

# 넓은 범위의 입사각에서 높은 Q-factor를 갖는 5G 통신용 Ka-대역 주파수 선택 표면

## Frequency Selective Surfaces with High Q-Factor and Angular Stability for the Ka-Band of 5G Communications

응웬띠엔팅 · 신 지 훈\* · 정 창 원\*

Thinh Tien Nguyen · Jihun Shin\* · Changwon Jung\*

### 요 약

본 논문에서는 5G 밀리미터파 주파수 대역(n257: 26.5~29.5 GHz)용 radome 응용을 위한 두 가지 주파수 선택 표면(FSS: frequency selective surface)을 제안하고 검증하였다. 주파수 선택 표면(FSS)은 슬롯(slot)과 미앤더 라인(meander line)을 기반으로 설계되었으며, 입사각 및 입사파의 편파에 안정적인 주파수 응답 특성을 확보하기 위해 대칭 구조로 구성되었다. 제안된 두 가지 FSS(case 1, case 2)는 0°~30° 입사각 변화에서 TE 및 TM 편파 각각에 대하여 주파수 편차가 1%를 넘지 않는 입사각 안정성을 보였고, 3 dB 대역폭은 중심 주파수(28 GHz)의 2.7 %(case 1), 그리고 8.85 %(case 2)를 얻으며 높은 Q-factor를 갖는다. 성능 평가를 위해, 고주파용 저손실 단층 기판, TLY-5( $\epsilon_r=2.2$ ,  $\tan\delta=0.0009$ ) 상에 FSS 프로토타입을 제작하였으며, 전체 FSS 패턴의 크기는 단위 셀( $5\times 5\text{ mm}^2$ )이 30×30개로 배열된  $15\times 15\text{ cm}^2$ 이다. 또한, 측정 결과는 시뮬레이션 및 계산 결과와 일치함을 보여준다.

### Abstract

This paper proposes two novel designs of a high Q-factor frequency selective surface (FSS), which resonates in the 5G mmWave band (n257: 26.5 to 29.5 GHz). Radome applications are proposed, and they were experimentally evaluated. The FSSs were designed based on slot and meander line elements and are composed of a simple symmetric structure for stable performance at angles of incidence and polarization. The proposed FSSs were investigated using electromagnetic waves incident at degrees from 0° to 30°; the frequency deviations did not exceed 1 % for transverse electric and transverse magnetic polarizations and achieved high angular stability. Additionally, a high Q-factor was confirmed by measuring a 3-dB bandwidth of 2.7 % and 8.85 % of the center frequency (28 GHz). For the performance evaluation, the fabricated FSS prototypes were designed on a single-layer substrate of high-frequency, low-loss TLY-5 ( $\epsilon_r=2.2$ ,  $\tan\delta=0.0009$ ) composed of 30×30 ( $15\times 15\text{ cm}^2$ ) unit cells ( $5\times 5\text{ mm}^2$ ). The experimental results were in good agreement with the numerical results.

Key words: Frequency Selective Surface, Band-Pass Filter, Angular Stability, Q-Factor, 5G Applications

「본 논문은 정보통신기획평가원(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00216221).」

서울과학기술대학교 NID융합기술대학원(Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology)

\*서울과학기술대학교 지능형반도체공학과(Department of Semiconductor Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

· Manuscript received September 13, 2023 ; Revised October 9, 2023 ; Accepted November 28, 2023. (ID No. 20230913-074)

· Corresponding Author: Changwon Jung (e-mail: changwoj@snu.ac.kr)

## I. 서 론

밀리미터파(mm-wave) 주파수를 사용하는 5세대(5G) 이동 통신은 미국, 한국, 중국 등 많은 국가에서 개발 및 상업화가 진행 중이며, 현재 5G 이동 통신은 여전히 6 GHz 이하 대역이 널리 사용되고 있다. 그러나 6 GHz 이하 주파수 대역에서 데이터 전송 속도에 영향을 미치는 제한된 스펙트럼 자원은 증가하는 데이터 트래픽을 충족 시키기에 불충분하며 새로운 주파수 대역의 개발이 요구되고 있다. 그중에서 24.25~29.5 GHz까지의 밀리미터파 주파수를 사용하는 n257, n258, n261의 통신방식들은 저지연, 높은 데이터 전송 속도 및 높은 신뢰성을 제공할 수 있어 새로운 주파수 대역으로 논의되고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나, 고주파 대역으로 주파수가 이동함에 따라 경로 손실이 증가하고, 회절이 감소하여 장애물에 의한 감쇄가 발생해 신호 품질이 크게 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 무선 통신 환경에 직접적인 영향을 미치는 전송 선로를 개선하고 주변 환경에 의한 간섭을 감소시킬 필요가 있다<sup>[1][2]</sup>.

