

병렬 공진 기반 주파수 선택적 Rasorber 설계

Design of a Parallel Resonance Based Frequency-Selective Rasorber

신건영 · 김영완* · 안세환* · 주지한* · 윤익재

Geonyeong Shin · Youngwan Kim* · Se-Hwan An* · Ji-Han Joo* · Ick-Jae Yoon

요약

본 논문에서는 RCS(radar cross section) 저감을 위한 rasorber를 제안하고, 최신 연구와의 성능 비교 및 특성 분석을 진행하였다. 레이돔(radome)과 흡수체(absorber)의 합성어인 rasorber는 외부의 전자기파는 흡수하면서 레이돔 기능을 이행하는 구조로, 주파수 대역에 의존적인 FSR(frequency-selective rasorber) 형태가 일반적이다. FSR은 병렬 LC 탱크 회로를 통한 35 GHz의 전자파 투과대역 특성을 갖도록 설계된 손실 공진기와 무손실 공진기로 구성된다. 무손실 공진기 전면에 위치하는 손실 공진기는 추가적인 직렬 RLC 회로에 의한 광대역 전자파 흡수대역을 갖는다. LC 탱크 회로의 공진 주파수 조절을 통해 투과대역의 중심주파수를 변화시킨다. 제안된 FSR은 투과대역 조절이 가능한 형상을 적용하여 흡수대역 종단에 투과대역이 위치한다. 제작된 FSR은 Ka-대역인 35 GHz의 투과대역을 가지면서 X-, Ku-, K-대역을 포함하는 7.8~28.5 GHz에서 80 % 이상의 흡수율을 보인다.

Abstract

In this study, we propose a rasorber in the Ka-band as a means of reducing the radar cross section (RCS) and compare its characteristics and performance with those of state-of-the-art studies. A rasorber is a combination of a radome and an absorber. It implements the radome function while absorbing external electromagnetic waves. Frequency-dependent frequency-selective rasorber (FSR) is the most commonly used type of rasorber. An FSR, comprising lossy and lossless resonators, is designed in this study to have an electromagnetic transmission characteristic at 35 GHz through a parallel LC tank circuit. The lossy resonator located in front of the lossless resonator exhibits a broadband electromagnetic absorption characteristic due to an additional series RLC circuit. The center frequency of the transmission band is tuned by adjusting the resonant frequency of the LC tank circuit. Additionally, the proposed FSR is designed with a transmission band located at the end of the absorption band. It has a transmission frequency of 35 GHz with an absorption rate of 80 % or more at 7.8~28.5 GHz including the X, Ku, and K-bands.

Key words: Frequency-Selective Surface, Radar Cross Section, Frequency-Selective Rasorber, Ka-Band, Parallel Resonance

「이 연구는 LIG 넥스원(주) 연구비의 지원으로 연구되었음.」

충남대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Chungnam National University)

*LIG 넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received November 29, 2021 ; Revised December 13, 2021 ; Accepted April 29, 2022. (ID No. 20211129-109)

· Corresponding Author: Ick-Jae Yoon (e-mail: ijyoon@cnu.ac.kr)

I. 서론

미사일은 전투기 핵심 무장의 하나로, 전장에서 아군 전투기의 자위뿐 아니라, 적기에 대한 공격 수단으로 활용된다. 미사일의 핵심 기술로는 기동성을 위한 로켓 추진 기술뿐 아니라, 사거리를 뒷받침해줄 수 있는 미사일의 눈인 탐색기 기술 확보가 필수적이다. 이에 탐색기 성능 개량용 27~40 GHz의 Ka-대역을 이용한 능동 위상 배열 안테나 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 일회성 소모품인 미사일에 적용되는 탐색기의 시스템 복잡도와 단가를 감소시키기 위한 저감된 방사소자를 활용한 배열 안테나 형상이 제안된다. 하지만 배열 형상에 따른 RCS(radar cross section)의 분석과 저감 방안이 요구된다^[1]. 특정 대역의 전자파만을 투과시키는 밴드패스 응답을 갖는 FSS (frequency-selective surface)가 적용된 레이돔은 배열 안테나 성능을 유지하면서 형상에 따른 RCS 문제를 해결하기 위한 효과적인 방안이다^[2]. 레이돔(radome)과 흡수체(absorber)의 합성어인 rasorber는 외부의 전자파를 흡수하면서 내부의 안테나 방사를 위해 부분적으로 투과대역을 갖는 구조이다^[3]. 이러한 rasorber의 흡수대역(A)과 투과대역(T) 구성은 흡수대역 중간에 투과대역이 위치하는 A-T-A와 흡수대역 종단에 투과대역이 위치하는 A-T로 나뉜다^{[4],[5]}. 본 연구에서는 FSS와 같이 주파수 선택적으로 투과 특성을 가지면서 동시에 반사파의 세기를 감소시키는 FSR(frequency-selective rasorber)를 설계하고, 그 성능을 논의한다.

