

논문 2008-45TC-8-3

스트립라인 형태의 주파수 선택적 표면 덮개층을 이용한 PCS대역 기지국용 EBG 공진기 안테나

(EBG Resonator Antenna with a Stripline Type FSS Superstrate for
PCS-band Base Station Antennas)

여 준 호*, 김 동 호**

(Junho Yeo and Dongho Kim)

요 약

본 논문에서는 스트립라인 형태의 주파수 선택적 표면 덮개층을 이용하여 PCS대역의 기지국 안테나로 사용될 수 있는 EBG 공진기 안테나를 제안하였다. PCS대역의 기지국 안테나에서 요구되는 안테나 이득과 대역폭을 가지는 EBG 공진기 안테나를 설계하기 위하여 덮개층 주기 구조의 단위 셀 시뮬레이션을 이용한 다양한 설계 파라미터의 변화에 따른 공진주파수 및 대역폭의 특성을 분석하였다. 이를 위하여 여러 구조들 중에서 많이 사용되는 스트립다이폴과 스트립라인 구조의 특성을 비교하였으며, 스트립라인 구조가 스트립다이폴 구조에 비해서 EBG 공진기의 공진 길이가 더 짧고 대역폭 조정이 더 쉬움을 알 수 있었다. 단위 셀 시뮬레이션 결과를 이용하여 PCS대역을 만족하는 평면구조의 EBG 공진기 안테나와 원통형 EBG 공진기 안테나를 설계하였다.

Abstract

In this paper, an EBG(Electromagnetic BandGap) resonator antenna with a stripline type FSS(Frequency Selective Surface) superstrate for PCS-band base station antennas is proposed. The characteristics of resonant frequency and -3dB bandwidth of a unit cell of a superstrate are first analyzed by varying several design parameters such as a strip width and a unit cell width in order to design an EBG resonator antenna satisfying the required antenna gain and bandwidth for PCS-band base station antennas. Among various unit cell shapes, strip dipole and stripline are considered and their characteristics are compared. It was found that a resonant length of the EBG resonator antenna becomes smaller when the stripline shape is used and the control of the bandwidth is also much easier. By using the unit cell simulation results, planar and cylindrical EBG resonator antennas at PCS-band are designed.

Keywords : EBG(Electromagnetic BandGap) resonator antenna, Frequency Selective Surfaces(FSS), Stripline, PCS(Personal Communications Services)-band, Base Station Antenna

I. 서 론

최근들어 인공적으로 합성되어 자연계에서 흔히 볼

수 없는 특수한 전자기적 성질을 나타내는 물질인 메타물질(Metamaterial)에 대한 이론적인 해석 및 다양한 분야에 대한 응용에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 메타물질에는 광학 밴드 갭(PBG, Photonic Bandgap) 혹은 전자기 밴드 갭(EBG, Electromagnetic Bandgap) 구조, 인공 자기 도체(AMC, Artificial Magnetic Conductor) 구조, 단일/이중 음의 유전율/투자율(Single/Double Negative Permittivity/Permeability) 물질, 음의 굴절률(NRI, Negative Refractive Index) 물질, Left-handed(LH) 물질 등이 있으며, 관심있는 물질의 특성에 따라 다르게 명명되어

* 정회원, 대구대학교 정보통신공학부
(School of Computer & Communication Eng.,
Daegu University)

** 정회원, 한국전자통신연구원 전파방송원천기술연구팀
(Radio & broadcasting fundamental technology
research team, Electronics and Telecommunications
Research Institute)

※ 본 연구는 대구대학교 교내연구비 지원으로 이루어
졌음.

접수일자: 2008년7월20일, 수정완료일: 2008년8월1일

불러지고 있다.^[1]

이 중에서 전자파(Electromagnetic Wave)의 전파(Propagation)를 효율적으로 제어할 수 있는 EBG 구조를 마이크로파 소자 및 시스템에 응용하는 연구가 마이크로파 및 안테나 공학 분야에서 활발히 연구되고 있다. EBG 구조는 광학분야에서 오래전부터 연구되어 오던 Photonic Crystal 혹은 PBG 구조에서 유래되었으며, 이러한 구조를 마이크로파나 밀리미터파 대역에 적용하면서 EBG 구조라고 부르고 있다. EBG 구조는 특정한 모양을 가지는 단위 셀(Unit Cell) 구조가 주기적으로 반복되는 구조로서 특정 주파수 대역의 전자파의 전파가 허용되지 않는 주파수 차단(Band Stop) 특성을 갖는다. 이러한 EBG 구조를 안테나에 적용할 경우 안테나의 기판(Substrate)이나 덮개층(Superstrate 혹은 Cover)로 사용될 수 있다.^[2]

안테나의 기판으로 사용될 경우 고유전율(High Permittivity)의 기판을 사용할 때 발생하는 표면파(Surface Wave)를 감소시켜 안테나의 방사특성 개선 및 이득을 향상시킬 수 있다. 또한 여러 안테나가 배열되어 있을 경우 안테나 사이에 적용될 경우 안테나 간의 상호 결합(Mutual Coupling)을 줄여주는 역할도 할 수 있다.^[3]

안테나의 덮개층으로 사용될 경우 안테나의 지향성(Directivity)을 향상시킬 수 있으며 배열 안테나(Array Antenna)에서 필요로 하는 복잡한 급전 구조가 필요없게 된다. 이러한 개념은 결국 고 지향성의 얇은 빔(narrow beam)을 만들기 위해서는 동위상을 가지는 큰 등가 개구면(Aperture)을 가지는 방사체가 필요하다는 것을 의미하며, 다이폴 안테나, 패치 안테나, 개구면 안테나와 같은 간단한 방사원(Radiation Source)을 이용하여 간단하게 만들 수 있다.^[4]

덮개층으로 사용할 수 있는 구조로는 다층 유전체층(Multiple Dielectric Layer), 유전체 봉(Dielectric Rod)을 이용한 전자기 밴드 갭(EBG) 구조, Woodpile 형태의 전자기 밴드 갭 구조 그리고 주기적인 금속 물질을 이용한 주파수 선택적 표면(FSS, frequency selective surface) 구조 등이 있다. 또한, 유전율이 0과 1사이인 ENZ(Epsilon Near Zero) 물질도 사용될 수 있다.

이러한 EBG 공진기 안테나 해석을 위해서 크게 두 가지 접근 방법이 연구되어왔다. 첫번째 방법은 전체 안테나를 누설파(Leaky Wave) 안테나로 해석한다. Jackson 등은 패치 안테나 위에 한층 혹은 다층 유전체층을 놓아 패치 안테나의 지향성이 향상됨을 보였고,

이를 누설파 이론을 이용하여 설명하였으며 유전층의 두께와 유전상수를 적절히 조절하여 지향성 향상이 나타나는 주파수를 조절할 수 있음을 보였다.^[5-6] Zhao 등은 이것을 금속 패치(Metallic Patch)나 금속 평면에 슬롯(Slot)으로 이루어진 2차원 주기 구조에 대해서 확장하였다.^[7-8]

두 번째 방법은 안테나의 덮개층을 부분 반사 표면(PRS, Partially Reflecting Surface)으로 간주하여 전체 안테나를 Fabry-Perot Cavity 형태의 안테나로 해석한다. 이 경우 부분 반사 표면과 접지면(Ground plane)에 의해 이루어지는 Fabry-Perot Cavity에서 두 표면사이의 거리가 주파수의 반파장이 될 때 발생하는 공진기 개념을 이용하여 지향성 향상을 설명한다. Trentini는 접지면이 있는 도파관 앞에 부분 반사 표면을 두고 접지면과 부분 반사 표면 사이를 금속 벽으로 둘러싸므로서 지향성 향상이 가능함을 처음 소개하였고^[4], Alexopoulos 등은 패치 안테나 위에 단일 혹은 다중 유전체층을 놓아 패치 안테나의 지향성이 향상을 시킬 수 있음을 보였고 이때 공진조건을 파선 이론(Ray Theory)과 Fabry-Perot Interferometer를 이용하여, 방사패턴을 가역정리(Reciprocity)와 전송선 이론(Transmission Line Theory)을 이용하여 유도하였다.^[9-10] Feresidis 등은 Jackson 등이 제안한 이론을 바탕으로 부분 반사 표면의 반사계수(Reflection Coefficient)의 크기와 위상을 이용하여 Boresight 이득과 대역폭을 구할 수 있는 식을 유도하고 넓은 주파수 대역에서 동작할 수 있는 최적화된 부분 반사 표면을 이용한 고이득 안테나 설계를 소개하였으며^[11], 패치 안테나의 접지면으로 완전 전기 도체(PEC, Perfect Electric Conductor) 대신에 인공 자기 도체(AMC)를 사용하여 스트립 다이폴 형태의 주파수 선택 표면으로 구성된 부분 반사 표면과 접지면사이에 필요한 거리인 공진 길이(Resonant length)를 절반, 즉 파장의 1/4로 줄일 수 있음을 보였다.^[12] Cheyue 등은 유전체 봉(Dielectric Rod)로 구성된 EBG 구조를 덮개층으로 사용하여 밴드 갭 대역 내에 결함 모드(Defect Mode)를 만들어서 패치 안테나의 지향성을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다.^[13] Lee 등은 같은 구조에서 두가지 결합 모드를 발생할 수 있는 방법을 소개하고 이들 모드를 조절할 수 있는 단위 셀 시뮬레이션 방법을 제시하고, 이를 이용하여 이중 대역 안테나, 이중 대역 이중 편파 그리고 광대역 안테나 등과 같은 여러 종류의 고 지향성 EBG 공진기 안테나를 제안하였다.^[14] 또한, Lee 등은 단위 셀

