

고주파 근역장 노이즈 측정을 위한 다층 인쇄회로기판 기반 자기장 프로브의 집전부 설계 구조 연구

Study on the Reception Structure Design of Magnetic Probes Based on Multilayer Printed Circuit Boards for High-Frequency Range Near-Field Noise Measurement

장 경 찬 · 송 익 환

Gyeongchan Jang · Eakhwan Song

요 약

본 논문에서는 다층 인쇄회로기판을 기반으로 설계된 자기장 근역장 프로브의 집전부 설계 구조에 따른 사례 분석 연구가 수행되었다. IEC 61967-3 표준의 프로브 전달 특성 평가법에 준거한 집전부 전달 특성 시뮬레이션 셋업을 구축하였으며, 집전부 성능을 평가하기 위해 전기장 저감비, 대역폭, 측정 감도를 성능 지표로 선정하였다. 자기장 프로브의 성능을 결정하는 집전부 구조의 설계 요소인 차폐 구조, 루프의 크기 및 턴 수, 루프와 차폐 구조 조합의 네 가지 사례에 대한 전자기 해석 시뮬레이션 기반 분석이 수행되었다. 각 사례에서의 집전부 성능을 비교 분석하였으며, 분석 결과를 토대로 고주파 측정 관점에서의 특성과 용도에 따른 집전부 루프 및 차폐 구조의 선정 방법을 제안하였다.

Abstract

In this study, a case study on the reception structure design of magnetic near-field probes based on multilayer printed circuit boards (PCBs) was conducted. The transfer function simulation setup of the reception structure design was established according to the probe transfer characteristic evaluation method based on the IEC 61967-3 standard, and the electric-field suppression ratio, bandwidth, and sensitivity were selected as performance indices to evaluate the reception performance. The electromagnetic simulation-based analysis was conducted for four cases: the shielding structure, the size and number of loops, and the combination of the loop and shielding structure, which determine the performance of magnetic near-field probes. The performance of the reception structure in each case was compared and analyzed, and based on the analysis results, a method of selecting the loop and shielding structure according to the characteristics and applications from a high-frequency measurement perspective was developed.

Key words: Near-Field Measurement, Magnetic Probe, Printed Circuit Boards, Electromagnetic Compatibility

「이 논문은 2021년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2020R1F1A1065960).」

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

· Manuscript received November 2, 2022 ; Revised November 25, 2022 ; Accepted November 30, 2022. (ID No. 20221102-002S)

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

I. 서 론

최근 디지털 시스템 내 송수신 데이터의 용량이 기하급수적으로 증가함에 따라 디지털 신호는 빠르게 고속화되고 있다. 고속화된 신호의 전송 환경에서는 시스템 내 근역장 노이즈로 인한 간섭 현상이 심화됨으로써 전자파 적합성(electromagnetic compatibility, EMC) 및 전자파 간섭(electromagnetic interference, EMI) 문제가 지속적으로 대두되고 있다^{[1],[2]}. 이를 해결하기 위해 디지털 시스템 내 고주파 근역장 노이즈원을 특정하기 위한 노이즈 측정 기술이 요구되고 있다.

노이즈원을 특정하기 위해 TEM-cell, surface scanning, electromagnetic probing 등의 근역장 측정 기술들이 활용되고 있으며, 편의성과 비용적인 면에서 이점을 가지는 전자기 프로브가 근역장 측정에 활용되고 있다^{[3]~[6]}. 전자기 프로브는 근역장 집전부 구조를 통해 노이즈원으로부터 발생된 전기장과 자기장을 측정하는 장비이며, 이중 자기장 프로브에는 자기장 노이즈를 측정하기 위해 루프 구조의 집전부 구조가 설계된다^[7]. 비차폐 자기장 프로브의 경우, 노이즈원의 전기장이나 외부 신호가 루프와 결합되어 정확한 자기장 노이즈 측정이 이루어지지 않으며, 고주파 노이즈 측정 시 해당 문제는 더욱 심화된다^[8]. 이를 위해 루프와 노이즈원의 전기장 결합을 저감하고, 자기장 집전 성능을 개선하기 위한 전기장 차폐 구조가 활용되며, 차폐 자기장 프로브의 집전 성능은 집전부 루프 및 차폐 구조 설계 방법에 따라 결정되므로 설계 목적에 따라 적합한 구조를 선정하는 것이 중요하다^{[9],[10]}.

