

CT 기반 금속 분말 모델링을 이용한 실리콘 고무 소켓의 전자기 시뮬레이션 분석

Analysis of Electromagnetic Simulation for Silicone Rubber Socket Using CT-Based Metal Powder Modeling

전 근 우 · 김 문 정

Geunwoo Jeon · Moonjung Kim

요 약

반도체 패키지의 집적도와 데이터 전송 속도가 증가함에 따라 테스트 소켓의 정확한 고주파 특성 예측이 중요해지고 있다. 그러나 기존 실리콘 고무 소켓의 전자기 시뮬레이션은 내부 금속 분말의 불규칙한 형상을 단순화하여 모델링하였기 때문에 고주파 대역에서 정확도 및 신뢰도가 저하되는 한계가 있었다. 본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위하여 CT 기반의 역기하 모델링 기법을 제안한다. 실리콘 고무 소켓의 CT 단층 촬영 영상을 3차원으로 재구성하여 금속 분말의 형상을 정밀하게 반영한 솔리드 모델을 생성하고, 기존의 단순화 모델 및 측정 결과와 신호 전달 특성 측면에서 비교 분석하였다. CT 기반 모델은 반사 손실 결과에서 측정값과 높은 상관성을 보여주었으나, 삽입 손실 및 누화 특성에서는 CT 해상도와 소켓의 구조적 요인에 따른 한계가 나타났다. 향후 고해상도 CT를 적용한다면 시뮬레이션의 정확도가 향상될 것으로 기대된다.

Abstract

As semiconductor packages continue to increase in integration density and data transfer rate, accurate prediction of the high-frequency characteristics of test sockets has become crucial. However, conventional electromagnetic simulations of silicone rubber sockets have shown limitations in terms of accuracy and reliability in high-frequency ranges, primarily because they model the irregular geometry of the internal metal powder in a simplified manner. To address this limitation, we proposed a CT-based reverse geometric modeling technique. A solid model that precisely represents the metal powder geometry is constructed by reconstructing 3D CT images of the socket. The signal transmission characteristics of this model are then comparatively analyzed against those obtained from a conventional simplified model and from experimental measurements. The CT-based model demonstrated a high correlation with the measured values in the return loss results, whereas limitations were observed in the insertion loss and crosstalk characteristics owing to the CT resolution and the structural factors of the socket. Future applications of higher-resolution CT are expected to improve the simulation accuracy.

Key words: Silicone Rubber Socket, Metal Powder, CT, Reverse Geometric Modeling, Electromagnetic Simulation

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

「이 연구는 중소벤처기업부 중소기업기술혁신개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: S3275783).」

국립공주대학교 전기전자제어공학과(Department of Electrical Electronic and Control Engineering, Kongju National University)

· Manuscript received October 21, 2025 ; Revised October 24, 2025 ; Accepted November 11, 2025. (ID No. 20251021-127)

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

I. 서 론

최근 고성능 반도체 패키지의 고집적화와 데이터 전송 속도의 급격한 증가로 인하여 전기적 특성을 평가하는 테스트 장비의 중요성이 커지고 있다^{[1]-[2]}. 특히, 테스트 소켓은 패키지와 테스트 장비 간의 전기적 인터페이스를 제공하며 신호 전송 경로의 특성에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 테스트 소켓 또한 반도체 패키지를 안정적으로 검증하기 위하여 고주파 성능 확보가 중요하다. 그 중 실리콘 고무 소켓은 포고(pogo) 타입 소켓에 비해 낮은 인덕턴스와 비파괴적 접촉 특성을 가지므로 고성능 패키지 테스트에 널리 사용되고 있다^[3]. 그림 1은 테스트 환경에서 반도체 패키지와 테스트 보드 사이에서 실리콘 고무 소켓이 물리적 결합을 형성하는 구조를 나타낸 것으로, 소켓의 핀 영역에 포함된 다수의 금속 분말 입자들이 전기적 경로를 형성하여 신호가 전달되도록 한다.

실리콘 고무 소켓의 고주파 신호 전달 특성 예측에는 주로 3차원 전자기 시뮬레이션이 활용된다. 시뮬레이션의 정확도와 신뢰도를 확보하기 위해서는 구조의 실제 형상을 반영해야 한다. 한편, 실리콘 고무 소켓 내부의 금속 분말은 불규칙한 형상으로 인하여 시뮬레이션 환경에서 직접 모델링이 불가능하다. 이 문제를 해결하기 위하여 이전 연구에서는 금속 분말로 구성된 소켓의 핀 영역을 sphere 및 cylinder 형태로 단순화하는 방식을 이용하였다^{[4]-[9]}. 그러나 이러한 모델링 방식은 실제 신호 전달 특성을 고주파 대역까지 정확하게 반영할 수 없으며, 시뮬

레이션 결과의 정확도와 신뢰도 저하를 발생시킨다. 따라서 3차원 전자기 시뮬레이션에 금속 분말 형상을 반영하기 위한 모델링 기법에 관한 연구가 필요하다.

