

## 곡면 재구성 주파수 선택막의 투과특성

이인곤<sup>1)</sup> · 홍익표<sup>\*,1)</sup> · 전흥재<sup>2)</sup> · 박용배<sup>3)</sup> · 김윤재<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 공주대학교 정보통신공학부

<sup>2)</sup> 연세대학교 기계공학부

<sup>3)</sup> 아주대학교 전자공학과

<sup>4)</sup> 국방과학연구소 제7기술연구본부

## Transmission Characteristics of Curved Reconfigurable Frequency Selective Structure

In-Gon Lee<sup>1)</sup> · Ic-Pyo Hong<sup>\*,1)</sup> · Heoung-Jae Chun<sup>2)</sup> · Yong-Bae Park<sup>3)</sup> · Yoon-Jae Kim<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University, Korea

<sup>2)</sup> School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea

<sup>3)</sup> Department of Electronics Engineering, Ajou University, Korea

<sup>4)</sup> The 7th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 20 January 2014 / Revised 2 May 2014 / Accepted 16 May 2014)

### ABSTRACT

In this paper, the flexible and reconfigurable frequency selective surface for C-band was designed using patch array and grid structure for radome and other curved surface applications. Frequency reconfigurability was obtained by varying the capacitance of varactor diode and flexibility is implemented by using flexible PCB. For the validity of the proposed structure, we fabricated the flexible and reconfigurable frequency selective structure and measured the frequency reconfigurability for different bias voltages and different curvature surfaces from the optimized design parameters. From the measurement results, we know that the proposed structure has the wideband reconfigurable frequency bandwidth of 6.05-7.08GHz. We can apply this proposed structure to the curved surface like as radome of aircraft or warship.

Key Words : Reconfigurable Frequency Selective Surface(재구성 주파수 선택 표면막), Transmission Characteristics(투과 특성), Flexible PCB(유연성기판)

### 1. 서론

주파수 선택막(FSS : Frequency Selective Surface)은 유전체 기판 위에 단위셀 구조를 갖는 도체 또는 슬롯이 주기적으로 배열된 전자기 구조로 특정 주파수만을 투과시키거나 또는 반사시키는 특성을 갖는다.

\* Corresponding author, E-mail: iphong@kongju.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

이 주파수 선택막은 일반적으로 기본 단위요소의 형상과 크기, 배열 주기 및 배열 형상 그리고 배열구조를 포함하는 유전체 등에 따라 전자기적 특성이 달라진다<sup>[1]</sup>. 특히 대역통과 특성을 갖는 전자기 공간필터 특성을 이용하여, 스텔스 레이돔 또는 배열구조 반사판 등 통신의 여러 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>[2,3]</sup>.

최근 단일 주파수 대역만을 통과하는 수동형 주파수 선택적 표면막의 특성을 개선하기 위해 주파수를 능동적으로 변화시킬 수 있는 능동형 주파수 선택막에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 능동형 주파수 선택막의 주파수를 변화시키는 방법은 핀 다이오드(PIN Diode), 바랙터 다이오드(Varactor Diode), MEMS(Micro-electro-mechanical Systems) 등의 능동소자를 이용하는 방법이 일반적이다<sup>[4~7]</sup>. 본 논문에서는 이 중 바랙터 다이오드를 이용하여 투과 주파수의 재구성 구현이 용이한 능동형 주파수 선택막을 설계하였다. 바랙터 다이오드를 이용한 능동형 주파수 선택막은 바이어스 전압에 따른 다이오드 커패시턴스의 변화를 이용하여 투과 주파수를 가변시키는 방법으로, 넓은 범위를 갖는 다중 투과 주파수 구현이 가능하다는 장점이 있지만, 높은 주파수 대역(5GHz 이상)에서는 주파수 재구성을 위해 요구되는 작은 커패시턴스값 때문에 구현이 어려워, 선행 연구 대부분은 낮은 주파수 대역 동작을 목적으로 설계되었으며<sup>[8,9]</sup>, 높은 주파수 대역 동작을 목적으로 설계된 능동형 주파수 선택막은 상용 바랙터 다이오드가 아닌 추가적으로 설계된 20~200fF 범위를 갖는 가변 커패시터가 사용되거나<sup>[5]</sup>, 시뮬레이션 상에서 구현된 이론적 커패시터 또는 바랙터가 아닌 커패시터를 사용 등, 실제 적용에 있어서 발생할 수 있는 오차를 고려하지 않은 결과를 제시하는 한계가 있다<sup>[10,11]</sup>.

