

타원형 금속봉이 있는 구형 도파관의 전파특성

정희원 김 원 기*, 이 창 언**, 김 상 태***, 실 용 태*, 신 철 재**

Propagation Characteristics of Rectangular Waveguide with Elliptical Conducting Post

Won-Ki Kim*, Chang-On Lee**, Sang-Tae Kim***, Yong-Tae Sul*,
Chull-Chai Shin** *Regular members*

요 약

본 논문에서는 내부의 타원형 금속봉에 의한 구형 도파관의 산란 특성과 금속봉의 등가 임피던스를 모드매칭법과 일반산란계수법을 사용한 수치적 방법으로 해석하였다. 타원형 금속봉에 의한 구형 도파관의 산란특성은 봉의 이심률과 높이에 따라 미세하게 변화되고 있으며, 봉의 높이가 낮은 경우(2.54mm, 4mm) 구형 도파관의 산란 특성 변화는 전체 주파수 대역에서 나타나는 반면, 봉의 높이가 높아질수록(7.62mm, 9mm) 이러한 특성의 변화는 높은 주파수 대역에서 뚜렷해짐을 알 수 있었다. 계산결과는 HFSS와 비교하여 잘 일치하였다. 본 논문에서 제시한 구조와 해석법은 튜닝 소자로 타원의 원통형 금속봉을 사용하는 도파관 관련 부품의 설계와 제작에 쉽게 이용될 수 있다.

키워드: 타원형 금속봉, 모드매칭, 산란특성, 구형도파관

ABSTRACT

In this paper, scattering characteristics of the rectangular waveguide with elliptical conducting post and equivalent impedance of post are analyzed by mode matching method and generalized scattering method. The scattering characteristics of rectangular waveguide are varied by the height and eccentricity of elliptical conducting post. When the height of post(2.54mm, 4mm) is small, variation in scattering characteristics appears in total simulated frequency. But as the height of post(7.62mm, 9mm) is increased, it is dominant in higher frequency. The simulated result shows good agreement with the HFSS's result. Proposed structure and analysis method are easily applied to the design and manufacture of waveguide component with elliptical conducting post.

I. 서 론

도파관을 사용하는 부품의 제작에 있어 튜닝 과정은 반드시 필요한 작업이나, 주파수가 높아질수록 특성 변화에 대한 예측이 매우 어렵기 때문에 정확한 해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1]-[4]}. 현재 가장 많이 사용되는 튜닝 요소는 원통형 금속봉이나 창을 사용하는 것이며, 다양한 해석법에 대한 연구가 진행되어 실제 부품의 설계 및 제작에 직접 응용되고 있다.

위의 구조는 제작상에서 발생하는 오차를 보정하기 위한 또 다른 튜닝 요소(스크류)의 사용이 반드시 필요하며 이는 손실의 증가와 함께 단가의 상승을 가져오는 원인이 된다. 따라서, 이러한 단점의 보완을 위한 새로운 튜닝 구조와 이에 대한 정확한 해석 방법에 대한 연구의 필요성이 대두되었고^[5], 구형 도파관 내부의 불연속 구조로 임의의 형태를 갖는 불연속구조에 대한 연구로 진행되어 FEM, MoM, Point matching Method, FDTD, 모드매칭법 등 다양한 해석방법에 기초하여 도파관 불연

* 호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구센터(kwk332@hanmail.net)

** 이주대학교 전자공학부

*** 한국산업기술평가원

논문번호 : #030123-0320, 접수일자 : 2003년 3월 21일

속 구조에 대한 연구가 수행되었다^{[6]-[8]}. 특히, 위에서 언급한 해석 방법 중 모드매칭법은 도파관의 불연속에 적용될 경우 타 해석법에 비해 해석과정의 복잡성 및 결과의 정확도에 있어 기타의 방법보다 용이하게 적용 가능하다는 장점이 있다.

최근 도파관의 튜닝 요소로 새로운 구조가 제안되고 있으며, 이중 R.Coccioli는 튜닝 요소로 half cylinder post를 이용하는 방법을 제안하고 이를 Hybrid FEM/Modal expansion approach 와 Point matching 방법으로 제안된 구조를 해석하였고 결과의 타당성을 입증하였다^[5]. 또한, B.N.Das^[9]와 P. Bhartia^[10]는 튜닝 구조로 평행판 선로의 내부에 스트립라인, 원통형 금속봉, 타원형 금속봉을 각각 주기적으로 위치시키는 구조를 제안하고, Conformal mapping을 이용하여 우모드/기모드 임피던스 등의 특성을 계산하여 고전력을 사용하는 스위치 등에 적용 가능성을 입증하였다. 이중 타원형 금속봉에 대한 연구는 특히 Optical Fiber의 분야에서는 매우 활발하게 이루어지고 있다^{[11]-[14]}. 그러나, 이동 및 위성 통신용 부품으로 사용하는 도파관용 부품에는 그 적용이 매우 미비한 실정이다. 또한, 대부분의 해석방법이 Point matching에 근거하여 이루어지기 때문에 경계면의 형태와 조건에 따라 해석방법이 복잡하며 결과의 오차도 커질 수 있다는 단점이 있다.

