

# 메타물질을 이용한 공진형 무선 에너지 전송 기술 연구

서 철 현

(송실대 정보통신전자공학부 교수)

IT 혁명의 근간이 되는 무선 통신 기술은 개인 간의 통신을 가능하게 하여, 단순 정보 전달에서 음성 및 화상 통화가 언제, 어느 곳에서도 가능하게 되었다. 그러나 이런 단말기를 작동하게 하는 전력 또는 에너지는 여전히 유선으로 공급하거나 전지를 충전하여 사용한다. 만약 무선 통신뿐만 아니라 무선 에너지 전송까지 가능하다면 IT 기술은 또 다른 도약을 하게 될 것이다. 이와 더불어 전세계적으로 에너지 기술과 IT 기술을 융합하는 에너지-IT 융합기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 무선 에너지 전송 기술은 전자기파 방식을 이용한 기술과 전자기 유도현상을 이용한 기술이 연구되고 있으며, 최근에는 근거리에서 공진 현상을 이용한 비방사 방식을 이용한 기술이 큰 관심을 받고 있다. 하지만 공진 현상을 이용한 비방사 방식은 전송 가능 거리가 짧고, 거리가 멀어질 경우 전송 효율이 떨어지는 문제점을 갖고 있다. 이와 같은 문제점들을 해결할 수 있는 음의 굴절률 특성을 갖는 메타물질을 이용한 공진형 무선 에너지 전송 기술에 대하여 소개하고자 한다.

## 1. 서론

최근 수년 동안 최종전선 단을 제거하기 위한 무선 에너지 전송 기술의 연구/개발에 관한 관심이 증가하고 있다. 노트북, 휴대전화, PDA 등과 같은 전자기기들에 전원을 공급하는 수많은 배터리와 벽에 내장된 콘센트에 연결된 수많은 전선

들의 엉킴은 단일의 편리한 충전 시스템 설계에 관한 관심을 유발시켰다. 무선 에너지 전송 시스템은 수신 코일을 갖추고 있는 수많은 전자기기들에 대한 충전을 가능하게 할 것이고, 휴대 무선 장치들의 최종전선 단을 제거할 수 있을 것이다. 무선 에너지 전송에 대한 접근 방법은 Near Field와 Far Field를 이용한 방법으로 분류될 수 있다. 현재까지 후자는 기존의 전력 공급원, 즉 벽에 내장된 콘센트에 전선을 연결하여 전력을 공급받는 방법과 대등한 수준의 전력 전송 효율을 얻기 위해 필요한 큰 전력과 큰 안테나에 대한 요구 때문에 소비자들이 사용하는 전자기기들에 적용하기에는 여전히 비현실적이다. 무선 에너지 전송을 위하여 비-방사 자기장을 통해 결합된 공진 구조를 이용한 방법의 가능성에 대한 분석은 최근 논문을 통하여 소개되었다. 동일한 공진 주파수를 갖고 있는 두 개의 공진 구조는 에너지를 효율적으로 주고받고 주위의 비-공진 구조에서 상대적으로 작은 에너지를 소모하는 특성이 있다. 또한, Near-Field 자기장 공진은 전자기기들과 같은 주위 물체와의 상호 작용이 크게 줄어들기 때문에 일상 생활에 활용되는 기기들에 적용되는 무선 에너지 전송 기술에 매우 적합하다.<sup>(1)-(4)</sup>

무선 에너지 전송 기술에서 가장 중요한 기술적 요소는 전송 가능 거리와 전송 효율이다. 최근에 이러한 전송 가능 거리와 전송 효율을 개선시키기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 그 중 1967년에 러시아 물리학자인 베셀라고(Veselago)가 음의 굴절률을 갖는 물질을 가정 한 이후 펜드

리(Pendry)가 음의 굴절률을 지닌 물질을 결합해 사용하면 소실광을 복원할 수 있는 완전 렌즈를 가능하게 한 메타물질을 이용한 공진형 무선 에너지 전송 기술 연구가 주목받고 있다. 이러한 메타물질의 음의 굴절률 특성을 무선 에너지 전송 기술에 적용할 경우, 에너지 전송의 매개체가 되는 자기장이 송수신 코일 사이에서 외부로 방사되어 손실되는 것을 줄일 수 있다. 즉, 송수신 코일 사이에서 전달되는 자기장의 방향을 송수신 코일 사이 공간 내부로 집중시킴으로써 방사 손실을 줄여서 전송 가능 거리 및 전송 효율을 크게 개선시킬 수 있다. 이를 자기장 집중 기술이라고 하며, 이러한 메타물질의 음의 굴절률 특성을 통한 자기장 집중 무선 에너지 전송 기술에 대한 연구가 필요하다.<sup>(5)-(10)</sup>

