

스펙트럴 영역에서 비등방성 기판위의 마이크로스트립 선로 해석

이 등방성 기판 위의 마이크로스트립 선로 해석을 위하여
 正會員 李承燁*, 李永勳**, 朴成均***, 朴漢奎****

Analysis of Microstrip Line on Anisotropic Substrate in the Spectral Domain

Sung Yup Rhee*, Young Hun Lee**, Seong Gyoon Park***, Han Kyu Park**** Regular Members

要 約

2축 유전율 텐서를 갖는 비등방성 기판위의 개방된 마이크로스트립 선로를 해석함에 있어서 Spectral-domain 방법을 적용하였으며, 비등방성 기판은 비등방성의 정도가 약한 경우와 강한 경우에 대하여 고려하였고, 이 같은 비등방성 기판위의 개방된 마이크로스트립 선로를 해석은 MMIC 또는 고속 광변조기와 같은 고주파 회로에 유용하게 응용되리라 생각된다.

약한 비등방성을 갖는 sapphire 또는 Epsilam-10 기판 위의 마이크로스트립 선로에 대한 전파특성에 대한 수치적인 해석 결과는 기존에 나온 결과와 비교할 때 매우 잘 일치됨을 확인할 수 있었다. 또한, $LiNbO_3$ 와 같이 강한 비등방성을 갖는 경우의 결과도 구하였다. 그리고 이들 비등방성 기판에 대해 유전율 텐서 축과 좌표계 축의 3가지 방향 변화에 따른 마이크로스트립 선로의 특성 변화도 보였다. 본 논문에서 구한 결과로부터 마이크로스트립선로가 있는 평면에 수직방향인 y축의 유전율 텐서 성분(ϵ_{yy})이 전파 특성에 매우 중요한 요인으로 작용됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The spectral-domain method has been applied to an analysis of an open microstrip line on a dielectrically biaxial anisotropic substrate which takes into account both weak and tight anisotropy effect, which are very important in high-frequency applications such as optical modulator, MMIC, etc.. Numerical results of propagation characteristics are validated against the data previously published for special dielectrically weak anisotropic cases(sapphire, Epsilam-10) and New data are calculated for dielectrically tight anisotropic case($LiNbO_3$). Data are for these anisotropic substrates presented to illustrate the effect of three different orientations of the principle dielectric axes. It can be derived from the calculated data in this paper that component of dielectric tensor(ϵ_{yy}) in y-axis which is normal to microstrip-laid plane is important factor in propagation characteristics.

*여수 수산대학교 전자통신과

**호남대학교 전파공학과

***공주대학교 정보통신공학과

****연세대학교 전파공학과

論文番號 : 95251-0731

接受日字 : 1995年 7月 31日

1. 서 론

현재 상용되고 있는 MIC나 MMIC회로용 기판은 기판에 사용되는 물질 자체 특성 및 기판 제작 과정으로 인하여, 강약의 차이가 있지만 유전율에 대한 비등방성 (Anisotropy) 특성을 가지고 있다. 이 같은 기판의 비등방성은 사용 주파수가 높아짐에 따라 선로의 특성 변화에 중요한 요인으로 작용되어 진다.

유전율의 비등방성 성질에 대한 해석 및 응용에 관한 중요성은 이미 1985년 N.G. Alexopoulos의 논문⁽¹⁾에 의해 종합적으로 지적된 바 있다. 비등방성 유전체는 마이크로파 대역에서는 미소한 특성이지만 전기광학적 (Electro-Optic) 및 전기압전(Piezo-Electric) 효과를 가지고 있기 때문에 이러한 효과를 이용하여, 단일 마이크로스트립 안테나의 방사패턴 제어 및 위상배열 안테나에서 안테나 사이의 상호 결합도를 제어하는 방법등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이와 같은 응용측면의 연구와 병행하여 비등방성 유전체를 해석하기 위한 노력도 활발히 진행되고 있다.⁽²⁾⁽³⁾ 그리고 비등방성 매질에서의 전파특성 변화 해석은 마이크로파 소자 뿐만 아니라 광소자 분야인 광변조기 및 광결합기등의 설계 및 해석에도 매우 중요하게 응용되는 연구분야로 자리잡고 있다. 그러므로 비등방성 매질을 사용한 선로 및 MIC회로 해석은 향후 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서의 회로 설계 및 특성 향상을 위해서는 필요불가결한 요소로 작용할 것으로 예상된다.

