

# 주파수 선택 구조 레이돔 제작 과정에서 발생 가능한 불연속적 구조의 영향 분석

이상화<sup>1)</sup> · 홍익표<sup>\*,1)</sup> · 김윤재<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 공주대학교 정보통신공학과

<sup>2)</sup> 국방과학연구소 항공기술연구원

## Analysis of Discontinuous Structure Effect in Frequency Selective Radome Manufacturing

Sang-Hwa Lee<sup>1)</sup> · Ic-Pyo Hong<sup>\*,1)</sup> · Yoon-Jae Kim<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Aerospace Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 18 June 2019 / Revised 31 August 2019 / Accepted 6 September 2019)

### ABSTRACT

In this paper, the electromagnetic effects on the discontinuity structures of the frequency selective radome in manufacturing process based on the X-band were analyzed. In order to fabricate a curved radome using a planar frequency selective surface structure, it is assumed that gaps, slanted gaps, pattern damage, and pattern misalignment between FSS patterns, which are discontinuous elements that can occur at the joint surface of the FSS panel. FSS specimens including continuous elements were fabricated and the frequency transmission characteristics were measured in a free space measurement environment. From the measurement results, resonance frequency shift, transmission performance degradation, and bandwidth variations were found to be the largest when the damaged pattern was bonded to the junction of FSS panels.

Key Words : Frequency Selective Surface(주파수 선택 표면구조), FSS Radome(FSS 레이돔), Discontinuous FSS(불연속 주파수 선택 표면구조)

### 1. 서론

주파수 선택 표면 구조(Frequency Selective Surface,

FSS) 기술이란 유전기판 위에 전도성 패턴이 주기적으로 배열된 전자기 구조로 공간필터 역할의 구조이다<sup>[1]</sup>. FSS 구조는 주기적으로 배열되는 하나의 패턴을 단위구조라 하며, 단위구조가 무한히 배열된 주기구조에서 이상적인 주파수 성능을 갖는다. FSS 기술은 전자파 흡수체, 실내공간 전파 제어, EMI/EMC 등 다양

\* Corresponding author, E-mail: iphong@kongju.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

한 응용분야에 적용되고 있으며, 특히 항공기의 RCS 저감을 위해 레이돔 구조에 응용되고 있다<sup>[2-4]</sup>.

일반적으로 FSS 구조는 평면형 유전기판 위에 전도성 패턴을 형성하는 기술인 PCB(Printed Circuit Board) 방식으로 제작되는데, 평면형으로 제작된 FSS 시트를 곡면형 레이돔 구조에 적용하기 위해서 다양한 제작 기법이 시도되고 있으며, FSS 시트가 겹치지 않고, 일정한 배열상태로 적용하기 위해 레이돔 구조를 분할하여, 레이돔 형상에 맞게 제작된 유한배열의 FSS 패널을 결합하는 조립형 구조의 제작방식이 유리하다<sup>[5]</sup>. 이와 같은 제작방식의 경우, 평면형 FSS 시트의 절단, 성형, 접합 등의 가공과정을 통해 FSS 패널을 제작하고 이를 조립하여 레이돔 구조로 제작하는 방식으로 일정한 배열상태를 갖지만, FSS 패널의 접합면에서 FSS 패턴은 전기적으로 분리되어있는 구조로 제작된다. 또한, 주기적으로 배열된 FSS와 레이돔의 크기 불일치로 인한 접합면에서 FSS 패턴의 절단, 평면형 FSS를 곡면형 레이돔 구조에 적용하는 과정에서 접합단에서 FSS 패턴의 배열이 어긋나는 등 다양한 구조적 원인으로 인해 FSS 패널의 접합단에서 패턴 불연속이 발생하게 된다<sup>[6]</sup>. 무한배열 주기구조에서 특정 주파수 투과/차단 특성을 갖도록 설계된 FSS 구조 내에서 이와 같은 불연속 요소는 전체 레이돔 구조에서 결함요소로 판단되며, 결함요소에 의한 주파수 투과/차단 대역의 오차, 성능 저하 요인으로 작용할 수 있어 FSS 불연속 요소에 의한 영향 분석이 필요하다<sup>[7-9]</sup>.

는 레이돔 제작방식을 가정할 때 발생 가능한 결함요소로 FSS 패널의 접합면에서 FSS 패턴 불연속 요소에 대해 영향 분석을 목표로 하였으며, 발생 가능한 불연속 요소를 구체화하고, 접합면의 불연속 요소를 포함하는 평면형 FSS 시편을 제작하여 자유공간 측정 환경에서 주파수 투과특성 측정을 통해 불연속에 의한 전기적 성능 변화를 관찰하였으며, 전기적 성능변화에 큰 영향이 있는 결함요소를 탐색하였다.

