

커넥터와 수직 상호 결합방식을 사용한 실리콘 고무 소켓의 S-파라미터 측정

S-Parameter Measurement of Silicone Rubber Socket Using Connector-Based Vertical Interconnection Method

엄 태 성 · 김 문 정

Taesung Eom · Moonjung Kim

요 약

반도체 패키지의 집적도 향상과 고속 동작에 대응하기 위해 테스트 소켓으로 실리콘 고무 소켓이 사용되고 있다. 그러나 실리콘 고무 소켓의 얇은 두께와 압축으로 신호 경로를 형성하는 동작 특성으로 인해 전기적 성능을 정확히 분석하는데 어려움이 발생하고 있다. 본 논문에서는 실리콘 고무 소켓의 전기적 성능을 측정하기 위해 프로브를 사용한 S-파라미터를 측정하는 방법을 대체하여 커넥터를 포함하는 fixture를 통해 수직 상호 결합방식의 측정 방법을 제안한다. 추가된 fixture로 인해 발생하는 손실은 2x-thru 방식의 de-embedding을 적용하여 제거하였으며, 사용된 Fixture는 고주파 대역까지 de-embedding을 적용할 수 있는 설계에 맞춰 제작하였다. 최종적으로 de-embedding을 적용하여 실리콘 고무 소켓만의 S-파라미터를 도출하였다. 이후 실리콘 고무 소켓만의 시뮬레이션 결과와 비교를 통해 커넥터를 사용한 수직 상호 결합방식의 측정 방법이 유효함을 확인하였다.

Abstract

Silicon rubber sockets are used as test sockets to match the integration density and high-speed operation of semiconductor packages. However, owing to the thinness and compressibility of silicon rubber sockets, it is difficult to accurately analyze their electrical performance. This study provides an alternative to the method of measuring S-parameters using a probe to determine the electrical performance of a silicone rubber socket. We propose a vertical interconnection measurement method that uses a fixture that includes a connector. The loss caused by the added fixture was removed by applying the 2x-thru de-embedding method. The fixture was designed to apply de-embedding up to a high-frequency band. Finally, de-embedding was applied to determine the S-parameters of the silicone rubber socket. The effectiveness of the vertical interconnection measurement method using connectors was confirmed through a comparison with the simulation results of a silicone rubber socket.

Key words: Silicone Rubber Socket, 2x-Thru, De-Embedding, Signal Integrity, S-Parameter

「본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.」

「본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0028098, 반도체특성화대학지원사업-동반성장형-한국공학대학교).」

공주대학교 전기전자제어공학부(Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju University)

· Manuscript received November 1, 2024 ; Revised November 18, 2024 ; Accepted December 15, 2024. (ID No. 20241101-121)

· Corresponding Author: Moonjung Kim (e-mail: mjkim@kongju.ac.kr)

I. 서 론

최근 반도체 패키지는 높은 집적도와 고속의 데이터 전송을 목표로 개발되고 있다. 이에 따라 반도체 패키지를 테스트할 때 사용되는 테스트 소켓 또한 고밀도 및 고대역폭에서 안정적으로 동작하도록 개발되고 있다. 주로 사용되는 Pogo 형식의 테스트 소켓은 핀 간격으로 인한 임피던스 매칭 문제와 핀의 길이로 인한 신호 무결성 문제 등으로 한계점이 발생하게 되었고 이를 대체하기 위해 실리콘 고무에 금속 분말을 배치한 실리콘 고무 소켓이 개발되었다^[1].

실리콘 고무 소켓은 실리콘 고무의 압축성으로 수직의 힘이 가해지면 금속 분말들이 정렬되어 신호 경로를 형성한다. 이에 따라 기존 Pogo 소켓 대비 신호 길이가 짧아지고 핀의 간격이 조밀해져 고주파 신호에서 신호 무결성 문제를 해결할 수 있다. 그러나 조밀한 핀 간격과 압축성으로 동작하는 특성으로 인해 실리콘 고무 소켓만의 전기적 성능을 측정하고 할 때 어려움이 발생하고 있다.