비등방성 매질은 등방성 매질과는 상이한 물리적 성질을 가지고 있기 때문에 비등방성 유전체를 이용한 전송 선로회로 해석은 수학적으로 단순하지가 않다. 비등방성 기판에서의 전송선로에 대한 연구는 유한차 기법(finite difference techniques), method of lines, mode matching, spectral domain techniques등 여러 해석 방법을 이용하여 현재까지도 활발히 진행되고 있다. 특히, spectral domain approach(SDA)는 선로의 구조에 따라 전파특성이 quasi-TEM(예:마이크로스트립 선로) 이거나 non-TEM(예:슬롯 선로)에도 적용이 매우 용이하기 때문에 해석방법으로 가장 많이 사용되고 있다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 비등방성 기판에서의 개방된 마이크로스트립 선로 특성을 스펙트럴 영역에서 해석하였고, 연구에 사용한 비등방성 기판은 sapphire, Epsilam-10

과 $LiNbO_3$ 이다. 앞의 두 매질은 본 논문의 결과를 다른 논문의 데이터와 비교하여 결과의 정확성을 검증하기 위함이고, $LiNbO_3$ 기판은 현재 광변조기 및 광소자에 많이 이용되는 기판으로 특히, 광변조기의 변조 주파수가 마이크로파 대역으로 높아짐에 따라 기판에 대한 마이크로파의 전파특성도 광변조기 설계에 매우 중요한 파라미터로 자리매김하고 있기 때문에, 본 논문의 결과는 이 분야의 연구에 도움이되리라 생각된다.

2. 이 론

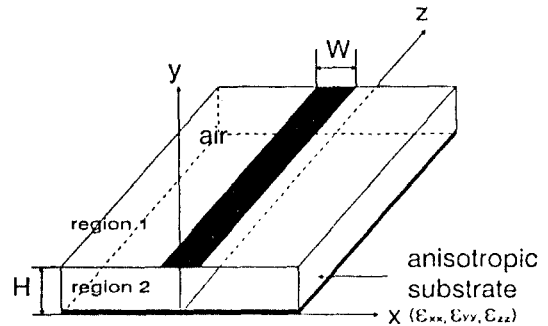


그림 1. 비등방성 기판위의 개방된 마이크로스트립 선로 구조
Fig. 1. Structure of open microstrip line on anisotropic substrate

SDA방법을 그림 1과 같이 개방된 단일 마이크로스트립 선로 구조에 적용하기 위해 접지면 및 선로의 도전체의 도전율 및 선로의 길이는 무한대이며, 실제 기판의 손실은 없다고 가정하고, 마이크로스트립 선로의 도체 두께는 선로 폭에 비해 매우 작기 때문에 무시할 수 있다고 가정한다. 그리고, 기판의 유전율이 비등방성 물질이라고 하자.

일반적으로 비등방성 매질내에서 벡터 형태의 Maxwell방정식은 다음과 같다.⁽³⁾

$$\begin{aligned}
 -\nabla \times \vec{E} &= j\omega \vec{B} \\
 \nabla \times \vec{H} &= j\omega \vec{D} \\
 \vec{B} &= \mu \vec{H} \\
 \vec{D} &= \hat{\epsilon} \vec{E}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

식(1)에서 투자율 μ 은 스칼라 량이고 유전율($\hat{\epsilon}$)은 텐서(Tensor) 량이다. 유전체 기판은 원래 비등방성 특

성을 갖거나 제조과정에서 임의의 비등방성 특성을 가지므로 텐서로 표시되는 유전율은 2차 텐서양 또는 다이아딕(Dyadic) 형태로 식(2)와 같이 표현된다.

$$\hat{\epsilon} = [\epsilon_{ij}] = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 텐서 유전율($\hat{\epsilon}$)은 손실을 무시한다면 축방향에 대해 대칭성($\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$)을 띠며 이 경우에는 $\hat{\epsilon}$ 을 축방향 성분만의 행렬(Diagonal Matrix)로 나타낼 수 있다. 이 때의 축은 비등방성 매질의 주축(Principal Axis)으로 이루어지며, 각 성분 값은 양의 값과 역행렬이 존재하게 된다. 기판에 사용된 좌표 축과 유전체 축이 일치하고 직각좌표계를 사용하면 $\hat{\epsilon}$ 는 식(3)과 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, ϵ_0 는 자유공간에서의 유전율이며, 위의 행렬식에서 $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$ 의 값이 모두 다른 경우를 2축(Biaxial) 비등방성 이라고 하며, 두개의 성분 값이 같으면 단축(Uniaxial) 비등방성이라고 한다.

