

전도성 노이즈 예측을 위한 차량용 수동 EMI 필터 모델링 방법에 관한 연구

A Study on Automotive Passive EMI Filter Modeling Method for Conducted Emission Prediction

이재원 · 이상욱 · 안장용* · 김홍석 · 김지성 · 안승영

Jaewon Rhee · Sanguk Lee · Jangyong Ahn* · Hongseok Kim · Jiseong Kim · Seungyoung Ahn

요 약

현재 전기자동차의 상용화 및 기술 발달로 다양한 전장 부품의 개발이 가속화되고 있으며, 전기자동차 부품 증가에 따라 제품 간의 전자파 간섭 문제를 해결하여 제품 품질을 높이기 위한 노력이 지속되고 있다. 이러한 이유로 전장 부품에서 EMC(electromagnetic compatibility) 신뢰성 평가는 필수 인증 규격이며, 품질 문제 발생 시 개발 지연, 비용 증가 등의 치명적인 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 필터 전달특성을 통한 전도성 노이즈(conducted emission) 예측을 위해, 전자파 노이즈 저감을 위해 전원회로에 주로 사용되는 수동 EMI(electromagnetic interference) 필터의 해석 기반 모델링 방법을 적용하였다. EMI 필터를 구성하는 MLCC(multilayer ceramic chip capacitors), 인덕터와 같은 수동소자의 3차원 EM 해석모델과 측정기반 등가회로 모델링을 진행하였으며, 필터 PCB(printed circuit board) 구조 3차원 모델링 후 EM 시뮬레이션을 통해 해석하였다. 필터 모델링 결과를 전달특성 측정 결과와 비교하였으며, FSV(feature selective validation) 방법을 이용하여 모델링 결과의 적합성 평가를 진행하였다. 필터의 전달특성 비교 결과, 10 kHz~108 MHz까지 Fair 이상으로 모델링 결과와 측정 결과가 우수한 적합성을 보인다.

Abstract

Currently, with the accelerated development of various electrical components owing to commercialization and technological development of electric vehicles (EVs), efforts are being made to improve product quality by solving electromagnetic interference (EMI) problems between components, thus making electromagnetic compatibility (EMC) tests essential. When quality problems occur, critical issues, such as development delays and increased costs, can occur. Therefore, in this study, we applied a simulation-based modeling method for passive EMI filters (primarily used in power circuits) to reduce EMI and predict conducted emissions (CE). We created 3D EM analysis models and equivalent circuit modeling of passive elements, such as multilayer ceramic chip capacitors (MLCC) and inductors that make up the EMI filter, and analyzed them through EM simulation after 3D modeling the printed circuit board (PCB) of the filter. The filter modeling results were compared with the measured transfer characteristics, with the accuracy of the modeling results evaluated using a feature-selective validation (FSV) method. The results showed excellent consistency (better than fair) from 10 kHz to 108 MHz, i.e., the automotive CE test frequency.

Key words: EMC (Electromagnetic Compatibility), EMI (Electromagnetic Interference), CE (Conductive Emission), EMI Filter

「이 연구는 2023년도 LG 이노텍 산학과제 연구비의 지원으로 연구되었음.」

한국과학기술원 조천식모빌리티대학원(CCS Graduate School of Mobility, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

*한국전자통신연구원 RF기술연구실(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· Manuscript received January 15, 2024 ; Revised February 3, 2024 ; Accepted March 11, 2024. (ID No. 20240115-007)

· Corresponding Author: Seungyoung Ahn (e-mail: sanh@kaist.ac.kr)

I. 서 론

최근 전기자동차의 상용화 및 전장 기술 발달로 여러 전장품이 개발되었으며, 다양한 전장품 간의 전자파 간섭 문제를 해결하기 위한 노력이 지속되고 있다. 구체적으로 전기자동차 모터 시스템은 배터리, EMI 필터, 인버터, 모터 등 다양한 구성품으로 이루어져 있으며, 노이즈 저감과 관련하여 EMI 필터의 역할은 매우 중요하다^{[1][2]}.

이러한 EMI 필터의 성능을 사전에 예측하고 노이즈 저감을 위한 설계를 위해 필터의 적절한 모델링이 필요하다. EMI 필터 모델링은 제품 컨셉 또는 설계 단계에서 필터의 성능을 보다 정확히 예측하고 나아가 활용 가능성을 높여줄 수 있다. 모델링을 통해 제품 설계 선행 단계에서 충분한 전도성 노이즈 규제 마진을 확보할 수 있으며, 이는 궁극적으로 EMC 시험 횟수와 비용을 줄여 제품 원가 절감과 개발 기간 단축 효과를 초래할 수 있다^[3].

우선 모델링 정확도 및 자유도를 높이기 위해서는 필터를 구성하고 있는 각 소자의 특성 모델링이 매우 중요하다. EMC 분야에서 수동소자의 모델링은 전통적으로 30 MHz 이하 대역에 중점을 두었으나, 현재의 복잡하고 고도화된 시스템에서는 고주파 대역 EMI 문제가 더욱 중요해지고 있다. 따라서 최근에는 고주파 대역 EMI 특성을 정확하게 모델링하기 위한 여러 기술들이 연구 및 개발되었다.

EMI 필터에 주로 사용되는 MLCC와 필름 커패시터는 다층으로 전극과 유전체가 겹쳐진 구조로 물리적 특성을 정확하게 모델링하기에 어려움이 있다. 필름 커패시터의 모델링 복잡성을 간소화하여 계산시간을 줄이고자 커패시터를 손실 유전체, 무손실 유전체, 손실 도체, 완전 도체(perfect electric conductor)로 단순화하여 해석한 연구가 진행되었다^[4]. 이 외에도 필터를 구성하는 차동 모드 초크코일 역할을 하는 인덕터 모델링 관련 연구도 진행되었다. 페라이트 코어에 솔레노이드 타입으로 감긴 파워 인덕터를 3차원 EM 시뮬레이션을 이용하여 해석하였으며, 약 10 MHz까지 모델링 정확도가 보장됨을 확인하였다^[5]. 개별 소자 모델링 뿐만 아니라, 소자 간 커플링을 고려하여 EMI 필터 전체의 3차원 EM 해석을 진행한 연구도 수행되었다^[6]. 이 연구에서는 최대 1 GHz까지 EMI 필

터 성능 예측을 위한 모델링 방법론을 제안하였으며, 기본적인 구성요소인 공통모드 초크 코일, X-커패시터, Y-커패시터가 포함된 Full 3차원 모델링을 진행하였다. 참고문헌 [6]은 2층 기판 PCB(printed circuit board)로 구성된 기본적인 EMI 필터만을 모델링하였으며, 결과를 정량적으로 비교하지 않았다. 그러므로 PCB 레이아웃과 비아(via) 등 다양한 구조에 대한 적용 가능성 분석이 추가로 필요하다.

