

휴대폰의 3차원 CAD 파일을 이용한 FDTD 모델링

FDTD Modeling using 3D CAD File of Hand-Held Mobile Phone

홍수원* · 이재용** · 김기희* · 오학태* · 박천석***

Soo-Won Hong* · Jae-Yong Lee** · Ki-Hwea Kim* · Hak-Tae Oh* · Cheon-Seok Park***

요 약

본 논문에서는 빠른 모델링과 정확한 계산을 위하여 상용 CAD인 PATRAN을 이용하여 3차원으로 설계한 휴대폰을 1 mm 해상도의 FDTD 모델링으로 직접 변환시키는 방법을 제안하였다. 이 방법의 우수성을 확인하기 위하여 3차원 과도 원거리 영역 변환법으로 계산한 복사패턴과 무반사실에서 이득비교법으로 측정된 결과를 비교하였을 때 그 차이는 0.5 dB 이내이다. 또한, SAR과 직접적으로 관련한 물리량을 찾기 위해서 휴대폰의 전면부에 형성되는 자기장을 계산하였다. 그 결과, 휴대폰 내부로부터 전면 방향으로 복사되거나 휴대폰 본체 길이 방향의 자기장 성분보다는 너비방향으로 흐르는 자기장 성분이 전체자기장에 가장 큰 영향을 주었다.

Abstract

In this paper, we propose a method that directly converts 3D CAD files for handheld phones designed by a commercial CAD S/W, PATRAN, to FDTD modeling with 1mm resolution. To qualify the accuracy of this method, we compared the calculation of radiation pattern using 3D transient far zone transformation with the measured results by gain comparison method in anechoic chamber and the difference is less than 0.5 dB. The calculation of magnetic field distributions on the front of handheld phones has been done to find a factor contributes to SAR. The result showed up the H-field in the width direction of the phone gives more dominant effect than the field in the length or inside to the front direction.

I. 서 론

휴대폰 사용자가 늘어나면서 통화시 발생하는 전자파의 인체 유해에 대한 막연한 불안감이 증가하고 있으며, 이동통신 단말기의 전자파는 방송 송신소 또는 기지국에 비하여 출력은 최대 0.6 W로 미약하지만, 인체조직 중 민감한 부분의 하나인 뇌 부근에 밀착시켜 사용하므로 그와 관련된 질병 유발을 우려하는 것이 현실이다. 국제 비전리 복사 방호위원회(ICNIRP)의 전자기장 노출에 관한 지침서에서는

전자기장에 의한 생체 작용을 열작용, 자극작용과 비열작용 등으로 구분한다. 100 kHz를 경계로 자극작용은 저주파수 영역에서, 열작용은 고주파수 영역에서 지배적이다. 전자기장에 의한 생체의 자극작용은 인체 조직에 유도되는 전류밀도와 관계되며, 열작용은 조직 내의 열 발생에 의한 체온, 혹은 조직 온도의 상승과 관계된다. 이 온도상승은 조직의 흡수 에너지와 밀접한 관계가 있고 SAR(specific absorption rate)을 평가량으로 이용한다. SAR은 RF와 MW 영역의 전자파에 의한 위험을 나타내는

* 전파연구소 전파환경연구과(Department of Radio Environment Research, RRL)

** 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Department of Electrical Engineering, KAIST)

*** 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부(School of Electrical & Computer Eng., Sungkyungwan Univ.)

· 논문 번호 : 991206-112

· 수정완료일자 : 2000년 1월 14일

척도로 널리 사용되고 있다. ANSI/IEEE C95.1-1992 RF 안전 지침서에 따르면 사용자가 근거리에서 사용하는 RF 장비에 대하여 안전을 유지하려면, 몸 전체를 평균한 SAR 값이 0.08 W/kg 이하일 것과, 임의의 인체 조직의 SAR 값을 정육면체 모양으로 1g 평균을 취한 SAR 값이 1.6 W/kg을 초과하지 않을 것, 손, 손목, 발, 발목은 10g 평균 취했을 경우에 4 W/kg 이하일 것으로 규제하고 있다.

