

개구면 크기에 따른 도전성 박막 소재의 자기장 차폐효과 분석

Analysis of the Magnetic Shielding Effectiveness of Conductive Sheets according to Aperture Sizes

김대연 · 이대헌 · 정재엽 · 유승갑

Dae-Yeon Kim · Dae-Heon Lee · Jae-Yeop Jung · Seung-Kab Ryu

요약

본 논문에서는 도전성 박막 차폐소재의 저주파수(10 kHz-10 MHz) 자기장 차폐효과(shielding effectiveness: SE) 측정 시 차폐소재가 결속되는 개구면 크기에 따른 차폐효과 영향을 분석한다. 개구면 크기에 따른 차폐소재의 차폐효과를 분석하기 위하여 개구면 차폐효과에 대한 산술 및 수치해석 값을 비교하고, 실험을 통해 검증한다.

Abstract

This study analyzes the effect of low-frequency (10 kHz-10 MHz) magnetic shielding effectiveness (SE) of a conductive sheet according to the aperture size used to measure its SE. To analyze the conductive sheet SE according to the size of the aperture, the analytical and numerical results of the aperture SE are compared and verified experimentally.

Key words: SE(Shielding Effectiveness), EMP(Electromagnetic Pulse), Conductive Sheet, Low-Frequency, Aperture

I. 서론

전력, 통신, 금융, 교통 등 주요 기반시설에 대한 고출력 전자파(EMP) 방호 및 전자파 차폐에 대한 필요성은 날로 커지고 있다. 최근에는 여러 가지 장점(저비용, 빠른 시공성, 취급 편의성 등)을 갖는 도전성 박막 차폐소재를 전자파 차폐시설에 활용하려는 시도가 증가하고 있다^{[1],[2]}. 이에 따라 차폐소재를 시설에 적용하기 전에 소재 자체에 대한 정확한 차폐효과(shielding effectiveness: SE) 평가가 요구된다.

차폐소재 차폐효과 평가 방법에는 ASTM-D4935, Dual

TEM Cell(DTC), MIL-DTL-83528D 등이 있다^{[3]~[7]}. 가장 많이 알려진 ASTM-D4935 표준은 동축 도파관을 활용한 TEM 측정법으로써, 30 MHz~1.5 GHz 범위를 측정 대역으로 한다^[4]. DTC 측정법은 도파관 개구면을 통해 이어지는 2 개의 TEM 셀을 이용한다. TEM 파를 활용한 원역장 측정뿐만 아니라, 근역장 투과 특성을 측정할 수 있으며, 1 MHz~200 MHz 대역에서 50~60 dB 동작 영역을 갖는다^{[5],[6]}. 마지막으로 MIL-DTL-83528D 표준은 차폐실 한 쪽 벽면의 61 cm×61 cm 개구면을 활용한 측정 환경으로써, 시험 시료(예: 전자파 차폐 가스켓)와 철판을 결속하여 시료 차폐효과를 측정한다. 측정 주파수 범위는 20

†이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 연구함(No. 2020-0-00917).

한국전자통신연구원 부설연구소(The Affiliated Institute of Electronics and Telecommunications Research Institute)

· Manuscript received October 20, 2021 ; Revised October 30, 2021 ; Accepted December 1, 2021. (ID No. 20211020-095)

· Corresponding Author: Dae-Heon Lee (e-mail: leedh@nsr.re.kr)

MHz~10 GHz이다^[7].

한편, EMP 방호를 위한 차폐시설은 MIL-STD-188-125-1에서 제시된 차폐효과 평가 방법을 이용하여 차폐성능을 측정한다^[8]. 측정 대역은 10 kHz~10 MHz의 저주파수 자기장 대역과 10 MHz~100 MHz의 공진주파수 대역, 그리고 100 MHz~1 GHz의 평면파 대역으로 구분된다. 따라서 EMP 방호시설에 적용되는 차폐소재들은 저주파 자기장 대역 차폐효과 측정이 필요하다. 그런데 앞에서 정리한 차폐소재 차폐효과 평가 방법들은 1 MHz 이상의 주파수 대역에 한해서 유효하다. 그러므로 기존의 소재 차폐효과 평가법에는 도전성 박막 차폐소재를 방호 시설에 적용하기 전에 소재 자체에 대한 저주파수 자기장 차폐효과 성능을 측정할 수 없는 한계가 존재한다.

