

저반사와 저손실 투과 특성을 갖는 주파수 선택 표면

Frequency Selective Surface with Low Reflection and
Low-Loss Transmission Characteristics

김선웅 · 최원우 · 백상원 · 김상근* · 최태인 · 이학주 · 김기철

Sun-Woong Kim · Won-Woo Choi · Sangwon Baek · Sang-Keun Kim* · Taein Choi ·
Hak Joo Lee · Kichul Kim

요 약

본 논문에서는 낮은 반사와 저손실 투과 특성을 갖는 레이돔용 주파수 선택 표면을 제안한다. 낮은 반사 특성은 비대칭 도체 패턴을 포함하는 편파 변환 메타표면을 적용하여 동일 편파의 반사 신호를 감소시키고, 저손실 투과 특성은 도체 평면에 교차슬롯을 삽입한 투과 메타표면을 이중층으로 이용하여 구현된다. 설계된 주파수 선택 표면의 전자파 반사와 투과 성능은 전자기 시뮬레이션을 통해 확인하고, 최소 반사성능은 -33 dB이고 최소 투과손실은 -0.49 dB임을 보여준다. 각 층의 메타표면은 PCB 공정으로 제작되고, 복합소재와 적층하여 측정용 시편은 제작된다. 자유공간 측정 결과, 최소 반사특성은 -32.7 dB이고, 최소 투과손실은 -1.95 dB임을 확인함으로써, 시뮬레이션 결과와 유사함을 보여준다.

Abstract

In this paper, a frequency-selective surface (FSS) for radomes with low-reflection and low-loss transmission characteristics is proposed. A low reflection is achieved by applying a polarization conversion metasurface featuring asymmetric conductive patterns to reduce copolarized reflection signals. Low-loss transmission is implemented using a dual-layer transmission metasurface with cross-slots embedded in the metallic plane. The electromagnetic wave reflection and transmission performance of the designed FSS are evaluated through full-wave simulations, demonstrating a minimum reflection of -33 dB and a minimum insertion loss of -0.49 dB. Each metasurface layer was fabricated using a printed circuit board (PCB) process and integrated with composite materials to build a test sample. The measured results, which confirmed a minimum reflection of -32.7 dB and a minimum transmission loss of -1.95 dB, show close agreement with the simulation results.

Key words: Frequency Selective Surface, Metasurface, Multi-Function, Polarization Conversion, Radome

I. 서 론

레이돔은 주로 가혹한 환경으로부터 내부 안테나 및

전자 기기를 보호하는 역할을 수행한다. 무인기 또는 항공기가 고속으로 비행할 경우, 레이돔 전방에 공기 흐름이 압축되어 다량의 열이 발생하게 된다^{[1][2]}. 이러한 환경

「이 논문은 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(협약번호 KRIT-CT-23-046).」

(재)파동에너지극한제어연구단(Center for Advanced Meta-Materials)

*LIG 디펜스&에어로스페이스(LIG Defense & Aerospace)

· Manuscript received February 26, 2026 ; Revised March 9, 2026 ; Accepted April 22, 2026. (ID No. 20260226-012)

· Corresponding Author: Kichul Kim (e-mail: kckim@cammm.re.kr)

에서는 레이돔의 구조적 안정성 및 전자기적 소재 선정과 구조 설계가 요구된다^[3]. 최근에는 레이돔에 스티스 기능과 전자파 투과 기능이 결합된 다기능의 주파수 선택 표면(FSS, frequency selective surface) 기술이 많은 관심을 받고 있다. 해당 기술은 대역 내 신호는 투과시키면서도, 대역 외 위협 탐지 신호에 대한 반사 신호를 효과적으로 줄일 수 있어 많은 관심을 받고 있다^[4]. 특히, 대역 외 반사 신호를 효과적으로 저감시키기 위해 저항 소자를 포함한 공진 구조의 전자파 흡수용 FSS와 대역 내 신호 투과를 위해 대역 통과 필터 특성을 갖는 전자파 투과용 FSS를 결합한 설계들이 제안되고 있다^{[5][6]}. 하지만, 레이돔 구조는 다양한 소재가 샌드위치 형태로 적층된 복합 구조로 구성되는 반면, 저항 소자는 구조적으로 돌출된 형태를 가지므로 레이돔의 복합재 성형 및 일체형 구조에 적합하지 않다. 따라서, 별도의 전기 소자나 특수 공정을 요구하지 않는 단순화된 구조의 다기능 FSS 설계가 필요하다.

본 논문에서는 낮은 반사와 저손실 투과 특성을 갖는 레이돔용 FSS를 제안한다. 제안된 구조는 도체 패턴 기반의 평면으로 구현되어 기존 PCB 제작 공정과 호환이 가능하며, 유리섬유 강화 플라스틱(GFRP, glass fiber reinforced plastic)을 포함한 다층 복합 레이돔 구조에 용이하게 일체화될 수 있다. 대역 외 위협 탐지 신호에 대해서는 비대칭 도체 패턴을 이용한 편파 변환 메타표면(PCM, polarization conversion metasurface)을 적용하여 반사 신호를 효과적으로 감소시키고, 내부 안테나의 동작 주파수 대역의 신호에 대해서는 도체평면에 삽입된 교차슬롯 기반 투과 메타표면(TM, transmission metasurface)을 통해 저손실 투과 특성을 확보한다^{[10][11]}. 설계된 FSS의 전자파 반사와 투과 성능은 전자기 시뮬레이션을 통해 확인하고, FSS의 단위셀을 14×14 배열로 시편을 제작하여 측정된 결과를 시뮬레이션 결과와 비교 검증하여 유사함을 보여준다.