본 논문은 실리콘 고무 소켓 시뮬레이션에 금속 분말 형상을 반영하기 위하여 CT(computed tomography) 기반의 역기하 모델링 기법을 제안한다. 기존의 단순화 모델링 방식을 적용한 실리콘 고무 소켓 모델과 CT 기반 모델을 측정 결과와 비교 분석하여 제안한 모델링 기법의 유효성을 검증한다.

II. CT를 이용한 금속 분말 모델링 기법

X선의 투과성을 이용하여 내부 형상을 정밀하게 촬영할 수 있는 CT 기반의 역기하 모델링에 관한 연구가 활발히 진행되었다^{[10]-[12]}. 그림 2는 본 논문에서 금속 분말 모델링에 사용한 CT 기반의 역기하 모델링 기법을 네 단계로 요약하고 있다. 먼저 CT 촬영을 통해 실리콘 고무 소켓의 단층 이미지를 확보하고, 이를 3차원으로 재구성하여 금속 분말의 표면 형상을 따라 표면 모델을 생성한다. 이후 생성된 표면 모델을 전자기 시뮬레이션에서 활용할 수 있도록 내부가 채워진 솔리드 모델로 변환하는 순서로 진행한다.

2.1 실리콘 고무 소켓의 단층 촬영

금속 분말의 형상 데이터를 얻기 위하여 CT 단층 촬영이 선행되었다. 실리콘 고무 소켓의 단층 촬영은 Bruker

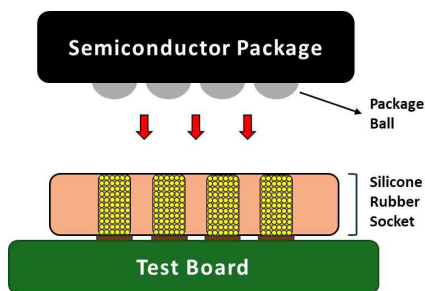


그림 1. 반도체 패키지와 실리콘 고무 소켓의 물리적 결합 구조도

Fig. 1. Physical connection structure between the semiconductor package and the silicone rubber socket.

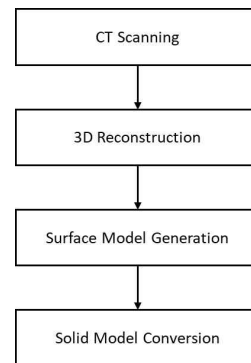


그림 2. CT를 이용한 역기하 모델링 흐름도

Fig. 2. Flowchart for CT-based reverse geometric modeling.

의 SKYSCAN 1272를 사용하였고, CT 영상의 공간 샘플링 간격(image pixel size)은 3 μm 로 설정하였다. 이는 평균 분말 직경($\approx 30 \mu\text{m}$)의 1/10에 해당하는 값으로, 이후 3차원 재구성 과정에서 개별 분말의 표면 형상이 연속적으로 재현되어 안정적으로 복원되도록 하였다. CT 촬영으로 약 2,000개의 단층 영상을 얻었고, 이를 통합하여 실리콘 고무 소켓의 내부 구조에 관한 3차원 이미지를 구현할 수 있다. 그림 3은 CT 촬영 영상 후처리 과정에서 확인한 단층 영상을 보여주고 있다. 이를 통해 실리콘 고무 소켓의 제조 공정상 정렬되지 않은 금속 분말들이 핀 주변에 분포해 있음을 확인할 수 있다.

2-2 3차원 재구성 및 표면 모델 생성

CT 단층 촬영으로 확보한 이미지를 CT 분석 소프트웨어에서 통합하여 3차원 재구성을 수행하였다. 그림 4의 3차원 재구성 결과는 각 물질의 X선 흡수율 차이에 따른

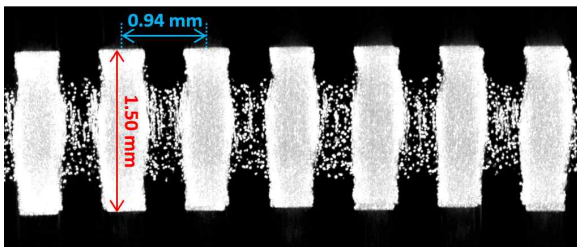


그림 3. 실리콘 고무 소켓의 단층 촬영 영상
Fig. 3. Tomographic image of a silicone rubber socket.

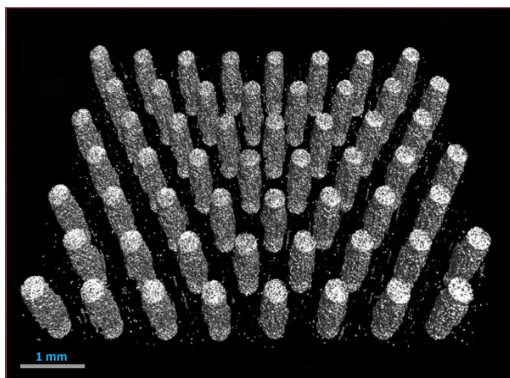


그림 4. CT 분석 소프트웨어를 이용한 3차원 재구성
Fig. 4. 3D reconstruction using CT analysis software.

