

사각 링 스트립선로를 결합시킨 소형 3층 EBG 구조

A Compact 3-Layer EBG Structure with Square Ring Stripline

안성남 · 신동구* · 김상인 · 추호성** · 김문일* · 박익모 · 임한조

Sung-Nam An · Dong-Gu Shin* · Sang-In Kim · Ho-Sung Choo** ·
Moon-Il Kim* · Ikmo Park · H. Lim

요 약

본 논문에서는 사각 패치와 사각 링 스트립선로가 전자기적으로 결합된 3층 구조의 소형화된 EBG 구조를 제안하였다. 제안한 EBG 구조는 상층의 사각 패치와 하층의 사각 링 스트립선로가 비아에 의해 접지면에 연결되었다. 반사위상 EM 시뮬레이션을 통해 EBG 구조 표면에서의 반사위상을 계산하여 EBG 구조의 밴드갭 특성을 연구하였고, 반사위상에서 나타나는 밴드갭과 투과계수(S_{21})에서 나타나는 밴드갭이 일치하는 것을 EM 시뮬레이션을 통해 확인하였으며, 측정은 제작이 용이한 프로브 안테나를 사용하여 EBG 구조의 표면을 진행하는 표면파의 투과계수를 측정하였다. 제안한 EBG 구조는 동일한 크기의 기존 3층 구조에 비하여 밴드갭이 나타나는 주파수가 약 34 % 감소되었다. 측정된 결과 제안한 구조는 0.930 GHz에서 0.945 GHz까지의 밴드갭을 갖는다.

Abstract

In this paper we propose the compact three-layer EBG structure. The unit cell of the proposed EBG structure is composed of a square patch in the upper layer and a square ring stripline in the lower layer that are connected to the ground plane through conducting vias. Reflection phase analysis method and tangential transmission method were considered to accomplish effective EM simulation and measurement. EM simulation results indicate that bandgap characteristics of the EBG structure using both methods is nearly identical. Parametric studies have been performed with the EM simulator to analyze the properties of the EBG structure by investigating the phase shift of the normally incident plane wave, and the transmission measurements between simple monopole antennas positioned near the EBG structure have been done. The operating frequency bandgap of the proposed EBG structure is about 34 % lower than the conventional EBG structure with the same size. Measured results show bandgap from 0.930 GHz to 0.945 GHz.

Key words : EBG, High-Impedance, Photonic Bandgap, Surface Waves

I. 서 론

최근 Single Negative(SNG), Double Negative(DNG), Negative Refractive Index(NRI), Left-Handed Material(LHM)과 같이 특정주파수 대역에서 자연 상태에서는 나타나지 않는 전자기적 반응을 가지는 인위적

물질인 메타물질(metamaterial)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{[1]~[5]}. 마이크로파 영역에서 크게 부각되고 있는 Electromagnetic Bandgap(EBG) 구조 중 High Impedance Electromagnetic Surface(HIES) 구조는 특정 주파수 대역에서 magnetic conductor처럼 동작하므로 메타물질의 범주에 포함할 수 있다^{[6]~[8]}.

「본 논문은 2004년도 유비쿼터스 컴퓨팅 프론티어 사업단의 연구비와 홍익대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.」
아주대학교 전자공학부(School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

*고려대학교 전파통신공학과(Department of Radio Communications Engineering, Korea University)

**홍익대학교 전기전자공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20041210-162

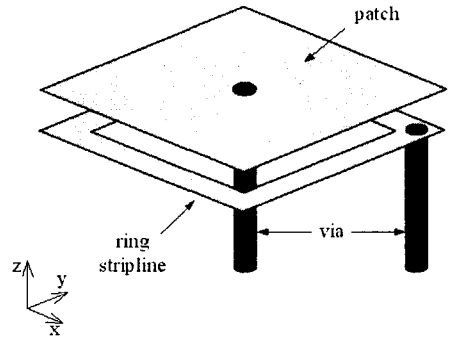
· 수정완료일자 : 2005년 3월 8일

EBG 특성을 갖는 구조는 전파 상수 β 와 주기 a 가 $\beta a = \pi$ 의 관계를 만족시키는 전자기파의 진행을 억제한다. 초기의 EBG 구조는 작은 전파상수를 가졌기 때문에 상대적으로 큰 주기가 필요해서, EBG 구조의 전체 크기가 커지는 단점이 있었다. Sievenpiper는 패치와 비아로 구성된 큰 전파상수를 갖는 HIES 구조를 제안하였으며, 그로 인해 주기가 작아지면서 EBG 구조의 크기를 줄일 수 있었다^{[7],[8]}.

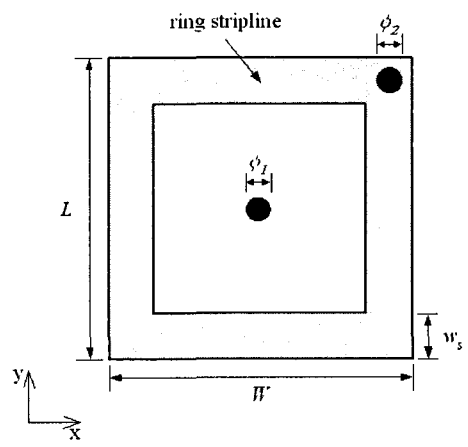
안테나로부터 유전체에 인가된 전자기파는 공기와 기판 사이의 불연속에 의해 발생하는 표면파(surface wave)로 인하여 기판의 가장자리에서 회절현상이 발생한다. 이러한 회절현상으로 인해 안테나의 복사패턴에 리플 또는 널이 생기게 되며, 회절(diffraction) 현상으로 인해 후방복사가 커지면서 안테나의 효율을 저해하는 요인이 된다. EBG 구조는 특정 주파수에서 표면파가 가장자리까지 진행하는 것을 막아주어 복사 패턴의 리플을 줄이고 복사효율을 증가시킨다^{[9]-[11]}. 또한 일부 EBG 구조의 표면은 높은 전자기적 임피던스를 가지므로 magnetic conductor처럼 동작하고 이로 인하여 안테나를 접지평면 가까이 위치시키더라도 영상 전류(image current)가 동위상을 갖기 때문에 안테나의 전류가 상쇄되지 않아 성능이 우수한 low profile 안테나의 설계가 가능하다^{[12],[13]}. 이처럼 EBG 구조가 안테나의 성능을 향상시키는 데 크게 기여하기 때문에, 이를 다양한 안테나에 응용하는 연구가 많이 수행되었다. EBG 구조는 이를 응용한 안테나 설계뿐만 아니라, 주기적 구조와 전송선로 이론을 기반으로 한 등가회로 모형^[14], HIES와 계단 모양의 유전체 기판의 비교^[15] 등 HIES의 고유한 특성에 대한 연구도 많이 수행되었다.