이를 극복하기 위하여 산·학·연에서는 차폐실 벽면 개구면을 활용하는 MIL-DTL-83528D 표준과 차폐 시설의 저주파수 차폐효과 측정 규격을 제시하는 MIL-STD-188-125-1 표준을 참고하여 소재의 저주파수 자기장 차폐효과를 측정한다. 하지만 MIL-DTL-83528D에 명시된 바에 따르면 표준에서 제시한 개구면 크기(61 cm×61 cm)는 소재 차폐효과를 정확하게 추정할 수 없고, 개구면 크기 등의 측정 환경에 따라 차폐효과가 영향을 받을 수 있다고 언급하고 있다^[7]. 따라서 개구면 결속 차폐소재 측정 방법을 수행할 때 개구면 크기에 따른 소재 차폐효과 영향에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 MIL-DTL-83528D 및 MIL-STD-188-125-1 표준을 활용한 도전성 박막 차폐소재의 자기장 차폐효과 측정 시 개구면 크기에 따른 차폐성능을 분석한다. 개구면 크기에 따른 투과 특성을 분석하기 위하여 차폐효과에 대한 산술 값과 시뮬레이션 값을 비교하고, 실험을 통해 검증한다.

II. 개구면을 갖는 도체 판의 자기장 차폐효과 해석

본 장에서는 개구면을 갖는 도체 판의 자기장 차폐효과를 분석하기 위해 산술 계산 및 시뮬레이션을 개구면 크기에 따라 수행하고, 그 결과를 비교, 분석하였다.

2-1 개구면 자기장 차폐효과 해석

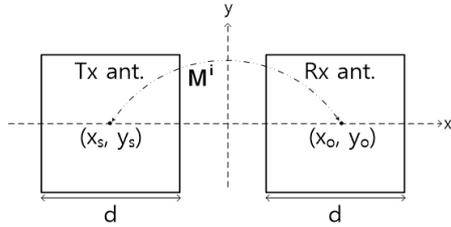
개구면을 갖는 도체 판의 차폐효과 성능을 구하기 위

한 다양한 접근 방법이 있다. 널리 사용되는 방법은 슬롯 안테나 이론을 기반으로 도체 판을 무한 평면으로 가정하여 간단하게 차폐효과를 계산한다^[9]. 또한, 무한 도체 평판 개구면에 입사하는 전자파의 개구면 전계분포를 적분 방정식으로 유도하여 차폐효과를 계산하거나, power balance 기법을 적용하는 방법, 개구면이 존재하는 차폐박스를 등가회로로 구현하여 전송선로 차폐효과를 계산하는 방법이 있다^{[10]~[12]}. 이러한 방법들의 공통점은 개구면 방향으로 입사되는 전자파를 평면파로 한정하기 때문에 자기장 영역(근거리장)에서의 차폐효과를 계산하기 어렵다. 그리고 평면파가 아닌 자기장 영역에서 차폐효과를 구하기 위해 개구면 도체 판과 송수신 안테나를 모델링해 차폐효과를 구하는 연구가 선행되었지만, 해석 결과를 위해 과도한 해석 자원이 필요한 한계점이 있다^{[13]~[15]}.

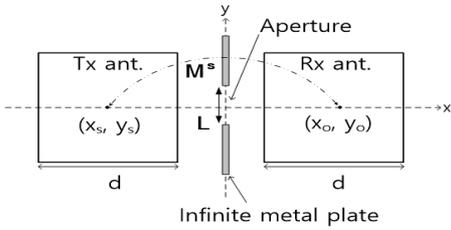
이러한 한계를 개선하기 위해 10 MHz 이하의 자기장 영역에서 개구면을 갖는 무한 평면 도체 판의 차폐효과를 산술적으로 유도된 송수신 정사각형 루프 안테나 간 상호 인덕턴스를 활용하여 구한다^[16]. 그림 1은 개구면을 갖는 무한 평면 도체 판의 자기장 차폐효과 해석 구조를 나타낸다. 두 안테나 높이와 개구면 중앙의 높이는 동일($z=0$)하고, 개구면의 중심점은 원점에 위치한다고 가정하며, 송신 안테나 중심점 좌표(x_s, y_s), 수신 안테나 중심점 좌표(x_o, y_o), 안테나 크기(d), 개구부 크기(L)를 파라미터로 사용한다^[16]. 그림 1(a)는 자유 공간에서 자기장이 유도된 기준 상호 인덕턴스(M^i)를 나타내며, 식 (1)과 같이 송신 안테나에 전류(I)가 흐를 때 수신 안테나를 통과하는 자속밀도(B_z^i)의 적분식으로 구한다.

