論文 94-19-3-16

스펙트럼 영역에서의 마이크로스트립-슬롯 결합 선로 해석

正會員 李 承 燁* 正會員 朴 漢 奎**

Analysis of a Coupled Microstrip-Slot Line in the Spectral Domain

Sung Yup Rhee*, Han Kyu Park** *Regular Members*

要 約

본 논문에서는 마이크로스트립-슬롯 결합 선로에 대한 Green함수를 스펙트럼 영역에서 유도하고, 수치적 결과를 정확히 얻기 위해 마이크로스트립 선로와 슬롯 부분에서의 전류분포에 대한 특이점을 고려한 기저함수를 이용한 Galerkin방법을 적용하여 선로의 특성 파라미터를 계산하였다.

특히, 마이크로스트립-슬롯 결합선로의 특성 중 마이크로스트립 선로에의한 우모드(even mode)와 슬롯에 의한 기모드(odd mode)의 특성에 의한 선로의 각 특성을 구하였고, 계산 결과값의 정확성을 비교하기 위해 기존의 데이타와 비교하였다.

ABSTRACT

A coupled microstrip-slot line is analysed using a full wave method in the specral domain.

The characteristics of the coupled microstrip-slot line are obtained based on the Galerkin's method. The characteristics of even mode by microstrip line and odd mode by slot line are calculated respectively. Especially the singularity of basis function is enforced to be considered with respect of modes.

Numerical results are compared with available data and shown good agreement.

I. 서 론

기존 마이크로스트립 선로인 경우 제작 기술 및 공정에 따라 정도의 차이는 있지만, 구현 가능한 임피던스 범위가 약 20~100Ω으로 선로 설계에 제한이 있으며, 주파수가 높아질수록 선로의 상대적 크기를 줄이기 위해 기판의 두께가 얇아져야 한다는 단점을 가지고 있다. 또한 1969년 Cohn에 의해 제안된 슬롯 선로는 마이크로스트립 선로 구조와 반대되는 형태로, 전송되는 기본 모드는 마이크로스트립 선로가 Quasi-TEM인 반면, Non-TEM으로 슬롯의 폭 변화에 따라 임피던스의 변화가 매우 큰 특성을 갖고 있다. 이러한 특성으로 슬롯 선로의 설계가능한 임피던스범위는 50~200Ω으로 마이크로스트립 선로 보다 높은 임피던스를 구현할 수 있고, MMIC와 같이 반

*麗水 水産大學校 電子通信科
Department of Electronic Communication Engineering, Yosu Fisheries Univ.
**延世大學校 電波工學科
Department of Propagation Engineering, Yonsei Univ.
論文番號 : 93212
接受日字 : 1993年 2月 9日

도체 회로와 결합하기나 표면 실장용 소자(SMD: Surface Mounted Devive)를 부착하기에 용이한 구조를 갖고 있지만, 주파수에 따른 분산특성 및 선로의 방사손실에 대한 특성이 저하되므로 광대역 선로로는 부적합하다.[1]

이러한 두 형태의 대표적인 단면 구조 전송선로의 단점을 보완하고 장점을 부각시킨 새로운 형태의 평면전송 선로가 1970년 E.C. Ronde에 의해 처음 제안한 마이크로스트립 슬롯결합 선로(Coupled Microstrip-Slot Line)이며[2], 구조는 그림1-1과 같다. 즉, 기판의 한쪽은 마이크로스트립 선로로 이루어져 있으며 다른 면은 마이크로스트립 선로와 평행하게 슬롯선로가 있는 기판의 양쪽면을 모두 사용한 양면 구조로 되어 있어, 마이크로스트립 선로의 특징인 주파수에 따른 양호한 분산특성 및 방사손실이 적다는 잇점과 슬롯 선로와 같이 넓은 범위의 사용 임피던스 값을 구현 가능하다는 장점을 모두 가지고 있다. 이후 마이크로스트립-슬롯 결합선로에 대한 연구는 구조의 특이성 때문에 주로 해석적인 면보다는 선로의 특성을 이용하는 응용쪽에 많은 연구가 이루어졌다.[3-10]

