

# EM 시뮬레이션을 이용한 BCI-모니터링 프로브 시스템의 특성에 관한 연구

## Characteristics of BCI-Monitoring Probe System Using Electro-Magnetic Field Simulation

김형주 · 최경륜 · 최성수 · 홍영기 · 황주성\* · 김찬규\* · 나완수

Hyongjoo Kim · Gyeong-Ryun Choi · SungSoo Choi · Young-gi Hong ·  
Joosung Hwang\* · Chan-Kyu Kim\* · Wansoo Nah

### 요 약

본 논문은 BCI-모니터링 프로브 시스템을 EM 모델로 구현하여, EM 시뮬레이션과 측정결과의 정합성을 달성하기 위한 방법론을 제안하였다. BCI - 모니터링 프로브 시스템을 정확하게 EM 모델링하기 위해서는 프로브의 코어를 구성하고 있는 페라이트의 주파수에 따라 변화하는 투자율  $\mu_r'(\omega)$ ,  $\mu_r''(\omega)$ 을 정확하게 산출할 필요가 있다. BCI 및 모니터링 프로브에서 측정된 임피던스는 커넥터의 임피던스 및 프로브의 코일형상에 기인한 커패시턴스 성분을 포함하고 있으며, 본 연구에서는 이러한 성분을 제외한 R-L 병렬회로 성분만을 이용하여 페라이트 코어의 상대 투자율을 추출하는 방법을 제안한다. 이와 같이 얻은 투자율을 이용하여 EM 해석 모델을 구축하였으며, 각 프로브의 반사특성과 전달특성의 정합성을 확인하였다. 최종적으로는 BCI-모니터링 프로브 시스템의 EM 모델을 구축하여 S-parameter를 시뮬레이션하였으며, 측정된 S-parameter의 응답특성과의 평균오차는 약 1.12 dB를 보였으며, 투자율 추출 방법과 전체 EM 모델이 유효함을 확인하였다.

### Abstract

In this study, we propose a methodology to achieve consistency between EM simulation and measurement results by implementing a BCI-monitoring probe system as an EM model. To accurately model the BCI monitoring probe system using EM, it is necessary to accurately calculate the magnetic permeability  $\mu_r'(\omega)$  and  $\mu_r''(\omega)$ , which change according to the frequency of the ferrite constituting the core of the probe. The impedance measured by the BCI and monitoring probe includes the connector impedance and the capacitance component owing to the coil shape of the probe. In this study, a method of extracting the relative permeability of the ferrite core using only the R-L parallel circuit components excluding these components suggests that the EM analysis model was constructed using the magnetic permeability obtained in this way, and the consistency of the reflection characteristics and transmission characteristics of each probe was confirmed. Finally, the EM model of the BCI-monitoring probe system was built to simulate the S-parameters. The average error with the response characteristics of the measured S-parameters was approximately 1.12 dB, and the effectiveness of the permeability extraction method and the entire EM model were confirmed.

Key words: EM-Simulation, BCI System, S-Parameter, Response Characteristics, Relative Permeability

「이 연구는 성균관대학교와 LG전자(주) 간의 산학협력과제 ‘대전류 노이즈 내성(BCI) 해석 기술 개발’ 연구비 지원으로 수행되었음.」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

\*LG전자 선행생산기술연구소(Production Engineering Research Institute, LG Electronics)

· Manuscript received February 8, 2023 ; Revised February 25, 2023 ; Accepted May 3, 2023. (ID No. 20230208-012)

· Corresponding Author: Wansoo Nah (e-mail: wsnah@skku.edu)

## I. 서 론

BCI(bulk current injection) 테스트는 자동차, 항공기 등 전장품이 도입되는 분야에서 보편적으로 사용되는 내성 표준 시험이며, 별도의 대형 챔버가 필요하지 않아 비용과 공간의 절약을 도모할 수 있다<sup>[1]</sup>. 자성체가 포함된 프로브에 RF 신호를 인가하여 생성되는 유도전류를 케이블을 통해 시스템에 주입하는 방법이며, 신호를 공급하는 RF generator와 인가된 신호를 바탕으로 유도전류를 생성하는 BCI 프로브, 생성된 전류를 측정하는 모니터링 프로브, 전류가 흐르는 케이블로 구성된다. 이러한 BCI 테스트에 필요한 시스템을 모두 집중소자로 구성된 등가회로로 대체하여 모델링할 경우, 각각의 프로브와 케이블 간에 존재하는 커플링 등 실제로 측정된 테스트 setup에 포함된 전자기적 현상을 반영하는 데에 한계가 있다<sup>[1]</sup>. 그렇기 때문에 각 구성품의 구조를 3D 형상으로 모델링하여 full wave-EM 시뮬레이션을 진행할 필요가 있고, 본 논문에서는 여기에 필요한 방법론을 기술하였다.