주파수 선택막이 실제 적용되는 환경은 레이돔 또는 반사판 등으로 대부분의 경우 평면이 아니라 곡면임에도 불구하고, 무한한 평면을 가정한 Floquet 이론 기반의 모멘트법(method of moments)을 사용함으로써, 평면형 구조가 곡면형의 구조를 가짐으로써 발생하는 효과 즉, 주파수 선택표면 구조의 단위셀 크기, 단위셀 간의 간격 등이 작아지는 효과와 유전체의 두께변형으로 인한 공진주파수, 대역폭의 변화 등이 고려되지 않는 한계를 가지고 있다. 따라서 능동형 주파수 선택표면 구조와 더불어 곡면형의 주파수 선택표면에 관한 효율적인 해석방법, 또는 평면형과 곡면형의 주

파수 응답특성 변화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 실제 적용될 형상에 따른 주파수 선택표면의 주파수 응답 특성 또는 RCS(Radar Cross Section) 변화가 고려된 설계의 중요성이 부각되고 있지만 곡면형 재구성 주파수 선택막과 관련한 연구는 매우 제한적으로 이루어지고 있다<sup>[12~14]</sup>.

본 논문에서는 기존 바랙터 다이오드를 사용한 능동형 주파수 선택막의 한계인 높은 주파수 대역에서 주파수 재구성을 구현하기 위해 유전체 앞면에는 패치배열과 접지그리드 구조 그리고 상용 바랙터를 사용하였으며, 뒷면에는 바이어스를 위한 그리드 구조를 구현하여 재구성구조를 구현하였다. 또한, 본 논문에서는 항공기 또는 군함에서 사용되는 완만한 곡면형상 레이돔과 같은 곡면형 구조에 실제 적용을 위하여 평판형의 재구성 주파수 선택막이 곡면형상을 가짐에 따라 발생하는 효과를 실험적으로 확인하기 위해 휘어짐이 가능한 유전체인 폴리이미드(Polyimide)를 사용한 유연성을 갖는 FPCB(Flexible Printed Circuit Board)를 사용하여 설계 및 제작하였으며, 실험적으로 평면 및 곡면에 대한 주파수 재구성특성을 확인하였다. 일반적으로 항공용 레이돔의 경우 X-대역인 8~12GHz 대역에서 동작하나, 연구팀이 보유한 투과특성 측정을 위한 자유공간 측정시스템의 주파수 제한, 주파수 선택면에 재구성특성을 구현하기 위해 사용한 바랙터 다이오드의 동작주파수 특성 등의 이유로 본 논문에서 설계한 재구성 주파수 선택막은 7GHz 대역에서 동작하도록 설계하였다.

## 2. 곡면형 재구성 주파수 선택막의 설계

서론에서 기술한 바와 같이 일반적으로 주파수 선택막은 높은 주파수 대역에서의 투과 주파수 재구성을 목적으로 설계하는 경우, 가변 커패시턴스를 구현하기 위한 도체와 접지사이 커패시턴스의 용량이 작기 때문에 일반 상용 가변 커패시터를 사용하여 높은 주파수 대역에서의 주파수 재구성 구현에 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 마름모 형태의 도체 패치를 제안하여 접지 그리드 사이에 커패시턴스 값을 조절 할 수 있고, 바랙터 다이오드를 추가함으로써 더욱 높은 커패시턴스를 구현하여 고주파수에서의 재구성이 가능하도록 하였다.

