

# 실내 환경의 온도, 습도 변화를 고려한 무선LAN 주파수 차단 필름의 주파수 응답특성 분석

조성실\*, 이상화\*\*, 윤선홍\*\*\*, 홍익표\*\*\*\*

## Analysis of Frequency Response Characteristics of WLAN Frequency Bandstop Film Considering Temperature and Humidity Changes in Indoor Environment

Sung-Sil Cho\*, Sang-Hwa Lee\*\*, Sun-Hong Yoon\*\*\*, and Ic-Pyo Hong\*\*\*\*

본 연구는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원(2017K000448)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1A2B6001680)으로 수행되었습니다.

### 요약

본 논문에서는 주파수 채널 간섭을 감소하기 위해 건물 벽면에 적용 가능한 사각루프 구조 기반 필름형 주파수 선택 표면 설계를 설계하였고, 온도 및 습도 변화에 따른 환경시험 평가를 하여 투과특성 변화를 분석하였다. 제한한 필름형 FSS의 단위구조는 편파 및 입사각 변화에 따른 안정성 및 소형화를 구현하기 위해 복잡한 사각루프 패턴으로 설계하였고, 낮은 제작 비용 및 대면적 생산이 가능한 스크린 인쇄 방식을 이용하여 WLAN대역에서 차단특성을 갖도록 제작하였다. 필름형 FSS가 실제 벽지로 적용될 경우, 온도나 습도 등 기후 변화에 따라 주파수 응답특성 변화가 발생하는지 확인하기 위해 고온, 고습 시험 평가와 온도변화 시험 평가를 진행하였으며, 환경평가를 하기 전과 환경평가를 한 후의 주파수 응답특성 측정 결과를 비교하였다. 제한한 구조는 최대 1.3%의 공진주파수 오차로 선행연구들 보다 비교적 안정적인 성능을 가짐을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we design a film-type frequency selective surface that can be easily applied to building walls. The changes in transmission characteristics were analyzed from environmental tests according to temperature and humidity. The proposed structure is designed with a complex rectangular loop pattern to realize stability and miniaturization according to the change of polarization and incident angle, and a film-type FSS having blocking characteristics in the WLAN band is manufactured by using a screen printing method. To investigate the effect of the environmental change on the film-type FSS, high temperature and high humidity test evaluation and temperature change test evaluation were performed. As a result of comparison, the proposed film-type structure has a relatively stable performance due to the resonance frequency error up to 1.3% depending on the ambient temperature and humidity.

### Keywords

film-type frequency selective surface, environmental test, screen printing method

\* 공주대학교 스마트자연공간연구소  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0878-077X>

\*\* 공주대학교 대학원 정보통신공학과  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7153-7962>

\*\*\* 전자부품연구원  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8769-6623>

\*\*\*\* 공주대학교 정보통신학부 교수(교신저자)  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>

· Received: Jun. 05, 2018, Revised: Jul. 13, 2018, Accepted: Jul. 16, 2018

· Corresponding Author: Ic-Pyo Hong  
Dept. of Information & Communication Eng., Kongju National University  
Cheonan, Korea.

Tel.: +82-41-521-9199, Email: [iphong@kongju.ac.kr](mailto:iphong@kongju.ac.kr)

