

자계 공명 무선전력전송 기술 연구

박 영 진

(전기연구원 전기정보망연구센터 책임연구원)

자계 공명 현상을 이용한 중단거리 무선전력전송 기술에 대한 연구가 국내외 산업체, 대학, 연구소에서 활발하게 진행 중이다. 자계 공명 무선전력전송 기술은 기존의 전자기 유도에 의한 전력전송과 달리 동일한 공진 주파수를 갖는 자기 공진기 사이의 강력한 자계 결합 현상을 이용한다. 이러한 강력한 자계 결합 현상은 기존의 전자기 유도 방식에 비해 전력전달 효율을 매우 많이 개선할 수 있으며, 전송거리 또한 수 미터까지 확장할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 자계 공명형 무선전력전송 기술에 대해 설명하고, 이 기술의 특징 및 실제 구현 과정에 상에 있어 발생할 수 있는 다양한 이슈들에 대해서 소개하고자 한다.

1. 서론

무선전력전송 기술은 공간을 통하여 선 없이 전력을 전달하는 기술로서, 많은 장점들을 가지고 있다. 특히, 모바일 기기 및 디지털 가전 기기들에 대한 전력 공급의 편의성, 실시간 전력 사용 제어를 통한 에너지 절약, 배터리 재충전을 이용한 폐건전지 배출량 절감, 전력 공급의 공간 제약 극복 등이 대표적이다. 이러한 무선전력전송 기술의 장점들은 시간이 흐를수록, 사회가 고도화 될수록 더욱 더 이 기술에 대한 수요가 증가하고 있다.

그림 1은 무선전력전송 기술의 광범위한 응용 분야를 나타내었다. 그림에서처럼 쉽게는 모바일 통신 기기뿐만 아니라 향후 폭발적인 수요가 예상되는 로봇, 초소형 의료 센서, 특

히, 미래 전기 자동차의 충전을 위해서 활용될 수 있다.

19세기 말부터 20세기 초까지 테슬라에 의해 시도된 무선 전력전송 기술은 100년이 지난 지금도 연구되고 있다.⁽¹⁾ 무선 전력전송 기술은 전파를 사용하는 경우와 레이저를 사용하는 방식으로 나눌 수 있으며, 전파를 사용하는 방식으로는 전자기 유도 방식(Magnetic induction), 마이크로파 방식, 자계 공명 방식(Magnetic resonance), 전계 공명 방식으로 구분할 수 있다.⁽²⁾⁽³⁾ 이 중 근거리 수 센티미터 이내에서 수백와트까지 전송할 수 있는 전자기 유도 방식이 가장 많이 연구되었

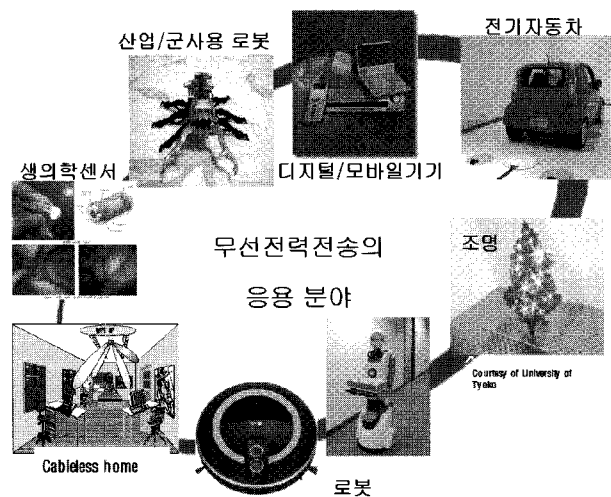


그림 1 무선전력전송의 다양한 응용 분야

다. 최근 전자기 유도 방식에 의한 무선전력전송 기술의 산업화 활성화를 위하여 Wireless Power Consortium (WPC) 국제 단체 표준이 제정되었다.^[4]

자계 공명 무선전력전송 방식은 2007년 MIT의 Marin Soljačić 교수 팀에서 최초로 발표한 기술이며,^[5] 2005년에 최초로 미국 특허 출원 하였다.^[6] 이 방식은 동일 공진 주파수를 갖는 자기 공진기(Self resonator)의 공명 현상을 이용한 것이다. 자계 공명 무선전력전송 방식은 기존의 전자기 유도 방식의 전송 거리, 전송 효율, 전자파 안전성을 극복할 수 있는 기술로 소개되었다. 자계 공명 무선전력전송 방식의 이러한 장점들은 기존 전자기 유도 기술에 의한 한계를 극복하여, 매우 큰 시장을 형성할 것으로 예측된다. 이러한 기술의 우수한 특성 때문에 최근 국내 기업, 대학, 연구소에서 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[7]-[10]}

본 논문에서는 이러한 자계 공명 무선전력전송 기술의 기본적인 원리와 다양한 특징을 언급하고자 한다. 우선 자계 공명 무선전력전송 기술의 원리 및 해석 방법에 대하여 소개하며, 이어서 자계 공명 무선전력전송 기술 구현 시에 고려해야 할 점들을 제시한다. 끝으로 자계 공명형 무선전력전송 기술의 활용 방안을 소개한다.

