

# 표준화된 인체모델을 이용한 공진형 무선전력전송 시스템의 효율 변화 및 인체 안전성 분석

(Efficiency and EMF Safety Analysis of Wireless Power Transfer System Using Standard Human Model)

신한수\* · 변진규\*\*

(Hansu Shin · Jin-Kyu Byun)

## Abstract

In this paper, resonant wireless power transfer systems are designed with double loop resonant coils for the resonant frequency of 150kHz. The transfer efficiency characteristics is analyzed according to the coil size, and the distance and misalignment between the coils. Then the change in efficiency is investigated when a human model is located between the resonant coils using the homogeneous human phantom of IEC-62311 standard. Also, in order to assess the safety of the wireless power transfer system, the induced current density inside the human model is calculated when it is exposed to the magnetic field of a plane wave and resonant coil. Then, the results are compared with the exposure limits in the EMF (electromagnetic field) safety guidelines.

Key Words : Wireless Power Transfer, Efficiency, Human Body Safety

## 1. 서 론

최근 무선전력전송(Wireless Power Transfer,

- 
- \* 주저자 : 송실대학교 전기공학부 석사과정
  - \*\* 교신저자 : 송실대학교 전기공학부 부교수
  - \* Main author : Master's course, Department of Electrical Engineering, Soongsil University
  - \*\* Corresponding author : Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Soongsil University  
Tel : 02-820-0644, Fax : 02-817-7961  
E-mail : jkbyun@ssu.ac.kr
- 접수일자 : 2013년 9월 27일  
1차심사 : 2013년 10월 2일  
심사완료 : 2013년 10월 22일

WPT) 기술의 발달과 함께 다양한 분야에 이를 적용하기 위한 연구가 계속되고 있다. 특히 휴대전화 등 휴대용기기에 대한 무선충전과 전기자동차의 배터리 무선충전과 관련된 시장이 유망할 것으로 전망된다 [1]. 무선전력전송 방식에는 자기유도방식, 자기공진방식, 마이크로파 방사 방식 등이 있으며, 현재 자기유도 방식의 경우 많은 분야에 적용되어 상용화가 진행되고 있다[2].

한편 2007년 MIT의 Soljacic 교수가 자기공진방식에 대한 논문을 발표하며 자기공진방식을 이용한 무선전력전송기술에 대한 관심도 높아지고 있다. 이 방식은 자기유도방식보다 더 긴 전력전송거리를 가지며, 송수전부 사이에 장애물이 존재해도 전력전송이 가능

한 장점 때문에 많은 관심을 받고 있다[3-4]. 그러나 송수전 코일의 상대적 위치와 거리에 따른 전력전송 효율의 변화가 크고 인체영향에 대한 정확한 평가가 어려운 단점 때문에 큰 잠재력에 비해 그 상용화 현황은 다소 미진한 실정이다. 그러나 이러한 문제점에도 불구하고 인체가 송수전 코일 사이에 위치할 경우 인체 내부에 유도되는 유도전류 크기의 분석이나 전송효율의 변화에 관한 연구는 활발히 이루지지 않고 있다.

본 논문에서는 150kHz 공진주파수 대역에서 다양한 크기의 코일 직경에 대해 이중 루프 형태의 공진형 무선전력전송 시스템을 설계하고 코일 직경, 전력전송 거리 및 송수전 코일의 어긋남에 따른 효율 변화를 분석한다. 또한 IEC-62311 표준을 따르는 균질 인체모델이 설계한 무선전력전송 시스템의 자기장에 노출되었을 때 전송효율의 변화 및 인체모델 내부의 유도전류를 계산하고 이를 인체보호기준과 비교한 결과를 분석한다.

## 2. 공진형 무선전력전송 시스템과 인체모델

### 2.1 공진형 무선전력전송 시스템 설계

자기공진 방식의 무선전력전송은 같은 공진주파수를 갖는 자기공진기 사이에 형성되는 강한 자기 결합 현상을 이용한다. 이 방식을 이용하면 자기유도 방식의 단점인 짧은 전송거리를 개선할 수 있다. 기존의 공진형 무선전력전송 시스템의 코일 모델링에 대한 연구는 이중 루프 형태의 코일[5], 헬리컬 구조의 코일[6], 스파이럴 구조의 코일[7] 그리고 메타물질을 이용한 방법[8] 등이 진행되고 있으며, 대부분 전력전송 효율 개선에 초점이 맞춰져 있다. 본 논문에서는 이중 루프 형태의 무선전력전송 시스템을 설계하였다.

