

플랜지된 평행평판도파관으로 급전된 슬릿의 등가 어드미턴스 및 좁은 슬릿을 통한 최대결합 메커니즘

Equivalent Admittance of a Slit Fed by a Flanged Parallel-Plate Waveguide and Maximum Coupling Mechanism through a Narrow Slit

이 종 익 · 김 강 옥* · 조 영 기*

Jong-Ig Lee · Kang-Wook Kim* · Young-Ki Cho*

요 약

플랜지된 평행 평판 도파관의 슬릿을 통한 전자기적인 결합문제를 고려하였다. 결합 슬릿 근처 도파관 내 · 외부의 무효전력을 반영한 슬릿의 등가 어드미턴스를 구하고, 슬릿의 폭이 매우 좁은 경우에서의 최대결합 메커니즘을 규명하였다. 도파관의 높이, 슬릿의 폭 및 슬릿의 변위 등과 같은 구조적인 파라미터들이 복사 특성에 미치는 영향을 관찰하였다.

Abstract

The problem of electromagnetic coupling through a slit in a flanged parallel-plate waveguide is considered. The equivalent slit admittance associated with reactive powers near the coupling slit inside and outside the waveguide has been obtained. The maximum coupling mechanism for the case of narrow slit has been quantitatively discussed. The effects of various geometrical parameters such as guide height, slit width, and slit offset on the radiation characteristics of the geometry have been investigated.

Key words : Maximum Coupling, Parallel-Plate Waveguide(PPW), Equivalent Admittance, Narrow Slit

I. 서 론

플랜지된 평행 평판 도파관의 복사 특성은 다양한 해석방법으로 많이 연구되어 왔다^{[1]~[4]}. 기존의 연구들에서 플랜지된 도파관 자체를 연구^[1]하였을 뿐만 아니라 개구에 도체 격막(diaphragm)을 장하여 슬릿을 구성한 구조에 대한 연구^[2]와 개구 근처의 도체실린더 및 도체 스트립과의 결합문제를 다룬 연구^{[3],[4]}들이 있었으며, 이 때 관찰되는 일부 현상들^[3]이 전면에 얇은 도체 패치를 갖는 구형 도파관으로 급전된 슬릿으로부터의 복사 특성^[5]과 유사함이 확

인되었다.

그러나 기존 연구들에서 슬릿을 통해 도파관 외부로의 최대결합 현상에 대한 메커니즘 분석과 다양한 최대결합 현상들에 대한 비교 연구가 미흡하였고 사료된다. 특히, 슬릿의 폭이 매우 좁은 경우에 슬릿 자체로는 급전 도파관과 임피던스 부정합되지만 슬릿 근처의 적절한 산란체(scatterers)에 의해 임피던스 정합 특성이 개선될 수 있는데, 이에 대한 원리를 규명하고 이를 확장하여 일반적인 좁은 개구를 통한 전자기적인 결합 현상에 대한 원리를 이해하는 것이 필요하다고 본다.

「본 논문은 2003년도 한국학술진흥재단지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-002-D00270).」

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

*경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Eng. and Computer Science, Kyungpook National Univ.)

· 논 문 번 호 : 20041004-130

· 수정완료일자 : 2004년 11월 11일

본 논문에서는 그림 1과 같이 플랜지된 평행 평판 도파관의 슬릿을 통한 도파관 외부로의 전자기적인 결합문제를 고려하였다. 슬릿의 접선성분 전계에 관한 적분방정식을 모멘트방법으로 풀어서 슬릿근처 도파관 내·외부 영역의 무효전력을 계산하고, 이를 반영하는 등가 서셉턴스 성분들의 합으로 TEM 모드에 대한 슬릿의 등가 서셉턴스를 표현하였다. 도파관의 높이, 슬릿의 폭 및 변위 등이 결합특성에 미치는 영향을 관찰하고 좁은 슬릿을 통한 도파관 외부로의 최대결합(혹은 급전 도파관과의 임피던스 정합)에 있어서 근접 산란체의 영향 및 역할에 대하여 살펴보고자 한다.

