

6.78 MHz 무선전력전송 시스템에 의한 전자파 노출량 분석

Analysis of Electromagnetic Wave Exposure Due to 6.78 MHz Wireless Power Transfer System

윤 석 · 정 현 중 · 임 영 석

Seok Yoon · Hyeonjong Jung · Yeongseog Lim

요 약

본 연구에서는 공진형 무선전력전송시스템에 의해 발생하는 자기장과 전기장 강도 및 이에 의한 인체 내부 전자파 비흡수율(Specific Absorption Rate: SAR) 분포를 분석하였다. 연구에서 사용된 동작주파수는 ISM 대역에 해당하는 6.78 MHz이다. 실제 시스템을 제작하고, 시스템의 송신측에 공급되는 가용 전력을 1 W로 제한하여 전기장 및 자기장 분포를 측정하고, 동일한 규격으로 시뮬레이션한 결과와 비교하였다. 피부, 지방, 근육의 순으로 조직층이 구성된 단순인체모형을 이용하여, WPT 시스템으로부터의 거리에 따른 인체 내부의 유도 전류밀도와 SAR 분포를 구하였다. 측정과 시뮬레이션을 통해 얻어진 전자파 노출 정도를 ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)의 국제 권고 기준과 비교하여 분석하였다.

Abstract

In this paper, we analyzed the electric/magnetic field distribution and SAR distribution in a human body due to the resonant-type wireless power transfer(WPT) system with an operating frequency of 6.78 MHz. To analyze the field distribution under the unperturbed condition, a prototype system was fabricated and the measured results were compared with the simulation results. For safety during measurement, the available power to the transmitter coil is limited to 1 W. To analyze the induced current density and SAR distribution, a simple human model consisting of three layers, skin, fat, and muscle, was used for the simulation. The electromagnetic wave exposure levels obtained through measurement and simulation were compared with the recommended levels by the ICNIRP.

Key words: Resonant Type Wireless Power Transfer System, Simple Human Model, Electric Field Strength, Magnetic Field Strength, SAR, ICNIRP

I. 서 론

공진형 무선전력전송 방식은 A4WP(Alliance for Wireless Power)에서 표준화한 6.78 MHz 대역의 동작주파수를 사용하는 자기공진방식으로써 일반적인 자기유도방식보다 거리에 대한 장점이 높다. 하지만 이 기술은 자유공간에

필연적으로 노출되는 전자기장으로 인한 인체에 미치는 영향 등의 이유로 아직 활발하게 상용화되지 못하고 있다.

전자파 노출로 인한 인체 영향 평가에 대한 연구 역사가 매우 길고 관심도 많기 때문에 다양하고 깊이 있는 연구들이 이루어지고 있다. 100 kHz 미만의 낮은 주파수 대역에서는 신경 또는 근육의 자극과 같은 비열적 영향으

전남대학교 전자컴퓨터공학부(School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University)

· Manuscript received August, 22, 2017 ; Revised September, 22, 2017 ; Accepted December, 18, 2017. (ID No. 20170822-085)

· Corresponding Author: Yeongseog Lim (e-mail: limys@jnu.ac.kr)

로, 그리고 10 MHz 이상의 주파수 대역에서는 전자파 에너지 흡수에 의한 온도 상승과 같은 열적 영향으로 전자파 노출에 따른 인체 영향 평가를 행하고 있다. 100 kHz~10 MHz의 대역은 두 가지 영향을 모두 고려하여야 하는 주파수 영역으로 인체 내부의 전기장 강도와 유도 전류 밀도 그리고 SAR 값들을 노출 기준치로써 활용하고 있다. WPT 시스템에서 사용하는 6.78 MHz 대역의 전자파 노출은 열적인 영향 그리고 비열적인 영향을 모두 고려해야 하는 주파수 대역으로 다양한 해부학적 인체 모델을 이용한 연구들이 이루어지고 있다^{[11]~[13]}.

이에 따라 본 연구에서는 6.78 MHz 대역 공진형 WPT 시스템을 구현하여 시스템에 의한 자유공간 영역에서의 전기장 및 자기장 강도 분포를 측정하고, 시뮬레이션을 통한 결과와 비교하였으며, 간단한 인체 모델을 구성하여 WPT 시스템에 의한 인체 내부의 자기장 분포와 전기장 및 그에 따른 SAR와 전류밀도 분포를 구하여 표 1과 표 2의 ICNIRP 권고 기준(1998^[14], 2010^[15])과 비교하고 분석하였다.

표 1. ICNIRP(1998)의 전기장 및 자기장 강도 기준($f=1\sim 10$ MHz)

Table 1. Reference levels for field intensities by ICNIRP (unperturbed RMS value).

Category	Magnetic field [A/m]	Electric field [V/m]
Occupational exposer	$1.6/f^{[14]}$, $80^{[15]}$	$610/f^{[14]}$, $170^{[15]}$
Public exposer	$0.73/f^{[14]}$, $21^{[15]}$	$87/f^{1/2[14]}$, $83^{[15]}$

※ f Unit : [MHz].

표 2. ICNIRP의 인체 내부 전기장, SAR 및 전류밀도 기본제한치($f=100$ kHz~10 MHz)

Table 2. Basic restrictions for internal field, current density and SAR by ICNIRP.

Category		Occupational exposer	Public exposer
Human internal electric field [V/m] ^[15]		$2.7 \times 10^{-4}f$	$1.35 \times 10^{-4}f$
Current density(RMS) ^[14] [mA/m ²]		$f/100$	$f/500$
SAR ^[14] [W/kg]	Whole body average	0.4	0.08
	Local(10 g-SAR)	10	2

※ f Unit : [MHz].

