

공진형 메타 전자파 구조의 설계 기술 및 동향

최재익 · 김동호 ·

주정호 · 이왕주

한국전자통신연구원

I. 서 론

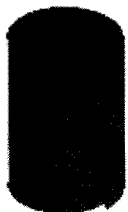
1968년 러시아 물리학자 Veselago는 음의 유전율과 투자율을 가질 경우에 매질의 물리적 특성과 응용 잠재성을 광범위하게 제시하였다<sup>[1]</sup>. 음의 유전율을 갖는 구조는 Veselago 이전에도 이미 제시가 되었었지만<sup>[2],[3]</sup>, 1999년 영국의 Imperial 대학 교수인 Pendry는 [그림 1]과 같은 Swiss Roll 형태의 공진 구조를 이용하여 자성체를 쓰지 않고도 음의 투자율 실현 가능성을 처음 소개하였다<sup>[4]</sup>. 그 후 미국의 UCSD의 Smith 그룹에 의하여 SRR(Split Ring Resonator)과 Thin Wire의 주기적 조합으로 음의 굴절률을 증명하게 되었다<sup>[5],[6]</sup>. UCLA에서는 전송선 구조를 이용한 메타 전자파 구조에 대한 이론을 정립하고 다양한 RF 부품 및 안테나에 적용한 구조를 제안하였다<sup>[7]</sup>.

이러한 기반 기술을 토대로 하여 미국, 유럽, 캐나다, 중국 등 많은 선진 국가의 대학과 연구기관에서 범 정부적인 지원으로 연구 개발을 경쟁적으로 추진

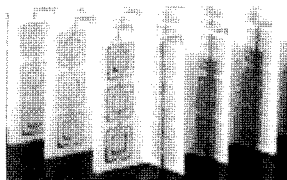
하고 있다.

특히 공진형 구조는 M/W 대역에서부터 THz 대역과 광파 대역에 이르기까지 고효율 안테나, 투명 전자파 기기, 고해상도 센서 및 광학 렌즈 등 다양한 응용을 위하여 동작 주파수의 광대역화와 구현의 용이성 등을 고려하여 많은 연구를 진행하고 있다. [그림 1](c)는 MIT, 보스톤대 등에서 광대역화 등을 위하여 제안한 전형적인 구조를 보였다<sup>[8],[9]</sup>.

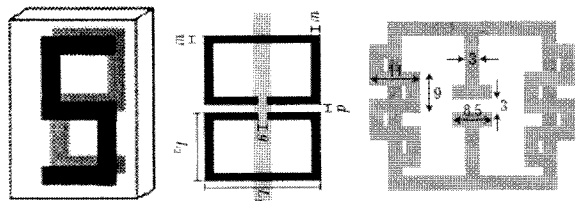
메타 물질은 특정 주파수에서 자연 상태의 물질로는 존재하지 않은 음의 유전율 또는 음의 투자율을 가질 수 있도록 파장보다 훨씬 짧은 주기적 구조로 이루어져 있다. 메타물질(MTM: Metamaterial)은 지금까지의 물리적 현상을 보다 확장한 것으로서 매우 신비롭고 흥미로운 다양한 특성(음의 굴절률, 파장과 주파수의 독립성, 위상 속도와 군 지연(group delay) 특성의 역상, 역 도플러 효과, 역 초점, 비자화 물질의 자화 현상, 표면 플라즈마 등)을 지니고 있다<sup>[7]</sup>. 이러한 메타 물질은 인공적인 구조에 의하여 특이한



(a) Pendry 교수가 음의 투자율을 실현한 스위스 롤(Swiss Roll) 공진구조



(b) Smith 교수가 음의 굴절률을 실험하기 위하여 제작한 구조



(c) 수정된 공진형 메타 전자파 구조들

[그림 1] 메타 전자파 구조

전자기적 특성 구현이 가능하므로 인공 전자파 구조라고도 한다<sup>[7]</sup>. 또한, M/W 영역에서 단위 셀 크기가 수 밀리미터 이상인 주기적 구조일 뿐만 아니라 일반적으로 알려진 전자파 특성과 다른 특이한 특성을 나타내고 있기 때문에 일반 독자들의 이해를 돕고 일반적인 물질이라는 용어로의 혼란을 방지하기 위하여 본 논문에서는 “메타 전자파 구조”라고 하기로 한다.

메타 전자파 구조는 2003년과 2006년 Science지에 LHM (Left Handed Metamaterial)과 미래 투명 망토가 가능한 M/W Cloak 기술로서 10대 혁신 기술로 각각 소개된 바 있으며, 2007년도에는 MIT 공대에서 10대 기술로 선정하여 연구 개발을 하고 있다.

메타 전자파 구조 기술은 기존의 기술로는 불가능했던 주파수 독립적인 파장, 위상 및 굴절률 제어를 바탕으로 한 신개념의 차세대 기술로서 정보 통신 기기, 전자 제품 등의 초소형화, 고성능화 등의 실현이 가능하며, 고성능/고효율의 전파 통신 부품, 광통신 부품, 의료 진단 영상 장치, 보안 감시 시스템 등에 응용되어 유비쿼터스 사회의 산업 전반에 지대한 파급 효과를 미칠 것으로 보고, 선진 각국에서는 차세대 핵심 원천 기술로서 개발을 경쟁적으로 추진하고 있다. 미래의 전·후방 산업에 중요한 핵심 기술로 주목하고 있다.

2000년 이후 새로운 전자파 제어 기술인 메타 전자파 구조 기술에 대한 연구가 미국, 유럽, 캐나다 등 선진국에서 활발히 이루어지고 있으며, 이의 핵심 원천 기술 개발에 심혈을 기울이고 있다. 차세대 RF·마이크로파 디바이스의 개발에 필수적인 핵심 기술로 전망하고 그 응용 연구를 가속화하고 있다.

본 논문에서는 최초로 Pendry 교수와 Smith 교수가 음의 굴절률을 증명하기 위하여 활용한 메타 전자파 구조를 바탕으로 하여 개발되고 있는 새로운 형태의 공진형 메타 전자파 구조의 설계 기술을 2장에서 설명하고, 3장에서는 공진형 메타 전자파 구조

를 적용한 안테나와 MRI 센서 설계 기술을 논의하기로 한다, 마지막으로 4장에서는 메타 전자파의 기술 발전 현황과 전망을 제시하여 공진형 메타 전자파 구조의 기술과 발전 방향을 파악하고자 한다.

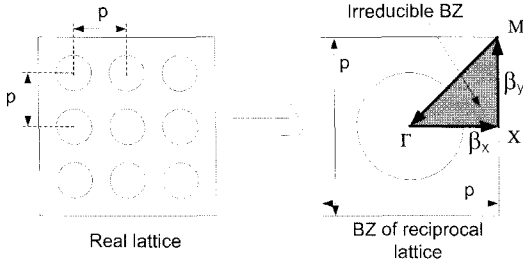
## II. 공진형 메타 전자파 구조의 설계

1보다 작은 유전율, 투자율, 굴절률을 얻기 위해서 전송선이나 공진 구조가 주로 이용되는데, 여기서는 메타 전자파 구조 설계에 필요한 기본적인 과정들 가운데 공진 구조와 관련된 방법들을 살펴보기로 한다.

제안된 공진형 구조가 메타 전자파 구조의 특성을 갖는지를 알아보기 위해서 살펴봐야 할 파라미터는 유전율, 투자율, 굴절률 등이며, 이를 위해 고유 모드(eigenmode) 해석, 투과(transmission) 특성 해석 및 유효 매질 파라미터의 추출과 같은 세 가지 방법을 이용할 수 있다.