명암을 3차원 공간에 시각화하여 금속 분말과 비전도성 영역인 실리콘 고무를 구분하여 보여준다. 실리콘(silicone), 공기(air)와 같은 유전체 물질에 비하여 원자번호가 크고 밀도가 높은 금속이 X선 흡수율이 높다^[13]. 이에 따라 X선 흡수율 차이로 인하여 흡수가 높은 금속 분말은 밝은색으로 표시되고 낮은 실리콘, 공기 등은 어두운색으로 나타난다. 이때, CT 분석 소프트웨어 환경에서 명암비 조정 기능을 사용하여 높은 밀도 값을 시각화 범위에서 제외하고, 실리콘과 공기가 분포한 저밀도 영역으로 관찰 범위를 제한하면 두 물질을 구분할 수 있다.

금속 분말만의 형상 데이터를 추출하기 위해서는 전체 영역에서 금속 분말 영역을 분리해야 한다. 이를 위하여 CT 분석 소프트웨어에서 재구성한 3차원 영상에 포함된 약 2,000개의 단층 영상을 대상으로 오투 알고리즘(Otsu algorithm)을 적용하였다. 오투 알고리즘은 영상의 전체 픽셀을 밝은 그룹과 어두운 그룹으로 분류할 때, 두 그룹의 밝기 차이가 가장 뚜렷하게 나타나는 최적의 임계값(threshold)을 찾아내는 기법이다^{[14]-[15]}. 본 연구에서는 CT 촬영 결과에서 나타난 고밀도의 금속 분말과 저밀도의 유전체의 명암 분포 차이를 활용하였으며, 산출된 임계값을 기준으로 영상을 이진화하여 금속 분말 영역을 특정하였다. 그림 5(a)는 CT 촬영 영상이며, 그림 5(b)는 오투 알고리즘을 사용한 영상 이진화 결과이고 노란색은 금속 분말, 검은색은 유전체로 CT 촬영 영상이 분할된 결과를 보여준다. 이에 따라 각 단층 영상에서 금속 분말의 경계가 특정되어 해당 정보가 3차원 재구성 결과에 반영된다. 이후 그림 5(c)에 나타난 것처럼 금속 분말 영역의 경계면 정보를 추출하여 3차원 표면 모델을 생성하였다. 이는 금속 분말 영역의 경계면을 다수의 미세한 삼각형들로 분해하여 표면을 근사하는 tessellation 과정이며, 그림 2의 흐름도에서 표면 모델 생성 단계에 해당한다.

2-3 솔리드 모델 변환

3차원 금속 분말 모델을 이용하여 유한요소해석(finite element analysis) 기반의 전자기 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 표면 모델을 솔리드 모델로 변환하는 과정이 필요하다. 표면 모델은 삼각형 기반의 경계면 정보만을

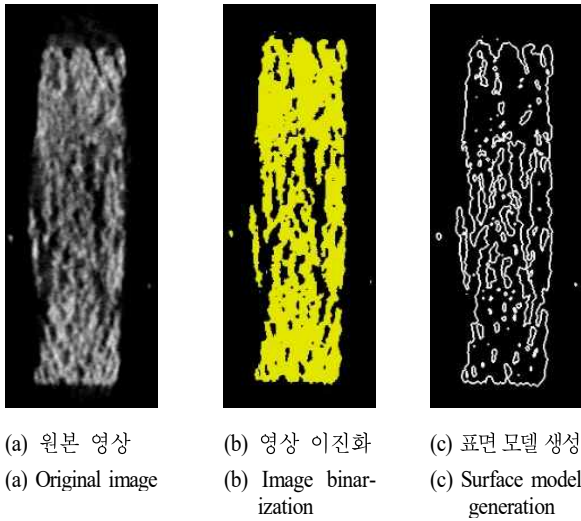


그림 5. CT 분석 소프트웨어를 이용한 표면 모델 생성 과정
 Fig. 5. Procedure for generating a surface model using CT analysis software.

포함하기 때문에, 내부 구조에 대한 연속적 물리 특성을 정의할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 CAD 소프트웨어를 이용하여 그림 2의 흐름도 중 마지막 단계인 솔리드 모델 변환을 수행하였다. CT 분석 소프트웨어에서 생성한 표면 모델을 CAD 소프트웨어 환경으로 import하여 솔리드 변환 작업을 거쳐 금속 분말의 솔리드 모델을 확보하였다. 변환된 솔리드 모델은 내부가 정의된 폐곡면 형태로 구성되며, CT 장비의 공간 샘플링 간격에 의해 결정되는 해상도를 가진다. 이후 솔리드 모델은 3D CAD 파일 형식으로 export 되어 유한요소해석 소프트웨어에서 전기 전도도 및 유전율 등의 물성 정보를 부여할 수 있는 3차원 객체로 활용된다.

