

논문 2004-41SD-11-3

코플래너 도파로 구조에서 S-파라미터를 이용한 유효유전상수 실험적 도출

(Experimental Extraction of Effective Permittivity on the Structures of Coplanar Waveguides)

지 용*

(Yong Jee)

요 약

본 논문에서는 초고주파나 밀리미터파 대역에서 코플래너 도파로 구조로부터 S-파라미터를 이용하여 유효유전상수를 도출하는 간단한 방법을 제시하였다. 이 방법은 특성임피던스 Z_0 와 전송선 길이 ℓ 로 주어지는 전송선이 주파수가 변화함에 따라 나타나는 S_{11} 값으로부터 $\beta\ell = n\pi$ 에서 극한적으로 바뀌는 것을 이용하여 유효유전상수 ϵ_{eff} 를 도출하는 기법이다. $\epsilon_r=3.38$ 의 Rogers 4003TM 기판 위에서 실험적으로 얻어진 유효유전상수 값은 2.042로 나타났으며, 기존의 공식으로부터 얻어진 ϵ_{eff} 값은 -3.4%에서 8% 범위의 오차를 보여 주었다. 코플래너 도파로 구조의 유효유전상수 값이 간단한 측정 방법으로 뿐만 아니라 제작된 회로 구조 위에서 직접 측정될 수 있어, 복잡한 회로 구조를 지닌 다른 유전체 재질의 기판 위에서도 측정이 보다 정확하고 간단하게 이루어 질 수 있음을 보여 주었다.

Abstract

This paper proposed a very simple method of extracting an effective permittivity from the data of scattering parameters measured on the transmission line of coplanar waveguides in the frequency range of microwave or millimeter waves. This is an extracting method of an effective permittivity ϵ_{eff} in the case of $\beta\ell = n\pi$ (n =integer), where the value of S_{11} changes abruptly following the operating frequency. The experimental value of the effective permittivity ϵ_{eff} on a dielectric substrate of Rogers 4003TM material of $\epsilon_r=3.38$ showed the value of 2.042, which differs in the error of -3.4% to 8% from those calculated from the previously reported formulae. This result showed that the measurement method was very simple, as well as applied directly to the fabricated circuit patterns, even though the circuit patterns might be complicated or on the substrate of different dielectric materials.

Keywords: effective permittivity, coplanar waveguide, scattering parameter

I. 서 론

코플래너 도파로 구조는 초고주파 및 밀리미터파 영역의 회로설계에서 같은 평면 위에 신호선과 접지면을 형성시키는 장점 때문에 마이크로스트립라인 구조에 비하여 많이 연구되고 있다.^[1-4] 하지만 저렴한 제작비용

과 작은 방사 손실 및 공식화된 특성임피던스를 제공하는 장점을 지닌 코플래너 도파로 구조가 많은 알고리즘과 설계 데이터를 지니고 있는 마이크로스트립라인 구조에 비해 회로설계에 적용하기 어려운 이유는 코플래너 도파로 의 구조적 변화에 따라 변화하는 수동소자 회로 값의 변화를 예측하기 어렵기 때문이다. 특히 유효유전상수와 특성임피던스 값은 코플래너 도파로 구조 변수의 변화에 따라 크게 변화하기 때문에 물리적으로 구현된 코플래너 도파로 구조에서의 유효 유전상수 ϵ_{eff} 와 특성 임피던스 Z_0 값이 기존에 제시된 공식에 의한 계산 값과 잘 일치하지 않는다. 이러한 유효유전상수

* 정회원, 서강대학교 공과대학 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, College of Engineering, Sogang University)

※ 이 연구는 2003년도 서강대학교 교내 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

접수일자: 2004년5월25일, 수정완료일: 2004년10월18일

값의 오차는 설계된 회로에 많은 영향을 미치고 있다.

코프래너 도파로 구조에서의 유효유전상수는 C.P. Wen에 의해서 공식화된 형태로 제시되었고^[7], 코프래너 도파로 구조 변수와의 관계식을 잘 나타내고 있다. 보다 정확한 유효유전상수를 제공하기 위해서 Hilberg는 근사식으로부터 유도된 유효유전상수 공식을 제시하였다.^[8] 전기장의 분포는 근사적으로 유전체 기판 내에서나 공기 중에서 주파수나 코프래너 도파로 구조의 변화에 대해 영향을 받지 않기 때문에 Hilberg의 식은 코프래너 도파로 구조의 윗부분에 유전체가 없는 열린 상태에서 다양하게 사용될 수 있겠다.

