

# 가변 임피던스 정합 회로를 갖는 루프 안테나를 이용한 13.56 MHz 무선 전력 전송 시스템

## 13.56 MHz Wireless Power Transfer System Using Loop Antennas with Tunable Impedance Matching Circuit

원도현 · 김희승 · 장병준

Do-Hyun Won · Hee-Seung Kim · Byung-Jun Jang

### 요약

본 연구에서는 가변 임피던스 정합 회로를 갖는 루프 안테나를 이용한 13.56 MHz 무선 전력 전송 시스템을 제안하였다. 일반적으로 무선 전력 전송 시스템은 공진기간의 이격 거리가 변함에 따라 결합계수가 변하게 되며, 이는 반사 임피던스에 의한 임피던스 부정합을 발생시킨다. 본 연구에서 제안한 방식은 varactor 다이오드를 갖는 가변 임피던스 정합 회로를 사용함으로써 루프 안테나 간의 이격 거리 변화에 따른 임피던스 부정합을 보상할 수 있다. 따라서, 안테나간의 거리가 가까워 결합계수가 큰 경우에도 우모드와 기모드의 발생을 최소화하여 중심 주파수의 변화 없이 최적의 전송 효율을 얻을 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 13.56 MHz에서 동작하는 30 cm×30 cm 크기의 루프 안테나를 갖는 무선 전력 전송 시스템을 고정 임피던스 정합 회로와 가변 임피던스 정합 회로를 갖는 경우로 각각 설계하고, 거리에 따른 입력 임피던스, 입력 반사 계수 및 효율 변화를 측정하였다. 또한 가변 임피던스 정합 회로를 송신기와 수신기의 한 쪽에만 사용하는 경우와 양 쪽 모두에 사용하는 경우를 비교 측정하였다. 측정 결과, 고정 임피던스 정합 회로보다 가변 임피던스 정합 회로를 사용하는 것이 효율이 개선되며, 한 쪽에만 사용하는 경우보다 양 쪽 모두에 사용하는 것이 개선된 효율을 보임을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we proposed a 13.56 MHz wireless power transfer system using loop antennas with tunable impedance matching circuits. In general, a wireless power transfer system shows an impedance mismatching due to a reflected impedance, because a coupling coefficient is varied with respect to separation distance between two resonating antennas. The proposed system can compensate the effect of this impedance mismatch owing to tunable impedance matching circuits using varactor diodes. Therefore, transmission efficiency is enhanced, moreover, the center frequency of the system is not changed, regardless of separation distance between two antennas. In order to demonstrate the performance of the proposed system, a wireless power transfer system with tunable impedance matching circuits is designed and implemented, which has a pair of loop antennas with a dimension of 30 cm×30 cm. The input return loss, coupling coefficient, efficiency, and input impedance variation with respect to a distance between loop antennas were measured. From measured results, the proposed system shows enhanced performances than the case of the general fixed 50 Ω impedance matching circuits. Therefore, we verified that the proposed wireless power transfer system using the proposed impedance matching scheme will be able to ensure robust operation even when the separation distance of antennas is varied.

Key words : Wireless Power Transmission, Loop Antenna, Coupling Coefficient, Impedance Matching, Efficiency, Resonance, Varactor Diode

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(IITA-2009-C1090-0904-0002)과 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0015435).」

국민대학교 전자공학부(Department of Electronics Engineering, Kookmin University)

· 논문 번호 : 20100304-015

· 교신저자 : 장병준(e-mail : bjjang@kookmin.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 4월 23일

## I. 서 론

최근 전원선을 사용하지 않고 자유 공간을 매질로 하여 전력을 전송하는 무선 전력 전송(Wireless Power Transfer: WPT) 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 휴대용 기기 및 가전용 전자 제품이 다양해짐에 따라 수십 cm 정도의 거리에서 대전력으로 전력을 공급하는 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다<sup>[1]</sup>.

무선 전력 전송 시스템은 전자파의 방사를 이용하는 방식과 자기장의 유도 결합(inductive coupling)을 이용하는 방식으로 크게 분류할 수 있으며, 유도 결합 방식은 공진을 이용하는 경우와 이용하지 않는 경우로 다시 분류할 수 있다. 특히, 2007년 MIT 물리학과와 마린 솔라치치(Marin Soljacic) 교수팀은 공진을 이용하는 유도 결합 방식으로 10 MHz의 정현파를 이용하여 2 m 거리에서 60 W의 전력을 두 개의 공진하는 헬리컬(helical) 구조의 안테나로 전송함으로써 무선 전력 전송에 대한 연구의 기폭제 역할을 하였다<sup>[2],[3]</sup>.

