

플루티드 코어 기반 주파수 가변 능동형 레이더 흡수 구조 설계 및 성능 분석

박권우* · 이우주* · 남영우***,***† · 곽병수*†

Design and Performance Analysis of a Frequency-Tunable Active Radar Absorber Based on a Fluted Core

Kwon-woo Park*, Woo-Ju Lee*, Young-Woo Nam***,***†, Byeong-Su Kwak*†

ABSTRACT: This paper presents the design of a frequency-tunable radar absorber based on a fluted core that can actively adjust the absorption frequency within a wide bandwidth (4-18 GHz). The proposed active radar absorber structure consists of a resistive sheet and a glass fiber-based sandwich composite, with a Cu-plate inserted into the internal space of the fluted core to serve as the frequency-tuning device. The frequency-tuning methods applied include gap tunable, angle tunable, and multi-array configuration, and the absorption performance was compared and analyzed. The results showed that the gap and angle tunable methods achieved more than 90% absorption performance in the C-Ku band (4-18 GHz). In contrast, the multi-array method had a relatively narrow frequency tuning range and could not achieve more than 90% absorption performance within the target frequency band. Additionally, combining the gap and angle tunable methods demonstrated improved electromagnetic wave absorption performance compared to using a single method.

초 록: 본 논문에서는 광대역(4-18 GHz)에서 흡수 주파수를 능동적으로 조절할 수 있는 플루티드 코어 기반 주파수 가변 레이더 흡수 구조를 설계하고, 다양한 조절 방식에 따른 전자기파 흡수 성능을 분석하였다. 설계된 능동형 레이더 흡수 구조는 저항 시트(Resistive sheet)와 유리섬유를 활용한 샌드위치 복합재 구조로 구성되었으며, Fluted core의 내부 공간에 Cu-plate를 삽입하여 주파수 가변 장치로 활용하였다. 주파수 가변 방식으로는 간격 조절, 각도 조절, 다중 배열 방식을 적용하였으며, 각 방식의 흡수 성능을 비교 분석하였다. 분석 결과, 간격 및 각도 조절 방식은 C-Ku 대역(4-18 GHz)에서 90% 이상의 흡수 성능을 달성하였다. 반면, 다중 배열 방식은 상대적으로 좁은 주파수 가변 범위를 가지며, 목표 대역에서 90% 이상의 흡수 성능을 달성하는 데 한계가 있었다. 또한, 간격과 각도 조절 방식을 결합하였을 때 단일 방식 대비 개선된 전자기파 흡수 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다.

Key Words: 스텔스 기술(Stealth technology), 전자기파 흡수 구조(Radar-absorbing structure), 주파수 가변(Frequency-tunable), 다기능 복합재료(Multifunctional composite materials)

Received 11 February 2025, received in revised form 9 March 2025, accepted 15 March 2025

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

**Department of Smart Drone Engineering, Korea Aerospace University

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

†Corresponding authors (E-mail: ywnam@kau.ac.kr, bs.kwak@gnu.ac.kr)

1. 서 론

레이더 흡수 구조(Radar-absorbing structure, RAS)는 스텔스 항공기를 구현하는 핵심기술 중 하나이다. 레이더 흡수 구조는 적으로부터의 탐지를 최소화하기 위해 레이더가 발산하는 전자기파를 흡수하고, 동시에 하중을 지지할 수 있는 효과적인 구조이다. 레이더 흡수 구조는 주로 전투기를 탐지하기 위해 사용되는 X-band (8.2-12.4 GHz) 주파수 대역 90% 이상의 전자기파를 흡수하는 것을 목표로 많은 연구가 수행되어 왔다[1-6]. 하지만, 최근 X-band 레이더의 대응하기 위해 S-, C-, Ku-band 등 다양한 주파수 대역을 활용한 레이더 기술이 개발되었고, 적탐지에 적극 활용되고 있다. 따라서 레이더 흡수 구조의 개발방향은 다양한 주파수 대역에 대응할 수 있는 광대역에서 우수한 전자기파 흡수 성능을 달성하는 것으로 변경되어 왔다[7-11]. 레이더 흡수 구조는 작동방식에 따라 2가지로 구분할 수 있다. 고유의 전자기파 흡수 성능을 변경할 수 없는 수동형(Passive) 레이더 흡수 구조와 흡수할 수 있는 주파수 대역을 가변할 수 있는 능동형(Active) 레이더 흡수 구조이다. 수동형 레이더 흡수 구조는 가장 일반적이며 보편적으로 연구되어 온 분야이며 흡수 성능뿐만 아니라 전투기 운용 시 직면하는 고온, 낙뢰, 수분환경 등의 다양한 환경 조건을 고려하여 설계되어 왔다[12-15]. 또한, 광대역 흡수 성능을 위해 자성 입자를 분산하거나 전자기 특성을 개질한 우수한 소재를 활용한 레이더 흡수 구조[16-18]와 우수한 기계적 물성을 달성한 연구[19-21]도 많이 진행되어 왔다. 광대역 흡수 성능과 우수한 기계적 물성을 달성하기 위해 여러 소재를 활용한 다층 구조나 기계적 물성이 우수한 샌드위치 복합재 구조를 활용하는 것은 필연적이지만 두께와 무게가 증가한다는 단점이 있어 적용에 한계가 있다. 이러한 수동형 레이더 흡수 구조의 단점을 극복하고자 전자기파 흡수 주파수 대역을 가변할 수 있는 능동형 레이더 흡수 구조에 대한 연구가 등장하였으며 주로 얇은 두께에서 광대역을 흡수 성능을 달성하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[22-26]. 능동형 레이더 흡수 구조는 전자 소자인 핀 다이오드(PIN diode)나 버랙터 다이오드(varactor diode), 전도성 잉크를 활용한 주파수 선택 표면(Frequency Selective Surface, FSS) 또는 매우 미세한 패턴을 가진 메타물질(Metamaterial)을 활용한 다층 구조로 설계된다. 주파수를 가변하기 위해 전자 소자의 종류나 전압의 조절하거나 주파수 선택 표면과 메타물질의 패턴 간격 및 모양을 변경한다. Xue Lei 등[22]은 핀 다이오드의 바이어스 전압을 조정하여 가변 임피던스를 구현함으로써 2.35-13.44 GHz 범위에서 -10 dB 이하의 흡수 성능을 달성하였다. Wei 등[23]은 버랙터 다이오드의 바이어스 전압 조절을 통해 8-12 GHz에서 -10 dB 이하의 낮은 반사율을 유지함을 확인하였다. Qi 등[24]은 원뿔형 구조의 고체-액체 메타표면을 이용하여 3.3-50 GHz에서 90%

