

유한차분 시간영역법을 이용한 Suspended Stripline 해석 및 필터 설계

Analysis of a Suspended Stripline using FDTD Method and Design of Suspended Stripline Filter

남 윤 권 · 박 동 철*

Yun-Kwon Nam · Dong-Chul Park*

요 약

본 논문에서는 임의의 두께의 기판을 갖는 suspended stripline의 효율적인 계산을 위해 Yee cell의 내부에 두 개의 유전체(공기와 기판)가 있을 때 사용할 수 있는 FDTD 수식을 유도하였으며 이를 이용하여 suspended stripline의 특성 임피던스와 유효유전율을 계산하였다. 이러한 계산결과를 이용해서 suspended stripline 5단 저역통과 필터를 설계하였고 이를 제작·측정하여 본 논문에서 제안된 FDTD법을 이용한 suspended stripline 해석의 유용성을 입증하였다.

Abstract

A simple and efficient analysis method of the suspended stripline using the finite-difference time-domain (FDTD) method is presented. New FDTD equations are derived using the contour path FDTD concept for the Yee cell which contains a dielectric sheet. The characteristic impedance and the effective dielectric constant of the suspended stripline are calculated using our proposed FDTD method. Using the calculated results, a 5-element lowpass filter is designed and fabricated. Our proposed FDTD method is validated by the measured data of the fabricated lowpass filter.

Key words : FDTD Method, Suspended Stripline, Lowpass Filter

I. 서 론

기존의 FDTD법을 사용하여 그림 1과 같은 suspended stripline을 해석할 경우 가장 작은 격자(grid)의 크기는 주로 기판(substrate)의 두께에 의해 좌우되며 이로 인해 FDTD 시뮬레이션시에 사용되는 시간 스텝(Δt)도 정해지게 된다. 특히 기판의 두께가 아주 얇아질 경우 기존의 FDTD법으로 suspen-

ded stripline을 해석하기 위해서는 아주 작은 격자를 사용해야 하므로 많은 양의 컴퓨터 메모리와 계산 시간이 필요하게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 참고 문헌 [1]의 smart 셀과 참고 문헌 [2]의 subcell 모델 유도를 위해 사용된 개념과 유사한 개념을 본 논문에서 해결하고자 하는 문제에 적용하여 하나의 Yee 셀에 두 가지의 유전체(공기와 기판)가 존재할 때 사용할 수 있는 새로

「본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터(MINT)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터(ERC) 지원금에 의하여 수행되었습니다.

충남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungnam National University)

*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호: 20020503-054

· 수정완료일자: 2002년 5월 27일

은 수식을 유도하였다. 이렇게 유도된 수식을 가지고 suspended stripline을 해석하게 되면 격자의 크기를 기판의 크기와 상관없이 잡을 수 있고 그로 인해 보다 효율적으로 suspended stripline을 해석할 수 있게 된다.

본 논문에서는 제안된 해석법을 이용해서 suspended stripline의 특성 임피던스와 유효유전율을 구하였고 이를 이용해서 차단주파수가 4 GHz인 5 단 저역통과 필터를 설계 및 제작해 보았다. 제작된 필터의 특성 측정을 통해서 본 논문에서 제안된 방법의 유용성을 입증하였다.

그림 1의 suspended stripline 구조는 본 논문의 저자들이 관심을 갖고 연구를 진행하고 있는 밀리미터파 대역 RF MEMS에 사용되는 대표적인 membrane 지지 전송선들중 하나인 SMM(Shielded Membrane Microstrip) 선로와 동일한 구조를 갖고 있으며 제작이 용이하기 때문에 밀리미터파 대역에서 사용되는 SMM 선로의 특성을 계산하기 위해서 적용한 이론을 그 보다 낮은 주파수 대역에서 검증하기 위해서 선택되었다.