※ Current density & 10 g-SAR based on head / torso.

II. 공진형 무선전력전송 시스템

무선전력전송 시스템에 의한 주변 전자기장 분포를 측정하기 위해 WPT 시스템을 실제 제작하였다. 다양한 모델들이 연구되어오고 있지만, 가장 보편적인 형태를 취하였다^{[16][17]}. 시스템 송신부와 수신부는 동일한 규격으로 구성하였으며, 각각 구동코일과 송신코일 그리고 부하코일과 수신 코일의 한 쌍으로 구성된다. 송신 전원 내부 저항과 수신 포트의 종단 부하는 모두 50 Ω이다.

표 3은 제작된 시스템의 구동(부하) 코일과 송신(수신)코일의 제원이며, 제작된 시스템의 형태는 그림 3과 같다^[18].

그림 1은 실제 제작된 시스템의 송·수신부 사이의 거리에 따른 전력 전송 효율을 보인 것으로, Agilent사의 Network Analyzer E5071C를 이용하여 측정하였다. 그림 1

표 3. 공진형 무선전력전송시스템의 규격
Table 3. Configuration of the WPT system.

Category	Drive coil	Transmit coil
Inner radius [mm]	50	65
Outer radius [mm]	51	104.5
Wire thickness [mm]	1	
Turns [N]	1	10
Added lumped capacitor [F]	1.58 nF	16.07 pF

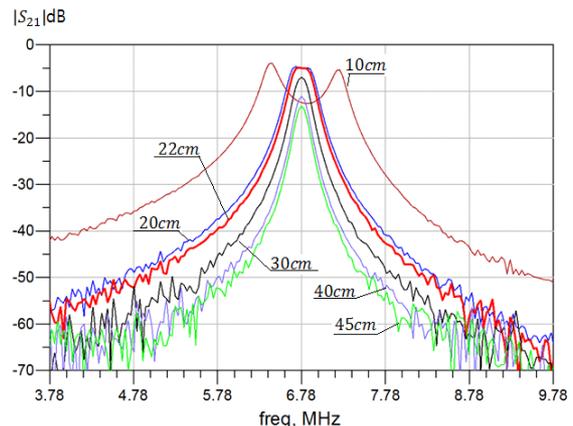


그림 1. 송/수신부 간의 거리에 따른 WPT 시스템의 전송 특성

Fig. 1. Insertion loss of WPT system for TX/RX distance.

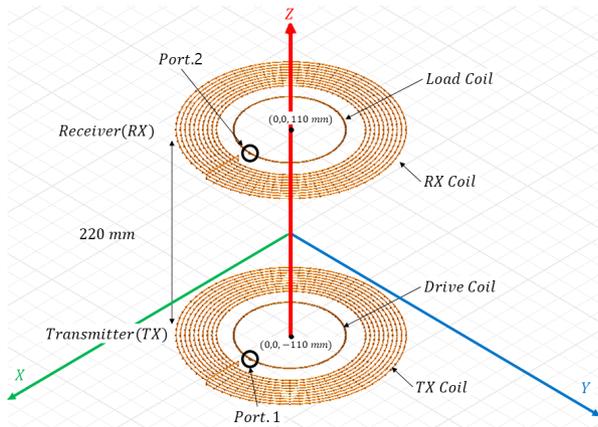


그림 2. 6.78 MHz WPT 시스템의 시뮬레이션 모델
Fig. 2. Simulation model for 6.78 MHz WPT system.

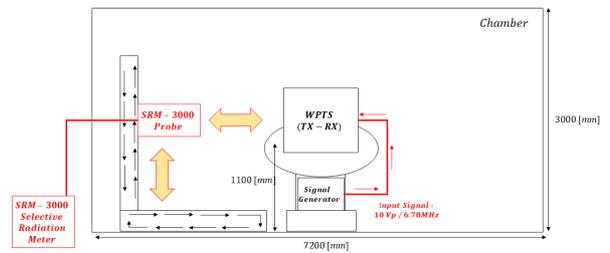
에서 볼 수 있듯이 제작된 시스템의 최대 전력 전달이 이루어지는 송·수신부 사이의 거리는 220 mm이다.

송신코일과 수신코일 간의 거리가 220 mm보다 가까워지면 두 코일 간의 결합계수가 증가하면서 최대 전송효율을 갖는 주파수가 6.78 MHz에서 벗어나게 된다. 또 거리가 더 멀어지면 결합계수의 감소로 인하여 전송효율이 급감하게 된다.

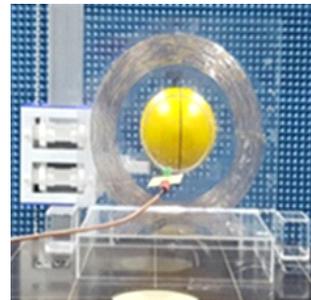
그림 2는 실제 제작된 시스템과 동일한 제원으로 시뮬레이션을 위해 모델링한 것이다. 송신부의 전원과 수신부의 부하는 제작된 시스템의 경우와 동일하다. 그림 2에서는 각 코일에 연결된 공진을 위한 커패시터들이 생략되었다.

