

평면파에 노출된 인체 두부의 전력흡수 해석

A Study of Power Absorption in Human Head Exposed to Plane Wave

이애경* · 조광윤* · 이혁재**

Ae-Kyoung Lee* · Kwang-Yun Cho* · Hyuck-Jae Lee**

요 약

본 논문에서는 350 MHz와 900 MHz 평면파에 노출된 다양한 모델의 인체 두부 내 비흡수율(specific absorption rate, SAR)의 분포를 해석하였다. 해석 방법은 유한차분시간영역(finite-difference time-domain, FDTD) 방법이며, 인체 두부 모델로서 균질 매질의 구형모델, 균질의 실질적인 형태를 갖는 모델 그리고 실질적인 형태를 갖는 비균질 모델이 사용된다. 입사 평면파의 편파는 인체 길이방향과 일치하며, 진행방향은 뒤에서 앞으로, 그리고 앞에서 뒤로 향하는 두 가지 경우를 다룬다. 얻어진 연구결과는 다음과 같다. 1) 세 가지 모델의 평균 SAR은 비슷하나 국부 SAR은 큰 차이가 있다. 2) 주파수가 900 MHz보다 두부의 공진이 일어나는 대역인 350 MHz에서 복사전력이 더 깊이 침투한다. 3) 후방입사 평면파의 경우에는 두부가 아닌 목 부근에서 "hot spot"이 일어난다. 4) 전방입사 평면파의 경우에는 900 MHz에서는 코, 350 MHz의 경우에는 입술 위와 턱 부분에서 "hot spot"이 나타난다.

Abstract

The specific absorption rate (SAR) distributions in various models of the human head have been analyzed when the models are exposed to 350 MHz and 900 MHz plane waves. The numerical analysis is performed with the finite-difference time-domain (FDTD) method. A homogeneous sphere including a cylindrical neck, a homogeneous head shaped model, and a heterogeneous realistic model are used as models of human head. The incident plane wave used for these calculations is propagating from the front to the back or from the back to the front of the head model, with its E-field vector orientation being parallel to the major length of the body. The specific findings are: 1) the average SARs of the three models are similar mutually but the local SARs of them differ greatly mutually; 2) the power is deposited more deeply in the head at 350 MHz, which is roughly the resonant frequency of a human head, than at 900 MHz; 3) for a plane wave propagating from the back, "hot spot" is found in the neck region, not in the head; 4) for a plane wave propagating from the front, "hot spot" is found in the nose at 900 MHz, and in the upper part of the lip and the jaw region at 350 MHz.

*한국전자통신연구원 전자과공학연구소(Electromagnetics Science Section, ETRI)

**한국전자통신연구원 전자과공학연구부(Radio Science Department, ETRI)

· 논문 번호 : 970927-066

· 수정완료일자 : 1997년 12월 3일

I. 서 론

비흡수율(specific absorption energy, SAR)로 표현되는 RF 에너지 침투율은 생체 시스템과 이 에너지의 상호작용의 정량화에 중요한 역할을 하여 현재 각종 안전기준(안)에는 노출공간의 전계, 전계 및 전력밀도와 SAR을 함께 다루고 있으며(1,2,3,4), 최근 휴대폰과 같은 미약 전파 국부 전자파원에 대한 FCC의 규제의 움직임으로 인해 휴대폰에 의한 인체 두부의 SAR 측정 및 해석에 관한 연구 사례들이 증가하고 있다. 인체 내부의 SAR 분포는 인체 모형의 모델을 사용한 실험적인 방법과 계산적인 방법을 사용하여 구하여 왔다. 실험적인 방법은 대개 인체의 근육조직 또는 평균조직 특성을 갖는 유동적인 균질의 인체 모델 내부에 삽입가능한 프로브 기법이나 온도측정 기법을 이용하며, 계산적인 방법은 최근 유한차분시간영역(finite-difference time-domain, FDTD) 수치기법을 사용하여 전자파원을 모델링하고 인체를 균질 또는 비균질 형태의 FDTD 메쉬로 모델링하여 계산한다. 그러나 여러 해석 및 실험결과 비교에서 연구자에 따라, 모델에 따라, 그리고 실험방법 및 해석방법에 따라 다양하게 결과가 나타난다. 따라서 연구자로서는 어떠한 노출 상황 - 평면파원이든 휴대폰과 같은 국부 전자파원에 대한 노출이든, 혹은 피노출체가 성인, 어린이 나아가 신체의 자세 그리고 주변 환경에 대해 - 해석이나 실험에 있어 합리적이고 재현성 있는 결과를 산출하도록 접근해 가면서 안전지침을 보다 바람직한 방향으로 개선해나가는 것이 필수적이라고 생각한다.

