

근역장 자기 프로브의 고주파 보정에 대한 전기장 결합 현상의 영향 연구

An Investigation of Electric Field Coupling Effects on High-Frequency Calibration of Near-Field Magnetic Probes

송 익 환

Eakhwan Song

요 약

본 논문에서는 자기장 프로브를 이용한 근역장 노이즈 측정 시 발생하는 전기장 결합 현상이 고주파 보정 결과에 미치는 영향이 제시되었다. GHz 이상의 고주파 대역에서 증가하는 전기장 결합의 영향으로 인해 자기장 프로브의 보정 계수의 고주파 왜곡이 발생하게 되며, 이에 따라 측정 결과의 최종 자기장 보정 결과의 정확도가 저하되는 현상을 분석하였다. 자기장 프로브에 대한 전기장 결합의 영향과 이로 인해 발생하는 자기장 프로브의 보정 결과의 오차는 3차원 전자기 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

Abstract

In this paper, the effect of electric field coupling on high-frequency correction results during near-field noise measurements using a magnetic field probe is presented. Due to the increasing influence of electric field coupling in the GHz frequency band, high-frequency distortion of the correction factor of the magnetic field probe occurs, which in turn degrades the final magnetic field correction accuracy of the measurement results. The impact of the electric field coupling on the magnetic field probe and the resulting errors in the correction results were verified through three-dimensional electromagnetic field simulations.

Key words: Near-Field Measurement, Magnetic Probe, Electric Field Coupling, Probe Factor, Field Calibration

I. 서 론

최근 모바일 무선기기는 소형화, 박형화 및 다기능화에 따라 시스템의 집적도가 증가하고 있다. 집적도의 증가에 따라 시스템 내부의 여러 디지털/RF 집적회로(IC, integrated circuits) 및 모듈과 같은 다양한 부품들이 매우

근접하게 배치되게 되며, 이에 따라 디지털 부품에서 발생하는 고속 스위칭 노이즈가 시스템 내부 RF 부품에 간섭을 일으키는 무선주파수 간섭(RFI, radio-frequency interference) 문제가 증가하고 있다^{[1][2]}. 이러한 무선주파수 간섭 현상에 대한 분석 및 대책설계를 위해서는 무선주파수 간섭을 발생시키는 노이즈 원인을 특정하고, 노이즈의

「이 논문은 2023년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업과 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-23-005).」

광운대학교 전자통신공학과(Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University)

· Manuscript received June 7, 2024 ; Revised June 13, 2024 ; Accepted June 13, 2024. (ID No. 20240607-056)

· Corresponding Author: Eakhwan Song (e-mail: esong@kw.ac.kr)

강도를 정량화하기 위한 측정기술이 중요하다. 특히 시스템의 무선통신 주파수가 증가함에 따라 고주파 노이즈원의 분석 필요성이 증가하고 있으며, 이를 위해 다양한 근역장 노이즈 측정기술이 활용되고 있다. 이러한 기술 중 근역장 자기 프로브(near-field magnetic probe)를 이용한 측정기술은 측정의 편의성과 공간적 측정 정확성의 장점으로 인하여 널리 사용되고 있다^{[3]~[7]}. 자기장 프로브를 이용한 측정 시 정확한 필드의 추출을 위하여 프로브 계수(PF, probe factor)를 이용한 측정결과와 보정(calibration)과정을 수행하게 되는데, 이 프로브 계수는 고주파 대역에서 증가하는 전기장 결합의 영향으로 인하여 왜곡되며, 이로 인해 고주파 대역 자기장 보정 결과의 정확도를 저하시키게 된다.

본 논문에서는 자기장 프로브를 이용한 근역장 측정 시 발생하는 전기장 결합 현상이 자기장 보정결과에 미치는 영향에 대한 분석연구 결과가 제시되었다. 3차원 전자기 시뮬레이션을 기반으로 대상 구조인 근역장 자기 프로브를 모델링하였고, 임피던스 정합된 마이크로스트립 선로 위의 기준 자기장을 추출하였다. 자기장 프로브의 전달함수와 기준 자기장으로부터 추출된 프로브 계수를 적용하여 자기장 보정을 수행하였으며, 전기장 결합에 따른 보정 결과의 오차를 제시함으로써 고주파 영역에서 전기장 결합이 자기장 보정 결과에 미치는 영향을 검증하였다.