EM 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 우선 프로브 내부에 포함되어 있는 페라이트 코어의 투자율을 선행적으로 확보해야 한다<sup>[2]</sup>. 지금까지 주어진 토로이드 형상의 페라이트 코어의 투자율을 효과적으로 구하기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔으며, 이 중에서 대표적인 3개의 연구에서<sup>[2]~[4]</sup> 투자율을 측정하는 방법에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 참고문헌 [2]에서는 5차 디바이(Debye) 모델을 기반으로 반복적인 피팅(iterative fitting)을 수행함으로써 측정된 프로브의 임피던스에 포함된 모든 성분 중 페라이트의 고유의 투자율을 도출하였다. 또 참고문헌 [3]에서는 이와 같은 과정을 로렌츠(Lorentzian) 모델을 통해 진행하였다. 그리고 참고문헌 [4]에서는 커넥터, 토로이드의 형상 등 모든 성분이 포함된 측정 데이터를 로렌츠 모델에 적용하여 투자율을 추출하고, 이를 기반으로 1차 디바이 모델을 통해 페라이트 고유의 투자율을 도출하여 두 결과를 비교 및 분석하였다. 이러한 기존의 디바이/로렌츠 모델은 페라이트의 고유 투자율(intrinsic permeability)을 추출하기 위해 프로브 내부의 모든 성분들이 포함된 측정 데이터로부터 변환하는 과정이 포함된다. 즉, 측정된 프로브의 임피던스를 통해서 추출된 유효 투자율

(effective permeability)은 음수의 구간이 포함되었으며, 이를 활용하여 고유 투자율을 도출하기 위해 많은 매개변수가 포함된 복잡한 수학적 모델링이 사용된 것이다. 또한 주어진 프로브 모델, 시험 환경 등 특정 조건을 목표로 설정하여 근사화하는 방식이기 때문에, 조건이 변경될 경우 추가적인 분석이 요구될 가능성이 있다.

본 논문에서는 이러한 복잡한 수학적 모델링을 사용하지 않고, 전 주파수 대역(1 MHz~400 MHz)에서 투자율을 간단하고 효과적으로 구할 수 있는 방법론을 제시한다. 구하고자 하는 페라이트의 투자율은 측정된 프로브의 임피던스를 이용하며, 이에 포함된 여러 성분 중에서 R-L 병렬회로만을 이용하여 투자율을 추출하는 방법을 제안한다. 이 투자율을 이용하여 BCI-모니터링 프로브 시스템의 EM 시뮬레이션 모델을 구축할 수 있으며, 실제 측정된 임피던스에 포함된 커패시턴스 성분, 커넥터의 고주파 기생성분들은 EM 시뮬레이션 모델에 포함된다. 이와 같이 구축된 EM 모델은 프로브 시스템의 입력 임피던스 및 전달 파라미터를 정확하게 예측하였다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다.

II장에서 투자율을 추출하는 방법과 이를 검증하는 과정을 상술하였고, III장에서는 추출된 투자율을 EM 모델에 적용하여 시뮬레이션을 진행하고, 이에 대한 결과와 측정 데이터 간의 정합성을 보였다. IV장에서는 각 프로브의 전달특성을 확인하고자 setup을 구축하여 측정 및 EM 시뮬레이션을 진행하여 이들 간의 정합성을 확인하였으며, 이를 정량화하기 위해 평균오차를 제시하였다. V장에서는 BCI-모니터링 프로브 시스템을 구축하여 두 프로브 간의 전달특성과 BCI 프로브와 DUT 간의 전달특성의 정합성을 보이고, 마찬가지로 평균오차를 제시하였다. VI장은 본 연구에서 진행한 절차와 이러한 방법론의 의의를 종합한 결론이다.

## II. 토로이드 구조에서의 투자율 추출 기법

### 2-1 프로브의 형상 및 등가회로

그림 1과 그림 2는 각각 BCI 및 모니터링 프로브의 형상을 나타낸다. 그림 1(a), 그림 1(b) 및 그림 2(a), 그림 2(b)는 프로브 모델을 X-ray로 촬영한 단면과 이를 기반으로 재구성한 3D 모델의 단면이며, 그림 1(c) 및 그림 2(c)는

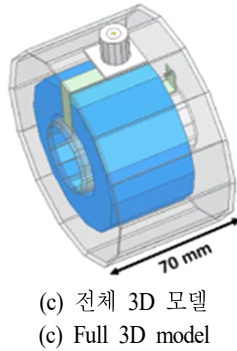
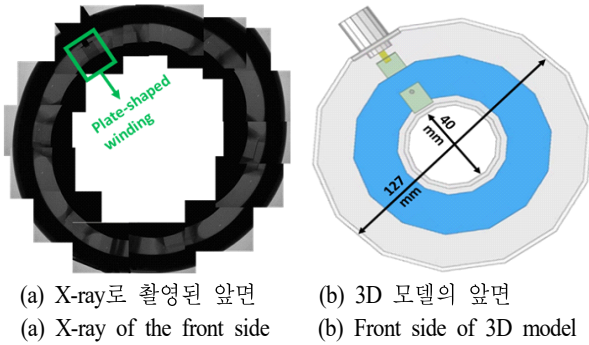


그림 1. BCI 프로브(F-130-1)의 구조 및 단면형상  
Fig. 1. Structure of BCI probe (F-130-1).

3D 모델 전체의 모습이다. 두 프로브 모델의 외함은 테이 터시트에 표기된 높이, 내부 및 외부 직경 등의 기본적인 규격을 반영하여 3D 모델링하였다<sup>[5],[6]</sup>. 그리고 프로브 내부의 코일은 X-ray 단면상으로 파악 가능한 대략적인 형태만을 참고하여, 세부적인 형상은 EM 시뮬레이션을 통해 경향성을 확인하면서 설계하였다. 그림 3(a) 및 그림 3(b)는 BCI 프로브의 임피던스의 크기와 위상, 그림 3(c) 및 그림 3(d)는 모니터링 프로브의 임피던스의 크기와 위상을 나타내며 모두 측정치이다. VNA(vector network analyzer)를 통해 1 MHz부터 400 MHz까지 각 프로브의  $S_{11}$ 를 측정하여 식 (1)을 통해  $Z_{probe}$ 로 변환한 것이다.

