

## 무선전력전송의 조사량 평가 시 전기장 영향

# Electric Field Effect on Numerical Dosimetry for Wireless Power Transfer System

박 상 욱

Sang-Wook Park

### 요 약

전자기 공진 현상을 이용한 무선전력전송 시스템에 대한 조사량 평가 시 전기장의 고려 여부를 검토하였다. 인체로 인가되는 전기장과 자기장의 상대적인 크기가 조사량 평가 시에 중요한 지표가 되기 때문에, 이를 검토하기 위해 자기 다이폴 인근의 다양한 전자기장의 크기를 갖는 곳에 구형의 간이 인체 모델을 위치시키고, 구 모델 내부로 유도되는 전기장의 값을 이론과 수치해석을 통하여 구하고 비교하였다. 그 결과, 전기장을 무시할 수 없는 영역이 존재함을 확인하였으며, 이는 무선전력전송의 조사량 평가 시 외부 전기장에 대한 고려가 필요함을 알 수 있었다.

### Abstract

The coupling effect of electric fields incident on the biological object is investigated in regards to dosimetry for a wireless power transfer(WPT) system using electromagnetic resonance phenomenon. The internal electric fields induced a biological sphere model exposed to a magnetic dipole are calculated with the finite-difference time-domain(FDTD) method considering both incident electric and magnetic fields, the impedance method considering only incident magnetic fields, and theoretical analysis. The results represent that the electric coupling effect on a biological object nearby the WPT system should be considered to conduct exact dosimetry.

Key words: Dosimetry, FDTD Method, Impedance Method, Mie Theory, Wireless Power Transfer

## I. 서 론

2007년도에 MIT(Massachusetts Institute of Technology) 대학 연구팀이 전자기 공진 현상을 이용한 무선전력전송 (Resonance-Based Wireless Power Transfer: RBWPT) 기술에 대한 실증 논문<sup>[1],[2]</sup>을 사이언스지에 게재한 이후로 다양한 기업, 연구소 그리고 대학에서 수많은 연구가 진행 중에 있다<sup>[3],[4]</sup>. 이 기술은 자기 유도 현상에 근간을 두고 있으나, 전자기 공진 현상을 이용하여 전송거리를 좀 더

늘릴 수 있다는 점에서 주목을 받아 휴대전화, 노트북, 가전기기, 그리고 전기자동차에 이르기까지 다양한 분야에 응용하려고 하고 있다. 그 중 현대의 IT 기술의 집합체인 휴대전화는 많이 사용되고 있다는 점과 다양한 응용 분야 중에 비교적 낮은 전력이 소모된다는 측면에서 가장 먼저 적용하여 상용화를 위해 나아가고 있다. 한편, 휴대전화뿐만 아니라, 대용량의 전력전송임에도 불구하고, 활발히 연구가 진행되고 있는 분야가 전기자동차이다. WPT 기술을 이용한다면 주차한 상태에서 자동으로 충전

자동차부품연구원 전자기파연구센터(EMI/EMC R&D Center, Korea Automotive Technology Institute)

· Manuscript received February 6, 2015 ; Revised April 17, 2015 ; Accepted April 17, 2015. (ID No. 20150206-012)

· Corresponding Author: Sang-Wook Park (e-mail: parksw@katech.re.kr)

이 이루어질 수는 편이성이 있어, 다른 분야에 비해 상용화가 급속히 이루어질 것이라고 전망되고 있다. 현재, 이 기술의 상용화를 위해서는 전자파 양립성, 인체보호를 위한 전자파 안정성, 표준화 등과 같은 문제에 직면해 있다. 특히, WPT 시스템으로부터 발생하는 전자기장에 인체가 노출되었을 때의 전자파 인체 안정성을 확인하는 것은 반드시 필요하다.