시물레이션을 이용하여 스트립 다이폴 형태의 주파수 선택 표면을 덮개층으로 구성된 고지향성 안테나의 지향성을 구하는 방법을 제안하였고^[15], 이중 대역에서 지향성을 향상시킬 수 있는 두 층의 주파수 선택적 표면으로 구성된 덮개층을 제안하였다^[16]. 최근에 Pirhadi 등은 단일 층(Single layer)의 주파수 선택적 표면과 접지면으로 인공 자기 도체(AMC)를 사용한 이중 대역 EBG 공진기 안테나를 소개하였다. 이중 대역 지향성 향상을 위해서 두 층의 주파수 선택적 표면을 사용하지 않고 단일 층으로 이중 대역에서 공진하도록 두 개의 루프(Double Loop Element)를 사용하였으며, 두 번째 공진 대역의 경우 전기장이 접지면에서 최대인 홀수 모드(Odd Mode)를 사용하기 위해서 완전 전기 도체(PEC) 대신에 인공 자기 도체(AMC)를 사용하였다. 이렇게 함으로써 이중 대역의 주파수 간격을 더 좁힐 수 있다.^[17]

한편, Gardelli 등은 EBG 공진기 안테나의 방사원으로 패치 안테나 대신에 배열 안테나를 사용할 경우 배열 안테나의 간격을 일반 배열 안테나의 경우 보다 훨씬 넓힐 수 있고 배열 안테나 소자의 수도 줄이고 결국 배열 안테나 소자 사이의 상호 결합도 줄일 수 있음을 보였다.^[18]

대부분의 논문에서 발표된 EBG 공진기 안테나의 경우 덮개층과 접지면이 모두 평면인 구조를 다루고 있으나, 원통형(Cylindrical) EBG 구조에 대한 연구도 몇몇 연구그룹에서 진행되고 있다. Vardaxoglou 등은 전방향성 방사패턴을 가지는 2.4 GHz 대역의 무선 랜(Wireless LAN)용 안테나를 패치형태의 주파수 선택적 표면을 사용한 원통형 EBG 구조를 이용하여 설계하였다.^[19] Jecko 등은 5.2 GHz 대역의 무선 랜(HiperLAN2)용 기지국 안테나를 원통형 EBG 구조를 이용하여 제작하였다. 얇은 금속 봉(Metallic rod) 형태의 부분 반사 표면이 사용되었으며 방사원으로 두개의 다이폴 안테나가 사용되었다.^[20] 그러나 이들 논문에서 설계된 원통형 EBG 공진기 안테나의 지향성은 8dBi 혹은 14 dBi 정도이며 실제 안테나의 이득에 대한 정보는 소개되지 않았다.

한편, Boutayeb 등은 무한 금속 선(Infinite Metallic wire)으로 구성된 원통형 EBG 구조에 대한 이론적 해석과 지향성 안테나 설계에 대한 연구를 소개했다. 이 경우 원점에 전방향성 방사원이 있다는 가정 하에 금속 선(Metallic Wire)으로 이루어진 다층의 원통형 주파수 선택적 표면이 부분 반사 표면을 구성할 때 이 구조가

원통구조의 원주(Circularly) 및 반지름(Radially)에 주기적인 것을 이용하여 전송계수(Transmission Coefficient)를 구하는 방법을 제시하였다. 또한 주기구조에 결함(Defect)을 발생시켜 원하는 방향각과 빔 폭을 갖는 지향성 안테나를 설계하는 방법도 소개하였다. 제작된 안테나의 이득은 1.77~2.17 GHz 대역에서 12.2~15.8 dB 이었다.^[21]

본 논문에서는 스트립라인 형태의 주파수 선택적 표면을 이용하여 PCS(Personal Communications Services)대역(1.75~1.87 GHz)용 기지국 안테나로 사용될 수 있는 EBG 공진기 안테나를 제안하였다. PCS대역의 기지국 안테나에서 요구되는 15dB이상의 안테나 이득과 120MHz의 대역폭을 가지는 EBG 공진기 안테나를 설계하기 위하여 공진기의 부분 반사 표면인 덮개층 주기 구조의 단위 셀 시물레이션을 이용한 다양한 설계 파라미터의 변화에 따른 공진주파수 및 대역폭의 특성을 분석하였다. 단위 셀 시물레이션 결과를 이용하여 PCS대역을 만족하는 평면구조의 EBG 공진기 안테나를 설계하였으며, 평면 구조의 EBG 공진기 안테나를 이용하여 원통형 EBG 공진기 안테나를 설계하였다.

II. PCS대역 주파수 선택적 표면 덮개층 설계

PCS대역에서 동작하는 주파수 선택적 표면 형태의 덮개층을 설계하기 위해 본 논문에서는 두 가지 형태의 단위 셀(Unit Cell) 구조, 즉 스트립 다이폴(Strip Dipole) 구조와 스트립라인(Stripline) 구조를 비교 분석하였다. 그림 1에는 스트립 다이폴 및 스트립라인 단위 셀 구조가 나타나 있으며, 단위 셀의 x축 방향 주기는 p_x , y축 방향 주기는 p_y , 스트립 다이폴과 스트립라인의 폭은 w_1 , 스트립 다이폴과 x축 단위 셀과의 간격은 g , 스트립 다이폴의 길이를 l_1 이다. 스트립라인의 경우 스트립라인의 길이는 y축 방향 주기 p_y 와 같다.

스트립 다이폴과 스트립라인 구조는 그 형태가 유사하지만 스트립 다이폴 구조는 금속 도체가 유한한 길이를 가지고 서로 떨어져 있는 반면에 스트립라인은 금속 도체가 서로 연결되어 무한하게 긴 도체로 볼 수 있다. 스트립라인 구조는 등가회로로 표현했을 때 인덕터(Inductor)로 볼 수 있으며 DC주파수에서 반사계수가 1이 되는 저역통과필터(Low Pass Filter)로 볼 수 있다. 반면에, 스트립 다이폴 구조는 등가회로로 표현했을 때 인덕터와 커패시터(Capacitor)가 직렬로 연결된 것으로 볼 수 있으며 인덕턴스(Inductance)값과 커패시턴스

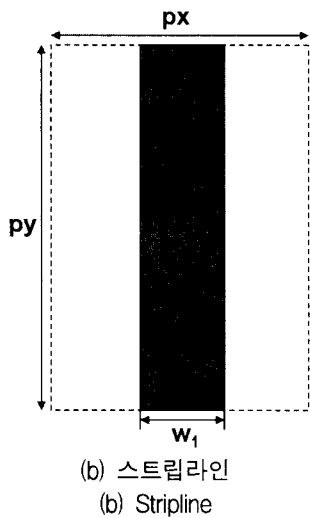
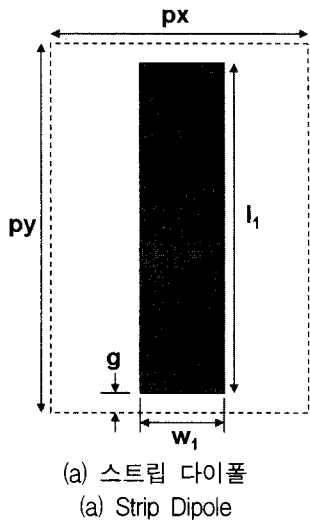
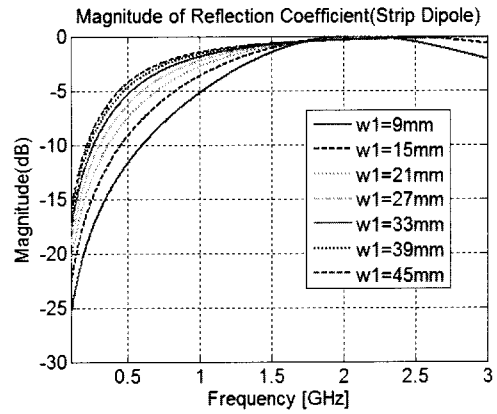


그림 1. 스트립 다이폴과 스트립라인 단위 셀 구조
Fig. 1. Geometry of unit cells with strip dipole and stripline.

