메타머티리얼을 이용한 무선전력전송기술

글 _ 서철헌
숭실대학교 정보통신전자공학부

IT 혁명의 근간이 되는 무선 통신 기술은 개인 간의 통신을 가능하게 하여, 단순 정보 전달에서 음성 및 화상 통화가 언제, 어느 곳에서도 가능하게 만들었다. 그러나 이런 단말기를 작동하게 하는 전력 또는 에너지는 여전히 유선으로 공급하거나 전지를 충전하여 사용한다. 만약 무선 통신뿐만 아니라 무선전력전송까지 가능하다면 IT 기술은 또 다른 도약을 하게 될 것이고, 이와 더불어 전세계적으로 에너지 기술과 IT 기술을 융합하는 에너지-IT 융합기술에 대한 관심도 또한 높아지고 있다. 무선전력전송 기술은 전자기파 방사를 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 또는 제로 굴절률 특성을 갖는 메타머티리얼을 이용한 공진형 무선전력전송 기술에 대하여 소개하고자 한다.

1. 서론

최근 수년 동안 최종전선 단을 제거하기 위한 무선전력전송 기술의 연구/개발에 관한 관심이 증가하고 있다. 노트북, 휴대전화, PDA 등과 같은 전자기기들에 전원을 공급하는 수많은 배터리와 벽에 내장된 콘센트에 연결된 수많은 전선들의 엉킴과 같은 불편은 단일의 편리한 충전 시스템 설계에 관한 관심을 유발시켰다. 무선전력전송 시스템은 수신 코일을 갖추고 있는 수많은 전자기기들에 대한 충전을 가능하게 할 것이고, 휴대 무선 장치들의 최종전선 단을 제거할 수 있을 것이다. 무선전력전송에 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 안테나 때문에 소비자들이 사용하는 전자기기들에 적용하기에는 여전히 비현실적이다. 무선전력전송을 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 전력을 효율적으로 주고받고 주위의 비-공진 구조에서는 상대적으로 작은 전력을 소모하는 특성이 있다. 또한, Near-Field 자기장 공진은 전자기기들과 같은 주위 물체와의 상호 작용이 크게 줄어들기 때문에 일상생활에 활용되는 기기들에 적용되는 무선전력전송 기술에 매우 적합하다.[1-4)]

무선전력전송 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 가정한 이후 펜드리 (Pendry)가 음의 굴절률을 지닌 물질을 결합해 사용하면 소실광을 복원할 수 있는 완전 렌즈를 가

능하게 한 메타머티리얼을 이용한 공진형 무선전력전송 기술 연구가 주목받고 있다. 이러한 메타머티리얼의 음의 굴절률 특성을 무선전력전송 기술에 적용할 경우, 전력 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 집속시킴으로써 방사 손실을 줄여서 전송 가능 거리 및 전송 효율을 크게 개선시킬 수 있다. 이를 자기장 집속 기술이라고 하며, 이러한 메타머티리얼의 음의 굴절률 특성을 통한 자기장 집속 무선전력전송 기술에 대한 연구가 필요하다.[5-10)]

2. 자기장 집속 무선전력전송 기술

IT 물리학과의 마린 솔랴치치 (Marin Soljacic) 교수팀은 2007년 Science지를 통해 기존의 무선전력전송과는 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 중 거리 무선전력전송” 기술을 개발하였다. 이 기술은 약 10 MHz 주파수를 사용하여 2.4 m 떨어진 60 W 전구를 켜는 것을 시연 하였다. 하지만 이 기술은 무선전력전송 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 음의 굴절률 또는 제로 굴절률 특성을 갖는 메타머티리얼의 특성을 이용한 자기장 집속 기술이 있다. Fig. 1은 메타머티리얼을 이용한 자기장 집속 기술을 적용한 무선전력전송 기술 개념도를 보여준다.[1,2)]

메타머티리얼은 자연에서 발견할 수 없는 음의 유전율과 음의 투자율과 같은 특별한 전기적 성질을 갖도록 인공적으로 설계된 구조이다. 이와 같은 메타머티리얼의 유전율과 투자율 특성은 일반적인 도체와 유전체 자체의 성질 보다는 그것들의 구조로부터 만들어진다. 자연 상태로 존재하지 않는 음의 유전율과 음의 투자율을 갖게