## 2. 불연속 요소를 포함하는 FSS의 제작

FSS 레이돔의 제작과정에서 발생 가능한 제작오차로 크게 FSS 패턴의 불연속과 복합재의 전기적 물성 변화로 구분할 수 있으며, FSS 패턴 불연속에 대해 접합면에서 발생 가능한 패턴 불연속 시나리오를 가정하여 측정을 통해 영향분석을 진행하였고, 레이돔 제작공정에서 발생하는 복합재의 전기적 물성변화에 대해 시뮬레이션을 통해 주파수 성능변화를 확인하였다.

레이돔 제작과정에서 발생가능한 FSS 패턴 불연속의 영향분석을 위해 결함요소를 세분화하고 FSS 패널 조립형 레이돔 구조의 제작과정에서 발생 가능한 불연속 요소를 탐색하였다. FSS 패널 조립형 레이돔 구조에서 FSS 패널의 접합면은 구조적으로 접합되어 있지만, 전기적으로 분리되어 있는 구조이다. 이와 같이 실제 제작되는 구조를 고려하여 FSS 패널의 모든 접합면에 틈이 존재한다고 가정하였으며, 분석하고자 하는 모든 불연속 요소의 접합면에 틈을 적용하였다. 본 연구에서 접합면에서 발생 가능한 결함요소로 결함 없는 온전한 FSS 패턴이 접합되는 접합면의 틈, 접합면의 FSS 패턴의 손상, 접합면의 FSS 패턴의 오정렬을 가정하였다. 일반적으로 FSS 레이돔은 적층형 구조로 설계되며, 본 논문에서는 전기적 성능 변화에 영향이 큰 불연속 요소 탐색을 위해 단일평면(single-layer)의 FSS에 대해서 영향 분석을 진행하였다. FSS 불연속 영향 분석을 위한 단위구조 설계로 패턴 형상에 의한 설계 요소를 최소화하고, 결합에 의한 성능 오차 분석을 위해 기본구조인 사각구조를 이용하였으며, 입사파의 편파와 입사각 안정성이 좋고, 넓은 대역폭을 갖는 특징을 갖는다. 본 논문에서는 10 GHz 대역에서 선택적 투과특성을 갖는 사각 루프 슬롯(Square loop slot) 형태의 단위구조를 설계하

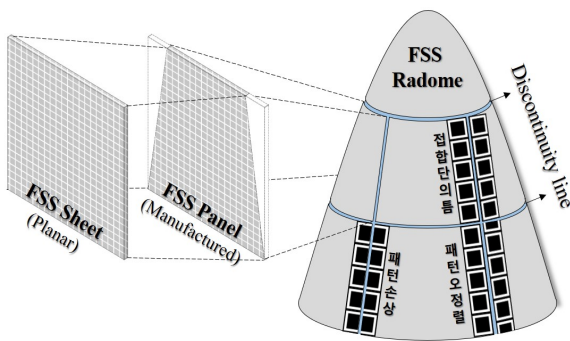


Fig. 1. Discontinuity FSS in the application of the radome structure of a planar FSS

본 연구에서는 FSS 레이돔 구조의 제작 과정에서 발생 가능한 결함요소 중, 다수의 FSS 패널을 조립하

였으며, 전자기 해석 소프트웨어인 Ansoft사의 HFSS를 이용하였다. 설계된 FSS 단위구조는 10.06 GHz에서 97.85 %의 최대투과성능을 가지며, 90 % 투과성능을 기준으로 2.6 GHz 대역폭을 확인하였으며, 설계된 단위구조를 Fig. 2(a)에, 제작 사진을 Fig. 2(b)에 나타내었다.

