

FDTD 방법을 이용한 휴대폰 전파의 인체 흡수전력량 산출

Computation of Absorbed Power Radiated from a Portable Phone Using FDTD

김채영* · 이승학* · 정백호**

Che-Young Kim · Seung-Hak Lee · Baek-Ho Jung

요 약

본 논문은 유한차분 시간영역 해석법(Finite-Difference Time-Domain method)을 사용하여 1.8 GHz용 휴대폰으로부터 방출된 전파의 인체 두부(頭部)에 흡수된 전력량을 산출하였다. 이를 위하여 인체 두부를 7층 매질로 모델링하였고, 휴대폰은 금속상자에 부착된 모노폴 안테나로 모델링하였다. 모델링에 사용된 인체 두부와 휴대폰의 크기는 상용의 크기를 갖도록 하였다. 이를 위하여 모노폴 안테나의 길이는 4.5 cm으로 하였다.

설정된 모델링하에서 인체의 위해(危害) 정도를 알려주는 지수인 비흡수율(SAR-Specific Absorption Rate)의 분포를 계산하였고 그 결과 비흡수율이 최대가 되는 지점은 인체 두뇌의 깊은 점인 아닌 두부의 표피근 방임을 알게 되었다. 그리고 설정된 조건하에서 그 최대치는 1.4 mW/g이었는데, 이는 국제 권고치인 1.6 mW/g보다 약간 작은 값이었다.

Abstract

Based on FDTD(Finite-Difference Time-Domain) method the human head absorbed power radiated from a 1.8 GHz portable phone is computed. For this computation the 7 layered media for the human head modeling and the monopole antenna attached to metallic box for the portable phone are used. To reflect the real circumstances typical sizes of human heads and portable phones are considered in the calculation. The length of monopole antenna is 4.5 cm.

Under the predetermined model the distribution of SAR over the human head are calculated, and from which the place of maximum SAR is near the head skin surface, not deep places far into the head. The computation shows the maximum SAR to be 1.4 mW/g somewhat less than the internationally adopted value of 1.6 mW/g.

I. 서 론

최근 이동통신분야의 성장에 따라서 휴대폰이 널리 보급되었고, 이들 휴대폰은 인체 두부에 밀착되

어 사용되고 있다. 그 결과 휴대폰 전파의 인체 유해설이 나옴에 따라 휴대폰 전파가 인체 두부에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 최근에는 셀룰라 밴드인 900 MHz로부터 PCS 밴드인 1.8 GHz로 주파수 대역(帶域)이 상향조정

*본 연구는 1996년도 한국과학재단(과제번호: 961-0923 133-2) 연구비 지원에 의한 결과임

*경북대학교 전자·전기공학부(Division of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook National University)

**호서대학교 정보통신공학부(Dept. of Information & Communication Eng., Hoseo University)

· 논문 번호 : 980309-029

· 수정완료일자 : 1998년 5월 29일

되는 추세이다. 셀룰라 밴드전파의 인체 영향에 관한 연구결과는 많이 공개되고 있으나 PCS 밴드 전파에 대한 연구는 상대적으로 적다. 따라서 본 연구에서는 PCS 밴드로 한정하였다. 이 밴드에서 휴대폰 전파에서 방출된 전파의 인체 두부에 흡수된 전력량(量)을 계산하였다. 위해(危害)의 관점에서는 흡수된 전력과 관계된 비흡수율(比吸收率, SAR)이 중요한 지수가 된다. 본 논문에서는 두부(頭部) 내부에서의 비흡수율 분포를 산출하였다. 그 결과 일반적인 예측과 같이 비흡수율이 최대가 되는 지점은 두피의 바로 밑부분임을 알게 되었고, 설정된 모델하에서 최대치는 1.4 mW/g이었는데 이는 ANSI의 국제 권고치인 1.6 mW/g보다 다소 낮은 값이다.