II. 자기장 프로브의 필드 보정법

그림 1은 마이크로스트립을 사용한 자기장 프로브의 필드 보정 방법을 보여준다. 임피던스 정합된 마이크로스트립을 사용하여 잘 정의된 자기장을 생성하고, 마이크로스트립에 의해 생성된 자기장을 측정하기 위해 자기장 프로브를 일정 높이에 배치한다. 마이크로스트립에 의해 생성된 자기장의 방향을 고려하여 측정 시 프로브는 마이크로스트립 선로와 평행하게 배치된다. 포트 1은 마이크로스트립의 한쪽 끝에 위치하며, 포트 2는 자기 프로브의 출력에 연결된다. 마이크로스트립의 다른 끝은 반사현상을 방지하기 위해 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스와 동일한 50 옴으로 임피던스 정합된다.

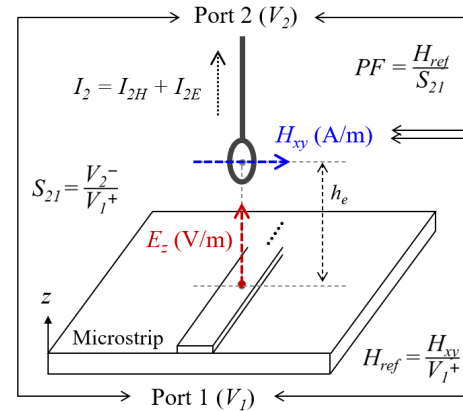


그림 1. 마이크로스트립을 이용한 근역장 자기 프로브의 필드 보정법

Fig. 1. A magnetic field calibration method for near-field magnetic probes using a reference microstrip.

프로브 계수(PF)는 식 (1)과 같이 마이크로스트립에 의해 생성된 기준 자기장(H_{ref})과 포트 1과 포트 2의 전달함수(S_{21})의 비율로 결정되며, dB 스케일의 경우에는 그 차이로 계산된다^[8]. 이렇게 추출된 프로브 계수는 실제 시험 대상 기기(DUT, device under test)를 측정할 때 자기장 보정 과정에 적용된다. 식 (2)에서와 같이, 포트 2에서 측정된 전압(V_2)은 보정을 수행하기 위해 프로브 계수와 곱해져 시험 대상 기기에 의해 생성된 자기장(H_{cal})을 결정하게 된다. 프로브 계수는 자기장 프로브에서 측정된 전압(V)을 필드 값(A/m)으로 변환하고, 주파수에 따라 변하는 프로브의 측정 감도를 보상하는 두 가지 목적을 수행한다. 프로브 계수의 정확한 추출은 근역장 노이즈 측정 및 보정결과와 정확도에 직접적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다.

$$PF^H \left[\frac{A/m}{V} \right] = H_{ref} \left[\frac{A/m}{V} \right] / S_{21}^H \quad (1)$$

$$H_{cal} [A/m] = V_2 [V] \cdot PF^H \left[\frac{A/m}{V} \right] \quad (2)$$

III. 자기장 프로브를 이용한 측정에서의 전기장 결합의 영향

제 II 장에서 소개한 자기 프로브 보정 방법은 자기 프

로브에 의해 수집된 모든 전압이 오직 자기장에 의해 유도된 것이라고 가정한다. 그러나 GHz 범위의 고주파 영역에서는 저주파에서 무시되는 전기장 결합의 영향이 증가하며, 이는 자기장과 함께 전기장에 의해 유도된 전압이 자기장 프로브에서 측정되는 결과를 초래한다. 이 전기장 결합 현상은 마이크로스트립과 자기장 프로브 간 존재하는 기생 커패시턴스에 의해 발생한다. 고주파 영역에서의 전기장 결합의 영향으로 인하여 자기장 프로브의 특성에 의해 결정되는 전달함수로부터 추출된 프로브 계수가 왜곡되게 되고, 최종 자기장 보정 결과에 오차가 발생하게 된다.