고유 모드 해석 방법은 일반적으로 잘 알려진 PBG (Photonic Band Gap), EBG(Electromagnetic Band Gap) 구조의 해석을 위하여 오래 전부터 사용되어왔던 방법으로, 제안된 구조가 무한 배열로 반복된다는 가정 하에, 각 방향으로 전파 가능한 모드를 주파수와 전파 상수(propagation constant)의 함수로 찾는 것이다. 주기 구조가 무한히 반복되는 경우, 단위 셀(unit cell)의 반복성 때문에 전파 상수 또한 공간적으로 반복되는 값을 갖게 된다. 따라서 주기를 대표하는 단위 셀의 전파 양상을 파악하면 전체 주기 구조 내부에서의 전파 양상을 알 수 있으며, 이러한 단위 셀을 Brillouin Zone(BZ)이라 부른다. 단위 셀 내부서도 전파 상수는 대칭성을 갖는데, 전파 상수가 대칭성을 갖지 않는 BZ 내부의 가장 작은 영역을 Irreducible BZ(IBZ)라 한다<sup>[10]</sup>. [그림 2]는 2차원 주기 구조에서 BZ와 IBZ의 예를 보인 것이다.

[그림 2]에서  $\beta_{x,y}$  는 x, y 방향의 전파 상수를 의

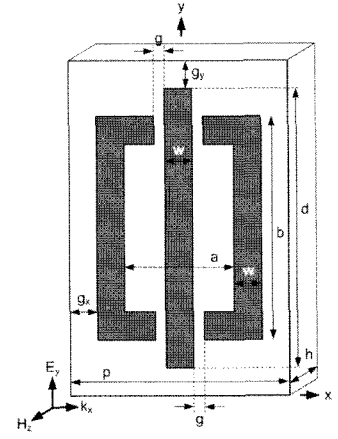


[그림 2] 주기 구조의 Brillouin zone과 irreducible Brillouin zone의 표현

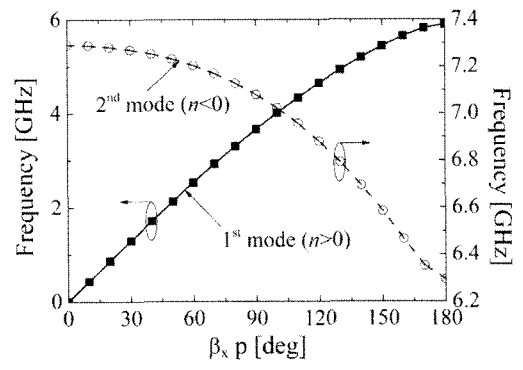
미한다.

[그림 3]은 음의 굴절률을 얻기 위한 공진 구조의 단위 셀의 일례를 보인 것이다. 입사파는 x 방향으로 진행하는 평면파로  $E_y, H_z$  필드로 구성된다. 그림에서 가운데의 wire로부터 음의 유전율이, 그리고 등가적으로 L, C로 구성된 가운데가 끊어진 루프로부터 음의 투자율을 얻을 수 있을 것으로 추측되며, 먼저 음의 굴절률의 존재 여부를 고유 모드 해석 방법을 통하여 알아보기로 한다. [그림 3]과 같은 평면파 입사 조건과 고유 모드 해석을 위해서 xz 평면에는 전기장의 접선 성분이 0인 경계 조건, xy 평면에는 자기장의 접선 성분이 0인 경계 조건을 각각 사용하였다. 그리고 yz 평면은 주기 경계 조건(periodic boundary condition)을 사용하였으며, x 방향으로 전파하는 전자파의 위상 변화( $\beta_x \cdot p$ )를 주기 경계 조건에 적용하였다.

[그림 4]는 [그림 3]의 구조를 [그림 2]에서 설명한 고유 모드 해석 방법을 이용하여 구한 모드들을 보인 것이다. [그림 4]에서 D.C.에서 약 6 GHz에 걸쳐서 존재하는 1차 통과 모드, 6.3 GHz에서 7.2 GHz에 걸쳐 존재하는 2차 통과 모드, 그리고 두 모드 사이에 존재하는 저지대역(stop band)을 각각 확인할 수 있다. 1차 모드는 굴절률이 양수인 모드이며, 2차 모드는 backward wave 모드를 의미하여 굴절률이 음수임을 확인할 수 있다. [그림 4]에서 보인 개별 모드



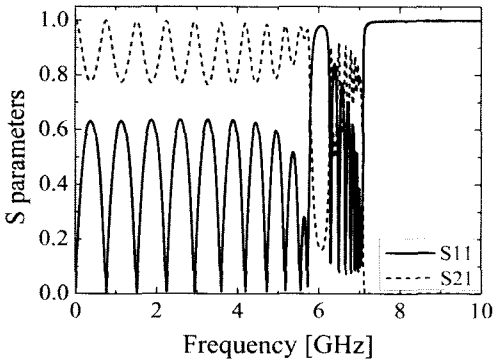
[그림 3] 변형된 루프와 와이어로 구성된 음 굴절 공진 구조 ( $a=6$  mm,  $b=12$  mm,  $d=14$  mm,  $g=0.25$  mm,  $g_x=1$  mm,  $g_y=0.2$  mm,  $h=4.035$  mm,  $p=10$  mm,  $w=1$  mm, and  $\epsilon_r=1.0$ )



[그림 4] 고유 모드(eigenmode) 해석 방법을 통하여 구한 1차 및 2차 전파(propagation) 모드

의 존재 여부를 확인하기 위하여 [그림 3]의 단위 셀을 전파의 진행 방향으로 몇 개 정도를 쌓아서 그 모드의 존재 여부를 직접 확인할 수 있는데, 이 방법이 앞서 언급한 투과(transmission) 특성 해석 방법이다.

[그림 5]는 [그림 3]에서 보인 단위 셀을 x 방향으로 10개를 쌓아서 만들어진 매질에 평면파를 입사시켰을 경우의 반사 및 투과 특성을 계산한 결과이다.



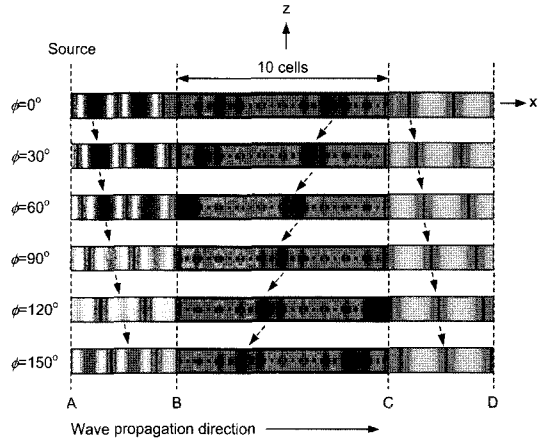
[그림 5] 그림 3의 단위 셀을 x 방향으로 10개를 쌓아 구성된 매질의 반사 및 투과 특성

[그림 5]를 보면 D.C.에서 약 5.8 GHz에 이르기까지 첫 번째 통과 대역(pass band)이 존재함을 알 수 있으며, 두 번째 통과 대역은 약 6.3 GHz에서 7.1 GHz까지 걸쳐 있음을 확인할 수 있다. 또한 그 두 모드 사이에 전파 저지 대역을 명확히 볼 수 있다. 이 결과는 [그림 4]에서 보인 고유 모드 해석 방법을 통해 구한 결과와 아주 잘 일치한다.

[그림 6]은 [그림 5]를 계산하기 위해 사용된 구조의 xy 평면 ( $y=0$ )을 잘라서  $E_z$  필드의 크기를 위상의 변화에 따라서 도시한 결과이다. [그림 6]에서 B~C 구간이 [그림 3]의 단위 셀을 10개 쌓은 구간이며, A~B 및 C~D 구간은 자유 공간이다. [그림 6]을 보면 시간의 흐름에 따라 자유 공간의 전자파는 x 방향으로 진행하지만 메타 전자파 구조가 있는 B~C의 구간에서는 역으로(-x 방향) 전파함을 확인할 수 있다.

따라서 [그림 4]~[그림 6]의 결과를 비교해 보면, 모드의 개수와 주파수 분포, 굴절률 값들이 모두 다 정확히 일치함을 알 수 있으며, 이는 두 해석 방법이 모두 정확함을 입증한다.

