

論文95-32A-9-10

이방성 다층 유전체 기판을 갖는 차폐된 코플래너 도파관 해석

(Analysis of the shielded coplanar waveguide
with multiple anisotropic substrates.)

安垧銀*, 李相高*

(Kwang Eun Ahn and Sang Seol Lee)

요약

이방성 유전체 층을 포함하는 다층 유전체 기판을 갖는 차폐된 서스펜디드 코플래너 도파관의 특성을 도파관 내부의 전자계를 TEM 모드로 근사하고 포인트매칭법을 이용하여 해석한다. 코플래너 도파관의 특성임피던스와 유효유전율을 전송스트립의 폭을 변화시키며 계산하고 또한 전송스트립과 접지스트립간의 간격을 변화시키며 그 영향을 고찰한다. 주기판인 이방성 유전체 기판의 두께와 이방성 유전율의 비(ϵ_x/ϵ_y)를 변화시키며 특성파라미터의 변화를 계산하고 지지기판의 영향을 고찰하기 위해 지지기판의 유전율을 변화시킨다. 코플래너 도파관의 접지판을 무한 평면으로 하고 차폐판이 없는 구조에 대해 계산한 특성파라미터는 기존의 변분법에 의해 계산된 연구결과와 잘 일치한다.

Abstract

In this paper, shielded suspended coplanar waveguide with multiple anisotropic substrates is analyzed by the point matching method in the quasi-TEM mode approximation. The characteristic impedance and the effective dielectric constant are calculated by varying the width of center strip and gap between the center strip and the ground strip. And also the characteristic parameters are calculated as a function of $\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$ and a permittivity of the support substrate. Approaching the ground strip to infinity, the values of the characteristic parameters are found to be in good agreement with the other results by variational method.

I. 서론

최근의 MMIC 제작에는 저손실과 낮은 분산 특성, 그리고 구조적으로 약한 기판을 보강할 수 있다는 이점 때문에 유전체나 도체판으로 지지된 코플래너 도파관이 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 지지된 코플래너 도파관은 다층의 유전체 기판을 갖게 되는데 이러

한 다층 구조를 갖는 코플래너 도파관은 도체판으로 차폐시켜 기판을 물리적으로 지지하는 것이 보통이다^[1]. 이러한 차폐된 다층 유전체 기판을 갖는 코플래너 도파관은 감쇠를 줄일 수 있고 기판의 양쪽면을 다 사용함으로써 스트립선로를 브로드사이드하게 결합시킬 수 있는 등의 이점을 갖게 된다.

실제에 사용되는 다양한 기판들은 그것이 물질자체의 고유한 것이든 혹은 제작과정에서 발생하는 것이든 어느정도는 이방성의 특성을 나타낸다^[2]. 사파이어나 석영같은 단방향 결정 기판들은 그 자체가 규칙적으로 잘 정의되는 이방성을 나타내고 Epsilam-10같은 세라

* 正會員, 漢陽大學校 電子通信工學科

(Dept. of Electronic Communication Eng.,
Hanyang University)

接受日字: 1995年4月29日, 수정완료일: 1995年8月28日

믹이 함유된 플라스틱들은 제작과정에서 이방성의 특성을 지니게 된다. 따라서 차폐된 다층 유전체 기판을 갖는 코플래너 도파관을 이용하여 회로를 제작하고자 하는 경우에 이러한 이방성에 의한 효과를 무시한다면 정확한 특성을 얻을 수가 없다.

이방성 기판위에 놓인 코플래너 도파관에 관한 연구는 많은 사람들에 의해 연구되어져 왔다. 그러나 대부분의 해석이 접지면이 무한한 경우이거나 지지기판의 두께가 무한한 경우인 이상적인 코플래너 도파관에 관한 것이었다. 그러나 실제 사용하는 코플래너 도파관은 유한한 경우이므로 측면효과와 상부의 도체판에 의한 특성 변화와 같은 실제적 조건들이 고려되어야 한다.