인체의 전자파 조사량 평가(Dosimetry)는 실측이 어려운 문제로 MRI(Magnetic Resonance Imaging) 및 CT(Computed Tomography) 촬영을 통하여 얻어진 데이터로부터 만들어진 정밀한 인체모형을 이용한 수치해석 기법을 이용하여 연구 조사가 수행되고 있다. 수치해석 방법으로는 고주파 대역에서는 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 법<sup>[5]</sup>이, 저주파 대역에서는 Impedance 법<sup>[6]</sup>이나 SPFD(Scalar-Potential Finite-Difference) 법<sup>[7]</sup>이 주로 사용되고 있다. WPT 기술의 동작 주파수는 10 MHz 대역 혹은 그 이하 대역이 논의되고 있다. 해당 주파수 대역은 FDTD 법을 적용하기에는 많은 계산 시간이 필요로 하므로, 아래와 같은 가정 하에 준정적 근사(Quasi-static approximation)를 이용한 수치해석 방법이 유용하다.

- 인체의 사이즈에 비하여 파장이 충분히 길다.
- 변위전류(displacement current)와 비교하여 유도전류가 지배적이다.
- 표피깊이(skin depth)가 충분히 깊다.
- 유도전류로부터 발생하는 2차 자기장은 무시 가능하다.

앞서 언급한 Impedance 및 SPFD 법은 준정적 근사에 기반을 둔 수치해석 기법으로서 인체에 입사되는 전자기장을 전기장과 자기장으로 각각 나누어 계산이 가능하다. 자기장의 경우에는 전기장처럼 인체에 의해 변형되지 않으므로 유도기전력의 원리를 적용하여 쉽게 고려할 수 있다. 반면에, 전기장의 경우에는 인체에 입사되는 전기장에 의하여 인체 표면에 유도되는 전하를 먼저 계산해야 하는데, 이를 구하기가 쉽지는 않으며, 저주파 대역일수록 인체의 복소 전도도(complex conductivity)가 높아지므로 일종의 도체로 간주할 수 있으므로 입사 전기장을 무시할 수 있다는 것이 이쪽 분야의 통설이므로, 대개의

경우 저주파 대역에서는 자기장만을 고려하여 계산이 행하여지고 있다. RBWPT의 시스템 주변에 인체에 대한 전자파 조사량 평가의 연구에서도 자기장만을 고려하여 계산한 연구가 진행되었다<sup>[8]</sup>. RBWPT 기술은 자기장 에너지를 이용하여 전력을 전송하고 있으므로 시스템 주변에는 강한 자기장이 분포하고 있으리라 예상되지만, 공진기 역할을 하는 송수신 코일에는 자기장과 전기장이 서로 에너지를 주고받는 공진 현상을 일으키고 있다. 따라서 RBWPT 시스템에서 발생하는 전자기장으로부터 인체의 전자파 조사량을 계산함에 있어서 자기장에 비해 전기장은 어느 정도의 영향이 있는지를 검토해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 RBWPT 시스템 주변에 인체가 놓여 있을 때 전자기장 조사량 계산 시 전기장의 무시 가능 여부를 조사하기 위해 그 지표로서 시스템 주변의 전기장과 자기장의 비(E/H)를 계산하여 그 범위를 검토하였다. 아울러, E/H에 따른 전기장 무시 가능 여부에 대한 검토를 위해 WPT 코일과 유사한 자기장 분포를 갖는 자기 다이폴(magnetic dipole)로부터 구 모델(sphere model)에 유도되는 전기장을 계산하였다. 이 때 자기 다이폴 주변의 변화하는 E/H에 따른 구 모델의 유도 전기장의 값을 이론 계산, 전자기장을 모두 고려한 FDTD 법, 그리고 자기장만을 고려한 impedance 법으로 얻어진 값들을 비교하였다.

## II. RBWPT 시스템 전자기장 분포

그림 1은 참고문헌 [1], [2]를 근간으로 하여 본 연구에서 설계한 단순화한 RBWPT 시스템이다. MIT 대학 연구팀에서 제안한 WPT 시스템은 2개의 송수신 루프와 2개의 공진기 역할을 하는 Helix 코일로 구성되어 있다. 송수신 루프는 공진 코일에 자기장 유도 현상을 이용하여 간접적인 급전을 취하고 있는 반면에, 본 논문에서 설계된 RBWPT 시스템은 송수신 루프를 제거하고, 공진 코일에 직접 급전을 하고 있다. 두 시스템의 주된 차이점은 MIT 방식이 송수신 루프와 공진 코일간 거리를 조정함으로써 매칭을 조정하는 반면에, 본 논문에서 설계된 시스템은 이러한 매칭 회로를 따로 두어야 한다는 것이다. 하지만, 두 시스템 모두 공진 코일로 전자기장 공진현상을 이용하여 에너지를 전송한다는 점에 있어서, 두 시스템 주변

