

# 誘電體 導波管 格子構造에서 TM-TE 모드 變換에 관한 研究

## (A Study of the TM-TE Mode Conversion in Dielectric Waveguide Grating Structures)

朴 東 徹\*

(Dong Chul Park)

### 要 約

밀리미터파대에서 응용 가능한 유전체 도파관 격자구조를 이미지 가이드 형으로 설계하는 방법을 제시하였으며, 이 설계방법으로 홈이 옆에 파인 격자구조를 설계하여 제작하였다.

이 격자들을 TE와 TM모드로 각각 여기시켜서 얻은 삽입 손실특성을 토대로 하여 TM-TE 모드 변환 관계를 모드의 대칭성과 관련시켜 규명해 보았다.

### Abstract

A design method of dielectric image-guide grating structures which are applicable for the millimeter-wave systems is presented. A dielectric image-guide grating with notches in the sides and also another grating with notches in the top have been designed, fabricated and tested with TM-and TE-mode excitations. From the experimental results the relation between TM-TE mode coupling and mode symmetry in the grating structure has been investigated.

### I. 서 론

금속 도파관이나 동축케이블이 마이크로파 회로에 사용되고 있듯이 유전체 도파관은 집적 광회로에서 광도파로로 광범위하게 사용되어 왔다. 최근들어 밀리미터파의 시스템 응용에 대한 관심이 증대됨에 따라 광회로에서 많이 쓰이던 유전체 도파관의 원리를 밀리미터파 회로에 적용시키기 위해 밀리미터파 유전체 도파관에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 아울러 유전체 도파관에 주기적인 변형을 주어 만든 유전체 도파관 격자구

조는 밀리미터파 및 광파 영역에서 격자 결합기, 격자 필터, 광속 분할기, 파장 분할 다중화기 등과 같은 수동소자로의 응용에서부터 분포 케환 레이저 등과 같은 능동소자로의 응용에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있다.

Peng과 Oliner<sup>[1]</sup>는 폭이 넓은 슬랫형 유전체 도파관 격자구조에 파동이 비스듬히 입사할 때 TM-TE 혹은 TE-TM 모드 결합 현상이 일어남을 지적하였다. 이 모드 결합 현상은 격자 필터를 광대역에서 응용하고자 할 때 필터의 특성을 저하시킬 수 있다. 왜냐하면 격자의 원하는 저지대역 바로 인접된 곳에 모드 결합으로 인하여 원하지 않는 저지대역이 형성될 수 있어서 실제 시스템 응용에 문제점을 야기시킬 수 있기 때문이다.

Shigesawa<sup>[2]</sup>는 밀리미터파 유전체 도파관의 일종인 H-가이드에 격자구조를 제작해 실험한 결과 Peng과

\*正會員, 忠南大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Chungnam Nat'l Univ.)

接受日字: 1987年 2月 11日

(※ 본 연구는 1985년도 후반기 한국과학재단 연구비 지원에 의해 이루어진 것임)

Oliner가 지적한 TM과 TE 모드간의 두드러진 결합 현상을 얻은 반면에 Matthaei와 Park<sup>(4,5)</sup>은 이미지 가이드 격자구조의 실험에서 TM과 TE 모드간의 두드러진 결합 현상을 발견하지 못하였다. 여기서 H-가이드란 사각 유전체봉 양옆에 두개의 평행 도체판이 밀착된 구조이며 이미지 가이드는 평행판 도체판 위에 사각 유전체봉이 얹어진 구조이다.

본 연구에서는 이미지 가이드 격자구조에서의 모드 결합 현상을 규명하기 위해 홈이 옆에 파인 이미지 가이드 격자구조와 홈이 위에 파인 이미지 가이드 격자구조 각각을 TM과 TE 모드로 여기시켜 TM-TE 혹은 TE-TM 모드의 결합 관계를 실험적으로 관찰해 보고자 한다. 아울러 이 결과를 토대로 이미지 가이드 격자구조에서 TM과 TE 모드간의 결합현상을 대칭성의 관점에서 분석하여 보고 이미지 가이드 격자구조와 H-가이드 격자구조의 모드 결합 현상의 차이점을 고찰해 보고자 한다.