본 논문에서는 자기장 프로브의 집전부 루프 및 차폐 구조 설계에 따른 고주파 노이즈 측정 성능의 분석연구 결과가 제시되었다. 설계 대상 구조는 다양한 집전부 설계 및 전기장 차폐 구조가 집적 가능한 다층 인쇄회로기판으로 설계되었으며, 전자기 해석 시뮬레이션 결과를 기반으로 집전부 루프 및 차폐 구조 설계에 따른 자기장 프로브의 전달함수 특성 분석이 수행되었다. 각 설계 구조에 따라 전기장 저감비(E-field suppression ratio, EFSR), 대역폭(bandwidth), 측정 감도(sensitivity)로 정의된 자기장 프로브의 성능을 비교 분석함으로써, 고주파 노이즈 측정 관점에서 자기장 프로브의 집전부 루프 및 차폐 구조의 선정 방법을 제안하였다.

II. 자기장 프로브의 Reference 설계 구조 및 성능평가 지표

그림 1은 본 연구에서 집전부 루프 및 차폐 구조의 설계에 따른 성능을 분석하기 위해 설계된 자기장 프로브의 reference 집전부 구조이다. 재현성과 정밀성을 확보하기 위해 다층 인쇄회로기판을 기반으로 설계되었으며, 기판 측면을 PEC(perfect electric conductor)로 도금 처리하여 외부 노이즈를 차단하였다. 각 설계 변수 및 기준 설계치는 표 1에 정리되었다.

본 논문에서는 집전부 구조의 성능을 평가하기 위해 IEC 61967-3 표준의 프로브 전달 특성 평가법을 기반으로

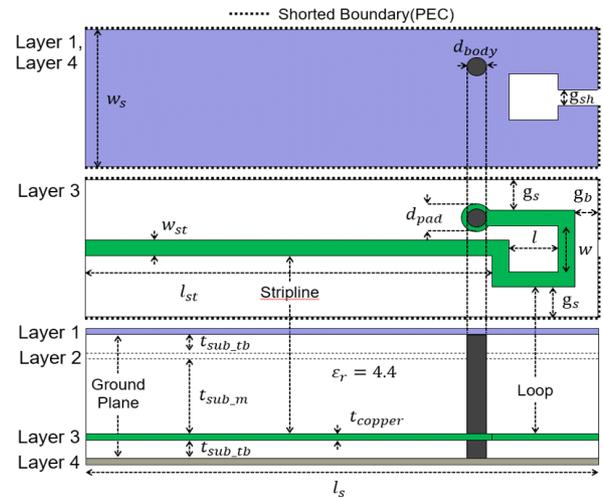


그림 1. 집전부 설계 구조와 스택업

Fig. 1. Designs and stackup of reception structure design.

표 1. 대상 집전부 구조의 설계 변수

Table 1. Design parameters of the reception structure design.

Parameter	Value [mm]	Parameter	Value [mm]
w_s	3.1	d_{body}	0.3
l_s	10	d_{pad}	0.5
w_{st}	0.2	t_{sub_tb}	0.2
l_{st}	8.4	t_{sub_m}	1.2
w	1	t_{copper}	0.018
l	1	g_b	0.2
g_{sh}	0.2	g_s	0.85

그림 2와 같이 전달 특성 시뮬레이션 셋업을 구축하였다^[5]. 그림 2(a)는 IEC 61967-3 표준의 측정 기반 프로브 전달 특성 평가법 셋업으로, 50 Ω으로 임피던스 매칭된 마이크로스트립을 근역장 노이즈원으로 하여 네트워크 분석기를 통해 프로브로 전달된 삽입 손실(S_{21})을 측정함으로써 프로브의 전달 특성을 추출한다. 본 논문의 설계 대상 구조는 프로브의 집전부 구조로서, 프로브 커넥터와 케이블 등 집전부 외 구조의 특성을 배제하기 위해 본 논문에서는 IEC 61967-3 표준 평가법에 준거하여 집전부 구조만을 대상으로 한 시뮬레이션 기반 셋업을 구축하였으며, 이를 그림 2(b)에 나타내었다. 본 논문에서는 폭, 길이, 높이가 각각 60 mm, 50 mm, 1.6 mm인 FR-4 기판에 50 Ω으로 임피던스 매칭된 3.4 mm 폭을 가지는 마이크로스트립 전송선로를 노이즈원으로 사용하였으며, 측정 높이는

1 mm로 설정하였다.