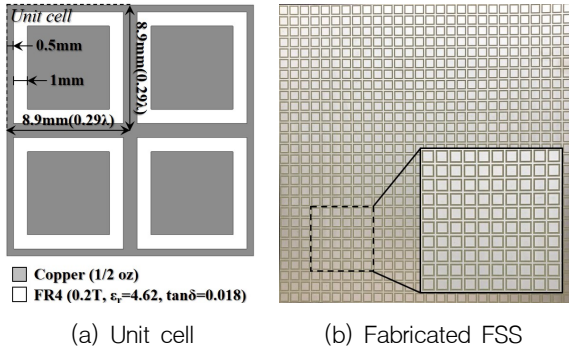


Fig. 2. Unit cell and Fabricated FSS

면에 일정 간격의 틈이 발생한 구조로 1 mm, 3 mm, 5 mm로 틈의 크기를 가정하였다. Fig. 3(b)는 곡면형 레이돔 구조 적용 과정에서 틈의 간격이 일정하지 않고, 기울어진 틈이 발생한 구조로, 1°, 3°, 5°로 틈의 정도를 가정하였다. Fig. 3(c)는 레이돔 형상에 맞게 FSS 패널을 제작하는 과정에서 FSS 패널의 가장자리에 패턴 절단이 발생하여 손상된 패턴이 접합된 구조로, 단위구조 크기에서 1 mm, 3 mm, 5 mm의 패턴 손상을 가정하였으며, 동시에 1 mm, 3 mm, 5 mm의 틈을 포함하는 구조로 가정하였다. Fig. 3(d)는 레이돔 형상에 맞게 제작된 FSS 패널을 조립하는 과정에서 접합단에 FSS 패턴이 어긋난 구조로, 어긋남의 정도가 최대인 단위구조의 절반이 어긋난 구조에서 틈의 크기로 1 mm, 3 mm, 5 mm를 가정하였다. 제작된 시편의 전체 영역에서 틈의 영역과 전체 패턴 중 손상된 패턴을 Table 1에 나타내었다.

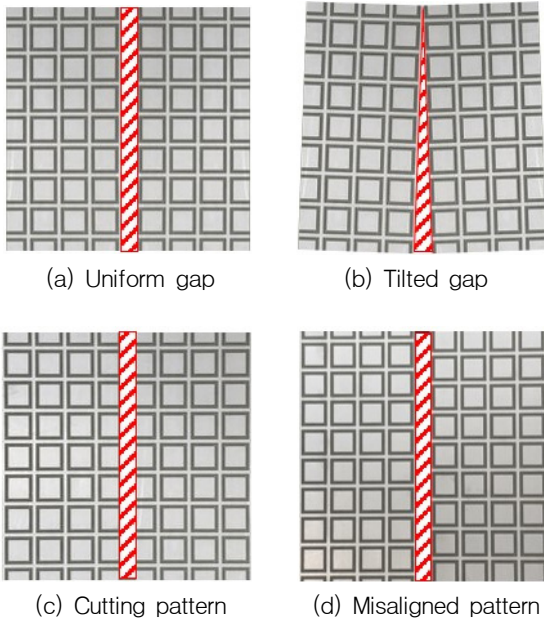


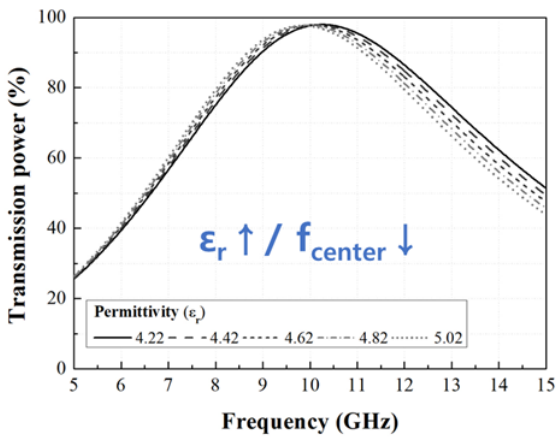
Fig. 3. Fabricated defect FSS

FSS는 FR4 에폭시 기판위에 PCB 방식으로 제작하였으며, 불연속 요소를 포함하는 제작된 FSS 구조를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 패턴의 손상 및 오정렬 없이 FSS 패널이 온전하게 접합되는 경우에 접합

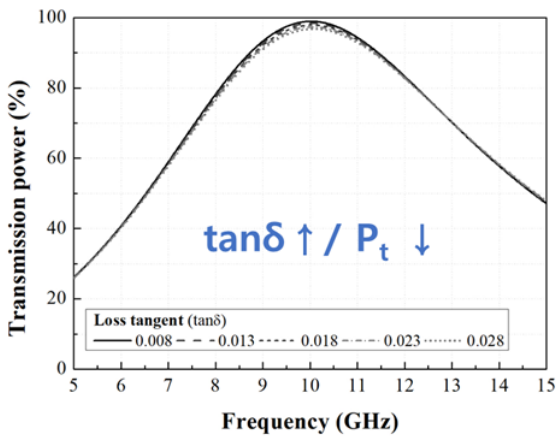
Table 1. Ratio of defect area and defect pattern

Defect case		Defect area (%)
Uniform gap (mm)	1 mm	0.5 %
	3 mm	1.5 %
	5 mm	2.5 %
Tilted gap (degree)	1°	0.87 %
	3°	2.62 %
	5°	4.36 %
Defect case		Defect pattern (%)
Cutting pattern		9.1 % (44/484)

