

휴대폰 전파의 인체 흡수전력량과 온도 상승량 산출

Computation of Temperature Rising by Absorbed Power Radiated from a Portable Phone

이승학 · 김채영 · 강승진

Seung-Hak Lee · Che-Young Kim · Seung-Jin Kang

요 약

본 논문은 유한차분 시간영역 해석법 (Finite-Difference Time-Domain method)을 사용하여 900 MHz용 휴대폰으로부터 방출된 전파의 인체 두부(頭部)에 흡수된 전력량을 산출하였고, 흡수전력으로 인한 두부내의 온도 상승량을 계산하였다. 이를 위하여 인체두부를 5층 매질로 모델링하였고, 휴대폰은 금속상자에 부착된 모노폴 안테나로 모델링하였다. 모델링에 사용된 인체 두부와 휴대폰의 크기는 상용의 값을 사용하였다. 사용된 모노폴 안테나의 길이는 8.16 cm이고, 휴대폰의 출력은 상용 900 MHz의 600 mW를 사용하였다.

설정된 모델링하에서 인체의 위해(危害) 정도를 알려주는 지수인 1 g, 10 g 평균 비흡수율(SAR-Specific Absorption Rate)의 분포를 계산하였고 이에 따른 1 g, 10 g 평균 온도 상승량을 계산하였다. 그 결과 비흡수율이 최대가 되는 지점은 인체 두부의 피부 부분이었고 최대 온도 증가 위치는 이보다 안쪽 부분에서 나타났다. 인체 두부와 휴대폰의 이격거리에 따른 SAR과 온도 상승량을 계산하였다.

Abstract

Absorbed power of the human head radiated from a 900 MHz portable phone and temperature rise are computed using FDTD(Finite-Difference Time-Domain) method. For this computation the 5 layered media for the human head modeling and the monopole antenna attached to metallic box for the portable phone are used. To reflect the real circumstances typical sizes of human heads and portable phones are considered in the calculation. The length of monopole antenna is 8.15 cm, and the output power of a phone is 600 mW.

Under the predetermined model the distribution of 1 g, 10 g averaged SAR and temperature rise rate over the human head are calculated, from which it was found that the position of maximum SAR is near at the head skin surface, not deep places far into the head. The position of the highest temperature is located far from the head skin more than that of the maximum SAR occured. The averaged SAR and temperature along the distance between the head and phone are calculated according to seperation distance between the head and phone.

I. 서 론

최근 이동통신의 성장과 더불어 휴대폰 단말기가 널리 보급되었고, 이들 단말기는 인체 두부에 밀착

되어 사용되고 있다. 그 결과 휴대폰 전파의 인체 유해설이 대두되면서 휴대폰 전파가 인체 두부에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]~[3]. 국내에서도 동물을 이용한 생체 실험과 모의

「본 연구는 2000년도 두뇌한국21 지원 사업에 의하여 수행되었음.」

경북대학교 공과대학 전자공학과(Department of Electronics, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 20001212-145

· 수정완료일자 : 2001년 1월 31일

실험 등으로 인체 영향에 대한 연구가 수행 중에 있으며, 또한 ANSI나 ICNIRP은 국부 최대 SAR을 피부조직 1 g 평균과 10 g 평균을 기준으로 하여 각각 1.6 W/kg과 2 W/kg을 초과하지 않도록 권고하고 있다^{[4],[5]}. 국내에서도 이와 같은 안전규정을 마련 중에 있다. 특히 최근에는 셀룰라 밴드인 900 MHz로부터 PCS 밴드인 1.8 GHz로 주파수 대역이 상향조정되는 추세이다. 국내 셀룰라 폰의 최대 출력은 600 mW이고 PCS 폰은 240 mW이다. 본 논문에서 SAR은 휴대폰 전력과 밀접한 관련을 가지고 있기 때문에 출력이 높은 900 MHz 대역의 폰에 대한 해석으로 국한시켰다. 이 밴드에서 휴대폰 전파에서 방출된 전파의 인체 두부에 흡수된 전력량(量)인 비흡수율을 산출하였으며, 이 흡수 전력은 열 생성원이 되어 두부내 온도를 상승시키는 결과를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 두부(頭部)내 흡수 전력으로 인한 상승 온도를 산출하였다. 또한 휴대폰 사용시 통화시간에 따른 두부내 과도기 상태의 온도 증가와 정상상태에서의 상승량을 계산하였다^{[6]~[8]}. 그 결과 SAR의 최대가 되는 지점은 피부 부근임에 비해 최대 상승 온도지점은 SAR보다 안쪽 부분에서 일어남을 알게 되었다.