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{probe} - Z_0}{Z_{probe} + Z_0}, \quad Z_{probe} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (1)$$

그림 4는 이에 대한 등가회로를 나타내며<sup>[7]</sup>, 프로브의 DC 저항 성분( $R_{DC}$ ), 토로이드 구조 그리고 커패터 부분이 직렬로 연결되어 있음을 나타내고 있으며, 식 (2) 및 식 (3)은 이것들을 수식적으로 표현하고 있다.

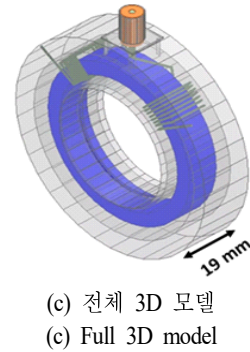
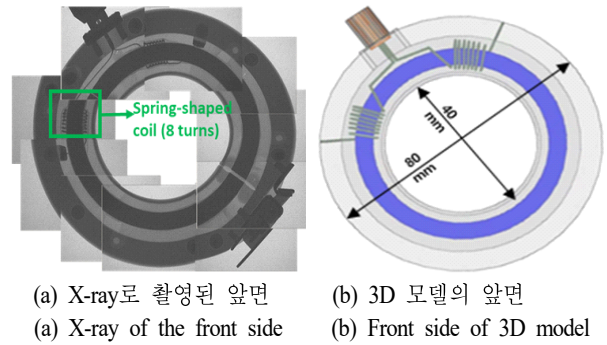


그림 2. 모니터링 프로브(F-52B)의 구조 및 단면형상  
Fig. 2. Structure of monitoring probe (F-52B).

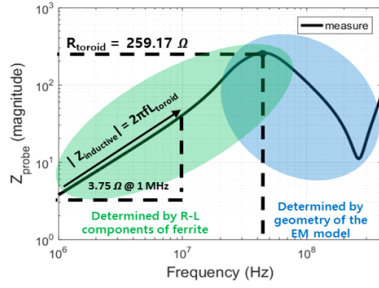
$$Z_{probe} = Z_{DC} + Z_{toroid} + Z_{con} \approx Z_{toroid} + Z_{con} [\Omega] \quad (2)$$

$$Z_{toroid} = R_{toroid} // j\omega L_{toroid} // \frac{1}{j\omega C_{toroid}} [\Omega] \quad (3)$$

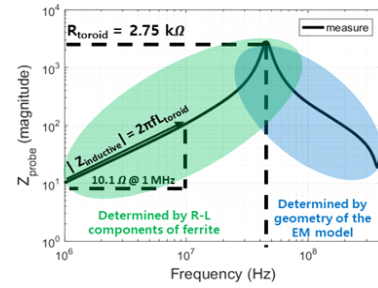
여기서 DC 저항 성분은 본 연구에서 분석하고자 하는 주파수 영역(1 MHz~400 MHz)에서 무시할 만큼 작기 때문에 무시하고자 하며, 그림에서 빨간색으로 표기하였다. 그리고 페라이트를 감싸고 있는 코일 간의 간격 등 형상으로 인해 생성되는 기생성분인  $C_{toroid}$ 와 커패터 성분에 해당되는  $L_{con}$ ,  $C_{con}$ 은 3D 모델로 구현되어 EM 해석상으로 반영될 성분이기 때문에 제외하였으며, 그림에서 파란색으로 표기하였다.  $Z_{probe}$ 의 측정 결과를 통해  $R_{toroid}$ ,  $L_{toroid}$ 의 소자값을 선정하는 방법과 이를 활용하여 투자율을 추출하는 과정은 2-2에서 기술하였다.

## 2-2 페라이트 코어의 상대 투자율 추출

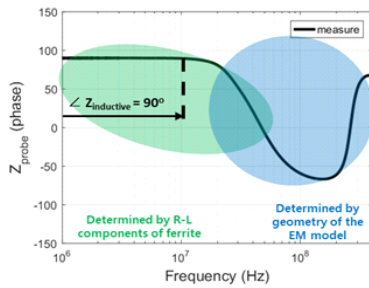
그림 4에서 제시한 등가회로의  $L_{toroid}$ 값은 그림 3(a) 및



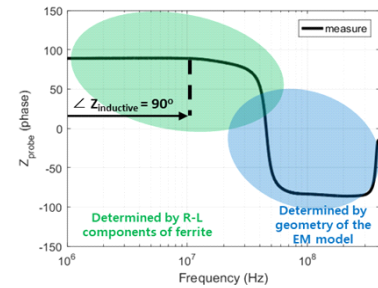
(a) F-130-1 모델의  $Z_{probe}$  크기  
(a) Magnitude of  $Z_{probe}$  of the F-130-1 model



(c) F-52B 모델의  $Z_{probe}$  크기  
(c) Magnitude of  $Z_{probe}$  of the F-52B model



(b) F-130-1 모델의  $Z_{probe}$  위상  
(b) Phase of  $Z_{probe}$  of the F-130-1 model



(d) F-52B 모델의  $Z_{probe}$  위상  
(d) Phase of  $Z_{probe}$  of the F-52B model

그림 3. 측정된  $Z_{probe}$ 의 크기와 위상

Fig. 3. Measurement and equivalent circuit of  $Z_{probe}$ .

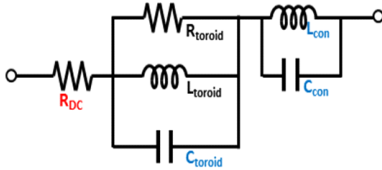


그림 4.  $Z_{probe}$ 의 등가회로

Fig. 4. Equivalent circuit of  $Z_{probe}$ .