본 논문에서는 그림 2(b)의 셋업에서 집전부의 성능을 평가하기 위한 지표로서 EFSR, 대역폭, 측정 감도를 사용하였다. 대역폭은 프로브의 측정 각도가 0°일 때 전달 특성 내에서 발생된 1차 직렬 공진 주파수로 정의하였으며, 측정 감도는 프로브의 대역폭 내 전달 특성의 최댓값, EFSR은 프로브의 측정 각도(0°, 90°)에 따라 측정되는 자기장과 전기장의 측정 감도 차이로 정의하였다.

III. 자기장 프로브 집전부 구조에 따른 시뮬레이션 기반 성능 분석

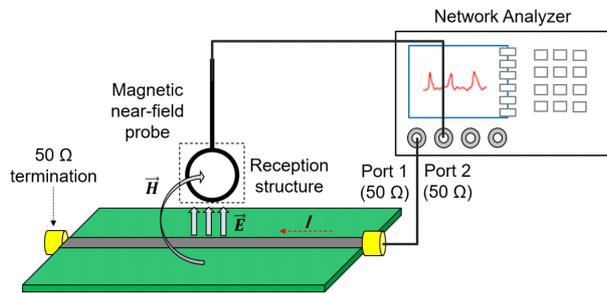
자기장 프로브의 집전 성능은 차폐 구조, 루프의 크기 및 턴 수, 루프와 차폐 구조의 조합에 의해 결정된다. 본 절에서는 위 네 가지 설계 요소에 대한 사례 분석을 진행하고, 고주파 노이즈 측정 관점에서 집전부 구조의 선정 방안을 제안하였다.

3-1 차폐 구조

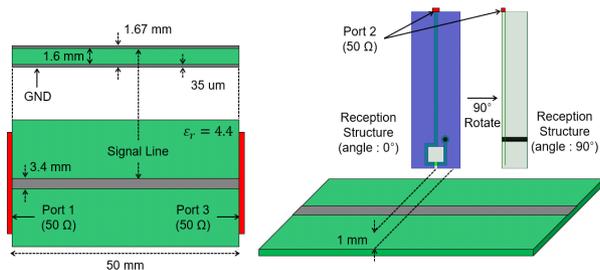
그림 3은 집전부 루프의 차폐 구조에 따른 설계 구조와 각 구조별 전달 특성을 보여준다. 그림 3(a)에서 루프 하단 차폐 구조의 갭(gap) 유무에 따라 갭 포함 차폐(이하 SWG)와 갭 미포함 차폐(이하 SWOG)로 각 구조를 정의하였으며, 차폐 구조가 적용되지 않은 비차폐 구조는 이하 US로 정의하였다^[6].

그림 3(b)에서 실선과 점선은 프로브의 각도가 각각 0°와 90°일 때의 전달 특성을 나타낸다. 차폐 루프 구조(SWG, SWOG)는 차폐 구조에 의해 루프와 노이즈원 간의 전기장 결합이 차단되어 전기장 측정 감도가 저감된 반면, US 구조는 루프가 노이즈원의 전기장에 온전히 노출되어 자기장과 전기장 모두 측정 감도의 변별력이 떨어지게 되어 낮은 EFSR 성능과 함께 자기장의 선택적 측정이 어려움을 알 수 있다.

차폐 루프 구조 중 SWOG 구조는 자기장 측정 감도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 노이즈원으로부터 발생된 자기장이 루프 구조를 이루는 차폐 구조와 결합하여 차폐 구조에 와전류(eddy current)를 유도하고, 와전류에 의해 발생된 역자기장과 노이즈원의 자기장이 서로 상쇄



(a) IEC 61967-3 표준의 측정 기반 프로브 전달 특성 평가법
(a) Measurement-based transfer characteristic evaluation method of probe based on IEC 61967-3 standard



(b) 집전부 구조의 전달 특성 시뮬레이션 셋업
(b) Transfer function simulation setup of the reception structure

그림 2. IEC 61967-3 표준 프로브 전달 특성 평가법 및 집전부 전달 특성 시뮬레이션 셋업

Fig. 2. IEC 61967-3 standard transfer characteristic evaluation method of probe and transfer function simulation setup of the reception structure.

