

휴대폰 복사전파에 의한 인체 두뇌의 흡수전력 해석

정희원 정 광 욱*, 이승 학**

An analysis for the absorbed power in human head from the radiating wave of handheld phone.

Kwang-Wook Jung*, Seung-Hak Lee**, *Regular Members*

요 약

본 논문은 유한차분 시간영역 해석법 (Finite-Difference Time-Domain method)을 사용하여 1.8GHz의 휴대폰으로부터 방사된 전파 중 인체 두부(頭部)에 흡수된 전력양을 산출하였다. 이를 위하여 인체두부는 7층 매질로, 휴대폰은 금속상자에 부착된 모노폴 안테나로 각각 모델링하였다. 모델링에 사용된 인체 두부와 휴대폰의 크기는 상용의 크기를 갖도록 하며 모노폴 안테나의 길이는 5.5 cm로 정하였다. 설정된 모델링하에서 인체의 위해(危害) 정도를 알려주는 지수인 비흡수율(SAR-Specific Absorption Rate)의 분포를 계산하고 그 결과 비흡수율이 최대가 되는 지점은 인체 두부의 깊숙한 점이 아닌 두부의 표피근방임을 알게 되었다. 설정된 조건하에서 계산 결과 비흡수율의 최대치는 0.031 W/kg를 얻었고 이는 국제 권고치인 1.6 W/kg보다 훨씬 작은 값이었다.

ABSTRACT

Based on FDTD(Finite-Difference Time-Domain) method the absorbed power to the human head which radiated from a 1.8 GHz portable phone is computed. For this computation the human head was modeled by 7 layered media and the mobile phone was modeled a monopole antenna attached to metallic box.

To reflect the real circumstances typical sizes of human head and portable phone were considered in calculation and the length of monopole antenna was decided by 5.5 cm. Under the predetermined model the distributions of SAR over the human head were calculated, and from which we got the results that the place of maximum SAR was near the head skin surface, not deep places far into the head. The numerical results are shown. The computation results are shown that the maximum SAR to be 0.031 W/kg and it's much less than the internationally adopted value of 1.6 W/kg.

I. 서 론

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

IMT2000 밴드인 1.8 GHz와 2.4GHz로 주파수 대역(帶域)이 상향조정되는 추세이다. 셀룰라 밴드전파의 인체 영향에 관한 연구결과는 많이 공개되고 있으나 PCS 밴드 전파에 대한 연구는 상대적으로 적은 실정이어서 본 연구에서는 PCS 밴드로 한정하여, 1.8 GHz 대역의 휴대폰에서 방출된 전파가 인체 두부에 흡수되는 전력양(量)을 계산하였다. 위해(危害)의 관점에서는 흡수된 전력파 관계된 비흡수율(比吸收率, SAR)이 중요한 지수가 되므로 본 논문

* 구미1대학 정보통신전공(kwjung@kumi.ac.kr)

** 경북대학교 전자·전기공학부(jsh@palgong.kyungpook.ac.kr)
논문번호 : 00021-0325, 접수일자 : 2000년 3월 25일

문에서는 두부(頭部)내부에서의 비흡수율 분포를 산출하였다. 그 결과 일반적인 예측과 같이 비흡수율이 최대가 되는 지점은 두피의 바로 밑 부분인음을 알게 되었고, 설정된 모델하에서 RF 출력을 3.75 mW로 하였을 때 비흡수율의 최대치는 0.031 W/kg로 계산되었다.

비흡수율을 얻는 방법은 크게 두 가지가 있으며 이는 동물 또는 사람에 대한 직접적인 생체실험법과 의사(擬似) 모델에 대한 수치해석법인데, 본 논문에서는 의사 모델인 수치해석법에 대해 논하고자 한다. 수치해석 방법에도 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 유한차분-시간영역(FDTD) 해석법을 사용하였다^[1-6]. 유한차분 시간영역 해석법을 사용하면 정상응답과 과도응답 해석이 가능하고^[7,9], 비균질 매질로 모델링된 구조물에 대한 응답 역시 비교적 손쉽게 얻을 수 있기 때문이다.