## 2. 자기장 집중 무선 에너지 전송 기술

MIT 물리학과와 마린 솔라치치(Marin Soljacic) 교수팀은 2007년 Science지를 통해 기존의 무선 에너지 전송과는 다른 새로운 개념의 전송 기술을 발표하였다. 이 기술은 기존의 원거리 전자파 방사와는 달리 사용되는 주파수/파장에 비해 짧은 거리에서의 전달로 근접장 효과를 이용하고 기존의 자기 유도에서 나아가 송수신부의 공진 주파수를 일치시켜 매우 높은 효율로 “비방사형 중거리 무선 에너지 전송 기술을 개발하였다. 하지만 현재 이 기술은 무선 에너지 전송 송수신용 코일의 크기가 매우 크고, 전송 가능 거리에 제한이 있으며, 전송 거리가 멀어지면 전송 효율이 급격히 악화되는 문제점들을 갖고 있다. 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 방법으로 메타물질의 음의 굴절률 특성을 이용한 자기장 집중 기술이 있다. 그림 1은 메타물질을 이용한 자기장 집중 기술을 적용한 무선 에너지 전송 기술 개념도를 보여준다.<sup>(1), (2)</sup>

메타물질은 자연에서 발견될 수 없는 음의 유전율과 음의

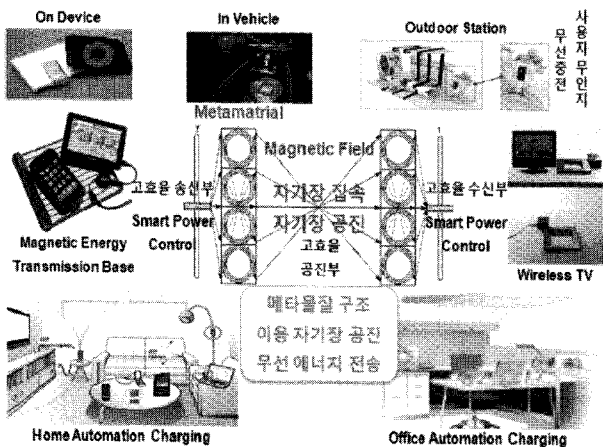


그림 1 메타물질을 이용한 자기장 집중 무선 에너지 전송 기술 개념도

투자율과 같은 특별한 전기적 성질을 갖도록 인공적으로 설계된 구조이다. 이와 같은 메타물질의 유전율과 투자율 특성은 일반적인 도체와 유전체 자체의 성질 보다는 그것들의 구조로부터 만들어진다. 자연 상태로 존재하지 않는 음의 유전율과 음의 투자율을 갖게 될 경우 물질의 굴절률이 음수가 되며, 이것은 일반적으로 우리가 알고 있는 물리적 현상이 뒤바뀐 새롭고 신비한 현상이 나타나게 된다. 메타물질의 가장 유망한 응용 분야 중의 하나는 -1의 전기적 유전율과 자기적 투자율을 보이는 일정한 두께를 갖는 단일 평판으로 구성된 베셀라고-펜드리 렌즈이다. 음의 유전율과 음의 투자율을 동시에 갖는 매체는 맥스웰 방정식에 의해 허용되어지고, 이러한 매체에 전달되는 평면파는 전계, 자계, 전달 상수가 좌향 특성을 나타낸다. 또한, 메타물질은 대응되는 굴절률,  $n = -\sqrt{\mu\epsilon}$  을 적절하게 정의하기 위하여 제곱근의 음의 값을 선택하며, 그러므로 메타물질은 음의 굴절률을 갖는 전자기파를 형성한다. 즉, 메타물질이 일반적인 유전체와 접촉되어 있을 때, 스넬의 법칙은 음의 굴절각으로 확대되고, 그러므로 입사되는 전자기 평면파의 음의 굴절을 만들어낸다.<sup>(11)-(14)</sup>