이 연구에서는 차폐된 이방성의 다층 유전체 기판을 갖는 코플래너 도파관에 대해 특성임피던스와 유효유전율을 구한다. 이방성 기판으로는 단결정 사파이어를 사용하였으며 도파관 특성 해석은 도파관 내의 전자계를 준 TEM모드로 근사하여 포인트매칭법을 사용하여 행하였다. 전송스트립 폭의 변화에 대한 특성 변화 및 전송스트립과 접지스트립사이의 간격 변화에 따른 영향을 고찰한다. 이방성 기판의 유전율의 비(ϵ_x/ϵ_y)에 따른 특성을 계산하고 지지기판의 유전율을 변화시키며 특성변화를 고찰한다.

II. 이론적 해석

그림1은 완전도체로 차폐된 서스펜디드 셉스트립 코플래너 도파관을 나타낸 것이다. 영역1은 등방성의 지지기판, 영역2는 이방성의 주기판, 영역3은 자유공간이다. 유전체는 손실이 없는 것으로 가정하고 전송스트립과 접지스트립은 두께가 없는 완전도체로 가정한다.

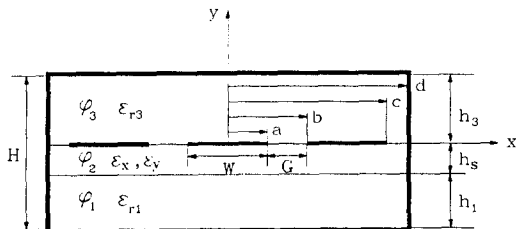


그림 1. 문제의 구조
Fig. 1. The geometry of the problem.

또한, 영역2의 이방성 주기판의 유전율은 다음 식과 같은 단축성 텐서로 주어진다 가정한다.

$$\epsilon = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

서스펜디드 셉스트레이트 코플래너 도파관 내부의 전자계는 다음의 Helmholtz 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2a)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (2b)$$

파의 진행방향 z에 따라 구조가 균일하며 도파관 내부에 TEM모드만 존재한다고 가정하면 식(1)의 해는 각 유전체 영역에서 스케일러 포텐셜에 대한 라플라스 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi_1 = 0 \quad 0 \leq y \leq h_1 \quad (3a)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi_2 = 0 \quad h_1 \leq y \leq h_s \quad (3b)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi_3 = 0 \quad h_s \leq y \leq H \quad (3c)$$

도파관의 경계조건은 다음과 같다.

$$\phi(x, y) = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} x = \pm d \\ y = 0, H \end{array} \right. \quad (4a)$$

$$\phi_2(x, y = h_1^+) = \phi_1(x, y = h_1^-) \quad (4b)$$

$$\phi_3(x, y = h_s^+) = \phi_2(x, y = h_s^-) \quad (4c)$$

$$D_{y2}(x, y = h_1^+) = D_{y1}(x, y = h_1^-) \quad (4d)$$

$$D_{y3}(x, y = h_s^+) - D_{y2}(x, y = h_s^-) = \rho(x) \quad (4f)$$

이방성 유전체층에서의 라플라스 방정식을 풀기 위하여 새로운 변수 u를 다음과 같이 정의한다.

$$u = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} y \quad (5)$$

이 변수를 라플라스 방정식 (3b)에 적용하면 식 (3b)는 다음과 같이 변환된다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial u^2} \right) \phi = 0 \quad h_1 \leq y \leq h_1 + h_e \quad (6)$$

여기서 $h_e = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} h_s$ 이다.

또한 변수 u를 경계조건식 (4f)에 대입하면 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{h_1, h_1^+} - \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y} \left. \frac{\partial \phi}{\partial u} \right|_{h_1, h_1^+} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0} \quad (7)$$

여기에 나타나는 $\sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}$ 를 이방성 유전체층의 등가유전 상수 ϵ_g 로 정의한다.

$$\epsilon_g = \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y} \quad (8)$$

식 (5)와 식 (8)에서의 이방성 유전체층에 대한 두께 변환과 등가유전상수의 도입을 통해 이방성 유전체층에 대한 해석을 등방성 유전체층에 대한 해석으로 바꾸어 수행할 수 있다.

