

무선 전력 전송에 관한 기본적인 고찰

Some Basic Investigation on Wireless Power Transfer

(Invited Paper)

박종민 · 남상욱

Jongmin Park · Sangwook Nam

요약

본 논문에서는 그 동안 서울대학교에서 수행된 무선 전력 전송 관련 몇 가지 기본적인 연구 결과를 요약 정리하였다. 첫 번째 고찰은 무선전력 전송의 물리적인 한계에 대한 것으로, 주어진 안테나(공진기)를 이용하여 주어진 거리에서 얻을 수 있는 전송효율의 한계를 구면파 모드 이론을 이용하여 구하는 것이다. 두 번째로, 무선 전력 전송에서 사용되는 전력원의 종류에 따른 무선 전력 전송 특성 변화를 연구한 것이다. 더불어, 무선 전력 전송 안테나 사이의 거리가 변할 때 효율적인 전력전송이 가능한 방법을 제안하는 것이다. 마지막으로, 그 동안 무선 전력 전송에서 불분명하게 사용된 자기 유도 방식과 자기 공명 방식의 차이를 분명히 하고자 하였으며, 결합 모드 이론을 이용하여 정량적인 구별 기준을 제시하였다.

Abstract

This paper summarizes the previous research results of fundamental investigation done in SNU on the wireless power transfer. Firstly, the physical limitation of a wireless power transfer using the spherical modes is reviewed. It is found that wireless power transfer depends only on the radiation efficiency of the antennas and the distance between two antennas involved. Secondly, we review the characteristics of WPTS with different sources and compare the performance differences of WPTS according to the source type. In addition, the method for efficient WPTS is suggested when the distance between antennas is varied. Finally, by using the time domain solution of the coupled mode equation, we present an analytic formula which can be used to differentiate Inductive Coupling(IC) and Magnetic Resonance Coupling(MAC) which are often used ambiguously in wireless power transfer system.

Key words: Physical Limitation, Wireless Power Transfer; Frequency Tracking, Inductive Coupling(IC), Magnetic Resonance Coupling(MRC)

I. 서론

무선 전력 전송은 최근에 관심 있는 연구 분야이다. 본 논문은 2008년 참고문헌^[1]이 발표된 이후, 무선 전력 전송에 관하여 제기된 근본적인 질문에 대하여 서울대학교에서 수행된 연구결과를 요약 정리하고자 한다. 모든 문

제에서와 마찬가지로 무선 전력 전송문제도 초기에는 분석을 위한 분석적인 모델이 제안되었다^{[1][2]}. 그러나 기존의 여러 가지 해석모델의 경우, 주어진 구조에서 전력 전송 특성을 예측할 수는 있었으나, 주어진 공진기(안테나)와 주어진 위치에서의 무선 전력 전송의 한계에 대한 이론은 없었다. 이러한 무선 전력 전송에서의 이론적인 한

「This research was supported by a grant to Bio-Mimetic Robot Research Center funded by Defense Acquisition Program Administration(UD130070ID).」
서울대학교 전기정보공학부 & 뉴미디어통신공동연구소(School of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National University)
· Manuscript received September 12, 2014 ; Revised October 8, 2014 ; Accepted October 17, 2014. (ID No. 20140912-011)
· Corresponding Author: Sangwook Nam (e-mail: snam@snu.ac.kr)

계를 보여준 모델이 구면파 모드를 이용한 해석모델이다^[3]. 구면파 모드를 이용한 해석방법은 두 안테나 사이의 근접장 결합의 특성을 명확하게 보여주며, 방사 전력을 포함한 무선 전력 전송 시스템의 물리적인 한계에 대하여 기술하고 있다. 단, 이 이론의 한계는 주어진 안테나를 포함한 최소의 구가 서로 겹치지 않는 경우에만 적용 가능하다는 점이다.