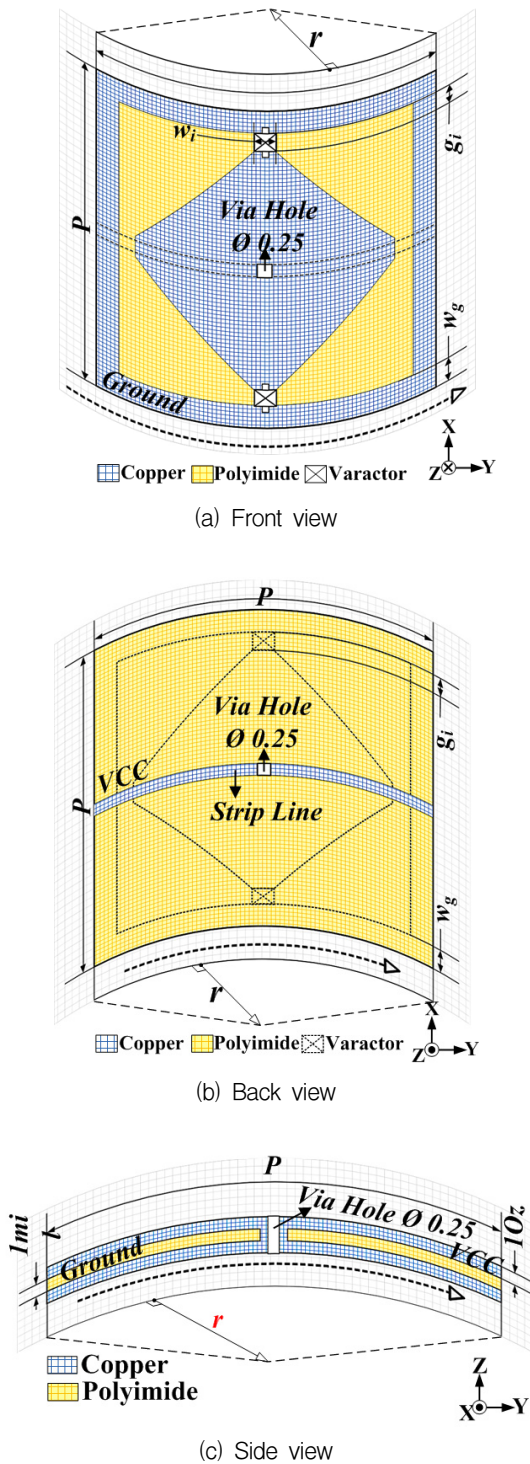
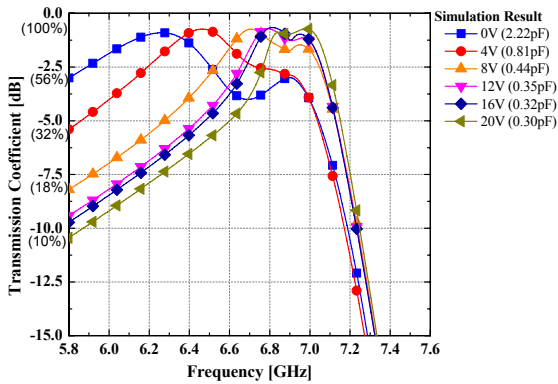


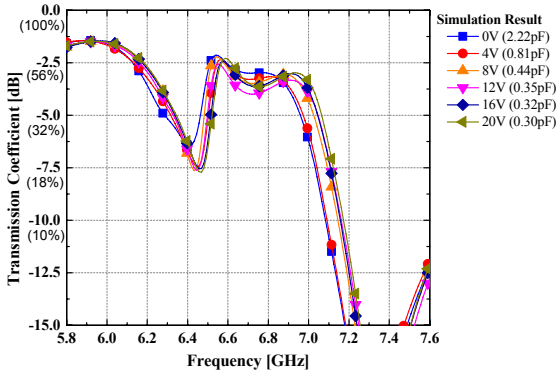
Fig. 1. Proposed unit cell structure implemented on FPCB