본 논문에서는 마이크로스트립 슬롯 결합 선로에 대한 Green함수를 스펙트럼 영역에서 유도하고, 수치적 결과를 정확히 얻기 위해 마이크로스트립 선로와 슬롯 부분에서의 전류와 전계분포에 대한 각각의 특이점(Singular point)을 고려한 기저함수를 이용한 Galerkin방법을 적용하여 선로의 특성 파라미터를 계산하였다.

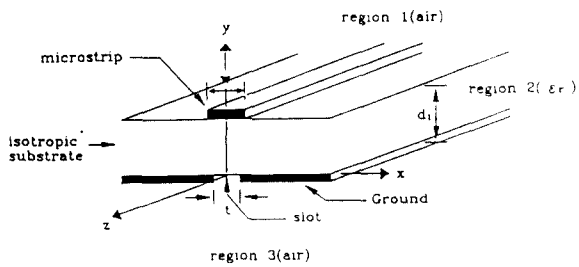


그림 1-1. 마이크로스트립-슬롯 결합선로 구조
Fig. 1-1. Configuration of coupled microstrip slot line

II. 해 석

일반적으로 전계 및 자계에 대한 성분을 중첩 원리(Superposition Principle)에 의해 TE 및 TM 모드의 합으로 표현할 수 있고, 전, 자계에 대한 미분 방정식을 쉽게 풀기 위해 퓨리에 변환된 TE 및 TM 모드에 해당되는 전계 및 자계 성분을 식 (2-1)과 같이 나타낼 수 있다.[10] 식 (2-1)에서 β는 전파상수로 미지수이며, k_0는 자유공간상에서의 파수(Wave Number)이다.

$$\begin{aligned}
\tilde{E}_1(\alpha, y) &= A^{(e)}(\alpha)\ \exp[-\gamma_1(y-d)] \\
\tilde{E}_2(\alpha, y) &= B^{(e)}(\alpha)\ \sinh \gamma_2 y + C^{(e)}(\alpha)\ \cosh \gamma_2 y \\
\tilde{E}_3(\alpha, y) &= D^{(e)}(\alpha)\ \exp[-\gamma_3 y] \\
\tilde{H}_1(\alpha, y) &= A^{(h)}(\alpha)\ \exp[-\gamma_1(y-d)] \\
\tilde{H}_2(\alpha, y) &= B^{(h)}(\alpha)\ \sinh \gamma_2 y + C^{(h)}(\alpha)\ \cosh \gamma_2 y \\
\tilde{H}_3(\alpha, y) &= D^{(h)}(\alpha)\ \exp[-\gamma_3 y]
\end{aligned} \tag{2-1}$$

여기서, $\gamma_i^2 = \alpha^2 + \beta^2 - k_i^2$, $k_1 = k_3 = k_0$, $k_2 = \sqrt{\varepsilon_r} k_0$ 이며, 윗 첨자 e, h는 각각 TE, TM에 해당된다. 위의 식에서 8개의 계수($A^{(e)}(\alpha) \sim D^{(h)}(\alpha)$)는 마이크로스트립-슬롯 결합 구조에서 나타나는 경계조건 및 $y=0$과 $y=d_1$에서 전계 및 자계의 연속조건을 적용하여 구할 수 있다. 본 논문에서 사용된 퓨리어(Fourier) 변환 정의식은 다음과 같다.

$$\tilde{\psi}_i^{(p)}(\alpha, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_i^{(p)}(x, y)\, e^{j\alpha x}\, dx, \tag{2-2}$$
$$(\tilde{\psi} = \tilde{E}, \tilde{H},\quad i = 1, 2, 3,\quad p = e\ or\ h)$$

