

휴대폰에 의한 국부 SAR 평가 방법 고찰

정희원 이애경*, 채종석*, 이혁재**

Study of Local SAR Estimation Method for a Mobile Phone

Ae-kyoung Lee*, Jong-suk Chae*, and Hyuck-Jae Lee** *Regular Members*

요약

본 논문은 휴대폰에 의한 인체의 SAR(specific absorption rate)에 대한 재현성있는 평가기법을 제공하기 위해 국부 SAR 평가시 가장 큰 변수로 작용할 수 있는 문제들 가운데 두부내의 1g 및 10g 국부 질량을 갖는 조직 부피를 취하는 방법을 다룬다. 제안되는 방법은 다음의 4가지이다.

1. 계산영역의 모든 FDTD (finite-difference time-domain) cell 중 최대 SAR point를 중심으로 FDTD cell을 둘러싸면서 1g 또는 10g을 갖는 누적된 체적을 취한다. 따라서 이것은 시험위치와 두부 모델에 따라 임의의 형상이 될 것이다.
2. 외이(external ear)를 제외한 FDTD cell 중 최대 SAR point를 중심으로 FDTD cell을 둘러싸면서 1g 또는 10g을 갖는 누적된 체적을 취한다.
3. 외이(external ear)를 포함한 FDTD cell 중 최대 SAR point를 포함하도록 직육면체 형상의 체적을 취한다.
4. 외이(external ear)를 제외한 FDTD cell 중 최대 SAR point를 포함하도록 직육면체 형상의 체적을 취한다.

사용되는 수치방법은 총 field FDTD 기법이다. 전화기는 도체박스, 플라스틱 케이스 그리고 모노폴과 helix로 구성된 whip 안테나로 모의되었다. 공간 정밀도 3 mm의 이산적 인체두부 모델은 MRI(Magnetic Resonance Imaging), CT(computerized tomography) 그리고 해부학적 이미지에 기초한 것으로 휴대폰의 실제 사용상태를 모의하기 위해 0°, 30° 그리고 60° 기울인 경우를 고려한다. 국부 조직을 상기의 4 가지 방법으로 취하고 SAR을 계산한 후 비교한다. 비교 결과 최대값을 중심으로 주변 FDTD cell을 둘러싸면서 국부 체적을 취하는 방법이 직육면체의 체적을 취하는 방법보다 간편하면서도 더 높은 SAR을 산출하므로 각종 노출기준의 기초지침의 취지에 더 적합한 평가방법임을 보인다.

ABSTRACT

This paper considers the methods to take the volume of 1 g and 10 g in tissues. This is an important parameter for estimations of the local specific absorption rates (SAR's) because small changes in the shape and position of the tissue volume may result in considerable changes in energy absorption in a head in contact with a mobile phone operating at 835 MHz. The proposed methods are as follows:

1. Take an accumulated volume of 1 g or 10 g by wrapping the FDTD (finite-difference time-domain) cells round the maximum SAR point as a center, so that it will be a contiguous tissue depending on the test position and the head model.
2. Take an accumulated volume of 1 g or 10 g by wrapping the FDTD cells round the maximum SAR point in the region that the external ear is excluded.
3. Take a hexahedral shape of the volume containing the maximum SAR point in the region that the external ear is included.
4. Take a hexahedral shape of the volume containing the maximum SAR point in the region that the external ear is excluded.

The used numerical method is a total field FDTD technique. The phone was simulated with a conducting box, a plastic case, and a whip antenna composed of a monopole and a helix. The discrete human model of the spatial

*한국전자통신연구원 무선·방송기술연구소 전파기술연구부(akdee@etri.re.kr) 정희원, **한국전자통신연구원 무선·방송기술연구소 논문번호:98313-0724, 접수일자:1998년 7월 24일

resolution 3 mm is based on Magnetic Resonance Imaging (MRI), computerized tomography (CT) and anatomical images. The human head is tilted forward by 0°, 30° or 60° to simulate commonly used positions of the phone. The SAR results of the above four methods are compared to offer a reproductive technique for SAR estimations. It is shown that for the purpose of the basic restrictions in guidelines for human exposure to EM fields, the method 1 and the method 2 are more suitable than the method 3 and 4, respectively.

I. 서 론

최근 휴대전화 이용자가 급속히 증가하면서 이들이 이동통신시스템의 수요에 대응하는 여러 가지 효율적 연구개발이 진행됨과 동시에 이러한 무선 복사 이용 기기에 의한 건강위해에 관한 관심과 우려 또한 높아져, 휴대전화에 의한 인체 두부의 SAR(specific absorption rate, 비흡수율) 측정 및 해석에 관한 연구가 활발하다[1]-[4]. 현재 휴대전화에 의한 인체의 전자파 흡수 측정 및 해석 방법 안은 미국의 FCC(the Federal Communications Commission)와 CENELEC(European Committee for Electrotechnical Standardization) 등에서 제시하고 있다[5],[6]. 이 지침들에는 측정방법을 주요하게 다루고 있으며, 본 논문의 주제인 조직의 국부 체적을 취하는 방법의 기준과 그 근거가 다소 모호한 실정이다. 이 두 가지 지침들은 각각 1g과 10g에 대한 SAR 평균치를 기준으로 하고 있으나 이 체적들을 모두 정방형으로 제한하고 있다. 그러나 휴대전화를 사용하는 인체 두부에서 전자파 에너지 흡수는 외이에서 가장 많이 일어남에도 불구하고 상기 측정 기준으로는 외이를 포함하는 정방형의 체적을 취하기가 극히 어렵고 또한 현재의 측정기술로는 내부에서 미소 전자계 프로브로 측정이 가능한 외이를 모의할 수 없기 때문에 거의 대부분 외이를 배제한 두부 내에서 국부 체적을 취하고 있다. 그러나 이들 지침들은 측정 뿐 아니라 수치해석에 의한 적합성 시험을 허용하고 있고 측정의 난점들을 극복하기 위한 보완책으로 FDTD 기법과 같은 수치해석을 이용한 SAR 추정분야에 많은 발전이 기대된다.