본 논문에서는 기존 연구들을 바탕으로 차량용 모터 시스템에 포함되는 EMI 필터의 3차원 모델링과 측정 기반 등가회로 모델링을 함께 수행하여 활용성 높은 모델링 방법에 관한 연구를 진행하였다. 기존 연구와 유사하게 전체를 Full 3차원 EM 시뮬레이션을 통한 모델링을 진행하였으며, 모델링 자유도 확보를 위해 개별 소자의 측정 기반 등가회로 모델을 추가로 진행하였다. 필터 전체를 3차원 모델링하여 해석한 결과와 PCB 성분만을 3차원 모델링하여 등가회로 모델을 연결한 결과를 비교하였으며, 두 결과가 일치하는 것을 확인하였다.

모델링 결과는 자동차 CE 시험 주파수 대역을 고려하여 10 kHz~108 MHz까지 검증되었으며, 모델링 결과는 현재 IEEE Standard 1597.1 표준에 채택된 FSV(feature selective validation) 방법을 이용하여 평가되었다^{[7][8]}.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I 장에서 본 연구의 배경을 소개하며, II 장에서는 EMI 필터를 구성하는 각 수동소자의 측정 기반 등가회로 모델링 결과를 보여준다. III 장에서는 EMI 필터 수동소자의 3차원 모델링 결과와 PCB 해석 결과를 보여주며, IV 장에서는 측정과 모델링 결과 간의 정합성 비교를 보여준다. 마지막으로 V 장에서는 본 연구의 결론을 요약한다.

II. 필터 수동소자 측정 및 등가회로 모델링

EMI 필터에 들어가는 소자는 대표적으로 X-커패시터, Y-커패시터, 초크 코일(인덕터)이 있다. 본 장에서는 위 소자가 사용되는 차량용 모터 시스템 내 EMI 필터의 수동소자 측정기반 등가회로 모델링을 진행하였으며, 측정 데이터를 높은 정확도로 모델링할 수 있는 ANSYS Circuit designer 내 vector-fitting 기능을 사용하였다^[9].

2.1 인덕터 임피던스 측정 및 모델링

본 절에서 모델링에 사용된 필터 회로도와 소자 정보는 각각 그림 1 및 표 1과 같다. MLCC의 경우, 제조사 SPICE 모델이 제공되나, 인덕터는 제공되지 않는다. 따라서 선정된 필터 소자의 S -parameter를 모두 VNA(vector network analyzer)를 사용하여 측정하였으며, 측정 결과를 바탕으로 등가회로 모델링을 진행하였다.

인덕터는 측정 시 추가 리드선의 영향을 최소화하기 위해 1-port 측정을 진행하였다. 커넥터의 신호 핀과 접지 핀에 각각 인덕터 양단을 연결하여 S -parameter를 측정하였으며, 측정한 결과를 임피던스로 변환하였다. 측정한 S -parameter는 식 (1)을 이용하여 임피던스로 변환할 수 있다^[10].

$$Z = 50 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (1)$$

임피던스 측정 결과를 이용하여 Ansys Circuit Designer의

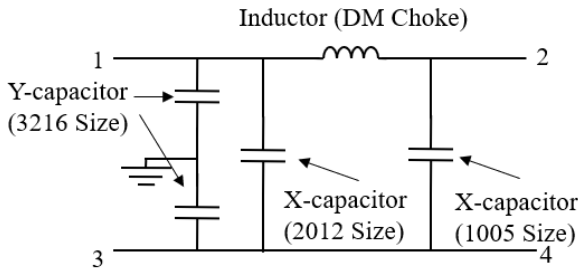


그림 1. 선정된 차량용 모터 시스템 EMI 필터 회로도
Fig. 1. Automotive motor system EMI filter circuit diagram.

표 1. EMI 필터 소자 정보

Table 1. EMI filter components list.

| | Model | Vendor |
|-------------------------------|----------------------|---------|
| DM Choke (Inductor) | SPI-130-65-3R3 | Todaisu |
| X-capacitor 1 (MLCC, 2012) | C2012X7R1E475K | TDK |
| X-capacitor 2 (MLCC, 1005) | GCM155R71H153JA55D | Murata |
| Y-capacitor (MLCC, 3216) | CGA5L1X7R1E106K160AC | TDK |

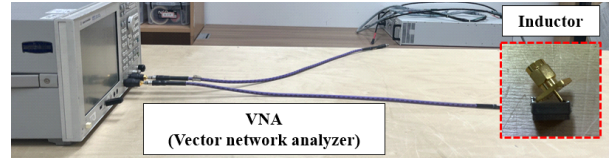


그림 2. 인덕터 S -parameter 측정 셋업
Fig. 2. Inductor S -parameter measurement setup.

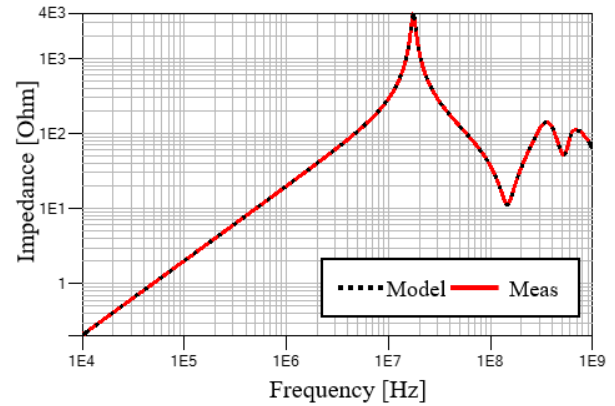


그림 3. 인덕터 측정 기반 등가회로 모델링 결과
Fig. 3. Equivalent circuit modeling results based on inductor measurement.

vector-fitting 기능으로 등가회로 모델링을 진행하였다^[9]. 측정 셋업 및 모델링 결과는 각각 그림 2 및 그림 3과 같으며, 검증된 귀납적 피팅 방식을 사용하였으므로 모델링 정확도는 매우 높음을 알 수 있다.

