

## 광대역 특성을 가지는 SIW 주파수 선택 표면 설계

# Design of a Wideband Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Frequency Selective Surface

오 세 명, 이 한 준, 이 길 영\*  
(Semyoung Oh<sup>1</sup>, Hanjun Lee<sup>1</sup>, and Gil-Young Lee<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Electronics Engineering, Republic of Korea Air Force Academy

**Abstract:** An SIW cavity is a useful tool to design an FSS which shows a rapid roll-off rate and insensitivity to polarizations and incident angles of electromagnetic waves. However, due to its high Q-factor, the FSS also shows narrow bandwidth which is undesirable for high-capacity communication. To address this drawback, we propose a novel technique to enhance the bandwidth while maintaining similar frequency response characteristics and minimizing the increase of the overall thickness of the SIW cavity FSS. In order to verify the performance of the technique, simulated frequency responses will be provided. Also, a parameter which affects the bandwidth will be studied. Finally the stability to polarizations and incident angles will be observed through the simulated results.

**Keywords:** frequency selective surfaces, substrate integrated waveguide, radomes, periodic structures

### I. 서론

오늘날에 이르러 저잡음 및 고속 데이터 전송이 가능한 대용량 무선통신의 수요가 증가함에 따라 높은 롤오프율(rapid roll-off rate), 저손실성(low loss), 광대역성(wide bandwidth) 및 높은 안정성(high stability)을 갖는 필터 등의 통신부품 개발이 활발히 진행되고 있으며[1,2] 이러한 추세에 힘입어 주파수 선택적 표면(FSS: Frequency Selective Surface) 또한 광범위하게 연구되고 있다. FSS는 마이크로파 및 밀리미터파용 공간필터 혹은 물리적인 보호 장치로서 사용되고 있으며, 대역통과 및 대역저지 필터로 동작하기 위해서 일반적으로 다이폴 및 슬롯 등과 같은 금속성 공진형 구조물이 주기적으로 배열되어 있다[3-9]. 이러한 공진형 구조물로 이루어진 FSS는 분석과 제작이 쉽다는 장점이 있는 반면에 개방형 구조로 인하여 낮은 롤오프율과 높은 내부 손실을 가지며 또한 입사각과 입사편파에 민감하다는 단점 또한 가지고 있다.

최근 위에서 언급한 단점들을 해결하기 위해 기관 집적형 도파관(SIW: Substrate-Integrated Waveguide) 기술이 FSS 설계에 적극적으로 활용되고 있다. SIW는 기존의 3차원 도파관을 유전 기관에 내장한 평면 도파관으로서 서로 평행한 두 개의 금속판들과 금속판들 사이에 위치한 유전기관 그리고 유전기관 경계면을 따라 설치된 전도성 중공원통(hollow cylinder)들로 구성되어 있다[10]. 이러한 SIW의 열려 있는 양단을 추가적인 중공원통 열로 폐쇄하여 기존의 3차원 공동과 동작 원리가 유사하며 높은 Q-factor를 갖는 SIW cavity [11]가 개발되었으며 최초로 대역통과 FSS의 단위셀로 이용되었다[12]. 또한 [13]에서 다중 모드를 이용한 편파회전 FSS로 개발하기

도 하였으며, Luo 교수의 연구팀은 매우 높은 롤오프율과 입사각 및 편파에 대한 최대 안정성을 가지는 다층 SIW cavity FSS로 제작하기도 하였다[14]. [12-14]의 연구결과에서 볼 수 있듯이 SIW cavity를 FSS의 단위셀로 이용할 경우 매우 가파른 롤오프율과 불필요한 공진(spurious resonance)이 없는 명확한 주파수 응답을 얻을 수 있다. 하지만 높은 Q-factor에 의한 좁은 대역폭에 의해 대용량 통신에는 부적합하다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 가파른 롤오프율, 낮은 내부 손실, 입사각과 입사편파에 대한 높은 안정성을 유지한 채 SIW cavity FSS의 대역폭을 개선시킬 수 있는 기술을 제안하였다. 제안된 기술이 전반적으로 간단하고 FSS의 두께를 미약하게 증가시켰음에도 불구하고 대역폭은 두드러지게 증가되었다.