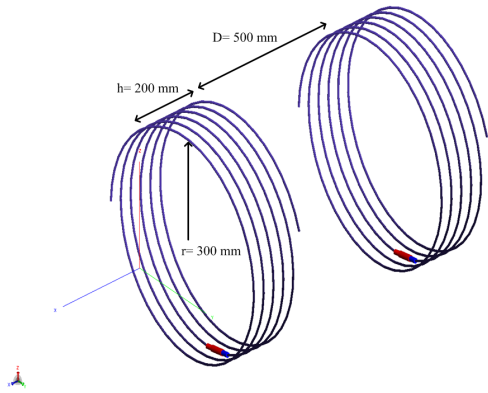


그림 1. 간략화된 전자기 공진 방식 무선전력전송 시스템  
Fig. 1. The simplified resonance-based wireless power transfer system.

의 전자기장의 분포에는 큰 차이가 없으므로, 본 논문에서는 단순화된 RBWPT 시스템을 이용하였다.

설계된 시스템의 Helix 코일의 반경은 300 mm, 코일의 높이는 200 mm, 턴수는 5.45, 그리고 두 송수신 코일간 거리는 500 mm이다. 입력과 출력의 종단 조건은 50 Ω이며, 전자기장의 해석은 MoM(Method of Moment)으로 계산하였다. 이때, 공진 주파수는 10 MHz로 전력전송효율은 87.5 %로 나타났다. 단, 본 논문에서 전력전송효율은 산란 매트릭스(scattering matrix) 투과계수의 자승으로 정의한다.

그림 2에서는 RBWPT 시스템 주변의 전기장 세기 자기장 세기로 나눈 비(E/H)의 분포를 표시한다. 공진 코일이 놓이는 부분은 검은색 사각박스로 처리하였고, E/H의 크기에 따라 등고선으로 표시하고 있다. 공진 코일의 중심축(y축) 방향은 자기장이 강하며, 상대적으로 전기장이 약해서 E/H가 50~100 Ω 정도인 반면, 공진 코일의 중심축과 직교(x축) 방향에서는 자기장에 비해 상대적으로 전기장이 강해서 300~500 Ω 정도의 값이 분포하고 있음을 알 수 있다. E/H가 적게는 50 Ω에서 크게는 500 Ω까지 분포하는 RBWPT 시스템 주변에 인체가 있을 때 그 인체 내로의 유도전기장 혹은 유도전류를 계산할 때, 인체 내로 입사하는 전기장을 무시 가능한지에 대해 다음 절에서 검토한다.

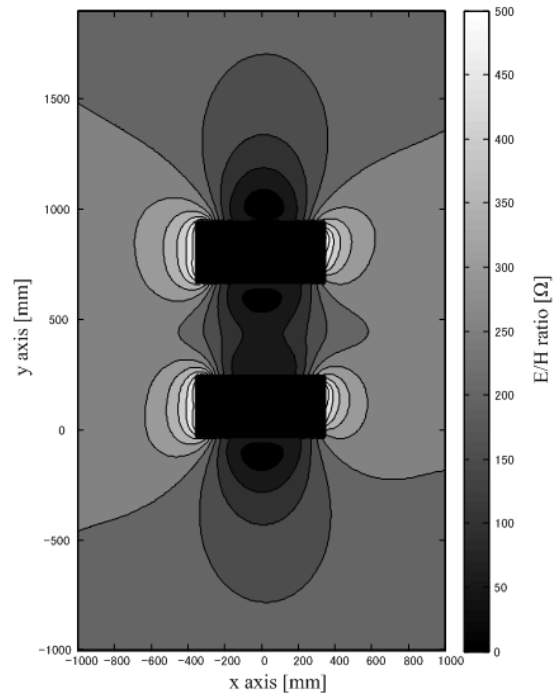


그림 2. 간략화된 전자기 공진 방식 무선전력전송 시스템 주변의 E/H 분포

Fig. 2. The E/H distribution around the simplified resonance-based wireless power transfer system.