III. 자유공간에 노출되는 전자기장 강도

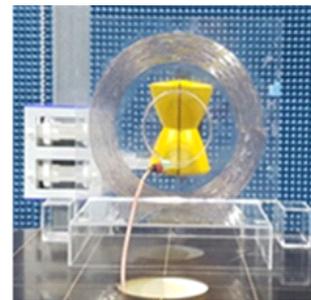
시스템에 의하여 발생하는 주변 전자기장 강도분포를 분석하기 위해 송·수신부 사이의 거리를 220 mm로 고정하고, 측정과 수치해석을 시행하였다. 송신부 코일의 중심 좌표는 (0, 0, -110 mm)이고, 수신부 코일의 중심좌표는 (0, 0, 110 mm)이다. 제작된 WPT 시스템의 전원 전압으로 진폭 10 V 그리고 주파수 6.78 MHz의 정현파를 인가하였으며, 송신 시스템에 공급되는 평균전력은 0.205 W이다. 시뮬레이션은 송신 시스템에의 가용전력을 1 W로 하여 수행하였으며, 실측 데이터들은 시뮬레이션과 같은 조건이 되도록 제작시스템의 가용전력이 1 W가 되도록



(a) 측정장비
(a) Measurement equipment



(b) 자기장 강도 측정
(b) Magnetic field strength



(c) 전기장 강도 측정
(c) Electric field strength measurement

그림 3. 전자기장 측정환경

Fig. 3. Electromagnetic field measurement system(unperturbed condition).

록 정규화하였다.

실제 측정에는 그림 3과 같은 국립전파연구원의 측정 시스템 NARDA SRM-3000을 이용하였다. 그림 3(b)의 자기장 프로브의 규격은 직경 120 mm의 구 형태로 3축 자기장을 측정할 수 있는 등방성 프로브이다. 그림 3(c)의 전기장 프로브는 길이 135 mm이고, 단면의 직경이 90 mm인 다이폴 구조의 단축 프로브로써 세 축방향의 전기장

을 각각 측정해야 한다.

자기장 및 전기장 강도의 측정은 z 축을 따라 시행하였다. 그림 2의 좌표를 기준으로 (0, 154.5, z)와 (0, 254.5, z)의 선을 따라 5 cm 간격으로 측정하였다. y = 154.5 mm는 WPT 시스템 최외각으로부터 50 mm의 위치이고, y = 254.5 mm는 최외각으로부터 150 mm의 위치이다. 그림 4와 그림 5에 측정선을 나타내었다.

그림 4는 실측 및 시뮬레이션으로 얻은 자기장 강도의 분포를 보인 것으로 값의 차이는 있지만 분포하는 경향이 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 예측할 수 있는 바와 같이 송신부 코일이 놓여 있는 z = -110 mm 지점 부근에서 최대의 크기를 보이고, 수신부 코일이 놓여 있는 z = 110 mm 부근에서 또 한번의 첨두치를 볼 수 있다. 그림 4에는 표 1에 보인 ICNIRP의 권고 기준치를 함께 표시하였는데, WPT 시스템의 최외각으로부터 50 mm(y = 154.5 mm) 거리에서는 물론 150 mm(y = 254.5 mm) 거리에서도 기준치를 상회하는 자기장 강도 분포를 보여주고 있다. 표 1에서 볼 수 있듯이 ICNIRP의 2010년 개정 권고에서는 25 Hz에서 10 MHz 구간에서의 자기장 강도 기준치가 대폭 상향되었지만, 여기서는 1998년의 권고기준으로 비교한다.

그림 5는 전기장 강도의 분포를 보인 것으로, 그림 4에 비하여 실측 데이터와 수치 해의 유사도가 많이 떨어짐

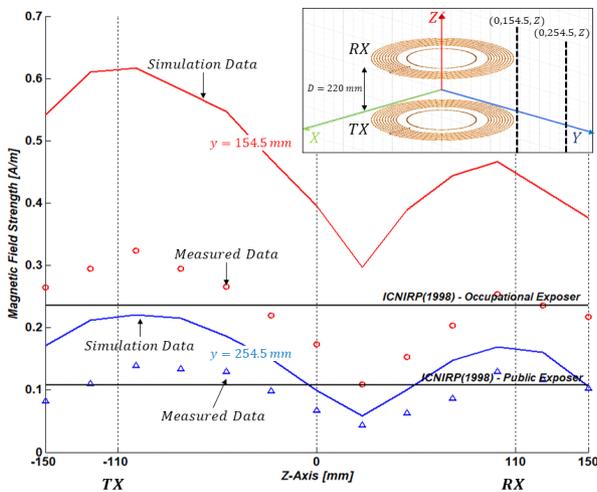


그림 4. 자기장 강도의 분포
Fig. 4. Distribution of magnetic field strength.

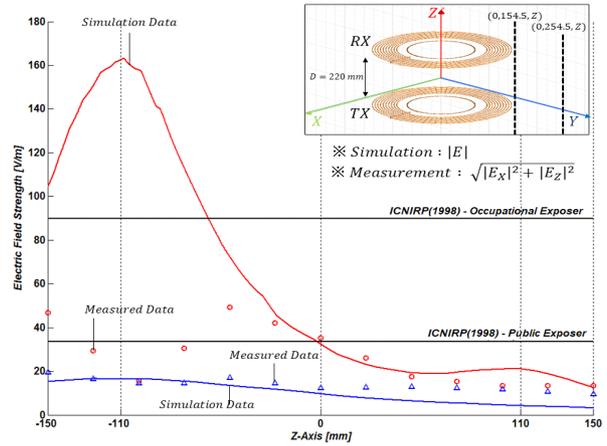


그림 5. 전기장 강도의 분포
Fig. 5. Distribution of electric field strength.

