을 하게 된다.

이렇게 그림 4와 같이 고유 모드들이 각 영역에서 분포하고 있을 때, 각각의 불연속 경계점에 모드 정합법을 적용하여서 행렬식들을 얻을 수 있다. 여기서, 중간에 위치한 미소 금속봉들의 윗 부분과 아래 부분의 행렬식은 2.2절에서 언급한 방사형 도파관들의 불연속 경계에서 얻은 것과 동일하다. 그리

고, 미소 분할체 금속봉들의 윗부분은 항상 우측의 종단 부분이 금속체 부분으로 종단되는 경계 조건을 갖게 되는데, 이런 종단 금속체 부분을 표현하는 경계 조건식은 다음과 같은 행렬식으로 주어지고,

$$D_N = -[\Gamma_N^L] C_N \quad (21)$$

여기서, $[\Gamma_N^L]$ 은 대각선 행렬로서 z-대각선상의 행렬 원소 값들은 다음과 같이 나타나게 된다^[14]. 그리고, 위첨자 L은 부하 값을 의미하는 것이다.

$$[\Gamma_N^L]_{ii} = \begin{cases} -J_n(\beta_{\rho m}^{Ne} \rho_N) / Y_n(\beta_{\rho m}^{Ne} \rho_N) & TM \text{ 모드} \\ -J_n(\beta_{\rho m}^{Nh} \rho_N) / Y_n(\beta_{\rho m}^{Nh} \rho_N) & TM \text{ 모드} \end{cases} \quad (22)$$

이러한 경계 조건식을 적용하면, 미소 금속봉들의 윗 부분에서는 앞 절에서 얻었던 것과 동일한 고유 모드들간의 행렬 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$[[M_c^a][M_b^b]] \begin{bmatrix} C^I \\ D^I \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

여기서, $[M_c^a]$ 와 $[M_b^b]$ 는 앞장에서 언급했던 것과 동일한 형태로 주어지게 된다. 다음으로, 미소 금속봉들의 아래 부분에서는 중간에 금속봉들에서는 일반적인 행렬식이지만, 맨 우측과 좌측의 종단에서는 두 개의 특별한 행렬식들로 나타나게 된다. 미소 금속봉들의 맨 좌측에서는

$$\begin{aligned} [S_I][Z_{EI}^I]C_I + [S_I][Z_{EY}^I]D_I \\ = [M_N][Z_{EI}^I]C_I + [M_N][Z_{EY}^I]D_I \\ [M_N]^T[Z_{HI}^I]C_I + [M_N]^T[Z_{HY}^I]D_I \\ = [M_N][Z_{EI}^I]C_I + [M_N][Z_{EY}^I]D_I \end{aligned} \quad (24)$$

과, 맨 우측에서는

$$\begin{aligned} [S_N][Z_{EN}^N]C_N + [S_N][Z_{EY}^N]D_N \\ = [M_{N,1}][Z_{EI}^I]C_I + [M_{N,1}][Z_{EY}^I]D_I \\ [M_{N,1}]^T[Z_{HN}^N]C_N + [M_{N,1}]^T[Z_{HY}^I]D_N \\ = [S_I][Z_{HI}^I]C_I + [S_I][Z_{HY}^I]D_I \end{aligned} \quad (25)$$

같은 행렬식들을 얻을 수 있다. 이때, 식 (23), (24)와 (25)을 조합해서 정리하면 미소 금속봉 아래 부분에서의 다음과 같은 행렬식을 얻게 된다.

$$\{ [I] - [M^{N,I}] [M^{M-1,N}] \dots [M^{i-1,i}] \dots [M^{1,2}] [M^{1,1}] \} \begin{bmatrix} C^I \\ D^I \end{bmatrix} = 0 \quad (26)$$

여기서, $[M^{i-1,i}]$ 은 다음과 같이 구성되어지고,

$$[M^{i-1,i}] = \begin{bmatrix} [M_{CC}^{i-1,i}] & [M_{CD}^{i-1,i}] \\ [M_{DC}^{i-1,i}] & [M_{DD}^{i-1,i}] \end{bmatrix} \quad (27)$$

