

論文97-34D-5-1

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

(Experiments of Bragg and Off-Bragg blazing phenomena by strip grating over a grounded dielectric slab for TE polarization case)

白雲 碩 \*, 趙 雄 熙 \*\*, 李 喆 勳 \*\*, 趙 榮 基 \*\*, 孫 鉉 \*\*

(W. S. Baek, U. H. Cho, C. H. Lee, Y. K. Cho, and H. Son)

## 요 약

접지된 유전체판 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 격자구조에 TE 편파된 평면전자파가 입사하는 경우에 대하여 전자기적 산란특성을 해석하고, 10GHz의 주파수에서 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상을 나타내는 스트립 반사격자구조의 파라미터값들을 도출하였다. 접지 도체판과 스트립은 각각 알루미늄(Al)과 구리(Cu; 두께 0.08mm)를 사용하고, 유전체로는 파라핀( $\epsilon_r=2.24$ )을 이용하여 반사격자를 제작하였으며, 제작된 스트립 격자의 반사전력을 측정하여 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상을 실험적으로 관찰하였고 이론치와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다.

## Abstract

An analysis method for the electromagnetic scattering of a TE polarized plane wave from a periodic strip grating over a grounded dielectric slab is considered from the viewpoint of reflection grating problem. The strip gratings showing Bragg and Off-Bragg blazing phenomena at the frequency of 10GHz are designed, respectively. 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) for Bragg as well as Off-Bragg blazing phenomenon have been compared with the theoretical results and fairly good agreements between theory and experiment have been observed.

## I. 서 론

주기적인 격자구조(periodic grating)는 초고주파대역에서 광파대역에 이르는 넓은 주파수범위에서 WDM(Wavelength Division Multiplexing), laser 공진기

\* 正會員, 東洋大學校 電子制御通信工學部  
(Dept. of Elec. Cont. Comm. Eng., Dongyang Univ.)

\*\* 正會員, 慶北大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

接受日字:1997年3月20日, 수정완료일:1997年4月28日

기 및 주파수 scanner 등에 사용됨으로써 그 중요성이 증가되어 왔다<sup>11-31</sup>. 이러한 목적으로 사용되는 주기적인 반사격자구조의 전자기적인 특성은 입사파전력이 반사파전력으로 변환되지 않고 하나의 고차모드 회절파전력만으로 변환되어야 한다. Bragg blazing현상을 이용하면 높은 회절효율을 얻을 수 있으나, 회절파가 입사파 경로를 따라 송신안테나로 되돌아가게 되는(feeding blockage) 단점이 있어, 이 단점을 극복하기 위해서는 별도의 소자(Magic Tee, isolator)를 필요로 하게 된다. Off-Bragg현상을 이용할 경우에는 입사경로와 회절경로가 서로 상이하므로 Bragg blazing 현상

의 이용시에 발생하는 단점이 생기지 않는다. 구형 홈 (rectangular groove) 격자구조에서의 Off-Bragg blazing 현상은 TM 편파된 평면전자파가 입사되는 경우에 대해서는 이론 및 실험적인 연구결과가 발표되어 왔지만, TE 편파의 경우에 대해서는 현재까지 보고된 바가 없다<sup>14)</sup>.

구형 홈 격자구조는 제작상의 어려움이 있고 비용이 많이 드는 단점을 갖고 있어, 이러한 단점이 없고 전자 기적인 특성도 다양한 접지된 유전체판 위에 주기적으로 스트립 격자가 놓여 있는 격자구조로 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>15-9)</sup>. Nair<sup>15)</sup>는 스트립 반사격자구조와 구형 홈 격자구조간의 전자기적 산란 특성이 유사함을 실험적으로 두 구조에서의 Bragg 현상을 관찰하였다. 또한 접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 구조에 TE 편파 및 TM 편파된 평면전자파가 입사되는 경우에 대하여 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상을 확인한 이론적인 연구가 최근에 발표되었으나<sup>17,8)</sup>, 현재까지 Off-Bragg blazing 현상에 대한 실험적인 연구는 기존 학계에 보고된 바 없다.

