

Metamaterial 소형 안테나 개발 및 동향

성 원 모

EMW 안테나

I. 서 론

현대를 살아가는 많은 사람들에 있어 휴대용 디지털 통신기기들은 하나의 필수 요소가 되었고, 디지털 유목인(digital nomad)이라는 새로운 문화 키워드까지 등장하였다^[1]. 소비자들은 언제 어디서나 자신이 원하는 다양한 고품질 서비스를 제공 받기 원한다. 또한, 소비자들의 휴대용 디지털 통신기기의 선택에 있어 휴대성과 디자인 그리고 다양한 기능은 매우 중요한 요소이다. 따라서 휴대용 디지털 통신기기는 추가적인 주변 기기의 구성이 없어야 하고 작은 크기를 가지면서도 다양한 기능을 제공하여야 한다. 하지만 이는 무선 통신 장치를 구현하는데 있어 많은 제약으로 작용한다. 일반적으로 안테나의 효율은 물리적 크기에 의존하기 때문이다. 또한, 디자인 때문에 안테나는 통신기기의 내부에 실장이 되어야 하는데, 이와 함께 안테나가 주변의 간섭을 많이 받게 되고 안테나 성능에 많은 영향을 주게 된다. 그럼에도 불구하고 안테나는 다양한 서비스를 제공하는 통신기기의 복잡한 전파 송수신 역할을 충실히 만족해야만 한다.

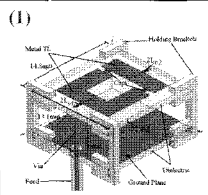
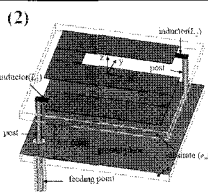
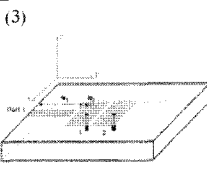
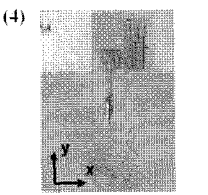
최근 메타머티리얼(metamaterial)이라는 자연적으로는 존재하지 않는 새로운 전자기 특성을 갖는 물질을 인공적으로 만들어 내는 기법에 대한 관심이 높아지고 있다. 유전율(permittivity)과 투자율(permeability)이 동시에 음의 값을 갖는 물질인 Left-Handed Material(LHM)의 새로운 전자기파 특성을 이용하여 물리적 크기에 제약을 받지 않는 소형 안테나 개발에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있다^{[2]~[8]}. 그중에서도 메타머티리얼 기법을 이용한 0차 공진(zeroth-order resonator)이라는 특수한 공진 특성을 이용한 연구가 주목을 받고 있다. 신호를 전송하는 선로 또는 회로에 직렬 커패시턴스(capacitance)와 병렬 인덕턴스(inductance)를 추가 구현하여 이 값을 적절하게 조정함으로써 공진 주파수가 전송 선로의 물리적 크기와 무관하게 결정될 수 있도록 구현할 수 있다는 것이다. 이러한 0차 공진 특성을 이용하여 안테나 등의 소자를 구현하게 되면 안테나의 공진 주파수는 안테나 크기와 무관하게 정해지므로 안테나를 얼마든지 소형화 시킬 수 있다. 또한, 다중 대역 안테나 구현 시 0차 공진에 의해 방사하는 방사체는 선험적인 체배 주파수를 갖지 않기 때문에 서로 다른 방사체 간의 간섭이 적으며, β (위상 상수)와 ω (주파수)의 관계가 비선형이므로 주파수에 따른 위상차가 작아 광대역 회로의 구현이 가능하며, 위상 변화가 전송 선로의 길이에 비례하지 않으므로 소형의 회로를 구현할 수 있다.

