

회로망 파라미터 변환을 이용한 마이크로파 회로의 효율적인 FDTD 해석

정회원 박면주*, 김병성**, 남상욱*

An efficient FDTD analysis of the microwave circuits using the network parameter conversion

Myun-Joo Park*, Byung-Sung Kim**, and Sangwook Nam* *Regular Members*

요약

본 논문에서는 FDTD를 이용하여 각종 마이크로파 회로의 S파라미터를 정확하게 구할 수 있는 간단하고 효율적인 방법을 제시하였다. 기존의 방법에서는 2번의 FDTD 해석을 통해 입사파와 반사파를 분리해 구한 후 S 파라미터를 직접 계산하는데 비해, 본 논문의 방법에서는 먼저 각 단자의 총전류와 전압을 변수로 하는 다른 회로 파라미터를 계산한 다음, 이를 회로망 이론을 사용하여 S 파라미터로 변환하는 방법을 사용하였다. 이 방법을 사용하면 FDTD의 불완전한 흡수경계조건에 의한 오차가 최종적으로 계산된 회로 파라미터에 미치는 악영향을 효과적으로 배제시킬 수 있다. 또한 도파관 문제 등과 같이 전송선로의 특성 임피던스를 알고 있는 경우에는 입사파를 구하기 위한 별도의 FDTD계산을 할 필요가 없이 바로 S 파라미터를 계산해 낼 수 있으므로 매우 효율적이다. 본 논문에서 제안하는 방법은 도파관이나 각종 평면형 전송선로회로등 광범위한 분야에 두루 적용될 수 있으며 매우 간단한 방법으로 FDTD해석의 정확도와 효율성을 향상시킬 수 있다.

ABSTRACT

This paper proposes a simple and efficient method for the accurate calculation of the scattering parameters of various microwave circuits using the FDTD method. In the proposed method, a circuit parameter which concerns the net current/voltages of each ports is first calculated, and is converted into S parameter using the network theory, which is different from the conventional method in which the S parameter of the circuit is directly calculated from the incident and reflected waves obtained through two independent FDTD simulations. The proposed method can eliminate the error in the calculated circuit parameters due to the imperfect absorbing boundary condition of the FDTD in an effective way. Furthermore, there is no need for an extra FDTD simulation to get the incident wave if the characteristic impedance of the transmission line is known (e.g. in the waveguide problems). The method of this paper can be applied to wide areas including waveguide and various planar transmission line circuits and can improve the accuracy and efficiency of the FDTD analysis in a very simple way.

I. 서론

FDTD(Finite Difference Time Domain)방법은 한 번의 해석으로 광대역에 걸친 주파수 특성을 계산

할 수 있으며, 복잡한 구조나 매질이 포함된 경우에도, 이를 쉽게 모델링할 수 있는 등의 여러 가지 장점때문에 각종 마이크로파 회로의 해석에도 널리 응용되고 있다^[1].

* 서울대학교 전기공학부(fert@samsung.co.kr)

** 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과

논문번호 : 98033-0119, 접수일자 : 1998년 1월 19일

FDTD의 여러 응용분야에서 항상 문제로 대두되는 것은 흡수경계조건에 의해 발생하는 오차이다. 일반적으로 사용되는 흡수경계조건들은 시간영역 파형에서는 매우 작은 반사파만을 발생시키는 경우에도 이를 주파수 영역으로 변환하면 상당한 정도의 오차를 가져오게 되는 경우가 많다. 따라서 정확한 결과를 얻기 위해서는 우수한 흡수성능을 나타내는 고도의 경계조건을 사용하여야 하지만 이를 위해서는 상당한 정도의 추가적인 계산이나 별도의 컴퓨터 기억용량이 필요해지게 된다. 따라서 최근에는 비교적 간단한 흡수경계조건을 사용하는 대신 여기서 발생하는 반사파에 의한 영향을 추후 계산을 통해 보정하는 방법에 대한 연구들도 많이 이루어지고 있다^[2,3].

