

평행평판도파관의 좁은 슬릿을 통한 도체 스트립과의 캐비티형 결합과 기생형 결합

Cavity-type and Parasitic-type Couplings through a Narrow Slit in a Parallel-Plate Waveguide with a Conducting Strip

이 종 익 · 고 지 환* · 조 영 기**

Jong-Ig Lee · Ji-Hwan Ko* · Young-Ki Cho**

요 약

본 연구에서는 유전체 슬랩으로 덮힌 평행평판 도파관의 좁은 슬릿을 통한 유전체슬랩 위의 도체 스트립과의 전자기적인 결합을 고려하였다. 제안된 구조에서 관찰되는 두 가지의 대조적인 결합현상인 캐비티형 결합과 기생형 결합의 차이점을 도체 스트립의 길이 및 위치, 도체 스트립에 유기된 전류, 복사패턴, 대역폭, 결합슬릿 근처의 전자계분포 등을 비교하여 관찰하였다.

Abstract

In this study, the electromagnetic coupling through a narrow transverse slit in the upper wall of a parallel-plate waveguide(PPW) covered by a dielectric slab with a nearby conducting strip on the slab is considered. Two contrastive coupling phenomena, cavity-type and parasitic-type, observed in the geometry have been distinguished by differences in the resonant strip lengths and offset positions, induced strip current, radiation pattern, frequency bandwidth, and electromagnetic field distributions near the coupling slit.

Key words : Coupling, Cavity-type and Parasitic-type, Narrow Slit, Conducting Strip

I. 서 론

평행평판 도파관의 슬릿을 통한 도파관 외부 도체 스트립과의 전자기적인 결합^{[1]~[5]}은 2차원 구조이나 관찰되는 현상들이 실제 3차원 구조에서와 매우 유사^[6]하고 동작원리를 이해하는데 매우 유익한 연구이므로 활발히 진행되어 왔다. 최근의 연구^{[3],[4]}에서 그림 1에서와 같이, 윗면이 유전체 슬랩으로 덮혀 있고 좁은 슬릿을 가지며 도파관 내부는 단락 종단된, 평행평판 도파관에 입사된 TEM파가 좁은

슬릿을 통해 유전체 슬랩 위에 놓여 있는 도체 스트립과 결합되어 입사전력의 거의 대부분(거의 100%)이 도파관 외부로 결합될 수 있음이 확인되었다. 또한 입사전력의 대부분이 결합되는 최대결합(maximum coupling)현상을 도체 스트립에 유기된 전류, 복사패턴, 도체 스트립의 길이 및 위치 등을 관찰하여 캐비티형(cavity-type) 결합과 기생형(parasitic-type) 결합으로 구분하고 차이점에 관하여 논의한 바 있다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 캐비티형 결합과 기생형 결합의 두 가지 결합현상들을 도체 스트립에 유기된 전류,

「이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.」

동서대학교 정보시스템공학부(Division of Information System Eng., Dongseo Univ.)

*금오공과대학교 전자공학부(School of Electronic Eng., Kumoh Nat'l Univ. of Tech.)

**경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

· 논문 번호 : 20021205-171

· 수정완료일자 : 2003년 2월 6일

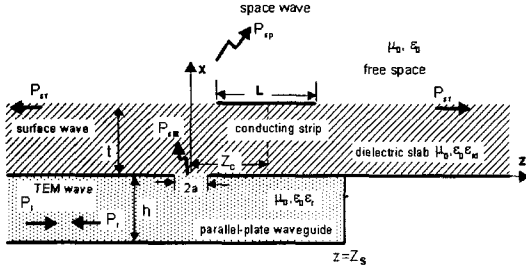


그림 1. 제안된 구조
Fig. 1. Geometry under consideration.

복사패턴, 도체 스트립의 길이 및 위치, 동작주파수에 대한 결합특성 변화, 슬릿 근처에서의 전자계 분포 등을 비교하여 구분하고자 한다. 또한 도파관의 특성임피던스로 정규화된 슬릿의 등가직렬 임피던스가 $1+jx$ 형태가 되는 경향과 이때, 도파관의 단락된 위치를 조절하여 임피던스 정합을 이룰 수 있는가 하는 것에 대해 살펴보고자 한다. 제안된 구조에 대한 해석방법은 기존의 연구^{[1]-[5]}에서 제시된 바와 같이 도체 스트립의 표면과 슬릿영역에서의 경계조건으로부터 도체 스트립에 유기된 전류와 슬릿영역에서 전계의 접선성분에 대한 결합적분방정식을 이끌어내고 이를 모멘트 방법으로 수치해석하는 것이다.

II. 이론

본 연구에서 제안된 구조는 그림 1에 도시된 바와 같다. 영역은 평행평판 도파관, 유전체 슬랩, 자유공간으로 구성되고 각각의 매질특성을 $\mu_0, \epsilon_0 \epsilon_r, \mu_0, \epsilon_0 \epsilon_{rd}$ 와 μ_0, ϵ_0 로 각각 표현하였다. 슬릿의 폭 $2a$, 도파관의 높이 h , 슬랩의 두께 t , 스트립의 길이 L , 스트립 중앙의 슬릿중앙($z=0$)에 대한 z -방향 변위(offset) 좌표 Z_c 이고 그림 1의 구조는 y 방향으로 변화가 없는 2차원 구조($\partial/\partial y=0$)이다. 도파관은 $z=Z_s$ 에서 단락되었고 슬릿영역으로 입사되는 평행평판 도파관의 입사파는 TEM파만으로 가정하여

$$\mathbf{E}^{inc} = \frac{V}{h} e^{-jkz} \hat{x}, \quad (1a)$$

$$\mathbf{H}^{inc} = \frac{V}{\eta h} e^{-jkz} \hat{y}, \quad (1b)$$

로서 주어지는데 여기에서 V 는 도파관 양면 사이의 전위차, $k = (k_0 \sqrt{\epsilon_r})$, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 2\pi/\lambda_0$ 는 전파

상수, $\eta (= \eta_0/\sqrt{\epsilon_r})$, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 는 도파관내 매질의 고유임피던스이다.