설계한 공진형 무선전력전송 시스템은 고주파 통신대역과의 간섭을 피하고자 공진주파수로 150kHz를 이용하고 있으며, 그림 1과 같은 구조로 되어있다.

이중 루프 형태의 공진형 무선전력전송 시스템의 코일은 급전 코일과 수신 코일 그리고 1쌍의 공진 코일 이렇게 총 4개의 코일로 구성된다. 공진 코일 루프 내에 공진을 위한 커패시터가 직렬로 접속되어 삽입된 형태이며, 공진 코일의 직경과 와이어 직경이 결정되면 식 (1)을 이용하여 코일의 인덕턴스를 구할 수 있다[9].

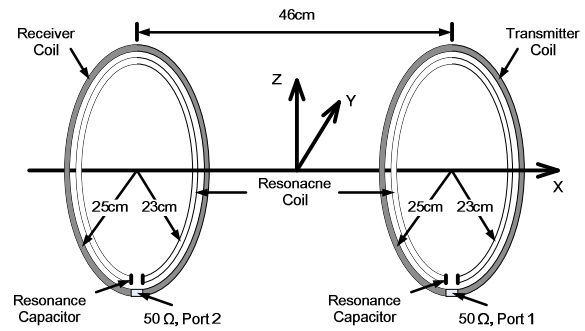


그림 1. 150kHz 공진형 무선전력전송 시스템의 설계도 (D=46cm)

Fig. 1. Design of 150kHz wireless power transfer system (D=46cm)

$$L = 0.01595D(2.303\log_{10} \frac{8D}{w} - 2 + \mu_r \delta) \quad (1)$$

여기서  $L$ 은 공진 코일의 인덕턴스,  $D$ 는 공진 코일의 루프 직경,  $w$ 는 코일 와이어의 직경,  $\mu_r$ 은 공진 코일의 재료인 구리의 비투자율이고,  $\delta$ 는 와이어 지름과 주파수에 따른 표피효과 보정 계수(skin effect correction factor)이다. 그리고 식 (2)를 이용하여 공진 커패시턴스를 계산한다[5].

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

여기서  $C$ 는 공진 커패시턴스,  $f$ 는 공진 주파수이다. 위와 같은 과정을 통하여 공진 코일의 직경(D)이 각각 46cm, 92cm인 두 종류의 150kHz 공진형 무선전력전송 시스템을 설계하였으며, 송수전 코일의 초기간격은 코일의 직경과 같게 하였다. 설계한 무선전력전송 시스템의 사양을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 150kHz 공진형 무선전력전송 시스템의 설계 요소

Table 1. Design elements of 150kHz resonant wireless power transfer system

설계 요소	D=46cm WPT시스템	D=92cm WPT시스템
공진 주파수	150kHz	150kHz
Port 임피던스	50Ω	50Ω
재료	구리	구리
와이어 지름	8mm	8mm
표피효과 보정계수	0.0256	0.0256
공진 코일 지름	46cm	92cm
급전/수전 코일 지름	50cm	96cm
인덕턴스	1.20μH	2.80μH
커패시턴스	0.938μF	0.402μF
코일 초기간격	46cm	92cm

### 2.2 균질 모의 인체모형

송수전 코일 사이에 인체가 존재할 경우 공진형 무선전력전송 시스템의 특성 변화와 인체 내부에 유도되는 유도전류를 확인하기 위해 인체모형을 설계하였다. 일반적으로 인체모형은 기하학적인 형태를 연결하여 인체를 단순화시켜 표현한 모델과 자기공명영상(MRI)을 이용하여 복잡한 비균질 해부학적 조직을 포함하는 인체모형 등이 존재한다. 본 논문에서는 IEC-62311 표준에서 제시하고 있는 균질 모의 인체모형을 사용하였다. 이 인체모형은 길이가 약 150cm이며, 손과 발이 없이 머리와 몸통으로만 이루어져 있다. 자세한 설계 치수는 IEC-62311 표준을 따른다[10].

