

투명 소재 기반 고선택도 주파수 선택적 표면 설계

Optically Transparent High-Selectivity Frequency-Selective Surface

방 승 우 · 오 정 석

Seungwoo Bang · Jungsuek Oh

요 약

본 논문에서는 단일 투명 기판 양면에 금속 패턴을 형성한 2-metal-layer 기반의 고선택도 주파수 선택적 표면(FSS, frequency selective surface)을 제안한다. 기존의 고선택도 FSS는 고선택도 응답을 구현하기 위해 다층 적층 구조나 비아를 주로 사용하였으나, 유리나 퀴츠와 같은 투명 기판에서는 이러한 구조 구현에 제약이 발생한다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 얇은 퀴츠 기판 양면에 형성된 공진기 사이의 전기적 및 자기적 커플링을 활용하여 단일 기판 구조에서도 높은 선택도의 대역통과 응답을 구현하였다. 제안된 구조는 상·하단 금속 패턴의 조합을 통해 통과대역 양측의 대역 저지 특성을 형성하며, 레이어 간 커플링 효과를 고려한 등가 회로 모델을 통해 그 동작 원리를 해석하였다. 제안하는 FSS는 0.7 mm 두께의 퀴츠 기판 위에 설계되어 약 87.1 %의 광학적 투명도를 보이며, 14×14 배열의 시제품 측정을 통해 성능을 검증하였다. 그 결과, 15.7 GHz에서 -1 dB 미만의 투과 손실 특성, 약 8.3 %의 3 dB 대역폭과 통과대역 외 10 dB 이상의 대역 차단 특성을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a high-selectivity frequency-selective surface (FSS) based on a single transparent substrate with double-sided metallic patterns. Conventional high-selectivity FSSs have primarily relied on multilayer stacked structures or vias to realize highly selective responses. However, such configurations are difficult to implement on transparent substrates such as glass or quartz. To address this limitation, the proposed design exploits the electric and magnetic coupling between resonators formed on both sides of a thin quartz substrate to achieve a highly selective bandpass response even with a single-substrate configuration. The proposed structure produces bandstop characteristics on both sides of the passband through the combination of top and bottom metallic patterns. Its operating principle is explained using an equivalent circuit model that considers interlayer coupling effects. The proposed FSS was designed on a 0.7-mm-thick quartz substrate and exhibited an optical transparency of approximately 87.1 %. Its performance was validated through measurements using a 14×14 array prototype. The results showed an insertion loss of less than 1 dB at 15.7 GHz, a 3 dB bandwidth of approximately 8.3 %, and an out-of-band rejection level greater than 10 dB.

Key words: Frequency Selective Surface (FSS), Spatial Filter, Transparent Surface, 6G Communication, High-Selectivity

「이 연구는 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업(No.915104201).」
서울대학교 전기·정보공학부 뉴미디어통신공동연구소(Institute of New Media and Communications, Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)
· Manuscript received March 13, 2026 ; Revised April 4, 2026 ; Accepted June 19, 2026. (ID No. 20260313-017)
· Corresponding Author: Jungsuek Oh (e-mail: jungsuek@snu.ac.kr)