II. FDTD 수식 유도

본 논문에서는 그림 1에서 보여지는 suspended stripline의 특성 임피던스와 유효유전율을 정밀하게 구하기 위해서 그림 2에 보여지는 것처럼 y와 z방향(축의 방향은 그림 1 참조)으로는 Δy 와 Δz 를 0.3 mm로 균일하게 분할을 하였고 x방향으로는 Δx_1

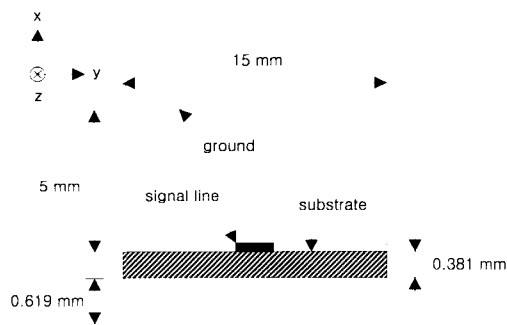


그림 1. Suspended stripline의 구조 및 크기
Fig. 1. The structure and dimensions of a suspended stripline.

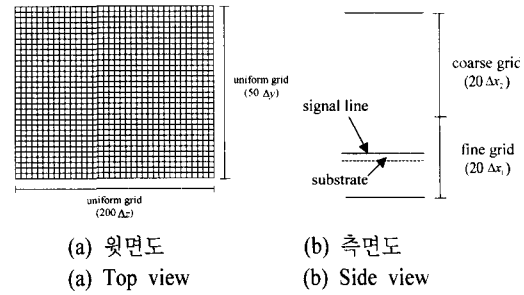


그림 2. 비균일 격자 분할
Fig. 2. Nonuniform grid mesh.

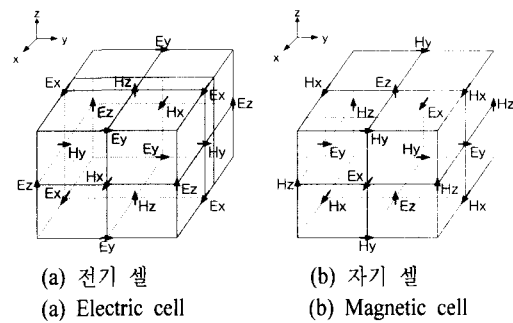


그림 3. 두 가지의 유전체를 포함하는 Yee 셀
Fig. 3. Yee cells which contain two dielectric materials.

과 Δx_2 를 각각 0.1 mm와 0.2 mm로 비균일하게 분할을 하였다.

이처럼 격자를 분할할 경우 그림 3과 같은 두 가지의 유전체를 포함하는 Yee 셀이 생기게 되며 이때 사용할 수 있는 FDTD 수식의 유도는 다음과 같다.

새로운 수식은 맥스웰 방정식의 적분형인 식 (1)과 (2)로부터 유도된다. 그림 4는 그림 3의 전기 셀과 자기 셀에서 E_z 와 H_z 를 포함하는 평면이다.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \iint \vec{D} \cdot \vec{ds} \quad (1)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad (2)$$

그림 4의 평면에서 유전체의 경계조건으로부터 두 매질의 경계에 수직인 전속밀도 $D_x (= \epsilon E_x)$ 와 자계 H_x 그리고 두 매질의 경계에 접선방향인 자계 H_y, H_z 와 전계 E_y, E_z 는 연속한다. 선적분시 각

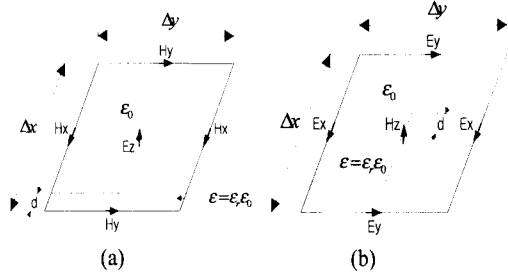


그림 4. 두 가지의 유전체를 포함하는 Yee 셀에서
(a) Ez와 (b) Hz를 포함하는 평면

Fig. 4. Two-dimensional cuts of Yee cells containing two dielectric materials for (a) Ez and (b) Hz.