서론에 이어 제 II 장에서는 SIW cavity FSS의 대역폭을 개선하기 위한 구조물의 설계 방법과 동작원리를 다루었으며 또한 주파수 응답을 통해 성능 개선을 검증하였다. 그뿐만 아니라 편파 및 입사각에 대한 성능의 안정성도 살펴보았다. 마지막으로 제 III 장에서는 제안한 방식에 대한 평가와 결론을 맺었다.

### II. 설계 및 시뮬레이션

제안된 광대역 SIW cavity FSS 단위셀(unit cell)의 측면 및 정면 구조가 그림 1에 제시되어 있다. 단위셀은 총 4개의 금속 층으로 이루어져 있으며 각 층들 사이에는 상대 유전율( $\epsilon_r$ )이 2.2인 3개의 유전기관판들이 끼워져 있다. 내부에 위치한 금속 층들은 십자가 형태의 슬롯이 새겨져 있는 접지면(ground plane)으로 서로 중공원통(hollow cylinder)들로 연결되어 있으며, 접지면 사이에 끼여있는 유전기관과 함께 SIW cavity FSS를 구성하고 있다. 본 논문에서는 이러한 SIW cavity FSS의 통과 대역폭을 증가시키기 위해 해당 구조물의 바깥쪽 양면에 여러 개의 정사각형 패치로 이루어진 금속 층

\* Corresponding Author

Manuscript received November 20, 2013 / revised December 20, 2013 / accepted December 31, 2013

오세명, 이한준, 이길영: 공군사관학교 전자공학과  
(osm12345@hanmail.net/irizurri@hotmail.com/gylee45@gmail.com)

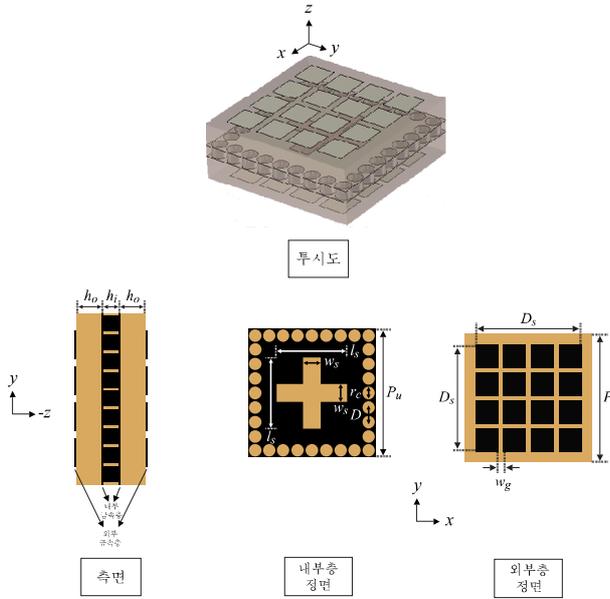


그림 1. 제안된 광대역 SIW cavity FSS의 구조.  
 Fig. 1. Geometry of the proposed wideband SIW cavity FSS.

들을 유전기판과 함께 적층하였다. 정사각형 조각들은 단위 셀의 크기(\$P\_u \times P\_u\$)보다 작은 제한된 경계면 내(\$D\_s \times D\_s\$)에서 균일하게 분포되어 있으며 각각의 조각 사이에는 \$w\_g\$의 너비를 가지는 미세한 틈이 존재한다.

1. SIW cavity FSS의 동작원리 및 설계

제안된 기법에 의한 대역폭 개선 효과를 살펴 보기 전 SIW cavity FSS의 주파수 응답과 동작원리를 먼저 살펴볼 필요가 있다. 그림 2는 SIW cavity FSS의 주파수 응답을 나타내고 있으며 그림 3은 해당 구조물의 전기장 분포를 보여주고 있다. 이 결과들은 상용 전자기 수치해석 프로그램인 CST MWS (Microwave Studio)를 이용하여 산출되었다. 주어진 주파수 응답에는 결합된 2개의 공진점들과 하나의 트랜스미션 널이 존재하며 이들은 롤오프율이 높고 경계가 명확한 통과 대역을 구성하고 있다.

