

이중 대역 지향성 증가용 박판 주파수 선택적 표면의 설계

Design of Thin Frequency Selective Surface Superstrates for Dual-Band Directivity Enhancement

이동현 · 이영주* · 여준호** · Raj Mittra*** · 박위상

Dong-Hyun Lee · Young-Ju Lee* · Junho Yeo** · Raj Mittra*** · Wee Sang Park

요 약

본 논문에서는 하나의 유전체 층으로 이중 대역 지향성을 증가시킬 수 있는 박판 frequency selective surface (FSS) superstrate를 제안하고 이의 설계 방법을 소개하였다. 제안하는 박판 FSS superstrate는 동일한 주기의 두 FSS 어레이가 하나의 유전체 위 아래로 존재하고, 두 FSS 어레이의 위치에 offset을 주어 이중 대역 지향성 향상을 위한 기존의 FSS superstrate가 가지는 문제점을 제거하였다. 단위 셀 시뮬레이션을 이용하여 다양한 파라미터의 변화에 따른 특성을 분석하고, 이를 이용하여 제안하는 superstrate의 설계 방법을 제시하였다. 3가지 다른 quality factor를 가지는 단위 셀과 이를 이용한 복합 안테나의 특성을 비교하여 두 대역에서의 지향성 향상 정도를 유사하게 하는 단위 셀의 quality factor 값을 제시하였다. 이와 함께 효율적으로 지향성을 향상시킬 수 있는 최적의 FSS 어레이 크기를 제시하였다. 제안한 박판 FSS superstrate를 이용한 안테나 복합체를 제작하였으며, 측정된 결과는 시뮬레이션 된 결과와 매우 잘 일치한다.

Abstract

We propose a thin frequency selective surface(FSS) superstrate etched on a substrate for dual-band directivity enhancement, and present a design method of the superstrate. In the proposed new design, two FSS arrays with the same periodicity, but with different alignments are placed above and below a thin dielectric layer to overcome the problem of conventional superstrates for dual band directivity enhancements. Based on the unit-cell simulation, several important parameters that characterize the thin FSS superstrate are investigated, and the procedure for designing such a superstrate is described. We compare the resonant frequencies and the quality factors of the unit cell with those of three FSS antenna composites with different quality factors, and identify the quality factors which support similar directivity enhancement at the dual-band directivity enhancement. It was found that there is an optimum FSS array size of a superstrate to enhance the directivity most efficiently. Measured results for a fabricated superstrate show a good agreement with the simulated ones.

Key words : Frequency Selective Surface(FSS), Directivity Enhancement, Dual-Band, Patch Antenna

I. 서 론

특정 모양의 단위 셀을 주기적으로 나열하여 자연계에 존재하지 않는 전자기적 특성을 가지는 me-

「본 논문은 정통부 및 정보통신연구진흥원의 정보통신선도기술개발사업의 연구 결과로 수행되었습니다.」

포항공과대학교 전자전기공학부(Department of Electronic and Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*삼성전자 무선사업부(Mobile Communication Division, Samsung Electronics)

**한국전자통신연구원 텔레메틱스.USN 연구단(Telemetics.USN Research Division, ETRI)

***펜실베이니아 주립대학교 전자전기공학부(Department of Electronic and Electrical Engineering, Pennsylvania State University)

· 논문 번호 : 20060502-048

· 수정완료일자 : 2006년 7월 5일

metamaterial을 이용하여 안테나의 성능을 향상시키는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 특히 frequency selective surface(FSS) 혹은 electromagnetic bandgap (EBG)과 같은 metamaterial superstrate를 평판형 안테나 위에 놓아 안테나의 지향성을 향상시킨 복합 안테나가 많이 발표되고 있다. 이러한 superstrate를 이용한 고 지향성 안테나는 일반적인 어레이 안테나에 비해 다수의 장점을 가진다. 어레이 안테나의 경우 다수의 단일 안테나를 배열함에 따라 급전 구조는 커지고 복잡해지며, 이에 따라 급전 구조에서 많은 전력 손실을 야기한다. 특히 밀리미터파 대역에서는 이러한 손실이 매우 심각해져 평판형 배열 안테나를 사용하지 못하게 되는 주요한 이유가 된다. 하지만 metamaterial 물질 기반의 superstrate를 이용한 고 지향성 안테나는 superstrate 아래 하나의 급전 안테나만 사용하므로 상기의 어레이 안테나에서 문제가 되었던 복잡한 급전 구조가 필요 없고, 급전 손실이 원천적으로 낮은 장점이 있다.

이러한 superstrate로는 다층 유전층^{[1],[2]}, 유전봉을 이용한 electromagnetic band gap(EBG), 그리고 주기적인 금속 물질을 이용한 frequency selective surface(FSS)^{[5]~[8]} 등이 있다. 참고문헌 [1], [2]에서는 패치 안테나 위에 다층 주기 유전층을 놓아 패치 안테나의 지향성이 향상됨을 보였고, 이를 leaky waves 이론을 이용하여 설명하였다. 유전층의 두께와 유전 상수를 적절히 조절하여 지향성 향상이 나타나는 주파수를 조절할 수 있다. 참고문헌 [3]에서는 결함 모드(defect modes)라는 새로운 EBG 특성을 설명하고, 이러한 결함 모드를 이용하여 패치 안테나의 지향성을 향상시켰다. 참고문헌 [4]에서는 유전봉을 이용한 EBG superstrate의 결함 모드를 조절할 수 있는 단위 셀 시뮬레이션을 제시하고, 이를 이용하여 이중 대역 안테나, 이중 대역 이중 편파 그리고 광대역 지향적인 안테나 등과 같은 고 지향성 EBG 안테나를 제안하였다.

