

초고속 플라스틱 패키지를 위한 본딩와이어의 광대역 혼신 해석

(Wideband Crosstalk Analysis of Coupled Bondwires for High-Speed Plastic Packaging)

尹尙基*, 李海英**

(Sang-Ki Yun and Hai-Young Lee)

요 약

플라스틱 패키지 재료가 본딩와이어의 혼신에 미치는 영향을 모멘트법 (Method of Moments)을 이용하여 주파수 영역에서 해석하고, fast Fourier transform을 적용하여 시간 영역에서의 전송 및 혼신 펄스 응답을 구하였다. 해석결과, 본딩와이어가 플라스틱 패키지 내부에 있을 때, 전송 특성은 유전효과로 인하여 개선되나 혼신은 증대된 방사효과로 인하여 크게 증가하며, 이러한 혼신 증가는 시간영역에서의 혼신 펄스 왜곡 현상을 현저하게 함을 관찰하였다. 한편, 정적 해석 방법을 이용한 플라스틱 패키지에 묻힌 본딩와이어의 해석 결과로부터, 모멘트법 결과와는 달리 방사효과에 의하여 증대되는 혼신현상을 계산하지 못하므로 본딩와이어 초고속 펄스 혼신 예측에는 적합하지 않음을 확인하였다. 또한, 본딩와이어 구조를 변화시키면서 혼신 펄스 응답을 살펴 본 결과, 방사효과에 의한 혼신의 우세함으로 인하여 본딩와이어간의 단순한 사이 간격 증가는 혼신감소에 효과적이지 않음을 관찰하였다. 본 해석 결과는 고속 디지털 IC 및 초고속주파 소자의 플라스틱 패키지 설계시 유용하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

Abstract

Signal transmission and crosstalk of coupled bondwires buried in plastic packages are analyzed using the Method of Moments and the Fourier Transform algorithm. It is also shown that the quasi-static crosstalk model of SPICE is inappropriate for designing the high-speed plastic packages. Plastic packaging material, increasing the self and mutual capacitances, is found to be helpful for the signal transmission integrity due to the dielectric compensation effect. However, it is also observed that the plastic material increases the crosstalk due to the radiation-enhanced mutual coupling effect. By investigating the geometrical and material dependence of the pulse transmission and crosstalk, it is found that the radiation-enhanced coupling effect is significant for most of typical bondwire geometries and plastic package materials. These calculation results can be effectively used for designing plastic packages of high-speed digital IC's and monolithic RFC's.

I. 서 론

반도체 제조 공정 및 설계 기술이 급격히 발전함에

따라 반도체 소자는 소형화, 고속화되고 있으나, 칩의 용이한 장착을 주목적으로 하는 패키지, (package)는 전기적 기생 성분으로 인하여 전체 성능을 크게 저하시킨다. 고속 반도체 소자의 저가화를 위하여, 초고속주파 부품을 패키지로 사용되던 세라믹 패키지를 플라스틱 패키지로 전환하는 기술이 연구되고 있으며^[1, 2], 이미 수 GHz 대역에서 사용되는 소자들은 플라스틱으로 실장 (packaging)되어 판매되고 있다. 세라믹

* 學生會員, ** 正會員, 亞洲大學校 電子工學部

(School of Electronics Engineering, Ajou University)

※ 본 연구는 1997년 정보통신부의 연구비 지원(과제번호: U96-135)에 의한 결과임.

接受日: 1998년 6월 2일, 수정완료일: 1998년 7월 27일

패키지는 열소산 (heat dissipation) 특성 및 전기적 특성이 좋은 장점이 있으나 고비용의 단점으로 인하여, 성능이 다소 열화되더라도 시스템 요구 사양을 만족한다면 플라스틱 패키지를 사용할 수 있기 때문이다. 이로써, 전체 생산비 가운데 큰 비중을 차지하는 패키지 공정의 생산 단가를 크게 낮출 수 있어 세계 반도체 시장에서 경쟁력을 높이는데 크게 기여할 수 있다.

