

건물 내 주파수 선택적 공간 구현을 위한 인쇄전자 기술 기반 필름형 주파수 선택 표면구조 설계

Design of Film-Type Frequency Selective Surface Structure Based on Printed Electronic Technology to Implement Frequency-Selective Space in Buildings

이 인 곤 · 윤 선 홍* · 홍 익 표

In-Gon Lee · Sun-Hong Yoon* · Ic-Pyo Hong

요 약

본 논문에서는 건물 내에서 통신성능 저하의 원인이 되는 인접 채널의 신호를 제어하기 위해 대역 저지 특성을 갖는 주파수 선택 표면구조를 설계하였다. 제안된 구조는 입사파의 편파 및 입사각에 안정적인 주파수 특성 구현을 위해 프렉탈 형상 기반의 소형화된 단위구조를 사용하였으며, 실제 적용성을 고려, 적은 제작비용으로 대량생산이 용이한 인쇄전자 기술을 이용하여 얇은 필름형 주파수 선택 표면구조를 제작하였다. 전통적인 회로제작 방식인 PCB 공정이 아닌 전도성 Ag 잉크를 이용한 스크린 프린팅 공정을 통해 생산성 및 환경성을 개선하였으며, 설계한 결과를 바탕으로 자유공간 측정을 통해 입사파의 편파 및 입사각에 대한 안정적인 특성을 검증하고, 실제 건물 내벽에 적용 후, 수신 신호강도 측정을 통해 주파수 선택 성능을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a frequency selective surface(FSS) with bandstop operation for radio-frequency spectrum management is presented. The proposed FSS is composed of patterns of fractal-based miniaturized unit cells for stable performance for angles of incidence and polarizations. For practical applications requiring high productivity and environmental compatibility, we fabricated a film-type FSS by screen-printing using Ag ink, rather than a conventional manufacturing method using a printed circuit board. To validate this study, we measured the transmission characteristics of the proposed FSS using the free-space measurement method, and observed the received strength of signal penetrating the FSS film applied to a wall.

Key words: Frequency Selective Surface, Screen Printing, Printed Electronics, Received Signal Strength

I. 서 론

편리성과 이동성이 극대화된 무선 통신기술을 바탕으

로 모든 사물이 네트워크에 연결되는 사물인터넷(Internet of Thing: IoT)이 본격화되면서, 특정 사용에 할당되지 않은 비면허 ISM(Industry, Scientific and Medical) 대역을 사

「본 연구는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원(2017K000488)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(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, 10, 2017 ; Revised November, 17, 2017 ; Accepted November, 18, 2017. (ID No. 20171010-106)

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

용하는 무선 통신망 연결대상이 소형 센서부터 자동차, 건축물에 이르기까지 적용범위가 확대되고 있으며, 급증하고 있는 기술 수요와 더불어 무선 기술의 광범위한 사용에 따른 부정적인 우려 또한 증가하고 있다. 주파수 자원은 이론적으로 무한한 자원이나, 사용하고자 하는 주파수 대역의 기술적 한계 또는 선호 대역 편중으로 희소성이 존재하는 한정된 자원이며, 따라서 동일 또는 인접 채널에 대한 수요의 증가는 동일한 시공간영역에서 통신품질 저하로 귀결될 뿐만 아니라, 무색, 무취의 자원으로써 직접적인 관리의 어려움으로 누설 신호 관리 부실을 야기하여 취약한 보안성 및 유입되는 전파간섭으로 인한 기기 및 시스템 오작동 등 필연적인 문제를 수반하고 있다. 다수의 사용자가 밀집된 한정된 영역에서 무선 통신 성능, 보안성 그리고 시스템 안정성을 확보하기 위해 주파수 자원을 물리적으로 구분하여 관리하기 위한 공간을 설계하고, 이를 통해 무선 신호 누설, 유입되는 전파 간섭의 영향을 축소하기 위한 스펙트럼 관리에 관한 연구가 지속되고 있다^{[1],[2]}. 최근 스펙트럼 효율성과 보안성 향상을 동시에 달성할 수 있는 방안으로, 특정한 형상의 전도성 패턴이 동일 간격으로 반복 배열된 주기구조를 통해 주파수를 선택적으로 차단 또는 통과시킬 수 있는 전자기 구조인 주파수 선택 표면구조(Frequency Selective Surface: FSS)를 건축물에 적용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[3]~[5]}. 본 연구에서는 선행연구에서 수행된 실제 건물 내에서 반사, 굴절, 산란 등의 다양한 전파경로를 통해 전파되는 전달 특성을 고려하여, 입사파의 편파 및 입사각에 안정적인 주파수 응답 특성을 갖는 소형화된 단위구조를 기반으로 무선랜 대역에서 동작하는 FSS 구조^[6]를 단순한 제작 공정으로 생산 비용과 대면적 생산에 큰 장점이 있는 인쇄전자 기술(printed electronics)을 이용하여 얇은 필름 위에 구현하였다^{[7],[8]}. 이를 바탕으로 자유공간 측정법을 통해 투과특성을 검증하였으며, 제작된 FSS 구조를 실제 건물 내벽에 적용하고, 수신 신호강도 측정 실험을 통해 그 성능을 확인하였다.