등방성 유전체로 수정된 SSCPW에 대하여 라플라스 방정식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi_1 = 0 \quad 0 \leq y \leq h_1 \quad (9a)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi_2 = 0 \quad h_1 \leq y \leq h_{es} \quad (9b)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi_3 = 0 \quad h_{es} \leq y \leq H_e \quad (9c)$$

여기서

$$h_e = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} h_s, \quad h_{es} = h_1 + h_e, \quad H_e = h_1 + h_e + h_3 \text{이다.}$$

수정된 경계조건은 다음과 같다.

$$\phi(x, y) = 0 \quad \begin{cases} x = \pm d \\ y = 0, H_e \end{cases} \quad (10a)$$

$$\phi(x, y = h_{es}^-) = \phi(x, y = h_{es}^+) \quad (10b)$$

$$D_y(x, y = h_{es}^-) - D_y(x, y = h_{es}^+) = \rho(x) \quad (10c)$$

식(9)에 식 (10a)를 적용하면 각 유전체 층에서의 전위는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_1 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sinh(k_n y) \cos(k_n x) \quad (11a)$$

$$\phi_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \{ B_n \sinh[k_n(y-h_1)] + C_n \cosh[k_n(y-h_1)] \} \cos(k_n x) \quad (11b)$$

$$\phi_3 = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sinh[k_n(H_e-y)] \cos(k_n x) \quad (11c)$$

여기서 $k_n = \frac{(2n-1)\pi}{2d}$ 이며, ϕ_i 에서 첨자 i 는 코플래너 도파관의 각 영역을 나타낸다. 식(11)에 포함된 미지 계수는 불연속 경계면에서의 경계조건으로부터 결정된다. 식 (11)에 경계조건을 적용하면 모든 영역에서의 전위는 미지계수 B_n 으로 표현된다. 이 연구에서는 식 (11)로 주어지는 전위함수를 구하기 위해서 포인트 매칭법을 적용한다. 도파관의 구조가 $x=$ 에 대하여 대

칭이므로 $x \geq$ 인 영역을 N 개의 구간으로 나누어 포인트매칭법을 적용하면 N 개의 독립방정식이 얻어지며 이를 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$[M_{in}] [B_i] = [V_i] \quad (12)$$

여기서

$$M_{in} = \begin{cases} a_n \cos(k_n x_i) & a < x_i < b, \quad c < x_i < d \\ \beta_n \cos(k_n x_i) & 0 \leq x_i \leq a, \quad b \leq x_i \leq c \end{cases} \quad (13a)$$

$$V_i = \begin{cases} 0 & a < x_i < d \\ 1 & 0 \leq x_i \leq a \end{cases} \quad (13b)$$

$$a_n = k_n \epsilon_g \left[\cosh(k_n h_e) + \frac{\epsilon_g}{\epsilon_1} \tanh(k_n h_1) \sinh(k_n h_e) + \left\{ \frac{\epsilon_3}{\epsilon_g} \sinh(k_n h_e) + \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} \tanh(k_n h_1) \cosh(k_n h_e) \right\} \frac{1}{\tanh(k_n h_3)} \right] \quad (13c)$$

$$\beta_n = \sinh(k_n h_e) + \frac{\epsilon_g}{\epsilon_1} \tanh(k_n h_1) \cosh(k_n h_e) \quad (13d)$$

이다. 이 방정식을 풀어 미지 계수 B_n 을 구한다.

유사 TEM모드인 경우 커패시턴스는 $C=Q/V$ 로부터 구할 수 있다. 여기서 전위차는 1이므로 커패시턴스는 곧 전송스트립상의 전하량이 된다. 전송스트립의 단위 길이당의 전하량을 구하기 위하여 발산정리를 이용하고 계산된 결과식은 다음과 같다.

$$C = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(k_n \frac{a+b}{2}) B_n \left[\epsilon_g \left[\cosh(k_n h_e) + \frac{\epsilon_g}{\epsilon_1} \tanh(k_n h_1) \sinh(k_n h_e) \right] + \epsilon_3 \coth(k_n h_3) \left[\sinh(k_n h_e) + \frac{\epsilon_g}{\epsilon_1} \tanh(k_n h_1) \cosh(k_n h_e) \right] \right] \quad (14)$$

