

論文97-34D-2-1

초고주파 소자 실장을 위한 유전체를 이용하는 본딩와이어 기생 효과 감소 방법

(Reduction of the Bondwire Parasitic Effect using Dielectric Materials for Microwave Device Packaging)

金成鎮*, 尹尙基*, 李海英*

(Sung-Jin Kim, Sang-Ki Yun, and Hai-Young Lee)

요 약

초고주파 소자의 실장에 사용되는 본딩와이어의 기생 성분을 감소시키고 정합특성을 개선하기 위하여 다중 본딩와이어 주위에 유전 물질(FR-4 composite)을 몰딩하는 방법을 제안하였다. 이 구조의 본딩와이어를 모멘트법(MoM : Method of Moment)을 이용하여 해석하고 기존 본딩방법들의 특성과 비교하였다. 특히, FR-4 composite의 유전율은 광대역 주파수에서 손실 및 변화를 고려할 수 있는 Cole-Cole 모델을 이용하였다. 해석결과, 주파수 20 GHz에서 기생 리액턴스는 11 Ω 으로 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본 와이어에 비하여 각각 약 90 %, 80 %, 60 %가 감소하였다. 또한, 등가 특성 임피던스는 60 Ω 으로 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어와 리본의 235 Ω , 133 Ω , 98 Ω 에 비하여 정합특성이 크게 개선되었다. 또한, 이러한 정합특성 개선으로 20 GHz에서 반사 손실은 각각 15 dB, 10 dB, 5 dB가 개선되었고 삽입 손실은 각각 2.5 dB, 0.7 dB, 0.2 dB가 개선되었다. 이 방법은 초고속 및 초고주파 소자용 패키지에 응용되어 본딩와이어에 의한 실장시 특성 저하를 극소화 할 수 있다.

Abstract

For the reduction of parasitic inductance and matching of bonding wire in the package of microwave devices, we propose multiple bonding wires buried in a dielectric material of FR-4 composite. This structure is analyzed using the method of moments(MoM) and compared with the common bondwires and ribbon interconnections. The FR-4 composite is modelled by the Cole-Cole model which can consider the loss and the variation of the permittivity in a frequency. At 20 GHz, the parasitic reactance is reduced by 90 %, 80 %, 60 % compared to those of a single bonding wire in air, double bonding wires in air and ribbon interconnection in air, respectively. Also, the new bondwire shows very good matching of 60 Ω characteristic impedance and has 15 dB, 10 dB, 5 dB improvement of the return loss and 2.5 dB, 0.7 dB, 0.2 dB improvement of the insertion loss compared to the common interconnections. This technique can minimize the parasitic effect of bondwires in microwave device packaging.

* 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25日, 수정완료일: 1997年2月6日

I. 서 론

최근 이동 통신, 멀티미디어 산업의 급속한 발전은 정보화 사회로의 진행을 가속화시키고 있다. 또한, 사용자에 대한 고품질 정보 서비스를 만족시키기 위한 대용량 및 초고속 통신 시스템의 개발이 지속적으로 진행 중이다. 이로 인하여 고집적, 고속 정보 통신용

반도체 소자 개발의 중요성이 강조되고 있다. 이러한 소자의 개발은 반도체 칩자체의 설계기술 뿐 아니라, 소자의 실장(packaging)기술 개발을 기본 전제로 한다. 그동안 국내외의 실장기술은 상대적으로 낮은 밀도와 낮은 속도의 반도체 칩을 고려하였으므로 주로 기계적, 재료적 측면에서 연구가 수행되었다. 그러나, 반도체 칩(chip)의 정보 처리량이 급속히 증가함에 따라 필연적으로 소자의 동작 속도가 증가되며 고속 신호의 전송 특성이 크게 열화된다. 이러한 전기적 신호의 전송 특성 열화는 특히 반도체 칩 자체 뿐 아니라 외부 연결선, 실장 물질, 실장 형태 등의 외적인 요소에 크게 영향을 받는다. 실제 반도체 칩내부의 대표적 외부 연결선의 하나인 본딩와이어는 기생 인덕턴스로 작용하여 소자의 고속 신호 전송 특성을 제한하는 중요한 원인이 된다^[1].

이러한 본딩와이어의 기생 효과를 개선할 수 있는 방법으로서 다중 와이어 본딩, 리본 본딩, 플립칩 본딩이 있다. 다중 와이어 본딩은 여러 본딩와이어를 병렬로 연결하여 기생 성분을 감소시키고 고주파 전송 특성을 개선시키나, 고밀도 집적회로에서는 와이어간의 좁은 사이 간격에 기인한 큰 상호 인덕턴스로 인하여 기생 성분의 감소 효과가 크지 않다^[2]. 리본은 본딩와이어에 비하여 전류 분산 및 도체 저항 감소의 장점이 있으나, 공정의 유연성이 부족하여 자동화 공정이 어렵다. 또한, 본딩시 소자에 과도한 스트레스를 줄 수 있어 소자 전체의 성능을 저하시킬 수 있다. 플립칩 본딩은 그 연결 길이가 매우 짧아 기생 성분이 작으며 특히, 고밀도 실장이 가능해 최근 응용분야가 확대되고 있으나 주로 초소형 모듈의 고밀도 실장에 적용되고 있다^[3].