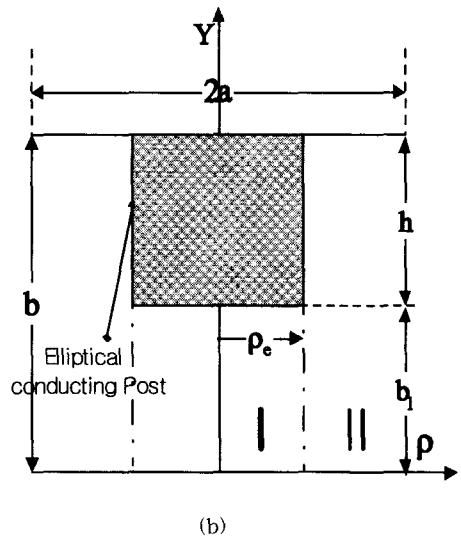
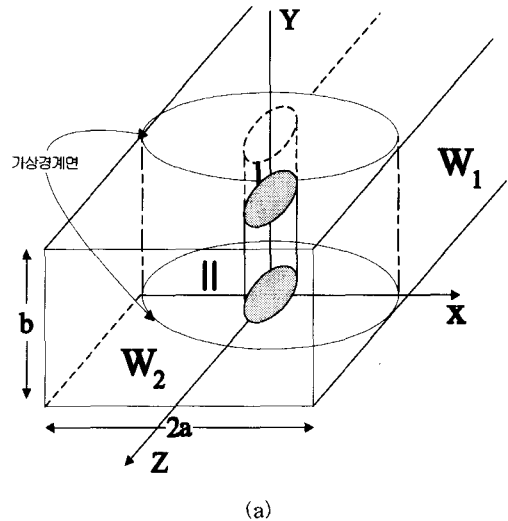
본 논문에서는 임피던스 튜닝을 위하여 타원형 금속봉을 사용하는 도파관의 구조를 제안하고 모드매칭법과 일반산란계수법을 사용하여 타원형 금속봉의 이심률 및 높이 변화에 따른 도파관의 산란 특성과 타원형 금속봉의 등가 임피던스를 계산하는 수치적 해석법을 제시하였다. 계산된 결과는 HFSS와 비교하여 해석방법의 타당성을 입증하였다. 기존의 타원의 원통형 금속봉에 대한 해석이 타원 좌표계에 근거하며 mathieu's equation이 이용되는 반면, 본 논문에서 제안한 방법은 기존의 타원 좌표계를 원통형 좌표계로 변화하는 과정을 통해 해석이 수행되므로, 해석과정이 간단하며 일반산란계수법^[15]과 연계할 경우 다단 구조에 대한 해석이 가능하여 도파관 트랜지션, 스위치, 여파기 등 부품의 설계에 용이하게 적용 가능할 것이다.

II. 타원형 금속봉을 갖는 구형 도파관

2-1 타원형 금속봉에 의한 구형 도파관의 전자계

그림 1에 타원형 금속봉이 있는 구형 도파관의 구조를 나타내었다. 구형도파관 내부로 입사되는 전자계는 타원형 금속봉에 의해 산란되어 그 형태가 변화될 것이며, 타원형 금속봉에 의한 구형 도파관의 전파 특성을 모드 매칭법으로 해석하기 위해서는 적절한 영역의 분할과 각 영역에서 전계와 자계를 유도한 후, 분할된 영역의 경계면에서 전계와 자계의 경계조건을 계산함으로써 해석 가능하다. 영역의 분할 방법 및 각 영역에서의 전자계 및 경계조건의 적용 방법은 본 장에서 설명하였다.

그림 1은 구형 도파관의 중앙에 타원형 금속봉이 위치한 구조이다.



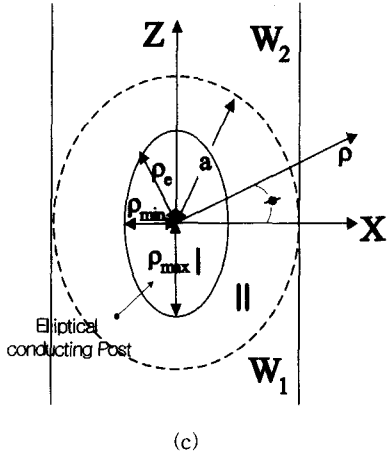


그림 1. 타원형 금속봉이 위치한 구형 도파관의 구조도
 (a) 전체도 (b) 정면도 (c) 윗면도
 Fig. 1. The Structure of rectangular waveguide with elliptical conducting post.

(a) Full structure (b) Front view (c) Top view

이러한 구조를 모드매칭법을 사용하여 해석하기 위해서는 적절한 영역의 분할과 분할된 영역에서 전자계의 유도가 선행되어야 한다^{[3],[11]-[14]}. 여기서, ρ_e 는 원점으로부터 타원까지의 거리로 영역 I과 II간의 경계면을 나타내며 ρ_{max} 는 타원의 장축의 길이를 ρ_{min} 은 단축의 길이를 나타낸다.

그림 1의 구조에서 전자계 유도를 위하여 분할된 영역은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{방사형 도파관 영역} \\
 & \begin{cases} \text{I: } \rho \leq \rho_e, & 0 < y < b_1 \\ \text{II: } \rho_e < \rho \leq a, & 0 < y < b \end{cases} \\
 & \text{구형도파관 영역} \\
 & \begin{cases} W_1: \rho > b, & 0 < y < b, & z < 0 \\ W_2: \rho > b, & 0 < y < b, & z > 0 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (1)$$

영역 I, II에서 전자계는 원통 좌표계에서 맥스웰 방정식에 의해 다음과 같이 유도된다^{[2],[3],[11]-[14]}.

$$\begin{aligned}
 \vec{E}^R(\rho, \phi, y) = & \vec{E}_\rho + \vec{E}_\phi + \vec{E}_y = \\
 & \sum_{\rho=\rho_e, a} \sum_{c, n} [C_{nj}^{TE} J_n(\beta^R \rho) + D_{nj}^{TE} Y_n(\beta^R \rho)] \\
 & [\vec{e}_{\phi nj}^{TE}(\phi, y) + \vec{e}_{y nj}^{TE}(\phi, y)] + \\
 & [C_{nj}^{TE} J_n(\beta^R \rho) + D_{nj}^{TE} Y_n(\beta^R \rho)] |\beta^R| \vec{e}_{\rho nj}^{TE}(\phi, y) + \\
 & \sum_{\rho=\rho_e, a} \sum_{c, n} [C_{nj}^{TM} J_n(\beta^R \rho) + D_{nj}^{TM} Y_n(\beta^R \rho)] \\
 & |\beta^R| [\vec{e}_{\phi nj}^{TM}(\phi, y) + \vec{e}_{y nj}^{TM}(\phi, y)] + \\
 & [C_{nj}^{TM} J_n(\beta^R \rho) + D_{nj}^{TM} Y_n(\beta^R \rho)] \vec{e}_{\rho nj}^{TM}(\phi, y)
 \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned}
 \vec{H}^R(\rho, \phi, y) = & \vec{H}_\rho + \vec{H}_\phi + \vec{H}_y = \\
 & \sum_{\rho=\rho_e, a} \sum_{c, n} [C_{nj}^{TE} J_n(\beta^R \rho) + D_{nj}^{TE} Y_n(\beta^R \rho)] \\
 & [\vec{h}_{\phi nj}^{TE}(\phi, y) + \vec{h}_{y nj}^{TE}(\phi, y)] + \\
 & [C_{nj}^{TE} J_n(\beta^R \rho) + D_{nj}^{TE} Y_n(\beta^R \rho)] |\beta^R| \vec{h}_{\rho nj}^{TE}(\phi, y) + \\
 & \sum_{\rho=\rho_e, a} \sum_{c, n} [C_{nj}^{TM} J_n(\beta^R \rho) + D_{nj}^{TM} Y_n(\beta^R \rho)] \\
 & |\beta^R| [\vec{h}_{\phi nj}^{TM}(\phi, y) + \vec{h}_{y nj}^{TM}(\phi, y)] + \\
 & [C_{nj}^{TM} J_n(\beta^R \rho) + D_{nj}^{TM} Y_n(\beta^R \rho)] \vec{h}_{\rho nj}^{TM}(\phi, y)
 \end{aligned} \quad (2b)$$

