

2개의 원통 도체로 구성된 봉이 있는 구형 도파관의 산란 특성

정회원 김 원 기*, 이 진 택**, 설 용 태*, 신 철 재**

Scattering Characteristics of Rectangular Waveguide with composed of two Cylindrical Conducting Post

Won-ki Kim*, Jin-taek Lee**, Yong-tae Sul*, Chull-chai Shin** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 중앙에서 벗어나 위치한 두 개의 원통형 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉이 있는 구형 도파관의 산란 특성을 금속 봉의 반경과 높이, 위치에 따라 모드 매칭법과 일반 산란 계수법을 적용하여 계산하고, 등가 임피던스 모델을 유도하였다. 해석 결과 구형 도파관의 산란 특성은 금속 봉의 위치에 따라 미세 변화가 가능하여 미세 튜닝에 효과적으로 사용할 수 있음을 확인하였고, HFSS와 비교한 결과 잘 일치하였다. 본 논문에서 제안한 구조와 해석법은 도파관을 사용한 이동/위성 통신 기지국의 부품의 설계에 용이하게 사용될 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, S-parameter characteristics and equivalent impedance of rectangular waveguide with composed of two off-centered cylindrical conducting post are calculated according to radius, height and position of conducting post by mode matching and generalized scattering method. From the simulated results, scattering characteristics of rectangular waveguide could be varied by position of conducting post. Consequently, it can be utilized to fine tuning of rectangular waveguide. The calculated results show good agreement to HFSS's results. The proposed structure and analysis method are easily applied to the design of waveguide component in mobile/satellite base station.

1. 서 론

원통형의 불연속 구조물이 있는 도파관의 해석은 Green's 함수를 이용한 적분 방법^[1], Point 매칭을 이용한 모멘트법^[2] 및 영상 원리를 이용한 영상법^[3] 등 다양한 방법이 이용되었으나, 해석방법이 매우 복잡하고 계산시간이 길며, 결과의 오차가 크다는 단점이 제기되었다. 이러한 문제점은 X. -P. Liang^[4] 과 H.-W. Yao^[5]가 제안한 방법에 의해 개선되었으나, 원통형 금속 봉이 구형 도파관의 중앙에 위치한 경우에만 적용가능 하였다. 구조적 제한성의 해결을

위하여 R.G. Gesche^[6]는 구형 도파관의 내부의 중앙에서 벗어난 위치에 존재하는 원통형 유전체에 대하여 축 변환 행렬을 이용한 모드 매칭법을 제안 하였으나, 이 방법 역시 H.-W. Yao^[5]가 제안한 방법에 비하여 전계와 자계의 유도 과정이 복잡하고, 도파관의 높이와 원통형 불연속 구조물의 높이가 동일한 경우(TE₁₀ 모드만 입사한다는 가정이 유효한 구조)에만 적용 가능하다는 단점이 있다.

최근 가변 높이의 원통형 금속 봉이 중앙에서 벗어난 위치에 주기적으로 존재하는 구조가 제안되었고, 그 결과 분산특성이 우수하여 Gyro-TWT의

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

** 아주대학교 전자공학부

논문번호 : 020315-0724, 접수일자 : 2002년 7월 24일

※ 본 연구는 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구센터의 지원에 의하여 수행되었습니다.

Interaction circuit으로 적용 가능성이 입증되었다⁷⁾. 그러나, 이러한 해석법은 모두 불연속 구조물의 구조가 단일 원통형으로 이루어진 경우에만 국한되어 있으며, 반경이 다른 원통형 금속 봉이 결합된 구조가 중앙에서 벗어나 위치한 경우에 대한 해석은 수행되지 않았다.

본 논문에서는 구형 도파관의 내부에 서로 다른 반경을 갖는 두개의 원통도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉의 상단 금속 봉이 도파관의 중앙에서 벗어나 위치한 구조를 제안하였고, 제안된 구조에 대하여 금속 봉의 반경, 높이, 위치 변화에 따른 산란 특성과 등가임피던스를 모드 매칭법을 사용하여 계산하였으며, HFSS의 결과와 비교 타당성을 검증하였다. 해석 결과로부터 본 논문에서 제안된 구조는 도파관의 임피던스의 미세 튜닝의 장점이 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제시한 구조와 해석법은 일반 산란 계수법과 연계할 경우 다단 구조의 금속 봉을 갖는 도파관의 해석에도 쉽게 적용이 가능하여 이동/위성 통신 기지국의 도파관 관련 부품의 해석과 설계에 용이하게 사용될 수 있다.

II. 두 개의 원통 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉이 있는 구형 도파관

2-1. 두 개의 원통 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉에 의한 전자계

두 개의 원통도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉이 있는 구형 도파관을 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 구조에서 도파관 내부의 이중 원통형 금속 봉에 전파 특성은 주어진 구조에 대하여 적절한 경계면을 설정하고, 설정된 영역에서 전계와 자계를 유

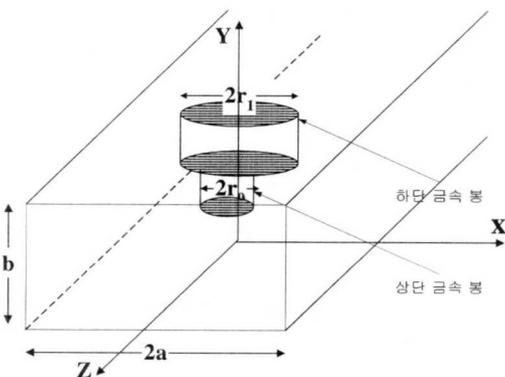


그림 1. 중앙에서 벗어나 위치한 이중 원통형 금속 봉이 있는 구형 도파관의 구조

도한 후 경계면에서 횡면 전계와 자계의 경계 조건을 해석함으로써 계산할 수 있다.^{[4]-[6],[12]}

그림 2에 그림 1의 구조를 자세히 도시하였다.

