

論文2001-38TC-7-2

# 밀리미터파 대역 패키징을 위한 이중 본드와이어와 리본의 광대역 특성

## (Wideband Characterization of Double Bondwires and Ribbon for Millimeter-Wave Packaging)

金 鎮 良 \* , 張 東 弼 \*\* , 廉 仁 福 \*\* , 李 海 英 \*

(Jin-Yang Kim, Dong-Pil Chang, In-Bok Yom, and Hai-Young Lee)

### 요 약

와이어본딩 기법은 공정이 쉽고 신뢰성이 우수하기 때문에 현재의 초고주파 회로 제작에 가장 일반적으로 사용되는 접속선 기술이다. 그러나, 밀리미터파 대역의 높은 주파수에서는 본드와이어에 의한 기생특성이 크게 증가하며, 이러한 기생특성은 시스템 전체의 성능에 큰 제한을 가져온다. 본 논문에서는 20~35 GHz의 광대역에서 본드와이어의 전송특성을 해석하고 측정하였으며, 그 결과를 리본의 특성과 비교하였다. 측정 및 비교 결과 이중 본드와이어 구조를 사용함으로써 35 GHz 까지 0.55 dB 이내의 작은 삽입 손실특성을 얻을 수 있었으며, 측정 주파수 전 대역에 걸쳐 리본과 거의 같은 특성을 나타내었다. 따라서 다중 와이어본딩 기법이 성능과 공정 측면에서 리본보다 밀리미터파 대역용 패키징에 더욱 적합함을 확인하였다.

### Abstract

The wirebonding is a common interconnection technique for modern microwave devices because of rather simple and reliable processes involved. At millimeter-wave frequencies, however, the bondwire parasitics are significant and consequently limit the external performance of packaged devices. In this paper, we represent wideband characterization of multiple bondwires and ribbon in a frequency range from 20 to 35 GHz. From these results, the double bondwire shows very small insertion loss less than 0.55 dB up to 35 GHz and its performance is comparable to that of the ribbon in the millimeter-wave frequencies. Therefore, the wirebonding is very suitable for millimeter-wave packaging in terms of performance and manufacturing cost.

\* 正會員, 亞洲大學校 電子工學部

(Department of Electronics Engineering, Ajou University)

\*\* 正會員, 韓國電子通信研究員 위성 RF 부품 연구팀  
(Satellite Communication System Dept., Electronics and Telecommunication Research Institute)

※ 본 연구는 한국전자통신연구원(ETRI)과 공동으로 수행되었으며, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터에 의하여 지원되었습니다.

受日字:2000年10月31日, 수정완료일:2001年6月8日

### I. 서 론

지난 수년간 초고주파 및 밀리미터파 대역용 저잡음, 고성능 시스템의 급속한 발전과 함께 칩 접속선 기술에 대해서도 관심이 증대되고 있는 실정이다. 대부분의 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit)와 모듈 (module)들이 마이크로스트립 (microstrip) 구조를 기반으로 설계되어지기 때문에 마이크로스트립과 마이크로스트립 (microstrip-to-microstrip)을 연결하는 접속선 기술이 매우 중요하다<sup>[1]</sup>. 여러 접속선 방식 중 와이