### Ⅲ. 해석 방법

RBWPT 시스템 주변의 전자기장으로부터의 인체 전자파 조사량을 계산할 때 전기장의 무시 가능 여부를 검토하기 위해서 자기장 다이폴로부터 구 모델 안으로 유도되는 전기장을 계산한다. RBWPT 시스템을 구성하는 공진 코일 주변의 전자기장 분포는 자기장 다이폴 주변의 전자기장 분포와 유사하며, 이론 해석이 가능하다는 이점에서 RBWPT를 대신에 자기장 다이폴을 이용하였으며, 자기장 다이폴 주변의 E/H 분포를 조사하여 원하는 E/H 값을 선정하여 구 모델을 위치시키고, 구 내부로 유도되는 전기장을 계산한다. 이때, 자기장만을 고려하여 impedance 기법으로 계산한 결과를 전기장과 자기장 모두를 고려한 FDTD 기법으로 얻어진 결과, 그리고 이론적 해석 결과와 비교함으로써 입사 전기장의 무시 가능 여부를 검토한다. 각각의 계산 방법에 대해서는 다음과 같다.

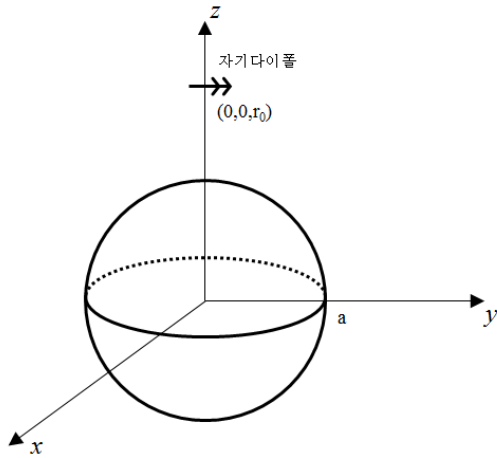


그림 3. 단순 매질의 구 모델과 자기 다이폴  
Fig. 3. The homogenous sphere model and magnetic dipole.

3-1 이론 해석

그림 3에서처럼 y 축방향의 자기모멘트  $I_m l$ 이 z 축 위에  $z=r_0$  위치(0, 0,  $r_0$ )에 놓여 있는 경우, 반경이  $a(<r_0)$ 인 구 내부의 유도전기장  $E$ 는 구 벡터 파동함수(spherical wave function vector)와 Mie 산란계수를 이용하여 아래 수식으로 표현할 수 있다<sup>[9],[10]</sup>.

$$\vec{E}(r, \theta, \Phi) = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{ a_n [k_0 r_0 h_n^{(2)}(k_0 r_0)] \vec{M}_{o1n}(kr, \theta, \Phi) - b_n [k_0 r_0 h_n^{(2)}(k_0 r_0)] \vec{N}_{e1n}(kr, \theta, \Phi) \} \quad (1)$$

여기서,  $E_0$ 는 아래와 같고

$$E_0 = \frac{jk_0 I_m l}{4\pi r_0} = \frac{\omega_0^2 \mu_0^2 I S}{4\pi r_0} \quad (2)$$

투과파의 구 벡터 파동함수  $M_{o1n}$ 과  $N_{e1n}$ 은

$$\vec{M}_{o1n}(r, \theta, \Phi) = \cos\Phi \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} j_n(kr) \vec{a}_\theta - \sin\Phi \frac{dP_n^1(\cos\theta)}{d\theta} j_n(kr) \vec{a}_\Phi \quad (3)$$

$$\vec{N}_{e1n}(r, \theta, \Phi) = \cos\Phi n(n+1) P_n^1(\cos\theta) \frac{j_n(kr)}{kr} \vec{a}_r + \cos\Phi \frac{dP_n^1(\cos\theta)}{d\theta} \frac{[kr j_n(kr)]'}{kr} \vec{a}_\theta$$

$$- \sin\Phi \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} \frac{[kr j_n(kr)]'}{kr} \vec{a}_\Phi \quad (4)$$