한편, 소자의 소형화, 다기능화를 위하여 칩 내부의 신호선 밀도가 급격하게 증가하고 실장구조가 소형화되면서 리드프레임 및 본딩와이어와 같은 외부연결선들의 배치 밀도가 현저하게 증가함에 따라 신호선간 혼신 (crosstalk)이 급격히 증가하게 된다. 특히, 본딩와이어는 패키지 내부에 위치하고 상대적으로 기생 성분이 크므로, 플라스틱 패키지의 경우 혼신이 크게 증대된다. 그러므로, 혼신 효과를 고려한 최적 본딩 배치를 설계하기 위하여 와이어 본딩 구조 및 패키지 재료에 따른 신호 전송 및 혼신에 관한 정량적인 해석결과 또는 측정결과가 필요하나 국내의 관련 자료에 보고된 바 없다. 그러므로, 플라스틱 패키지의 본딩와이어간 혼신에 미치는 구조적, 재료적 영향을 초고주파 영역에서 해석하고, 펄스 해석을 통하여 영향을 살펴보는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 패키지 재료에 묻힌 본딩와이어의 전송 및 혼신을 주파수 및 시간 영역에서 해석하기 위하여 모멘트법과^[3] FFT (Fast Fourier Transform)를 이용하였다. 초고주파 플라스틱 패키지의 대표적인 재료로는 FR-4 (유전상수 ≈ 4.5)를 고려하였다^[4] 계산결과, FR-4의 유전효과로 인하여 본딩와이어의 전송 특성을 개선시키나, 높은 주파수에서 방사효과 (radiation effect)가 증가하고, 이로 인한 와이어간 혼신이 크게 증가함을 관찰하였다. 이러한 방사효과가 시간영역에서의 펄스 혼신에 미치는 영향이 매우 현저함을 확인하였다. 정적 (static) SPICE 모델을^{[5], [6]} 이용하여 혼신을 계산한 결과, 공기에 있는 본딩와이어 경우 주파수 및 시간 영역에서 모멘트법과 잘 일치하나, 플라스틱 패키지에 묻힌 본딩와이어에서는 높은 주파수영역 및 시간영역에서 차이가 현저함을 관찰하였다. 이로써, 일반적인 SPICE 모델은 본딩와이어 초고속 펄스 혼신 예측에는 적합하지 않음을 확인하였다. 또한, 본딩와이어 사이의 간격 및 유전체의 유전상수를 변화시키면서 혼신 펄스 응답을 살펴 본 결과, 간격의 증가는 방사효과에 의하여 발생하는 혼신 때문

에 혼신감소에 효과적이지 않음을 관찰하였다. 본 해석 결과는 초고주파 소자 및 초고속 디지털 IC의 플라스틱 실장시, 본딩와이어 혼신을 감안한 최적 본딩 배치를 설계하는데 참고자료로 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 해석 구조 및 방법

1. 본딩와이어 모델링 및 혼신계산

본딩와이어간 혼신을 해석하기 위하여 패키지의 본딩와이어들 가운데 두 와이어만을 선택하여 그림 1에 개략적으로 도시하였으며 본딩와이어간의 혼신을 관찰하기 위하여 리드프레임은 고려하지 않았다. 재질이 금인 본딩와이어는 400 μm 간격을 두고 평행하게 위치하고 있으며, 직경이 25 μm 인 각각의 와이어는 400 μm 두께의 실리콘 기판 위에 위치한 특성임피던스가 50 Ω 인 전송선에서 다른 쪽 50 Ω 전송선 까지 2 mm의 길이가 되도록 볼-웨지 (Ball-Wedge) 본딩되어 있다. 본딩와이어가 50 Ω 전송선과 연결되는 부분을 각각 Port로 설정하였으며, 그중 입력신호가 인가되는 부분을 Port-1이라고 명칭하였다. 그림에서 dielectric material (ϵ_r)은 유전체 재료의 유전상수를 의미하며, 세라믹 패키지의 경우 패키지 내부가 비어 있으므로 공기의 유전상수(=1), 플라스틱 패키지의 경우엔 FR-4 계열 에폭시의 유전상수(≈ 4.5)에 각각 대응된다.