등가원리를 이용하여 단락된 슬릿의 양측에 $\mathbf{M} = M_y \hat{y} = -E_z(0, z) \hat{y}$ 로서 주어지는 등가 자계전류로 대체하면, 도파관 내부에서의 자계 H_y 는

$$H_y = H_y^{sc} + H_y^M \quad (2)$$

와 같이 표현될 수 있으며 여기에서 H_y^{sc} 는 슬릿영역이 단락된 도파관에 TEM파가 입사되었을 때의 총 자계이며 H_y^M 는 슬릿의 등가자계전류(\mathbf{M})에 의한 도파관 내부에서의 자계이고 각각에 대한 상세한 표현식은 참고문헌 [3]에 제시된 바와 같다.

유전체 슬랩 내부(H_y^d)와 자유공간(H_y^0)에서의 자계는 각각

$$H_y^d = H_y^{M_d} + H_y^{I_d}, \quad (3a)$$

$$H_y^0 = H_y^{M_0} + H_y^{I_0} \quad (3b)$$

와 같이 등가자계전류($-\mathbf{M}$)에 의한 것들($H_y^{M_d}$ 와 $H_y^{M_0}$) 도체 스트립에 유기된 전류($I = J_z \hat{z}$)에 의한 것들($H_y^{I_d}$ 와 $H_y^{I_0}$)의 합으로서 표현된다^{[2],[3],[5]}.

위에서 구한 각 영역에서의 전자계에 대한 표현식으로부터 슬릿영역($|z| < a$)에서의 전자계의 접선성분의 연속조건($H_y = H_y^d$)과 도체 스트립($x = t, |z - Z_c| < L/2$)에서 접선성분전계가 0이라는 조건($E_z^d = E_z^0 = 0$)을 부과하여 슬릿의 등가자계 전류와 스트립에 유기된 전류를 미지수로 하는 결합적분방정식^{[2],[3]}을 얻을 수 있으며, 이를 모멘트 방법으로 풀기 위하여 슬릿영역에서는 필스기저함수로써 $M_y(z)$ 를 전개하고 점 정합(point-matching)하였으며, 스트립 영역에서는 구분정현함수(piecewise sinusoidal function)를 $J_x(z)$ 의 기저함수로 하는 Galerkin 방법을 이용하였다. 모멘트방법으로 구한 슬릿의 전계 [$E_z(z) = -M_y(z)$]와 도체 스트립에 유기된 전류로부터 각 영역에서의 전자계를 계산할 수 있으며, 이로부터 도파관 내부에서 입사전력으로 정규화된 반사전력(P_r), 슬릿을 통해 결합된 전력(P_{slit}), 유전체 슬랩을 따라 전파되는 표면파 전력(P_{sp}), 자유공간으로 복사되는 공간파 전력(P_{sp}), 복사패턴 등을 얻을

수 있고 도파관 내부에서 슬릿으로부터 TEM파 전압반사계수(Γ_V)를 구하여 정규화된 등가 부하 임피던스 ($Z_L/Z_0 = z_L = r_L + jb_L = \frac{1 + \Gamma_V}{1 - \Gamma_V}$) 등을 계산^{[2]-[5],[7]}할 수 있다.

그림 2는 슬릿의 폭이 좁은 경우 급전도파관 영역에서 제안된 구조의 등가회로이다. 제안된 등가회로는 도파관의 특성임피던스($Z_0 = \eta h$)로 정규화된 것이며 슬릿의 등가 직렬임피던스($Z_1/Z_0 = z_1 = r_1 + jb_1$)는 일반적인 등가 π -회로망^[7]에서 좁은 슬릿의 경우에 대해 병렬임피던스성분이 무시된 것이며 도파관 외부 유전체슬랩과 도체 스트립의 영향을 고려한 것이다. 리액턴스 $jx_s = j \tan[k(Z_S - a)]$ 는 슬릿의 가장자리($z = a$)에서 바라다 본 도파관의 단락스터브(short stub)의 리액턴스이고, 슬릿의 가장자리($z = -a$)에서 바라다 본 부하 임피던스는 $z_L = r_L + jx_L = z_1 + jx_s = r_1 + j(x_1 + x_s)$ 이다. 기존의 연구^{[3],[4]}에서는 급전도파관과의 임피던스정합 조건 $Z_L = 1$ 을 얻기 위해 먼저 슬릿영역의 등가직렬임피던스 $z_1 (= r_1 + jx_1)$ 이 $1 + j0$ 값을 갖도록 스트립의 폭(L), 변위(Z_C), 유전체슬랩의 두께(t) 등을 결정하고, $jx_s = 0$ 가 되도록 도파관 내부 단락의 위치를 $Z_S \approx \lambda/2$ [$\lambda = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$; 도파관내부에서 TEM파장]로 둠으로써 $z_L \approx 1$ 을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 슬릿의 등가직렬 임피던스가 $z_1 = 1 + jx_1$ 인 경우에 있어서 도파관의 단락의 위치 Z_S 를 조정하여 $x_s = -x_1$ 가 되도록 하면 임피던스 정합($z_L \approx 1$)을 얻을 수 있는 지 확인해 보고자 한다. 이를 위해 먼저 슬릿의 등가임피던스가 $z_1 = 1 + jx_1$ 의 값을 갖는 파라미터들을 결정하여야 하는데, $z_1 = 1 + jx_1$ 의 형태가 나타나는 경향과 임피던스 정합의 가능성 여부를 확인하고자 한다.