이며,  $j_n(x)$ 는 일종 구 벡터 벡셀 함수(spherical Bessel functions of the first kind),  $P_{mn}(x)$ 는 일종 르젠드 함수(associated Legendre functions of the first kind)이다. 또한, 투과파의 Mie 산란계수  $a_n$ 과  $b_n$ 은

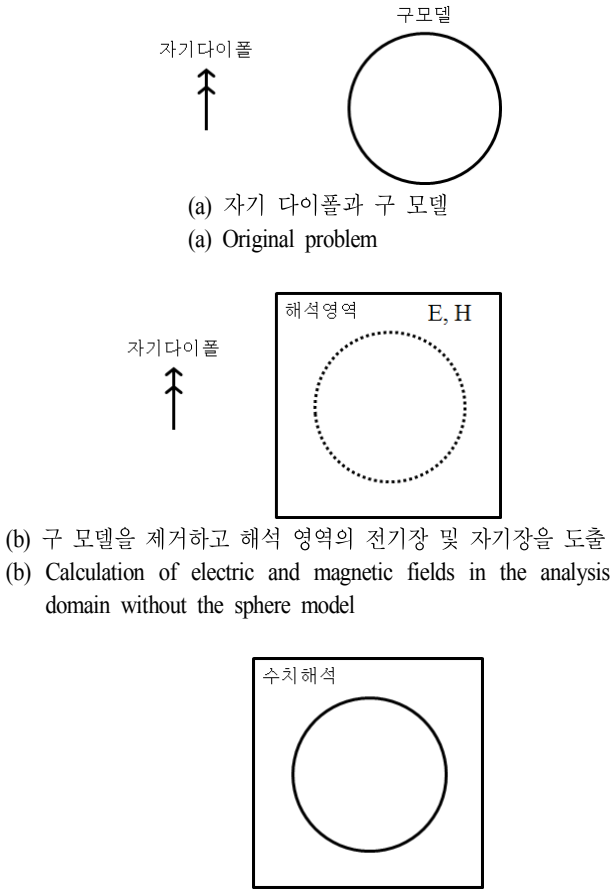
$$a_n = \frac{j/k_0 a}{h_n^{(2)}(k_0 a) [ka j_n(ka)]' - j_n(ka) [k_0 a h_n^{(2)}(k_0 a)]'} \quad (5)$$

$$b_n = \frac{j \sqrt{\epsilon_0 \epsilon} / k_0 a}{\epsilon_0 h_n^{(2)}(k_0 a) [ka j_n(ka)]' - \epsilon j_n(ka) [k_0 a h_n^{(2)}(k_0 a)]'} \quad (6)$$

여기서,  $h_n^{(2)}(x)$ 는  $n$ 차 2종 한켈 함수(Hankel functions of the first kind),  $k_0$ 는 구 외부의 파수(wave number)이다.

3-2 수치 해석

자기장 다이폴에 의한 구 내부 유도 전기장을 계산함에 있어서, 입사 전기장과 입사 자기장 모두를 고려하기 위해서는 산란(scattered-field) FDTD 기법을 입사 자기장만을 고려하기 위해서는 Impedance 기법을 이용하였다. 두 기법 모두 2 단계를 걸쳐 계산을 수행한다. 그림 4(a)와 같이 자기 다이폴로부터 발생하는 전자기장으로부터 구 모델에 유도되는 전기장을 얻기 위해 첫 단계에서는 그림 4(b)처럼 자기 다이폴로부터 일정거리에 떨어져 있는 해석하고자 하는 구 모델을 포함하고 있는 영역의 전기장과 자기장을 구 모델을 제거한 상태에서 이론해석으로부터 계산한다. 다음 단계에서는 그림 4(c)처럼 앞 단계에서 얻어낸 전기장과 자기장을 입사장으로 간주하여 구 모델을 포함한 영역에 대해 수치해석으로 문제를 푼다. 이때, 산란 FDTD 법은 전기장과 자기장 모두를 고려하고, Impedance 법은 자기장만을 고려하여 계산하였다. 이와 같은 2 단계의 수법은 생체에서 산란되어 되돌아오는 전자기장 혹은 전자파가 시스템에 다시 영향을 주는 상호영향(Interaction)은 고려할 수 없으나, 인체로부터 산란되어 시스템으로 되돌아가는 전자기장 혹은 전자파는 무



