

# 페라이트 층을 갖는 유전체 슬랩 도파관 격자 구조의 해석

## (Analysis of Dielectric Waveguide Gratings with a Ferrite Layer)

尹 相 元\*

(Sang Won Yun)

### 要 約

페라이트 층을 갖는 유전체 도파관이 갖는 비가역 전자파 전파특성을 아이솔레이터와 같은 비가역 소자에 응용 가능하도록 페라이트로 되어 있는 격자 구조를 제시하였다. 격자 구조를 유전체 도파관의 계단형 불연속이 cascade로 연결된 것으로 보고, 모드 정합법으로 구한 계단형 불연속의 산란 행렬을 이용하여 격자 구조의 특성을 해석하였다. 주기적인 격자 구조의 저지 주파수 대역이 사용하고자 하는 주파수 근처에 있을 때와 상당히 떨어져 있는 두 경우의 비가역 산란 특성을 35GHz 근처에서 해석하였으며, X-Band에서 제안된 격자 구조를 제작 실험하였다.

### Abstract

In this paper, dielectric waveguide gratings, which can be applied to the nonreciprocal devices such as isolators, are proposed. Those grating structures can be considered as cascade connections of step discontinuities between uniform dielectric waveguides and another uniform dielectric waveguides with a ferrite layer. Therefore, the nonreciprocal scattering characteristics of such gratings can be obtained from the scattering characteristics of step discontinuities and uniform dielectric waveguides. For the periodic grating structures, band-reject characteristics can be located inside or outside the frequency range of interest. Numerical analyses are performed at 35GHz and experimental results at X-band are also presented.

### I. 서 론

밀리미터파 대역에서 종래의 마이크로 스트립 선

로를 대신할 수 있는 유전체 도파관이 제시된 이래 이를 이용한 많은 소자가 제시되어 왔다. 이러한 소자들중의 하나인 유전체 도파관 격자 구조는 대역저지 여파기 특성<sup>[1]</sup>을 갖고 있어, 이를 이용한 발진기<sup>[2]</sup>, 대역 통과 여파기<sup>[3]</sup>, 채널 드로핑 여파기<sup>[4]</sup> 등에 응용되어 왔으며, 또한 이 격자 구조에서 leaky wave를

\*正會員, 西江大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Sogang Univ.)  
接受日字: 1989年 4月 22日

얻을 수 있어 안테나<sup>1),5)</sup>에 널리 응용되어 왔다.

이러한 격자 구조의 일부를 페라이트와 같은 자성체로 하고 외부에서 직류 자계를 인가해 주면 비가역 전파와 전파 특성을 얻을 수 있다. Araki<sup>6)</sup>가 제안한 구조는 유전체 도파관 위 아래에 격자를 갖는 페라이트 도파관 격자 구조를 접착시킨 것으로 섭동법을 이용하여 그 특성을 해석하였다. 비가역 전파 특성을 얻기 위해 소자내에서 전파파가 한 방향으로 진행되는 경우에 감쇄없이 전달되도록 하고, 반대방향의 경우 leaky wave로 방사되도록 설계하였다. 그러나, 격자의 깊이가 커지면 이러한 섭동법에 의한 해석이 어려워지는 단점이 있다.

본 논문에서는 유전체 도파관 위에 페라이트를 격자로 하여 비가역 전파 특성을 얻을 수 있는 구조를 제시한다. 이 격자 구조를 유전체 도파관이 페라이트 층을 갖는 유전체 도파관과 계단형 불연속을 이루는 구조<sup>7)</sup>가 cascade로 연결된 것으로 보고 해석하였다. 페라이트 층을 갖는 유전체 도파관이 외부의 직류 자계내에서 비가역 전파 상수를 가지므로 연결된 유전체 도파관의 위상 정수와 한 전파파 전파방향으로는 비슷하게, 반대방향으로는 차이가 나게 함으로써 비가역 전파 특성을 얻었고, 하나의 불연속 구조에서 얻어지는 비가역 특성은 그다지 크지 못하므로, 계단형 불연속이 cascade로 연결된 격자 구조로 함으로써 비가역 특성을 크게 하였다. 불연속을 연결하는데 있어 비주기적으로 할 수 있지만 본 논문에서는 주기적인 경우만을 고려하였으며, 주기적으로 하였을 경우 저지 대역이 사용주파수 가까이 위치하는 경우와 멀리 위치하는 경우로 나누어 해석하였다. 분석방법은 모드 정합법을 이용하였기 때문에 격자의 깊이와 무관하게 적용할 수 있다는 잇점이 있다. 모드 정합법으로 해석된 불연속 구조에서 얻어지는 산란 행렬과 불연속사이의 균일한 유전체 도파관의 산란 행렬을 이용하여 전체 격자 구조의 비가역 산란 특성을 유도하였다.

