

다중 산란 매커니즘을 활용한 전자파 저감 효과를 갖는 3D 프린팅 코러게이트 코어 광대역 전파흡수 샌드위치 복합재 구조 설계

심재원* · 서한준* · 이건규* · 강승현* · 유종경** · 황민제** · 최광식** · 남영우*,***†

Electromagnetic Wave Attenuation Based on the Multi-scattering Mechanism for the 3D-Printed Corrugated-core Broadband Radar-absorbing Composite Structure

Jae-Won Shim*, Han-Jun Seo*, Geon-Gyu Lee*, Seung-Hyeon Kang*, Jong-Gyoung Yoo*,
Min-Je Hwang**, Kwang-Sik Choi**, Young-Woo Nam*,***†

ABSTRACT: In this study, a corrugated-core sandwich radar-absorbing structure was designed and fabricated via FDM (Fused deposition method) based 3D printing process and its electromagnetic absorption performance and mechanical properties were evaluated. The core material was composed of PLA dispersed with conductive carbon black (CB) nanoparticles which provided high dielectric loss. Based on the shape variables of the corrugated core, the structure was designed to achieve a broadband absorption below -10 dB over the C, X, and Ku bands. Radar-absorbing performance of the fabricated specimens was verified by free-space measurement system, the obtained reflection loss achieving below -10 dB across all targeted frequency ranges. Additionally, flexural tests were conducted and the obtained mechanical properties deteriorated due to particle agglomeration and weakened polymer bonding due to high CB contents. These results demonstrate that the 3D-printed corrugated core can provide an efficient approach to achieving both high geometric freedom and excellent radar absorbing performance.

초 록: 본 연구에서는 코러게이트 코어를 갖는 샌드위치 전파흡수구조를 설계하고 FDM 방식의 3D 프린팅 공정을 통해 제작하여 전파흡수성능과 기계적 특성을 평가하였다. 코어 재료로는 전도성 나노 입자인 카본블랙이 분산된 PLA를 사용하여 높은 유전 손실 특성을 확보하였다. 코러게이트 코어의 형상에 대한 변수를 바탕으로 C-X-Ku 대역 전반에서 -10 dB 이하의 광대역 흡수 성능을 달성하도록 설계하였고 제작된 시편에 대한 자유공간측정을 수행한 결과 모든 대역에서 -10 dB 이하를 유지하여 우수한 전파흡수성능을 확인하였다. 또한, 굽힘 시험으로 기계적 특성을 평가한 결과 카본블랙 함량 증가에 따른 응집 및 고분자간 결합력 저하로 인해 기계적 물성이 감소됨을 확인하였다. 본 연구를 통해 3D 프린팅 기반 코러게이트 코어가 복잡한 형상에 대하여 높은 형상 자유도를 보임과 동시에 우수한 전파흡수성능을 만족시키는 효율적 접근 방안을 제시하였다.

Key Words: 적층 제조(Additive manufacturing), 전파흡수구조(Radar absorbing structure), 코러게이트 코어(Corrugated core), 열가소성 수지(Thermoplastic resin), 나노 입자 복합재료(Nano-particle composites)

Received 11 April 2025, received in revised form 1 May 2025, accepted 14 May 2025

*Graduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

**Korea Aerospace Industries, Ltd.

***†Department of Smart Drone Engineering, Korea Aerospace University, Corresponding author (E-mail: ywnam@kau.ac.kr)

1. 서 론

전투기의 전투 생존성은 적 레이더에 탐지될 가능성과 실제 전장 상황에서 충돌, 피탄 등으로 인한 구조 손상을 버틸 수 있는 능력에 의해 크게 좌우된다. 일반적으로 전자기파 기반 레이더는 멀리서도 전투기를 탐지할 수 있어 레이더 반사 면적(Radar Cross Section, RCS)을 최소화하여 스텔스 성능을 확보하는 것은 현대 전투기 설계의 핵심 과제 중 하나다. 이를 위해 기존에는 기체 형상으로 전파의 반사각을 제어하거나 표면에 전파흡수물질(Radar-Absorbing Material, RAM)을 코팅하는 방식이 적용되어 왔다[1-3]. 그러나 이러한 방법은 중량 증가와 유지보수 비용 상승이라는 부담을 초래한다는 단점이 지적되었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 유전체 섬유 기반 복합재의 전자기 물성을 개질하여 설계된 전파흡수구조(Radar-Absorbing Structure, RAS)에 대한 많은 연구가 수행되었다[4-6].

RAS는 전자기파 흡수와 하중 지지 능력을 갖는 구조로 RAM 적용 시 발생하는 중량 증가 및 유지비 문제를 일정 부분 해소할 수 있으나 전투기 운용 과정에서 발생할 수 있는 구조 파손 및 설계 시 불가피하게 발생하는 불연속면에 대한 문제가 존재한다. 이러한 국소 손상 부위나 불연속면은 국지적으로 RCS 상승을 유발해 전투 생존성을 낮출 수 있다. 또한, 광대역 전파흡수구조는 다층형으로 적층된 구조나 허니컴 코어와 같은 샌드위치 구조가 주로 적용되어 복잡한 형상을 요구하는 부위나 비정형적 파손 부위를 신속하게 보완하기가 쉽지 않다. 최근에는 이러한 RAS의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 3D 프린팅 기술을 활용하여 복잡한 형상의 전파흡수구조를 설계, 제작하고 전장 환경에서 즉각적인 교체와 보완을 가능하게 하는 연구가 시도되고 있다[7-13]. 예를 들어 기존 전파흡수구조에서 설계되는 복

잡한 형상 변수에 대한 제작을 자유롭게 할 수 있으며 전도성 나노 입자를 혼합한 열가소성 수지를 활용하여 전파흡수 성능을 확보할 수 있다. 또한, 고강도 고분자를 활용한 적층 출력을 통해 우수한 기계적 강도와 넓은 흡수대역을 동시에 얻을 수 있다. Table 1은 3D 프린팅을 통한 샌드위치 코어 전파흡수구조 연구 사례를 요약한 것으로 넓은 대역폭 설계에서는 두꺼운 두께를 확보하거나 높은 밀도의 흡수체를 활용하였고 얇은 두께로 설계 시 특정 대역폭에 대한 협대역 전파흡수구조 설계를 수행한 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 코러게이트 코어를 활용하여 전파흡수구조를 설계하였다. 설계된 구조는 10 mm의 얇은 두께와 낮은 밀도로 구조를 경량화를 하면서 C, X, Ku 밴드 대역(4-18 GHz)을 포함하는 광대역에서 -10 dB 이하의 흡수 성능을 확보하였다.

코러게이트 코어 샌드위치 구조는 V자 형태로 접힌 코어 3차원의 열린 구조이다. 닫힌 형상의 코어인 허니컴 코어와 비교하여 습기 축적의 문제가 없어 유지 보수에 유리하다[17]. 또한, 우수한 전단, 굽힘 성능을 나타내며 충격 저항성이 뛰어나다[18-20]. 코러게이트 코어는 입사되는 전자기파의 다중 반사를 유도해 단계적으로 감쇠시키며 설계 요구에 맞춰 형상 변수를 조정함으로써 효율적인 전파흡수구조를 구현할 수 있다[21,22].

본 연구에서는 카본블랙(Carbon Black, CB)이 분산된 PLA를 코어 재료로 하는 코러게이트 코어 샌드위치 전파흡수구조를 FDM 방식의 3D 프린팅 공정을 통해 제작하고 전파흡수 성능을 평가하였다. Fig. 1에서는 본 연구에서 제안하는 코러게이트 코어 샌드위치 구조의 전파흡수 방식 및 적층 방식의 3D 프린팅으로 형성된 나노 입자의 전도성 경로에 대한 그림으로 제안된 구조 및 마이크로 스케일에서의 전파 흡수 거동을 나타낸다. 굽힘 시험으로 확인한 기계

Table 1. Comparison of recent literature on 3D-Printed radar-absorbing structure

Ref	-10 dB absorption Bandwidth (GHz)	Density (kg/m ³)	Thickness (mm)	Unit cell geometries	Material
This work	4.0 - 18.0	125	10.0	Corrugated core	PLA/CB
Jiang (2018) [7]	3.5 - 24.0	255	15.5	Honeycomb core	PLA+ resistive ink
Ghosh (2018) [8]	5.7 - 16.4	286	5.5	Honeycomb core	PLA-C
Laur (2020) [9]	5.0 - 20.0	300	10.0	Honeycomb core	PLA-C
Lim (2022) [10]	5.8 - 18.0	205	10.0	Octet-truss	PLA/CB
Sun (2024) [11]	2.8 - 40.0	-	15.0	Octet-truss	PLA/CB
Hyun (2024) [12]	10.1 - 10.5, 10.9 - 11.5	-	6.0	Square-convex surface pattern	Onyx
Yin (2018) [13]	12.0 - 18.0	-	-	Woodpile	Photosensitive resin
Ren (2018) [14]	3.9 - 12.0	-	9.4	Cylindrical pattern	Carbon-loaded ABS
Cho (2024) [15]	8.2 - 12.4	-	4.3	Frequency selective surface	PLA/CB
Noh (2024) [16]	8.2 - 18.0	-	4.6	Periodic pattern	Basalt fiber/PLA-CB Carbon fiber/PLA-CB

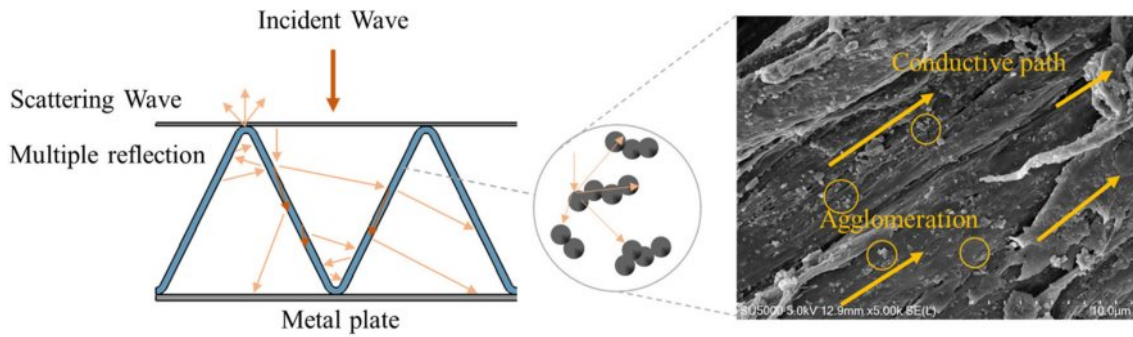


Fig. 1. Schematic of corrugated core radar-absorbing structure and 3D-Printed conductive path of carbon black dispersed PLA

적 거동을 바탕으로 카본블랙 함량에 대한 물성 변화를 분석하였다. 본 연구를 통해 전투기나 무인기 등에서 복잡한 형상 부위나 파손 영역에 3D 프린팅 기반 전파흡수구조를 적용함으로써 경량화와 스텔스 성능을 동시에 달성할 수 있는 효율적 접근 방안을 제시하고자 한다.