III. 해석결과 및 고찰

제안된 구조에서 도파관 외부로의 최대결합효율 (P_{stu} 의 최대치)은 거의 입사파의 100 % 가까이 이르며 이 때 급전도파관에서 슬릿영역을 바라본 부하 임피던스[그림 2의 z_L 에 해당됨]는 도파관의 특성임피던스에 정합($z_L = 1$)되게 된다^{[3],[4]}. 최대결합이 관찰되는 결합현상은 캐비티형과 기생형 결합^{[2]-[5]}으로 나누어지며, 기존의 연구에서 두 가지 현

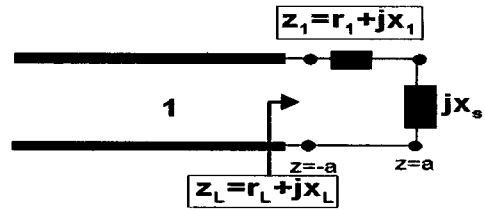


그림 2. 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit.

상의 차이점을 도체 스트립에 유기된 전류(J_z), 복사 패턴, 도체 스트립의 길이(L) 및 슬릿으로부터의 상대적인 위치(t 및 Z_C) 등에 대한 상호비교를 통해 부각시키고자 하였다.

본 논문에서는 두 가지 대조적인 결합현상들을 보다 명확히 구분하기 위해 전술된 비교량들과 아울러 동작주파수에 대한 결합특성변화, 슬롯 근처에서의 전자계 분포 등을 비교하여 보고자 한다. 또한 도파관의 특성임피던스($Z_0 = \eta h$)로 정규화된 슬릿의 등가직렬임피던스가 $z_1 = 1 + jx$ 형태가 되는 파라미터를 구성하고, 도파관의 단락스터브의 길이(Z_S)를 조절하여 정규화된 스터브의 리액턴스 x_s 가 슬릿의 리액턴스 성분과 상쇄($x_s = -x$)되도록 할 때 임피던스 정합을 이룰 수 있는가 하는 것에 대해 살펴보고자 한다.

그림 3과 그림 4는 도체 스트립의 변위(Z_C)에 대한 슬릿을 통한(입사전력으로 정규화된) 결합전력 P_{stu} 과 도파관의 특성임피던스로 정규화된 슬릿의 등가임피던스($z_1 = r_1 + jx_1$)의 변화를 도시한 것이며 각각 캐비티형 및 기생형 결합현상에 해당된다^{[2]-[5]}. 캐비티형 결합현상은 도파관의 윗면과 도체 스트립에 의해 구성된 캐비티에 강한 캐비티 모드가 형성되는 경우이며, 캐비티의 우세모드는 x-방향에 대한 TM_{01} 모드이고 공진현상이 관찰될 때 도체 스트립의 길이(L)는 유전체 슬랩 내부에서의 TEM파의 반파장에 근접하는 값($L \approx 0.5 \lambda_d$)이 되고, 이는 기관의 두께가 파장에 비해 매우 작은 마이크로스트립 안테나^[8]에서 관찰되는 전형적인 현상이다. 캐비티의 높이(t)가 낮을수록 강한 캐비티가 구성되고 공진시 스트립의 길이(L)는 TEM파의 반파장에 더욱 근접한 값이 되며 캐비티를 급전하는 도파관의 슬릿 위치(Z_C 에 의해 결정됨)에 따라 급전점 임피던스

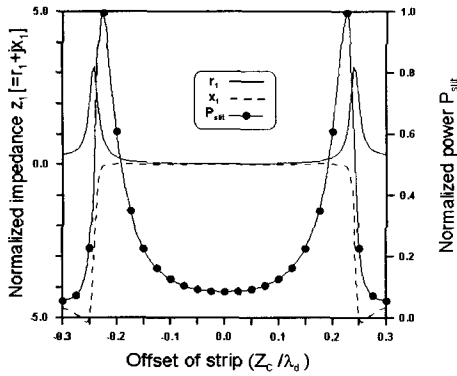


그림 3. 스트립의 변위 Z_c/λ_d 에 대한 슬릿을 통해 결합된 전력 P_{slit} 과 슬릿의 정규화된 등가 임피던스 $z_1(=r_1+jx_1)$ [캐비티형 결합]
 Fig. 3. Coupled power P_{slit} through the slit and normalized equivalent slit impedance $z_1(=r_1+jx_1)$ versus strip offset Z_c/λ_d [cavity-type coupling].

