

RCS 저감을 위한 CNT-PMI 폼 기반 LGF 다층 구조 설계 및 성능 평가

김성준* · 정연화* · 김동현* · 김재욱* · 이상의*[†]

Design and Performance of CNT-PMI Foam-Based Loss-Gradient Foam Multilayer Structure for RCS Reduction

Seongjun Kim*, Yeonhwa Jeong*, Dongheon Kim*, Jaewook Kim*, Sang Eui Lee*[†]

ABSTRACT: In this study, a CNT-PMI foam-based Loss-gradient foam multilayer structure (LGF-MS) with different permittivities was designed by controlling the CNT content. The electromagnetic (EM) wave absorption performance of the proposed structure was analyzed. The LGF-MS was designed to gradually vary the permittivity, minimizing impedance mismatch and maximizing EM wave penetration into the structure. Return loss (RL) simulation confirmed that the LGF-MS achieved broadband EM wave absorption performance comparable to the alternating CNC-FRP and foam multilayer structure (ACF-MS). Furthermore, RCS simulation results for the wing box leading edge (LE) region showed RCS reductions of 92% and 95% relative to the PEC reference under HH and VV polarization conditions, respectively, which were higher than those of the ACF-MS (86% and 94%, respectively). Power loss distribution simulation confirmed EM wave penetration with gradual dissipation at low frequencies, and concentrated energy absorption in the frontal region at high frequencies. The proposed CNT-PMI foam-based LGF-MS demonstrates its feasibility as a viable RAS design approach for aircraft structural components requiring broadband RCS reduction.

초 록: 본 연구에서는 CNT 함량 제어를 통해 유전율이 서로 다른 CNT-PMI 폼 기반 loss-gradient foam (LGF) 다층 구조를 설계하고 전파 흡수 성능을 분석하였다. LGF 다층 구조는 유전율을 점진적으로 변화시켜 층간 임피던스 변화를 최소화하여 전파의 구조 내부 침투를 극대화하도록 설계하였다. 반사 손실(return loss, RL) 해석 결과 LGF 다층 구조는 alternating CNC-FRP and foam (ACF) 다층 구조와 유사한 광대역 전파 흡수 성능을 확인하였다. 또한 윙박스 leading edge (LE) 영역에 적용한 레이더 반사 면적(Radar Cross Section, RCS) 해석 결과 LGF 다층 구조는 HH와 VV 편파 조건에서 PEC 대비 각각 92% 및 95%의 RCS 저감률을 나타내었으며, 이는 ACF 다층 구조의 86% 및 94%보다 높은 결과이다. Power loss 분포 해석을 통해 저주파 조건에서는 전파가 구조 내부로 깊이 침투하며 점진적으로 소산되고 고주파 조건에서는 구조 전면부에서 에너지가 집중적으로 흡수됨을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 CNT-PMI 폼 기반 LGF 다층 구조는 광대역 RCS 저감이 요구되는 항공기 구조 부품에 적용 가능한 전파 흡수 구조체 설계 방안으로서의 유효성을 확인하였다.

Key Words: LGF 다층 구조(Loss-gradient foam multilayer structure), ACF 다층 구조(Alternating CNC-FRP and foam multilayer structure), CNT-PMI 폼(CNT-PMI foam), 전파흡수 구조(Radar absorbing structure)

1. 서 론

스텔스 기술은 항공기, 함정 및 미사일 같은 무기체계가 적의 탐지체계에 식별되는 신호를 최소화하기 위한 핵심 기술이다. 다양한 탐지 수단 중에서도 레이더 기반 탐지는 가장 보편적인 위협 요소로 간주되며, 이에 대응하기 위한 레이더 스텔스 기술은 구조물에서 반사 및 산란되는 전자기파를 효과적으로 제어하는 것을 목표로 한다. 레이더 스텔스 성능은 레이더 반사 면적(Radar Cross Section, RCS)으로 정량화되며 이는 구조물에 의해 산란된 전자기파가 레이더 수신 방향으로 재방사되는 정도를 등가 면적으로 나타낸 지표이다. 따라서 RCS 값이 낮을수록 표적의 탐지 가능성이 감소한다. RCS 저감 설계는 크게 두 가지 방식으로 분류된다. 형상 기반 설계(body shaping)[1,2]는 구조물의 외형을 최적화하여 레이더 방향으로의 후방 산란 성분을 최소화하는 방법이며 재료 기반 설계는 재료의 유전 및 자기 특성을 활용하여 전파를 구조 내부에서 소산시키는 방법이다. 재료 기반 설계는 전파 흡수 특성을 갖는 전파 흡수 재료(Radar Absorbing Material, RAM)[3-10]와 구조 하중 지지 기능 및 전파 흡수 기능을 동시에 구현하는 전파 흡수 구조체(Radar Absorbing Structure, RAS)[11-32]가 있다. 최근에는 우수한 전파 흡수 성능과 구조적 강성을 동시에 확보하는 RAS에 대한 연구가 활발히 보고되고 있다.

기존 RAS는 도전성 필러가 분산된 복합재나 저항성 시트 등을 포함하는 손실 특성을 이용하여 전파를 구조 내부에서 흡수하는 손실 기반 구조와 주파수 선택적 표면(frequency selective surface, FSS)와 같은 주기적 패턴을 통해 특정 주파수에서 공진을 유도하는 공진 기반 구조로 구분된다[15,23,27,33-35]. 위와 같은 구조들은 전파의 반사와 투과를 조절하여 내부 전파 투과를 유도하며 손실 기반 구조는 재료 손실을 통한 전파 흡수를 유도하고 공진 기반 구조는 공진 특성을 이용해 목표 주파수에서 반사를 최소화한다. 그러나 기존 RAS는 균일한 전자기 물성으로 구성된 소재가 적용되어 자유공간과 구조체 사이 임피던스 정합이 되지 않아 전파의 내부 침투가 제한된다. 또한 목표 주파수에서만 최적화되어 광대역 전파 흡수 성능 확보에 한계가 있다.

이러한 한계를 해결하기 위해 소재의 물성을 점진적으로 변화시키는 경사 구조가 제안되었다[36-39]. 경사 구조는 점진적인 임피던스 정합 변화를 통해 표면 반사를 억제하고 전파의 내부 침투를 유도하여 내부 다중 반사를 통한 광대역 흡수 성능을 구현한다. 그러나 기존 경사 구조 연구는 주로 나노소재 기반 흡수층으로 구성된 RAM 연구에 집중되며 구조재로서의 하중 지지 기능을 동시에 수행하는 RAS에 경사 구조를 적용한 연구는 상대적으로 제한적이다.