2. 자계 공명형 무선전력전송 원리 및 특징

2.1 기본 원리

자계 공명 방식의 무선전력전송의 기본 원리는 동일한 공진 주파수를 갖는 자기 공진기 사이에 형성되는 강한 자계 결합(Strong magnetic coupling) 현상을 이용한다.^{[5][11]} 이러한 기본 원리를 설명하기 위하여, 평행 평판 커패시터를 갖는 단일 원형 루프를 고려한다. 그림 2에 단일 원형 루프를 나타내었다.

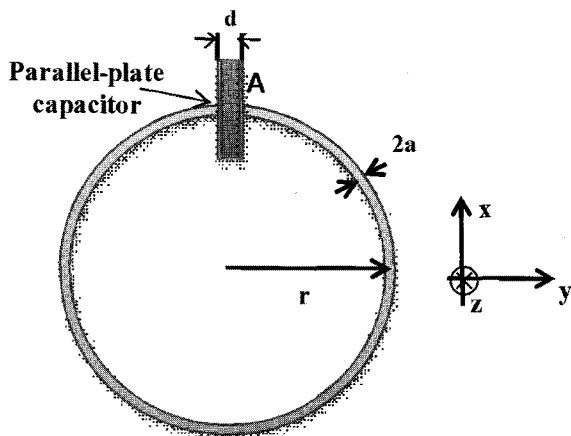
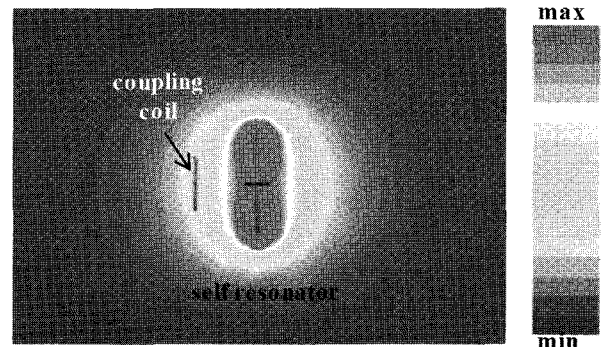


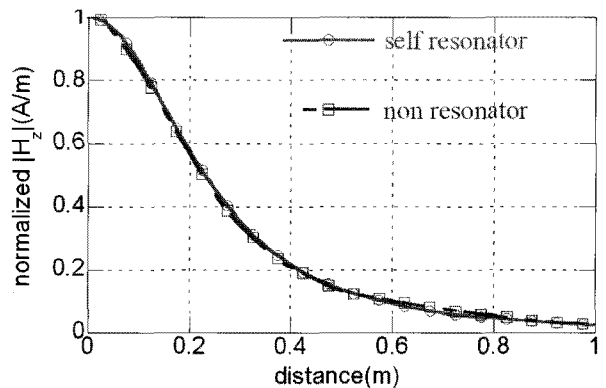
그림 2 평행평판 커패시터를 갖는 단일루프 자기 공진기

이 공진기는 일반적인 루프 안테나에 평행 평판 커패시터를 갖는다. 단일 루프형 자기 공진기는 공진 코일 주위의 근접장에서 만들어지는 자계 강도는 코일의 중심에서부터 떨어진 거리 $1/R^3$ 에 비례한다.^[12]