2.2 MLCC 임피던스 측정 및 모델링

MLCC는 일반적으로 사이즈가 매우 작아 인덕터와 달리 커넥터, 리드 등을 사용하여 측정이 불가하다. 또한 측정 시 발생하는 기생성분이 MLCC의 측정 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 적절한 test fixture를 설계하여 측정 후 디임베딩 과정이 별도로 필요하다. 본 논문에서는 EIA-970 표준에 명시된 방법을 적용하여 test fixture 설계 후 MLCC의 임피던스 측정을 진행하였다^[11].

Test fixture는 임피던스 변화에 따른 S -parameter의 변화가 비교적 큰 2-port shunt through 방법으로 설계되었다. 측정한 S -parameter는 식 (2)를 통해 임피던스로 변환 가능하다^[10].

$$Z = 25 \frac{S_{21}}{1 - S_{21}} \quad (2)$$

측정한 임피던스는 Fixture 성분을 포함하고 있으므로, 이를 제거하기 위해 short fixture의 임피던스를 측정 후 식 (3)과 같이 빼주어야 한다^[12].

$$Z_{MLCC} = Z_{fix + DUT} - Z_{short} \quad (3)$$

셋업 및 측정순서는 각각 그림 4 및 그림 5와 같으며, 측정은 VNA와 Probe station을 사용하여 진행되었다. 각

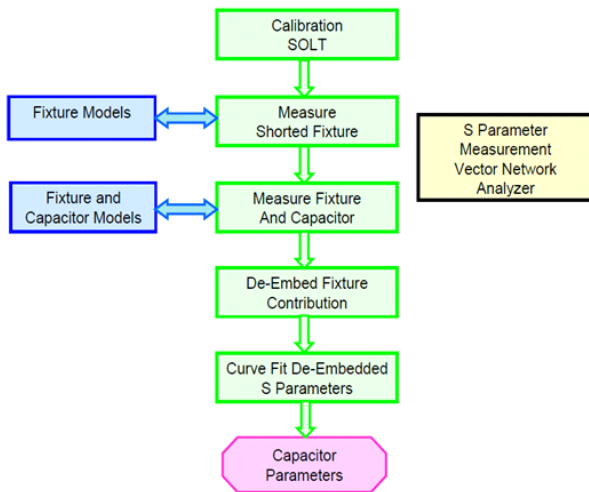


그림 4. EIA-970 표준에 제시된 측정 순서도^[11]

Fig. 4. Measurement flow chart presented in EIA-970 standard^[11].

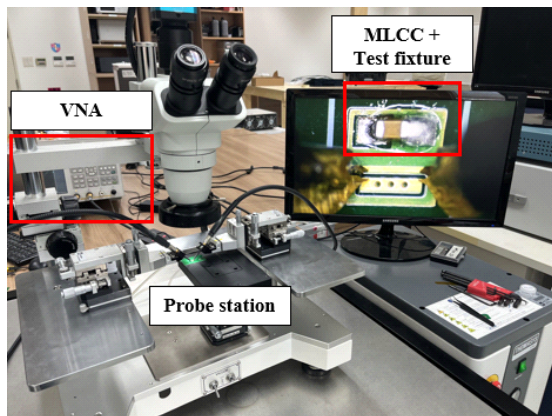


그림 5. MLCC의 S-parameter 측정 셋업

Fig. 5. MLCC S-parameter measurement setup.

MLCC의 디임베딩 결과와 모델링 결과, 제조사 제공 측정 S-parameter를 그림 6~그림 8에 정리하였다. 2012, 3216 사이즈는 TDK 제품으로 Murata 제품보다 제조사 측

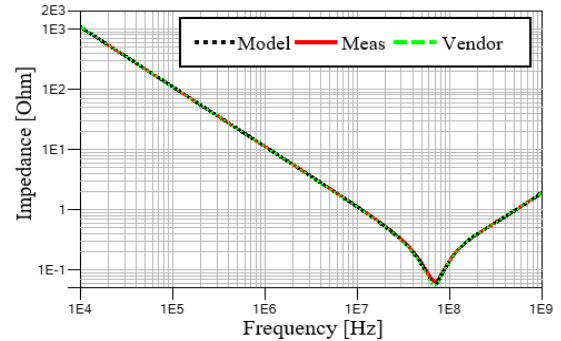


그림 6. MLCC(1005) 측정 기반 등가회로 모델링 결과

Fig. 6. MLCC(1005) measurement-based equivalent circuit modeling results.

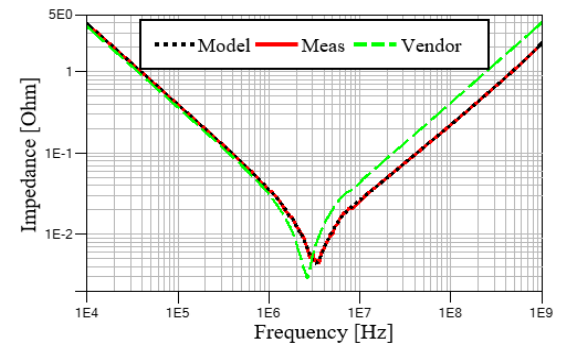


그림 7. MLCC(2012) 측정 기반 등가회로 모델링 결과

Fig. 7. MLCC(2012) measurement-based equivalent circuit modeling results.

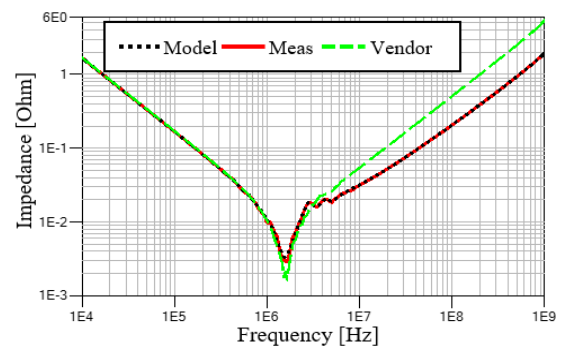


그림 8. MLCC(3216) 측정 기반 등가회로 모델링 결과

Fig. 8. MLCC(3216) measurement-based equivalent circuit modeling results.