Fig. 1에 본 논문에서 제안한 곡면 재구성 주파수 선택막의 단위셀을 나타내었다. 제안한 재구성 주파수 선택막에서 커패시턴스는 Fig. 1(a)의 설계 변수( $w_i$ )를 통하여 조절함으로써 재구성 주파수 동작을 위한 변수를 단순화 하였다. 이로부터 바랙터의 커패시턴스 동작범위 조절이 용이해져, 투과 주파수 가변범위를 조절하기 위한 임의의 커패시터 용량을 갖는 바랙터를 사용한 재구성 주파수 선택막의 설계가 가능하다. 제안한 구조는 Fig. 1(a)와 같이 유전체 앞면에 접지 그리드에 마름모 패치형태의 주파수 선택막이 위치하며, 뒷면에는 Fig. 1(b)에 나타낸 것처럼 바랙터 다이오드의 전원 인가를 목적으로 전원 그리드가 위치하여 Fig. 1(c)와 같이 비아홀로 윗면의 패치와 연결된 구조로 단위셀이 구성되어 있다. 본 논문에서는 바랙터 다이오드의 전원 인가를 위한 바이어스 회로를 주기적인 단위셀 구조에서 동작시키기 위해 제시된 참고문헌 [10]을 응용하였으며 뒷면에서는 전원 그리드를 구성하고 앞면에는 접지 그리드를 구성하였다. 그러나, 본 논문에서 응용한 형태의 전원 및 접지 그리드 구성은 실제 전원 인가를 위한 추가적인 바이어스 길이에 대한 주파수 응답을 고려하지 않은 설계이며, 따라서 바이어스의 길이에 따른 인덕턴스의 변화로 인한 공진주파수의 이동이 예상된다. 본 연구에서는 단순히 바이어스의 길이의 변화를 최소화하여 제작하였으며 추후, 바이어스 회로에 초점을 맞춘 연구를 통해 안정화 된 바이어스 회로를 갖는 재구성 주파수 선택막의 설계 파라미터를 제안할 계획이다.

본 논문에서는 Fig. 1(a)에 나타낸 것처럼 접지 그리드와 마름모 패치 사이에 상용 바랙터 다이오드인 Skyworks 사의 SMV2019-079LF를 이용하여 커패시턴스 변화를 얻도록 설계하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 재구성 주파수 선택막은 C 밴드인 7GHz 대역에서 투과하도록 설계하였으며, 곡면형상 등에 적용하기 위해 유연성을 갖는 유전체인 두께 1mil의 폴리이미드 ( $\epsilon_r = 3.5$ ,  $\tan\delta = 0.0027$ )를 사용하였다. 전파해석 시뮬레이터인 Ansoft사 HFSS의 Floquet Mode를 사용하여, 제안한 재구성 주파수 선택막의 평면 상태일 때의 결과를 Fig. 2와 같이 TE(Transverse Electric) Mode와 TM(Transverse Magnetic) Mode에서, 가변 커패시턴스 값을 0.30pF(20V), 0.32pF(16V), 0.35pF(12V), 0.44pF(8V), 0.81pF(4V), 2.22pF(0V)으로 각각 변화시키면서 투과특성을 계산하였다. Fig. 1에 나타낸 제안 구조에 대한 최적화된 설계 파라미터를 Table 1에 나타내었다.



