

필름형 이중 대역 주파수 선택 구조가 적용된 실내 환경의 무선신호강도 분석

Analysis of Wireless Signal Strength in Indoor Environment with Film-Type Dual-Band Frequency Selective Structure

조성실 · 이상화 · 윤선흥* · 홍익표

Sung-Sil Cho · Sang-Hwa Lee · Sun-Hong Yoon* · Ic-Pyo Hong

요 약

본 논문에서는 건물 내 무선 통신환경 개선을 위한 필름형 이중 대역 주파수 선택 구조를 제안하였다. 제안한 주파수 선택 구조는 간단한 설계 변수를 통해 2.4 GHz와 5 GHz 이중 대역의 공진 주파수를 제어할 수 있는 소형화된 구조로 얇은 투명 필름 위에 스크린 프린팅 방식을 사용하여 설계 및 제작하였으며, 측정을 통해 성능을 확인하였다. 건물 내에 전파환경 성능 분석이 가능한 소프트웨어를 사용하여 설계한 FSS 구조를 건물에 적용했을 때 실외로부터 유입되는 불요 신호에 대한 감쇠 성능을 분석하였다. 또한 분석 결과를 검증하기 위하여 실제 건물 내벽에 제작한 FSS 필름을 적용하여 실내 환경의 신호강도를 측정하였다. 측정결과 제작된 이중 대역 주파수 선택 구조는 실제 건축물에 적용할 경우 2.4 GHz와 5 GHz 대역에서 각각 29.4 dB, 15.94 dB의 감쇠 성능을 가짐을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a film-type dual-band frequency selective structure for improving the wireless communication environment in a building. The proposed frequency-selective structure is a miniaturized structure that can control the resonant frequencies of 2.4 GHz and 5 GHz dual band through simple design parameters. We fabricated the frequency-selective surface by screen printing using conductive ink on a thin transparent film and confirmed its performance by measurement. We analyzed the attenuation performance of the unnecessary signal from the outside when the frequency-selective structure designed using the software to analyze the propagation environment performance is applied to the building. To verify the analytical results, the signal strength of the indoor environment was measured by applying the frequency-selective film fabricated on the inner wall of the actual building. The measurement results show that the dual-band frequency-selective film has 29.4 dB and 15.94 dB attenuation performance in the 2.4 GHz and 5 GHz, respectively.

Key words: Dual-Band Frequency Selective Structure, Wireless Communication, Transparent Film, Screen Printing

「본 연구는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원(2017K000488)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(NRF-2015R1A2A2A01003380)으로 수행되었음.」

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

*전자부품연구원(IT Application Research Center, Korea Electronics Technology Institute)

· Manuscript received October, 16, 2017 ; Revised December, 4, 2017 ; Accepted December, 15, 2017. (ID No. 20171016-01S)

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

I. 서 론

최근 무선신호를 이용한 다양한 통신서비스의 지속적인 성장으로 일상생활에서 무선 통신 서비스 사용이 보편화됨에 따라 전자파 간섭으로 인한 통신성능 저하, 통신 정보보안 문제, 전자파 노출 등의 우려가 심화되고 있다. 특히, 사용자가 밀집된 실내 환경에서는 전자파 간섭에 따른 통신성능 저하문제가 더욱 심각해져, 실내 환경에서 무선 통신 성능을 개선하기 위한 방법으로 주파수 선택 표면(Frequency Selective Surface: FSS) 구조를 건물에 적용하는 연구가 진행되고 있다^{[1],[2]}. FSS 구조는 단위구조의 형태, 크기 등의 변화에 따라 특정 주파수 대역을 통과하거나 차단하는 특성을 갖는 전자파 공간 필터로서^[3] 레이돔(radome)^[4], CA 전파흡수체(Circuit Analog EM absorber)^[5], 전자파 간섭 차폐(EMI shielding)^[6] 등에 응용되고 있다.