유효유전상수가 주파수의 변화에 따라서 그 값이 변화하는 경우에 대해서는 크기가 매우 작기는 하지만 전달 위상계수(transmission phase constant) β 는 주파수에 따라서 비선형적으로 변화하기 때문에 유효유전상수 도출에서는 주파수 변화에 따른 유효유전상수의 변화를 포함시켜야 한다.

한편, Rayit는 실험 및 이론 데이터로부터 코프래너 도파로의 구조적 변화와 주파수 변화에 따른 유효유전상수 공식을 도출하였다.^[4, 10] 이 공식은 코프래너 도파로 구조의 유효유전정수가 구조변수 변화와 주파수의 변화에 따라 변화함을 볼 수 있다.

하지만, 초고주파 및 밀리미터파 대역에서는 코프래너 도파로 구조 변수인 수백 μm 나 되는 전기적 길이 변화가 물리적 설계길이에 비하여 무시할 수 없을 정도이기 때문에 회로 설계 과정에서 주어진 코프래너 도파로 구조 변수가 위의 공식 등에 적용될 때 유효 유전상수 값의 오차를 발생시킨다. 이것은 접지면과 신호선과의 간격에 의해서 형성된 간격 커패시턴스나 인덕턴스가 물리적 길이를 연장시키는 결과로 나타나서 유효유전상수 ϵ_{eff} 의 변화를 예상하지 않기 때문이다.

이러한 문제에 대한 해결방법으로서 설계 제작된 코프래너 도파로 구조로부터 전기적으로 측정된 데이터인 S-파라미터를 이용하면 보다 정확한 유효유전상수를 도출할 수 있겠다.

본 논문에서는 코프래너 도파로 전송선 이론으로부터 제공되는 S-파라미터를 이용하여 실험적으로 얻어진 S_{11} 값이 최소로 되는 주파수를 찾아서 유효유전상수를 도출되는 방법을 제시하였다. 코프래너 도파로 전송선로는 ABCD 매개변수로 표현될 수 있으며, 이로부터 S-파라미터를 도출할 수 있다. 이에 따라, 특성임피던스 Z_0 와 일정한 전송선 길이 l 을 지닌 코프래너 도파로 전송선로는 S_{11} 값으로 나타낼 수 있고, 전기장의

주파수를 변화시킴에 따라 S_{11} 값의 변화가 극한적인 값으로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 즉 S_{11} 값이 극한적으로 바뀌는 주파수를 선정하여 유효유전상수 ϵ_{eff} 를 도출하게 되는 방법이다. 이를 위하여 실험과정에서는 시뮬레이션을 통하여 유효유전상수를 도출하는 과정을 살펴보고, 제작 측정 실험을 통하여 확인하였다.

II. 본 론

코프래너 도파로의 구조에서 유효유전상수는 마이크로스트립라인 구조에서와 마찬가지로 식(1)과 같이 자유공간에서의 전자기파 속도 c 와 매질에서의 위상속도(phase velocity) v_p 로 주어진다. 매질에서의 속도는 유효유전상수와 관계되며 전자기파 매질의 구조에 따라서 많이 변화하기 때문에 각 구조에서의 특성임피던스 Z_0 나 파장 길이 λ_g 를 구하는데 주요 변수로 작용하고 있다.^[5]

