

고온 환경에서 전파흡수를 위한 금속-세라믹 메타구조

Metal-Ceramic Meta Structure for Electromagnetic Wave Absorption in High-Temperature Environments

윤 도 형 · 백 상 민* · 이 원 준*

Do-Hyeong Yoon · Sang-Min Back* · Won-Jun Lee*

요 약

본 연구에서는 세라믹 소재인 YSZ(Yttria stabilized-zirconia)와 3차원 형태를 가진 금속 SRR(split ring resonator) 구조를 결합하여, 별도의 손실 소재가 포함되지 않은 고온용 전파흡수체를 제안한다. 금속은 전파를 반사시키는 특징이 있지만, 3차원 금속 구조물의 형태를 조절하고, 사이에 고유전체를 배치함으로써 전파흡수 기능이 부여됨을 확인하였다. 메타 패턴 구조물의 형상은 상용프로그램 CST Studio Suite를 이용하여 설계되었다. SRR 구조는 금속 3D 프린팅을 이용해 제작되었고, 제작된 금속 구조 위에 용사방식으로 YSZ를 코팅하였다. 제안된 흡수구조는 자유공간 측정 장비를 사용하여 X-band 내 약 0.8 GHz 대역폭에서 -10 dB 이하의 반사손실 특성이 있음을 확인하였다.

Abstract

In this study, we propose a high-temperature radar-absorbing structure that combines the ceramic material (YSZ, yttria-stabilized zirconia) with a metamaterial (SRR, split-ring resonator) structure without including additional lossy materials. Although metals typically reflect electromagnetic waves, we found that adjusting the shape of the 3D metal structure and placing dielectric materials in between can impart wave-absorption functionality. The shape of the metamaterial pattern structure was designed using the commercial program CST Studio Suite. The SRR structure was fabricated using metal 3D printing, and YSZ was coated onto the fabricated metal structure using thermal spraying techniques. The proposed radar-absorbing structure was verified using free space measurement equipment, demonstrating a reflection loss characteristic of less than -10 dB over a bandwidth of approximately 0.8 GHz within the X-band.

Key words: Metamaterial, RAS(Radar Absorbing Structure), High-Temperature Resistance, Metal 3D Printing

I. 서 론

스텔스 기술은 적의 레이더, 적외선 등 다양한 탐지 기술에 대응하여 발전해 왔으며, 군사적 우위를 유지하는데 중요한 역할을 한다. 저피탐 기능은 레이더 흡수 재료

(RAM, radar absorbing material)와 흡수 구조(RAS, radar absorbing structure)가 있다. RAS는 복합재료의 섬유나 기지재료에 전자기파에 손실을 발생하는 재료를 사용하거나, 저항층을 삽입하는 등 여러 방법으로 구현된다. RAS는 주로 낮은 레이더 반사 면적(RCS, radar cross section)

과학기술연합대학원대학교 무기체계공학과(Department of Weapon Systems, University of Science and Technology)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received July 5, 2024 ; Revised August 12, 2024 ; Accepted September 20, 2024. (ID No. 20240705-004S)

· Corresponding Author: Won-Jun Lee (e-mail: lwj@add.re.kr)

을 가져야 하는 스텔스 유, 무인체계에 적용된다. RCS 증가를 유발하는 주요 부위는 항공 엔진의 흡입구와 배기구 등의 캐비티 구조이며, 특히 배기구나 극초음속 비행체의 첨두부는 고온 환경으로 인해 세라믹이 적용된 고내열 전자파 흡수 물질에 관한 연구가 진행되고 있다^[1].

YSZ는 높은 화학적, 열적 안정성 등 특성이 우수하여^[2] 엔진 내부 코팅 소재에 사용되고 있는 대표적인 세라믹 소재이며, YSZ는 약 1,000℃ 이상의 고온에서도 구조적 변형 없이 우수한 열적 안정성을 유지한다. 전파 흡수 성능이 없는 YSZ와 전자기 손실 소재를 첨가하여 내열성을 갖는 전파흡수체의 연구도 활발히 수행하고 있다^[3]. 하지만 손실 소재를 첨가함으로써 발생하는 내열 한계가 존재하며, 첨가제가 불순물로 작용하여 코팅 성능 저하를 야기시킨다. 따라서 순수 YSZ를 사용하면 YSZ 또는 금속 본연의 내열 한계까지 운용할 수 있으며, 코팅 최대의 성능을 발휘한다.