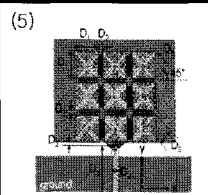
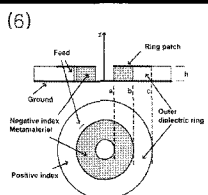
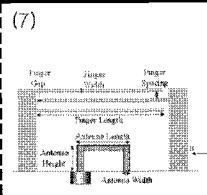
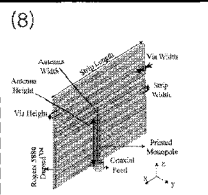
본 원고에서는 최근 메타머티리얼의 대표적인 특성 중 하나인 0차 공진 모드를 이용한 안테나 소형화에 대한 연구와 다양한 메타머티리얼 안테나 동향, 그리고 더불어 현재 당사에서 진행하고 있는 휴대폰에 내장 가능한 소형 메타머티리얼 0차 공진 안테나에 대한 연구 결과를 소개하고자 한다.

II. 메타머티리얼 소형 안테나 연구 동향

최근 발표된 대표적인 메타머티리얼 안테나의 연구 내용을 <표 1>을 통해 소개하고자 한다. 구조 (1)은 토론토 대학 Eleftheriades 교수 연구실에서 제안한 링 모양의 CRLH-TL(Composite Right/Left-Handed

<표 1> 발표된 metamaterial 안테나

CRLH-TL: Composite Right/Left Handed Transmission Line				
Shape	(1) 	(2) 	(3) 	(4) 
Operation	CRLH-TL	CRLH-TL	CRLH-TL	CRLH-TL
Mode	0th	0th	0th	0th
Frequency (GHz)	1.77	0.57	3.38	2.45
Size (λ)	0.09 x 0.077 x 0.036	0.03 x 0.03 x 0.01	0.16 x 0.16 x 0.02	0.09 x 0.09 x 0.003
Bandwidth (%)	6.8	6.5	-0.1	4.5
Efficiency (%)	54	48	70	-
Gain (dB)	0.95	-	0.87	0.16

Shape	(5) 	(6) 	(7) 	(8) 
Operation	CRLH-TL	Metamaterial loading	Capacitive matching	Inductive matching
Mode	0th, -1st, -2st	TM ₁₁₀	-	-
Frequency (GHz)	1.73, 2.36, 3.2	0.47	0.43	1.37
Size (λ)	0.1 x 0.1 x 0.015	0.1(diameter) x 0.008	0.106 x 0.001 x 0.055 (Ground: 0.73 x 0.73)	0.082 x 0.004 x 0.067 (Ground: 0.72 x 0.72)
Bandwidth (%)	8	4.4	1.3	4.1
Efficiency (%)	-	-	87.4	88
Gain (dB)	1	1.8	3.64	1.44

Transmission Line) 안테나이다^[2]. 2개의 병렬 전송선으로 연결된 형태로 칩 커패시터(chip capacitor)로 직렬 커패시턴스를 구현하였으며, 칩 인덕터(chip inductor)와 via로 병렬 인덕턴스를 구현하였다. 방식은 칩 인덕터와 연결된 두 via로부터 일어나며, 0.1 λ 이하로 소형이지만 6.8 %의 넓은 대역폭을 가지고 있다.

구조 (2)는 포스틱 박위상 교수 연구실에서 제안한 Peano 형태의 CRLH-TL 안테나이다^[3]. 윗면에 Peano

curve가 있다는 점을 제외하면 링 안테나와 구조적으로 비슷하며, 칩 인덕터 L_1 과 L_2 를 이용하여 주파수를 저주파 대역으로 이동시키고 동시에 매칭(matching)이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 방식은 링 안테나와 마찬가지로 두 via에서 발생하게 된다. 크기는 0.03 λ 으로 매우 소형임에도 불구하고 6.5 %의 넓은 대역폭을 가지고 있다.

구조 (3)은 UCLA의 Itoh 교수 연구실에서 발표한

mushroom 구조를 이용한 안테나이다⁴⁾. 두 패치 사이에 간격을 두어서 직렬 커패시턴스를 구현하였으며, via를 통하여 병렬 인덕턴스를 구현할 수 있다. 구조가 단순하고 셀의 개수를 늘이면 다중모드를 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있으나 대역폭이 매우 좁다($\sim 0.1\%$).