## II. 해 석

비가역 전파 특성을 갖는 [7]에 제안된 계단형 불연속 구조를 이용한 격자 구조는 그림 1과 같다. 그림 1(a)는 FDM (ferrite-dielectric-metal) 구조와 유전체 도파관의 계단형 불연속 구조를 응용한 격자 구조이며, 그림 1(b)는 DFM (dielectric-ferrite-metal) 구조와 유전체 도파관 사이의 계단형 불연속 구조를 응용한 격자 구조이다. 그림 1의 두 구조가 y방향으로는 무한한 2차원 구조를 가정하고, 손실이 없다고 가

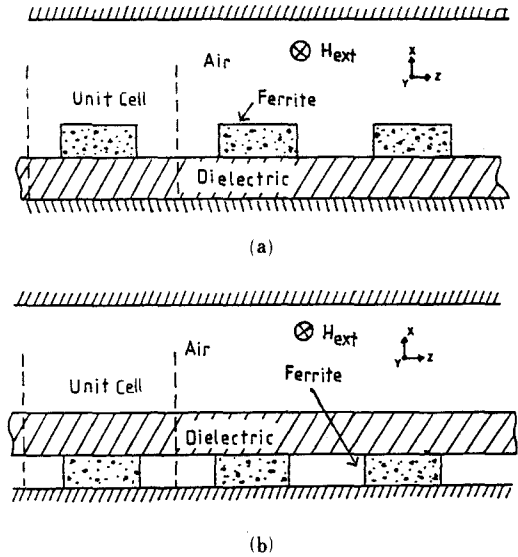


그림 1. 페라이트층을 갖는 유전체 도파관 격자  
(a) FDM-유전체 구조  
(b) DFM-유전체 구조

Fig. 1. Dielectric waveguide gratings with a ferrite layer.

(a) FDM-dielectric structure.  
(b) DFM-dielectric structure.

정한다. 두 구조가 모두 주기적인 격자 구조라고 가정한다면, 그림 1에서 기본 구조가 N개 연결된 것으로 볼 수 있으므로, 기본 구조를 그림 2와 같이 다섯 부분으로 나누어 생각할 수 있다. 기본 구조에서 두 개의 불연속 구조에 대한 모드 정합법에 의한 해석결과<sup>7)</sup> 얻어지는 일반 산란 행렬 (generalized scattering matrix)<sup>8)</sup>은 각각

$$[S_b] = \begin{bmatrix} [S_{11}] & [S_{12}] \\ [S_{21}] & [S_{22}] \end{bmatrix} \quad (1)$$

와

$$[S_d] = \begin{bmatrix} [S'_{11}] & [S'_{12}] \\ [S'_{21}] & [S'_{22}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 얻어지며, 각 성분은 그림 3에 표기되어 있다. 고차 모드의 산란 현상으로 인하여  $[S_b]$ 와  $[S_d]$ 의 성분들도 역시 행렬로 표시된다.

두 불연속 면을 연결시켜 주는 유전체와 페라이트-유전체의 두 도파관은 균일한 전송선로로 생각할 수 있으므로, n번째 모드에 대한 각 도파관내에서의 산란 행렬은 각 도파관에서의 위상 정수를 각각  $\beta_n$ ,  $\beta'_n$ 이라 하면

$$[S_a] = [S_e] = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-j\beta_n d_1) \\ \exp(-j\beta_n d_1) & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

와

$$[S_c] = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-j\beta_n d_2) \\ \exp(-j\beta_n d_2) & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 표시되며, 페라이트-유전체 도파관의 경우 전파파의 전파방향에 따라 위상 정수가 다르므로 식(4)에서 이를 고려하여야 한다.

