

## 마이크로스트립 선로를 이용한 EMI 시트의 광대역 자기장 차폐 측정 방법

### Wideband Magnetic Field Shielding Measurement Method of EMI Sheets Using Microstrip Lines

박 현 호 · 김 철 수\*

Hyun Ho Park · Cheolsoo Kim\*

#### 요 약

본 논문에서는 전자파 간섭(EMI)을 차단하거나 억제하기 위해 사용되는 얇은 EMI 시트의 근역 자기장 차폐 특성을 측정하는 IEC 62333-2 표준 방법과 마이크로스트립 선로를 이용한 측정 방법을 수치해석을 통해 비교 검토하였다. 근역 자기장을 발생시키는 소스(source)로서 제안된 마이크로스트립 선로를 IEC 62333-2 방법에서 제시된 원형 루프 프로브와 비교하였을 때, 비록 자기장의 세기는 약하지만 광대역의 균일한 근역 자기장을 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 수신 프로브로 원형과 사각형 루프를 비교하였는데, 결합 특성은 사각형 루프가 더 우수하였고, 수신 프로브의 변위에 따른 차폐효과 오차는 원형 루프가 더 작았다.

#### Abstract

In this study, the near magnetic field shielding measurement method using a microstrip line is analyzed and compared with the IEC 62333-2 standard method for thin electromagnetic interference (EMI) sheets that are used to prevent or suppress the noise coupling through numerical simulation. A comparison of the microstrip line as a source for generating a near magnetic field with the circular loop probe presented in the IEC 62333-2 method confirmed that although the strength of the magnetic field was weak, it could generate a uniform near magnetic field in a wide frequency range. In addition, for a receiving probe, the rectangular loop showed better coupling characteristics than the circular loop.

Key words: EMI Sheet, IEC 62333-2, Loop Probe, Microstrip-Line

#### I. 서 론

모바일 기기를 포함한 전자기기들의 동작 속도가 빨라짐에 따라 기기 내에서 발생하는 전자파 간섭(electro-

magnetic interference, EMI) 문제는 제품 설계에서 중요한 이슈가 되고 있다<sup>[1]</sup>. 근거리 전자파 간섭 문제를 해결하거나 완화하기 위해서 많이 사용하는 것이 두께가 얇은 EMI 시트이다<sup>[2]</sup>. 이들은 노이즈 소스(source)를 차폐 또는

수원대학교 전기전자공학부(School of Electric & Electronic Engineering, The University of Suwon)

\*㈜이엠시스(EMCIS Co., Ltd)

· Manuscript received June 7, 2023 ; Revised June 19, 2023 ; Accepted July 14, 2023. (ID No. 20230607-038)

· Corresponding Author: Hyun Ho Park (e-mail: hhpark@suwon.ac.kr)

흡수하거나 노이즈 결합(coupling) 경로를 차단시켜준다<sup>[3]</sup>. 이러한 EMI 시트, 특히 자성 시트의 근역 자기장 결합 특성을 측정하기 위한 표준 방법으로 IEC 62333-2가 있는데<sup>[3]</sup>, 원형 루프(loop)를 근역 자기장을 발생시키는 소스와 수신 프로브(probe)로 사용하고 있다.

본 논문에서는 수치해석을 통해서 근역 자기장 소스에서 원형 루프 구조뿐만 아니라, (정)사각형 루프 그리고 마이크로스트립 선로 구조를 비교하였다. 또한 수신 프로브로서 원형 및 사각형 루프의 특성도 비교하였다. 결과적으로 어떤 구조의 조합(소스와 수신 프로브)이 근역 자기장 차폐 측정을 위해서 가장 효과적인지를 분석하였다.

