

휴대폰 전자파의 인체 흡수량(SAR) 평가 기술

오 학 태

전파연구소 공업연구원

I. 서 론

SAR(Specific absorption rate)은 RF와 MW 영역의 전자파에 의한 위험을 나타내는 척도로 널리 사용되고 있다. ANSI/IEEE C95.1-1992 RF 안전 지침서에 따르면 사용자가 근거리에서 사용하는 RF 장비에 대하여 안전을 유지하려면, 몸 전체에 대해서 평균한 SAR 값이 0.08 W/kg 이하일 것과, 임의의 인체 조직의 SAR 값을 정육면체 모양으로 1g 평균을 취한 SAR 값이 1.6W/kg을 초과하지 않을 것, 손, 손목, 발, 발목은 10g 평균을 취했을 경우에 4W/kg 이하일 것으로 규제하고 있다.

인체의 SAR 값을 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 방법과 MRI 데이터(Om P. Gandhi 1996, J. Wang 1999, N. Kuster 1997)를 이용한 해부학적 모델을 이용하여 인체 각 부위의 전자기장을 계산해서 SAR 값을 평가하는 방법이 널리 사용된다. 하지만, 이러한 방법들은 휴대폰을 생산하는 입장에서 크게 도움이 되지 못한다. 왜냐하면, SAR 적합성 시험은 인체두부 모양의 Phantom에 시험대상 휴대폰의 사용주파수에 해당하는 뇌 조직의 전기적 특성을 갖는 액체를 채워 넣어 실

험하는 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 악화되는 경우가 많아 시간과 금전적 손실이 크다.

따라서 빠른 모델링과 정확한 계산을 위하여 상용 Computer Aided Design(CAD)인 PATRAN을 이용하여 3차원으로 설계한 휴대폰을 1mm 해상도의 FDTD(Taflove 1995, Kunz 1993) 모델링으로 직접 변환시키는 방법(Adam D 1998)을 제안하였으며, 이 방법의 우수성을 확인하기 위하여 3차원 과도 원거리 영역 변환법으로 계산한 복사패턴과 무반사실에서 이득비교법으로 측정된 결과를 비교하였을 때 그 차이는 0.5dB 이내였다.

그리고, CAD 파일을 Finite Difference Time Domain method(FDTD) 입력 데이터로 변환한 휴대폰과 SAR 적합성 시험에서 사용되는 Phantom을 모델링한 것을 이용하여 측정 상황을 컴퓨터 시뮬레이션으로 재연이 가능함을 확인하였다.

II. Phantom(모의인체) 모델링

본 稿에서 측정과 계산에 사용된 phantom은 SAR compliance test(K. Meier 1996, V.

Anderson 1995)를 위해 많은 기관들이 SAR measurement system으로 사용하는 제품으로 Schmid & Partners사(swiss)의 DASY3에서 사용되는 Generic Twin phantom이다. 이 phantom을 선택한 이유는 현재 정보통신부 전파연구소에서 사용하는 것이며, 이 Generic Twin phantom의 수치해석 데이터셀이 Swiss Federal Institute of Technology(ETH)에서 제공되고 있기 때문에 측정과 계산으로 구한 SAR 값을 직접 상호 비교할 수 있는 장점이 있다.

