

論文2003-40TC-11-1

유한한 두께를 갖는 평판 상의 주기적 슬롯이 배열된 다중스크린 구조의 전자파 모드 해석

(Electromagnetic Modal Analysis for the Multiscreen Structure with Periodic Slot Array Including Conductor Thickness Effect)

高知 煥 * , 趙 榮 基 **

(Ji Whan Ko and Young Ki Cho)

요 약

본 논문에서는 유전체 위에 도체 평판 상의 주기적 슬롯이 배열된 다중 스크린 구조에 대한 전자파 해석 방법을 제시하였다. 이런 다중스크린 구조는 위상 변위 벽으로 둘러 싸여진 마이크로웨이브 도파관처럼 볼 수 있어, 모드 해석 방법으로 각 불연속면에서 산란행렬을 구하고 도파 구간에는 전송 산란행렬을 구하여 직렬 연산하여 다중스크린의 전체 산란행렬을 계산하는 방법을 사용하였다. 본 해석 방법을 검증하기 위해 단일스크린 구조에서 기존의 모멘트 방법으로 계산한 결과와 비교하였으며 타당함을 확인하였다. 본 해석의 적용 예로 공간여파기를 설계하여 각도와 주파수에 따른 투과 및 반사 계수의 특성을 분석하였다.

Abstract

The electromagnetic modal analysis method for the multiscreen structure with periodic slot array with including conductor thickness effect is presented. The multiscreen structure is seen to be exactly equivalent to a microwave guide closed by phase-shift walls. From this viewpoint, the entire generalized scattering matrix of the multiscreen structure is calculated by the cascade connection of the scattering matrices obtained by the modal analysis at guide junctions and the transmission matrices of guide region. The present method is verified in comparison with the results calculated by the previous method of moment for single screen structure. As an application example of the present method, the spatial filter having multiscreen structure is designed and the interesting characteristics such as transmission and reflection coefficient versus frequency & angle are investigated.

Keywords : spatial filter, angular filter, frequency selective surface, FSS

* 正會員, 金烏工科大學校 電子工學部

(School of Electronic Eng., Kumoh National University of Technology)

** 正會員, 慶北大學校 電子電氣컴퓨터工學部

(School of Electronic and Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

※ 본 연구는 2000년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문입니다.

接受日: 2003년 6월 2일, 수정완료일: 2003년 11월 1일

I. 서론

패치 또는 슬롯이 주기적으로 배열된 구조에 대한 연구는 여러 방향으로 진행되어 왔으며, 유전체면 위에 주기적 배열 구조이거나 또는 접지된 유전체 위에 주기적 배열 구조로 구분될 수 있다. 전자의 대표적인 응용 분야로는 주파수 선택 반사기(frequency selective

surface), 공간 여파기, 레이돔 등을 들 수 있으며^[1-5], 후자로서는 주파수 스캐닝 반사기(frequency scanning reflector), twist reflector, 등에 사용된다^[7-9]. 일반적으로 패치 또는 슬롯이 주기적으로 배열된 단일 스크린 구조가 널리 사용되고 있지만, 용도에 따라서는 스크린이 여러 장 겹쳐진 다중스크린 구조가 사용되기도 한다.

전자파 해석 관점에서 보면 단일 스크린 구조에서는 벡터 Floquet 이론과 모드전개를 이용하여 스펙트럼 영역에서 MOM기법으로 반사계수와 투과계수를 구하는 방법이 널리 사용되어 왔으며^[1], 다중스크린 구조에서는 각 스크린에 대한 산란행렬을 구하고 이를 직렬 결합하여 반사계수와 투과계수를 구하는 방법이 사용되어 왔다^[10, 11]. 이러한 기존의 방법은 회절(diffraction) 관점에서 전자파 문제를 다루었기 때문에 다중스크린구조에서의 산란행렬 계산이 비교적 복잡하다는 단점이 있다.

또 다른 해석 관점으로 보면 무한 주기 배열 구조는 위상 변위 벽(phase shift wall)으로 둘러 싸여져 있어 하나의 주기내의 전자파만 고려해도 되는 위상 변위 도파관(phase shift guide) 구조로 볼 수도 있다. 이러한 관점으로 보면 다중 스크린 구조를 마치 마이크로웨이브 도파관 여파기에서의 불연속 구조의 전자파 문제로 쉽게 다룰 수 있어, 다중스크린 구조로 주파수 또는 각도 여파기와 같은 부품을 설계하는데 용이하다. 이러한 점을 이용하여 문헌[12]에서는 1차원 주기 배열인 도체 스트립(metal strip) 구조를 위상 변위 도파관으로 접근하여 각도 대역 통과 여파기(angular bandpass filter)가 설계된 바 있으나, 아직까지 2차원 주기 배열 다중스크린에 대해서는 다룬적이 없다.

따라서 본 논문에서는 2차원 주기 슬롯이 배열된 다중스크린 구조를 위상 변위 도파관 관점으로 보고 전자파 해석 방법을 제시하고자 한다. 다중스크린 구조는 <그림 1>과 같이 유전체 위에 유한한 두께를 갖는 도체 평판 상의 주기적인 슬롯이 배열된 스크린이 공간 거리를 두고 여러 장 겹쳐진 형태이다. 이러한 다중스크린 구조에 대해 평면파가 입사할 때 반사계수와 투과계수의 계산은 도파관 불연속 구조의 전자파 해석 문제^[13, 14]와 동일하게 각 불연속면에서 모드 해석(modal analysis)방법을 통해 산란행렬을 구하고, 도파 구간에는 전송 산란행렬을 구하여 이를 직렬 연산하는 방법을 사용하였다. 이러한 전자파 해석 방법의 정확성을 검증하기 위해 단일스크린 구조에 대해 널리 사용되는 기존의 MOM 방법과 비교하였으며, 슬롯 배열이 있는 도체 평