무선 전력 전송 시스템은 모든 근접장 영역에서 높은 효율의 전력 전송이 요구된다. 그러나 실제로 높은 효율의 무선 전력 전송 시스템을 구현을 하기 위해서는 당시에 해결되지 않은 많은 문제들이 남아있었다. 우선 안테나들의 방향 및 결합 거리에 따라 최적의 소스 임피던스와 부하 임피던스가 급격하게 변하는 현상은 잘 알려져 있었다^[3]. 쉽게 생각할 수 있는 문제 해결하는 방법은 거리에 따라 가변하는 임피던스 정합기를 구현하는 것이나, 현실적으로 쉬운 방법이 아니다. 따라서 거리 변화에 따른 무선 전력 전송 시스템의 동작 특성을 자세히 들여다 볼 필요가 있었다. 그 결과, 참고문헌 [4], [5]에서는 두 안테나 사이의 거리가 변하는 경우, 동시 공액 정합을 하지 않고 높은 효율은 전력 전송이 가능함을 보였다.

무선 전력 전송 시스템에서 자기 유도 기술은 송신 신호의 파장보다 극히 짧은 거리에서 동작하며, 유도기 전력을 이용하여 수신기가 전력을 공급받는다. 자기 공명 방식의 경우, 송신기와 수신기는 상호 작용을 하며, 입력 임피던스의 공명하는 정점은 결합된 코일들 사이의 증가된 상호 인덕턴스에 의해서 여러 개의 정점들로 분리된다^[6]. 그러나 이 두 용어가 무분별하게 사용되고 있다. 이 논문에서는 결합 모드 이론을 이용하여 무선 전력 전송에서 자기 유도 방식과 자기 공명 방식, 두 용어를 정의하기 위해 이전의 이론적인 분석을 확장하였다. 핵심 용어인 임계 계수가 제시되었다. 이 논문에서는 무선 전력 전송 시스템의 두 가지 형태의 전력원에 대해 고려하였다.

II. 무선 전력 전송의 물리적인 한계

무선 전력 전송에 사용되는 안테나들은 canonical minimum scattering(CMS) 안테나로 가정이 가능하다. CMS 안테나는 오직 기본적인 구형 모드만을 발생시킨다. CMS 안테나는 급전 포트가 개회로인 상태에서 산란되는 전자

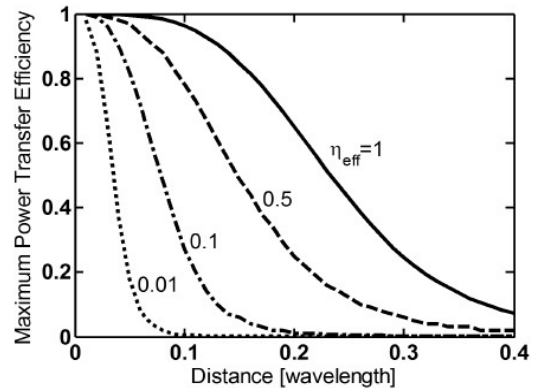


그림 1. 안테나의 다양한 방사효율에 따른 최대 전력 전송 효율

Fig. 1. The maximum power transfer efficiencies of antennas with different radiation efficiencies.