비흡수율을 얻는 방법은 크게 두 가지이다. 이는 동물 또는 사람에 대한 직접적인 생체실험법과 의사(擬似) 모델에 대한 수치해석법이다. 생체실험법은 본 논문의 내용이 아니기에 더 이상의 언급은 하지 않으며, 본 논문에서는 의사 모델에 대한 수치해석법에 대해 논하고자 한다. 수치해석 방법에도 여러 가지가 있는데 본고에서는 유한차분-시간영역(FDTD) 해석법을 사용하였다^{[1]-[6]}. 유한차분 시간영역 해석법을 사용함으로써 정상응답과 과도응답 해석이 가능해진다^{[7]-[9]}. 그리고 비균질 매질로 모델링된 구조물에 대한 응답 역시 비교적 손쉽게 얻을 수 있기에 이 해석법을 채택하였다.

유한차분-시간영역 해석법을 휴대폰 문제에 적용하기 위해서는 휴대폰과 인체 두부를 적절히 모델링하여야 하며, 채택된 모델링에 따라서 해의 정확도가 달라진다. 먼저 휴대폰 모델링은 다음과 같다. 휴대폰 몸체는 금속상자로 두었고, 이 금속상자에 모노폴 안테나를 장착하였다. 이 안테나의 급전전압은 정현파 함수로 가정하였다^[10]. 인체 두부는 뼈, 수정자 등의 부위에 따라서 전기상수의 값이 서로 다르다. 따라서 이를 반영하기 위하여 Jensen 모델을 사용하였으며^[2], 본 모델에서는 7층 매질을 사용하였다. 전체 셀의 크기는 45×55×60 [cells³]이고 각 셀의 크기 Δ=6.56 mm이다. 그리고 단말기와 인체 두부와의 거리는 3Δ로 두었다.

단말기에 근접한 인체 두부에 흡수되는 전력을 산출하기 위해서는 각 전장성분들의 정상상태 이후

의 값을 알아야 한다. 이를 구하기 위하여 함수의 직교성을 이용한 추출 알고리즘을 이용하였다^[11].

II. 본 론

2-1 유한차분-시간영역법

미분방정식 형태의 맥스웰 방정식에 유한차분-시간영역법을 적용하여 이 방정식을 푸는 법은 Yee에 의해 제시되었고^[1], 이는 이미 알려진 방법이기여 여기서는 간략히 기술한다.

미분방정식 형태의 맥스웰 방정식은 다음과 같으며, 여기서 전위함(項)들은 나타나 있지 않다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \bar{E} &= -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \bar{H} &= \sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 σ, μ, ε은 각각 전도도, 투자율 및 유전율이다. 식 (1)을 직각좌표계에서 기술하면 다음 식 (2)로 주어지는 스칼라 방정식이 된다.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2-2)$$

단 ε=ε_rε₀, μ=μ_rμ₀이다. 식 (2)는 시간변화율 전장과 자장의 x축 성분이며, 나머지 시변 전장장 성분 역시 식 (2)와 유사한 형태가 된다^{[7],[8]}.

Yee의 표시법에 따라 공간 좌표(iΔx, jΔy, kΔz)에 대응되는 점을 (i, j, k)로 표기한다. 여기서 Δ=Δx=Δy=Δz는 공간 증가분이고 Δt는 시간 증가분이다. Δt는 안정성 조건에 따라서 Δt=Δ/(2c)로 두며, 여기서 c는 광속도이다.

유한차분-시간영역법으로 전파와 문제를 해석할 때, 유한차분화된 방정식이 만족해야 하는 흡수경계 조건이 있다. 본 논문에서는 Mur의 2차 흡수 경계조건을 사용하였고 해석하고자 하는 물체와 흡수 경계면 간의 최소거리는 10Δ로 두었다^{[1],[12]}.