## II. 수치해석 구조 및 결과

### 2-1 해석 구조

그림 1에서는 네 가지 근역 자기장 차폐 측정 방법들을 도시하였다. 첫 번째는 IEC 62333-2에서 제시된 두 원형 루프를 소스와 수신 프로브를 이용하는 방법(cir-cir)<sup>[4]</sup>, 두 번째는 (정)사각형 루프를 이용하는 방법(rect-rect), 세 번째는 근역 자기장 소스로는 마이크로스트립 선로를 사용하고, 수신 프로브로는 원형 루프를 이용하는 방법(micro-cir), 네 번째는 마이크로스트립 선로와 사각형 루프를 이용하는 방법(micro-rect)이다. 원형 루프의 경우, 반경은  $lr$  이고, 정사각형 루프는 한 변의 길이가  $lp$ 이다. 루프 와이어(wire)의 두께는  $lt$ 인데, 1.5 mm로 설정하였다. 마이크로스트립 선로는 폭이 3.78 mm이고 길이는  $tl$ 이며 50 Ω으로 종단되어 있다. 마이크로스트립 선로의 인쇄회로기판 크기는 140 mm × 140 mm이며, 두께가 2 mm인 FR4 유전체로 되어 있다. 자기장을 발생시키는 아래쪽 소스 루프나 마이크로스트립 선로에 포트(port) 1을 설정하고(1 W 인가), 위쪽 수신 루프에는 포트 2를 설정하여 두 루프 간의 결합 특성을 산란 파라미터의  $S_{21}$ 을 통해 계산하였다. 자성 흡수 시트의 크기는 140 mm × 140 mm이고 두께는  $t$ 인데, 여기서는 1 mm로 가정하였고, 소스와 수신 루프 사이에 삽입되어 있다. 3차원 전자파 수치해석은 CST사의 Microwave Studio를 사용하여 3 GHz까지 수행하였다<sup>[5]</sup>. 네 가지 구조에서 루프 프로브의 크기인  $lr$ 과  $lp$ , 마이크로스트립 선로의 길이인  $tl$ 이 변화함에 따라 소스의 자기

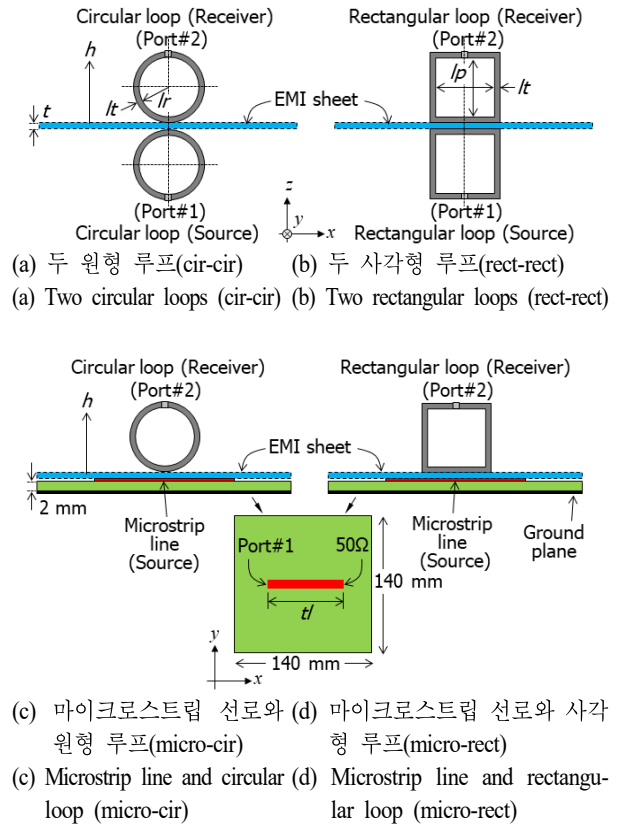


그림 1. 근역 자기장 차폐 측정 방법들(해석 구조)

Fig. 1. Near magnetic shielding measurement methods (simulation geometries).

장 특성, 소스와 수신 루프 사이의 결합 특성, 자성 흡수 시트가 있을 때의 차폐 특성, 그리고 수신 프로브의 변위에 따른 차폐효과의 오차를 비교 분석하였다.

### 2-2 소스의 자기장 특성 분석

우선 그림 1의 구조에서 EMI 시트와 수신 프로브가 없을 때 세 가지 자기장 소스 구조(원형 루프, 사각형 루프, 마이크로스트립 선로)에 대한 10 MHz, 100 MHz, 그리고 1 GHz에서의 근역 자기장 세기를 비교하였다. 그림 2는 소스로부터 1 mm 위의 면(EMI 시트의 표면)으로부터 높이  $h$ 에서의 자기장의 세기를 보여준다. 10 MHz와 100 MHz에서는 원형 및 사각형 루프가 마이크로스트립 선로에 비해 5~8 dB 정도 강한 자기장 세기를 보였고, 1 GHz에서는 오히려 마이크로스트립 선로가 더 큰 자기장 세