전자기적 소자의 소형화의 필요성에 따라 EBG 구조의 소형화는 주 관심의 대상이 되고 있다. 일반적인 EBG 구조는 캐패시턴스(capacitance) 값을 증가시켜 소형화를 구현하기 때문에 밴드갭 대역폭이 약화되는 문제를 가지고 있다. 본 논문에서는 사각 패치가 비아를 통해 접지면으로 연결된 구조와 비아를 통해 접지면에 연결된 사각 링 스트립선로가 커플된 구조를 이용하여 캐패시턴스뿐만 아니라 인덕턴스(inductance) 또한 증가시킬 수 있는 EBG 구조를 제안하였다. 한편, EM 시뮬레이션과 측정을 효율적으

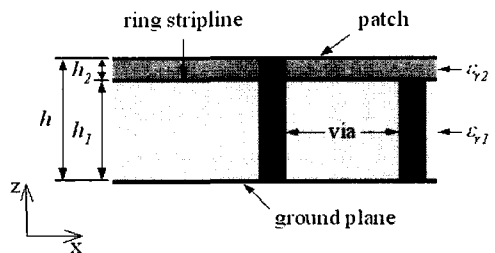
로 수행하기 위해서 EM 시뮬레이션은 반사위상 값을 통한 방법을 이용하였고, 측정은 투과계수 값을 통한 방법으로 측정하였으며, 반사위상 값을 통한 방법과 투과계수 값을 통한 방법의 밴드갭 특성이 일치함을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 EBG 구조는 동일한 크기의 기존 EBG 구조에 비하여 공진



(a) 입체도
(a) 3-dimensional view



(b) 평면도
(b) Top view



(c) 측면도
(c) Side view

그림 1. 제안한 EBG 구조의 단위 셀 구조
Fig. 1. EBG unit cell structure.

주파수를 34 % 감소시켜 소형화하였다. 또한 기존 구조와 달리 여러 대역에서 EBG 특성을 가짐으로써 다중 대역 시스템에 응용할 수 있을 것이다.

II. EBG의 구조

그림 1은 제안한 EBG 구조의 단위셀 구조도이다. 상층의 사각 패치는 길이 L , 폭 W , 높이 h 이며, 사각 패치의 중앙지점을 지름 ϕ_1 의 비아를 이용하여 접지면과 연결하였다. 하층의 사각 링 스트립선로의 폭은 w_s 이고, 모서리 부분에 지름 ϕ_2 의 비아를 통해 접지면과 연결하였다. 사각 링 스트립선로의 바깥쪽의 길이와 폭은 사각 패치와 동일하다. 사각 링 스트립선로 아래 기판은 비유전율 ϵ_{r1} 이고 두께 h_1 이며, 사각 패치와 사각 링 스트립선로 사이의 기판은 비유전율 ϵ_{r2} , 두께 h_2 이다.

제안한 EBG 구조의 단위 셀을 2차원으로 배열한 구조의 측면도를 그림 2(a)에 나타내었고, 그림 2(b)는 기존의 3층 EBG 구조의 측면도이며, g 는 패치 사이의 갭(gap), a 는 배열 주기이다^[7]. 기존의 3층 EBG 구조는 상층의 사각 패치와 하층의 사각 패치가 위 기판에 의해 분리되어 있고, 각각의 사각 패치는 비아를 통해 접지면에 연결되어 있다. 기존의 구조에서 표면에 표면파가 진행하면 패치의 가장자리에 전하가 집중되어 캐패시턴스 값을 가지고, 패치 사이의 전압 차로 인해 비아를 통해 전류가 흐르면서 인덕턴스 값을 가지게 되어 LC 병렬회로처럼 동작하

여 표면파의 진행을 억제시킨다^{[7],[8]}. 그리고 상층과 하층의 패치가 겹쳐지는 면적이 커질수록 전기장의 세기가 커져서 큰 캐패시턴스 값을 얻을 수 있기 때문에 하층 패치가 없는 2층 구조보다 EBG 구조의 크기를 줄일 수 있다^{[7],[8]}. 본 논문에서 제안한 EBG 구조는 상층의 사각 패치와 하층의 사각 링 스트립선로 사이에 형성된 전기장에 의해 캐패시턴스 값을 가지고, 하층의 인접한 사각 링 스트립선로 사이의 전자기적 결합에 의해 상호 인덕턴스 값을 증가시켜 공진 주파수를 감소시켰다.

III. EBG 구조의 특성

제안한 EBG 구조의 설계를 위한 EM 시뮬레이션은 CST사의 Microwave Studio로 하였으며, 사각 링 스트립선로 아래의 기판은 비유전율 $\epsilon_{r1}=10.2$ 이고 두께 $h_1=1.27$ mm인 RT/Duroid 6010 기판을 사용하였다. 사각 패치와 사각 링 스트립선로 사이의 기판은 비유전율 $\epsilon_{r2}=10.2$ 이고 두께 $h_2=0.254$ mm인 RT/Duroid 6010으로 하였다.