본 연구에서는 항공기 윙박스의 leading-edge(LE) 영역에 적용하기 위하여 CNT 함량 제어를 통해 유전율이 서로 다른 CNT-PMI 폼을 기반으로 loss-gradient foam(LGF) 다층

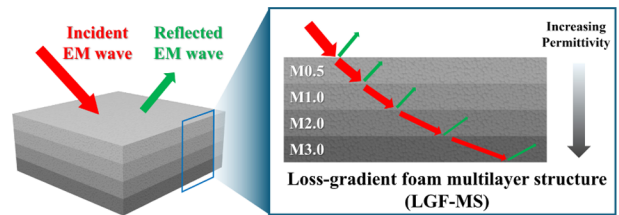


Fig. 1. Schematic of the CNT-PMI foam-based LGF-MS

구조를 설계하였으며, Fig. 1에 제안된 구조의 개요도를 나타내었다. 전파 흡수 성능 평가 결과 LGF 다층 구조는 층별 유전율 변화를 통해 표면 반사 최소화와 전파의 내부 침투를 유도해 구조 내부에서의 점진적인 에너지 소산을 통해 광대역 흡수 성능을 향상시켰다. 비교 대상으로는 저손실 PMI 폼과 전자기 손실 특성을 갖는 CNC-GF 복합재를 교대로 적층한 alternating CNC-FRP and foam (ACF) 다층 구조를 선정하였다[42]. ACF와 LGF 다층 구조의 성능 비교를 위해 반사 손실(return loss, RL) 및 RCS 해석을 수행하였으며, 동일한 윙박스 LE 적용 형상과 주파수 조건에서 제안된 LGF 다층 구조의 성능 향상 효과와 구조 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 측정방법

본 연구에서는 제안된 LGF 다층 구조와 성능 비교를 위한 ACF 다층 구조를 구성하기 위하여 서로 다른 종류의 소재를 사용하였다. LGF 다층 구조에는 CNT 함량에 따라 유전율이 조절된 CNT-PMI 폼을 적용하였으며, CNT 함량이 낮은 M0.5에서 M3.0 순으로 전파 진행 방향을 따라 적층하여 경사형 흡수 코어를 구성하였다. 반면, 비교 구조인 ACF 다층 구조에는 전도성 손실층인 CNC-GF 복합재료와 저유전율 폼을 교대로 적층하였다.

본 연구에서 사용한 CNT-PMI 폼은 선행 연구에서 보고된 방법과 동일한 공정을 통해 제작하였다[40]. 전체 제작 공정은 분산, 예비 중합, 본 중합 및 발포 단계로 구성된다. 단량체인 아크릴로니트릴(acrylonitrile, Aldrich Chemistry Co., USA)과 메타크릴산(methacrylic acid, Aldrich Chemistry Co., USA)을 1:1 몰 비로 혼합한 후 다중벽 탄소나노튜브(multi walled carbon nanotube, MWCNT, Lucan, LG Chem. Ltd., South Korea)를 첨가하여 초음파 분산기(VC750, Sonics & Materials, USA)를 이용해 출력 450 W 조건에서 2시간 동안 분산하였다. 분산된 용액에 단량체 총 질량 대비 중류수 100 wt%, 발포제인 폼아미드(formamide, Aldrich Chemistry Co., USA) 6 wt%, 개시제인 아조비스이소부티로니트릴(2-methyl propionitrile, Aldrich Chemistry Co., USA) 0.7 wt%를 순차적으로 혼합한 후, 70°C에서 20분

간 예비 중합을 수행하였다. 이후 공중합체 전구체를 몰드에 주입하여 70°C 오븐에서 15시간 동안 본 중합을 진행함으로써 상대적으로 두꺼운 기공벽 구조를 형성하였으며, 최종적으로 210°C에서 20분간 가열하여 발포시킴으로써 CNT 함량별로 CNT-PMI 폼을 제작하였다.

본 연구에서 사용한 conformally networked CNT-coated glass fabric (CNC-GF)는 비교 구조인 ACF 다층 구조의 전도성 손실층으로 사용되었으며 선행 연구에서 보고된 방법과 동일한 공정을 통해 제작하였다[41-43]. 전도성 코팅 용액은 증류수 1 L에 MWCNTs 1 g과 분산제인 소듐 도데실벤젠설페이트(Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate, Aldrich Chemistry Co., USA) 10 g을 첨가한 후, 초음파 분산기를 이용하여 30분간 분산하여 제조하였다. 준비된 유리섬유(GF, glass fiber, DCT Co., Busan, Republic of Korea) 직물을 상기 전도성 코팅 용액에 침지한 후 진공오븐(SH-VDO-70NG, SH Scientific, South Korea)에서 120°C, 30분간 건조하였다. 전도성 코팅 및 건조 과정을 1 사이클로 정의하였으며 총 10 사이클을 반복하여 CNC-GFs를 제작하였다. CNC-GFs 기반 복합재료는 에폭시 수지(YD-128, kukdo chemical Co., South Korea)와 경화제(KH-819, kukdo chemical Co., South Korea)를 질량비 100:35로 혼합한 후 핸드레이업 공정을 통해 적층하였으며, 진공 조건에서 120°C에서 2시간 동안 경화를 수행하여 제작하였다. 페이스 시트와 그라운드층으로 각각 유리섬유 강화 플라스틱 프리프레그(GFRP prepreg, HG181, Hankuk carbon, South Korea)와 탄소섬유 강화 플라스틱 프리프레그(CFRP prepreg, WSN3KRK, Toray Advanced Materials, Japan)를 사용하였다. 비교 구조인 ACF 다층 구조의 저손실 층으로는 상용 PMI 폼인 71HF (Rohacell 71HF, Evonik Industries, Germany)를 사용하였다. 71HF 폼은 CNT가 첨가되지 않은 순수 PMI 폼으로 유전율이 낮고 손실이 거의 없어, ACF 다층 구조에서 CNC-GF 복합재 손실층 사이의 층간 임피던스 차이를 형성하는 저유전율 스페이서 역할을 한다. 71HF 폼의 전자기 물성은 선행 연구에서 측정된 값을 적용하였다[42].