(a) 자기 다이폴과 구 모델  
(a) Original problem

(b) 구 모델을 제거하고 해석 영역의 전기장 및 자기장을 도출  
(b) Calculation of electric and magnetic fields in the analysis domain without the sphere model

(c) 앞 단계에서 얻은 전기장과 자기장을 입사장으로 간주하여 구 모델을 포함한 영역을 수치 해석  
(c) Numerical analysis for the sphere considering the previously obtained electric and magnetic fields as the incident fields

그림 4. 수치해석 절차  
Fig. 4. The procedure of numerical analysis.

시할만한 수준이므로 충분히 유효하다.

#### IV. 해석 결과

그림 5(a)는 10 MHz의 주파수에서 자기 다이폴에 수직 방향으로 거리에 따른 E/H의 값을 표시하고 있다. 이 결과로부터 자기 다이폴로부터 가까운 곳에서 5 m까지는 E/H가 점점 커져 550 Ω에 이르고 있음을 알 수 있다. 앞서 계산한 RBWPT의 주변의 E/H의 값이 최대 500 Ω까지 분포하고 있는 것과 견주어 구 모델을 자기 다이폴로부터 5 m 사이의 구간에 변화하는 E/H 값에 위치시킴으로

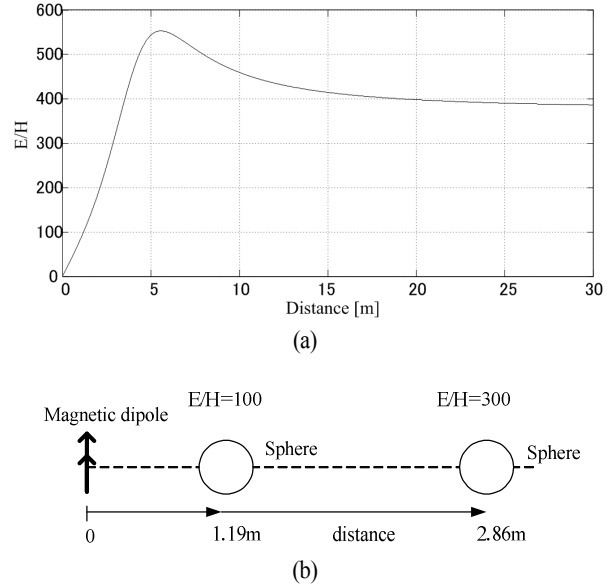


그림 5. (a) 자기 다이폴로부터 거리에 따른 E/H 값, (b) 자기 다이폴로부터 1.19 m와 2.86 m 떨어진 곳에서의 E/H 값

Fig. 5. (a) E/H ratio along the distance between the magnetic dipole and the sphere model, (b) E/H ratio at 1.19 m and 2.96 m from the magnetic dipole.

써 RBWPT 주변에서 발생하는 전자기장의 E/H와 유사한 상황에서 구 모델로 유도되는 전기장의 값을 구하였다. 이때 구 모델의 전기적 특성은 10 MHz에서 인체 근육조직의 도전율과 유전율의 2/3의 값인 0.41과 103으로 설정하였다. 이는 Gabriel의 Cole-Cole model로부터 도출된 수치를 이용하였다<sup>[11]</sup>.