II. 이미지 가이드 모드의 명명

일반적으로 사각형의 단면적을 갖는 유전체 도파관의 모드는 6개의 전자계 성분, 즉  $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ 를 모두 갖는 하이브리드 모드이어서 모드의 분류가 금속 구형도파관에서의와 달리 TM이나 TE 모드로 엄밀히 나누어지지 않는다. 그러나 주된 전자계 성분을 이용해 유전체 도파관 모드의 명칭을 붙이는데 이러한 모드의 명명도 몇가지 방법이 있다. 그림 1과 같은 이미지 가이드에 대해 생각해 보자.

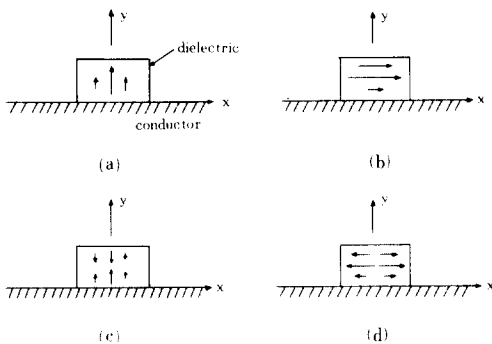


그림 1. 유전체 이미지 가이드에서의 의사 TM과 TE 모드. 화살표는 주된 전계의 방향을 나타냄. (a)  $TM_{11}$  모드 (b)  $TE_{11}$  모드 (c)  $TM_{12}$  모드 (d)  $TE_{21}$  모드  
 Fig. 1. Pseudo TM and TE modes in Dielectric Image Guide. The Arrows Indicate Dominant E-field Direction. (a)  $TM_{11}$  Mode. (b)  $TE_{11}$  Mode. (c)  $TM_{12}$  Mode. (d)  $TE_{21}$  Mode.

Oliner와 Peng<sup>(1,2)</sup> 그리고 Shigesawa<sup>(3)</sup> 등은 이미지 가이드의 모드를 무한 유전체 슬래브의 모드와 관련시켜 TM 모드( $E_y, E_z, H_x$  성분만 가진) 혹은 TE 모드( $H_y, H_z, E_x$  성분만 가진)라는 명칭을 쓰고 있으나 실제로 이미지 가이드는 6개의 전자계 성분을 모두 가지고 있어 의사(pseudo) TM(그림 1(a), (c)) 혹은 의사 TE 모드(그림 1(b), (d))를 의미한다고 볼 수 있다.

Marcatili<sup>(6)</sup>는 주된 전계가 y방향인 모드를  $E^y$  모드(그림 1(a), (c)) 그리고 x방향인 모드를  $E^x$  모드(그림 1(b), (d))로 명명했으며 Solbach<sup>(7)</sup>는  $E_y$ 가 주된 모드를 EH모드(그림 1(a), (c)) 그리고  $E_x$ 가 주된 모드를 HE 모드(그림 1(b), (d))라 부르고 있다.

본 연구에서는 참고문헌[1-3]의 명명에 준하여 TE 혹은 TM의 이름을 사용하면서 두개의 첨자를 사용하여 모드를 분별하고자 한다. 첫번째 첨자는 x 방향으로의 변화수를, 두번째 첨자는 y방향으로의 변화수를 나타낸다. 그래서 그림 1(a)의 모드는  $TM_{11}$  모드로, 그리고 그림 1(b)의 모드는  $TE_{11}$  모드로 명명한다.

III. 격자의 설계

이미지 가이드 격자는 그림 1과 같은 이미지 가이드에 주기적인 홈을 파서 구성될 수 있다. 홈이 옆에 파인 격자구조가 그림 2에, 그리고 홈이 위에 파인 격자구조가 그림 3에 있다.

유전체 도파관 격자구조의 실제 응용은 밀리미터파 영역이나 세삭 및 측정의 편의상 격자구조의 크기를 확대하여 마이크로파 대역에서 측정될 수 있도록 설계해 보고자 한다. 상대 유전 상수가 2.55인 Rexolite 1422를 이용한 이미지 가이드의 기본구조, 즉 홈을 파

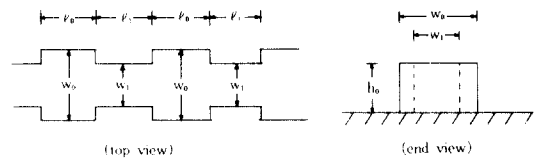


그림 2. 양 옆에 홈이 파인 이미지 가이드 격자구조  
 Fig. 2. An Image-guide Grating Structure with Notches in Both Sides.

