

접지된 유전체 슬랩 위에 위치한 주기적인 스트립 격자 구조에서의 전자기적 산란공진: TE 편파 경우의 Bragg Blazing 현상

Electromagnetic Scattering Resonances on a Periodic Strip Grating on a Grounded Dielectric Slab: Bragg Blazing Phenomena of TE Polarization Case

조웅희* · 홍재표** · 조영기***

U. H. Cho* · J. P. Hong** · Y. K. Cho***

요 약

접지된 유전체슬랩 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 격자구조에 대한 전자파 산란특성을 TE편파의 경우에 대하여 반사격자(reflection grating) 관점과 누설파안테나(leaky wave antenna) 관점에서 조사하였다. 수치해석 결과로 Bragg blazing 현상을 두가지 형태(공진형과 비공진형)로 구분하였으며 그 특성(복소전파상수, 산란특성, 전류밀도분포)에 대하여 논의하였다.

Abstract

The electromagnetic scattering characteristics by a periodic strip grating on a grounded dielectric slab for TE polarization case is examined from the viewpoints of both the reflection grating and the leaky wave antenna problems. Numerical results for two kinds of Bragg blazing (resonance type and non-resonance type) phenomena are given and some discussions on the properties such as complex propagation constants, scattering characteristics, and distributions of strip current density are presented.

I. 서 론

광학회절격자(optical diffraction gratings)에서의 Wood's anomalies에 관한 연구는 1902년 Wood교수에 의해 실험결과^[1]가 처음으로 학계에 보고된

이래로 수많은 연구가 수행되어 오고 있다. 1902년 대에는 현재의 격자이론이 태동되기 이전이었으므로 산란현상에 대한 이론적인 설명이 불가능하여 변칙이란 의미의 'anomaly'로서 지칭되었지만, 현재는 Maxwell 방정식에 기초한 격자이론을 이용하여 주기격자구조에서 확인되는 자연스러운 산란현

* 경동정보대학 전자정보과(Dept. of Electronic Information, Kyungdong College of Techno-Information)

** 경일대학교 전자정보공학과(Dept. of Electronic Information, Kyungil Univ.)

*** 경북대학교 전자공학과(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

· 논문 번호 : 990316-028

· 수정완료일자 : 1999년 4월 15일

상으로 받아들여지고 있다. Twersky는 다중산란(multiple-scattering)방법^[2]을 이용하여 제한적인 격자구조에 대해 격자구조 자체의 공진과 산란현상과의 연관성을 설명하였으며, Hessel 및 Oliner교수는 단순화된 모델로서 정현적으로 변조된 임피던스표면모델(sinusoidally-modulated reactance surface model)을 이용하여 누설파안테나 관점에서의 격자구조의 공진(free resonance)현상과 반사격자관점에서의 산란공진(scattering resonance 또는 forced resonance)현상간의 연관성에 대하여 설명하고자 하였다^[3]. 또한 Oliner교수 등은 본 연구구조(유전체슬랩의 비유전율을 자유공간의 경우로 하여)에 대해 등가회로망(equivalent network)이론을 이용하여 단면공진조건(transverse resonance condition)으로부터 누설파안테나 관점에서의 복소전파상수(complex propagation constant)를 구하였고, 등가회로망이론을 이용하여 구한 산란특성과의 연관성을 제한적인 경우에 대하여 설명하였다^[4]. 제시된 해석결과를 보면 누설파안테나관점에서 구한 복소전파상수는 어느 정도 타당한 결과를 주지만, 반사격자관점에서 전력보존법칙(power conservation law)과 가역성(reciprocity)면에서 보면 전력보존법칙은 만족되지만 가역성이 만족되지 않는 오류를 범하였는데, 그 원인은 사용된 등가임피던스의 제한 조건과 고차모드들을 무시 한데서 기인된 것이었다. 또한 최근에 본 논문의 연구구조에 대하여 반사격자관점에서 TE 및 TM편파된 평면파가 입사되는 경우에서의 blazing현상을 관찰한 이론^{[5],[6]} 및 실험결과^{[7],[8]}가 보고되었으며, 동시에 반사격자관점과 누설파안테나관점과의 연관성에 대한 연구결과^[9]도 보고된 바 있으나, 누설파안테나관점에서 구한 복소전파상수가 각각의 경우에서 격자구조를 통해 도파되는 최저차 모드인 TM_0 모드와 TE_1 모드에 대한 결과만으로 반사격자관점에서 관찰되는 blazing현상과의 연관성을 조사했던 오류를 지니고 있다. 본 논문의 연구구조에서 조사된 blazing현상은 Bragg blazing현상과 Off-Bragg blazing현상으로

구분 할 수 있는데, 본 논문에서는 TE편파 경우의 Bragg blazing현상에 관하여 상세히 기술하고, TM편파 경우의 Bragg blazing현상과 Off-Bragg blazing현상은 본 논문의 후속 논문에서 다루고자 한다.

II. 본 문

접지된 유전체슬랩 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 격자구조를 그림 1에 도시하였다. 스트립은 완전 도체이고 두께는 무시할 만큼 얇으며 유전체슬랩은 손실이 없으며 유전율은 $\epsilon_0\epsilon_r$, 투자율은 μ_0 이다. 유전체슬랩의 두께는 h 이고 주기는 d 이며 스트립의 폭은 a 이고 스트립 축은 x 축과 평행하게 놓여 있다.

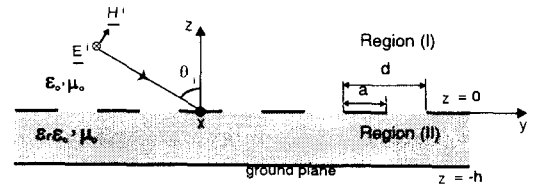


그림 1. 해석구조와 좌표계

Fig. 1. Geometry and coordinate systems.

본 논문의 연구구조에 대한 해석방법은 반사격자관점과 누설파안테나관점에 대하여 각 경계면에서의 경계조건과 스트립에서 접선성분 자계의 불연속 조건으로부터 스트립에 유기되는 전기전류밀도(surface electric current density)를 미지수로 하는 선형행렬방정식을 유도하는 수치해석방법^{[9],[10]}과 각 경계면에서의 경계조건과 등가원리를 이용하여 해석영역을 두 영역으로 분리하고 슬롯에서 접선성분 전계의 연속조건으로부터 슬롯에서의 등가자기전류밀도(equivalent magnetic current density)를 미지수로 하는 선형행렬방정식을 유도하는 수치해석방법^[9]이 있는데 각각의 경우에 있어서 동일한 해석결과를 주며, 본 논문에서는 참고문헌^[9]의 수치해석방법을 이용하였다.

표 1. 약어목록

Table 1. Nomenclatures.

비고		반사격자관점	누설파안테나관점
n차 모드의 위상정수	y축 방향 위상정수	$\beta_n = \beta_0 + \frac{2n\pi}{d}$ ($\beta_0 = k_0 \sin \theta_i$)	$\beta_{mn} = \beta'_{m0} + \frac{2n'\pi}{d}$ (β'_0)
	z축 방향 위상정수 (영역 II)	$\gamma_n = \sqrt{(k_1^2 - \beta_n^2)}$ ($\gamma_0 = \sqrt{k_1^2 - \beta_0^2}$)	$\gamma'_{mn} = Re\sqrt{(k_1^2 - (\beta'_{mn} - ja)^2)}$ (γ'_0)
n차 공간조화모드		n	n'

(주) 누설파 안테나 관점에서 mn 중 m은 도파모드의 차수이고 n은 n' 차의 공간조화모드를 의미하며, ()안은 최저차 도파모드의 기본파수이다.