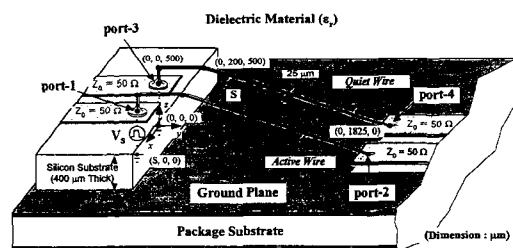


그림 1. 반경이 25 μm 인 두 개의 금 본딩와이어를 400 μm 간격을 두고 평행하게 길이가 2 mm가 되도록 400 μm 두께의 실리콘 기판으로부터 본딩한 구조.

Fig. 1. The geometry of coupled 2-mm-long gold bondwires with 25- μm -diameter separated by 400 μm on a 400- μm -thick silicon substrate.

2. 모멘트법 해석 및 펄스해석

그림 1에 보인 본딩와이어 구조의 혼신 및 신호 전

달 특성을 모멘트법으로 계산하기 위하여, 각 본딩와이어를 3 개의 직선 와이어로 선형 분할 후, 총 20개의 펄스 세그먼트로 재분할하였다. 이는 계산이 고려된 전체 주파수 대역에서 각 펄스 세그먼트 상에 분포하는 전장과 포텐셜의 위상이 일정하다고 가정할 수 있도록 하기 위해서이다. 본딩와이어 연결부분의 불연속 효과를 모멘트법에 포함하는 것은 매우 복잡하며 수십 GHz 이상의 매우 높은 주파수에서 발생하므로 계산의 단순화를 위하여 고려하지 않았다. 본딩와이어 반경이 와이어의 길이나 계산 파장에 비하여 매우 작으므로 와이어에 흐르는 전류를 와이어 축 방향 성분만의 함수로 표현할 수 있다. 동일한 펄스 기저 함수 및 시험 함수를 이용하여 와이어 세그먼트에서의 전장, 벡터 포텐셜, 그리고 전하 밀도 분포를 전류 확장 계수를 통하여 각각 이산화한 다음, 그린 함수의 공간 적분식을 적용하여 회로망 행렬을 얻는다. 모멘트법 계산시 완전 접지평면은 영상 와이어로 대체되었으며, 와이어의 도체손실은 주파수에 따라 계산하여^[7] 집중소자화한 다음 전체 와이어상에 균일하게 입력하였다. 자세한 모멘트법 계산 과정은^[8]에 설명되어 있다.

시간영역에서의 펄스 응답을 얻기 위하여 주파수 영역에서 계산된 결과에 FFT 알고리즘을 적용하였다. 주파수 영역 계산결과에 FFT 처리를 위해 모멘트법 결과로부터 4-단자 산란계수를 얻은 다음^[9], HP Microwave and RF Design System에 입력하여 제공되는 FFT 기능을 이용하여 펄스 응답을 계산하였다.

3. 정적 (static) SPICE 혼신 모델

모멘트법을 이용한 본딩와이어 혼신 결과를 검증 및 비교하기 위하여 그림 2에 SPICE 등가회로를 보였다. 그림에 보인 집중소자들은 CAD 프로그램에 일반적으로 사용되는 정적 해석식을 이용하여 구해졌다^[10]. 계산시 본딩와이어를 여러 직선 와이어들로 분할한 후, 각 직선 와이어의 등가 길이와 접지평면에 대한 등가 높이를 구하여 정적 해석식에 적용하고 각 와이어들에 대한 계산값들을 더하여 등가 집중 소자의 값을 구하였다. 이 가운데 M (상호 인덕턴스) 과 C_M (상호 커패시턴스) 은 본딩와이어 혼신에 직접적으로 관계하며, 본딩와이어간의 간격 및 패키지 재료에 따라 변한다. 신호선간의 혼신을 모델링할 때 보편적으로 이용되는 단순한 SPICE 모델은 파장에 비하여 해석구조의 크

