

論文 97-34D-2-3

# 초고주파소자의 저가 플라스틱 실장을 위한 접지된 본딩와이어의 기생특성 해석

## (Parasitics Analysis of a Grounded Bondwire for Low-Cost Plastic Packaging of Microwave Devices)

尹 尙 基 \*, 李 海 英 \*\*

(Sang-Ki Yun and Hai-Young Lee)

### 요 약

반도체소자의 실장시 외부연결선으로 사용되는 본딩와이어의 전기적 특성에 미치는 유전체 물질의 영향을 도체손실 및 유전체 손실을 고려한 모멘트법을 이용하여 광대역 주파수에서 해석하였다. 유전체 물질로서 플라스틱 패키지의 실장재료 및 PCB의 기판 재료로 널리 사용되는 FR-4 composite를 고려하였다. 폴리머계의 대표적 유전상수 모델인 Cole-Cole 모델을 이용하여 FR-4 composite의 주파수에 관계하는 복소 유전상수를 모델화 하였다. FR-4 composite내의 접지된 본딩와이어의 입력 임피던스는 공기중의 것에 비하여 높은 주파수에서 급격히 증가함을 관찰하였다. 본 해석결과는 고주파 저 단가 집적소자의 설계 및 실장에 유용하게 사용될 수 있다.

### Abstract

The dielectric effects on the parasitics of bondwires buried in slightly-lossy dielectric materials have been investigated over a wide frequency range using the method of moments with incorporation of ohmic and dielectric losses. The FR-4 composite is widely used as a basis material for PCB and plastic packages, because of its inherent electrical and chemical stability and low cost. The Cole-Cole model, which is a representative complex permittivity model of epoxy polymers, has been applied to consider the dielectric effects in the MoM calculation. The parasitic impedance of a grounded bondwire in FR-4 composite is greatly increased due to the dielectric loading effect enhanced by the radiation at high frequencies. These calculation results will be helpful for designing and packaging of high-frequency low-cost IC's.

### I. 서 론

최근 정보화 사회 요구에 부응하여 통신기술은 전송

데이타의 대량화 및 고속화 추세에 있고, 이에 따라 세계 정보통신 시장에서 경쟁우위를 잡하기 위해서 저가 고속 반도체 소자의 개발이 필수적이 되었다<sup>1)</sup>. 특히, 초고주파 소자의 실장(packaging)에 널리 사용되는 세라믹 계열의 패키지(package)는 소자의 생산비의 50% 이상을 차지하고 있어 소자의 저가화를 크게 제한하므로, 통신시장에서의 경쟁력 강화를 위하여 최근 고주파소자를 위한 저가 플라스틱 패키지 연구가 진행되고 있다<sup>2)</sup>. 세라믹 패키지를 플라스틱 패키지로 대체

\* 學生會員, \*\* 正會員, 亞洲大學校 電氣電子工學部  
(School of Electrical and Electronics Engineering, Ajou University)