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \quad (1)$$

1. 구조변수에 의한 유효유전상수

가. Wen의 유효유전상수

C.P. Wen에 의해서 도출된, conformal mapping 방법에 의한 Schwarz-Christoffel transformation으로부터 구해진, 식(2)의 유효유전상수는 코프래너 도파로 구조 변수인 신호선폭 W , 전극간격 S , 접지면의 폭 C , 유전체 기판 두께 h 에 의해서 유효 유전상수 값을 제시해 준다.^[7] 식(2)는 초기에 기판의 두께를 무한대로 설정하고, 접지면의 크기도 무한대라고 하는 조건으로부터 시작하여 유도된 후 코프래너 도파로의 구조에 따른 제한 조건을 삽입하여 유한한 유전체 기판 두께 h 와 유한한 접지면의 크기 C 값을 갖는 구조에 대해 식(2)와 같이 주어지게 되었다.^[6] 식(3)은 k_3 값이 0.707에서부터 1사이의 범위 내에 있을 때 적용된다. 각 변수에 대한 값들은 구조에 따라서 변화하는 식(3)에 의해서 주어진다.^[1, 2, 4]

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{K(k_4)K'(k_3)}{K'(k_4)K(k_3)} \right)$$

$$k_3' = \sqrt{1 - k_3^2}; K'(k_3) = K(k_3') \quad (2)$$

$$k_3 = \frac{W}{b} \sqrt{\frac{1 - b^2/c^2}{1 - W^2/c^2}}; b = W + 2S$$

$$k_4 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi W}{2h}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi b}{2h}\right)} \sqrt{\frac{1 - \frac{\sinh^2\left(\frac{\pi b}{2h}\right)}{\sinh^2\left(\frac{\pi c}{2h}\right)}}{1 - \frac{\sinh^2\left(\frac{\pi W}{2h}\right)}{\sinh^2\left(\frac{\pi c}{2h}\right)}}} \quad (3)$$

$$\frac{K'(k_3)}{K(k_3)} = \frac{1}{\pi} \ln \left| \frac{2(1 + \sqrt{k_3})}{1 - \sqrt{k_3}} \right| \quad (4)$$

for $0.707 \leq k_3 \leq 1$

식(2)는 코프래너 도파로 구조의 이상적인 조건인 물리적 구조 변수로부터 구해진다. 하지만, 식(2)에는 주파수의 변화에 대한 고려 사항이 없고, 주어진 구조적 변수 값이 전기장에 의해 변화가 발생할 때 그 값을 예측할 수 없는 문제점이 있다.

나. Hilberg의 유효 유전상수

Hilberg에 의해서 주어진 식(5)는 보다 간단한 식이면서 단순한 구조 변수를 이용하여 구해진 식이다.^[4, 8]

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left\{ \tanh \left[1.785 \log \left(\frac{h}{s} \right) + 1.75 \right] + \frac{k_s}{h} [0.04 - 0.7k + 0.01(1 - 0.1\epsilon_r)(0.25 + k)] \right\}, k = \frac{W}{W + 2S}, \text{ for } \frac{h}{s} \geq 1 \quad (5)$$

Hilberg의 식(5)는 주어진 조건이 부합될 때 정확한 값을 제시해 준다. 하지만 코프래너 도파로의 구조에 변형이 생겨서 기판의 두께 h 와 전극 간의 간격 S의 크기가 서로 변하여 h/S의 비율이 1과 같거나, 1 보다 작은 경우에는 적용할 수 없는, 제한적으로 공식이 적용되는 결과를 보여 주고 있으며, 코프래너 도파로 구조의 위 부분이 공기 층으로 개방된 구조에서만 식(5)가 잘 적용됨을 볼 수 있다.

2. 실험치 및 이론치 근사식에 의한 유효유전상수

Rayit에 의해서 유도된 식 (6)은 실험 및 이론 데이터로부터 동작주파수에 따라 변화하는 변화를 포함하고 있다.^[4, 10]

$$\sqrt{\epsilon_{eff}} = \sqrt{\epsilon_q} + \frac{\sqrt{\epsilon_r} - \sqrt{\epsilon_q}}{1 + a(f/f_{TE})^{-b}} \quad (6)$$

$$f_{TE} = \frac{c}{4h\sqrt{\epsilon_r - 1}}$$

$$\log a \approx u \log\left(\frac{W}{S}\right) + v \quad (7)$$

$$b \approx 1.8, \quad q = \log\left(\frac{W}{h}\right)$$

$$u = 0.54 - 0.64q + 0.015q^2$$

$$v = 0.43 - 0.86q + 0.540q^2$$

여기서 f_{TE} 는 최저 TE 모드의 cutoff 주파수를 나타내며, 식(7)과 같이 주어진다. ϵ_q 는 준 정전 접근 값이며, 계산에 의해서 초기에 2.1로 설정되었다. b값은 약 1.8로 주어지며, a값은 식(7)과 같이 주어진다. 이 식에 의하면 5% 이내의 정확도를 보여준다.

