

# 유연한 구조를 갖는 X-Band 재구성 주파수 선택구조 설계

## Design of Flexible Reconfigurable Frequency Selective Surface for X-Band Applications

이인곤 · 박찬선\* · 육종관\* · 박용배\*\* · 전흥재\*\*\* · 김윤재\*\*\*\* · 홍익표

In-Gon Lee · Chan-Sun Park\* · Jong-Gwan Yook\* · Yong-Bae Park\*\* ·  
Heung-Jae Chun\*\*\* · Yoon-Jae Kim\*\*\*\* · Ic-Pyo Hong

### 요 약

본 논문에서는 휘어짐이 가능한 유연한 기판 위에 X-대역에서 동작하는 PIN 다이오드 기반 재구성 주파수 선택 표면구조(RFSS)를 설계하였다. 제안된 구조는 윗면에 십자형 루프 패턴과 인덕턴스 성분의 스텐드 사이에 위치한 PIN 다이오드의 전기적 제어를 통해 C-대역(OFF)과 X-대역(ON)에 대한 주파수 재구성이 가능하며, 그리드 형태의 전원 바이어스 회로와 비아홀 구성을 통해 기생 결합을 최소화함으로써 단위구조와의 격리도를 확보하였다. 설계한 결과를 바탕으로 유연한 필름기판위에 제안한 RFSS 를 제작하고, 측정 실험을 통해 입사파의 편파와 입사각 그리고 단일 곡률을 갖는 곡면에 대한 안정적인 투과 특성을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, the X-band reconfigurable frequency selective surface having flexible geometry was proposed. The proposed RFSS is composed of patterns of cross-shaped loop with inductive stub, which can control the frequency response for C-Band and X-band by ON/OFF state of PIN diode. To minimize the parasitic effect and to obtain the high level of isolation between the unit cell of FSS and the bias circuit, we designed the grid type bias line on bottom layer through via hole. The measured transmission characteristics show good agreement with the simulation results and good stability of frequency response for different incident angles and curvatures of surface.

Key words: Reconfigurable Frequency Selective Surface, Flexible Geometry, Transmission Characteristics

### I. 서 론

주파수 선택 표면구조(FSS, Frequency Selective Surface)

는 일정한 주기로 배열된 도전성 패턴에 의해 유도된 커패시턴스, 인덕턴스 성분의 전류로부터 특정 임피던스를 갖는 주파수에 공진하여 입사 전자기파의 주파수를 선택

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화 연구센터 사업의 일환으로 수행되었음.」

공주대학교 정보통신공학부(Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University)

\*연세대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

\*\*아주대학교 전자공학과(Department of Electrical & Computer Engineering, Ajou University)

\*\*\*연세대학교 기계공학부(Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)

\*\*\*\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 10, 2016 ; Revised December 13, 2016 ; Accepted December 18, 2016. (ID No. 20161010-08S)

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

적으로 투과 또는 반사시키는 특성을 가진 전자기 구조를 말하며<sup>[1]</sup>, 전파 간섭 신호 제어<sup>[2]</sup>, 국방 분야의 레이더 단면적(RCS: Radar Cross Section) 저감<sup>[3]</sup> 등에 적용되고 있다. FSS는 수동 회로로 고정 주파수에서 동작하기 때문에 현대의 다기능화, 복잡화된 시스템 환경에서 적응성 문제를 안고 있으며, 이를 개선하기 위해 능동적으로 주파수 투과 특성을 재구성하는 재구성 주파수 선택 표면 구조(RFSS: Reconfigurable-FSS)에 관한 연구가 이루어지고 있다<sup>[3],[4]</sup>. RFSS 구조는 단위구조로부터 유도된 등가 커패시턴스와 인덕턴스 성분에 영향을 주는 조절 가능한 소자를 단위구조에 포함시킴으로써 동작 주파수를 재구성하는 기본 원리를 바탕으로 MHz 대역부터 THz 이르기까지 공진 주파수, 주파수 대역폭, 주파수 감쇠 성능 등 다양한 재구성 방식이 연구되고 있다. 대표적으로 PIN 다이오드, 바랙터 다이오드 그리고 RF MEMS 등의 능동소자를 이용하여 단위구조의 임피던스를 변화시켜 주파수를 재구성하는 회로적 재구성 기법이 있으며, 제어 방식이 단순하고 제작이 용이하다는 장점을 갖는다. 그러나, 입사파의 입사각, 편파특성과 같은 안정적인 주파수 응답 특성을 위해 많은 능동소자가 요구됨에 따라 복잡한 바이어스 회로의 구성이 필요하며, 입사파로부터 단위구조와 바이어스 회로와의 격리도, 단위구조와 단위구조 간 격리도 확보를 위한 설계 및 RF Choke와 같은 부품 추가가 필요하다는 한계가 있다<sup>[4],[5]</sup>. 또한, 선행 연구된 RFSS 구조의 대부분은 입사파의 편파 및 입사각에 대한 고려가 없거나, 평판형 유전기판 위에 구현되어 평면구조 이외의 곡면형 구조 등 다양한 형태에 적용이 어려우며, 형상에 따른 특성 변화에 대한 분석이 미비하다<sup>[5]-[7]</sup>.

