

論文96-33A-2-9

FR-4 Composite 기판을 이용한 Microstrip 전송선의 광대역 전송 특성 해석

(Wideband Propagation Characteristics Analysis of a Microstrip Transmission Line on FR-4 Composite Substrate)

洪正基 **, 金永國 *, 李海英 *

(Jung-Ki Hong, Young-Guk Kim, and Hai-Young Lee)

요 약

본 논문에서는 FR-4 composite 기판을 이용한 microstrip 전송선의 광대역 복소 유전상수 모델과, 현상학적 도체 손실 등가 기법을 이용하여 광대역 전송 특성을 해석하였다. 전송 손실의 해석 결과로부터 특정 주파수의 복소 유전상수를 이용하여 구한 손실이 광대역의 복소 유전상수 모델로부터 구한 손실보다 매우 크게 나타남을 확인하였다. 이러한 광대역 전송 해석 결과는, 광대역 변화를 갖는 유전체 재료 특성을 고려한 고속/고밀도 전송선 특성 연구의 기초 자료로 활용할 수 있으며, FR-4 composite 기판의 사용 가능한 주파수 대역의 확장 가능성을 보여주고 있다.

Abstract

We analyzed wideband propagation characteristics of a microstrip transmission line based on FR-4 composite substrate using the wideband complex dielectric constant model and the phenomenological loss equivalence method. The loss calculated by constant relative permittivity and loss tangent is greatly overestimated compared to that calculated by the frequency-dependent complex relative permittivity. This wideband analysis can be helpful to characterize high-speed and high-density transmission lines associated with the wideband dielectric characteristics and shows that the FR-4 composite substrate has high potential of high frequency circuit applications in terms of the propagation loss.

I. 서 론

컴퓨터와 통신 기술의 발달은 고속 및 대용량화된 정보를 전달할 수 있는 소자의 개발을 전제로 하며, 이는 반도체 소자의 고속화 및 고밀도화를 유도하고 있다. 또한 사용 주파수의 범위가 수십 MHz에서 수십 GHz까지 광범위하게 확장되고 있으며, 특히 최근 관심을 모으고 있는 개인 이동 통신 대역의 매우 높은

주파수에서 사용 가능한 초고주파 집적회로의 발전을 가속화하고 있다. 따라서, 이러한 소자를 사용한 광대역에서의 고속 신호 전송을 하기 위해서는 고속 및 고밀도의 신호 전송선을 정확하게 해석하여야 한다.

일반적으로 고속 신호 전송선은 광대역 특성을 갖도록 하기 위하여 도체 접지면을 갖는 신호 전송선(Microstrip 구조)을 이용하며, 진행 방향에 수직인 단면상에 전장과 자장이 존재하는 특징을 갖는 광대역 quasi-TEM 전송선이다. 이러한 고밀도, 고속 신호 전송선의 전송 특성은 광대역에서 복합적인 전기적 전달 특성을 나타내며, 신뢰도가 높은 펄스의 전송을 위하여는 재료 및 mode 특성을 고려한 전송선상에서의

*正會員, ** 學生會員, 亞洲大學校電子工學科

(Dept. of Electrical Engineering Ajou Univ.)

接受日字: 1995年8月14日, 수정완료일: 1996年1月23日

펄스의 분산 및 전송 손실을 해석하여야 한다. 이러한 전송선의 광대역 해석을 위하여, 그 등가회로는 등가 인덕턴스(L), 캐패시턴스(C) 및 전송 손실에 해당하는 도체저항(R)과 컨덕턴스(G_o) 등으로 나타낸다. 이 등가회로의 구성 성분 중 도체저항은 주파수에 따른 전류의 침투 정도에 따라 크게 달라지므로 광대역에서의 도체저항을 고려하여야 하며, 수백 MHz에서 수 GHz의 고속 펄스 전송시 감쇄와 분산의 주요 원인이 된다. 또한, 유전체 손실을 나타내는 컨덕턴스는 사용되는 유전체 재료에 따라 광대역에서 크게 변화하여 도체저항과 마찬가지로 수 GHz의 높은 주파수에서 감쇄와 분산을 유발하므로 정확한 해석이 필요하다. 전송선의 도체 구조에 따라 변하는 mode 분산 특성은 매우 높은 주파수에서 나타나며, 지금까지 많은 해석이 이루어졌다^{1,2}. 그러나, 광대역 특성상의 재료의 영향을 고려한 해석 방법들은 표피 효과 저항과 주파수에 무관한 유전체 특성(특정 주파수의 유전상수와 $\tan \delta$)에 근거하여 모델하였으며, 주파수에 따라 재료의 특성이 크게 변하는 경우는 많은 오차를 갖게 된다.