II. 병렬 공진 기반 FSR

2-1 병렬 공진 기반 FSR

그림 1(a)에서 보듯이, FSS는 투과대역에서 $|S_{11}|=0$, $|S_{21}|=1$ 을 만족하고, 반사대역에서 $|S_{11}|=1$, $|S_{21}|=0$ 을 만족한다. 즉, 전자파 감쇠가 없는 전투과와 전반사 특성을 보이지만, 그림 1(b)의 FSR은 투과대역에서 $|S_{11}|=0$, $|S_{21}|=1$ 을 만족하고, 반사대역에서 $|S_{11}|<1$, $|S_{21}|=0$ 을 만족한다. 이러한 FSR은 반사대역에서 전자파가 일부분 흡수되기 때문에 FSS와 달리 세기가 감쇠된 반사파를 보인다. 감쇠된 반사파를 보이는 FSR은 FSS와 달리 monostatic RCS

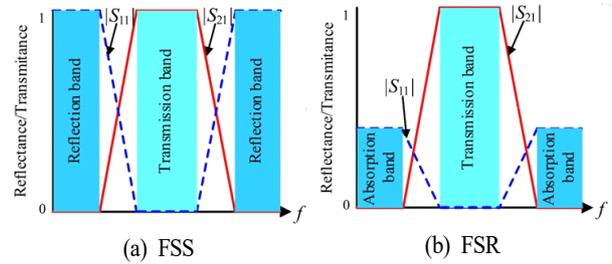


그림 1. 주파수 선택적 구조의 S-파라미터^[3]
Fig. 1. S-parameter of frequency-selective structures^[3].

저감뿐 아니라, multistatic RCS 저감에도 효과적이다^[3].

그림 2는 FSR의 등가회로로, 손실 공진기와 무손실 공진기의 두 부분으로 구성된다. 적색의 박스로 구분된 손실 공진기는 광대역 전자파 흡수대역을 위한 밴드스탑의 직렬 RL_1C_1 회로와 투과대역을 위한 밴드패스의 병렬 L_2C_2 회로로 구성된다. 청색의 박스로 구분된 무손실 공진기는 투과대역을 위한 밴드패스의 병렬 L_3C_3 회로로, 손실 공진기의 L_2C_2 회로와 동일한 공진 주파수($f_0 = 1/\sqrt{L_2C_2} = 1/\sqrt{L_3C_3}$)를 갖도록 설계된다. 공진 주파수는 FSR의 투과대역으로 LC값을 조정함으로써 투과대역의 중심주파수를 이동시킬 수 있다.

2-2 FSR 설계를 위한 손실 공진기

그림 3은 FSR 설계를 위한 제안된 손실 공진기의 단일 셀 구조와 투과 계수이다. 그림 3(a)는 투과대역을 위한 병렬 LC 성분이 추가되기 이전의 단일 셀로, 직렬 LC 회로로 표현되는 루프(loop) 형상에 전자파 흡수를 위한 저항

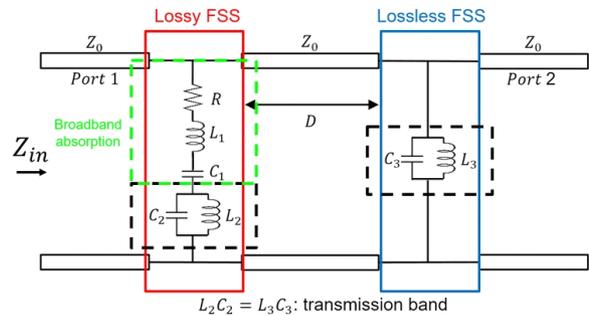
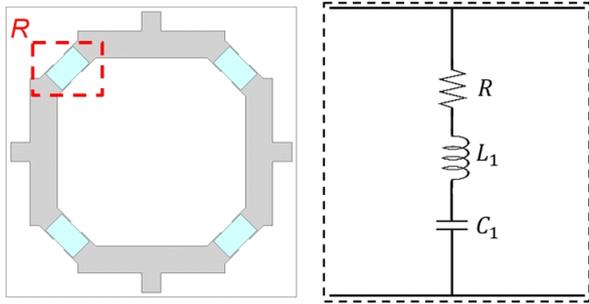
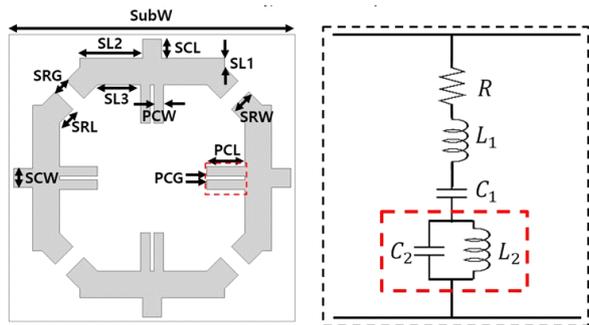


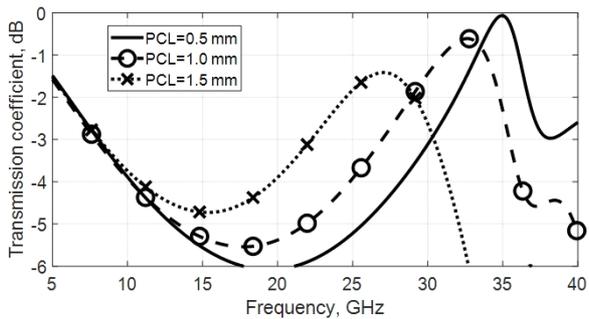
그림 2. FSR의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit model of the FSR.



