

1[MHz] 대역의 자계 공명을 이용한 무선 전력 전송 장치에 관한 연구

(A Study on the Wireless Power Transfer System using Magnetic Resonance at the 1[MHz] Frequency Band)

박정흠*

(Jeong-Heum Park)

Abstract

In this paper, the wireless power transfer system using the magnetic resonance was designed, analyzed by circuit analysis method and the calculated transfer function was compared with the measured one. The self-resonant coil was made up of the commonly used capacitor which had the lumped capacitance and it enabled the stable magnetic resonance not to be affected by the circumstance. The transmission efficiency of this system was 70[%] at the 15[cm] between the transmission and receiving coil and the measured transfer function was similar to the calculated one, which means the circuit analysis method is valid in this system. When the intermediate coils were added between the transmission and receiving coil, the transmission efficiency was increased, which produced the increase of transfer distance. In the case of the five intermediate coils adding, the 35[%] transmission efficiency was achieved at the 90[cm] distance.

Key Words : Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance, Self Resonator, Intermediate Coil

1. 서 론

1900년대 초 Nikola Tesla 가 무선전력전송의 개념을 제안[1]한 이후 100여년이 지났다. 최근 들어, 모바일기기, 디지털가전기, 전기자동차, 유비쿼터스센서 응용, 초소형 의료센서, 로봇응용 등의 기술이 실용화

됨에 따라 이들 기기에 효율적으로 전력을 공급하기 위해 전력전송의 무선화가 강하게 요구되고 있다.

기존의 무선전력전송에는 전파, 레이저, 초지향성 초음파가 사용되었고, 이중 전파를 사용하는 방법으로 전자기 유도 방식(Magnetic Induction), 자계 공명 방식(Magnetic resonance), 전계 공명 방식, 마이크로파 방식 등이 사용되었다. 이 중 전자기 유도 방식이 효율 80[%]에 이르러 실용화되고 있으나[2], 코일크기의 30[%]로 전송거리가 제한되고 방향성이 있는 문제가 있다. 마이크로파 방식은 원거리까지 전송 시키는 데는 장점이 있으나, 효율이 낮은 문제가 있다[3].

* 주저자 : 김포대학교 IT학부 부교수
Tel : 031-999-4654, Fax : 031-999-4775
E-mail : jhpark@kimpo.ac.kr
접수일자 : 2011년 11월 8일
1차심사 : 2011년 11월 10일
심사완료 : 2011년 12월 21일

2007년 MIT의 Marin Soljačić 교수 팀이 자기 공진기(Self Resonator)를 이용하여 2[m]거리에서 40[%] 전달효율을 가지는 자기 공명 방식을 제안한 이후[4], 이 방식에 대한 많은 연구가 있어왔다.

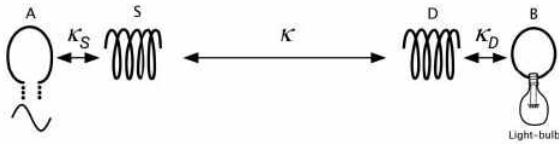


그림 1. MIT가 제안한 자기 공명을 이용한 무선전력전송 장치[4]
 Fig. 1. Wireless power transfer system using magnetic resonance proposed by MIT[4]

그림 1에 제안된 자기 공명 방식의 개요를 나타내었다. 소스코일로 공급된 시변전류는 유도결합에 의해 송신코일(s)에 유도전류를 생성하고 이 코일이 근방의 같은 구조의 코일과 자기 공진을 일으켜 수신코일(d)에 전력을 전달하게 된다. 이 방식은 기존의 전자기 유도 방식에 비해 전송거리가 길며, 전력전달효율이 우수하고, 전자파 안전성이 높다. 또한 방사신호 및 방사저항이 작으며, 비자성체에 대해 높은 투과력을 가지고, 방향성이 없는 등의 장점이 있다[5].

