

# 플랜지된 평행 평판 도파관으로 급전된 슬릿을 통한 도체 스트립과의 최대 결합 현상

## Maximum Coupling Phenomena through a Slit Fed by a Flanged Parallel-Plate Waveguide with a Conducting Strip

이 종 익 · 조 영 기\*

Jong-Ig Lee · Young-Ki Cho\*

### 요 약

본 논문에서는 플랜지된 평행 평판 도파관의 슬릿을 통한 도체 스트립과의 전자기적인 결합을 연구하였다. 슬릿의 전계와 스트립의 유기 전류에 관한 결합 적미분 방정식을 유도하고 모멘트 방법으로 풀었다. 몇 가지 슬릿을 통한 최대 결합 현상들의 특성을 도체 스트립의 위치, 동작 주파수, 스트립의 길이 등 다양한 파라미터에 대한 슬릿의 등가 어드미턴스와 결합 전력의 변화를 통해 조사하였다.

### Abstract

In this paper, the electromagnetic coupling through a slit in a flanged parallel-plate waveguide with a conducting strip is studied. The coupled integro-differential equations for the electric field over the slit and the induced current over the strip are derived and solved by use of the method of moments. The characteristics of some types of maximum coupling phenomena are investigated from the examinations of the variations of the equivalent slit admittance and the coupled power against various parameters such as the location of conducting strip, operating frequency, and strip length.

Key words : Electromagnetic Coupling, Maximum Coupling Phenomena, Flanged Parallel-Plate Waveguide, Slit, Conducting Strip

### I. 서 론

평행 평판 도파관의 슬릿을 통한 외부 산란체와의 전자기적인 결합문제에 대한 연구<sup>[1],[2]</sup>는 보다 실제적인 구조<sup>[3]</sup>에서 발견되는 다양한 현상들에 대한 개념적인 이해와 설계에 많은 도움이 될 유익한 정보를 제공하므로 활발히 진행되어 왔다. 최근 플랜지된 평행 평판 도파관의 좁은 슬릿을 통한 결합 현상에 관한 연구<sup>[4],[5]</sup>에서는 도파관 슬릿의 등가 어드미턴스의 서셉턴스 성분을 슬릿 근처 도파관 내외부에

축적된 무효 전력을 계산하여 두 개의 서셉턴스로 분리하고 어드미턴스의 변화를 관찰하였다. 또한 기존 연구<sup>[4],[5]</sup>에서 좁은 슬릿을 통한 도파관 외부로의 최대 결합에 있어서 도파관 외부 슬릿 근처에 존재하는 산란체(scatterer)의 역할에 대해 상세히 설명되었다.

본 논문에서는 도파관 외부 산란체로서의 도체 스트립이 플랜지된 도파관으로 급전된 슬릿 근처에 위치할 때 관찰되는 몇 가지 최대 결합 현상에 대해 조사하였다. 여러 가지 파라미터(슬릿으로부터 도체 스트립의 위치, 도체 스트립의 길이 등) 및 주파수에

「이 논문은 전과교육연구센터(RERC) 운영지원사업에 의해 지원받았음.」

동서대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Dongseo University)

\*경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 20060224-014

· 수정완료일자 : 2006년 6월 7일

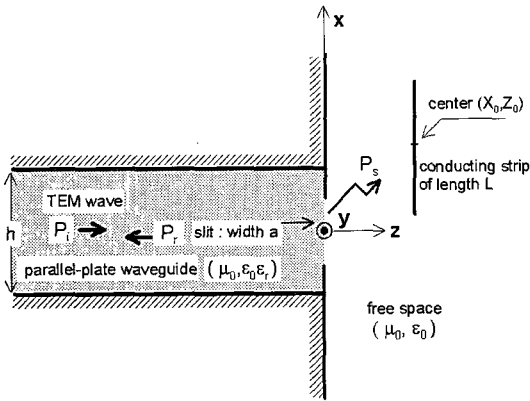


그림 1. 제안된 구조  
Fig. 1. Geometry under consideration.

대한 슬릿의 등가 어드미턴스, 결합 전력, 복사 패턴, 이득 등의 변화로부터 결합 현상들의 특성을 비교 분석하였다. 기존 연구<sup>[2],[6]</sup>에서 상술된 방법을 적용하여 제안된 그림 1의 구조를 해석하였으며, 도파관 영역에 TEM파가 입사된다고 가정할 때 슬릿의 전계와 도체 스트립의 유기 전류를 미지수로 하는 결합 적미분 방정식(coupled integro-differential equations)을 유도하고 모멘트 방법으로 풀었다.

## II. 해석 방법

제안된 구조인 그림 1은 y방향으로 변화가 없는 2차원 구조이고, 도파관의 높이  $h$ , 슬릿의 폭  $a$ , 도체 스트립의 길이  $L$ , 스트립 중심의 좌표  $(X_0, Z_0)$ 이다. 도파관 내부에서는 TEM파만이 전파 가능하다고 가정할 때, 슬릿 영역( $z=0$ )에 입사되는 TEM파의 자계는

$$H_y^i(z) = H_0 \exp[-jkz] \quad (1)$$

$$2H_0 = \int_{-a/2}^{a/2} E_x^A(x') \left\{ \frac{1}{\eta h} + j \frac{2k}{\eta h} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\cos[q\pi(x+h/2)/h] \cos[q\pi(x'+h/2)/h]}{a_q} \right\} dx' + \int_{-a/2}^{a/2} E_x^A(x') \frac{k_0}{2\eta_0} H_0^{(2)}(k_0|x-x'|) dx' + \int_{\text{strip region}} J_x(x') \frac{1}{j2} H_1^{(2)}[k_0\sqrt{(x-x')^2 + Z_0^2}] \frac{k_0 Z_0}{\sqrt{(x-x')^2 + Z_0^2}} dx' \quad (5)$$

$$\int_{-a/2}^{a/2} E_x^A(x') \frac{1}{j2} H_1^{(2)}[k_0\sqrt{(x-x')^2 + Z_0^2}] \frac{k_0 Z_0}{\sqrt{(x-x')^2 + Z_0^2}} dx' = \left[ k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] \int_{\text{strip region}} J_x(x') \frac{\eta_0}{4k_0} \{ H_0^{(2)}(k_0|x-x'|) - H_0^{(2)}[k_0\sqrt{(x-x')^2 + (2Z_0)^2}] \} dx' \quad (6)$$

로서 표현될 수 있으며, 여기에서  $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}$ ,  $H_0 (= E_0/\eta)$ 는 입사 자계의 진폭, 그리고  $\eta (= \sqrt{\mu_0/\epsilon_0\epsilon_r})$ 는 도파관 내부 유전체의 고유 임피던스(intrinsic impedance)이다. 본 논문에서는 편의상 입사파의 y 방향으로 단위길이당 평균 전력( $P_i = \eta h |H_0|^2 / 2$ )은 1로 정규화 되었다고 가정하였다.