(a) 전자파 흡수를 위한 직렬 RLC 구조와 등가 회로
 (a) Serial RLC geometry and equivalent circuit for electromagnetic absorption



(b) 투과대역을 위한 병렬 LC를 포함한 구조와 등가 회로
 (b) Geometry and equivalent circuit with parallel LC for transmission band



(c) 설계 변수 PCL 길이에 따른 투과 계수
 (c) Transmission coefficient according to the PCL length

그림 3. FSR 설계를 위한 제안된 손실 공진기
 Fig. 3. Proposed lossy resonator for the FSR design.

성분이 추가된 RLC 구성이다⁶⁾. 그림 3(a)에 표시된 저항 (R)은 0402 크기로, 목표하는 대역에서 일정한 저항 성분을 제공할 수 있는 칩 저항 소자이다⁷⁾.

그림 3(b)는 적색 박스로 표시된 기생 선로를 통해 투과대역을 위한 병렬 LC 성분이 추가된 손실 공진기의 단일 셀로, 상하좌우로 대칭적인 구조이다. 이러한 대칭성은 입사하는 전자파의 수직(TE)과 수평(TM) 편파를 모두 대응하기 위한 구조로, 하나의 편파에서만 동작하는 FSR보다 그 활용도가 높다⁴⁾. 그림 3(b)에 기생 선로의 길이인 PCL은 투과대역의 중심주파수를 결정하는 L_2C_2 회로에 주된 영향을 미치는 설계 변수 중 하나이다.

그림 3(c)는 설계 변수 PCL 길이에 따른 투과 계수 결과로, PCL이 0.5 mm에서 1.5 mm로 증가함에 따라 공진 주파수가 35 GHz에서 27 GHz로 이동한다. 중심주파수가 이동함에 따라 삽입손실(insertion loss)이 증가하지만, 이는 35 GHz의 투과대역에 최적화된 형상에서 PCL 설계 변수만 변화하였기 때문이다. 제안된 손실 공진기는 투과대역 조정이 용이한 형상으로, 흡수대역 종단에 투과대역이 위치하는 A-T 구성으로 설계되었다. Ka-대역인 35 GHz의 투과대역을 갖도록 설계된 그림 3(b)의 손실 공진기 설계 변수 세부 수치는 표 1과 같다.

2-3 FSR 설계를 위한 무손실 공진기

그림 4(a)는 FSR 설계를 위한 무손실 공진기의 단일 셀 구조와 세부 치수로, 손실 공진기와 같이 대칭적인 구조이다. 무손실 공진기에 이용된 구조는 교차 슬롯(crossed slot)으로 병렬 LC 회로로 표현되며, 슬롯 길이에 의해 공진 주파수가 결정된다⁸⁾. 그림 4(b)에서 보듯이, 설계된 무손실 공진기는 35 GHz의 중심주파수를 만족하면서 0.1 dB 삽입손실을 보인다.

표 1. 손실 공진체의 설계 변수

Table 1. Design parameters of the lossy resonator.

Parameter	[mm]	Parameter	[mm]
SL1	0.24	PCL	0.5
SL2	1.65	PCW	0.25
SL3	1.14	PCG	0.1
SRL	0.5	SCL	0.5
SRW	0.65	SCW	0.5
SRG	0.4	SubW	7.5

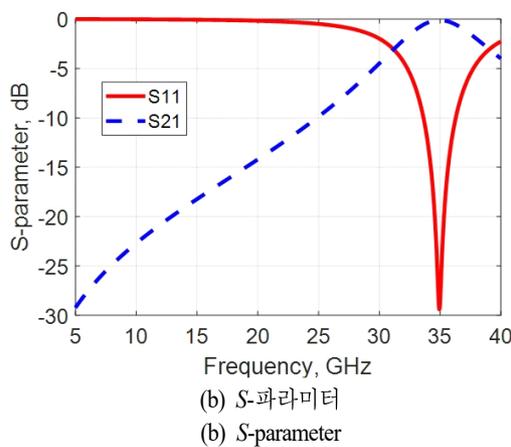
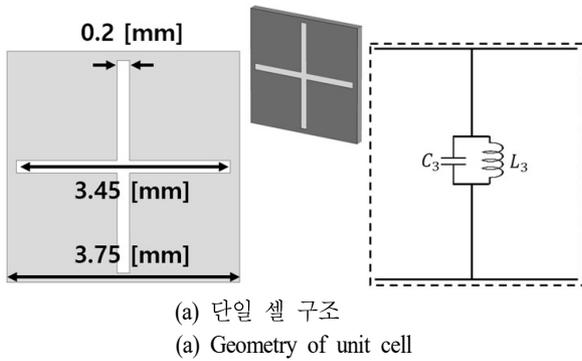


그림 4. FSR 설계를 위한 제안된 무손실 공진기
Fig. 4. Proposed lossless resonator for FSR design.

