

평판형 메타 물질로 구성된 상부 덮개를 갖는 와이브로 기지국용 고 이득 Fabry-Pérot 공진기 안테나

High-Gain Fabry-Pérot Cavity Antenna with Planar Metamaterial Superstrate for Wibro Base Station Antennas

김 동 호 · 최 재 익

Dongho Kim · Jae-Ick Choi

요 약

음의 유전율 및 투자율을 갖도록 고안된 메타 물질을 안테나 상부 덮개(superstrate)로 사용한 와이브로(Wibro: wireless broadband internet) 기지국용 고 이득 Fabry-Pérot 공진기 안테나를 제안한다. 안테나의 상부 덮개로 사용된 새로운 메타 물질은 기존의 PCB 기술로 쉽게 제작 가능하도록 평판형으로 설계되었으며, 와이브로 서비스 주파수 대역 근방에서 음의 굴절률 및 '1'보다 작은 저 굴절률 값을 갖는다. 안테나의 이득 증대 효과를 유효 매질 관점에서 추출된 메타 물질의 저 굴절률 특성과 Fabry-Pérot 공진기의 공진 조건이라는 두 가지 측면에서 분석하였다. 단일 정사각형 패치 안테나가 공진기 내부의 신호 피더로 사용되었으며, Fabry-Pérot 공진 조건을 충족시키기 위해 피더와 메타 물질 상부 덮개 사이의 이격 거리는 유전체층을 포함한 접지면의 반사 위상과 메타 물질 상부 덮개의 반사 위상을 함께 고려하여 설정하였다. 시뮬레이션을 통한 예측 특성과 실험 결과가 잘 일치하였으며, 이를 통하여 본 논문에서 제시한 설계 방법이 타당함을 입증할 수 있었다.

Abstract

A new high-gain Fabry-Pérot cavity antenna for wireless broadband internet(Wibro) base station antennas, which is covered with metamaterial superstrate presenting simultaneous negative values of permittivity and permeability, is proposed. To facilitate the fabrication process using the printed circuit board(PCB) technology of today, a new planar-type metamaterial superstrate is designed, which shows negative and low positive values of a refractive index near the Wibro service frequency band. And the principle of antenna gain enhancement is analyzed from the two different view points of effectively low refractive index and of the Fabry-Pérot resonance condition. Single square patch antenna is used as a feeder. The separation distance is determined by considering the reflection phases of the metamaterial superstrate and the substrate satisfying Fabry-Pérot resonance condition, respectively. Comparison between the prediction and the measurement shows good agreement, which verifies the validity of our design approach.

Key words : Metamaterial, Negative & Low Refractive Index, Fabry-Pérot Cavity, Resonator Antenna

I. 서 론

음의 유전율과 투자율을 동시에 갖는 메타 물질

에 대한 연구는 1968년 Veselago가 그 이론적인 특성에 관하여 고찰 결과를 발표한 후, 음의 유전율을 얻을 수 있는 매질에 관한 연구에서는 여러 가지 성과

「이 연구는 지식경제부에서 지원하는 전문 연구 사업의 일환으로 수행되었음[인공 전자기 구조를 이용한 차세대 전파 센서 기술 개발].」

한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 20080902-113

· 수정완료일자 : 2008년 10월 27일

가 있었지만, 음의 투자율에 대한 연구는 Pendry에 의해 인류 최초로 음의 투자율 매질(SRR: Split-Ring Resonator)이 제안되기까지 거의 30년 동안 별다른 진전이 없었다^{[1]~[3]}.

음의 굴절률을 갖는 메타 물질의 물리적 존재 가능성은 실험적으로도 증명되었는데, 스넬의 법칙을 응용하여 짧은 와이어와 SRR로 이루어진 메타 물질로 구성된 프리즘을 통과한 전자파가 실제 음의 각도로 굴절됨이 확인되었다^[4]. 그 후, 음의 굴절률을 얻을 수 있는 구조에 대한 많은 연구가 진행되었는데, 대부분의 메타 물질 구조들은 음의 굴절률을 얻을 수 있는 구조와 음의 투자율을 얻을 수 있는 개별 공진 구조들의 조합으로 이루어졌다. 이러한 개별 공진 구조들의 조합은 음의 굴절률을 나타내는 주파수 범위가 매우 좁다는 단점이 있는데, 이를 극복하기 위해 'S'자 모양의 공진 구조가 새롭게 제안되었다^[5]. 'S' 모양의 구조는 기존의 메타 물질 구조들에 비해 대략 10배 이상의 넓은 대역에서 음의 굴절 특성을 나타낸다.

