

論文99-36D-4-4

# 주기적인 슬릿을 갖고 유전체층으로 덮힌 평행평판 도파관에서의 누설과 복사 및 표면파 launching

## (Leaky Wave Radiation and Surface Wave Launching Problems in a Dielectrically Covered Periodically Slitted Parallel-Plate Waveguide)

李 鍾 益 \*, 李 喆 勳 \*\*, 趙 榮 基 \*\*

(Jong-Ig Lee, Cheol-Hoon Lee, and Young-Ki Cho)

### 요 약

유전체로 덮혀 있고 주기적인 슬릿을 갖는 평행평판 도파관에서의 누설과 복사 및 표면파 launching 효율, 안테나 이득, 그리고 복사패턴 등의 수치해석결과들을 제시하였다. 또한 제안된 주기적인 구조를 이용한 표면파 launching 효율의 개선방법을 기술하였으며 최대효율은 이론적으로 97.5%에 이르렀다. 따라서 이 구조는 image 도파관이나 유전체 격자 안테나의 효과적인 급전기로서 유망하리라 사료된다.

### Abstract

Leaky wave radiation and surface wave launching problems in a dielectrically covered and periodically slitted parallel-plate waveguide(PPW) are considered for the TEM wave incidence case. Both the infinite and finite periodic geometries are analyzed by use of the method of moments. Some numerical results for the reflected and transmitted powers in the PPW, radiation efficiency into the free space, surface wave launching efficiency into the slab, antenna gain, and radiation patterns against dielectric thickness are presented to show the effect of the dielectric cover on the performances of the slitted leaky wave antenna. In addition, the method for improving surface wave launching efficiency using the proposed periodic geometry is described and maximum launching efficiency of 97.5% is obtained theoretically. So this structure is thought to be promising as an efficient feeder of dielectric grating antenna as well as image guide.

\* 正會員, 東西大學校 情報通信工學部  
(Division of Information and Communication Eng.,  
Dongseo Univ.)

\*\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部  
(School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook

Nat'l Univ.)

※ 본 논문은 정보통신 연구관리단의 연구 지원으로  
연구된 연구결과의 일부임.

接受日字:1998年6月11日, 수정완료일:1999年3月29日

### I. 서론

접지된 유전체층 위에 도체 스트립이 장하된 스트립 격자구조를 누설과 안테나의 관점에서 다른 기존의 연구들은 무한주기구조에 대한 것들로서 편중되어 있었고, 최근에 발표된 유한한 주기구조에 대한 연구들<sup>[1-3]</sup>에 있어서는 스트립의 폭(혹은 스트립간의 거리)이 스트립의 배열 주기에 비해서 좁은 경우에 대한 해석들로서 제한되어 있었다. 무한한 주기구조에 대한 연구에서는 격자영역을 따른 누설파의 복소전파상수 ( $\gamma = \alpha + j\beta$ )를 구하여 누설파빔의 복사각도, 빔폭 등을 예측<sup>[4]</sup>할 수 있으나, 실제적인 누설파 안테나 구조의 설계에서 필요한 케환손실(return loss), 안테나 효율, 이득 등의 물리량들을 관찰할 수가 없어서 유한한 주기구조에 대한 연구가 요구된다. 2 차원적으로 단순화된 유한한 누설파 구조로서는 윗면에 주기적인 슬릿을 갖는 평행평판 도파관(PPW : parallel-plate waveguide)<sup>[35]</sup>과 주기적인 도체 스트립으로 장하된 접지된 유전체층<sup>[1,2,6]</sup>의 두 가지 구조들이 대표적이다. 그러나 전술된 유한한 누설파 구조들에 대한 연구들에서는 안테나를 물리적으로 외부환경으로부터 보호하고 안테나의 운용 주파수에서 전자기적으로 창(window)의 역할을 하는 레이돔(RADOME)에 대한 영향을 고려한 연구는 매우 드문 실정이다.

본 연구에서는 그림 1에 도시된 바와 같이 유한한 개수의 주기적인 슬릿을 갖는 평행평판 도파관의 윗면이 유전체층으로 덮힌 구조를 누설과 안테나의 관점에서 해석하고 유전체층이 누설과 안테나의 성능에 미치는 영향을 유전체층이 없는 경우에서 관찰되는 현상과 비교하여 살펴보고자 한다. 입사파는 도파관의 TEM 파이고 도파관 내부에서는 TEM파만이 전파될 수 있다고 가정하였다. 슬릿영역에서 전자계의 접선성분의 연속조건으로부터 슬릿의 전계를 미지함수로 하는 적분방식(integral equation)을 얻고, 이를 모멘트 방법(펄스 기저함수 전개 및 점 정합)으로 풀어서 그 해를 구하고자 한다<sup>[7,8]</sup>. 도파관 내부에서의 반사 및 투과 전력, 유전체 슬랩을 따라서 전파되는 표면파(surface wave)의 전력, 유전체 슬랩 위의 자유공간으로 복사되는 공간파(space wave)의 전력, 안테나의 이득, 그리고 자유공간에서의 복사패턴 등을 유전체 슬랩의 두께 변화에 대하여 관찰하여서, 제안된 누설파 구조에서 유전체 슬랩이 누설과 안테나의 성능에

미치는 영향을 점검해 보고자 한다. 이 때 제안된 구조의 슬릿의 개수가 무한개인 무한한 주기적인 구조에 대한 해석도 병행하여서 무한한 주기적인 구조에서의 복소전파상수의 변화가 유한한 주기적인 구조에서 어떠한 물리적인 변화와 상응하는 가를 확인하게 된다. 또한 적절한 격자 구조의 파라미터들을 구성하여서 PPW 내부의 TEM파 전력을 도파관의 윗면을 접지면으로 하는 유전체 도파로의 표면파 전력으로 효율적으로 결합시킬 수 있는 지를 최대 launching 효율을 계산하여 기존에 유전체 실린더 도파관<sup>[9,10]</sup>이나 접지된 유전체 도파관<sup>[11,12]</sup>에서의 최대 launching 효율 95%와 비교해 보고자 한다.