본 논문에서는 제안한 EBG 구조의 특성을 분석하기 위해서 반사위상(reflection phase) EM 시뮬레이션을 먼저 수행하였다. 반사위상 EM 시뮬레이션은 periodic 경계조건(boundary condition)을 갖는 단일 주기의 EBG 구조 표면에 평면파가 수직으로 입사될 때, EBG 표면에서의 반사계수의 위상(이하 반사위상)을 계산한다. Electric conductor의 경우 표면에서의 반사위상이 180° 이고 magnetic conductor는 0° 의 반사위상을 갖는 반면, EBG 구조의 표면은 주파수에 따른 반사위상이 180° 부터 -180° 까지 연속적으로 변하게 된다. 이때 EBG 구조가 magnetic conductor처럼 동작하는 90° 의 반사위상을 갖는 주파수부터 -90° 의 반사위상을 갖는 주파수까지의 구간을 EBG 구조의 밴드갭으로 정의하였다^[7]. 또한 밴드갭의 공진 주파수는 반사위상이 0° 인 주파수로 정의하였으며 상대 대역폭(fractional bandwidth)을 이용하여 대역폭을 나타내었다.

제안한 EBG 구조의 특성은 설계변수에 대한 parametric study를 통해 분석하였다. 설계변수는 표 1의 값들을 기준으로 하였으며 하나의 변수가 변할 때, 다른 값들은 표 1의 값으로 고정하였다. 아래 기

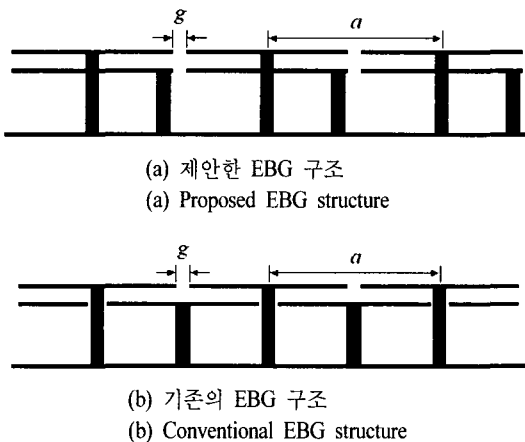


그림 2. 3층 EBG 구조
Fig. 2. 3 layer EBG structure.

표 1. 제안한 EBG 구조의 설계변수

Table 1. The design parameter of the proposed EBG structure.

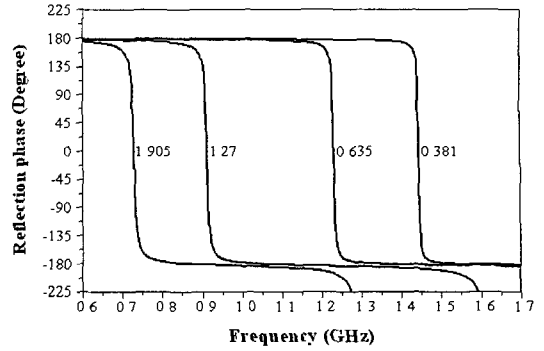
	설계변수	길이(mm)
사각 패치	L	7.1
	W	7.1
	ϕ_1	0.3
	h	1.524
	g	0.1
사각 링 스트립선로	ws	1.1
	ϕ_2	0.3
	$h1$	1.27
	$h2$	0.254
	ϵ_{r1}	10.2
	ϵ_{r2}	10.2

판의 두께, 패치 사이의 갭(링 스트립선로 사이의 갭), 기판의 유전율, 그리고 기판 사이의 링 스트립선로의 폭에 대해서 분석하였으며, 나머지 변수에 대해서는 간략히 언급하였다.

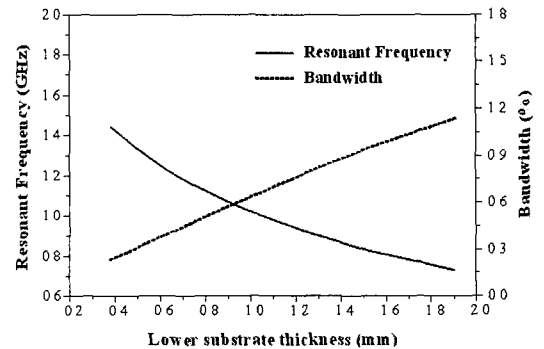
아래 기판의 두께 변화에 따른 특성을 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 기판의 두께가 변할 때의 반사위상을 나타내고, 그림 3(b)는 기판의 두께에 대한 공진 주파수와 대역폭을 나타낸다. 기판의 두께가 0.381 mm에서 1.905 mm로 증가함에 따라 밴드갭의 공진 주파수는 1.445 GHz에서 0.729 GHz로 감소하고, 밴드갭의 대역폭은 0.24 %에서 1.14 %로 증가한다. EBG 구조를 간단히 모델링한 LC 병렬회로에서 공진 주파수는 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 이고 대역폭은 $\sqrt{L/C}$ 에 비례한다^[7]. 아래 기판의 두께가 증가할수록 인덕턴스 값이 증가하므로 공진주파수가 감소하고 대역폭이 증가한다. 이 특성은 기존의 3층 구조에서 인덕턴스 값이 식 (1)과 같이 아래 기판의 두께의 함수로 표현되는 것과 유사한 경향을 보인다^[7].

$$L = \mu h \tag{1}$$

설계변수 중에서 갭(g)의 변화는 제안한 EBG의 특성을 결정짓는 가장 중요한 변수이다. 그림 4(a)는 갭의 크기가 0.3 mm 이하일 때의 반사위상을 나타낸다. 갭의 크기가 감소할수록 공진 주파수가 낮아지고 대역폭은 증가하게 된다. 이는 갭이 작아질수