참고문헌 [2], [6]에 제시된 방법을 따라 등가원리(equivalence principle)를 적용하면, 도파관 내부 영역에서의 총 자계  $H_y$ 는 슬릿 영역이 단락된 도파관에 TEM 파가 입사된 경우의 자계  $H_y^{sc}$ 와 슬릿의 y 성분 등가 자류(equivalent magnetic current) [ $\underline{M} = M_y(x) \hat{y} = E_x^A(x) \hat{y}$ ]에 의한 산란자계  $H_y^M$ 의 합으로

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

와 같이 표현되며,  $E_x^A(x)$ 는 슬릿 영역의 접선 성분 총 전계  $E_x(x, 0)$ 를 나타낸다. 도파관 외부 영역에서의 총 자계  $H_y^0$ 는 등가 자류  $-\underline{M}$ 에 대한 자계  $H_y^{M_0}$ 와 도체 스트립에 유기된 전류  $J_x(x)$ 에 의한 자계  $H_y^{J_0}$ 의 합으로

$$H_y^0 = H_y^{M_0} + H_y^{J_0} \quad (3)$$

와 같이 표현되고, 도체 스트립에 대한 접선(x) 성분 전계  $E_x^0$ 는 슬릿의 등가 자류에 의한 것( $E_x^{M_0}$ )과 도체 스트립의 유기 전류에 의한 것( $E_x^{J_0}$ )의 합으로

$$E_x^0 = E_x^{M_0} + E_x^{J_0} \quad (4)$$

와 같이 표현될 수 있다.

슬릿 영역( $z=0, |x| < a/2$ )에서 전자계 접선 성분의 연속 조건( $H_y = H_y^0$ )과 도체 스트립 영역( $z = Z_0, |x - X_0| < L/2$ )에서 접선 성분 전계가 0인 조건

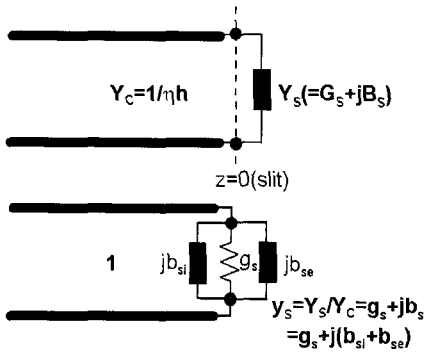


그림 2. 슬릿의 등가 어드미턴스  
Fig. 2. Equivalent slit admittance.

( $E_x^0=0$ )을 부과하면 슬릿의 전계  $E_x^A(x)$ 와 도체 스트립의 전류  $J_x(x)$ 에 관한 결합 적미분 방정식 (coupled integro-differential equations)을 식 (5), (6)과 같이 얻을 수 있고 여기에서,  $k_0$ 와  $\eta_0$ 는 각각 자유 공간에서의 전파 상수와 고유 임피던스,  $\alpha_0 = \sqrt{(q\pi/h)^2 - k^2}$ ,  $H_n^{(2)}$ 는  $n$ 차 2종 Hankel 함수이다<sup>[2],[6]</sup>.

결합 적미분방정식 (5) 및 (6)을 모멘트 방법으로 풀기 위해 슬릿의 전계  $E_x^A(x)$ 와 스트립의 유기 전류  $J_x(x)$ 를 펄스 함수(piecewise constant function)와 구분 정현 함수(piecewise sinusoidal function)로 각각 전개하고 Galerkin 방법을 적용하였으며, 구한 슬릿의 전계  $E_x^A(x)$ 와 스트립의 전류 분포  $J_x(x)$ 로부터 각 영역에서 전자계를 계산할 수 있다<sup>[2],[6]</sup>.

그림 2는 제안된 구조에 대한 TEM 모드 등가 회로이며,  $Y_c (= 1/\eta h)$ 는 도파관의 특성어드미턴스,  $Y_s (= G_s + jB_s)$ 는 슬릿의 등가 어드미턴스이다. 도파관의 특성 어드미턴스로 정규화된 슬릿의 어드미턴스  $y_s (= Y_s/Y_c = g_s + jb_s)$ 는 슬릿으로부터의 전압 반사 계수( $\Gamma_v$ )로부터 얻을 수 있으며<sup>[4],[5]</sup>, 그 중에서  $g_s$ 는 슬릿을 통해 도파관 외부로 결합된 전력 [ $P_s = P_i - P_r = P_i(1 - |\Gamma_v|^2)$ ]을 반영하는 것이고  $b_{si}$ 와  $b_{se}$ 는 슬릿( $z=0$ )을 경계로 하는 도파관 내부와 외부 영역에 축적된 에너지(혹은 무효 전력)를 반영하는 것이다<sup>[4],[5]</sup>. 슬릿을 통해 도파관 외부로 결합된 전력이 최대 ( $P_r \approx 0$  및  $P_s \approx 1$ )가 되는 급전 도파관과의 임피던스 정합 조건은  $y_s \approx 1 + j0$ 이다.

슬릿을 통해 도파관 외부 자유 공간 영역으로 결합된 전력  $P_s$ 는 슬릿으로부터 far-field 전력 복사 패

턴  $D(\theta)$ 를 적분하여

$$P_s = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D(\theta) d\theta \quad (7)$$

와 같이 구할 수 있다.

### III. 해석 결과 및 토의

전술된 방법으로 제안된 구조를 해석한 후 슬릿의 등가 어드미턴스( $y_s$ )와 슬릿을 통해 도파관 외부로 결합된 전력( $P_s$ )의 변화에서 관찰되는 다양한 최대 결합 현상들의 특성을 비교하고자 한다.

그림 3(a)는  $\epsilon_r = 1.0$ ,  $h = a = L = 0.29 \lambda_0$ ,  $Z_0 = 0.227 \lambda_0$ 인 경우 도체 스트립의  $x$ 방향 변위  $X_0$ 에 대한 등가 어드미턴스( $y_s = g_s + jb_s$ )와 결합 전력( $P_s$ )의 변화를 계산한 것이다.  $X_0 = 0$  근처에서 최대 결합 현상이 관찰되며 이 때, 안테나로서의 이득은 약 4.9 [dBi]이다. 이 경우 슬릿의 폭( $a = h = 0.29 \lambda_0$ )이 비교적 큰 값이어서 스트립이 제거된 경우에도  $P_s = 91.6 \%$ ,  $y_s = 0.77 + j0.48$ , 이득 3.35 [dBi] 정도로서 양호한 복사기(radiator)로 동작<sup>[4],[5]</sup>하며, 최대 결합이 관찰되는 경우 도체 스트립과 슬릿간의 거리( $Z_0 = 0.227 \lambda_0$ )가 후술될 경우들에 비해 큰 값이다.