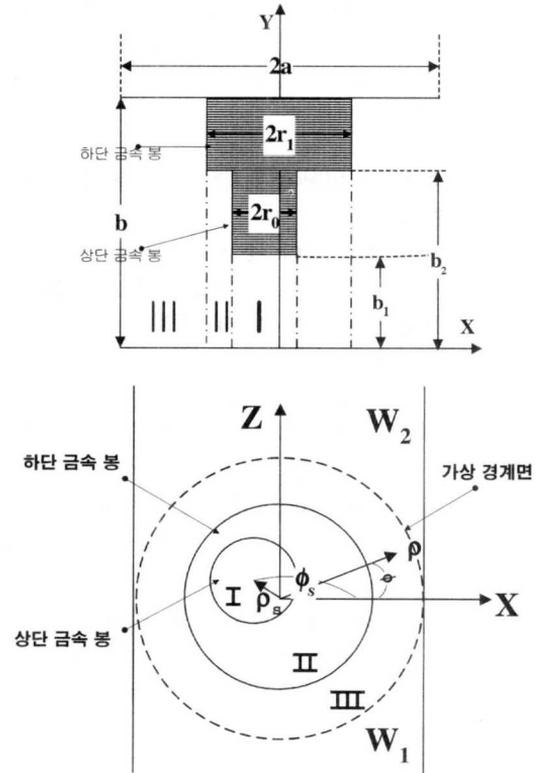


그림 2. 중앙에서 벗어나 위치한 이중 원통형 금속 봉이 있는 구형 도파관 (a) 정면도 (b) 횡면도

그림 2의 구조는 서로 다른 반경을 갖는 두 개의 원통 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉이 구형 도파관 내부에 위치하며 그 중 상단 금속 봉이 원 좌표계의 원점으로부터 ρ_s (천이 거리)와 ϕ_s (천이 각도)만큼 이동된 구조이다. 여기서, 내부의 전자계는 방사형 도파관과 구형 도파관의 전자계 유도 및 축 변환 행렬에 의해 계산 될 수 있으며, 축 변환 행렬의 계산은 다음절에 설명하였다.^{[6]-[8]}

그림 2에 도시된 구조는 방사형 도파관(radial waveguide)과 구형 도파관이 결합된 구조로 각 영역의 분할은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{cases} \text{방사형 도파관 영역} \\ \text{I: } \rho \leq r_0, \quad 0 < y < b_1 \\ \text{II: } r_0 < \rho \leq r_1, \quad 0 < y < b_2 \\ \text{III: } r_1 < \rho \leq a, \quad 0 < y < b \end{cases} \quad (1)$$

구형도파관 영역

$$\begin{cases} W_1: \rho > a, \quad 0 < y < b, \quad z < 0 \\ W_2: \rho > a, \quad 0 < y < b, \quad z > 0 \end{cases}$$

분할된 영역인 I, II, III에서 구형 도파관 내부의 금속 봉에 의하여 산란되는 전자계는 방사형 도파관에 존재하는 전자계의 형태를 취하며, 원통 좌표계의 xz 평면에 존재하는 두 평행판 내의 y 방향 전파 방정식에 의하여 계산되고, 영역 W_i ($\rho > b$)에서 전계와 자계는 구형 도파관의 전계와 자계의 형태를 취한다.^{[5],[6],[12]}

2-2. 중앙에서 벗어나 위치한 금속 봉의 축 변환 행렬

그림 1의 구조와 같이 중앙에서 벗어나 위치한 원통형 불연속 구조에 모드매칭법의 적용을 위해서는 축 변환 행렬에 의해 원 좌표계로 변환하는 과정이 선행되어야 한다.^{[6]-[8]} 좌표 변환의 과정을 위하여 그림 3에 중앙에서 벗어난 곳에 위치한 금속 봉을 나타내었다. 그림 3은 원 좌표계인 (ρ, ϕ, y) 와 금속 봉의 위치를 중앙으로 하는 국부 좌표계인 (ρ_1, ϕ_1, y) 로 구성되어 있다. 여기서, 도파관 내의 금속 봉은 원 좌표계인 (ρ, ϕ, y) 를 기준으로 ρ_0 와 ϕ_0 만큼 이동되어 있다. 이러한 구조에서 원통형 금속 봉에 의한 전자계는 Maxwell 방정식의 단일성 원리(Unitary Theorem)에 따라 (ρ, ϕ, y) 축이나 (ρ_1, ϕ_1, y) 축에 관계없이 고유 모드들의 합으로 표현될 수 있다.