최근에는 FSS와 partially reflective surface(PRS)와 같은 금속 형태의 superstrate를 이용하여 평판형 안테나의 지향성을 향상시키는 방법이 소개되고 있다^{[5]~[8]}. 도파관 앞에 PRS를 두어 지향성 향상을 보였으며^[5], 패치 안테나를 artificial magnetic conductors (AMCs) 위에 설계하여 superstrate와 그라운드 평면

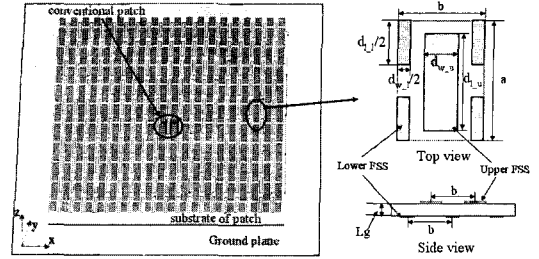


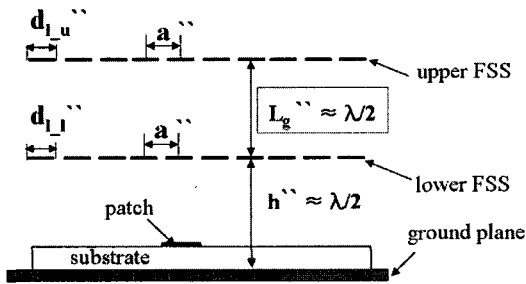
그림 1. 박판 FSS 복합 안테나 구조
Fig. 1. Geometry of a thin FSS antenna composite.

사이에 필요한 거리인 공진 길이를 절반으로 줄였다^[6]. 단위 셀 시뮬레이션을 이용하여 strip 다이폴 FSS superstrate가 소개되었고^[7], 이중 대역 지향성 향상 FSS superstrate가 발표되었다^{[8],[9]}. 이러한 금속 형태의 superstrate는 에칭을 통해 쉽게 제작이 가능하므로 유전봉을 주기적으로 지지할 수 있는 추가적인 구조물이 필요한 EBG superstrate보다 제작에 있어서 장점이 있다.

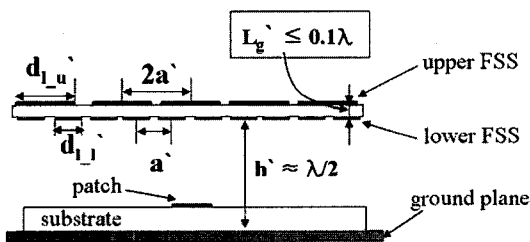
본 논문에서는 상기의 이중 대역 지향성 향상 FSS superstrate를 대체할 수 있는 박판 FSS superstrate를 제안하였다. 제안한 FSS superstrate는 그림 1에서 볼 수 있듯이 동일한 주기의 두 FSS 층이 하나의 유전층 위 아래로 존재한다. 두 FSS 어레이가 offset을 가지고 존재하도록 하여 두 FSS 층을 반 파장으로 거리를 두지 않더라도 이중 대역 지향성 향상이 가능하도록 하였다. 제안한 FSS 안테나 복합체는 하나의 유전층 위 아래로 FSS 어레이가 존재하는 박판 FSS superstrate와 그 FSS superstrate 아래 단일 패치 안테나로 구성된다. 박판 FSS superstrate 특성을 분석하기 위해 공진 길이(FSS superstrate와 패치 안테나의 그라운드 사이의 거리), 유전층의 높이(gap length), 그리고 strip 다이폴의 길이와 너비 등의 파라미터 변화에 따른 FSS superstrate의 특성을 분석하였다. 단위 셀 시뮬레이션의 결과로부터 제안한 박판 FSS superstrate의 설계 방법을 제안하였다. 이 설계 방법을 이용하여 FSS 안테나 복합체를 설계하고, 지향성 향상이 나타나는 두 대역에서의 지향성 향상 정도가 유사하도록 하는 최적의 quality factor와 FSS 어레이 개수를 결정하였다. 끝으로 FSS 안테나 복합체를 제작하여 측정된 안테나 복합체의 반사 손실, 지향성 그리고 방사 패턴을 나타내었다.

II. 박판 FSS Superstrate 설계

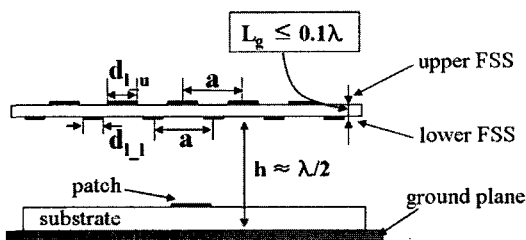
그림 2에 이중 대역 지향성 향상을 위한 3가지 다른 FSS superstrate를 나타내었다. 3가지의 FSS superstrate 모두 2개의 FSS 층으로 구성된다. 그림 2(a)의 이중 대역 지향성 향상 FSS superstrate는 동일한 주기의 FSS 층이 약 반파장의 간격으로 위치한다^[8]. 아래 FSS 층은 패치 안테나의 그라운드 평면으로부터 약 반 파장 위치에 존재하므로 전체 FSS 높이는



(a) 기존의 FSS 복합체
(a) Conventional FSS composite



(b) 다른 주기의 박판 FSS superstrate를 이용한 FSS 복합체
(b) Thin FSS antenna composite with a superstrate of different periodicities



(c) 제안한 박판 FSS 복합체
(c) Proposed thin FSS antenna composite

그림 2. 이중 대역 지향성 향상을 위한 다양한 FSS 복합체

Fig. 2. Various FSS composites for dual-band operation.

그라운드에서부터 약 한 파장의 거리가 된다.

그림 2(a)와 달리 두 FSS 층이 동일한 주기가 아닌 다른 주기를 가지면 FSS 층 사이의 간격인 L_g 를 줄일 수 있어 전체 높이를 줄일 수 있다. 이를 그림 2(b)에 나타내었다. 이 구조에서 위층의 FSS 층의 주기($2a'$)는 아래층의 주기(a')의 두 배이다. 하지만 이러한 구조는 L_g 를 파장에 비해 10배 이상으로 줄일 수 있지만, FSS superstrate의 크기가 고정되었을 경우 위층의 dipole 개수가 아래층의 dipole 개수의 절반에 해당하여 낮은 대역에서의 지향성 향상 정도가 높은 대역에서의 지향성 향상보다 낮게 된다. 또한 낮은 대역에서의 최대 지향성 주파수를 조절하기 어려운 단점이 있다.