을 확인할 수 있다. 동작주파수가 매우 낮아 근거리 영역(reactive near-field region)의 장을 측정해야 하는 어려움이 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션으로 얻은 전기장 강도는 전기장 벡터의 세 방향 성분을 모두 포함하는 반면에, 측정에 의한 전기장 강도는 E_y 성분이 포함되지 못하여 두 값의 차이가 크게 보인다. 전기장을 측정하기 위한 그림 3(c)의 프로브의 크기가 커서 코일 부근에서는 전기장의 y 방향 성분을 측정하기 위한 관측점을 특정하기 어려워 E_y 는 측정하지 못하였다. 그 결과, 송신부 코일이 놓여 있는 위치인 z = -110 mm 부근에서 코일과 가까운 y = 154.5 mm에 해당하는 데이터들의 오차가 특히 매우 큼을 알 수 있다.

자기장의 경우와 달리 측면 외곽으로부터 150 mm (y = 254.5 mm) 거리에서의 전기장 강도는 일반인 기준치를 상회하지 않는 것으로 나타나고 있다. 이것은 WPT 시스템이 코일에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자기장 중심의 결합 시스템이기 때문이며, 코일 부근은 전자기장 에너지가 대부분 자기장의 형태로 저장되는 유도성인 리액티브 근거리장 영역이다.

IV. 단순인체모델과 전자파노출량 분석

4-1 단순인체모델(Simple Human Model)

시스템에 의한 전자기장 강도가 인체에 미치는 영향을

분석하기 위해 사용되는 해부학적 모델은 인체와 유사한 크기의 조직으로 구성되지만, 제작한 나라 및 인종, 나이에 따라 다르다. 또한 제작비용 및 수치해석 시간이 많이 소요된다. 본 연구에서는 WPT 시스템에 의해 발생하는 전자파에 의한 인체 내의 유도 전기장과 그에 따른 유도 전류 및 SAR는 국부적인 영역, 즉 WPT 시스템 인근에 노출된 영역에 집중되기 때문에 부분적으로 균질한 단순 인체모델을 구성하여 인체 내부에 유도되는 전기장 강도와 전류밀도 그리고 SAR 분포를 해석하였다.

본 연구에서 사용된 직육면체의 단순인체모델은 피부, 지방, 근육의 순서의 세 조직층으로 구성되었으며, WPT 시스템의 영향을 충분히 평가할 수 있도록 498×258×550 mm³의 크기로 모델링하였다. 표 4에 보인 각 조직의 전기적 특성 수치들은 해부학적인 인체 모델의 해당 조직의 값들을 사용하였다^[19].

그림 6은 WPT 시스템 앞에 놓인 인체모델을 보인 것이다. WPT 시스템의 최외각과 인체모델 사이의 거리 D 에 따른 인체 모델 내부의 자기장, 전기장 및 SAR 분포를 분석하였다.

WPT 시스템이 동작하여 전자파가 노출되는 공간에 인체 모델이 놓이게 되면 시스템의 동작 특성에도 영향을 미치게 된다. 그 효과는 다른 주제이므로 여기서 논의하지 않는다. WPT 시스템과 인체 모델 사이의 거리 D 와 무관하게 송신시스템에의 가용전력은 1 W로 고정하여, WPT 시스템이 정상상태로 계속 동작하는 조건에서 시뮬레이션을 행하였다.

4-2 단순인체모델과 자기장 강도

본 연구에서 사용한 단순 인체모델은 대부분의 연구

표 4. 단순인체모델 규격

Table 4. Tissues for simple human model.

Tissue	Skin(dry)	Fat(dry)	Muscle
Tissue thickness [mm]	2	5	244
Simulation cell size [mm]	0.1	0.1	0.1~2.48
Relative permittivity ϵ_r	478.398	34.9833	1,090.4
Conductivity σ [S/m]	0.147119	0.0495639	0.602104
Mass ρ [kg/m ³]	1,109	911	1,090.4

에서 그렇듯이 비자성 물질들로 모델링한 것이다. 따라서 근거리장 영역에 해당하는 인체 모델 내외부에서, 전기장에서와 같은 물질의 전기적 특성에 따른 강도의 변화가 거의 나타나지 않는다. 이 사실은 그림 7에서도 살펴볼 수 있다. 인체 모델이 없는 자유공간에 놓인 WPT 시스템의 경우와 $y = 129.5 \text{ mm}(D=25 \text{ mm})$ 그리고 $y = 154.5 \text{ mm}(D=50 \text{ mm})$ 에 각각 인체 모델이 놓여 있는 경우의 자기장 분포의 변화를 보인 것이다. 세 경우의 자기장 강도의 차이는 인체모델로 인한 WPT 시스템의 부하 조건의 변화에 기인하는 것으로 판단된다.

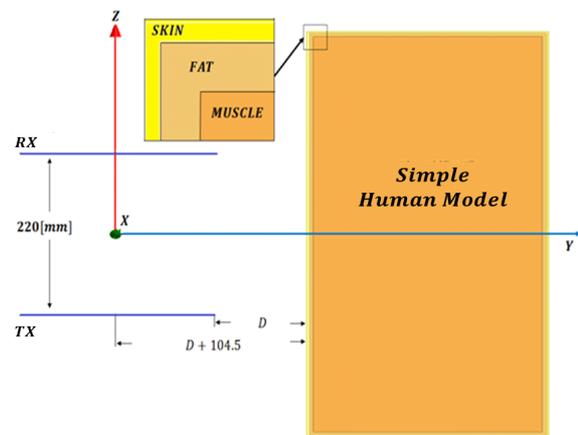


그림 6. 단순 인체모델과 WPT 시스템
Fig. 6. Simple human model & WPT system.