2-2 대상 구조물의 모델링

그림 1은 모델링된 인체 두부와 휴대폰 안테나이다. 휴대폰은 모노폴 안테나가 금속상자에 장착된 형태로 모델링하였다. 금속상자의 크기는 $47.5 \times 24 \times 122$ [mm³]이고 모노폴 안테나의 길이는 4.5 cm로 하였다. 또한 안테나 반경은 셀 크기의 10분의 1 크기인 0.656 mm로 두었다. 인체 두부의 모델링시 사용된 셀의 개수는 $24 \times 33 \times 31$ [cells³]이고, 그 셀의 크기는 $15.74 \times 21.65 \times 20.34$ [cm³]이다. 그리고 휴대폰과 인체 두부가 포함된 전체 해석공간의 크기는 $45 \times 55 \times 60$ [cells³]이다. 휴대폰과 인체 두부와의 거리는 3Δ 로 하였다. 그림 1에서 우측은 얼굴면이고, 좌측은 뒷머리부분이다.

인체 두부는 공기층을 제외한 7층의 매질로 구성하였으며, 각 매질의 전기적 상수는 유전율과 전도율만을 사용하였다.

2-2-1 휴대폰 모델링

휴대폰으로부터 공간으로 전력을 복사시키기 위해서는 안테나 급전점에 전원을 인가하여야 한다. 전원 인가법에는 델타갭 여기법과 자기 프릴(magnetic frill)법이 있는데, 여기서는 자기 프릴법을 이용하였다^[10]. 자기 프릴법을 이용한 경우의 x축

및 y축 전장성분은 다음 식으로 주어진다.

$$E_x^n(i, j, k) = -E_x^n(i-1, j, k) = -\frac{2V(n\Delta t)}{\Delta x \ln\left(\frac{\Delta x}{r}\right)} \quad (3-1)$$

$$E_y^n(i, j, k) = -E_y^n(i, j-1, k) = -\frac{2V(n\Delta t)}{\Delta y \ln\left(\frac{\Delta y}{r}\right)} \quad (3-2)$$

여기서 $V(n\Delta t) = V_0 \cos(2\pi f n\Delta t)$ 이고, r 은 안테나로부터의 거리이다. 이러한 접근법에서는 각 전장 성분들은 안테나 주위를 회전하는 등가 자장 전류원으로 간주된다.

휴대폰에 대한 모델링 중 중요한 부분은 안테나의 반경 설정이다. 이의 설정에 따라서 근접장의 값이 달라지며, 그 결과 입력 임피던스가 달라진다. 반경의 크기는 해석에서 사용한 단위 격자 크기와 상대적 크기에 의해 정해지는데, 본 논문에서는 사용 파장의 10분의 1 크기로 정하였다. 그러나 이 경우 안테나 주위의 전자장은 전형적인 유한차분 전자장 식을 사용할 수가 없기 때문에 다음과 같은 가는 도선 근사(thin wire approximation)를 활용하였다^[13].

가는 도선 근사는 도체 원통의 중심 축 방향에 E_z 전장 성분이 위치해 있다고 가정한다. 안테나에서 복사된 전자장의 크기는 안테나로부터의 거리에 반비례한다는 가정 하에서, x축 및 y축 전자장 성분은 다음처럼 근사화 된다.