### II. 이론

#### 1. 유한한 누설파 구조에 대한 해석

본 논문에서 다루고자 하는 그림 1의 구조에서 평행평판 도파관, 유전체 슬랩, 자유공간의 매질특성은  $\mu_0, \epsilon_0 \epsilon_r, \mu_0, \epsilon_0 \epsilon_{ra}$  및  $\mu_0, \epsilon_0$  로서 각각 표현되고, 슬릿의 폭(2w)과 주기(d)는 일정한 균일한 구조이며 총 슬릿의 개수는 L이다. 슬릿영역으로 입사되는 평행평판 도파관의 입사파는 TEM파만으로 가정하여

$$E^{inc} = \frac{V}{h} e^{-jkz} \hat{x}, \tag{1a}$$

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

로서 주어지는데, 여기에서 h는 평행평판 도파관의 높이,  $V/h$ 는 입사전계의 진폭,  $k(=k_0\sqrt{\epsilon_r} = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r})$ 는 전파상수,  $\eta(= \eta_0/\sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0\epsilon_r})$ 는 도파관내 매질의 고유임피던스이다.

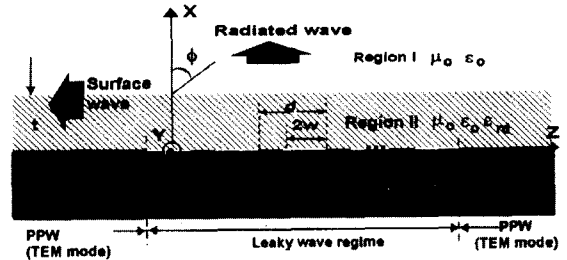


그림 1. 제안된 누설파 구조  
Fig. 1. Leaky wave geometry under consideration.

등가원리를 이용하면 모든 슬릿을 단락시킨 후 각

$\ell$  번째 슬릿의 위치에  $y$ 방향의 등가 자계전류  $\underline{M}_\ell = M_\ell \hat{y} = -E_z(0, z)\hat{y}$ 로 대체할 수 있고, 이로부터 도파관 내부에서의 자계  $H_y$ 는 입사자계( $H_y^{inc}$ )와 슬릿의 등가 자계전류에 의한 자계( $H_y^M$ )의 합<sup>[7,8]</sup>으로서

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

와 같이 표현될 수 있고, 유전체 슬랩 내부 ( $H_y^d = H_y^{M,d}$ )와 자유공간에서의 자계( $H_y^0 = H_y^{M,0}$ )는 등가 자계전류만에 의한 것으로서 표현된다.

슬릿 영역에서의 전자계의 접선성분의 연속조건을 부과하여 슬릿의 등가 자계전류를 미지수로 하는 적분방정식을 얻을 수 있고, 적분방정식을 모멘트 방법(필스기저함수 전개 및 점 정합방법으로 테스트)으로 풀어 미지량인 슬릿에서의 등가 자계전류를 구하면 각 영역(도파관, 유전체 슬랩, 그리고 자유공간)에서의 전자계를 기술할 수 있다. 도파관내에서 TEM모드의 반사 및 투과 전력<sup>[7,8]</sup>은

$$P_r = P_{inc} \left| \frac{1}{2V} \sum_{\ell=1}^L \int_{\ell \text{ th slit}} M_\ell(z') e^{-jkz'} dz' \right|^2, \quad (3a)$$

$$P_t = P_{inc} \left| 1 - \frac{1}{2V} \sum_{\ell=1}^L \int_{\ell \text{ th slit}} M_\ell(z') e^{jkz'} dz' \right|^2 \quad (3b)$$

로서 표현되며, 여기에서  $P_{inc}$ 는 입사된 TEM파의 시평균 전력이다. 슬릿을 통하여 도파관 외부로 결합되는 전력은 Poynting 정리에 의하여

$$P_{slit} = \frac{1}{2} \text{Re} \sum_{\ell=1}^L \int_{\ell \text{ th slit}} M_\ell(z) [H_y^d(z)]^* dz \quad (4)$$

로서 주어지며, 여기에서 \*는 복소공액을 나타낸다. 식 (4)의  $P_{slit}$ 은 유전체 슬랩을 따라서  $(-)$ z 방향으로 전파되는 표면파(surface wave)전력( $P_{surf}^{+(-)}$ )과 자유공간으로 복사된 전력( $P_{rad}$ )으로 나눌 수 있으며, 표면파 전력( $P_{surf} = P_{surf}^+ + P_{surf}^-$ )은 유전체 슬랩 내부와 자유공간에서의 그린함수의 표면과극점(surface wave pole)  $k_s$ 에서의 유수(residue)를 구하여 계산<sup>[7,8]</sup>할 수 있다. 자유공간에서의 far-field  $H_y^0(\rho, \phi)$ 에 대한 표현식은 saddle-point 방법을 이용하여 근사적으로 구할 수 있고, 이로부터 안테나의 이득 Gain과 자유공간으로 복사된 전력  $P_{rad}$ 를

$$\text{Gain [dBi]} = 10 \log_{10} \{ \pi \eta_0 |H_y^0(\rho, \phi)|^2 \rho / P_{inc} \} \quad (5)$$

$$P_{rad} = \frac{\eta_0}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_y^0(\rho, \phi)|^2 \rho d\phi \quad (6)$$

와 같이 계산할 수 있다.