본 논문에서는 접지된 유전체판 위에 주기적인 스트립이 놓여 있는 격자구조에 TE 편파된 평면전자파가 입사되는 경우에 대해 Bragg 및 Off-Bragg 현상을 관찰할 수 있는 주기격자구조의 파라미터값들을 이론적으로 계산하고, 이를 근거로 반사격자구조를 설계 및 제작하였으며 제작된 스트립 격자구조에 TE 편파된 평면전자파를 입사시켜 반사파전력을 측정하여 이론치와 실험치가 잘 일치함을 확인하였다.

## II. 본 론

### 1. 이론

접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 구조에 TE 편파가 입사되는 경우를 그림 1에 도시하였다. 영역 (1)은 반무한 자유공간이고 영역 (2)는 비유전율이  $\epsilon_r$ , 높이가  $h$ 인 유전체층이다. 두께를 무시할 수 있을 정도로 얇은 도체 스트립의 폭은  $a$ , 주기는  $d$ 이고 스트립은  $y$ 축에 평행하게 놓여 있으며 시간조화 함수는  $e^{j\omega t}$ 로 생각하였다.

TE 편파된 입사파는

$$E^i = \hat{y}_0 E_0 e^{-j\beta_0 z} e^{j\gamma_0 x} \quad (1)$$

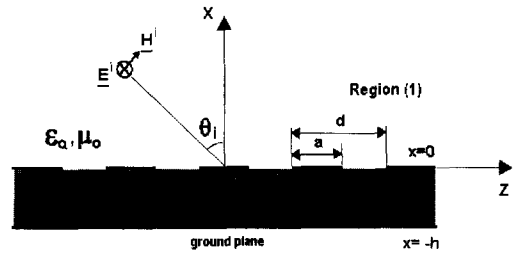


그림 1. 접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 격자구조에 TE 편파된 평면전자파가 입사되는 구조

Fig. 1. Geometry of TE polarized plane wave incident on the strip grating over a grounded dielectric slab.

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 미지량인 도체 스트립에 유기된 표면전류밀도는 Chebyshev 다항식의 급수와 가장자리 조건을 만족하는 함수의 곱의 합 형태로 표현될 수 있으며, 슬롯에서의 접선성분 전계의 연속조건과 스트립에서 접선성분 자계의 불연속조건을 부과하고 Galerkin 방법으로 testing하면 다음의 선형방정식을 얻을 수 있다<sup>17,8)</sup>.

$$\sum_{i=0}^{\infty} f_i Z_{i\ell} = E_i, \quad i=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

여기에서

$$Z_{i\ell} = -\frac{2k_0 \eta_0}{(1+R)\pi da} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{H_{\ell n}^i H_{in}^{\ell}}{j\gamma_{n2} \cot \gamma_{n2} h - \gamma_{n1}}$$

$$E_i = \begin{cases} E_0, & i=0 \\ 0, & i \neq 0 \end{cases}, \quad \eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

$$\gamma_{n1} = \sqrt{k_0^2 - (\beta_0 + \frac{2n\pi}{d})^2}$$

$$\gamma_{n2} = \sqrt{\epsilon_r k_0^2 - (\beta_0 + \frac{2n\pi}{d})^2}$$

$$H_{i,n} = \int_{-a/2}^{a/2} \frac{T_i(2z/a)}{\sqrt{1-(2z/a)^2}} e^{-j\gamma_{n2} z} dz$$

$$R = \frac{j\cos\theta_i \sin(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} h) - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} \cos(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} h)}{j\cos\theta_i \sin(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} h) + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} \cos(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} h)}$$

이다.

(2) 식의 해인 미지의 계수  $f_i$ 를 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 TE편파된 주파수 10GHz의 평면전자파가 입사되는 경우에 대해 격자구조 파라미터들(주기, 스트립 폭, 유전체층 두께 등) 변화시키면서 Bragg현상과 Off-Bragg현상을 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 n 차 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.