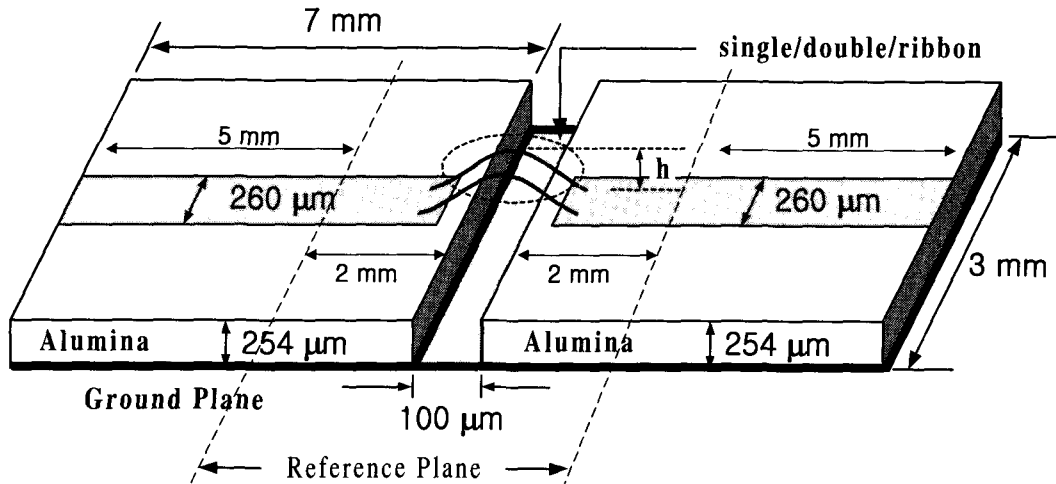


그림1. 제작된 구조에 대한 개략도

Fig.1. Schematic diagram of the fabricated test devices.

어본딩은 그 공정이 쉽고 신뢰성이 우수하므로 많은 초고주파 대역용 MMIC와 HMIC (Hybrid Microwave Integrated Circuit)의 제작에 폭넓게 이용되어 왔다. 그러나 주파수가 증가할수록 본드와이어에 의한 기생특성을 무시할 수 없게 되며, 초고주파 및 밀리미터파 대역용 시스템의 전체성능에 큰 제한을 가져오게 된다<sup>[2-4]</sup>. 실제로 주파수나 접속 거리가 증가할수록 본드와이어의 기생 인덕턴스(parasitic inductance)로 인해서 신호 전송 특성이 급격히 저하된다는 많은 연구 결과들이 보고 되었다<sup>[2][5-6]</sup>. 또한, 본드와이어의 저항손실, 마이크로스트립 전송선로와의 부정합 특성도 고주파 전송 특성을 크게 열화시키는 원인이 된다<sup>[7]</sup>. 반면에 리본은 본드와이어에 비해 공정의 신뢰도가 떨어지지만 넓은 선 폭을 갖고 있기 때문에 기생 인덕턴스와 저항 손실이 작고 불연속 특성도 개선시킬 수 있다고 알려져 있다<sup>[8]</sup>. 그러나, 현재까지 단일, 다중 본드와이어와 리본의 고주파 전송특성에 대해 서로 유사한 조건하에서 정량적으로 비교 연구된 결과가 없는 실정이다.

본 논문에서는 단일, 이중 본드와이어, 리본을 이용한 각각의 접속선 구조를 20~35 GHz 대역에 걸쳐 해석하고 측정하였으며, 그 결과를 비교하였다. 측정시 DUT (Device Under Test)에 사용된 본드와이어와 리본은 총 길이와 본딩 높이가 거의 같도록 제작되었다. 해석은 유한 요소법 (Finite Element Method : FEM)을 사용하는 상용 시뮬레이션 툴인 HFSS™ (High Frequency Structure Simulator)를 사용하였고, 측정은

벡터 회로망 측정기 (Vector Network Analyzer : VNA)와 UTF (Universal Test Fixture)를 사용하였다. 측정 결과 이중 본드와이어 구조를 사용함으로써 35 GHz 까지 0.55 dB 이내의 삽입 손실을 얻을 수 있었으며, 리본의 경우에는 약 0.7 dB 이내의 삽입 손실 특성을 얻을 수 있었다. 이러한 결과로부터 이중 본드와이어 구조가 마이크로파 및 밀리미터파 대역용 패키징에 매우 효과적이라는 것을 확인하였다. 또한, 측정 결과와 FEM을 이용한 해석 결과가 잘 일치하였으며 제작과 측정을 수행하지 않더라도 접속선의 특성을 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다.

## II. 해석 및 측정방법

### 1. 제작 구조

그림 1은 실제 제작된 DUT에 대한 개략도이다. 각 기판은 두께가 254  $\mu\text{m}$ 이고 비유전율 (relative permittivity :  $\epsilon_r$ )과 유전체 손실(tangent loss :  $\tan \delta$ )이 각각 9.96, 0.0003인 알루미늄을 사용하였고, 두 기판의 크기는 각각 7 mm  $\times$  3 mm 이다. 이때 각 기판 사이의 간격은 100  $\mu\text{m}$ 가 되도록 설계되었으며, 신호선은 gold를 사용하여 두께가 3  $\mu\text{m}$ , 폭 260  $\mu\text{m}$ 를 갖도록 제작되었다.