(a) 반사위상 변화
(a) Variation of reflection phase

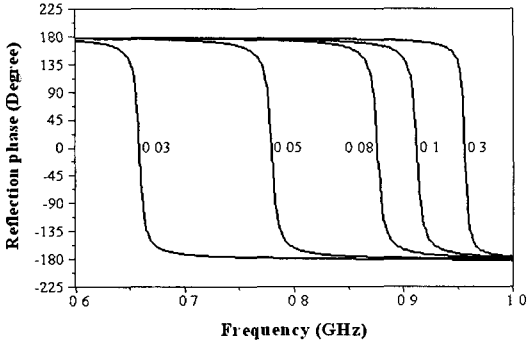


(b) 공진 주파수와 대역폭
(b) Resonant frequency and bandwidth versus lower substrate thickness

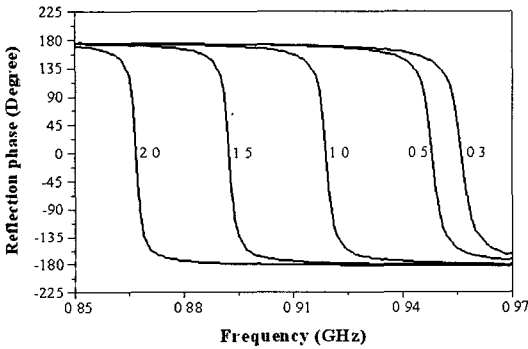
그림 3. 아래 기판의 두께 변화에 따른 특성
Fig. 3. Characteristics of EBG structure with respect to the thickness of lower substrate.

록 링 스트립선로 사이에 자기적 결합이 강해져서 캐패시턴스 값의 변화보다 링 스트립선로가 갖는 인덕턴스 성분의 증가량이 크기 때문이다. 그림 4(b)는 갭의 크기가 0.3 mm 이상일 때 반사위상을 나타낸다. 갭의 크기가 증가할수록 링 스트립선로 사이의 거리가 멀어지면서 자기적 결합이 감소하여 패치와 링 스트립선로 사이의 캐패시턴스 성분이 우세하게 나타나기 때문에 공진 주파수는 낮아지고 대역폭은 감소하게 된다. 따라서 갭이 0.3 mm 이상일 때는 캐패시턴스 성분이 증가하게 된다. 그림 4(c)는 갭의 크기에 대한 공진 주파수와 대역폭을 나타낸다. 대역폭은 갭이 커짐에 따라 갭이 0.3 mm 이하일 때는 급격하게 감소하다 0.3 mm 이상에서 완만하게 감소한다. 공진 주파수는 0.3 mm 이하에서는 증가하고 그 이상일 때는 감소하게 된다. 갭에 대한 대역폭과

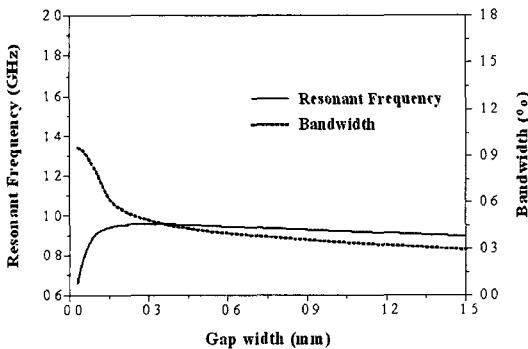
공진 주파수의 변화를 통해 갭의 크기가 작을 때는 인덕턴스 값이 커지고, 갭의 크기가 클 때는 캐패시턴스 값이 커지는 것을 알 수 있다.



(a) 갭이 0.3 mm 이하일 때, 반사위상 변화
(a) Variation of reflection phase for gap width smaller than 0.3 mm



(b) 갭이 0.3 mm 이상일 때, 반사위상 변화
(b) Variation of reflection phase for gap width greater than 0.3 mm



(c) 공진 주파수와 대역폭
(c) Resonant frequency and bandwidth versus gap width

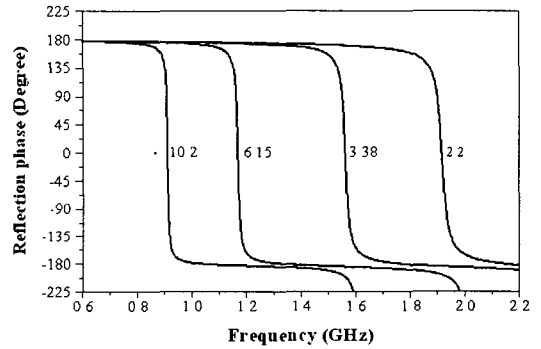
그림 4. 갭의 변화에 따른 반사위상 특성
Fig. 4. Characteristics of EBG structure with respect to the width of gap.

기판의 유전율은 3층 EBG 구조의 캐패시턴스와 가장 밀접한 관련이 있다. 기존의 3층 구조에서 위 기판의 두께(h_2)가 얇을 경우, 식 (2)에서처럼 캐패시턴스 값은 기판의 유전율에 비례하게 된다^[7].

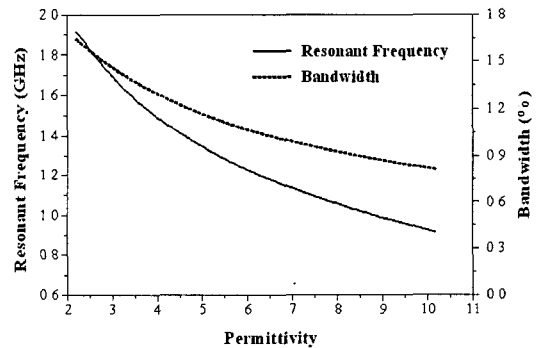
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{h_2}$$

A : the area of overlapping plates (2)

제안한 EBG 구조에서 기판의 유전율의 변화에 따른 특성을 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)는 기판의 유전율에 따른 반사위상을 나타내고, 그림 5(b)는 기판의 유전율에 대한 공진 주파수와 대역폭을 나타낸다. 기판의 유전율이 2.2에서 10.2로 증가함에 따라 밴드갭의 공진 주파수는 1.916 GHz에서 0.912 GHz로 감소하고, 밴드갭의 대역폭은 1.64 %에서