식 (2-1)의 계수들은 마이크로 스트립 선로상의 전류분포 및 슬롯에서의 수평 전계분포의 함수로 나타내어지며, 이들 전류분포 및 전계분포는 실제 스트립에 흐르는 전류 분포 및 슬롯상에 분포되는 전계의 모양으로 수식화 시켜야한다. 경계조건 및 연속조건에 위의 식들을 풀어 정리하면, 식 (2-3)과 같이 4×4의 Green 행렬을 얻을 수 있다. 이때의 Green함수들은 α와 β의 함수로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} G_{11}(\alpha,\beta) & G_{12}(\alpha,\beta) & G_{13}(\alpha,\beta) & G_{14}(\alpha,\beta) \\ G_{21}(\alpha,\beta) & G_{22}(\alpha,\beta) & G_{23}(\alpha,\beta) & G_{24}(\alpha,\beta) \\ G_{31}(\alpha,\beta) & G_{32}(\alpha,\beta) & G_{33}(\alpha,\beta) & G_{34}(\alpha,\beta) \\ G_{41}(\alpha,\beta) & G_{42}(\alpha,\beta) & G_{43}(\alpha,\beta) & G_{44}(\alpha,\beta) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{J}_x(\alpha) \\ \tilde{J}_z(\alpha) \\ \tilde{E}_x(\alpha) \\ \tilde{E}_z(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{e}_x(\alpha) \\ \tilde{e}_z(\alpha) \\ \tilde{I}_x(\alpha) \\ \tilde{I}_z(\alpha) \end{bmatrix} \tag{2-3}$$

식(2-3)에서 $\tilde{e}_x(\alpha)$와 $\tilde{e}_z(\alpha)$는 경계 1과 경계 2에 있는 유전체상($y=d_1$)의 수평방향 전계의 퓨리에 변환이며, $\tilde{I}_x(\alpha)$와 $\tilde{I}_z(\alpha)$는 경계 2와 3에 있는 접지면($y=0$)에서의 전류 밀도의 퓨리에 변환 형태이다. G_{11}, G_{12}, G_{21}, G_{22}는 마이크로스트립선로 그리고 G_{33}, G_{34}, G_{43}, G_{44}는 슬롯에 위한 Green함수 성분들을 각각 나타내며, 나머지 성분들은 이들 두 선로에 의한 상호 결합 성분을 의미한다.

그러므로, 식 (2-3)에서 구한 Green 함수를 이용하면 마이크로스트립 선로 및 슬롯 선로도 해석이 가능함을 알 수 있다. 식(2-3)과 같은 대수방정식을 효율적으로 풀기 위해 퓨리어 영역에서 Galerkin방법을 적용하고, 전계 및 전류 성분들을 직교성(Orthogonality)을 갖는 기저함수(Basis Function)의 합으로 표현한다.[11,12]

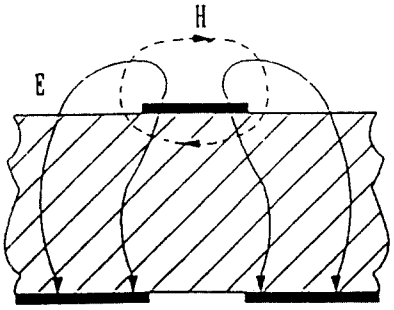
마이크로슬립-슬롯 결합 선로에서 마이크로스트립 선로와 슬롯으로 각각 전파되는 직교모드에 대한 특성임피던스는 Parseval 정리를 이용하여, $+z$ 방향으로 진행되는 평균전력(P_{av}), 슬롯사이에 형성된 전압(V_o)의 크기 비 그리고 마이크로스트립상에 $+z$방향으로 흐르는 전류(I_o)의 비로 식(2-4)와 같이 각각 정의할 수 있다.[13]-[16]

$$Z_{even}=\frac{4P_{av}}{I_o^2}\ , \qquad Z_{odd}=\frac{V_o^2}{4P_{av}} \tag{2-4}$$