$$M^i = \frac{1}{I} \int_{y_o - \frac{d}{2}}^{y_o + \frac{d}{2}} \int_{x_o - \frac{d}{2}}^{x_o + \frac{d}{2}} B_z^i(x, y) dx dy \quad (1)$$

그림 1(b)는 송수신 안테나의 위치가 그림 1(a)와 동일하지만 개구면을 갖는 무한 평면 도체 판이 존재할 때의 개구면 상호 인덕턴스(M_s)를 나타낸다. 기준 상호 인덕턴스와 마찬가지로 수신 안테나를 통과하는 자속밀도의 적분식으로 구하지만, 참고문헌 [16]에서는 자속밀도를 식 (2)와 같이 유도하여 개구면의 크기(L)와 개구면 원점에서의 자기장 세기(H_{z0}^i), 투자율(μ_0) 등을 대입하여 구한다.



(a) 기준 상호 인덕턴스(M^i) 배치
(a) Geometry of reference mutual inductance(M^i)



(b) 개구면 상호 인덕턴스(M^s) 배치
(b) Geometry of aperture mutual inductance(M^s)

그림 1. 개구면을 갖는 무한 평면 도체 판 유무에 따른 상호 인덕턴스 2차원 개념도

Fig. 1. 2-D approximation of mutual inductances according to presence and absence of the infinite metal plate with an aperture.

$$M^s = \frac{-0.13\mu_0 L^3 H_{z0}^i}{\pi I} \int_{y_o - \frac{d}{2}}^{y_o + \frac{d}{2}} \int_{x_o - \frac{d}{2}}^{x_o + \frac{d}{2}} \frac{1}{(x^2 + y^2)^{3/2}} dx dy \quad (2)$$

개구면 차폐효과는 식 (3)에 나타난 바와 같이 기준 상호 인덕턴스와 개구면 상호 인덕턴스 비를 통해 계산한다. 이때, 상호 인덕턴스 값은 정자기(magnetostatic) 유도를 가정하여 도출되었기 때문에 10 MHz 이전 대역에서 주파수 대비 차폐효과는 일정한 값을 갖는다^[16].

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{M^i}{M^s} \right) \quad (3)$$

2-2 개구면 자기장 차폐효과 시뮬레이션

개구면 크기에 따른 자기장 대역 차폐효과를 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하고 산술 계산 값과 비교하였다^[17]. 산술 계산은 앞서 설명한 상호 인덕턴스 방법을 활용했고, 해당 수식에 들어가는 파라미터는 표 1과 같으며, 단위는 m이다. 송수신 안테나 중심점 좌표는 자기장 측

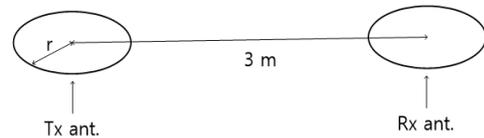
표 1. 개구면 크기에 따른 산술 차폐효과 계산을 위한 파라미터

Table 1. Parameters for analytic SE calculations according to apertures size.

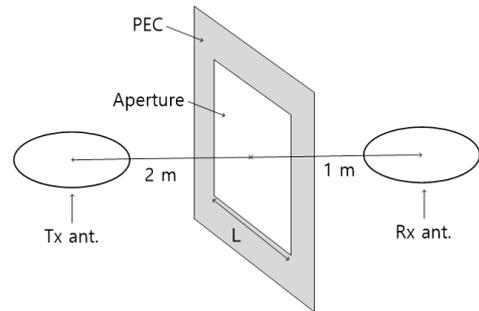
(x_s, y_s)	(x_o, y_o)	d [m]	L [m]
(-2,0)	(1,0)	0.53	0.6~1.8

정 방법을 제시하는 MIL-STD-188-125-1에 따라(송신: 2 m, 수신: 1 m) 설정했다. 파장 대비 안테나의 크기가 매우 작은 소형 루프 안테나의 방사 특성은 안테나 형태와는 무관하고 면적과 관계있으므로, 시뮬레이션 및 측정에는 보유하고 있는 원형 루프 안테나를 사용하였다^{[18],[19]}. 이에 따라 정사각형 루프 안테나 크기(d)는 시뮬레이션 및 측정에 사용한 반경(r) 0.3 m인 원형 루프 안테나와 동일한 면적(πr^2)으로 가정하여 한 변의 길이($d = \sqrt{\pi r^2}$)를 구하였다. 개구면 역시 정사각형으로 가정하며 한 변의 길이(L)가 0.6 m부터 1.8 m까지 0.3 m 간격으로 변화할 때 차폐효과를 구했다.