그림 2는 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 이용한 무선 에너지 전송 방법을 보여준다. 그림 2에서 보는 것과 같이, 송신 장치에서는 송신 장치의 커플링 루프에 의해 방사되는 자기장이 송신 장치의 메타물질 구조에 닿았을 때, 자기장은 송수신 장치의 메타물질 구조 사이의 공간 내부로 굴절된다. 만약, 메타물질 구조가 아니라 일반적인 양의 굴절률을 갖는 구조였다면, 자기장은 송수신 장치의 일반적인 양의 굴절률을 갖는 구조 사이의 공간 밖으로 굴절되어진다. 수신 장치에서는 송신 장치의 메타물질 구조에 의해 음의 굴절각으로 굴절된 자기장이 수신 장치의 메타물질 구조에 닿았을 때, 자기장은 수신 장치의 메타물질 구조와 커플링 루프 사이의 공간 내부로 굴절된다. 만약, 메타물질 구조가 아니라 일반적인 양의

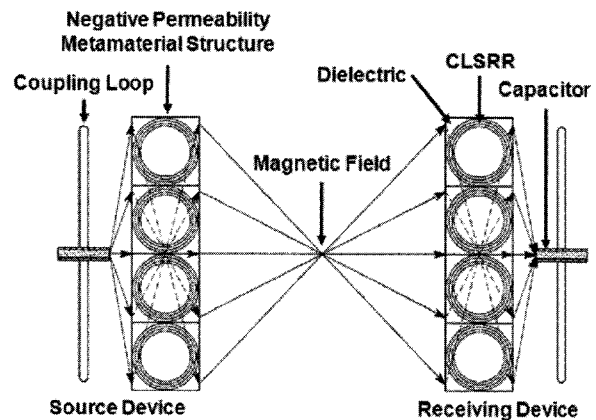


그림 2 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 이용한 무선 에너지 전송 방법

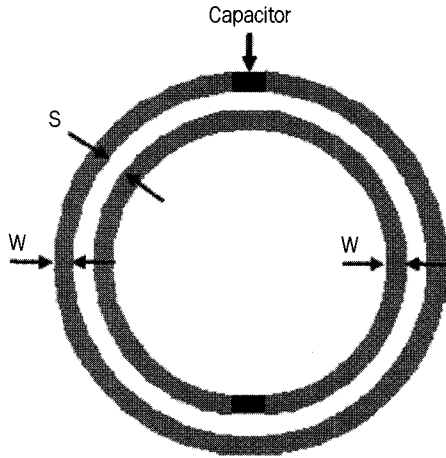
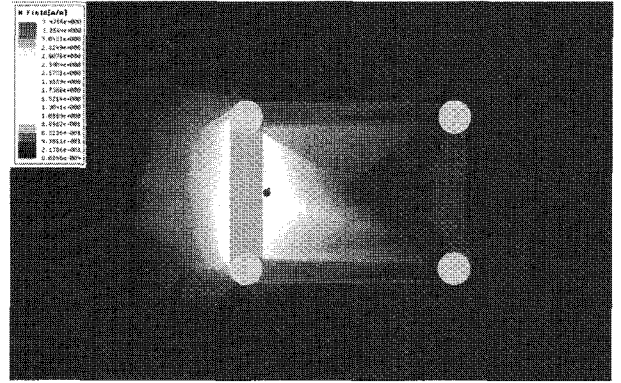


그림 3 음의 굴절률을 갖는 3차원 메타물질 구조의 단위 셀을 구성하는 CLSRR

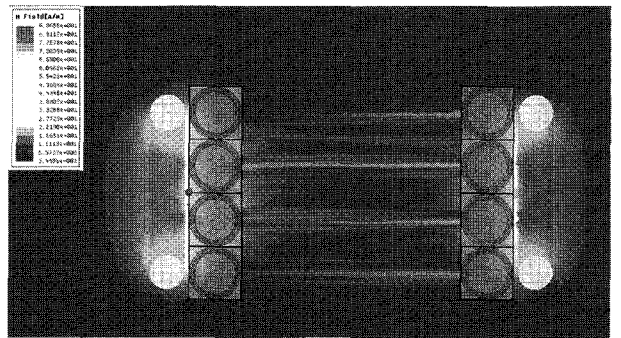
굴절률을 갖는 구조였다면, 자기장은 수신 장치의 일반적인 양의 굴절률을 갖는 구조와 커플링 루프 사이의 공간 밖으로 굴절되어 진다. 이는 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조의 역의 굴절 특성 때문이다. 이와 같은 방법을 통하여, 송신 장치의 커플링 루프에 의해 방사된 자기장은 수신 장치의 커플링 루프로 집중된다. 즉, 무선 에너지 전송에서 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 통하여 자기장을 집중시킴으로써 방사 손실이 감소하기 때문에 에너지 전송 효율은 동일한 전송 거리에서 크게 개선될 수 있다. <sup>(11)-(13)</sup>

