

루프 안테나를 이용한 무선 전력 전송 시스템의 새로운 설계법

New Design Method of Wireless Power Transfer System Using Loop Antennas

김희승 · 원도현 · 임재봉 · 장병준

Hee-Seung Kim · Do-Hyun Won · Jae-Bong Lim · Byung-Jun Jang

요 약

본 논문에서는 가전기기 등에 무선으로 전력을 전송하는 것을 목표로 루프 안테나를 이용한 무선 전력 전송 시스템의 새로운 설계 방법을 제안하였다. 본 설계 방법은 복잡한 전자기 시뮬레이션 없이 간단한 결합 계수의 측정과 루프 안테나의 등가 회로 모델에 대한 근사식만으로 무선 전력 전송 시스템을 설계할 수 있다. 본 논문에서 제시한 설계 방법에 따라 13.56 MHz에서 동작하는 50×50 cm² 크기를 갖는 루프 안테나 쌍을 설계하고, 거리에 따른 입력 반사 계수, 결합 계수, 효율 및 임피던스 변화를 측정하였다. 측정 결과, 본 논문에서 제안한 설계 방법이 입력 임피던스 특성을 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 50 cm 이하의 거리에서 본 논문의 설계 방법을 이용하여 임피던스 정합한 무선 전력 전송 시스템이 일반적인 50 Ω 임피던스 정합 회로를 갖도록 설계된 경우보다 효율이 2배 정도 개선되는 것을 확인하여 제안한 설계법의 유용성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a new design method to design a wireless power transfer system using loop antennas for consumer electronics. This method can simply design a wireless power transfer system only using measurements of coupling coefficients and simple equations of equivalent circuit model about loop antennas without complicated electromagnetic analysis. Using the proposed design method, a wireless power transfer system with a pair of loop antennas operating at the frequency of 13.56 MHz, which have a dimension of 50×50 cm², is designed and implemented. The input return loss, coupling coefficient, efficiency, and input impedance variation with respect to a distance between loop antennas were measured. The proposed design method provides good agreements between measured and predicted results. Also, the wireless power transfer system with impedance matching circuits designed by the proposed design method shows two times higher efficiency characteristics than the case with the general 50 Ω impedance matching circuits. Therefore, we verified that our design method could be an effective tool to design a wireless power transfer system.

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

I. 서 론

최근 전원선을 사용하지 않고 자유공간을 매질로 하여 전력을 전송하는 무선 전력 전송(Wireless Po-

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(IITA-2009-C1090-0904-0002)과 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20090067664).」

국민대학교 전자공학부(Department of Electronics Engineering, Kookmin University)

· 논문 번호 : 20090930-113

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

· 수정완료일자 : 2009년 11월 19일

wer Transmission: WPT) 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 휴대용 기기 및 가전용 전자제품이 다양해짐에 따라 수십 cm 정도의 거리에서 대전력으로 전력을 공급하는 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다^[1].

현재까지 전력을 무선으로 전송하는 방식으로는 초고주파 주파수에서 전자파의 방사(radiation)를 이용하는 방식과 수 cm 이내의 단거리에서 유도 결합(induction coupling)을 이용하는 방식이 연구되어 왔다. 하지만 이 중 전자파 방사를 이용하는 방식은 인체에 미치는 영향 및 고이득 안테나의 사용에 따른 직진성 등으로 인해 상용화되지 못하고 있으며, 유도결합의 경우 전력 전송 거리가 짧다는 단점을 가지고 있다^{[2],[3]}. 따라서 수십 cm 떨어진 가전기기 등에 무선으로 전력을 전송하기에는 이 두 방식을 적용하기 어려웠다. 다행히 2007년 MIT 물리학과와 마린 솔라치치(Marin Soljagic) 교수팀이 제안한 비방사(non-radiated) 방식의 무선 전력 전송 기술은 10 MHz의 정현파를 이용하여 2 m 거리에서 60 W의 전력을 두 개의 공진하는 헬리컬 구조의 안테나로 전송함으로써 향후 미래 유망 기술로 대두되고 있다^{[4],[5]}. 하지만 MIT 기술은 3차원 헬리컬 구조로 사용함으로써 실제 가전기기에는 적용하기 어려운 구조이며, 10 MHz 역시 전세계적으로 주파수 할당이 필요한 주파수라서 상용화에 단점이 있다. 또한 MIT 연구 결과는 복잡한 전자기 시뮬레이션을 사용하여 시스템 설계가 어렵고, 특히 입력 임피던스에 대한 회로적인 해석이 부족하여 실제 하드웨어 구현 시 임피던스 정합을 하기 어려운 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 비방사 방식의 무선 전력 전송을 13.56 MHz의 RFID 주파수 대역에서 동작하는 사각형 루프(loop) 안테나로 구현하고자 한다^[6]. 사각형 루프 안테나는 구조가 간단하면서도, 가전기기 등의 모서리를 따라 안테나를 배치할 수 있어 실제 가전기기에 무선 전력 전송 시스템을 적용할 때 상용화 가능성이 매우 높은 구조이다. 또한, 13.56 MHz는 RFID 시스템에 적용되고 있는 ISM(Industrial, Scientific, and Medical) 주파수 대역으로 전세계에서 공통으로 사용할 수 있어 별도의 주파수 배정이 필요 없는 대역이다^[7].