$$\mathcal{F}(a, y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(jax) dx \quad (4)$$

식(1)을 스펙트럴 영역에서 풀기 위해 식(4)으로 정의한 푸리에 변환을 사용하였다. 전계(E_z) 및 자계(H_z)을 전파의 진행방향인 z축에 대해 풀고 위의 푸리에 변환을 적용하여 풀면 다음과 같은 E_z 와 H_z 에 대한 미분방정식을 유도할 수 있다.⁽⁵⁾

$$j \frac{\alpha \beta}{\omega \mu_0} (x_x^2 - x_y^2) \frac{d\tilde{E}_z}{dy} + \left\{ x_y^2 \frac{d^2}{dy^2} - x_x^2 (\alpha^2 - x_y^2) \right\} \cdot \tilde{H}_z = 0 \quad (5)$$

$$\left\{ x_x^2 \epsilon_{yy} \frac{d^2}{dy^2} + x_y^2 (x_x^2 \epsilon_{xx} - \alpha^2 \epsilon_{xx}) \right\} \cdot \tilde{E}_z + j \frac{\alpha \beta}{\omega \mu_0} (x_x^2 - x_y^2) \frac{d\tilde{H}_z}{dy} = 0 \quad (6)$$

여기서, $x^2 = k_0^2 \epsilon_{xx} - \beta^2$ 및 $x^2 = k_0^2 \epsilon_{yy} - \beta^2$ 이다.

식 5와 식6은 등방성 매질에서와는 다른 \tilde{E}_z 및 \tilde{H}_z 의 2차 결합 미분 방정식이며, 위의 식과 같은 미분방정식에 적합한 영역2(비등방성 기판)에서 \tilde{E}_{z2} 와 \tilde{H}_{z2} 에 대한 해의 형태는 식(7)과 같이 설정할 수 있다.⁽²⁾⁽⁷⁾ 그리고 영역1에서의 해의 형태는 지수적으로 감소하는 함수를 선택한다.

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{z2} &= A_{21} \sinh(\gamma_{21} y) + B_{21} \cosh(\gamma_{21} y) \\ &\quad - \mathcal{J}_H \{ A_{22} \sinh(\gamma_{22} y) + B_{22} \cosh(\gamma_{22} y) \} \\ \tilde{H}_{z2} &= -\mathcal{J}_E \{ A_{21} \cosh(\gamma_{21} y) + B_{21} \sinh(\gamma_{21} y) \} \\ &\quad + A_{22} \cosh(\gamma_{22} y) + B_{22} \sinh(\gamma_{22} y) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\tilde{E}_{z2}, \tilde{H}_{z2}$ 에 대한 해를 설정할 때 두 개의 전파상수가 나오는 것은 5와 식6처럼 전자계가 서로 결합이 되어있기 때문이다. 두 개의 전파상수를 구하기 위해 식(5)와 식(6)을 풀고 정리하면 식(8)과 같은 특성방정식을 얻을 수 있다.

$$x_x^2 x_y^2 \epsilon_{yy} \gamma^4 + [x^4 (x_y^2 - \alpha^2) \epsilon_{yy} + x_y^4 (x_x^2 \epsilon_{zz} - \alpha^2 \epsilon_{xx}) + k_0^2 \alpha \beta (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2] \gamma^2 - x_x^2 x_x^2 (x_y^2 - \alpha^2) (\alpha^2 \epsilon_{xx} - x_x^2 \epsilon_{zz}) = 0 \quad (8)$$

식(8)은 비등방성 매질내의 존재하는 전파상수를 결정하는 결정 방정식으로 이 방정식의 두 해는 각각 γ_{21} 와 γ_{22} 으로 영역2에서의 전파 상수값을 의미한다.