그런데, 이 수치해석 phantom은 휴대폰을 왼손으로 사용할 때만 고려할 수 있는 왼쪽 두부(left side head)이고, 각 위치와 매질에 대한 데이터 형식이 본 연구에서 이용하는 FDTD engine에서 요구하는 형식과 다르기 때문에 일부 수정이 필요하다. 첫째, 현재 대부분의 휴대폰은 정면에서 보았을 때 안테나가 본체의 왼쪽이나 오른쪽 위의 모서리부분에 장착되어 있기 때문에 동일한 휴대폰이라 할 지라도 왼손으로 사용할 때와 오른손으로 사용할 때 안테나와 인체 두부와의 거리가 다르다. 그런데, ETH에서는 왼쪽 두부 데이터만 제공하므로 각각의 사용상황에서 SAR의 차이를 비교하기 위해서는 오른쪽 두부가 필요하다. 이것은 왼쪽 두부를 translation이나 rotation하여 만들 수 없으므로 각 좌표값을 inverse transformation하여 생성하였다. 둘째, 제3장(III)에서 정확한 계산을 위하여 휴대폰 CAD 파일을 1mm mesh size의 FDTD model로 변환하므로 2mm mesh의 phantom 데이터에 1mm mesh의 휴대폰을 merge시킬 때 mesh size가 다르기 때문에 그 경계면에서 interpolation이 필요하므로 그 부근에서 상대적으로 큰 오차가 발생할 수 있다. 왜냐하면, 휴대폰이 밀착되는 phantom의 귀 부근에서 SAR의 최대값이 나타나므로 경계면에서의 오차 발생은 계산결과의 신뢰도를 떨어뜨린다. 그래서, 본 연구에서는 phantom data를 1mm mesh size의 데이터로 remesh함으로써 휴대폰과 phantom 데이터가 merge될 때 하나의 grid를 사용할 수 있도록 하여 오차발생요인을 감소시켰다.

셋째로 ETH의 phantom data 형식은 4개의 column에 직교좌표의 X, Y, Z 위치와 매질이 순서대로 정의되어 있다. 하지만, 본 연구의 FDTD engine은 6개의 column에 X, Y, Z 위치와 각 좌표에 대한 매질이 정의되어야 하므로 이러한 형식이 되도록 수정하였으며, 상세한 내용은 다음 장(III)에서 기술한다.

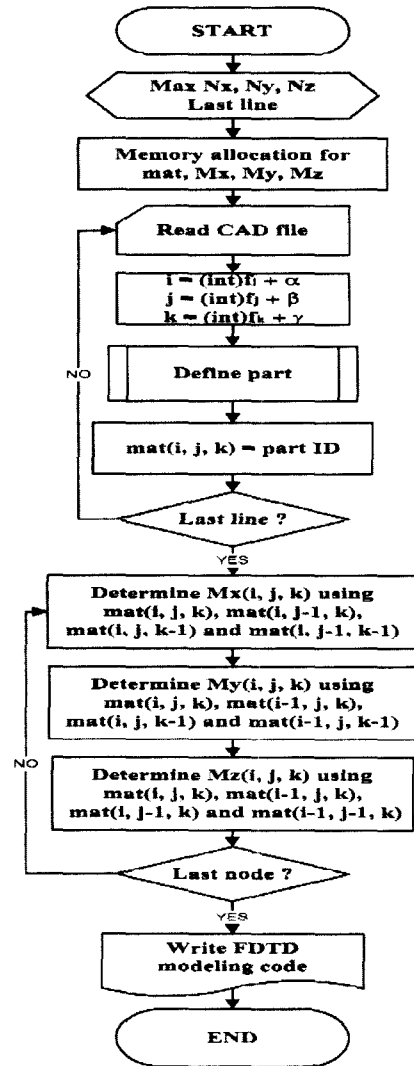
III. 3차원 CAD 파일의 변환

계산에서 이용되는 FDTD 방법은 Yee 셀을 이용하여 전자기장을 계산하는 방법으로서 최근 들어 컴퓨터의 발달과 함께 널리 이용되는 방법이다. 이 방법은 맥스웰 방정식을 시간영역 차분 방법으로 해석하며 매우 안정적인 계산을 할 수 있으며 전체파/산란파 전개법을 이용하면 계산하고자 하는 대상을 쉽고 정확하게 해석할 수 있다. Yee cell로 불리는 FDTD 격자 구조에 해석하고자 하는 매질의 구조와 전기적 특성(permittivity, conductivity 등)을 정확하게 모델링하면 near field 영역에서 scattering analysis나 SAR의 계산 결과가 측정값과 잘 일치한다는 것이 널리 알려져 있다. 그러나, 계산하고자 하는 대상이 휴대폰처럼 복잡한 구조를 가지고 있다면 그것을 실제와 가깝게 모델링하는데 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라, 눈(eye)이나 자(ruler)를 이용하여 모델링하므로 실제 휴대폰과는 많은 차이가 나게 된다. 따라서 지금까지 주로 휴대폰을 직육면체 형태의 conducting box와 monopole antenna 형태로 극히 단순화하여 모델링을 하였다. 최근 들어 Pro-Engineer로 설계한 휴대폰 CAD 파일을 FDTD model로 변환하여 계산하기 시작하였으며 이는 측정값과 오차범위 $\pm 20\%$ ($\pm 1\text{dB}$) 내에서 잘 맞는다. 한편, 우리나라의 일부 휴대폰 제조업체에서는 Pro-Engineer가 아닌 PATRAN을 이용하여 휴대폰 설계 및 stress와 strain simulation을 하고 있으며, 본 연구에서 고려하는 휴대폰 역시