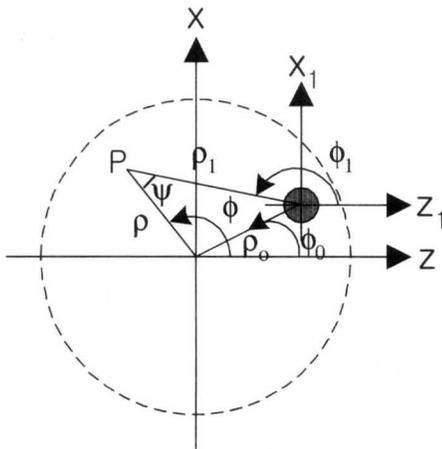


그림 3. 중앙에서 벗어난 위치에 있는 원통형 금속 봉

따라서, 그림 3의 임의의 P점에서 TM_y 전자계는 단일성 원리에 의해 식(2)와 같이 표현된다.

$$\sum_{\beta=s,c} \sum_n a_{nm}^{\beta e} \vec{E}_{ynm}^{\beta e}(\rho_1, \phi_1, y) = \sum_{\beta=s,c} \sum_n b_{nm}^{\beta e} \vec{E}_{ynm}^{\beta e}(\rho, \phi, y) \quad (2)$$

식(2)에 방사형 도파관의 전자계를 대입하여 정리하면 다음과 같은 항등식을 얻을 수 있다.

$$a_{0m}^{ce} Z_0(\beta_m^e \rho_1) + \sum_{\beta=s,c} \sum_n a_{nm}^{\beta e} Z_n(\beta_m^e \rho_1) \Phi_n^{\beta e}(\phi_1) = b_{0m}^{ce} Z_0(\beta_m^e \rho) + \sum_{\beta=s,c} \sum_n a_{nm}^{\beta e} Z_n(\beta_m^e \rho) \Phi_n^{\beta e}(\phi) \quad (3)$$

여기서, β_m 은 방사형 도파관의 전파상수를 나타내며, Z_n 은 방사형 도파관의 전파상수에 따른 1종 및 2종 베셀 함수를 나타내고, Φ 는 방사형 도파관의 ϕ 방향 변화인 $\sin(\phi)$ 또는 $\cos(\phi)$ 를 나타낸다. 식(3)은 그림 3에 표현된 베셀 함수의 덧셈 이론을 만족한다.

$$Z_n(\beta_m^e \rho_1) \Phi_n^{\beta e}(\Psi) = \sum_{n'=-\infty}^{\infty} \delta_n P_n(\beta_m^e \rho_0) Z_{n+n'}(\beta_m^e \rho) \Phi_{n'}^{\beta e}(\phi - \phi_0) \quad (4)$$

여기서,

$$P_n(\beta_m^e \rho_0) = \begin{cases} J_n(\beta_m \rho_0) & Z_{n'} \in J_{n'}, Y_{n'} \\ I_n(|\beta_m| \rho_0) & Z_{n'} \in I_{n'}, K_{n'} \end{cases}$$

$$\delta_n = \begin{cases} 1 & Z_{n'} \in J_{n'}, Y_{n'}, K_{n'} \\ (-1)^{n'} & Z_{n'} \in I_{n'} \end{cases}$$

이다.

식(4)를 식(3)에 대입하여 정리하면 국부 좌표계의 전자계는 원 좌표의 전자계로 변환되며, 이때 축 변환 행렬은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} b_m^{ce} \\ b_m^{se} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Tr_{cc}^e & Tr_{cs}^e \\ Tr_{sc}^e & Tr_{ss}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_m^{ce} \\ a_m^{se} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, e는 TM 모드를 c와 s는 ϕ 방향 변화인 $\cos(\phi)$, s는 $\sin(\phi)$ 를 나타낸다.

TE 모드에 대한 전자계의 축 변환 행렬도 위와 동일한 방법에 의해 유도될 수 있다. 따라서, 국부 좌표계와 원 좌표계간의 변환 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} b_m^{ce} \\ b_m^{se} \\ b_m^{ch} \\ b_m^{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Tr_{cc}^e & Tr_{cs}^e & 0 & 0 \\ Tr_{sc}^e & Tr_{ss}^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Tr_{cc}^h & Tr_{cs}^h \\ 0 & 0 & Tr_{sc}^h & Tr_{ss}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_m^{ce} \\ a_m^{se} \\ a_m^{ch} \\ a_m^{sh} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2-3. 이중 원통형 금속 봉에 대한 산란 계수의 계산

구형 도파관 내부의 두 개의 원통 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉에 의한 산란 계수는 구형 도파관 내부의 전자계에 대한 경계 조건과 모드 직교

성의 원리에 의해 계산할 수 있다. 각 영역의 전계와 자계는 불연속 경계면인 $\rho = r_0, r_1, a$ 에서 다음의 경계 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} E_{ct}^I - E_{ct}^{II} \Big|_{\rho=r_0} &= 0 \\ H_{ct}^I - H_{ct}^{II} \Big|_{\rho=r_0} &= \begin{cases} \vec{J}_{s1} & \text{도체표면} \\ 0 & \text{그 외} \end{cases} \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} E_{ct}^{II} - E_{ct}^{III} \Big|_{\rho=r_1} &= 0 \\ H_{ct}^{II} - H_{ct}^{III} \Big|_{\rho=r_1} &= \begin{cases} \vec{J}_{s2} & \text{도체표면} \\ 0 & \text{그 외} \end{cases} \end{aligned} \quad (7b)$$

$$\begin{aligned} E_{ct}^{III}(a, \phi, x) &= \delta_1 E_{W_1}(x, y, z) \Big|_{\rho=a} \\ &\quad + \delta_2 E_{W_2}(x, y, z) \Big|_{\rho=a} \\ H_{ct}^{III}(a, \phi, x) &= \delta_1 H_{W_1}(x, y, z) \Big|_{\rho=a} \\ &\quad + \delta_2 H_{W_2}(x, y, z) \Big|_{\rho=a} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \delta_1 = 1: \frac{\pi}{2} \leq \phi < \frac{3\pi}{2} \\ \delta_2 = 0: \frac{\pi}{2} \leq \phi < \frac{3\pi}{2} \end{cases}, \begin{cases} \delta_1 = 0: -\frac{\pi}{2} \leq \phi < \frac{\pi}{2} \\ \delta_2 = 1: -\frac{\pi}{2} \leq \phi < \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

