

레고블록 기반 재구성 주파수 선택표면 구조 설계

조성실*, 홍익표**

Design of Reconfigurable Frequency Selective Surface Structure Based on Lego Blocks

Sung-Sil Cho* and Ic-Pyo Hong**

본 논문은 2021년도 교육부의 재원으로 중점연구소지원사업의 지원(2019R1A6A1A03032988)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1A2B6001680)으로 수행되었습니다

요약

본 논문에서는 금속블록과 유전체 블록으로 구성된 레고블록을 이용하여 원하는 주파수 응답특성을 쉽게 구현할 수 있는 재구성 주파수 선택표면 구조를 설계하였다. 제안한 구조는 금속 블록과 유전체 블록을 조립하여 다양한 패턴을 쉽게 제작할 수 있어 동작주파수를 쉽게 재구성할 수 있다는 장점을 가진다. 레고블록 기반 주파수 선택 표면 구조가 원하는 주파수 성능을 갖는지 가능성을 확인하기 위해 비교적 조립하기 간단한 다이폴형 주파수 선택표면 구조와 십자가형 주파수 선택표면 구조를 설계 및 제작하였다. 측정 결과, 수직 입사파에서 다이폴형 주파수 선택표면 구조의 공진주파수는 9.32GHz로 시뮬레이션 결과와 0.64%의 공진주파수 오차를 가지며, 십자가형 주파수 선택표면 구조의 공진주파수는 6.49GHz로 시뮬레이션 결과와 0.15%의 오차가 발생하여 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구 결과를 활용하면 주파수 재구성 특성을 갖는 선택적 전자파 차폐 또는 흡수 기능을 갖는 실내 전자파 보안공간 구현이 가능하다.

Abstract

In this paper, we design a reconfigurable frequency selective surface structure that can easily implement the desired frequency response characteristics using Lego blocks composed of a metal and a dielectric block. The proposed structure has the advantage of being able to easily reconfigure the operating frequency since various patterns can be easily fabricated by assembly using metal blocks and dielectric blocks. To confirm the possibility that the Lego block-based frequency selective surface structure has the desired frequency performance, a simple structure such as a dipole-type frequency selective surface structure and a cross-type frequency selective surface structure were designed and fabricated. The measured frequency response characteristics resonate frequency has a 9.32GHz for the dipole-type and 6.49GHz for the cross-type frequency-selective surface structure. Error compared with the simulation results is 0.64% for the dipole-type and 0.15GHz for the cross-type frequency-selective surface structure. Using the results of this study, it is possible to implement an indoor electromagnetic wave security space with a frequency selective shielding or absorption function with frequency reconfiguration characteristics.

Keywords

frequency selective surface, lego block, reconfigurable, frequency response

* 공주대학교 스마트자연공간연구센터
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0878-077X>
** 공주대학교 정보통신공학부 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>

· Received: Mar. 03, 2021, Revised: Apr. 19, 2021, Accepted: Apr. 22, 2021
· 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

1. 서 론

주파수 선택표면(Frequency Selective Surface, FSS)은 전도성을 가진 패턴을 무한히 배열한 구조로, 패턴의 형상이 패치(Patch) 타입인지 슬롯(Slot) 타입인지에 따라 특정 주파수 대역을 차단 또는 통과시킬 수 있는 공간필터이다. 일반적으로 FSS 구조의 동작 주파수 대역은 패턴의 모양이나, 크기, 패턴을 지지해주는 유전기판의 종류, 두께 등과 같은 파라미터를 조절하여 원하는 주파수 대역에서 동작하는 패턴을 설계한다[1]. 이러한 특징을 가진 FSS 구조는 군사적인 측면에서는 주로 전투기의 레이돔에 적용되며[2], 일상적인 측면에서는 전자파 흡수체[3], 전자파 차단제[4] 또는 건물 내에서 LTE나 5G 통신 성능을 개선시키기 위해 적용되는 등[5][6] 다양한 분야에서 적용되고 있다.

