

전자기파 손실 감쇠 특성을 갖는 날개 앞전 스텔스 샌드위치 복합재 구조물의 광대역 RCS 저감 설계

임채환* · 홍동준* · 허성행* · 서한준** · 최원호*** · 홍성원*** · 이현석*** · 이수용*** · 남영우****†

Design of Wing-shaped Leading-edge Stealth Honeycomb Sandwich Composites Based on Gradual EM Wave Attenuation

Chae-Hwan Lim*, Dong-Jun Hong*, Seong-Haeng Heo*, Han-Jun Seo**, Won-Ho Choi***, Seong-Weon Hong***, Hyun-Seok Lee***, Soo-Yong Lee***, Young-Woo Nam****†

ABSTRACT: This study proposes a radar-absorbing structure for the leading edge by combining conductive carbon-based nanoparticles-coated honeycomb core and a multi-layer wave absorbing structure based on metal-coated glass fabric. The honeycomb core induces electromagnetic wave gradual attenuation through absorption and scattering, while multi-layer wave absorbing structure exhibits broadband absorption characteristics. SEM and EDS analyses were performed to investigate the microstructure and particle distribution, and a free-space measurement system was used to evaluate the electromagnetic properties of the metal-coated glass/epoxy composite. In the proposed radar absorbing structure, the honeycomb core contributes to wave attenuation by absorbing and scattering incident electromagnetic waves, and the dielectric loss characteristics of the metal-coated glass fiber further enhance wave absorption efficiency. By applying the proposed structure to a wing leading-edge, we compared its RCS performance under TM and TE polarizations and various incidence angles with those of a conventional model. In the combined design which integrates a conductive nanoparticle-coated honeycomb core and a multi-layer radar absorbing structure, gradual attenuation led to improved RCS performance. Under oblique conditions, additional absorption and scattering provided by the radar absorbing structure further enhanced electromagnetic wave performance compared to the conventional model.

초 록: 본 연구에서는 전도성 카본계 나노 입자로 코팅된 허니컴 코어와 금속 도금 유리섬유를 활용한 다층형 전파흡수 구조를 결합하여 날개 앞전 전파흡수 구조를 설계하였다. 허니컴 코어는 전자기파 흡수와 산란을 통해 전파 감쇠를 유도하며 다층형 전파흡수 구조는 광대역에서 전파흡수 특성을 발휘한다. SEM과 EDS를 활용하여 미세 구조와 입자 분포를 분석하였으며, 자유공간 측정 장비를 이용해 금속 도금 유리섬유의 전자기적 물성을 평가하였다. 제안된 전파흡수구조에서 허니컴 코어는 전자기파의 흡수와 산란을 통해 전파 감쇠를 일으켰고, 금속 도금 유리섬유의 손실 특성을 활용하여 추가적인 전파흡수 효율 향상에 기여하였다. 본 구조를 날개 앞전 형상에 적용하여 TM 및 TE 편파 모드와 다양한 입사각에 대해 일반적인 모델과 RCS 특성을 비교하였다. 전도성 나노 입자가 코팅된 허니컴 코어와 다층형 전파흡수 구조가 결합된 구조에서 점진적인 감쇠를 통해 RCS 성능 향상을 확인하였다. 고각 입사 조건에서 전파흡수 구조의 추가적인 흡수 및 산란으로 일반적인 모델 대비 우수한 전파흡수 성능을 확인하였다.

Key Words: 전파흡수 구조(Radar absorbing structure), 허니컴 코어(Honeycomb core), 전도성 코팅(Conductive coating), 전자기파 감쇠(Electromagnetic wave attenuation)

Received 16 December 2024, received in revised form 4 January 2025, accepted 11 February 2025

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

**Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

***Stealth Technology Section, UCAV Development Team, Korean Air

****Department of Smart Drone Engineering, Korea Aerospace University

†Corresponding author (E-mail: ywnam@kau.ac.kr)

1. 서 론

스텔스 항공기는 레이더, 적외선, 시각, 음향 신호와 같은 다양한 탐지 수단에 노출될 가능성을 줄이도록 설계된 항공기이다. 특히 레이더 신호는 항공기의 위치, 속도, 방향 등 핵심 정보를 제공하므로, 이를 저감하는 기술은 스텔스 성능 구현에 있어 핵심적인 요소이다[1-9]. 스텔스 성능의 주요 척도 중 하나인 레이더 반사 면적(Radar Cross Section, RCS)을 줄이기 위해서는, 기하학적 설계(Shaping)부터 전자파 흡수 재료(Radar absorbing material, RAM)[9,10], 메타표면 기반 설계[7], 다층형 전파흡수 구조(Radar absorbing structure, RAS)[11-28], 그리고 전도성 나노 입자를 통한 전자파 특성과 특성 조절[29-38] 등 다양한 기법이 제시되어 왔다. 그러나 대부분의 RCS 저감 기술은 특정 주파수 대역에서 최적화된 성능을 보이지만, 다른 주파수 대역으로 넘어가면 흡수 및 산란 특성이 떨어진다[39-45]. 또한, 항공기 날개 앞전(Leading edge)과 같이 곡률이 큰 부위는 형상적 특성 때문에 레이더파 반사가 집중되거나 예상치 못한 산란이 발생하여, 스텔스 성능 전반에 부정적인 영향을 줄 수 있다[46-48]. 이와 관련해 Choi 등[49]은 허니컴 코어에 PEDOT(Poly(3,4-ethylenedioxythiophene))을 코팅하여, 날개 앞전에 적용한 뒤 C-X 밴드에서 RCS 저감 성능을 평가함으로써 전도성 허니컴 코어가 날개 앞전에서의 RCS 저감 기술에 대해 제시하였다. Baek 등[50]은 허니컴 코어에 전도성 패턴을 형성하여 광대역 RCS 저감 성능을 확인하였으며, 이를 날개 앞전에 적용할 수 있음을 평가하였다. Zhou 등[51]은 전도성 나노 입자인 카본 블랙을 허니컴 코어에 코팅한 뒤, 시뮬레이션과의 비교를 통해 전자기적 구조 설계 방법을 제시함으로써 허니컴 기반 전파흡수 구조의 잠재력을 입증하였다. 이러한 선행 연구들은 모두 전자기적 물성 조절을 통해 날개 앞전에서의 RCS 저감 가능성을 보여주었다. 그러나 전자파가 고각(Oblique angle)으로 입사되는 상황에서는 전도성 허니컴 코어를 활용하여 RCS 저감 기술을 실현하는데 한계가 존재한다[52-60]. 최근 많은 연구에서 날개 앞전에 전자기적 특성을 부여한 섬유를 적용하여 우수한 전파흡수 성능이 나타나고 있다. 이는 전자기적 특성을 부여한 섬유가 RCS 저감에 효과적임을 제시한다[61-68]. 본 연구에서는 날개 앞전에서 전파흡수 성능 향상을 위해 전도성 카본계 나노 입자를 허니컴 코어에 코팅하였고, 전자기적 특성을 부여한 금속 도금 유리섬유를 전파흡수 구조를 설계하였다. 이를 통해 전자기적 성능을 평가하고 전기장(E-field) 및 자기장(H-field) 분석을 통해 전자기적 특성을 평가하였다. 또한, 고각에서 전자기파 입사 시 날개 앞전 영역에서의 고각 입사에 대한 RCS 저감 성능을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 전도성 나노 입자 코팅 허니컴 코어

본 연구에서는 Nomex社에서 제작된 아라미드 섬유 기반 허니컴 코어를 활용하였다. 허니컴 코어는 경량성과 우수한 구조적 안정성으로 인해 항공기 분야에서 폭넓게 활용되어 왔다[69-71]. 특히, 셀 형태의 다공성 구조가 높은 기계적 강도 대비 낮은 밀도를 구현함으로써, 항공기 날개에 경량화가 필요한 부위에 우수한 기계적 성능을 제공한다. 또한, 허니컴 코어에 전도성 나노 입자를 코팅하여 벽면에서 발생하는 전도성 손실을 극대화하면, 전자파 흡수 성능을 동시에 확보할 수 있다. 전도성 카본계 나노 입자는 경량성과 넓은 표면적을 모두 지니고 있어, 전자파 입사 시 다중 반사와 산란을 유도함으로써 높은 흡수 특성을 기대할 수 있다. 또한 다른 나노 입자 대비 비교적 용이한 전기전도도 조절이 가능하여, 전달 손실(Conduction loss)과 분극 손실(Polarization loss)을 동시에 발생시켜 광대역 전자파 흡수에 유리하다[72,73]. 이러한 특성을 활용하고자, 본 연구에서는 허니컴 코어 벽면에 카본계 나노 입자를 코팅하여 전도성 허니컴 구조가 갖는 전자파 흡수 메커니즘을 극대화하고자 하였다. 코팅된 벽면은 전자파가 코어 내부를 통과하