식(7)과 (8)로부터 구형 도파관의 산란 계수는 모드 직교성 원리를 적용하여 계산할 수 있다.^{[5],[6],[12]} 먼저, 영역 I 과 II ($\rho = r_0$)의 경계조건인 식(7a)에 각각 영역 II의 자계와 영역 I의 전계의 고유 모드로 외적을 취하면 모드 직교성의 원리에 따라서 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} [Se^{II}][[J_E^{II}]C^{II} + [Y_E^{II}]D^{II}] \\ = [M^{I,II}][[J_E^I]C^I + [Y_E^I]D^I] \\ [M^{I,II}]^T [[J_H^{II}]C^{II} + [Y_H^{II}]D^{II}] \\ = [Se^I][[J_H^I]C^I + [Y_H^I]D^I] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $Se^R (R = I, II)$ 는 동일 영역의 전계와 자계의 외적을 나타내는 행렬이고, $M^{R,R}$ 은 서로 다른 영역간의 전계와 자계의 외적을 나타내며, J_E^R or H , Y_E^R or H 는 베셀 함수의 행렬이고, C^R 와 D^R 는 전계와 자계의 계수를 나타내는 행렬이다. 또한, 만일 영역 R 이 원점을 포함한다면 $D^R = 0$ 이 된다. 식(9)를 C^{II} 와 D^{II} 로 정리하면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [M_C^{II}] & [M_D^{II}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Tr_C] \\ [Tr_D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^{II} \\ D^{II} \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

여기서, $[Tr]$ 은 앞 절에서 설명한 좌표계 변환에 의해 유도된 국부 좌표계에서 원 좌표계로의 축 변환

행렬을 나타내며, 금속 봉이 도파관의 중앙(원점)에 있을 경우 단위행렬이 된다.

식(10)으로부터 C^{II} 와 D^{II} 는 다음의 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} D^{II} &= -[[M_D^{II}][Tr_D]]^{-1}[[M_C^{II}][Tr_C]]C^{II} \\ &= [\Gamma_{II}]C^{II} \end{aligned} \quad (11)$$

또한, 영역 II 과 III ($\rho = r_1$)의 경계조건인 식 (7b)에 위의 방법과 마찬가지로 영역 III의 자계와 영역 II의 전계의 외적을 취하면 식(9)와 동일한 형태로 표현되며, 식(11)을 대입하여 간단히 한 후 이를 C^{III} 와 D^{III} 로 정리하면 식(10)과 같은 형태의 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [M_C^{III}] & [M_D^{III}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^{III} \\ D^{III} \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

이때 M_C^R 와 $M_D^R (R = II, III)$ 는 해석에 사용된 모드의 개수가 N^R 이라 가정할 때 크기가 $N^R \times N^R$ 정방행렬로 방사형 도파관 영역의 전계와 자계에 모드 직교성의 원리가 적용된 정상모드간의 외적 관계를 나타내며, C^R 와 D^R 는 정상 모드의 전계와 자계의 계수를 나타내는 서브행렬이다.

마지막으로 주어진 구조에 대한 산란계수의 계산을 위하여 구형 도파관과 방사형 도파관 영역의 경계 조건으로부터 각 영역의 계수의 관계를 구한 후 식(12)와 정리하면 산란 계수를 유도할 수 있다. 이를 위하여 먼저 방사형 도파관과 구형 도파관의 불연속 경계면인 $\rho = a$ 에서는 경계조건이 서로 다른 두 좌표계에서 정의되었으므로 좌표 변환에 의해 각각 좌표계를 원통 좌표계로 변환한 후 모드 매칭법이 적용되어야 한다. 방사형 도파관(III)과 구형 도파관(W_i)의 불연속 경계면 $\rho = a$ 인 면의 경계 조건인 식(8)에 영역 III의 자계와 전계의 외적을 취한 후 C^{III} 과 D^{III} 으로 정리하면 모드 직교성의 원리에 따라 다음의 행렬식으로 표현된다.^{[5],[6],[12]}

$$\begin{aligned} [W_A^1 \ W_B^2] \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \end{bmatrix} + [W_B^1 \ W_A^2] \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} C^{III} \\ D^{III} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 A^n 는 진행파의 크기를 나타내는 행렬이며, B^n 은 반사파의 크기를 나타내는 행렬이다. 따라서, 식(12)와 (13)을 정리하여 진행파 A와 반사파 B의 형태로 표현하면 도파관 내부의 금속 봉에 의한 산란 계수를 구할 수 있다.

$$[B] = [S][A] \tag{14}$$

도파관 내의 금속 봉에 대한 임피던스 등가 모델은 도파관을 사용한 수동 부품의 설계에 있어 매우 중요한 요소이며, 이러한 등가 임피던스는 계산된 산란 계수에 Network 이론을 이용하여 T형 또는 π 형 등가 모델로 유도될 수 있다. 그림 4는 구형 도파관 내부에 금속 봉에 대한 T형 임피던스 등가 모델을 나타낸다.^{[7],[13]} 만일 원통형 불연속 구조물이 N개로 결합되어 이루어 질 경우 위의 과정을 반복적용함으로써 쉽게 해석 할 수 있으며, 일반 산란 계수 법과 연계하여 사용될 경우 다단의 불연속 구조도 용이하게 해석할 수 있다.^[14]