2.4 입사각 및 편파에 따른 설계된 FSR의 성능

그림 5(a)와 같이, 제안하는 FSR 단일 셀은 7.5 mm 폭인 손실 공진기 단일 셀과 3.75 mm 폭으로 설계된 무손실 공진기 단일 셀 4개로 구성된다. FSR 표면은 입사하는 전자기파의 고유 임피던스($120\pi \approx 377 \Omega$)에 준하는 입력 임피던스를 만족할 때, 전자기파를 효과적으로 흡수한다^[9]. 이러한 FSR의 입력 임피던스는 그림 2에 표시된 두 공진기 사이의 거리(D)와 손실 공진기에 적용된 저항(R)의 값에 의존적이다. 그림 5(b)와 그림 5(c)는 0° 의 각도로 입사하는 수직 편파에서의 S-파라미터 시뮬레이션 결과이며 그래프에서 보듯, 투과 계수는 설계 변수들의 변화에 둔감한 것에 반해서 반사 계수는 편차를 보인다.

R 값이 150 Ω 으로 고정된 그림 5(b)에서 보듯이, D 가 작아짐에 따라서 FSR의 반사 계수와 투과 계수가 모두 낮

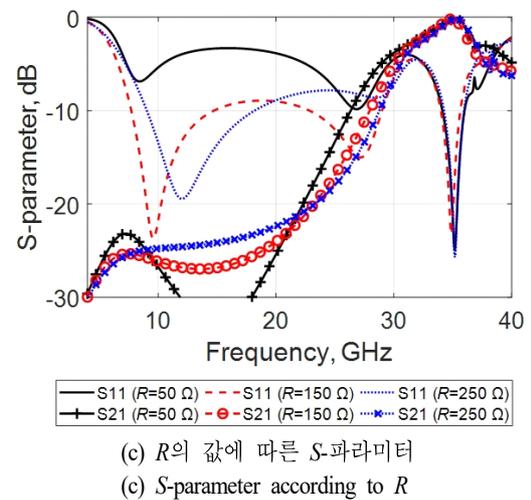
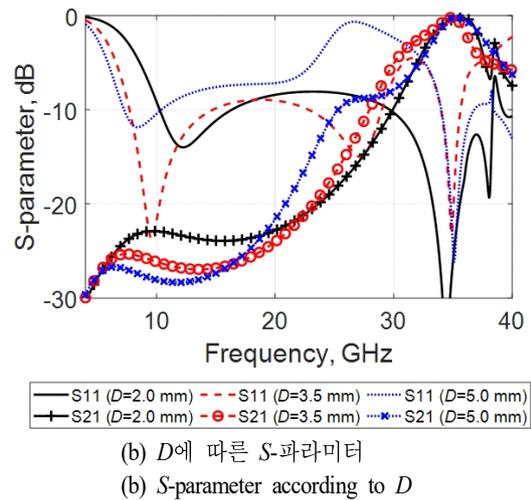
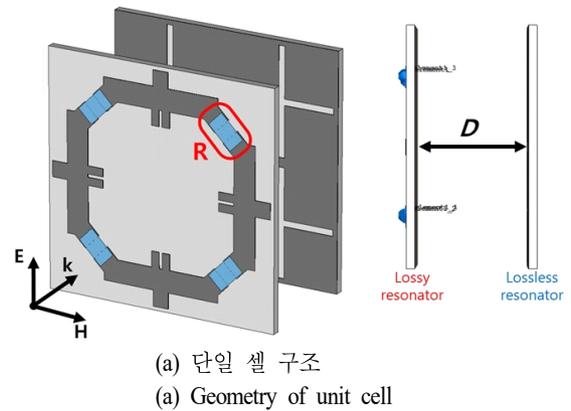
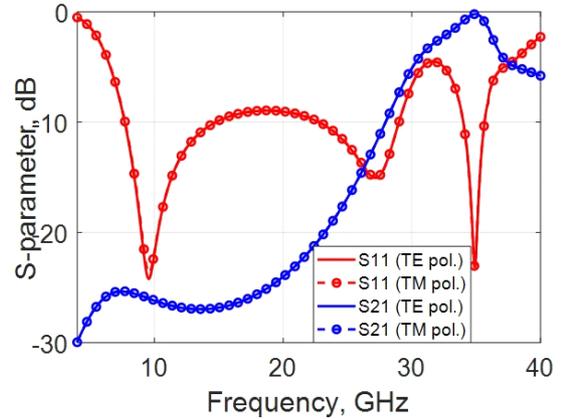


그림 5. 제안된 공진기로 구성된 FSR
Fig. 5. FSR composed of the proposed resonators.