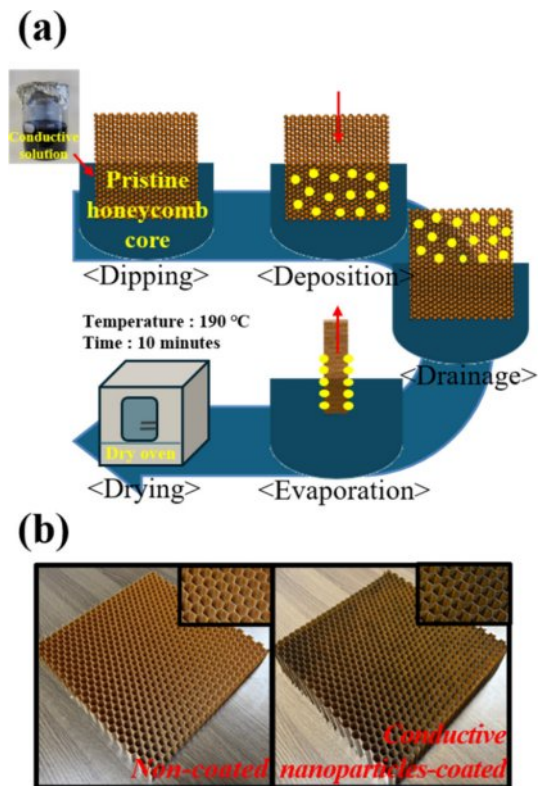


Fig. 1. (a) Dip coating process (b) Left: non-coated honeycomb core, right: conductive nanoparticles-coated honeycomb core

는 과정에서 다중 반사와 산란 경로를 증가시킴으로써 에너지 손실을 증대하여 전파흡수 성능을 높이는 데 기여한다[74]. Fig. 1(a)에는 코팅 공정이 제시되어 있으며, Fig. 1(b)에는 코팅 전 허니컴 코어와 코팅 후 허니컴 코어의 사진이 제시되어 있다. 코팅 공정은 코원 산업社에서 수행되었으며 딥 코팅 공정을 활용하였다. 허니컴 코어를 전도성 카본계 나노 입자 용액에 담근 후 천천히 올려 코팅이 잘 부착되도록 하였다. 이후, 190°C에서 10분간의 경화 과정을 통해 코팅이 허니컴 코어에 견고하게 결합되도록 하였다. 코팅 후, 면 저항 측정은 허니컴 코어와 같은 다공성 물질 측정에 적합한 비접촉식 측정 방법을 활용하여 Fig. 2(a)에 나타나 있는 Mitsubishi MCP-T610 장비를 활용하여 면 저항 측정을 진행하였다. 측정 방식은 허니컴 코어를 6구역으로 나눠 평균 면 저항을 도출하였다. Fig. 2(b)에는 전도성 카본계 나노 입자가 코팅된 허니컴 코어의 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM)을 이용하여 100 μm 수준의 코팅된 허니컴 코어 이미지를 얻었다. 이미지를 확인해보면 허니컴 셀 벽면 표면에 카본계 나노 입자 응집체가 분포되어 있으며, 이는 SWCNT가 용액 내에서 응집(Agglomeration)된 상태로 코팅되었기 때문이다. 입자의 평균 크기는 일반적인 전도성 카본계 나노 입자 크기인 수 μm 정도로 확인된다[75]. SEM 단면 이미지를 통해 허니컴 코어에 형성된 도금층을 확인한 결과, 도금 두께는 대략 300-500 nm 범위로 나타났다. 면저항은 도금 층 조건에서 약 3-4배 정도의 평균 범위를 확인할 수 있다. Fig. 2(c)에는 에너지 분산 X선 분광법(Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 분석 결과가 제시되어 있다. EDS 스펙트럼 결과, 탄소(C) 원소가 약 71.47 wt.%로 가장 큰 비중을 차지하여 시료의 주성분이 카본계 나노 입자를 확인하였다. 또한 Pt 신호는 SEM 관찰 시 스퍼터 코팅에 기인한 것으로 판단되며, Fe, S 등 미량의 다른 원소들은 나노 입자 합성 과정에서 사용된 촉매로 확인하였다. 이를 통해 전도성 카본계 나노 입자가 허니컴 코어 표면에 코팅되었음을 확인하였다. 날개 앞전 전파흡수 구조 설계의 효율성을 검증하기 위해 세 가지 셀 조건의 허니컴 코어를 분석하였으며 세부 특성은 Table 1에 제시되어 있다. 세부특성에 대한 정보는 해당 제조업체의 기술 데이터 시트를 확인하였다. Case 1이 가장 작은 셀 크기이며, 밀도는 48,50 kg/m^3 수준이며, 허니컴 코어 벽면의 두께는 0.07 mm이다.

Table 1. Properties of honeycomb core

Cell type	Density (kg/m^3)	Compression Strength (MPa)	Wall thickness (mm)
Case 1	48	2.07	0.07
Case 2	50	1.97	
Case 3	48	2.00	

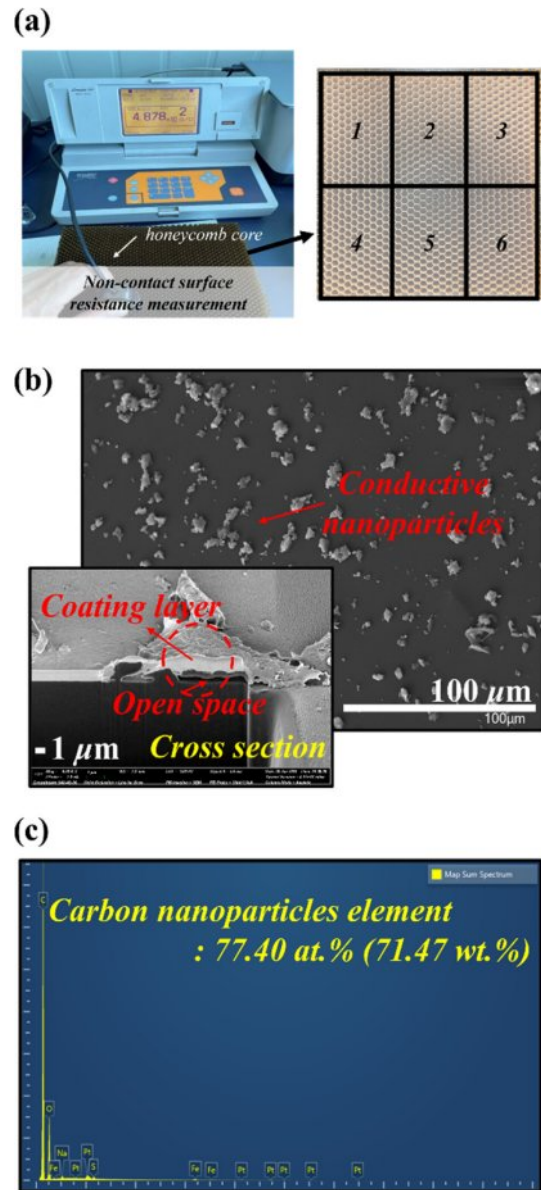


Fig. 2. Conductive carbon-based nanoparticles-coated honeycomb core (a) non-contact surface resistance measurement (Mitsubishi MCP-T610) (b) results of SEM (c) results of EDS

2.2 금속 코팅된 유리섬유

날개 앞전 전파흡수구조를 구현하기 위해 (주)이지 컴퍼지트에서 구매한 유전체 섬유인 유리섬유/에폭시(Glass fabric/epoxy, GFRP) 프리프레그를 활용하였다. 또한, 유리 섬유의 전자기적 특성을 부여하기 위해 금속을 도금하였다[70,71]. 금속이 도금된 유리섬유(Metal-coated glass fabric, MCF)는 아진일렉트론社에서 무전해 도금 과정을 수행했다. Fig. 3(a)에는 무전해 도금 방식이 제시되어 있다. 균일한 표면 도금을 위해 표면 상태를 조정하였다. 산 세척을 통해 표면의 불순물을 제거한 후, 유리섬유 표면에 촉매 처리를 하여 금속