정 결과와 실제 측정 결과 간의 차이가 발생한다. 이는 TDK에서 측정한 데이터는 fixture의 pad와 via의 디임베딩이 진행되지 않았기 때문이다^[13].

III. EMI 필터 수동소자 3차원 모델링

본 장에서는 수동소자의 실물 치수 기반 3차원 모델링 및 EM 시뮬레이션을 진행하였다. 인덕터와 MLCC의 구조와 물성을 반영하였으며, 모델링 결과를 측정 결과와 비교하였다. 모델링 및 해석은 ANSYS HFSS를 사용하였다.

3-1 인덕터 3차원 EM 해석 모델링

선정된 인덕터는 metal alloy 인덕터로 일반적인 구조인 코어에 코일이 감긴 형태가 아닌 코어가 코일을 감싸고 있는 구조이다. 이와 같은 인덕터의 코어는 절연된 마그네틱 파우더로 이루어져 있으며, 투자율을 가지며 전기적으로 인덕터 내부 코일과 절연된 구조이다. 따라서 이러한 인덕터 구조는 일반적인 페라이트 코어를 사용한 인덕터와 비교하여 외부로 누설 자기장을 비교적 덜 발생시키며, 주로 소자 간의 간섭을 고려하여 고밀도 패키징 목적으로 사용된다^[14].

인덕터 3차원 모델은 제조사 제공 CAD 파일을 이용하여 모델링하였으며, 내부 코일은 제조사 제공 턴 수를 바탕으로 모델링하였다. 인덕터의 내부 구조 및 치수는 제조사 제공 정보를 바탕으로 모델링 하였으며, 사용된 물성 정보는 표 2와 같다.

코어로 사용된 마그네틱 파우더를 모델링 하기 위해 제조사 제공 투자율 정보를 사용하였으며, 모델링 결과는

표 2. 인덕터 3차원 모델 물성 정보

Table 2. Inductor 3D model properties parameters.

| | Parameter | Value |
|-----------|-----------------------|--|
| Coil | Turns | 4 |
| | Material | Copper |
| Terminals | Material | PEC (Perfect electric conductor) |
| Core | Relative permeability | 18.5 |
| Inductor | Dimensions | 12.7 mm, 13.2 mm, 6.5 mm (horizontal, vertical, height) |

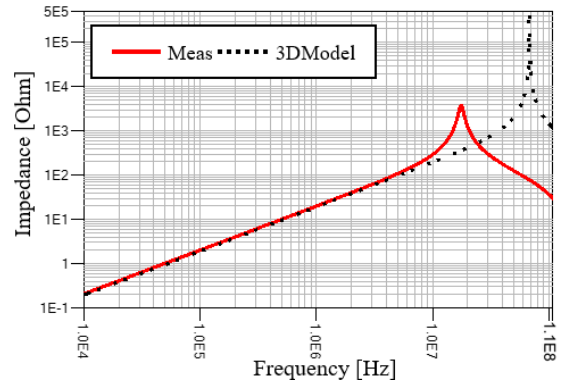


그림 9 인덕터 3차원 모델링 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Inductor 3D modeling simulation results.

표 3. MLCC 3차원 모델 치수 및 물성 정보

Table 3. MLCC 3D model properties parameters.

| | | 10 μF (3216) | 4.7 μF (2012) | 15 μF (1005) |
|-------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Dimension [mm] | W | 1.6 | 1.448 | 0.45 |
| | W_{in} | 1.28 | 1.15 | 0.45 |
| | T | 1.9 | 1.245 | 0.55 |
| | T_{in} | 1.9 | 0.996 | 0.54 |
| | B | 0.2 | 0.203 | 0.25 |
| | G | 2.8 | 1.8 | 0.55 |
| | Gap | 0.028 | 0.018 | 0.0055 |
| Material | σ^* [S/m] | 1,090,000 | 80,990,000 | 1,000,000 |
| | μ_r^* | 7 | 800 | 80 |
| | ϵ_d | 12,300,000 | 7,200,000 | 38,341 |
| | $\tan\delta_d$ | 0.000942 | 0.012 | 0.15 |

그림 9와 같다. 그 결과, 약 10 MHz까지 측정 결과와 모델링 결과가 높은 정합성을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 투자율을 이용한 마그네틱 파우더의 모델링이 최소 10 MHz까지 정확도를 보장함을 알 수 있다. 10 MHz 이후에는 오차가 발생하는데, 이는 인덕터 내부 코일의 권선 사이의 간격, 권선의 형상 등 정확히 알 수 없기 때문이며, 제조 공정 시 발생하는 오차에 따라 고주파 정확도는 감소할 수 있다(표 3)^[5].

3-2 MLCC 3차원 EM 해석 모델링

선정된 3가지 MLCC 모델에 대해 3차원 모델링을 진행

하였으며, 실제 MLCC는 그림 10과 같이 내부에 수많은 유전체와 전극이 layer를 이루고 있으므로 해석 모델이 매우 복잡하다. 이에 따라 해석 시간을 줄이기 위해 block model을 이용하여 모델링을 진행하였다^[4].

Block modeling은 MLCC의 복잡한 내부 전극을 간소화하기 위한 모델링 방법으로, 그림 11과 같이 모델링을 진행한다. 전체 크기와 양쪽 터미널은 실제 제품 치수에 맞추어 모델링하며, 커패시턴스와 유전 특성을 반영하기 위해 MLCC 가운데에 얇은 유전층을 배치한다. MLCC 내부에 겹겹이 배치된 전극을 표현하기 위해 유전체 양쪽은 금속 블록으로 모델링하며, 위 방법을 이용하면 MLCC의 유전특성, 커패시턴스, 전극을 비교적 단순하게 모델링할 수 있다.

