

# 다층구조에서 도체 두께를 고려한 비대칭 결합선로의 특성해석

정희원 윤남일\*, 홍익표\*, 박한규\*

## Characteristic Analysis of the Asymmetric Coupled Microstrip Lines with Finite Metallization Thickness in the Multilayered Structure

Nam-Il Yun\*, Ic-Pyo Hong\*, Han-Kyu Park\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 준정적 해석방법을 사용하여 다층 구조에서 유한한 도체 두께를 갖는 비대칭결합 마이크로스트립(ACM : Asymmetric Coupled Microstrip) 선로의 특성을 연구하였다. 준정적 해석방법으로서 모드정합법을 이용하였으며, ACM 선로의 특성 임피던스와 유효 유전율 상수가 도체 두께의 함수로 나타나는 결과를 얻었다. 수치 해석 결과를 통해서 단층 및 다층구조에서 도체 두께의 변화로 인하여 ACM 선로의 전파특성이 변화되는 것으로 나타났다.

### ABSTRACT

In this paper, the characteristics of the asymmetric coupled microstrip(ACM) lines with finite metallization thickness are investigated using the quasi-static analysis in the multilayered structure. By mode-matching method as the quasi-static analysis, the characteristic impedances and effective dielectric constants in ACM lines are obtained as a function of metallization thickness. The numerical results show that the propagation characteristics of ACM lines in the single and multilayered structure will be changed by the variation of metallization thickness.

### 1. 서 론

전송선로에서 선로의 도체 두께가 전송선로의 전파특성에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 이루어져왔다<sup>[1][2]</sup>. 더욱이 단일선로가 아니라 결합선로의 경우는 도체 두께가 전송선로의 전파특성에 미치는 영향이 보다 복잡하여 해석하기가 쉽지 않고, 특히 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits)와 같은 소형 집적 전송선로에서는 선로의 폭에 비해 도체 두께가 견줄만한 크기가 되므로, 이러한 전송선로의 전파특성을 고려한 전기적 파라미터를 정확히 설계하기 위해서는 도체 두께에 의한

영향을 무시할 수가 없다<sup>[2]</sup>. 그러나 기존의 연구들은 도체 두께가 전송선로의 전파특성에 미치는 영향에 대하여 대칭 결합 마이크로스트립(SCM : Symmetric Coupled Microstrip) 선로에 한정되어 연구되었는데<sup>[3][4]</sup>, 대칭결합 선로의 경우는 비대칭 결합선로의 특수한 경우로 일반적인 경우는 비대칭 결합선로의 경우가 되고, 본 논문에서는 이를 다층 구조에서 비대칭 결합을 이루는 ACM 선로의 경우로 일반화 시켜서 전송선로의 전파특성을 해석하였다.

ACM 선로의 설계와 특성 표현에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔는데<sup>[3][5]</sup>, 이러한 비대칭 결합선로의 응용분야로는 알려진 대로 여파기, 방향결합기,

\* 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 전파통신연구실 (niyun@mail.mjc.ac.kr)  
논문번호 : 99388-0920, 접수일자 : 1999년 9월 20일

위상전이기와 임피던스 정합 회로망 등이 있으며, 이러한 비대칭 결합 마이크로스트립 선로의 장점은 다양한 회로를 설계하는 데 있어서 대칭 결합선로에 비하여 임피던스 전달특성 등에서 설계의 유연성을 더욱 가질 수 있다는 점이다<sup>[5]</sup>. 그러나 최근까지의 ACM 선로 해석에 대한 연구결과들은 무한히 얇은 도체 두께를 가정한 것으로<sup>[3][4]</sup>, 도체 두께를 고려하지 않은 대략적인 설계 파라미터 값들만을 예측할 수 있다는 단점을 갖는다.