※ 이 연구는 1996년도 정보통신부의 연구비 지원(과제번호 : U96-135)에 의한 결과임

接受日字: 1996年10月8日, 수정완료일: 1997年2月6日

하면서 발생하는 popcorn 현상<sup>[3]</sup>, 열 방출 문제<sup>[4]</sup> 등 재료적인 문제에 관한 연구결과가 보고되었다. 그러나, 수 GHz 이상의 주파수에서 플라스틱 실장재료가 소자의 전기적 외부특성에 미치는 영향에 관한 정량적 해석은 보고된 바 없다. 소자의 실장시 Chip과 리드(lead)간의 연결 방법으로는 와이어 본딩, 리본, 플립칩 본딩(flip-chip bonding) 등이 있으며, 그중 와이어 본딩은 공정단가가 낮고 자동화 공정이 가능하여 일반적으로 많이 사용되는 방법이다. 그러나, 본딩와이어의 기생 인덕턴스는 와이어 길이가 2 mm인 경우 1.4 nH 정도로 주파수 10 GHz에서 리액턴스가 88 Ω이 되어 소자의 이득 및 SNR 등 전기적 외부특성을 크게 열화 시키기에 충분하다<sup>[5], [6]</sup>. 자유공간에서의 본딩와이어는 모멘트법을 통하여 정량적으로 해석되었으나<sup>[7]</sup>, 이 결과는 플라스틱 재료에 묻힌 본딩와이어의 경우에는 직접 적용할 수 없다. 플라스틱 실장 재료 및 PCB의 기판 재료로 널리 사용되는 FR-4 composite를 고려하였는데, 이는 FR-4 composite의 전기적, 기계적 특성이 안정하기 때문이다<sup>[8]</sup>. 그러므로, FR-4 composite를 패키지 재료로 하는 플라스틱 패키지 안에서는 FR-4 composite의 유전효과로 인하여 본딩와이어의 방사파가 크게 증대되기 때문에, 유전효과를 고려한 본딩와이어의 기생 특성을 광대역 주파수에서 정확히 해석하여야 한다.

본 논문에서는 FR-4 composite에 묻힌 최단 길이(460 μm)의 본딩와이어를 도체손실을 고려한 모멘트법을 이용하여 광대역 주파수에서 해석하였다. 측정결과를 바탕으로 한 Cole-Cole 모델<sup>[8], [9]</sup>을 이용하여 FR-4 composite의 비유전율을 광대역 모델화 되었다. 자유공간상의 본딩와이어에 비하여, 높은 주파수에서 FR-4 composite에 묻힌 본딩와이어의 저항이 방사효과에 의하여 크게 증대되었으며, 이에 따라 기생 인덕턴스가 증가함을 관찰하였다. 또한, FR-4 composite의 비유전율을 상수로 가정하는 경우, 측정결과를 이용한 Cole-Cole 모델과 비교하여 높은 주파수에서 큰 오차를 가짐을 확인하였다. 유전체 손실에 의한 영향은 60 GHz 이상의 매우 높은 주파수에서 관찰되었으며, 유전체 손실을 고려할 경우 본딩와이어의 리액턴스가 고려하지 않았을 때의 것에 비하여 약간 작은 값을 보임을 관찰하였다. 따라서, 플라스틱 재료의 정확한 광대역 비유전율 모델이 고주파 플라스틱 패키지의 설계에 필수적임을 확인하였다. 일반적으로 수 GHz 대역

의 ISM 밴드에서 사용되는 소자의 실장 경우 본딩와이어의 길이가 수 mm이므로, 본 해석결과와 주파수를 수 배 감산하여 기생특성을 예측할 수 있다. 이 결과는 고주파 소자의 플라스틱 실장시 본딩와이어의 기생 성분 예측 및 회로보상에 매우 효과적으로 이용될 수 있다.

## II. 모델링 및 해석

### 1. 본딩구조 및 유전체의 광대역 모델

그림 1은 웨지 본딩와이어를 크기가 80 μm × 80 μm인 본딩 패드로부터 완전 접지평면에 최단거리로 연결한 경우이다. 본딩와이어의 구조는 GaAs 기판을 이용한 실제 본딩실험으로부터 통계적 길이가 최소일 때로 구해졌으며 모멘트법 계산을 위하여 3개의 직선 와이어로 근사하였다. 모멘트법 계산에서 본딩와이어의 직경과 전체 길이는 각각 25 μm, 460 μm이다.

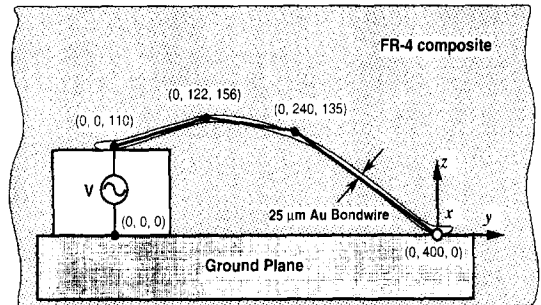


그림 1. FR-4 composite에 묻힌 길이가 460 μm인 웨지 본딩와이어의 구조

Fig. 1. A 460 μm-long grounded bondwire buried in an FR-4 composite.