기술된 메타 물질 구조들은 음의 유전율 혹은 투자율을 얻기 위한 전파의 진행 방향이 모두 유전체의 넓은 면과 평행한 방향이다. 이러한 특성은 메타 물질의 실제 응용을 위해 'hot-pressing' 기법 등을 이용하여 많은 층을 쌓아야 하는 제작상의 문제점을 야기하는데, 평판형 메타 물질 구조가 제안됨에 따라 위와 같은 문제가 해결되었다^[6].

앞서 언급된 메타 물질의 특성 분석은 주로 굴절률의 측정으로부터 이루어지는데, 이 방법으로는 메타 물질의 유전율, 투자율 또는 임피던스와 같은 전자기적 특성 파악이 용이하지 않다. 이를 위해 고안된 방법이 유효 매질(effective medium) 관점에서 물질의 파라미터를 추출하는 방법이다. 이 방법은 외부에서 메타 물질에 전자파를 인가하여, 반사 및 투과된 파의 크기와 위상을 바탕으로 필요한 파라미터들을 추출한다^{[7],[8]}. 본 논문에서 추출한 파라미터들도 위의 방법을 따르고 있다.

음의 유전율 및 투자율 이외에 메타 물질이 갖는 다른 중요한 특성 중 하나가 저 굴절률이다. 저 굴절률 매질은 통상적으로 자유 공간의 굴절률보다 작은 값을 갖는 매질을 지칭하며, 저 굴절률 매질을 빠져나오는 전자파는 스넬의 법칙에 따라 한 방향으로

집중되는 성질을 이용하여 안테나의 지향 특성을 향상시키기 위한 여러 가지 응용이 주목받고 있다^{[9],[10]}.

앞서 언급한 메타 물질의 여러 가지 특성들을 기반으로 최근 주목 받고 있는 응용 분야 중 하나가 전자기적 밴드 갭(EBG: Electromagnetic BandGap)을 이용한 공진기 안테나(EBG-resonator antenna)이다. 초기 단순히 Fabry-Pérot 공진기 내부에 안테나를 위치시킨 형태에서 출발한 공진기 안테나 분야는 최근 들어 인공 자기 도체(AMC: Artificial Magnetic Conductor), 주파수 선택적 표면(FSS: Frequency Selective Surface) 혹은 부분적 반사 표면(PRS: Partially Reflective Surface) 등의 구조가 공진기 내부 도체를 대체 하면서 안테나의 크기, 공진 주파수 및 이득 등을 사용자의 요구에 맞도록 조절 가능한 설계 방법도 출할 수 있는 방향으로 발전하고 있다^{[11]~[13]}. 그 외에도 실린더 구조에서의 응용, 좀 더 넓은 빔 폭의 획득이나, 아주 가까운 주파수 대역의 분리 등으로도 공진기 안테나의 응용 분야는 지속적으로 확장되고 있다^{[14]~[16]}.

본 논문은 크게 두 가지 내용으로 요약된다. 우선, 2 GHz 대역에서 음의 유전율, 투자율 및 굴절률을 동시에 갖는 평판형 메타 물질을 새롭게 제안한다. 그리고 이 메타 물질이 갖는 두 가지 서로 다른 특성, 즉, 굴절률이 거의 '0'에 근접하는 특성과, Fabry-Pérot 공진 특성을 유도할 수 있는 반사 위상 특성이 각각 안테나의 이득 향상에 미치는 영향을 구분하여 분석하였다. 설계 대상 안테나는 와이브로(Wibro: Wireless broadband internet) 주파수 대역(2.3~2.4 GHz)에서 동작하는 고 이득 기지국용 안테나이다. 이 안테나는 기존 PCB 공정으로도 제작이 용이한 평판형 메타 물질 구조를 안테나의 상부 덮개로 갖는 Fabry-Pérot 공진기와 신호 피더로 구성된다. 본 논문의 시뮬레이션은 CST Microwave Studio를 이용하여 수행되었다.

II. 평판형 메타 물질 설계

본 논문에서 제안한 평판형 메타 물질 구조가 그림 1에 주어져 있다. 내부의 'X'자 모양 형태 구조와 외부의 정사각형 루프 구조로 구성되어 있으며, 유전체의 양면에 동일한 구조가 에칭되어 있다. 사용된 유

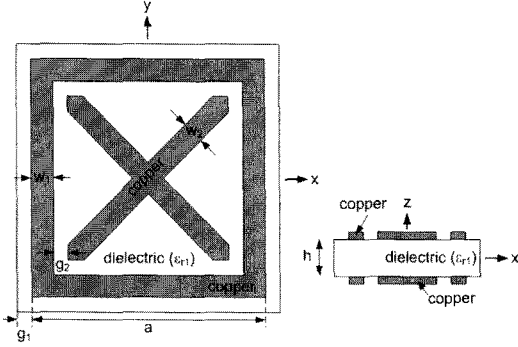


그림 1. 음의 굴절률을 갖는 메타 물질 구조($a=18$ mm, $g_1=2$ mm, $g_2=w_1=0.5$ mm, $w_2=1.5$ mm, $h=3.175$ mm, $\epsilon_{r1}=6.15$)

Fig. 1. Geometry of metamaterial with negative refractive index($a=18$ mm, $g_1=2$ mm, $g_2=w_1=0.5$ mm, $w_2=1.5$ mm, $h=3.175$ mm, $\epsilon_{r1}=6.15$).