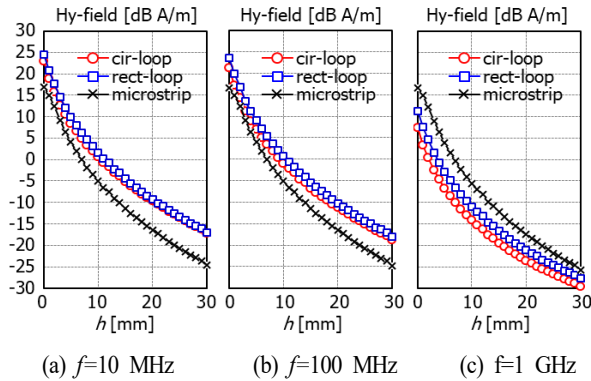


그림 2. 자기장 소스로부터의 거리에 따른 자기장 세기 ( $lr=12$  mm,  $lp=20$  mm,  $tl=60$  mm)

Fig. 2. Comparison of near magnetic field intensity according to distance ( $lr=12$  mm,  $lp=20$  mm,  $tl=60$  mm).

기를 보였다. 원형 루프의 직경( $2lr=24$  mm)이 사각형 루프의 한 변의 길이( $lp=20$  mm)보다 큼에도 불구하고, 주파수에 상관없이 사각형 루프에 의해 발생하는 근역 자기장이 최대 약 3 dB 정도 강하게 나타났다.

세 가지 자기장 소스 구조에서 발생하는 근역 자기장의 주파수 특성을 좀 더 명확히 살펴보기 위해서 그림 3에서는 세 구조의 크기( $lr$ ,  $lp$ ,  $tl$ )가 변할 때  $h=5$  mm에서의 주파수에 따른 자기장의 세기를 비교하였다. 원형과 사각형 루프의 경우, 그 크기가 감소하면 자기장도 급격히 감소한 반면, 마이크로스트립 선로의 경우 선로의 길이가 감소하여도 자기장의 세기가 크게 줄어들지 않았다. 또한

그림 2에서 보았듯이, 마이크로스트립 선로는 저주파수에서부터 1 GHz까지 거의 균일한 크기의 자기장을 발생시키는 반면 원형 및 사각형 루프의 경우 그 크기에 따라 40~200 MHz 정도부터 자기장의 세기가 급격히 감소하였다. 결과적으로 마이크로스트립 선로는 원형 및 사각형 루프에 비해서 자기장의 세기는 약하지만 광대역에서 균일한 세기의 자기장을 발생시킬 수 있으며, 선로의 길이 변화에 따른 자기장 세기의 변화도 적다. 마이크로스트립 라인 소스의 경우 선로의 길이가 변화하더라도 선로와 접지면과의 두께는 일정하기 때문에 수신 프로브 방향(z축 방향)으로 근역 자기장의 주파수에 따른 변화가 적게 나타난다. 다만 약한 자기장의 세기는 10 dB 이상의 증폭기를 사용하면 충분히 극복될 수 있을 것이다.

### 2.3 소스와 수신 프로브 간 결합 특성 분석

다음은 소스 루프와 수신 루프 간 또는 마이크로스트립 소스와 수신 루프 간 자기장 결합(coupling) 특성을 2 포트 해석을 통해 분석하였다. 그림 4에서는 그림 1의 네 가지 측정 구조에서 EMI 시트가 없을 때 소스와 수신 루프의 크기( $lr$ ,  $lp$ ,  $tl$ ) 변화에 따른  $S_{21}$ 을 비교하였다. 원형과 사각형 루프 프로브의 경우에는 결합 특성이 저주파수에서부터 20 dB/decade로 증가하다가, 그 크기에 따라 약 200 MHz~1 GHz에서부터 감소하는 반면 마이크로스트립 선로의 경우에는 결합 특성이 감소하지 않는다. 원형과 사각형 루프의 경우 결합 특성이 감소하기 시작하는 주파수를 고주파수로 확장시키려면 루프의 크기를 줄여야 한다. 하지만 이렇게 하면 결합 특성이 감소하게 된다. 결과적으로 두 루프 간 결합 특성에 비해 마이크로스트립 선로와 루프 간 결합 특성이 상대적으로 낮지만, GHz 이상의 주파수 대역까지 감소 없이 이를 유지할 수 있으며, 선로의 길이나 루프의 크기가 작아져도 결합 특성의 감소가 루프만 사용하는 구조에 비해 상대적으로 적음을 알 수 있다.