$$\epsilon_r = \epsilon_{rd} = 2.2, h = 0.015 \lambda, 2a = 0.002 \lambda, t = 0.01 \lambda_d, L = 0.482 \lambda_d, Z_S = a + 0.5 \lambda.$$

z_1 은 매우 민감하게 변화된다. 강한 캐비티 내부에서의 전자계는 높이(t)가 큰 캐비티 내부에서의 전자계에 비해 상대적으로 그 세기가 큰 값을 갖게 되며, 캐비티 벽면 전류에 해당되는 도체 스트립의 전류도 큰 값을 갖는다[참고로, 그림 3의 최대결합인 경우($|Z_c/\lambda_d| \approx 0.226$)에 도체 스트립의 최대전류는 입사자계의 약 7배에 이른다(즉, $|J_z|_{\max} \approx 7|H^{\text{inc}}|$)]. 그림 3에서 슬릿이 스트립(캐비티)의 중앙을 급전하는 경우($Z_c = 0$) 임피던스는 매우 작은 값이 되어 도체 스트립에 의해 슬릿이 단락된 효과를 갖는데 이는 TM_{01} 모드에 부합하는 스트립 중앙의 급전점 임피던스(z_1)는 매우 작은 값을 갖는 것에서 기인한다.

그러나 그림 4에서는 도체 스트립의 중앙을 급전하는 $Z_c = 0$ 에서 그림 3에서와 같이 임피던스가 매우 작은 값이 되지 않고 오히려 임피던스 정합이 되어 최대 결합이 관찰되므로 도체 스트립에 의해서 강한 캐비티가 구성된 그림 3에서의 현상과는 차이를 보이며, 도체 스트립이 최대결합에 미치는 영향은 야기 안테나의 기생소자인 director^[9]의 역할과 유사하다. 도체 스트립의 길이($L = 0.417 \lambda_d$)가 director의 길이에 부합하고 broadside 방향으로의 복사특성이 개선되며 $Z_c = 0$ 근처에서 결합특성의 변화가

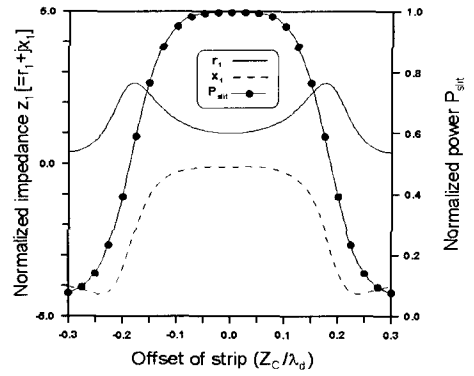


그림 4. 스트립의 변위 Z_c/λ_d 에 대한 슬릿을 통해 결합된 전력 P_{slit} 과 슬릿의 정규화된 등가 임피던스 $z_1(=r_1+jx_1)$ [기생형 결합]
 Fig. 4. Coupled power P_{slit} through the slit and normalized equivalent slit impedance $z_1(=r_1+jx_1)$ versus strip offset Z_c/λ_d [parasitic-type coupling].

$$\epsilon_r = \epsilon_{rd} = 2.2, h = 0.015 \lambda, 2a = 0.002 \lambda, t = 0.066 \lambda_d, L = 0.417 \lambda_d, Z_S = a + 0.5 \lambda.$$

크지 않고 도체 스트립 중앙에 유기된 전류의 크기는 입사자계에 근접한 정도($|J_z|_{\max} \approx |H^{\text{inc}}|$)이다. 그림 3 및 그림 4에서 도파관의 단락벽의 위치는 슬릿 가장자리($z = a$)으로부터 반파장의 거리에 위치($Z_S = a + 0.5 \lambda$)하므로 $x_s \approx 0$ 이고 슬릿에지($z = -a$)에서 바라본 부하임피던스는 $z_L \approx z_1$ 이며 최대결합이 관찰되는 경우 $z_1 = r_1 + jx_1 \approx 1$ 을 의미한다.

다음으로 제안된 구조에서 최대결합이 관찰되는 두 가지 대조적인 결합현상의 차이점을 주파수에 대한 특성변화를 통해 살펴보고자 한다. 그림 5는 그림 3에서 최대결합이 관찰되는 상태($Z_c = 0.226 \lambda_d$)에서 정규화된 주파수 변화(f/f_0)에 대한 결합특성변화를 계산한 것이다. 주파수 변화에 대해 임피던스가 매우 민감하게 변화하여 결합전력이 $P_{slit} \geq 50\%$ 인 대역폭은 약 4.1%이며, $P_{slit} \geq 90\%$ 인 대역폭은 1.3%로서 매우 좁다.

그림 6은 그림 4에서 최대 결합이 관찰되는 $Z_c = 0$ 의 경우에 있어서 주파수 변화(f/f_0)에 대한 결합특성변화를 계산한 것이며 그림 5의 경우에 비해 임피던스가 상대적으로 완만하게 변화하며 결합전력이 $P_{slit} \geq 50\%$ 인 대역폭은 약 24.7%이고 $P_{slit} \geq 90\%$ 인 대역폭은 8.1%로서 훨씬 넓다. 이는 일반적인

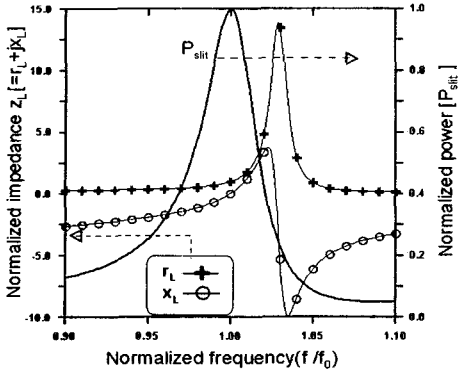


그림 5. 주파수 특성 [캐비티형 결합]
Fig. 5. Frequency behaviour [cavity-type coupling].