기장을 발생시키지 않는다. 파장에 비하여 상대적으로 작은 많은 안테나들은 CMS 안테나로 가정이 가능하다. 무선 전력 전송에 사용되는 안테나는 파장에 비해서 아주 작기 때문에 CMS 안테나로 가정이 타당하다. 두 안테나 사이의 Z 파라미터를 유도하기 위해서 우리는 안테나를 generalized scattering matrix(GSM)으로 표현하였다. 두 안테나 사이의 결합은 3 네트워크의 cascade로 고려가 가능하다^[3]. 두 네트워크는 안테나의 GSM이고, 나머지 하나의 네트워크는 두 안테나 사이의 공간을 표현한다. 결합된 두 안테나의 Z 파라미터는 cascade된 세 네트워크를 풀어서 얻을 수 있다. 두 개의 동일한 CMS 안테나가 결합되어 있는 경우, Z 파라미터, 최적의 부하 임피던스, 최대 전력 전송 효율은 참고문헌 [3]에서 연구되었다. 참고문헌 [3]의 최대 전력 전송 효율 공식을 분석해 보면 안테나의 방사효율이 높을수록 최대 전력 전송 효율도 높아지는 것을 알 수 있다. 그림 1에서는 다양한 방사효율 η_{eff} 의 동일한 두 CMS 안테나로 구성된 근접장을 이용한 무선 전력 전송시스템의 최대 전력 전송 효율을 보여준다. 그림 1에서 두 안테나는 좌표계의 Z축에 위치하고 있다. 최대 전력 전송 효율은 안테나의 특정한 구조와는 상관없이 오직 안테나의 방사효율과 두 안테나 사이의 거리에 의해서만 결정된다.

III. 전력원의 종류 비교

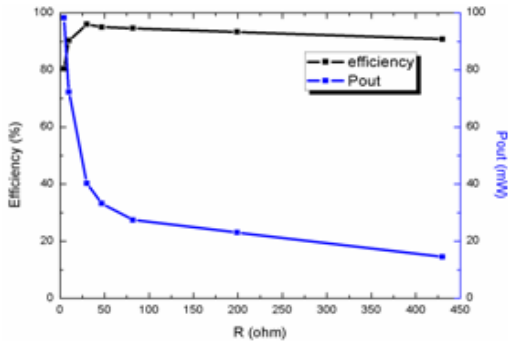
무선 전력 전송시스템의 입력 포트에 높은 전력을 공

급하기 위해서 일반적으로 전력증폭기가 사용된다. 전력 증폭기는 크게 두 가지 형태 선형 증폭기와 스위칭 증폭기로 분류가 된다. 선형 증폭기는 효율에 한계를 가진다^[7]. 예를 들면, A급 증폭기는 최대 50 %, B급 증폭기는 78.5 %, C급 증폭기와 J급 증폭기는 87 %로 최대효율이 제한된다. 반면에 스위칭 증폭기는 이론적으로 100 %의 효율을 얻을 수 있다.

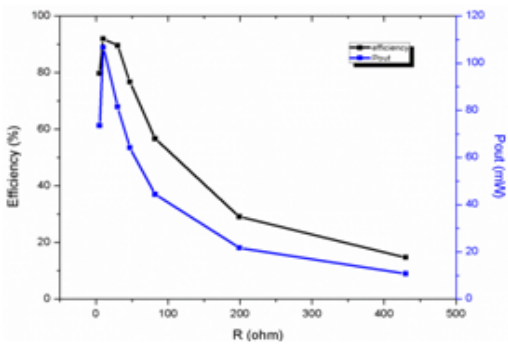
안테나들 사이의 결합이 변할 때, 송신 안테나에서 입력임피던스는 변하게 된다. 이런 현상은 무선 전력 전송 시스템에서 큰 문제를 발생시킨다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 선형 증폭기의 경우, 전력증폭기의 효율이 부하 임피던스에 따라 변화하므로 최대 효율을 얻기 위하여 무선 전력 전송시스템의 입력 임피던스를 조절하는 방법

이 필요하다^[8]. 그러나 D급 증폭기와 같은 스위칭 증폭기의 경우, 증폭기는 전압증폭기로 동작하게 되므로^[7] 부하 임피던스의 변화에 대한 증폭기 효율의 변화가 적다^[5]. 다만, 부하로 수신되는 전력이 부하 임피던스에 따라 변화하게 된다. 따라서 무선 전력 전송 시스템에 일정한 입력 전력을 공급하기 위해서 바이어스 전압을 조절해줄 필요가 있다. 그래서 우리는 무선 전력 전송 시스템의 전력원으로 사용되는 전력증폭기의 특성을 고려하였다.