구조 (4)는 Chiao Tung 대학의 Chung 교수 연구실에서 제안한 안테나로 π 형 RH-TL과 T형 LH-TL가 다단(cascade) CRLH-TL 형태로 구현되어 있다⁵⁾. RH-TL과 LH-TL의 위상의 합이 0이 되도록 등가회로 및 안테나 패턴을 구현함으로써 소형 0차 공진 안테나를 구현하였다. via 구성없이 안테나 크기와 높이가 각각 0.1λ 와 0.003λ 이하의 소형임에도 불구하고 4.5%의 대역폭을 가지고 있다.

구조 (5)는 UCLA의 Itoh 교수 연구실에서 발표한 변형된 그래운드를 가진 mushroom 안테나이다⁶⁾. 기존의 전체 그래운드에서 안테나 그래운드와 전송선로 그래운드를 분리하여 마이크로스트립(microstrip) 형태의 전송선로에 대한 매칭(matching) 그래운드로 사용하여 기존의 그래운드에 비해 80% 이상 향상된 임피던스 매칭 효과를 보였다.

구조 (6)은 펜실베이니아 대학의 Engheta 교수 연구실에서 발표한 메타머티리얼 로딩 안테나이다⁷⁾. 가운데 위치한 메타머티리얼의 유전율과 투자율을 바꾸어 줌으로써 공진주파수를 정할 수 있는 장점이 있으나, 현재 이상적인 메타머티리얼이 나와 있지 않기 때문에 제작이 어려운 단점을 지닌다.

구조 (7)은 아리조나 대학의 Ziolkowski 교수 연구실에서 발표한 루프안테나이다. 안테나의 inductive한 성분을 루프 주변의 capacitive한 성분으로 상쇄함으로써 매칭이 가능한 구조이며 대역폭은 1.3%이다. 구조 (8)은 일반적인 다이폴(dipole) 안테나의 capacitive한 성분을 다이폴 주변의 inductive한 성분으로 상쇄함으로써 매칭이 가능한 구조이며 대역폭은 4.1%이다⁸⁾.

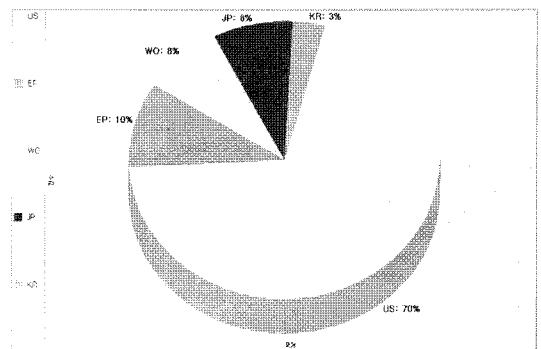
지금까지 메타머티리얼 소형 안테나 연구 동향을 정리하면 CRLH-TL ZOR 안테나가 주로 발표되었으며, 주파수 대비 매우 작은 크기의 안테나를 제안하였지만 실제 디지털 휴대용 통신기기들에 제안하기에는 구현하기 어려운 구조를 갖거나 협대역인 특징을 갖고 있어 제안된 안테나를 실제 상용화시키기에는 매우 힘들다.

III. 메타머티리얼 안테나 특허 동향

[그림 1]은 메타머티리얼 관련 특허 출원 국가별 점유율을 보여준다. 한국과 일본에서도 계속적으로 출원이 늘어나고 있는 추세이나, 아직은 미국에 비하면 미약한 실정이다.

[그림 2]는 메타머티리얼 기술 분야별 국가별 점유율을 나타낸다. 모든 분야에서 미국이 높은 점유율을 보이는 것을 볼 수 있으며, 메타머티리얼 기술을 이용한 방사체 구조 개발에 있어서 한국도 어느 정도의 점유율을 보인다.