인체의 SAR값을 도출하는데 있어서 가장 문제가 되는 것은 직접적인 임상 실험이 불가능하다는 것이다. 실험을 목적으로 전자파를 사람에게 직접 노출시킬 수 없고, 인체 각 부위의 SAR 값도 직접 측정하기가 어렵기 때문에, 문제가 되는 인체 두부의 경우 인체 조직과 같은 전기적 특성을 가지는 매질을 이용한 Phantom 모델을 제작하여 전기장이나 온도 분포를 측정하는 방법^{[1]~[3]}과 MRI 데이터를 이용한 해부학적 모델을 이용하여 인체 각 부위의 전자기장을 계산해서 SAR 값을 평가하는 방법^{[4]~[6]}이 널리 사용된다. 하지만, 이러한 방법들은 휴대폰을 생산하는 입장에서는 크게 도움이 되지 못한다. 왜냐하면, SAR 적합성 시험은 인체 두부 모양의 Phantom에 시험대상 휴대폰의 사용주파수에 해당하는 뇌조직의 전기적 특성을 갖는 액체를 채워 넣어 실험하는 것이 일반적인 방법이기 때문이다. 그래서, 현재 새로운 휴대폰을 개발할 때 설계부터 SAR을 고려하지 못하고 단지 경험에 의존하거나, 거의 완성단계에서 SAR 적합성 시험을 통과하기 위해 별개의 작업이 이루어지므로 최적화가 끝난 다른 특성, 예를 들어 통화품질이나 기구 외형이 악화

되는 경우가 많아 시간과 금전적 손실이 크다.

본 논문에서는 휴대폰 판매를 위하여 거치게 되는 SAR 적합성 시험 상황을 시뮬레이션으로 재연하기 위하여 상용 휴대폰의 CAD(Computer Aided Design) 파일을 FDTD(Finite Diference Time Domain) 입력 데이터로 변환하여 계산함으로써 SAR 도출이 가능하도록 하여 개발단계에서부터 SAR을 고려할 수 있는 초기환경을 구현하는 것을 목표로 한다.

II. 3차원 CAD 파일 변환 프로그램

FDTD 방법은 Yee 셀을 단위 격자로 이용하여 전자기장을 계산하는 방법으로서 최근 들어 컴퓨터의 발달과 함께 널리 이용되는 방법이다. 이 방법은 시간영역 맥스웰 방정식을 유한차분법으로 해석하며 매우 안정적인 계산을 할 수 있다. FDTD 격자 구조에 해석하고자 하는 매질의 구조와 전기적 특성(유전율, 투자율, 전도도 등)을 정확하게 모델링하면 정확한 전자파 산란 해석이 가능하다. 그러나, 계산하고자 하는 대상이 휴대폰처럼 복잡한 구조를 가지고 있다면 그것을 실제와 가깝게 모델링하는데 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라, 목적(目測)이나 자를 통하여 모델링하므로 실제 휴대폰과는 많은 차이가 나게 된다. 따라서 지금까지는 휴대폰을 주로 직육면체 형태의 도전체 박스와 모노폴 안테나로 극히 단순화하여 모델링했다^{[7]~[11]}. 그러나, 최근 들어 Pro-Engineer로 설계한 휴대폰 CAD 파일을 FDTD 입력 데이터로 변환하여 계산하기 시작하였으며 이는 복사패턴과 SAR의 측정값이 오차범위

표 1. 흐름도에서 사용된 변수들의 의미

Table 1. Parameters on flow chart.

변 수	의 미
Max N_x, N_y, N_z	CAD 파일에서 휴대폰이 차지하는 공간
mat(i, j, k)	$i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z$ 위치에 있는 셀 내부 매질의 평균값
M_x, M_y, M_z	E_x, E_y, E_z 를 계산하기 위한 직교좌표계 각 축의 등가매질 성분
α, β, γ	FDTD 모델링 내에서 휴대폰 위치 이동에 해당하는 상수
(int) f_i	실수인 노드의 좌표값을 정수로 변환시키는 함수
$M_x(i, j, k)$	$E_x(i, j, k)$ 노드에서 E_x 를 계산하기 위한 등가 매질

