

입사각 및 편파에 안정적인 소형화된 X-대역 투과 주파수 선택 표면

Miniaturized X-Band Bandpass Frequency Selective Surface with Angular and Polarization Stability

김상윤¹ · 곽민재² · 김지수³ · 김현중⁴ · 정은태⁵ · 황인준^{6*} · 윤달재⁷

Sang-Yoon Kim¹ · Min-Jae Kwak² · Jisu Kim³ · Hyunjoong Kim⁴ · Eun Tae Jeong⁵ ·
In-June Hwang^{6*} · Dal-Jae Yun⁷

요 약

본 논문에서는 X-대역을 선택적으로 투과시키는 소형화된 주파수 선택 표면(FSS, frequency selective surface)을 제안한다. 제안된 FSS의 단위 구조는 육각형 형태의 슬롯이 사선 격자(skew grid)로 배열된 형태로, 배열 주기는 0.10λ 로 소형화되었다. 전자기장 시뮬레이션 결과 10 GHz에서 공진이 발생하며, -3 dB 기준 대역폭 38.74%를 갖는다. 입사각 및 편파에 대해 매우 안정적인 주파수 응답을 확인하였으며, 등가 회로 모델을 제시하여 파라미터를 분석하였다. 구리 에칭 공정으로 실제 제작이 이루어졌고, 자유 공간 측정 시스템에서 측정을 수행해 성능을 검증하였다.

Abstract

This paper proposes a miniaturized frequency selective surface (FSS) that selectively transmits in the X-band. The unit cell of the proposed FSS consists of hexagonal slots arranged in a skew grid, and its periodicity is reduced to 0.10λ . Electromagnetic simulation results showed that resonance occurs at 10 GHz, exhibiting a -3 dB fractional bandwidth of 38.74 %. A highly stable frequency response with respect to incidence angles and polarizations was confirmed, and an equivalent circuit model was presented to analyze its geometric parameters. The prototype was fabricated using a copper etching process, and its performance was verified through measurements in a free-space measurement system.

Key words: Angular Stability, Equivalent Circuit Model, Free-Space Measurement System, Frequency Selective Surface, Miniaturization

I. 서 론

주파수 선택 표면(FSS, frequency selective surface)은 패턴이 주기적으로 배열된 2차원 구조로, 특정 주파수 대역을 선택적으로 투과 또는 반사하는 특성을 갖는다^[1].

이론적으로 FSS는 무한 주기 구조로 가정하지만, 실제 적용을 위해서는 유한한 평면상에 제작되어야 한다. 따라서 이론적인 주파수 응답에 근접한 성능을 얻기 위해서는 제한된 면적 내에 충분한 수의 단위 구조가 포함되어야 한다. 단위 구조의 소형화는 곡면상에 적용을 용이하

「본 연구는 IITP와 과학기술정보통신부의 지원(No. RS-2024-00396235, Development of flexible thin film spatial filter radome integrated 5G/LTE convergence antenna)으로 수행된 연구임.」

충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio Science & Communication Engineering, Chungnam National University)

*한국표준과학연구원 전략기술연구소(Strategic Technology Research Institute, Korea Research Institute of Standards and Science)

1: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0003-8277-0315>), 2: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0009-1912-5587>), 3: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0003-0664-9812>),

4: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0004-4275-6954>), 5: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0000-0990-1153>), 6: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-3709-1359>),

7: 교수(<https://orcid.org/0000-0003-2385-7990>)

· Manuscript received June 19, 2026 ; Revised July 20, 2026 ; Accepted August 10, 2026. (ID No. 20260619-009S)

· Corresponding Author: Dal-Jae Yun (e-mail: daljae.yun@cnu.ac.kr)

게 만들 뿐만 아니라, 입사각 안정성을 확보하고 그레이팅 로브(grating lobe)의 발생 주파수를 더 높은 대역으로 지연시켜 안정적인 주파수 응답을 얻는 데 유리하다^[2].

따라서 FSS의 소형화를 위한 다양한 연구가 수행되었다. 집중 소자를 사용하여 단위 구조의 인덕턴스와 커패시턴스를 증가시키는 방법^[3]과 FSS에 2.5D 구조를 적용하는 방법이 제안되었다^[4].

이러한 방법들은 우수한 소형화 특성을 제공하지만, 집중 소자의 기생 성분과 2.5D 구조에 따른 두께 증가 등의 문제로 인해 범용적인 적용에는 한계가 있다.

이에 대한 대안으로 space filling curve 기법을 통한 소형화^{[2],[5]-[9]}가 고려될 수 있다. 단위 구조가 가지는 등가 인덕턴스와 커패시턴스를 증가시켜 전기적 길이를 늘이는 원리로, 파장이 긴 낮은 주파수 대역에서 특히 효과적이다. 그러나 X-대역 또는 그 이상의 주파수 대역에서는 파장이 짧아져 소형화가 제한적으로 이루어진다.