지금까지 고유 모드 해석 및 투과 특성 해석 방법에 관하여 살펴보았다. 두 방법의 공통점은 비교적 간단하게 모드 분포 및 굴절률이 음수가 되는 대역



[그림 6] 메타 전자파 구조 내부와 외부에서의 전파 양상 ( $f=7.0$  GHz)

을 찾을 수 있다는 것이다. 하지만 유전율과 투자율의 정확한 값을 알 수 없다는 것이 이 두 방법의 단점이다. 유전율과 투자율을 구하기 위해 [그림 3]의 메타 전자파 구조를 유효 매질(effective medium) 관점에서 분석하는 방법이 널리 사용되고 있다<sup>[11]</sup>. 이 방법은 해석 대상 매질(혹은 구조)에 외부에서 평면파를 인가하여 얻어진 반사 및 투과 특성을 이용하여 대상 매질의 굴절률과 임피던스, 유전율, 투자율과 같은 유효 매질 파라미터들을 구하는 방법이다. 우선,  $e^{-i\omega t}$  시간 제약 조건과 해석 대상 구조가 전파의 진행 방향으로 대칭이라는 가정 하에 매질의 유효 굴절률, 임피던스는 및  $S$  파라미터와의 관계는 다음과 같다<sup>[11]</sup>.

$$S_{11} = \frac{A(1 - e^{i2nk_0p})}{1 - A^2e^{i2nk_0p}}, S_{21} = \frac{(1 - A^2)e^{ink_0p}}{1 - A^2e^{i2nk_0p}} \quad (1)$$

여기서  $A=(Z-1)/(Z+1)$ 이고,  $n$ 은 매질의 유효 굴절률,  $k_0$ 는 자유공간 전파상수,  $p$ 는 전파 진행 방향에 대한 매질의 길이,  $Z$ 는 자유공간 전파 임피던스로 정규화 된 매질의 유효 임피던스이다. 식 (1)로부터,

매질의 임피던스와 유효 굴절률을 다음과 같이 유도 가능하다.

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

$$e^{ink_0 p} = \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \pm i \sqrt{1 - \left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}}\right)^2} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)의 부호는 대상 매질이 수동 매질 (passive material)이라는 가정 하에, 다음의 조건을 이용하여 결정된다.

$$\text{Re}\{Z\} \geq 0, \text{Im}\{n\} \geq 0 \quad (4)$$

식 (4)에서 Re와 Im은 각각 실수부와 허수부를 의미한다. 매질의 유효 굴절률은 식 (3)으로부터 다음과 같이 정리된다.

$$n = \frac{1}{k_0 p} \left[ \text{Im}\left\{ \ln\left(e^{ink_0 p}\right) \right\} + 2m\pi - i \cdot \text{Re}\left\{ \ln\left(e^{ink_0 p}\right) \right\} \right] \quad (5)$$

식 (5)에서  $m$ 은 정수이다.

$Z$ 의 부호는 유효 굴절률  $n$ 의 허수부가 양수라는 가정 하에 다음의 조건으로 결정될 수도 있다.

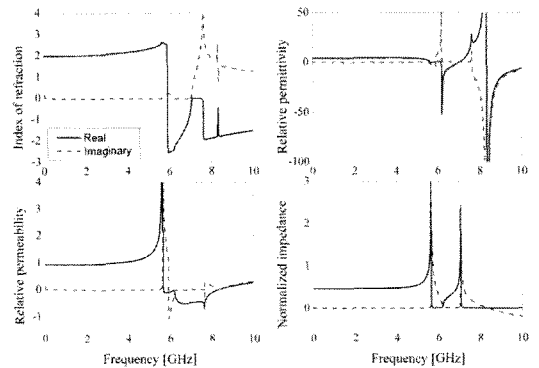
$$\left| e^{ink_0 p} \right| = \left| \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{Z - 1}{Z + 1}} \right| \leq 1 \quad (6)$$

식 (6)을 통하여, 유효 매질 굴절률  $n$  또한 보다 명확하게 구할 수 있다. 지금까지 해석 대상 구조가 전파의 진행 방향에 대하여 대칭인 경우를 살펴보았는데, 그렇지 않은 경우에도 앞선 방법과 유사하게

유효 매질의 파라미터들을 추출할 수 있다<sup>[12]</sup>.

식 (1)~(6)에 의한 유효 매질 파라미터 추출 방법을 이용하여, [그림 3]에 주어진 메타 전자파 구조에 대한 유효 매질 파라미터를 [그림 7]에 추출하였다. 그림을 살펴보면, 앞서 적용했던 고유 모드 해석 및 투과 특성 해석 방법으로부터 계산된 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 유효 유전율 및 투자율의 실수부가 각각 음수이며, 매우 낮은 손실을 갖는 특성으로부터 음의 유효 굴절률이 유도된 것이라는 것을 함께 파악할 수 있다. 또한, 임피던스 특성으로부터 [그림 3]의 구조가 직사각형 단면을 갖는 도파관의 TM 모드처럼 대부분의 주파수 영역에서 임피던스가 자유 공간 임피던스보다 작음을 확인할 수 있다. 따라서 유효 매질 파라미터를 추출하는 방법은 앞선 두 가지 방법으로는 알 수 없었던, 매질의 유효 상대 유전율, 투과율 및 임피던스 정보까지 추가로 알 수 있는 장점이 있음을 알 수 있다.

이 방법의 단점은 유효 매질 파라미터를 구할 수 는 있지만, 해석 대상 매질 내부의 전파 양상을 구체적으로 기술할 수 없다는 것이다. 즉, [그림 3]의 구조를 배열하여 안테나에 적용시킬 경우, 안테나의 신호 급전 부분과 [그림 3]의 구조 사이에 발생하는 신호 결합 현상 등은 [그림 7]로부터 예측하기 힘들



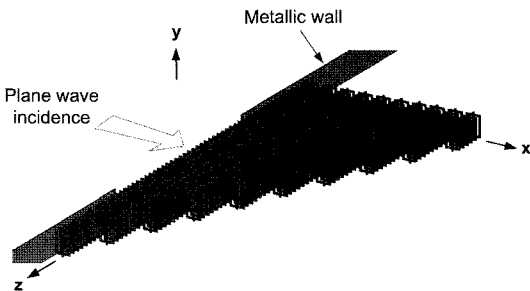
[그림 7] [그림 3]의 메타 전자파 구조에 대한 유효매질 파라미터 추출 결과

다는 점이다. 따라서 [그림 7]의 결과는 제안된 구조에 평면파가 인가되었을 때 전반적인 응답 특성을 보인 것 정도로 이해하면 좋을 것이다.

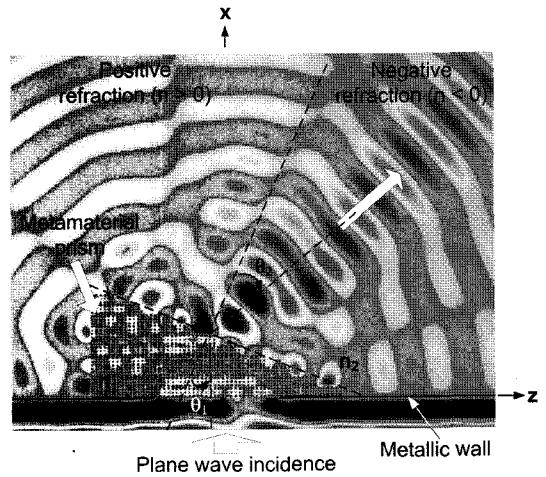
마지막으로, 실험을 통하여 대상 매질의 유효 굴절률을 측정하는 방법에 대하여 간략히 살펴보기로 한다. 이 방법은 Shelby에 의해 처음으로 제안되었으며, 스넬의 법칙을 이용하여 투과파의 굴절 각도를 측정함으로써 매질의 굴절률을 계산하는 방법이다<sup>[6]</sup>. [그림 8]은 굴절률 측정을 위해 [그림 3]의 단위 셀 330개로 구성된 메타 전자파 구조 프리즘을 보인 것이다.