여기서, R 은 영역 I 및 II를 의미하고, e 와 h 는 방사형 도파관의 ρ, ϕ, y 방향에 대한 전개와 자계의 고유 모드를 나타낸다. P 는 ϕ 방향에 대한 고유모드의 변화인 $\sin(\phi), \cos(\phi)$ 를 의미하며, n 과 j 는 각각 ϕ 와 y 방향으로의 모드 수이다. 또한, $\beta^R = \sqrt{k^2 - k_m^2}$ 이며 k 는 자유공간의 전파상수를 k_m 은 방사형 도파관의 y 방향의 전파상수이고, J_n 와 Y_n 는 β^R 에 의하여 결정되는 제1종 2종 베셀 함수 또는 제1종과 2종 Modified 베셀함수를 나타낸다.

구형 도파관 영역인 W_i ($\rho > a$)에서 전개와 자계는 다음의 식과 같다^{[2],[3]}.

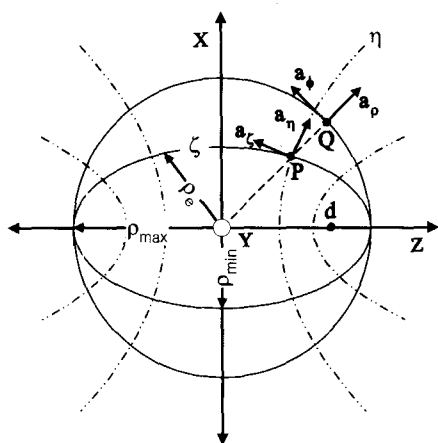
$$\begin{pmatrix} \vec{E}_{W_1}(x, y, z) \\ \vec{E}_{W_2}(x, y, z) \end{pmatrix} = \sum_{q=TE, TM} \sum_l \sum_i \left[\begin{pmatrix} A_{li}^{W_1} \\ B_{li}^{W_1} \end{pmatrix} \vec{e}_{li}^{qF} + \begin{pmatrix} B_{li}^{W_1} \\ A_{li}^{W_1} \end{pmatrix} \vec{e}_{li}^{qB} \right] \quad (3a)$$

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

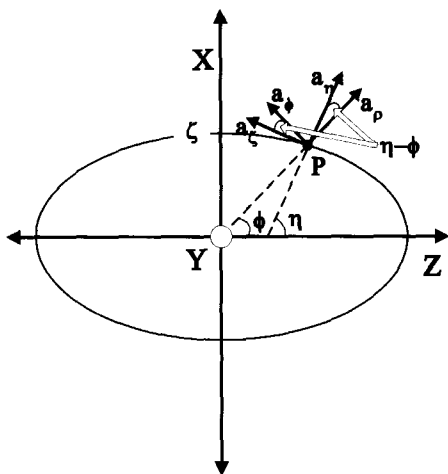
여기서, A^{W_i}, B^{W_i} 는 영역 W_i 에서의 진행파와 반사파의 크기들이고, e_{wi} 와 h_{wi} 는 구형 도파관의 고유모드 나타내며, l 과 i 는 x 와 y 방향에 대한 모드 수를 의미하고, 윗첨자 F 는 진행파를 B 는 반사파를 나타낸다.

2-2 타원형 금속봉의 해석을 위한 각 영역별 경계조건

구형 도파관 내부의 타원형 금속봉에 대한 해석은 앞 절에서 유도한 전개와 자계의 $\rho = \rho_e, a$ 인 경계면에서 접선방향 성분에 대한 경계조건으로부터 이루어진다.



(a)



(b)

그림 2. 원통 좌표계와 타원의 원통 좌표계의 비교
(a) 원과 타원의 원주상의 접선방향 성분
(b) 원과 타원의 접선방향 성분의 관계

Fig 2. The comparison between elliptical cylindrical coordinate and cylindrical coordinate

- (a) The tangential component of circle and ellipse.
- (b) The relationship of tangential component between circle and ellipse

여기서, 두 경계면인 $\rho = \rho_e$ 와 a 인 면은 경계면의 구조가 타원과 원의 형태를 취하며, 기준 좌표 역시 타원의 경우 (η, ζ, y) 이고, 원의 경우 (ρ, ϕ, y) 로 서로 상이하다. 즉, $\rho = a$ 인 경계면에서 전자계의 접선방향 성분은 ϕ 방향 y 방향 성분이 되나, 경계면이 타원인 $\rho = \rho_e$ 에서 접선방향

성분은 η 방향 및 y 방향의 성분으로 표현된다.

그림 2에 원과 타원의 경계면에서 전계와 자계의 접선방향 성분과 두 접선 방향 성분의 좌표 관계를 나타내었다.

앞 절에서 방사형 도파관 영역(I, II)에서 유도된 전자계는 (ρ, ϕ, y) 로 정의된 원통 좌표계의 맥스웰 방정식에 의해 식(1)과 같이 유도되나, 그림 2에서 볼 수 있듯이 $\rho = \rho_e$ 인 타원의 경계면에서 전자계의 접선 방향 성분은 ζ, y 방향 성분으로 표현된다. 따라서, 식(1)의 전자계를 $\rho = \rho_e$ 인 타원의 경계면에서 접선 방향인 ζ, y 방향 성분으로 표현하기 위해서는 원통 좌표계와 타원의 원통 좌표계간의 좌표변환이 필요하다.

그림 2에서 원통 좌표계와 타원의 원통 좌표계는 다음의 관계를 갖는다^[16].

$$\begin{aligned} \zeta &= \cosh^{-1} \left[\frac{\rho_{\max}}{d} \right], \quad d : \text{focal distance} \\ \eta &= \cos^{-1} \left[\frac{1}{2d} (\sqrt{\rho_e^2 + d^2 + 2\rho d \cos \phi} - \sqrt{\rho_e^2 + d^2 - 2\rho d \cos \phi}) \right] \\ y &= y \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, ρ_{\max} 와 ρ_{\min} 은 타원의 장축 및 단축의 길이를 의미하며, d 는 타원의 초점간의 길이를 ρ_e 는 원점으로부터 타원까지의 길이를 나타낸다.