판의 두께의 효과를 분석하였다. 그리고 적용 예로써 공간 여파기를 설계하여 각도와 주파수 응답특성에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

II. 다중 스크린의 산란행렬

본 논문에서 다루고자 하는 다중스크린 구조는 <그림 1>과 같이 두께가 있는 도체에 사각형 슬롯이 2차원 주기적으로 무한히 배열되어 있고 유전체가 접속되어 있으며, 각 스크린의 배열 주기는 동일하다고 두었다. 슬롯 배열의 좌표 정의는 <그림 2>와 같이 x-y 평면에 슬롯이 배열되어 있고 주기는 T_x, T_y 이며 사각형 슬롯의 크기는 dx, dy 이다.

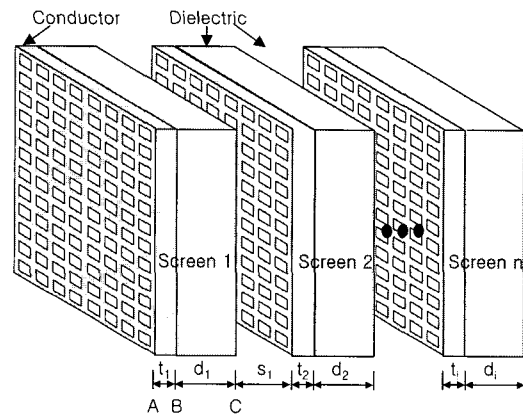


그림 1. 슬롯이 배열된 다중스크린 구조
Fig. 1. Multiscreen structure with periodic slot array.

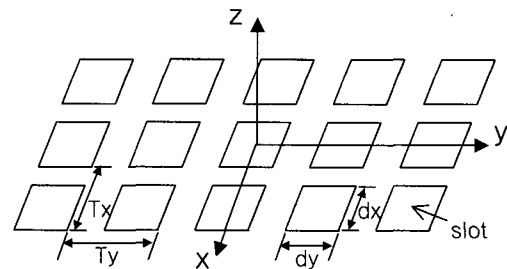


그림 2. 주기적인 슬롯 배열의 좌표 정의
Fig. 2. Coordinate definition of periodic slot array.

이와 같은 구조에서 각 영역을 구분하여 보면 유전체 영역과 슬롯 영역으로 구분되고, 전자파의 불연속은 유전체 영역과 슬롯 영역간의 불연속 그리고 유전율이 서로 다른 유전체 영역간의 불연속으로 구분된다. 이러한

불연속면에서 산란행렬을 구하고, 도체 내부의 슬롯영역인 사각형 도파관과 유전체 영역은 위상 변위 도파관으로 보고 각각 전송 산란행렬을 구하여 이를 직렬 결합하므로 도파관 불연속 문제처럼 다중 스크린 전체에 대한 산란행렬을 쉽게 계산할 수 있다. 따라서 다음은 각 불연속면에 대한 산란행렬 구하는 방법을 언급하고자 한다.

1. 유전체 영역과 슬롯 영역간의 불연속에 대한 산란행렬

<그림 1>에서 보는 바와 같이 유전체 공간 영역과 슬롯 영역간의 전자파 불연속면에서 산란행렬 계산은 한 주기내의 전자파만 고려해도 되므로 가상의 위상 변위 벽으로 둘러 싸여진 한 주기만 <그림 3>에 나타내었다. <그림 3>에서 영역 1은 유전체 공간 영역, 영역 2은 사각형 도파관에 해당되고 도파관의 불연속 문제를 볼 수 있다. 따라서 $z=0$ 인 지점에서 산란행렬을 구하는 방법은 일반적으로 불연속 문제에 널리 사용되고 있는 모드 해석 방법을 적용할 것이다. 이를 위해 먼저 유전체 공간 영역에서 불연속면의 접선 전계 성분은 다음의 식과 같이 TE(h-type)와 TM(e-type) Floquet 모드의 합으로 표현된다^[1].

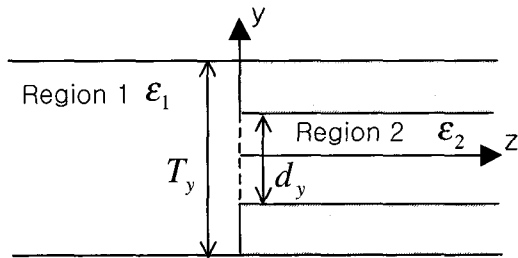


그림 3. 도파관에서의 불연속
Fig. 3. Discontinuity in the waveguide.

$$\bar{e}_1(x, y) = \sum_p \sum_q [a_{pq}^h \bar{e}_{1pq}^h(x, y) + a_{pq}^e \bar{e}_{1pq}^e(x, y)] \quad (1)$$

여기서

$$\bar{e}_{1pq}^h(x, y) = \frac{e^{j(k_{yp}x + k_{yq}y)}}{\sqrt{d_x d_y} \sqrt{k_{xp}^2 + k_{yq}^2}} (k_{yq} \hat{x} - k_{xp} \hat{y}) \quad (2a)$$

$$\bar{e}_{1pq}^e(x, y) = \frac{e^{j(k_{yp}x + k_{yq}y)}}{\sqrt{d_x d_y} \sqrt{k_{xp}^2 + k_{yq}^2}} (k_{xp} \hat{x} + k_{yq} \hat{y}) \quad (2b)$$