이상의 흡수율을 달성하는 초광대역 재구성 가능한 흡수체를 개발하였으며, 흡수 대역의 95.5%에서 95% 이상의 흡수 효율을 유지함을 확인하였다. 능동형 레이더 흡수 구조는 전자회로를 기반으로 하기 때문에 설계와 제작이 복잡하여 적용에 어려움이 따른다. 또한, 높은 전자기파 흡수 성능을 갖추고 있더라도 대부분의 연구에서는 구조적 하중 지지 능력을 고려하지 않거나, 구조적 하중 지지가 불가능하다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 간단한 기계적 움직임으로 흡수 전자기파 대역을 변경하여 결과적으로 넓은 주파수 대역에서 전자기파를 효과적으로 흡수할 수 있는 능동형 광대역 레이더 흡수 구조를 구현하기 위한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 흡수 주파수 대역을 조절할 수 있는 다양한 방식들을 제시하였으며 광대역(4-18 GHz)에서 우수한 전자기파 흡수 성능을 가지는 능동형 레이더 흡수 구조를 설계하였다.

2. 능동형 레이더 흡수 구조의 설계

2.1 주파수 가변 능동형 레이더 흡수 구조 설계

본 연구에서는 Salisbury screen 원리를 활용하여 주파수를 가변할 수 있는 능동형 레이더 흡수 구조를 설계하였다. 제안된 주파수 가변 능동형 레이더 흡수 구조는 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 최외곽 표면에 저항 시트와 구리테이프를 부착한 평판인 Cu-plate를 포함한 샌드위치 복합재 구조이다. 능동형 레이더 흡수 구조를 구현하기 위해, 샌드위치 복합재 구조의 코어로 내부 구조를 유연하게 활용할 수 있으면서도 기계적 성능을 저하시키지 않는 플루티드(Fluted) 코어 형상을 채택하였다. 기존의 레이더 흡수 구조는 Perfect Electric Conductor(PEC) 역할을 할 수 있는 Cu-tape를 하단에 부착하여 구조로 입사된 전자기파가 PEC에 반사되고, 반사된 전자기파는 입사하는 전자기파와 상쇄간섭을 일으켜 흡수 성능을 나타낸다. 그러나 본 연구에서는 능동형 흡수 구조의 구현을 위해 샌드위치 복합재 구조 코어 내부에 PEC 역할을 수행하는 내부 구조를 적용하고, 본 구조의 이동 및 형상 변화를 통해 구조가 흡수하는 주파수 대역을 가변하는 방식을 고안하였다.

2.2 주파수 가변 능동형 레이더 흡수 구조의 시뮬레이션 모델

Fig. 2는 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 능동형 레이더 흡수 구조의 내부 공간은 25 × 25 mm로 설정하였으며, 실제 구조의 제작성을 고려하여 3 mm의 필렛(Fillet)을 적용하였다. 또한, 저항 시트의 면저항은 입사하는 전자기파의 반사를 최소화하고 무반사 조건을 만족하는 최적 값인 377 Ω/sq로 선정하였으며, 샌드위치 구조의 전자기 물성은 측정을 통해 획득한 유리섬유/에폭시 복합재 평판의 유전율을

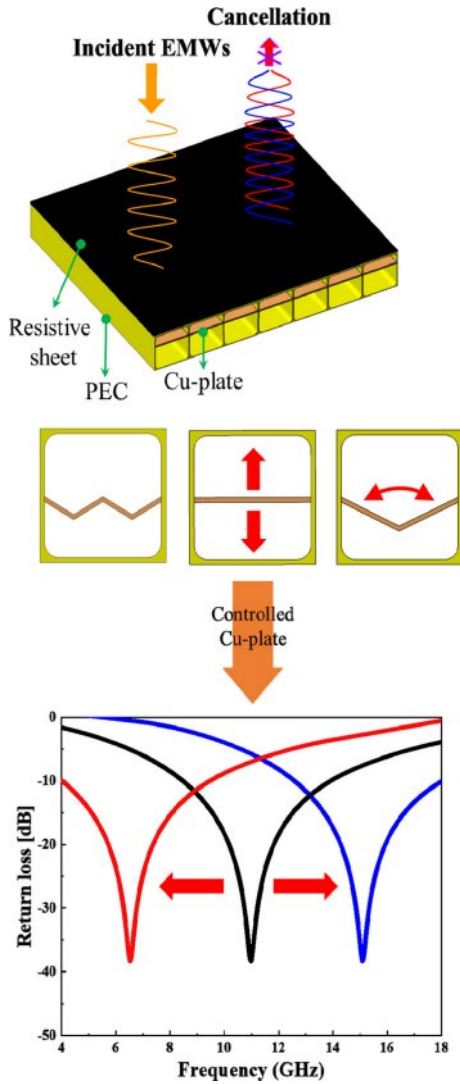


Fig. 1. A schematic of the proposed active radar-absorbing structure

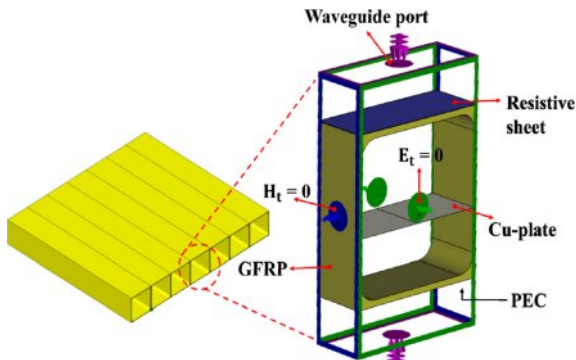


Fig. 2. Design of the active RAS unit-cell model

적용하였다. 모델의 세부 사항은 Table 1에 정리하였다. 전자기 해석은 상용 소프트웨어인 CST Microwave Studio를 통해 수행되었다. 시뮬레이션 모델의 경계조건으로는 모델의