반사격자관점과 누설파안테나관점에서의 표기상에 혼돈을 피하기 위하여 표 1에 본 논문에서 사용되는 약어를 수록하였다.

누설파안테나관점에서의 해석은 인가되는 전파가 없는 경우로 도파구조(격자구조) 자체의 공진(free resonance)시의 고유치(eigenvalue)인 복소전파상수(complex propagation constant)를 계산한 후, 각각의 수치해석과정에서의 미지수인 슬롯에서의 등가표면자기전류밀도 또는 스트립상에서의 등가표면전류밀도의 분포를 구한 다음 안테나로서의 복사패턴등을 구하는 것으로 요약할 수 있다. 본 논문의 해석구조는 누설파안테나관점에서 그림 2에 도시된 바와 같이, 고속파구조(fast wave structure)와 지파구조(slow wave structure)로 구분된다. 고속파구조는 공간조화모드(space harmonics) 중에서 기본모드(basic mode)의 파수가 자유공간의 파수($k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$)보다 작아서($\beta'_0 < k_0$) 기본모드가 복사되는 경우이고, 지파구조는 공간조화 모드중에서 기본모드의 파수가 자유공간의 파수보다 커서($\beta'_0 > k_0$) 기본모드가 복사되지 않는 경우이다. 고속파구조는 전 영역이 누설파 영역인데 비하여 지파구조는 누설파영역(leaky wave region)과 표면파영역(surface wave region)으로 구분되는데, 여기에서 누설파영역은 공간조화모드의 복소전파 상수중에서 하나 이상의 공간조화모드 위상정수(β'_{mn})의 절대치가 자유공간의 파수보다

작게 되어 복사가 되는 경우이고, 표면파영역은 모든 공간조화모드 위상정수의 절대치가 자유공간의 파수보다 큰 경우로 복사모드가 없는 경우이다. y축 방향의 위상정수가 $\beta'_0 d = N\pi$ 되는 영역을 결합영역(coupling region)이라하며, 이 결합영역은 표면파 영역에 있을 경우에는 밴드(band)를 형성하게 되고, 누설파영역(표면파영역을 제외한 나머지영역)에서는 점(point)이 된다. 누설파영역에서의 결합영역은 복사모드가 홀수 개인 경우($\beta'_0 d = 2N\pi$)와 짝수 개인 경우($\beta'_0 d = (2N+1)\pi$)로 구분할 수 있는데, 복사모드가 홀수 개인 경우중에서 복사모드가 하나인 경우에는 복사모드의 복사방향이 broadside(격자면에 수직방향)가 되고 복사되는 모드계수의 크기가 영이 되므로 감쇠정수(α)가 영이 되지만, 복사모드가 세 개이상인 경우에는 broadside로 복사되는 모드의 계수는 영이 되지만 나머지 복사모드의 계수들이 값을 갖게 되므로 감쇠정수가 영이 되지 않고 주변의 감쇠정수 값에 비해 매우 작은 값(sharp dip)이 된다. 복사모드가 짝수 개인 경우에는 모든 복사모드의 계수들이 값을 갖게 되어, 이 경우에도 감쇠정수는 영이 되지 않고 주변의 감쇠정수 값에 비해 매우 작은 값(sharp dip)이 된다. 결합영역에서 공간조화 모드간에는 짝을 이루게 되는데, $\beta'_0 d = (2N+1)\pi$ 인 경우에는 $|A_{-N}| = |A_{-N-1}|, \dots, |A_0| = |A_{-2N-1}|, \dots, |A_{+n}| = |A_{-2N-n-1}|, \dots$ 와 같

접지된 유전체 슬랩 위에 위치한 주기적인 스트립 격자구조에서의 전자기적 산란공진: TE 편파 경우의 Bragg Blazing 현상

이 되고, $\beta_0 d = 2N\pi$ 인 경우에는 $A_{-N} = 0$, $|A_{-N+1}| = |A_{-N-1}|, \dots, |A_0| = |A_{-2N}|, \dots, |A_{+n}| = |A_{-2N-n}|, \dots$ 이 되며, 각각의 경우에서 짝을 이루는 공간조화모드간에는 위상정수의 크기는 같고 부호가 반대이므로 정재파가 되어 도파구조가 차단된다. 그림 2에서 괄호 안의 숫자는 각 영역에서 복사되는 모드들이다.

반사격자관점에서의 해석은 외부에서 인가되는 전자파에 의한 격자구조의 산란현상을 다루는 것

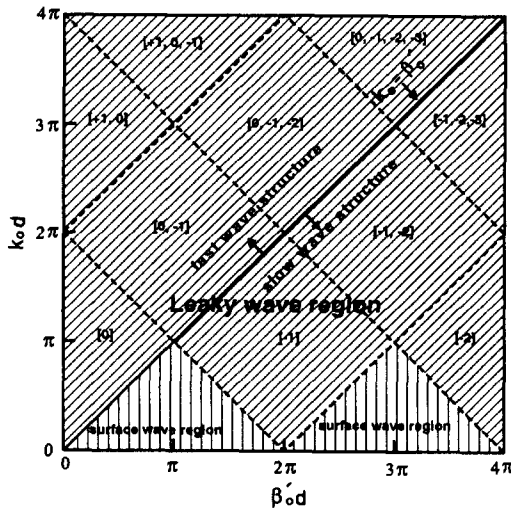


그림 2. 분산도표
Fig. 2. Dispersion diagram.

이다. 반사격자관점에서 전파모드의 수는 격자방정식($\sin \theta_n = \sin \theta_i + \frac{n\lambda}{d}$ 이고, 여기에서 θ_n 와 θ_i 는 각각 회절각과 입사각이고 λ 는 자유공간파장이며 d 는 주기이다)의 지배를 받는데 격자의 주기 및 입사파의 입사각도에 의해 전파모드의 수가 결정된다. 전파모드가 두개 이상이 되는 경우에 있어서 입사파전력이 반사파가 아닌 고차의 회절모드 전력으로 모두 변환되는 blazing현상을 확인할 수 있는데, blazing현상은 다시 입사파의 입사 경로와 고차회절파의 진행 경로에 따라서 Bragg blazing현상과 Off-Bragg blazing현상으로 구분된다. Bragg blazing현상(그림 3(a))은 입사파의 입사 경로와 고차회절파의 진행 경로가 동일한 경우, 즉 고차의 회절파가 입사 경로로 되돌아가는 경우이고, Off-Bragg blazing현상(그림 3(b))은 입사파의 입사 경로와 고차회절파의 진행 경로가 서로 다른 경우이다.

반사격자관점에서 확인된 Bragg blazing현상은 누설파안테나관점에서의 복사현상과 밀접한 관련이 있는 공진형의 Bragg blazing현상과 누설파안테나관점에서의 복사현상과 무관한 비공진형의 Bragg blazing현상으로 구분할 수 있으며, 또한 공진형의 Bragg blazing현상은 고속파구조와 저파구조에서 각각 독특한 특성을 갖게 된다.