시뮬레이션 구조는 그림 2에 나타나며, 측정에 사용하



(a) 기준 신호 시뮬레이션
(a) Simulation for reference signal



(b) 개구면 차폐 신호 시뮬레이션
(b) Simulation for aperture shielding signal

그림 2. 개구면 도체 판 차폐효과 시뮬레이션 구조

Fig. 2. Structures of SE simulations for metal plate with an aperture.

는 원형 루프 안테나와 동일하게 모델링했고, 송수신 안테나, 개구면 위치는 산술 계산과 동일하게 MIL-STD-188-125-1을 준용하여 배치했다. 그림 2(a)는 자유 공간의 기준 신호 시뮬레이션 구조이며 그림 2(b)는 개구면을 갖는 무한 도체 판이 존재할 때 차폐 신호 시뮬레이션 구조이다. 산술 계산과 마찬가지로 개구면 크기(L)를 0.6 m부터 1.8 m까지 0.3 m 간격으로 변화시켜 차폐효과를 계산했으며, 시뮬레이션 해석 주파수 대역은 10 kHz~10 MHz이다. 그림 3에서 개구면 크기에 따른 차폐효과 시뮬레이션 결과를 볼 수 있다. 개구면 크기가 증가할수록 차폐효과가 감소함을 알 수 있다. 이를 통해, 사용되는 개구면 크기에 따라 소재 차폐효과가 바뀔 수 있음을 추정할 수 있다. 또한, 주파수 독립적인 특성을 갖는 상호 인덕턴스 산술 계산 방법과 유사하게 시뮬레이션 결과 또한 10 MHz 이전 저주파수 자기장 대역에서는 주파수에 따른 차폐효과 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

그림 4는 안테나 높이(z=0)에서 개구면 크기에 따른 자기장 분포를 나타낸다. 개구면이 없는 기준 자기장 분포에서는 송신 루프 안테나(Tx ant.)에서 발생한 자기장은 거리에 따라 감쇄하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 개구면이 존재하는 경우의 자기장 분포는 거리뿐만 아니라 개구면 크기에 따라 자기장의 세기가 변동함을 알 수 있다. 즉, 개구면 크기가 증가할수록 개구면을 통해 커플링되는 자기장으로 인해 수신되는 전자파의 세기가 증가함을 확인할 수 있다.

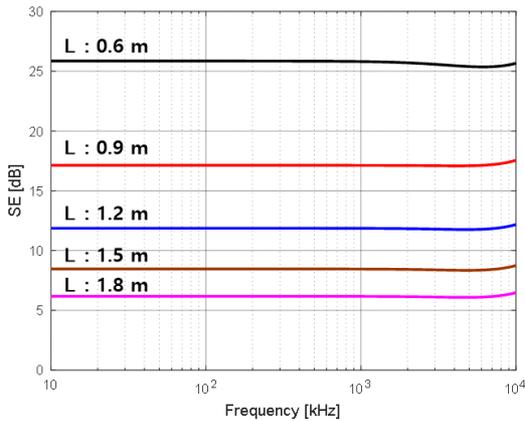


그림 3. 개구면 크기에 따른 차폐효과 시뮬레이션 결과
Fig. 3. SE simulation results according to aperture sizes.

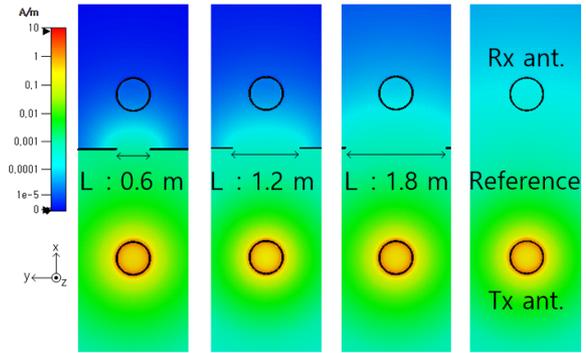


그림 4. 개구면 크기에 따른 자기장 분포 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Magnetic field distributions according to aperture sizes.