그림에 보인 FR-4 composite는 패키지 및 인쇄회로기판의 재료로 널리 사용되는데, 이는 물리적, 화학적, 기계적 특성이 뛰어나며 경제성측면에서 우수하기 때문이다. FR-4 composite는 보강재(reinforcement)와 수지(resin)를 주성분으로 하는데, 이것의 유전 특성은 이들의 체적 구성비에 따라 크게 변하며, 다음과 같은 복소 유전율로 표현된다.

$$\epsilon^* = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

여기에서  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon'$ , 그리고  $\epsilon''$ 은 각각 자유공간의 유전율, 비유전율, 유전율의 실수부분과 허수부분을 의미한다.  $\epsilon''$ 은 시변(time-varying) 전장에 따른 유전

체의 이완(relaxation) 현상에 의한 유전체 손실을 표현하며, 주파수에 따라 증가하다가 최대 이완 주파수( $f_m$ ) 이후 감소한다. 이는 전계가 매우 급하게 변화되어 물질 내부의 분극이 이루어지기 전에 완료되기 시작하므로 오히려 손실이 감소하는 결과를 초래하기 때문이다. 그리고  $\epsilon'$ 은  $f_m$ 이후 급격하게 감소하는 만곡부를 보인다. 이러한 복소 비유전율의 주파수에 따른 변화는 다음의 Debye 분산 방정식에 의하여 표현될 수 있다<sup>[10,11]</sup>.

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

여기에서  $\omega$ ,  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$ , 그리고  $\tau(=1/(2\pi f_m))$ 는 각각 각주파수, 저주파( $\ll f_m$ )에서의 유전상수의 실수부분, 고주파( $\gg f_m$ )에서의 유전상수의 실수부분, 그리고 분극 이완 시간(polarization relaxation time)이며 다음과 같이 실수부와 허수부로 분리된다.

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3-a)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3-b)$$

그러나, Debye 방정식은 폴리머계 물질인 FR-4 composite의 분산효과에 의한 다중 완화 작용(multiple relaxation)을 표현할 수 없으므로, Debye 방정식을 부분적으로 수정하여 분산효과를 고려한 Cole-Cole 모델에 의하여 근사적으로 복소 유전상수를 실제에 근접하게 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^\alpha} \quad \text{단, } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4)$$

여기에서  $\alpha$ 는 분산 인자로 1일때 Debye 분산 방정식과 동일하게 되며 값이 작을 수록 복합 완화 작용에 의한 분산효과가 커짐을 의미한다. 이 유전체 모델은 다음의 모멘트법 계산과정에서 주파수에 관계하는 유전체공간 모델로서 사용된다.

## 2. 모멘트법 해석

그림 1에 보인 본딩와이어의 입력임피던스를 모멘트법으로 계산하기 위하여, 본딩와이어를 1차 선형 분할(3개의 직선 와이어) 및 2차 세부 분할(13개 펄스 조각)로 나누어 각 세부 분할에서의 전류를 펄스시험(pulse testing) 함수 및 펄스확장(pulse expansion)

함수로 전개한다. 모멘트법 계산의 편이를 위하여 GaAs 기판의 유전효과와 본딩 패드의 자체 정전용량은 매우 작으므로 무시하였다. 이는 기판 모드(substrate mode)가 수 천 GHz 이상에서 발생되며 접지된 와이어구조를 고려하였으므로 전장에 비하여 자장이 주요하여 계산이 고려된 주파수 대역에서 기판의 유전효과를 무시할 수 있기 때문이다. 고려되는 주파수 범위에서 본딩와이어 반경은 12.5  $\mu\text{m}$  로 와이어의 길이나 파장에 비하여 매우 작기 때문에 와이어에 흐르는 전류는 와이어의 축 방향성분만으로 가정할 수 있다. 와이어상의 미지 전류에 의하여 산란되는 전장은 벡터 포텐셜로 표현할 수 있으며 자유공간상의 그린 함수에 의한 스칼라 포텐셜은 로렌즈 게이지 조건을 이용하여 나타낼 수 있다. 여기서 전하 밀도 분포를 연속 방정식에 의하여 전류분포로 표현한다. 각 펄스분할에 분포하는 전장과 포텐셜의 위상이 펄스분할상에서 일정하다고 가정하므로써, 동일한 펄스 시험 함수를 이용하여 와이어의 세부분할에서의 전장, 벡터 포텐셜 그리고 전하 밀도 분포를 전류 확장 계수를 통하여 각각의 시험 분할에서 이산화한다. 이산화된 식을 다음의 적분식( $\Psi_{m,p,q}$ )을 이용한  $N \times N$ 의 행렬형태의 회로망 식으로 정리된다<sup>[7]</sup>.