전체 사이즈는 데이터 시트 상 치수로 모델링되었으며, 실제 MLCC 내부 전극은 전체 사이즈보다 작게 위치하므로, 금속 블록의 사이즈를 전체 크기 대비 최대 20 % 조절하였다^[6]. 또한 금속 블록은 도전율과 투자율을 가지는 물체이므로, 구리 물성에서 도전율과 투자율을 조절하였다. 각 케이스의 유전율은 식 (4)를 이용하여 구하였으

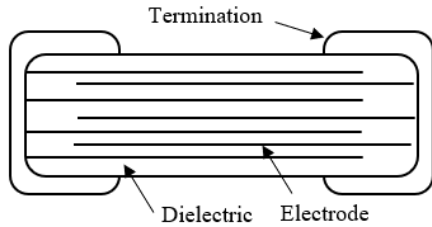


그림 10. 일반적인 MLCC 내부 구조
Fig. 10. Typical MLCC internal structure.

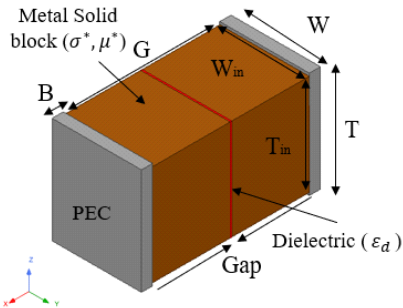


그림 11. MLCC 3차원 EM 해석 모델
Fig. 11. MLCC 3D EM simulation model.

며, 수식에 사용된 C 는 데이터시트의 커패시턴스를 이용하였다. MLCC의 손실 탄젠트와 관련된 ESR(equivalent series resistance)은 식 (5)를 이용하여 구하였다.

$$\epsilon_d = (C \times Gap) / (W_{in} T_{in}) \quad (4)$$

$$ESR \approx \frac{\tan \delta_d}{\omega C} \quad (5)$$

각 MLCC의 모델링 결과는 그림 12~그림 14와 같으며, 측정 결과 대비 자동차 CE 시험 주파수 대역인 108 MHz까지 높은 정합성을 보인다. 따라서 위 결과를 통해 복잡한 구조의 MLCC를 간단히 해석할 수 있다.

다음 장에서는 소자 간의 커플링을 고려하여 III장에서 모델링한 수동소자의 3차원 모델을 PCB 3차원 모델에 적용하여 필터 성능을 측정 결과와 비교하였다.

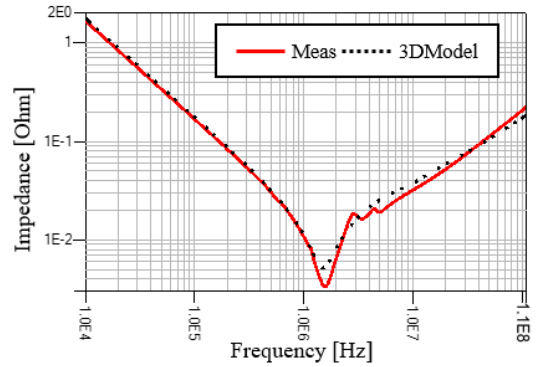


그림 12. MLCC(3216) 3차원 모델링 시뮬레이션 결과
Fig. 12. MLCC (3216) 3D modeling simulation results.

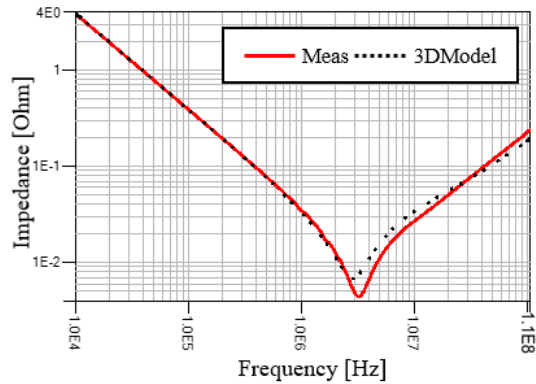


그림 13. MLCC(2012) 3차원 모델링 시뮬레이션 결과
Fig. 13. MLCC (2012) 3D modeling simulation results.

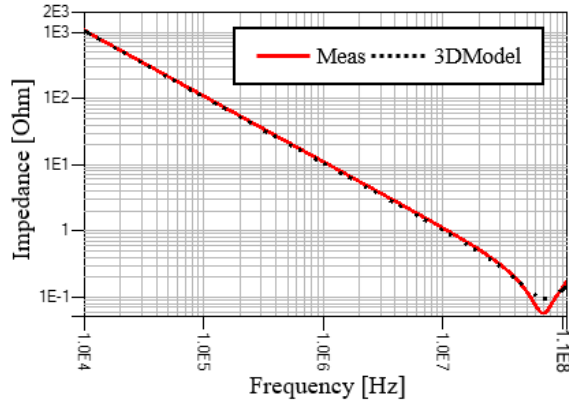


그림 14. MLCC(1005) 3차원 모델링 시뮬레이션 결과
Fig. 14. MLCC (1005) 3D modeling simulation results.

IV. EMI 필터 3차원 EM 시뮬레이션 방법 및 결과

Ⅲ 장에서 소자별 측정 기반 등가회로 모델링과 3차원 모델링을 진행하였으며, 이번 장에서는 PCB를 포함한 보드 레벨에서 3차원 EM 시뮬레이션을 진행하였다. 제작된 보드의 거버 파일을 이용하여 EMI 필터의 전체 3차원 모델링과 등가회로 모델링을 적용한 시뮬레이션을 진행 후, 필터의 전달특성을 측정 결과와 비교하였다.

4-1 EMI 필터 Full 3차원 EM 해석

모델링된 개별 소자를 활용하여 4층 기판의 EMI 필터를 모델링하였다. 소자 간 커플링을 최소화하기 위해 비교적 크기가 큰 인덕터는 필터 보드의 Bottom에 연결하였으며, X-capacitor와 Y-capacitor는 Top에 연결하였다. 측정을 위해 사용된 SMA 커넥터는 RF Korea의 End launch 1.0T 모델이며, 실물 치수를 바탕으로 모델링되었다. 제작 및 모델링된 PCB 물성 정보는 표 4와 같으며, 전체 3차원 모델링된 EMI 필터는 그림 15 및 그림 16에 나타나 있다.

해석 결과를 실제 측정 결과와 비교하기 위해 그림 17에 나타난 것과 같이 실물 EMI 필터에 4개의 SMA 커넥터를 연결하여 4-port S-parameter를 측정하였다. 측정에 사용된 VNA는 Keysight의 E5071C 모델이다. 측정된 S-parameter를 이용하여 필터의 차동모드, 공통모드 전달 특성을 식 (6) 및 식 (7)을 통해 구하였다^[15].