주파수 선택 표면(FSS)은 지난 수십 년간 연구되어왔다. 주기성을 갖는 구조 배열을 기반으로, 주파수 선택의 특성이 제공된다. 최근에는 반사 안테나, 레이돔, 공간 필터 및 Fabry-Perot 안테나 등 마이크로파와 광학에서 FSS 기술 개발과 관련한 응용 분야가 연구되고 있다<sup>[3]~[7]</sup>. 위 응용 분야에서는 다른 주파수 대역과의 간섭을 막고 고품질의 신호를 얻기 위해 일반적으로 좁은 대역폭 특성이 요구된다. FSS의 성능을 향상하기 위해 높은 Q-factor를 달성하기 위한 여러 접근 방법이 시도되었으나, 소개된 접근 방법들은 FSS 성능 향상에 따른 단점들이 존재한다<sup>[3]~[7]</sup>. Cascaded FSS 방법을 통해 좁은 대역폭을 달성할 수 있지만<sup>[3]~[5]</sup>, 높은 비용과 부피가 크고 다층 구조로 인해 널리 받아들여지지 않을 것으로 보인다. 또한, 3D 구성을 기반으로 한 FSS<sup>[6],[7]</sup>도 제안되었다. 복잡한 3D 구조의 특성으로 인해 높은 주파수 선택성을 얻을 수 있으며, 이는 전자기파의 전파 경로를 제한할 수 있다. 그러나, 복잡한 3차원 구조를 구현하는 것은 여전히 큰 과제이다.

본 논문에서는 5G 밀리미터파 대역에서 작동하는 높은 Q-factor와 입사각 안정성을 갖는 FSS 구조를 제안한

다. 우선, 전송 특성이 우수한 FSS 모델들을 제안하고, 평가하며 비교하였다. 두 번째로, 제안된 FSS들을 제작하고 측정을 통하여 신호 전송 성능을 검증하였다. 제안된 FSS들의 좁은 3 dB 대역폭, 급격한 감쇄 구조, 그리고 K/Ka 대역에서 안정된 편파 및 입사 각도의 성능검증을 통하여 5G 레이돔 및 낮은 간섭 환경을 요구하는 통신 응용 분야에서 폭넓게 사용될 수 있음을 확인하였다.

## II. FSS 단위 셀 디자인

그림 1과 같이 제안된 두 개의 FSS 구조(case 1, case2)는 두께 1.52 mm인 유전체 기판, TLY-5( $\epsilon_r=2.2$ ,  $\tan\delta=0.0009$ ) 상에 단일 구조층으로 설계되어 FSS 레이돔에 적용하기에 적합하며, 질은 회색 영역은 구리 박막( $t=0.035$  mm)의 도체(conductor)이며, 흰색 영역은 TLY-5 기판 영

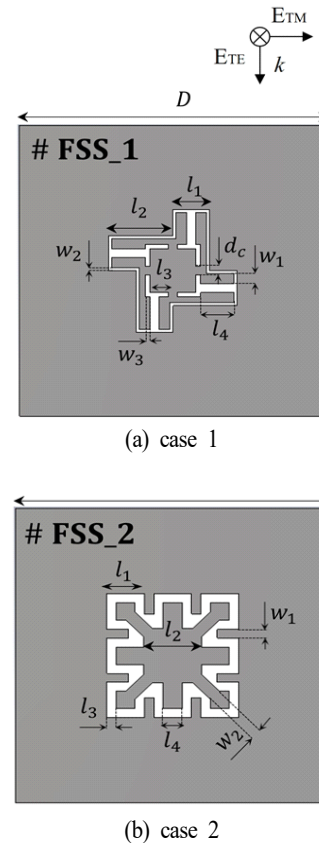


그림 1. 제안된 FSS 구조  
Fig. 1. The proposed FSS structures.

