

전도성 그리드를 활용한 전자파 흡수차폐/방열 복합소재 필름

박병진*[†] · 류승한* · 권숙진* · 김수련* · 이상복*

A Conductive-grid based EMI Shielding Composite Film with a High Heat Dissipation Characteristic

Byeongjin Park*[†], Seung Han Ryu*, Suk Jin Kwon*, Suryeon Kim*, Sang Bok Lee*

ABSTRACT: Due to the increasing number of wireless communication devices in mmWave frequency bands, there is a high demand for electromagnetic interference (EMI) shielding and heat dissipating materials to avoid device malfunctions. This paper proposes an EMI shielding composite film with a high heat dissipation characteristic. To achieve this, a conductive grid is integrated with a polymer-based composite layer including magnetic and heat dissipating filler materials. A high shielding effectiveness (>40 dB), low reflection shielding effectiveness (<3 dB), high thermal conductivity (>10 W/m·K), thin thickness (<500 μm) are simultaneously achieved with a tailored design of composite layer compositions and grid geometries in 5G communication band of 26.5 GHz.

초 록: 무선통신기술의 발전과 함께 통신기기의 활용영역은 기하급수적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 통신기기 성능의 저하를 막기 위한 전자파 노이즈 간섭문제 해결 및 방열문제 해결 소재에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 연구에서는 전자파 차폐와 우수한 방열특성을 동시에 가질 수 있는 복합소재 필름을 제안하였다. 이 필름은 고분자 수지에 자성 및 방열 필러 물질이 분산된 복합소재 레이어와 전도성 그리드로 구성되어 있다. 복합소재 레이어의 조성 및 특성에 대한 제어 및 전도성 그리드 형상에 대한 설계를 통해 높은 전자파 차폐능(>40 dB), 낮은 전자파 반사능(<3 dB), 우수한 열전도도(>10 W/m·K)를 5G 통신 대역인 26.5 GHz에서 500 μm 이하의 극박 필름으로 달성하는 데 성공하였다.

Key Words: 전자파 차폐(EMI shielding), 전도성 그리드(Conductive grid), 방열소재(Heat dissipating materials), 자성소재(Magnetic materials)

1. 서 론

5G/6G 시대의 도래와 무선통신기술의 발전과 함께 모바일 단말기, 기지국(스몰 셀), 자율주행자동차 레이더, 사물인터넷 통신부품 등 통신기기의 활용영역은 기하급수적으로 증가하고 있다[1]. 이에 따라 각 기기에서 활용되는 전자파 공해와 기기간 간섭으로 인한 노이즈 발생과 무선통신기기 성능 저하에 대한 우려가 높아지고 있으며, 특히 5G/

6G에서 활용되는 밀리미터파 대역에서의 전자파 간섭 문제 해결에 대한 수요가 크다[2,3].

또한 통신 부품에서 발생하는 열에 의한 성능 저하를 막기 위해 방열소재의 활용도 증가하고 있는데, 소형화되고 있는 무선통신기기 내부에서 전자파 차폐소재와 방열소재를 별도로 활용하는 대신 하나의 소재로 두 문제를 동시에 해결할 수 있는 다기능 복합소재에 대한 관심도 높아지고 있다.

Received 3 June 2022, received in revised form 17 June 2022, accepted 23 June 2022

*Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

*[†]Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea, Corresponding author (E-mail: b.park@kims.re.kr)

과거의 2G/3G/4G 통신 시대부터 전자파 간섭 문제 해결을 위해 다양한 전자파 차폐소재들이 연구되어 왔다. 기존의 전자파 차폐소재들은 대부분 반사 위주의 차폐(반사차폐)를 통해 전자파의 투과를 막는 방식으로 작동한다[4,5]. 이를 위해 가장 중요한 것은 높은 전기전도도를 확보하는 것으로, 전도성 물질인 금속[6-8], 맥신(MXene)[9,10], 탄소 기반[11-15]의 경량 극박 필름이 널리 활용된다. 전자파 차폐소재의 차폐성능은 차폐능(SET, Total Shielding Effectiveness)으로 표현되는데 이들 전도성 필름들은 대부분 30 dB(99.9%) 이상의 우수한 차폐능을 가져 외부 전자파의 투과를 0.1% 이하로 낮게 유지할 수 있으며 높은 열전도도 역시 가지고 있기에 방열 소재로도 활용이 가능하다.