<표 2>는 최근 메타머티리얼 안테나 특허 동향을 나타낸다. 구조 (9)와 (10)의 안테나는 방산 업체인 Harris사에서 개발한 메타머티리얼 안테나이다. 구조 (9)는 다이폴 안테나에 메타머티리얼 유전체 기판을 적용하여 유전체 기판에 의해 결정되는 유전율과 투자율로 안테나를 소형화 시키면서도 리액턴스 커플



[그림 1] 특허 출원 국가별 점유율

링 성분을 줄여 향상된 임피던스 대역폭을 갖게 한다^[9]. 구조 (10) 또한 LPDA(Log Periodic Dipole Array)에 메타머티리얼 유전체 기판을 적용하여 높은 안테나 효율을 보장하게 하였다^[10].

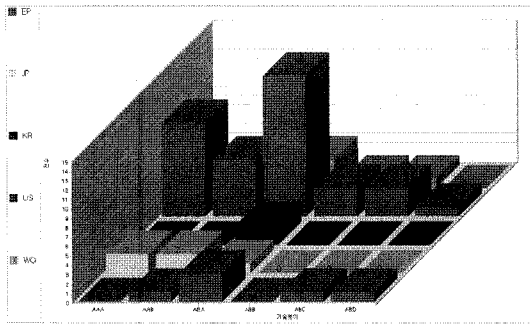
구조 (11)은 전송망 업체인 Lucent사의 메타머티리얼 안테나이다. 안테나는 하나의 공진기(resonator)

와 도파관(waveguide)으로 구성되어 있다. 신호가 여기되면 공진기의 적어도 한 부분은 음의 유전율과 투자율을 갖게 되고 공진기와 도파관 사이의 커플링에 의해 공진이 결정된다^[11].

구조 (12)는 미국의 HRL(Hughes Research Laboratories)에서 제안한 누설파 안테나(leaky wave antenna)로 메타머티리얼 구조를 이용하여 안테나의 forward/backward 방사를 조절할 수 있도록 하였다^[12].

구조 (13)은 Electromagnetic Band Gap(EBG) 상판에 2차원 회전 등방형(rotational symmetry) 패턴의 복수 개 슬롯을 형성함으로써 메타머티리얼 특성을 지니는 안테나를 제안하였다^[13]. 전자기 밴드 갭 상판 또는 하판의 슬롯의 형상, 슬롯 사이의 간격 등을 간단히 조정하는 것만으로도 원하는 대역의 주파수를 효과적으로 확보할 수 있어 안테나의 소형화는 물론 안테나 설계 시 더욱 높은 적용 용이성을 제공할 수 있다.

구조 (14)은 메타머티리얼 전송선 동작 원리에 의해 공진하는 전송선로이며, 양 종단에 각각 한 쌍의 헬리컬(Helical) 형태의 방사 소자와 타단 접지면과 연



[그림 2] 기술 분야별 국가별 점유율

(AAA: 전송선 구조, AAB: 전송선 응용 RF 디바이스, ABA: 방사체 구조 및 응용, ABB: 반사판(그라운드)구조 및 응용, ABC: 전송 도움 구조 및 응용(도파기 역할), ABD: 전파 차단 구조 및 응용)

<표 2> Metamaterial 안테나 특허

Shape	(9)	(10)	(11)	(12)
Shape	(13)	(14)	(15)	(16)
Operation	CRLH-TL + EBG	CRLH-TL	CRLH-TL	CRLH-TL
Mode	0th	0th	0th	0th

결되는 가변 커패시터를 포함하는 메타머티리얼을 이용한 초소형 안테나를 제안하였다^[14]. 안테나는 한 쌍의 방사 소자와 그 사이의 전송 선로 그리고 접지면 간의 등가 커패시터 값으로 결정된다. 접지면 간의 등가 커패시터 값을 증가시켜 안테나를 소형화시킬 수 있고, 가변 커패시터의 값을 조정함으로써 주파수를 조정할 수 있다. 또한, 안테나의 공진부와 방사 소자가 나누어져 있기 때문에 외부 영향에 둔감하고, 특히 인체 영향을 최소화할 수 있다.