2. 전자파 흡수체 이론 및 재료

2.1 전파의 반사, 투과 및 전송선로 이론

전자파(Electromagnetic wave)는 전기장(E)과 자기장(H)의 상호 작용으로 구성된 에너지로서 매질을 따라 전파된다. 전파는 매질의 전자기적 특성에 따라 일부는 반사되고 일부는 투과하며 특정 조건에서는 산란 현상도 발생한다. 일반적으로 전파의 반사와 산란은 매질의 유전율과 투자율과 같은 전자기적 특성에 의해 결정된다. 유전율은 물체가 전기적 에너지를 저장할 수 있는 양을 나타내는데 일반적으로 복소수 형태로 표현되는 복소 유전율을 사용한다. 이는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

복소 유전율의 실수부(ϵ')는 전자기 에너지를 저장할 수 있는 능력을 나타내고 허수부(ϵ'')는 분극 과정에서의 위상 지연으로 인한 손실로 인해 에너지가 열로 소모되는 정도를 나타낸다. 투자율 역시 복소수 형태인 복소 투자율로 식 (2)과 같이 정의되며 자기장에 대한 매질의 반응을 나타낸다.

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

이러한 복소 유전율(ϵ) 및 복소 투자율(μ)은 전자파가 매질 경계에서 반사되거나 투과될 때 중요한 역할을 하며 내부에서 전자기 에너지를 열로 소산시키는 물리적 근거가 된다. 또한 이 값들을 통해 구한 매질의 임피던스(η) 특성이 매질 간의 경계면에서 반사 및 투과를 결정짓게 된다.

광대역 전파흡수구조는 주로 여러 층의 매질로 구성하

여 다양한 주파수 대역에서 반사 손실을 극대화하는 방식으로 설계된다. 다층형 전파흡수구조는 각 층의 전파정수, 특성 임피던스, 두께 등을 전송선로 이론으로 해석한다. 다층 전파흡수구조에서 입사면으로부터 n 번째 층까지 차례대로 각 층의 입력 임피던스를 계산할 수 있으며 다음과 같은 식 (3)으로 표현된다.

$$Z_{in}(i) = Z_i \frac{Z_{in}(i+1) + jZ_i \tan(\beta_i d_i)}{Z_i + jZ_{in}(i+1) \tan(\beta_i d_i)} \quad (3)$$

$i = n, n-1, \dots, 1$ 순서로 식 (3)을 반복 적용하여, 각 층의 두께 d_i , 특성 임피던스 Z_i , 파수 β_i 를 대입하여 최종 입력 임피던스인 $Z_{in}(1)$ 이 자유공간과 경계를 하는 전체 다층구조의 입력 임피던스가 된다. 이렇게 구해진 입력 임피던스와 자유공간의 임피던스(Z_0)를 비교하여 입력 임피던스가 충분히 낮아지면 입사면에서의 반사가 줄어 반사 손실이 낮게 나타나고 이는 식 (4)로 정의된다.

$$\Gamma = \frac{Z_{in}(1) - Z_0}{Z_{in}(1) + Z_0}, \text{ Relection Loss (dB)} = 20\log_{10}|\Gamma| \quad (4)$$

코어게이트 코어를 활용한 전파흡수구조는 입사파의 경로가 단순 평면 구조에 비해 늘어가거나 국부적인 다중 반사가 발생하는 등 3차원 효과가 발생한다. 이는 2차원 근사인 단순 전송선로 모델만으로는 완전히 설명하기 어렵다. 따라서 실제 설계 단계에서는 등가 유전율을 적용하거나 형상 변수 최적화를 활용한 3차원 전자기 수치 해석을 통해 임피던스 정합을 유도하고 내부 손실 경로를 증가시켜 반사 손실을 효과적으로 낮추려는 연구가 수행되고 있다. 코어게이트 전파흡수구조 설계 시 매질의 복소 유전율이 높은 경우에는 전파 감쇠 효과가 커질 수 있으나 동시에 표면 반사도 증가할 수 있다. 결국 임피던스 정합과 내부 손실 메커니즘 사이의 균형을 효율적으로 맞추기 위한 형상 설계와 재료의 선택이 종합적으로 고려되어야 한다.

2.2 재료

일반적으로 샌드위치 구조는 두 개의 스킨(Skin) 사이에

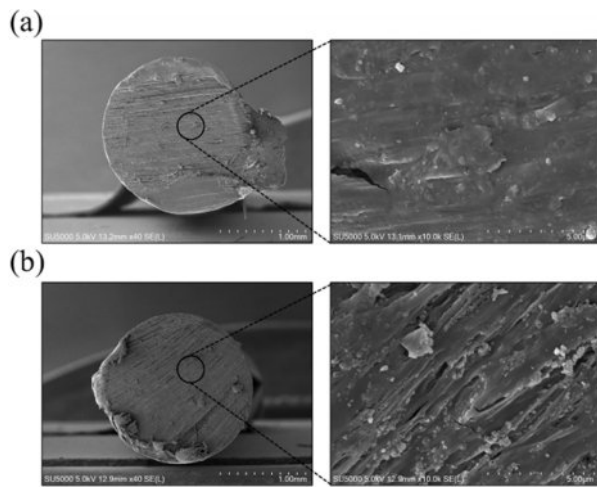


Fig. 2. SEM analysis of (a) PLA filaments, (b) PLA/CB filaments

코어(Core)를 배치한 형태를 가지며 이러한 구조적 특성으로 평면 내의 하중 및 굽힘 하중에 대한 지지 능력이 우수하다. 본 연구에서는 샌드위치 구조의 코어로 코러게이트 코어를 활용하였고 전파의 흡수를 위해 Proto pasta 社의 PLA/CB(Carbon black filled polylactic acid)를 사용하였다. 또한, 샌드위치 코어의 스킨은 표면에서의 임피던스 정합을 위해 복소 유전율이 낮은 Creatbot 社의 PLA (Polylactic acid)를 사용하였다.

코어에 사용된 PLA/CB는 최대 21.43 wt%에 달하는 높은 카본블랙 함량으로 인해 우수한 유전 손실 특성을 나타낸다[16]. 카본 블랙은 전도성 나노 입자로서 유전체 내부에 분산될 경우 매질 내 분극을 유도하여 전자파가 흡수, 감쇠된다. 고분자 필라멘트 내의 카본블랙 함량이 높아지면 PLA 내부에 입자 응집이 발생하고 전도성 경로가 형성되어 전파를 효율적으로 흡수할 수 있다. 하지만 입자의 응집은 내부의 응력을 증가시키고 고분자 간의 결합을 제한하여 기계적 물성이 저하될 수 있다. Fig. 2(a), (b)는 PLA와 카본블랙이 포함된 PLA 필라멘트 단면을 각각 SEM으로 관찰한 결과이다. PLA/CB 단면에서는 카본블랙 입자와 응집에 따른 전도성 경로가 확인된다.

각 소재의 복소 유전율 측정을 위해 평판형 시편을 3D 프린터를 활용해 Fig. 3(a)와 같이 $200 \times 200 \times 1.6$ mm 크기로

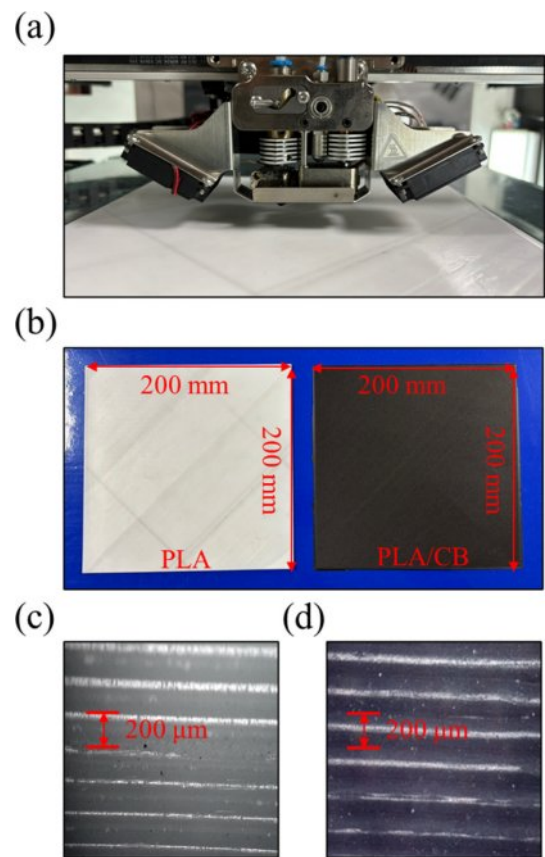


Fig. 3. (a) 3D-Printing fabrication of specimen, (b) 3D-Printed specimen, cross section of the specimen (c) PLA, (d) PLA/CB

출력하였고 각 소재 별 시편을 Fig. 3(b)에 나타냈다. Table 2는 각 소재에 대한 상세 출력 조건이며 카본블랙 입자 존재에 따른 필라멘트의 점도 증가로 PLA보다 높은 온도에서 출력하였다. 베드 온도, 층별 두께, 충전률을 동일하게 설정하여 출력 시 발생할 수 있는 오차를 줄였고 적층 방향에 따른 전자기 물성의 영향을 최소화하기 위해 두께 각층의 두께를 $200 \mu\text{m}$ 로 설정하여 대칭으로 적층하였다. Fig. 3(c), (d)는 출력물의 단면에 대한 현미경 관찰 결과를 나타내며 이는 각 층이 동일한 두께인 $200 \mu\text{m}$ 로 적층이 되었음을 알 수 있다.