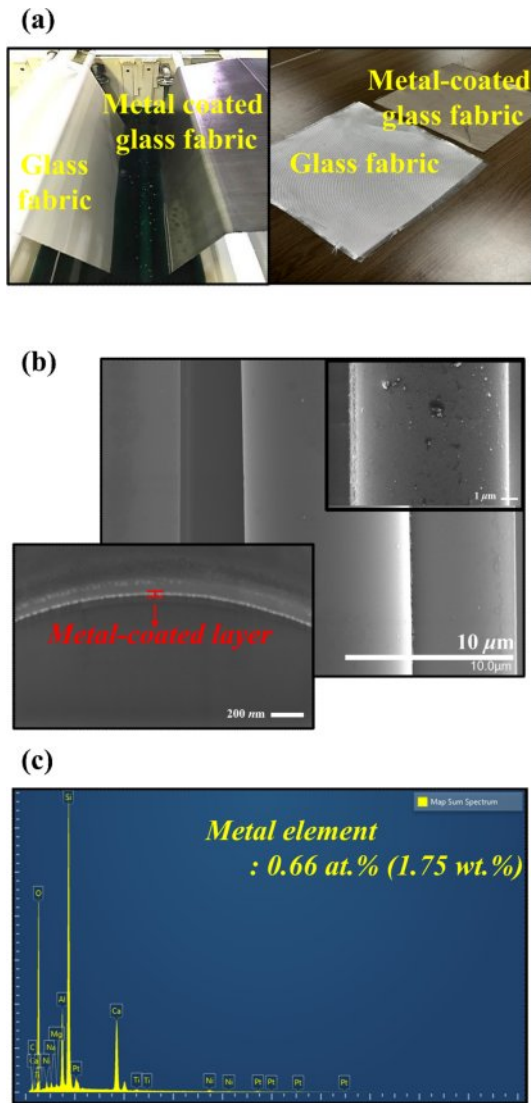


Fig. 3. (a) Electroless metal plating process, metal-coated glass fabric of (b) results of SEM, (c) results of EDS

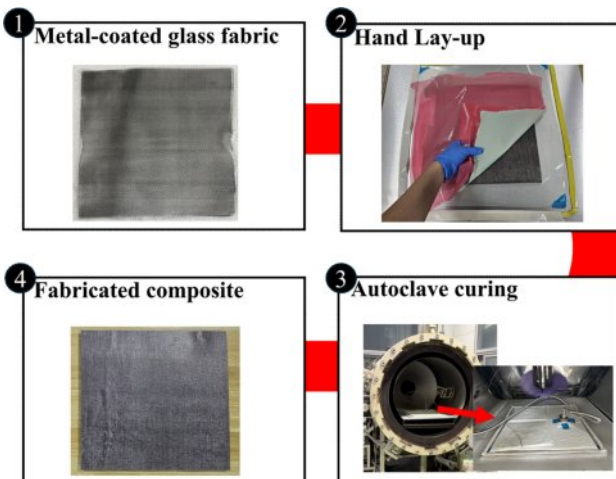


Fig. 4. Fabrication process of the metal-coated composite

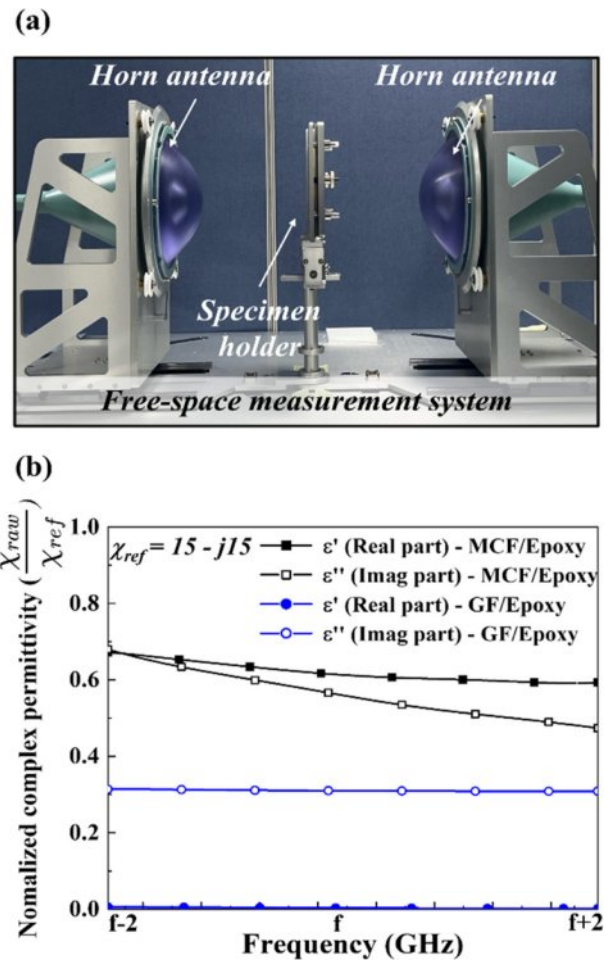


Fig. 5. (a) Free-space measurement system (b) The complex permittivity of GFRP, MCF composites

입자 형성하여 고르게 부착되도록 하였다. 촉매 가속기에 담가 도금 효율을 높이고 무전해 도금을 통해 금속 입자의 이온이 수용액에서 용해되고 환원제를 통해 환원되었다. 이후, 금속 도금액에 담가 전기적 반응 없이 금속이 유리섬유 표면에 균일하게 도금되게 진행하였다. Fig. 3(b)와 (c)에는 금속이 도금된 유리섬유의 SEM 이미지와 EDS 분석결과가 제시되어 있다. 유리섬유의 금속 도금층이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 금속 표피 깊이보다 도금 층 두께가 작은 것을 보여준다. 이를 확인하여 표피 효과에 의해 금속이 도금된 유리섬유에서 전파 투과, 손실이 발생하는 것을 예측할 수 있었다. EDS 스펙트럼 결과를 확인해보면 1.75 wt.%의 금속 성분이 검출된 것을 확인할 수 있으며 유리섬유의 전자기적 특성이 부여되었음을 확인할 수 있다. 금속이 도금된 유리섬유의 전자기적 특성을 평가하기 위해 복합재를 제작하였다. 제작 과정은 Fig. 4에 제시되어 있다. 섬유와 레진의 직접적인 함침이 용이한 Hand Lay-up 공정을 통해 진행되었다. 섬유의 울이 풀리지 않도록 재단한 후, 레진을 고르게 바르고 스크래퍼를 사용해 섬유에 함

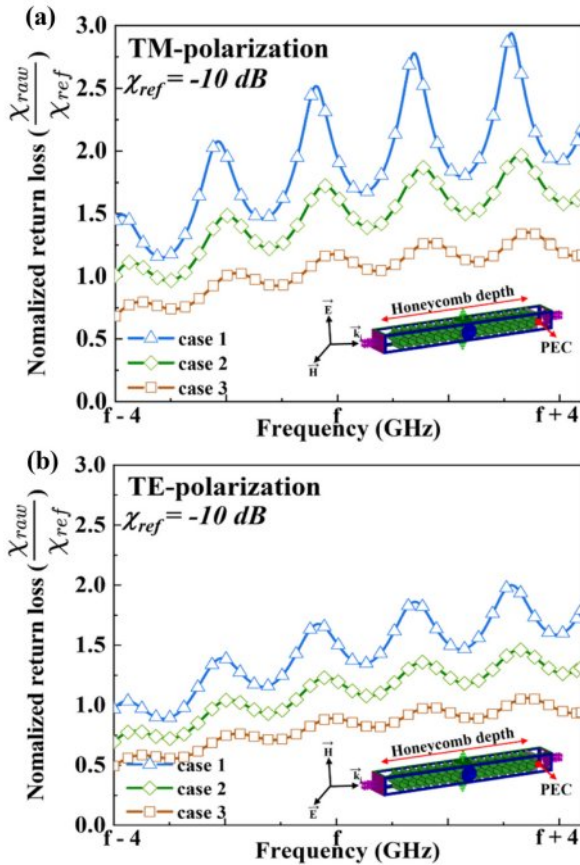


Fig. 6. Effect of cell size on return loss for (a) TM-polarization, (b) TE-polarization