역을 나타낸다. case 1, case 2는 기본적으로 슬롯(slot)과 미앤더 라인(meander line)의 형태로 구성되어있다. 제안된 FSS의 TE 및 TM 편파는 진행방향과 모두 수직이며 FSS의 시뮬레이션은 full-wave EM solver(Ansys HFSS)에 의해 수행되었다. 최적화된 FSS의 크기는 표 1에 나타나 있다.

제안된 구조는 그림 2와 같은 등가회로 모델(ECM, equivalent circuit model)로 표현되었다. 제안된 FSS 구조의 주파수 필터 특성은 등가회로 모델을 통해 예측할 수 있으며, 두 FSS 구조의 주파수 응답을 고려할 때, 인덕터와 직렬 LC 공진회로의 병렬 구조로 나타낼 수 있으며, 유전체층은 짧은 전송선로 임피던스,  $Z_{t1}=Z_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 로 나타낼 수 있으며,  $Z_0$ 은 377  $\Omega$ 의 값을 가지는 자유 공간의 임피던스이다. 등가회로 모델로부터 FSS 구조의 중심 주파수( $f_o$ )는 직렬 LC 공진기에 의해 결정되며, 식 (1)을 통해 계산할 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$f_o = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{C_1 \times (L_1 + L_2)}} \quad (1)$$

표 1. FSS 구조의 크기(단위: mm)

Table 1. Physical dimensions of FSS structures (Unit: mm).

Parameter	Case 1	Case 2
$l_1$	0.6	0.6
$l_2$	1.05	0.92
$l_3$	0.3	0.2
$l_4$	0.55	0.3
$w_1$	0.18	0.15
$w_2$	0.1	0.2
$w_3$	0.12	
$d_c$	0.15	
$D$	5	5

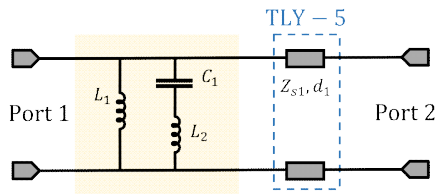


그림 2. 두 FSS 구조의 등가회로 분석 모델

Fig. 2. Equivalent circuit analysis model of both FSS.

좁은 대역폭을 달성하기 위해 Q-factor를 증가시켜야 하며 Q-factor는 등가 인덕턴스( $L_1+L_2$ )를 증가시키거나  $C_1$ 을 감소시킴으로써 달성할 수 있다<sup>[9]</sup>. 여기서  $L_1$  및  $L_2C_1$ 은 각각 슬롯 소자 외부의 구리와 슬롯 소자 내부의 구리 조합의 등가회로 매개변수이다<sup>[4]</sup>. 알려진 바와 같이, 슬롯 소자의 길이가 길수록, 등가 인덕턴스의 크기가 증가하며 슬롯 소자의 폭이 좁을수록 등가 커패시턴스의 크기가 증가한다. 따라서 단위셀의 크기가 소형화될수록 등가 인덕턴스와 등가 커패시턴스를 크게 증가시킬 수 있다. 특히, 소형화된 FSS 구조는 다양한 입사각과 편파에서 안정성을 향상시키는 특성을 보인다<sup>[10]~[12]</sup>.

등가회로 모델 설계상에서 공간 거리(clearance)를 포함한 매개변수 값들을 근사적으로 계산하였기 때문에, HFSS 소프트웨어를 이용하여 계산된 초기 매개변수 값들을 기반으로 최적화하였으며, 계산된 결과값을 표 2에 나타냈다.

