

# 유전체로 채워진 유한한 슬롯을 가지는 평행평판 도파관 누설과 안테나 구조에 대한 특성모드 해석

(Characteristic mode analysis for the finite slotted parallel-plate waveguide as a leaky wave antenna structure)

尹利虎\*, 趙榮基\*

(L. H. Yun and Y. K. Cho)

## 요 약

유전체로 채워진 평행평판 도파관의 윗면에 유한한 갯수의 슬롯이 있는 누설과 안테나 구조에 대하여 특성모드 이론(characteristic mode theory)을 사용하여 특성전류, 특성패턴, 복사패턴 그리고 복소 전파상수를 구하였다. 1, 11, 29개 슬롯의 경우 등가자기전류와 복사패턴 그리고 복소 전파상수를 구하였고 이 결과들을 기존의 결과들과 비교하여 매우 잘 일치함을 확인하였다.

## Abstract

A characteristic mode analysis of parallel-plate waveguide with finite number of slots as a leaky wave antenna structure is considered for calculating the characteristic currents, the characteristic patterns, radiation patterns, and the complex propagation constants. For the cases of 1, 11, and 29 slots, numerical results for the equivalent magnetic currents, the radiation patterns, and the complex propagation constants are computed and compared with those obtained by use of the conventional method of moments. Good correspondence between them is observed.

## I. 서 론

1960년대 후반이후 공진영역(resonant region)에서 임의의 형태를 갖는 도체 산란체에 대한 전자기 산란 문제를 해석하기 위하여 특성모드 이론이 연구되어 왔다<sup>[1-3]</sup>. Garbacz 등은 원형 및 타원형 루프, 다이폴 그리고 헬릭스(helix)의 경우에 대해서 산란행렬(scattering matrix)을 대각화(diagonalization)함으로써 몇 개의 특성모드들(characteristic modes)을 계산하

계산하여 산란특성을 구하였고<sup>[1]</sup>, Harrington 등은 특별한 가중 고유방정식(weighted eigenvalue equation)-예를들면 임피던스 행렬 [Z]의 실수부인 저항행렬 [R]을 가중행렬로 선택-을 풀어 Garbacz 등과 동일한 특성모드들을 구하였다<sup>[2,3]</sup>.

1985년경 도체 산란체에 위치한 임의의 크기, 형태를 갖는 개구(aperture)에 대한 전자기산란 및 결합문제를 해석하기 위해 도체 산란체의 경우와 동일한 방법인 가중 고유방정식을 도입하여 특성모드 이론을 전개하는 방법이 연구되었으며<sup>[4]</sup> 이 방법을 이용하여 도체 평판(conducting plane)에 유한한 갯수의 슬롯이 있는 경우, TE 및 TM 입사파가 임의의 각도로 입사할 때 몇 개의 특성값(characteristic values), 특

\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部  
(School of Electronic and Electric Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

接受日字:1997年5月29日, 수정완료일:1997年8月19日

성전류(characteristic currents), 특성패턴(characteristic patterns) 그리고 복사패턴 등을 연구한 결과가 발표되었다<sup>[5]</sup>. 또한 원통좌표계 문제로서 TE의 경우, 외부도체면에 축방향 슬롯이 있는 동축선로 도파관 구조에 대한 전자기 산란문제를 특성모드 이론으로 해석하여 일반적인 모멘트법과 비교된 바 있다<sup>[6]</sup>.

최근에 유전체로 채워진 평행평판 도파관의 윗면에 유한한 갯수의 슬롯이 있는 구조에 대해서 슬롯의 폭이 파장에 비해서 매우 작은 경우에 준정근사(quasi-static approximation)와 특성모드 이론을 이용하여 등가자기전류와 복사패턴을 구하였다<sup>[7]</sup>. 그러나 이들의 연구는 슬롯의 폭이 파장에 비하여 매우 작은 경우에 국한되었기 때문에 복사문제(radiation problem)는 다루지 않았다. 따라서 유한한 주기적인 슬롯을 갖는 평행평판 도파관 누설파 안테나 구조의 경우 평행평판 도파관 내부에서 TEM 파가 인가될 때 누설파 안테나의 복사문제에 대해서 특성모드 이론을 이용한 해석결과가 필요하다고 생각된다.