비등방성 기판에 의해 나타난 식(7)의 계수 C_H 와 C_E 는 식(6)~식(8)로부터 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_E &= \frac{\gamma_{21} \alpha \beta (x_x^2 - x_y^2)}{\omega \mu_0 \{ x_y^2 \gamma_1^2 - x_x^2 (\alpha^2 - x_y^2) \}} \\ C_H &= \frac{\gamma_{22} \alpha \beta (x_x^2 - x_y^2)}{\omega \epsilon_0 \{ x_x^2 \epsilon_{yy} \gamma_2^2 + x_y^2 (x_x^2 - \alpha^2 \epsilon_{xx}) \}} \end{aligned} \quad (9)$$

그림 1에 나타낸 영역1과 영역2에서의 접선 전류성분을 포함한 경계조건을 적용하여 정리하면 식 (10)과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} G_{11}(\alpha, \beta) & G_{12}(\alpha, \beta) \\ G_{21}(\alpha, \beta) & G_{22}(\alpha, \beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{I}_x(a) \\ \tilde{I}_z(a) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{e}_x(a) \\ \tilde{e}_z(a) \end{pmatrix} \quad (10)$$

식(10)에서 $\tilde{e}_x(a)$ 와 $\tilde{e}_z(a)$ 는 경계 1과 경계2에 있

는 유전체상($y=H$)의 수평방향 전계의 푸리에 변환이며, $\tilde{J}_x(\alpha)$ 와 $\tilde{J}_z(\alpha)$ 는 같은 경계면에서의 전류 밀도의 푸리에 변환 형태이다.

식(10)과 같은 대수방정식을 효율적으로 풀기 위해, $\tilde{J}_x(\alpha)$ 와 $\tilde{J}_z(\alpha)$ 를 직교성(Orthogonality)을 갖는 기저함수(Basis Function)의 합으로 표현하고 Galerkin방법을 적용한다. 이 과정은 SDA의 기본적인 과정이므로 여기서는 생략한다.^{[4][8]}

본 논문에서 사용한 기저함수의 형태는 도체선로의 가장자리(edge)효과를 고려한 함수를 선택하였다. 마이크로스트립 선로에서 각각 전파되는 직교모드에 대한 특성 임피던스는 Parseval 정리를 이용하여, +z 방향으로 진행되는 평균전력(P_{av}), 마이크로스트립상에 +z 방향으로 흐르는 전류(I_0)의 비로 식(11)과 같이 각각 정의할 수 있다.

$$Z_0 = \frac{2P_{av}}{I_0^2} \tag{11}$$

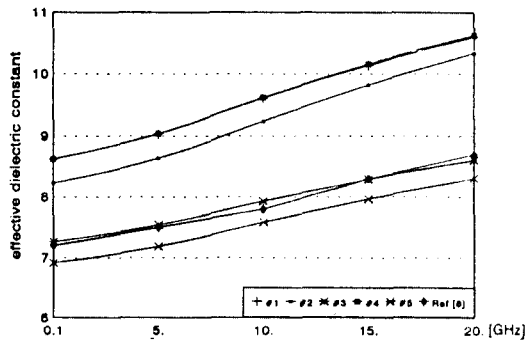
여기서, 평균전력 P_{av} 는 각 영역에서 독립적으로 구해야하며 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{av} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\alpha) d\alpha \tag{12}$$

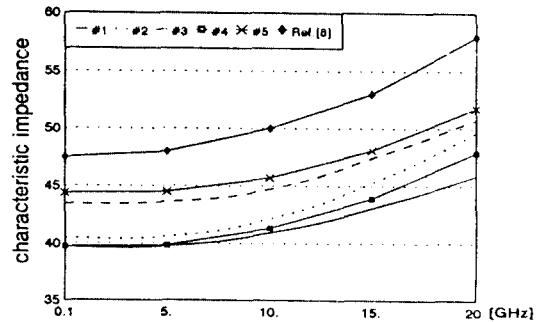
여기서, $g(\alpha) = g_1(\alpha) + g_2(\alpha)$ 로 그림 1.에서 표시한 각 영역에서의 평균전력을 나타낸다.