제작된 시편의 전자기 물성을 Fig. 4(a)의 자유공간측정 장비를 활용하여 측정하였다. 측정에는 네트워크 분석기(Network analyzer; Keysight P9375A)와 X 대역 안테나를 사용하였고 측정된 S-파라미터를 NRW(Nicolson-Ross-Weir) 방식으로 변환하여 복소 유전율을 계산하였다. 측정된 PLA와 PLA/CB의 복소 유전율을 각각 Fig. 4(b), (c)에 나타냈다. PLA의 복소 유전율을 10 GHz에서 실수부는 약 2.8, 허수부는 약 0에 가까워 유전 손실이 매우 작은 특성을 확인하였고, PLA/CB는 10 GHz에서 실수부가 약 17, 허수부가 약 20 수준으로 높은 손실 탄젠트 값을 보였다. 이는 카본

Table 2. Printing parameter of 3D printer

Parameters	PLA	PLA/CB
Nozzle temperature ($^{\circ}\text{C}$)	210	250
Bed temperature ($^{\circ}\text{C}$)	60	60
Layer thickness (mm)	0.2	0.2
Infill ratio (%)	100	100
Layup orientation	[45/-45/0/90] _s	[45/-45/0/90] _s

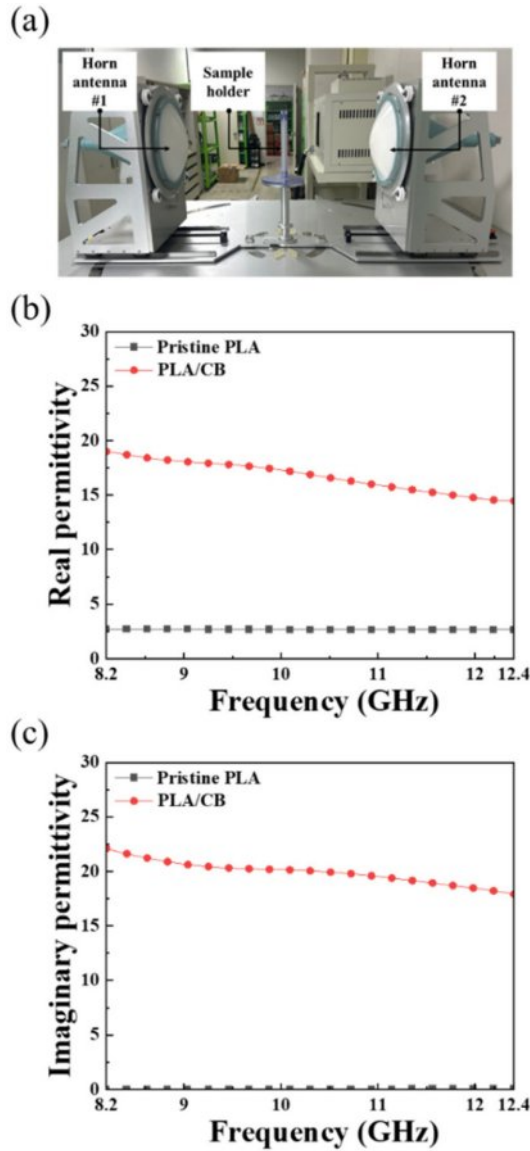


Fig. 4. a) Free space measurement system, complex permittivity of PLA, PLA/CB (b) real part and (c) imaginary part

블랙이 PLA 내부에 분산되어 유전 손실 특성을 부여하였고 전파 흡수 효과가 클 수 있음을 나타낸다.

3. 설계 및 제작

3.1 코러게이트 코어 전파흡수구조 설계

코러게이트 코어는 3차원 구조물로 물결 및 접힘 형상으로 입사되는 전파가 반복 산란되도록 유도한다. 입사된 전파는 샌드위치 구조에서 투과, 반사, 다중 산란을 거쳐 점진적으로 감쇠된다.

본 연구에서는 코러게이트 코어 설계에 있어 Fig. 5(a)와 같이 코어의 높이(H), 두께(t), 접힘 각도($\angle a$), 사이드 길이(A), 곡률(D)에 해당하는 5가지 형상 변수를 설정하고 각 변

수에 따른 전파흡수 성능을 상용 전자기 해석 소프트웨어인 CST Studio Suite 2023으로 평가하였다. 전자기 해석을 수행하기 위한 경계 조건 및 샌드위치 코어 설계 구조를 Fig. 5(b)에 나타내었다.

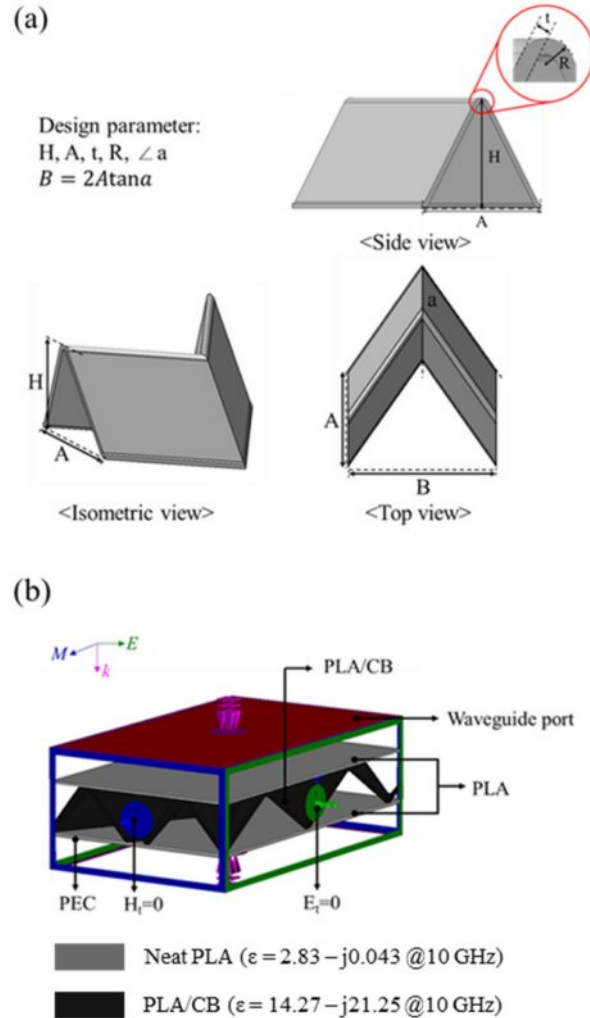


Fig. 5. (a) Design parameter of corrugated core, (b) boundary condition of corrugated core unit cell model

Table 3. Design range of corrugated core sandwich structure for broad wave absorption

Structures [Materials]	Parameters	Range [unit]
Face sheet [PLA]	Upper sheet thickness, [U_t]	0.2 - 1 [mm]
	Lower sheet thickness, [L_t]	0.2 - 1 [mm]
Corrugated core [PLA/CB]	Core height, [H]	6 - 14 [mm]
	Core thickness, [t]	0.6 - 1.4 [mm]
	Dihedral fold angle, [$\angle a$]	50 - 90 [$^\circ$]
	Side length, [A]	10 - 50 [mm]
	Curvature radius [D]	2 - 10 [mm]