그림 3에는 단일 루프 자기 공진기의 자계 강도를 시뮬레이션 하여 나타내었다. 시뮬레이션을 위해 Ansoft HFSS를 이용하였다.^[13] 공진 주파수는 8MHz로 하였으며, 루프의 반지름은 30cm 이다. 중심에 자기 공진기가 있으며, 공진기에 신호를 인가하기 위하여 커플링 코일을 사용하였다. 그림 3(a)에는 자기 공진기의 yz 평면에 만들어진 전체 자계 강도 ($|H_{total}|$)를 나타내었다. 그림에서처럼 커플링 코일에 의해 전달된 에너지가 자기 공진 코일에 저장되어 있다. 또한, 그림에서처럼 전체 자계 강도의 크기는 코일 주위에서 타원 모양을 갖는다. 그러나, 루프 코일의 축 방향 필드인 $|H_z|$ 는 참고문헌[11]에서 제시한 것처럼, 특정 방향에서 null이 존재한다. 그림 3(b)에는 루프 코일의 중심에서부터 코일의 중심 축에서 거리에 따른 균일화된 z 방향의 자계 강도의 크기의 변화를 나타 낸다. 그림에서처럼 0.4m이내의 가까운 거리에서



(a)



(b)

그림 3 (a) 단일 루프 자기 공진기의 yz 평면에서의 전체 자계강도 크기

(b) 거리에 따른 z 방향으로의 자계 강도 ($|H_z|$) 크기 변화

는 자계 강도는 급격히 떨어지지만 이상에서는 조금 더 천천히 떨어진다는 것을 알 수 있다. 그림 3(b) 결과로부터 기존 전자기 유도에 의한 무선전력전송은 거리가 떨어질 경우 송수신 코일의 커플링이 급격히 떨어지기 때문에 전력 전달 효율이 급격히 떨어진다. 그러나, 무시 할 수 없을 정도의 상호 결합은 존재할 수가 있다. 그림 3(b)에는 자기 공진기가 아닌 일반적인 단일 루프 코일에 대한 z방향의 자계 강도를 나타내었다. 규격화된 두 결과가 일치함을 알 수 있다.

그림 4는 동일한 공진 주파수를 갖는 두 개의 자기 공진기가 동축으로 놓여져 있는 경우의 자계 공명에 의한 전력전달 현상을 보인 그림이다. 송신 공진기는 source 코일에 의해 에너지를 전달 받고, 수신 공진기에는 부하와의 연결을 위해 수신 디바이스 코일이 존재한다.

그림에서처럼 상호 커플링이 매우 작은 두 공진 코일이지만, 공명 현상에 의해 자기 공진기 사이에 많은 전력 전달이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 5에는 coupled mode theory를 이용하여 얻어진, 시간에 따른 신호 전달 현상을 나타내었다. 그림에서처럼 송신 신호는 자기 공진기에 인가되며, 송신 공진기는 계속해서 발전하고 있으며 그 크기는 조금씩 줄어든다. 그 사이 수신 공진기는 송신 공진기로부터 조금씩 신호를 받는다. 전달되는 신호의 크기는 그림 3(b)의 상호 결합 크기와 일치한다. 그러나 수신 공진기는 공명 현상처럼 점점 더 많은 에너지를 저장하게 된다는 것을 그림에서 알 수 있다.

이처럼 자계 공명 무선전력전송은 매우 작은 결합 계수의 환경에서도 매우 큰 전력을 전달할 수 있는 구조이다.

2.2 특징

자계 공명 방식의 무선전력전송 기술은 다양한 특징들이 있

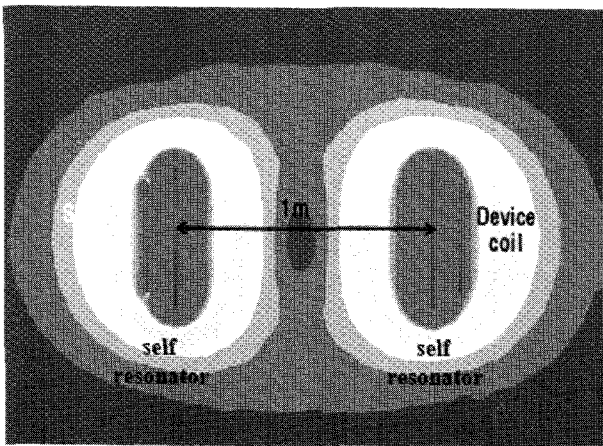


그림 4 동축으로 놓여진 두 개의 단일 루프 자기 공진기의 자계 공명에 의한 전력전달

다고 보고되었다.⁽²⁾⁽⁵⁾

기존 전자기 유도 방식에 비해 전송거리 및 전송 효율을 개선할 수 있다. 앞서 2.1절 기본적인 원리에서 보였던 것처럼 거리가 멀어질수록 자계 강도가 줄어들어 커플링 계수가 떨어지지만, 자기 공진기 사이의 공명 현상에 의해 전송 효율이 매우 높음을 보였다.

