

# 접지된 유전체층 위에 위치한 주기적인 스트립 격자구조에 대한 특성모드 해석

°윤 리호\*, 김 병문\*, 조 영기\*\*

\*예천전문대학 정보통신과 \*\*경북대학교 전자·전기공학부

## Characteristic mode analysis of a periodic strip grating over a grounded dielectric slab

°L. H. Yun\*, B. M. Kim\*, and Y. K. Cho\*\*

\* Inform. Communi., Yecheon College

\*\* School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook National University

### 요 약

접지된 유전체층 위에 위치한 스트립 격자구조에 TM 편파된 입사파가 입사할 경우 전자기 산란문제를 특성모드 이론으로 해석하였다.

몇 개의 특성 모드전류로부터 원거리 산란패턴을 구하여 blazing 현상과 같은 산란특성과 특성모드 패턴과의 연관성을 관찰하고, 기존의 결과들과 비교하여 특성모드 해석방법의 타당성을 검증하였다.

산란패턴을 계산한다. Blazing 현상이 나타날 수 있는 파라미터들을 선택하여 몇 개의 특성모드 패턴으로 구성된 원거리 산란패턴으로 blazing 현상을 관찰할 수 있는지 살펴보고 이의 연관성을 고찰하고자 한다.

또한 실제 설계시 유용한 유한한 주기구조를 특성모드 이론으로 해석하여 blazing 현상을 관찰함으로써 특성모드 해석방법의 타당성을 검증하고자 한다.

### I. 서 론

1960년대 후반이후 특성모드 이론을 이용하여 임의의 구조에 대한 전자기 복사 및 산란문제를 해석하기 위한 방법이 현재에 이르기까지 연구되어 왔다[1,2].

최근에 유전체로 채워진 유한한 주기적인 슬롯을 갖는 평행평판 도파관 누설과 안테나 구조에 대하여 특성모드 이론을 이용하여 등가자기전류와 복사패턴 그리고 복소 전파상수를 구한 결과가 발표되었고[3], 또한 유전체로 채워진 유한한 주기적인 환형 슬롯을 갖는 누설 동축선로 도파관 구조에 대하여 도파관 내부에서 TEM 파가 인가될 때 특성모드 이론을 이용하여 전자기 복사문제를 해석하였다[4].

본 논문에서는 접지된 유전체층 위에 위치한 주기적인 스트립 격자구조에 대한 전자기 산란문제를 특성모드 이론으로 해석하고자 한다. 적분방정식을 세우고 가중행렬 고유방정식을 구한 다음 일반적인 수치방법으로 풀이 몇 개의 특성 모드전류를 구하고 이로부터 원거리 산

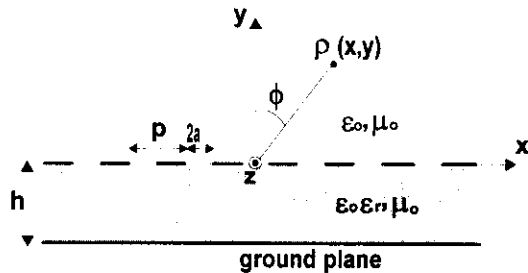


그림 1 접지된 유전체층 위에 위치한 주기적인 스트립 격자구조

### II. 본 론

접지된 유전체층 위에 위치한 무한한 주기적인 스트립 격자구조와 좌표계를 그림 1에 도시하였다. 유전체층의 두께는 h, 슬롯폭은 2a, 주기는 p이다. 또한 슬롯의 축방향인 z축에 대하여 TM 편파된 입사파가 임의의 각도로 입사한다고 가정한다.

