

# 휴대폰 전자파와 인체의 상호 영향 및 뼈 유사 물질 합성 연구

## Electromagnetic Interactions between a Cellular Phone and the Human Body and Synthesis of a Bone-Equivalent Material

윤용섭\* · 김인광\*\* · 전중창\*\*\* · 박위상\*\*

Yong-Seob Yun\* · In-Kwang Kim\*\* · Joong-Chang Chun\*\*\* · Wee-Sang Park\*\*

### 요 약

유한차분 시간영역 수치해석 기법을 사용하여 휴대폰과 인체 간의 전자파 결합 현상을 시뮬레이션하였고, 인체 두부의 모형을 제작하기 위한 생체 뼈 유사 물질의 합성에 관한 연구를 수행했다. 휴대폰 모형을 제작하여 자유 공간에서 안테나 반사계수 및 복사 패턴을 측정하였다. 인체와 안테나 사이의 거리를 매개 변수로 하여 안테나의 입력 임피던스, 반사계수, 복사 패턴, 효율, 그리고 인체 두부의 전력 흡수량을 계산하였다. 인체 근접 효과에 의하여 안테나 공진 주파수가 약 12%까지 감소되었으며, 출력이 0.6 W일 때, 두부와 안테나 사이의 거리가 30 mm 이상 떨어져 있을 경우, 1-g 평균 최대 SAR가 ANSI/IEEE 안전 기준인 1.6 W/kg 이하로 계산되었다. 뼈 유사 물질의 합성에는 에폭시, 응고제, 그리고 흑연 분말을 기본 물질로 하고, 전도도를 제어하기 위해 소량의 전도성 에폭시를 첨가하였다. 850 MHz에서 비유전율이 18.04, 전도도가 0.347로서 생체 뼈의 특성에 매우 근접하는 시료가 합성되었음을 보였다.

### Abstract

A simulation using the finite-difference time-domain method to analyze the electromagnetic interactions between a cellular phone and the human body was conducted, and a synthesis of a bone-equivalent material to make a human head phantom was performed. A test model of the cellular phone was fabricated to measure its reflection coefficient and radiation pattern in the free space. Various effects of the human body on the characteristics of the phone, such as input impedance, reflection coefficient, radiation pattern, and radiation efficiency are analyzed as the distance between the head and the phone antenna varies. When the phone was operated close to the head, the resonant frequency of the antenna decreased by up to 12%. With the output power of 0.6 W, as long as the distance was larger than 30 mm, the 1-g averaged peak SAR was below the ANSI/IEEE safety guideline, 1.6 W/kg. To synthesize the bone-equivalent material, an epoxy

「이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음.」

\*대우전자주식회사 디지털정보통신연구소(DIT Research Center, Daewoo Electronics Co., Ltd.)

\*\*포항공과대학교 전자전기공학과, 전자파특화연구센터(Department of Electronic and Electrical Engineering, Microwave Application Research Center, Pohang University of Science and Technology)

\*\*\*위덕대학교 정보통신공학과(Department of Communications Engineering, Uiduk University)

· 논문 번호 : 981203-126

· 수정완료일자 : 1999년 2월 3일

with hardener and a graphite powder were used as basis ingredients, and a small amount of a conducting epoxy was added to control the conductivity of the material. A material having a relative permittivity of 18.04 and a conductivity of 0.347, which are close to those of the bone at 850 MHz, was synthesized.

## I. 서 론

최근 국내외적으로 휴대폰의 사용이 급격히 증가함에 따라 이로부터 발생하는 전자파의 인체 유해성 여부에 관한 논란이 꾸준히 제기되고 있다. 이는 휴대폰이, 비록 그 출력은 보통 0.6 W로서 미약한 편이지만, 인체 두부에 밀착한 상태에서 주로 사용되기 때문이며, 이러한 우려를 규명하기 위해 많은 이론적, 실험적인 연구가 수행되어 왔다<sup>[1]~[11]</sup>. 휴대폰 전자파가 인체에 영향을 미치는 이유는, 현재까지 알려진 바에 의하면, 이에 노출된 인체 부위의 온도가 국부적으로 상승하기 때문이다. 이러한 현상을 설명하기 위해 도입된 계수가 비흡수율(specific absorption rate: SAR)이며, 이는 생체의 단위 질량이 단위 시간에 전자파로부터 흡수하는 에너지 양을 의미한다. 1992년에 발표된 휴대폰에 관한 ANSI/IEEE 안전 규격에 의하면 개인이 인식하지 못하고 노출을 제어할 수 없는 환경에서 전신 평균 SAR는 0.08 W/kg 이하이어야 하고, 임의의 조직 1g 평균 최대 SAR는 1.6 W/kg을 초과해서는 안 된다고 되어 있다<sup>[12]</sup>. 휴대폰의 출력이 보통 0.6 W이므로 상기의 전신 평균 SAR에 관한 제한치는 대체로 만족된다. 반면에 1-g 평균 최대 SAR 값이 상기의 제한치를 초과하는 경우는 종종 있으므로 휴대폰에 의한 인체 두부의 SAR값을 계산할 수 있는 시뮬레이션 기술과 이의 검증에 관한 연구가 필요하다. 참고문헌 [11]에서는 고정된 거리에서 1.8 GHz의 PCS 휴대폰에 대한 최대 SAR값을 계산하였다. 그러나 전자파의 인체 흡수량은 안테나와 인체 사이의 거리에 따라서 달라지게 되므로, 본 연구에서는 셀룰라 휴대폰에 대

하여 안테나와 두부 사이의 거리를 변화 시키면서 SAR를 계산하였다.

본 논문에서는 유한차분 시간영역 방법(finite-difference time-domain method: FDTD method)<sup>[13]</sup>을 사용하여 휴대폰 전자파와 인체의 상호 영향을 연구하였으며, 인체 두부의 SAR 분포 측정에 사용되는 인체 모형 제작을 위한 물질을 합성하여 복소 유전율과 전도도를 측정하였다. 유한차분 시간영역 방법은, 해석 구조에 대한 기하학적 적응성이 뛰어나므로, 실물에 가까운 휴대폰 모델과 실제 형상에 가까운 비균질 인체 두부 모델을 취급하는 것이 용이하다. 먼저, 최근에 소개된 여러 가지의 효율적인 FDTD 해석 기법을 도입하여 FDTD 코드(code)를 프로그램하고, 이를 이용하여 휴대폰의 간략화된 모델을 수치적으로 계산하였다. 휴대폰 모형과 모노폴(monopole) 안테나를 설계, 제작하여, 그 측정결과를 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 이 코드의 유효성을 검증하였다. 그리고 이 코드를 이용하여 간략하게 모델링 된 인체 두부와 휴대폰 간의 전자파 결합 현상을 해석하였으며, 인체에 의한 안테나 특성 변화 및 인체 두부에 흡수되는 SAR 값의 계산 결과를 제시하였다. 인체 두부 모델링에는 균질 타원체 모델과 비균질 타원체 모델이 사용되었다.