전체는 타코닉(Taconic)사의 RF-60A 기판으로 10 GHz에서 상대유전율은 6.15, 손실 탄젠트(loss tangent)는 약 0.0018의 값을 갖는다.

그림 1의 평판형 메타 물질 구조가 갖는 유효 매질 파라미터는 시뮬레이션을 통하여 계산된 매질의 S 파라미터로부터 다음의 식을 이용하여 추출이 가능하다^[7].

$$Z_n = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (1)$$

$$n = \frac{\text{Im}[\ln(e^{ink_0h_i})] + 2m\pi - i\text{Re}[\ln(e^{ink_0h_i})]}{k_0h_i} \quad (2)$$

$$e^{ink_0h_i} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1}} \quad (3)$$

위의 식에서 Z_n 은 자유 공간 임피던스로 정규화된 메타 물질의 전파 임피던스, n 은 유효 굴절률, k_0 는 자유 공간 전파 상수, h_i 는 도체 패들들을 포함한 메타 물질의 전체 두께, m 은 정수, $\text{Im}[\]$ 과 $\text{Re}[\]$ 는 각각 허수부와 실수부를 의미한다. 본 논문의 메타 물질 구조는 수동 소자이기 때문에 식 (1)의 임피던스의 실수부는 항상 0 이상의 값을 가져야 한다. 또한, 굴절률은 식 (3)의 크기가 항상 1 이하인 조건으로부터 적합한 유효 임피던스와 유효 굴절률 값을 얻을 수 있으며, 유효 유전율과 유효 투자율은 식 (4)로부터 결정된다.

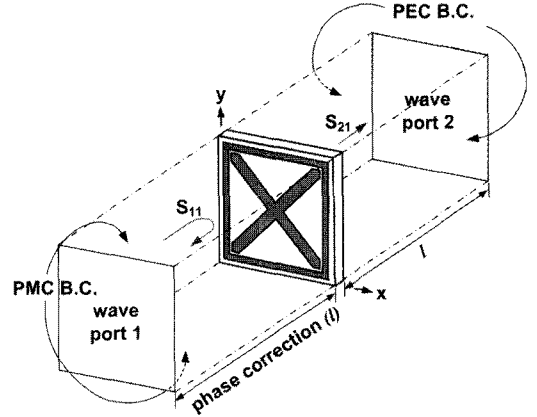


그림 2. 메타 물질의 유효 매질 특성 추출을 위한 시뮬레이션 셋업

Fig. 2. Simulation setup for the retrieval of effective medium parameters of the proposed metamaterial.

$$\epsilon = \frac{n}{Z_n}, \quad \mu = n Z_n \quad (4)$$

본 논문에서는 $e^{-i\omega t}$ 시간 의존성이 사용되었다.

식 (1)~(4)를 이용한 유효 매질 파라미터는 입사 파가 평면파임을 가정한다. 따라서 그림 2에 보인 바와 같이 시뮬레이션을 통한 매질의 S 파라미터를 구하기 위해서는 평면파가 전파 가능한 도파관이 필요한데, 이는 전장의 접선 성분과 자장의 접선 성분이 각각 0이 되게 하는 완전 전기 도체(PEC: Perfect Electric Conductor) 및 완전 자기 도체(PMC: Perfect Magnetic Conductor) 경계 조건을 이용함으로써 쉽게 구현이 가능하다. 단, 실제로 존재하지 않는 평면파 전파가 가능한 구형 도파관 내부에 고차 모드가 발생하지 않는 주파수 영역을 선택하는 것이 중요하다.

그림 1에서 제안된 평판형 메타 물질 구조가 갖는 유효 매질 파라미터들이 그림 3에 주어져 있다. 그림에서 수치 해석적인 방법을 통한 예측치와 정사각형 심벌로 표시된 실험치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 실험은 참고문헌 [6]에서 사용된 것과 유사한 방법을 통하여 이루어졌다. 측정에는 ETS-Lindgren 사의 ETS-3115 광대역 표준 혼 안테나가 사용되었다.

