

# 접지된 유전체판 위에 위치한 스트립 격자에 TM편파된 평면파가 입사되는 경우에서의 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상 - 실험

正會員 백운석\*, 조응희\*\*, 이종익\*\*, 이철훈\*\*,  
홍재표\*\*\*, 조영기\*\*, 손현\*\*

## Experiments of Bragg and Off-Bragg Blazing Phenomena by Strip Grating over a Grounded Dielectric Slab for TM Polarization Case

W. S. Baek\*, U. H. Cho\*\*, J. I. Lee\*\*, C. H. Lee\*\*,  
J. P. Hong\*\*\*, Y. K. Cho\*\*, H. Son\*\* *Regular Members*

### 요 약

접지된 유전체판 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 격자구조에 TM편파된 평면전자파가 입사하는 경우에 대한 전자기적인 산란특성을 해석하고, 10GHz의 주파수에서 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상을 나타내는 스트립 반사격자구조의 파라미터값들을 각각 도출하였다. 접지 도체판과 스트립은 각각 알루미늄(Al)과 구리(Cu; 두께 08mm)를 사용하고, 파라핀( $\epsilon_r = 2.24$ )을 유전체로 하여 스트립 반사격자를 제작하였다. 제작된 스트립 격자에 TM 편파된 평면전자파를 입사시켜, 반사전력(reflection power)의 측정에 의한 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상을 실험적으로 관찰하였고 이론치와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다.

### ABSTRACT

An analysis method for the electromagnetic scattering of a TM polarized plane wave from a periodic strip grating over a grounded dielectric slab is considered from the viewpoint of reflection grating problem. The parameters

\*동양대학교 전자제어통신공학부  
\*\*경북대학교 전자공학과  
\*\*\*경일대학교 전자공학과  
論文番號: 97103-0320  
接受日字: 1997年 3月 20日

of strip gratings showing Bragg and Off-Bragg blazing phenomena at the frequency of 10GHz are derived theoretically. The strip grating structure is implemented using Aluminum plate(ground conductor), paraffin(dielectric material;  $\epsilon_r = 2.24$ ), and copper(strip conductor; 0.08mm thickness). The experimental results(reflection power) of Bragg as well as Off-Bragg blazing phenomenon for TM polarized plane wave have been compared with the theoretical results and fairly good agreements between theory and experiment have been observed.

I. 서 론

반사 회절격자(periodic reflection grating) 구조에서 Bragg blazing현상<sup>[1]</sup>과 Off-Bragg blazing현상<sup>[2]</sup>을 이용하면 입사파전력을 하나의 고차모드 회절파전력으로 변환할 수 있다. 입사파와 회절파의 경로가 동일한 Bragg blazing현상을 이용하면 회절파가 입사파 경로를 따라 되돌아가게 되어 feeding blockage 현상이 발생되나, Off-Bragg현상을 이용할 경우에는 입사경로와 회절경로가 서로 상이하므로 이러한 문제점이 일어나지 않는다.

구형 홈(rectangular groove) 격자구조에서의 Off-Bragg blazing현상은 TM편파된 평면전자파가 입사되는 경우에 대한 이론 및 실험적인 연구결과가 발표되었다<sup>[2]</sup>. 그러나 구형 홈 격자구조는 제작상의 어려움이 있고 비용이 많이 드는 단점을 갖고 있어, 이러한 단점이 없고 전자기적인 특성도 다양한 접지된 유전체판 위에 주기적으로 스트립 격자가 놓여 있는 격자구조로 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[3-5]</sup>. Nair<sup>[3]</sup>는 스트립 반사격자구조와 구형 홈 격자구조간의 전자기적 산란특성(Bragg현상)이 유사함을 실험적으로 관찰하였다. 또한 접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 구조에 TE편파 및 TM편파된 평면전자파가 입사되는 경우에 대하여 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상을 확인한 이론적인 연구가 최근에 발표되었으며<sup>[5]</sup>, TE편파된 평면전자파에 대한 Off-Bragg 현상은 실험적으로 확인이 되었으나<sup>[6]</sup> TM 편파에 대한 Off-Bragg blazing 현상의 실험적인 연구는 기존 학계에 보고된 바 없다.