$\epsilon_r = \epsilon_{rd} = 2.2$, $t = 0.01 \lambda_d$, $L = 0.482 \lambda_d$, $Z_C = 0.226 \lambda_d$, $h = 0.015 \lambda$, $2a = 0.002 \lambda$ and $Z_S = a + 0.5 \lambda$ at $f = f_0$.

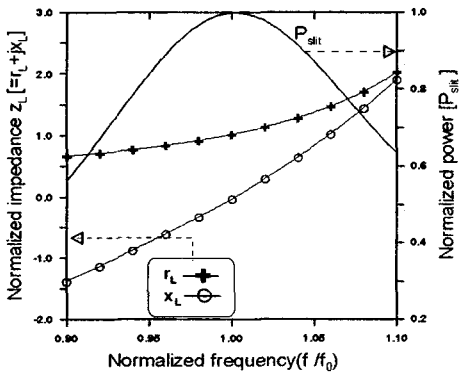


그림 6. 주파수 특성 [기생형 결합]
Fig. 6. Frequency behaviour [parasitic-type coupling].

$\epsilon_r = \epsilon_{rd} = 2.2$, $t = 0.066 \lambda_d$, $L = 0.417 \lambda_d$, and $Z_C = 0$, $h = 0.015 \lambda$, $2a = 0.002 \lambda$, and $Z_S = a + 0.5 \lambda$ at $f = f_0$.

마이크로스트립 안테나에 있어서 기판의 두께가 두꺼운 경우에 광대역 특성을 갖는 것에 부합된다.

그림 7은 캐비티형 결합에서의 전계분포를 도시한 것이며, 예상된 바와 같이 도체 스트립과 도파관 윗면으로 이루어진 캐비티 내부 영역 중 슬릿 근처를 제외한 대부분의 영역에서 마이크로스트립패치의 TM_{01} -to-x 모드에 부합하는 전계분포를 갖는다. 도파관 내부의 단락스트리브에 해당되는 영역인 $a < z < Z_S$ 에서는 정계파에 부합하는 전계분포를 가지

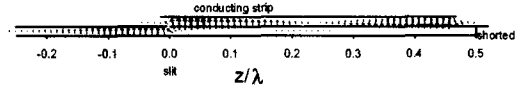


그림 7. 전계분포 [캐비티형 결합]
Fig. 7. Electric field distribution [cavity-type coupling].

$\epsilon_r = \epsilon_{rd} = 2.2$, $t = 0.01 \lambda_d$, $L = 0.482 \lambda_d$, $Z_C = 0.226 \lambda_d$, $h = 0.015 \lambda$, $2a = 0.002 \lambda$, and $Z_S = a + 0.5 \lambda$ at $f = f_0$.

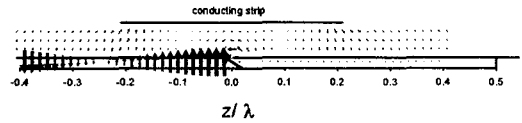


그림 8. 전계분포 [기생형 결합]
Fig. 8. Electric field distribution [parasitic-type coupling].

$\epsilon_r = \epsilon_{rd} = 2.2$, $t = 0.066 \lambda_d$, $L = 0.417 \lambda_d$, and $Z_C = 0$, $h = 0.015 \lambda$, $2a = 0.002 \lambda$, and $Z_S = a + 0.5 \lambda$ at $f = f_0$.

며, 급전도파관 영역 $z < -a$ 에서는 $+z$ 방향의 진행파를 관찰할 수 있다.

그림 8은 기생형 결합의 전계분포를 도시한 것이며 도파관 내부 영역에서는 캐비티형과 유사한 경향을 보이나 주된 차이점은 도파관 윗면과 도체 스트립 사이의 유전체 영역에서 관찰된다. 슬릿 근처 영역 ($|z|/\lambda_d \leq 0.1$)에서 전계분포는 도파관의 E-면 도파관 T-접합^[10]에서의 전계와 유사한 형태이며, 이러한 필드형태는 유전체 층의 두께(t)가 파장에 비해 충분히 작은 캐비티에서의 필드분포인 그림 7과는 대조적이다. 또한 그림 7의 캐비티형 결합에서는 스트립의 가장자리를 벗어난 영역 ($|z - Z_C| \geq L/2$)에서의 전자계가 급격히 감소되지만, 그림 8의 기생형 결합에서의 전자계는 스트립을 벗어난 영역에서 상대적으로 감소가 매우 완만하다. 호이겐스원리에 의해 유전체 슬릿과 자유공간의 경계면 ($x = t$)에서 접선성분 전자계분포는 자유공간으로의 복사특성을 결정하게 되며, 캐비티형 결합인 그림 7의 경우 도체 스트립의 가장자리 근처 ($|z - Z_C| \approx L/2$)에 집중된 형태이나 기생형 결합인 그림 8에서는 상대적으로 넓은 영역에 걸쳐 전자계가 분포된다.