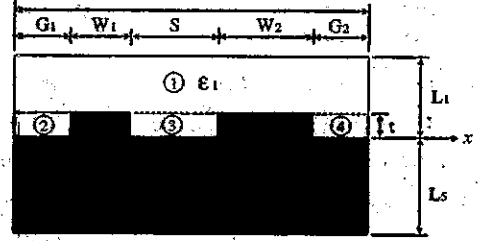
MMIC와 같은 마이크로파 집적회로에 사용되는 전송선로에서는 선로에 인가되는 전파의 파장에 비해 해석하고자 하는 구조의 크기가 작기 때문에, 준정적해석(quasi-static analysis)을 사용하여도 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다<sup>[6]</sup>. 유한한 도체 두께를 갖는 구조들에 대한 준정적해석의 해법은 혼합주파수 공간영역법(mixed spectral-space domain method)<sup>[2]</sup>, 등각사상법(conformal mapping method)<sup>[7]</sup>, 경계요소법(boundary element method)<sup>[8]</sup>, 선로법(the method of lines)<sup>[9]</sup> 등 여러 가지 방법을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 다층구조에서 유한한 도체 두께를 갖는 ACM 선로의 특성을 해석하기 위해서, 준정적해석 방법 중에서 다층 구조의 해석에 적합하고, 수식 전개가 용이한 모드정합법(mode-matching method)<sup>[10]</sup>을 사용하였다.

## II. 구조 및 해석

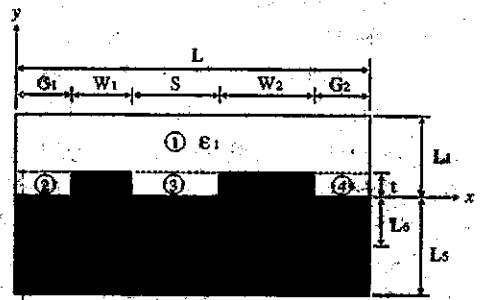
단층 및 다층 유전체 기판으로 이루어진 전송선로 구조에서 유한한 도체 두께를 갖는 ACM 선로를 그림 1(a)와 그림 1(b)에 나타내었다. 본 논문에서는 그림 1(a) 구조에 대해서는 5개의 영역으로 나누고, 그림 1(b)에 대해서는 6개의 영역으로 나누어 해석하였으며, 구조 내에 존재하는 모든 도체는 완전도체를 가정하였다.

그림 1(a)와 그림 1(b)의 구조에서 전위함수는 라플라스 방정식(Laplace's equation)과 경계조건을 만족하는 항으로 구성된 푸리에-정현파 급수(Fourier-sine series)로 나타낼 수 있는데, 그림 1(a)의 구조에서 5개 영역의 각 전위함수는 식 (6)을 생략한 나머지 식 (1)~(5)로 표현할 수 있으며 그림 1(b)의 구조에서 6개 영역의 각 전위함수는 식 (1)~(6)으로 각각 나타낼 수 있다.

$$\phi_1 = \sum_{n=1}^N A_n \left[ e^{\frac{j\pi(y-L)}{L}} - e^{-\frac{j\pi(y-L)}{L}} \right] \sin \frac{j\pi x}{L} \quad (1)$$



(a) 단층구조



(b) 다층구조

그림 1. 비대칭 결합 마이크로스트립(ACM) 선로

$$\phi_2 = \frac{V_1}{G_1} x + \sum_{n=1}^N \left[ B_n e^{\frac{j\pi x}{G_1}} + C_n e^{-\frac{j\pi x}{G_1}} \right] \sin \frac{j\pi x}{G_1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \phi_3 = & \frac{(V_2 - V_1)[x - (G_1 + W_1)]}{S} + V_1 \\ & + \sum_{n=1}^N \left[ P_n e^{-\frac{j\pi x}{S}} + Q_n e^{-\frac{j\pi x}{S}} \right] \\ & \times \sin \frac{j\pi [x - (G_1 + W_1)]}{S} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \phi_4 = & \frac{V_2(L-x)}{G_2} \\ & + \sum_{n=1}^N \left[ D_n e^{\frac{j\pi x}{G_2}} + E_n e^{-\frac{j\pi x}{G_2}} \right] \\ & \times \sin \frac{j\pi [x - (L - G_2)]}{G_2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\phi_5 = \sum_{n=1}^N H_n \left[ e^{\frac{j\pi(y+L)}{L}} - e^{-\frac{j\pi(y+L)}{L}} \right] \sin \frac{j\pi x}{L} \quad (5)$$

$$\phi_6 = \sum_{n=1}^N \left[ F_n e^{\frac{j\pi x}{L}} + G_n e^{-\frac{j\pi x}{L}} \right] \sin \frac{j\pi x}{L} \quad (6)$$