Y 방향 편파를 갖는 평면파를 z축에 대하여  $\theta_1$  각도로 기울어진 경사면을 갖도록 단위 셀을 ([그림 3] 참조) 프리즘 모양으로 구성한 구조에 입사시켜 투과된 파의 굴절 각도를 측정함으로써 대상 매질의 굴절률을 계산할 수 있으며, 구체적인 예가 [그림 9]에 주어져 있다. [그림 9]는 [그림 8]과 동일한 구조이며, 6.9 GHz에서 시뮬레이션 한 결과이다. [그림 8], [그림 9]에서 xz 평면의 경계 조건은 [그림 3]의 입사 조건을 맞추기 위해 전기장의 접선 성분이 0인 것이 적용되었다.

[그림 9]에서 투과파가 음의 굴절 방향으로 굴절되어 나가는 것을 확인할 수 있다. 이때, 굴절된 파의 각도( $\theta_2$ )를 측정하여 다음과 같이 메타 물질의 실효 굴절률을 계산할 수 있다.



[그림 8] 굴절률 측정을 위한 메타 전자파 구조 프리즘의 구성



[그림 9] 메타 전자파 구조 프리즘을 이용한 유효 굴절률의 측정 방법 ( $\theta_1=22.4^\circ$ ,  $\theta_2=-26.7^\circ$ )

$$n_1 = n_2 \frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} \quad (7)$$

식 (7)에서 굴절각( $\theta_2$ )의 부호는 [그림 9]에서 굴절된 파의 진행 방향이 음의 굴절 방향이면 ‘-’이고 양의 굴절 방향이면 ‘+’이다. [그림 9]의 실험 결과에서 메타 전자파 구조는 약 -0.85의 굴절률을 가짐을 식 (7)로부터 계산할 수 있다.

### III. 공진형 메타 전자파 구조 응용 설계

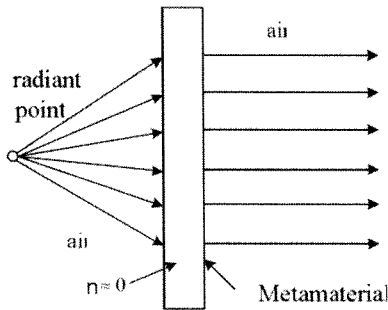
#### 3-1 안테나

메타 전자파 구조를 이용한 안테나 응용 분야는 크게 소형 안테나 분야와 고 이득 안테나 분야로 분류할 수 있다. 메타 전자파 구조의 특성에 따라 Zeroth Order Resonator(ZOR), Epsilon-Negative(ENG), Mu-Negative(MNG)셀을 이용한 소형 안테나로 분류될 수 있다<sup>[13]~[15]</sup>. ZOR 안테나는 메타 전자파 구조에서만 나타나는 고유의 전파 특성인 0차 모드를 이용한다. 여기서 0차 모드란 메타 전자파 구조 전송선 특

성의 전파 상수가 0의 값을 가지는 것을 의미한다. ZOR 안테나는 0차 모드를 이용하기 때문에 안테나의 전기적 길이에 상관없이 안테나의 공진 주파수를 일정하게 유지할 수 있으며 안테나의 소형화를 달성할 수 있다. ENG와 MNG 셀을 이용한 소형 안테나는 각각의 MTM 셀과 그 주위를 둘러싸고 있는 매질과의 정합을 통하여 공진을 일으킨다. 그러므로 ENG, MNG셀을 이용한 안테나는 일반적인 소형 안테나에서 임피던스 부정합을 개선하기 위한 임피던스 변환기가 필요 없게 된다. 또한, 구조적 공진이 아닌 메타 전자파 구조의 유전율과 투자율의 값에 의해 결정되므로 공진 주파수의 전기적 길이와 상관없이 소형화 할 수 있다.

메타 전자파 구조의 0의 굴절률의 특성을 이용하여 안테나의 이득을 개선하는데 효과적으로 활용될 수 있다. [그림 10]과 같이 굴절률이 0의 값을 가지는 메타 전자파 구조에 전자기파를 입사시킬 경우 전자기파는 입사각에 관계없이 메타 전자파 구조 경계면에서 모두 수직으로 방사가 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 0의 굴절률을 가지는 메타 전자파 구조를 안테나의 상부로 사용하면 안테나의 이득을 증가시킬 수 있다<sup>[16]</sup>.

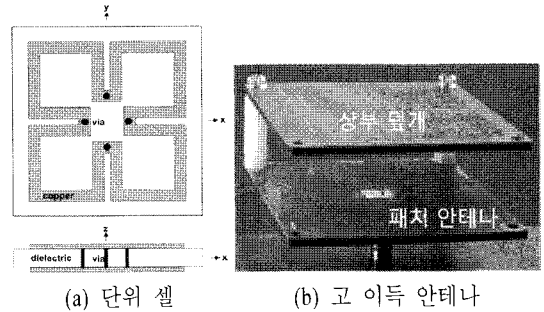
[그림 11]은 굴절률 값이 0인 메타 전자파 구조를 구성하는 단위 셀의 모양과 메타 전자파 구조를 상부로 갖는 고 이득 안테나를 보여준다. 요철 모양의



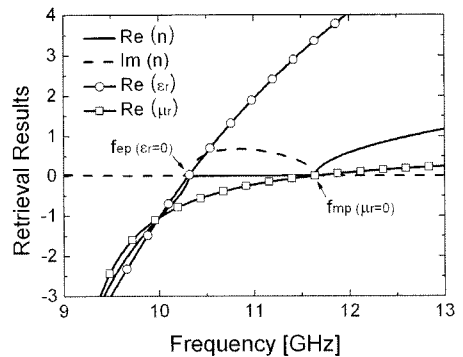
[그림 10] 메타 전자파 구조에서의 입사파와 투과파

금속선이 유전체위에 상하부면에 성형되어 있으며, 유전체 양면에 성형된 금속선은 금속으로된 4개의 비아를 통해 연결된다. 이러한 단위 셀이 메타 전자파 구조 특성을 가지기 위해서는 전자기파의 입사 방향이 중요하다. 단위 셀에 입사하는 전자기파는 x나 y편파를 가지고 z축으로 진행되어야 단위 셀이 메타 전자파 구조 특성을 가지게 된다. 급전을 위한 x-편파를 가지는 패치 안테나와 메타 전자파 구조 상부 덮개로 [그림 11](b)와 같이 고이득 안테나를 설계할 수 있다.

[그림 11](a) 단위 셀로부터 추출한 유전율, 투자율, 굴절률의 값을 [그림 12]에 보였다. [그림 12]에서 알 수 있듯이 제안한 메타 전자파 구조는 전자기 플라즈마 주파수(10.32~11.66 GHz) 사이에서 넓은 0



[그림 11] 메타 전자파 구조



[그림 12] 단위 셀의 유효 매질 추출 결과

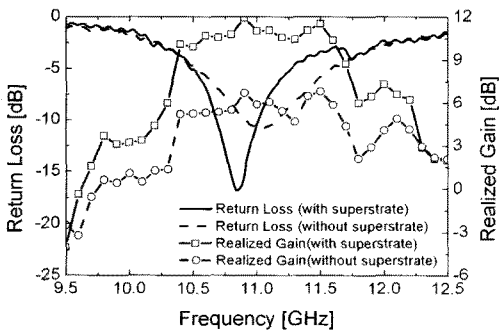
의 굴절률을 갖고 있으며, 굴절률이 0인 주파수 대역폭은 약 12 %로 광대역 특성을 보이고 있다.

또한, [그림 13]은 제안한 메타 전자파 구조의 상부 덮개에 대한 존재 유무에 따른 안테나의 이득 결과를 보여 주고 있다. 메타 전자파 구조 상부 덮개가 있을 경우 [그림 12]에서 보인 굴절률이 0인 주파수 대역에서 안테나의 이득이 6 dB에서 12 dB로 6 dB 이 향상됨을 알 수 있다. 이와 같이 안테나의 이득이 향상될 수 있는 이유는 메타 전자파 구조의 굴절률이 0이므로 입사되는 전자기파가 투과면에 수직으로 진행하기 때문이다.