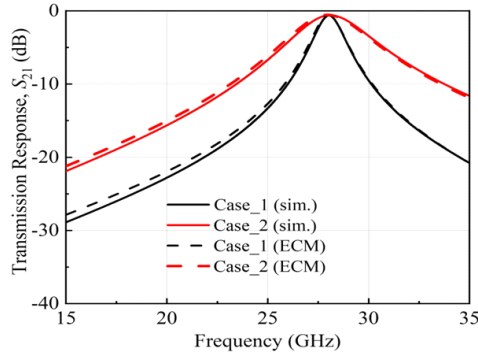
그림 3(a)에서 ECM를 통해 계산된 전송응답 결과는 full-wave 시뮬레이션 결과와 일치함을 볼 수 있다. 두 case의 Q-factor 평가에서, case 1은 case 2보다 높은  $C_1$  값을 가지며 Q-factor가 높았으며, case 2의 인덕턴스  $L_1$  값은 case 1보다 높지만, Q-factor에 영향을 주기에는 충분하지 않았다. 제안된 FSS의 HFSS를 이용한 full-wave 시뮬레이션에서는 주기적인 구조를 갖는 소자의 전송 특성을 분석하기 위해 플로켓 포트(floquet port)의 주(master) 및 종속(slave) 경계 조건을 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3(b)는 TE 및 TM 편파에 대한 S-파라미터 전달 특성을 보여주고 있으며, 제안된 FSS 설계는 수직입사( $0^\circ$ )에서 편파에 비의존적임을 보여준다.

그림 4 및 그림 5는 제안된 case 1, case 2 FSS의 TE 및 TM 편파에 대한 입사각 안정성(angular stability) 시뮬레이

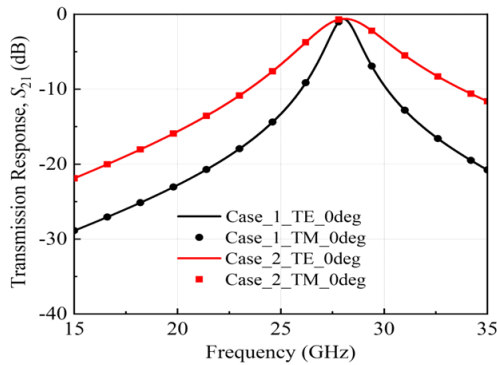
표 2. 회로 모델의 매개변수들

Table 2. Parameters of the circuit model.

Lumped Com.	Case 1	Case 2
$C_1$	0.4 pF	0.23 pF
$L_1$	0.0565 nH	0.113 nH
$L_2$	0.025 nH	0.025 nH
$Z_{s1}$	254.17 $\Omega$	
$d_1$	1.52 mm	



(a) 등가회로 모델(ECM)과 full-wave 시뮬레이션의 전송응답  
(a) Transmission response of equivalent circuit model (ECM) and full-wave simulation

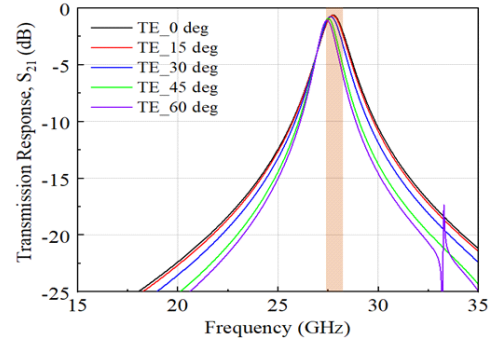


(b) 두 case의 수직 입사각에서의 TE와 TM 편파 비교  
(b) Comparison of TE and TM polarizations at normal incident angle of both cases

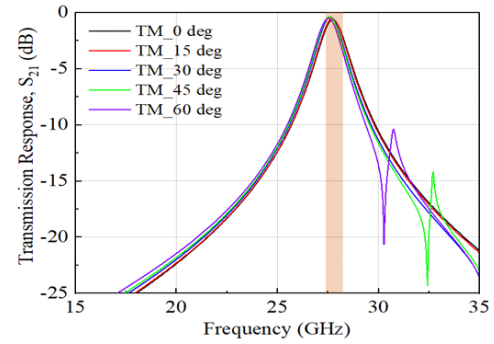
그림 3. 두 case의 등가회로 모델(ECM)과 full-wave 시뮬레이션 및 수직 입사각에서의 TE와 TM 편파 비교

Fig. 3. Comparison of equivalent circuit model (ECM) and full-wave simulation, and polarizations of TE and TM at normal incident angle of both cases.