기가 매우 작을 때에만 유효하다. 이는 사용 주파수 및 주위 환경의 유전상수의 증가에 따른 파장의 감소로 인하여 본딩와이어상에 분포한 신호의 위상이 위치에 따라 크게 변하기 때문이다. 그러므로, 본딩와이어 상에서의 위상 변화를 고려하기 위하여 그림 2에 보인 N-segmented SPICE 모델을 이용하였다. 그림에서 R' , L' , 그리고 C' 등은 본딩와이어의 단위 길이 당 값들이며, Δl 은 분할된 본딩와이어의 각 부분 길이를 의미한다.

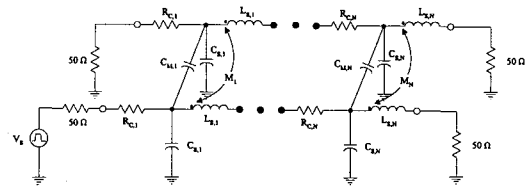


그림 2. 정적 등가 집중 회로를 이용하여 구성된 N-분할된 SPICE 모델

Fig. 2. N-segmented SPICE model using the static equivalent lumped network.

III. 해석결과 및 고찰

1. 산란계수

그림 1 구조에서 유전체 재료의 유전율을 변화시키면서 모멘트법으로 계산한 산란계수를 그림 3에 보였다. 그림 3(a), (b)에서 보듯이 유전상수의 증가에 따라 S_{11} 및 S_{21} 은 각각 감소 및 증가한다. 이는 본래 본딩와이어가 그 길이에 비하여 매우 가늘고 도전성이 좋기 때문에 본딩와이어의 주위에 분포하는 자장에 의한 유도성 성분이 우세하나, 유전체 재료의 몰딩 (molding) 후 유전효과로 인하여 증가된 용량성 성분이 효과적으로 유도성 성분을 상쇄하여 신호전송을 용이하게 하기 때문이다. 그러나 유전상수가 너무 크게 되면 전송 특성의 개선 정도가 감소하며, 오히려 특성의 열화를 초래함을 볼 수 있다. 한편, 그림 3(c), (d)에 보인 S_{31} , S_{41} 은 유전상수의 증가에 따라 그 특성이 저하됨을 보여 주고 있다. 이는 전송특성이 개선됨에 따라 신호선에 전달되는 유효전력이 증가되고, 이로써 옆 와이어에 결합되는 전력이 증가되기 때문이다. 특히 그림 3(d)의 S_{41} 을 보면 유전상수의 증가에 따라 12 GHz 주파수를 중심으로 낮은 영역에서의 부분적인 감소, 높은 영역에서의 급격한 증가를 관찰할 수 있다. 이는 낮은 주파수 영역에서의 효과적인 전자기

결합 상쇄 효과 및 높은 주파수 영역에서 증대된 방사 현상에 의한 용량성 상호결합의 증가에 기인한다.

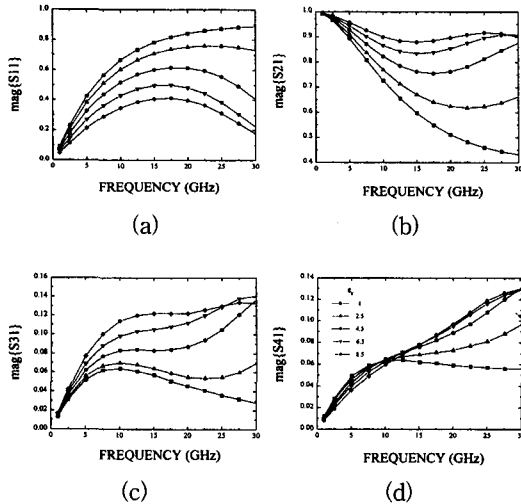


그림 3. 사이 간격이 400 μm인 두 본딩와이어에 대하여 계산한 산란계수: (a) S11, (b) S21, (c) S31, 그리고 (d) S41

Fig. 3. S-parameters of coupled bondwires with 400-μm spacing: (a) S11, (b) S21, (c) S31, and (d) S41.