Table 1. Simulation parameters for the active RAS

Parameter	Simulation value
Inner length \times height	25.0 \times 25.0 mm
Web thickness	1.0 mm
Skin thickness	1.0 mm
Corner radius	3.0 mm
Resistive sheet	377 Ω/\square

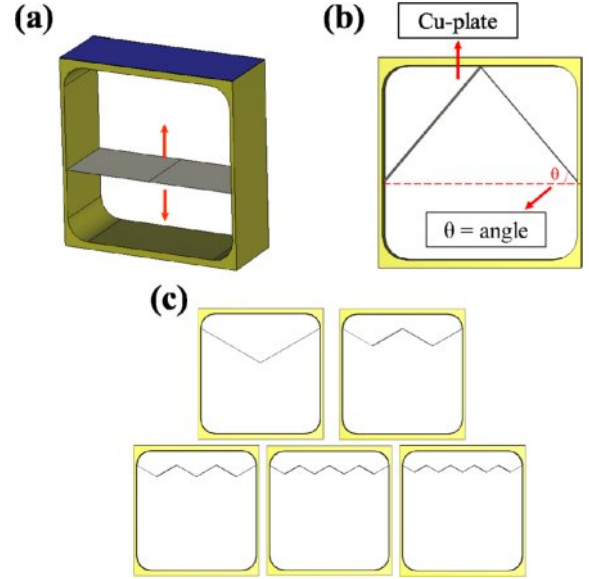


Fig. 3. Simulation unit-cell model: (a) GAP tunable method (b) Angle tunable method (c) Multi-array method

Table 2. Type of frequency tunable method

Method	Range
GAP tunable	1-10 mm
Angle tunable (' Δ ', ' ∇ ')	0°-50°
Multi-array (' Δ ', ' ∇ ')	1-5 cu-plates

좌우 측면은 Magnetic tangential 성분이 0인 $H_t = 0$ 으로 정의되었고 모델의 앞뒤 측면은 Electric tangential 성분이 0인 $E_t = 0$ 으로 설정하였다.

우수한 전자기파 흡수 성능을 달성하기 위해 본 연구에서는 3개의 주파수 가변 방식을 수행하였으며, 3개의 방식과 범위는 Fig. 3과 Table 2에 정리하였다. Fig. 3(a)는 플루티드 코어 내부에 삽입된 Cu-plate와의 간격(GAP) 조절 방식으로 1 mm에서 10 mm까지 1 mm 간격을 두어 간격을 조절하여 전자기파 흡수 성능을 변환하는 것이다. Fig. 3(b)는 Cu-plate의 중심부와 양 끝의 Web을 기준으로 한 'V' 모양과 'A' 모양을 구분하였으며 각각 0°에서 50°까지 10° 간격을 두어 전자기파 흡수 성능을 조절하는 각도 조절 방식이다. 마지막으로 Fig. 3(c)는 Cu-plate의 다중 배열 방식이며

Cu-plate의 형상을 반복적으로 배열함으로써 전자기파 흡수 성능을 조절하는 방법이다. Cu-plate 형상의 배열 개수 변화에 따라 전자기파 흡수 성능을 확인하였다. 각 방식들에 따른 광대역(4-18 GHz)에서의 전자기파 흡수 성능을 비교 분석하였다.

3. 능동형 레이더 흡수 구조의 시뮬레이션 및 측정 결과

3.1 간격 조절 방식에 따른 전자기파 흡수 성능

3.1.1 간격 조절 방식에 따른 전자기파 흡수 성능 시뮬레이션 결과

코어 내부 상단을 기준으로 Cu-plate와의 간격에 따른 해석을 수행하였으며 1-10 mm 범위에서 1 mm 간격으로 전자기파 흡수 성능을 확인하였다. 간격 조절 방식의 결과는 Fig. 4와 Table 3에 정리하였으며, GAP 1과 GAP 2는 각각 코어 내부 상단과 Cu-plate 간격이 1 mm, 2 mm임을 의미한다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, Cu-plate와의 간격(GAP)이 증가할수록 공진 주파수가 저주파 대역으로 이동하였고, 그 이동 거리는 점차 줄어드는 경향을 보였다. 또한, GAP이 증가함에 따라 공진 주파수 피크 값은 증가했지만, -10 dB 대역 폭은 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 Salisbury screen 원리에 의해 설명할 수 있는데, GAP이 증가할수록 두께가 두꺼운 레이더 흡수 구조로 변하게 되며, 이에 따라 저주파 대역에서 우수한 흡수 성능을 보이지만, 공진 주파수 피크 값이 커지고 90% 이상 흡수하는 범위는 좁아진다. 반면, GAP이 감소할수록 공진 주파수는 고주파 대역으로 이동하며, 고주파 대역에서 공진 주파수 피크 값은 감소하고 -10 dB 대역 폭이 확대되는 경향을 보였다.