그림 2는 스위칭 증폭기의 부하 임피던스의 변화에 따른 증폭기의 효율과 출력전력을 보여준다. E급 증폭기의 경우, 이론적인 효율은 최적의 분포 커패시터와 부하 임피던스의 관계에 의해 결정된다. 그래서 부하 임피던스의 변화는 효율을 급격하게 감소시키는 원인이 될 수 있다. 그림 2(b)와 같이 효율이 최적의 부하저항에서 변할수록 효율도 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 반대로 D급 증폭기의 경우, 부하저항의 변화에 대해 둔감한 특성을 가지고 있다. 그림 2(a)와 같이 부하 임피던스의 변화가 큰 상황에서도 전체적인 효율이 높은 효율로 유지되는 것을 볼 수 있다. 따라서 두 안테나의 거리가 변하는 무선 전력 전송시스템의 경우, D급 증폭기를 선택하는 것이 유리하다고 판단된다.



(a) D급 증폭기
(a) Class-D PA



(b) E급 증폭기
(b) Class-E PA

그림 2. 부하 임피던스의 변화에 따른 스위칭 증폭기의 효율 및 출력전력

Fig. 2. The efficiencies output power of switching PAs according to the varied load impedance.

IV. 안테나들 사이의 거리가 변하는 상황에서 동작하는 무선 전력 전송시스템

참고문헌 [8]에서 최대무선 전력 전송효율을 얻기 위한 최적의 부하저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R_L^{opt} = R_r \sqrt{1 + \frac{(\omega M)^2}{R_r R_r}} \quad (1)$$

수식에서 T , R 그리고 L 은 각각 송신기, 수신기 그리고 부하를 나타낸다. 상호 임피던스는 안테나들 사이의 거리에 따라서 변한다. 최적의 부하 임피던스는 상호 임피던스의 함수이기 때문에 최적의 부하 임피던스도 안테나 사이의 거리에 따라서 변하게 된다. 따라서 최대 전력 전송 효율을 얻기 위해서는 동시에 송수신 포트에서 정합조건을 만족시키는 것이 필요하다. 그러나 동시 공액 정합을 실제로 구현하는 것은 어렵다. 따라서 비교적 쉽게 정합

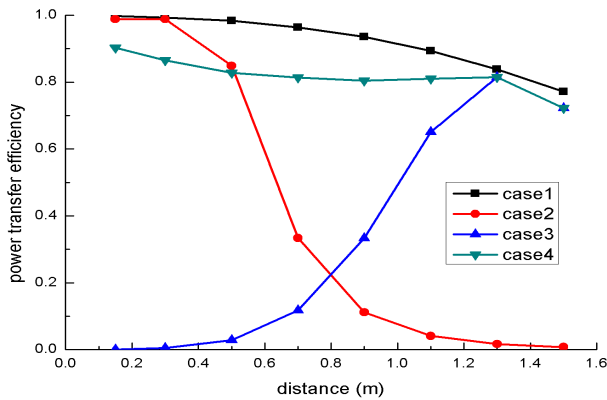


그림 3. 두 개의 결합된 작은 나선형 안테나의 전력 전송 효율 비교(case 1: 고정된 주파수에서 동시공액정합을 한 경우; case 2: 부하 임피던스가 50 Ω일 때 주파수 추적 방식; case 3: 고정된 주파수와 고정된 부하 임피던스[1.5 m에서 최적의 임피던스]; case 4: 고정된 부하 임피던스[1.5 m에서 최적의 임피던스]에서 주파수 추적 방법).

Fig. 3. Comparison of the power transfer efficiency for two coupled small spiral antennas(case 1: fixed frequency with simultaneous matching condition; case 2: frequency tracking with 50 Ω load impedance; case 3: fixed frequency with fixed load impedance(optimum impedance at 1.5 m); case 4: frequency tracking with fixed load impedance(optimum impedance at 1.5 m)).