FDTD를 마이크로파 회로 해석에 이용할 때, 경계에서의 반사파에 의한 영향은 최종적으로 계산된 주파수 영역 S파라미터의 오차로 나타나게 된다. 지금까지의 연구에서 마이크로파 회로의 S파라미터를 계산하는데 주로 이용된 방법은 S파라미터의 정의식을 그대로 이용하는 것이다. 이 방법에서는 먼저 회로의 각 단자를 정합시킨 후, 각 포트에서의 전압파 또는 전류파를 계산한다. 여기서 구해진 전류파나 전압파는 입사파와 반사파가 더해진 성분이기 때문에, S파라미터를 계산하기 위해서는 입사파와 반사파를 분리하여야 한다. 이를 위해 각 회로단자의 입력에 해당하는 균일전송선로를 FDTD로 해석하여 반사파가 없는 순수한 입사파를 얻은 후 원래의 회로구조에서 계산된 값과 입사파 성분과의 차로부터 반사파를 계산하면, 입사파와 반사파의 비로 정의되는 S파라미터를 계산할 수 있다. 이 방법으로 정확한 S파라미터를 구하려면 회로의 각 포트가 완전히 정합되어야 한다. 그러나 실제 FDTD에서 사용되는 각종 경계조건들은 모두 정도의 차이는 있으나 일정한 크기의 반사파를 발생시키게 되므로, 이에 의한 각 회로단자에서의 부정합이 최종 계산된 S파라미터에 오차를 일으키는 주요 원인이다. 즉 실제로는 불완전한 흡수경계조건에 의한 반사파가 존재함에도 불구하고 이를 무시하기 때문에 계산결과가 부정확해지게 되는 것이다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 일반적으로 불완전한 흡수경계조건에 의한 반사파의 영향을 정확히 고려하여야 하며, 이는 해석하려는 회로의 각 단자가 부정합된 상태로 되어 있음을 의미한다. S파라미터는 그 정의 자체가 각 포트의 정합조건을 가정하고 있기 때문에 이와 같은 경우에는 부적당

하다. 따라서 본 논문에서는 S파라미터 이외에 다른 회로망 파라미터를 사용하며 위에서 제기된 문제를 해결할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. S파라미터 방법의 경우 각 단자를 정확히 정합시켜야 함은 물론이고, 입사파와 반사파를 분리하기 위해 입사파를 구해내는 별도의 계산이 필요하다. 그러나 본 논문에서 제시하는 방법은 부하조건에 영향을 받지 않으므로, FDTD해석시 수치적으로 구현이 간단한 흡수경계조건을 이용할 수 있어 계산효율을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 각 단자에 사용된 전송선로의 특성 임피던스를 해석적인 방법 등 다른 방법을 사용하여 구할 수 있는 경우에는 별도의 다른 계산을 거치지 않고도 계산된 회로파라미터를 S파라미터로 쉽게 변환할 수 있는 장점이 있다.

II. 이론

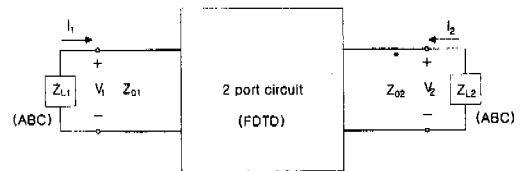


그림 1. FDTD를 이용한 마이크로파 회로 해석 모델
Fig. 1 Microwave circuit analysis model using FDTD

그림 1은 2단자 회로망을 FDTD로 해석하는 경우의 등가회로 모델을 보여주고 있다. 회로의 각 단자는 특성 임피던스가 Z_{01} , Z_{02} 인 전송선로로 외부에 연결되어 있다. 각 단자에는 부하 Z_{L1} , Z_{L2} 가 연결되어 있는데 이는 FDTD의 흡수경계조건에 의한 부하효과를 표시하고 있다. 이상적인 흡수경계조건인 경우 $Z_{L1}=Z_{01}$, $Z_{L2}=Z_{02}$ 가 되도록 하여야 한다.