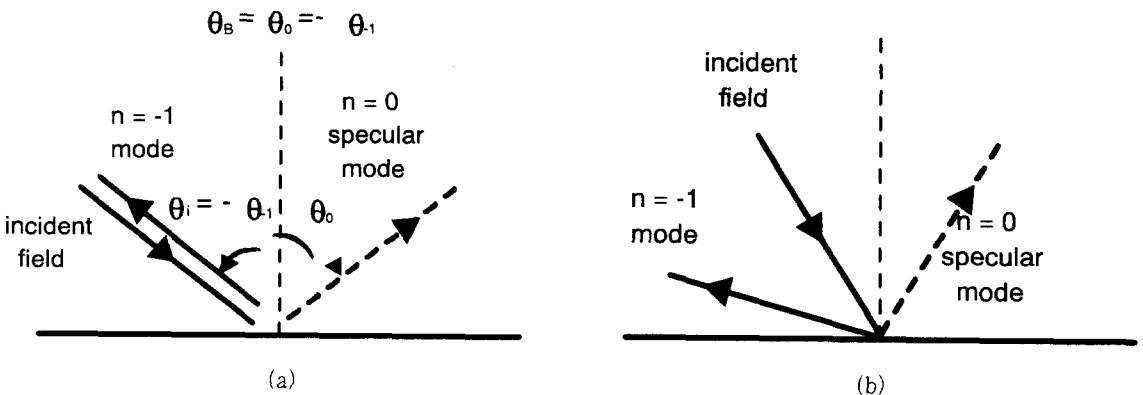


그림 3. Blazing현상 (a) Bragg blazing현상, (b) Off-Bragg blazing 현상
Fig. 3. Blazing phenomena. (a) Bragg blazing phenomenon, (b) Off-Bragg blazing phenomenon.

2-1 고속파구조에서의 Bragg blazing현상

격자구조의 주기가 $d=1.1831 \lambda$ 이고, 스트립의 폭은 $a = 0.5 d$. 유전체의 비유전율은 $\epsilon_r = 1.03$ 이고 TE편파된 평면파의 입사각도는 Bragg각 $\theta_i = 25^\circ (\sin^{-1}(\lambda/2d))$ 로 고정하고 유전체슬랩의 두께 h 를 가변하면서 조사한 반사전력을 그림 4에 나타내었다. 본 격자구조는 주기와 입사파의 입사각도에 의해 전파모드가 반사파모드(speculally reflected mode)와 -1차의 회절모드 뿐이므로 입사파 전력에서 반사파전력을 제외한 나머지 전력은 모두 -1차의 회절파모드의 전력으로 변환된다. 그림 4에서 유전체슬랩의 두께 변화에 따라 6곳(A~F)에서 입사파전력의 전부가 -1차의 회절파모드의 전력으로 변환되는 Bragg blazing 현상을 확인할 수 있으며, 유전체슬랩의 두께 변화에 따라 반사파전력의 변화가 비교적 둔감한 경우(비공진형)와 두께 변화에 따라 반사파전력이 급격하게 변화되는 경우(공진형)가 반복되고 있음을 알 수 있다. 또한 공진형의 Bragg blazing현상이 확인되는 두께 보다 조금 더 큰 곳에서 전반사가 되는 3점(㉠, ㉡, ㉢)

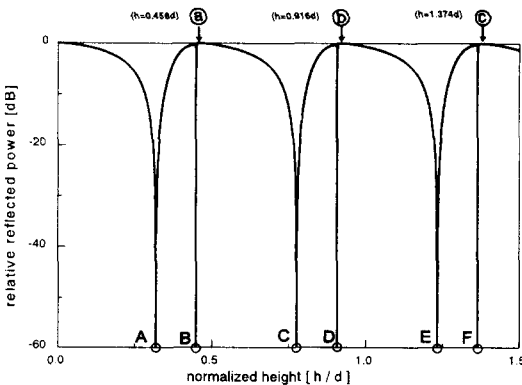


그림 4. 유전체 슬랩 두께 변화에 따른 반사파 전력
 ($d=1.1831 \lambda, a=0.5 d, \epsilon_r=1.03, \theta_i=25^\circ$)
 Fig. 4. Relative reflected power against normalized dielectric slab height.
 ($d=1.1831 \lambda, a=0.5 d, \epsilon_r=1.03, \theta_i=25^\circ$)

㉢)을 확인할 수 있다.

Bragg blazing현상이 확인된 격자구조에 대하여 입사파의 입사각도 변화에 따른 반사특성 및 전류 밀도분포등을 조사하여 보면 공진형(그림 4의 B, D, F점)과 비공진형(그림 4의 A, C, E점)으로 분류할 수 있는데, 본 논문에서는 각 형태의 산란특성이 유사하므로 대표적인 예로서 공진형의 B점과 비공진형의 C점에 해당되는 경우에 대한 특성만을 살펴 보기로 한다. 먼저 입사파의 입사각도를 변화 하면서 조사한 반사특성을 그림 5에 나타내었다. 공진형의 경우에 해당되는 그림 5(a) 경우에는 입사파전력이 -1차 회절모드의 전력으로 변환되는 효율이 높은 영역의 입사각도 범위가 매우 좁음을 볼 수 있으며 동시에 전반사가 되는 점(그림 5(a)의 ㉠, ㉡점)이 Bragg 각에 매우 근접해 있음을 관찰 할 수 있다. 접지된 유전체 슬랩에 대한 반사특성은 유전체 슬랩의 두께(h)와 입사파의 입사각에 따른 z 축 방향 위상정수(γ_0)의 곱이 $n\pi$ 가 될 때 전계의 반사계수가 -1이 되고(이 경우에는 $z=0$ 인 면에 슬롯이 없는 도체판이 있는 효과와 동일함), 이 경우에는 유전체슬랩 위에 주기적으로 배열된 도체 스트립의 유무와 격자의 주기(전파모드의 수)에 관계없이 항상 전반사가 된다. 그림 4에서 확인된 3점($\gamma_0 h = \pi, 2\pi, 3\pi$)의 전반사 현상과 그림 5(a)의 ㉠점($\gamma_0 h = \pi$)에서 확인된 전 반사 현상은 모두 여기에 속하는 경우이다. 그림 5(a)의 ㉡점은 격자방정식에 의해 ㉠점의 짝이 되는 입사각으로 이 경우에는 $\gamma_{-1} h = \pi$ 가 되며 전 반사(이 전반사는 반드시 전파모드가 2개인 경우에만 만족되고, 전파모드가 3개 이상인 경우는 전 반사가 되지 않음)가 된다. 비공진형의 경우에 해당되는 그림 5(b)의 경우에는 입사파전력이 -1차 회절모드로 변환되는 효율이 높은 영역의 입사각도 범위가 공진형에 비하여 매우 넓음을 알 수 있으며 전반사가 되는 점이 Bragg각 주변에는 없다(경우에 따라서는 Bragg각 주변에서 전반사현상이 확인되기도 하는데 비공진형의 Bragg각 주변에서