본 연구팀에서는 최근 공진을 이용하는 유도 결합 방식을 13.56 MHz RFID 주파수 대역에서 동작하는 사각형 루프(loop) 안테나로 구현하였고, 이에 대한 정량적인 분석 및 새로운 설계 법을 제안한 바 있다<sup>[4]</sup>. 제안된 무선 전력 전송 시스템의 연구 결과에 따르면 공진기 간의 이격 거리의 변화에 따라 결합 계수(coupling coefficient)가 변하게 되며, 이는 반사 임피던스(reflected impedance)에 의한 임피던스 부정합을 발생시킨다. 이를 보상하기 위하여 본 연구팀에서는 안테나 간의 거리가 고정될 경우, 반사 임피던스를 고려한 임피던스 정합 회로를 제안하고, 반사 임피던스를 고려하지 않은 경우보다 효율이 2배 정도 개선됨을 확인하였다.

본 논문에서는 이러한 연구 결과를 확장하여, 무선 전력 전송 시스템의 공진기 간의 거리가 변하더라도 자동으로 임피던스 정합을 가변할 수 있는 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 거리에 따른 임피던스 부정합을 보상하기 위하여 varactor 다이오드를 이용한 가변 임피던스 정합 회로를 사용함으로써 루프 안테나 간의 이격 거리의 변화에 따른 임피던스 부정합을 보상할 수 있다. 따라서, 안테나간의 거

리가 가까워 결합계수가 큰 경우에도 우모드(even mode)와 기모드(odd mode)의 발생을 최소화하여 중심 주파수의 변화 없이 최적의 전송 효율을 얻을 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 고정 임피던스 정합 회로와 가변 임피던스 정합 회로를 갖는 경우로 비교 분석한다. 또한, 가변 임피던스 정합 회로를 송신단과 수신단의 한 쪽에만 사용하는 경우와 양 쪽 모두에 사용하는 경우를 비교 측정함으로써 실제 무선 전력 전송 시스템을 구현할 때 발생할 수 있는 다양한 경우에 적용될 수 있도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 고정 임피던스 정합 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템의 특성을 설명한다. 먼저, 캐피시턴스 정합 회로를 갖는 단일 루프 안테나의 설계 방법을 설명하고, 이러한 루프 안테나가 쌍으로 있을 때 거리에 따른 입력 임피던스, 입력 반사 계수 및 효율의 측정 결과를 이론 값과 비교하여 설명한다. 이를 바탕으로 3장에서는 거리에 상관없이 일정한 효율을 얻기 위해 varactor 다이오드를 사용한 가변 임피던스 정합 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템의 구성 및 측정 결과를 보여 준다. 특히, 임피던스 정합 회로의 종류에 따라 3가지 무선 전력 전송 시스템의 실험 결과를 제시하여 본 논문에서 제안한 방식의 타당성을 검증한다. 마지막으로 4장에서 본 연구의 결론을 맺는다.

## II. 고정 임피던스 정합 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템

### 2-1 단일 루프 안테나의 설계

본 논문에서 제안하는 무선 전력 전송 시스템은 13.56 MHz의 주파수 대역에서 동작하는 사각형 루프 안테나를 이용하는 것으로 그림 1과 같다. 사각형 루프 안테나는 구조가 간단하면서도, 가전기기의 모서리를 따라 안테나를 배치할 수 있어 실제 가전 기기에 무선 전력 전송 시스템을 적용할 때 유리한 구조이며, 13.56 MHz는 RFID 시스템에 적용되고 있는 ISM(Industrial, Scientific, and Medical) 주파수 대역으로 전 세계에서 공통으로 사용할 수 있어 별도의 주파수 배정이 필요 없는 대역이다. 루프 안테나의 크기 및 자세한 설계법은 참고문헌 [4]와 동일하

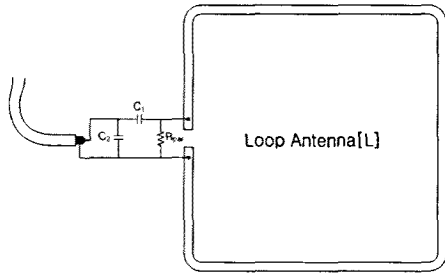


그림 1. 캐패시턴스 정합을 갖는 사각형 루프 안테나의 구성

Fig. 1. Configuration of a rectangular loop antenna with a capacitance matching circuit.

다. 이러한 루프 안테나를 정합시키기 위한 방법으로는 Gamma 정합, T-정합, 트랜스포머 정합, 캐패시턴스 정합 등의 방법이 가능한데<sup>[5]</sup>, 본 논문에서는 가변 임피던스 정합 회로를 구성하기 용이한 캐패시턴스 정합 방법을 이용하였다.

