

초광대역 차단 특성을 갖는 종이기반 주파수 선택적 구조 설계

Design of Paper-Based Frequency Selective Surface with Ultra-Wideband Rejection

김호진 · 조성실 · 김윤재* · 홍익표

Ho-Jin Kim · Sung-Sil Cho · Yoon-Jae Kim* · Ic-Pyo Hong

요 약

본 논문은 실내 환경에서 초광대역 레이더 신호 및 광대역 간섭 신호를 차단하기 위해 벽지로 응용이 가능한 광대역 차단 특성을 갖는 종이기반 UWB 주파수 선택적 구조를 제안하였다. 제안된 구조는 저주파 차단특성을 갖는 사각 루프형 구조와 고주파 차단특성을 갖는 팬 날개형 구조를 결합하여 광대역 특성을 구현하였으며, 저항소자를 추가하여 편파 및 입사각 안정성을 구현하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 얇은 두께를 갖는 종이 위에 스크린 프린팅 기법을 이용하여 전도성 패턴과 저항소자를 각각 구현하여 제작하였다. 제작된 주파수 선택구조를 자유공간 측정법을 통해 확인한 결과 6.9 GHz의 넓은 대역폭을 가지며, 편파(TE, TM) 및 입사각($0^\circ \sim 45^\circ$) 변화에 따라 안정적인 성능을 갖고, 계산결과와 유사한 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a paper-based very thin ultra-wideband(UWB) frequency selective structure to block UWB radar or broadband interfering signals. The proposed structure combines a square loop structure with low frequency blocking characteristics and a fan-wing structure with high frequency blocking characteristics to realize wideband rejection. Resistive elements were added to compensate for polarization and incident angle stability. Based on the simulation results, we fabricated conductive patterns and resistive elements on a thin paper using the screen printing technique. We measured the transmission characteristics of the fabricated frequency selective structure using the free space measurement method and found that it has a wide bandwidth of 6.9 GHz and stable performance despite the variation in polarization and incident angle.

Key words: Paper-Based Frequency Selective Structure, Ultra-Wideband, Incidence Angle Stability, Screen Printing

I. 서 론

수백 피코초의 아주 짧은 임펄스 신호를 사용하는 UWB

(Ultra-wideband) 기술은 높은 데이터 전송 속도와 고정밀도의 장점을 가진다. 특히 단순한 회로만으로 높은 분해능 특성을 구현할 수 있고, 장애물 너머의 목표물에 대한

「이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로(UD170044JD) 수행되었음.」

공주대학교 정보통신공학부(Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received February 14, 2019 ; Revised March 11, 2019 ; Accepted July 8, 2019. (ID No. 20190214-021)

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

형태와 위치 탐지가 가능하여 무선통신 시스템과 의료 분야, 레이더 등 다양한 분야에 응용되고 있다^[1]. 한편, 이러한 기술은 광대역 특성으로 인해 타 서비스가 사용 중인 인접 채널에 장애나 레이더 신호에 대한 원치 않는 탐지의 위협을 야기할 수 있다는 단점이 있다. 따라서 UWB 레이더 신호를 차단하여 보안성을 확보하고, 주파수를 효율적으로 사용하기 위한 방법으로 특정 주파수 대역을 통과/차단 특성을 갖는 주파수 선택적 구조(frequency selective surface: FSS)를 이용한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다^{[2]~[6]}.

광대역 특성을 구현하는 방법은 크게 상호 결합 효과를 이용한 방법과 복잡한 구조를 이용한 방법으로 구분할 수 있다. 상호 결합 효과를 이용한 방법은 동일 또는 상이한 단위구조를 적층하여 구조 간 발생하는 상호 결합 특성을 통해 광대역 특성을 구현하는 방법이다. 하지만 구조를 다층으로 적층함으로써 구조의 두께가 두꺼워지는 단점이 발생하여, 단층 형태의 양면 구조로 단위구조를 적층하는 연구가 진행되어 왔으나, 다층 구조에 비해 협대역 특성을 갖는다^{[2],[3]}. 복잡한 구조를 이용한 방법은 단위구조를 복잡한 형상으로 구현하여 전기적 길이를 증가시킴으로써 광대역 특성을 구현하는 것으로 대표적인 연구로 육각 구조 기반의 2.5차원의 FSS 구조와 사각 패치 기반의 프랙탈 구조가 있다^{[4],[6]}. 하지만 복잡한 구조로 인해 제작 과정이 어렵고 제작비용이 증가하며, 불안정한 입사각 안정특성을 갖는다는 단점이 있다.

