

論文96-33A-12-5

# FR-4 Composite 기판의 성분 구성비에 따른 광대역 유전상수 모델 및 전송 특성 해석

## (Wideband Dielectric Modeling and Transmission Analysis of FR-4 Composite Substrate with Different Composition Ratio)

洪正基\*, 金星一\*\*, 李海英\*\*

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

### 요 약

본 논문에서는 FR-4 composite 기판을 이용한 microstrip 전송선에서 구성 물질의 성분 조합비에 따른 광대역 복소 유전상수 모델과 광대역 전송 특성을 해석하였다. FR-4 composite의 강화제로 사용되는 E-glass와 FR-4 epoxy resin의 체적비에 따른 광대역 복소 유전상수 모델링과 microstrip의 유전체 손실 해석으로부터 1 GHz 이상의 고주파 대역에서 resin의 체적비가 증가할수록 전송 손실 및 전송 속도가 증가함을 확인하였다. 따라서 고주파 대역에서 전송 손실을 낮추기 위해서는 resin의 체적비를 줄여야 하며, 전송 속도의 증대를 위해서는 resin의 체적비를 증가시켜야 한다. 이러한 해석 결과는 고속·고밀도 다층 회로 기판의 최적 재료 성분비 및 전송선 구조 설계에 효과적으로 활용할 수 있다.

### Abstract

In this paper, we modeled the complex dielectric constant and analyzed the propagation characteristics of a FR-4 composite substrate with different compositions. From the wideband dielectric modeling and the propagation loss analysis of FR-4 composites that consists of FR-4 resin and E-glass reinforcement, we have found that the propagation loss and velocity increase with the volume fraction of FR-4 resin above 1 GHz. These results are helpful in determining to design optimum substrate composition ratio and cross-sectional geometry of high-speed and high-density transmission line.

### 1. 서 론

고속·고밀도 반도체 소자 패키지 및 회로 기판에 사용되는 대표적인 재료인 세라믹이나 테프론은 고주파 특성이 좋으나 매우 고가이고 가공성이 떨어지므로

저가격의 다양한 반도체 소자 제품에는 부적합하다. 한편, FR-4 등 합성물계의 EMC(Epoxy Molding Compounds)나 회로 기판 재료는 매우 저가이고 가공성이 뛰어난 뿐만 아니라, 적절한 전기적 특성과 재료적 신뢰성이 매우 우수하여 현재 가장 많은 반도체 패키지와 회로 기판으로 사용되고 있다. 반면에 이러한 FR-4 composite는 높은 유전체 손실로 인하여 고주파(1 GHz 이상)에는 부적합하다고 일반적으로 인식되어왔다. 그럼에도 불구하고 FR-4 composite는 저가격의 장점 때문에 정확한 정량적 특성 해석 및 사용 한계 주파수의 규명없이 몇몇 저성능 고속 소자 및 회로

\* 正會員, LG 情報通信

(LG Information & Communications, Ltd.)

\*\* 正會員, 亞洲大學校 電氣電子工學部

(School of Electrical and Elec. Eng., Ajou Univ.)

接受日字: 1996年9月17日, 수정완료일: 1996年11月21日

기판에 시험적으로 이용되므로써 그 실용화 및 적용 범위가 제한되어 왔다.

그러므로, FR-4 composite의 정확한 유전체 모델을 통한 전송 특성 해석은 저가의 고속·고밀도 반도체 소자의 패키지 및 회로 기판의 설계에 매우 중요하다. FR-4 epoxy resin과 glass 강화제의 체적 구성비가 7.24 : 2.76일 경우 측정된 복소 유전상수에 Cole-Cole model을 적용하여 매우 정확한 유전체 모델링<sup>11)</sup>이 가능하였는데 이는 FR-4 composite의 분극 현상이 간단한 Debye Relaxation Model에 매우 적합함을 나타내는 것이다. 한편 FR-4 composite의 구성성분은 그 응용 예에 따라 다양하나 FR-4 resin과 강화제의 체적 구성비가 가장 중요하여 전기적 특성은 이 두 구성원의 체적 구성비에 따라 주로 결정된다.