2. 방사효과에 의하여 증대된 상호결합

본딩와이어간 상호결합에 미치는 방사효과의 영향을 자세하게 살펴보기 위하여, 그림 1에서 εr이 1 (세라믹 패키지), 4.5 (플라스틱 패키지)일 때에 대하여 각각 모멘트법과 그림 2의 정적 SPICE 모델을 이용하여 계산한 S41을 그림 4에 함께 도시하였다. 정적 SPICE 모델을 이용한 계산과정에서 와이어상에서의 위상변화를 충분히 고려할 수 있도록 그림 2에서 N을 4로 정하여, 유전상수는 4.5, 30 GHz 주파수에서의 파장에 비하여 분할된 본딩와이어의 부분들이 10 배 이상 작도록 하였다.

모멘트법에 의한 S41을 살펴보면, εr이 4.5일 때 εr이 1일 때에 비하여 낮은 주파수 영역에서는 작고 높은 영역에서는 큼을 알 수 있다. 이는 εr이 4.5일 때, 낮은 주파수 영역에서는 유전 효과에 의하여 증가한 용량성 상호 결합이 유도성 상호 결합을 효과적으로 상쇄시키기 때문이며, 높은 주파수 영역에서는 유전효과로 인하여 증대된 방사현상에 의하여 용량성 상호 결합이 우세해지는 것에 기인한다. 한편, 정적 SPICE 모델은 방사현상에 기인한 본딩와이어 혼신 증가 현상을 표현할 수 없음을 그림 4의 결과로부터

알 수 있다. εr이 1일 경우 모멘트법과 SPICE 모델이 잘 일치하나, 플라스틱 패키지 경우엔 주파수의 증가에 따라 차이가 심화된다. 이는 높은 주파수에서 더욱 증대된 방사현상으로 인하여 플라스틱 패키지의 두 본딩와이어간 상호 전자기 결합이 증가하기 때문이다.

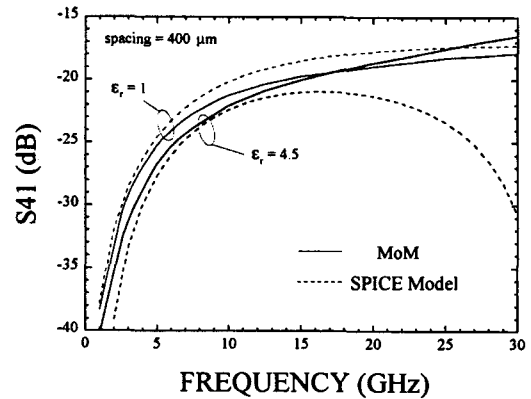


그림 4. 모멘트법과 정적 SPICE 모델을 이용하여 사이 간격이 400 μm인 두 본딩와이어에 대하여 계산한 far-end 혼신 (S41) 비교

Fig. 4. The far-end crosstalk (S41) comparison of the MoM and the static SPICE for coupled bondwires with 400-μm spacing.