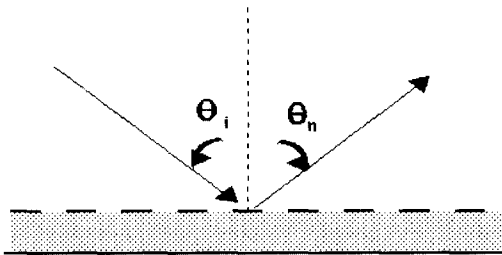


그림 2. 반사격자에서의 입사각과 회절각  
Fig. 2. Incident angle scattered angle of reflection grating.

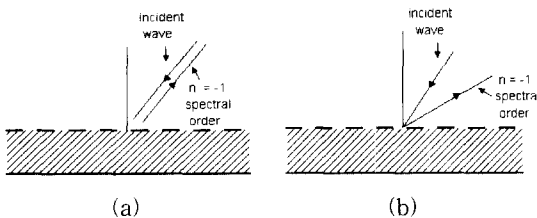


그림 3. Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상  
(a) Bragg blazing (b) Off-Bragg blazing  
Fig. 3. Bragg and Off-Bragg blazing phenomena.  
(a) Bragg blazing (b) Off-Bragg blazing

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 고정하

고, 반사격자구조의 파라미터 중에서 도체 스트립 폭과 유전체층의 두께만을 변화시키면서 변환효율(입사파전력과 고차모드 회절파전력의 비)이 최대가 되는 파라미터를 찾아서 스트립 격자를 설계 및 제작하였다. 표 1에는 실제 제작된 스트립 격자구조의 파라미터들을 나타내었으며, 그림 4는 제작된 스트립 격자의 실물사진이다. 제작된 스트립 격자구조는 접지 도체판, 유전체층, 그리고 도체 스트립으로 구성되며 접지 도체판은 두께 10mm의 알루미늄판(360 x 1060 mm)을 사용하였고, 유전체로는 비유전율이 2.24인 파라핀을 사용하였으며, 도체 스트립은 두께 0.08mm의 동판을 이용하여 구현하였다.

표 1. 스트립 격자 파라미터  
Table 1. Parameters of strip gratings.

격자구조 파라미터	격자구조A(Bragg)	격자구조B(Off-Bragg)
스트립폭(a)	6.6 mm	6 mm
주기(d)	30 mm	30 mm
유전체층 높이(h)	6.5 mm	16.6 mm
스트립 갯수(N)	11개	11개
비유전율( $\epsilon_r$ )	2.24(파라핀)	2.24(파라핀)

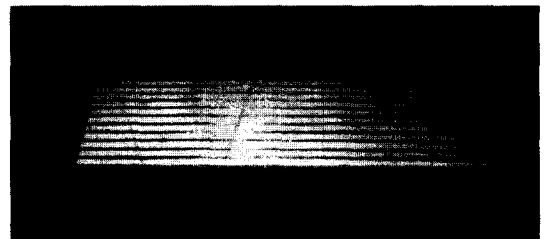


그림 4. 제작된 스트립 격자 사진  
Fig. 4. Photograph of fabricated strip grating.

Ⅲ. 실험 및 고찰

그림 5는 반사격자구조의 회절특성을 측정하기 위한 실험구성도이며, 시험주파수는 측정장소(옥외 운동장)의 전자파환경, 격자구조 제작의 편의성 및 안테나의 원거리조건 등을 고려하여 10GHz로 결정하였다. 송·수신안테나는 표준 혼안테나를 사용하였으며, 송신측의 초고주파 신호발생원으로는 HP-8580A를 사용하였고 수신은 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer) HP-8563E를 사용하였으며 수신단의 수신신호가 미약하여 신호증폭기(preampifier) HP-8449B를 이용하였다.

그리고 반사 격자구조와 송수신 안테나는 지면으로부터 1.5m의 높이에 설치하였으며, 반사격자의 중심을 기준으로 하여 반경이 10m되는 반원상에서 송·수신 안테나를 이동시키며 반사특성을 측정하였다.