상기의 그림 2(a)와 (b)의 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 두 FSS 층을 동일한 주기로 둔과 동시에 두 층이 존재하는 위치를 달리한 그림 2(c)의 구조를 제안하였다. 이러한 구조에서는 L_g 를 파장의 10배 미만으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 지향성 향상이 나타나는 두 대역에서의 지향성 향상 정도와 주파수를 쉽게 조절할 수 있다.

2-1 박판 FSS Superstrate의 단위 셀 특성

FSS superstrate를 사용한 FSS 복합 안테나의 지향성이 나타나는 주파수와 지향성 향상 정도는 단위 셀 시뮬레이션 방법으로 예측할 수 있다^[7]. 이 방법은 높은 지향성이 나타나는 주파수를 빠르게 제공할 뿐만 아니라 다수의 공진 모드를 제공하므로 공진 조건에 의해 하나의 공진 모드를 제공하는 ray method^[5]보다 이중 대역 지향성 향상을 위한 superstrate의 특성을 분석하는데 더 유용하다. 이러한 이유로 본 논문에서는 FSS superstrate의 특성을 예측하기 위해 단위 셀 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 지면의 제약상 단위 셀 시뮬레이션의 자세한 설명은 생략하며, 이의 자세한 설명은 참고문헌 [7]에 나와 있다.

Quality factor는 안테나의 손실을 나타내는 유용한 지표이고, 안테나의 효율과 대역폭과 밀접히 연관된다. FSS superstrate를 이용한 FSS 안테나 복합체에서는 단위 셀의 quality factor를 이용하여 지향성 향상 정도를 결정할 수 있다^[7]. 이 절에서는 이중 대

역에서는 공진 주파수와 quality factor를 이용한 이중 대역 FSS superstrate의 설계 방법에 대해서 설명한다. 이를 위해 그림 1의 우측 상단의 단위 셀의 파라미터 변화에 따른 단위 셀의 특성을 살펴본다. 시뮬레이션은 CST사의 microwave studio ver 5.0을 사용하였다. 기준 설계 파라미터 값은 아래와 같이 고정하였다(mm).

$$\begin{aligned}
 a &= 12, b = 6, d_{l1} = 10.5, d_{l2} = 11.5, \\
 d_{w1} &= 0.5, d_{w2} = 5, h = 16, L_g = 2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

FSS superstrate와 그라운드 사이의 거리인 공진 길이 h 는 FSS 복합 안테나의 최대 지향성이 나타나는 주파수를 결정한다. Strip dipole FSS superstrate인 경우 이 길이가 약 반 파장이 되는 곳에서 지향성이 향상된다^[7]. h 가 15 mm에서 17 mm로 변할 때 단위 셀의 투과 특성을 그림 3에 나타내었다. 이 때 $a = 0.75 \cdot h (= 2/16 \cdot h)$, $b = 0.375 \cdot h (= 6/16 \cdot h)$, $d_{l1} = 0.65625 \cdot h (= 10.5/16 \cdot h)$, $d_{l2} = 0.71875 \cdot h (= 11.5/16 \cdot h)$, $d_{w1} = 0.03125 \cdot h (= 0.5/16 \cdot h)$, $d_{w2} = 0.3125 \cdot h (= 5/16 \cdot h)$, 그리고 $L_g = 0.125 \cdot h (= 2/16 \cdot h)$ 로 h 에 따라 정규화 하였다. 그림에서 하나의 공진 길이에 대해 투과가 최대로 일어나는 주파수는 3개 혹은 4개이다. 하지만 처음과 세 번째 피크에서만 지향성 향상이 나타나는데, 이는 두 번째와 네 번째 모드에서는 그라운드가 존재하는 곳에서 접선 전계 성분이 존재하기 때문이다. h 가 증가함에 따라 첫 번째 피

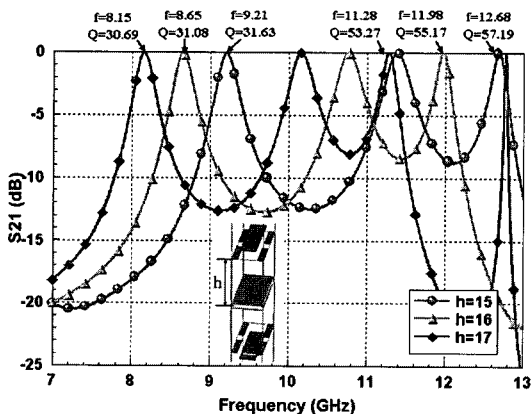


그림 3. h 에 따른 박판 FSS 단위 셀의 투과 계수
 Fig. 3. Transmission coefficient of a thin FSS unit cell as a function of h .

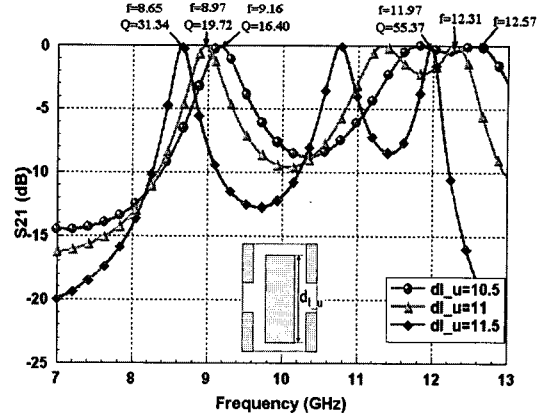


그림 4. d_{l_u} 에 따른 박판 FSS 단위 셀의 투과 계수
 Fig. 4. Transmission coefficient of a thin FSS unit cell as a function of d_{l_u} .

크 주파수는 9.21 GHz에서 8.15 GHz로, 그리고 세 번째 피크 주파수는 12.68 GHz에서 11.28 GHz로 감소되는 것을 볼 수 있다. 반면 두 피크 주파수의 quality factor는 일정하게 유지된다.