본 논문에서는 FR-4 composite 기판을 이용한 microstrip 전송선의 재료적 특성을 고려한 광대역 전송 특성을 해석하기 위하여 도체 저항은 현상학적 도체 손실 등가 기법(Phenomenological Loss Equivalence Method: PEM)^{1,2,3,4,5}을 이용하여 구하고 유전체 손실을 나타내는 컨덕턴스는 Cole-Cole 모델¹⁶을 이용하여 복소 유전체 특성을 광대역에서 모델하여 구하고자 한다. 이는 낮은 가격 및 높은 신뢰도 등으로 일반적인 회로 기판으로 가장 많이 사용되는 FR-4 composite 전송선의 광대역 전송 특성 해석을 통하여 사용 주파수 대역을 넓힐 수 있는 가능성과 고속 펄스 전송시 분산 왜곡을 줄이기 위한 정량적 자료 마련을 목표로 한다. 광대역에서의 유전체 특성 모델은 수 GHz 이상의 고주파에서 전체 손실중 감쇄의 주요 요인이 되는 유전체 손실을 정확히 해석할 수 있는 전제 요건이며, 이러한 해석 방법과 그 결과들은 고속, 고밀도에서 동작을 요하는 반도체 소자의 내부 및 외부 연결선의 전기 및 재료적 특성을 광대역에서 정확히 해석하기 위한 기반을 마련해 줄 것이다.

II. 현상학적 도체 손실 등가 기법

PEM¹⁵은 quasi-TEM 전송선의 quasi-static

field가 도체를 침투함에 따른 전류 분포의 변화를 관찰함에 기초를 두고 있다. 이 방법은 침투 깊이와 비슷한 도체 두께를 가지는 planar quasi-TEM 전송선을 같은 도체 손실을 가지는 등가 단일 판형 전송선으로 근사할 수 있으며, 표면 전류 분포와 내부 분포 전류를 각각 이 등가 전송선의 균일 전류 등가 폭과 등가 두께로 치환할 수 있다. 결국 본 기법은 등가 판형 전송선의 도체 손실을 원 전송선의 도체 손실로 등가시킴으로써, 등가 폭과 등가 두께를 결정하고, 이 등가 전송선의 도체 저항을 간단히 해석하는 것이다.

원 전송선의 전송 특성은 전송선의 등가회로 모델로부터 계산된다. 이 회로 모델에서 분포 저항(R)과 내부 인덕턴스(L_i)는 PEM으로부터 계산되어 전송선의 외부 인덕턴스(L_o)와 직렬로 연결된다. 일정 주파수에서의 외부 인덕턴스(L_o), 캐패시턴스(C_o)와 컨덕턴스(G_o)는 광대역에서 모델된 복소 유전상수와 quasi-TEM 해석으로부터 계산된 후, 전송선 등가회로에 삽입된다. 결국 전송선의 모든 전송 특성을 해석하기 위하여 이 등가회로 모델에 일반적인 공식을 이용할 수 있다.

전송선 모델에서 전송선 내부 임피던스를 포함한 전체 전송선의 복소 전송 상수(γ)는

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{\{R + j\omega(L_o + L_i)\} \{G_o + j\omega C_o\}} \quad (1)$$

이며, 복소 특성임피던스(Z_o)는

$$Z_o = \sqrt{\{R + j\omega(L_o + L_i)\} / \{G_o + j\omega C_o\}} \quad (2)$$

로 나타나며, 전송 손실은 α 로부터, 위상 속도는 $v_p = \omega/\beta$ 로부터 구한다.

III. 복소 유전상수의 수학적 모델

전송선에서는 기본적으로 낮은 손실의 유전체를 사용하여야 한다. 유전체 손실은 시간에 따라 변하는 전계에 의하여 전달되는 에너지와 극성 물질의 불완전한 결합에 기인한다. 저주파나 고주파 대역의 극단적인 주파수 대역을 제외한 중간 주파수 대역에서는 극성의 변화가 전계의 변화보다 느려져 유전체의 이완 현상(relaxation phenomena)이 생기게 되어 전계와의 위상 차이가 점점 심화된다. 이러한 이완 현상에 의한 유전체 손실을 반영하기 위하여 유전상수(ϵ_r)는

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

와 같이 복소수로 표현된다. 여기에서 ϵ' 은 유전상수의 실수 부분이며 ϵ'' 은 이완 현상에 의한 유전체 손실을 나타낸다. ϵ'' 은 주파수에 따라서 계속적으로 증가하여 이완 현상에 의한 최대값을 갖게 되고 ϵ' 이 감소하기 시작하는 굴곡 부분을 전후하여 감소하기 시작한다. 이와 같은 유전상수의 주파수에 따른 변화 현상은 잘 알려진 Debye 분산 방정식(Debye dispersion equation)^[7]에 의하여 모델되어 있으며 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (4)$$

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (5)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (6)$$

여기에서 $\omega, \epsilon_s, \epsilon_\infty, \tau$ 는 각각 주파수, 저주파에서의 유전상수의 실수 부분, 고주파에서의 유전상수의 실수 부분, 분극 이완 시간을 나타낸다. 식(5)와 식(6)의 $\omega\tau$ 를 소거하여 두 식을 연립하면 다음과 같은 복소 유전상수 평면에서 반원의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{2}\right)^2 + \epsilon''^2 = \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}\right)^2 \quad (7)$$