그림 3(b)는 그림 3(a)와 동일한 상태에서 최대 결합이 관찰되는  $X_0 = 0$ 으로 고정된 후 주파수에 따른 결합 전력과 이득의 변화를 관찰한 것이다. 결합 전력이 90 % 이상인 주파수 대역은 약 63 %이고 이 때, 이득은 3.65 [dBi] 이상으로 유지된다.

그림 3(c)는 그림 3(a)에서 최대 결합이 관찰되는  $X_0 = 0$ 에서의 복사 패턴을 도시한 것이다. 참고로 이 때, 슬릿과 스트립 간의 거리  $Z_0$ 에 따라 이득도 변화되며 최대 이득이 관찰되는 경우의 거리  $Z_0$ 값과 최대 결합이 관찰되는 경우의  $Z_0$ 값은 그림 3(d)에서 보는 바와 같이 상이하다<sup>[3]</sup>.

그림 4(a)는 도파관의 높이가  $h = 0.29 \lambda_0$ 로 그림 3과 동일하나 슬릿의 폭이  $a = 0.1h$ 로 좁은 경우이며,  $L = 0.519 \lambda_0$ ,  $Z_0 = 0.093 \lambda_0$ 이고  $X_0 = 0$ 에서 최대 결합이 관찰된다. 참고로 스트립이 제거된 경우  $y_s = 0.91 + j3.02$ 로서 대부분의 전력이 반사되고 일부 전력( $P_s = 28.5 \%$ )만이 도파관 외부로 결합된다. 그림 3의 경우에 비해 슬릿과 도체 스트립 사이의 간격( $Z_0 = 0.093 \lambda_0$ )이 매우 작고 스트립의 길이( $L = 0.519$

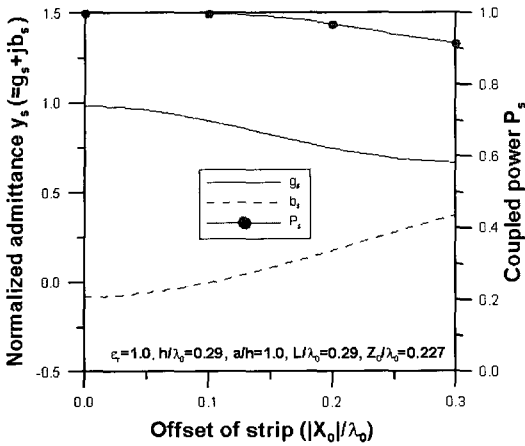


그림 3. (a) 도체 스트립의 변위  $X_0$ 에 대한 어드미턴스( $y_s = g_s + jb_s$ ) 및 결합 전력( $P_s$ )  
 Fig. 3. (a) Admittance  $y_s$  and coupled power ( $P_s$ ) against strip offset  $X_0$ .  
 $\epsilon_r = 1.0, h = 0.29 \lambda_0, a = L = h, Z_0 = 0.227 \lambda_0$ .

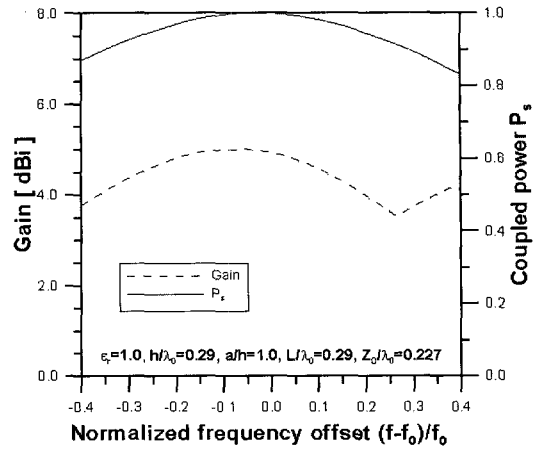


그림 3. (b) 그림 3(a)의 최대 결합( $X_0=0$ )의 주파수 특성  
 Fig. 3. (b) Frequency behaviour of the maximum coupling( $X_0=0$ ) in Fig. 3(a).  
 $\epsilon_r = 1.0, h = 0.29 \lambda_0, a = L = h, Z_0 = 0.227 \lambda_0$ .

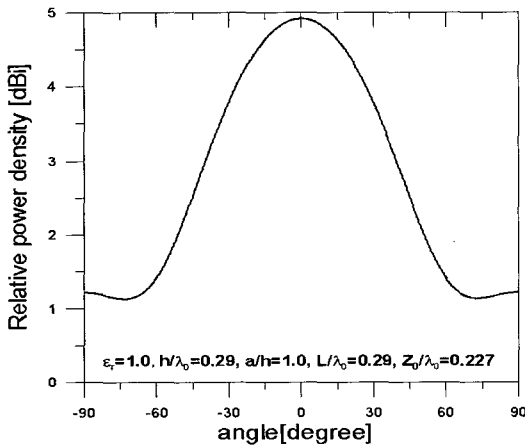


그림 3. (c) 그림 3(a)에서 최대 결합인 경우( $X_0=0$ )의 복사 패턴  
 Fig. 3. (c) Radiation pattern for the case of the maximum coupling( $X_0=0$ ) in Fig. 3(a).

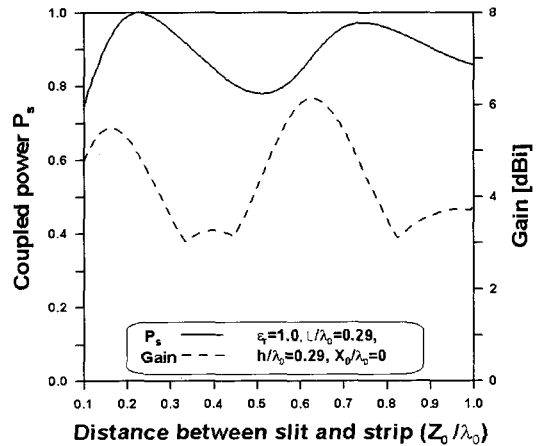


그림 3. (d) 슬릿과 스트립 사이의 거리  $Z_0$ 에 대한 결합 전력과 이득의 변화  
 Fig. 3. (d) Coupled power  $P_s$  and gain against the distance  $Z_0$  between slit and strip.

$\lambda_0$ 는 반 파장에 근접하며 스트립의 변위  $X_0$ 에 따라 결합되는 전력이 훨씬 민감하게 변화됨을 알 수 있다.