CNC-GF 복합재료, GFRP, CNT-PMI 폼의 전자기 물성은 자유공간 측정 시스템을 이용하여 평가하였다. 해당 소재의 전자기적 물성은 Fig. 2에 정리하였다. 자유공간 측정 시스템은 혼 안테나, 네트워크 분석기, 시편 홀더 및 데이터 처리용 컴퓨터로 구성된다[44]. 측정을 위한 시편의 크기는 220 mm × 220 mm이다. 측정 주파수 범위는 식 (1)에서와 같이 주파수 f 를 중심 주파수 f_{center} 기준으로 $\pm 50\%$ 이내의 구간으로 설정하였다. 여기서 f_c 는 일반 주파수(Hz), f_{center} 는 측정 대역의 중심 주파수이며, df_c 는 중심 주파수 대비 주파수 편차를 의미한다.

$$df_c = \frac{f - f_{center}}{f_{center}} \times 100(\%) \quad (1)$$

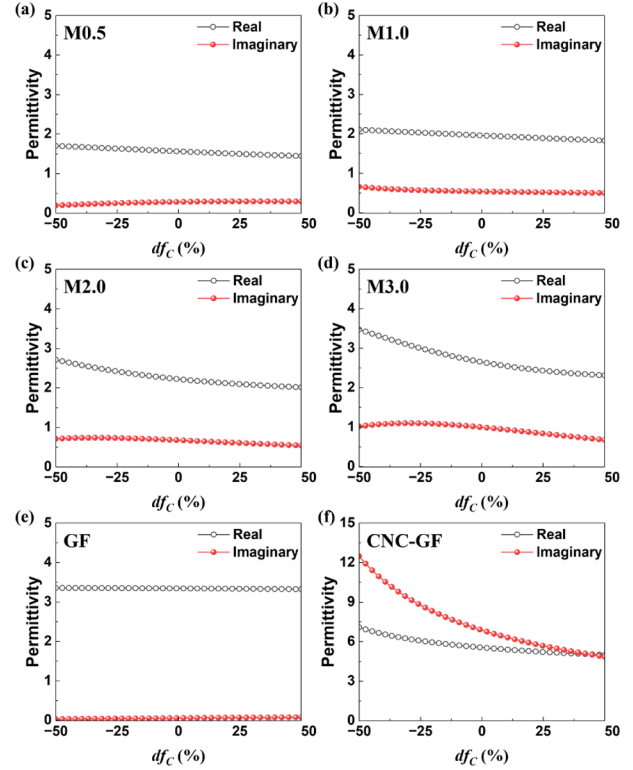


Fig. 2. Permittivity of GFRP, CNC-GF, and CNT-PMI foams with different CNT contents

2.2 해석 조건

본 연구에서는 ACF 다층 구조와 LGF 다층 구조의 전자기적 흡수 특성을 평가하기 위해 CST Studio suite 2021 (Dassault Systems, France)를 이용한 전자기 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 항목은 RL과 RCS로 구성하였다. RL 해석은 주파수 영역 기반의 F-solver를 사용하여 수행하였으며 해석 주파수 범위는 중심 주파수 f_{center} 를 기준으로 $\pm 50\%$ 범위로 설정하였다. 해석 조건으로 unit cell 경계 조건과 tetrahedral mesh를 적용하였다. 입사 전자기파는 waveguide port를 통해 도입하였으며 입사각은 0° 조건에서 해석을 수행하였다. RCS 해석은 시간 영역 기반의 T-solver를 이용하여 수행하였으며 주파수 범위는 RL 해석과 동일하게 설정하였다. 해석 조건으로 open space 경계 조건과 hexahedral mesh를 적용하였다. 입사파는 plane wave로 설정하였으며 Transverse Electric(TE) 및 Transverse Magnetic(TM) 편파 조건을 각각 적용하여 RCS를 분석하였다. TE 편파는 전기장이 입사면에 수직한 경우를 의미하며, TM 편파는 자기장이 입사면에 수직한 경우를 의미한다. 이는 실제 레이더 신호가 TE 및 TM 성분을 동시에 포함한다는 점을 고려하여 CNC-GF/CNT-PMI 폼 기반 전파 흡수 구조의 편파에 따른 RCS 저감 성능을 평가하기 위함이다. 본 연구에서는 TE 및 TM 모드에 따른 RCS 결과를 각각 수평 편파(Horizontal-Horizontal, HH)와 수직 편파(Vertical-Vertical, VV)로 구분

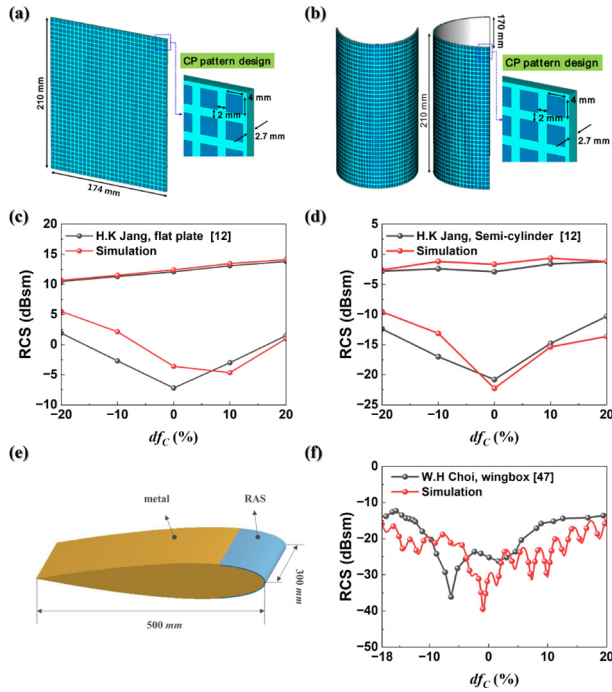


Fig. 3. Schematics of (a) the flat structure and (b) the curved structure from the reference [12]. RCS results comparison between the literature and simulation for (c) the flat structure and (d) the curved structure. (e) Schematics of the RAS applied to the wingbox LE region in the reference [48]. (f) RCS results comparison between the literature and simulation for the wingbox LE region with the applied RAS

하여 제시하였다[45].

2.3 RCS 해석 검증

Fig. 3은 본 연구에서 수행한 RCS 해석의 신뢰성을 검증하기 위해 기존 문헌의 RCS 해석 결과와 비교한 결과이다 [12,48]. Fig. 3(a)와 (b)는 검증에 사용된 평판 및 곡면부 구조의 개요도이며 해당 문헌 내 소재 물성을 적용하여 해석을 수행하였다[12]. Fig. 3(c)와 (d)는 평판 및 곡면부에 대한 RCS 해석 결과를 문헌과 비교한 것으로 유사한 결과를 확인하였다. 문헌과 해석 결과의 평균 절대 오차(mean absolute error)를 비교한 결과, 평판과 곡면부에서 각각 최대 2.84 dB 및 2.42 dB의 오차가 나타났으며, 이는 문헌과 완전히 동일하지 않은 해석 조건에 의한 것으로 판단된다. Fig. 3(e)와 (f)는 윙박스 leading edge (LE) 영역 구조와 해당 구조에 대한 RCS 해석 비교 결과를 나타낸다[48]. 평균 절대 오차를 통해 문헌과 해석 결과 비교 시 5.5 dB의 오차로 완전한 일치는 나타나지 않았으나 주파수에 따른 RCS 변화 경향이 문헌 결과와 유사함을 확인하였으며 이 또한 소재 물성 및 해석 조건의 차이에 의한 것으로 판단된다. 해당 연구 비교 결과들을 통해 본 연구에서 적용한 RCS 해석 방법론의 신뢰