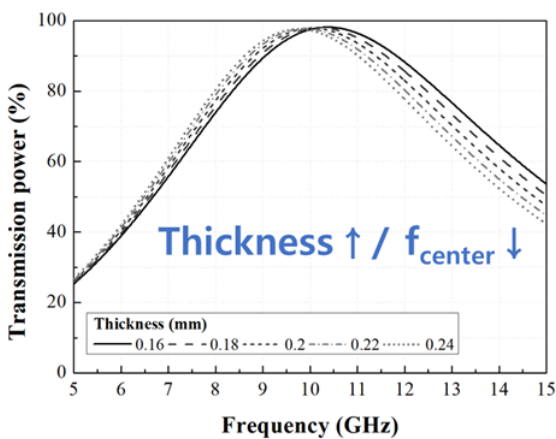
레이돔 제작공정에서 발생하는 복합재의 전기적 물성변화의 경우, 제작 오차 요소로 유전특성을 갖는 재료의 유전율, 손실탄젠트, 두께가 있으며, 이에 대해 앞서 설계한 FR4 에폭시를 기판으로 하는 사각구조를 이용하여 시뮬레이션을 통해 물성변화에 따른 주파수성능 변화를 확인하였다. 유전기판의 유전율이 증가할수록 중심주파수는 낮은 대역으로 이동하고, 손실탄젠트가 증가할수록, 투과성능은 감소하며, 기판의 두께가 증가할수록 중심주파수는 낮은 대역으로 이동하는 경향을 확인하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.



(a) Variation of permittivity



(b) Variation of loss tangent

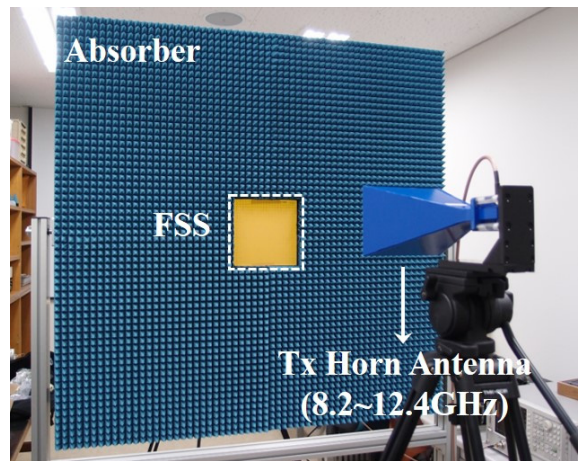


(c) Variation of thickness

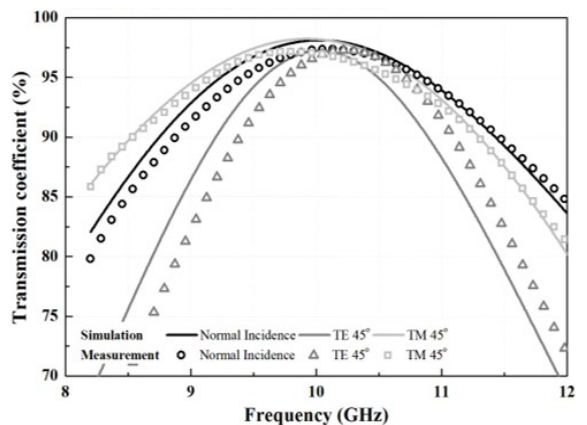
Fig. 4. Variation of dielectric characteristic

### 3. 불연속 요소를 포함하는 FSS의 측정

제작된 FSS 시편의 주파수 성능 측정을 위해 자유공간측정환경에서 주파수 투과특성을 측정하였으며, 자유공간측정환경은 X대역(8.2~12.4 GHz)의 혼 안테나와 네트워크 분석기로 구성된다. 측정 시편이 위치하는 개구의 사이즈는 200×200 mm이며, 시편과 혼 안테나 사이 측정거리는 1 m이고, 개구면 주위로 흡수체가 부착된 지그에서 측정하였으며, 자유공간측정환경을 Fig. 5(a)에, 결합없는 FSS 시편의 주파수 투과특성 측정 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다.



(a) Free space measurement setup



(b) Measurement results of frequency transmitted characteristic

Fig. 5. Measurement of fabricated FSS

FSS의 불연속 방향에 의한 영향을 관찰하기 위해 결합이 수직방향으로 형성된 구조와 수평방향으로 형성된 구조로 구분하여 측정을 진행하였으며, 결합요소의 측정결과는 패턴의 연속적 배열로 구성된 온전한 FSS 시편의 측정 결과를 기준으로 하여 공진 주파수, 투과율, 대역폭의 성능 차이를 비교하였다. 결합요소의 측정결과로부터 최대 투과되는 지점의 공진주파수와 투과율에 대해서, 결합없는 FSS 시편의 수직입사 측정결과를 원점으로 하는 공진주파수, 투과율의 성능 변화 비교 그래프를 나타내었다. FSS 불연속에 의한 영향이 크고 작음을 판단하기 위해, 중심주파수로 9.5~10.5 GHz 대역에 존재하며, 이때 90 % 이상의 투과율을 목표 성능으로 하여, 그래프 상에 중심주파수로 -6 % ~ +4 %, 투과율로 ±5 %로 목표 성능 영역을 표시하였다. 결합에 의한 성능 오차가 발생하여도, 목표 성능을 달성하는 경우에 영향이 적다고 가정하였고, 목표 성능을 달성하지 못하는 결합 요소에 대해 주요 성능변화 요인으로 가정하였다. 투과성능은 측정된  $S_{21}$  결과로부터 식 (1)로 계산하였으며, 수직, 수평 방향의 결합요소에 대한 주파수 투과특성 측정결과를 Fig. 6~9에 나타내었다.