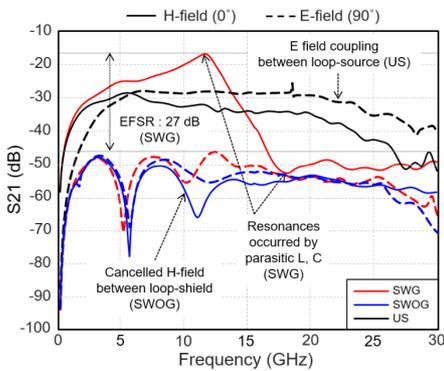
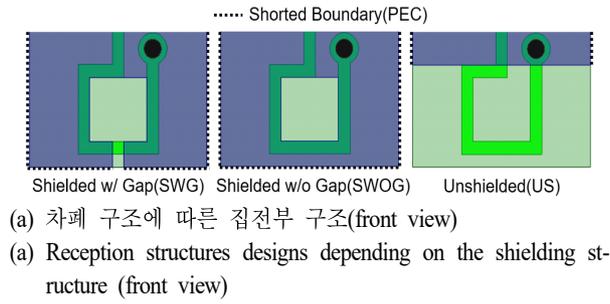
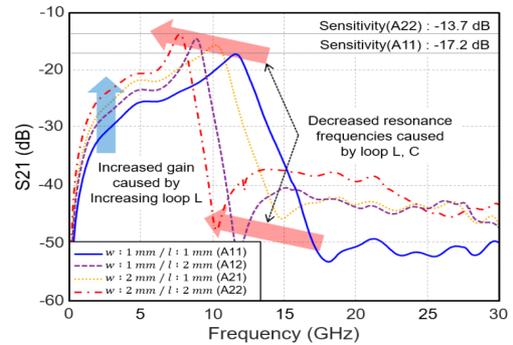
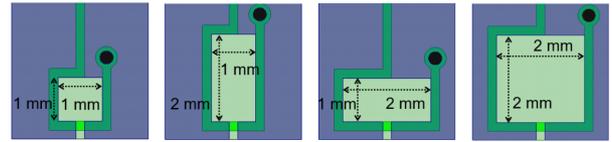


그림 3. 설계 구조의 차폐 유무에 따른 구조와 전달 특성 시뮬레이션 결과
 Fig. 3. Reception structure designs and transfer function simulation results of the target structure depending on the shielding structure.

되어 집전부 루프의 측정 감도를 열화시키기 때문이다. 이와는 달리 SWG 구조에서는 차폐 구조의 와전류 경로에 갭을 적용하여 단선시킴으로써 차폐 구조의 와전류 발생이 차단되며, 노이즈원의 자기장이 온전히 루프에 결합되도록 하여 높은 측정 감도와 함께 약 27 dB의 우수한 EFSR이 확보됨을 확인할 수 있다. 그러나 차폐 구조를 사용함으로써 루프 구조의 기생 성분이 증가하여 공진 현상이 발생되고, 주파수가 증가함에 따라 루프의 기생 성분으로 인해 자기장 측정 감도가 저하되어 17.8 GHz 이상의 주파수 대역에서는 낮은 EFSR 성능을 가짐을 알 수 있다. 따라서 고주파 근역장 노이즈의 고감도 측정을 위해서는 와전류를 차단할 수 있는 SWG 형태의 차폐 구조를 사용해야 하며, 그 사용 대역폭은 집전부 루프와 차폐 구조에 존재하는 기생 성분에 의해 제한된다.

3-2 루프의 크기

그림 4는 SWG 구조를 기반으로 한 루프 크기별 집전부 구조와 전달 특성 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4(a)에서 w 와 l 은 각각 루프의 폭과 길이를 나타낸다. 폭



(b) 전달 특성 시뮬레이션 결과(측정 각도: 0°)
 (b) Transfer function simulation results (measurement angle: 0°)

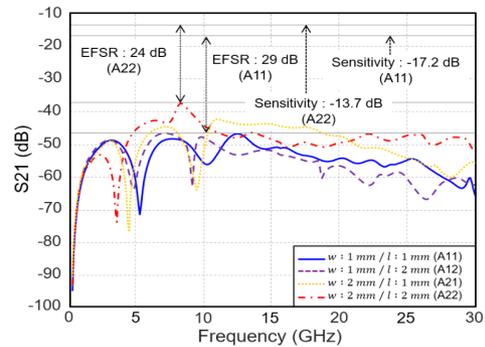


그림 4. 루프의 크기에 따른 구조와 전달 특성 시뮬레이션 결과
 Fig. 4. Reception structure designs and transfer function simulation results of the target structure depending on size of loop.

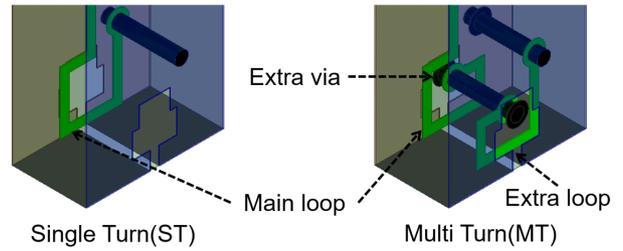
과 길이가 모두 1 mm인 구조(이하 A11), 모두 2 mm인 구조(이하 A22), 폭이 1 mm이고 길이가 2 mm인 구조(이하 A12), 폭이 2 mm이고 길이가 1 mm인 구조(이하 A21)로 각 구조를 정의하였다.