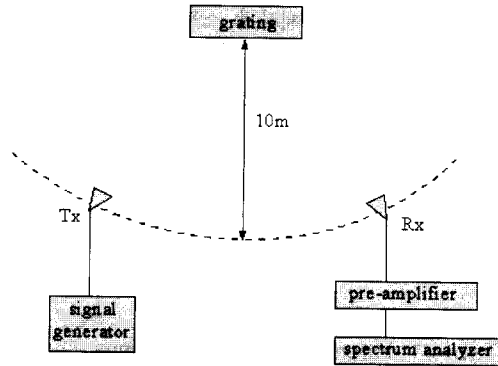


그림 5. 측정시스템의 구성도

Fig. 5. Diagram of measurement system.

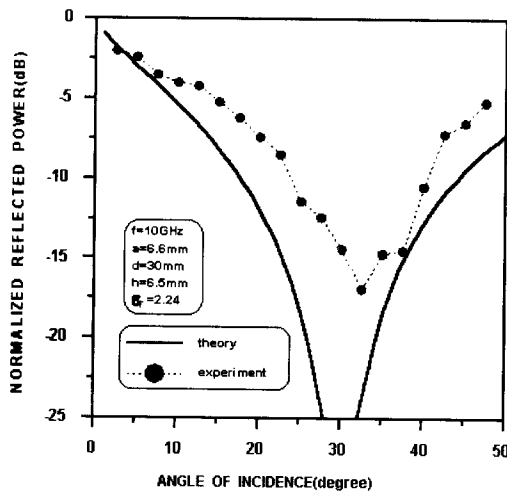


그림 6. 입사각의 변화에 따른 정규화된 반사파전력 (Bragg 현상)

Fig. 6. Normalized reflected power versus the incident angle.(Bragg blazing)

그림 6은 주기 격자구조의 파라미터를 Bragg blazing 현상을 관찰할 수 있도록 표1의 격자구조 A 수치들로 선택하고 TE편파된 평면전자파가 입사할 때, 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 반사파전

력이 최소가 되고, 이론치에서 반사파전력은 입사전력의 0.0005%(-53dB)이며, 실험치에서는 반사파전력이 입사전력의 5.7%(-13.6dB)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 되돌아가게 되는 Bragg 현상임을 확인할 수 있다.

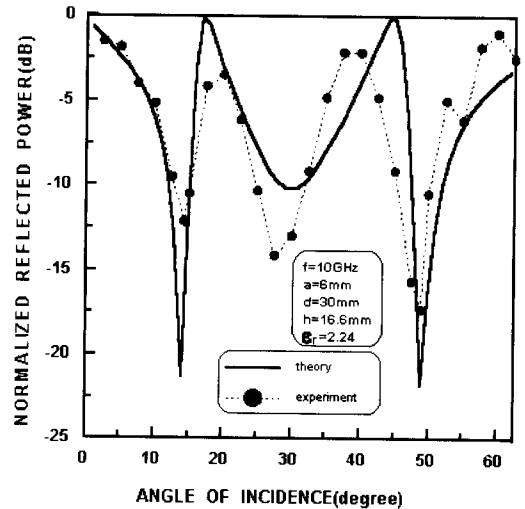


그림 7. 입사각의 변화에 따른 정규화된 반사파전력 (Off-Bragg 현상)