### 2. 무한한 누설과 구조에 대한 해석

주기의 개수가 충분히 큰 유한한 누설과 구조에서 관찰되는 물리적인 현상들은 무한한 주기구조에서와 유사하기 때문에 유한한 주기적인 누설과 구조에 대한 해석과 아울러 무한한 구조에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해서 본 논문에서는 참고문헌<sup>[13]</sup>의 해석방법을 확장하여 적용하였는데 무한한 주기구조에서의 고유치(eigenvalue)인 복소전파상수( $\gamma = \alpha + j\beta$ )를 구하기 위한 고유치 방정식은 아래와 같은 행렬방정식<sup>[13]</sup>으로서 요약된다.

$$\sum_{i=0}^{\infty} f_i Y_{i\ell} = 0 \quad (7)$$

$$Y_{i\ell} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_n H_{\ell n}^* H_{in}$$

$$P_n = \frac{\omega \epsilon_0}{d} \left\{ \frac{\epsilon_r \cot(\alpha_n h)}{j\alpha_n} + \frac{\epsilon_{rd} [\alpha_n^{(d)} \cos \alpha_n^{(d)} t + j\epsilon_{rd} \alpha_n^{(0)} \sin \alpha_n^{(d)} t]}{\alpha_n^{(d)} D_{TM}^{(n)}} \right\}$$

$$\alpha_n^{(0)} = (k_0^2 - \gamma_n^2)^{1/2}, \alpha_n^{(d)} = (k_0^2 \epsilon_{rd} - \gamma_n^2)^{1/2},$$

$$\alpha_n = (k_0^2 \epsilon_r - \gamma_n^2)^{1/2}, \gamma_n = \beta - ja + 2n\pi/a,$$

$$D_{TM}^{(n)} = \epsilon_{rd} \alpha_n^{(0)} \cos \alpha_n^{(d)} t + ja \alpha_n^{(d)} \sin \alpha_n^{(d)} t,$$

$$H_{\ell n} = \pi \omega j_\ell(|2n\pi w/d|) \cdot \begin{cases} (-j)^\ell, & n > 0 \\ (j)^\ell, & n < 0 \end{cases}$$

### III. 해석결과 및 고찰

앞 절에서 제안된 이론을 바탕으로 도파관 내부의 유전체의 유전율이 비교적 낮은( $\epsilon_r = 3.5$ ) 경우와 높은 경우( $\epsilon_r = 9.8$ )로 나누어서 cover(레이돔)로서의 유전체 슬랩이 제안된 누설과 안테나의 성능에 미치는 영향과 평행평판 도파관의 TEM 모드의 입사전력을 슬

릿 영역을 통하여 유전체층의 표면파 전력으로 어떻게 효과적으로 결합시킬 수 있는 지를 살펴보고자 한다.

그림 2는  $\epsilon_r=3.5, \epsilon_{rd}=2.57, d=0.4667\lambda_0, h=0.5d, 2w=0.2d$ 인 경우에서의 유전체의 두께 변화에 대한 무한한 주기적인 구조의 복소전파상수( $\beta - ja$ )를 도시한 것이다. 위상정수  $\beta$ 의 변화가 작은 것에 비해 감쇠상수  $a$ 가 유전체층의 두께가 매우 얇은 경우에 있어서도 민감하게 변화됨을 알 수 있다. 이 때 누설파의  $n=-1$  모드가 복사모드가 되며 누설파 빔의 복사방향  $\phi_{max}$ 가  $\phi_{max} < 0$ 인 후방 누설파 복사(backward leaky wave radiation)의 경우이다.

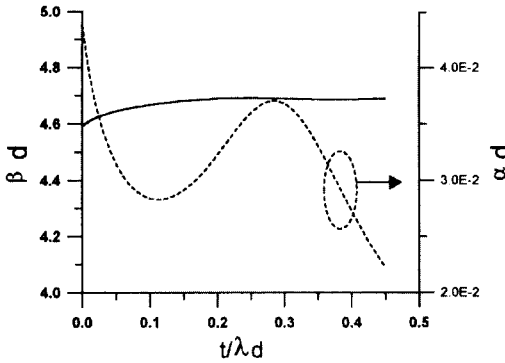


그림 2. 유전체 슬랩의 두께(t) 변화에 대한 무한한 주기구조에서의 복소전파상수( $\beta - ja$ ).  $\epsilon_r=3.5, \epsilon_{rd}=2.57, d=0.4667\lambda_0, h=0.5d, 2w=0.2d$   
 Fig. 2. Complex propagation constant( $\beta - ja$ ) of the infinite periodic structure against dielectric thickness(t).  $\epsilon_r=3.5, \epsilon_{rd}=2.57, d=0.4667\lambda_0, h=0.5d, 2w=0.2d$ .