II. FSS 설계

그림 1은 설계하는 FSS의 반사와 투과 성능에 대한 주파수 특성을 나타낸다. 대역 외 입사되는 주파수 f_1 의 전

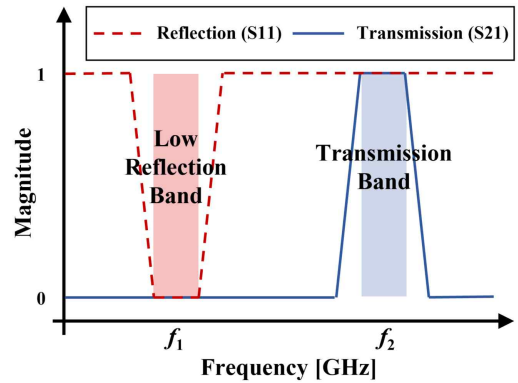


그림 1. 제안된 FSS의 반사와 투과 특성
Fig. 1. The reflection and transmission properties of proposed frequency selective surface.

자파는 PCM에 의해 편파가 교차편파로 변환되므로 입사파와 동일한 편파의 반사파는 감소된다. 반면, 대역 내 송수신되는 주파수 f_2 에서 TM은 대역 통과 필터로 동작한다^[12]. 본 연구에서 고려하는 PCM과 TM의 설계주파수 대역은 각각 X대역과 Ku대역이며, 비교적 인접한 두 주파수 대역에서 낮은 반사와 저손실 투과 특성의 복합기능 FSS를 구현하는 데에 중점을 둔다.

그림 2는 본 연구에서 제안하는 구조의 단위 셀 형상과 설계 파라미터들을 보여준다. 그림에서 보는 것과 같이 단위 셀에는 하나의 PCM과 두 개의 TM으로 구성된다.

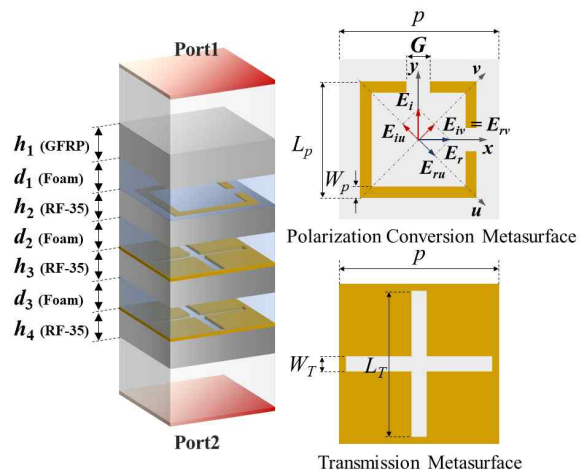


그림 2. 제안된 FSS의 단위 셀 구조
Fig. 2. The unit cell of proposed frequency selective surface.

PCM은 대역 외 입사 신호의 편파 변환을 유도하기 위해 두 개의 직사각형 슬롯을 포함한 사각 링 형태의 비대칭 구조를 갖는 메타표면층과 하부의 도체면으로 구성된다. 이로 인해 입사된 전자파가 교차 편파 성분으로 변환되기 때문에 반사되는 동일 편파의 전자파가 효과적으로 저감된다. TM은 PCM의 하부 도체면에 교차 슬롯을 삽입하여, 대역 내 신호를 투과시킬 수 있다. 투과 대역의 저손실 특성을 개선하고 저반사와 저손실 투과 특성을 명확하게 분리하기 위해 TM을 이중 층으로 이용한다. PCM과 TM의 기판은 모두 유전율 3.5와 손실 탄젠트 0.0025를 갖는 RF-35 유전체를 사용한다. 설계 구조의 최상층에 배치된 GFRP는 유전율 4.1과 손실 탄젠트 0.02의 특성을 갖는 레이돔 최외각층으로서 외부 환경으로부터 전체 구조를 보호하는 역할을 한다. 마지막으로, 각 층별 이격거리를 유지하기 위해, 유전율 $\epsilon_r=1.13$ 과 손실 탄젠트 0.0022을 갖는 Divinycell F90 폼이 추가되어 있다. 제안된 FSS의 단위 셀 구조의 설계와 성능 해석에는 CST Studio Suite를 이용하고 주기 경계 조건(periodic boundary condition)을 포함한다.

2-1 TM 설계

복합기능 FSS 설계에 앞서 PCM을 제외한 구조에서 TM의 특성을 먼저 확인한다. 그림 3은 제안된 이중 층 TM의 등가회로 모델을 나타낸다. 상층 TM과 하층 TM의 인덕턴스는 L_1 과 L_2 로 구분하고, 커패시턴스는 C_1 과 C_2 로 구분하여 보여준다. 각 층의 TM은 L-C 공진 회로로 모델

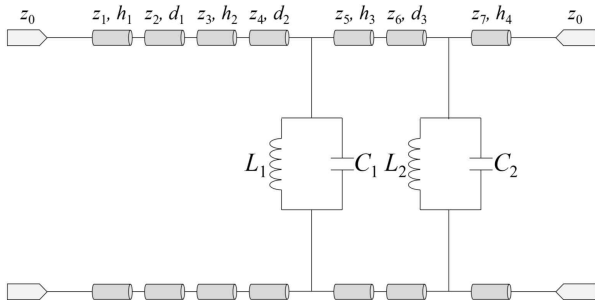


그림 3. 제안된 이중 층 TM 등가회로 모델
Fig. 3. Equivalent circuit model of the proposed double-layer TM.