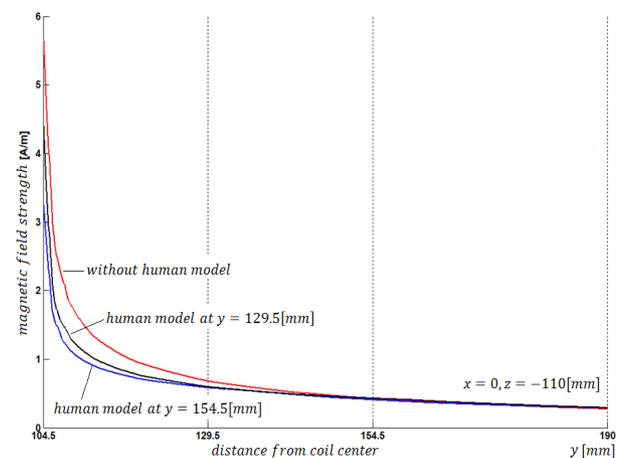


그림 7. 인체모델의 위치에 따른 자기장 강도
Fig. 7. Magnetic field strength for positions of human model.

4.3 단순인체모델과 전기장 강도, 전류밀도 및 SAR

그림 6의 WPT 시스템의 측면 외곽으로부터 인체 모델까지의 거리 D 에 따른 인체 모델 내부의 전기장 강도 분포와 이에 따른 SAR 분포를 해석하였다. 인체 내부의 전기장 \vec{E} 와 전류밀도 \vec{J} 및 SAR의 관계는 다음 식과 같다.

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |\vec{E}|^2 = \frac{|\vec{J}|^2}{\sigma\rho} \tag{1}$$

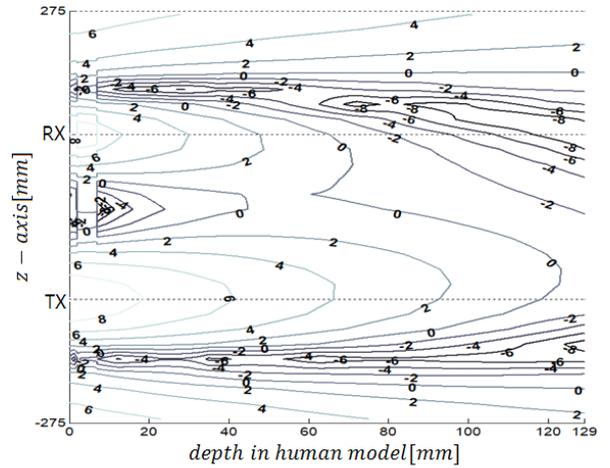
식 (1)에서 알 수 있듯이, SAR는 $\frac{\sigma}{\rho}$ 에 비례하는 데, σ 와 ρ 는 조직마다 다르며, 또 같은 조직에서도 주파수에 따라, 또 조직의 수분 함량에 따라 다르다. 전류밀도는 σ 에 비례하므로 간단하게 구할 수 있다. 표 3을 참조하면 $\frac{\sigma}{\rho}$ 는 근육>피부>지방 조직의 순임을 알 수 있다.

인체 내부에서의 SAR 분포를 분석하기 위해 WPT 시스템의 측면 외곽으로부터 인체 모델까지의 거리 D 를 25, 50 및 100 mm로 변화시켜가면서, 인체 모델 내부의 전기장 분포와 이에 따른 1 g 평균 SAR(1 g-SAR) 분포를 구하였다. y 좌표는 $D+104.5$ mm이다. 그림 8은 $D=25$ mm인 경우이다.

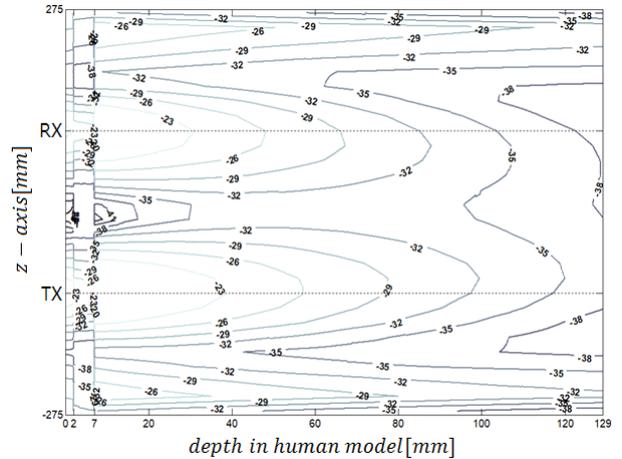
모델 내부의 분포를 살펴보면 송신부 공진코일이 놓인 위치인 $z=-110$ mm에서 전기장과 SAR 모두 가장 큰 값의 분포를 보이고 있다. SAR의 최대치는, 지방층에 인접한 근육조직에서 발생하는 데 그 크기는 14.27 mW/kg에 이른다.

그림 9와 그림 10은 $D=50$ mm와 $D=100$ mm인 경우의 인체 모델 내부의 전기장 및 1 g-SAR를 보인 것으로 그림 8과 비교하여 모델 내부의 동일 위치에서의 값들이 감소함을 살펴볼 수 있다.