그러나 5G/6G 통신 시대의 도래와 함께 기존 반사 차폐소재의 활용의 한계가 지적되기 시작했다. 기존 반사 차폐소재들은 높은 전기전도도를 갖고 있기에 90% 이상의 외부 전자파를 반사하는 방식으로 전자파를 차폐하는데(반사능(SER, Reflection Shielding Effectiveness)>10 dB), 통신부품의 집적화와 고주파 대역에서의 파장 감소 및 직진성 향상으로 인해 차폐소재에서 반사된 전자파에 의한 다른 통신부품의 2차 간섭 문제가 지적되고 있다[16,17]. 이를 해결하기 위해 반사 위주의 차폐소재 대신 대부분의 전자파를 흡수하여 제거할 수 있는 흡수 위주의 차폐(흡수차폐)소재에 대한 연구가 늘어나고 있다[18,19]. 그러나 흡수 위주의 차폐소재들은 대부분 밀리미터파 대역에서 높은 차폐능을 갖지 못하기에 차폐능 향상을 위해 두께가 수 mm 이상으로 두꺼워지는 등의 단점이 지적되고 있으며, 반사를 낮추기 위해 전도성 소재의 활용이 최소화되기에 열전도도 역시 기존 반사차폐소재들에 비해 크게 저하되는 한계가 있다. 본 연구진에서도 기존에 전도성 그리드를 활용하여 흡수차폐소재를 개발한 바 있으나, 그 열전도도는 우수하지 못했다[20,21].

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 5G 통신 주파수에서 낮은 반사능, 높은 흡수 위주 차폐능, 높은 열전도도를 동시에 달성할 수 있는 복합소재 필름에 대해 연구하였다. 열가소성 고분자 기반의 자성/유전/방열 복합소재 레이어와 전도성 그리드의 복합화를 통해 3 dB(50%) 이하의 낮은 반사능, 40 dB(99.99%) 이상의 높은 차폐능, 10 W/m·K 이상의 우수한 열전도도를 동시에 달성하는 데 성공하였다.

2. 흡수/방열 복합소재 필름 설계

제안된 흡수/방열 복합소재 필름의 구조는 Fig. 1과 같다. 상부에는 고분자 수지에 자성소재와 방열소재가 분산된 복합소재 레이어가 있으며, 복합소재 레이어 아래쪽에는 전도성 그리드가 복합화되어 있다. 외부에서 전자파가 입사하는 경우 일부 전자파는 복합소재 레이어 표면에서

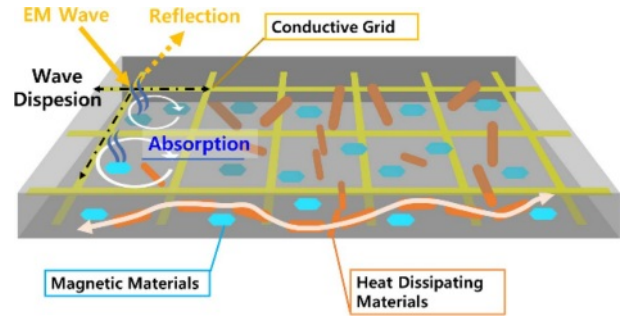


Fig. 1. Schematic diagram of the proposed composite shielding film

반사되며, 반사되지 않은 전자파는 복합소재 내부로 입사한다.

이 때 입사한 전자파는 자성소재가 발현하는 유전손실/자성손실에 의해 전자파 에너지가 열에너지로 변환되어 소실된다. 전도성 그리드는 이 때 크게 세 가지 역할을 수행하는데, (1) 입사한 전자파를 소재 전체 평면에 분산시킴으로써 필름에 분산된 자성소재의 흡수 기여를 활발하게 하고 (2) 그리드 자체의 전도손실을 활용하여 입사한 전자파를 추가로 흡수하며 (3) 적절한 임피던스를 가져 전체 필름의 임피던스와 공기 임피던스의 차이를 저감시킨다.

흡수/방열 복합소재 필름 설계에 있어 가장 핵심적인 부분은 전자파의 반사를 최소화하기 위해 전체 필름의 임피던스를 공기의 임피던스와 유사하게 하는 것이다. 전송선로 이론에 따르면 2층으로 구성된 필름의 입력 임피던스(Z_i)는 다음과 같이 주어진다[22].

$$Z_i = Z_c \frac{Z_g + Z_c \times k}{Z_c + Z_g \times k} \quad (1)$$

$$Z_c = Z_0 \sqrt{\mu/\epsilon} \quad (2)$$

$$k = \tanh\left(j2\pi f \frac{t}{c} \sqrt{\mu \times \epsilon}\right) \quad (3)$$

이 때 Z_c 는 복합소재 레이어의 특성 임피던스, Z_g 는 전도성 그리드의 특성 임피던스, Z_0 는 공기의 특성 임피던스, μ 는 복합소재 레이어의 투자율, ϵ 은 복합소재 레이어의 유전율, t 는 복합소재 레이어의 두께, f 는 전자파의 주파수, c 는 공기 중 빛의 속도를 의미한다. 따라서 반사를 줄이기 위해서는 필름의 임피던스를 공기 임피던스와 유사하게 하기 위해 원하는 주파수에서 복합소재 레이어의 유전율과 투자율, 두께, 그리고 그리드의 임피던스를 적절히 제어해야 한다. 이 때 그리드의 임피던스는 그리드를 구성하는 소재의 전도도와 그리드 형상을 변화시킴으로써 제어하는 것이 가능하며, 극단적으로 낮은 임피던스보다 적절한 값을 가지는 것이 반사능을 낮추는 데 기여할 수 있음이 알려져 있다[20]. 그리드의 형상 제어를 위해 스크린 프린팅, 잉크

젯 프린팅 등 다양한 방법이 활용될 수 있으나 본 연구에서는 전주도금 방식을 이용해 원하는 형상의 그리드를 제조하였다.