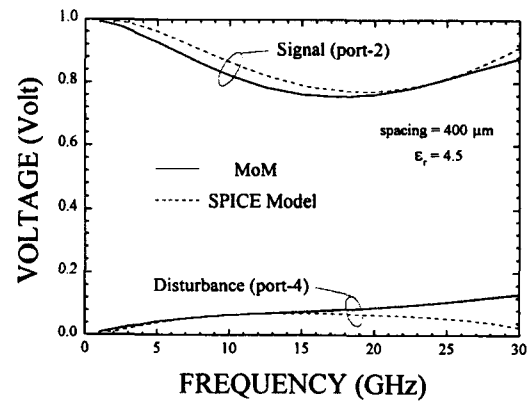


그림 5. FR-4 플라스틱 재료에 묻힌 두 본딩와이어에서의 전송 및 혼신 전압

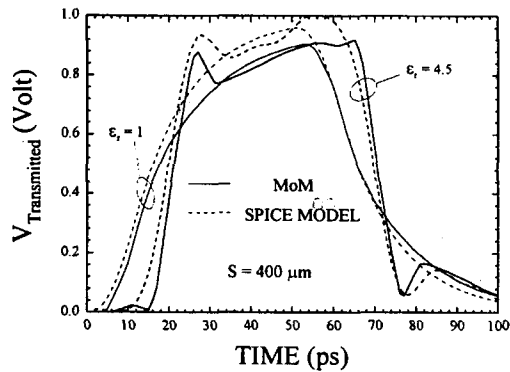
Fig. 5. Signal and disturbance voltages for coupled bondwires buried in FR-4 plastic materials.

이러한 결과의 원인을 자세하게 살펴보기 위하여 Port-2, Port-4에서의 전압을 그림 5에 나타내었다. Port-2측 전압 (전송 전압)을 보면, 전체 주파수 영역에서 모멘트법과 SPICE 모델이 잘 일치함을 볼 수 있다. 한편, Port-4측 전압 (혼신 전압)에서는 SPICE 모델의 결과가 15 GHz 근처 주파수를 중심으로 증가

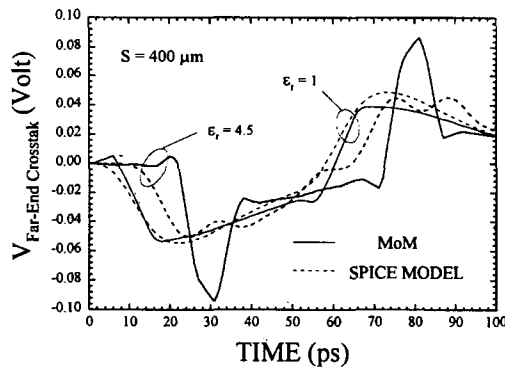
하다가 감소하는데 반하여 모멘트법 결과는 주파수의 증가에 따라 계속 증가된다. 이로부터, 주파수의 증가에 따라 증대되는 방사효과로 인하여 상호 결합이 증가함을 알 수 있다.

3. 펄스 해석결과

그림 6(a), (b)는 그림 1에서 ϵ_r 가 1일 때 전달 신호 (Port-2측 전압) 및 옆 와이어에 유기되는 혼신 신호 (Port-4측 전압)의 펄스 응답이다.



(a)



(b)

그림 6. (a) 전송 전압 (Port-2) 및 (b) 혼신 전압 (Port-4)의 펄스 응답.

Fig. 6. Pulse responses of (a) transmitted voltage at port-2 and (b) crosstalk voltage at port-4.

여기에서 입력 전압 펄스는 크기가 5 V이고 상승 및 하강시간이 각각 10 ps, 펄스 폭이 40 ps인 파형을 가정하였는데, 이는 높은 주파수에서 발생하는 본딩와이어 방사효과에 의하여 증대된 혼신을 살펴보기 위해서이다. 그림 6(a)으로부터, 모멘트법과 정적 SPICE 모델에 의하여 계산된 전달 펄스 파형이 잘 일치함을

볼 수 있다. 이는 SPICE 모델이 와이어상에 있는 신호의 위상변화를 충분히 고려할 수 있도록 하였기 때문이다. ϵ_r 이 1일 때에 비하여 ϵ_r 이 4.5일 때의 펄스 파형이 오히려 원 입력 펄스에 비한 왜곡 정도가 작음을 볼 수 있다. 이는 ϵ_r 이 1일 때는 직렬 유도성 기생 성분이 우세하여 펄스 파형의 상승/하강 부분의 고주파 성분을 크게 제한한다. 그러나, ϵ_r 이 4.5일 때는 이러한 본딩와이어의 유도성 성분을 패키지 재료의 유전효과에 의하여 증가된 용량성 성분이 효과적으로 상쇄하기 때문이다. 또한, 모멘트법에 의한 펄스 응답 파형이 SPICE 모델에 의한 것보다 약간 높은 이유는 SPICE 모델이 높은 주파수에서 본딩와이어의 도체 저항 및 방사저항에 의한 전압 강하를 고려하지 못하기 때문이다.