본 논문에서는 유전체로 채워진 유한한 주기적인 슬롯을 갖는 평행평판 도파관 누설파 안테나 구조에 대한 복사문제를 특성모드 이론을 적용하여 누설파 안테나의 복사특성을 해석하고자 한다. 먼저 1, 11, 29개 슬롯의 경우에 대하여 적분방정식을 세운다음 미지의 복소계수를 포함하는 특성전류를 도입하여 가중 고유방정식을 구하고 이 방정식으로부터 일반적인 수치방법(bisection 방법과 Jacobi 방법)으로 특성값과 특성전류를 계산한다. 계산한 결과들을 이용하여 등가자기전류와 복사패턴을 구하고 이와 병행하여 특성값들에 대응되는 특성전류들 중에서 주된 기여를 하게 되는 몇 개의 특성전류들의 선형적인 합으로 계산되는 등가자기전류로부터 참고문헌 [8]의 식 (4)를 이용하여 복소 전파상수  $\beta - j\alpha$ 를 계산하고, 이 결과를 기존의 모멘트방법을 사용하여 구한, 유한한 갯수의 슬롯에 유기되는 등가자기전류에 대하여 산술적 의미(average sense)에서 구한<sup>[8]</sup> 복소 전파상수를 비교하게 된다.

## II. 본 론

그림 1은 유전체로 채워진 유한한 주기적인 슬롯을 갖는 평행평판 도파관 누설파 안테나 구조이다. 도파관 위의 반무한 자유공간과 도파관 내부의 매질특성은

각각  $(\mu_0, \epsilon_0)$ 와  $(\mu_o, \epsilon_o\epsilon_r)$ 이며 여기에서  $\epsilon_r$ 은 상대유전율이다. 주기와 슬롯폭은 각각  $p, 2a$ 이고, 평행평판 도파관의 높이  $h$ 는  $h/\lambda < 1/2\sqrt{\epsilon_r}$ 의 조건을 만족하여 TEM 모드만이 전파한다고 가정한다. 여기에서  $\lambda$ 는 자유공간 파장이다. 또한 시간조화함수는  $e^{j\omega t}$ 로 생략하였다.

도파관 내부에서 정규화된 입사자장이 인가되면

$$H_z^{inc} = e^{-jk_1x} \quad (1)$$

이다. 여기에서  $k_1(=k_0\sqrt{\epsilon_r})$ 은 도파관 내부의 전파상수이며 괄호안의  $k_0$ 는 자유공간의 전파상수이다.

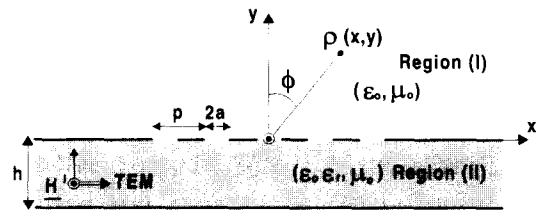


그림 1. 유한한 주기적인 슬롯을 갖는 평행평판 도파관 누설파 안테나 구조

Fig. 1. Parallel plate waveguide with finite number of periodic slots as a leaky wave antenna.

등가원리를 이용하면 그림 1의 문제는 영역 (I)(반무한 자유공간 영역)과 영역 (II)(도파관 영역)로 나누어진다. 각 영역에서 등가자기전류  $M$ 에 기인하는 산란자장들을 구하여 슬롯영역에서 자장의 접선성분이 연속이라는 경계조건을 부과하여 정리하면 등가자기전류를 미지수로 하는 적분방정식은

$$\int M(x') \left[ \frac{k_n}{2\eta_o} H_o^{(2)}(k_n|x-x'|) + j\frac{k_1}{2\eta_1 h} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\epsilon_n}{\gamma_n} e^{-\gamma_n|x-x'|} \right] dx' = e^{-jk_1x} \quad (2)$$

로 주어진다. 여기에서  $H_o^{(2)}(\cdot)$ 는 2종 0차 한켈함수이고,  $\eta_o = \sqrt{\mu_o/\epsilon_o}$ ,  $\eta_1 = \eta_o/\sqrt{\epsilon_r}$ 이며,  $n=0$ 일 때  $\epsilon_n=1$ ,  $n \neq 0$ 일 때  $\epsilon_n=2$ 이고,  $\gamma_n$ 은 x방향의 전파상수로

$$\gamma_n = \begin{cases} jk_1, & n=0 \\ \sqrt{\left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 - k_1^2}, & n \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

이다.

식 (2)의 적분방정식을 operator 방정식으로 변환하면

$$Y(M) = I \quad (4)$$

로 표현되는데 여기에서 operator Y와 I는 각각

$$Y(M) = \int M(x') \left[ \frac{k_0}{2\eta_0} H_0^{(2)}(k_0|x-x'|) + j \frac{k_1}{2\eta_1 h} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\epsilon_n}{\gamma_n} e^{-\gamma_n|x-x'|} \right] dx' \quad (5)$$

$$I = e^{-jk_0 x} \quad (6)$$

로서 주어진다.