먼저 자유공간과 도파관 영역에서 슬롯의 등가자기전

류에 의한 산란전자장은 공간조화함수의 선형적인 합으로 표현할 수 있는데 이들은 각각

$$\underline{H}_1 = \hat{z}_0 H_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{-j\gamma_n y - j\beta_n x} \quad (1)$$

$$\underline{E}_1 = \frac{H_0}{\omega \epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [-\hat{x}_0 \gamma_n + \hat{y}_0 \beta_n] A_n e^{-j\gamma_n y - j\beta_n x} \quad (2)$$

$$\underline{H}_2 = \hat{z}_0 H_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n [e^{j\gamma_n y} + e^{-j2\gamma_n h} e^{-j\gamma_n y}] e^{-j\beta_n x} \quad (3)$$

$$\underline{E}_2 = \hat{x}_0 \frac{H_0}{\omega \epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\gamma_n}{\epsilon_r} B_n [e^{j\gamma_n y} + e^{-j2\gamma_n h} e^{-j\gamma_n y}] e^{-j\beta_n x} \\ + \hat{y}_0 \frac{H_0}{\omega \epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\beta_n}{\epsilon_r} B_n [e^{j\gamma_n y} + e^{-j2\gamma_n h} e^{-j\gamma_n y}] e^{-j\beta_n x} \quad (4)$$

로 주어진다. 여기에서 x, y 방향의 파수는 각각

$$\beta_n = \beta_0 + 2n\pi/p, \quad \gamma_{n1} = \sqrt{k_0^2 - \beta_n^2}, \quad \gamma_{n2} = \sqrt{\epsilon_r k_0^2 - \beta_n^2}$$

이며,  $\beta_0 = k_0 \sin \theta$ 이다. 이때  $\theta$ 는 입사파의 입사각이다.

슬롯과 스트립에서 전자계의 접선성분이 연속이라는 경계조건을 부과하면 등가자기전류를 미지수로 하는 적분방정식을 얻을 수 있으며, 이로부터 근사해를 구하기 위하여 등가자기전류를 특성모드의 항으로 기저함수를 가정하고 펄스 Galerkin 방법으로 테스트하면 특성모드 이론으로 해석하는데 가장 중요한 가중행렬 고유방정식을 구할 수 있다. 이 가중행렬 고유방정식을 일반적인 수치방법으로 풀면 몇 개의 특성값과 이에 대응하는 특성모드를 찾을 수 있으며, 이들로부터 필요한 물리량들- 등가자기전류 또는 원거리 산란패턴-을 기술할 수 있다.

특성모드의 항으로 나타나는 등가자기전류와 원거리 산란패턴은 각각

$$M_z \approx 2\Delta \frac{H_0 p}{\omega \epsilon_0} \sum_{m=1}^M \frac{1}{1 + j b_m} \left( \sum_{i=1}^N U_{mi} \right) \sum_{i=1}^N U_{mi} e^{-j\beta_m x_i} \quad (5)$$

$$H_{z1} \approx -2\Delta^2 H_0 \sum_{m=1}^M \frac{1}{1 + j b_m} \left( \sum_{i=1}^N U_{mi} \right) \sum_{i=1}^N U_{mi} \\ \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\text{sinc}(n\pi\Delta/p)}{\gamma_{n1}} e^{-j k_n (\gamma_n \cos \phi - \beta_n \sin \phi)} \quad (6)$$

로 주어진다. 여기에서  $b_m$ 은 특성값이고, 나머지 항들에 대한 설명은 참고문헌 [5]의 21쪽을 참고하며, 주기적인 스트립 격자구조에서 슬롯의 주기와 유전체층의 두께를 가변하면 특이한 산란특성인 blazng 현상을 관찰할 수 있는데, 이와같은 구조를 선택하여 특성모드 이론으로 해석하기 위해서는 기본모드의 파수  $\beta_0$ 를 이미 알고 있어야 한다. 즉 입사파의 특정한 입사각도를 알고 있어야 한다.

### III. 수치해석 및 결과

먼저 전자기 산란특성중 특이한 산란특성인 Bragg blazng 현상을 관찰하기 위하여 선택한 파라미터들은 동작주파수가  $f=10.84$  GHz 이고, 주기  $p=28.1$  [mm], 슬롯폭  $2a=0.5p$ , 도파관의 높이  $h=0.1p$ , 상대유전율  $\epsilon_r=2.57$ 이다. 이 파라미터들은 무한 주기구조에서 참고문헌 [6]의 그림 11의 B점의 것으로, 이때 Bragg blazng 각도는  $29.5^\circ$ 로 관찰되었다.