I. 서 론

무선통신의 세대가 진화할수록 기존에 사용되지 않던 새로운 주파수 대역을 탐색하는 활동과 더불어, 기존 할당된 주파수 대역을 재활용하는 등 제한된 주파수 자원을 사용하여 새로운 무선통신 서비스를 제공하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다^{[1][2]}. 주파수를 더욱 촘촘하게 할당하는 과정에서, 할당받은 주파수 대역에 인접한 사용자 간의 간섭을 최소화하는 것이 중요하다. 특히, 6G 주파수 대역의 국제 표준으로 검토되고 있는 X 대역의 경우 기존 군에서 레이다 운용에 활용하고 있으므로 사용자 간의 간섭을 최소화하는 방안을 확보해야 한다. 이를 위해 통상적으로는 협대역에서 동작하며 주파수 선택도가 높은 SAW/BAW 필터, 혹은 Cavity 공진기 기반의 세라믹 필터를 사용한다^{[3][4]}. 그러나 SAW/BAW 필터의 경우 사용 가능한 주파수가 제한되어 고주파에서 운용하기 어렵다는 단점이 있으며, 세라믹 필터의 경우 MIMO 환경에서 운용 시 회로의 크기와 무게가 급증한다는 단점이 존재한다. 또한, 특정 주파수 대역을 위한 필터 기반 하드웨어는 운용 주파수가 바뀔 경우 하드웨어를 분해하여 주파수 조정 후 제조립하는 과정을 거치므로 재사용 과정이 번거롭다. 파장보다 작은 크기의 구조체를 배열하여 특정 주파수 신호만을 투과 및 반사할 수 있는 주파수 선택적 표면(FSS, frequency selective surface)는 높은 주파수 대역에서 동작하고, 가벼운 무게와 평면형이라는 구조적인 장점, 그리고 하드웨어의 분해 없이 부품 교체가 가능하다는 특징으로 인해 많이 연구되고 있는 RF 하드웨어이다^{[5]-[9]}. 특히, 기존 PCB 유전체 기판 외에도 얇은 박막, 반도체 웨이퍼, 유리와 같은 물질을 기판으로 사용하여 유연하거나 투명한 기능을 포함하는 다기능 하드웨어로써 많은 연구가 최근 보고되고 있으며, 그중 대면적의 FSS를 투명하게 제작하여 빌딩 등 제품의 투명도가 필요한 분야에서 큰 관심을 받고 있다^{[10]-[13]}. 그러나 투명한 소재인 유리나 쿼츠(quartz) 기판을 통해 고선택도 특성을 가진 FSS를 설계할 경우, FSS의 공진 차수를 높이기 위해 주로 사용하는 기판 적층 및 비아(via) 구조 사용이 제한되어 설계에 어려움을 겪고 있다.

본 논문에서는 앞서 말한 문제를 해결하기 위해, 단일

투명 기판 양면에 금속 패턴을 형성한 2-metal-layer FSS 구조를 제안하였다. 제안 구조는 다층 기판 적층이나 비아를 사용하지 않는다는 점에서 단일 기판 기반 구조이며, 얇은 쿼츠 기판 양면에 형성된 금속 레이어 간 전기적 및 자기적 커플링을 활용하여 FSS의 주파수 응답 차수를 높인다. 따라서 제안한 구조는 투명 기판 환경에서 제작 복잡도를 낮추면서도 높은 선택도의 대역통과 응답을 구현할 수 있다.

II. FSS 설계 및 측정

2-1 FSS 단위 셀 구조 및 투명화

그림 1은 제안하는 FSS 단위셀의 형상을 보여준다. 비유전율 5.0, 손실 탄젠트 0.003의 투명한 쿼츠 기판 양면이 도금 처리되어 금속층을 쌓게 되며, 단위셀 중심에 동일한 길이의 사각 패치가 위치한다. 사각 패치 주위에는 서로 다른 길이를 가진 금속 막대가 패치를 둘러싸고 있으며, 이를 주기적으로 배열하면 상단 면은 십자 형태의 공진기가, 하단 면은 서로 수직인 두 종류의 일자 막대가 형성된다. 표 1은 제안하는 FSS 단위셀의 설계 파라미터

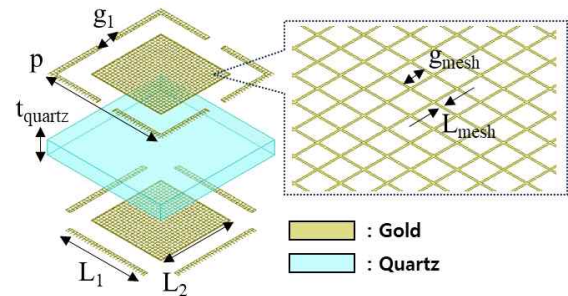


그림 1. 제안하는 투명 FSS 단위셀 구조
Fig. 1. Exploded view of the proposed unit cell.

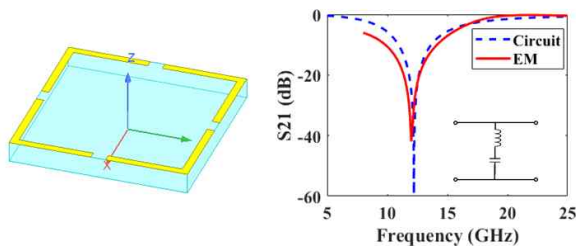
표 1. 제안하는 투명 FSS의 설계 파라미터
Table 1. Design parameters of the proposed FSS.