그림 6(b)에 보인 혼신 펄스 파형으로부터, ϵ_r 이 1일 경우엔 모멘트법 결과와 SPICE 모델 결과가 잘 일치하나 ϵ_r 이 4.5일 경우 모멘트법은 그림 6(a)에 보인 전송 펄스 응답의 상승 및 하강 시간 부근에서 첨예한 파형을 보이는데 반하여, SPICE 모델은 완만한 파형을 보임을 알 수 있다. 즉, 높은 주파수에서 방사효과에 의하여 증가된 혼신은 시간영역에서 혼신 펄스 파형의 첨예한 부분을 증가시킨다. 이로 인하여 ϵ_r 이 4.5일 때 혼신펄스의 첨두치 (peak value)가 ϵ_r 이 1일 경우에 비하여 약 2배 정도 크게 됨을 볼 수 있다.

4. 패키지 재료의 유전상수 및 본딩 간격에 따른 혼신 본딩와이어의 사이 간격을 200 μm 로 고정하고, 유전상수를 변화시키면서 계산한 Near-End Crosstalk (NEC)와 Far-End Crosstalk (FEC) 펄스 전압 파형의 첨두치를 그림 7에 나타내었다. 첨두 전압은 단조적인 변화를 보이지 않으며, NEC와 FEC는 각각 다른 유전상수에서 최대값을 보인다. 이러한 현상은 용량성 상쇄 효과 및 증대된 방사효과에 기인한다. 첨두 전압이 증가하는 낮은 유전상수 영역에서는 유전효과가 혼신 및 방사 효과를 증가시킨다. 한편 첨두 전압이 감소하는 유전상수 영역에서는 증가된 용량성 상호결합이 유도성 결합을 효과적으로 상쇄한다.

그림 8은 유전상수를 4.5로 고정하고 본딩와이어간격의 변화에 따라 계산한 NEC와 FEC 펄스 파형의 첨두치를 보여준다. 와이어 간격의 증가에 따라 NEC, FEC의 첨두치가 모두 감소함을 알 수 있다. 자세히

살펴보면, NEC는 400 μm 를 기준으로 좁은 간격에서는 감소가 급하며 넓은 간격에서는 서서히 감소하고, FEC는 전체 사이 간격에서 서서히 감소한다. 이는 좁은 와이어 간격에서는 주로 용량성 결합과 유도성 결합의 상쇄 효과에 의하여 혼신이 감소하는 것을 의미하며, 넓은 간격에서는 주로 방사효과에 기인한 traveling-wave 효과에 의하여 혼신이 발생하므로 와이어 간격 증가에 대한 혼신 감소 정도가 매우 적다. 그러므로, 본딩 간격의 단순한 변화는 초고속 및 고속 소자의 혼신을 최소화하는데 효과적이지 않음을 알 수 있다.

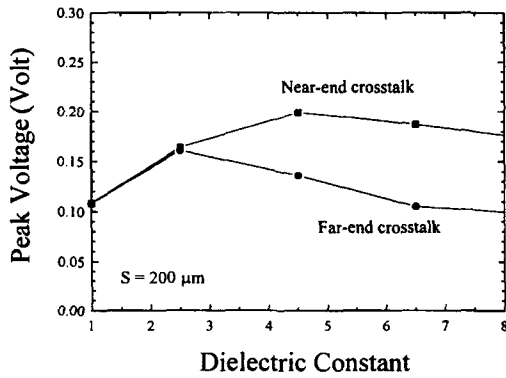


그림 7. 패키지 재료의 유전 상수 변화에 따른 near-end 및 far-end 혼신 전압의 침투치
Fig. 7. Peak crosstalk voltages of near-end and far-end to the dielectric constant.