그림 1의 루프 안테나의 각 소자 값들은 다음과 같다. 먼저, 사각형 루프 안테나의 인덕턴스는 식 (1)과 같이 근사식으로 계산될 수 있다.

$$L[uH] = Side \times 0.008 \left[ \ln \left( \frac{Side \times 1.414}{2 \times Diameter} \right) + 0.379 \right] \quad (1)$$

여기서, side는 정사각 루프의 한 변의 길이[cm]를 의미하며, diameter는 안테나 튜브의 직경[cm]에 해당한다. 이제 인덕턴스가 주어지면, 13.56 MHz에서 공진하기 위한 캐패시턴스 C는 다음 식 (2)로 주어진다. 여기서,  $f_{res}$ 는 루프 안테나의 공진 주파수를 의미한다.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_{res})^2 L} \quad (2)$$

마지막으로 병렬 저항  $R_{par}$ 은 루프 안테나의 대역폭과 밀접한 관련을 갖게 되는데, 안테나의 대역폭에 따른 quality factor(Q)가 주어질 경우 식 (3)과 같이 주어진다.

$$R_{par} = 2\pi f_{res} LQ \quad (3)$$

이 때 Q값이 높으면 안테나간의 전송 효율이 좋아지지만, 공진 주파수의 작은 변화에도 효율 특성

이 민감하게 가변되므로 적당한 Q값을 선정해야 한다. 이제 이러한 루프 안테나의 등가 모델을 50 Ω으로 정합하기 위하여 식 (4) 및 식 (5)와 같이 캐패시턴스의 값을 결정할 수 있다.

$$C_2 = C \times \sqrt{\frac{Z_{out}}{Z_{in}}} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{1}{\frac{1}{C} - \frac{1}{C_2}} \quad (5)$$

여기서,  $Z_{out}$ 은 안테나의 등가 저항으로, 중심 주파수에서는  $R_{par}$ 이며,  $Z_{in}$ 은 50 Ω에 해당된다. 캐패시터를 이용한 정합 안테나는 캐패시턴스의 작은 변화에도 정합이 변하는 특징을 갖고 있다. 본 논문에서는 이 특징을 이용하여 루프 안테나를 설계하였으며, 자세한 내용은 다음 절에서 다루도록 한다.

## 2-2 반사 임피던스를 고려한 임피던스 특성

앞에서 제시한 단일 루프 안테나의 설계 이론을 가지고 무선 전력 전송 시스템을 설계하였을 경우, 루프 안테나의 상호 결합에 의한 입력 임피던스의 변화를 반영할 수 없다. 즉, 무선 전력 전송 시스템의 입력 임피던스는 루프 안테나 간의 결합계수의 변화에 따라 영향을 받는다. 루프 안테나간의 상호 결합에 의한 입력 임피던스의 영향을 분석하기 위하여 그림 2와 같은 등가모델을 사용하였다. 두 안테나 간의 결합계수는 상호 인덕턴스를 이용하여 그림 2(a)와 같이 모델링 하였고, 수신 안테나의 존재 유무에 따라 가변되는 송신 안테나의 입력 임피던스의 변화를 설명하기 위하여 그림 2(b)와 같이 반사 임피던스(reflected impedance:  $Z_r$ )의 개념을 도입하였다<sup>[6],[7]</sup>. 그림 2와 참고문헌 [4]가 다른 점은 직렬 공진과 병렬 공진의 차이이다. 참고문헌 [4]에서는 고정 임피던스 회로를 사용하기 위하여 입력 임피던스의 실수항만이 가변되는 직렬 공진 방식을 사용하였으나, 본 논문에서는 입력 임피던스의 변화를 가변 임피던스 정합 회로로 보상할 수 있으므로 병렬 공진 방식을 사용하였다.

먼저, 병렬 공진에서의 반사 임피던스는 식 (6)과 같이 주어진다.

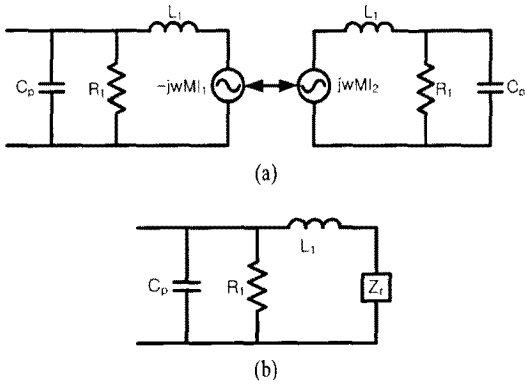


그림 2. (a) 송수신 안테나의 결합 모델, (b) 송신 안테나에서 바라본 등가 모델

Fig. 2. (a) Combined model of transmitter and receiver antenna, (b) Equivalent circuit shown in transmitter antenna.

$$Z_r = \frac{M^2 R_1}{L_1^2} - j \frac{\omega_0 M^2}{L_1} \quad (6)$$

여기서,  $L_1$ 은 루프 안테나의 자기 인덕턴스를,  $M$ 은 상호 인덕턴스를 의미하며,  $\omega_0$ 는 각주파수를 의미한다. 식 (6)을 그림 2(b)와 같이 입력 측에서 바라본 임피던스로 치환하면, 입력 임피던스  $Z_{in}$ 은 식 (7)과 같이 주어진다.