따라서 중심이 $(\epsilon_s + \epsilon_\infty)/2, 0$ 이고 반지름이 $(\epsilon_s - \epsilon_\infty)/2$ 인 반원을 나타낸다. 그리고, ϵ' 과 ϵ'' 이 모두 양수이므로 1사분면에 반원으로 도시된다. 그러나 식(7)은 유전체에 대한 일반적인 식으로서, 반도체용 고밀도 전송선의 기판으로 사용되는 polymer 계의 유전 물질은 이완 현상에 의한 ϵ'' 의 최대값이 작고 dispersion 특성이 더욱 이산되어 Debye 모델에 의한 식(7)의 반원 안쪽에 dispersion이 위치하게 된다. 이러한 polymer 계 유전 물질의 현상은 실험 및 경험적인 Cole-Cole 모델에 의하여 복소 유전상수가 다음과 같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^\alpha} \quad (8)$$

여기에서 α 는 0과 1사이의 크기를 가지는 이완 현상의 보정 상수이다.

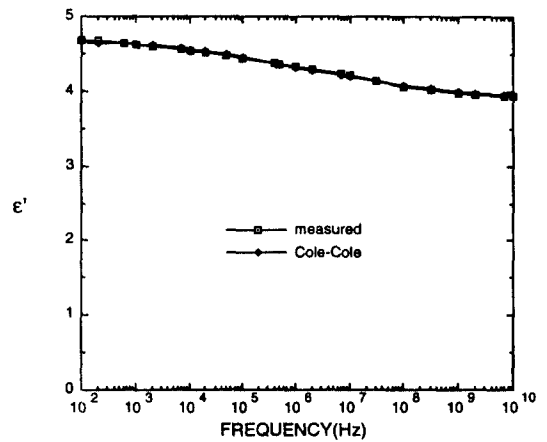
IV. FR-4 Composite의 복소 유전상수 모델과 컨덕턴스 계산

polymer 계의 FR-4 composite의 복소 유전상수를

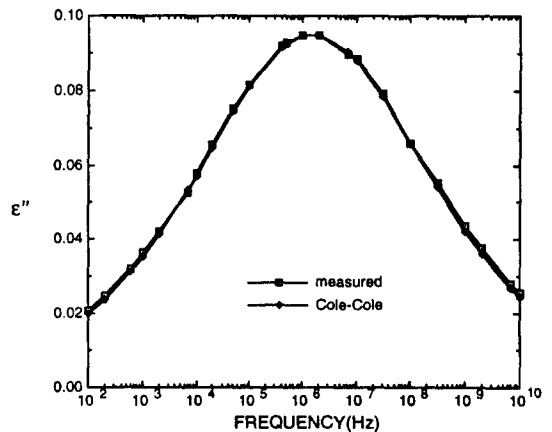
Cole-Cole에 의한 방법으로 모델 (Cole-Cole 모델) 하고, 이를 기초로 하여 전송선의 등가회로 성분중 유전체 손실을 나타내는 컨덕턴스를 계산하여 등가회로에 삽입한다.

1. FR-4 Composite의 복소 유전상수 모델

그림 1은 좋은 유전체 성질을 가지고 있어서 반도체용 소자의 고밀도 전송선에 사용 가능한 대표적인 polymer 계 물질인 FR-4 composite의 복소 유전상수를 측정된 값^[8]으로부터 Cole-Cole이 제시한 식에 의하여 모델한 것이다. 측정된 값과 식(8)로부터 $\epsilon_s, \epsilon_\infty, \alpha$ 는 각각 4.71, 3.89, 0.28이며 τ 는 1.06×10^{-7} 초이다.



(a)



(b)

그림 1. FR-4 composite의 유전상수의 (a) 실수 부분 (b) 허수 부분

Fig. 1. (a) Real and (b) Imaginary relative permittivities of the FR-4 composite.

그림 1(a)는 복소 유전상수의 실수 부분으로 본 논문에서 사용된 Cole-Cole 모델의 정확성을 보여준다. 그림 1(b)는 복소 유전상수의 허수 부분으로 약 1.7 MHz에서 보정된 단일 이완 현상을 보이고 있다. 결국 그림 1의 복소 유전상수의 모델은 Cole-Cole에 의하여 수학적으로 모델된 polymer 계의 유전 물질의 광대역 특성에 부합하면서, 측정된 data로부터 그 정확성을 입증한 결과가 된다. 이러한 광대역 유전체 성질의 모델은 고주파 대역에서 더욱 심화되는 유전체 손실에 의한 감쇄 요인의 정확한 분석을 가능케 할 것이다.