표 4. EMI 필터 보드 레이어 치수 및 물성

Table 4. Dimensions and properties of board layers.

| Subclass | Type | Materials | Thickness [mm] |
|----------|------------|-------------|----------------|
| | Dielectric | Solder mask | 0.012 |
| Top | Conductor | Copper | 0.035 |
| | Dielectric | FR-4 | 0.18 |
| Layer2 | Conductor | Copper | 0.035 |
| | Dielectric | FR-4 | 0.19 |
| Layer3 | Conductor | Copper | 0.035 |
| | Dielectric | FR-4 | 0.18 |
| Bottom | Conductor | Copper | 0.035 |
| | Dielectric | Solder mask | 0.012 |

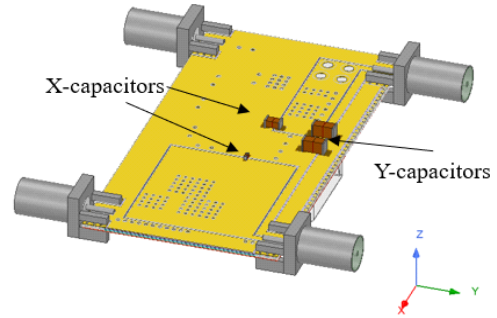


그림 15. EMI 필터 3차원 EM 해석 모델(top)
Fig. 15. EMI filter 3D EM simulation model (top).

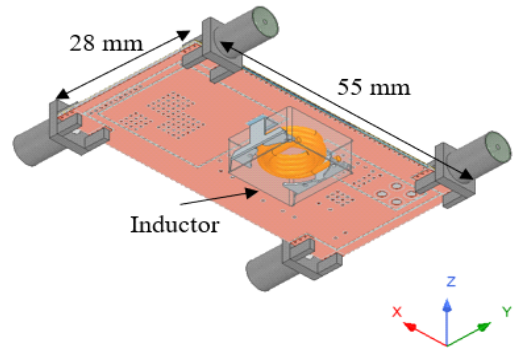


그림 16. EMI 필터 3차원 EM 해석 모델(bottom)
Fig. 16. EMI filter 3D EM simulation model (bottom).

$$S_{dd21} = 0.5(S_{21} - S_{23} - S_{41} + S_{43}) \quad (6)$$

$$S_{cc21} = 0.5(S_{21} + S_{23} + S_{41} + S_{43}) \quad (7)$$

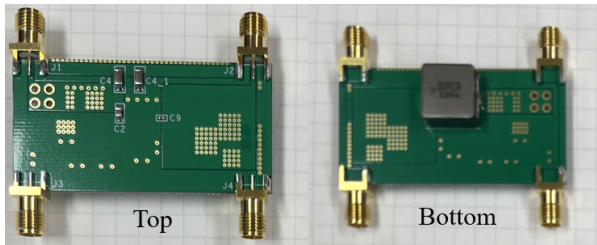


그림 17. 제작된 EMI 필터 보드
Fig. 17. Manufactured EMI filter board.

측정 결과와 모델링 결과 비교는 그림 18 및 그림 19의 Meas, Full 3차원으로 나타나 있으며, CE 시험 대역인 108 MHz까지 우수한 정합성을 보임을 확인하였다. 약 1 MHz ~ 10 MHz 사이의 차동모드 전달특성 측정 결과가 주파수에 따라 변화가 큰 원인은 측정에 사용된 VNA의 dynamic range 한계로 측정이 불가하여 발생하는 현상이다.

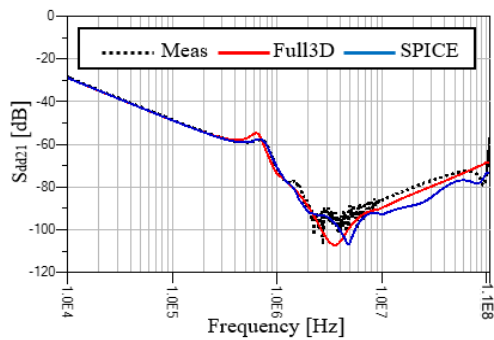


그림 18. EMI 필터 차동모드 전달 특성
Fig. 18. EMI filter differential mode transfer characteristics.

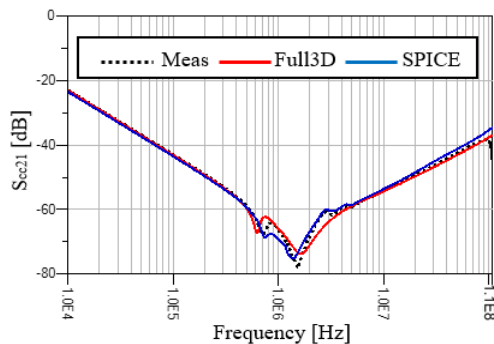


그림 19. EMI 필터 공통모드 전달 특성
Fig. 19. EMI filter common mode transfer characteristics.

4.2 EMI 필터 등가회로 모델 해석

모델링된 EMI 필터에서 3차원으로 모델링된 수동소자들을 lumped port로 대체 후 PCB의 전기적 특성을 S-parameter 형태로 추출하였다. 추출된 SnP 파일에 측정 기반 등가회로 모델을 연결하여 필터의 전달특성을 측정 결과와 비교하였다. 그림 20은 모델링된 PCB에 각 소자의 등가회로 모델을 연결한 회로도이다.

시뮬레이션 결과, 그림 18 및 그림 19에서 측정 결과와 SPICE로 표기한 필터 등가회로 모델 해석 결과가 약 108 MHz까지 높은 정합성을 보임을 확인하였으며, 이를 통해 전체 3차원 모델링뿐만 아니라, 등가회로 모델을 사용하여 시뮬레이션을 통한 필터 성능 검증이 가능함을 확인하였다. 그림 18 및 그림 19에서 필터 전체를 3차원 모델링한 결과와 SPICE 모델을 이용한 결과를 비교하였을 때, 차동모드 전달특성은 3 MHz에서 약 3 dB 차이가 발생함을 확인할 수 있으며, 공통모드 전달특성은 약 11 dB 차이가 발생함을 확인하였다. 이를 통해 소자 간의 커플링을 고려하여 전체를 3차원 모델링하는 것이 정확도에 영향을 미침을 알 수 있다.