그림 11은 조직별 노출 정도를 살펴보기 위해, 영향이 가장 큰 송신부와 나란한 위치($z=-110$ mm)에서 모델 내부 10 mm 깊이까지의 전기장 강도와 식 (1)의 10 g-SAR 및 전류밀도의 분포를 보인 것이다. 그림 11(a)에서 볼 수 있듯이 모델 내부의 전기장은 피부에서 지방층을 통과해 근육층으로 투과해 들어갈수록 그 강도가 빠르게 감소한다. 그러나 그림 11(b)에서 확인할 수 있듯이, SAR는 근육 조직에서 가장 큰 값을 갖는다. 이는 세 조직들의 전기적 특성($\frac{\sigma}{\rho}$)에 기인하는 현상이다. 전기장과 10 g-SAR 분포



(a) 전기장[dBV/m]
(a) Electric field strength[dBV/m]



(b) 1 g-SAR[dBW/kg]
(b) 1 g-SAR[dBW/kg]

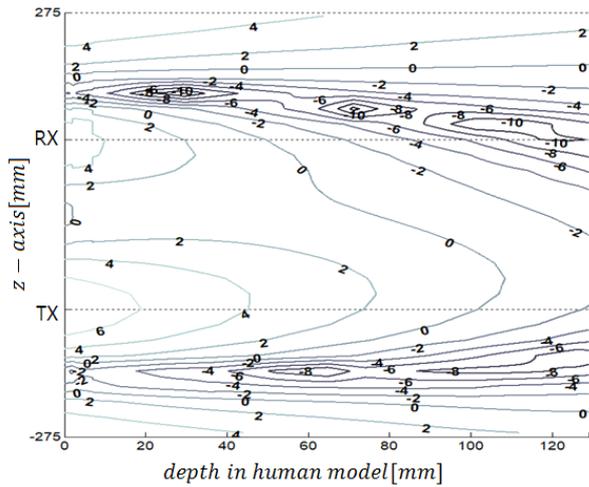
그림 8. $D=25$ mm일 때 인체 모델 내부의 전기장 및 1 g-SAR 분포

Fig. 8. Electric field strength and 1 g-SAR distribution in human model for $D=25$ mm.

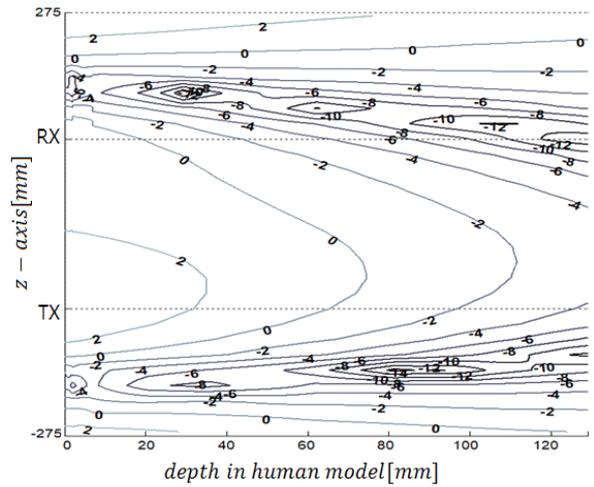
모두 WPT 시스템으로부터 거리가 멀어짐에 따라 급격하게 감소한다. 그림 11(c)의 전류 밀도 분포는 식 (1)로부터 예측할 수 있듯이 10 g-SAR의 분포와 유사함을 볼 수 있다.

4.4 노출량 분석

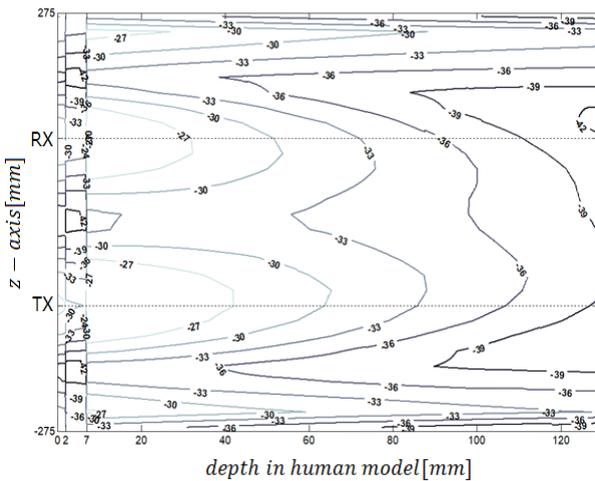
표 2의 ICNIRP의 일반인에 대한 전신 평균 SAR 기준은 0.08 W/kg이지만, WPT 시스템의 노출전자파의 유의



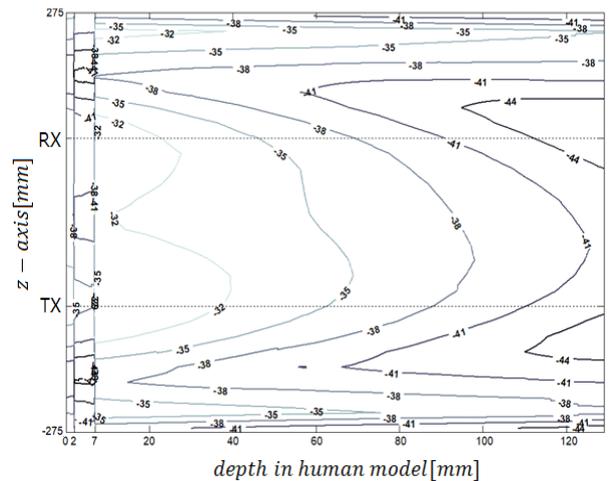
(a) 전기장[dBV/m]
(a) Electric field strength[dBV/m]



(a) 전기장[dBV/m]
(a) Electric field strength[dBV/m]



(b) 1 g-SAR[dBW/kg]
(b) 1 g-SAR[dBW/kg]



(b) 1 g-SAR[dBW/kg]
(b) 1 g-SAR[dBW/kg]

그림 9. $D=50$ mm일 때 인체 모델 내부의 전기장 및 1 g-SAR 분포

Fig. 9. Electric field strength and 1 g-SAR distribution in human model for $D=50$ mm.