스크린 프린팅 기법은 인쇄전자 기술 중 하나로 메시 형태의 스크린 마스크 위에 전도성 잉크를 도포하여 찍어내는 기술이다. 기존 PCB 기반의 제작 방식은 화학 약품의 부식작용을 이용하여 불필요한 부분을 제거하여 원하는 구조를 제작하는 방식으로 정밀도가 높고, 제작 오차가 작으며, 복잡한 구조 형성이 용이하지만 제작 공정이 복잡하고, 화학물질로 인한 환경오염이 발생할 뿐만 아니라, 고온 공정으로 인해 유전기판의 선택도가 낮다는 특징을 가지고 있다. 하지만 스크린 프린팅 기법은 스크린 마스크를 이용하여 대량 생산이 가능하며, 종이나 필름과 같이 고온에 약한 유연한 유전기판 위에 제작이 가능하여 건물 벽면이나 유리창 등 실내 공간에 적용이 용이하기 때문에, 실내 무선통신 시스템 용량 향상 및 간섭

차단용 FSS 구조 등 다양한 연구가 진행되어 왔다^{[7]~[9]}.

본 논문에서는 특정 실내 공간의 UWB 레이더 및 간섭 신호를 차단하기 위해 입사파의 편파(TE, TM) 및 입사각($0^\circ \sim 45^\circ$) 변화에 따라 안정적인 성능을 갖는 종이기반 UWB FSS 구조를 설계하였다. 제작 편의성 및 벽지로 사용하기 위해 스크린 프린팅 기법으로 제작하였고, 측정 실험을 통해 성능을 검증하였다.

II. 설계 및 시뮬레이션

UWB에서 동작하는 FSS 구조를 설계하기 위해 광대역 특성을 갖는 루프형 구조를 응용하여 저주파 차단특성을 갖는 사각 루프형 구조와 고주파 차단특성을 갖는 팬 날개형 구조를 결합하였으며, 수직입사파를 기준으로 $4.2 \sim 11.8$ GHz(7.6 GHz)의 넓은 대역폭을 갖는다. 하지만 경사 입사의 경우 원치 않는 유도 전류가 발생하여 TE 모드 45° 조건에서 불안정한 주파수 응답특성이 나타나는 것을 그림 1을 통해 확인할 수 있다^[10]. 따라서 원치 않는 유도 전류를 억제하기 위해 사각 루프형 구조에 4개의 저항 소자를 추가하여 다양한 입사각 변화에 따라 안정적인 특성을 갖는 UWB FSS 구조를 설계하였다^[11].

제안된 구조는 그림 2에 나타난 바와 같이 4개의 저항 소자가 포함된 구조로, 기존의 PCB 제작 방식이 아닌 제작이 쉽고 대량생산이 용이한 스크린 프린팅 기법을 이

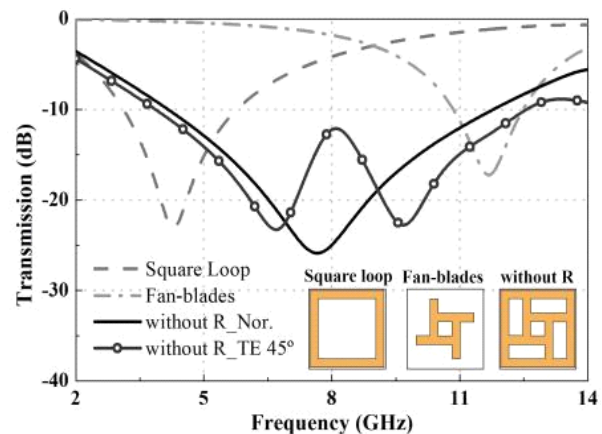


그림 1. 단위구조 설계 방법 및 투과특성 시뮬레이션
Fig. 1. Design process of unit cell and simulated transmission characteristics.