실제 인체 조직의 전기적 상수는 주파수에 따라 변화한다. 본 논문에서는 균질 모의 인체에 근육의 전기적 상수값을 사용하였으며 Gabriel. et al의 연구를 참고하여 150kHz에서 근육의 도전율로 0.37265S/m, 비유전율로 7109.1을 적용하였다[11]. 위와 같이 구성한 균질 인체모형을 그림 2와 같이 무선전력전송 시스템 송수전 코일 사이에 위치시켜 전송효율과 인체모형에 유도되는 유도전류를 계산하였다.

### 3. 공진형 무선전력전송 시스템 효율 분석

#### 3.1 코일의 크기와 간격에 따른 효율 변화

본 절에서는 앞 장에서 설계한 두 개의 무선전력전송 시스템에 대하여 공진 코일의 중심축이 일치하는 경우 코일의 크기(D) 및 송수전 코일 사이의 거리(d)의 변화에 따른 효율의 변화를 분석하였다. 전자기 시뮬레이션은 ANSYS사의 HFSS를 이용하였다. 그림 3에 코일 직경 D=46cm 시스템과 D=92cm 시스템의 코일간 거리(d)에 따른 S<sub>21</sub> 파라미터 분포를 각각 나타내었다. S<sub>21</sub> 파라미터는 출력전력 P<sub>o</sub>에 대한 입력전력 P<sub>i</sub>의 비를 이용하여 식 (3)으로 구할 수 있다.

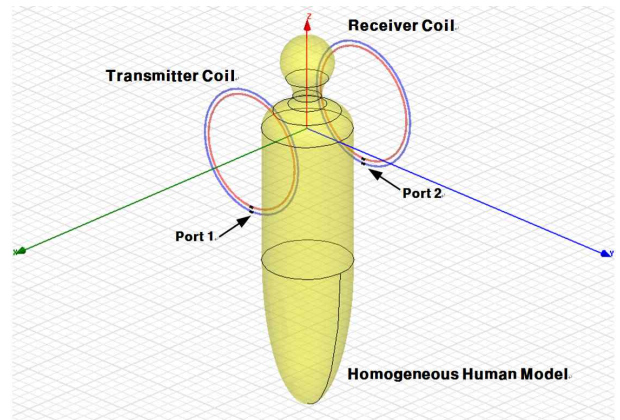


그림 2. 공진형 무선전력전송 시스템의 송수전 코일 사이에 위치한 균질 인체모형

Fig. 2. Homogeneous human model placed between receiver and transmitter coils

$$S_{21} [dB] = 10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i} \quad (3)$$

0dB인 경우 100% 전송효율을 의미하며 S<sub>21</sub>이 -10dB인 경우 전송효율은 10%이다. 두 시스템 모두 코일 사이의 거리가 가까울수록 높은 효율을 보였으며, 코일 사이의 거리가 같을 때는 D=92cm 시스템이 더 높은 전력전송 효율을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 10cm 거리에서 D=46cm 시스템은 최대

50.676%, D=92cm 시스템은 최대 82.014%의 효율을 보였다.

그림 3에서 그래프의 포인트 옆에 표시된 숫자는 시스템이 최대 효율을 나타낼 때의 공진 주파수를 뜻하며 코일 사이의 거리(d)가 짧아짐에 따라 최대 효율이 나타나는 주파수가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 코일 사이의 거리가 짧을 경우 코일 사이의 상호인덕턴스와 코일 사이의 커패시턴스가 증가하여 공진주파수에 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 이러한 영향은 전력전송 거리(d)가 공진 코일의 직경(D)보다 짧아질 경우 크게 나타나며 코일 사이의 거리가 직경보다 클 경우에는 공진주파수가 2장에서 계산한 150kHz와 거의 일치한다. 즉 D=46cm 시스템의 경우 거리(d)가 약 50cm 이상, D=92cm 시스템의 경우 거리(d)가 약 80cm 이상에서부터 공진주파수가 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다.