위쪽 다이폴의 길이인 d_{l_u} 의 변화에 따른 단위 셀의 투과 특성을 그림 4에 나타내었다. d_{l_u} 이 10.5 mm에서 11.5 mm로 증가함에 따라 첫 번째 피크가 나타나는 주파수는 9.16 GHz에서 8.65 GHz로 감소하고 quality factor는 16.4에서 31.34로 증가함을 볼 수 있다. 마찬가지로 세 번째 피크가 나타나는 주파수도 12.57 GHz에서 11.97 GHz로 감소하고, quality factor도 유사하게 증가됨을 관찰할 수 있다.

다음으로 낮은 다이폴 길이인 d_{l1} 에 따른 단위 셀의 투과 특성을 그림 5에 나타내었다. d_{l1} 이 10 mm에서 11 mm로 증가함에 따라, 첫 번째 피크가 나타나는 주파수는 8.6 GHz로 거의 일정한 반면 세 번째 피크가 나타나는 주파수는 12.37 GHz에서 11.46 GHz로 감소함을 볼 수 있다. 이에 반해 두 피크에서의 quality factor는 d_{l1} 에 따라 크게 변하지 않음을 볼 수 있다. 이는 d_{l1} 를 이용하여 세 번째 피크가 나타나는 주파수를 조절할 수 있음을 의미한다.

단일 대역 지향성 향상을 위한 FSS superstrate에서 다이폴의 너비는 bla 가 0.5보다 작으면, 너비의 영향을 무시할 수 있으며, 비가 0.5 이상이면 너비의 영향이 두드러지게 나타난다^[7]. 기존의 FSS superstrate의 공진 주파수와 quality factor는 superstrate의

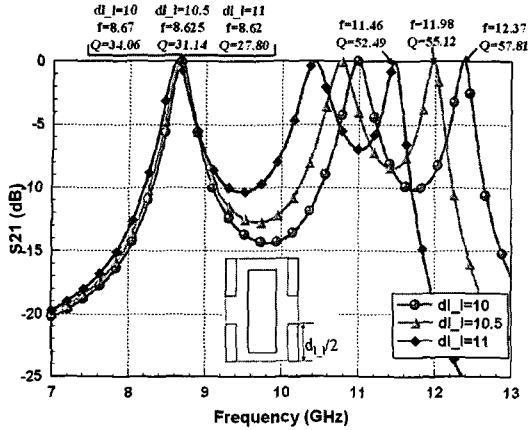


그림 5. d_L 에 따른 박판 FSS 단위 셀의 투과 계수
 Fig. 5. Transmission coefficient of a thin FSS unit cell as a function of d_L .

높이와 다이폴의 길이로 충분히 조절할 수 있기 때문에 너비의 영향을 없애기 위해 그 비를 작게 두었다. 하지만 박판 FSS superstrate를 완벽히 설계하기 위해서는 세 번째 모드의 quality factor만 영향을 주는 파라미터가 필요한데, b/a 의 비를 0.5로 두고 위쪽 다이폴의 너비인 $d_{w,u}$ 를 이용하면 이를 조절할 수 있다. 이를 설명하기 위해 그 비가 0.5일 때 $d_{w,u}$ 에 따른 단위 셀의 투과 특성을 그림 6에 나타내었다. 그림에서부터 $d_{w,u}$ 가 1에서 5까지 증가할 때 오직 세 번째 모드의 quality factor만 477.92에서 55.44까지 변함을 볼 수 있다.

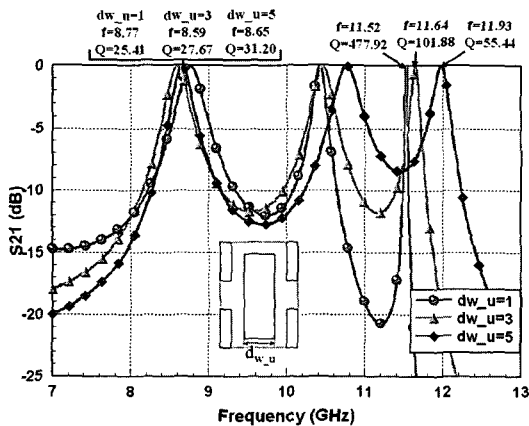


그림 6. $d_{w,u}$ 에 따른 박판 FSS 단위 셀의 투과 계수
 Fig. 6. Transmission coefficient of a thin FSS unit cell as a function of $d_{w,u}$.

상기의 파라미터 변화에 따른 단위 셀의 특성 변화에 따른 연구를 바탕으로 박판 FSS superstrate의 단위 셀을 설계하는 순서와 이를 이용한 FSS composite을 설계하는 순서를 그림 7에 나타내었다.

2-2 박판 FSS Superstrate와 복합체의 특성

그림 1의 composite 구조를 시뮬레이션하기 위해 유전율과 유전층의 두께가 3.38이고 0.508 mm인 유전층 위의 패치 길이가 7.5 mm인 사각 패치 안테나를 이용하였다. 이 패치 안테나의 중심 주파수는 10 GHz이고 7~13 GHz 사이에서 5~7 dBi의 지향성을 가진다. 이때 패치 안테나의 동작 주파수와 FSS superstrate의 지향성 향상이 나타나는 주파수를 일치시켜야 하지만, 복합체의 입력 임피던스는 복합체의 지향성에는 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 이번 절에서는 위의 패치 안테나를 이용하여 FSS superstrate에 사용에 따른 지향성 향상에 대해 살펴보고, 다음 장에서 입력 임피던스를 지향성 향상이 나타나는 대역과 일치시키는 방법을 설명한다.

먼저 공진 길이인 h 가 15, 16 그리고 17로 변할 때 thin FSS 안테나 복합체의 최대 지향성이 나타나는 주파수, 지향성 그리고 quality factor를 표 1에 나타내었다. FSS 어레이 크기는 $10 \times 20 (120 \times 120 \text{ mm})$ 로 두었고, 파라미터는 (1)의 값으로 고정하였다. 단위 셀 시뮬레이션에서 예측하였듯이 단위 셀의 첫 번째, 세 번째 모드에 해당하는 주파수에서 지향성이 향상됨을 볼 수 있다. 또한 공진 길의 증가에 따른 지향성 변화 정도가 단위 셀의 특성과 유사하다. 복합체의 quality factor가 단위 셀의 quality factor보다 낮는데, 이는 단위 셀 시뮬레이션에서는 무한한 FSS 어레이 개수 사용했기 때문이다. 두 대역에서 지향성은 패치 안테나에 비해 약 12 dB 향상되었다.