또한 타원 원주상의 임의의 점에서 전자계의 접선 방향 성분을 E_{elt} 와 H_{elt} 라하고 식(1)에 그림 2(b)와 식(4)의 관계를 적용하면 다음과 같이 표현된다^{[12],[13]}.

$$\begin{aligned} E_{elt} &= \sin(\chi)E_\rho + \cos(\chi)E_\phi + E_y \\ H_{elt} &= \sin(\chi)H_\rho + \cos(\chi)H_\phi + H_y \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\chi = \eta - \phi$ 이다. 만일 $\rho = \rho_e$ 인 경계면이 원이 되면 $\chi = 0$ 이 되어 전자계의 접선 방향 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{elt} &= E_\phi + E_y \\ H_{elt} &= H_\phi + H_y \end{aligned} \quad (6)$$

식(5)에서 타원형 금속봉의 불연속 경계면인 $\rho = \rho_e$ 전계와 자계의 접선방향 성분은 다음 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} E_{elt}^I - E_{elt}^{II} \Big|_{\rho = \rho_e} &= 0 \\ H_{elt}^I - H_{elt}^{II} \Big|_{\rho = \rho_e} &= \begin{cases} \vec{J}_{sl} & \text{도체표면} \\ 0 & \text{그 외} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,
$$\rho_e = \frac{\rho_{\max} \times \rho_{\min}}{\sqrt{(\rho_{\max} \times \sin \phi)^2 + (\rho_{\min} \times \cos \phi)^2}}$$

이다.

다음으로 가상의 경계면인 $\rho = a$ 에서 전계와 자계는 다음의 경계 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} E_{elt}^{\text{II}}(a, \phi, y) &= \delta_1 E_{w_1}(x, y, z) \Big|_{\rho=a^+} \\ &\quad \delta_2 E_{w_2}(x, y, z) \Big|_{\rho=a} \\ H_{elt}^{\text{II}}(a, \phi, y) &= \delta_1 H_{w_1}(x, y, z) \Big|_{\rho=a^+} \\ &\quad \delta_2 H_{w_2}(x, y, z) \Big|_{\rho=a} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

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

2-3 타원형 금속봉에 대한 산란 계수의 계산

타원형 금속봉에 의한 산란 계수는 앞 절에서 설명한 각 영역에서의 전자계에 경계 조건에 모드 직교성의 원리를 적용함으로써 유도될 수 있다^[3].

먼저 $\rho = \rho_e$ 인 경계면의 전계와 자계는 식(2)과 식(5)에 따라 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{nj}^I Z_n^I e_{eltj}^I + D_{nj}^I Z_n^I e_{eltj}^{I-} \\ (C_{nj}^{\text{II}} Z_n^{\text{II}} e_{eltj}^{\text{II}} + D_{nj}^{\text{II}} Z_n^{\text{II}} e_{eltj}^{\text{II}}) = 0 \\ C_{nj}^I Z_n^I h_{eltj}^I + D_{nj}^I Z_n^I h_{eltj}^{I-} \\ (C_{nj}^{\text{II}} Z_n^{\text{II}} h_{eltj}^{\text{II}} + D_{nj}^{\text{II}} Z_n^{\text{II}} h_{eltj}^{\text{II}}) = \begin{cases} \vec{J}_{s1} & \text{도체표면} \\ 0 & \text{그 외} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $Z_n^{(R=1, \text{II})}$ 는 C_{nj}^R 와 D_{nj}^R 및 TE와 TM 모드에 따라 결정되는 제1종과 2종 베셀함수 또는 modified 제1종과 2종 베셀함수를 의미하며, $e_{elt}^{(R=1, \text{II})}$ 과 $h_{elt}^{(R=1, \text{II})}$ 는 식(2)에 유도된 방사형 도파관의 ρ, ϕ, y 방향에 대한 고유 모드를 타원의 경계면에서 접선방향 성분을 나타내는 식(5)에 따라 표현한 성분이다.

식(9)에서 영역 I은 $\rho = 0$ 을 포함하며 이 때 전계와 자계는 제 2종 베셀 함수를 포함하므로 D_{nj}^I 은 0이 된다. 또한, C_{nj}^R 과 D_{nj}^R 은 다음의 관계를 갖는다^{[3],[18]}.

$$D_{nj}^R = -\Gamma_{nj}^R C_{nj}^R \quad (10)$$

식(10)을 이용하여 타원의 경계면인 $\rho = \rho_e$ 인 면에서 영역 I의 전계의 영역 II의 자계의 접선 방향 성분을 간단히 표현하면 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} E_{elt}^I &= C_{nj}^I Z_n^I e_{eltj}^I = C_{nj}^I Z_n^I e_{eltj}^I \\ H_{elt}^{\text{II}} &= C_{nj}^{\text{II}} Z_n^{\text{II}} h_{eltj}^{\text{II}} + D_{nj}^{\text{II}} Z_n^{\text{II}} h_{eltj}^{\text{II}} \\ &= C_{nj}^{\text{II}} (Z_n^{\text{II}} h_{eltj}^{\text{II}} - Z_n^{\text{II}} \Gamma_{nj}^{\text{II}} h_{eltj}^{\text{II}}) \end{aligned} \quad (11)$$

식(9)의 전계에 $(Z_n^{\text{II}} h_{eltj}^{\text{II}} - Z_n^{\text{II}} \Gamma_{nj}^{\text{II}} h_{eltj}^{\text{II}})$ 의 외적을 취하고, 자계에 $Z_n^I e_{eltj}^I$ 의 외적을 취하면 전계와 자계의 경계조건은 모드직교성의 원리에 따라 식(12)과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} S^{C^{\text{II}}} C^{\text{II}} + S^{D^{\text{II}}} D^{\text{II}} &= M^{C^{\text{II}}} C^I \\ M^{C^{\text{II}}} C^{\text{II}} + M^{D^{\text{II}}} D^{\text{II}} &= S^{C^I} C^I \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)을 C^{II} 와 D^{II} 에 관해서 정리하면 다음의 행렬식을 얻을 수 있다^{[3],[17],[18]}.

$$\begin{bmatrix} [M_C^{\text{II}}] & [M_D^{\text{II}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^{\text{II}} \\ D^{\text{II}} \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

이때 M_C^R 와 M_D^R ($R = \text{II}$)는 크기가 $N^R \times N^R$ 정방행렬로 방사형 도파관 영역의 전계와 자계에 모드직교성의 원리가 적용된 고유 모드간의 외적 관계를 나타내며, C^R 와 D^R 는 고유 모드의 전계와 자계의 계수를 나타내는 서브행렬이다.