본 논문은 참고문헌 [9]와 같은 격자구조에서 TM 편파된 평면전자파가 입사되는 경우에 대해 Bragg 및 Off-Bragg 현상을 관찰할 수 있는 주기격자구조의 파라미터값들을 이론적으로 도출하고, 이를 근거로 스트립 격자구조를 설계 및 제작하였으며 제작된 스트립 격자구조에 TM편파된 평면전자파를 입사시켜 반

사파전력을 측정하여 이론치와 실험치가 잘 일치함을 확인하였다.

II. 본 론

1. 이 론

접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 구조에 TM편파가 입사되는 경우를 그림 1에 도시하였다. 영역 (1)은 반무한 자유공간이고 영역 (2)는 비유전율이  $\epsilon_r$ , 높이가 h인 유전체층이다. 두께를 무시할 수 있을 정도로 얇은 도체 스트립의 폭은 a, 주기는 d이고 스트립은 y축에 평행하게 놓여 있으며 시간조화 함수는  $e^{j\omega t}$ 로 생략하였다.

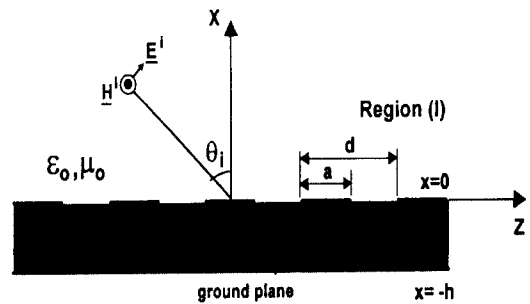


그림 1. 제안된 구조.  
Fig. 1 Geometry.

TM 편파된 입사파는

$$\underline{H}^i = \hat{y}_0 H_0 e^{-j\beta_0 z} e^{j\gamma_0 x} \tag{1}$$

와 같이 표현되고 여기에서  $\beta_0 = k_0 \sin \theta_i$ ,  $\gamma_0 = k_0 \cos \theta_i$ , 그리고  $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 이다.

영역 (1)과 (2)에서의 산란 전자장은 공간 조화함수의 합으로서 표현이 가능하고, 슬롯에서의 미지량인

등가자기전류밀도는 Chebyshev 다항식의 급수와 가장자리 조건을 만족하는 함수의 곱의 합 형태로 표현될 수 있으며, 슬롯에서의 접선성분 전자계의 연속조건을 부과하고 Galerkin 방법으로 testing하면 다음의 선형방정식을 얻을 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$\sum_{\ell=0}^{\infty} f_{\ell} Y_{i\ell} = H_i, \quad i=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

여기에서

$$Y_{i\ell} = -\frac{k_o \epsilon_r}{\eta_o d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( \frac{\cot \gamma_{n2} h}{j \gamma_{n2}} + \frac{1}{\epsilon_r} \frac{1}{\gamma_{n1}} \right) H'_{\ell n} H_{in},$$

$$I_i = \begin{cases} H_o \pi a, & i=0 \\ 0, & i \neq 0 \end{cases}, \quad \eta_o = \sqrt{\mu_o \epsilon_o},$$

$$\gamma_{n1} = \sqrt{k_o^2 - (\beta_o + \frac{2n\pi}{d})^2}, \quad \gamma_{n2} = \sqrt{\epsilon_r k_o^2 - (\beta_o + \frac{2n\pi}{d})^2},$$

$$H_{\ell n} = \int_{-a/2}^{a/2} \frac{T_{\ell}(2z/a)}{\sqrt{1-(2z/a)^2}} e^{-j \frac{2m}{d} z} dz \text{ 이다.}$$

(2) 식의 해인 미지의 계수  $f_{\ell}$ 을 구하면 각 영역에서의 전자장을 계산할 수 있고, 이로부터 입사파에 대한 반사파와 회절파의 전력을 구할 수 있다.

