

마이크로스트립 선로와 자성 시트 사이의 공극이 전송감쇠에 미치는 영향

Effect of Air Gap between Microstrip Line and Magnetic Sheet on Transmission Attenuation

박현호 · 송익환* · 김지성** · 김철수***

Hyun Ho Park · Eakhwan Song* · Jiseong Kim** · Cheolsoo Kim***

요 약

본 논문에서는 IEC 62333-2 표준 방법을 이용하여 전자파 노이즈 저감용으로 만들어진 자성 시트의 전송감쇠 특성을 측정할 때 발생할 수 있는 마이크로스트립 선로와 자성 시트 사이의 공극(air gap)이 전송감쇠 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 우선 이론적인 분석을 통해 공극이 전송감쇠에 미치는 영향을 살펴보고, 수치해석과 측정을 통해 그 특성을 검증하였다.

Abstract

In this study, we investigated the influence of an air gap between a microstrip line and a magnetic sheet on the reduction of electromagnetic noise that may arise when measuring the transmission attenuation characteristics of a sheet using the IEC 62333-2 standard method. First, the effect of the air gap on the transmission attenuation was examined through theoretical analysis, and these characteristics were verified through numerical simulations and experimental measurements.

Key words: IEC 62333-2, Magnetic Sheets, Transmission Attenuation, Microstrip Line, Air Gap

I. 서 론

전자기기의 스위칭 주파수가 높아짐에 따라 이제 원치 않는 전자파 노이즈의 발생은 피할 수 없는 문제가 되었다. 전도성(conducted) 또는 복사성(radiated) 전자파 장해(electromagnetic interference)나 간섭을 완화하거나 제거하기 위해서 다양한 EMI 대책 부품들이 사용되고 있다. 특

히 전자파 노이즈 저감용으로 만들어지는 자성 시트는 전도 노이즈 전류나 그로 인해 발생하는 주변 자기장을 감쇠시키기 위해 선로나 케이블, 그리고 금속함체와 같이 공통모드 전류가 잘 흐르는 구조에 많이 사용되고 있다^{[1],[2]}. IEC 62333-2에서는 이러한 자성 시트의 전자파 노이즈 결합 감쇠 특성을 측정하고 평가하기 위해서 네 가지 방법을 제시하고 있다. 내부-감결합 비율(R_{da} , intra-decoupling

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

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

**한국과학기술원 조천식모빌리티대학원(CCS Graduate School of Mobility, KAIST)

***㈜이엠시스(EMCIS, Co. LTD.)

· Manuscript received June 5, 2024 ; Revised June 12, 2024 ; Accepted July 3, 2024. (ID No. 20240605-055)

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

ratio), 상호-감결합 비율(R_{de} , inter-decoupling ratio), 전송감쇠 전력 비율(R_{tp} , transmission attenuation power ratio), 방사억제 비율(R_{rs} , radiation suppression ratio)이 그것이다^[3]. 이 중에서 전송감쇠 전력 비율(R_{tp})은 마이크로스트립 선로와 같이 전도 경로를 따라 전송되는 전자파 노이즈의 감쇠 특성을 측정하는 방법이다. 그림 1에서 나타냈듯이 전송감쇠 특성을 측정하기 위해서 표준에서는 마이크로스트립 선로와 자성 시트 사이에 25 μm 의 공극(air gap)을 주도록 명시하고 있지만, 이러한 공극의 두께 변화에 따른 자성 시트의 전송감쇠 특성 변화를 분석한 논문은 아직 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 마이크로스트립 선로와 자성 시트 사이의 공극의 크기에 따라 전송감쇠 특성이 어떻게 변화하는지 먼저 이론적인 분석을 통해 정성적으로 살펴보고, 수치해석과 측정을 통해 정량적인 변화를 분석하였다. 본 연구에서는 두 종의 자성 시트에 대해서 공극이 시트의 전송감쇠 특성에 얼마나 영향을 주는지 측정을 통해 살

펴보았다. 한 종은 페라이트 분말로 제작된 자성 시트로 전도도가 매우 낮아 손실이 크지 않다. 이러한 자성 시트는 저주파수 대역에서 흡수체로 많이 사용된다. 반면 금속 성분의 샌더스트(sendust) 분말로 제작된 노이즈억제시트(NSS, noise suppression sheet)는 전도도에 의한 손실이 있어 주파수가 증가함에 따라 그 손실이 증가하므로 고주파수 대역에서 많이 사용한다. 본 논문의 결과들은 노이즈 저감을 위해 자성 시트를 사용하는 실제 상황에서 참고가 될 수 있을 것이다.