비 방사형의 무선전력전송 기술이다. 이는 자기 공진형 무선전력전송 기술은 자기 공진기의 근접장에서 만들어지는 Evanescent파의 공명 현상을 이용하기 때문에, 방사 신호가 거의 없고, 방사 저항도 매우 적다.

다음으로는 자기장을 사용하기 때문에, 일반적인 비 자성체와 상호 작용이 없어 높은 투과력을 갖는다.

또한, 기존의 전자기 유도 방식은 방향성을 띠고 있으나, 자계 공명 방식은 omni-directional한 특징을 갖는다. 이러한 특징은 그림 3(a)로부터 설명 될 수 있다. 즉, 전체 자계 강도의 크기는 타원이다. 즉, 기존 전자기 유도 방식에서는 작은 자계 결합에 대해서는 전송 효율이 매우 낮았지만, 자계 공명 방식의 경우는 매우 낮은 자계 결합에 대해서도 성능이 우수한 자기 공진기에 의해 매우 높은 전송효율을 가질 수 있다.

2.3 해석 방법

자계 공명 무선전력전송 시스템의 기본적인 구성은 그림 6과 같다.⁽⁵⁾⁽¹¹⁾ 그림에서처럼 송신 쪽은 Source coil과 Tx

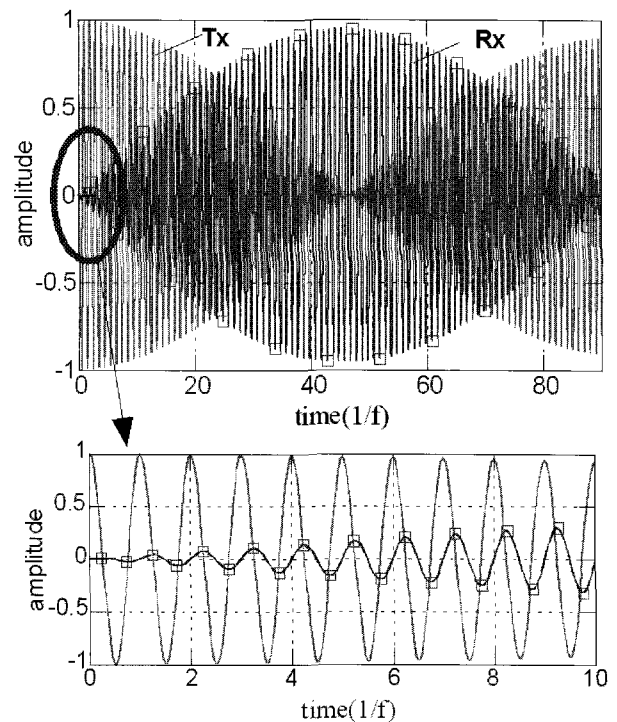


그림 5 시간영역에서의 송수신 에너지 전달 현상

resonant coil로 구성되어 있고, 수신은 Rx resonant coil과 device coil로 되어 있다. 기존의 전자기 유도과 비교할 경우 송수신 공진 코일이 추가되었다. 전송 방식은 우선 source coil에 인가된 전력은 송신 공진 코일과 magnetic induction 방식에 의해 커플링이 일어난다. 송신 공진 코일은 수신 공진 코일과 동일한 공진 주파수를 가지며, 강력한 자계 결합을 갖게 된다.

이러한 자계 공명 무선전력전송 기술에 대한 해석을 위해서 다양한 방법이 제시되었다.

우선 두 개의 자기 공진기에서 형성되는 커플링 현상을 coupled mode theory를 적용하여 해석한 경우이다.⁽⁵⁾⁽¹¹⁾ 이 방법은 시간 영역에서 직접 1차 미분 방정식을 풀어 해를 구한다.

$$\frac{da_1}{dt} = -(i\omega_1 + \Gamma_1)a_1 + i\kappa_{12}a_2 \quad (1-1)$$

$$\frac{da_2}{dt} = -(i\omega_2 + \Gamma_2)a_2 + i\kappa_{21}a_1 \quad (1-2)$$

a_1, a_2 는 각각 송전부 공진 코일과 수신부 공진 코일에서의 모드 크기를 나타내고, Γ_1, Γ_2 는 각 공진 코일의 감쇄 계수, κ 는 두 코일 사이의 커플링 계수를 나타낸다. 그리고 ω_1, ω_2 는 각 공진 코일의 공진 주파수이다. 커플링이 생기면 공진 코일이 원래 가지고 있던 공진 주파수가 커플링 계수 κ 에 의해 이동하게 되는데 그 정도는 식 (2)와 같다. 즉, κ 가 클 경우 두 개의 공진 주파수가 생김을 알 수 있고, 거리가 멀어질수록 작아져 단일 공진 주파수처럼 동작하게 된다.