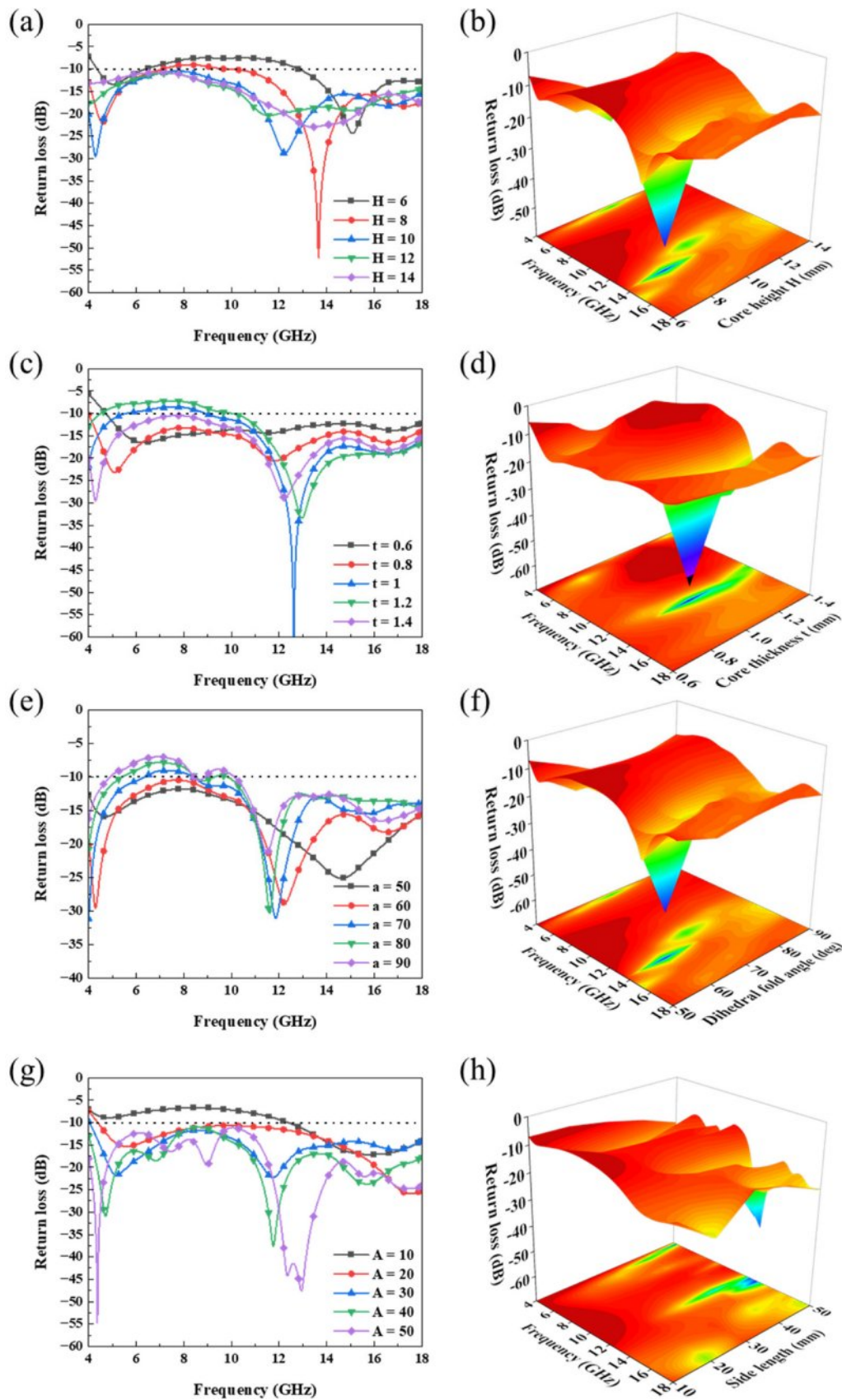


Fig. 6. Return loss result of 3D-printed corrugated core sandwich composites (a, b) core height, (c, d) core thickness, (e, f) dihedral fold angle, (g, h) side length

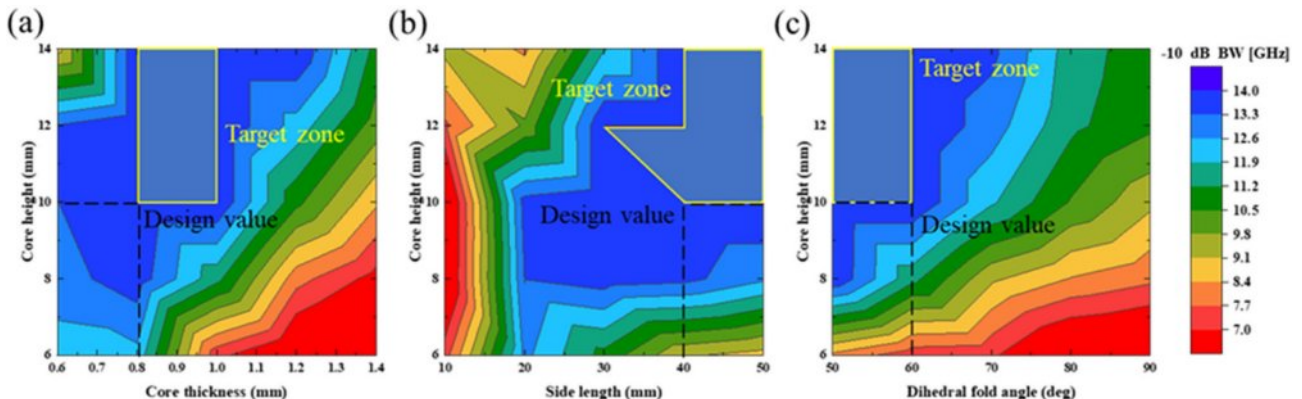
Table 4. Optimal design parameter results for the corrugated core radar-absorbing structure

H (mm)	t (mm)	$\angle a$ (°)	A (mm)	D (mm)
10	0.8	60	40	4

샌드위치 복합재 구조의 스킨은 전파의 투과를 위한 PLA, 코어는 반사, 산란에 의한 유전 손실을 위해 PLA/CB를 사용하였다. 전파가 샌드위치 구조를 투과하는 것을 방지하기 위해 완전 도체 평면을 구조 아래에 적용하였고 T-solver를 통해 전자기 해석을 수행하였다. 또한 코어의 접힘 방향을 자기장 방향, 접힘 각도의 수직 방향을 전기장으로 설정하여 전자기 해석을 수행하였다. 우선 각 형상 변수가 전파 흡수 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 다른 변수를 고정하고 한가지 변수만 변경하면서 전자기 해석을 수행하였고 각 형상 변수의 범위를 Table 3에 나타내었다. Fig. 6은 각 변수를 독립적으로 변화시켰을 때의 반사손실 곡선을 주파수 스펙트럼 상에서 비교한 결과로 코어의 높이, 두께, 접힘 각도, 사이드 길이 등의 변화에 따른 반사 손실을 나타낸다.

Fig. 6(a), (b)에서 코어 높이를 늘릴수록 저주파 영역에서 반사손실이 개선되며 전체 대역폭이 확대되는 경향이 나타난다. 이는 코어 내부에서의 물리적 경로가 길어짐에 따라 전파가 반사 및 산란을 반복적으로 겪기 때문이며, 이로 인해 주파수에 따라 최저 반사점이 저주파 쪽으로 이동하는 경향이 나타난다. 하지만 코어높이가 지나치게 높아지면 무게와 두께가 증가하여 구조적 제약이 발생하여 적절한 높이의 설정이 필요하다. 코어 두께는 코어의 밀도를 결정하는 중요한 요소 중 하나로 두꺼워질수록 유효 유전율이 증가하여 임피던스 정합을 유도할 수 있다. Fig. 6(c), (d)에 따르면 두께를 증가시키면 중간 주파수 대역 중심으로 반사손실 구간이 넓어지거나 최대 흡수성능이 이동한다. 두께가 너무 얇을 경우 -10 dB 이하를 만족하는 대역폭이 축소되는 반면 적절한 두께로 설계하면 폭넓은 주파수 범

위에서 뛰어난 흡수 성능이 나타난다. 다만 과도하게 증가할 경우 저주파 영역에서의 임피던스 매칭이 저하되기 때문에 고주파와 저주파의 성능을 균형 있게 만족하도록 형상을 결정해야한다. 코어의 접힘 각도에 따른 전파흡수성능은 Fig. 6(e), (f)에 나타났다. 코어의 접힘 각도의 변화는 코어 형상의 주기에 영향을 주게 되며 작은 단위 셀 크기는 코어의 밀도를 갖도록 하며 이는 유효 유전율의 증가를 초래한다. 또한, 접힘 각도의 경우 전체 코어의 대칭성을 저하시킬 수 있어 측정 시 각도에 따른 전파흡수성능을 고려해야 한다. Fig. 6(g), (h)에서 보듯 코어의 접힘 각도와 유하게 사이드 길이가 작아질수록 코어 밀도가 높아지게 된다. 따라서, 작은 사이드 길이에서는 높은 유효 유전율로 임피던스 정합이 되지 않아 흡수 성능이 저하된다. 사이드 길이가 증가함에 따라 저주파 대역에서의 흡수 성능이 증가되지만 전파 흡수의 최대치는 저하된다. 사이드 길이 또한 접힘 각도와 마찬가지로 설계 변수에 따라 코어의 밀도 및 대칭성이 변화하게 되고 이를 고려하여 설계 변수가 결정되어야 한다. 각 변수에 따른 흡수 성능의 비교를 바탕으로 최종 설계 목표인 얇은 샌드위치 코어 흡수구조의 설계를 위해 두께에 대한 각 형상 변수의 대역폭에 대하여 -10 dB 흡수 성능을 Fig. 7의 등고선을 통해 나타내었다. Fig. 7은 이러한 설계 목표를 반영하여, 코어 높이와 접힘 각도, 사이드 길이, 코어 두께 변수 간의 상관관계를 대역폭 기준으로 도시한 등고선 그래프이다. 색 스케일은 전파흡수 대역폭에 따른 -10 dB 이하의 전파흡수성능이 유지되는 범위를 나타낸다. 그림 속 노란색 박스로 표시된 부분이 목표 범위 내에서도 저밀도와 얇은 두께를 동시에 만족하는 형상 변수를 기준으로 최종 설계 값을 결정하였다. 즉, 코어 높이를 약 10 mm 전후로 설정하면서, 접힘 각도, 두께 등의 변수를 균형 있게 조정하여 C, X, Ku 대역 모두에서 평균 -10 dB 이하 반사손실을 달성하는 동시에 중량과 부피를 최소화하고자 하였다. Table 4는 전자기 해석의 결과로 선정된 최종 형상 변수에 대한 내용을 나타낸다. 설계된 코리게이트

**Fig. 7.** Simulation results for the variation in -10 dB bandwidth with each design parameter at a fixed core height(a) core thickness, (b) side length, (c) dihedral fold angle

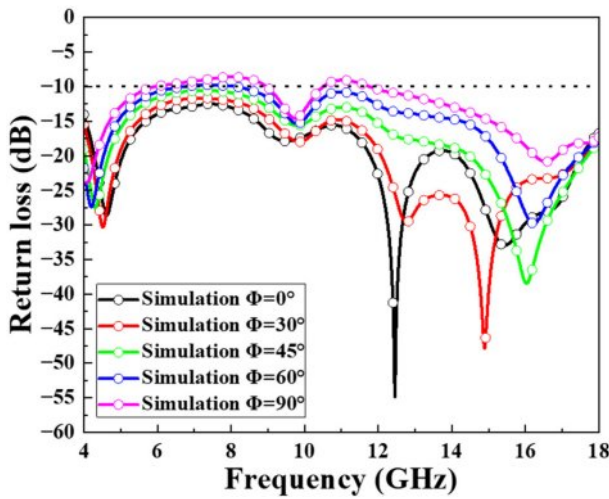


Fig. 8. Simulation results for a corrugated sandwich radar-absorbing structure at each polarization angle

코어 샌드위치 전파흡수구조의 경우 비대칭구조로 시편의 각도에 따른 흡수성능을 평가해야 하며 이를 Fig. 8에 나타내었다. 각도가 90도인 경우를 제외한 모든 경우에서 -10 dB 이하의 우수한 전파흡수 성능 결과를 나타냈다.