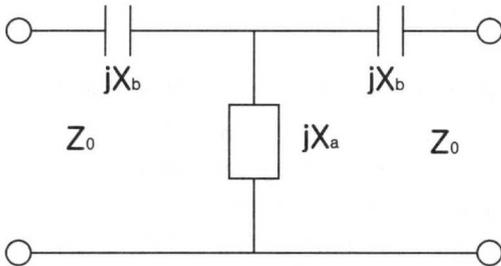


그림 4. 원통형 금속 봉의 임피던스 등가모델

III. 해석 결과 및 분석

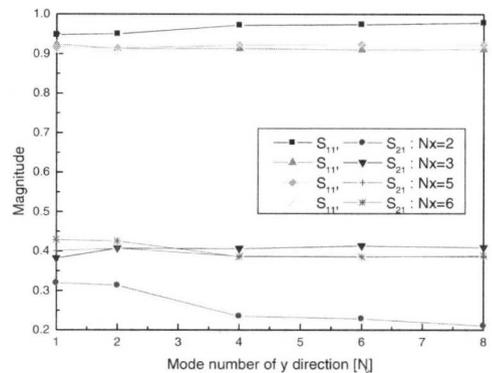
모드 매칭법에서 적절한 모드 수의 선택은 해석 시간 및 결과의 정확성에 있어 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서 제안한 구조의 경우 천이된 위치를 나타내는 ϕ_s 에 따른 결과의 수렴도가 모드 수에 따라 차이를 보였다. 그림 5는 구형 도파관의 크기가 $22.86\text{mm} \times 10.16\text{mm}$ 이며, $b_1=2.54\text{mm}$, $b_2=7.62\text{mm}$, $r_0=1.5875\text{mm}$, $r_1=3.175\text{mm}$ 이고, 중심으로부터의 천이된 위치는 $\phi_s = \pi/2$, $\rho_s = 1.5\text{mm}$ 일 때의 산란계수의 수렴도이다. 여기서, N_x 는 x 방향으로의 모드 수이며, N_y 는 y 방향으로의 모드 수를 나타낸다.

표 1은 ϕ_s 가 $\pi/4$ 이고 ρ_s 가 1.5mm 일 때의 산란계수의 값을 HFSS 결과와 비교한 값이다.

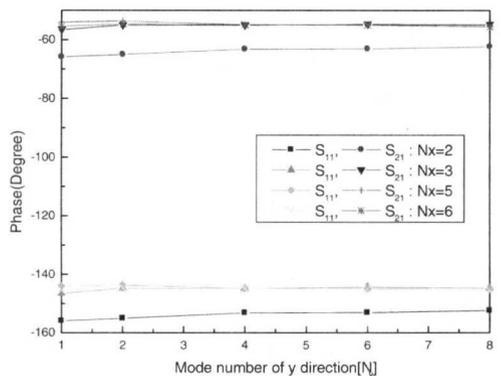
그림 5와 표 1에서 해석을 위한 최적의 모드 수는 ϕ_s 에 따라 큰 차이를 보이고 있다. ϕ_s 에 따른 최적의 모드 수를 구하기 위해 ϕ_s 에 따른 결과의 수렴도를 계산하였을 때 ϕ_s 가 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 의 경우 N_x 와 N_y 가 각각 5 이상이면 일정한 값으로 수렴하며, 위의 ϕ_s 를 제외한 임의의 ϕ_s 에서는 최소 N_x 와

표 1. 산란계수 값의 비교

$N_x=13$ $N_y=6$	Simulated result		HFSS's result	
	S_{11}	S_{21}	S_{11}	S_{21}
	0.9127 $\angle -157.6^\circ$	0.4019 $\angle -54.44^\circ$	0.9249 $\angle 159.42^\circ$	0.3884 $\angle -55.9^\circ$



(a)



(b)

그림 5. 모드 수에 따른 산란계수의 수렴도 ($\phi_s = \pi/2$)

(a) 크기 (b) 위상

N_y 는 13 및 6임을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서는 ϕ_s 가 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 인 경우에 N_x 및 N_y 는 5와 6으로 하였고, 위의 ϕ_s 를 제외한 경우에는 N_x 와 N_y 를 각각 13과 6으로 하였다.

본 논문에서 제시한 방법의 검증을 위하여 주파수 변화에 따른 산란계수를 계산하여 HFSS에 의한 결과와 비교하였을 때 그림 6과 같이 잘 일치함을 알 수 있다. 여기서, 구형 도파관은 $22.86\text{mm} \times 10.16\text{mm}$ 이며, 금속 봉의 구조는 $b_1=2.54\text{mm}$, $b_2=7.62\text{mm}$, $r_0=1.5875\text{mm}$, $r_1=3.175\text{mm}$ 이고, 중앙에서 벗어난 위치는 $\phi_s = \pi/2$, $\rho_s = 1.3\text{mm}$ 로 하였다. 그리고, 두 개

의 원통 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉의 개수는 2개로 하였고 금속 봉간의 거리는 22.86mm로 설정하였다. 해석에 사용한 모드 수는 각각 5, 6이었다. 두 개의 원통 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉의 상단 및 하단 금속 봉의 반경에 따른 특성 변화를 조사하기 위하여 반경의 변화에 따른 등가 임피던스를 계산하였다. 그림 7은 구형 도파관의 중앙에 위치한 두 개의 원통 도체로 구성된 금속 봉의 반경 변화에 따른 등가 임피던스를 나타낸다. 이때 구형 도파관은 22.86mm×10.16mm이고 금속 봉의 높이는 각각 $b_1=2.54\text{mm}$, $b_2=7.62\text{mm}$, $\rho_s=\phi_s=0$, 주파수는 10GHz로 하였다.