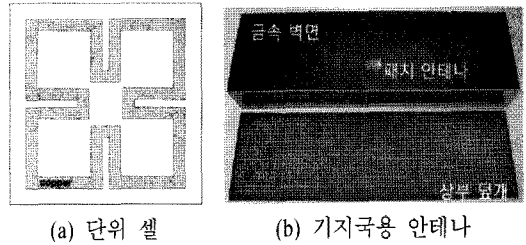
[그림 14]는 메타 전자파 구조의 단위 셀과 메타 전자파 구조를 기지국에 응용한 안테나의 구성도이다<sup>[17]</sup>. 기지국에서는 넓은 빔 폭과 높은 이득의 안테나가 사용된다. 이러한 넓은 빔 폭을 얻기 위해서 전자기파가 방사되는 개구면의 모양을 직사각형으로 성형하였고, 안테나의 주변에 금속벽을 설치함으로써 높은 전후 방비(front-to-back ratio)와 높은 효율 얻을 수 있다.

일반적인 Fabry P erot 공진 안테나는 식 (8)과 같이 상부 덮개와 접지면 사이의 반사 위상과 공진 거리에 의해서 공진 주파수가 결정되게 된다.

$$f_{fp} = \frac{c}{2h} \times \left( \frac{\Phi_{prs} + \Phi_{ground}}{2\pi} + p \right), p=0, 1, 2, 3... \quad (8)$$



[그림 13] 안테나의 이득 및 반사 손실



[그림 14] 메타 전자파 구조

식 (8)에서  $c$ 는 빛의 속도이며,  $h$ 는 그라운드와 상부덮개의 이격 거리이다.  $\Phi_{prs}$  와  $\Phi_{ground}$ 는 상부 덮개와 접지면의 반사 위상이다. 하지만 식 (8)은 안테나 주변에 둘러 싸여진 금속 벽면을 고려하지 않은 식이다. 그러므로 금속 벽면의 영향을 고려한 새로운 식 (9)를 이용하여 안테나의 공진 주파수를 예측할 수 있다.

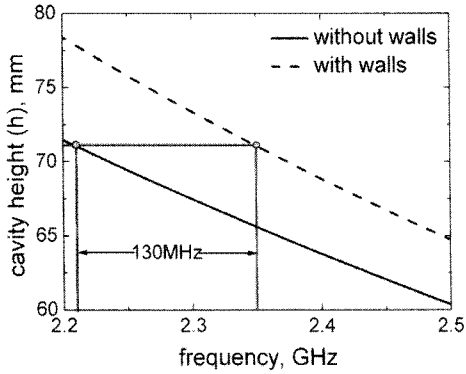
$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{kx^2 + ky^2 + kz^2}, \quad kx = \frac{m\pi}{a},$$

$$ky = \frac{n\pi}{b}, \quad kz = 2\pi f_{fp} \sqrt{\mu\epsilon} \quad (9)$$

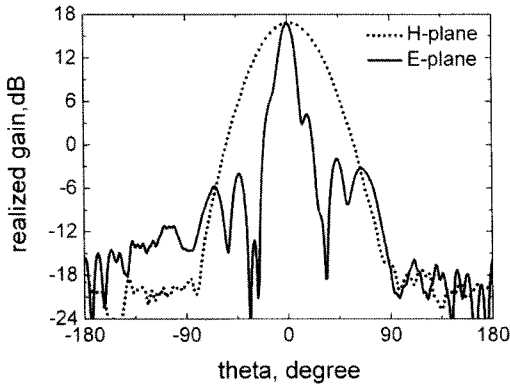
$a$ 와  $b$ 는 공진기의  $x$  방향과  $y$  방향 길이이다. 안테나의 외부를 감싸고 있는 금속 벽면과 상부 덮개에 의해 FP 공진 안테나는 일반적인 rectangular 공진기와 같은 공진 모드가 발생하게 된다. FP 공진 안테나에 발생하는 공진 모드는 TE<sub>011</sub>이 된다. 그러므로  $m=0, n=1, p=1$ 로 설정하고 상부 덮개와 접지면의 반사 위상 값을 식 (9)에 대입하여 구한 공진 주파수와 일반적인 식 (8)을 통해 구한 FP 공진 안테나의 공진 주파수를 계산한 결과를 [그림 15]에서 비교하였다.

FP 공진기의 금속 벽면의 영향으로 130 MHz의 공진 주파수 차이가 생기게 되므로 금속 벽면이 설치된 FP 공진 안테나의 경우에는 식 (9)를 통해서 설계하는 것이 정확하다<sup>[17]</sup>. [그림 16]은 중심 주파수를 2.35 GHz로 설정하고 식 (9)를 통해 설계된 안테나의 측정된 방사 패턴을 보여준다. 특정된 3 dB 빔 폭





[그림 15] 금속 벽면 존재 유무에 따른 공진 주파수 비교



[그림 16] 기지국 안테나의 방사 패턴

은 E, H 평면에서 각각 12°, 48°였고, 전후방비는 E, H 평면 모두에서 30 dB 이상의 값을 가진다. 또한 안테나의 효율은 90 % 이상이 되고 있다.

### 3-2 MRI 센서

이 절에서는 음의 투자율을 나타내는 소자 및 저주파 대역에서의 응용에 대해 알아보기로 한다. 이 소자는 참고문헌 [4]에 처음 소개되었으며, 수식적으로 잘 정리되어 있으므로 여기서는 원리에 대해 정성적으로 분석하였다. 먼저  $i$  방향 투자율  $\mu_i$ 는 자기장  $H_i$ 에 대한 자속밀도  $B_i$ 의 비율( $B_i/H_i$ )로 정의되는데, 참고문헌 [4]에서 제시한 균질화(homogenization)

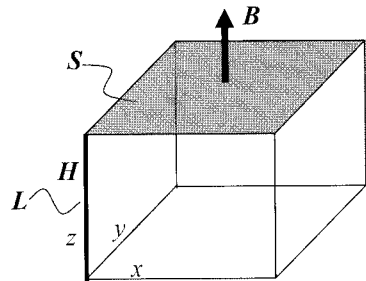
방법에 따르면 단위 셀의 크기가 고려하는 파장에 비해 훨씬 작을 때 [그림 17]과 같이  $H_i$ 는  $H_i$ 와 평행한 단위 셀의 한 변  $L$ 을 따라 평균한 값을 취하고,  $B_i$ 는  $B_i$ 에 수직인 단면적  $S$ 에서의 평균값을 취한다.

즉,

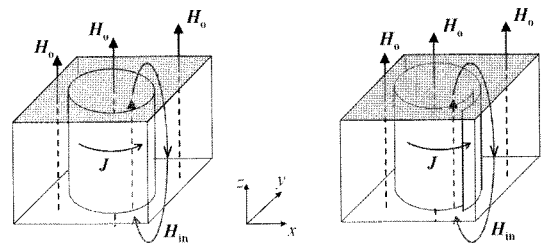
$$H_i = \frac{1}{L} \int_0^L \vec{H} \cdot \hat{i} dl, \quad B_i = \frac{1}{S} \int_S \vec{B} \cdot \hat{i} ds$$

이다. 여기서  $\hat{i}$ 는  $i$  방향의 단위벡터이며, [그림 17]에서  $S$ 의 수직 방향과  $L$ 은  $z$  방향이므로 투자율은  $\mu_z$ 가 된다. 이러한 방법으로 구한 투자율은 방법이 처음에 논란의 여지가 있었지만 추후 발표된 실험에 의해 그 타당성이 입증되었다<sup>[5],[6]</sup>.