표 2에서 3가지 다른 FSS superstrate의 단위 셀 특성과 이 superstrate를 사용한 안테나 복합체의 특성을 나타내었다. 어레이 개수는 모두 10×20 으로 고정하였다. FSS-1 복합체의 quality factor는 14.69와 34.59이고, 지향성은 15.85와 13.73 dBi이다. FSS-2 복합체의 경우 낮은 대역의 quality factor는 단위 셀의 quality factor보다 매우 낮은 18.05이고, 높은 대역의 quality factor는 단위 셀의 quality factor와 유사한

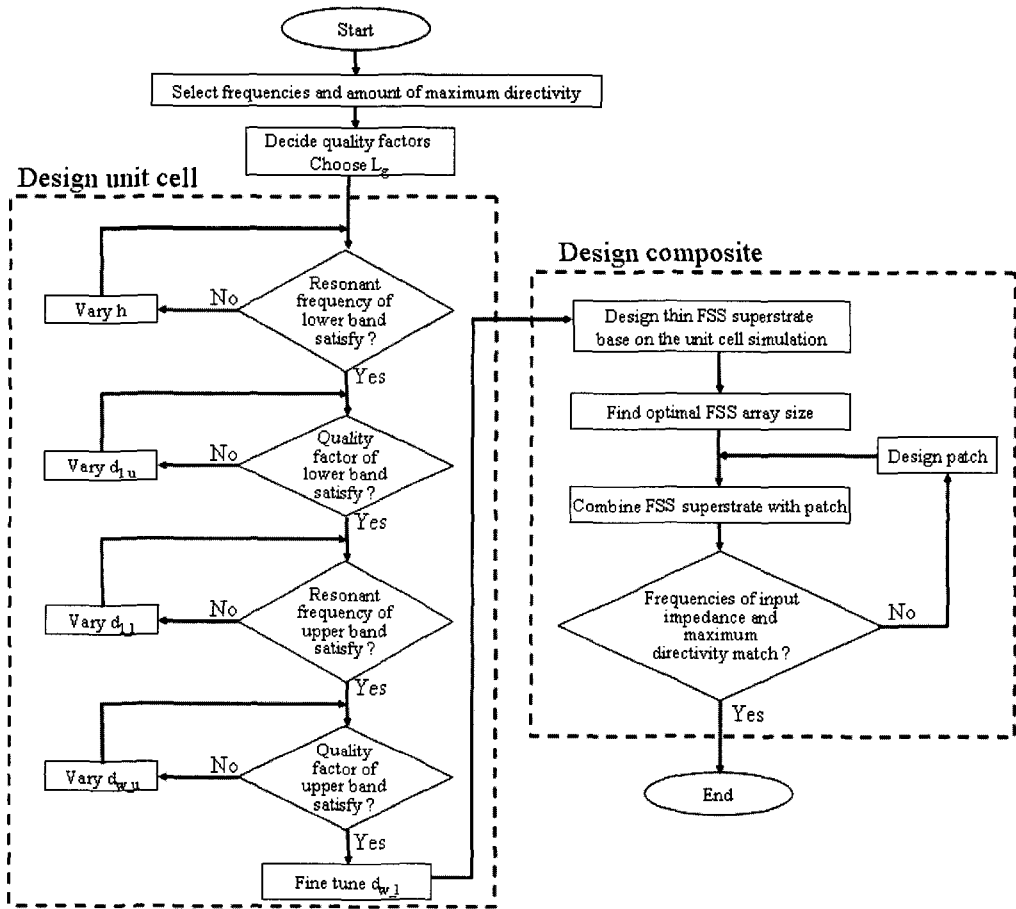


그림 7. 박판 FSS 복합체의 설계 순서
Fig. 7. Design procedure for the thin FSS composite.

표 1. h 의 변화에 따라 단위 셀과 FSS 복합체의 특성 비교(F : 최대 지향성이 나타나는 주파수(GHz), D : 최대 지향성(dBi), Q : Quality factor)

Table 1. Comparison of characteristics of the unit cell with those of the FSS antenna composites as a function of h (F : frequency with maximum directivity(GHz), D : maximum directivity(dBi), Q : quality factor).

		Lower band			Upper band		
		F	D	Q	F	D	Q
$h=15$	단위 셀	9.21	-	31.36	12.98	-	57.19
	복합체	9.23	18.96	23.22	12.60	19.37	41.02
$h=16$	단위 셀	8.66	-	30.88	11.98	-	54.13
	복합체	8.73	18.52	19.97	11.90	19.40	40.66
$h=17$	단위 셀	8.15	-	30.69	11.28	-	53.27
	복합체	8.20	17.74	22.03	11.30	18.70	39.22

33.68이다. 두 대역에서의 최대 지향성은 각각 19.04 dBi와 16.13 dBi이다. FSS-1 복합체와 FSS-2 복합체의

결과로부터 고정된 FSS 어레이 크기에서 높은 대역에서의 quality factor는 항상 낮은 대역의 quality fac-

표 2. 다른 quality factor에 따른 단위 셀과 FSS 복합체의 특성 비교

Table 2. Comparison of characteristics of the unit cell with those of the FSS composites as the three different quality factor.