문제를 해결하기 위한 방법들을 제안할 필요가 있었다.

4.1 주파수 추적 방식

두 공진 안테나가 근접장의 영역에서 서로 강하게 결합된 경우, 공진주파수가 갈라지게 된다^[9]. 갈라진 공진주파수들은 안테나사의 결합된 세기에 의하여 결정된다. 결합된 작은 안테나들의 갈라진 공진주파수들에서 입력임피던스의 특성은 최근에 연구되었다^[9]. 우리는 강하게 결합된 영역 내에서 실제 시스템의 경우처럼 부하 임피던스가 손실저항과 방사저항에 비하여 충분히 클 때, 갈라진 공진 주파수에서 입력임피던스가 거의 부하 임피던스와 같은 점을 주목하였다. 따라서 입력 정합과 효율적인 전력전송은 포트의 임피던스를 고정하고, 시스템의 갈라진 공진주파수에 전력원의 주파수를 적응시켜서 얻을 수 있다. 그림 3는 다양한 적응형 정합방법들의 전력 전송 효율의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 개선된 주파수 추적

방식은 목표 거리인 1.5 m까지 높은 효율을 유지하는 것을 보여준다.

4.2 부하저항 조정 방식

주파수 추적 방식을 실제로 무선 전력 전송시스템에 적용시킬 경우 한계가 있다. 일반적으로 industrial, scientific, and medical(ISM) 주파수 대역의 상대적인 범위는 1 %보다 더 작다. 따라서 주파수 추적 방식을 적용할 경우, 주파수 규정에 위반되기 쉽다. 그래서 두 안테나 사이의 거리가 변할 때 동작주파수를 고정시키고, 효율적인 무선 전력 전송이 가능한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 무선 전력 전송 시스템은 오직 제안된 적당한 부하저항을 이용하고, 시스템의 전력원으로 사용되는 D급 전력증폭기만을 조정하여 효율적인 무선 전력 전송이 가능하다. 최대 전력 전송 효율을 얻기 위한 부하저항과 상호인덕턴스의 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$R_R \ll R_L \ll \frac{(\omega M)^2}{R_T} \tag{2}$$

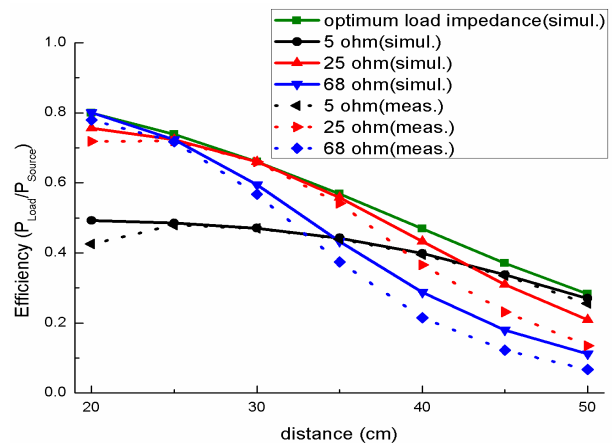


그림 4. 두 개의 결합된 안테나의 전체 전력 전송 효율 (실선: 전력증폭기의 효율을 100 %로 가정하고 balun의 손실을 포함한 시뮬레이션 결과, 점선: 측정된 결과)

Fig. 4. The total power transfer efficiency for two coupled antennas(line: simulated results including the balun loss and assuming that PA efficiency is 100 %, dot: the efficiencies are measured results).

전체 전력 전송 효율의 시뮬레이션과 측정 결과는 그림 3에서 보여진다. 전체 전력 전송 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_{total} = PTE \cdot \eta_{PA} = \frac{P_{Load}}{P_{Source}} \quad (3)$$

5 Ω, 25 Ω 그리고 68 Ω은 각각 20 cm, 30 cm 그리고 50 cm에서 최적의 부하저항 값이다. 20 cm에서 30 cm 사이에서 식 (2)의 조건을 만족하는 경우는 오직 25 Ω뿐이다. 그림 4에서처럼 측정된 결과가 계산된 결과와 잘 일치한다. 5 Ω와 68 Ω의 경우와 비교했을 때, 25 Ω의 경우 근거리에서 효율적으로 전력을 전송할 수 있다.