본 논문에서는 항공 및 방산 분야에서 활발히 사용되는 X-대역을 선택적으로 투과시키는 새로운 FSS 단위 구조를 제안한다. 제안된 단위 구조에 대해 전자기장 시뮬레이션과 등가 회로 분석을 수행하였으며, 실제 제작 및 측정을 통해 성능을 검증하였다.

II. FSS 설계 및 시뮬레이션

2-1 단위 구조 설계 및 시뮬레이션

그림 1은 제안된 FSS 단위 구조의 형상을 나타낸다. 제안된 FSS 단위 구조는 육각형의 루프 타입(loop type) 슬롯을 포함한다. 본 구조는 슬롯을 경계로 하여 내부의 다이폴과 소자 사이를 연결하는 메쉬 구조로 구성된다. 전통적인 루프 타입의 소자와 달리^[1], 그림 1의 구조는 다이폴과 메쉬가 서로 맞물리는 형태를 통해 더 높은 등가 커패시턴스를 유도하며 소형화를 달성한다. 또한 각 소자는 사선 방

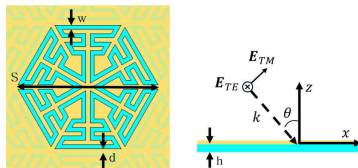


그림 1. 제안된 FSS 단위 구조
Fig. 1. Proposed FSS unit cell structure.

으로 주기적으로 배열되었다. 단위 구조를 사선 격자(skew grid)로 배열할 때 직사각형 격자(rectangular grid) 대비 그레이팅 로브의 발생 주파수를 지연시킬 수 있다^[1].

설계된 단위 구조의 파라미터는 다음과 같다. S 는 육각형 슬롯의 너비를, w 는 슬롯의 선폭을, d 는 소자 사이의 간격을, h 는 유전체 기판의 두께를 나타낸다. k 는 평면파의 진행 방향을, θ 는 입사각을 의미하고, E_{TE} 와 E_{TM} 은 각각 TE(transverse electric) 편파, TM(transverse magnetic) 편파를 의미한다. 각 파라미터의 값은 $S=3.34$ mm, $w=d=0.1$ mm, $h=0.05$ mm이다. 이때 단위 구조의 주기는 0.10λ 가 된다. 유전체 기판은 높은 내열성과 유연성을 지니는 폴리이미드를 사용하였으며, 유전율 $\epsilon_r=3.64$, 손실 탄젠트 $\tan\delta=0.015$ 이다.

그림 2는 Floquet port 시뮬레이션 결과를 보여준다. 공진 주파수 f_r 은 10 GHz이고, 21.73 GHz에서 전송 영점(transmission zero)이 관찰된다. 수직 입사 조건에서 -3 dB 비대역폭(FBW, fractional bandwidth)은 38.74 %로, 이는 X-대역의 96.85 %를 포괄하는 수치이다. 또한, 대칭적인 구조로부터 편파에 독립적인 주파수 응답이 확인되며, 입사각이 증가함에 따라 TE 모드의 대역폭은 감소하고 TM 모드의 대역폭은 증가하는 경향이 관찰된다. 이는 TE 및 TM 모드의 파동 임피던스 $Z_0^{TE}=Z_0/\cos\theta$ 와 $Z_0^{TM}=Z_0\cos\theta$ 의 차이에서 기인한 것으로 이해된다^[10].

표 1은 선행 연구와 성능 비교를 제시한다. 본 논문

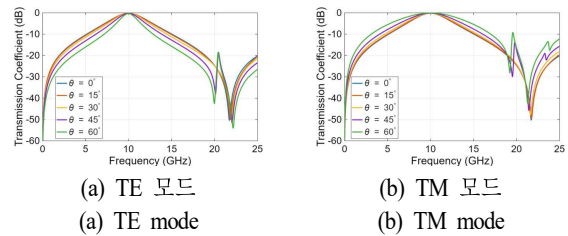


그림 2. 제안된 FSS의 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulation results of the proposed FSS.

표 1. 선행 연구와 성능 비교

Table 1. Performance comparison with previous works.

Ref.	ϵ_r	f_r (GHz)	Unit cell (λ)	Type	FBW (%) (dB)	Stability ($^\circ$)
[6]	3.5	10	0.233	Bandpass	6.8 (-3)	N/A
[7]	2.7	10	0.25	Bandstop	23 (-10)	45
[8]	3.5	10	0.167	Bandstop	40 (-15)	80
[9]	4.4	10	0.20	Bandstop	26 (-10)	60
This work	3.64	10	0.10	Bandpass	38.74 (-3)	60

서 제안된 FSS 단위 구조의 주기는 0.10λ 로 선행 연구 대비 개선된 소형화를 보여준다.