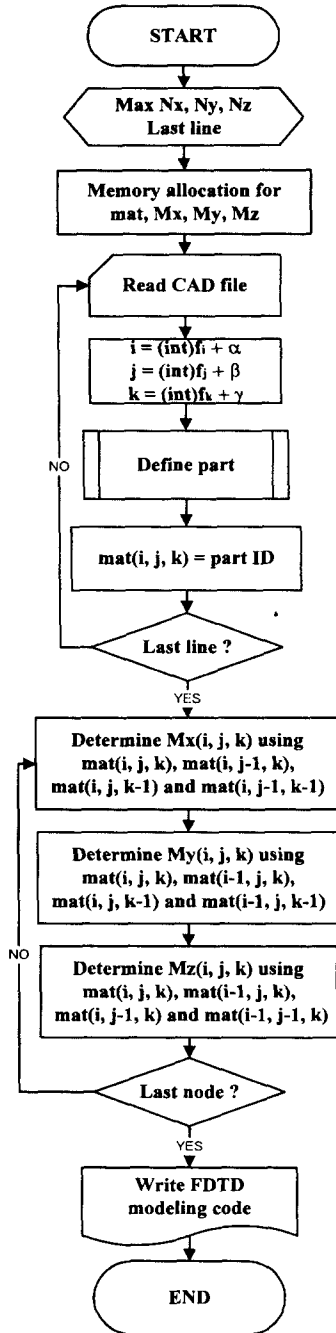


그림 1. CAD 파일을 FDTD 입력 데이터로 변환하는 흐름도

Fig. 1. Flow chart for conversion CAD files into FDTD data.

20 %내에서 아주 잘 맞는다^[12]. 한편, 국내의 일부 휴대폰 제조업체에서는 Pro-Engineer가 아닌 PAT-

RAN을 이용하여 휴대폰 설계 및 압력과 응력변형 시뮬레이션을 수행하고 있다.

실제 휴대폰을 모델링하기 위하여 PATRAN으로 설계된 CAD 파일을 FDTD 입력 데이터로 변환하는 프로그램 작성 방법에 대해 기술하고자 한다. PATRAN에서 3차원으로 설계한 휴대폰에 그림 3(b)와 같이 각 면과 그 면들의 연결점 모서리가 각각 요소(element)와 노드(node)가 되도록 육면체 매쉬(Hexahedral edge mesh)를 적용시킨 다음, 이것을 텍스트 형식으로 출력하면 각 요소들을 연결하는 노드 정보가 좌표로 주어진다. 이 노드는 단지 3개의 세로열로 직교좌표계의 X, Y, Z 위치정보만 있기 때문에 각 노드가 휴대폰의 어떤 부분에 해당하는지 파악해야 한다. 따라서 본 논문에서 휴대폰을 하나의 직교좌표 공간에서 매질이 같은 부분 단위로 개별적으로 작업한 다음 전체를 구성하는 방법으로 표현하였다. 즉, 각 부분들을 그림 3의 c)와 같이 1) Antenna, 2) Front case up, 3) Front case middle, 4) Front case down, 5) Back case upper, 6) Back case lower, 7) Battery, PCB, 8) LCD on PCB, 9) LCD window on face, Speaker, 10) Key pad, 11) Flip cover로 나누어 설계하였으며, Speaker와 PCB는 내부에 있기 때문에 보이지 않는다. 이와 같은 방법으로 설계를 하면 각 부분의 노드들이 순차적으로 표기되므로 변환프로그램을 수월하게 작성할 수 있다. 즉, 각 노드의 몇 번부터 몇 번까지가 어떠한 부분인지 쉽게 알 수 있기 때문에 해당 좌표 정보에 매질정보만 추가하면 되므로 FDTD 모델링이 용이해진다.