본 논문에서는 앞서 언급한 국부 체적을 취하는 몇 가지 방법을 취하여 결과를 비교해봄으로써 재현성 있고 보다 바람직한 SAR 평가기법을 모색하려고 한다. 이를 위해 800 MHz 대역에서 사용되는 셀룰라 휴대

전화에 의한 인체 두부의 SAR을 FDTD 수치 해석 방법을 이용하여 계산하고 4가지 방법에 의한 SAR 추정을 하고 비교한다.

국내에서 사용되는 셀룰라 휴대전화의 한 모델을 선택하여 그 외관 크기와 모노폴과 helix로 이루어진 이중 안테나 구조를 모델링하였다. ray-tracing model을 이용하여 현재 사용되는 휴대전화 플라스틱 케이스의 유전율과 두께를 간접적으로 모델링하였다. 흡수 대상이 되는 인체 두부 모델은 미국 NLM(National Library of Medicine)이 후원한 Visible Human Project의 두부 데이터 (공간정밀도:3 mm)를 이용하였다. 현재 측정에서 흔히 균질의 조직 특성을 갖는 인체 팬텀을 사용하므로 비균질 인체 모델과 함께 균질 인체 모델도 분석하고 또한 휴대전화의 사용상태를 달리하였을 때 조직 부피를 취하는 방법들을 적용하기 위해 휴대전화는 고정시키고 사용자의 두부를 앞으로 기울이도록 하였다. 그리고 전화기의 안테나를 뿜은 경우와 접은 경우에 대해 인체 두부의 전자파 흡수율을 계산하였다. 계산 결과는 SAR로 나타내되 1g 및 10g에 대한 평균치로 표현하도록 한다.

II. 이 론

1. 비흡수율(specific absorption ratio, SAR)과 인체노출에 관한 기초지침 (basic restrictions) [8],[9],[13]

생체가 전자계에 노출되는 경우에, 단기적으로 나타나는 생물학적 영향으로는 전신가열에 의한 체온 상승 작용이 있다. 이 작용은 동물실험에 의해 얻어지는 행동유형의 변화에 가장 민감하게 나타난다고 전해진다. 행동유형의 변화를 나타내는 전신에 대한 열작용의 임계치는 전신 평균 SAR을 지표로 하며, 동물실험의 결과로부터 ANSI에서는 4-8 W/kg,

EPA(미국환경보호청)의 연구보고에서는 1-2 W/kg으로 되어 있다. 이러한 사실에 근거하여 표 1의 주요 기관 또는 국가들의 SAR 제한치에서 전신 평균은 동일하게 0.4 W/kg을 사용하고 있다. 이 지침치에는 상기 동물실험에서의 행동변화 임계치에 대하여, 2.5 - 10의 안전율이 포함된다. 그러나 두부나 몸통에 관한 국부 SAR을 살펴보면 상대적으로 IEEE와 FCC가 더 엄격한 기준을 제시하는 것을 볼 수 있다.

표 1. 주요 기준들의 SAR 제한치
Table 1. SAR Limits of the Basic Restrictions

기관명 (국명)	ICNIRP	CENELEC	IEEE	JAPAN	FCC
주파수영역 (Hz)	10 ⁶ - 10 ⁸	10 ⁶ - 3×10 ⁸	10 ⁶ - 6×10 ⁸	10 ⁶ - 3×10 ⁸	3×10 ⁶ - 10 ⁸
전신평균(W/kg)	0.4 (0.08)	0.4 (0.08)	0.4 (0.08)	0.4 (0.08)	0.4 (0.08)
국부(손목,발목) (W/kg)	20(4)	20(4)	20(4)	20(4)	20(4)
국부(머리,몸통) (W/kg)	10(2)	10(2)	8(1.6)	10(2)	8(1.6)

또한 휴대폰과 같은 국부 전자파원인 경우에는 국부치 계산을 위한 조직의 질량은 그 위치와 형태에 따라 상당한 차이가 있을 수 있다고 보고 본 논문은 두부의 국부 SAR을 추정하는 과정에서 위치 또는 형태를 달리하는 1g 및 10g을 취하는 네 가지의 방법을 제시하고 그 결과를 고찰하려 한다.

2. 인체 두부 모델[10], [13]

서론에서 언급하였듯이 두부의 공간적 모델은 한 가지를 사용하되 흔히 실시하는 측정의 경우를 고려하여 두부를 구성하는 조직을 균질한 혹은 비균질한 조건을 주도록 한다.