$$H_x(i, r, k) \cong H_x(i, j, k) \frac{\Delta y}{2r} \quad (4-1)$$

$$H_y(r, j, k) \cong H_y(i, j, k) \frac{\Delta x}{2r} \quad (4-2)$$

$$E_x(r, j, k) \cong E_x(i, j, k) \frac{\Delta x}{2r} \quad (5-1)$$

$$E_y(i, r, k) \cong E_y(i, j, k) \frac{\Delta y}{2r} \quad (5-2)$$

식 (4)는 안테나 주위를 회전하는 자장 성분이고, 식 (5)는 안테나에 인접한 전장 성분이다. 안테나의

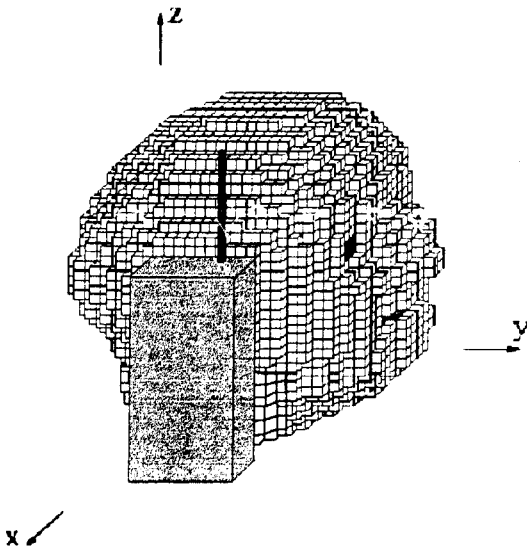


그림 1. 인체두부와 휴대폰 모델링
Fig. 1. The human head and the portable phone model.

축 상을 따른 E_z 는 영이고, 안테나 축 상에 놓이지 않은 E_z 는 Δz 를 따라서 균일하다고 가정한다. 단, 이러한 근사는 안테나에 바로 인접한 격자들에만 적용되며, 그 외의 격자들에서는 전형적인 유한차분-시간영역 해석법을 적용한다. 식 (6)으로 주어진 Faraday 식에 유한차분-시간영역법을 적용하면, 인접한 격자에 대한 유한차분-시간영역 방정식이 얻어진다.

$$\oint_c \bar{E} \cdot d\bar{l} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \iint_s \bar{H} \cdot d\bar{s} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 안테나 주변의 자장에 대한 식을 얻을 수 있다.

2-2-2 인체 두부 모델링

인체 두부를 작은 입방체들의 모임으로 나타낸 것이 그림 1이며, 한 개의 작은 입방체가 단위 셀이 된다. 인체 두부의 각 해당 부위에 따라서 매질의 전기상수 값이 달라지는데, 본 논문에서는 7개의 다른 부위를 고려하였고 각 부위들의 종류와 이에 대응되는 전기상수의 값을 표 1에 정리하였다^[6]. 표 1에 보인 유전상수와 전도도는 1.8 GHz에서 계산된 값이다. 인체 두부가 놓인 공간의 셀 크기는 $24 \times 33 \times 31$ [cells³]이며, 이는 $15.74 \times 21.65 \times 25.58$ [cm³]의 부피를 갖는다. 그리고 인체 두부와 휴대폰간의 거리는 3Δ 로 하였다.

두 매질의 경계면에 놓인 전장성분의 계산시는 두 매질의 각 전도도와 유전율의 평균을 취한 후에 해당 전장성분을 구하였다. 즉 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2, \quad \sigma = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 \quad (7)$$

여기서 유전율과 전도율에 붙인 첨자 1과 2는 서

표 1. 각 부위의 매질상수

Tissue	Air	Bone	Skin / Fat	Muscle	Brain	Humour	Lens	Cornea
Medium number	0	1	2	3	4	5	6	7
Dielectric constant (ϵ_r)	1.00	8.00	32.0	55.0	53.0	75.0	41.0	50.0
Conductivity (σ [S/m])	0.00	0.16	0.52	1.90	1.70	2.40	1.29	2.32

로 접한 두 매질번호를 의미한다.

그림 2(a)와 그림 2(b)는 모델링된 인체 두부의 수평 단면과 수직 단면을 각각 나타낸다^[6]. 그림 2에서 보는 것처럼, 두부를 7개의 서로 다른 부위로 구분하였고 각 부위의 전기상수 역시 서로 다르게 설정되었다.

