

입사각 안정성을 갖는 밀리미터파 대역 주파수 선택적 레이돔 설계

Millimeter-Wave Band Frequency-Selective Radome Design with Angle of Incidence Stability

조성실 · 윤대영* · 김지형** · 윤나내** · 오경현** · 우대웅*** · 박용배*,**** · 홍익표

Sung-Sil Cho · Daeyeong Yoon* · Jihyung Kim** · Nanae Yoon** · Kyung Hyun Oh** ·
Dae Woong Woo*** · Yong Bae Park*,**** · Ic-Pyo Hong

요 약

본 논문에서는 입사각 안정성이 우수한 밀리미터파 대역의 주파수 선택적 레이돔을 설계하였다. 레이돔을 구성하는 하이브리드 구조는 다층의 복합소재에 밀리미터파 대역에서 선택적 투과 특성을 갖는 사각 루프 타입의 FSS 구조를 결합한 구조로, 편파 TE, TM 및 입사각 $0 \sim 50^\circ$ 변화에 따라 목표 통과대역에서 1 dB 이하의 낮은 투과특성을 가지며, X-대역에서는 10 dB 이상의 높은 차단 특성을 가진다. 설계 성능을 확인하기 위하여 하이브리드 복합재 구조를 제작하였고, 자유공간측정법을 이용하여 밀리미터파 대역과 X-대역에서의 투과손실을 측정하였다. 측정 결과로부터 수직입사파 기준으로 통과대역 중심주파수에서 0.62 dB, 차단대역 중심주파수에서 13.45 dB의 투과손실을 가짐을 확인하였다.

Abstract

In this study, a frequency-selective radome in the millimeter-wave band with excellent incident-angle stability is designed. The hybrid structure comprising the designed radome combines a multilayered composite material, which has a rectangular loop-type FSS (frequency selective surface) structure with frequency-selective transmission characteristics in the millimeter-wave band. It has a low transmission loss of ≤ 1 dB in the pass band and a high blocking characteristic of ≥ 10 dB in the X-band for polarization TE (transverse electric). Additionally, the TM (transverse magnetic) modes and incidence angles ranged from 0° to 50° . To confirm the design performance, a hybrid composite structure is fabricated and the transmission characteristics in the millimeter-wave band and X-band are measured using free-space measurement. The results confirm that the normal incident wave has a passband center frequency and stopband center frequency of 0.62 and 13.45 dB, respectively.

Key words: Frequency Selective Radome, Incident Angle Stability, FSS, Hybrid Composite, Transmission.

「이 연구는 2022년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.」

공주대학교 스마트정보기술공학과(Department of Smart IT Engineering, Kongju National University)

*아주대학교 AI융합네트워크학과 (Department of A.I. Convergence Network, Ajou University)

**한화시스템 특수레이다팀(Department of Specific Radar Team, Hanwha Systems)

***국방과학연구소(Agency for Defense Development)

****아주대학교 전자공학과(Department of Electronic and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received March 16, 2022 ; Revised March 28, 2022 ; Accepted May 18, 2022. (ID No. 20220316-026)

· Corresponding Author: Ic-Pyo Hong (e-mail: iphong@kongju.ac.kr)

I. 서 론

전도성이 있는 특정 패턴을 단위구조로 하여 균일한 간격으로 무한히 배열한 주파수 선택 표면구조(frequency selective surface: FSS)는 입사하는 입사파에 대하여 특정 주파수 대역을 투과시키거나 또는 반사시킬 수 있는 전자 기 구조이다. 이는 단위구조의 형상이나 크기, 배열 간격, 배열 수, 그리고 유전기관의 두께와 전기적 특성 등에 의해 주파수 특성이 결정이 된다. 따라서 이러한 기술을 가진 FSS 구조는 실내의 주파수 간섭 제어^[1], 전파 흡수체^[2] 등 다양한 민간분야에 응용 및 적용되고 있을 뿐만 아니라, 레이더 단면적(radar cross section: RCS) 저감을 위한 레이돔^[3]에 적용되는 등 국방 분야에도 적용이 되고 있다.