2. 컨덕턴스 계산

전송선의 유전체 손실을 나타내는 컨덕턴스의 광대역 해석은 정확한 광대역 유전체 특성의 모델로부터 가능하다. 컨덕턴스는 일반적으로 많이 쓰이는 아래의 유전체 손실 계산식^[9]으로부터 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} a_d &= \frac{\omega}{2} \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon_{\text{reff}}} (\tan \delta)_e \\ &= \frac{\omega}{2} \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon_{\text{reff}}} \frac{\sigma_e}{\omega \epsilon_0 \epsilon_{\text{reff}}} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 유전체 손실은 유효 $\tan \delta$ 와 주파수의 함수로 주어지며, 특성 임피던스(Z_0)와 유전체 손실이 주어진 경우의 단위 길이당 컨덕턴스와 유전체 손실과의 관계적인 식(10)을 이용하면 식(11)을 유도할 수 있다.

$$G_0 = \frac{2}{Z_0} a_d \quad (10)$$

$$G_0 = \frac{2\pi f}{Z_0} \frac{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}{\epsilon_{\text{reff}}} q \epsilon'' \quad (11)$$

여기에서 ϵ_0 , μ_0 는 각각 공기에서의 유전율과 투자율을 나타낸다. 또한 ϵ'' 은 복소 유전상수의 허수 부분이며, q 는 유전체의 filling fraction으로서 다음과 같이 정의된다.

$$q = \frac{\epsilon_{\text{reff}} - 1}{\epsilon_r - 1} \quad (12)$$

이러한 단위 길이당 컨덕턴스를 구할 때 Cole-Cole 모델을 사용하는 경우는 복소 유전상수의 실수 부분으로부터 주파수에 따른 유효 유전상수($\epsilon_{\text{reff}}(f)$)를 구하고 $\epsilon''(f)$ 은 복소 유전상수의 허수 부분을 이용하면 된다. 반면에 그동안 많이 사용되었던 특정 주파수의 복소 유전상수를 사용하는 경우는 주파수의 함수가 아

닌 상수로서 유효 유전상수 및 유전상수의 허수 부분을 이용하게 되며, 주파수 변화에 따라 많은 오차를 갖게 된다.

V. 고속/고밀도용 Microstrip 전송선의 광대역 전송 특성 해석

광대역 도체 손실 해석법인 PEM과 광대역 유전체 특성 모델 방법인 Cole-Cole 모델을 이용하여 반도체 패키징에서 고속, 고밀도용으로 사용 가능한 구조의 전송선에 대한 광대역 전송 특성을 해석하고자 한다. 특히, 전송 손실의 해석에서 도체 및 유전체 손실은 각각 도체 손실과 유전체 손실에 의한 감쇄상수(attenuation constant)를 계산하였다. 또한, 광대역 유전체 특성 모델의 효용성을 알아보기 위해 각 해석에서는 특정 주파수의 유전 상수와 $\tan \delta$ 를 이용한 경우와 비교하였다.

1. 유전체 손실이 없는 Microstrip의 도체 손실 해석

일반적인 좋은 전송선에서 사용되는 유전체의 $\tan \delta$ 가 매우 작으므로 컨덕턴스(G_0)를 영으로 가정하여 전송 특성을 해석한다. 이러한 가정은 저주파에서는 작은 $\tan \delta$ 로 인하여 컨덕턴스가 매우 작으므로 타당하지만 주파수가 증가함에 따라서 컨덕턴스 역시 증가하므로 고주파수에서의 전송선 해석에 있어서는 정확한 컨덕턴스의 값을 전송선 등가회로 모델에 삽입하여야 한다.

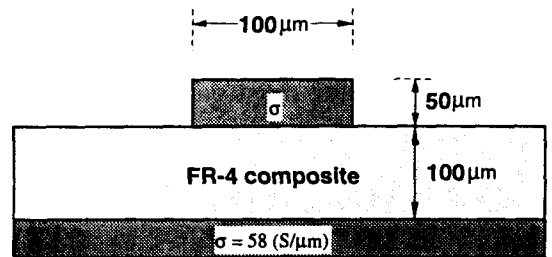
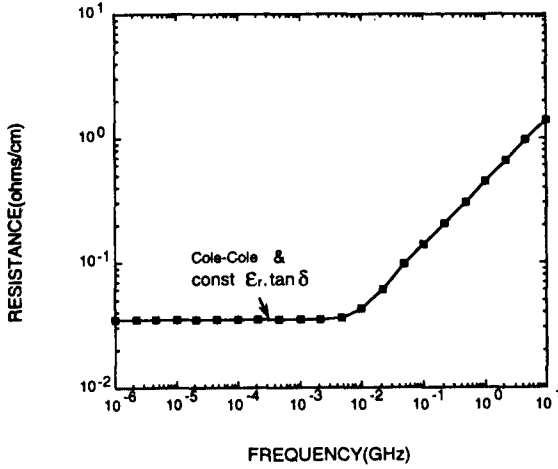