(a) 반사위상 변화
(a) Variation of reflection phase

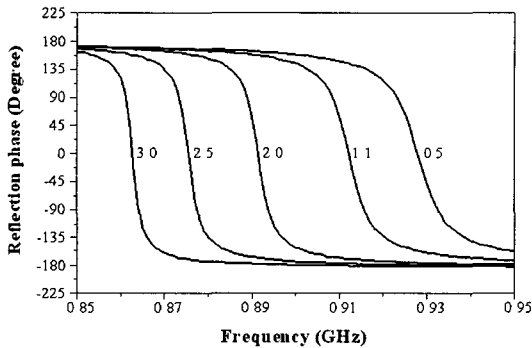


(b) 공진 주파수와 대역폭
(b) Resonant frequency and bandwidth versus substrate permittivity

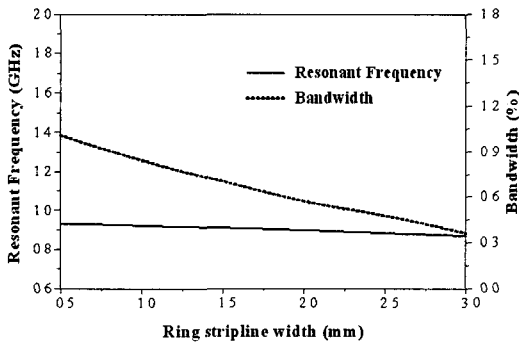
그림 5. 기판의 유전율 변화에 따른 특성
Fig. 5. Characteristics of EBG structure with respect to the permittivity of substrate.

0.81 %로 감소한다. 이 결과는 기판의 유전율이 증가할수록 상층 사각 패치와 하층의 사각 링 스트립선로 사이의 전기장의 세기가 커져서 기존의 3층 구조와 마찬가지로 캐패시턴스 값이 증가하기 때문이다.

그림 6(a)는 사각 링 스트립선로의 폭의 변화에 따른 반사위상을 나타내고, 그림 6(b)는 스트립선로의 폭에 대한 공진 주파수와 대역폭을 나타낸다. 사각 스트립선로의 폭이 0.5 mm에서 3.0 mm로 증가함에 따라 밴드갭의 공진 주파수는 0.928 GHz에서 0.863 GHz로 감소하고, 밴드갭의 대역폭은 1.01 %에서 0.36 %로 감소한다. 하층의 사각 링 스트립선로의 폭이 커지면 상층의 사각 패치와 하층의 링 스트립선로 사이의 전기장의 세기가 커져서 캐패시턴스가 증가하고 링 스트립선로의 인덕턴스 값이 감소하게 된다. 따라서 공진주파수는 $1/\sqrt{LC}$ 이므로 그 변



(a) 반사위상 변화
(a) Variation of reflection phase



(b) 공진 주파수와 대역폭
(b) Resonant frequency and bandwidth versus ring stripline width

그림 6. 링 스트립선로의 폭 변화에 따른 특성
Fig. 6. Characteristics of EBG structure with respect to the width of ring stripline.

화량은 크지 않고 대역폭은 $\sqrt{L/C}$ 에 비례하여 감소하게 된다.

주요 변수 이외의 나머지 변수에 따른 특성은 다음과 같다. 사각 패치 크기가 증가함에 따라 사각 패치와 사각 링 스트립선로 사이의 캐패시턴스가 증가하기 때문에 공진 주파수와 대역폭 모두 감소하고, 위 기판의 두께가 커지면 사각 패치와 사각 링 스트립선로 사이의 커플링이 약화되기 때문에 공진 주파수와 대역폭이 증가한다. 한편, 비아의 지름이 커지면, 공진 주파수와 대역폭이 모두 증가하지만 변화량은 크지 않다.

이상으로 변수의 변화에 따른 특성을 살펴보았으며, 이를 바탕으로 설계된 EBG 구조는 표 1의 설계 변수 값을 갖는다. 설계된 EBG 구조의 반사위상을 그림 7에 나타내었고, 특성 비교를 위해서 그림 2(b)에 나타낸 기존 EBG 구조의 반사위상을 그림 7에 동시에 나타내었다. 그림 2(b)의 설계변수는 상층 사각 패치의 폭과 길이가 하층 사각 패치의 폭과 길이와 같고, 나머지 변수는 그림 2(a)와 동일하다. 그림 2(b)에서 하층 사각 패치 사이의 간격은 0.1 mm이며, 하층 사각 패치가 상층의 사각 패치로 연결되는 비아와 단락되지 않게 하기 위해서 비아로부터 0.1 mm 간격을 유지하도록 하층 사각 패치의 모서리를 잘라냈다. 그림 7에서 공진 주파수를 비교했을 때, 제안된 구조는 0.912 GHz이고 기존의 구조는 1.38 GHz로서 제안된 구조는 기존의 EBG에 비해서 34 % 감소되었다. 이러한 소형화는 무선 통신에서 매우 중요한 요소이기 때문에, 제안한 EBG 구조는 유용성이 있다.

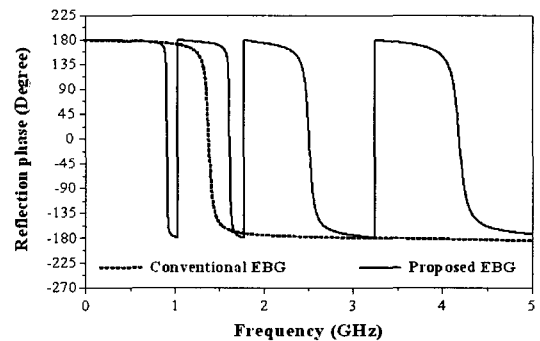


그림 7. EBG 구조의 반사위상
Fig. 7. Reflection phase of EBG structure.