링되며, 각 유전체층에 대응하는 전송선로를 통해 입력 및 출력 포트에 연결된다.

각 유전체층의 전송선로 임피던스 $z_i(z_1-z_7)$ 는 고유 임피던스와 비유전율 ϵ_r 에 의해 정의되며, 식 (1)과 같이 표현된다^{[13],[14]}.

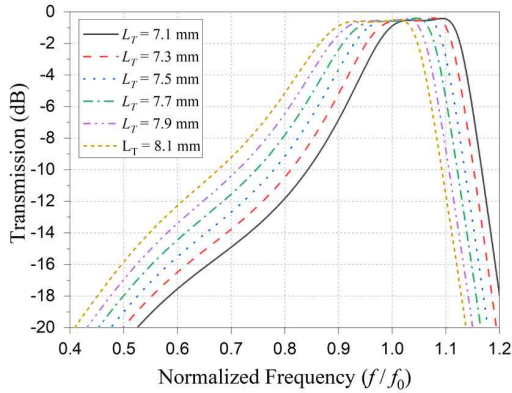
$$Z_i = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_{r,i}}}, (i = 1, 2, \dots, 7) \tag{1}$$

여기서, GFRP층에 해당하는 임피던스는 z_1 이며, 폼층은 z_2, z_4, z_6 , 그리고 RF-35 기판은 z_3, z_5, z_7 로 각각 임피던스를 갖는다. 교차 슬롯 구조는 공진 조건이 만족될 때 특정 대역에서 대역 투과 특성을 갖게 된다. 대역 투과 특성에 대한 공진 주파수 f_0 는 식 (2)와 같이 정의된다.

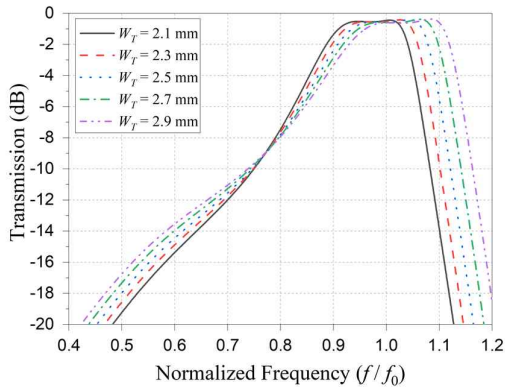
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2}$$

그림 2에서 보여준 교차 슬롯의 설계 파라미터인 L_T 와 W_T 는 인덕턴스 L 과 커패시턴스 C 에 직접적인 영향을 주며, 본 논문에서는 f_0 를 그림 1에서 보여준 투과 대역의 중심 주파수인 f_c 에 맞추어 설계한다. 그림 4는 TM 슬롯의 길이 L_T 와 폭 W_T 의 변화에 따른 전자파 투과 성능의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이, 슬롯 길이 L_T 가 증가할수록 전류 경로가 길어져 인덕턴스가 증가하며, 이에 따라 공진 주파수는 저주파 대역으로 이동한다. 반면, 그림 4(b)에서는 슬롯 폭 W_T 가 증가할수록 도체 간 간격이 넓어져 정전 결합이 감소하고 이에 따라 커패시턴스가 줄어들어 공진 주파수가 고주파 대역으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이에 따라, L_T 와 W_T 는 각각 8.28, 2.5 mm로 선정하고, 이는 중심 주파수 기준으로 각각 약 $0.41 \lambda_0, 0.125 \lambda_0$ 의 전기적 크기를 갖는다.

투과 특성을 그림 5에 보여준다. 단층 구조의 경우 비투과 대역에서 그래프 기울기가 완만함을 볼 수 있다. 반면, 이중 층 구조는 비투과 대역에서 보다 급격한 기울기를 나타내며, 이를 통해 인접 대역 간의 격리 성능을 향상시킨다.



(a) 슬롯 길이 L_T 변화에 따른 시뮬레이션 결과
 (a) Simulation results with variations in the slot length L_T



(b) 슬롯 폭 W_T 변화에 따른 시뮬레이션 결과
 (b) Simulation results with variations in the slot width W_T

그림 4. TM의 전자파 투과 성능 결과
 Fig. 4. Simulated transmission performance of TM.

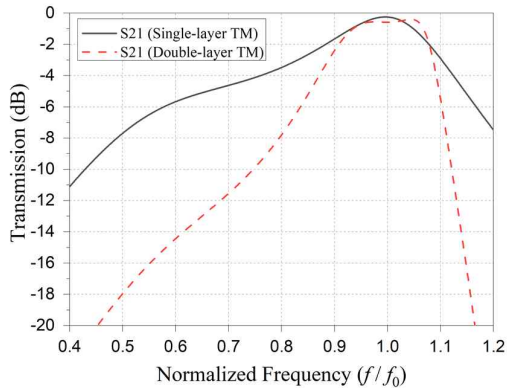
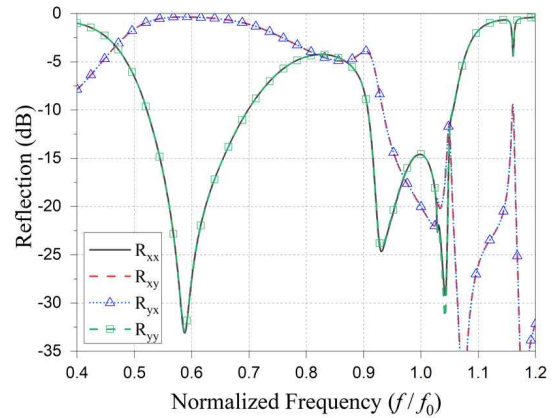