한편 FSS 구조를 건축물에 적용하기 위한 연구는 FSS 구조의 특성에 따라 구분할 수 있는데, 우선 단일 주파수 대역을 통과하는 특성을 갖는 FSS 구조는 건물 벽에 적용하여 원하는 신호의 수신 신호 강도를 증가시켜 넓은 커버리지 영역을 제공하거나^[7], 적외선 차단으로 건물을 보온성을 높이기 위한 에너지 저감 유리(energy-saving glass)에 FSS 구조를 적용하여 GSM 통신 시스템, GPS, 3G 등의 수신 신호 성능 개선에 응용되고 있다^[8]. 반대로 외부 신호를 선택적으로 차단하는 FSS 구조를 이용하여 동일 또는 인접 채널 간 간섭 현상을 최소화하여 통신 성능 향상을 위한 응용 연구도 있다^[9]. 최근에는 다양한 주파수에 대하여 동시 제공하는 무선 서비스에 대응하기 위한 방법으로 다중 대역에서 동작하는 FSS 구조나^{[10]~[12]}, 실내 무선 서비스 영역을 효율적으로 제어하기 위해 재구성 FSS 구조를 실내 공간 벽면에 적용하여 실내 환경의 신호 강도나 신호 대 간섭 비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)를 확인하는 등 많은 연구가 진행되어 왔지만^{[13],[14]}, 실제 실내 환경에 적용하여 신호성능을 측정 및 검증한 연구 사례는 미비하며^{[7],[9]}, 특히 국내 연구는 매우 부족하다.

본 논문에서는 실제 건물 내벽에 적용을 고려하여 얇은 두께를 가진 필름에 대면적 제작이 가능하고 대량생산이 용이한 스크린 프린팅 방식을 사용하여 이중 대역 차단 특성을 갖는 FSS 구조를 설계하였으며, 실내 환경에

FSS를 적용하여 외부 신호에 대한 감쇠 성능을 시뮬레이션 및 측정 실험을 통해 분석하였다.

II. 이중 대역 FSS 구조 설계

건물 내의 전파환경은 복잡한 구조물과 벽 구조로 인하여 반사 또는 회절, 굴절 등의 다양한 전파 현상이 발생하기 때문에, 실제 건물 내벽에 FSS 구조를 적용하기 위해서는 입사파의 편파 및 입사각 안정성을 갖는 구조의 설계가 매우 중요하다. 따라서 단일 평면 위에 입사파의 편파 및 입사각에 대한 안정적인 주파수 응답 특성을 갖는 소형화된 이중 대역 FSS 구조^[15]를 기반, 대면적 및 대량생산이 가능한 인쇄전자 기술을 이용하여 설계하였다.

인쇄전자 기술은 인쇄 회로 기판(PCB) 형태로 제작하는 전통적인 방식과 달리 낮은 온도에서 공정이 가능하기 때문에 종이나 필름, 섬유 위에 제작이 용이하고, 비용이 낮은 가격으로 대량생산이 가능하다는 장점을 가지고 있다^{[16],[17]}. 제작 방식에 따라 잉크젯 인쇄(inkjet printing) 방식, 그라비어 인쇄(gravure printing) 방식, 스크린 프린팅(screen printing) 방식 등으로 구분할 수 있으며, 본 논문에서는 공정이 간단하고 비용이 저렴한 스크린 프린팅 방식을 사용하여 0.1 mm의 얇은 두께와 유연성을 갖는 투명 필름 위에 2.4 GHz, 5 GHz 대역에서 동작하는 FSS 구조를 설계하였다.

FSS 구조의 단위 구조는 그림 1과 같이 사각 루프 구조를 응용한 소형화된 구조로 복잡한 형상(convoluted ele-

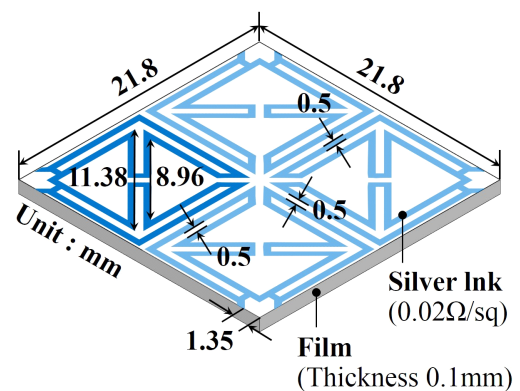
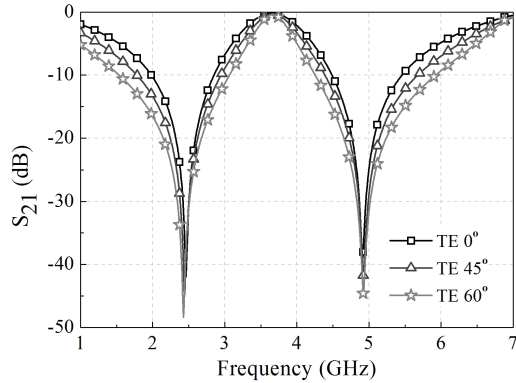