그림 3과 4는 제안된 유한한 주기구조에서 총 슬릿의 개수를  $L=40$ 으로 택하였을 때 여러 가지 물리량들의 변화를 그린 것인데 편의상 TEM파의 입사전력  $P_{inc}$ 는 1로 하였다. 도파관 내부에서 슬릿영역을 지나 투과된 전력  $P_t$ 는 근사적으로  $(1 - P_r)\exp(-aLd)$ 이고 슬릿을 통해 도파관 외부영역으로 결합된 전력  $P_{slit}$ 은 전력보전관계로부터  $P_{slit} \approx 1 - P_r - P_t$  이므로,  $P_t$ 와  $P_{slit}$ 은 그림 2에서의 감쇠상수의 변화와 부합하여 변화됨을 관찰할 수 있다. 유전체층의 두께가  $t=0.2 \sim 0.3\lambda_a$  ( $\lambda_a = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_{rd}}$ ) 부근에서는 표면파 전력( $P_{surf} = P_{surf}^+ + P_{surf}^-$ )이 작은 값으로 유지되고 자유공간으로의 복사효율  $P_{rad}$ 가  $t=0$ 인 경우와 비교하여 큰 차이가

없음을 알 수 있다.

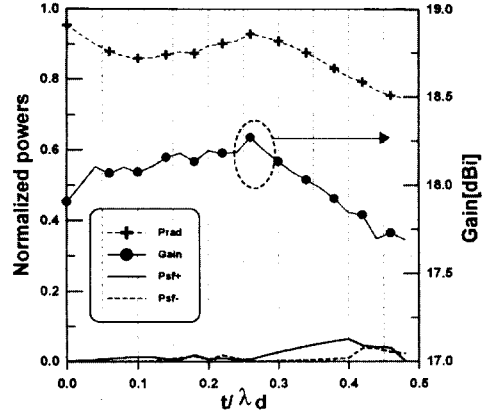


그림 3. 유전체 슬랩의 두께(t) 변화에 대한 복사 전력( $P_{rad}$ ), 표면파 전력( $P_{surf} = P_{surf}^+ + P_{surf}^-$ ), 안테나 이득(Gain).  $\epsilon_r=3.5, \epsilon_{rd}=2.57, d=0.4667\lambda_0, h=0.5d, 2w=0.2d, L=40$   
 Fig. 3. Radiated power( $P_{rad}$ ), surface wave power ( $P_{surf} = P_{surf}^+ + P_{surf}^-$ ), and antenna gain(Gain) against dielectric thickness(t).  $\epsilon_r=3.5, \epsilon_{rd}=2.57, d=0.4667\lambda_0, h=0.5d, 2w=0.2d, L=40$ .

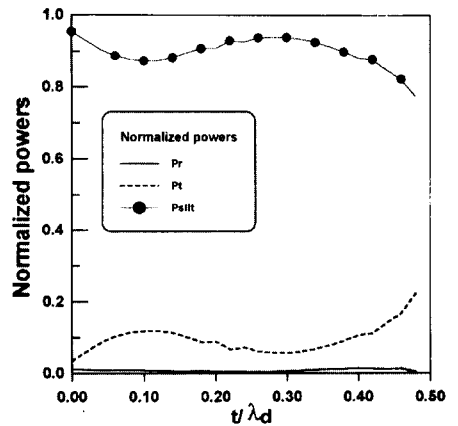


그림 4. 유전체 슬랩의 두께(t) 변화에 대한 반사전력( $P_r$ ), 투과 전력( $P_t$ ), 슬릿을 통해 결합된 전력( $P_{slit}$ ).  $\epsilon_r=3.5, \epsilon_{rd}=2.57, d=0.4667\lambda_0, h=0.5d, 2w=0.2d, L=40$   
 Fig. 4. Reflected( $P_r$ ) and transmitted( $P_t$ ) powers, and coupled power through the slits( $P_{slit}$ ) against dielectric thickness(t).  $\epsilon_r=3.5, \epsilon_{rd}=2.57, d=0.4667\lambda_0, h=0.5d, 2w=0.2d, L=40$ .

또한 투과전력  $P_t$  가 비교적 작은 값이지만  $t=0$ 인 경우에 비해 다소 큰 것을 볼 수 있는데 이는 그림 2에서의 감쇠 상수가  $t=0$ 인 경우에 비해서  $t > 0$ 인 전 영역에서 작은 값이 되기 때문이며 충분한 누설과 복사를 얻기 위해서는 슬릿의 총 개수를 증가시켜야 한다.

그림 5는 슬랩이 없는  $t=0$ 인 경우와 표면파 전력이 최소가 되고 이득이 최대가 되는  $t=0.26\lambda_d$ 인 경우에서의 복사패턴을  $L=60$ 일 때 비교한 것이다. 유전체층이 없는  $t=0$ 인 경우에 비해  $t=0.26\lambda_d$ 일 때 누설파빔의 최대 복사각이 위상정수  $\beta$ 의 증가로 인하여 약간 broadside 방향으로 이동(2.5 degree 정도)하고 감쇠 상수의 감소로 인하여 빔이 예리해지고 측엽의 level이 상대적으로 감소되며  $\pm 90^\circ$  부근에서는 표면파의 영향으로 공간파(space wave)가 0이 됨을 볼 수 있다. 참고로  $t=0$ 인 경우에서  $P_r=1.15\%$ ,  $P_t=0.63\%$ ,  $P_{rad}=98.25\%$ , Gain=18.97 [dBi] 이고  $t=0.26\lambda_d$ 인 경우에는  $P_r=0.38\%$ ,  $P_t=0.2\%$ ,  $P_{surf}=0.57\%$ ,  $P_{rad}=98.85\%$ , Gain=19.37 [dBi] 이다.