여기서  $V_1$ 과  $V_2$ 는 각각의 스트립에 인가된 전위이고,  $A_n, B_n, C_n, D_n, E_n, F_n, G_n, H_n, P_n$ 과  $Q_n$

은 결정되어야 할 계수들이다. 각 전위의 급수 전개는 각 영역에 대한 각기 다른 모드 수  $N_1, N_2, N_3$  과  $N_4$ 로 나누어진다. 각 영역의 경계로서  $y=t$ ,  $y=0$ 과  $y=-L_6$ 인 평면과 각 영역에 대응하는  $x$ 의 각 구간으로서  $0 < x < L$ ,  $0 < x < G_1$ ,  $G_1 + W_1 < x < G_1 + W_1 + S$ 와  $L - G_2 < x < L$ 에 대하여 경계조건을 적용하여 풀면  $B_j, C_j, D_k, E_k, F_i, G_i, P_m$ 과  $Q_m$ 은  $A_i$ 와  $H_i$ 에 종속적인 변수들로 유도되는데, 먼저  $A_i$ 와  $H_i$ 의 계수를 행렬의 원소 형태로 구해 나머지 계수들을 순서대로 구한 후 급수형태의 전위함수를 완성하고, 각 영역의 전위함수로부터  $x-y$  방향의 전계성분을 구하여 각각의 스트립을 둘러싼 폐곡면으로 발산되는 전하량을 계산한다.

그림 1(a),(b)의 구조에서 차폐 SCM 선로라면 대칭 및 차폐구조의 특성에서 우모드(Even Mode)와 기모드(Odd Mode)에서 가정할 수 있는 자계벽과 전계벽이 중심부에 위치한 대칭구조를 이루므로 한 쪽 스트립의 전하량만을 계산하여 구할 수 있었으나<sup>[1]</sup>, 본 논문에서 해석한 비대칭 구조의 c-모드와  $\pi$ -모드의 두 가지 전송모드<sup>[5]</sup>에 대해서 특성 임피던스와 유효 유전율 상수는 각각의 스트립에서의 전하량을 계산함으로써 구할 수 있다<sup>[11]</sup>.

### ■. 수치해석 결과

#### 1. 단층구조에서 도체 두께를 고려한 ACM선로

그림 1(a)의 구조에서  $G_1 = G_2 = 4\text{ mm}$ ,  $W_1 = 0.6\text{ mm}$ ,  $W_2 = 1.2\text{ mm}$ ,  $L_1 = 10\text{ mm}$ ,  $L_5 = 0.635\text{ mm}$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_0$  와  $\epsilon_5 = 9.6\epsilon_0$  일 때의 유한한 도체 두께를 갖는 ACM 선로의 특성 임피던스와 유효 유전율 상수를 계산하였다. 여기서  $\epsilon_0$  는 공기중의 유전율 상수이다.

그림 1(a)의 ACM 선로에서 도체 두께의 변화가  $t=0.01 \sim 0.3\text{ mm}$ , 스트립 간격의 변화가  $S=0.1 \sim 0.6\text{ mm}$ , 모드 수가  $N_1=N_2=N_3=N_4=75$ 로 동일할 때의 c-모드와  $\pi$ -모드의 특성 임피던스와 유효 유전율 상수를 계산하여 그림 2와 그림 3에 각각 나타내었다.