본드와이어 접속선은 직경이 17.8  $\mu\text{m}$ 인 gold 와이어를 사용하여 wedge-to-wedge 방식으로 제작되었다. 리본은 두께가 12.7  $\mu\text{m}$ 이고 폭이 76  $\mu\text{m}$ 이며 재질은

gold 이다. 신호선으로부터의 와이어 최대 높이 (h)는 단일, 이중 본드와이어 모두 약 80  $\mu\text{m}$  이고 리본은 약 75  $\mu\text{m}$  이다. 또한, 와이어 루프의 총 길이 ( $L_T$ )는 단일 본드와이어의 경우 약 400  $\mu\text{m}$  이고, 이중 본드와이어와 리본은 모두 약 410  $\mu\text{m}$  이다. 이중 본드와이어의 경우 와이어간의 간격은 약 110  $\mu\text{m}$  이다.

2. 해석 방법 및 측정 방법

마이크로파 및 밀리미터파 대역에서의 정확한 광대역 해석을 위하여 유한 요소법 (Finite Element Method : FEM)을 사용하는 상용 시뮬레이션 툴을 사용하였다<sup>[9]</sup>. 본 논문에서는 전체 산란계수 크기의 변화율이 2 % 이내에 수렴하도록 유한 요소 mesh생성을 반복 수행하였으며, 각 포트를 제외한 경계 면에서의 방사효과를 고려하기 위해 기판 두께의 약 5배 이상 떨어진 지점에 흡수경계조건 (Absorbing Boundary Condition : ABC)을 적용하였다. 해석시 물질 값들에 대한 조건은 실제 제작된 경우와 동일하도록 설정되었다. 측정은 벡터 회로망 측정기와 UTF를 사용하였으며, Calibration은 고주파 대역에서 정확성이 매우 우수한 TRL (Thru Reflect Line) calibration 방법을 사용하였다<sup>[10]</sup>. 또한, 그림 1에서 점선으로 표시한 것처럼 TRL calibration 방법을 사용하여 측정 기준면 (reference plane)을 각 포트로부터 5 mm씩 내부로 이동시켰다<sup>[11]</sup>.

III. 해석 및 측정 결과

1. 해석 및 측정 결과

그림 2와 3은 마이크로스트립 선로간의 접속선으로써 단일 본드와이어를 사용한 경우와 이중 본드와이어를 사용한 경우에 대한 각각의 측정 및 해석 결과를

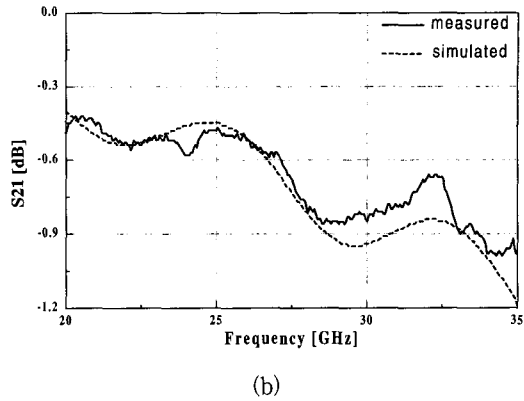
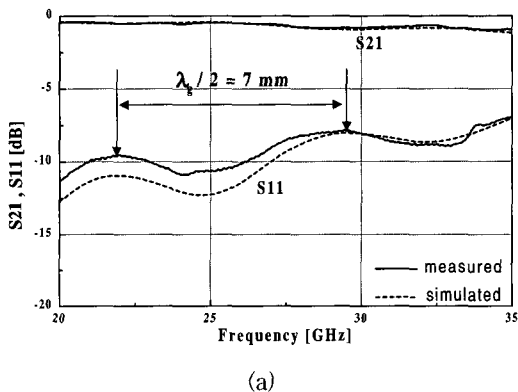


그림 2. 단일 본드와이어의 측정 및 해석 결과; (a)산란계수; (b)삽입 손실  
Fig. 2. Measured and simulated results of the single bondwire; (a)Scattering parameters; (b)Insertion loss.