다음으로 슬릿의 등가직렬 임피던스가 $z_1 = 1 + jx_1$

형태인 경우에 단락스터브의 리액턴스를 조절하여 임피던스 정합을 이루고 슬릿을 통해 최대결합이 가능한지 점검해 보고자 한다. 먼저 참고문헌 [2], [3], [5]에서 제시된 해석방법을 이용하여 슬릿의 등가임피던스가 어떠한 경우에 $z_1 = 1 + jx_1$ 의 형태가 되는가를 살펴보기 위해 슬릿의 중앙으로부터 도체 스트립의 변위 Z_c 의 변화에 대한 슬릿의 등가 직렬 임피던스의 변화를 구하였으며 그 결과 중 일부를 그림 9에 제시하였다. 도파관의 슬릿이 좁은 경우에 있어서 슬릿의 임피던스는 Z_c 에 대해 대칭적인 우함수 형태로 관찰^{[1]-[5]}되기 때문에 편의상 +z 방향으로의 변위($0 < Z_c$)에 대한 결과만 제시하였다.

먼저 스트립의 폭이 상대적으로 좁은 $L = 0.326 \lambda_d$ (그림 9(a))의 경우에 있어서는 $Z_c = 0.15 \lambda_d$ 근처에서만 $r_1 \approx 1$ 인 현상이 관찰되지만 스트립의 폭이 상대적으로 넓은 $L = 0.381 \lambda_d$ (그림 9(b))의 경우에 있어서는 $Z_c = 0$ 및 $Z_c = 0.25 \lambda_d$ 의 두 점 근처에서 $r_1 \approx 1$ 인 현상이 관찰된다. 도체 스트립의 폭이 $L = 0.326 \lambda_d$ 인 그림 9(a)의 경우에 있어서 슬릿은 스트립의 가장자리 부근에 위치하게 되고, $L = 0.381 \lambda_d$ 인 그림 9(b)에 있어서 $Z_c = 0$ 인 경우에는 슬릿이 스트립의 중앙에 위치하지만 $Z_c = 0.25 \lambda_d$ 의 경우 슬릿은 스트립의 가장자리를 완전히 벗어난 경우가 된다.

그림 9(a)의 $Z_c = 0.15 \lambda_d$ 인 경우에 있어서 $x_1 = -4.437$ 정도이므로 $z_L \approx 1$ 을 얻기 위해서 도파관 단락스터브의 위치를 $Z_S = 0.2157 \lambda$ 로 택하게 되면 입사 전력의 대부분이 슬릿을 통해 도파관 외부로 결합되리라 기대된다. 결과는 기대했던 바와 같이 입사 전력의 대부분이 슬릿을 통해 결합($P_{slit} \approx 1$)되었으며 이 때, 자유공간으로의 최대복사각도 $\phi_m = 6^\circ$, 이득 약 5 dBi, 표면파 전력 $P_{sf} \approx 5\%$ 등이고 도체 스트립에 유기된 전류는 스트립의 중앙에 대해 비대칭적인 전류분포를 갖게 된다.

그림 9(b)의 $Z_c = 0.25 \lambda_d$ 인 경우에 있어서 $x_1 = -5.5$ 정도이므로 전술된 방법으로 $z_L \approx 1$ 을 얻기 위해서 $Z_S = 0.2224 \lambda$ 로 택하였을 때, 자유공간으로의 최대복사각도 $\phi_m = 21^\circ$, 이득 약 5.25 dBi, 표면파 전력 $P_{sf} \approx 6.7\%$ 등이고 스트립에 유기된 전류는 스트립의 중앙에 대해 비대칭적인 전류분포를 갖게 된다.

그림 9(b)의 $Z_c = 0$ 인 경우 $x_1 = -1.3214$ 정도이므

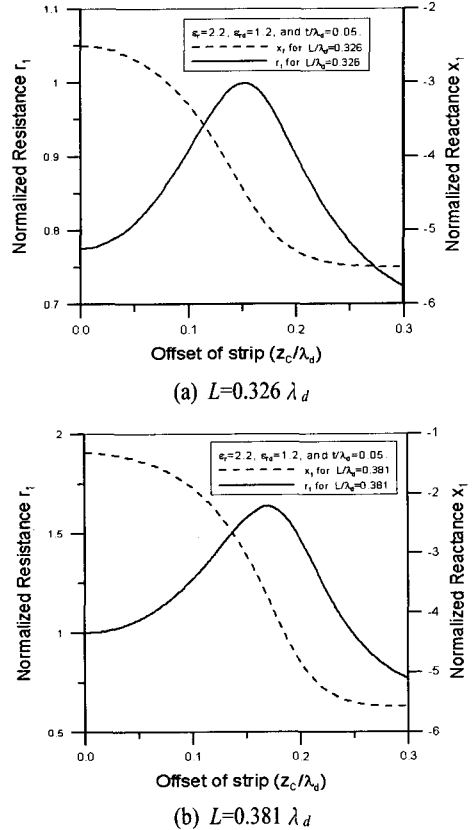


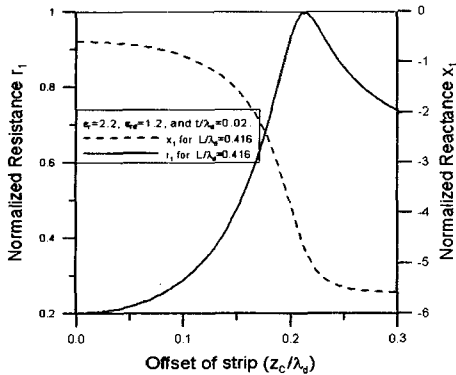
그림 9. 도체 스트립의 변위(Z_c)에 대한 슬릿의 등가 임피던스 $z_1 (=r_1 + jx_1)$

Fig. 9. Equivalent slit impedance $z_1 (=r_1 + jx_1)$ against the offset Z_c of the conducting strip.