유한차분-시간영역 해석법을 휴대폰 분체에 적용하기 위해서는 휴대폰과 인체 두부를 적절히 모델링 하여야 하며, 채택된 모델링에 따라서 해의 정확도가 달라진다. 먼저 휴대폰의 경우는 휴대폰 몸체를 금속상자로 하고, 이 금속상자에 모노폴 안테나가 장착된 형태로 모델링 하였으며, 이 안테나의 급전전압은 정현파 함수로 가정하였다^[10]. 인체 두부는 뼈, 수정자 등의 부위에 따라서 전기상수의 값이 서로 다르므로, 이를 반영하기 위하여 Jensen 모델을 사용하였고^[2], 매질은 7층으로 하였다. 전체 셀의 크기는 $45 \times 54 \times 75$ [cells³]로 하고 각 셀의 크기는 $\Delta = 5$ mm, 그리고 단말기와 인체 두부와의 거리는 1Δ 로 두었다. 단말기에 근접한 인체 두부에 흡수되는 전력을 산출하기 위해서는 각 전장성분들의 정상상태 이후의 값을 알아야 하므로 이를 구하기 위하여 함수의 적교성을 이용한 추출 알고리즘을 이용하였다^[11].

II. 본 론

1. 유한차분-시간영역법

미분방정식 형태의 맥스웰 방정식에 유한차분-시간영역법을 적용하여 해를 구하는 방법이 Yee에 의해 제시되었다^[1]. 미분방정식 형태의 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

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

여기서 σ, μ, ϵ 은 각각 전도도, 투자율, 및 유전율이며, 식 (1)을 직각좌표계에서 기술하면 다음 식 (2-1), (2-2)로 주어지는 스칼라 방정식이 된다.

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

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

여기서 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \mu = \mu_r \mu_0$ 이다. 식 (2)는 시간변화율 전장과 자장의 x 축 성분이며, 나머지 시변 전장 성분 역시 식 (2)와 유사한 형태가 된다^[7, 8].

유한차분-시간영역법으로 전자파 문제를 해석할 때, 유한차분화된 방정식이 만족해야 하는 흡수경계 조건이 있으며, 본 논문에서는 Berenger의 완전정합층(Perfectly Matched Layer)을 사용하였고 해석하고자 하는 물체와 흡수 경계면 간의 최소거리는 5Δ 로 두었다^[12].

2. 대상 구조물의 모델링

그림 1은 모델링된 인체 두부와 휴대폰 안테나이다. 휴대폰은 모노폴 안테나가 금속상자에 장착된 형태로 모델링하였다. 금속상자의 크기는 $45 \times 25 \times 120$ [mm³]이고 모노폴 안테나의 길이는 5.5 cm로 하였으며, 안테나 반경은 셀 크기의 10분의 1 크기인 0.5 mm로 두었다. 인체 두부의 모델링시 사용된 셀의 개수는 $24 \times 33 \times 31$ [cells³]이고, 한 셀의 크기는 $12 \times 16.5 \times 15.5$ [cm³]이며, 휴대폰과 인체 두부가 포함된 전체 해석공간의 크기는 $45 \times 54 \times 75$ [cells³]이고, 휴대폰과 인체 두부와의 거리는 1Δ 로 하였다. 그림 1에서 우측은 얼굴면이고, 좌측은 뒷머리부분이다. 인체 두부는 공기층을 제외한 7층의 매질로 구성하였으며, 각 매질의 전기적 상수는 유전율과 전도율만을 사용하였다.

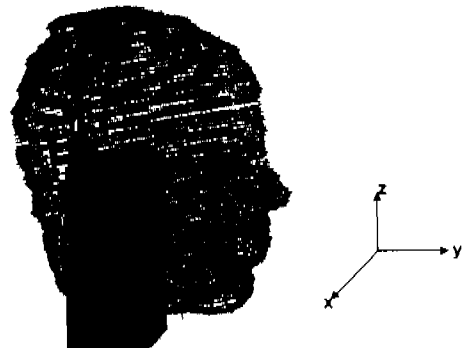


그림 1. 인체두부와 휴대폰 모델링

(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 이용하였으며, x 축 및 y 축 전장성분은 다음 식 (3-1), (3-2)로 주어진다^[10].