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_p} \parallel \left( \frac{M^2 R_1}{L_1^2} - j \frac{\omega_0 M^2}{L_1} + L_1 \right) \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 계산한 입력 임피던스의 실수

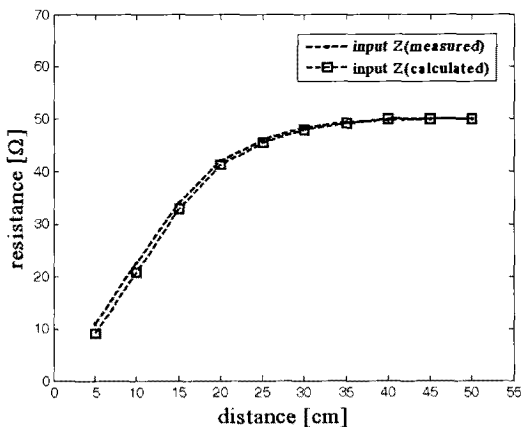


그림 3. 루프 안테나의 입력 임피던스 변화  
Fig. 3. Variation of input impedance loop antenna.

값과 측정된 임피던스의 실수 값을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 병렬 공진에 의해 안테나 사이의 거리가 가까워질수록 입력 임피던스가 50 Ω보다 작아지는 것을 알 수 있으며, 식 (7)이 무선 전력 전송 시스템의 거리에 따른 임피던스의 변화를 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

### 2.3 고정 임피던스 정합 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템의 측정 결과

참고문헌 [4]에서 설명한 바와 같이 고정 임피던스 정합 회로를 사용하여 설계된 무선 전력 전송 시스템은 안테나 사이의 거리가 가까워짐에 따라 결합 계수가 변하게 되고, 이 결합계수는 반사 임피던스에 의해 입력 임피던스를 변화시킨다. 따라서 임피던스 부정합이 발생하며, 이를 입력 반사 계수( $S_{11}$ ) 측면에서 보면 그림 4와 같이 동작주파수가 중심 주파수에서 분리되어 2개의 피크가 발생하게 된다. 이를 각각 우모드(even mode)와 기모드(odd mode) 주파수라 부른다<sup>[8]</sup>. 이러한 현상은 거리가 가까워짐에 따라 결합계수가 커질수록 확연히 나타난다. 하지만 우모드와 기모드 주파수에서의 반사 손실 크기를 살펴보면 거리가 변하여도 크게 바뀌지 않아서 효율 면에서 크게 차이가 나지 않을 것이라는 것을 알 수 있다. 하지만 공진 주파수인 13.56 MHz에서 살펴보면 40 cm 거리에서는 -21.5 dB, 10 cm 거리에서는

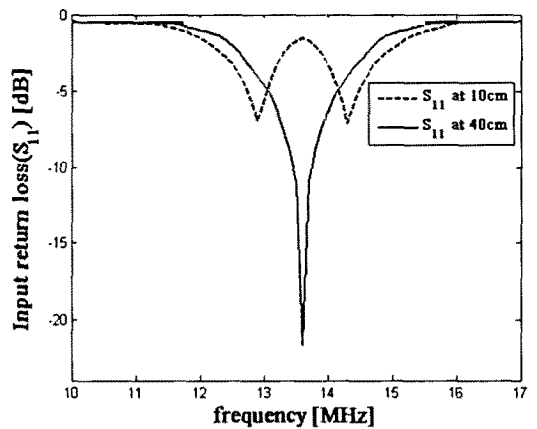


그림 4. 고정 임피던스를 갖는 사각형 루프 안테나의 반사 손실  
Fig. 4. Return loss of rectangular loop antenna with a fixed matching circuit.

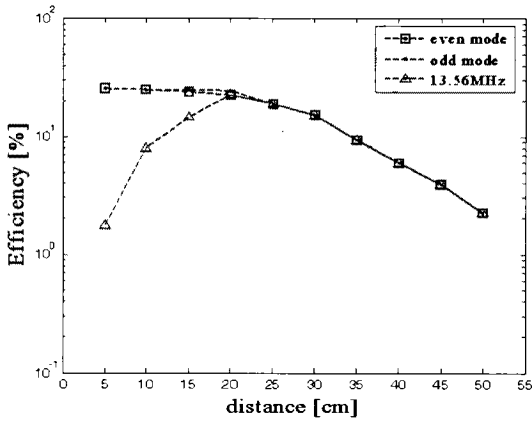


그림 5. 각각의 주파수에서의 고정 임피던스를 갖는 루프 안테나의 전송 효율  
 Fig. 5. Transmission efficiency in each frequency of loop antenna with a fixed matching circuit.