그러므로, 본 논문에서는 FR-4 composite를 이루는 E-glass 강화제와 FR-4 epoxy resin의 성분 조합비에 따른 유전체 모델링과 이 재료를 사용하는 고속 전송선의 전송 특성을 해석하므로써 다양한 응용 예에 대한 정량적 설계 자료를 마련하고자 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 성분 조합비에 따른 Cole-Cole 모델식<sup>12)</sup>의 선형적 합성으로 복소 유전율을 모델하고 이 기판을 사용하는 고속 전송선의 전송 특성을 도체 손실과 유전체 손실을 고려하여 광대역 해석을 하였다. 본 논문의 기판의 성분비에 따른 전송 특성의 정량적 해석 결과는 저가격 고속 회로 기판이나 소자 실장 재료 및 구조 설계에 매우 효과적으로 이용될 수 있다.

## II. FR-4 composite의 재료 구성비에 따른 복소 유전 특성 모델

### 1. 분극 이완 현상 및 복소 유전상수 특성

반도체 소자 패키지 및 회로 기판으로 사용되는 유전체 재료는 기본적으로 낮은 손실이 요구된다. 일반적으로 유전체 손실은 시간에 따라 변하는 전계에 대하여 유전체 분극의 지연 효과로부터 발생하는 이완 현상(relaxation phenomena)에 의해 생기게 되는데 이러한 단일 이완 현상으로 인한 유전상수의 주파수에 따른 변화는 잘 알려진 Debye 분산 방정식(Debye dispersion equation)<sup>13)</sup>을 따르게 되며 다음과 같이 복소 유전상수( $\epsilon_r$ )로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= \epsilon' - j\epsilon'' \\ &= \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}\end{aligned}\quad (1)$$

여기에서  $\omega$ ,  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$ ,  $\tau$ 는 각각 주파수, 이완 주파수보다 매우 낮은 저주파에서의 유전상수, 이완 주파수보다 매우 높은 고주파에서의 유전상수, 분극 이완 시간 등을 나타낸다. 이 Debye 분산 방정식은 단일 이완 시간을 갖는 단일 매질 유전체에 대한 일반식으로서, FR-4 composite는 구성 요소들이 복합적 이완 현상을 가지므로 그 이완 시간의 분산이 더욱 이산되어 광범위 분산식인 Cole-Cole 모델로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^a}\quad (2)$$

여기에서  $a$ 는 0과 1사이의 크기를 가지는 이완 현상의 보정 상수이다<sup>11)</sup>.

본 논문에서는 FR-4 composite의 주요 구성 요소인 E-glass 강화제와 FR-4 epoxy resin의 체적비에 따른 광대역 복소 유전상수를 모델하므로써 최적 설계를 위한 재료 선택의 정량적인 자료를 마련하고자 한다. 일반적으로 폴리머계의 복소 유전상수는 Cole-Cole 모델에 의해서 광대역에서 모델되므로 이를 체적비에 따른 모델로 보완하므로써 성분 조합비에 따른 광대역 모델을 가능케 한다. FR-4 composite의 구성원인 이러한 폴리머 재료들은 상호 화학적 반응이 작으며 특히 전기적 분극 특성이 장기간 독립성을 유지하는 특성을 갖는다. 특히, 체적 구성비가 95% 이상으로 가장 큰 두 강화제와 resin이 전체의 전기적 분극 특성을 결정하게 된다<sup>14)</sup>. 그러므로, FR-4 composite의 복소 유전율은 이들 두 구성원의 체적 구성비에 따른 선형적 분극도에 비례하며 다음의 선형식을 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned}\epsilon_{comp}^* &= V_{resin} \epsilon_{resin}^* + V_{mf} \epsilon_{mf}^* \\ &\approx V_{resin} \epsilon_{resin}^* + (1 - V_{resin}) \epsilon_{mf}^*\end{aligned}\quad (3)$$

여기에서  $\epsilon_{comp}^*$ ,  $\epsilon_{resin}^*$ ,  $\epsilon_{mf}^*$ 는 각각 composite, resin, 강화제의 복소 유전상수를 나타내며,  $V_{resin}$ 과  $V_{mf}$ 는 각각 resin 및 강화제의 체적비를 의미한다. E-glass 강화제는 본 논문에서 고려하는 10 GHz 이내의 주파수 범위에서 그 복소 유전상수가 거의 변하지 않으며, 그 유전체 손실이 resin에 비하여 극히 작으므로, 일정한

실수 유전상수( $\epsilon_{rnf}$ )로 근사화할 수 있다.