이는 GAP이 감소함에 따라 두께가 얇아져 고주파 대역에서의 흡수 성능을 향상시키지만, 공진 주파수 피크 값이

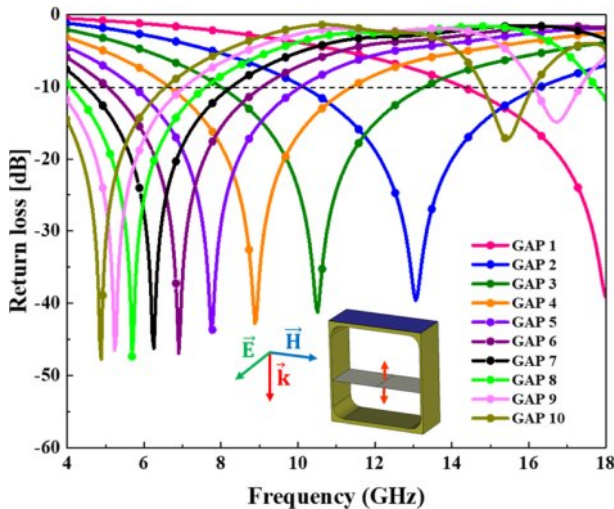


Fig. 4. Simulation results of gap tunable method

Table 3. Return loss of gap tunable method

	Maximum return loss (dB)	Resonance peak frequency (GHz)	-10 dB bandwidth (90% absorption) (GHz)
GAP 1	-37.46	x	14.22-18.0
GAP 2	-36.48	13.07	10.13-16.4
GAP 3	-38.33	10.5	8.00-13.42
GAP 4	-41.34	8.9	6.66-11.49
GAP 5	-42.36	7.76	5.73-10.1
GAP 6	-43.17	6.91	5.04-9.07
GAP 7	-44.72	6.24	4.51-8.27
GAP 8	-48.11	5.7	4.08-7.63
GAP 9	-49.77	5.25	4.00-7.06
GAP 10	-45.8	4.86	4.00-6.58

감소하고 흡수 성능이 일정 범위에서 제한되는 특성이 나타난다. 또한, 저주파 및 고주파 공진 특성에 따라 GAP을 조절함으로써 저항시트와 PEC 간의 거리를 조절할 수 있어, 두께가 다양한 레이더 흡수 구조를 형성하게 된다. 따라서, GAP 1-GAP 8 가변으로도 목표 주파수 대역에서 우수한 전자기파 흡수 성능을 달성되는 것을 확인하였다. GAP 조절을 통해 흡수 주파수 대역을 가변할 수 있었으며, 목표 주파수 대역(4-18 GHz)에서 90% 이상 전자기파를 흡수하는 우수한 성능을 달성하는 것을 확인하였다.

3.1.2 간격 조절 방식의 전자기파 흡수 성능 측정 결과 및 시뮬레이션 비교 분석

본 연구에서 설계한 능동형 레이더 흡수 구조의 성능을 검증하기 위해, 플루티드 코어 기반 샌드위치 복합재 구조를 제작하고 전자기파 흡수 성능을 측정하였다. 대표적인 예제로 간격 조절 방식을 채택하였으며 2가지 케이스를 선별하여 시뮬레이션 결과와 비교 분석을 수행하였다. 전자

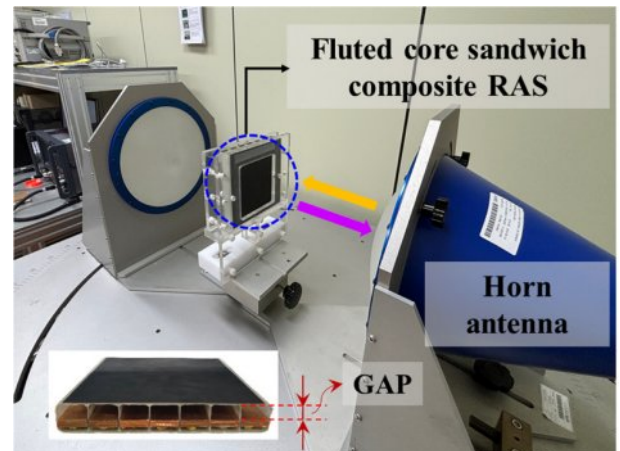


Fig. 5. Free-space measurement setup to measure electromagnetic wave absorption performance

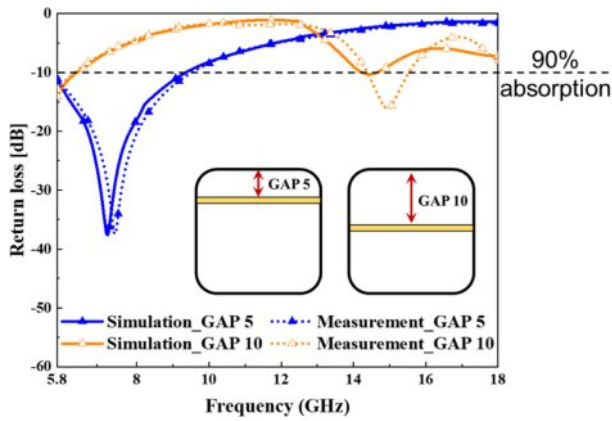


Fig. 6. Comparison of Simulation and Measurement Results for Reliability Verification

기파 흡수 성능은 C-Ku (5.8-18 GHz) 대역에서 측정할 수 있는 자유공간 측정장비를 활용하였으며, Fig. 5은 자유공간 측정장비 셋업을 나타냈다. Fig. 6는 간격 조절 방식 중 대표적으로 GAP 5와 GAP 10을 선정하여 시뮬레이션 값과 측정 값을 비교한 그래프이다. 점선은 시뮬레이션 결과, 실선은 측정 결과이며 실측 결과의 공진 주파수 피크가 시뮬레이션 값보다 다소 저주파 대역으로 이동하였다. 이는 샌드위치 복합재 구조 제작 과정에서 두께가 증가했기 때문으로 판단된다. 그러나 두께 증가에도 불구하고 전자기파 흡수 성능은 시뮬레이션 결과와 유사하게 나타났으며, 따라서 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 기법은 전자기파 흡수 성능을 예측하는 데 적절한 것으로 판단된다.