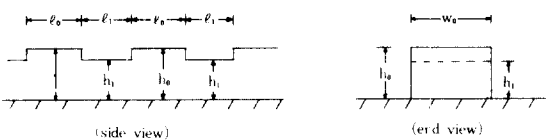


그림 3. 위에 홈이 파인 이미지 가이드 격자구조  
 Fig. 3. An Image-guide Grating Structure with Notches in the Top Surfaces.

기전의 이미지 가이드의 컷수는 폭  $w_0=1.27\text{cm}$ , 높이  $h_0=1.016\text{cm}$ 로 고정하였다( $w_0$ 와  $h_0$ 는 그림 2와 3 참조). 다음, 격자구조의 저지대역 중심주파수와 홈의 깊이를 고정하면 격자의 설계 문제는 홈을 판 부분의 길이와 홈의 주기, 즉 그림 2에서의  $l_0$ 와  $l_1$ 을 결정하는 문제로 귀착이 된다.

홈이 옆에 파인 그림 2와 같은 격자구조에서  $w_0=1.27\text{cm}$ ,  $w_1=0.794\text{cm}$ ,  $h_0=1.016\text{cm}$ 로 놓고 또 격자의 저지대역 중심주파수를  $10.610\text{GHz}$ 로 정하였다. 이 주파수에서 Bragg 조건이 만족되어야 하며 우리의 목표는 (1)식의 Bragg 조건을 만족시키는  $l_0$ 와  $l_1$ 을 구하는 것이다.

$$k_{z_0}l_0 + k_{z_1}l_1 = \pi \quad (1)$$

여기서  $k_{z_0}$ 는 홈이 파이지 않은, 즉  $w_0$ 와  $h_0$ 로 구성된, 부분의 z방향으로의 위상 상수이고  $k_{z_1}$ 은 홈이 파인, 즉  $w_1$ 과  $h_0$ 로 구성된, 부분의 z방향으로의 위상 상수이다. 이  $k_{z_0}$ 와  $k_{z_1}$ 은 이미지 가이드 분산 (dispersion) 특성을 구하는 방법으로 많이 사용되는 유효 유전 상수방법(Effective Dielectric Constant Method)<sup>8</sup>을 이용해 계산될 수 있다.  $f_0=10.610\text{GHz}$ ,  $\epsilon_r=2.55$ ,  $h_0=1.016\text{cm}$ 의 상황에서  $w_0=1.27\text{cm}$ 인 부분과  $w_1=0.794\text{cm}$ 인 부분의 위상 상수  $k_{z_0}$ 와  $k_{z_1}$ 은 유효 유전 상수 방법을 이용한 계산결과  $k_{z_0}=2.9419\text{cm}^{-1}$  그리고  $k_{z_1}=2.7375\text{cm}^{-1}$ 이었다. (1)식을 만족시키는 무수히 많은  $l_0$ ,  $l_1$ 쌍 중에서  $l_0$ 와  $l_1$ 부분에서의 위상 변화가 각각  $\pi/2$ 가 되도록  $l_0=0.529\text{cm}$ ,  $l_1=0.578\text{cm}$ 를 택하였다.

다음, 홈이 위에 파인 그림 3과 같은 격자구조를 설계해 보자. 이 경우에는 홈이 옆에 파인 격자구조에서 얻은  $l_0$ 와  $l_1$ 을 그대로 이용하면서 홈이 파인부분과 파이지 않은 부분의 위상 상수의 비가 앞의 홈이 위에 파인 경우와 같도록 그림 3의  $h_1$ 을 결정하고자 한다. 즉

$$\left(\frac{k_{z_0}}{k_{z_1}}\right)_{\text{side notch}} = 1.0747 = \left(\frac{k_{z_0}}{k_{z_1}}\right)_{\text{top notch}} \quad (2)$$

을 만족시키는 홈이 위에 파인 격자의 홈이 있는 곳에서의  $k_{z_1}$ 을 구해 이로부터  $h_1$ 을 얻어내고자 한다. 홈이 위에 파인 격자에서의  $k_{z_1}$ 을 (2)식으로 부터 구하면  $k_{z_1}=2.7374\text{cm}^{-1}$  이어서  $k_{z_1}/k_0=1.232$ 를 얻는다. 그래서 중심주파수  $10.610\text{GHz}$ ,  $w_0=1.270\text{cm}$ 인 경우에  $k_z/k_0=1.232$ 를 주는 이미지 가이드의 높이  $h_1$ 을 구하면 되는데 유효 유전상수 방법과 보간법을 이용하여 구한 결과  $h_1=0.688\text{cm}$ 이었다.