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

그림 7은 주기 격자구조의 파라미터를 Off-Bragg blazing 현상을 관찰할 수 있도록 표1의 격자구조 B 수치들로 선택하고 TE편파된 평면전자파가 입사할 때의 입사각도에 따른 반사특성의 이론치와 실험치이다. 이론치와 실험치간에 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있으며, 그림 6과 달리 반사전력이 최소가 되는 입사각이 각각  $14.3^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $48.85^\circ$  근처에서 존재하게 되는데, 입사각도가 Bragg 각인  $30^\circ$  근처에서 반사전력이 최소가 되는 것은 그림 6의 경우와 동일한 Bragg 현상이다. 그리고 입사각이 각각  $14.3^\circ$  와  $48.85^\circ$ 에서 반사전력이 최소가 되는 것은 입사각과 회절파의 회절각간의 조건에서 알 수 있듯이, 입사각도가  $14.3^\circ$  인 경우  $n=-1$ 인 고차모드의 회절각은  $-48.85^\circ$ 이고 역으로 입사각도가  $48.85^\circ$ 인 경우의  $n=-1$ 인 고차모드의 회절각은  $-14.3^\circ$ 가 되므로 전술한 바와 같이 입사파의 경로와 고차모드의 회절파의 경로가 서로 상이한 경우인 Off-Bragg

현상임을 확인할 수 있다. 따라서 격자구조 B에서는 Bragg 및 Off-Bragg현상을 동시에 관측할 수 있다<sup>[4]</sup>.

그림 6과 그림 7에서 이론치와 실험치 사이에 발생된 오차의 요인으로는 첫째, 제작된 스트립 반사격자의 접지면이 실제 구성된 주기격자면 보다 넓어서 주기격자 가장자리의 접지면에 의한 직접반사, 둘째로는 송수신안테나와 반사격자간에 송수신각의 부정확도(uncertainty), 마지막으로 주기구조의 제작시 발생된 오차(유전체층의 두께, 스트립 폭, 주기 등)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>[11]</sup>.

반사격자에서의 Bragg 및 Off-Bragg현상을 공학적으로 응용하는 경우에 고려되어야 할 점으로는 고차모드의 변환효율(diffraction efficiency), 반사격자의 유효면적(effective area), 주파수 선택도(frequency selectivity) 등이다. 변환효율은 입사파전력과 고차모드 회절파전력의 비로 표현되며 blazing현상이 일어나는 입사각 주변의 넓은 각도 범위에서, 혹은 고정된 입사각에 대하여 입사파 주파수가 가변될 경우의 넓은 주파수범위에서 높아야 한다. 반사격자의 유효면적은 입사각의 여현에 비례하기 때문에 입사각이 작은 경우에 유효면적이 넓어 유리하다. Bragg blazing의 경우 입사각은  $\theta_b = \sin^{-1}(\lambda/2d)$ 에 의해 결정되며 주기가 커지면 Bragg각이 작아지고 역으로 주기가 작아지면 Bragg각이 커지게 되나, Off-Bragg blazing의 경우는 이와 다르다.<sup>[17,8]</sup> 그리고 입사각을 고정하고 입사파의 주파수 변화에 따라 회절파의 경로가 달라지게 되는데, 작은 주파수의 변화에 큰 회절각의 변화를 얻게 되면(회절각이 큰 경우) 주파수 선택도가 좋은 경우가 된다. Bragg현상이 Off-Bragg현상에 비해 비교적 넓은 입사각도 범위에서 변환효율이 높은 반면 송신신호가 송신안테나로 되돌아오는 feeding blockage현상을 가지게 된다. 그러나 Off-Bragg현상을 이용하면 이러한 단점을 해결할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 접지된 유전체층 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 구조에 TE편파된 평면전자파가 입사되는 경우에 대해 주기구조 파라미터들(스트립 폭,

유전체 두께)을 변화시키면서 반사격자관점에서의 물리 현상인 Bragg 및 Off-Bragg현상을 이론적으로 확인한 후, 이를 근거로 스트립 격자를 제작하여 실험적으로 증명하였다. 본 연구구조에서 확인된 Off-Bragg현상을 공학적으로 응용(multiplexer, frequency scanner 등)하게 되면 Bragg현상을 이용할 경우에 발생하는 feeding blockage를 제거할 수 있다. 또한 격자구조에서 회절각이 클 경우 입사파의 작은 주파수 변화에도 큰 회절각의 변화를 주게 되어 주파수선택도는 좋아지지만, Bragg현상을 이용하여 큰 회절각을 얻기 위해서는 입사각이 커져야 하므로(즉, 주기를 파장보다 작게 하여 Bragg각을 크게 하여야 하므로) 반사격자의 유효면적(effective area)이 매우 감소하게 되는 단점이 있다. 그러나 Off-Bragg현상을 이용하게 되면 작은 입사각으로 큰 회절각을 얻게 되어 유효면적 관점에서도 장점이 있다. 기존의 반사격자구조(rectangular groove, echelette grating 등)보다 접지된 유전체판 위에 주기적인 스트립 격자가 놓여 있는 구조가 제작, 설치 및 비용면뿐만 아니라 전자기적 특성도 다양한 장점이 있으며, (de)multiplexer, twist reflector, frequency scanner 등의 용도로 활용이 가능하다.