PATRAN으로 설계되었다.

이번 장에서는 실제 휴대폰을 모델링하기 위하여 PATRAN으로 설계된 CAD 파일을 FDTD model로 변환하는 프로그램 작성 방법에 대해 기술하고자 한다. PATRAN에서 3차원으로 설계된 휴대폰에 각 면이 element, 그 면들의 연결점 모서리가 node라고 불리우는 Hexahedral edge mesh를 적용시킨 다음(그림 3(b)), text 형식으로 export하여 그 내용 중 Grid 항목을 보면 각 element들을 연결하는 node 정보가 좌표로 주어진다. node는 단지 3개의 column으로 직교좌표계의 X, Y, Z 위치정보만 있기 때문에 각 node가 휴대폰의 어떤 부분에 해당하는지 파악해야 한다. 따라서 본 논문에서는 휴대폰을 하나의 직교좌표 공간에서 매질이 같은 part 단위로 개별적으로 그런 다음 전체를 구성하는 방법으로 표현하였다. 즉, 각 part들을 <그림 3(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, and 11) Flip cover로 나누어 설계하였으며, Speaker와 PCB는 내부에 있기 때문에 보이지 않는다. 이와 같은 방법으로 설계하면 line 단위로 각 파트의 node들의 좌표들이 순차적으로 표기되므로 변환프로그램을 쉽게 작성할 수 있다. 즉, node의 몇번 line부터 몇번 line까지가 어떠한 part인지 쉽게 알 수 있기 때문에 해당 좌표 정보에 매질정보만 추가하면 되므로 FDTD 모델링이 용이해진다.

CAD 파일을 FDTD model로 변환하는 과정이 <그림 1>의 흐름도에 나타나 있다. 첫 번째 loop는 CAD 화일을 읽으면서 각 node들의 좌표와 그 매질이 무엇인가를 알기 위함이고, 두 번째 loop는 첫 번째 loop로부터 알게된 각 node로부터 매질의 Mx, My, Mz 각 성분을 결정하기 위한 과정이다. 여기서 사용한 변수들의 의미는 <표 1>과 같고, 각 셀의 위치 X, Y, Z 방향을 나타내는 index는 i, j, k로 표현하였다.

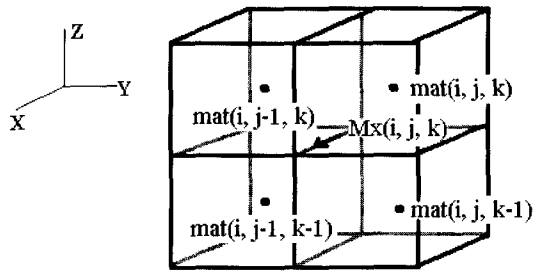


<그림 1> CAD 파일을 FDTD 입력 데이터로 변환하는 흐름도

두 번째 loop를 좀 더 구체적으로 설명하기 위한 예로서 node가 임의의 mat(i, j, k)에서 Mx(i, j, k)를 결정하는 방법을 <그림 2>에 나타내었다. Mx(i, j, k)의 값은 주위의 node 4개 즉, mat(i, j, k), mat(i, j-1, k), mat(i, j, k-1) and mat(i, j-1, k-1)의 매질 값을 비교하여 다수를 차지하는 매질로 결정한다. My, Mz도 flow chart에 표기되어 있듯이 Mx와 동일한 방법으로 결정한다. 여기서 4개의 node를 비교하