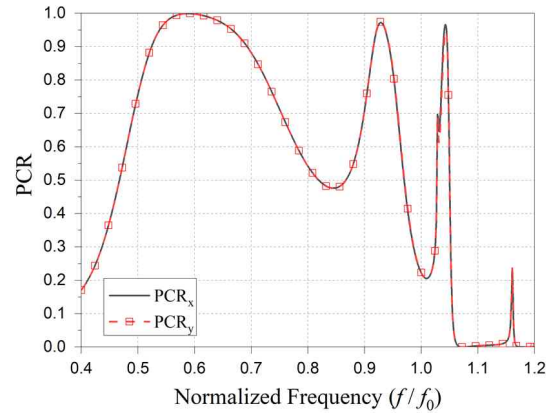
그림 5. 단층 및 이중층 TM에 대한 투과 특성 비교
 Fig. 5. Comparison of transmission characteristics between the single-layer and double-layer TM.

2-2 PCM 통합 설계

PCM 구조는 그림 2에서 보여준 것처럼 길이 L_p 와 선평 W_p 를 갖는 사각 링 구조를 기반으로 슬릿 간격 G 를 추가하여 비대칭 형태로 설계된다. 이러한 비대칭성으로 인해, 예를 들어 입사되는 전기장 E_i 가 y-편파라면 PCM의 편파 변환으로 인하여 반사되는 전기장 E_r 은 x-편파가 된다. PCM 구조의 성능은 반사 성능에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과는 그림 6에 나타났다. 그림 6(a)에서는 동일 편파와 교차 편파에 대한 반사 성능 시뮬레이션 결과이다.



(a) 반사 성능 결과
 (a) Reflection performance results



(b) PCR 결과
 (b) PCR results

그림 6. 제안된 FSS의 반사 성능 시뮬레이션 결과
 Fig. 6. Simulated reflection characteristics of the proposed FSS.

저반사 설계 대역(정규화 주파수 0.55~0.70)에서는 동일 편파 성분인 R_{xx} 와 R_{yy} 가 -10 dB 이하로 유지되며, 교차 편파 성분인 R_{xy} 와 R_{yx} 은 0 dB에 근접하는 값을 보인다. 반면, 투과 설계 대역(정규화 주파수 0.96~1.03)에서는 동일 편파 성분 R_{xx} 와 R_{yy} 가 -10 dB 이하로 유지되지만, 교차 편파 성분 R_{xy} , R_{yx} 은 0 dB에 도달하지 않는다. 이는 저반사 대역에서 대부분의 입사파가 교차 편파 성분으로 변환됨을 의미하며, 반면 투과 대역에서는 독립적인 투과 특성이 유지됨을 의미한다. 그림 6(b)는 편파 변환율(PCR, polarization conversion ratio)에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. PCR은 식 (3)과 같이 정의된다^{[15][17]}.

$$PCR_x = \frac{|R_{yx}|^2}{|R_{yx}|^2 + |R_{xx}|^2}, PCR_y = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2} \quad (3)$$

그림에서 보듯이, 정규화된 주파수 범위 0.55~0.70에서 편파 변환율이 0.9 이상으로 유지되며, 이는 입사 전자파의 x -편파와 y 편파 성분이 모두 90 % 이상 교차 편파로 변환됨을 의미한다. 이에 따라, L_p 와 W_p 는 각각 7.88, 0.25 mm로 선정한다. TM 및 PCM 설계를 통해 최종 선정된 FSS의 파라미터는 표 1에 정리하여 보여준다. 설계된 FSS의 반사 성능과 투과 성능은 그림 7에서 확인할 수 있다.

PCM의 반사 특성 결과, 정규화 주파수 0.55~0.70 구간에서 -10 dB 기준으로 약 24 %의 비대역폭(fractional bandwidth)을 나타내며, 최소 반사특성은 -33 dB이다. TM은 정규화 주파수 0.96~1.03 구간에서 -3 dB 기준으로 약 7%의 비대역폭을 보이고, 최소 투과손실은 -0.49 dB이다. 따라서, 제안된 FSS가 낮은 반사 특성과 동시에 저

표 1. 제안된 FSS의 설계 파라미터
Table 1. Design parameters of the proposed FSS.

Parameters	Dimension (mm)	Parameters	Dimension (mm)
L_T	8.28	W_T	2.5
L_P	7.88	W_P	0.25
G	0.6	p	10.5
h_1	1.5	d_1	1
h_2	0.76	d_2	1
h_3	0.76	d_3	2
h_4	0.76		

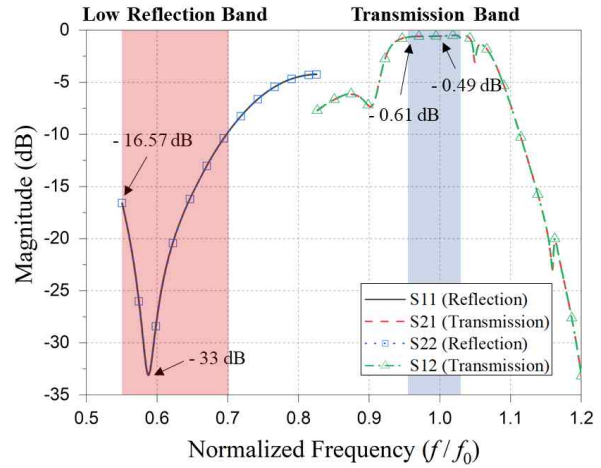


그림 7. 제안된 FSS의 반사 및 투과 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulated reflection and transmission results of the proposed FSS.