무선전력전송 실용화 단계에서의 목표 전력범위는 100~1,000[W]의 고전력이므로, 전자파인체흡수율(SAR : Specific Absorption Rate)을 고려해야 한다. 이와 관련하여 IEEE 혹은 ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)의 국제기준에 따르면, 10[MHz]~10[GHz] 대역에서의 전자파 세기 규제기준이 가장 엄격하다. 이는 이 주파수 대역에서 SAR이 상대적으로 높기 때문이다. 그러나 자기공명방식을 이용한 무선전력전송에 대한 많은 연구들이 10[MHz]대역 근처에 집중된 상황이다. 이에 본 연구에서는 전자파 세기의 규제가 작은 1[MHz]를 중심주파수로 하는 자기 공명 방식의 무선 전력전송장치를 구현하였다.

또한 이러한 자기 공명을 이용한 무선전력전송은 물리적, 전자기적 해석 위주로 연구가 진행되었고, 최근 들어 회로적 관점에서의 해석이 일부 진행되었다

[6-7]. 본 연구에서는 구현된 자기 공명 무선전력전송 장치를 회로적으로 해석하고, 이를 확장하여 송신효율 및 거리를 늘릴 수 있는 방안에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험 방법

그림 2에 자기공명을 이용한 무선전력전송 장치의 구성을 나타냈다. 신호발생기로부터 1[MHz]의 정현파를 소스코일로 입력 받아 무선전송을 위한 송신코일로 유도성 결합을 통해 전달하였다. 송신코일로 전달된 전력은 같은 형상의 수신코일로 자기 공진을 통해 전달되며 다시 유도성 결합에 의해 부하코일로 전달된다.

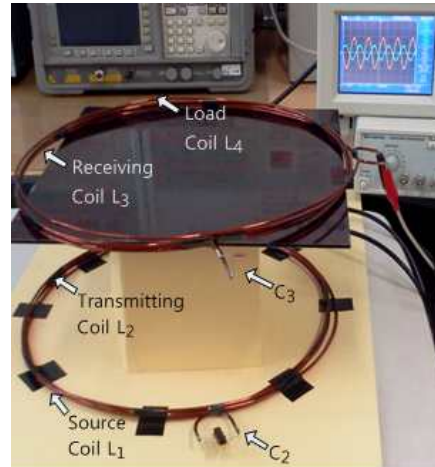


그림 2. 자기 공명을 이용한 무선전력전송 장치의 구현
 Fig. 2. Photograph of wireless power transfer system using magnetic resonance

각 코일은 직경 3[mm]인 에나멜선을 사용하여, 소스 및 부하코일은 1[회], 송신 및 수신코일은 3[회]씩 직경 300[mm]로 감아서 제작하였다. 이전에 보고된 송수신코일은 같은 형상의 자기 공진(self-resonant) 코일을 따라 분포정수적으로 형성된 인덕턴스 성분과 캐패시턴스 성분에 의해 공진주파수가 결정되었다. 본 논문에서는 송신 및 수신코일의 양 끝단을 집중소자인 상용의 캐패시터(C₂, C₃)로 종단하였는데, 이는 높은 Q값의 결합을 구현하기 위함이고, 또한 회로적

해석을 용이하게 한다. 특히 C_2 는 정확한 공진을 구현하기 위해 미세조정이 가능하도록 가변구조로 제작하였다.

그림 3은 회로적 해석을 위해 자기공명을 이용한 무선 전력 전송 장치를 회로 요소로 나타내었다.

네 개의 폐회로에 대해 키르히호프 전압법칙을 적용하여 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$V_s = (R_s + R_1) i_1 + j\omega A_1 \quad (1)$$

$$0 = R_2 i_2 + \frac{i_2}{j\omega C_2} + j\omega A_2 \quad (2)$$

$$0 = R_3 i_3 + \frac{i_3}{j\omega C_3} + j\omega A_3 \quad (3)$$

$$0 = (R_4 + R_L) i_4 + j\omega A_4 \quad (4)$$

여기서 V_s 는 전원전압, $i_1 \sim i_4$, $A_1 \sim A_4$ 는 각 코일에서의 전류와 자속쇄교수이며 각 값은 모두 복소수 크기를 나타낸다. $R_1 \sim R_4$ 은 각 코일의 저항성분, R_s , R_L 은 전원 및 부하저항값이고, C_2 , C_3 는 캐패시턴스, ω 는 공진각주파수를 나타낸다.