그림 7(a)와 (b)로부터 상단 원통형 금속 봉의 반경의 변화에 따라 X_b 값은 선형적으로 변하는 반면 X_a 값은 변화의 폭이 작음을 알 수 있고, 이와는 반대로 하단 원통형 금속 봉의 반경에 따라 X_a 값은 선형적 변화를 갖으며, X_b 는 변화의 폭이 작음을 알 수 있다. 따라서, 상단 및 하단 금속 봉의 반

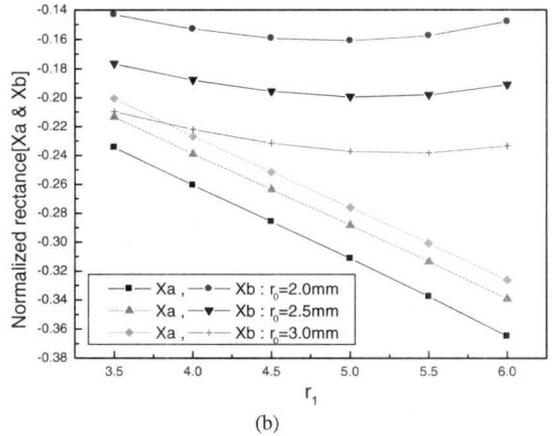


그림 7. 금속 봉의 반경에 따른 등가 임피던스
(a) r_0 변화 (b) r_1 변화

경의 조절을 통하여 X_a 혹은 X_b 만을 조절 할 수 있다. 이중 원통형 금속 봉의 상단 금속 봉의 ρ_s 에 따른 도파관의 특성 변화를 그림 8에 나타내었다. 이때 주파수는 10GHz, $b_1=2.54\text{mm}$, $r_0=2\text{mm}$, $r_1=6\text{mm}$ 로 하였다. 그림 8은 ϕ_s 가 0과 $\pi/2$ 일 때의 ρ_s 의 변화에 따른 결과로 ρ_s 의 변화에 따라 도파관의 산란 특성 및 등가 임피던스가 변화되며, 여기서, b_2 및 ρ_s 의 변화에 의해 도파관의 특성 변화의 폭을 조절할 수 있음을 알 수 있다. ϕ_s 에 따른 도파관의 산란 특성 및 등가 임피던스의 변화를 계산하기 위하여 주파수 10GHz에서 $r_0=1.5875\text{mm}$, $r_1=3.175\text{mm}$, $b_1=2.54\text{mm}$, $b_2=7.62\text{mm}$, $\rho_s=1\text{mm}$ 일 때 ϕ_s 의 변화에 따른 결과를 그림 9에 나타내었다.

그림 9로부터 산란 특성은 천이각도에 따라 매우 미세한 변화를 갖는다. 그림 8에 보여진 결과에 다르게 산란 특성의 변화가 크기 않은 이유는 ρ_s 가 1mm로 매우 작으며, 두 개의 원통 도체로 이루어진

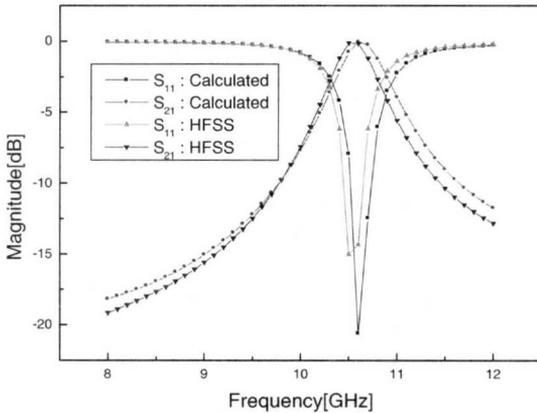
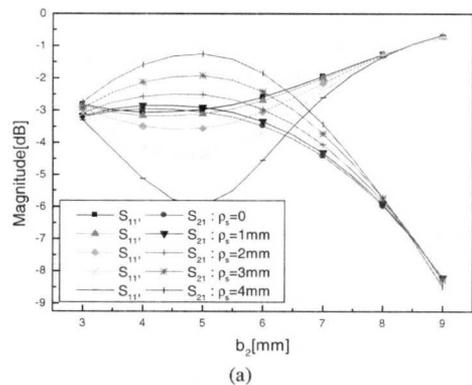
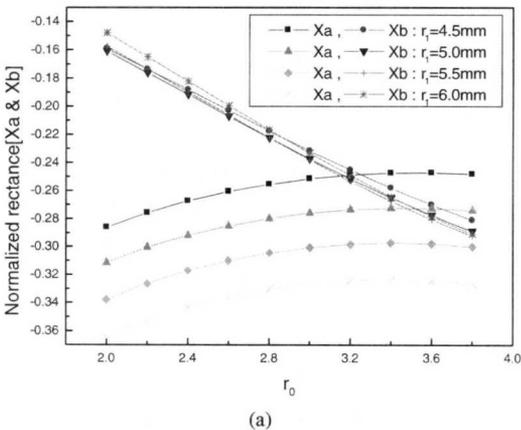