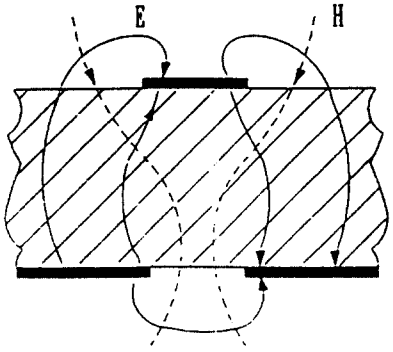
마이크로스트립 선로상의 전계 분포는 그림2-1(a)와 같은 우모드의 형태이며, 슬롯상의 전계는 그림 2-1(b)와 같기 때문에 위에서 정의한 우모드(even mode)와 기모드(odd mode) 특성 임피던스는 각각 마이크로스트립선로와 슬롯에 의한 것으로 생각할 수 있다. 또한 평균전력 P_{av}는 각 영역에서 독립적으로 구해야하며 Parseval정리를 이용하면 식 (2-5)로부터 간단히 구할 수 있다.

$$P_{av}=\frac{1}{4\pi}\int_{-\infty}^{\infty} p(\alpha)\,d\alpha \tag{2-5}$$

여기서, $p(\alpha)=p_1(\alpha)+p_2(\alpha)+p_3(\alpha)$로 $p_i(i=1,2,3)$은 그림 1-1에서 표시한 영역i에서의 평균 전력을 나타낸다.



(a) 우모드인 경우의 전계 및 자계 분포



(b) 기모드인 경우의 전계 및 자계 분포

그림 2-1. 마이크로스트립-슬롯(MSS) 선로의 전계 및 자계 분포

Fig. 2-1. Electric and magnetic field distribution in coupled microstrip-slot line

Ⅲ. 수치 계산 및 결과

앞에서 구한 마이크로슬립-슬롯 결합 선로에 대한 Dyadic Green함수 및 임피던스 정의식로 부터 전파

상수 및 임피던스를 구하기 위해서는 선로에 맞는 적절한 기저함수를 선택해야 한다. 이때 이용되는 기저함수들은 결과값 및 컴퓨터 계산시간에 큰 영향을 미치므로, 선택시 선로의 전류 및 전계분포에 대한 분포도 및 성질을 예측하여 선택하여야 한다.

본 논문에서는 마이크로스트립 선로 및 슬롯 선로 가장자리에서 발생하는 자계 및 전계의 특이점(Singular Point)을 좀 더 정확하게 모델링[11] 하기 위해 우모드인 경우에는 식 (3-1)과 같은 기저함수를 사용하였다. 그림3-1과 그림3-2는 우모드인 경우 슬롯 폭 변화에 대한 유효 유전율 및 임피던스에 대한 결과로 Ogawa[3]가 사용한 기저함수를 사용했을 때와 결과를 비교한 것으로, 우모드인 경우는 마이크로스트립 선로의 특성이 강하게 나타남을 볼 수 있다.

$$J_{z1}(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{1-(2x/W)^2}}, & |x|<\dfrac{W}{2}\\ 0, & |x|>\dfrac{W}{2}\end{cases}$$

$$E_{x1}(x)=\begin{cases}1, & 0<x<\dfrac{t}{2}\\ -1, & -\dfrac{t}{2}<x<0\\ 0, & |x|>\dfrac{t}{2}\end{cases} \qquad (3\text{-}1)$$

$$E_{z1}(x)=\begin{cases}1, & |x|<\dfrac{t}{2}\\ 0, & |x|>\dfrac{t}{2}\end{cases}$$