사용된 인체 두부 모델은 미국의 NLM (National Library of Medicine)이 후원한 Visible Human Project에서 얻은 것으로 성인 남자에 대해 MRI, CT 그리고 해부 영상을 인체 길이방향으로 각각 4mm, 1mm, 그리고 1mm의 정밀도로 얻은 다음 3mm 간격으로 채편 집된 문자 데이터 파일이다[10]. 따라서 본 연구에서 FDTD 기법에 사용되는 cell 크기는 3×3×3 mm³의 정방형이고 두부를 회전시키기 전, 전체 구조 데이터 셋트는 153×118×120 개의 cell로 구성되어 있으며,

두부 위 부분과 옆 부분으로는 흡수경계면까지 15개의 cell이 존재한다. 835 MHz에서 사용된 각 구성 조직에 대한 σ 와 ϵ , 전기정수 및 밀도 ρ 는 표 2와 같다. 비균질 모델은 [10]에서, 균질모델은 FCC에서 제시하는 뇌(brain)조직의 값을 따른다.

휴대폰의 사용자 상태를 고려하여 두부모델은 0°, 30°, 그리고 60° 앞으로 회전된 경우가 해석된다. 그림 1은 시험위치에 따른 인체 모델의 옆모습을 보이고 있으며, 휴대폰의 ear piece가 닿는 부분을 찾아내기 위해 FDTD grid 상의 가장 돌출된 부분을 흰색으로 그 다음 돌출된 부분을 회색으로 표시하여 외이(external ear)를 구분하고 있다. 그리고 각 옆모습 우측에 휴대폰을 외이에댄 두부 형상을 보이고 있다.

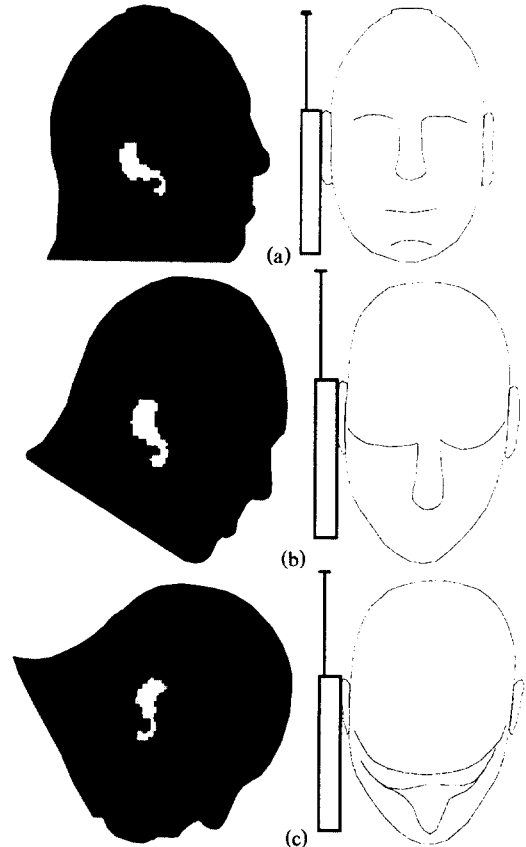


그림 1. 휴대폰 시험위치 (a) 위치 1, (b) 위치 2, 그리고 (c) 위치 3
Fig. 1. The Test Positions of the Phone (a) Position 1, (b) Position 2, and (c) Position 3

표 2. 835 MHz에서 두부 모델의 조직 특성
Table 2. Electrical Properties of the Head Model at 835 MHz

(a) 비균질 모델			
조직 타입	밀도 (kg/m ³)	σ (도전율)	ϵ_r (유전율)
Cartilage	1000	0.09	8.3
Muscle	1020	0.92	57.0
Eye	1000	1.70	74.0
Nerve, brain	1050	0.61	55.0
Skin	1000	0.92	57.0
Fat, Bone	1200	0.09	8.3
Blood	1000	1.19	74.0

(b) 균질 모델			
조직 타입	밀도 (kg/m ³)	σ	ϵ_r
Brain	1030	0.74	46.1

3. 휴대폰 모델

휴대폰은 국내에서 사용되는 800 MHz 대역 셀룰라 휴대폰 중 한 가지를 선택하여 외형 크기 및 안테나 구조를 모델링한다. 고려되는 휴대폰의 크기는 표준형 배터리를 장착하였을 때를 기준으로 하여 130(L)×51(W)×23(H)로 두었으며, 주파수는 송신 주파수 대역의 근사적인 중앙 주파수 835 MHz에서 동작하는 것으로 가정하였다. 그리고 안테나는 현재 셀룰라 휴대폰에서 많이 사용되고 있는 고정된 helix와 접을 수 있는 모노폴로 구성된 이중 구조로서 helix의 S(spacing between turns)는 2 mm, D(diameter of helix)는 6 mm, n (number of turns)는 8회이고, 안테나의 길이는 wire를 뽑았을 때 전체 98 mm이다.

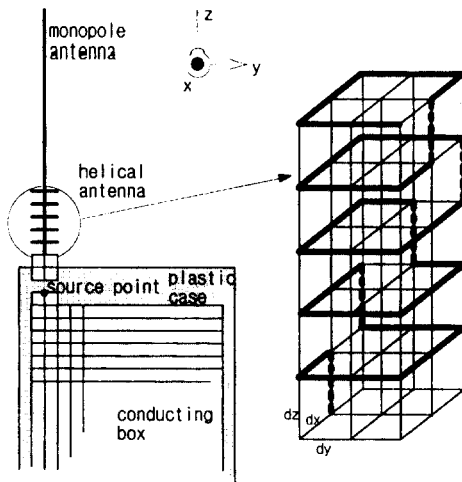


그림 2. FDTD grid내의 휴대폰 모델
Fig. 3. Ray-tracing Model

안테나의 모델링을 간단히 하기 위해 계산에서 사용되는 FDTD cell의 크기를 두부 모델과 같은 3 mm로 균일하게 두고 helix의 S는 3 mm로 가정하고 나선 구조 대신 근사적으로 그림 2와 같이 모델링하였다.