그림 3(c)에서 1 MHz부터 약 10 MHz까지 주파수에 따라 임피던스가 증가하는 인덕터의 특성에 의해 결정될 수 있으며,  $R_{toroid}$  값은 리액턴스 값이 0이 되는 최대 임피던스 값으로 근사화될 수 있다. 따라서 각 파라미터는 식 (4) 및 식 (5)를 통해 계산될 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$L_{toroid} = \frac{|Z_{inductive}|}{2\pi f} [H] \quad (4)$$

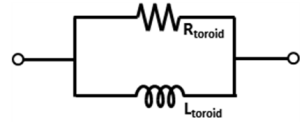
$$R_{toroid} \approx Z_{max} [\Omega] \quad (5)$$

이를 통해 BCI 프로브(F-130-1)는  $L_{toroid}=0.6 \mu H$ ,  $R_{toroid}=$

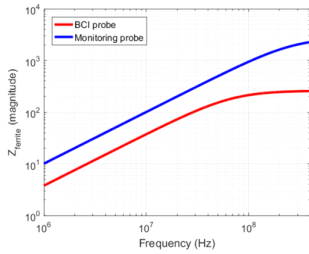
259.17  $\Omega$ 으로, 모니터링 프로브(F-52B)는  $L_{toroid}=1.6 \mu H$ ,  $R_{toroid}=2.75 k\Omega$ 으로 각각 선정되었다. 그림 5(a)는 주파수에 따라 변화하는 상대 투자를 추출을 위해 사용한 R-L 병렬회로이다. 이는 그림 4의 등가회로에서  $R_{DC}$ ,  $C_{toroid}$ ,  $L_{con}$ ,  $C_{con}$ 을 제외한 형태이며, 이에 대한 임피던스  $Z_{ferrite}$ 를 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$Z_{ferrite} = R_{toroid} // j\omega L_{toroid} [\Omega] \quad (6)$$

각 프로브의  $R_{toroid}$ ,  $L_{toroid}$  값을 식 (6)에 그대로 적용하면  $Z_{ferrite}$ 를 추출할 수 있으며, 그림 5(b)는 이에 대한 결과를 나타낸다. BCI 프로브와 모니터링 프로브 모두 저주파 대역에서  $L_{toroid}$ 의 특성으로 인해 주파수가 증가함에 따라  $Z_{ferrite}$ 의 크기가 선형적으로 증가하지만, 수십 MHz 이상의 고주파 대역에서는 페라이트의 손실에 해당되는 성분  $R_{toroid}$ 로 인해 기울기가 점차 감소한다. BCI 프로브와 모니터링 프로브의  $R_{toroid}$  값은 각각 259.17  $\Omega$ 과 2.75 k $\Omega$ 으로 큰 차이를 보이며, 이러한 손실의 차이로 인하여 기울기



(a)  $Z_{ferrite}$ 의 R-L 병렬회로  
(a) R-L parallel circuit of  $Z_{ferrite}$



(b) 각 프로브의  $Z_{ferrite}$ 의 크기  
(b) Magnitude of each probe's  $Z_{ferrite}$

그림 5.  $Z_{ferrite}$ 의 R-L 병렬회로 및 크기  
Fig. 5. R-L parallel circuit and magnitude of  $Z_{ferrite}$ .

가 포화되는 주파수 대역 또한 상이하다. 이와 같은 손실을 배제한,  $L_{toroid}$ 만이 반영된 상대 투자율은 식 (7)과 같이  $Z_{inductive}$ 에 대한 식으로 전개할 수 있으며<sup>[2]</sup>, 해당 식의 임피던스에  $Z_{ferrite}$ 를 적용하면 식 (8)과 같이 주파수에 따라 변화하는 상대 투자율을 추출할 수 있다. 식 (8)의 파라미터들과 페라이트 코어의 구조는 그림 6에 나타냈으며, 각 모델의 페라이트 코어의 형상 파라미터를 표 1에 정리하였다. 이를 통해 추출된 상대 투자율의 실수부와 허수부를 각각 빨간색 실선과 파란색 실선 그래프로 그림 7에 나타내었다.

$$L_{toroid} = \frac{\mu N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) [H] \quad (7)$$

$$\mu_r = \frac{2\pi L_{toroid}}{\mu_0 N^2 h \ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \frac{2\pi Z_{inductive}}{j\omega \mu_0 N^2 h \ln\left(\frac{b}{a}\right)} [H/m]$$

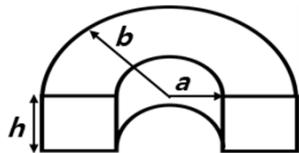
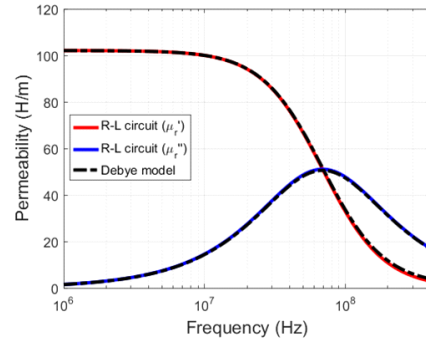


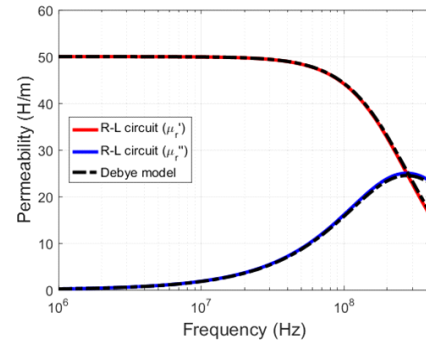
그림 6. 페라이트 코어의 구조  
Fig. 6. Structure of the ferrite core.