그림 2는 도체 두께  $t$ 의 변화에 대한 스트립 간격  $S$ 에 따른 특성 임피던스 값으로 c-모드일 때의  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$ 과  $\pi$ -모드일 때의  $Z_{\pi 2}$ 가 도체 두께의 변화에 따라서 변화되는 것을 보여주고 있다.  $\pi$ -모

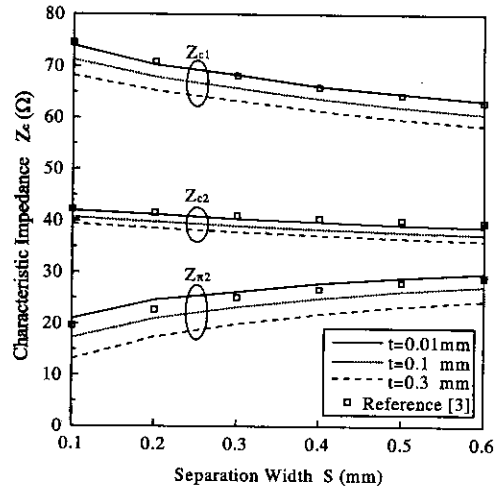


그림 2. 도체 두께  $t$ 의 변화에 대한 스트립 간격  $S$ 에 따른 c-모드와  $\pi$ -모드의 특성 임피던스  $Z_c$ 의 변화

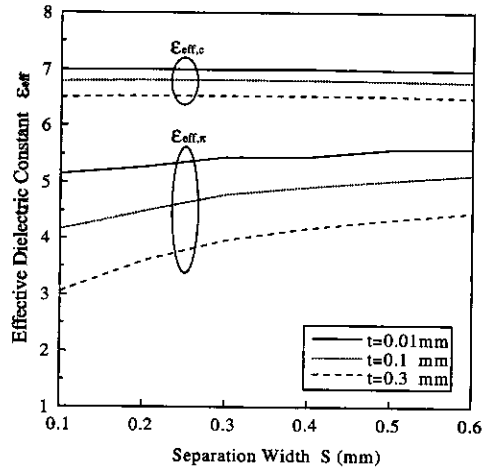


그림 3. 도체 두께  $t$ 의 변화에 대한 스트립 간격  $S$ 에 따른 c-모드와  $\pi$ -모드의 유효 유전율 상수  $\epsilon_{eff}$ 의 변화

드일 때의 특성 임피던스 값  $Z_{\pi 1}$ 은 그림 2에서  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$ 와  $Z_{\pi 2}$ 의 비가 용이하도록 편리상 생략하였다. 그림 3의 결과 역시 그림 2와 같은 해석 조건에서, 도체 두께  $t$ 의 변화에 대한 스트립 간격  $S$ 에 따른 유효 유전율 상수 값으로 c-모드일 때의  $\epsilon_{eff,c}$ 와  $\pi$ -모드일 때의  $\epsilon_{eff,\pi}$ 가 도체 두께의 변화에 따라서 변화되는 모습을 보여주고 있다.

본 논문에서 행해진 연구결과에 대하여 그 유효성을 입증하기 위하여, 모드정합법을 이용하여 본 논문에서 얻은 특성 임피던스 계산 결과와 다른 해석방법을 사용한 기존 이론의 연구결과<sup>[3]</sup>와 비교한

결과를 그림 2에 제시하였다. 그림 2에서 기존의 연구 결과로 얻어진 무한히 얇은 도체 두께를 가정했을 경우의 c-모드와  $\pi$ -모드에 대한 특성 임피던스와, 본 논문에서 같은 구조를 가정하고  $t=0.01$  일 때 얻은 특성 임피던스 값이 매우 근사하다는 결과를 얻었다.

그림 2의 결과로 도체 두께가 비대칭 결합선로의 경우에도 특성 임피던스를 결정하는 중요한 변수 중 하나가 된다는 것을 알 수 있다. 그림 2의 결과에서 이 구조에서의 도체 두께가  $t=0.01, 0.1, 0.3\text{mm}$ 로 변화할 때 ACM 선로의 특성 임피던스가 c-모드일 때 6~8%,  $\pi$ -모드 일 때 18~39% 변화되는 것으로 나타났다.