### 2. 스트립 격자의 설계 및 제작

앞절에서 제시한 이론을 바탕으로 접지된 유전체판 ( $\epsilon_r=2.24$ ) 위에 주기적인 스트립이 위치한 구조에 TM 편파된 주파수 10GHz의 평면전자파가 입사되는 경우에 대해 격자구조 파라미터들(주기, 스트립 폭, 유전체층 두께 등) 변화시키면서 Bragg현상과 Off-Bragg 현상을 확인하였다. 이때 입사파의 입사각과 고차모드 회절파의 회절각간에는  $\sin \theta_i + \sin \theta_n = n\lambda/d$ 의 조건이 만족되며, 여기에서  $\theta_i$ 는 입사각이고,  $\theta_n$ 은 n차 모드의 회절각이다(그림 2). 그리고 반사격자에 입사되는 입사파전력이 반사파전력으로 변환되지 않고 고차모드의 회절파전력으로 모두 변환되는 현상을 blazing이라고 하며, blazing현상은 입사파의 입사경로로 고차모드의 회절파가 되돌아가는( $\theta_i = |\theta_n|$ ) Bragg-blazing현상(그림 3(a))과 입사파와 고차모드의 회절파의 경로가 서로 상이한( $\theta_i \neq |\theta_n|$ ) Off-Bragg blazing현상(그림 3(b))으로 구분된다.

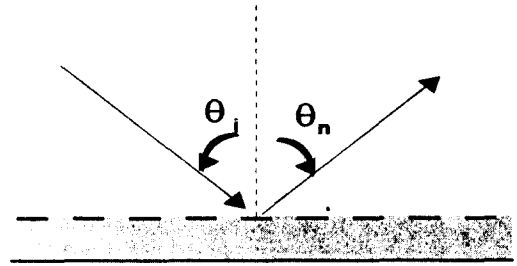
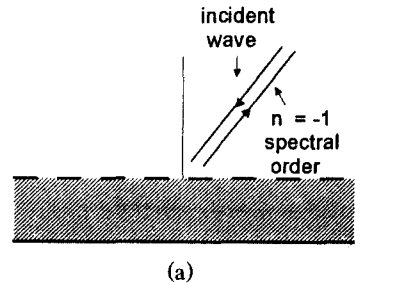
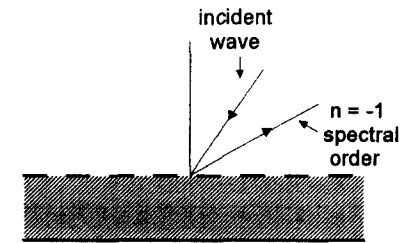


그림 2 반사격자에서의 입사각과 회절각.  
Fig. 2 Incident angle and scattered angle of reflection grating.



(a)



(b)

그림 3. Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상.

(a) Bragg blazing (b) Off-Bragg blazing

Fig. 3 Bragg and Off-Bragg blazing phenomena.

(a) Bragg blazing (b) Off-Bragg blazing

본 연구에서는 반사파( $n=0$  또는 specular mode)와  $n=-1$ 인 고차모드(spectral mode 또는 space harmonics)만이 전파 가능하도록 주기( $d=\lambda$ )는 고정하고, 반사격자구조의 파라미터 중에서 도체 스트립 폭과 유전체층의 두께만을 변화시키면서 변환효율(입사파전력과 고차모드 회절파전력의 비)이 최대가 되는 파라미터를 찾아서 스트립 격자를 설계 및 제작하였다.

그림 4는 제작된 스트립 격자의 실물사진이며, 접지 도체판, 유전체층, 그리고 도체 스트립으로 구성된다. 접지 도체판은 두께 10mm의 알루미늄판(1060×360 mm)을 사용하였고, 유전체로는 비유전율이 2.24인 파라핀을 사용하였으며, 도체 스트립(22개)은 두께 0.8mm의 동판을 이용하여 구현하였다.

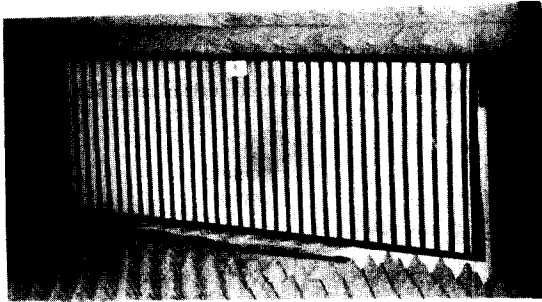


그림 4. 제작된 스트립 격자 사진.  
Fig. 4 Photograph of fabricated strip grating.

