

論文2000-37TC-11-1

접지된 유전체 슬랩 도파로에서 주기적인 임의 형태의 격자에 의한 표면파 산란

(Surface wave scattering by finite periodic gratings of an arbitrary profile in a grounded plane)

李喆勳*, 趙雄熙**, 趙榮基*

(Cheol-Hoon Lee, Ung-Hee Cho and Young-Ki Cho)

Abstract

Surface wave scattering by periodic grooves of arbitrary profile in a grounded dielectric slab is investigated for the TE surface wave incidence. Both the finite and infinite periodic geometries are considered. The former case is analyzed by using of hybrid FEM/MOM and the latter by using of full MOM procedure. Some numerical results for the reflected and transmitted powers in a grounded dielectric slab, radiation power into the free space, and radiation patterns in case of finite structure and for the dispersion diagram in case of infinite structure are presented. And some descriptions on the relationship between the finite and infinite structure such as the maximum beam angle are given.

I. 서론

여러 가지 다양한 도파관에서의 주기적인 장하 (loading) 문제는 유전체 이미지 배열 안테나^[1], 격자 결합기^[2-3] 또는 mode launcher^[1-3]와 같은 분야에 적용하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 연구는 섭동이론(perturbation theory)^[2-3]과 같은 근사해석방법을 사용하거나 사각^[4-5]이나 정현 모양^[2-3]과 같은 일정한 구조에 제한되어 있었다. 게다가 공간 조화함수를 이용하여 쉽게 접근할 수 있는 무한주기구조의 경우 산란문제나 고유치 문제와 관련하여 비교적 많은 연구가 수행되었지만 유한주기구조의 경우 실제

적인 설계에 있어 중요한 요소인 반사손실(return loss)이나 안테나 이득 등과 같은 유용한 정보를 얻을 수 있음에도 불구하고 상대적으로 연구가 미흡하였다. 최근 이루어진 유한주기구조에 대한 연구의 예를 들면 1987년에 유한한 사각격자 구조를 푸리에 변환과 모드 매칭 방법으로 해석하였으며^[4], 평행평판 도파관 윗면에 위치하는 주기적인 슬릿을 가지는 구조에 대해 주기가 균일하거나 비균일한 경우에 대한 누설파 특성 해석^[6] 및 유전체 Radome에 의한 모드 launching 효율 연구^[7] 등이 있다.

본 연구에서는 그림 1과 같은 접지된 유전체 슬랩 도파로에서 임의 형태의 유한한 격자에 의한 표면파 산란을 해석하고 이로부터 얻어진 결과들에 대해 무한 주기구조의 해석을 통하여 구할 수 있는 고유치(복소전파상수)를 이용하여 물리적인 이해를 돕고 전술한 여러 응용분야에 이용하고자 한다. 해석에 사용되는 편파는 TE 편파이며 유한주기구조의 경우 기본 TE 표면파(fundamental TE surface wave)가 입사하는 것으로 가정하였다(본 연구의 방법은 약간의 변형을 통하여 TM 편파에 대해서도 동일하게 적용될 수 있다). 유한주기

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部
(Electrical and Electronic Eng., Kyungpook National University)

** 正會員, 경동情報大學校 컴퓨터情報通信系列
(Division of Computer & Information Telecommunication, Kyungdong College of Techno Information)
接受日:2000年8月23日, 수정완료일:2000年10月2日