기모드인 경우는 우모드와는 달리 마이크로스트립 선로의 특성보다는 슬롯[11]에 의한 영향이 강하게 나타남을 예상할 수 있으므로 기모드인 경우의 전류 및 전계에 대한 기저함수는 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$E_{z1}(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{1-(2x/t)^2}}, & |x|<\dfrac{t}{2}\\ 0, & |x|>\dfrac{t}{2}\end{cases}$$

$$J_{x1}(x)=\begin{cases}1, & |x|<\dfrac{W}{2}\\ 0, & |x|>\dfrac{W}{2}\end{cases} \qquad (3\text{-}2)$$

$$J_{z1}(x)=\begin{cases}1, & 0<x<\dfrac{W}{2}\\ -1, & -\dfrac{W}{2}<x<0\\ 0, & |x|>\dfrac{W}{2}\end{cases}$$

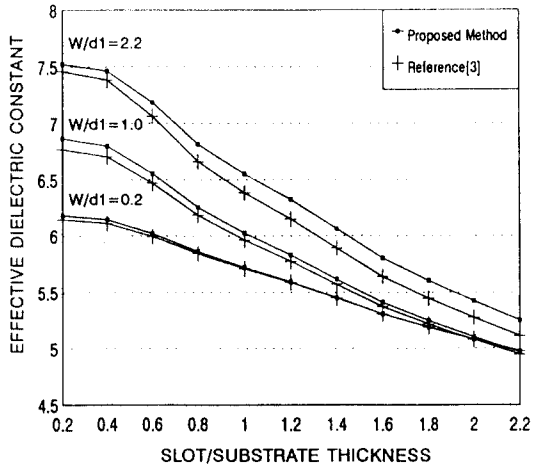


그림 3-1. 마이크로스트립-슬롯 결합선로의 우모드에 대한 유효 유전율

Fig. 3-1. Effective dielectric constant of coupled microstrip slot line for even mode

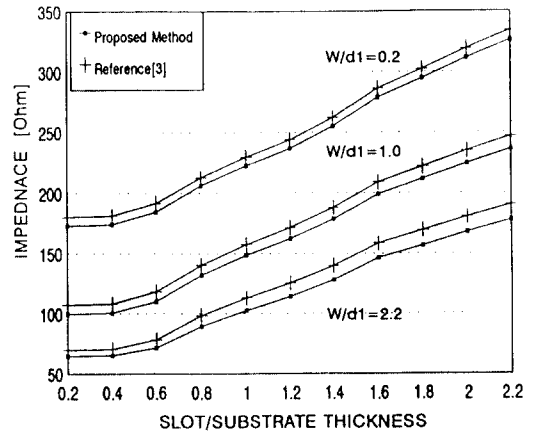


그림 3-2. 마이크로스트립-슬롯 결합선로의 우모드에 대한 특성임피던스

Fig. 3-2. Characteristic impedance of coupled microstrip-slot line for even mode

그림3-3과 그림3-4는 기모드인 경우의 결과로 마이크로스트립 선로의 폭 변화에 대한 유효 유전율 및 임피던스에 대한 변화를 나타낸 것이다. 기모드인 경우는 선로 폭의 변화에 대해 우모드인 경우에 비해 영향을 덜 받는다는 것을 알 수 있다.

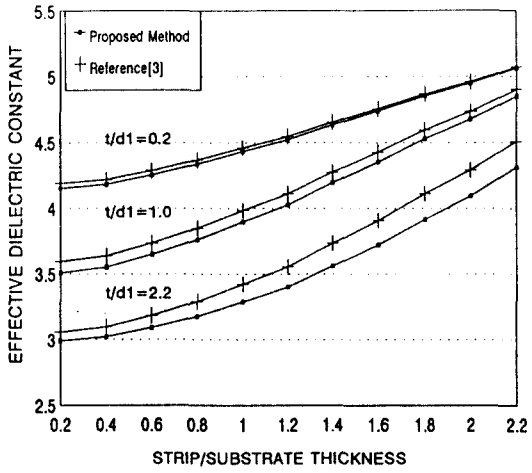


그림 3-3. 마이크로스트립-슬롯 결합선로의 기모드에 대한 유효 유전율

Fig. 3-3. Effective dielectric constant of coupled microstrip-slot line for odd mode