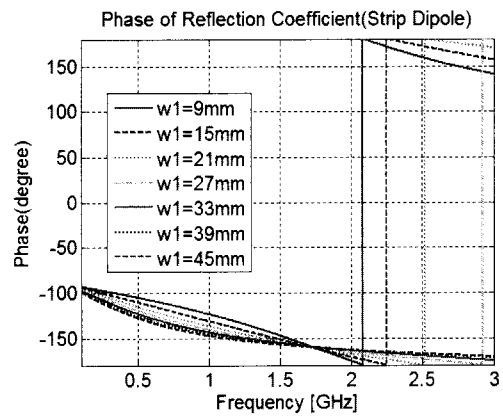
(Capacitance)값에 따라 대역이 결정되는 대역통과필터 (Band Pass Filter) 특성을 가진다.^[22]

1. 부분 반사 표면 단위 셀 구조의 반사계수 특성

PCS 대역에서 동작하는 덮개층을 설계하기 위해 y 축 방향 단위 셀 주기를 $py = 80 \text{ mm}$ 로 고정하고 x축 방향 단위 셀 주기 px 와 스트립 다이폴과 스트립 라인의 폭 w_1 을 변화시킬 때 스트립 다이폴과 스트립라인 구조의 단위 셀의 반사계수(Reflection Coefficient)의 크기(Magnitude)와 위상(Phase)의 변화를 비교하였다. 먼저 x축 방향 단위 셀 주기를 $px = 47 \text{ mm}$ 로 고정하고 스트립 다이폴과 스트립라인의 폭 w_1 을 9 mm에서 45 mm로 6 mm간격으로 증가시킬 경우 반사계수가 그림 2와 3에 나타나 있다. 이때 스트립 다이폴의 길이는



(a) 크기
(a) Magnitude



(b) 위상
(b) Phase

그림 2. 스트립 폭 w_1 에 따른 스트립 다이폴 단위 셀의 반사계수($px = 47 \text{ mm}$, $py = 80 \text{ mm}$, $l_1 = 77 \text{ mm}$)

Fig. 2. Reflection coefficient of a strip dipole unit cell as a function of strip width w_1 ($px = 47 \text{ mm}$, $py = 80 \text{ mm}$, $l_1 = 77 \text{ mm}$).

$l_1 = 77 \text{ mm}$ 이고, 스트립 다이폴과 x축 단위 셀과의 간격은 $g = 1.5 \text{ mm}$ 이다. 본 논문에서 사용된 시뮬레이션은 CST사의 Microwave Studio 2008을 사용하였다.

스트립 다이폴의 경우 그림 2에 나타나 있듯이 스트립 폭 w_1 이 증가할수록 반사계수의 크기가 0 dB 근처에 있는 대역폭이 늘어나고 반사계수 위상의 기울기가 완만해짐을 알 수 있다. 반면에, 스트립라인의 경우 스트립 폭 w_1 이 증가할수록 반사계수의 크기가 0 dB에 가까워지고 반사계수 위상이 180°에 근접함을 알 수 있다.

다음으로 스트립 다이폴과 스트립라인의 폭 w_1 을 9 mm로 고정하고, x축 방향 단위 셀 주기 px 를 11 mm에서 47 mm까지 6 mm간격으로 증가시킬 경우 반사계수가 그림 4와 5에 나타나 있다. 이때 스트립 다이폴의 길이는 $l_1 = 77 \text{ mm}$ 이고, 스트립 다이폴과 x축 단위 셀

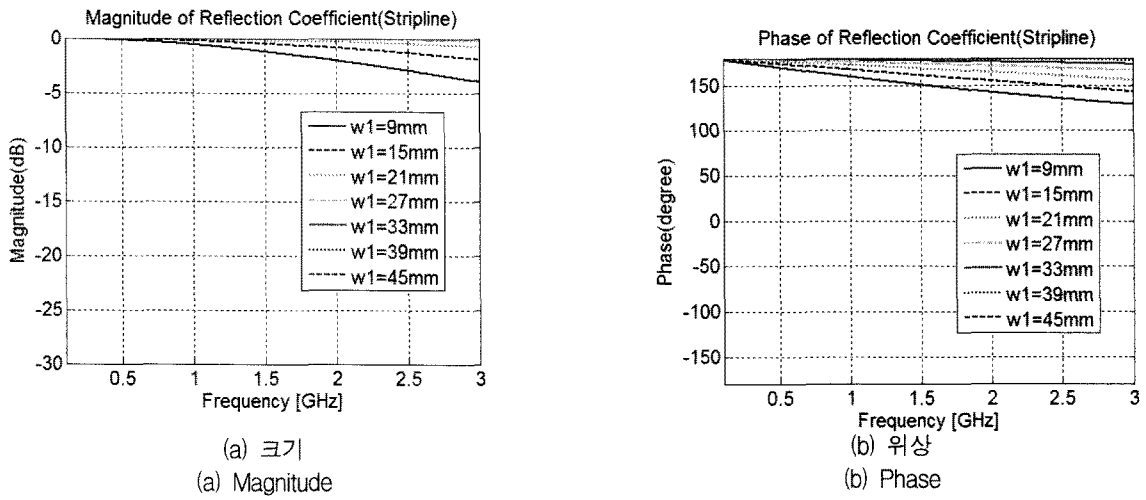


그림 3. 스트립 폭 w_1 에 따른 스트립라인 단위 셀의 반사계수($p_x = 47$ mm, $p_y = 80$ mm)
 Fig. 3. Reflection coefficient of a stripline unit cell as a function of strip width w_1 ($p_x = 47$ mm, $p_y = 80$ mm).

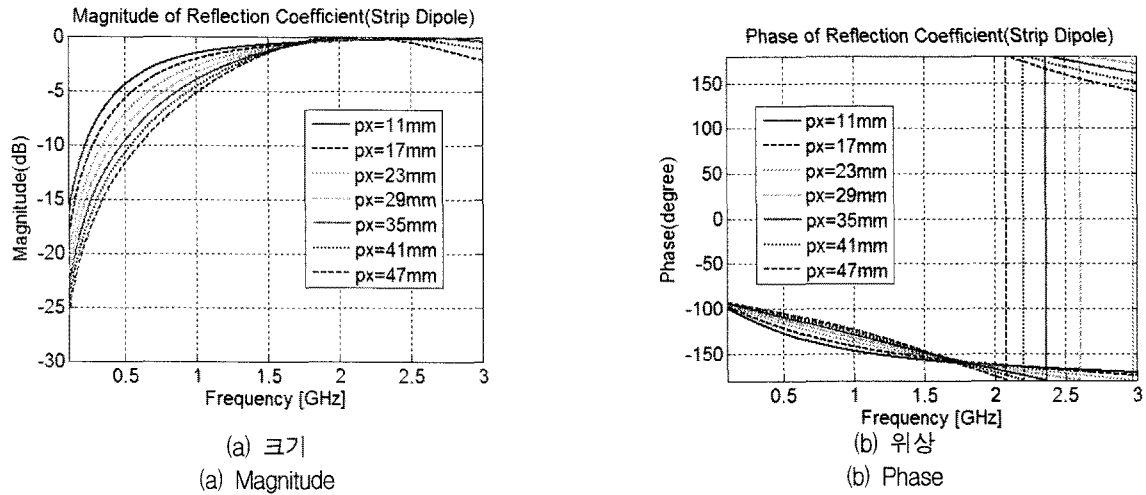


그림 4. x축 방향 단위 셀 주기 p_x 에 따른 스트립 다이폴 단위 셀의 반사계수($w_1 = 9$ mm, $p_y = 80$ mm, $l_1 = 77$ mm)
 Fig. 4. Reflection coefficient of a strip dipole unit cell as a function of x-direction unit cell periodicity p_x ($w_1 = 9$ mm, $p_y = 80$ mm, $l_1 = 77$ mm).