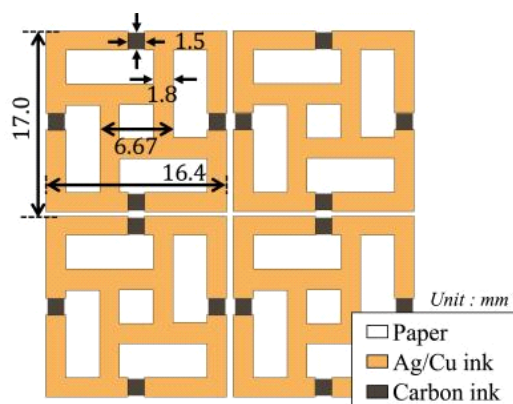


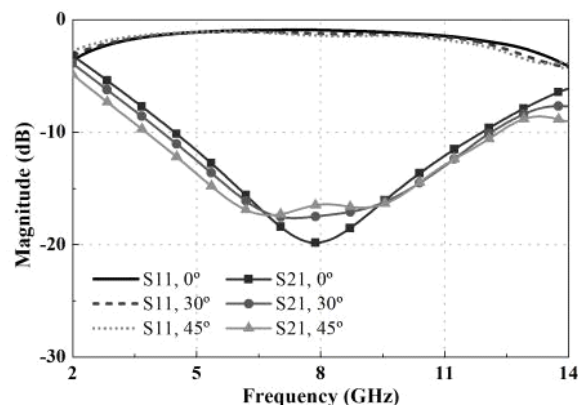
그림 2. 제안한 단위구조

Fig. 2. Geometry of proposed unit cell.

용하여 제작하기 위해 0.2 mm 두께를 갖는 종이를 유전 기판으로 사용하였다. 종이의 유전율(ϵ_r)과 손실탄젠트(loss tangent)는 얇은 유전체의 전기적 특성을 측정할 수 있는 SPDR(Split Post Dielectric Resonators)을 사용하여 측정한 결과를 바탕으로 유전율(ϵ_r)은 2.9, 손실탄젠트(loss tangent)는 0.07로 설정하였다. 또한 전도성 패턴은 동작 주파수 대역에서 높은 감쇠특성을 구현하기 위해 높은 전도성을 갖는 MG Chemicals사의 Ag/Cu 잉크를 사용하였고, 저항소자는 높은 저항성을 구현하기 위해 Bare Conductive사의 Carbon 잉크를 사용하였다. 이때 각 잉크의 표면저항은 4-탐침법 방식의 MCP-T370 휴대용 비저항측정기를 사용하여 측정하였으며, 각각 1.2 Ω/sq , 55 Ω/sq 의 표면저항을 갖는 것을 확인하였다.

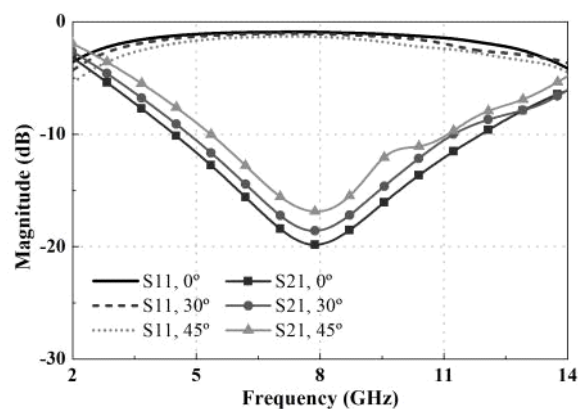
제안된 구조의 전자파 투과 및 반사특성을 확인하기 위해 전자기 소프트웨어인 HFSS의 무한배열 주기구조 해석에 사용되는 플로켓 모드(floquet mode) 경계조건을 이용하였고, 편파(TE, TM) 및 입사각($0^\circ \sim 45^\circ$) 변화에 따른 투과/반사특성을 시뮬레이션하였다. 그림 3에 나타낸 바와 같이, 수직 입사 조건에서 공진 주파수는 7.9 GHz, -10 dB 대역폭이 4.5~11.9 GHz(7.4 GHz)임을 확인하였으며, 입사 조건에 따른 공진 주파수 최대 오차는 2.4 % (200 MHz)로 입사파의 편파 및 입사각에 대해 안정적인 성능을 가지는 것을 확인하였다.

입사 각도가 증가할수록 TE 모드에서는 대역폭이 증가하고, TM 모드에서는 대역폭이 감소하는 특성이 나타



(a) TE 모드

(a) TE mode



(b) TM 모드

(b) TM mode

그림 3. 투과/반사특성 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulated transmission/reflection characteristics.