구조의 해석방법은 등가원리를 사용하여 유전체 슬랩 영역과 격자 영역을 분리한 후 각각 그린 함수와 유한요소법(FEM)을 사용하여 전자장을 표현^[8]하고 유전체 슬랩과 격자 사이의 경계면에서 전자계의 접선성분의 연속조건으로부터 적분방정식을 얻고 모멘트 방법을 사용하여 해를 구하고자 한다. 이 경우 유한요소법을 사용하여 격자내부의 전자장을 모델링 하는 것은 모든 격자에 대해 동일하게 적용되므로 하나의 격자에 대해서만 구하면 되기 때문에 그리 많은 시간을 필요로 하지 않는다. 다양한 형태의 격자 구조에 대해 투과전력, 반사전력 및 복사전력 및 복사패턴 등을 구하여 누설파 안테나(leaky wave antenna) 혹은 모드 필터 측면에서의 성능을 관찰하여 보고자 한다. 무한주기구조는 다층구조(multilayered structure)에 대한 주기그린함수를 구하고 격자의 경계면을 따른 전장에 대한 경계조건으로부터 적분방정식을 구하고 모멘트 방법을 사용하여 해석하였다. 유한주기구조에서 일어나는 물리적인 현상의 변화에 대해 무한주기구조에서 구하게 될 고유치가 어떤 의미를 지니는지 병행하여 연구하고자 하며 이는 상호점점의 의미도 있다고 사료된다.

II. 이론

1. 유한한 주기구조에 대한 해석

본 연구에서 다루고자하는 구조를 그림. 1에 도시하였는데 z 축으로 구조는 무한하다고 가정하였다. 접지면 위의 유전체 슬랩의 두께를 h , 격자의 주기를 p , 격자내부와 유전체 슬랩의 비유전율을 각각 ϵ_{r1} 및 ϵ_{r2} 라 하였으며 총 격자의 개수는 N 개이다. 접지된 유전체 슬랩 영역에 입사되는 TE 표면파와 기본 모드를 표현하면

$$E_z^{inc}(x, y) = \sin(\gamma y) e^{-j\beta_0 x}, \quad 0 < y < h \quad (1)$$

$$E_z^{inc}(x, y) = \sin(\gamma h) e^{-j\beta_0 x - \gamma_0(y-h)}, \quad y > h \quad (2)$$

로 주어지는데 여기에서 β_0 , γ_0 와 γ 는 $k_0^2 \epsilon_{r2} = \gamma^2 + \beta_0^2$, $k_0^2 = \beta_0^2 - \gamma_0^2$ 의 관계식과

$$\gamma_0 h \tan \gamma h = -\gamma h \quad (3)$$

$$(\gamma h)^2 + (\gamma_0 h)^2 = (k_0 h)^2 (\epsilon_{r2} - 1) \quad (4)$$

의 두 식을 만족하는데 $\gamma h < \pi$ 인 영역의 해를 구하면

기본모드가 된다.

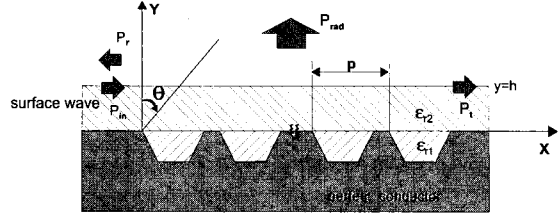


그림. 1. 유한한 주기 구조의 경우에 대해 제안된 구조
Fig. 1. The geometry of consideration for finite periodic structure.

등가원리를 이용하여 슬랩과 격자 윗면사이의 경계면(이하 개구라 칭함)을 단락시킨 후 등가자기전류를 가정하면 접지면 위($y > 0$)에서의 전계는 입사전계(E_z^{inc})와 개구상의 등가자기전류에 의한 산란전계(E_z^M)의 합으로서 다음과 같이 표현할 수 있으며

$$E_z^{tot}(x, y) = E_z^{inc}(x, y) + E_z^M(x, y) \quad (5)$$

단락된 격자내부는 등가자기전류에 의한 전장만으로 이루어진다.

격자외부($y > 0$)에서의 등가자기전류에 의한 산란전계는 그린함수를 사용하여 표현할 수 있는데 유전체 슬랩 영역에서의 표현식을 구하면 다음과 같이 기술된다.

$$E_z^M(x, y) = \frac{1}{2\pi k_0 \eta_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta_d (\zeta \cos \zeta_d h + j \zeta_d \sin \zeta_d h)}{\zeta_d \cos \zeta_d h + j \zeta \sin \zeta_d h} \tilde{M}_x^* e^{-j\beta x} d\beta \quad (6)$$

여기에서 $\zeta = \sqrt{k_0^2 - \beta^2}$, $\zeta_d = \sqrt{k_0^2 \epsilon_r - \beta^2}$ 이며 \tilde{M}_x^* 는 등가자기전류의 푸리에 변환을 의미하며 *는 복소공액을 나타낸다.