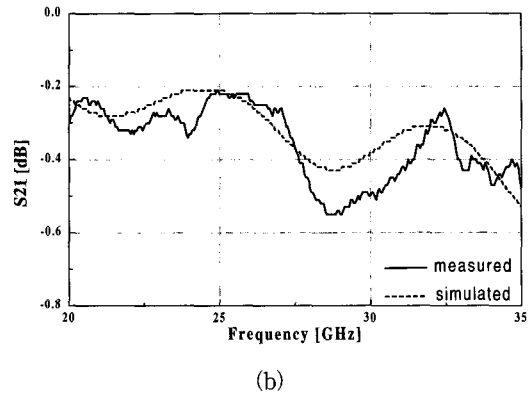
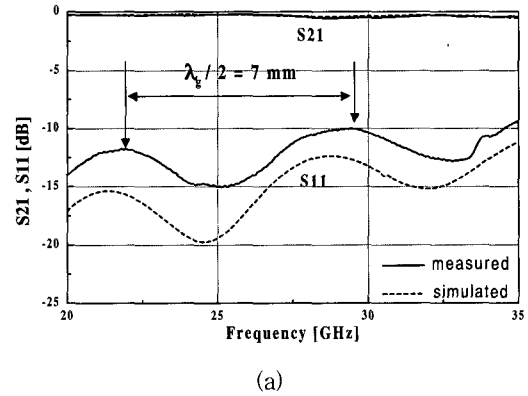


그림 3. 이중 본드와이어의 측정 및 해석 결과; (a)산란계수; (b)삽입 손실  
Fig. 3. Measured and simulated results of the double bondwire; (a)Scattering parameters; (b)Insertion loss.

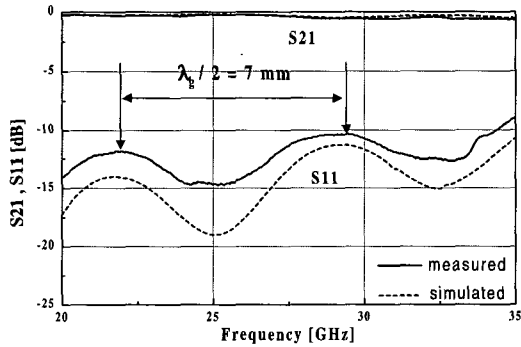
나타내고 있다. 단일 본드와이어의 경우는 35 GHz 까지 1 dB 이내, 이중 본드와이어의 경우에는 35 GHz 까지 0.55 dB 이내의 삽입 손실 특성을 얻었으며, 그림 2(b)와 그림 3(b)로부터 주파수 증가에 대한 삽입손실의 변화에 있어서 단일 본드와이어가 이중 본드와이어보다 약 2배 이상 증가됨을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 본드와이어의 고주파 기생 인덕턴스 때문이다. 반면에 이중 본드와이어의 경우에는 단일 본드와이어의 경우보다 삽입 손실이 측정 주파수 전 대역에서 약 0.35 dB 정도 향상되었다. 이러한 결과로부터, 이중 본드와이어의 구조가 고주파 기생 인덕턴스를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 결과 그래프에서 나타나는 리플 (ripple)은 그 주기가 약 8 GHz 이며, 이는 본드와이어 부분과 각 포트의 임피던스 (impedance) 부정합으로 인해서 나타나는 공진 (resonance)현상이다. 또한, 측정 주파수 전 대역에 걸쳐 FEM을 이용한 해석 결과가 측정 결과와 매우 잘

일치함을 볼 수 있다.

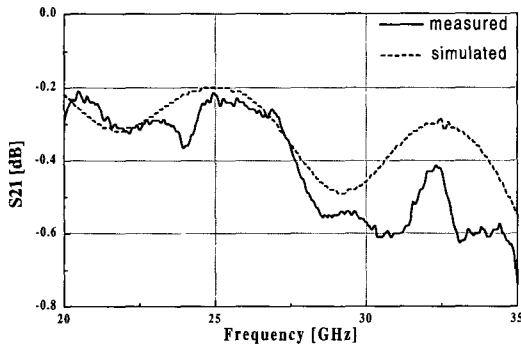
그림 4는 리본을 사용하였을 때의 측정 및 해석 결과이다. 측정 결과 35 GHz 까지 0.7 dB 이내의 삽입 손실을 보인다. 이때 나타나는 리플현상도 본드와이어의 경우와 같이 접속선 부분과 각 포트의 임피던스 부정합에 의한 것이다. 리본의 경우에도 FEM을 이용한 해석결과와 측정결과가 매우 잘 일치함을 확인하였다.