일반적으로 실리콘 고무 소켓의 전기적 성능을 측정하기 위해서는 프로브를 사용하여 VNA(vector network analyzer) 장비를 통해 S-파라미터를 측정한다. 하지만 프로브를 사용한 측정 방법은 실리콘 고무 소켓의 얇은 두께로 인해 프로브 간의 결합(coupling) 효과가 발생하며, 실리콘 고무의 반발력으로 인해 프로브가 손상될 위험성이 있다. 이외에도 실리콘 고무 소켓의 금속 분말이 수직으로 정렬되어있기에 프로브를 회전시켜 측정해야 하며, 이 과정에서 측정의 정확도가 떨어질 수 있다^[2].

본 논문은 고주파 대역에서 실리콘 고무 소켓의 전기적 성능을 측정할 때 발생하는 문제를 해결하기 위해 커넥터를 사용하여 실리콘 고무 소켓을 측정하는 방법을 연구하였다. 커넥터와 실리콘 고무 소켓을 직접 연결하여 측정할 수 없기에 커넥터와 실리콘 고무 소켓을 연결하기 위한 test fixture가 필요하다. 그러나 test fixture를 사용하게 되면 측정 결과에 커넥터와 fixture의 영향이 포함된 결과가 나타나는 문제가 발생한다. 이러한 불필요한 요소의 성분을 제거하기 위해 de-embedding 기법이 연구되었으며, SOLT(short-open-load-thru), TRL(thru-reflect-line), 2x-thru 방식 등이 널리 알려져 있다^{[3]~[6]}. 이에 본 논문은

AFR(automatic fixture removal)이라는 응용 프로그램을 사용하여 2x-thru 방식의 De-embedding을 적용하였다.

II. De-Embedding을 이용한 실리콘 고무 소켓 측정 방법

2-1 De-Embedding을 사용한 측정 과정

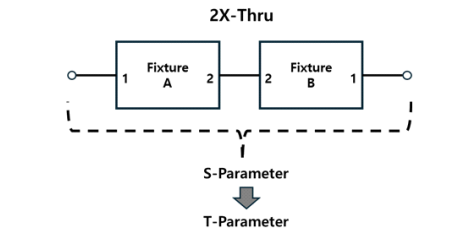
2x-thru의 De-embedding 응용 프로그램으로 잘 알려진 AFR의 알고리즘은 측정된 S-파라미터를 T-파라미터로 변환하여 수행한다^[7]. 이후 계산된 결과는 다시 S-파라미터로 변환하여 나타내게 된다. 이는 여러 네트워크로 연결되어있는 행렬의 경우 S-파라미터로 계산하는 것이 어려우므로 T-파라미터로 변환하여 계산하게 된다^{[8],[9]}. 이러한 S-파라미터와 T-파라미터 간의 변환 관계는 식 (1)과 같이 나타난다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{12}}{T_{22}} & \frac{T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21}}{T_{22}} \\ \frac{1}{T_{22}} & -\frac{T_{21}}{T_{22}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

본 논문에서 사용하는 2x-thru의 de-embedding 방법은 그림 1에 제시된 순서를 따라 진행된다. 우선 그림 1(a)와 같이 양쪽 fixture가 결합이 되어 있는 구조인 2x-thru의 S-파라미터를 측정한다. 측정된 데이터는 이후 de-embedding 과정에서 양쪽 fixture의 기생성분을 제거할 때 사용된다. 이후 그림 1(b)와 같이 DUT(device under test)를 중심으로 양쪽 fixture가 포함되어있는 전체 구조의 S-파라미터를 측정한다. 이때 측정된 S-파라미터는 DUT뿐만 아닌 fixture에 포함되어있는 커넥터, PCB 등의 기생성분들이 추가된다. 그림 1(a) 및 그림 1(b)의 S-파라미터 결과 바탕으로 AFR를 사용하여 de-embedding을 적용하면 그림 1(c)와 같이 Fixture-DUT-fixture 구조에서 양쪽 fixture의 기생성분이 제거된 DUT만의 S-파라미터가 도출된다.