(559)

$$k_{xp} = \sqrt{\epsilon_{r1}} k_0 \sin \theta \cos \phi + \frac{2\pi p}{T_x}$$

$$k_{yq} = \sqrt{\epsilon_{r1}} k_0 \sin \theta \sin \phi + \frac{2\pi q}{T_y}$$

위 식에서 (θ, ϕ) 는 스크린에 입사되는 파의 방향을 나타내며, a_{pq} 는 각 모드의 계수를 의미한다. 그리고 z 방향의 전파상수는 다음과 같이 주어진다.

$$k_{zpq} = \sqrt{\epsilon_{r1} k_0^2 - k_{xp}^2 - k_{yq}^2} \quad (3)$$

다음은 영역 2의 사각형 도파관에서 불연속면($z=0$)에서 접선 전계는 TE와 TM 모드의 합으로 다음식과 같이 주어질 수 있다^[15].

$$\bar{e}_2(x, y) = \sum_m \sum_n [b_{mn}^h \bar{e}_{2mn}^h(x, y) + b_{mn}^e \bar{e}_{2mn}^e(x, y)] \quad (4)$$

여기서

$$\bar{e}_{2mn}^h(x, y) = \frac{\sqrt{c_m c_n}}{\sqrt{ab} \sqrt{\beta_{xm}^2 + \beta_{yn}^2}} [\hat{x} \beta_{yn} \cos \beta_{xm} (x + d_x / 2) \sin \beta_{yn} (y + d_y / 2) - \hat{y} \beta_{xm} \sin \beta_{xm} (x + d_x / 2) \cos \beta_{yn} (y + d_y / 2)] \quad (5a)$$

$$\bar{e}_{2mn}^e(x, y) = \frac{-2}{\sqrt{ab} \sqrt{\beta_{xm}^2 + \beta_{yn}^2}} [\hat{x} \beta_{xm} \cos \beta_{xm} (x + d_x / 2) \sin \beta_{yn} (y + d_y / 2) + \hat{y} \beta_{yn} \sin \beta_{xm} (x + d_x / 2) \cos \beta_{yn} (y + d_y / 2)] \quad (5b)$$

위 식에서 $m, n=0, 1, 2, 3, \dots$ 이고 $m=n=0$ 인 경우는 제외되며, c_m 은 $m=0$ 이면 1, $m \neq 0$ 이면 2가 되고, b_{mn} 는 사각형 도파관에서 각 모드의 계수를 의미한다. 그리고 $\beta_{xm} = m\pi / d_x$, $\beta_{yn} = n\pi / d_y$ 이다.

이제 유전체 공간과 도파관의 불연속면에서 전계의 접선 성분은 서로 연속이라는 경계조건을 적용할 것이다. 그러면 $z=0$ 인 지점에서 유전체 공간 영역의 접선 전계 성분인 식 (1)과 도파관 영역의 접선 전계 성분인 식 (4)는 서로 같게 두면 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\bar{e}_1(x, y) = \begin{cases} \bar{e}_2(x, y), & |x| < d_x/2 \text{ and } |y| < d_y/2 \\ 0, & |x| \geq d_x/2 \text{ or } |y| \geq d_y/2 \end{cases} \quad (6)$$

위 식 (6)의 양변에 식 (2a)인 $\bar{e}_{1pq}^h(x, y)$ 를 곱하고 한 주기 면적 만큼 적분하면 식 (1)의 계수 a_{pq}^h 를 얻을 수 있으며, 다시 식 (6)의 양변에 식 (2b)인 $\bar{e}_{1pq}^e(x, y)$ 를 곱하고 한 주기 면적 만큼 적분하면 식 (1)의 계수 a_{pq}^e 도 얻을 수 있으며 관계식은 다음과 같다.

$$a_{pq}^h = \sum_m \sum_n [A_{pqmn} b_{mn}^h + B_{pqmn} b_{mn}^e] \quad (7a)$$

$$a_{pq}^e = \sum_m \sum_n [C_{pqmn} b_{mn}^h + D_{pqmn} b_{mn}^e] \quad (7b)$$

여기서

$$A_{pqmn} = \int_{-d_x/2}^{+d_x/2} \int_{-d_y/2}^{+d_y/2} \bar{e}_{1pq}^h(x, y) \bar{e}_{2mn}^h(x, y) dx dy \quad (8a)$$

$$B_{pqmn} = \int_{-d_x/2}^{+d_x/2} \int_{-d_y/2}^{+d_y/2} \bar{e}_{1pq}^h(x, y) \bar{e}_{2mn}^e(x, y) dx dy \quad (8b)$$

$$C_{pqmn} = \int_{-d_x/2}^{+d_x/2} \int_{-d_y/2}^{+d_y/2} \bar{e}_{1pq}^e(x, y) \bar{e}_{2mn}^h(x, y) dx dy \quad (8c)$$

$$D_{pqmn} = \int_{-d_x/2}^{+d_x/2} \int_{-d_y/2}^{+d_y/2} \bar{e}_{1pq}^e(x, y) \bar{e}_{2mn}^e(x, y) dx dy \quad (8d)$$

식 (8)의 관계식을 보면 A, B, C, D는 불연속면에서 두 영역의 접선 전계인 TE 모드와 TM 모드간의 결합 계수를 의미한다. 여기서 (8b)의 우변을 적분을 해보면 $B_{pqmn} = 0$ 이 되고, 식 (7)을 행렬로 표현하면 다음의 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} a^h \\ a^e \end{bmatrix} = [M] = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b^h \\ b^e \end{bmatrix} \quad (9)$$

따라서 <그림 3>의 불연속면에서 접선 전계 모드의 계수 산란행렬 S_{22} 는 다음의 식으로부터 쉽게 얻을 수 있다^[14].