2. 다층구조에서 도체 두께를 고려한 SCM선로

그림 1(b)의 구조에서  $G_1 = G_2 = 3.5\text{mm}$ ,  $W_1 = W_2 = 1\text{mm}$ ,  $S = 1\text{mm}$ ,  $L_1 = 10\text{mm}$ ,  $L_5 = 2\text{mm}$ ,  $L_6 = 1\text{mm}$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_5 = \epsilon_0$ 와  $\epsilon_6 = 4\epsilon_0$  일 때의 유효한 도체 두께를 갖는 SCM 선로의 특성 임피던스와 유효 유전율 상수를 계산하였다. 그림 1(b)의 대칭결합 선로구조에서 도체 두께의 변화가  $t = 0.1 \sim 0.3\text{mm}$ , 모드 수가  $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 200$ 으로 동일할 때, c-모드와  $\pi$ -모드의 특수한 형태인 우모드와 기모드의 특성 임피던스와 유효 유전율 상수를 계산하여 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 우모드와 기모드의 경우에 대하여, 도체 두께  $t$ 의 함수로 표현되는 특성 임피던스 값을  $Z_{0e}$ ,  $Z_{0o}$ 로 각각 나타내고, 유효 유전율 상수 값을

$\epsilon_{eff,o}$ 와  $\epsilon_{eff,e}$ 로 나타내었다.

본 논문에서 해석한 다층구조에서 도체 두께를 고려한 ACM 선로의 특성에 대한 연구결과의 타당함을 입증하기 위하여, 이를 SCM 선로에 적용하여 그림 4에서 본 논문의 해석방법으로 얻은 특성 임피던스와 유효 유전율 상수의 수치해석 결과와 다른 해석방법을 사용하여 SCM 선로에 대해서 얻은 기존의 연구결과<sup>[2]</sup>를 비교하여 매우 근사하게 일치함을 보였다.

3. 다층구조에서 도체 두께를 고려한 ACM선로

그림 1(b)의 구조에서  $G_1 = 3.5\text{mm}$ ,  $W_1 = 1\text{mm}$ ,  $S = 1\text{mm}$ ,  $W_2/W_1 = 1 \sim 2$ ,  $L = 10\text{mm}$ ,  $L_5 = 2\text{mm}$ ,  $L_6 = 1\text{mm}$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_0$ ,  $\epsilon_5 = 10.2\epsilon_0$ 와  $\epsilon_6 = 4\epsilon_0$  일 때의 유효한 도체 두께를 갖는 ACM 선로의 특성 임피던스와 유효 유전율 상수를 계산하였다. 그림 1(b)의 ACM 선로에서 도체 두께의 변화가  $t = 0.01 \sim 1.0\text{mm}$ , 모드 수가  $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 80$  일 때의 c-모드와  $\pi$ -모드의 특성 임피던스와 유효 유전율 상수를 계산하여 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

그림 5에서 c-모드와  $\pi$ -모드에 대하여 얻은 특성 임피던스 결과가 도체 두께  $t$ 에 따라서 변화되는 결과를 얻었다. 그림 5의 결과에서 도체 두께가  $t = 0.01 \sim 1\text{mm}$ 로 변화할 때, 이 구조에서의 특성 임피던스는 두 스트립 선로 폭의 비가  $W_2/W_1 = 1.0$ 으로 대칭인 경우에 우모드에서 30%, 기모드에서 39% 변화하는 것과 마찬가지로, 비대칭인  $W_2/W_1 = 1.5 \sim 2.0$ 의 경우에도 c-모드에서 28~30%,