각 값들은 항목별로 다음과 같이 구하였다.

① 전원 전압 V_s : $V_{peak}=10[V]$ 인 정현파 교류전압

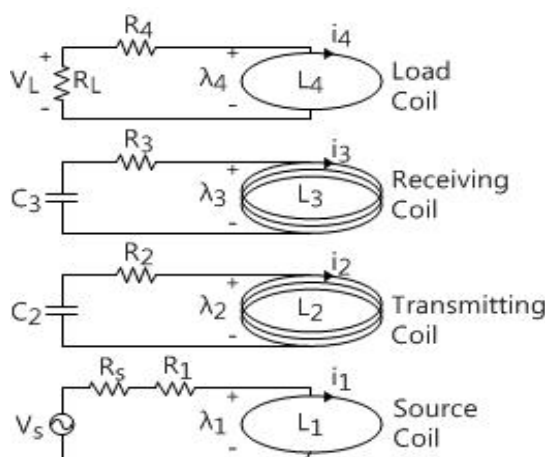


그림 3. 회로적 해석을 위한 자기 공명 무선 전력 전송 장치의 개념도

Fig. 3. A schematic drawing of the wireless power transfer system using magnetic resonance for circuit analysis

② 코일의 저항값 R_n :

$$\text{코일만의 저항 } R_{nL} = \frac{2\pi a N}{\sigma 2\pi r \delta} = \frac{aN}{\sigma r \delta} \quad (5)$$

a : 각 코일의 반경(=150[mm])

N : 코일의 감은 회수

$$(N_1 = 1, N_2 = 3, N_3 = 3, N_4 = 1)$$

σ : 구리의 전도도($\sigma = 5.8 \times 10^7$ [S/m])

r : 코일을 구성하는 도선의 반경(=1.5[mm])

$$\delta : \text{표피두께 } \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (6)$$

$f = 1$ [MHz](전원 주파수)

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$$

R_c : 코일과 회로연결부의 접촉저항(=0.5[Ω])

코일에 의한 저항값은 $R_n = R_{nL} + R_c$ 이므로, 각 코일에 의한 저항값들은 다음과 같다.

$$R_1 = R_4 \approx 0.52 [\Omega], R_2 = R_3 \approx 0.58 [\Omega]$$

③ 전원 저항 R_s :

신호발생기의 출력임피던스 $R_s = 50[\Omega]$

④ 부하 저항 R_L :

1/4[W]급 탄소피막저항기의 저항값 $R_L = 100[\Omega]$

⑤ 자기 인덕턴스 L_2, L_3 :

코일의 자기 인덕턴스값을 결정하기 위해 최대전력 전달조건을 이용하였다. 코일의 저항이 근사적으로 0일 때, 최대전력이 전달되기 위해서는 코일의 리액턴스 X_L 이 전원 저항 R_s 와 같아야 하므로, 코일 양단 간 전압 V_L 은 인가된 전원 전압 V_s 의 $1/\sqrt{2}$ 배가 된다. 코일을 직접 신호발생기에 연결하고 인가신호의 주파수를 가변시켰을 때, 코일 양단간의 전압 V_L 이 $V_s/\sqrt{2}$ 가 되는 주파수를 찾아 $L = R_s/2\pi f$ 로 결정할 수 있다. 이와 같이 실험적으로 구한 L_2, L_3 값은 6.85[μH]였다.

⑥ 코일 캐패시턴스 C_2, C_3 :

각 코일을 LC공진기로 해석하였고, ⑤에서 인덕턴스 L값을 구하였으므로 아래 식으로 각 코일에 부가할 캐패시턴스를 구할 수 있다.