$$P_{trans} (%) = (10^{(S_{21}/10)}) \times 100 \quad (1)$$

일정 간격의 틈이 있는 결합의 경우, 수직 결합의 측정결과 Fig. 6(a)에서, 5 mm 틈의 경사입사에도 공진주파수 및 투과성능 오차가 적은 것으로 확인되었으며, 수평 결합의 측정결과 Fig. 6(b)에서, TE, TM 편파의 경사 입사 시, 2 % 이하의 투과성능 저하를 확인하여, 주파수성능 변화, 투과성능 저하에 영향이 적은 것으로 확인되었다.

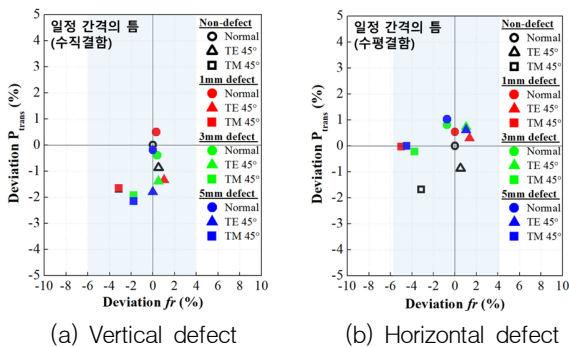


Fig. 6. Measurement results of uniform gap defect FSS

기울어진 틈이 있는 결합의 경우, 수직 결합의 측정결과 Fig. 7(a)에서, 공진주파수 및 투과성능 오차가 적은 것으로 확인되었으며, 성능 변화가 가장 크게 발생한 경우로 TE 45° 입사 시, 5° 기울어진 틈에서 2 % 이상의 투과성능 저하를 확인하였다. 수평 결합의 측정결과 Fig. 7(b)에서, 1~5° 기울어진 틈에서 2 % 이하의 투과성능 변화가 확인되어, 주파수성능과 투과성능에 영향이 적은 것으로 확인되었으며, 공진주파수 성능 변화가 가장 크게 발생한 경우로 5° 기울어진 틈의 경우, TM 45°에서 -230 MHz의 공진주파수 이동을 확인하였다.

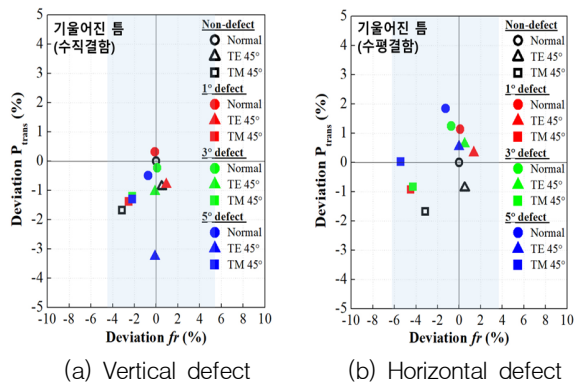


Fig. 7. Measurement results of tilted gap defect FSS

패턴이 손상된 결합의 경우, 수직 결합의 측정결과 Fig. 8(a)에서, TE, TM 편파의 경사입사 시, 공진주파수 이동과 투과전력 성능저하가 확인되었으며, 패턴의 손상 정도와 성능 저하 사이의 선형성을 확인하기 어려우며, 이는 패턴 손상으로 인한 형상 변화로 예측 불가능한 성능 변화가 발생하였다고 판단하였다. 수평 결합의 측정결과 Fig. 8(b)에서, 1 mm 패턴 손상에서 투과 대역의 fluctuation 현상이 확인되었고, 이로 인해 10 GHz 대역에서 투과성능 저하가 크게 발생하여 공진주파수 이동 및 대역폭 성능 비교를 통한 영향분석이 어려워 10.12 GHz를 중심주파수로 1 GHz 대역폭인 9.62 GHz에서 10.62 GHz 사이의 각 투과율로 평균 투과율을 나타내었으며, 평균 투과율은 식 (2)와 같고, 3 mm, 5 mm의 경우에도 전체적인 성능 변화가 크게 확인되었다. 패턴손상의 경우 목표성능을 달성하지 못하여 주요 성능변화 요인으로 판단되며, 패턴손상에 의한 영향분석 및 패턴손상을 최소화하는 제작이 고려되어야 한다.