구조 (15)는 CRLH-TL를 가지는 소형 ZOR 안테나를 제안하였다. 안테나는 기본적으로 다이폴(dipole) 안테나의 구성을 갖는다^[15]. 안테나는 하단부에서 180° 위상차의 신호가 각각 급전되는 두 개의 방사체를 포함하며, 각각의 방사체는 각각의 급전 신호에 대하여 90°의 위상차를 제공함으로써 다이폴 안테나로 동작하게 된다. 이와 같은 위상차를 제공하기 위하여 LH-TL과 RH-TL이 결합된 구성을 갖게 되는데, 이를 변형하여 안테나 방사체가 2개 이상의 LH-TL과 RH-TL이 서로 어긋나게 접속됨으로써 이들의 조합에 의해 다중 대역 특성을 구현하게 된다.

구조 (16) 역시 CRLH-TL를 가지는 소형 ZOR 안테나를 제안하였다^[16]. ZOR 역할을 하는 CRLH-TL로 구성되어진 제1 방사 소자와 1차 공진기 역할을 하는 제2 방사 소자를 포함하고 있다. 제2 방사 소자는 급전 단자에서 분기되어 상기 제1 방사 소자의 스텐트(stub)로 동작하게 되며, 또한 제1 방사 소자에 대하여 병렬 인덕턴스와 커패시턴스의 역할을 한다. 제안된 안테나는 접지 단자에 직렬로 연결되는 인덕터를 포함하여 구성될 수 있는데, 일단이 상기 접지와 연결되고 타단이 인쇄 회로 기판(PCB)과 연결됨으로써 상기 접지 단자의 임피던스 조정 역할을 할 수 있다. 또한, 인덕터를 통해 균일한 전류 분포를 갖는 안테나를 구현함으로써 주변 환경의 영향을 최소화하여 우수한 전파 특성을 얻을 수 있게 하였다.

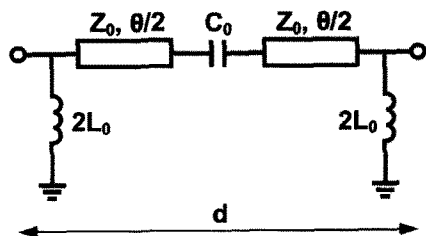
지금까지 특허에서 발표된 메타머티리얼 안테나

동향은 실제 상용화를 위해 안테나를 소형화 시키면서도 다중 대역 안테나 구현을 위해 다중 셀을 이용하거나 가변 커패시터를 이용한 공진 주파수 조절과 같은 다양한 기법들을 제안한 것을 볼 수 있었다. 하지만 현재까지는 다중 대역 특성을 구현하기 위한 다중 0차 공진 안테나를 설계하여 발표된 바가 없다.

IV. Dual ZOR 안테나 구조 및 설계

메타머티리얼 안테나의 상용화를 위해서 가장 선행되어야 할 두 가지는 휴대용 단말기 내부에 삽입할 수 있을 만한 작은 크기를 가져야 하며, 여러 서비스를 만족시킬 수 있을만한 다중 대역 혹은 광대역 특성을 가져야 한다는 것이다. 이 절에서는 휴대용 단말기 내장형 메타머티리얼 안테나 설계 및 제작에 관하여 EMW에서 보유하고 있는 기술을 중심으로 메타머티리얼 Dual ZOR 안테나를 소개하고자 한다.

[그림 3]은 CRLH-TL 구조의 unit cell에 대한 π 형 등가 회로를 나타낸 것이다. 특성 임피던스가 Z_0 , 길이가 d 인 일반적인 구조의 전송선로는 직렬 인덕턴스와 병렬 커패시턴스를 갖고 RH 특성을 나타낸다. LH 특성을 적용하기 위해 직렬 커패시턴스 C_0 , 병렬 인덕턴스 L_0 를 추가한 것이다. 여기서 직렬 커패시턴스 C_0 가 존재하면 DNG(Double Negative) unit cell에 해당되고, 존재하지 않으면 ENG(Epsilon Negative) unit cell에 해당된다. 이러한 π 형 CRLH-TL 등가회로를 이용하여 Dual ZOR 안테나를 설계하였다.