침하였다. 이후, 오토클레이브 공정을 적용하여 7 bar 압력에서 처음 30분 동안 80°C로 Fig. 3 유지한 후, 130°C에서 120분간 유지하며 복합재를 제작하였다. 제작된 복합재는 자유공간 측정 시스템을 통해 유전율을 측정하였으며, Fig. 5(a)에는 유전율 측정 장비와 Fig. 5(b)에는 유리섬유/에폭시 복합재와 금속 코팅된 유리섬유/에폭시 복합재의 유전율 측정 결과가 제시되어 있다. 자유공간측정장비는 혼안테나 앞 부분에 유전체 렌즈를 장착하여 Focused beam을 발생하여 시편 정중앙에 전파가 평면파로 입사되게 하여 반사파와 투과파를 측정한다. 유전율을 측정하는 방법은 비 접촉 방식으로 다중 반사 및 간섭효과를 최소화하여 Time domain gating 방식으로 측정하였다. 유전율 측정 결과는 Fig. 5(b)에 제시되어 있다. 복소 유전율 15-j15 기준 값으로, 해당 값을 나눠 정규화 하여 나타내었다. 금속 코팅된 유리섬유/에폭시 복합재의 유전율을 확인해보면 주파수가 증가함에 따라 유전율이 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 Jonscher 유전 스펙트럼 이론에 따라 주파수 변화로 인한 분극 속도 저하로 유전율의 실수부와 허수부가 감소하는 경향이 나타난다[76].

3. 광대역 날개 앞전 전파흡수구조 설계

3.1 허니컴 코어 셀 크기에 따른 전파흡수 성능 분석

날개 앞전 허니컴 코어의 선정을 위해 전도성 카본계 나노 입자가 코팅된 유닛 셀 허니컴 코어의 셀 사이즈별 전파흡수 성능을 평가하였다. 상용 소프트웨어인 CST Microwave Studio를 활용하여 TM (Transverse magnetic) 및 TE (Transverse electric) 편파 모드에서 허니컴 코어의 벽면의 전자기파를 투과하여 반사 손실 특성을 분석하였고 전자파가 허니컴 구조를 통과하지 못하도록 접지면에 완전 도체(Perfect electric conductor, PEC)를 사용하였다. Fig. 6에 해석 결과가 제시되어 있다. 셀 크기는 Case 1이 가장 작으며 Case 3가 가장 크다. Case 1은 Case 3 대비 50% 수준이고 Case 2는 Case 3 대비 70% 수준이다. 기준 값을 -10 dB로 선정하여 해당 값을 나눠 정규화를 통해 그래프에 제시되었다. 셀 크기가 가장 작은 Case 1 허니컴 코어에서 Case 2, Case 3 대비 각각 23%, 56% 우수한 반사손실 값을 확인하였다. 이는 전도성 입자가 코팅된 허니컴 코어의 벽면에서 발생하는 에너지 손실 메커니즘에 의해 전파흡수 성능을 확보하는데 이 때, 셀 크기가 작을 수록 전자기파가 허니컴 코어 내부에서 다중 반사를 거치며 복잡한 경로를 따라 이동함으로써 전파 흡수율이 향상된 결과로 확인하였다. Fig. 7은 전도성 카본계 나노 입자가 코팅된 허니컴 코어가 벽면 방향 기준에 대한 전자기장 분포를 나타낸다. H-field 분포(왼쪽)에서는 코어 벽면 인근에서 국소적으로 자기장이 집중되는 영역이 관찰되며, 이는 코팅층으로 인한 전도성 소실로 인해 에너지가 감소되는 것으로 확인하였다. 마찬가지로 자기장 분포 영역에서도 셀 내부 및 벽면에서 집중되는 경향을 보이는데, 이는 다중 산란 및 흡수 경로가 형성되어 전자파가 벽면에 접촉할 때 분극 손실과 전달 손실이 동시에 발생하였다.

3.2 다층형 전파흡수구조 설계

Fig. 8에는 다층형 전파흡수구조가 제시되어 있다. 전자

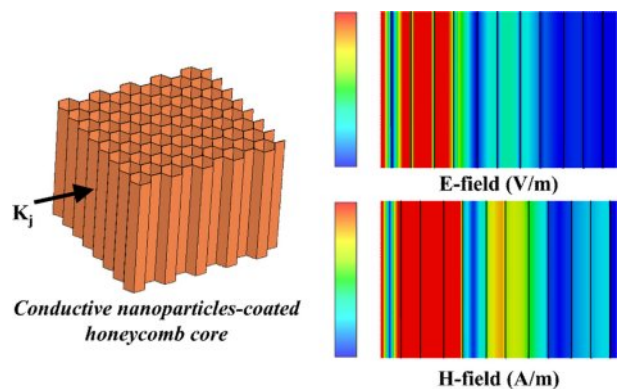


Fig. 7. H-field and E-field distributions of the honeycomb core

파는 전기장과 자기장의 상호 작용으로 전파되는 에너지이다. 전자파가 매질을 만나게 되면 일부는 반사되고 일부는 투과된다. 전파의 투과 및 반사 특성은 물질의 전자기적 특성을 나타내는 유전율과 투자율에 의하여 결정된다. 다층형 전자파 흡수 구조는 각 층의 전파 매개변수를 조절하여 자유공간 임피던스와 재료의 임피던스 매칭시킴으로써 전체 구조의 반사 손실을 최소화한다. 임피던스 매칭은 각 층의 두께와 재료 특성을 조절하여 이루어지며, 이를 통해 전자파 흡수 성능을 향상할 수 있다[46-48]. 전송선로 이론을 통해 각 층에서 입력 임피던스 η_n 를 식 (1)과 같이 계산한다[49-51].

$$\eta_n = Z_n \frac{Z_{n-1} + Z_{cn} \tanh \gamma_n d_n}{Z_{cn} + Z_{n-1} \tanh \gamma_n d_n} \quad (1)$$

$$R = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0} \quad (2)$$

$$\text{Reflection loss} = 20 \log |R| \text{ (dB)} \quad (3)$$

여기서 γ_n 는 전파상수, Z_n 은 n 번째 특성 임피던스, d_n 은 n 번째 두께이다. 반사계수(Reflection coefficient)란 전자파 흡수 구조에서 반사되는 전파의 강도를 나타낸다. 전자파 흡수체의 표면에서의 입력 임피던스와 자유 공간의 임피던스 간의 차이에 의해 결정된다. 반사계수는 식 (2)와 같이 정의된다. 식 (3)과 같이 반사계수를 dB단위로 나타낼 수 있다. 앞에서 측정된 전자기 물성 값을 바탕으로 다층형 전파 흡수구조를 설계하였다. 설계를 하기 위해 상용 소프트웨어인 MATLAB R2024b을 이용하여 식 (1)을 활용해 입력 임피던스를 도출하고 자유 공간의 임피던스의 정합이 되도록 일치하도록 반사계수가 0이 되도록 GA 알고리즘을 활용하여 유리섬유와 금속 코팅 유리섬유를 통해 최적의 구조 두께를 도출하였다. 외피 층 유리섬유 복합재는 전체 두께의 34%를 차지하였고 금속 도금된 유리섬유 복합재는 49% 하단에 있는 유리섬유 복합재는 17%로 도출되었다. 도출된 결과를 바탕으로 상용 소프트웨어인 CST Microwave Studio를 활용하여 반사 손실 분석을 진행하였다. 위 해석과 동일하게 완전 도체를 최하단에 두어 전자기파가 전파

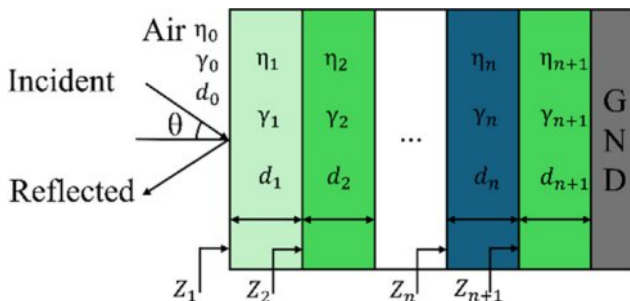


Fig. 8. Multi-layered absorbing structure [76]