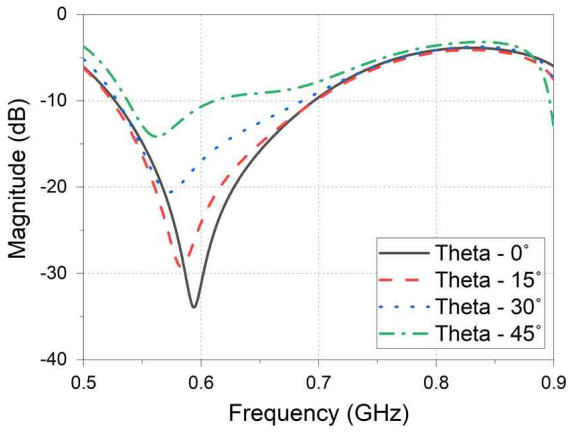
손실 투과 특성을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 제안된 FSS의 경사 입사 각도에 따른 반사 및 투과 성능을 보여준다. 반사 특성은 입사각 30°까지는 -10 dB 이하의 성능이 유지되나 입사각이 증가할수록 -10 dB 대역폭과 최소 반사특성이 저하된다. 이는 경사 입사 조건에서는 PCM의 편파 변환 효율이 감소하기 때문으로 보인다. 투과 특성은 입사각 30°까지는 -3 dB 이하의 성능을 유지하나 그 이상의 각도에서는 투과 성능이 감소한다. 따라서 제안된 FSS는 경사 입사 30°까지는 안정적인 반사 및 투과 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

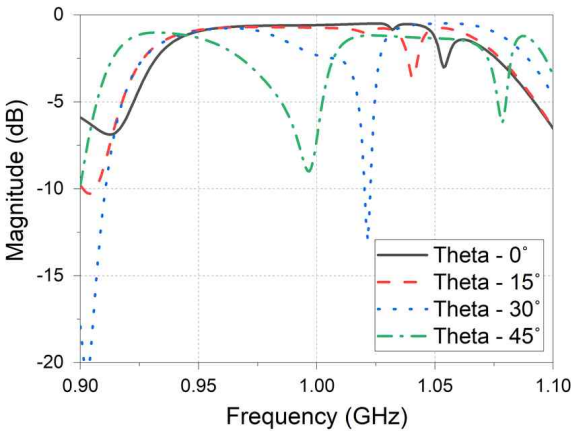
III. FSS 제작 및 측정

제안된 FSS는 GFRP, 폼, PCM, 그리고 TM을 적층한 구조로 제작된다. PCM과 TM은 PCB 공정으로, 그리고 GFRP는 일반적인 복합재 성형공정으로 제작 가능하다. 본 연구에서 사용한 GFRP 성형조건은 125°C에서 3 bar이다. 제작된 메타표면은 14×14개의 단위 셀 배열로 구성되며, 전체 크기는 150×150 mm²이다. 설계 두께는 7.78 mm인 반면, 제작된 시편의 두께는 8.54 mm로 확인되어, 원소재의 치수와 제작공정에서의 오차를 포함한다. 제작된 시편은 그림 9에 제시되어 있다.

제작된 FSS의 성능을 검증하기 위해, 자유공간 측정



(a) 반사 특성
(a) Reflection characteristics



(b) 투과 특성
(b) Transmission characteristics

그림 8. 제안된 FSS의 경사 입사 각도에 따른 반사 및 투과 성능 시뮬레이션 결과

Fig. 8. Simulated reflection and transmission results of the proposed FSS at different incident angle.

시스템을 사용하여 반사 특성과 투과 특성을 측정할 수 있다. 그림 10(a)는 측정 환경을 보여주며, 그림 10(b)는 측정 환경에 대한 시스템 구성도이다. 측정 대상인 FSS의 양측에 송·수신용 렌즈 혼 안테나를 배치하고 반사 및 투과 특성은 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer, Keysight P9375A)를 이용하여 측정한다. 측정용 안테나는 X대역과 Ku대역으로 구분되어 있으므로 두 주파수 대역으로 나누어서 측정을 수행한다. S_{11} 의 경우 알루미늄 도