본 논문에서는 자기 다이폴로부터의 변화하는 E/H에 대해 구 모델의 유도 전기장을 계산한 결과로부터 대표되는 E/H의 두 값 100 Ω와 300 Ω에서의 결과 값을 비교하여 입사 전기장의 영향에 대해서 논의한다. 그림 5(b)에서처럼 구 모델을 자기 다이폴로부터 1.19 m와 2.86 m에 위치시킴으로써 구 모델에 입사되는 전기장과 자기장의 비인 E/H가 100 Ω과 300 Ω이 되도록 하였다. 각각의 E/H에 대한 구 모델 내로의 유도전기장을 앞장에서 설명했던 이론, FDTD 기법, Impedance 기법으로 얻어진 결과에 대해 그림 6(a)와 (b)에 보이고 있다. 그림 6(a)에서처럼 E/H가 100 Ω인 경우에는 입사 자기장만을 고려하여 계

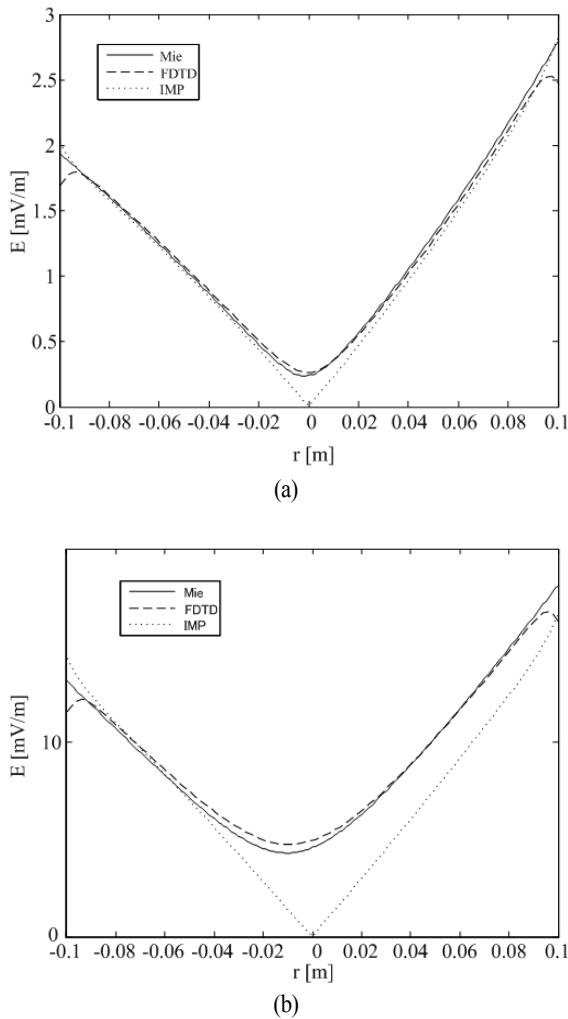


그림 6. (a) E/H가 100 Ω인 경우, 구 내부의 유도 전기장, (b) E/H가 300 Ω인 경우, 구 내부의 유도 전기장

Fig. 6. (a) electric field intensity induced the sphere when E/H ratio is 100 Ω, (b) electric field intensity induced the sphere when E/H ratio is 300 Ω.

산한 Impedance 기법의 결과는 입사 자기장과 입사 전기장 모두를 고려한 이론값과 FDTD 기법의 결과와 원점에서 미세한 차이를 보이고, 다른 부분에서는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이와 반면에, 그림 6(b)에서처럼 E/H가 300 Ω인 경우에는 Impedance 기법으로 얻어진 결과가 이론값과 FDTD 기법의 결과와 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 E/H가 점점 클수록 더욱 심

하게 나타났다. 입사 자기장에 의해서 구 모델에 유도되는 전기장은 Faraday 법칙에 의해서 구 모델의 바깥쪽에서 가장 크게 유도되고, 중심에서 0이 된다. 반면에 입사 전기장은 구 모델의 표면에 전하를 대전시키고, 이러한 표면 전하에 의해서 어느 한쪽 방향으로 유도 전기장이 형성되게 된다.

이처럼 상대적으로 입사 전기장에 의해 작게 유도되는 유도전기장은 입사 자기장에 의해 유도된 유도전기장과 벡터 합으로 합쳐져서 최종적인 구 내부의 유도전기장이 된다. 그림 6(a)에 비해 그림 6(b)를 보면 이러한 현상이 더욱 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 입사 자기장에 비해 상대적인 입사 전기장이 더욱 커져서 E/H가 100 Ω인 경우보다 300 Ω인 경우가 더욱 극명한 차이를 보인다. 이로서 전자기 공진현상을 이용하는 무선전력전송 기술의 경우, 인체의 조사량 평가를 할 때 RBWPT 시스템 주변의 E/H를 고려하여 입사 전기장에 의한 영향을 평가해야 할 것이다.