(a) TE mode



(b) TM mode

Fig. 2. Simulated transmission characteristics for different bias voltages

Table 1. Design parameters (unit : mm)

파라미터	설계값
$P$	45.0
$w_i$	1.50
$g_i$	1.00
$w_g$	2.88
Strip Line	1.5×45

커패시터의 용량이 작아짐에 따라 투과주파수가 높은 주파수 대역으로 이동하는 것을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였으며, Fig. 2의 (a)는 TE Mode에서의 투과 특성을 (b)에는 TM Mode에서의 투과 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

### 3. 곡면형 재구성 주파수 선택막의 제작 및 측정

Fig. 2(a)의 시뮬레이션 결과로부터 약 6.27GHz부터 6.98GHz 사이의 약 710MHz 대역폭에서 0~20V 까지 입력 전압에 따른 각각의 커패시턴스에 따라 투과 주파수의 변화를 갖는 주파수 특성을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 측정을 위해 5×5의 단위 셀을 갖는 크기 225mm×225mm의 재구성 주파수 선택막을 Fig. 3(a)과 Fig. 3(b)와 같이 설계 및 제작하였다. 제작한 재구성 주파수 선택막이 평면구조일 때와 곡면구조일 때의 주파수 응답 변화를 관찰하기 위해, 일정한 곡률 반경( $r = 1\text{meter}, 1.2\text{meter}$ )을 갖는 폼을 제작하여 재구성되는 투과특성을 측정하였다. 본 논문에서는 곡면형 응용을 위해 유전체 두께가 매우 얇고 유연성을 갖는 FPCB를 사용하였는데, 이 경우 FPCB에서 구현되는 커패시턴스의 값이 바랙터 다이오드의 커패시턴스 변화값보다 크기 때문에 재구성 특성 구현이 쉽지 않다. 따라서, FSS 패턴 설계에 매우 주의를 해야 하며, 또한 곡면인 경우 실장된 바랙터 다이오드의 파손이 발생할 수 있기 때문에 곡률의 방향에 따른 부품의 배치 등도 아울러 FSS 패턴 설계시에 고려가 되어야 한다.

제작된 평면 재구성 선택막이 곡면구조를 가질 때의 주파수 응답 특성 측정을 위해 제작된 폼에 거치된 재구성 주파수 선택막의 앞면과 측면을 Fig. 3의 (a), (b)에, 구성한 자유공간 측정법의 측정시스템을 (c)에 그리고 실제 측정 환경을 (d)에 나타내었다. 본 논문에서는 제안한 곡면형 주파수 선택막을 자유공간 측정법을 사용하여 투과특성을 관찰하였다. 제작된 재구성 주파수 선택막을 검증하기 위해 평면, 곡면 구조일 때 순으로 전원공급기를 이용하여 0~20V까지 4V 간격으로 각각의 전압에 따라 각각 측정하였다. 제작한 재구성 주파수 선택막이 평면일 때, 측정된 각 전압에서의 투과 주파수의 가변 범위는 약 6.05GHz~7.08GHz를(약 1.03GHz, TE) 얻었으며, 측정된 투과 특성이 시뮬레이션과 대체로 일치하는 결과를 Table 2를 통하여 확인할 수 있다.

시뮬레이션과 측정값사이의 투과 주파수 오차는 측정이 무반사실에서 이루어지지 않아 측정 시간이 길어짐에 따라 반사된 신호의 누적으로부터 발생한 측정오차와 사용된 바랙터 다이오드의 모델링값에 의한 오차에 기인한다고 판단된다. Fig. 4의 (a)와 (b)에는 제작한 재구성 주파수 선택막의 평면, 곡면 구조 일

때의 측정된 주파수 응답을 곡률반경( $r = 1\text{meter}$ ,  $1.2\text{meter}$ )에 따라 각각 비교하여 나타내었다. 측정방법은 평면 상태와 동일하게 전원 공급기를 이용하여, 0~