본 논문에서는 이러한 사각형 루프 안테나 쌍을

13.56 MHz에서 공진시켜 무선 전력 전송 시스템을 구성하는데 있어 간단한 설계식과 회로적인 해석을 바탕으로 임피던스 특성을 해석하는 방법을 제안한다. 이는 기존의 결합 공진 이론(coupled resonator theory)^[8]과 반사 임피던스(reflected impedance) 개념^{[9],[10]}을 혼용하여 사용한 것으로 간단한 결합 계수의 측정과 설계식만으로 무선 전력 전송 시스템을 설계할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서 제시한 설계 방법의 유용성을 입증하기 위하여 특정 거리에서 최대의 전력 효율이 나올 수 있는 임피던스 정합 방법을 제시하고, 일반적으로 안테나 설계 시 사용하는 50 Ω 임피던스에 정합한 경우와 비교하여 특정 거리에서 전력 효율이 개선됨을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 본 논문에서 사용한 루프 안테나가 단독으로 있을 때의 설계 원리를 살펴보고, 공진하는 두 개의 루프 안테나 쌍의 특성을 결합 공진 이론과 반사 임피던스 개념을 이용하여 회로적으로 해석하였다. 제 3장에서는 제작된 루프 안테나의 실험 결과와 특정 거리에서 전력 효율이 최대가 되는 임피던스 정합 회로를 이용한 무선 전력 전송 시스템에 대한 실험 결과를 제시하고 4장에서 결론을 맺었다.

II. 상호 결합하는 루프 안테나 설계

2-1 단일 루프 안테나 설계

본 논문에서 설계한 사각형 루프 안테나의 구성이 그림 1에 나타나 있다. 이러한 루프 안테나는 회로적으로 인덕터에 해당하며, 13.56 MHz에서 공진시키기 위해 가변 커패시터를 병렬로 연결하였으며, 안테나의 Q값을 조정하기 위한 병렬 저항이 연결되어 있다. 공진 시에 이 안테나는 저항 성분만이 보이므로, 트랜스포머의 turn비를 조정함으로써 입력 임피던스(현재는 50 Ω)에 정합할 수 있으며, 비평형(unbalanced) 선로와 연결하기 위하여 발룬(balun) 회로가 추가될 수 있다. 트랜스포머를 사용하지 않을 경우에서도 커패시터 등을 이용한 임피던스 정합 회로를 사용할 수 있으며, 발룬 회로를 추가할 경우 전도성 공통 모드 노이즈에 강인한 전력 전송 특성을 가질 수 있다.

그림 1에서 제시한 루프 안테나를 설계하기 위해

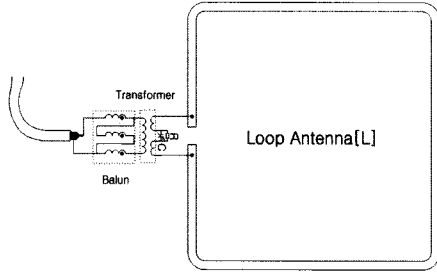


그림 1. 사각형 루프 안테나의 구성
Fig. 1. Configuration of a rectangular loop antenna.

서는 각 등가회로의 소자 값들 중 인덕턴스(L)의 계산이 필요하다. 사각형 루프에 대한 인덕턴스는 다음 식 (1)과 같이 근사식으로 계산될 수 있다^[11].

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

여기서,

Side : 정사각 루프의 한 변의 길이 [cm]

Diameter : 안테나 튜브의 직경 [cm]

이다. 인덕턴스 값이 주어지면, 13.56 MHz에서 공진하기 위한 캐패시턴스(C)는 다음 식으로 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.

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

이러한 근사식을 사용하게 되면, 복잡한 전자기(ElectroMagnetic: EM) 시뮬레이션 없이 원하는 주파수 대역에서 공진하는 루프 안테나를 설계할 수 있게 된다. 근사식 (1)을 이용하여 인덕턴스가 결정되면 식 (2)를 이용하여 공진을 위한 캐패시터 소자의 값을 결정할 수 있으며, 적절한 저항값을 이용하여 안테나의 공진 대역폭을 결정할 수 있다. 마지막으

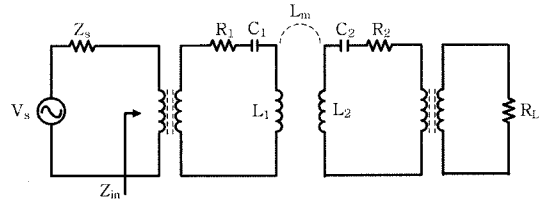


그림 2. 두 개의 루프 안테나로 구성된 전력 전송 시스템의 등가 회로
Fig. 2. Equivalent circuit of wireless power transfer system with two loop antennas.