### III. 실험 및 결과

그림 5는 스트립 격자구조의 반사특성을 측정하기 위한 실험구성도이며, 시험주파수는 측정장소(무반사실)의 전자파환경(X-band)을 고려하여 10GHz로 결정하였다. 송·수신안테나는 표준 혼안테나를 사용하였으며, 송신측의 초고주파 신호발생원으로는 HP-8580A

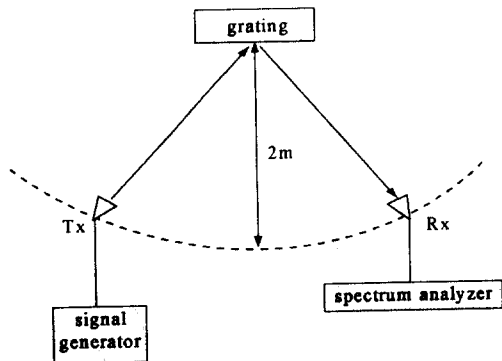


그림 5. 측정시스템의 구성도.  
Fig. 5 Diagram of measurement system.

를 사용하였고, 수신은 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer) HP-8563E를 사용하였다. 그리고 반사 격자구조와 송수신 안테나는 지면으로부터 0.8m의 높이에 설치하였으며, 반사격자의 중심을 기준으로 하여 반경이 2m되는 반원상에서 송·수신안테나를 이동시키며 반사특성을 측정하였다.

그림 6은 유전체의 비유전율( $\epsilon_r$ )은 2.24이고 주기구조 파라미터들은 각각  $d=\lambda$ ,  $a=\lambda/3$ ,  $h=0.15\lambda$ 인 스트립 격자구조에 TM편파된 평면전자파가 입사할 경우, 입사각도의 변화에 대한 반사특성의 이론치와 실험치를 나타내었으며 이론치와 실험치간에 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이론치와 실험치 모두 입사각이 Bragg각인  $\theta_B [= \sin^{-1}(\lambda/2d)] = 30^\circ$  근처에서 반사파전력이 최소가 되고, 이론치에서 반사파전력은 입사전력의 0.015%(-38.2dB)이며, 실험치에서는 반사파전력이 입사전력의 0.158%(-28dB)로 이론치와 실험치 사이에 다소 차이는 있으나 전체적으로 유사한 특성을 나타낸다. 이 경우에는 입사파전력의 대부분이  $n=-1$ 인 고차모드의 회절파전력으로 변환되는 경우이며 회절파의 전파 경로가 입사파의 경로로 되

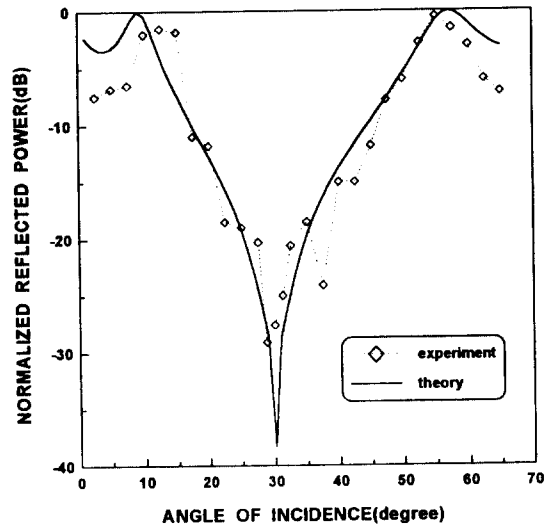


그림 6. 입사각의 변화에 따른 정규화된 반사파전력(Bragg).  
( $d=\lambda$ ,  $a=\lambda/3$ ,  $h=0.15\lambda$ ,  $\epsilon_r=2.24$ ,  $f=10\text{GHz}$ )  
Fig. 6 Normalized reflected power versus the incident angle (Bragg).  
( $d=\lambda$ ,  $a=\lambda/3$ ,  $h=0.15\lambda$ ,  $\epsilon_r=2.24$ ,  $f=10\text{GHz}$ )

돌아가게 되는 Bragg 현상임을 확인할 수 있다.

그림 7은 유전체의 비유전율( $\epsilon_r$ )은 2.24이고 주기구조 파라미터들은 각각  $d = \lambda$ ,  $a = 0.5\lambda$ ,  $h = 0.5\lambda$ 인 스트립 격자구조에 TM편파된 평면전자파가 입사할 때, 입사각도의 변화에 대한 반사특성의 이론치와 실험치를 나타내었으며 이론치와 실험치간에 다소 차이는 있으나 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 6의 경우와는 달리 반사전력이 최소가 되는 입사각이 3개 존재하는데, 입사각도가 Bragg 각인  $30^\circ$  근처에서 반사전력이 최소가 되는 것은 그림 6의 경우와 동일한 Bragg 현상이며, 나머지 두 개의 최소가 되는 입사각간에는 입사각과 회절파의 회절각간의 조건에서 알 수 있듯이 Off-Bragg 현상이다. 이론치에서는 입사각도가 각각  $23^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $37^\circ$  근처에서 최소가 되는데 실험치에서는  $19^\circ$ ,  $32.5^\circ$ ,  $42^\circ$ 로 약간의 각도오차가 있다.