3.2 전기장 분포를 통한 흡수 메커니즘 분석

설계된 코어게이트 코어 기반 전파흡수구조에서 전파가 투과·반사·산란되는 과정을 명확히 파악하기 위해, Fig. 9에 전기장(E-field) 벡터 분포를 나타내었다. 파장 길이에 따른 전기장 분포를 분석하기 위해, 분석 대상 주파수는 각각 C, X, Ku 대역의 중심 주파수인 6 GHz, 10 GHz, 15 GHz로 설

정하였다. 이때, 자유 공간 파장은 각각 $\lambda \approx 50$ mm, 30 mm, 20 mm이며, 6 GHz는 상대적 장파장, 15 GHz는 단파장 영역에 해당한다. 이러한 상대적 파장 차이는 전기장 분포와 공진 거동을 결정짓는 핵심 인자이다. 또한, 코어게이트 구조 내부에서의 기하학적 상호작용을 비교하기 위해 위상이 각각 0°와 90° 시점일 때의 전기장 분포를 비교하였다. 이를 통해 파동의 주기에 따른 구조 내부 전기장 세기와 방향이 어떤 양상으로 변화하는지 시각적으로 확인할 수 있다. Fig. 9(a), (b)는 6 GHz 대역에서의 전기장 분포이다. 파장이 코어 높이에 비해 길어, 코어 내부에 형성되는 반사·간섭 패턴이 상대적으로 완만하게 나타난다. 위상 0°일 때는 넓은 구간에서 전기장이 서서히 감소하고, 90° 시점에서는 전기장 벡터의 방향과 세기가 일부 달라져 코어 중앙 부근에 비교적 강한 전기장이 분포하기도 한다. 장파장일수록 한 번 반사 시 전파가 멀리 이동하면서 감쇠가 커지므로 코어 하단부까지 진행함에 따라 흡수가 크게 일어난다. 이는 두꺼운 코어 구조가 저주파 대역에서도 우수한 흡수 성능을 발휘할 수 있다. Fig. 9(d), (e)는 10 GHz 대역에서의 전기장 분포이다. 6 GHz보다 파장이 짧아 삼각 코어 경사면을 따라 더 잦은 반사가 발생하고, 이로 인해 내부에서 다중 산란이 활발해진다. 그 결과 전기장 벡터 크기가 단계적으로 감소하는 양상을 보이는데, 이는 손실 재료인 카본 블랙에 의해 충분한 감쇠가 일어나고 있음을 의미한다. 파장과 구조 치수가 적절히 맞물려 반사 경로가 늘어남에 따라, 전체적으로 높은 흡수 효율을 달성할 수 있다. Fig. 9(g), (h)는 15 GHz 대역에서의 전기장 분포로, 코어 높이나 두께 대비 파장이 짧으므로 구조 내부의 반사·회절 패턴이 더 복잡하게 형성된다. 특히 삼각 코어 면과 자유공간이 만나는 경계 부근에

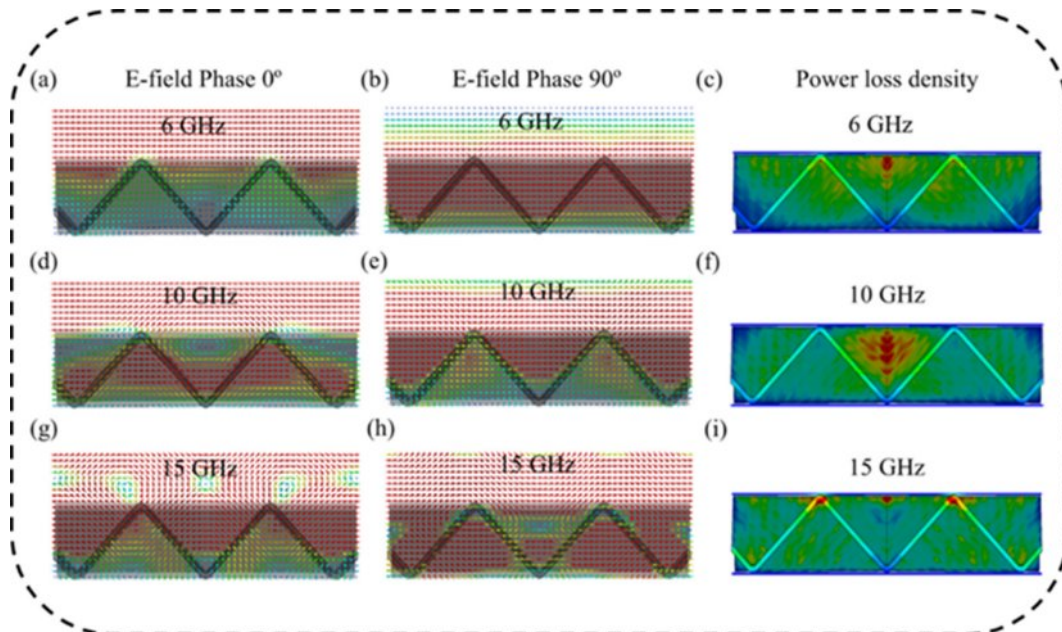


Fig. 9. Strength distribution results of E-field at each phase and power loss density (a, b, c) 6 GHz, (d, e, f) 10 GHz, (g, h, i) 15 GHz

서 전자파가 손실재와 접촉하는 빈도가 증가함에 따라 전기장 진폭이 빠르게 변한다. 파장이 짧을수록 반사·굴절 시 전파가 큰 각도로 꺾여 경로가 가중되므로 고주파 대역에서도 충분히 높은 흡수율을 확보할 수 있다. 코어의 기하학적 형상(삼각형 접힘 구조)에 의해 전파 경로가 늘어나고 그 과정에서 복소 유전율이 큰 손실재와 상호작용함으로써 전파 에너지가 열로 소모된다. 이를 통해 6 GHz(장파장)부터 15 GHz(단파장)에 이르는 광대역에서 높은 흡수 효율이 달성된다. 즉, 6 GHz는 파장이 길어 침투와 감쇠가 완만하며 10 GHz는 파장과 코어 치수가 최적 범위 내에서 다중 반사가 증폭된다. 15 GHz에서는 짧은 파장으로 인해 코어의 경계면에서 반사 및 산란이 빈번히 일어나 에너지가 빠르게 감쇠하게 된다. 결과적으로 코어 내부 다중 반사와 손실 재료의 특성이 시너지를 이루어 각 주파수 대역에서 고른 흡수 성능이 확보됨을 확인할 수 있다.

3.3 전력 손실 밀도 분포 분석

본 연구에서 제안된 코러게이트 코어 전파흡수구조가 전자파 에너지를 어느 지점에서 얼마나 소모하는지를 구체적으로 파악하기 위해 Fig. 9(c), (f), (i)에 각 대역별 중심 주파수인 6 GHz, 10 GHz, 15 GHz에서의 전력 손실 밀도 (Power loss density, W/m^3) 분포를 나타내었다. 직관적인 전력 손실 밀도의 비교를 위해 최대값을 $1.6 \times 10^5 W/m^3$ 로 동일하게 적용하였으며 색상이 빨강 계열에 가까울수록 해당 위치에서 전자파가 열에너지로 소실되는 정도가 높음을 의미한다. 앞서 살펴본 전기장 분포와 대조해 보면 전기장 세기가 큰 곳에서 고손실 구역이 형성되는 양상을 확인할 수 있다. 이는 다음의 전력 손실식과 같이 전기장 $|E|^2$ 에 비례하여 결정된다.

$$P_{loss} = \frac{1}{2}(2\pi f)\epsilon_0\epsilon_r''|E|^2 \quad (3)$$

여기서 f 는 주파수, E_0 는 자유 공간 유전율, ϵ_r'' 는 재료 복소 유전율의 허수부에 해당한다. 즉, 특정 지점에서 전기장이 클수록 주파수에 비례하여 전파 에너지가 열 등으로 전환되는 양이 커짐을 의미한다.