로 루프 안테나의 공진 회로를 바탕으로 안테나의 입력 임피던스를 계산한 후 50 Ω으로 정합하기 위해 트랜스포머를 사용한다. 루프 안테나는 공진 시 실수 저항 성분 값을 가지게 되므로 트랜스포머의 turn 비를 조절함으로써 원하는 임피던스로 정합하는 것이 가능하다.

2-2 루프 안테나 간의 결합 계수 특성

앞 절에서는 루프 안테나 단독으로 있을 경우에 설계 이론을 제시하였다. 본 절에서는 이러한 루프 안테나가 쌍으로 있을 경우의 설계 이론을 제시한다. 그림 2는 두 개의 루프 안테나를 이용한 무선 전력 전송 시스템의 등가회로를 나타낸 것이다. 왼쪽의 루프 안테나는 송신 안테나가 되고, 오른쪽의 루프 안테나는 수신 안테나가 되어 두 안테나 사이에 상호 결합에 의한 에너지의 전송이 이루어진다. 이때 공진하는 두 안테나간의 결합 계수(coupling coefficient: k)에 의한 상호 인덕턴스(mutual inductance: L_m)가 주요 설계 포인트가 된다. 따라서 본 장에서는 공진하는 두 개의 루프 안테나에서의 설계 이론을 결합 공진 이론을 이용하여 분석한다.

각각의 공진하는 안테나는 공진 전류에 의한 자기 선속(magnetic flux)의 형성에 따라 두 안테나 사이에 상호 인덕턴스가 형성된다. 상호 인덕턴스에 의해 두 안테나는 서로에게 전기적으로 영향을 미치며, 이 영향의 정도를 표시한 것이 결합 계수 k 이다. 결합 계수와 상호 인덕턴스 사이의 관계식은 다음 식 (4)와 같다^[8].

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{L_m}{L} = \frac{f_{even}^2 - f_{odd}^2}{f_{even}^2 + f_{odd}^2} \quad (4)$$

여기서 두 안테나의 인덕턴스 L_1 과 L_2 는 L 로서 동일한 경우이며, f_{even} 은 우모드(even mode)에 의한 공진 주파수를, f_{odd} 는 기모드(odd mode)에 의한 공진 주파수를 나타낸다. 식에서 알 수 있듯이 안테나 사이의 거리가 가까울수록 두 공진 루프를 통과하는 자기 선속이 많아지기 때문에 결합 계수의 값은 커지고 멀어질수록 결합 계수의 값은 작아진다. 또한 안테나 사이의 거리가 가까울수록 f_{even} 과 f_{odd} 의 값은 단일 안테나의 공진 주파수 f_{res} 에서 멀어지게 된다. 결합 계수 k 는 사용하는 매질의 종류, 루프의 크기 등을 고려한 EM simulation 을 통해 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 공진기 자체의 특성보다는 공진기를 이용한 전력 전송 시스템 구축 및 간단한 설계 이론을 구현하는데 의의를 두고 있기 때문에 복잡한 EM 시뮬레이션을 f_{even} 과 f_{odd} 의 측정으로 대신하는 방식을 채택하였다.

2.3 반사 임피던스를 고려한 입력 임피던스 유도

송신 루프 안테나의 입력 임피던스는 결합 계수가 커지면 커질수록 수신 루프 안테나의 부하 임피던스의 영향을 받게 된다. 따라서 두 안테나 상호 간의 결합 계수는 입력 임피던스에 영향을 미치며, 입력 임피던스는 반사계수의 주요 요소이므로 거리에 따른 공진기의 입력 임피던스는 효율에 영향을 미치는 또 다른 주요 요소가 된다. 이러한 결합 계수의 입력 임피던스의 영향을 분석하기 위하여 그림 3과 같은 등가 모델을 사용하였다. 두 안테나 간의 결합 계수는 상호 인덕턴스를 이용하여 그림 3(a)와 같이 모델링하였고, 수신 안테나의 존재 유무에 따라 가변되는 송신 안테나의 입력 임피던스의 변화를 설명하기 위하여 그림 3(b)와 같이 반사 임피던스(reflected impedance: Z_r)의 개념을 도입하였다^{[9],[10]}.