II. 해석방법

그림 1은 본 연구에서 제안된 구조로서 y 방향으로 변화가 없는 2차원 구조이다. 평행 평판 도파관 내부($z < 0$) 유전체영역($\mu_0, \epsilon_0 \epsilon_r$)과 도파관 외부($z > 0$) 자유공간 영역(μ_0, ϵ_0)으로 나누어지며, 두 영역은 경계면($z=0$)에 존재하는 폭 a 인 슬릿에 의해 결합된다. 그림 1에서 h 는 도파관의 높이, X_a 는 슬릿 중앙의 변위이고 도파관 내부에서는 TEM파만이 전파 가능하다고 가정하였다. 입사 TEM파의 자계는

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

로서 표현될 수 있으며, 여기에서 $k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}$, $H_0 (= V_{inc} / \eta h)$ 는 입사 자계의 진폭, 그리고 $\eta (= \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0 \epsilon_r})$ 는 도파관 내부 유전체의 고유임피던스이다. 본 논문에서는 편의상 입사파의 평균전력 $P_i =$

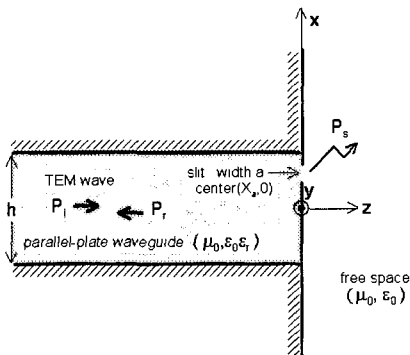


그림 1. 제안된 구조

Fig. 1. Geometry under consideration.

$|V_{inc}|^2 / (2\eta h)$ 은 1로 정규화 되었다고 가정하였다.

참고문헌 [2], [4]에서 제시된 방법을 따라 등가원리를 적용하면 도파관 내부 영역에서의 총 자계 H_y 는 슬릿영역이 단락된 도파관에 TEM파가 입사된 경우의 자계 H_y^{sc} 와 슬릿의 등가자류 [$M = M_y(x) \hat{y} = E_x^A(x) \hat{y}$]에 의한 자계 H_y^M 의 합($H_y = H_y^{sc} + H_y^M$)으로 표현되며, $E_x^A(x)$ 는 슬릿의 접선성분 총 전계 $E_x(x, 0)$ 를 나타낸다.

도파관 외부영역에서의 자계 H_y^0 는 등가자류 $-M$ 에 대한 자계 $H_y^{M_0}$ 이며, 슬릿 영역($z=0, |x-X_a| < a/2$)에서 전자계 접선성분의 연속조건 ($H_y = H_y^0$)을 부과하면 슬릿의 전계 $E_x^A(x)$ 에 관한 적분방정식(integral equation)을 얻을 수 있다^{[2],[4]}.

적분방정식을 풀기 위해 슬릿의 전계 $E_x^A(x)$ 를 펄스함수로 전개하고 Galerkin 방법을 적용하여 정합하면

$$[Y_{mn}][V_n] = [I_m] \quad (2)$$

와 같은 행렬방정식을 얻을 수 있다. 식 (2)에서 V_n 은 슬릿의 전계, Y_{mn} 은 어드미턴스, I_m 은 전원 행렬요소를 의미하며, 각각

$$I_m = \Delta \frac{2V_{inc}}{\eta h}, \quad (3a)$$

$$Y_{mn} = Y^0 + Y_{mn}^h + Y_{mn}^e, \quad (3b)$$

$$Y^0 = \frac{\Delta^2}{\eta h}, \quad (3c)$$

$$Y_{mn}^h = j\Delta^2 \frac{2k}{\eta h} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\cos[q\pi(x_m + h/2)/h] \cos[(x_n + 0.5h)q\pi/h]}{a_q} \left[\frac{\sin(q\pi\Delta/2h)}{(q\pi\Delta/2h)} \right]^2, \quad (3d)$$

$$Y_{mn}^e = \frac{k_0}{2\eta_0} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} H_0^{(2)}[k_0|x_m + \zeta - x_n - \zeta'|] d\zeta' d\zeta, \quad (3e)$$

$$a_q = \sqrt{(q\pi/h)^2 - k^2}, \quad (3f)$$

$$E_x^A(x) \cong \sum_{n=1}^N V_n \Pi_n(x), \quad (3g)$$

$$\Pi_n(x) = \begin{cases} 1, & |x - x_n| \leq \Delta/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3h)$$