$$[Z][I] = [V] \quad (5)$$

여기서

$$[I] = [I_1 \quad I_2 \quad \dots \quad I_n]^T$$

$$[V] = [\vec{E}_i(s_1) \cdot \vec{s}_1 \quad \vec{E}_i(s_2) \cdot \vec{s}_2 \quad \dots \quad \vec{E}_i(s_m) \cdot \vec{s}_m]^T$$

$$Z_{mm} = \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_0\epsilon_r(\omega)} \left\{ \begin{aligned} & \omega^2\epsilon_0\epsilon_r(\omega)\mu_0[\vec{s}_m \cdot \vec{s}_n]\Psi_{m,n-\frac{1}{2},n+\frac{1}{2}} \\ & - \frac{1}{(s_{n+1}-s_n)}[\Psi_{m+\frac{1}{2},n,n+1} - \Psi_{m-\frac{1}{2},n,n+1}] \\ & + \frac{1}{(s_n-s_{n-1})}[\Psi_{m+\frac{1}{2},n-1,n} - \Psi_{m-\frac{1}{2},n-1,n}] \end{aligned} \right\}$$

$$\Psi_{m,p,q} = \int_{s_p}^{s_q} k(s_m - s') ds'$$

위에서  $k(s-s')$ 는 다음과 같이 전체 와이어 둘레에서의 그린함수를 적분하여 계산된다.

$$k(s-s') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r(\omega)}r}}{r} d\phi \quad (6)$$

위 계산과정중 유전체의 전기적 영향을 고려하기 위하

여 식 (4)를 유전상수 부분에 입력하였다. 모멘트법 계산에서 완전 접지평면은 영상 와이어로 대체되었다. 재질이 금인 본딩와이어의 도체손실에 기인한 slow-wave 효과에 의한 방사 증대를 표현하기 위하여, 와이어 펄스조각에 현상학적 도체손실 등가기법에 의하여 계산된 내부 분포 임피던스를 집중소자화하여 균일하게 입력하였다. 본딩와이어의 입력 임피던스는 인가 전압을 본딩패드에서의 입력전류로 나누어 계산된다.

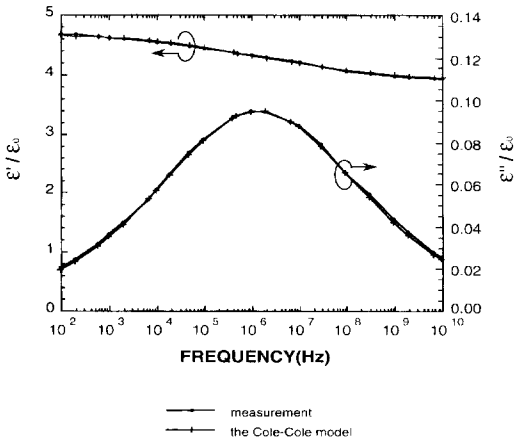


그림 2. FR-4 composite의 측정된 비유전율과 모델링된 비유전율

Fig. 2. Measured and modeled permittivities of a typical FR-4 composite.