그림 4(b)는 프로브 각도가 0°인 경우의 각 구조별 전달 특성을 나타낸다. 루프의 면적이 가장 큰 A22 구조에서는 타 구조 대비 노이즈원으로부터 발생된 자기장이 크게 결합되어 측정 감도가 개선됨을 알 수 있다. 그러나 루프가 크게 설계될수록 넓어진 루프의 면적으로 인해 루프의 인덕턴스가 증가하고, 루프와 Layer 1, 4의 차폐 구조 간 커패시턴스가 증가하게 되어 공진 주파수가 감소하고 대역폭이 제한된다. 이는 루프의 크기에 따른 측정 감도와 대역폭 간 trade-off 관계가 있음을 보여준다. 그러나 실제 측정 환경에서 측정 감도는 증폭기(amplifier) 등의 외부 장비를 활용하여 개선이 가능한 반면, 대역폭 성능은 집전부의 설계 구조에만 의존하므로 집전부 설계 시 대역폭을 우선적으로 확보해야 함을 알 수 있다. 추가적으로 A11 구조와 A22 구조를 비교하였을 때, 두 구조의 EFSR은 각각 29 dB와 24 dB로 두 구조의 면적 비율인 4배를 감안하면 유의미한 차이를 보이지는 않는다. 이는 EFSR 측면에서 루프의 크기가 미치는 영향은 작다는 것을 의미한다.

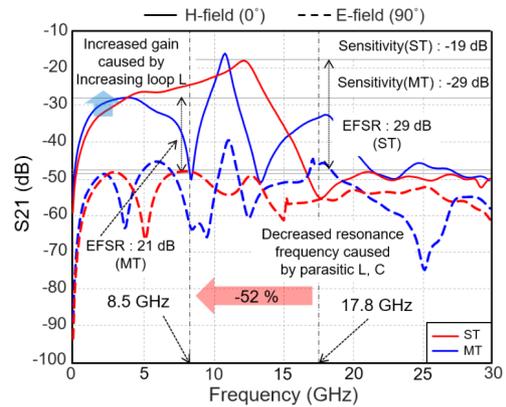
A12 구조에서는 루프의 면적이 동일한 A21 구조 대비 낮은 주파수에서 공진 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 A12 구조와 A21 구조에서 물리적인 루프의 길이가 각각 5.5 mm와 5 mm로 A12 구조가 상대적으로 큰 루프 인덕턴스를 갖기 때문이다. A21 구조는 노이즈원에 근접한 루프의 면적이 A12 구조 대비 크기 때문에, 노이즈원으로부터 발생된 자기장과의 결합량이 증가하여 대역폭 내에서 더 높은 측정 감도가 확보됨을 확인할 수 있다. 따라서 고주파 근역장 노이즈의 측정을 위해서는 기생 성분을 최소화하여 높은 대역폭을 확보할 수 있도록 루프 구조의 소형화 설계가 필요하며, 동일한 루프 면적 조건에서는 목표 대역 내 측정 감도를 확보하기 위하여 루프의 폭이 길이보다 우선하여 설계되어야 한다.

3.3 루프의 턴 수

그림 5는 루프의 턴 수에 따른 집전부 구조와 전달 특



(a) 루프 턴 수에 따른 집전부 구조(perspective view)
(a) Reception structure designs depending on number of loop (perspective view)



(b) 전달 특성 시뮬레이션 결과
(b) Transfer function simulation results

그림 5. 설계 구조의 루프 턴 수에 따른 구조와 전달 특성 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Reception structure designs and transfer function simulation results of the target structure depending on number of loop.

성 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 5(a)에서 루프의 턴 수가 1개인 단일 루프 구조(이하 ST)와 턴 수가 2개인 다중 루프 구조(이하 MT)로 각 구조를 정의하였다.