$$x_n = X_a - a/2 + (n - 0.5)\Delta, \quad \Delta = a/N \quad (3i)$$

와 같이 주어지고, $H_0^{(2)}$ 는 0차 2종 Hankel 함수를 의

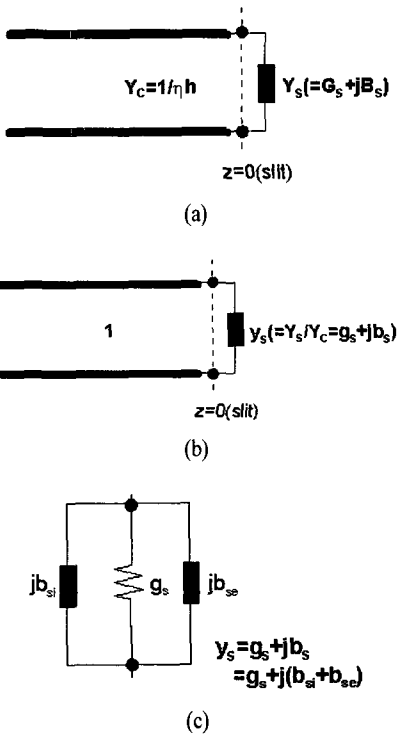


그림 2. 슬릿의 등가어드미턴스
Fig. 2. Equivalent slit admittance.

미한다.

행렬방정식 (2)를 풀어서 슬릿의 전계분포를 얻은 후 슬릿으로부터 반사된 전력 P_r , 도파관 외부로의 결합전력 $P_s (= P_i - P_r)$, 자유공간으로의 복사패턴 등을 구할 수 있다. 그림 2(a)는 제안된 구조에 대한 TEM 모드 등가회로이며 $Y_c (= 1/\eta h)$ 는 도파관의 특성어드미턴스, $Y_s (= G_s + jB_s)$ 는 슬릿의 등가어드미턴스이다. 도파관의 특성어드미턴스로 정규화된 슬릿의 어드미턴스 $y_s (= Y_s/Y_c = g_s + jb_s)$ 에 대한 등가회로 그림 2(b)에 있어서 콘덕턴스 g_s 는 슬릿을 통해 도파관 외부로 결합된 전력($P_s = P_i - P_r$)을 반영하는 것이고, 서셉턴스 b_s 는 슬릿 근처의 무효전력을 반영하는 것이다. 그림 2(c)에서 b_{si} 와 b_{se} 는 슬릿($z=0$)을 경계로 하는 도파관 내부와 외부영역에 축적된 에너지(혹은 무효전력)를 각각 반영하는 것이다. 슬릿을 통해 도파관 외부로 결합된 전력이 최대($P_r \approx 0$ 및 $P_s \approx 1$)가 되는 급전도파관과 슬릿의 임피던스 정합조건은 $y_s = 1 + j0$ 이다.

슬릿양단간의 전압 V_{slit} 은 입사전압 V_{inc} 과 반사

전압($\Gamma_V V_{inc}$)의 합으로

$$V_{slit} = \sum_{n=1}^N V_n \Delta = (1 + \Gamma_V) V_{inc} \quad (4)$$

와 같이 계산되며, 전압 반사계수 $\Gamma_V (= V_{slit}/V_{inc} - 1)$ 로부터 정규화된 슬릿의 등가어드미턴스 y_s 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$y_s = g_s + jb_s = \frac{1 - \Gamma_V}{1 + \Gamma_V} \quad (5)$$

식 (5)로부터 얻은 등가서셉턴스 b_s 를 등가회로 그림 2(c)에서와 같이 b_{si} 와 b_{se} 로 나누어 표현하기 위해 슬릿면($z=0$)을 경계로 하는 슬릿 근처 도파관 내부영역(V_{in})과 외부영역(V_{ex})의 무효전력 Q_{in} 및 Q_{ex} 을 계산하여야 한다. 그림 3에 도시된 바와 같이 도파관 내부영역 V_{in} 과 외부영역 V_{ex} 를 둘러싸는 폐곡면 $S_i (= S_0 + S_c + S_a)$ 와 $S_e (= S_{in} + S_c + S_a)$ 에 대해 포인팅 정리를 적용하고 허수부분을 취함으로써

$$Q_{in(ex)} = \frac{1}{2} \text{Im} \left\{ \oint_{S_i(e)} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot d\mathbf{s} \right\} \quad (6)$$