일반적으로 FDTD에 의한 마이크로파 회로해석에서는 입사파와 반사파의 분리를 통한 S파라미터 계산방법을 많이 이용해 왔다. 그러나, FDTD에서는 한번의 해석으로 입사파나 반사파를 분리하여 얻을 수는 없으며 단지 이들의 총합만을 알 수 있을 뿐이다. FDTD를 이용하여 계산할 수 있는 총전류와 전압값들간의 관계는 S파라미터가 아닌 다른 2단자 회로망 파라미터를 사용하여 기술될 수 있다. 어드미턴스(Y) 파라미터를 사용한 경우를 예로 들면 각 단자 전압과 전류의 관계를 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

4개의 Y 파라미터를 알기 위해서는 서로 독립적인 2쌍의 단자전압, 전류 데이터가 필요하다. 이를 위해 먼저 해석하고자 하는 구조에 전원 여기 조건을 다르게 주어 2번의 FDTD 해석을 수행한다. 두 번의 해석에서 얻어진 각 단자전압과 단자전류를 각각 $(I_1^{(1)}, I_2^{(1)}, V_1^{(1)}, V_2^{(1)})$ 과 $(I_1^{(2)}, I_2^{(2)}, V_1^{(2)}, V_2^{(2)})$ 로 표시한다. 이 데이터를 식 (1)의 관계식에 대입하여 역산하면 다음과 같은 어드미턴스 파라미터 계산식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_{11} &= (V_2^{(2)} I_1^{(1)} - V_2^{(1)} I_1^{(2)}) / \Delta V, \\ Y_{12} &= (V_1^{(2)} I_1^{(1)} - V_1^{(1)} I_1^{(2)}) / \Delta V, \\ Y_{22} &= (V_1^{(1)} I_2^{(2)} - V_1^{(2)} I_2^{(1)}) / \Delta V, \\ Y_{21} &= (V_2^{(1)} I_2^{(2)} - V_2^{(2)} I_2^{(1)}) / \Delta V, \\ \Delta V &= V_1^{(1)} V_2^{(2)} - V_1^{(2)} V_2^{(1)} \end{aligned} \quad (2)$$

이와 같은 방법으로 계산된 Y 파라미터는 FDTD의 흡수경계조건에 해당하는 부하조건에는 무관한 값을 가진다. 따라서 FDTD 해석시 Mur의 1차 경계조건^[4]과 같은 비교적 간단한 흡수경계조건만을 사용하여도 정확한 계산결과를 얻을 수 있다.

일반적으로 마이크로파 회로의 이론 및 응용에서는 S파라미터를 사용하는 경우가 많으므로, 위에서 구한 어드미턴스 파라미터를 S파라미터로 변환하기 위해 각 단자의 전압 및 전류를 다음과 같이 입사파와 반사파의 합으로 분해한다.

$$\begin{aligned} I_k &= I_{kt} + I_{ks} \\ V_k &= V_{kt} + V_{ks}, \quad k=1,2 \end{aligned} \quad (3)$$

위의 식에서 아래첨자 i와 s는 각각 입사파와 반사파를 의미한다.

각 단자에서 전류파와 전압파는 전송선로의 특성 임피던스에 의해 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$\begin{aligned} I_{kt} &= V_{kt} / Z_{0k} \\ I_{ks} &= -V_{ks} / Z_{0k} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)와 (3)을 식 (1)에 적용하면 (1)의 관계식을 입사전압파와 반사전압파와의 관계식으로 변환할 수

있고, 이로부터 이 회로의 S파라미터를 계산할 수 있다. 이는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\begin{bmatrix} V_{1s} \\ V_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1i} \\ V_{2i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta Y}$$

$$\begin{bmatrix} (1/Z_{01} - Y_{11})(1/Z_{02} + Y_{22}) + Y_{12}Y_{21} & -2Y_{12}/Z_{02} \\ -2Y_{21}/Z_{01} & (1/Z_{01} + Y_{11})(1/Z_{02} - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21} \end{bmatrix} \Delta Y = (1/Z_{01} + Y_{11})(1/Z_{02} + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21} \quad (5)$$

II.1. 도파관 문제의 응용

도파관 문제는 그 특성 임피던스가 해석적인 형태로 주어지기 때문에 본 논문의 방법을 적용하기에 가장 적합하다. 도파관 문제에서는 각 모드를 등가 전송선로로 대체시켜 생각할 수 있으며 이때 전압파나 전류파 및 그 특성 임피던스는 다음의 식으로 나타낼 수 있다[5].