[그림 18]은 각각 완전한 금속 파이프 (a)와 옆이 절단된 금속 파이프 (b)로 구성된 단위 셀이다. 옆이 절단된 금속 파이프의 양단은 일정 부분이 중첩되어 커



[그림 17] 단위 셀 및 균질화 방법(z 방향)



(a) 닫힌 파이프

(b) 한 쪽이 절단된 파이프

[그림 18] 닫힌 금속파이프와 한 쪽이 절단된 파이프 로 구성된 자기 단위 셀

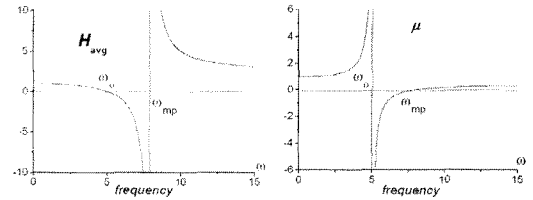
패시턴스 성분을 가지고 있다. 외부 교류 자기장  $H_0$ 가 축 방향으로 관통할 때 실린더의 원주 방향으로 유도전류가 생기는데 긴 솔레노이드에서의 자기장 공식을 적용하면 축방향 단위 길이당 전류(전류밀도)  $j$ 에 대하여 크기  $j$ 의 자기장  $H_{in}$ 이 실린더 내부에 유도된다. 또한, 자성 물질이 아닌 전류에 의해 생긴 자기장( $H$ )은 폐곡선을 이루는 것을 고려하면 균질화 방법을 적용할 때 면  $S$ ([그림 17] 참조)에서 나온 자기장은 단위 셀이  $xy$  평면에 무한 배치된 경우 모두 면  $S$ 로 다시 돌아오기 때문에 면  $S$ 에서 평균한 자속 밀도  $B$ 는 바뀌지 않는다. 그러나 변  $L$ 을 따라 평균한 자기장은 외부 자기장에 유도 자기장이 중첩되므로 유도 자기장의 크기 및 방향에 따라 투자율이 바뀌게 된다.

[그림 18](a) 닫힌 파이프의 경우 정상 상태에서 유도 자기장은 외부 자기장과 내부에서는 항상 반대, 그리고 외부에서는 항상 같은 방향이 된다. 따라서 평균 자기장이 커지므로 투자율은 1보다 작아지는 반자성(diamagnetic) 특성을 보이며, 금속의 저항 성분을 무시하면 주파수 변화에 따른 크기 변동은 없다. 그러나 [그림 18](b)와 같이 커패시턴스를 포함한 파이프는 공진 특성을 보이는데, 자기 플라즈마 주파수 ( $\omega_{mp}$ )에서 최대 유도 전류가 흐르게 된다. 이것을 유도 자기장 측면에서 자세히 살펴보면  $\omega_{mp}$  이하에서 유도 자기장은 파이프 외부에서 외부 자기장과 역위상인데 DC에서부터 주파수가 높아짐에 따라 점점 커지다가 특정 주파수에서 외부 자기장을 상쇄한다. 이 때 평균 자기장  $H_{avg}$ 는 0이 되고  $\mu$ 는 발산하므로 이 주파수를 공진주파수( $\omega_o$ )라고 한다.  $\omega_o$ 와  $\omega_{mp}$ 는  $\omega = \sqrt{1-F} \cdot \omega_{mp}$ 인 관계가 있으며,  $F$ 는 단위 셀에 대한 금속 파이프의 부피비(比)이다. 이후 유도자기장은 점점 더 큰 음의 값을 가지다가  $\omega_{mp}$ 에서 발산하고  $\omega_{mp}$  이상에서는 큰 양의 값으로부터 점점 줄어들어 0으로 수렴한다. 이에 따라  $\mu$ 는  $\omega_o$ 과  $\omega_{mp}$  사이에서 음의 값을 가지고  $\omega_{mp}$ 에서 0가 된 다음

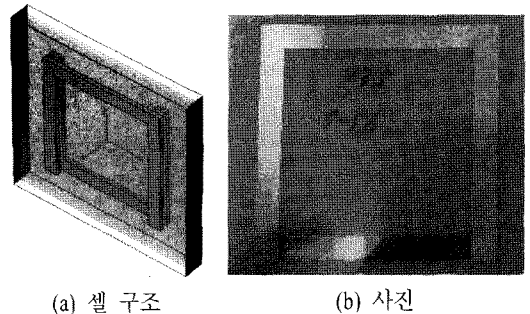
$\sqrt{1-F}$ 에 수렴한다. [그림 19]는 주파수에 따른  $H_{avg}$ 와  $\mu$ 의 변화를 임의 척도로 나타낸 것이다.

[그림 19]에서 본 바와 같이 외부 자기장에 반응하여 공진을 발생시키는 구조를 통하여 음 또는 매우 큰 투자율을 구현할 수 있는데, [그림 19]와 같은 소자가 소개된 직후 이것을 이용하여 MRI 신호와 같은 자기장 신호를 손실 없이 일정 거리 전송한 결과가 발표되었다<sup>[18]</sup>. 본 연구에서도 이러한 원리를 이용하여 [그림 20]과 같은 소자를 설계, 제작하여 MRI 신호의 SNR 개선을 위한 시도를 하였다. 이 소자는 통상 SRR(Split Ring Resonator) 이라고 불리는 planar 구조로서 인체에 부착 가능하도록 플렉시블 PCB 형태로 제작하였다.

제작한 소자는 두 개의 ‘c’ 자형 금속 패턴이 PCB 양면에서 서로 마주 보고 루프를 이루는 형태로서 패턴에 수직으로 입사되는 자기장 성분에 의해 공진을 일으키며 루프 면적에 의한 인덕턴스와 패턴 오버랩



[그림 19] 주파수에 따른  $H_{avg}$ 와  $\mu$ 의 변화(금속체의 저항 무시)



[그림 20] 인체 부착용 SRR

에 의한 커패시턴스에 의해 공진주파수가 결정된다. MRI 장비는 현재 많이 사용되고 있는 3 테슬라 장비의 경우 공진주파수가 127.8±1 MHz 정도가 되어야 하므로 나중에 공진주파수를 튜닝할 수 있도록 하였다.

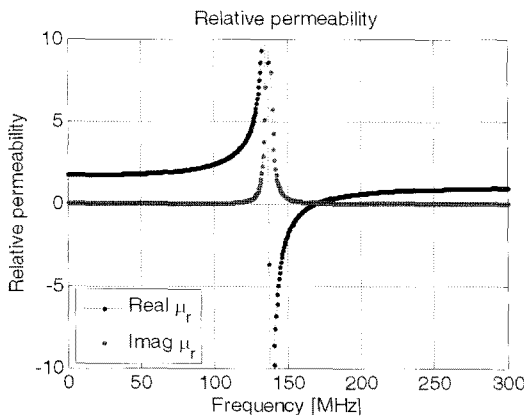
[그림 21]은 [그림 20](a)의 SRR 단위 셀을 시뮬레이션 한  $S$  파라미터로부터 투자율을 추출한 것으로 ~130 Hz 정도의  $\omega_o$ 과 ~170 MHz의  $\omega_{mp}$  특성을 보이고 있다.

3 테슬라 MRI 장비를 사용하여 제작한 플렉시블 SRR을 부착한 두 가지 팬텀의 MR 영상을 보았다. [그림 22]에서 화살표는 SRR 부착지점을 나타내며, 왼쪽부터 각각 SRR 미부착, 위에 부착, 옆에 부착한 결과이다.

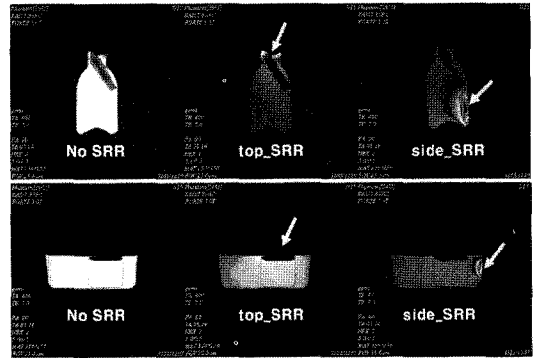
MR 영상 결과를 보면 SRR 부착시 국소적인 자기적 특성을 보이기는 하지만 전체적으로는 어두워졌는데, 이것은 임피던스 매칭이 고려되지 않은 결과로 보이며 실제 적용을 위해 많은 연구가 필요한 것으로 생각된다.