코플래너 도파관의 특성파라미터인 유효유전율과 특성임피던스는 다음 식으로 주어진다¹³⁾.

$$\epsilon_{eff} = \frac{C}{C_0} \quad (15)$$

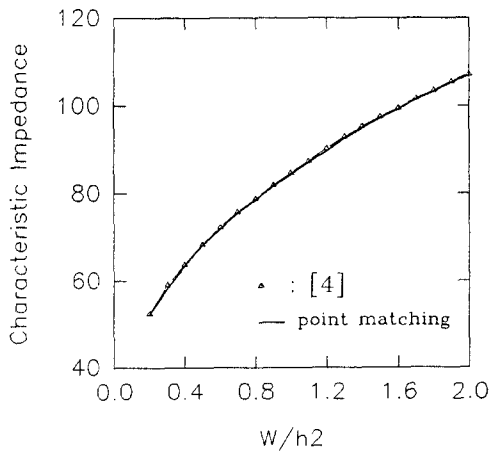
$$Z_0 = \frac{1}{v \sqrt{CC_0}} \quad (16)$$

여기서 C_0 는 $\epsilon_1 = \epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_3 = \epsilon_0$ 인 경우의 커패시턴스이다.

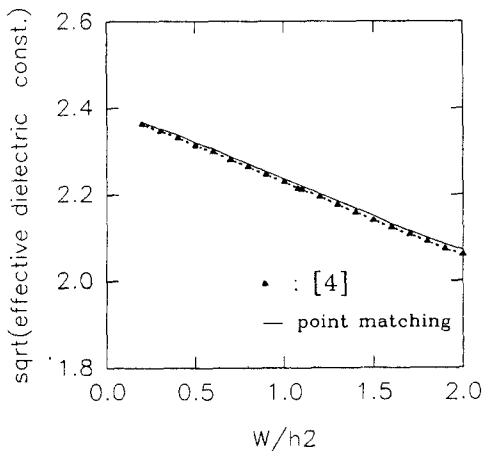
III. 수치계산 및 결과고찰

이방성 유전체층을 포함하는 다층유전체 기관을 갖

는 차폐된 코플래너 도파관의 특성임피던스와 유효유전율을 전송스트립의 폭을 변화시키며 계산하고 또한 전송스트립과 접지스트립간의 간격을 변화시키며 그 영향을 고찰한다. 주기판인 이방성 유전체 기판의 두께와 ϵ_x/ϵ_y 를 변화시키며 특성파라미터의 변화를 계산하고 지지기판의 영향을 고찰하기 위해 지지기판의 유전율을 변화시키며 계산한다. 이방성 주기판의 상대유전율은 $\epsilon_x=9.4$, $\epsilon_y=11$. 이고 지지기판의 상대유전율은 $\epsilon_{r1}=8.87$ 로 하였다.



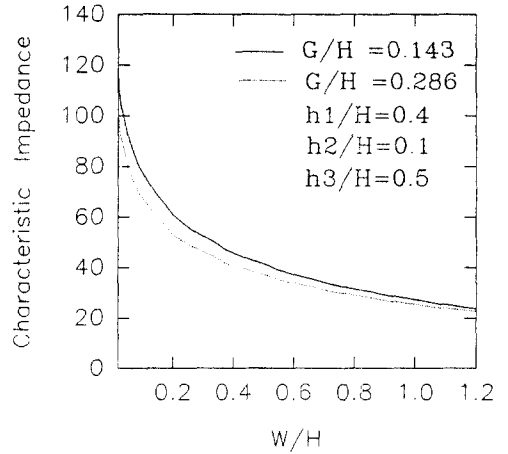
(a)