### 1. 서 론

이동통신기술의 급격한 발전으로 무선 트래픽의 수요와 무선 디바이스 수가 폭발적으로 증가함에 따라 빠른 데이터 전송이 가능한 차세대 이동통신 기술인 5G 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 보다 빠른 데이터 전송 속도를 제공하기 위해서는 넓은 주파수 대역이 확보되어야 하지만 주파수 자원은 제한되어 있어 시간이 지날수록 사용 가능한 면허 대역 주파수는 줄어들고 있다. 이를 대비하여 면허 대역 주파수와 비면허 대역 주파수를 같이 사용하는 기술에 대한 연구가 개발됨에 따라 최근 비면허 대역에 대한 수요가 점차 증가하고 있다[1][2]. 하지만 비면허 대역은 별도의 허가 없이 누구나 이용이 가능한 대역으로 이미 블루투스, 무선LAN 등 다양한 무선 서비스에 사용되고 있다. 그로 인해 전파 혼선, 간섭이 빈번히 발생하게 되어 기기 및 시스템 오작동, 무선통신성능 저하 등의 문제가 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하고, 효율적으로 비면허 대역을 사용하기 위해서 물리적으로 특정 주파수 채널을 분리시킬 수 있는 주파수 선택 표면(FSS, Frequency Selective Surface)에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다[3][4].

FSS는 유전기판에 전도성 패턴이 주기적으로 배열된 주기구조로, 패턴의 형상이 패치인지 또는 슬롯인지에 따라 선택적으로 주파수를 차단 또는 통과하는 필터 특성을 구현할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 흡수체(Absorber)[5], 레이돔(Radome)[6], 안테나 이득 향상[7], EMI 차폐[8] 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. FSS의 동작주파수는 전도성 패턴의 구조 형태와 크기 등에 영향을 받을 뿐만 아니라 전도성 패턴을 지지하는 유전기판의 유전율, 손실탄젠트, 두께 등 다양한 요소들에 의해 결정된다. 그러나 [9]에서 연구된 바와 같이 마이크로파 대역에서 유전 물질의 유전율과 손실탄젠트 값은 온도에 따라 변화하기 때문에 주변 실내 환경의 온도, 습도 등 다양한 환경에 노출된 FSS의 성능 변화 여부를 확인할 필요가 있다.

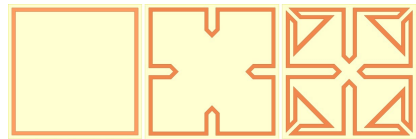
본 논문에서는 비면허 대역 중 무선LAN 2.4GHz 대역의 간섭을 줄이기 위해 선택적으로 주파수를 차단하는 소형화된 FSS를 설계 및 스크린 프린팅

방식을 이용하여 구현하였다. 환경의 온도, 습도 등 변화에 따라 필름형 FSS의 투과특성 변화를 확인하기 위해 고온 고습, 온도변화 시험 평가를 진행하였으며, 자유공간 측정법을 통해 필름형 FSS의 투과특성을 측정하여 성능 변화를 관찰하였다.

### II. 필름형 주파수 선택 표면

#### 2.1 필름형 주파수 선택 표면 설계

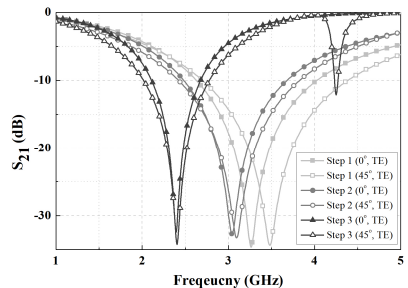
제안한 구조는 소형화 및 입사하는 입사파의 편파 및 입사각도에 안정성을 높이기 위하여 그림 1(a)의 Step 2와 같이 복잡한 사각 루프 패턴을 기반으로 하였으며[10], 구조의 최적화를 위하여 Step 3와 같이 단위구조를 구현하였다. 그림 1(b)는 설계 과정에 대한 투과특성 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 기존 사각 루프 패턴보다 24.5% 단위구조의 크기를 줄일 수 있으며, 입사각 0°~45°변화에 따라 안정적인 성능이 나타나는 것을 확인할 수 있다.