그림 2. FR-4 Composite 기판을 이용한 구리 microstrip 전송선 구조

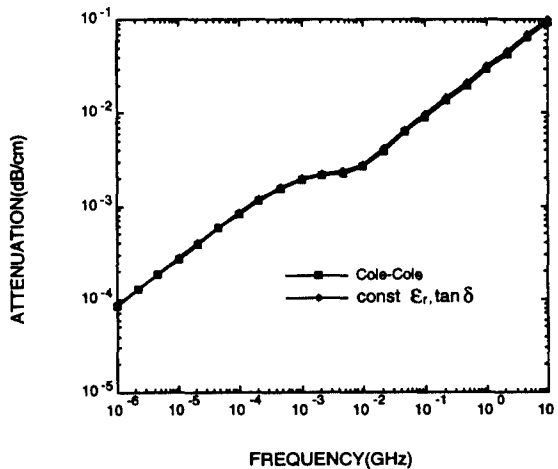
Fig. 2. Copper microstrip transmission line on the FR-4 composite substrate.

우선 도체 손실과 유전체 손실 효과의 상대적 비교를 위하여 대표적 quasi-TEM 전송선인 microstrip의 전송선 특성을 도체 손실만을 고려하여 해석하고자 한

다. 도체 손실의 계산에 있어서는 다음의 광대역 유전체 특성 모델의 유전체 손실의 영향을 알아보기 위해 비유전율(relative permittivity)을 상수로 가정한 경우와 Cole-Cole 모델을 이용한 복소 유전상수의 실수 부분을 사용한 경우에 대하여 각각 도체 저항과 도체 손실을 구하였다.



(a)



(b)

그림 3. (a) 분포 저항 (b) 도체 손실
Fig. 3. (a) Distributed Resistances and (b) Conductor losses.

그림 2는 고속, 고밀도 반도체 소자에서 사용 가능한 대표적 quasi-TEM 전송선인 microstrip 전송선의 구조를 나타낸다. strip의 재질은 copper이며, FR-4 composite 기판으로 이루어져 있다. 또한

strip의 폭은 100 μ m, 두께는 50 μ m, 그리고 기판의 두께는 100 μ m를 선택하였다. FR-4 composite는 낮은 유전상수와 적절한 $\tan \delta$ 의 특성을 가지고 있어서 그동안 사용되었던 저속 회로에서만 아니라 고속 회로에서도 사용될 수 있는 높은 잠재력을 갖고 있다.

그림 3(a)는 그림 2의 microstrip의 광대역에 걸친 도체 저항을 PEM을 이용하여 구한 것이다. 상대적으로 낮은 10MHz 이하의 저주파에서는 직류 저항 값을 보이고 10MHz 이상의 고주파에서는 도체 내의 전자 파 침투 깊이를 고려한 교류 저항 값을 보이고 있다. 또한 위에서 가정한 두가지 경우의 유전율 모델에 대해서 도체 저항은 정확히 일치하고 있는데, 그 이유는 도체 저항 계산시 유전상수는 크게 영향을 미치지 않기 때문이다. 그림 3(b)는 이 도체 저항 값을 전송선 등가회로 모델에 삽입하여 복소 전송 상수를 구하여 광대역 도체 손실을 나타낸 그림이다. 단, 유전체 손실을 고려하지 않았으므로 전송선 등가회로 모델에서 컨덕턴스는 영으로 가정했다. 도체 저항과 마찬가지로 각각의 경우 도체 손실이 거의 일치하고 있다.

2. 유전체 손실을 고려한 Microstrip 전송선의 광대역 전송 특성 해석

유전체 손실의 주파수에 따른 큰 변화는 도체 손실과 복합적으로 작용하여 전체 전송 특성을 크게 열화시키므로 도체 손실과 아울러 유전체 손실을 고려한 광대역의 정확한 해석이 필요하다.

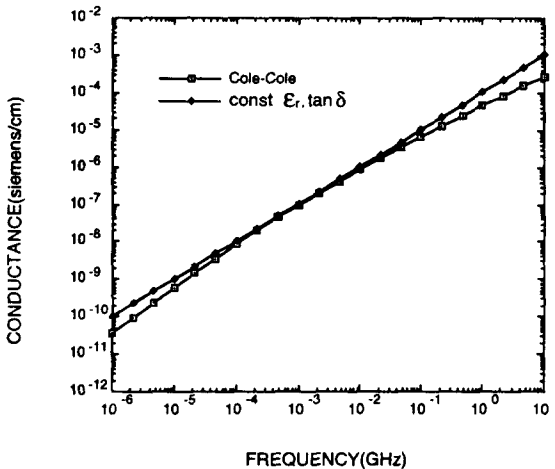
일반적으로 PCB 기판으로 사용되는 기판이 저주파에서는 거의 유전 손실이 없으므로 이를 무시 하는 경향이 있으나, 대부분의 유전 손실은 주파수에 따라 크게 증가하게 되어 고주파에서는 많은 전송 특성 변화가 생긴다. Teflon의 경우는 유전 손실이 초고주파에서의 경우에서도 매우 작으므로 고주파 회로 제작시 유용하나 가격이 일반 유전체 기판에 비하여 매우 높으므로, 100MHz 대역에서의 대면적 회로의 상용화에는 부적합하다. 따라서 적절한 재료 특성(적절한 유전상수와 $\tan \delta$)과 저가격으로 고밀도 반도체 소자의 재료로 사용할 수 있는 FR-4 composite를 사용한 microstrip 전송선의 유전체 손실을 해석하였다.