III. 실리콘 고무 소켓 시뮬레이션

본 연구에서는 측정 결과를 기준으로 CT 기반의 금속 분말 모델링이 실리콘 고무 소켓의 신호 전달 특성 예측 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 전자기 시뮬레이터는 Ansys의 HFSS(high frequency structure simulator)를 이용하였다. 먼저 설계 도면을 기반으로 핀 영역을 제외한 소켓의 기본 구조를 모델링한 후, 수행한 솔리드 변환 모

델을 적용하여 CT 기반 모델을 완성하였다. 비교 분석을 위하여 핀 영역을 설계 도면에 제시된 형상과 치수를 기반으로 구현한 실리콘 고무 소켓 모델을 설정하였다. 이 모델은 금속 분말로 구성된 실제 핀 형상을 원통형으로 근사화한 모델이므로, 본 논문에서 단순화 모델이라 명칭한다. 그림 6은 CT 기반 모델과 단순화 모델의 핀 형상을 비교하여 보여주고 있다. CT 기반 모델에는 핀을 구성하는 금속 분말뿐만 아니라, 핀 주변에 분포한 분말도 함께 포함하였다. 이러한 인접 분말은 신호 핀 주변의 전자기장 분포에 영향을 미쳐 임피던스 및 손실 특성에 변화를 유발할 가능성이 있다.

시뮬레이션 결과의 신뢰도는 실제 측정 환경의 반영 정도에 따라 결정된다. 따라서 시뮬레이션에 앞서 측정이 선행되었다. 2X-Thru de-embedding 기법을 적용하여 fixture의 영향을 제거하고 소켓만의 측정 데이터를 확보하였다^[16]. De-embedding 소프트웨어는 AtaiTec의 ISD(in-situ de-embedding)를 이용하였으며, 측정은 Keysight의 E5080B VNA(vector network analyzer)를 사용하여 그림 7에서 보이는 측정 구성을 바탕으로 10 MHz부터 44 GHz까지 4-port에 대하여 수행하였다.

정확한 비교를 위하여 시뮬레이션 또한 측정과 동일한 de-embedding 과정을 적용하였다. 즉, 소켓을 포함한 전체 fixture 구조와 2X-Thru 구조를 각각 시뮬레이션한 후, ISD를 이용하여 소켓만의 4-port 손실 데이터를 확보하였다. 이는 fixture에 의한 기생 성분과 de-embedding 알고리즘에

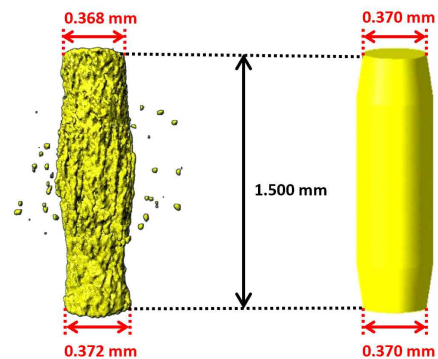
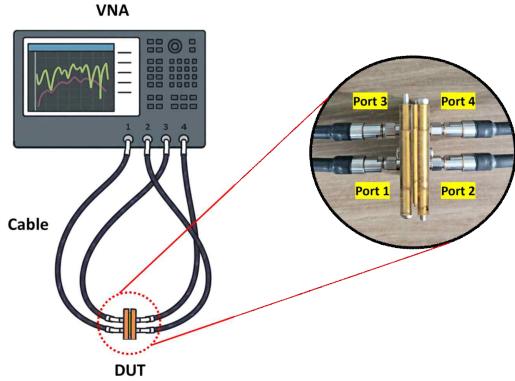
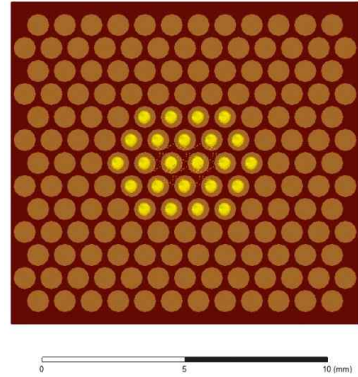


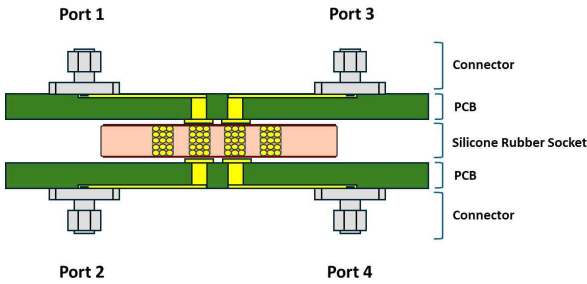
그림 6. CT 기반 모델(좌)과 단순화 모델(우)의 핀 형상
 Fig. 6. Pin geometry of the CT-based model (left) and the simplified model (right).



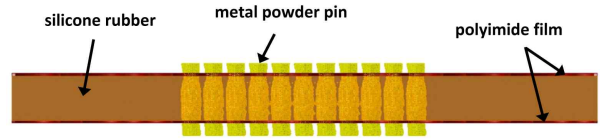
(a) 실리콘 고무 소켓의 측정 구성도
(a) Measurement setup of the silicone rubber socket



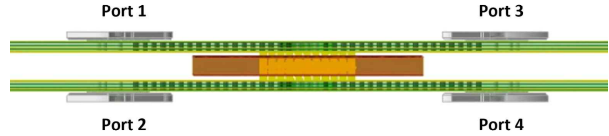
(a) 실리콘 고무 소켓 모델 및 핀 배열
(a) Silicone rubber socket model and pin array



(b) 전체 fixture 구성 및 연결 구조
(b) Overall fixture configuration and connection structure