그림 6. 계산값과 HFSS의 결과 비교



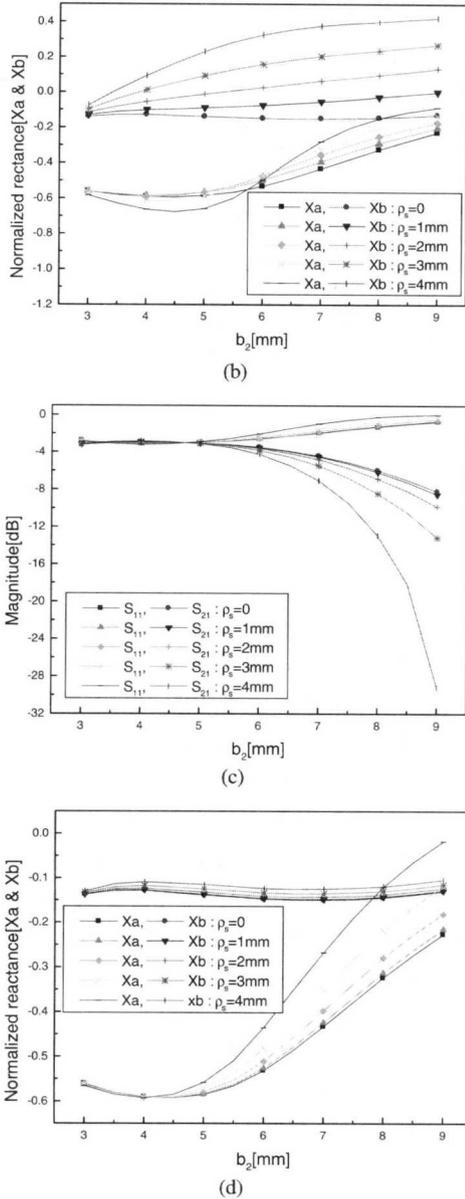


그림 8. ρ_s 변화에 따른 구형 도파관의 특성
 (a) $\phi_s=0$ 일 때 산란 특성
 (b) $\phi_s=0$ 일 때 등가임피던스
 (c) $\phi_s=\pi/2$ 일 때의 산란 특성
 (d) $\phi_s=\pi/2$ 일 때의 등가임피던스

이중 원통형 금속 봉이 하나만 있다고 가정하였기 때문이다. 그러나, 등가 임피던스의 변화는 그림 9(b)에서 알 수 있듯이 천이각도에 따라 변화됨을 알 수 있다. 따라서, 위의 결과들로부터 본 논문에서 제안한 구조와 방법은 구형 도파관의 튜닝 소자로 원통형 금속 봉을 사용한 통신 부품의 설계 및 제작에

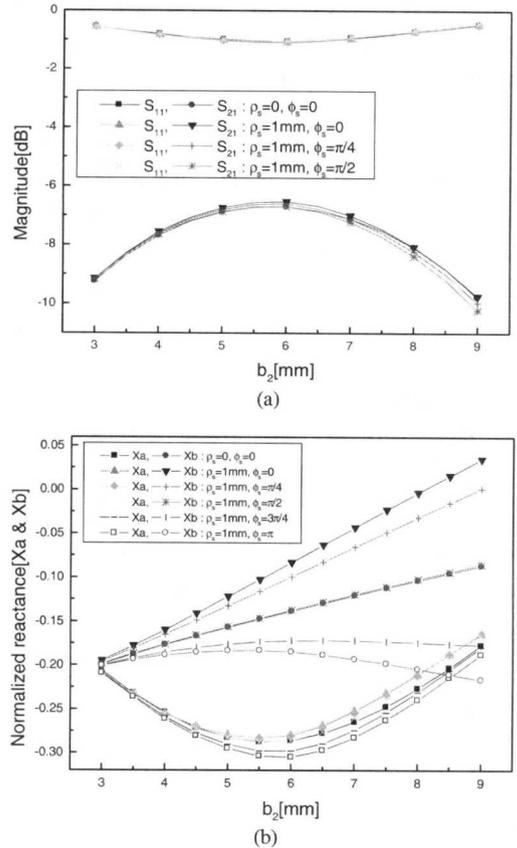


그림 9. ϕ_s 변화에 따른 구형 도파관의 특성
 (a) 산란 특성 (b) 등가임피던스

있어 발생할 수 있는 오차에 대한 정확한 해석을 수행할 수 있으며, 도파관의 튜닝 요소로 천이거리 및 천이각도를 이용함으로써 보다 정밀한 부품의 제작에 도움을 줄 수 있음을 알 수 있다.

앞의 그림 7-9는 도파관 내부에 한 개의 이중 원통형 금속 봉에 대한 전파특성의 결과이다. 이러한 금속 봉은 도파관의 트랜지션 및 여파기의 구성 요소로 이용될 수 있으며, 사용 목적에 따라 한 개 또는 두 개 이상으로 사용될 수 있다. 그림 10은 두 개의 원통 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉이 2개가 연속으로 구형 도파관내에 중앙에 위치할 경우와 중앙에서 벗어난 곳에 위치할 경우에 대한 산란 특성의 비교이다. 여기서 $r_0=2\text{mm}$, $r_1=6\text{mm}$, $b_1=2.54\text{mm}$, $b_2=7.62\text{mm}$ 로 하였다.