루프 또는 마이크로스트립 선로 소스와 수신 프로브 간의 자기장 결합 특성을 잘 나타내는 것이 그들 간의 상호 인덕턴스이다. 표 1에서는 네 가지 구조에 대한 100 MHz에서의 상호 인덕턴스를 비교하였다. 수치해석으로 계산된 2 포트 산란 파라미터를 이용하여 임피던스( $Z$ ) 파

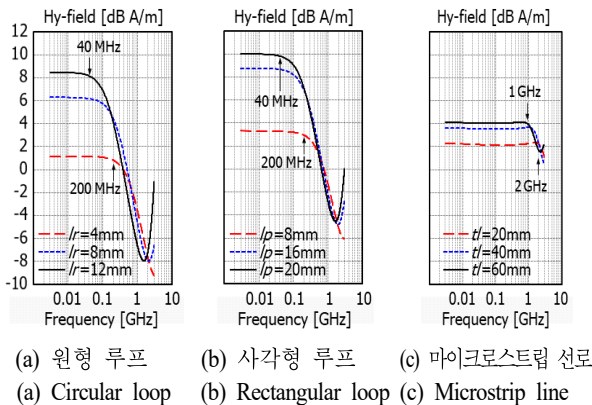


그림 3. 주파수에 따른 세 소스 구조의 자기장 변화 ( $h=5$  mm)

Fig. 3. Comparison of magnetic field according to frequency.

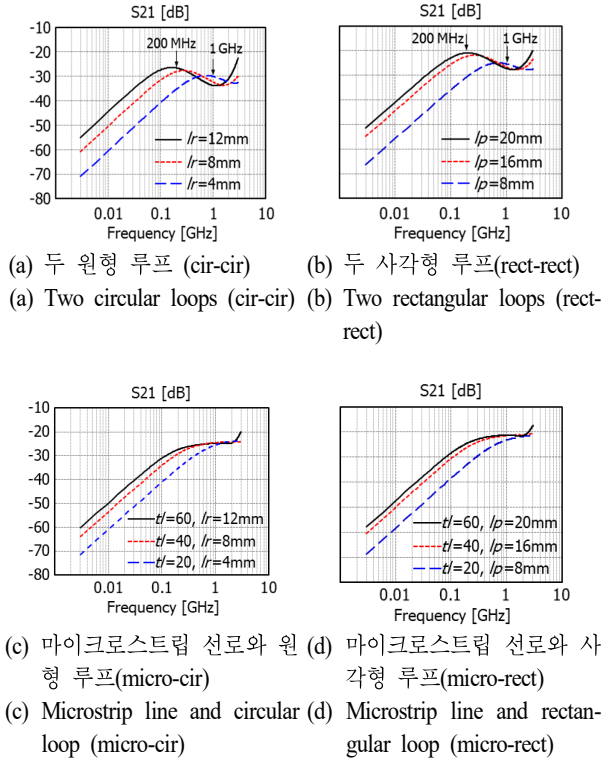


그림 4. 네 가지 측정 구조의 자기장 결합 특성( $S_{21}$ ) 비교  
Fig. 4. Comparison of magnetic couplings of four geometries.

표 1. 네 가지 자기장 결합 구조에 대한 100 MHz에서의 상호 인덕턴스

Table 1. Mutual inductance at 100 MHz of four magnetic coupling structures.

Two circular loops (cir-cir)			Two rectangular loops (rect- rect)		
$lr=12\text{ mm}$	$lr=8\text{ mm}$	$lr=4\text{ mm}$	$lp=20\text{ mm}$	$lp=16\text{ mm}$	$lp=8\text{ mm}$
2.413 nH	1.222 nH	0.373nH	3.601 nH	2.437 nH	0.648 nH
Microstrip line and circular loop (micro-cir)			Microstrip line and rectangular loop (micro-rect)		
$tl=60\text{ mm}, lr=12\text{ mm}$	$tl=60\text{ mm}, lr=8\text{ mm}$	$tl=40\text{ mm}, lr=4\text{ mm}$	$tl=60\text{ mm}, lp=20\text{ mm}$	$tl=40\text{ mm}, lp=16\text{ mm}$	$tl=20\text{ mm}, lp=8\text{ mm}$
1.303 nH	0.844 nH	0.357 nH	1.714 nH	1.262 nH	0.484 nH

라미터를 추출하였고,  $Z_{21}$ 을 통해 상호 인덕턴스를 계산하였다. 그림 4의 결과와 동일하게 두 사각형 루프 프로브를 사용했을 때 상호 인덕턴스가 가장 크며, 소스로 마이크로스트립 선로를 사용하였을 때 소스와 프로브의 크기에 따른 상호 인덕턴스의 차이가 가장 적게 나타났다.