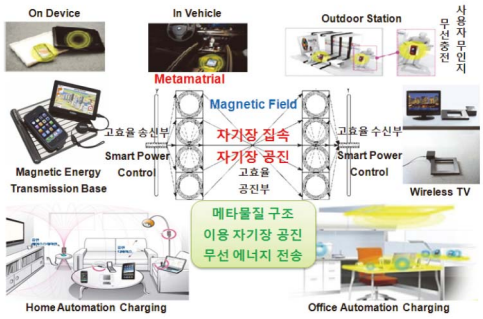


Fig. 1. 메타머티리얼을 이용한 자기장 집속 무선전력전송 기술 개념도

될 경우 물질의 굴절률이 음수가 되며, 이것은 일반적으로 우리가 알고 있는 물리적 현상이 뒤바뀐 새롭고 신비한 현상이 나타나게 된다. 메타머티리얼의 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, 메타머티리얼은 대응되는 굴절률을 적절하게 정의하기 위하여 제곱근의 음의 값을 선택하며, 그러므로 메타머티리얼은 음의 굴절률을 갖는 전자기파를 형성한다. 즉, 메타머티리얼이 일반적인 유전제와 접촉되어 있을 때, 스넬의 법칙은 음의 굴절각으로 확대되고, 그러므로 입사되는 전자기 평면파의 음의 굴절을 만들어낸다.[11-14)]

Fig. 2는 음의 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 이용한 무선전력전송 방법을 보여준다. Fig. 2에서 보는 것과 같이, 송신 장치의 커플링 로프에 의해 방사되는 자기장이 송신 장치의 메타머티리얼에 닿았을 때, 자기장은 송수신 장치의 메타머티리얼 사이의 내부로 굴절된다. 만약, 메타머티리얼이 아니라 일반적인 양의 굴절률을 갖는 구조였다면, 자기장은 송수신 장치의 일반적인 양의 굴절률을 갖는 구조 사이의 공간 밖으로 굴절된다. 수신 장치에서는 송신 장치의 메타머티리얼에 의해 음의 굴절각으로 굴절된 자기장이 수신 장치의 메타머티리얼에 닿았을 때, 자기장은 수신 장치의 메타머티리얼과 커플링 루프 사이의 공간 내부로 굴절된다. 만약, 메타머티리얼이 아

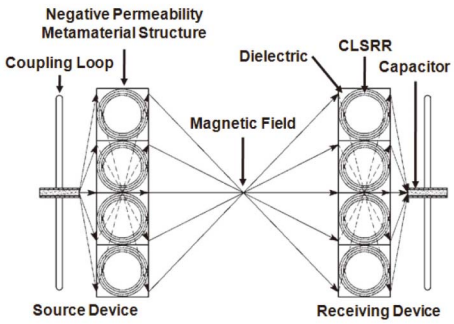


Fig. 2. 음의 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 이용한 무선전력전송 방법.

니라 일반적인 양의 굴절률을 갖는 구조였다면, 자기장은 수신 장치의 일반적인 양의 굴절률을 갖는 구조와 커플링 루프 사이의 공간 밖으로 굴절된다. 이는 음의 굴절률을 갖는 메타머티리얼의 역의 굴절 특성 때문이다. 이와 같은 방법을 통하여, 송신 장치의 커플링 루프에 의해 방사된 자기장은 수신 장치의 커플링 루프로 집속된다. 즉, 무선전력전송에서 음의 굴절률 또는 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼 통하여 자기장을 집속시킴으로써 방사 손실이 감소하기 때문에 전력 전송 효율은 동일한 전송 거리에서 크게 개선될 수 있다.[11-13)]

유효 투자율이 1 미만의 값을 갖는 메타머티리얼은 CLSRR (Capaci- tively-Loaded Split Ring Resonator)이 있다. 메타머티리얼 특성인 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼의 단위 셀을 구성하는 CLSRR은 Fig. 3에 나와 있다. Fig. 3에서 보는 것과 같이, 있다. 유효 투자율 값을 조절할 수 있는 메타머티리얼의 단위 셀을 설계하기 위하여 이용 되어진 CLSRR은 유전체 위에 식각된 개방 갭을 갖는 동심의 내/외부 도체링의 개방 갭에 연결된 캐패시터로 구성되어있다.[10,13)]