먼저, 반사 임피던스의 식 (5)와 같이 상호 임피던스에 의한 전압원을 송신 안테나의 전류로 나눔으로써 정의할 수 있다.

$$Z_r = \frac{-j\omega M I_s}{I_1} = \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} \quad (5)$$

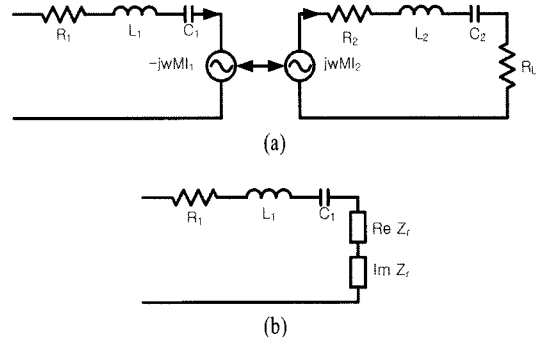


그림 3. (a) 송수신 안테나의 결합 모델, (b) 송신 안테나에서 바라본 등가 모델

Fig. 3. (a) Combined model of transmitter antenna and receiver antenna, (b) Equivalent circuit shown in transmitter antenna.

여기서, Z_2 는 수신 안테나의 등가 임피던스로 수신 안테나를 직렬 공진 회로라고 가정할 경우 식 (6)과 같다.

$$Z_2 = j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + (R_2 + R_L) \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 반사 임피던스는 다음 식 (7)과 같다.

$$Z_r = \frac{\omega^4 C_2^2 M^2 (R_2 + R_L)^2 - j\omega^3 C_2 M^2 (\omega^2 C_2 L_2 - 1)}{(\omega^2 C_2 L_2 - 1)^2 + \omega^2 C_2^2 (R_2 + R_L)^2} \quad (7)$$

식 (7)은 공진 주파수에서 ($\omega_{res} = 1/\sqrt{C_2 L_2}$)는 다음 식 (8)과 같이 주어진다.

$$Z_r = \frac{\omega_{res}^2 M^2}{(R_2 + R_L)^2} \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있듯이 안테나의 공진 주파수와 부하저항이 고정되어 있을 때 두 안테나 사이의 거리가 가까우면 상호 인덕턴스가 M 이 커지게 되고, 반사 임피던스는 M^2 에 비례하여 증가하게 됨을 알 수 있다. 이는 그림 3(b)의 송신 안테나의 직렬 저항값을 증가시키므로 단일 안테나의 임피던스 정합 회로를 구현할 때 반사 임피던스의 값을 추가하게 되면 특정 거리에서 최적의 임피던스 정합 회로를 구현할 수 있음을 유추할 수 있다.

이는 벽걸이 TV의 전력을 무선으로 전송하는 상

황을 가정할 때 유용하게 활용될 수 있다. 이 경우 벽 내부에 장착된 송신 안테나와 TV에 부착된 수신 안테나 사이의 거리가 고정되어 있으므로 안테나의 설계 시 식 (7)에 의한 반사 임피던스를 고려하여 임피던스 정합을 하는 경우 고려하지 않는 경우보다 임피던스 부정합에 의한 전력손실을 최소화할 수 있게 된다.

III. 실험 및 결과 고찰

제 2장에서는 무선 전력 전송을 위해 루프 안테나를 설계하는 이론을 제시하였고, 이를 확장하여 동일한 주파수에서 공진하는 두 개의 루프 안테나가 있을 경우 입력 임피던스 변화를 반사 임피던스 개념으로 간단하게 회로적으로 해석할 수 있음을 알 수 있었다. 본 장에서는 이를 이용하여 단일 루프 안테나와 루프 안테나 쌍을 이용한 무선 전력 전송 시스템을 구축하고, 두 안테나 간의 상호 결합에 대한 분석 없이 50 Ω에 정합하여 설계된 경우와의 차이점을 보인다. 그림 4는 2장에서 설명한 이론을 바탕으로 루프 안테나를 이용한 무선 전력 전송 시스템의 설계 방법을 나타낸다. 먼저 안테나 크기를 결정하면 인덕턴스가 결정되고, 공진 주파수에 따라 캐

패시턴스가 결정된다. 여기에 공진기의 Q값, 즉 대역폭에 따라 저항 R이 결정된다. 이렇게 설계된 R-L-C 공진기를 50 Ω에 정합하여 단일 공진기 두 개를 만든다. 이로부터 정해진 거리에서 두 공진기 간의 결합 계수를 측정하고, 이 값을 통하여 상호 인덕턴스를 계산한 후 식 (7)을 이용하여 입력 임피던스를 계산한다. 이제 수정된 입력 임피던스를 바탕으로 임피던스 정합 회로를 다시 설계함으로써 특정 거리에서 최대 정합 특성을 갖는 무선 전력 전송 시스템을 제작할 수 있다.