그림 4(b)는 그림 4(a)에서 최대 결합이 관찰되는 경우( $X_0=0$ ) 주파수  $f$ 에 따른 결합 전력과 이득의 변화를 나타낸 것이다. 결합 전력이 90 % 이상인 주파수 대역은 약 11.2 %이며, 이득은 6.63 [dBi] 이상으로 유지된다.

그림 4(c)는 그림 4(a)에서 최대 결합이 관찰되는 경우( $X_0=0$ )의 복사 패턴이며, 그림 4(d)는 거리  $Z_0$ 에 대한 결합 전력과 이득의 변화를 나타낸 것으로서 매우 민감하게 변화됨을 관찰할 수 있다.

그림 5(a)는 급전 도파관의 높이가 파장에 비해 매우 낮은  $h = 0.012 \lambda_0$ 인 경우로서  $a = h, L = 0.408 \lambda_0, Z_0 = 0.05 \lambda_0$ 이며  $X_0 = 0$ 에서 최대 결합이 관찰된다. 스트립이 슬릿에 근접해 감에 따라 슬릿의 어드미턴

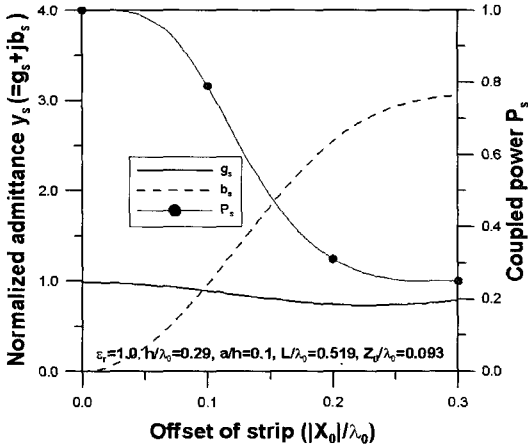


그림 4. (a) 도체 스트립의 변위  $X_0$ 에 대한 어드미턴스( $y_s = g_s + jb_s$ ) 및 결합 전력( $P_s$ )

Fig. 4. (a) Admittance  $y_s$  and coupled power( $P_s$ ) against strip offset  $X_0$ .

$$\epsilon_r=1.0, h=0.29 \lambda_0, a=0.1h, L=0.519 \lambda_0, Z_0=0.093 \lambda_0.$$

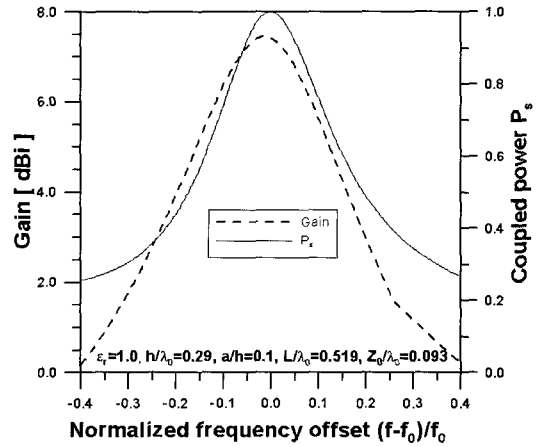


그림 4. (b) 그림 4(a)의 최대 결합( $X_0=0$ )의 주파수 특성

Fig. 4. (b) Frequency behaviour of the maximum coupling( $X_0=0$ ) in Fig. 4(a).

$$\epsilon_r=1.0, h=0.29 \lambda_0, a=0.1h, L=0.519 \lambda_0, Z_0=0.093 \lambda_0.$$

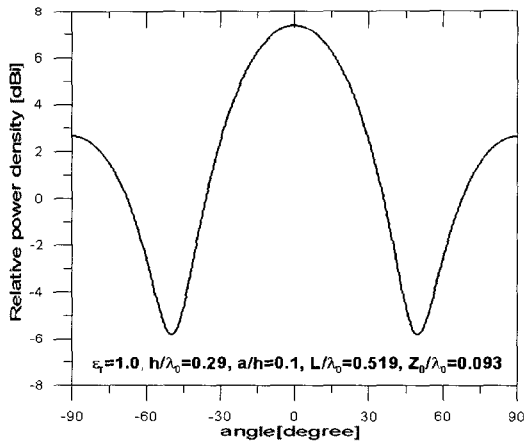


그림 4. (c) 그림 4(a)에서 최대 결합인 경우( $X_0=0$ )의 복사 패턴

Fig. 4. (c) Radiation pattern for the case of the maximum coupling( $X_0=0$ ) in Fig. 4(a).

스는 증가되어 단락 회로화 되어 가는 반면, 스트립이 슬릿으로부터 멀어져서 스트립이 제거된 경우  $y_s=0.04+j0.1$ ,  $P_s=13.9\%$ 로 대부분의 전력이 반사되며, 도파관의 높이가 감소됨에 따라 슬릿 어드미턴스도 감소되어 슬릿은 등가적으로 개방 회로로 되어간다<sup>[4],[5]</sup>.

그림 5(b)는 그림 5(a)에서 최대 결합이 관찰되는

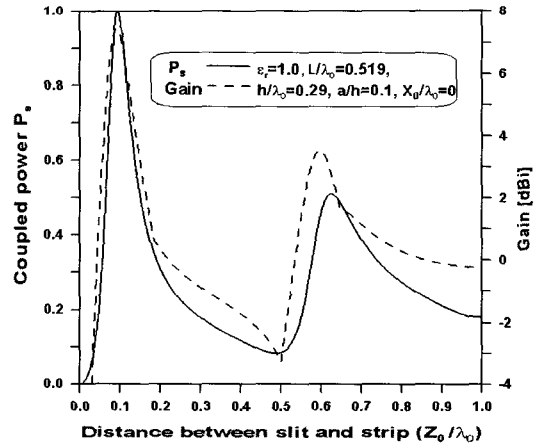


그림 4. (d) 슬릿과 스트립 사이의 거리  $Z_0$ 에 대한 결합 전력과 이득의 변화

Fig. 4. (d) Coupled power  $P_s$  and gain against the distance  $Z_0$  between slit and strip.

$X_0=0$ 인 경우 주파수  $f$ 에 따른 특성 변화를 도시한 것으로  $f=f_0$ 일 때 이득은 7.4 [dBi]이고,  $P_s > 90\%$ 인 대역폭은 중심 주파수의 9.9% 정도이며 이득은 6.6 [dBi] 이상으로 유지된다.

그림 5(c)는 그림 5(a)에서 최대 결합( $X_0=0$ )인 경우의 복사 패턴이고, 그림 5(d)는 거리  $Z_0$ 에 따라 민감하게 변화하는 특성을 나타낸 것이다.