지금까지 FSS 구조는 주로 평면 유전기판 위에 PCB 제작 방식을 이용한 평면형 구조로 설계되었다. 하지만 빠른 제작 기술의 발전으로 매우 얇은 두께를 가진 종이나, 필름과 같이 고온에서 견딜 수 없는 유전기판 위에서도 전도성 패턴을 구현할 수 있는 인쇄전자기술을 사용하여 유연한 특성을 갖는 FSS 구조에 대한 연구가 진행되어왔다[7][8]. 또한, 복잡한 형상을 가진 입체형 구조를 빠르고 쉽게 제작이 가능한 3D 프린팅 기술이 나타남에 따라 입체형 FSS 구조에 대해 역시 꾸준히 연구되고 있다[9]-[11]. 입체형 FSS 구조는 평면형 구조보다 설계할 수 있는 자유도가 높아 다양한 패턴을 설계할 수 있으며, 소형화가 용이하여 입사하는 입사파에 대한 주파수 응답특성이 안정적인 특징을 가진다[11].

최근 무선통신의 발전으로 무선통신 시스템의 복잡화, 다기능화, 고기능화된 통신 시스템 환경이 요구됨에 따라 FSS 구조 역시 특정 주파수 대역에서 동작하지 않고 다양한 특성을 구현할 수 있어야 한다. 주파수 응답특성을 조절할 수 있는 기본적인 방법으로는 능동 소자들을 FSS 구조에 적용하는 방법이다. 이는 외부에서 전압을 인가하여 전도성 패턴의 전기적 길이를 조절하여 동작주파수 대역을 이동시킬 수 있다. 하지만 수많은 능동소자를 요구할

뿐만 아니라 인덕터, 저항 같은 수동소자 그리고 복잡한 바이어스 회로도 구현해야한다는 문제가 있다. 이러한 단점을 보완하여 능동/수동소자들을 사용하지 않고 기계적으로 단위구조의 전기적인 길이를 각각 조절하여 재구성 특성을 구현하는 연구들이 진행되어왔다.

대표적인 연구로 2017년도 한 연구 팀에서는 동심나사형 실린더의 높이를 조절하여 동작주파수 대역을 1.86GHz에서 3.10GHz까지 조절이 가능한 FSS 구조를 설계하였다[12]. 같은 해에 정사각형의 슬롯형 구조를 기계적으로 회전시켜 동작주파수를 2.4GHz에서 4.0GHz까지 재구성을 구현할 수 있는 FSS 구조를 설계하였다[13]. 뿐만 아니라 얇은 두께를 가진 FSS 구조를 늘리거나 수축 또는 기계적으로 변형시켜 동작주파수 대역을 조절하기도 하였으며[14], 종이 접기 방식을 사용하여 구조를 접거나 펼쳐서 단일대역 또는 다중대역 특성으로 변화시키는[15] 등 능동소자들을 사용하지 않고 다양한 방법을 사용하여 주파수 재구성 특성을 구현하였다. 하지만 이러한 방법들은 기계적으로 각각의 단위구조를 균일하게 조절하기에는 어려움이 있다.

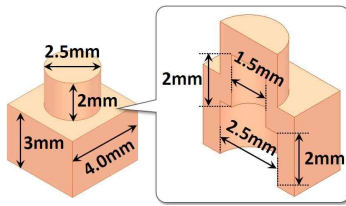
선행연구[16]에서는 기계적으로 단위구조를 조절하지 않고 각각의 단위구조를 퍼즐 조립하듯이 각각 조립하여 동작주파수 대역을 이동시키거나, 동작대역을 단일대역에서 다중대역 특성으로 구현이 가능한 피라미드 형상의 FSS 구조를 설계하였다. 빠른 제작을 위해 3D 프린팅 기술로 피라미드형 유전기판 위에 전도성 패턴을 형성하였으나, 사용자의 목적에 따라 매번 FSS 단위구조를 제작을 해야하는 어려움이 있다.