나는데, 이는 입사파의 조건에 따라 파동 임피던스 변화에 의해 발생된다. 대역 통과 특성을 갖는 FSS의 경우, TE 모드의 파동 임피던스는 $Z_{TE} = Z_0 / \cos\theta$ 로 입사 각도가 증가할수록 파동 임피던스가 증가하며, Q-factor가 증가하여 대역폭은 감소한다. 또한 TM 모드의 파동 임피던스는 $Z_{TM} = Z_0 \times \cos\theta$ 로 입사 각도가 증가할수록 파동 임피던스가 감소하며, Q-factor가 감소하여 대역폭은 증가하게 된다^[12]. 하지만 대역 통과 특성을 갖는 FSS(개구면 타입)와 대역 차단 특성을 갖는 FSS(패치 타입)는 서로 상호 보완적인 특징을 가짐에 따라^[10] 대역 차단 특성을 갖는 FSS의 경우에는 TE 모드에서 입사 각도가 증

가할수록 Q-factor가 감소하여 대역폭은 증가하며, TM 모드에서는 입사 각도가 증가할수록 Q-factor가 증가하여 대역폭은 감소하게 된다.

III. 제작 및 측정

제안한 UWB FSS 구조를 종이 위에 구현하기 위해 인쇄 전자 기술 중 스크린 프린팅 방식을 사용하여 170×170 mm(10×10 배열) 크기를 갖는 종이기반 UWB FSS 구조를 제작하였으며, 제작된 구조를 그림 4에 나타내었다. 그림 5는 제작된 종이기반 UWB FSS 구조의 성능을 검증하기 위해 사용한 자유공간측정 환경을 나타낸 것으로, 네트워크 분석기와 송/수신용 안테나 그리고 흡수체가 부착된 지그로 구성되어 있다. 사용된 송/수신 안테나는 광대역 이중 편파 렌즈 혼 안테나로 포트의 입력에 따라 편파(TE, TM)를 조절할 수 있으며, 지그를 회전하여 입사파의 입사 각도를 조절할 수 있다. 이러한 측정 시스템을 이용하여 제작한 구조를 지그의 가운데 부착하여 편파 및 입사각 변화에 따른 투과/반사특성을 측정하였다.

측정결과, 수직 입사 조건일 경우 공진 주파수는 7.85 GHz, -10 dB 기준 대역폭은 4.5~11.4 GHz(6.9 GHz)이며, 편파(TE, TM) 및 입사각($0^\circ \sim 45^\circ$) 변화에 따라 변화하는 공진 주파수의 최대 오차는 3.1 % (250 MHz)임을 그림 6을 통해 확인할 수 있다. 시뮬레이션과 비교한 결과, 입사파 TM 45° 조건에서 공진 주파수 최대 오차는 2.85 % (220 MHz)로 약간의 오차가 발생하지만 비교적 안정된 특성을 갖는 것을 확인하였다.



그림 4. 제작된 UWB FSS
Fig. 4. Fabricated UWB FSS.