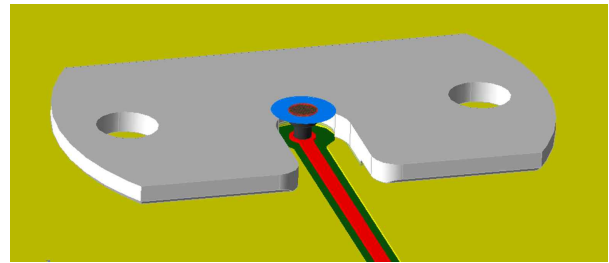
(b) 실리콘 고무 소켓 모델의 단면 구조
(b) Cross-sectional structure of the silicone rubber socket model



(c) 전체 fixture 구조 모델
(c) Overall fixture structure model

그림 7. 실리콘 고무 소켓의 4-port 측정 구성
Fig. 7. 4-port measurement configuration of the silicone rubber socket.

서 발생할 수 있는 오차까지 반영된 결과를 비교하기 위함이다. 해석 주파수 대역과 port 및 핀 배열 또한 측정과 동일하게 설정하여 진행하였다. 그림 8은 전자기 시뮬레이션에서 사용한 각 모델 및 핀 배열, 포트 설정 방식을 보여주고 있다. 그림 8(a)에서 실리콘 고무 소켓 모델 중앙의 노란색 영역은 금속 분말로 구성된 핀을 나타낸 것이며, 접지 핀과 fixture에 의한 차폐 효과를 고려하여 그림 4에서 보이는 핀 구조에서 외곽 영역의 핀을 제외하여 해석 시간을 단축하였다. 핀 배열에서 S는 신호 핀을 G는 접지 핀을 의미한다. 실리콘 고무 소켓에서 핀 영역을 제외한 나머지 구조는 그림 8(b)에 나타난 바와 같이 중앙의 실리콘 고무와 상·하단에 배치된 폴리이미드 필름으로 구성되어 있다. 실리콘 고무 소켓 모델에 적용된 각 재료의



(d) 시뮬레이션 모델의 포트 구성
(d) Port configuration of the simulation model

그림 8. 실리콘 고무 소켓의 시뮬레이션 모델 구성
Fig. 8. Configuration of the simulation model for the silicone rubber socket.

물성은 다음과 같다. 금속 분말의 전기 전도도는 4.1×10^7 S/m로 설정하였고, 실리콘 고무와 폴리이미드 필름은 주파수 의존적인 유전체 특성을 가지므로, HFSS에서 제공

하는 Djordjevic-Sarkar 모델을 적용하였다. 해당 모델은 특정 주파수에서 정의된 유전 상수 및 손실 탄젠트 값을 초기 조건으로 활용하여 주파수 전 대역에서 물리적 인과율 (causality)을 만족하는 유전체 특성을 수학적으로 생성하도록 구성되어 있다^{[7],[18]}. 본 연구에서는 실리콘 고무와 폴리이미드 필름의 데이터시트에 제시된 1 MHz 기준값을 초기 입력값으로 사용하였으며, 유전 상수는 각각 2.7과 3.3, 손실 탄젠트는 0.04와 0.008의 값을 적용하였다.

한편, 그림 7에 나타난 커넥터는 3차원 모델이 공개되어 있으나 제조사로부터 내부 구조에 대한 세부 정보가 제공되지 않았기 때문에, 그림 8(c) 및 그림 8(d)에 보인 것처럼 PCB의 접지면과 신호 선로에 접촉되는 하단부까지만 모델링하였다. 이러한 모델링 범위는 PCB와의 전자기적 결합 효과와 커넥터 하단부 중심 도체의 노출 구간에서 발생하는 손실을 시뮬레이션에 반영하기 위한 것이다. 이후 그림 8(d)에 나타난 것처럼, 파란색으로 표시된 원형 면포트를 설정하여 신호가 커넥터를 기준으로 중심 도체를 통해 PCB 선로 방향으로 전달되도록 구성하였다.

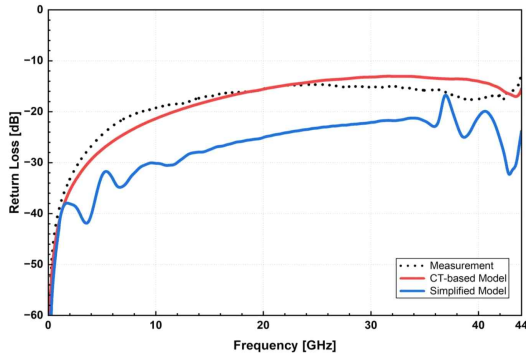
정확한 해석을 위하여 HFSS 시뮬레이션에서 초기 mesh(유한요소) 크기는 최대 해석 주파수인 44 GHz의 $\lambda/3$ 를 기준으로 설정하였다. 이후 adaptive mesh refinement 기능을 적용하여 mesh를 단계적으로 세분화하였다. 이 과정을 통해 전자기 해석을 위한 최종 mesh를 구성하였으며, 평균 직경이 약 30 μm 인 단일 금속 분말의 영역에서 min mesh edge length는 약 0.5 μm 로 확인되었다. 해당 mesh 해상도는 CT 촬영에서의 공간 샘플링 간격인 3 μm 보다 충분히 세밀하여 정확한 전자기 해석이 가능함을 의미한다.