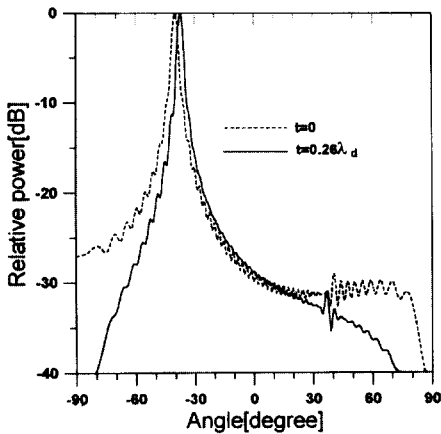


그림 5. 복사패턴.  $\epsilon_r=3.5$ ,  $\epsilon_{rd}=2.57$ ,  $d=0.4667\lambda_0$ ,  $h=0.5d$ ,  $2w=0.2d$ ,  $L=60$   
 Fig. 5. Radiation pattern.  $\epsilon_r=3.5$ ,  $\epsilon_{rd}=2.57$ ,  $d=0.4667\lambda_0$ ,  $h=0.5d$ ,  $2w=0.2d$ ,  $L=60$ .

그림 6은 도파관 내부의 유전체의 유전율이 앞서의 경우보다 다소 높은  $\epsilon_r=9.8$ 이고  $\epsilon_{rd}=2.57$ ,  $d=0.4\lambda_0$ ,  $h=0.25d$ ,  $2w=0.1d$ 인 경우에서의 유전체의 두께 변화에 대한 무한주기구조의 복소전파상수를 도시한 것이다. 그림 2에서와 같이 위상정수의 변화는 감쇠정수의

변화에 비해 작으나  $t=0$ 인 경우에 비해서  $t=0.28\lambda_d$  근처에서는 감쇠정수가 다소 커짐을 볼 수 있다. 이때 누설파의  $n=-1$  모드가 복사모드가 되며 누설파 빔의 복사방향  $\phi_{max}$ 가  $\phi_{max} > 0$ 인 전방 누설파 복사(forward leaky wave radiation)이다.

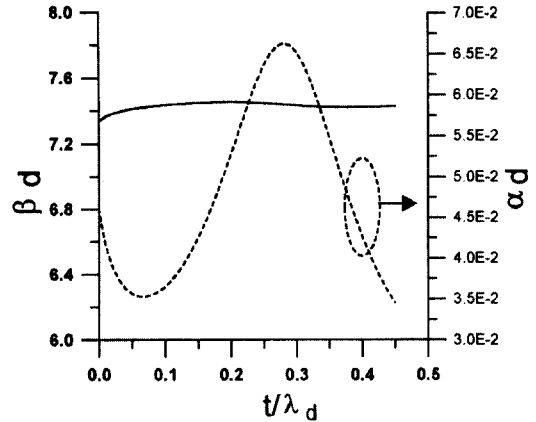


그림 6. 유전체 슬랩의 두께(t) 변화에 대한 무한한 주기구조에서의 복소전파상수( $\beta - ja$ ).  $\epsilon_r=9.8$ ,  $\epsilon_{rd}=2.57$ ,  $d=0.4\lambda_0$ ,  $h=0.25d$ ,  $2w=0.1d$   
 Fig. 6. Complex propagation constant( $\beta - ja$ ) of the infinite periodic structure against dielectric thickness(t).  $\epsilon_r=9.8$ ,  $\epsilon_{rd}=2.57$ ,  $d=0.4\lambda_0$ ,  $h=0.25d$ ,  $2w=0.1d$ .

그림 7과 8은 유한한 주기구조( $L=40$ )에서의 여러 가지 전력들과 안테나 이득을 계산한 것이다.

감쇠정수가  $t=0$ 인 경우에 비해서 작은 경우에는 슬릿 영역을 통하여 충분한 복사가 일어나지 않아서 투과전력이 약 10%정도까지 되지만 감쇠정수가 큰 부분에서는 투과전력이 작은 값으로 유지됨을 볼 수 있다.

그러나 감쇠정수는 큰 값이어서  $P_{slit}$ 이 큰 값으로 유지된다 할지라도 그 중에서 표면파전력이 차지하는 비중이 커지면 안테나의 복사효율( $P_{rad}$ )이 떨어지게 되므로 유전체의 두께  $t$ 는 표면파전력과 도파관 내부의 투과전력이 작은 값으로서 유지되는 약  $0.17 \sim 0.3\lambda_d$ 로서 선택하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 이 영역에서는 안테나의 복사전력은 큰 값이지만 이득이  $t=0$ 인 경우에 비해 최대 약 0.5dB 정도 감소됨을 볼 수 있는데 이는 감쇠정수가 증가하면 그림 9에서 보는 바와 같이 누설파의 빔폭이 넓어지기 때문이다.