## 2.4 차폐효과 분석

그림 5에서는 1 mm 두께의 EMI 시트에 대한 네 가지 측정 방법에서의 근역 자기장 차폐효과를 비교하였다. 수치해석에서 사용된 EMI 시트의 주파수에 따른 상대 투자율은 그림 5(a)에 도시되어 있다. 그림 5(b)에서 보듯이 근역 자기장 차폐효과는 자기장 소스와 수신 루프의 구조에 따라 달라짐을 알 수 있다. 따라서 근역 자기장 차폐효과를 나타낼 때는 측정 방법과 조건을 명확히 제시할 필요가 있다. 두 원형 루프 프로브를 이용했을 때(cir-cir) 가장 낮은 근역 자기장 차폐효과를 보인 반면 마이크로스트립 선로와 사각형 루프 프로브를 이용했을 때(micro-rect) 가장 높은 차폐효과를 보였다. 이들의 차이는 6 dB 가까이 되었다. 또한 원형 루프에 비해 사각형 루프가 더 높은 차폐효과를 보였다. 해석에 사용된 EMI 시트의 근역 자기장 차폐효과는 저주파수에서 약 20 dB 내외의 값을 가지며, 주파수가 증가하면서 상대 투자율이 감소하므로 차폐효과도 줄어들었다.

그림 6에서는 자기장 소스와 수신 프로브의 크기( $lr$ ,  $lp$ ,  $tl$ )에 따른 차폐효과 변화를 살펴보았다. 자기장 소스와 수신 프로브의 크기가 작아짐에 따라 차폐효과는 증가하

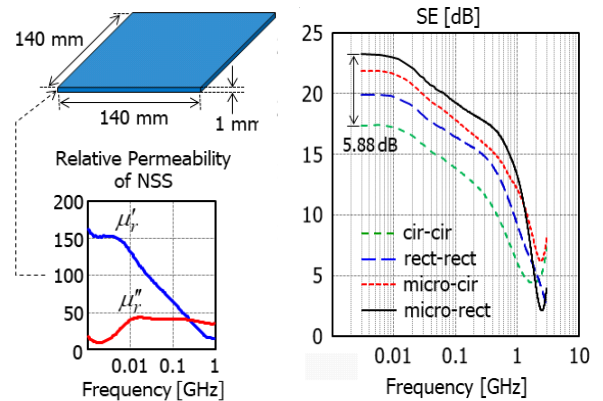


그림 5. 네 가지 측정 방법의 차폐효과 비교  
Fig. 5. Comparison of shielding effectiveness (SE) of four measurement configurations ( $lr=12\text{ mm}$ ,  $lp=20\text{ mm}$ ,  $tl=60\text{ mm}$ ).

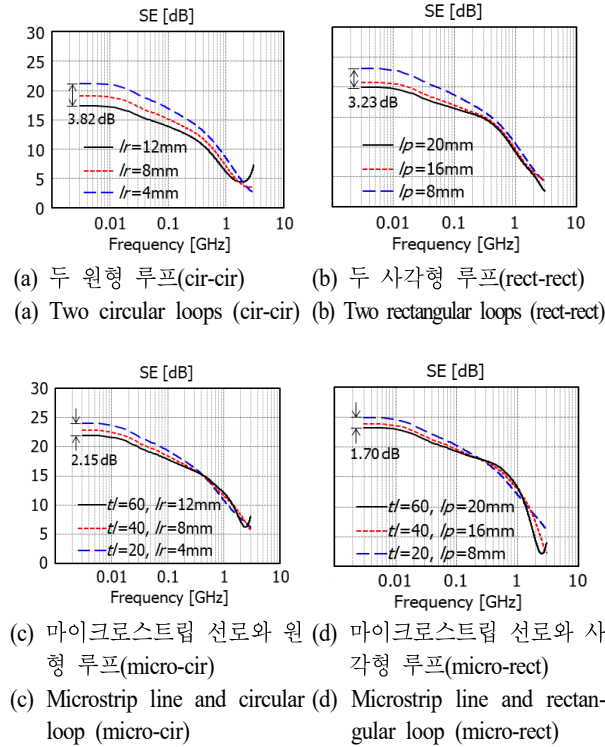


그림 6. 자기장 소스와 수신 프로브의 크기에 따른 차폐효과  
Fig. 6. SE due to size of loop probes and microstrip line.