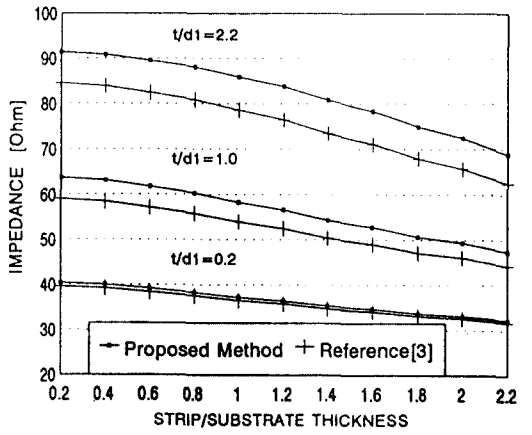


그림 3-4. 마이크로스트립-슬롯 결합선로의 기모드에 대한 특성임피던스

Fig. 3-4. Characteristic impedance of coupled microstrip-slot line for odd mode

표 1과 2는 본 논문에서 유도된 식을 이용하여 계산한 결과값의 정확성을 Ogawa가 계산한 결과값과 객관적으로 비교하기 위한 것으로, 우모드인 경우는 슬롯의 폭을 영(t=0 : 마이크로스트립 선로)으로 하여 Ogawa의 방법과 Immitance방법에 의한 결과값과 비교하였으며, 기모드인 경우는 마이크로스트립 선로의 폭을 영(w=0 : 슬롯 선로)으로 하여 Ogawa 방법과 참고문헌[13]에 의한 해석법으로 계산한 결과값과 비교하였다.

표 1. t=0, w=d1=1, 0[mm] 26GHz 일때 결과 비교 (우모드)

	OGAWA 방법	제안된방법	Immitance방법
유효 유전율	6.77	6.86	6.82
특성임피던스[Ω]	104.98	93.81	96.76

표 2. w=0, t=d1=1, 0[mm] 26GHz 일때 결과 비교 (기모드)

	OGAWA 방법	제안된방법	참고문헌[13]방법
유효 유전율	3.38	3.30	3.33
특성임피던스[Ω]	87.08	89.62	88.11

위의 결과로 부터 마이크로스트립-슬롯 결합선로의 마이크로스트립과 슬롯 선로에 대해 평균적인 특성을 갖고 있다는 사실을 알 수 있다.

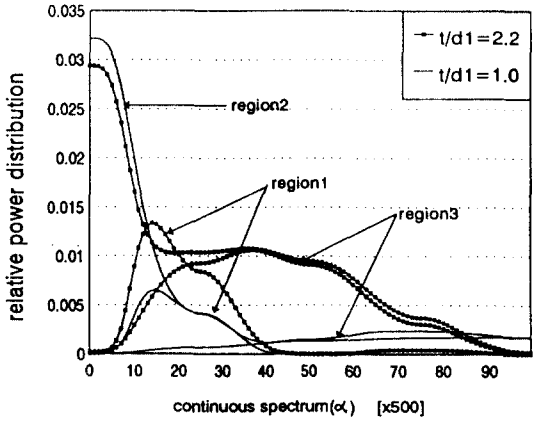


그림 3-5. 마이크로스트립-슬롯 결합선로의 우모드에 대한 각영역에서의 평균전력분포

Fig. 3-5. Average power distribution of coupled microstrip-slot line for even mode in the individual region

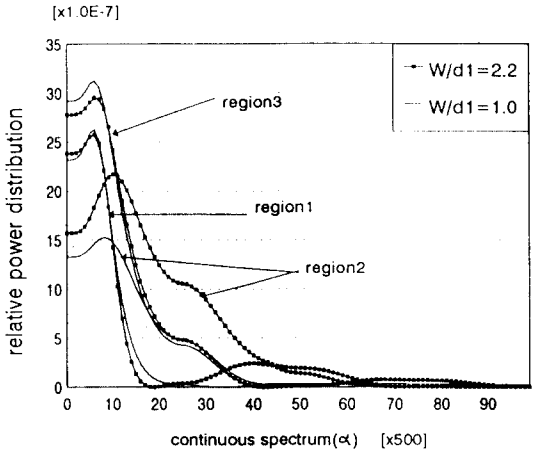


그림 3-6. 마이크로스트립 슬롯 결합선로의 기모드에 대한 각 영역에서의 평균 전력분포

Fig. 3-6. Average power distribution of coupled micro strip slot line for odd mode in the individual region