$$Avg. P_{trans} (\%) = \frac{P_1^* + P_2 + \dots + P_N^{**}}{N} \quad (2)$$

\*P<sub>1</sub> : 9.62 GHz에서 투과율

\*\*P<sub>N</sub> : 10.62 GHz에서 투과율

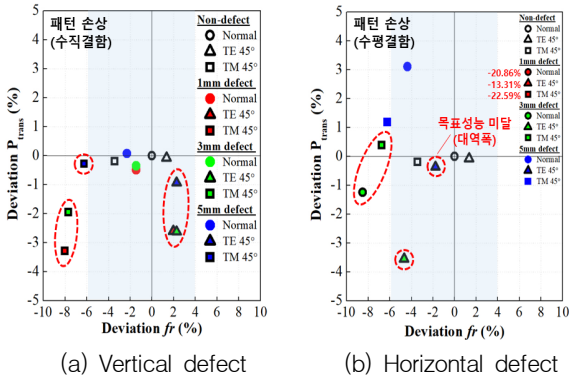


Fig. 8. Measurement results of cutting pattern defect FSS

패턴이 오정렬된 결함의 경우, 수직 결함의 측정결과 Fig. 9(a)에서, TE, TM 편파의 경사 입사 시 투과 성능 변화가 확인되었으며, 5 mm 틈의 경우에 성능 변화가 가장 크게 확인되었다. 수평 결함의 측정결과 Fig. 9(b)에서, 1~5 mm 틈에 의한 투과성능 변화가 확인되지만, 1% 이하의 투과성능 변화로 패턴 오정렬의 영향은 적은 것으로 확인되었다.

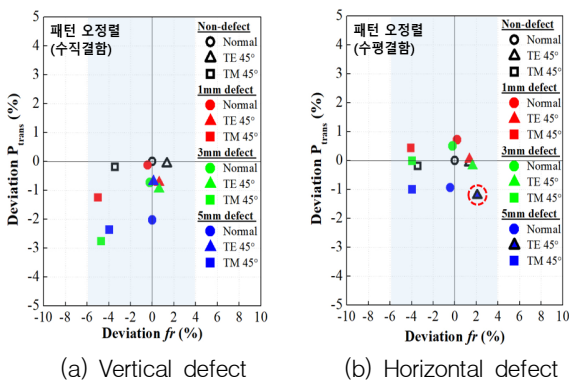


Fig. 9. Measurement results of misaligned pattern defect FSS

전기적 성능변화가 확인된 패턴의 손상, 패턴의 오정렬 결함에 대해 공진주파수, 투과전력, 대역폭의 성

능 변화를 Table 2와 3에 나타내었으며, Table 2에서 수직방향의 결함요소 중 1 mm의 패턴 손상의 경우에 전체적인 성능변화가 가장 크게 확인되었으며, Table 3에서 수평방향의 결함요소 중 1 mm의 패턴 손상의 경우에 투과 성능 저하, 3 mm의 패턴 손상의 경우에 공진주파수 이동 및 대역폭 변화가 가장 크게 확인되었다.

Table 2. Deviation of frequency characteristic of defect FSS(Vertical defects)

Incidence	Defect Case	Deviation (vs.Non-defect)		
		fr	P <sub>trans</sub> (%)	BW
Normal	Non-defect	10.12 GHz	97.3 %	2.55 GHz
	패턴 손상 (수직결함) 1 mm	-150 MHz	-0.49 %	+130 MHz
	3 mm	-150 MHz	-0.36 %	+150 MHz
	5 mm	-230 MHz	+0.07 %	+220 MHz
패턴 오정렬	1 mm	-40 MHz	-0.12 %	-10 MHz
	3 mm	-20 MHz	-0.73 %	-120 MHz
	5 mm	-	-2.02 %	-340 MHz
	TE 45°	10.25 GHz	97.3 %	1.69 GHz
패턴 손상	1 mm	-70 MHz	-2.52 %	-480 MHz
	3 mm	+100 MHz	-2.54 %	-490 MHz
	5 mm	+100 MHz	-0.85 %	-210 MHz
	패턴 오정렬	1 mm	-70 MHz	-0.65 %
3 mm		-70 MHz	-0.89 %	-10 MHz
5 mm		-120 MHz	-0.62 %	-10 MHz
TM 45°		Non-defect	9.77 GHz	97.2 %
	패턴 손상 1 mm	-460 MHz	-3.1 %	-1160 MHz
	3 mm	-430 MHz	-1.75 %	-700 MHz
	5 mm	-280 MHz	-0.18 %	-300 MHz
패턴 오정렬	1 mm	-160 MHz	-1.05 %	-110 MHz
	3 mm	-120 MHz	-2.56 %	-370 MHz
	5 mm	-50 MHz	-2.16 %	-310 MHz

- P<sub>trans</sub> : Transmitted Power

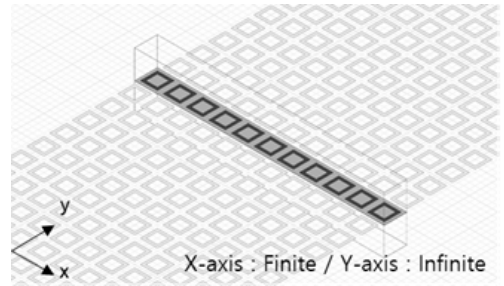
- BW : Bandwidth of P<sub>trans</sub> ≥ 90 %