SIW cavity FSS는 양 표면에 개구면(aperture)이 설치된 SIW cavity의 2차원 배열이다. 이러한 배열 표면에 x축 혹은 y축으로 편파되어 있는 전자기파가 입사될 때 십자가 형태의 슬롯이 우선 공진하며 그 다음 에너지 전달을 통해 그림 3과 같이 SIW cavity가 여기 후 공진한다. 슬롯과 SIW cavity 각각의 공진 주파수는 식 (1), (2)를 통해 근사적으로 계산할 수 있다[11].

$$f_s \cong \frac{c_0}{2l_s \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

$$f_{c-mn} \cong \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{W_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_{eff}}\right)^2} \quad (2)$$

여기서 \$c\_0\$는 자유공간에서 빛의 속도이며 \$\epsilon\_{eff}\$와 \$\epsilon\_r\$는 각각 실효유전율과 비유전율이다. 그리고 \$W\_{eff}\$와 \$L\_{eff}\$는 SIW cavity의 실효 너비와 실효 길이를 의미하며 아래와 같은 관계를 가진다.

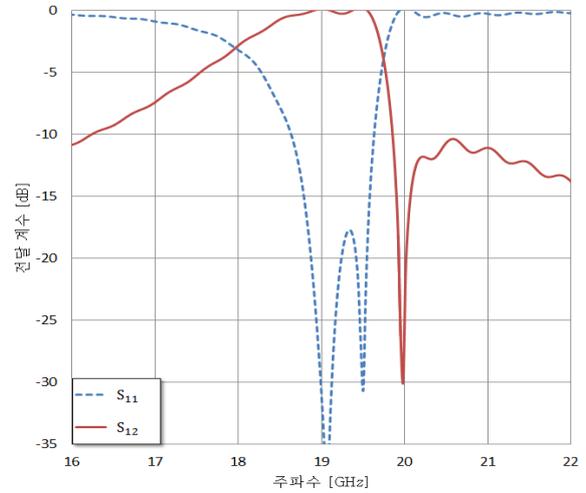


그림 2. SIW cavity FSS의 주파수 응답.  
 Fig. 2. Frequency response of the SIW cavity FSS.

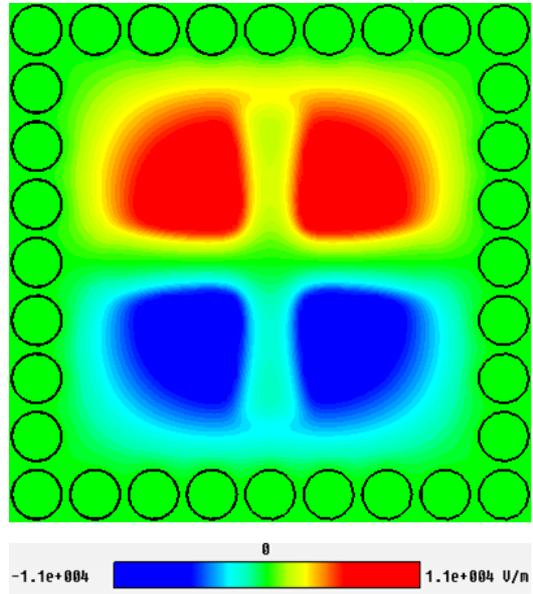


그림 3. TE 모드에서의 SIW cavity FSS의 전기장 분포.  
 Fig. 3. Electric field distribution of the SIW cavity FSS at TE mode.

$$W_{eff} = W - \frac{(2r_c)^2}{0.95D}, \quad L_{eff} = L - \frac{(2r_c)^2}{0.95D} \quad (3)$$

위 식들뿐만 아니라 CST-MWS를 이용할 경우 더욱 정확한 공진주파수를 계산할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 계산된 슬롯과 SIW cavity 각각의 공진주파수는 16.2 GHz와 21.1 GHz이며 이 결과는 그림 2에서 주어진 슬롯과 SIW cavity가 결합된 SIW cavity FSS의 공진주파수인 19.1 GHz와 19.5 GHz와는 다르다. 또한 SIW cavity FSS의 공진주파수들이 슬롯과 SIW cavity의 공진주파수들에 비해 안쪽으로 몰려있는데 그 이유는 두 구조물간 전기적 결합효과(coupling effect) 때문이다. 이러한 결합효과는 슬롯을 통해 SIW cavity를 공진시키기 위해서는 반드시 필요한 것이며 20 GHz에서의 트랜스미션 널을 발생시키기도 한다. 따라서 높은 롤오프율과 명확한 주파수 응답을 가지는 SIW cavity FSS를 설계하기 위해서는 두 구조

표 1. SIW cavity FSS의 매개변수 값.