	Lower band			Upper band		
	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>Q</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>Q</i>
FSS-1	$a=12, b=6, d_{l_f}=10, d_{l_u}=10.9, d_{w_f}=0.5, d_{w_u}=5.4, h=16, L_g=2.4$					
단위 셀	8.8	-	16.15	12.14	-	19.48
복합체	9	15.82	14.69	12.42	13.73	34.59
FSS-2	$a=12, b=6, d_{l_f}=10.5, d_{l_u}=11.4, d_{w_f}=0.5, d_{w_u}=5, h=16, L_g=1.5$					
단위 셀	8.93	-	37.04	12.294	-	37.7
복합체	9.21	19.04	18.05	12.71	16.13	33.68
FSS-3	$a=12, b=6, d_{l_f}=10.5, d_{l_u}=11.5, d_{w_f}=0.5, d_{w_u}=5, h=16, L_g=2$					
단위 셀	8.66	-	30.88	11.98	-	54.13
복합체	8.73	18.52	19.97	11.9	19.4	40.66

tor보다 높게 정해야 함을 알 수 있다. 또한 높은 대역에서의 지향성 향상 정도가 낮은 대역의 그 것보다 향상 낮기 때문에, 높은 대역의 quality factor를 높게 함으로써 고정된 물리적 크기로 두 대역에서의 지향성 향상 정도를 유사하게 할 수 있다.

따라서 단위 셀의 높은 대역의 quality factor를 낮은 대역의 quality factor보다 높도록 FSS-3을 설계하였다. 두 대역에서의 quality factor는 각각 30.88과 54.13으로 두 대역에서의 차이는 약 23이다. 이 FSS-3 복합체의 quality factor는 19.97과 40.66이다. 이는 FSS 어레이 개수가 충분치 않아 단위 셀의 quality factor보다는 작지만, 두 대역에서의 단위 셀과 복합체의 quality factor의 차이는 10.9와 13.47로 유사하다. 앞의 FSS-1과 FSS-2의 경우와 달리 두 대역에서

의 최대 지향성은 18.52 dBi와 19.40 dBi로 유사하다. 따라서 두 대역에서의 지향성 향상 정도를 유사하게 하기 위해서는 높은 대역의 quality factor를 낮은 대역의 quality factor보다 약 20 정도 높게 설계하는 것이 바람직하다.

FSS-3 복합체에 대해 FSS 어레이 개수를 6×12에서 14×28로 변화시켰을 때 최대 지향성이 나타나는 주파수 그리고 그 때의 지향성과 quality factor를 표 3에 나타내었다. FSS 어레이 개수가 증가할수록 두 대역에서의 quality factor는 증가하고, 단위 셀의 quality factor와 유사해짐을 볼 수 있다. FSS 어레이 개수가 14×28일 때 두 대역에서의 quality factor는 단위 셀의 quality factor와 유사해 짐을 볼 수 있다. 하지만 작은 FSS 어레이 개수로 지향성을 효율적으로 증가

표 3. FSS-3 복합체의 FSS 어레이 개수에 따른 단위 셀과 FSS 복합체의 특성 비교(*N*: FSS 어레이 개수)

Table 3. Comparison of characteristics of the unit cell with those of the FSS antenna composites as a function of the FSS array size for the FSS-3 superstrate(*N*: FSS array size).

	<i>N</i>	Lower band			Upper band		
		<i>F</i>	<i>D</i>	<i>Q</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>Q</i>
단위 셀	-	8.66	-	30.88	11.98	-	54.13
FSS 3 복합체	6×12	9.00	16.65	9.03	12.20	15.17	26.61
	8×16	8.90	16.56	15.72	12.10	16.27	31.06
	10×20	8.73	18.52	19.97	11.90	19.40	40.66
	12×24	8.71	18.27	24.11	11.88	19.34	44.64
	14×28	8.69	18.85	29.89	11.85	19.84	56.60

시키는 것을 최적의 FSS 어레이 개수로 생각한다면, 최적의 FSS 어레이 개수는 14×28 가 아니라 10×20 이다. 10×20 일 때 FSS 어레이 개수의 증가에 따른 지향성 향상 정도가 가장 크기 때문이다.

III. 박판 FSS 안테나 복합체의 제작 및 측정

제안한 FSS 안테나 복합체의 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 박판 FSS 안테나 복합체를 제작하였으며, 이를 그림 8에 나타내었다. 복합체는 박판 FSS superstrate와 이 superstrate 아래 패치 안테나로 구성된다. 4개의 기둥을 이용하여 FSS superstrate를 그라운드로부터 공진 길이 위에 위치하도록 하였다. 그림 1의 박판 FSS superstrate의 낮은 층과 높은 층은 하나의 유전층의 위 아래로 존재하며, 유전층의 유전율과 두께는 각각 2.2와 2.0828 mm이다. 유전층의 두께가 gap length(L_g)에 해당한다. 제작된 복합체의 파라미터 값은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} a = 12, b = 6, d_{l1} = 8.7, d_{lu} = 11.2, \\ d_{w1} = 1, d_{wu} = 4.9, h = 16 \end{aligned} \quad (2)$$

단위 셀 시뮬레이션에서 첫 번째와 세 번째 피크는 8.41 GHz와 11.67 GHz에서 나타난다. 앞에 설명한 것과 같이 두 대역에서 지향성 향상 정도를 유사하게 하기 위해 높은 대역의 quality factor를 낮은 대역의 quality factor보다 약 20보다 높게 정했다. 지향성을 효율적 향상시키는 최적의 FSS 어레이 개수는 10×20 이며 이 크기로 박판 FSS superstrate를 제작하

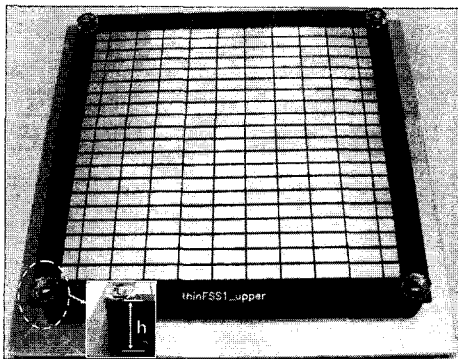


그림 8. 제작된 박판 FSS 안테나 복합체의 구조
Fig. 8. Geometry of a fabricated thin FSS antenna composite.

였다.