그러므로, 식 (3)은 resin의 Cole-Cole 복소 유전상수 모델식<sup>[21]</sup>으로 부터 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{comp}(\omega, V_{rsn}) = V_{rsn} \left\{ \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^\alpha} \right\}_{rsn} + (1 - V_{rsn}) \epsilon_{rnf} \quad (4)$$

식 (4)에 나타나는 각 변수들은 FR-4 composite의 측정된 결과<sup>[41]</sup>로 부터 추출되며 표 1에 그 결과를 나타내었다. 그림 1은 1 MHz 와 100 MHz 에서 여러 체적 구성비에 대하여 측정된 FR-4 laminate의 비 유전상수<sup>[41, [5]</sup>를 식 (3)의 선형식과 비교한 것이다. 여기서 laminate 강화제의 유전상수로 6.45(1 MHz)와 6.4(100 MHz)를 사용하였으나 E-glass의 경우 광대역에서 일정한 유전율을 사용할 수 있다. 광범위한 체적 구성비 및 넓은 대역에서 식 (3)이 적용될 수 있음을 보여주며, 여러 다른 종류의 폴리머 composite의 경우도 선형성을 가질 수 있음을 확인하였다.

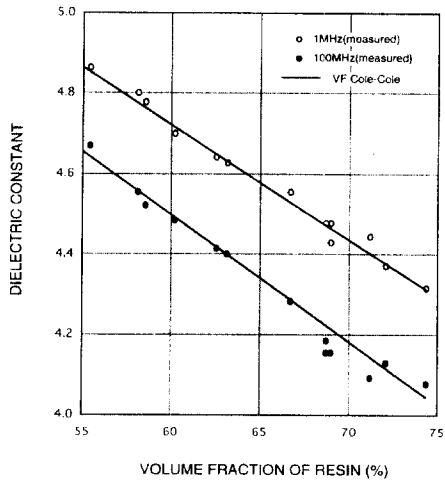


그림 1. resin의 체적비에 따른 FR-4 composite의 유전상수

Fig. 1. Modeled and measured dielectric constant of FR-4 resin at different frequencies.

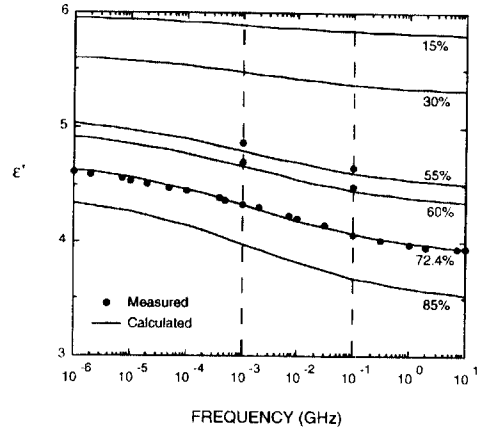
표 1. resin에 대한 Cole-Cole 모델의 각 변수 값

Table 1. Modeled Cole Cole parameters of FR 4 resin.

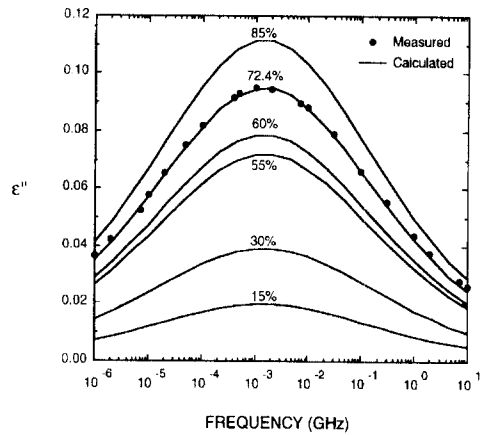
Constants	Values
$\epsilon_s$	4.10
$\epsilon_{\infty}$	2.97
$\tau$	0.106 $\mu$ sec
$\alpha$	0.29

2. 광대역 복소 유전상수 모델 결과

성분 조합비에 따른 FR-4 composite의 광대역 복소 유전상수 모델을 이용하여 여러 조합비에 따른 복소 유전상수를 넓은 주파수 대역에서 구하였다.



(a)



(b)

그림 2. resin의 체적비에 따른 FR-4 composite의 복소 유전상수의 (a) 실수 부분 (b) 허수 부분

Fig. 2. (a) Real and (b) Imaginary permittivities of the FR 4 composite for different volume fractions of resin.