앞에서 구한 그림 2의 microstrip의 도체 손실과 함께 유전체 손실을 구하여 전체적인 광대역 전송 특성을 해석한다. 도체 손실의 경우와 마찬가지로 비유전율을 상수로 가정한 경우(Case I)와 Cole-Cole 모

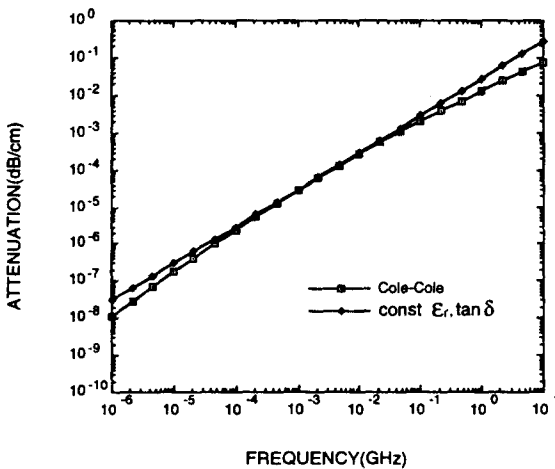
델을 이용한 복소 유전상수를 사용한 경우(Case II)에 대해서 유전체 손실의 효과를 비교하였다.

1) 컨덕턴스와 유전체 손실의 계산 결과

그림 4(a)는 두가지 경우의 복소 유전상수에 대해서 컨덕턴스를 계산한 결과이다. Case I에서는 1MHz에서의 FR-4 composite의 비유전율인 4.7 및 $\tan \delta$ 값인 0.021을 사용하였다. Case II와 비교하여 Case I에서는 컨덕턴스가 대체적으로 크게 나타난다. 이러한 현상은 단일 주파수 (1MHz)에서의 재료 특성을 광범위 주파수 대역에서 사용하기 때문이다. 그림 4(b)는 유전체 손실만을 계산한 결과로서 주파수에 따라 급격히 증가하며 컨덕턴스 결과와 마찬가지로 Case I은 전대역에서 많은 오차를 갖게 된다.



(a)

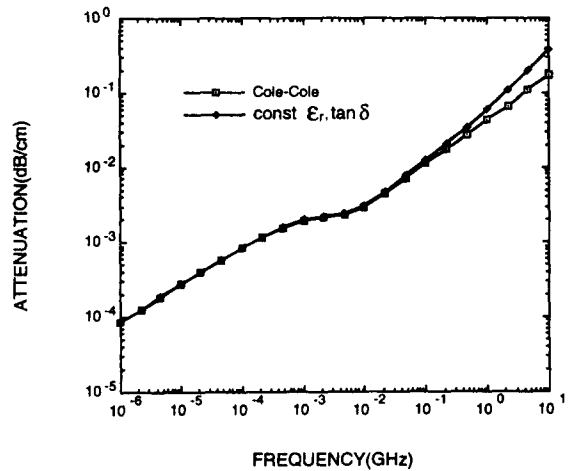


(b)

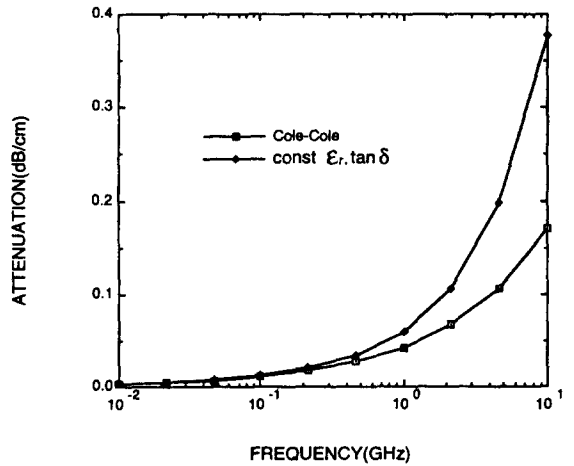
그림 4. (a) 컨덕턴스 (b) 유전체 손실
Fig. 4. (a) Conductances and (b) Dielectric losses.

2) 광대역 전송 특성 해석 결과

그림 5(a)의 광대역 감쇄 특성은 Case I과 Case II에 대해서 microstrip 구조에서 손실의 주된 원인이 되는 도체 손실과 유전체 손실을 모두 고려하여 계산한 결과이며, strip 폭이 좁으므로 방사 효과는 수십 GHz 이하에서는 무시될 수 있다. 저주파에서는 두가지 경우가 잘 일치하고 있으나 100MHz 이상에서는 많은 오차를 갖는데 이러한 오차는 유전체 손실의 오차에 기인한다.