따라서 본 논문에서는 전자파와 생체의 결합을 계산하는 기초 단계로서 일정한 주파수를 갖는 선형 편파의 전자파가 입사하는 경우에 인체 두부의 SAR을 계산하고자 한다. 인체의 전자파 흡수와 분포는 그 인체의 크기와 방향에 매우 강하게 의존한다. 특히 인체 길이가 $4/10\lambda$ 이고 길이 방향이 전계의 방향과 일치할 때 흡수가 최대값에 이르는 것으

로 알려져 있다(5). 그러나 본 논문에서는 눈이나 뇌와 같이 전자파에 취약한 기관을 포함하는 두부만을 대상으로 한다. 따라서 인체 전체 구조에 의한 현상을 피하기 위해 인체 길이가 $4/10\lambda$ 에 근접하는 주파수(약 70 MHz)가 아닌 두부의 공진 주파수 부근인 350 MHz와 그 이상의 주파수인 900 MHz의 전자파원을 다룬다. 그리고 이 주파수에서의 결과는 인체 전신 모델을 대상으로한 실험 결과(6,7)와 대체로 경향은 일치하였다.

원래 측정 및 해석에서, 인체 두부모형은 간단하게는 구형의 두부만을 고려하는 경우(8)에서부터 변형된 구형의, 구체화된 부피를 갖는 균질 두부(9), 그리고 자기공진촬영(magnetic resonance imaging, MRI)에 기초한 해부적으로 수정된 비균질 모델(10)까지 다양한 형태가 혼용되고 있다. 따라서 이 모델들 간의 근사가 어느 정도 가능한지, 다르다면 어느 정도 차이가 있는지 비교, 분석하는 것이 필요하다고 판단되어 본 논문에서는 인체의 두부 모델을 세 가지로 선택하였다. 먼저 구형모델을 다룰 때 구형만 고려한 경우와 목을 고려한 경우 양 쪽의 내부 흡수전력의 분포는 서로 크게 차이가 나는 것을 볼 수 있었기 때문에 기존에 다루어진 것과 같이 두부를 모델링하기 위해 구형만 도입하는 것이 아니라 원통형의 목을 고려한 모델을 해석한다. 그리고 인체는 길이방향으로 개속됨을 고려하여 원통형 목 끝에 흡수경계조건을 적용하였다. 그리고 두 번째와 세 번째 모델은 형상 면에서는 실제 해부에 기초한 인체 두부와 동일하되 매질이 각각 균질한 경우와 비균질한 경우이다. 형체는 두부, 목 그리고 약간의 어깨 부위를 포함하며, 역시 이 두 경우에도 인체 모델 하단에는 공간을 두지 않고 바로 흡수경계조건을 적용하였다. 이 두 모델을 선택한 이유는 SAR 분포가 외형적인 형상에 의존하는 지 아니면 내부의 복잡한 인체 조직의 각기 다른 전기정수에 강하게 의존하는지를 분석하기 위한 것이다. 현재 타 연구에서 얻을 만한 실험적인 비교 데이터는 대부분 인체 매질의 평균적인, 혹은 그에 준하는 등가의 전기적 특성을 갖는 유동적이고 균일한 매질을

사용하고 있으며, 비균질의 인체 팬텀은 프로브가 삽입될 수 없는 비유동적인 매질을 포함하기 때문에 실험적인 방법에 의해서는 균질한 팬텀과 비균질 팬텀에 대한 결과 비교가 어렵다. 따라서 현재로서 이러한 의문점은 해석적인 방법에 의존할 수밖에 없다.

실험적인 결과인 경우 경향은 본 논문의 결과와 일치하나 조직 1 g에 대한 국부 SAR이나 전신 또는 두부 평균에 대한 SAR 결과를 제시하지 못하기 때문에 결과 비교를 위한 동일한 조직의 정량적인 비교는 할 수 없었으므로 참고문헌만 소개하고 900 MHz 평면파의 전/후방 입사에 대해서는 유사한 연구 사례를 언급할 것이다. 각 연구마다 다른 신체 치수와 다른 해부학적 모델을 다루므로 완전히 동일한 인체 모델(본 논문의 세가지 모델)을 사용한 경우와 비교할 수는 없다. 다만 현재의 연구결과와 어느 정도의 경향은 일치함을 확인할 수 있었다.

II. 이 론

본 장에서는 FDTD 방법을 이용함에 있어 평면파 입사에 대한 산란 field 해석기법 및 RF 파에 노출된 인체의 열적 효과와 관련된 SAR의 개념 그리고 본 해석에 사용된 인체 두부 모델들을 세부적으로 기술한다.

2-1 유한차분 시간영역 방정식⁸⁾

FDTD 기법은 맨 처음 Yee에 의해 제안된 후 많은 연구자들에 의해 발전되었다. FDTD 방법은 수렴된 해가 얻어질 때까지 유한 체적에 걸쳐 Maxwell의 시간 의존 curl 방정식을 이산화하고 매시간 단계마다 유한공간에 대해 반복 진행을 산출하도록 하는 것이다.