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (mm)
p	6.0	t_{quartz}	0.7
L_1	4	L_2	3.8
g_1	0.5	$g_{\text{mesh}} / L_{\text{mesh}}$	0.14/0.01

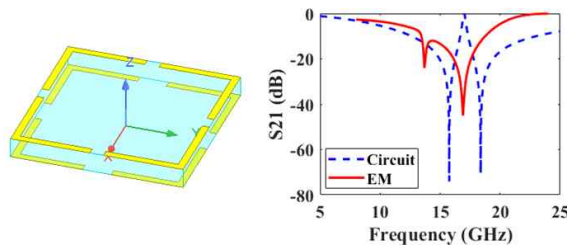
를 나타낸다. 또한 실제 제작 시 FSS 구조물이 육안으로 투명하게 보이기 위한 대표적인 광학적 투명도 확보 기법인 메시-그리드(mesh-grid) 기법을 적용하여 FSS의 투명도를 확보하였다. 메시 형상의 두께는 $10\ \mu\text{m}$, 간격은 $140\ \mu\text{m}$ 로 약 87.1 %의 투명도를 형성한다^[11].

2.2 단위 셀 동작 원리

FSS의 구조를 등가 회로로 구성할 경우, 자유공간에서 자유공간으로 신호가 전달되는 2 포트 네트워크에서 각 금속 레이어가 공진기로서 신호 전파 방향에 병렬로 연결된다. 따라서 각 레이어의 형상에 따라 커패시터, 인덕터, 직렬 LC, 병렬 LC로 모델링할 수 있다. 그림 2(a)는 대표적인 대역 저지 공진기인 직렬 LC 공진기를 FSS로 모델링한 형상과 FSS의 전자기(EM, electromagnetic) 시뮬레이션 결과를 등가 회로(ECM, equivalent circuit model)



(a) 대역 저지 FSS의 EM 및 회로 시뮬레이션 결과
(a) Simulation results of EM/equivalent circuit for bandstop type FSS



(b) 두 종류의 대역 저지 FSS가 기판 양면에 있을 때 EM 및 회로 시뮬레이션 결과
(b) Simulation results of EM/equivalent circuit for cascaded bandstop type FSS

그림 2. 대역 저지 FSS의 EM 및 회로 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulation results of EM/equivalent circuit for bandstop type FSS.

시뮬레이션에 비교한 결과이다.

그러나 그림 2(b)처럼, 서로 다른 공진 주파수를 가진 두 직렬 LC 공진기를 얇은 기판 사이에 나란하게 배열할 경우, EM 시뮬레이션과 ECM 시뮬레이션의 결과에는 차이가 발생한다. 파장보다 짧은 두께의 기판을 사이에 둔 두 금속 레이어 사이에는 금속과 금속 사이에 강한 전기장이 형성되므로, 전기적 커플링에 의한 효과인 직렬 C 성분이 등가 회로에 고려돼야 한다. 또한, 금속 레이어에 유도되는 전류 분포로 발생하는 레이어 간 커플링에 의한 상호 인덕턴스 또한 등가 회로에 고려돼야 한다. 그림 3은 단위 셀 상단에 수직인 방향으로 전자기파가 입사되었을 때 두 금속 레이어 사이에 형성되는 전기장의 세기를 보여준다. 사각형 모양의 패치 공진기의 경우, 주기적으로 배열될 때 상하좌우에 있는 패치 사이에 형성되는 전기장으로 인해 대표적인 병렬 C 회로로 모델링된다^[14]. 그러나 얇은 기판 양면에 패치가 함께 있을 경우 두 패치 사이 또한 그림과 같이 강한 전기장이 형성되기 때문에, 등가 회로 모델링 시 직렬 C 소자를 추가해줘야 한다^[15]. 따라서, 기존 얇은 기판에서는 구현이 어려웠던 FSS의 주파수 응답을 두 금속 레이어 간의 상호작용을 적절하게 활용하여 구현할 수 있음을 보여준다.