Step 1 Step 2 Step 3

(a) 단위구조 설계 과정

(a) Design process of FSS unit cell



(b) 각 구조의 투과특성

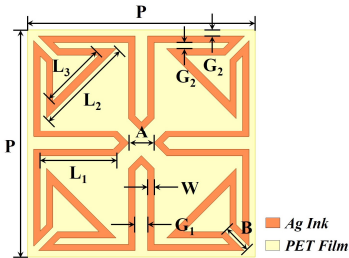
(b) Transmission characteristic of FSS unit cell

그림 1. 제안한 FSS 단위구조의 설계 과정  
Fig. 1. Design process of proposed FSS unit cell

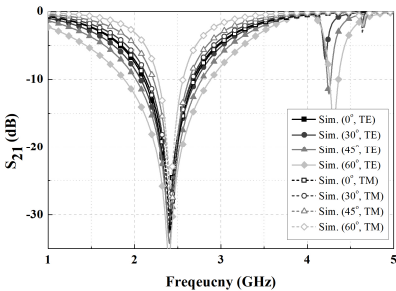
설계한 FSS의 단위구조는 건물 벽면 적용을 위해 유전 기판은 0.1mm의 두께(t), 3.5의 유전율, 0.003의 손실 탄젠트를 가진 PET 필름이며, 전도성 패턴은 0.05Ω/sq로 가정하였다. 무선LAN 2.4GHz 대역을 차단하는 것을 목표로, 최적화된 설계 파라미터를 얻기 위해 그림 2(a)와 같이 단위구조의 설계 파라미터를 가정하고, 3차원 전자기장 해석 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션 하였으며, 표 1에 최적화된 설계 파라미터 값을 나타내었다.

표 1. FSS 단위구조의 설계 파라미터  
Table 1. Design parameters of FSS unit cell

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (mm)
P	18	G <sub>2</sub>	0.5
L <sub>1</sub>	6	A	5
L <sub>2</sub>	7.778	B	2.121
L <sub>3</sub>	5.157	W	0.5
G <sub>1</sub>	1		



(a) FSS의 단위구조  
(a) Unit cell of FSS



(b) 투과특성 시뮬레이션 결과  
(b) Simulated transmission characteristic results

그림 2. 제안한 필름형 FSS  
Fig. 2. Proposed film type FSS

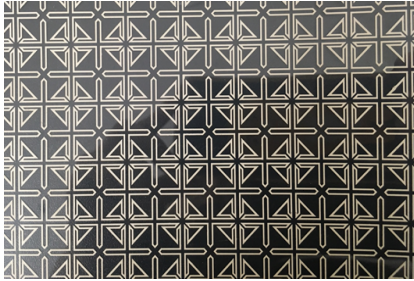
시뮬레이션 결과, TE 모드 입사각 0°일 경우 공진주파수는 2.4GHz, -10dB 기준 대역폭은 570MHz (23.75%)이며, TM 모드 0°일 경우 공진주파수는 2.42GHz, 대역폭은 570MHz(23.75%)이다. TE 모드 입사각 60°일 경우에는 공진주파수 2.416GHz, 대역폭 1GHz(41.66%)이며, TM 모드 입사각 60°일 경우에는 공진주파수 2.416GHz, 대역폭 290MHz(12.08%)임을 확인하였다. 제안한 필름형 FSS 구조는 시뮬레이션 결과를 통해 편파 TE, TM 모드 및 입사각 0°~60° 변화에 따라 안정적인 성능을 가짐을 그림 2(b)를 통해 확인할 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 PET 필름이나 종이 등 얇은 두께를 가진 유전 기판을 이용하여 설계한 선행 연구된 구조들과 비교한 결과, 본 논문에서 제안한 구조는 시뮬레이션 결과를 기준으로 입사각도 0°~60° 변화에 따라 최대 0.82%의 공진주파수 오차로 비교적 매우 안정적인 성능을 가짐을 표 2를 통해 알 수 있다.