IV. 측정 결과 및 고찰

EBG 구조의 특성을 측정하는 방법은 크게 두 가지가 있다^[7]. 첫 번째는 혼 안테나를 이용하여 EBG 구조 표면에서의 반사위상을 구하는 방법이고, 두 번째는 간단한 모노폴 안테나를 EBG 구조의 표면 가까이 위치시켜 두 안테나 사이의 투과계수를 측정하는 방법이다. 첫 번째 방법은 흡수체(absorber)로 둘러싸인 무반사실 내에서 두 개의 혼 안테나를 옆으로 나란히 위치시키고, 송신용 혼 안테나에서 발생한 평면파가 표면에 수직으로 입사되도록 EBG 구조를 안테나로부터 일정한 거리가 떨어진 곳에 배치한다. 송신용 안테나에서 입사된 평면파는 EBG 구조의 표면에서 반사하여 수신용 안테나에 의해 검출되어 반사파의 반사위상을 구할 수 있다. 또한, EBG 구조 대신 도체판(metal plane)을 배치하여 수신 안테나에서 검출한 도체판에 대한 반사위상을 EBG 구조의 반사위상을 계산하기 위한 기준으로 삼는다. 두 번째 방법은 EBG 구조의 표면에 표면파를 인가하여 포트 1에서 포트 2까지 전달되는 표면파의 크기를 알아내는 방법이다. 측정을 위해 사용되는 소형 모노폴 안테나는 표면파의 편파(polarization)를 구분하기 위해 안테나의 배치를 달리한다. TM 모드의 표

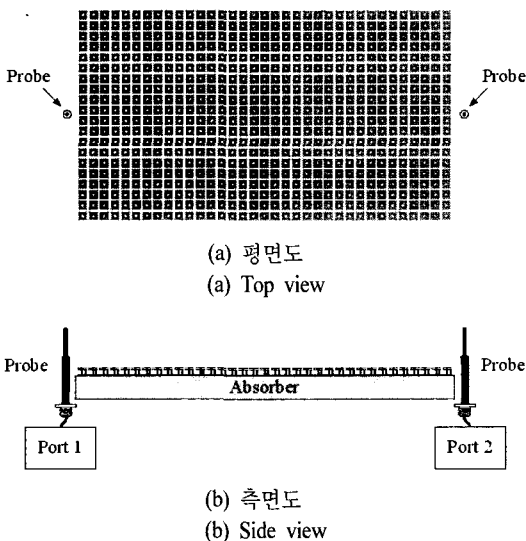


그림 8. 모노폴 프로브 안테나를 이용한 TM 표면파 측정
Fig. 8. TM surface wave measurement using monopole probe antennas.

면파는 그림 8에서처럼 EBG 구조의 가장자리에 표면과 수직으로 작은 프로브(probe) 안테나를 위치시켜 EBG 구조의 표면에 인가되도록 하였으며, TE 모드의 표면파는 그림 9에서처럼 EBG 구조의 가장자리에 표면과 평행하게 작은 프로브 안테나를 위치시켜 EBG 구조의 표면에 인가되도록 한다. 그리고 불요파가 접지면에 인가되는 것을 방지하기 위해 EBG 구조 아래에 흡수체를 사용한다.

EBG 구조의 밴드갭 특성은 EBG 구조의 고유한 특성으로 반사위상 방법을 통한 밴드갭과 투과계수 방법을 통한 밴드갭은 동일한 주파수 대역에서 나타난다. 따라서 EM 시뮬레이션과 측정시 적절한 방법을 선택하여 연구를 진행할 필요가 있다. EM 시뮬레이션을 수행할 때, 반사위상 방법은 단일 주기의 EBG 구조에 대해서 해석하기 때문에 해석 시간이 빠르다는 장점이 있다. 이에 비해 투과계수 방법은 EBG 구조가 여러 주기로 배열되어 있기 때문에 계산영역이 커져서 해석시간이 급격하게 증가하므로 시간의 제약을 많이 받는다. 따라서 EBG 구조의 경향을 조사하기 위한 parametric study는 반사위상 방법이 훨씬 유리하다. 측정 시, 반사위상 값을 통한 측정은 두 개의 혼 안테나가 필요하고 무반사실에서 수행되어야 하기 때문에 측정 환경 구성이 쉽지 않고, 반사위상 도표를 얻기 위해 EBG 구조에 대한 반

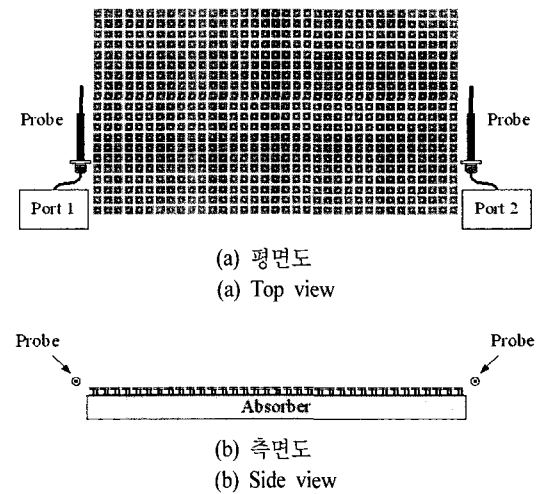


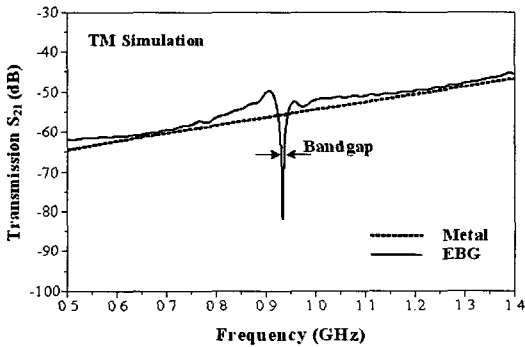
그림 9. 모노폴 프로브 안테나를 이용한 TE 표면파 측정
Fig. 9. TE surface wave measurement using monopole probe antennas.