그림 4와 표 2는 제안하는 FSS 구조의 등가 회로 모델과 각 소자의 파라미터를 보여준다. 각 레이어는 대표적인 이중 편파 직렬 공진기인 십자가 형상의 공진기와 막대 형상의 공진기를 사용하여 투과 대역 양쪽에 대역 저

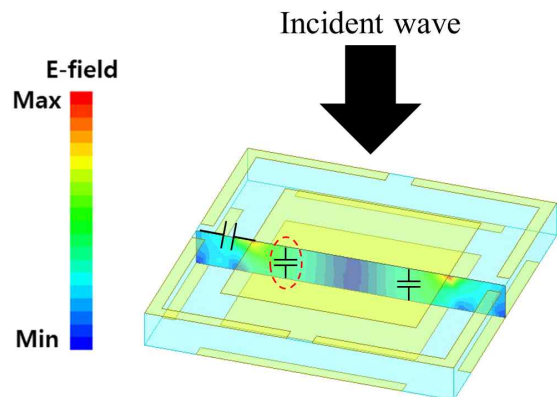


그림 3. 제안하는 FSS에 형성되는 전기장 분포
Fig. 3. E-field distribution of the proposed FSS.

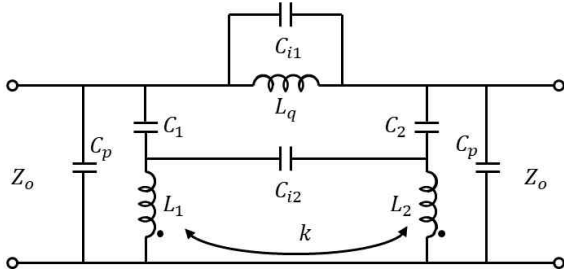


그림 4. 제안하는 투명 FSS의 등가 회로 모델
Fig. 4. ECM of the proposed FSS.

표 2. 등가 회로 모델의 파라미터

Table 2. Design parameters of the equivalent circuit.

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
Zo	377 Ω	Cp	11.9 fF	C1	170.9 fF
C2	2.7 fF	Ci1	545 fF	Ci2	27.6 fF
L1	0.39 nH	L2	2.2 nH	Lq	0.17 nH
k	0.42	-	-	-	-

지 응답을 형성하였고, 기판 양면에 있는 패치 공진기를 통해 저주파 통과 응답을 형성하여 대역 통과 응답을 구현하였다. 두 패치 사이의 전기적 커플링을 고려하여 직렬 커패시턴스 C_{i1} 을 모델링했으며, 직렬 공진기에 의해 유도되는 전기장과 자기장 간의 상호작용은 직렬 커패시턴스 C_2 와 상호 인덕턴스 계수 k 로 모델링되었다. 두 직렬 공진기의 길이는 둘 간의 offset을 조절하는 방식을 통해 커플링을 조절하였다. 그림 5는 제안하는 FSS 구조의

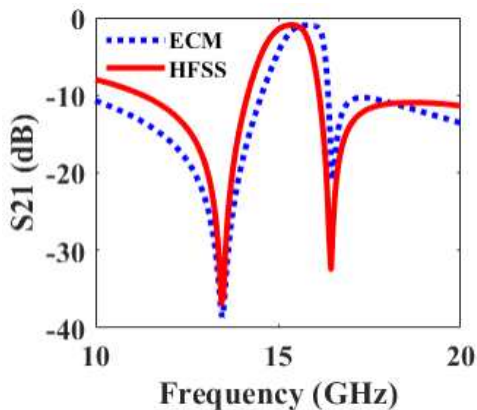


그림 5. 제안하는 FSS의 EM/ECM 시뮬레이션 결과
Fig. 5. EM/ECM simulation results of the proposed FSS.

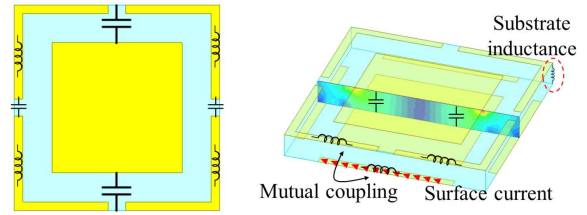


그림 6. 제안한 FSS 단위셀의 등가회로 모델 및 물리적 동작 원리

Fig. 6. Equivalent circuit model and physical operating principle of the proposed FSS unit cell.