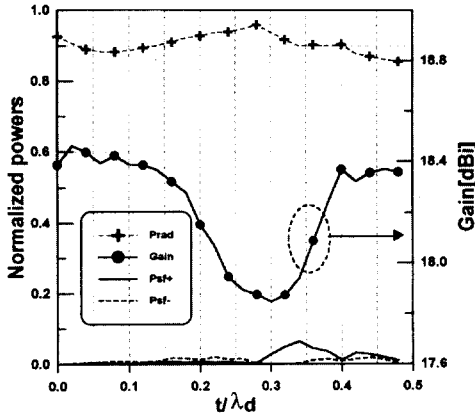


그림 7. 유전체 슬랩의 두께(t) 변화에 대한 복사전력 ( $P_{rad}$ ), 표면파 전력 ( $P_{surf} = P_{surf}^+ + P_{surf}^-$ ), 안테나 이득(Gain).  $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\epsilon_{rd} = 2.57$ ,  $d = 0.4\lambda_0$ ,  $h = 0.25d$ ,  $2w = 0.1d$ ,  $L = 40$

Fig. 7. Radiated power( $P_{rad}$ ), surface wave power ( $P_{surf} = P_{surf}^+ + P_{surf}^-$ ), and antenna gain(Gain) against dielectric thickness(t).  $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\epsilon_{rd} = 2.57$ ,  $d = 0.4\lambda_0$ ,  $h = 0.25d$ ,  $2w = 0.1d$ ,  $L = 40$ .

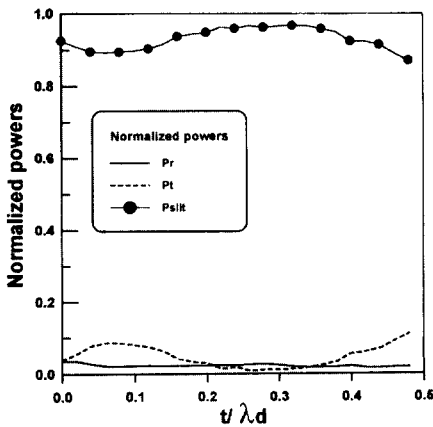


그림 8. 유전체 슬랩의 두께(t) 변화에 대한 반사전력 ( $P_r$ ), 투과 전력( $P_t$ ), 슬릿을 통해 결합된 전력( $P_{slit}$ ).  $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\epsilon_{rd} = 2.57$ ,  $d = 0.4\lambda_0$ ,  $h = 0.25d$ ,  $2w = 0.1d$ ,  $L = 40$

Fig. 8. Reflected ( $P_r$ ) and transmitted ( $P_t$ ) powers, and coupled power through the slits( $P_{slit}$ ) against dielectric thickness(t).  $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\epsilon_{rd} = 2.57$ ,  $d = 0.4\lambda_0$ ,  $h = 0.25d$ ,  $2w = 0.1d$ ,  $L = 40$ .

위에서 살펴본 현상들에 있어서는 누설파 모드들 중에서 복사모드에 해당하는  $n = -1$  모드의 진폭이 다른

모드의 진폭에 비해서 우세하여서 자유공간으로의 누설과 복사 현상이 뚜렷이 관찰되는 경우들이었으나 유전체층의 유전율이 높아지면 복사모드의 진폭에 비해 다른 모드들(예를 들면  $n = 0, 1$ )의 진폭이 증가되어서 자유공간으로의 복사효율( $P_{rad}$ )은 떨어지고 도파관 내부의 투과전력( $P_t$ )이나 유전체 슬랩을 따른 표면파 전력( $P_{surf}$ )이 증가하여 누설파 안테나로서의 성능이 저하됨을 관찰할 수 있었다.

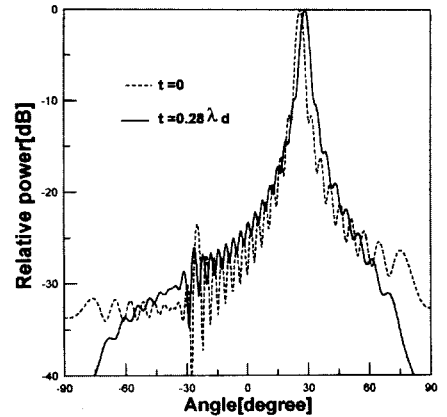


그림 9. 복사패턴.  $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\epsilon_{rd} = 2.57$ ,  $d = 0.4\lambda_0$ ,  $h = 0.25d$ ,  $2w = 0.1d$ ,  $L = 40$

Fig. 9. Radiation pattern.  $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\epsilon_{rd} = 2.57$ ,  $d = 0.4\lambda_0$ ,  $h = 0.25d$ ,  $2w = 0.1d$ ,  $L = 40$ .

이상의 결과들로부터 도파관 내부의 유전체의 유전율에 비하여 다소 유전율이 낮고 적절한 두께를 갖는 유전체 슬랩을 누설파안테나의 cover로서 사용하여서 안테나 이득, 복사효율, 임피던스 정합, 복사빔의 방향 등의 전자기적인 관점에서의 도파관 슬롯안테나의 성능을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문의 구조를 바라보는 다른 관점으로는 도파관으로부터 입사된 TEM파의 전력이 유전체 슬랩의 표면파 전력으로 어느 정도 결합될 수 있는 지(또는 그 반대의 경우로서 유전체 슬랩에 표면파가 입사되었을 때 도파관 내부로 결합된 전력이 어떠한 경우에 잘 결합되는 지)를 살펴보는 연구가 있을 수 있다.