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}} \quad (7)$$

상기 식에 의해 C_2, C_3 는 3.4[nF]로 계산되었고, 이

를 구현하기 위해 중심값이 3.4[nF] 가변 캐패시터를 제작하여, 부하에서의 전압이 최대가 되도록 미세 조정할 수 있는 구조로 만들었다.

시스템의 구성에서 네 개의 코일 각각은 다른 세 개의 코일과 유도성 결합을 이루고 있으므로, 각 코일의 자속쇄교수는 아래의 행렬로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{12} & L_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{13} & M_{23} & L_{33} & M_{34} \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

L_{22}, L_{33} 은 앞서 구한 코일 2와 3의 자기 인덕턴스 L_2, L_3 이고, 코일 1과 4의 자기 인덕턴스 L_{11}, L_{44} 를 L_1, L_4 라 하면, $L_1/L_2 = N_1^2/N_2^2, L_4/L_3 = N_4^2/N_3^2$ 으로부터 값을 구할 수 있다.

$$L_1=L_4=0.76[\mu\text{H}]$$

M_{ij} 는 각 코일 간의 상호인덕턴스로 다음의 식으로 구해진다.

$$M_{ij} = k_{ij}\sqrt{L_i L_j} \quad (9)$$

각 코일 간의 결합계수는 한 코일과 다른 코일 간의 자속이 결합하는 정도를 나타내며, 전달함수 $(V_L/V_S)(\omega)$ 가 실제 측정치와 유사하도록 값을 조정하였다. 그 결과, 아래와 같이 코일간의 결합계수를 결정하였다.

$$k_{12}=0.8, k_{13}=0.09, k_{14}=0.1$$

$$k_{23}=0.095, k_{24}=0.09, k_{34}=0.5$$

3. 해석 및 측정 결과

상기한 식들로 구성되는 연립방정식의 해로부터 $i_1 \sim i_4$ 를 구하면, $V_L = -R_L i_4$ 로부터 부하전압의 복소수 크기를 구할 수 있다. 최종적으로는 각주파수에 대한 전달함수 $(V_L/V_S)(\omega)$ 를 구할 수 있고, 그 결과를 실제 측정된 값과 함께 그림 4에 나타냈다.

측정값은 송신코일과 수신코일 사이의 거리를 15[cm]로 하고, 부하코일에 있는 100[Ω] 저항 양단의 전압 피크값을 오실로스코프로 측정하여 소스전압 피

크값과의 비로 계산하여 산출하였다. L과 C값에 의해 결정된 중심주파수 1[MHz] 부근에서 최대전력이 전송됨을 알 수 있다. 결합계수의 값에 따라서 전달함수의 양태가 변화하는데, k_{23} 값이 커지면 대역폭도 커지며, 손실은 증가한다. k_{12}, k_{34} 값이 커지면, 공진 대역 내의 손실의 감소하며, k_{13} 과 k_{24} 값이 커지면, 대역폭이 커지는 경향을 나타내었다.

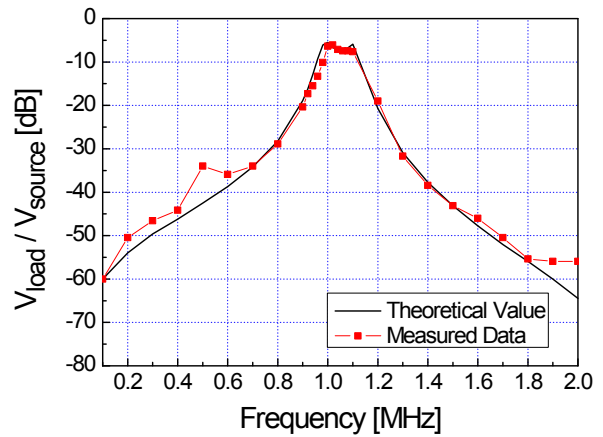


그림 4. 소스코일과 부하코일에서의 전압비에 대한 계산값과 측정치 비교

Fig. 4. A comparison of theoretical and measured values about the rate of voltage at the source and load coil

자기 공진기인 중계 코일(intermediate coil)을 추가하면, 전력전송거리를 늘일 수 있다. 실제 구현된 장치와 개념도를 그림 5에 나타냈다.