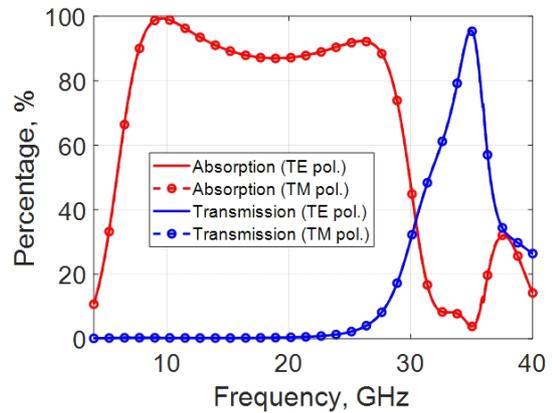
은 흡수대역은 넓어지지만 최저 동작 주파수는 상승한다. 반사 손실 7 dB 기준으로, $D=5.0$ mm인 경우는 6.5~20.8 GHz의 K-대역을 부분적으로 만족하고, $D=2.0$ mm인 경우의 최저 동작 주파수는 9.3 GHz로서 모든 X-대역을 포함하지는 못한다. 이에 반해서, $D=3.5$ mm인 경우에는 X-, Ku-, K-대역을 포함하는 7.1~28.5 GHz를 만족한다. 또한, D 가 3.5 mm로 고정되었음에도 R 의 크기에 따른 그림 5(c)에서 보듯, R 이 150 Ω 에서 벗어남에 따라 FSR의 흡수 특성은 열화된다. 이처럼 FSR의 광대역 흡수 특성은 D 와 R 에 의존적이기에, 본 연구에서는 목표하는 대역에서 수급이 용이하고 안정적으로 저항 성분을 제공할 수 있는 칩 소자로서 VISHAY사의 150 Ω 시리즈를 선정하였다^[7].

그림 6(a)는 입사각의 각도(θ)가 0°일 때, 설계된 FSR의 S-파라미터로, 그림 6(b)의 흡수율($(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \times 100$)과 투과율($|S_{21}|^2 \times 100$) 계산에 사용된다. 설계된 FSR 구조는 광대역 흡수대역과 낮은 삽입 손실을 갖도록 그림 5(a)의 R 에 150 Ω 의 저항, D 는 3.5 mm가 되도록 하였다. 그림 6(a)에서 보이듯, A-T 구성으로 설계된 FSR은 대칭적인 구조로 인해서 입사각($\theta=0^\circ$)의 편파에 무관한 산란계수 특성을 보인다. 설계된 FSR은 그림 6(b)의 그래프에서 보듯, 7.1~28.5 GHz에서 80%(7 dB 반사 손실) 이상의 흡수율을 만족하면서, 35 GHz에서 95.5%(0.2 dB 삽입 손실) 투과율을 보인다.

그림 7은 입사각과 편파에 따른 FSR의 산란 계수이며, 흑색으로 표시된 결과는 그림 6(a)와 동일한 0°의 입사각에 따른 결과이다. 그림 7(a)에서 보듯, 30°로 입사하는 TE 편파는 0°의 입사각 대비 26 GHz에서 5.5 dB로 반사 손실이 증가하지만, 이를 제외한 7.1~28.5 GHz의 광대역 흡수 특성을 유지한다. 이에 반해 TM 편파는 TE 편파에 비해서 입사각에 둔감한 응답을 보이지만, 반사 손실 7 dB 기준으로 7.1 GHz에서 8 GHz로 최저 주파수가 소폭 증가한다. 또한, 그림 7(b)와 같이, 0°의 입사각에 대한 0.2 dB 삽입 손실에서 30°의 입사각에 대한 TE 편파와 TM 편파는 각각 3 dB를 초과하지 않는 0.75 dB와 2.5 dB를 만족한다. 그림 7의 결과에서 보듯, 제안된 FSR은 입사각과 편파에 의존적인 특성을 보이지만, $\pm 30^\circ$ 입사각 내에서는 3 dB 이하의 삽입 손실을 목표하는 35 GHz에서 보이면서, X-, Ku-, K-대역을 포함하는 광대역의 흡수 특성을 유



(a) S-파라미터
(a) S-parameter



(b) 흡수율과 투과율
(b) Absorption rate and transmission rate

그림 6. 제안된 FSR의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results of the proposed FSR.

지한다.