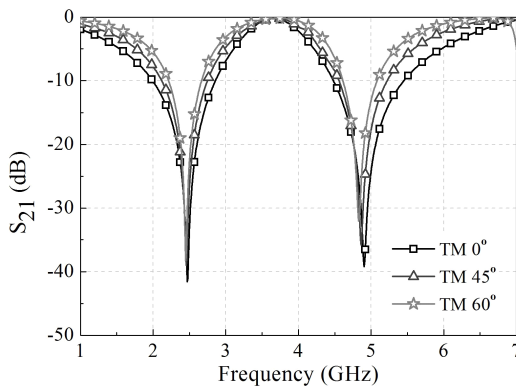
그림 1. 제안된 FSS 구조와 설계 파라미터

Fig. 1. Geometry of proposed FSS and design parameters.

ment)을 이용하여 다중 대역 특성을 구현하는 설계 방식의 단점을 보완하여 단순한 설계 변수 조절을 통해 이중 대역 FSS의 공진 주파수를 쉽게 조절할 수 있으며^[15], 이 구조를 벽면에 적용하기 위하여 필름 위에 크기 $21.8 \times 21.8 \text{ mm}(0.17 \lambda)$ 를 갖는 단위 구조를 설계하였다. 유전 기판은 유전율 3.5, 손실 0.003인 투명 필름을 사용하였으며, FSS 패턴은 고전도성은 나노 잉크로 $0.02 \Omega/\text{sq}$ 의 표면저항을 갖는다고 가정하였다. 설계한 FSS 구조에 대하여 상용 전자기 소프트웨어인 HFSS를 사용하여 시뮬레이션한 결과, TE 모드에서 공진주파수는 2.46 GHz와 4.99 GHz로 입사각 $0^\circ \sim 60^\circ$ 변화에 따라 1.6 % (20 MHz), 0.2 % (10 MHz)의 오차를 가지며, TM 모드에서는 최대 오차 1.2 %



(a) TE 모드
(a) TE mode

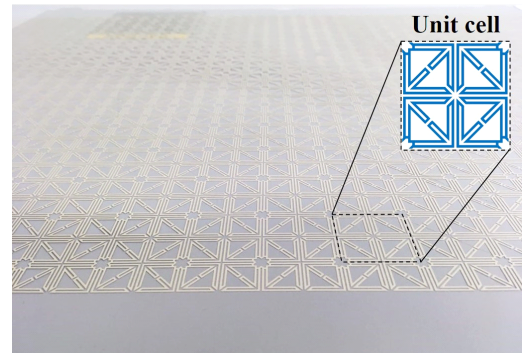


(b) TM 모드
(b) TM mode

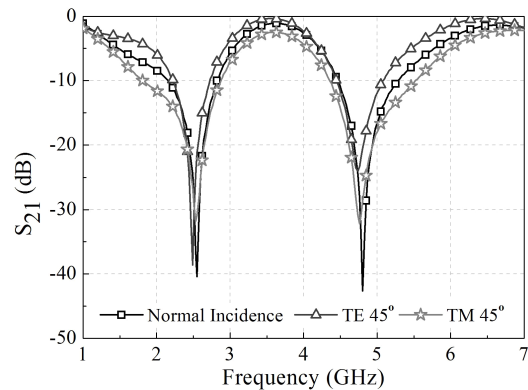
그림 2. 제안된 구조의 투과 특성 시뮬레이션
Fig. 2. Simulated transmission characteristics of FSS.

(30 MHz)로 편파 및 입사각에 따라 매우 안정적인 성능을 가지는 것을 그림 2를 통해 확인할 수 있다.

설계한 이중 대역 차단 특성을 갖는 FSS 구조의 성능을 검증하기 위하여 스크린 프린팅 방식을 사용하여 크기 $300 \times 400 \text{ mm}$ 인 필름형 FSS 구조를 제작하였다. 유전 기판은 두께 0.1 mm인 투명한 PET 필름을 사용하였고, 전도성 패턴은 FSS 구조의 높은 감쇠 성능을 구현하기 위하여 고전도성은 나노 잉크를 사용하여 온도 130°C 에서 30분간 경화하여 낮은 표면 저항을 갖도록 제작하였다. 제작된 FSS 구조는 그림 3(a)에 나타내었으며, 자유공간 측정법을 사용하여 제작된 이중대역 FSS 구조의 투과 특성 측정 결과를 그림 3(b)에 나타내었다. 수직으로 입사할



(a) 제작된 FSS
(a) Fabricated FSS



(b) 측정결과
(b) Measured result

그림 3. 제작된 FSS와 투과특성 측정 결과
Fig. 3. Fabrication of FSS and measured result of transmission characteristics.

경우(normal incidence) 공진주파수 2.55 GHz와 4.83 GHz에서, 대역폭은 각각 26.3 %(670 MHz) 16.8 %(810 GHz)이며, TE, TM 모드에서 입사각이 45°일 경우에는 공진주파수의 변화가 2.4 % 오차로 비교적 안정적인 성능을 갖는 것을 확인하였다.