IV. 결과 및 분석

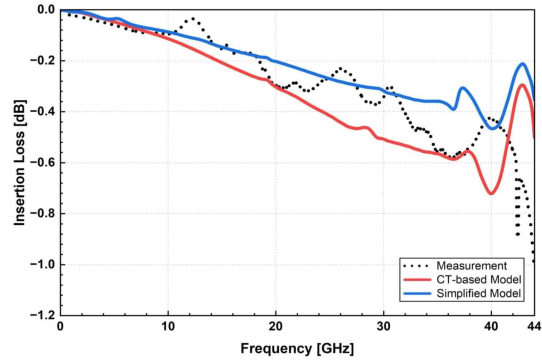
측정 결과와 CT 기반 모델 및 단순화 모델의 시뮬레이션 결과는 그림 9에서 비교한다. 그림 9(a)의 반사 손실 결과에서 CT 기반 모델은 전체 주파수 대역에서 측정과 높은 상관성을 보인다. 이는 그림 6에서 확인할 수 있듯이 신호 전달 경로를 구성하는 금속 분말 핀의 불규칙한 형상이 임피던스 불연속을 유발하여 반사 신호가 증가한 결과로 해석된다. 반면, 단순화 모델은 비교적 균일한 단면 구조를 가지므로 임피던스 부정합이 거의 발생하지

않아 반사 손실이 상대적으로 적게 나타난다. 두 모델 간 차이는 그림 9(b) 및 그림 9(c)에 제시된 삽입 손실 및 원단 누화 결과에서도 확인되며, CT 기반 모델은 전체 주파수 대역에서 단순화 모델에 비해 높은 손실을 보이고 있다. 삽입 손실에서의 차이는 금속 분말의 불규칙한 표면 형상과 표피 효과로 인하여 신호의 유효 경로가 증가하고, 그에 따른 도체 손실이 커졌기 때문으로 분석된다. 원단 누화의 경우, 두 모델의 핀 간격과 높이는 동일하지만 CT 기반 모델의 핀 표면은 곡률이 크기 때문에 전하 밀도가 상대적으로 높게 형성된다. 이로 인해 그림 10에 나타난 포트 1 인근 신호 핀 단면의 전기장 분포에서 확인할 수 있듯이 전기장의 세기가 강화되고 인접 핀과의 결합이 증가하여 신호가 이동하며 누적된 결합 효과가 원단에 나타난 것으로 해석된다. 그림 9(d)에 나타난 근단 누화 결과에서는 두 모델뿐 아니라 측정 결과까지 모두 유사한 경향을 보인다. 근단 누화는 핀의 전체적인 형상보다 주로 포트 인근에서 발생하는 전자기 결합에 의해 결정되며, 그림 6에서 확인된 바와 같이 결합이 시작되는 영역에서 두 모델의 핀 직경이 거의 동일할 경우 결합 특성에 유의미한 차이는 나타나지 않는다. 그림 10에 나타난 핀 상단부의 전기장 분포를 비교하면 CT 기반 모델의 전기장의 분포 형태는 단순화 모델과 유사하다. 이러한 결과는 CT 기반 모델뿐만 아니라 단순화 모델의 기반이 된 설계 도면이 실제 구조의 포트 인근 핀의 단면 특성을 적절히 반영하고 있음을 시사한다. 한편, 그림 6(a)에 나타난 핀 주변에 인접한 금속 분말은 신호 특성에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 확인되었다. 이는 금속 분말의 크기가 최대 해석 주파수의 $\lambda/10$ ($\approx 415 \mu\text{m}$)에 비해 충분히 작으므로 금속 분말이 핀 주변에 존재하더라도 전송 경로 내에서의 손실에 기여하지 않는 것으로 해석된다.

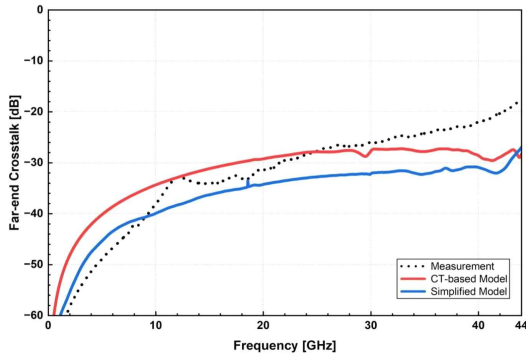
핀 형상의 영향으로 그림 9(a)의 반사 손실에서는 두 모델과 측정 결과 간의 유의미한 차이가 나타났으나, 그림 9(b) 및 그림 9(c)의 삽입 손실 및 원단 누화 결과에서는 CT 기반 역기하 모델링의 유효성을 입증할 수준의 명확한 차이가 확인되지 않았다. 이러한 결과는 두 모델 모두 전체 핀 길이가 1.5 mm로 짧고 동일한 핀 간격을 가지므로, 금속 분말의 불규칙한 표면 형상으로 인한 신호 경로 증가 및 핀 간 결합 효과가 누적되기 어려운 구조적