본 연구에서는 퍼즐 조립 방식이 아닌 전도성을 가진 레고블록을 이용하여 다양한 구조를 쉽고 빠르게 제작이 가능한 레고블록 기반 FSS 구조를 설계하였다. 설계한 레고블록 기반 FSS 구조는 기본적인 구조 중에서 조립 및 제작이 가장 용이한 다이폴형과 십자가형으로 설계하였으며, 성능을 검증하기 위해 자유공간측정법을 통해 제작한 레고블록 FSS 구조의 투과특성을 편파 및 입사각 변화에 따라 측정하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

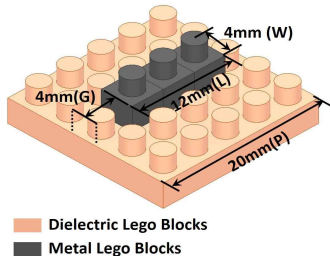
II. 레고블록 기반 주파수 선택표면 구조

2.1 다이폴형 주파수 선택표면 구조

레고블록기반 FSS 구조는 레고타입의 블록들을 사용하여 단위구조의 형태에 구애받지 않고 변형이 가능하며, 평면형 구조 뿐만 아니라 입체형 구조로도 쉽게 제작이 가능하다는 특징을 가진다. 본 논문에서 사용한 레고블록은 그림 1(a)와 같이 가로x세로 4mm×4mm에 전체 높이 5mm인 레고블록이다. 이를 이용하여 조립이 간단한 다이폴형 FSS 구조를 그림 1(b)와 같이 설계하였다. 블록 한 개의 크기가 고정되어 있어 다이폴의 폭(W)은 4mm, 길이(L)는 12mm이며, 단위구조의 간격(G)는 4mm이다.



(a) 1x1배열의 레고블록
(a) Lego block of 1x1 array



(b) 다이폴형 FSS 단위구조
(b) Unit cell of dipole-type FSS structure

그림 1. 레고블록과 다이폴형 FSS 단위구조
Fig. 1. Lego block & Unit cell of dipole-type FSS

레고블록은 크게 유전 레고블록과 전도성을 가진 금속 레고블록으로 구성되어 있으며, 설계한 단위구조의 투과특성을 확인하기 위해 3차원 전자기장 해석툴을 사용하여 다이폴형 FSS 구조의 입사각 변화에 따른 투과특성을 시뮬레이션하였다. 이때 유전 레고블록의 유전율은 2.6, 손실 탄젠트는 0.002, 금속 레고블록의 표면 임피던스는 $0.5\Omega/\text{sq}$ 로 가정하였다.

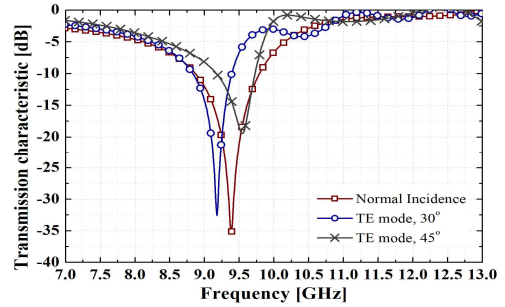


그림 2. 다이폴형 FSS 구조의 투과특성 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulated transmission characteristics for dipole-type FSS structure

시뮬레이션 결과, 다이폴형 FSS 구조는 수직입사파에서 9.38GHz의 공진주파수를 가짐을 그림 2를 통해 확인할 수 있다. 입사각 30°와 45°에서의 공진주파수 시뮬레이션 결과는 각각 9.18GHz와 9.54GHz으로, 입사각 변화에 따라 수직입사파에서의 공진주파수와 오차가 있음을 확인할 수 있다. 다이폴형 FSS 구조는 루프 구조들이나 예루살렘 등과 같은 구조들 보다 큰 단위구조를 가지며, 입사각 변화에 따라 낮은 주파수 응답특성을 가진다[17]. 하지만 제작이 용이하고 적은 개수의 레고블록을 사용하여 많은 단위구조를 배열할 수 있으며, 조립이 용이해 본 연구에서는 레고블록 FSS 구조의 성능을 검증하기 위해 다이폴형 구조를 선택하였다.