Ⅲ. 이중 대역 FSS 구조 적용한 실내 공간의 수신 신호강도 분석

3-1 실내 공간 모델링 및 수신 신호 강도 해석

설계한 FSS 구조를 건물에 적용했을 경우, 외부 신호에 대한 감쇠 성능을 확인하기 위하여 복잡한 실내·외 전파환경에서의 통신 성능을 예측할 수 있는 상용 전파해석 소프트웨어인 wireless insite를 사용하여 실내 공간의 수신 신호 강도를 확인하였다. 실내 공간의 모델링 구조는 그림 4와 같이 크기 7.75×6.75×3.00 m인 실험실(room)과 크기 7.75×2.60×3.00 m인 복도로 구성된 구조이며, 실험실 내벽에는 앞에서 설계한 이중 대역 FSS 구조가 적용되어 있다. 표 1은 실내 공간을 구성하는 바닥과 벽, 유리 등과 같은 구조물의 건축 자재의 물성 정보를 나타낸 것이며, FSS와 FSS가 적용된 실내 벽은 측정 환경과 비슷한 환경을 구현하기 위해 실제 측정된 실내 벽과 FSS의 투과특성(S_{21}), 반사특성(S_{11}) 결과를 적용하여 실내 공간

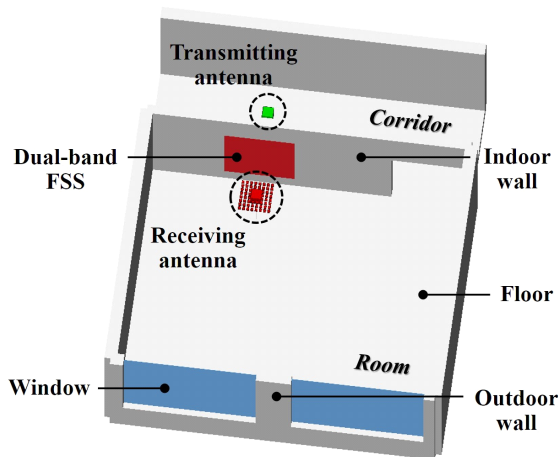


그림 4. 실내 공간의 모델링 구조
Fig. 4. Modeling structure of indoor space.

의 구조물을 모델링하였다. 이와 같이 실내 공간 모델링 및 구조물의 물성을 설정을 한 후 그림 4와 같이 송신/수신 안테나를 실내 벽면과 1 m 떨어진 위치에 각각 설치하고, 주파수 1~6 GHz 변화에 따른 실내 공간의 수신 신호 강도를 분석하였으며, 시뮬레이션에 적용한 송신/수신 안테나의 자세한 사양은 표 2와 같다.

시뮬레이션 방법은 먼저 기준값을 확인하기 위해 FSS 구조가 적용되지 않은 공간일 때의 수신 신호 강도를 시뮬레이션하여 기준값을 결정하고, 벽면에 FSS 구조를 적용한 공간에 대한 수신 신호 강도를 시뮬레이션하여 외부 신호에 대한 수신감쇠 정도를 확인하였다. 그림 5는 수신 신호 강도의 시뮬레이션 결과로서, FSS 구조를 건물에 적용할 경우 2.55 GHz와 4.83 GHz에서 각각 -62.8 dBm, -68.65 dBm으로 외부 신호에 대하여 38.8 dB, 36.5 dB의 감쇠 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

3-2 실내 공간의 수신 신호 강도 측정

시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 실제 건물 내벽에

표 1. 건축 자재의 물성 정보

Table 1. Electrical properties for building materials.

	Floor	Outdoor wall	Indoor wall	Window	Dual-band FSS
Material	Concrete	Concrete	Concrete	Glass	FSS
Thickness(cm)	50	30	23	0.3	0.01
Permittivity	10	7	S_{11}/S_{21}	2.4	S_{11}/S_{21}
Conductivity	0.015	0.015		0	

표 2. 송신/수신 안테나 사양

Table 2. Specifications for Tx/Rx antenna.

