

# 휴대폰 전자파에 노출된 頭部에 흡수되는 SAR의 FDTD에 의한 해석

## FDTD Calculation for SAR Induced in a Head Model by the Electromagnetic Fields Irradiated from a Cellular Phone

이윤경 · 임현준 · 우종우 · 윤현보

Yun-Kyung Lee · Hyun-Jun Lim · Jong-Woo Woo · Hyun-Bo Yoon

### 요 약

모노폴 안테나를 갖는 휴대폰의 근거리 전자계를 맥스웰 방정식의 적분형을 이용한 FDTD 수식으로부터 계산하였다. 이 전자계 값을 기존의 맥스웰 방정식의 미분형인 FDTD 수식에 대입하여 頭部の 전자파 노출 부위에 따른 SAR 분포를 계산하였다. 頭部는 유전율과 도전율이 같은 각 부분을 5 mm 크기인 80,000 개의 정육면체 셀로 분할하였고 휴대폰의 입력 전력은 0.6 W 이며 동작 주파수는 833 MHz로 하였다. 안테나로부터 2 cm 떨어진 거리에서 頭部모형내 유기되는 최대 SAR 값은 1.5 [W/kg] 이었으며 이 값은 IEEE 의 안전기준인 1.6 [W/kg] 이하임을 알 수 있다.

### Abstract

The near field radiated from the monopole antenna of the cellular phone was calculated by using the modified finite difference time domain algorithm derived from the integral form of Maxwell's equations. Substituting the near field value into the differential form of Maxwell's equations, SAR's distribution in the human head was obtained. The human head was simulated by a model of 80,000 block cells with dielectric constant and conductivity. The cell size was taken to be 0.5 cm. The transmitted power of the cellular phone was assumed to be 0.6 watts at the frequency of 833 MHz. The distance between the head and the cellular phone was 2.0 cm, the maximum SAR induced in the human head was about 1.5 W/kg and was below the IEEE's upper safety limit of 1.6 W/kg.

### I. 서 론

최근에 휴대폰으로부터 복사된 전자파의 인체위해에 관한 관심이 증가됨에 따라 다이폴 안테나와 인체간의 전자결합해석 및 인체에 흡수되는 에너지

의 평가량으로서 SAR (Specific Absorption Rate) 분포에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다<sup>[1]-[3]</sup>.

따라서 본 논문에서는 휴대폰에서 사용하고 있는 모노폴 안테나로부터 복사되는 근거리 전자계를 맥스웰 방정식의 적분형을 이용한 FDTD (Finite

동국대학교 전자공학과(Dept. of Electronics Eng., DongGuk University)

· 논문 번호 : 970329-021

· 수정완료일자 : 1997년 11월 28일

Difference Time Domain) 수식으로부터 계산하여 맥스웰 방정식의 미분형인 FDTD 수식에 이 전자계값을 대입하여 頭部の 전자파 노출 부위에 따른 SAR 분포를 계산하였다.

頭部는 유전율과 도전율이 같은 각 부분을 5 mm 크기인 80,000 개의 정육면체 셀로 분할하였고 모노폴 안테나는 휴대폰 우측 상단에 부착되어 있는 형태로 모델링하였다.

안테나로부터 복사되는 전자계가 인체 조직 내부에 흡수되는 전계를 FDTD 방법으로 계산하기 위해서 여기신호는 Gaussian 펄스 대신에 안테나 동작 주파수를 갖는 연속 정현신호를 사용하였으며, 신호 모델링은 주파수영역 해석 방법인 모멘트법(MOM) 등에서 도선의 여기신호로 이용하는 magnetic frill source 방법을 사용하였다<sup>4)</sup>.

안테나의 입력전력은 0.6 W 이며 동작 주파수는 833 MHz로 하였으며 안테나로부터 2 cm 떨어진 거리에서 頭部の 전자파 노출 부위에 따라 유기되는 SAR 분포를 계산한 결과 최대 SAR 값은 1.5 [W/kg] 이었다.