CAD 파일을 FDTD 입력 데이터로 변환하는 과정이 그림 1의 흐름도에 나타나 있다. 첫 번째 루프는 우선 CAD 파일을 처음부터 끝(Last line)까지 읽으면서 각 노드들의 좌표와 그 매질에 해당하는 mat(i, j, k)를 정의하고, 두 번째 루프는 첫 번째 루프로부터 알게 된 각 노드 mat(i, j, k)를 처음부터 끝(Last node)까지 읽으면서 M_x , M_y , M_z 각 성분을 결정하기 위한 과정이다. 여기서 사용한 변수들의 의미는 표 1과 같고, 각 셀의 위치 X, Y, Z 방향을 나타내는 인덱스는 i, j, k 로 표현하였다.

두 번째 루프를 좀 더 구체적으로 설명하기 위하여 예로서 임의의 노드 mat(i, j, k)에서 $M_x(i, j, k)$ 를

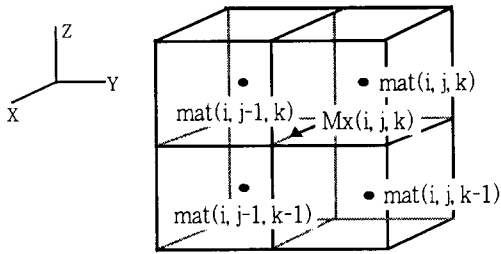


그림 2. $M_x(i, j, k)$ 를 결정할 때 고려되는 4개의 노드
Fig. 2. 4 nodes for determination of $M_x(i, j, k)$.

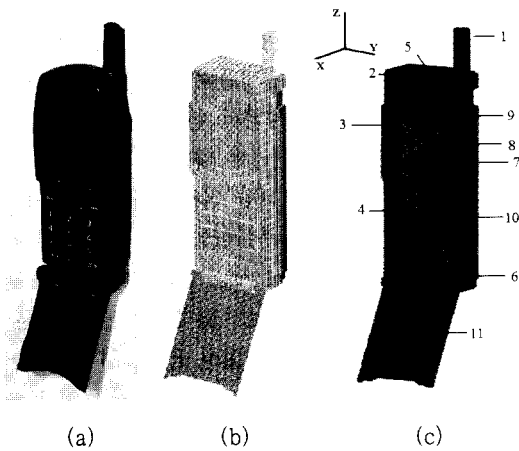


그림 3. 실제 휴대폰과 CAD 파일을 FDTD 입력 데이터로 변환한 후의 외관 비교. (a) 835 MHz 휴대폰, (b) CAD로 설계된 휴대폰, (c) CAD 파일을 변환한 FDTD 모델링

Fig. 3. Comparison of real phone and CAD-derived phone used for FDTD calculation, (a) 835 MHz mobile phone, (b) Mobile phone designed by CAD, (c) FDTD modeling as imported from the CAD file.

결정하는 방법을 그림 2에 나타내었다. 본 논문에서는 전계를 기준으로 Yee 셀을 구성하였으며, 노드 $mat(i, j, k)$ 는 (i, j, k) 번째 Yee 셀 내부의 매질 값이다. $E_x(i, j, k)$ 의 계산에 영향을 미치는 셀은 $E_x(i, j, k)$ 가 정의된 $(i+1/2)\Delta x, j\Delta y, k\Delta z$ 를 중심으로 이웃하는 4개의 $(i, j, k), (i, j-1, k), (i, j, k-1), (i, j-1, k-1)$ 번째 Yee 셀이다. 따라서 $E_x(i, j, k)$ 를 계산하기 위한 등가매질 성분인 $M_x(i, j, k)$ 의 값은 주위의 노드 4개, 즉 $mat(i, j, k), mat(i, j-1, k),$

$mat(i, j, k-1), mat(i, j-1, k-1)$ 의 매질 값을 비교하여 다수를 차지하는 매질로 결정한다. M_y, M_z 도 흐름도에 표기되어 있듯이 M_x 와 동일한 방법으로 결정한다. 단, 4개의 노드를 비교하는 과정에서 자유 공간에 해당하는 노드 점은 고려하지 않았다. 이는 자유 공간에 해당하는 노드가 다수를 차지하더라도 소수의 매질 노드에 따라 전기장이 좌우되기 때문이다. 이와 같은 방법으로 모든 노드의 M_x, M_y, M_z 를 결정하여 우리가 사용하는 FDTD engine으로 계산 가능한 X, Y, Z, M_x, M_y, M_z 6개 세로 열형식의 FDTD 입력 데이터를 만들었다. 그 결과는 그림 3의 휴대폰 일부 모서리의 곡선형태만 제외하면 정상적으로 변환된 것을 확인할 수 있다.