사위상을 도체판에 대한 반사위상으로 정규화(normalization) 해야 번거로움이 있다. 그러나 투과계수 값을 통한 측정은 측정용 안테나를 동축 케이블을 이용하여 쉽게 제작할 수 있고, 투과계수 도표를 얻기 위한 중간 계산과정이 없기 때문에 반사위상 값을 통한 측정보다 선호된다. 따라서 본 논문에서는 측정시 투과계수 값을 통한 측정 방법을 이용하였다.

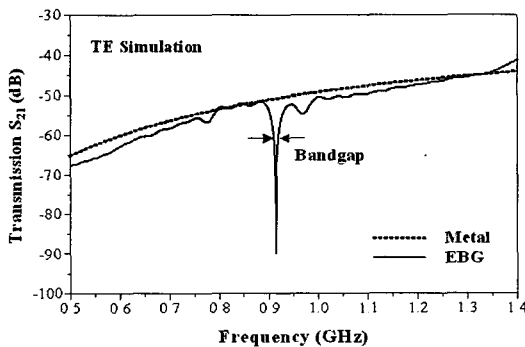
투과계수의 크기를 측정하기에 앞서 위상변화 값을 통한 밴드갭 특성과 투과계수 값을 통한 밴드갭 특성을 비교하기 위해 투과계수 값을 얻기 위한 EM 시뮬레이션을 수행하였다. EM 시뮬레이션을 위한 단위셀의 설계변수는 표 1과 같고, EBG 구조는 x 방향으로 35 주기, y 방향으로 20 주기를 갖도록 설계되어 전체 크기는 $255 \times 145 \text{ mm}^2$ 이다.

투과계수 값을 통한 EM 시뮬레이션 결과를 그림 10에 나타내었다. EBG 구조의 밴드갭 특성은 도체

판에 대한 TM 모드와 TE 모드의 S_{21} 과 비교하여 확인하였다. EBG 구조의 밴드갭은 EBG 구조의 투과계수가 도체판의 투과계수보다 크게 감소하는 구간으로 정의되므로^[7], 본 논문에서는 0.85 GHz부터 1.0 GHz까지의 구간에서 EBG 구조의 S_{21} 값이 도체판의 S_{21} 평균값보다 10 dB 낮은 값을 기준으로 정의하였다. 그림 10(a)의 TM 모드에서 밴드갭의 공진 주파수는 0.93 GHz이고, 그림 10(b)의 TE 모드에서 밴드갭의 공진 주파수는 0.914 GHz로서 그림 7의 반사위상 EM 시뮬레이션에서 얻은 밴드갭 공진 주파수 0.912 GHz와 비교했을 때, 거의 일치한다. 위상변화 값을 통한 EM 시뮬레이션과 투과계수 값을 통한 EM 시뮬레이션 결과 동일한 주파수 대역에서 밴드갭 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 투과계수 값을 통한 방법으로 측정된 결과를 그림 11에 나타내었다. 측정은 Agilent사의 E5071B Network analyzer

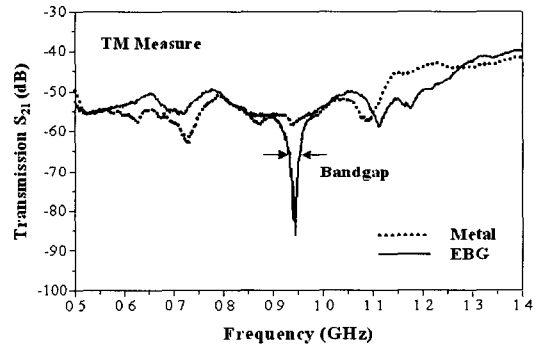


(a) TM 모드
(a) TM mode

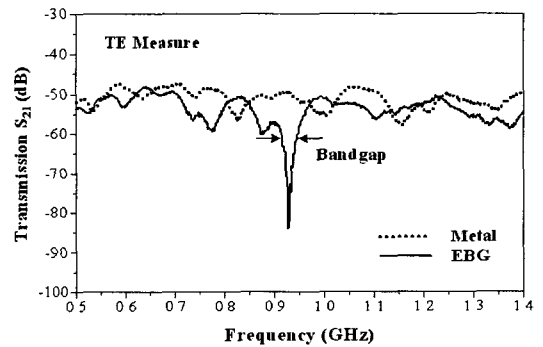


(b) TE 모드
(b) TE mode

그림 10. EBG 구조의 S_{21} EM 시뮬레이션
Fig. 10. S_{21} EM simulation of EBG structure.



(a) TM 모드
(a) TM mode



(b) TE 모드
(b) TE mode

그림 11. EBG 구조의 S_{21} 측정 결과
Fig. 11. S_{21} measurement of EBG structure.

를 사용하였다. 그림 11(a)의 TM 모드의 밴드갭은 0.85 GHz에서 1.0 GHz까지의 구간에서 EBG의 S_{21} 값이 도체판의 S_{21} 평균값 -56 dB보다 -10 dB 낮은 -66 dB를 기준으로 0.930 GHz부터 0.955 GHz까지이고, 그림 11(b)의 TE 모드의 밴드갭은 0.85 GHz에서 1.0 GHz까지의 구간에서 EBG의 S_{21} 값이 도체판의 S_{21} 평균값 -51 dB보다 -10 dB 낮은 -61 dB를 기준으로 0.915 GHz부터 0.945 GHz까지이며, TM 모드와 TE 모드를 모두 만족시키는 밴드갭은 0.930 GHz에서 0.945 GHz까지이다. 그림 10의 시뮬레이션 결과와 그림 11의 측정 결과 사이에 약간의 차이가 있지만, 도체판을 기준으로 밴드갭 특성을 비교했을 때, S_{21} 측정 결과는 EM 시뮬레이션을 통해 예측한 값과 일치한다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 사각 패치와 사각 링 스트립선로가 전자기적으로 결합된 3층 구조의 소형화된 EBG 구조를 제안하였다. 설계 변수에 따른 특성 변화를 통해 제안한 EBG 구조의 특성을 연구하였다. 아래 기판의 두께가 증가하면 공진 주파수는 감소하고 대역폭이 증가하기 때문에 아래 기판은 두꺼운 기판을 선택하였고, 고유전율의 기판을 이용하여 공진 주파수를 감소시켰다. 또한 갭의 크기가 작아질수록 링 스트립선로 사이의 전기적 결합이 증가하여 상호 인덕턴스 성분이 증가한다. 이로 인해 공진 주파수는 감소하고 대역폭이 증가하게 된다. 하지만 갭이 작아질수록 제작상의 한계로 인해 제작 오차가 크기 때문에 0.1 mm로 설계하였다. 따라서 제안한 EBG 구조는 링 스트립선로를 통해 인덕턴스 값을 증가시켜 공진 주파수를 감소시켜 기존의 사각 패치 3층 구조보다 크기를 34 % 줄일 수 있다.