### III. 수치적 결과

#### 1. FR-4 composite의 광대역 유전상수 모델

그림 2에 주파수에 관계하는 FR-4 composite(레진의 부분체적비 : 0.724)의 측정된 비유전율과 Cole-Cole 모델된 비유전율을 보였다. Cole-Cole 모델식이 실제 측정값에 잘 맞도록 곡선맞춤(curve fitting)하여 계수를 구한 결과,  $\epsilon_{\infty}$ ,  $\epsilon_s$ ,  $\tau$ , 그리고  $\alpha$ 는 각각 3.89, 4.71, 0.106  $\mu\text{sec}$ , 그리고 0.28로 구해졌다. 그림 2에 보인 바와 같이, 모든 주파수 영역에서 측정값과 모델된 값과의 차이가 무시할 수 있을 정도로 매우 근소함을 알 수 있다. 10 GHz 이상 1 THz미만인 주파수에서의 복소유전상수는 그림 2의 결과를 외삽(extrapolation)하여 근사할 수 있다. 이는 분극의 발생 메커니즘에 기인한다. 분극은 크게 이극분극(dipole polarization), 원자분극(atomic polarization), 그리고 전자분극(electronic polarization)으로 분류되는데, 저

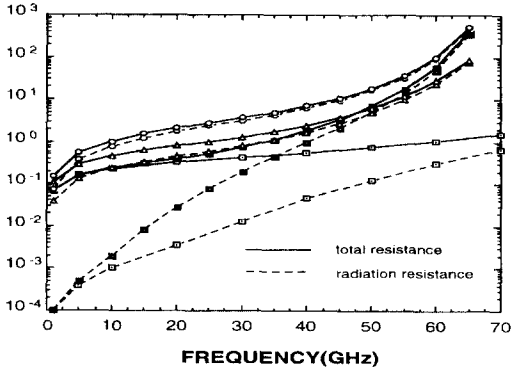
주파에서 수 백 GHz까지는 이극분극, 이후 주파수에서 수 백 THz까지는 원자분극, 그 이후의 주파수에서는 전자분극이 각각 우세하다<sup>[11]</sup>. 그러므로, 분순물 함유가 매우 적은 FR-4 composite의 경우 100 GHz 이전의 주파수까지의 체계적인 분극현상은 이극분극 외에 다른 분극요소가 없으므로 복소 유전상수를 외삽하여 모멘트법 계산시 주파수 70 GHz까지 근사적으로 적용할 수 있게 된다.

#### 2. 입력 임피던스

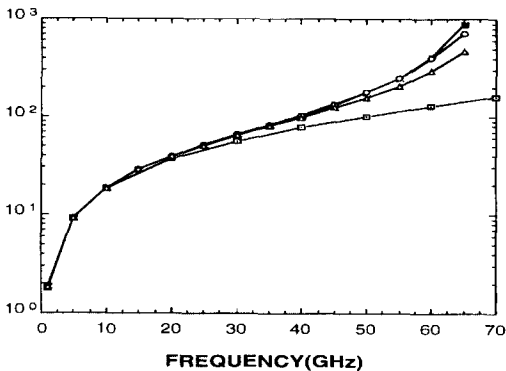
그림 3(a), (b)에 자유공간 및 여러 비유전율 모델에 의한 물질에 묻힌 본딩와이어의 저항과 리액턴스를 광대역 주파수에서 계산하여 각각 보였다. 비유전율  $\epsilon_r$ 이 1일 때(경우 I)는 자유공간을 의미한다. FR-4 composite의 비유전율을 실수 비유전율 모델( $\epsilon_r = 4.5$  : 경우 II), 복소 비유전율 모델( $\epsilon_r = 4.5 - j0.0945$  : 경우 III), 그리고 Cole-Cole 모델(경우 IV)의 3가지 경우로 나누었다. 유전체가 있을 때인 경우 II, III, IV를 살펴 보면, 자유공간인 경우 I에 비하여 30 GHz 이상의 주파수에서 저항이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이는 유전 효과에 의하여 파장의 유효 길이가 감소하여 방사효과가 증대되었기 때문이다. 경우 I, II에서, 전체 저항은 저주파에서 도체손실에 의한 내부 분포 저항 성분, 고주파에서 방사 저항 성분이 우세하다. 이에 반하여, 경우 III, IV일 때는 낮은 주파수에서 도체손실이 전체 저항에 미치는 영향이 매우 작다. 이는 낮은 주파수에서 비유전율의 허수부분( $\epsilon''$ )에 의한 유전체 손실이 와이어의 도체손실에 필적할 수 있을 정도로 크기 때문이다. 경우 III과 경우 IV의 비교로부터, 전체 주파수 영역에서 전체 저항이 크게 차이가 남을 볼 수 있는데, 이는 경우 IV의 비유전율중  $\epsilon'$ 이 최대분극이원주파수( $f_m$ ) 이후 주파수에 따른 급격한 감소에 의하여 경우 IV의 방사 저항이 감소하기 때문이다.