(a)



(b)

그림 5. 전체 전송 손실의 (a) 로그도표 (b) 선형도표
Fig. 5. (a) Log Plot and (b) Linear Plot of Total Transmission losses.

그림 5(b)의 선형도표에서 기존의 방법으로 계산한 Case I이 광대역 유전상수 모델로 계산한 Case II보

다 손실이 크게 나타나며 10GHz에서는 거의 2배 이상 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 microstrip 전송선상의 실제 손실은 기존의 방법으로 계산된 결과에 비해서 작으며, 실제 FR-4 composite 기판을 고주파에서 사용할 경우 유전체 손실에 의한 전송 특성 열화가 적어서 현재 정량적 해석이 없이 상대적으로 낮은 주파수(1~2GHz)에서 사용되는 몇가지 경우만이 아니라 정량적 해석을 통하여 더욱 높은 주파수(10GHz 이상)까지 다양한 응용이 가능함을 나타내는 것이다.

그림 6은 두가지 경우에 대하여 위상 속도를 나타낸 그림으로 거의 일치하고 있다. 위상 속도는 1MHz 이하에서 급격히 떨어지며 그 이유는 전송선의 외부 인덕턴스보다 손실에 의한 저항 성분의 효과가 두드러져서 전송 속도를 감소시키는 slow-wave effect가 나타나기 때문이다. 이러한 전송 속도의 급격한 변화는 전송 손실의 변화와 더불어 고속, 고밀도 전송선을 통한 펄스의 전송시 왜곡을 일으키는 주된 원인이 된다. 따라서 이러한 위상 속도의 급격한 변화를 완화시키기 위한 전송선의 구조 변경 및 기판의 유전체 손실에 의한 위상 속도 보상 방법 등이 고려될 수 있다. 특히, 고밀도 회로의 경우 사용되는 도체의 단면이 매우 작으므로, 이 위상 속도의 감소 주파수가 높은 주파수로 이동함으로써 광대역 전송 특성 해석이 더욱 중요하게 된다.

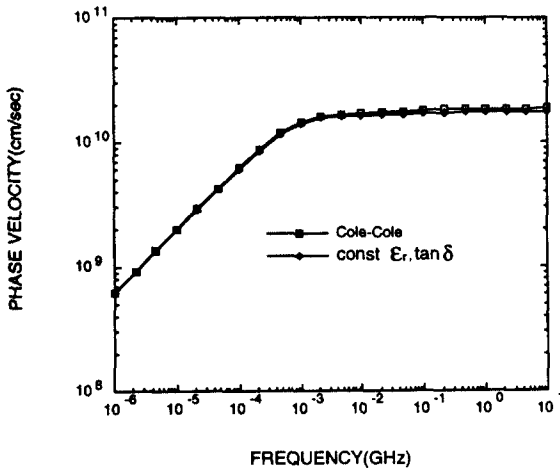
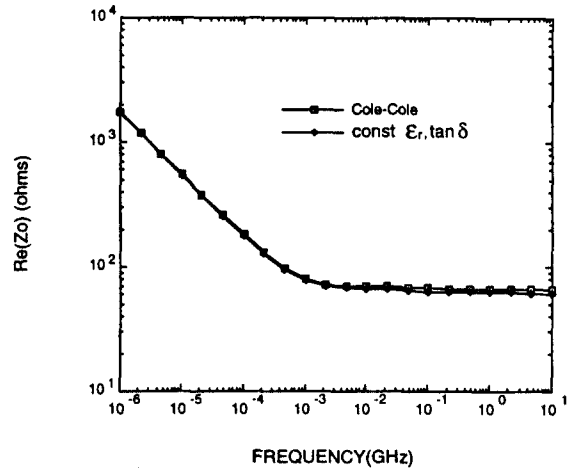


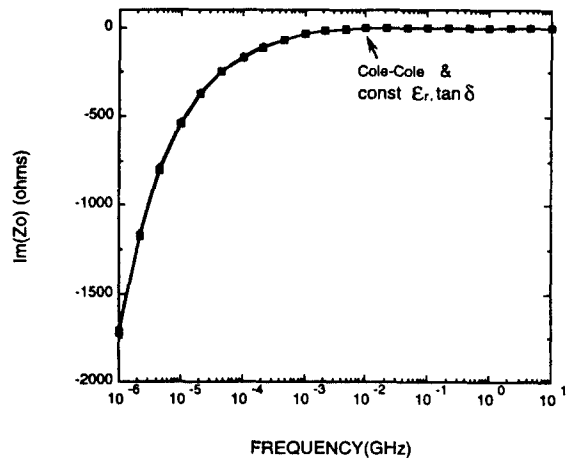
그림 6. 위상 속도
Fig. 6. Phase velocities.

