

# 주파수 선택 표면

## 최신 기술 동향

맥스웰 방정식이 발견된 이래로 수많은 전자기 소자가 개발되었다. 이들은 회로와 같은 2차원 구조에서의 전자기 신호 흐름을 통제하는 역할을 수행하여 왔으나, 헤르츠와 테슬라와 같은 과학자들에 의해 선보인 무선전송기술로 인해 공간상의, 즉 3차원상에서의 전자기 신호 통제를 할 수 있는 장치의 개발 또한 부각되고 있다. 이 일환으로 주파수 선택 표면이 활발히 연구되어졌다. 본 고에서는 최근 이슈화 되고 있는 주파수 선택 표면의 소형화 기술과 동작 주파수 가변 기술에 대해서 알아보려고 한다.

■ 오세명, 이한준, 이길영\*  
(공군사관학교)

### I. 서론

무선통신이 시작한 이래로 수많은 전자기파가 우리 주변을 흘러 다니고 있다. 전자기파는 통신장비와 레이더 장비 등의 운영을 위한 필수적인 매개체이기도 하지만 때로는 전자파 간섭과 같은 부정적인 영향을 끼치기도 한다. 이러한 문제점을 완화시키기 위해 Ben A. Munk 교수 연구팀[1]을 포함한 수많은 과학자와 공학자들에 의해 연구된 주파수 선택 표면(Frequency Selective Surface, FSS)[2]-[4]이 활용되고 있다. 주파수 선택 표면은 원하는 주파수대역의 전자기파를 통과시키고 원하지 않은 혹은 불필요한 주파수 대역의 전자기파는 차단시키는 공간필터(spatial filter)이다. 마이크로 회로 필터와 같이, 주파수 선택 표면은 저역필터(low-pass filter), 고역필터(high-pass filter), 통과대역필터(pass-band filter) 및 저지대역필터(stop-pass filter)로서 동작하며 일반적으로 정교한 주파수 제어를 위해 통과대역필터

와 저지대역필터로 많이 이용된다. 이를 위해서는 일반적으로 그림 1과 같이 다이폴이나 슬롯 형태의 공진형 구조물을 포함한 단위셀(unit cell)이 규칙적으로 배열되어 있어야 한다. 이러한

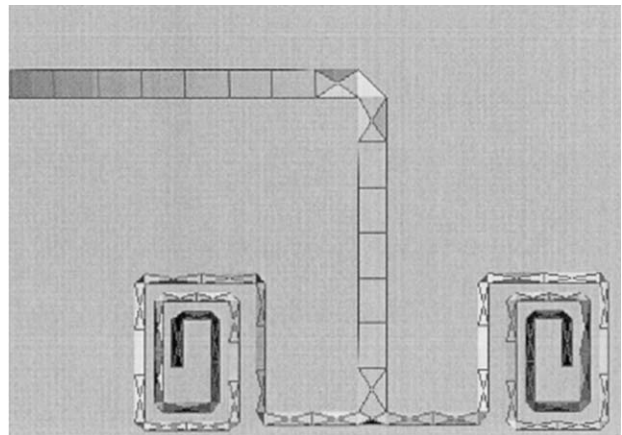


그림 2. 나선형 슬롯가지가 추가된 슬롯 안테나(5).

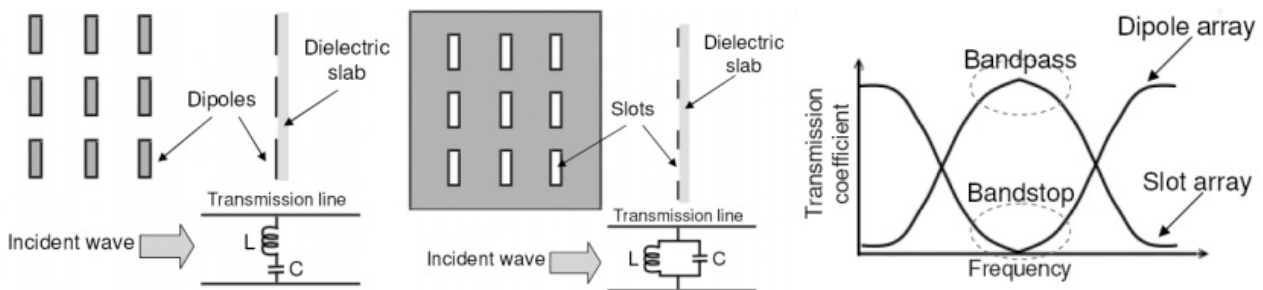


그림 1. 다이폴 및 슬롯을 이용한 주파수 선택 표면(1).