였다. 그리고 자기장 소스로서 마이크로스트립 선로를 사용할 때 소스와 수신 프로브의 크기 변화에 따른 차폐효과와 변화는 약 2 dB 정도로 원형이나 사각형 루프를 사용할 때보다 많이 감소함을 알 수 있다.

## 2.5 수신 프로브의 변위에 따른 차폐효과 오차 분석

마지막으로 EMI 시트의 근역 자기장 차폐효과 측정 시 소스의 중심과 수신 프로브의 중심 위치가 정확히 일치하지 않을 때 발생하는 측정 오차를 분석하였다. 그림 7에서는 자기장 소스로 루프를 사용할 때와 마이크로스트립 선로를 사용할 때의 y축 방향의 수신 루프 프로브의 변위( $\Delta y$ )를 나타내었다. 그림 8에서는 네 가지 차폐 측정 방법에서 수신 루프 프로브의 변위에 따른 차폐효과 오차( $\Delta SE$ )를 비교하였다. 여기서 오차( $\Delta SE$ )는 소스와 수신 프로브의 중심이 일치할 때의 차폐효과(정확한 값)와 변위된 수신 프로브의 위치에서 계산된 차폐효과(부정확한 값)의 차이를 말한다. 이 때 루프의 와이어(wire) 두께

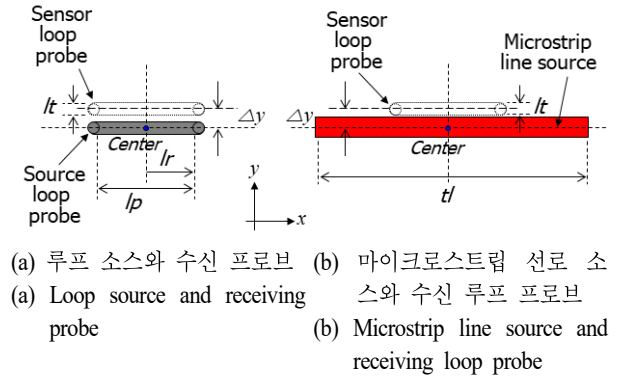


그림 7. 자기장 소스 중심으로부터 수신 루프 프로브의 변위  
Fig. 7. Displacement of receiving loop probe from center of source probe.

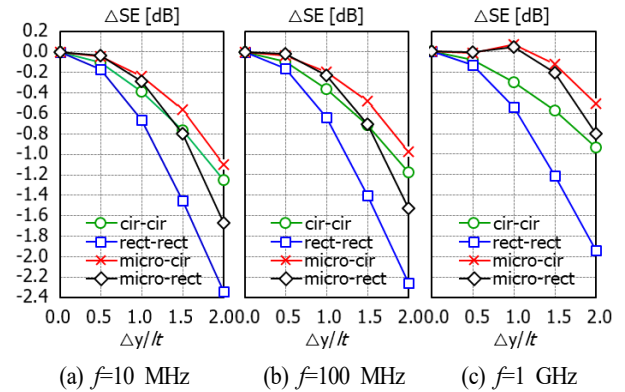


그림 8. 수신 루프 프로브의 변위에 따른 차폐효과 오차  
Fig. 8. Errors of SE due to displacement of receiving loop probe ( $l=12$  mm,  $p=20$  mm,  $t=60$  mm).

( $lt$ )는 1.5 mm인데, 변위  $\Delta y$ 를  $lt$ 로 정규화하여 나타내었다. 변위가 3 mm까지 증가할수록 차폐효과는 감소하고 오차는 증가하였다. 소스와 수신 프로브가 모두 사각형 루프(rect-rect)일 때 10 MHz에서 약 2.4 dB 차폐효과가 감소하였고, 원형 루프의 경우(cir-cir)에는 이보다 오차가 줄었다. 마이크로스트립 선로 소스와 원형 루프를 사용할 때는 오차가 약 1.1 dB까지 줄었다. 가장 오차가 적은 경우는 마이크로스트립 선로를 자기장 소스로 사용하고 원형 루프를 수신 프로브로 사용할 경우이다.