그리고, 각 구성 행렬식들은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$[M_{CC}^{i-1,i}] = ([Z_{EY}^i]^{-1} [Z_{EJ}^i] - [Z_{HY}^i]^{-1} [Z_{HJ}^i])^{-1} \cdot ([Z_{EY}^i]^{-1} [S_i]^{-1} [M_{i,i-1}] [Z_{EJ}^{i-1}] - [Z_{HY}^i]^{-1} ([M_{i,i-1}]^T)^{-1} [S_{i-1}] [Z_{HJ}^{i-1}]) \quad (28-a)$$

$$[M_{CD}^{i-1,i}] = ([Z_{EY}^i]^{-1} [Z_{EJ}^i] - [Z_{HY}^i]^{-1} [Z_{HJ}^i])^{-1} \cdot ([Z_{EY}^i]^{-1} [S_i]^{-1} [M_{i,i-1}] [Z_{EY}^{i-1}] - [Z_{HY}^i]^{-1} ([M_{i,i-1}]^T)^{-1} [S_{i-1}] [Z_{HY}^{i-1}]) \quad (28-b)$$

$$[M_{DC}^{i-1,i}] = ([Z_{EY}^i]^{-1} [Z_{EY}^i] - [Z_{HY}^i]^{-1} [Z_{HY}^i])^{-1} \cdot ([Z_{EY}^i]^{-1} [S_i]^{-1} [M_{i,i-1}] [Z_{EJ}^{i-1}] - [Z_{HY}^i]^{-1} ([M_{i,i-1}]^T)^{-1} [S_{i-1}] [Z_{HJ}^{i-1}]) \quad (28-c)$$

$$[M_{DD}^{i-1,i}] = ([Z_{EY}^i]^{-1} [Z_{EY}^i] - [Z_{HY}^i]^{-1} [Z_{HY}^i])^{-1} \cdot ([Z_{EY}^i]^{-1} [S_i]^{-1} [M_{i,i-1}] [Z_{EY}^{i-1}] - [Z_{HY}^i]^{-1} ([M_{i,i-1}]^T)^{-1} [S_{i-1}] [Z_{HY}^{i-1}]) \quad (28-d)$$

여기서, 우리는 식 (28-a)~(28-d)들은 $[M^{N,I}]$ 에 도 적용되지만, $[M^{1,1}]$ 에서만은 약간의 차이들 가지게 된다. 이것은 경계 조건식의 차이로 아래와 같은 관계식들로 나타나게 된다.

$$[M_{CC}^{1,1}] = ([Z_{EY}^1]^{-1} [Z_{EJ}^1] - [Z_{HY}^1]^{-1} [Z_{HJ}^1])^{-1} \cdot ([Z_{EY}^1]^{-1} [M_{1,1}]^{-1} [S_1] [Z_{EJ}^1] - [Z_{HY}^1]^{-1} [S_1]^{-1} [M_{1,1}]^T [Z_{HJ}^1]) \quad (29-a)$$

$$[M_{CD}^{1,1}] = ([Z_{EY}^1]^{-1} [Z_{EJ}^1] - [Z_{HY}^1]^{-1} [Z_{HJ}^1])^{-1} \cdot ([Z_{EY}^1]^{-1} [M_{1,1}]^{-1} [S_1] [Z_{EY}^1] - [Z_{HY}^1]^{-1} [S_1]^{-1} [M_{1,1}]^T [Z_{HY}^1]) \quad (29-b)$$

$$[M_{DC}^{1,1}] = ([Z_{EY}^1]^{-1} [Z_{EY}^1] - [Z_{HY}^1]^{-1} [Z_{HY}^1])^{-1} \cdot ([Z_{EY}^1]^{-1} [M_{1,1}]^{-1} [S_1] [Z_{EJ}^1] - [Z_{HY}^1]^{-1} [S_1]^{-1} [M_{1,1}]^T [Z_{HJ}^1]) \quad (29-c)$$

$$[M_{DD}^{1,1}] = ([Z_{EY}^1]^{-1} [Z_{EY}^1] - [Z_{HY}^1]^{-1} [Z_{HY}^1])^{-1} \cdot ([Z_{EY}^1]^{-1} [M_{1,1}]^{-1} [S_1] [Z_{EY}^1] - [Z_{HY}^1]^{-1} [S_1]^{-1} [M_{1,1}]^T [Z_{HY}^1]) \quad (29-d)$$

위와 같이 정리된 수식으로 식 (26)을 미소 금속봉 아래 부분에서 행렬식을 다시 표현하면 식 (9)와 같은 형태로 다음과 같이 표현될 수 있을 것이다.