위와 동일한 방법으로 $\rho = a$ 인 경계면에서 전계와 자계의 경계조건인 식(8)에 영역 II의 전계와 자계의 접선방향 성분으로 외적을 취한 후 모드직교성의 원리를 적용하여 C^{II} 와 D^{II} 에 관해 정리하면 식(14)와 같은 행렬식으로 표현된다^{[3],[17],[18]}.

$$\begin{bmatrix} C^{\text{II}} \\ D^{\text{II}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_C^{W,F}] & [T_C^{W,B}] \\ [T_D^{W,F}] & [T_D^{W,B}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{W_1} \\ A^{W_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [T_C^{W_2,F}] & [T_C^{W_2,B}] \\ [T_D^{W_2,F}] & [T_D^{W_2,B}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B^{W_1} \\ B^{W_2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 A^{W_i} 와 B^{W_i} 진행파와 반사파의 크기를 나타내는 벡터이고, $T_C^{W_i}$ 와 $T_D^{W_i}$ 는 크기가 $N^R \times N/2^R$ 인 행렬로 방사형 도파관 영역(II)과 구형 도파관 영역(W)간의 전계와 자계에 모드직교성의 원리가 적용된 고유 모드간의 외적 관계를 나타내며, 윗첨자 F와 B는 진행파와 반사파를 나타낸다.

마지막으로 식(14)을 식(13)에 대입하여 진행파 A와 반사파 B의 함수로 정리하면 도파관 내부의 타원형 금속봉에 의한 산란계수를 구할 수 있다.

$$[B] = [S][A] \quad (15)$$

계산된 결과에 Network Theorem을 적용할 경우 타원형 금속봉에 대한 등가임피던스의 유도도 가능하다^[17]. 위의 해석법은 일반산란계수법과 연계

할 경우 다단 구조의 해석에도 쉽게 적용 가능하여 도파관을 사용한 부품의 설계 및 제작에 용이하게 적용될 수 있다.

III. 해석결과 및 분석

그림 3에 22.86×10.16mm(WR-90)인 구형 도파관의 내부에 타원형 금속봉에 대한 산란 계수의 수렴도를 나타내었다. 해석된 구조는 주파수는 10GHz이며 타원형 금속봉의 장축(ρ_{max})과 단축이(ρ_{min}) 각각 3.175mm, 2.175mm이고 높이(h)는 7.62mm이다.

그림 3으로부터 사용한 모드수가 각각 $N_x=5$, $N_y=6$ 이상이면 산란계수가 수렴하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 N_x 와 N_y 는 각각 5와 6으로 하였다. 또한, 본 논문에서 해석을 위하여 사용한 구형 도파관은 모두 WR-90(22.86×10.16mm)으로 가정하였다.

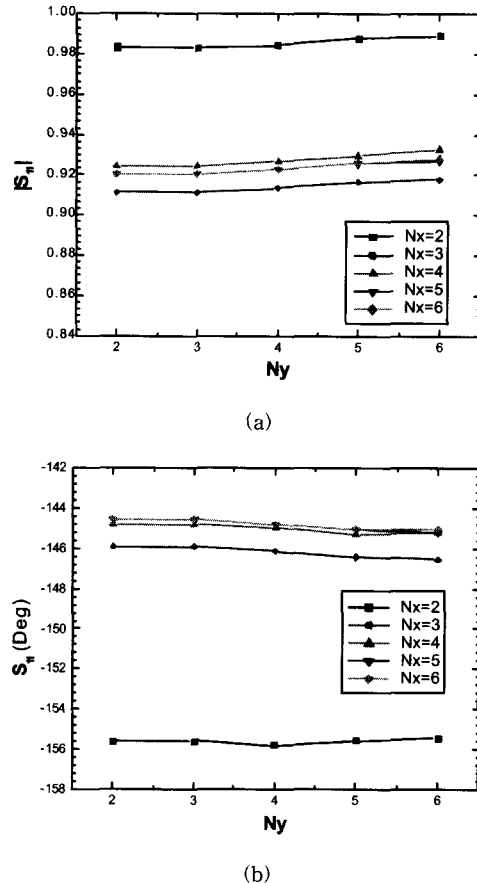


그림 3. 산란계수의 수렴도 (a)크기, (b)위상
Fig. 3. Convergence of S-parameter
(a)Magnitude, (b)Phase

타원의 형태는 장축과 단축의 길이에 따라 형태가 결정되며 이때 장축과 단축의 길이의 비는 이심률(e , eccentricity)로 표현된다. 여기서, 만일 장축의 길이를 ρ_{max} , 단축의 길이를 ρ_{min} 라 가정하면 이심률은, $e = \sqrt{(\rho_{max}^2 - \rho_{min}^2) / \rho_{max}^2}$ 와 같다.

그림 4에 본 논문에서 제시한 방법에 의한 산란 특성의 계산 결과를 HFSS에 의한 결과와 비교하였다. 해석한 구조는 45.72mm 길이의 구형 도파관(WR-90) 내부에 높이(h)가 7.62mm, ρ_{max} 가 3.175mm, ρ_{min} 가 2.575mm인 두 개의 타원형 금속봉이 22.86mm의 거리를 두고 연속적으로 중앙에 위치하였다고 가정하였다.

그림 4로부터 두 결과가 잘 일치하며, 따라서 본 논문에서 제시된 방법이 타당함을 알 수 있다.

도파관의 임피던스 튜닝 요소로 타원형 금속봉이 사용될 때 전파특성에 영향을 주는 주요 변수는 금속봉의 위치, 높이 외에도 타원의 구조를 결정하는 이심률도 주요 인자가 될 것이다. 그러나, 현재 금속봉의 높이와 위치에 대한 도파관의 특성 변화는 많은 연구가 수행되었으나 이심률에 따른 도파관의 전파특성 변화는 아직 연구가 미비한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 타원형 금속봉의 이심률에 따른 도파관의 특성 변화를 중점으로 주어진 구조를 해석하였다.