III. 휴대폰의 복사 패턴

FDTD 계산을 위한 흡수경계조건은 8층의 PML (perfectly matched layer)을 적용하였으며, 본 논문에서 사용된 FDTD 셀의 크기는 $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ mm로서 CAD 파일 각 노드들의 좌표가 실수이던 것을 정수로 변환하여 만들었다. 또한, FDTD 계산의 시간 스텝은 $\Delta t = 1.93$ ps가 되게 하여 Courant 안정 조건을 만족시켰다.

본 논문에서 사용된 휴대폰의 주파수영역은 약 Tx : 824 MHz ~ 849 MHz, Rx : 869 MHz ~ 894 MHz이고, 최고 출력(최악의 SAR을 고려함)은 아날로그 방식에 해당하는 600 mW이다. 통신 방식이 디지털인 경우에는 최고 출력이 이보다 작은 200~300 mW이기 때문에, 본 논문에서는 언급하지 않는다. 이러한 이유로 본 논문에서는 복사 전력이 600 mW이고, Tx 주파수 대역의 중심 주파수 835 MHz의 조건으로 계산 및 측정을 하였다.

835 MHz 대역의 휴대폰을 계산하기 위해 835 MHz의 사인함수를 가지는 전압을 휴대폰 안테나에 입사시켰다. 이 때 사인파를 직접 임의의 매질에 입사시키면 overshoot가 생기므로 steady state가 될 때까지 사인파의 크기를 서서히 증가시키는 식 (1)과 같은 방법으로 입사파를 구현하였으며 여기서 T는 주기에 해당하고, 이를 나타내면 그림 4와 같다. 본 논문에서 수행한 휴대폰 모델링은 결국 SAR 계산을 위한 것으로 셀의 크기가 1 mm 일 때 인체 두

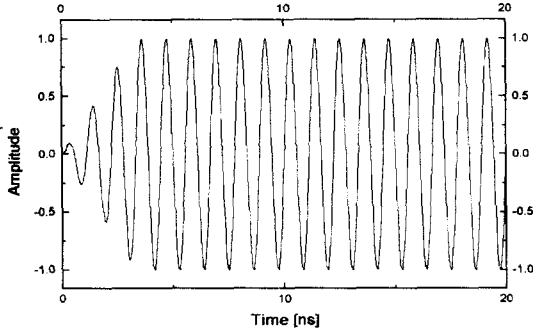


그림 4. 835 MHz로 입사되는 사인파
Fig. 4. Incident sine wave at 835 MHz.

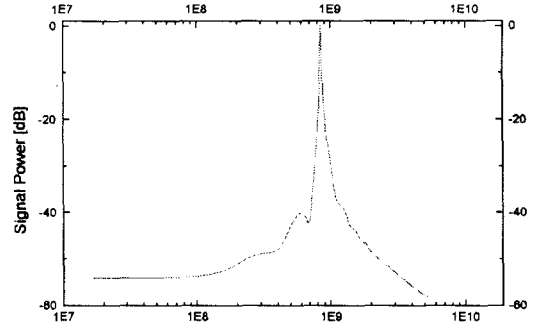
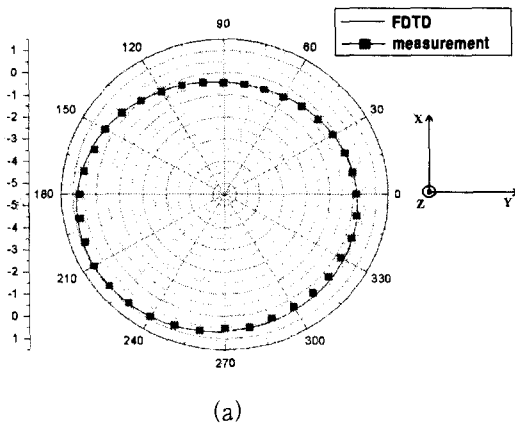
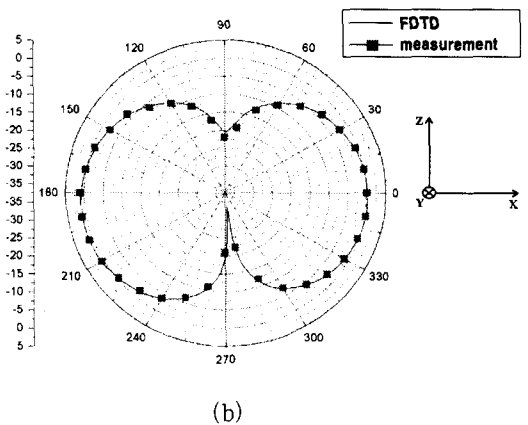