실제 외부 케이스의 비유전율은 3내지 4, 케이스의 두께는 보통 1mm 정도이다. 비유전율 4를 갖는 1mm 두께의 케이스를 본 계산의 3 mm cell 크기로 케이스를 모델링하기 위해 그림 3의 Ray-tracing Model을 이용하여 등가의 유전율을 구하였다. 즉, 휴대폰 외부의 자유공간, 플라스틱 케이스 그리고 케이스 내부의 완전도체 박스 층을 반무한(semi-infinite) 평면으로 가정하고 실제 케이스의 유전율과 두께에 해당하는 총 입력반사계수를 케이스에 접한 자유공간 층에서 구하고 이 총입력반사계수가 같아지도록 3 mm 두께를 갖는 등가의 유전율을 유도해낸다. 모델의 $x=d^+$ 에서 총반사계수는 등비수열로 나타낼 수 있으므로 식 (1)과 같다.

$$\Gamma_m(x=d^+) = \Gamma_{12} + \frac{T_{21}\Gamma_{23}T_{12}e^{-j2\theta}}{1-\Gamma_{21}\Gamma_{23}e^{-j2\theta}} = \frac{\Gamma_{12} + \Gamma_{23}e^{-j2\theta}}{1 + \Gamma_{12}\Gamma_{23}e^{-j2\theta}} \quad (1)$$

여기에서, $\theta = 2\beta_2 d$

$$\Gamma_{12} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}, \Gamma_{23} = 1, \text{ and } \Gamma_{12} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{이므로}$$

식 (1)은 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Gamma_m(x=d^+) = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r} + (1 + \sqrt{\epsilon_r})e^{-j2\theta}}{1 + \sqrt{\epsilon_r} + (1 - \sqrt{\epsilon_r})e^{-j2\theta}} \quad (2)$$

여기서 ϵ_r 은 매질 2의 유전상수이다.

식 (2)를 사용하여 835 MHz에서 4.0의 비유전율을 갖는 두께 1 mm의 휴대폰 케이스에 대해 두께 1~5 mm 범위에서 그 등가의 비유전율이 그림 4와 같다. 앞서 언급하였듯이 본 논문에서는 3 mm의 균일한 FDTD cell을 사용하므로 그림에서 Δx 가 3 mm일 때의 등가 유전율 1.332를 사용하도록 한다.

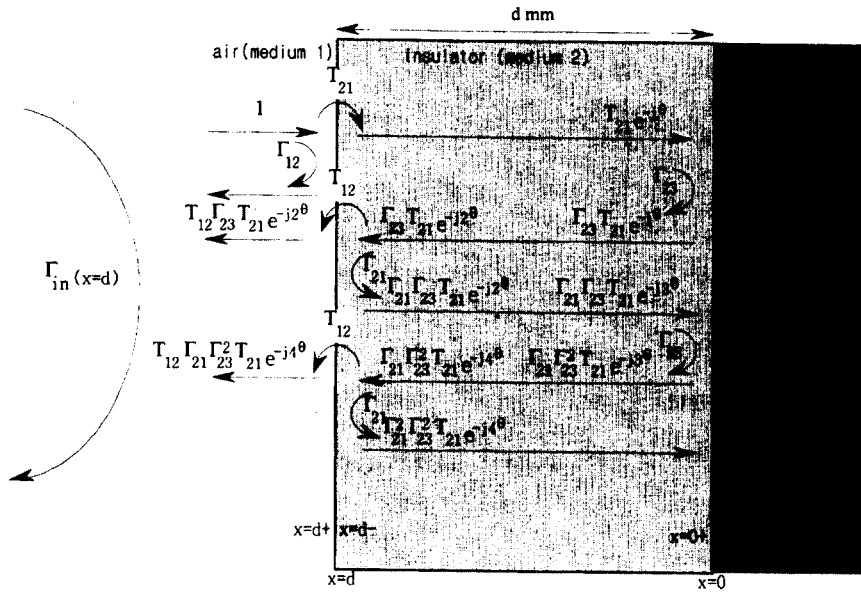


그림 3. Ray-tracing Model

Fig. 3. Ray-tracing Model

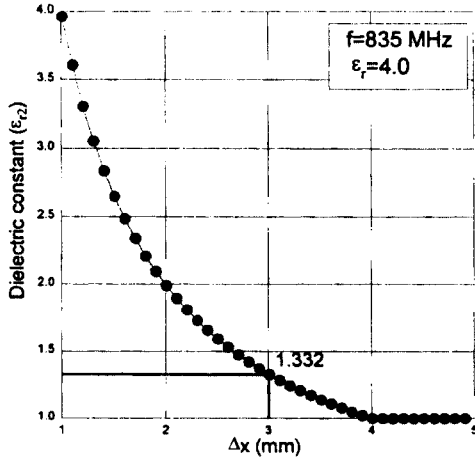


그림 4. 휴대폰의 플라스틱 케이스의 두께 (x)에 따른 동가 비유전율

Fig. 4. The Equivalent Dielectric Constant of According to the Thickness (x) of The Plastic Case

III. 해석 결과 및 고찰

본 논문에서 FDTD cell 크기는 모두 3 mm, Δt 는 안정조건[7]을 만족하는 4 ps로 두고 FDTD 알고리즘을

적용하였다. 총 FDTD 계산 시간스텝 수는 4,000 까지 수행하고 안정화된 시간 스텝상의 시간 평균 평균치를 가지고 SAR을 계산한다.