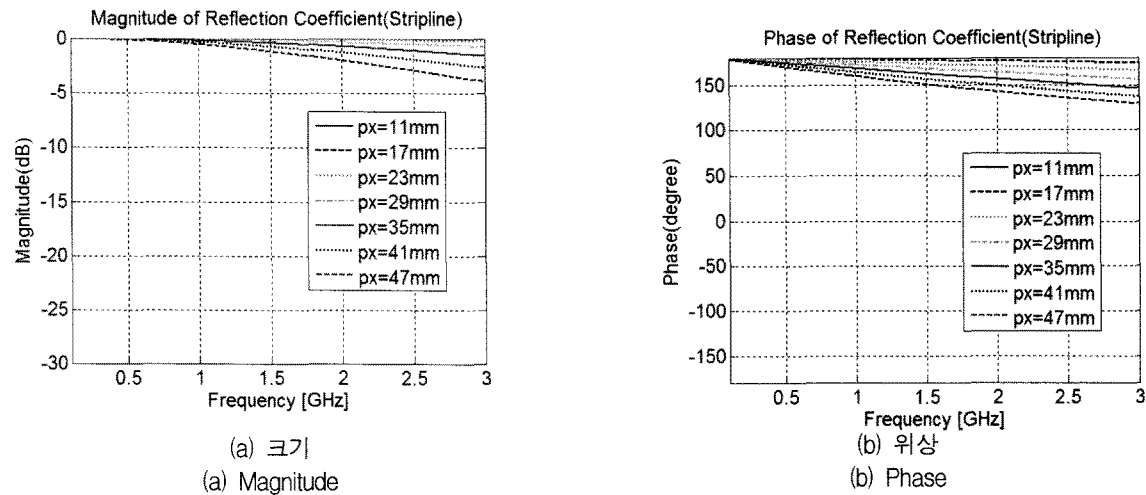


그림 5. x축 방향 단위 셀 주기 p_x 에 따른 스트립라인 단위 셀의 반사계수($w_1 = 9$ mm, $p_y = 80$ mm)
 Fig. 5. Reflection coefficient of a stripline unit cell as a function of x-direction unit cell periodicity p_x ($w_1 = 9$ mm, $p_y = 80$ mm).

과의 간격은 $g = 1.5 \text{ mm}$ 이다.

스트립 다이폴의 경우 x 축 방향 단위 셀 주기 px 가 감소할수록 반사계수의 크기가 0 dB 근처에 있는 대역폭이 늘어나고 반사계수 위상의 기울기가 완만해짐을 알 수 있다. 반면에, 스트립라인의 경우 x 축 방향 단위 셀 주기 px 가 감소할수록 반사계수의 크기가 0 dB 에 가까워지고 반사계수 위상이 180° 에 근접함을 알 수 있다.

2. EBG 공진기 안테나의 단위 셀 구조의 특성

EBG 공진기 안테나는 부분 반사 표면 역할을 하는 덮개층과 접지면으로 이루어지는 Fabry-Perot Cavity와 방사원으로 구성된다. 방사원으로는 다이폴 및 모노폴 안테나, 개구면 안테나, 마이크로스트립 패치 안테나, 혼(Horn) 안테나, 배열 안테나 등이 사용될 수 있다. EBG 공진기 안테나의 공진주파수, 즉 지향성이 향상되는 주파수와 그 대역폭을 예측하기 위해서 EBG 공진기 안테나 덮개층 주기 구조의 단위 셀을 시뮬레이션하는 방법이 제안되었다.^[14] 이 방법에서는 그림 6에 나타나 있듯이 접지면의 특성을 이용하여 덮개층을 포함한 접지면 위의 구조를 접지면에 대해서 대칭되도록 단위 셀 구조를 만든 후 평면파(Plane Wave)를 아래쪽에서 입사시켜 덮개층 위쪽에서 전송계수(Transmission Coefficient)를 계산한다. 이 방법은 EBG 공진기 안테나 전체를 시뮬레이션하지 않아도 되므로 공진 주파수를 빠르고 손쉽게 알 수 있으며 공진기에 존재할 수 있는 여러 공진 모드들(Resonant Modes)을 제공한다. 이러한 공진 모드들 중에서 접지면에서의 접선 전기장 성분을 이용하여 실제 접지면과 방사원을 사용하여 공진기 안테나를 구성했을 경우 존재할 수 있는 공진 모드를 선택할 수 있다.

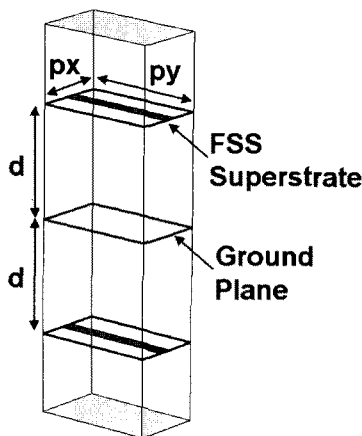


그림 6. EBG 공진기 안테나의 단위 셀 구조

Fig. 6. Geometry of a unit cell of an EBG resonator antenna.

접지면으로 완전 전기 도체(PEC)가 사용될 경우 접선 전기장 성분이 0이 되어야 하며, 완전 자기 도체(PMC)나 인공 자기 도체(AMC)가 사용될 경우 접지면에서 최대가 된다.

부분 반사 표면과 완전 전기 도체 접지면으로 구성된 Fabry-Perot Cavity의 경우 공진이 발생하는 길이, 즉 공진 길이(Resonant Length) d 는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.^[4]

$$d = \frac{c}{2f_c} \left(m + \frac{\phi_h - \pi}{2\pi} \right) \quad (1)$$

여기서, c 는 빛의 속도, f_c 는 공진주파수, ϕ_h 는 덮개층으로 사용된 부분 반사 표면의 반사 계수의 위상, $m = 0, 1, 2, \dots$ 이다. 식 (1)에서 접지면으로 완전 전기 도체가 사용되어서 반사계수 위상 $-\pi$ (-180°)가 사용되었다.

스트립 다이폴 및 스트립라인 단위 셀 구조를 부분 반사 표면으로 사용할 경우, 식 (1)과 그림 2와 3에서 구한 반사 계수의 위상을 이용하여 스트립 폭 w_1 에 따른 공진 길이의 변화가 그림 7에 나타나 있다. 이 공진 길이는 EBG 공진기 안테나에서 발생할 수 있는 가장 낮은 모드에 대응하는 것이다.

스트립 다이폴의 경우 1.73 GHz 보다 낮은 주파수에서는 스트립 폭 w_1 이 증가할수록 공진 길이가 짧아지거나 1.73 GHz 보다 높은 주파수에서는 스트립 폭이 감소할수록 공진 길이가 짧아진다. 스트립라인의 경우 스트립 폭이 감소할수록 공진 길이가 짧아짐을 알 수 있다. 또한, 스트립 다이폴과 스트립 라인을 비교할 경우 같은 스트립 폭일 때 스트립 라인을 단위 셀로 사용할 경우가 공진 길이가 더 짧아짐을 알 수 있다. 예를 들면, 공진 주파수가 PCS대역의 중심주파수인 1.81 GHz 이고 스트립 폭이 9 mm 일 때, 스트립 다이폴의 경우 공진 길이가 86.4 mm 이고 스트립라인의 경우 74.85 mm 로서 10 mm 이상 짧다.