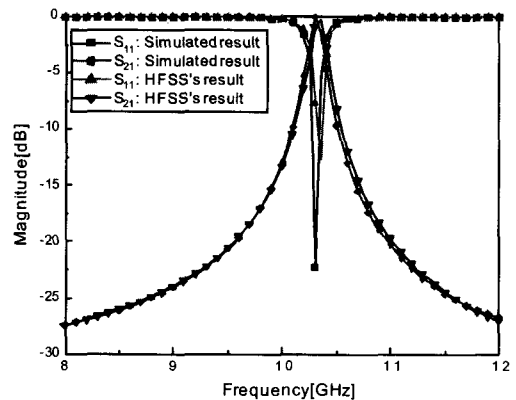
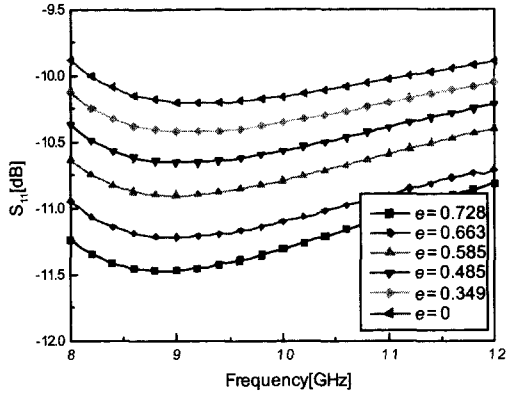


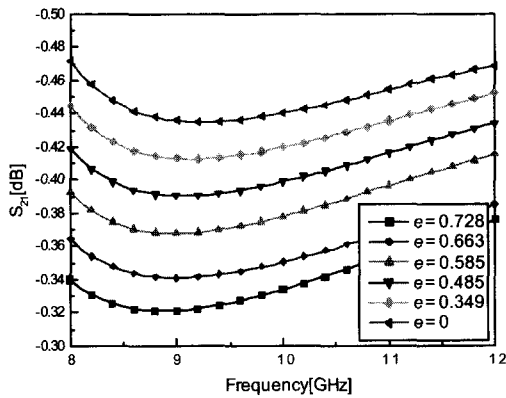
그림 4. 계산값과 HFSS의 결과 비교
Fig. 4. Comparison between simulated result and HFSS's result

그림 5~8은 구형 도파관 내부에 있는 단일 타원형 금속봉의 이심률(e)과 높이 변화에 따른 도파관의 산란특성 변화를 나타낸다. 해석된 구조에서 타원형 금속봉의 장축의 길이(ρ_{max})는 3.175mm로

하였으며, 구형 도파관(WR-90)의 중앙에 위치한다고 가정하였다.



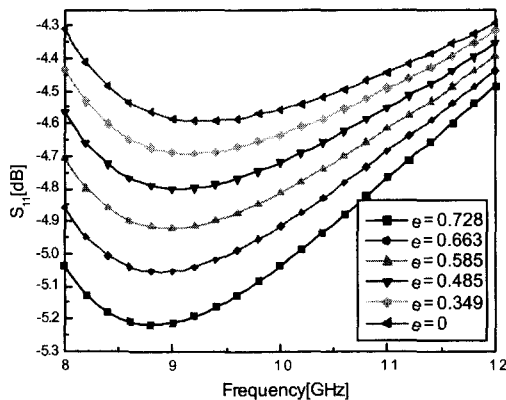
(a)



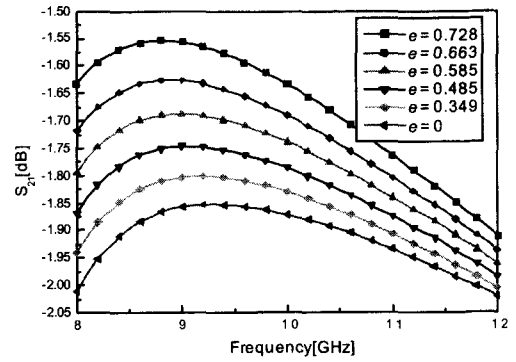
(b)

그림 5. 금속봉의 높이가 2.54mm일 때 이심률에 따른 구형 도파관의 산란특성 (a) S_{11} , (b) S_{21}

Fig 5. Scattering characteristics of rectangular waveguide according to eccentricity when height of post equals to 2.54mm (a) S_{11} , (b) S_{21}



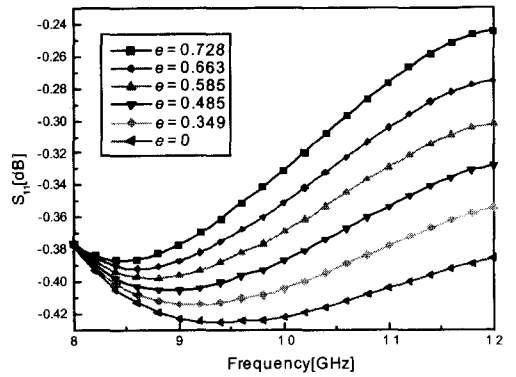
(a)



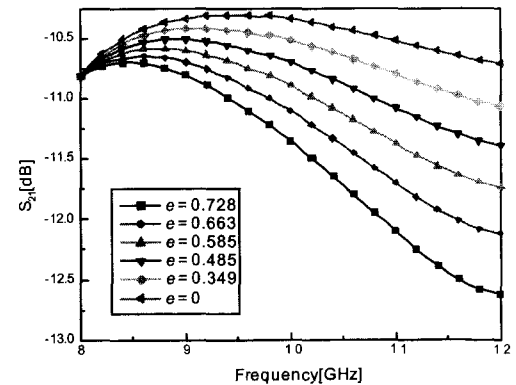
(b)

그림 6. 금속봉의 높이가 4mm일 때 이심률에 따른 구형 도파관의 산란특성 (a) S_{11} , (b) S_{21}

Fig 6. Scattering characteristics of rectangular waveguide according to eccentricity when height of post equals to 4mm (a) S_{11} , (b) S_{21}



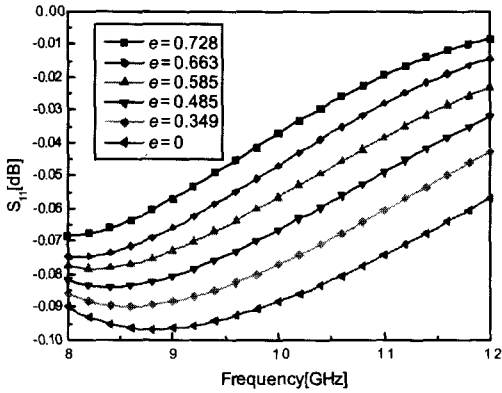
(a)