II. 필름형 주파수 선택 표면구조의 설계

제안된 구조는 삼각 루프가 원형으로 반복 배열된 육각 형태의 소형화된 단위구조를 가지며, 이를 통해 입사파

의 입사각에 안정적인 성능을, 패턴의 대칭적인 구성을 통해 두 TE(Transverse Electric), TM(Transverse Magnetic) 편파에 대한 주파수 응답 안정성을 확보하였다. FSS 구조의 감쇠 성능에 영향을 주는 전도성 패턴의 낮은 표면저항 특성 구현을 위해 고전도성 Ag 잉크를 얇은 필름위에 인쇄하는 접착식 인쇄공정인 스크린 프린팅(screen printing) 기법의 사용을 목표로, 패턴의 표면저항을 $0.05 \Omega/\square$, 유전체를 두께 0.1 mm , 유전율(ϵ_r) 3.5, 손실탄젠트($\tan\delta$) 0.003의 PET(Polyethylene Terephthalate) Film을 가정하였다. 제안된 구조는 단위구조 전체 형상의 크기를 결정하는 변수 L_{out} 을 구조의 전기적 길이 즉, 공진 주파수를 결정하는 주요 설계 변수를 가진다^[6]. 최적화된 설계 변수를 얻기 위해, 공진 주파수에 영향을 주는 설계변수로 외경(R_1), 내경(R_2)을, 대역폭 성능에 영향을 주는 설계변수로 선폭(W), 간격(G)을 가정하고, ANSYS HFSS의 Floquet Mode 시뮬레이션을 이용한 투과특성 분석을 통해 최적화하였으며, 주요 설계변수와 외형을 그림 1에 나타내었다.

설계한 결과를 바탕으로 입사파의 편파 TE, TM 그리고 입사각 $0^\circ \sim 60^\circ$ 변화에 따른 투과특성에 대한 해석결과를 그림 2에 나타내었다. 제안된 구조의 성능을 검증하기 위해 $37 \times 47.5 \text{ cm}$ 크기의 필름으로 제작하였으며, 그 외형을 그림 3(a), 자유공간 측정법을 이용한 투과특성 측정 결과를 그림 3(b)에 나타내었다.

그림 3(b)로부터 수직으로 입사하는 평면파(normal in-

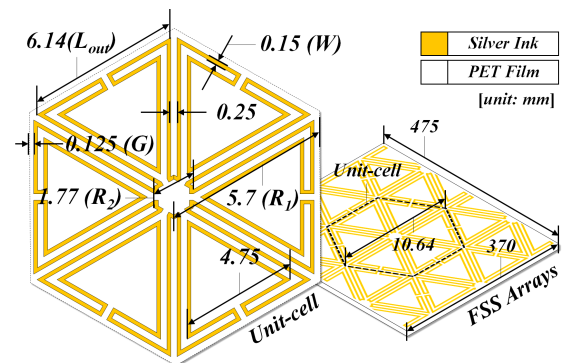


그림 1. 필름형 FSS 구조와 최적화된 치수

Fig. 1. Geometry of the film-type FSS with optimized design parameters.