접지된 유전체 슬랩 위에 위치한 주기적인 스트립 격자구조에서의 전자기적 산란공진: TE 편파 경우의 Bragg Blazing 현상

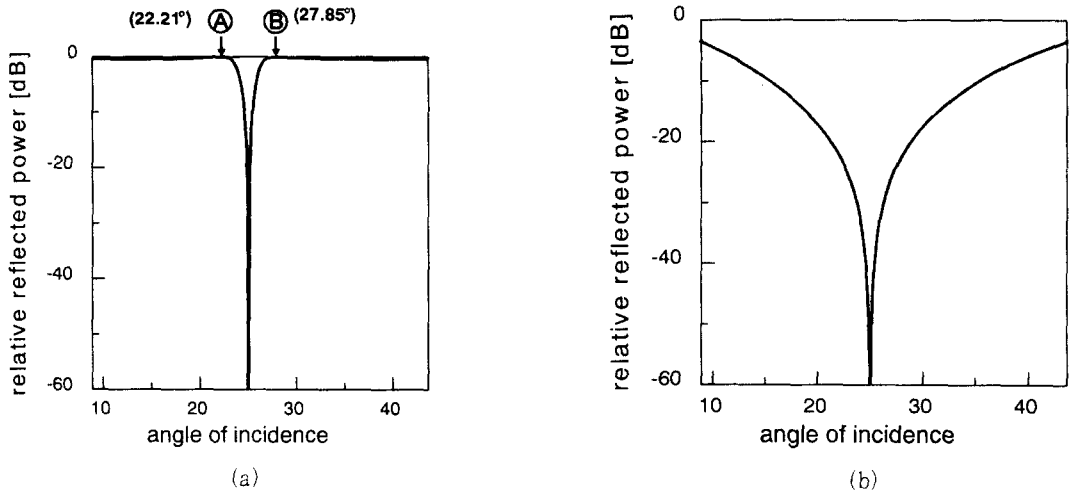


그림 5. 입사각 변화에 따른 반사특성. (a) 공진형(그림 4의 B점), (b) 비공진형(그림 4의 C점)
 Fig. 5. Relative reflected power against angle of incidence.

(a) Resonance type(point B in Fig. 4), (b) Non-resonance type(pint C in Fig. 4)

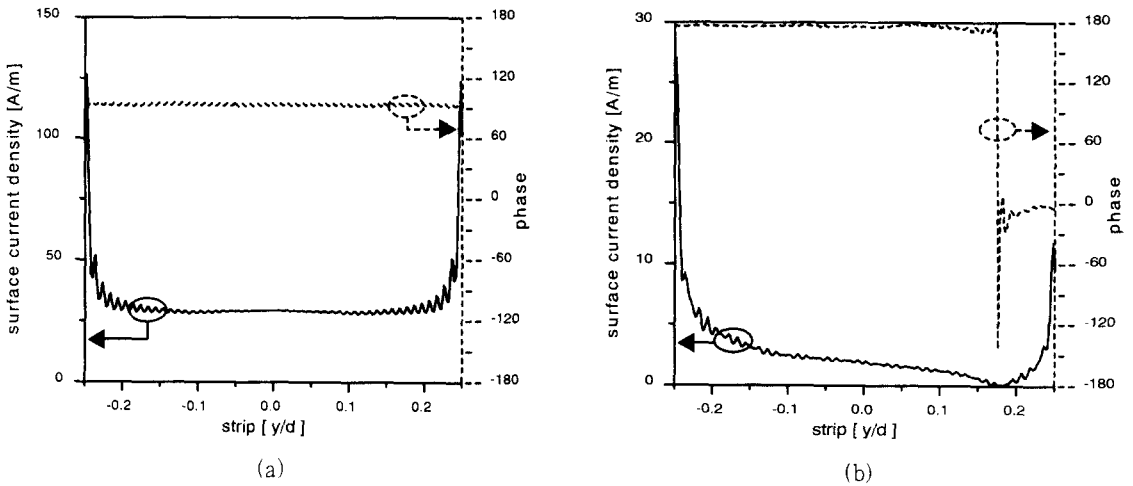


그림 6. 스트립상의 전류밀도분포. (a) 공진형(그림 4의 B점), (b) 비공진형(그림 4의 C점)

Fig. 6. Distribution of strip current density.

(a) Resonance type (point B in Fig. 4), (b) Non-resonance type (point C in Fig. 4)

의 전반사현상은 두 가지 형태로 분류할 수 있다. 먼저 격자구조 파라미터의 변화(주기에 대한 스트립 폭의 변화)에 의해 비공진형 Bragg blazing 현상이 확인되는 유전체슬랩의 두께와 공진형 Bragg blazing 현상이 확인되는 두께가 비슷한 경우에는

전술한 전반사현상이 확인되고, 나머지 한 경우는 후술되는 지파구조에서의 형태와 동일한 전반사현상이 확인된다.)

그림 6에는 공진형과 비공진형의 Bragg blazing 현상시 스트립에 유기되는 전류밀도의 크기와 위

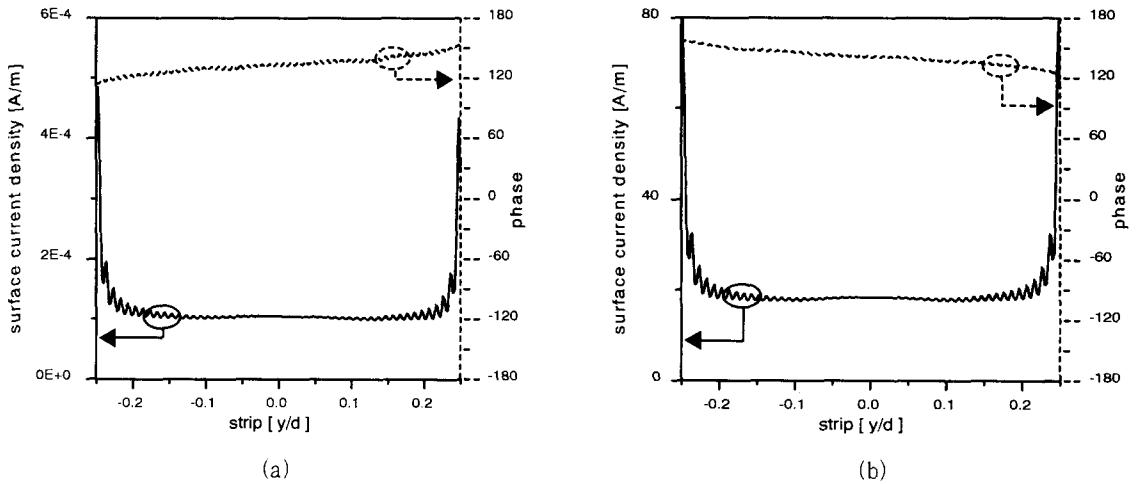


그림 7. 스트립상의 전류밀도분포. (a) 그림 5(a)의 ㉠ 경우, (b) 그림 5(a)의 ㉡ 경우
 Fig. 7. Distribution of strip current density. (a) Point ㉠ in Fig. 5(a), (b) Point ㉡ in Fig. 5(a)

상(본 논문에서는 입사파와 접지된 유전체슬랩에 의한 반사파를 제외한 산란장계의 접선성분 불연속에 의해 도체스트립에 유기되는 전류밀도와 위상임)의 변화를 나타내었는데 공진형에 해당되는 (a)의 경우(그림 4의 B점)를 보면 유기되는 전류밀도의 크기가 매우 크고 스트립의 중심에 대해 대칭적인 전류밀도분포와 위상을 갖게 되는데 비해, 비공진형에 해당되는 (b)의 경우(그림 4의 C점)는 공진형에 비하여 전류밀도가 적고 전류밀도분포와 위상이 스트립의 중심에 대칭이 되지 않는다.