III. 제작 및 측정 결과

3-1 제안된 FSR 시제품 제작

그림 8은 15×15 단일 셀로 구성된 FSR 시제품 구성 요소인 손실 공진기와 무손실 공진기이다. FSR을 구성하는 그림 8(a)의 손실 공진기와 그림 8(b)의 무손실 공진기 설계와 제작에 이용된 기판은 두께 0.254 mm의 Rogers RT5880이다. 그림 8(a)에서 보이듯, 손실 공진기 단일 셀에는 150 Ω 의 0402 크기의 칩 소자가, 설계와 같이 4개씩

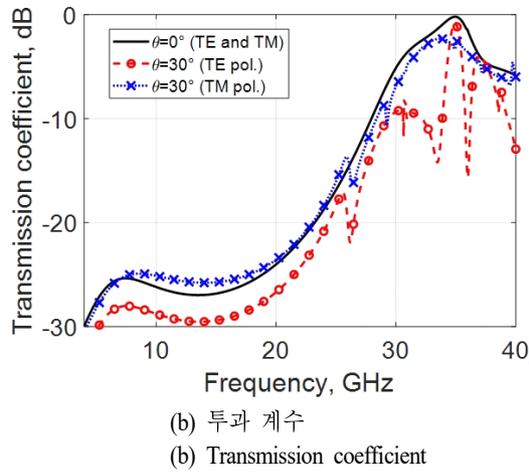
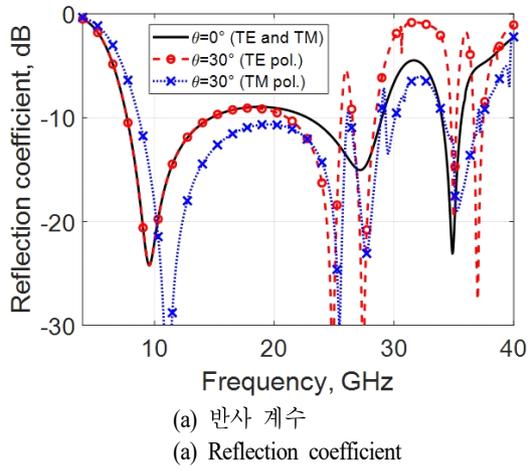
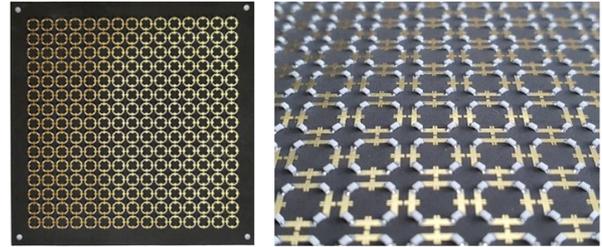


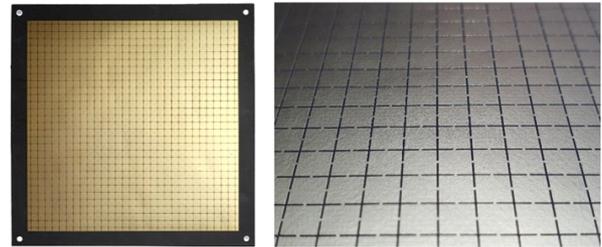
그림 7. 입사각과 편파에 따른 설계된 FSR의 산란 계수
Fig. 7. Scattering parameters of the designed FSR according to incident angle and polarization.

이용되어 함께 900개의 소자가 위치한다. 제작에 이용된 칩 저항은 VISHAY사의 초고주파 시리즈로, 저항 성분이 요구되는 설계된 흡수 대역을 포함하는 40 GHz 이상의 운용 주파수를 만족한다.

그림 9에서 보듯, 제작된 두 공진기 사이에 설계 변수 D 와 같은 3.5 mm 두께의 스티로폼을 추가하고, 이를 고정하기 위해서 네 모퉁이에 나일론 나사가 위치한다. 고정을 위한 나일론 나사를 포함하는 FSR 시제품의 겉면적은 $130 \times 130 \text{ mm}^2$ 이고, 15×15 배열의 FSR의 면적은 $112.5 \times 112.5 \text{ mm}^2$ 이다.



(a) 15×15 단일 셀로 구성된 손실 공진기
(a) Lossy resonator with 15×15 unit cells



(b) 30×30 단일 셀로 구성된 무손실 공진기
(b) Lossless resonator with 30×30 unit cells

그림 8. FSR 시제품 구성 요소
Fig. 8. FSR prototype components.