Table 1. The geometric parameters of the proposed wideband SIW cavity FSS.

매개변수	$h_0$	$h_i$	$P_u$	$l_s$	$w_s$
값(mm)	0.787	1.575	11	6	1.5
매개변수	$r_c$	$D$	$D_s$	$w_g$	-
값(mm)	0.524	1.222	9	0.5	-

물간 결합이 잘 이루어 질 수 있도록 기하학적 매개변수들의 값을 유의하여 결정하여야 하며, 반복된 시뮬레이션을 통해 얻은 매개변수 데이터는 표 1에 주어져 있다.

2. 대역폭 증가를 위한 구조물의 동작원리 및 설계

그림 4에 보여지고 있는 그래프는 SIW cavity FSS의 양면에 균일하게 분포된 정사각형 patch층과 유전기판들을 추가 하였을 때 계산된 주파수응답이다. 그림에서 알 수 있듯이 3 dB 대역폭이 1.8 GHz에서 4.6 GHz로 증가하였으며 가파른 롤오프를 특성은 크게 변하지 않았다. 또한 우수한 대역폭 성능 개선에도 불구하고 전체 두께는  $0.177\lambda_0$  정도만 증가하였다. 여기서  $\lambda_0$ 는 SIW cavity FSS 통과대역의 중심주파수 (16.9 GHz)에서의 자유공간 파장을 의미한다.

위의 현상은 전자기판이 입사될 때 정사각형 patch층으로부터 생성되는 커패시턴스 성분( $C_p$ )에 의해 발생한다(그림 5 참조).  $C_p$ 가 SIW cavity FSS 접지면과 슬롯의 인덕턴스 성분과 상충하면서 병렬 공진을 형성하며 결과적으로 기존의 SIW cavity FSS의 통과대역 보다 낮은 주파수에 추가적인 통과대역을 형성한다[15,16]. 이러한 이중 대역을 이용하여 폭이 넓은 단일대역을 이루기 위해서는 소형화[17]를 통해 SIW cavity FSS의 대역 주파수를 추가 통과대역의 주변으로 내리거나 혹은 반대로 추가 통과대역의 대역폭과 동작주파수를 증가시켜 SIW cavity FSS의 통과대역과 유도결합이 쉽게 이루어 질 수 있도록 하여야 한다. 하지만 SIW cavity FSS의 소형화는 그 구조 자체의 복잡함으로 인해 난해하므로 본 논문에서는 대역폭과 동작주파수를 증가시켰다. 이를 위해서 다음의 식들과 같이  $C_p$ 의 감소를 통해 추가된 병렬 공진기의 Q-factor 값과 동작주파수를 줄였다.  $L_w$ 는 병렬 공진기의 인덕턴스 성분을 나타낸다.

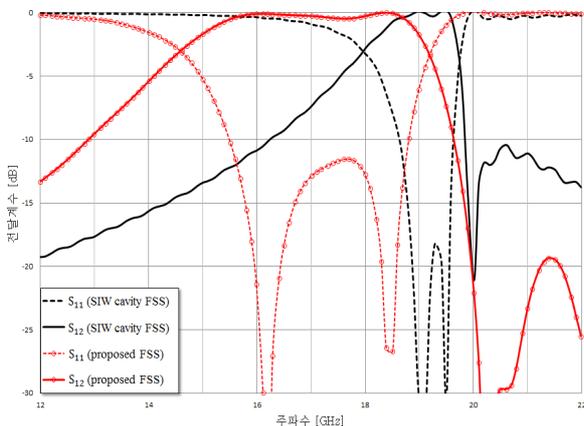


그림 4. 광대역 SIW Cavity FSS의 주파수 응답.  
Fig. 4. The frequency response of the wideband SIW Cavity FSS.