Table 3. Deviation of frequency characteristic of defect FSS(Horizontal defects)

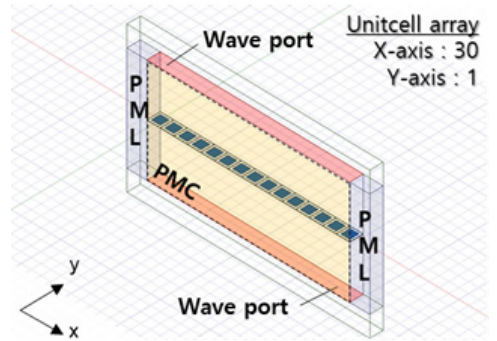
Incidence	Defect Case	Deviation (vs.Non-defect)		
		fr	P <sub>trans</sub> (%)	BW
<b>Normal</b>	<b>Non-defect</b>	<b>10.12 GHz</b>	<b>97.3 %</b>	<b>2.55 GHz</b>
패턴 손상	1 mm	Avg. P <sub>trans</sub> : -20.86 %		
	3 mm	-860 MHz	-1.24 %	-1210 MHz
	5 mm	-440 MHz	+3.1 %	-310 MHz
패턴 오정렬	1 mm	+20 MHz	+0.71 %	+60 MHz
	3 mm	-20 MHz	+0.49 %	-10 MHz
	5 mm	-50 MHz	-0.93 %	-310 MHz
<b>TE 45°</b>	<b>Non-defect</b>	<b>10.25 GHz</b>	<b>97.3 %</b>	<b>1.69 GHz</b>
패턴 손상	1 mm	Avg. P <sub>trans</sub> : -13.31 %		
	3 mm	-600 MHz	-3.47%	-990 MHz
	5 mm	-310 MHz	-0.29%	-720 MHz
패턴 오정렬	1 mm	-	+0.11%	+20 MHz
	3 mm	+30 MHz	-0.12%	-70 MHz
	5 mm	+80 MHz	-1.13%	-270 MHz
<b>TM 45°</b>	<b>Non-defect</b>	<b>9.77 GHz</b>	<b>97.2%</b>	<b>2.75 GHz</b>
패턴 손상	1 mm	Avg. P <sub>trans</sub> : -22.59 %		
	3 mm	-330 MHz	+0.58 %	-1320 MHz
	5 mm	-280 MHz	+1.39 %	-590 MHz
패턴 오정렬	1 mm	-60 MHz	+0.62 %	+10 MHz
	3 mm	-50 MHz	+0.17 %	-180 MHz
	5 mm	-50 MHz	-0.8 %	-410 MHz

- Avg. P<sub>trans</sub> : Average Transmitted Power(9.62~10.62 GHz)

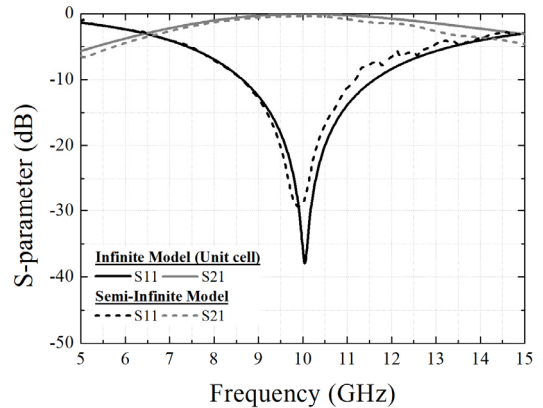
본 논문에서는 레이돔 제작 시 발생 가능한 FSS 불연속 요소에 대해 사각구조를 적용한 평면형 시편에서 측정을 통해 영향분석을 진행하였으며, 접합면의 패턴 손상이 주요 성능변화 요인으로 작용하는 것을 측정을 통해 확인하였다. 추후, FSS 불연속의 영향이 적은 패턴에 관한 연구와, 곡면형 구조에서 불연속의 영향분석, FSS 불연속요소에 의한 RCS 영향분석이 진행되어야 하며, 향후 연구방향에 대해 아래에 서술하였다.