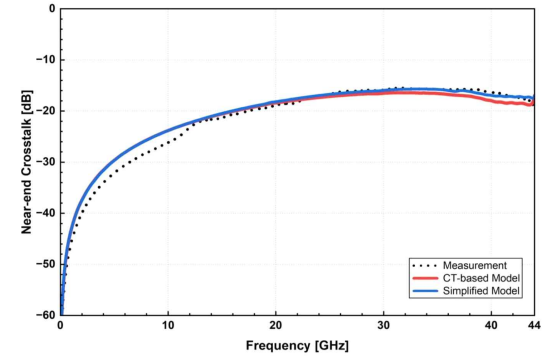
(a) 시뮬레이션과 측정의 반사 손실
(a) Return loss of simulation and measurement



(b) 시뮬레이션과 측정의 삽입 손실
(b) Insertion loss of simulation and measurement



(c) 시뮬레이션과 측정의 원단 누화
(c) Far-end crosstalk of simulation and measurement



(d) 시뮬레이션과 측정의 근단 누화
(d) Near-end crosstalk of simulation and measurement

그림 9. 실리콘 고무 소켓의 S-파라미터 시뮬레이션 결과와 측정 결과 비교
Fig. 9. Comparison of S-parameter simulation and measurement results for a silicone rubber socket.

특성에 의한 것으로 해석된다. 또한, CT 기반 모델과 측정 결과의 차이는 CT 장비의 공간 해상도 한계에 기인한 것으로 분석하였다. CT 영상의 공간 해상도는 표면 모델 및 솔리드 모델 형상의 정밀도와 직접적으로 연관되며, 해상도가 높을수록 금속 분말의 미세 표면 형상이 보다 정확하게 재현된다. 본 연구에서는 CT 장비의 사양과 금속 분말의 평균 직경을 고려하여 공간 샘플링 간격을 $3 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 이 조건은 개별 금속 분말의 형상 복원에는 적합하지만, 그림 5(a)에 나타난 단층 영상에서 볼 수 있듯이 분말 간 접촉 경계의 미세 형상을 반영하기에는 한계가 있다. 이로 인해 그림 5(c)의 표면 모델 생성 단계에서는 일부 실리콘 영역이 금속 분말 영역으로 인식되는 현상이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는

더 높은 해상도의 CT 촬영이 요구되며, 이에 따른 해석 시간 및 메모리 사용량 증가는 본 연구에서 제한한 CT 기반 역기하 모델링 기법의 현실적인 한계로 판단된다.

V. 결 론

본 논문은 CT 기반의 역기하 모델링 기법을 적용하여 실리콘 고무 소켓 내부 금속 분말의 불규칙한 형상을 3차원 전자기 시뮬레이션에 반영하고, 해당 모델링 기법의 유효성을 검증하였다. CT 단층 촬영 영상의 명암 대비를 이용하여 금속 분말과 유전체 영역을 분리하였고, 이를 활용하여 실제 구조를 반영한 솔리드 모델을 구현하였다. 이후 CT 기반 모델과 단순화 모델을 측정과 비교한 결과,

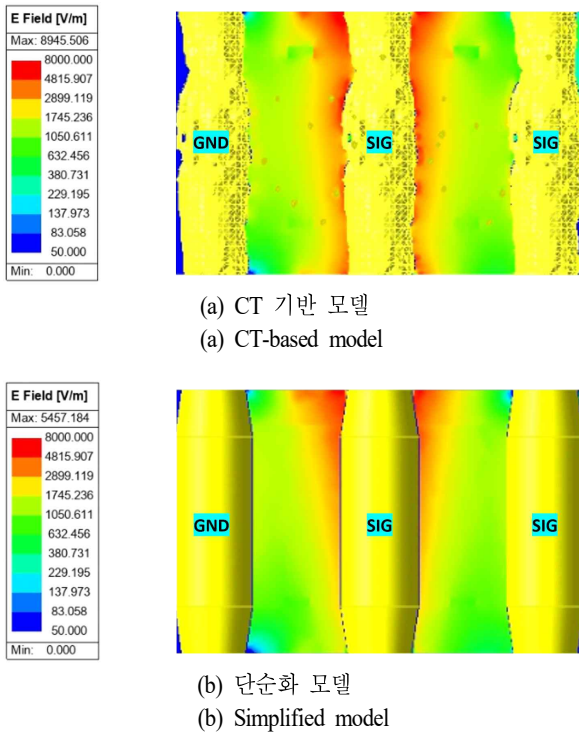


그림 10. 20 GHz에서의 실리콘 고무 소켓 전기장 분포 비교

Fig. 10. Comparison of electric field distribution of the silicone rubber socket at 20 GHz.