메타물질은 기존의 물질을 이용해 주기 구조를 설계함으로써 자연에 존재하지 않는 특성을 나타내도록 설계 및 제작된 물질을 말한다. 최근 패턴 설계 시 유효 유전율(permittivity)과 유효 투자율(permeability) 제어 효과를 통해 얇은 두께에서 전파흡수를 갖는 메타물질 흡수체를 스텔스 기술에 사용하고 있다.

본 연구에서는 저피탐 특성이 유전율과 투자율에 의해 결정되므로, 다양한 유전율의 제어 효과를 나타낼 수 있는 패턴인 SRR(split ring resonator) 패턴을 적용하여 설계하였다. 이 패턴을 2차원 금속 모재 위에 배열하여 메타표면(meta surface)을 만들었으며, 내열성과 고온 환경에서 사용할 수 있는 RAS를 설계하였다. 설계된 RAS는 상용 소프트웨어인 CTS Studio Suite를 사용하여 최적 변수를 도출하고 검증했다. 이후 금속 3D 프린터의 DED(directed energy deposition) 방식으로 시편 제작 후 내열, 고온 소재인 YSZ 재료만 활용하여 코팅하고, 고온에서 자유공간 측정 장비를 사용하여 X-band의 전파흡수 가능성을 확인하였다.

II. 고온 흡수체 설계

고온용 RAS 제작을 위해 고려해야 할 사항으로는 제

작 방식이다. 금속 모재 표면에 패턴을 구현하기 위해 기계 가공방식은 구현 가능성 및 생산성 효율이 낮으므로 금속 3D 프린터를 사용하려고 한다. 금속 3D 프린터는 크게 PBF(powder bed fusion)와 DED로 구분하고 있다. PBF의 경우, 금속 분말 소재를 베드에 얇은 레이어로 깔고, 레이저나 전자빔으로 소결시키거나 적층시켜 모델을 조형한다. DED의 경우, 금속 분말 공급과 동시에 고출력 레이저 빔을 통해 순간적으로 용융되어 적층해 나가는 방식이다. PBF는 복잡한 형상을 구현할 수 있는 반면 모델링 형상 및 크기에 따라 금속 분말이 많이 필요하다. DED의 경우 비교적 단순한 형상만 구현할 수 있으나, 대형 구조물 제작이 가능하고 금속 분말 손실률이 낮은 장점이 있다. 본 연구에서는 최종 목적인 비행체의 배기구에 적용할 예정으로 DED 방식을 활용하여 제작하고자 한다.

DED 방식을 활용하기 위해서는 표면 패턴의 방식을 단순한 구조로 설계해야 한다. 그렇기에 일반적인 메타물질 형태인 SRR구조를 사용했다. 또한, SRR은 공진 특성을 통해 전파흡수 성능을 극대화할 수 있으며, 특정 주파수에서 강한 공진 현상을 유도하여 전자기파를 효과적으로 흡수할 수 있다. SRR은 LC(인덕턴스, 캐패시턴스) 공진을 통해 유전율 제어 효과를 활용한다. 두 원형의 개방 루프(loop)에 외부시간에 따라 변하는 자기장이 발생하면, 이로 인해 두 개방 루프에 전류가 유도된다. 유도된 전류는 두 개방 루프에서 인덕턴스(L, inductance)를 생성하고, 루프 사이에는 유도된 전류에 의해 전압 분포가 그림 1과 같이 형성된다. 또한, 안쪽과 바깥쪽의 개방 루프 사이에는 캐패시턴스(C, capacitance) d_2 가 발생하게 된다.