본 논문에서는 초고주파소자의 실장후 발생하는 기생 성분을 효과적으로 감소시키는 방법으로서, 저주파 플라스틱 실장재료(Epoxy Molding Compound : EMC) 및 PCB의 기판재료로 널리 쓰이는 에폭시 소재의 FR-4 composite로 기존의 이중 본딩와이어를 몰딩하는 방법을 제안하고 해석하였다. 그리고, 현재 초고주파 집적회로 및 하이브리드 초고주파 회로에 널리 쓰이고 있는 기존의 본딩와이어 및 리본과 특성을 비교하였다. 기존의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본과 본 논문에서 제안한 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어를 모멘트법을 이용하여 전체 입력 임피던스를 30 GHz까지 계산하였다. 또한, 각 연결선

구조를 전송 선로로 모델하여 특성 임피던스를 구한 다음, 50 Ω 선로에 대한 정합특성을 고찰하였다. 특히, 본 논문에서 제안한 구조의 해석시, FR-4 composite의 광대역 유전율 모델인 Cole-Cole 모델^[4]을 이용하여 주파수에 따른 유전율의 변화와 손실이 본딩와이어에 미치는 영향을 정량적으로 고려하였다. 해석결과, 20 GHz에서 제안된 구조의 기생 리액턴스는 11 Ω으로 기존의 단일 본딩와이어(100 Ω)와 이중 본딩와이어(50 Ω)에 비하여 각각 90 %, 80 %가 감소되고 고주파 특성이 우수한 리본(26 Ω)에 대하여서도 60 %의 큰 개선을 보였다. 이러한 기생 리액턴스의 감소는 FR-4 composite의 정전용량 증가 효과가 본딩와이어의 유도성 리액턴스 효과를 보상시키기 때문이다.

한편, 초고주파 대역에서 본딩와이어는 일종의 전송선로로 등가 특성 임피던스를 정의할 수 있으며 비교적 큰 특성 임피던스^[5]로 부정합특성을 보인다. 이러한 부정합 특성으로 인한 고주파 신호 전송 특성을 개선하기 위한 방법으로서, Flared 리드 스트립(lead strip)을 이용하여 본딩와이어의 고주파 전송특성을 향상시키는 연구가 발표되었다^[6]. 이 방법은 본딩와이어가 연결되는 리드 스트립의 폭을 증가시켜 용량성 성분을 구현하고 이로써 본딩와이어의 유도성 성분을 상쇄시킨다. 그러나, 용량성 성분이 Flared 리드 스트립 부분에 분포하기 때문에, 와이어의 인덕턴스와 결합하여 일종의 공진회로가 구성되므로, 광대역 주파수에서의 효과적인 반사 손실 감소를 기대할 수 없다. 이에 반하여, FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어에서는 몰딩 유전물질로 분포 용량성 리액턴스를 구현하므로 수십 GHz 이상의 높은 주파수까지 우수한 정합특성 및 신호 전송특성을 보장할 수 있다.

해석 결과, FR-4 composite에 몰딩된 이중 본딩와이어는 특성임피던스가 60 Ω으로 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본의 235 Ω, 133 Ω, 98 Ω에 비하여 정합특성이 크게 개선됨을 확인하였다. 또한, 20 GHz에서 몰딩된 이중 와이어는 향상된 정합특성으로 인하여 반사 손실이 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본에 비해 각각 15 dB, 10 dB, 5 dB가 개선되고 삽입 손실은 각각 2.5 dB, 0.7 dB, 0.2 dB가 개선되었다. 본 논문의 해석결과는 실장용 외부 연결선의 기생특성 및 정합특성을 향상시키는데 직접적으로 적용 가능하며, 초고주파 소자의 실장구조 설계시 효과적으로 이용될 수 있다.

II. 구조 및 해석 방법

1. 연결선 구조

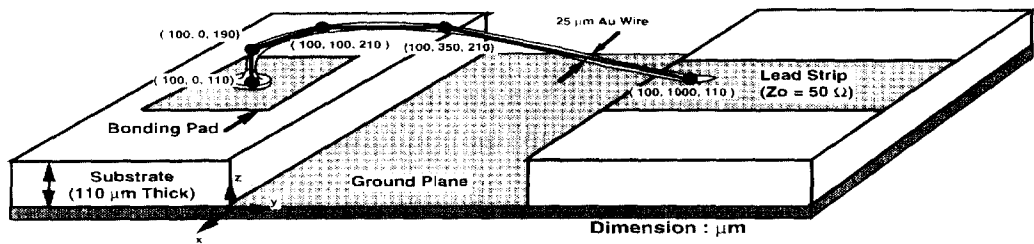
본 논문에서 고려한 연결선 구조인 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본과 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어의 구조를 그림 1에 나타내었다. 이 연결선 구조는 모놀리딕 고주파집적회로(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 및 하이브리드 초고주파 회로(Hybrid Microwave Circuit)에서 일반적으로 관찰되는 구조이다. 모멘트법을 이용한 정량적인 해석을 위하여, 그림 1(a), (b), (d)에 보인 본딩와이어는 실제구조와 오차를 최소화하는 범위 내에서 선형화하여 각 지점에 좌표를 부여하였다.