계산한 결과값과 H.Y. Chen 이 휴대폰을 등가 저항 120 Ω을 갖는 등가 다이폴 안테나로 모델링하여 전자파에 노출된 頭部모형내 SAR 분포를 FDTD로 해석한 결과<sup>5)</sup>와 유사한 값을 확인하였다.

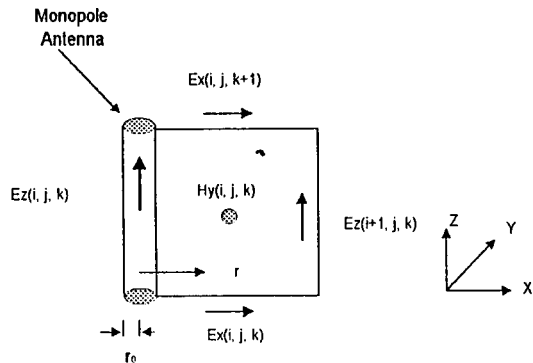


그림 1. 가는 도선 모델링을 위한 전자계 성분위치  
Fig. 1. The field components for the thin wire modeling

## II. Monopole 안테나의 근접 전자계 계산

모노폴 안테나를 갖는 휴대폰으로부터 복사되는 근거리 전자계를 계산하기 위하여 가는 도선 근사법<sup>6)</sup>과 맥스웰 방정식의 적분형을 이용하였다.

우선 그림 1에서 FDTD 계산영역내의 수직전계 성분  $E_z(i, j, k)$ 가 반경  $r_0$ 인 도선의 중앙에 위치하고  $r_0$ 가 FDTD 단위격자 길이  $\Delta x/2$  보다 작다고 가정하면, 도선주위의 전자계 성분은 근사적으로 도선 중앙으로부터 거리  $r$ 의 역비례하므로 이를 수식으로 표현하면, 도선으로부터  $r$  거리의 주위 전자계  $H_y, E_x$ 는

$$H_y(r, j, k) = H_y(i, j, k) \cdot \frac{\Delta x}{2r} \quad (1.a)$$

$$E_x(r, j, k) = E_x(i, j, k) \cdot \frac{\Delta x}{2r} \quad (1.b)$$

이 된다.

또한 맥스웰 방정식의 적분형은

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_s \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{s} + \iint_s \sigma \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (2.a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_s \mu \vec{H} \cdot d\vec{s} = - \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.b)$$

이고, 위식을 유한 차분 형태로 바꾸면

$$\begin{aligned} & [H_x(i, j-1, k) - H_x(i, j, k) \Delta x + [H_y(i, j, k) - H_y(i-1, j, k) \Delta y \\ & = \epsilon \frac{\partial}{\partial t} E_z(i, j, k) \Delta x \Delta y + \sigma E_z(i, j, k) \Delta x \Delta y \quad (3.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [E_y(i, j, k) - E_y(i, j, k+1) \Delta y + [E_z(i, j+1, k) - E_z(i, j, k) \Delta z \\ & = -\mu \frac{\partial}{\partial t} H_x(i, j, k) \Delta y \Delta z \quad (3.b) \end{aligned}$$

이 된다.

따라서 식(3a, b)에 식(1a, b)를 대입하여 그림 1에서와 같이 4 개의 전계위치에 따라 적분하여 정리하면 모노폴 안테나 주위의 근접 전자계 계산에 사용될 변형된 FDTD 수식<sup>6)</sup>은 다음과 같게 된다.

$$H_x^{n+1/2}(ij,k) = H_x^{n-1/2}(ij,k) + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_y^n(ij,k+1) - E_y^n(ij,k)] + \frac{2\Delta t}{\mu \Delta x \ln(\frac{\Delta y}{r_0})} \cdot E_z^n(ij+1,k) \quad (4.a)$$

$$H_y^{n+1/2}(ij,k) = H_y^{n-1/2}(ij,k) + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_x^n(ij,k) - E_x^n(ij,k+1)] + \frac{2\Delta t}{\mu \Delta x \ln(\frac{\Delta x}{r_0})} \cdot E_z^n(i+1,j,k) \quad (4.b)$$