-1.5 dB로 근거리로 갈수록 반사되는 신호가 많다는 것을 알 수 있다. 따라서 13.56 MHz로 고정된 안테나의 효율은 그림 5와 같이 특정 거리에서 가장 높은 효율이 나오고 그 전·후의 거리에서는 효율이 낮아지게 된다. 일반적으로 가장 높은 효율이 나오는 거리는 사각형 루프 안테나의 직경과 비슷한 크기가 된다. 그림 5의 효율에 대한 식은 참고문헌 [4]와 동일하다.

결론적으로 우모드, 기모드를 이용한 안테나의 효율은 그림 5와 같이 근거리에서 특정한 거리까지 높은 효율을 유지하다가 멀어질수록 효율이 낮아지게 된다. 하지만 우모드, 기모드를 사용하기 위해서는 주파수가 거리에 따라 가변되어야 하는데, 주파수는 사용 목적과 용도에 따라 할당된 주파수가 정해져 있어서 사용자가 원하는 대로 변경하는 것은 어렵다. 따라서 무선 전력 전송 시스템은 고정된 주파수를 사용하면서도 거리에 상관없이 효율은 높게 유지할 수 있는 방법이 필요함을 알 수 있다.

### Ⅲ. 가변 임피던스 정합 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템

제2장에서는 무선 전력 전송 시스템에서 루프 안테나간의 거리에 따라 입력 임피던스가 변하게 되고, 이에 따라 입력 반사 계수 및 전송 효율이 변함을 알 수 있다. 따라서 고정된 임피던스 정합 회로를

가지고는 거리에 따라 전송 효율이 변화게 되어 실제 두 루프 안테나의 이격 거리가 가변되어야 하는 일반적인 응용에 사용하기가 어렵게 된다. 따라서, 본 장에서는 varactor 다이오드를 이용한 가변 임피던스 정합 회로를 이용한 무선 전력 전송 시스템을 제안한다. 본 장에서는 설계된 가변 임피던스 정합 회로를 갖는 루프 안테나 쌍을 이용한 무선 전력 전송 시스템을 구축하고, 고정 캐패시터만을 이용하여 50 Ω으로 정합된 안테나 쌍을 이용한 기존의 시스템과 특성 비교를 한다. 또한 실제 시스템 구현 시 수신부에는 자체 전력이 없으므로 송신부 한 쪽에만 가변 임피던스 정합 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템과의 특성을 비교하여 그 차이점을 보인다.

#### 3-1 바랙터 다이오드를 이용한 임피던스 정합 회로의 구성

앞에서 언급했듯이 근거리에서 높은 효율을 만들기 위해 우모드 또는 기모드 중 하나의 주파수로 가변하는 것은 실제 주파수 할당 문제 등으로 인해서 불가능하다. 따라서 주파수 가변이 아닌 다른 방법을 통해 이를 해결해야 한다. 따라서 본 논문에서는 varactor 다이오드를 이용하여 무선 전력 전송 시스템의 입력 임피던스를 중심 주파수의 변화없이 일정하게 50 Ω에 정합시키는 방법을 이용하였다. 안테나 사이의 거리가 변했을 때도 입력 임피던스를 50 Ω으로 일정하게 한다면 송·수신간에 반사되는 신호가 거의 없기 때문에 기존 안테나에 비해 더 높은 효율을 유지할 수 있다. Varactor 다이오드는 역방향으로 바이어스를 인가했을 때 인가 전압에 따라 캐패시턴스 값이 변하는 소자로서, 본 논문에 사용된 varactor 다이오드는 Zetex사의 ZC836BCT-ND로 0에서 20 V의 가변 전압에 대해 195 pF에서 17 pF까지의 캐패시턴스가 변화한다.