식 (4)의 해를 구하기 위해서 먼저 등가자기전류  $M(x')$ 을 서로 직교성질을 갖는 특성전류의 항의 선형적인 합으로 기술할 수 있으므로  $M(x')$ 은

$$M(x') = \sum_{m=1}^{\infty} V_m M_m \quad (7a)$$

$$V_m = \frac{\langle M_m, I \rangle}{1 + jb_m} \quad (7b)$$

로서 주어지고, 여기에서  $V_m$ 은 미지의 복소계수이며,  $b_m$ 은 m번째 특성값이고,  $M_m$ 은 m번째 특성전류(characteristic current)이다. 식 (7)을 식 (5)에 대입하고  $V_m$ 을 제외한 m번째 특성전류  $M_m$ 만에 의한 어드미턴스 operator  $Y(M_m)$ 을 표현하면 이는

$$Y(M_m) = \int M_m \left[ \frac{k_0}{2\eta_0} H_0^{(2)}(k_0|x-x'|) + j \frac{k_1}{2\eta_1 h} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\epsilon_n}{\gamma_n} e^{-\gamma_n|x-x'|} \right] dx' \quad (8)$$

와 같이 표현되며 이로부터 특성전류를 구하기 위하여 가중 고유방정식(weighted eigenvalue equation)을 도입하면<sup>13)</sup>

$$B(M_m) = b_m G(M_m) \quad (9)$$

의 표현식을 얻게 된다. 여기에서  $G(M_m)$ 과  $B(M_m)$ 은 각각 m번째 특성전류  $M_m$ 으로 표현된  $Y(M_m)$ (= $G(M_m) + jB(M_m)$ )의 실수부분과 허수부분이고,  $b_m$ 은 특성값을 의미한다.

식 (9)로부터 m번째 특성값  $b_m$ 과 특성전류  $M_m$ 을 구하기 위하여 기저함수(basis function)를 펄스함수(pulse function)로 선택하면

$$M_m = \sum_{k=-N}^N \sum_{\ell=1}^{N_k} U_{m k \ell} f_{k \ell} \quad (10)$$

$$f_{k \ell} = \begin{cases} 1, & x_{\ell} - \Delta/2 \leq x' \leq x_{\ell} + \Delta/2 \\ 0, & \text{else where} \end{cases}$$

이다. 여기에서  $k$ 는 k번째 슬롯,  $\ell$ 은 k번째 슬롯에서  $\ell$ 번째 segment,  $2N+1$ 은 슬롯의 갯수,  $N_k$ 는 한 슬롯의 segment 수,  $\Delta$ (= $2a/N_k$ )는 한 segment의 폭, 그리고  $U_{m k \ell}$ 은 미지의 실수계수(real coefficient)를 의미한다.

식 (10)을 식 (9)에 대입하고 펄스함수로 테스트하여 정리하면 다음과 같은 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$[B_{r s k \ell}] [U_{m k \ell}] = b_m [G_{r s k \ell}] [U_{m k \ell}]. \quad (11)$$

여기에서 어드미턴스 행렬의 각 성분들은,  $r=k$ 이고  $s=\ell$ 일 때는

$$Y_{r s k \ell} = \frac{k_0 \Delta^2}{2\eta_0} \left[ 1 - \frac{(k_0 \Delta)^2}{24} - j \frac{2}{\pi} \left( \ln \frac{\gamma k_0 \Delta}{2} - \frac{3}{2} \right) \right] + j \frac{k_1 \Delta^2}{2\eta_1 h} \left[ -\frac{2h}{\pi} \left( \ln \frac{\pi \Delta}{h} - \frac{3}{2} \right) + j \left( \frac{k_1 \Delta^2}{12} - \frac{1}{k_1} \right) \right] \quad (12a)$$

로 주어지며, 여기에서  $\gamma$ (= $1.5772\dots$ )는 Euler 상수이고,  $s \neq \ell$ 일 때는

$$Y_{r s k \ell} = \frac{k_0}{2\eta_0} \int_{x_s - \Delta/2}^{x_s + \Delta/2} \int_{x_r - \Delta/2}^{x_r + \Delta/2} H_0^{(2)}(k_0|x-x'|) dx' + j \frac{k_1}{2\eta_1 h} \int_{x_s - \Delta/2}^{x_s + \Delta/2} \int_{x_r - \Delta/2}^{x_r + \Delta/2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\epsilon_n}{\gamma_n} e^{-\gamma_n|x-x'|} dx' \quad (12b)$$

로 표현되므로 이러한 표현식으로부터 Y 행렬의 실수부분과 허수부분을 취하여  $[G_{r s k \ell}]$ 과  $[B_{r s k \ell}]$ 의 각 요소를 구하게 된다.