그림 3에 주어진 유효 굴절률은 그림 3의 유효 유전율 및 투자율로부터 역으로도 계산이 가능하며, 이

는 식 (1)~(4)의 이용에 있어서 정확한 유전율 및 임피던스의 부호가 채택되었음을 의미한다. 그림 3의 임피던스를 살펴보면, 전반적으로 자유 공간 임피던스에 비해 낮은 임피던스를 갖지만 2.0~2.3 GHz 사이와 약 3 GHz 근방에서 자유 공간 임피던스와 유사한 임피던스를 갖는다. 이러한 메타 물질의 임피던스 변화 특성은 안테나와 메타 물질이 근접해 있을 경우, 안테나의 설계 단계에서 고려해야할 중요한 파라미터이다.

또한, 그림 3은 비교적 좁은 주파수 대역에서 굴절률의 변화가 음수에서 양수로 전환되는 것을 보여준다. 이는 와이브로 주파수 대역에서 그림 3과 같은 유효 매질 특성이 안테나의 상부 덮개로 어떤 역할을 하는지 파악하기 위해 고의적으로 유도한 특성이며, 그림 1의 구조를 적절히 변형함으로써 더욱 넓은 대역에서 음수 혹은 저 굴절률 특성을 갖게할 수도 있다⁷⁾.

그림 1의 구조가 그림 3과 같은 음의 유전율, 음의 투자율 및 음의 굴절률을 갖는 원리를 간단히 설명하면 다음과 같다. 우선 음의 유전율은 사각형 루프와 'X' 모양 패턴의 플라즈마와 유사한 특성으로부터 바로 유도된다. 음의 투자율은 유전체 기판 앞뒷면에 에칭된 패턴들이 구성하는 직렬 공진으로부터 얻어진다. 즉, 패턴들의 표면에 유기되는 전도 전류 밀도(conduction current density)에 의한 인덕턴스

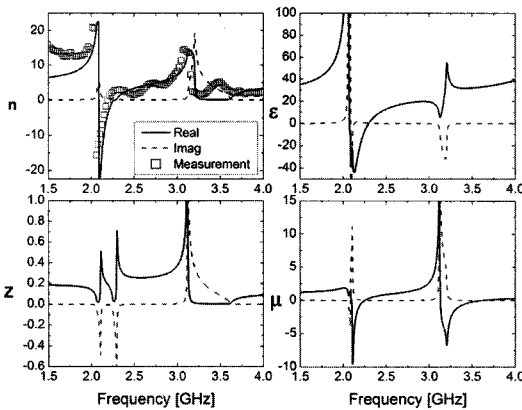


그림 3. 시뮬레이션 및 측정을 통한 제안된 메타 물질의 유효 매질 특성

Fig. 3. Comparison of simulated and measured effective medium parameters of proposed metamaterial.

와 패턴 사이의 유전체 층 내부에 존재하는 변위 전류 밀도(displacement current density)에 의한 커패시턴스가 직렬 공진 회로를 구성하여, 음의 투자율을 얻을 수 있다^{3),5)}. 이렇게 도출된 음의 유전율과 음의 투자율을 특정한 주파수 대역에서 동시에 존재하도록 중첩시킴으로써 그림 3과 같은 음의 굴절률을 얻을 수 있는 것이다. 이는 그림 1에 주어진 구조의 설계 파라미터를 조절함으로써 그림 3의 매질 특성을 사용자가 원하는 주파수 대역으로 이동 가능하다는 것을 함께 의미한다.

그림 4는 제안된 메타 물질 구조가 그림 3과 같은 음의 굴절 특성을 갖는지 검증하기 위한 시뮬레이션 셋업 및 결과를 보인 것이다. 실험을 위하여 x 방향으로 10개의 메타 물질 셀을 붙이고, z 방향으로는 경사를 갖도록 맨 왼쪽에 20개의 셀을 쌓고, x 방향으로 가면서 셀을 2개씩 빼면서 결과적으로 그림 4와 같은 프리즘 형태를 만들었다. 명확한 굴절 특성 관찰을 위해 프리즘 부분을 제외한 나머지 부분은 도체로 막아 y 방향 편파를 갖는 평면파가 프리즘 부분으로만 입사되도록 하였다. 프리즘의 경사 각도는 약 16.5°이다.