인체 두부의 SAR 분포를 측정하기 위해서는 모형 인간(phantom)을 이용해야 하며, 이 측정은 FDTD 시뮬레이션 결과를 검증하는 역할로도 중요하지만 실제 주어진 휴대폰의 1-g 평균 최대 SAR의 합격 여부를 최종적으로 판정하는 절차이기도 하다. 아직 모형 인간의 형상에 관한 표준은 국내외적으로 설정되지 않은 상태이다. 최근에 Gabriel<sup>[14]</sup>에 의하여 생체 뼈의 비유전율과 전도도가 835

MHz에서 17.4와 0.31이고, 1900 MHz에서는 16.4와 0.26이라는 측정치가 발표되었다. 따라서 휴대 전화기의 SAR를 측정하는데 사용되는 모형 인간의 제조에 이를 만족하는 생체 뼈 유사 물질이 사용되어야 하며, 이런 물질이 합성을 통하여 개발되어야 한다는 요구가 대두되고 있다. 이러한 물질합성에는 에폭시, 응고제, 그리고 흑연(graphite) 분말이 기본 재료로서 사용된다. 그리고 합성된 물질의 주파수에 따른 비유전율을 용이하게 확인하기 위해서는 넓은 주파수 대역에서 복소 유전율을 측정하는 기술이 확보되어야 한다. 측정 방법에는 여러 종류가 있지만 본 연구에서는 유전체 프로브(HP 85070B)를 사용하는 방법과 동축선을 이용하는 방법을 채택하여 합성된 생체 뼈 유사 물질의 물질 상수를 측정하였다.

## II. 휴대폰 전자파와 인체의 상호 영향 연구

FDTD 수치해석 기법의 기본 알고리즘과 차분 방정식의 유도는 여러 문헌<sup>[11],[14]</sup>에 자세히 언급되어 있으므로, 본 논문에서는 이에 관한 내용은 생략하기로 하고, 실제 시뮬레이션에서 관건이 되는 전원 인가 방법 및 안테나 모델링 방법에 대하여 설명한 후, 제작된 휴대폰 시험 모델의  $S_{11}$  및 복사 패턴에 대한 계산 결과와 측정 결과를 비교, 분석하고자 한다. 그리고 인체에 의한 입력 임피던스, 복사 패턴 등의 안테나 특성 변화 및 안테나와 인체 사이의 거리에 따른 SAR의 계산 결과를 보이도록 한다.

### 2-1 휴대폰 모델링 및 해석 방법

휴대폰에  $\lambda/4$  모노폴(monopole) 안테나가 부착되어 있는 구조로부터 방출되는 전자파의 복사 특성을 FDTD 방법으로 시뮬레이션하기 위해 그림 1(a)에 보여진 시뮬레이션 모델을 사용하였다. 이 시뮬레이션 모델은  $130 \times 50 \times 25 \text{ mm}^3$ 의 완전 도

체 상자로 구성되어 있다. 모노폴 안테나는 도체 상자에 연결되어 있고, 이들 사이에 셀(cell) 한 개 길이의 간격을 두어 전압원을 인가하였다. 이 전압원은 한 번의 계산으로 광대역의 주파수 응답을 구하기 위해 가우시안(Gaussian) 형태로 인가되었다. 해석 영역은 정육면체의 격자(cell grid)로 분할하여 total-field formulation<sup>[15]</sup>을 적용하였으며, 계산 영역을 한정시키기 위하여 10 개의 자유공간 셀을 더 두고 Mur의 2차 흡수 경계 조건<sup>[16]</sup>으로 적용하였다. 본 연구에서 사용된 단위 셀의 크기는 5 mm이며, 전체 계산영역의 크기는  $74 \times 60 \times 85$  셀로 설정되었다.

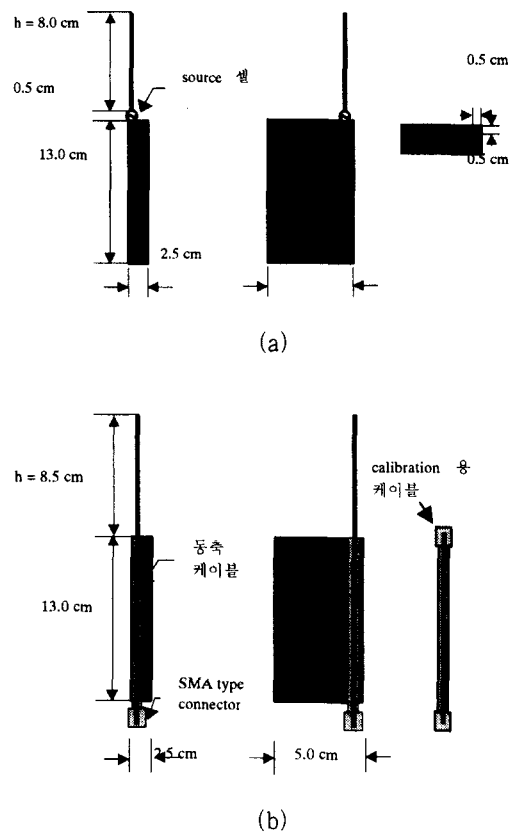


그림 1. 휴대폰의 FDTD 시뮬레이션 및 실험 모델  
Fig. 1. Telephone model for FDTD simulation and measurement. (a)FDTD simulation model, (b)Measurement test model

전자계 여기(excitation)를 위한 전압원은, 835 MHz에서 계산의 정확도를 높이기 위하여, 식 (1)과 같이 835 MHz의 코사인 함수로 변조된 가우스 펄스(cosine modulated Gaussian pulse) 함수를 인가하였다.

$$V_g(n\Delta t) = V_o \exp(-((n\Delta t - \beta\Delta t)^2 / (2\sigma^2))) \cdot \cos(\omega_o(n\Delta t - \beta\Delta t)) \quad (1)$$

여기서  $V_o$ 는 진폭,  $\Delta t$ 는 시간 스텝,  $n$ 은 시간 영역에서의 index,  $\beta$ 는 가우스 펄스의 값이 최대인 시간에서 잘라주는 시간까지의 시간 스텝수이며,  $\sigma$ 는 가우스 함수의 표준편차이고,  $\omega_o$ 는 코사인 함수의 각주파수이다. 본 논문에서 사용된 각 파라미터는  $\Delta t = 8.33$  ps,  $\beta = 32$ ,  $\sigma = 16$ 이며, 진폭  $V_o$ 는 안테나 출력이 전압 인가원에서 0.6 W가 되도록  $8.67530 \times 10^{10}$  V로 두었다. 또한, FDTD 계산의 시간 반복회수는 1245로 설정되었다.