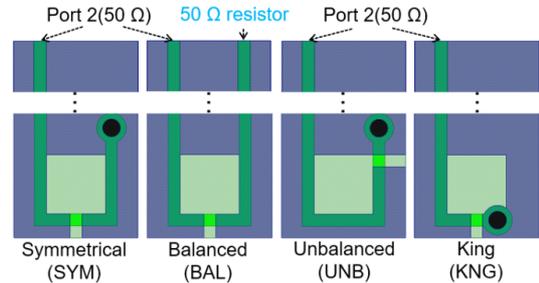
그림 5(b)에서 실선과 점선은 프로브의 각도가 각각 0°, 90°일 때 각 구조의 전달 특성을 나타낸다. 2턴 구조의 MT 구조에서는 집전부와 결합되는 근역장의 자속이 2배가 되어 약 4 GHz 이하 대역에서 높은 측정 감도를 가짐을 알 수 있다. 그러나 MT 구조에서는 다중 루프 구조에서 기인하는 큰 기생 성분으로 인해 ST 구조의 공진주파수인 17.8 GHz 대비 52% 열화된 8.5 GHz로 대역폭이 제한됨을 확인할 수 있다. ST 구조와 MT 구조의 EFSR은 각각 29 dB와 21 dB로, ST 구조에서 높은 EFSR 성능을

가짐을 알 수 있다. 본 절의 사례에서 루프의 턴 수에 따른 대역폭과 측정 감도 간 trade-off 관계가 보이나, MT 구조에서는 기생 성분으로 인해 대역폭이 심각하게 열화되어 낮은 주파수 대역에서의 측정 감도가 높은 것을 알 수 있다. 따라서 고주파 근역장 노이즈의 측정을 위해서는 최소화된 기생 성분으로 인한 높은 대역폭 성능과 EFSR 성능을 가지는 ST 구조를 사용해야 한다.

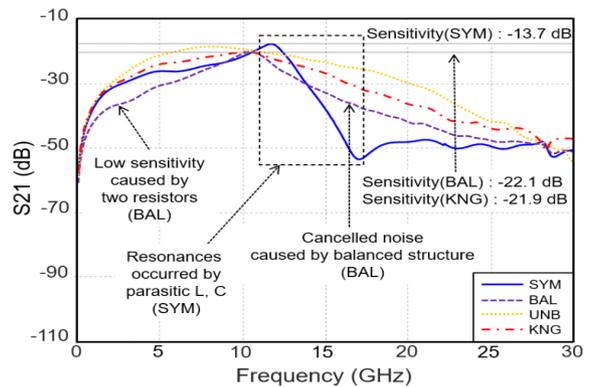
3.4 루프와 차폐 구조의 조합

그림 6은 루프와 차폐 구조의 조합에 따른 자기장 근역장 프로브의 집전부 구조와 전달 특성 시뮬레이션 결과를 보여준다¹⁰⁾. 그림 6(a)에서 비아로 종단된 1턴 루프와 중앙 갭 차폐 구조의 조합(이하 SYM), 1턴 후 회귀하는 전송선로 구조로 설계되는 루프와 중앙 갭 차폐 구조의 조합(이하 BAL), 비아로 종단된 1턴 루프와 루프 종단 지점 직전에 갭이 설계된 차폐 구조의 조합(이하 UNB), 0.5턴 루프와 중앙 갭 차폐 구조의 조합(이하 KING)으로 각 구조를 정의하였다. 본 연구의 reference 구조에서는 전송선로가 루프 구조의 중앙에서 배선되지만, BAL 구조는 루프가 회귀하는 전송선로 구조로 설계되기 때문에 루프 구조의 중심으로 배선이 불가능하다. 이에 따라 본 절에서는 각 구조 간 공평한 비교를 위해 집전부의 전송선로를 BAL 구조와 같이 회귀하는 구조로 설계하였다.

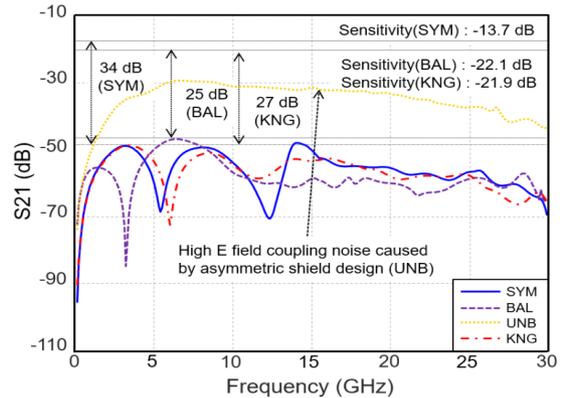
그림 6(b) 및 그림 6(c)는 프로브의 각도가 각각 0°, 90° 일 때 각 구조의 전달 특성을 나타낸다. UNB 구조는 중앙 갭 차폐 구조로 설계된 SYM, BAL, KING 구조와 달리 자기장과 전기장 모두 높은 측정 감도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 중앙에 갭이 설계되는 차폐 구조는 좌우 대칭 구조가 되어 차폐 구조에 유도된 공통 모드 전류가 서로 상쇄되기 때문이다. 따라서 그림 6(c)에서 중앙 갭 차폐 구조로 설계된 SYM, BAL, KING 구조의 EFSR은 각각 34 dB, 25 dB, 27 dB로 높은 EFSR 성능이 확보됨을 확인할 수 있다. 이와는 달리 UNB 구조와 같이 갭이 중앙에 설계되지 않는 비대칭 차폐 구조는 공통 모드 전류가 상쇄되지 않아 전기장 근역장 노이즈가 함께 측정된다. 따라서 UNB 구조는 낮은 EFSR 성능을 가지며, 자기장의 선택적 측정이 어려움을 알 수 있다.