2. 측정 결과 비교 및 고찰

그림 5에서 단일, 이중 본드와이어와 리본에 대한 삽입 손실의 측정 결과를 비교하였다. 이중 본드와이어 구조를 사용함으로써 단일 본드와이어의 고주파 기생 특성을 상당히 보완할 수 있음을 알 수 있다. 특히, 이중 본드와이어와 리본의 삽입 손실을 비교하면, 30 ~ 35 GHz 대역에서 약 0.1 dB 정도의 작은 차이를 보이지만, 전체적으로는 유사한 전송 특성을 나타내고 있으며 이러한 결과를 표 1에 정리하였다. 또한, 그림 5의 결과들은 각 포트에 약 2 mm 정도의 마이크로스트립 급전선로 특성을 포함한 결과이다.



(a)



(b)

그림 4. 리본의 측정 및 해석 결과; (a)산란계수; (b)삽입 손실

Fig. 4. Measured and simulated results of ribbon; (a)Scattering parameters; (b)Insertion loss.

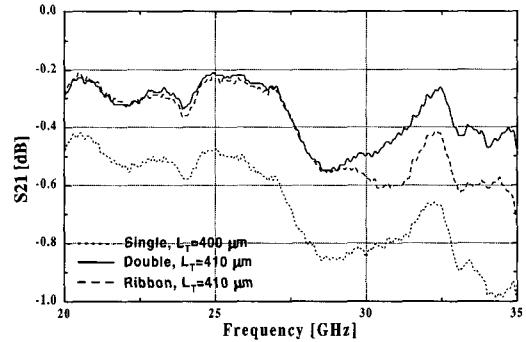


그림 5. 삽입 손실들의 비교

Fig. 5. Comparison of the insertion losses.

표 1. 단일/이중 본드와이어와 리본에 대한 측정결과

Table 1. Measured results of the bondwires and ribbon.

	Single	Double	Ribbon
$L_T/h$ ( $\mu\text{m}$ )	400/80	410/80	410/75
IL [dB] @35 GHz	< 1	< 0.55	< 0.7

그림 6에서는 이중 본드와이어 구조가 리본만큼 우수한 전송특성을 갖는 원인을 설명하였다. 그림 6(a)는 이중 본드와이어의 간략화된 회로 모델이고, 그림 6(b)는 이중 본드와이어와 리본을 같은 비율로 확대하여 도시한 것이다.

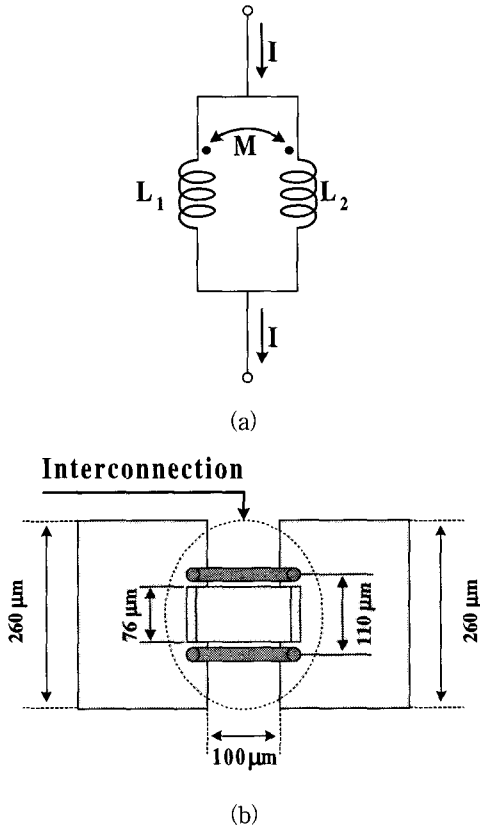


그림 6. (a) 이중 본드와이어의 간략화된 회로 모델; (b) 이중 본드와이어와 리본의 종횡비  
 Fig. 6. (a) Simplified circuit model of the double bondwire; (b) Aspect ratio of the double bondwire and ribbon.