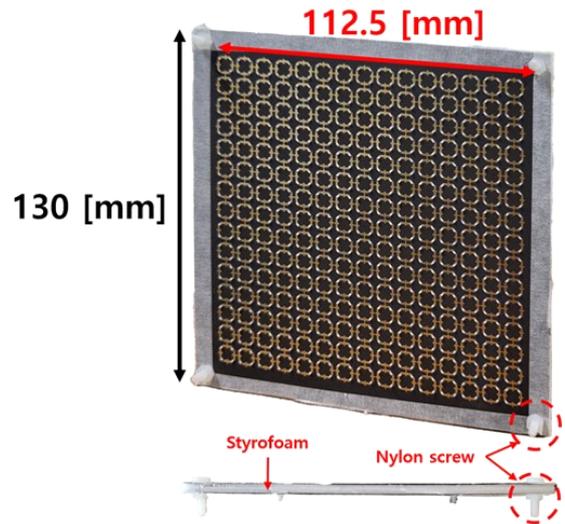
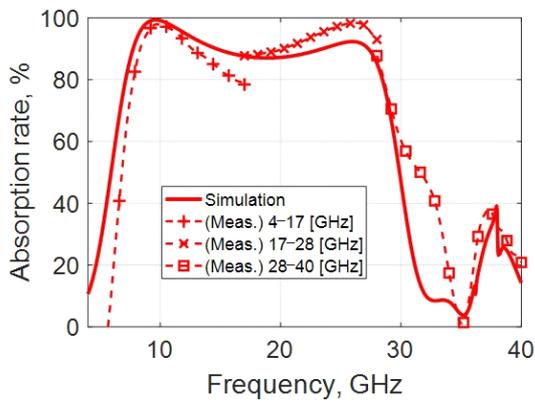


그림 9. 나일론 나사와 스티로폼으로 고정된 15×15 단일 셀로 구성된 FSR 시제품
Fig. 9. FSR prototype consisting of 15×15 unit cells fixed with nylon screw and styrofoam.

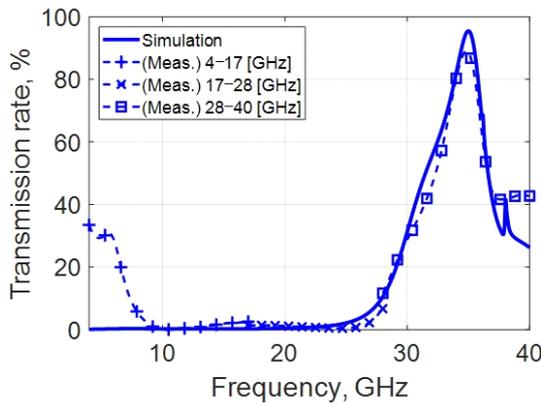
3-2 측정 결과 및 비교

그림 10은 제안된 FSR의 시뮬레이션과 측정된 흡수율 및 투과율 결과이다. FSR 시제품 측정 시, 각각 4~17 GHz, 17~28 GHz, 28~40 GHz의 대역으로 구분하여 실험되었다. 그림 10의 흡수율과 투과율 측정 결과에서 보듯, X-대역보다 낮은 8 GHz 이하에서 설계 대비 열화된 측정 성능을 보인다. 이는 제작된 FSR 시제품의 면적이 8 GHz 기준으로, $3 \lambda \times 3 \lambda (112.5 \times 112.5 \text{ mm}^2)$ 로 전기적으로 충분히 크게 제작되지 않았기 때문이다.

그림 10(a)의 흡수율 결과에서 보듯, 7.1~28.5 GHz의



(a) 흡수율
(a) Absorption rate



(b) 투과율
(b) Transmission rate

그림 10. 제안된 FSR 구조의 시뮬레이션과 측정 결과
Fig. 10. Simulation and measurement results of the proposed FSR.

대역에서 80 % 이상의 흡수율을 만족하도록 설계된 FSR은 비록 17 GHz에서 78 %의 흡수율을 보이지만, 이를 제외한 7.8~28.5 GHz의 대역에서 80 % 이상의 흡수율을 보인다. 또한, 그림 10(b)의 투과율 결과에서 보듯, 목표하는 35 GHz에서 95.5 % (0.2 dB 삽입 손실)의 투과율을 만족하도록 설계된 FSR은 감소된 90 % (0.5 dB 삽입 손실)의 투과율을 보인다.

표 2는 본 연구에서 제안한 A-T 구성의 FSR과, 선행 연구된 병렬 공진 기반 FSR의 비교 결과이다. 표 2에서 보듯, 기존 연구들의 FSR은 X-대역인 10 GHz 이하의 흡수대역과 투과대역을 갖는다. 이러한 FSR의 운용 대역을 Ka-대역으로 높이기 위해서는, 저항 성분을 운용 대역에서 제공할 수 있는 고주파 칩 소자와 PCB 공정 해상력을 만족하는 단순화된 단일 셀 형상이 요구된다. 이를 만족하는 Ka-대역 투과 특성을 갖는 A-T 구성 FSR은 35 GHz에서의 투과 특성을 만족하면서 기존 연구들보다 넓은 3.65:1의 흡수대역을 보인다.

IV. 결론

본 연구에서는 배열 안테나 형상에 따른 RCS 저감 문제를 해결하기 위한 FSR 구조를 제안하였다. 제안된 FSR은 10 GHz 이하의 대역에서 주로 연구되어 온 기존 사례에 비해서 높은 Ka-대역인 35 GHz의 투과대역을 만족하

표 2. A-T 구성의 FSR 비교 표
Table 2. A-T composition FSR comparison table.