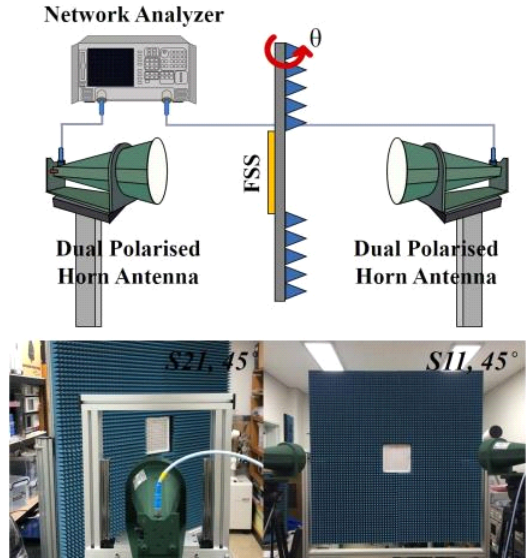


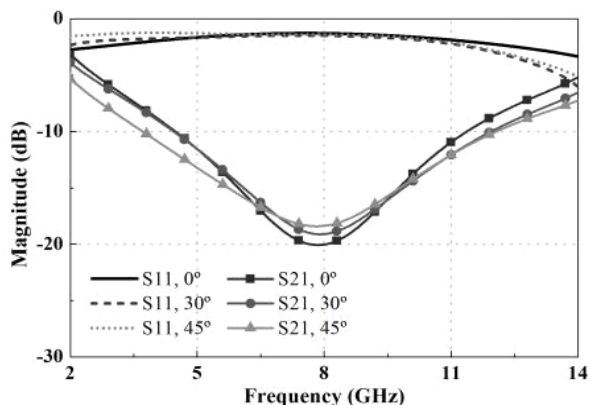
그림 5. 측정시스템
Fig. 5. Measurement system.

또한 선행 연구된 UWB FSS 구조와 비교한 결과, 표 1에 나타낸 바와 같이 제안된 구조는 기존 연구들에 비해 구조의 두께가 매우 얇은 특징을 가지며, 넓은 대역에서 입사각 45° 까지 안정적인 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

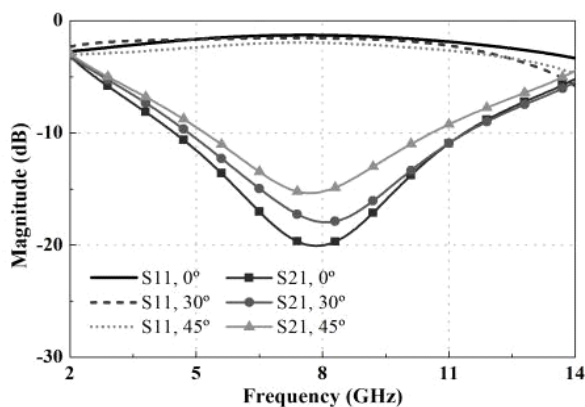
일반적으로 이상적인 구조와 다르게 실제 FSS 구조는 유한한 구조에서 입사파가 반사되어 산란되는 문제점이 있다^[13]. 따라서 본 논문에서는 제안된 구조의 흡수특성을 시뮬레이션 및 측정 실험을 통해 확인하였으며, 그림 7에 나타낸 바와 같이 차단주파수 대역에서 약 25 %의 흡수 특성을 갖는 것을 확인하였다. 제안된 구조는 높은 흡수 특성을 나타내지는 않지만, 입사면으로 산란/반사된 신호를 약간 흡수함으로써 산란 신호로 인해 발생하는 시스템 오작동 문제를 억제할 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 얇은 두께를 갖는 종이 위에 초광대역 차단 특성을 갖는 종이기반 UWB FSS 구조를 설계하였고, 제작 및 측정실험을 통해 성능을 검증하였다. 제안된 구조는 사각 루프형과 팬 날개형 구조를 결합하여 광대역 특성을 얻었으며, 저항소자를 통해 입사각 안정성을 확보하였다. PCB 제작과정 없이 빠른 제작을 위해 스크



(a) TE 모드
(a) TE mode



(b) TM 모드
(b) TM mode

그림 6. 투과/반사특성 측정 결과

Fig. 6. Measured transmission/reflection characteristics.

표 1. UWB FSS 성능 비교

Table 1. Performance comparison of UWB FSS.

Ref.	Profile (mm)	Sim. BW (GHz)	Fraction BW (%)	Angular sensitivity	Design description
[2]	10.9	8.0	100	Not reported	Double layer
[4]	1.6	6.1	122	30°	Metallic vias
[5]	0.5	8.0	114	Not reported	High ϵ_r
[6]	Not reported	8.9	99	30°	Single side
This paper	0.2	7.4	90	45°	Single side

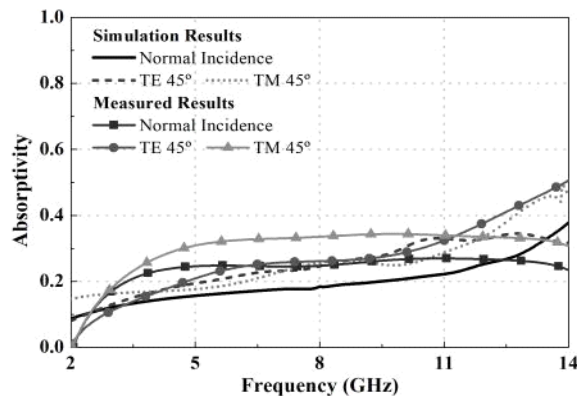


그림 7. 흡수특성 시뮬레이션과 측정 결과

Fig. 7. Simulated and measured absorptivity.