단락된 격자내부의 공진기 영역에서 등가자기전류에 의한 전자장은 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하여 모델링하였다. 벡터가장자리요소(vector edge element)를 사용^[9]하고

$$\bar{H}_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_{ei} \bar{W}_{ei} \quad (7)$$

로 자계를 표시하였을 때 최종적인 functional의 형태는 다음과 같이 주어진다^[8-10].

$$F(\bar{H}_e) = \sum_{e=1}^M \left\{ \sum_{f=1}^3 \alpha_{ef}^* \sum_{j=1}^3 \alpha_{ej} \int_{\Omega_e} \left[\frac{1}{\epsilon_{r1}} (\nabla \times \bar{W}_{ej}) \right. \right.$$

$$\begin{aligned} & \cdot (\nabla \times \bar{W}_{ei}) - k_0^2 \epsilon_{r1} \bar{W}_{ei} \cdot \bar{W}_{ei} d\Omega_e \} \\ & - \sum_{b=1}^{N_b} a_b^* \left\{ j \frac{k_0}{\eta_0} \int_c \bar{W}_b \cdot \bar{M}_n d\ell \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 N_e 는 공진기내부의 총요소(total element)의 수를 나타내고 Ω_e 는 각 요소 영역을 의미하며 c 는 개구의 경계면을 따른 적분을 말한다.

전술한 식들을 사용하여 개구에서의 자계에 대한 연속조건을 부과하면 등가자기전류를 미지수로 하는 적분방정식을 얻을 수 있으며 모멘트 방법(삼각기저함수 및 Galerkin 테스트)을 사용하여 미지량인 등가자기전류를 구하게 되면 이로부터 각 영역에서의 전자계를 기술할 수 있다. 표면파 전력은 유전체 슬랩 내부와 자유공간에서의 그린함수의 표면파 극점(surface wave pole)에 대한 유수정리(residue theorem)를 사용하여 구할 수 있으며 자유공간에서의 원거리(far-field) 전계는 정위상근사(stationary phase approximation)를 이용하여 구할 수 있다.

2. 무한한 주기구조에 대한 해석

유한한 주기구조에서 얻어진 수치적인 결과들에 대한 물리적인 이해를 위해서는 무한주기구조에 대한 연구가 병행되어야 한다. 무한주기구조의 경우 입사파가 존재하지 않는 경우에, 외부영역에서의 x 방향의 복소전파상수($\beta_0 - ja$)를 구하기 위한 고유치 방정식(eigenvalue equation)을 유도하게 되는데 이로부터 구해지는 위상정수(β_0) 및 감쇠상수(a)로부터 유한한 구조에서의 최대복사각이나 빔폭 혹은 임피던스 정합에 대한 정보 등을 얻을 수 있기 때문이다. 이를 위하여 그림. 2와 같이 접지면 아래의 영역을 격자내부의 유전체와 같은 비유전율(ϵ_{r1})을 가지는 유전체로 대체하고 x 축을 따라 간격(주기)가 p 인 z 방향 성분의 선전류원의 배열에 대한 주기그린함수를 사용하였다.

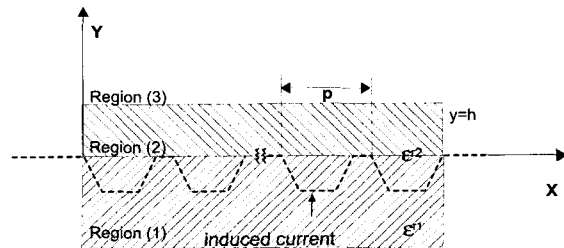


그림 2. 무한주기구조에 대한 등가 모델
Fig. 2. The equivalent model for the geometry of the problem for infinite periodic case.