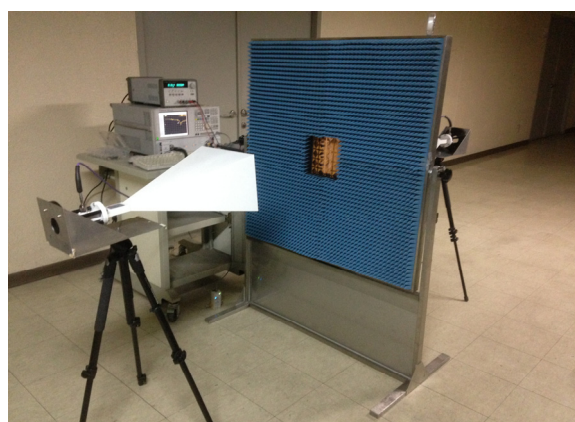
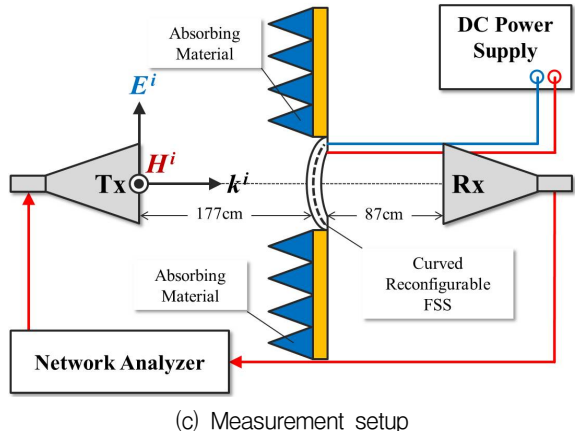
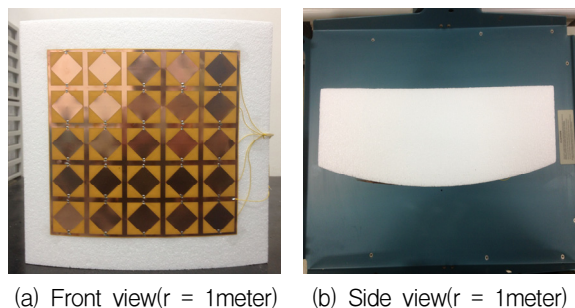
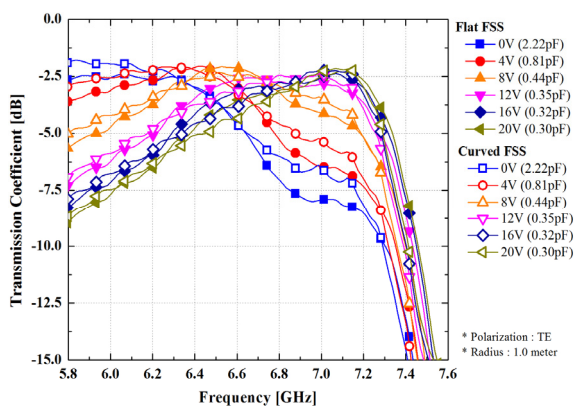


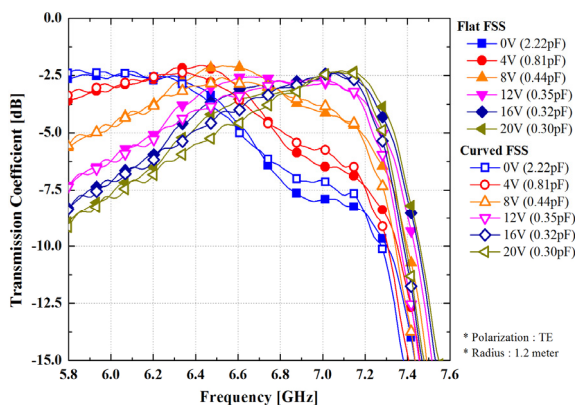
Fig. 3. Fabricated curved reconfigurable frequency selective surface and measurement setup environment

Table 2. Comparisons between simulated and measured operating frequency for planar reconfigurable frequency selective surface