평면의 선분에 존재하는 D_x , E_y 와 H_x , H_y 는 일정하고 면적분시 각 평면에서의 E_z 와 H_z 는 일정하다고 가정한다. 위와 같은 조건을 식 (1)과 (2)에 적용하고 시간에 대한 미분은 중심차분을 이용하여 정리하면 식 (3), (4)를 얻을 수 있다.

$$E_z |_{i,j,k}^{n+1} = E_z |_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_{r,nf} \epsilon_0 \Delta x} \cdot (H_y |_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_y |_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\epsilon_{r,nf} \epsilon_0 \Delta y} (H_x |_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_x |_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}) \quad (3)$$

$$H_z |_{i,j,k}^{n+1/2} = H_z |_{i,j,k}^{n-1/2} + \frac{\mu_{r,nf} \Delta t}{\mu_0 \Delta y} \cdot (E_x |_{i,j+1/2,k}^n - E_x |_{i,j-1/2,k}^n) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} (E_y |_{i+1/2,j,k}^n - E_y |_{i-1/2,j,k}^n) \quad (4)$$

여기에서, $\epsilon_{r,nf} = (1 - R + \epsilon_r R)$, $\mu_{r,nf} = (1/2 + R + \epsilon_r(1/2 - R))$, $R = d/\Delta x$ 이다.

나머지 E_x , E_y , H_x , H_y 에 대한 수식들도 위와 같은 방법에 의해서 구해질 수 있으며 각각 식 (5)~(8)과 같다.

$$E_x |_{i,j,k}^{n+1} = E_x |_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} \cdot (H_z |_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z |_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} (H_y |_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y |_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}) \quad (5)$$

$$E_y |_{i,j,k}^{n+1} = E_y |_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_{r,nf} \epsilon_0 \Delta z} \cdot (H_x |_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_x |_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\epsilon_{r,nf} \epsilon_0 \Delta x} (H_z |_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_z |_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}) \quad (6)$$

$$H_x |_{i,j,k}^{n+1/2} = H_x |_{i,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} \cdot (E_y |_{i,j,k+1/2}^n - E_y |_{i,j,k-1/2}^n) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} (E_z |_{i,j+1/2,k}^n - E_z |_{i,j-1/2,k}^n) \quad (7)$$

$$H_y |_{i,j,k}^{n+1/2} = H_y |_{i,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} \cdot (E_z |_{i+1/2,j,k}^n - E_z |_{i-1/2,j,k}^n) - \frac{\mu_{r,nf} \Delta t}{\mu_0 \Delta z} (E_x |_{i,j,k+1/2}^n - E_x |_{i,j,k-1/2}^n) \quad (8)$$

식 (3)~(8)을 이용하면 두 가지의 유전체를 포함하는 Yee 셀의 전계와 자계를 구할 수 있다.

III. Suspended Stripline의 특성 임피던스와 유효유전을 계산

그림 1에 보여지는 suspended stripline을 해석하기 위해서 공간의 격자 분할은 앞 절에서 이미 설명된 것처럼 그림 2와 같이 분할하였고 시간 스텝 (Δt)은 Courant의 안정조건을 만족시키도록 하기 위해서 3×10^{-13} s로 하였다. 시뮬레이션을 위해서 사용된 전체 셀의 수는 $40 \times 50 \times 200$ (그림 2 참조)이며, 전원(source)은 변조된 Gaussian 펄스로 넣었고 전원을 인가한 포트와 다른 한쪽 끝단의 흡수경계조건으로 처리된 포트에서 각각 130 셀과 70 셀 씩 떨어진 곳에서 전류($i(t)$), 전압($v(t)$), 전하($q(t)$) 및 전속($\phi(t)$)을 구한 후 Matlab에서 지원되는 FFT를 이용해서 주파수 영역으로 변환했다. 전류, 전압, 전하 및 전속은 본 논문에서 제안된 FDTD법(식 (3)~(8)을 이용)을 사용해 얻어진 전계와 자계를 참고문헌 [3]에서 제안한 방법에 넣어서 구해진다. 이때 suspended stripline 기관의 유전상수 ϵ_r 은 3.27이며 $d = 0.031$ mm이다.