음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조는 CLSRR(Capacitively-Loaded Split Ring Resonator)이 육면체의 유전체 표면에 주기적으로 배열되어져 있는 단위 셀의 3차원 주기적 집합체를 이용하여 설계되어 진다. 음의 굴절률을 갖는 3차원 메타물질 구조의 단위 셀을 구성하는 CLSRR은 그림 3에 나와 있다. 그림 3에서 보는 것과 같이, 음의 굴절률을 갖는 3차원 메타물질 구조의 단위 셀을 설계하기 위하여 이용되어진 CLSRR은 유전체 위에 식각된 개방 갭을 갖는 동심의 내/외부 도체 링(어두운 회색)과 동심의 내/외부 도체 링의 개방 갭에 연결된 커패시터(검정색)로 구성되어 있다. 이와 같은 CLSRR들이 육면체의 유전체 표면에 주기적으로 배열되었을 때, CLSRR들 사이의 상호작용 때문에 메타물질은 전송 스펙트럼 상에서 대역 통과 특성이 나타난다. CLSRR은 자기장에 의해 외부적으로 구동될 수 있는 LC 공진 탱크로 모델링될 수 있고, 적절히 맞춰지면 좁은 특정 주파수 대역에서 신호 전달이 강화된다. <sup>(10), (13)</sup>

그림 4는 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조가 없는 경우와 있는 경우에서의 무선 에너지 전송의 자기장 흐름 모의실험 결과를 보여준다. 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조가 없는 무선 에너지 전송의 송수신 장치 사이의 자기장 전달 특성과



(a)



(b)

그림 4 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 이용한 무선 에너지 전송의 자기장 흐름 모의실험 결과

- (a) 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조가 없는 경우,
- (b) 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조가 있는 경우

비교했을 때, 동일한 전송 거리에서 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조가 있는 무선 에너지 전송의 송수신 장치 사이의 자기장 전달 특성이 수신 장치에 강하게 집중되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 동일한 전송 거리에서 송신 장치에서 동일한 세기의 자기장이 방사되었을 때, 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 이용한 무선 에너지 전송의 경우, 수신 장치에 전달된 자기장의 세기가 훨씬 더 강한 것을 확인할 수 있다.

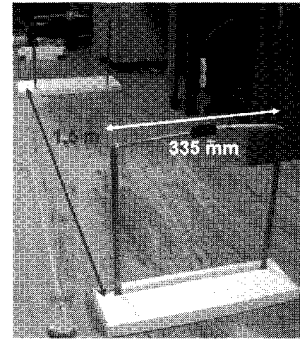
이와 같은 자기장의 흐름으로부터 자기장이 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조에 의하여 집중되었다는 사실이 증명되었다. 이는 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 이용하여 무선 에너지 전송에서 전송 가능 거리를 늘리고, 전송 효율을 개선시킬 수 있다는 것을 보여준다.

### 3. 자기장 집중 무선 에너지 전송 실험

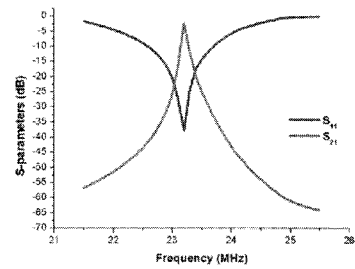
그림 5는 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조 제작물을 보여준다. 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조는 유전율 10.2와 두께 31 mils을 갖는 Taconic 사의 CER-10 기판으로 제작되

었다. 육면체 단위 셀의 각 면은 CLSRR들이 도체 선로로 형성된 유전체 기판으로 되어있고, 육면체 단위 셀의 내부는 공기로 차있다. 그림 5에 보는 바와 같이, 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조는 CLSRR들이 육면체의 유전체 표면에 주기적으로 배열되어 있는 단위 셀의 4×4 3차원 주기적 합성체로 설계되었다. 제작된 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조의 크기는 480×480×120 mm이다.