표 1. 상대 투자율 계산을 위한 파라미터  
Table 1. Parameters for calculating relative permeability.

Parameter Model	$N$ (turns)	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$h$ (mm)
F-130-1	1.0	25	45	50
F-52B	8.0	23.5	29.5	11



(a) BCI 프로브(F-130-1)의 상대 투자율  
(a) Relative permeability of BCI probe (F-130-1)



(b) 모니터링 프로브(F-52B)의 상대 투자율  
(b) Relative permeability of monitoring probe (F-52B)

그림 7.  $Z_{ferrite}$ 를 통해 추출된 상대 투자율  
Fig. 7. Relative permeability extracted through  $Z_{ferrite}$ .

$$\mu_r(\omega) = \mu_r'(\omega) - j\mu_r''(\omega) = \frac{2\pi Z_{ferrite}}{j\omega \mu_0 N^2 h \ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

$$= \frac{2\pi (R_{toroid} + j\omega L_{toroid})}{j\omega \mu_0 N^2 h \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (8)$$

또한,  $Z_{ferrite}$ 를 통해 추출된 상대 투자율의 신뢰성을 나타내기 위해 식 (9)에 나타낸 1차 디바이 모델로 재현해

보고자 한다.

$$\mu_r(\omega) = \mu_\infty + \frac{\mu_s - \mu_\infty}{1 + \frac{j\omega}{\omega_0}} [H/m] \quad (9)$$

식 (9)의  $\mu_s$ 는 정적(static) 상태, 즉 저주파에서의 상대 투자율의 실수부를 나타낸다. 또한  $\mu_\infty$ 는 무한대 주파수에서의 상대 투자율의 실수부를 나타내며, 이론적으로는 무한대 주파수에서 진공상태와 유사한 상태로 수렴하므로, 본 연구에서는 1로 적용하였다. 그리고  $\omega_0$ 는 완화 주파수(relaxation frequency)를 나타내며, 페라이트 코어의 자성 특성이 가장 급격하게 변하는 주파수이다. 이는 R-L 병렬회로를 활용하여 도출된  $Z_{ferrite}$ 를 통해 추출한 상대 투자율의 실수부가 가장 가파르게 감소하는 동시에 허수부가 최대값인 지점에 해당한다. R-L 병렬회로를 통해 추출된 상대 투자율을 이와 같은 1차 디바이 모델을 통해 재현한 결과를 그림 7에 검정색 점선으로 나타내었으며, 매우 유사함을 확인할 수 있다.

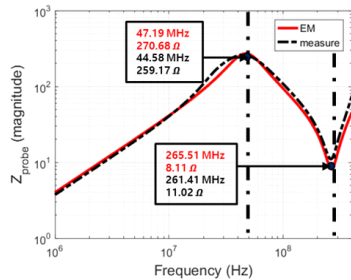
### III. 각 프로브의 입력 임피던스 정합성

II장에서  $Z_{ferrite}$ 를 통해 추출한 BCI 프로브와 모니터링 프로브의 상대 투자율을 EM 모델의 페라이트 코어에 적용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 그림 8의 그래프는 이에 대한 결과에 해당된다. 그림 8(a) 및 그림 8(b)는 BCI 프로브의  $Z_{probe}$ 의 크기와 위상이며 전 주파수 대역에서의 정합성이 우수함을 확인할 수 있다. 이와 동일한 과정을 모니터링 프로브에 대해 진행한 결과가 그림 8(c) 및 그림 8(d)에 해당된다. IV장에서는 해당 모델에 대해 측정 및 시뮬레이션 setup을 구축하여 전달특성을 확인하였다.

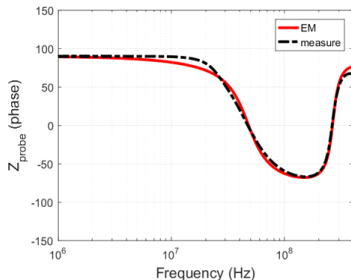
### IV. 각 프로브의 전달특성 정합성

#### 4-1 BCI 프로브의 전달특성 정합성

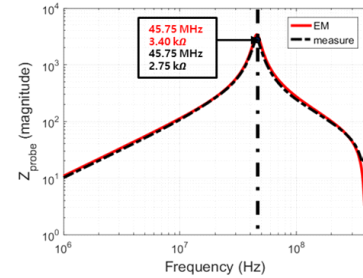
그림 9(a) 및 그림 9(b)는 각각 전달특성 확인을 위한 BCI 프로브의 측정 및 시뮬레이션 setup을 나타낸다. 이



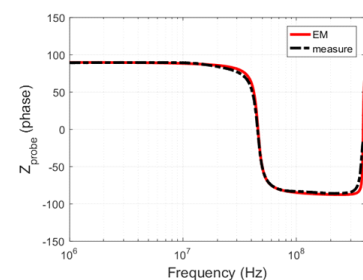
(a) BCI 프로브의  $Z_{probe}$  크기  
(a) Magnitude of  $Z_{probe}$  of the BCI probe



(b) BCI 프로브의  $Z_{probe}$  위상  
(b) Phase of  $Z_{probe}$  of the BCI probe



(c) 모니터링 프로브의  $Z_{probe}$  크기  
(c) Magnitude of  $Z_{probe}$  of the monitoring probe



(d) 모니터링 프로브의  $Z_{probe}$  위상  
(d) Phase of  $Z_{probe}$  of the monitoring probe

그림 8. 각 프로브 모델의  $Z_{probe}$  정합성

Fig. 8. Consistency of  $Z_{probe}$  of individual probe models.