지향성 향상이 나타나는 두 대역에서의 박판 FSS superstrate 성능을 확인하기 위해 8.5 GHz와 12 GHz에서 동작하는 두 개의 사각 패치 안테나를 설계하였다. 두 패치 안테나의 길이는 8.7 mm와 6.3 mm이다. 두 패치 안테나에 사용된 유전층의 유전율은 3.38이고 두께는 0.508 mm이다. 편의상 두 패치를 'Patch-1'과 'Patch-2'로 명하였다. 'Patch-1'과 'Patch-2'의 주파수 특성과 이 두 패치 사용한 박판 FSS 안테나 복합체의 주파수 특성을 그림 9에 나타내었다. 그림으로부터 패치 안테나 위에 FSS superstrate를 올려두면 안테나의 동작 주파수가 약 300 MHz 아래로 떨어짐을 볼 수 있다. 이러한 동작 주파수 하향을 보상하기 위해 패치 안테나의 동작 주파수를 FSS superstrate의 지향성 향상이 나타나는 주파수보다 약 300 MHz 높게 설계해야 한다.

두 패치를 박판 FSS superstrate 아래 두어 FSS 안테나 복합체의 지향성을 각각 측정하였으며, 이를 그림 10에 나타내었다. 측정된 지향성 향상이 나타나는 주파수는 8.2 GHz와 11.7 GHz이고, 시뮬레이션 시에 지향성 향상은 8.39 GHz와 11.28 GHz에서 나타난다. 측정 결과와 시뮬레이션 결과는 약간의 차이를 보이지만, 제작상의 오차를 고려하면 이러한 차이는 무시할 수 있을 것이다. 측정된 지향성 향상이 나타나는 주파수는 FSS 안테나 복합체의 입력 임피던스 대역폭(반사 손실 ≤ -10 dB)과 일치함을 알 수 있다. 그 때의 지향성은 19.67 dBi와 21.38 dBi이다.

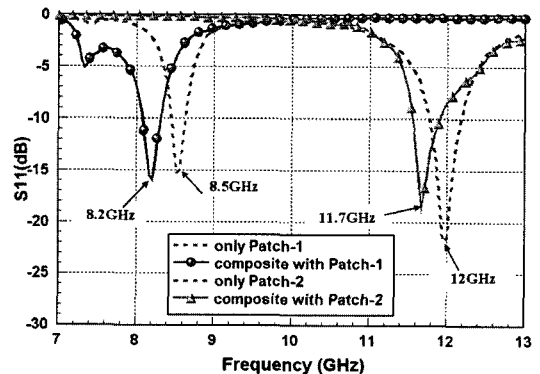


그림 9. 'Patch-1', 'Patch-2' 그리고 복합체의 S_{11}
Fig. 9. S_{11} characteristics of 'Patch-1' and 'Patch-2', and the composite.

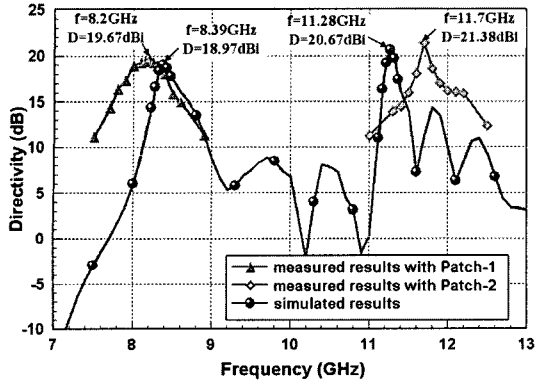
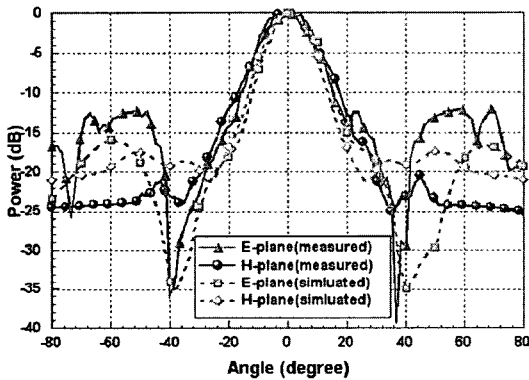
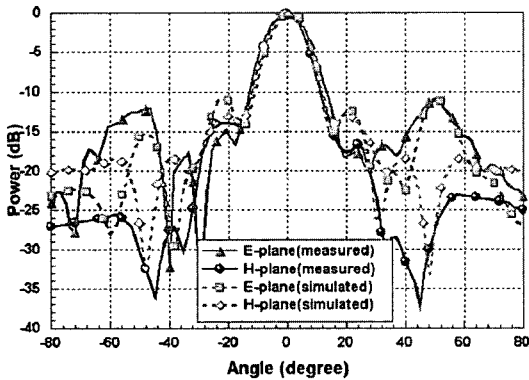


그림 10. 복합체의 측정된 지향성과 시뮬레이션 지향성

Fig. 10. Measured and simulated directivity of the composite.



(a) 낮은 대역(측정: 8.2 GHz, 시뮬레이션: 8.4 GHz)
(a) Lower band(measured: 8.2 GHz, simulated: 8.4 GHz)



(b) 높은 대역(측정: 11.7 GHz, 시뮬레이션: 11.3 GHz)
(b) Upper band(measured: 11.7 GHz, simulated: 11.3 GHz)

그림 11. FSS 복합체의 방사 패턴

Fig. 11. Radiation patterns of the FSS composist.

이는 단일 패치의 지향성(5~7 dBi)보다 15 dB 이상 향상된 값이다. 제작된 박판 FSS superstrate 아래 'Patch-1'과 'Patch-2'가 아닌 다른 패치를 두어 지향성을 측정하였는데, 지향성 패턴은 패치 안테나에 따라 크게 변하지 않았다. 이는 FSS 안테나 복합체 설계 시 패치 안테나와 FSS superstrate를 독립적으로 설계하여 나중에 결합시킬 수 있음을 의미한다.

그림 11은 최대 지향성이 나타나는 두 주파수에서 FSS 안테나 복합체의 시뮬레이션 된 방사 패턴과 측정된 방사 패턴을 나타낸다. 두 방사 패턴이 잘 일치함을 볼 수 있다.