본 논문에서는 의사 모델에 대한 수치해석법으로 유한차분-시간영역(FDTD) 해석법을 사용하였다. 유한차분 시간영역 해석법을 사용함으로써 정상응답과 과도응답 해석이 가능해진다^{[9]~[12]}. 그리고 비균질 매질로 모델링된 구조물에 대한 응답 역시 비교적 손쉽게 얻을 수 있다. 유한차분-시간영역 해석법을 휴대폰 문제에 적용하기 위해서는 휴대폰과 인체 두부를 적절히 모델링하여야 하며, 채택된 모델링에 따라서 해의 정확도가 달라진다. 흡수 경계 조건은 8층 PML을 사용하였다^[13].

II. 본 론

2-1 비흡수율(SAR) 계산

본 논문에서 사용한 인체 두부 모델은 Jensen 모델이다^[14]. 수직축 방향으로 62개의 단면을 가지며, 각 단면은 48×66개의 셀로 구성되어 있다. 각 방향으로 3.5 mm의 해상도를 가지는 정방형 셀을 사용

표 1. 인체 두부의 매질상수

Table 1. Tissue parameters of the human head.

조직	뼈	피부	근육	두뇌	눈
매질 번호	1	2	3	4	5
ϵ_r	17.4	39.5	51.8	44.1	74.3
σ [S/m]	0.19	0.17	1.11	0.89	1.97
ρ [kg/m ³]	1810	1010	1040	1040	1010

하였다. 해석대상은 피부, 뇌, 눈, 근육, 뼈의 5개 조직으로 구성된 인체 두부만 고려하였고, 손의 영향은 고려하지 않았다. 표 1에 각 매질의 유전율, 전기전도도 그리고 매질 밀도가 주어져 있으며, 이들은 900 MHz에 대한 전기상수 값들이다. 각 매질의 투자율은 자유공간 투자율과 같게 두었다.

휴대폰은 완전도체 상자위에 $\lambda/4$ 모노폴 안테나를 사용하였으며, 도체상자는 높이 110 mm, 폭 45 mm 그리고 두께 25 mm로 모델링하였다. 그리고 0.35 mm의 반경을 가지는 안테나를 도체상자의 모서리에 위치하였다. 이러한 해석 구조를 그림 1에 나타내었다. 흡수경계 영역을 제외한 구조가 놓인 전 해석 공간은 83×89×85 개의 셀들로 구성되어 있다. 흡수경계 영역은 PML 경계를 사용하였으며,

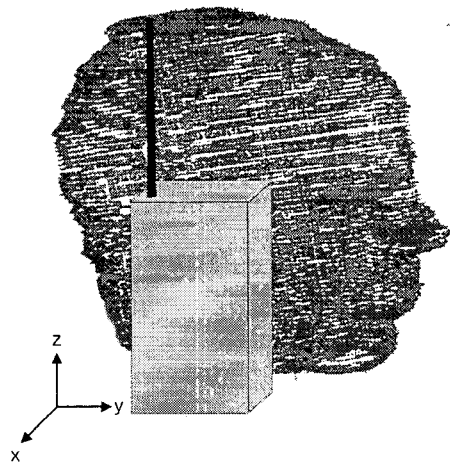


그림 1. 인체 두부와 휴대폰 모델링

Fig. 1. The human head and the portable phone model.

8개 층을 가진다. 시간 안정조건은 $\delta/(2c)$ 를 사용하였으며, δ 는 3.5 mm이고 c 는 광속이다.