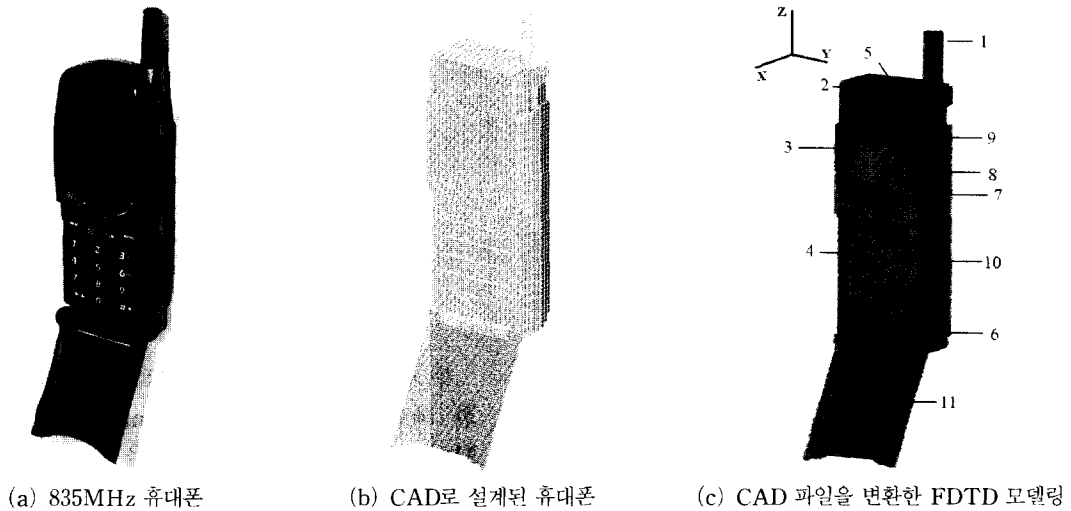
〈표 1〉 흐름도에서 사용된 변수들의 의미

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 각축의 등가매질 성분
α, β, γ	FDTD 모델링 내에서 휴대폰 위치 이동에 해당하는 상수
(int) f_i	실수인 노드의 좌표값을 정수로 변환시키는 함수
$M_x(i, j, k)$	(i, j, k) 노드에서 E_x 를 계산하기 위한 등가 매질



〈그림 2〉 $M_x(i, j, k)$ 를 결정할 때 고려되는 4개의 노드

는 과정에서 free space에 해당하는 node 점은 고려하지 않았다. 이는 free space에 해당하는 노드가 다수를 차지하더라도 소수의 매질 노드에 따라 전기장 값이 좌우되기 때문이다. 이와 같은 방법으로 모든 node의 M_x, M_y, M_z 를 결정하여 2장(II)에서 언급한 FDTD engine으로 계산가능한 X, Y, Z, M_x, M_y, M_z , 6개 column 형식의 FDTD model로 만들었다. 그 결과, 〈그림 3(c)〉의 일부 모서리의 곡선 형태만 제외하면 정상적으로 변환된 것을 확인할 수 있다.



〈그림 3〉 실제 휴대폰과 CAD 파일을 FDTD 입력 데이터로 변환한 후의 외관 비교

IV. 수치해석적 연구결과와 측정결과 비교

본 稿에서 사용된 FDTD 셀의 크기는 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{mm}$ 이고, $\Delta t = 1.93 \text{ps}$ 가 되게 하여 Courant stability condition을 만족시켰으며 흡수 경계조건은 8 layers의 Perfectly Matched Layer(PML)를 적용하였다.

1. 복사 패턴

복사 패턴(in dBi)을 분석함으로써 휴대폰의 통화 품질을 예측할 수 있다. 따라서, $\phi=0(XZ)$ and $\theta=0(XY)$ 면에서의 복사 패턴을 측정과 FDTD 계산 방법으로 상호 비교하여 <그림 4>에 나타내었다.