$$[[M_C^d] [M_D^d]] \begin{bmatrix} C^I \\ D^I \end{bmatrix} = 0 \quad (30)$$

여기서 식 (26)에서

$$[[M_C^d] [M_D^d]] = \{ [I] - [M^{N,I}] [M^{N-1,N}] \dots [M^{i-1,i}] \dots [M^{1,2}] [M^{1,1}] \} \quad (31)$$

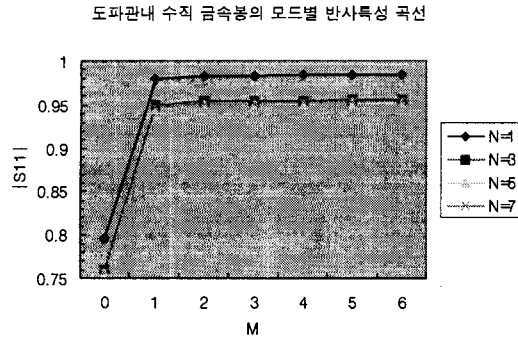
와 같이 될 것이다. 결과적으로 경사진 금속봉의 근사화된 미소 금속봉들의 일련체에 의한 전체적인 반사와 투과 행렬식은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$[[M_C^T] [M_D^T]] \begin{bmatrix} C^I \\ D^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_C^u] [M_D^u] \\ [M_C^d] [M_D^d] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^I \\ D^I \end{bmatrix} = 0 \quad (32)$$

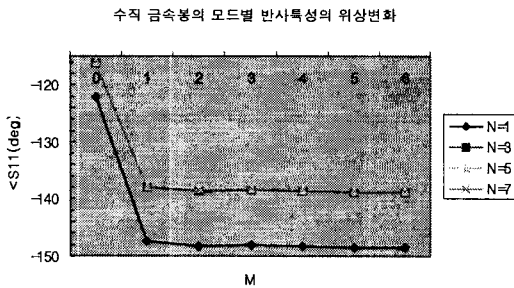
그래서, 이러한 관계식을 앞에서 유도했던 바와 같이 구형 도파관 영역에서 구했던 행렬식 (10)을 대입하므로써, 전체 경사진 금속봉을 가진 구형 도파관의 산란계수 행렬을 식 (11)과 같은 형태로 구할 수 있게 될 것이다.

IV. 수치해석결과 및 분석

본 논문에서 사용한 모드 정합법과 일반 산란계수법을 이용하여 폭 $(2a) = 0.9$ inch와 높이 $(b) = 0.4$ inch인 X밴드용 구형 도파관 내에 반경 $(r_0) = 0.125$ inch인 금속봉이 존재할 때, 모드 정합법에서 구형 도파관의 단면에서 x와 y방향의 고유 모드 개수인 N_x 와 N_y 에 따라서 해의 수렴정도를 고찰하였다. 이에 대한 그림은 그림 6에 그림으로 표시하였는데, 이것을 바탕으로 해의 수렴 정도는 $N_x = 5$ 와 $N_y = 6$



(a)



(b)

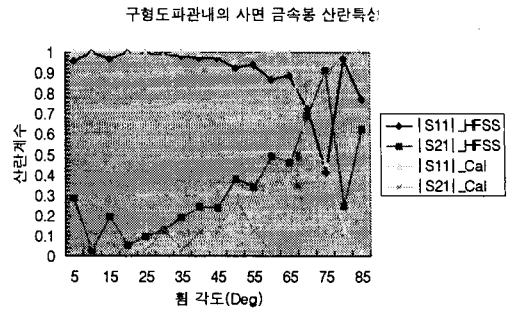
그림 6. 모드 정합법의 고유 모드에 따른 금속봉을 가진 구형도파관의 반사 손실. (a) 크기, (b) 위상 ($f=10$ GHz, $\gamma_0=0.125$ inch, $b_2=0.1$ inch, $b_1=0$)

Fig. 6. Calculated reflection loss versus the number of eigen modes in rectangular waveguide with a conducting post by mode matching method. (a) Magnitude, (b) Phase ($f=10$ GHz, $\gamma_0=0.125$ inch, $b_2=0.1$ inch, $b_1=0$).