그림 2의 영역 (1)에서의 주기그린함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} G_z^{(1)}(\bar{r}, \bar{r}') &= -\frac{\omega\mu}{p} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{e^{-j\gamma_n y} e^{-j\beta_n(x-x')}}{\gamma_n} \\ & \frac{\gamma_{n1} TE_o(n) \cos \gamma_{n1} y_c - j\gamma_{n2} TE_e(n) \sin \gamma_{n1} y_c}{\gamma_{n1} TE_o(n) + \gamma_{n2} TE_e(n)} \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서

$$\begin{aligned} TE_o(n) &= \gamma_{n2} \cos \gamma_{n2} h + j\gamma_{n1} \sin \gamma_{n2} h, \\ TE_e(n) &= \gamma_{n1} \cos \gamma_{n2} h + j\gamma_{n2} \sin \gamma_{n2} h, \\ \beta_n &= \beta_0 + 2n\pi/d - ja, \quad \gamma_n = \sqrt{k_0^2 - \beta_n^2}, \\ \gamma_{n1} &= \sqrt{k_0^2 \epsilon_{r1} - \beta_n^2}, \quad \gamma_{n2} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_{r2} - \beta_n^2} \end{aligned}$$

를 의미하고 y_c 는 $y < y'$ 이면 y 를 사용하고 $y' < y$ 이면 y' 를 사용하는 것을 나타내며 y_c 의 경우는 그 반대이다.

식 (9)로 주어지는 주기그린함수를 사용하여 원래 문제의 구조(그림. 1)의 접지면의 경계를 따라 전장에 대한 경계조건을 부과하면 다음과 같은 적분방정식을 구할 수 있다.

$$\int_c G_z^{(1)}(r, r_0) J_z(x', y') d\ell' = 0 \quad (10)$$

그런 다음 모멘트 방법(펄스기저함수 및 Galerkin 테스트)을 사용하여 행렬방정식을 만들고 이로부터 고유치 방정식을 이끌어 낼 수 있다^[11].

III. 해석결과 및 고찰

앞 절에서 제안된 이론을 바탕으로 여러 가지 형태의 격자에 대해 유한주기구조에서 복사패턴과 투과전력(transmitted power), 반사전력(reflected power) 및 복사전력(radiated power)을 계산하고 무한주기구조에서 얻어지는 복소전파상수를 통하여 유한주기구조에서 얻어지는 물리적인 현상들에 대한 이해를 돕고자한다. 본 연구에서는 특히 복사의 관점에서 누설파 특성에 중점을 두어 살펴보고자 한다.

그림. 3은 유한주기구조에서 격자의 모양이 사각형(rectangular groove)일 때 격자의 수(N)에 따른 복사전력(P_{rad}), 투과전력(P_t) 및 반사전력(P_r)의 변화를 입사전력으로 정규화하여 도시한 것이다. W 는 사각격

자의 개구의 폭을 나타내고 b 를 사각격자의 깊이로 두었다. 그림에서 보는 바와 같이 전력 보존의 관계가 잘 성립함을 알 수 있고, 격자의 수가 증가함에 따라 복사 전력이 일률적으로 증가하여 격자의 수가 50개에 이르면 복사전력은 약 95.58%를 보이며, 투과전력 및 반사전력은 각각 3.93% 및 0.49%정도로 아주 작게 됨을 관찰할 수 있다. 여기에서 λ_0 는 자유공간에서의 파장을 의미한다.

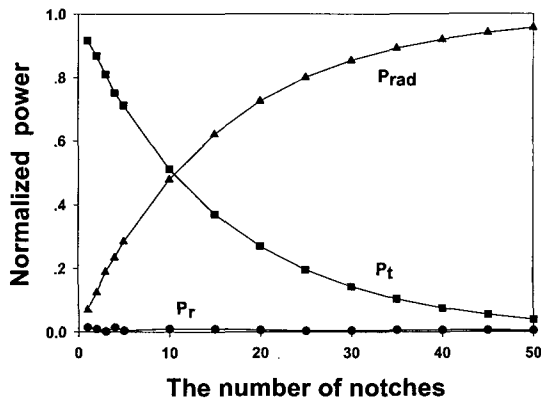


그림 3. 사각 격자의 수에 따른 복사전력, 투과전력 및 반사전력의 변화

($p=0.8\lambda_0$, $h=0.3\lambda_0$, $W=0.35\lambda_0$, $b=0.1\lambda_0$, $\epsilon_{r1}=\epsilon_{r2}=2.5$)

Fig. 3. Radiated, transmitted, and reflected powers versus the number of notches.