<그림 4>의 복사 패턴은 정보통신부 전파연구소의 무반사실에서 측정하였으며 무반사실의 규격은 폭 10.4m, 길이 8.2m, 높이 8.1m이다. 그리고 측정은 반경 0.9m의 디스크 중앙에 휴대폰의 실제 사용상황을 고려한 1.5m 높이에서 수행하였다.

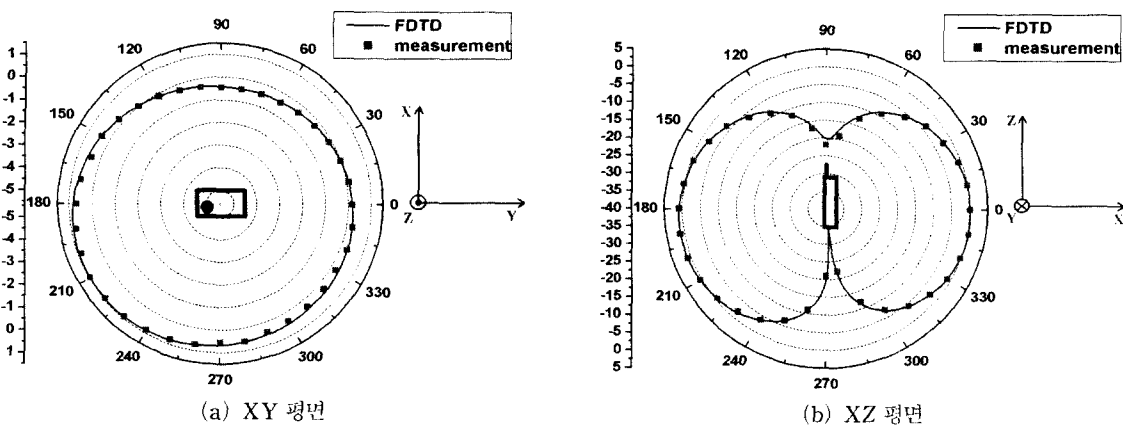
<그림 4>의 복사 패턴 비교는 휴대폰을 정면에서 보았을 때 helical antenna가 우측 상단의 후면부(battery에 가까운 쪽)에 위치하기 때문에 본체의 영향을 받아 radiation이 전면 보다

는 후면으로 최대 1.5dB 정도 더 양호하게 일어남을 확인할 수 있고, 계산과 측정 결과의 차이는 $\pm 0.5 \text{dB}$ 이내이다.

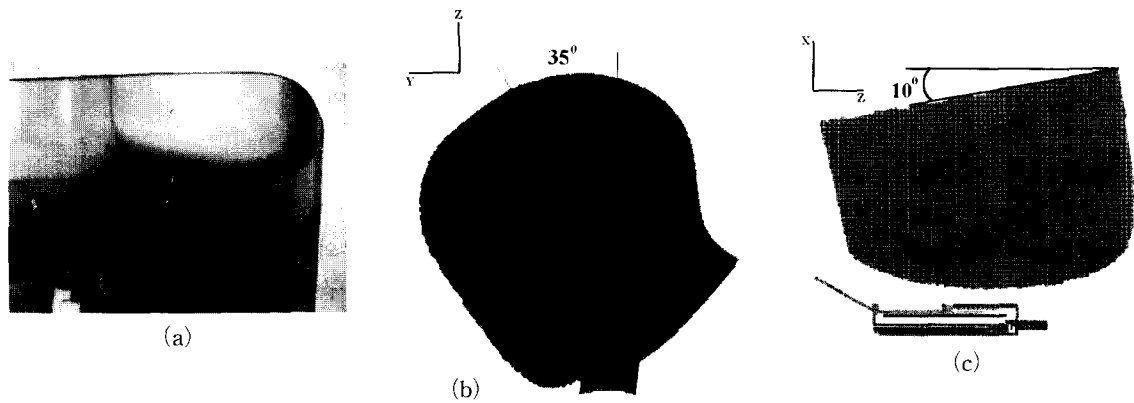
2. SAR

제2장(II)에서 언급하였듯이 휴대폰의 사용 자세에 따라 두부와 휴대폰 안테나와의 거리가 달라지므로 본 연구에서는 2가지 경우의 휴대폰 사용 자세를 고려하였다. 첫째, 휴대폰을 phantom에 수직으로 위치시킨 경우, 둘째, 휴대폰이 귀와 입에 연결될 수 있도록 휴대폰을 35° 기울인 다음 휴대폰을 10° 정도 안쪽으로 비틀어 입 쪽으로 가까이 갖다 댄 경우에 대하여 측정과 계산을 수행하였다.