TE modes

$$\begin{aligned} V &= \frac{j\omega\mu H_z}{k_c^2} \\ I &= U : \vec{H}_t = -\nabla_t U \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} / \sqrt{1 - (\frac{f_c}{f})^2} \end{aligned} \quad (6)$$

TM modes

$$\begin{aligned} I &= \frac{j\omega\epsilon E_z}{k_c^2} \\ V &: \vec{E}_t = -\nabla_t V \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \sqrt{1 - (\frac{f_c}{f})^2} \end{aligned} \quad (7)$$

위의 식에서 k_c 와 f_c 는 각각 차단파수(cutoff wavenumber)와 차단주파수이다.

따라서 먼저 도파관 구조의 FDTD 해석을 통해 각 단자에서의 등가 전류파와 등가 전압파를 얻으면, 이로부터 어드미턴스 파라미터를 계산할 수 있으며, 여기에 (6),(7)에 주어진 특성 임피던스 관계식을 이용하면 식 (5)로부터 쉽게 그 S파라미터를 구할 수 있다.

II.2. 균일 전송선로의 전송특성 해석

본 논문의 방법은 3차원 FDTD방법을 이용하여 각종 전송선로의 전파상수나 특성임피던스 등의 전송특성을 해석하는 데에도 유용하게 쓰일 수 있다. 일정한 길이 l의 균일 전송선로를 생각하면 그 Y 파라미터를 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$Y_{11} = Y_{22} = 1/jZ_0 \tan \beta l$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -1/jZ_0 \sin \beta l \tag{8}$$

따라서 균일한 선로의 FDTD해석으로부터 Y파라미터들을 구하고 나면, 다음 식들로부터 이 전송선로의 특성임피던스 Z_0 와 전파상수 β 를 계산할 수 있다.

$$\beta = \frac{\cos^{-1}(-Y_{11}/Y_{21})}{l} \tag{9}$$

$$Z_0 = \frac{1}{jY_{11} \tan(\beta l)} = \frac{-1}{jY_{21} \sin(\beta l)} \tag{10}$$

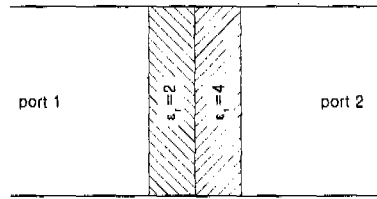
II.3. 일반적인 전송 선로 불연속 및 회로 해석

도파관 이외에 마이크로스트립 등 보다 일반적인 전송선로구조를 이용한 회로에서는 전송선로의 특성 임피던스가 해석적인 형태로 주어지지 않기 때문에, FDTD해석으로 얻은 어드미던스 파라미터를 S파라미터로 변환하기 위해서는 다른 방법으로 특성 임피던스를 알아내어야 한다. 특성 임피던스를 알아내는 데에는 위에서 제시한 균일 전송선로 해석법이나 2차원 FDTD해석 또는 기타 다른 주파수 영역 방법 등 여러 가지 다양한 방법이 있을 수 있다. 또한 마이크로스트립 선로 등 일반적으로 마이크로파 회로의 해석에서 흔히 쓰이고 있는 전송선로들에 대해서는 그 특성 임피던스를 계산할 수 있는 여러 가지 근사식들도 잘 정리되어 있으므로, 이들 결과를 사용할 경우 별도의 계산을 하지 않고도 바로 S 파라미터를 구해낼 수 있다.