성을 검증하였다. 이하 3장의 RCS 해석은 본 절에서 검증된 해석 조건과 동일한 조건으로 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 전파 흡수 구조체 설계 및 RL 분석

Fig. 4는 ACF 다층 구조와 LGF 다층 구조의 전파 흡수 성능을 비교한 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)는 ACF 다층 구조와 LGF 다층 구조의 개요도를 나타내었다. ACF 다층 구조는 선행 연구에서 제시된 CNC-GF/PMI 폼 다층 구조의 설계 방법과 결과를 바탕으로 구성하였다[42]. 해당 선행 연구에서는 전송선 이론을 기반으로 CNC-GF 복합재와 PMI 폼의 두께에 따른 99% 흡수 대역폭($BW_{99\%}$)을 평가하여 층 두께를 선정 후, PMI 폼의 적층 수에 따른 전파 흡수 및 RCS 저감 성능을 분석하였다. 본 연구에서 비교 대상으로 사용한 ACF 다층 구조는 71HF PMI 폼 19층과 CNC-GF 복합재 18층을 교대로 적층한 구조이다. LGF 다층 구조는 네 개의 CNT-PMI 폼 층으로 구성되며 유전율이 낮은 M0.5에서 높은 M3.0 순으로 적층되었다.

Fig. 4(b)는 두 구조의 전파 흡수율을 나타내었다. ACF 다층 구조는 손실층과 저유전율 층이 반복된 구조로 내부 다중 반사에 의해 광대역 흡수를 유도한다. 반면, LGF 다층 구조는 유전율이 점차 증가하도록 설계하여 전파의 내부 유입을 유도하여 구조 내부에서의 유전 및 전도 손실을 통해 흡수가 발생한다. ACF 다층 구조는 대부분의 주파수 구간에서 LGF 다층 구조보다 높은 흡수율을 나타내었다. 이는 저손실 71HF 폼과 전도성 CNC-GF 복합재가 교대로 적층되어 다수의 계면과 18개의 전도성 손실층이 형성되기 때문이다. 수직 입사 평판 조건에서 구조 내부로 유입된 전파는 다층 계면과 PEC 후면층 사이에서 반복적으로 반사되

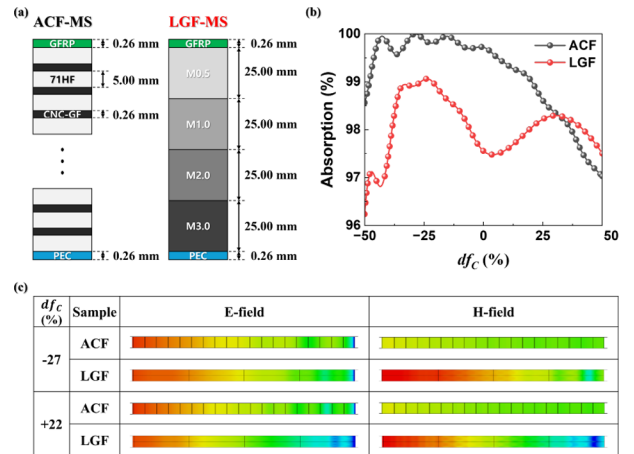


Fig. 4. (a) Schematics of the ACF-MS and LGF-MS. (b) Absorption performance of the ACF-MS and LGF-MS. (c) E-field and H-field distribution of the ACF-MS and LGF-MS at $df_c = -27\%$ and $+22\%$ conditions

며, 다수의 CNC-GF 손실층과 상호작용하는 과정에서 에너지가 소산된다. 반면, LGF 다층 구조는 M0.5에서 M3.0으로 유전율과 손실 특성이 점진적으로 증가하므로 입사면에서의 급격한 임피던스 변화를 완화하고 전파의 내부 침투를 유도한다. 유입된 전파는 각 CNT-PMI 폼 층에서 발생하는 유전 손실과 전도 손실에 의해 점진적으로 소산된다. LGF 다층 구조는 ACF 다층 구조와 달리 독립적인 고손실 CNC-GF 층이 반복적으로 배치되지 않기 때문에 일부 주파수 구간에서 상대적으로 낮은 흡수율을 나타내었으나, 전체 해석 주파수 범위에서 95% 이상의 흡수율을 유지하였다.

Fig. 4(c)는 $df_c = -27\%$ 및 $+22\%$ 조건에서 두 구조의 전기장 및 자기장 분포를 나타낸다. 두 구조는 전기장 분포에서는 유사한 경향을 나타낸 반면, 자기장 분포에서는 상이한 경향을 나타내었다. ACF 다층 구조의 경우 전체 구조에서 균일한 자기장 분포를 나타내었다. 이는 71HF 폼과 CNC-GF 복합재 사이의 반복적인 계면 반사로 인해 전파가 구조 전체에 걸쳐 분포하고, 다수의 CNC-GF 손실층을 통과하면서 흡수되기 때문으로 해석된다. 반면 LGF 다층 구조는 입사면에서 GND 방향으로 점진적으로 자기장 분포가 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 소재의 물성이 점진적으로 변화함에 따라 유입된 전파가 각 층에서 발생하는 유전 손실과 전도 손실에 의해 연속적으로 소산되기 때문으로 판단된다[46,47]. 따라서 ACF 다층 구조는 반복적인 내부 다층 반사와 전도성 손실층에 의한 흡수가 지배적인 반면, LGF 다층 구조는 점진적인 임피던스 변화에 따른 전파 침투와 분포형 손실이 지배적인 흡수 메커니즘을 갖는 것으로 판단된다.

다만 본 절의 RL 해석은 수직 입사 및 주기 경계 조건이 적용된 평판 모델에서 입사 방향으로 되돌아오는 정반사 성분을 평가한 결과이다. 따라서 곡률과 유한 적용 영역에 의해 비정반사 산란이 발생하는 윙박스 LE 형상의 RCS 저감 성능과는 직접적으로 일치하지 않을 수 있다. 이에 실제 구조 적용 조건에서의 성능을 평가하기 위하여 3.2절에서 윙박스 LE 영역에 대한 RCS 해석을 수행하였다.

3.2 RCS 해석 결과

Fig. 5는 ACF 다층 구조와 LGF 다층 구조가 적용된 윙박스 LE 영역의 개요도이다. RL 해석에 적용된 구조와 동일하게 ACF 다층 구조는 71HF 폼 19층과 CNC-GF 18층이 교대로 적층된 구조이고 LGF 다층 구조는 M0.5에서 M3.0 순으로 적층한 구조이다. 두 구조는 LE 영역의 100 mm 범위에 적용되었으며 해당 영역 외의 부분은 완전 도체(perfect electric conductor, PEC)로 물성을 설정하였다.