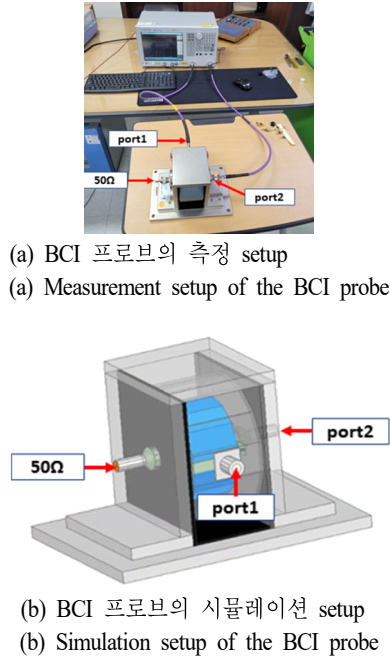


그림 9. BCI 프로브의 측정 및 시뮬레이션 setup  
Fig. 9. Measurement and simulation setup of the BCI probe.

는 ISO 11452-4 규격에 해당되며<sup>[8]</sup>, 캘리브레이션 지그는 FCC사의 BCICF-1을 사용하였다. 그림 10은 측정 및 EM 시뮬레이션을 진행하여 나타낸 전달특성 그래프이다. 이를 dB scale로 나타낸 것이 그림 10(a), 위상으로 나타낸 것이 그림 10(b)이며 우수한 정합성을 보인다. 전달특성의 정합성을 정량화하기 위해 식 (10)을 통해 계산된 평균오차  $avg(E_n)$ 은 0.33 dB의 우수한 정합성을 보임을 확인할 수 있으며 주파수 데이터는 200 points / decade로, 총 521개의 point들을 기준으로 계산하였다. 여기서  $E_n$ 은  $n$ 번째 point에서 측정과 해석 결과 간의 차이의 절대값,  $avg(E_n)$ 은 모든 point에서 산출된  $E_n$ 들의 평균값을 의미한다.

$$E_n = |S_{21}(EM) - S_{21}(measure)|_{nth\ point} [dB]$$

$$avg(E_n) = \frac{\sum_{n=1}^{521} E_n}{521} [dB] \quad (10)$$

#### 4.2 모니터링 프로브의 전달특성 정합성

그림 11(a) 및 그림 11(b)는 각각 전달특성 확인을 위한 모니터링 프로브의 측정 및 시뮬레이션 setup을 나타낸다.

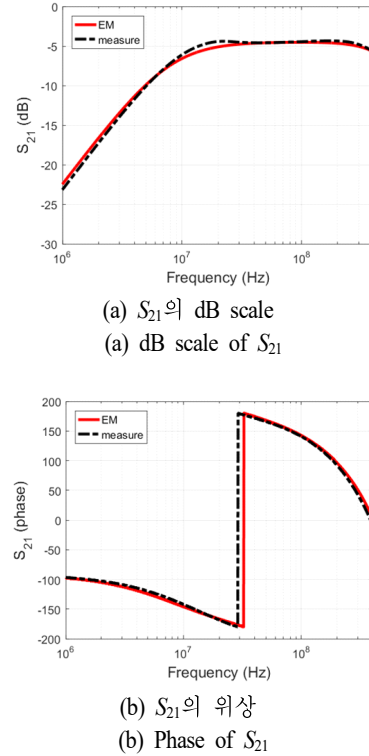
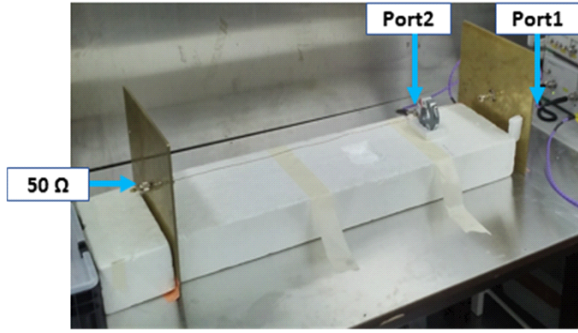
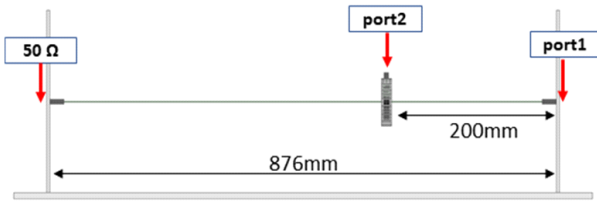


그림 10. BCI 프로브의  $S_{21}$  정합성  
Fig. 10. Consistency of  $S_{21}$  of the BCI probe.

F-52B 모델에 대한 캘리브레이션-Jig를 제조사에서 제공하지 않기 때문에 동판과 케이블을 통해 환경을 구축하였다. 그림 12는 측정과 EM 시뮬레이션 결과 간의 정합성을 나타낸다.  $S_{21}$ 을 dB scale로 나타낸 것이 그림 12(a)이며 전 주파수 대역의 정합성을 보임을 확인할 수 있다. 또한  $S_{21}$ 을 위상으로 나타낸 것이 그림 12(b)에 해당된다. 약 300 MHz ~ 340 MHz 대역에서 위상이 왜곡되었지만, 해당 대역 외의 정합성은 전반적으로 우수함을 확인할 수 있다. 이러한 위상 왜곡은 측정환경의 불안정성으로 인한 영향으로 판단되며, 특히 측정 setup과 VNA의 밀착된 배치에서 발생한 케이블의 굴곡으로 인한 신호의 지연과 주변의 금속 물체들로 인한 영향이 상호작용하여 발생한 것으로 추정된다. BCI 프로브와 마찬가지로 식 (10)을 통해 전달특성의 정합성을 정량화했으며 전체 주파수 대역에서 평균 오차값은 1.17 dB를 보였다. 동일한 setup 환경으로 BCI 프로브를 추가하여, BCI-모니터링 프로브 시스템의 응답특성을 V장에서 확인하였다.