레이돔은 주로 곡면형태의 구조를 가지므로 평판형 FSS 구조를 곡면형 레이돔에 적용 시, 평판형 FSS 구조를 절단하고 접합하는 등의 가공을 하여 패턴 배열이 변화함에 따라 평판형 구조보다 성능이 감소하는 특징이 있다^[4]. 또한 FSS 구조와 레이돔이 결합되어 있어 제작이 어렵고, 추후 FSS 구조를 수정 및 수리하기에 어려우므로, 최근에는 안테나 윗면에 평판형 구조를 비스듬하게 위치시키고, 곡면형 유전체 레이돔을 덮개로한 새로운 형태의 레이돔에 대한 연구가 진행되어 왔다^[5]. 본 논문에서는 새로운 레이돔에 적용하기 위하여 밀리미터파 대역을 선택적으로 통과시키는 FSS 구조가 결합된 하이브리드 구조를 설계 및 제작하였으며, 자유공간측정법을 사용하여 투과손실을 측정하여 성능을 검증하였다.

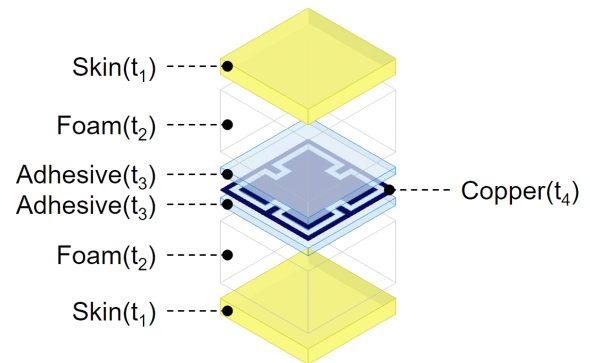
II. 본 문

2-1 FSS 구조 결합된 하이브리드 구조 설계

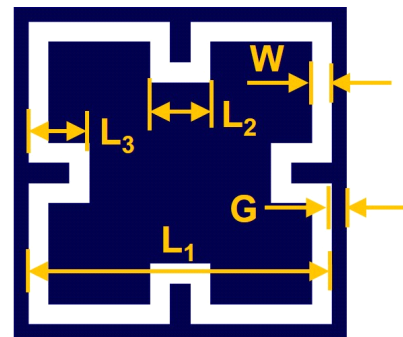
본 논문에서는 다층 복합 소재에 밀리미터파 대역에서 선택적 투과 특성을 갖는 FSS 구조를 결합한 하이브리드 구조를 설계하였다. 설계한 하이브리드 구조는 그림 1(a)와 같이 중간층인 FSS 구조 구리판을 기준으로 양면에 접착필름, 폼, 그리고 스킨 순으로 구성되어 있다. FSS 구조는 제작 시 발생하는 제작 오차를 줄이기 위해 적은 설계 파라미터를 요구하는 단순한 패턴으로 설계할 필요가 있다. 따라서 구조 소형화가 가능하고, 편파 TE(transverse

electric), TM(transverse magnetic) 모드 및 입사각에 대한 안정성을 갖는 사각 루프 구조를 기반으로 그림 1(b)와 같이 FSS 구조를 설계하였다. 그림 2는 제안한 FSS 구조의 표면 전류 분포를 나타낸 것으로, 복잡한 사각 루프타입으로 설계함으로써 전기적 전류의 길이가 더 길어짐에 따라 단위구조의 크기를 $0.19 \lambda^p c$ 로 소형화할 수 있다.

하이브리드 구조를 설계하기 전, 다층 복합구조를 구성하는 소재들의 전기적 특성은 구조의 성능을 결정하는데 매우 중요한 설계 파라미터로 설계 구조의 통과대역(밀리미터파 대역)과 차단대역(X-대역)에 대하여 각 소재의 전기적 특성을 측정하였다. 측정 결과를 통해 스킨의 경우, 통과대역에서의 ϵ_r 은 4.30, loss는 0.035, 차단대역에서의 $\epsilon_r=4.297$, loss=0.014로 가정하였다. 폼의 전기적 특성은 통과대역에서 $\epsilon_r=1.0951$, loss=0.0046, 차단대역에