그림 2(a), (b)는 FR-4 composite 구성원 중 주파수에 따른 유전율의 변화가 큰 epoxy resin의 체적비에 따른 FR-4 composite의 복소 유전상수의 계산 결과 및 측정 결과를 나타낸다. 그림 2(a)는 resin의 성분비를 변화시키면서 광대역에서 복소 유전상수의 실수 부분을 구한 결과로서 resin의 성분비가 증가할수록 FR 4 composite의 복소 유전상수의 실수 부분이 감

소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 강화제의 유전상수가 resin의 유전상수보다 크기 때문에 resin의 성분비가 증가할수록 상대적으로 강화제의 성분비가 줄어들어 전체 composite에 미치는 영향이 줄어들기 때문이다. 그림 2(b)는 그림 2(a)와 같은 방법으로 resin의 성분비를 변화시키면서 복소 유전상수의 허수 부분을 구한 결과로서 유전체 손실을 나타내는 resin의  $\tan \delta$ 가 강화제의  $\tan \delta$ 보다 매우 크기 때문에 resin의 성분비가 증가할수록 복소 유전상수의 허수 부분이 증가하는 결과를 보여주고 있다.

이 모델 결과는 광대역, 광범위 성분비에서 측정 결과와 매우 잘 일치함을 나타내며 FR-4 composite의 다양한 응용 설계시 매우 유용하게 이용될 수 있다.

### III. FR-4 기판의 성분비에 따른 Microstrip 전송 특성 해석

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<sup>[11], [16], [17]</sup>. 반도체 실장용 봉지재(EMC) 및 회로 기판 재료로 가장 많이 쓰이는 이 FR-4 composite는 그 성분 구성비에 따라 전기 신호 전송 특성이 변한다. 따라서 성분비에 따른 접속선의 광대역 전송 특성의 변화를 알아보기 위해 그림 3의 microstrip 전송선 기판의 composite 성분비를 변화시키면서 전송 손실 및 전송 속도를 해석하였다. 전송 손실 및 전송 속도의 광대역 해석을 위해 식 (4)의 성분비에 따른 광대역 복소 유전상수를 이용하였다.

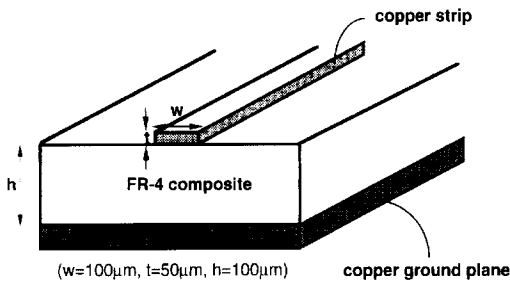


그림 3. FR-4 composite 기판을 이용한 구리 microstrip 전송선 구조  
 Fig. 3. Copper microstrip transmission line on the FR-4 composite substrate.

그림 3은 고속·고밀도 반도체 소자에서 사용 가능

한 대표적 Quasi-TEM 전송선인 microstrip 전송선의 구조를 나타낸다<sup>[6]</sup>. strip의 재질은 copper이며, FR-4 composite 기판으로 이루어져 있다. 또한 strip의 폭은 100  $\mu\text{m}$ , 두께는 50  $\mu\text{m}$ , 그리고 기판의 두께는 100  $\mu\text{m}$ 인 고밀도 전송선 구조를 선택하였다. 전송 특성 해석 방법으로는 도체와 유전체 손실을 고려한 현상학적 도체 손실 등가 기법<sup>[7], [8]</sup>을 이용하였다.

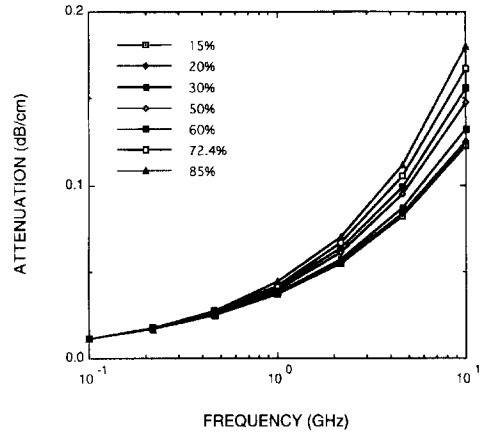
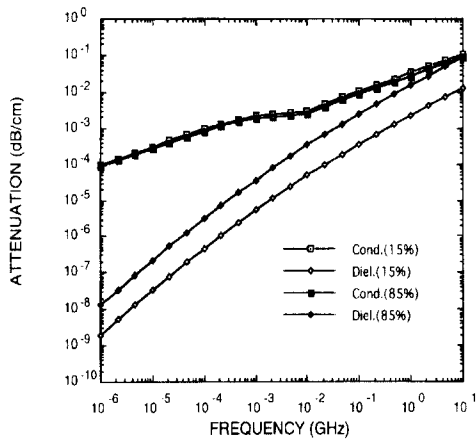


그림 4. resin의 체적비에 따른 감쇄 특성  
 Fig. 4. Attenuation characteristics to the volume fraction of resin.