(a) 모니터링 프로브의 측정 setup  
(a) Measurement setup of the monitoring probe

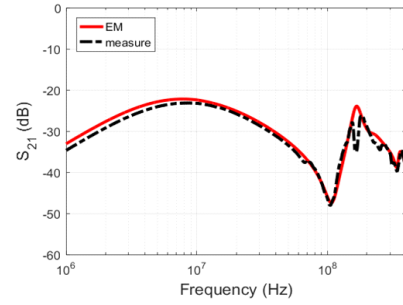


(b) 모니터링 프로브의 시뮬레이션 setup  
(b) Simulation setup of the monitoring probe

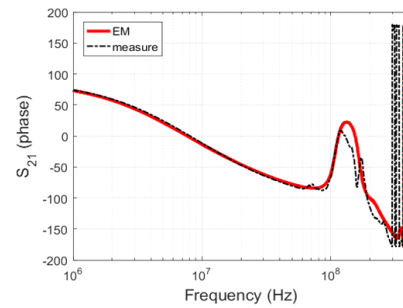
그림 11. 모니터링 프로브의 측정 및 시뮬레이션 setup  
Fig. 11. Measurement and simulation setup of the monitoring probe.

## V. BCI-모니터링 프로브 시스템의 응답특성 정합성

IV장에서 확보된 각 모델의 응답특성 정합성을 기반으로, 두 프로브가 포함된 시스템을 최종적으로 구축하였으며 이에 대한 측정 및 시뮬레이션 setup은 각각 그림 13(a) 및 그림 13(b)에 해당된다. 그림 14는 BCI-모니터링 프로브 시스템의 응답특성을 나타낸다. 이중 그림 14(a)와 그림 14(b)는 두 프로브 간의 응답특성인  $S_{21}$ 을 dB scale과 위상으로 나타낸 것이며, 그림 14(c) 및 그림 14(d)는 BCI 프로브와 DUT 간의 응답특성인  $S_{31}$ 을 dB scale과 위상으로 나타낸 것이다. 두 응답특성 모두 본 연구의 주파수 대역(1 MHz~400 MHz)에서 우수한 정합성을 보임을 확인할 수 있다. IV장에서와 마찬가지로 정합성을 정량화하여  $S_{21}$ 은 1.12 dB,  $S_{31}$ 은 0.73 dB의 평균오차를 보였다. 이를 통해 II장부터 단계적으로 진행한 방법론의 타당성을 확



(a)  $S_{21}$ 의 dB scale  
(a) dB scale of  $S_{21}$  (dB)



(b)  $S_{21}$ 의 위상  
(b) Phase of  $S_{21}$

그림 12. 모니터링 프로브의  $S_{21}$  정합성  
Fig. 12. Consistency of  $S_{21}$  of the monitoring probe.

인할 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 BCI 테스트 진행 시 소요되는 시간 및 비용을 저감하고, 전자기적 특성을 선행적으로 파악할 수 있는 EM 모델링의 중요성과 이를 위한 방법론을 제안하였다. II장에서 R-L 병렬회로를 통해 추출된 페라이트 코어의 임피던스로부터 상대 투자율을 도출하였으며, 토로이드 내의 구조물 간의 간격 등 형상적인 요인으로 인해 생성되는 기생성분인  $C_{toroid}$ 와 커패시터 성분인  $L_{con}$ ,  $C_{con}$ 은 EM 모델상에서 3D 형태로 구현되었다. 즉, R-L 성분 ( $R_{toroids}$ ,  $L_{toroid}$ ) 외의 기생성분은 EM 모델의 기하학적 형상으로 인해 자연스럽게 반영된 것이다. 또한 본 논문의 방법으로 추출한 상대 투자율을 1차 디바이 모델을 통해 재현함으로써 해당 방법론의 신뢰성을 보였다. 이를 바탕으로 R-L 병렬회로를 통해 추출된 상대 투자율을 EM 모델



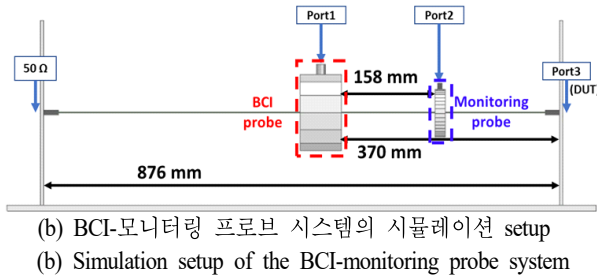
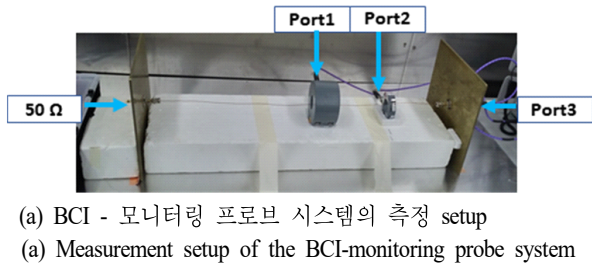


그림 13. BCI-모니터링 프로브 시스템의 측정 및 시뮬레이션 setup

Fig. 13. Measurement and simulation setup of the BCI-monitoring probe system.