2-2 등가 회로 모델

그림 3은 제안된 FSS의 등가 회로를 나타낸다. 여기서 Z_0 는 자유 공간 임피던스를 나타내며, L_0 와 L 은 각각 메쉬 구조와 슬롯 내부 다이폴에서 기인한 인덕턴스를, C 는 슬롯 간극에서 형성된 커패시턴스를 의미한다. 이를 명확히 하기 위해 그림 4에 10 GHz에서 표면 전류 밀도 및 전계 분포를 제시하였다. 표면 전류가 집중된 메쉬 구조와 내부 다이폴에서 L_0 와 L 이 발생하고, 전계는 슬롯 부근에 집중되어 C 를 형성한 것을 확인할 수 있다.

다음으로 등가 회로 모델의 각 소자의 값을 최적화하기 위해, 그림 3에서 FSS의 어드미턴스 Y_{FSS} 와 공진 주파수 ω_r , 전송 영점 주파수 ω_z 를 도출한다.

$$Y_{FSS} = \frac{1 - \omega^2 C(L + L_0)}{j\omega L_0(1 - \omega^2 LC)} \quad (1)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{(L_0 + L)C}}, \quad \omega_z = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

식 (2)에서 커패시턴스 C 를 독립 변수로 택해 L 과 L_0 에 대해 수식을 정리하면 식 (3)과 같다.

$$L = \frac{1}{\omega_z^2 C}, \quad L_0 = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{\omega_r^2} - \frac{1}{\omega_z^2} \right) \quad (3)$$

등가 회로의 투과 계수 $T_{ECM}(\omega)$ 는 식 (4)와 같다^[5].

$$T_{ECM}(\omega) = \frac{2Y_0}{2Y_0 + Y_{FSS}} \quad (4)$$

식 (3)의 C 로 제어되는 각 변수를 식 (1)에 대입하면 식 (4)의 투과 계수 또한 C 에 대한 함수로 표현할 수 있다. 전

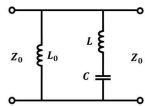


그림 3. 제안된 FSS의 등가 회로 모델

Fig. 3. Equivalent circuit model of the proposed FSS.

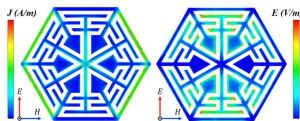


그림 4. 제안된 FSS의 표면 전류 밀도 및 전계 분포

Fig. 4. Surface current density and E-field distributions.

자기장 시뮬레이션의 투과 계수 $T_{sim}(\omega)$ 와 등가 회로의 투과 계수 $T_{ECM}(\omega)$ 사이의 유클리드 거리로 정의되는 식 (5)가 파라미터 최적화를 위한 목적 함수로 사용된다.

$$E(C) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [T_{ECM,dB}(C, \omega_i) - T_{sim,dB}(\omega_i)]^2} \quad (5)$$

여기서 N 과 i 는 각각 주파수 샘플의 수와 인덱스이며, 정확한 커브 피팅을 위해 관심 대역인 0~25 GHz 대역에서 해석이 이루어졌다. 이때, 식 (1)에서 발생하는 특이점 문제를 회피하기 위해 직류와 ω_z 는 샘플에서 제외되었다. 다음으로 C 의 값을 얻기 위해 통상적인 커패시턴스의 값인 0.001~10 pF 범위에서 임의의 로그 간격으로 분할하고, 격자 탐색(grid search)을 수행해 $E(C)$ 가 최소가 되는 지점을 최적화의 초기값으로 설정하였다. 앞선 절차로 얻은 초기값 $C=0.133$ pF으로부터 Nelder-Mead 알고리즘을 이용하여 변수 C 및 목적 함수 값의 변화량이 각각 허용 오차 $\epsilon_C=10^{-8}$ pF, $\epsilon_E=10^{-10}$ dB 이내로 수렴할 때까지 연산을 수행한다. 최종적으로 소자의 값은 $C=0.131$ pF, $L=0.41$ nH, $L_0=1.52$ nH이다. 이를 적용한 ADS 시뮬레이션 결과를 전자기장 시뮬레이션의 결과와 함께 그림 5에 제시하였다.

III. FSS 제작 및 측정

그림 6은 제작된 FSS와 자유 공간 측정 시스템을 보여준다. FSS는 구리 에칭 공정으로 155.50×155.61 mm의 크기로 제작되었으며, 3,120개의 단위 구조가 포함된다. 측정은 8~25 GHz 대역에서 수행되었으며, 타임 게이팅과 GRL(gated reflect line) 교정이 적용되었다^[11].

그림 7은 제작된 FSS의 측정 결과를 나타낸다. 시뮬레이션과 측정 결과 간의 차이는 제작 공정상 발생한 오차로 이해되며, 전반적으로 좋은 일치가 확인된다.