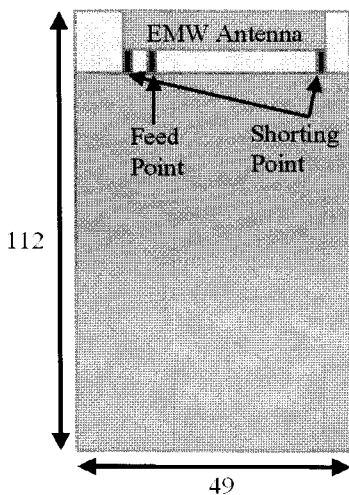


[그림 3] CRLH-TL 등가회로

[그림 4]는 unit cell 형태로 설계한 안테나가 급전 선로를 중심으로 양 방향으로 각각 구현된 dual ZOR 안테나를 나타낸 것이다. 2개의 방사체가 급전 선로를 중심으로 좌우측에 위치한다. 좌측은 고주파 대역 특성을, 우측은 저주파 대역 특성을 각각 만족할 수 있도록 구현하였다. 각각의 방사체 종단에는 스텐브(stub)를 통하여 접지면과 연결되는데, 스텐브에 의한 병렬 인덕턴스 및 방사체에 의한 병렬 커패시턴스에 의하여 공진 주파수 튜닝이 가능하다. 또한, 급전 선로와 접지면, 스텐브와 접지면 사이에는 공진 주파수 튜닝을 위한 인덕터 로딩 삽입이 가능하다.

[그림 5]는 모의 실험과 실제 제작하여 측정한 반사 손실(return loss)을 나타낸 것이다. 모의 시험은 상용 툴인 Ansoft사의 HFSS V11를 사용하였다^[17]. 좌측부터 저주파 대역의 ZOR 안테나 0차, 고주파 대역의 ZOR 안테나 0차, 저주파 대역의 ZOR 안테나 1차 공진 모드가 발생한다. 고주파 대역의 ZOR 안테나 0차와 저주파 대역의 ZOR 안테나 1차 공진 모드가 인접하여 광대역 특성을 나타낸다.

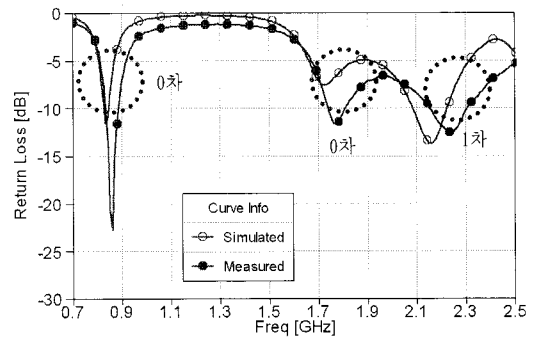
[그림 6]은 실제 제작된 안테나의 근접계 프로브



[그림 4] PCB에 장착한 dual ZOR 안테나 (특허 출원 중 공개 불가)

(near-field probe)를 이용한 표면 전류 분포(surface current distribution) 측정 결과를 보여준다. 공진 차수에 따라 PCB 그라운드 면에 흐르는 근접계 전류 분포가 다른 것을 볼 수 있다. 0차 공진인 약 850 MHz 및 1,850 MHz 주파수에서는 안테나 주위에 근접계 전류 분포가 강하게 나타난 반면 다른 고차 모드 주파수(2,170 MHz)에서는 안테나와 떨어진 PCB 그라운드 면에 hot spot이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 다른 고차 공진 모드 대비 0차 공진 모드에서 PCB 그라운드 면에 흐르는 근접계 전류 분포 편차가 작기 때문에 SAR(Specific Absorption Ratio)에도 유리한 특성을 가질 수 있다.

[그림 7]은 방사 이득 패턴(radiation gain pattern) 측정 결과를 나타낸 것이다. 순서대로 x-y plane, x-z plane, y-z plane에 대한 방사 패턴이다. 휴대 단말기에 적