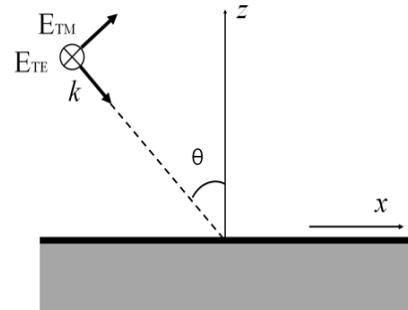
선 결과이다. 그림 4의 경우, case 1 FSS의 입사각 변화  $0^\circ \sim 30^\circ$ 에서 TE 편파 및 TM 편파의 전송응답특성은 0.02 % 및 0.04 %의 주파수 편차를 보이고,  $0^\circ \sim 60^\circ$ 에서는 TE 편파 및 TM 편파의 전송응답특성은 0.08 % 및 0.13 %의 주파수 편차를 보인다. 그림 5의 경우, case 2 FSS의 입사각 변화  $0^\circ \sim 30^\circ$ 에서 TE 편파 및 TM 편파의 전송응답특성은 0.1 % 및 0.12 %의 주파수 편차를 보이고,  $0^\circ \sim 60^\circ$ 에서는 TE 편파 및 TM 편파의 전송응답특성은 0.36 % 및



(a) TE 편파  
(a) TE polarization



(b) TM 편파  
(b) TM polarization

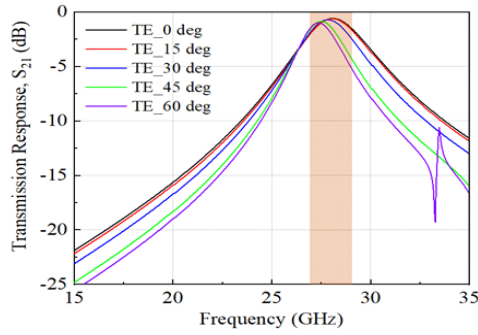


(c) TE 편파에서의 경사입사  
(c) Oblique incidence of TE polarization

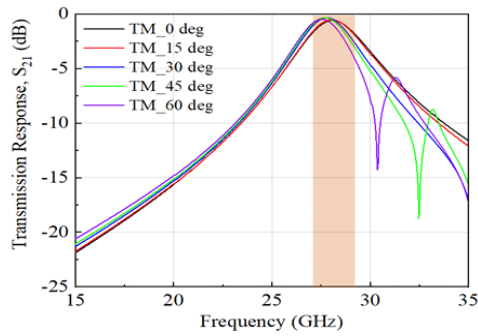
그림 4. Case 1의 다양한 입사각에서의 전송응답

Fig. 4. Transmission response under various incident angles of case 1.

0.21 %의 주파수 편차를 보인다. 시뮬레이션 결과, 높은 Q-factor는 FSS로 전송되는 신호의 입사각 안정성을 증가시킬 수 있음을 확인하였다.



(a) TE 편파  
(a) TE polarization



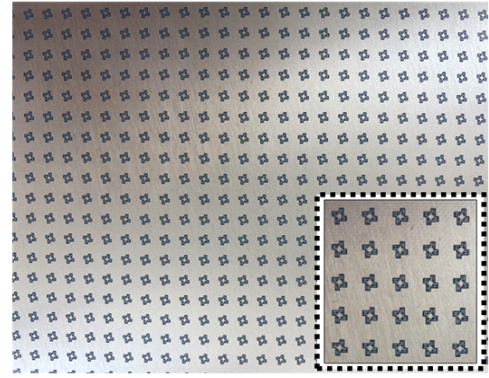
(b) TM 편파  
(b) TM polarization

그림 5. Case 2의 다양한 입사각에서의 전송응답  
Fig. 5. Transmission response under various incident angles of case 2.

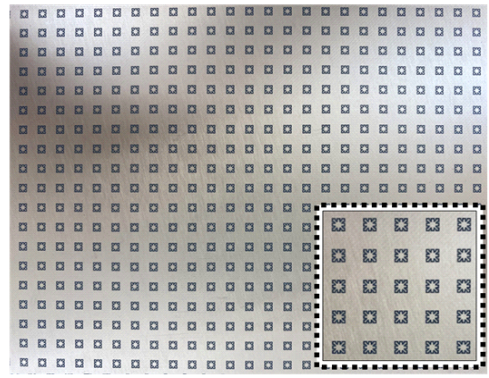
### III. 전송효율 측정

제안된 FSS의 측정을 통한 성능검증을 위해 그림 6과 같이 고주파용 저손실 단층 기판, TLY-5( $\epsilon_r=2.2$ ,  $\tan\delta=0.0009$ ) 상에 FSS 프로토타입을 제작하였으며, 전체 FSS 패턴의 크기는 단위셀( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ )이  $30 \times 30$ 개로 배열된  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 이다.