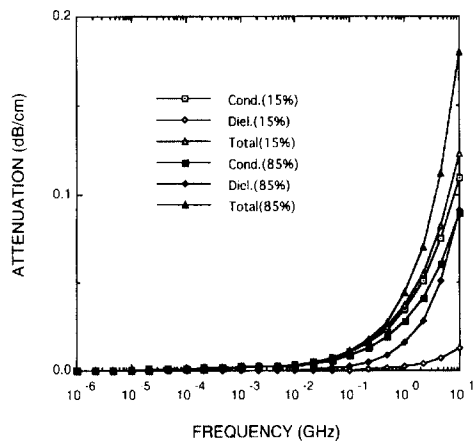
그림 4는 그림 2의 resin의 체적비에 따른 복소 유전상수를 이용하여 100 MHz에서 10 GHz까지 전송 손실을 계산한 결과이다. 전송 손실은 고주파에서 resin의 성분비가 증가할수록 증가함을 알 수 있으며, 이는 resin의 유전체 손실이 강화제의 유전체 손실보다 크기 때문이다. 따라서 전송 속도, 전송 지연 등 다른 요소들이 충족된다면 전송선 기판의 성분은 강화제가 많이 함유될수록 전송 손실을 줄일 수 있다.

그림 5(a), (b)는 그림 3의 microstrip 전송선 기판에서 resin의 구성비가 각각 15%, 85%인 경우의 FR-4 composite를 사용한 경우에 주파수에 따른 전송선의 손실 특성을 나타낸다. 그림 5(a)는 두 극단적인 경우(resin 구성비가 15%, 85%인 경우)에 대하여 도체 손실과 유전체 손실을 해석한 결과이다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 resin이 85%인 경우는 10 GHz까지는 도체 손실이 유전체 손실보다 크지만 10 GHz 이상에서는 유전체 손실이 더 크며 resin이 15%인 경우는 유전체 손실이 상대적으로 작아져서 10

GHz 이상에서도 도체 손실이 유전체 손실보다 크다. 그러므로 resin의 성분비에 따라서는 10 GHz 이상에서도 낮은 전송 손실을 유지할 수 있다. 그림 5(b)에서 전체 손실은 resin의 구성비가 85 %를 차지하는 경우가 15 %인 경우보다 크며, resin이 15 %인 경우 유전체 손실은 전체 손실에 비하여 무시할 정도로 작다. 두 경우 도체 손실은 비슷하나 resin 비율이 낮은 경우 부분적으로 증가되는 비유전율로 특성 임피던스가 감소되어 도체 손실이 약간 증가하게 된다. 따라서 resin의 성분이 증가할수록 도체 손실은 약간 감소하고 유전체 손실은 크게 증가하므로 전체 손실을 감소시키기 위해서는 resin의 성분을 줄여야 한다.



(a)



(b)

그림 5. resin의 체적비가 15%와 85%인 경우의 (a) 도체 및 유전체 손실 (b) 전체 손실  
Fig. 5. (a) Conductor, dielectric, and (b) total losses for 15% and 85% volume fractions of resin.

그러나, 그림 6의 위상 속도 해석 결과에 의하면 resin의 성분비가 작을수록 복소 유전상수의 실수 부분이 작아지므로 위상 속도가 감소한다. 따라서 전송 손실과는 다르게 전송 속도의 증가 및 전송 지연 감소를 위해서는 resin의 성분을 증가시켜야 한다.