#### IV. 공진형 메타 전자파 구조의 발전 동향

메타 전자파 구조 기술은 M/W 영역에서 optical



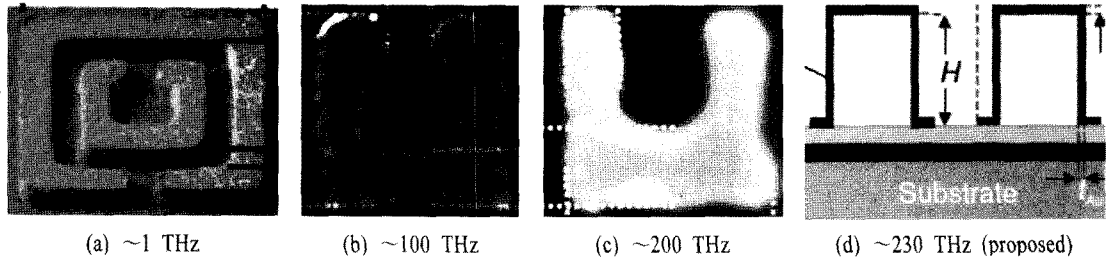
[그림 21]  $S$  파라미터를 사용하여 추출한 SRR의 투자율 변화



[그림 22] SRR을 부착한 팬텀의 MR 영상

영역까지 연구가 확장되고 있으며, THz와 optical 영역에서의 메타 전자파 구조는 모두 공진구조를 기반으로 하고 있다. M/W 대역에서 음의 유전율과 투자율을 동시에 나타내는 공진형 메타 전자파 구조가 구현된 이후 단위 셀 크기를 단순히 줄임으로써 THz 영역까지는 동작 주파수를 높여 가고 있다. 그러나 광(optical) 대역과 같은 매우 높은 주파수 영역에서는 금속체의 비이상적인 전도 특성 때문에 단순한 SRR 구조의 축소로는 구현이 어렵다. 본 절에서는 이와 같이 고주파수화에 따른 공진형 메타 전자파 구조의 설계 방향과 특성에 대하여 파악하기로 한다.

음의 유전율은 전기장에 평행한 금속 막대기를 통해 비교적 쉽게 구현할 수 있지만 음의 투자율을 얻기 위한 구조는 고리면이 자기장과 수직이어야 하므로 제작이 매우 힘들어진다. 따라서 THz 대역 이상에서는 음의 투자율을 얻을 수 있는 SRR에 대한 연구가 많이 이루어졌다. [그림 23]은 THz 대역에서 근적외선 대역까지 SRR 단위 셀의 변천을 나타낸다. [그림 23](a)는 최초로 ~1 THz에서 동작하는 것으로 수십  $\mu\text{m}$  단위 셀 크기에 이중 고리 SRR 형태를 하고 있었으나<sup>[19]</sup>, 이후 구조가 더욱 단순한 단일 고리 SRR<sup>[20]</sup>과 큰 갭을 가지는 SRR<sup>[21]</sup> 및 수직 고리 SRR<sup>[22]</sup> 등의 변형된 SRR 구조를 사용함으로써 음의 투자율 영역은 200 THz(1.5  $\mu\text{m}$ )까지 확장되었다.



[그림 23] THz 대역 SRR 구조 변천

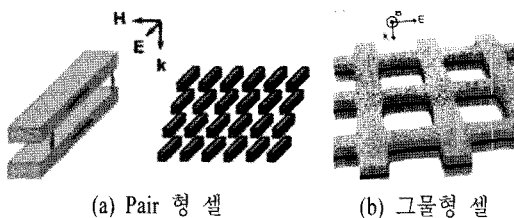
그러나 ~100 THz 이상에서는 단위 셀 크기가 줄어들 때 커패시턴스와 자기장으로 축적되는 에너지 성분을 나타내는 인덕턴스는 줄지만 전자 운동 에너지로 축적되는 성분을 나타내는 인덕턴스는 오히려 커지므로 공진주파수는 포화되기 시작하고 공진이 발생해도 Q가 작아 음의 투자율을 얻기 힘들어진다<sup>[23]</sup>. 따라서 SRR 형태의 단위 셀 크기를 줄이는 것만으로는 한계에 부딪치게 된다. SRR 구조의 또 다른 문제점으로는 자기 공진을 위해서는 SRR 면을 수직 관통하는 입사 자기장 성분이 있어야 하므로 SRR 면에 대하여 수직 입사대신 경사진 입사를 해야 한다. [그림 24](a)는 이를 개선한 구조로서 2 개의 gold 층 사이에 유전체를 spacer 층으로 쌓은 다음 전체를 막대기 형태로 식각한 pair 형이다<sup>[24]</sup>. 이 구조에서는 입사파가 수직일 때 전기장은 막대기 길이 방향으로 놓이며 아래 위 두 개의 막대기에 같은 방향의 전류를 유도하여 음의 유전율을 만들고 자기장은 두 막대기 사이를 수직 관통하면서 회전하는 전류를 유도하여 음의 투자율을 만들 수 있다. 주파수 측면에서

pair 형의 특성을 더욱 개선한 구조로서 [그림 24](b)와 같이 금속층으로 gold 대신 silver를 사용하고 막대기를 서로 연결한 그물형(fishnet) 구조를 들 수 있는데, 가시광선 바로 바깥의 근적외선 대역에서는 이 구조를 사용하여 음의 굴절률을 얻을 수 있다<sup>[25]</sup>.

메타 전자파 구조 단위 셀은 파장에 비해 수 배 이상 작는데, 단위 셀 내의 최소 크기 패턴은 셀에 비해 다시 몇 배 더 작으므로 가시광선 이상의 높은 주파수에서는 패턴을 형성하는 자체가 힘들어진다. 참고문헌 [25]의 경우도 최소 패턴 사이즈는 68 nm로서 e-빔을 이용한 패턴 형성이 필요하여 대량 생산에는 적합하지 않은 크기이다. 이보다 더 높은 대역에서 최근 연구되고 있는 하이퍼 렌즈와 투명 망토 등은 음의 유전율 특성만을 사용하기 때문에 단위 셀 구조에서 음의 투자율을 제공하는 루프 형태의 속성은 사라지고 구조가 더욱 단순한 박막 자체나 막대기 형태만 사용되고 있다<sup>[26],[27]</sup>.

## V. 결 론

본 논문에서 유효 유전율과 투자율 그리고 굴절률이 음수, 0 및 양수의 값을 가질 수 있는 메타 전자파 구조의 설계 기술과 마이크로파 응용 및 발전 방향에 대하여 살펴보았다. 공진형 메타 전자파 구조의 설계 방법 및 해석 방법에는 비교적 간단하게 음의 굴절 특성 여부를 확인 가능한 고유 모드 해석 및 투과 특성 해석 방법으로부터, 매질의 전자기적



[그림 24] 근적외선 대역 단위 셀

파라미터들을 추출할 수 있는 유효 매질 파라미터 추출 방법에 이르기까지 여러 방법들을 설명하였다. 이들 유효 매질 파라미터 추출 방법을 통하여 메타 전자파 구조의 유전율, 투자율, 굴절률 및 임피던스에 이르기까지 매질의 다양한 정보를 알 수 있으며, 추출된 매질 정보는 마이크로파 부품 소자 설계 등에 이용될 수 있음을 시뮬레이션 방법으로 확인하였다.