와 같이 계산된다. 입사 TEM파의 평균 전력이 1로써 정규화된 경우 식 (6)의 적분결과는

$$Q_{in} = \frac{1}{2} \text{Im} \left\{ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N V_m (V_n Y_{mn}^h)^* \right\}, \quad (7)$$

$$Q_{ex} = \Gamma_V - \Gamma_V^* - Q_{in} \quad (8)$$

과 같이 정리되며, 이로부터 슬릿 근처에서 정규화된 총 무효전력은

$$Q_{slit} = Q_{in} + Q_{ex} = 2\text{Im}\{\Gamma_V\} \quad (9)$$

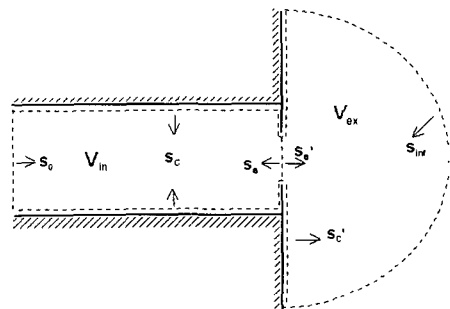


그림 3. 적분경로
Fig. 3. Path of integration.

임을 알 수 있다. 각 영역에서의 무효전력(Q_{in} 및 Q_{ex})으로부터 서셉턴스(b_{si} 및 b_{se})를

$$b_{si(e)} = \frac{Q_{in(ex)}}{Q_{slit}} b_s \quad (10)$$

와 같이 얻을 수 있다.

다음으로 슬릿의 폭이 매우 좁은 경우($a \ll \lambda$)에 대하여 근사해를 구하고 이로부터 슬릿에 근접하는 산란체(scatterers)가 좁은 슬릿을 통한 최대 결합에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 파장에 비해 매우 좁은 슬릿영역의 전계분포 $E_x^A(x)$ 를 균일한 분포로 $E_x^A(x) \approx E_s$ 와 같이 가정하면 행렬방정식 (3)에서 $N=1$, $L=a$, $V_1 = E_s$ 이므로 전계 E_s 를

$$E_s = \frac{2V_{inc}/a}{A + j(B_i + B_e)} = \frac{2V_{inc}/a}{A + jB} \quad (11)$$

와 같이 얻을 수 있고, 여기에서

$$A = 1 + \frac{k_0 \eta h}{2\eta_0}, \quad (12a)$$

$$B_i = 2k_0 \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\cos^2[q\pi(X_a + h/2)/h]}{\sqrt{(q\pi/h)^2 - k^2}} \left[\frac{\sin(q\pi a/2h)}{(q\pi a/2h)} \right]^2, \quad (12b)$$

$$B_e = \frac{k_0 \eta h}{\eta_0 \pi} \left(\log \frac{2}{k_0 a \cdot 1.781} + 1.5 \right) \quad (12c)$$

이다. 식 (5) 및 (11)로부터 정규화된 슬릿의 어드미턴스 y_s 는

$$y_s = (A-1) + jB = (A-1) + j(B_i + B_e) \quad (13)$$

임을 알 수 있다. 슬릿의 폭이 매우 좁은 경우 식 (13)에서 B_i 와 B_e 모두 용량성 성분을 갖는 양(positive)의 값을 갖게 되어 슬릿 자체로는 공진조건($B=0$)을 만족할 수 없으므로 슬릿에 근접한 영역에 유전체 혹은 도체 산란체를 적절히 위치시켜야 한다. 식 (13) 및 (12a)로부터 좁은 슬릿의 콘덕턴스는

$$G_s = g_s Y_c = \frac{k_0}{2\eta_0} = \frac{1}{120\lambda_0} \quad (14)$$

임을 알 수 있는데, 이는 평행 평판 도파관 윗면의 좁은 횡방향 슬릿(narrow transverse slit)의 등가 콘덕턴스^[6]와 높이가 낮은 평행 평판 도파관의 넓은 슬릿의 등가 콘덕턴스^[6] 등과 동일한 값으로 슬릿의 폭

(a)에 무관하게 일정하다. 슬릿의 폭이 0으로 접근해 감에 따라 슬릿의 정규화된 등가 콘덕턴스($g_s = A-1$)는 식 (12a)와 같이 일정하지만 서셉턴스($b_s = B = B_i + B_e$)는 크게 증가되어 어드미턴스는 $|y_s| \approx b_s \gg 1$ 이므로 슬릿은 단락되게 된다^[6].