그림 5에서 휴대폰의 출력전력을 고려하기 위한 계산 과정에서 얻어진 원역장 복사패턴을 보이고 있다. Helical 안테나가 주요 복사원으로 작용할 때에는 그림에서 약 2~3 dB 떨어지는 것으로 나타난다. $\lambda/2$ 다이폴 안테나 패턴에 비해 전력분포가 약간 아래 처지고 있으나, 안테나를 뽑은 경우에 $\lambda/2$ 다이폴 안테나에 대한 이득은 약 1.04로 거의 동일하므로 출력 전력을 구하는 데 안테나 이득은 간단히 1로 두고 원하는 복사전력을 산출하였다. 전원 여기는 그림 2의 휴대폰 모델의 여기점(source point)에 835 MHz의 정현파 전계로써 여기하되 SAR을 해석하기 전에 전자기 모델에 대해 FDTD 해석공간의 외곽 경계에서 복사 전력이 원하는 크기가 되도록 전계 크기를 조절하였다. 모든 FDTD 공간 스텝은 3 mm, 시간 스텝은 4 ps를 사용하였다.

인체를 포함하지 않는 휴대폰만의 근역장에서 전자기적 특성은 그림 6과 같다. (a)와 (b)는 각각 모노폴 안테나를 뽑은 경우와 접은 경우에 대해 좌측은

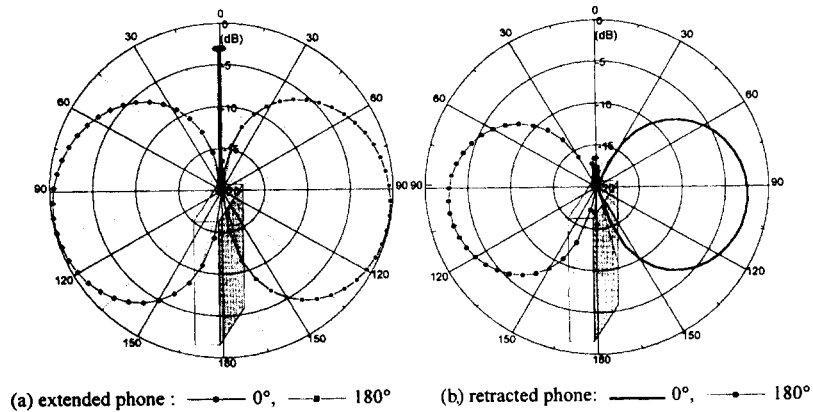


그림 5. 휴대폰의 원역장 복사 패턴
Fig. 5. The Radiation Pattern of the Phone

y=source point인 x-z 평면, 우측은 전화기로부터 인체가 존재하는 방향으로 3 mm 떨어진 y-z 평면에서 근역장 전계 분포를 나타낸다. 이 분포의 값은 전계 크기의 자승을 시간 평균값으로 나타낸 것이다. 그림에서 휴대폰 안테나를 뽑은 경우가 접은 경우보다 복사 효율이 좋으며, 대략 $|전계|^2$ 이 167k 근처 또는 그 이하에서 두피에 접하게 될 것이다. [11]과 [12]에서는 휴대폰 인가 주파수 835 MHz에서 직업인에 대한 평균 전계강도를 102.2 V/m 이내로 허용하고 있다. 따라서 휴대폰의 근역장에서는 이 기준을 만족하지 않음을 알 수 있다. 그러나 이것은 SAR에 바탕을 둔 생물학적 기초기준을 관리 또는 평가하기 위한 최대노출기준(MPE:maximum permissible exposure) 이므로 이에 앞서 SAR 제한치(임의의 조직 1 g 에서의 국부 최대 SAR은 직업인이 8 W/kg, 일반인이 1.6 W/kg를 넘지 못하도록 하고 있다)를 만족하면 생물학적인 연구에 근거한 안전기준을 만족한다 할 수 있다. 근역장 분포에서 helix가 주요 복사원으로 작용할 때에는 모노폴이 존재할 때 보다 복사가 덜 되는 것으로 나타나 인체 두부 내의 SAR 또한 안테나를 뽑은 경우에 더 높게 나타날 것임을 미루어 짐작할 수 있다.

두부 내의 SAR 해석 결과는 휴대폰 안테나를 접은 경우와 뽑은 경우, 인체 조직이 균질한 경우와 비균질한 경우로 나뉘어 1g 그리고 10g 평균의 국부 SAR

로 나타낸다. 인체 두부모델에 대한 전체 평균 SAR은 모든 경우에 표 2의 일반인의 전신평균 제한치에도 못미치므로 언급하지 않기로 한다.

본 논문에서는 국부 SAR 산출하기 위해 인체조직의 질량을 1g 혹은 10g을 취하는 네 가지 방법을 시도하고 결과를 비교하였다. 그 방법들은 다음과 같다.

방법 1. 계산영역의 모든 FDTD cell 중 최대 SAR point를 중심으로 FDTD cell을 둘러싸면서 1g 또는 10g을 갖는 누적된 체적을 취한다. 따라서 이것은 시험 위치와 두부 모델에 의존하는 임의의 형상이 될 것이다.

방법 2. 외이(external ear)를 제외한 FDTD cell 중 최대 SAR point를 중심으로 FDTD cell을 둘러싸면서 1g 또는 10g을 갖는 누적된 체적을 취한다.

방법 3. 외이(external ear)를 포함한 FDTD cell 중 최대 SAR point를 포함하도록 직육면체 형상의 체적을 취한다.