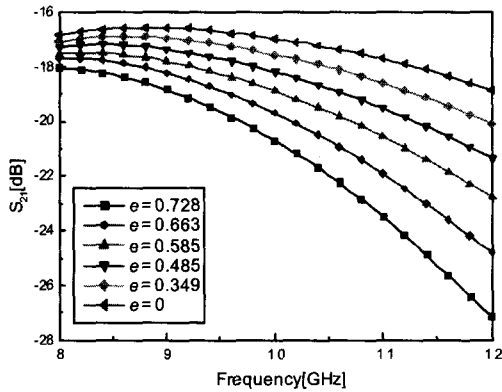
(b)

그림 7. 금속봉의 높이가 7.62mm일 때 이심률에 따른 구형 도파관의 산란특성 (a) S_{11} , (b) S_{21}

Fig 7. Scattering characteristics of rectangular waveguide according to eccentricity when height of post equals to 7.62mm (a) S_{11} , (b) S_{21}



(a)



(b)

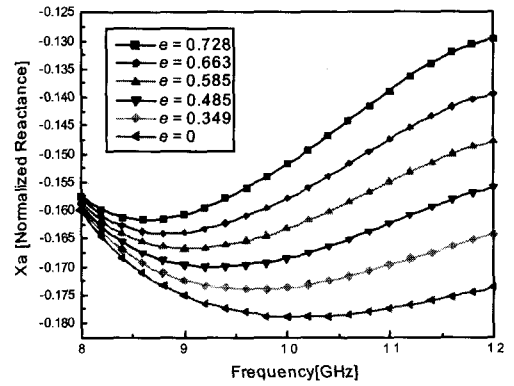
그림 8. 금속봉의 높이가 9mm일 때 이심률에 따른 구형 도파관의 산란특성 (a) S_{11} , (b) S_{21}

Fig 8. Scattering characteristics of rectangular waveguide according to eccentricity when height of post equals to 9mm (a) S_{11} , (b) S_{21}

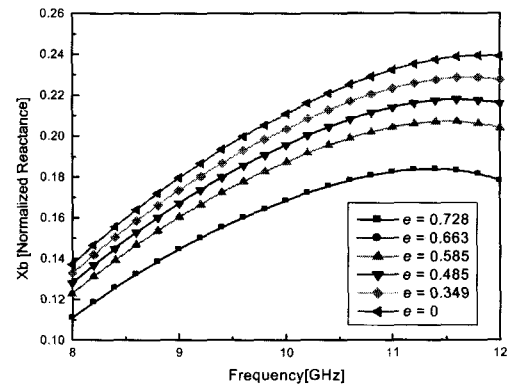
그림 5~8로부터 도파관의 임피던스 튜닝 요소로 타원형 금속봉 ($e \neq 0$)이 사용된 경우 주파수 변화에 따른 도파관의 산란 특성은 이심률에 비례하여 변화되며, 원통형 금속봉 ($e = 0$)이 사용된 경우에 비하여 크게 변화되고 있다. 이러한 특성의 차이는 원통형 금속봉의 경우 구조가 대칭이기 때문에 도파관 내부의 위치에 따른 전계와 자계의 특성 변화가 크지 않을 것이나, 타원형 금속봉의 경우 장축과 단축의 길이가 다른 구조적 측면으로 도파관 내부에서 위치에 따른 전계와 자계의 특성이 변화되기 때문일 것이다. 이는 앞 절에서 유도된 타원형 금속봉의 경계 조건에서도 특성 변화가 원통형 금속봉에 비해 클 것임을 알 수 있다. 또한, 금속봉의 높

이가 낮은 경우 ($h=2.54\text{mm}, 4\text{mm}$) 타원형 금속봉의 이심률에 따른 도파관의 산란특성 변화는 주파수대역 전체에 비슷한 영향을 주는 반면, 금속봉의 높이 ($h=7.62\text{mm}, 9\text{mm}$)가 증가할수록 타원형 금속봉이 도파관의 산란특성에 미치는 영향은 하위주파수보다 상위주파수에서 더 커짐을 알 수 있다.

도파관의 산란 특성과 더불어 타원형 금속봉 자체의 등가 임피던스 특성은 도파관을 사용한 부품의 설계에 있어 중요 설계 데이터로 응용된다. 그림 9는 그림 6에서 해석한 구조의 타원형 금속봉에 대한 T형 등가회로^{[4],[17],[18]}의 정규화된 등가 리액턴스를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 9. 타원형 금속봉의 정규화된 등가 리액턴스 (a) X_a , (b) X_b

Fig. 9. Normalized equivalent reactance of elliptical conducting post (a) X_a , (b) X_b

그림 9에 나타난 등가 리액턴스에 대한 결과도 그림 6의 결과와 동일한 양상을 보인다. 즉, 이심률에 의한 산란특성이 상위주파수에서 더 크게 변화

되는 것과 동일하게 타원형 금속봉의 등가 리액턴스 역시 이심률에 의해 변화되며, 상위 주파수 대역으로 갈수록 더 크게 변화되고 있다.

도파관을 사용한 부품의 설계에 있어 임피던스 튜닝 요소로 타원형 금속봉이 사용될 경우 그 개수는 한 개 이상이 될 수 있다. 이러한 경우 모드매칭법을 사용한 수치적 해석은 개별 해석 결과를 일반 산란계수법에 적용함으로써 해석 가능하다.

그림 10에 구형 도파관 내부에 두 개의 타원형 금속봉이 위치할 때 이심률 변화에 의한 도파관의 산란 특성을 나타내었다. 해석한 구조는 구형 도파관(WR-90)의 내부에 ρ_{max} 는 3.175mm, h 는 7.62mm인 타원형 금속봉 두 개가 22.86mm의 거리 차로 위치한다고 가정하였다

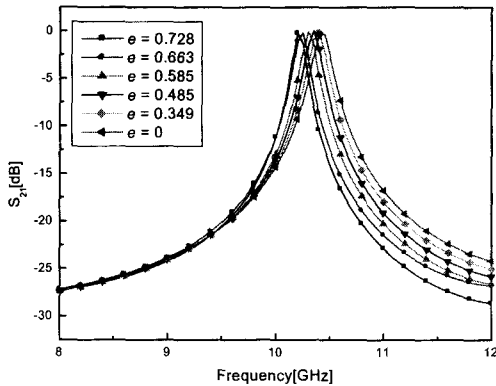


그림 10 두 개의 타원형 금속봉의 이심률에 따른 도파관의 산란특성 (S_{21})

Fig 10. Scattering characteristic of rectangular waveguide with two elliptical conducting post by change of eccentricity (S_{21})

그림 10의 결과는 그림 6에서 해석한 구조가 다단으로 연결되었을 때의 해석 결과이다. 앞의 결과에서도 나타났듯이 이 때 타원형 금속봉에 의한 도파관의 산란 특성변화는 상위 주파수에서 뚜렷함을 알 수 있었다. 그림 10도 이와 마찬가지로 타원형 금속봉의 이심률 변화에 의한 산란특성은 하위주파수보다는 상위 주파수에서 뚜렷하게 나타나고 있다. 따라서, 일정한 높이의 타원형 금속봉을 임피던스 튜닝 소자로 사용할 경우 상위 주파수에서 도파관의 산란 특성 개선에 효과적으로 사용할 수 있음을 의미한다.