그림 7은 제작된 FSS의 측정을 위한 측정 셋업을 보여 준다. FSS의 송신 및 반사 특성을 측정하기 위해 네트워크 분석기(N5227 PNA, Keysight, Santa Rosa, CA, USA)와 한 쌍의 송수신 혼안테나를 설치하였으며, 제작된 FSS가 장치의 회절을 최소화하기 위해<sup>[4]</sup> FSS를 고정하는 알루미늄판이 제작되었다. FSS 평면과 혼안테나가 수직하도록 정렬하기 위해, FSS 중심의 바닥면에 다중 선 레이



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 6. 제작된 FSS  
Fig. 6. The fabricated FSS.

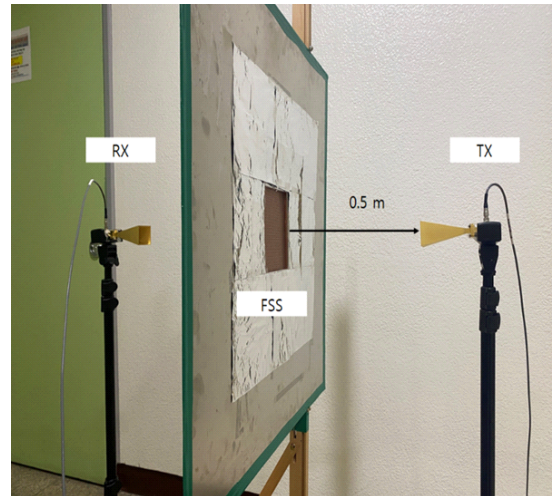


그림 7. 측정 셋업  
Fig. 7. Photograph of measurement setup.

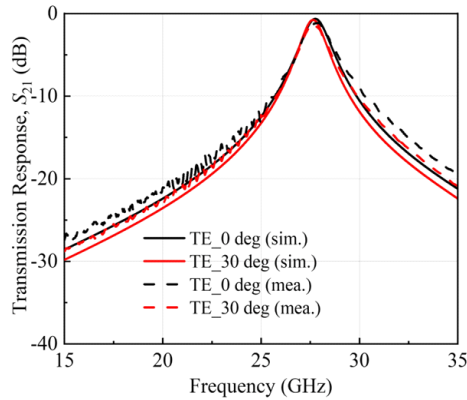


저(multi line laser)를 배치하여 레이저의 수직, 수평 방향과 FSS 평면의 수직 수평 방향이 일치하도록 FSS를 정렬하고 FSS 평면과 혼안테나가 수직 방향의 레이저와 일직선상에 놓이도록 정렬하였다. 원거리 측정 요구사항에 따라 두 개의 혼안테나는 FSS의 정면과 후면에 0.5 m 거리를 두고 각각 위치시키고 자유-공간법(free-space method)을 이용하여 측정하였다. 혼안테나는 수직 방향의 입사를 측정하기 위해 송수신 안테나가 FSS 평면과 수직을 이룬 상태에서 측정하였다. 또한, FSS 평면으로부터 30° 각도로 입사하는 경사의 TE 및 TM 편파를 측정하기 위해 알루미늄판과 레이저의 수평 방향이 30° 각도를 이루도록 FSS를 회전시키고 측정하였다. TM 편파 측정은 TE 편파 측정 후

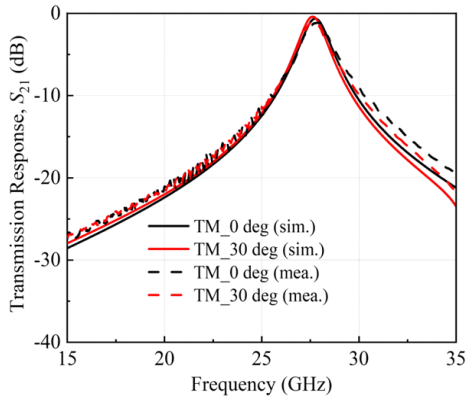
혼안테나를 편파 방향으로 90° 회전시킨 후 측정하였다.