그림 10. $D=100$ mm일 때 인체 모델 내부의 전기장 및 1 g-SAR 분포

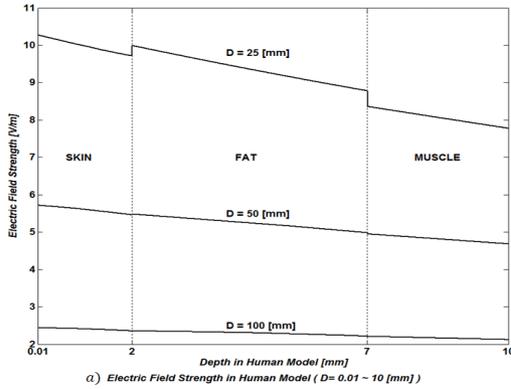
Fig. 10. Electric field strength and 1 g-SAR distribution in human model for $D=100$ mm.

한 영역은 근거리장 영역이므로 전선 평균 SAR의 기준은 크게 의미를 두지 않아도 된다. 머리/몸통을 대상으로 하는 국부 평균 SAR의 ICNIRP의 기준은 표 2와 같이 10 g-SAR가 2 W/kg을 넘지 않도록 하는 것이고, FCC와 한국은 1 g-SAR가 1.6 W/kg을 넘지 않도록 기준을 설정하고 있다.

SAR의 값이 가장 크게 발생하는 $D=25$ mm인 경우의

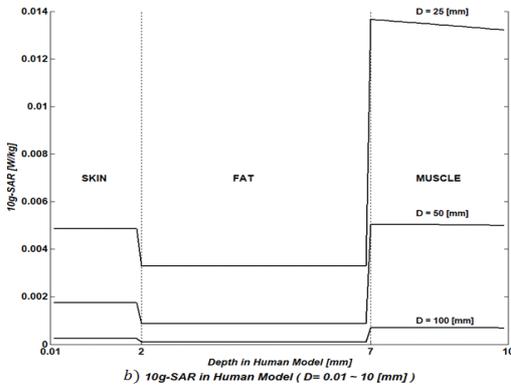
SAR, 1 g-SAR 및 10 g-SAR를 그림 12에 비교하여 나타내었다.

1 g-SAR의 최대치는 0.0156 W/kg이고 10 g-SAR의 최대치는 0.0136 W/kg으로 모두 같은 위치이다. 1W의 가용 전력을 공급한 WPT 시스템으로부터 노출되는 SAR의 정도는 인체 모델이 WPT 시스템의 송신부 코일로부터 25



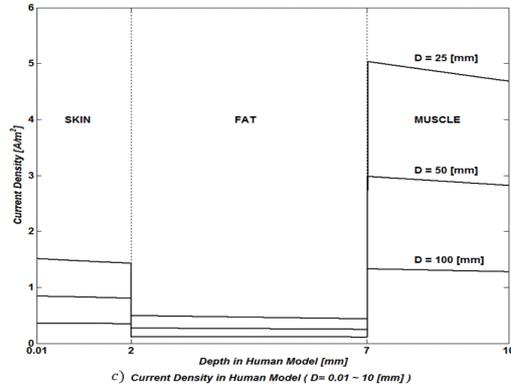
(a) 전기장의 강도

(a) Electric field strength



(b) SAR

(b) SAR



(c) 전류밀도

(c) Current density

그림 11. WPT 시스템으로부터의 거리에 따른 인체 모델의 전자파 노출

Fig. 11. EM-wave exposure of human model for the distance from WPT system.

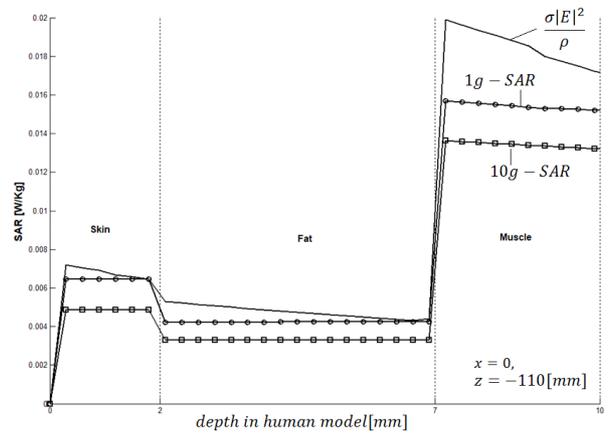


그림 12. 질량 평균에 따른 SAR 분포

Fig. 12. SAR distribution for averaged masses.

mm 이격된 거리에서도 ICNIRP와 FCC 기본 제한치의 1/100에 미치지 못할 정도로 매우 미약하다.

인체 모델 내부의 전류 밀도의 최대치 또한 SAR와 같은 위치에서 최대치를 갖는데, 표 2의 ICNIRP 기본 제한치인 13.56 A/m^2 를 초과하지 않지만, 25 mm 이격된 거리에서의 최대치는 5.034 A/m^2 로 기본 제한치의 37%에 이를 정도이므로, 가용전력이 3 W만 되어도 기본 제한치를 넘게 되는 수준이다.

인체 모델 내부의 전기장 강도는 피부 표면으로부터 감소하기 시작한다. 전파의 자극효과의 영향을 받는 조직을 대상으로 고려하면, 근육층에서의 최대치는 8.4 V/m 로 표 2에 보인 ICNIRP의 동일주파수에서의 일반인에 대한 기본 제한치인 915.3 V/m 의 0.92%에 불과하다.

자기장 강도는 인체 모델의 유무에 따라 크게 달라지지 않았다. 따라서 송신 코일이 놓인 면에서 관측하면, SAR의 경우와는 달리 WPT 시스템의 최외각으로부터 150 mm의 거리에서도 ICNIRP가 1998년 권고한 일반인 기준치를 넘게 된다.