그림 6과 그림 7에서 이론치와 실험치 사이에 발생한 오차의 원인은 스트립 격자구조의 제작시 발생된 오차(유전체층의 두께, 스트립 폭, 주기 등) 및 송·수

신안테나와 반사격자간에 송수신각의 부정확도(uncertainty)인 것으로 판단된다. 그리고 격자구조의 크기가 유한하고 송신안테나로부터 격자면까지의 거리가 제한된 관계로 인해서 격자면에서 입사파는 완전한 평면파로 되지 않으나 실험치에는 심각한 영향을 미치지 않는다<sup>[10]</sup>.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 참고문헌 [9]와 같은 접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 구조에 TM편파된 평면전자파가 입사되는 경우에 대해 주기구조 파라미터들(스트립 폭, 유전체 두께)을 변화시키면서 반사격자관점에서의 물리현상인 Bragg 및 Off-Bragg 현상을 이론적으로 확인한 후, 이를 근거로 스트립 격자를 제작하여 실험적으로 확인하였다. 본 연구구조에서 확인된 Off-Bragg 현상을 공학적으로 응용(multiplexer, frequency scanner 등)하게 되면 Bragg 현상을 이용할 경우에 발생하는 feeding blockage를 제거할 수 있다. 기존의 반사격자구조(rectangular groove, echelette grating 등)보다 접지된 유전체판 위에 주기적인 스트립 격자가 놓여 있는 구조가 제작이 어려움이 적으며 저비용일 뿐만 아니라 전자기적 특성도 다양한 장점이 있으므로, (de)multiplexer, twist reflector, frequency scanner 등의 용도로 활용이 가능하다.

#### 참 고 문 헌

1. E. V. Jull, J. W. Heath, and G. R. Ebbeson, "Grating that diffract all incident energy," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 67 no. 4, pp. 557-560, April 1977.
2. W. Chen, D. G. Michelson, and E. V. Jull, "Off-Bragg TM blazing of rectangular groove gratings," *International Symposium on Electromagnetic Theory, St. Petersburg, Russia*, pp. 311-313, May 1995.
3. K. A. Jose and K. G. Nair, "Reflector-Backed perfectly blazed strip gratings simulated corrugated reflector effects," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 2, pp. 86-87, Jan. 1987.
4. H. A. Kalhor, "Electromagnetic scattering by a dielectric slab loaded with a periodic array of strips

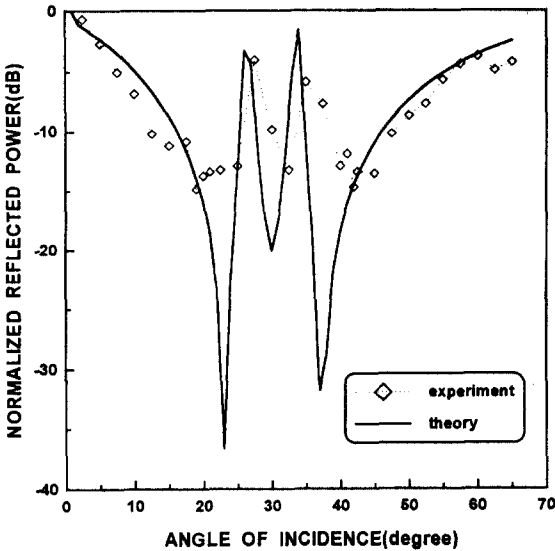


그림 7. 입사각의 변화에 따른 정규화된 반사파전력(Off-Bragg).

( $d = \lambda$ ,  $a = 0.5\lambda$ ,  $h = 0.5\lambda$ ,  $\epsilon_r = 2.24$ ,  $f = 10\text{GHz}$ )

Fig. 7. Normalized reflected power versus the incident angle (Off-Bragg).

( $d = \lambda$ ,  $a = 0.5\lambda$ ,  $h = 0.5\lambda$ ,  $\epsilon_r = 2.24$ ,  $f = 10\text{GHz}$ )