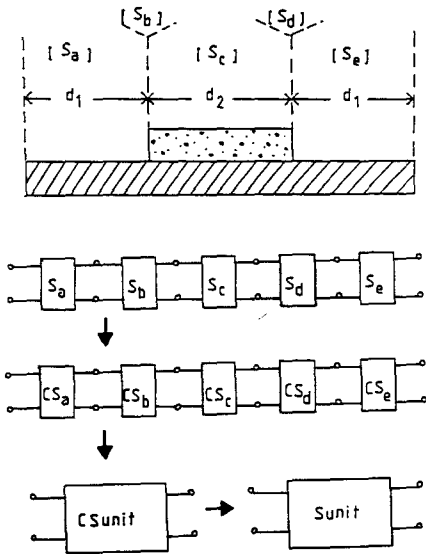


그림 2. 산란 계수 유도를 위한 기본 구조의 등가 회로망

Fig. 2. Equivalent network of the unit cell for the derivation of scattering parameters.

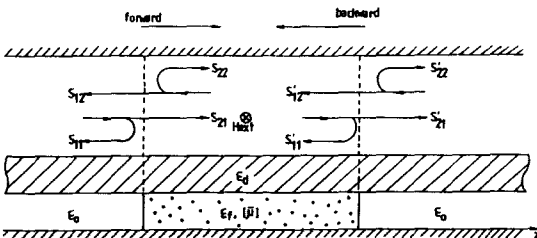


그림 3. 산란 계수의 정의

Fig. 3. Conventions for the scattering parameters.

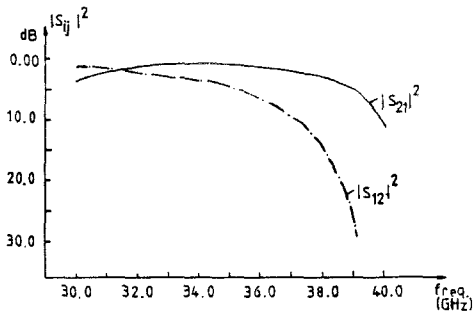
기본 구조 전체에 대한 산란 행렬은 ABCD 행렬로 변환시켜 구하고 이를 이용하여 전체 격자 구조의 산란 행렬을 구하거나, 산란 행렬을 그대로 사용하여 전체 격자 구조의 산란 행렬을 유도할 수 있다.<sup>1)</sup> 이 과정을 그림 2에 단계적으로 도시하였다.

### III. 수치해석 및 실험결과

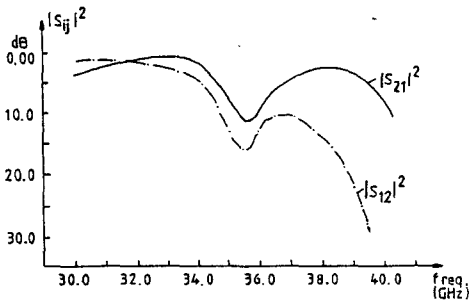
수치해석은 35GHz 근처에서 수행하였다. 유전체는 비유전율  $\epsilon_r = 9.6$ 이고 두께는 1.0mm로 택하였고, 페라이트는 비유전율  $\epsilon_f = 11.47$ , 포화 자화도  $4\pi Ms = 5.0KG$ , 두께는 1.0mm로 택하였다. 외부 자계의 세기는  $H_{ext} = 5.0KOe$ 로 하였다. 이 때 페라이트 자체의 공진 주파수는 20GHz로 동작 주파수 35GHz에서 상당히 떨어져 있으므로 페라이트의 공진 현상을 직접 이용하지 않았다. 그림 1(b) 구조가 위의 치수에서 그림 1(a)보다 삽입 손실을 줄일 수 있기 때문에 그림 1(b) 구조에 대한 해석을 수행하였다. 위에 제시된 유전체 및 페라이트의 특성 및 치수는 각 도파관내에서 최저차 bound(surface wave) 모드만을 전파하도록 택하여 졌으며, 고차 모드는 fast(radiation) 모드 뿐이다. 이 때 불연속 면에서 발생하는 고차 모드의 크기는 무시할 수 있을 만큼 작았고, 실험시에 그림 1의 두 구조 위에 있는 도체를 제거하기 위하여 아래 도체로부터의 거리를 70mm 이상으로 하여 bound 모드의 산란 특성에 영향을 미치지 않도록 하였으며 fast 모드의 크기는 이 거리에 따라 변하기는 하나 그 크기가 작기 때문에 아래 해석에서는 산란 행렬식 (1), (2)를 간단한  $2 \times 2$ 의 행렬로 처리하였다. 또한 균일한 두 도파관 영역에서도 산란 행렬 (3), (4)에서  $n = 1$ 인 경우만 고려하였다.