3. 수치적 결과

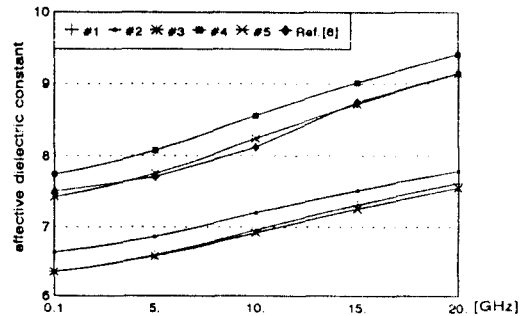
위에서 유도한 수식을 이용하여 sapphire ($\epsilon_{xx} = \epsilon_{zz} = 9.4$, $\epsilon_{yy} = 11.6$, Epsilam-10 ($\epsilon_{xx} = \epsilon_{zz} = 13$, $\epsilon_{yy} = 10.3$)와 $LiNbO_3$ ($\epsilon_{xx} = \epsilon_{zz} = 43$, $\epsilon_{yy} = 28$.)에 대한 비등방성 기판에서 마이크로스트립 선로에 대한 특성을 수치적으로 계산하였다. 수치적 계산시에 사용된 기저함수는 참고문헌[5]와 같은 함수를 사용하였고, 계산시간을 절약하고 결과의 오차를 최소화하기 위해 기저함수의 갯수는 x방향과 z방향으로 각각 1개씩 두었다.



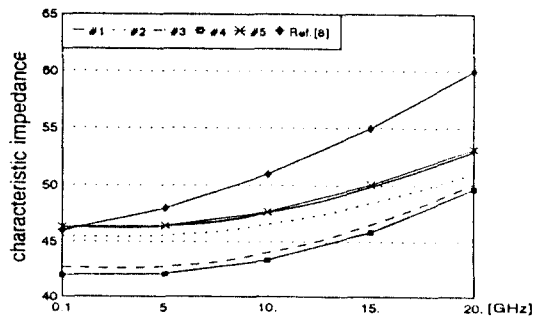
(2-a) Effective dielectric constant for Epsilam-10



(2-b) Characteristic impedance for Epsilam-10



(2-c) Effective dielectric constant for sapphire



(2-d) Characteristic impedance for sapphire

그림 2. 비등방성 성질이 약한 기판에서의 마이크로스트립 선로 특성
Fig. 2. Characteristics of microstrip line on substrates with weak anisotropy

그림 2는 마이크로스트립 선로의 기하학적 구조가 W/H=1.0일 때 주파수 범위를 0.1~20. (GHz)까지 변화시키면서 구한 sapphire와 Epsilam-10에 대한 유효유전율 및 특성임피던스에 대한 그림이다. 그리고 기판에서 사용된 축에 대해 유전체 주축을 표 1과 같이 변화시켰을 때 유효유전율 및 특성임피던스 변화도 그림 2에 함께 나타내었다.

표 1. 그림 2에서 유전율 텐서 ($\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$)
Table 1. dielectric tensor in Fig. 2

	그림 1-a, b	그림 1-c, d
#1	(13., 13., 10.3)	(9.4, 9.4, 11.6)
#2	(10.3, 13., 13.)	(11.6, 9.4, 9.4)
#3	(13., 10.3, 13.)	(9.4, 11.6, 9.4)
#4	(13., 13., 13.)	(11.6, 11.6, 11.6)
#5	(10.3, 10.3, 10.3)	(9.4, 9.4, 9.4)

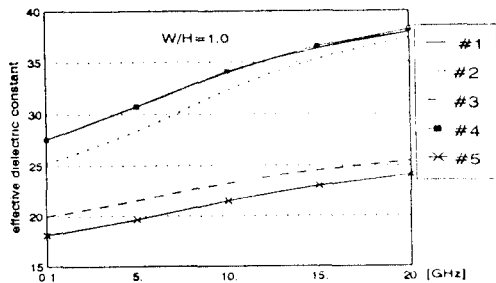
그림 2에서 #1, #2, #3에 대한 결과는 수치적 정확성을 기준 연구결과와 비교 검토하기 위해 구한 것으로 Epsilam-10에 대한 결과는 참고문헌[8]과 sapphire에 대한 결과는 참고문헌[5]와[8]의 결과와 잘 일치됨을 알 수 있다. 그러나 sapphire에 대한 임피던스 결과는 참고문헌 결과(8)와 약3~6Ω정도 차이가 남을 알 수 있는데, 이 차이는 임피던스 정의식이 다르기 때문에 기인한 것으로 예상된다. 즉 참고문헌 (8)에서는 전류와 전압으로 본 논문에서는 평균전력과 전류의 비로

식 (11)과 같이 정의했다. 또한, 고려한 마이크로 스트립선로의 구조적 차이로 인한 영향(차폐 영향)이라고 생각된다.