## 2.6 분석 결과 정리

지금까지 근역 자기장 차폐효과 측정 방법과 관련하여

세 가지 자기장 소스와 두 가지 수신 프로브 구조에 대해서 주파수에 따른 자기장 세기, 소스의 크기에 따른 결합 특성 및 차폐효과, 그리고 수신 프로브의 변위에 따른 차폐효과 오차를 분석하였다. 근역 자기장 소스로서 사각형 루프는 원형 루프에 비해 더 강한 자기장을 발생시킬 수 있다. 하지만 이들 루프 구조는 주파수가 증가함에 따라 그 세기가 급격히 감소하였다. 마이크로스트립 선로를 자기장 소스로 사용하면 비록 자기장의 세기는 루프 구조에 비해 5~8 dB 정도 약하지만, 1 GHz까지 균일한 세기의 근역 자기장을 발생시킬 수 있었다. 이들 소스와 수신 프로브 간의 결합 특성도 루프 소스를 사용하면 100 MHz 이상의 주파수에서는 급격히 감소하지만, 마이크로스트립 선로를 소스로 사용하면 수 GHz까지 결합 특성이 감소하지 않았다. 소스와 수신 프로브의 크기가 변함에 따른 근역 자기장 차폐효과의 변화도 루프 소스를 사용할 때보다 마이크로스트립 선로 소스를 사용했을 때 그 변동 폭이 적었다. 마지막으로 수신 프로브의 변위에 따른 차폐효과 오차를 분석한 결과에서도 루프 소스를 사용할 때보다 마이크로스트립 선로를 소스로 사용할 때 그 오차가 줄어들을 수 있었다. 결과적으로 IEC 62333-2에서 제시한 두 원형 루프를 사용하는 것보다 마이크로스트립 선로를 자기장 소스로, 사각형 루프를 수신 프로브로 사용하는 것이 EMI 시트의 차폐효과 측정을 위해서 가장 효과적인 방법임을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 EMI 시트의 근역 자기장 차폐효과 측정

을 위한 방법으로 IEC 62333-2에서 제시된 원형 루프 구조뿐만 아니라, 사각형 루프 그리고 마이크로스트립 선로 구조를 수치해석을 통해 비교 분석하였다. 또한 수신 프로브로서 원형 및 사각형 루프의 특성도 비교하였다. 결과적으로 자기장 소스로서 마이크로스트립 선로를 사용하면 GHz까지 광대역의 균일한 자기장을 발생시킬 수 있으며, 수신 프로브로 사각형 루프 프로브를 이용하면 소스와 프로브의 크기와 위치가 변화하여도 일정한 차폐효과를 측정할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 마이크로스트립 선로를 자기장 소스로 이용한 EMI 시트의 근역 자기장 차폐 측정 방법은 기존의 IEC 62333-2 방법의 좋은 대안이 될 것으로 기대한다.

### References

- [1] H. H. Park, "Reduction of electromagnetic noise coupling to antennas in metal-framed smartphones using ferrite sheets and multi-via EBG structures," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 2, pp. 392-401, Apr. 2018.
- [2] E-SONG EMC Co. Ltd., Available: <https://esongemc.com/kr/>
- [3] TOKIN, Available: <https://www.tokin.com>
- [4] *Noise Suppression Sheet for Digital Devices and Equipment-Part 2: Measuring Methods*, IEC 62333-2, May 2006.
- [5] CST Microwave Studio, Available: <https://www.3ds.com>



박 현 호 [수원대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-8518-1151>



1999년 8월: 한국과학기술원 전기및전자  
공학과 (공학박사)

1999년 9월: 한국전자통신연구원(ETRI)  
선임연구원

2006년 6월: 삼성전자 글로벌기술센터 수  
석연구원

2012년 9월~현재: 수원대학교 전기전자

공학부 교수

[주 관심분야] EMI/EMC 대책 기술, 전자파 차폐 기술, 전자파  
해석 기술, SI/PI 설계 기술

김 철 수 [(주)이엠시스/대표이사]

<https://orcid.org/0009-0000-8290-5820>



1980년 4월: LG전자 중앙연구소

1984년 1월: 나우정밀(주) 중앙연구소

1988년 1월: (주)동일기연 기술연구소

1999년 11월~현재: (주)이엠시스 대표이사

2012년 2월: 서경대학교 전자컴퓨터공학  
과 박사과정 수료

[주 관심분야] EMC 부품 및 장비 개발,

EMC 표준