이 문제를 해결하려면 자기장에 의해 유도된 전압만을 추출해야 하며, 이는 자기장 프로브를 식 (3)에서와 같이 역방향으로 배치한 후 추출한 전달함수(S_{21}^{rev})와 정방향에서의 전달함수(S_{21}^{fwd}) 차이의 절반을 취하면 얻을 수 있다. 이는 자기장 프로브의 방향에 따른 전달함수의 정반대 위상의 차이에 의해 결정되는 자기장 결합 성분은 추출하고 방향과 무관하게 동일한 전기장 결합의 공통 성분은 제거하는 원리에 근거하며, 같은 원리를 바탕으로 전기장 결합에 의해 유도된 전압 또한 식 (4)와 같이 추출할 수 있다^[9].

$$S_{21}^H = |S_{21}^{fwd} - S_{21}^{rev}|/2 \quad (3)$$

$$S_{21}^E = |S_{21}^{fwd} + S_{21}^{rev}|/2 \quad (4)$$

그림 2는 자기장 프로브와 마이크로스트립 선로 간 전달함수 추출을 위한 3차원 전자기 시뮬레이션 셋업을 보여주고 있다. 모델링된 프로브는 W_{prb} 의 폭과 H_{prb} 의 높이를 가지며, 프로브 신호선의 하단과 마이크로스트립 간의 물리적 높이는 h_{prb} 가 되도록 배치되었다. 프로브를 구성하는 동축선과 마이크로스트립은 특성 임피던스 50 옴을 갖도록 설계되었으며, 마이크로스트립 선로의 한쪽 끝은 반사 현상을 제거하기 위해 동일한 임피던스로 종단처리되었다. 자기장 프로브 계수 PF_H 를 얻기 위해 식 (3)에서와 같이 프로브를 정방향과 역방향으로 각각 배치하여 시뮬레이션을 수행함으로써 S_{21}^H 를 추출하였다. 그림 3은 프로브의 폭 W_{prb} 와 높이 H_{prb} 가 각 10 mm 일 경우, 프로브의 물리적 측정 높이 h_{prb} 에 따른 자기장 프로브의 전달함수 시뮬레이션 결과를 비교하여 보여주고 있다. 프로브

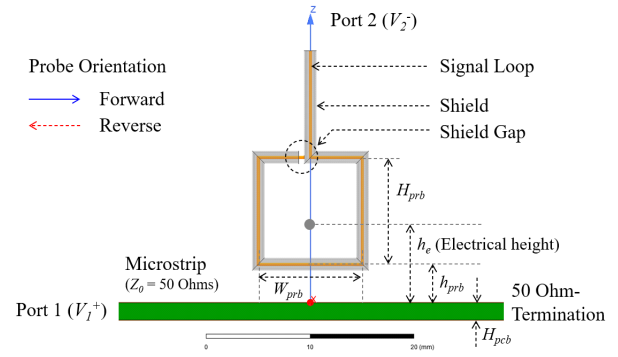


그림 2. 자기장 프로브와 마이크로스트립의 전달함수 시뮬레이션 셋업

Fig. 2. Transfer function (S_{21}) simulation setup for a magnetic probe and a reference microstrip.

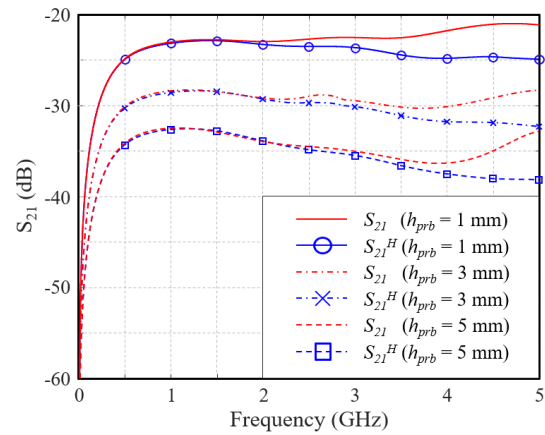


그림 3. 전기장 결합의 영향에 따른 전달함수 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulation results of transfer function depending on the impact of electric field coupling.

의 높이가 증가함에 따라 예상되는 프로브 전달함수의 감소를 확인할 수 있으며, 특히 GHz 대역의 고주파 영역에서 정방향 전달함수 S_{21} 과 자기장에 의해 유도된 S_{21}^H 간 오차가 증가하는 것을 확인함으로써, 주파수에 따라 증가하는 전기장 결합의 영향을 검증하였다.