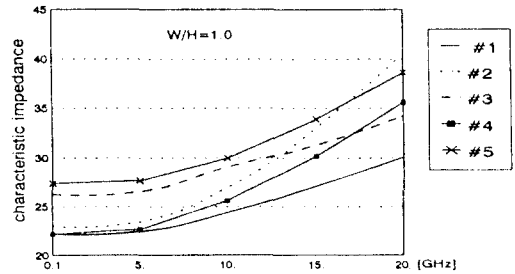
그리고 #4와 #5는 유전율 텐서 성분 중 어느 좌표축의 유전율이 선로 특성에 가장 많은 영향을 미치는가를 알아보기 위해 구한 것이다. sapphire인 경우 다른 축 유전율 보다 큰 y축 유전율 성분인 $\epsilon_{yy}=11.6$ 에 대한 유효유전율 및 특성임피던스의 특성 변화가 $\epsilon_r=11.6$ (#5)인 결과와 매우 유사하게 변화하고 있으며, Epsilam-10인 경우 다른 축 유전율 성분보다 작지만 $\epsilon_{yy}=10.3$ 에 대한 유효유전율 및 특성임피던스의 특성 변화가 $\epsilon_r=10.3$ (#5)인 결과와 매우 유사하게 변화를 보이고 있다. 이것은 유전율 텐서 중 마이크로스트립 선로와 수직이고 파의 진행방향과도 수직인 유전율 성분(y축의 유전율: ϵ_{yy})이 마이크로스트립 선로의 특성을 결정하는 중요한 인자로 작용됨을 알 수 있다.

그림3과 4는 $LiNbO_3$ 기판에 대한 마이크로스트립 선로의 유효유전율 및 특성임피던스를 구한 그림으로 $LiNbO_3$ 에 대한 유전율은 표2와 같다.

$LiNbO_3$ 는 ϵ_{yy} 유전율 텐서 성분이 다른 축 유전율 텐서 성분과의 차, $\Delta\epsilon = \epsilon_{yy} - \epsilon_{xx}$ (or ϵ_{zz})가 -15로 Epsilam-10의 -2.7과 sapphire의 2.2와는 큰 차이가 있는 비등방성 성질이 매우 강한 매질이다. 그림3에서와 같이 ϵ_{yy} 와 같은 $\epsilon_r=28$ (#5)인 등방성 기판에서의 특성과 유사한 결과를 보이고 있다. 그림 4는 선로폭에 따른 특성 변화를 나타낸 것으로 일반적인 등방성기판에서의 마이크로스트립 선로의 특성과는 차이가 있음을 알 수 있다.

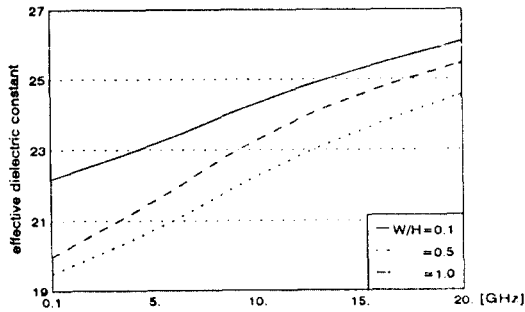


(a) Effective dielectric constants versus W/H.

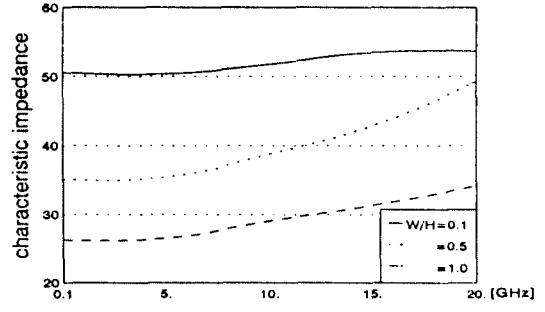


(b) characteristic impedance versus W/H.

그림 3. $LiNbO_3$ 기판에서 W/H=1.0인 경우 마이크로스트립 선로의 주파수 특성
Fig. 3. Frequency-dependent characteristics of microstrip line on $LiNbO_3$ substrates with W/H=1.0.



(a) Effective dielectric constants versus W/H.



(b) characteristic impedance versus W/H.