모노폴 안테나는 가는 도선 근사를 사용하였으며, 이는 FDTD 셀 크기보다 작은 반경을 가지는 안테나 해석에 적합하다. 또한 안테나의 전원 여기 방법은 MOM의 델타 갭 방법을 사용하였으며, 상용 900 MHz 휴대폰의 출력인 600 mW를 사용하였다. 이는 전원 인가 부분에서 입력 전력이 아니라 휴대폰에 의한 전체 복사 전력을 나타내며, 호이겐스 원리에 의한 등가이론으로부터 계산하였다. 그리고 인체 두부의 비흡수율은 다음과 같다.

$$SAR = \sigma E^2 / 2\rho \quad (1)$$

여기서 σ 는 전기전도도, ρ 는 매질 밀도를 나타내고, E 는 각 셀에서의 최대 전장값을 나타내며, 추출 알고리즘을 이용하여 계산하였다^[15,16].

그림 2는 인체 두부와 휴대폰과의 거리에 따른 1 g, 10 g 평균 SAR을 나타낸다. 그림에서 두부와의 거리가 가까울 경우 SAR은 ANSI나 ICNIRP 규정치보다 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 거리가 멀어질수록 규정치보다 낮아짐을 알 수 있다. 또한 10 g 평균이 1 g 평균 SAR보다 다소 낮은 결과를 나타내었다. 1 g 평균 SAR이 ANSI 규정인 1.6

W/kg 보다 낮기 위해서는 대략 6 셀인 1.8 cm 정도로 이격이 된 이후였다. 여기서 1 g, 10 g 평균을 구하는 법은 셀의 밀도를 1,000 kg/m³이라 하면, 한 셀이 차지하는 질량은 대략 0.043 g의 질량을 가진다. 1 g은 약 23 셀의 합과 같다. 따라서 1 g 평균 SAR은 23개 셀의 SAR 합과 해당 셀 개수로 나눈 값을 의미한다^[3]. 인체 두부와 휴대폰의 1셀 거리에서 인체 두부 전체에 흡수되는 SAR 평균 값은 1 g, 10 g 평균 각각 0.157 W/kg과 0.146 W/kg 이었다.

2-2 온도 상승량 계산

사람의 인체는 평균 37 °C의 온도분포를 가진다. 따라서 휴대폰 전력에 의한 상승 온도량을 계산하기 위해서는 등온상태에서의 인체 두부가 필요하게 된다. 등온 상태의 온도와 SAR에 의한 상승 온도를 계산하기 위해서 다음과 같은 과도기 열전달 방정식을 사용한다^[6].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + \rho SAR - b(T - T_b) \quad (2)$$

그리고

$$K \frac{\partial T}{\partial n} = -h_i(T_s - T_a) \quad (3)$$

식 (3)은 혼합 경계조건을 의미한다^[8]. 여기서 $T = T(x, y, z, t)$ 로써 시간 t 에서 셀 각 지점의 온도를 나타낸다. n 는 인체 두부 외부로의 법선 벡터를 의미한다. 또한 T_s 와 T_a 는 각각 인체 피부면의 온도와 해석 구조가 놓인 공간의 온도를 나타내고, 본 논문에서 T_a 는 20°C로 설정하였다. C_p ($J/kg \cdot ^\circ C$)는 비열, b ($W/m^3 \cdot ^\circ C$)는 혈액 순환과 관계된 계수, K 는 매질의 열 전도도, T_b 는 혈액 온도 그리고 h_i ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)는 공기와 매질 경계에 대한 대류 열전달 계수로 다음의 두가지 경우에 대한 계수이다. 인체 두부의 피부 표면일 경우 열전달 계수를 10.5로 사용하며, 인체 두부내 공기 구조의 표면일 경우 50을 사용하였다^[6]. 그러나 C_p , K 그리고 b 는 모두 온도에 따라 변하는 계수들이지만 흡수 전력에 의한 온도 변화는 작기 때문에 계산의 단순화를 위해서 상수로 가정하였다. 각 조직에 대한 열전달 계

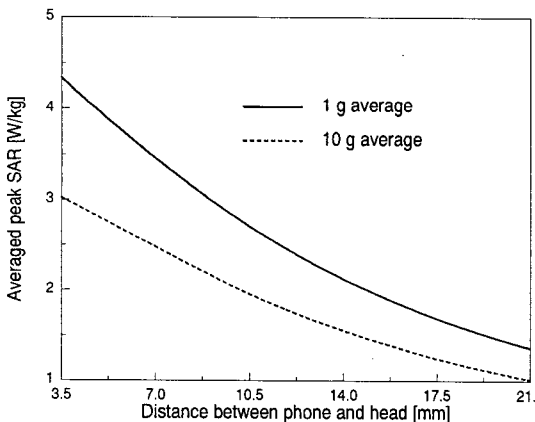


그림 2. 휴대폰과 인체 두부와의 이격 거리에 따른 평균 SAR

Fig. 2. The averaged SAR according to the separation distance between the human head and the portable phone.