격자의 갯수를  $N = 20$ 으로 택하고 저지 대역을 35GHz보다 아래쪽에 위치시켰을 때의 그림 4(a) 격자 구조의  $S_{12}$ 와  $S_{21}$ 의 크기를 그림 4(a)에 제시하였으며, 그림 4(b)는 저지 대역을 35GHz 근처로 하였을 때의  $|S_{12}|$ 와  $|S_{21}|$ 을 제시한 것이다. 두 결과를 비교해 보면 위에 제시된 치수에서는 저지 대역을 사용 주파수에 인접시켰을 때 더 나은 아이솔레이션 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

X-Band에서 측정을 위하여 제작한 구조는 그림 1(b)이다. 유전체는 비유전율이 2.55인 Rexolite 1422로 두께는 7mm이고, 페라이트는 Trans Tech사의 TT-1000으로 비유전율이 11.47, 포화 자화도가 1.0KG로 최저차 bound 모드만을 전송시킬 수 있는 두께 2mm로 택하였다. 이 때 외부에서 인가되는 자계의 세기는 2.0KOe로 하였다. 따라서, 페라이트의 공진 주파수는 6.85GHz에 위치한다.  $N = 20$ 으로 하고 저지



(a)



(b)

그림 4. DFM-유전체 도파관 격자의 비가역 산란 특성

- (a) 30~40GHz에 저지 대역을 갖는 격자
- (b) 30~40GHz에 저지 대역이 없는 격자

Fig. 4. Nonreciprocal scattering characteristics of DFM-dielectric waveguide gratings.

- (a) with stopband within 30~40GHz.
- (b) with stopband outside 30~40GHz.

대역을 8GHz 부근으로 하였을 때의  $|S_{12}|$ 와  $|S_{21}|$ 의 계산 및 실험결과를 그림 5에서 비교하였다. 계산된 결과는 35GHz 대역에서의 결과와, 9GHz 근처를 제외하면 거의 유사한 특성을 갖는다고 볼 수 있다. 9GHz 근처에서는 계단형 불연속의 영향이 크게 나타나 특성이 좋지 않은 것으로 생각된다.

실험결과는 이론에서 예측된 결과와 유사하다. 삽입 손실이 3dB 정도인데 이는 유전체 도파관의 길이가 36cm이므로 유전체 손실이 고려되어야 하고, 복사 손실 그리고 유전체 도파관이 혼 안테나로 결합되는 데서 생기는 launching 손실에 기인한다. 이러한 손실의 합은 측정 주파수 대역에서 2~3dB가 발생될 때 측정되어, 계산결과에 접근함을 알 수 있다. 10GHz에서의 dip은 제작시 주기가 균일하지 못함에서 생겼다고 볼 수 있다. 그리고, 측정된 특성이 계산 결과보다

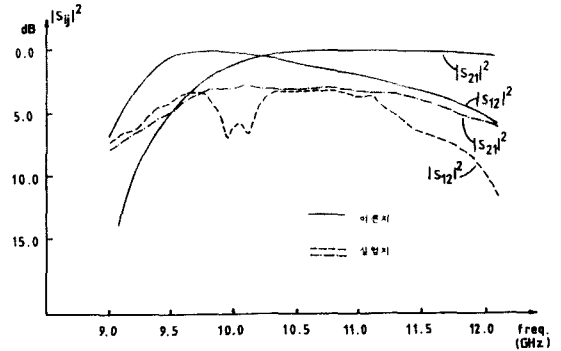


그림 5. X-Band에서의 이론치와 실측치의 비교  
Fig. 5. Comparison between theoretical and experimental results at X-Band. ( $l_1 = 3.05\text{mm}$ ,  $l_2 = 5.4\text{mm}$ ).