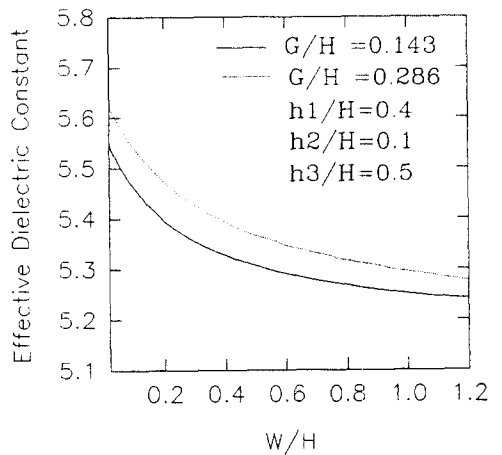
(b)

그림 2. 마이크로스트립 전송선로의 특성파라미터
 a. 특성임피던스 b. 정규화된 위상정수
 Fig. 2. Characteristic parameters of the microstrip line
 a. characteristic impedance
 b. normalized phase constant

그림 2는 연구의 타당성을 입증하기 위하여 코플래너 도파관의 접지판을 무한 평면으로 하고 지지기판과 차폐판이 없는 구조에 대해 계산한 특성 임피던스와 유효유전율을 Hayashi의 변분법에 의한 계산결과와 비교한 것이다^[4]. 변분법에 의한 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.



(a)

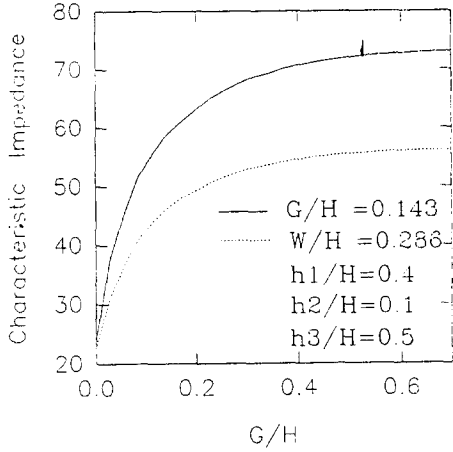


(b)

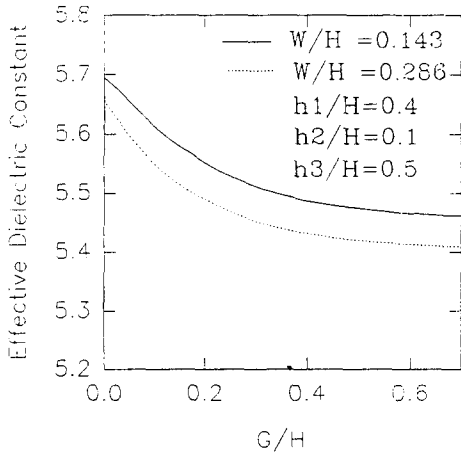
그림 3. 전송스트립 폭 변화에 따른 특성파라미터
 a. 특성임피던스 b. 유효유전율
 Fig. 3. Characteristic parameters as a function of W/H
 a. characteristic impedance
 b. effective dielectric constant

그림 3은 $h1=2.8\text{mm}$, $h2=0.7\text{mm}$, $h3=3.5\text{mm}$ 인 경우 전송스트립과 접지스트립과의 간격 G 를 각각 1mm, 2mm로 고정하고 계산한 특성임피던스 및 유효

유전율이며 변화이며 전송스트립의 폭이 증가함에 따라 특성임피던스와 유효유전율이 감소함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. 도체 스트립 사이의 간격 변화에 따른 특성파라미터

a. 특성임피던스 b. 유효유전율

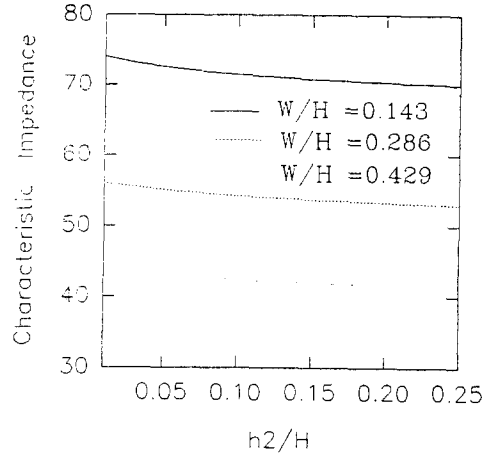
Fig. 4. Characteristic parameters as a function of G/H