계속해서 윗식 (11), (12a)와 (12b)를 이용하여 특성값과 특성전류를 구한다음, 이러한 특성전류 항들의 선형적인 합으로 표현된 등가자기 전류와 원거리 자장의 표현식을 계산하여 정리하면

$$M(x') \approx \sum_{k=-N}^N \sum_{\ell=1}^{N_k} \left( \sum_{m=1}^M \frac{1}{1 + jb_m} \left[ \sum_{r=-N}^N \sum_{s=1}^{N_r} U_{m r s} \langle f_{r s}, D \rangle \right] \right) U_{m k \ell} f_{k \ell} \quad (13)$$

$$H_z^i(M) \approx \frac{k_0 \Delta}{2\eta_0} \frac{1+j}{\sqrt{\pi k_0 \rho}} \text{sinc} \left( \frac{k_0 \Delta}{2} \cos \phi \right) \sum_{k=-N}^N \sum_{\ell=1}^{N_k} \left( \sum_{m=1}^M \frac{1}{1 + jb_m} \left[ \sum_{r=-N}^N \sum_{s=1}^{N_r} U_{m r s} \langle f_{r s}, D \rangle \right] \right) U_{m k \ell} e^{jk_0 x' \cos \phi} \quad (14)$$

로서 주어지는 최종의 결과식을 구하게 된다.

### III. 수치해석 및 결과

2N+1개의 유한한 주기적인 슬롯을 갖는 평행평판

도파관 누설과 안테나 구조에 대해서 그림 1에서와 같이 도파관 내부에서 TEM 파가 인가될 때 복사문제를 특성모드 이론을 이용하여 해석하였다. 식 (11)로부터 일반적인 수치방법(bisection 방법과 Jacobi 방법)<sup>[9]</sup>을 사용하여 특성값  $b_m$ 과 특성전류  $M_m$ 을 계산한 다음 식 (13)과 (14)로 주어지는 등가자기전류 및 복사패턴을 구하였고, 참고문헌 [8]의 식 (4)를 이용하여 복소 전파상수를 구하였다.

누설과 안테나 구조를 특성모드로 해석하는 것이 가능하다는 이론의 타당성을 검증하기 위하여 슬롯이 1, 11, 29개의 경우에 대해서 특성모드 방법을 사용하여 그림 1에서와 같이 평행평판 도파관 내부에서 TEM 파가 입사할 때의 등가자기전류, 복사패턴, 복소 전파상수를 구하고자 하는데 먼저 동작주파수가  $f=25\text{GHz}$ 이고,  $\epsilon_r=3.5$ ,  $2a=0.04167\lambda$ ,  $p=0.4167\lambda$ ,  $h=0.2\lambda$ 인 경우에 대하여 1개의 슬롯이 있는 경우에 segment 수  $N_s$ 의 변화에 따른 특성값의 수렴도를 검사하여 표 1에 도시하였다.

표 1. 특성값의 수렴도(1 슬롯)  
Table 1. Convergence of the characteristic values(1 slot).

Segment 수	$b_1$	$b_2$	$b_3$
4	2.992666	57.495159	30060.351280
8	3.046273	59.129132	26704.222408
12	3.067490	60.012622	26709.352489
16	3.078983	60.570345	26893.219798
20	3.086268	60.954597	27070.730920
24	3.088021	61.179506	27224.344683

표 1로부터 더 낮은 차수의 특성값이 더 빨리 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 표 1로부터 충분히 수렴되었다고 생각되는 segment 수인  $N_s=20$ 을 선택하여  $N_s=20$ 일 때 3개의 특성전류를 구하여 그림 2에 도시하였는데 이로부터 특성전류들이 가장자리 조건(edge condition)을 잘 만족함을 확인하였다. 이 경우 첫 번째 특성모드만에 의한 기여(등가자기전류나 복사패턴과 같은 물리량에 대한)에 비하여 다른 특성모드들에 의한 기여는 무시될 수 있으므로 첫 번째 특성모드만에 의하여 등가자기전류를 구한 결과를 기존의 점정합(point matching) 방법으로 구한 결과와 비교하여 그림 3에 도시하였다. 그림 3으로부터 두가지 방법으로 구한 결과가 서로 비교적 잘 일치하지만 특성전류로

구한 등가자기전류는 가장자리 부근에서 불안정한 특성을 가지는 것을 관찰하게 되는데 이는 슬롯의 폭이 파장에 비해 매우 작기 때문이다.