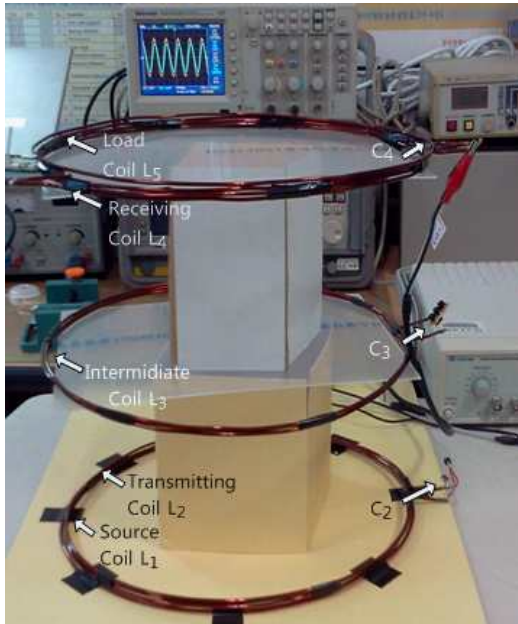
이 경우 앞의 식 (1)~(4)에 회로방정식이 하나가 더 추가가 되고, 각 코일 및 자속쇄교수는 아래와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ M_{12} & L_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ M_{13} & M_{23} & L_{33} & M_{34} & M_{35} \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_{44} & M_{45} \\ M_{15} & M_{25} & M_{35} & M_{45} & M_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

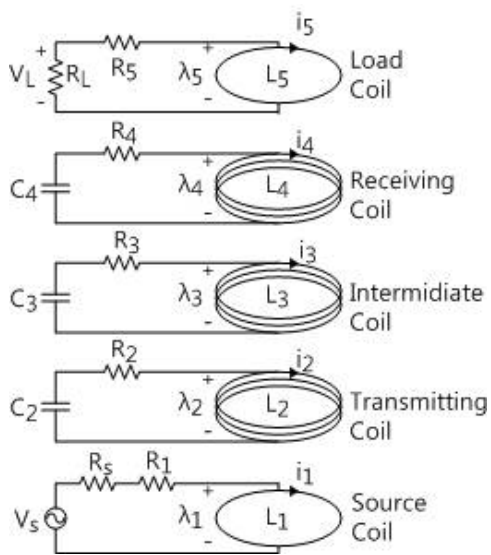
식 (10)과 회로방정식을 연립하여 풀면 앞서와 같이 전달함수 $(V_L/V_S)(\omega)$ 를 구할 수 있다. 이 때 사용되는 코일 간 결합계수는 측정치와 유사하도록 반복 계산

을 통해 조정하였고, 그 결과를 아래에 나타내었다.

$$k_{12}=0.1, k_{13}=0.01, k_{14}=0.005, k_{15}=0.01, k_{23}=0.09, k_{24}=0.02, k_{25}=0.02, k_{34}=0.095, k_{35}=0.01, k_{45}=0.1$$



(a) Photograph



(b) Schematic drawing

그림 5. 중계코일이 추가된 자계 공명 무선 전력 전송 장치
Fig. 5. The wireless power transfer system using magnetic resonance added by intermediate coil

또한 수신코일에서의 저항값 R_4 를 $8[\Omega]$ 으로 가정하였는데, 이는 코일과 단자 사이의 접촉저항을 근사화시킨 값이다.

이에 따른 계산값과 실제 측정값을 그림 6에 나타내었다.