그림 7은 복소 특성 임피던스를 나타낸 그림으로 특성 임피던스의 실수 부분과 허수 부분이 두가지 경우

에 대하여 거의 일치하고 있다. 그림 7(a)는 복소 특성 임피던스 중 실수 부분을 나타낸 것으로 주파수가 낮은 경우 위상 속도의 경우와 같은 이유로 크게 변하는데 최적 전송을 위한 연결선의 임피던스 정합을 어렵게 한다. 또한, 그림 7(b)의 허수 특성 임피던스로부터 연결선의 임피던스 정합은 저주파수에서 용량성이 되어야 반사파가 없음을 알 수 있으며, 최대 전력 전송을 위해서는 유도성이 되어야 함을 보이고 있다. 그러므로, 전송선의 전원 임피던스와 종단 임피던스를 보정하므로써 전송 속도와 대역폭을 크게 개선할 수 있다.



(a)



(b)

그림 7. (a) 실수 특성임피던스 (b) 허수 특성임피던스
Fig. 7. (a) Real and (b) Imaginary part of the characteristic impedances.

VI. 결 론

본 논문에서는 FR-4 composite 기판을 이용한 microstrip 전송선의 광대역 전송 특성을 해석 하였다. 우선 도체 저항을 광대역에서 계산하기 위하여 현상학적 도체 손실 증가 기법을 이용하여 도체 손실을 구하였으며, 유전체의 재료적 특성을 고려한 광대역 해석을 하기 위해서, 광대역의 유전체 특성을 측정값으로부터 모델한 Cole-Cole 모델을 이용하여 유전체 손실을 계산하였다.

손실 해석 결과에 의하면 기존의 유전체 손실 해석법은, 측정값에 잘 일치하는 광대역 복소 유전상수의 모델을 이용하여 손실 계산을 한 경우보다 손실이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 위상 속도와 특성 임피던스의 해석으로부터 저주파수 대역에서의 급격한 변화를 보상해 주기 위한 재료 및 구조적인 새로운 연구가 필요함을 확인하였다. 이러한 결과는 고속, 고밀도 반도체 소자의 접속 및 전송선의 재료적 특성을 고려한 해석의 기초 자료로 사용될 수 있으며, FR-4 기판의 고주파 응용 가능성과 반도체 소자의 고속 및 고밀도화를 위한 전송선의 구조 및 재료 개선의 필요성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] K. C. Gupta, R. Garg, and I. J. Bahl, *Microstrip Lines and Slotlines*. Dedham, MA: Artech House, 1979.
- [2] H.-Y. Lee and T. Itoh, "Phenomenological loss equivalence method for planar quasi-TEM transmission line with a thin normal conductor or superconductor." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-37, no. 12, pp. 1904-1909, Dec. 1989.
- [3] H.-Y. Lee, "Experimental and theoretical characterization of very-thin coplanar waveguide and coplanar slow-wave structures," *IEEE International Microwave Symposium*, pp. 175-178, 1990.
- [4] H.-Y. Lee, K.-S. Kong, T. Itoh, "Conductor loss calculation of superconducting microstrip line using a phenomenological loss equivalence method," *19th European Microwave Conference*, London, England, Sep. 1989.
- [5] 洪正基, 李海英, 閔炯福, "현상학적 도체 손실 증가 기법을 이용한 고속 전송선의 펄스 전송 특성 해석," *電子工學論文誌*, 第32卷 第3號, pp.25~37, 1995年 3月
- [6] A. R. Blythe, *Electrical properties of polymers*. New York, NY: Cambridge University Press, 1979.
- [7] L. K. Van Beek, *Progress in Dielectrics*, vol. 7, Heywood Publishing, 1967.
- [8] Merrill L. Minges *et al.*, *Electronic Materials Handbook*. Materials Park, OH: ASM International, 1989.
- [9] Welch, J. D. and H. J. Pratt, "Losses in Microstrip Transmission Systems for Integrated Microwave Circuits," *NEREM Rec.*, vol. 8, pp. 100-101, 1966.

— 저 자 소 개 —



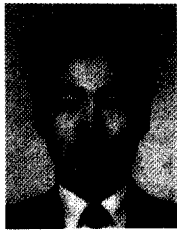
洪正基(學生會員)

1968年 4月 10日生. 1994年 2月 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1996年 2月 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업예정(공학석사). 주관심 분야는 고속/고밀도 전송선의 펄스 전송 특성 해석 및 측정 등임



金永國(學生會員)

1972年 2月 15日生. 1994年 2月 동의대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1996年 2月 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업 예정(공학석사). 주관심 분야는 초소형 안테나, 반도체 실장용 물질의 고주파 모델링, 고속 전철의 EMI 등임



李海英(正會員)

1957年 3月 7日生. 1980年 2月 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1982年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1982年 ~ 1986年 국방부 연구사무관. 1989年 12月 The University of Texas at Austin 졸업(공학박사). 1990年 ~ 1992年 금성 중앙연구소 기초1실장(책임연구원). 1992年 ~ 현재 아주대학교 전자공학과 조교수. 주관심 분야는 초고속/고밀도 반도체 Package의 설계/측정, 초고주파소자 및 광전소자의 설계/측정, 초소형 안테나 해석/설계, 초전도체의 고속 전송 특성 모델링 등임