방법 4. 외이(external ear)를 제외한 FDTD cell 중 최대 SAR point를 포함하도록 직육면체 형상의 체적을 취한다.

공통적으로 이 방법들에 의해 취해진 체적내에는 공기가 포함되지 않도록 한다. 방법 1과 2는 연결된 조직의 덩어리일 뿐 그 부피가 일정한 형상을 이루지

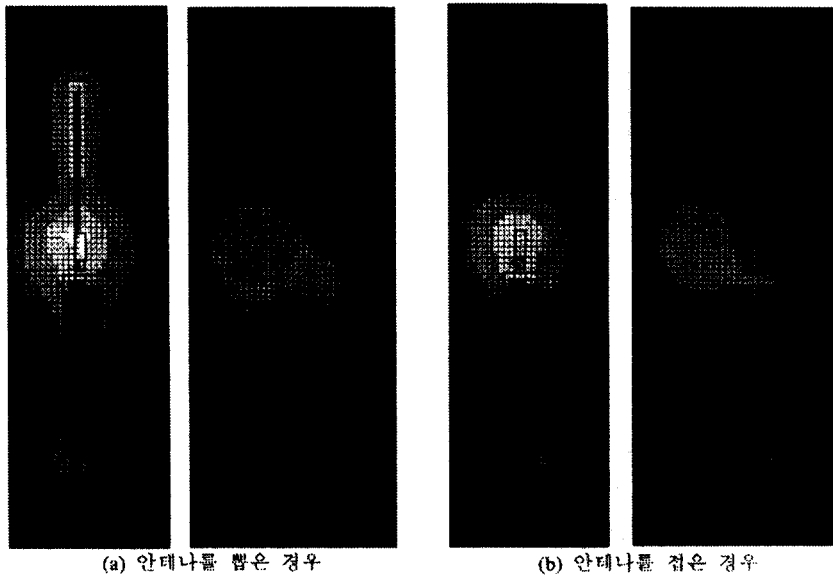


그림 6. 휴대폰 주변의 $|E|^2$ 분포($\square \geq 100M$, $\square \geq 1.80M$, $\square \geq 167k$, $\square \geq 85k$)
 Fig. 6 The distribution of $|E|^2$ near the Phone ($\square \geq 100M$, $\square \geq 1.80M$, $\square \geq 167k$, $\square \geq 85k$)

는 않는다. 즉, FDTD 계산 후 최대 SAR값을 갖는 FDTD cell을 찾고 그 cell을 중심으로 겹질을 싸듯이 FDTD cell을 누적시키되 자유공간을 제외하고 총 부피의 질량이 1g 또는 10g이 되도록 하여 그 부피 내의 SAR 평균치를 얻는 것이다. 그리고 방법 3은 외이를 포함하여 1g 또는 10g의 직육면체 부피를 취하여 SAR을 산출하는 것이다. 방법 4는 현재 SAR 측정 기준과 유사하게 외이를 포함하지 않고 방법 3과 같이 직육면체 부피에 대한 평균 SAR을 산출한다. 그러나 방법 3과 4는 최대 SAR 지점을 포함하면서 취할 수 있는 직육면체의 경우수가 많기 때문에 취해진 직육면체에 따라 산출된 SAR 값 자체가 매우 다양할 수 있다. 측정에서는 이러한 경우의 수를 모두 조사하고 최악의 값, 즉, SAR 최대값을 얻기가 용이하지 않지만 수치해석에서는 짧은 시간 내에 추출이 가능한 장점이 있다. 본 논문의 3 mm FDTD cell에 대해 방법 3과 4에 준하여 1g SAR을 얻기 위해 FDTD cell을 x, y 그리고 z 축으로 각각 $4 \times 3 \times 3$ 개의 부피를 취하였다. 외이를 제외한 모든 계산 영역 가운데 최대 SAR 점을 포함하는 직육면체 수는 직육면체 내의 FDTD cell 수와 같은 36가지이고 이 직육면체 중 자유공간 매질

을 포함하는 것은 버리고 나머지 중 평균 SAR이 가장 높은 것을 선택하였다. 10g SAR의 경우는 $8 \times 7 \times 7$ 개의 FDTD cell을 취하여 392가지의 직육면체에 대해 동일한 방법으로 최종의 SAR 값을 산출하였다.

예로 그림7에는 그림 1의 사용자 시험위치 2에 대해 외이 주변의 FDTD 층 별 SAR 분포를 나타내고 있다. $i=43$ 인 평면은 그림 1의 (b)에서 가장 돌출된 흰부분의 형상과 일치함을 볼 수 있다. 여기서 i, j 그리고 k는 x, y 그리고 z 방향의 이산적 공간 위치를 나타내고 있다. 이 예에서 방법 3에 따라 1g SAR과 10g SAR을 구하기 위해 각각 7과 9개의 육면체에 대한 SAR 값들 중 최대값을 취하고, 방법 4를 따라 SAR을 산출하기 위해서는 각각 9와 43개의 체적에 대한 평균 SAR 값 중 최대치를 선택하였다.