2.2 십자가형 주파수 선택표면 구조

앞에서 언급한 바와 같이 레고블록들을 사용하여 FSS 구조를 설계할 경우 쉽게 다른 패턴의 구조로 조립할 수 있다는 장점을 이용하여, 동일한 유전 레고블록과 금속 레고블록을 사용하여 다른 공진주파수를 가진 십자가형 FSS 구조를 설계하였다. 그림 3은 설계한 십자가형 FSS 단위구조로 유전 레고블록 위에 금속 레고블록을 십자가형으로 구현하였다.

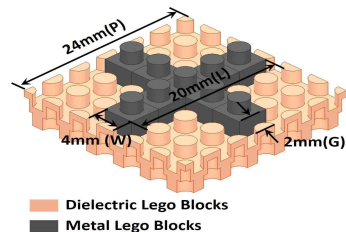
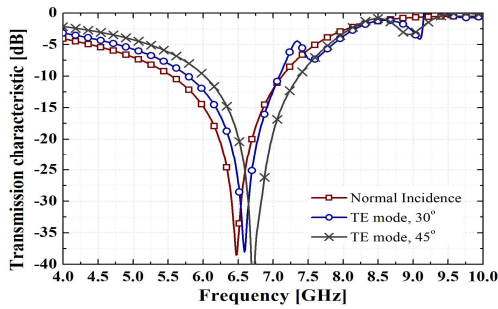


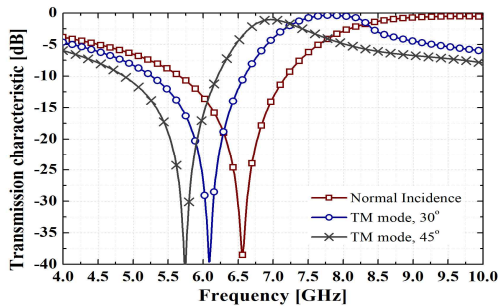
그림 3. 십자가형 FSS 단위구조
Fig. 3. Unit cell of cross-type FSS structure

이때 레고블록은 동일한 크기의 레고블록을 사용하여 단위구조의 폭(W)은 4mm으로 동일하며, 간격(G)은 2mm, 십자가형의 길이(L)는 20mm으로 단위구조의 전체 크기는 24mmx24mm이다.

설계한 십자가형 FSS 구조의 투과특성을 시뮬레이션한 결과, 수직입사파에서 6.48GHz의 공진주파수를 가짐을 확인하였다. 편파 및 입사각 변화에 따라 투과특성을 확인한 결과, 그림 4(a)를 통해 알 수 있듯이 편파 TE 모드에서 입사각 변화에 따라 공진주파수가 6.58GHz, 6.71GHz로 점점 높은 주파수 대역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 편파 TM 모드일 때의 입사각 변화에 따른 투과특성을 나타낸 것으로, 입사각 변화에 따라 6.08GHz, 5.74GHz로 아래쪽 주파수 대역으로 이동함을 확인할 수 있다. 십자가형 구조 역시 다른 기본 구조들보다 단위구조가 크고, 입사각 안정성은 낮으므로 입사각 변화가 커질수록 안정적인 특성을 가지지 않는다.