(a) 루프 및 차폐 구조 조합에 따른 집전부 구조
(a) Reception structure designs depending on combination of loop and shield



(b) 전달 특성 시뮬레이션 결과(측정 각도: 0°)
(b) Transfer function simulation results (measurement angle: 0°)



(c) 전달 특성 시뮬레이션 결과(측정 각도: 90°)
(c) Transfer function simulation results (measurement angle: 90°)

그림 6. 설계 구조 내 루프 및 차폐 구조의 조합에 따른 구조와 전달 특성 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Reception structure designs and transfer function simulation results of the target structure depending on combination of loop and shield.

SYM 구조는 본 연구의 reference 구조에 적용된 구조로 타 구조 대비 낮은 대역폭이 확보됨을 확인할 수 있다. 이는 차폐 구조를 사용함으로써 증가된 루프 구조의 기생 성분으로 인해 공진 현상이 발생되기 때문이다. BAL 구조는 balanced 전송선 구조에 의해 공진 등의 노이즈가 상쇄되어 높은 대역폭 성능을 가짐을 알 수 있다. 그러나 50 Ω 종단 저항으로 인해 단일 50 Ω 측정 포트를 사용하는 집전부 구조 대비 측정 감도는 저하된다.

KNG 구조는 SYM, BAL 구조 대비 높은 자기장 측정 감도와 함께 우수한 대역폭 성능을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 KNG 구조가 차폐 구조의 중앙 갭 직후 루프가 종단되어 물리적으로는 0.5턴 루프이나 대칭 구조에서 발생하는 이미지 효과로 인해 전기적으로는 1턴 루프로 동작하기 때문이다. KNG 구조에서 물리적으로 짧은 루프의 기생 성분으로 인해 공진 주파수는 고주파 대역으로 증가하여 높은 대역폭이 확보되고, 전기적인 1턴 루프와 동일한 자기장 결합을 통해 높은 측정 감도가 확보됨을 알 수 있다.

본 절의 사례 분석을 통해 자기장의 선택적 측정을 위해서는 중앙 갭 차폐 구조를 사용해야 하며, 고주파 근역장 노이즈의 고감도 측정을 위해서는 높은 대역폭과 측정 감도를 확보할 수 있는 KNG 구조가 가장 적합함을 알 수 있다.

3-5 고주파 근역장 노이즈 측정을 위한 집전부 루프 및 차폐 구조의 선정

본 절에서는 집전부 성능 평가 지표인 EFSR, 대역폭, 측정 감도에 대하여 각 평가 지표에서 우수한 성능을 보이는 구조를 표 2에 정리하였으며, 그 중 자기장의 선택적 측정이 어려운 US 구조와 UNB 구조는 제외되었다.

전기장 차폐 성능의 평가지표인 EFSR을 확보하기 위해서는 와전류를 차단할 수 있는 SWG 형태의 차폐 구조와 함께 ST 구조를 사용해야 하며, 차폐 구조는 전기장 노이즈로 인한 공통 모드 전류를 상쇄하는 중앙 갭 차폐 구조로 설계된 SYM, BAL, KNG 구조로 설계되어야 함을 알 수 있다.

평가 지표 중 전기장 노이즈 차폐 성능을 나타내는

표 2. 성능 지표 관점에서의 각 사례별 우수 설계 구조 비교

Table 2. Comparison of best design structures for each case from a performance index perspective.