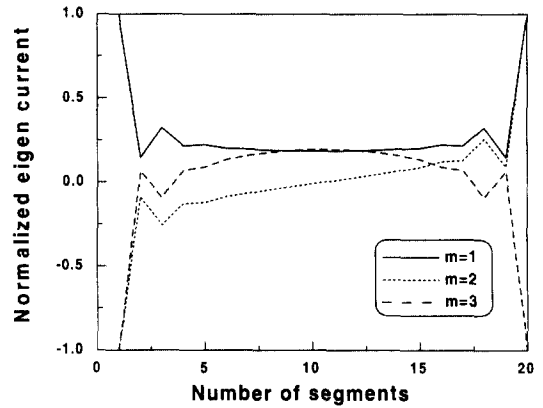


그림 2. 세 개의 정규화된 특성전류  
Fig. 2. The first three normalized characteristic currents.

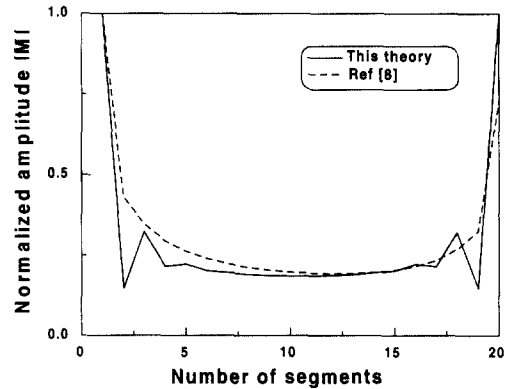


그림 3. 정규화된 등가자기전류(1 슬롯)  
Fig. 3. The normalized equivalent magnetic current (1 slot).

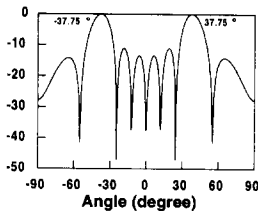
표 2는 11개 슬롯의 경우 segment 갯수  $N_s$ 에 따른 특성값의 수렴도를 조사한 것인데 슬롯이 한 개인 경우보다 더 작은 특성값들이 나타났다. 이때 등가자기전류와 복사패턴은 1개 슬롯의 경우와는 다르게 몇 개의 특성전류들에 의해 결정된다는 사실을 알 수 있었다.  $N_s=20$ 일 때 6개의 특성전류를 계산해서 이에 대응하는 특성패턴들(characteristic patterns)을 구하였고 이를 그림 4에 도시하였다. 또한 특성패턴의 상대적인 크기를 그림 5에 나타내었다. 6개의 특성패턴 중에서 처음 2개의 특성패턴은 나머지 특성패턴들보다 약 24 dB이상의 크기이고, 첫 번째와 두번째 특성패

턴의 주빔의 각도는 각각  $\pm 37.75^\circ(m=1)$ 와  $\pm 39^\circ(m=2)$ 가 관찰되었다. 그림 6은 특성모드 이론으로 구한 누설과 안테나의 복사패턴을 참고문헌 [8]로 구한 결과와 비교한 것이다. 그림 6으로부터, 기여가 큰 두 개의 특성전류에 의한 특성패턴들의 (+) 각도의 주빔들은 서로 상쇄되고, (-)각도의 주빔들은 서로 보강되어 누설과 안테나의 복사패턴을 구성하게 됨을 관찰하게 된다. 이는 복사패턴의 주빔의 각도가 약  $-38.25^\circ$  ( $-37.75^\circ$ 와  $-39^\circ$ 의 평균치)라는 사실로부터 확인할 수 있었다. 또한 특성패턴들의 함으로 구한 안테나 복사패턴의 주빔의 각도와 모멘트법으로 구한  $-37.2596^\circ$  사이에는 약  $1^\circ$  정도의 편차가 관찰되었지만 안테나 복사패턴의 형태는 매우 잘 일치하였다. 이 편차의 원인은 특성모드 이론으로 전개할 때 6개의 특성전류만을 고려했기 때문이다. 그리고 유한한 주기를 가지는 누설과 안테나의 복소 전파상수  $\beta - j\alpha$ 는 식 (13)으로부터 구한 등가자기전류로부터 참고문헌 [8]의 식 (4)를 이용하여 구하면  $934.086 - j5.936972$ 가 되는데 참고문헌 [8]에서의 계산치인  $939.612 - j5.03877$ 와 비교적 잘 일치하는 것을 확인하게 된다.