Ref.	Transmission band /insertion loss	Polarization	Absorption bandwidth (>80 %)
[4]	9.5 GHz/0.3 dB	Dual	2.8~9.8 GHz (3.5:1)
[10]	9.3 GHz/0.5 dB	Single	2.5~8.3 GHz (3.3:1)
[11]	9.45 GHz/0.15 dB	Single	3~8.3 GHz (2.8:1)
[12]	5.6 GHz/0.2 dB	Single	2.6~6.6 GHz (2.5:1)
This work	35 GHz/0.5 dB	Dual	7.8~28.5 GHz (3.65:1)

면서 X-, Ku-, K-대역을 포함하는 7.1~28.5 GHz의 대역에서 80 % 이상의 흡수율을 보이도록 설계되었다. 초고주파 칩 저항과 제작 공정을 고려한 FSR 시제는 35 GHz에서 0.5 dB 삽입 손실을 만족하면서, 7.8~28.5 GHz의 대역에서 80 % 이상의 흡수율을 갖는다. 제안된 FSR은 Ka-대역 능동 위상 배열 시스템과 같이 높아져 가는 근래의 운용 주파수에 맞추어, 내부의 안테나 성능을 유지하면서 RCS를 저감하는 방안이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] H. Chen, X. Hou, and L. Deng, "Design of frequency-selective surface radome for a planar slotted waveguide antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1231-1233, 2009.
- [2] R. Mittra, C. H. Chan, and T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces: A review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 12, pp. 1593-1615, Dec. 1988.
- [3] Z. Shen, J. Wang, and B. Li, "3-D frequency selective rasorber: Concept, analysis, and design," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 10, pp. 3087-3096, Oct. 2016.
- [4] Q. Chen, S. Yang, J. Bai, and Y. Fu, "Design absorptive/transmissive frequency-selective surface based on parallel resonance," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 9, pp. 4897-4902, Sep. 2017.
- [5] M. Qu, S. Sun, L. Deng, and S. Li, "Design of a frequency-selective rasorber based on notch structure," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 3704-3711, 2019.
- [6] D. Ferreira, R. F. S. Caldeirinha, I. Cuiñas, and T. R. Fernandes, "Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 9, pp. 3947-3955, Sep. 2015.
- [7] VISHAY, "Thin film chip resistor," 2022. Available: <https://www.vishay.com/docs/53014/ch-cha.pdf>
- [8] H. H. Chou, G. J. Ke, "Narrow bandpass frequency selective surface with high level of angular stability at Ka-band," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 4, pp. 361-364, Apr. 2021.
- [9] G. Kim, S. Kim, and B. Lee, "Design of wideband microwave absorbers using reactive salisbury screens with maximum flat reflection," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 2, pp. 71-81, Apr. 2019.
- [10] Q. Chen, L. Chen, J. Bai, and Y. Q. Fu, "Design of absorptive frequency selective surface with good transmission at high frequency," *Electronic Letters*, vol. 51, no. 12, pp. 885-886, Jun. 2015.
- [11] Q. Chen, L. Liu, L. Chen, J. Bai, and Y. Fu, "Absorptive frequency selective surface using parallel LC resonance," *Electronic Letters*, vol. 52, no. 6, pp. 418-419, Mar. 2016.
- [12] Z. Wang, Q. Zeng, J. Fu, W. Chen, B. Lv, and M. Song, et al, "A high-transmittance frequency-selective rasorber based on dipole arrays," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31367-31374, 2018.

신 건 영 [충남대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5161-8685>



2017년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2019년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학석사)
2019년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 안테나, 전자파이론

주 지 한 [LIG 넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0643-6246>



2002년 8월: 충북대학교 전파공학과 (공학사)
2004년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2008년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
2008년 7월~현재: LIGNex1 수석연구원
[주 관심분야] 초고주파 탐색기, 레이더 시스템

김 영 완 [LIG 넥스원(주)/수석연구원]

<http://orcid.org/0000-0001-6404-8335>



2005년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2007년 2월~현재: LIGNex1 수석연구원
[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 설계, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계

윤 익 재 [충남대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9623-2612>



2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
2005년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2012년 8월: University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2005년 7월~2008년 8월: 삼성종합기술원

연구원
2012년 9월~2013년 12월: Technical University of Denmark 전기공학과 Electromagnetic Systems group 박사후연구원
2013년 1월~2014년 8월: Technical University of Denmark 전기공학과 조교수
2014년 9월~현재: 충남대학교 전기공학과 부교수
[주 관심분야] 안테나, 초고주파회로, 전자파이론

안 세 환 [LIG 넥스원(주)/수석연구원]

<http://orcid.org/0000-0002-8955-9067>



2004년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)
2006년 2월: 숭실대학교 정보통신공과 (공학석사)
2007년 1월~현재: LIGNex1 수석연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기