2-2-3 비흡수율(SAR)

SAR을 구하기 위해서는 인체두부 내의 정상상태 이후의 전자장 값이 결정되어야 한다. 이를 구하기 위해서 정현파 함수의 직교성을 이용한 추출 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘에서는 전자장의 실효값을 구하는 것이 아니라 전자장의 최대값을 구하게 된다.

$$\hat{E}_N = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N E(i\Delta t + T_{ini}) e^{-j\omega(i\Delta t)} \quad (8)$$

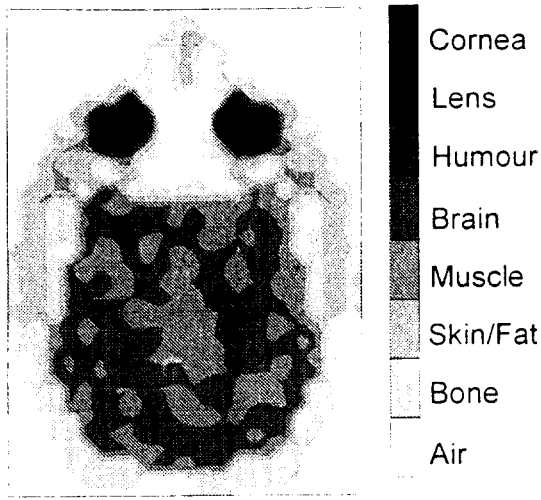
여기서 \hat{E}_N 은 전장 성분의 복소 전장값이다. T_{ini} 는 전장이 정상상태에 도달한 후, 그 전장의 절대치와 위상을 추출하는 시작시간이다. N 은 현재 합해지는 반복 회수이고 ω 는 전원 주파수이다. 합의 과정이 진행됨에 따라서 과도기의 전장이 정상상태의 전장 값으로 수렴하게 된다.

수렴된 전장으로부터 다음 식을 사용하여 비흡수율을 구하게 된다.

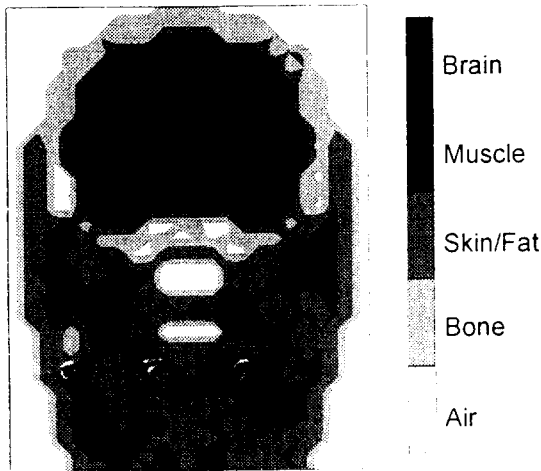
$$SAR = \frac{\sigma E_r^2}{2\rho} \quad (9)$$

여기서 σ 는 매질의 전도도이고 ρ 는 매질의 밀도이다. E_r 는 각 단위 격자의 중심에 위치한 전체 전장을 나타낸다. 그리고 인체 두부 전체에 흡수된 총 흡수 전력은 식 (10)에 의해서 산출된다.

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \iiint_v \sigma E_r^2 dv \quad (10)$$



(a)



(b)

그림 2. 모델링된 7개 부위

(a) 인체두부의 수평단면

(b) 인체두부의 수직단면

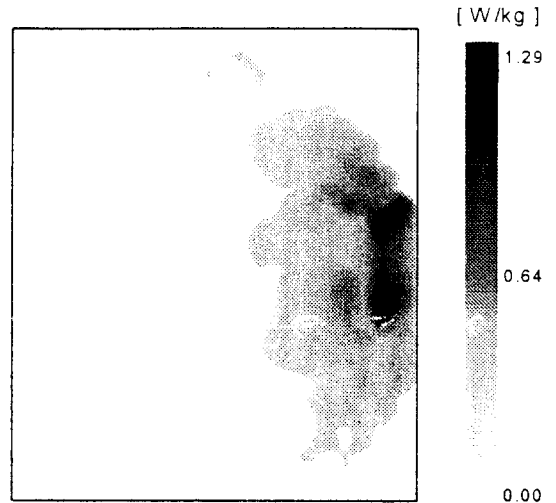
Fig. 2. 7-layered human head

(a) Horizontal cross-section of the human head.