IV. 결론

본 논문에서는 여파기 및 트랜지션 등 도파관 관련 부품의 임피던스 튜닝을 위해 타원형 금속봉을 사용하는 도파관의 구조를 제안하였고, 제안된 구조를 모드매칭법과 일반산란계수법을 사용하여 수치적으로 해석하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 방법에 의해 구형 도파관 내부에 타원형 금속봉의 이심률 및 높이 변화에 따른 산란 특성을 계산하였고, 타원형 금속봉에 대한 등가 임피던스를 유도하였다. 계산 결과로부터 이심률 변화에 의해 타원형 금속봉이 도파관의 산란 특성에 미치는 영향은 타원형 금속봉의 높이와 밀접하게 관련되어 타원형 금속봉의 높이가 낮을 경우($h=2.54\text{mm}, 4\text{mm}$) 전체 주파수 대역에서 비슷한 효과를 갖는 반면, 타원형 금속봉의 높이가 높을 경우($h=7.62\text{mm}, 9\text{mm}$) 타원형 금속봉이 도파관의 산란특성 및 등가 임피던스에 미치는 영향은 상위 주파수로 올라갈수록 커지고 있음을 알 수 있었다. 또한, 원통형 금속봉에 의한 결과와 비교할 때 급격한 변화를 보이지 않아 도파관의 미세한 특성 개선에 효과적으로 사용 가능함을 알 수 있다. 본 논문에서 제시한 구조와 해석법은 일반 산란계수법과 연계할 경우 다단의 연결 구조에도 쉽게 적용이 가능하며, 도파관 관련 부품의 설계에 적절하게 사용 가능하다.

참고 문헌

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Boston : Boston Technical Publishers, 1951.
- [5] R.Coccioli, A.Morini, G.Pelosi and T.Rozzi, *Design of Tolerance-Corrected Filters Em*

- p-loying Half-Cylinder Posts," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, pp. 116-118, Jan. 1998.
- [6] H. Auda and R. F. Harrington, "Inductive posts and diaphragms of arbitrary shape and number in a rectangular waveguide," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 32, pp. 606-613, Jun. 1984.
- [7] J. M. Reiter and F. Arndt, "A boundary contour mode-matching method for the rigorous analysis of cascaded arbitrarily shaped H-plane discontinuities in rectangular waveguides," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 2, pp. 403-405, Oct. 1992.
- [8] M. Okoniewski and J. Mazur, "An accurate field matching analysis of waveguides of complex cross-sectional geometry loaded with magnetized ferrite rods," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 880-886, Apr. 1995.
- [9] B. N. Das and K. V. S. Rao, "Analysis of an elliptical conducting rod between parallel ground planes by conformal mapping," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 30, pp. 1079-1085, July. 1982.
- [10] P. Bhartia and K. V. S. Rao, "Analysis of edge coupled elliptical(Oval) rods between infinite ground planes," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, pp. 1260-1263, Aug. 1989.
- [11] E. Yamashita, K. Atsuki, O. Hashimoto and K. Kamijo, "Modal analysis of homogeneous optical fibers with deformed boundaries," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 27, pp. 352-356, Apr. 1979.
- [12] E. Yamashita, K. Atsuki and Y. Nishino, "Composite dielectric waveguides with two elliptic-cylinder boundaries," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 29, pp. 987-989, Sep. 1981.
- [13] E. Rothwell and L. L. Frasc, "Propagation characteristics of dielectric rod loaded waveguides," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 36, pp. 594-600, Mar. 1988.
- [14] E. Yamashita, K. Atsuki and R. Kuzuys, "Composite dielectric waveguides," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 28, pp. 986-990, Sep. 1980.
- [15] A. S. Omar and K. Schunemann, "Transmission matrix representation of fin line discontinuities," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-33, pp. 765-770, Sep. 1985.
- [16] Morse and Feshbach, *Method of Theoretical Physics*, New York : McGRAW-HILL, 1953.
- [17] 김원기, 양기덕, 김민택, 박익모, 신철재, "2개의 불연속 구조물을 갖는 도파관의 임피던스 계산", 한국전자과학회논문지, 8권 5호, pp.462-475, 1997.10.
- [18] 김원기, 이진택, 설용태, 신철재, "2개의 원통도체로 구성된 봉이 있는 구형 도파관의 산란 특성", 한국통신학회논문지, 27권 11호, pp.1046-1054, 2002.11.

김 원 기(Won-Ki Kim)

정희원



1995년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업

1997년 2월 : 아주대학교 전자공학과 석사

1997년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 박사과정

1999년 3월~현재 : 호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구센터 연구원

<주관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

이 창 언(Chang-On Lee)

정희원



1998년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업

2000년 2월 : 아주대학교 전자공학과 석사

2000년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 박사과정

<주관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

김 상 태(Sang-Tae Kim) 정회원



1985년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 졸업
1987년 8월 : 아주대학교 전자
공학과 석사
2001년 2월 : 아주대학교
전자공학과 박사

1991년 3월~현재 : 한국산업기술평가원 선임연구원

〈주관심분야〉 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

설 용 태(Yong-Tae Sul) 정회원



1979년 2월 : 한양대학교 전기
공학과 졸업
1981년 2월 : 한양대학교 전기
공학과 석사
1984년 2월 : 한양대학교 전기
공학과 박사

1985년 3월~현재 : 호서대학교 전기정보통신공학부
교수

〈주관심분야〉 공정제어, 반도체 장비

신 철 재(Chull-Chai Shin) 정회원



1964년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업
1968년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 석사
1983년 3월 : 연세대학교 전자
공학과 박사

1977년~현재 : 아주대학교 전자공학부 교수

〈주관심분야〉 전자공학, 통신공학, 광통신 공학