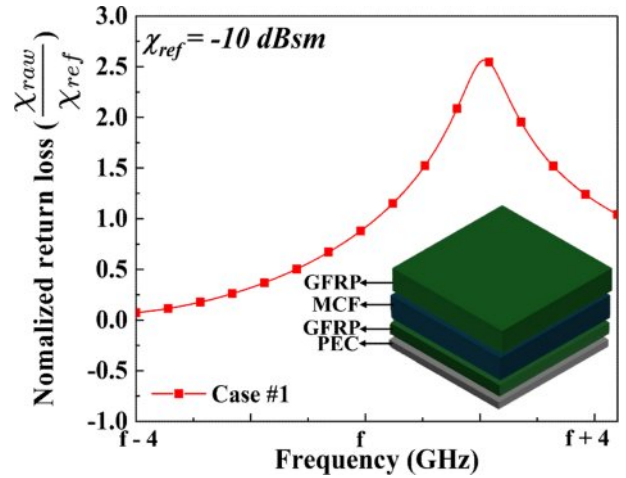


Fig. 9. Return loss of multi-layered absorbing structure

흡수 구조를 통과하지 못하도록 설계하였다. Fig. 9에 해석 결과가 제시되어 있고, 기준 값을 -10 dB를 기준으로 정규화 하여 나타내었다. 해석 결과 고주파대역에서 90% 이상 전파흡수 성능을 확인할 수 있다. 또한, 고주파대역에서 우수한 공진 주파수가 최적으로 형성되는 것으로 확인하였다. 해당 전파흡수 구조를 활용하여 날개 앞면에 전파흡수 구조를 설계하였다.

3.3 날개 앞면 전파흡수 구조 설계

Fig. 10에는 항공기 앞면 형상의 RCS 해석 모델이 제시되어 있다. 모델 A는 전도성 카본계 나노 입자가 코팅된 허니컴 코어만으로 이루어진 일반적으로 활용되는 모델을 제안하였다. 모델 B는 전도성 카본계 나노 입자가 코팅된 허니컴 코어와 본 연구에서 제안한 금속 코팅된 유리섬유를 활용한 전파흡수 구조가 날개 앞면에 삽입된 허니컴 코어 뒷면에 부착되어 있는 모델이다. 두 모델을 활용하여 광대역에서 RCS 저감 성능을 평가하였다. 또한, 고각에서의 전자기파 입사 조건에서도 우수한 RCS 저감 성능이 작용하는지 평가하기 위해 전자기파 입사각 범위 0°, 15°에서 해석을 진행하였다.

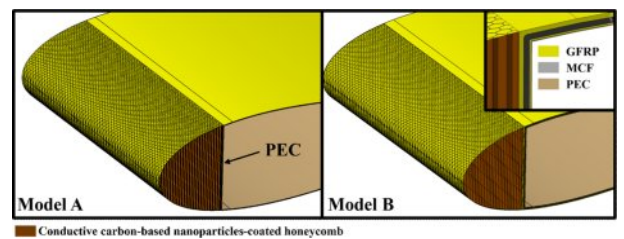


Fig. 10. Design of the RCS analysis models: the leading edge of conductive carbon-based nanoparticle-coated honeycomb cores (a) without RAS (b) with RAS

4. 결과 및 토의

4.1 입사각에 따른 날개 앞전 전파흡수 구조 RCS 평가

앞 절에서 제시된 모델 A와 B를 활용하여 RCS 해석을 수행하였다. 상용 소프트웨어인 CST Microwave Studio를 활용하여 TM 및 TE 편파 모드에서, 입사각을 0°와 15°로 설정해 해석을 수행하였다. 이후 Monostatic 레이다 조건에서 RCS 해석을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 11에 제시하였다. -10 dBsm을 기준으로 정규화 하여 나타내었다. 모델 B는 TM 편파 모드에서 0°와 15°의 입사 조건에서 광대역에서 여러 공진 형성과 우수한 RCS 저감 성능을 확인할 수 있었다. 특히, 모델 A와 비교했을 때 RCS 저감 성능을 크게 향상시킨 것을 확인할 수 있었다. 모델 A와 모델 B의 RCS 저감 성능을 비교한 결과, TM와 편파 모드 기준으로 0° 및 15°에서의 전자기파 입사각 조건에서 모델 A 대비 모델 B의 해석 주파수 대역 내에서의 RCS 해석 데이터 평균은 각각 39.91%, 51.53% 감소한 것을 확인할 수 있었다. TE 모드 및 15° 전자기파 입사각 조건에서는 비교적 비슷한 RCS 해석 결과를 확인할 수 있었고, 0°의 경우 저주파수 대역에서는 비슷한 거동을 보이다가 고주파수 대역에서 모델 B의 공진이 형

성되는 것을 확인할 수 있다. 모델 A 대비 모델 B의 RCS 해석 데이터 평균이 각각 10.50%, 1.96% 감소한 것으로 비교적 비슷한 RCS 저감 성능을 확인하였다. 이는 본 연구에서 제안된 다층형 전파흡수 구조가 허니컴 구조 뒤편에 결합되었을 때 고각도의 전자기파 입사각 조건에서의 RCS 저감 성능이 향상되는 것을 해석 결과를 통해 확인할 수 있다.

4.2 입사각에 따른 날개 앞전 전파흡수 구조의 전기장 감쇠 특성 분석

Fig. 12에서는 모델 B의 전기장 강도 분포를 입사각에 따라 분석한 결과가 제시되어 있다. TM 및 TE 편파 모드에서 해석을 진행하였다. 해석 결과, 전도성 카본계 나노 입자가 코팅된 허니컴 코어와 뒤편 전파흡수구조 층이 다중 반사, 흡수 경로를 형성함으로써, 전자파가 구조 내부로 깊이 진입할수록 전기장 세기가 점진적으로 감쇠되는 경향을 보인다. 이는 허니컴 코어 벽면에서 1차적으로 에너지가 소산된 뒤, 뒤쪽 전파흡수구조 층에서 재차 산란과 흡수가 일어나기 때문에 복합적인 감쇠 효과가 증폭된 결과로 확인할 수 있다. 15° 입사각에서는 전자파가 고각으로 유입되어 구조물 내부에서의 반사와 간섭 경로가 더욱 복잡해진다. 이