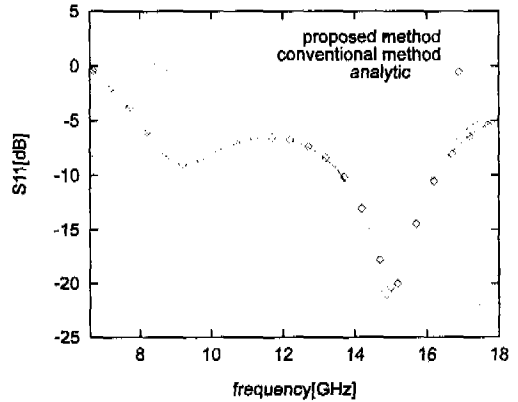
III. 결과 및 검토

본 논문에서 제안한 방법을 도파관 및 마이크로스트립 회로의 FDTD 해석에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 앞으로 제시될 모든 결과는 Mur의 1차 흡수경계조건을 사용한 FDTD 해석을 통해 계산되

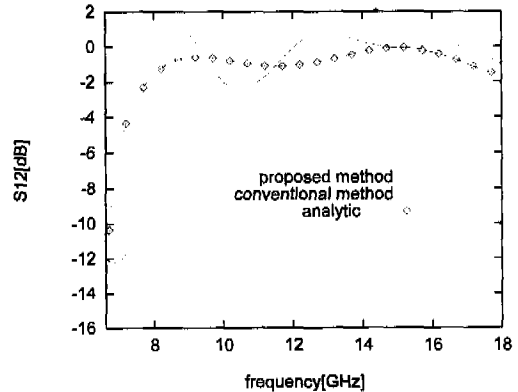
었다.



(a) 구조
(a) structure



(b) S11 특성
(b) S11 characteristic

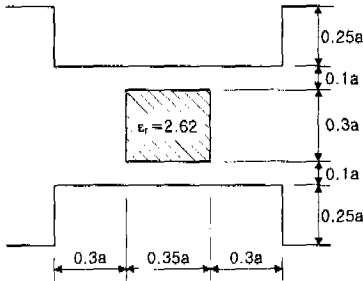


(c) S12 특성
(c) S12 characteristic

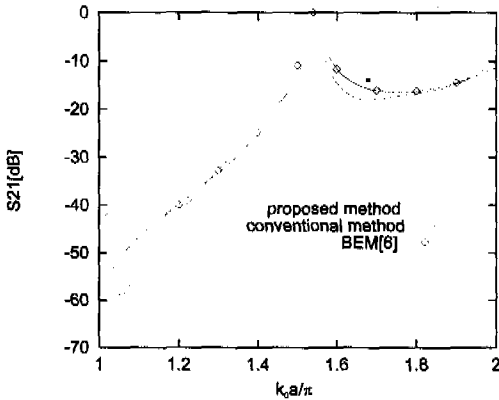
그림 2. 도파관 내의 유전체판에 의한 전자파 산란
Fig. 2 Scattering by dielectric slabs in the waveguide

먼저 그림 2에서는 도파관 단면을 채우고 있는 두 개의 유전체 판(slab)에 의한 전자파 산란에 대한 예이다. Mur의 1차 흡수경계조건은 도파관 문제에서처럼 심한 분산(dispersion)특성을 나타내는 구

조에 대해서는 그 흡수성능이 매우 떨어지는 것으로 알려져 있다. 그 결과 기존의 방법으로 계산된 S 파라미터 결과에 상당한 오차가 생기는 것을 그림에서 알 수 있다. 그러나 같은 조건하에서 본 논문의 방법을 적용한 경우는 매우 정확한 결과를 보여주고 있다.



(a) 필터구조
(a) Filter structure



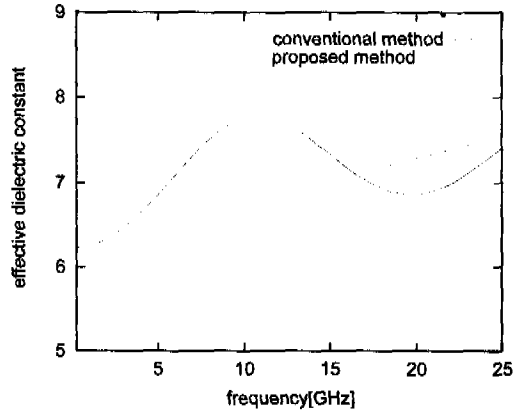
(b) 계산된 필터특성
(b) Calculated filter characteristics