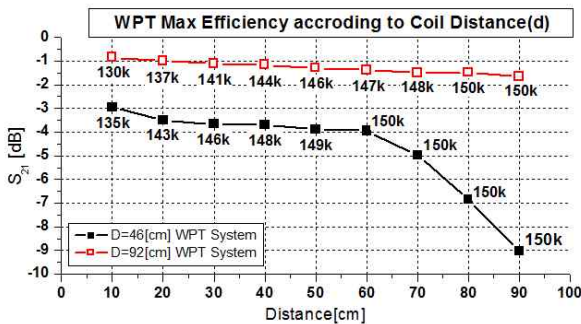


그림 3. 코일 사이 거리(d)에 따른 최대효율의 변화  
Fig. 3. Maximum efficiency according to distance between coils(d)

그림 4에는 D=46cm 시스템과 D=92cm 시스템에서 코일 간격(d) 및 주파수에 대한  $S_{21}$  파라미터의 분포를 나타내었다. 코일 간격이 가까워질수록  $S_{21}$ 의 최대값이 처음에 설계한 공진주파수인 150kHz에서 크게 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과에서 전력 전송거리가 변화할 수 있는 공진형 무선 전력전송 시스템의 경우 효율을 모니터링 하고 그에 맞추어 송전단의 스위칭 주파수를 조정하여 최대 효율을 구현할 수 있는 지능형 시스템이 필요한 것을 알 수 있다.

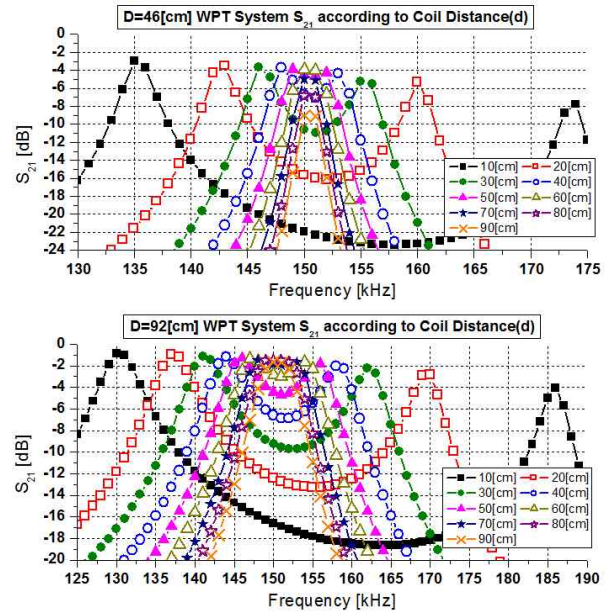


그림 4. 다양한 코일 사이의 거리(d)에 대한  $S_{21}$  파라미터의 분포

Fig. 4.  $S_{21}$  parameter distribution for various distances between coils(d)

### 3.2 송수전 코일의 중심축이 어긋난 경우의 효율 변화

무선전력전송 시스템의 전력전송에 최상의 조건은 앞 절에서 살펴본 바와 같이 송수전 코일의 중심축이 일치하는 경우이다. 그러나 실제 적용에서는 충전기기의 위치가 변화함에 따라 코일의 중심축이 어긋날 수 있다. 자기유도방식의 경우 근거리에서 코일의 중심축이 어긋나는 것을 최소화하고 전력전송 효율을 높이기 위해 여러 개의 코일로 송전코일 배열을 구성하고 수신 코일의 위치를 감지하여 최적위치의 송전 코일을 동작시키는 방법, 모터를 이용하여 송전 코일을 이동시키는 방법, 또는 자석을 이용하여 수신 코일의 위치를 바로잡는 방법 등을 이용하고 있다. 하지만 공진형 무선전력전송 시스템의 경우 자기유도방식에 비해 코일의 중심축이 다소 어긋나있어도 전력전송이 가능하다.

본 절에서는 각각의 무선전력전송 시스템의 공진 코일의 반지름을 R이라고 할 때, 송수전 코일의 중심축이 일치하는 경우( $m=0cm$ )와 두 코일의 중심축이 R만



크 어긋난 경우( $m=R\text{cm}$ )에 대하여 효율을 비교하였다. 이 때 중심축이 일치할 경우 코일 사이의 거리( $d$ )는 46cm로 고정하였다. 그림 5에  $D=46\text{cm}$  시스템과  $D=92\text{cm}$  시스템에서 중심축이 일치하는 경우와 R만큼 어긋난 경우  $S_{21}$  파라미터의 분포를 각각 나타내었다. 코일이 중심축에서 어긋나게 되면 최대효율은 감소하고, 중심축 사이의 거리가 멀어지면서 상호인덕턴스와 코일 사이 커패시턴스가 감소하여 공진주파수는 이론치인 150kHz에 접근하는 것을 확인할 수 있다. 구체적으로 중심축이 R만큼 어긋난 경우  $D=46\text{cm}$  시스템에서는 최대 효율이 41.057%에서 39.548%로,  $D=92\text{cm}$  시스템에서는 74.786%에서 72.102%로 감소하였다. 위의 결과에서  $D=92\text{cm}$  코일을 사용하는 경우 두 코일의 중심축이 어긋나있을 때의 충전자유도가  $D=46\text{cm}$  시스템에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