전형적인 주파수 선택 표면은 설계와 제작이 용이하지만 공진형 구조물의 크기가 동작 주파수에서의 파장의 반이 되어야 한다는 물리적 제약과 좁은 대역폭을 가진다는 전기적 제약을 지니고 있다.

본 고에서는 위에서 언급한 단점들을 해결하기 위해 제시되고 있는 최신 기술 동향을 우선 살펴보고자 한다. 그리고 추가적으로 급변하는 주파수 운용 현황을 만족시키기 위해 개발되고 있는 가변형 주파수 선택 표면에 대해서도 살펴볼 것이다.

## II. 주파수 선택 표면의 소형화

최근에 이르러 무선장비들이 차량 및 항공기 표면에 설치되고 있으며 또한 웨어러블 시스템의 도입으로 인해 무선장비의 소형화가 필수적인 조건이 되었다. 이러한 기술적 추세에 따라 주파수 선택 표면의 소형화 또한 진행되고 있으나 앞에서 언급하였다시피 단위셀 내 공진형 구조물의 크기, 즉, 다이폴과 슬롯의 크기가 대략  $1/2\lambda_0$  이 되어야 하며, 여기서  $\lambda_0$  은 공진주파수에서의 자유공간 파장, 주파수 선택 표면 내 단위셀의 개수가 400개[1] 이상 되어야 한다는 제약으로 인해 난관에 부딪히고 있다.

위의 난관을 효율적으로 해결할 수 있는 방안이 미시간 대학의 Sarabandi 연구팀에 의해 제시되었다. 그의 연구팀은 전자기파 입사 시 전기장이 슬롯의 중심에서  $1/4\lambda_0$  범위에 집중적으로 분포한다는 사실에 기반하여 그림 2와 같이 슬롯의 끝단에 나선형의 얇은 슬롯 가지를 추가하였다. 이를 통해 주파수 응답의 큰 변화 없이 전류경로를 늘려 전기길이(electrical length)를 증가시켰으며 최종적으로 슬롯의 물리적 길이(physical length)를 감소시킬 수 있었다. 이 연구결과는 우선적으로 소형 슬롯 안테나 설계[5]에 적용되었으며 나아가 주파수 선택 표면 설계에도 이용되어졌다. 실제로 [6]에서는 나선형 가지가 추가된 슬롯을 이용하여 단위셀의 크기를 절반 이상으로 줄였으며, 슬롯의 상보적인 형태(complementaries)인 다이폴의 크기를 감소시켜 저대역 주파수 선택 표면의 단위셀 크기 또한 크게 줄였다[7]. 하지만 Chu의 연구결과[8]에 따르면 소형화된 슬롯을 이용할 경우 장치의 대역폭이 좁아지게 되는데, 이 문제 또한 Sarabandi 교수팀의 노력을 통해 개선되었다. [9]에서 그림 3과 같이 두 개의 소형화된 슬롯이 하나의 접지면에 근접하여 설치되었는데 슬롯간의 전기 공진에 의해 대역폭이 개선되었다. 하지만 공진구현이 복잡하다는 점과 편파(polarization)와 입사각에 상대적으로 민감하여 주파수 선택 표면 설계에 있어서 적절하지 않았다.

2000년대 중, 주파수 선택 표면의 소형화에 획기적인 변화를 일으킨 기술이 제시되었다. 최초의 아이디어는 앞에서 언급한 Sarabandi 교수 팀에 의해 제시되었으나[10], 위스콘신 대학의 Behdad 교수 팀에 의해 더욱 진보되고 발전되었다[11]-[12]. 그들의 논문에 따르면, 유전기판의 한쪽 면에 금속패치를 배열하고 그 반대 면에 금속망을 설치할 경우 전자기파 입사시 커패시턴스와 인덕턴스 성분이 발생하여 병렬 공진기를 형성하며 최종적으로 통과대역 필터를 생성한다. 이러한 디자인의 최대 장점은 구조가 매우 간단하여 제작이 쉽고 단위셀의 크기와 두께가 기존의 공진형 주파수 선택 표면에 비해 매우 작으며 입사각과 편파에 대해 매우 안정적이라는 것이다. 그뿐만 아니라 공진 구조물을 지닌 주파수 선택 표면과의 합성이 용이하며, 두 구조물간의 동작 주파수 대역이 차이가 발생한다는 원리를 이용하여 이중대역[13] 혹은 삼중대역[14]의 주파수 응답을 얻을 수 있어 현 시대에서 요구하는 멀티태스킹 능력에 부합된다. 그리고 높은 에너지를 가지는 전자기파가 입사되어도 상대적으로 안정적으로 동작하여 전자전 분야와 같은 군사적인 부분에도 이용될 수 있다[15].