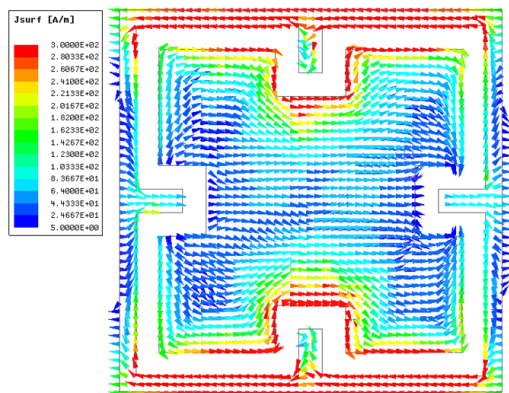


(a) 제안한 하이브리드 구조
(a) Proposed hybrid structure

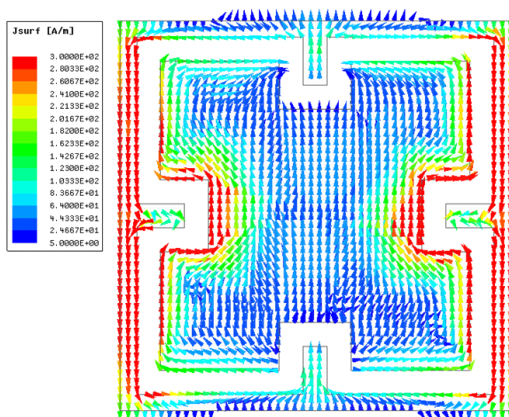


(b) 제안한 FSS 구조
(b) Proposed FSS structure

그림 1. FSS 구조가 결합된 하이브리드 구조
Fig. 1. Hybrid structure combined with FSS.



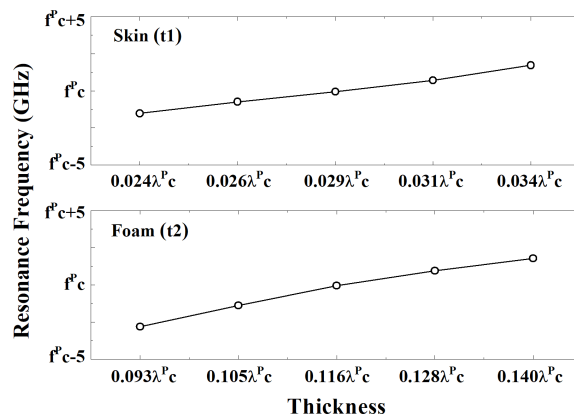
(a) TE 모드
(a) TE mode



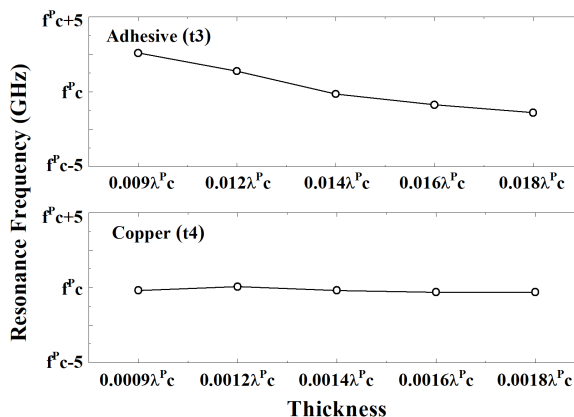
(b) TM 모드
(b) TM mode

그림 2. 통과대역에서의 표면 전류 분포
Fig. 2. Surface current distribution in the passband.

서 $\epsilon_r=1.07$, $\text{loss}=0.0045$ 이며, 접착필름은 통과대역에서 $\epsilon_r=2.85$, $\text{loss}=0.02$, 차단대역에서 $\epsilon_r=3.008$, $\text{loss}=0.023$ 으로 가정하였다. 또한 다층 복합구조를 구성하는 소재들의 두께도 구조의 성능을 결정하는 데 중요한 파라미터이다. 그림 3은 복합 소재들의 두께 변화에 따른 중심주파수 변화를 나타낸 것으로, 스킨과 폼은 두께가 두꺼워질수록 공진주파수가 증가하지만, 반대로 접착필름은 공진주파수가 감소하는 특징을 가진다. 이러한 특성을 기준으로 편파 TE, TM 모드 및 입사각도 $0 \sim 50^\circ$ 변화에 따라 통과대역에서 1 dB 이하의 손실을 갖도록 설계하기 위해 ANSYS HFSS를 사용하였다. 최적화된 구조의 파라미터