EM 및 ECM 시뮬레이션 결과를 비교하여 보여준다. 시뮬레이션 결과 둘 간의 공진 주파수가 유사함을 보이는 것을 통해, 두 금속 레이어 간 커플링을 등가 회로로 모델링하는 방식이 실제 EM 시뮬레이션 상황과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 제안한 FSS 단위셀의 등가회로 모델과 각 공진 성분의 물리적 의미를 나타낸다. 제안 구조의 등가회로는 기존 FSS 등가회로 모델링 방법을 기반으로 구성하였다^{[14],[15]}. 단위셀 중심의 패치 구조는 주기 배열에서 인접한 패치 사이에 전기장을 저장하므로 병렬 커패시턴스 C_p 로 모델링된다. 또한 상단과 하단에 형성된 금속 스트립은 특정 주파수에서 대역저지 응답을 발생시키는 직렬 LC 공진기로 동작하므로, 각각 L_1 - C_1 및 L_2 - C_2 의 직렬 공진 성분으로 모델링하였다. 이때 직렬 LC 공진기의 초기값은 EM 시뮬레이션에서 확인한 transmission zero 주파수를 이용하여 설정하였다. 또한 쿼츠 기판은 전자파 진행 방향에서 등가적인 기판 인덕턴스 L_q 로 반영하였다.

제안 구조는 얇은 쿼츠 기판 양면에 금속 패턴이 형성된 2-metal-layer 구조이므로, 단일 금속층 FSS와 달리 층간 커플링 성분을 함께 고려해야 한다. 그림 3에서 확인할 수 있듯이, 양면에 위치한 패치 사이에는 강한 전기장이 형성되며, 이는 기본적인 병렬 커패시턴스 외에 층간 직렬 커패시턴스 C_{i1} 로 모델링된다. 또한 상-하단 스트립 공진기에 흐르는 표면 전류에 의해 두 공진기 사이에 자기적 결합이 발생하므로, 이를 상호 인덕턴스 결합 계수 k 로 반영하였다. 스트립 공진기 사이의 추가적인 전기적 결합은 C_{i2} 로 모델링하였다. 따라서 표 2에 제시된 소자

값은 각 공진 구조의 물리적 동작을 기반으로 초기값을 설정한 후, 통과대역 중심 주파수, 양측 transmission zero, 대역저지 응답이 EM 시뮬레이션 결과와 일치하도록 ADS 기반 parametric study를 통해 도출한 유효 등가회로 파라미터이다.

2.3 제작 및 측정

그림 7은 제안하는 FSS를 실제로 제작한 샘플의 형상을 보여준다. 앞서 말했듯 약 87.1 %의 광학적 투명도를 보이므로 FSS의 형상이 육안상 투명하게 보이는 것을 확인할 수 있다. FSS 단위셀은 EM 시뮬레이션 시 단위셀이 무한하게 배열되어 있는 평면임을 가정하고 시뮬레이션을 한다. 따라서 실제 제작 시 이를 모사할 수 있을 만큼의 충분히 큰 개수의 배열로 FSS를 설계해야 한다. 제안하는 샘플은 측정 편의성을 고려하여 총 84×84 mm 크기의 14×14 배열로 구성하여 제작하였다.

그림 8(a)는 기판 비유전율 변화에 따른 제안한 mesh-grid 형태의 투명 FSS의 주파수 응답 민감도 분석 결과를 나타낸다. 초기 EM 시뮬레이션에서는 제조사 데이터시트에서 제공된 쿼츠 기판의 비유전율 5.27을 사용하였다. 그러나 해당 값은 1 kHz에서 제공된 저주파 기준의 물성값이며, 본 연구에서 별도로 확인한 결과 15 GHz 대역에서는 쿼츠 기판의 비유전율이 약 5.0으로 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 유전체는 주파수가 증가함에 따라 비유전율이 감소하는 분산 특성을 보이므로, 이

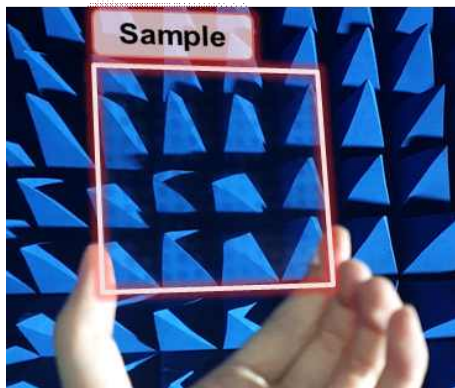
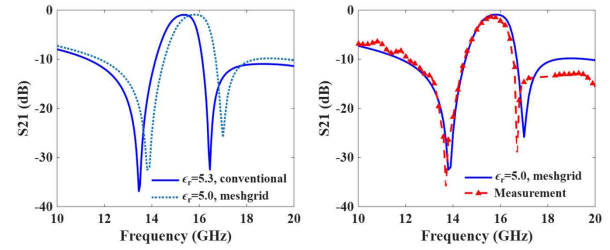


그림 7. 제작된 투명 FSS의 형상

Fig. 7. Photograph of the proposed transparent FSS.