II. 이론적 분석

문헌에 보면 서로 다른 유전체의 적층 구조에 대한 등가 유효 비유전율을 이론적으로 계산하는 방법이 있다^[4]. 이 방법을 자성 시트와 같은 자성 소재에 적용하면, 그림 2(a)와 같은 다층 자성 물질 구조에서 등가 유효 비투자율을 다음과 같이 나타낼 수 있다^[5].

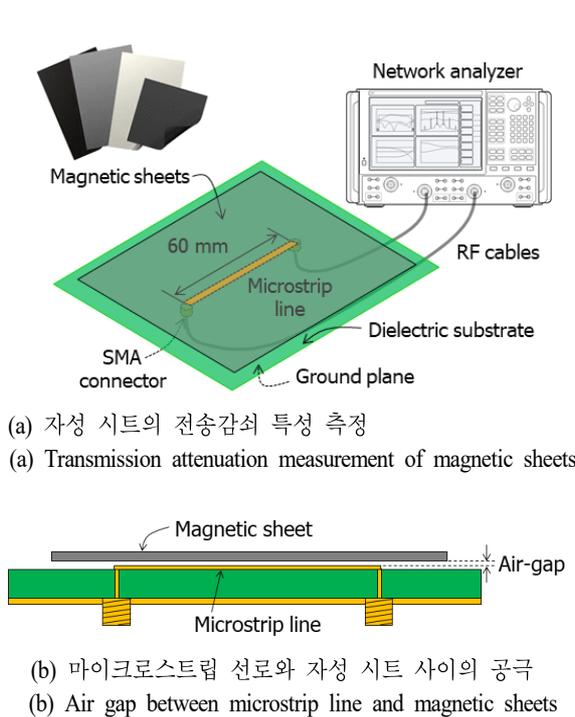
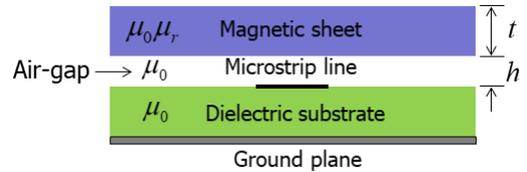
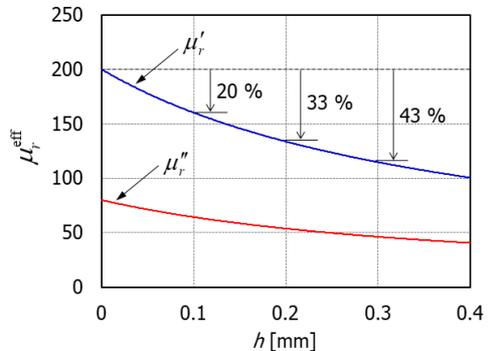


그림 1. IEC 62333-2 표준 기반의 자성 시트의 전송감쇠 특성 측정 방법

Fig. 1. Measurement method for transmission attenuation of magnetic sheets based on IEC 62333-2 standard.



(a) 마이크로스트립 선로와 자성 시트 사이의 공극 구조
(a) Geometry of air gap between microstrip line and magnetic sheet



(b) 공극의 두께에 따른 유효 비투자율의 변화
(b) Changes of effective relative permeability due to thickness of air gap

그림 2. 해석 구조와 유효 비투자율의 변화

Fig. 2. Analysis geometry and changes of effective relative permeability.

$$\mu_r^{\text{eff}} = \frac{\mu_r t + h}{(t + h)}. \quad (1)$$

여기서 μ_r 와 t 은 자성 시트의 비투자율과 두께를 나타내고, h 는 공극의 두께를 나타낸다. 일반적으로 인쇄회로기판 제작 시 구리의 산화를 방지하기 위해서 도포하는 유기물의 두께는 수십 μm 로 매우 작아 무시하였다. 그림 2(b)에서는 식 (1)의 공극의 두께가 증가할 때 비투자율의 실수성분과 허수성분이 어떻게 변화하는지 보여주고 있다. 여기서 시트의 실수 비투자율은 200, 허수 비투자율은 80으로 가정하였다. 공극의 두께가 증가하게 되면 유효 비투자율이 감소하게 됨을 알 수 있다.