메타 전자파 구조의 응용 기술은 기존의 마이크로파 관련 부품 소자 분야뿐 아니라, 과학 및 의료용 영상 진단 기기에서부터 차세대 유비쿼터스 통신 분야의 핵심 부품에 이르기까지 그 응용도가 다양하지만, 안테나와 MRI에 메타 전자파 구조를 적용한 예를 설명하였다. FP 공진형 안테나의 상판 덮개로 활용 가능한 메타 전자파 구조를 제안하고 특성을 제시하였으며, 이를 이용하여 상판 덮개로 활용한 FP 공진 안테나의 설계, 시뮬레이션과 측정 결과를 제시함으로써 메타 전자파 구조를 이용한 안테나의 고이득화가 가능함을 보였다. MRI의 적용을 위하여 외부 자기장에 반응하여 공진을 발생시키는 소자를 설계, 제작하여 투자율 특성과 MRI에 적용하여 측정된 SNR 및 영상을 분석하고 향후 대응 방향을 제시하였다. 이와 같이 제안된 메타 전자파 구조를 바탕으로 고이득 안테나와 MRI 센서에 대한 설계 및 측정 결과를 간단하게 보였지만, 메타 전자파 구조가 고성능의 부품소자 개발에 적용될 수 있는 가능성을 확인하였다고 할 수 있다. 또한, 메타 전자파 구조 기술의 발전은 M/W 영역에서 광대역화와 저손실화를 추구하면서 대부분이 공진구조를 기반으로한 THz와 광파 영역까지 연구가 확장되고 있다. 향후 많은 응용이 가능한 광파 영역에서는 금속체의 비이상적인 전도 특성 때문에 단순한 SRR 구조의 축소가 아닌 수정된 공진 형태로 설계되고 있음을 메타 전자파 구조에 대한 정성적인 분석을 통하여 설명하였다.

현재까지 개발된 대부분의 메타 전자파 구조는 비교적 협대역인 메타 전자파 구조 특성을 보인다는

단점이 있다. 향후 다양한 응용 분야에서 핵심 기술로 발전할 메타 전자파 구조의 활용도를 높이기 위해서는 광대역화, 저손실화 등을 포함하여 현재 구조들이 안고 있는 문제점과 한계들을 해결하고 극복하기 위한 많은 연구가 지속적으로 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ", *Soviet Physics*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, 1968.
- [2] W. Rotman, "Plasma simulation by artificial dielectrics and parallel-plate media", *IRE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 10, pp. 82-95, 1962.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 79, no. 25, pp. 4773-4776, 1996.
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, 1999.
- [5] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", *Physical Rev. Lett.*, vol. 84, p. 4184, 2000.
- [6] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction", *Science*, vol. 292, no. 5514, pp. 77-79, 2001.
- [7] C. Caloz, T. Itoh, *Transmission Line Theory and Microwave Applications*, John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [8] H. Chen, L. Ran, J. Huangfu, X. Zhang, K. Chen,

- T. M. Grzegorzcyk, and J. A. Kong, "Left-handed materials composed of only S-shaped resonators", *Physical Rev. E* 70, 057605, 2004.
- [9] H-T. Chen, J. F. O'Hara, A. K. Azad, A. J. Taylor, R. D. Averitt, D. B. Shrekenhamer, and W. J. Padilla, "Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials", *Nature Photonics.*, vol. 2, pp. 295-298, 2008.
- [10] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 1995.
- [11] X. Chen, T. M. Grzegorzcyk, B. I. Wu, J. Pacheco, and J. A. Kong, "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials", *Physical Rev.*, E 70, 016608, 2004.
- [12] D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials", *Physical Rev.*, E 71, 036617, 2005.
- [13] A. Sanada, K. Murakami, I. Awai, H. Kubo, C. Caloz, and T. Itoh, "A planar zeroth order resonator antenna using a left-handed transmission line", *34 European Microwave Conference, Amsterdam, The Netherlands*, pp. 1341-1344, 2004.
- [14] A. Alu, F. Bilotti, N. Engheta, and L. Vegni, "Subwavelength, compact, resonant patch antennas loaded with metamaterials", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 55, no. 1, pp. 13-25, 2007.
- [15] A. Erentok, R.W. Ziolkowski, "Metamaterial-inspired efficient electrically-small antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 3, pp. 691-707, 2008.
- [16] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guerin, and P. Vincent, "A metamaterial for directive emission", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 89, 213902, 2002.
- [17] J. Ju, D. Kim, and J. Choi, "Fabry-Pérot cavity antenna with lateral metallic walls for WiBro base station applications", *Electronics Lett.*, vol. 45, no. 3, pp. 141-142, 2009.
- [18] M. C. K. Wiltshire, J. B. Pendry, I. R. Young, D. J. Larkman, D. J. Gilderdale, and J. V. Hajnal, "Microstructured magnetic materials for RF flux guides in magnetic resonance imaging", *Science*, vol. 291, no. 5505, pp. 849-851, 2001.
- [19] T. J. Yen, W. J. Padilla, N. Fang, D. C. Vier, D. R. Smith, J. B. Pendry, D. N. Basov, and X. Zhang, "Terahertz magnetic response from artificial materials", *Science*, vol. 303, no. 5663, pp. 1494-1496, 2004.
- [20] S. Linden, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Magnetic response of metamaterials at 100 Terahertz", *Science*, vol. 306, no. 5700, pp. 1351-1353, 2004.
- [21] C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden, S. Burger, L. Zschiedrich, F. Schmidt, J. F. Zhou, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies", *Phys. Rev. Lett.*, 95, 203901, 2005.
- [22] S. Zhang, W. Fan, B. K. Minhas, A. Frauenglass, K. J. Malloy, and S. R. J. Brueck, "Midinfrared resonant magnetic nanostructures exhibiting a negative permeability", *Phys. Rev. Lett.*, 94, 037402, 2005.
- [23] J. Zhou, Th. Koschny, M. Kafesaki, E. N. Economou, J. B. Pendry, and C. M. Soukoulis, "Saturation of the magnetic response of split-ring resonators at optical frequencies", *Phys. Rev. Lett.*, 95, 223902, 2005.
- [24] V. M. Shalaev, W. Cai, U. K. Chettiar, H. Yuan, A. K. Sarychev, V. P. Drachev, and A. V. Kildis-

shev, "Negative index of refraction in optical metamaterials", *Optics Lett.*, vol. 30, no. 24, pp. 335-3358, 2005.

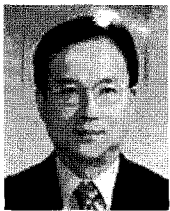
[25] G. Dolling, M. Wegener, C. M. Soukoulis, and S. Linden, "Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength", *Optics Lett.*, vol. 32, no. 1, pp. 53-55, 2007.

[26] Zubin Jacob, Leonid V. Alekseyev, and Evgenii Narimanov, "Optical hyperlens: Far-field imaging beyond the diffraction limit", *Optics Express* 8247, vol. 14, no. 18, 2006.

[27] W Cai, U. K. Chettiar, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, "Optical cloaking with metamaterials", *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 224-227, 2007.

≡ 필자소개 ≡

최 재 익

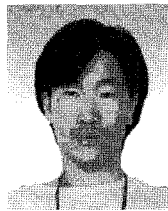


1981년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)  
 1983년 8월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1995년 2월 고려대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1983년 3월~현재: 한국전자통신연구원

(이동통신, 위성통신, 전파 공학, 안테나, 전자파 환경, 메타물질 등 연구)

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

주 정 호



2006년 2월: 인천대학교 정보통신공학과 (공학사)  
 2006년 3월~2008년 2월: 인천대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
 2008년 2월~현재: 한국전자통신연구원 연구원

[주 관심분야] 안테나 설계, 메타물질 해석 및 설계, RF 부품소자 등

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] 안테나 설계, 메타물질 해석 및 설계, 주기 구조 해석, 전자파 이론 및 산란 문제 해석 등

이 왕 주



1986년: 서울대학교 물리학과 (이학사)  
 1988년: 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)  
 1999년: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)  
 1988년~1993년: 현대전자 반도체 연구소

2000년~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

[주 관심분야] 메타물질 응용, 초고속통신 등