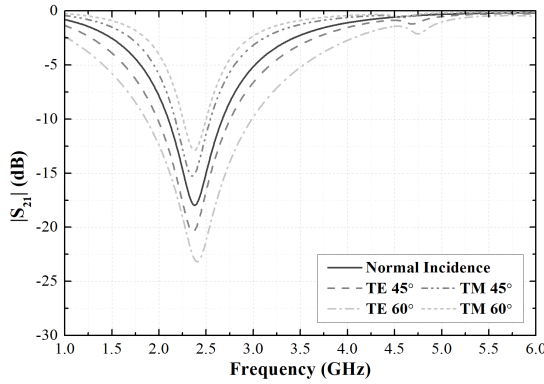
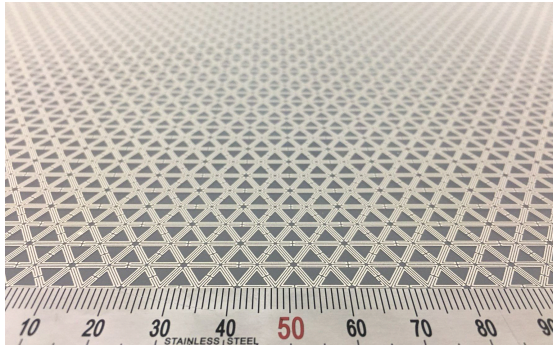
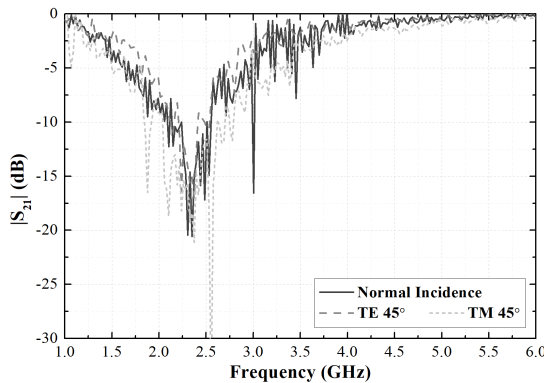


그림 2. 필름형 FSS 구조의 계산된 투과특성
Fig. 2. Simulated transmission characteristics of the film-type FSS.



(a) 제작된 필름형 FSS 구조의 외형
(a) Fabricated film-type FSS



(b) 필름형 FSS 구조의 투과특성 측정 결과
(b) Measured transmission characteristics of film-type FSS

그림 3. 제작된 필름형 FSS 구조와 투과특성 측정 결과
Fig. 3. Fabricated film-type FSS and measured transmission characteristics.

incidence) 기준 공진 주파수는 2.35 GHz(−20.55 dB), −10 dB 대역폭은 약 450 MHz(19 %)이며, 입사파의 편파 및 입사각에 따라 변화하는 공진 주파수의 편차는 최대 0.9 %(22.5 MHz) 이하로 안정적인 주파수 응답특성을 확인하였다. 이를 바탕으로 실제 건물 내벽에 적용하여, 복도에 위치한 송신 안테나(A)로부터 내벽을 통해 투과된 무선 신호의 수신 신호강도를 측정(B)하는 방식으로 실험을 수행하였다. Log-periodic 송/수신 안테나(freq. range: 680 MHz to 20 GHz)와 함께 실험에 사용된 장비의 구성과 측정 시나리오를 그림 4에 나타내었다.

측정 실험은 주파수 변화에 따라 ① 송신 신호가 없는 상태에서 수신 신호강도 측정(P_{\min}), ② 송신 안테나로부터 벽을 통해 투과된 신호강도 측정(P_{\max}), ③ FSS 구조가 적용된 벽을 통해 투과된 신호강도 측정(P_{FSS}) 순으로 진행하였으며, 실험 환경을 그림 5(a)에, 측정 결과를 바탕으로 식 (1)을 통해 산출된 투과되는 신호의 비율을 그림 5(b)에 각각 나타내었다.

$$P_r(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{P_{\max} - P_{FSS}}{P_{\max} - P_{\min}} \right) \quad (1)$$

측정 결과로부터, 필름형 FSS 구조의 동작 주파수 2.35 GHz에서 약 10 % 이하의 수신 신호강도를 확인하였으며, 자유공간 측정을 통해 측정한 주파수 특성과의 오차는 건물 내벽으로 한정된 영역에 적용된 FSS 구조를 피해