$$[S_{22}] = ([Y_2] + [Y_{L2}])^{-1} ([Y_2] - [Y_{L2}]) \quad (10)$$

여기서

$$[Y_{L2}] = [M]^T [Y_1] [M] \quad (11)$$

위의 식에서 $[Y_1]$ 과 $[Y_2]$ 는 각 도파관에 대한 모드 어드미턴스 행렬을 의미하며 다음 식과 같이 대각행렬로 표현된다.

$$[Y_i] = \begin{bmatrix} [Y_i^h] & 0 \\ 0 & [Y_i^e] \end{bmatrix}, \quad i=1, 2 \quad (12)$$

그리고 각 영역에서 모드 어드미턴스 Y^h 와 Y^e 는 다음 식과 같다.

$$Y_{1pq}^h = \frac{k_{zpq}}{\omega \mu_o}, \quad Y_{1pq}^e = \frac{\omega \epsilon_1}{k_{zpq}} \quad (13)$$

$$Y_{2mn}^h = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2} k_o^2 - \beta_{xm}^2 - \beta_{yn}^2}}{\omega \mu_o},$$

$$Y_{2mn}^e = \frac{\omega \epsilon_2}{\sqrt{\epsilon_{r2} k_o^2 - \beta_{xm}^2 - \beta_{yn}^2}} \quad (14)$$

또한 나머지 산란행렬은 다음의 관계식으로부터 구할 수 있으며, 여기서 $[I]$ 는 단위 행렬, Γ 는 전치를 의미한다.

$$[S_{12}] = [M] [S_{22}] + [I] \quad (15)$$

$$[S_{21}] = 2([Y_2] + [Y_{L2}])^{-1} [M]^T [Y_1] \quad (16)$$

$$[S_{11}] = [M] [S_{21}] - [I] \quad (17)$$

2. 서로 다른 유전체 영역간의 불연속에 대한 산란행렬

<그림 1>을 보면 스크린과 스크린 사이에 유전율이 서로 다른 유전체가 접속되어 있다. 이런 접속면에서 전자파는 불연속이 존재하며 위상 변위 벽으로 싸여진 한 주기만 고려하여 그리면 <그림 4>와 같다. 이 경우는 동일한 크기의 도파관 내부에 유전율이 서로 다른 유전체가 채워져 있는 것으로 볼 수 있다.

<그림 4>의 불연속면에서 산란행렬을 구하기 위해 앞에서 언급된 모드 해석 방법을 적용해 보자. 각 영역 1, 2에서 불연속면의 접선 전계 성분은 식 (1)과 같이 둘 수 있으며, 경계 조건을 부과하여 식 (9)의 행렬 $[M]$ 을 계산하여 보면 단위 행렬($[I]$)을 얻는다. 이것은 서로 다른 모드간에는 결합이 발생되지 않는다는 것을 의미

한다. 이런 이유로 <그림 4>의 불연속면에서 산란행렬은 다음 식과 같이 간단하게 얻을 수 있다.

$$[S_{22}] = ([Y_2] + [Y_1])^{-1}([Y_2] - [Y_1]) \quad (18)$$

$$[S_{12}] = [S_{22}] + [I] \quad (19)$$

$$[S_{21}] = 2([Y_2] + [Y_1])^{-1}[Y_1] \quad (20)$$

$$[S_{11}] = [S_{21}] - [I] \quad (21)$$

여기서 $[Y_1]$ 과 $[Y_2]$ 는 각 도파관에 대한 모드 어드미턴스로 대각행렬이므로 식 (18)~식 (21)의 산란행렬은 대각행렬이 된다.

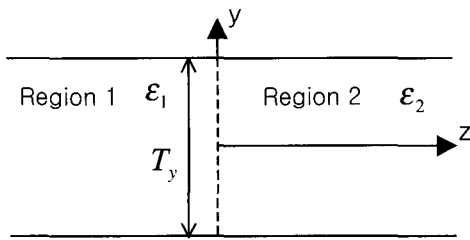


그림 4. 두 유전체간의 접속
Fig. 4. Interface between two dielectric media.

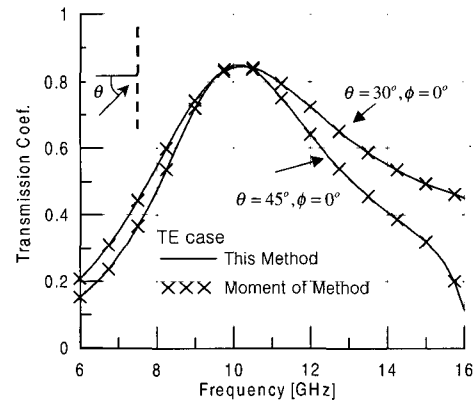
III. 다중스크린의 산란행렬 수치 계산

앞 절에서는 <그림 1>의 불연속에서 산란행렬을 구하는 방법을 제시하였다. 다중스크린의 전체 산란행렬을 계산하기 위해서는 불연속면에서 산란행렬뿐만 아니라 슬롯이 배열된 도체 평판의 두께에 해당하는 도파 구간과 유전체 두께에 해당하는 도파 구간에 대해서도 전송 산란행렬도 구하여야 한다. 이것은 각 도파관의 z 축의 전파상수와 도파관의 길이를 알면 쉽게 계산할 수 있다^[13].