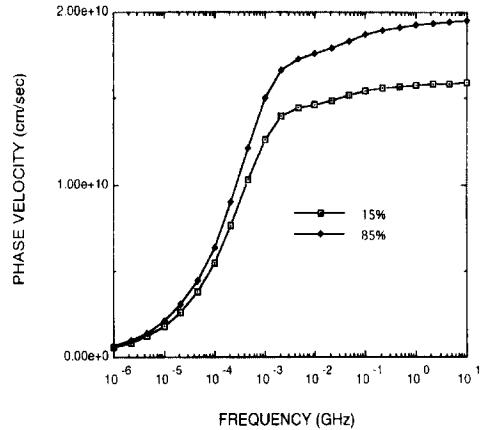


그림 6. resin의 체적비가 15%와 85%인 경우의 위상 속도  
Fig. 6. Phase velocities for 15% and 85% volume fractions of resin.

이러한 composite의 성분비에 따른 전송 특성의 해석 결과로부터 최적 전송 재료 선택을 위해서는 resin과 강화제 성분비가 중요한 요소로 작용함을 알 수 있으며, 각 접속 및 연결선의 사용 용도에 따라서 성분비 조절의 필요성을 확인하였다.

#### IV. 결론

FR-4 composite의 구성성분은 그 응용 예에 따라 다양하나 FR-4 resin과 강화제의 체적 구성비가 가장 중요하여 전기적 특성은 이 두 구성원의 체적 구성비에 따라 주로 결정되므로, 본 논문에서는 FR-4 composite를 이루는 E-glass 강화제와 FR-4 epoxy resin의 성분 조합비에 따른 복소 유전율을 모델하고 이 기관을 사용하는 고속 전송선의 전송 특성을 도체 손실과 유전체 손실을 고려하여 광대역 해석하므로써 다양한 응용 예에 대한 정량적 설계 자료를 마련하였다.

FR 4 composite의 성분 구성비에 따른 복소 유전상수의 모델은 구성원이 상호 독립적이며 선형적이라

는 가정하에 Cole-Cole 모델을 유전체의 성분 구성비에 따른 모델로 변환하였다. 또한, 이러한 결과를 측정 결과와 비교하여 FR-4 composite 성분 구성비에 따른 모델의 정확성을 확인하였으며, 현상학적 도체 손실 증가 기법을 이용하여 FR-4 composite 기판을 사용하는 microstrip 전송선의 광대역 전송 특성 해석을 하였다. 그 결과, FR-4 composite 기판의 초고주파 범위에서의 사용을 위해서는 resin의 성분비를 줄여야 하고, 전송 속도의 증가를 위해서는 resin의 성분비를 증가시켜야 함을 확인할 수 있었다. 특히, 유전체의 정확한 모델링을 통하여 경제성이 뛰어난 FR-4 composite의 응용 가능 주파수 범위를 확장할 수 있었다.

본 논문의 결과는 저가격 고속 회로 기판이나 소자 실장 재료 및 구조 설계에 매우 효과적으로 이용될 수 있으며, FR-4 composite 기판의 성분 구성비에 따른 손실 특성의 정량적인 자료로서 활용될 수 있다.

※ 이 연구는 1996년도 정보통신부의 연구비지원(과제 번호: U96-135)에 의한 연구결과임.

#### 참 고 문 헌

- [1] 洪正基, 李海英, "FR-4 Composite 기판을 이용한 Microstrip 전송선의 광대역 전송 특성 해석," 電子工學論文誌, 第33卷 第2號, pp.69~77, 1996年 2月
- [2] A. R. Blythe, *Electrical properties of polymers*. New York, NY: Cambridge University Press, 1979.
- [3] L. K. Van Beek, *Progress in Dielectrics*, vol. 7, Heywood Publishing, 1967.
- [4] M. L. Minges, Cyril A. Dostal et al, "Electronic materials handbook Vol. I PACKAGING," *ASM International*, 1989.
- [5] E. Tsunashima, "A multilevel epoxy substrate for flip-chip hybrid multichip module applications," *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol.*, vol. CHMT 15, pp. 103-106, Feb. 1992.
- [6] K. C. Gupta, R. Garg, and I. J. Bahl, *Microstrip Lines and Slotlines*, Dedham, MA : Artech House, 1979.
- [7] 洪正基, 李海英, 민형복, "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
- [8] 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.

#### 저 자 소 개

金星一(正會員) 第33卷 A編 第7號 參照  
현재 아주대학교 공과대학원 전자공학과 석사과정 재학중

洪正基(正會員) 第33卷 A編 第2號 參照  
현재 LG 정보통신 중앙연구소 연구원

李海英(正會員) 第33卷 A編 第7號 參照  
현재 아주대학교 전기전자공학부 교수