이 구조를 특성모드 이론으로 해석하기 위하여 먼저 총 슬롯의 수 N을 60으로 선택하고 단일슬롯의 구분의 수를 5-21까지 가변하면서 펄스 Galerkin 방법을 이용하여 구한 가중 행렬 고유방정식을 풀어 특성값의 수렴도를 조사하여  $|b_m| \leq 1$ 인 특성값들이 약  $10^2$  차수로 양호하게 수렴하는 것을 알 수 있었으며 이로부터 수치계산시 적합한 결과를 주도록 구분의 수를 선택하였다.

입사각  $\alpha$ 가  $29.5^\circ$ 일 때 특성전류들에 대응되는 특성패턴들을 구해보면 각 특성패턴들은 고유의 복사각도를 가지며 특히 기여도가 큰 특성패턴의 복사각도는 각각  $\pm 29.5^\circ$ 가 관찰되었다. 각 특성패턴들의 산란패턴에 대한 기여도를 조사하기 위하여 특성패턴들의 상대적인 크기를 계산하면 주된 기여를 하는 특성패턴이 나머지의 것들보다 매우 크다는 사실을 알 수 있었다. 또한 대칭성을 가지는 특성패턴들이 산란패턴에 어떻게 기여하는지 알아보기 위해서 특성패턴의 실수값과 허수값의 상대적인 크기를 각각 구하여 살펴보면 각 특성패턴의 상대적인 실수값과 허수값은 (+), (-) 주빔의 각도 부근에서는 서로 보강간섭을 일으키고, 나머지 각도 부근에서는 서로 상쇄간섭을 일으켜 (+), (-) 주빔의 각도 부근에서 복사패턴의 주빔이 형성되리라는 사실을 알 수 있었다.

그림 2는 특성패턴들로부터 구한 산란패턴을 도시하였다. 이때 주빔의 각도는  $\pm 29.5^\circ$ 가 관찰되었는데  $+29.5^\circ$ 의 주빔은 반사파(reflected wave)와 상쇄간섭을 일으켜서 입사파와 반사파를 합하면 없어지고,  $-29.5^\circ$ 의 주빔은 회절파의 복사각도로서 바로 무한 주기구조에서 관찰된 입사파의 입사경로와 -1차 회절파의 회절경로가 일치하는 Bragg blazng 각도를 의미한다. 따라서 무한한 주기적인 스트립 격자구조를 특성모드 이론으로 해석하면 Bragg blazng 현상이 관찰될 수 있으며, Bragg blazng 현상이 관찰된 특이한 산란패턴은 단지 두 개의 특성모드패턴만으로 형성될 수 있다는 사실을 확인하였다.

Off-Bragg blazing 현상을 관찰하기 위하여 선택한 파라미터들은 동작주파수가  $f=10.84$  GHz이고, 주기  $p=27$  [mm], 슬롯폭  $2a=0.5p$ , 도파관의 높이  $h=0.1p$ , 상대유전율을  $\epsilon_r=2.57$ 이다. 이 파라미터들은 참고문헌 [6]의 그림 11의 A점의 것으로, 이때 Off-Bragg blazing 각도는 각각  $3.4^\circ$ 와  $74.8^\circ$ 가 관찰되었다.

슬롯의 주기가 자유공간 파장과 비슷한 크기이므로  $|b_m| \leq 1$  인 값들이 많이 나타나고 이들은 약  $10^{-2}$  차수로 수렴하는 것을 알 수 있었지만 Bragg blazing의 예와 마찬가지로 특성값의 절대치가 작지만 기여도가 적은 특성값들이 단지 몇 개가 있다는 사실을 알 수 있었다.

입사각  $\alpha$ 가 Off-Bragg blazing 각도의 하나인  $74.8^\circ$  일 때 특성전류에 대응하는 특성패턴들을 구한 결과 특성패턴들은 고유의 복사각도를 가지고 특히 기여도가 큰 주빔의 각도는  $\pm 3.4^\circ$  라는 것이 관찰되었다. 나머지 특성패턴들은 기여도가 상대적으로 매우 적다는 사실을 알 수 있었다. 대칭성을 가지는 특성패턴의 산란패턴에 대한 기여도를 조사하기 위하여 복소값을 가지는 특성패턴들의 실수값과 허수값을 각각 취하여 상대적인 크기를 구하여 비교해 보면 두 값이 서로 상쇄간섭과 보강간섭을 일으킴으로써 요구하는 산란패턴을 형성한다는 사실을 알 수 있었다.