그리고 Delta-gap-feeding에서 수렴속도를 높이기 위하여 resistive voltage source<sup>[17]</sup>를 사용하였다. 이 때, source 셀의 위치  $(i_s, j_s, k_s)$ 에서 electric source field는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$E_z^n(i_s, j_s, k_s) = -V_g(n\Delta t) / \Delta z + I_s^{n-1/2} R_s / \Delta z \quad (2)$$

여기서  $\Delta z$ 는 안테나축 방향의 이산 간격을 나타내며, 내부저항  $R_s$ 는  $50 \Omega$ 이다. 만일  $R_s = 0$ 이면 일반적인 hard-voltage source가 된다. 안테나에 흐르는 전류  $I_s(n\Delta t)$ 는 source 셀 주위의 자계를 이산 선형 적분함으로써 구하여진다.

계산된 시간 영역의 전자계로부터 주파수 영역의 전자계를 구하기 위해서 FDTD의 계산에서 매 시간 스텝마다 단계적으로 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)을 수행하였다<sup>[18]</sup>. 안테나의 광대역 입력 임피던스를 계산할 때 주파수 해상도를 높이기 위해서는 FDTD 계산의 총 시간 스텝 수를 크게 설정하여야 한다. 그러나, 계산의 총 시간 스텝수를 늘리지 않고 주파수 해상도를 높이기 위해서 frequency shifting technique<sup>[19]</sup>을 사용하였다.

안테나의 입력임피던스는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$Z_{in}(\omega) = \frac{V_s(\omega)}{I_s(\omega)}, \quad (3)$$

여기서  $V_s(\omega) = -E_z(\omega)\Delta z$ ,  $E_z(\omega) = \int \{E_z^n(i_s, j_s, k_s)\}$ 이다. 반사 계수  $S_{11}$ 은 급전선의 특성 임피던스를  $50 \Omega$ 으로 두었을 때 식 (4)와 같이 표현된다.

$$S_{11} = \frac{Z_{in}(\omega) - Z_o}{Z_{in}(\omega) + Z_o} = \frac{Z_{in}(\omega) - 50}{Z_{in}(\omega) + 50} \quad (4)$$

모노폴 안테나를 구성하는 도선의 반경은 FDTD 셀보다 매우 작은  $0.5$  mm이기 때문에 여기에 가는 도선 모델링 기법(thin wire modeling technique)<sup>[20]</sup>을 적용하였다.

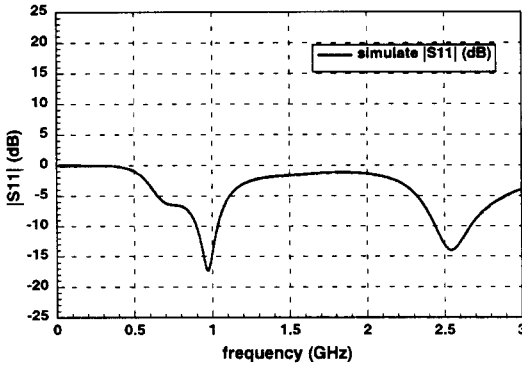
## 2-2 휴대폰 실험 모델 제작 및 안테나 특성 측정

그림 1(b)는 휴대폰 실험 모델을 보이고 있으며, 알루미늄을  $130 \times 50 \times 25$  mm<sup>3</sup> 크기로 가공하여 도체 상자를 만든 후, 안테나 케이블 연결을 위하여 지름 3.5 mm의 구멍이 관통하도록 뚫은 것이다. 안테나 케이블은 아래 끝단에서부터 SMA형 connector, 동축 케이블, 그리고 길이 8.5 cm의 내부 도체(inner conductor)로 구성되어 있다. 여기서 측정 시험 모델 안테나의 길이를 8.5 cm로 제작한 이유는, 인체의 근접 효과를 고려한 FDTD 시뮬레이션 모델의 안테나 길이 8.0 cm에 source 셀 size 0.5 cm를 고려하면, 도체 상자 위에서 안테나의 높이가 8.5 cm가 되기 때문이다.

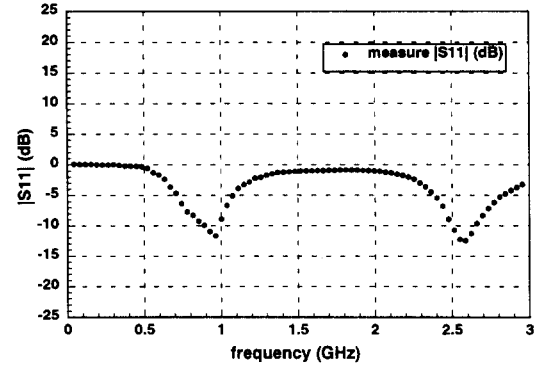
HP 8510B 회로망분석기로 휴대폰 모델의  $S_{11}$ 을 측정하였으며, 급전 위치(feed point)를 도체 상자

위의 안테나가 시작되는 지점으로 하기 위해, SMA 형 커넥터에서 안테나까지의 거리와 같은 길이를 갖는 케이블을 별도로 제작하여 교정하였다. 이 케이블을 회로망 분석기의 port 1에 연결하고 45 MHz~3.0 GHz 대역에 대한 교정을 수행하였다. 그 후 교정용 케이블을 떼어 내고, 시험 모델을 port

1에 연결하여  $S_{11}$ 값을 측정하였다. 휴대폰 모델에 대한  $|S_{11}|$ 의 FDTD 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 그림 2에 도시하였다. 이 그림에서 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 휴대폰 안테나 길이를 인체의 영향을 고려해서 설계했기 때문에 자유 공간의 공진 주파수



(a)



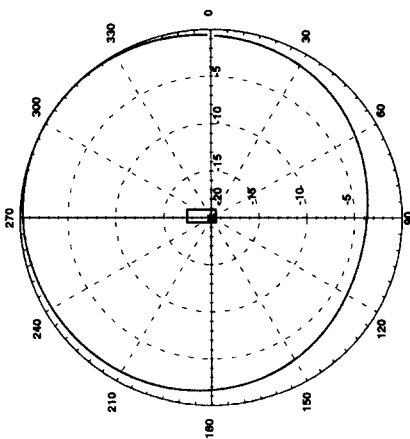
(b)

그림 2. 휴대폰 모델의  $|S_{11}|$ 에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과

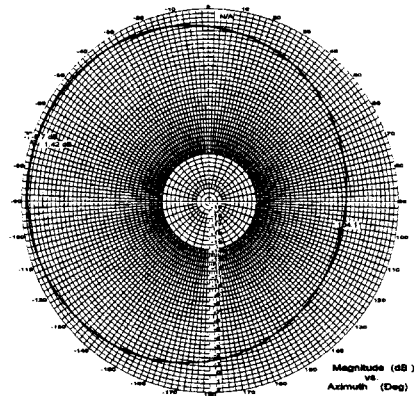
(a) FDTD 시뮬레이션 결과 (b) 측정 결과

Fig. 2. Simulation and measurement results of  $|S_{11}|$  for telephone model.