그림 10과 11은  $\epsilon_r = 2.57$ ,  $\epsilon_{rd} = 9.8$ ,  $d = 0.245\lambda_0$ ,  $h = 0.2037d$ ,  $t = 0.4\lambda_d$ ,  $2w = 0.1d$ 일 때 슬릿의 총 개수 L의 변화에 대한 도파관 내부와 유전체층의 전력의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 무한한 주기적인 구조에서는 누설파의 복사모드가 존재하지 않고 격자구조를

다른 도파모드만이 존재하는 경우이며 슬릿영역을 통해 도파관 외부로 결합된 전력( $P_{slit}$ )이 급격히 증가됨을 볼 수 있다. 결합된 전력 중에서 자유공간으로 복사된 전력( $P_{rad}$ )과  $+z$  방향으로 도파되는 표면파 전력( $P_{surf}^+$ )이 매우 작은 값이 되고 대부분의 전력이  $-z$  방향으로 도파되는 표면파의 전력( $P_{surf}^-$ )으로 변환됨을 관찰할 수 있다.

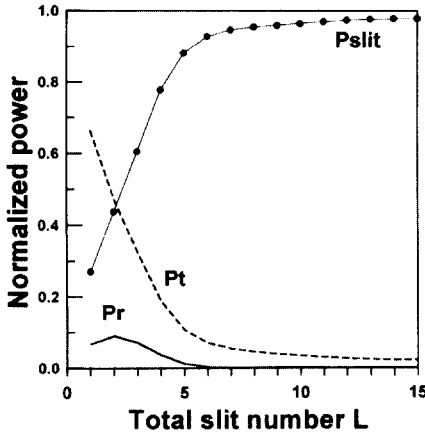


그림 10. 슬릿의 총 개수 L의 변화에 대한 반사전력 ( $P_r$ ), 투과 전력( $P_t$ ), 슬릿을 통해 결합된 전력( $P_{slit}$ ).  $\epsilon_r=2.57$ ,  $\epsilon_{rd}=9.8$ ,  $d=0.245\lambda_0$ ,  $h=0.2037d$ ,  $t=0.4\lambda_a$ ,  $2w=0.1d$

Fig. 10. Reflected ( $P_r$ ) and transmitted ( $P_t$ ) powers, and coupled power through the slits( $P_{slit}$ ) against total number L of slits.  $\epsilon_r=2.57$ ,  $\epsilon_{rd}=9.8$ ,  $d=0.245\lambda_0$ ,  $h=0.2037d$ ,  $t=0.4\lambda_a$ ,  $2w=0.1d$ .

이 현상을 보다 세밀히 살펴보기 위해 도파관 윗면을 접지면으로 하는 유전체 도파관을 따른 표면파의  $z$  방향 전파상수  $k_s(=2.522k_0)$ 를 계산하면, 도파관 내부의 전파상수  $k(=1.603k_0)$  및 주기  $d=0.245\lambda_0$ 와  $(k_s+k)d/(2\pi)=1.01$ ,  $(k_s-k)d/(2\pi)=.225$ 의 관계를 갖음을 확인할 수 있다. 이것은 도파관으로 입사된 TEM파 중에서 각 슬릿을 통해 도파관 외부로 결합된 것은 유전체 슬랩을 따라  $(-)$  $z$  방향으로 전파되는데 그 중에서  $-z$  방향으로 전파되는 표면파가 보강간섭(위상이 약  $2\pi$ )을 일으켜서  $+z$  방향으로 전파되는 전력( $P_{surf}^+$ )은 매우 작은 값이 되고 대부분의 전력이  $-z$  방향으로 전파( $P_{surf}^-$ )되기 때문이며, 잘 알려진 도파관의 방향성 결합기의 동작원리와 유사하다.

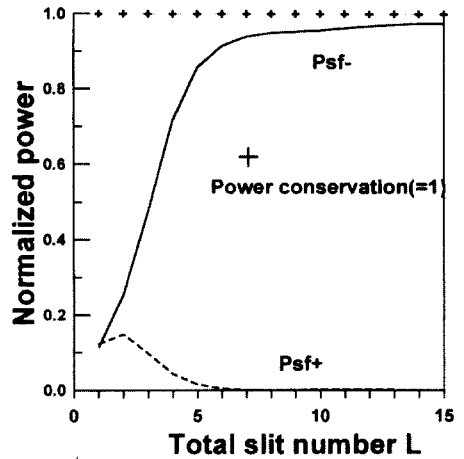


그림 11. 슬릿의 총 개수 L의 변화에 대한 표면파 전력( $P_{surf}=P_{surf}^++P_{surf}^-$ ).  $\epsilon_r=2.57$ ,  $\epsilon_{rd}=9.8$ ,  $d=0.245\lambda_0$ ,  $h=0.2037d$ ,  $t=0.4\lambda_a$ ,  $2w=0.1d$

Fig. 11. Surface wave power ( $P_{surf}=P_{surf}^++P_{surf}^-$ ) against total number L of slits.  $\epsilon_r=2.57$ ,  $\epsilon_{rd}=9.8$ ,  $d=0.245\lambda_0$ ,  $h=0.2037d$ ,  $t=0.4\lambda_a$ ,  $2w=0.1d$ .