## III. 가변형 주파수 선택 표면

주파수 사용 포화 및 통신량 증가로 인하여 주파수 선택 표면을 포함한 통신장비의 주파수 변환이 수시로 요구되고 있다. 주파수 선택 표면의 동작 주파수를 변경시키기 위해서 매우 다양한 기술이 제시되었으며 이들 중 대표적인 방법은 단위셀의 공진구조내 PIN[16] 혹은 varactor[17] diode를 적절히 설치하는 것

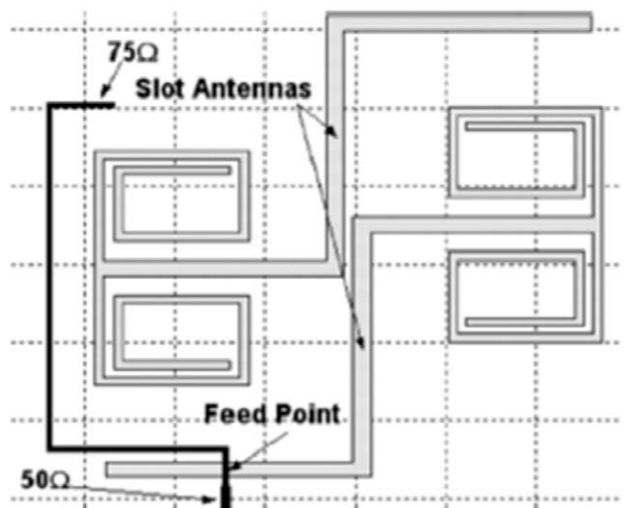


그림 3. 나선형 슬롯가지가 추가된 이중 슬롯 안테나(9).

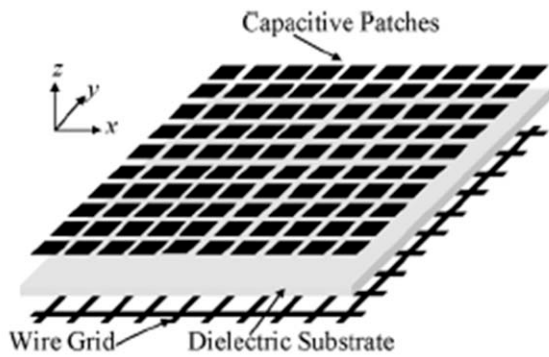


그림 4. 비공진형 주파수 선택 표면(10).

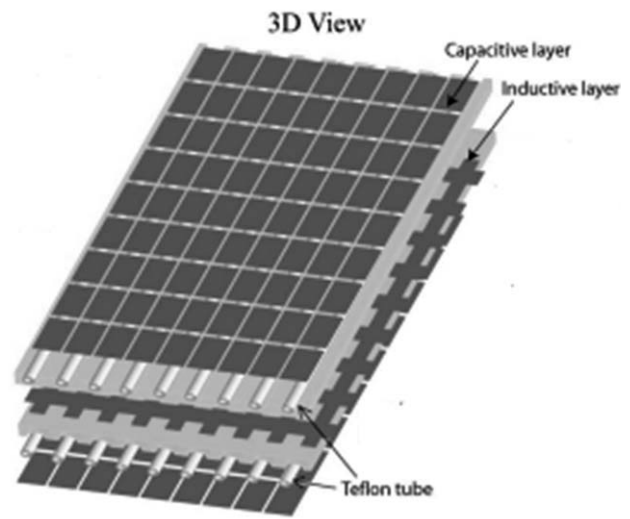


그림 7. 금속 방울을 이용한 주파수 선택 표면(19).