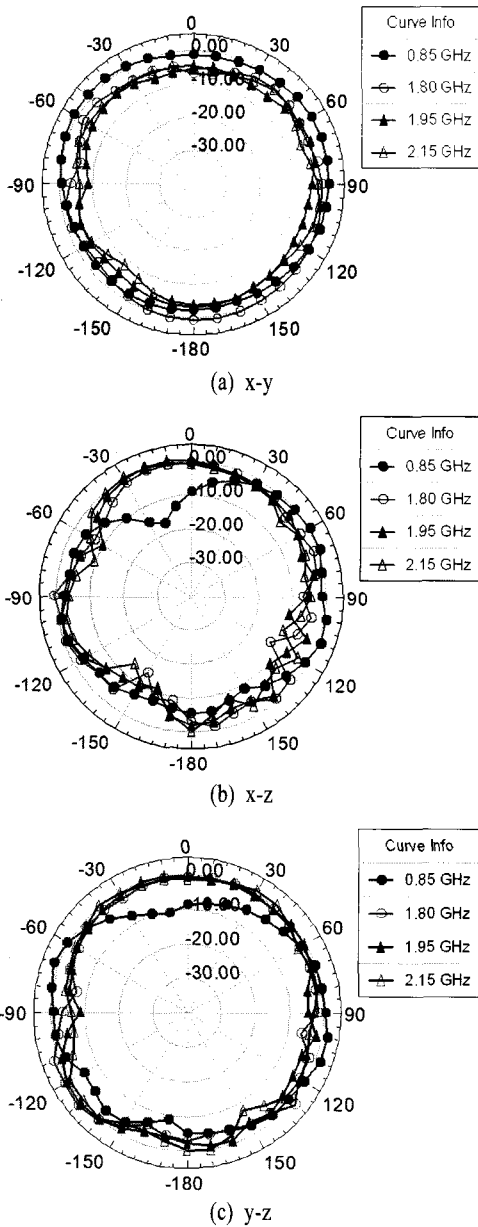
[그림 5] Dual ZOR 안테나 반사 손실



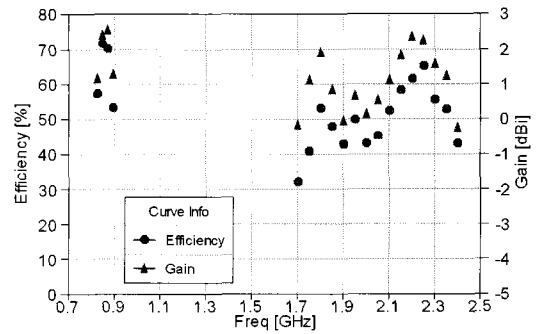
[그림 6] Dual ZOR 안테나 및 그라운드의 표면 전류 분포

용 가능한 omni-directional한 방사 패턴을 얻을 수 있다.

[그림 8]은 GSM850/1800/1900, WCDMA, WiBro 대역별로 안테나 효율(eficiency) 및 최대 이득(gain) 측정 결과를 나타낸 것이다.



[그림 7] Dual ZOR 안테나 방사 이득 패턴



[그림 8] Dual ZOR 안테나 효율과 이득

제안된 안테나는 Dual ZOR 구조를 이용하여 두 개의 0차 공진 주파수와 1차 공진 주파수를 형성함으로써 다중 대역 및 광대역 안테나로 동작할 수 있도록 구현하였다. 제안된 안테나는 실제 단말기에 적용 가능한 작은 크기를 가지며, 메타머티리얼 안테나 특성상 그라운드 크기에 많은 영향을 받지 않기 때문에 다양한 휴대용 디지털 통신기기들의 내장형 안테나로 사용이 가능하다.

V. 결 론

현대인의 필수품의 하나가 되어 버린 휴대 디지털 기기들은 사용자의 편리성과 휴대성을 위해 점점 단일/소형화 되어가고 있다. 따라서 시스템 그라운드 환경과 같은 주변 환경에 둔감하면서도 주파수에 비해 0.1λ 이하의 아주 작은 크기를 가지며, 사용자의 다양한 요구를 모두 수용할 수 있는 많은 서비스를 제공할 수 있는 다중 대역 혹은 광대역 안테나의 요구가 증가하고 있다. 이러한 다양한 요구를 모두 수용하기 위해서는 기존의 기술로는 불가능하다. 메타머티리얼 기법과 같은 새로운 기술을 이용한 혁신적인 안테나 개발이 절실하며, 국내외적으로 많은 연구가 행하여지고 있다. 하지만 논의된 많은 연구들은 실질적인 환경에 구현하여 적용하기 어려운 구조가 많고 대역폭이 좁다는 문제들을 가지고 있었다.