자성 시트의 유무에 따른 유효 비투자율(μ_r^{eff} , μ_{r0}^{eff})을 알면 자성 시트 내에서 발생하는 자성 손실(magnetic loss, α_m)을 다음과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$\alpha_m = \frac{27.3f}{c\sqrt{\mu_r^{\text{eff}}}} \left(\frac{\mu_r^{\text{eff}}/\mu_{r0}^{\text{eff}} - 1}{\mu_r - 1} \right) \tan \delta_m. \quad (2)$$

여기서 f 와 c 는 주파수와 빛의 속도를 나타내며, μ_{r0}^{eff} 와 δ_m 는 자성 시트가 없을 때의 유효 비투자율과 자성 시트의 자성 손실 탄젠트를 나타낸다.

결과적으로 자성 손실은 $\sqrt{\mu_r^{\text{eff}}}$ 에 비례하는데, 시트가 있을 때 공극의 두께가 증가하여 유효 비투자율(μ_r^{eff})이 감소하게 되면 자성 손실도 감소함을 알 수 있다. 따라서 자성 손실의 감소로 자성 시트의 전송감쇠 특성이 감소할 것임을 정성적으로 예상할 수 있다.

III. 수치해석 및 측정 검증

앞 절에서 유효 비투자율과 자성 손실에 대한 이론적인 수식을 이용하여 공극이 자성 시트의 자성 손실에 미치는 영향을 정성적으로 살펴보았다. 이 절에서는 수치해석과 실험을 통해 공극이 노이즈억제시트를 포함한 자성 시트의 전송감쇠 특성에 미치는 영향을 정량적으로 살펴볼 것이다. 우선 IEC 62333-2에서 정의되어 있는 전송감쇠 전력 비율은 다음과 같다^[3].

$$R_{\text{tp}} = -10 \log_{10} \left(\frac{10^{S_{21}/10}}{(1 - 10^{S_{11}/10})} \right). \quad (3)$$

여기서 S_{11} 과 S_{21} 는 그림 1에서 나타냈듯이 마이크로스트립 선로 위에 자성 시트가 놓여있을 때 선로 양 끝단 사이의 산란 계수의 dB값이다. 식 (3)에서 로그 함수 안의 분모는 입력 전력을 1이라고 했을 때 포트 1에서 반사되는 전력($10^{S_{11}/10}$)을 빼고 마이크로스트립 선로로 온전히 입력되는 전력을 나타내고 분자는 포트 2로 전송되는 전력($10^{S_{21}/10}$)을 나타낸다. 따라서 R_{tp} 는 노이즈가 마이크로스트립 선로를 지나면서 자성 시트를 통해 얼마나 감쇠되는지를 나타낸다고 볼 수 있다. 만약 $S_{11} = -30$ dB 이면 $R_{\text{tp}} = -0.99928 \times S_{21}$ 이다.

우선 수치해석 툴인 CST Microwave Studio^[7]를 이용하여 공극이 자성 시트의 전송감쇠 특성에 미치는 영향을 그림 3에서 살펴보았다. 수치해석에 사용된 자성 시트의 복소 비투자율은 그림 3 내 작은 그림에 나타나 있고, 두께는 0.4 mm로 설정했다. 공극의 두께가 0 mm에서 0.1 mm까지 증가함에 따라 10 GHz에서 R_{tp} 가 약 0.87 dB 감소함을 알 수 있다. R_{tp} 의 감소량이 크지는 않지만 공극의 두께가 커지면 전송감쇠 특성이 확연히 줄어들음을 알 수 있다.