### Ⅲ. 頭部내의 SAR 계산

모노폴 안테나로부터 복사된 전자계가 頭部 조직 내부에 흡수되는 전계를 FDTD 방법으로 계산하기 위해 손실이 있는 해석대상에서 기존의 맥스웰 방정식 미분형을 유한 차분 형태로 표현하면 다음과 같다<sup>7),8)</sup>.

$$H_x^{n+1/2}(ij,k) = H_x^{n-1/2}(ij,k) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \frac{E_y^n(ij,k) - E_y^n(ij,k-1)}{\Delta z} + \frac{E_z^n(ij-1,k) - E_z^n(ij,k)}{\Delta y} \right] \quad (5.a)$$

$$H_y^{n+1/2}(ij,k) = H_y^{n-1/2}(ij,k) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \frac{E_x^n(ij,k) - E_x^n(i-1,j,k)}{\Delta x} + \frac{E_z^n(ij,k-1) - E_z^n(ij,k)}{\Delta z} \right] \quad (5.b)$$

$$H_z^{n+1/2}(ij,k)' = H_z^{n-1/2}(ij,k) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[ -\frac{E_x^n(ij,k) - E_x^n(ij-1,k)}{\Delta y} + \frac{E_y^n(i-1,j,k) - E_y^n(ij,k)}{\Delta x} \right] \quad (5.c)$$

$$E_x^{n+1}(ij,k) = \frac{2\epsilon - \Delta t \sigma}{2\epsilon + \Delta t \sigma} E_x^n(ij,k) + \frac{2\Delta t}{(2\epsilon + \Delta t \sigma) \Delta x} [H_z^{n+1/2}(ij+1,k) - H_z^{n+1/2}(ij,k) + H_y^{n+1/2}(ij,k) - H_y^{n+1/2}(ij,k+1)] \quad (5.d)$$

$$E_y^{n+1}(ij,k) = \frac{2\epsilon - \Delta t \sigma}{2\epsilon + \Delta t \sigma} E_y^n(ij,k) + \frac{2\Delta t}{(2\epsilon + \Delta t \sigma) \Delta y} [H_x^{n+1/2}(ij,k+1) - H_x^{n+1/2}(ij,k) + H_z^{n+1/2}(ij,k) - H_z^{n+1/2}(i+1,j,k)] \quad (5.e)$$

$$E_z^{n+1}(ij,k) = \frac{2\epsilon - \Delta t \sigma}{2\epsilon + \Delta t \sigma} E_z^n(ij,k) + \frac{2\Delta t}{(2\epsilon + \Delta t \sigma) \Delta z} [H_y^{n+1/2}(i+1,j,k) - H_y^{n+1/2}(ij,k) + H_x^{n+1/2}(ij,k) - H_x^{n+1/2}(ij+1,k)] \quad (5.f)$$

FDTD 방법에 의한 시간영역 전자계 해석에서 경계조건 설정은 계산영역내의 자유공간을 포함한다. 유전체 및 이들의 접합부에 대한 경계조건을 부여하는 내부 경계조건과 계산 영역과 외부 자유공간사이의 경계조건인 외곽 경계조건이 있다.

외곽 경계조건은 FDTD 방법에서 가장 많이 이용하고 있는 임의의 평면에 법선방향으로 진행하는 전자파에 대한 흡수 경계조건<sup>9)</sup>을 사용하였다.