또한 본 논문에서는 효과적으로 EBG 구조를 설계하기 위한 방법을 고려하였다. EM 시뮬레이션을 통한 EBG 구조의 분석은 해석 시간이 짧은 반사위상 EM 시뮬레이션을 수행하였고, 측정은 측정에 사용되는 안테나의 제작이 쉬운 S_{21} 측정 방법으로 측정하였다. 그리고 반사위상에서 나타나는 밴드갭과 S_{21} 에서 밴드갭이 일치하는 것을 EM 시뮬레이션과 측정을 통해 확인하였고, 제안한 EBG 구조는 측정

결과, 0.930 GHz에서 0.945 GHz까지의 밴드갭을 가졌다.

참 고 문 헌

- [1] D. R. Fredkin, A. Ron, "Effectively left-handed (negative index) composite material", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 10, pp. 1753-1755, Sep. 2002.
- [2] A. Alú, N. Engheta, "Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: resonance, tunneling and transparency", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 10, pp. 2558-2571, Oct. 2003.
- [3] R. W. Ziolkowski, E. Heyman, "Wave propagation in media having negative permittivity and permeability", *Phys. Rev. E.*, vol. 64, no. 056625, pp. 1-15, Oct. 2001.
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction", *Sci.*, vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.
- [5] C. Caloz, C. -C. Chang, and T. Itoh, "Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations", *J. Appl. Phys.*, vol. 90, no. 11, pp. 5483-5486, Dec. 2001.
- [6] See for examples, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2150, Nov. 1999.
- [7] D. Sievenpiper, "High-impedance electromagnetic surfaces", Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. California at Los Angeles, Los Angeles, CA, 1999.
- [8] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
- [9] R. F. J. Broas, D. Sievenpiper, and E. Yablonovitch, "A high-impedance ground plane applied to a cellphone handset geometry", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, no. 7, pp. 1262-1265, Jul. 2001.
- [10] M. Rahman, M. A. Stuchly, "Circularly polarised

patch antenna with periodic structure", *IEE Proc. Microwave Antennas Propagat.*, vol. 149, no. 3, pp. 141-146, Jun. 2002.

- [11] D. Pavlickovski, R. B. Waterhouse, "Shorted microstrip antenna on a photonic bandgap substrate", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 9, pp. 2472-2475, Sep. 2003.
- [12] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, "Curl antennas over electromagnetic band-gap surface: a low profiled design for CP applications", *IEEE AP-S Int. Symp.*, vol. 3, pp. 372-375, Jul. 2001.
- [13] H. Nakano, M. Ikeda, K. Hitosugi, J. Yamauchi,

and K. Hirose, "A spiral antenna backed by an electromagnetic band-gap material", *IEEE AP-S Int. Symp.*, vol. 4, pp. 482-485, Jun. 2003.

- [14] M. Rahman, M. A. Stuchly, "Modeling and application of 2D photonic band gap structures", *IEEE Aerospace Conf. Proc.*, vol. 2, pp. 2/893-2/898, Mar. 2001.
- [15] F. Yang, C. Kee, and Y. Rahmat-Samii, "Step-like structure and EBG structure to improve the performance of patch antennas on high dielectric substrate", *IEEE AP-S Int. Symp.*, vol. 2, pp. 482-485, Jul. 2001.

안 성 남



및 해석

2003년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
 2005년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년 2월~현재: Patron 안테나 설계팀
 [주 관심분야] EBG, Antenna 설계

김 상 인



부

2003년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수
 [주 관심분야] Photonic Crystal, 광통신 및 소자

1992년: 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1995년: 미네소타 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1997년: 미네소타 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1997년~2003년: KT 연구개발 본

신 동 구



2003년 8월: 고려대학교 전자 및 정보공학부 (공학사)
 2004년 3월~현재: 고려대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] EBG, Antenna 설계

추 호 성



박사)

1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
 2000년 8월: 미국 Univ. of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
 2003년 5월: 미국 Univ. of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
 2003년 6월~2003년 8월: 미국 Univ. of Texas at Austin 전자전기공학부 (Post Doctor)
 2003년 8월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 전임강사
 [주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테나

김 문 일



1987년 2월: Illinois Institute Technology (공학사)
1987년~1992년: California Institute Caltech 대학원 (공학박사)
1995년~1998년: Jet Propulsion Laboratory/NASA 연구원
1998년~2002년: Rockwell Scientific 연구원

2000년~현재: 고려대학교 부교수

[주 관심분야] MMIC, RFID Tag, Power amplifier module, EBG구조 응용, MEMS 스위치를 응용한 RF 부품 연구

임 한 조



1971년 2월: 서울대학교 문리과대학 물리학과 (이학사)
1974년 2월: 서울대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
1982년: Montpellier II 대학 (USTL: 불) (이학박사)
1975년 9월~현재: 아주대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] Photonic Crystal, 결합 및 계면물리, III-V족 반도체 소자 및 물성특성

박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자 공학과 (공학사)
1989년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
1994년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학과 (공학박사)
1994년~1996년: LG전자기술원

1996년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] 초고주파 수동소자(안테나 포함) 설계 및 해석