Fig. 4는 음의 굴절률을 갖는 메타머티리얼이 없는 경우와 있는 경우에서의 무선전력전송의 자기장 흐름 모의실험 결과를 보여준다. Fig. 5는 음의 굴절률 외에 메타머티리얼 특성을 갖는 제로 굴절률 특성을 나타내는 메타머티리얼이 없는 경우와 있는 경우에서의 모의실험 결과를 보여준다. Fig. 4와 5 모두 메타머티리얼이 없는 무선전력전송의 송수신 장치 사이의 자기장 전달 특성과 비교했을 때, 동일한 전송 거리에서 메타머티리얼이 있

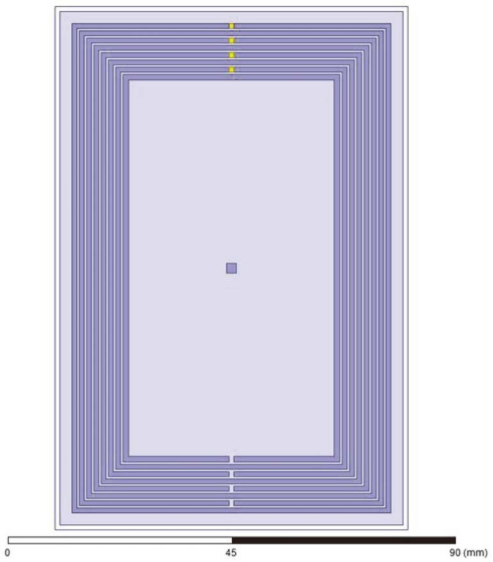
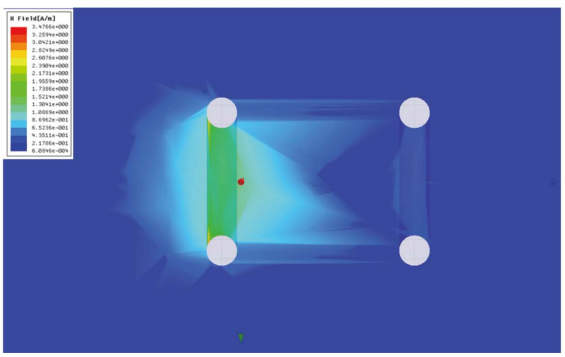
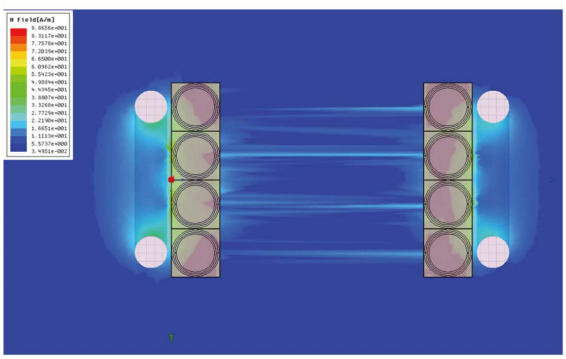


Fig. 3. 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼의 단위 셀을 구성하는 CLSRR.



(a)



(b)

Fig. 4. 음의 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 이용한 무선전력전송의 자기장 흐름 모의실험 결과 (a) 음의 굴절률을 갖는 메타머티리얼이 없는 경우, (b) 음의 굴절률을 갖는 메타머티리얼이 있는 경우.

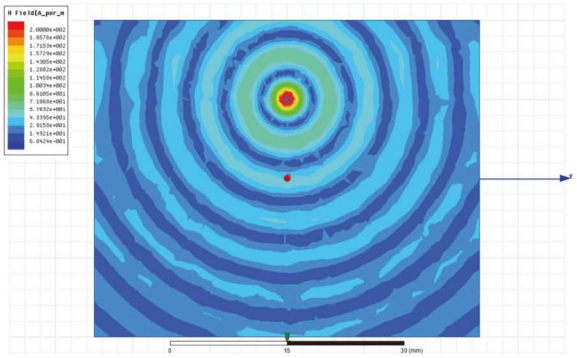


Fig. 5. 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 이용한 무선전력전송의 자기장 흐름 모의실험 결과 (a) 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼이 없는 경우, (b) 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼이 있는 경우.