$x=0$ 인  $y-z$  평면 상에 법선 방향으로 입사하는

전자파에 대한 흡수 경계조건은

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{v_\psi} \frac{\partial}{\partial t} \right] E_{\tan} = 0 \quad (6)$$

이며, 식 (6)을 시간과 공간에 대해 분할하고 컴퓨터 계산에 용이하도록 변환하면 다음과 같다.

$$E_0^{n+1} = E_1^n + \left[ \frac{v_\psi \Delta t - \Delta x}{v_\psi \Delta t + \Delta x} \right] (E_1^{n+1} - E_0^n) \quad (7)$$

여기서  $v_\psi$ 는 자유공간에서 빛의 속도이다.

매질 경계조건에서는 서로 다른 유전율을 갖는 두 유전체 사이의 접합경계면과 유전체와 자유공간 사이의 접합면이 있다.  $\epsilon_1, \epsilon_2, \sigma_1, \sigma_2$ 인 두 유전체가  $x$ - $y$  평면상에 서로 접하고 있을 때 두 유전체 경계에서 접선 전계성분과 법선 자계성분은 연속이고 접선 자계성분은 불연속인 조건이 성립하면, 경계면에서 맥스웰 방정식은

$$\begin{aligned} \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2} \frac{\partial E_x}{\partial t} + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} E_x \\ = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \end{aligned} \quad (8)$$

로서 두 유전체 경계면에서 유전율과 도전율은 각각  $(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2, (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ 로 근사화할 수 있다<sup>[10]</sup>.

따라서 모노폴 안테나 주위의 근접 전자계를 가는 도선 근사법 및 맥스웰 방정식의 적분형을 이용한 FDTD 수식으로 계산한 값과 위식 (7, 8)의 경계 조건을 (5d, e, f)에 대입하여 계산하면 頭部내 전계의 절대값은 아래 식으로 계산된다.

$$E(i,j,k) = \sqrt{E_x^2(i,j,k) + E_y^2(i,j,k) + E_z^2(i,j,k)} \quad (9)$$

따라서 頭部내 SAR 값은

$$SAR(i,j,k) = \frac{\sigma(i,j,k)[E(i,j,k)]^2}{\rho(i,j,k)} \text{ [W/kg]} \quad (10)$$

이고, 여기서  $\sigma$  : 조직의 전기전도도 (S/m)

$E$  : 조직에서의 전계강도 (V/m)

$\rho$  : 조직의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

을 이용하여 계산 할 수 있다.

#### IV. 수치해석 및 결과

모노폴 안테나를 갖는 휴대폰 전자파에 노출된 頭部에 흡수되는 SAR 분포를 계산하기 위하여 모노폴 안테나는 도체박스 위에 부착된 형태로 하고 頭部는 아래 그림 2와 같은 장방형 모형을 사용하였다. 도체박스와 모노폴 안테나는 완전도체로 가정하고, 자유공간상의 전도도  $\sigma = 0$ 으로 설정하였으며 안테나의 반경  $r_0$ 는 0.5 mm, 도체박스의 두께는 1 cm 이고, FDTD 단위격자  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5$  mm 크기로 분할하였다. 이때의 시간간격은 8.33 ps 이었으며 모노폴 안테나를 포함한 휴대폰의 전체 길이가  $\lambda/2$  가 되도록 하였다<sup>[11]</sup>. 頭部모형은 셀룰라 주파수 대역에서 인체 각 부위의 전기적 특성인 유전율과 도전율을 고려한 5 mm 크기인 80,000 개의 셀로 구성하였고 바깥쪽으로부터 피부, 뼈, 뇌의 구조로 전체크기는  $40 \Delta x \times 40 \Delta y \times 50 \Delta z$ 로 모델링하였다.