### V. 결 론

본 논문에서는 전자기 공진 현상을 이용한 무선전력전송(RBWPT) 시스템에 의한 인체 조사량 평가에 있어서 입사 전기장이 무시 가능한지에 대해 검토하였다. 이를 위해 단순화된 RBWPT 시스템을 설계하고, 이 시스템 주변의 자기장의 세기 대비 전기장의 세기(E/H)를 평가하였다. 그 결과, E/H가 RBWPT 코일의 중심에서처럼 자기장이 큰 곳에서는 대략 50 Ω 이하로 코일의 중심축과 수직 방향의 부근에서는 대략 500 Ω 정도의 큰 값을 보였다. E/H가 크기는 500 Ω까지 분포하는 RBWPT의 주변에 인체에 입사하는 전기장의 영향을 평가하기 위해서 자기다이폴 주변에 다양하게 변화하는 E/H에 인체 구 모델을 위치시키고, 유도전기장을 계산하였다. 이때 입사 자기장만을 고려하여 Impedance 기법으로 얻은 결과를 입사 자기장과 입사 전기장 모두를 고려하여 계산한 FDTD 기법의 결과 및 이론적 해석 값과 비교 검토함으로써 입사 전기장의 영향을 평가하였다. 그 결과, E/H가 50 Ω 이상부터 입사 전기장에 의한 영향이 나타나기 시작하였으며, 그 크기가 커질수록 더욱 큰 차이를 보였다. 따라서 RBWPT

시스템에서 전자기파 인체 조사량을 평가할 시 입사 전기장의 E/H를 조사하여 50 옴을 넘는 부분에 대해서는 전기장의 영향을 고려해야 한다.

References

[1] Aristeidis Karalis, J. D. Joannopoulos, and Marin Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Ann. Phys.*, vol. 128, no. 2, pp. 804-807, 2006.

[2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 84-86, Jul. 2007.

[3] 박종민, 남상욱, "무선 전력 전송에 관한 기본적인 고찰", 한국전자과학회논문지, 25(10), pp. 959-965, 2014년 10월.

[4] Ju-Hui Kim, Byung-Chul Park, and Jeong-Hae Lee, "New analysis method for wireless power transfer system with multiple n resonators", *JEES*, vol. 13 no. 3, pp. 173-177, Sep. 2013.

[5] K. S. Kunz, R. J. Luebbers, *Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, Boca Raton, FL, USA: CRC, 1993.

[6] J. DeFord, O. P. Gandhi, "An impedance method to cal-

culate currents induced in biological bodies exposed to quasi-static electromagnetic fields", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-27, no. 3, pp. 168-173, Aug. 1985.

[7] T. W. Dawson, J. D. Moerlose, and M. A. Stuchly, "Comparison of magnetically induced ELF fields in humans computed by FDTD and scalar potential FD codes", *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 63-71, 1996.

[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", *Phys. Med. Biol.*, vol. 57, pp. 4991-5002, 2011.

[9] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1941.

[10] J. J. Bowman, et al., *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, Hemisphere Publishing Corp. 1987.

[11] C. Gabriel, S. Gabriel, "Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies", *Brooks Air Force Base, Brooks City Base, TX, USA*, retrieved Apr. 2006. Available: <http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/reports/dielectric/home.html>

박 상 욱



2003년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
 2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2008년 3월: The University of Electro-Communications 정보통신공학과 (공학박사)  
 2008년 4월~2009년 8월: The University of Electro-Communications 조교수

2009년 9월~2013년 4월: National Institute of Information and Communications Technology 연구원

2013년 6월~현재: 자동차부품연구원 전자기파연구센터 선임 연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, Microwave Transmission Circuits, Numerical Analysis, Biomedical EMC, WPT