그림 4의 결과에서 볼 수 있듯이, 프리즘을 통과한 전자파가 프리즘의 경사면에 수직인 방향으로 오른쪽으로 굴절되고 있으며, 이는 프리즘이 음이 유효 굴절률을 가짐을 의미한다. 굴절률이 거의 '0'에 가까울수록 굴절된 전자파는 경사면에 수직인 방향과 평행한 방향으로 진행하며, 굴절률이 양수인

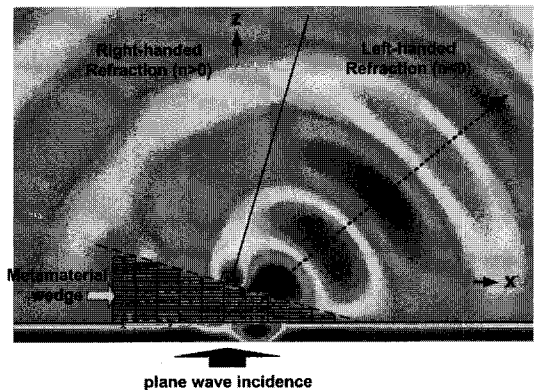
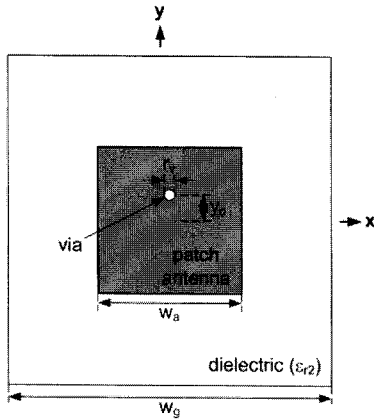


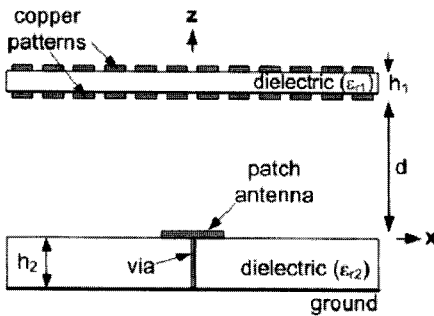
그림 4. 음의 굴절 특성 검증을 위한 시뮬레이션
Fig. 4. Computer simulation for the verification of negative refraction.

경우, 경사면에 수직인 방향에서 왼쪽으로 굴절하게 된다. 실험 방법은 참고문헌 [4], [5]에 사용된 방법과 매우 유사하다.

이제 그림 3, 4와 같이 도출된 평판형 메타 물질 특성이 안테나의 복사에 미치는 영향을 살펴보겠다. 그림 5는 본 논문에서 제안한 공진기 안테나의 전체적인 구성과 피더로 사용된 정사각형 패치 안테나의 구조를 보여준다. 신호 피더는 일반적인 정사각형 패치 안테나이며, 그림 5(a)의 via는 동축 케이블의 내부 도체를 의미한다. 안테나 상부 덮개는 그림 1의 메타 물질을 x, y 방향으로 각각 11×11 개(약 $1.9 \lambda \times 1.9 \lambda$)씩 붙여 만들어졌으며, 패치 안테나로부터



(a) 패치 안테나
(a) Patch antenna



(b) 공진기 안테나 구조(단면도)
(b) Resonator antenna(cut-view)

그림 5. 공진기 안테나 및 피더로 사용된 패치 안테나 구조($r_v=1.0$ mm, $y_o=4$ mm, $h_2=1.52$ mm, $w_a=32.5$ mm, $w_g=262$ mm, $\epsilon_{r1}=6.15$, $\epsilon_{r2}=3.5$)

Fig. 5. Geometry of a resonator antenna and a patch antenna($r_v=1.0$ mm, $y_o=4$ mm, $h_2=1.52$ mm, $w_a=32.5$ mm, $w_g=262$ mm, $\epsilon_{r1}=6.15$, $\epsilon_{r2}=3.5$).

거리 d 만큼 이격되어 있다. 패치 안테나는 Taconic사의 RF-35 기판으로 제작되었다. 제안된 안테나는 그림 5(b)와 같이 상부 덮개와 유전체로 덮인 접지면이 Fabry-Pérot 공진기를 이루고 있으며, 이 공진기 내부에 패치 안테나가 신호를 공급하고 있다. 이러한 안테나는 상부 덮개와 접지면의 반사 위상 및 거리 d 가 공진기의 공진 조건을 만족시킬 때, 높은 이득을 나타내는 특성이 있다. 이러한 고 이득 특성은 다음 절에서 살펴보기로 하고, 여기서는 우선 이러한 Fabry-Pérot 공진 특성을 없애 굴절률이 거의 '0'에 근접하는 메타 물질의 특성이 안테나에 미치는 영향에 대하여 살펴보겠다.