그림 6은 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조 없이 오직 두 개의 커플링 루프를 구성된 무선 에너지 전송 구조의 제작물과 전송 및 반사 특성 ( $S_{21}$ ,  $S_{11}$ )의 측정치를 보여준다. 그림 6 (b)에서, x-축의 주파수 범위는 21.5 MHz에서부터 25.5 MHz이다. 그림 6 (b)에서 보는 것처럼, 전송 거리가 1.5 m 일 때, 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조 없이 오직 두 개의 커플링 루프를 구성된 무선 에너지 전송 구조의 전송 및 반사 특성은 23.20 MHz의 공진 주파수에서 각각 -2.27 dB와 -37.80 dB이다. 반사 손실을 고려했을 때, 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조가 없는 무선 에너지 전송의 방사 손실과 에너지 전송 효율은 각각 40.67 %와 59.30 %이다. 그림 7은 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 적용한 무선 에너지 전송 구조의 제작물과 전송 및 반사 특성 ( $S_{21}$ ,  $S_{11}$ )의 측정치를 보여준다. 그림 7 (b)에서, x-축의 주파수 범위는 21.5

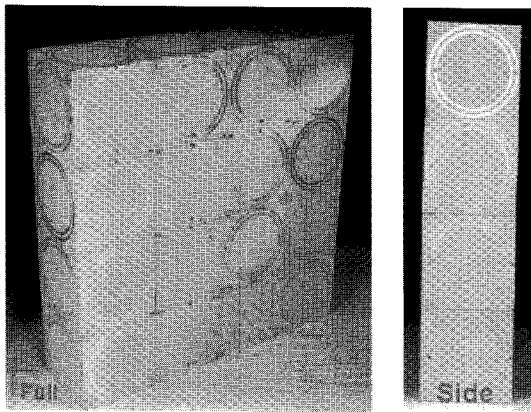


(a)



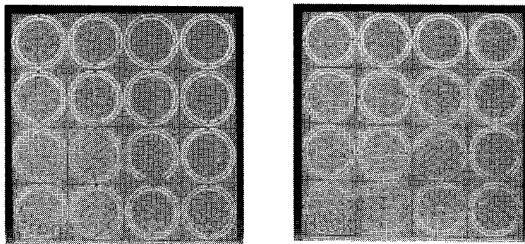
(b)

그림 6 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조가 없는 무선 에너지 전송 (a) 제작물, (b) 전송 및 반사 특성 ( $S_{21}$ ,  $S_{11}$ )의 측정치



(a)

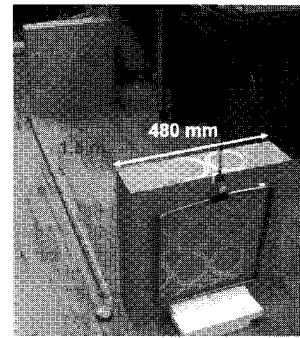
(b)



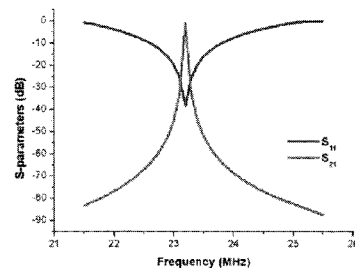
(c)

(d)

그림 5 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조 제작물 (a) 전체, (b) 옆면, (c) 앞면, (d) 뒷면



(a)



(b)

그림 7 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 적용한 무선 에너지 전송 (a) 제작물, (b) 전송 및 반사 특성 ( $S_{21}$ ,  $S_{11}$ )의 측정치

표 1 무선 에너지 전송 동작 특성 측정치

특성	단위	음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조 없는 경우	음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조 있는 경우
주파수	MHz	23.20	23.20
전송 거리	m	1.5	1.5
전송 특성	dB	-2.27	-0.95
반사 손실	dB(%)	-37.80(0.03)	-38.50(0.03)
방사 손실	%	40.67	19.62
전송 효율	%	59.30	80.35
크기 (커플링 루프 / 메타물질 구조)	mm	335×335 / NA	335×335 / 480×480×120

MHz에서부터 25.5 MHz이다. 그림 7 (b)에서 보는 것처럼, 전송 거리가 1.5 m일 때, 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 적용한 무선 에너지 전송 구조의 전송 및 반사 특성은 23.20 MHz의 공진 주파수에서 각각 -0.95 dB와 -38.50 dB이다. 반사 손실을 고려했을 때, 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 적용한 무선 에너지 전송의 방사 손실과 에너지 전송 효율은 각각 19.62 %와 80.35 %이다. 이와 같은 측정 결과로부터, 에너지 전송 효율이 자기장 집중 원리로서 음의 굴절률을 갖는 메타 물질을 이용하여 크게 개선되었다는 것이 확인되었다. 즉, 자기장을 수신 장치에 집중시킴으로써 방사 손실이 크게 감소하였다. 무선 에너지 전송을 위하여 제작된 커플링 루프의 크기는 335×335 mm이다. 표 1은 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조가 없는 경우와 있는 경우에서의 무선 에너지 전송의 동작 특성을 보여준다. 표를 보면, 무선 에너지 전송에 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 적용하였을 때, 자기장을 수신 장치에 집중시킴으로써 방사 손실이 절반으로 감소하였다. 이러한 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조에 의한 자기장 집중으로 인하여 방사 손실이 감소함으로써 전송 효율이 크게 개선되었다. 또한, 동일한 전송 효율 특성 갖는 전송 가능 거리를 크게 늘릴 수 있다. 즉, 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 통한 자기장 집중 기술을 무선 에너지 전송에 적용하여 기존의 자기장 공진을 이용한 무선 에너지 전송 기술이 갖고 있던 전송 거리가 늘어날 때 전송 효율이 급격히 감소하는 문제를 해결할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존의 자기장 공진 무선 에너지 전송 기술에 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조의 자기장 집중 기술을