Fig. 6은 ACF 다층 구조와 LGF 다층 구조가 적용된 윙박스 LE 영역에 대한 RCS 해석 결과이다. Fig. 6(a)는 0° 입사 조건에서 HH 및 VV 편파에 대한 RCS 해석 결과를 나타내었다. 두 구조 모두 PEC 대비 RCS가 감소하여 RCS 저감 성

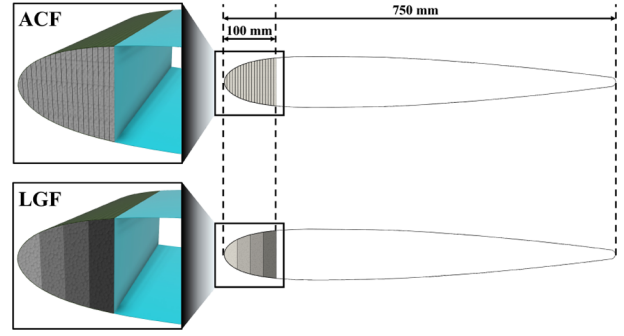


Fig. 5. Schematic of the wingbox LE region with ACF-MS and LGF-MS

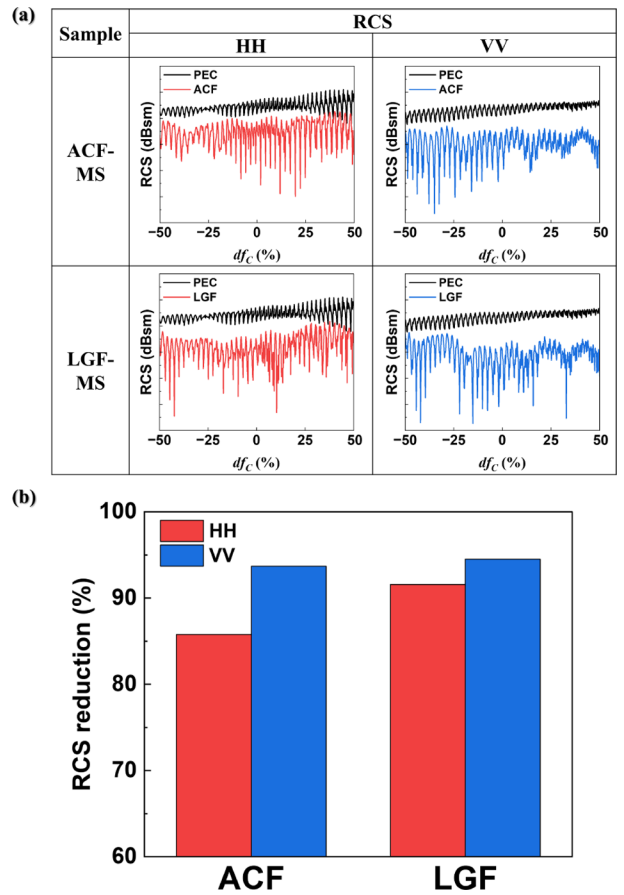


Fig. 6. (a) RCS simulation results of the ACF-MS and LGF-MS under HH and VV polarization conditions. (b) RCS reduction performance of the ACF-MS and LGF-MS under HH and VV polarization conditions

능이 향상됨을 확인하였다. Fig. 6(b)는 PEC 대비 두 구조의 RCS 저감률을 나타내었다. ACF 다층 구조는 HH 및 VV 조건에서 각각 86%, 94%의 저감률을 보인 반면 LGF 다층 구조는 각각 92%, 95%를 나타내었다. 두 구조 모두 VV 편파에서 HH 편파보다 높은 RCS 저감률을 나타내었다. 윙박스 LE는 곡면 형상이므로 전체 입사각이 0° 이더라도 중앙부

를 제외한 영역에서는 전파가 경사 입사하며, 표면 위치에 따라 입사각과 입사면이 연속적으로 변화한다. 이에 따라 HH와 VV 편파에서 자유공간과 흡수 구조 사이의 임피던스 정합 조건이 서로 다르게 형성된다. 선행 연구에서는 경사 입사각이 증가함에 따라 HH 편파의 흡수 성능 저하가 VV 편파보다 크게 나타나는 경향이 보고되었다[14]. 본 연구에서도 이와 유사하게 HH 편파에서는 곡면부의 경사 입사에 따른 정합 저하로 표면 반사와 잔류 후방 산란이 상대적으로 증가한 반면, VV 편파에서는 흡수 성능이 상대적으로 잘 유지되어 더 높은 RCS 저감률을 나타낸 것으로 판단된다.

한편, 동일한 편파 조건에서 ACF와 LGF 다층 구조 사이의 RCS 저감률 차이는 두 구조의 층 구성과 계면 특성에 기인한 것으로 판단된다. ACF 다층 구조는 CNC-GF 복합재와 71HF 폼이 교대로 적층되어 다수의 임피던스 불연속 계면을 가지며, 전파가 각 계면을 통과할 때 부분적인 반사가 발생한다. 평판의 수직 입사 조건에서는 이러한 반사파가 구조 내부에서 반복적으로 진행하며 CNC-GF 손실층과 상호작용하여 전파 흡수에 기여할 수 있다. 그러나 원박스 LE와 같은 곡면 구조에서는 표면 위치에 따라 입사각이 달라지므로, 계면에서 발생한 반사 성분의 진행 방향과 위상도 위치별로 달라진다. 이에 따라 흡수되지 않고 남은 일부 반사 성분이 완전히 상쇄되지 않고 잔류 후방 산란에 기여할 수 있다. 이는 Fig. 4(c)에서 ACF 다층 구조가 구조 전체에 걸쳐 비교적 균일한 자기장 분포를 나타내어 내부 다중 반사가 활발히 발생한 것으로 해석한 결과와도 부합한다.

반면 LGF 다층 구조는 유전율이 점진적으로 변화하므로 층간 임피던스 변화가 상대적으로 작아 급격한 계면 반사가 억제된다. 또한 Fig. 4(c)에서 자기장이 입사면에서 GND 방향으로 점진적으로 감소하는 분포를 나타내어, 유입된 전파가 구조 내부에서 유전 및 전도 손실을 통해 연속적으로 소산됨을 확인하였다[37,46]. 이러한 구조 간 차이는 곡면부의 경사 입사에 따른 흡수 성능 저하가 상대적으로 크게 나타나는 HH 편파에서 더욱 뚜렷하게 반영되어, ACF 다층 구조가 86%의 RCS 저감률을 나타낸 반면, LGF 다층 구조는 92%로 더 높은 RCS 저감률을 나타낸 것으로 판단된다. 반면 VV 편파에서는 경사 입사 조건에서도 두 구조의 흡수 성능이 상대적으로 잘 유지되었으며, ACF 다층 구조에서도 전파가 다수의 CNC-GF 손실층과 반복적으로 상호작용하면서 높은 흡수 성능이 유지된 것으로 판단된다. 이에 따라 계면 반사에 의한 잔류 후방 산란의 영향이 RCS 저감률에 상대적으로 작게 반영되어, ACF와 LGF 다층 구조가 각각 94%와 95%의 유사한 RCS 저감률을 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 7은 ACF 다층 구조의 편파 및 주파수 조건에 따른 power loss 분포 해석 결과이다. 모든 편파 및 주파수 조건에서 저손실 폼 내부의 power loss는 낮게 나타난 반면 CNC-