그림 1(a)에서 직경이 $25\ \mu\text{m}$ 이고 재질이 금인 본딩 와이어는 $100\ \mu\text{m}$ 두께의 기판, $10\ \mu\text{m}$ 두께의 본딩 패

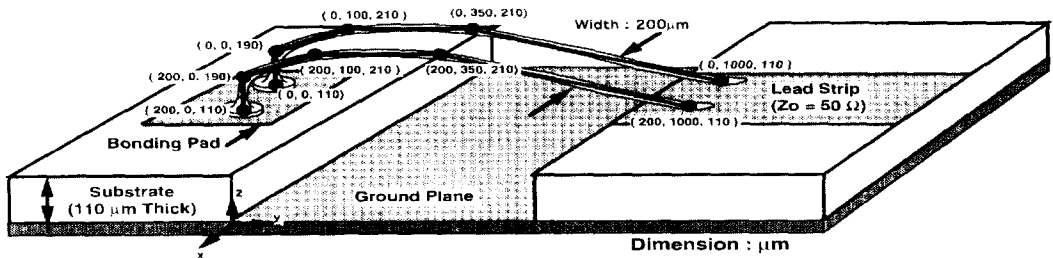
드(Bonding Pad)으로 구성된 본딩 스텝(Bonding Step)으로부터 본딩단차가 동일하며 특성 임피던스가 $50\ \Omega$ 인 마이크로스트립 기판에 볼-웨지(ball-to-wedge) 방식으로 와이어의 길이를 $1.1\ \text{mm}$ 가 되도록 본딩되었다. 그림 1(b)에 보인 이중 본딩와이어는 그림 1(a) 구조를 갖는 와이어 두개를 $200\ \mu\text{m}$ 간격으로 본딩하였다. 그림 1(c)는 리본으로 비교를 위하여 이중 본딩와이어와의 사이 간격과 동일한 폭을 갖도록 하였다. 그림 1(d)의 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어에서, 본딩와이어와 그 주위의 공간은 FR-4 composite로 몰딩되었다.

2. FR-4 composite의 광대역 유전율 모델링

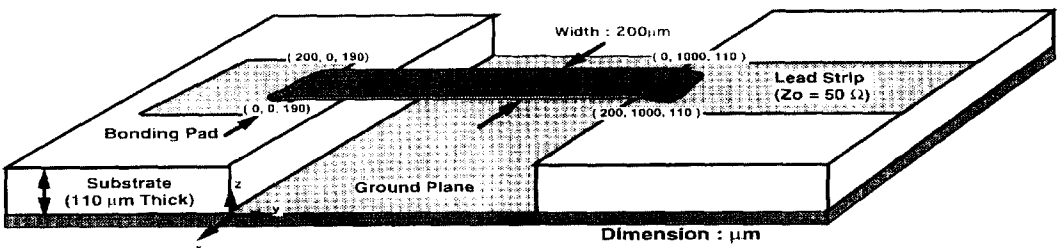
폴리머 계열의 FR-4 composite는 기계적, 전기적 안정성 및 경제성으로 인하여, 저주파 플라스틱 실장재



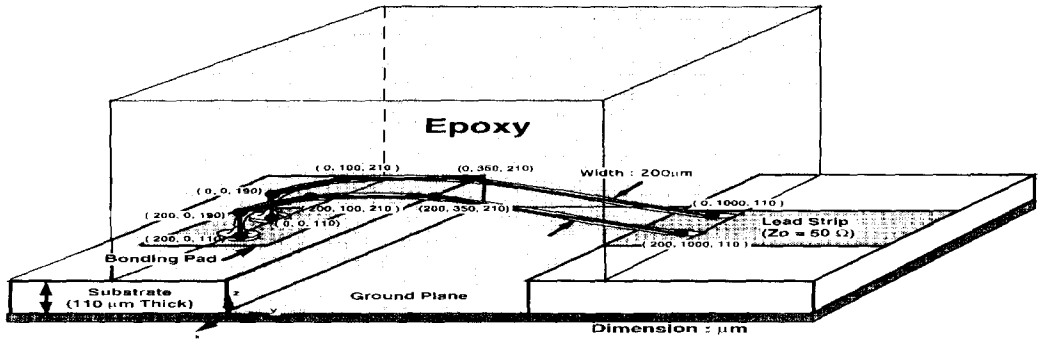
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 1. 여러 본딩형태: (a) 공기중의 단일 본딩와이어, (b) 공기중의 이중 본딩와이어, (c) 공기중의 리본 접속, (d) FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어