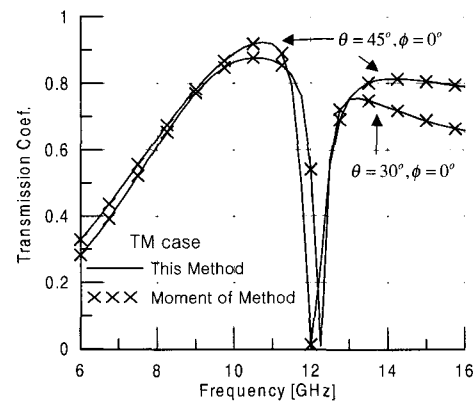
예로서 <그림 1>에서 단일 스크린만 있다고 보자. 그러면 좌측에서 공간과 슬롯이 배열된 도체면간의 불연속 접속(A)의 산란행렬 $[S_a]$, 슬롯이 배열된 도파 구간의 전송 산란행렬 $[S_b]$, 다시 슬롯이 배열된 도체면과 유전체간의 불연속 접속(B)의 산란행렬 $[S_b]$, 유전체영역의 전송 산란행렬 $[S_d]$ 그리고 유전체 영역과 공간간의 불연속 접속(C)의 산란행렬 $[S_c]$ 을 구하고, 이들 5개의 산란행렬을 직렬 결합하면 단일스크린의 전체 산란행렬을 계산할 수 있다. 이와 같은 방법을 사용하여 <그림 1>과 같이 스크린이 여러 장 있는 경우에도 각 산란행렬

을 직렬 결합하면 다중스크린의 전체 산란행렬을 계산할 수 있다. 만약, 동일한 스크린이 여러 장 있으면 각 스크린의 산란행렬을 구할 필요가 없으므로 더욱 간단하게 전체 산란행렬을 계산할 수 있다. 다중스크린에 대한 전체 산란행렬을 구하였다면 TE 파와 TM 파의 반사계수는 $[S_{11}]$ 과 $[S_{22}]$ 그리고 투과 계수는 $[S_{21}]$ 과 $[S_{12}]$ 로 부터 바로 얻을 수 있다.

이와 같이 본 논문에서 제시한 다중스크린에 대한 산란행렬을 구하는 방법이 타당한지 검토하기 위해 먼저 단일스크린(Single screen)만 있을 경우에 기존에 널리 사용되고 있는 모멘트 방법(Moment of Method)과 비교하였다. 이를 위해 입사되는 평면파의 주파수를 10GHz 대로 두고 단일 스크린의 구조를 정하였다. 스크린의 주기는 식 (3)의해 Floquet 모드의 기본파(p=0,q=0)만 전파되도록 x, y 방향의 주기가 동일하게 $T_x=T_y=10\text{mm}$.



(a) TE case



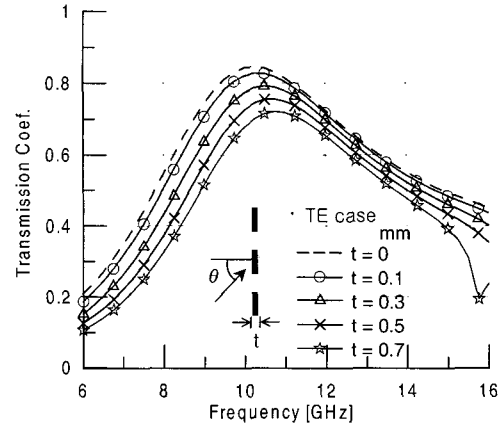
(b) TM case

그림 5. 단일스크린 구조에서의 투과계수
Fig. 5. Transmission coefficient of the single screen structure. ($\epsilon_r=5$, $d=2\text{mm}$, $T_x=T_y=10\text{mm}$, $dx=dy=8\text{mm}$)

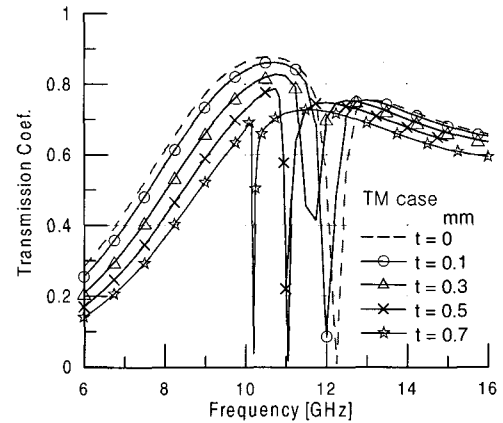
로 정하였고, 슬롯의 크기는 정사각형으로 $dx=dy=8\text{mm}$ 설정하고 도체의두께는 무한히 얇게 두었다. 그리고 유전체는 유전율이 $\epsilon_r=5$, 두께는 2mm 인 기판을 사용하였다. 이러한 단일 스크린에 z 축에 대해 TE 파와 TM 파가 비스듬하게 할때 본 논문에서 제시한 방법과 기존의 모멘트 방법에 의한 투과계수의 계산 결과를 비교하여 <그림 5>에 나타내었다. 그림에서 보면 두 방법에 의한 계산 결과는 일치함을 볼 수 있으며, 입사파의 전력은 반사파 전력과 투과파 전력의 합과 같다는 전력보존법칙도 만족시켜 본 논문에서 제시한 해석 방법이 타당함을 알 수 있었다.

<그림 5>에서는 슬롯이 배열된 도체판의 두께가 무한히 얇은 경우에 대한 투과계수의 계산결과를 보여 주고 있다. 실제로 스크린은 주로 안테나의 전면에 부착되므로 내구성과 견고성을 위해 도체판의 두께가 어느 정도 요구된다. 슬롯이 배열된 도체판의 두께가 투과계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 <그림 5>의 단일스크린과 동일한 구조에 평면파가 ($\theta = 30^\circ, \phi = 0^\circ$) 방향으로 입사될 때 도체 두께에 따른 투과계수를 <그림 6>에 제시하였다. 그림에서 보면 도체의 두께가 두꺼울수록 투과계수가 적어짐을 볼 수 있다. 이것은 도체판의 슬롯영역은 길이가 매우 짧은 사각형 도파관으로 볼 수 있으므로 도파관의 폭과 높이가 차단 파장보다 훨씬 적어 파가 진행할 수 없기 때문이다.