표 2. 개구면 크기에 따른 산술 및 시뮬레이션 차폐효과
Table 2. Analytic and simulation SE according to aperture size.

L [m]	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
Analytic SE [dB]	29.4	18.9	11.4	5.5	0.8
Simulation SE [dB]	25.8	17.1	11.8	8.4	6.1

개구면 크기에 따른 자기장 대역의 산술 계산 차폐효과와 시뮬레이션 차폐효과 결과를 표 2에 정리하였다. 시뮬레이션 차폐효과는 자기장 해석 주파수에 대해 차폐효과 평균값을 사용하였다. 두 가지 결과 모두 개구면 크기가 증가할수록 차폐효과가 감소하는 것을 알 수 있으며, 전반적으로 차폐효과 값이 유사함을 확인할 수 있다. MIL-DTL-83528D에 따른 개구면 크기(0.61 m)와 유사한 0.6 m에서의 산술 및 시뮬레이션 차폐효과 값은 각각 29.4 dB, 25.8 dB로써, 도전성 박막 소재를 결속하지 않더라도 상대적으로 높은 차폐효과가 있다는 점을 알 수 있다. 또한, 개구면 크기가 작을수록 기준값은 낮게 측정될 수 있으며 배경 잡음 크기가 일정할 경우 동작영역(기준값 - 잡음)이 감소하여 소재의 차폐효과를 측정할 수 있는 범위가 줄어들 수 있음을 알 수 있다.

III. 도전성 박막 소재 자기장 차폐효과 측정

본 장에서는 가변 개구면이 설치된 차폐실 벽면을 활용하여 개구면 크기에 따른 개구면 차폐효과와 개구면에 결속한 도전성 박막 소재의 차폐효과를 측정하고, 개구면

크기에 따른 소재 차폐효과 측정값 차이를 분석했다.

3-1 개구면 자기장 차폐효과 측정

앞서 구한 개구면 크기에 따른 차폐효과를 측정을 통해서 검증하기 위해 그림 5와 같이 개구면 차폐효과 측정 환경을 구성했다. MIL-STD-188-125-1 측정 규격을 준용하여 송수신 원형 루프 안테나 위치를 설정하고 안테나 편파는 지면과 수직, 수평 두 방향에 대해 측정하고 두 값의 평균을 구했다. 자유 공간에서 수신 기준값(P_r)과 그림 5와 같이 차폐실 내부 수신값(P_a)을 측정하여 두 값의 상대적인 비($10\log(P_r/P_a)$)로 개구면의 차폐효과를 구했다. Signal generator(SG)로 생성한 신호를 power amplifier(PA)로 크기를 증폭시켜 송신 안테나에 신호를 전달했고, 수신 안테나 신호의 크기를 spectrum analyzer(SA)로 측정하였다. 측정 대역은 시뮬레이션과 동일한 10 kHz~10 MHz이다. 측정에 이용한 원형 루프 안테나 반경(d)은 0.3 m이다. 표 3은 차폐효과 측정에 사용된 장비 정보를 나타낸다. 개구면을 갖는 차폐실의 크기는 5 m(너비)×3 m(폭)×2.5 m(높이)이며, 개구면은 차폐실 한쪽 면

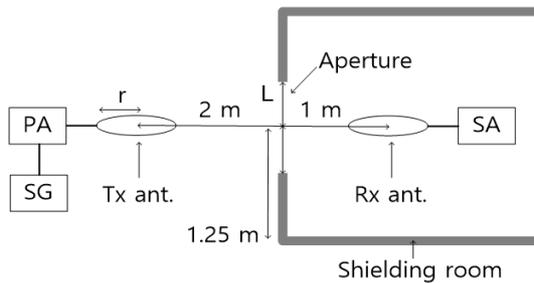


그림 5. 개구면 차폐효과 측정 환경 모식도
Fig. 5. Geometry for SE measurement of aperture.

표 3. 차폐효과 측정 장비 정보
Table 3. Information on SE measuring equipments.

Equipment	Manufacturer	Model
SG	KEYSIGHT	N5171B
PA	Amplifier research	10WD1000
SA	KEYSIGHT	N9918A
Tx ant.	ETS LINDGREN	6512
Rx ant.	ETS LINDGREN	6502

정중앙에 위치한다. 안테나 높이는 개구면 정중앙 높이 (1.25 m)로 설정하였다. 개구면 한 변의 길이가 0.6 m, 0.9 m, 1.2 m 세 가지 경우를 측정했다.