800MHz정도 주파수가 이동하였는데, 이는 y방향으로의 길이를 2.3cm로 제한하였기 때문이다.<sup>[10]</sup> 즉, 그림 1에서 y방향으로 무한하다고 가정을 했기 때문에 y방향의 전파 정수는 0이다. 그러나, 제작시 y방향으로 유한한 길이를 택하였기 때문에 y방향의 전파 정수는 0보다 큰 값을 갖게 되어 z방향으로의 위상 정수의 감소를 유발하기 때문이다. 저지 대역을 9GHz 근처로 설계하였을 때의 측정된 특성이 그림 6이다. 이 경우에도 저지 대역이 800MHz정도 이동하였고 -z방향으로의 위상 정수를 이용해서 저지 대역을 설정하였기 때문에  $|S_{21}|$ 은 측정시 거의 이 저지 대역이 나타나지 않았다. 페라이트층에서의 위상 정

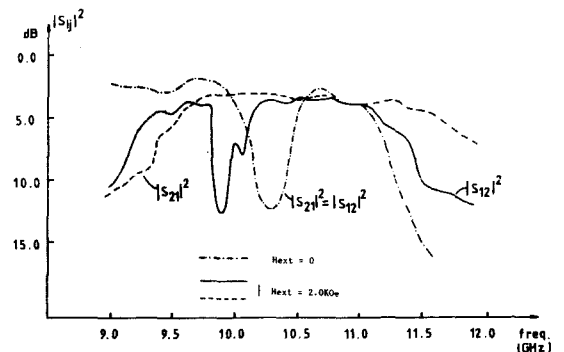


그림 6. X-Band에서의 측정결과  
Fig. 6. Measured results at X-Band. ( $l_1 = 2.9\text{mm}$ ,  $l_2 = 5.4\text{mm}$ ).

수가 외부 자계에 따른 변화를 보이기 위해 외부 자계  $H_{ext}=0$ 인 경우 대역 저지특성을 함께 제시하였다.

#### IV. 결 론

페라이트층을 갖는 유전체 도파관이 일반 유전체 도파관과 계단형 불연속을 이룰 때 외부 자계하에서 갖는 비가역 전파 특성을 증가시킬 수 있는 방법의 하나로 주기적인 격자 구조를 제안하여 이를 해석하고 실험으로 그 타당성을 확인하였다. 현재 이러한 구조를 2차원 구조로 보고 해석하였으나 앞으로 정확한 해석을 위해 3차원 해석법에 대한 연구가 요망된다.

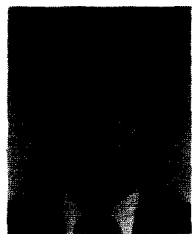
#### 參 考 文 獻

- [1] T. Itoh, "Application of gratings in a dielectric waveguide for leaky wave antennas and band-reject filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-25, no. 12, pp. 1134-1138, Dec. 1977.
- [2] B.S. Song and T. Itoh, "Distributed Bragg reflection dielectric waveguide oscillators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, no. 12, pp. 1019-1022, Dec. 1979.
- [3] 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, no. 10, pp. 825-835, Oct. 1983.

- [4] 김신기, 박동철, 오승엽, "유전체 도파관을 이용한 채널 드로핑 필터," 대한전자공학회 논문지, 제25권, 제1호, pp. 1-7, 1988년 1월.
- [5] R.E. Collin and F.J. Zucker, *Antenna Theory*, vol. 2, Chap. 19, 20, McGraw-Hill, 1969.
- [6] K. Araki and T. Itoh, "Analysis of periodic ferrite slab waveguides by means of improved perturbation method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-29, no. 9, Sept. 1981.
- [7] S.W. Yun and M.J. Lee and I.S. Chang, "Analysis of step discontinuities on planar dielectric waveguide containing a gyrotropic layer," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, no. 3, March 1989.
- [8] R. Mittra and S.W. Lee, "Analytical techniques in the theory of the guided waves," Chap. 4, Mac Millan, 1971, New York.
- [9] F. Arndt, J. Bornemann, D. Grauerholz and R. Vahldieck, "Theory and design of low-insertion loss fin-line filters," *IEEE Trans. MTT*, vol. MTT-30, no. 2, pp. 155-162, Feb. 1982.
- [10] 정중성, 이해선, 윤상원, 장익수, "유전체 도파관 Grating의 필드 해석," 대한전자공학회 논문지, 제24권 제1호, pp. 15-19, 1987년 1월. \*

#### 著 者 紹 介



#### 尹 相 元 (正會員)

1954年 11月 9日生. 1977年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업. 1979年 2月 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업. 1984年 5月 미국 University of Texas at Austin 전기공학과 박사학위 취득. 1984年 9月~현재 서강대학교 전자공학과 조교수. 1988年 1月~12月 미국 University of Texas at Austin 전기공학과. 주관심분야는 마이크로파와 밀리미터파 소자 및 집적회로의 CAD, 페라이트를 이용한 비가역 소자 및 회로설계 등임.