(a) Semi-Infinite array



(b) Semi-Infinite modeling



(c) Semi-Infinite simulation

Fig. 10. Semi-Infinite analysis

FSS 불연속의 영향이 적은 패턴을 탐색하기 위해, 단위구조의 크기변화, 패턴형상 변화에 따른 패턴손상의 영향분석을 통해 결함에도 성능변화가 적은 FSS 패턴을 탐색하는 연구를 수행할 예정이다. 곡면형 구조의 불연속 영향분석을 진행하기 위해 곡률을 갖는 배열구조의 시뮬레이션 및 측정을 수행한 선행 연구

에서 제안하는 반무한(Semi-Infinite) 해석을 이용하여 곡률을 갖는 구조의 FSS 불연속에 대한 연구를 수행할 예정이다<sup>[10-12]</sup>. 단위구조의  $N \times N$  배열인 유한(finite) 해석에 비해 해석시간 및 소요 메모리 축소가 가능하며, 무한(infinite) 배열 해석 결과와 비교하여 단위구조의 배열개수, 경계 설정조건 등을 개선하여 해석 정확도 확보가 필요하며, 반무한 해석에 대해 Fig. 10에 나타내었다. 접합단의 FSS 불연속에 대해 RCS 영향분석을 위해 전자기장 해석 소프트웨어를 이용하여  $N \times N$  배열의 유한배열 FSS 구조에서 RCS 해석을 통해 성능변화를 확인 할 수 있으며, 유한배열 FSS 구조의 RCS 해석을 위해 해석시간과 해석 정확도를 고려하여 단위구조의 배열개수를 정의하고, 해석시간 단축을 위해 단순화된 FSS 층을 구성하여 RCS의 성능변화를 관찰할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 평면형으로 제작되는 FSS 시트를 곡면형 레이돔 구조에 적용하는 과정에서 발생 가능한 불연속 요소를 구체화하고, 불연속 요소를 포함하는 시편 제작 및 측정을 통해 접합단의 FSS 불연속에 의한 투과성능 변화를 관찰하였다. 측정결과 접합면에 틈, 오정렬이 발생한 경우, 경사입사에서 성능변화가 심화되는 현상을 확인하였고, 패턴 손상이 발생한 경우, 수직, 수평방향 모두 주파수성능 변화와 투과성능 저하가 크게 확인되었으며, 추후 FSS 패턴 손상에 의한 성능 저하를 최소화할 수 있는 방안에 대해 실험을 통해 탐색할 예정이다.

#### 후 기

이 연구는 국방과학연구소의 연구비지원으로 (UD170044JD) 수행되었음.

#### References

[1] B. A. Munk, "Frequency Selective Surfaces : Theory and Design," Wiley-Interscience, 2005.  
 [2] R. Zhang, G. Z. Lu, D. D. Zeng and Q. X. Guo,

"Designing a Radome with Frequency Selective Surface by Using the Physical Optics Method," 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, pp. 516-518, 2016.

[3] I. B. Choi, D. Y. Lee and D. G. Lee, "Hybrid Composite Low-Observable Radome Composed of E-Glass/Aramid/Epoxy Composite Sandwich Construction and Frequency Selective Surface," Composite Structures, Vol. 117, No. 1, pp. 98-104, 2014.  
 [4] N. Liu, X. Sheng, C. Zhang and D. Guo, "Design of Frequency Selective Surface Structure With High Angular Stability for Radome Application," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 17, No. 1, pp. 138-141, Jan, 2018.  
 [5] B. A. Munk, "Finite Antenna Arrays and FSS," Wiley-Interscience, 2003.  
 [6] R. E. Jorgenson, L. I. Basilio, W. A. Johnson, L. K. Warne, D. W. Peters, D. R. Wilton and F. Capolino, "Analysis of Electromagnetic Scattering by Nearly Periodic Structure: an LDRD Report," Sandia National Laboratories, 2006.  
 [7] K. Persson, "Radome Diagnostics: Utilizing Source Reconstruction based on Surface Integral Representation," Ph.D, Lund University, 2013.  
 [8] C. S. Park, I. P. Hong, H. J. Chun, Y. B. Park and Y. J. Kim, "Registration Sensitivity Study of Double-layer FSS Design for Radome," The 2015 International Workshop on Antenna Technology, Seoul, South Korea, pp. 342-344, Mar. 2015.  
 [9] I. P. Hong, "Investigation of the Finite Planar Frequency Selective Surface with Defect Patterns," Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 742-746, Jan. 2014.  
 [10] M. Nauman, R. Saleem, A. K. Rashid and M. F. Shafique, "A Miniaturized Flexible Frequency Selective Surface for X-Band Applications," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 58, No. 4, pp. 419-428, Apr. 2016.  
 [11] W. Y. Yong, S. K. A. Rahim, M. Himdi, F. C. Seman, D. L. Suong, M. R. Ramli and H. A. Elmobarak, "Flexible Convolute Ring Shaped FSS for X-Band Screening Application," IEEE Access,



Vol. 6, pp. 11657-11665, Mar. 2018

[12] S. Kalraiya, M. Ameen, R. K. Chaudhary and R. K. Gangwar, "Compact Ultrathin Conformal

Metamaterial Dual-Band Absorber for Curved Surfaces," International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering, Jul. 2019.