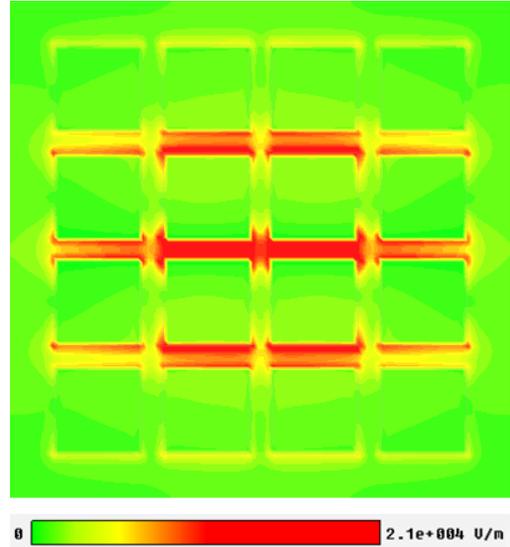


그림 5. TE 모드에서의 정사각 patch층의 전기장 분포.  
Fig. 5. Electric field distribution of the square patch layers at TE mode.

$$Q_r \approx \sqrt{C_p/L_w} \tag{4}$$

$$f_c \approx 1/2\pi\sqrt{C_pL_w} \tag{5}$$

이러한  $C_p$  값을 감소시키기 위해서는 아래의 식 (6)과 같이 제한된 경계면 내 조각의 개수( $n_p$ )를 증가시키거나 조각 간의 간격( $w_g$ )을 넓혀야 한다[18-20].

$$C_p = \epsilon_0\epsilon_{eff} \frac{2D_e}{\pi} \ln \left[ \frac{1}{\sin(\pi w_g / 2D_e)} \right] \tag{6}$$

여기서  $D_e$ 는  $\{D_s - (\sqrt{n_p} - 1) \times w_g\} / \sqrt{n_p}$ 를 의미한다.

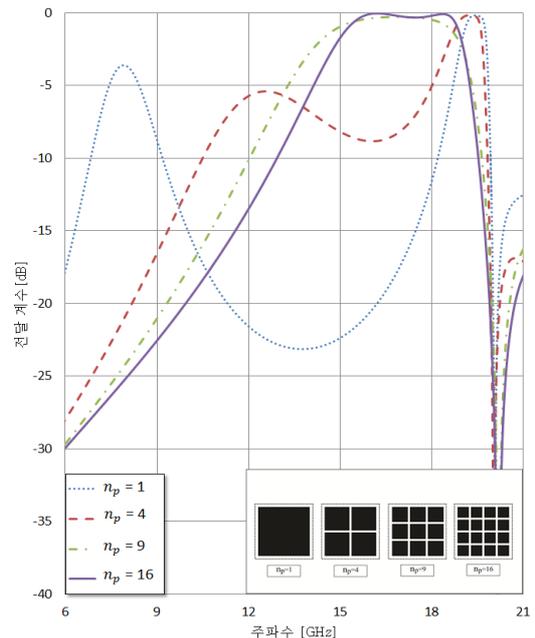


그림 6. 다양한  $n_p$  값에서의 주파수 응답.  
Fig. 6. Frequency responses at the various values of  $n_p$ .

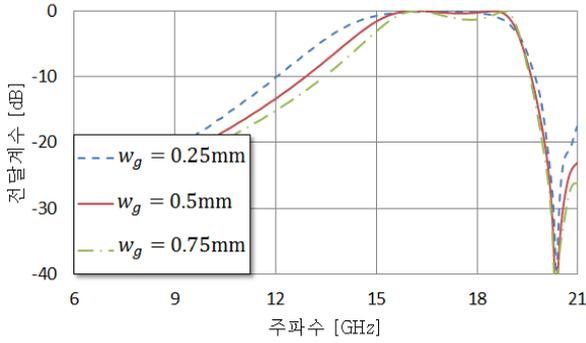


그림 7. 다양한  $w_g$  값에서의 주파수 응답.  
Fig. 7. Frequency responses at the various values of  $w_g$ .

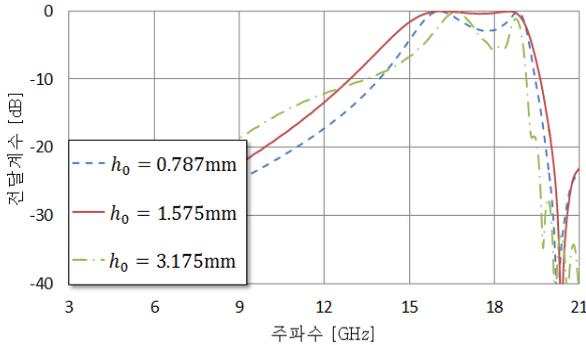


그림 8. 다양한  $h_o$  값에서의 주파수 응답.  
Fig. 8. The frequency responses at the various values of  $h_o$ .