그림 4에서는 자성 시트의 전송감쇠 전력 비율(R_{tp}) 측정 셋업을 보여주고 있다. 2포트 벡터 네트워크 분석기(VNA)에 마이크로스트립 선로가 있는 시험 지그(test jig)^[8]를 연결하여 측정하였다. 의도적인 공극을 제공하기 위해서 100×50 mm 크기의 종이 세 장을 스페이서(spacer)

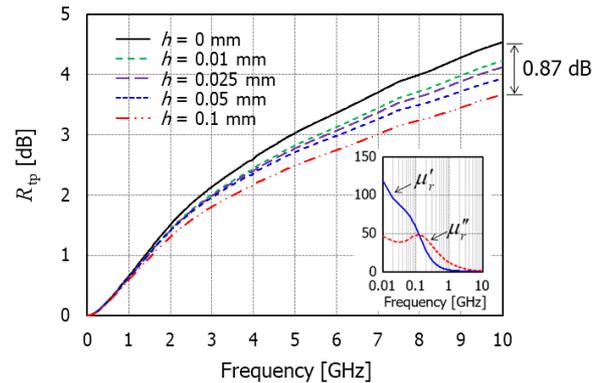
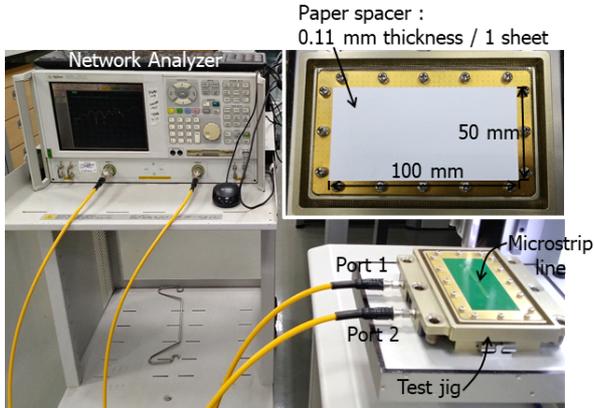
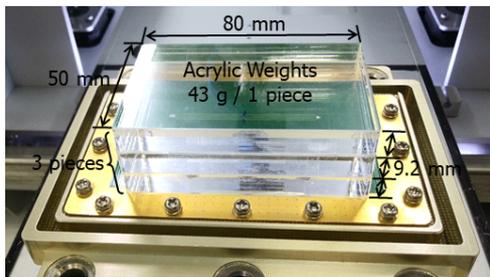


그림 3. 공극에 따른 자성 시트의 전송감쇠 수치해석 결과
Fig. 3. Numerical simulation results of transmission attenuation of magnetic sheet according to air gap.



(a) 마이크로스트립 선로를 가진 시험 지그와 네트워크 분석기, 선로 위에 공극으로 사용된 종이 스페이서
 (a) Test jig with a microstrip line and network analyzer, and paper spacers used as air gap above the line



(b) 측정 시트를 눌러주기 위해 사용한 아크릴 웨이트
 (b) Acrylic weight for pressing the measured sheet

그림 4. 노이즈억제시트의 전송감쇠 측정을 위한 구성
 Fig. 4. Configuration for transmission attenuation measurement of noise suppression sheets.

로 사용하였다. 종이 한 장의 두께는 약 0.11 mm이다. 자성 시트의 R_{tp} 를 잘 측정하기 위해서 크기가 80×50×9.2 mm이고 무게가 약 43 g인 아크릴 웨이트(acrylic weight) 세 개를 이용하여 1.264 N(0.043 kg×3×9.8 m/s²)의 힘으로 시트를 눌러주었다. 자성 시트를 눌러주는 아크릴 웨이트가 자성 시트의 전송 감쇠 특성에 영향을 주면 안 되기 때문에 자성 시트가 없는 상태에서 아크릴 웨이트 자체의 전송 감쇠 특성을 먼저 측정하였다.

그림 5에서는 마이크로스트립 선로 자체와 그 위에 아크릴 웨이트(weight)가 있을 때 종이 스페이서 개수에 따른 R_{tp} 를 보여준다. 아크릴 웨이트로 인해 R_{tp} 가 최대 0.65 dB 정도 증가하지만 통상 수 dB에서 수십 dB의 전송