($p=0.8\lambda_0$, $h=0.3\lambda_0$, $W=0.35\lambda_0$, $b=0.1\lambda_0$, $\epsilon_{r1}=\epsilon_{r2}=2.5$)

그림. 4에는 $\epsilon_{r1}=\epsilon_{r2}=3$, $d/h=1.1859$, $W/d=0.5$, $b/W=0.4004$ 인 사각격자의 무한주기구조에서의 특성 방정식으로부터 계산된 $k_0d-\beta_0d$ 및 k_0d-ad 에 대한 분산도표(dispersion diagram)를 도시하였다. 그림에서 실선은 접지된 유전체 슬랩 도파로에 존재하는 기본모드의 섭동(perturbation)으로 기인된 누설모드이며 점선은 첫 번째 고차모드의 섭동에서 생기는 누설모드이다. 따라서 ㉠점($k_0d=3.9521$) 이하의 주파수에서는 하나의 누설모드만이 존재하므로 복사는 한방향으로 이루어지고 ㉠점 이상의 주파수에서는 두 개의 누설모드가 존재하므로 두 방향으로 복사가 이루어지리라 예상할 수 있다. (여기서 조심해야 할 점은 두 개의 누설모드가 유전체 슬랩에 전파되는 모드의 관점에서 보면 기본모드와 고차모드로 구별되지만 자유공간에서의 공간조화

모드의 측면에서 보면 동일한 -1차 공간조화모드라는 것이다.) 그리고 고차모드로 갈수록 감쇠상수는 전반적으로 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 일례로서 ㉠점에서 계산된 복소전파상수는 각각 $(1.558-j3.33 \times 10^{-3})k_0$ 및 $(1.01-j7.58 \times 10^{-3})k_0$ 이며 이를 근거로 복사각을 추정해보면 각각 -3.85° 와 -37.86° 이다.

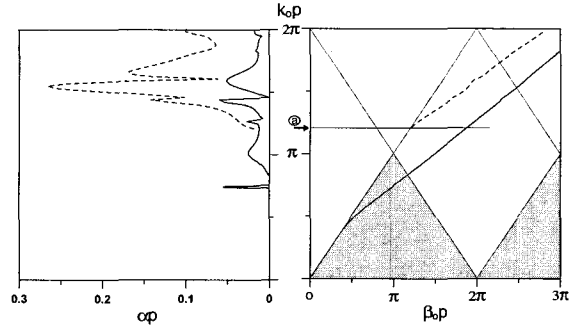


그림 4. 무한한 사각 격자구조에서의 분산도표

($\epsilon_{r1}=\epsilon_{r2}=3$, $d/h=1.1859$, $W/d=0.5$, $b/W=0.4004$)

Fig. 4. Dispersion diagram in case of infinite periodic notches.

($\epsilon_{r1}=\epsilon_{r2}=3$, $d/h=1.1859$, $W/d=0.5$, $b/W=0.4004$)