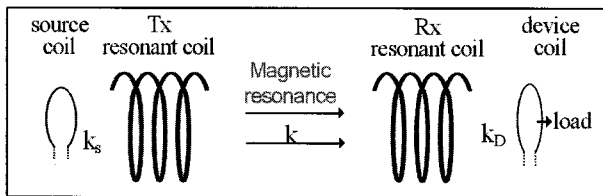


그림 6 자계 공명 무선전력전송의 기본 구성. k 는 커플링 계수

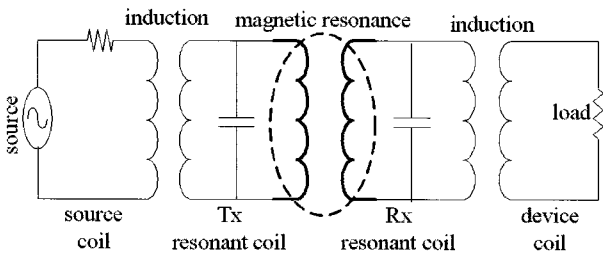


그림 7 자기 공명 방식의 무선전력전송 시스템등가회로

$$\Delta\omega = 2\sqrt{(\kappa^2 - \Gamma^2)} \quad (2)$$

두 공진 코일이 동일하고 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ 라고 가정하여 식 (1-1)과 식 (1-2)에서 방정식을 풀면, 식 (3-1)과 식 (3-2)와 같이 각 공진 코일에서의 모드를 구할 수 있다. 각 모드는 cos과 sin 형태로 나타나기 때문에 항상 한쪽이 최대이면 다른 쪽이 최소가 되는 형태로 모드가 생성되어야 함을 알 수 있다.

$$a_1(t) = a_1(0)e^{-i\omega t} e^{\Gamma t} \cos(\kappa t) \quad (3-1)$$

$$a_2(t) = ia_1(0)e^{-i\omega t} e^{\Gamma t} \sin(\kappa t) \quad (3-2)$$

다음으로는 회로 이론을 적용한 경우이다.⁽¹⁴⁾ 회로 이론을 적용하기 위한 자계 공명 무선전력전송 시스템의 등가회로는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

다른 방법으로는 자기 공진기를 안테나로 고려하고 모드 이론을 적용한 mode-based analysis방법이 있으며, 자기 공진기를 필터로 등가화 하여 해석할 수도 있다.⁽¹⁰⁾ 자기 공진기를 필터로 해석한 경우는 시스템 설계에 유리한 장점이 있다.⁽¹⁰⁾

마지막으로 EM solver를 이용한 방법으로, 이 경우는 매우 많은 계산 시간과 많은 양의 메모리를 요구한다. 참고문헌 [15]에서는 Ansoft HFSS를 사용하여 자계 공명 무선전력전송 시스템에 있어, 자기 공진 코일의 수직 또는 수평 배열에 의한 전력전송 연구 결과를 제시하였다.

3. 자계 공명 무선전력전송 시스템 설계 기술

자계 공명형 무선전력전송 시스템에서 가장 중요한 소자는 자기 공진기이다. 지금까지 소개된 자기 공진기로는 평행 평판을 갖는 단일 원형 루프 코일이 있으며, 헬릭스 형,⁽¹¹⁾ 스파이럴 형⁽¹⁴⁾ 등이 소개되었다.

여기서는 단일 원형 루프 코일의 설계 및 최적화 방법에 대해서 소개한다.

3.1 단일원형 루프 자기 공진기 설계

그림 2의 단일 원형 루프의 공진 코일 구조는 반지름 r , 코일의 두께 $2a$ 를 가지며, 공진을 위한 평행 평판 커패시터로 구성되어 있다. 이 구조에 대한 자기 인덕턴스 L , 저항 R , 자기 커패시턴스 C 값은 다음과 같이 정의 된다.

$$L \approx r\mu_0\mu_r \left[\ln\left(\frac{8r}{a}\right) - 2 \right] \quad (4-1)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (4-2)$$

$$R = R_0 + R_r \quad (4-3)$$

여기서, R_o 는 코일의 전도 손실을 발생하는 전도저항이며, R_r 는 루프 코일의 방사에 의한 방사 저항을 말한다. 각각은 다음과 같이 정의할 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$R_o = \sqrt{\frac{\omega\mu_o\mu_r}{2\sigma}} \frac{r}{a}, \quad R_r = 20 \left(\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 \cdot \pi r^2 \right)^2$$