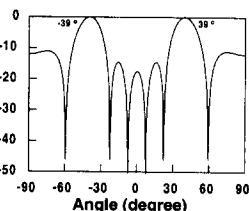
표 2. 특성값의 수렴도(11 슬롯)

Table 2. Convergence of the characteristic values(11 slots).

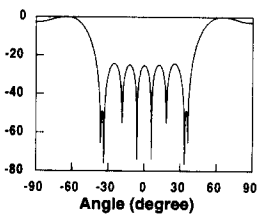
Segment 수	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
4	0.148029	0.306850	2.784350	2.891508	3.796777	5.416306	64.997209
8	0.163834	0.325323	2.831577	2.949098	3.866397	5.491818	65.543110
12	0.170233	0.332864	2.850406	2.972330	3.894627	5.522676	65.942233
16	0.173760	0.337037	2.860743	2.985078	3.910147	5.539699	66.203993
20	0.176020	0.339718	2.867356	2.993233	3.920083	5.550619	66.386811



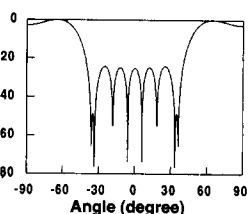
(a) 1번째 특성패턴



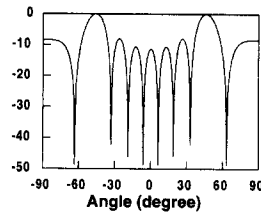
(b) 2번째 특성패턴



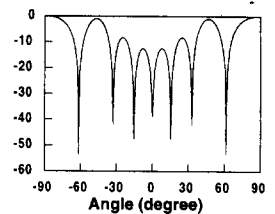
(c) 3번째 특성패턴



(d) 4번째 특성패턴



(e) 5번째 특성패턴



(f) 6번째 특성패턴

그림 4. 6개의 정규화된 특성패턴(11 슬롯)

Fig. 4. The first six normalized characteristic pattern(11 slots).

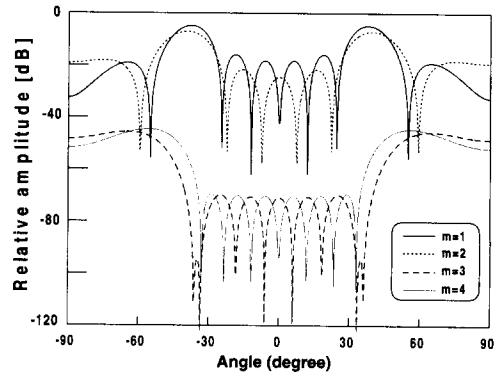


그림 5. 4개의 특성패턴의 상대적인 크기(11 슬롯)

Fig. 5. The relative amplitude of the first four characteristic pattern(11 slots).

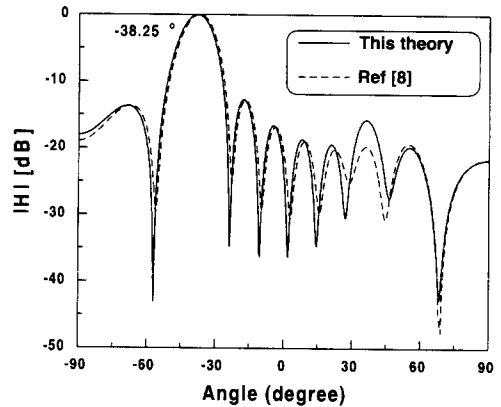


그림 6. 정규화된 복사패턴(11 슬롯)

Fig. 6. The normalized radiation pattern(11 slots).

이때의 오차는 몇 개의 특성전류만을 고려한 결과이지만 또한 슬롯의 수가 적은 경우에 나타날 수 있는 차이이라고 사료된다.

표 3은 29개 슬롯의 경우 특성값의 수렴도를 나타낸 것이다. 11개 슬롯의 경우와 마찬가지로 등가자기전류와 복사패턴은 몇 개의 특성값과 이에 대응되는