3. S-파라메타를 이용한 유효 유전상수

가. 코프래너 도파로 전송선의 S-파라메타

코프래너 도파로의 전송선 이론에 따라서 ABCD 매개 변수는 식(8)과 같이 주어진다. 이에 따른 S-파라메타는 특성 임피던스 Z_0 와 전송선 길이 l 을 갖는 코프래너 도파로 전송선 구조식 (9)로 나타나며, S-파라메타 S_{11} 은 식(9)와 같이 주어진다.^[3, 4]

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta l & jZ_0 \sin\beta l \\ jY_0 \sin\beta l & \cos\beta l \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$S_{11} = \frac{A + B - C - D}{A + B + C + D}$$

$$= \frac{Z_0^2 - 1}{Z_0^2 + 1 - 2jZ_0 \cot\beta l}$$

$$S_{21} = \frac{2}{A + B + C + D}$$

$$= \frac{1}{\cos\beta l + j\frac{Z_0 + Y_0}{2} \sin\beta l} \quad (9)$$

나. 반파장 길이 전송선

식(8)에서 코프래너 도파로 전송선의 길이가 반파장 길이의 정수배를 가질 때 $\beta l = n\pi$ 가 되어서 $\cot\beta l = \infty$ 가 되며, S-파라메타 S_{11} 은 상대적인 최소 값을 갖게 된다. 반파장 길이의 정수배를 갖는 코프래너 도파로 전송선을 이용하여 S-파라메타 S_{11} 값이 최소가 되는 주파수를 측정하면 식(12)와 같이 $\beta l = n\pi$ 를 만족시키는 유효 유전상수를 얻게 된다.

$$\beta l = \frac{w}{c} \sqrt{\epsilon_{eff}} \ell = n\pi \quad (n = \text{integer}) \quad (10)$$

$$f_n = \left(\frac{nc}{2\ell \sqrt{\epsilon_{eff}}} \right)^2 \quad (11)$$

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{nc}{2f\ell} \right)^2 \quad (12)$$

식(12)는 식(2)나 식(3)과는 달리 코프래너 도파로 전송선의 전기길이 ℓ 에 관계되는 각 성분들을 포함하게 된다. 따라서 코프래너 도파로 구조에서 유효유전상수를 측정할 경우에는 물리적인 길이 ℓ 값을 알고, 그 구조에서 S-파라미터를 측정하게 되면, S_{11} 이 상대적인 최소 값을 갖게 되는 주파수 f_n 에서 유효유전상수를 간단히 얻을 수 있게 된다. 다음은 시뮬레이션과 실험을 통하여 조사하였다.

4. 시뮬레이션

그림 1은 Rogers 4003™ ($\epsilon_r=3.38$, $\tan\delta=0.0027$, 두께 $h=0.50\text{mm}$, 0.5oz.Cu) 유전체 기판 위에 신호선 선폭 $w=1220\mu\text{m}$, 전극간격 $s=100\mu\text{m}$, 길이 $\ell=1.25\text{cm}$ 로 코프래너 도파로 전송선로를 설계한 레이아웃을 보여준다. Hewlett Packard 사의 Advanced Design System 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 2는 시뮬레이션을 통해 얻어진 S-파라미터를 나타낸다. S_{11} 값이 상대적으로 최소가 되는 주파수는 각각 $f_1=8.4\text{GHz}$, $f_2=16.8\text{GHz}$, $f_3=25.2\text{GHz}$, $f_4=33.6\text{GHz}$ 로 나타났다. 이 결과로부터 식(12)를 이용하여 유효 유전상수 ϵ_{eff} 를 구해보면 각각 $\epsilon_{eff}(f_1) = \epsilon_{eff}(f_2) = \epsilon_{eff}(f_3) = \epsilon_{eff}(f_4) = 2.0408$ 로 모두 같은 값인 유효 유전상수 ϵ_{eff} 를 제공할 수 있었다.