3-1 단일 루프 안테나 실험 및 결과 고찰

본 논문에서 설계한 사각형 루프 안테나의 사진이 그림 5에 나타나 있다. 안테나 제작 방법은 루프 안테나를 고정하기 위하여 사각형 아크릴 판 가장자리를 따라 홈을 파고, 그 홈에 RG58 동축 케이블을 끼워 사각형 루프를 구성하였다. 이 때 동축 케이블의 내부 도체는 연결하지 않고, 동축 케이블의 외부 도체를 안테나로 사용하였다. 이렇게 하면 속이 빈 원통을 도체로 하는 루프 안테나를 간단하게 제작할 수 있으며, 내부 도체에 의한 영향은 있을 수 있지만 주파수가 낮으므로 인덕턴스 특성은 크게 변하지 않는다.

먼저, 근사식 (1)의 정확도를 판정하기 위하여, 안테나를 50×50 cm²의 아크릴 판 위에 제작한 후 Agilent사의 4395A 임피던스 분석기(Impedance Analyzer)를 사용하여 측정한 결과 2.04 μH과 측정되었고, 이는 계산값 1.9 μH와 7% 이하의 오차로 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다. 실제와의 차이는 루프를 소재의 차이, 동축 케이블 내부 도체의 효과, 두께 및 길이의 오차에 의한 것으로 추정된다.

다음으로 13.56 MHz에서 공진시키기 위해 식 (2)에 의해 계산된 가변 캐패시터를 병렬로 연결하였으며, 안테나의 Q값을 조정하기 위한 병렬 저항을 연결하였다. 안테나를 제작한 후 공진 시에 이 안테나는 저항 성분만이 보이므로, 토로이드(toroid) 트랜스포머의 turn비를 조정함으로써 입력 임피던스(현재는 50 Ω)에 정합하였다. 이 때 비평형(unbalanced) 선로와 연결하기 위하여 발룬(balun) 회로가 추가될 수 있으나, 이는 안테나의 입력 임피던스에는 영향을

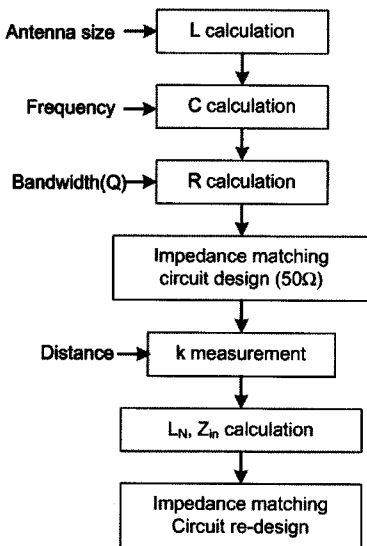


그림 4. 루프 안테나를 이용한 무선 전력 전송 시스템 설계법
 Fig. 4. Design method of wireless power transfer system using loop antennas.

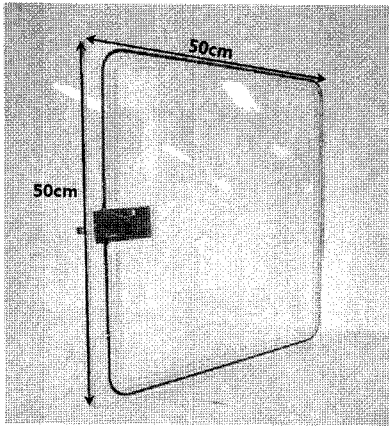


그림 5. 트랜스포머와 발룬을 갖는 사각형 루프 안테나의 사진

Fig. 5. Photograph of rectangular loop antenna using transformer and balun.

주지는 않는다.

안테나를 제작한 후 Agilent사의 8753D 네트워크 분석기(network analyzer)로 측정된 결과가 그림 6에 나타나 있다. 측정 결과, 본 논문에서 사용한 설계 방법이 비록 근사식을 사용할지라도 단일 루프 안테나를 정확하게 설계할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 5에서 반사 손실(S_{11}) 계산치는 다음과 같이 계산되어진다. 먼저, 식 (1)~(3)을 이용하여 계산된 소자들의 ABCD 행렬과 트랜스포머의 ABCD 행렬을 구하여 이를 곱한 최종 ABCD 행렬을 구한다. 이 행렬을 이용하여 식 (9)에 의해 입력 임피던스(Z_{in})를 계산하고, 이를 식 (10)에 적용하여 반사 손실을 계산하였다.