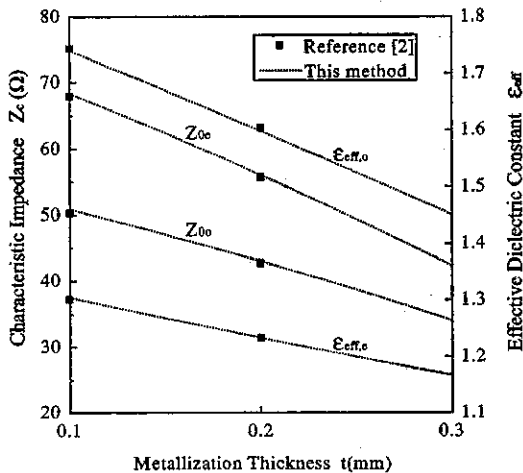
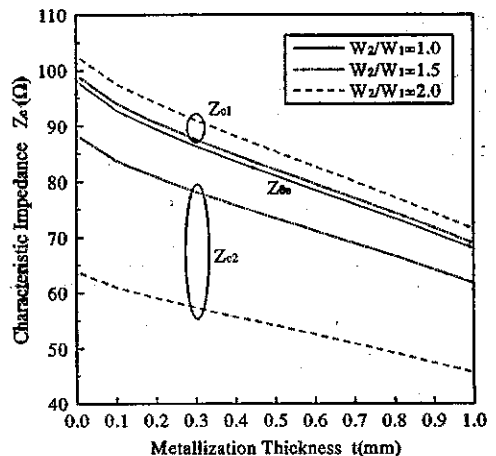
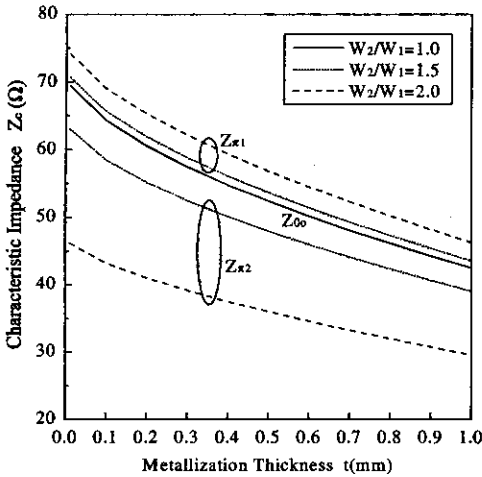


그림 4. 도체 두께 변화에 대한 SCM 선로의 특성 임피던스와 유효 유전율 상수의 변화



(a) c-모드



(b)  $\pi$ -모드

그림 5. 도체 두께  $t$ 의 변화에 따른 ACM 선로의 특성 임피던스  $Z_c$ 의 변화

$\pi$ -모드에서 36~38% 변화되는 것으로 나타났다.

그림 2, 그림 3의 단층구조에서의 결과와 그림 5, 그림 6의 다층구조에서의 결과에서 ACM 선로의 전기적 특성을 설계하는 데 공통적으로 적용되는 설계 파라미터로서 스트립의 폭, 스트립 간격, 유전체 기판의 높이와 유전율 등과 함께 도체 두께 역시 중요한 설계 변수가 된다는 것을 알 수 있었다.

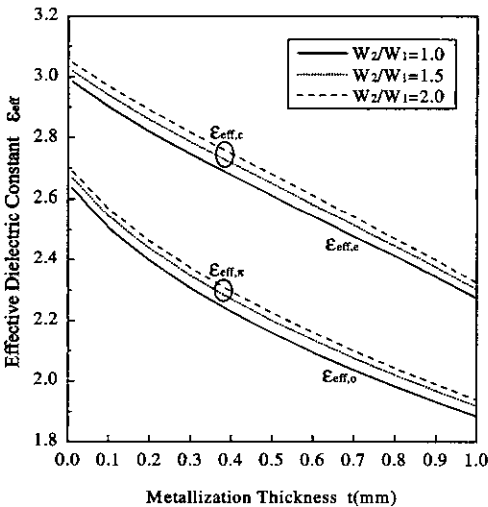


그림 6. 도체 두께  $t$ 의 변화에 따른 ACM 선로의 유효 유전율 상수  $\epsilon_{eff}$ 의 변화

#### IV. 결론

본 논문에서는 준정적 해석방법인 모드정합법을 사용하여 다층 구조에서 유한한 도체 두께를 갖는 비대칭결합 마이크로스트립 선로의 특성을 해석하고, 도체 두께의 변화에 따른 특성 임피던스와 유효 유전율 상수와 같은 전파특성을 c-모드와  $\pi$ -모드에 대하여 구하였다. 수치해석 결과를 통해서 이들 구조에서 도체 두께의 변화로 인하여 ACM 선로의 전파특성이 변화되는 결과를 얻었다.