상의 페라이트 코어에 적용하였으며, 그 결과를 III장에서 기술하였다. 그리고 각 프로브 모델 및 시스템의 응답특성의 정합성을 IV장과 V장에서 확인하였으며, 평균 오차 값이 모두 1.5 dB 이내로 정합성이 우수함을 확인하였다. 본 논문의 방법론은 BCI 프로브 및 시스템을 3D EM 모델로 구현하기 위하여 선행적으로 확보되어야 하는 투자율을 추출할 수 있는 기초적인 솔루션을 제공하여, 다양한 산업 및 연구 환경에서 초기 시행착오를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] P. DeRoy, S. Piper, "Full-wave modeling of bulk current injection probe coupling to multi-conductor cable bundles," in *2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC)*, Ottawa, ON, Jul. 2016, pp. 770-774.
- [2] J. Joo, S. I. Kwak, J. H. Kwon, and E. Song, "Simula-

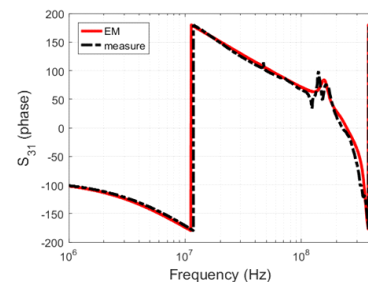
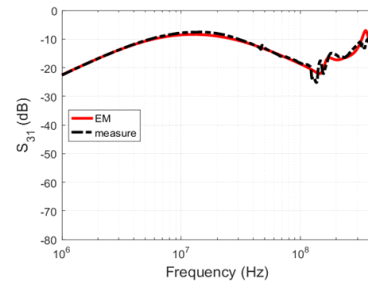
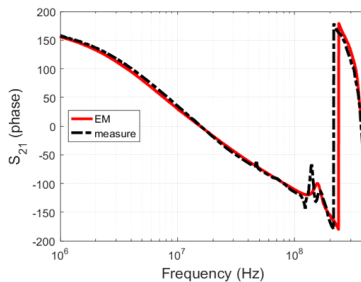
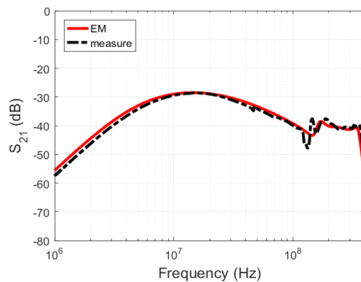


그림 14. BCI-모니터링 프로브 시스템의 응답특성

Fig. 14. Response characteristics of BCI-monitoring probe system.

tion-based system-level conducted susceptibility testing method and application to the evaluation of conducted-noise filters," *Electronics*, vol. 8, no. 8, p. 908, Aug. 2019.

- [3] S. Miropolsky, S. Frei, and J. Frensch, "Modeling of bulk current injection(BCI) setups for virtual automotive IC tests," in *2010 EMC Europe*, Wroclaw, Sep. 2010, no. 1, p. 2.
- [4] F. Grassi, "Accurate modeling of ferrite-core effects in probes for bulk current injection," in *2009 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems*, Tel Aviv, Nov. 2009, pp. 1-6.
- [5] Fischer Custom Communications, "Bulk current injection

probes," 2009. Available: <https://accelonix.nl/wp-content/uploads/FCC-Injection-Probe-Brochure.pdf>

- [6] Fischer Custom Communications, "Current probe." Available: <https://www.arbenelux.com/wp-content/uploads/2020/02/F-52B.pdf>
- [7] J. Lee, H. Lee, J. Ha, M. Kim, S. Yun, and Y. Kim, et al., "Modeling of transfer impedance in automotive BCI test system with closed-loop method," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 103, no. 4, pp. 405-414, Apr. 2020.
- [8] *Road Vehicles-Component Test Method for Electrical Disturbances From Narrowband Radiated Electromagnetic Energy-Part 4: Bulk Current Injection(BCI)*, ISO 11452-4, Apr. 2005.

김 형 주 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9898-7517>



2020년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)  
 2023년 2월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)  
 [주 관심분야] EMI/EMC, RF System, PCB/Package Design

최 성 수 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-6413-5834>



2021년 2월: 강남대학교 전자공학과 (공학사)  
 2023년 2월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)  
 [주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC

최 경 루 [성균관대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3649-0000>



2021년 2월: 수원대학교 전자공학과 (공학사)  
 2023년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)  
 2023년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정  
 [주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC

홍 영 기 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-9922-6207>



2022년 2월: 수원대학교 전자공학과 (공학사)  
 2022년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
 [주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC

황 주 성 [LG전자/선임연구원]

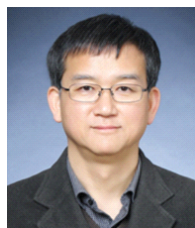
<https://orcid.org/0000-0002-9919-9587>



2011년 2월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학부 (공학사)  
2013년 2월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학부 (공학석사)  
2013년 3월~현재: LG전자 생산기술원 선임연구원  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC, RF

나 완 수 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0315-3294>



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)  
1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator  
1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원  
1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC

김 찬 규 [LG전자/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5470-6824>



2015년 2월: 건국대학교 전자공학부 (공학사)  
2017년 2월: 한양대학교 정보디스플레이 공학과 (공학석사)  
2017년 3월~현재: LG전자 생산기술원 선임연구원  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC, RF