Waveform	Type	Sinusoid
	Frequency(GHz)	1 ~ 6
Antenna	Type	Directional
	Height(m)	1.3
	Distance(m)	1
	Power(dBm)	0(at Tx)
	Gain(dBi)	5.0(at Tx), 19.0(at Rx)
	VSWR	2.5(at Tx), 2.0(at Rx)

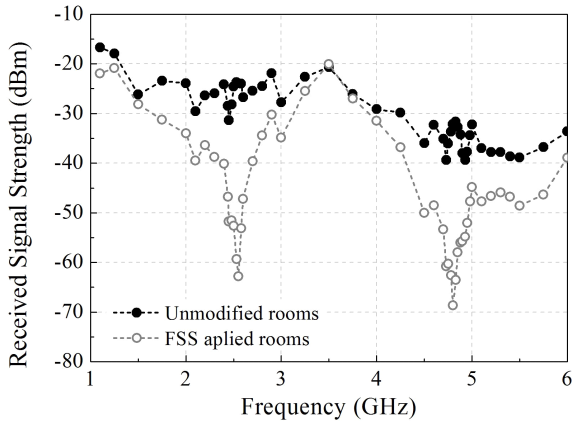


그림 5. 실내 공간의 수신 신호 강도 시뮬레이션
Fig. 5. Simulated received signal strength results of indoor space.

스크린 프린팅 방식으로 제작한 이중 대역 FSS 필름 구조를 적용, 실내 공간의 수신 신호 강도를 측정하였다. 실내 공간은 그림 4에서 모델링한 실내 공간과 동일한 크기를 갖는 실험실과 복도이며, 실험실 내벽에는 1.2×0.9 m 크기를 갖는 필름형 이중 대역 FSS 구조를 적용하였다.

그림 6과 같이 복도에는 신호 발생기가 연결된 송신 안테나를, 실험실에는 스펙트럼 분석기가 연결된 수신 안테나를 설치하여 실험실 내부의 수신 신호 강도를 측정하였다. 측정에 사용한 송·수신 안테나는 로그-주기 다이폴 배열(Log-Periodic Dipole Array: LPDA) 안테나로, 14 dB

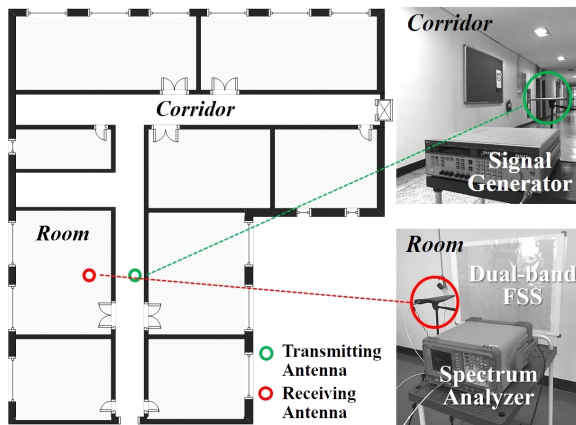


그림 6. 측정환경과 시스템
Fig. 6. Measurement setup and environment.

이득을 갖는 저잡음 증폭기(Low-Noise Amplifier: LNA)를 가진 수신안테나를 사용하여 외부 신호에 대한 실내 공간 수신 신호 강도를 측정하였다.

그림 7에 FSS가 없는 공간 대비 FSS를 적용한 공간에 대한 수신 신호 강도의 측정 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 결과와 비교하여, 대역폭이 약간 좁아지지만, 2.4 GHz 대역에서는 -29.4 dB로 높은 감쇠 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 5 GHz 대역에서는 매우 많은 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 주파수가 높아질수록 벽에 의한 손실이 높아짐에 따라 생긴 오차로 인한 것으로 사료된다.

3.3 전파환경 시뮬레이션 시나리오

실제로 건물 내의 무선 통신환경을 개선을 위해서는 FSS 구조를 벽면 일부가 아닌 전체에 적용해야 하기 때문에 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 FSS 구조의 적용 유무에 따른 실내 환경의 통신 성능 변화를 관찰하였다. 실내 구조는 그림 6에 나타난 건축 도면의 축소 모델로 그림 8과 같이 다른 크기를 갖는 9개의 실험실과 복도로 구성되어 있으며, 복도와 실험실 2(room 2), 실험실 5(room 5), 실험실 8(room 8)에 각각 2.4 GHz/5 GHz인 AP(Access Point)를 위치시켰다. AP의 송신 안테나는 무지향성 안테나이며, 안테나 높이는 1.3 m, 송신안테나의 이득은 5 dBi, 송신 출력 파워는 0 dBm로 설정하였다.

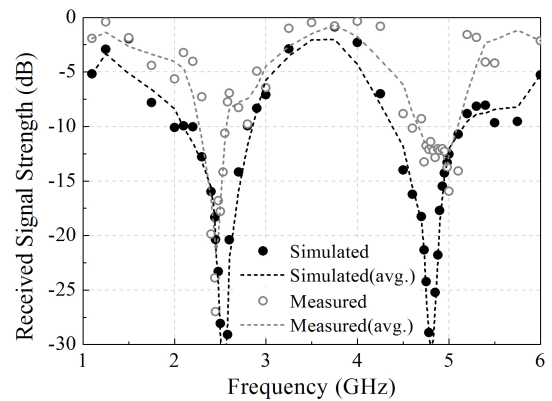


그림 7. 실내 공간의 수신 신호 강도 측정 결과
Fig. 7. Measured received signal strength results of indoor space.