4.3 EMI 필터 모델링 결과 평가

두 가지 방법을 이용하여 모델링한 결과를 정량적으로 비교하기 위해, IEEE standard 1597.1 표준에 채택된 FSV 방법으로 모델링 결과를 평가하였다^[8]. FSV 방법은 두 데

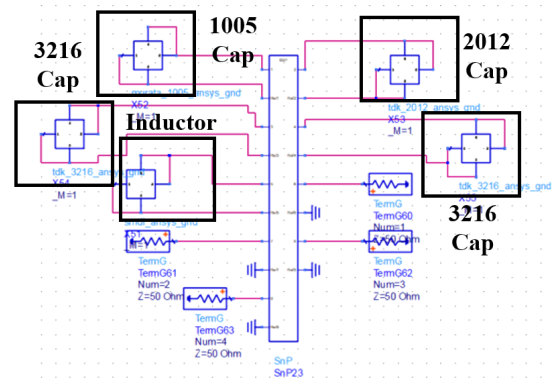


그림 20. 등가회로 모델을 적용한 EMI 필터 회로도
Fig. 20. EMI filter equivalent circuit using equivalent circuit model.

이터 세트 간의 유사도를 정량적으로 평가하는 방법으로, 데이터 세트 간의 경향을 비교하는 ADM(amplitude difference measure)과 데이터 세트 간의 형상이나 패턴의 차이를 비교하는 FDM(feature difference measure)으로 나뉜다. 이 방법은 EMC 분야에서 흔히 정성적으로 평가해 오던 데이터 간의 비교를 정량적으로 할 수 있다는 장점이 있으며, 상대 오차나 평균 제곱 오차와 같은 전통적인 통계적 지표들보다 데이터의 시각적, 구조적 특성을 더 잘 반영하여 더욱 직관적으로 결과를 해석할 수 있게 한다.

평가 결과는 표 5와 같이 6개의 등급으로 나눌 수 있으며, 위 척도는 사용자(전문가)의 판단에 따라 결과의 해석을 달리할 수 있다. 즉, 적용 분야별로 등급의 정도가 나타내는 의미가 다를 수 있음을 의미하며, 본 논문에서는 IEEE P1597.1 2021 Draft를 참고하여 EMI 필터 모델링 결과의 평가 수준을 Fair로 선정하였다^[8].

표 6은 Web-based FSV tool을 사용하여 EMI 필터 모델링 결과를 FSV 방법으로 평가한 결과이며, Fair 이상의 결과를 확보하였음을 확인할 수 있다^[16]. ADM은 Good 이상이나, FDM은 Fair로 나타나는데, 이는 FDM이 변곡점을 비교하는 지표로, 약 100 kHz에서 10 MHz에서 데이터 세트 간의 공진 주파수와 피크(peak) 차이 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 EMC 분야의 전도성 노이즈 예측을 위해 노이즈 저감과 관련된 EMI 필터와 구성 소자 모델링을 진행하였다. 소자 레벨에서 정확한 모델링을 위해 측정 기반 등가회로 모델링을 진행하였으며, 추가로 측정

표 5. FSV 평가 척도
Table 5. FSV interpretation.

| FSV value | FSV interpretation |
|----------------------|--------------------|
| $ADM \leq 0.1$ | Excellent |
| $0.1 \leq ADM < 0.2$ | Very good |
| $0.2 \leq ADM < 0.4$ | Good |
| $0.4 \leq ADM < 0.8$ | Fair |
| $0.8 \leq ADM < 1.6$ | Poor |
| $1.6 \leq ADM$ | Very poor |

표 6. EMI 필터 모델링 결과의 FSV 평가 결과
Table 6. FSV results of EMI filter modeling results.

| @10 kHz~108 MHz | | ADM | FDM |
|-----------------|-------|-------------------|--------------|
| Full 3D | Sdd21 | 0.242 (Good) | 0.513 (Fair) |
| | Scc21 | 0.225 (Good) | 0.725 (Fair) |
| SPICE | Sdd21 | 0.140 (Very good) | 0.616 (Fair) |
| | Scc21 | 0.180 (Very good) | 0.470 (Fair) |

불가한 상황을 고려하여 3차원 모델링 및 해석도 함께 진행하였다. 개별 소자의 모델링 완료 후 필터 보드를 3차원 모델링하여 소자 간 커플링을 고려한 필터의 전달특성을 측정 결과와 비교하였으며, 비교 결과, 차량용 CE 시험 주파수 대역인 108 MHz까지 높은 정합성을 보임을 확인하였다. 소자를 측정 기반 등가회로 모델로 대체하였을 때도 측정 결과 대비 높은 정합성을 보임을 확인하였으며, 이를 통해 필터 설계의 자유도를 확보하였다. 모델링 결과를 정량적으로 평가하기 위해 FSV 방법을 사용하였으며, 평가 결과 모두 Fair 이상의 수준으로 모델링되었음을 확인하였다. 본 연구를 통해 추후 시뮬레이션을 통한 CE 예측 및 EMI 필터 모델링이 가능할 것으로 예상되며, 표 7에서 본 논문에서 시도한 접근 방법을 기존 방법과 비교하였다. 이를 통해 본 논문에서 적용한 방법으로 디버깅 시간과 비용을 줄임과 동시에 노이즈 저감 성능

표 7. 제안하는 방법과 기존 방법과의 비교 및 요약
Table 7. Comparison and summary of the 3D modeling method and conventional measurement methods.

| | Proposed method (3D modeling) | Conventional method (Measurement) |
|----------|---|---|
| Time | < | |
| Cost | > | |
| Accuracy | < | |
| Summary | <ul style="list-style-type: none"> - No need to purchase components - No production cost required - Reduced production time - Reduced high frequency accuracy | <ul style="list-style-type: none"> - Component purchase required - Production cost required - Increased production time - Increased high frequency accuracy |