IV. 자기장 프로브의 고주파 보정에서의 전기장 결합의 영향

본 장에서는 제 III장에서 확인한 고주파 전기장 결합

현상이 자기장 프로브의 고주파 보정결과에 미치는 영향을 분석한다. 자기장 보정을 수행하기 위해서는 동일한 마이크로스트립 선로 위에서 발생하는 기준 자기장(H_{ref})을 추출해야 하며, 그림 4는 이를 위한 전자기 시뮬레이션 셋업을 보여준다. Port 1에는 기준 전압에 의해 발생하는 기준 자기장을 추출하기 위해 1 V의 입사 전압이 인가되었으며, 마이크로스트립의 특성 임피던스 및 종단처리되는 그림 2의 전달함수 시뮬레이션 셋업과 동일하게 유지되었다. 마이크로스트립 선로 길이방향에 따른 자기장의 분포는 일정하다고 가정하고, 마이크로스트립 선로 중간 지점을 기준으로 선로로부터의 전기적 높이(h_e , electrical height)에 따라 선로와 수직 방향의 기준 자기장 관찰 라인을 설정하였다. 전기적 높이에 따른 평면한 자기장 분포 추출을 위하여 전기적 높이는 0.1 mm 간격으로 배치하였으며, 전달함수 추출 시와 동일한 주파수 대역에서 각 전기적 높이에 해당하는 자기장 관찰 라인의 기준 자기장 분포를 추출하였다. 이렇게 추출한 기준 자기장과 제 III장에서 얻은 자기장 프로브의 전달함수로부터 식 (1)에 의해 프로브 계수를 결정하고, 식 (2)를 이용하여 최종 보정된 자기장을 추출하였다. 이 때 프로브에서 관측되는 전압(V_2)은 Port 1에 기준전압 1 V가 인가되는 경우를 가정하여 전달함수 S_{21} 과 동일하게 설정하였으며, 자기장 프로브의 설계 변수와 물리적 측정 높이에 따른 프로브의 전기적 높이는 식 (5)에 의해 결정되었다⁹⁾.

$$h_e = \sqrt{(h_{prb} + h_{pcb})^2 + (h_{prb} + h_{pcb} + H_{prb})^2} \quad (5)$$

그림 5는 측정 높이와 각 높이에서의 전기장 결합 유무

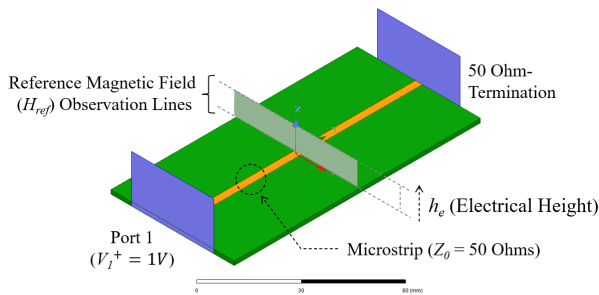


그림 4. 기준 자기장 추출을 위한 시뮬레이션 셋업
 Fig. 4. Simulation setup for extraction of reference magnetic fields on a microstrip.

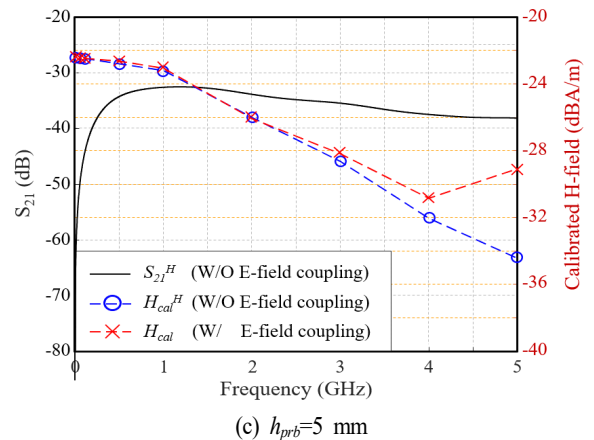
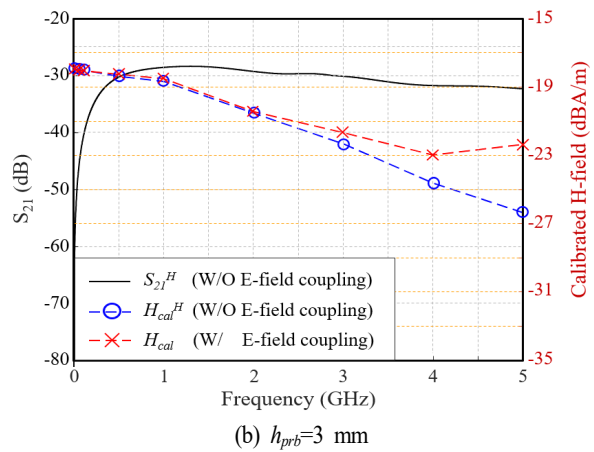
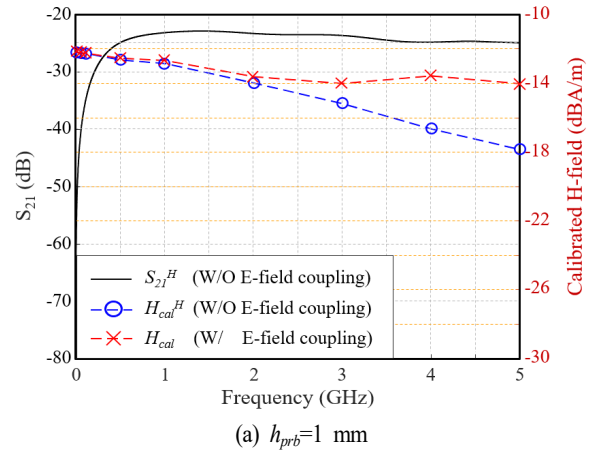