#### IV. 격자의 특성 측정 및 결과 분석

앞에서 설계된  $w_0=1.270\text{cm}$ ,  $w_1=0.794\text{cm}$ ,  $h_0=$

$1.016\text{cm}$ ,  $l_0=0.529\text{cm}$ , 그리고  $l_1=0.578\text{cm}$ 인 그림 2와 같은 홈이 옆에 있는 격자구조와  $w_0=1.270\text{cm}$ ,  $h_0=1.016\text{cm}$ ,  $h_1=0.688\text{cm}$ ,  $l_0=0.529\text{cm}$ , 그리고  $l_1=0.578\text{cm}$ 인 그림 3과 같은 홈이 위에 있는 격자구조를 상대 유전 상수가 2.55인 Rexolite 1422를 이용하여 제작하였으며 이때 두 격자구조 모두 홈의 갯수는 32개로 하였다. 이 두 격자구조를 각각  $TM_{11}$  모드와  $TE_{11}$  모드로 여기시켜 격자구조의 삽입 손실을 측정하였다. 먼저 그림 2와 같은 홈이 옆에 파인 격자구조를  $TM_{11}$  모드로 여기시켜  $8\text{GHz}$ 에서  $18\text{GHz}$ 까지 삽입 손실을 측정하였으며 이 결과가 그림 4에 있다.

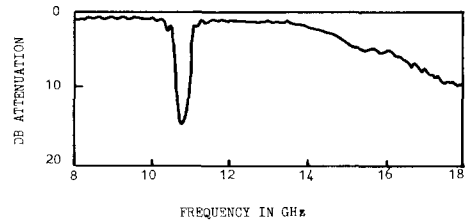


그림 4. 옆에 홈이 파인 격자가  $TM_{11}$  모드로 여기되었을 때 측정된 삽입손실

Fig. 4. Measured Attenuation for the Grating which has Side Notches. The Grating was Excited with the  $TM_{11}$  Mode.

$TM_{11}$  모드에 의한 격자구조의 저지대역 중심주파수는  $10.814\text{GHz}$ 로 측정되었으며 이는 설계 중심주파수  $10.610\text{GHz}$ 보다 1.9% 높은 값으로 오차는 주로 유효 유전 상수 방법의 오차에 기인한다고 생각된다. 또한  $14\text{GHz}$  이상에서 손실이 증가하는 것은 격자구조가 도파관 모드에서 안테나 모드로 옮겨가고 있는 과정을 보여주고 있는 것이다. 특히 측정 주파수 범위내에서 어떠한 스퓨리어스(spurious) 저지대역도 존재하지 않는데 이는  $TM_{11}$  모드가 모드 결합에 의해  $TE$  모드로 결합이 된다 하여도  $TE_{11}$  모드로는 결합이 안됨을 의미한다고 볼 수 있다. 왜냐하면  $TM_{11}$  모드가  $TE_{11}$  모드와 결합한다면 생성된  $TE_{11}$  모드에 의한 저지대역이  $TM_{11}$  모드로 인한 저지대역 바로 인접된 곳에 나타나야 하기 때문이다.

그림 2의 격자구조에서  $TM_{11}$  모드와  $TE_{11}$  모드 사이에 결합이 일어나지 않음을 실험적으로 더욱 확인하기 위하여  $TE_{11}$  모드를 같은 격자구조에 여기시켰다. 측정된 결과가 그림 5에 나타나 있다.

이 경우 가장 큰 저지대역은  $12.39\text{GHz}$ 를 중심으로 나타나며 이것은  $TE_{11}$  모드에 의한 특성임은 분명하다.  $TE_{11}$  모드는 전계가 이미지 가이드의 도체판에 평

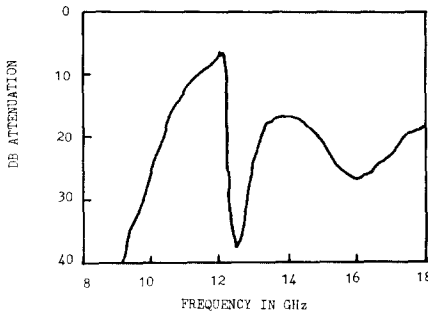


그림 5. 그림 4 에 사용된 동일한 격자가 TE<sub>11</sub> 모드로 여기되었을 때 측정된 삽입손실

Fig. 5. Measured Attenuation for the Same Grating as for Fig.4 but with the TE<sub>11</sub>-Mode Excitation.