(a) 두께 t_1 과 t_2
(a) Thickness t_1 and t_2



(b) 두께 t_3 과 t_4
(b) Thickness t_3 and t_4

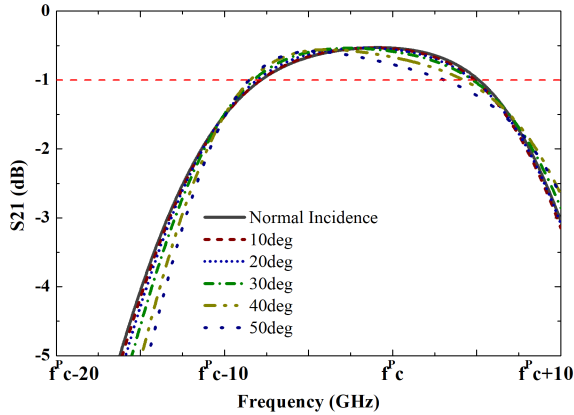
그림 3. 복합소재 두께 변화에 따른 공진주파수
Fig. 3. Resonance frequency according to composite material thickness change.

값은 표 1에 나타내었으며, 그에 대한 투과손실 시뮬레이션 결과는 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

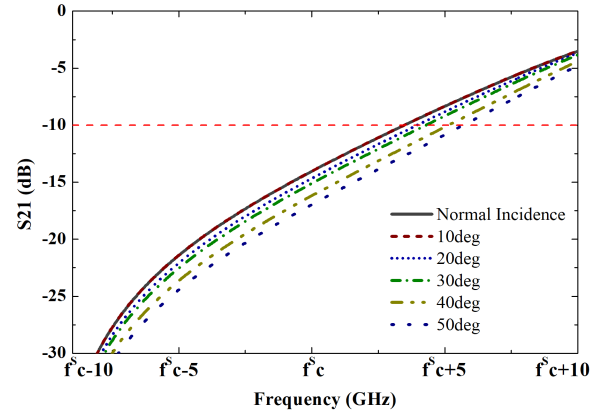
그림 4는 통과대역(밀리미터파 대역)에서 입사파의 편

표 1. FSS 구조 파라미터값
Table 1. FSS structure parameter values.

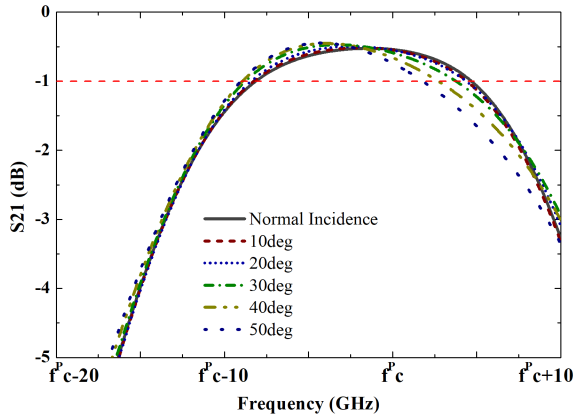
L_1	L_2	L_3	W	G
$0.174 \lambda^P_c$	$0.035 \lambda^P_c$	$0.035 \lambda^P_c$	$0.012 \lambda^P_c$	$0.008 \lambda^P_c$
t_1	t_2	t_3	t_4	
$0.028 \lambda^P_c$	$0.116 \lambda^P_c$	$0.014 \lambda^P_c$	$0.0014 \lambda^P_c$	



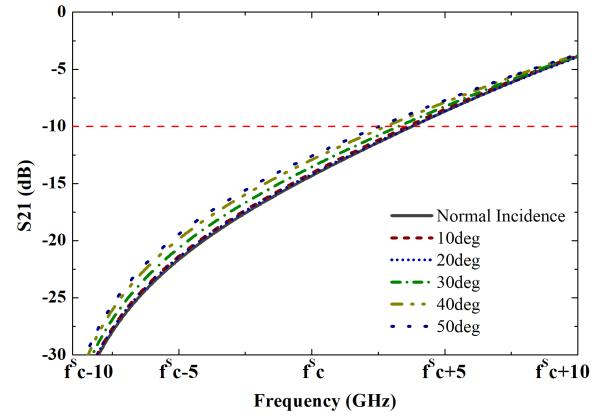
(a) TE 모드
(a) TE mode



(a) TE 모드
(a) TE mode



(b) TM 모드
(b) TM mode



(b) TM 모드
(b) TM mode

그림 4. 설계한 하이브리드 구조의 통과대역 투과손실
Fig. 4. Passband transmission loss of hybrid structure.