다음은 동일한 스크린 두께가 놓여져 있는 이중스크린(Dual screen)에 대해 투과계수를 계산해 보았다. 여기서 각 스크린의 주기는 $T_x=T_y=12\text{mm}$, 슬롯의 크기는 $dx=dy=8\text{mm}$ 로 두었고, 도체판 두께는 $t=0.035\text{mm}$, 유전율은 $\epsilon_r=2.25$, 유전체 두께는 $d=2\text{mm}$ 인 기판을 사용하였다. 이런 이중스크린 구조에 주파수가 10GHz 인 파가 ($\theta = 10^\circ, \phi = 0^\circ$) 방향으로 입사될 때, 두 스크린 사이의 간격(공간 거리 S)을 7mm 부터 13mm 까지 변화하면서 투과계수를 계산하여 <그림 7>에 나타내었다. 그림에서 살펴보면 공간 거리 $S=10.3\text{mm}$ 일때 TE파와 TM파 모두 투과계수가 거의 0dB 로 되어 입사파가 반사 없이 전부 투과함을 보여주고 있다. 만약, 스크린이 하나만 있다면 입사파는 거의 대부분 반사되지만, 이 조건에서 이중스크린은 두 스크린 사이의 공간에서 공진 현상이 일어나서 입사파를 전부 투과하게 한다. 마치 1단 도파관 여파기처럼 중간에 공진기가 있고 양쪽에 아이리스(iris)가있는 구조로 볼 수 있다.



(a) TE case



(b) TM case

그림 6. 단일스크린 구조에서의 도체판 두께에 따른 투과계수

Fig. 6. Transmission coefficient of the single screen structure versus conductor thickness. ($\epsilon_r=5, d=2\text{mm}, T_x=T_y=10\text{mm}, dx=dy=8\text{mm}, \theta = 30^\circ, \phi = 0^\circ$)

그리고 두 스크린 사이의 공간 거리를 $S=10.3\text{mm}$ 로 두고 입사 각도에 따른 TE파와 TM파의 투과계수를 계산하고 그리고 동일한 조건에서 스크린이 하나만 있는 경우에 투과계수를 계산하여 <그림 8>에 나타내었다. 단일스크린인 경우는 입사파를 거의 대부분 반사하지만 이중스크린인 경우를 보면 $0^\circ \sim 10^\circ$ 각도 범위 내에서는 입사파가 거의 전부 투과(투과계수 0.2dB 이내)하고 그 이상의 각도에서는 차단되는 특성을 볼 수 있다. 즉 저역통과여파기의 특성응답과 비슷함을 알 수 있다. 그리고 이중스크린의 차단특성을 보면 TM파가 입사될때 보다 TE파가 입사될때 차단 특성이 보다 우수하다. 이러한 스크린은 입사 각도에 대한 여파기 특성을 나타내

므로 각도 여파기 (Angular filter) 또는 공간 여파기 (Spatial filter)라 부른다.

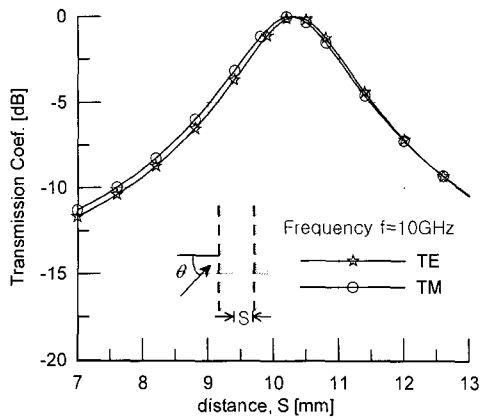


그림 7. 이중스크린의 공간 거리 S에 따른 투과계수
 Fig. 7. Transmission coefficient of the dual screen structure versus space distance S. ($\epsilon_r=2.25$, $d=2\text{mm}$, $t=0.035\text{mm}$, $T_x=T_y=12\text{mm}$, $dx=dy=8\text{mm}$, $\theta=10^\circ$, $\phi=0^\circ$)

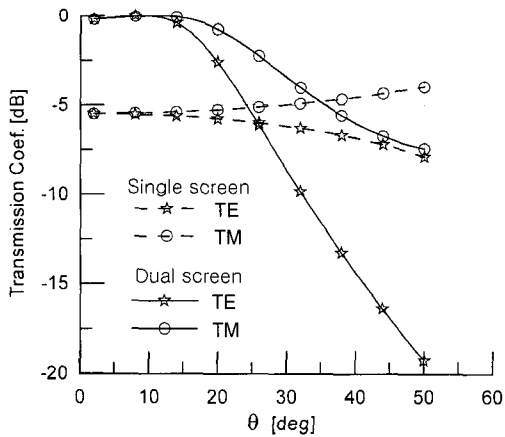


그림 8. 입사 각도에 따른 단일스크린과 이중스크린의 투과계수
 Fig. 8. Transmission coefficient of the single screen and the dual screen versus incident angle. ($S=10.3\text{mm}$, $\phi=0^\circ$)

따라서 본 논문에서는 3개의 스크린을 가지고 공간 여파기를 설계해 보았다. 여파기 설계 방법은 널리 사용되고 있는 문헌[16]에 자세히 언급되어 있어 본 논문에서는 생략하였다. 공간 여파기 설계를 위해 주파수는 $f=10\text{GHz}$, 차단 각도는 10° , 리플은 0.05dB 로 설정하고 2단 Chebyshev 응답 특성을 갖는 분포정수 반파장 원형 여파기를 먼저 구한 다음에 인버터 K를 가지고 각

스크린의 슬롯의 크기와 스크린 사이의 공간 거리를 구현하였다.