먼저, Fig. 9(c)는 6 GHz 대역에서의 전력 손실 밀도 분포를 나타낸다. 장파장의 경우 코어 높이에 비해 길어 반사와 간섭 패턴이 완만하여 넓은 구간에서의 균일한 전력 손실이 이루어지기 때문에 전반적으로 녹색 계열이 우세하다. 삼각형 경사면이나 꼭짓점 부근에서 노란색 계열이 간헐적으로 나타나 국소적 손실 증가를 보이며 최대 전력 손실 값은 다른 주파수 대역에 비해 낮은 편이다. 이는 장파장일수록 한 번 반사될 때 전파가 멀리 이동하여 코어 내부 전반에 걸쳐 누적적 에너지가 소모되는 특성 때문이다. 반면, Fig. 9(f)는 10 GHz 대역에서의 결과로 파장이 짧아지면서 삼각 코어 내부의 반사·굴절이 더 잦게 발생하여 코어 접힘 부근에서 노랑~주황색 이상의 고손실 영역이 뚜렷히 형성된다. 이는 전기장이 코어의 접힘 영역에서 강하게 나타나는 영역과 동일하다. 최대 전력 손실 값은 약 $2.17 \times 10^5 W/m^3$ 로 6 GHz와 큰 차이를 보이지 않지만 특정 지점에서 에너지가 국소적으로 집중적으로 소모되기 때문에 중간 파장대에서도 충분히 높은 흡수 효율이 달성된다. 마지막으로, Fig. 9(i)는 단파장인 15 GHz에서의 분포로 최대 전력 손실 값이 약 $2.63 \times 10^5 W/m^3$ 에 이른다. 파장이 더 짧아 구조 내부 간섭이 미세하게 형성되고 반사·산란 각도가 커져 경계면에서의 전기장의 변화가 뚜렷하게 형성되고 이로 인해 코어와 자유공간의 경계면에서 국소적으로 높은 손실 밀도가 나타난다. 비록 고손실 영역이 6 GHz에 비해 물리적 면적으로는 작게 보일 수 있으나 그 지점에서의 손실 밀도는 높아 결과적으로 고주파 영역에서도 적극적인 흡수 효과가 발현된다. 결과적으로 코어 기하학적 구조와 손실 재료 특성이 전기장 세기에 따라 다양한 주파수 대역에서 전파 흡수를 이끌어낸다는 점을 나타낸다. 즉, 6 GHz와 같은 장파장에서는 전체적으로 완만하면서 넓은 구간에서 감쇠가 일어나고 10 GHz나 15 GHz처럼 파장이 짧아질수록 코어 내부에서 반사·간섭이 빈번해지면서 국소적으로 높은 전력 손실 밀도를 기록한다. 제안된 코러게이트 코어 샌드위치 구조는 주파수가 올라갈수록 형성되는 고손실 지점의 면적은 작아지더라도 전파 에너지를 훨씬 큰 값으로 소모시킬 수 있어 저주파부터 고주파에 이르는 광범위한 대역에서 우수한 흡수 성능을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

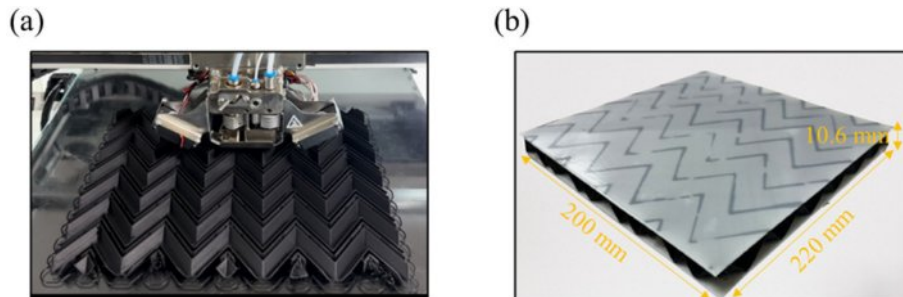


Fig. 10. (a) 3D-Printing fabrication of corrugated core, (b) Result of corrugated core sandwich structure

3.4 FDM 방식 3D 프린팅 출력

코어게이트 코어 샌드위치 복합재를 3차원 형상으로 모델링한 뒤 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식으로 출력하기 위해 3D 프린터 슬라이서 소프트웨어인 Aura를 활용하여 G-code를 생성하였다. 사용된 3D 프린터는 Anisoprint社の Composer A3로 시편과 동일한 유전율로 출력하기 위해 Table 1에 제시된 재료별 출력 변수를 동일하게 적용하였다. 출력 과정에서 코어는 접합 구조를 구현하기 위해 내부에 서포터를 활용하여 적층 방향을 구성하였으며 코어의 출력을 Fig. 10(a)에 나타내었다. 또한, 곡률에 의한 적층 불량 발생을 방지하기 위해 프린터 챔버 내부의 온도 및 냉각 팬 속도를 조절하였다. 출력된 코어는 적층 구조로 인해 형성된 표면의 거친 면이 형성되었고 사포를 통하여 고르게 다듬은 후 시아네이트 에스터 수지를 활용하여 페이스 시트와 코어를 접착하였다. 최종 제작된 코어게이트 코어 샌드위치 복합재를 Fig. 10(b)에 나타내었으며 두께는 10.6 mm로 설계된 값과 동일하게 나타났다.

4. 결과 및 고찰

4.1 반사손실 측정

본 연구에서 제안한 구조의 흡수 성능을 확인하기 위해 자유공간 측정 시스템을 이용하여 따른 반사 손실을 측정하였다. Fig. 11에 제시된 흡수체의 반사 손실 곡선은 편파각을 단계적으로 변화시키면서 4-18 GHz 범위에서 자유공간 측정 시스템을 통해 얻은 측정치와 동일 조건에서 수행한 시뮬레이션의 결과를 비교한 것이다. 측정 결과, 편파각이 0°인 경우와 30° 경우 모든 주파수 대역에서 -10 dB 이하의 전파흡수능이 나타났으나 편파각이 60°인 경우와 90°의 경우 4-4.8 GHz의 구간과 7.3-8.9 GHz를 제외한 모든 주파수 대역에서 -10 dB의 우수한 전파흡수능이 나타났다. 전

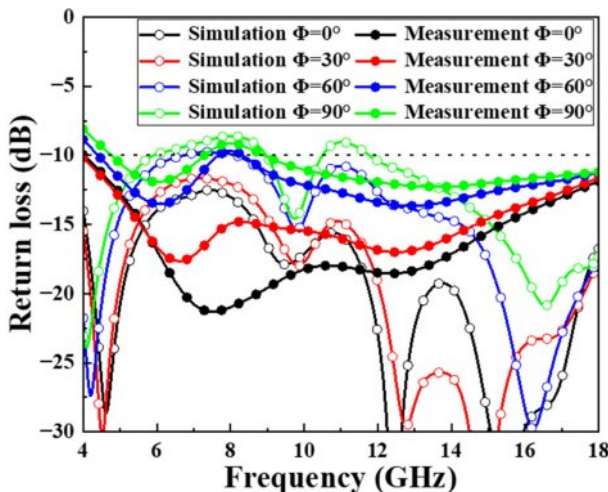


Fig. 11. Comparison of the simulated and measured return loss of corrugated core sandwich radar-absorbing structure

자기 해석 결과와 비교하였을 때 반사손실의 최대값 및 주파수에서의 차이가 나타났는데 이는 3D 프린팅 후 표면 거칠기, 출력 방향 및 재료의 복소 유전율 편차 등 다양한 요인 때문이다. 편파각이 0°에서 90°로 커질수록 특정 구간에서 반사손실이 곡선이 완만해져 최저 반사손실이 다소 상승하는 경향이 나타난다. 이는 코어게이트 코어가 비대칭적인 구조적 특성을 지니고 있어 입사되는 전파가 편파 방향에 따라 내부 경로와 반사, 산란조건이 달라지기 때문이다. 그럼에도 모든 편파각에 대하여 -10 dB 수준의 성능을 폭넓게 유지하여 편파각의 변화에도 안정적인 흡수 성능을 보였다.

4.2 기계적 물성 평가

본 연구에서는 전파흡수구조에 적용되는 PLA 및 PLA/CB 복합재의 기계적 거동을 3점 굽힘 시험(ASTM D790)으로 평가하였다. 3점 굽힘 하중은 시편 외측(인장 영역)과 내측(압축 영역)에 최대 종방향 응력이, 중립면 부근에서는 전단 응력이 동시에 작용하므로 전도성 필러가 층간 계면과 국부 응력 분포에 미치는 영향을 일괄적으로 평가할 수 있다. 또한, FDM 공정으로 적층된 시편은 사출 성형된 시편과 달리 층간 접합 강도에 크게 좌우되므로 굽힘 응답이 실제 구조 거동을 보다 현실적으로 반영한다. 시험 설정은 Fig. 12(a)에 제시하였다. Table 5과 Fig. 12(b)에는 굽힘 시험 결과와 응력-변형률 곡선을 나타내었다. PLA 시편의 굽힘 항복 강도는 99.7 MPa, 굽힘 탄성률은 3.4 GPa로 측정되었는데, 이는 PLA/CB 시편(61.3 MPa, 2.3 GPa) 대비 각각 62.7% 및 47.8% 높은 값이다. 이러한 강도 및 강성 저하는 카본블랙 함량이 임계치를 초과할 때 입자 응집으로 고분자 사슬 간 결합이 약화되고 응력 집중이 유도된 결과로 해석된다. Fig. 12(c)에서 보듯이 PLA 시편은 하중 방향과 수직인 균열이 발생하면서 층간 결합을 유지한 채 파단되었다. 반면 PLA/CB 시편은 Fig. 12(d)와 같이 층간 박리가 선행되며 파단이 진행되었는데, 이는 과도한 카본블랙 응집체가 계면 접착력을 저해하였기 때문이다. 또한, 항복점까지의 변형에너지 U_y 는 PLA 대비 PLA/CB에서 약 32% 감소하였다. 이는 탄성 및 초기 소성 단계에서 흡수 가능한 에너지가 줄어들어 소재의 취성이 증가한 것으로 판단된다. 결론적으로 고함량의 카본블랙은 필라멘트 내부에 전도성 경로를 형성해 전기적 특성을 향상시키지만, 입자 응집에 따른 응력 집중과 계면 결합력 저하로 기계적 성능을 저해한다. 따라

Table 5. Flexural yield properties and energy absorption of PLA and PLA/CB composites obtained from three-point bending tests

Materials	σ_y (MPa)	σ_y (%)	E (GPa)	U_y (MJ/m ³)
PLA	99.7 ± 0.5	4.7 ± 0.2	3.4 ± 0.1	3.1 ± 0.2
PLA/CB	61.3 ± 2.3	5.0 ± 0.3	2.3 ± 0.2	2.1 ± 0.3