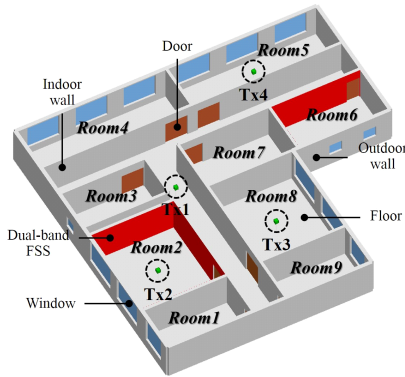
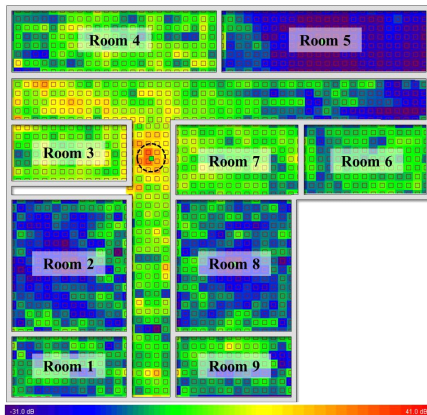
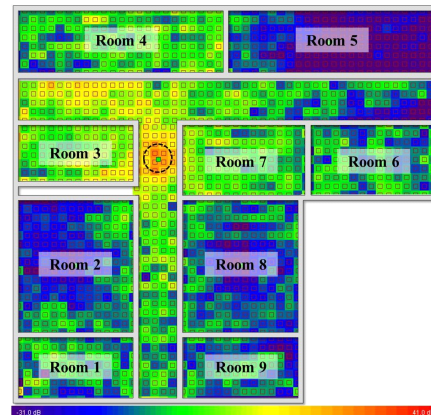


그림 8. 시나리오 공간
Fig. 8. Scenario layout.

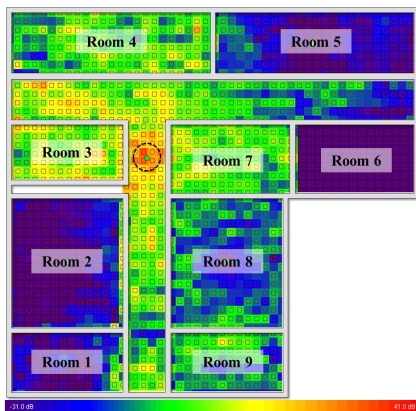
실험실 2와 실험실 6은 2.4 GHz, 5 GHz를 차단하는 이중 대역 FSS 구조가 적용된 공간으로, 다수의 무선 신호가 있는 건물 내 통신 성능 개선효과를 분석하기 위하여 동일 채널의 수신 신호전력 대 간섭신호전력 비를 나타내는 C/I (Carrier-to-Interference-ratio)를 확인하였다. 먼저 복도에 위치하고 있는 송신 안테나 Tx1에 대한 건물 내의 C/I 를 확인한 결과, 그림 9와 같이 FSS 구조를 적용한 실험실 2 내부의 C/I 값은 2.4 GHz일 때 평균 -38.96 dB, 5 GHz일 때에는 평균 -36.34 dB로, 일반 공간일 때보다 각각 25.31 dB, 22.27 dB 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 실험실 6의 내부 C/I 값 역시 주파수 2.4 GHz, 5 GHz에



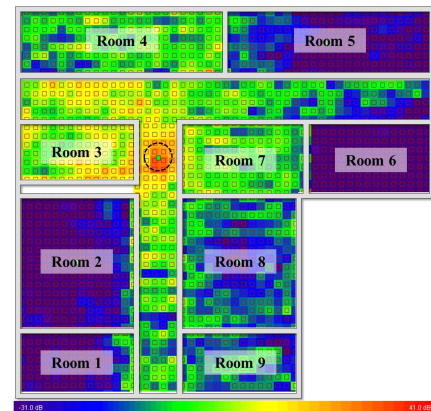
(a) FSS가 없는 공간 : 2.4 GHz
(a) Rooms without FSS : 2.4 GHz



(b) FSS가 없는 공간 : 5.0 GHz
(b) Rooms without FSS : 5.0 GHz



(c) FSS 구조 적용 공간 : 2.4 GHz
(c) FSS applied rooms : 2.4 GHz



(d) FSS 구조 적용 공간 : 5.0 GHz
(d) FSS applied rooms : 5.0 GHz

그림 9. 수신 신호 대 간섭신호의 전력 비(Tx1 기준)
Fig. 9. Carrier to interference ratio (based Tx1).