그림 5. 입사파의 FFT 결과
Fig. 5. FFT of the incident wave.



(a)



(b)

그림 6. 계산과 측정에 의한 835 Mz 휴대폰 복사 패턴의 비교. (a) XY 평면, (b) XZ 평면
Fig. 6. Comparison between calculated and measured radiation patterns at 835 Mz. (a) XY plane, (b) XZ plane.

부의 비유전을 중 가장 큰 값이 약 80이라고 할 경우, 파장당 10개의 셀로 계산한다면 3.6 GHz까지 정확한 값을 계산할 수 있다.

$$V_i(t) = \begin{pmatrix} \frac{t}{3T} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), & t < 3T \\ \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), & t \geq 3T \end{pmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 입사파 $V_i(t)$ 가 835 MHz 휴대폰 해석에 타당한 지를 살펴보기 위해 FFT 한 결과를 그림 5에 나타내었다. 입사파에서 셀의 크기가 1/4 파장이 이상이 되는 고주파수 신호의 크기가 충분히 작지 않다면 잡음과 비안정성에 대하여도 고려해 보아야 한다. 이와 같은 현상은 셀의 크기를 1mm로 했을 경우 8.4 GHz에 해당하는데 그림 5에서 이 주파수의

스펙트럼이 잡음 수준이므로 위에서 결정한 값들이 계산의 안정성에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

복사 패턴으로부터 이득을 분석함으로써 실제 제작시 휴대폰의 통화품질을 예측할 수 있다. 따라서, 복사 패턴을 $\psi=0$ (X-Z 평면)와 $\theta=0$ (X-Y 평면)에 대하여 자유공간에서 측정하고 계산하여 그 결과를 상호 비교하였다. 측정은 감쇠특성이 FCC-OET-55를 만족하고, 차폐효율이 120 dB인 무반사실에서 실시하였다. 무반사실의 크기는 폭 10.4 m, 길이 8.2 m, 높이가 8.1 m이며 일반인의 실제 통화상황을 고려하여 반경이 0.9 m이고 회전 가능한 디스크 중심의 바닥으로부터 1.5 m의 높이에 휴대폰을 테스트 모드로 동작시켜 놓은 상태에서 10° 씩 회전시키면서 측정을 수행하였다. 정량적으로 이득을 얻기 위해서 이

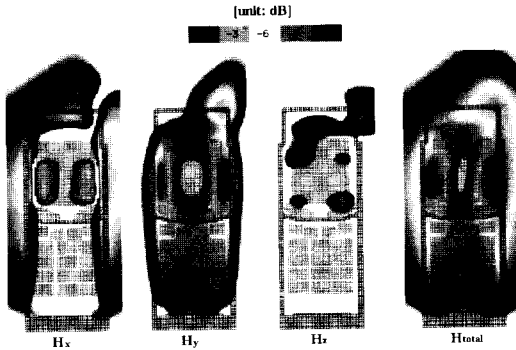


그림 7. 휴대폰 전면에서의 자기장
Fig. 7. B-field on the front of mobile phone.

득비교법(Gain-Comparison method)으로 측정하였으며 이때 기준으로 이용한 안테나는 ROHDE & SCHWARZ사의 대수주기 안테나 HUF-Z3이다. 계산에서는 원거리장을 한번의 FDTD 계산으로 모든 방향의 복사패턴을 쉽게 얻을 수 있는 3차원 과도 원거리 영역 변환법^[13]이 사용되었다.