이러한 특성을 이용하여 varactor 다이오드를 사용한 가변 임피던스 정합 회로는 그림 6과 같다. 기존 캐패시터  $C_1$ 과  $C_2$ 에 varactor 다이오드를 병렬로 연결하고, 전압을  $V_1$ ,  $V_2$ 로 인가한다. 이 때 인가하는 DC 전압이 다른 소자에 영향을 주는 것을 방지하기 위해 DC blocking 캐패시터를 그림과 같이 삽입하였다. 왼쪽의 인덕터는 50 Ω 정합 설계 시 입력 임피

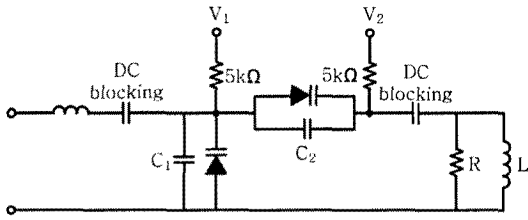


그림 6. Varactor 다이오드를 이용한 입력 임피던스 정합 회로

Fig. 6. Input impedance matching circuit using varactor diodes.

턴스의 허수값에 의해 틀어지는 위상을 보정하기 위하여 작은 크기의 인덕터(100 nH)를 추가로 삽입하였다.

3-2 실험 및 결과 분석

본 논문에서 설계한 사각형 루프 안테나의 일반적인 형상 및 안테나 제작 방법은 참고문헌 [4]와 동일하다. 루프 안테나를 설계하기 위하여 근사식 (1)을 사용하여 인덕턴스를 계산하고, 안테나의 대역폭 값을 조정하기 위한 병렬저항을 연결하였다. 다음으로, 13.56 MHz에서 공진되도록 식 (2)에 의해 C값을 도출한 후에 병렬 저항과 C값, 입력 임피던스 50 Ω을 이용하여 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>를 구한다. 이제 그림 6과 같이 varactor 다이오드를 포함한 회로로 변형시키고, varactor 다이오드를 포함한 회로를 다시 계산하면, C<sub>1</sub>은 20 pF 정도의 변화가 필요하고, C<sub>2</sub>의 경우에는 150 pF 정도의 변화량이 필요함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 마진을 두어 C<sub>1</sub>이 연결되는 부분에는 일반적인 100 pF의 고정 캐패시터와 varactor

다이오드 한 개를 병렬로 사용하였고, C<sub>2</sub>가 연결되는 부분에는 일반적인 330 pF의 고정 캐패시터와 varactor 다이오드 4개를 병렬로 연결하여 회로를 완성하였다.

표 1은 거리에 따른 입력 임피던스 변화와 임피던스 정합에 필요한 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>의 값을 나타내며, 그림 6의 회로에서 varactor 다이오드에 인가되는 전압의 이론 값과 측정 값을 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 이론 치와 설계 값이 거의 유사함을 알 수 있다.

그림 7은 varactor 다이오드를 사용하지 않고 50 Ω에 정합시킨 안테나 쌍(이하 type 1)을 사용했을 때 40 cm와 20 cm에서의 반사 임피던스 S<sub>11</sub>의 궤적의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 S<sub>11</sub>과 S<sub>22</sub>의 궤적은

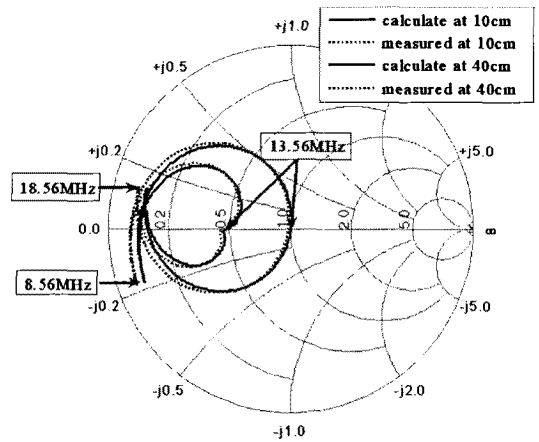


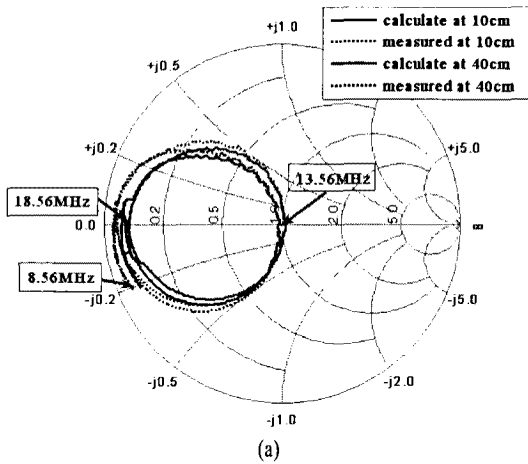
그림 7. Type 1의 40 cm, 20 cm 거리에서 S<sub>11</sub> 궤적의 변화

Fig. 7. S<sub>11</sub> locus at 40 cm and 20 cm distance between two loop antennas.