설계를 위하여 공진 주파수가 13.56MHz이고, 도선의 재질은 구리이며, 동일한 크기의 두 공진 코일이 수평으로 거리 D 만큼 떨어져 있는 경우를 고려한다. 이 때 전달 효율 η 는 다음과 같이 정의된다.⁽⁵⁾

$$\eta = \frac{\frac{\Gamma_w \kappa^2}{\Gamma_D \Gamma_S \Gamma_D}}{\left(1 + \frac{\Gamma_w}{\Gamma_D}\right)^2 + \left(1 + \frac{\Gamma_w}{\Gamma_D}\right) \frac{\kappa^2}{\Gamma_S \Gamma_D}} \quad (5)$$

여기서, Γ 는 송신 공진코일 (S), 수신 공진 코일 (D), 부하코일 (W)의 intrinsic decaying rate를 각각 말하며, κ 는 두 자기 공진기 사이의 coupling coefficient를 말한다. 각각은 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{R}{2L}, \quad \kappa = \frac{\omega M}{2\sqrt{L_S L_D}}$$

또한, M 은 자기 공진 코일 사이에서의 mutual inductance를 말하며, 두 자기 공진 코일이 동축으로 놓여져 있을 때, 다음과 같이 정의된다.

$$M = \frac{\pi\mu_o(r_S r_D)^2}{2(D^2 + r_S^2)^{3/2}}$$

주어진 수식을 이용하여 단일루프 코일의 치수에 따른 효율을 구할 수 있다.

그림 8은 $D=1.5m$ 떨어진 경우에 대하여 단일 루프 코일의 두께, 반지름에 따른 효율을 나타내었다. 그림에서 a 와 r 에 따라 효율이 변하며, a 가 0.35 cm 이하에서는 r 의 변화와 상관없이 효율 90%를 넘지 못한다. 또한, 동일한 a 에 대하여 반지름 r 이 커지면, 효율이 떨어진다. 이는 방사 저항 R_r 이 증가하기 때문이다. 추가적인 최적화 모델은 참고문헌 [17]에 기술되어 있다.

그림 9에서는 단일 루프 코일의 치수에 따른 전도 저항과 방사 저항에 의한 영향을 나타내었다. 예를 들어 루프 도선의

두께가 4cm일 경우, 반지름이 증가할수록 그림에서처럼 반지름이 증가할수록 전도 저항에는 큰 변화가 없지만, 방사 저항이 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한, 도선 두께가 두꺼울수록 전도 저항이 낮아져 intrinsic decay rate이 줄어든다는 것을 알 수 있다.

3.2 자기 공명 무선전력전송 시스템 설계시 고려사항

자기 공명 무선전력전송 시스템 설계 시에 다음과 같은 다양한 문제들을 고려해야 한다.

3.2.1 자기 공진기 (Self resonator)