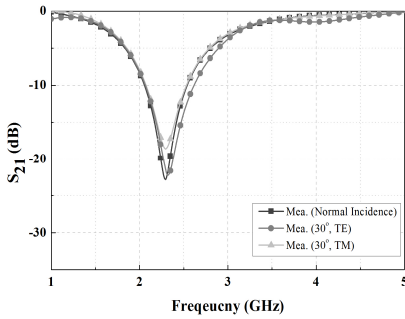
설계한 필름형 FSS의 성능을 검증하기 위해 스크린 인쇄 방식을 사용하여 필름형 주파수 선택 구조를 제작하였다. 스크린 인쇄 방식은 필름이나 종이, 섬유, 유리 등 위에 고전도성은 나노 잉크를 사용하여 패턴을 찍어 인쇄하는 방식으로, 저비용 단순 제작 공정이 가능하여 대량생산이 용이하다 [4][8].

표 2. 제안한 구조와 선행 연구된 구조들과의 성능 비교  
Table 2. Comparison between the proposed FSS and previous researches

Ref. (Freq.)	unit cell	Substrate	Stability (Sim.)	Stability (Mea.)
[4] (2.0GHz)	0.1λ	PET film (t=0.1mm)	Max 5% at 0°~60°	Max 1.6% at 0°~30°
[11] (12.25GHz)	0.3λ	PET film (t=0.1mm)	Max 3% at 0°~60°	Not reported
[12] (1.0&1.7GHz)	0.15λ	Paper (t=0.5mm)	Max 6% at 0°~60°	Max 1.4% at 0°~30°
[13] (2.4&5.6GHz)	0.14λ	Paper (t=0.2mm)	Max 5% at 0°~60°	Not reported
This paper (2.4GHz)	0.14λ	PET film (t=0.1mm)	Max 0.8% at 0°~60°	Max 0.8% at 0°~30°



(a) 제작된 필름형 FSS  
(a) Fabricated film type FSS



(b) 투과특성 측정결과  
(b) Measured transmission characteristic results

그림 3. 제작된 필름형 FSS와 측정결과  
Fig. 3. Fabricated film type FSS and measured results

그림 3(a)와 같이 크기 41cm×30cm 투명 PET 필름 위에 제한한 단위구조를 배열하여 제작하였으며, 자유공간 측정법을 사용하여 제작된 필름형 FSS의 투과특성을 측정하였다. 측정 결과, 입사하는 입사파가 수직으로 입사할 때 공진주파수는 2.29GHz (-22.8dB)이며, 대역폭은 -10dB 기준으로 472MHz (20.61%)를 가짐을 확인하였다. 편파 TE 모드, 30°에서의 공진주파수와 대역폭은 2.31GHz(-22.2dB), 528MHz(22.85%)이며, TM 모드, 30°에서 공진주파수와 대역폭은 2.29GHz(-18.4dB), 450MHz (19.65%)로 편파 및 입사각 변화에 따라 0.87% 이하의 오차가 발생하는 것을 그림 3(b)를 통해 확인할 수 있다.

## 2.2 환경변화에 따른 필름형 주파수 선택 표면의 주파수 응답특성 분석

제작한 필름형 FSS의 제품화시 요구되는 환경 신뢰성 확보를 위하여 고온, 고습 시험 평가와 온도 변화 시험 평가를 진행하였다. 고온, 고습 시험은 전기·전자 부품, 기기 또는 그 밖의 제품을 높은 상대습도의 상태에서 사용할 수 있는 능력을 확인하는 시험으로 KS C 0222에서 규정하는 시험방법에 따랐다. 고온, 고습 시험에 사용하는 장비인 항온항습기 내의 온도는 40±2℃, 상대습도는 85~95%로 유지 시킨 후, 필름형 FSS를 항온항습기에 넣어 96시간 동안 방치하였다.