복합소재 레이어에 포함되어 있는 방열소재는 레이어 내부에서 열전도 네트워크를 형성하여 열에너지의 빠른 확산에 기여한다. 이 때 적은 양의 방열소재로 우수한 열전도도를 얻기 위해서는 방열소재의 네트워크 구성이 요구되며, 퍼콜레이션 구조의 형성 등을 통해 우수한 열전도도를 확보할 수 있음이 알려져 있다[23]. 그러나 본 연구에서는 전자파 흡수차폐 특성의 확보를 위해 별도의 내부구조 제어가 이루어지지 않았다. 전도성 그리드 또한 열전도도 향상에 기여하는데, 그리드를 구성하는 금속이 일반적으로 높은 열전도도를 가지는 만큼 그리드가 형성되어 있는 방향으로의 열확산이 용이하게 이뤄질 수 있도록 한다.

3. 실험 방법

3.1 실험재료

복합소재 레이어의 수지로 송원산업의 A-9410 열가소성 폴리우레탄(TPU)이 활용되었다. 해당 수지는 TPU가 N,N-dimethylformamide (DMF) 용매에 30% 용해되어 있는 형태이다. 자성소재로 철계 분말(CIP, BASF Korea)이 활용되었으며 해당 분말은 평균 3 μm 의 입도를 가진다. 유전소재로 나노솔루션의 TMC-100 다중벽 탄소 나노튜브(MWCNT, Multi-walled carbon nanotube)가 사용되었다. 방열소재로 질화붕소(BN, Boron Nitride) 분말(Denka, XGP)이 활용되었으며 해당 분말은 평균 30 μm 의 입도를 가진다.

전도성 그리드로 삼원ACT의 전주도금 그리드가 활용되었다. 해당 그리드는 선폭 100 μm , 그리드 간격 100 μm 을 가지며 두께는 20 μm 이다. 니켈(Ni)과 구리(Cu)가 도금된 그리드 2종이 흡수차폐/방열 복합소재 필름에 적용되었다.

3.2 제조방법

TPU 수지와 철계 분말, BN 분말을 적절한 비율로 혼합한 후 5분간 플래네티리 믹서(ARE-310, Thinky)에서 2000 rpm으로 분산하여 복합소재 레이어로 활용될 페이스트를 제조한다. 제조된 페이스트를 블레이드 캐스팅을 통

해 100 μm 두께의 필름으로 제조한다. 제조된 필름은 110°C에서 4시간 동안 건조해 DMF 용매와 불필요한 기포를 제거한다. 건조가 종료된 후, 필름 5장을 차례로 적층하고 그 위에 금속 그리드를 최종 적층한 후 120°C에서 20분간 10 MPa의 압력을 가하는 핫 프레스 공정을 통해 400 μm 두께의 흡수차폐/방열 복합소재 필름을 제조한다. 실험에 사용된 TPU 수지와 철계 분말, BN 분말의 비율 등의 조건은 Table 1과 같다.

3.3 분석방법

제조된 필름의 형상과 내부 구조는 광학현미경(Y-IM, Nikon) 및 주사 전자 현미경(SEM, Scanning Electron Microscopy, JSM-7001F, JEOL)을 활용해 분석하였다.

필름의 열전도도는 레이저 플래시법(LFA 467 HyperFlash, NETZSCH)를 활용해 면내 방향(In-plane)의 열확산률을 측정 한 후, 시차주사열량측정기(Q2000, TA)에서 얻은 비열과 필름의 밀도를 곱해 계산하였다.

전자파 차폐 특성은 벡터 네트워크 분석기(N5222B, Keysight)를 이용해 측정하였다. 26.5 GHz 전자파 차폐 특성 측정을 위해 WR-42 도파관이 활용되었으며, 전자파 차폐 필름을 $29.2 \times 29.2 \text{ mm}^2$ 으로 가공 후 도파관에 삽입하여 측정 한 S-parameter로부터 다음과 같이 차폐능을 계산하였다.

$$R = |S_{11}|^2 \quad (4)$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad (5)$$

$$SE_R = -10 \log(1 - R) \quad (6)$$

$$SE_A = -10 \log(T/(1 - R)) \quad (7)$$

$$SE_T = -10 \log(T) = SE_R + SE_A \quad (8)$$

복합소재 레이어의 전자기 특성(유전율 및 투자율)은 복합소재 레이어를 $10.7 \times 4.3 \text{ mm}^2$ 으로 가공 후 도파관에 삽입하여 측정 한 S-parameter로부터 Nicholson-Ross-Weir 방법을 이용해 계산하였다[24].