자기 공진형 무선전력전송 시스템의 효율을 높이기 위해서

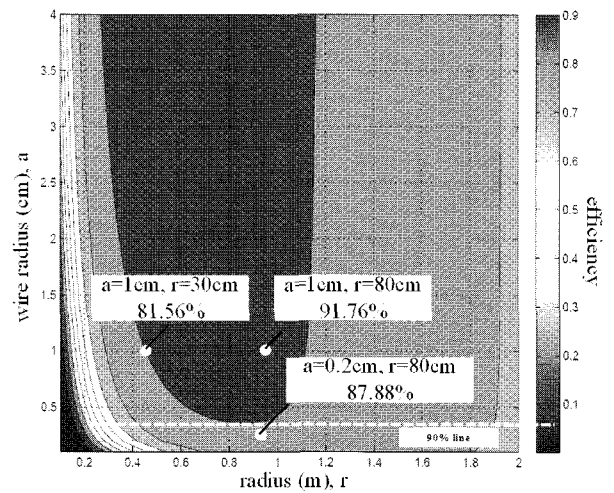


그림 8 거리 $D=1.5m$ 고정, 단일 공진 코일의 치수 a, r 의 변화에 따른 효율

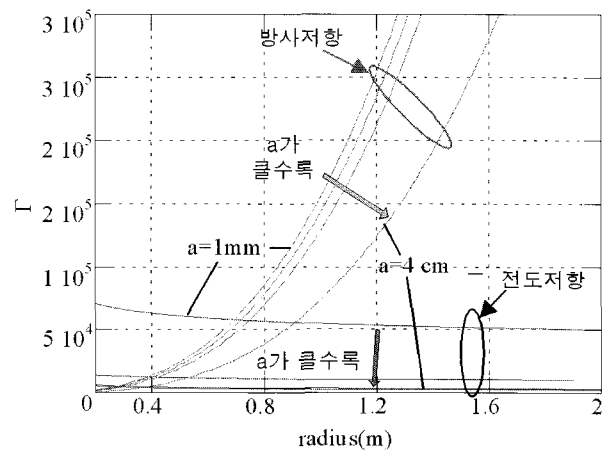


그림 9 단일 루프 코일 두께, 반지름의 변화에 따른 전도저항 및 방사 저항 변화

는 자기 공진기의 저항을 낮추는 것이 필수적이다. 대개의 경우 1Ω 이하로 제작하는 것이 바람직하지만, 도선의 재료, 공진 주파수, 인덕턴스에 따라 저항 값을 낮추는 것이 매우 어렵다. 특히, 소형 구조에 대해서는 이러한 조건을 만족하기가 어려워, 다양한 해결 방법에 대한 연구가 필요하다.

특히, 공명형 무선전력전송 기술은 손실이 매우 작은 자기 공진기를 연속적으로 배치하여 전력 전달 거리 및 효율을 향상시킬 수 있다.^{[15][18]} 이러한 에너지 중계 시스템의 효과를 최대한 활용하기 위해서는 중계 공진기의 저항을 최소화하여 오랜 시간동안 손실 없이 에너지를 갖고 있도록 설계하여야 한다.

또한 자기 공진기는 특정 방향에 존재하는 수신 공진 코일과의 커플링을 증가시키기 위하여 자기장 빔 패턴을 조절할 수 있는 구조가 유리하다. 참고 문헌 [19]에서처럼 메타 물질을 이용하여 자기장의 빔 패턴을 제어하여, 전송효율을 개선하였다.

3.2.2 공진 주파수 틀어짐

실제 자기 공진기를 제작하면, 자기 공진기의 공진 주파수는 조금씩 달라진다. 이러한 요소는 경우에 따라 다를 수 있지만, 수천 이상의 Q-factor를 갖는 시스템일수록 시스템의 전력 전송 효율을 급격히 떨어뜨리는 요소가 된다.

또한, 수식 2에서 알 수 있듯이 상호 커플링이 커지면, 시스템의 최대 효율 주파수가 이동하게 된다.^[11] 이를 frequency splitting이라고 한다. 이러한 frequency splitting은 $\Gamma = \Gamma_D + \kappa_D$ 로 대체할 수 있기 때문에 κ_S, κ_D 를 활용하여 제거할 수도 있으며, 또는 splitting되는 주파수를 추적하여 중심 주파수를 변경하여 사용할 수도 있다. 그러나, 만약 송수신 공진 코일이 움직이는, 이동형 무선전력전송 시스템의 경우, 이러한 frequency splitting에 대응하기 위하여 adaptive matching과 시스템 공진 주파수를 동시에 사용할 수도 있을 것이다.

공진 주파수가 변경되는 또 다른 이유는 자기 커패시턴스의 변동이다. 헬릭스 코일, 스파이럴 코일, 단일 루프 코일 등은 일반적으로 자기 커패시턴스가 수십 pF이하이기 때문에, 송수신 공진 코일 사이에 물체가 높이거나 외부 물체에 의하여 쉽게 커패시턴스 값이 변동되고, 이는 공진 주파수의 이동으로 나타난다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 자기 공진 코일에 수백 pF이상의 추가적인 커패시터를 부착하여 이러한 문제를 해결할 수 있다.

3.2.3 매칭


그림 6과 7로부터 자계 공명 무선전력전송 시스템의 최대 전력 전달을 위해서는 송신 소스와 공진기 사이와 수신 공진기와 부하 사이에 매칭이 필요하다. 그림 6과 7의 구조에서는

매칭을 위하여 송신 또는 부하 코일과 공진 코일 사이의 거리를 변경하여 상호 인덕턴스를 조절하여 최대 전력 전달을 달성하였다. 그러나, 이러한 방식은 전송한 것과 같이 송신 코일과 공진 코일 사이는 전자기 유도 방식에 의한 커플링으로, 송신 코일의 위치에 따라 매우 민감하게 임피던스가 변화되어, 이에 대한 개선책이 필요하다. 다른 방법으로는 참고문헌 [14]와 같이 스파이럴 형태의 턴수를 바꾸거나, 코일의 크기를 변화시킬 수도 있으며, 기계적으로 송신/수신 코일과 공진 코일 사이의 커플링 정도를 변경해 가면서 조절할 수 있다.