또한, 루프 끝단에 있는 개방 루프 부분에는 캐패시턴

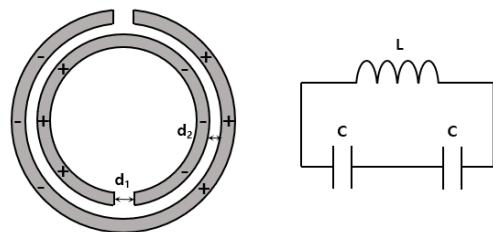


그림 1. 일반적인 형태의 SRR의 등가 회로 구조
Fig. 1. Equivalent circuit and general structure of a SRR.

스 d_1 이 발생하므로, 총 캐패시턴스는 루프 사이의 캐패시턴스 d_2 와 끝단의 개방 구조에서 발생하는 캐패시턴스 d_1 의 합으로, 등가 회로에서 이들이 직렬로 연결되어 있다고 가정할 수가 있다.

SRR의 등가 회로는 LC 공진 회로와 동일하므로, 공진 주파수는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$w_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

여기서 C 는 루프 사이의 단위 길이당 캐패시턴스를 의미하고, L 은 SRR의 두 원형 개방 루프에서 발생하는 총 인덕턴스이다.

III. 최적 설계 시뮬레이션 결과

최적의 매개 변수값을 도출하기 위해 X-band(8~12 GHz)에서 흡수능을 가지는 전파 흡수구조 단위 셀을 그림 2와 같이 설계하였다.

설계된 RAS 패턴 모델링의 기본 물성은 PEC(perfect electric conductor)로 하였고, 코팅된 물질은 세라믹 소재인 YSZ를 사용했다. 유전율 ϵ_r 은 27, 손실 탄젠트 $\tan\delta_\epsilon$ 은 0.1이며, 흡수 특성을 X-band 내 위치시키기 위해, YSZ와 메타표면 조합을 무반사 곡선 기준으로 1.8 mm 이하에서 형성될 것으로 예상했다. 따라서 코팅 두께를 1.8 mm 이하로 설정하고, 단위 패턴화를 위해 90° 회전하여 배치한 모델링을 하였다. 그림 3과 같이 RAS 패턴 매개 변수를 지정하여 하나씩 증감해보며 최적값 도출을 위한 범위를 지정하였고, CST Studio Suite의 Optimizer 기능을 활용하여 최적의 매개 변수값을 도출하였다.

매개 변수에 genetic algorithm을 사용하였고, X-band 내

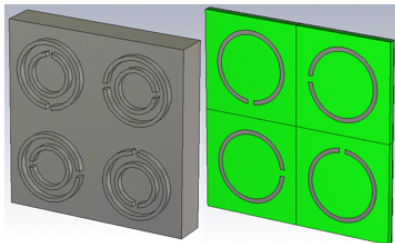


그림 2. RAS 모델링
Fig. 2. RAS modeling.

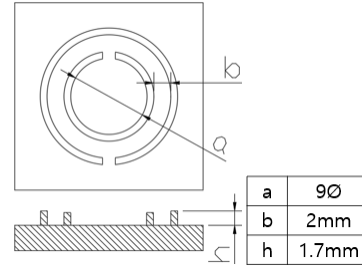


그림 3. SRR 패턴의 매개 변수
Fig. 3. Parameters of SRR pattern.

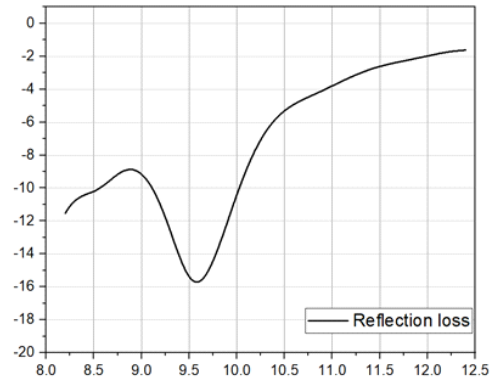


그림 4. 최적 설계 RAS의 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation results for optimal design RAS.

최소값이 오면서 9.5~10.5 GHz 사이에 최소 피크 값이 오도록 목적함수를 설정하여 최적설계하였다. 최적화를 위해서는 많은 반복 시뮬레이션이 필요하며, 매개 변수 변화에 따른 전반적인 반응을 효과적으로 최적화할 수 있는 T-solver(time domain solver)를 사용하였다. 그림 4는 CST의 T-solver를 통해 최적 설계 결과로 얻은 S-parameter의 S_{11} 결괏값으로 X-band에서 약 1 GHz (9.1~10.1 GHz) 대역폭에 대해 -10 dB 이하의 반사손실을 보여준다.