(a) FDTD simulation result, (b) Measurement result.



(a)



(b)

그림 3. 휴대폰 모델의 azimuth plane 복사 패턴. (a) FDTD 시뮬레이션 결과, (b) 측정 결과

Fig. 3. Radiation pattern in the azimuth plane. (a)FDTD simulation result, (b) Measurement result.

는 약 950 MHz가 된다. 인체가 휴대폰과 3 cm 떨어진 지점에 위치할 경우 공진 주파수가 약 12% 감소해서 835 MHz로 된다. 안테나의 첫번째 공진 주파수는  $\lambda/4$  모노폴 안테나에 해당하고 두번째 공진 주파수는  $3\lambda/4$  모노폴 안테나에 해당한다.

이 휴대폰의 azimuth plane 복사 패턴을 전파 무반향실에서 측정하였다. 무반향실의 회전축에 휴대폰 모델을 고정하고 360° 회전시키면서 4.3 m 떨어진 지점에서 반파장 다이폴 안테나로 복사 전력을 수신하였다. 그림 3은 FDTD 시뮬레이션 결과의 azimuth plane 복사 패턴과 실제로 무반향실에서 측정된 복사 패턴이다. 두 결과가 매우 비슷하게 일치함을 알 수 있다. 안테나의 위치가 도체 상자의 가운데가 아닌 한쪽으로 치우쳐 있는 관계로 FDTD 시뮬레이션 결과의 패턴이 한쪽이 찌그러진 원형이 되는 것을 볼 수 있으며, 실제 측정에서도 같은 방향으로 찌그러지는 것이 확인된다.

### 2-3 인체 두부의 모델링 및 시뮬레이션 방법

인체 두부를 간략화한 구형 모델(sphere model)은 매우 정확하지는 않지만 컴퓨터 모델링이나 실험에 쉽고 효율적으로 사용할 수 있다<sup>[6]</sup>. 본 논문에서는 구형 모델처럼 쉽고 효율적으로 사용할 수 있으면서 인체 두부와 비슷한 타원체 모델(ellipsoid model)을 선택하였다. 균질 및 비균질 두 종류를 모두 취급하였으며, 균질 타원체 모델(homogeneous ellipsoid model)은 근육 조직(muscle)으로 모델링했고, 비균질 타원체 모델(layered ellipsoid model)은 외각으로부터 피부 조직층(skin layer), 뼈 조직층(bone layer), 그리고 뇌 타원체(brain ellipsoid)로 모델링 하였다. 여기서 brain ellipsoid는 중심에서 위쪽은 brain으로 아래쪽은 muscle로 모델링했다. 목은 피부 조직층과 뼈 원기둥으로 모델링 했다. 모든 층의 두께는 모두 5 mm로 하였다. 물질 상수는 표 1의 Gabriel<sup>[14]</sup>이 측정한 값이 사용되었다.

표 1. 835 MHz에서 인체 두부의 물질 상수<sup>[13]</sup>

Table 1. Material constants of human head at 835 MHz.

Tissue	Specific gravity ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )	비유전율	전도도(S/m)
skin	1.01	35.40	0.63
bone	1.81	17.40	0.25
brain	1.04	45.26	0.92
muscle	1.04	51.76	0.11

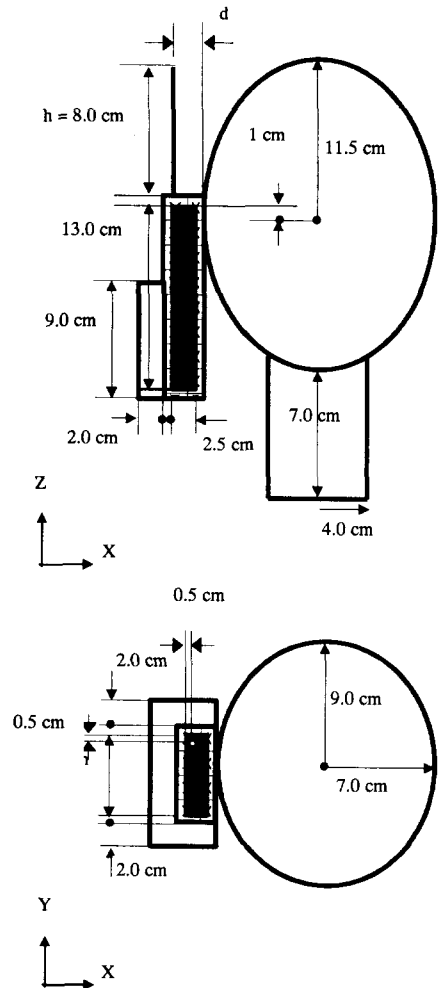


그림 4. 인체 두부 및 휴대폰의 시뮬레이션 모델  
Fig. 4. Human head and cellular phone model for simulation.

휴대폰은 앞에서와 같이  $130 \times 50 \times 25 \text{ mm}^3$ 의 완전 도체 상자로 모델링 했고, 표면에는 1개의 셀을 더 두어 비유전율이 2.0인 무손실 유전체로 코팅된 것을 모델링하였다. 휴대폰은 인체 두부의 오른쪽에 위치시켰고 휴대폰을 잡고 있는 손은 간단한 parallelepiped hand로써 근육 조직으로 물질로 모델링했다. 전체 시뮬레이션 모델을 그림 4에 나타내었다.

FDTD로 계산된 인체 두부의 전계 강도로부터 비흡수율은 식 (5)에 의해 계산된다.

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} [ |E_x(\omega)|^2 + |E_y(\omega)|^2 + |E_z(\omega)|^2 ] \quad (5)$$

여기서  $\sigma$ 는 조직의 전도도이고,  $\rho$ 는 조직의 밀도이다. 1-g 평균 최대 SAR는 1-g 조직( $2 \times 2 \times 2$  셀:  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ ) 내의 각 단위 셀에 대한 SAR값의 평균을 취하여 계산된다.

### 2-4 인체 두부에 의한 안테나 특성 변화 및 비흡수율 계산

입력 임피던스와 복사 패턴은 비균질 모델에 대해서만 계산되었고, 복사 효율과 SAR는 균질 모델 및 비균질 모델 모두에 대하여 계산되었다. 먼저, 휴대폰에서 3cm 떨어진 지점에서 인체 유무에 따른 안테나의 입력 임피던스 변화를 그림 5에 나타내었다. 그림 6은  $50 \Omega$  급전선을 가정하였을 때, 두 경우에 대한  $|S_{11}|$ 을 나타낸다.