V. 결 론

본 연구에서는 6.78 MHz 대역 공진형 무선전력전송시스템으로부터의 전자파 노출 정도를 시스템의 제작과 측정 그리고 SEMCAD를 이용한 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

인체모델 내부 SAR 및 전류밀도 분포는 송신 코일이 있는 면의 피부에 가까운 근육층에 집중적으로 분포하였다. 동일한 가용전력이 공급되는 시스템이라든가 코일의 반경이 크면 인덕턴스가 증가하고, 따라서 더 먼 거리의 전력전송이 가능하나 전자파 노출량은 더 증가하게 된다. 그러나 본 연구에서의 시스템으로 한정하고 인체모델의 전기적인 특성이 선형적이라고 가정하면, 가용전력이 1 W일 때 10 g-SAR의 최대치로부터 선형적으로 추산하면 가용전력 100 W의 경우에도 ICNIRP의 기본 제한치를 초과하지 않는다. WPT 시스템은 자기장 결합을 이용한 전력전송 기법이다. 따라서 WPT에 의한 전자파 노출 가운데 인체 내의 온도상승을 유발하는 열적인 영향은 미약하다고 할 수 있다.

그러나 비열적인 영향을 유발하는 유도 전류밀도와 자기장의 분포는 권고 기준치에 근접하거나 혹은 초과하였다. 특히 자기장 강도의 분포는 가용전력이 1 W인 경우에도 ICNIRP의 1998년 권고 기준을 초과하기 때문에 WPT 시스템의 상용화를 위해서는 적절한 자기장 차폐의 기술이 필요하다.

References

- [1] S.-E. Hong, I.-K. Cho, J.-H. Kwon, and J. K. Park, "Assessment of human exposure to electromagnetic fields from wireless power transfer system in the 1.8 MHz," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 5, pp. 1125-1129, May 2015.
- [2] J. Chakarothai, W. Kanako, and S. Watanabe, "Evaluation of EM absorption characteristics in realistic adult and child models in vicinity of wireless power transfer system," in *IEEE Asia-Pacific Symposium on EMC*, Taipei, May 2015, pp. 448-451.
- [3] A. Christ, M. G. Douglas, J. M. Roman, E. B. Cooper, A. P. Sample, and B. H. Waters, et al., "Evaluation of wireless resonant power transfer system with human electromagnetic exposure limits," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 2, pp. 263-274, Apr. 2013.
- [4] W.-G. Kang, Z. Alexander, H.-Y. Jun, Y.-H. Park, and J.-K. Pack, "Exposure assessment for a wireless multi-phone charger," 2014 *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, 2014, pp. 198-201.
- [5] X. Shi, B. H. Waters, and J. R. Smith, "SAR distribution for a strongly coupled resonant wireless power transfer system," in *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, USA, 2015, pp. 1-4.
- [6] J. Y. Mun, M. G. Seo, W. G. Kang, H. Y. Jun, Y. H. Park, and J. K. Pack, "Study on the human effect of a wireless power transfer device at low frequency," in *the 32nd Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings*, Moscow, 2012, pp. 19-23.
- [7] Ž. Štih, T. Župan, S. Berberovic, and V. Ciganovic, "Analysis of human exposure due to WPT in 100~200 kHz range," *International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, Czech, 2013, pp. 13-14.
- [8] I. Laakso, S. Tsuchida, A. Hirata, and Y. Kamimura, "Evaluation of SAR in a human body model due to wireless power transmission in the 10 MHz band," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 57, no. 15, pp. 4991-5002, 2012.
- [9] S. W. Park, K. Wake, and S. Watanabe, "Incident electric field effect and numerical dosimetry for a wireless power transfer system using magnetically coupled resonances," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 9, pp. 3461-3469, 2013.
- [10] J. Nadakuduti, M. Douglas, L. Lin, A. Christ, P. Guckian, and N. Kuster, "Compliance testing methodology for wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6264-6273, 2015.
- [11] 김윤명, 주영준, "자기공진형 무선전력전송기술과 전자파 인체영향," *한국전자과학회논문지*, 23(6), pp. 38-47, 2012년 6월.
- [12] 신한수, 송혜진, 변진규, "공진형 무선전력전송 시스템 주변의 자기장 환경 측정 및 분석," *한국 조명·전기설비학회 추계 학술대회*, 2011년 11월.
- [13] 김민혁, 정현교, "자기 공진형 무선 전력전송 시스템의 인체 영향에 관한 연구," *대한전기학회 하계 학술*

대회, 2013년 7월.

- [14] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physcis*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [15] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields(1 Hz ~ 100 kHz)," *Health Physcis*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, 2010.
- [16] C.-J. Chen, T.-H. Hsiung Chu, C.-L. Lin, and Z.-C. Jou, "A study of loosely coupled coils for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 57, no. 7, pp. 536-540, Jun. 2010.
- [17] A. P. Sample, D. T. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Mar. 2011.
- [18] 국립전파연구원, 무선전력전송기기의 전자파 인체노출량 분석, 2016년.
- [19] IFAC-CNR, An Internet Resource for the Calculation of the Dielectric Properties of the Human Body Tissues in the Frequency Range of 10 Hz~100 GHz. Available: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop>.

윤 석



2016년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
 2016년 3월 ~ 현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파회로설계, 전자파 인체영향

임 영 석



1984년 9월 ~ 현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, 안테나, EMC/EMI

정 현 중



2017년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
 2017년 3월 ~ 현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파회로설계, EMC/EMI