2-2 수직 상호 결합의 측정 구조

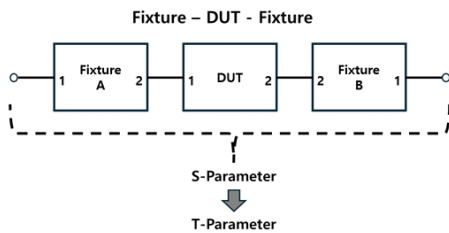
일반적으로 제시되는 de-embedding 구조는 그림 2(a)와 같이 동일한 평면 위에 DUT를 실장 후 측정하는 방법으로 나타난다^{[9]~[11]}. 하지만 그림 2(a)와 같은 구조를 사용



$$[T_{Measurd}] = [T_{Fixture A}][T_{Fixture B}]$$

(a) 2x-thru 구조의 S-파라미터 측정

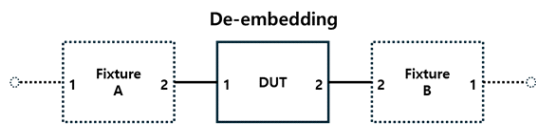
(a) S-parameter measurement of 2x-thru structure



$$[T_{Measurd}] = [T_{Fixture A}][T_{DUT}][T_{Fixture B}]$$

(b) Fixture-DUT-fixture 구조의 S-파라미터 측정

(b) S-parameter measurement of fixture-DUT-fixture structure



$$[T_{DUT}] = [T_{Fixture A}]^{-1} [T_{Fixture A}][T_{DUT}][T_{Fixture B}][T_{Fixture B}]^{-1}$$

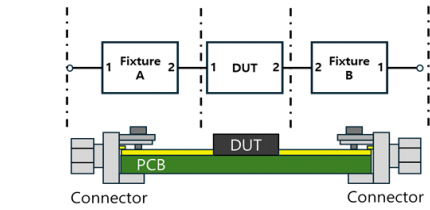
(c) De-embedding을 적용한 양쪽 fixture 제거

(c) Apply de-embedding to remove both fixtures

그림 1. 2X-thru 방식의 de-embedding 과정

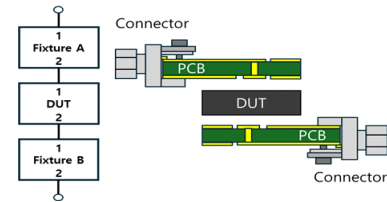
Fig. 1. De-embedding process using 2x-thru method.

해서는 실리콘 고무 소켓의 S-파라미터를 측정할 수 없다. 이는 실리콘 고무 소켓의 구조 특성상 신호가 전달되는 구조가 수직 형태를 가지고 있기 때문이다. 따라서 일반적인 동일 평면에서 DUT를 측정하는 구조가 아닌 수직 구조에서 DUT를 측정할 수 있는 새로운 구조가 필요하다. 본 논문은 그림 2(b)와 같이 대칭 구조를 갖는 2개의 fixture를 제작하여 DUT를 중심으로 상부와 하부에 fixture를 배치해 수직으로 결합하는 수직 상호 결합 형태의 측정 구조를 제안한다. 표 1에서는 기존 구조와 제안 구조의 차이점을 제시한다. 제안하는 구조는 기존 구조와 달리 수직 형태 구조기 때문에 fixture를 통해 DUT에 압



(a) 동일한 평면에서의 de-embedding 적용 구조

(a) De-embedding structure on the same plane



(b) 수직 상호 결합방식의 de-embedding 적용 구조

(b) De-embedding structure using vertical interconnection method

그림 2. 동일 평면 방식을 대체하는 수직 상호 결합방식의 De-embedding 적용 구조

Fig. 2. De-embedding structure with vertical mutual coupling method replacing same plane method.

표 1. 기존 구조와 제안 구조의 차이점

Table. 1. Difference between existing and proposed structures.

	Existing structure	Proposed structure
Fastening structure	Plane	Vertical
Mechanical connection	Soldering	External pressure
Electrical connection	Soldering	Via

력을 가할 수 있게 된다. 또한 압력을 통해 DUT를 fixture에 고정할 수 있어 기존 구조와 달리 납땜이 필요하지 않다. 이러한 납땜 작업을 하지 않음으로 SMD 패턴 및 납땜으로 인한 특성 임피던스의 불연속 문제를 최소화할 수 있다^[10].

III. Test fixture 설계 및 시뮬레이션 검증

3-1 Test Fixture의 설계기준 및 구조

고주파 대역까지의 de-embedding을 적용하기 위해서는 fixture의 2x-thru 성능이 일정 기준을 충족해야 한다. 2x-thru의 설계기준은 IEEE P370에 자세히 명시되어 있다

표 2. 50 GHz까지 de-embedding 적용을 위한 2x-thru의 설계기준

Table. 2. Design criteria for 2x-thru for de-embedding applications up to 50 GHz.