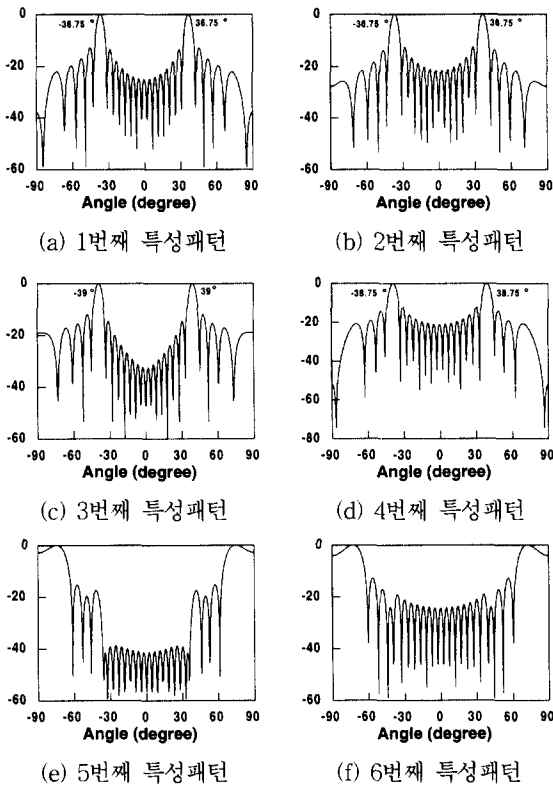


그림 7. 6개의 정규화된 특성패턴(29 슬롯)  
 Fig. 7. The first six normalized characteristic pattern(29 slots).

특성전류에 의존함을 알 수 있었다.  $N_k=16$ 일 때 6개의 특성패턴을 구하여 그림 7에 도시하였는데 처음 4개의 특성패턴의 주빔의 각도는 각각  $\pm 37.75^\circ$  ( $m=1$ ),  $\pm 37.75^\circ$  ( $m=2$ ),  $\pm 39^\circ$  ( $m=3$ ),  $\pm 38.75^\circ$  ( $m=4$ )임을 볼 수 있다. 처음 4개의 특성패턴이 누설파 안테나의 복사패턴을 결정하게 되는데 이를 확인하기 위하여 그림 8에 특성패턴의 상대적인 크기를 도시하였다. 처음 4개의 특성패턴들은 나머지와 약 14 dB이상 차이가 있었다. 그림 9는 특성모드 이론으로 구한 누설파 안테나의 복사패턴을 기존의 방법<sup>[8]</sup>으로 구한 결과와 비교한 것이다. 11개 슬롯의 경우와 같이 (+)각도의 주빔은 서로 상쇄되고 (-)각도의 주빔은 서로 보강되

표 3. 특성값의 수렴도(29 슬롯)

Table 3. Convergence of the characteristic values(29 slots).

Segment 수	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$
4	-1.908846	-1.614516	1.167028	1.313392	2.064406	2.118040	3.053272	3.214404	6.295130
8	-1.814526	-1.534241	1.259480	1.400325	2.105919	2.162114	3.131222	3.290468	6.406448
12	-1.777418	-1.502763	1.297070	1.435654	2.122678	2.179889	3.162316	3.321067	6.451620
16	-1.757204	-1.485639	1.317405	1.455079	2.131832	2.186692	3.179216	3.373748	6.476341

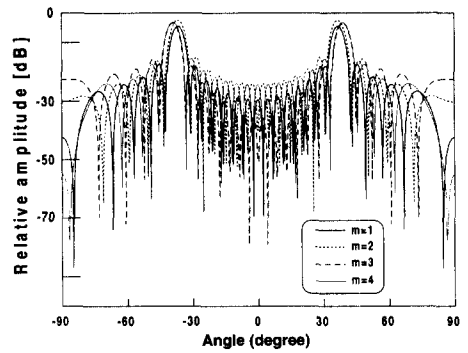


그림 8. 4개의 특성패턴의 상대적인 크기(29 슬롯)  
 Fig. 8. The relative amplitude of the first four characteristic pattern(29 slots).

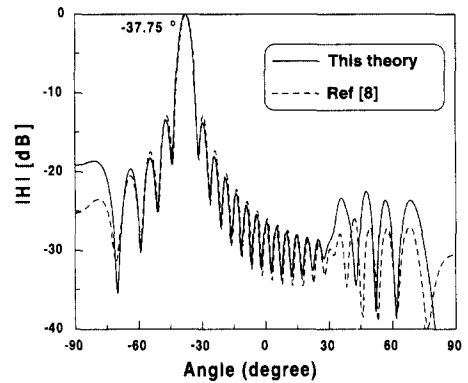


그림 9. 정규화된 복사패턴(29 슬롯)  
 Fig. 9. The normalized radiation pattern(29 slots).