그러므로 위의 두 번째 경우가 실제 SAR compliance test를 할 때의 상황이다. 그런데, 휴대폰의 안테나 부분은 field의 변화가 심하고 얇은 도선으로 이루어졌기 때문에 계산에 있어서 휴대폰이 FDTD 격자 구조에 비스듬한 경우에는 부정확한 결과를 유발하게 된다. 따라서 phantom을 35° (<그림 5(b)>)와 10° (<그림 5(c)>)로 tilt시킨 다음, FDTD 모델로 변환시킨 휴대폰을 수직으로 세운 상태로 phantom과의 거리를 3mm 간격으로 변화시키면서 merge하여 계산하였다. 측정은 Schmid & Partner사(swiss)의 DASY3에서 Generic Twin Phantom(ϵ_r



<그림 4> 계산과 측정에 의한 835MHz 휴대폰 복사 패턴



(a) FCC-OET-65에 의거하여 전파연구소에서 수행 중인 SAR compliance test
 (b) YZ plane에서 Phantom을 35° tilt시킨 모양
 (c) XZ plane에서 Phantom을 10° tilt시킨 모양

〈그림 5〉 측정과 계산에 의한 SAR compliance test 조건

=42.5, $\sigma=0.85$)에 동일한 휴대폰 4대를 계산과 동일한 조건(〈그림 5(a)〉)으로 수행하였다.

사용되는 휴대폰의 주파수영역은 Tx: 824MHz~849MHz, Rx: 869MHz~894MHz이고, 최고 출력(최악의 SAR을 고려함)은 Advanced Mobile Phone Service(AMPS) 방식에 해당하는 600mW이다. 통신 방식이 digital인 경우에는 최고 출력이 이보다 작은 200~300mW이기 때문에 여기에서는 언급하지 않는다. 이러한 이유로 본 연구에서는 복사 전력이 600mW이고, Tx 주파수 대역의 중심 주파수 835MHz의 조건으로 계산과 측정을 수행하였다.

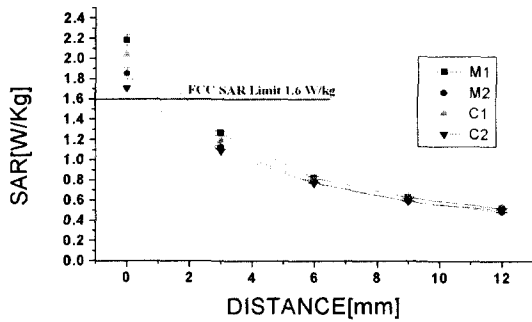
RF와 MW 영역의 전자파에 의한 위험을 나타내는 척도로 널리 사용되는 SAR는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{\sigma (|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2)}{\rho} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 조직의 밀도 [g/cm^3]이고, σ 는 조직의 전기 전도도 [S/m]이다. 휴대폰에 의한 인체 두부의 SAR는 대단히 불균일 하기 때문에 침투 SAR가 휴대폰에 의한 위험 정도를 잘 나타낼 수 있다. 각 지점에서의 SAR 중 정육면체