각 스크린은 동일한 기관(유전율 $\epsilon_r=2.25$, 유전체 두께 $d=2\text{mm}$, 도체 두께 $t=0.035\text{mm}$)을 사용하고, 배열 주기도 기본모드만 전파되게 스크린 3개 모두 $T_x=T_y=10\text{mm}$ 로 동일하게 두고 본 논문에서 언급한 산란행렬에서 TE파의 Floquet 기본모드만 고려하여 공간 여파기를 설계하였다. 설계 결과로 양쪽 가장자리에 있는 스크린 1, 3의 정사각형 슬롯의 크기는 $dx=dy=7.351\text{mm}$, 중간에 있는 스크린 2의 정사각형 슬롯의 크기는 $dx=dy=5.026\text{mm}$ 그리고 각 스크린 사이의 공간 거리는 반 파장보다 약간 적게 $S_1=S_2=12.314\text{mm}$ 로 구현되었다.

그리고 설계된 다중스크린 구조에 대해 본 논문에서 제시한 전자파 모드 해석 방법으로 TE파와 TM파의 투과계수와 반사계수를 계산하여 <그림 9>에 나타내었다. 투과계수와 반사계수의 계산은 CPU 시간을 줄이기 위해 스크린 1과 스크린 3은 동일한 구조이므로 스크린 1의 산란행렬과 스크린 2의 산란행렬만 계산하고, 스크린 사이의 공간 거리에 대한 전송 산란행렬을 계산하여 이들 산란행렬을 직렬 결합하였다.

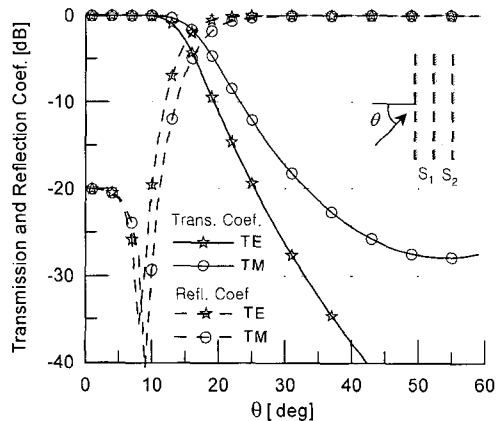


그림 9. 다중스크린에서 각도에 따른 투과 및 반사계수
 Fig. 9. Transmission and reflection coefficient of multiscreen. ($f=10\text{GHz}$, $\phi=0^\circ=0^\circ$, $\epsilon_r=2.25$, $d=2\text{mm}$, $t=0.035\text{mm}$, 스크린 1, 3($T_x=T_y=10\text{mm}$, $dx=dy=7.351\text{mm}$), 스크린 2($T_x=T_y=10\text{mm}$, $dx=dy=5.026\text{mm}$), $S_1=S_2=12.314\text{mm}$)

<그림 9>에서 투과계수와 반사계수를 보면 입사 각도가 $0^\circ \sim 10^\circ$ 범위 이내에는 입사파는 전부 투과하고 그 이상의 각도에서는 급격히 감쇠하여 입사파는 모두 반사됨을 알 수 있다. 즉 입사 각도에 따라 매우 양호한

여파기 특성을 보여주고 있다. 이러한 공간 여파기는 능동배열안테나의 전면에 부착하여 grating lobe를 차단하거나 또는 파라볼라 안테나와 같은 side lobe를 차단하는데 주로 사용된다.

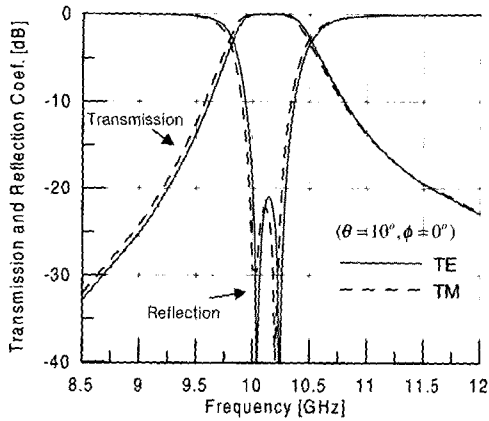


그림 10. <그림 9>의 주파수에 따른 다중스크린의 투과 및 반사 계수
 Fig. 10. Transmission and reflection coefficient of multiscreen versus frequency.

<그림 9>의 다중스크린 구조에 대해 주파수 특성을 알아보기 위해 파가 $(\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ)$ 방향으로 입사할 때 주파수에 따른 투과계수와 반사계수를 <그림 10>에 나타내었으며 주파수 특성은 대역통과여파기 특성과 비슷함을 볼 수 있다. 따라서 설계된 다중스크린은 각도 여파 기능뿐만 아니라 주파수 여파 기능도 동시에 가지고 있음을 알 수 있다. <그림 9>에서 다룬 2차원 배열 다중스크린 구조는 1차원 배열인 도체 스트립 구조^[12]에 비하여 편파와 차단 특성이 보다 향상되게 여파기 구현이 가능하다고 생각된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 유전체 위에 유한한 두께를 갖는 도체 평면 상에 2차원 주기적 슬롯이 배열된 다중스크린 구조에 대한 전자파 모드 해석 방법을 제시하였다. 이러한 무한 주기 배열 구조에 대하여 기존에는 회절 관점에서 주로 전자파 문제를 다루었는데 반하여 본 논문에서는 위상 변위 벽으로 둘러 쌓여져 있는 도파관으로 보고 마이크로웨이브 도파관의 불연속 문제와 같이 모드 해석 방법을 통해 각 불연속면에서는 산란행렬을 구하고, 도파 구간에서는 전송 산란행렬을 구한 다음 직렬 연산

과정을 통하여 전체 산란행렬을 계산하였다.