3.2 각도 조절 방식에 따른 전자기파 흡수 성능

Cu-plate의 중앙부 기준으로 'V'와 'Λ' 모양으로 구분하였으며, 각 형상에 대해 각도를 조절하면서 주파수 가변 흡수 성능을 평가하였다. Fig. 7에 각 형상의 각도에 따른 성능을 나타내었으며 Table 4와 5에 모든 결과를 정리하였다. Fig. 7(a)에서는 Cu-plate를 GAP 3의 위치로 고정하여 'V' 모양에 대해 0°-50° 범위에서 10° 간격으로 해석을 수행하였다. 각도가 증가할수록 공진 주파수가 저주파 대역으로 이동하였고, 공진 주파수 피크 값이 소폭 증가하였으나 -10 dB 범위가 작아지는 것을 확인하였다. 이는 각도가 생기며 내부 다중 산란이 발생하고 이와 유사한 흡수 기제가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 각도가 증가할수록 Cu-plate의 중앙부가 상부와 멀어짐에 따라 저주파 대역으로 이동한 것으로 판단된다.

Fig. 7(b)에서는 GAP 14인 'Λ' 모양의 Cu-plate를 0°-50° 범위에서 10° 간격으로 해석하였다. 각도가 증가할수록 공진 주파수가 고주파 대역으로 이동하였고, 공진 주파수 피크 값이 줄어들며 -10 dB 범위가 감소하는 것을 확인하였다. 특히 40°-50°는 -10 dB를 거의 달성하지 못하는 것을 확인

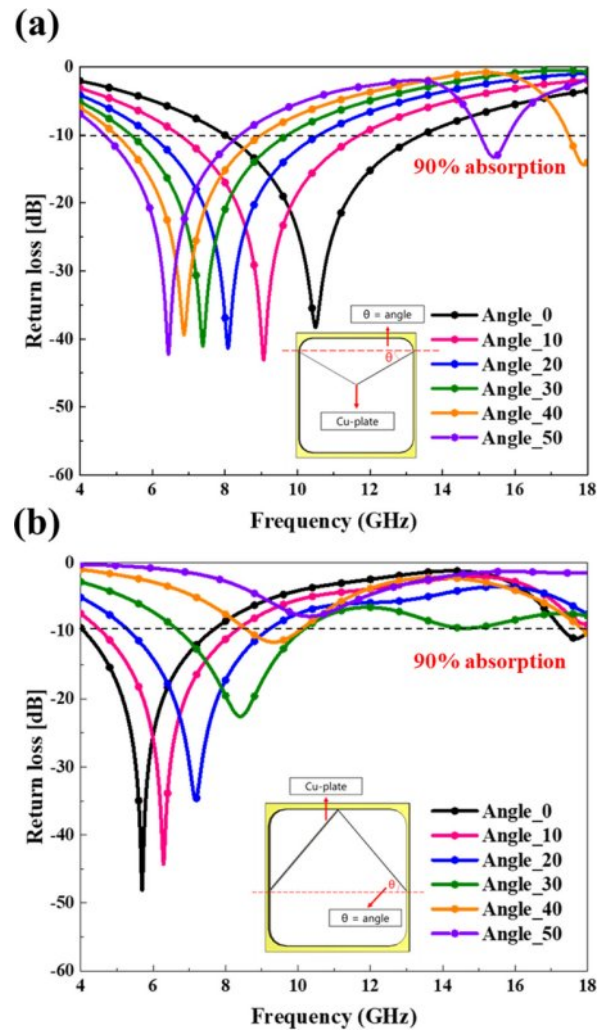


Fig. 7. Simulation results of angle tunable method: (a) 'V' shape (b) 'Λ' shape

Table 4. Return loss of 'V' shape angle tunable method

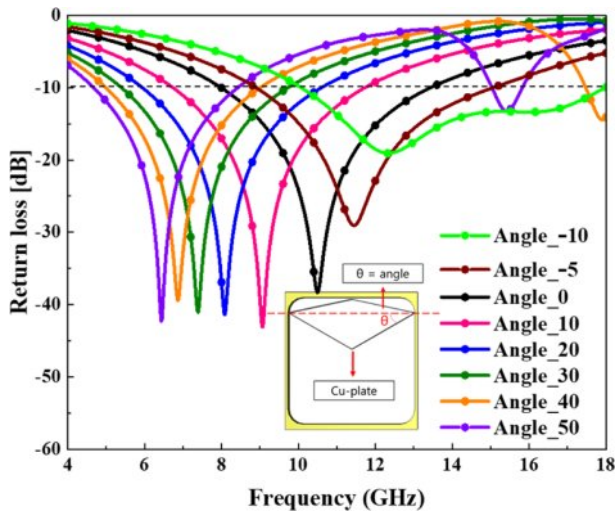
'V' shape	Maximum return loss (dB)	Resonance peak frequency (GHz)	-10 dB bandwidth (90% absorption) (GHz)
0°	-38.33	10.5	8.00-13.42
10°	-43.07	9.07	6.75-11.71
20°	-41.4	8.08	5.95-10.59
30°	-41.07	8.9	5.41-7.39
40°	-39.44	6.86	5.01-8.99
50°	-42.28	6.43	4.67-8.42

하였다. 이는 각도가 증가할수록 Cu-plate의 중앙부가 상부와 가까워져 고주파 대역으로 이동한 것으로 판단된다.