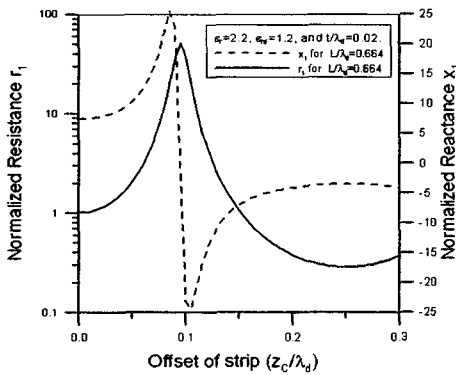
$\epsilon_r = 2.2$, $\epsilon_{rd} = 1.2$, $h = 0.015 \lambda$, $2a = 0.002 \lambda$, $t = 0.05 \lambda_d$, and $Z_S = a + 0.5 \lambda$.

로 $Z_S = 0.1479 \lambda$ 로 택하면 $z_L \approx 1$ 을 얻을 수 있으며 이 때, 자유공간으로의 최대복사각도 $\phi_m = 0^\circ$, 이득 약 6.4 dBi, 표면파 전력 $P_{sf} \approx 1.5\%$ 등이고 스트립에 유기된 전류는 스트립의 중앙에 대해 대칭적인 전류분포를 갖게 된다.

위의 그림 9의 경우에 있어서 도체 스트립의 폭이 약 $L = 0.326 \sim 0.381 \lambda_d$ 일 때 $r_1 \approx 1$ 형태를 두 개의 Z_c 값에서 관찰할 수 있었다. 동일한 조건 하에서 유전체 슬랩의 두께만을 $t = 0.05 \lambda_d$ 로부터 $0.02 \lambda_d$ 로 감소시키면서 $r_1 \approx 1$ 형태를 두 개의 Z_c 값에서 관찰할 수 있는 도체 스트립의 폭의 범위를 살펴본 결과 $t = 0.04 \lambda_d$ 인 경우 $L = 0.354 \sim 0.45 \lambda_d$, $t = 0.03 \lambda_d$ 인 경우 $L = 0.384 \sim 0.546 \lambda_d$, $t = 0.02 \lambda_d$ 인 경우 $L =$



(a) $L=0.416 \lambda_d$



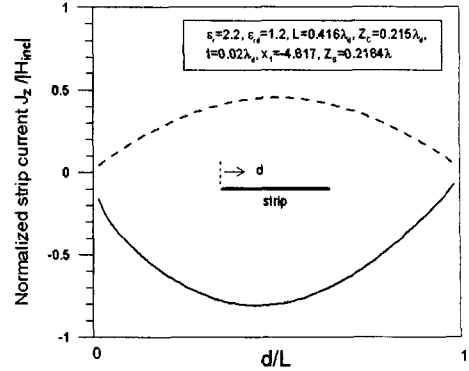
(b) $L=0.664 \lambda_d$

그림 10. 도체 스트립의 변위(Z_C)에 대한 슬릿의 등가 임피던스 $z_1(=r_1+jx_1)$

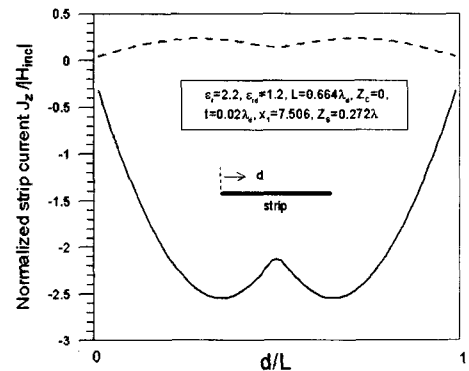
Fig. 10. Equivalent slit impedance $z_1(=r_1+jx_1)$ against the offset Z_C of the conducting strip. $\epsilon_r=2.2$, $\epsilon_{rd}=1.2$, $h=0.015 \lambda$, $2a=0.002 \lambda$, $t=0.02 \lambda_d$, and $Z_S=a+0.5 \lambda$.

0.416~0.664 λ_d 와 같이 확인되었으며 이를 통해서 유전체슬랩의 두께가 낮아질수록 그 범위가 넓어지고 스트립의 폭이 증가됨을 관찰할 수 있다.

그림 10은 $t=0.02 \lambda_d$ 일 때 $L=0.416 \lambda_d$ 및 $0.664 \lambda_d$ 에 대한 결과를 도시한 것이며 유전체층이 두꺼운 $t=0.05 \lambda_d$ 의 경우에 비해 상대적으로 임피던스변화의 폭이 크게 됨을 관찰할 수 있다. 그림 11은 임피던스 정합시 도체 스트립의 전류분포를 나타낸 것으로서 그림 11(a)에서 전류분포는 비대칭적이며 $\phi_m=8.25^\circ$, 이득 약 5.16 dBi, 표면파 전력 $P_{sf} \approx 2.1 \%$ 이며, 그림 11(b)에서 전류분포는 대칭적이며 $\phi_m=0^\circ$, 이득 약 8.05 dBi, 표면파 전력 $P_{sf} \approx 2.39 \%$ 이다.



(a) $L=0.416 \lambda_d$, $Z_C=215 \lambda_d$



(b) $L=0.664 \lambda_d$, $Z_C=0$

그림 11. 도체 스트립의 전류분포

Fig. 11. Current distribution over the conducting strip.