파 TE, TM 모드 및 입사각 $0 \sim 50^\circ$ 변화에 따른 투과손실을 나타낸 것이다. 이때 f^p_c 는 수직입사파일 때 통과대역에서의 중심주파수를 나타낸다. 수직입사파일 경우, 중심주파수 f^p_c 에서 0.53 dB의 낮은 투과손실을 가지며, 1 dB 기준 12.93 GHz의 넓은 대역폭을 가진다. 입사파의 입사각도가 커질수록 높은 주파수 대역의 투과손실이 저하되어 입사각 50° 일 때 1 dB 기준 대역폭이 11.64 GHz로 감소하지만, 중심주파수 f^p_c 에서는 1 dB 이하의 투과손실을 가짐을 확인할 수 있다.

그림 5는 차단대역인 X-대역의 투과손실을 나타낸 것으로, 이때 f^s_c 는 차단대역의 중심주파수를 나타낸다. 수

그림 5. 설계한 하이브리드 구조의 저지대역 투과손실
Fig. 5. Stopband transmission loss of hybrid structure.

직입사파일 경우, 중심주파수 f^s_c 에서 13.75 dB의 투과손실을 가지며, 입사각도의 변화에 따라 모두 10 dB 이상의 투과 손실을 가짐을 확인할 수 있다.

2-2 하이브리드 구조 제작 및 측정결과

설계한 하이브리드 구조의 성능을 검증하기 위해 그림 6과 같이 E-glass/epoxy의 스킨과 폼 사이에 설계한 사각루프 타입의 FSS 구조를 접착필름을 사용하여 제작하였다. 네트워크분석기에 연결된 2개의 송/수신 안테나 사이에 하이브리드 구조 시편을 위치시켜 입사하는 입사파에

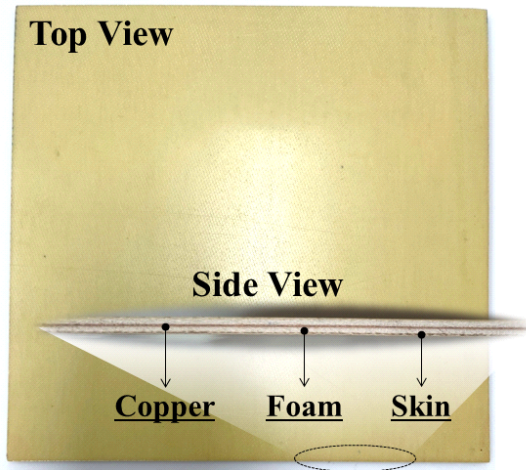


그림 6. 제작한 하이브리드 구조

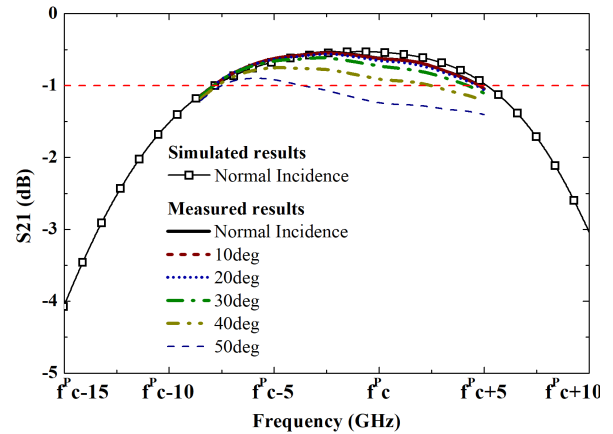
Fig. 6. Fabricated hybrid structure.

대한 투과손실을 측정하는 자유공간측정방법을 사용하여 밀리미터파 대역과 X-대역에서의 투과손실을 측정하였다^{[6],[7]}.