그림 6은 개구면 차폐효과 측정환경을 보여주고 있으며, 개구면 크기 가변을 위해 차폐실 한쪽 벽면에 개구면 프레임 고정 가능한 결속 클램프를 설치했다. 개구면 프레임은 개구면 크기(0.6 m, 0.9 m, 1.2 m)에 따라 3종을 제작했고, 측정 대상 개구면 크기의 프레임을 차폐실 벽면 결속 클램프를 활용해 고정했다. 클램프 결속 방법에 대한 차폐효과를 측정함으로써 차폐실 내부로 유입되는 전자파가 없음을 확인하였다.

그림 7에 개구면 크기에 따른 차폐효과에 대해 앞서 구한 산술 계산, 시뮬레이션과 측정을 통해 구한 값을 함께 도식했다. 세 방법 모두 10 MHz 이하 대역에서는 주파수

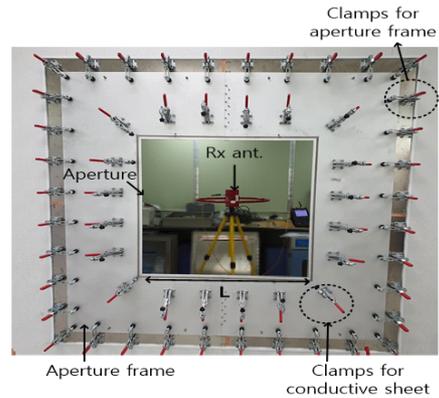


그림 6. 개구면 차폐효과 측정환경 사진(L=0.9 m)
Fig. 6. Picture for SE measurement of aperture (L=0.9 m).

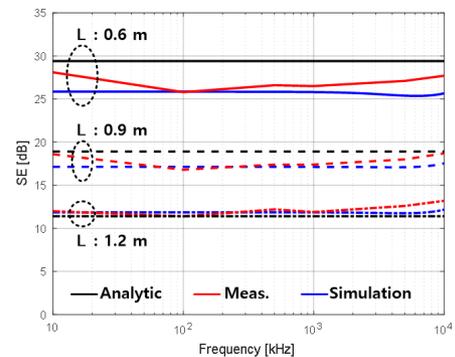


그림 7. 개구면 크기에 따른 차폐효과 비교
Fig. 7. Comparison of SE by aperture sizes.

에 따른 차폐효과의 변동이 크지 않은 점을 알 수 있다. 산술 계산과 시뮬레이션에서는 도체 벽이 무한 평면이고 수신 안테나가 위치한 공간이 자유 공간임을 가정하는 반면, 실제 측정 환경에서는 차폐실 벽면의 크기는 유한하고, 수신 안테나는 차폐실 내부에 존재한다. 그럼에도 불구하고 차폐효과 결과가 유사하게 나온 이유는 차폐실 내부 공간(5 m×3 m×2.5 m)의 기본 공진모드(TE101) 주파수는 67 MHz로서 측정을 수행했던 주파수 대역보다 높아 내부 공진에 의한 차폐효과 변화가 크지 않기 때문이다²⁰⁾. 이를 통해 차폐실 내부 공간 크기에 따른 공진 주파수보다 낮은 주파수 대역에서는 산술 계산 및 시뮬레이션으로 개구면 크기의 차폐효과를 비교적 정확하게 예측할 수 있다는 점을 알 수 있다.

3-2 도전성 박막 소재 자기장 차폐효과 측정

앞서 측정한 가변 개구면 환경에 도전성 박막 소재를 결속하고 차폐효과를 측정했다. 그림 8은 개구면 프레임에 도전성 박막 소재를 결속하고 클램프로 고정한 사진이며, 표 4는 자기장 차폐효과 측정 대상인 도전성 박막 소재의 사양을 나타낸다. 개구면 차폐효과 측정 방법과 동일하게 0.6 m, 0.9 m, 1.2 m 세 가지 크기의 도전성 박막 소재의 수신값(P_r)을 측정했다. 기준값 설정에 따른 차폐효과 차이를 분석하기 위해 두 가지 경우의 기준값을 측정하였다. 첫 번째는 자유 공간에서 측정한 자유공간 기준값(P_f)이고, 두 번째는 소재가 결속되지 않은 개구면 기준값(P_a)이다. 소재 차폐효과 계산은 개구면 차폐효과

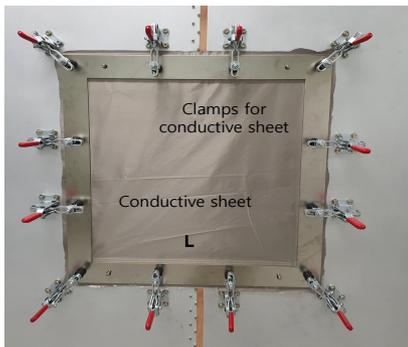


그림 8. 차폐소재 차폐효과 측정환경 사진(L=0.6 m)
Fig. 8. Picture for SE measurement environment of conductive sheet(L=0.6 m).