그림. 5는 구조적 치수가 그림. 4와 동일하고 주파수가 $k_0d=\pi$ 일 때(즉 누설모드가 한 개일 경우) 50개의 사각격자에 대하여 유한 주기 구조 및 무한 주기 구조에서의 복사패턴을 비교하여 도시한 것이다. 무한 주기 구조에서의 복사패턴은 특성방정식에서 구한 고유치로부터 등가전류에 해당하는 고유함수(eigenvector)를 구하고 다층구조(multilayered structure)에서의 그린함수를 이용하여 구할 수 있다^[12]. 그림에서 보는바와 같이 측엽(side-lobe)에서는 약간의 차이가 있지만 주빔(main beam)의 각도와 빔폭(beam width)은 정확히 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림. 6에는 구조적 치수가 그림. 4와 동일할 때 ㉠점(즉 누설모드가 두 개일 경우)에서 격자의 수가 50개인 유한 주기구조에서의 복사패턴을 도시하였다. 참고로 점선은 푸리에 변환과 모드매칭을 사용한 참고문헌[4]에서 얻어진 결과이다. 유한주기구조에서 최대 복사각은 약 -3.8° 에서 일어나는데 이는 무한구조에서 기본모드의 복사각으로 예측된 값(-3.85°)과 아주 잘 일치하며 두 번째 최대 복사각이 -37.4° 근처에서 관찰되는데 고

차모드의 복사각으로 예측된 -37.86° 에 아주 근접한 값임을 알 수 있다. 부가적으로 $+37.4^\circ$ 에서 형성되는 부엽은 -37.4° 로 복사각을 형성하는 누설파 모드가 격자의 오른쪽 끝에서 일어나는 임피던스 부정합에 의하여 반사되면서 $-x$ 방향으로 전파하면서 복사되는 것이다.

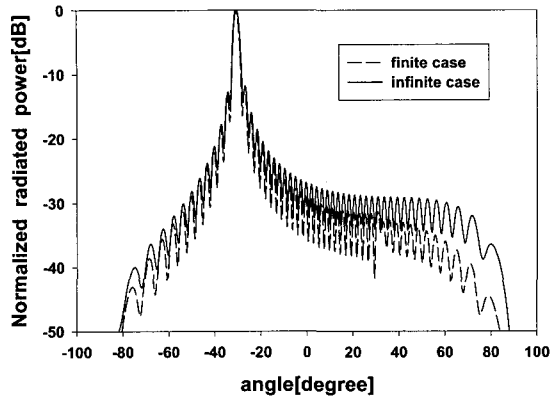


그림 5. 정규화된 복사 패턴(N=50)
 $(\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 3, k_0 p = \pi, d/h = 1.1859, W/d = 0.5, b/W = 0.4004)$
 Fig. 5. Normalized radiation pattern(N=50).
 $(\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 3, k_0 p = \pi, d/h = 1.1859, W/d = 0.5, b/W = 0.4004)$

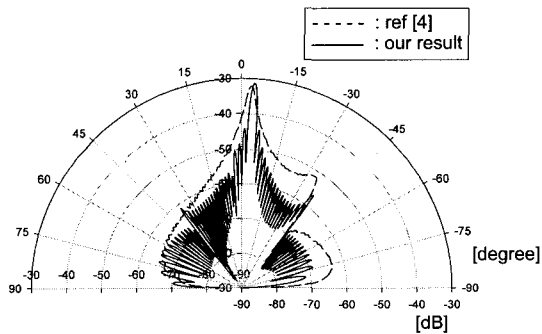


그림 6. 복사 전력 밀도(N=50)
 $(\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 3, k_0 p = 3.9521, d/h = 1.1859, W/d = 0.5, b/W = 0.4004)$
 Fig. 6. Radiation power density versus observation angle(N=50).
 $(\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 3, k_0 p = 3.9521, d/h = 1.1859, W/d = 0.5, b/W = 0.4004)$

그림. 7에는 격자의 모양이 삼각형(echelette grating) 형태일 때 유한주기구조에서 격자의 수(N)를 5개, 10개 및 50개로 증가시키면서 복사패턴의 변화를 도시하였다. 여기에서 개구의 폭은 주기와 동일하고 θ_1 및

θ_2 는 각각 격자의 왼쪽 경계와 오른쪽 경계가 개구면과 이루는 각을 의미한다. 무한주기구조의 해석에서 얻어지는 분산도표에서 한 개의 누설모드만이 존재하는 영역을 선택하였으므로 최대복사는 한 방향($\approx -7.7^\circ$)으로만 일어나며 격자의 수가 증가함에 따라 주빔은 점점 더 좁아지면서 커지고 측엽부분은 점점 더 낮아지면서 많은 수의 ripple이 나타남을 관찰할 수 있다.