$\epsilon_r=2.2$, $\epsilon_{rd}=1.2$, $h=0.015 \lambda$, $2a=0.002 \lambda$, $t=0.02 \lambda_d$, and $Z_S=a+0.5 \lambda$.

그림 9~11의 결과들로부터 슬릿의 등가 임피던스가 $z_1=1+jx_1$ 형태인 경우에 도파관의 단락스터브(jx_s)를 조절하여 임피던스 정합($z_L=1$)을 얻을 수 있고 슬릿을 통해 최대결합현상이 관찰됨을 알 수 있다. 그러나 이러한 임피던스 정합의 주파수 변화에 따른 특성변화를 반드시 점검해 보아야 한다. 특히, $z_1=1+jx_1$ 형태인 등가 슬릿 임피던스의 허수부인 x_1 이 큰 값을 갖는 그림 10의 경우에는 주파수 변화에 따라 부하임피던스의 변화가 민감함을 확인하였다. 도파관 단락 스테르브를 조절하여 임피던스 정합이 가능하도록 $z_1=1+jx_1$ 형태가 발견되는 도체 스트립의 범위는 유전체층의 높이(t)에 따라서 큰 차이를 보인다. 즉, 유전체층의 높이(t)가 낮은 경우에는 공진길이($L \approx 0.5 \lambda_d$)를 중심으로 넓은 분포(t

$= 0.02 \lambda_d$ 인 경우 $L=0.416 \sim 0.664 \lambda_d$)를 보이거나 유전체층의 높이(t)가 높은 경우에는 공진길이와는 다소 차이가 큰 값의 범위($t=0.05 \lambda_d$ 인 경우 $L=0.326 \sim 0.381 \lambda_d$)를 갖는다.

IV. 결 론

유전체 슬랩으로 덮혀 있고 단락 종단된 평행 평판 도파관의 좁은 슬릿을 통한 유전체슬랩 윗면에 놓여 있는 도체 스트립과의 전자기적인 결합문제를 고려하였다. 슬릿을 통한 도파관 외부로의 결합현상을 캐비티형 결합과 기생형 결합으로 구분하여 차이점을 도체 스트립에 유기된 전류, 복사패턴, 도체 스트립의 길이 및 위치, 동작주파수에 대한 결합특성 변화, 슬롯근처에서의 전자계 분포 등을 비교하여 관찰하였다. 또한 도파관의 특성임피던스로 정규화된 슬릿의 등가적렬임피던스가 $1+jx$ 형태가 되는 경향을 파악하고 급전도파관의 단락된 위치를 조절하여 임피던스 정합을 이룰 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] C. H. Lee, J. I. Lee and Y. K. Cho, "Coupling mechanism through a slit in a parallel-plate waveguide covered by a dielectric slab with an embedded conducting strip of a finite thickness", *PIERS 1999*, vol. 1, pp. 215, Taipei, Taiwan, March 1999.

[2] 이종익, 홍재표, 조영기, "유전체 슬랩으로 덮혀 평행평판 도파관의 좁은 슬릿을 통한 슬랩 위의 도체 스트립과의 결합", 대한전자공학회 논문지, 37-TC(2), pp. 68-74, 2000년 2월.

[3] 이종익, 조영기, "단락종단된 평행평판 도파관의 좁은 슬릿을 통한 근접 도체 스트립과의 최대 결합", 대한전자공학회 논문지, 37-TC(12), pp. 15-21, 2000년 12월.

[4] C. H. Lee, J. I. Lee and Y. K. Cho, "Electromagnetic coupling to a nearby conducting strip through narrow and wide slits in parallel plate waveguide," *Proc. International Symp on Electromagnetic Theory*, pp. 685-687, Victoria, Canada. May 2001.

[5] J. I. Lee, C. H. Lee and Y. K. Cho, "Electromagnetic coupling mechanism to a conducting strip through a narrow slit in a parallel-plate waveguide", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-49, no. 4, pp. 592-596, April 2001.

[6] 김종규, 윤이근, 조영기, "Aperture와 Feedline Gap 결합으로 급전되는 마이크로스트립 패치 안테나의 전자기 결합 메커니즘", 대한전자공학회논문지, 38-TC(1), pp. 27-33, 2001년 1월.

[7] Y. K. Cho, "On the equivalent circuit representation of the slitted parallel-plate waveguide filled with a dielectric", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-37, no. 9, pp. 1193-1200, Sept. 1989.

[8] I. J. Bahl, P. Bhartia, *Microstrip antennas*. Artech House, 1980.

[9] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna theory and design*, 2nd ed. pp. 223, Wiley, 1998.

[10] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

이 종 익



1992년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1994년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
1998년: 금오공과대학교 연구교수

1999년~현재: 동서대학교 정보시스템공학부 조교수
[주 관심분야] 전자기산란, 평면안테나

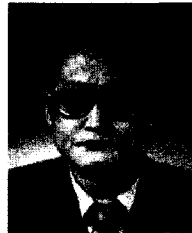
고 지 환



1982년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1985년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
1985년~2000년: 한국전자통신연구원 연구원

2000년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 조교수
[주 관심분야] 안테나 설계, 초고주파 도파관 및 부품 설계, 위성통신

조 영 기



1978년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1981년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1981년~현재: 경북대학교 전자전

기공학부 교수

1992년~현재: 국제전파연합(URSI) 한국대표
2000년~현재: 한국전자과학회 학술이사
2002년~현재: 경북대학교 공과대학 BK사업 단장
[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기구조, 안테나 이론