각도 조절 방식이 목표 주파수 대역인 C-Ku band (4-18 GHz)에서 우수한 성능을 달성하는지 최종적으로 확인하였다. 간격 조절 방식에서 흡수 성능이 목표 대역의 중간에

Table 5. Return loss of 'Λ' angle tunable method

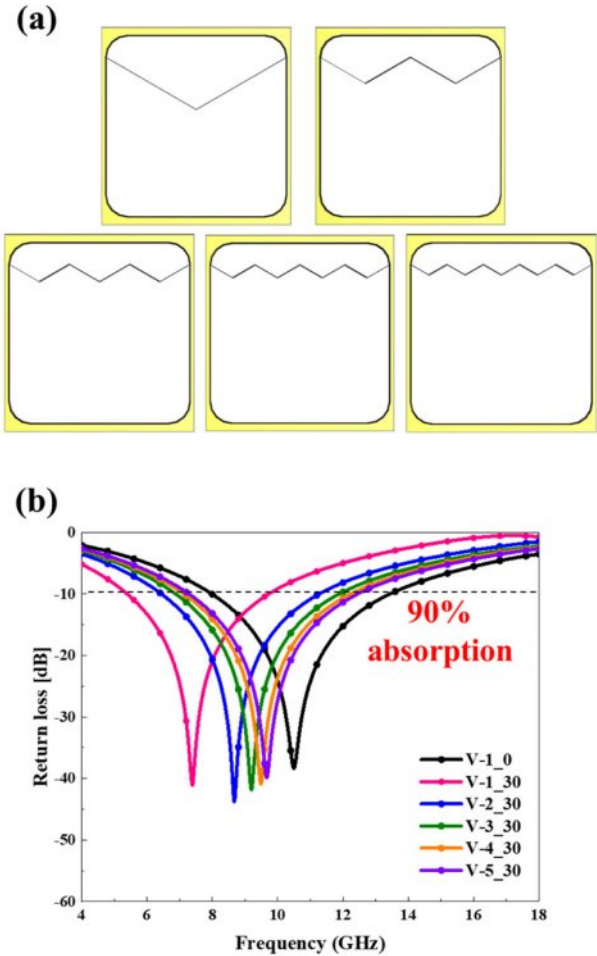
'Λ' shape	Maximum return loss (dB)	Resonance peak frequency (GHz)	-10 dB bandwidth (90% absorption) (GHz)
0°	-48.11	5.7	4.10-7.62
10°	-44.31	6.29	4.58-8.27
20°	-34.87	7.17	5.34-9.14
30°	-22.59	8.4	6.72-10.10
40°	-11.65	9.33	8.64-10.02
50°	-7.85	10.3	x

**Fig. 8.** Optimal simulation results of angle adjustment method

위치했던 GAP 3에서 Cu-plate를 고정하여 각도를 조절하였고, 'V'와 'Λ' 모양 모두 활용하였다. 'V'는 최대 50°, 'Λ'는 최대 10° 까지 각도를 변환하였고, 각도 조절 방식의 전자기파 흡수 성능 결과는 Fig. 8에 나타났다. 4.45-18 GHz에서 전자기파를 90% 이상 흡수하는 것을 확인하였으며, 이는 목표 주파수 대역을 거의 대부분 충족하는 결과이다. Cu-plate의 각도 조절 방식이 목표 주파수 대역에서 우수한 전자기파 흡수 성능을 달성함을 확인하였다.

3.3 다중 배열 방식에 따른 전자기파 흡수 성능

Cu-plate의 배열에 따른 전자기파 흡수 성능을 분석하기 위해, 'V'와 'Λ' 모양을 모두 사용하여 1개에서 5개까지의 범위에서 해석을 진행하였다. 'V' 형상의 경우, 결과는 Fig. 9과 Table 5에 나타나 있으며 각도는 30°로 동일하게 설정하였다. Cu-plate의 배열 개수가 증가할수록 공진 주파수가 고주파 대역으로 이동하는 경향을 보였고, 특히 1개에서 2개가 되었을 때 주파수 이동 폭이 가장 크게 발생하였다. 이는 Cu-plate의 배열 개수가 2개로 증가하면서 코어 상단에서의 거리가 멀었던 Cu-plate의 중앙부 면적이 급격히 감소했기 때문으로 판단된다. 또한, Cu-plate 배열 개수가 증가

**Fig. 9.** Multi-array method with 'V'-shaped Cu-plate: (a) models (b) return loss results**Table 6.** Simulation results of multi-array method with 'V'-shaped Cu-plate

'V' shape	Maximum return loss (dB)	Resonance peak frequency (GHz)	-10 dB bandwidth (90% absorption) (GHz)
1_0°	-38.33	10.5	8.00-13.42
1_30°	-41.07	7.39	5.41-9.71
2_30°	-43.78	8.67	6.46-11.26
3_30°	-41.83	9.2	6.90-11.87
4_30°	-40.92	9.49	7.14-12.22
5_30°	-39.87	9.66	7.30-12.43

함에 따라 Cu-plate 중앙부의 높이가 점차 작아져 각도가 0°인 형태와 유사해졌으며, 이러한 변화는 그래프에도 명확히 반영되었다. Fig. 10은 'Λ' 형상에 따른 다중 배열 방식의 결과이며, Table 7에 자세한 결과를 확인할 수 있다. 'V' 형상과는 다른 간격에서 해석을 진행했으며, 각도는 동일하게 30°로 수행하였다. Cu-plate가 증가할수록 공진 주파수

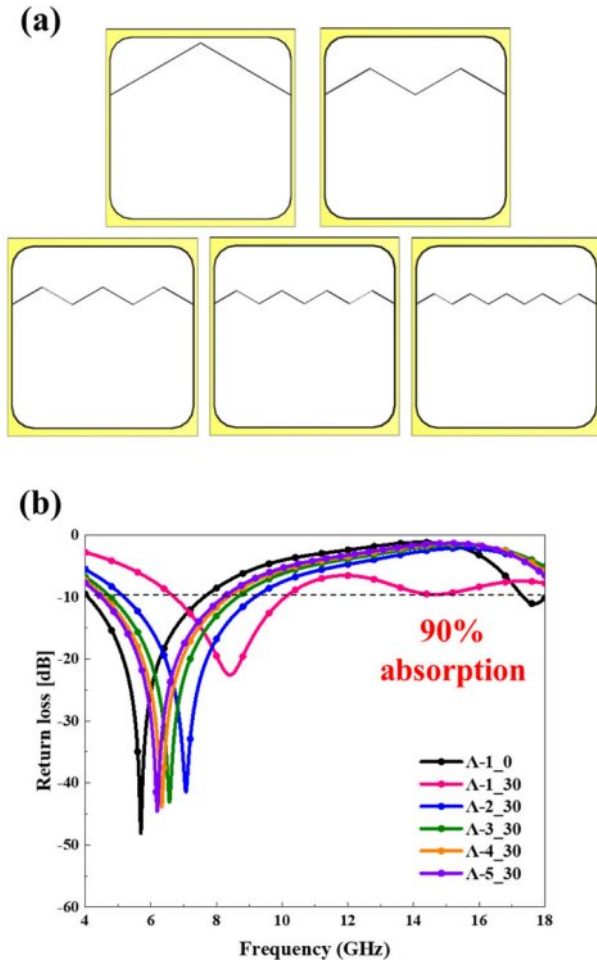


Fig. 10. Multi-array method with 'Λ'-shaped Cu-plate: (a) models (b) return loss results