최근 메타머티리얼 ZOR 안테나에 대한 연구가 꾸준히 진행되어왔다. ZOR 구조를 이용하여 리액턴스 성분을 조절하여 안테나의 크기에 의존하지 않는 서로 다른 0차 공진 주파수를 동시에 구현하고 비선형성으로 나타나는 양의 차수 공진 주파수를 얻음으로써 안테나의 소형화, 다중 대역, 광대역 특성을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

현재까지 연구 발표된 메타머티리얼 안테나에 대한 실용/효용화에 대한 논란은 앞으로도 계속될 것이다. 하지만 메타머티리얼 안테나에 대한 연구가 꾸준히 지속되고 있고 논문과 특허가 꾸준히 발표되고 있는 한 물리적 제약을 받지 않고 많은 대역을 서비스 할 수 있는 혁신적인 안테나의 개발은 곧 이루어질 수 있을 것이라고 본다.

참 고 문 헌

- [1] Attali Jacques, "DICTIONNAIRE du XXle SIECLE".
- [2] F. Qureshi, M. A. Antoniadis, and G. V. Eleftheriades, "A compact and low-profile metamaterial ring antenna with vertical polarization", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, pp. 333-336, 2005.
- [3] D. H. Lee, A. Chauraya, J. A. Flint, W. S. Park, and J. C. Vardaxoglou, "Reconfigurable metamaterial Peano antenna", *Metamaterials 2007*, Rome Italy, p. 168, Oct. 2007.
- [4] Anthony Lai, Kevin M. K. H. Leong, and Tatsuo Itoh, "Infinite wavelength resonant antennas with monopole radiation pattern based on periodic structures", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 55, no. 3, Mar. 2007.
- [5] Yu-Shin Wang, Min-Feng Hsu, and Shyh-Jong Chung, "A compact slot antenna utilizing a right/left-handed transmission line feed", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 56, no. 3, pp. 675-683, Mar. 2008.
- [6] Cheng-Jung Lee, Kevin M. K. H. Leong, and Tatsuo Itoh, "Broadband small antenna for portable wireless application", *iWAT 2008*, Chiba Japan, p. 168, Mar. 2008.
- [7] A. Alu, F. Bilotti, N. Engheta, and L. Vegni, "Sub-wavelength, compact, resonant patch antennas loaded with metamaterials", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 55, no. 1, pp. 13-24, Jan. 2007.
- [8] Aycan Erentok, Richard W Ziolkowski, "Metamaterial-inspired efficient electrically small antenna", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 56, no. 3, pp. 691-707, Mar. 2008.
- [9] Harris Corp., "Dipole arrangements using dielectric substrates of meta-materials", 6753814(등록번호).
- [10] Harris Corp., "High efficiency printed circuit LPDA", 6734827(등록번호).
- [11] Lucent Tech., "Miniaturized antennas based on negative permittivity materials", 7009565(등록번호).
- [12] HRL Lab., "Steerable leaky wave antenna capable of both forward and backward radiation", 7071888 (등록번호).
- [13] Lsmtron Corp., "메타머티리얼 안테나 및 이를 이용한 통신 장치", 10-2009-0002043(출원번호).
- [14] EMW Corp., "메타머티리얼을 이용한 초소형 안테나", 10-2007-0058663(출원번호).
- [15] EMW Corp., "LH 선로를 이용한 안테나", 10-2007-0115182(출원번호).
- [16] EMW Corp., "메타머티리얼 전송선로를 이용한 안테나 및 상기 안테나를 이용한 통신장치", 10-2008-0124571(출원번호).
- [17] Ansoft corporation HFSS V11 (High Frequency Structure Simulator), <http://www.ansoft.com>.

≡ 필자소개 ≡

성 원 모



1995년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)

2007년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학박사)

1998년 6월~현재: (주)EMW 안테나 연

구소장

[주 관심분야] 안테나 설계 및 해석