행하기 때문에 금속 도파관 모드에서 유전체도파관 모드로의 변화가 용이치 않아 전반적으로 기본 삽입손실이 커졌음을 볼 수 있으나 '변환 장치를 잘 고안하면 기본 삽입 손실을 크게 줄일 수 있으리라 생각된다. 12GHz 아래에서 손실이 증가하는 것은 TE<sub>11</sub> 모드가 12GHz 근처에서 cutoff 상태로 되기 때문이다. 그림 4의 측정 결과에서 보면 12.39GHz에 저지대역이 나타나 있지 않으며 이는 사용된 홈이 옆에 있는 이미지 가이드 격자구조에서 TM<sub>11</sub> 모드와 TE<sub>11</sub> 모드가 결합되지 않았음을 의미한다.

지금까지의 측정에는 홈이 옆에 파인 격자구조를 사용했다. 동일한 측정을 홈이 위에 파인 그림 3에 있는 격자구조를 이용해 수행하였다. TM<sub>11</sub> 모드를 이 격자에 여기시켰을 때의 손실 특성을 그림 6에 나타내었다.

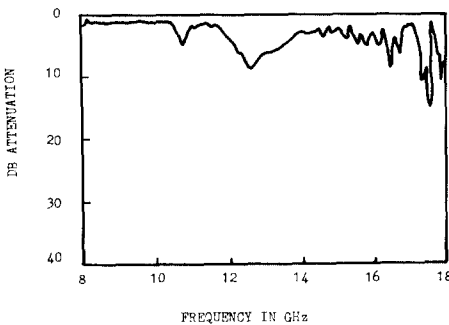


그림 6. 위에 홈이 파인 격자가 TM<sub>11</sub> 모드로 여기되었을 때 측정된 삽입손실

Fig. 6. Measured Attenuation for the Grating which has Top Notches. The Grating was Excited with the TM<sub>11</sub> Mode.

10.73GHz에서 작은 저지대역이 관측되며 이것은 TM<sub>11</sub> 모드에 의한 저지대역이다. 이 작은 저지대역 옆에 12.55GHz를 중심으로 강하고 넓은 저지대역이 또 나타나고 있다. 이 저지대역은 모드결합 때문에 생길 수 있는 TE<sub>11</sub> 모드에 의해 생긴 저지대역이 아니라 TM<sub>12</sub> 모드에 의해 생긴 저지대역이다. 이를 확인하기 위하여 홈이 위에 파인 동일 격자구조를 TE<sub>11</sub> 모드로 여기시켰다. 그림 7에 나타나 있듯이 강한 저지대역이 12.82GHz를 중심으로 관측되었다.

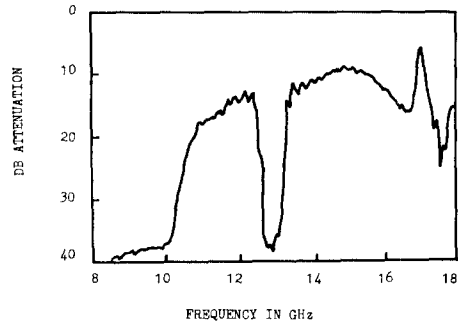


그림 7. 그림 6에 사용된 동일한 격자가 TE<sub>11</sub> 모드로 여기되었을 때 측정된 삽입손실

Fig. 7. Measured Attenuation for the Same Grating as for Fig. 6 but with the TE<sub>11</sub>-Mode Excitation.

이 주파수는 TM<sub>11</sub> 모드로 여기시켰을 때 생기는 두 번째 저지대역의 중심주파수와는 다르다. 그림 7에서도 그림 5의 경우와 같이 TE<sub>11</sub> 모드를 이미지 가이드에 결합시키는 장치문제로 기본 삽입손실이 상당히 크을 알 수 있다.

이상의 4개의 실험을 통하여 이미지 가이드 격자구조에서 TM<sub>11</sub> 모드와 TE<sub>11</sub> 모드 사이의 모드결합이 이루어지지 않고 있음이 확인되었다.