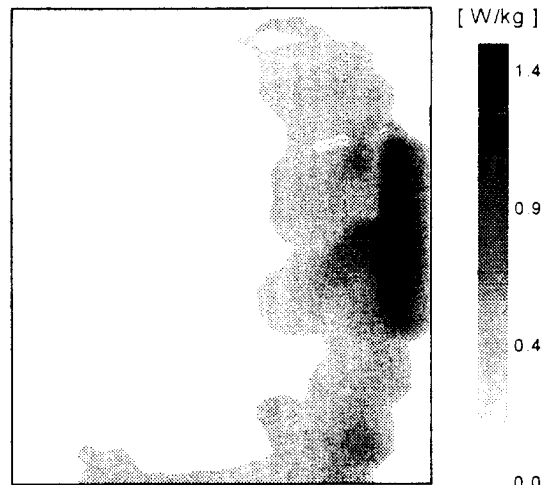
(b) Vertical cross-section of the human head.

여기서 P_{abs} 는 인체가 흡수한 전체 흡수전력을 나타낸다.

그림 3(a)와 그림 3(b)는 인체두부의 수직단면



(a)



(b)

그림 3. 인체두부의 비흡수율 분포도

(a) 수직단면 비흡수율

(b) 수평단면 비흡수율

Fig. 3. SAR distribution over human head.

(a) SAR of horizontal cross-section of the human head.

(b) SAR of vertical cross-section of the human head.

과 수평단면 상에서의 SAR분포도이다. 이 그림으로부터 휴대폰에 가장 근접한 부위에서의 비흡수율

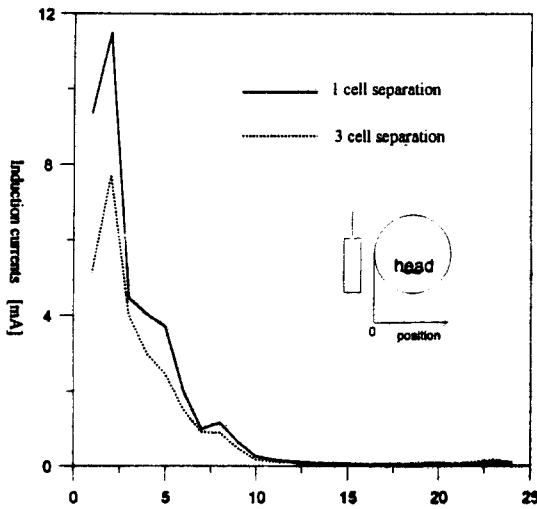


그림 4. 인체두부 내부의 유기 전류
Fig. 4. Induced current inside the human head.

이 가장 큰데 이는 흡수된 전력이 그 근처에서 가장 크기 때문이다. 또한 계산된 비흡수율 분포도를 조사한 결과, 대부분의 전력이 두피 근처에서 흡수됨을 알 수 있었다. 이러한 사실이 각 부위에 따른 의학적인 병리현상과 결합되면, PCS 밴드 휴대폰이 인체에 어떤 종류의 병적 위해(危害)를 가할 수 있는지를 알 수 있게 된다.

그림 4는 휴대폰과의 간격이 1 Δ 와 3 Δ 일 때의 인체두부 내부에 유기된 유기 전류를 나타낸 그림이다. 이러한 유기전류는 인체두부 내의 자장과 두부가 가진 유한한 전도도에 기인하는 것이다. 이 그림 역시 그림 3의 비흡수율 분포도에서 본 것처럼, 안테나에 근접해 있는 부위의 유기전류가 높게 나타남을 볼 수 있다.

III. 결 론

본 논문은 1.8 GHz의 동작 주파수를 갖는 휴대폰에 근접한 인체 두부의 비흡수율 분포도를 계산하였다. 본 계산에서 RF 출력이 560 mW일 때 최대 비흡수율 수치는 1.42 mW/g이었는데, 이는 국제 권고치인 ANSI 규정의 1.6 mW/g보다 다소 낮은 수치이다.