Fig. 1. Various Bonding Types: (a) Single Bonding Wire in air, (b) Double Bonding Wires in air, (c) Ribbon Wire, (d) Double Bonding Wires in FR-4 composite

료(Epoxy Molding Compound : EMC)와 인쇄회로 기판(Printed Circuit Board : PCB)에 널리 사용된다. 일반적으로 FR-4 composite의 비유전율은 사용 주파수에 관계없이 4.5 근처의 값으로 가정되어 왔으나, 제안된 구조의 본딩와이어에 미치는 전기적 영향을 광대역에서 고려하기에는 부적합하다. 그러므로, 모멘트법을 이용한 해석시 FR-4 composite의 영향을 정확하게 고려하기 위해서는 FR-4 composite의 광대역 주파수에 관계하는 유전율을 모델링하는 것이 중요하다. FR-4 composite의 주성분은 보강재(reinforcement)와 수지(resin)이고 이 외의 여러 첨가재로 구성되어 있다. FR-4 composite의 전기적 특성을 표현하는 유전율은 보강재와 수지의 체적비의 함수로 표현 가능하며, 다음 식으로 간단하게 표현된다^[4].

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

여기에서 ϵ_0 , ϵ_r' , ϵ_r'' 는 각각 자유 공간의 유전율, 비유전율, 비유전율의 실수 부분과 허수 부분에 해당한다. ϵ_r' 은 최대 이완 주파수(f_m)를 중심으로 하는 주변 주파수 대역에서 급격하게 감소하는 만곡부를 보인다. 그리고 ϵ_r'' 은 시변전장에 따른 유전체 이완 현상에 의한 유전체 손실을 표현하며, 주파수에 따라 증가하다가 f_m 이후 감소한다. 그리고 이러한 복소 비유전율의 주파수에 따른 변화는 폴리머의 대표적 유전율 모델인 Debye분산 방정식에 의하여 표현될 수 있다.

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

여기에서 ω , ϵ_s , ϵ_∞ , 그리고 $\tau (= 1/(2\pi f_m))$ 는 각각 각주파수, 저주파($\ll f_m$)에서의 유전 상수의 실수 부분, 고주파($\gg f_m$)에서의 유전 상수의 실수 부분, 및 분극 이완 시간을 의미한다. 그러나, Debye 방정식은 단일 완화 작용에 관하여 잘 표현하나, 복합 폴리머계 물질인 EMC의 다중 완화 작용에 의한 분산 효과를 고려할 수 없으므로, Debye 방정식을 부분적으로 수정한 Cole-Cole 모델을 이용하여 복소 비유전율을 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^\alpha} \quad \text{단, } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (3)$$

위 식에서 α 는 다중 완화 작용을 고려할 수 있도록 하기 위한 분산 인자이다. 식 (3)에 의하여 모델링된 FR-4 composite의 유전율을 모멘트법 해석시 입력하여 본딩와이어의 신호 전송에 미치는 재료의 영향을 보다 정확히 고려할 수 있도록 하였다. 실제 측정결과와 일치하는 FR-4 composite에 대한 Cole-Cole 모델의 파라미터를 계산한 결과, 수지의 체적비가 72.4%인 FR-4 composite의 복소 비유전율에 관한 ϵ_s , ϵ_∞ , τ , α 의 값으로 각각 3.89, 4.71, 0.106, 0.28을 얻었다^[4].

3. 모멘트법 및 등가 전송선로 모델

그림 1에 보인 여러 연결선 구조를 모멘트법을 이용하여 광대역 주파수에서 해석하였다. 여러 선형 와이어들의 연결로 근사된 본딩와이어에 흐르는 전류를 잘 표현할 수 있도록, 와이어를 인가 신호 파장의 1/32 배

이상으로 분할하였다. 또한, 리본 본딩와이어는 횡방향 전류 분포(Transverse distributions)를 충분히 나타낼 수 있도록 리본을 여러 직선 와이어로 표현하는 와이어 그리드(Wire-grid) 모델을 이용하여 모멘트법을 적용하였다. 모멘트법 계산시 각 선형와이어는 다시 여러 개로 2차 선형 분할을 한후 전류를 펄스 확장(Pulse expansion) 함수로 전개하고, 다시 펄스 시험(Pulse testing)함수를 이용하여 Galerkin's Process를 수행하였다¹⁷⁾. 본딩 패드의 자체 정전용량은 매우 작으므로 모멘트법 계산의 편이를 위하여 무시하였다. 또한, 기판 모드들(Substrate modes)은 100 GHz이상에서 발생되며 본딩와이어의 방사 효과(Radiation effect) 및 기판 모드와의 결합 효과(Substrate mode coupling effect)가 매우 작으므로 계산이 고려된 주파수 대역에서 본딩와이어 양끝 쪽의 구조 및 유전율의 불연속 효과를 무시하였다.