a. characteristic impedance
b. effective dielectric constant

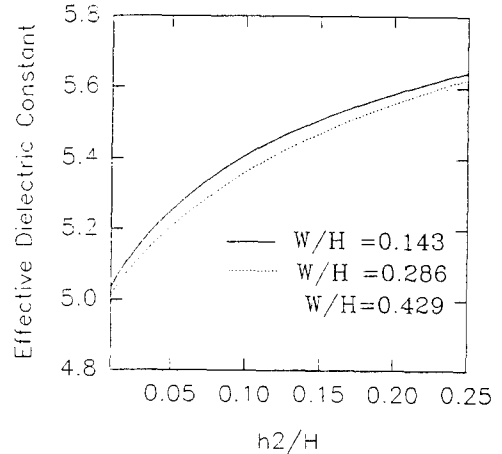
그림 4는 전송스트립의 폭을 고정하고 전송스트립과 접지스트립과의 간격 G 를 변화시키면서 구한 특성임피던스 및 유효유전율이며 스트립간의 간격이 증가함에 따라 특성임피던스는 증가하고 유효유전율은 감소한다.

그림 5는 h_2 를 변화시킬 때의 특성임피던스 및 유효

유전율의 변화를 전송스트립의 폭 W 를 1mm, 2mm, 3mm로 고정시키고 고찰해 본 것이다. 주기판의 두께가 증가함에 따라 유효유전율 값은 증가를, 특성임피던스는 약간의 감소를 보여준다.



(a)



(b)

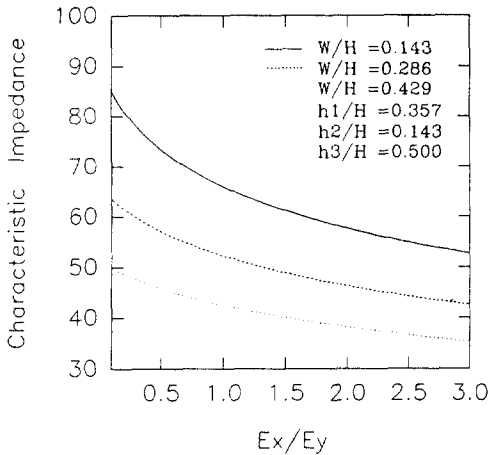
그림 5. 주기판의 두께 변화에 따른 특성파라미터

a. 특성임피던스 b. 유효유전율

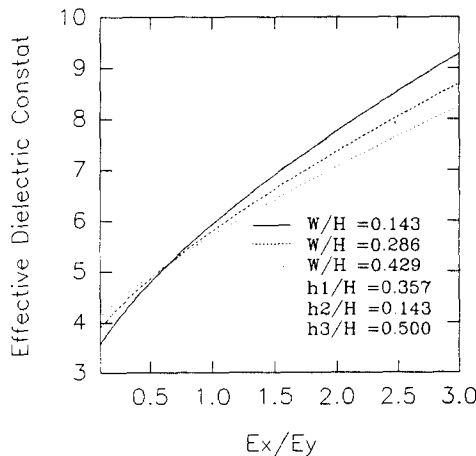
Fig. 5. Characteristic parameters as a function of h_2/H

a. characteristic impedance
b. effective dielectric constant

그림 6은 이방성 유전체층의 유전율의 비 ϵ_x/ϵ_y 의 변화에 따른 영향을 나타낸 것이고 그림 7은 지지기판의 유전율을 증가시키면서 얻은 결과를 나타낸 것이다. 지지기판의 유전율이 증가함에 따라 유효유전율은 증가하고 특성임피던스는 감소함을 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 이방성 유전율 ϵ_x/ϵ_y 의 변화에 따른 특성파라미터