### 3.3 인체모델의 유무에 따른 효율 변화

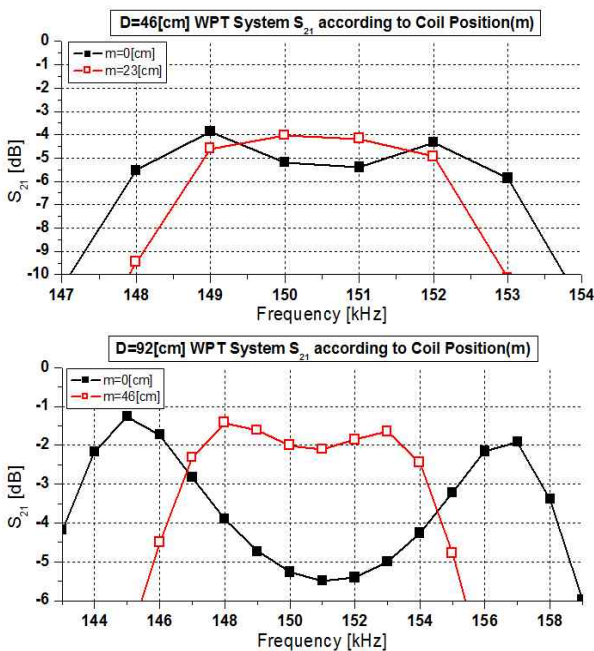


그림 5. 코일의 중심축이 어긋난 경우  $S_{21}$  파라미터의 변화  
 Fig. 5. Changes in  $S_{21}$  parameter distribution when transmitter coil and receiver coil axes are not aligned

공진형 무선전력전송 시스템에서 전력전송 거리가 길어질 경우 사람이나 물체가 송수전 코일 사이에 놓일 가능성이 존재하지만 공진 방식의 특성상 전력전송에 미치는 영향은 적은 것으로 알려져 있다[3]. 본 절에서는 2.2절에서 소개한 균질 인체모델이 송수전 코일 사이에 놓였을 경우 전력전송 효율의 변화를 분석하였다. 그림 6에  $D=46\text{cm}$  시스템과  $D=92\text{cm}$  시스템에 대해 송수전 코일 사이에 인체모델이 있는 경우와 없는 경우 거리( $d$ )에 따른  $S_{21}$  파라미터의 변화를 나타내었다.

$D=46\text{cm}$  시스템의 최대 효율 변화는 1.01%,  $D=92\text{cm}$  시스템의 최대 효율 변화는 0.68%였다. 즉 송수전 코일 사이에 존재하는 인체모델의 유무에 따른 전력전송 효율의 변화는 미미한 것을 알 수 있다.  $D=92\text{cm}$ 의 경우 코일 내부 면적에 비해 인체의 단면적이 차지하는 비율이 작기 때문에 최대 효율 변화가 더 작은 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과에서 공진형 무선전력전송 시스템의 전송효율에 가장 큰 영향을 주는 요인은 송수전 코일 사이의 거리( $d$ )와 송수전 코일의 중심축이 어긋난 경우 중심축 사이의 거리( $m$ )이며, 인체모델의 유무는 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 공진형 무선전력전송 시스템 자기장의 인체 안전성 분석

인체가 자기장에 노출되면 인체 내부에 유도전류가 발생하게 된다. 이 유도전류를 인체유도전류라고 한다. 인체유도전류밀도는 전자기장 인체보호기준에서 규제대상으로 지정하고 있다. 전자기장을 발생시키는 제품의 인체보호기준 만족여부를 파악할 때는 일반적으로 측정의 편의를 위해 자유공간에서 전기장이나 자기장의 세기를 측정하는 방법을 주로 이용해 왔다. 그러나 실제 인체영향과 관련된 물리량은 인체내부의 유도전류밀도나 유도전기장이며 똑같은 세기의 자기장에 노출되더라도 자기장 소스의 종류와 성질에 따라 인체유도전류밀도의 크기와 분포는 달라질 수 있다. 본 연구에서 인체유도전류밀도는 식 (4) 같이 계산된다.