본 연구에서는 기존 회로적 재구성 기법의 격리도 한계를 개선하기 위해 그리드 형태의 바이어스 회로와 비아홀 구조를 통해 격리도를 개선한 PIN 다이오드 기반 X-대역 RFSS를 설계하였다. 제안된 구조는 안정적인 입사각 및 편파 특성을 위해 다이오드를 포함한 단위구조를 대칭적으로 구성하여 안정적인 주파수 응답 특성을 구현하였다. 또한, 0.2 mm 두께 FPCB(Flexible Printed Circuit Board)에 구현하여 휘어짐이 가능한 유연한 구조적 특징을 바탕으로 곡률에 따른 주파수 응답 특성 변화를 실험을 통해 분석하였다.

## II. 유연한 구조를 갖는 RFSS 설계

제안된 구조는 입사파의 입사각 및 편파에 비교적 안정적인 주파수 응답 특성을 갖는 십자형 루프 패턴과 주파수 재구성을 위해 추가한  $\Pi$  자형 유도성 스티브 사이에 PIN 다이오드가 위치하며, 전원인가를 위한 바이어스 회로를 그리드 형태로 윗면과 아랫면에 비아홀을 통해 연결된 구조로 구성하였다. 이와 같은 바이어스 회로로부터 형성된 저항 및 인덕턴스 성분을 통해 단위구조와 바이어스 회로 간 높은 격리도를 확보할 수 있으며, 바이어스로부터 발생한 기생 성분의 억제 가능하다<sup>[8]</sup>. 제안된 구조는 상용 전파 해석 S/W인 ANSYS HFSS v.2015를 사용하여 설계하였으며, 상용 PIN 다이오드는 MACOM사의 MADP00090714020를, 유전체는 두께 0.2 mm, 유전율( $\epsilon_r$ ) 3.5, 손실탄젠트( $\tan\delta$ ) 0.004의 Polyimide film을 가정하고, 직경 0.3 mm의 비아홀을 모델링하여 설계하였다. 이를 바탕으로 최적화된 치수를 그림 1에 나타내었으며, PIN 다이오드의 단락(ON), 개방(OFF) 상태에 따른 입사파의 편파 TE, TM 그리고 입사각  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ 에서의 투과 특성에 대한 해석 결과를 그림 2에 나타내었다.

해석 결과로부터 다이오드가 ON 상태일 때 X-대역 ( $-0.99$  dB @ 9.8 GHz)에서, OFF 상태일 때는 C-대역 ( $-1.12$  dB @ 5.7 GHz)에서 투과 특성을 각각 가짐을 알 수 있으며, 이를 바탕으로 제안된 구조의 검증에 위해 단위구조가 7×7로 배열된 91.4×91.4 mm 크기의 RFSS를 휘

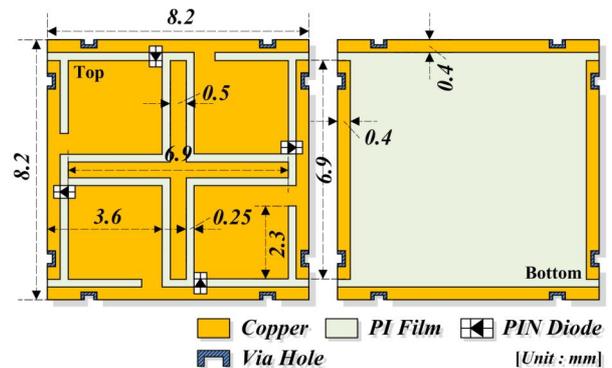


그림 1. 제안된 RFSS 구조의 단위구조와 최적화된 치수  
Fig. 1. The unit-cell of the proposed RFSS with optimized design parameters.