반사 손실에서 CT 기반 모델이 측정값과 높은 상관성을 보여 실제 형상 반영의 유효성을 확인하였다. 근단 누화에서는 두 모델의 포트 인접 영역의 편 형상이 유사하여 측정 결과와의 차이가 크지 않았다. 반면, 삽입 손실 및 원단 누화에서는 CT 기반 모델이 측정 결과와 다소 차이를 보였으며, 금속 분말 형상을 반영하지 못한 단순화 모델과의 차이는 제한적으로 나타났다. 이러한 결과는 실리콘 고무 소켓의 구조적 특성과 CT 장비의 해상도 한계에 의한 영향으로 판단하였다. 향후 더 높은 해상도의 CT 장비를 적용할 경우 세밀한 형상 재현으로 인하여 계산 자원 증가는 불가피하나, 실리콘 고무 소켓의 손실 특성을 고주파 대역까지 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] N. Basak, O. Akinwale, and M. E. Ryan, "Signal integrity comparison of commercially available sockets for the 50Gbps Ethernet channel," in *Proceedings of the 2024 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity(EMC+SIPI)*, Phoenix, AZ, Aug. 2024, pp. 570-575.
- [2] T. K. Kim, J. G. Yook, J. Y. Kim, Y. H. Cho, and U. H. Lee, "Fabrication and characterization of three-dimensional microelectromechanical system coaxial socket device for semiconductor package testing," *Sensors*, vol. 23, no. 14, p. 6350, Jul. 2023.
- [3] J. Park, H. Kim, J. J. Kim, B. Bae, D. Ha, and M. Bae, "Measurement of high-bandwidth and high-density silicone rubber socket up to 110 GHz," in *Proceedings of the 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference(ECTC)*, Las Vegas, NV, Jun. 2016, pp. 2481-2486.
- [4] 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 *Proceedings of the 2015 IEEE 24th Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems(EPEPS)*, San Jose, CA, Oct. 2015, pp. 1235-1240.
- [5] H. Kim, B. Bae, J. J. Kim, J. Park, D. Ha, and M. Bae, et al., "Modeling and analysis of a conductive rubber contactor for package test," in *Proceedings of the 2015 IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference (EPTC)*, Singapore, Dec. 2015, p. 7412426.
- [6] J. Park, H. Kim, Y. Kim, J. J. Kim, B. Bae, and J. Kim, "Analysis of external force dependent lumped RLGC model of high-bandwidth and high-density silicone rubber socket," in *Proceedings of the 2015 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium(EDAPS)*, Seoul, Dec. 2015, pp. 55-58.
- [7] H. Kim, J. Park, S. Park, J. J. Kim, J. Kim, and D. Ha, "High-frequency modeling and signal integrity analysis of high-density silicone rubber socket," in *2016 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems*

- (EDAPS), Honolulu, HI, Dec. 2016, pp. 35-38.
- [8] H. Kim, J. J. Kim, J. Park, S. Park, S. Choi, and B. Bae, "High-frequency modeling and signal integrity analysis of a silicone rubber socket for high-performance package," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 7, no. 8, pp. 1356-1368, Aug. 2017.
- [9] J. Park, H. Kim, J. J. Kim, D. H. Kim, K. Son, and S. Kim, "High-frequency electrical characterization of a new coaxial silicone rubber socket for high-bandwidth and high-density package test," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no. 12, pp. 2152-2162, Dec. 2018.
- [10] J. Favata, S. Shahbazmohamadi, "Realistic non-destructive testing of integrated circuit bond wiring using 3-D X-ray tomography, reverse engineering, and finite element analysis," *Microelectronics Reliability*, vol. 83, pp. 91-100, Apr. 2018.
- [11] A. Devaraj, "Accuracy assessment of a computed tomography based reverse engineering," M. S. thesis, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, 2020.
- [12] M. C. Miron, Z. Major, and B. Plank, "Structural FE simulations of CT scanned microstructures: A comparison between idealized and real microstructures," in *10th Conference on Industrial Computed Tomography(iCT)*, Wels, Apr. 2020.
- [13] R. Hauko, J. P. Gomilšek, I. Arčon, and A. Kodre, "Absolute determination of the X-ray absorption coefficient of strontium in the K edge region," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 103, pp. 203-208, Oct. 2014.
- [14] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, Jan. 1979.
- [15] Y. Lee, J. H. Kim, "A computational improvement of Otsu's algorithm by estimating approximate threshold," *Journal of Korea Multimedia Society*, vol. 20, no. 2, pp. 163-169, Feb. 2017.
- [16] T. Eom, M. Kim, "S-parameter measurement of silicone rubber socket using connector-based vertical interconnection method," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 12, pp. 978-984, Dec. 2024.
- [17] A. R. Djordjević, R. M. Biljic, V. D. Likar-Smiljanic, and T. K. Sarkar, "Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 4, pp. 662-667, Nov. 2001.
- [18] M. H. Mubarak, S. Hara, S. Tanoi, T. Hagino, I. Watanabe, and A. Kasamatsu, "Brief on PCB modeling for sub-THz transceiver module design," in *Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology(RFIT)*, Cairns, Aug. 2023.

진근우 [국립공주대학교/학석사연계과정]

<https://orcid.org/0009-0000-1014-2748>



2025년 2월: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 반도체정보공학전공 (공학사)
 2024년 9월~현재: 국립공주대학교 전기전자제어공학과 학석사연계과정
 [주 관심분야] 신호무결성, 전원무결성

김문정 [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: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 교수

[주 관심분야] 신호무결성, 전원무결성