그 결과가 그림 6으로서 휴대폰을 정면에서 보았을 때 헬리칼(helical) 안테나가 우측 상단의 후면부(건전지에 가까운 쪽)에 위치하기 때문에 본체의 영향을 받아 복사가 전면보다는 후면으로 최대 1.5 dB 정도 더 양호하게 일어남을 확인할 수 있고, 계산과 측정 결과의 차이는 0.5 dB 이내이다.

SAR은 휴대폰 안테나에 흐르게 되는 전류에 의해 형성되는 자기장과 직접적으로 관련되기 때문에 위 조건으로 계산하여 휴대폰의 LCD를 포함하는 면에 형성되는 자기장을 X, Y, Z 각 성분으로 그림 7에 도시하였다. 이를 살펴보면 휴대폰 내부로부터 나오는 H_x 나 휴대폰 길이방향의 H_z 보다는 H_y 성분이 전체 자기장에 가장 영향을 많이 미친다. 그러므로, 앞으로 휴대폰을 설계할 때 SAR 이 작기 위해서는 내부에서 발생하는 필드를 막기 위해 EMI 코팅을 보강하는 방법보다는 옆으로 흐르는 필드의 세기를 효과적으로 저감시키는 방법을 강구해야 할 것이다.

IV. 결 론

휴대폰의 정확한 모델링을 위하여 텍스트 형식의

로 출력한 CAD 파일을 1 mm 해상도의 FDTD 입력 데이터로 변환할 수 있는 프로그램을 만들었다. 그리고, 무반사실에서 이득비교법을 이용하여 정량적인 복사패턴을 측정하였으며 그 결과가 계산값과 0.5 dB 이내로 잘 일치함을 확인하였다. 또한 현재 대부분의 휴대폰에 적용되는 $1/4\lambda$ 헬리칼 안테나가 받게되는 단말기 본체에 의한 접지면 영향도 분석할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 방법은 외형의 특성상, 안테나와 인체두부 사이의 거리가 자연스럽게 멀리 멀어지게 되는 폴더(folder)형보다는 사용시에 안테나가 인체두부에 밀착되어 SAR값이 더 높을 것으로 예상되는 바(bar)형 및 플립(flip)형의 휴대폰을 개발할 경우에 보다 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

아직 SAR 측정방법에 대한 정확한 표준이 정해져 있지 않은 상황이지만 본 논문에서 제안한 방법으로 휴대폰을 설계하고 제작한다면 앞으로 발표될 어떠한 측정 방법이나 조건에도 대응할 수 있을 것으로 생각된다. 이것을 기초로 현재 진행 중인 SAR 측정시스템의 모의 인체(phantom)에 대한 모델링이 완료되면 휴대폰을 모의인체에 병합시켜 SAR 측정시스템과 동일한 상황을 재연하여 계산하는 것이 가능해진다. 그러면, 단지 경험에 의존하거나, 제품의 완성단계에서 별개의 작업으로 SAR을 고려하는 것이 아니라, 설계단계에서 정량적으로 SAR을 고려하여 휴대폰을 개발할 수 있을 것이다.

뿐만 아니라, 모델링 데이터의 해상도가 1 mm이므로 파장 단축율을 고려하더라도 더 높은 주파수의 서비스, 즉 PCS와 IMT-2000뿐만 아니라 미래의 이동 통신 서비스에 대해서도 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Quirino Balzano, Oscar Garay, and Thomas J. Manning, Jr., "Electromagnetic Energy of Simulated Users of Portable Cellular Telephones", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 390-403, August, 1995.
- [2] Niels Kuster, Ralph Kastle, and Thomas