그림 7의 (a), (b)는 각각 그림 5(a)의 ㉠, ㉡점에 해당(전반사)되는 경우에서 도체 스트립에 유기되는 전류밀도분포로 그림 7(a)의 경우에는 도체스트립에 유기되는 전류밀도가 무시할 수 있을 정도로 매우 작는데 비해, 그림 7(b)의 경우에는 도체스트립에 유기되는 전류밀도는 공진형 Bragg blazing시와 유사하나 위상은 차이가 있다. 전반사가 되는 경우에 대해 공간조화모드의 계수를 구해보면 그림 7(a)의 경우($\gamma_0 h = \pi$)에는 모든 공간조화모드의 계수가 영이 되는데 비해, 그림 7(b)의 경우($\gamma_{-1} h = \pi$)에는 -1차 회절모드의 계수만이 영이 된다.

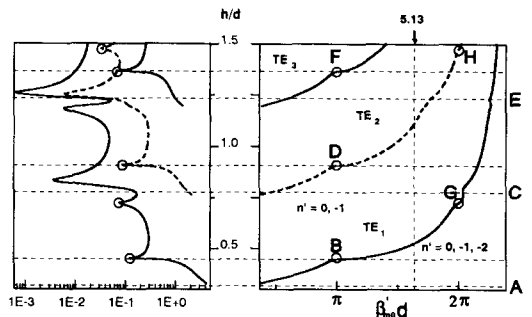


그림 8. 접지된 유전체슬랩 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 격자구조의 분산도표

$$(d=1.1831 \lambda, a=0.5d, \epsilon_r=1.03)$$

Fig. 8. Dispersion diagrams for periodic strip grating on a grounded dielectric slab.

$$(d=1.1831 \lambda, a=0.5d, \epsilon_r=1.03)$$

반사격자관점에서 회절모드의 전파각도와 누설파안테나관점에서의 복사모드의 최대 복사각도 ($\sin^{-1}(\beta_{mn}/k_0)$) 간의 연관성을 조사하기 위하여 누설파안테나관점에서 구한 y축 방향의 복소전파상수(β_{m0})를 그림 8에 나타내었다. 그림은 유전체슬랩의 두께변화에 따른 TE_1, TE_2 및 TE_3 모드까지의 복소전파상수(β_{m0})이며, 슬롯이 없는

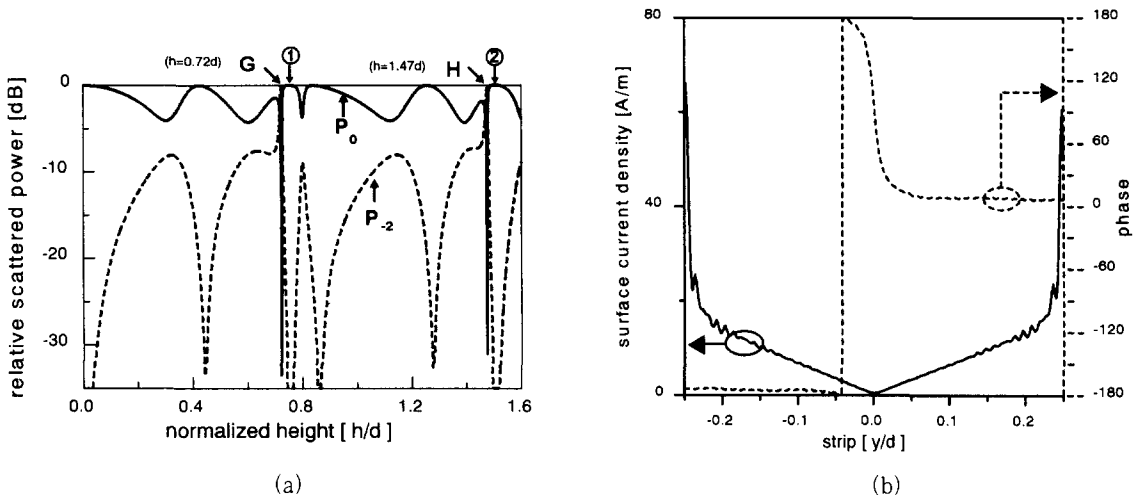


그림 9. 회절파전력과 전류밀도분포

(a) 유전체슬랩 두께변화에 따른 회절파전력, (b) 스트립상의 전류밀도분포 (그림 9(a)의 G점)

Fig. 9. Relative scattered powers and distribution of strip current density.

(a) Relative scattered powers normalized dielectric slab height,

(b) Distribution of strip current density.

평행평판도파로에서의 각 모드별로 도파가 차단 (cutoff)되는 높이($\sqrt{k_1^2 - (\frac{n\pi}{h})^2}$)보다 작은 높이에서부터 각 모드별로 복소전파상수가 구해지며, 조사된 영역에서 각 모드의 기본모드가 모두 복사 ($|\beta'_{m0}| < k_0$)되므로 누설파안테나 관점에서 모두 고속파구조에 속하게 된다. 또한 각 모드별로 유전체슬랩의 두께가 두꺼워짐에 따라 기본모드의 복사각이 전(forward)방향의 broadside쪽에서 endfire 쪽으로 변화(두께가 두꺼워짐에 따라 β'_{m0} 가 증가)함을 알 수 있다. 그림에서 A~F점은 그림 4에서 Bragg blazing현상이 확인된 격자두께이다. B, D, F점은 $\beta'_{m0}d = \pi$ 인 경우로 누설파안테나관점에서의 기본모드 복사각도가 Bragg각과 동일한 25° 이고, -1차의 누설모드의 복사각도는 -25° 이며 감쇠정수는 주변의 감쇠정수에 비해 작은 값(sharp dip)이 됨을 알 수 있다.

그림 8에서 $\beta'_{m0}d = 5.13$ 보다 크게 되면 누설파안테나관점에서 -2차의 공간조화모드가 복사하게 되는 Rayleigh파장이 되고 반사격자관점에

서도 $\beta_0d = 5.13$ 보다 크게 되면 -2차의 공간조화 모드가 전파하게 된다. 그림 8의 G점은 $\beta'_{0d} = 2\pi$ 가 되는 점이고 H점은 $\beta'_{20d} = 2\pi$ 가 되는 점인데 누설파안테나관점에서 기본모드의 복사각도가 57.7° 이고, -1차 모드의 복사각도는 broadside가 되고, -2차 복사모드의 복사각도가 -57.7° 가 되는데, 이 경우에 있어서 -1차 모드의 계수 크기가 영이 되어 broadside로는 복사되지 않는다.

반사격자관점에서 입사파의 입사각도를 57.7° 로 하고 유전체슬랩의 두께를 가변하면서 반사파전력과 -2차 모드의 회절파전력을 그림 9(a)에 나타내었다. 두 점에서 반사파전력이 급격히 작아지고 입사파전력이 -2차 회절모드의 전력으로 급격히 변환되는데, 이 두 점은 그림 8의 G, H점에 해당된다. 그림 9(a)에서 ①, ②점은 전반사($\gamma_0h = \pi, 2\pi$)가 되는 점이다. $\beta_0d = \pi$ 인 경우에는 격자구조 파라미터(주기에 대한 스트립 폭의 비가 적절한 경우)에 따라 비공진형 Bragg blazing현상이 확인되는데 비하여, 입사파의 위상정수가 $\beta_0d = 2\pi$

인 경우에는 격자구조 파라미터를 변화하여도 비공진형 Bragg blazing 현상은 확인되지 않고 공진형 Bragg 현상만 확인된다. 그림 9(b)에는 Bragg 현상이 확인된 그림 9(a)의 G 점에서 스트립에 유기되는 전류밀도분포와 위상인데, 스트립의 중심에 대하여 전류밀도분포와 위상이 대칭적이다.