이 두 그림으로부터, 길이가 8.0 cm인  $\lambda/4$  모노폴 안테나는 자유 공간에서 공진 주파수는 950 MHz이지만 인체가 거리  $d = 3.0 \text{ cm}$ 에 근접해 있을 때의 공진 주파수는 835 MHz로 뒀을 볼 수 있다. 그림 7은 835 MHz에서 인체 두부와 안테나 사이의 거리  $d$ 에 대한 입력 임피던스의 변화를 나타내고 있다.

그림 8에서는 인체의 유무와 인체 두부와 안테

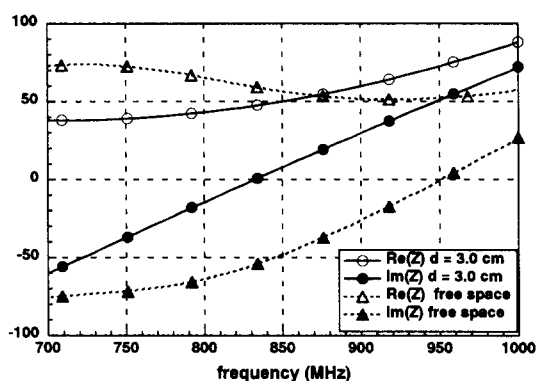


그림 5. 인체 유무에 따른 휴대폰 안테나의 입력 임피던스 변화

Fig. 5. Input impedance of cellular phone antenna with the human body.

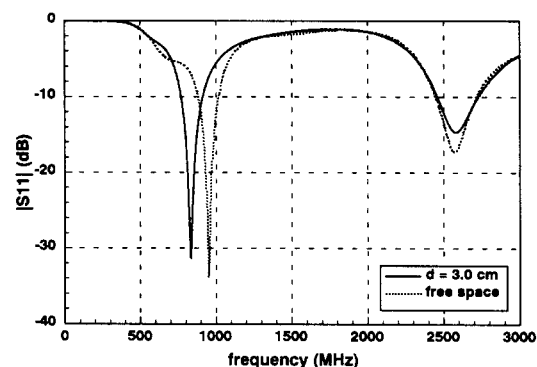


그림 6. 인체 유무에 따른 휴대폰 안테나의  $|S_{11}|$  변화

Fig. 6.  $|S_{11}|$  of cellular phone antenna with the human body.

나 사이의 거리  $d$ 에 따른 휴대폰 안테나의  $\theta = 90^\circ$ 인 azimuth plane(x-y plane) 복사 패턴을 서로 비교했다. 예상대로 인체 두부가 있는 half-space방향으로는 복사가 상당히 줄어들어서 전방성 패턴이 상당히 일그러진다. 인체의 유무에 따른 최대 복사량 차이는 약 11 dB이다. 거리  $d$ 가 커질수록 인체 두부가 안테나의 복사 패턴에 적게 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 거리에 대한 안테나의 복사 효율 변화이다. 안테나 복사 효율은 안테나에 공급된 전력에

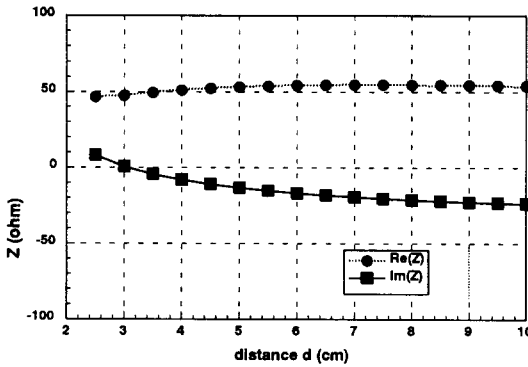


그림 7. 인체 두부와 안테나 사이의 거리에 대한 입력 임피던스 변화

Fig. 7. Input impedance versus the distance between head and antenna.

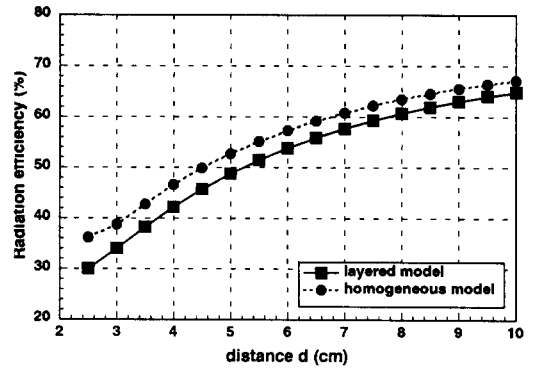


그림 9. 인체 두부와 안테나 사이의 거리에 대한 안테나 복사 효율 변화

Fig. 9. Radiation efficiency versus the distance between head and antenna.

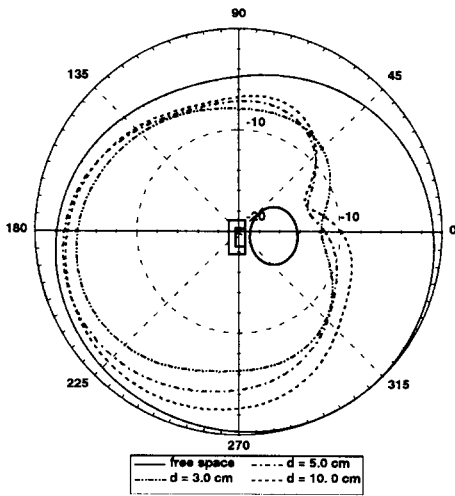


그림 8. 휴대폰 안테나의 azimuth plane(x-y plane) 복사 패턴 변화

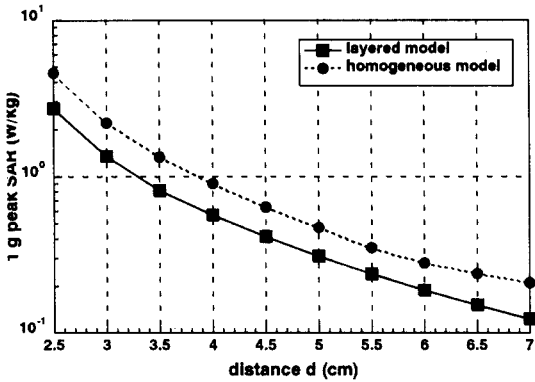
Fig. 8. Radiation pattern of the telephone antenna in azimuth plane(x-y plane).

대한 자유 공간으로 복사되는 전력의 비이다. 그리고, 에너지의 흡수가 인체에서만 일어난다면 자유 공간으로 복사되는 전력은 안테나에 공급된 전력에서 인체에 흡수된 전력을 뺀 값이다. 본 논문의 인체 두부 모델은 귀를 포함시키지 않았기 때문에 거리  $d$ 가 2.5 cm인 경우는 휴대폰과 인체 두부의

표면이 접촉된 상태다. 그러나 휴대폰 표면이 코팅된 유전체로 절연되어 있기 때문에 전기적 관점에서는 서로 접촉 되지 않은 상태다. 만약 귀를 포함시킬 경우 두부 표면에서 귀의 높이 1.5 cm를 고려하면 거리  $d$ 가 4.0 cm 인 경우가 휴대폰과 귀가 접촉한 상태이다. 실제 사용자가 휴대폰과 귀가 접촉한 상태에서 휴대폰을 사용하는 경우라면 본 시뮬레이션에서 안테나 복사 효율은 약 43%이다. 즉 안테나 출력 power 의 약 57%가 인체 두부, 목, 그리고 손에서 흡수된다.