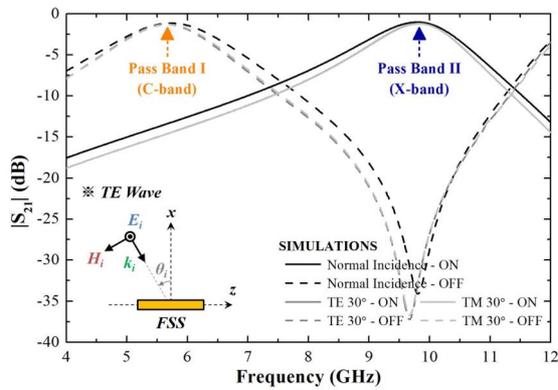
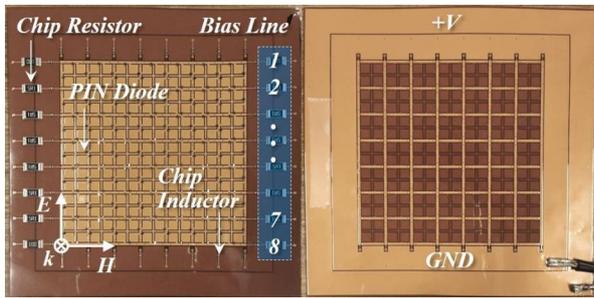
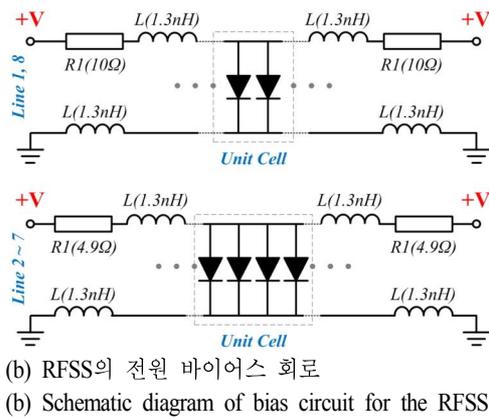


그림 2. 제안된 RFSS 구조의 계산된 투과 특성 결과  
Fig. 2. Simulated transmission characteristic of the RFSS.

어짐이 가능한 FPCB 방식으로 제작하였다. 제작된 외형을 그림 3(a)에 다이오드 구동을 위한 바이어스 라인에 대한 회로를 그림 3(b)에 나타내었다. DC 전원 입력단으로부터 발생할 수 있는 잡음을 차단하기 위해 10 GHz 자기

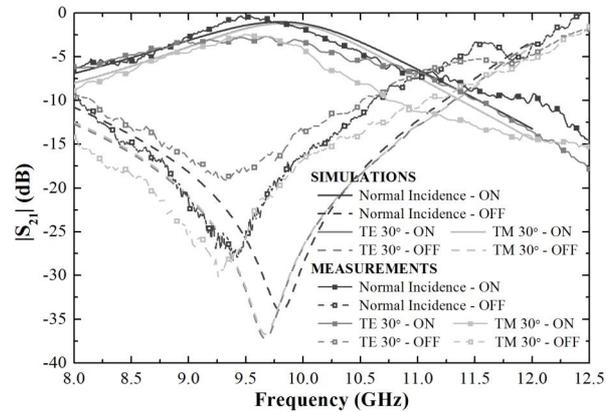


(a) 제작된 RFSS 구조의 외형  
(a) Fabricated RFSS

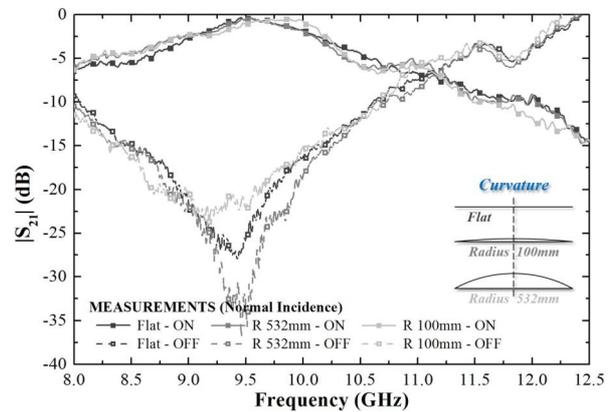


(b) RFSS의 전원 바이어스 회로  
(b) Schematic diagram of bias circuit for the RFSS

그림 3. 제작된 7×7 RFSS와 전원 바이어스 회로  
Fig. 3. Fabricated 7×7 RFSS and bias circuit.



(a) 편파 및 입사각에 따른 투과특성  
(a) Transmission characteristics for the different polarizations and incident angles



(b) 곡률 반경에 따른 RFSS 구조의 투과특성  
(b) Transmission characteristics of the proposed RFSS for curvature

그림 4. 제안된 RFSS 구조의 투과 특성 측정 결과  
Fig. 4. Measured transmission characteristics of the proposed RFSS.

공진주파수(SRF: Self Resonant Frequency)를 갖는 Abracon사의 ATFC-0402-1N3(1.3nH) 인덕터를 사용하였으며, 각 다이오드의 최소 구동 전압 1.4 V, 최대 소모 전류 20 mA로 가정하고, 최대 0.75 W를 수용할 수 있는 저항을 사용하였다.