는 무선전력전송의 송수신 장치 사이의 자기장 전달 특성이 수신 장치에 강하게 집속되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 동일한 전송 거리에서 송신 장치에서 동일한 세기의 자기장이 방사되었을 때, 메타머티리얼을 이용한 무선전력전송의 경우, 수신 장치에 전달된 자기장의 세기가 훨씬 더 강한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3의 CLSRR 구조 외에 다른 제로 굴절률 특성을 갖는 구조를 이용하여 자기장을 집속 시킬 수도 있다. Fig. 6은 SRR 구조와 이를 연결하는 via 구조를 사용한 메타머티리얼의 단위 셀과 단위 셀을 배열 한 메타머티리얼을 보여주고 있다. Fig. 5의 메타머티리얼은 총 2개로 이루어져 있으며, 5 × 5 형태의 배열 구조이며, 또 하나는 가운데가 비워져 있는 구조로 이루어져 있다. 이는 메타

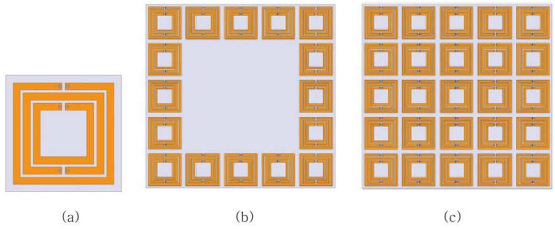


Fig. 6. 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼 (a) 단위 셀, (b) 배열구조 1,(c) 배열구조 2.

머티리얼의 성능을 최적화하기 위해 제안된 구조이다. 각각의 메타머티리얼은 기본 송수신공진기의 앞에 위치하게 되며, 제로 굴절률 특성을 이용하여 원거리에서도 평탄한 S21 특성 및 이에 따른 고른 형태의 고효율 특성을 얻을 수 있다. 이러한 SRR 구조의 메타머티리얼을 이용하여 기본 공진기에 적용을 하였다. Fig. 7과 8은 Fig. 6의 메타머티리얼을 적용하기 전과 적용후의 모의실험 결과를 보여준다. 송수신기간 거리는 100 mm이며, 기본 무선전력전송 공진기의 모의실험의 경우에는 over-coupling으로 인한 split 현상이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 8에서 보여주는 것과 같이 메타머티리얼을 적용한 무선전력전송 구조는 송수신간 거리가 가까워짐에도 불구하고 S21 특성의 split 현상이 없음을 확인할 수 있다. 기본 송수신 구조에 비해 제안된 구조는 거리가 가까워짐에도 불구하고 S_{21} 특성의 변화가 없음을 확인할 수 있다.[15)]

이와 같은 결과는 자기장이 음의 굴절률과 제로 굴절

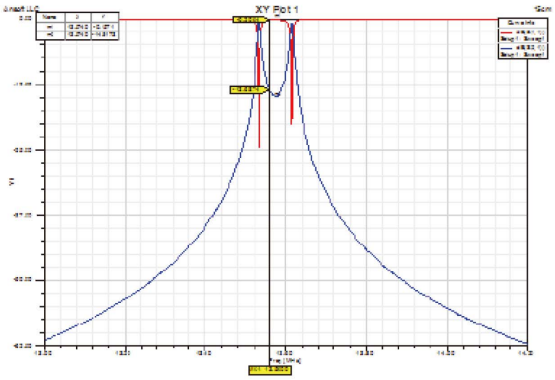


Fig. 7. 기본 무선전력전송 구조의 모의실험 결과.