Design parameter	Equation	Value (dB)
Insertion loss	$20 \times \log_{10} S_{21} $	-15 dB
Return loss	$20 \times \log_{10} S_{11} $	-6 dB
Difference between insertion and return loss	$20 \times \log_{10} S_{21} - 20 \times \log_{10} S_{11} $	0 dB

[12],[13]. 설계기준에 충족하지 않는 경우 de-embedding 결과의 정확도를 보장할 수 없게 된다. 이에 본 논문은 IEEE P370을 참조하여 50 GHz까지 표 2와 같은 설계기준을 적용하여 fixture를 설계하였다.

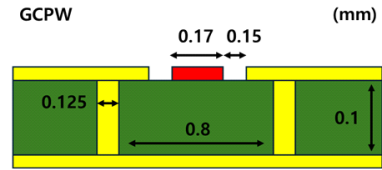
50 GHz까지 손실 크기를 맞추기 위해서는 유전체 손실이 적은 PCB 소재를 사용해야 한다. 이에 PCB 소재로 유전체 손실이 적은 I-TERA MT40 소재를 사용하였다. 또한 50 GHz까지 삽입 손실과 반사 손실의 차이가 0dB 이상의 값을 가지기 위해서는 급격한 손실을 유발하는 공진과 같은 요소를 방지할 필요가 있다. 그림 3(a)와 같은 GCPW(grounded coplanar waveguide) 구조를 사용하여 50 GHz까지 우수한 신호 전달특성을 확보하고 구조 공진을 최소화하였다[14].

그림 3(b)는 그림 3(a)에서 제시한 GCPW 구조와 설계치수를 반영하여 설계된 Fixture 구조를 나타낸다.

3-2 2X-thru 시뮬레이션 검증

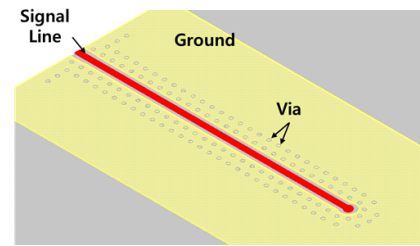
설계한 fixture의 성능이 de-embedding 기능 사용에 적합한지 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 검증을 진행하였다. 시뮬레이션은 Ansys의 HFSS를 이용하여 50 GHz까지 2x-thru의 S-파라미터를 확인하였다(그림 4).

2x-thru 시뮬레이션 결과 50 GHz까지 삽입 손실 -1.3 dB 반사 손실은 -18 dB 성능이 나타났다. 다만 그림 4의 결과는 커넥터 모델링의 한계로 인해 커넥터의 손실이 추가되지 않았다. 따라서 실제 2x-thru의 손실은 그림 4의 결과보다 더 크게 나타낼 수 있다. 그러나 신호손실이 설계기준보다 우수한 성능을 나타내기 때문에, 추가적인 손실을 고려하더라도 설계가 유효함을 확인하였다.



(a) Grounded coplanar waveguide의 구조 및 설계 치수

(a) Structure and design dimensions of grounded coplanar waveguide



(b) Grounded coplanar waveguide의 구조를 사용한 fixture 설계

(b) Fixture design using grounded coplanar waveguide structure

그림 3. 50 GHz까지 신호 무결성을 확보하기 위한 fixture 설계

Fig. 3. Fixture design to ensure signal integrity up to 50 GHz.

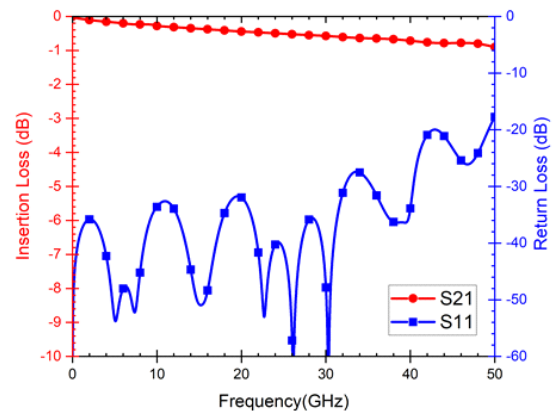


그림 4. 시뮬레이션을 통한 2x-thru의 S-파라미터 결과

Fig. 4. 2X-thru S-parameter results from simulation.