표 2. 인체 조직의 열전달 계수

Table 2. The heat-transfer coefficients of the human tissue.

Tissue	C_p	K	b
뼈	1300	0.3	1401
피부	3500	0.5	8652
근육	3500	0.6	3488
두뇌	3500	0.6	37822
눈	3900	0.5	0

수는 표 2와 같다^[6].

식 (3)은 공간과 인체 두부의 경계가 되는 피부와 공진기 구조를 가지는 부분의 표면에서 적용이 되며, 각각 다른 열전달 계수를 사용한다. 식 (2)와 (3)을 차별화 시키기 위해서 $T(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = T^n(i, j, k)$ 로 둔다. 여기서 i, j, k 는 각 셀 중심을 의미하며, SAR을 계산하기 위한 셀 위치와 같다. 따라서 시간 미분은 전방 차분, 공간은 중앙 차분하여 근사식을 구한다. 식 (3)의 표면 온도는 공기와 인체 두부와의 경계면에 해당하므로 표면온도를 공간적인 평균값으로 대체한다. 이에 대한 내용은 식 (5), (6)과 같다. 여기서 Δt 는 시간 증가분을 나타내고, Δ 은 x, y 그리고 z 축 방향의 공간 증가분을 의미한다. 식 (5)와 (6)은 x 축 방향을 따른 인체 머리와부의 가상 온도를 나타내며 주위 공기로의 열전달을 나타낸다. y와 z 축 방향으로의 경계에 대한 경계조건은 식 (5), (6)과 동일하다. 따라서 인체 머리 내부의 온도를 계산하기 위해서 식 (4)를 적용할 때 자유공간과 인체와의 경계지점에서 인체 머리외부 지점의 온도는 식 (5)와 (6)으로 대체한다.

$$\begin{aligned}
 T^{n+1}(i, j, k) &= T^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{C_p(i, j, k)} SAR(i, j, k) \\
 &- \frac{\Delta t b(i, j, k)}{\rho(i, j, k) C_p(i, j, k)} (T^n(i, j, k) - T_b) \\
 &+ \frac{K(i, j, k) \Delta t}{\rho(i, j, k) C_p(i, j, k) \Delta^2} \left\{ \begin{array}{l} T^n(i+1, j, k) + T^n(i-1, j, k) \\ + T^n(i, j+1, k) + T^n(i, j-1, k) \\ + T^n(i, j, k+1) + T^n(i, j, k-1) \\ - 6T^n(i, j, k) \end{array} \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 T(i_{\min} - 1/2) &= \frac{2K(i_{\min} + 1/2) - h_i \Delta}{2K(i_{\min} + 1/2) + h_i \Delta} T(i_{\min} + 1/2) \\
 &+ \frac{2h_i \Delta}{2K(i_{\min} + 1/2) + h_i \Delta} T_a
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 T(i_{\max} + 1/2) &= \frac{2K(i_{\max} - 1/2) - h_i \Delta}{2K(i_{\max} - 1/2) + h_i \Delta} T(i_{\max} - 1/2) \\
 &+ \frac{2h_i \Delta}{2K(i_{\max} - 1/2) + h_i \Delta} T_a
 \end{aligned} \tag{6}$$

그리고 계산의 안정성을 보장하기 위해서 다음의 시간 증가분을 사용한다^{[6]-[8]}.

$$\Delta t \leq \frac{2\rho C_p \Delta^2}{12K + b\Delta^2} \tag{7}$$

본 논문에서 온도에 대한 시간 증가분은 1 초로 정의하였다.

식 (4)로부터 인체 두부내의 흡수 전력에 의한 온도 상승량을 계산하기 전에 반드시 인체 두부의 열적 평형상태의 온도 계산이 선행되어야 한다. 이는 두부내의 온도 분포는 부위별로 조금씩 다르기 때문이다. 이는 식 (4)의 SAR를 영으로 둬으로써 계산이 가능하며, 이로 인해 흡수 전력에 의한 상대적인 온도 상승량을 계산할 수 있다. 열적 평형상태에서의 인체의 귀는 33.3~34.4 °C, 눈은 32.1~36.3 °C 그리고 두뇌는 34.2~37 °C의 온도 분포를 가지는 것으로 계산되었다.