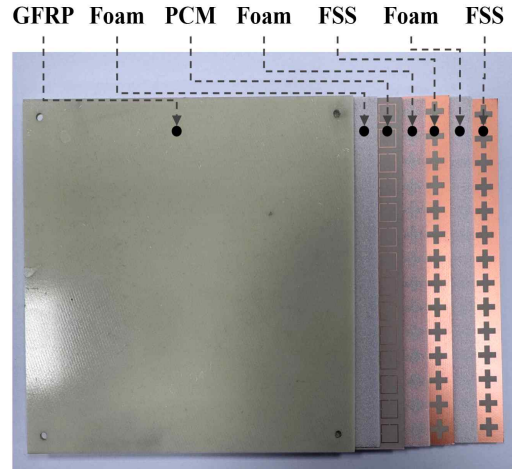
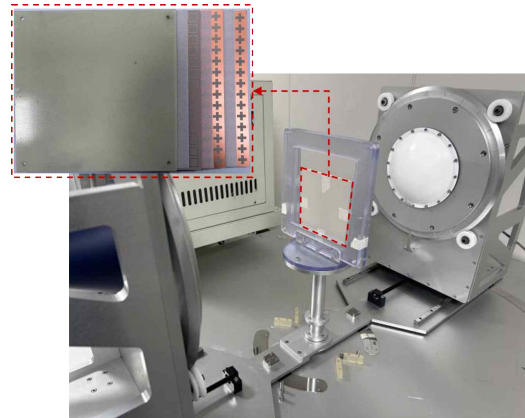
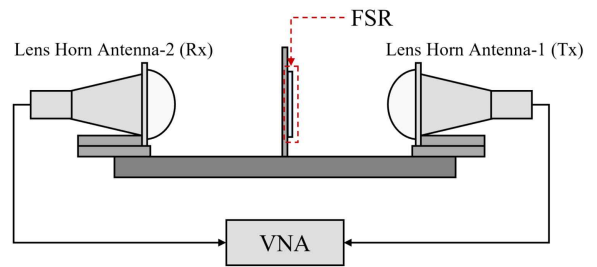


그림 9. 제작된 FSS
Fig. 9. Fabricated FSS.



(a) 자유공간 측정 시스템 측정 환경
(a) Measurement environment of the free-space system



(b) 자유공간 측정 시스템 구성
(b) Schematic configuration of the measurement system

그림 10. 제작된 FSS의 측정 환경과 측정시스템 구성
Fig. 10. Measurement setup for the fabricated FSS.

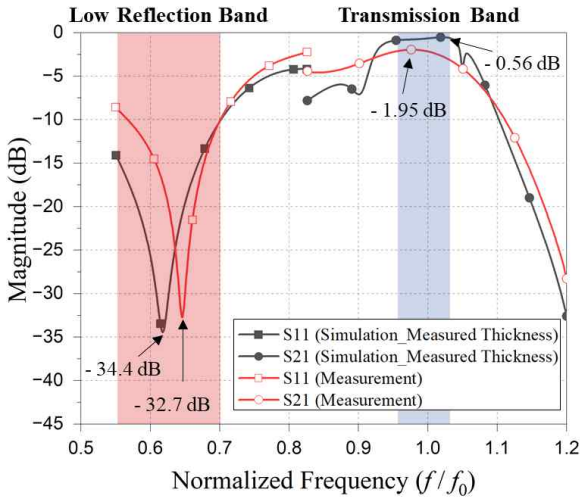


그림 11. 실측 두께를 반영한 시뮬레이션과 측정 결과의 반사 및 투과 특성 비교

Fig. 11. Comparison of reflection and transmission characteristics among simulations based on the measured thicknesses and the measurement results.

체판(PEC)의 반사신호를 기준으로 하여 시편의 상대적인 반사 특성을, S_{21} 의 경우 공기층의 전송신호를 기준으로 하여 시편의 상대적인 투과 특성을 측정한다. 또한, 측정용 렌즈홀 안테나와 연결 케이블을 포함한 측정 환경에 의한 불필요한 신호를 제거하기 위해 타임 게이팅을 적용하면 시편으로부터의 반사 및 투과 성분만 분리할 수 있다. 제작된 FSS의 반사 성능과 투과 성능에 대한 측정 결과는 그림 11과 같다. 그림에서는 결과의 비교를 위해 제작된 시편의 실측 두께를 반영한 시뮬레이션 결과와 같이 보여준다. 측정 결과, 반사 특성은 정규화 주파수 0.55~0.70 구간에서 -10 dB 기준으로 약 21%의 비대역폭을 나타내며, 최소 반사특성은 -32.7 dB이다. 또한, 저반사 대역 내 최대 반사특성은 -8.55 dB이다. 투과 특성은 정규화 주파수 0.96~1.03 구간에서 -3 dB 기준으로 약 7%의 비대역폭을 보이고, 최소 투과손실은 -1.95 dB, 최대 투과손실은 -3 dB이다. 그림에서 보여주는 바와 같이, 저반사 대역에서는 측정 결과의 주파수 특성이 약간 올라가 있고, 투과 대역에서는 측정 결과의 손실이 더 크게 나타난다. 이와 같은 시뮬레이션 결과와 측정 결과의 차이는 시편 제작 시 발생하는 제작 오차에 의한 영

표 2. 제안된 FSS와 기존 연구 결과 비교

Table 2. Comparison of the proposed FSS with previously reported works.

Ref.	Radome integration	Main function (Frequency band)	Minimum transmission loss (minimum transmission loss) (dB)
[18]	FSS-only	Low reflection (S/C/X band) & transmission (C band)	0.21
[19]	FSS-only	Low reflection (C/X/Ku band) & transmission (X band)	0.24
[20]	FSS-only	Low reflection (S/C/X+Ku band) & transmission (Ku band)	0.6
[21]	Radome-integrated	Low reflection (X band) & transmission (K/Ka band)	2.67
This work	Radome-integrated	Low reflection (X band) & transmission (Ku band)	1.95

향으로 추측된다. 특히 시뮬레이션 결과에서는 투과 손실이 -0.56 dB인 반면, 측정 결과에서는 -1.95 dB로 더 큰 손실을 보인다. 제작 시편에서 상부 폼 두께 d_1 과 중간 폼 두께 d_2 는 실측 두께가 각각 1.13 mm 및 1.12 mm로 설계 값 대비 13% 및 12% 두껍다.