그림3.5는 식(2-2)에서 사용한 푸리에 변환 변수 α와 슬롯 크기에 따라 각 영역에서 우모드 평균전력을 식(2.5)로 부터 구한 결과이다. 우모드는 유전체내에 전, 자계가 집중된 마이크로스트립 선로인 경우와 같이 유전체내(영역2)에서의 상대적인 평균전력이 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 저차 모드에 대한 전력이 주로 분포되어 있으며, 고차 모드는 마이크로스트립(영역1) 및 슬롯(영역3)상에 분포되어 있음을 보여주고 있다. 그리고 슬롯 크기를 크게 함에 따라 영역3에서의 전력분포가 점점 증가되는 것은 마이크로스트립 선로에서의 전계에 대한 집적 밀적이 상대적으로 줄어들어, 높은 임피던스를 갖게 됨을 설명할 수 있다.

그림3-6은 기모드인 경우이며, 마이크로스트립 선로 폭을 변화시켜 각 영역에서의 평균전력을 나타낸 것으로, 일반적인 슬롯 선로인 경우와 같이 유전체상 및 공기 표면상(영역3)에 전, 자계가 집중되어 있음을 알 수 있다. 그러나 평균전력의 점유율가 우모드와 비교하여 보다 높은 모드에서 발생하는 것은 슬롯 선로상의 전파모드가 마이크로스트립 선로보다 좀더 복잡한 모드로 전파됨을 보여준다[11].

그리고 슬롯 크기를 변화함에 따라 전력분포의 변화가 일어나지만, 우모드와 같은 큰 변화는 없기 때문에 기모드의 임피던스는 그림3-4와 같이 큰 변화가 없다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 마이크로스트립-슬롯 결합선로를 스펙트럼 영역에서 Full-wave방법을 적용하여 Green 함수를 유도하였고, Galerkin 방법을 사용하여 선로의 주요 파라미터인 유효유전율, 특성임피던스 및 각 영역에서의 평균전력 분포를 산출하였다. 또한, 본 논문에서 사용한 전류에 대한 기저함수(우모드인 경우) 및 전계에 대한 기저함수(기모드인 경우)를 각 경우에 있어서 Ogawa가 사용한 기저함수보다 특이점을 보다 정확히 모델링함으로써 표1, 과 2에서 알 수 있듯이 계산값의 정확도를 높일 수 있었다.

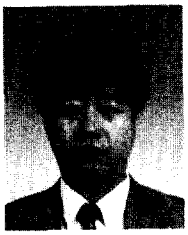
이와같은 계산 결과로 부터 마이크로스트립 슬롯 결합선로는 단일 마이크로스트립 선로 및 슬롯 선로와 같은 기존 선로에서 볼 수 없는 특성인 전계 및 자계가 우모드(마이크로스트립 선로모드)와 기모드(슬롯 선로모드)로 나누어 진행하는 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 그림2.5와 2.6에서 나타난 결과로 부터 기모드인 경우는 선로 폭의 변화에 대해 우모드인 경우에 비해 영향을 덜 받는다는 것을 알 수 있으며, 같은 구조의 마이크로스트립 선로의 특성임피던스와 비교하면 매우 큰 값을 나타내는 데 이는 마이크로 스트립 선로가 슬롯 선로와 결합하여 전계 및 자계가 왜곡되어 전파되는 모드가 Quasi-TEM에서 많이 변화된 모드가 진행되기 때문으로 해석할 수 있다.