5. 실험 및 검토

그림 3은 Rogers 4003™($\epsilon_r=3.38$) 기판을 이용하여

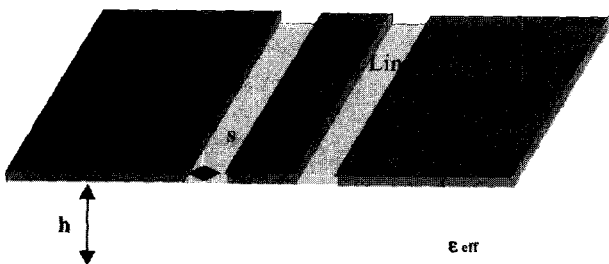


그림 1. Rogers 4003™ 기판의 유전체 기판 위에 코프래너 도파로 전송선로를 설계한 레이아웃
Fig. 1. Layout of coplanar waveguide transmission line on the substrate of Rogers 4003™ materials.

그림 1의 구조와 같이 신호선폭 $W=1220\mu\text{m}$, 전극간의 간격 $S=100\mu\text{m}$, 전송선길이 $\ell=5.6\text{cm}$ 의 코프래너 도파로 전송선을 제작한 후, 측정용 지그 위에 실장시켜 superSMA 커넥터를 사용하여 연결하였다.

벡터 네트워크 애널라이저 HS8722ES로 측정된 결과, 그림 4와 같이 S_{11} 값이 상대적으로 최소가 되는 주파수는 $f_2=3.74\text{GHz}$, $f_3=5.62\text{GHz}$, $f_4=7.5\text{GHz}$, $f_5=9.4\text{GHz}$, $f_6=11.23\text{GHz}$, $f_7=13.1\text{GHz}$, $f_8=15.0\text{GHz}$, $f_9=16.9\text{GHz}$, $f_{10}=18.75\text{GHz}$ 로 나타났다. 이 결과로부터 식(12)를 이용하여 유효 유전상수 ϵ_{eff} 를 구해보면 각각 $\epsilon_{eff}(f_2) = 2.0517$, $\epsilon_{eff}(f_3) = 2.0444$, $\epsilon_{eff}(f_4) = 2.0408$, $\epsilon_{eff}(f_5) = 2.0300$, $\epsilon_{eff}(f_6) = 2.0481$, $\epsilon_{eff}(f_7) = 2.0486$, $\epsilon_{eff}(f_8) = 2.0408$, $\epsilon_{eff}(f_9) = 2.0347$, $\epsilon_{eff}(f_{10}) = 2.0408$ 로 유효 유전상수 ϵ_{eff} 가 평균값 2.042를 중심으로 0.4% 범위 내에 있음을 알 수 있었다.

표 1은 코프래너 도파로 구조로부터 주어진 공식을 이용하여 얻어진 유효 유전상수 ϵ_{eff} 와 시뮬레이션 및 실험 결과로 얻어진 결과를 비교하였다. 실험에서 얻어진 값을 100%로 놓았을 때 각 계산식과 시뮬레이션으로부터 얻어진 결과를 오차로 비교하였다. 그 결과 -3.6%에서 8.2% 내의 오차를 보여 주었다. 그림 5는 실험결과와 공식으로부터 얻어진 유효 유전상수를 비교하였다. 측정으로부터 얻어진 유효유전상수 값은 2GHz에서 20GHz의 범위에서 2.042를 중심으로 0.4% 미만의 범위 내에서 분포된 반면 시뮬레이션에 의해서 구해진 유효 유전상수는 1GHz에서 40GHz의 범위에서 일정한 값인 2.041를 제공하였고, Wen식에 의한 값은 2.186를, Hilberg식에 의한 값은 1.969를, Rayit식에 의한 값은 2.210을 제공하였다. Rayit식에 의한 유효 유전상수 값은 주파수의 변화에 따라 변화하는데, 주파수가 증가함에 따라 40GHz에서 2% 증가하는 모습을 보여 주었다.