표 3은 방법 1~4에 따른 1g 및 10g SAR을 휴대폰 복사전력 100 mW에 준하여 나타내고 있다. 앞서 휴대폰의 근역장 및 원역장에서 살펴 보고 예측한 바와 같이 휴대폰의 안테나를 접은 경우에는 뽑은 경우보다 SAR 값이 더 낮게 산출되므로 표 3에는 뽑은 경우에 대한 결과만을 표현하였다. 표에서 보는 바와 같이 결과적으로 방법 3과 4는 방법 1 또는 2에 비해 수

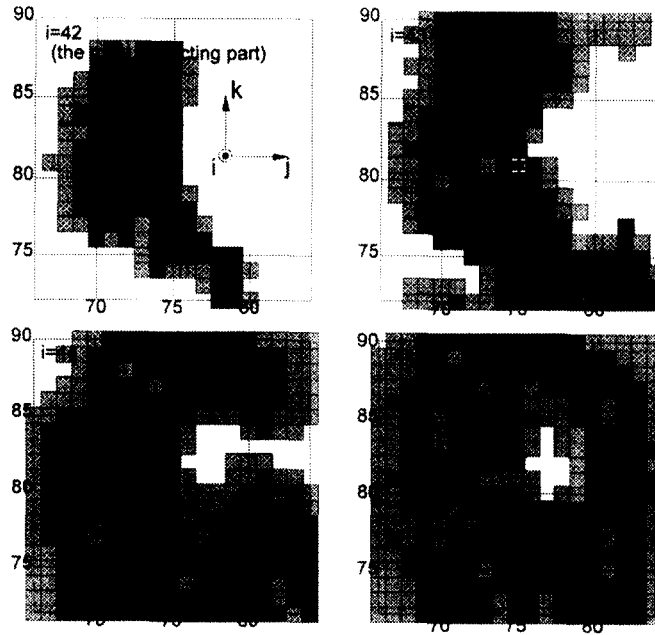


그림 7. 시험위치 2에 대한 외이 주변의 SAR 분포 (□: SAR=0 (air), ▨: SAR<1.4 W/kg, ▩: SAR<4.3 W/kg, ▪: SAR<6.6 W/kg, and ■: SAR(6.6 W/kg, ★: the maximum SAR)
 Fig. 7 The SAR Distributions in The External Ear for the Test position 2 (□: SAR=0 (air), ▨: SAR<1.4 W/kg, ▩: SAR<4.3 W/kg, ▪: SAR<6.6 W/kg, and ■: SAR(6.6 W/kg, ★: the maximum SAR)

십 또는 수백회의 절차를 더 거쳐 그 중 최대 SAR 값을 취했음에도 불구하고 대부분의 경우에 SAR을 더 낮게 산출함을 볼 수 있다. 그리고 예상되는 바와 같이 1g SAR이 10g SAR보다 더 높은 값이 얻어지므로

IEEE와 FCC의 기준이 다른 기준들과 비교하여 전신 평균 SAR 기준이 동일함에도 불구하고 국부 SAR 기준에서는 더 엄격함을 확인할 수 있다. 현재 측정에서 뇌(brain) 또는 근육(muscle)을 모의하기 위해 물,

표 3. 국부 SAR 값의 비교 (f=835 MHz, 휴대폰의 시간평균복사전력=100 mW)

Table 3. Comparison of the Local SAR's (f=835 MHz, Time-averaged Radiated Power from the Phone is 100 mW)

tissue	tilt	SAR 단위 : [W/kg]								Averaged over the whole model
		Method 1		Method 2		Method 3		Method 4		
		1 g	10 g	1 g	10 g	1 g	10 g	1 g	10 g	
Hetero	0†	1.00	0.55	0.42	0.31	0.80	0.41	0.38	0.24	0.012
geneo	30	1.19	0.64	0.45	0.35	1.08	0.58	0.50	0.29	0.011
us	60	0.93	0.55	0.40	0.33	0.84	††	0.44	0.26	0.010
Homo	0†	0.79	0.45	0.40	0.28	0.77	0.39	0.35	0.24	0.012
geneo	30	0.93	0.53	0.38	0.31	0.92	0.50	0.38	0.29	0.010
us	60	0.72	0.47	0.36	0.28	0.69	††	0.35	0.25	0.009

† : 두부의 회전각도가 0 인 경우에는 휴대폰의 공간이 확보되지 않아 모델에서 어깨가 제거하고 해석되었다. 그러므로 모델 전체에 대한 평균 SAR 값이 상대적으로 다른 회전각도에 대한 결과보다 더 높게 산출된다.

†† : 60도 회전된 모델에서 방법 3에 따른 10g 측정은 전혀 확보되지 않는다.

소금, 그리고 HEC라 불리는 화합물로 제조된 액체 형태의 인체 팬텀을 많이 사용한다. 따라서 본 논문에서 뇌의 특성으로 모델의 전기적 특성을 재구성하여 계산된 SAR이 해부학적인 비균질 조직에 의한 결과와 비교되고 있다. 비균질 조직에 의한 SAR이 더 높게 나타나는 이유는 피부 조직의 전기적 특성 때문으로 짐작할 수 있을 것 같으나 앞서 살펴본 뇌조직에 있어서 25.6%의 전계 투과율을 보이고 피부조직에 대해서는 27.3%의 투과율이 보이고 두부의 회전각도에 대한 영향을 살펴보면 대체로 그림 1(b)의 30도 기울인 자세에서 SAR이 가장 높게 산출됨을 볼 수 있다. 휴대폰이 닿는 면적이 다른 경우에 비해 넓게 자리함으로써 발생한 것으로 생각되나 이것은 두부 모델의 형상과 이산적인 공간 데이터를 갖는 두부의 회전에서 발생하는 오차와도 관련이 있을 수 있어 이 문제 또한 더욱 확장된 연구가 필요하다.