앞으로의 연구과제는 본 연구에서 제안된 형태의 스트립 격자구조에 TM 편파된 전자파가 입사되는 경우에 대한 이론적인 연구결과<sup>[7]</sup>를 실험을 통해 확인하는 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Y. Fujii, K. Aoyama, and J. Minowa, "Optical demultiplexer using a silicon Echelette grating," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-16, no. 2, pp. 165-169, Feb. 1980.
- [2] P. S. Henry and J. T. Ruscio, "A low-loss diffraction grating frequency multiplexer," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-26, no. 6, pp. 428-433, June 1978.
- [3] R. Lagerholm, "Study of metallic strip gratings for frequency scanning," *Micro-wave and Opt. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 14, Dec. 1992.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] H. A. Kalhor, "Electromagnetic scattering by a dielectric slab loaded with a periodic array of strips over a ground plane," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-36, no. 1, pp. 147-151, Jan. 1988.
- [7] 이종익, 조응희, 윤리호, 홍재표, 박진택, 조영기, 손현, "접지된 유전체층 위의 스트립 격자의 Off-Bragg blazing," 전자공학회 논문지, 제 33권 A편 제 10호, pp. 90-97, 1996
- [8] W. S. Baek, C. H. Lee, U. H. Cho, J. I. Lee, L. H. Yun, Y. K. Cho, and H. Son, "TE Blazing phenomena in strip grating over a grounded dielectric slab as a fast wave structure," *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, C EEM'96, Xi'an, China*, pp. 164-167, Nov. 1996.
- [9] 고지환, 백운석, 윤리호, 이종익, 조응희, 이철훈, 홍재표, 조영기, 손현, "접지된 유전체층 위에 위치한 주기적인 스트립 격자구조에 의한 2차원적인 산란," 통신학회논문지 제21권 제 10호 1996
- [10] Y. K. Cho, U. H. Cho, and J. H. Ko, "Blazing of the periodic strip grating on a grounded dielectric ; TE polarisation case," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 23, pp. 2035-2037, Nov. 1995.
- [11] E. V. Jull and G. R. Ebbeson, "The reduction of interference from large reflecting surface," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-25, no. 7, pp. 565-570, July 1977.

## — 저 자 소 개 —



白雲碩(正會員)

1960年 1月 3日生. 1982年 2月 慶北大學校 電子工學科(工學士). 1985年 8月 慶北大學校 大學院 電子工學科 電波工學專攻(工學碩士). 1989年 2月 ~ 1995年 8月 國防科學研究所 先任 研究員. 1995年 9月 ~ 현재 東洋大

學校 電子制御通信工學部 專任講師.

趙榮基(正會員) 第 33 卷 A編 第 8 號 參照

현재 慶北大學校 電子工學科 教授



李喆勳(正會員)

1970年 7月 16日生. 1995年 2月 慶北大學校 電子工學科(工學士). 1997年 2月 慶北大學校 電子工學科(工學碩士) 1997년 3월 ~ 현재 慶北大學校 大學院 電子工學科 電波工學專攻 博士科程

趙榮基(正會員) 第 33 卷 A編 第 8 號 參照

현재 慶北大學校 電子工學科 教授

孫鉉(正會員) 第 33 卷 A編 第 8 號 參照

현재 慶北大學校 電子工學科 博士科程