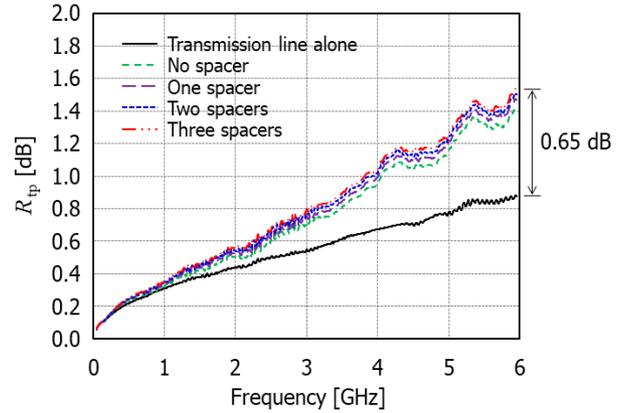
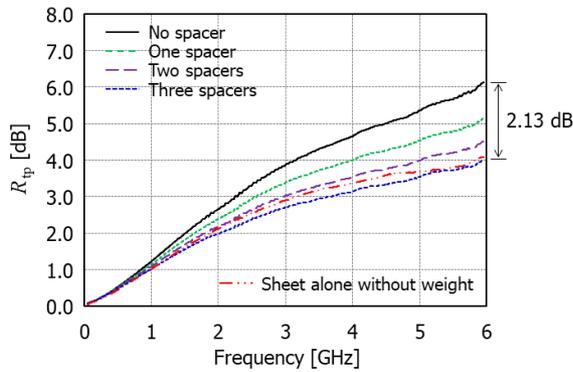


그림 5. 시트가 없을 때 공극에 따른 아크릴 웨이트의 전송감쇠 측정 결과
 Fig. 5. Measured transmission attenuation results of acrylic weights as varying air gap when without a sheet.

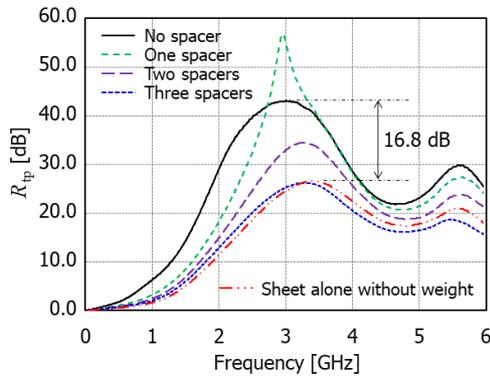
감쇠 특성을 갖는 자성 시트의 R_{tp} 에 영향을 줄 정도는 아니다.

그림 6에서는 두 종의 자성 시트에 대해 공극의 변화에 따른 R_{tp} 의 변화를 측정하였다. 측정에 사용된 시트는 DMEGC사(이하 D사)의 모델^[9]과 Laird사(이하 L사)의 모델^[10]로 모두 0.4 mm의 두께를 가진다. D사의 모델은 페라이트 분말로 제작된 자성 흡수 시트이며, L사의 모델은 금속 성분의 샌더스트 분말로 제작된 노이즈억제시트이다.

그림 6(a)에서 보듯이 D사의 모델은 공극이 없을 때 6 GHz에서 약 6 dB의 R_{tp} 를 보여준다. 종이 스페이서 세 장이 적층되어 있으면 즉 공극이 약 0.33 mm인 경우에는 6 GHz에서 약 4 dB로 공극이 없을 때 보다 약 2 dB 정도 R_{tp} 가 감소함을 알 수 있다. 만약 아크릴 웨이트를 사용하지 않을 경우의 R_{tp} 를 보면 아크릴 웨이트를 사용한 상태에서 종이 스페이서가 두 장과 세 장일 때의 R_{tp} 값 사이에 있음을 알 수 있다. 다시 말해 아크릴 웨이트로 눌러주지 않을 경우 마이크로스트립 선로와 시트 사이에 대략 0.22~0.33 mm의 공극이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6(b)에 나타난 L사의 모델의 경우에는 2 GHz 이상에서 10 dB 이상의 R_{tp} 를 가짐을 알 수 있다. 그래서 공극에 의한 R_{tp} 의 차이도 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 공극이 없는 상태, 즉 마이크로스트립 선로와 시트 사이에 종이 스페이서가 없으면서 시트를 아크릴 웨이트로



(a) D사의 자성 흡수 시트에 대한 전송감쇠 측정결과
(a) Measured transmission attenuation results of magnetic absorbing sheet made by D-company