IV. 결 론

국내 휴대폰 모델 가운데 한 가지를 선택하여 휴대폰의 외형 크기와 안테나 구조를 근사적으로 모델링하고 FDTD 기법을 이용하여 휴대폰에 의한 인체 두부의 10 g 국부 SAR 및 두부 전체 평균 SAR을 해석하였다.

휴대폰은 도체 박스가 비유전율 4, 두께 1 mm의 물질로 둘러싸여 있는 것을 등가적으로 모델링하되 크기는 표준형 배터리를 사용한 경우로 가정하였고 안테나는 helix와 wire로 구성된 이중 안테나를 고려하였다. 인체 두부는 실제 사용자의 자세를 모델링하기 위해 0°, 30° 그리고 60° 회전하고 휴대폰을 위치시켜 SAR을 해석하였다. 두부의 매질은 비균질 해부학적 모델, 그리고 동일한 형상을 갖되 매질이 뇌조직과 동일한 균질인 모델 두 가지를 사용하였다. 1 g 또는 10 g SAR을 얻을 때 조직의 부피를 취하는 방법을 네 가지 제안하였다. 제한치에 대한 적합 여부를 판단할 때에는 최악의 결과치를 산출하도록 시험하는 방법이 바람직하므로 기초치침의 국부 SAR 적합성 시험을 하는 데에는 방법 1 또는 2와 같이 최대 SAR 지점을 중심으로 FDTD cell을 둘러싸는 것이 현재 타 연

구에서 취하는 정방형 또는 직육면체 체적을 취하는 것보다 더 바람직한 것으로 본다.

그러나 본 논문에서 전화기 모델, 인체 모델은 모두 한 가지에 국한한 것이어서 두부의 자세에 대한 최악의 조건을 판단하는 것은 이르다고 보이며, 매질에 있어서는 복사체나 모델자체에 대한 영향이 적으므로 해석결과에서처럼 균질한 경우가 비균질한 경우보다 낮게 산출된다고 결론지을 수 있으나 그 정도에 대해서는 연구가 더 진행되어야 한다. 또한 일반적으로 이론적 수치해석을 이용하여 전화기 내부의 회로 구조나 케이스 상의 keypad 등을 정확히 모델링하기는 어렵다. 따라서 좀 더 정확한 결과값을 얻기 위해서는 실제 휴대폰의 근역장 및 원역장 복사 패턴의 결과를 도입하여 이론적인 결과를 입증한 뒤 본격적인 SAR 추정을 하는 것이 바람직하며, 인체 모델 또한 국내인을 대상으로 표준화하고 또한 그 인체 데이터에 준하여 실험용 인체팬텀을 제작하여 측정치와 비교하는 작업이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Michal Okoniewski, and Maria A. Stuchly, "A Study of the Handset Antenna and Human Body Interaction," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-44, No. 10, pp. 1855-1864, Oct. 1996.
2. Volker Hombach, Klaus Meier, Michael Burkhardt, Eberhard Kuhn and Niels Kuster, "The Dependence of EM Eenergy Absorption Upon Human Head Modeling at 900 MHz," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-44, No. 10, pp. 1865-1873, Oct. 1996.
3. So-ichi Watanabe, Masao Taki, Toshio Nojima and Osamu 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. MTT-44, No. 10, pp. 1874-1883, Oct. 1996.
4. 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 Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-44, No. 10, pp. 1884-1897, Oct. 1996.
5. FCC, OET Bulletin 65, Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, Edition 97-01, released August 25, 1997.
 6. CENELEC, Feb. 1997, Considerations for Human Exposure to EMFs from Mobile Telecommunication Equipment (MTE) in the Frequency Range 30 MHz-6GHz, European Committee for Electrotechnical Standardisation SECRETARIAT SC 211/B WAMTE
 7. Karl S. Kunz and Raymond J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, 1993.
 8. George Franceschetti, Om P. Gandhi, and Martino Grandolfo, *Electromagnetic Biointeraction*, Plenum Press, New York, 1989.
 9. Charels Polk and Elliot Postow, *CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, 1986, CRC Press
 10. Human Head and Shoulders Mesh with 3 mm cells, REMCOM inc.
 11. 전자파 안전기준(안), 한국전자통신연구소, 1993.1.
 12. IEEE C95.1-1991, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, (Revision of ANSI C95.1-1992)
 13. 이애경, 조광윤, 이혁재, "평면파에 노출된 인체 두부의 전력흡수 해석", 한국전자파학회 논문지 제8권 제6호, 1997, pp 665 - 680.



이 애 경(Ae-kyoung Lee)정회원
1990년2월:중앙대학교 전자공학과(공학사)
1992년2월:중앙대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1992년2월~현재:한국전자통신연구원 무선·방송기술연구소

전파기술연구부 선임연구원
<연구분야> EMC현상의 이론적 해석, 전자파 인체 영향 등

채 종 석(Jong-suk Chae) 정회원
1977년2월:한국항공대학교 전자공학과(학사)
1979년3월:연세대학교 대학원 전자공학과(석사)
1989년2월:연세대학교 대학원 전자공학과(박사)
1985년~현재:한국전자통신연구원·무선방송기술연구소 전파기술연구부장

이 혁 재(Hyuck-Jae Lee) 정회원
1970년:서울대학교 전자공학과(학사)
1977년: Oregon State Univ. 전자공학과(석사)
1982년: Oregon State Univ. 전자공학과(박사)
1970년~1973년:해군기술장교
1976년~1982년:Oregon State Univ. 연구 조 교 및 Teaching Assistant.
1983년~현재:한국전자통신연구원 무선·방송기술연구소장