Table 7. Simulation results of multi-array method with 'Λ'-shaped Cu-plate

'Λ' shape	Maximum return loss(dB)	Resonance peak frequency (GHz)	-10 dB bandwidth (90% absorption) (GHz)
1_0°	-48.11	5.7	4.10-7.62
1_30°	-22.59	8.4	6.72-10.10
2_30°	-41.4	7.07	5.18-9.17
3_30°	-43.07	6.56	4.78-8.64
4_30°	-43.89	6.34	4.59-8.37
5_30°	-44.58	6.19	4.48-8.21

가 저주파 대역으로 이동하였다. 또한, Cu-plate가 1개에서 2개가 되었을 때 흡수 주파수 이동 폭이 가장 컸으며, 이는 코어 상단과 Cu-plate의 간격이 다른 경우에 비해 급격하게 감소한 것으로 판단된다. 또한 Cu-plate 배열 개수가 증가할수록 동일한 간격(각도 0°) Cu-plate과 유사한 형태와 그

래프가 도출되었다. 그러나 다중 배열 방식의 주파수 가변 흡수 구조는 간격 조절과 각도 조절 방식에 비해 90% 이상 전자기와 흡수 대역 폭이 목표 주파수 대역에 달성하지 못한 것으로 확인되었다.

3.4 설계 변수 간 상호작용에 따른 최적 전자기와 흡수 성능 분석

앞서 설계한 방식의 성능을 개선하기 위해, 가장 우수한 흡수 성능을 보였던 간격 조절 방식과 각도 및 다중 배열 방식을 조합하여 추가적인 해석을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 11-12에 정리하였다. 먼저, 간격과 각도를 조절하는 방식은 기존보다 적은 변동으로도 우수한 흡수 성능을 달성하는 것을 목표로 설정하였으며, GAP 1-GAP 5와 각도 0° 및

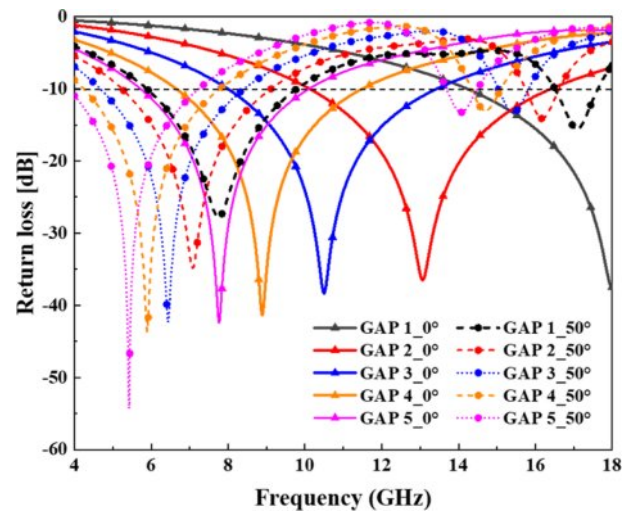


Fig. 11. Simulation results of the combination of gap and angle tunable methods

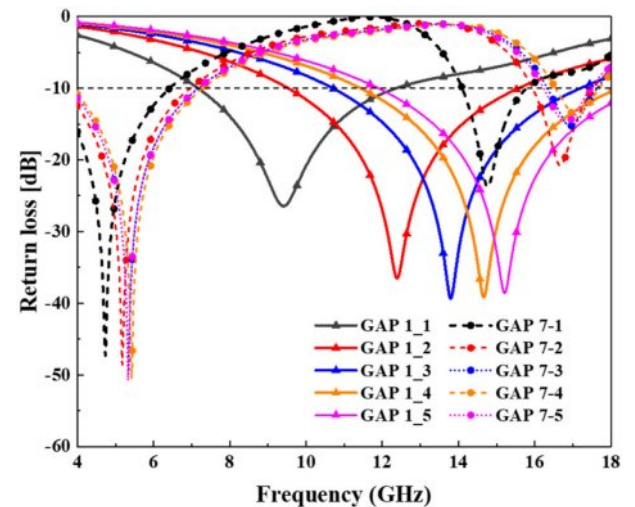


Fig. 12. Simulation results of the combination of gap and multi-array tunable methods