$$Z_{in} = \frac{AZ_L + C}{CZ_L + D} \quad (9)$$

$$S_{11} = 50 \frac{Z_{in} - 50}{Z_{in} + 50} \quad (10)$$

3-2 루프 안테나 쌍을 이용한 무선 전력 전송 시스템 실험 및 결과 고찰

루프 안테나 쌍을 이용한 무선 전력 전송 시스템을 구성하기 위해서는 먼저 두 안테나간의 거리에 따른 결합 계수를 측정하여야 한다. 그림 7은 앞에서 설계된 루프 안테나의 입력 임피던스를 2장의 이

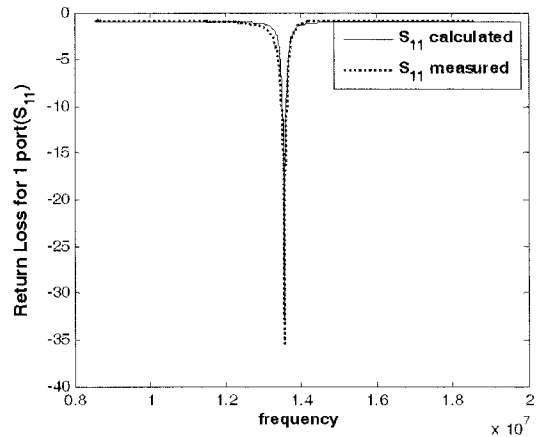


그림 6. 제작한 루프 안테나의 입력 정합 특성(실선: 계산값, 점선: 측정치)

Fig. 6. Input impedance characteristics of fabricated loop antenna(solid line: calculated value, dotted line: measured value).

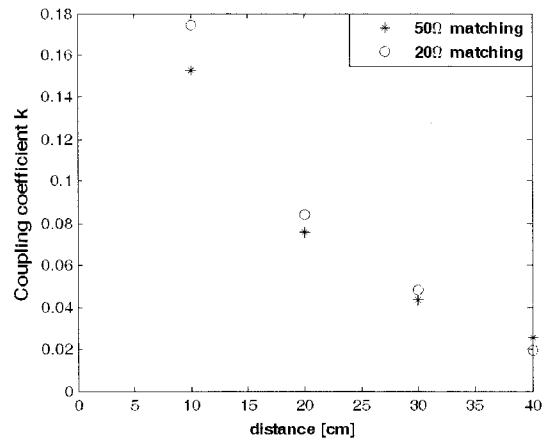


그림 7. 거리에 따른 두 개의 루프 안테나 사이의 결합 계수의 측정치(o: 50 Ω 정합의 경우, *: 20 Ω 정합의 경우)

Fig. 7. Measured value of coupling coefficient between two loop antennas with respect to a distance(o: 50 Ω impedance matching case, *: 20 Ω impedance matching case).

론을 이용하여 각각 20 Ω과 50 Ω으로 정합시킨 상태에서 거리에 따른 결합 계수의 변화를 네트워크 분석기를 이용하여 측정된 결과이다. 거리 측정 결과에서 알 수 있듯이 거리가 가까울수록 두 안테나 사이의 결합 계수는 커지고, 멀어질수록 결합 계수는 작아지는 것을 알 수 있다. 즉, 결합 계수는 거리에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 20 Ω 정합 안테

나와 50 Ω 정합 안테나를 비교해 보면 두 공진기의 결합 계수는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 확인할 수 있다.

그림 7의 결과로부터 결합 계수는 안테나의 초기 입력 임피던스 정합 값에 영향을 받지 않고 두 안테나간의 거리에 의한 영향만을 받음을 알 수 있다. 이는 본 논문의 설계과정의 실용성을 입증한 것으로 결합 계수의 측정만으로 상호 인덕턴스를 복잡한 전자기 시뮬레이션 없이 측정할 수 있으며, 이를 활용해 상호 결합을 고려한 입력 임피던스를 식 (7)을 이용하여 간단하게 계산할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8(a)는 식 (7)을 이용하여 공진 주파수에서 거리에 따른 반사 임피던스의 변화를 고려하여 송신 안테나의 입력 임피던스를 계산한 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 두 개의 루프 안테나가 50 cm 이상 떨어진 경우는 f_{even} 과 f_{odd} 의 차이를 네트워크 분석기로는 측정이 불가능하여 계산이 이루어지지 않았다. 하지만 50 cm 이하에서는 계산치와 측정치가 일치함을 알 수 있다. 또한 두 안테나의 거리가 가까워지면, 식 (8)에서 예측한 바와 같이 상호 인덕턴스가 커짐에 따라 입력 임피던스의 실수 값이 증가함을 알 수 있다. 거리에 따라서 임피던스가 커지는 경향성을 확인하여 40 cm 거리에서 50 Ω 정합이 될 수 있도록 단일 안테나의 임피던스를 결정하였다. 임피던스 정합은 단일 안테나의 경우 50 Ω 임피던스보다 작은 값으로 정합하여야 한다는 것을 근거로 실험적으로 얻을 수 있다.