이렇게 구해진 주파수영역에서의 전류($I(f)$), 전압($V(f)$), 전하($Q(f)$)와 전속($\Psi(f)$)을 식 (9)와 식

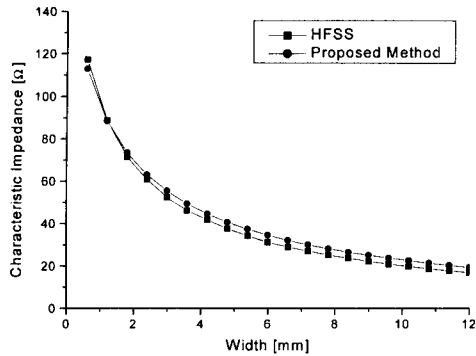


그림 5. 신호선의 폭에 따른 suspended stripline의 특성 임피던스

Fig. 5. Characteristic impedance of the suspended stripline.

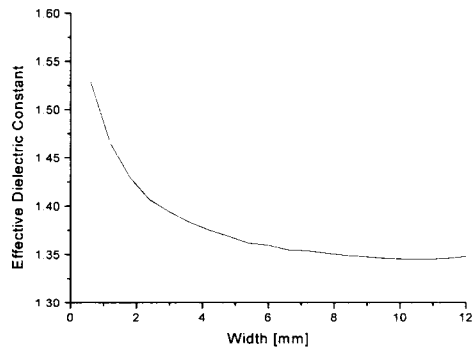


그림 6. 신호선의 폭에 따른 suspended stripline의 유효유전율

Fig. 6. Effective dielectric constant of the suspended stripline.

(10)에 대입하여 커패시턴스($C(f)$)와 인덕턴스($L(f)$)를 구하고 이 결과를 식 (11)과 식 (12)에 대입하면 각각 suspended stripline의 특성 임피던스($Z_0(f)$)와 유효유전율($\epsilon_{eff}(f)$)을 구할 수 있으며^{[3],[4]} 그 결과는 그림 5와 그림 6에 나타나 있다.

$$C(f) = \frac{Q(f)}{V(f) \cdot \Delta z} \quad (9)$$

$$L(f) = \frac{\Psi(f)}{I(f) \cdot \Delta z} \quad (10)$$

$$Z_0(f) = \sqrt{\frac{L(f)}{C(f)}} \quad (11)$$

$$\epsilon_{eff}(f) = c_0^2 L(f) \cdot C(f) \quad (12)$$

그림 5에 보여지는 것처럼 본 논문에 제안된 방

법에 의해서 얻어진 특성 임피던스는 Ansoft HFSS에 의해서 얻어진 특성 임피던스와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 1과 같은 크기를 갖는 suspended stripline의 경우 첫 번째 고차모드인 TE₁₀ 모드가 9 GHz 근방에서 발생하므로 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과들은 사용범위가 9 GHz 이하로 제한된다.

IV. Suspended Stripline 저역통과 필터 설계

본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 다음과 같은 특성을 갖는 저역통과 필터를 설계하고 제작해 보았다.

차단주파수	:	fc = 4 GHz
필터의 단수	:	N = 5
필터응답특성	:	체비세프형
통과대역리플	:	L _{Ar} = 0.1 dB
입출력임피던스	:	50 Ω

위와 같은 저역통과 필터를 suspended stripline으로 구현하기 위해서 낮은 임피던스를 갖는 선로 부분과 높은 임피던스를 갖는 선로 부분을 그림 5와 6으로부터 다음과 같이 정의하였다.