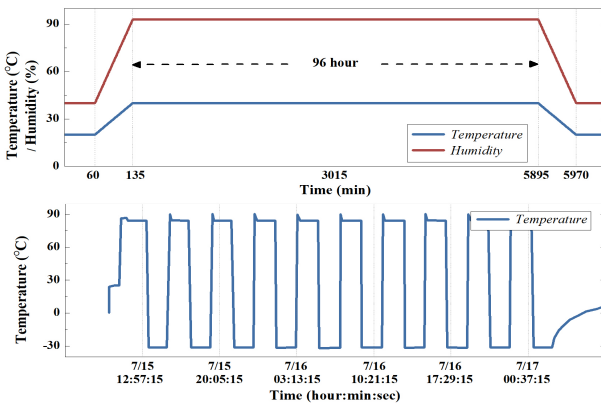


그림 4. 환경변화 시험의 조건  
Fig. 4. Conditions of environmental change test

온도변화 시험은 온도 변화 또는 온도 변화의 반복이 부품, 기기 또는 기타 제품에 주는 영향을 확인하기 위한 시험이다. KS C 0225에서 규정한 시험을 따라 온도변화 시험을 평가하기 위해 환경시험용 열충격시험기를 사용하였다. 열충격시험기 내 고온실의 온도는 80±2℃, 저온실의 온도는 -30±2℃로 설정하였고, 고온실과 저온실의 유지시간은 각각 3시간, 고온실과 저온실의 사이 이동시간은 5분 이내로 규정하였다. 시험 방법은 먼저 고온실, 저온실 온도와 유지시간을 설정한 열충격시험기에 필름형 FSS를 넣은 후, 고온실과 저온실을 각각 10번 반복 이동하였다. 반복 이동이 종료된 이후 열충격시험기 내 온도는 상온으로 유지시켰으며, 육안으로 외형을 확인하여 정상동작을 확인하였다. 그림 4는 고온, 고습시험과 온도변화시험 조건에 대한 그래프를 나타내었다.

환경변화 시험 평가를 진행한 후, 앞에서 사용한 측정 환경과 동일한 환경에서 필름형 FSS의 투과특성을 측정하였다.

그림 5와 표 3은 고온, 고습 시험을 평가한 필름형 FSS의 투과특성을 나타낸 것이다. 수직으로 입사하는 입사파일 경우 공진주파수는 2.29GHz (-22.7dB), -10dB 대역폭은 481MHz(21%)로, 환경평가를 하지 않은 필름형 FSS의 투과특성과 매우 비슷한 성능을 가짐을 확인하였다. 편파 TE, 입사각도 30°일 경우 역시 공진주파수와 투과손실이 환경평가를 하지 않은 필름형 FSS의 투과특성과 매우 비슷한 성능을 가지지만, TM 모드, 입사각도 30°에서는 공진주파수가 2.32GHz로 약간 이동하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 오차가 1.3% 이하로 미비하고, 투과손실 및 대역폭이 비슷함으로 고온, 고습 환경에서도 필름형 FSS는 안정적인 성능을 가지는 것을 측정 실험을 통해 확인하였다.

그림 6과 표 4는 온도 변화 시험을 진행한 필름형 FSS의 투과특성을 나타낸 것으로, 수직 입사할 경우 공진주파수는 2.29GHz(-23.9dB), 대역폭은 472MHz (20.61%)이다. TE 모드, 입사각 30°일 경우 역시 공진주파수는 2.31GHz(-22.7dB), 대역폭은 551MHz(23.85%)로 환경평가를 진행하기 전의 필름형 FSS와 비슷한 성능을 가진다. TM 모드, 입사각 30°에서는 공진주파수와 손실에서 약간의 오차가

발생하나, 0.87% 이하의 오차로 안정적인 특성을 가진다.