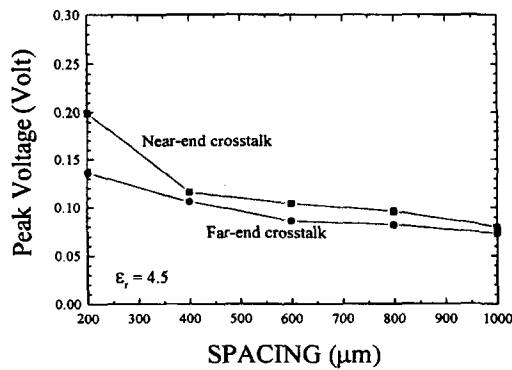


그림 8. 본딩와이어간의 간격 변화에 따른 near-end 및 far-end 혼신 전압의 침투치
Fig. 8. Peak crosstalk voltages of near-end and far-end to the spacing.

IV. 결 론

모멘트법과 FFT를 이용하여 유전체 재료가 본딩와

이어간의 혼신에 미치는 영향을 주파수 및 시간 영역에서 해석하고, 정적 SPICE 모델을 이용하여 비교하였다. FR-4의 유전효과에 의하여 증대된 용량성 성분이 본딩와이어의 유도성 성분을 상쇄시켜 전송 특성을 개선시키나, 높은 주파수에서 증가된 방사효과로 인하여 와이어간 혼신이 크게 증가함을 확인하였다. 펄스 해석결과, 이러한 방사효과가 시간영역에서의 펄스 혼신에 미치는 영향이 현저함을 확인하였다. 모멘트법 해석 결과 검토를 위하여 정적 (static) 등가 SPICE 모델을 이용하여 혼신을 계산하였다. 해석 결과, 세라믹 패키지의 본딩와이어 경우, 주파수 및 시간 영역에서 모멘트법 결과와 잘 일치하나, 플라스틱 패키지에 묻힌 본딩와이어에서는 높은 주파수 영역에서 차이가 현저하며, 시간영역에서는 펄스의 상승/하강 부분에서 크게 차이가 남을 관찰하였다. 이로써, 일반적인 SPICE 모델은 고속, 고밀도 소자의 플라스틱 실장 후의 본딩와이어 혼신 예측에는 적합하지 않음을 확인하였다. 또한, 본딩와이어 사이 간격 및 유전체의 유전상수를 변화시키면서 혼신 펄스 응답을 계산하였다. 그 결과, NEC와 FEC는 유전체 상쇄 효과 및 방사효과에 밀접하게 관계하며, 방사효과로 인하여 단순한 사이 간격의 증가는 혼신감소에 효과적이지 않음을 관찰하였다. 본 결과는 초고속주파 소자 및 초고속 디지털 IC의 플라스틱 실장시, 본딩와이어 혼신을 감안한 최적 본딩 배치를 설계하는데 참고자료로 이용될 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] M. Murphy, P. Schwab, and A. Imhoff, "Advances in plastic packaging for RFIC applications," *M/A-Com Frequencies*, Summer 5, 1995.
- [3] R. F. Harrington, *Field computation by moment methods*. New York: The Macmillan Company, 1968.
- [4] *ASM International, Electronic materials handbook, Volume 1, Packaging*, 1989.

- [5] C.-T. Tsai and W.-Y. Yip, "An experimental technique for full package inductance matrix characterization," *IEEE Trans. Comp., Pack., Manufact., Tech. - Part B*, vol. 19, no. 2, pp. 338-343, May 1996.
- [6] M. I. Montrose, *Printed circuit board design techniques for EMC compliance*. New York: IEEE Press, 1996.
- [7] 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.
- [8] H.-Y. Lee, "Wideband characterization of a typical bonding wire for microwave and millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, no. 1, pp. 63-68, Jan. 1995.
- [9] G. Gonzalez, *Microwave transistor amplifiers*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- [10] C. S. Walker, *Capacitance, inductance, and crosstalk analysis*. Dedham, MA: Artech House, 1990.

 저 자 소 개

尹尙基(學生會員) 第 34卷 D編 2號 參照
 현재 아주대학교 대학원 전자공학과 박사과정

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