표 2에 입사각 및 편파에 따른 FSS의 성능 변화가 제시되어 있다. 최대 입사각에서 시뮬레이션 및 측정 결과

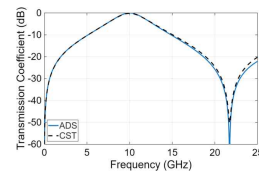


그림 5. 등가 회로 모델 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Simulation results of the ECM.

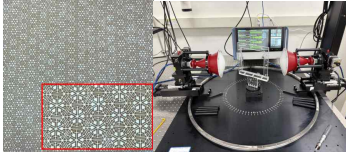


그림 6. 제작된 FSS와 자유 공간 측정 시스템
Fig. 6. Fabricated FSS and measurement setup.

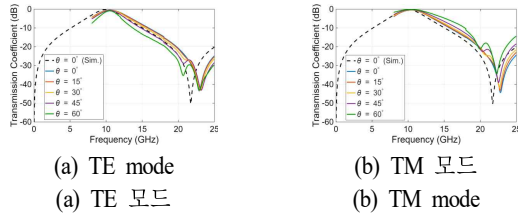


그림 7. 제작된 FSS의 측정 결과
Fig. 7. Measurement results of the fabricated FSS.

표 2. 입사각 및 편파에 따른 FSS의 주요 특성 변화
Table 2. Performance variations of the proposed FSS with respect to incident angles and polarizations.

	Pol.	Δf_r (%)	FBW (0°/60°) (%)	IL (0°/60°) (dB)
Sim.	TE	<0.25	38.74/19.25	0.19/0.38
	TM	0.5	38.74/70.64	0.19/0.1
Meas.	TE	0.28	41.84/26.84	0.46/0.95
	TM	0.96	42.91/N/A	0.47/0.21

공진 주파수 편이가 모두 1 % 미만으로 안정적인 주파수 응답을 나타내며, 입사각 증가에 따라 편파별 대역폭의 변화만이 관찰된다. 다만, TM 모드 60° 조건에서 대역폭 일부가 측정 시스템의 주파수 구간을 벗어나 표기에서 제외되었다. 삽입 손실 또한 모든 조건에서 안정적으로 낮은 값을 유지하는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 X-대역을 선택적으로 투과시키는 소형화된 FSS 단위 구조를 제안하였고, 시뮬레이션과 측정을 통해 성능을 검증하였다. 제안된 단위 구조의 주기는 0.10 λ 로 우수한 소형화 특성을 달성하였다.

References

[1] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2000.
[2] M. Yan, S. Qu, J. Wang, J. Zhang, A. Zhang, and S. Xia,

"A novel miniaturized frequency selective surface with stable resonance," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 639-641, Mar. 2014.
[3] H. L. Liu, K. L. Ford, and R. J. Langley, "Design methodology for a miniaturized frequency selective surface using lumped reactive components," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 9, pp. 2732-2738, Sep. 2009.
[4] Y. M. Yu, C. N. Chiu, Y. P. Chiou, and T. L. Wu, "A novel 2.5-dimensional ultraminiaturized-element frequency selective surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3657-3663, Jul. 2014.
[5] P. C. Zhao, Z. Y. Zong, W. Wu, and D. G. Fang, "A convoluted structure for miniaturized frequency selective surface and its equivalent circuit for optimization design," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 7, pp. 2963-2970, Jul. 2016.
[6] P. Bactavatchalame, "Design of X-band bandpass frequency selective surface and optimization using spider monkey algorithm," in *2025 International Conference on Emerging Technologies in Engineering Applications(ICETEA)*, Puducherry, Jun. 2025.
[7] W. Y. Yong, S. K. A. R. Rahim, M. Himdi, F. C. Seman, D. L. Suong, and M. R. Ramli, "Flexible convoluted ring shaped FSS for X-band screening application," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 11657-11665, Mar. 2018.
[8] E. Chellaiah, M. Kannan, "An ultra-thin frequency-selective surface with inductive loading for X-band shielding applications," *International Journal of Communication Systems*, vol. 37, No. 6, p. e5699, Apr. 2024.
[9] M. Idrees, Y. He, Y. Wen, Y., and A. Majeed, "Design of a miniaturized and polarization-independent frequency-selective surface for targeted EMI shielding," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 8, p. 4534, Apr. 2025.
[10] M. A. Al-Joumayly, N. Behdad, "Low-profile, highly-selective, dual-band frequency selective surfaces with closely spaced bands of operation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 12, pp. 4042-4050, Dec. 2010.
[11] D. J. Yun, H. Jung, I. J. Hwang, J. H. Kim, I. H. Lee, and Y. P. Hong, "Conditional WGAN-GP-based radome FSS inverse design for stealth applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 821-825, Feb. 2026.