위에서 구한 공진 길이를 이용하여 그림 6의 대칭 구조를 만들어서 평면파를 아래쪽에서 입사한 후 위쪽에서 전송계수 S_{21} 을 구한 결과가 그림 8에 나타나 있다. 앞에서 설명했듯이 여러 모드들 중에서 2번째 모드가 실제 EBG 공진기 안테나에 존재할 수 있는 가장 낮은 모드이며^[15] 이 모드만을 나타내었다. 스트립 다이폴의 경우 공진 길이는 스트립 폭이 45 mm 일 때의 87.13 mm 를 사용하고 스트립 폭을 변화시켰다. 스트립 폭이 줄어들수록 공진주파수가 낮은 주파수로 조금 이동하고 대역폭도 조금 줄어들음을 알 수 있다. $w_1 = 45 \text{ mm}$ 일 때

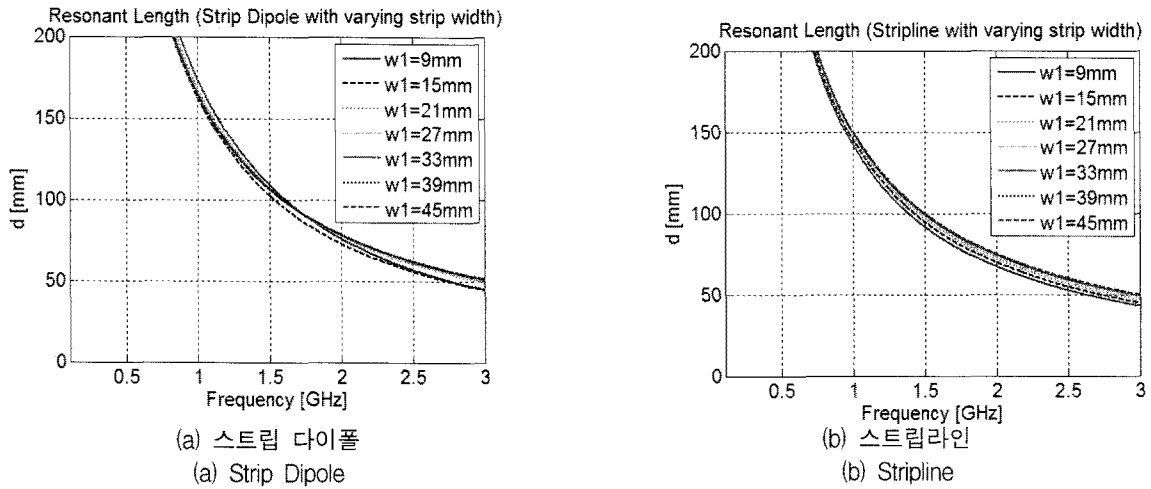


그림 7. 스트립 폭 w_1 에 따른 EBG 공진기 안테나 단위 셀의 공진 길이의 변화

Fig. 7. Variation of a resonant length of a unit cell of an EBG resonator antenna as a function of strip width w_1 .

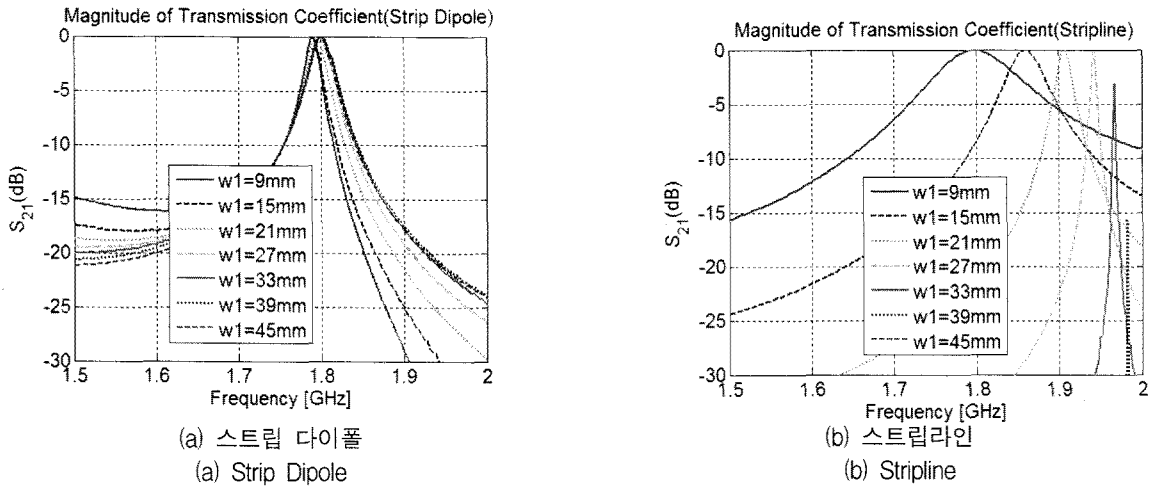


그림 8. 스트립 폭 w_1 에 따른 EBG 공진기 안테나 단위 셀의 공진주파수 및 -3dB 대역폭의 변화

Fig. 8. Variations of resonant frequency and -3dB bandwidth of a unit cell of an EBG resonator antenna as a function of strip width w_1 .

-3dB 대역이 1.785 ~ 1.814 GHz로 PCS대역의 일부분만을 차지한다. 스트립라인의 경우 공진 길이는 스트립 폭이 9 mm일 때의 74.85 mm를 사용하고 마찬가지로 스트립 폭을 변화시켰다. 이 경우 스트립 폭이 증가할수록 공진 주파수가 높은 주파수로 이동하고 대역폭은 줄어들음을 알 수 있으며 스트립 다이폴에 비해서 공진 주파수나 대역폭의 변화가 훨씬 큼을 알 수 있다. 특히, $w_1 = 9\text{mm}$ 일 때 -3dB 대역이 1.742~1.858 GHz로 PCS 대역과 거의 비슷함을 알 수 있다. 표 1에는 스트립 폭에 따른 EBG 공진기 안테나 단위 셀의 공진 주파수와 -3dB 대역폭이 정리되어 있다.

x축 방향 단위 셀 주기 px 에 따른 공진 길이의 변화도 식 (1)과 그림 4와 5를 이용하여 그림 9에 나타나 있다. 스트립 다이폴의 경우 1.73 GHz 보다 낮은 주파수

표 1. 스트립 폭 w_1 에 따른 EBG 공진기 안테나 단위 셀의 공진 주파수 및 -3dB 대역폭

Table 1. Resonant frequency and -3dB bandwidth of a unit cell of an EBG resonator antenna as a function of w_1 .

w_1 (mm)	Strip Dipole		Stripline	
	f_r (GHz)	-3dB BW (MHz)	f_r (GHz)	-3dB BW (MHz)
9	1.79	19.07	1.7975	116.08
15	1.7915	20.77	1.859	51
21	1.795	24.12	1.906	20.78
27	1.7985	27.11	1.9425	6.05
33	1.802	29.16	1.967	
39	1.802	29.43	1.9825	
45	1.7985	28.61	1.9875	

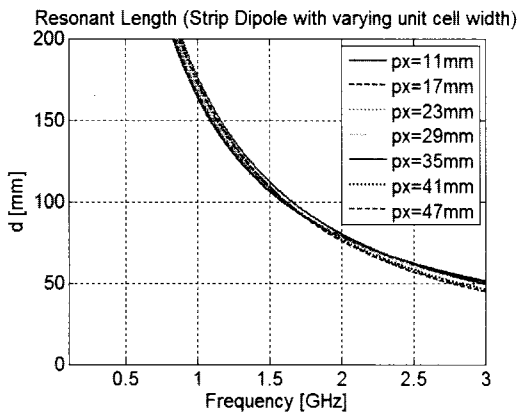
에서는 x축 방향 단위 셀 주기 px 가 감소할수록 공진 길이가 짧아지나 1.73 GHz 보다 높은 주파수에서는 x

축 방향 단위 셀 주기가 증가할수록 공진 길이가 짧아진다. 스트립라인의 경우 x축 방향 단위 셀 주기가 증가할수록 공진 길이가 짧아짐을 알 수 있다. 또한, 스트립 다이폴과 스트립 라인을 비교할 경우 같은 x축 단위 셀 주기를 사용할 때 스트립 라인을 단위 셀으로 사용할 경우가 공진 길이가 더 짧아짐을 알 수 있다.