2-2 지파구조에서의 Bragg blazing 현상

격자구조의 주기가 $d=1.1831\lambda$ 이고, 스트립의 폭은 $a=0.65d$, 유전체의 비유전율은 $\epsilon_r = 2.57$ 이고 TE 편파된 평면파의 입사각도는 $\theta_i = 25^\circ$ 로 고정하고 유전체슬랩의 두께 h 를 가변하면서 조사한 반사특성을 그림 10에 나타내었다. 전술한 경우(고속파구조)와 입사각도와 주기가 동일하므로 전파되는 모드는 반사파모드(speculally reflected mode)와 -1차의 회절파모드 뿐이다. 그림 10에서 유전체 슬랩의 두께 변화에 따라 4곳(A~D)에서 입사파전력의 전부가 -1차의 회절파모드의 전력으로 변환되는 Bragg blazing 현상을 확인할 수 있으며, 유전체슬랩의 두께 변화에 따라 산란특성이 비교적 둔감하게 변화되는 비공진형 A, C와 두께

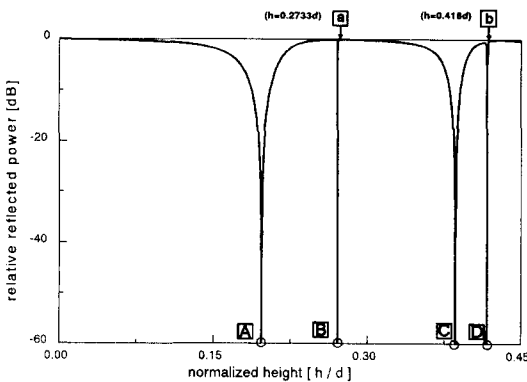


그림 10. 유전체슬랩 두께변화에 따른 반사파전력
 ($d=1.1831\lambda$, $a=0.65d$, $\epsilon_r=2.57$, $\theta_i=25^\circ$)
 Fig. 10. Relative reflected power against normalized dielectric slab height.
 ($d=1.1831\lambda$, $a=0.65d$, $\epsilon_r=2.57$, $\theta_i=25^\circ$)

변화에 민감하게 변화되는 공진형 B, D로 구분할 수 있다. 또한 공진형의 Bragg blazing 현상이 발생하는 B, D점의 두께보다 조금 더 큰 곳에서 전반사되는 점을 확인할 수 있다.

그림 10에서 확인된 4개의 Bragg blazing 현상 중에서 A, B점의 경우는 전술한 고속파구조(그림 14참조)에서의 산란특성과 동일하므로 생략하였고, 그림 11은 지파구조에서 Bragg blazing 현상이 확인된 C, D점의 격자구조에 대하여 입사파의 입사각도를 변화하면서 조사한 반사특성이다. 그림 11(a)는 공진형(그림 10의 D점)이고 (b)는 비공진형(그림 10의 C점)으로 두 경우 모두에서 전반사가 되는 점을 확인할 수 있다. 고속파구조와 지파구조에서의 공진형 Bragg blazing 현상시에 입사파의 위상정수(β_0)와 누설파관점에서의 복사모드(입사파의 입사각도에 해당되는 복사모드) 위상정수(β_{mn})간의 관계를 살펴보면, 먼저 고속파구조에서는 반사격자관점에서 입사파의 위상정수(β_0)가 누설파관점에서 기본복사모드의 위상정수($\beta_{m0} = \beta_0$)에 해당되지만, 지파구조의 누설파영역에서는 입사파의 위상정수가 누설파관점에서 보면 고차모드의 위상정수($\beta_{m0}d = 3\pi$ 인 경우에는 누설파관점에서 -1차와 -2차 모드가 복사되며, 반사격자관점에서 입사파의 위상정수(β_0)가 누설파관점에서 -1차 공간조화모드의 위상정수에 해당($\beta_{m,-1}(\beta_{m0} - 2\pi/d) = \beta_0$)됨)에 해당된다. 따라서 고속파구조에서 전반사조건($\gamma_0d = \pi$)을 만족하는 경우가 지파구조에서 공진형 Bragg blazing시 Bragg각 주변에는 있을 수 없으므로, 지파구조에서 확인되는 Bragg각 주변에서의 전반사 현상은 고속파구조에서의 전반사조건과는 다른 형태이다.

그림 12에는 지파구조에서 확인된 공진형과 비공진형의 Bragg blazing 현상시 스트립에 유기되는 전류밀도의 크기와 위상의 변화를 나타내었는데 공진형에 해당되는 (a)의 경우를 보면 고속파구조에서와 유사하게 유기되는 전류밀도의 크기가 매우

접지된 유전체 슬랩 위에 위치한 주기적인 스트립 격자구조에서의 전자기적 산란공진: TE 편파 경우의 Bragg Blazing 현상

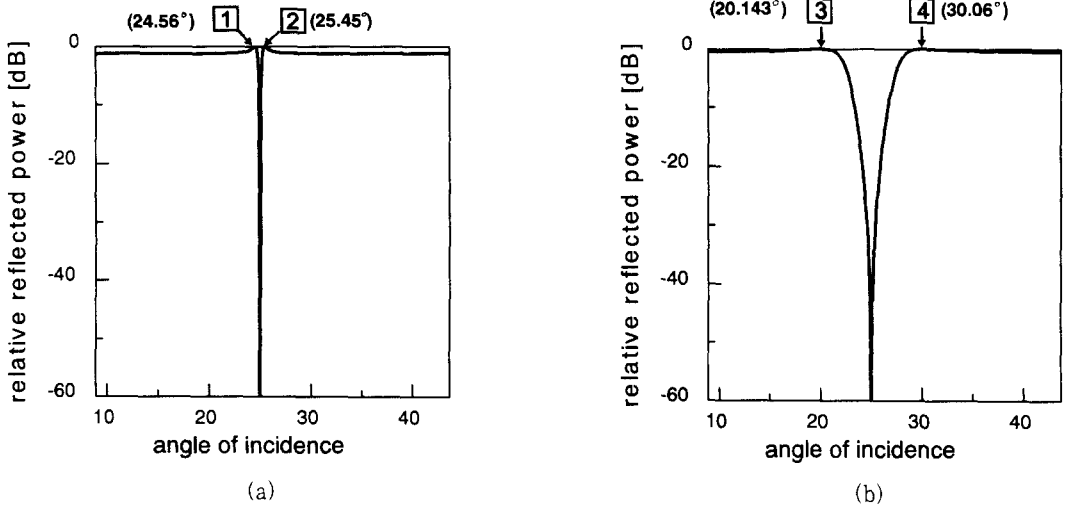


그림 11. 입사각 변화에 따른 반사특성. (a) 공진형(그림 10의 D점), (b) 비공진형(그림 10의 C점)

Fig. 11. Relative reflected power against angle of incidence.