을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] I. F. Kovačević, T. Friedli, A. M. Muesing, and J. W. Kolar, "3-D electromagnetic modeling of EMI input filters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 1, pp. 231-242, Jan. 2014.
- [2] S. F. Zarei, S. Khankalantary, "A simplified frequency model for industrial common-mode chocks used in high-power converters," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 1, pp. 15-22, Jan. 2021.
- [3] J. H. Lee, Y. G. Hong, and W. S. Nah, "Experimental study of active EMI filters for the reduction of EMI passive elements in SMPS for TV power," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 9, pp. 657-665, Sep. 2023.
- [4] R. He, S. Arun Walunj, S. Yong, V. Khilkevich, D. Pommerenke, and H. Aichele, et al., "Modelling strategy for film capacitors in EMI filters," in *2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity(EMC+SIPI)*, New Orleans, LA, Jul. 2019, pp. 259-265.
- [5] A. Asmanis, D. Stepins, G. Asmanis, and L. Ribickis, "3D modelling and analysis of parasitic couplings between surface-mount components of EMI filters," in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC/APEMC)*, Suntec City, May 2018, pp. 496-501.
- [6] R. He, Y. Xu, S. Walunj, S. Yong, V. Khilkevich, and D. Pommerenke, et al., "Modeling strategy for EMI filters," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 4, pp. 1572-1581, Aug. 2020.
- [7] A. P. Duffy, A. J. M. Martin, A. Orlandi, G. Antonini, T. M. Benson, and M. S. Woolfson, "Feature selective validation(FSV) for validation of computational electromagnetics(CEM). Part I-the FSV method," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 3, pp. 449-459, Aug. 2006.
- [8] A. Duffy, G. Zhang, "FSV: State of the art and current research fronts," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 55-62, 3rd Quarter 2020.
- [9] W. Tan, C. Cuellar, X. Margueron, and N. Idir, "A high frequency equivalent circuit and parameter extraction procedure for common mode choke in the EMI filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 3, pp. 1157-1166, Mar. 2013.
- [10] E. Frank, "S-parameters and impedance transformation," in *Radio Frequency Integrated Circuits and Technologies*, Berlin, Springer, pp. 57-78, 2007.
- [11] Electronic Components Industry Association, "Test procedure for high frequency characterization of low inductance multilayer ceramic capacitors," Electronic Components Industry Association, Alpharetta, GA, ANSI/EIA-970, 2013.
- [12] TDK, "S-parameter data library," 2016. Available: https://product.tdk.com/system/files/dam/tvcl/readme_spara_en_v20160516.pdf
- [13] S. Lee, H. Kim, W. Kim, B. Im, S. Ahn, et al., "De-embedding method considering parasitic capacitance to expand the measurable frequency band of EIA970," *The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science 2022 Summer Conference*, vol. 10, no. 1, 2022.
- [14] H. I. Hsiang, "Progress in materials and processes of multilayer power inductors," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, no. 19, pp. 16089-16110, Aug. 2020.
- [15] J. G. Kraemer, "S-parameter characterization for EMI filters," in *2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Boston, MA, Aug. 2003, pp. 361-366.
- [16] X-Mate Cloud, "Feature selective validation," 2023. Available: http://www.x-mate.cloud/sources/smape_vs_fsv.html

이 재 원 [한국과학기술원/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5186-5395>



2020년 2월: 경북대학교 전기공학과 (공학사)
2022년 2월: 한국과학기술원 조천식녹색
교통대학원 (공학석사)
2022년 3월~현재: 한국과학기술원 조천
식모빌리티대학원 박사과정
[주 관심분야] EMC Design, Power EMC,
High Power EMC 등

안 장 용 [한국전자통신연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5024-2441>



2016년 2월: 경희대학교 전자전파공학과
(공학사)
2018년 2월: 한국과학기술원 조천식녹색
교통대학원 (공학석사)
2022년 8월: 한국과학기술원 조천식모빌
리티대학원 (공학박사)
2022년~2023년: 한국과학기술원 기계기
술연구소 연수연구원
2023년 7월~현재: 한국전자통신연구원 임체통신연구소 전파
연구본부 RF기술연구실 선임연구원
[주 관심분야] RF, EMC/EMI 등

이 상 욱 [한국과학기술원/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-9130-5293>



2021년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학
사)
2023년 2월: 한국과학기술원 조천식모빌
리티대학원 (공학석사)
2023년 3월~현재: 한국과학기술원 조천
식모빌리티대학원 박사과정
[주 관심분야] EMC, SI/PI Design 등

김 홍 석 [한국과학기술원/위촉연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5222-619X>



2011년 2월: 성균관대학교 전자전기공학
부 (공학사)
2013년 2월: 한국과학기술원 미래자동차
학제전공 (공학석사)
2017년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학부 미래자동차학제전공 (공학박사)
2017년~2019년: 미국 Missouri University
of Science and Technology, Visiting Assistant Research
Professor (EMC Lab.)
2020년~2021년: 미국 Missouri University of Science and
Technology, Assistant Research Professor (EMC Lab.)
2021년~현재: 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 위촉연
구원 (EMC 연구실)
2022년~현재: (주)씨피에스테크 대표이사
[주 관심분야] EMC, 무선전력전송, 전기자동차 시스템, 디지털
트윈, 가상공학, 자동화, 최적설계, 인공지능 등

김 지 성 [한국과학기술원/초빙교수]

<https://orcid.org/0000-0001-7333-6427>



1993년 2월: 홍익대학교 전기제어공학과 (공학사)

1997년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학석사)

2000년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering

(공학박사)

2000년~2006년: 삼성전자 수석연구원

2007년~2014년: 한국과학기술원 전기전자공학과 연구교수

2015년~2022년: 수원과학대학교 전자정보통신공학과 교수

2022년~현재: 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 초빙교수

[주 관심분야] EMI/EMC, Signal/Power Integrity, 고속신호 인터커넥트 및 시스템 설계, 무선전력전송

안 승 영 [한국과학기술원/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0771-7050>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학사)

2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학석사)

2005년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학박사)

2001년~2002년: Singapore Institute of Manufacturing Technology 방문연구원

2005년~2009년: 삼성전자 컴퓨터시스템사업부 책임연구원

2009년~2010년: 한국과학기술원 온라인전기자동차사업단 선임연구원

2010년~2011년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 연구교수

2011년~현재: 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 교수

[주 관심분야] EMC, 무선전력전송, 전기자동차 시스템 등