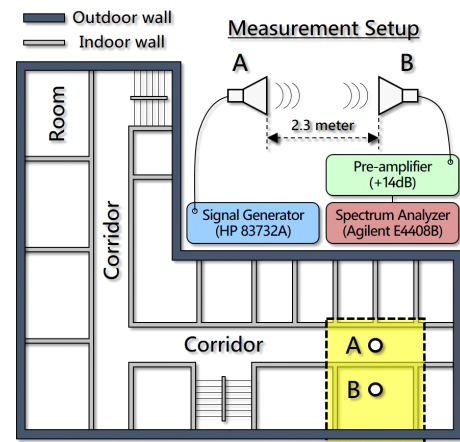
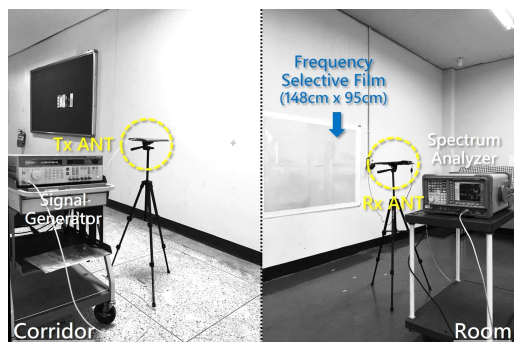
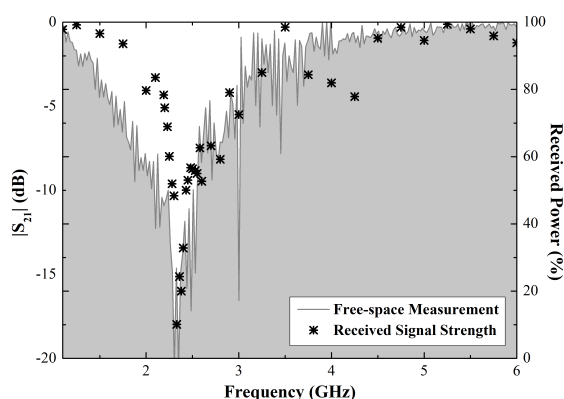


그림 4. 수신 신호강도 측정 시나리오 및 장비 구성
Fig. 4. Measurement setup and scenario.



(a) 측정 환경
(a) Measurement environment



(b) 수신 신호강도 측정 결과
(b) Measurement of received signal strength

그림 5. 측정 환경 및 FSS 구조가 적용된 공간의 수신 신호강도 측정 결과

Fig. 5. Measurement environment and received signal strength for FSS applied room.

다중 경로로 전달된 신호와 건물 내 기 설치된 무선랜 신호에 의해 발생한 오차로 예상된다.

III. 결 론

본 논문에서는 건물 내 주파수 자원을 물리적으로 구분하여 스펙트럼 효율성과 보안성 향상이 동시에 가능한 대역 저지 특성의 필름형 FSS 구조를 설계하고, 생산성, 환경성에서 장점을 갖는 스크린 프린팅 공정으로 제작, 측정을 통해 성능을 검증하였다. 측정 결과로부터 입사파의 편파, 입사각에 안정적인 주파수 응답특성을 확인하였다. 실제 건물 내벽에 적용, 수신 신호강도 측정 실험을

통해 제안된 구조가 동작 주파수 대역에서 충분한 감쇠 성능을 가짐을 확인하여 건물 내 선택적 전자파차단벽지, 차량 내 선택적 전자파간섭 차단 필름연구 등에 응용이 가능하다.

References

- [1] D. C. K. Lee, K. W. Sowerby, and M. J. Neve, "Shielding strategies for interference mitigation in indoor wireless communications with frequency selective surfaces," in *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Washington, vol. 3, Jul. 2005, pp. 260-263.
- [2] G. H. Sung, K. W. Sowerby, M. J. Neve, and A. G. Williamson, "A frequency-selective wall for interference reduction in wireless indoor environments," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, no. 5, Oct. 2006.
- [3] M. Gustafsson, A. Karlsson, A. P. Rebelo, and B. Widenberg, "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 6, pp. 1897-1900, Oct. 2006.
- [4] M. Raptopoulos, S. Stavrou, "Frequency selective buildings through frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 8, pp. 2998-3005, Jun. 2011.
- [5] M. M. M. Sideeq, N. Qasem, "Smart wall based on active frequency selective wallpaper," *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 28, no. 2, 2016.
- [6] 이인곤, 홍익표, "동작 주파수 확장성을 갖는 소형화된 주파수 선택 표면구조 설계," *한국전자과학회논문지*, 27(6), pp. 512-520, 2016년 6월.
- [7] 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, Jul. 2011.
- [8] B. M. Turki, E. T. A. Parker, S. Wünscher, U. S. Schubert, R. Saunders, V. Sanchez-Romaguera, et al., "Significant factors in the inkjet manufacture of frequency-selective surfaces," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 933-940, Jun. 2016.