그림 5. 전기장 결합의 영향에 따른 자기장 필드 보정결과
 Fig. 5. Magnetic field calibration results depending on the impact of electric field coupling.

에 따른 자기장 프로브의 측정 보정 결과를 보여준다. 프로브의 물리적 측정 높이 h_{prb} 는 각 1 mm, 3 mm, 5 mm로 설정되었으며, 이에 해당하는 전기적 높이 h_e 는 식 (5)에 의해 각 4.6 mm, 6.9 mm, 9.1 mm로 결정되어, 식 (1)에 의한 프로브 계수의 계산 시 필요한 기준 자기장 추출에 적용되었다. 전기장 결합 유무에 따라 추출된 프로브 계수를 적용하였을 경우, 모든 측정 높이에서 주파수가 증가할수록 자기장 보정 결과의 오차가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 제 III장에서 확인한 프로브 계수 결정 시 적용되는 전달함수의 시뮬레이션 결과에서 확인한 주파수에 따른 전기장 결합 영향과 유사한 경향성을 보여줌으로써, GHz 영역의 고주파 대역에서 전기장 결합의 영향이 일관되게 자기장 프로브의 보정 결과의 오차에 기여함을 확인할 수 있다.

이러한 전기장 결합의 영향은 프로브 측정 높이에 따른 전기장 결합의 기여도를 정량적으로 분석함으로써 정확히 확인할 수 있다. 그림 6은 고주파 전기장 결합 현상이 자기장 프로브의 물리적 높이에 따라 발생시키는 자기장 보정 결과의 오차를 보여준다. 그림 5에서도 확인할 수 있듯이 주파수가 증가할수록 자기장 결합에 의해 발생하는 보정 결과의 오차가 증가하는 결과와 함께, 프로브의 물리적 높이가 감소함에 따라 오차 역시 증가하는 경향성을 확인할 수 있다. 이는 마이크로스트립과 자기장

프로브 사이에 존재하는 기생 커패시턴스가 거리에 따라 달라지게 되고, 그에 따른 전기장 결합의 총량이 변화하는 경향성을 보여줌으로써 자기장 보정 결과의 오차가 전기장 결합에 의한 영향에 기인함을 재확인할 수 있다.

특히 본 연구에서 사용된 자기장 프로브는 동축선 구조를 기반으로 설계되어 전기장 차폐 구조를 내재하고 있음에도 불구하고, 자기장 프로브와 측정 대상시료 간 존재하는 기생 커패시턴스가 GHz 영역의 고주파 대역에서는 유의미한 영향을 끼친다는 점에 주목할 필요가 있다. 대부분의 차폐 구조가 적용된 자기장 프로브는 차폐 구조에서 발생하는 와전류(eddy current)로 인한 측정감도 저하를 방지하기 위해 그림 2에서와 같이 차폐 구조가 페루프를 형성하지 못하도록 차폐 갭(shield gap)을 적용한다. 이 경우, 저주파 외부 전기장의 차폐에는 효과적이거나, 기생 커패시턴스로부터 기인하는 고주파 전기장 결합의 경우 표피효과(skin effect)에 의해 차폐 갭 사이로 전기장 결합에 의해 유도된 전류가 진입하여 최종 측정 결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서 확인된 고주파 전기장 결합의 영향을 원천적으로 제거하기 위해서는 자기장 프로브의 구조 설계만으로는 한계점이 존재하고, 고주파 전기장 결합을 고려한 프로브 계수 추출 및 자기장 필드 보정 과정이 필수적으로 수반되어야 할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 근역장 자기 프로브의 보정 과정에서 발생하는 고주파 전기장 결합 현상의 영향을 제시하고 분석하였다. 주파수가 증가할수록 자기장 프로브와 측정 대상 시료간의 기생 커패시턴스에 의한 고주파 전기장 결합이 증가함을 확인하였으며, 전자기 시뮬레이션 결과를 기반으로 전기장 결합의 영향이 자기장 보정 결과의 고주파 오차 발생에 기여함을 검증하였다. 특히 이러한 전기장 결합 문제를 해결하기 위해서는 자기장 프로브의 설계뿐 아니라, 고주파 전기장 결합의 영향을 고려하거나 최소화 할 수 있는 보정법 개발의 접근이 필요하다. 본 연구 결과는 갈수록 고속화되는 무선기기의 무선주파수 간섭 노이즈 측정 시, 전기장 결합에 따른 고주파 측정결과 신뢰성 분석에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