그림 3은 특성패턴들로부터 산란패턴을 구하여 도시한 것이다. 입사파의 입사각  $\alpha$ 가 무한 주기구조에서 관찰된 Off-Bragg blazing 각도의 하나인  $74.8^\circ$ 일 때 산란패턴의 주빔의 각도는  $3.4^\circ$ 로써 입사파의 입사경로와  $-1$ 차 회절파의 회절경로가 서로다른 Off-Bragg blazing 현상이 나타남을 관찰할 수 있었다.

무한한 주기적인 스트립 격자구조를 실제 제작하여 blazing 현상을 관찰하기 위해서는 무한한 경우의 결과를 유추할 수 있다는 신뢰성이 있는 슬롯의 수가 유한한 구조를 해석, 설계 및 제작하여 실험하여야 한다. 따라서 슬롯의 수가 11개 정도인 유한한 주기구조에 대하여 특성모드 이론으로 해석하여 몇 개의 특성패턴들로 구성된 산란패턴들을 그림 4와 5에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 유한한 구조로 인하여 blazing 각도가 무한 주기구조보다 약간 어긋나지만 특이한 산란특성인 blazing 현상들이 잘 나타나고 있음을 알 수 있었다.

그러므로 이 구조를 제작 및 실험하면 유용한 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

#### IV. 결 론

접지된 유전체층 위에 위치한 주기적인 스트립 격자구조에 대한 전자기 산란문제를 특성모드 이론을 이용하여 해석하였다.

TM 편파의 경우 선택된 파라미터들을 이용하여 특성모드 이론으로 구한 가중행렬 고유방정식을 구하였고, 이를 일반적인 수치방법으로 풀어 기여도가 큰 몇 개의 특성값과 이에 대응하는 특성 모드전류를 구하였다. 이로부터 구한 결과들을 기존의 Chebychev 펄스 방법으로 구한 결과들과 비교하여 매우 양호한 결과를 얻음으로써 특성모드 해석방법의 타당성을 검증하였다.

전자기 산란특성중 특이한 산란특성인 blazing 현상이 기여도가 큰 대칭성을 갖는 몇 개의 특성모드 패턴의 합성으로 이 현상을 정확히 표현할 수 있음을 보여 주었다. 또한 실제 설계하여 실험할 때 유용한 슬롯의 수가 유한한 구조의 경우에도 blazing 현상이 잘 관찰될 수 있음을 보여 주었다.

#### 참고문헌

- [1] R. J. Garbacz, "A generalized expansion for radiated and scattered fields, " Ph. D. dissertation, Ohio state Univ., Columbus, 1968.
- [2] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Characteristic modes for aperture problems, " IEEE Microwave Theory Tech., vol. 33, no. 6, pp. 500-505, June 1985.
- [3] 윤 리호, 조 영기, "유전체로 채워진 유한한 슬롯을 가지는 평행평판 도파관 누설과 안테나 구조에 대한 특성모드 해석, " 전자공학회논문지, 34-A(10), pp. 1997.
- [4] 윤 리호, 조 영기, "주기적인 환형스트립을 갖는 원통형 및 동축선로 도파관 누설과 안테나 구조의 해석, " 한국전자파학회 종합학술발표회논문집, 한국전기연구소, pp. 93-95, 1997.
- [5] 윤 리호, "특성모드 이론을 이용한 유한하고 주기적인 슬롯배열을 갖는 도파구조에서의 복사 및 산란 해석," 박사학위논문, 경북대학교, 1998.
- [6] 이 종익, 조 응희, 윤 리호, 홍 재표, 박 진택, 조 영기, 손 현, "접지된 유전체층 위의 스트립 격자의 Off-Bragg blazing, " 전자공학회논문지, 33-A(10):90-97(1996)