본딩와이어 직경은 25 μm로 와이어의 길이나 고려되는 주파수 범위의 파장에 비하여 매우 작기 때문에 와이어에 흐르는 전류는 와이어의 축 방향 성분만으로 가정할 수 있다. 이 분할된 와이어상의 미지 전류에 의하여 산란되는 전자장은 로렌즈 조건을 이용하여 균일 공간상의 그린 함수에 의하여 나타낼 수 있다. 각 펄스 분할에 분포하는 전장과 포텐셜의 위상이 2차 분할된 전류 펄스에서 일정하다고 가정하므로써, 동일한 펄스 시험 함수를 이용하여 와이어의 세부 분할에서의 전장, 벡터 포텐셜, 전하 밀도 분포를 전류 확장 계수를 통하여 각각의 시험 분할에서 이산화 한다. 이렇게 이산화된 식은 다음의 적분식(Ψ_m, p, q)을 정의하여 $N \times N$ 의 행렬 형태의 잘 알려진 회로망 식으로 정리할 수 있다.

$$[Z][I] = [V] \quad (4)$$

여기서

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

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

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

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

$$\vec{S}_i = i\text{번째 분할의 선벡터}$$

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

$$k(s-s') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-j\omega'(\mu_0\epsilon_r(\omega))r}}{r} d\phi \quad (5)$$

위 모멘트법 계산 과정에서 작은 손실을 갖는 유전체에 의한 분극 및 이완 현상은 복소 유전 상수($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)를 이용하여 고려하였으며, 완전 접지평면은 영상 이론(Image theory)을 이용하여 영상 와이어로 대체되었다. 본딩와이어의 입력 임피던스는 인가 전압을 본딩패드 위치에서의 입력 전류로 나누어 계산된다.

이상의 모멘트법 계산 결과로부터 본딩와이어 양 끝단의 본딩패드 및 리드 스트립 접속점에서 두 전류(I_1, I_2)를 추출하고 이로부터 산란 계수(S-parameter)를 계산할 수 있다. 연결선 양끝의 본딩패드와 리드 스트립과의 접속점을 각각 Port 1과 Port 2로 정의할 때, 리드 스트립의 특성 임피던스(Z_{L2})는 50 Ω으로 기준 임피던스와 같으므로 Port 2에서의 입사 전압 V_2^+ 가 존재하지 않게 된다. 이때, Port 1에서의 입력 임피던스(Z_{in1})로부터 다음 식을 이용하여 반사 손실을 구할 수 있다.

$$S_{11} = \left. \frac{V_1^-}{V_1^+} \right|_{Z_{L2}=50} = \Gamma_1 \Big|_{Z_{L2}=50} = \frac{Z_{in1} - 50}{Z_{in1} + 50} \Big|_{Z_{L2}=50} \quad (6)$$

한편, 삽입 손실은 Port 1에 구동 전원과 함께 전원 저항($Z_{L1}=50 \Omega$)을 직렬 연결하여 Port 1을 정합한 후 정합된($Z_{L2} = 50 \Omega$) Port 2에 전송되는 전압(V_2)을 Port 2의 전류(I_2)로부터 구하여 다음 식으로 계산한다.

$$S_{21} = \left. \frac{V_2^-}{V_1^+} \right|_{Z_{L2}=50} = \frac{V_2}{V_g/2} \Big|_{Z_{L2}=50} = \frac{2I_2 Z_{L2}}{V_g} \Big|_{Z_{L2}=50} \quad (7)$$

본딩와이어의 전송특성을 이해하기 위하여 와이어의 높이가 부분적으로 불균일한 전송 구조를 근사적인 균일 전송선으로 묘사한 후 등가 특성 임피던스(Z_0)를 구하였다. 이는 고려된 본딩와이어의 구조가 길이에 비하여 높이의 변화율이 매우 작으므로 그 특성 임피던스의 불균일성이 매우 낮아서 Quasi-TEM 모드 해석이 가능하기 때문이다. 여기서 모멘트법으로 구한 본딩와이어의 입력 임피던스(Z_{in1})로부터 등가 균일 전송선로

식¹⁸⁾을 이용하여 다음과 같이 등가 균일 특성 임피던스(Z_0)를 계산할 수 있다.

$$Z_0 = \frac{1}{2} \left\{ (Z_{in1} - Z_{L2}) \coth \gamma l + \sqrt{(Z_{in1} - Z_{L2})^2 \coth^2 \gamma l + 4Z_{in1}^2 Z_{L2}^2} \right\} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \gamma = j\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega)}$$

위 식에서 Z_{L2} , γ , l 은 각각 리드 스트립의 특성 임피던스, Quasi-TEM 모드의 복소 전송 상수, 본딩패드로부터 리드 스트립 연결점까지의 직선 거리를 나타낸다. 그림 1(a), (b), (c)의 공기 중의 접속선에서 ϵ_r' , ϵ_r'' 는 각각 해석된 전 주파수에서 1, 0을 사용하였다.