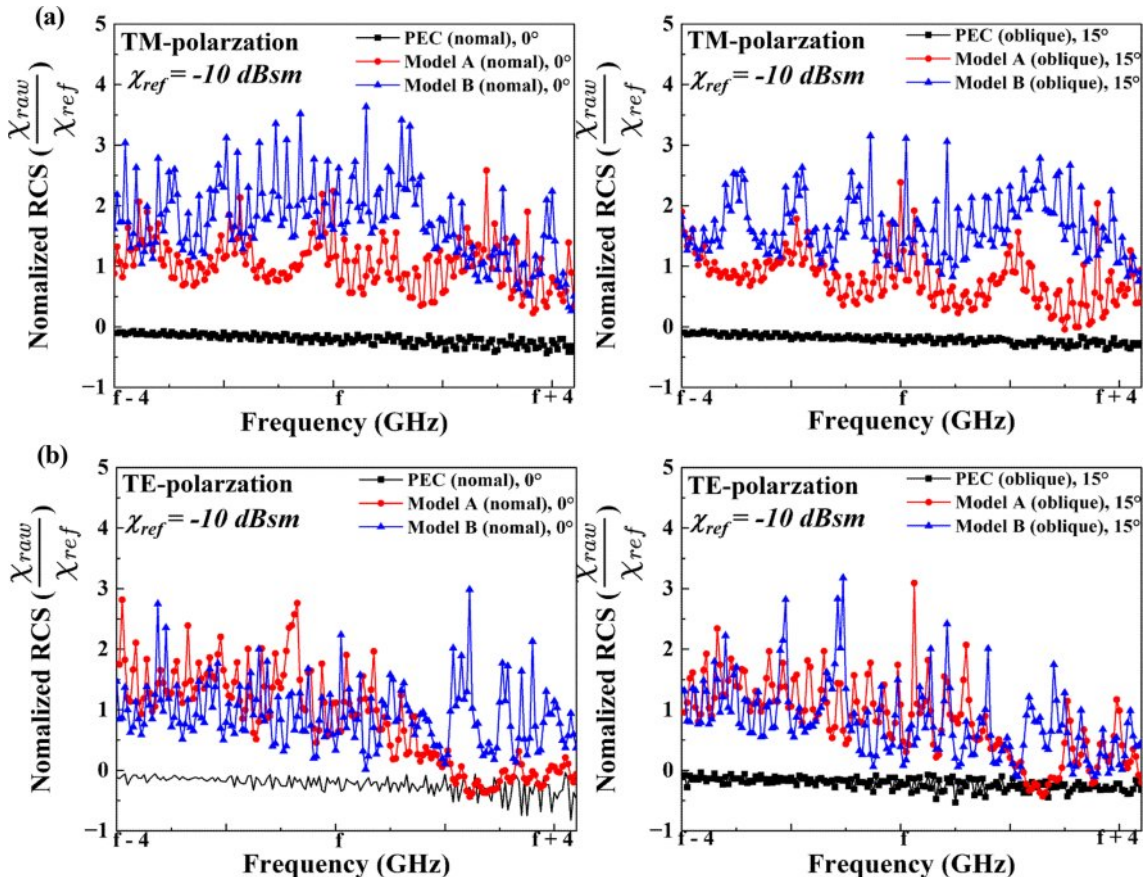


Fig. 11. RCS reduction performance of the proposed leading-edge wing-shaped radar absorbing structure under 0°, 15° (a) TM-polarization and (b) TE-polarization

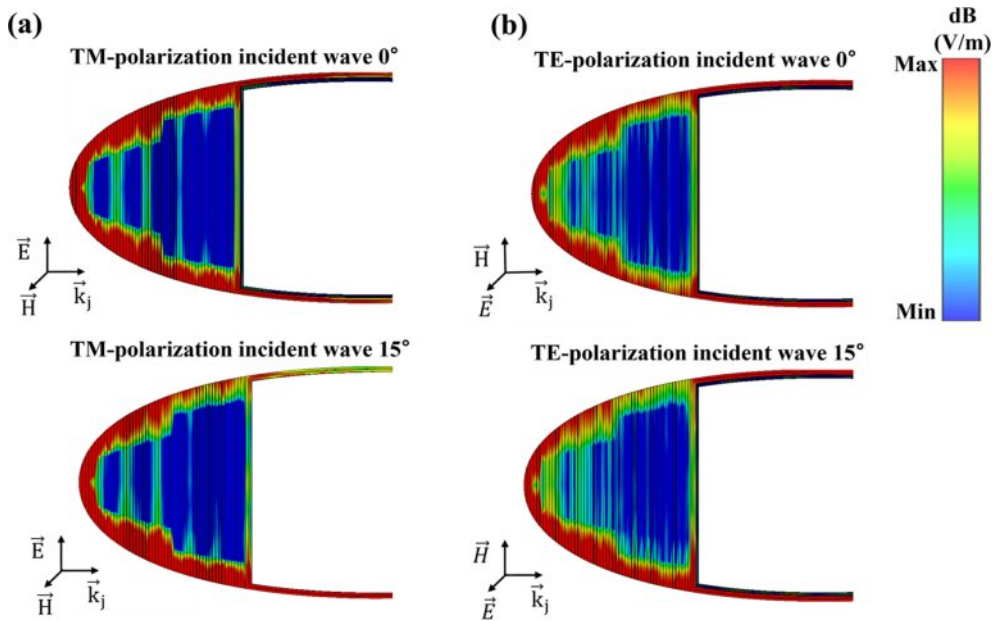


Fig. 12. E-field strength (V/m) for (a) TM polarization 0°, 15° (b) TE polarization 0°, 15°

때, 허니컴 셀 구조가 다공성 경로를 제공하여 전자파가 여러 차례 산란, 간섭을 거치는 동시에 뒤쪽 전파흡수구조에서 추가 흡수가 겹치면서 국부적인 불규칙 감쇠가 두드러지게 나타난다. 반면 0° 입사각에서는 비교적 단순한 진행 경로를 통해 표면 근방에서의 흡수가 우세해지고, 전기장 감쇠가 균일하게 형성하였다. 고각 입사에서 전도성 카본계 나노 입자 허니컴 코어와 전파흡수 구조가 결합된 구조를 통과하며 반복적인 반사와 간섭 과정을 거치므로, 전파 감쇠 성능이 한층 더 향상하였다. 이는 본 연구에서 제안된 날개 앞전 전파흡수구조가 광대역에서 우수한 RCS 저감 성능을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 날개 앞전에서의 광대역 RCS 저감 성능을 확보하기 위해 전도성 카본계 나노 입자를 코팅한 허니컴 코어와 금속이 도금된 유리섬유 기반 다층 전파흡수 구조를 결합하는 구조를 제안하였다. 다양한 입사각 조건과 편파 모드 조건에서 평가를 진행하였고 해석 결과, 제안된 복합 구조는 기존 단순 구조인 모델 A 대비 모델 B에서 TM 편파모드 기준 0°, 15°에서 각각 9.91%, 51.53%, TE 편파모드에서 10.50%, 1.96% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 특히 TM 편파모드에서 입사각 15°와 같은 고각 조건에서 다중 반사, 간섭 경로가 한층 복잡 해져 전기장 감쇠가 두드러졌다. 이는 전도성 코팅 허니컴 코어가 벽면에서 1차적인 전도성 손실을 유발한 뒤, 뒤편에 다층형 전파흡수 구조 층에서 추가적으로 산란과 흡수가 일어나 에너지가 연쇄적으로 소산되는 것으로 확인된다. 전기장 분포 결과에서도 여러 반

사를 거치며 에너지가 점진적으로 감쇠하는 현상을 확인하였으며, 단순 구조와는 달리 복합 구조가 고각 입사 시에도 높은 RCS 저감 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다. 이는 항공기 날개 앞전처럼 곡률이 큰 형상에서도 광대역 및 고각에서의 스텔스 성능을 구현하기에 적합한 설계임을 확인하였다. 금속이 도금된 유리섬유를 활용한 다층형 전파흡수 구조는 허니컴 코어에서 일차적으로 감쇠된 전파를 흡수 및 산란을 통해 복합적인 흡수 경로를 늘렸고, 그 결과 전반적인 RCS 저감 효과가 향상되었다. 향후에는 시뮬레이션에서 제시한 조건을 기반으로 프로토타입을 제작하여, 다양한 주파수 영역과 입사각 조건에서 실험적 검증을 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2021년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UI14202801024). 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2022R1A6A1A03056784).

REFERENCES

- WESTWICK, Peter, *Stealth: The Secret Contest to Invent Invisible Aircraft*. Oxford University Press, 2019.
- Akman, O., Kavas, H., Baykal, A., Toprak, M.S., Çoruh, A., Aktas, B., "Magnetic metal nanoparticles coated polyacrylonitrile textiles as microwave absorber," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 327, 2013, pp. 151-158.
- Ding, D.H., Zhou, W.C., Luo, F., and Zhu, D.M., "Influence of