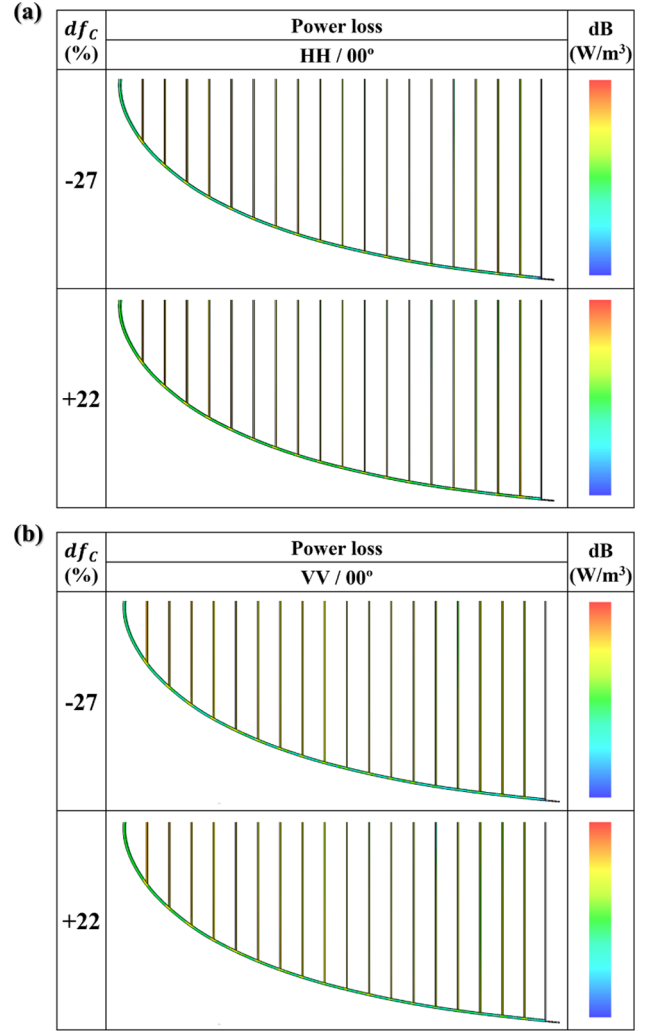


Fig. 7. Power loss distributions of the ACF-MS under (a) HH and (b) VV polarization conditions at $df_c = -27\%$ and $+22\%$

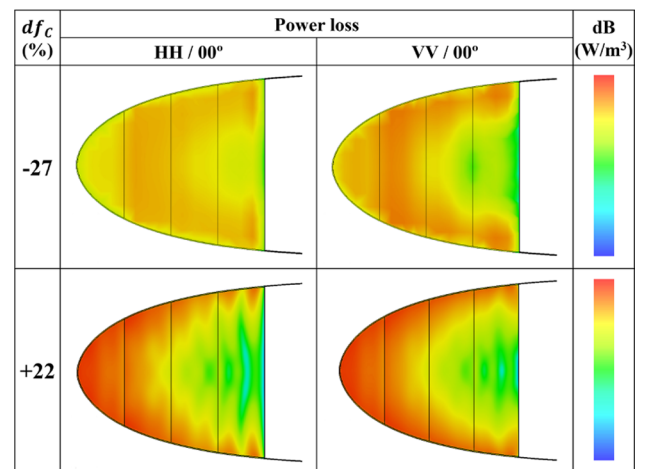


Fig. 8. Power loss distributions of the LGF-MS under HH and VV polarization conditions at $df_c = -27\%$ and $+22\%$

GF를 중심으로 power loss가 반복적으로 나타났다. 이는 ACF 다층 구조로 유입된 전파 에너지가 폼보다는 반복적으로 배치된 CNC-GF에서 주로 소산됨을 보여준다. 또한 power loss가 입사면 인근에만 집중되지 않고 구조 내부의 다수 CNC-GF 층에 걸쳐 반복적으로 나타났다. 이는 층간 임피던스 차이에 의해 내부 다중 반사가 유도되는 ACF 다층 구조의 흡수 거동과 Fig. 4(c)에서 확인된 비교적 균일한 자기장 분포에 부합한다.

Fig. 8은 LGF 다층 구조의 편파 및 주파수 조건에 따른 power loss 분포 해석 결과이다. $df_c = -27\%$ 일 때 LGF 다층 구조 표면에서는 power loss가 낮고 구조 내부의 중간 영역에서 power loss가 증가하는 분포를 확인하였다. 이는 전파가 내부로 침투하며 점진적으로 흡수되어 소산됨을 나타낸다. 또한 $df_c = -27\%$ 일 때 VV 편파는 HH 편파와 비교하여 곡면 상·하부를 중심으로 상대적으로 높은 국부 power loss를 나타내었다. 이는 편파에 따라 구조 내부에서 전자기 에너지가 소산되는 위치와 분포가 달라짐을 보여주며, Fig. 6에서 나타난 편파별 RCS 저감 성능 차이와 정성적으로 일치한다. $df_c = 22\%$ 일 때 구조 표면에서 높은 power loss가 나타나는 것을 확인하였다. 이는 주파수가 증가하며 파장이 감소하여 구조 두께가 파장 대비 상대적으로 증가하기 때문이다. 이에 따라 전파는 구조 전면부에서부터 에너지를 소산하기 시작하여 내부에 도달하기 전에 구조 전면부에서 집중적으로 소산된 것으로 판단된다[46,47].