(a) 기판 비유전율 변화에 따른 시뮬레이션 결과

(a) Simulated results according to the substrate permittivity

(b) 보정된 시뮬레이션 결과와 측정 결과 비교

(b) Comparison between the corrected simulation and measurement results

그림 8. 제안한 FSS의 기판 유전율 보정 및 측정 결과 검증

Fig. 8. Substrate permittivity correction and measurement validation of the proposed FSS.

러한 유전율 변화는 고주파 대역에서 자연스러운 물성 변화로 해석할 수 있다. 그림 8(a)에서 확인할 수 있듯이, 5.27의 비유전율을 사용한 경우 통과대역과 대역저지 주파수가 측정 결과보다 낮은 주파수에 형성되는 반면, 5.0의 비유전율을 적용하면 전체 주파수 응답이 측정 결과와 일치하는 방향으로 이동한다. 또한, mesh-grid 구조는 광학적 투명도 확보를 위해 적용되었으나 기존 연구에서와 같이 주요 표면 전류 경로를 보존하도록 설계할 경우 RF 응답의 변화는 크지 않다^{[11],[12]}.

그림 8(b)는 보정된 비유전율을 반영한 EM 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 보정 후 시뮬레이션 결과는 측정된 통과대역 및 양측 대역저지 응답과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 기존 시뮬레이션과 측정 결과 사이에서 관찰된 약 400 MHz의 주파수 편차는 메쉬 그리드 선포 오차나 일반적인 제작 오차보다는, 고주파 대역에서의 실제 기판 유전율 변화가 지배적인 원인인 것으로 분석된다. 측정 결과, 제안한 FSS는 6G upper-mid 대역으로 고려되는 15.8 GHz에서 최대 투과 특성을 보였으며, 이때의 투과 손실은 0.9 dB이다. 또한, 3 dB 대역폭은 약 8.3 %이고, 통과대역 외 영역에서는 10 dB 이상의 대역 차단 특성이 확인되었다.

그림 9는 입사각 변화에 따른 제안한 FSS의 투과도 응답을 나타낸다. TE 및 TM 편파에 대해 입사각이 증가하

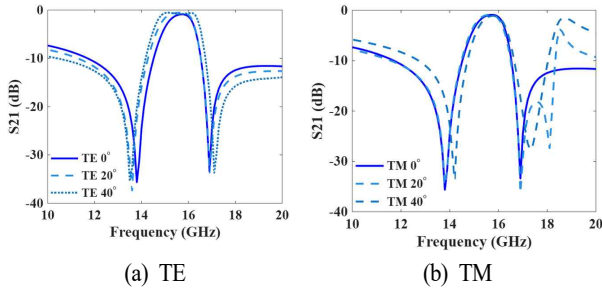


그림 9. 입사각 변화에 따른 제안한 FSS의 투과도 시뮬레이션 결과

Fig. 9. Simulated transmittance of the proposed FSS under various incident angles.

더라도 15.8 GHz 부근의 통과대역이 유지된다. TE 편파의 경우, 입사각 변화에 따른 통과대역의 주파수 이동과 투과 손실 변화가 비교적 작게 나타난다. TM 편파의 경우, 입사각이 증가함에 따라 고주파 측 대역 저지 응답에 일부 변화가 발생하지만, 중심 통과대역과 인접 대역 차단 특성은 유지된다. 이를 통해 제안한 FSS가 다양한 입사 조건에서도 안정적인 대역통과 특성을 제공할 수 있음을 확인하였다.

표 3은 제안한 FSS와 기존 투명 소재 기반 FSS의 성능을 비교한 것이다. 비교를 위해 본 논문에서는 FSS의 주

표 3. 기존 투명 FSS와 제안 구조의 성능 비교

Table 3. Performance comparison with previously reported transparent FSSs.