그림 7은 실제 제작한 하이브리드 구조를 통과대역에서 편파 TE, TM 모드 및 입사각 0° 부터 50° 변화에 따른 투과손실을 측정된 결과이다. 수직 입사파를 기준으로 중심주파수 f^p_c 에서 0.62 dB의 낮은 투과손실을, 1 dB 기준 대역폭은 12.65 GHz로 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 가진다. 입사각도가 증가할수록 투과손실이 저하되며, 특히 TE 모드 입사파 50° 에서는 투과손실이 전체적으로 급격하게 저하되어 1 dB 기준 대역폭이 3.86 GHz로 매우 좁아진 것을 확인할 수 있다. 이는 입사각도가 증가할수록 입사파 기준으로 하이브리드 구조의 전체 면적이 좁아짐에 따라 손실이 크게 발생하여 생긴 오차로 사료된다. 그림 8은 차단대역에서의 투과손실을 측정된 결과로, 수직 입사파를 기준으로 중심주파수 f^s_c 에서 13.45 dB의 투과손실을 가지며, 시뮬레이션결과와 유사한 주파수 응답특성을 가짐을 확인하였다.

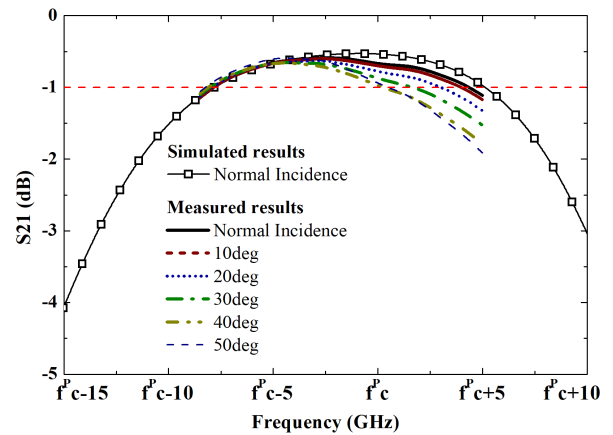
III. 결 론

본 논문에서는 복잡한 사각 루프 타입의 FSS 구조를 다층 복합 소재와 결합한 하이브리드 구조를 설계하였다.



(a) TE 모드

(a) TE mode



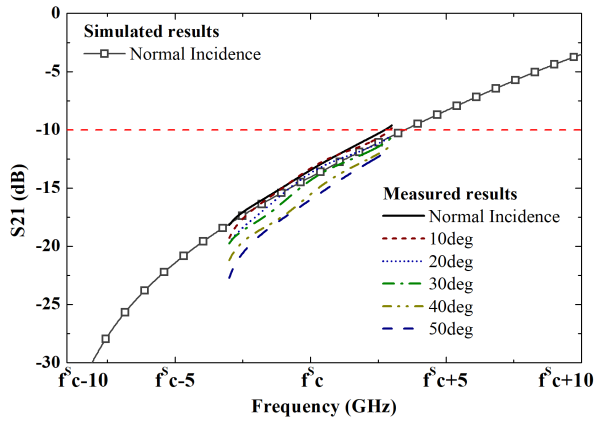
(b) TM 모드

(b) TM mode

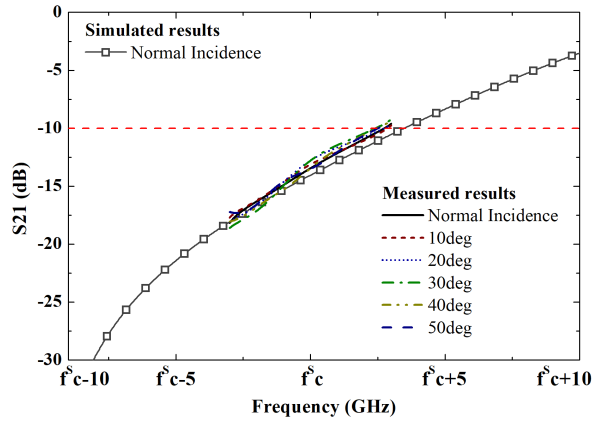
그림 7. 통과대역에서의 투과손실 측정결과

Fig. 7. Measured transmission loss results in passband.

설계한 구조는 편파 TE, TM 모드 및 입사각 0° 부터 50° 변화에 따라 밀리미터파 대역 중에서 목표 주파수대역에서는 1 dB 이하의 주파수 투과특성을 가지며, X-대역에서는 10 dB 이상의 주파수 차단특성을 가짐을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 제작된 하이브리드 구조 시편에 대해 자유공간측정방법을 사용하여 수직입사파를 기준으로 통과대역과 차단대역의 투과손실을 측정된 결과, 모두 설계 목표 조건에 만족하며, 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 가짐을 확인하였다.