그림 8(b)는 40 cm 거리 떨어진 루프 안테나 쌍이 있을 때 입력쪽 루프 안테나의 S_{11} 궤적의 주파수에 따른 변화를 Smith 도표를 이용하여 계산치와 함께 나타내었다. 반사 임피던스에 대한 고려 없이 루프 안테나를 50 Ω 임피던스에 정합한 경우에는 반사 임피던스에 따라 Smith 도표의 중심에서 멀어지는 현상이 발생하나, 일반적으로 반사 임피던스를 고려하여 40 cm 거리에서 Smith 도표의 중심에 오도록 20 Ω으로 정합한 경우 임피던스 정합이 이루어짐을 알 수 있다. 그림 8의 결과로부터 안테나를 50 Ω으로 정합시킨 상태에서 무선 전력 전송을 하는 경우, 결합이 강한 근거리에서는 임피던스 부정합이 커짐에 따라 전달 특성이 감소됨을 알 수 있다. 이 경우

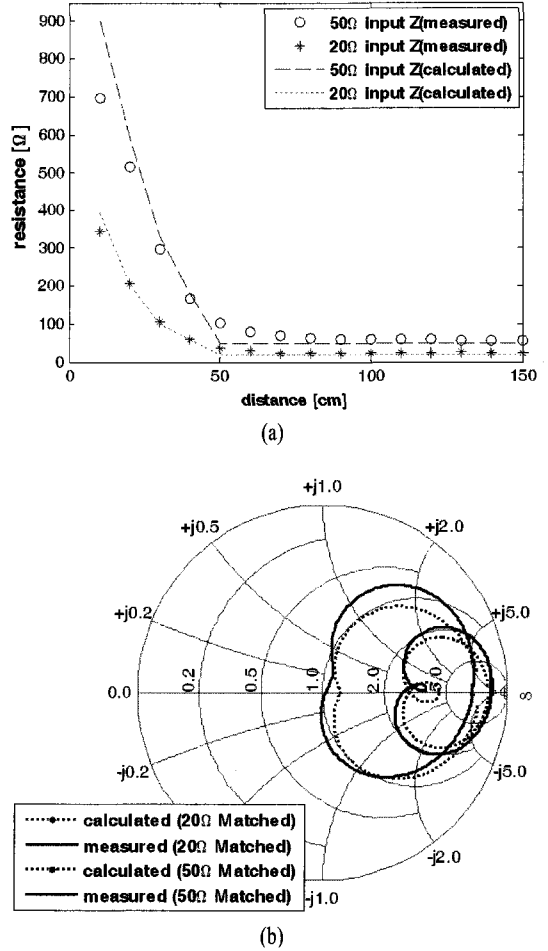


그림 8. (a) 루프 안테나 간의 거리에 따른 공진 주파수에서의 입력 임피던스 변화, (b) 40 cm 거리에서 Smith chart를 이용한 S_{11} 궤적의 변화

Fig. 8. (a) Input impedance variation with respect to distance between two loop antennas at the frequency of resonance: (b) S_{11} locus at 40 cm distance between two loop antennas.

에는 그림 8에서와 같이 반사 임피던스를 고려하여 임피던스 정합을 하면 임피던스 부정합에 따른 효율 저하를 막을 수 있음을 알 수 있다.

3-3 거리에 따른 효율 개선

공진을 하는 두 안테나 사이에는 거리에 따라 입력 임피던스의 변화에 의해 효율이 달라지게 된다. 먼저 효율은 전달 효율만을 나타내면 식 (11)과 같이 정의될 수 있다.

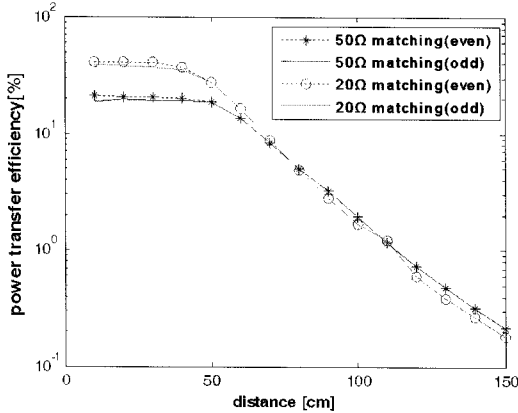


그림 9. 루프 안테나 간의 거리에 따른 공진 주파수에서의 효율의 변화

Fig. 9. Efficiency variation with respect to distance between two loop antennas at the frequency of resonance.