본 논문을 통하여 단층 및 다층구조에서 ACM 선로에서 도체 두께가 다른 설계 변수들과 마찬가지로 전송선로의 전파특성을 결정하는데 중대한 영향을 미치는 파라미터가 되는 것을 보였으며, 이러한 결과들은 MMIC 회로를 더욱 소형화하는 목표에 새로운 설계 변수로 첨가될 수 있을 것이며, 향후 이를 이용한 실제적인 MMIC 회로설계 및 연구 개발도 계속되어야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] N. H. Zhu, W. Qiu, E. Y. B. Pun and P. S. Chung, "Quasi-Static Analysis of Shielded Microstrip Transmission Lines with Thick Electrodes," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-45, pp. 288-291, Feb. 1997.
- [2] G. G. Gentili and G. Macchiarella, "Quasi-Static Analysis of Shielded Planar Transmission Lines with Finite Metalization Thickness by a Mixed Spectral-Space Domain Method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-42, pp. 249-255, Feb. 1994.
- [3] S. S. Bedair, "Characteristics of Some Asymmetrical Coupled Transmission Lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 108-110, Jan. 1984.
- [4] S. Kal, D. Bhattacharya and N. B. Chakraborti, "Normal-Mode Parameters of Microstrip Coupled Lines of Unequal Width," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 198-200, Feb. 1984.
- [5] V. K. Tripathi, "Asymmetric Coupled Transmission Lines in an Inhomogeneous Medium,"

*IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-23, pp. 734-739, Sep. 1975.

- [6] H. Jin and M. Bélanger, "General Analysis of Electrodes in Integrated-Optics Electrooptic Devices," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 243-251, Feb. 1991.
- [7] W. Heinrich, "Quasi-TEM Description of MMIC Coplanar Lines Including Conductor-Loss Effects," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-41, pp. 45-52, Jan. 1993.
- [8] T. N. Chang and C. H. Tan, "Analysis of a Shielded Microstrip Line with Finite Metallization Thickness by the Boundary Element Method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-38, pp. 1130-1132, Aug. 1990.
- [9] F. J. Schmückle and R. Pregla, "The Method of Lines for the Analysis of Planar Waveguides with Finite Metallization Thickness," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-39, pp. 107-111, Jan. 1991.
- [10] H. Jin, R. Vahldieck, M. Bélanger and Z. Jacubczyk, "A Mode Projecting Method for the Quasi-Static Analysis of Electrooptic Device Electrodes Considering Finite Metalization Thickness and Anisotropic Substrate," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 2306-2314, Oct. 1991.
- [11] C. Nguyen, "Broadside-Coupled Coplanar Waveguides and Their End-Coupled Band-Pass Filter Applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-40, pp. 2181-2189, Dec. 1992.

선임연구원

1994년 3월~현재 : 명지전문대학 전자과 조교수  
<주관심 분야> 전자기 해석, 마이크로파회로 설계

홍익표(Ic-Pyo Hong)

정회원

1994년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업  
1996년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
2000년 2월 : 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 (공학박사)

<주관심 분야> 전자기 해석, 마이크로파회로 설계

박한규(Han-Kyu Park)

정회원

1941년 6월 21일 생  
1964년 2월 : 연세대학교 전기공학과 졸업  
1968년 2월 : 연세대학교 전기공학과 (공학석사)  
1973년 : 불란서 파리(소르본)대학교 박사과정 수료 (DEA)

1975년 : 불란서 파리6대학교 (Ph.D.)

1976년~1992년 : 연세대학교 전자공학과 교수  
1992년~1998년 : 연세대학교 전파공학과 교수  
1999년~현재 : 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 교수

<주관심 분야> 이동통신, 안테나, 마이크로파 통신, 전파전파

윤남일(Nam-II Yun)

정회원



1985년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 졸업  
1987년 2월 : 연세대학교 전자  
공학과(공학석사)  
1995년 9월~현재 : 연세대학교  
전기·컴퓨터공학과  
박사과정

1987년 2월~1994년 2월 : 삼성전자 통신연구소