이를 바탕으로 자유공간 측정법(8~12.5 GHz)을 통해 PIN 다이오드의 상태에 따른 투과 특성 측정 실험을 진행하였으며, 입사파의 편파 및 입사각에 따른 투과 특성과 수직 입사하는 평면파에 대하여 임의의 단일 곡률 ( $R=532$  mm, 100 mm)을 갖는 구조에 대한 투과 특성을

표 1. 제안된 RFSS 구조의 계산값과 측정값 비교  
Table 1. Comparisons between measurements and simulations for the proposed RFSS.

Incident wave (ON state)	$f_r$ (GHz)		$S_{21}$ (dB)	-3 dB BW(GHz)	
	Sim.	Mea.		Sim.	Mea.
Normal	9.80	9.54	-0.31	1.40	1.25
TE30	9.83	9.67	-2.70	1.18	0.56
TM30	9.82	9.51	-2.44	1.17	0.47
Incident wave (OFF state)	$f_r$ (GHz)		$S_{21}$ (dB)	-10 dB BW(GHz)	
	Sim.	Mea.		Sim.	Mea.
Normal	9.81	9.42	-27.93	3.35	2.55
TE30	9.67	9.33	-19.11	3.79	2.32
TM30	9.67	9.26	-30.15	3.76	3.06
Curved structure (measurement)					
Type	$f_r$ (GHz)	$S_{21}$ (dB)	-3 dB BW(GHz)		
Flat	9.54	-0.31	1.25		
$R=532$ mm	9.46	-0.47	1.34		
$R=100$ mm	9.72	-0.54	1.43		

그림 4(a)와 그림 4(b)에 각각 나타내었다. 표 1에 PIN 다이오드의 단락 상태 기준, 동작 주파수와 대역폭에 대한 계산값과 측정값을 비교하였으며, 곡률 반경에 따른 투과 특성을 나타내었다. 측정 결과로부터 1.4 % 이하의 공진 주파수 편차를 갖는 등 안정적인 주파수 응답 특성을 확인할 수 있었으며, 투과 손실과 대역폭에 대한 차이는 측정 시료의 크기와 적은 셀 개수 등으로부터 발생한 성능 열화라 사료된다. 또한, 단락 상태에서 곡률 반경이 증가함에 따라 공진 주파수, 투과 손실, 대역폭은 증가하는 경향을 보였으며, 1.9 % 이하의 공진 주파수 편차를 가지는 등 안정적인 성능을 확인하였다.

### III. 결 론

본 논문에서는 휘어짐이 가능한 유연한 기판 위에 X-대역에서 주파수 재구성이 가능한 RFSS 구조를 설계하고, 제작 및 측정을 통해 검증하였다. 제안된 구조는 그리드 형태의 전원 바이어스 회로와 비아홀 구성을 통해 단위구조의 격리도를 확보하였으며, 단위구조의 대칭적 구성을 바탕으로 입사파의 편파 및 입사각의 안정적인 주파

수 특성을 얻는 등 선행 연구들의 한계를 개선하였다. 또한, 평면구조뿐만 아니라, 단일 곡률을 갖는 곡면형 구조에 대하여 곡률 반경에 따른 주파수 투과 특성을 분석하였으며, 측정 결과로부터 평면형, 곡면형 모두 1.4 %, 1.9 % 이하의 공진 주파수 편차를 갖는 등 우수한 주파수 응답 특성을 가짐을 확인하였다.

### References

- [1] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, John Wiley & Sons, 2000.
- [2] M. Yan, et al., "A miniaturized dual-band FSS with stable resonance frequencies of 2.4 GHz/5 GHz for WLAN applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 895-898, 2014.
- [3] C. Sudhendra, et al., "A novel ultra wide band radar Absorber based on hexagonal resistive patch FSS", *In Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, pp. 1-2, 2013.
- [4] P. Kong, et al., "Switchable frequency selective surfaces absorber/reflector for wideband applications", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 29, no. 11, pp. 1473-1485, 2015.
- [5] H. Wang, et al., "Broadband tunability of polarization-insensitive absorber based on frequency selective surface", *Scientific Reports*, vol. 6, 2016.
- [6] L. Jialin, et al., "Design of a tunable low-frequency and broadband radar absorber based on active frequency selective surface", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 774-777, 2016.
- [7] M. Safari, et al., "X-band tunable frequency selective surface using MEMS capacitive loads", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 3, pp. 1014-1021, 2015.
- [8] J. P. Turpin, et al., "Reconfigurable and tunable metamaterials: a review of the theory and applications", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, 2014.