그림. 8에는 격자의 경계가 $y = \frac{b}{2}(\cos \frac{2\pi x}{p} - 1)$ 로 주어지는 정현격자(sinusoidal grating)의 형태일 때 모드 필터^[4]로 사용될 수 있는 Bragg 반사 조건($\beta_0 p = \pi$) 근처에서의 투과전력 및 반사전력의 변화를 도시하였다. 수치해석에 사용한 구조적 수치는 $b = 0.5p, h = 0.7p, \epsilon_{r1} = 2, \epsilon_{r2} = 5$ 이며 격자의 수가 70개 일 때 $k_0 p = 1.94$ 에서 약 95%정도의 반사율을 보이고 있다. Bragg 반사 조건하에서 평면파가 무한주기구조에 입사되면 모든 입사전력이 -1차 공간조화모드로 변환되어 입사파의 방향으로 되돌아가는 현상이 일어나며 유한주기구조에서는 입사표면파(incident surface wave)는 격자와의 임피던스 부정합에 의하여 그림에서와 같이 격자 영역

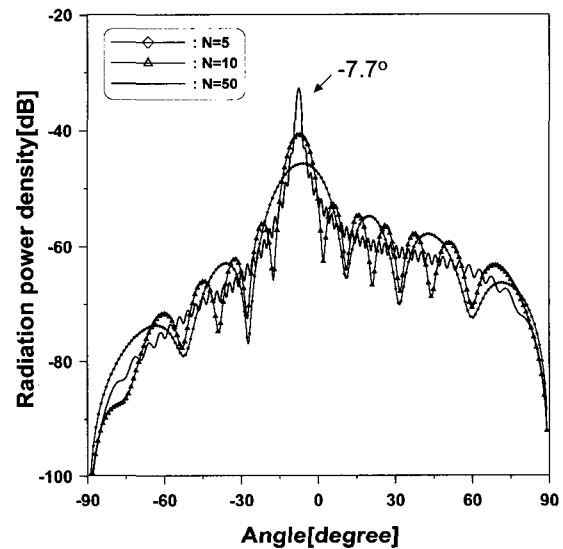


그림 7. 삼각 격자의 경우에 격자의 수에 따른 복사 전력 밀도의 변화
 $(p = 0.7\lambda_0, h = 0.43\lambda_0, \epsilon_{r1} = 2.5, \epsilon_{r2} = 3.5, \theta_1 = \theta_2 = 35^\circ)$
 Fig. 7. Radiation power densities for N=5, 10, and 50 in case of triangular groove grating.
 $(p = 0.7\lambda_0, h = 0.43\lambda_0, \epsilon_{r1} = 2.5, \epsilon_{r2} = 3.5, \theta_1 = \theta_2 = 35^\circ)$

으로 입사되지 못하고 대부분 반사하게 된다. 이 경우 그림. 4의 음영으로 표시되는 삼각형 내부의 영역을 사용하지하므로 누설모드가 존재하지 않게 되고 따라서 복사 전력은 아주 작으므로 그림에서 생략하였다.

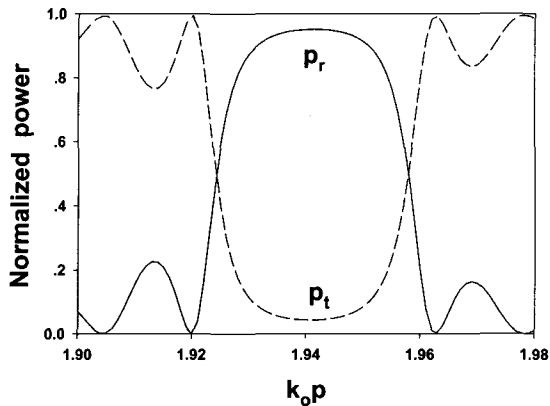


그림 8. 정현 격자인 경우 주파수에 따른 반사 및 투과 계수 ($N=70$)

$$(b=0.5p, h=0.7p, \epsilon_{r1}=2, \epsilon_{r2}=5)$$

Fig. 8. Reflection and transmission coefficients versus the normalized frequency in case of sinusoidal grating ($N=70$).