그림 3(b)로부터 기생 리액턴스는 재료의 비유전율에 따른 의존도가 큼을 관찰할 수 있다. 경우 II, III, IV의 리액턴스는 30 GHz 이후 급격하게 증가한다. 이러한 리액턴스는 낮은 주파수에서 비유전율에 관한 의존도가 매우 낮으나, 30 GHz 이후 비유전율에 따라 변화가 매우 큼을 관찰할 수 있다. 이는 약 30 GHz 이상의 높은 주파수에서 유전효과에 의하여 증대된 방사저항에 기인한다. 60 GHz 이상의 주파수에서 경우

III의 리액턴스는 경우 II의 것에 비하여 약간 큰 값을 갖는데, 이는 비유전율중  $\epsilon''$ 의 유전체 손실 때문이다. 이는  $\epsilon''$ 에 의한 유전체 손실로 인하여 본딩와이어 둘레의 전자기장이 효과적으로 감소하기 때문이다.



(a)



(b)

그림 3. 여러 비유전율 조건에서 계산된 본딩와이어의 (a)저항과 (b)리액턴스

Fig. 3. Calculated (a) resistance and (b) reactance of the bondwire for different permittivities.

그림 4는 본딩와이어의 계산된 기생 인덕턴스이다. 경우 I의 것에 비하여, 경우 II, III, IV의 인덕턴스는 유전 효과에 의하여 증대된 방사 효과로 인하여 주파수에 따라 급격하게 증가한다. 경우 III과 경우 IV를 비교하면, 60 GHz에서 0.6 nH 정도의 차이가 남을 관찰할 수 있는데, 이는 경우 III이 비유전율을 전체 주파수에서 상수로 가정하므로써, 수 GHz 이상의 높은

주파수에서 FR-4 composite의 실제 비유전율과 차이가 크기 때문이다.

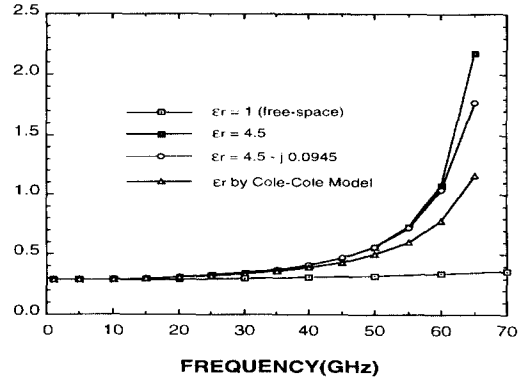


그림 4. 여러 비유전율 조건에서 계산된 본딩와이어의 인덕턴스

Fig. 4. Calculated inductance of the bondwire for different permittivities.

이러한 결과로부터, 광대역 주파수에서 동작하는 플라스틱 실장된 소자의 실장 기생성분을 정확하게 예측하기 위하여, 실장재료의 비유전율을 Cole-Cole 모델화 하는 것이 필수적이며, 기존에 사용되는 일정 주파수에서의 비유전율 모델(경우 II, III)의 적용이 매우 부적합함을 확인하였다. 특히, 수 GHz 대역에서 사용되는 본딩와이어는 길이가 수 mm 정도이므로, 이러한 주파수 특성 변화가 사용되는 수 GHz 이내로 이동하게 되어 소자의 플라스틱 실장시 그 유전체 효과를 역시 고려해야 한다.