(a) TE 모드
(a) TE mode



(b) TM 모드
(b) TM mode

그림 8. 차단대역에서의 투과손실 측정결과

Fig. 8. Measured transmission loss results in stopband.

References

[1] B. Sakthi Abirami, E. F. Sundarsingh, and V. S.

- Ramalingam, "Mechanically reconfigurable frequency selective surface for RF shielding in indoor wireless environment," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 6, pp. 2643-2646, Dec. 2020.
- [2] R. Panwar, S. Puthucheri, D. Singh, V. Agarwala, and J. R. Lee, "Microwave absorption properties of FSS impacted composites as a broadband microwave absorber," *Advanced Composite Materials*, vol. 26, no. 2, pp. 99-113, 2017.
- [3] N. Liu, X. Shen, C. Zhang, and D. Guo, "Design of frequency selective surface structure with high angular stability for radome application," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 138-141, Jan. 2018.
- [4] S. H. Lee, I. P. Hong, and Y. J. Kim, "Analysis of discontinuous structure effect in frequency selective radome manufacturing," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 607-615, Oct. 2019.
- [5] B. Liu, Z. Nie, Y. Cao, H. Gu, K. Fan, and Y. Sui, "Performance improvement by new integration scheme of radome-FSS-antenna," in *2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics(ICCEM)*, Chengdu, Mar. 2018. pp. 355-359.
- [6] U. Farooq, A. Iftikhar, M. F. Shafique, M. S. Khan, A. Fida, and M. J. Mughal, et al., "C-band and X-band switchable frequency-selective surface," *Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 476, Feb. 2021.
- [7] I. G. Lee, Y. J. Yoon, K. S. Choi, and I. P. Hong, "Design of an optical transparent absorber and defect diagnostics analysis based on near-field measurement," *Sensors*, vol. 21, no. 9, pp. 3076, Apr. 2021.

조 성 실 [공주대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0878-077X>



2016년 2월: 공주대학교 정보통신공학부 (공학사)
2018년 2월: 공주대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2018년 3월~2022년 2월: 공주대학교 스마트자연공간연구센터 연구원
2022년 3월~현재: 공주대학교 정보통신

공학과 박사과정

[주 관심분야] 주파수 선택구조 설계 및 응용

윤 나 내 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9703-5335>



2019년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학박사)
2018년 12월~2019년 12월: 한국전기연구원 Post-Doctor
2020년 3월~현재: 한화시스템(주) 전문연구원

[주 관심분야] 안테나, 배열안테나, 위상 배열안테나, 초고주파 회로 설계 등

윤 대 영 [아주대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4811-4969>



2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2018년 3월~현재: 아주대학교 AI융합네트워킹학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 주기구조 설계 및 해석, Ray Tracing, 레이더 및 RCS 해석

오 경 현 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7715-8995>



1998년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2010년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월~2015년 6월: 삼성탈레스(주) 수석연구원
2015년 7월~현재: 한화시스템(주) 수석연구

원

[주 관심분야] 밀리미터파 안테나, 배열 안테나, 빔조향 배열안테나

김 지 형 [한화시스템/전문연구원]

<http://orcid.org/0000-0002-3854-3145>



2009년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
2016년 3월~2016년 9월: 한화탈레스(주) 전문연구원
2016년 9월~현재: 한화시스템(주) 전문연구

원

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 레이더 전자파해석

우 대 웅 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6718-9122>



2007년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
2013년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2013년 4월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 위상배열안테나, 슬롯배열 안테나, 주기구조, Direction-Finding

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학사)

2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학박사)

2003년 2월~2006년 8월: KT인프라연구

소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과/AI 융합네트워크학
과 교수

[주 관심분야] 안테나, 전자장 해석, EMI/EMC

홍 익 표 [공주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
사)

1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
석사)

2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학
과 (공학박사)

2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 무선

사업부 책임연구원

2006년 2월~2007년 2월: Texas A & M University, Visiting
Scholar

2012년 2월~2013년 2월: Syracuse University, Visiting Scholar

2003년 3월~현재: 공주대학교 정보통신공학부 교수

[주 관심분야] 전자기 수치해석, 주파수 선택구조 등