그림 3. 도파관 유전체 필터
Fig. 3 Waveguide dielectric filter

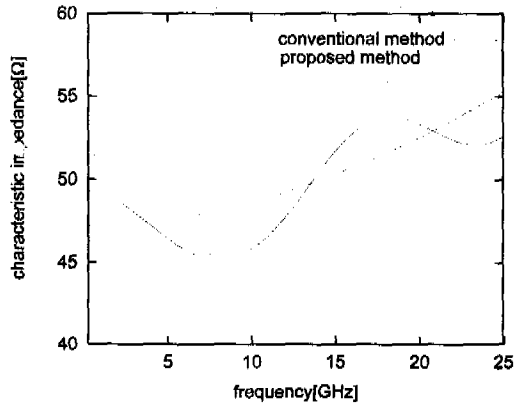
그림 3은 도파관 유전체 필터⁶⁾에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 이 경우 구조의 대칭성을 이용하여 단 한번의 FDTD 해석으로 그림에 나타낸 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제안된 방법은 기존의 방법에 비해 보다 적은 계산으로도 매우 정확한 결과를 나타냄을 볼 수 있다.

다음은 마이크로스트립 전송선로의 전파상수와 특성 임피던스의 계산에 본 논문의 방법을 적용한 결과를 그림 4에 보였다. 해석에 사용된 구조는 기판의 두께가 0.635mm, 유전상수가 9.6이며 폭이 0.635mm인 차폐된(shielded) 마이크로스트립선로이

다. 차폐도체의 크기는 9.525mm×3.175mm이다. 그림에서 볼 수 있듯이 기존의 S 파라미터방법을 사용하여 해석한 결과는 FDTD 해석에서 사용한 Mur의 1차 흡수경계조건에 의한 오차의 영향으로 주파수에 따라 요동하는 특성(ripple)이 나타나지만, 본 논문에서 제시한 방법에 의한 해석 결과에서는 이런 오차가 생기지 않음을 볼 수 있다.



(a) 유효유전율
(a) Effective dielectric constant

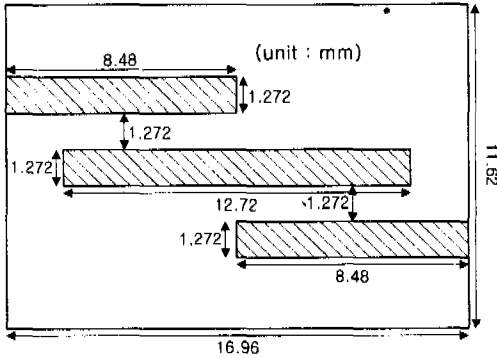


(b) 특성임피던스
(b) Characteristic impedance

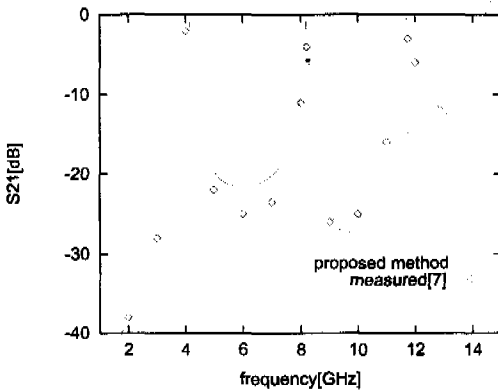
그림 4. 차폐된 균일 마이크로스트립 선로의 전송특성
Fig. 4 Propagation Characteristic of a uniform shielded microstrip line

다음 그림 5는 본 논문의 방법을 마이크로스트립 결합선로 필터구조의 해석에 적용한 결과를 보여주고 있다. FDTD 해석에서 얻어진 결과에 본 논문의 방법을 적용하여 얻어지는 어드미턴스 파라미터를 S 파라미터로 변환할 때 각 포트에 사용된 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스는 해석에 사용된 모

든 주파수 범위에서 유사 정전 근사값인 50Ω 로 일정하다고 가정하였다. 마이크로스트립의 경우 도파관에 비해 비교적 작은 분산특성을 나타내므로 유사 정전 근사값을 사용하여 본 논문의 방법을 적용한 경우에도 그 계산한 결과가 측정값^[7]과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.