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 필름 제작 결과

Fig. 2는 제조된 필름의 형상을 나타내고 있다. Fig. 2(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 제조된 흡수차폐/방열 복합소재 필름의 전면에는 복합소재 레이어가, 후면에는 전도성 그리드가 위치하고 있다. Cu 전도성 그리드의 형상은 Fig. 2(c)와 같으며, Ni 그리드도 동일한 형상으로 제작되었다. Fig. 2(d)는 제조된 필름의 단면을 SEM으로 촬영한 것이다. 위쪽에는 고분자 수지 복합소재 레이어가 위치하고 있으며, 레이어 최하단에 전도성 그리드의 와이어가 일정한 간격으로 배치되어 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(c)와 같이 그리드

Table 1. Specimen Compositions

	TPU (wt%)	Fe (wt%)	BN (wt%)	Grid
Fe Composites w/o Grid	30	70	0	-
Fe/BN Composites w/o Grid	15	70	15	-
Fe Composites w/ Ni Grid	30	70	0	Ni
Fe/BN Composites w/Ni Grid	15	70	15	Ni
Fe Composites w/Cu Grid	30	70	0	Cu
Fe/BN Composites w/Cu Grid	15	70	15	Cu

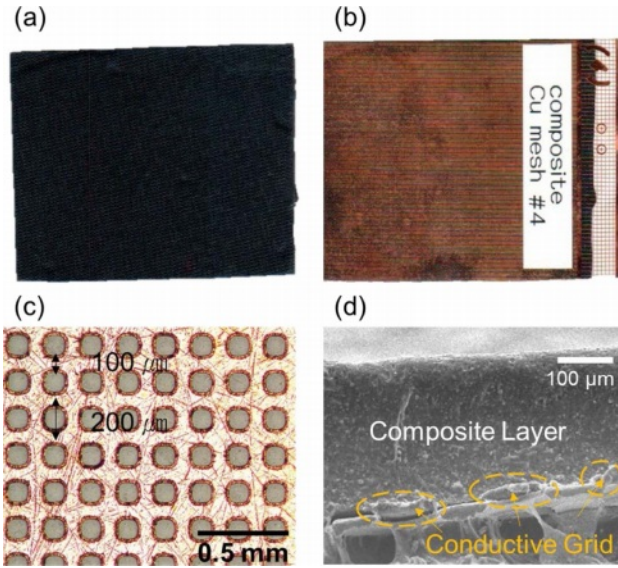


Fig. 2. Morphology of the proposed composite shielding film: (a) Front view of the composite film; (b) Rear view of the composite film; (c) Optical microscopic image of the conductive grid; (d) SEM image of the composite film cross section

와이어의 폭은 약 100 μm 이며, 와이어간 간격도 100 μm 임이 확인된다.

4.2 방열 특성

Table 1에서 제시된 6종의 필름에 대해 면내 방향 열전도도를 측정한 결과는 Fig. 3과 같다. BN 분말의 포함 여부와 그리드의 종류 등에 따라 1.7~10.5 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ 내외의 값을 가지고 있으며, Fe/BN/Cu Grid를 사용한 필름의 경우 10 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ 가 넘는 우수한 열전도도를 보여 흡수차폐/방열 복합소재로 활용하기에 적합한 성능을 가지고 있다 할 수 있다.

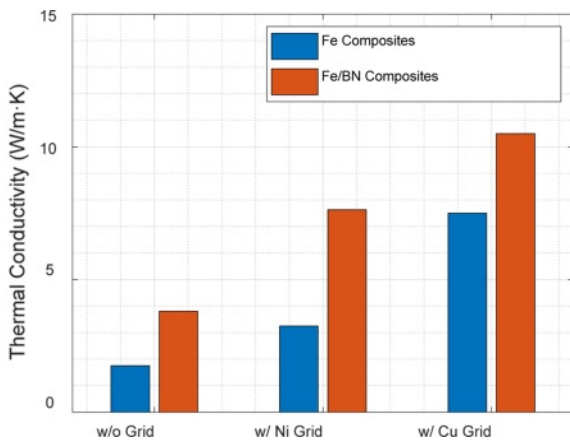


Fig. 3. Measured in-plane thermal conductivity of the composite shielding films

Fig. 3에서 보듯이 복합소재 레이어에 BN 분말이 포함된 경우 그렇지 않은 경우에 비해 열전도도가 크게는 2배 이상 향상되는 것을 볼 수 있다. 이는 판상형의 BN이 필름 캐스팅 과정에서 평면 방향으로 열전도 네트워크를 형성하기 때문으로, BN 분말의 투입이 면내 방향 열전도도 향상에 크게 기여함을 알 수 있다. 특히 BN 분말은 CNT, 그래핀과 같은 타 방열 필러들에 비해 전기 전도도가 낮고 절연성이 좋기 때문에 차폐소재의 반사능을 낮추는데 도움을 줄 수 있다.