Feature	[12]	[13]	This work
Freq. (GHz)	27	28	15.8
IL (dB)	0.07	2.41	0.9
Incident angle (deg)	45	50	40
# of metal layers	1	2	2
Type of substrates	Thin film	COC*/Quartz composite	Quartz
OT (%)	84	58.84	87.1
FoM (%)	32**	46**	47.0

*Cyclic olefin copolymer.

**Estimated from the figures in the paper.

파수 선택도를 정량적으로 평가하는 FoM(figure of merit)을 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\text{FoM} = \frac{3 \text{ dB BW}}{20 \text{ dB BW}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

여기서 3 dB BW는 통과대역에서 투과도가 -3 dB 이상으로 유지되는 대역폭을 의미하며, 20 dB BW는 통과대역 양측에서 투과도가 -20 dB가 되는 두 주파수 사이의 대역폭을 의미한다. 따라서 FoM은 3 dB 통과대역이 20 dB 기준 대역폭과 비교해 얼마나 넓게 유지되는지를 나타내며, 값이 100 %에 가까울수록 필터 응답이 이상적인 사각형 응답에 가깝고 주파수 선택도가 높다는 것을 의미한다.

표 3에서 확인할 수 있듯이, 참고문헌 [12]의 S-FSS는 0.07 dB의 매우 낮은 투과 손실과 84 %의 높은 광학적 투명도를 보이지만, 넓은 통과대역과 완전한 대역 전이 특성으로 인해 FoM은 상대적으로 낮다. 참고문헌 [13]의 meshed FSS는 제안 구조와 유사한 FoM을 보이지만, 광학적 투명도가 58.84 %로 낮고 투과 손실이 2.41 dB로 비교적 크다. 반면, 제안한 FSS는 87.1 %의 가장 높은 광학적 투명도를 유지하면서도 0.9 dB의 낮은 투과 손실과 높은 FoM을 동시에 달성하였다. 특히, 제안 구조는 다층 적층이나 비아를 사용하지 않고 단일 투명 기판 양면의 금속 패턴 간 커플링을 활용하므로, 투명 기판 환경에서 제작 복잡도를 낮추면서도 높은 선택도의 대역통과 응답을 구현할 수 있다. 따라서 제안한 FSS는 기존 투명 FSS와 비교하여 구조적 단순성, 광학적 투명도, 투과 손실, 선택도 측면에서 균형 잡힌 성능을 보인다.

III. 결 론

본 논문에서는 적층과 비아 구조물 적용이 어려운 투명 소재 기판 환경에서 구현 가능한 단일 투명 기판 양면 금속 패턴 기반의 고선택도 FSS 구조를 제안하였다. 제안한 구조는 쿼츠 기판 양면의 금속 공진기 사이에서 발생하는 전기적 및 자기적 커플링을 활용함으로써, 기존의 다층 적층이나 비아 구조에 의존하지 않고도 높은 선택도의 주파수 응답을 구현하였다. 또한, 이러한 금속 레이

어 간 상호작용을 고려한 등가 회로 모델을 제시하고 이를 EM 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 제안 구조의 동작 원리를 검증하였다.

메쉬-그리드 기법을 적용한 제안 구조는 약 87.1 %의 광학적 투명도를 확보하며, 제작 및 측정 결과에서 중심 주파수 15.8 GHz에서 0.9 dB의 낮은 투과 손실, 약 8.3 %의 3 dB 대역폭, 그리고 통과대역 외 10 dB 이상의 대역 차단 특성을 나타내었다. 또한, 입사각 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 통해 TE 및 TM 편파의 경사 입사 조건에서도 중심 통과대역과 대역 차단 특성이 유지됨을 확인하였다. 이를 통해 제안한 FSS가 투명성을 확보하면서도 인접 주파수 대역 간 간섭을 줄일 수 있는 고선택도 공간 필터로서 효과적으로 동작함을 확인하였다.

제안 구조는 단일 투명 기판의 양면 금속 패턴만으로 구성되므로, 다층 기판 적층, 비아 형성, 비아 도금, 층간 정렬과 같은 추가 공정을 요구하지 않는다. 따라서 기존의 다층 또는 비아 기반 고선택도 FSS에 비해 제작 공정이 단순하며, 투명 기판에서 발생할 수 있는 층간 정렬 오차와 비아 제작 오차를 줄일 수 있다. 이러한 구조적 단순성은 대면적 투명 기판으로의 확장과 반복 제작 측면에서 장점을 가지며, 건물 외장재, 윈도우형 통신 장치, 투명 전자파 제어 구조물과 같이 광학적 투명성과 전자기적 필터링 성능이 동시에 요구되는 응용 분야에 적합하다. 따라서 제안한 FSS는 향후 6G upper-mid 대역을 포함한 다양한 고주파 무선 시스템에 유용하게 적용될 수 있다.