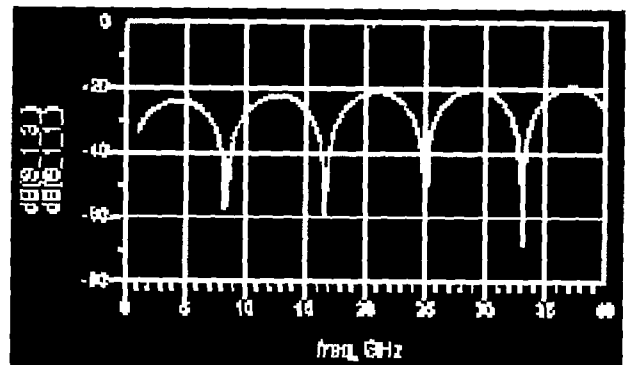


그림 2. 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 S-파라미터 S_{11} dB 곡선; $f_1=8.4\text{GHz}$, $f_2=16.8\text{GHz}$, $f_3=25.2\text{GHz}$, $f_4=33.6\text{GHz}$
Fig. 2. S_{11} dB plot generated from the simulation results; $f_1=8.4\text{GHz}$, $f_2=16.8\text{GHz}$, $f_3=25.2\text{GHz}$, $f_4=33.6\text{GHz}$.

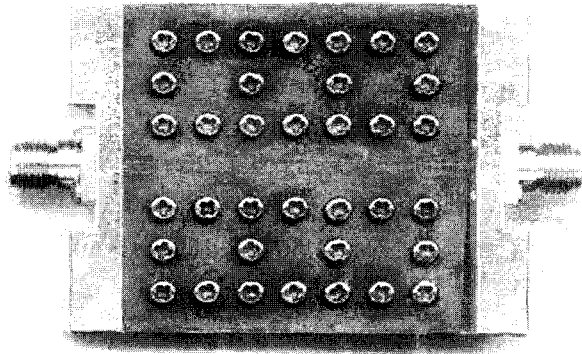


그림 3. Rogers 4003TM 기판 위에 코프래너 도파로 전송선을 형성한 후, 측정용 지그 위에 superSMA 커넥터를 함께 실장시켰다.

Fig. 3. A fabricated substrate of a coplanar waveguide transmission line on the substrate of Rogers 4003TM materials, mounted on a test zig with superSMA connectors.

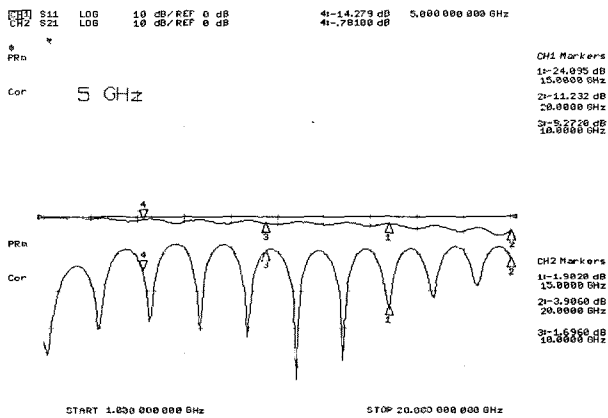


그림 4. Rogers 4003TM 기판 위에 제작된 코프래너 도파로 전송선으로 부터 얻어진, 주파수 변화에 따른 S-파라메타 곡선; $f_2=3.74\text{GHz}$, $f_3=5.62\text{GHz}$, $f_4=7.5\text{GHz}$, $f_5=9.4\text{GHz}$, $f_6=11.23\text{GHz}$, $f_7=13.1\text{GHz}$, $f_8=15.0\text{GHz}$, $f_9=16.9\text{GHz}$, $f_{10}=18.75\text{GHz}$

Fig. 4. Experimental data of S_{11} dB plot generated from the CPW transmission lines fabricated on Rogers 4003TM substrates; $f_2=3.74\text{GHz}$, $f_3=5.62\text{GHz}$, $f_4=7.5\text{GHz}$, $f_5=9.4\text{GHz}$, $f_6=11.23\text{GHz}$, $f_7=13.1\text{GHz}$, $f_8=15.0\text{GHz}$, $f_9=16.9\text{GHz}$, $f_{10}=18.75\text{GHz}$.

표 1. 주어진 식과 시뮬레이션 및 실험결과로 얻어진 유효유전상수 값

Table 1. Effective permittivities obtained from the formulae, simulation data and experimental results.