낮은 특성 임피던스 선로 :

$$Z_0 = 24.961 \, \Omega, \epsilon_{r,eff} = 1.3431, w(\text{선로폭}) = 9.0 \text{ mm}$$

높은 특성 임피던스 선로 :

$$Z_0 = 88.250 \, \Omega, \epsilon_{r,eff} = 1.4628, w(\text{선로폭}) = 1.2 \text{ mm}$$

낮은 특성 임피던스 선로와 높은 특성 임피던스 선로는 제작상의 용이성을 위하여 각각 선로폭을 9.0 mm와 1.2 mm로 선정하였다. 이와 같은 선로를 이용하여 구현된 suspended stripline 저역통과 필터의 신호선의 패턴은 그림 7과 같다. Z_H와 Z_L은 각각 높은 임피던스 선로와 낮은 임피던스 선로를 나타낸다. 이미 잘 알려진 설계방법^[5]에 의해서 최종 계산된 suspended stripline 저역통과 필터의 각 선로의 길이는 표 1과 같다.

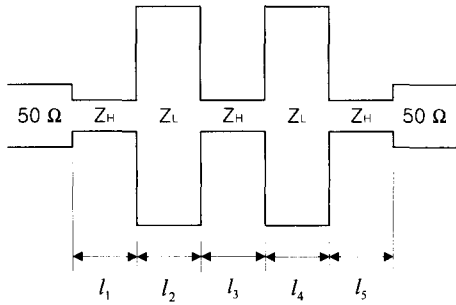


그림 7. Suspended stripline 저역통과 필터 신호선의 패턴

Fig. 7. The signal line pattern of a suspended stripline lowpass filter.

표 1. Suspended stripline 저역통과 필터 각 선로의 길이

Table 1. The length of each section.

	길이 [mm]
$l_1 = l_5$	6.6717
$l_2 = l_4$	4.7426
l_3	9.7164

설계된 suspended stripline 저역통과 필터를 ADS Momentum을 이용해서 시뮬레이션한 결과가 그림 8에 보여진다. 그 결과 차단주파수가 약 0.1 GHz정도 내려갔으며 반사손실이 이론치에 비해 약 3 dB 정도 커진 것을 알 수 있는데 이것은 주로 필터 설계시 낮은 임피던스 선로와 높은 임피던스 선로 사이의 스텝에서 발생하는 기생커패시턴스를 고려하지 못한 것으로 인해 발생한 오차로 생각된다. 본 논문의 목적이 필터의 설계에 있지 않고 제안된 방법과 계산된 결과들의 유용성 검증에 있기 때문에

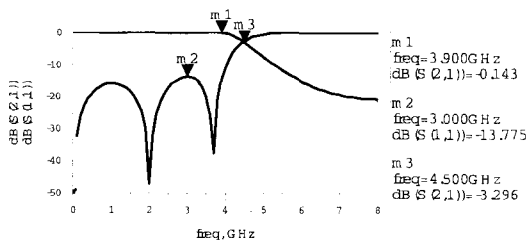


그림 8. 설계된 suspended stripline의 특성

Fig. 8. Characteristics of the designed suspended stripline lowpass filter.

기생커패시턴스에 대해 신중히 고려하지 않았다. 설계된 필터의 양 끝단은 측정을 위해서 그림 7과 같이 50 Ohm 선로로 연장되어 있는데 50 Ohm 선로의 폭은 그림 5로부터 3.5197 mm임을 알 수 있고 이 선로의 길이에 따라 시뮬레이션된 필터 특성의 변화가 없는 것으로 보아 그림 5와 그림 6의 계산결과에 거의 오차가 없는 것으로 생각된다.

V. Suspended Stripline 저역통과 필터 제작 및 측정

Suspended stripline 저역통과 필터를 구성하는 의

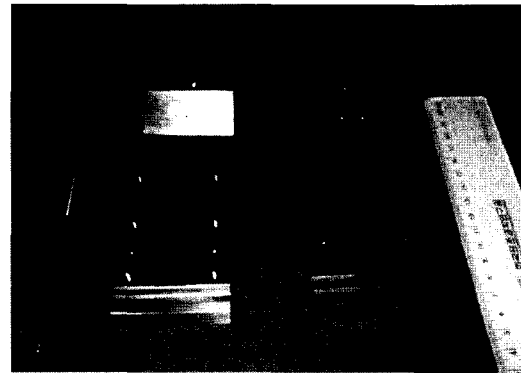


그림 9. 제작된 suspended stripline의 해부도

Fig. 9. Disassembled picture of a fabricated suspended stripline.