그림 6은 그림 5와 같이 구성된 안테나의 반사 손실 및 실현 이득(realized gain) 특성을 보인 것이다. Fabry-Pérot 공진 특성을 없애고, 메타 물질 상부 덮개의 영향만을 보기 위해서 패치 안테나의 크기는 동일하게 유지하면서 접지면의 면적을 상부 덮개 면적의 약 1/24 크기로 축소하였다. 그리고 상부 덮개와 패치 안테나 사이 거리를 2 mm 거리로 밀착시켰다. 그림 6을 보면 비록 안테나의 이득은 크지 않지만, 이득이 최대인 주파수가 그림 3에서 굴절률의 실수부(real part)가 '0'이 되는 주파수(약 2.28 GHz)와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이득이 크지 않은 이유는 안테나와 상부 덮개 사이의 임피던스의 부정합 등의 영향으로 판단되며, 좀 더 높은 이득을

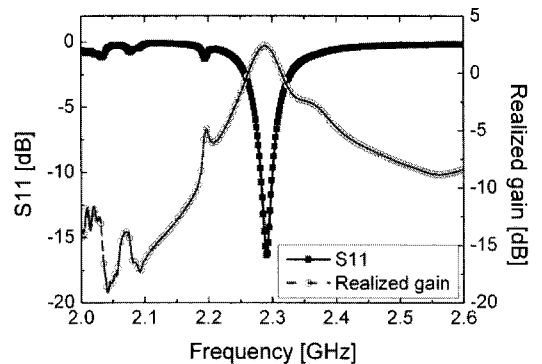


그림 6. 메타 물질 상부 덮개로 덮여 있으며 작은 접지면을 갖는 안테나의 특성($d=2$ mm, $w_g=50$ mm, $\theta=\phi=0$)

Fig. 6. Behaviors of the antenna with a small ground plane, which is covered with metamaterial superstrate($d=2$ mm, $w_g=50$ mm, $\theta=\phi=0$).

얻기 위해서는 위와 같은 기술적 요인들을 해결해야 한다.

III. 와이브로 안테나 설계

본 절에서는 Fabry-Pérot 공진 특성을 이용하여 높은 이득을 갖는 안테나를 설계한다. 공진기 안테나의 구조는 앞서 보인 그림 5와 동일하며, 접지면은 상부 덮개와 동일한 크기를 갖는다. 안테나의 이득을 높이기 위해서는 접지면과 메타 물질 상부 덮개 사이의 이격 거리 및 반사 위상들이 식 (5)에 주어진 Fabry-Pérot 공진 조건을 만족하여야 한다^[6].

$$d = \frac{c}{2f} \left(\frac{\phi_l + \phi_h}{2\pi} + m \right) \quad (5)$$

식 (5)에서 d 는 패치 안테나와 상부 덮개 사이의 이격 거리, c 는 자유 공간에서의 전파 속도, f 는 주파수, ϕ_l 은 접지반의 반사 위상, ϕ_h 는 상부 덮개의 반사 위상, m 은 정수를 의미한다.

그림 7은 메타 물질 상부 덮개와 접지반의 반사 위상을 각각 보인 것이며, 그림 8은 그림 7의 반사 위상을 식 (5)에 대입하여 얻은 Fabry-Pérot 공진 조건이다.

본 논문에서는 안테나의 중심 주파수를 와이브로 대역의 중심인 2.35 GHz로 설정하였으며, 그림 8에서 보인 바와 같이 그 중심 주파수에 해당하는 적절한 이격 거리(d)가 약 10 mm와 72 mm임을 확인할 수 있다. 이격 거리가 10 mm인 경우, 다른 주파수 대역에서의 이격 거리가 구현 불가능한 음수의 값을 가지며, 안테나의 상부 덮개에 적용한 결과 적절한 이득을 얻을 수 없었다. 따라서 본 논문의 안테나에서는 72 mm의 이격 거리를 사용하였다.

그림 9는 그림 8의 방법으로 예측된 공진 거리 d 를 갖는 안테나의 실현 이득(realized gain) 및 지향성(directivity) 등을 나타낸 것이다. 안테나의 최대 실현 이득은 2.35 GHz에서 약 14.1 dB이며, 패치 안테나만 사용하였을 경우에 비해 약 10 dB 정도의 이득 증가 효과가 있었다. 또한, 약 2.3~2.4 GHz 대역에서 실현 이득이 11 dB 이상으로, 와이브로 서비스 대역 전체를 커버하고 있음을 볼 수 있다. 그림 9에서 목표로 한 와이브로 대역을 제외한 주파수 대역에서

지향성(directivity)과 실현 이득 사이에 많은 차이가 있음을 볼 수 있는데, 이는 안테나의 전체 효율(total efficiency)이 2.35 GHz를 중심으로 양쪽으로 많이 낮아지기 때문이다. 이러한 현상은 피더로 사용된 패치 안테나 자체 및 패치 안테나와 상부 덮개 사이의 임피던스 부정합에 기인한다. Fabry-Pérot 공진 조건을 다른 주파수 대역에서는 만족하지 못하는 것이 또 다른 이유이다. 하지만 실현 이득이 안테나의 소스부와 안테나 사이의 부정합, 복사 효율(radiation efficiency), 안테나의 손실 저항 등을 모두 포함하는 최종 이득임을 감안하면, 목표 주파수 대역에서 지향성(directivity)과 거의 유사한 값을 보이는 것은 제안된 안테나의 전체 효율(total efficiency)이 매우 좋음을 의미한다.