그림 8은 입사각 0°와 30°에 대한 case 1의 TE 및 TM 편파의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸다. 제작된 case 1의 삽입 손실은 입사각이 0°와 30°인 입사파에 대하여 각각 약 0.72 dB 및 1.25 dB임을 보여준다. 그리고 3 dB 대역폭은 27.5~28.25 GHz이며, 중심 주파수의 약 2.7 %이다.

그림 9에서는, 입사각이 0°와 30°에 대하여 case 2의 TE 및 TM 편파의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸다. 제작된 case 2의 삽입 손실은 입사각이 0°와 30°인 입사파에 대하여 각각 약 0.83 및 1.32 dB임을 보여준다. 그리고 3 dB 대역폭은 27~29.5 GHz이며, 중심 주파수의 약 8.85 %이다. 제안된 FSS들의 시뮬레이션과 측정 결과의 비교 시



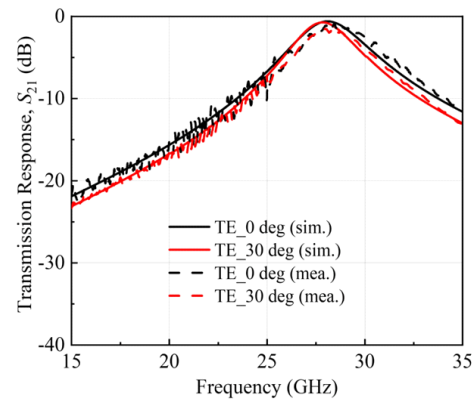
(a)



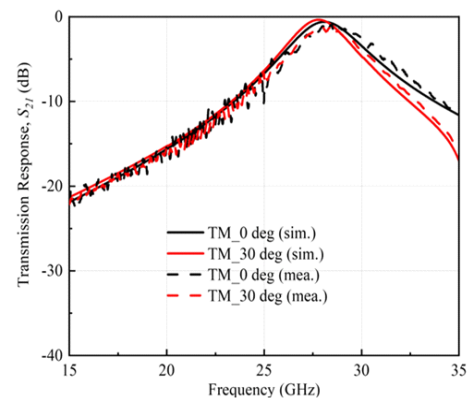
(b)

그림 8. Case 1의 0°와 30°에서 (a) 편파 TE 및 (b) TM 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 8. Simulated and measured results of (a) TE, and (b) TM polarizations at 0° and 30° degrees of case 1.



(a)



(b)

그림 9. Case 2의 0°와 30°에서 (a) 편파 TE 및 (b) TM 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 9. Simulated and measured results of (a) TE, and (b) TM polarizations at 0° and 30° degrees of case 2.

표 3. 5G/Ka-band에서 다른 FSS들과 성능 비교

Table 3. Performance comparison with other FSS at 5G/Ka-band.

Ref.	3dB BW/ $f_0$ (%)	Size ( $\lambda^3$ )	TP/ ZP	TE (%)	TM (%)
[4]	10/3.8	6×6×3.3	2/2	2.6 (60°)	2.6 (60°)
[5]	20/10	4.5×4.5×1.1	2/1	7 (60°)	10 (60°)
[6]	5/21	3×3×3.9	2/2	7 (40°)	2.5 (40°)
Case 1	2.7/28	5×5×1.52	1/1	0.05 (30°)	0.08 (30°)
Case 2	8.85/28	5×5×1.52	1/1	0.7 (30°)	0.89 (30°)

제작의 일부 허용오차로 인해 두 결과가 완전히 일치하지는 않으며, HFSS의 플로켓 포트가 아닌 실제 혼안테나에서 입사파가 발생하고 수신되기 때문에 측정 과정에서 손실이 발생할 수 있지만, 측정 결과가 수치 시뮬레이션과 일치하는 것을 확인하였다.