표 4. 도전성 박막 소재 사양
Table 4 Spec. of conductive sheet.

Category	Surface resistance [Ω/\square]	Thickness [mm]
Conductive fabric	0.07	0.035

계산과 동일한 방법으로 구했으며, 개구면 크기 별 기준값 설정(P_f , P_a)에 따라 두 가지 차폐효과를 계산했다.

그림 9에 개구면 크기와 기준값 설정에 따른 도전성 박막 소재의 차폐효과 측정 결과를 나타냈다. 두 기준값 모두 개구면 크기에 따라 차폐효과 차이가 발생했다. 개구면 기준값으로 차폐효과를 계산하는 경우에도, 개구면 크기에 따라 측정 주파수 대역에서 차이(최대 4.29 dB)가 발생함을 확인할 수 있어 측정 소재의 면적이 작아질수록 차폐효과가 감소하는 것을 알 수 있다. 자유 공간 기준값을 이용한 차폐효과 측정법은 개구면 자체의 차폐효과가 소재 차폐성능 측정 결과에 부가됨을 확인할 수 있다.

표 5는 개구면 크기에 따른 차폐효과 차이(ΔSE)를 나

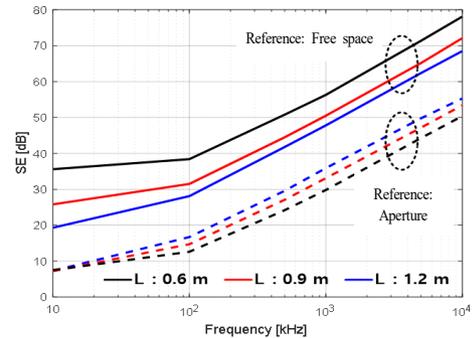


그림 9. 개구면 크기, 기준값에 따른 도전성 박막 소재의 자기장 차폐효과 비교

Fig. 9. Comparison of magnetic SE of conductive sheet according to aperture sizes and references.

표 5. 개구면 크기, 기준값에 따른 소재 차폐효과 차이 (ΔSE) 계산

Table 5. Calculation of SE difference(ΔSE) of conductive sheet according to aperture sizes and references.

Reference	ΔSE [dB]		
	0.9 m-0.6 m	1.2 m-0.9 m	1.2 m-0.6 m
Free space	6.83	3.61	10.44
Aperture	2.31	1.98	4.29

타내며, 개구면 크기에 따라 세 묶음으로 구분하고 주파수에 따라 차폐효과 차이를 계산한 뒤, 그 값의 평균을 절대값으로 표현했다. 그림 9에 나타난 바와 같이, 자유공간 기준값보다 개구면 기준값을 적용했을 때 차폐효과 차이(ΔSE)가 감소함을 알 수 있으며, 개구면을 활용한 소재 차폐효과 측정 시 개구면 차폐효과를 제거해야 개구면 크기에 따른 차폐효과 측정 결과 차이를 줄일 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 MIL-DTL-83528D 및 MIL-STD-188-125-1 표준을 활용한 도전성 박막 차폐소재의 자기장 차폐효과 측정 시 개구면 크기에 따른 소재 차폐성능을 분석하였다. 이를 위해 개구면 크기에 따른 개구면 자기장 차폐효과를 산술 계산 및 시뮬레이션 하였고, 측정을 통해 검증하였다. 다양한 크기의 개구면에 도전성 박막 차폐소재를 결속하고 소재 차폐효과를 측정할 결과, 개구면 기준 차폐효과에서도 개구면 크기에 따라 유의미한 차이가 발생함을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 소재 자기장 차폐효과 측정 방법 및 도전성 박막 소재를 사용한 차폐시설 설계 자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] X. C. Tong, *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*, New York, NY, CRC Press, pp. 297-299, 2016.