흡수 전력에 의한 최대 온도 증가량의 계산은 정상상태 계산으로 가능하다. 이는 식 (2)에서 시간에 대한 변화가 없고 공간에 대한 변화가 없다고 가정을 하게 되면 임의의 한 지점에서 정상상태 이후의 온도 증가량은 다음과 같이 간단하게 계산할 수 있다.

$$T(x, t = \infty) = \frac{\rho SAR}{b} \tag{8}$$

ANSI/IEEE의 제한치인 1.6 W/kg에 대한 인체 두뇌의 최대 온도 증가량은 0.06 °C이며, 이는 보통 사람의 혈류량($b \approx 26,667 [W/m^3 \cdot ^\circ C]$)의 값으로 계산한 것이다^[7]. 그러나 본 논문의 경우에 대해서는 더 큰 혈류량으로 인해 증가된 온도는 0.044 °C이었다. 이는 피의 흐름량이 많을수록 온도상승이 저하되기 때문이다.

2-3 수치해석 결과와 고찰

인체 두부와 휴대폰과의 이격 거리에 따라서 1 g, 10 g 평균 SAR 수치를 앞 절에서 보였다. 이러한 SAR는 인체 두부내의 정상상태 전장에 의해 계산되며, 도달 시간은 사용주파수의 2~3 주기 내에 이루어진다. 이는 곧 수초안에 두부내 전장은 정상상태에 도달을 의미한다. 휴대폰 사용자는 평균 수십 분 통화를 하며, 이 경우 인체 두부의 온도는 계속적인 상승을 하게 된다. 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

그림 3은 과도기 상승 온도와 정상상태에서의 온도를 모두 보여 주고 있으며, 인체 두부와 휴대폰 사이의 거리를 1~2 셀로 두고 해석한 결과이다. 그림에서 1셀과 2셀 간의 온도 차이는 약 36% 감소하였으며, 1셀과 3셀간은 약 53%의 감소를 보였고 2셀과 3셀간은 약 27%의 감소를 보였다. 또한 통화시간 17분 내에 온도가 급격히 증가함을 확인할 수 있고, 대략 30분 통화 시간까지 계속적인 온도가 지속적으로 상승함을 볼 수 있다. 그 이후는 온도가 상승하지 않는 정상상태에 도달하게 된다.

그림 4는 인체 두부와 휴대폰의 위치에 따른 1 g, 10 g 평균 온도변화이다. 최대 온도 증가 위치는 SAR의 최대위치보다 안쪽에 형성이 되었다⁶⁾. 또한 휴대폰과 인체 두부와의 이격거리가 멀수록 두부내 평균 온도의 침투값의 감소는 그림 2의 평균 SAR 침투값의 감소와 유사하다. 1 셀 위치에서 SAR에 의해 인체 두부 전체의 온도 상승량은 1 g, 10 g 평

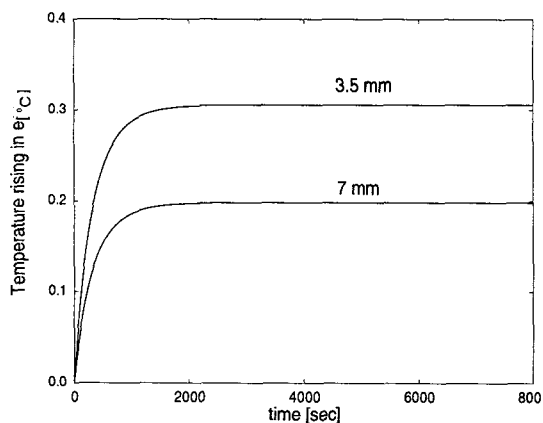


그림 3. 휴대폰에 의한 귀 온도 상승량
Fig. 3. Temperature rising of the ear by the portable phone.