이러한 특성은 기존의 선로로는 제작이 어려운 결합 계수가 큰 결합기(Tight Coupled Coupler)와 같은 회로를 만드는 데 사용[3], [9]될 수 있으며, 앞으로 MMIC회로에 응용하기 위해서는 비등방성 기판에서의 해석[11][15]이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. B. Bhat & S. K. Koul, Analysis, design & application of fin lines, Artech House, 1987.
2. K. C. Gupta, R. Garg & I. J. Bahl, Microstrip lines and slot lines, Artech House, 1979.
3. Ogawa & M. Aiawa, "マイクロストリップスロット結合線路の解析," 電子通信學會論文誌, Vol.

J62-B, No.4, pp.396-403, Apr. 1979.
4. H. Ogawa, T. Hirota & M. Aikawa, "マイクロストリップ-スロット結合線路を用いた方向性結合器," 電子通信學會論文誌, Vol.J65-B, No.7, pp. 882-889, Jul. 1982.
5. H. Ogawa, T. Hirota & M. Aikawa, "New MIC power dividers using coupled microstrip-slot lines : two sided MIC power dividers," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol.MTT-33, No.11, pp.1155-1164, Nov. 1985.
6. M.F.Wong, V.F.Hanna, O.Picon & H.Baudrand, "Analysis and design of slot-coupled directional couplers between double-sided substrate microstrip lines," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol.29, No.12, pp.2123-2128, Dec. 1991.
7. M. Aikawa, "マイクロストリップ-スロット結合線路を用いた密結合 方向性結合器," 電子通信學會論文誌, Vol.J60-B, No.4, pp.253-259, Apr. 1977.
8. El-Badawy El-Sharawy & R.W.Jackson, "Analysis and design of microstrip-slot line for phase shifting applications," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol.38, No.3, pp.276-283, Mar. 1990.
9. T. Itoh & A. S. Hebert, "A generalized spectral domain analysis for coupled suspended microstriplines with tuning septums," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol.MTT-26, No.10, pp.820-826, Oct. 1978.
10. R.F. Harrington, Time-harmonic electromagnetic fields, McGRAW-HILL, New York, 1961.
11. T. Itoh, Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures, John Wiley & Sons, New York, 1989.
12. Masonori Kobayashi, "Dispersion characteristics of open microstrip lines," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-35, No.2, pp.101-105, Feb. 1978.
13. J. B. Knorr and K. D. Kuchler, "Analysis of coupled slots and coplanar strip on dielectric substrate," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-23, No.7, pp.541-548, July 1975.
14. N. G. Alexopoulos, "Integrated-circuit strucures on anisotropic substrates," IEEE Trans. Micro-wave Theory Tech., vol. MTT-33, No. 10, pp.847-881, Oct., 1985.
15. Clifford M. Krowne, "Green's function in the spectral domain for biaxial and uniaxial anisotropic planar dielectric structures," IEEE Trans. Antenna and Pro., vol. AP-32, No.12, pp. 1273-1282, Dec., 1984.



李 承 燁(Sung Yup Rhee) 정회원
1964년 2월 3일생
1986년 2월 : 연세대 전자공학과 졸업(공학사)
1988년 2월 : 연세대 전자공학과 졸업(공학석사)
1993년 8월 : 연세대 전자공학과 졸업(공학박사)
1993년 9월 ~ 현재 : 국립여수수산대 전자통신과 전임강사
※주관심분야 : 마이크로파 소자 광변조기및 광제어 마이크로파 소자 해석

朴 漢 奎(Han Kyu Park) 正會員
1941年 6月 21日生
1964年 2月 : 延世大學校 電氣工學科 卒業
1968年 2月 : 延世大學校 大學院 電氣工學科 卒業(工學碩士)
1973年 : 불란서 파리大學校(소르본느大學校)博士課程修了(DEA)
1975年 : 불란서 파리6대학(ph.D)
1976年 ~ 現在 : 延世大學校 電子工學科 教授