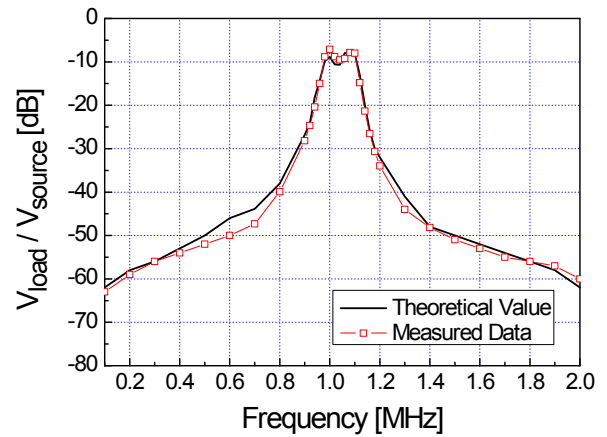


그림 6. 중계코일 하나가 추가된 경우의 전달 함수
Fig. 6. The transfer function of the case with adding a intermediate coil

중계코일이 삽입된 경우는 송수신코일 간의 거리가 $30[\text{cm}]$ 에서 최대전달이 일어났다. 이는 앞선 실험에서 코일 간 거리가 $15[\text{cm}]$ 일 때 최대전달이 발생하였는데, 중계코일이 추가됨에 따라 정확히 두 배의 거리에서 최대전달이 발생하게 된 것이다. 손실은 $15[\text{cm}]$ 거리에서 $-6.6[\text{dB}]$, 중계코일이 삽입된 경우 $30[\text{cm}]$ 거리에서 $-7.1[\text{dB}]$ 로 약간 증가하였다. 그림 4, 6에서 처럼 자계 공명 현상을 회로적으로 모델링하여 해석한 결과, 코일 간 결합계수를 적정히 결정하면, 실제의 전기적 특성과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

중계코일을 여러 개 사용함에 따라 전력전송거리를 늘일 수 있다. 그림 7에 다수의 중계코일이 삽입된 무선 전력 전송 장치를 나타내었다.

중계코일의 개수와 전송거리(소스코일과 부하코일 사이의 거리)에 따른 전달 효율을 측정하여 그림 8에 나타내었다. 전달효율은 입력단자를 $100[\Omega]$ 으로 중단했을 때의 전압과 출력단자를 $100[\Omega]$ 으로 중단했을 때의 전압을 비교하여 다음과 같이 정의하였다.

1[MHz] 대역의 자기 공명을 이용한 무선 전력 전송 장치에 관한 연구

전달효율 (Transmission Efficiency) (11)

$$= \frac{V_{\text{출력측}}}{V_{\text{입력측}}} \times 100[\%]$$



그림 7. 다수의 중계 코일이 삽입된 무선 전력 전송 장치
Fig. 7. The wireless power transfer system inserted with several intermediate coils

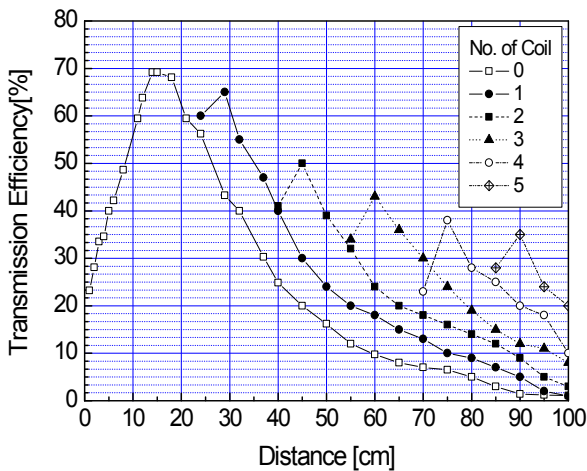


그림 8. 중계코일 개수 및 송수신코일 간의 거리에 따른 전달 효율 변화
Fig. 8. The variation of transmission efficiency according to the number of intermediate coil and the distance between the transmission and receiving coil