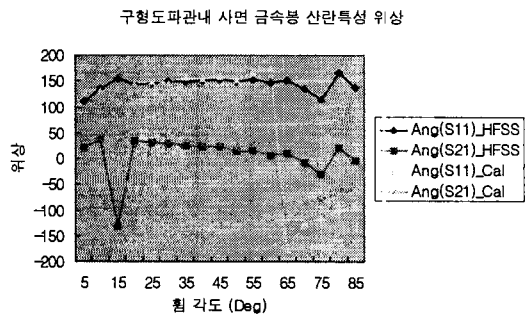
모드 개수로도 해석이 가능함을 알 수 있었다.

그리고, 이러한 X밴드용 구형 도파관내에서 사면 방향의 금속봉이 있을 때에 주파수가 10 GHz 일때 사면 방향에 따른 산란 계수들의 특성을 계산하였다. 여기서, 금속봉의 반경은 $r_0=0.025$ inch이고, 높이 (h)는 0.3 inch로 SMA 형태의 동축선로의 규격을 사용하여 각도의 휨의 정도에 따라서 반사 손실이 작아지고 위상의 변화를 얻을 수 있었다. 그에 대한 해석된 결과는 그림 7에 그림으로 표시하였다.

마지막으로, 이러한 X밴드용 구형 도파관과 50 Ohm의 SMA 동축 선로의 접합된 구조에서 동축 선로의 내부 도체의 피드 구조가 위에서 계산된 구형 도파관내에서의 금속봉과 같은 구조를 가지고서 내



(a)



(b)

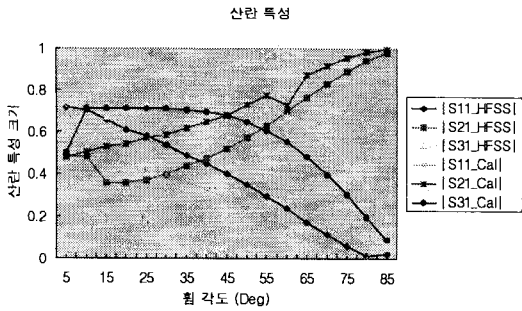
그림 7. 금속봉의 각도에 따른 구형도파관의 산란 특성. (a) 크기, (b) 위상

Fig. 7. Scattering parameters along skewed conducting post in rectangular waveguide. (a) Magnitude, (b) Phase

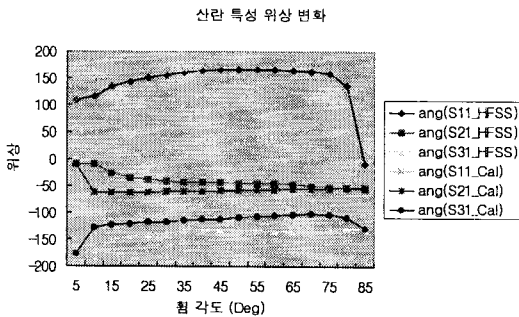
부 도체의 피드 구조의 각도 변화에 대한 산란계수 특성을 계산하였다. 이러한 결과를 그림 8에 도시하였는데, 이러한 결과에서 특정한 휨 각도 $\theta=45^\circ$ 에서 구형 도파관과 동축 선로의 접합부의 구조에 최적의 산란 계수 특성을 얻을 수 있다. 즉, 도파관 내부의 금속봉만을 고려했을 때 얻어진 계산 결과와 같이 휨 각도에 따라서 입력단의 반사 손실이 낮아져서 최소 -40dB까지 감소하였고, 접합 구조에서는 투과 손실에서는 휨 각도 $\theta=45^\circ$ 에서 최대값 2.4 dB을 얻을 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 초고주파 통신용 회로에 많이 사용되는 구형 도파관에서 동축 선로의 접합부의 해석을 위해서 금속봉을 갖는 구형 도파관에 대해 모



(a)



(b)

그림 8. 금속봉의 각도에 따른 구형도파관과 동축 선로의 천이 구조의 산란 특성 (a) 크기, (b) 위상

Fig. 8. Scattering parameters along skewed conducting post in a transition of waveguide to coaxial. (a) Magnitude, (b) Phase.

드 매칭법과 일반 산란계수 법을 이용하여 전체의 산란계수를 추출하였고, 이를 이용하여 구형 도파관 내에 침투한 금속봉의 형태에 따른 접합 구조의 특성 개선을 위해서 입사된 포트로의 경사를 주어서 설계하였다. 이때 특성상의 입력 임피던스와 전달 특성을 개선할 수 있는 각도를 제시하고자 하였다. 이런 구조를 해석하기 위해서 모드 매칭법과 일반 산란계수법을 적용하고자 하였고, 이런 경사 구조에 적합한 모드 정합법의 적용에 적합할 수 있도록 구조를 근사화 하여서 적용하였다.