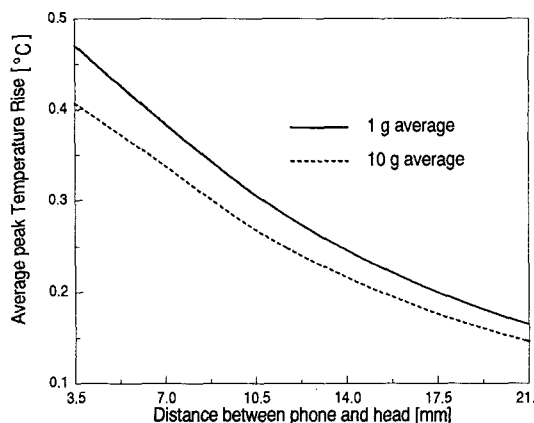


그림 4. 휴대폰과 인체 두부와의 이격 거리에 따른 평균 온도 변화

Fig. 4. The averaged peak temperature variation to the separation distance between the human head and the portable phone.

균 각각 0.027 °C와 0.025 °C이었다.

그림 5는 인체 두부와 휴대폰 사이의 이격 거리에 따른 두뇌에서의 최대 온도 증가량을 나타낸다.

그림 5에서 이격 거리가 가까울수록 SAR이나 온도가 높게 나타나듯이 두뇌에서도 같은 현상이 일

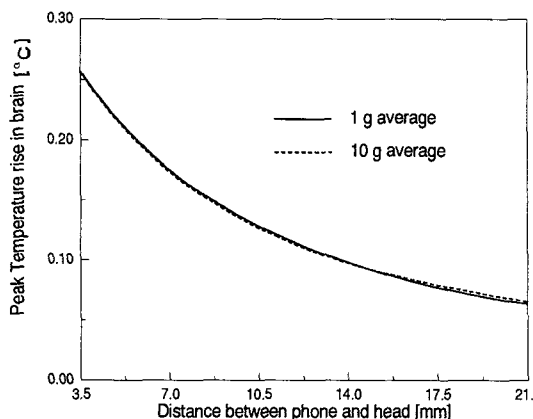


그림 5. 휴대폰과 인체 두부와의 이격 거리에 따른 인체 두뇌에서의 최대 온도 증가

Fig. 5. The peak temperature rise according to the separation distance between the human head and the portable phone in the human brain.

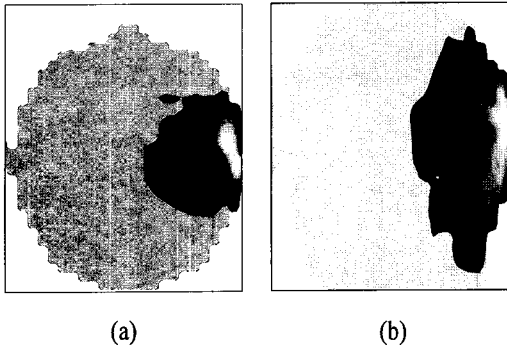


그림 6. 인체 두부의 1 g 평균 SAR 분포
a) xy 단면, b) xz 단면

Fig. 6. The 1 g averaged peak SAR distribution in the human head.
a) xy plane, b) xz plane

어남을 알 수 있었다. 또한 1셀 이격 거리에서 두뇌에서의 1 g, 10 g 최대 평균 온도 상승은 각각 0.256 °C와 0.255 °C이었다. 이는 SAR 값이 ANSI/IEEE 규정치인 1.6 W/kg 보다 높게 나온 결과로 이와 같이 최대 상승 온도도 높게 나타났다.

그림 6은 각각 그림 1의 xy 단면과 xz 단면 인체 두부의 1 g 평균 SAR 분포를 나타낸다. 그림에서 밝은 부분이 가장 높은 SAR을 나타내고, 위치는 피부 바로 아래 부분이었으며, 휴대폰이 위치한 방향이다.