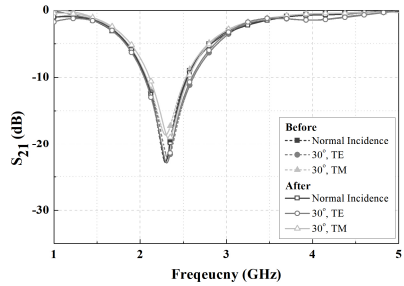


그림 5. 고온, 고습 시험 평가를 한 필름형 FSS 투과특성  
Fig. 5. Transmission characteristics of film type FSS with high temperature and high humidity tests

표 3. 고온, 고습 시험 평가 결과

Table 3. High temperature and humidity test results

	Before test			After test		
	f <sub>0</sub> (GHz)	loss (dB)	BW (MHz)	f <sub>0</sub> (GHz)	loss (dB)	BW (MHz)
0°	2.29	-22.8	472	2.29	-22.7	481
TE, 30°	2.31	-22.2	528	2.31	-22.9	551
TM, 30°	2.29	-18.4	450	2.32	-19.0	450

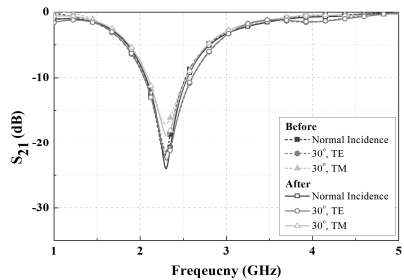


그림 6. 온도 변화 시험 평가를 한 필름형 FSS 투과특성  
Fig. 6. Transmission characteristics of film type FSS with temperature change tests

표 4. 온도 변화 시험 평가 결과

Table 4. Temperature change test results

	Before test			After test		
	f <sub>0</sub> (GHz)	loss (dB)	BW (MHz)	f <sub>0</sub> (GHz)	loss (dB)	BW (MHz)
0°	2.29	-22.0	450	2.29	-23.9	472
TE, 30°	2.31	-21.6	551	2.31	-22.7	551
TM, 30°	2.29	-17.0	438	2.31	-19.0	438

본 연구에서 제시한 결과를 바탕으로 스크린 프린팅 방식으로 제작한 필름형 FSS는 그림 4에서 제시한 환경변화에 노출된 조건에서 선행 연구들 보다 비교적 안정적인 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 입사파의 편파 및 입사각도 변화에 따라 안정적인 주파수 특성을 가지는 사각 루프 패턴을 기반으로 소형화된 FSS를 설계하였다. 이는 건물 적용을 목표로 하여, 대량생산 및 대면적 적용이 용이한 스크린 프린팅 방식을 이용하여 필름형 FSS를 제작하였다. 자유공간 측정법을 통해 측정된 결과 2.29GHz의 공진 주파수를 가지며, 편파, 입사각  $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$  변화에 따라 0.87% 이하의 공진주파수 오차를 가짐을 확인하였다. 제작된 필름형 FSS는 온도  $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ , 상대습도 85~95%인 환경에 96시간 동안 노출되거나, 온도  $-30^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$  사이에서 변화하는 환경에 노출되더라도 공진주파수의 오차가 최대 1.3%로 비교적 일정한 성능을 유지하는 것을 확인하였다.