또한 전도성 그리드의 복합화 여부 및 그리드의 종류에

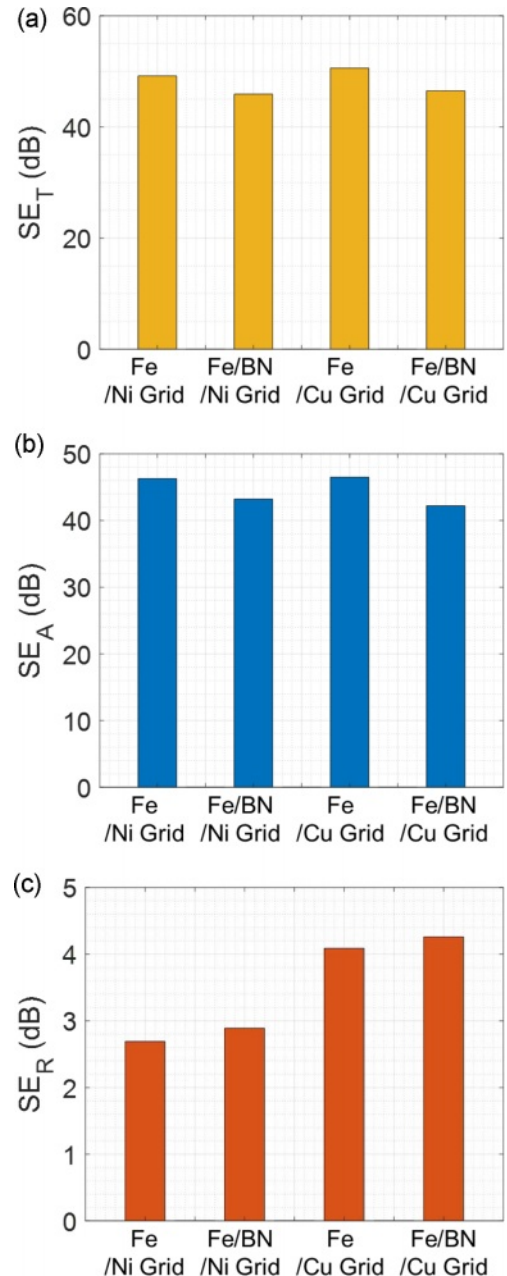


Fig. 4. (a) Total, (b) absorption, and (c) reflection shielding effectiveness of the composite shielding films

따라 열전도도의 큰 차이가 있음이 확인되었다. BN 분말은 열전도도를 크게 향상시키는 데 도움을 줄 수 있지만, 전자파 흡수차폐 기능을 고려할 때 BN 분말의 투입량에는 한계가 존재한다. 이에 따라 복합소재 레이어의 구성에 영향을 미치지 않으면서 열전도도를 향상시킬 수 있는 방안이 필요한데, 본 논문에서 적용한 전도성 그리드는 전체 필름에서 차지하는 부피는 5% 미만이지만 그리드의 형상이 면내 방향으로 효율적인 열전도 네트워크를 구성하기에 열전도도를 크게 향상시킬 수 있다. 동일한 형상의 전도성 그리드를 활용하더라도 열전도도가 높은 Cu (~ 400 W/m·K) 도금을 통해 제조된 그리드가 Ni(~ 90 W/m·K) 기반의 그리드에 비해 더 우수한 방열 효과를 보임을 확인할 수 있는데, 이는 전도성 그리드의 열전도 네트워크 형성이 제작된 필름의 방열 특성에 큰 기여를 하고 있음을 의미한다[25].

4.3 전자파 차폐 특성

그리드와 복합화된 4종의 시편에 대해 전자파 차폐능을 측정한 결과는 Fig. 4와 같다. 전자파 차폐능은 입사한 전자파 중 얼마나 많은 전자파가 소재를 투과하였는지를 나타내는 지표로, 높은 차폐능을 가질수록 적은 전자파가 투과함을 의미한다. 차폐능은 반사능과 흡수능으로 분리하여 설명할 수 있는데, 각각은 입사한 전자파 중 얼마나 많은 전자파가 반사되었는지를 나타내는 지표, 반사되지 않은 전자파 중 얼마나 많은 전자파가 흡수되었는지를 나타내는 지표이다. 따라서 전체 차폐능은 반사능과 흡수능의 합과 같다. 일반적으로 20 dB 이상의 차폐능을 갖고 있는 경우 99%의 전자파를 차폐해 시스템 적용이 가능하다고 평가받으며, 40 dB 이상의 차폐능을 갖고 있는 경우 99.99%의 전자파를 차폐해 매우 우수하다고 평가된다.