V. 두 공진기 모드의 결합

그림 5는 송신안테나와 수신안테나의 등가회로 모델을 보여준다. 등가회로 모델은 LCR 공진기로 동작한다. 공진모드의 시간에 따른 변화를 간단한 수식화 한 것은 두 공진 모드 사이의 결합을 표현하기에 유용하다. 자체 공진 주파수가 ω_1 과 ω_2 인 두 결합된 손실 공진기의 모드의 크기 a_1 과 a_2 의 크기의 변화에 대한 수식을 고려하면^[10].

$$\frac{da_1}{dt} = \left(j\omega_1 - \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_{ext1}} \right) a_1 + k_{12} a_2 \quad (4)$$

$$\frac{da_2}{dt} = \left(j\omega_2 - \frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_{ext2}} \right) a_2 + k_{21} a_1 \quad (5)$$

$1/\tau$ 는 손실에 의한 감쇄비율, k_{12} 와 k_{21} 은 결합계수를 나타낸다. 식 (4), (5)의 일반적인 해를 사용하면 공진기 1

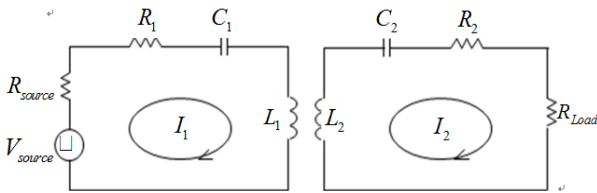


그림 5. 공진기의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of resonators.

의 에너지(i.e. $|a_1(t)|^2$)를 얻을 수 있다.

$$|a_1(t)|^2 = \left[(a_1(0))^2 + \frac{\left(2k_{12}a_2(0) - a_1(0) \left(j(\omega_2 - \omega_1) - \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_{ext1}} + \frac{1}{\tau_{ext2}} \right) \right) \right)^2}{2\Omega} \right] \cdot \sin^2(\Omega t + \theta) \cdot e^{\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_{ext1}} + \frac{1}{\tau_{ext2}} \right) t} \quad (6)$$

$$\Omega = \sqrt{\left(\frac{j(\omega_1 - \omega_2) - \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_{ext1}} - \frac{1}{\tau_{ext2}} \right)}{2} \right)^2 + k_{12}^2} \quad (7)$$

5-1 임계계수의 유도

$k_{critical}$ (i.e. 임계계수)은 두 개의 공진을 구별하기 위해 도입되었다. 두 공진기는 연속적으로 하나의 공진기에서 다른 공진기로 에너지를 주고받는다. 이 논문에서는 얼마나 많은 에너지를 첫 번째 공진기에서 전송 후 다시 돌려받는지를 기준으로 기준을 제시하였다. 첫 번째 공진기가 한 주기 (1T)후에 받은 에너지가 초기 송신 에너지의 e^{-5} 배보다 크면 (i.e., $|a_1(1T)|^2 > |a_1(0)|^2 \cdot e^{-5}$), 무선 전력 전송 시스템은 자기 공명 방식을 이용한 것으로 판단한다. e^{-5} 이 기준인 이유는 두 공진기 사이의 임계결합에 기반해서 결정되었다. 한 주기 후 수신된 에너지가 기준보다 적을 때 첫 번째 공진기가 한 주기가 지나는 동안 다시 에너지를 돌려받지 못하는 것으로 판단한다. 이 경우, 무선 전력 전송 시스템은 자기 유도 방식을 이용한 것으로 결정한다. $k_{critical}$ 은 시뮬레이션을 통해서 한 주기 후 초기 에너지의 e^{-5} 배만큼 에너지를 수신하는 경우의 k 값으로 구할 수 있다.

$$k_{critical} = \frac{\omega_0 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \frac{1}{Q_{ext1}} + \frac{1}{Q_{ext2}} \right) \cdot \pi}{10} \quad (8)$$

$Q_{1,2}$ 과 $Q_{ext1,2}$ 는 각각 부하가 없는 경우의 Q 와 부하가 있는 경우의 Q 를 의미한다.