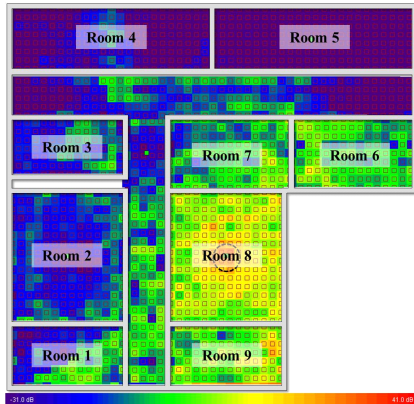
대하여 각각 평균 -54.12 dB, -51.19 dB로, FSS 구조를 적용함에 따라 Tx1의 수신 신호 강도가 많이 감소되는 것을 알 수 있다.

그림 10은 실험실 8에 위치하고 있는 송신 안테나 Tx3에 대한 건물 내부의 C/I 분포를 나타낸 것으로, FSS 구조가 적용된 실험실 2는 Tx3의 신호의 강도를 감소하여 주파수 2.4 GHz, 5 GHz에서 각각 -31.05 dB, -36.34 dB의 C/I 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 하지만 실험실 6은 실내 벽면에 FSS 구조가 적용되어 있지만 C/I가 2.4 GHz에서 17.98 dB, 5 GHz에서 12.58 dB로 매우 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 T자 형태를 가진 건물 구조일

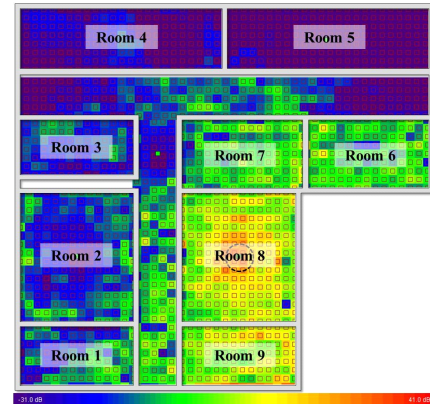
경우 실내뿐만 아니라 실외를 통하여 신호들이 강하게 유입되기 때문에 발생한 현상으로 생각되며, 효율적으로 주파수 간 간섭을 줄이기 위해서는 실내 벽뿐만 아니라 실외 벽, 창문, 문 등에 대한 FSS 구조 적용도 고려해야 한다는 것을 의미한다.

IV. 결 론

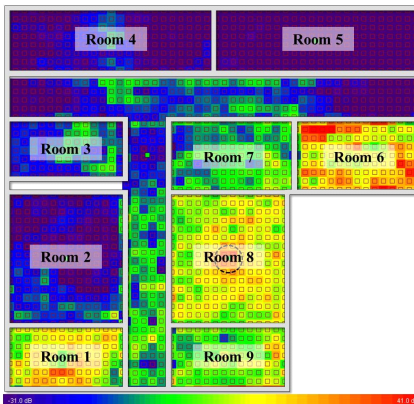
본 논문에서는 저비용으로 대량생산 및 대면적 제작이 가능한 스크린 프린팅 방식을 사용하여 무선랜 대역인 2.4 GHz, 5 GHz에서 동작하는 이중대역 FSS 필름을 설계하였으며, 건물 벽에 적용하여 실내 공간의 수신 신호 강



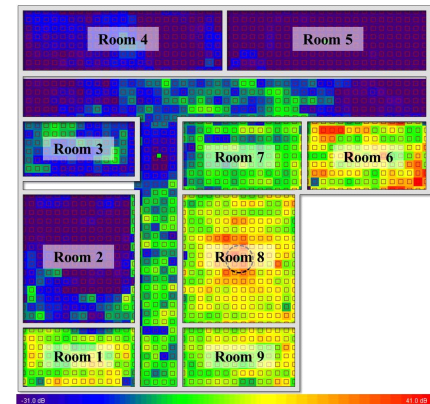
(a) FSS가 없는 공간 : 2.4 GHz
(a) Rooms without FSS : 2.4 GHz



(b) FSS가 없는 공간 : 5.0 GHz
(b) Rooms without FSS : 5.0 GHz



(c) FSS 구조 적용 공간 : 2.4 GHz
(c) FSS applied rooms : 2.4 GHz



(d) FSS 구조 적용 공간 : 5.0 GHz
(d) FSS applied rooms : 5.0 GHz

그림 10. 수신 신호 대 간섭신호의 전력 비(Tx3 기준)
Fig. 10. Carrier to interference ratio (based Tx3).