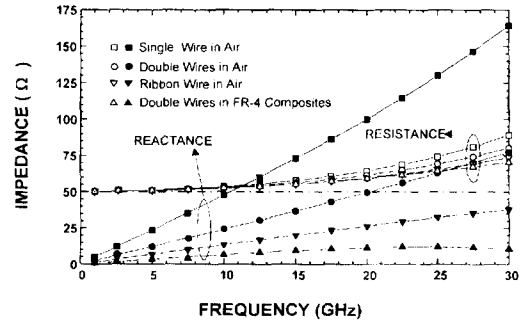
III. 해석 결과

1. 입력 임피던스

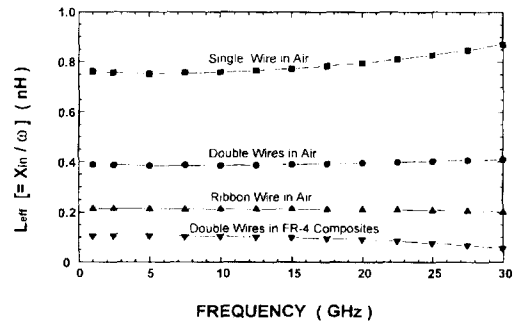
공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본, 그리고 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어의 주파수에 따른 입력 임피던스와 유효 기생 인덕턴스를 모멘트법으로 계산하여 그림 2(a), (b)에 각각 도시하였다. 주파수의 증가에 따라 입력 저항과 입력 리액턴스가 모두 증가함을 볼 수 있다. 주파수 30 GHz에서 네 연결선의 입력 저항의 차이는 최대 20 Ω이하인 것에 반하여 입력 리액턴스는 공기중의 단일 본딩와이어와 몰딩된 이중 본딩와이어간에 최대 150 Ω 차이가 발생함을 관찰하였다. 이로부터, 네 연결선의 전기적 특성의 차이는 주로 입력 리액턴스에 의해 결정됨을 알 수 있다. 주파수가 증가함에 따라 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본, 그리고 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어의 순서로 입력 리액턴스가 증가한다. 고려한 전체 주파수영역에서 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어의 입력 리액턴스가 최소임을 확인하였다. 유전체 몰딩을 적용한 본딩 기법은 20 GHz에서 기존의 단일, 이중, 리본 본딩 방법에 비하여 각각 약 90%, 80%, 60%의 입력 리액턴스 감소를 보였다. 이러한 리액턴스의 감소는 유전체로 인한 용량성 리액턴스가 기존의 본딩와이어에서 우세했던 유도성 리액턴스를 뺀 주파수영역에서 상쇄하기 때문이다.

그림 2(b)로부터, 공기중의 단일 와이어의 실효 기생 인덕턴스는 20 GHz에서 0.8 nH로 큰 기생 성분으로 작용함을 알 수 있다. 이에 비하여 공기중의 이중 와

어는 50 %의 인덕턴스 감소 효과를 가짐을 볼 수 있다. FR-4 composite로 몰딩한 이중 와이어의 실효 기생 인덕턴스는 계산이 고려된 전체 주파수 영역에서 0.1 nH 이하로 전기적 특성이 우수한 리본 와이어에 비하여서도 50% 감소 효과가 있음을 관찰하였다.



(a)



(b)

그림 2. 모멘트법 해석결과: (a) 입력 임피던스, (b) 실효 기생 인덕턴스

Fig. 2. Results from the MoM: (a) Input Impedance, (b) Effective Parasitic Inductance.

2. 특성 임피던스와 반사 계수

그림 3(a)에서 네가지 연결선의 입력 임피던스를 50 Ω Z-Smith Chart에 도시하여 정합특성과의 관계를 고찰하였다. 모든 연결선 구조는 주파수 증가에 따라 전기적 길이가 증가하므로, 입력 임피던스는 스미스 차트상에서 전압원 방향으로 회전하게 된다. 모든 본딩구조는 1 GHz이하에서는 부정합특성으로 인한 기생 입력 임피던스를 무시할 수 있으나, 주파수가 증가함에 따라 기생 입력 임피던스가 증가된다. 이 때 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어는 가장 작은 입력 임피던스의 증가를 보이며 회전반경이 가장 작아 정합특성이 가장 우수함을 예상할 수 있다.