폼 두께 d_1 과 d_2 에 따른 파라미터 스터디 결과, 두께가 10% 증가하면 최소 투과 손실은 각각 약 0.2 dB와 0.1 dB 증가하는 경향을 보였다. 또한, 각 유전체 층 간의 간격이 균일하지 않을 수도 있으므로, 추가적인 오차를 발생시킬 수도 있을 것으로 생각된다. 반면, 유전 물성과 패턴 가공 오차의 경우 1% 이하 수준으로 상대적으로 영향이 제한적이다. 따라서 폼 두께 변화가 투과 손실 증가에 영향을 미치는 주요 원인으로 추측된다.

제안된 FSS의 성능을 검증하기 위해, 기존 연구 결과들과의 비교를 표 2에 보여준다. 기존 연구들은 주로 FSS 구조의 광대역 특성 확보에 초점을 맞춘 반면, 본 논문에서 제안하는 구조는 실제 운용 환경을 고려한 저반사와 저손실 투과의 다중기능 특성, 복합재 소재의 레이돔과 FSS의 일체형 설계를 제안한다. 특히 유사한 레이돔 통합 구조를 적용한 기존 연구결과^[21]와 비교할 때, 본 연구는

더 낮은 삽입 손실을 보이며, 레이돔 구조를 포함한 환경에서도 저반사 및 저손실 투과 성능을 확인할 수 있다. 결과적으로 구조적 견고성과 전자기적 성능을 통합적으로 확보한 점에서 차별화된 성능을 가진다.

IV. 결 론

본 논문에서는 레이돔에 적용하기 위한 저반사 및 저손실 투과 기능을 동시에 갖는 FSS를 설계하고 그 결과를 보여준다. FSS는 Ku 대역에서의 투과 특성을 구현하기 위해 교차 슬롯 구조의 TM을 이중층으로 적층하고, X 대역의 외부 위협 신호의 반사를 줄이기 위해 PCM을 함께 적용하여 구성된다. 설계 결과, PCM에 의한 최소 반사 특성은 -33 dB이고, TM에 의한 최소 투과 손실은 -0.49 dB이다. 설계의 타당성을 검증하기 위해 자유공간 측정을 수행한 결과, 최소 반사 특성은 -32.7 dB이고, 최소 투과 손실은 -1.95 dB이며 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 유사함을 확인할 수 있다. 제안된 구조는 일반적인 PCB 공정과 복합재 성형공정을 사용할 수 있으므로 제작이 용이하고 구조적으로 견고하여 실제 레이돔 응용에 적합할 것으로 기대된다.

References

[1] Y. X. Che, S. J. Wu, M. Li, and Y. L. Ban, "Research progress on FSS stealth radome," *Electronics*, vol. 14, no. 6, p. 1132, Mar. 2025.

[2] Y. Dan, J. Yang, "Electromagnetic performance analysis of inhomogeneous radome walls considering temperature and ablation," *Aerospace*, vol. 10, no. 11, p. 927, Oct. 2023.

[3] F. Friederich, K. H. May, B. Baccouche, C. Matheis, M. Bauer, and J. Jonuscheit, et al., "Terahertz radome inspection," *Photonics*, vol. 5, no. 1, p. 1, Jan. 2018.

[4] S. Yu, N. Kou, Z. Ding, and Z. Zhang, "Harmonic-suppressed frequency selective rasorber using resistive-film sheet and square-loops resonator," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 292-296, Feb. 2020.

[5] A. A. G. Amer, S. Z. Sapuan, A. Alzahrani, N. Nasimuddin,

A. A. Salem, and S. S. M. Ghoneim, "Design and analysis of polarization-independent, wide-angle, broadband metasurface absorber using resistor-loaded split-ring resonators," *Electronics*, vol. 11, no. 13, p. 1986, Jun. 2022.

[6] J. Y. Jeong, J. R. Lee, H. Park, J. Jung, D. S. Choi, and E. Jeon, et al., "Fabrication and characterization of resistive double square loop arrays for ultra-wide bandwidth microwave absorption," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 12767, Jun. 2021.

[7] R. Shi, S. Yu, and N. Kou, "A miniaturized frequency-selective rasorber with absorption bands on two sides of passband for antenna dome," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 11, pp. 2161-2165, Nov. 2022.

[8] M. Wang, Z. Xiang, Y. Li, P. Ren, C. Gu, and S. Gao, "Active frequency-selective rasorber with switchable dual operating modes," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 3178-3182, Oct. 2024.

[9] M. Wang, Z. Xiang, Y. Li, P. Ren, R. Xu, and C. Gu, et al., "Design of a dual-passband frequency-selective rasorber with high selectivity," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 9, pp. 2954-2958, Sep. 2025.

[10] C. Liu, Y. Tang, S. Zhong, and Y. You, "Design of a single-layer ultrawideband cross-polarization conversion metasurface with high efficiency," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 3212-3216, Oct. 2024.

[11] H. Shin, D. Yoon, D. Y. Na, and Y. B. Park, "Analysis of transmission loss and boresight error of a curved FSS radome-enclosed antenna," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 95843-95852, Jul. 2021.