50°를 적용하였다. Fig. 11에 확인할 수 있듯이, GAP 1-GAP 5는 5.7-18 GHz 범위에서, 50°는 4.0-9.7 GHz에서 우수한 흡수 성능을 나타냈다. 이는 기존의 간격 및 각도 조절 방식보다 적은 조정만으로도 목표 주파수 대역에서 우수한 전자파 흡수가 이뤄짐을 보여준다. 특히, GAP 1-GAP 5와 GAP 5_50°에서 목표 주파수 대역 내에서 목표 주파수 대역에서 우수한 흡수 성능을 달성함을 확인하였다. 간격 조절 방식과 다중 배열 방식을 조합하여 해석을 진행하였으며, 다중 배열 방식을 적용하기 위해 Cu-plate의 각도를 30°로 설정하고 GAP 1과 GAP 7을 선정하여 최소한의 GAP 변동으로 우수한 흡수 성능을 달성하고자 하였으며 Fig. 12에 나타났다. Cu-plate의 배열 개수가 증가할수록 공진 주파수가 고주파 대역으로 이동하였으며, 주파수 이동 폭은 점차 감소하는 경향을 보였다. 특히, GAP 1에서 배열 방식을 적용했을 때 7.2-18 GHz 범위에서 우수한 흡수 성능을 나타냈으며, GAP 7에서는 4-7.2 GHz 범위에서 우수한 흡수 성능을 달성했다. 결과적으로, 간격 및 배열 방식을 조합한 방식이 가장 우수한 성능을 보였으며, 이는 GAP 조절 방식이 흡수 성능에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 플루티드 코어 기반 주파수 가변 능동형 레이더 흡수 구조를 설계하고, 간격 조절, 각도 조절, 다중 배열 방식을 적용하여 흡수 성능을 비교 분석하였다. 수행 결과, 간격 조절 및 각도 조절 방식은 C-Ku 대역(4-18 GHz)에서 우수한 전자파 흡수 성능을 발휘하는 것을 확인하였으며, 목표 주파수 대역에서 90% 이상 흡수 성능을 달성하였다. 반면, 다중 배열 방식은 상대적으로 좁은 주파수 가변 범위를 가지며, 목표 주파수 대역에서 90% 이상의 흡수 성능을 확보하는 데 한계를 보였다. 추가적으로, 간격과 각도 조절 방식을 조합하여 적용한 결과, 단일 방식에 비해 적은 조정으로 더욱 효과적인 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 본 연구에서 제안한 구조를 실제로 제작하여 구현하고 성능을 측정하여 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성(R&D) (P0025289)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

본 논문은 2022년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2074536)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- Shin, J. H., and Kwak, B. S., “Evaluation of the absorbing performance of radar-absorbing structure with periodic pattern after the low-velocity impact,” *Composites Research*, 2022, 35(6), 469–476.
- 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*, 2024, 6(4), 045004.
- 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*, 2022, 35(3), 201–215.
- 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*, 2011, 20(3), 215–229.
- 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*, 2024, 6(4), 045004.
- 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*, 2020, 239, 111885.
- Choi, W. H., Kim, T. I., and Lee, W. J., “Broadband radar absorbing sandwich composite with stable absorption performance for oblique incidence and its application to an engine duct for RCS reduction,” *Advanced Composite Materials*, 2020, 30(1), 76–90.
- 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*, 2020, 29(5), 495–507.
- 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*, 2019, 1(3), 032001.
- 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, 28(sup1), 79–90.
- Li, C., Cao, Q., Zhou, G., Kuai, X., and Cai, D., “Investigation on mechanical properties and stealth characteristics of a novel gradient-stitched composite structure,” *Advanced Composite Materials*, 2024, 1–21.
- Malles, S., Shim, D., Ko, H., Kang, Y., Hong, D., Kwak, B., and Nam, Y., “Radar absorption characteristics of ceramic oxide fiber/aluminosilicate-sendust composite structure at ultrahigh temperatures,” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 968, 2023, 171979.
- 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*, 2023, pp. 1–20.
- Malles, S., Hwang, J., Choi, H., Hong, D. J., Seok, C., Kwak, B., S., Lee, S., Y., and Nam, Y., “Advanced acoustic design: 3D

- printed thermoplastic folded core sandwich structures with porous materials and microperforations for enhanced sound absorption,” *Composite Structures*, 2024, 118371.
15. Choi, W. H., Choe, H. S., and Nam, Y. W., “Space hypervelocity impact-shielding and microwave absorbing composite composed of cobalt-coated aramid fibers,” *Composite Structures*, Vol. 266, 2021, 113875.
 16. Lee, J. S., Hoang, V. T., Kweon, J. H., and Nam, Y. W., “Multi-functional Ni-plated carbon fiber reinforced thermoplastic composite with excellent electrothermal and superhydrophobic properties using MWCNTs and SiO₂/Ag microspheres,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 171, 2023, 107585.
 17. 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, 107952.
 18. 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, 113148.
 19. Jeong, G. W., Noh, Y. H., Choi, W. H., Shin, J. H., Kweon, J. H., Yook, J. G., and Nam, Y. W., “Electromagnetic-mechanical repair patch of radar-absorbing structure with electroless nickel-plated glass fabric damaged by lightning strike,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 7, 2021, pp. 989-1002.
 20. 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 circuit-analog absorbers subjected to low-velocity impact loads,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2024, 07316844241260326.
 21. Jang, M. S., Choi, J. H., Jang, W. H., Nam, Y. W., and Kim, C. G., “Effects of dot-type electroless nickel plating on the mechanical properties of glass/epoxy used for radar-absorbing structures,” *Composite Structures*, Vol. 257, 2021, 113165.
 22. Lei, X., Long, X., Luo, L., Li, X., Liu, X., and Zhou, M., “A broadband tunable absorber based on a PIN diode-loaded frequency selective surface,” *2022 International Conference on Computing, Communication, Perception and Quantum Technology (CCPQT)*, 2022, 324–327, IEEE.
 23. Wei, K., Wu, B., and Xu, W., “Design of broadband tunable frequency selective rasorber structure,” *2024 IEEE International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies (iWR-FandAT)*, 2024, 95-98, IEEE.
 24. Qi, D., Zhang, C., Wu, S., Zhang, Q., Li, W., and Wang, Y., “Ultra-broadband and reconfigurable liquid-based microwave metasurface absorber,” *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26(21), 2401121.
 25. Wen, J., Ren, Q., Peng, R., and Zhao, Q., “Multi-functional tunable ultra-broadband water-based metasurface absorber with high reconfigurability,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(28), 285103.
 26. Ge, J., Zhang, Y., Li, H., Dong, H., and Zhang, L., “Ultra-broadband, tunable, and transparent microwave meta-absorber using ITO and water substrate,” *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(10), 2202873.