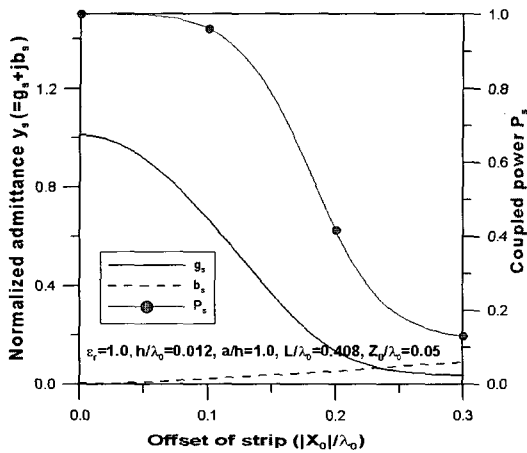


그림 5. (a) 도체 스트립의 변위  $X_0$ 에 대한 어드미턴스( $y_s = g_s + jb_s$ ) 및 결합 전력( $P_s$ )  
 Fig. 5. (a) Admittance  $y_s$  and coupled power( $P_s$ ) against strip offset  $X_0$ .  
 $\epsilon_r=1.0, h/\lambda_0=0.012, a/h=1.0, L/\lambda_0=0.408, Z_0/\lambda_0=0.05$

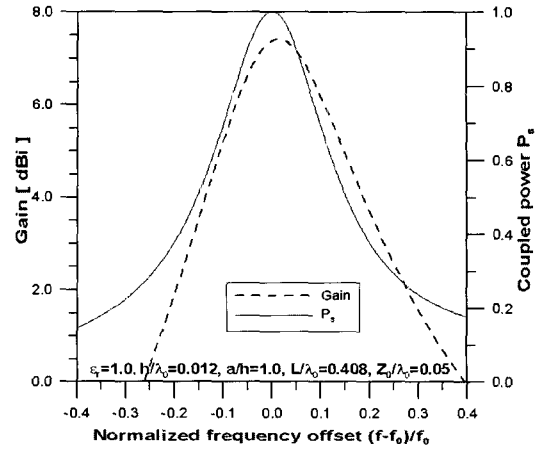


그림 5. (b) 그림 5(a)의 최대 결합( $X_0=0$ )의 주파수 특성  
 Fig. 5. (b) Frequency behaviour of the maximum coupling( $X_0=0$ ) in Fig. 4(a).  
 $\epsilon_r=1.0, h=0.012 \lambda_0, a=h, L=0.408 \lambda_0, Z_0=0.05 \lambda_0$

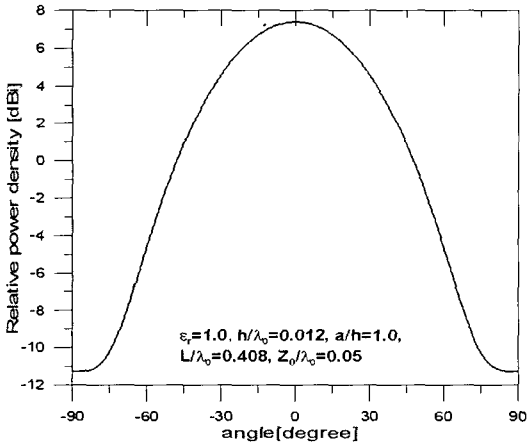


그림 5. (c) 그림 5(a)에서 최대 결합인 경우( $X_0=0$ )의 복사 패턴  
 Fig. 5. (c) Radiation pattern for the case of the maximum coupling( $X_0=0$ ) in Fig. 5(a).

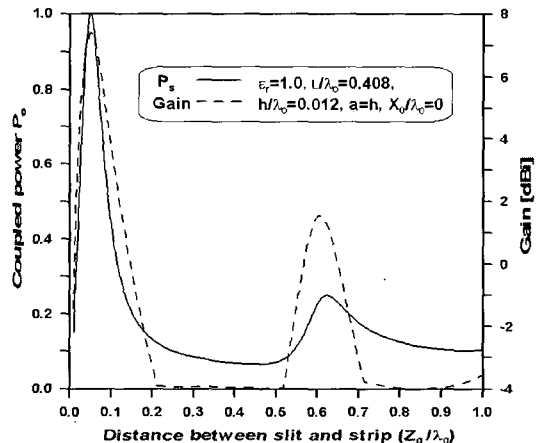


그림 5. (d) 슬릿과 스트립 사이의 거리  $Z_0$ 에 대한 결합 전력과 이득의 변화  
 Fig. 5. (d) Coupled power  $P_s$  and gain against the distance  $Z_0$  between slit and strip.

도파관의 높이와 슬릿의 폭이 큰 그림 3(b)의 경우에 비해 슬릿의 폭이 점차 감소된 그림 4(b) 및 그림 5(b)의 경우 이득은 증가된 반면 대역폭은 감소되었으며, 도체 스트립과 슬릿간의 거리도 감소되어 도체 스트립이 좁은 슬릿에 대해 최대 결합을 얻기 위해 매우 근접한 영역에 위치하여야 함을 알 수 있다. 앞에서 제시된 슬릿을 통한 결합 현상들에 있어서

슬릿에 대한 스트립의 변위가 0인  $X_0=0$ 일 때 최대 결합이 관찰되었으나, 이와는 달리 스트립의 변위가 0이 아닌 경우에 일어나는 유형의 최대 결합 현상도 관찰된다. 그림 6(a)는  $h=a=0.012 \lambda_0, L=0.468 \lambda_0, Z_0=0.013 \lambda_0$ 인 경우 스트립의 변위  $Z_0$ 에 대한 결합 전력과 어드미턴스의 변화이다. 스트립의 변위가  $|X_0|=0.21 \lambda_0$ 인 경우 최대 결합이 관찰되고,  $X_0=0$

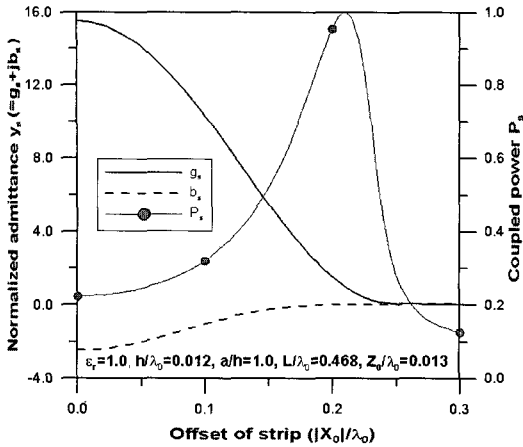


그림 6. (a) 도체 스트립의 변위  $X_0$ 에 대한 어드미턴스( $y_s = g_s + jb_s$ ) 및 결합 전력( $P_s$ )