이처럼 자계 공명 무선전력전송 기술의 상용화를 위하여 adaptive matching기술 개발은 필수적으로, 이에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 자계 공명형 무선전력전송의 기본적 원리, 특징, 간단한 설계 기법 및 시스템 설계시 고려 사항들에 대해 기술하였다. 본문에서 보인 것처럼, 자계 공명 무선전력전송 기술은 기존의 전자기 유도 방식과 달리, 자기 공진기 주위에서 형성되는 감쇄파 자기장의 강한 자계 결합에 의해 에너지를 전달할 수 있어, 전송 거리 및 전송 효율을 크게 개선할 수 있음을 보였다.

자계 공명 무선전력전송 기술에 대하여 소개된 다양하고 유용한 특징들은 새로운 응용 제품 및 거대한 시장을 만들 것이라 생각한다. 그러나, 실제 응용 시스템 제작을 위하여 자계 공명 기술에 대한 다양한 애로 기술들이 해결되어야 할 것이다. 특히, 전자파의 인체 유해성, 전자파 간섭 문제들에 대한 해결이 우선되어야 하며, 전자파 소스 및 시스템의 저가격화를 위한 집적회로 기술 확보, 전력전송 제어 표준, 우수한 자기 공진기 제작을 위한 저저항 재료 기술 및 빔 패턴 제어 기술들에 대한 해결이 되어야 할 것이다. 

참고 문헌

- [1] D. H. Childress, The Tesla papers, Adventures unlimited press, 2000.
- [2] Hidetoshi Matsuki, Frontier of wireless electric power transmission, 세이모시 출판, 2009.
- [3] Wireless power: current status and future directions, Fuji-Keizai U.S.A., Inc., 2010.
- [4] <https://www.wirelesspowerconsortium.com>
- [5] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J.D.Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, Vol. 317,

- June 7, 2007, pp. 83-86.
- [6] J. D. Joannopoulos, A. Karalis, and M. Soljagic, "Wireless non-radiative energy transfer", US Patent No. US 7,741,734 B2, Jun, 22, 2010.
- [7] "무선에너지 전송 기술 워크샵", 대한전자공학회, 2010. 5. 14.
- [8] 대한전기학회 기획시리즈, "무선전력전송 기술의 동향 및 현황", 대한전기학회, 제 59권 제 1호, 2010년 1월.
- [9] "무선전력전송/자기장 통신 융합기술 워크샵", 자기장 통신 융합 포럼, SETEC, 2010. 10. 29.
- [10] "2010 마이크로파 및 밀리미터파 워크샵", 한국전자과학기술회, 서울 교육문화회관, 2010. 10. 7.
- [11] Aristeidis Karalis, J.D.Joannopoulos, Marin Soljacić, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, Vol.323, 2008, pp. 34-48.
- [12] David K. Cheng, *Field and wave electromagnetics* (2nd Ed.), Addison-Wesley, 1989.
- [13] Ansoft, HFSS v.11.2.
- [14] P. Sample, T. Meyer, and J. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaption of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Trans. on industrial electronics*, Vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 0 doi: 10.1109/TIE.2010.2046002.
- [15] 김진욱 외, "자기 공명 무선전력전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구," *한국전자과학기술회논문지*, 제 21권, 제6호, 2010년 6월, pp. 564-572.
- [16] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna theory and desing*, John Wiley & Sons, 2007.
- [17] H. Son, et al, "Efficiency analysis and optimal design of a circular loop resonant coil for wireless power transfer," accepted for the publication in 2010 Asia pacific microwave conference (APMC), Yokohama, Dec. 2010.
- [18] J. Choi and C. Seo, "High-efficiency wireless energy transmission using magnetic resonance based on metamaterial with relative permeability equal to -1," *Progress in electromagnetic research*, Vol. 106,, 33-47, 2010.
- [19] R. Hamam, A. Karalis, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, "Efficient weakly-radiative wireless energy transfer: An EIT-like approach," *Annals of Physics* 324, 2009, pp. 1783-1795.

〈 필 자 소 개 〉



박영진(朴永鎭)

1971년 1월 7일생. 2002년 Universitaet Karlsruhe, Institute fuer Hoehstfrequenz technik und Electronik (IHE) 졸업(공학). 2002년 11월~현재 한국전기연구원 전기정보망 연구센터 책임연구원. 2004년~현재 과학기술연합대학원대학교 (UST) 전력정보통신공학과 겸임교원 (부교수).