5-2 시뮬레이션 결과 및 논의

이론을 검증하기 위해 시뮬레이션에 사용된 변수의 값

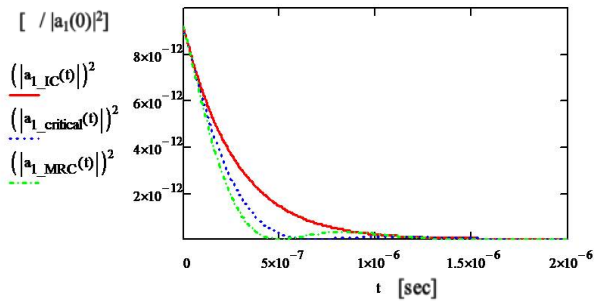


그림 6. 전력원의 경우, 첫 번째 공진기의 시간에 따른 에너지($k_{12}=0.05, 0.367, 0.5$).
 Fig. 6. In case of power source, the energy of primary resonator according to the time($k_{12}=0.05, 0.367, 0.5$).

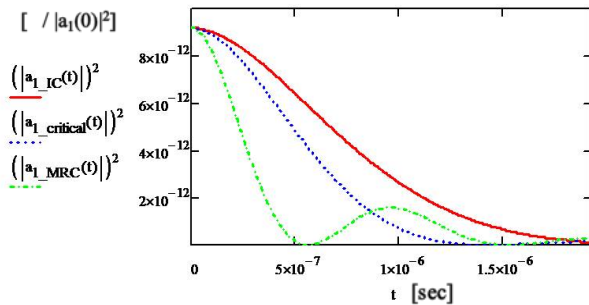


그림 7. 전압원의 경우, 첫 번째 공진기의 시간에 따른 에너지($k_{12}=0.05, 0.178, 0.5$).
 Fig. 7. In case of voltage source, the energy of primary resonator according to the time($k_{12}=0.05, 0.178, 0.5$).

은 다음과 같다. 공진주파수 10.03 MHz에서 $R_{Tx}=R_{Rx}=0.296\Omega$, $Q_1=Q_2=2878$, $V_{source}=1$ V이다. 전력원일 경우, 시스템의 소스와 부하저항은 50 Ω 이다. 전압원을 사용한 경우는 오직 부하저항만을 고려하였다. 그림 6, 7은 각각의 방식에서 첫 번째 공진기의 시간에 대한 에너지의 변화를 보여준다. 전력원이 사용된 경우, 첫 번째 공진기의 각 주기별 에너지는 표 1과 같이 앞에서 제시된 기준을 만족하는 것을 볼 수 있다. 전압원의 경우, 식 (8)로부터 $k_{critical}$ 은 0.187이다. 한 주기 후 초기 송신에너지의 e^{-5} 배 만큼 에너지를 수신하는 결합계수는 0.178이다. 식 (8)과 시뮬레이션 결과가 약 4.54 % 오차가 있다. 이는 부하저항이 없는 경우, Q 가 소스 임피던스를 무시함에 따라 더 커졌기 때문이다. 표 2에서 보여주는 결과 또한 앞에서

표 1. 전력원을 사용한 경우 첫 번째 공진기의 에너지
 Table 1. In case of power source, the energy of primary resonator.