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

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

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 설정이며, 반경 설정에 따라서 근접장의 값이 달라지고, 그 결과 입력 임피던스가 달라진다. 본 논문에서는 안테나 반경은 사용 파장의 10분의 1 크기로 정하였으며, 도체 원통의 중심 축 방향에 E_x 전장 성분이 위치해 있다고 가정한 가는 도선 근사(thin wire approximation)를 활용하였다^[13]. 안테나에서 복사된 전자장의 크기는 안테나로부터의 거리에 반비례한다는 가정 하에서, x 축 및 y 축 전장 성분은 다음 식들처럼 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 축 상을 따른 E_x 는 영이고, 안테나 축 상에 놓이지 않은 E_x 는 Δx 를 따라서 균일하다고 가정하였다. 단, 이러한 근사는 안테나에 바로 인접한 격자들에

만 적용되며, 그 외의 격자들에는 전형적인 유한차분-시간영역 해석법을 적용한다. 식 (6)으로 주어진 Faraday 식에 유한차분-시간영역법을 적용하면, 인접한 격자에 대한 유한차분-시간영역 방정식이 얻어지며, 식 (6)으로부터 안테나 주변의 자장에 대한 식을 얻을 수 있다.

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

그림 2는 자기 프릴방법에 의한 전원 인가점에서의 전류 크기를 나타내며, 가로축은 시간 증가분에 따른 수행시간을 나타낸다.

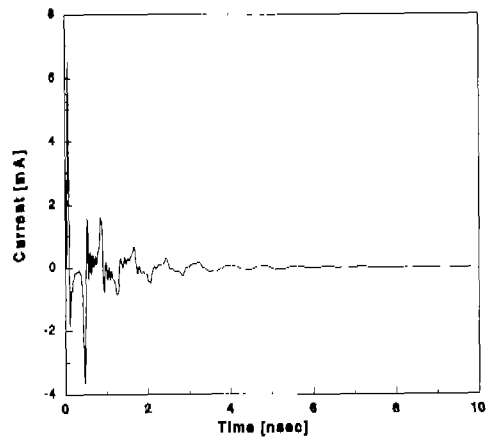


그림 2. 가우시안 전압 펄스에 의한 핸드폰 모델 기저부의 전류

그림 3은 본문에서 언급한 자기 프릴방법의 타당성을 검증하기 위하여 전원 인가점에서의 입력 임피던스를 델타갭인가법을 적용한 결과와 상호 비교하였으며, 두 방법의 결과는 잘 일치함을 알 수 있

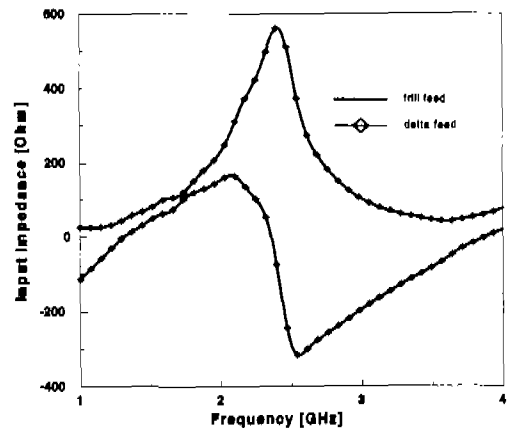


그림 3. 두가지 전원인가법에 따른 입력 임피던스

다. 그림에서 위의 곡선은 저항성분이고, 아래 곡선은 리액턴스 성분을 나타낸다. 또한 그림 3에서 1.8GHz의 입력 임피던스는 $148.1+j118.4 \Omega$ 이고, 안테나 길이가 5.5cm에 해당하는 공진 주파수에서 입력 임피던스는 $57.7+j12.8 \Omega$ 임을 보인다.