### V. 대칭성과 모드 결합

앞절에서는 이미지 가이드 격자구조에서 TM<sub>11</sub> 모드와 TE<sub>11</sub> 모드 사이에 모드결합이 일어나지 않음을 실험적으로 확인하였고 본 절에서는 이 현상을 대칭성과 관련시켜 보고자 한다.

그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 TM<sub>11</sub> 모드는 x방향으로 전계가 우대칭(even symmetry)이나 TE<sub>11</sub> 모드는 x방향으로 기대칭(odd symmetry)이다. 왜냐하면 TE<sub>11</sub> 모드의 경우 y-z 평면의 왼쪽에서는 전계가 들어오는 방향이고 y-z 평면의 오른쪽에서는 전계가 나가는 방향이기 때문에 기대칭이다.

제작된 두개의 격자구조의 불연속 방향이 공히 x 방향으로 우대칭 성질을 지니고 있기 때문에 구조의 불연속성으로 인하여 발생할 수 있는 TM-TE 모드 결합도 우대칭 성질을 갖는 TE 모드로만 결합이 된다. 그래서  $TM_{11}$  모드로 여기시켰을 때 결합이 가능한 최저의 TE 모드는 그림 1(d)의  $TE_{21}$  모드이다. 이  $TE_{21}$  모드는  $TE_{11}$  모드보다 상대적으로 많은 양의 에너지가 유전체 밖에 있으므로 전파 속도가 더 빠르다. 그래서 원하는  $TM_{11}$  모드의 저지대역과 결합현상으로 인해 생길 수 있는  $TE_{21}$  모드의 스퓨리어스 저지대역은 서로 상당히 떨어질 수 밖에 없어서 격자구조를 이용한 필터의 장점인 통과대역의 광대역성을 유지시킬 수 있는 것이다.  $TM_{11}$  모드와 고차(higher-order) TM 모드와의 결합도 전계가 x 방향으로 우대칭인 모드로만 결합될 수 있어  $TM_{21}$  모드는 기대칭성 때문에 생성이 안 되고  $TM_{12}$ ,  $TM_{31}$  모드 등은 생성될 수 있는 모드들이다.

다음, 이 대칭성 논리를 TM-TE 모드 결합이 두드러지게 나타난 H-가이드 격자구조를 이용한 실험결과 분석에 이용해 보자. 그림 8 과 그림 9 는 참고문헌 [3]에서 발췌한 것으로 그림 8 은 H-가이드 격자구조를 나타내며 그림 9 는 이 격자구조에  $TM_{11}$  모드를 여기시켰을 때 얻은 측정치이다.

그림 9에서 볼 수 있듯이 이 경우에는 TM-TE 모드 결합이 두드러지게 나타나  $TM_{11}$  모드에 의한 원하는 저지대역 바로 인접한 곳에 모드 결합에 의해 생긴  $TE_{11}$  모드에 의한 스퓨리어스 저지대역이 형성되기 때문에 필터등에의 응용에 저해를 줄 수 있음을 알 수 있다. H-가이드 격자구조의 경우 TM-TE 모드 결합이 두드러진 것은 모드의 대칭성으로 설명할 수 있다.

그림 10에서 알 수 있듯이 H-가이드의  $TM_{11}$  모드와  $TE_{11}$  모드는 모두 전계가 x 방향으로 우대칭이므로 이

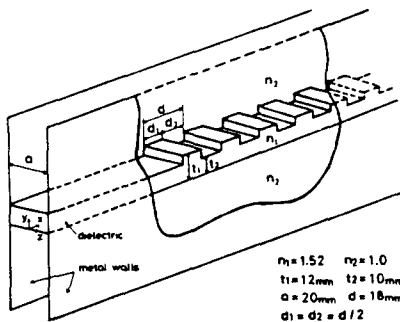


그림 8. 주기적인 유한한 홈을 갖는 H가이드(참고문헌[3]에서 발췌)

Fig. 8. H-guide with Finite Periodic Corrugation. (Excerpted from Ref. 3).