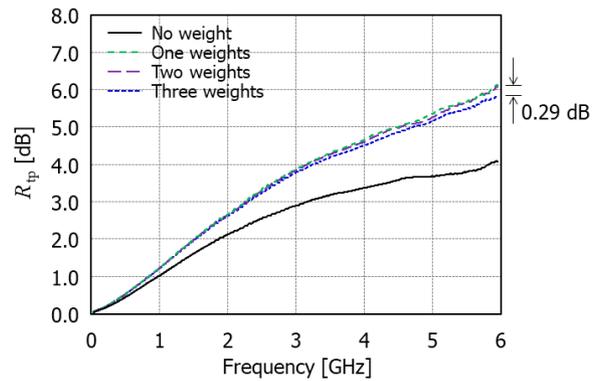
(b) L사의 자성 흡수 시트에 대한 전송감쇠 측정결과
(b) Measured transmission attenuation results of magnetic absorbing sheet made by L-company

그림 6. 종이 스페이서 개수에 따른 전송감쇠 특성 비교
Fig. 6. Comparison of measured transmission attenuation according to the number of paper spacers.

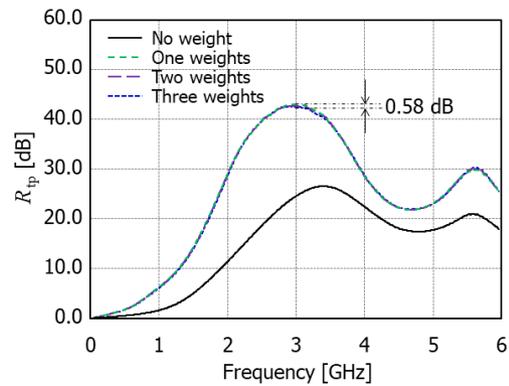
눌러준 경우에 R_{tp} 는 3 GHz에서 약 43 dB이다. 하지만 종이 스페이서를 한 장, 두 장, 세 장을 추가하게 되면 공극이 증가하여 R_{tp} 가 점점 감소하게 된다. 종이 스페이서가 한 장 삽입되었을 때는 약 2.9 GHz에서 강한 공진으로 인해 그 주파수 주변에서만 R_{tp} 가 매우 커지는 현상이 관측되었다. 이러한 공진 특성은 마이크로스트립 선로와 자성 시트 간의 LC 공진회로에 의한 것으로 보인다^[11]. 또한 종이 스페이서의 수가 증가할수록 R_{tp} 가 감소하며 최대 16.8 dB 정도의 R_{tp} 차이를 보였다. 만약 아크릴 웨이트를 사용하지 않은 경우의 R_{tp} 를 보면 3 GHz까지 중

이 스페이서 세 장을 사용한 경우의 R_{tp} 와 유사하였고, 그 이상의 주파수 대역에서는 종이 스페이서 두 장과 세 장일 때의 R_{tp} 값 사이의 범위에 놓여 있음을 알 수 있다. 다시 말해 D사의 모델과 유사하게 아크릴 웨이트를 사용하여 시트를 눌러주지 않으면 마이크로스트립 선로와 시트 사이에 약 0.22~0.33 mm의 공극이 발생함을 알 수 있다. 그러나 이러한 공극의 크기는 측정하고자 하는 시트의 두께와 무게에 따라 달라질 수 있다.

그림 7에서는 0.4 mm 두께의 자성 흡수 시트를 눌러주



(a) D사의 자성 흡수 시트에 대한 전송감쇠 측정결과
(a) Measured transmission attenuation results of magnetic absorbing sheet made by D-company



(b) L사의 자성 흡수 시트에 대한 전송감쇠 측정결과
(b) Measured transmission attenuation results of magnetic absorbing sheet made by L-company

그림 7. 아크릴 웨이트 개수에 따른 전송감쇠 특성 비교
Fig. 7. Comparison of measured transmission attenuation according to the number of acrylic weights.