#### IV. 결론

유전체 재료내에 묻힌 본딩와이어의 입력 임피던스를 광대역 주파수에서 도체손실 및 유전체손실을 고려한 모멘트법을 이용하여 계산하였다. 플라스틱 실장 재료로서 FR-4 composite를 이용하였으며, Cole-Cole 모델을 이용하여 FR-4 composite의 비유전율을 광대역 모델화 하였다. 계산결과로부터, 유전체 효과에 의하여 크게 증대된 방사효과로 인하여 FR-4 composite에 묻힌 본딩와이어의 기생 인덕턴스가 주파수에 따라 급격하게 증가함을 관찰하였다. 길이가 460  $\mu\text{m}$ 인 본딩와이어의 경우, 유전체 손실에 의한 영향은 60 GHz 이상의 매우 높은 주파수에서 관찰되었으며, 유전체 손실을 고려할 경우 본딩와이어의 리액턴스가 고려

하지 않았을 때의 것에 비하여 약간 작은 값을 보임을 확인하였다. 이로써, FR-4 composite의 유전체 손실에 의한 영향은 매우 작음을 관찰하였다. 또한, 초고주파 플라스틱 패키지의 기생특성을 예측하는데 있어 비유전율을 상수로 가정하는 방법이 부적합함을 확인하였다. 본 논문의 결과는 본딩와이어 길이에 따른 주파수 대역 변환을 통하여 저가형 초고주파 플라스틱 패키지의 설계에 있어 정량적 자료로 활용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] C. Nagy, L. Shumway, and M. Gomes-Casseres, "Advanced Manufacturing and Packaging Technologies for Military and Commercial Markets," *Microwave Journal*, vol. 38, no. 8, pp. 22-36, Aug. 1995.
- [2] D.-W. Wu and G. N. Henderson, "Large-Signal Modeling and Characterization of a Plastic Packaged HBT for Use in Wireless Portable Units," in *Proc. of IEEE 4th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging*, Portland, Oregon, Oct. 2-4, 1995, pp. 166-169
- [3] E. Suhir, "Predicted Failure Criterion (von-Mises Stress) for Moisture-Sensitive Plastic Packages," in *Proc. of 45th Electronic Components and Technology Conference*, 1995, pp. 266-284
- [4] D. Edwards, B. Stream, and M. Helmick, "The Effect of Internal Package Delaminations on the Thermal Performance of

- PQFP, Thermally Enhanced PQFP, LOC, and BGA Packages," in *Proc. of 45th Electronic Components and Technology Conference*, 1995, pp. 285-292
- [5] S.-K. Yun, H.-Y. Lee, "Characterization of angled bonding wires for high frequency integrated circuits," *IEEE CPMT and NIST, VLSI Packaging Workshop*, pp. 19-22, Oct. 1995
- [6] M. Nakamura, N. Suzuki and T. Ozeki, "The Superiority of Optoelectronic Integration for High-speed Laser Diode Modulation," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-22, pp. 822-826, June 1986.
- [7] H.-Y. Lee, "Wideband Characterization of a Typical Bonding Wire for Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-43, no. 1, pp. 63-68, Jan. 1995.
- [8] ASM International, *Electronic Materials Handbook*, Volume 1, Packaging, 1989, pp. 597-600.
- [9] K. S. Cole and R. H. Cole, "Dispersion and absorption in dielectrics I: alternating current characteristics," *J. Chem. Phys.*, vol. 9, pp. 341-351, 1941.
- [10] L. K. Van Beek, *Progress in Dielectrics*, Vol. 7, Heywood Publishing, 1967.
- [11] A. R. Blythe, *Electronic Properties of Polymers*, Cambridge University Press, 1979.

### 저 자 소 개



尹尙基(學生會員)

1996年 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사). 1996년 ~ 현재 아주대학교 대학원 전자공학과 박사 과정 재학중. 주관심분야는 고속, 고밀도 신호선 및 실장구조의 최적설계 및 측정 등임.

李海英(正會員) 第33卷 A編 7號 參照

현재 아주대학교 전자공학과 교수