### References

- [1] S. Y. Kim and H. D. Choi etc, "Trends for LTE-U spectrum sharing technology", 2015 Electron. Telecommun. Trends, Vol. 30, No. 3, pp. 84-94, Jun. 2015.
- [2] S. H. Hwang, S. H. Lee, and E. K. Hong, "LTE technology using unlicensed spectrum", Journal of KICS, Vol. 31, No. 11, pp. 73-78, Oct. 2014.
- [3] S. Can, K. Y. Kapusuz, and A. E. Yilmaz, "A dual-band polarization independent FSS having a transparent substrate for ISM and Wi-Fi shielding", Microw. Opt. Technol. Lett., Vol. 59, No. 9, pp. 2249-2253, Feb. 2017.
- [4] A. A. Dewani, S. G. O'Keefe, D. V. Thiel, and A. Galehdar, "Window RF shielding film using printed FSS", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 66, No. 2, pp. 790-796, Feb. 2018.
- [5] B. A. Munk, P. Munk, and J. Pryor, "On designing jaumann and circuit analog absorbers (CA Absorbers) for oblique angle of incidence", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 55, No. 1, pp. 186-193, Jan. 2007.
- [6] H. Chen, X. Hou, and L. Deng, "Design of frequency selective surface radome for a planar slotted waveguide antenna", IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., Vol. 8, pp. 1231-1233, Oct. 2009.
- [7] Z. C. Ge, W. X. Zhang, Z. G. Liu, and Y. Y. Gu, "Broadband and high-gain printed antennas constructed from fabry-perot resonator structure using EBG or FSS cover", Microw. Opt. Technol. Lett., Vol. 48, No. 7, pp. 1272-1274, Jul. 2006.
- [8] L. B. Wang, K. Y. See, J. W. Zhang, B. Salam, and A. C. W. Lu, "Ultrathin and flexible screen-printed metasurfaces for EMI shielding applications", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 53, No. 3, pp. 700-705, Aug. 2011.
- [9] V. V. Varadan, R. D. Hollinger, D. K. Ghodgaonkar, and V. K. Varadan, "Free-space, broadband measurements of high-temperature, complex dielectric properties at microwave frequencies", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 40, No. 5, pp. 842-846, Oct. 1991.
- [10] M. Nauman, R. Saleem, A. K. Rashid, and M. F. Shafique, "A miniaturized flexible frequency selective surface for X-band applications", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 58, No. 2, pp. 419-428, Apr. 2016.
- [11] A. A. Dewani, S. G. O'Keefe, D. V. Thiel, and A. Galehdar, "Optically transparent frequency selective surfaces on flexible thin plastic substrates", AIP Advances, Vol. 5, No. 2, pp. 1-9, Feb. 2015.
- [12] R. Sivasamy, L. Murugasamy, M. Kanagasabai, E. F. Sundarsingh, and M. G. N. Alsath, "A low-profile paper substrate-based dual-band FSS for GSM shielding", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 58, No. 2, pp. 611-614, Apr. 2016.

[13] A. N.-Martin, F. D. Barros, G. E.-P.Tourtollet, and P. L.-Auger, "Metapaper: a frequency selective surface wallpaper for the attenuation of Wi-Fi signals", 2015 European Microwave Conference, pp. 466-469, Sep. 2015.

홍 익 표 (Ic-Pyo Hong)



2000년 2월 : 연세대학교  
전기컴퓨터공학과 대학원  
공학박사  
2000년 3월 ~ 2003년 2월 :  
삼성전자 무선사업부 책임연구원  
2006년 2월 ~ 2007년 2월 : Texas  
A&M 대학교 방문연구원

2012년 2월 ~ 2013년 2월 : Syracuse 대학교 방문연구원  
2003년 3월 ~ 현재 : 국립 공주대학교 정보통신공학부  
교수

관심분야 : 전자기 수치해석, 주파수 선택구조, 스펙트럼  
공학

저자소개

조 성 실 (Sung-Sil Cho)



2016년 2월 : 국립 공주대학교  
정보통신공학부 졸업  
2018년 2월 : 국립 공주대학교  
정보통신공학과 석사  
2018년 3월 ~ 현재 : 국립  
공주대학교 스마트자연공간  
연구센터 연구원

관심분야 : 안테나, 주파수 선택구조

이 상 화 (Sang-Hwa Lee)



2018년 2월 : 국립 공주대학교  
정보통신공학부 졸업  
2018년 3월 ~ 현재 : 국립  
공주대학교 정보통신공학과  
대학원 석사과정  
관심분야 : 안테나, 주파수  
선택구조

윤 선 홍 (Sun-Hong Yoon)



2002년 8월 : 아주대학교  
응용화학과 졸업  
2005년 2월 : 포항공과대학교  
화학과 석사  
2012년 1월 ~ 현재 :  
전자부품연구원 책임연구원  
관심분야 : 인쇄전자, 3D프린팅,

에너지저장/변환