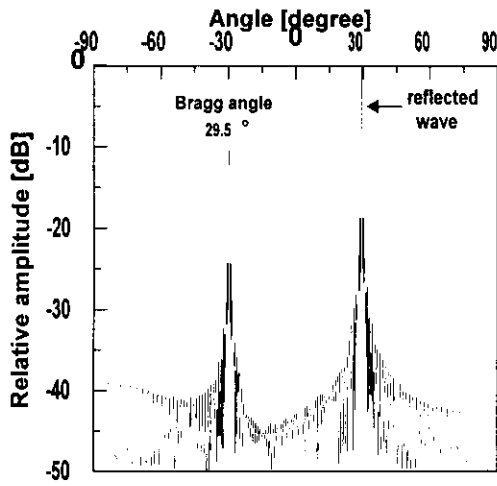


그림 2 정규화된 산란패턴(Bragg blazing)  
 ( $f=10.84\text{GHz}$ ,  $p=28.1\text{[mm]}$ ,  $2a=0.5p$ ,  $h=0.1p$ ,  $\epsilon_r=2.57$ )

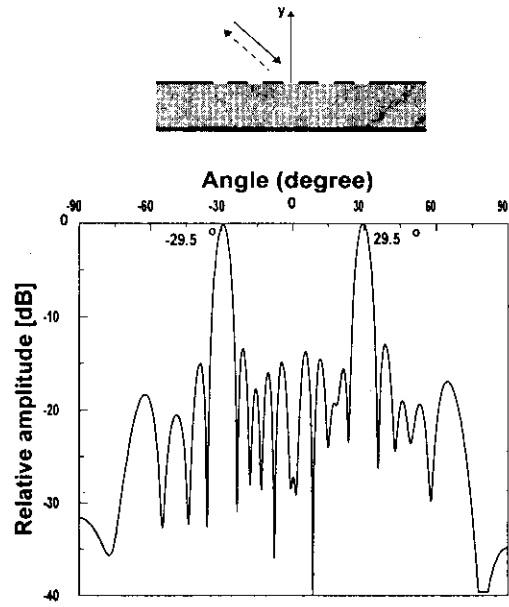


그림 5 유한한 구조의 경우 정규화된 산란패턴  
 (Bragg blazing)

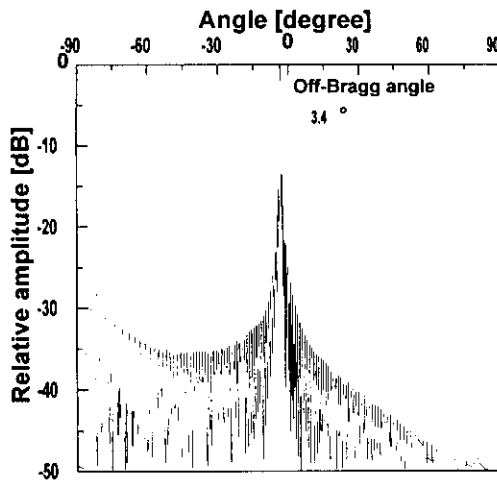


그림 3 정규화된 산란패턴(Bragg blazing)  
 ( $f=10.84\text{GHz}$ ,  $p=27\text{[mm]}$ ,  $2a=0.5p$ ,  $h=0.1p$ ,  $\epsilon_r=2.57$ )

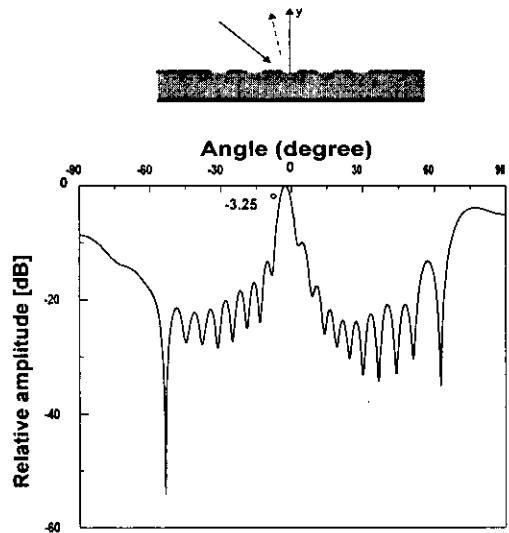


그림 4 유한한 구조의 경우 정규화된 산란패턴  
 (Off-Bragg blazing)