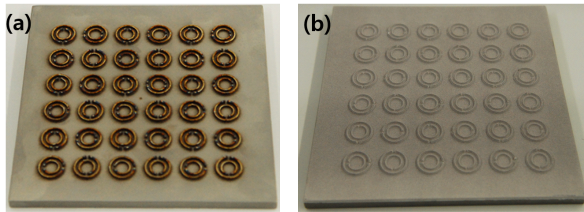
IV. 제작 및 시험

RAS에 대한 최적 설계 후 시편 제작을 표 1의 조건으로 금속 3D 프린팅 DED 방식으로 제작하였으며(그림 5(a)), 기존 엔진 노즐 제작 시 사용되는 SUS304를 사용하여 기존 재질 그대로 패턴을 구현하였다. Thermal barrier coating을 위해 시편에 YSZ를 플라즈마 코팅하여 소결하

표 1. 금속 3D 프린터 DED 방식의 조건

Table 1. Conditions for metal 3D printer DED.

Laser power (W)	180~258
Traverse speed (mm/s)	850
Powder feed rate (g/min)	1.8
Z step (mm)	0.15±0.05
Powder particle size (μm)	50~150



(a) 3D 프린터 출력 후

(a) After 3D printing

(b) YSZ 코팅 후

(b) After YSZ coating

그림 5. 3D 프린터 출력 후(a) 및 YSZ 코팅 후(b) 시편

Fig. 5. Specimens after 3D printing (a) and YSZ coating (b).

였다(그림 5(b)).

제안된 RAS는 자유공간 측정법으로 측정되었다. 자유공간 측정법은 일정 크기 이상의 평판 시편이 요구됨에 따라, 메타 패턴이 적용된 흡수구조의 측정에 용이하다. 시편을 가운데 두고, 포커스드 렌즈 혼 안테나와 양옆 초점거리에 위치시켜 안테나로부터 송, 수신되는 전자기파 신호를 분석하여 *S-parameter*를 측정한다.

그림 6 측정은 상온(약 22°C) 조건에서 수행되었으며, 표 2 Plate_SRR은 코팅 전 메타구조로 된 금속이고, Plate_YSZ는 금속평판에 YSZ를 1.8 mm 코팅하였을 경우이다. 이 둘을 측정하였을 때, 흡수능이 없음을 확인하였다. 반면 금속 메타구조에 YSZ를 코팅한 시편인 RAS_SRR의 경우 X-band 내 약 0.8 GHz(9.1~9.9 GHz) 대역폭에서 -10 dB 이하의 성능을 발휘하였다.

제안된 RAS를 고온 환경 모사 장비를 통해 고온 환경에서 전파특성을 측정하였다(그림 7). 고온 환경 모사 장비의 플라즈마를 이용해 목표 온도까지 올리고 가열된

표 2. 색인 Plate_SRR / Plate_YSZ

Table 2. Index Plate_SRR / Plate_YSZ.

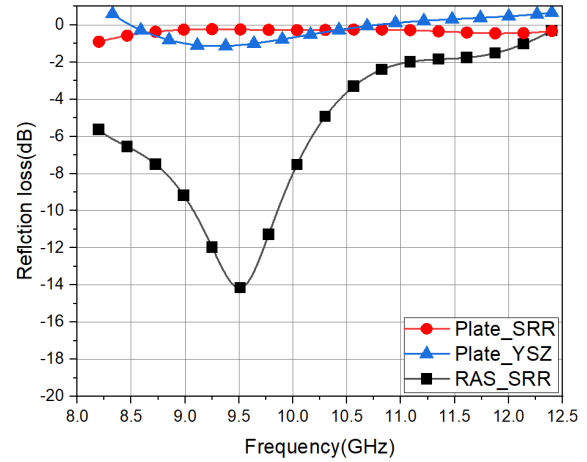
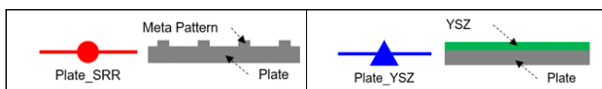


그림 6 자유공간 측정장비를 통한 반사손실

Fig. 6. Reflection loss using free space measurement equipment.