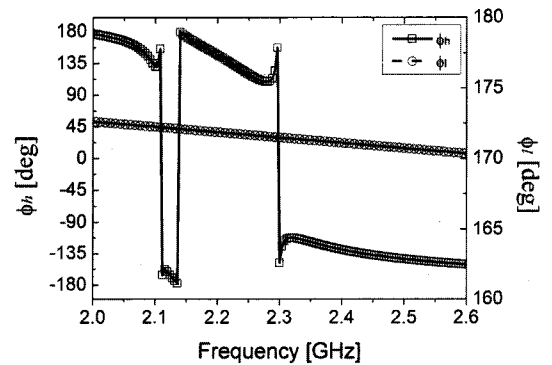


그림 7. 메타 물질 상부와 접지반의 반사 위상
Fig. 7. Reflection phases of the metamaterial superstrate and ground substrate.

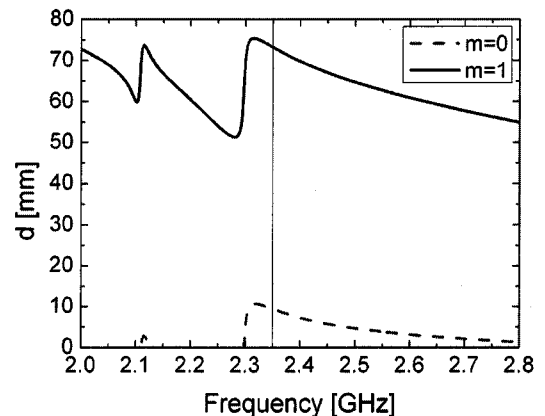


그림 8. Fabry-Pérot 공진 조건
Fig. 8. Fabry-Pérot resonance condition.

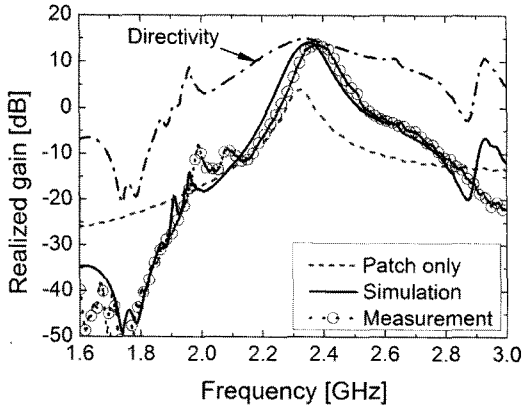


그림 9. 와이브로 안테나의 실현 이득 및 지향 특성 ($d=72$ mm, $w_g=242$ mm, $\theta = \phi=0$)

Fig. 9. Gain and directivity properties of the Wibro antenna ($d=72$ mm, $w_g=242$ mm, $\theta = \phi=0$).

본 논문에서 사용된 상부 덮개의 메타 물질 셀은 0 굴절률과 원하는 Fabry-Pérot 공진 특성이 안테나에 미치는 영향을 최대한 유사한 주파수 대역에서 함께 보기 위한 목적으로 설계되었다. 따라서 그림 9에 보인 약 14.1 dB의 안테나 최대 이득은 상부 덮개 구조 등의 변형을 통하여 더 높은 값으로 증가시킬 수 있다.

그림 10은 최대 복사 주파수에서 안테나의 복사 패턴을 보인 것이다. E, H 평면에 대해 주 빔 방향으로 유사한 패턴을 나타내며, 주 빔은 약 30° 내외의 3 dB 빔 폭을 가진다. 그림 9와 그림 10에 주어진 안테나 이득의 측정 결과들은 시뮬레이션을 통한 예측

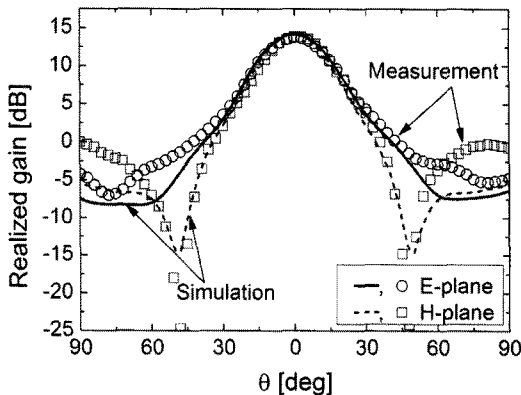


그림 10. 와이브로 안테나의 복사 패턴($f=2.35$ GHz)

Fig. 10. Radiation patterns of the Wibro antenna ($f=2.35$ GHz).