적용하여 전송 가능 거리를 확장하고, 전송 효율을 개선시킨 기술에 대하여 간단하게 기술하였다. 현재 1m이상의 전송 거리에서 높은 전송 효율 특성을 얻었으며, 본 기술은 전기자동차, TV 등과 같이 무선으로 에너지 공급이 필요한 크기가 큰 전기/전자 기기에 적용가능하다. 하지만 이와 같은 기술이 노트북, 휴대전화, PDA 등과 같은 소형의 모바일 기기 등에 적용되기 위해서는 무선 에너지 전송 수신부의 소형화가 필요하다. 현재의 음의 굴절률을 갖는 메타물질 구조를 이용한 자기장 집중 자기장 공진 무선 에너지 전송 기술에 순수 좌향 메타물질 구조에 대한 연구를 통한 소형화 기술을 적용하여 소형 모바일 기기에 대한 무선 에너지 전송을 가능하게 하는데 주력할 계획이다. ■

#### 참고 문헌

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, Vol. 317, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [2] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, Vol. 323, No. 1, pp. 34-48, Jan. 2008.
- [3] B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein, "Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 7, pp. 1819-1825, Jul. 2009.
- [4] M. C. K. Wiltshire, J. B. Pendry, I. R. Young, D. J. Larkman, D. J. Gilderdale, J. V. Hajnal, "Microstructured magnetic materials for RF flux guides in magnetic resonance imaging," *Science*, Vol. 291, No. 2, pp. 849-851, Feb. 2001.
- [5] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability," *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 10, pp. 509-514, Jan. 1968.
- [6] G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, C. M. Soukoulis, and S. Linden, "Simultaneous negative phase and group velocity of light in a metamaterial," *Science*, Vol. 32, No. 5775, pp. 892-894, 2006.
- [7] A. Grbic, and G. V. Eleftheriades, "Dispersion

- analysis of a microstrip-based negative refractive index periodic structure," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 13, No. 4, pp. 155-157, Apr. 2003.
- [8] J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, and X. Zhang, "Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index," *Nature*, Vol. 455, No. 7211, pp. 376-379, 2008.
- [9] 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.
- [10] R. Marques, F. Mesa, J. Martel, and F. Medina, "Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design - Theory and Experiments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 51, No. 10, pp. 2572-2581, Oct. 2003.
- [11] G. V. Eleftheriades, "Enabling RF/microwave devices using negative-refractive-index transmission-line (NRI-TL) metamaterials," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 49, No. 2, pp. 34-51, Apr. 2007.
- [12] L. Markley, and G. V. Eleftheriades, "A negative-refractive-index metamaterial for incident plane waves of arbitrary polarization," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 6, pp. 28-32, 2007.
- [13] E. Ozbay and C. M. Soukoulis, "Observation of negative refraction and negative phase velocity in true left-handed metamaterials," *Proceedings of the 36th European Microwave Conference*, pp. 959-962, Sep. 2006.
- [14] R. Marques, F. Martin, and M. Sorolla, *Metamaterial with Negative Parameters: Theory and Microwave Applications*, Wiley, New York, 2008.

### 〈 필 자 소 개 〉



#### 서철헌(徐哲憲)

1959년 10월 10일생. 1983년 서울대 공과대학 전자공학과 졸업. 1985년, 1983년 동 대학원 전자공학과 졸업(공석, 공박). 1993년 3월~1995년 2월 MIT 연구원. 1993년 3월~2003년 8월 송실대 조교수, 부교수. 2007년 3월~2008년 8월 MIT 연구 교수. 2003년 9월~현재 송실대 교수.