Fig. 6. (a) Admittance  $y_s$  and coupled power( $P_s$ ) against strip offset  $X_0$ .

$$\epsilon_r = 1.0, h = 0.012 \lambda_0, a = h, L = 0.468 \lambda_0, Z_0 = 0.013 \lambda_0.$$

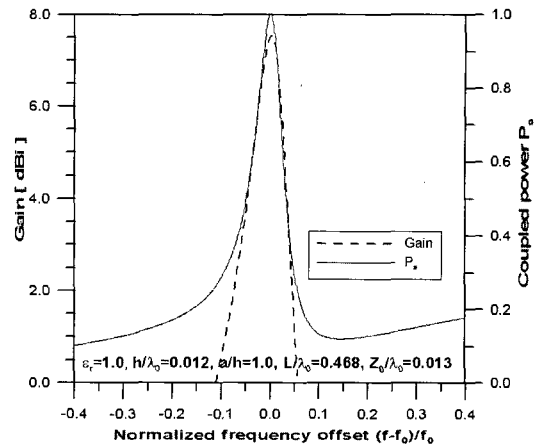


그림 6. (b) 그림 6(a)의 최대 결합( $X_0 = 0.21 \lambda_0$ )의 주파수 특성

Fig. 6. (b) Frequency behaviour of the maximum coupling ( $X_0 = 0.21 \lambda_0$ ) in Fig. 6(a).

$$\epsilon_r = 1.0, h = 0.012 \lambda_0, a = h, L = 0.468 \lambda_0, Z_0 = 0.013 \lambda_0.$$

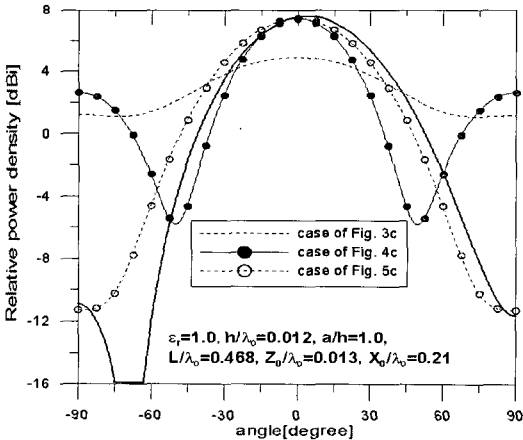


그림 6. (c) 그림 6(a)에서 최대 결합인 경우( $X_0 = 0.21 \lambda_0$ )의 복사 패턴

Fig. 6. (c) Radiation pattern for the case of the maximum coupling ( $X_0 = 0.21 \lambda_0$ ) in Fig. 6(a).

에서는  $|y_s| \gg 1$ 이므로 스트립이 슬릿을 단락시키는 효과를 주게 된다. 스트립이 슬릿에 근접해감에 따라 최대 결합이 관찰되는 스트립의 길이는 반 파장에 근접해가고 결합 전력 및 어드미턴스는 더욱 민감하게 변화됨을 관찰하였다<sup>[6]</sup>.

그림 6(b)는 그림 6(a)에서 최대 결합이 관찰되는  $X_0 = 0.21 \lambda_0$ 인 경우 주파수에 따른 특성 변화를 나타

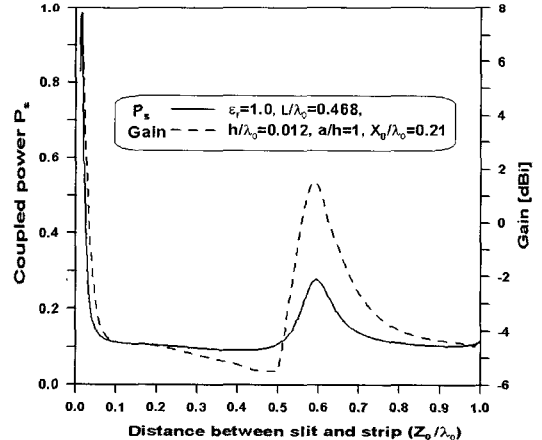


그림 6. (d) 슬릿과 스트립 사이의 거리  $Z_0$ 에 대한 결합 전력과 이득의 변화

Fig. 6. (d) Coupled power  $P_s$  and gain against the distance  $Z_0$  between slit and strip.

낸 것으로,  $f = f_0$ 에서 이득이 7.5[dBi]이고  $P_s \geq 90\%$ 인 대역폭은 2.5%로 매우 좁아지며 이 때, 이득은 7.0 [dBi] 이상으로 유지된다. 평행 평판 도파관 윗면의 좁은 슬릿을 통한 도체 스트립과의 결합에 관한 기존 연구<sup>[6]</sup>에 있어서 상호 대조적인 특성을 갖는 두 가지 현상인 기생형(parasitic-type) 결합과 캐비티형(cavity-type) 결합이 발견되었고 이에 대해 깊이

있게 논의된 바 있다. 이와 매우 유사한 결과가 급전 구조는 다소 다르지만 본 연구의 구조에 대한 해석 결과인 그림 5 및 그림 6과 같은 경우에 있어서 관찰되었다.

그림 6(c)는 최대 결합인 경우( $X_0=0.21 \lambda_0$ )의 복사 패턴이며, 참고로 그림 3(c), 4(c), 5(c)의 결과들도 상호 비교가 용이하도록 함께 도시하였다. 그리고 그림 6(d)는 거리  $Z_0$ 에 따라 매우 민감하게 변화하는 특성을 나타낸다.

위에서 살펴본 바와 같이 도파관 슬릿의 폭과 도체 스트립의 위치에 따라 다양한 형태의 결합 현상들이 제안된 그림 1의 2차원 구조에서 관찰되었다. 제시된 최대 결합의 유형을 크게 4가지로 분류하면 (1) 급전 도파관의 높이와 슬릿의 폭이 큰( $h=a=0.29 \lambda_0$ ) 그림 3의 유형, (2) 급전 도파관의 높이( $h=0.29 \lambda_0$ )에 비해 슬릿의 폭이 좁은( $a=0.1h=0.029 \lambda_0$ ) 그림 4의 유형, (3) 급전 도파관의 높이와 슬릿의 폭이 파장에 비해 매우 좁은( $h=a=0.012 \lambda_0$ ) 그림 5의 유형, (4) 좁은 슬릿에 대해 도체 스트립이 offset 되었을 때 최대 결합이 관찰되는 그림 6의 유형 등이다. 슬릿의 폭이 감소됨에 따라 스트립과의 거리  $Z_0$ 가 감소되었고, 이에 따라 주파수 대역폭도 점차 감소되었다. 이와 유사한 현상들이 실제적인 3차원 구조(구형 도파관의  $TE_{10}$  모드로 급전되는 슬롯을 통한 도체 패치와의 결합 구조 [3])에서도 관찰되는가를 확인해 보는 것은 흥미롭고 중요한 일이라 생각된다.