Fig. 4(a)와 같이 4종의 필름은 모두 40 dB 이상의 우수한 차폐능을 가진다. 이를 흡수능과 반사능으로 분리해 보면 Fig. 4(b),(c)와 같다. 흡수능에 기여하는 것은 소재 내에서 전자파를 손실시킬 수 있는 자성손실, 유전손실, 전도손실 특성으로, 제한된 복합소재 필름의 경우 철계 분말의 유전손실/자성손실과 전도성 그리드의 전도손실이 큰 역할을 한다. 4종 필름 모두 전도성 그리드를 포함하고 있기에 전도성 그리드의 전도손실 덕분에 40 dB 이상의 높은 흡수능을 나타내나, BN 분말이 포함된 필름의 경우에는 오히려 흡수능이 소폭 저하되는 것이 확인되었다. 이는 철계 분말 사이사이에 BN 분말이 분산되면서 철계 분말의 네트워크를 막는 절연 역할을 하기 때문으로, 이로 인해 유전손실이 감소하면서(Fig. 5(a)) 철계 분말의 흡수능 기여분이 줄어들기 때문으로 판단된다.

반사능의 경우, 일반적으로 3 dB 이하의 반사능을 가지는 차폐소재의 경우 50% 이하의 전자파를 반사시키기에 흡수 위주의 차폐소재라고 평가받는다. 4종 필름의 반사능을 비교해 보면 Ni 그리드를 활용한 경우에는 최소 2.69 dB의

반사능을 나타내나 BN 분말 투입에 의해 반사능이 다소 증가하고, Cu 그리드를 사용한 경우에는 반사능이 4 dB 내외로 다소 높아짐을 볼 수 있다.

이는 임피던스 매칭의 관점에서 설명할 수 있다. 반사능은 공기 임피던스와 매질(소재) 임피던스의 차이에 의해 결정되는데, 임피던스 차이가 크게 발생할수록 반사능이 높아지게 된다. BN 분말이 투입되는 경우 Fig. 5(a)와 같이 유전율이 감소하게 되며, 이에 따라 복합소재 필름의 임피던스가 변화하게 된다(Equation (1)). 전도성 그리드의 변화에 따른 반사능 증가도 마찬가지로, 복합소재 그리드의 특성 임피던스 변화에 의해 발생하는 현상이라 할 수 있다.

따라서 Cu 그리드를 사용하는 경우 높은 열전도도를 얻을 수 있으나, 반사능 또한 높아지게 되기에 우수한 흡수차폐 필름이라 할 수 없다. 따라서 높은 열전도도와 낮은 반사능을 동시에 확보하기 위해 유전율 제어가 필요하며, 이를 위해 Fe/BN 복합소재 레이어를 제조하는 과정에서 MWCNT를 추가 투입하여 흡수차폐/방열 복합소재 필름을 제조하였다. 이 때 CNT 함량 증가에 따라 반사능이 감소하여 0.3 wt% 투입시 반사능이 3 dB에 도달하는 것을 확인하였다(Fig. 6). 이는 BN분말 투입과는 반대로 CNT의 투입에 의해 유전율이 상승하기 때문에 공기와 임피던스

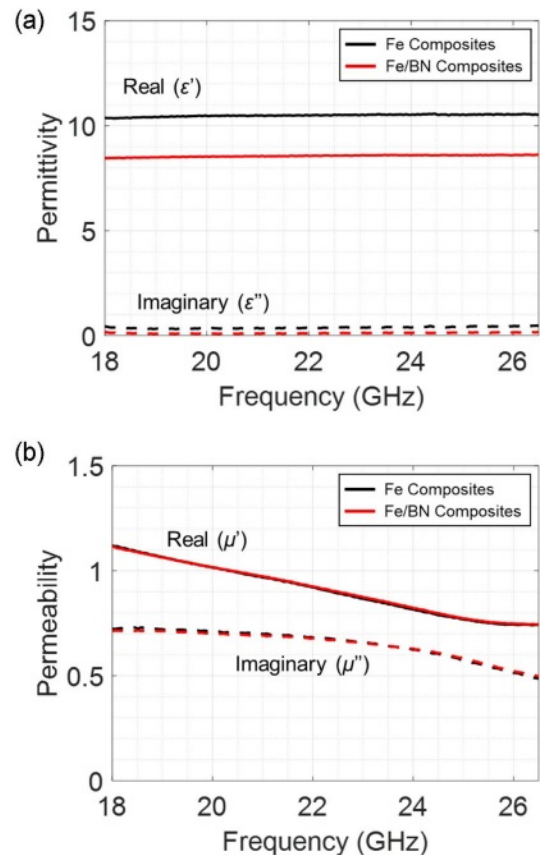


Fig. 5. (a) Complex permittivity and (b) permeability of the composite layers with/without BN powder