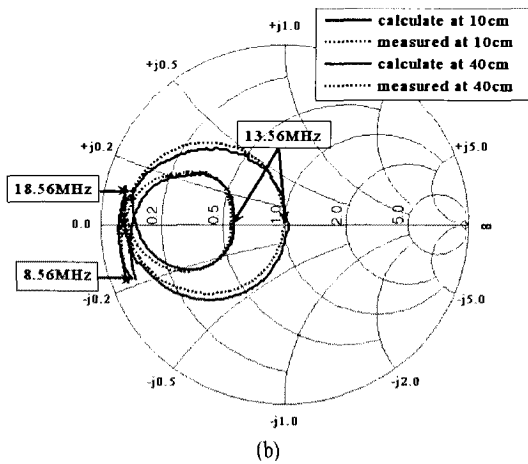
표 1. 거리에 따른 임피던스의 변화를 고려한 캐패시터 값과 인가 전압

Table 1. Capacitances and input voltages considering input impedance variation with respect to distance between two loop antennas.

Distance(cm)		50	40	30	20	10	5
Item							
	Impedance [Ω]	50	49.86	48.4	42.05	22.6	10.9
	C <sub>1</sub> [pF]	218	218	216.7	210.8	191.5	177.8
	C <sub>2</sub> [pF]	512	512.8	520.4	558.3	761.6	1,097
Theory	V <sub>1</sub> [V]	1.3	1.3	1.4	1.7	2.5	3.4
	V <sub>2</sub> - V <sub>1</sub> [V]	6.8	6.8	6.6	5.3	1.7	0.2
Measured	V <sub>1</sub> [V]	1.4	1.4	1.5	1.8	2.7	3.6
	V <sub>2</sub> - V <sub>1</sub> [V]	6.7	6.7	6.4	5.4	1.9	0.5



(a)



(b)

그림 8. (a) Type 2의 40 cm와 20 cm 거리에서  $S_{11}$  궤적의 변화, (b) Type 2의 40 cm와 20 cm 거리에서 이용한  $S_{22}$  궤적의 변화

Fig. 8. (a)  $S_{11}$  loci at 40 cm and 20 cm distance between two loop antennas, (b)  $S_{22}$  locus at 40 cm and 20 cm distance between two loop antennas.

같은 이유로 여기서는  $S_{11}$ 만 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전송거리가 작아지면 반사 임피던스의 영향으로 임피던스 부정합이 발생함을 알 수 있다. 거리가 작아질수록 이러한 임피던스 부정합 정도는 커지게 된다.

그림 8은 송신부만 varactor 다이오드 사용하고, 수신부는 50  $\Omega$ 에 정합시킨 안테나 쌍(이하 type 2)의  $S_{11}$ 과  $S_{22}$ 의 궤적을 나타낸다.  $S_{11}$ 의 궤적을 살펴보면 varactor 다이오드의 전압을 인가함으로써 거리에 상관없이 50  $\Omega$ 에 정합이 되었다. 반면  $S_{22}$ 는 임피던

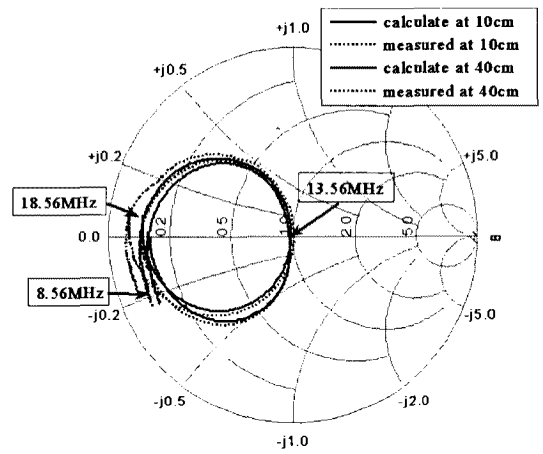


그림 9. Type 3의 40 cm, 20 cm 거리에서  $S_{11}$  궤적의 변화

Fig. 9.  $S_{11}$  loci at 40 cm and 20 cm distance between two loop antennas.

스를 가변할 수 없기 때문에 type 1과 같이 임피던스가 50  $\Omega$ 보다 작아지는 현상을 보였다.

그림 9는 송신부와 수신부 양쪽에 varactor 다이오드를 사용한 무선 전력 전송 시스템(이하 type 3)의  $S_{11}$ 과  $S_{22}$ 의 궤적을 나타낸다. 두 안테나 모두 임피던스를 가변할 수 있어서 거리에 상관없이 13.56 MHz 공진 주파수에서 50  $\Omega$ 에 정확히 정합시킬 수 있다. 이 때  $S_{11}$ 과  $S_{22}$ 의 궤적은 같으므로 여기서는  $S_{11}$ 만 표시하였다.