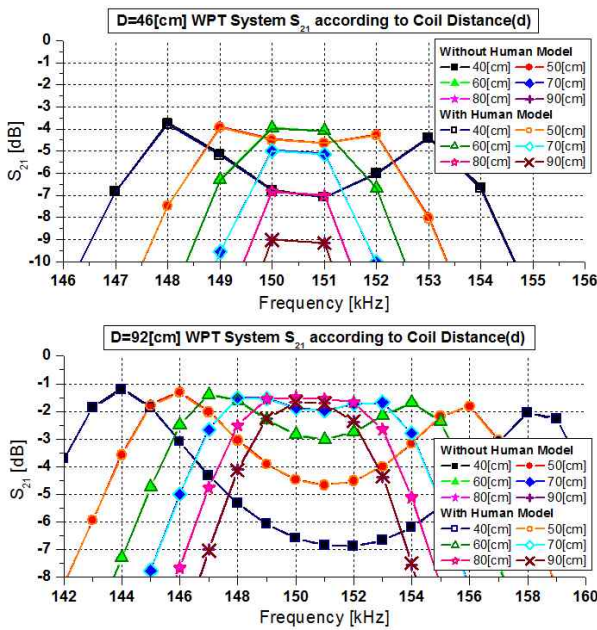


그림 6. 인체모델의 존재 유무에 따른  $S_{21}$  파라미터의 변화  
 Fig. 6. Changes in  $S_{21}$  parameter distribution with human model

$$J = \sigma E \quad (4)$$

여기서  $J$ 는 유도전류밀도,  $\sigma$ 는 인체모델의 도전율,  $E$ 는 인체모델 내부의 전기장 세기이다.

본 장에서는 공기 중에서 동일한 자기장 세기가 측정되는 노출조건에서 다양한 무선전력전송 시스템과 평면파 노출의 인체유도전류밀도를 비교하기 위해  $D=46\text{cm}$  시스템에서 인체모델이 없고 입력전력이 1W 인 경우 송전코일의 중심에서 5.5cm 떨어진 지점에서 자기장의 세기를 먼저 계산하였다. 그리고 동일한 지점에서 같은 크기의 자기장이 발생하도록  $D=92\text{cm}$  시스템과 평면파의 입력전력을 조정한 후 코일 중심에서 5.5cm 떨어진 지점에 인체모델을 위치시키고 인체유도전류밀도를 비교하였다. 여기서 평면파 노출의 경우에는 자기장의 영향만을 고려하기 위해 두 개의 평면파를 서로 반대 방향으로 입사시켜 중첩의 원리에 의해 전기장 성분은 제거되고, 자기장 성분만 남도록 하였다.

그림 7은 이와 같은 노출조건에서  $D=46\text{cm}$ 와  $D=92\text{cm}$  무선전력전송 시스템의 자기장과 평면파에

노출된 균질 인체모델에 유도되는 유도전류밀도의 분포를 나타낸 것이다. 유도전류밀도가 가장 집중되는 곳은 인체의 가장자리 부분인 목과 어깨 그리고 팔 부위인 것을 확인할 수 있다. 그리고 코일의 직경이 커지며 자기장의 특성이 평면파에 근접할수록 인체유도전류 발생부위도 넓어진다.

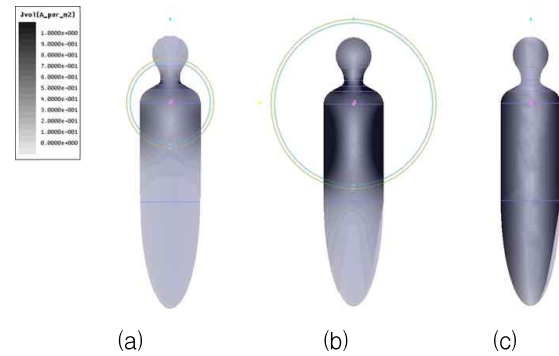


그림 7. 무선전력전송 시스템과 평면파에 노출된 균질 인체모델 내부의 유도전류밀도 분포 비교 [13]  
 (a)  $D=46\text{cm}$ , (b)  $D=92\text{cm}$ , (c) 평면파

Fig. 7. Comparison of induced current density distribution in homogeneous human models exposed to wireless power transfer systems and planewave [13] (a)  $D=46\text{cm}$ , (b)  $D=92\text{cm}$ , (c) planewave