누설파 안테나의 복사패턴을 구성한다는 사실을 알 수 있다. 처음 4개의 특성전류들을 식 (13)에 대입하여 구한 등가자기전류로부터 참고문헌 [8]의 식 (4)를 이용하면 복소 전파상수  $\beta - j\alpha$ 는  $935.703 - j5.577911$ 이고 이로부터 주빔의 각도를 구하면  $-37.75^\circ$ 가 되는데 기존의 수치해석 방법<sup>[8]</sup>으로 계산하면 복소 전파상수  $\beta - j\alpha$ 는  $937.790 - j5.32982$ 이고 주빔의 각도는  $-37.5102^\circ$ 가 되어 특성모드 이론과 기존의 방법으로 계산한 복소 전파상수와 주빔의 각도는 서로 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다. 그러므로 위의 평행평판도파관의 윗면에 1, 11, 29개 슬롯이 있는 구

조에 결과들을 근거로 하여, 본 논문에서 제시한 누설과 안테나 구조에 대하여 특성모드 이론을 적용하면 몇 개의 특성전류만으로 누설과 안테나의 등가자기전류와 복사패턴 그리고 복소 전파상수를 구할 수 있음을 확인하게 된다.

#### IV. 결 론

유전체로 채워진 유한한 주기적인 슬롯을 갖는 평행평판 도파관 누설과 안테나 구조에 대해서 평행평판 도파관 내부에서 TEM 파가 인가될 때의 복사문제를 특성모드 이론을 이용하여 해석하였다. 슬롯에 유기되는 등가자기전류를 미지의 복소계수를 포함하는 특성전류들의 선형적인 합으로 가정하고 행렬방정식을 세운다음 어드미턴스 행렬의 실수부와 허수부를 각각 취하여 원하는 가중 고유방정식(weighted eigenvalue equation)을 구하였다. 1, 11, 29개 슬롯의 경우에 대해서 일반적인 수치방법으로 특성값과 특성전류를 계산하여 이로부터 특성패턴들의 상대적인 크기를 구하여, 몇 개의 특성모드(전류)만으로 누설과 안테나의 등가자기전류와 복사패턴을 구하였고, 참고문헌 [8]로부터 구한 결과들과 비교하여 본 논문에서 제시한 특성모드 방법의 타당성을 검증하였다. 또한 슬롯의 수가 증가할수록 특성모드 이론으로 구한 복소 전파상수  $\beta - ja$ 에 대한 결과와 기존의 방법<sup>[8]</sup>으로부터 구한 결과가 매우 잘 일치함을 확인하였다.

그리고 본 논문에서 다뤄 본 누설과 안테나, 즉 복사문제(radiation problem)의 경우에서 얻은, 특성모드의 특성값과 특성전류는 동차 적분방정식의 해이므로, 입사파가 평행평판 도파관 외부에서 입사될 때의 산란문제(scattering problem)의 경우에도 바로 적용될 수 있다. 그외에 이와 유사한 구조들, 예를들면 유한한 주기적인 슬롯이 있는 동축선로 누설과 안테나에 대해서도 특성모드 이론을 적용하면 효율적인 해석방법이 될 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

[1] R. J. Garbacz and R. H. Turpin, "A

generalized expansion for radiated and scattered fields," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 19, no. 3, pp. 348-358, May 1971.

- [2] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Theory of characteristic modes for conducting bodies," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 19, no. 5, pp. 622-628, Sept. 1971.
- [3] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Computation of characteristic modes for conducting bodies," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 19, no. 5, pp. 629-639, Sept. 1971.
- [4] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Characteristic modes for aperture problem," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 33, no. 6, pp. 500-505, June 1985.
- [5] A. El-Hajj, K. Y. Kabalan, and R. F. Harrington, "Characteristic mode analysis of electromagnetic coupling through multiple slots in a conducting plane," *IEE Proc. H*, vol. 140, no. 6, pp. 421-425, Dec. 1993.
- [6] 윤 리호, 조 영기, "외부 도체면에 축방향 슬롯이 있는 동축선로 도파관의 산란에 대한 특성모드의 해석 : TE의 경우," *전자공학회논문지*, 제 32-A권 7호, pp. 23-29, 1995
- [7] H. A. Auda, "Quasistatic characteristics of slotted parallel-plate waveguides," *IEE Proc. H*, vol. 135, no. 4, pp. 256-262, Aug. 1988.
- [8] C. W. Lee, J. I. Lee, and Y. K. Cho, "Analysis of leaky waves from a periodically slotted parallel-plate waveguide for finite number of slots," *Elect. Lett.*, vol. 30, no. 20, pp. 1633-1634, Sept. 1994.
- [9] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical recipes in fortran*, Cambridge, KALA, 1992.