제안된 FSS 설계와 입사각 안정성을 강조하는 최신 기술<sup>[4]~[6]</sup>들을 비교하는 논문들을 표 3에 나타내었다. 제안된 FSS 설계는 TE 및 TM 편파 모두에서 더 높은 입사각 안정성을 보였고, 입사각 30°에서 주파수 편차가 0.05 % 및 0.08 %, 그리고 case 2의 경우 0.7 % 및 0.89 % 을 보인다. 앞선 선행 연구들과 비교하여 안정된 값을 보인다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 5G 밀리미터파 주파수 대역(n257: 26.5 ~ 29.5GHz)에서 동작하는 두 종류(case 1, case2)의 FSS 설계, 제작 및 측정을 진행하였다. 등가회로 분석을 통해 10 % 이내의 대역폭을 갖는 높은 Q-factor의 FSS를 설계하였으며, TE 및 TM 편파의 경우, 입사각이 0°~30° 범위 내에서 주파수 편차가 각각 1 % 미만의 높은 입사각 안정성을 갖는다. 제안된 FSS는 1.52 mm 두께의 고주파용 저손실 단층 기판상에 비교적 단순한 구조를 기반으로 제작되었으며, 측정 결과는 full-wave 시뮬레이션 결과와 일치하였다. 본 연구는 5G 레이더 및 낮은 간섭을 필요로 하는 밀리

미터 대역 통신분야에 활용될 수 있을것으로 판단된다.

#### References

- [1] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellios, and J. Zhang, "Overview of millimeter wave communications for fifth-generation(5 g) wireless networks—with a focus on propagation models," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Dec. 2017.
- [2] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, 2016.
- [3] M. Hussein, J. Zhou, Y. Huang, and B. Al-Juboori, "A low-profile miniaturized second-order bandpass frequency selective surface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2791-2794, 2017.
- [4] M. Al-Joumayly, N. Behdad, "A new technique for design of low-profile, second-order, bandpass frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 2, pp. 452-459, Feb. 2009.
- [5] S. M. A. Momeni Hasan Abadi, N. Behdad, "Inductively-coupled miniaturized-element frequency selective surfaces with narrowband, high-order bandpass responses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4766-4774, Nov. 2015.
- [6] A. A. Omar, Z. Shen, "Thin 3-D bandpass frequency-selective structure based on folded substrate for conformal radome applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 1, pp. 282-290, Jan. 2019.
- [7] Y. Ma, X. Zhang, S. Wu, Y. Yuan, and N. Yuan, "A hybrid 2-D - 3-D miniaturized multiorder wide bandpass FSS," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 2, pp. 307-311, Feb. 2022.
- [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] A. Ebrahimi, T. Baum, J. Scott, and K. Ghorbani, "Narrowband bandpass frequency selective surface with miniaturized elements," in *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, 2017, pp. 196-199.
- [10] M. Yan, S. Qu, J. Wang, J. Zhang, A. Zhang, and S. Xia, et al., "A novel miniaturized frequency selective surface with stable resonance," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 639-641, 2014.
- [11] X. D. Hu, X. L. Zhou, L. S. Wu, L. Zhou, and W. Y. Yin, "A miniaturized dual-band frequency selective surface(FSS) with closed loop and its complementary pattern," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1374-1377, 2009.
- [12] A. Kesavan, R. Karimian, and T. A. Denidni, "A novel wideband frequency selective surface for millimeter-wave applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1711-1714, 2016.

#### 응웬띠엔팅 [서울과학기술대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3166-1501>



2021년: 미국 Department of Electronics and Telecommunications Engineering, Hanoi University of Science and Technology (HUST), Vietnam (공학사)  
2021년~현재: 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원 석사과정  
[주 관심분야] 안테나, 주파수 선택 필터, EMI/EMC 등

#### 정 창 원 [서울과학기술대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8030-8093>



1997년: 광운대학교 전자공학과 (공학사)  
2001년: 미국 University of Southern California 전자공학과 (공학석사)  
2005년: 미국 University of California, Irvine 전자공학과 (공학박사)  
1997년~2000년: LG정보통신 연구원  
2005년~2008년: 삼성종합기술원 전문연구원  
2008년~현재: 서울과학기술대학교 지능형반도체공학과 교수  
[주 관심분야] 안테나, MR-WPT, 투명전극 응용, RF-Sensor, EMI/EMC 등

#### 신 지 훈 [서울과학기술대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0003-1760-9138>



2023년: 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학사)  
2023년~현재: 서울과학기술대학교 지능형반도체공학과 석사과정  
[주 관심분야] 안테나, 주파수 선택 필터, EMI/EMC 등