4. 결 론

본 연구에서는 CNT 함량 제어를 통해 유전율이 다른 CNT-PMI 폼을 제작하고 유전율이 점진적으로 변화하는 LGF 다층 구조를 설계하였다. ACF 다층 구조와 LGF 다층 구조의 전파 흡수 성능을 비교하기 위해 RL과 RCS 해석을 수행하였다. RL 해석 결과 LGF 다층 구조는 ACF 다층 구조보다 상대적으로 낮은 광대역 흡수 성능을 보였지만 전체 주파수 영역에서 95% 이상의 흡수율을 나타내었다. 자기장 분포를 통해 전파가 구조 내부로 침투하여 점진적으로 흡수되는 거동을 확인하였다. 윙박스 LE 영역에 두 구조를 적용한 RCS 해석 결과 LGF 다층 구조는 HH 및 VV 편파 조건에서 각각 92% 및 95%의 RCS 저감률을 나타내어 ACF 다층 구조 대비 향상된 RCS 저감률을 확인하였다. 이는 LGF 다층 구조의 유전율이 점진적으로 변화하여 계면 반사가 억제되고, 전파의 내부 침투와 흡수가 유도되기 때문으로 판단된다. LGF 다층 구조의 power loss 분포 분석 결과 저주파 조건에서는 전파가 구조 내부로 침투하며 점진적으로 흡수되었고 고주파 조건에서는 구조 표면에서 흡수되는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과를 통해 CNT-PMI 폼 기반 LGF 다층 구조는 광대역 전파 흡수 구조체로 활용 가능성이 높은 것으로 판단된다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF2022R1A2C1006020)과 산업통상자원부(MOTIE) 소재부품기술개발사업(과제번호: RS-2024-00467179)의 재원으로 한국산업기술평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- Hoseini, M., Abdolali, A., Fallah, M., and Amir-Hosseini, M. K., "A new method for optimizing RCS of the nose of flying objects," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, No. 6, 2015, pp. 1361-1365.
- Thoulon, C., Roge, G., and Pironneau, O., "Gradient-Based Aero-Stealth Optimization of a Simplified Aircraft," *Fluids*, Vol. 9, No. 8, 2024.
- Gama, A. M., Rezende, M. C., and Dantas, C. C., "Dependence of microwave absorption properties on ferrite volume fraction in MnZn ferrite/rubber radar absorbing materials," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 22, 2011, pp. 2782-2785.
- Panwar, R., Son, D.-S., and Lee, J.-R., "Novel optimization method of single square FSS impinged and cascaded radar absorbing composites," *Advanced Composite Materials*, Vol. 27, No. 3, 2018, pp. 297-307.
- Delfini, A., Albano, M., Vricella, A., Santoni, F., Rubini, G., Pastore, R., and Marchetti, M., "Advanced Radar Absorbing Ceramic-Based Materials for Multifunctional Applications in Space Environment," *Materials (Basel)*, Vol. 11, No. 9, 2018.
- Ruiz-Perez, F., López-Estrada, S. M., Tolentino-Hernández, R. V., and Caballero-Briones, F., "Carbon-based radar absorbing materials: A critical review," *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, Vol. 7, No. 3, 2022.
- Yeswanth, I. V. S., Jha, K., Bhowmik, S., Kumar, R., Sharma, S., and Ilyas, R. A., "Recent developments in RAM based MWCNT composite materials: a short review," *Functional Composites and Structures*, Vol. 4, No. 2, 2022.
- Kim, S. H., Lee, S. Y., Zhang, Y., Park, S. J., and Gu, J., "Carbon-Based Radar Absorbing Materials toward Stealth Technologies," *Adv Sci (Weinh)*, Vol. 10, No. 32, 2023, p. e2303104.
- Gholipur, R., "Characterization of wheat husk-derived holey carbon/(RGO) x/CoFe₂O₄/PVA nanocomposites: insights into structural, optical, magnetic, and dielectric properties," *Functional Composites and Structures*, Vol. 6, No. 2, 2024, p. 025001.
- Calvo-de la Rosa, J., Vazquez-Aige, M., Pérez, P., Medina, L., Marín, P., Lopez-Villegas, J. M., and Tejada, J., "Experimental radar absorption in high-filling factor magnetic composites," *Materials Today Communications*, Vol. 42, 2025.
- Lee, S.-E., Kang, J.-H., and Kim, C.-G., "Fabrication and design of multi-layered radar absorbing structures of MWNT-filled glass/epoxy plain-weave composites," *Composite Structures*, Vol. 76, No. 4, 2006, pp. 397-405.