치와 매우 잘 일치하며, 이는 본 논문에서 사용된 해석 및 설계 방법이 유효함을 증명한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 음의 굴절률을 나타내는 평판형 메타 물질과 이 메타 물질을 상부 덮개로 갖는 패치 안테나 피더로 구성된 2.3 GHz 대역을 사용하는 와이브로 기지국용 공진기 형태의 안테나를 제안하였다. 비교적 얇은 메타 물질의 두께 방향으로 진행되는 평면파에 대하여 제안된 메타 물질은 음의 굴절률을 나타냄을 확인할 수 있었으며, 굴절률이 거의 '0'에 가까운 대역에서 이득이 높지는 않지만 예측했던 대로 빔이 집중되는 현상을 확인할 수 있었다.

그리고 실제 응용 가능한 고 이득 안테나의 설계를 위하여 메타 물질 상부를 덮개로 갖는 Fabry-Pérot 공진기 타입의 안테나를 제안하였으며, 와이브로 전 주파수 대역에서 약 11 dB 이상의 실현 이득을 얻을 수 있었다. 3 dB 빔 폭이 E, H 평면에 대하여 약 30° 정도로 국한되어 안테나 하나만으로는 방위각(azimuth)에 해당하는 전 방향을 커버할 수는 없지만, 단일 패치 안테나라는 단순한 피딩 구조만으로도 비교적 높은 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

이러한 단점의 보완을 위해 안테나 구조의 변형이나 개선을 통한 이득 및 빔 폭의 증대에 대한 연구가 현재 진행 중이다.

참 고 문 헌

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Soviet Phys. Usp.*, vol. 10, pp. 509-514, Jan.-Feb. 1968.
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 25, pp. 4773-4776, Jun. 1996.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Trans. Microwave and Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.

- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction", *Science*, vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.
- [5] H. Chen, L. Ran, J. Hungfu, X. Zhang, K. Chen, T. M. Grzegorzcyk, and J. A. Kong, "Left-handed materials composed of only S-shaped resonators", *Phys. Rev. E* 70, 057605, 2004.
- [6] L. Markley, G. V. Eleftheriades, "A negative-refractive-index metamaterial for incident plane waves of arbitrary polarization", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 28-32, 2007.
- [6] X. Chen, T. M. Grzegorzcyk, B. I. Wu, J. Pacheco, and J. A. Kong, "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials", *Phys. Rev. E* 70, 016608, 2004.
- [7] D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials", *Phys. Rev. E* 71, 036617, 2005.
- [8] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabourous, N. Guerin, and P. Vincent, "A metamaterial for directive emission", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 89, no. 21, 213902, Nov. 2002.
- [9] Q. Wu, P. Pan, F. Y. Meng, L. W. Li, and J. Wu, "A novel flat lens horn antenna designed based on zero refraction principle of metamaterials", *Appl. Phys. A* 87, pp. 151-156, 2007.
- [10] A. Ourir, A. D. Lustrac, and J. M. Lourtioz, "All-metamaterial-based subwavelength cavities ($\lambda/60$) for ultrathin directive antennas", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, 084103, 2006.
- [11] D. H. Lee, Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Design of novel thin frequency selective surface superstrates for dual-band directivity enhancement", *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 1, no. 1, pp. 248-254, 2007.
- [12] N. Guerin, S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, P. Vincent, and H. Legay, "A metallic Fabry-Pérot directive antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 1, pp. 220-224, Jan. 2006.
- [13] H. Boutayeb, T. A. Denidni, "Metallic cylindrical EBG structures with defects: Directivity analysis and design optimization", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 11, pp. 3356-3361, 2007.
- [14] Z. Liu, W. Zhang, D. Fu, Y. Gu, and Z. Ge, "Broadband Fabry-Pérot resonator printed antennas using FSS superstrate with dissimilar size", *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 50, no. 6, pp. 1623-1627, Jun. 2008.
- [15] E. Rodes, M. Diblanc, E. Arnaud, T. Monediere, and B. Jecko, "Dual-band EBG resonator antenna using a single-layer FSS", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 368-371, 2007.
- [16] 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 Propag.*, vol. 55, no. 6, pp. 1682-1690, Jun. 2007.

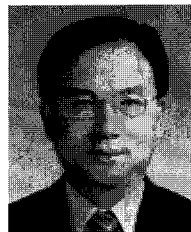
김 동 호



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2003년 3월~2006년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)
 2000년 1월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원

[주 관심분야] 메타 물질 해석 및 설계, 안테나 설계, 주기 구조 해석, 전자파 산란, 전자파 이론 등

최 재 익



1981년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 8월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
 1995년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학박사)
 1983년 3월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원/팀장

[주 관심분야] RF 안테나 기술, 메타 물질 응용 기술, 전파 엔지니어링 등