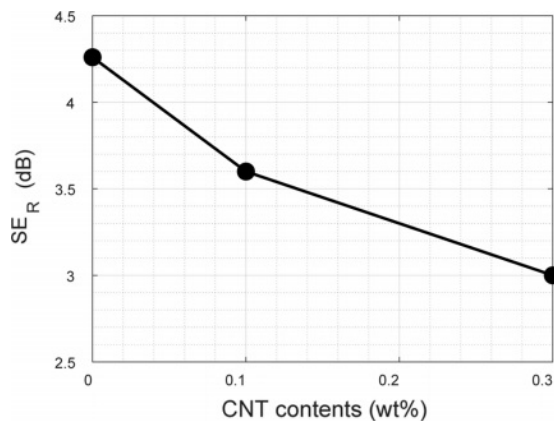


Fig. 6. Reflection shielding effectiveness of Fe/BN/MWCNT composite films with a Cu grid

차이 저감에 긍정적인 영향을 주기 때문이라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 전도성 그리드와 자성/방열 복합소재 레이어의 복합화를 통해 전자파 차폐와 방열기능을 동시에 수행할 수 있는 다기능 복합소재 필름을 제안하였다. 제안된 필름은 고분자 수지에 자성필러와 방열필러가 분산된 복합소재 레이어와 금속 전도성 그리드로 구성되어 있으며, 이들의 적절한 조성제어 및 형상제어를 통해 높은 전자파 차폐능(>40 dB), 낮은 전자파 반사능(<3 dB), 우수한 열전도도(>10 W/m·K)를 5G 통신 대역인 26.5 GHz에서 500 μ m 이하의 극박 필름으로 달성하는 데 성공하였다.

추후 연구에서는 복합소재 조성의 개선 및 퍼콜레이션 구조 등 내부 구조의 제어, 그리드 형상의 최적화 등을 통해 현재보다 더 낮은 반사능과 더 높은 열전도도를 확보하는 방안에 대해 확인해 볼 계획이다.

후 기

본 연구는 한국재료연구원 주요사업(PNK8330)과 한국연구재단 나노 및 소재기술개발사업(2020M3H4A308184313)으로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Shui, X., and Chugn, D.D.L., "Nickel Filament Polymer-matrix Composites with Low Surface Impedance and High Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 26, No. 8, 1997, pp. 928-934.
- Hu, Y., Li, D., Wu, L., Yang, J., Jian, X., and Bin, Y., "Carbon Nanotube Buckypaper and Buckypaper/polypropylene Composites for High Shielding Effectiveness and Absorption-dominated Shielding Material," *Composites Science and Technology*, Vol. 181, 2019, pp. 107699.
- Hu, M., Gao, J., Dong, Y., Li, K., Shan, G., Yang, S., and Li, R.K.-Y., "Flexible Transparent PES/Silver Nanowires/PET Sandwich-Structured Film for High-Efficiency Electromagnetic Interference Shielding," *Langmuir*, Vol. 28, No. 18, 2012, pp. 7101-7106.
- Zhang, M., Zhang, P., Wang, Q., Li, L., Dong, S., Liu, J., and Rao, W., "Stretchable Liquid Metal Electromagnetic Interference Shielding Coating Materials with Superior Effectiveness," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 7, No. 33, 2019, pp. 10331-10337.
- Wanasinghe, D., and Aslani, F., "A Review on Recent Advancement of Electromagnetic Interference Shielding Novel Metallic Materials and Processes," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 176, 2019, pp. 107207.
- Zhang, N., Zhao, R., He, D., Ma, Y., Qiu, J., Jin, C., and Wang, C., "Lightweight and Flexible Ni-Co Alloy Nanoparticle-coated Electrospun Polymer Nanofiber Hybrid Membranes for High-performance Electromagnetic Interference Shielding," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 784, 2019, pp. 244-255.
- Wang, H., Ji, C., Zhang, C., Zhang, Y., Zhang, Z., Lu, Z., Tan, J., and Guo, L.J., "Highly Transparent and Broadband Electromagnetic Interference Shielding Based on Ultrathin Doped Ag and Conducting Oxides Hybrid Film Structures," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 11, No. 12, 2019, pp. 11782-11791.
- Choi, J.R., Jung, B.M., Choi, U.H., Cho, S.C., Park, K.H., Kim, W.J., Lee, S.K., and Lee, S.B., "Characterization of FeCo Magnetic Metal Hollow Fiber/EPDM Composites for Electromagnetic Interference Shielding," *Composites Research*, Vol. 28, No. 6, 2015, pp. 333-339.
- Liu, R., Miao, M., Li, Y., Zhang, J., Cao, S., and Feng, X., "Ultra-thin Biomimetic Polymeric $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Composite Films for Electromagnetic Interference Shielding," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 10, No. 51, 2018, pp. 44787-44795.
- Nguyen, V.-T., Min, B.K., Yi, Y., Kim, S.J., and Choi, C.-G., "MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/graphene/PDMS Composites for Multifunctional Broadband Electromagnetic Interference Shielding Skins," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 393, 2020, pp. 124608.
- Liu, C., Huang, X., Zhou, J., Chen, Z., Liao, X., Wang, X., and Shi, B., "Lightweight and High-performance Electromagnetic Radiation Shielding Composites Based on a Surface Coating of Cu@Ag Nanoflakes on a Leather Matrix," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 4, No. 5, 2016, pp. 914-920.
- Al-Saleh, M.H., and Sundararaj, U., "Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Effectiveness of PP/PS Polymer Blends Containing High Structure Carbon Black," *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 293, No. 7, 2008, pp. 621-630.
- Yousefi, N., Sun, X., Lin, X., Shen, X., Jia, J., Zhang, B., Tang, B., Chan, M., and Kim, J.-K., "Highly Aligned Graphene/Polymer Nanocomposites with Excellent Dielectric Properties for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding," *Advanced Materials*, Vol. 26, No. 31, 2014, pp. 5480-5487.
- Moon, J.J., Park, O.K., and Lee, J.H., "Development of Hybrid Metals Coated Carbon Fibers for High-Efficient Electromag-