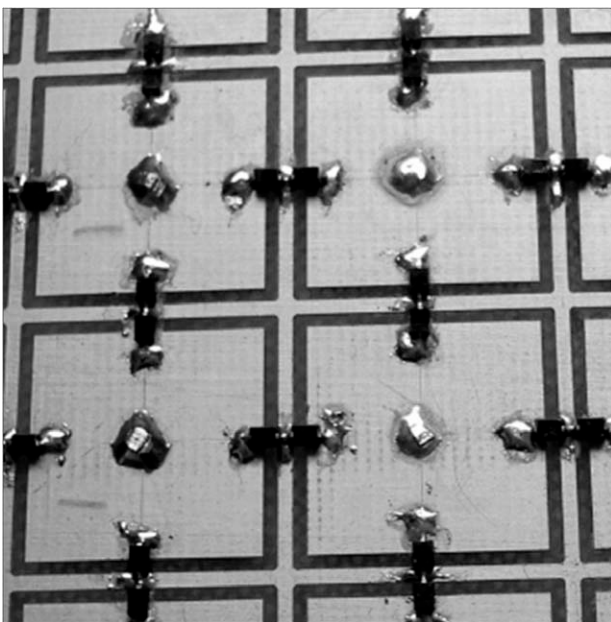


그림 5. 가변형 주파수 선택 표면(16).

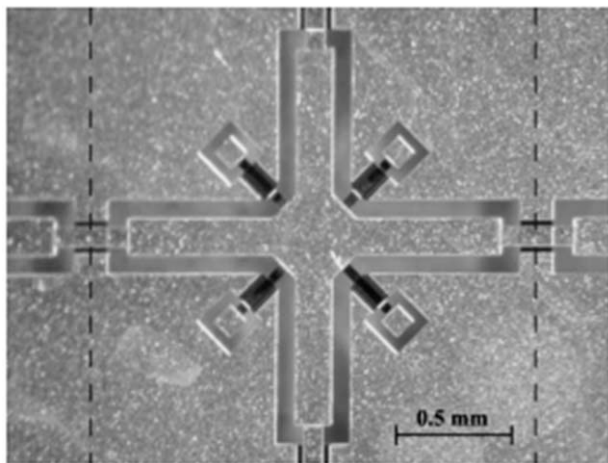


그림 6. MEMS 기술을 적용한 주파수 선택 표면(18).

이다. 가장 보편적으로 많이 사용되는 방법이나 다음과 같은 단점을 가지고 있다. 우선 단위셀마다 다이오드를 일일이 설치하여야 하는데 일반적으로 주파수 선택 표면당 단위셀이 400개 이상 있으므로 최소 400개 이상의 다이오드를 직접 설치해야 한다는 번거로움이 있다. 또한 다이오드와 납땀에 의해 주파수 응답이 변형되고 또한 내부 손실까지 발생하게 된다. 이러한 문제를 개선할 수 있는 방법 중 하나가 바로 MEMS 기술이다. MEMS 기술을 통해 다이오드를 표면에 직접 형성하여 위의 문제점을 극복하였다 [18]. 하지만 MEMS 기술을 이용할 경우 제작과 설계가 매우 어려워진다는 단점이 있다.

전자소자를 이용하여 주파수 선택 표면의 주파수를 변경하는 방법 외에도 기계적으로 주파수를 변경하는 방법도 있다. 이 기술은 II 장에서 살펴본 주파수 선택 표면과 융합할 경우 매우 큰 효과를 발휘한다. 금속 패치와 금속 망 사이의 유전기판에 금속 방울이 들어 있는 테플론 관을 삽입하여 금속 방울의 위치를 적절히 변경하면 금속 패치간의 커패시턴스 값이 변화하여 공진주파수가 변화하게 된다[19]. 전자소자를 사용하지 않기 때문에 전기적 충격에 강하며 제작비용이 저렴하나 정밀한 주파수 조절이 어렵다.

### III. 결론

본 고에서는 주파수 선택 표면의 최신 기술 동향에 대해 살펴보았다. 소형화를 위해 사용된 나선형 슬롯 가지 기술의 동작원리와 특성에 대해 살펴보았고 해당 기술의 단점 역시 알아보았

다. 또한 이러한 단점들을 극복하고 소형화를 극대화 할 수 있는 방법을 기술하였다. 그 외에도 동작 주파수를 쉽게 변형시킬 수 있는 가변형 주파수 선택 표면의 최신 기술에 대해서도 알아보았다. PIN 혹은 Varactor 다이오드를 직접적으로 설치하는 기존의 방법 외에도 MEMS 기술을 이용한 방법, 액체 금속을 이용한 기계적 방법에 대해서도 살펴보았다.