IV. 결론

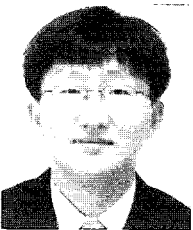
이 논문에서는 기존의 이중 대역 지향성 향상을 위한 FSS superstrate를 대체할 수 있는 박판 FSS superstrate를 제안하였다. 제안한 FSS superstrate는 하나의 유전층으로 이중 대역 지향성 향상을 할 수 있으며, 두 대역에서의 지향성 향상 정도를 쉽게 조절할 수 있다. 단위 셀 시뮬레이션을 이용하여 다양한 파라미터의 변화에 따른 단위 셀의 특성을 분석하였고, 이를 이용하여 제안한 FSS superstrate의 설계 방법을 제시하였다. 3개의 다른 FSS superstrate와 이를 이용한 안테나 복합체를 설계하였으며, 단위 셀과 복합체의 지향성과 quality factor 등의 특성을 비교하였다. 이로부터 두 대역에서 지향성 향상 정도를 유사하게 하기 위해서는 높은 대역의 quality factor를 낮은 대역의 quality factor보다 약 30 정도 높게 정해야 함을 보였다. 또한 최소의 FSS 어레이 개수로 지향성을 최대로 향상시키는 최적의 FSS 어레이 개수를 설명하고, 이 최적의 FSS 어레이 개수를 결정하였다. 시뮬레이션 결과를 토대로 박판 FSS superstrate와 superstrate의 지향성 향상이 나타나는 두 대역에서 동작하는 두 개의 패치 안테나를 각각 제작하였다. Superstrate가 패치 안테나 위에 존재하면 패치 안테나의 동작 주파수가 300 MHz 낮아지므로 이를 보상하기 위해 패치 안테나의 동작 주파수를 지향성 향상이 나타나는 주파수보다 300 MHz 정도 높게 설계해야 함을 보였다. 제작된 FSS 안테나 복합체의 동작 주파수와 지향성 향상이 나타나는 대역을 일치시켰다. 제작된 복합체의 지향성과 패턴을 측정

하였으며, 두 대역에서의 지향성은 19.67 dBi와 21.38 dBi이고, 측정된 패턴과 시뮬레이션 된 패턴은 매우 잘 일치함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] D. R. Jackson, N. G. Alexopoulos, "Gain enhancement methods for printed circuit antennas", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 33, no. 9, pp. 976-987, Sep. 1985.
- [2] D. R. Jackson, A. A. Oliner, "Leaky-wave analysis of the high-gain printed antenna configuration", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 36, pp. 905-910, Jul. 1988.
- [3] C. Cheype, C. Serier, M. Thevenot, A. Reineix, and B. Jecko, "An electromagnetic bandgap resonator antenna", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 50, no. 9, pp. 1285-1290, Sep. 2002.
- [4] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Application of electromagnetic bandgap(EBG) superstrates with controllable defects for a class of patch antennas as spatial angular filters", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 224-235, Jan. 2005.
- [5] A. P. Feresidis, J. C. Vardaxoglou, "High gain planar antenna using optimized partially reflective surfaces", *IEE Proc. Elect. Eng. Microw. Antennas Propag.*, vol. 148, no. 6, pp. 345-350, Dec. 2001.
- [6] A. P. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang, and J. C. Vardaxoglou, "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 209-215, Jan. 2005.
- [7] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "A novel design technique for control of the resonant frequency and quality factor of a frequency selective surface(FSS) screen for directivity enhancement of microstrip antenna", *Microwave & Optical Technology Letters*, vol. 43, no. 6, pp. 462-467, Dec. 2004.
- [8] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Design of a frequency selective surface(FSS) type superstrate for dual-band directivity enhancement of microstrip patch antenna", *IEEE Antennas & Propagation Society International Symposium*, vol. 43, no. 6, pp. 462-467, Jul. 2005.
- [9] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Thin frequency selective surface(FSS) superstrate with different periodicities for dual-band directivity enhancement", *IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Materials(IWAT)*, pp. 375-378, Mar. 2005.

이 동 현



2003년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)

2003년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 석·박사 통합과정

[주 관심분야] 마이크로스트립 안테나 설계 및 해석, 안테나 이득

향상을 위한 주기구조 설계 및 해석, UWB 안테나, RFID 리더 및 태그 안테나, 소형 안테나

이 영 주



1998년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2005년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2005년 3월~현재: 삼성전자 정보통신총괄 무선사업부 선행 Lab. 책임연구원

[주 관심분야] 마이크로스트립 안테나 설계, 공간 필터 설계(EBG, FSS), 이동통신용 소형 안테나 설계, RF 시스템 설계

여 준 호



1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 8월: 미국 Pennsylvania State University 전기공학과 (공학박사)
1994년 3월~1999년 6월: 국방과학

연구소 연구원

2003년 9월~2004년 6월: Postdoctoral Research Scholar, 미국 Pennsylvania State University

2004년 8월~현재: 한국전자통신연구원 RFID 시스템연구팀 선임연구원

[주 관심분야] Design of conformal fractal antennas and wideband antennas for wireless applications, Development of numerically efficient techniques for the analysis of microwave antennas, circuits and scattering problems, Design of high directive electromagnetic band gap(EBG) antennas for multiband operation, and Semi-passive & Active RFID sensor tag technology

박 위 상



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1982년 6월: University of Wisconsin Madison 전자공학과 (공학석사)
1986년 8월: University of Wisconsin Madison 전자공학과 (공학박사)
1976년 7월~1978년 11월: 삼성전

자 공업주식회사

1984년 1월~1986년 8월: University of Wisconsin-Madison, TA 및 RA

1986년 8월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
[주 관심분야] Design of Microstrip Antennas, Full-Wave Analysis of Microstrip Structures, Design of Passive Microstrip Devices by Network Modeling, Measurement and Simulation of EMI/EMC for Cellular Phones

Raj Mittra



현재: 미국 Pennsylvania State University 전기공학과 교수

[주 관심분야] Communication Antenna Design, RF circuits, computational electromagnetics, electromagnetic modeling and simulation of electronic packages, EMC analysis,

radar scattering, frequency selective surfaces, microwave and millimeter wave integrated circuit