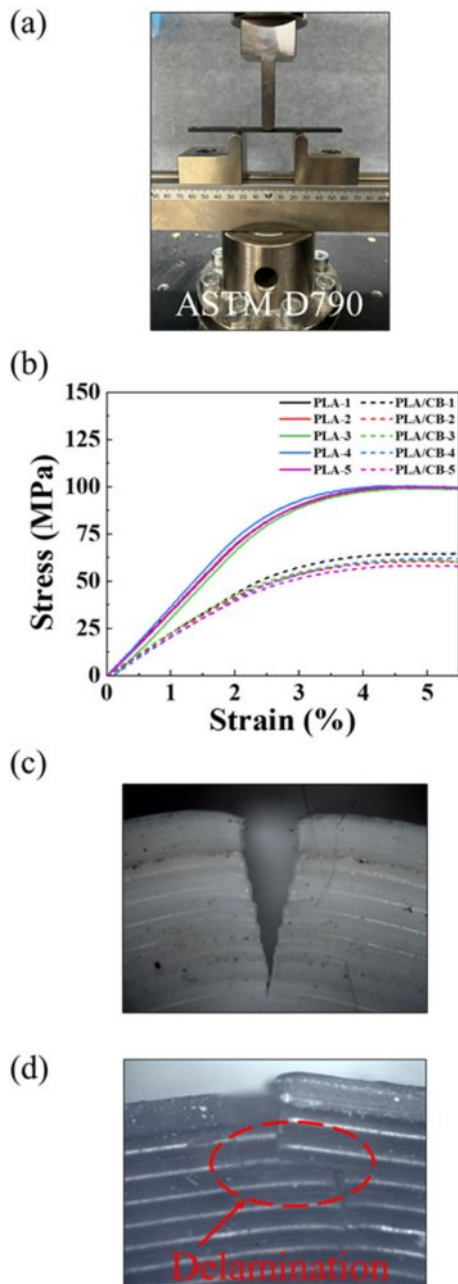


Fig. 12. (a) Three-point bending test setup, (b) stress-strain curves of PLA and PLA/CB specimens, microscopic cross-section of (c) PLA and (d) PLA/CB

서 전파흡수 구조 설계에서는 카본블랙 함량과 분산 균일도를 최적화하여 기계적, 전자기적 요구 조건을 균형 있게 충족시킬 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 코어게이트 코어 기반 3D 프린팅 샌드위치 전파흡수구조를 설계, 제작하고 전파흡수 성능과 기계

적 특성을 평가하였다. 코어 재료로는 카본 블랙이 충전된 PLA를 사용해 유전손실 특성을 높였고, 스킨에는 PLA를 적용하여 전파 투과를 유도하였다. 전자기 해석 결과, 코어 높이 10 mm를 기준으로 두께, 접합각, 사이드 길이를 최적화하여 C, X, Ku 밴드 대역을 포함하는 광대역 전반에서 -10 dB 이하의 흡수 성능을 달성할 수 있었다. 전기장 및 전력 손실 분포 분석에서는 장파장(6 GHz)에서 두께 방향 감쇠가 우세하며, 단파장(15 GHz)으로 갈수록 접합부 근처의 국소 손실이 지배적임을 확인하였다. 이후 도출된 설계 변수를 바탕으로 3D 프린팅을 통해 출력하였으며 성능을 평가하였다. 측정 결과, 편파각의 변화에도 4.8-7.3 GHz 및 8.9-18 GHz의 광대역에서 -10 dB 이하의 흡수성능 유지하였다. 카본블랙의 충전에 따른 기계적 물성의 영향을 확인하기 위해 3점 굽힘 시험을 수행하였다. 그 결과, PLA와 비교하여 PLA/CB 복합재는 카본블랙 응집체로 인한 응력 집중과 고분자 사슬 결합력 약화로 기계적 물성이 저하됨을 확인하였다. 향후 연구에서는 전도성 필러 분산 최적화와 계면 강화 공정으로 기계적 물성을 개선하고, 본 구조가 실제 레이더 단면적 저감에 미치는 효과를 추가로 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업[GRRC 항공 2023-B05]과 2024년도 한국항공우주산업(주) 재원으로 통합 사내 R&D과제(KZZ90114B)의 지원(계약번호: CT24080055)으로 수행하였음.

REFERENCES

1. A. Chevalier and V. Laur, "Composites-based microwave absorbers: Toward a unified model," *Proc. IEEE Int. Microw. Symp.*, 2017, pp. 1804-1807.
2. P. Toneguzzo, G. Viau, O. Acher, F. Fiévet-Vincent, and F. Fiévet, "Monodisperse Ferromagnetic Particles for Microwave Applications," *Advanced Materials*, Vol. 10, No. 13, 1998, pp. 1032-1035.
3. J. Neige, T. Lepetit, A. L. Adenot-Engelvin, N. Malléjac, A. Thiaville, and N. Vukadinovic, "Microwave Permeability of Fe Ni Mo Flakes-Polymer Composites with and Without an Applied Static Magnetic Field," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, No. 3, 2013, pp. 1005-1008.
4. Y. W. Nam, J. H. Choi, W. J. Lee, and C. G. Kim, "Fabrication of a Thin and Lightweight Microwave Absorber Containing Ni-Coated Glass Fibers by Electroless Plating," *Composites Science and Technology*, Vol. 145, 2017, pp. 165-172.
5. W. Li, C. Li, L. Lin, Y. Wang, and J. Zhang, "All-Dielectric Radar Absorbing Array Metamaterial Based on Silicon Carbide/Carbon Foam Material," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 781, 2019, pp. 883-891.

6. A. Ling, G. Tan, Q. Man, Y. Lou, S. Chen, X. Gu, R.-W. Li, J. Pan, and X. Liu, "Broadband Microwave Absorbing Materials Based on MWCNTs' Electromagnetic Wave Filtering Effect," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 171, 2019, pp. 214–221.
7. W. Jiang, L. Yan, H. Ma, Y. Fan, J. Wang, M. Feng, and S. Qu, "Electromagnetic Wave Absorption and Compressive Behavior of a Three-Dimensional Metamaterial Absorber Based on 3D Printed Honeycomb," *Scientific Reports*, Vol. 8, No. 1, 2018, p. 4817.
8. S. Ghosh and S. Lim, "Perforated Lightweight Broadband Metamaterial Absorber Based on 3-D Printed Honeycomb," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 17, No. 12, 2018, pp. 2379–2383.
9. V. Laur, A. Maalouf, A. Chevalier, and F. Comblet, "Three-Dimensional Printing of Honeycomb Microwave Absorbers: Feasibility and Innovative Multiscale Topologies," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 63, No. 2, 2021.
10. D. D. Lim, et al., "Broadband Mechanical Metamaterial Absorber Enabled by Fused Filament Fabrication 3D Printing," *Additive Manufacturing*, Vol. 55, 2022, p. 102856.
11. J. M. Hyun and J. R. Lee, "Evaluation of Electromagnetic Characteristics of 3D-Printed Radar Absorbing Structures Based on Three-Dimensional Period Pattern Surface," *Measurement*, Vol. 227, 2024, p. 114213.
12. C. Sun, D. Li, T. Liu, Q. An, C. Zhang, Y. Li, and W. Liao, "Design of Functionally Gradient Metastructure with Ultra-Broadband and Strong Absorption," *Composites Part B*, Vol. 280, 2024, p. 111484.
13. L. Yin, J. Doyhamboure-Fouquet, X. Tian, and D. Li, "Design and Characterization of Radar Absorbing Structure Based on Gradient-Refractive-Index Metamaterials," *Composites Part B*, Vol. 132, 2018, pp. 178–187.
14. J. Ren and J. Y. Yin, "3D-Printed Low-Cost Dielectric-Resonator-Based Ultra-Broadband Microwave Absorber Using Carbon-Loaded Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer," *Materials*, Vol. 11, 2018, p. 1249.
15. J. Y. Cho, Y. C. Oh, S. C. Shin, S. K. Lee, H. S. Seo, and S. E. Lee, "Fusedly Deposited Frequency-Selective Composites Fabricated by a Dual-Nozzle 3D Printing as Microwave Filter," *Polymers*, Vol. 16, 2024, p. 786.
16. J. S. Noh, S. M. Hong, V. T. Hoang, B. S. Kwak, and Y. W. Nam, "3D-Printed Broadband Electromagnetic Wave-Absorbing Basalt/CF/PLA Composites with a High Current Path for Lightning Strike Protection," *Journal of Composite Materials*, Vol. 58, 2024, pp. 3029–3043.
17. S. Heimbs, J. Cichosz, M. Klaus, S. Kilchert, and A. F. Johnson, "Sandwich Structures with Textile-Reinforced Composite Fold-cores Under Impact Loads," *Composite Structures*, Vol. 92, 2010, pp. 1485–1497.
18. X. Zhou, H. Wang, and Z. You, "Mechanical Properties of Miura-Based Folded Cores Under Quasi-Static Loads," *Thin-Walled Structures*, Vol. 82, 2014.
19. S. Heimbs, P. Middendorf, C. Hampf, F. Hähnel, and K. Wolf, "Aircraft Sandwich Structures with Folded Core Under Impact Load," *Proc. 8th Int. Conf. Sandwich Structures (ICSS 8)*, 2008, pp. 369–380.
20. S. Kilchert, A. F. Johnson, and H. Voggenreiter, "Modelling the Impact Behaviour of Sandwich Structures with Folded Composite Cores," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 57, 2014, pp. 16–26.
21. Z. Wang, C. Zhou, V. Khaliulin, and A. Shabalov, "An Experimental Study on the Radar Absorbing Characteristics of Folded Core Structures," *Composite Structures*, Vol. 194, 2018, pp. 199–207.
22. Z. Zhang, H. Lei, H. Yang, M. Xu, M. Chen, C. Wang, and D. Fang, "Radar-Stealth and Load-Bearing Corrugated Sandwich Structures with Superior Environmental Adaptability," *Composites Science and Technology*, Vol. 227, 2022, p. 109594.
23. M. Petroff, J. Appel, K. Rostem, C. L. Bennett, J. Eimer, T. Marriage, J. Ramirez, and E. J. Wollack, "A 3D-Printed, Broadband Millimeter Wave Absorber," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 90, 2019, p. 024701.
24. M. Abdullahi and M. Ali, "Additively Manufactured Metastructure Design for Broadband Radar Absorption," *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 10, 2021, pp. 1–12.
25. Z. Viskadourakis, K. Vasilopoulos, E. Economou, C. M. Soukoulis, and G. Kenanakis, "Electromagnetic Shielding Effectiveness of 3D Printed Polymer Composites," *Applied Physics A*, Vol. 123, 2017, pp. 1–7.
26. H. Mei, X. Zhao, S. Zhou, D. Han, S. Xiao, and L. Cheng, "3D-Printed Oblique Honeycomb Al₂O₃/SiCw Structure for Electromagnetic Wave Absorption," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 372, 2019, pp. 940–945.
27. X. Chen, Z. Wu, Z. Zhang, and Y. Zou, "Ultra-Broadband and Wide-Angle Absorption Based on 3D-Printed Pyramid," *Optics and Laser Technology*, Vol. 124, 2020, p. 105972.
28. C. Wang, M. Chen, H. Lei, K. Yao, H. Li, W. Wen, and D. Fang, "Radar Stealth and Mechanical Properties of a Broadband Radar Absorbing Structure," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 123, 2017, pp. 19–27.
29. Q. Li, X. Yin, W. Duan, L. Kong, B. Hao, and F. Ye, "Electrical, Dielectric and Microwave-Absorption Properties of Polymer Derived SiC Ceramics in X Band," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 565, 2013, pp. 66–72.
30. Z. Liu, S. Wang, J. Shao, et al., "3D Radar Stealth Composite Hierarchical Grid Structure with Extremely Broadband Absorption Performance and Effective Load Bearing," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 247, 2022, p. 110316.
31. Z. Liu, R. Zhang, S. Wang, et al., "Design and Fabrication of an All-Composite Ultra-Broadband Absorbing Structure with Superior Load-Bearing Capacity," *Composites Science and Technology*, Vol. 240, 2023, p. 110094.
32. L. Cheng, Y. Si, Z. Ji, et al., "A Novel Linear Gradient Carbon Fiber Array Integrated Square Honeycomb Structure with Electromagnetic Wave Absorption and Enhanced Mechanical Performances," *Composite Structures*, Vol. 305, 2023, p. 116510.
33. J. C. S. Chieh, B. Dick, S. Loui, and J. D. Rockway, "Development of a Ku-Band Corrugated Conical Horn Using 3-D Print Technology," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, 2014, pp. 201–204.