앞에서는 스트립의 변위에 대한 특성 변화 결과를 제시하였으며, 최대 결합이 관찰되는 도체 스트립의 폭은 반 파장에 근접하는 경우로 제한되어 있었다. 그림 7은  $\epsilon_r=1.0$ ,  $h=0.25 \lambda_0$ ,  $a/h=1$ 인 도파관의 슬릿으로부터 길이  $L=1.0 \lambda_0$ 인 도체 스트립의 위치  $Z_0$ 를 변화시켰을 때 슬릿의 등가 어드미턴스( $y_s = g_s + jb_s$ )와 슬릿을 통해 결합된 전력( $P_s$ )의 변화를 도시한 것이며, 간격  $Z_0$ 에 따른 변화를 관찰해 볼 때 공진기로서의 특성을 보임을 알 수 있다. 도체 스트립의 길이를 변화시킨 후 동일한 시뮬레이션을 반복한 결과,  $Z_0$ 를 적절히 변화시켰을 때 슬릿을 통한 최대 결합을 얻을 수 있음이 확인되었다. 도체 스트립( $z = Z_0$ )과 무한 접지 도체( $z=0$ )로 이루어진 캐비티 공진기는 길이  $L$ 이 큰 값이고  $Z_0$ 가 작은 값일 때 높

은  $Q$ 값을 보인다.

도체 스트립이 슬릿에 매우 근접하며 스트립의 길이가 반 파장에 근접하거나 그 이상인 경우, 제안된 구조의 도체 스트립과 플랜지 도파관의 접지면 ( $z=0$ )이  $x$  방향으로 전파되는 TEM파 전송 선로를 구

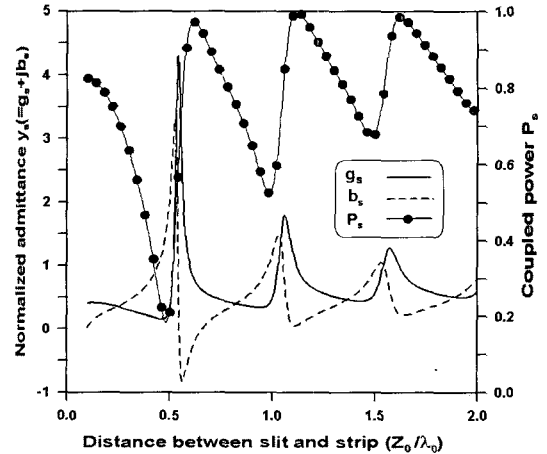


그림 7. 도체 스트립과 슬릿의 거리 ( $Z_0$ )에 대한 어드미턴스( $y_s$ ) 및 결합 전력( $P_s$ )

Fig. 7. Admittance and coupled power against the distance  $Z_0$  between conducting strip and slit.  $\epsilon_r=1.0$ ,  $h=0.25 \lambda_0$ ,  $a=h$ ,  $L=1.0 \lambda_0$ ,  $X_0=0$ .

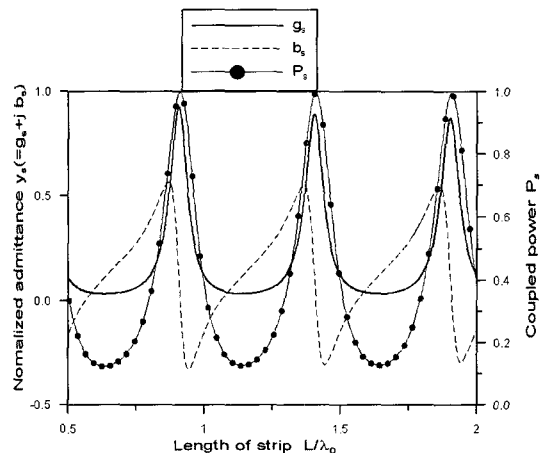


그림 8. 도체 스트립의 길이( $L$ )에 대한 슬릿의 어드미턴스( $y_s$ ) 및 결합 전력( $P_s$ )

Fig. 8. Admittance( $y_s$ ) and coupled power( $P_s$ ) against strip length  $L$ .  $\epsilon_r=1.0$ ,  $h=0.012 \lambda_0$ ,  $a/h=0.1$ ,  $X_0=0.5 \delta_L$ ,  $Z_0=0.05 \lambda_0$ ,  $L=L_0 + \delta_L$ ,  $L_0=0.4135 \lambda_0$ .



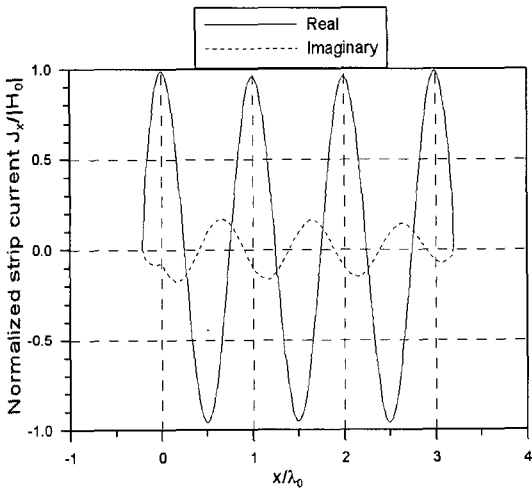


그림 9. 도체 스트립의 전류 분포

Fig. 9. Current distribution over conducting strip.

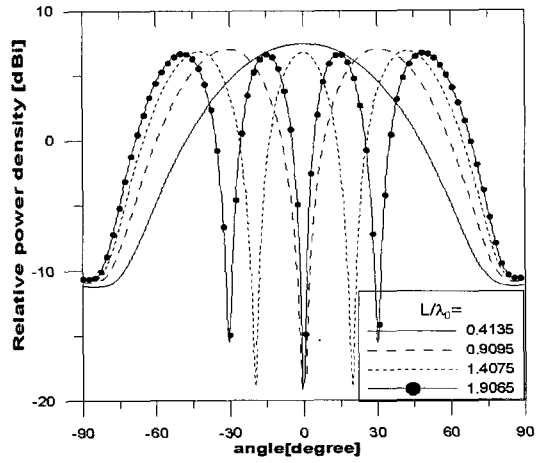
$$\epsilon_r=1.0, h=0.12\lambda_0, a/h=0.1, X_0=0.5\delta_L, Z_0=0.05\lambda_0, L=L_0+\delta_L, L_0=0.4135\lambda_0, \delta_L=3.0\lambda_0.$$

성한다고 볼 수 있으며, 도체 스트립 에지 근처는 복사 에지(radiating edge) 혹은 복사 슬릿이 되어 등가 회로 관점에서 마이크로스트립 안테나의 등가 전송 선 모델<sup>[7]</sup>과 동일하다고 볼 수 있다. 전송선 이론에 의하면 반 파장의 정수배 길이의 전송 선로를 급전점인 슬릿을 기준으로 좌우측에 부가하여도 급전점에서의 입력 임피던스가 동일하게 유지될 것으로 기대된다. 한편 기존 연구 결과<sup>[4],[6]</sup>에서는 도체 스트립의 길이가 단지 반 파장에 근접하는 경우의 임피던스 정합 현상 관찰로 제한되어 있었다.