- pyrolytic carbon coatings on complex permittivity and microwave absorbing properties of Al₂O₃ fiber woven fabrics," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, 2012, pp. 354-359.
4. Park, K.Y., Han, J.H., Lee, S.B., and Yi, J.W., "Microwave absorbing hybrid composites containing NieFe coated carbon nanofibers prepared by electroless plating," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 5, 2011, pp. 573-578.
 5. Wen, B., Wang, T., and Cheng, K., "Simulation research on dynamic RCS characteristics of cruise missile," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 300, No. 2, 2019, p. 022170. IOP Publishing.
 6. Ishimaru, A., Jaruwatanadilok, S., and Kuga, Y., "Multiple scattering effects on the radar cross section (RCS) of objects in a random medium including backscattering enhancement and shower curtain effects," *Waves in Random Media*, Vol. 14, No. 4, 2004, pp. 499-511.
 7. Zhao, S., Zhang, X., and Li, H., "RCS reduction based on double parabolic phased metasurface," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 56, No. 43, 2023, Article No. 435301.
 8. Ufimtsev, P.Y., "Comments on diffraction principles and limitations of RCS reduction techniques," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 84, No. 12, 1996, pp. 1830-1851.
 9. Deng, X., Ding, C., Wang, Y., Li, Z., Cheng, G., Chen, Z., Lv, X., and Shi, J., "Investigation into wideband electromagnetic stealth device based on plasma array and radar-absorbing materials," *Plasma Science and Technology*, Vol. 24, No. 11, 2022, Article No. 114006.
 10. Pinho, M.S., Luisa, M., and Regina, C., "Performance of radar absorbing materials by waveguide measurements for X- and Ku-band frequencies," *European Polymer Journal*, Vol. 38, 2002, pp. 2321-2327.
 11. Tegowski, B., and Koelpin, A., "Accuracy limitations of interferometric radar owing to the radar cross section of its antenna," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024.
 12. Zhang, Z., Zhang, L., Ren, Z., Zhang, Y., Hao, T., Liu, D., Xu, L., Liu, W., Sun, J., Ji, H., and Wang, Y., "Multifunctional Ultrathin Metasurface with a Low Radar Cross Section and Variable Infrared Emissivity," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 16, No. 16, 2024, pp. 21109-21117.
 13. Lin, B., Huang, W., Guo, J., Wang, Z., Si, K., and Ye, H., "An absorptive coding metasurface for ultra-wideband radar cross-section reduction," *Scientific Reports*, Vol. 14, No. 1, 2024, Article No. 12397.
 14. Pinto, J., Whyman, N.L., Ritchie, M.A., and Griffiths, H., "Statistical analysis of hypersonic glide vehicle radar cross section," *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 18, No. 1, 2024, pp. 158-170.
 15. Chen, P., Ren, J., Zhang, T., Zheng, Q., and Pang, X., "An orbital angular momentum metasurface antenna with broadband radar cross section reduction," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 177, 2024, Article No. 155186.
 16. Abdelaziz, A.H., Shohdy, A., Mohammed, S.A., and Montaser, A.M., "Reducing radar cross section through absorption metamaterial antenna for concealment and detection applications," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 178, 2024, Article No. 155260.
 17. Noh, J.S., Noh, Y.D., Ha, J.H., Nam, Y.W., and Kwak, B.S., "Investigation of scarf-patch-repaired radar-absorbing composite using CA absorbers subjected to low-velocity impact loads," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2024 (Accepted).
 18. Park, Y.J., and Lee, C.G., "A study on ferrite-rubber composite for C-band electromagnetic wave absorber," In *Proceedings of the 3rd Conference on National Defense Materials*, 2000, pp. C178-C185.
 19. Kaynak, A., Polat, A., and Yilmazer, U., "Some microwave and mechanical properties of carbon fiber/polypropylene and carbon black/polypropylene composites," *Materials Research Bulletin*, Vol. 31, No. 10, 1996, pp. 1195-1206.
 20. Sandler, J., Shaffer, M.S.P., Prasse, T., Bauhofer, W., Schulte, K., and Windle, A.H., "Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and resulting electrical properties," *Polymer*, Vol. 40, 1999, pp. 5967-5971.
 21. Rosa, I.M.D., Mancinelli, R., Sarasini, F., Sarto, M.S., and Tamburrano, A., "Electromagnetic design and realization of innovative fiber-reinforced broad-band absorbing screens," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 51, No. 3, 2009, pp. 700-707.
 22. Choi, I., Lee, D., and Lee, D.G., "Radar absorbing composite structures dispersed with nano-conductive particles," *Composite Structures*, Vol. 122, 2015, pp. 23-30.
 23. Kim, J.B., Lee, S.K., and Kim, C.G., "Comparison study on the effect of carbon nanomaterials for single-layer microwave absorbers in X-band," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 14, 2008, pp. 2909-2916.
 24. Micheli, D., Vricella, A., Pastore, R., Delfini, A., Giusti, A., Albano, M., Marchetti, M., and Moglie, F., "Ballistic and electromagnetic shielding behaviour of multifunctional Kevlar fiber reinforced epoxy composites modified by carbon nanotubes," *Carbon*, Vol. 104, 2016, pp. 141-156.
 25. Choi, W.H., Shin, J.H., Song, T.H., Kim, J.B., Cho, C.M., Lee, W. J., and Kim, C.G., "Design of circuit-analog (CA) absorber and application to the leading edge of a wingshaped structure," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 56, No. 3, 2014, pp. 599-607.
 26. Lee, W.J., Lee, J.W., and Kim, C.G., "Characteristics of an electromagnetic wave absorbing composite structure with a conducting polymer electromagnetic bandgap (EBG) in the X-band," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 12, 2008, pp. 2485-2489.
 27. Papanicolaou, G.C., Papaefthymiou, K.P., Koutsomitopoulou, A.F., Portan, D.V., and Zoutsos, S.P., "Effect of dispersion of MWCNTs on the static and dynamic mechanical behavior of epoxy matrix nanocomposites," *Journal of Materials Science*, Vol. 47, 2012, pp. 350-359.
 28. Shah, A., Wang, Y., Huang, H., Zhang, L., Wang, D., Zhou, L., and Zhang, Z., "Microwave absorption and flexural properties