$$(b=0.5p, h=0.7p, \epsilon_{r1}=2, \epsilon_{r2}=5)$$

IV. 결론

접지된 유전체 슬랩 도파로에 임의 형태의 격자에 의한 표면파의 산란 문제를 다루어 보았다. 임의 형태에 대한 예로서 사각형, 삼각형 혹은 정현형태(sinusoidal profile)의 격자구조를 가지는 유한주기구조에 대해 유한요소법과 모멘트 방법을 혼합하여 등가자기전류를 구하고 이로부터 투과전력, 반사전력 및 복사 전력(복사패턴) 등의 변화를 관찰하였으며 이러한 결과들의 물리적인 의미를 유한주기구조의 해석을 통하여 살펴보았다. 본 연구에서는 TE 편파에 대해서만 다루었지만 전술한 해석방법은 TM 편파의 경우에도 적용이 가능하다.

참고 문헌

[1] K. Solbach, "Slots in dielectric image line as mode launchers and circuit elements," *IEEE*

Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 29, pp. 10-16, Jan. 1981.

[2] W. S. Park and S. R. Seshadri, "Theory of the grating coupler for a grounded-dielectric slab waveguide," *IEE Proc.*, Vol. 132, Pt. H, No. 3, pp. 149-156, June 1985.

[3] W. S. Park and S. R. Seshadri, "Reradiation from a grating coupler for a grounded dielectric slab waveguide," *Proc. Inst. Elec. Eng.*, Vol. 133, No. 1, pp. 10-17, Feb. 1986.

[4] K. Uchida, "Numerical analysis of surface-wave scattering by finite periodic notches in a grounded plane," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp.481-486, May 1987.

[5] R. D. Nevels and C. M. Butler, "Electromagnetic scattering by a surface wave from a notch in a grounded plane covered by a dielectric slab," *J. Appl. Phys.*, Vol. 52, No. 5, pp. 3145-3147, May 1981.

[6] 이 종익, 이 철훈, 조 영기, "접지된 유전체층 위에 위치한 유한한 도체스트립 배열구조로 구성된 비균일 누설파구조" 전자공학회 논문지, 36-D(8), pp. 45-53, 1999.

[7] 이 종익, 이 철훈, 조 영기, "주기적인 슬릿을 갖고 유전체층으로 덮힌 평행평판 도파관에서의 누설파 복사 및 표면파 launching" 전자공학회 논문지, 36-D(4), pp. 25-33, 1999.

[8] S. D. Gedney and R. Mittra, "Analysis of the electromagnetic scattering by thick gratings using a combined FEM/MM solution," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 39, No. 11, pp. 1605-1614, Nov. 1991.

[9] Matthew, and N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics" *CRC Press*, Chap. 6, pp. 407-492, 1992.

[10] C. H. Lee, U. H. Cho and Y. K. Cho, "Surface wave scattering by finite periodic structure of arbitrary profile in a ground plane : TE case" *IEEE AP/URSI Symp.*, Florida, USA, June 1999.

[11] 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 Optical Technology Lett.*, John Wiley & Sons, Vol. 11, pp. 41-45, Jan. 1996.

[12] C. W. Lee, J. I. Lee, and Y. K. Cho, "Analysis of leaky waves from a periodically slotted parallel-plate waveguide for finite number of slots" *Electron. Lett.*, Vol. 30, No. 20, pp. 1633-1634, Sept. 1994.

저 자 소 개

李 喆 勳(正會員) 第 34卷 D編 第 5號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 박사과정

趙 榮 基(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 교수

趙 雄 熙(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照

현재 경동정보대학교 컴퓨터정보통신계열 전임강사