[12] Y. Yu, G. Q. Luo, Q. Liu, W. Yu, H. Jin, and Z. Liao, et al., "3D band-absorptive frequency selective rasorber: Concept and analysis," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 2520-2528, Dec. 2018.

[13] S. Clendinning, R. Cahill, D. Zelenchuk, and V. Fusco, "Single screen cross slot polarization convertors with enhanced bandwidth and frequency selective filtering performance," *Journal of Electromagnetic Waves and Appli-*

- cations, vol. 35, no. 11, pp. 1420-1432, Mar. 2021.
- [14] Y. Lu, J. Chen, J. Li, and W. Xu, "A study on the electromagnetic-thermal coupling effect of cross-slot frequency selective surface," *Materials*, vol. 15, no. 2, p. 640, Jan. 2022.
- [15] H. A. Khan, U. Rafique, S. M. Abbas, F. Ahmed, Y. Huang, and J. A. Uqaili, et al., "Polarization-independent ultra wideband RCS reduction conformal coding metasurface based on integrated polarization conversion-diffusion-absorption mechanism," *Photonics*, vol. 10, no. 3, p. 281, Mar. 2023.
- [16] A. Ahmad, D. Y. Choi, "Design, optimization, and comparative analysis of wide-band polarization conversion along with dual coding sequences for RCS reduction," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 8262, Apr. 2024.
- [17] B. Kamal, J. Chen, Y. Yin, J. Ren, S. Ullah, and U. Ali, "Design and experimental analysis of dual-band polarization converting metasurface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1409-1413, Aug. 2021.
- [18] Q. Xing, W. Wu, Y. Yan, X. Zhang, and N. Yuan, "A wideband frequency-selective rasorber with rectangular spiral resonators," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 8, pp. 1688-1692, Aug. 2022.
- [19] J. Zhou, S. Yu, and N. Kou, "A frequency selective rasorber with absorption bands on both sides of passband based on screen-printed resistive film," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 3912-3916, Nov. 2024.
- [20] M. M. Zargar, A. Rajput, and K. Saurav, "Miniaturized design of dual transmission frequency selective rasorber with wide angular stability," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 5, no. 4, pp. 922-932, Aug. 2024.
- [21] D. J. Yun, I. J. Hwang, H. Jung, J. H. Kim, I. H. Lee, and M. S. Kim, et al., "Multifunctional radome-based frequency selective surface composites for stealth applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 11, pp. 4303-4307, Nov. 2025.

김 선 응 [(재)파동에너지극한제어연구단/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2656-2955>



2012년 2월: 조선대학교 정보통신공학과 (공학사)

2014년 2월: 조선대학교 정보통신공학과 (공학석사)

2018년 2월: 조선대학교 정보통신공학과 (공학박사)

2024년 1월 ~ 2025년 8월: (재)파동에너지

극한제어연구단 선임연구원

[주 관심분야] 메타물질, 메타표면, 전자기 흡수체, 저피탐 안테나, IR-UWB 레이다, 광대역 안테나 등

최 원 우 [(재)파동에너지극한제어연구단/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7759-313X>



2020년 2월: 경상국립대학교 나노신소재 공학부 (공학사)

2022년 2월: 경상국립대학교 기계항공공학부 (공학석사)

2022년 5월 ~ 현재: (재)파동에너지극한제어연구단 연구원

[주 관심분야] 다기능 복합재료, 메타물질, 전자파 스텔스 등

백 상 원 [(재)과동에너지극한제어연구단/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3461-7802>



2017년 2월: 포항공과대학교 신소재공학과 (공학사)
2023년 8월: 포항공과대학교 신소재공학과 (공학박사)
2023년 12월~현재: (재)과동에너지극한제어연구단 선임연구원

[주 관심분야] Metasurface-Based Broad-Band Electromagnetic Absorbers, Genetic Algorithm Optimization for Metamaterial Design, Microwave Stealth Composite Materials 등

이 학 주 [(재)과동에너지극한제어연구단/연구단장]

<https://orcid.org/0000-0002-2573-1761>



1983년 2월: 성균관대학교 기계공학과 (공학사)
1985년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
2003년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
2014년 8월~현재: (재)과동에너지극한제어연구단 연구단장

[주 관심분야] Applications of Metamaterials and Transfer Printing, Nanoscale Measurement and Nanofabrication 등

김 상 근 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-2216-1245>



2005년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2007년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2007년~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 수석연구원

[주 관심분야] 초고주파회로 및 능동위상배열레이더 시스템 등

김 기 출 [(재)과동에너지극한제어연구단/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-2639-521X>



1999년 8월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
2009년 8월: 미국 University of Colorado Boulder 전기공학과 (공학석사)
2011년 5월: 미국 University of Colorado Boulder 전기공학과 (공학박사)
2020년 10월~현재: (재)과동에너지극한제어연구단 책임연구원

[주 관심분야] 안테나, 전자기 응용 및 모델링, 전자파 측정, 메타물질 등

최 태 인 [(재)과동에너지극한제어연구단/연구위원]

<https://orcid.org/0009-0009-4914-7023>



1974년 2월: 서울대학교 응용물리학과 (공학사)
1980년 2월: 미국 University of Florida 전기공학과 (공학석사)
1984년 2월: 미국 University of Florida 전기공학과 (공학박사)

2015년 1월~현재: (재)과동에너지극한제어연구단 연구위원

[주 관심분야] 메타물질, 메타표면, 전자파 스텔스 등