그림 4. $LiNbO_3$ 기판에서의 W/H에 따른 마이크로스트립 선로의 주파수 특성
 Fig. 4. Frequency-dependent characteristics of microstrip line on $LiNbO_3$.

표 2. 그림 3과4에서 유전율 텐서 ($\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$)
 Table 2. dielectric tensor in Fig. 3 and 4

	유전율 텐서	비고
#1	(43.0, 43.0, 28.0)	
#2	(28.0, 43.0, 43.0)	y-cut
#3	(43.0, 28.0, 43.0)	z-cut
#4	(43.0, 43.0, 43.0)	
#5	(28.0, 28.0, 28.0)	

표 3은 $W/h=1.0$ 인 비등방성 기관위의 마이크로스트립 선로에 대해 비등방성 매질 상수를 참고문헌(9)와 [10]에서 정의한 변환식을 이용하여, 등방성 매질상수로 변환하여 본 결과 값과 본 논문에서 구한 값과의 차이를 분석한 표이다. 표 3에서의 유효유전율 및 특성임피던스의 오차는 본 논문과의 차이로 정의하였다.

표 3. 비등방성 기관 경우와 변환된 매질 상수를 비등방성 기관⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾인 경우의 계산값 비교.
 Table 3. Comparison of the calculated data in case of the anisotropic substrates with using material constants transformed by Ref. (9)[10].

	유전율	유효 유전율	유효유전율 오차	특성 임피던스	특성임피던스 오차
sapphire	(9.4, 11.6, 9.4)	8.24		44.01	
	11.6	8.56	-0.32	43.33	0.68
	ϵ'_e	7.69	0.55	45.52	-1.51
	ϵ'_e, h'_e	7.70	0.54	42.68	1.33
Epsilm-10	(13.0, 10.3, 13.0)	7.93		44.71	
	10.3	7.59	0.34	45.19	-0.48
	ϵ'_e	8.54	-0.61	43.49	1.02
	ϵ'_e, h'_e	8.54	-0.61	46.72	-1.49
z-cut $LiNbO_3$	(43.0, 28.0, 43.0)	23.27		29.08	
	28.0	21.52	1.75	29.99	-0.91
	ϵ'_e	27.08	-3.81	27.65	1.43
	ϵ'_e, h'_e	27.40	-4.13	32.83	-3.75

참고문헌 (9)와 [10]에 의해 변환된 매질상수의 정의 : $\epsilon'_e = \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}, H'_e = H \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}}$

표3에서 알 수 있듯이 변환된 유전율로 구한 값이 기판의 두께까지 변환하여 계산된 결과 값과 차이가 나지 않지만, 비등방성이 강한 $LiNbO_3$ 기판에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고, 변환된 유전율을 이용하여 구한 값은 1~2%이지만 ϵ_{yy} 를 이용한 경우는 1%이내의 오차를 보여, 비등방성 기판의 유전율 텐서 중 마이크로스트립 선로와 수직이고 파의 진행방향과도 수직인 유전율 성분(y축의 유전율: ϵ_{yy})이 마이크로스트립 선로의 특성을 결정하는 중요한 인자임을 표3에서 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 비등방성 기판에 놓인 개방된 마이크로스트립 선로 특성을 스펙트럴 영역에서 해석하였고, 해석한 비등방성 기판은 sapphire, Epsilam-10과 $LiNbO_3$ 이다. 앞의 두 매질에 대한 본 논문의 결과는 참고 논문의 데이터와 비교하여 결과의 정확성을 확인하였다.

수치적 결과로부터 유전율 텐서 중 마이크로스트립 선로와 수직이고 파의 진행방향과도 수직인 유전율 성분(y축의 유전율: ϵ_{yy})이 마이크로스트립 선로의 특성을 결정하는 중요한 인자로 작용됨을 알 수 있었다. 또한, 비등방성 성질이 비교적 적은($\Delta\epsilon$ 이 작은) 기판에서는 파의 진행방향과 선로와 각각 수직인 매질의 유전율 성분으로 근사화하여 해석할 수 있지만 비등방성 성질이 강한 매질에서의 전파특성은 근사화할 경우 오차가 커짐을 알 수 있었다. 참고문헌(9)[10]등에서 정의한 비등방성 매질상수를 등방성 매질로 근사화시키는 변환 정의를 이용하여 얻은 결과와 비교했을 때, 비등방성 매질을 y축의 유전율(ϵ_{yy})을 갖는 등방성 기판으로 가정하여 해석하는 것이 보다 유용하다는 것을 확인하였다.