(a) Resonance type(point D in Fig. 10), (b) Non-resonance type(pint C in Fig. 10)

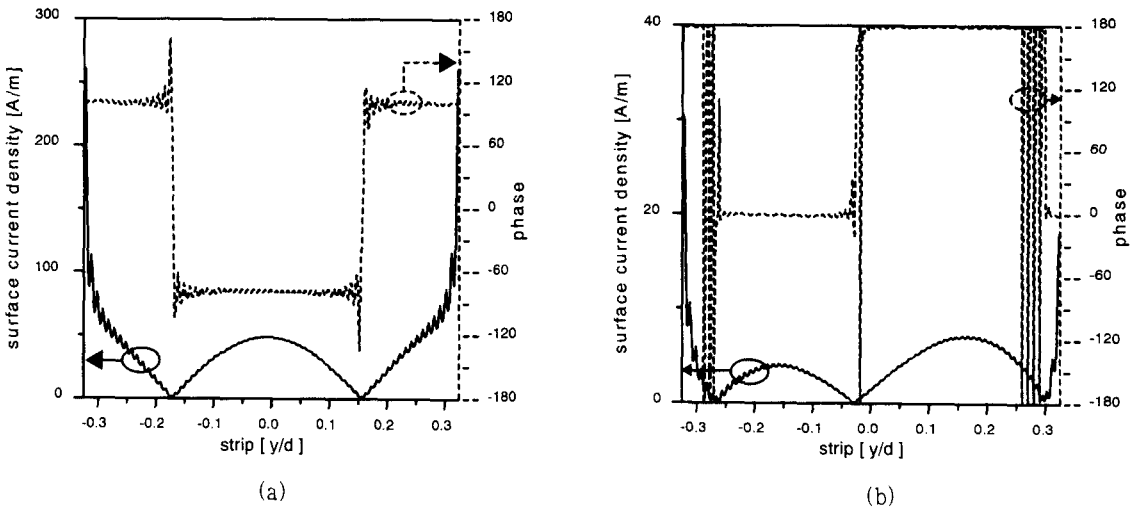


그림 12. 스트립상의 전류밀도분포. (a) 공진형(그림 10의 D점), (b) 비공진형(그림 10의 C점)

Fig. 12. Distribution of strip current density.

(a) Resonance type (point D in Fig. 10), (b) Non-resonance type (point C in Fig. 10)

크고 스트립의 중심에 대해 대칭적인 전류밀도분포와 위상을 갖게 되는데 비해, 비공진형에 해당되는 (b)의 경우는 전류밀도가 적고 전류밀도분포와 위상이 스트립의 중심에 대칭이 되지 않는다.

그림 13의 (a), (b)는 각각 그림 11(a)의 1, 2

점에 해당(전반사)되는 경우에서 구한 도체 스트립에 유기되는 전류밀도분포와 위상이다. 전반사가 되는 경우에 대해 공간조화모드의 계수를 구해보면 두 경우 모두 -1차 전파모드의 계수만이 영이 된다.

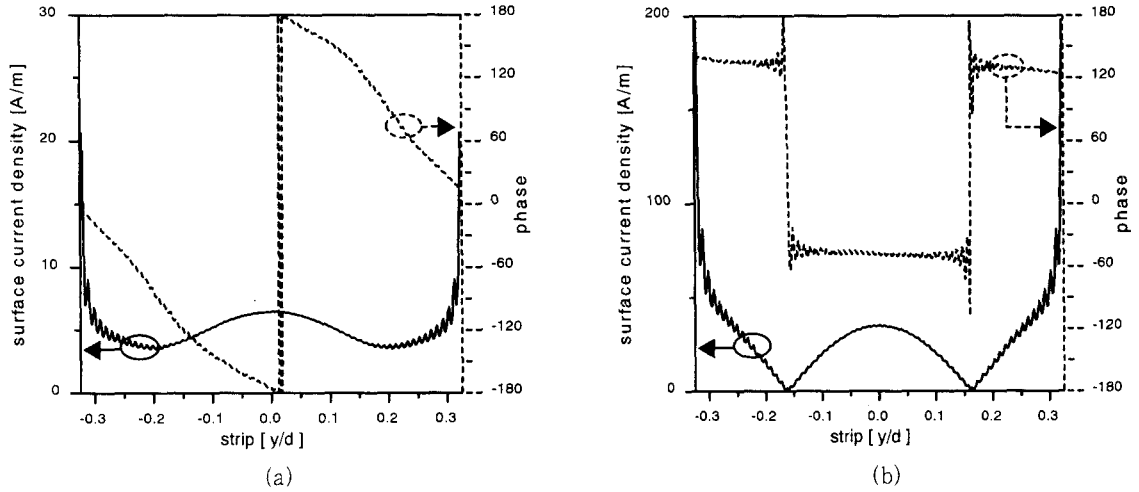


그림 13. 스트립상의 전류밀도분포. (a) 그림 11(a)의 1 경우, (b) 그림 11(a)의 2 경우
 Fig. 13. Distribution of strip current density. (a) Point 1 in Fig. 11(a), (b) Point 2 in Fig. 11(a)

Bragg blazing현상Bragg blazing현상 그림 14는 누설파안테나관점에서 구한 복소전파상수이고, 유전체슬랩의 두께를 도파구조내부에서 TE₁모드만이 도파가능한 범위에서만 구하였으며, 유전체슬랩의 두께가 두꺼워질수록 위상정수의 값이 증가함을 알 수 있다. 그림에서 $\beta_0 d = 5.13$ 과 $\beta_0 d = 7.43$ 이 되는 점이 레일리 파장이 되는데 $\beta_0 d = 5.13$ 보다 커지게 되면 -2차의 복사모드가 복사되게 되고, $\beta_0 d = 7.43$ 보다 커지게 되면 기본모드가 복사하지 못하게 된다. 따라서 도파구조는 복소전파상수의 위상정수가 $\beta_0 d = 7.43$ 을 기준으로 해서 작은 값이 되면 고속파구조이고 큰 값이 되면 저파구조가 된다. 그림에서 B점보다 유전체 슬랩의 두께가 작은 영역에서 감쇠정수가 급격히 커짐을 알 수 있다. 이는 슬롯이 없는 평행평판 도파관에서는 도파모드가 차단되는 높이가 정해져 있지만 본 연구구조에서는 도파모드가 차단되는 높이를 명확하게 규정할 수 없으므로 감쇠정수가 큰 영역에서는 도파구조가 차단되었다고 볼 수 있다. 따라서 그림 10에서 확인된 Bragg blazing현상을 누설파안테나관점에서 보면 B점의 경우는 고속파구조에 해당되고, C, D점의 경우는 저파구조에

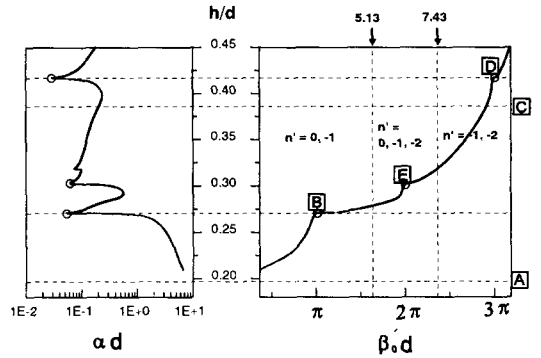


그림 14. 접지된 유전체슬랩 위에 주기적으로 스트립이 놓여 있는 격자구조의 분산도표
 ($d = 1.1831\lambda$, $a = 0.65d$, $\epsilon_r = 2.57$).
 Fig. 14. Dispersion diagrams for periodic strip grating on a grounded dielectric slab.
 ($d = 1.1831\lambda$, $a = 0.65d$, $\epsilon_r = 2.57$).