그림 6(a)의 회로를 등가화된 하나의 인덕터로 나타낼 때 등가화된 인덕터의 인덕턴스는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이중 본드와이어의 경우  $L_1=L_2=L_B$  이므로 식(1)은 식(2)와 같이 정리할 수 있다. 이때 M은 상호 인덕턴스 (mutual inductance)를 나타낸다.

$$L_t = \frac{M^2 - L_1 L_2}{2M - L_1 - L_2} \quad (1)$$

$$L_t = \frac{L_B + M}{2} \quad (2)$$

또한, 식(2)의 자기 인덕턴스 (self inductance)와 상호 인덕턴스를 간단히 계산하기 위하여 그림 7에 대한 해석식을 사용하였다. 그림 7(a), (b)는 각각 본드와이어와 리본의 인덕턴스를 해석하기 위한 간략화된 구조이며, 이에 대한 해석식은 각각 식(3), (4), (5)로 표현될 수 있다<sup>[12]</sup>

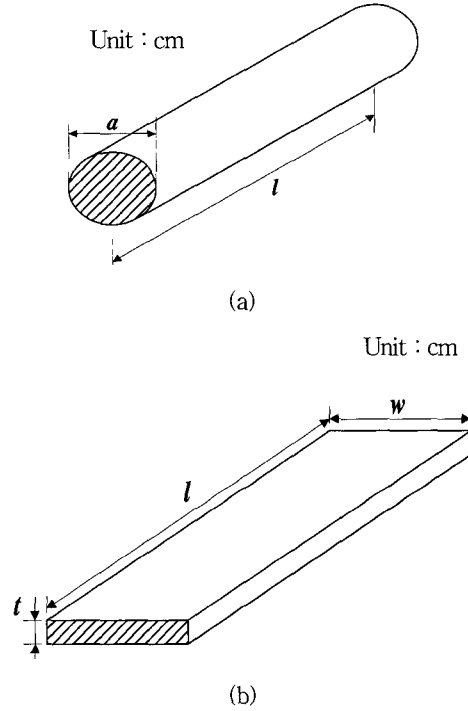


그림 7. (a)원형 도체 와이어; (b)직사각형 단면의 평판 도체  
 Fig. 7. (a)Round wire; (b)Flat wire.

$$L_B = 2.0l \left\{ \ln \left( \frac{4.0l}{a} \right) - 1.00 + \frac{a}{2.0l} + \frac{\mu_r T(x)}{4.0} \right\}$$

$$T(x) = \sqrt{\frac{0.873011 + 0.00186128x}{1.0 - 0.278381x + 0.127964x^2}} \quad (3)$$

$$x = a\pi \sqrt{\frac{2.0\mu f}{\sigma}}$$

$$M = 2.0l \left\{ \ln \left( \frac{l}{d} + \sqrt{1.0 + \frac{l^2}{d^2}} \right) - \sqrt{1.0 + \frac{d^2}{l^2}} + \frac{d}{l} \right\} \quad (4)$$

$$L_R = 2.0l \left\{ \ln \left( \frac{l}{w+t} \right) + 1.193 + 0.2235 \left( \frac{w+t}{l} \right) \right\} \quad (5)$$

여기서 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 단위는 nH이며 식(4)에서 사용된 d는 두 본드와이어 사이의 간격을 나타낸다. 식(3)과 식(4)는 각각 그림 7(a)의 자기 인덕