주파수 선택 표면은 통신 및 레이더 기술이 발전함에 따라 그 필요성이 점점 대두되고 있다. 1990년대까지 관련 기술이 군사 기밀로 분류되어 활용도가 군수분야로만 제한되어 있었으나 2000년대에 이르러 민간분야에도 그 적용 분야가 확대되고 있다. 따라서 관련 시장도 점점 성장하고 있으며 이용사례도 계속 증가할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces : Theory and Design*, Wiley-Interscience, 2000.
- [2] H. M. Lee and Y. J. Kim, "Double-layered frequency selective surface superstrate using ring slot and dipole-shaped unit cell structure," *J. Electromagn. Eng. Sci.*, vol. 10, no. 3, pp.86-91, Sep. 2012.
- [3] G. A. E. Crone, A. W. Rudge and G. N. Taylor, "Design and performance of airborne radomes : a review," *Proc. of IEE Pt. F*, vol. 128, no 7, pp. 451-464, Dec. 1981.
- [4] M. Gustafsson, A. Karlson, A. P. Rebelo, and B. Widenberg, "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, pp. 1987-1990, Jun. 2006.
- [5] K. Sarabandi, and R. Azadegan, "Design of an efficient miniaturized UHF planar antenna," *Proc. IEEE Int. Atennas Propagat & URSI Symp.*, Boston, MA, July 8-13, 2001.
- [6] G. Yang, T. Zhang, W. Li and Q. Wu, "A novel stable miniaturized frequency selective surface," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 1018-1021, Nov. 2010.
- [7] T. Zhang, G.-H. Yang, W.-L. Li, and Q. Wu, "A novel frequency selective surface with compact structure and stable responses," *ISAPE, 9th International Symposium*, pp. 932-935, Dec. 2010.
- [8] L. J. Chu, "Physical limitations on omni-directional antennas," *J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 1163-1175, Dec. 1948.
- [9] N. Behdad and K. Sarabandi, "Bandwidth enhancement and further size reduction of a class miniaturized slot antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 8, pp. 1928-1935, Aug. 2004.
- [10] K/ Sarabandi and N. Behdad, "A frequency selective surface with miniaturized elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, pp. 1239, 1245, May 2007.
- [11] M. Salehi, N. Behdad, "A second-order dual X-/Ka-band frequency selective surface," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 12, pp. 785-787, Dec. 2008.
- [12] M. A. Al-Joumayly and N. Behdad N, "Generalized method for synthesizing low-profile band-pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 12, pp. 4033-4041, Dec. 2010.
- [13] M. A. Al-Joumayly and N. Behdad, "Low-profile, highly-selective, dual-band frequency selective surfaces with closely spaced bands of operation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 12, pp. 4042-4050, Dec. 2010.
- [14] D. Wang, W. Che, Y. Chang, K.-S. Chin, and Y. L. Chow, "A Low-profile frequency selective surface with controllable tri-band characteristics," *IEEE Antennas Wireless Propag. Letters*, vol. 12, pp. 468-471, Mar. 2013.
- [15] M. Li and N. Behdad, "Frequency selective surfaces for pulsed high-power microwave applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 2, pp. 677-687, Feb. 2013.
- [16] G. I. Kiani, K. L. Ford, L. G. Olsson, K. P. Esselle, and C. J. Panagamuwa, "Switchable frequency selective surfaces for reconfigurable electromagnetic architecture of buildings," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 2, pp. 581-584, Feb. 2010.
- [17] C. Mias, "Varactor-tunable frequency selective surface with resistive-lumped-element biasing grids," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 9, pp. 570-572, Sep. 2005.
- [18] B. Schoenlinner, A. A.-Tamijani, L. C. Kempel, and G. M. Rebeiz, "Switchable low-loss RF MEMS Ka-band frequency-selective surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 11, pp. 2474-2481, Nov. 2004.
- [19] M. Li and N. Behdad, "Fluidically tunable frequency selective/phase shifting surfaces for high-power microwave applications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 6, pp.2748-2759, June 2012.

◎ 저 자 약 력



**오 세 명**

- 2007년 공군사관학교 전자공학과 졸업.
- 2011년 위스콘신주립대학교(메디슨) 전자공학 석사.
- 2013년~현재 공군사관학교 전자공학과 강사 재직.
- 관심분야 : 마이크로파 수동회로 설계, 안테나.



**이 한 준**

- 2010년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업.
- 2012년 한국과학기술원 전자공학 석사.
- 2013년~현재 공군사관학교 전자공학과 강사 재직.
- 관심분야 : RF 및 전력전자 회로 설계.



**이 길 영**

- 1997년 공군사관학교 전자공학과 졸업.
- 2004년 서울대학교 전기공학 석사.
- 2012년 오하이오주립대학교 전기공학 박사.
- 2012년~현재 공군사관학교 전자공학과 부교수 재직.
- 관심분야 : 마이크로파 수동회로 설계, MIMO, 안테나 및 전파전파.