표 2에는 동일 자기장 세기 노출조건 및 동일 입력 전력 노출조건에서 인체유도전류밀도의 평균값, 최대값, 백분위 99%값을 비교하였다. 백분위 99%값은 전체 데이터를 오름차순으로 정렬하였을 때, 총 데이터 수에 대하여 99%에 해당하는 값이다. 시뮬레이션을 통해 인체유도전류를 계산할 경우 인체유도전류밀도의 최대값은 시뮬레이션 소프트웨어의 종류나 인체모델을 분할할 때 사용하는 요소망의 크기나 품질에 따라 현저하게 달라질 수 있다[13]. 따라서 시뮬레이션 결과에서 인체유도전류밀도의 크기를 보다 안정적으로 비교할 수 있는 물리량은 최대값이 아니라 백분위 99%값이라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 균질 인체모델 내부에서 5mm 간격으로 유도전류밀도를 추출한 데이터로부터 백분위 99%값을 계산하였다. 계산 결과 동일 자기장세기 노출조건에서는 코일의 직경과 비례하여 인체유도전류밀도의 백분위 99%값이 커지

는 것을 확인할 수 있으며, 평면파 노출의 경우 그 중간 정도의 값을 보였다. 하지만  $P_{in}=1W$  동일 입력전력 조건에서는  $D=92cm$  시스템의 자기장 세기, 인체유도전류밀도 백분위 99%값이  $D=46cm$  시스템보다 현저히 작은 것으로 나타났다.

표 2. 무선전력전송 시스템과 평면파에 노출된 균질 인체모델의 유도전류밀도 비교

Table 2. Comparison of induced current density in homogeneous human models exposed to wireless power transfer systems and planewave

노출 조건	입력 전력 W	자기장 세기 A/m	인체유도전류밀도 $A/m^2$		
			평균값	최대값	백분위 99%
D=46cm WPT 시스템	1	15.3468	0.1688	1.0626	0.7491
D=92cm WPT 시스템	1	3.3375	0.1030	0.4052	0.3374
D=92cm WPT 시스템	21	15.2942	0.4721	1.8567	1.5461
평면파	-	15.3468	0.4541	1.1907	1.1225

국제 비전리 방사 보호위원회(ICNIRP)의 1998년 보호기준에 따르면 150kHz에서 머리와 몸통의 유도전류밀도기준은 직업인은  $1.5A/m^2$ , 일반인은  $0.3A/m^2$ 이다[12]. 여기서 직업인은 직무상 작업수행 과정에서 자신이 전자기장에 노출되고 있음을 알고 있으며, 잠재적인 위험성을 주의하도록 훈련받은 자를 말하고, 일반인은 전자파에 노출되고 있는 사실을 모르거나 조치를 할 수 없는 자를 말한다.

ICNIRP 인체보호기준의 노출제한치와 인체유도전류밀도 계산결과를 비교하였을 때, 동일 자기장 노출 조건에서 세 가지 경우 모두 인체유도전류밀도의 평균값은 직업인 보호기준에 적합하였으나,  $D=92cm$  시스템과 평면파에서는 일반인 보호기준을 초과하였다.  $P_{in}=1W$  동일입력전력 조건에서는  $D=92cm$  시스템의 경우 평균값, 최대값, 백분위 99%값 모두 직업인 보호기준을 만족하였으며 일반인 보호기준은 평균값은 만

족하고 백분위 99%값은 기준에 근접하였다. 즉 동일 입력전력의 노출조건에서 코일의 직경이 큰 경우 효율뿐 아니라 인체보호기준 적합성에 있어서도 유리한 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 이중 루프 코일 형태의 자기공진방식을 이용하는 무선전력전송 시스템을 설계하고 시스템의 코일 직경과 거리 그리고 인체모델의 유무에 따른 효율 변화를 분석하였다. 또한 무선전력전송 시스템의 인체 안전성 평가를 위해 균질 인체모델이 노출되었을 때의 인체유도전류를 계산하여 인체보호기준과 비교하였다.

설계한 무선전력전송 시스템은 코일 간격이 같은 경우 코일의 직경이 클수록 높은 전력전송 효율을 나타냈으며, 송수전 코일의 중심축이 어긋나 있는 경우에도 효율의 감소가 있지만 전력전송이 가능한 것을 확인하였다. 또한 송수전 코일이 근접한 경우는 송수전 코일의 상호 인덕턴스와 커패시턴스가 영향을 받아 공진주파수가 변화하는 것을 확인하였다.