이 식을 입증하기 위해  $n_p$ 가 1, 4, 9, 16일 때의 주파수 응답을 시뮬레이션을 통해 계산하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내고 있다. 예상한 것과 같이  $n_p$ 가 증가함에 따라 추가적인 대역폭의 증가와 공진 주파수 상향으로 기존의 대역과 점점 결합되어가고 있는 것을 알 수 있으며 그림을 통해  $n_p$ 가 16일 때 두 대역이 안정적으로 결합하여 원하는 단일 대역이 얻어진다는 것 또한 알 수 있다. 이뿐만 아니라 그림 7에서  $w_g$ 가 증가함에 따라 변화하는 주파수 응답을 살펴봄으로써 위에서 제공된 식이 유효하다는 것을 재확인할 수 있다.

추가적으로 정사각형 patch층이 위치하는 유전기판들의 두께가 증가함에 따라 제안된 광대역 FSS의 주파수 응답이 어떻게 변화하는지 살펴볼 필요도 있다. 그림 8은 0.787 mm, 1.575 mm, 3.175 mm의 두께를 가지는 유전기판을 사용하였을 때의 주파수 응답을 보여주고 있다. 본 논문에서 사용된 두께를 제외하고는 내부 손실이 발생하는 것을 알 수 있는데 이것은 두께가 증가 및 감소함에 따라 구조물간의 전기적 결합이 변하기 때문이다.

3. 안정성

FSS의 중요한 기능 중 하나가 바로 전자기파의 입사각 및 편파에 대한 안정성이다. 그림 9와 10은 TE (Transverse Electric)와 TM (Transverse Magnetic) 모드에서 입사각이 0°, 15°, 30° 일 때의 주파수 응답을 보이고 있으며 해당 그림을 통해 TE 모드의 경우 비록 입사각도가 증가함에 따라 불필요한 공진(spurious resonance)이 발생하지만 30°까지 안정적으로 동작하는 것을 볼 수 있다. 하지만 TM 모드의 경우 15°

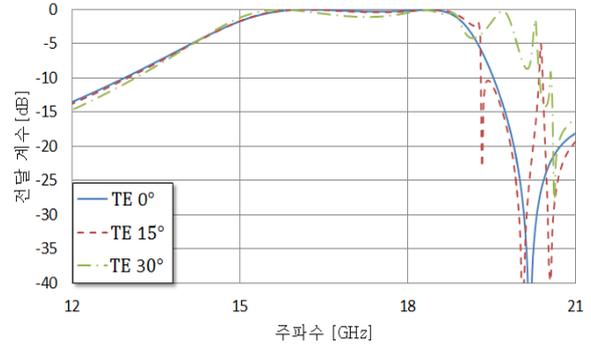


그림 9. 입사각이 0°, 15°, 30° 일 때 주파수응답(TE mode).  
Fig. 9. Frequency responses at 0°, 15°, 30° for TE mode.

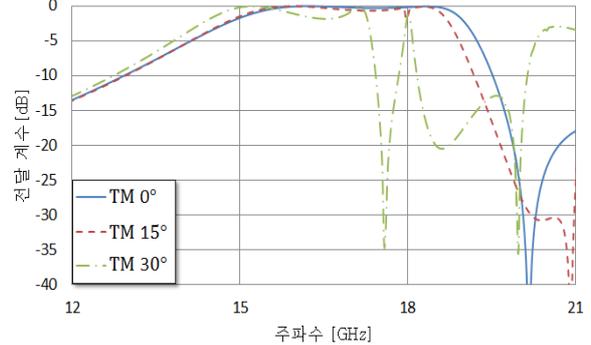


그림 10. 입사각이 0°, 15°, 30° 일 때 주파수응답(TM mode).  
Fig. 10. Frequency responses at 0°, 15°, 30° for TM mode.