본 논문에서 제시한 방법을 사용해 폭 (2a) 0.9 inch, 높이 (b) 0.4 inch인 구형도파관에 존재하는 금속봉에 대해 주파수 f (GHz), 금속봉 (반경 0.025 inch)의 각도(θ)를 변화시켜 그에 따른 반사손실을 구하였고, 투과 손실 변화를 계산하였다. 본 논문에서

서 제안된 반사 손실과 투과 손실의 변화가 정확하게 계산되므로 금속봉이 이용되는 모든 초고주파 통신용 부품 설계에 보다 적절하고 용이하게 적용될 수 있을 것이다. 또한, 구형 도파관과 동축 선로의 접합구조, 즉 어댑터를 보다 적절하고 편리하게 설계할 수 있는 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] A. S. Omar and K. Schüneman, "Scattering by material and conducting bodies inside waveguides," *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 and 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] X. Liang, K. A. Zaki and A. E. Atia, "A Rigorous Three Plane Mode-Matching Technique for Characterizing Waveguide T-Junctions, and its Application in Multiplexer Design," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, pp. 2138-2146, Dec., 1991.
- [5] M. Davidovitz, "Reconstruction of the S-Matrix for a 3-Port Using Measurements at Only Two Ports," *IEEE Trans. Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 5, pp. 349-350, Oct., 1995.
- [6] T. Shibata and T. Itoh, "Generalized-Scattering-Matrix Modeling of Waveguide Circuits Using FDTD Field Simulations," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, pp. 1742-1751, Nov., 1998.
- [7] R. Gesche and N. Lochel, "Scattering by a lossy dielectric cylinder in rectangular waveguide," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,

- vol. 36, pp. 137-144, Jan., 1988.
- [8] J. B. Andersen and B. Majborn, "Semiconductor Rod in Waveguide-Field Distribution for Positive and Negative Conductivity," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 16, pp. 194-196, Mar., 1968.
- [9] 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.
- [10] A. S. Omar and K. Schunemann, "Transmission matrix representation of finline discontinuities," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-33, pp. 765-770, Sep., 1985.
- [11] S. W. Chen and K. A. Zaki, "Dielectric ring resonators loaded in waveguide and substrate," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, pp. 2069-2076, Dec., 1991.
- [12] 김원기, 양기덕, 김민택, 박익모, 신철재, "2개의 불연속 구조물을 갖는 도파관의 임피던스 계산" 한국전자파학회, 한국전자파학회논문지, 논문 97-8-5-4, pp462-475, 97.10.
- [13] X. P. Liang and 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.
- [14] J. A. Bradshaw, "Scattering from a round metal post and gap," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 21, pp. 313-322, May, 1973.
- [15] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Boston Technical Publishers, Inc. 1964
- [16] G. N. Watson, *A Treatise on The Theory of Bessel Functions*, Cambridge University Press, 1980.
- [17] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, IEEE PRESS, 1991.
- [18] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons. Inc., 1989.
- [19] T. Itho, *Numerical Technique for Microwave and Millimeter-wave Passive Structures*, John Wiley & Sons. Inc., 1989.
- [20] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill Book Company. Inc., 1961.

이 상 호



1993년 2월: 아주대학교 전자공학과(공학사)
 1995년 2월: 아주대학교 전자공학과(공학석사)
 1995년3월~현재: 아주대학교 박사과정 재학 중
 [주 관심분야] 이동통신 및 위성통신 부품설계, MMIC 및 부품모델링, 수치해석

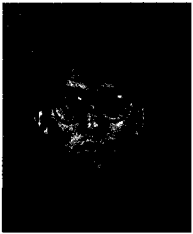
신 철 재



1964년: 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1968년: 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1983년: 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 1970년~1977년: 광운대학교 조교수

1986년~1987년: 플로리다 대학교 방문교수
 1977년~현재: 아주대학교 전기전자공학부 교수
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 초고주파 통신부품 개발, 전파전파

박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학(공학사)
 1989년: 일리노이대학교 전기전자공학(공학석사)
 1994년: 일리노이대학교 전기전자공학(공학박사)
 1994년~1996년: LG전자기술원 선임 연구원

1996년~현재: 아주대학교 전기전자공학과 조교수
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 수치 해석