유효유전상수	1-40GHz	오차
Wen ϵ_{eff}	2.1865	107.1%
Hilberg ϵ_{eff}	1.9692	96.4%
Rayit ϵ_{eff}	2.2095	108.2%
시뮬레이션	2.0408	99.9%
측정결과	2.0422	100.0%

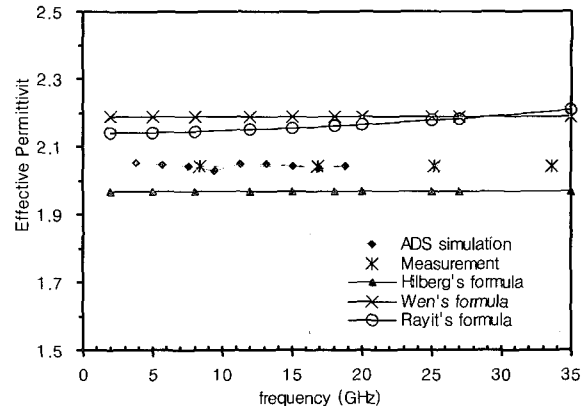


그림 5. Rogers 4003TM 기판 위에 제작된 코프래너 도파로 전송선으로 부터 얻어진 주파수 변화에 따른 유효유전상수의 변화

Fig. 5. Effective permittivities vs. frequency obtained from CPW transmission lines fabricated on Rogers 4003TM substrates.

III. 결론

본 논문에서는 코프래너 도파로 전송선의 S-파라메타를 이용하여 유효유전상수를 간단하게 도출하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 특성임피던스 Z_0 와 일정한 전송선 길이 l 을 지닌 코프래너 도파로 전송선로가 S_{11} 값으로 나타내어질 때, 주파수의 변화에 따라 S_{11} 값이 $\beta l = n\pi$ 에서 극한적으로 바뀌는 것을 이용하여 유효유전상수 ϵ_{eff} 를 도출하는 기법이다. 실험 결과 $\epsilon_r=3.38$ 의 Rogers 4003TM 기판 위에 제작된 코프래너 도파로의 전송선로로부터 얻어진 유효유전상수 값은 2.041로 나타났으며, 공식으로부터 얻어진 유효유전상수 값은 측정결과보다 8% 더 큰 값을 제시하거나 3.5% 감소된 값을 보여 주었다. 이러한 결과는 본 논문의 유효유전상수 도출기법이 제작된 코프래너 도파로 구조에서 실질적인 유효유전상수 값을 간단히 측정할 수 있을 뿐만 아니라 다른 유전체 재료의 기판 위에서도 측정이 보다 정확하고 간단하게 이루어질 수 있음을 보여 주었다.

참고 문헌

[1] R. N. Simons, *Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems*, John Wiley and Sons, New York, 2001.
 [2] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahi, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed., Artech House, Norwood, MA, 1996.
 [3] B. Wadal, *Transmission Line Design Handbook*,

- Artech House, Norwood, MA, 1991.
- [4] T. Edwards, *Foundations for Microstrip Circuit Design*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [5] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1992.
- [6] K. Chang, I. Bahl, and V. Nair, *RF and Microwave Circuit and Component Design for Wireless Systems*, John Wiley and Sons, New York, 2002.
- [7] C.P. Wen, "Coplanar Waveguide; a Surface Strip Transmission Line Suitable for Non Reciprocal Gyromagnetic Device Applications." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 17, pp. 1087-1090, Oct. 1969.
- [8] W. Hilberg, "From Approximation to Exact Relations for Characteristic Impedance," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* vol. 17, pp.259-265, 1969.
- [9] M.-H. Mao, R.-B. Wu, C.-H. Chen, and C.-H. Lin, "Characterization of Coplanar Waveguide Open End Capacitance-Theory and Experiment," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 1016-1024, June 1994.
- [10] A.K. Rayit, *Characteristics and Applications of Coplanar Waveguide and its Discontinuities*, Ph.D. Dissertation, University of Bradford, UK, 1997.

저 자 소 개

지 용(정회원)

제31권 A편 제3호 참조

현재 : 서강대학교 전자공학과 교수