- of Fe nanoparticle/carbon fiber/epoxy resin composite plates,” *Composite Structures*, Vol. 131, 2015, pp. 1132-1141.
29. Cao, W., Wen, Y., Jiang, C., Yu, Y., Wang, Y., and Ma, Z., “A pure dielectric metamaterial absorber with broadband and thin thickness based on a cross-hole array structure,” *Chinese Physics B*, Vol. 31, No. 11, 2022, Article No. 117801.
 30. Wang, Y., Li, T., Zhao, L., Hu, Z., and Gu, Y., “Research progress on nanostructured radar absorbing materials,” *Energy and Power Engineering*, Vol. 3, No. 4, 2011, pp. 580-584.
 31. Choi, W.H., Jang, H.K., Shin, J.H., Song, T.H., Kim, J.B., Lee, W.J., and Kim, C.G., “Wideband Radar Absorbing Structure with Low Density Material and Load bearing MWCNT Added Composite Material,” *Electronics Letters*, Vol. 49, No. 9, 2013, pp. 620-622.
 32. Panwar, R., Agarwala, V., and Singh, D., “A Cost-effective Solution for Development of Broadband Radar Absorbing Material Using Electronic Waste,” *Ceramics International*, Vol. 41, No. 2, 2015, pp. 2923-2930.
 33. Biswas, M.C., Chowdhury, A., Hossain, M.M., and Hossain, M.K., “Applications, Drawbacks, and Future Scope of Nanoparticle-based Polymer Composites,” In *Nanoparticle-based Polymer Composites*, Woodhead Publishing, 2022, pp. 243-275.
 34. Lan, D., Gao, Z., Zhao, Z., Kou, K., and Wu, H., “Application Progress of Conductive Conjugated Polymers in Electromagnetic Wave Absorbing Composites,” *Composites Communications*, Vol. 26, 2021, Article No. 100767.
 35. Borkar, V.G., Ghosh, A., Singh, R.K., and Chourasia, N., “Radar cross-section measurement techniques,” *Defence Science Journal*, Vol. 60, No. 2, 2010, pp. 204-212.
 36. Potgieter, M., Odendaal, J.W., Blaauw, C., and Joubert, J., “Bistatic RCS measurements of large targets in a compact range,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 67, No. 4, 2019, pp. 2847-2852.
 37. Lima, U.R., Nasar, M.C., Nasar, R.S., Rezende, M.C., and Araujo, J.H., “Ni-Zn Nanoferrite for Radar-absorbing Material,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, No. 10, 2008, pp. 1666-1670.
 38. Zhao, Y., Xing, S., Tang, N., Wu, N., Tang, J., He, Y., Yin, C., and Zhang, J., “A multi resonant wave-absorbing honeycomb sandwich structure with excellent electrical performance damage tolerance,” *Composite Structures*, Vol. 325, 2023, Article No. 117581.
 39. Yuan, C.X., Zhou, Z.X., Zhang, J.W., Xiang, X.L., Feng, Y., and Sun, H.G., “Properties of Propagation of Electromagnetic Wave in a Multilayer Radar-absorbing Structure with Plasma and Radar-absorbing Material,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 39, No. 9, 2011, pp. 1768-1775.
 40. Choi, W.H., Shin, J.H., Song, T.H., Kim, J.B., Cho, C.M., Lee, W.J., and Kim, C.G., “Design of circuit-analog (CA) absorber and application to the leading edge of a wingshaped structure,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 56, No. 3, 2014, pp. 599-607.
 41. Fortunati, E., D’Angelo, F., Martino, S., Orlacchio, A., Kenny, J. M., and Armentano, I., “Carbon Nanotubes and Silver Nanoparticles for Multifunctional Conductive Biopolymer Composites,” *Carbon*, Vol. 49, No. 7, 2011, pp. 2370-2379.
 42. Wang, C., Chen, M., Lei, H., Yao, K., Li, H., Wen, W., and Fang, D., “Radar stealth and mechanical properties of a broadband radar absorbing structure,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 123, 2017, pp. 19-27.
 43. 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.
 44. Bollen, Pierre, Quievy, N., Detrembleur, C., Thomassin, J.M., Monnereau, L., Bailly, C., and Pardoën, T., “Processing of a new class of multifunctional hybrid for electromagnetic absorption based on a foam filled honeycomb,” *Materials & Design*, Vol. 89, 2016, pp. 323-334.
 45. Choi, W.H., Jang, H.K., Shin, J.H., Song, T.H., Kim, J.K., and Kim, C.G., “Monostatic RCS reduction by gap-fill with epoxy/MWCNT in groove pattern,” *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic and Science*, Vol. 12, No. 1, 2012, pp. 101-106.
 46. Vinoy, K.J., and Jha, R.M., *Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization*. Springer, 1996.
 47. Micheli, D., Pastore, R., Apollo, C., Marchetti, M., Gradoni, G., Primiani, V.M., and Moglie, F., “Broadband electromagnetic absorbers using carbon nanostructure-based composites,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 59, No. 10, 2011, pp. 2633-2646.
 48. 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.
 49. Choi, W.H., and Kim, C.G., “A Broadband Microwave-Absorbing Honeycomb Structure with a Novel Design Concept,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 83, 2015, pp. 14-20.
 50. Baek, S.M., and Lee, W.J., “A Lightweight, Flexible, and Polarization-insensitive Microwave Absorbing Honeycomb Core Using Conductive Losses in Printed Periodic Pattern,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 180, 2024, Article No. 108089.
 51. Zhou, P., Huang, L., Xie, J., Liang, D., Lu, H., and Deng, L., “A study on the effective permittivity of carbon/PI honeycomb composites for radar absorbing design,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 60, No. 8, 2012, pp. 3679-3683.
 52. Kim, S.H., Lee, S.Y., Zhang, Y., Park, S.J., and Gu, J., “Carbon-based radar absorbing materials toward stealth technologies,” *Advanced Science*, Vol. 10, No. 32, 2023, Article No. 2303104.
 53. Pozar, D.M., *Microwave Engineering*. New Jersey: Wiley, 2011.
 54. Deng, Y., Zheng, Y., Zhang, D., Han, C., Cheng, A., Shen, J., and Zhang, H., “A Novel and Facile-to-synthesize Three-dimensional Honeycomb-like Nano-Fe₃O₄@C Composite: Electromagnetic Wave Absorption with Wide Bandwidth,” *Carbon*, Vol. 169, 2020, pp. 118-128.
 55. Xian, Y.-X., Yang, J.-S., Li, H.-Z., Xu, C., and Wang, X.-W., “A Novel Frequency-Selective Surface-Enhanced Composite Honeycomb Absorber with Excellent Microwave Absorption,” *Polymers*, Vol. 16, No. 23, 2024, Article No. 3312.
 56. Nie, M., Ren, Y., Wang, H., and Qiu, Q., “Recovery of Wave-

- Absorbing Efficiency for Honeycomb Sandwich Structure Under Penetrating Damage via Composite Patch Electromagnetic Parameters Design,” *Materials Today Communications*, Vol. 41, 2024, Article No. 110799.
57. 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.
 58. Liu, S., Zhang, F., Chao, B., Fu, W., Deng, K., Li, Y., and Wu, H., “Based on the preparation of dual-absorber agents using Ni and Ni/rGO for the fabrication of a dual honeycomb nested structure for wideband microwave absorption,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 284, 2024, Article No. 111735.
 59. Zhang, J., Li, D., and Wang, M., “Multi-material fused deposition modelling of structural-functional integrated absorber with multi-scale structure possessing tunable broadband microwave absorption,” *Materials & Design*, Vol. 246, 2024, Article No. 113315.
 60. Yang, X., Qiang, R., Shao, Y., Xue, R., Wu, X., Zhang, Y., Ren, F., Ding, Y., Niu, W., Ma, Q., and Wang, Y., “Constructing of three-dimensional molybdenum carbide nanoparticles embedded in honeycomb carbon as efficient microwave absorbers,” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 1004, 2024, Article No. 175732.
 61. 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, Article No. 112129.
 62. Yang, J., Pang, Y., Wang, J., Sui, S., Jiang, W., Zhang, J., and Qu, S., “Achieving broadband RCS reduction using carbon fiber connected composite via scattering mechanism,” *Composites Science and Technology*, Vol. 200, 2020, Article No. 108410.
 63. 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*, Vol. 28, Suppl. 1, 2019, pp. 79-90.
 64. Choi, W.H., Shin, J.H., Song, T.H., Kim, J.B., Cho, C.M., Lee, W.J., and Kim, C.G., “Design of circuit-analog (CA) absorber and application to the leading edge of a wing-shaped structure,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 56, No. 3, 2013, pp. 599-607.
 65. Pang, Y., Li, Y., Wang, J., Yan, M., Chen, H., Sun, L., Xu, Z., and Qu, S., “Carbon fiber assisted glass fabric composite materials for broadband radar cross section reduction,” *Composites Science and Technology*, Vol. 158, 2018, pp. 19-25.
 66. Liu, C., He, T., Hu, C., Qian, Q., Hao, Y., Xu, L., Lu, H., and Ji, G., “The Optimized Design of Sandwich Structured SiO₂/C@SiC/SiO₂ Composites Through Numerical Simulation for Temperature-Resistant Radar and Infrared Compatible Stealth,” *Advanced Functional Materials*, 2024, Article No. 2416108.
 67. Zhou, Q., Yin, X., Ye, F., Liu, X., Cheng, L., and Zhang, L., “A novel two-layer periodic stepped structure for effective broadband radar electromagnetic absorption,” *Materials & Design*, Vol. 123, 2017, pp. 46-53.
 68. 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.
 69. Xie, S., Jing, K., Zhou, H., and Liu, X., “Mechanical properties of Nomex honeycomb sandwich panels under dynamic impact,” *Composite Structures*, Vol. 235, 2020, p. 111814.
 70. Schubel, P.M., Luo, J.J., and Daniel, I.M., “Low velocity impact behavior of composite sandwich panels,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, No. 10, 2005, pp. 1389-1396.
 71. Fischer, C., Hähnel, F., Wolf, K., and Markmiller, J., “Impact analysis of compression preloaded honeycomb sandwich structures,” *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 26, No. 3, 2024, pp. 350-372.
 72. Nam, Y.W., Choi, J.H., Jang, M.S., Lee, W.J., and Kim, C.G., “Radar-absorbing structure with nickel-coated glass fabric and its application to a wing airfoil model,” *Composite Structures*, Vol. 180, 2017, pp. 507-512.
 73. 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, Article No. 112252.
 74. Agrawal, P.M., Sudalayandi, B.S., Raff, L.M., and Komanduri, R., “A comparison of different methods of Young’s modulus determination for single-wall carbon nanotubes (SWCNT) using molecular dynamics (MD) simulations,” *Computational Materials Science*, Vol. 38, No. 2, 2006, pp. 271-281.
 75. Hussain, S., Jha, P., Chouksey, A., Raman, R., Islam, S.S., Islam, T., and Choudhary, P.K., “Spectroscopic investigation of modified single-wall carbon nanotube (SWCNT),” *Journal of Modern Physics*, Vol. 2, No. 6, 2011, p. 538.
 76. Choi, K.S., Sim, D., Choi, W., Shin, J.H., and Nam, Y.W., “Ultra-high Temperature EM Wave Absorption Behavior for Ceramic/Sendust-aluminosilicate Composite in X-band,” *Composites Research*, Vol. 35, No. 3, 2022, pp. 201-215.