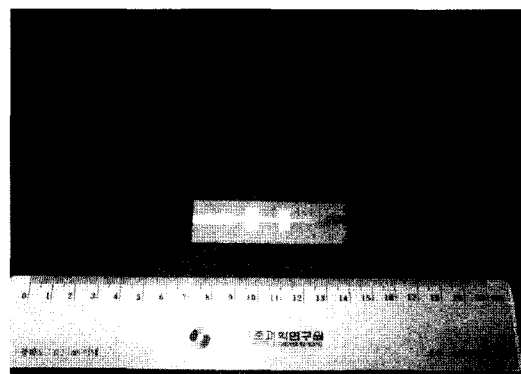


그림 10. 제작된 suspended stripline 저역통과 필터 신호선의 패턴

Fig. 10. The pattern of the signal line of the fabricated suspended stripline losspass filter.

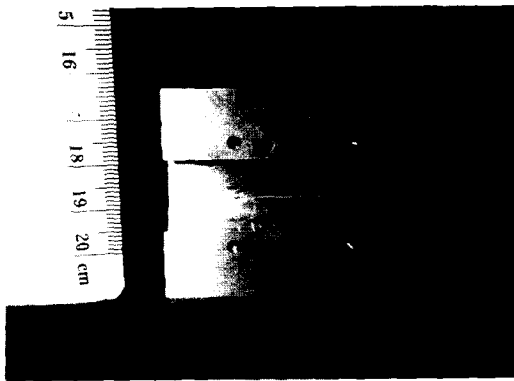


그림 11. 제작된 suspended stripline의 구조
Fig. 11. The structure of the fabricated suspended stripline.

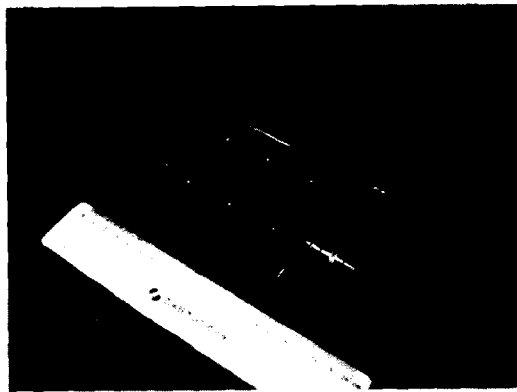


그림 12. 제작된 suspended stripline의 전체 모양
Fig. 12. The fabricated suspended stripline lowpass filter.

박들은 그림 9에 보여지는 네 조각의 금속(황동: brass)으로 제작되었다. 네 조각 중 아래에 있는 두 조각은 그림 1에 보여지는 구조의 최외곽에 있는 접지를 구성하며 위 두 조각은 각각 입·출력 포트를 구현하기 위해서 제작되었다. 기판은 Rogers사의 TMM 3(두께 : 0.381 mm, 유전상수 : 3.27)을 이용해서 제작하였다. 제작된 신호선의 패턴은 그림 10에 보여진다.

조합하여 제작된 suspended stripline의 구조와 필터의 전체 모양은 각각 그림 11과 그림 12에 나타나 있다.