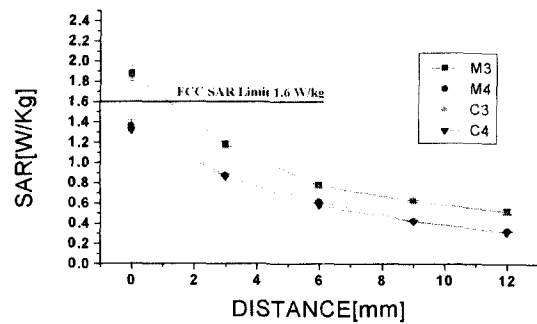
형태로 1g 평균을 취한 SAR_{1g} 의 최고값으로 나타낸다. 이때 1 셀에서의 SAR 값(1 voxel SAR)을 구하는 것은 단순히 공식만 이용하면 될 정도로 간단하지만, 1g 평균 SAR 값을 구할 경우에는 문제가 복잡해진다. 휴대폰은 귀에 갖다 대는 전자 장비이기 때문에, 대부분 안테나에 접촉하는 귀 부근에서 SAR의 최고값을 갖는다. 그런데, phantom의 외부는 공기와 접하고 있고, 공기는 질량이 없다. 정육면체의 1g 평균을 취할 경우, 공기 부분이 포함되면 1g 평균 SAR의 정의로는 값을 구할 수 없다. 만약, 공기가 일부 포함되도록 1g 평균 SAR 값을 계산하면, SAR 1g의 값이 기준치 이상으로 커질 염려가 있고, 공기가 포함된 영역을 제외하게 되면 1 voxel SAR값이 가장 큰 지점을 빠뜨리고 계산하게 된다. 본 연구에서는 이것에 대한 분명한 공식적인 계산 방법이 나와 있지 않은 관계로 정육면체 내부에 공기가 포함되는 영역을 1g 평균 SAR 계산에서 제외하였다.

위의 방법으로 수행한 SAR의 계산과 측정결과를 〈그림 6〉에 나타냈다. 〈그림 6〉에서 가로축의 distance는 휴대폰과 phantom과의 거리이다. 측정에서는 측정오차를 분석하기 위해 동일한 휴대폰 4대가 사용되었다. phantom으로부터



(a) vertical condition

M1 : Measurement with left head
 M2 : Measurement with right head
 C1 : FDTD with left head
 C2 : FDTD with right head



(b) tilted condition

M3 : Measurement with left head
 M4 : Measurement with right head
 C3 : FDTD with left head
 C4 : FDTD with right head

〈그림 6〉 phantom과 휴대폰의 거리 변화에 따른 SAR

거리가 멀어질수록 SAR이 줄어들면서 측정값의 오차도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 당연한 것으로 휴대폰의 안테나로부터 전자파가 복사될 때 phantom에 의해 영향을 받게 되는데 그 정도가 phantom에 가까울수록 그 영향이 크기 때문이다. 다양한 조건에서 계산의 신뢰도를 확인하기 위하여 오른쪽 귀로 밀착시켜 휴대폰을 사용할 경우 왼쪽 귀에 밀착시킨 경우보다 약 15% 적은 SAR이 나왔다. 물론 본 연구에 사용된 휴대폰의 SAR compliance test는 M3에서 distance zero의 조건으로 수행되었으며, 그 결과는 측정 $1.88 \pm 0.08 \text{ W/kg}$, 계산 1.85 W/kg 으로 FCC SAR Limit 1.6 W/kg 보다 $0.25 \sim 0.3 \text{ W/kg}$ 정도의 높은 값을 가진다. 일반적으로 휴대폰의 안테나가 우측 상단에 있기 때문에 왼손으로 사용할 때보다는 오른손으로 사용할 때 인체 두부와 휴대폰의 안테나와의 거리가 멀어지므로 SAR 값을 낮출 수 있다. 따라서, 일반인이 휴대폰을 사용할 때 사용자의 자세에 따라 두부와 안테나와의 거리를 가능한 많이 확보할 수 있는 올바른 사용 방법을 택할 필요가 있음을 알 수 있다.

마지막으로 계산과 측정의 오차 또한 phantom으로부터 휴대폰의 거리가 멀어질수록 줄어드는데 그 이유는 lossy dielectric material인

phantom과 휴대폰에서 방사되는 전자파가 coupling을 할 때 가까운 거리에서는 inductive coupling이 dominant하다가 거리가 멀어질수록 capacitive coupling의 영향이 커지기 시작한다. 그러므로 가까운 거리에서는 inductive coupling 영향으로 측정값이 계산결과보다 다소 크다. 이 모든 결과를 종합해 볼 때 SAR compliance test에 대한 계산과 측정오차는 최대 $\pm 10\%$ 이내로 일치한다.