해당되지만 A점의 경우는 도파구조가 차단된 구조로 구분할 수 있다. 이상의 결과로 볼 때 비공진형의 Bragg blazing현상은 도파구조의 형성 유무에 관계없음을 알 수 있다. 그림 14의 B점은 그림 10의 공진형 Bragg blazing현상이 확인된 B점으로 $\beta_0 d = \pi$ 인 점이고, 그림 14의 E점은 $\beta_0 d = 2\pi$

인 점으로 전술한 바와 같이 고속파구조에서의 공진형 Bragg blazing 현상이다. 그림 14의 \square 점은 그림 10의 \square 점에 해당되고 $\beta_0 d = 3\pi$ 인 점으로 지파구조에서의 공진형 Bragg blazing 현상이 확인되는 경우로 누설파안테나관점에서 복사모드는 -1차와 -2차 모드이며, 복사각도는 -1차 복사모드의 복사각도가 25° 이고 -2차 복사모드의 복사각도가 -25° 이다. 지파구조에서의 공진형 Bragg blazing 현상은 고속파구조에서의 Bragg blazing 현상과 복사모드의 차수만 다를 뿐 Bragg 각과 복사되는 누설파 모드의 복사각도가 동일하다.

그림 15는 누설파안테나관점에서 구한 TE_1 모드의 z 축 방향 위상정수 (γ_0)에 격자의 높이 h 를 곱한 값인데 공진형의 Bragg blazing 현상이 확인되는 세 경우 모두 π 에 근접해 있다. 고속파구조에서 공진형 Bragg blazing 현상시에 Bragg 각 주변에서 작은 입사각의 변화에도 -1차 회절모드로 변환되는 전력이 급격하게 변화되는 것은 위상정수의 값이 $\gamma_0 h = \pi$ (또는 $\gamma_{-1} h = \pi$)가 되어 전반사가 되므로 -1차의 회절모드로의 변환되는 전력의 변화가 비공진형에 비해 매우 급격하게 됨을 알 수 있다.

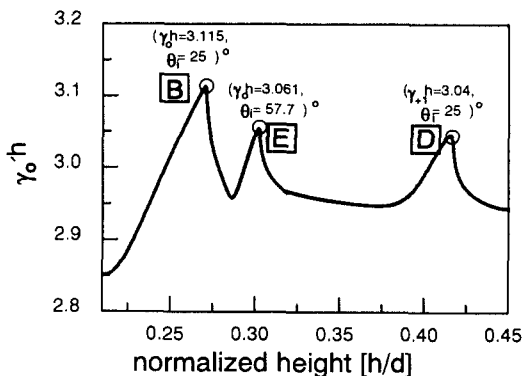


그림 15. 유전체슬랩 두께변화에 따른 위상정수 ($\gamma_0 h$)
($d=1.1831 \lambda$, $a=0.65d$, $\epsilon_r = 2.57$)

Fig. 15. Phase constant ($\gamma_0 h$) against normalized dielectric slab height.
($d=1.1831 \lambda$, $a=0.65d$, $\epsilon_r = 2.57$).

III. 결 론

TE편파의 경우에 대하여 접지된 유전체슬랩 위에 주기적인 스트립격자가 놓여 있는 구조를 누설파안테나관점에서 고속파구조와 지파구조로 구분하여 각각의 구조에서 반사격자관점에서 확인한 Bragg blazing 현상을 누설파안테나관점과 관련이 있는 공진형의 Bragg blazing 현상과 누설파안테나관점과 무관한 비공진형의 Bragg blazing 현상으로 구분하여 상세히 기술하였다. 또한 반사격자관점에서 확인되는 전반사현상에 대하여도 상세히 기술하였다.

본 연구구조의 활용면을 보면, 반사격자관점에서는 blazing 현상을 응용하여 초고주파대역부터 광파대역에 이르는 넓은 주파수대역에서 이용되는 주파수 분할 다중화기(frequency division multiplexer), polarizer, frequency scanner 등의 다양한 응용분야에 활용 가능하며, 누설파안테나 관점에서 보면 DBR(distributed Bragg reflection) oscillator 및 격자구조의 파라미터 (주기, 스트립폭, 유전체높이, 유전율 등)를 적절히 조절하면 좁은 빔폭과 넓은 각도의 빔주사특성을 갖는 frequency scannable 안테나 등의 설계시에 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. W. Wood, "On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum," *Phil. Mag.*, vol. 4, pp. 396-402, 1902.
- [2] V. Twersky, "On scattering of waves by the infinite grating of circular cylinders," *IRE Trans. on Antennas Propagat.* vol. AP-10, pp. 737-765, Nov., 1962.
- [3] A. Hessel and A. A. Oliner, "A new theory of the Wood's anomalies on optical gratings," *Applied Optics*, vol. 4, no. 10, pp. 1275-1279.

Oct. 1965.

[4] R. C. M. Li and A. A. Oliner, "Scattering resonances on a fast wave structure," *IRE Trans. on Antennas Propagat.*, vol. AP-13, pp. 948-959, Nov., 1965.

[5] Y. K. Cho, U. H. Cho, and J. H. Ko, "Blazing of the periodic strip grating on a grounded dielectric: TE polarization case," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 23, pp. 2035-2037, Nov., 1995.

[6] Y. K. Cho, U. H. Cho, and J. H. Ko, "TM-Polarized Electromagnetic scattering from a periodic strip array on a grounded dielectric," *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 41-45, Jan., 1996.

[7] 백운석, 조응희, 이종익, 이철훈, 조영기, 손현, "접지된 유전체판 위에 위치한 스트립 격자

에 TM편파된 평면파가 입사되는 경우에서의 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상-실험", 통신학회 논문지 22(4): pp. 605-610, 1997.

[8] 백운석, 조응희, 이철훈, 조영기, 손현, "접지된 유전체판 위에 위치한 스트립 격자에 TE 편파된 평면파가 입사되는 경우에서의 Bragg 및 Off-Bragg blazing 현상-실험", 전자공학회논문지 제34권 D편 제 5호, pp. 1-6, 1997.

[9] 이종익, 조응희, 윤리호, 홍재표, 박진택, 조영기, 손현, "접지된 유전체층 위의 스트립격자의 Off-Bragg blazing" 전자공학회 논문지, 제33권 A편 제10호, pp. 90-97, 1996.

[10] 조응희, 김종규, 이종익, 조영기, "접지된 유전체층 위에 위치한 주기적인 스트립격자구조에 TM편파된 평면파가 입사되는 경우에서의 산란현상", 춘계 마이크로파 및 전파학술대회논문집 제21권 1호 pp. 405-408, 1998.

조 응 희



1987년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 전파공학전공(공학석사)
 1989년 2월~1995년 2월: 국방과학연구소 연구원
 1995년 3월: 경북대학교 대학원 전자공학과 전파공학 전공 박사과정

현재: 경동정보대학 전자정보과 전임강사
 [주 관심분야] 전자파산란, 안테나 이론, EMI/ EMC

홍 재 표



1981년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1989년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1990년 3월~현재: 경일대학교 전자정보공학과 부교수

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 전자기산란 및 전자기이론

조 영 기



1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1981년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
 1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)
 1981년 9월~현재: 경북대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 안테나 이론, 마이크로파공학, 전자기 산란 및 전자기 이론