IV. S-파라미터 측정 결과

4-1 2X-Thru의 S-파라미터 측정 결과

S-파라미터 측정은 VNA 장비를 사용하여 진행한다. VNA 장비는 Keysight사의 N5227B를 사용하였으며, 그림 5

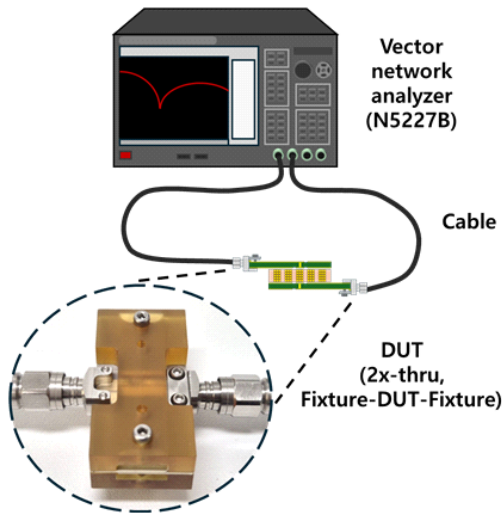


그림 5. VNA를 이용한 S -파라미터 측정
Fig. 5. S -parameter measurement using VNA.

에서 나타내는 측정 구조와 측정 모습을 바탕으로 50 GHz까지의 2x-thru, fixture-DUT-fixture의 순서로 측정을 진행하였다.

2X-thru의 측정 결과는 그림 6과 같이 50 GHz까지 삽입 손실은 약 -6.3 dB, 반사 손실은 -7.5 dB로 확인되었다. 제작된 2X-thru는 앞서 확인한 시뮬레이션 결과

보다 손실이 증가하였으나 표 2에서 제시된 50 GHz까지의 삽입 손실 및 반사 손실의 크기와 두 손실의 차이가

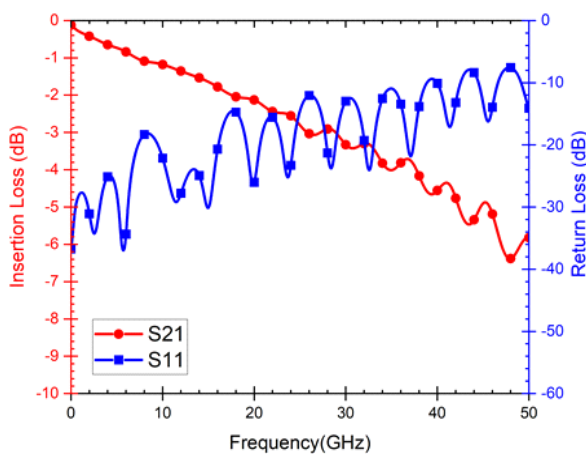


그림 6. 2X-thru의 S -파라미터 측정 결과
Fig. 6. S -parameter measurement results of 2x-thru.

설계 기준값에 충족하는 것을 확인하였다. 이를 통해 50 GHz까지 De-embedding 기능을 적용할 수 있음을 확인하였다.

4-2 Fixture-DUT-Fixture의 S -파라미터 측정 결과

2X-thru 사이에 실리콘 고무 소켓을 넣어 조립한 후 fixture-DUT-fixture 구조의 S -파라미터 측정을 진행하였다. 측정된 S -파라미터 결과는 그림 7과 같이 확인되었다. 그림 6의 2X-thru 측정 결과 대비 삽입 손실에서 약 -1 dB 정도 증가함을 확인할 수 있다. 이는 2X-thru 사이에 실리콘 고무 소켓이 추가되어 발생한 것이므로 손실의 증가 폭이 실리콘 고무 소켓만의 손실이라고 유추할 수 있다.

4-3 De-Embedding 적용 결과 및 시뮬레이션 결과 비교

그림 6 및 그림 7의 결과를 바탕으로 실리콘 고무 소켓만의 S -파라미터를 도출하기 위해 AFR를 사용하여 de-embedding을 적용하였다. De-embedding이 적용된 결과는 그림 8과 같이 나타난다. 50 GHz까지 실리콘 고무 소켓의 전기적 성능으로 삽입 손실은 약 -0.47 dB, 반사 손실은 약 -19 dB로 나타남을 확인하였다.