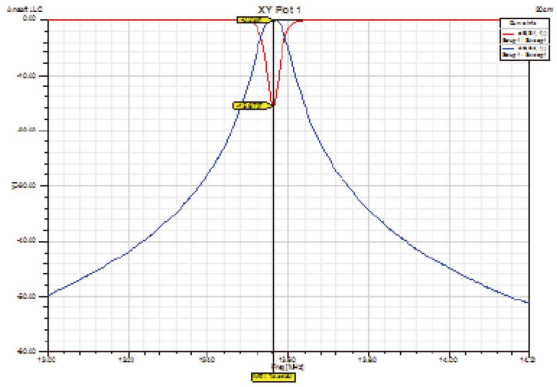


Fig. 8. 제로 굴절률 특성의 메타머티리얼을 적용한 무선전력전송 구조의 모의실험 결과.

률을 갖는 메타머티리얼에 의하여 집속되었다는 사실을 증명해 준다. 이는 음의 굴절률과 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 이용하여 무선전력전송에서 전송 가능 거리를 늘리고, 전송 효율을 개선시킬 수 있다는 것을 보여준다.

3. 자기장 집속 무선전력전송 실험

Fig. 9는 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 실제 제작한 사진이다. Fig. 10은 리츠와이어를 이용한 무선전력전송 공진기이며, Fig. 11은 Fig. 9의 메타머티리얼을 리츠와이어를 이용한 공진기에 적용한 공진형 무선전력전송 구조 제작물을 보여준다. Fig. 9에 보는 바와 같이, 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼은 CLSRR들이 유전체 표면에 주기적으로 배열되어 있는 단위 셀의 5 × 5 배열의 주기적 합성체로 설계되었다.

Fig. 10은 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼 없이 오직 두 개의 커플링 루프로 구성된 무선전력전송 구조의 제작물을 보여준다. 기본 무선전력전송 공진기의 주파수는 6.78 MHz이다. Table 1은 거리별 전송 특성 (S_{21})의 시뮬레이션 결과 대비 측정결과이다. 전송 거리가 100 mm에서 150 mm로 변화 할 때, 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼 없이 오직 두 개의 공진기로 구성된 무선전력전송 구조의 전송 특성은 6.78 MHz의 공진 주파수에서 -5.71 dB에서 -11.58 dB로 변화한다. 반사 손실을 고려했

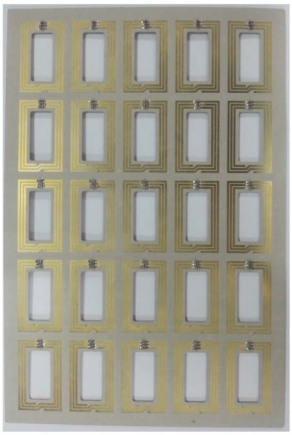


Fig. 9. 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼.

Fig. 10. 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼이 없는 무선전력전송 제작물.

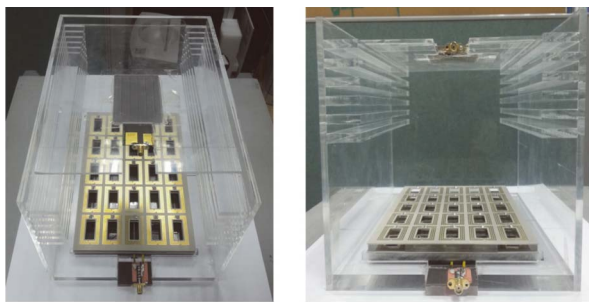


Fig. 11. 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 적용한 무선전력전송 제작물.

을 때, 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼이 없는 무선전력전송의 전력 전송 효율은 거리가 멀어질수록 26.9%에서 7.1%로 감소한다. Fig. 11는 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 적용한 무선전력전송 구조의 제작물을 보여준다. Table 2는 거리별 전송 특성 (S_{21})의 측정 결과이다. 전송 거리가 100 mm에서 150 mm로 변화 할 때, 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 적용한 무선전력전송

Table 1. 기본공진기의 전송거리별 무선전력전송효율

전송거리	측정 결과	
	S_{21} (dB)	효율 (%)
100 mm	−5.71	26.9
110 mm	−6.49	22.4
120 mm	−7.56	17.5
130 mm	−8.82	13.2
140 mm	−10.19	9.6
150 mm	−11.58	7.1