전압 (V)	커패시턴스 (pF)	동작주파수 (GHz)	
		시뮬레이션	측정
0	2.22	6.266	6.054
4	0.81	6.469	6.432
8	0.44	6.707	6.526
12	0.35	6.791	6.702
16	0.32	6.815	7.066
20	0.30	6.982	7.080



(a)  $r = 1\text{meter}$



(b)  $r = 1.2\text{meter}$

Fig. 4. Measured transmission characteristics for different curvature radii and bias voltages

20V 까지 4V 간격의 전압에 따른 투과 주파수 응답 특성을 측정하였다. 측정결과를 통하여 평면구조의 주파수 선택 구조가 곡면 구조로, 또는 곡률반경이 증가함에 따라 투과 주파수는 더 높은 주파수 대역으로 이동하는 경향과 투과 대역의 손실이 커지며, 통과하는 투과 주파수의 대역폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는, 입사파의 입사각이 증가함에 따른 주파수 응답과 비슷한 경향을 가짐을 확인할 수 있으며, 이러한 경향은 선행연구 된 곡면구조의 주파수 선택막에 관한 연구의 결과와 일치함을 알 수 있다<sup>[13,14]</sup>.

항공용 레이돔의 경우 투과특성이 85% 이상을 가져야 하는데 본 논문에서 제작한 재구성 주파수 선택막 구조의 경우 투과특성이 약 65% 정도로 측정이 되었다. 첫 번째 원인은 측정이 무반사실에서 이루어지지 않아서 발생한 측정손실이라 판단되며, 두 번째는 측정된 시편이 유한한 크기이기 때문에 발생하는 손실, 마지막으로 본 논문에서 설계한 FSS 패턴에서 금속면을 구성하는 단위셀 자체가 가지는 손실 등으로 생각해 볼 수 있다. 따라서, 투과율 향상을 위해서는 측정의 정확도를 높이고, 손실특성이 우수한 FSS 단위패턴의 최적화 설계 등을 고려해야 한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 유연성을 갖는 유전체인 폴리이미드로 구성된 FPCB 기판위에 C 밴드인 7GHz 대역에서 바이어스 전압에 따라 능동적으로 투과 주파수 특성을 변화시킬 수 있는 곡면형 재구성 주파수 선택막을 설계 및 제작하였다. 높은 주파수에서 재구성 선택막을 구현하기 위하여 마름모 형태를 갖는 도체 패치 배열과 접지 그리드구조를 갖는 형태를 응용하였으며, 상용 바랙터 다이오드를 이용하여 설계 및 제작하고 측정하였다. 측정된 재구성 주파수 선택막의 투과 주파수 가변 범위는 6.05GHz~7.08GHz(약 1.03GHz)로 광대역 특성을 얻었으며 또한, 평면구조의 주파수 선택막과 곡률반경이 증가함에 따라 변화하는 곡면 주파수 선택막에 대한 투과주파수 응답특성을 측정을 통하여 확인하였다.

본 논문에서 제안한 재구성 주파수 선택막 구조를 X-대역인 항공용 레이돔에 적용하기 위해서는 X-대역에서 동작가능한 바랙터 다이오드와 바랙터에서 구현 가능한 커패시턴스보다 작은 값을 갖는 주파수 선택

막 구조설계, 곡면구조상에서 부품의 파손 등을 보완할 수 있는 주파수 선택막 구조설계 등과 관련한 연구가 필요하다.