Performance index \ Case	EFSR	Bandwidth	H-field sensitivity
Shielding	SWG	-	SWG
Loop size	-	Small loop	Large loop
Number of turns	ST	ST	MT
Combination of loop and shielding	SYM, BAL, KNG	BAL, KNG	KNG>SYM >BAL

EFSR은 독립적인 성능을 평가할 수 있는 반면, 대역폭과 측정 감도는 trade-off 관계를 가지므로 두 평가지표를 모두 고려한 선정 방법론을 제안하였다. 고주파 노이즈 측정을 위한 대역폭 확보를 위해서는 루프의 기생 성분 최소화를 위해 소형화 설계된 ST 구조와 함께 중앙 갭 차폐 구조로 설계되는 BAL, KNG 구조를 사용해야 함을 확인하였다. 더불어 측정 감도를 확보하기 위한 구조로는 SWG, KNG, 면적이 넓은 루프 구조(large loop) 및 다중 루프 구조(MT)가 적합한 것을 확인할 수 있으며, 이 중 KNG 구조가 고주파 대역폭과 높은 측정감도를 동시에 만족하는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 자기장 근역장 프로브의 집전부 설계 구조에 따른 전자기 시뮬레이션 기반 사례 분석이 수행되었다. 대상 구조인 프로브 집전부 구조의 전달 특성을 온전하게 분석하기 위해 시뮬레이션 기반으로 평가 셋업을 구축하였으며, 집전부의 성능을 평가하기 위한 지표로서 EFSR, 대역폭, 측정 감도를 선정하였다.

자기장 프로브의 차폐구조, 루프의 크기 및 턴 수, 루프와 차폐 구조의 조합으로 이루어진 네 가지의 사례분석을 통하여 고주파 자기장 근역장 측정 프로브 설계 관점에서의 집전부 구조 선정 방법을 제안하였다. EFSR 관점에서는 SWG 구조가 적용된 ST 구조, SYM, BAL, KNG

구조의 성능이 우수함을 확인하였다. 대역폭과 측정 감도 평가지표는 여러 구조에서 trade-off 관계를 확인할 수 있었으나, 이를 동시에 만족시키는 구조로서 KNG 구조가 가장 적합함을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 고주파 자기장 프로브의 집전부 루프 및 차폐 구조 선정 방법은 고주파 자기장 프로브 설계 시 목적과 용도에 따른 적합한 초기 설계 구조를 선정하는 데에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] E. Bogatin, *Signal Integrity: Simplified*, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2004.
- [2] M. Horowitz, C. K. K. Yang, and S. Sidiropoulos, "High-speed electrical signaling: Overview and limitations," *IEEE Micro*, vol. 18, no. 1, pp. 12-24, Jan.-Feb. 1998.
- [3] *Integrated Circuits-Measurement of Electromagnetic Emissions, 150 kHz to 1 GHz-Part 2: Measurement of Radiated Emissions-TEM Cell and Wideband TEM Cell Method*, IEC 61967-2, Sep. 2005.
- [4] *Integrated Circuits-Measurement of Electromagnetic Emissions, 150 kHz to 1 GHz-Part 6: Measurement of Conducted Emissions-Magnetic Probe Method*, IEC 61967-6, Jun. 2002.
- [5] *Integrated Circuits-Measurement of Electromagnetic Emissions, 150 kHz to 1 GHz-Part 3: Measurement of Radiated Emissions-Surface Scan Method*, IEC 61967-3, Jun. 2005.
- [6] D. Baudry, C. Arcambal, A. Louis, B. Mazari, and P. Eudeline, "Applications of the near-field techniques in investigations," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 4, pp. 485-493, Aug. 2007.
- [7] H. Whiteside, R. King. "The loop antenna as a probe," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 12, no. 3, pp. 291-297, May 1964.
- [8] C. F. M. Carobbi, L. M. Millanta, and L. Chiosi, "The high-frequency behavior of the shield in the magnetic-field probes," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record*, Washington, DC, Aug. 2002, pp. 35-40.
- [9] D. C. Smith, "Signal and noise measurement techniques using magnetic field probes," in *1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record*, Seattle, WA, Aug. 1999, pp. 559-563.
- [10] E. Roy, P. Semiconductors, "Probing the magnetic field probe," 2003. Available: https://www.proxmark3.org/files/Documents/Antennas/Probes/Probing_the_Magnetic_Field_Probe.pdf

장 경 찬 [광운대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8783-9540>



2020년 2월: 동양미래대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2022년 8월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] System-Level EMC/EMI, High Frequency Noise Measurement Techniques

송 익 환 [광운대학교/교수]

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



2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2010년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2011년~2013년: 삼성전자 글로벌기술센터 책임연구원

2014년~현재: 광운대학교 전자통신공학과 교수
 [주 관심분야] System-Level EMC/EMI, High-Speed Signal Integrity/Power Integrity, Electromagnetic Measurements Technologies