- netic Interference Shielding,” *Composites Research* Vol. 33, No. 4, 2020, pp. 191-197.
15. Lee, K., Lee, J., Jung, B.M., Lee, S.B., and Kim, T., “Dispersion Characteristics of Magnetic Particle/Graphene Hybrid Based on Dispersant and Electromagnetic Interference Shielding Characteristics of Composites,” *Composites Research*, Vol. 31, No. 3, 2018, pp. 111-116.
 16. Xu, Y., Yang, Y., Yan, D.-X., Duan, H., Zhao, G., and Liu, Y., “Gradient Structure Design of Flexible Waterborne Polyurethane Conductive Films for Ultraefficient Electromagnetic Shielding with Low Reflection Characteristic,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 10, 2018, pp. 19143-19152.
 17. Biswas, S., Airef, I., Panja, S.S., and Bose, S., “Absorption-dominated Electromagnetic Wave Suppressor Derived from Ferrite-doped Cross-linked Graphene Framework and Conducting Carbon,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 9, 2017, pp. 3030-3039.
 18. Li, Y., Sun, N., Liu, J., Hao, X., Du, J., Yang, H., Li, X., and Cao, M., “Multifunctional BiFeO₃ Composites: Absorption Attenuation Dominated Effective Electromagnetic Interference Shielding and Electromagnetic Absorption Induced by Multiple Dielectric and Magnetic Relaxations,” *Composites Science and Technology*, Vol. 159, 2018, pp. 240-250.
 19. Liu, X., Kang, J., Liu, B., and Yang, J., “Separation of Gold Nanowires and Nanoparticles Through a Facile Process of Centrifugation,” *Separation and Purification Technology*, Vol. 192, 2018, pp. 1-4.
 20. Ryu, S.H., Han, Y.K., Kwon, S.J., Kim, T., Jung, B.M., Lee, S.B., and Park, B., “Absorption-dominant, Low Reflection EMI Shielding Materials with Integrated Metal Mesh/TPU/CIP Composite,” *Chemical Engineering Journal*, Vol. 428, 2022, pp. 131167.
 21. Ryu S.H., Park, B., Han, Y.K., Kwon, S.J., Kim, T., Lamouri, R., Kim, K.H., and Lee, S.B., “Electromagnetic Wave Shielding Flexible Films with Near-Zero Reflection in the 5G Frequency Band,” *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 10, 2022, pp. 4446-4455.
 22. Wang, T., Han, R., Tan, G., Wei, J., Qiao, L., and Li, F., “Reflection Loss Mechanism of Single Layer Absorber for Flake-shaped Carbonyl-iron Particle Composite,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 112, No. 10, 2012, pp. 104903.
 23. Zhang, G., Xia, Y., Wang, H., Tao, Y., Tao, G., Tu, S., and Wu, H., “A Percolation Model of Thermal Conductivity for Filled Polymer Composites,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 4, No. 8, 2010, pp. 963-970.
 24. Nicolson, A.M., and Ross, G.F., “Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 19, No. 4, 1970, pp. 377-382.
 25. Terada, Y., Ohkubo, K., Mohri, T., and Suzuki, T., “Thermal Conductivity in Nickel Solid Solutions,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 81, 1997, pp. 2263-2268.