FDTD 계산영역의 외곽 경계는 흡수 경계 조건

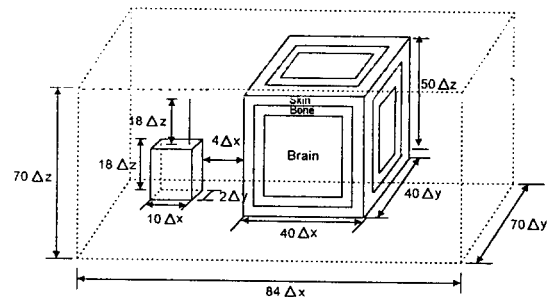
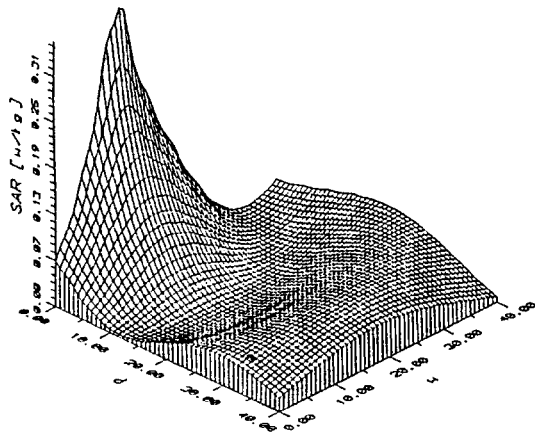


그림 2. FDTD 시뮬레이션을 위한 頭部모형과 휴대폰의 계산영역

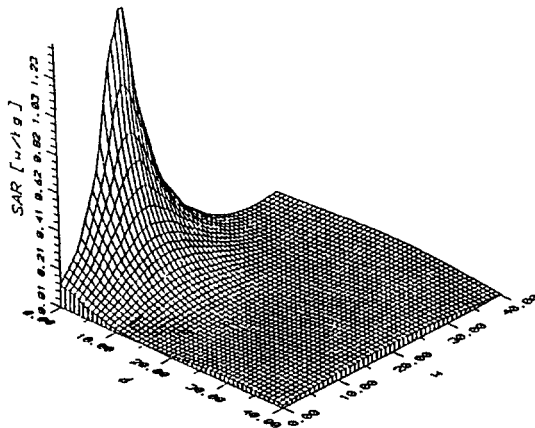
Fig. 2. FDTD Computation domain of head model & handy phone

을 이용하였으며, 모노폴 안테나의 근거리 전자계에 적용하기 위해 해석대상과 외곽 경계사이에는 FDTD의 일반적인 기준인  $10 \Delta$  보다 약간 큰  $15 \Delta$ 가 되도록 하였다. 여기서  $\Delta$ 는 단위 격자 크기인  $5 \text{ mm}$ 이며 Courant의 안정조건<sup>12)</sup>에 만족하도록 분할하였으며 따라서 FDTD 전체 계산영역은 그림 2와 같다.

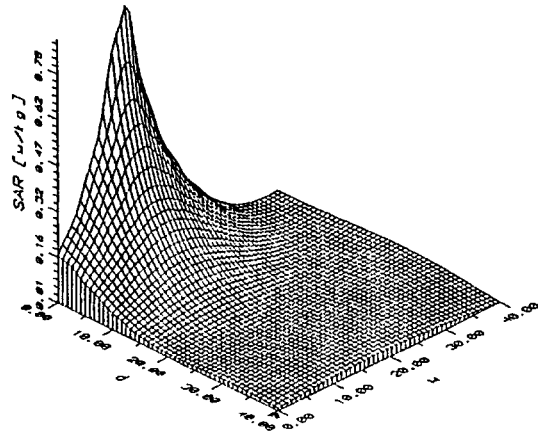
그림 2에서 모노폴 안테나의 급전위치는  $24 \Delta x$ ,  $24 \Delta y$ ,  $33 \Delta z$  지점으로서 여기신호는 Gaussian 펄스 대신에 안테나 동작 주파수를 갖는 연속 정현 신호를 사용하였다. 여기신호의 입력전압 및 전류로부터 입력전력을 계산한 후 안테나의 입력전력이  $0.6 \text{ W}$ 가 되도록 여기신호의 크기를 주었으며 동작