제작된 suspended stripline 저역통과 필터의 측정된 특성은 그림 13에 보여진다. 제작된 suspended

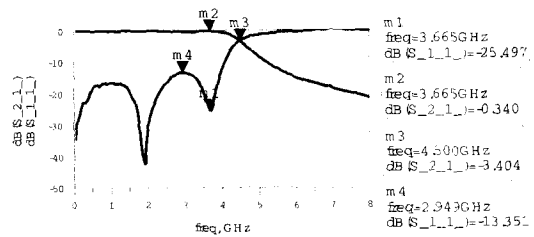


그림 13. 제작된 suspended stripline의 측정된 특성
Fig. 13. The measured characteristics of the fabricated suspended stripline lowpass filter.

stripline 저역통과 필터는 삽입손실이 시뮬레이션 결과에 비해 0.34 dB 정도 커졌는데 이것은 제작된 필터가 황동을 이용해서 최외곽 접지를 만들었고 신호선을 구리기판을 사용하여 만들었기 때문에 발생한 도체 손실에서 기인하는 것이며 반사손실은 약 0.4 dB 정도 커졌다. 3 dB 차단주파수는 4.5 GHz 정도로 시뮬레이션 결과와 거의 일치한다.

VI. 결 론

본 논문에서는 FDTD법을 이용하여 효율적으로 suspended stripline의 특성을 계산하기 위해 하나의 Yee 셀내에 서로 다른 두 유전체가 존재할 때 사용할 수 있는 새로운 FDTD 수식을 유도하였으며 이렇게 유도된 수식을 이용한 FDTD법으로 suspended stripline의 특성 임피던스와 유효유전율을 계산하였다.

본 논문에서 제안된 방법과 이를 이용해 얻어진 계산 결과의 유용성을 입증하기 위해서 차단주파수가 4 GHz인 5단 저역통과 필터를 설계 및 제작해 보았다. 본 논문에서 얻어진 계산 결과를 이용해 설계된 필터의 특성은 차단주파수가 3.9 GHz로 약 0.1 GHz 정도 내려갔으며 반사손실이 이론치에 비해 약 3 dB 정도 커진 것을 알 수 있는데 이것은 주로 필터 설계시 낮은 임피던스 선로와 높은 임피던스 선로 사이의 스텝에서 발생하는 기생커패시턴스를 고려하지 못한 것으로 인해 발생한 오차로 생각된다. 제작된 필터의 삽입손실은 시뮬레이션 결과에 비해 0.34 dB 정도 커졌는데 이것은 도체 손실에 의한 것이고 반사손실은 0.4 dB 정도 커졌다. 3 dB 차

단주파수는 4.5 GHz 정도로 시뮬레이션 결과와 거의 일치하였다.

이와 같은 결과들로부터 일반적인 상용 CAD tool들에서는 지원되지 않는 밀리미터파 대역에서 사용되는 SMM 선로의 특성에 대한 계산이 가능하게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] Panayiotis A. Tirkas and Kenneth R. Demarest, "Modeling of Thin Dielectric Structures Using the Finite-Difference Time-Domain Technique", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no. 9, pp. 1338-1344, Sept. 1991.
- [2] James G. Maloney and Glenn S. Smith, "The Efficient Modeling of Thin Material Sheets in the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, no. 3, pp. 323-330, March 1992.
- [3] L. L. Liou, M. Mah and J. Cook, "An Equivalent Circuit Approach for Microstrip Component Analysis Using the FDTD Method", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, no. 10, pp. 330-332, Oct. 1998.
- [4] Christian Schuster and Wolfgang Fichtner, "Explanation and Extension of the Equivalent Circuit Approach for Parameter Extraction", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 9, no. 10, pp. 392-394, Oct. 1999.
- [5] G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching networks*, New York: McGraw-Hill, 1964.

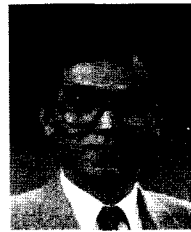
남 윤 권



1992년 2월: 충남대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 충남대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1994년 3월~현재: 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] Microwave and millimeter-wave passive devices, RF MEMS and Antennas

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1984년 12월: University of California, Santa Barbara (공학박사)
 1977년~1978년: Ruhr University,

Bochum, Germany, 방문교수
 1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson
 1994년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson
 2000년~2001년: 한국전자파학회 회장
 1976년~현재: 충남대학교 공과대학 전파공학과 교수
 [주 관심분야] Microwave and millimeter-wave passive devices, EMC/EMI topics and Antennas