이후 De-embedding 결과와 실리콘 고무 소켓만 시뮬레이션을 진행한 삽입 및 반사 손실 결과와 비교하여 두 손

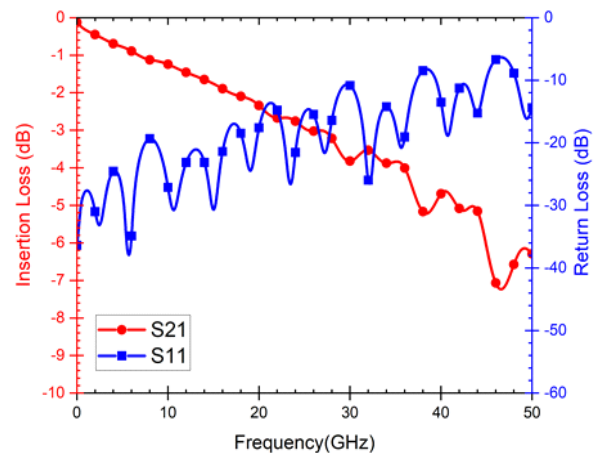


그림 7. Fixture-DUT-fixture의 S -파라미터 측정 결과
Fig. 7. S -parameter measurement results of fixture-DUT-fixture.

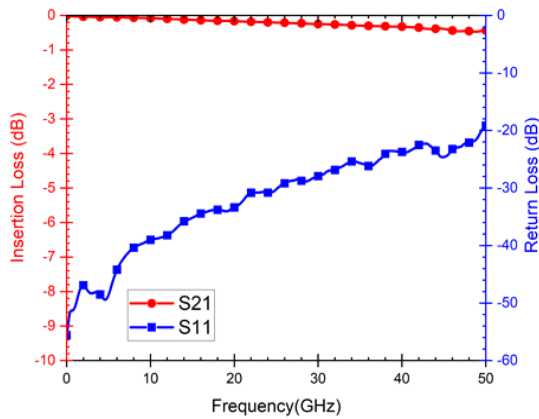


그림 8. De-embedding을 적용한 실리콘 고무 소켓의 S-파라미터 결과

Fig 8. S-parameter results of silicone rubber socket by applying de-embedding.

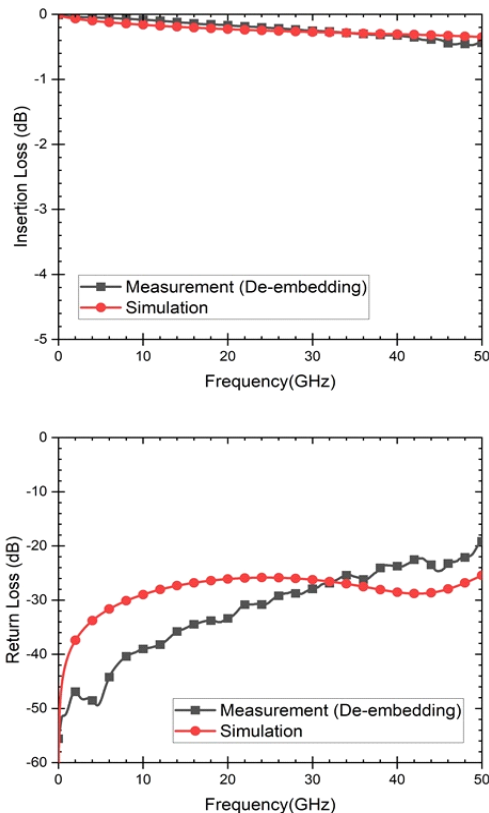


그림 9. De-embedding 결과와 실리콘 고무 소켓만의 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 9. Comparison of de-embedding results with simulation results for only silicone rubber sockets.

실 결과의 유사성을 검증하였다. 비교 결과는 그림 9와 같이 확인할 수 있으며, 두 결과의 삽입 손실과 반사 손실이 유사한 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 실리콘 고무 소켓의 전기적 성능을 측정하기 위해 커넥터를 포함하는 fixture를 설계하고 수직 상호 결합방식을 사용하여 S-파라미터를 측정하는 방법을 제시하였다. AFR를 통해 2x-thru 방식의 de-embedding을 적용하여 실리콘 고무 소켓만의 S-파라미터를 도출하였다. 이후 도출된 결과가 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 확인할 수 있었으며, 커넥터를 사용한 수직 실장 구조의 측정 방법이 유효함을 확인하였다.