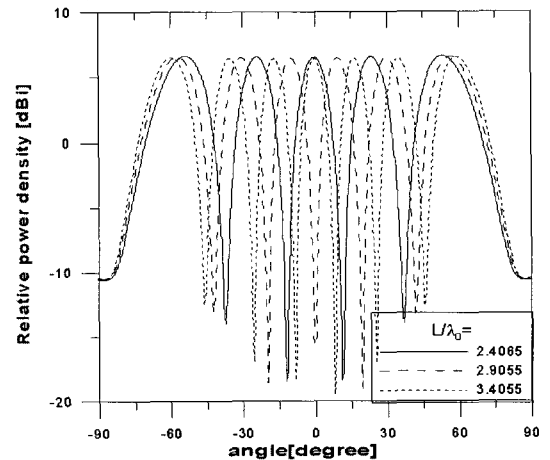
그림 8은  $\epsilon_r=1.0, h=0.012\lambda_0, a/h=0.1, X_0=0.5\delta_L, Z_0=0.05\lambda_0, L=L_0+\delta_L, L_0=0.4135\lambda_0$ 에 대한 등가 어드미턴스 및 결합 전력의 변화를 나타낸다. 임피던스 정합 현상이 관찰되는 최소 길이  $L_0=0.4135\lambda_0$ 이며, 부가되는 스트립의 길이  $\delta_L$ 이 반 파장의 정수배가 되는 경우에  $L=L_0$ 일 때와 동일한 현상이 주기적으로 관찰된다.

그림 9는  $\delta_L=3.0\lambda_0$ 인 경우 도파관의 입사 자계 ( $H_0$ )로 정규화된 도체 스트립의 전류 분포를 나타내며, 도체 스트립( $z=Z_0$ )과 접지면( $z=0$ )이 강한 캐비티를 구성하므로 급전점 부근을 제외하면 거의 정현 함수 분포가 관찰된다.

그림 10은  $\delta_L$ 이 반 파장의 정수배에 근접하여 임



(a)



(b)

그림 10. 복사 패턴

Fig. 10. Radiation pattern.

$$\epsilon_r=1.0, h=0.012\lambda_0, a/h=0.1, X_0=0.5\delta_L, Z_0=0.05\lambda_0, L=L_0+\delta_L, L_0=0.4135\lambda_0.$$

피던스 정합(혹은 최대 결합)이 관찰되는 경우 도파관 외부 자유 공간으로의 복사 특성이며  $\delta_L$ 의 증가에 따라 lobe의 수가 증가된다. 이는 두 개의 복사 에지를 등가 선자류(equivalent line magnetic current)로 가정<sup>[8]</sup>하였을 때 선자류간의 거리 증가에 따른 lobe 수의 증가로 이해할 수 있다.

#### IV. 결 론

플래지된 평행 평판 도파관으로 급전된 슬릿을

통한 도파관 외부의 도체 스트립과의 전자기적인 결합문제를 최대 결합의 관점에서 연구하였다. 도파관의 높이, 슬릿의 폭, 도체 스트립과 슬릿의 간격 등에 대한 슬릿의 등가 어드미턴스, 도파관 외부로의 결합 전력, 도체 스트립의 전류, 복사 패턴, 주파수 특성 등의 변화를 통해 제안된 구조에서 일어나는 다양한 최대 결합 현상들의 특성을 관찰하였다. 특히, 슬릿의 폭이 감소됨에 따라 도체 스트립이 보다 슬릿에 근접할 때 최대 결합 현상이 일어나고, 이에 따라 주파수 대역폭도 감소됨을 관찰하였다.

### 참 고 문 헌

[1] M. S. Leong, P. S. Kooi, Chandra, and T. S. Yeo, "Theoretical and experimental investigations of two-dimensional waveguide-excited short backfire antenna structure", *Proc. IEE*, pt. H, vol. 136, no. 3, pp. 263-268, Jun. 1989.

[2] C. M. Butler, C. C. Courtney, P. D. Mannikko, and J. W. Silvestro, "Flanged parallel-plate waveguide coupled to a conducting cylinder", *Proc. IEE*, pt. H, vol. 138, pp. 549-559, Dec. 1991.

[3] S. N. Sinha, D. K. Mehra, and R. P. Agarwal, "Radiation from a waveguide-backed aperture in an

infinite ground plane in the presence of a thin conducting plate", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, no. 4, pp. 539-545, Apr. 1986.

[4] J. I. Lee, J. H. Ko, and Y. K. Cho, "Coupling through a slit in a flanged parallel-plate waveguide with a conducting strip", *Proc. 2004 ISAP*, vol. 1, pp. 589-592, Sendai, Japan, Aug. 2004.

[5] 이종익, 김강욱, 조영기, "플랜지된 평행평판 도파관으로 급전된 슬릿의 등가 어드미턴스 및 좁은 슬릿을 통한 최대결합 메커니즘", 한국전자파학회논문지, 15(11), pp. 1116-1122, 2004년 11월.

[6] J. I. Lee, Y. K. Cho, "Maximum electromagnetic coupling to a nearby conducting strip through narrow and wide slits in a parallel-plate waveguide", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP- 51, no. 4, pp. 693-699, Apr. 2003.

[7] I. J. Bahl, P. Bhartia, *Microstrip Antennas*, Artech House, Norwood, 1980.

[8] 조영기, 이창원, 이종익, 윤리호, 채규수, 홍재표, "구형 마이크로스트립 안테나구조의 상호결합에 대한 개선된 해석방법과 제안된 해석방법의 광대역 기술에의 응용", 전자공학회논문지, 32-A(1), pp. 61-69, 1995년.

### 이 종 익



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

1999년~현재: 동서대학교 정보시스템공학부 부교수

[주 관심분야] 전자기산란, 평면안테나

### 조 영 기



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

기컴퓨터학부 교수

1992년~현재: 국제전파연합(URSI) 한국대표

2004년~현재: 한국전자파학회 부회장

2002년~현재: 경북대학교 공과대학 BK사업 단장

[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기구조, 안테나 이론