다음으로 주파수를 13.56 MHz에 고정하고, type 1과 type 2, 그리고 type 3의 전송 효율을 거리에 따라 측정된 결과가 그림 10에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 방식은 고정 임피던스 정합 회로에 비해 근거리에서도 높은 효율을 보이고 있다. 그리고 type 1보다 type 2가 효율이 높으며 type 3가 가장 높다. 임피던스를 50  $\Omega$ 에 정합시킬수록 반사계수가 작아서 효율이 더 크게 나옴을 알 수 있다. 이 결과로부터 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 거리에 따라 발생하는 임피던스 부정합을 가변 임피던스 정합 회로를 정합시키면 더 높은 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 실제 무선 전력 전송 시스템이 응용될 때 송신기와 수신기 사이의 거리는 고정될 수 없으므로 거리에 따른 임피던스 부정합은 필수적으로 발생한다. 이를 고려하면 거리에 상관없이 임피던스 정합을 할 수 있는 본 연구 결과가 향후

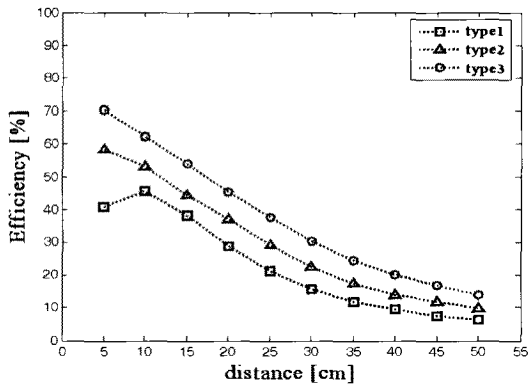


그림 10. 공진 주파수에서 루프 안테나 간의 거리에 따른 효율의 변화

Fig. 10. Efficiency variation with respect to a distance between two loop antennas at the frequency of resonance.

무선 전력 전송 시스템에 상용화에 유용하게 사용될 수 있음을 유추할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 루프 안테나와 가변 임피던스 정합 회로를 이용하여 13.56 MHz에서 동작하는 무선 전력 전송 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 varactor 다이오드를 이용한 가변 임피던스 정합 회로를 사용하여 루프 안테나 간의 이격 거리의 변화에 따른 임피던스 부정합을 보상할 수 있었다. 따라서, 안테나간의 거리가 가까워 결합계수가 큰 경우에도 우모드와 기모드의 발생을 최소화하여 중심 주파수의 변화 없이 최적의 전송 효율을 얻을 수 있었다. 실제 무선 전력 전송 시스템의 응용시 송신기와 수신기 사이의 거리는 고정할 수 없다. 따라서 거리에 상관없이 효율을 높일 수 있는 본 논문의 연구 결과가 향후 무선 전력 전송 시스템의 상용화에 이바지할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, "무선 에너지 전송 기술", ETRI 전자통신동향분석, 23(6), pp. 59-69, Dec. 2008.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [3] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annals of Physics* 323, pp 34-48, 2008.
- [4] 김희승, 원도현, 임재봉, 장병준, "루프 안테나를 이용한 무선 전력 전송 시스템의 새로운 설계법", 한국전자과학회논문지, 21(1), pp. 36-45, 2010년 1월.
- [5] Texas Instruments Ltd., "HF antenna design notes technical application report", *Literature number: 11-08-26-003, Radio Frequency Identification System*, Sep. 2003.
- [6] Xun Liu, W. M. Ng, C. K. Lee, and S. Y. Hui, "Optimal operation of contactless transformers with resonance in secondary circuits", *IEEE 23rd Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 645-650, Feb. 2008.
- [7] Chwei-Sen Wang, Grant A. Covic, and Oskar H. Stielau, "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 148-157, Feb. 2004.
- [8] Takehiro Imura, Toshiyuki Uchida, and Yoichi Hori "Experimental analysis of high efficiency power transfer using resonance of magnetic antennas for the near field(Japanese)", vol. 2, pp. 539-542, 일본전기학회 산업응용부문대회, 2008.



원 도 현



2009년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)  
2009년 2월~현재: 국민대학교 전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] RF/마이크로파 회로 시스템, 에너지-IT 융합, 전력 회로 시스템 전력 품질 개선 시스템

장 병 준



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
1995년 3월~1999년 1월: LG전자 (주)  
1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소  
2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원  
2005년 9월~현재: 국민대학교 전자공학부 교수  
[주 관심분야] RF/마이크로파 회로 및 시스템, 무선 통신 시스템, RFID/USN, 주파수 간섭 에너지-IT 융합, 바이오-RF 융합

김 희 승



2008년 9월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)  
2008년 9월~현재: 국민대학교 전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] RF/마이크로파 회로 시스템, 에너지-IT 융합, 전력 회로 시스템 전력 품질 개선 시스템