(a) TE 모드
(a) TE Mode



(b) TM 모드
(b) TM Mode

그림 4. 십자가형 FSS 투과특성 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulated transmission characteristics for cross-type FSS structure

III. 제작 및 측정

3.1 제작 및 측정방법

설계한 다이폴형 FSS 구조와 십자가형 FSS 구조의 성능을 검증하기 위해 실제 레고블록을 사용하여 제작하였다. 제작에 사용한 레고블록은 레고블록형 안테나 조립 키트인 Anten'it 사의 유전 레고블록과 금속 레고블록이다. 그림 5와 같이 1x1 배열, 1x2 배열, 1x6 배열, 2x2 배열, 2x4 배열 등 다양한 배열의 레고블록들로 구성되어 있다.

이때 유전 레고블록의 경우에는 유전율 2.6, 4.4, 8.0으로 서로 다른 유전율을 가진 3가지 종류의 유전 레고블록으로 구성되어있다. 본 논문에서는 대면적 제작을 위해 레고블록의 개수가 많은 유전율 2.6의 레고블록을 사용하여 유전기판을 만들고, 다양한 배열의 금속 레고블록들을 사용하여 다이폴형과 십자가형 구조를 구현하였다.



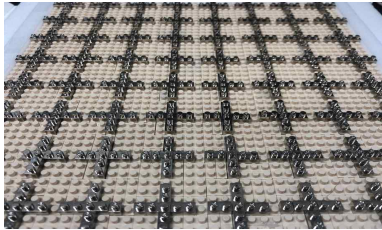
그림 5. 유전 레고블록과 금속 레고블록

Fig. 5. Dielectric lego blocks and metal lego blocks

레고블록 FSS 구조는 측정 지그의 개구면 크기를 고려하여 전체 크기 188mmx188mm로 결정하였다. 그림 6(a)는 20mmx20mm 크기를 갖는 다이폴형 단위구조를 9x9 배열하여 제작한 사진이며, 그림 6(b)는 24mmx24mm 크기를 갖는 십자가형 단위구조를 8x8 배열하여 제작한 사진을 나타낸다. 또한 제작한 레고블록 FSS 구조를 두 개의 광대역 혼 안테나를 사용하여 자유공간측정법으로 편파 및 입사각(0°, 30°) 변화에 따른 투과특성을 측정하였다.



(a) 다이폴형 FSS 구조
(a) Dipole-type FSS structure



(b) 십자가형 FSS 구조
(b) Cross-type FSS structure

그림 6. 제작한 레고블록기반 FSS 구조
Fig. 6. Fabricated lego blocks based FSS structure

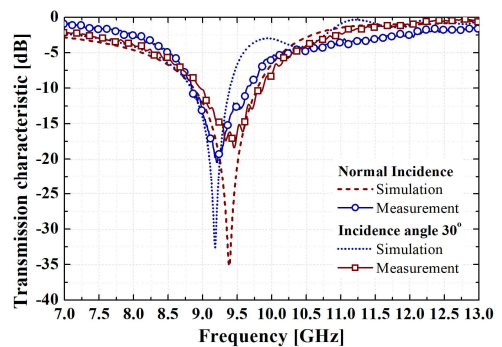
3.2 측정결과

먼저 다이폴형 FSS 구조를 측정한 결과, 수직입사파에서의 공진주파수는 9.32GHz이며 시뮬레이션 결과와 비교한 공진주파수의 오차는 0.64%이다. 또한 입사파의 각도가 30°일 경우, 측정된 공진주파수는 9.21GHz로 시뮬레이션 결과와 비교한 공진주파수의 오차는 0.32%으로 비교적 오차가 작으나, 대역폭에서 약간의 차이가 발생함을 그림 7(a)를 통해 확인할 수 있다.

그림 7(b)는 십자가형 FSS 구조의 투과특성 측정 결과를 나타낸 것으로, 수직입사파에 6.49GHz의 공진주파수를 가짐을 확인하였다. 입사파의 입사각도가 30°에서 TE 및 TM 모드 변화에 따라 측정된 공진주파수는 각각 6.66GHz, 6.07GHz이다. 또한 편파 및 입사각 변화에 따라 측정된 공진주파수를 시뮬레이션 결과와 비교한 결과, 최대 1.2%의 공진주파수 오차를 가진다. 십자가형 FSS 구조는 다이폴형 FSS 구조 보다 공진주파수의 오차가 조금 크지만, 대역폭과 주파수 변화에 따른 주파수 응답특성이 매우 유사함을 확인할 수 있다.