References

- [1] J. Park, H. Kim, J. J. Kim, H. Won, B. Bae, and J. Kim, et al., "Modeling and measurement of high-bandwidth and high-density silicone rubber socket for 100 Gbps transceiver IC test," in *2015 IEEE 24th Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems(EPEPS)*, San Jose, CA, Oct. 2015, pp. 109-112.
- [2] J. Park, H. Kim, J. J. Kim, B. Bae, D. Ha, and M. Bae, et al., "Measurement of high-bandwidth and high-density silicone rubber socket up to 110 GHz," in *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Las Vegas, NV, May-Jun. 2016, pp. 2481-2486.
- [3] C. Ning, M. Resso, Z. Wenxue, J. Gongxian, and L. Faming, "Characterization of PCB s-parameters with a new calibration method," in *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC)*, Shenzhen, May 2016, pp. 240-242.
- [4] X. Ye, J. Fan, B. Chen, J. L. Drewniak, and Q. B. Chen, "Accurate characterization of PCB transmission lines for high speed interconnect," in *2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility(AP EMC)*, Taipei, May 2015, pp. 16-19.

- [5] S. J. Moon, X. Ye, and R. Smith, "Comparison of TRL calibration vs. 2x thru de-embedding methods," in *2015 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity*, Santa Clara, CA, Mar. 2015, pp. 176-180.
- [6] Y. Chen, B. Chen, J. He, R. Zai, J. Fan, and J. Drewniak, "De-embedding comparisons of 1X-Reflect SFD, 1-port AFR, and 2x-thru SFD," in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC/APEMC)*, Suntec City, May 2018, pp. 160-164.
- [7] M. Resso, E. Bogatin, and A. Vatsyayan, "A new method to verify the accuracy of de-embedding algorithms," in *2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC)*, Puerto Vallarta, Dec. 2016, pp. 1-4.
- [8] J. Y. Ye, J. Fan, X. Cao, Q. M. Cai, Y. Zhu, and Y. Zhu, "A 2x-thru standard de-embedding method of surface components in high-speed PCBs," in *2022 IEEE USNC-URSI Radio Science Meeting(Joint with AP-S Symposium)*, Denver, CO, Jul. 2022, pp. 58-59.
- [9] B. Chen, J. He, Y. Guo, S. Pan, X. Ye, and J. Fan, "Multi-Ports([2]) 2x-thru de-embedding: Theory, validation, and mode conversion characterization," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 4, pp. 1261-1270, Aug. 2019.
- [10] S. Lee, H. Kim, J. Ahn, J. Rhee, J. Cho, and H. Kim, et al., "A method for deembedding the mounting pad and via-hole effect in a test fixture for accurate impedance measurement of the surface mount device component," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, p. 2003813, Apr. 2024.
- [11] Y. Li, L. Zhu, "A short-open calibration method for accurate de-embedding of 3-D nonplanar microstrip line structures in finite-element method," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 3, pp. 1172-1180, Mar. 2018.
- [12] S. J. Moon, X. Ye, K. A. Wang, U. I. Khan, and T. Wig, "Application of IEEE-370 for PCIe interconnect test with 2X-Thru de-embedding," in *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Raleigh, NC, Jul.-Aug. 2021, pp. 835-839.
- [13] M. Tsiklauri, "P370:electrical characterization of printed circuit board and related interconnects at frequencies up to 50 GHz," in *2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, Washington, DC, Aug. 2017, pp. 1-15.
- [14] A. Sain, K. L. Melde, "Impact of ground via placement in grounded coplanar waveguide interconnects," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 136-144, Jan. 2016.

엄 태 성 [국립공주대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0003-2201-2424>



2024년 2월: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 (공학사)

2024년 3월~현재: 국립공주대학교 전기전자제어공학과 석사과정

[주 관심분야] SI, PI 등

김 문 정 [국립공주대학교/교수]

<https://orcid.org/0009-0007-4007-6930>



1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2003년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2006년 9월~현재: 공주대학교 전기전자

제어공학부 교수

[주 관심분야] SI, PI 등