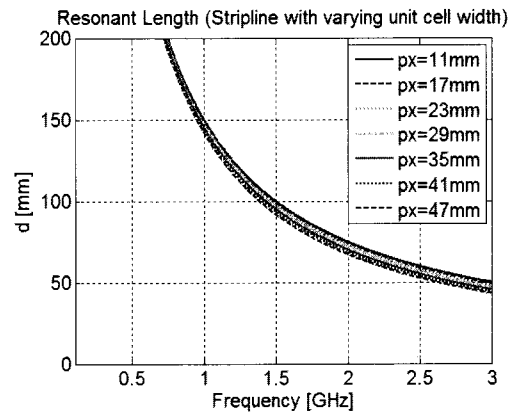
이 경우에도 마찬가지로 위에서 구한 공진 길이를 이용하여 그림 6의 대칭 구조를 만들어서 평면파를 아래 쪽에서 입사한 후 위쪽에서 전송계수 S_{21} 을 구한 결과가 2번째 모드에 대해서 그림 10에 나타나 있다. 스트립 폭은 모두 9 mm를 사용하였다. 스트립 다이폴의 경우 공진 길이는 86.4 mm를 사용하고 x축 방향 단위 셀 주기를 변화시켰다. x축 방향 단위 셀 주기가 증가할수

표 2. x축 방향 단위 셀 주기 p_x 에 따른 EBG 공진기 안테나 단위 셀의 공진 주파수 및 -3dB 대역폭
Table 2. Resonant frequency and -3dB bandwidth of a unit cell of an EBG resonator antenna as a function of x-direction unit cell periodicity p_x .

p_x (mm)	Strip Dipole		Stripline	
	f_c (GHz)	-3dB BW (MHz)	f_c (GHz)	-3dB BW (MHz)
11	1.816	29.02	1.9875	
17	1.822	32.91	1.968	
23	1.823	33.29	1.9385	7.91
29	1.822	30.90	1.904	22.61
35	1.817	27.39	1.866	45.6
41	1.812	22.74	1.83	76.88
47	1.802	17.71	1.7975	116.08



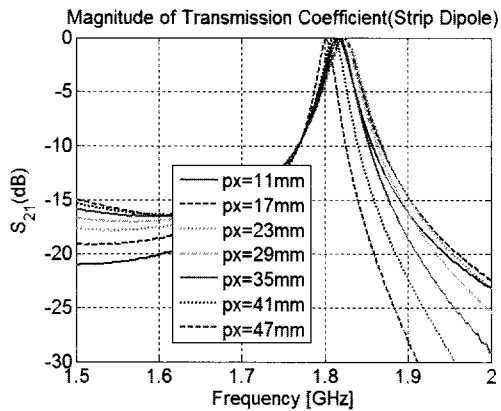
(a) 스트립 다이폴
(a) Strip Dipole



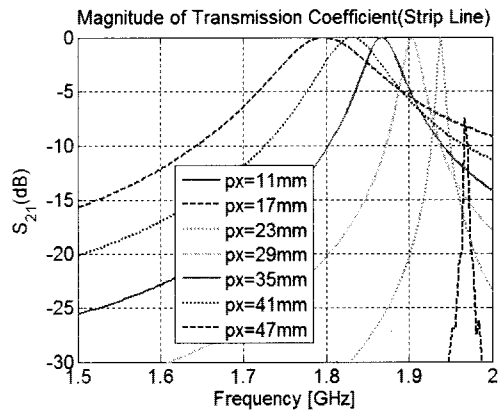
(b) 스트립라인
(b) Stripline

그림 9. x축 방향 단위셀 주기 p_x 에 따른 EBG 공진기 안테나 단위 셀의 공진 길이의 변화($w_r = 9$ mm)

Fig. 9. Variation of a resonant length of a unit cell of an EBG resonator antenna as a function of x-direction unit cell periodicity p_x .



(a) 스트립 다이폴
(a) Strip Dipole



(b) 스트립라인
(b) Stripline

그림 10. x축 방향 단위셀 주기 p_x 에 따른 EBG 공진기 안테나 단위 셀의 공진주파수 및 -3dB 대역폭의 변화

Fig. 10. Variations of resonant frequency and -3dB bandwidth of a unit cell of an EBG resonator antenna as a function of x-direction unit cell periodicity p_x .

록 공진주파수가 조금 높아지고 대역폭이 늘어나다가 $p_x = 35$ mm일 때부터 다시 공진 주파수가 낮은 주파수로 이동하고 대역폭도 조금 줄어들을 알 수 있다. 스트립라인의 경우 공진 길이는 74.85 mm를 사용하고 마찬가지로 x축 방향 단위 셀 주기를 변화시켰다. 이 경우 스트립 폭이 증가할수록 공진 주파수가 높은 주파수로 이동하고 대역폭은 줄어들을 알 수 있으며 스트립 다이폴에 비해서 공진 주파수나 대역폭의 변화가 훨씬 큼을 알 수 있다. x축 방향 단위 셀 주기에 따른 EBG 공진기 안테나 단위 셀의 공진 주파수와 -3dB 대역폭이 표 2에 정리되어있다.

EBG 공진기 안테나의 단위 셀 시뮬레이션을 통해 스트립라인 구조의 단위 셀을 사용할 경우 스트립 다이폴 구조에 비해 PCS대역에 사용할 수 있는 충분한 대역폭을 제공할 수 있고 공진 주파수도 조절이 용이함을 알 수 있다.

III. 평면 구조의 PCS대역 EBG 공진기 안테나 설계

앞 절에서 얻은 PCS대역 EBG 공진기 안테나의 단위 셀 시뮬레이션 결과를 바탕으로 스트립라인 구조를

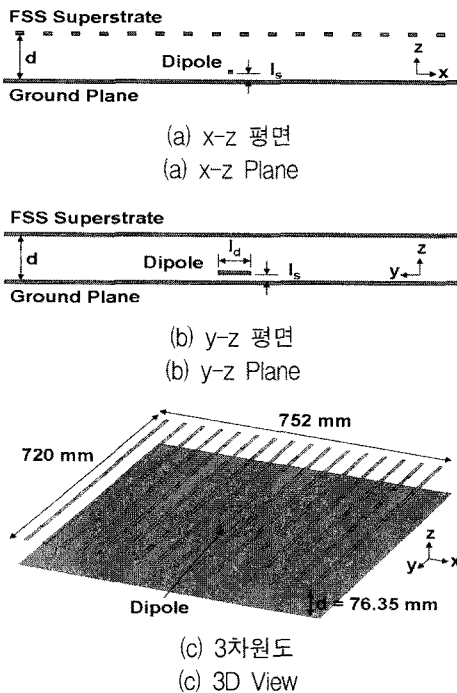


그림 11. 9X16 PCS대역 평면 EBG 공진기 안테나의 구조
Fig. 11. Geometry of a 9X16 planar EBG resonator antenna at PCS band.

사용하여 다이폴 안테나를 방사원으로 평면 구조의 EBG 공진기 안테나를 설계하였다. 설계하고자 하는 PCS대역 기지국 안테나는 1.75~1.87 GHz 대역에서 15 dB이상의 이득을 가져야한다. 그림 11에는 최종 설계된 9X16 평면 구조 PCS대역 EBG 공진기 안테나가 나타나 있다. 단위 셀의 x축 방향 주기는 $p_x = 47$ mm, y축 방향 주기는 $p_y = 80$ mm, 스트립 다이폴과 스트립라인의 폭은 $w_1 = 9$ mm이다. 공진 길이와 다이폴 안테나의 위치 및 길이는 PCS대역 기지국 안테나의 규격을 만족시키기 위해서 최적화되었다. 최적화된 공진 길이 $d = 76.35$ mm이고, 다이폴 안테나는 접지면으로부터 $l_s = 19$ mm 위에 위치한다. 다이폴 안테나의 길이는 $l_d = 68$ mm이고 폭은 $w_d = 2$ mm이다.

그림 12에는 9X16 평면 구조 PCS대역 EBG 공진기 안테나의 입력 반사계수(Input Reflection Coefficient)

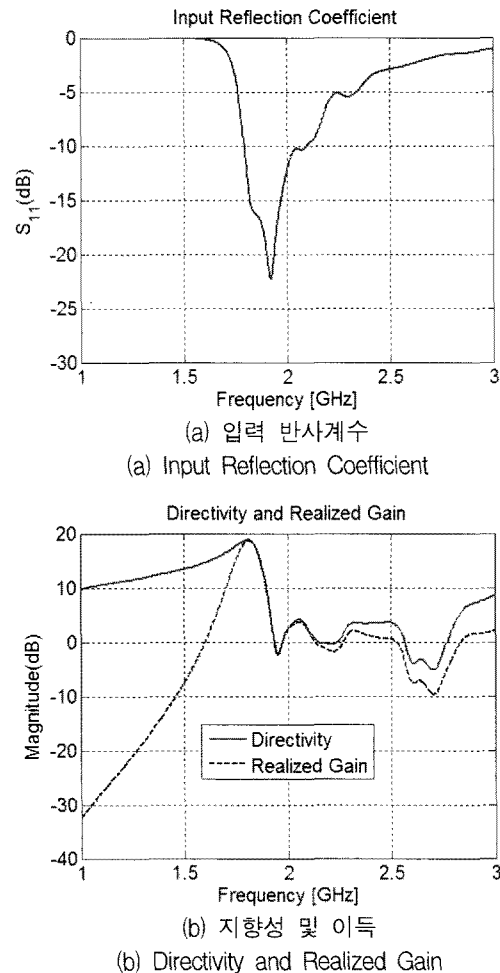


그림 12. 9X16 PCS대역 평면 EBG 공진기 안테나의 입력 반사계수, 지향성 및 이득
Fig. 12. Input reflection coefficient, directivity and realized gain of the 9X16 planar EBG resonator antenna at PCS band.