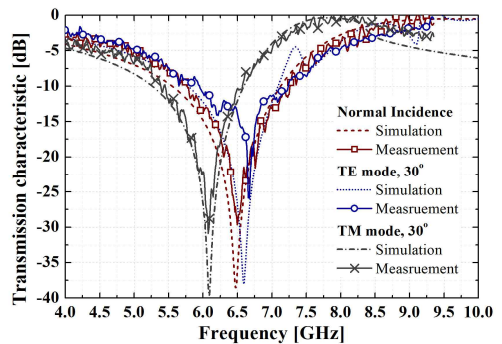
이를 통해 레고블록을 사용하여 서로 다른 공진

주파수를 갖는 FSS 구조를 쉽게 조립 및 제작이 가능함을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 기제작된 레고블록을 사용하여 설계 및 제작함으로써 단위구조의 길이와 폭, 간격 등이 제한되어 있으며, 원과 같은 곡면을 구현하기에는 제한이 있다. 하지만 복잡한 입체형 구조를 쉽고 빠르게 제작이 가능한 3차원 프린팅 기술을 이용하여 더 작은 크기의 레고블록들을 제작할 경우에는 이러한 제한사항들을 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.



(a) 다이폴형 FSS 구조

(a) Dipole-type FSS structure



(b) 십자가형 FSS 구조

(b) Cross-type FSS structure

그림 7. 레고블록기반 FSS 투과특성 측정 결과
Fig. 7. Measured transmission characteristics for lego block based FSS structure

IV. 결론

본 논문에서는 레고블록을 사용하여 다양한 패턴으로 조립하여 주파수 재구성 특성을 구현할 수 있는 레고블록 기반 FSS 구조를 연구하였다. 제안한 레고블록 FSS 구조는 다이폴형과 십자가형 FSS 구조로 서로 다른 공진주파수를 가지며, 이때 사용한

레고블록은 모두 유전율 2.6의 유전 레고블록과 금속 레고블록을 사용하여 설계하였다. 설계한 다이폴형 FSS 구조는 9.38GHz의 공진주파수를, 십자가형 FSS 구조는 6.48GHz의 공진주파수를 가짐을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 자유공간측정법을 통해 편파 및 입사각 변화에 따라 측정하였다. 측정결과, 제작한 다이폴형 FSS 구조는 공진주파수 9.32GHz을 가지며, 시뮬레이션 결과와 공진주파수 오차를 비교한 결과 60MHz (0.64%)으로 오차가 작음을 확인하였다. 또한 십자가형 FSS 구조의 공진주파수는 6.49GHz으로 시뮬레이션 결과와 비교한 공진주파수의 오차는 10MHz (0.15%)이다. 이를 통해 레고블록을 사용하여 제작한 다이폴형, 크로스형 FSS 구조 모두 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 가짐을 확인하였다.