제안한 구조는 유연성을 갖는 구조로 바랙터 다이오드 때문에 제한적이지만 휘어짐이 가능하기 때문에, 항공기 또는 군함에서 사용되는 완만한 곡면형상 레이돔과 같은 구조에 적용이 용이하다는 구조적 장점을 갖는다. 향후 제안한 재구성 주파수 선택막의 입사각에 대한 안정성과, 휘어짐이 가능한 유연성으로부터 다양한 곡면형 형상에 대한 주파수 응답 특성에 관한 연구가 필요하다. 또한 항공용 레이돔 응용을 위해 투과율 향상을 위한 측정방법의 정확도 개선, 손실특성이 우수한 주파수 선택막 구조의 최적화 설계 등의 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다

#### References

- [1] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. L. Law, "Simple Formulas for Transmission Through Metal Periodic Grids or Plates," *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, Vol. 30, No. 5, pp. 904-909, Sep. 1982.
- [2] E. L. Pelton and B. A. Munk, "A Streamlined Metallic Radome," *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, Vol. 22, No. 6, pp. 799-803, Nov. 1974.
- [3] A. E. Martynyuk, J. I. Martinez Lopez, and N. A. Martynyuk, "Spiraphase-type Reflectarrays based on Loaded Ring Slot Resonators," *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, Vol. 52, No. 1, pp. 142-153, Jan. 2004.
- [4] G. I. Kiani, K. L. Ford, L. G. Olsson, K. P. Esselle and C. J. Panagamuwa, "Switchable Frequency Selective Surface for Reconfigurable Electromagnetic Architecture of Buildings," *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, Vol. 58, No. 2, pp. 581-584, Feb. 2010.
- [5] D. T. M. Rosales, A. E. Martynyuk, J. I. M. Lopez

- and J. R. Cuevas, "Frequency Selective Surfaces based on Ring Slots Loaded with Monolithically Integrated Capacitors," *IET Microwaves, Antennas & Prop.*, Vol. 6, No. 3, pp. 245-250, Mar. 2012.
- [6] B. Schoenlinner, A. A. Tamijani, L. C. Kempel and G. M. Rebeiz, "Switchable Low-loss RF MEMS Ka-band Frequency-selective Surface," *IEEE Trans. on Microwave Theory & Tech.*, Vol. 52, No. 11, pp. 2474-2481, Nov. 2004.
- [7] D. Robben, S. F. Peik, T. Henning, M. Becker and K. Froehner, "Laser Machined Microsystems for Active Frequency Selective Surfaces," 2012 IEEE MTT-S International, pp. 1-3, Jun. 2012.
- [8] L. B. Qin, Q. S. Bo, T. C. Ming, Z. Hang, Z. H. Yang and L. Wei, "Varactor-tunable Frequency Selective Surface with Embedded Bias Network," *Chin. Phy. B*, Vol. 22, No. 9, 094103.1-094103.4, Sep. 2013.
- [9] C. Mias and C. Tsakonas, "Waveguide Demonstration of Varactor-diode-tunable Band-pass Frequency Selective Surface," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 45, No. 1, pp. 62-66, 2005.
- [10] F. Bayatpur, K. Sarabandi, "Design and Analysis of a Tunable Miniaturized-element Frequency-selective Surface without Bias Network", *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, Vol. 58, No. 4, pp. 1214-1219, Apr. 2010.
- [11] F. Bayatpur, K. Sarabandi, "Tuning Performance of Metamaterial-based Frequency Selective Surfaces," *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, Vol. 5, No. 2, pp. 590-592, Feb. 2009.
- [12] Z. Sipus, M. Bosiljevac and J. Bartolic, "Rigorous and Approximate Analysis of Curved Frequency Selective Surfaces," 2008 IEEE AP-S International Symposium, pp. 1-4, Jul. 2008
- [13] B. Philips, E. A. Parker and R. J. Langley, "Ray Tracing Analysis of Transmission Performance of Curved FSS," *IEE Proc. Microwaves, Antennas & Prop.*, Vol. 142, No. 3, pp. 193-200, Mar. 1995.
- [14] C. Yu and C. C. Lu, "Analysis of Finite and Curved Frequency-selective Surfaces using the Hybrid Volume-surface Integral Equation Approach," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 45, No. 2 pp. 107-112, Feb. 2005.