k	Energy		Type of coupling
	$ a_1(1T) ^2$	$ a_1(0) ^2 \times e^{-5}$	
0.05	≈ 0	6.19×10^{-14}	IC
0.367	6.19×10^{-14}		Critical
0.5	2.34×10^{-13}		MRC

표 2. 전압원을 사용한 경우 첫 번째 공진기의 에너지
 Table 2. In case of voltage source, the energy of primary resonator.

k	Energy		Type of coupling
	$ a_1(1T) ^2$	$ a_1(0) ^2 \times e^{-5}$	
0.05	≈ 0	6.19×10^{-14}	IC
0.178	6.19×10^{-14}		Critical
0.5	1.53×10^{-12}		MRC

제시된 조건을 잘 만족한다.

VI. 결 론

본 논문은 구면파 모드를 이용하여 무선 전력 전송의 물리적인 한계를 구한 기존의 논문을 요약 정리하였다. 안테나의 방사효율과 두 안테나 사이의 거리가 무선 전력 전송 특성을 결정하는 설계변수인 것을 보였으며, 무선 전력 전송의 특성을 분석하기 위해서 안테나의 구조는 알 필요가 없었다.

무선 전력 전송시스템의 전원으로 사용되는 전력증폭기에 따른 전력 전송 특성의 차이를 요약 정리하였으며, 두 종류의 전력원(voltage source와 power source)을 비교하였다. 그리고 목표거리에서 정합되는 부하저항을 사용하여 개선된 주파수 추적 방법을 제안한 논문의 기본 아이디어를 정리하였다. 개선된 주파수 추적 방법은 강하게 결합된 영역 넘어서까지도 안정적으로 효율적인 전력전송이 가능한 방법이었다. 또한, D급 전력증폭기를 전원으로 사용하고 부하저항을 앞에서 제시한 조건에 만족하는 값으로 사용하는 무선 전력 전송시스템을 제안하였다.

전력원과 전압원을 사용하는 무선 전력 전송에서 자기 유도 방식과 자기 공명 방식의 기준을 제시하였다. 제시

된 임계 결합 계수를 사용하면 두 방식을 분석적으로 명확하게 분류할 수 있다.

References

- [1] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Ann. Phys.*, vol. 323, no. 1, pp. 34-48, Jan. 2008.
- [2] P. Sample, T. Meyer, and R. Smith, "Analysis, experimental result, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [3] J. Lee, S. Nam, "Fundamental aspects of near-field coupling small antennas for wireless power transfer", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 11, pp. 3442-3449, Nov. 2010.
- [4] J. Park, Y. Tak, Y. Kim, Y. Kim, and S. Nam, "Investigation of adaptive matching methods for near-field wireless power transfer", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 5, pp. 1769-1773, May 2011.
- [5] J. Park, S. Lee, Y. Tak, and S. Nam, "Simple efficient resonant coupling wireless power transfer system operating at varying distances between antennas", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, issue 10, pp. 2397-2401, Oct. 2012
- [6] F. Z. Shen, W. Z. Cui, W. Ma, J. T. Huangful, and L. X. Ran, "Circuit analysis of wireless power transfer by coupled magnetic resonance", *IET International Conf.*, pp. 602-605, 2009.
- [7] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, London: Artech-House, ch. 3, 2006.
- [8] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Scienceexpress*, Jun. 2007.
- [9] Y. Kim, H. Ling, "Investigation of coupled mode behaviour of electrically small meander antennas", *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 23, Nov. 2007.
- [10] H. A. Haus, *Waves and Fields in Optoelectronics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.

박 중 민



2006년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 2008년 8월: 서울대학교 전기정보공학부 (공학석사)
 2014년 8월: 서울대학교 전기정보공학부 (공학박사)
 2014년 9월~현재: LIG넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 무선 전력 전송, 전자파 수치해석 등

남 상 욱



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
 1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin (공학박사)
 1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 능동/수동 회로 설계, 안테나 및 전파전파, 전자파 수치해석 등