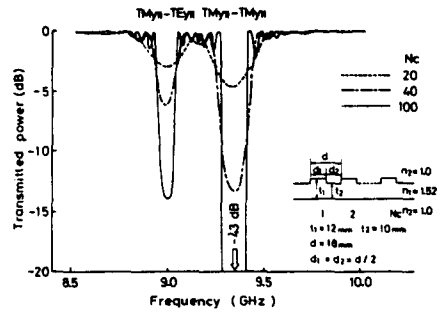


그림 9. 그림 8의 H가이드 격자가  $TM_{11}$  모드로 여기되었을 때 측정된 삽입손실(참고문헌[3]에서 발췌)

Fig. 9. Measured Attenuation for the H-guide Grating Shown in Fig.8. The Grating was Excited with the  $TM_{11}$  Mode(Excerpted from Ref.3).

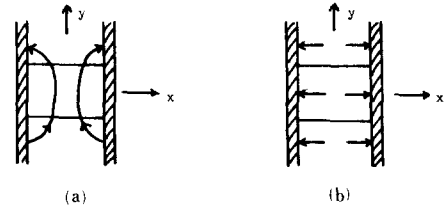


그림 10. 유전체 H가이드에서의 의사TM과 TE모드 화살표는 주된 전계방향을 나타냄  
(a)  $TM_{11}$  모드 (b)  $TE_{11}$  모드

Fig. 10. Pseudo TM and TE Modes in Dielectric H-guide. The Arrows Indicate Dominant E-field Direction. (a)  $TM_{11}$  Mode. (b)  $TE_{11}$  Mode.

미지 가이드 격자와는 달리 결합이 용이하다. 아울러  $TM_{11}$  모드의 전파 속도와  $TE_{11}$  모드의 전파 속도가 크게 다르지 않아 서로의 저지대역이 그림 9에서와 같이 인접해 있다.

### VI. 결 론

유전체 도파관 격자구조를 필터로 응용할 때 문제가 될 수 있는 TM-TE 모드 변환 관계를 고찰해 보았다. 이미지 가이드 격자구조를 두가지 형태, 하나는 홈이 옆에 파인 격자이고 다른 하나는 홈이 위에 파인 격자로 제작하여 각각을  $TM_{11}$  모드와  $TE_{11}$  모드로 여기시켜 모드 결합 관계를 실험적으로 관찰하였다. 이 실험적 관찰로부터 모드 결합과 모드 전계 및 격자의 대칭성과 밀접한 관계가 있음을 규명하였다. 이미지 가이드 격자구조의 경우  $TM_{11}$  모드는 우대칭이고  $TE_{11}$

모드는 기대칭이에서 두 모드 사이의 결합은 없으나 H-가이드 격자구조의 경우에는  $TM_{11}$  모드와  $TE_{11}$  모드 모두 우대칭이에서 두 모드사이의 결합이 가능하다. 이 대칭성 논리는 다른 형태의 유전체 도파관에서도 TM-TE 모드 결합 판별에 사용될 수 있으리라 믿는다.

#### 參 考 文 獻

- [1] J.P. Hsu, S.T. Peng and A.A. Oliner, "Scattering by dielectric step discontinuities for obliquely incident surface waves," in *Dig. URSI Meeting*, (College Park, MD), p. 46, May 1978.
- [2] M.J. Shiau, H. Shigesawa, S.T. Peng and A.A. Oliner, "Mode conversion effects in Bragg reflection from periodic grooves in rectangular dielectric image guide," in 1981 Int. Microwave Symp. Dig., pp. 14-16, *IEEE*, New York.
- [3] M. Tsuji, S. Matsumoto, H. Shigesawa and K. Takiyama, "Guided-wave experiment with dielectric waveguides having finite periodic corrugation," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, pp. 337-344, Apr. 1983.
- [4] G.L. Matthaei, D.C. Park, Y.M. Kim and D.L. Johnson, "A study of the filter properties of single and parallel-coupled dielectric-waveguide gratings," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, pp. 825-835, Oct. 1983.
- [5] D.C. Park, G.L. Matthaei and M.S. Wei, "Bandstop filter design using a dielectric waveguide grating," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-33, pp. 693-702, Aug. 1985.
- [6] E.A.J. Marcatili, "Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, pp. 2071-2102, Sept. 1969.
- [7] K. Solbach and I. Wolff, "The electromagnetic fields and the phase constants of dielectric image line," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-26, pp. 747-751, Oct. 1978.
- [8] W.V. McLevige, T. Itoh and R. Mittra, "New waveguide structures for millimeter-wave and optical integrated circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-23, pp. 788-794, Oct. 1975.