(2) 인체 두부 모델링

인체 두부의 각 해당 부위에 따라서 매질의 전기상수 값이 달라지는데, 본 논문에서는 7개의 다른 부위를 고려하였으며 각 부위의 종류와 이에 대응되는 전기상수의 값을 표 1에 정리하였다¹⁾. 표 1에 보인 유전상수와 전도도는 1.8 GHz에서 계산된 값이고, 인체 두부가 놓인 공간의 셀 크기는 $24 \times 33 \times 31$ [cells³]이며, 이는 $12 \times 16.5 \times 15.5$ [cm³]의 부피를 갖고, 인체 두부와 휴대폰간의 거리는 1Δ로 하였다.

표 1. 인체 두부의 매질상수

Tissue	Air	Bone	Skin/Fat	Muscle	Brain	Humour	Lens	Cornea
Dielectric constant (ϵ_r)	1.00	19.7	38.4	55.2	41.0	67.2	34.7	52.7
Conductivity (σ [S/m])	0.00	0.55	0.99	1.30	1.65	2.08	0.87	1.67
density ρ [kg/m ³]	1000	1850	1100	1040	1030	1010	1050	1020
Material no	0	1	2	3	4	5	6	7

두 매질의 경계면에 놓인 전장성분의 계산은 두 매질의 각 전도도와 유전율의 평균을 취한 후에 해당 전장성분을 구하였으며, 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 서로 접한 두 매질번호를 의미한다. 위와 같이 모델링된 인체두부에 핸드폰을 근접시켜 전원을 인가하면 전원 인가점에서 주파수 변화에 따른 입력임피던스의 변화는 다음 그림 4와 같이 나타난다. 1.8GHz에서 입력 임피던스는 $112.2+j130.9 \Omega$ 로 인체두부가 없는 그림 3과 비교하여 저항성분은 감소하였고 리액턴스 성분은 증가하였음을 알 수 있다. 그림에서

위의 곡선 두개는 저항성분이고, 아래 곡선 2개는 리액턴스 성분을 나타낸다.

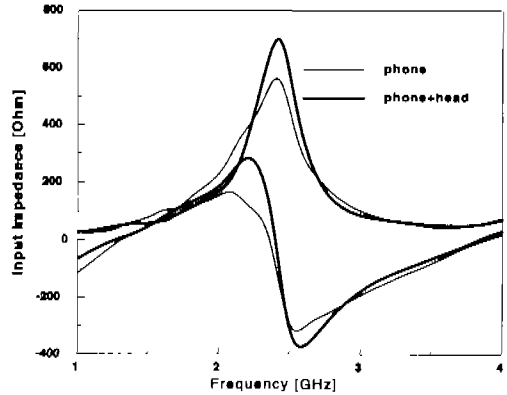


그림 4. 인체 두부에 의한 입력 임피던스의 변화

(3) 비흡수율(SAR)

SAR을 구하기 위해서는 인체두부내의 정상상태 이후의 전자장 값을 알아야 하며 이를 구하기 위해서 정현파 함수의 직교성용 이용한 추출 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘에서는 아래 식(8)을 이용하여 전자장의 최대값을 구하게 된다.

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

여기서 \hat{E}_N 은 전장 성분의 복소 전장값이고, T_{init} 는 전장이 정상상태에 도달한 후, 그 전장의 절대치와 위상을 추출하는 시작시간이며, N 은 현재 합해지는 반복 회수이고 ω 는 전원 주파수이다. 합의 과정이 진행됨에 따라서 과도기의 전장이 정상상태의 전장 값으로 수렴하게 되며, 수렴된 전장으로부터 다음 식을 사용하여 비흡수율을 구하게 된다.

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

여기서 σ 는 매질의 전도도이고 ρ 는 매질의 밀도이며, E_i 는 각 단위 격자의 중심에 위치한 전체 전장용 나타낸다. 그리고 인체 두부 전체에 흡수된 총 흡수전력 P_{abs} 은 식 (10)에 의해서 산출된다.