- case 1 : $\rho_s = 2\text{mm}$, $\phi_{s0} = \phi_{s1} = \pi/2$,
 불연속 구조물간의 거리=22.86mm
- case 2 : $\rho_s = 2\text{mm}$, $\phi_{s0} = \pi/2$, $\phi_{s1} = (3\pi)/2$,

불연속 구조물간의 거리=22.86mm

그림 10에서 알 수 있듯이 금속 봉이 중앙에 위치한 도파관은 대역은 넓으나, 높은 주파수 대역에서의 반사 특성이 나쁠 수 있다. 그러나, 금속 봉의 위치를 중앙에서 벗어나 위치할 경우 도파관의 대역은 협대역이 되나 도파관의 반사 특성은 불연속 구조의 위치에 따라 매우 향상됨을 알 수 있으며, 도파관의 협대역성은 금속 봉의 위치 변화에 의해 해결 가능하다. 따라서, 금속 봉의 위치 변화도 금속 봉을 사용하는 부품의 설계에 있어 유용하게 사용할 수 있음을 알 수 있다.

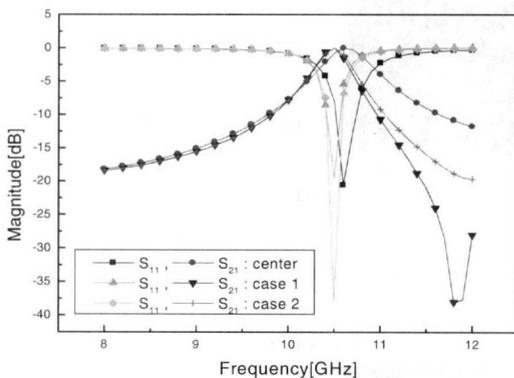


그림 10. 이중 원통형 금속 봉이 2개가 연속적으로 있을 때 구형 도파관의 산란 특성

IV. 결론

논문에서는 통신 기지국용 부품에 응용 가능한 중앙에서 벗어나 위치한 두 개의 원통 도체로 구성된 이중 원통형 금속 봉을 갖는 구형 도파관의 구조와 수치적 해석법을 제안하였고, 제안된 방법으로 금속 봉에 의한 산란 특성 및 등가 임피던스 모델을 유도하였다. 구형 도파관 내부의 이중 원통형 금속 봉에 의한 산란 특성의 해석은 금속 봉의 반경과 높이, 위치에 따른 산란 특성을 분석하여 이로부터 등가 임피던스를 유도하는 방법을 취하였다. 해석된 결과로부터 이중 원통형 금속 봉 구조의 반경의 변화에 따른 등가 임피던스(X_a, X_b)는 상단 금속 봉의 반경이 커짐에 따라 X_b 는 선형적으로 감소되며 변화의 폭이 큰 반면, X_a 의 미세한 변화로 증가하였다. 이와는 반대로 하단 금속 봉의 반경 변화에 대하여는 위와 역의 관계로 등가 임피던스가 변화되어, 상단 및 하단 금속 봉의 반경의 조절을 통하여 X_a 혹은 X_b 만을 선택적 조절이 가능함을

알 수 있었다. 또한 상단 원통형 금속 봉의 위치(천이거리 ρ_s , 천이각도 ϕ_s)와 하단 금속 봉의 높이(b_2)에 따른 결과로부터 도파관의 산란 계수는 ρ_s 의 변화에 비례하여 증가하고 ϕ_s 와 b_2 의 값에 따라 산란 특성 및 등가 임피던스가 크게 변화됨을 알 수 있었다. 위와 같은 결과로부터 이중 원통형 금속 봉 중 상단 금속 봉의 위치 및 이중 원통형 금속 봉의 높이와 반경에 의해 구형 도파관의 산란 특성 및 임피던스의 미세 변화가 가능함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 구조와 해석법은 튜닝 소자로 원통형 금속 봉을 사용하는 도파관의 해석 및 설계에 용이하게 적용될 수 있다.

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] 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. 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 이용희, 이재근, 이정해, "도파관내에 금속 봉이 주기적으로 위치한 구조의 분산 특성", 한국전자

과학기술 학술대회, Vol.9, No.1, pp209-213, 1999

- [8] 이상호, 박익모, 신철재, “경사진 금속봉을 가진 구형 도파관과 동축 접합선로의 접합구조 특성 계산”, 한국전자과학회 논문지, 11권, 7호, pp.1271-1281, 2000. 10.
- [9] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Boston : Boston Technical Publishers, 1951.
- [10] S. W. Chen and K. A. Zaki, “Dielectricring resonators loaded in waveguide and substrate,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech...*, vol. 39, pp.2069-2076, Dec. 1991.
- [11] T. Itho, *Numerical Technique for Microwave and Millimeter-wave Passive Structures*, New York : John Wiley & Sons, 1989.
- [12] D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Norwood, MA : Artech House, 1986.
- [13] 김원기, 양기덕, 김민택, 박익모, 신철재, “2개의 불연속 구조물을 갖는 도파관의 임피던스 계산”, 한국전자과학회논문지, 8권 5호, pp.462-475, 1997.10.
- [14] 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.
- [15] 손영일, 김상태, 황충선, 백락준, 신철재, “개선된 Three Plane Mode Matching Method를 이용한 계단형 T-접합의 해석과 응용”, 한국통신학회지, 24권, 6호, pp.1123-1133, 1999.6.

김 원 기(Won-ki Kim)

정회원



1995년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 졸업
1997년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 석사
1997년 3월~현재 : 아주대학교
전자공학과 박사과정

1999년 4월~현재 : 호서대학교 반도체 제조장비 국
산화 연구센터 연구원

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

이 진 택(Jin-taek Lee)

정회원



1997년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 졸업
2002년 8월 : 아주대학교 전파
공학과 석사
2002년 8월~현재 : 아주대학교
전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 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

<주관심 분야> 공정제어, 빈도체 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

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학