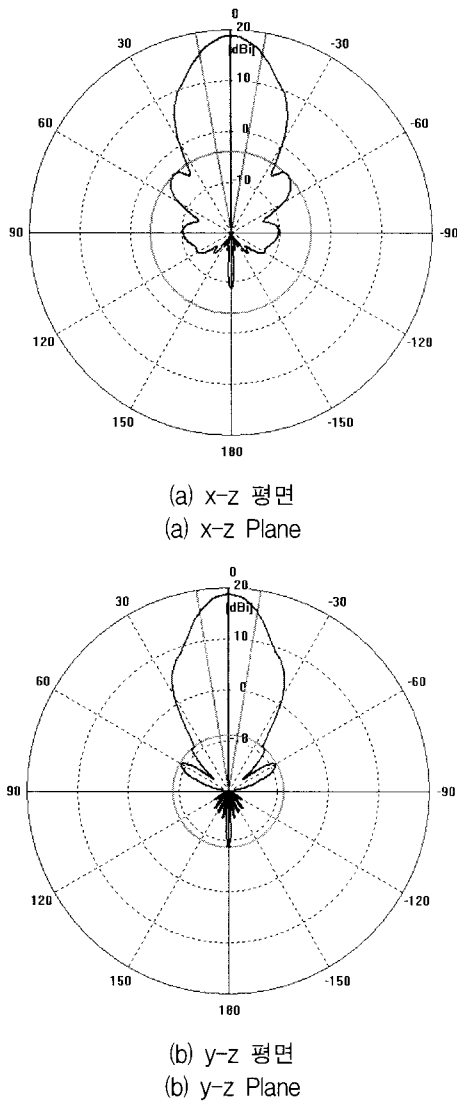


그림 13. 1.81 GHz에서 9X16 PCS대역 평면 EBG 공진기 안테나의 방사패턴
 Fig. 13. Radiation patterns of the 9X16 planar EBG resonator antenna at 1.81 GHz.

S_{11} 과 지향성(Directivity) 및 이득(Realized Gain)이 나타나 있다. 지향성은 최대값이 1.81 GHz에서 18.87 dBi이고 1.624~1.87 GHz 대역에서 15dBi 이상이다. 이득의 경우 최대값이 1.814 GHz에서 18.86 dB이고 1.75~1.87 GHz 대역에서 15 dB 이상이다.

PCS대역 중심주파수인 1.81 GHz에서 9X16 평면 구조 PCS대역 EBG 공진기 안테나의 방사패턴은 그림 13에 나타나 있다.

IV. 원통형 구조의 PCS대역 EBG 공진기 안테나 설계

앞 절에서 설계한 9X16 평면 구조 PCS대역 EBG 공

진기 안테나를 이용하여 원통형 구조의 EBG 공진기 안테나를 설계하였다. 현재 기지국 안테나들은 대부분 360°를 3개 섹터(Sector)로 나누어서 각 섹터(120°)를 하나의 안테나가 담당을 한다. 따라서 9X16 평면 구조 PCS대역 EBG 공진기 안테나를 이용하여 한 섹터를 담당할 수 있는 원통형 구조의 PCS대역 EBG 공진기 안테나를 설계하였다. 그림 14에 나타나있듯이 원통형 구조 EBG 공진기 안테나는 9X16 주파수 선택적 표면 형태의 덮개층과 접지면을 원통형 구조로 변형시켰으며, 덮개층과 접지면 사이의 공진길이는 평면 구조와 동일하다. 덮개층의 반지름은 359.1 mm이며, 접지 원통도체의 반지름은 282.7 mm이다.

그림 15에는 9X16 원통 구조 PCS대역 EBG 공진기 안테나의 입력 반사계수 S_{11} 과 지향성 및 이득이 나타나 있다. 지향성은 최대값이 1.77 GHz에서 14.7 dBi이고 -3dB 대역은 1.332~1.84 GHz이다. 이득의 경우 최대값이 1.79 GHz에서 14.1 dB이고 -3dB 대역은 1.727

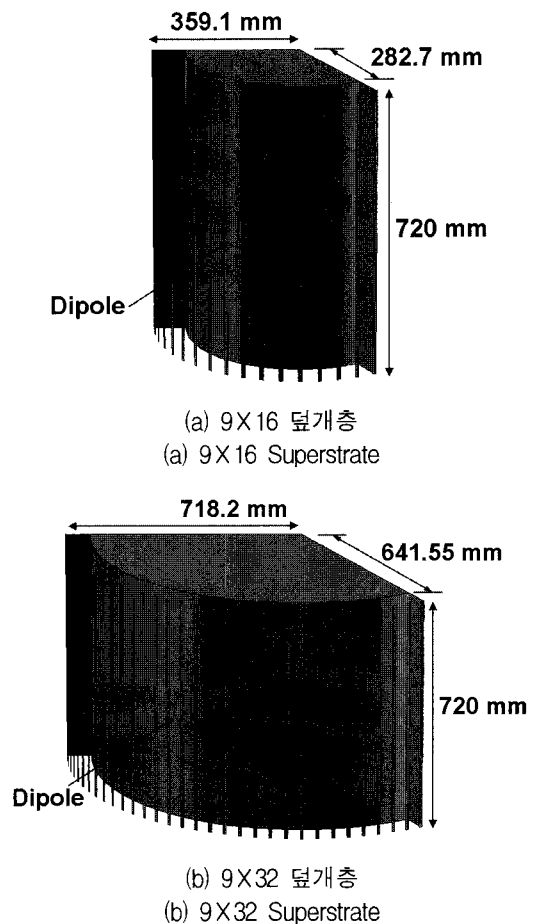


그림 14. 9X16 및 9X32 PCS대역 원통형 EBG 공진기 안테나의 구조
 Fig. 14. Geometry of 9X16 and 9X32 cylindrical EBG resonator antennas at PCS band.

V. 결 론

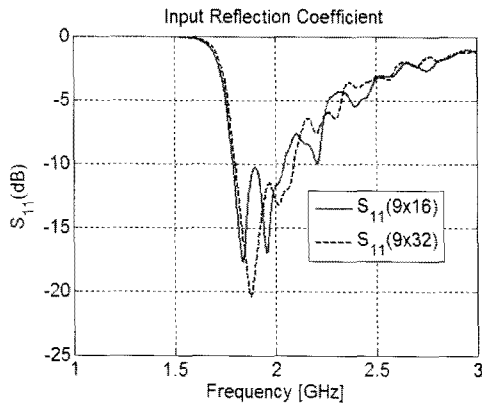
본 논문에서는 PCS대역의 기지국 안테나로 사용될 수 있는 스트립라인 형태의 주파수 선택적 표면 덮개층을 이용한 EBG 공진기 안테나를 설계하였다. PCS대역의 기지국 안테나는 15dB 이상의 안테나 이득을 1.75 ~1.87 GHz 대역에서 제공해야 하며, 이러한 특성을 가지는 EBG 공진기 안테나를 설계하기 위하여 부분 반사 표면으로 사용된 덮개층 주기 구조의 단위 셀 시뮬레이션을 이용하였고 다양한 설계 파라미터의 변화에 따른 공진주파수 및 대역폭의 특성을 분석하였다. 이를 위하여 여러 구조들 중에서 많이 사용되는 스트립다이폴과 스트립라인 구조의 특성을 비교하였으며, 스트립라인 구조가 스트립다이폴 구조에 비해서 EBG 공진기의 공진길이가 더 짧고 대역폭 조정이 더 쉬움을 알 수 있었다.

단위 셀 시뮬레이션 결과를 이용하여 PCS대역을 만족하는 최적화된 9X16 평면구조 EBG 공진기 안테나를 설계하였다. 설계된 안테나 이득은 최대값이 1.814 GHz에서 18.86 dB이고 1.75~1.87 GHz 대역에서 15 dB 이상이어서 PCS대역 기지국 안테나의 요구규격을 만족한다. 마지막으로 평면 구조의 EBG 공진기 안테나를 이용하여 원통형 EBG 공진기 안테나를 설계하였다. 같은 9X16 덮개층을 원통형 구조로 설계할 경우 원통형 구조의 곡률 반경으로 인해 실제 다이폴 안테나에서 보는 덮개층의 배열수가 줄어들고 Boresight 방향으로 유효 개구면적이 줄어들어 안테나 이득이 4dB정도 줄어들었다. 안테나 이득을 높이기 위해 원주방향 배열수를 2배로 증가시켜 9X32 원통형 EBG 안테나를 설계하였다. 이 경우 지향성은 최대값이 1.76 GHz에서 16.21 dBi로 1.5 dB 정도 증가했고, 이득의 경우 최대값이 1.784 GHz에서 15 dB로 0.9 dB정도 증가했으나 PCS대역 기지국 안테나의 요구규격을 만족시키지는 못했다.