835 MHz의 주파수에서 휴대폰 출력이 0.6 W일 때, 휴대폰 안테나와 인체 두부 사이의 거리  $d$ 에 대한 인체 두부의 1-g 평균 최대 SAR을 그림 10에 나타내었다. 거리  $d$ 가 2.5~5.5 cm일 때는 인체 두부의 1-g 평균 최대 SAR가 급전점 부근의 skin에서 나타나며, 거리  $d$ 가 6 cm를 넘으면 1-g 평균 최대 SAR는 인체 두부의 아래부분 skin에서 나타났다. 그림 10에서, 짧은 거리에서 1-g 평균 최대 SAR값은 약  $d^{-3.25}$ 의 비율로 감소한다. 짧은 거리에서는  $d$ 가 증가함에 따라 두부의 1-g 평균 최대 SAR값은 급격히 감소하므로 거리  $d$ 는 중요한 파라미터이다. 예를 들어, 거리를 2.5 cm에서 3.5 cm로 1 cm를 늘리면 SAR이 많이 감소된다. 그리고





거리 d	2.5 cm	3.0 cm	3.5 cm	4.0 cm
homogeneous model (W/kg)	4.55	2.20	1.33	0.90
layered model (W/kg)	2.72	1.34	0.81	0.57

그림 10. 인체 두부와 안테나 사이의 거리에 대한 인체 두부의 1-g 평균 최대 SAR (주파수: 835 MHz, 출력: 0.6 W)

Fig. 10. 1-g averaged peak SAR for the human head versus the distance between head and antenna(Frequency: 835 MHz, Output power: 0.6 W)

1-g 평균 최대 SAR값도 ANSI/IEEE 표준인 1.6 W/kg<sup>[12]</sup>보다 작아진다. 한편, 거리에 따른 SAR 감소 비율이 참고문헌 [1], [5]에서는 약  $d^{-1.5}$ 인 것으로 보고되어 있다. 본 논문의 결과와 차이점을 보이는 것은 계산에 사용된 인체 모델과 안테나의 기울어진 각도가 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다.

### III. 인체 모형 제작용 물질 합성에 관한 연구

FDTD방법으로 해석된 SAR값을 실제적으로 측정하기 위해서는 인체와 같은 물질 상수를 갖는 모형인체(phantom)를 제작할 필요성이 있다. 본

논문에서는 모형 인간을 제작하기 위한 뼈 유사물질을 합성하였다. 이 물질의 구성 요소는 일본의 Tamura 등<sup>[21]</sup>이 개발한 물질의 합성에 근거하여 선택되었다. Tamura가 개발한 재료는 900 MHz에서 비유전율이 50이고 전도도가 0.50 S/m으로서 근육 및 뇌에 대한 유사 물질이다. 이 물질은 세라믹 분말, 흑연(graphite) 분말, 그리고 에폭시로 구성되어 있고, 그 구성비를 다양하게 변화시키면서 그린 삼각 합성 지도에 근거하여 만들어졌다. 우선, 이 합성 지도가 뼈 유사물질의 합성에도 타당한지를 검토하였다. 위의 세 요소를 사용하여 비유전율을 17.4에 고정시킨 상태에서 얻을 수 있는 최대의 전도도는 0.24이며, 전도도를 0.31에 고정시키고 얻을 수 있는 최소의 비유전율은 23이었다. 따라서 이 세 요소만으로써는 우리가 원하는 물질을 얻을 수 없기 때문에 새로운 요소를 추가할 필요가 발생된다.

상기의 관찰에 근거하여 새로운 물질은 위의 세 요소에서 세라믹 분말을 빼고 전도성 에폭시를 추가하는 것이 적절할 것이라고 가정하였다. 왜냐하면 전도성 에폭시는 전도도를, 세라믹 분말은 비유전율을 증가시키기 때문이다. 따라서 새로운 물질의 구성 요소는 에폭시, graphite 분말, 그리고 전도성 에폭시가 된다.

이들을 이용하여 물질을 합성하기 위해 조그만 플라스틱 시험관에 에폭시, graphite 분말, 그리고 전도성 에폭시 순으로 넣어 혼합하였다. graphite 분말을 넣고 나서 유리 막대를 사용하여 잘 교반하는 것이 중요하다. 이렇게 하여 다음과 같은 구성비를 갖는 2 종류의 시료를 제작하였다. 시료 1은 에폭시 15g, graphite 분말 10g, 그리고 응고제 12g으로 만들어졌으며, 시료 2는 에폭시 10g, graphite 분말 10g, 응고제 8g, 전도성 에폭시 part A와 part B 각각 0.07g씩으로 구성되어 있다. 시험관에 든 시료의 크기는 지름이 2.5cm이고 높이는 5.0cm정도이며, 24시간 정도 경화시킨 후에 가공했다.

이러한 실험 과정에서 한가지 문제점은 시료에 기포가 존재한다는 점이다. 기포가 있으면 유전율에 영향을 주기 때문이다. 따라서, 이 기포를 제거하기 위해 시료 3은 진공 펌프를 이용하여 실험하였다. 이 실험에서는 진공 chamber로 10.6 cm × 10.6 cm × 12 m의 철판으로 이루어진 직육면체 구조물을 사용하였다. 그리고 이 진공 chamber의 한 면의 중앙에 지름 2.4 cm인 구멍을 뚫어 진공 펌프의 호스를 연결할 수 있게 하였다. 물질 합성의 비율은 에폭시 10g, graphite 분말 8g, 그리고 응고제 8g이 사용되었으며 이의 혼합 순서는 위에서 기술한 방법과 동일하다. 이렇게 혼합된 시료를 chamber에 넣고 진공 펌프를 이용하여 기포를 뽑아내어 보았다. 하지만 에폭시의 점성이 큰 관계로 기포의 제거는 크게 효과적이지 못하였다. 점성을 낮출 목적으로 진공 펌프 이용시 chamber를 heating room에 넣고 한시간 정도 온도를 100°C 정도로 유지하면서 위에서의 방법과 동일하게 실험을 수행하였으나 이 역시 기포를 만족할 만큼 제거하지는 못하였다.