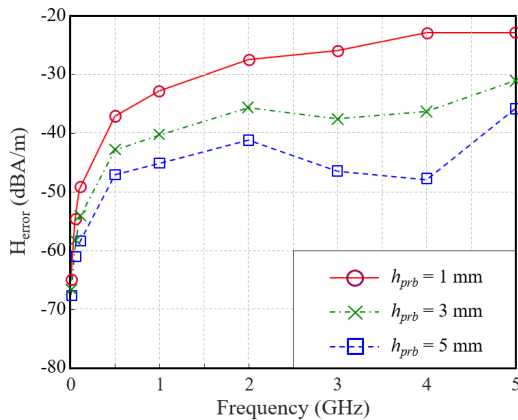


그림 6. 전기장 결합의 영향으로 인한 자기장 보정 결과의 오차

Fig. 6. Errors in the calibrated magnetic field due to the impact of electric field coupling.

References

- [1] S. Grivet-Talocia, M. Bandinu, F. Canavero, I. Kelandar, and P. Kotiranta, "Fast assessment of antenna-PCB coupling in mobile devices: A macromodeling approach," in *Proceedings of the 20th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Jan. 2009, pp. 193-196.
- [2] M. Ramdani, E. Sicard, A. Boyer, S. Ben Dhia, J. J. Whalen, and T. H. Hubing, et al., "The electromagnetic compatibility of integrated circuits—Past, present, and future," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 1, pp. 78-100, Feb. 2009.
- [3] J. Lee, H. H. Hsu, P. Davuluri, Y. Ho, and J. Chen, "Impact of broadband and out-of-band radio frequency interference(RFI) noise on WiFi performance," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Signal/Power Integrity(EMCSI)*, Aug. 2017, pp. 453-457.
- [4] D. Baudry, A. Louis, and B. Mazari, "Characterization of the open-ended coaxial probe used for near-field measurements in EMC applications," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 60, pp. 311-333, Mar. 2006.
- [5] S. Jarrix, T. Dubois, R. Adam, P. Nouvel, B. Azais, and D. Gasquet, "Probe characterization for electromagnetic near-field studies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 2, pp. 292-300, Feb. 2010.
- [6] H. H. Chuang, G. H. Li, E. Song, H. H. Park, H. T. Jang, and H. B. Park, et al., "A magnetic-field resonant probe with enhanced sensitivity for RF interference applications," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 6, pp. 991-998, Dec. 2013.
- [7] E. Song, H. H. Park, "A high-sensitivity electric probe based on board-level edge plating and LC resonance," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 24, no. 12, pp. 908-910, Dec. 2014.
- [8] J. Zhang, K. W. Kam, J. Min, V. V. Khilkevich, D. Pommerenke, and J. Fan, "An effective method of probe calibration in phase-resolved nearfield scanning for EMI application," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 3, pp. 648-658, Mar. 2013.
- [9] G. R. Choi, H. H. Park, "Analytical probe factor models for rectangular loop probes used in near-field measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 6, pp. 1781-1790, Dec. 2021.

송 익 환 [광운대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4176-6179>



2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학사)

2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)

2010년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학박사)

2011년~2013년: 삼성전자 글로벌기술센

터 책임연구원

2014년~현재: 광운대학교 전자통신공학과 교수

[주 관심분야] System-Level EMC/EMI, High-Speed Signal
Integrity/Power Integrity, Electromagnetic Measurements Tech-
nologies