도를 분석하였다. 제안한 구조는 벽에 적용이 가능한 얇은 두께를 가진 투명 필름 위에 설계하였으며, 측정을 통해 입사파의 편파 및 입사각에 따라 안정적인 성능을 갖는 것을 확인하였다. 측정 결과를 바탕으로 실제 건물의 실험실 내벽에 제작한 FSS 구조를 적용하여 실내 공간의 수신 신호 강도를 측정한 결과, 외부 신호에 대하여 주파수 2.45 GHz에서 최대 29.4 dB, 5 GHz에서는 15.94 dB 정도의 감쇠 성능을 가지는 것을 확인하였다. 본 논문의 결과는 복잡한 실내 전파환경에서 무선 주파수 혼신 및 간섭을 줄이고 주파수의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대되며, 추후 건축물의 종류에 따른 전파특성 등 다양한 시나리오에 대한 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] J. Roberts, K. L. Foard, and H. M. Rigelsford, "Secure electromagnetic buildings using slow phase-switching frequency-selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 1, pp. 251-261, Jan. 2016.
- [2] P. S. Taylor, A. C. M. Austin, E. A. Parker, M. J. Neve, J. C. Batchelor, and J. T. P. Yiin, et al., "Angular independent frequency selective surfaces for interference control in indoor wireless environments," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 2, pp. 61-62, Jan. 2012.
- [3] B. A. Munk, *Frequency Selective Surface: Theory and Design*, John Wiley & Sons, Apr. 2000.
- [4] B. Yi, P. Liu, G. Li, and Y. Dong, "Design of miniaturized ultrathin absorptive/transmissive radome with wideband absorbing property," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, no. 8, pp. 1870-1875, Aug. 2016.
- [5] S. Ghosh, S. Bhattacharyya, and K. V. Srivastava, "Design, characterisation and fabrication of a broadband polarisation-insensitive multi-layer circuit analogue absorber," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 10, no. 8, pp. 850-855, May 2016.
- [6] 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 Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 53, no. 3, pp. 700-705, Aug. 2011.
- [7] N. Qasem, "Enhancing wireless communication system performance through modified indoor environments," Ph. D. dissertation, Loughborough University, Jun. 2014.
- [8] G. I. Kiani, L. G. Olsson, A. Karlsson, K. P. Esselle, and M. Nilsson, "Cross-dipole bandpass frequency selective surface for energy-saving glass used in buildings," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 2, pp. 520-525, Feb. 2011.
- [9] M. Raspopoulos, S. Stavrou, "Frequency selective buildings through frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 8, pp. 2998-3005, Aug. 2011.
- [10] 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 Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 2, pp. 611-614, Apr. 2016.
- [11] 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.
- [12] B. Sanz-Izquierdo, J.-B. Robertson, E. A. Parker, and J. C. Batchelo, "Wideband FSS for electromagnetic architecture in buildings," *Applied Physics A*, vol. 103, no. 3, pp. 771-774, 2011.
- [13] M. M. M. Sideeq, N. Qasem, "Smart wall based on active frequency selective wallpaper," *Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 28, no. 2, pp. 363-371, 2016.
- [14] L. Subrt, P. Pechac, L. Ford, R. Langley, and J. Rigelsford, "Controlling coverage for indoor wireless networks using metalized active fss walls," in *2013 19th Asia-Pacific Conference on Communications(APCC)*, Denpasar, Aug. 2013, pp. 496-500.
- [15] 이상화, 홍익표, "건물 내 WLAN 대역 전파환경 개선을 위한 이중 대역 주파수 선택 구조의 설계," 한국정보기술학회논문지, 15(9), pp. 63-70, 2017년 9월.

- [16] 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, 027107, Feb. 2015.

- [17] M. Haghzadeh, A. Akyurtlu, "All-printed, flexible, re-configurable frequency selective surfaces," *Journal of Applied Physics*, vol. 120, no. 18, 184901, 2016.

조 성 실



2016년 2월: 국립공주대학교 정보통신공학부 (공학사)
2016년 3월~현재: 국립공주대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 주파수 선택구조 설계 및 응용

윤 선 홍



2002년 8월: 아주대학교 응용화학과(이학사)
2005년 2월: 포항공과대학교 화학과(이학석사)
2012년 1월~현재: 전자부품연구원 책임연구원
[주 관심분야] 인쇄전자, 3D프린팅, 에너지저장/변환 등

이 상 화



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

홍 익 표



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 무선사업부 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