- Schmid, "Dosimetric Evaluation of handheld Mobile Communications Equipment with Known precision", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E80-B, pp. 645-652, May, 1997.
- [3] Qishan Yu, Magnus Aronsson, Ding Wu, and Om P. Gandhi, "Automated SAR Measurements for Compliance Testing of Cellular Telephones", *Proceeding of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4, pp. 1980-1983, 1998.
- [4] Mark J. Hagmann, Om P. Gandhi, and Carl H. Durney, "Numerical Calculation of Electromagnetic Energy Deposition for a Realistic Model of Man", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-27, no. 9, pp. 804-809, September, 1979.
- [5] Niels Kuster, Quirino Balzano, and James C. Lin, *Mobile Communications Safety*, Chapman & Hall, pp. 17-19, 1997.
- [6] 홍수원, 김기희, 오학태, "한국인 인체두부모델을 이용한 SAR 계산", 제3회 전자장의 생체영향에 관한 워크숍 발표집, pp. 89-98, 1999. 7.
- [7] James G. Maloney, Glenn S. Smith, and Waymond R. Scott, Jr., "Accurate Computation of the Radiation from Simple Antennas using the Finite-Difference Time-Domain Method", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 7, pp. 1059-1068, July, 1990.
- [8] Michal Okoniewski, and Maria A. Studchly, "A Study of the Handset Antennas and Human Body Interaction", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1855-1864, October, 1996.
- [9] Om P. Gandhi, Gianluca Lazzi, and Cynthia M. Furse, "Electromagnetic Absorption in the Human Head and Neck for Mobile Telephones at 835 and 1900 MHz", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1884-1897, October, 1996.
- [10] Taki M. Watanabe S, and Nojima T, "FDTD Analysis of Electromagnetic Interaction between Portable Telephone and Human Head", *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E79-C, no. 10, pp. 1300-1307, October, 1996.
- [11] Michael Burkhardt, Nicolas Chavannes, Katja Pokovic, Thomas Schmid, and Niels Kuster, "Study on the FDTD Performance for Transmitters in Complex Environments", *ICECOM '97, DUBROVNIK*, October, 1997.
- [12] Om P. Gandhi, Gianluca Lazzi, Adam Tinniswood, and Qi-Shan Yu, "Comparison of Numerical and Experimental Methods for Determination of SAR and Radiation Patterns of Handheld Wireless Telephones", *Bioelectromagnetics*, 20:93-101, pp. 93-101, 1999.
- [13] Karls S. Kunz, and Raymond J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press Inc., Chapter 7, 1993.

홍 수 원

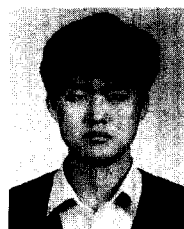


1995년 2월: 성균관대학교 물리학과(이학사)
 1997년 2월: 성균관대학교 대학원 물리학과(이학석사)
 1999년 3월~현재: 성균관대학교 대학원 전자공학과(박사과정)
 1997년 6월~현재: 정보통신부 전

파연구소 공업연수사

[주 관심분야] 전자파 인체영향, 전자장 수치해석

이 재 용



1992년 2월: 한양대학교 전자통신공학과(공학사)
 1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
 1994년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 전파 전파 및 산란 해석, 이동 통신, EMI/EMC 등

김 기 희



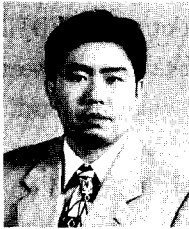
1995년 2월: 성균관대학교 물리학과(이학사)
1997년 2월: 성균관대학교 물리학과(이학석사)
1997년~현재: 정보통신부 전파연구소 공업연구소
[주 관심분야] 전자파 인체영향, SAR 측정 및 계산, 안테나 공학, 무선이동통신

박 천 석



1988년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학사)
1990년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과(공학석사)
1995년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과(공학박사)
1995년~현재: 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수
[주 관심분야] 전자장 수치해석, 마이크로파 능동 및 수동소자, 안테나

오 학 태



1986년 2월: 부산대학교 물리학과(이학사)
1989년 2월: 부산대학교 물리학과(이학석사)
1993년 2월: 부산대학교 물리학과(이학박사)
1994년 1월~1996년 1월: 일본 오사카대학 물리학과 객원연구원

1995년 6월~1996년 11월: 공업기술원 전자정보과
1996년 11월~현재: 정보통신부 전파연구소 공업연구소
[주 관심분야] 전자파-인체영향, EMI/EMC