그리고 휴대폰 전력의 가장 높은 흡수 부위는 인

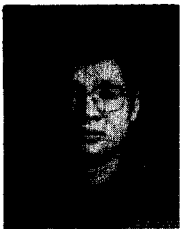
체 두피의 바로 아래 부위이었다. 또한 흡수된 전력은 인체 두부에 깊게 침투하지 못한다는 것을 알 수 있었다. 이 사실은 계산된 비흡수율 분포도와 유기전류 분포도로부터도 알 수 있었다. 유기전류는 피부 근처에서 가장 높게 나타났고, 두부 안쪽으로 향할수록 낮아짐을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상들과 의학적인 병리현상이 서로 결부되면 휴대폰에 의해 어떠한 종류의 위해가 인체에 나타나게 되는지를 좀 더 구체적으로 알게 되리라 보며, 본 논문의 내용은 이러한 분야에도 도움을 주게 되리라 본다.

참 고 문 헌

- [1] M. Okoniewski and M. A. Stuchly, "A study of the handset antenna and human body interaction," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1855-1864, Oct. 1996.
- [2] M. A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "EM interaction of handset antennas and a human in personal communications," *IEEE Proceedings*, vol. 83, no. 1, pp. 7-17, Jan. 1995.
- [3] P. Bernardi, M. Cavagnaro and S. Pisa, "Evaluation of the SAR distribution in the human head for cellular phones used in a partially closed environment," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, no. 3, pp. 357-365, Aug. 1996.
- [4] O. P. Gandhi, G. Lazzi and C. M. Furse, "Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1844-1897, Oct. 1996.
- [5] V. Hombach, K. Meier, M. Burkhardt and N. Kuster, "The dependence of EM energy absorption upon human head modeling at 900 MHz," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1865-1873, Oct. 1996.

- [6] M. A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "Performance analysis of antennas for handheld transceiver using FDTD," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 42, no. 8, pp. 1106-1113, Aug. 1994.
- [7] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 14, pp. 302-307, May 1966.
- [8] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, no. 8, pp. 623-630, Nov. 1975.
- [9] A. Taflove, "Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady-state electromagnetic-penetration problems," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 22, no. 3, pp. 191-202, Aug. 1980.
- [10] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics.*, pp. 279-289, CRC, 1993.
- [11] R. Mittra and P. H. Harms, "A new finite-difference time-domain(FDTD) algorithm for efficient field computation in resonator narrow-band structures," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters.*, vol. 3, no. 9, pp. 316-318, Sept. 1993.
- [12] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 23, no. 4, pp. 377-382, Nov. 1981.
- [13] A. Taflove, K. R. Umashankar, B. Beker, F. Harfoush, and K. S. Yee, "Detailed FDTD analysis of electromagnetic fields penetrating narrow slots and lapped joints in thick conducting screens," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, pp. 247-257, Feb. 1988.

김 채 영



1976년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1978년 2월 : 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1985년 9월~1993년 2월 : 미국 MIT

공대 연구과학자

1979년 4월~1992년 9월 : 경북대학교 전자공학과 전임강사 - 부교수

1992년 10월~현재 : 경북대학교 공과대학 전자·전기공학부 전자파 연구실 교수

[주 관심분야] 이동통신 전파환경, 무선망 설계, 무선호출기 안테나 설계, 전자파 이론 및 응용 등

이 승 학



1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1998년 3월~현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전자파 산란특성, 안테나

해석 및 설계, 원격탐지

정 백 호



1985년 2월 : 경북대학교 전자공학과
(공학사)

1989년 2월 : 경북대학교 대학원 전자
공학과 (공학석사)

1997년 8월 : 경북대학교 대학원 전자
공학과 (공학박사)

1986년 5월~1986년 12월 : 한국조폐

공사 기술연구소 연구원

1989년 2월~1994년 3월 : 국방과학연구소 연구원

1995년 9월~1996년 10월 : 경북대학교 전자·전기공학부
조교

1997년 8월~현재 : 호서대학교 정보통신공학부 전임강사

[주 관심분야] 전자파 산란특성, 이동통신 전파환경, 안테나
해석 및 설계