$LiNbO_3$ 기판은 현재 광변조기 및 광소자에 많이 이용되는 기판으로 특히, 광변조기의 변조 주파수가 마이크로파 대역으로 높아짐에 따라 기판에 대한 마이크로파의 전파특성도 광변조기 설계에 매우 중요한 파라미터로 자리매김하고 있기 때문에, 본 논문의 결과는 이 분야의 연구에 도움이되리라 생각된다.

참고문헌

1. N. G. Alexopoulos, "Integrated - circuit structures on an - isotropic substrates", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-33 No. 10, pp.847-881, Oct., 1985.
2. Clifford M. Krowne, "Green's function in the spectral domain for biaxial and uniaxial anisotropic planar dielectric structures", IEEE Trans. Antenna and Prop., vol. AP-32 No. 12, pp.1273-1282, Dec., 1984.
3. H. Lee, and V. K. Tripathi, "Spectral domain analysis of frequency dependent propagation characteristics of planar structures of uniaxial medium", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-30 No. 8, pp.1188-1193, Aug., 1982.
4. M. Geshiro, S. Yagi, & Shinnosuke Sawa, "Analysis of slot lines and microstrip lines on anisotropic substrates", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-39 No. 1, pp.64-69, Jan., 1991.
5. T. Q. Ho & B. Beker, "Spectral-domain analysis of shielded micro -strip lines on biaxially anisotropic substrates", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-39 No. 6, pp.1017-1021, June, 1991.
6. T. Itoh, "Spectral domain immitance approach for dispersion characteristics of generalized printed transmission lines," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-28, No. 7, pp733-736, July, 1980.
7. T. Itoh, Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures, John Wiley & Sons, New York, 1970.
8. B. E. Kretch & R. E. Collin, "Microstrip dispersion including an -isotropic substrates", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-35 No.8, pp.847-881, Aug., 1987.
9. E. Yamashita, K. Atsuki & T. Mori, "Application of MIC formulas to a class of integrated-optics modulator analyses: A simple transformation," IEEE Trans. Microwave Theory &

Tech., Vol. MTT-25, No. 7, pp.146-150, Feb. 1977.

10. A-M. A. Elshrbiny, "Hybrid mode analysis of

microstrip lines on anisotropic substrates,"IEEE Trans.Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-29, No. 12, pp.1261-1266, Dec. 1980.



李承燁(Sung Yep Rhee) 정희원

1986년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1988년 2월 : 연세대학교 전자공학과 본대학원 졸업(공학석사)

1993년 8월 : 연세대학교 전자공학과 본대학원 졸업(공학박사)
1993년 9월~현재 : 여주수산대학교 전자통신공학과(조교수)
※주관심 분야 : 안테나 및 마이크로파 소자, 특히 광을 이용한 마이크로파 소자제어등임



李永勳(Young Hun Lee) 정희원

1986년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1988년 8월 : 연세대학교 전자공학과 본대학원 졸업(공학석사)

1995년 2월 : 연세대학교 전자공학과 본대학원 졸업(공학박사)
1995년 3월~현재 : 호남대학교 전파공학과
※주관심 분야 : 안테나, 마이크로파 수동 및 능동소자, 마이크로파 통신등임



朴成均(Seong Gyoon Park) 정희원

1985년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1987년 2월 : 연세대학교 전자공학과 본대학원 졸업(공학석사)

1988년 : 삼성전자 연구원
1994년 2월 : 연세대학교 전자공학과 본대학원 졸업(공학박사)
1994년 9월~현재 : 공주대학교 정보통신공학과
※주관심 분야 : MMIC, 광소자 및 Fiber Optic Link등임



朴漢奎(Han Kyu Park) 정희원

1941년 6월 21일생
1964년 2월 : 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1968년 2월 : 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1973년 : 불란서 파리대학교(소르본 대학교) 박사과정 수료 (DEA)
1975년 : 불란서 파리6대학교(Ph.D)
1976년~1992년 : 연세대학교 전자공학과 교수
1992년~현재 : 연세대학교 전파공학과 교수
※주관심 분야 : 마이크로파, 전파전파, 안테나