Table 2. 메타머티리얼 적용한 전송 거리별 무선 전력 전송 효율

전송 거리	측정 결과	
	S_{21} (dB)	효율 (%)
100 mm	−2.64	54.4
110 mm	−2.06	62.2
120 mm	−2.04	62.5
130 mm	−2.51	56.1
140 mm	−3.07	49.3
150 mm	−3.44	45.2

구조의 전송 특성은 6.78 MHz의 공진 주파수에서 -2.64 dB에서 -3.44 dB로 변화한다. 반사 손실을 고려했을 때, 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 적용한 무선전력전송의 전력 전송 효율은 거리가 멀어질수록 54.4%에서 45.2%로 감소한다. 이와 같은 측정 결과로부터, 전력 전송 효율이 자기장 집속 원리로 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 이용하여 크게 개선되었다는 것이 확인되었다. 즉, 자기장을 수신 장치에 집속 시킴으로써 방사 손실이 크게 감소하였다. 무선전력전송을 위하여 제작된 커플링 루프의 크기는 140 × 210 mm이다. Table 1은 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼이 없는 경우와 있는 경우에서의 무선전력전송의 동작 특성을 보여준다. 표를 보면, 무선전력전송에 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 적용하였을 때, 자기장을 수신 장치에 집속시킴으로써 방사 손실이 절반으로 감소하였다. 이러한 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼에 의한 자기장 집속으로 인하여 방사 손실이 감소함으로써 전송 효율이 크게 개선되었다. 또한, 동일한 전송 효율 특성을 가지면서도 전송 가능 거리를 크게 늘릴 수 있다. 즉, 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 통한 자기장 집속 기술을 무선전력전송에 적용하여 기존의 자기장 공진을 이용한 무선전력전송 기술이 갖고 있던 전송 거리가 늘어날 때 전송 효율이 급격히 감소하는 문제를 해결할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 공진형 무선전력전송 시스템의 고효율 성능을 얻기 위해 메타머티리얼을 이용하였다. 기존의 자기장 공진 무선전력전송 기술에 송신기와 수신기 공진기 사이에 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼의 자기장 집속 기술을 적용하여 전송 가능 거리를 확장하고, 전송 효율을 개선시켰으며, 기술에 대하여 간단하게 기술하였다. 실제 제작한 메타머티리얼구조를 이용한 무선전력전송 기술은 150 mm의 전송 거리에서 높은 전송 효율 특성을 얻었으며, 본 기술은 무선으로 전력 공급이 필요한 이동통신 전자 기기에 적용이 가능하다. 현재의 음의 굴절률과 제로 굴절률을 갖는 메타머티리얼을 이용한 자기장 집속 공진형 무선전력전송 기술에 순수 좌향 메타머티리얼에 대한 연구를 통하여 거리 및 고효율 기술에 대한 무선전력전송을 가능하게 하는데 주력할 계획이다.

참고문헌

1. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, **317** 83-86 (2007).
2. A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer," *Annals of Physics*, **323** [1] 34-48 (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*, **24** [7] 1819-25 (2009).
4. 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*, **291** [2] 849-51 (2001).
5. V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Permittivity and Permeability," *Soviet Physics Uspekhi*, **10** 509-14 (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*, **32** [5775] 892-94 (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*, **13** [4] 155-57 (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* **455** [7211] 376-79 (2008).
9. R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction," *Science*, **292** [5514] 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*, **51** [10] 2572-81(2003).
11. G. V. Eleftheriades, "Enabling RF/microwave Devices Using Negative-Refractive-index Transmission-line (NRI- TL) Metamaterials," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **49** [2] 34-51 (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*, **6** 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.
15. H. J. Kim and C. H. Seo, "Resonant Wireless Power Transfer System with High Efficiency using Metamaterial Cover," *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, **51** [1] 47- 51 (2014).

서 철 헌

- 2004년-현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수
- 2007-2009년 MIT 연구교수
- 1997-2004년 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수
- 1999-2001년 숭실대학교 MIT 방문교수
- 1993-1997년 숭실대학교 정보통신학과 조교수
- 1993-2001년 MIT 연구원
- 1993년 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 현재 IEEE MTT Korea Chapter Chairman, 한국전자파학회 부회장