린 프린팅 기법을 사용하여 제작하였으며, 측정 결과를 통해 6.9 GHz의 넓은 광대역 특성과 안정적인 입사각 특성을 가지는 것을 확인하였다.

References

- [1] X. Zhuge, A. G. Yarovoy, T. Savelyev, and L. Ligthart, "Modified Kirchhoff migration for UWB MIMO array-based radar imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 6, pp. 2692-2703, Jun. 2010.
- [2] Y. Ranga, L. Matekovits, K. P. Esselle, and A. R. Weily, "Multioctave frequency selective surface reflector for ultrawideband antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 219-222, Mar. 2011.
- [3] A. A. Dewani, S. G. O'Keefe, and D. V. Thiel, "Transmission bandwidth enhancement using lateral displacement in a thin flexible single layer double sided FSS," in *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Hobart, TAS, 2015, pp. 1-4.
- [4] B. Hua, X. He, and Y. Yang, "Polarisation-independent UWB frequency selective surface based on 2.5D miniaturised hexagonal ring," *Electronics Letters*, vol. 53, no. 23, pp. 1502-1504, Nov. 2017.
- [5] R. Yahya, A. Nakamura, M. Itami, and T. A. Denidni, "A novel UWB FSS-based polarization diversity antenna,"

- IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2525-2528, Jul. 2017.
- [6] F. C. G. da Silva Segundo, A. L. P. S. Campos, and E. C. Braz, "Wide band frequency selective surface for angular and polarization independent operation," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 1, pp. 216-219, Nov. 2014.
- [7] A. A. Dewani, S. G. O'Keefe, D. V. Thiel, and A. Galehdar, "Window RF shielding film using printed FSS," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 66, no. 2, pp. 790-796, Feb. 2018.
- [8] D. Dawod, N. Qasem, "Enhancing the capacity of MIMO systems via modified building using frequency selective wallpapers," in *2015 6th International Conference on Information and Communication Systems(ICICS)*, Amman, 2015, pp. 171-176.
- [9] U. Farooq, M. F. Shafique, and M. J. Mughal, "Polarization insensitive dual band frequency selective surface for RF shielding through glass windows," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-8, Feb. 2019.
- [10] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 4, 35-37, 2000.
- [11] S. Ghosh, S. Bhattacharyya, and K. V. Srivastava, "Design, characterisation and fabrication on a broadband polarisation-insensitive multi-layer circuit analogue absorber," *IET Microwaves, Antennas Propagation*, vol. 10, no. 8, pp. 850-855, May 2016.
- [12] P. C. Zhao, Z. Y. Zong, W. Wu, B. Li, and D. G. Fang, "An FSS structure with geometrically separable meanderline inductors and parallel-plate capacitors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 9, pp. 4693-4705, Sep. 2017.
- [13] B. A. Munk, D. S. Janning, J. B. Pryor, and R. J. Marhefka, "Scattering from surface waves on finite FSS," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 12, pp. 1782-1793, Dec. 2001.

김 호 진 [국립공주대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9158-9487>



2014년 3월~현재: 국립공주대학교 정보통신공학부 학사과정
[주 관심분야] 주파수 선택구조 설계 및 응용

조 성 실 [국립공주대학교/연구원]

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



2016년 2월: 국립공주대학교 정보통신공학부 (공학사)
2018년 2월: 국립공주대학교 정보통신학과 (공학석사)
2018년 3월~현재: 국립공주대학교 스마트자연공간연구센터 연구원
[주 관심분야] 주파수 선택구조 설계 및 응용

김 윤 재 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1048-5318>



2005년 8월: 서울대학교 기계항공공학부
(공학석사)

2011년 8월: 서울대학교 기계항공공학부
(공학박사)

2011년 9월~2012년 3월: 서울대학교 정
밀기계공동연구소 선임연구원

2012년 4월~현재: 국방과학연구소 7본부

3부 선임연구원

[주 관심분야] 기체구조, 진동소음, 주기격자 구조

홍 익 표 [국립공주대학교/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