References

- [1] B. A. Munk, "Frequency selective surface: Theory and Design", New York:John Wiley&Sons Inc., pp. 1-25, Apr. 2000.
- [2] N. Liu, X. Sheng, C. Zhang, and D. Guo, "Design of frequency selective surface structure with high angular stability for radome application", *Antenna and Wireless Propagation Letters, IEEE*, Vol. 17, No. 1, pp. 138-141, Jan. 2018.
- [3] Y. He, W. Feng, S. Guo, J. Wei, Y. Zhang, Z. Huang, C. Li, L. Miao, and J. Jiang, "Design of a dual-band electromagnetic absorber with frequency selective surfaces", *Antennas and Propagation Letters, IEEE*, Vol. 19, No. 5, pp. 841-845, May 2020.
- [4] S. Ghosh and K. V. Srivastava, "Broadband polarization insensitive tunable frequency selective surface for wideband shielding", *Transactions on Electromagnetic Compatibility, IEEE*, Vol. 60, No. 1, pp. 166-172, Feb. 2018.
- [5] A. B. Sakthi, E. F. Sundarsingh, and V. S. Ramalingam, "Mechanically reconfigurable frequency selective surface for RF shielding in indoor wireless environment", *Transactions on Electromagnetic Compatibility, IEEE*, Vol. 62, No. 6, pp. 2643-2646, Feb. 2020.
- [6] Y. Li, P. Ren, and Z. Xiang, "A dual-passband frequency selective surface for 5G communication", *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, Vol. 18, No. 12, pp. 2597-2601, Dec. 2019.
- [7] A. A. Dewani, S. G. O'Keefe, D. V. Thiel, and A. Galehdar, "Optically transparent frequency selective surfaces on flexible thin plastic substrates", *API Advances*, Vol. 5, No. 2, pp. 5-13, Jan. 2015.
- [8] W. Y. Yong, S. K. A. Rahim, M. Himdi, F. C. Seman, D. L. Suong, M. R. Ramli, and H. A. Elmobarak, "Flexible convoluted ring shaped FSS for X-band screening application", *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 11657-11665, Mar. 2018.
- [9] S. Qiu, Q. Guo, and Z. Li, "Tunable frequency selective surface based on a sliding 3D printed inserted dielectric", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 19743-19748, Jan. 2021.
- [10] W. Wang, Q. Cao, and Y. Zheng, "Bandstop frequency selective structures based on stepped impedance loop resonators: design, analysis, and measurement", *Transactions on Antennas and Propagation, IEEE*, Vol. 67, No. 2, pp. 1053-1064, Feb. 2019.
- [11] R. Panwar, and J. R. Lee, "Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures:A critical review", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 66, pp. 216-234, Jul. 2017.
- [12] R. Sivasamy and M. Kanagasabai, "Novel reconfigurable selective surface", *Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, IEEE*, Vol. 7, No. 10, pp. 1678-1682, Oct. 2017.
- [13] D. Ferreira, I. Cuninas, R. F. S. Caldeirinha, and T. R. Fernandes, "3D mechanically tunable square slot FSS", *Transactions on Antennas Propagation*,

IEEE, Vol. 65, No. 1, pp. 242-250, Jan. 2017.

- [14] S. M. A. M. H. Abadi, J. H. Booske, and N. Behdad, "Exploiting mechanical flexure as a means of tuning the responses of large scale periodic structures", Transactions on Antennas and Propagation, IEEE, Vol. 64, No. 3, pp. 933-943, Mar. 2016.
- [15] A. Biswas, C. L. Zekios, and S. V. Georgakopoulos, "Transforming single-band static FSS to dual-band dynamic FSS using origami", Scientific Reports, Vol. 10, No. 1, pp. 1-12, Aug. 2020.
- [16] S. S. Cho, S. H. Yoon, and I. P. Hong, "Design of three-dimensional frequency selective structure with replaceable unit structures using a 3-D printing technique", Antennas Wireless Propagation. Letter, IEEE, Vol. 17, No. 11, pp. 2041-2045, Nov. 2018.
- [17] T. K. Wu, "Frequency selective surface and grid array", Wiley-Interscience, pp. 5-7, Oct. 1995.

홍익표 (Ic-Pyo Hong)



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
관심분야 : 전자기 수치해석, 주파수 선택구조, 스펙트럼
공학

저자소개

조성실 (Sung-Sil Cho)



2016년 2월 : 공주대학교
정보통신공학부 (공학사)
2018년 2월 : 공주대학교
정보통신공학과 (공학석사)
2018년 3월 ~ 현재 : 공주대학교
스마트자연공간 연구센터 연구원
관심분야 : 안테나, 주파수

선택구조 설계 및 응용