그림 10과 11에서 관찰되는 바와 같이 격자영역의 길이를 약  $2\lambda_0(L=8)$ 로 하였을 때 95%정도 이상의 launching 효율( $P_{surf}^-$ )을 얻을 수 있으며 최대 효율이 약 97.5%( $L=15$ )에 이르는 것을 확인할 수 있는데, 이는 다양한 급전구조를 이용한 유전체 실린더 도파관과 접지된 유전체 도파관(image guide)으로의 표면파 launching 효율의 개선에 관한 기존의 연구들<sup>[9-12]</sup>에서 확인된 최대 95%정도의 효율과 비견될만한 값이다. 이 결과들로부터 제안된 주기적인 구조가 밀리미터파 대역에서의 표면파 launching 소자로서 응용될 수 있음을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제시된 수치 해석결과들의 타당성은 전력보전관계( $P_r+P_t+P_{slit}=P_{inc}=1$ ,  $P_{slit}=P_{rad}+P_{surf}$ )를 점검하여 확인하였다.

#### IV. 결론

주기적인 슬릿을 갖는 평행평판 도파관의 윗면이 유전체층으로 덮힌 유한한 격자구조를 누설과 안테나의 관점에서 무한한 주기구조와 유한한 주기구조를 모멘트방법을 적용하여 해석하고 유전체층의 두께의 변화에 따른 복소전파상수, 도파관 내부에서의 반사 및 투과 전력, 슬릿을 통해서 도파관 외부로 결합된 전력,

표면파 launching 효율, 복사효율, 복사패턴, 이득 등의 변화를 관찰하여서 유전체층이 누설파 안테나의 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 적절한 주기구조를 구성하여 도파관의 입사전력이 유전체층의 표면파 전력으로 대부분(97.5%)이 결합될 수 있음을 관찰하여 제안된 구조가 밀리미터파 대역의 유전체 안테나와 유전체 image 도파관의 급전부로서 응용되기에 매우 유망함을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] V. I. Kalinichev and Y. V. Kuranov, "Surface Wave Diffraction by a Finite Metal Grating and Numerical Model for Design of Leaky-Wave Antennas," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol. 1, pp. 282-284, Oct. 1991.
- [ 2 ] V. I. Kalinichev, "Diffraction Characteristics of a Finite Metal-Strip Grating Integrated with a Planar Dielectric Waveguide," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E78-C, pp. 1447-1452, Oct. 1995.
- [ 3 ] V. I. Kalinichev, "Analysis of Planar Slot Arrays Using Magnetic Currents and Magnetomotive Force," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-43, pp. 131-136, Feb. 1995.
- [ 4 ] A. Hessel, "On the influence of complex poles on the radiation pattern of leaky-wave antennas," *IRE Trans. Antennas Propagat.*, pp. 646-647, Sep. 1962.
- [ 5 ] 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," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 20, pp. 1633-1634, Sept. 1994.
- [ 6 ] Jong Ig Lee and Young Ki Cho, "Electromagnetic scattering by finite periodic strip grating on a grounded dielectric slab," *1997 IEEE AP-S (Antennas and Propagation Society)/URSI Joint Meeting, AP-S Digest*, pp. 298-301, Montreal, Canada, June 1997.
- [ 7 ] R. D. Nevels and C. M. Butler, "Coupling through a slot in a parallel-plate waveguide covered by a dielectric slab," *AEU*, pp. 46-53, 1988.
- [ 8 ] 이 중익, 조 영기, "내부에 도체실린더를 갖는 유전체 슬랩으로 덮힌 평행평판도파관의 슬릿을 통한 전자기적 결합," *전자공학회 논문지*, 33-A(1): 41-50 (1996)
- [ 9 ] R. H. DuHamel and J. W. Duncan, "Launching efficiency of wires and slots for a dielectric rod waveguide," *IRE Trans. Microwave Theory and Tech.*, pp. 277-284, July 1958.
- [ 10 ] J. W. Duncan, "The efficiency of excitation of a surface wave on a dielectric cylinder," *IRE Trans. Microwave Theory and Tech.*, pp. 257-268, April 1959.
- [ 11 ] A. L. Cullen and J. A. Staniforth, "The launching of surface waves by an end-fire array of slots," *Proc. IEE*, pp. 492-495, June 1961.
- [ 12 ] W. K. McRitchie and J. C. Beal, "Yagi-Uda array as a surface-wave launcher for dielectric image lines," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-20, no. 8, pp. 493-496, August 1972.
- [ 13 ] Y. K. Cho, U. H. Cho, and J. H. Ko, "TM-polarized electromagnetic scattering from a periodic strip array on a grounded dielectric," *Microwave and Optical Technology Lett., John Wiley & Sons*, vol. 11, pp. 41-45, Jan. 1996.



— 저 자 소 개 —



**李 鍾 益(正會員)**

1967년 1월 6일생. 1992년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1998년 8월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1998년 3월 ~ 12월 금

오공과대학교 전자공학부 연구교수. 1999년 3월 ~ 현재 동서대학교 정보통신공학부 전임강사. 주관심분야는 전자기산란 해석 및 응용, 평면형 안테나

**李 喆 勳(正會員) 第 34卷 D編 第 5號 參照**

현재 경북대학교 전자전기공학부 박사과정

**趙 榮 基(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照**

현재 경북대학교 전자전기공학부 교수