또한 인체모델이 송수전 코일 사이에 있는 경우 인체모델이 없는 경우에 비해 약 1% 내외의 효율변화를 보여 두 코일 사이에 비자성 물체 또는 사람이 위치했을 때 전력전송 효율에는 큰 영향이 없는 것으로 볼 수 있다.

한편 설계한 무선전력전송 시스템에서 발생하는 자기장에 인체모델이 노출된 경우 인체유도전류밀도를 계산한 결과 동일입력전력 조건에서는 코일의 직경이 클수록 인체보호기준 적합성에 유리하였다. 본 논문에서 설계한  $D=46cm$ ,  $D=92cm$  무선전력전송 시스템은 입력전력 1W와 코일로부터의 거리 5.5cm 기준으로 직업인 인체보호기준은 만족하지만 일반인 인체보호기준에는 적합하지 않다고 할 수 있다. 그러나 본 논문의 기준거리 5.5cm는 코일의 직경과 파장 대비 매우 작은 값이므로 충분히 큰 기준거리의 경우에는 입력전력이 1W를 초과할 경우에도 일반인 인체보호기준을 만족시킬 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 향후 다양한 기준거리에서 무선전력전송 시스템의 인체

보호기준 만족여부를 평가하는 추가적인 연구가 필요하다.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0029721). 또한 본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203160)입니다.

## References

[1] S. I. Park, "A Survey on the Wireless Power Transfer Market", TTA Journal, Vol.138, pp. 40-44, 2011.

[2] S. O. Lim and S. J. Kang, "Recent Trends in the Standardization of Wireless Power Transfer", TTA Journal, No.129, pp. 80-85, 2012.

[3] A. Kurs, A. Karakis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transmission Via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science, Vol.317, pp. 83-86, July. 2007.

[4] A. Kurs, "Power Transfer Through Strongly Coupled Resonances," M. Sc. Thesis, MIT, 2007.

[5] Y. J. Ju, "Magnetic-Resonance Wireless Power Transfer System and Its EMF Safety at 100kHz Band", Ph.D. Thesis, Dankook University, Korea, 2012.

[6] S. H. Cheon, Y. -H. Kim, S. -Y. Kang, M. L. Lee, J. -M. Lee, and T.Y. Zyung, "Circuit Model Based Analysis of a Wireless Energy-Transfer System Via Coupled Magnetic Resonances", IEEE, Vol.58, No.7, pp. 2906-2914, 2011.

[7] Y. H. Jang, J. S. Kwon, J. S. Park, J. H. Choi, "Design of a High Efficiency Resonator for Wireless Power Transfer", The Journal Of Korean Institute Of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 22, No.9, 2011.

[8] J. Choi and C. Seo, "High-efficiency Wireless Energy Transmission Using Magnetic Resonance Based on Negative Refractive Index Metamaterial with Relative Permeability Equal to -1", PIER, Vol. 106, pp. 33-47 2010.

[9] F. E. Terman, "Radio Engineers Handbooks", First Edition, McGraw-Hill, London, 1950.

[10] IEC-62311, "Assessment of Electronic and Electrical Equipment Related to Human Exposure Restrictions for Electromagnetic Fields (0Hz~300GHz)", 2007.

[11] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, "The Dielectric Properties of Biological Tissue: Part III-Parametric Models for the Dielectric Spectrum of Tissues", Phys. Med. Biol., Vol. 41, pp. 2271-2293, 1996.

[12] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)", Health Physics, Vol.74, No.4, pp. 494-522, 1998.

[13] H. -J. Song, H. S. Shin, H. -B. Lee, J. -H. Yoon, and J. -K. Byun, "Induced Current Calculation in Detailed 3D Adult and Child Model for the Wireless Power Transfer Frequency Range", to be published in IEEE Transactions on Magnetics.

[14] E. Waffenschmidt, "Wireless Power for Mobile Devices, Telecommunications Energy Conference (INTELEC), IEEE 33rd International, 2011.

## ◇ 저자소개 ◇



**신한수** (申韓秀)

1988년 10월 19일생. 2012년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사과정.



**변진규** (邊陳奎)

1972년 7월 13일생. 1995년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 2008년~현재 숭실대학교 전기공학부 부교수.