#### IV. 복소 유전율의 측정

##### 4-1 유전체 프로브(HP 85070B)를 이용한 측정

합성된 물질의 유전율을 확인하기 위한 유전체 프로브 측정 시스템의 주요 구성 장비는 HP 8720C 회로망 분석기, HP 85070B high temperature dielectric probe kit, HP 82335B HP-IB card, HP 85079B software, 그리고 desktop computer 이다. 이 시스템을 교정(calibration) 하는데 가장 신뢰성이 있는 방법은 air, short, 그리고 25°C 온도의 증류수이다. 이 시스템은 본래 액체나 젤 상태의 물질 측정에 최적인 시스템이다. 이 시스템의 정확도를 검증하기 위해 메탄올의 유전율을 측정하여, 이들 값을 기존의 Davis 등<sup>[22]</sup>과 Hippel 등<sup>[23]</sup>이 발표한 자료와 비교해 보았고 상호 잘 일치

함을 확인할 수 있었다.

한편, 이 HP kit는 고체의 유전율을 측정하는 데에도 사용될 수 있으며 이를 위해서는 그 접촉면이 평면이어야 한다. 시료의 직경은 probe보다 약간 커야 되며 따라서 20 mm가 적절했다. 시료의 두께는 20 mm를 시료의 비유전율의 제곱근으로 나눈 값보다 크면 된다. 따라서 뼈 유사물질의 비유전율은 9 이상의 값을 가지므로 시료의 두께를 10 mm로 잡는 것은 적절하다. 제작된 시료를 probe에 부착하기 위해 금속제 집게 2개를 사용했다.

시료 1과 시료 2를 측정한 결과를 표 2와 표 3에 나타내었다. 850 MHz에서 비유전율이 각각 12.46, 18.04로 나왔고, 전도도가 각각 0.255 S/m, 0.347 S/m로 나왔다. 따라서 시료 2의 값이 시료 1의 값보다 생체 뼈의 특성에 더 가깝다고 할 수 있다.

표 2. 시료 1의 비유전율 및 전도도 측정결과

Table 2. Measurement result of sample 1 for relative permittivity and conductivity.

주파수(MHz)	비유전율	전도도(S/m)
800	12.45	0.267
825	12.46	0.251
850	12.56	0.255
875	12.49	0.257
900	12.56	0.251

표 3. 시료 2의 비유전율 및 전도도 측정결과

Table 3. Measurement result of sample 2 for relative permittivity and conductivity.

주파수(MHz)	비유전율	전도도(S/m)
800	17.99	0.358
825	17.98	0.347
850	18.04	0.347
875	17.95	0.343
900	17.98	0.338

4-2 동축선(coaxial airline)을 이용한 측정

이 측정 시스템은 HP 8510B 회로망 분석기와 MMC 2653H beadless coaxial airline으로 구성되며, 이 측정에서 사용되는 이론은 반사투과법이다. S-parameter test set의 probe 양 끝단에 coaxial airline을 연결하면 시료 내부로 TEM mode의 전파가 통과하게 된다. 이때 측정되는  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 으로써 물질상수를 계산해 낼 수 있다<sup>[24]</sup>.

물질상수를 측정할 때 시료를 coaxial airline 속에 넣기 위해 두께 5 mm, 내경 3.04 mm, 외경 7 mm의 도우넛 모양으로 가공한다. 시료와 coaxial airline 사이에 간격이 생기면 S-parameter 측정시 오차 요인이 되므로 시료를 정밀하게 가공하는 것

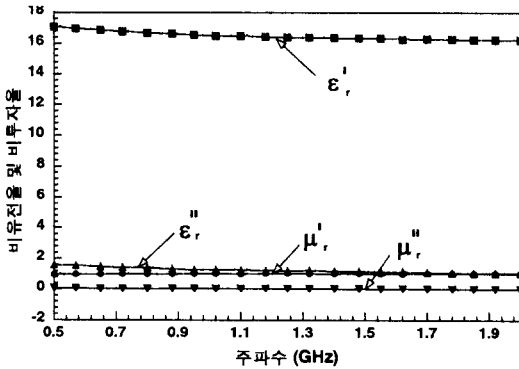


그림 11. 시료 3의 비유전 및 비투자율 측정 결과  
Fig 11. Measurement result of sample 3 for relative permittivity and permeability.

이 매우 중요하다.

에폭시 10g, 응고제 8g, graphite 8g으로 합성된 시료 3을 이 방법으로 측정하였다. 측정 결과를 그림 11에 나타내었으며, 850 MHz에서 비유전율이 16.7, 전도도가 0.065 S/m로 나왔고, 1.9 GHz에서는 비유전율이 16.2, 전도도가 0.108 S/m로 측정되었다. 또한 투자율은 주파수에 관계없이 1에 근접한 값으로 나왔는데 이는 마그네틱 물질을 내포하지 않은 시료의 특성으로 미루어 예측된 결과이다. 표 4에 시료 1, 2, 3의 물질 합성 비율과 주파수 850 MHz에서 측정된 물질상수 값을 종합하여 나타내었다. 표 4로부터 graphite 분말을 증가시키면 유전율이 올라가고, 전도성 에폭시를 증가시키면 전도도가 커진다는 것을 유추할 수 있다. 따라서, 생체 뼈 유사 물질은 상기의 세 요소를 적절히 잘 조합함으로써 합성할 수 있다는 가설을 세울 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 휴대폰 전자파와 인체의 상호 영향을 해석할 수 있는 FDTD code를 개발하였으며, 생체 뼈와 유전율 및 전도도가 유사한 물질을 합성하여 이의 물질상수를 측정하였다.

FDTD 코드의 연구에서는 자유 공간에서의 휴대폰 안테나 복사 패턴과 인체가 근접해 있을 경우의 안테나 입력 임피던스 및 복사 패턴, 그리고 인체 두부의 전력 흡수량(SAR) 등을 단 한번의

표 4. 3개의 시료에 대한 합성비와 850 MHz에서의 물질상수

Table 4. Composition ratio of 3 samples and material constants at 850 MHz.

시료 번호	물질 합성비				물질 상수	
	에폭시	응고제	graphite	전도성 에폭시	비유전율	전도도(S/m)
1	15 g	12 g	10 g	0 g	12.46	0.255
2	10 g	8 g	10 g	0.14 g	18.04	0.347
3	10 g	8 g	8 g	0 g	16.7	0.065

시뮬레이션으로 구하는 프로그램이 개발되었다. 이 FDTD 코드의 정확성을 검증하기 위하여, 자유 공간에서의 휴대폰 안테나 특성에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교 분석하였으며, 휴대폰 모형을 제작하여 실험한 결과, 본 프로그램에 의해 계산된 반사계수 및 복사 패턴이 실험 결과와 매우 잘 일치함을 확인하였다. 인체 두부는 균질 타원체 모델과 비균질 타원체 모델(layered ellipsoid model)이 사용되었으며, 특히 비균질 모델에 의한 시뮬레이션 결과에서는 인체 근접 효과에 의하여 안테나 공진 주파수가 약 12% 감소함을 보였다. 그리고 인체와 안테나 사이의 거리에 따른 안테나의 입력 임피던스, 복사 패턴 및 효율의 변화와 인체 두부의 전력 흡수량 계산 결과를 제시하였다. 835 MHz의 주파수에서 출력이 0.6 W인 경우, 두부와 안테나 사이의 거리가 3.0 cm일 때 1-g 평균 최대 SAR값이 1.34 mW/g으로 계산되었으며, 거리 d의 증가에 따라 SAR값은  $d^{-3.25}$ 의 비율로 급속히 감소하였다.