고 있는 아크릴 웨이트의 개수에 따른 R_{tp} 의 변화를 보여준다. 이미 그림 6에서도 나타냈듯이 아크릴 웨이트 유무에 따른 R_{tp} 의 차이는 크지만 아크릴 웨이트 한 개를 사용할 때와 두 개 또는 세 개를 사용할 때의 R_{tp} 의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. D사 시트의 경우에는 아크릴 웨이트 개수에 따라 6 GHz에서 약 0.29 dB의 차이를 보였고, L사 시트의 경우에는 최대 0.58 dB의 차이를 보였다. 이는 본 연구에서 사용한 0.4 mm 두께를 갖는 시트의 경우 약 1 N 정도의 힘으로 눌러준다면 신뢰성 있는 측정 결과를 얻을 수 있음을 의미한다. 웨이트의 무게는 측정하고자 하는 시트에 따라 다를 수 있지만 충분한 무게의 웨이트를 사용하면 자성 시트에 대한 신뢰성 있는 전송 감쇠 특성을 측정할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 IEC 62333-2 표준 방법인 마이크로스트립 선로를 이용하여 자성 시트의 전송감쇠 특성을 측정할 때 발생할 수 있는 마이크로스트립 선로와 시트 사이의 공극(air gap)이 전송감쇠 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 공극이 전송감쇠에 미치는 영향을 먼저 유효 비투자율과 자성 손실에 대한 이론식을 통해 정성적으로 분석하였고, 수치해석과 측정을 통해 그 특성을 정량적으로 검증하였다. 마이크로스트립 선로와 측정 시트 사이에 발생하는 공극은 전송감쇠 측정결과의 정확성을 저하시킬 수 있으며 따라서 측정 시 공극의 발생을 최대한 줄이기 위해서 전송감쇠 특성에 영향을 주지 않는 소재로 제작된 충분한 무게를 갖는 웨이트(weight)의 사용이 필요하다.

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. 394-401, Apr. 2018.

[2] P. DeRoy, M. Y. Koledintseva, C. F. Rostamzadeh, M.

Worden, T. Monti, and W. Schulz, et al., "Effectiveness of noise suppressing sheet material for mitigation of automotive radiated emissions," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 2, pp. 398-409, Apr. 2021.

[3] *Noise Suppression Sheet for Digital Devices and Equipment - Part 2: Measuring Methods*, IEC Standard 62333-2, May 2006.

[4] A. K. Verma, G. H. Sadr, "Unified dispersion model for multilayer microstrip line," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 7, pp. 1587-1591, Jul. 1992.

[5] K. Etse, P. Clerico, L. Prevond, A. L. Helbert, T. Baudin, and X. Mininger, "Comparative study of thin layers modeling in electromagnetism: Application to multilayer magnetic shielding," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 5, pp. 1351-1359, Oct. 2023.

[6] E. Sano, M. Ikebe, "Analytical methods for evaluating the characteristics of noise suppression sheets," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, no. 4, pp. 1052-1057, Aug. 2022.

[7] CST Microwave Studio(MWS). "Dassault systemes," 2020. Available: <https://www.3ds.com>

[8] C. S. Kim, "5G band shielding and absorption material measurement technologies and equipment," *The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 1 pp. 82-86, Jan. 2023.

[9] DMEGC, "Magnetic Materials," 2024. Available: <https://www.chinadmegc.com/product/6.html>

[10] Laird, "Eccosorb™ LS," 2024. Available: <https://www.laird.com/products/absorbers/microwave-absorbing-foams/single-layer-foams/eccosorb-ls>

[11] T. Mikami, S. Muroga, M. Tanaka, Y. Endo, S. Hashi, and K. Ishiyama, "Estimation of noise suppression in MSL with Co-Zr-Nb film considering impedance matching," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 2, p. 6100205, Feb. 2022.

박 현 호 [수원대학교/교수]

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



1999년 8월: 한국과학기술원 전기및전자 공학과 (공학박사)
1999년 9월: 한국전자통신연구원 선임연구원
2006년 6월: 삼성전자 글로벌기술센터 수석연구원
2012년 9월~현재: 수원대학교 전기전자

공학부 교수

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

김 지 성 [한국과학기술원/초빙교수]

<https://orcid.org/0000-0001-7333-6427>



1993년 2월: 홍익대학교 전기제어공학과 (공학사)
1997년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학석사)
2000년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학박사)

2000년~2006년: 삼성전자 수석연구원

2007년~2014년: 한국과학기술원 전기전자공학과 연구교수

2015년~2022년: 수원과학대학교 전자정보통신공학과 교수

2022년~현재: 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 초빙교수

[주 관심분야] EMI/EMC, Signal/Power Integrity, 고속신호 인터커넥트 및 시스템 설계, 무선전력전송

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 글로벌기술센터

책임연구원

2014년~현재: 광운대학교 전자통신공학과 교수

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

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 전자컴퓨터공학과 박사과정 수료

[주 관심분야] EMC 부품 및 장비 개발,

EMC 표준