폭이 좁은 슬릿을 통한 최대결합(혹은 급전도파관의 임피던스 정합) 조건 $y_s = 1 + j0$ 이 만족되기 위해서는 식 (13)에서 $A=2$ 및 $B=0$ 가 되어야 하며, 슬릿 자체로는 불가하므로 슬릿영역 근처에 산란체를 적절히 위치시켜야 한다. 이 때, 근접 산란체에 의한 영향은 결과적으로 식 (11)의 분모에 복소수 $A_s + jB_s$ 를 추가시키는 영향을 주게 되어 E_s 는

$$E_s = \frac{2V_{inc}/a}{(A + A_s) + j(B + B_s)} = \frac{2V_{inc}/a}{A' + jB'} \quad (15)$$

와 같이 변화되며, 이에 따라 어드미턴스도

$$y_s = (A' - 1) + jB' = (A + A_s - 1) + j(B_i + B_e + B_s) \quad (16)$$

로 변화된다. 도파관 외부의 슬릿에 근접한 산란체의 위치, 모양, 크기 등을 적절히 조정하면 $A'=2$ 및 $B'=0$ 가 되어 급전 도파관과 슬릿의 임피던스 정합이 가능할 것으로 기대된다. 이때, 서셉턴스 b_{si} ($=B_i$)는 변화가 없으나 b_{se} ($=B_e + B_s$)는 변화되어 $b_{se} = -b_{si}$ 가 되어야 하며, 이는 $B_i > 0$, $B_e > 0$ 이므로 $B_s = -(B_i + B_e)$ 와 같은 유도성 서셉턴스를 제안된 구조에 제공하여야 한다^[7].

III. 해석결과 및 토의

제안된 그림 1의 구조에 대한 해석결과의 타당성을 점검하기 위해 $X_a = 0$ 인 경우의 등가 어드미턴스 y_s 에 대한 참고문헌 [2]의 결과들과 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 그러나 참고문헌 [2]의 연구에서는 슬릿의 등가 서셉턴스 b_s 를 본 연구의 그림 2(c)와 같이 b_{si} 와 b_{se} 로 분리하여 표현하지 않았으며, 그림 4(a)는 본 논문에서 제시된 방법으로 계산한 것이다. 슬릿의 폭(a)이 도파관의 높이(h)와 동일한 경우($a/h=1$)에는 도파관 내부의 서셉턴스 성분 b_{si} 가 상대적으로 외부의 서셉턴스 성분 b_{se} 에 비해 매우 작은 값으로 유지(특히, 도파관의 높이가 파장

에 비해 매우 작은 경우)되나, 도파관의 높이에 대한 슬릿의 폭이 좁아짐에 따라 b_{si} 의 값의 비중이 증가됨을 관찰할 수 있다.

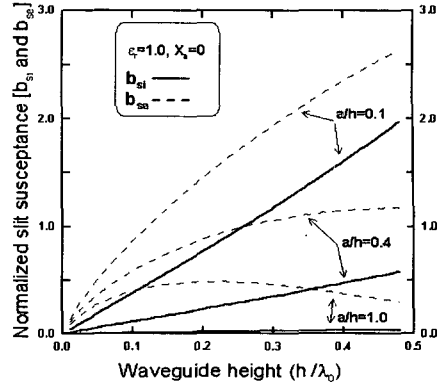
슬릿의 폭이 감소됨에 따라 서셉턴스 b_s 가 지수 함수적으로 증가되는 반면 콘덕턴스 g_s 는 식 (13)로부터 예상된 바와 같이 $g_s = \pi(h/\lambda_0)$ 에 수렴해 가며 해석 결과는 그림 4(b)에 제시된 바와 같다.

그림 4(c)는 도파관 외부로의 결합(복사)전력 P_s 를 나타내며 $alh=1$ 이고 $h \geq 0.27 \lambda_0$ 일 때, $P_s \geq 90\%$ 로 슬릿 근처에 부가적인 장치 없이 도파관 슬릿 자체만으로도 유용한 복사체(radiator)로 동작됨을 볼 수 있다.