V. 결 론

전자파 비흡수율(SAR : Specific Absorption Rate)은 전자파의 인체흡수정도를 정량화한 물리량으로, 전자파 노출에 대한 인체보호기준의 기본한계(basic restriction)로서 널리 이용되고 있다. 본 논문에서는 SAR의 정확한 평가를 위하여 computer simulation 및 phantom을 이용한 SAR 측정 data의 상호비교를 통한 연구결과에 대해 검증이 가능하게 하였다.

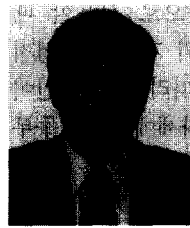
휴대폰의 정확한 모델링을 위하여 CAD로 설계된 휴대폰을 1mm 해상도의 FDTD 모델로 변환시킬 수 있었으며, 복사패턴의 계산 결과가

무반사실에서 실시한 측정값과 $\pm 0.5\text{dB}$ 이내로 잘 일치함을 확인하였다. 또한 현재 대부분의 휴대폰에 적용되는 $1/4\lambda$ helical 안테나와 단말기 본체에 의한 접지면 영향도 분석할 수 있었다. 그리고 SAR 측정시스템에 사용되는 phantom의 FDTD 모델에 휴대폰을 merge시켜 측정시스템과 동일한 상황으로 구현하여 계산한 결과가 측정값과 오차 범위 $\pm 10\%$ 내로 접근함을 확인함으로써 Om P. Gandhi의 결과 오차 $\pm 20\%$ 를 개선하였다. 이로써 단지 경험에 의존하거나, 제품의 완성단계에서 별개의 작업으로 SAR을 고려하는 것이 아니라, 설계 단계에서 정량적으로 SAR이 고려된 휴대폰을 개발할 수 있는 기술적 기반을 마련하였다.

참고 문헌

- [1] Adam D. Tinniswood, Cynthia M. Furse, and Om P. Gandhi, "Computations of SAR Distributions for Two Anatomically Based Models of the Human Head Using CAD Files of Commercial Telephones and Parallelized FDTD Code", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 46, No. 6, June 1998.
- [2] Allen Taflove, "COMPUTATIONAL ELECTRODYNAMICS; The Finite-Difference Time-Domain Method", Artech House, pp.35-106, 1995.
- [3] Jianqing Wang,, Takahiro Joukou, Osamu Fujiwara, "Uncertainty of the One-Gram Averaged Spatial Peak SAR in Human Head for Portable Telephones due to Average Procedures", T. IEE Japan, Vol. 119-C, No. 1, 1999.
- [4] KARL S. KUNZ and RAYMOND J. LUEBBERS, "Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics", CRC Press, pp.11-46, 1993.
- [5] Klaus Meier, Michael Burkhardt, Thomas Schmid, and Neils Kuster, "Broadband Calibration of E-Field Probes in Lossy Media", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 44, No. 10, October 1996.
- [6] Niels Kuster, Quirino Balzano, James C. Lin, "Mobile Communications Safety", CHAPMAN & HALL, pp. 13-57, 1997.
- [7] Om P. Gandhi, "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, October 1996.
- [8] V. Anderson and K. H. Joyner, "Specific Absorption Rate Levels Measured in a Phantom Head Exposed to Radio Frequency Transmissions From Analog Hand-Held Mobile Phones", Bioelectromagnetics 16, pp.60-69, 1995.

저자 소개



吳鶴泰

1964년 3월 26일생, 1986년 2월 부산대학교 물리학과 이학사, 1989년 2월 부산대학교 대학원 이학석사, 1993년 2월 부산대학교 대학원 이학박사, 1994년 1월~1996년 1월 : 일본 오오사카 대학 물리학과 객원연구원, 1995년 6월~1996년 11월 : 중소기업청 국립기술품질원, 1996년 11월~현재 : 전파연구소 공업연구관, <주관심 분야 : 전자파 인체영향, EMI/EMC>