a. 특성임피던스 b. 유효유전율

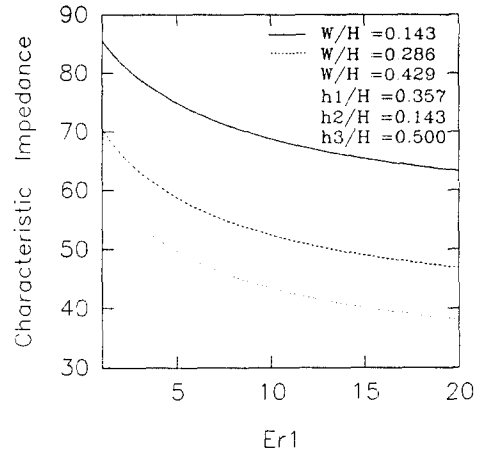
Fig. 6. Characteristic parameters as a function of ϵ_x/ϵ_y

a. characteristic impedance
b. effective dielectric constant

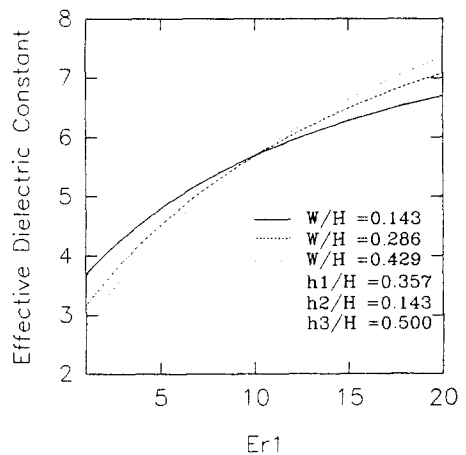
IV. 결론

이방성 유전체 층을 포함하는 다층 유전체층을 갖는 차폐된 코플래너 도파관의 특성임피던스와 유효유전율을 도파관 내부의 전자계를 유사TEM 모드로 근사하고 포인트 매칭법을 사용하여 구하였다. 전송스트립의 폭을 증가시켜 본 결과 특성임피던스와 유효유전율은 감소하였으며 전송스트립과 접지스트립간의 간격을 증가시켰을 때는 특성임피던스가 증가하고 유효유전율은

감소하였다. 주기판의 두께를 증가시켜 본 결과 유효유전율은 증가하고 특성임피던스는 약간 정도 감소하였다. 이방성 유전체층의 유전율의 비 ϵ_x/ϵ_y 의 비가 증가함에 따라 특성임피던스의 감소와 유효유전율의 증가를 볼 수 있었다. 이상의 연구결과는 다층구조를 갖는 실제의 코플래너 도파관의 설계에 이용될 수 있을 것이다.



(a)



(b)

그림 7. 지지기관의 유전율 변화에 따른 다른 특성파라미터

a. 특성임피던스 b. 유효유전율

Fig. 7. Characteristic parameters as a function of ϵ_r

a. characteristic impedance
b. effective dielectric constant

참 고 문 헌

- [1] M.R. Lyons, J.P.K Gilb, C.A. Balanis, "Enhanced Dominant Mode Operation of a Shielded Multilayer Coplanar Waveguide Via Substrate Compensation," IEEE Trans. MTT., Vol. 41, No. 9, September 1993.
- [2] R.P.Owens, J.E.Aitken, T.C. Edwards, "Quasi-Static Characteristics of Microstrip on an Anisotropic Sapphire Substrate", IEEE Trans. MTT., pp. 499-505, August 1976.
- [3] 오 응근, 황 정섭, 안 광은, 이 상철, "포인트 매칭법을 이용한 차폐된 서스펜디드 셉스트레이트 코플래너 도파관 해석", 춘계 마이크로파 및 전파전파연구회 학술발표회 논문집, Vol. 17, No. 1, 1994년 5월
- [4] T.kitazawa, Y.Hayashi, "Variational method for coplanar waveguide with anisotropic substrates", IEE PROCEEDINGS, Vol. 134, Pt.H, No. 1, Feb. 1987.

 저 자 소 개

李 相 高(正會員) 第 31卷 A編 11號 參照
 현재 한양대학교 전파공학과 교수

安 垞 銀(正會員) 第 32卷 A編 4號 參照
 현재 한양대학교 전자통신공학과 박사과정 재학중