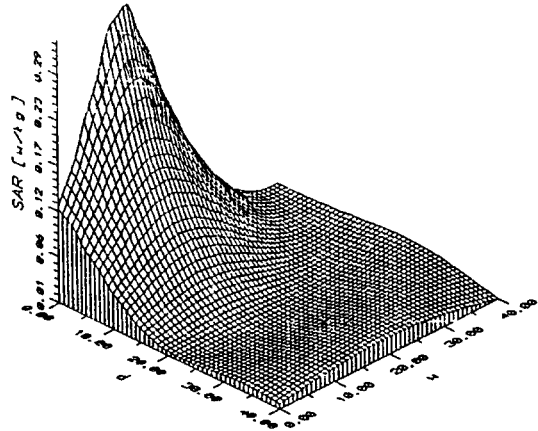
(a) 頭部の  $10 \Delta z$



(b) 頭部の  $25 \Delta z$



(c) 頭部の  $40 \Delta z$



(d) 頭部の  $50 \Delta z$

그림 3. 頭部모형내에서 SAR 분포

Fig. 3. SAR distribution in the head model

주파수는  $833 \text{ MHz}$ 로 하였다.

頭部모형내 SAR 분포는 모노폴 안테나 주위의 근거리 전자계를 가는 도선 근사법과 맥스웰 방정식의 적분형을 이용한 FDTD 수식 (4a, b)로부터 계산하고, 그 전자계 값을 기존의 맥스웰 방정식 미분형인 FDTD 수식 (5d, e, f)에 대입하여 전계의 각 성분을 구한 후, 식 (9, 10)에 의해 계산하였다.

그림 3은 안테나로부터  $2 \text{ cm}$  떨어진 거리에서 頭部の 전자파 노출 부위 즉,  $z = 10 \Delta z$ ,  $25 \Delta z$ ,  $40 \Delta z$ ,  $50 \Delta z$ 의 각 위치에서 x-y 평면상에 유기

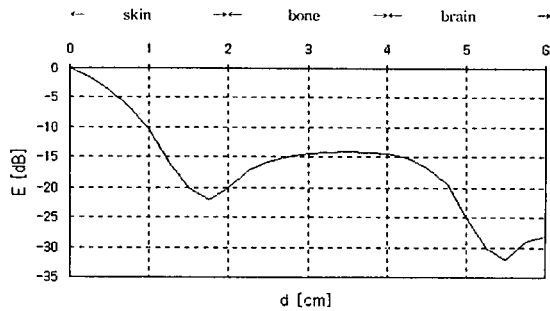


그림 4. 피부, 뼈, 뇌에서의 전계분포

Fig. 4. E-field distribution in skin, bone and brain

되는 SAR 분포를 계산한 결과이다. 여기서 SAR 값은 모노폴 안테나의 최대 복사 위치인  $z = 25 \Delta z$  에서 최대  $1.5 [W/kg]$  임을 알 수 있었다.

이 결과는 H.Y. Chen 이 등가 저항이  $120 \Omega$ 인 다이폴 안테나를 이용하여 안테나로부터 2 cm 거리에서 頭部모형내 유기되는 SAR 분포를 그래프에 도시한 결과에서  $z = 25 \Delta z$  에서 최대  $1.6 [W/kg]$ 과 비교할 때 크기 및 분포가 잘 일치하였다.

그림 4는 전자파가 피부, 뼈, 뇌로 전파될 때 각 매질에서의 전계 감쇠를 별도로 계산한 결과이다. 여기서 전계의 크기는 정규화된 값이며, 피부, 뼈, 뇌의 두께를 각각 2 cm로 하였다. 그 결과 각 매질에서 유전율 차가 크기 때문에 매질경계면에서 반사로 인한 전계 값이 크게 감소되는 것을 알 수 있었으며 피부에서 전계의 흡수량이 많으며 뼈에서는 거의 흡수되지 않음을 알 수 있었다.