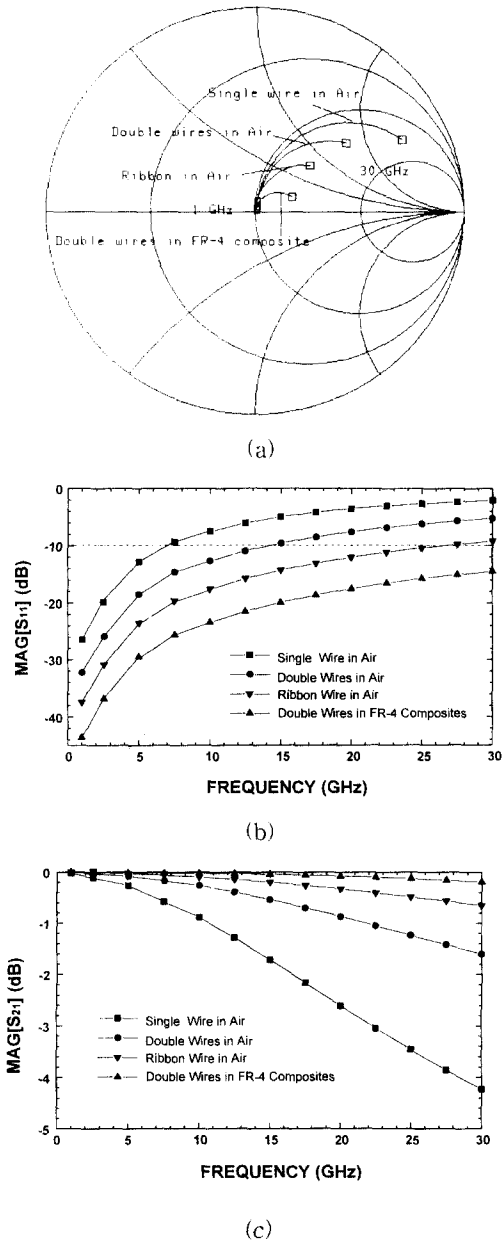


그림 3. (a) 입력 임피던스, (b) 반사 손실, (c) 삽입 손실
 Fig. 3. (a) Input Impedance, (b) Return Loss, (c) Insertion Loss.

실제 여러 연결선의 특성 임피던스를 식 (4)를 통하여 계산한 다음, 표 1에 정리하였다. 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본의 특성 임피던스는 각각 235 Ω, 133 Ω, 98 Ω으로 50 Ω 전송선로에 비하여 큰 부정합 특성을 보이나, 몰딩된 이중 본딩와이어의 특성 임피던스는 60 Ω으로 정합특성이 나머지

연결선에 비하여 크게 개선됨을 확인하였다.

그림 3(b), (c)에 각 연결선 구조의 50 Ω 전송선로에 대한 반사 계수(S_{11})와 전송 계수(S_{21})를 도시하였다. 그림 3(b)로부터, 주파수 증가에 따라 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어가 30 GHz까지 -15 dB이하 매우 작은 반사 손실을 가져 우수한 고주파 신호 전송 특성을 보장함을 알 수 있다. FR-4 composite로 몰딩한 이중 와이어는 우수한 정합특성으로 인하여 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본에 대하여 각각 15 dB, 10 dB, 5 dB의 개선 효과를 보인다. 그림 3(c)에서 공기중의 단일 와이어의 경우 25 GHz이상에서는 -3 dB이상의 삽입 손실로 신호 전송 특성이 크게 열화됨을 확인할 수 있다. 반사 손실의 경우와 마찬가지로 FR-4 composite로 몰딩한 이중 와이어는 우수한 정합특성으로 25 GHz에서 0.2 dB의 매우 작은 손실만을 가짐을 볼 수 있다. 또한, 표 1에 각 연결선 구조에 대하여 반사 손실이 -10 dB 이하가 되는 주파수 범위를 나타내었다. 예폭시로 몰딩한 이중 와이어가 가장 넓은 대역에서 신호 전송 특성을 보장할 수 있음을 볼 수 있다

표 1. 연결선 구조에 따른 특성 임피던스 및 반사 손실이 -10 dB 이하인 주파수 대역

Table 1. Characteristic impedance and frequency range for return loss(≤ -10 dB) depending on interconnection structure.

본딩 방법	공기중 단일 본딩와이어	공기중 이중 본딩와이어	공기중의 리본 와이어	몰딩된 이중 본딩와이어
특성임피던스(Ω)	235	133	98	60
반사손실(≤ -10 dB)	≤ 7 GHz	≤ 14 GHz	≤ 25 GHz	≤ 30 GHz

3. 유전율과 와이어 간격에 따른 몰딩된 이중 본딩 와이어의 특성 임피던스

여러 유전체로 이중 본딩와이어를 몰딩한 각각의 경우에 대하여 와이어의 사이 간격을 변화시키면서 특성 임피던스를 계산하여 그림 4에 도시하였다. 고려한 비유전율의 변화 범위는 실제 몰딩이 가능한 에폭시의 비유전율 중에서 선택하였으며 3.5에서 4.5사이의 값을 이용하였다. 그림에서 폭이 일정한 경우 비유전율이 증가함에 따라 유전 효과의 증대로 특성 임피던스가 감소함을 확인하였다. 그리고, 비유전율이 일정한 경우

사이 간격의 증가에 따라 특성 임피던스가 감소함을 볼 수 있는데, 이는 사이 간격의 증가에 따른 와이어간의 상호 결합 자장의 감소로 이중 본딩와이어의 자체 유도성 리액턴스가 감소하기 때문이다. 사이 간격을 증가시키고 특정 비유전율의 유전체를 이용할 경우 50 Ω 정합이 이루어지는 최적 본딩구조가 존재함을 확인하였다.