12. Jang, H.-K., Shin, J.-H., Kim, C.-G., Shin, S.-H., and Kim, J.-B., "Semi-cylindrical Radar Absorbing Structures using Fiber-reinforced Composites and Conducting Polymers in the X-band," *Advanced Composite Materials*, Vol. 20, No. 3, 2011, pp. 215-229.
13. Choi, W.-H., and Kim, C.-G., "Broadband microwave-absorbing honeycomb structure with novel design concept," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 83, 2015, pp. 14-20.
14. Feng, J., Zhang, Y., Wang, P., and Fan, H., "Oblique incidence performance of radar absorbing honeycombs," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 99, 2016, pp. 465-471.
15. Baek, S. M., Lee, W. J., and Joo, Y. S., "A Study on a Radar Absorbing Structure for Aircraft Leading Edge Application," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 18, No. 2, 2017, pp. 215-221.
16. Lee, W.-J., Baek, S.-M., and Joo, Y.-S., "Development of a composite EM wave absorber for the leading edge of low observable aircraft," *Advanced Composite Materials*, 2018, pp. 1-12.
17. Luo, H., Chen, F., Wang, X., Dai, W., Xiong, Y., Yang, J., and Gong, R., "A novel two-layer honeycomb sandwich structure absorber with high-performance microwave absorption," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 119, 2019, pp. 1-7.
18. Panwar, R., and Lee, J. R., "Recent advances in thin and broadband layered microwave absorbing and shielding structures for commercial and defense applications," *Functional Composites and Structures*, Vol. 1, No. 3, 2019.
19. Choi, J.-H., Jang, M.-S., Jang, W.-H., and Kim, C.-G., "Investigation on microwave absorption characteristics of conductive-coated honeycomb absorber," *Composite Structures*, Vol. 242, 2020.
20. Choi, W.-H., Choe, H.-S., and Nam, Y.-W., "Multifunctional microwave heating and absorbing honeycomb core using nickel-coated glass fabric," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 138, 2020.
21. Choi, W.-H., Kwak, B.-S., Kweon, J.-H., and Nam, Y.-W., "Radar-absorbing foam-based sandwich composite with electroless nickel-plated glass fabric," *Composite Structures*, Vol. 243, 2020.
22. Choi, W.-H., Song, W.-H., and Lee, W.-J., "Broadband Radar Absorbing Structures with a Practical Approach from Design to Fabrication," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 20, No. 4, 2020, pp. 254-261.
23. Choi, W.-H., Song, W.-H., and Lee, W.-J., "Equivalent pattern modeling method of periodic pattern surface and its application to the broadband radar absorbing sandwich structure," *Advanced Composite Materials*, Vol. 29, No. 5, 2020, pp. 495-507.
24. Kwak, B.-S., Choi, W.-H., Noh, Y.-H., Jeong, G.-W., Yook, J.-G., Kweon, J.-H., and Nam, Y.-W., "Nickel-coated glass/epoxy honeycomb sandwich composite for broadband RCS reduction," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 191, 2020.
25. Kwak, B.-S., Jeong, G.-W., Choi, W.-H., and Nam, Y.-W., "Microwave-absorbing honeycomb core structure with nickel-coated glass fabric prepared by electroless plating," *Composite Structures*, Vol. 256, 2021.
26. Jin, D.-H., Hyun, J.-M., Lee, J.-R., and Ahn, J.-M., "Fabrication of multi-layer radar absorbing structures based on continuous fiber 3D printing and thickness correction method," *Advanced Composite Materials*, Vol. 33, No. 4, 2024, pp. 618-639.
27. Sun, Y., Pang, Y., Chen, R., Qiao, B., Yang, J., Qu, B., Li, Z., and Xu, Z., "Multilayer metasurface-based sandwich composites for wideband radar cross section reduction," *Composites Science and Technology*, Vol. 241, 2023.
28. Cho, H.-T., Song, T.-H., Seok, C.-M., Kweon, J.-H., Lee, S.-Y., Nam, Y.-W., and Kwak, B.-S., "Electromechanical behavior of radar-absorbing thermoplastic composites with nickel-coated glass/polyamide 6 under high humidity conditions," *Advanced Composite Materials*, Vol. 33, No. 5, 2024, pp. 1040-1059.
29. Wen, X., Chen, W., Chen, K., Wang, G., Song, C., and Zhang, J., "Study on the electromagnetic wave absorption performance of dual-loss type composite MWCNT/CIP/GF/EP," *Functional Composites and Structures*, Vol. 6, No. 4, 2024.
30. Heo, S.-H., Hong, D.-J., Seo, H.-J., Lee, H.-S., Hong, S.-W., Choi, W.-H., and Nam, Y.-W., "Bendable over-expanded honeycomb sandwich composites for broadband RCS reduction in leading edge applications," *Advanced Composite Materials*, Vol. 35, No. 4, pp. 613-631, 2026.
31. Hong, D.-J., Heo, S.-H., Seo, H.-J., Lee, H.-S., Hong, S.-W., Choi, W.-H., and Nam, Y.-W., "Nickel plated fiber based trailing edge stealth sandwich composites with conductive honeycomb/foam core for broadband RCS reduction," *Advanced Composite Materials*, Vol. 35, No. 2, 2026, pp. 247-265.
32. Kumar, T. M. M., Kini, H. J., Praveen, M., Kumar, M., P S J, N C, D., and Sindhushree, K. L., "Polyethylene composites for X-band electromagnetic interference shielding: combined benefits of conductive MWCNT/graphene nanoplatelets and soft magnetic MgFe_2O_4 nanoparticles," *Functional Composites and Structures*, Vol. 7, No. 3, 2025.
33. Choi, W.-W., Baek, S., Kim, S., Lee, H., Choi, T., Kim, I., Koh, S., Yook, J.-G., and Kim, K., "Resistive ink-based broadband metamaterial microwave absorber for leading edge of wings," *Advanced Composite Materials*, Vol. 35, No. 4, 2026, pp. 743-756.
34. Choi, W.-W., Baek, S., Kim, S.-W., Choi, T., Joo Lee, H., Kim, I., Koh, S., Yook, J.-G., and Kim, K., "Metasurface Embedded Microwave Absorbing Composites on Curved Surfaces for Radar Cross Section Reduction," *IEEE Access*, Vol. 13, 2025, pp. 179463-179474.
35. Choi, M., Cho, Y. S., Park, K. T., Lee, K., Shin, K.-Y., Jung, Y., and Kim, T., "Unique correlation between electrical, structural properties and electromagnetic shielding properties of carbon nanotube sheets," *Functional Composites and Structures*, Vol. 6, No. 2, 2024, p. 025004.
36. Chen, M., Zhu, Y., Pan, Y., Kou, H., Xu, H., and Guo, J., "Gradient multilayer structural design of CNTs/ SiO_2 composites for improving microwave absorbing properties," *Materials & Design*, Vol. 32, No. 5, 2011, pp. 3013-3016.
37. Fan, Q., Yang, X., Lei, H., Liu, Y., Huang, Y., and Chen, M., "Gradient nanocomposite with metastructure design for

- broadband radar absorption,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 129, 2020, p. 105698.
38. Yadav, R., and Panwar, R., “Multilayer gradient perforated radar absorbing structure for stealth applications,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 58, No. 2, 2022, pp. 1-5.
 39. Zhou, Q., Shi, T., Xue, B., Gu, S., Ren, W., Ye, F., Fan, X., Duan, W., Zhang, Z., and Du, L., “Gradient carbonyl-iron/carbon-fiber reinforced composite metamaterial for ultra-broadband electromagnetic wave absorption by multi-scale integrated design,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 30, No. 6, 2023, pp. 1198-1206.
 40. Jeong, Y. H., Kang, S. W., Shin, S. C., Kim, J. W., and Lee, S. E., “Carbon nanotube/thick-walled polymethacrylimide foam core with enhanced mechanical and electromagnetic properties for radar absorbing sandwich structures,” *Composite Structures*, Vol. 377, 2026.
 41. Choi, S., Park, J., Kang, D., and Lee, S. E., “MWCNT-Coated Glass Fabric/Phenol Composite Heating Panel Fabricated by Resin Infusion Process,” *Polymers (Basel)*, Vol. 15, No. 16, 2023.
 42. Kim, S. J., Hong, S. W., Choi, W. H., and Lee, S. E., “Radar-Absorbing Multilayer Structure Based on Conformally Networked CNT-GFRP and PMI Foam for RCS Reduction in Leading Edge Application,” *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 27, No. 2, 2026, pp. 1441-1457.
 43. Shin, S. C., Choi, S., and Lee, S. E., “Conformally-networked MWCNTs on glass fiber fabric with low electrical resistivity and tunneling activation energy,” *Polymer Composites*, Vol. 46, No. 13, 2025, pp. 12013-12024.
 44. Seo, I. S., Chin, W. S., and Lee, D. G., “Characterization of electromagnetic properties of polymeric composite materials with free space method,” *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1-4, 2004, pp. 533-542.
 45. Hamd, H. I., Hatem, H. R., and Mohamed, W. Q., “Evaluation of bistatic and monostatic RCS for simple and complex targets in X-Band,” *International Journal of Microwave and Optical Technology*, Vol. 15, No. 6, 2020, pp. 583-591.
 46. Ji, B., Fan, S., Kou, S., Xia, X., Deng, J., Cheng, L., and Zhang, L., “Microwave absorption properties of multilayer impedance gradient absorber consisting of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/polymer films,” *Carbon*, Vol. 181, 2021, pp. 130-142.
 47. Qin, M., Zhang, L., and Wu, H., “Dielectric loss mechanism in electromagnetic wave absorbing materials,” *Advanced Science*, Vol. 9, No. 10, 2022, p. 2105553.
 48. Choi, W.-H., Kwak, B.-S., Noh, Y.-H., Yook, J.-G., Kweon, J.-H., and Nam, Y.-W., “Radar-absorbing nickel-coated fabric composite for wing-shaped structure in the X-band,” *Composite Structures*, Vol. 239, 2020, p. 111885.