## V. 결 론

휴대폰 모노폴 안테나로부터 인체의 머리부분으로 진행하는 전자파의 세기를 FDTD 방법으로 직접 계산하였다.

안테나로부터 2 cm 떨어진 거리에서 頭部를 직육면체로 가정한 후,  $z = 5 \text{ cm}, 12.5 \text{ cm}, 20 \text{ cm}, 25 \text{ cm}$ 인 각각의 높이에서 x-y 평면상의 전파흡수

율(SAR)를 계산하였다.

833 MHz, 0.6 W 로 여기된 모노폴 안테나에 의한 인체에 흡수되는 SAR 의 최대값은  $1.5 [W/kg]$  이었으며 피부, 뼈, 뇌로 진행되는 전자파에 의한 SAR 분포는 급격히 감소됨을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] I. Chatterjee, M. J. Hagmann and O. P. Gandhi , "Electromagnetic energy deposition in an inhomogeneous black model of man for near-field irradiation conditions , " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-28, pp.1452-1459, 1980.
- [2] H. R. Chuang , "Human operator coupling effects on radiation characteristics of a portable communication dipole antenna , " *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-41, pp. 556-560, 1994.
- [3] D. M. Sullivan, D. T. Borup and O. P. Gandhi , "The use of the frequency-dependent Finite-Difference Time-Domain method for induced current and SAR calculations for a heterogeneous model of the human body , " *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, EMC-36, pp. 128-133, May 1994.
- [4] R. Luebbers and L. Chen , "FDTD calculation of radiation patterns, impedance and gain for a monopole antenna on a conducting box , " *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-40, pp. 1577-1583, Dec. 1992.
- [5] H. Y. Chen and H. H. Wang , "Current and SAR induced in a human head model by the electromagnetic fields-irradiated from a cellular phone , " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 2249-

- 2254, Dec. 1994.
- [6] K. Umashankar and A. Taflove , "Calculation and experimental validation of induced currents on coupled wires in an arbitrary shaped cavity , " *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-35, pp. 1248-1257, Nov. 1987.
- [7] K. S. Yee , "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic Media , " *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, pp. 302-307, May 1966.
- [8] D. M. Sullivan, D. T. Borup and O.P. Gandhi , "Use of the Finite-Difference Time-Domain method in calculating EM absorption in human tissue , " *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, BME-34, pp. 148-157, Feb. 1987.
- [9] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the Finite-Difference approximation of the Time-Domain electromagnetic-field equations , " *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, EMC-23, pp. 377-382, Nov. 1981.
- [10] M. D. Pourcq, "Field and power-density calculations in closed microwave systems by three-dimensional finite difference , " *IEE Proceedings* vol. 132, pt. No.6, Oct. 1985.
- [11] 손영수, 윤현보, "시간 영역 유한차분법을 이용한 휴대용 전화기의 모노폴 안테나 특성 해석," 한국전자과학회지, 제 6권 3호, pp. 3-14, 1995.
- [12] A. Taflove and M. E. Broddwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations , " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-23, No.6, pp. 623-630, June 1975.

### 이 윤 경

1993년 : 서울산업대학교 매체공학과 (공학사)  
 1996년 : 동국대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)  
 1996년~현재 : 동국대학교 전자공학과 (박사과정)

### 우 종 우

1991년 : 동국대학교 전자공학과 (공학사)  
 1993년 : 동국대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)  
 1994년~현재 : 동국대학교 전자공학과 (박사과정)

### 임 현 준

1993년 : 동국대학교 전자공학과 (공학사)  
 1995년 : 동국대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)  
 1996년~현재 : (주) 한화정보통신 무선가입자망 연구그룹  
 (주임연구원)  
 1996년~현재 : 동국대학교 전자공학과 (박사과정)

### 윤 현 보

1979년~현재 : 동국대학교 전자공학과 교수