References

- [1] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, and K. Wang, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, May 2013.
- [2] H. Yang, S. Bang, H. Kim, S. Kim, Y. Sung, and K. Park, "6G channel measurement in urban, dense urban scenario and massive ray-tracing-based coverage analysis at 7.5 GHz," in *ICC 2025 - IEEE International Conference on Communications*, Montreal, QC, Jun. 2025, pp. 3309-3314.
- [3] S. Mahon, "The 5G effect on RF filter technologies," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 30, no. 4, pp. 494-499, Nov. 2017.
- [4] G. Shen, W. Che, W. Feng, Y. Shi, and Y. Shen, "Low insertion-loss MMIC bandpass filter using lumped-distributed parameters for 5G millimeter-wave application," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 98-108, Jan. 2021.
- [5] S. Bang, T. Yoon, B. Kim, J. Oh, H. Kim, and J. Oh, "Extremely miniaturized free-space measurement system for RF metamaterial composite based on beam focusing transmitarray," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 6, pp. 1705-1709, Jun. 2024.
- [6] S. Bang, H. Kim, and J. Oh, "Enhancing 2-D beam scanning capability through extended transmission paths in a liquid crystal-based transmitarray antenna for mmWave communications," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 1, pp. 85-91, Jan. 2025.
- [7] J. Kim, S. Bang, J. Jeong, S. H. Wi, and J. Oh, "Enhancing selectivity in 5G/6G ultranarrowband applications: Plug-and-play frequency-selective surfaces with field-manipulating vias," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 72, no. 8, pp. 6783-6788, Aug. 2024.
- [8] Y. S. Moon, J. H. Kwon, and I. P. Hong, "Design of frequency selective rasorber applicable to domestic 5G communication environments," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 37, no. 1, pp. 12-17, Jan. 2026.
- [9] T. T. Nguyen, J. Shin, and C. Jung, "Frequency selective surfaces with high Q-factor and angular stability for the Ka-band of 5G communications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 1, pp. 28-35, Jan. 2024.
- [10] B. Kim, S. Bang, S. Kim, D. Kwon, S. Kim, and J. Oh, "Locally optimal periods in periodic optically transparent two-metal-layered refractive metasurfaces for outdoor-to-indoor communication," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 1253-1257, May 2025.
- [11] S. H. Kang, C. W. Jung, "Transparent patch antenna using

- metal mesh," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 4, pp. 2095-2100, Apr. 2018.
- [12] D. T. Nguyen, C. W. Jung, "Transparent frequency selective surfaces with high optical transparency and wide bandwidth for 5G mm-wave spatial filtering applications," *Optik*, vol. 336, p. 172440, Sep. 2025.
- [13] H. Chen, H. Chen, X. Xiu, Q. Xue, and W. Che, "Transparent FSS on glass window for signal selection of 5G millimeter-wave communication," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 2319-2323, Dec. 2021.
- [14] M. A. Al-Joumayly, N. Behdad, "A generalized method for synthesizing low-profile, band-pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 12, pp. 4033-4041, Dec. 2010.
- [15] J. Oh, "Millimeter-wave thin lens employing mixed-order elliptic filter arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 7, pp. 3222-3227, Jul. 2016.

방 승 우 [서울대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-4341-3270>



2022년 2월: 서울과학기술대학교 전기·정보공학과 (공학사)
2022년 3월~현재: 서울대학교 전기·정보공학부 석·박사통합과정
[주 관심분야] 메타표면, 스마트 안테나, 측정 시스템

오 정 석 [서울대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-2156-4927>



2002년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)
2007년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
2012년 8월: 미시간대학교 전기공학과 (공학박사)
2018년 3월~현재: 서울대학교 전기·정보

공학부 교수

[주 관심분야] Antenna, Metasurface/Metamaterial, RF Circuit/System, Wave Propagation Analysis/Modeling