[2] C. Afilipoaei, H. Teodorescu-Draghicescu, "A review over electromagnetic shielding effectiveness of composite materials," in *The 14th International Conference on Interdisciplinarity in Engineering(INTER-ENG 2020)*, vol. 63, no. 1, no. 23, Dec. 2020.

[3] H. Park, "Electromagnetic wave shielding measurement technology trend of EMI countermeasure sheet," *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 29, no. 1, pp. 40-49, Jan. 2018.

[4] *Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials*, ASTM

D4935-10, Sep. 2010.

[5] C. Koo, P. Sambyal, A. Iqbal, F. Shahzad, and J. Hong, *Two-Dimensional Materials for Electromagnetic Shielding*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 58-60, 2021.

[6] C. Morari, I. Balan, "Methods for determining shielding effectiveness of materials," *Electrotechnica, Electronica, Automatica*, vol. 63, no. 2, pp. 236-136, 2015.

[7] *Gasketing Material, Conductive, Shielding Gasket, Electronic, Elastomer, EMI/RFI General Specification For, MIL-DTL-83528D*, Sep. 2011.

[8] *Department of Defense Interface Standard: High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protections for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 1 - Fixed Facilities*, MIL-STD-188-125-1, Jul. 1998.

[9] H. W. OTT, *Electromagnetic Compatibility Engineering*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 267-270, 2009.

[10] B. Lim, H. Seo, S. Lim, and K. Kim, "Shielding effectiveness of an aperture in infinite conducting plane due to HEMP incidence," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1647-1652, Aug. 2011.

[11] D. A. Hill, M. T. Ma, A. R. Ondrejka, B. F. Riddle, M. L. Crawford, and R. T. Johnk, "Aperture excitation of electrically large, lossy cavities," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 3, pp. 169-178, Aug. 1994.

[12] M. P. Robinson, T. M. Benson, C. Christopoulos, J. F. Dawson, M. D. Ganley, and A. C. Marvin, et al., "Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 3, pp. 169-178, Aug. 1998.

[13] H. Park, J. Kwon, "Analysis of low-frequency magnetic SE of a metal plate: Diffusion and slot effects," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 4, pp. 324-327, Apr. 2019.

[14] H. Park, C. Hyoung, and J. Kwon, "Improvement of magnetic se measurement of shielded rooms using rectangular loop antennas," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 4, pp. 320-323, Apr. 2019.

[15] A. Frikha, M. Bensetti, L. Pichon, F. Lafon, F. Duval, and N. Benjelloun, "Magnetic shielding effectiveness of enclosures in near field at low frequency for automotive applications," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 6, pp. 1481-1490, Dec. 2015.

[16] H. Park, "Analytic magnetic shielding effectiveness of multiple long slots on a metal plate using rectangular

loops," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 5, pp. 1971-1979, Oct. 2020.

[17] CST, "Microwave Studio(MWS)," 2021, Available: <https://www.3ds.com>

[18] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 97-107, 2014.

[19] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 237-246, 2005.

[20] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 314-316, 2004.

김 대 연 [ETRI부설연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8294-4317>
 저자의 요청으로 출판물에 사진 미기재
 2015년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
 2017년 2월: 광주과학기술원 기전공학부 (공학석사)
 2017년 7월~현재: ETRI부설연구소 연구원
 [주 관심분야] EMP, EMC, EMI

정 재 엽 [ETRI부설연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3827-603X>
 저자의 요청으로 출판물에 사진 미기재
 2015년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
 2017년 2월: 충남대학교 전자전파통신공학부 (공학석사)
 2017년 7월~현재: ETRI부설연구소 연구원
 [주 관심분야] Antenna, EMP, EMI/EMC

이 대 현 [ETRI부설연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4889-327X>
 저자의 요청으로 출판물에 사진 미기재
 1999년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2001년 2월: 경북대학교 전파공학과 (공학석사)
 2013년 8월: 경북대학교 전파공학과 (공학박사)
 2003년 6월~현재: ETRI부설연구소 책임연구원
 [주 관심분야] Antenna, UWB, EMC, GPS 등

유 승 갑 [ETRI부설연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0693-8345>
 저자의 요청으로 출판물에 사진 미기재
 1999년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2001년 8월: 광주과학기술원 기전공학과 (공학석사)
 2014년 8월: 광주과학기술원 정보기전공학부 (공학박사)
 2004년 2월~현재: ETRI부설연구소 책임연구원
 [주 관심분야] RF/Microwave, EMC, EMP 등