까지는 TE 모드에 비해 불필요한 공진이 적게 발생하지만 30°에서는 주파수 응답이 이중 대역으로 분리되는 현상을 볼 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 SIW cavity FSS의 통과대역폭을 대용량 통신에 적합하도록 개선시키는 기법을 연구하였다. 기존 SIW cavity FSS 구조에 양 외곽층에 적절히 설계된 정사각형 patch층을 배치함으로써 3-dB 대역폭을 1.8 GHz에서 4.6 GHz로 255 % 증가시킨 반면에, 전체 두께는 오직 0.117λ<sub>0</sub>만 증가하였다. 여기서 λ<sub>0</sub>는 SIW cavity FSS 통과대역의 중심주파수 (16.9 GHz)에서의 자유공간 파장이다. 이러한 대역폭 개선 효과는 정사각형 patch층의 커패시턴스 성분과 접지면의 인덕턴스 성분의 병렬 배열로부터 기인한 추가 공진과 커패시턴스 감소를 통한 추가 공진의 대역폭 증가와 주파수 이동에 의해 가능하였다. 또한 커패시턴스 감소를 위해서는 patch의 개수와 patch 사이의 너비를 증가시켜야 한다는 것을 매개변수 연구를 통해 확인하였고 그 결과를 이용해 제안된 구조에서는 단위셀당 총 16개의 금속 patch를 0.5 mm 간격을 유지한 채 배열하였다. 추가적으로 편파 및 입사각에 대한 안정성을 살펴보았으며 TE 모드에서는 입사각 30°도까지 안정적으로 동작을 하는 것을 확인하였다. 하지만 TM 모드의 경우 30°에서 안정성이 현저히 떨어지는 것으로 확인되어 이러한 문제점을 해결할 방안이 추가적으로 연구되어야 할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] S. M. Seong, "A cooperative navigation for UAVs with inertial sensors and passive sensor using wireless communication," *Journal of Institute of Control, Robotics, and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 2, pp. 80-176, Feb. 2013.
- [2] D. W. Lim, H. H. Choi, M. B. Heo, and S. J. Lee, "A model-based multipath estimation techniques for GPS receivers," *Journal of Institute of Control, Robotics, and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 4, pp. 295-399, Apr. 2012.
- [3] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, Wiley-Interscience, 2000.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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. 1987-1900, Jun. 2006.
- [7] 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.
- [8] H. Kiu, K. L. Ford, and R. J. Langley, "Miniaturized bandpass frequency selective surface with lumped components," *IET Elec. Lett.*, vol. 44, pp. 1054-1055, Aug. 2008.
- [9] W. T. Wang, P. F. Zhang, S. X. Gong, B. Lu, J. Ling, and T. T. Wang, "Compact angularly stable frequency selective surface using hexagonal fractal configurations," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 41, no. 11, pp. 2541-2544, Nov. 2009.
- [10] D. Deslandes and K. Wu, "Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. Feb. 2003.
- [11] Y. L. Zhang, W. Hong, K. Wu, J. X. Chen, and H. J. Tang, "Novel substrate integrated waveguide cavity filter with defected ground structure," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 53, no. 4, Apr. 2005.
- [12] G. Q. Luo, W. Hong, Z.-C. Hao, B. Liu, W. D. Li, J. X. Chen, H. X. Z, and K. Wu, "Theory and experiment of novel frequency selective surface based on substrate integrated waveguide technology," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 12, pp. 4035-4043, Dec. 2005.
- [13] S. A. Winkler, W. Hong, M. Bozzi, and K. Wu, "Polarization rotating frequency selective surface based on substrate integrated waveguide technology," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 4, pp. 1202-1213, Apr. 2010.
- [14] G. Q. Luo, W. Hong, H. J. Tang, and K. Wu, "High performance frequency selective surface using cascading substrate integrated waveguide cavities," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 648-650, Dec. 2006.
- [15] M. Salehi and 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.
- [16] 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.
- [17] R. Azadegan and K. Sarabandi, "Bandwidth enhancement of miniaturized slot antennas using folded, complementary, and self-complementary realizations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 9, pp. 2435-2444, Sep. 2007.
- [18] K. Sarabandi and N. Behdad, "A frequency selective surface with miniaturized elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 5, pp. 1239-1245, May 2007.
- [19] M. A. Al-Joumayly and N. Behdad, "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.
- [20] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Boston Technical Publishers, 1964.



오 세 명

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



이 한 준

2010년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2012년 한국과학기술원 전자공학 석사. 2013년~현재 공군사관학교 전자공학과 강사 재직. 관심분야는 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. 관심분야는 마이크로파 수동회로 설계, MIMO, 안테나 및 전파 전파.