34. G. L. Huang, S. G. Zhou, C. Y. D. Sim, T. H. Chio, and T. Yuan, "Lightweight Perforated Waveguide Structure Realized by 3-D Printing for RF Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 65, No. 8, 2017, pp. 3897–3904.
35. M. Ahmadloo and P. Mousavi, "A Novel Integrated Dielectric-and-Conductive Ink 3D Printing Technique for Fabrication of Microwave Devices," *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, 2013, pp. 1–3.
36. X. An, X. Yuan, and H. Fan, "Meta-Kagome Lattice Structures for Broadband Vibration Isolation," *Engineering Structures*, Vol. 277, 2023, p. 115403.
37. N. Wu, Y. Yang, C. Wang, Q. Wu, F. Pan, R. Zhang, J. Liu, and Z. Zeng, "Ultrathin Cellulose Nanofiber Assisted Ambient-Pressure-Dried, Ultralight, Mechanically Robust, Multifunctional MXene Aerogels," *Advanced Materials*, Vol. 35, No. 1, 2023, p. 2207969.
38. B. Li, N. Wu, Y. Yang, et al., "Graphene Oxide-Assisted Multiple Cross-Linking of MXene for Large-Area, High-Strength, Oxidation-Resistant, and Multifunctional Films," *Advanced Functional Materials*, Vol. 33, No. 11, 2023, p. 2213357.
39. J. Du, T. Li, Z. Xu, et al., "Structure–Activity Relationship in Microstructure Design for Electromagnetic Wave Absorption Applications," *Small Structures*, 2023, p. 2300152.
40. P. Singh, V. K. Babbar, A. Razdan, R. K. Puri, and T. C. Goel, "Complex Permittivity, Permeability, and X-Band Microwave Absorption of CaCoTi Ferrite Composites," *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, 2000, pp. 4362–4366.
41. X. G. Liu, B. Li, D. Y. Geng, W. B. Cui, F. Yang, Z. G. Xie, D. J. Kang, and Z. D. Zhang, "(Fe, Ni)/C Nanocapsules for Electromagnetic-Wave-Absorber in the Whole Ku-Band," *Carbon*, Vol. 47, 2009, pp. 470–474.
42. X. F. Zhang, X. L. Dong, H. Huang, B. Lv, J. P. Lei, and C. J. Choi, "Microstructure and Microwave Absorption Properties of Carbon-Coated Iron Nanocapsules," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40, 2007, pp. 5383–5387.
43. C. L. Zhu, M. L. Zhang, Y. J. Qiao, G. Xiao, F. Zhang, and Y. J. Chen, "Fe₃O₄/TiO₂ Core/Shell Nanotubes: Synthesis and Magnetic and Electromagnetic Wave Absorption Characteristics," *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 114, 2010, pp. 16229–16235.
44. M. Park, J. Choi, and S. Kim, "Wide Bandwidth Pyramidal Absorbers of Granular Ferrite and Carbonyl Iron Powders," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 5, 2000, pp. 3272–3274.
45. L. Li, Y. Yang, and C. Liang, "A Wide-Angle Polarization-Insensitive Ultra-Thin Metamaterial Absorber With Three Resonant Modes," *Journal of Applied Physics*, Vol. 110, No. 6, 2011, p. 063702.
46. D. Lim, D. Lee, and S. Lim, "Angle- and Polarization-Insensitive Metamaterial Absorber Using Via Array," *Scientific Reports*, Vol. 6, 2016, p. 39686.
47. Q. Zhou, X. Yin, F. Ye, X. Liu, L. Cheng, and L. Zhang, "A Novel Two-Layer Periodic Stepped Structure for Effective Broadband Radar Electromagnetic Absorption," *Materials & Design*, Vol. 123, 2017, pp. 46–53.
48. S. Zhou, G. Zhang, Z. Nie, H. Liu, H. Yu, Y. Liu, K. Bi, W. Geng, H. Duan, and X. Chou, "Recent Advances in 3D Printed Structures for Electromagnetic Wave Absorbing and Shielding," *Materials Chemistry Frontiers*, Vol. 6, 2022, pp. 1736–1751.
49. T. Shi, L. Jin, L. Han, M. C. Tang, H. X. Xu, and C. W. Qiu, "Dispersion-Engineered, Broadband, Wide-Angle, Polarization-Independent Microwave Metamaterial Absorber," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 69, No. 1, 2020, pp. 229–238.
50. X. P. Shen, T. J. Cui, J. M. Zhao, H. F. Ma, W. X. Jiang, and H. Li, "Polarization-Independent Wide-Angle Triple-Band Metamaterial Absorber," *Optics Express*, Vol. 19, No. 10, 2011, pp. 9401–9407.
51. D. M. Li, W. H. Pan, Y. H. Guo, and X. Wang, "Evolutionary Design of Impedance Gradient Honeycomb Metastructure with Broadband Microwave Absorption and Effective Mechanical Resistance," in *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, IEEE, 2021, pp. 705–711.
52. H. B. Zhang, P. H. Zhou, L. W. Deng, J. L. Xie, D. F. Liang, and L. J. Deng, "Frequency-Dispersive Resistance of High Impedance Surface Absorber with Trapezoid-Coupling Pattern," *Journal of Applied Physics*, Vol. 112, 2012, p. 014106.
53. C. Zhang, J. Yang, W. K. Cao, W. Yuan, J. C. Ke, L. X. Yang, et al., "Transparently Curved Metamaterial with Broadband Millimeter Wave Absorption," *Photonics Research*, Vol. 7, No. 4, 2019, pp. 478–485.
54. B. Yu, B. Han, P. B. Su, C. Y. Ni, Q. C. Zhang, and T. J. Lu, "Graded Square Honeycomb as Sandwich Core for Enhanced Mechanical Performance," *Materials & Design*, Vol. 89, 2016, pp. 642–652.
55. L. L. Yan, K. Y. Zhu, N. Chen, X. T. Zheng, and M. Quaresimin, "Energy-Absorption Characteristics of Tube-Reinforced Absorbent Honeycomb Sandwich Structure," *Composite Structures*, Vol. 255, 2021, p. 112946.
56. L. Zhang, B. Song, A. G. Zhao, R. J. Liu, L. Yang, and Y. S. Shi, "Study on Mechanical Properties of Honeycomb Pentamode Structures Fabricated by Laser Additive Manufacturing: Numerical Simulation and Experimental Verification," *Composite Structures*, Vol. 226, 2019, p. 111199.
57. X. W. Li, X. Yu, J. W. Chua, H. P. Lee, J. Ding, and W. Zhai, "Microlattice Metamaterials with Simultaneous Superior Acoustic and Mechanical Energy Absorption," *Small*, Vol. 17, No. 24, 2021, p. 2100336.
58. Y. X. Huang, D. Wu, M. J. Chen, K. Zhang, and D. N. Fang, "Evolutionary Optimization Design of Honeycomb Metastructure with Effective Mechanical Resistance and Broadband Microwave Absorption," *Carbon*, Vol. 177, 2021, pp. 79–89.
59. L. Zhang, B. Song, R. J. Liu, A. G. Zhao, J. L. Zhang, L. R. Zhuo, et al., "Effects of Structural Parameters on the Poisson's Ratio and Compressive Modulus of 2D Pentamode Structures Fabricated by Selective Laser Melting," *Engineering*, Vol. 6, No. 1, 2020, pp. 56–67.
60. J. M. Hyun and J. R. Lee, "Electromagnetic Characteristics of 3D-Printed Composites by Free-Space Measurement," *Measurement*, Vol. 217, 2023, p. 1130.