본 논문에서 제시한 전자파 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 단일스크린에 대해 널리 사용되고 있는 기존의 모멘트 방법의 결과와 비교하여 계산 결과가 일치함을 확인하였다. 단일스크린 구조인 경우 슬롯이 배열된 도체판의 두께에 따른 투과계수의 변화를 분석하였으며, 이중스크린인 경우 두개 스크린사이의 공간 거리에 따른 투과 및 반사 계수를 분석하여 공간 여파기의 기능을 확인하였다. 또한 공간 여파기 설계 예로서 3개의 스크린 형태를 갖는 2단 chebyshev 여파기를 설계하고 각도와 주파수에 따른 투과 및 반사 계수의 특성을 조사하였다.

따라서 본 논문에서 제시한 방법은 슬롯이 배열된 다중스크린의 전자파 문제를 매우 간편하고 쉽게 다룰 수 있으며, 도파관 불연속 구조로 보았기 때문에 여파기 설계에 바로 이용할 수 있다는 장점이 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.P. Montgomery, "Scattering by an infinite periodic array of thin conductors on a dielectric sheet," IEEE Trans, vol. AP-23, no. 1, pp. 70-75, Jan. 1975.
- [2] C. C. Chen, "Transmission through a conducting screen perforated periodically with apertures," IEEE Trans, vol. MTT-18, no. 9, pp. 627-632, Sept. 1970.
- [3] R. Mittra, C. H. Chan and T. Cwik "Techniques for analyzing frequency selective surfaces—a review," Proc. of IEEE, vol. 76, no. 12, pp. 1593-1615, Dec. 1988.
- [4] T. K. Wu, Frequency Selective Surface and Grid Array, John Wiley & Sons, Inc., 1995
- [5] 고지환, 엄만석, "격자 사각 루프 형태를 갖는 주파수 선택 반사기," 전자공학회 논문지, vol. 34, no. 9, pp. 703-710, 1997
- [6] 고지환, 조영기, "원편파 변환 주파수선택반사기 설계," 전자공학회논문지, vol. 38TC, no. 1, pp. 34-42, 2001
- [7] 고지환, 강성춘, 조영기, 손현, "접지된 유전체 위에 이중 다이폴 소자의 주기적 배열에 의한 전자파 산란", 한국전자파학회 종합학술발표회, KEES

- '96, Nov. 1996
- [8] 조영기, 고지환, "접지된 판상 유전체층 위에 위치한 주기적인 스트립격자 구조에 의한 전자기파의 산란 및 복사," 전자공학회논문지, vol. 33A, no. 8, pp. 72-88, 1996
- [9] F. S. Johansson, "A new planar grating-reflector antenna," IEEE Trans., vol. AP-38, no. 9, pp. 1491-1495, Sep. 1990.
- [10] Tom Cwik and R. Mittra, "The Cascade Connection of Planar Periodic Surfaces and Lossy Dielectric Layers to Form an Arbitrary Periodic Screen," IEEE Trans., vol. AP-35, no. 12, pp. 1397-1405, Dec. 1987.
- [11] C. Wan and J. A. Encinar, "Efficient Computation of Generalized Scattering Matrix for Analyzing Multilayered Periodic Structures," IEEE Trans., vol. AP-43, no. 11, pp. 1233-1242, Nov. 1995.
- [12] D. Kinowski, M. Guglielmi and A. G. Roederer, "Angular Bandpass Filters: An Alternative Viewpoint Gives Improved Design Flexibility," IEEE Trans., Vol. AP-43, No. 4, pp. 390-395, April 1995.
- [13] R. Safavi-Naini and S. H. MacPhie, "Scattering at Rectangular-to-Rectangular Waveguide Junctions," IEEE Trans., Vol. MTT-30, No. 11, pp. 2060-2063, Nov. 1986.
- [14] J. D. Wade and R. H. Macphie, "Scattering at Circular-to-Rectangular Waveguide Junctions," IEEE Trans., Vol. MTT-34, No. 11, pp. 1085-1091, Nov. 1986.
- [15] N. Marcuvitz, Waveguide Handbook, New York: McGraw-Hill, 1951.
- [16] G. Matthei, L. Young and E.M.T. Jones, Microwave Filter, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, Artech House, 1980.

저 자 소 개



高 知 煥(正會員)

1982년 : 경북대학교 전자공학과(공학사). 1985년 : 경북대학교 전자공학과(공학석사). 1998년 : 경북대학교 전자공학과(공학박사). 1985년~2000년 : 한국전자통신연구원 연구원. 2000년~현재 : 금오공과대학교

전자공학부 교수. <주관심분야 : 안테나 설계, 초고주파 도파관 및 부품 설계, 전자파 산란, 위성통신>



趙 榮 基(正會員)

1978년 : 서울대학교 전자공학과(공학사). 1981년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1998년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 1981년~현재 : 경북대학교 전자전 기공학부 교수.

1992년~현재 : 국제전파연합(URSI) 한국대표. 2000년~현재 : 한국전자과학회 학술이사. 2002년~현재 : 경북대학교 공과대학 BK사업 단장. <주관심분야 : 전자파 산란 및 복사, 주기구조, 안테나 이론>