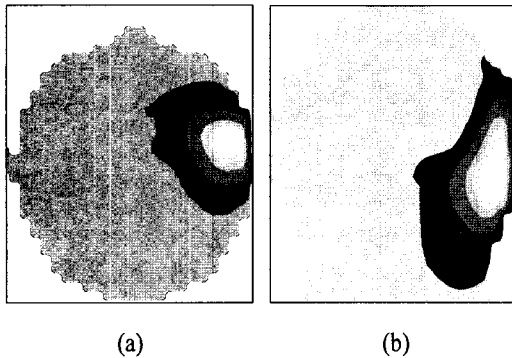


그림 7. 인체 두부의 1 g 평균 온도분포
a) xy 단면, b) xz 단면

Fig. 7. The 1 g averaged peak temperature distribution in the human head.
a) xy plane, b) xz plane

그림 7은 각각 그림 1의 xy 단면과 xz 단면 인체 두부의 1 g 평균 온도 분포를 나타낸다. 그림에서 밝은 부분이 가장 높은 온도를 나타내고, 위치는 최대 SAR의 위치보다 안에서 발생하였다. 그림에서 온도 분포는 SAR 분포와 같은 분포를 가짐을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문은 인체 두부와 휴대폰과의 이격 거리에 따른 SAR 분포와 온도 상승량을 계산하였다. 거리가 아주 가까울 경우에는 SAR은 규정치보다 높게 나타났고, 대략 2.1 cm 이후에서 1.6 W/kg의 규정치보다 낮은 SAR값이 계산되었으며 단말기가 인체에 가까울수록 높은 SAR값을 나타냈고 두부내의 온도도 증가하였다.

참 고 문 헌

- [1] P. Bernardi, M. Cavagnaro and S. Pisa, "Evaluation of the SAR distribution in the human head for cellular phones used in a partially closed environment," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, no. 3, pp. 357-365, Aug., 1996.
- [2] O. P. Gandi, G. Lazzi and C. M. Farse, "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.
- [3] V. Hombach, K. Meier, M. Burkhardt and N. Kuster, "The dependence of EM energy absorption upon human head modeling at 900MHz," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1865-1873, Oct., 1996.
- [4] *American National Standard-Safety Levels with Respect to Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 100 GHz*, ANSI/IEEE C95.1-1999.

- [5] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields(up to 300 GHz), *ICNIRP Guideline, Health Phys.*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [6] J. Wang and O. Fujiwara, "FDTD computation of temperature rise in the human head for portable telephone," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1528-1534, Aug., 1999.
- [7] P. J. Riu and K. Foster, "Heating of tissue by near-field exposure to a dipole: a model analysis," *IEEE Trans. Biomedical Eng.*, vol. 46, no. 8, pp. 911-917, Aug., 1999.
- [8] M. N. Ozisik, *Finite Difference Methods in Heat Transfer*, CRC, 1994.
- [9] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagt.*, vol. 14, pp. 302-307, May, 1966.
- [10] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, no. 8, pp. 623-630, Nov., 1975.
- [11] A. Taflove, "Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady-state electromagnetic-penetration problems," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 22, no. 3, pp. 191-202, Aug., 1980.
- [12] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics.*, pp. 279-289, CRC, 1993.
- [13] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic wave," *J. Comput. Phys.*, vol. 114, pp. 185-200, Oct., 1994.
- [14] M. A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "Performance analysis of antennas for hand-held transceiver using FDTD," *IEEE Trans. Antennas Propagt.*, vol. 42, no. 8, pp. 1106-1113, Aug., 1994.
- [15] R. Mittra and P. H. Harms, "A new finite-difference time-domain(FDTD) algorithm for efficient field computation in resonator narrow-band structures," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters.*, vol. 3, no. 9, pp. 316-318, Sept., 1993.
- [16] 김채영, 이승학, 정백호, "FDTD 방법을 이용한 휴대폰 전파의 인체 흡수전력량 산출," 한국전자과학기술논문집, 제9권, 제4호, pp. 491-498, 1998년 8월.

김 채 영



1976년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1978년 2월: 한국과학원 전기 및 전자공학과(공학석사)
1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)
1985년 9월~1993년 2월: 미국

MIT 공대 연구과학자
1979년 4월~1992년 9월 : 경북대학교 전자공학과 전임강사-부교수
1992년 10월~현재 : 경북대학교 전자·전기공학부 전자파연구실 교수
[주 관심분야] 이동통신 전파환경, 무선망 설계, 무선호출기 안테나 설계, 전자파 이론 및 응용 등

강 승 진



2000년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
2000년 3월~현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파의 인체 영향, 안테나 해석 및 설계

이 승 학



1996년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1998년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1998년 3월~현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 전자파 산란특성, 안테나 해석 및 설계, 원격 탐지, 전자파의 인체 영향