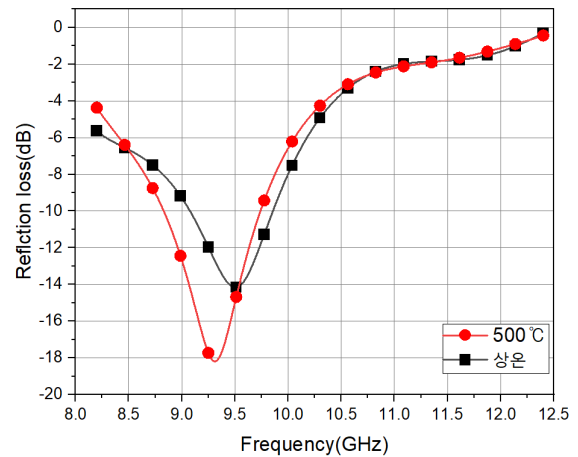


그림 7. 고온 환경 모사 장비를 통한 반사손실

Fig. 7. Reflection loss using high-temperature equipment.

시편을 측정 장치로 이송 후 온도 측정 장비를 통해 온도를 측정하며 전파특성을 측정하였다. 목표 온도인 500°C에서 상온 대비 더 넓은 대역폭의 반사손실을 보여줬다.

V. 결 론

본 연구에서는 세라믹 소재인 YSZ와 3차원 형태를 가진 금속 SRR 구조를 결합한 메타표면을 만들어, 별도의 손실 소재가 포함되지 않은 고온용 전파흡수체를 제안하

고, 자유공간 측정 장비를 사용하여 전파흡수 성능을 확인하였다. YSZ 또는 SRR 구조 단독으로는 전파흡수 성능은 나타나지 않았으나, 제안된 고온용 전파 흡수구조는 X-band 내 약 0.8 GHz(9.1~9.9 GHz) 대역폭에서 -10 dB 이하의 성능을 보였다. 본 연구는 RCS 증가를 유발하는 고온 부에 적용 가능성을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 고온 환경에서도 우수한 전파 흡수성능을 유지할 수 있는 구조 설계의 가능성을 제시하며, 향후 다양한 고온 환경에서의 응용 가능성을 넓히는 데 기여할 것이다.

References

- [1] M. S. Cao, W. L. Song, Z. L. Hou, B. Wen, and J. Yuan, "The effects of temperature and frequency on the

dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/silica composites," *Carbon*, vol. 48, no. 3 pp. 788-796, Mar. 2010.

- [2] X. Zhang, B. Lin, Y. Ling, Y. Dong, D. Fang, and G. Meng, et al., "Highly permeable porous YSZ hollow fiber membrane prepared using ethanol as external coagulant," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 494 no. 1-2, pp. 366-371, Apr. 2010.
- [3] W. J. Lee, S. M. Baek, "EM wave absorbing material for high temperature aerial structure," in *2021 Fall Conference of the Korean Society for Composite Materials*, Yeosu, Nov. p. 25.

윤 도 형 [과학기술연합대학원대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0008-6047-0967>



2018년 2월: 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 (공학사)
2024년 3월~현재: 과학기술연합대학원대학교 국방과학연구소캠퍼스 무기체계공학과 석사과정
[주 관심분야] Stealth Aircraft, Radar Absorber 등

이 원 준 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6609-7461>



2002년 2월: 부산대학교 항공우주공학과 (공학사)
2004년 8월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학석사)
2008년 8월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학박사)
2012년 3월: SK Innovation

2012년 4월~현재: 국방과학연구소 항공기술연구원 책임연구원

[주 관심분야] Aircraft Structure, Composite, Radar Absorber, RCS 등

백 상 민 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9147-1964>



2013년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)
2015년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
2023년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
2015년 3월~현재: 국방과학연구소 항공

기술연구원 선임연구원

[주 관심분야] Radar Absorber, RCS 등