중계코일의 개수를 늘임에 따라, 전달효율이 증가하였다. 예를 들어 송수신 코일간의 거리가 60[cm]일 때, 중계코일이 없는 경우 전달효율이 10[%]정도이지만, 중계코일이 송수신코일로부터 15[cm] 거리에 삽입된 경우는 18[%]로 증가하며, 다음 15[cm]에 또 추가되면 25[%]로, 다음 15[cm]에 다시 추가되면 43[%]로 증가됨을 알 수 있다. 이에 중계 코일을 늘임에 따라 전송 거리를 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 중계코일의 개수를 늘려감에 따라 최소전달손실은 점차 증가하는 경향을 보이고 있지만, 거리 증가에 따른 전달효율의 감소를 효과적으로 보상하고 있음을 알 수 있다.

중계코일을 5개까지 삽입하여 실험하였고, 이 때 송수신코일간 거리 90[cm]에서 35[%]의 전달효율을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 인체에 미치는 영향이 상대적으로 적은 1[MHz] 주파수 대역에서의 자기 공명 무선 전력 전송 장치를 구현하였다. 또한 이를 회로적으로 해석하여 계산 및 측정된 전달함수를 비교하였다. 자기 공진 코일 구성 시, 이전에는 코일을 따라 분포정수적으로 구성된 커패시터스로 공진주파수를 결정하였으나, 본 논문에서는 집중소자인 상용의 커패시터를 사용하였다. 이에 따라 주변의 도체나 유전체의 접근에 무관한 안정적인 공진주파수를 가지는 자기 공진을 구현할 수 있었다. 실험 결과 15[cm]의 거리에서 70[%]의 전달효율을 가졌으며, 회로적 해석을 통한 계산값과도 유사한 전달함수를 나타내었으므로, 이러한 해석이 유효함을 알 수 있었다. 송수신코일 사이에 중계코일을 추가한 경우 전달효율을 높여서 전송거리를 늘일 수 있었고, 앞선 회로적 해석과 같은 방법으로 시뮬레이션을 행하였을 때 측정값과 유사한 결과를 얻을 수 있었으므로, 본 논문에서의 해석 방법이 중계코일이 삽입된 시스템에도 유효함을 알 수 있었다. 5개의 중계코일이 추가된 경우 송수신 코일 간 거리가 90[cm]일 때, 35[%]의 전달효율을 얻을 수 있었다.

향후 실용화의 관점에서 모바일 기기의 충전용으로 사용하기 위해서는 직경이 작은 코일의 전달효율 증

가 방안 및 평판형 코일 구현에 대한 연구가 있어야 할 것으로 보인다. 또한 공급전원의 교류출력을 높였을 때 공진코일 주변의 전계 및 자계의 세기를 측정하고, 구조적 혹은 회로적인 개선을 통해 SAR기준을 충족하는 방안을 검토해야 할 것이다.

이 논문은 2011학년도 김포대학의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Nikola Tesla, Apparatus for transmitting electrical energy, US patent 1119732, 1914.
- [2] 대한전기학회 기획시리즈. 무선전력전송기술의 동향 및 현황, 대한전기학회지, 59(1), 2010.1.
- [3] Jeong-Heum Park, Design and fabrication of rectenna for microwave wireless power transmission, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 20, No.6 pp. 43-48, 2006.
- [4] Andre Kurs et. al., Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, Science, Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [5] 박영진, 자계 공명 무선전력전송 기술 연구, 전력전자학회지, 제15권, 제6호, 2010.
- [6] K. O'Brien, Inductively coupled radio frequency power transmission system for wireless systems and devices, Aachen, Germany, 2007. ISBN 978-3-83225775-0.
- [7] 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 Trans. on Power Electronics, Vol.24, No.7, 2009.

◇ 저자소개 ◇



박정흠 (朴正欽)

1967년 9월 23일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~1994년 삼성전기 종합연구소 연구원. 1998~2000년 삼성전자 반도체 연구소 선임연구원. 2003~2004년 영국 Birmingham Univ. EDT Center 방문연구원. 2000년~현재 김포대학교 IT학부 부교수.