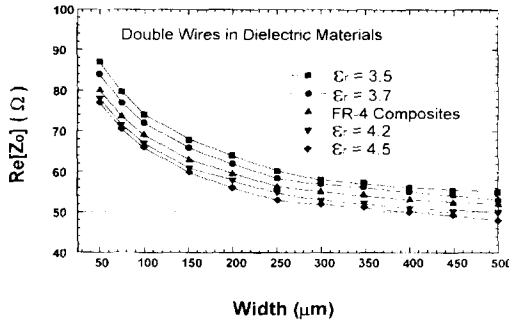


그림 4. 폭과 유전율에 따른 특성 임피던스

Fig. 4. Characteristic Impedance to the Width and the Relative Permittivity.

IV. 결 론

초고주파 소자의 실장시 발생하는 외부 연결선의 기생 성분을 감소시키기 위한 방법으로서, 유전체 재료로 연결선을 몰딩하는 구조를 제안하고 모멘트법을 이용하여 광대역 주파수에서의 입력 임피던스, 특성 임피던스, 그리고 입력 및 반사 손실의 전기적 특성을 해석하였다. 유전체 재료로는 FR-4 composite를 이용하였으며 Cole-Cole 모델을 이용하여 주파수에 관계하는 복소 유전율을 모델링하였다. 또한, 현재 사용되고 있는 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본의 해석을 동시에 수행하여 그 결과를 비교하였다. 20 GHz 주파수에서 FR-4 composite로 몰딩한 이중 본딩와이어의 기생 리액턴스는 11 Ω으로 공기중의 단일 본딩와이어, 이중 본딩와이어, 리본에 비하여 각각 89%, 78%, 58%가 감소하여 고려한 연결선 구조 가운데 가장 작은 기생 성분을 가짐을 확인하였다. 제안한 연결선 구조의 특성 임피던스는 60 Ω으로 다른 연결선에 비하여 정합특성이 현저하게 향상됨을 관찰하였다. 또한, 제안된 구조의 반사 손실은 25 GHz 이하에서 공기중의 단일 본딩와이어와 이중 본딩와이어에 비해 각각 15 dB, 10 dB가 개선되었고 리본 와이어에

비해서도 5 dB가 향상되었다. 이로부터, 30 GHz이하의 주파수에서 사용되는 초고주파 소자 실장용 연결선 구조에 적용되어 소자의 외부 정합특성 및 전체 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 본 해석결과는 초고주파 집적회로의 칩패드와 리드의 연결, 멀티칩 모듈에서 칩간의 연결, 하이브리드 초고주파 회로에서의 연결에 유용하게 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] H.-Y. Lee, "Wideband characterization of a typical bonding wire for microwave and millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-43, no. 1, pp. 63-68, Jan. 1995.
- [2] S.-K. Yun and H.-Y. Lee, "Parasitic impedance analysis of double bonding wires for high frequency integrated circuit packaging," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 5, no. 9, pp. 296-298, Sept. 1995.
- [3] Charles A. Harper, *Electronic Packaging and Interconnection Handbook*. McGraw-Hill, 1991, pp. 6.59-7. 38.
- [4] 洪正基, 金永國, 李海英, "FR-4 Composite 기판을 이용한 Microstrip 전송선의 광대역 특성 해석," *電子工學論文誌*, 第 33卷 第2號, pp. 69-77, 1996年 2月
- [5] R. H. Caverly, Characteristic impedance of integrated circuit bond wires, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-34, pp. 982-984, Sep. 1986.
- [6] S. Nelson, M. Youngblood, J. Pavio, B. Larson, R. Kottman, "Optimum microstrip interconnects," *Proc. IEEE MTT-s. Dig.*, 1991, Boston, MA, pp. 1071-1074.
- [7] W. L. Stutzman and G. A. Rhie, *Antenna Theory and Design*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1981.
- [8] Simon Ramo, John R. Whinnery and Theodore Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1993.
- [9] T. Krems, W. Haydl, H. Massler, J.

Rudiger, "Millimeter-wave performance of interconnections using wire bonding and flip chip," *Proc. IEEE MTT-s. Dig.*, 1996, San Francisco, CA, pp. 247-250.

[10] F. Alimenti, U. Goebel, R. Sorrentino, "Quasi static analysis microstrip bondwire interconnects," *Proc. IEEE MTT-s. Dig.*, 1995, Orlando, FL, pp. 679-682.

— 저 자 소 개 —



金 成 鎭(正會員)

1996년 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학사). 1996년 ~ 현재 아주대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학중. 주관심분야는 초고속 소자 패키지의 해석 및 최적 설계.



尹 尚 基(學生會員)

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

李 海 英(正會員) 第 33卷 A編 第 7號 參照

현재 아주대학교 전자공학과 교수