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \iint \int_V \sigma E_i^2 dv \quad (10)$$

그림 5는 휴대폰 급전점의 yz면에 해당하는 인체 두부 면의 SAR분포도이다. 가로 세로 축은 인체

두부 단면의 좌표에 해당하며, 각각 그림 1의 x와 z 축에 해당된다. 핸드폰이 놓인 위치인 가로축의 끝과 세로축의 중앙 부분의 흰색이 진할수록 비흡수율이 큼을 나타내며, 이는 휴대폰에 가장 근접한 부위에서 전력의 흡수가 크기 때문이다. 또한 계산된 비흡수율 분포도를 조사한 결과, 대부분의 전력이 두피 근처에서 흡수됨을 알 수 있었다. 이러한 사실이 각 부위에 따른 의학적 병리현상과 결합되면, PCS 밴드 휴대폰이 인체에 어떤 종류의 병적 위해(危害)를 가할 수 있는지를 알 수 있을 것이다.

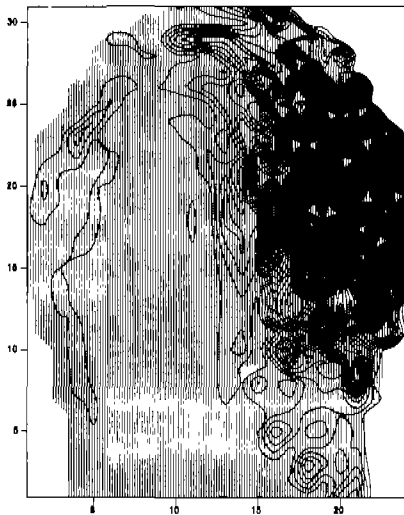


그림 6. 인체두부의 비흡수율 분포도

■. 결 론

본 논문은 휴대폰의 복사전파에 의하여 인체 두부가 받는 전기적인 영향을 해석하기 위하여 1.8 GHz의 동작 주파수를 갖는 휴대폰에 근접한 인체 두부의 비흡수율 분포도를 계산하였다. 한 예로 RF 출력이 3.75 mW일 때 최대 비흡수율 수치는 0.031 W/kg이었는데, 이는 국제 권고치인 ANSI 규정의 1.6 W/kg보다 낮은 수치였다. 그리고 휴대폰 전력의 가장 높은 흡수 부위는 인체 두피의 바로 아래 부위였으며 대부분의 전력이 두피 근처에서 흡수된다는 것을 알 수 있었다. 또한 인체 두부의 존재로 인해 휴대폰 안테나의 복사저항은 감소하고, 리액턴스 성분은 증가함을 알 수 있었다. 본 논문은 휴대폰 전파가 인체에 미치는 흡수율을 해석한 연구로서 전자파가 인체에 미치는 의학적인 영향은 포함하지 않는다. 앞으로 흡수 전력이 인체에 가하는 영

향을 종합적으로 분석하기 위해서는 공학과 의학의 연구가 함께 결부되어야 할 것으로 보며, 인체두부에 흡수되는 전력을 감소시키면서도 통신에 지장이 없는 안테나 개발과 이에 따른 통신 성능 문제까지 같이 고려되어야 될 것으로 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. Gandi, G. Lazzi and C. M. Farse, "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 900MHz," *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 hand-held transceiver using FDTD," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 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 Propag.*, 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] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Comp. Phys.*, vol. 114, no. 2, pp. 185-200, Oct. 1994

[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.

정 광 욱(Kwang-Wook Jung)

정회원



1982년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1984년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업, 통신전공(공학석사)
 1996년 8월 : 경북대학교 전자공학과 졸업, 전파전공(공학박사)

1983년 10월 ~ 1992년 2월 : 삼성전자 정보통신부문 연구개발 과장

1992년 2월 ~ 현재 : 구미1대학 정보통신과 부교수
 <주관심 분야> 이동통신단말기 설계, Bluetooth기술 적용 설계, 안테나 설계와 전파복성해석

이 승 학(Seung-Hak Lee)

정회원



1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1998년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1998년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사수료

<주관심 분야> 전자파 산란특성, 안테나 해석 및 설계, 원격 탐지, 전자파의 인체영향