$$\eta = 100 \times \left(10^{\frac{S_{21}}{20}} \right)^2 \quad (11)$$

이제 50 cm 이하에서 효율이 최대가 되도록 반사 임피던스 개념을 포함하여 개별 안테나를 정합시킨 경우와, 안테나 간의 상호 결합에 대한 분석 없이 50 Ω에 정합하여 설계된 경우와의 효율을 비교한 결과가 그림 9에 나타나 있다. 그림에서 효율 계산은 기 모드와 우모드 주파수에서 이루어졌다. 그림에서 알 수 있듯이 근접한 거리에서 반사 임피던스를 포함하여 정합시킨 공진기가 상대적으로 50 Ω에 더욱 정합되어 있기 때문에 반사계수가 작아서 효율이 두 배 정도 높게 나옴을 알 수 있다. 이 결과로부터 무선 전력 전송 시스템을 설계할 때 입력 임피던스 계산 시 반사 임피던스를 고려하여 설계하면 특정 거리에서 효율을 높일 수 있음을 알 수 있으며, 이는 본 연구 결과가 유용함을 나타낸다. 단, 본 논문에서 사용한 전송 효율 측정 방식은 두 안테나가 마주 보고 있는 경우이며, 어긋남 특성에 관해서도 분석할 수 있지만 본 논문은 설계 방식에 국한하고 있으므로 내용에 포함하지는 않았다. 두 안테나가 어긋나 있을 경우는 참고문헌 [13]을 참조하면 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 가전기기 등에 응용할 수 있도록

13.56 MHz에서 동작하는 루프 안테나 쌍을 이용한 무선 전력 전송 시스템의 새로운 설계 방법을 제안하고, 제안한 설계 방법에 따라 임피던스 정합 회로를 설계하여 효율이 개선됨을 보였다. 제안한 설계법은 복잡한 전자기 시뮬레이션 없이 간단한 결합 계수의 측정과 루프 안테나의 등가 회로 모델을 바탕으로 하는 설계식만으로 무선 전력 전송 시스템을 설계할 수 있다. 본 논문에서 제시한 설계법의 유용성을 입증하기 위해 13.56 MHz에서 동작하는 50×50 cm² 크기를 갖는 루프 안테나 쌍을 설계하였고, 거리에 따른 입력 반사 계수, 결합 계수, 효율 및 거리에 따른 임피던스 변화를 측정하였다. 측정 결과, 본 설계법을 이용하면 복잡한 전자기 시뮬레이션 없이 무선 전력 전송 시스템을 정확하게 설계할 수 있음을 확인하였다. 또한 50 cm 이하의 거리에서 본 논문의 설계 방법을 이용하여 임피던스 정합한 시스템이 일반적인 50 Ω 임피던스 정합 회로를 갖도록 설계된 경우보다 근거리에서 효율이 2배 정도 개선되는 것을 확인하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 루프 안테나의 turn 수를 증가시키거나, 페라이트를 이용하여 자기장의 전송 효율을 증가시키는 연구를 추가로 진행하면, 실제 상용화 가능한 무선 전력 전송 시스템이 구현될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, "무선 에너지 전송 기술", ETRI 전자통신동향분석, 23(6), pp. 59-69, 2008년 8월.
- [2] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, Sep. 1984.
- [3] Hideaki Abe, Hiroshi Sakamoto, and Koosuke Harada, "A noncontact charger using a resonant converter with parallel capacitor of the secondary coil", *IEEE Trans. Industrial Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 444-451, Mar. 2000.
- [4] A. Kurs, A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [5] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic,

- "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annals of Physics* 323, pp. 34-48, 2008.
- [6] A. G. P. Boswell, "Loop antennas in the 3~30 MHz band", *8th International Conference on HF Radio Systems and Techniques, IEE Conference Publication 474*, Apr. 2000.
- [7] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, John Wiley, Chichester, 2003.
- [8] J. G. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, ch. 8. 2001.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Texas Instruments Ltd., "HF Antenna Design Notes Technical Application Report", *Literature number: 11-08-26-003, Radio Frequency Identification System*, Sep. 2003.
- [12] Y. Kim, H. Ling, "Investigation of coupled mode behaviour of electrically small meander antennas", *Electronic Letters*, vol. 43, no. 23, Nov. 2007.
- [13] 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, 일본 전기학회 산업응용부문대회, 2008.

김 회 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

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

임재봉



1974년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1976년: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1987년: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
 1975년~1981년: 충남대학교 전자

공학과 조교수
 1988년: 미국 텍사스 주립대학교 전기공학과 조교수
 1990년: 한국통신학회 이사
 1990년~2005년: SKT, 홍창, 삼성전자, Netel, A-telsys, SK-Telesys 기술고문
 1996년: 제21회 산학협동대상 수상
 1981년~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수
 [주 관심분야] GPS 시스템 application, 셀룰라/IMT-200용 광중계기 설계

장병준



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, 무선통신 시스템, RFID/USN, 주파수 간섭 에너지-IT 융합, 바이오-RF 융합