(a) 구조
(a) Structure



(b) S21 특성
(b) S21 characteristic

그림 5. 마이크로스트립 결합선로 필터
Fig. 5 Microstrip coupled line filter

IV. 결론

본 논문에서는 FDTD를 이용하여 마이크로파 회로를 해석할 때 회로망 파라미터의 변환을 이용하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법의 장점은 수치적으로 구현이 간단한 흡수경계조건을 사용한 경우에도 정확한 해석결과를 얻을 수 있으며 입사파와 반사파를 분리하기 위한 별도의 FDTD 해석이 불필요하다는 점이다. 또한 그 이론과 수치적인 계산

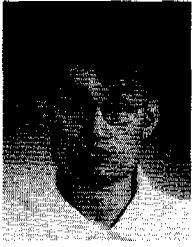
방법이 매우 단순하며, 도파관 및 각종 평면형 전송선로의 전송특성 해석이나 그 불연속 혹은 이들 전송선로를 이용하여 만들어지는 여러 가지 회로소자의 해석 등 광범위한 분야에 널리 적용될 수 있다. 따라서 이 방법은 FDTD를 이용한 마이크로파 회로 해석에서 계산의 효율성과 정확성을 향상시키는데 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] I. Wolff, "Finite Difference Time-Domain simulation of Electromagnetic Fields and Microwave Circuits," *Int. Jour. of MIMICAE*, vol. 5, no. 3, pp. 163-182, Aug. 1992
- [2] F. Moglie, S. Amara, T. Rozzi, and E. Martelli, "De-Embedding Correction for Imperfect Absorbing Boundary Condition in FDTD," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 6, no. 1, pp. 37-39, Jan. 1996.
- [3] X. P. Lin and K. Naishadham, "A simple technique for minimization of ABC-induced error in the FDTD analysis of microstrip discontinuities," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 4, no. 12, pp. 402-404, Dec. 1994.
- [4] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol. 23, pp. 377-382, Nov. 1981.
- [5] E. C. Jordan and K. G. Balmain, *Electromagnetic waves and radiating systems*, 2nd Ed., pp. 264-269, Prentice Hall, 1968.
- [6] M. Koshiba, and M. Suzuki, "Application of the Boundary-Element Method to Waveguide Discontinuities," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 34, no. 2, pp. 301-307, Feb. 1986.
- [7] T. Shibata, T. Hayashi, and T. Kimura, "Analysis of Microstrip circuits Using Three-Dimensional Full-Wave Electromagnetic Fields Analysis in the Time Domain," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 36, no. 6, pp. 1064-1070, June 1988.

박 먼 주(Myun-Joo Park)

정회원

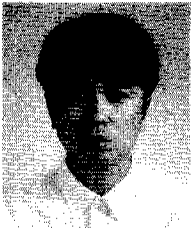


1991년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 학사
1993년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 석사
1998년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 박사
1998년 4월~현재 : 서울대학교
반도체 공동연구소
특별연구원

<주관심 분야> 전자파 수치해석 및 모델링

김 병 성(Byung-Sung Kim)

정회원



1989년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 학사
1991년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 석사
1997년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 박사
1998년 8월~현재 : 성균관대학
교 전기전자컴퓨터공학
과 전임강사

<주관심 분야> 초고주파 능동 및 수동소자 모델링

남 상 욱(Sangwook Nam)

정회원

1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사
1983년 2월 : 한국과학기술원 전기전자공학과 석사
1989년 2월 : University of Texas, Austin 전기공학
과 박사
1990년~현재 : 서울대학교 전기공학부 교수
<주관심 분야> 전자파 수치해석, 안테나 및 초고주
파 회로 설계