턴스와 상호 인덕턴스를 추출하기 위한 것이며, 식(5)는 그림 7(b)의 자기 인덕턴스를 추출하기 위한 해석식이다. 식(3), (4)로부터 계산된 본드와이어의 자기 인덕턴스 ( $L_B$ )와 상호 인덕턴스 ( $M$ )는 각각 0.31 nH, 0.1 nH이며 이러한 결과와 식(2)로부터 계산된 이중 본드와이어의 총 인덕턴스 ( $L_t$ )는 약 0.205 nH이다. 그리고 식(5)에 의해 계산된 리본의 인덕턴스 ( $L_R$ )는 약 0.227 nH이다. 이와 같은 결과로부터 이중 본드와이어가 리본만큼 우수한 전송 특성을 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 20 ~ 35 GHz 대역에 걸쳐 단일, 이중 본드와이어와 리본에 대한 고주파 전송특성을 해석하고 측정하였으며, 그 결과들을 비교하였다. 또한, FEM을 이용한 해석 결과를 측정 결과와 비교함으로써 해석의 신뢰성을 확인하였다. 해석 및 측정 결과, 이중 본드와이어의 경우 35 GHz 까지 0.55 dB 이내의 매우 작은 삽입 손실을 얻을 수 있었으며, 리본의 경우에는 35 GHz 까지 0.7 dB 이내의 삽입 손실을 얻을 수 있었다. 결과적으로 측정 주파수 전 대역에 걸쳐 이중 본드와이어의 특성이 리본의 전송 특성만큼 우수함을 확인하였다. 따라서, 리본보다 공정이 쉽고 신뢰성이 우수한 이중 본드와이어의 구조가 마이크로파 및 밀리미터파 대역용 패키징에 더욱 효과적이고 유용하다는 것을 확인하였다. 본 논문의 결과는 고성능, 저가의 마이크로파 및 밀리미터파 대역용 회로 및 모듈에 활용 될 수 있으리라 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Nelson, M. Youngblood, J. Pavio, B. Larson, R. Kottman, "Optimum microstrip interconnects," Proc. IEEE MTT-s Dig., Boston, MA, pp. 1071-1074, 1991.
- [2] T. Krems, W. Haydl, H. Massler, J. Rudiger, "Millimeter-wave performance of chip interconnections using wire bonding and flip chip," Proc. IEEE MTT-s. Dig., San Francisco, CA, pp. 247-250, 1996.
- [3] 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.
- [4] D. R. Decker, H. M. Olson, R. Tatikola, R. Gutierrez, and N. R. Mysoor, "Multichip MMIC Package for X and Ka bands," IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology, vol. 20, No. 1, pp. 27-33, Feb. 1997.
- [5] F. Alimenti, P. Mezzanotte, L. Roselli, R. Sorrentino, "An Equivalent circuit for the double bonding wire interconnection," Proc. IEEE MTT-s Dig., Anaheim, CA, pp. 633-636, 1999.
- [6] T. Krems, W. Haydl, L. Verweyen, M. Schlechtweg, H. Massler, and J. Ruediger, "Coplanar bond wire interconnections for millimeter-wave applications," The 4th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging, Portland, OR, pp. 178-180, 1995.
- [7] C. Schuster, G. Leonhardt, W. Fichtner, "Electromagnetic simulation of bonding wires and comparison with wide band measurements," IEEE Trans. on Advanced Packaging, vol. 23, No. 1, pp.69-79, Feb. 2000.
- [8] M. Hotta, Y. Qian, T. Itoh, "A novel resonant coupling type microstrip line interconnect," IEICE Trans. Electron., vol. E82-C, No. 1, pp. 147-150, Jan. 1999.
- [9] HFSS (High Frequency Structure Simulator), ver 7.0, Ansoft.
- [10] David M. Pozar, Microwave Engineering, New York: John Wiley & Sons, Inc., pp. 217-221, 1998.
- [11] Network Analysis : Applying the HP 8510 TRL calibration for non-coaxial measurements, HP Product Note 8510-8A, 1995.
- [12] Brian C. Wadell, Transmission Line Design Handbook, MA: Artech House, Inc., pp. 382-411, 1991.

저 자 소 개



金 鎮 良(正會員)  
1999년 : 아주대학교 전자공학부 졸업(학사). 2001년 : 아주대학교 전자공학부 대학원 졸업(공학석사). 2001년~현재 : 아주대학교 전자공학부 대학원 박사과정 재학. <주 관심분야> 밀리미터파대역 HMIC

설계 및 패키징 기법



張 東 弼(正會員)  
1992년 : 충남대학교 전자공학과 (학사). 1994년 : 충남대학교 대학원 전자공학과 (공학석사). 1994년~현재 : 한국전자통신연구원 근무, 선임연구원. <주 관심분야> M/W 및 mmWave 부품 설

계 제작

廉 仁 福(正會員)

1990년 : 한양대학교 전자공학과(공학사). 1990년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 위성RF부품연구팀장, 선임연구원. 1992년 9월~1995년 5월 : 무궁화 위성 현장교육 참여 (영국 Matra Marconi 사). <주 관심분야> 위성통신중계기, MMIC회로, 필터 설계

李 海 英(正會員) 第 36卷 D編 第 9號 參照

현재 아주대학교 전자공학부 교수