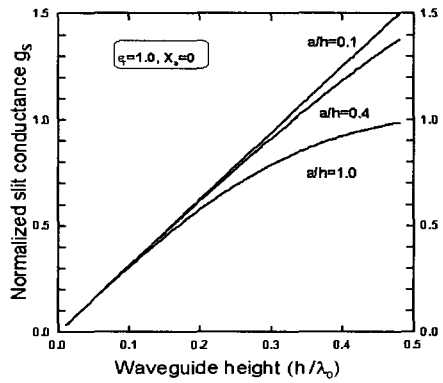
그러나 도파관의 높이(h)가 파장에 비해 매우 낮거나 슬릿의 폭(a)이 매우 작아서 좁은 개구를 형성하는 경우에는 도파관과의 부정합에 의해 결합전력 P_s 가 낮은 값으로 유지되어 플랜지 도파관의 슬릿 자체만으로는 복사체로 동작하기엔 부적합하므로, 도파관 외부의 슬릿 근처에 유전체, 도체 실린더, 도체 스트립 등의 산란체를 적절히 위치시켜서 급전 도파관과의 임피던스정합($y_s = 1 + j0$)을 얻고 결합전력(P_s)을 최대화 할 수 있다.

그림 5는 도파관의 높이 변화에 따른 전압반사계수 Γ_V 를 나타내며, 슬릿의 폭을 $a = 0.001 \lambda_0$ 로 고정시킨 경우와 도파관의 높이에 비해 작은 값을 갖도록 비(ratio)를 $alh=0.1$ 로 고정한 경우의 결과들이다. 도파관의 높이가 파장에 비해 매우 작은 경우 ($h \approx 0.001 \lambda_0$)에는 슬릿의 폭이 도파관의 높이와 동일하게 된 $a = 0.001 \lambda_0$ 의 경우뿐만 아니라 슬릿의 폭이 매우 작은 $alh=0.1$ 인 경우에도 반사계수가 $\Gamma_V \approx 1 \angle 0^\circ$ 이므로 슬릿은 개방회로로 동작됨을 알 수 있다. 이는 평행 평판 도파관 윗면의 좁은 횡방향 슬릿(narrow transverse slit)이 도파관의 높이가 매우 작은 경우에는 개방회로로 동작^[6]하는 것과 매우 유사하다. 이와는 달리 도파관의 높이가 증가된 경우 ($h \approx 0.5 \lambda_0$)에는 슬릿의 폭이 도파관의 높이에 비해 작을수록 반사계수가 $\Gamma_V \approx 1 \angle -180^\circ$ 이므로 단락회로의 특성을 갖게 된다.

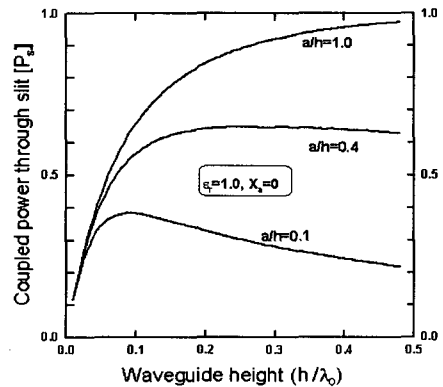
그림 6은 슬릿의 변위 X_a 에 대한 등가 서셉턴스의 변화를 나타낸 것이며, 도파관 외부 서셉턴스 성분 b_{se} 는 변화가 없고 내부 서셉턴스 성분 b_{si} 가 증가된다.



(a) 정규화된 등가 서셉턴스 $b_s (= b_{si} + b_{se})$
 (a) Normalized equivalent susceptance $b_s (= b_{si} + b_{se})$



(b) 정규화된 등가 콘덕턴스 g_s
 (b) Normalized equivalent conductance g_s



(c) 슬릿을 통해 결합된 전력 P_s
 (c) Coupled power P_s through the slit

그림 4. 등가어드미턴스 및 결합전력
 Fig. 4. Equivalent admittance and coupled power.

그림 7은 $alh=1$ 인 경우에 대한 등가 어드미턴스를

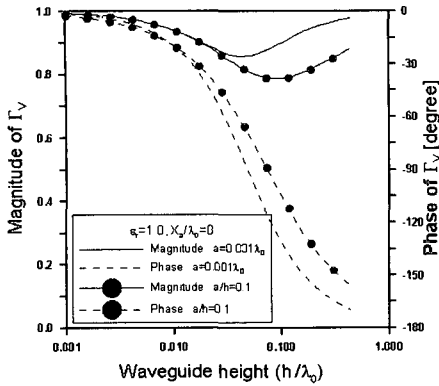


그림 5. 전압반사계수 Γ_V
Fig. 5. Voltage reflection coefficient Γ_V .