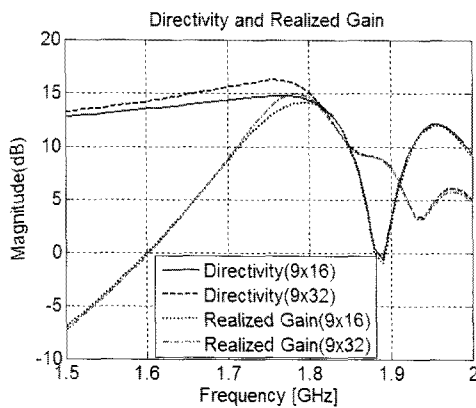
원통형 구조에서 안테나 지향성과 이득을 더 증가시키기 위해서는 원주 방향 배열 수를 더 증가시키거나 여러 층의 원통형 주파수 선택적 표면 덮개층을 이용한 방법을 적용해야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 박면주, "LH Metamaterial의 마이크로파 응용," 한국전자과학회지, 제16권, 제4호, 62-75쪽, 2005년



(a) 입력 반사계수
(a) Input Reflection Coefficient



(b) 지향성 및 이득
(b) Directivity and Realized Gain

그림 15. 9X16 PCS대역 원통형 EBG 공진기 안테나의 입력 반사계수, 지향성 및 이득

Fig. 15. Input reflection coefficient, directivity and realized gain of the 9X16 cylindrical EBG resonator antenna at PCS band.

~1.843 GHz이다. 원통 구조 EBG 공진기 안테나의 지향성과 이득이 4dB 정도 줄어든 이유는 원통형 구조의 곡률 반경으로 인해 실제 다이폴 안테나에서 정면, 즉 Boresight 방향으로 보는 덮개층의 배열수가 줄어들어서 유효 개구면적이 줄어들기 때문이다. 안테나 이득을 높이기 위해 원주방향 배열 수를 2배로 증가시킨 9X32 원통형 EBG 안테나의 결과가 그림 15에 나타나 있다. 이 경우 지향성은 최대값이 1.76 GHz에서 16.21 dBi로 1.5 dB 정도 증가했고, 이득의 경우 최대값이 1.784 GHz에서 15 dB로 0.9 dB정도 증가했다.

원통형 EBG 공진기 안테나의 경우 접지면으로 사용되는 원통도체의 크기로 인해 안테나 전체 높이가 평면 EBG 공진기 안테나에 비해서 매우 크나 원통 도체 내부가 비어있는 경우 높이를 많이 줄일 수 있다.

10월

- [2] P. de Maagt, R. Gonzalo, Y. C. Vardaxoglou, and J.-M. Baracco, "Electromagnetic bandgap antennas and components for microwave and (sub)millimeter wave applications," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 51, no. 10, pp. 2667-2677, Oct. 2003.
- [3] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Microstrip antennas integrated with Electromagnetic Band-Gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 51, no. 4, pp. 2936-2946, Oct. 1956.
- [4] G. V. Trentini, "Partially reflecting sheet arrays," *IRE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 4, pp. 666-670, Oct. 1956.
- [5] D. R. Jackosn and A. A. Oliner, "A leaky-wave analysis of the high-gain printed antenna configuration," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 36, no. 7, pp. 905-910, Jul. 1988.
- [6] D. R. Jackosn, A. A. Oliner, and A. Ip, "Leaky-wave propagation and radiation for a narrow-beam multiple-layer dielectric structure," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 41, no. 3, pp. 344-348, Mar. 1993.
- [7] T. Zhao, D. R. Jackson, J. T. Williams, H. Y. Yang, and A. A. Oliner, "2-D periodic leaky-wave antennas-part I: metal patch design," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 53, no. 11, pp. 3505-3514, Nov. 2005.
- [8] T. Zhao, D. R. Jackson, and J. T. Williams, "2-D periodic leaky-wave antennas-part II: slot design," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 53, no. 11, pp. 3515-3524, Nov. 2005.
- [9] D. R. Jackson and N. G. Alexopoulos, "Gain enhancement methods for printed circuit antennas," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 33, no. 9, pp. 976-987, Sep. 1985.
- [10] H. Y. Yang and N. G. Alexopoulos, "Gain enhancement methods for printed circuit antennas through multiple superstrates," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 35, no. 7, pp. 860-863, Jul. 1987.
- [11] A. P. Feresidis and J. C. Vardaxoglou, "High gain planar antenna using optimised partially reflective surfaces," *IEE Proceedings-Microwave, Antennas and Propagation*, Vol. 148, no. 6, pp. 345-350, Dec. 2001.
- [12] 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 Propagation*, Vol. 53, no. 1, pp. 209-215, Jan. 2005.
- [13] C. Cheype, C. Serier, M. Thevenot, T. Monediere, A. Reineix, and B. Jecko, "An Electromagnetic BandGap resonator antenna", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 50, no. 9, pp. 1285-1290, Sep. 2002.
- [14] 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 Propagation*, Vol. 53, No. 1, Part 1, pp. 224-235, Jan. 2005.
- [15] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Design of a High-Directivity Electromagnetic Band Gap (EBG) Resonator Antenna Using a Frequency Selective Surface (FSS) Superstrate," *Microwave & Optical Technology Letters*, Vol. 44, No. 6, pp. 462-467, Dec. 2004.
- [16] D. H. Lee, Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Design of Novel Thin Frequency Selective Surface (FSS) Superstrates for Dual-band Directivity Enhancement," *IET Proceedings Special Issue on Metamaterials (RF/Microwave and Millimetre-wave Applications)*, Vol. 1, No. 1, pp. 248-254, Feb. 2007.
- [17] A. Pirhadi, M. Hakkak, F. Keshmiri, and R. K. Bae, "Design of Compact Dual Band High Directive Electromagnetic Bandgap (EBG) Resonator Antenna Using Artificial Magnetic Conductor," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 6, pp. 1682-1690, Jun. 2007.
- [18] R. gardelli, M. Albani, and F. Capolino, "Array thinning by using antennas in a Fabry-Perot cavity for gain enhancement," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 54, No. 7, pp. 1979-1990, Jul. 2006.
- [19] G. K. Paliekaras, A. P. Feresidis, and J. C. Vardaxoglou, "Cylindrical Electromagnetic BandGap structures for directive base station antennas", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 3, pp. 87-89, 2004.
- [20] H. Chreim, E. Pointereau, B. Jecko, and P. Dufrane, "Omnidirectional Electromagnetic BandGap antenna for base station applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 6, pp. 499-502, 2007.
- [21] H. Boutayeb, T. A. Denidni, K. Mahdjoubi, A.-C. Tarot, A.-R. Sebak, and L. Talbi, "Analysis and

design of a cylindrical EBG-based directive antenna," IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 54, No. 1, pp. 211-219, Jan. 2006.

[22] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces-Theory and Design, John-Wiley & Sons, Inc., pp. 5-6, 2000.

저 자 소 개



여 준 호(정회원)
 1992년 경북대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 1994년 경북대학교
 전자공학과 석사 졸업.
 2003년 미국 Pennsylvania State
 University 전기공학과
 박사 졸업

1994년 3월~1999년 6월 국방과학연구소 연구원
 2003년 9월~2004년 6월 미국 Pennsylvania
 State University 박사후과정
 2004년 8월~2007년 2월 한국전자통신연구원
 RFID 시스템연구팀 선임연구원
 2007년 3월~현재 대구대학교 정보통신공학부
 교수

<주관심분야 : Antenna design using EBG
 structures, FSS & AMC design, RFID tag
 antenna design, RFID sensor tag, development
 of numerically efficient methods in
 electromagnetics>



김 동 호(정회원)
 1998년 2월 경북대학교
 전자공학과 공학사
 2000년 2월 경북대학교
 전자공학과 공학석사
 2006년 2월 한국과학기술원
 전자전산학과 공학박사

2000년 1월~현재 한국전자통신연구원 방송통신
 융합부문 전파방송원천기술연구팀
 선임연구원

<주관심분야 : Metamaterials, antennas, FSS,
 AMC, periodic structure analysis, EM theory>