생체 뼈 유사 물질의 합성에는 기저재료로는 에폭시, 응고제, 그리고 첨가제로 graphite 분말과 전도성 에폭시가 사용되었다. 이들을 각각 10, 8, 10 g씩, 그리고 전도성 에폭시를 0.14 g을 넣고 잘 교반하여 시료를 제작한 후, HP 85070B 유전체 프로브 키트로써 물질 상수를 측정하였다. 이 시료는 850 MHz에서 비유전율이 18.04, 전도도가 0.347이었으며, 이들 값은 뼈의 비유전율 17.40, 전도도 0.31에 상당히 접근하는 것으로서 상기 합성비를 적절히 조정하면 완전한 접근을 이룰 수 있다고 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] P. J. Dimbylow and S. M. Mann, "SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz," *Phys. Med. Biol.*, vol. 39, pp. 1537-1553, 1994.
- [2] Om. P. Gandhi, J. Y. Chen and D. Wu, "Electromagnetic absorption in the human head for mobile telephones at 835 and 1900 MHz," *Proc. Int. Symp. Electromag. Compat.*, pp. 13-16, Sept. 1994.
- [3] 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.
- [4] V. Hombach, K. Meier, M. Burkhardt, E. Kuhn 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.
- [5] S. Watanabe, M. Taki, T. Nojima and O. Fujiwara, "Characteristics of the SAR distributions in a head exposed to electromagnetic fields radiated by a hand-held portable radio," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1874-1883, Oct. 1996.
- [6] Om. 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. 1884-1897, Oct. 1996.
- [7] M. A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "EM interaction of handset antennas and a human in personal communications," *Proc. IEEE*, vol. 83, no. 1, pp. 7-17, Jan. 1995.
- [8] J. Toftgard, S. N. Hornsleth and J. B. Andersen, "Effects on portable antennas of the presence of a person," *IEEE Trans. An-*

- tennas Propagat.*, vol. 41, no. 6, pp. 739-746, Jun. 1993.
- [9] Q. Balzano, O. Garay and F. R. Steel, "Energy deposition in simulated human operators of 800-MHz portable transmitters," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. VT-27, no. 4, pp. 174-181, Nov. 1978.
- [10] Q. Balzano, O. Garay and T. J. Manning, "Electromagnetic energy exposure of simulated users of portable cellular telephones," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 44, no. 3, pp. 390-403, Aug. 1995.
- [11] 김채영, 이승학, 정백호, "FDTD 방법을 이용한 휴대폰 전파의 인체 흡수전력량 산출," 한국전자파학회논문지, 9(4), pp. 491-498, 1998. 8.
- [12] ANSI/IEEE C 95.1-1991, "*IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*," published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY, 10017- 2394, USA.
- [13] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, no. 3, pp. 302-307, May 1966.
- [14] Camelia Gabriel, *Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies*, AL/OE-TR-1996-0037, Air Force Material Command, Brooks Air Force Base, Texas.
- [15] K. S. Kunz, and R. J. Luebbers, *The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics*, Boca Raton, FL : CRC, 1993.
- [16] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations," *IEEE Trans. Electro. Compat.*, vol. EMC-23, no. 4, pp. 377-382, Nov. 1981.
- [17] R. J. Luebbers and H. S. Langdon, "A simple feed model that reduces time steps needed for FDTD antenna and microstrip calculations," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, no. 7, pp. 1000-1005, Jul. 1996.
- [18] C. M. Furse, S. P. Mathur and Om. P. Gandhi, "Improvements to the finite-difference time-domain method for calculating the radar cross section of a perfectly conducting target," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, no. 7, pp. 919-927, Jul. 1990.
- [19] A. P. Zhao and A. V. Raisanen, "Accurate and detailed FDTD solution of microwave integrated circuits using the frequency shifting technique," *1996 IEEE MTT-S Digest*, pp. 577-580, 1996.
- [20] K. R. Umashankar, A. Taflove and B. Becker, "Calculation and experimental validation of induced currents on coupled wires in an arbitrary shaped cavity," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-35, no. 11, pp. 1248-1257, Nov. 1987.
- [21] H. Tamura, Y. Ishikawa, T. Kobayashi, and T. Nojima, "A dry phantom material composed of ceramic and graphite powder," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, no. 2, May 1997.
- [22] C. C. Davis, L. S. Taylor, and E. C. Elson, "Complex dielectric constants of tissues in the head," *Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Me-*

*dicine*, Bologna, Italy, June 1997.

[23] Arthur R. Von Hippel, Editor, *Dielectric Materials and Applications*, John Wiley & Sons, New York, 1954.

[24] Hewlett-Packard product note number 8510-

3, Measuring dielectric constant with the HP 8510 network Analyzer, *The measurement of both permittivity and permeability of solid materials*.

윤 용 섭



1992년 3월~1996년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)

1996년 3월~1998년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 대학원(공학석사)

1998년 2월~현재: 대우전자(주) 디지털정보통신연구소 연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, 안테나 설계, Microwave Link GSM Repeater, GSM 단말기 RF 설계

전 중 창



1984년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)

1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)

1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)

1995년 3월: 한국통신 연구개발본부

선임연구원

1997년 3월~현재: 위덕대학교 정보통신공학과 조교수

[주 관심분야] 안테나공학, 마이크로파소자 수치해석, 마이크로파 계측시스템, 무선이동통신

김 인 광



1997년 2월: 인하대학교 전자공학과(공학사)

1997년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 대학원 석사과정

[주 관심분야] EMI/EMC, 안테나 설계

박 위 상



1952년 생

1974년: 서울대학교 전자공학과(공학사)

1982년: University of Wisconsin-Madison 전기공학(공학석사)

1986년: University of Wisconsin-Madison 전기공학(공학박사)

1986년~1988년: Wichita State University 객원조교수

1988년~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 조교수, 부교수, 정교수

1997년: Utah 대학교 Gandhi 교수의 bioelectromagnetics 연구실 방문 교수

1995년~현재: MARC(국방부 및 국방과학연구소 지정 전자파특화연구센터) 안테나 연구실 실장

[주 관심분야] 초고주파공학, 안테나공학, 마이크로스트립 위상배열 안테나 설계, 초고주파 대역 물질 상수 측정, 휴대폰 전파 SAR 계산 및 측정.