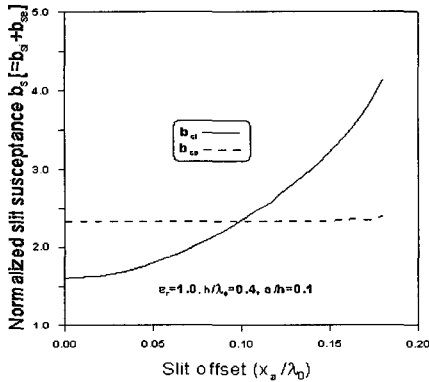


그림 6. 슬릿의 변위 X_a 에 대한 서셉턴스 b_s
Fig. 6. Susceptance b_s against slit offset X_a .

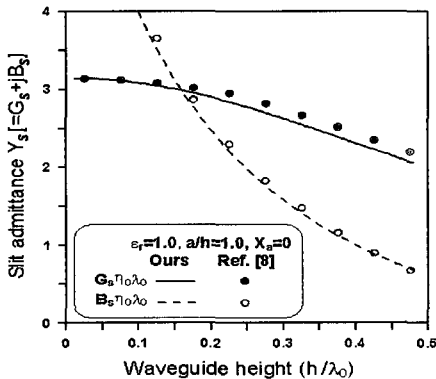


그림 7. 슬릿 어드미턴스
Fig. 7. Slit admittance.

계산한 것이며, 참고문헌 [8]의 결과는 슬릿의 전개 분포를 입사 TEM 모드로 가정하여 근사해석한 것

이다. 흥미롭게도 본 연구의 방법으로 해석한 결과와 참고문헌 [8]의 근사해석 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있다.

본 논문에서는 펄스함수를 기저함수로써 사용하였는데 에지조건(knife edge condition)을 만족하는 가중 Chebyshev 다항식(weighted Chebyshev polynomials)을 기저함수로 택하게 되면 훨씬 작은 개수의 기저함수로 거의 동일한 결과들을 얻을 수 있다^[2].

IV. 결론

플랜지된 평행 평판 도파관의 슬릿을 통한 도파관 외부로의 전자기적인 결합문제를 고려하였다. 슬릿근처 도파관 내부와 외부영역의 무효전력을 각각 계산하고 이를 반영하는 서셉턴스 성분들의 합으로 슬릿의 등가 서셉턴스를 표현하였다. 슬릿의 폭이 좁은 경우 등가 어드미턴스를 구하고 급전도파관과 슬릿의 임피던스 정합(혹은 슬릿을 통한 도파관 외부로의 최대결합) 메커니즘에 관하여 논의하였으며, 도파관의 높이, 슬릿의 폭 및 변위가 결합특성에 미치는 영향에 대하여 관찰하였다. 본 논문의 연구결과는 근접 산란체에 의한 도체판상의 좁은 개구^[9] 혹은 도파관으로 급전된 좁은 슬릿^[5]의 공진 및 최대결합 메커니즘 이해에 유용할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] M. S. Leong, P. S. Kooi and Chandra, "Radiation from a flanged parallel-plate waveguide: solution by moment method with inclusion of edge condition", *Proc. IEE*, pt. H, vol. 135, no. 4, pp. 249-255, Aug. 1988.
- [2] R. W. Scharstein, "Two numerical solutions for the parallel plate-fed slot antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-37, no. 11, pp. 1415-1425, Nov. 1989.
- [3] 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.
- [4] 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.

[5] 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.

[6] J. I. Lee, J. H. Ko and Y. K. Cho, "A note on diffraction and equivalent admittance properties of a transverse slit in a parallel-plate waveguide", *IEICE Trans. Com.*, vol. E86-B, no. 12, pp. 3600-3605,

Dec. 2003.

[7] 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. 592-596, Apr. 2003.

[8] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, New York: McGraw-Hill, 1961.

[9] R. F. Harrington, "Resonant behavior of a small aperture backed by a conducting body", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-30, no. 2, pp. 205-212, Mar. 1982.

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

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

김 강 욱



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1987년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1996년 7월: University of California, Los Angeles. 전자공학과 (공학박사)

1987년~1990년: 한국전기연구소 연구원
 1996년~1998년: University of California Los Angeles. post-doctor 연구원
 1998년~1999년: P-Com, Inc. 마이크로파 설계 연구원
 1999년~2001년: Narda DBS Microwave, RF 설계 연구원
 2001년 9월~현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수

[주 관심분야] 마이크로파 통신시스템 및 서브시스템, 마이크로파 및 밀리미터파 부품 및 패키징, 무선통신용 안테나, 전자기 상호작용 및 전자기 수치해석