등방성 매질에서, 연속적인 Maxwell 방정식은 다음 식과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

이 방정식들은 전자장의 기본식이며 공간 중의 한 지점의 전자계인, E 및 H와 관련된다. 식 (1)과 (2)는 FDTD 기법의 총 field를 얻기 위해 이산화된다. 그리고, E 및 H field는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^{total} \equiv \mathbf{E}^{incident} + \mathbf{E}^{scattered} \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^{total} \equiv \mathbf{H}^{incident} + \mathbf{H}^{scattered} \quad (4)$$

평면파를 다루는데 있어, 휴대폰과 같은 국부적인 source를 다루는 경우와 비교하여 큰 이점은 개별적 field 접근이 가능한 것이다. 총 field가 아닌 산란 field와 입사 field가 분리된 개별적 field 접근은 FDTD formulation을 산란 field에 대해 행하며 입사 field 성분은 문제영역 전체에 걸쳐 시간에 대한 규정만 함으로써 평면파를 모델링하며, 또한 이것은 문제공간 외부 경계에서 총 field를 흡수시키는 것이 아니라 산란 field만을 흡수시킴으로 효과적이다.

산란 field는 Maxwell 방정식을 만족하며, 산란체 내부 또는 표면에서의 적절한 경계조건을 만족하도록 입사 field의 응답으로서 산란체 내부 또는 표면에서 발생된다. 이러한 경계조건은 완전도체 내에 있을 때는 총 field가 0이 되도록 $\mathbf{E}^{scattered} = -\mathbf{E}^{incident}$ 가 요구되고, 완전도체가 아닌 매질에 대해서는 산란 field가 매질의 구조변수에 의존한다. 매질내의 산란 field는 그 매질에 대한 Maxwell 방정식을 만족하고 그 매질 외부는 자유공간 Maxwell 방정식을 만족한다. 입사 field는 항상 자유공간을 전파하며, 산란체가 없을 때 발생하는 field로서 정의된다.

총 field를 구하기 위해서는 산란 field와 입사

field를 더하면 된다. 입사와 산란 field는 Maxwell 방정식을 독립적으로 만족해야 한다. 산란체인 인체 두부는 자유공간 내에 존재한다고 가정한다. 그러면 입사 field가 문제의 전 영역을 통해 자유공간 속을 진행하는 동안, 총 field는 산란체 내부 매질과 외부 자유공간을 전파한다. 이때 인체 두부 해석을 위해 손실성 유전체를 산란체로 가정할 경우 다음의 수식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{H}^{scat}}{\partial t} = -\frac{(\mu - \mu_0)}{\mu} \frac{\partial \mathbf{H}^{inc}}{\partial t} - \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}^{scat}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{E}^{scat}}{\partial t} &= -\frac{\sigma}{\varepsilon} \mathbf{E}^{scat} - \frac{\sigma}{\varepsilon} \mathbf{E}^{inc} \\ &- \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\varepsilon} \frac{\partial \mathbf{E}^{inc}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} (\nabla \times \mathbf{H}^{scat}) \end{aligned} \quad (6)$$

이 수식을 FDTD 알고리즘에 적용하기 위해 Yee의 표기법에 따라 전계 x 성분과 자계 y 성분을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_x^s(I, J, K)^n &= E_x^s(I, J, K)^{n-1} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma \Delta t} \right) - \\ &\left(\frac{\sigma \Delta t}{\varepsilon + \sigma \Delta t} \right) E_x^s(I, J, K)^n - \left(\frac{(\varepsilon - \varepsilon_0) \Delta t}{\varepsilon + \sigma \Delta t} \right) \dot{E}_x^s(I, J, K)^n \\ &+ \frac{H_z^s(I, J, K)^{n-\frac{1}{2}} - H_z^s(I, J-1, K)^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta y} \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon + \sigma \Delta t} \right) \\ &+ \frac{H_y^s(I, J, K)^{n-\frac{1}{2}} - H_y^s(I, J, K-1)^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta z} \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon + \sigma \Delta t} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} H_y^s(I, J, K)^n &= H_y^s(I, J, K-1)^{n-\frac{1}{2}} \\ &- \left(\frac{\mu - \mu_0}{\mu} \Delta t \right) \dot{H}_y^s(I, J, K)^{n+\frac{1}{2}} \\ &+ \frac{E_z^s(I, J, K)^n - E_z^s(I-1, J, K)^n}{\Delta x} \left(\frac{\Delta t}{\mu} \right) \\ &+ \frac{E_x^s(I, J, K)^n - E_x^s(I, J, K-1)^n}{\Delta z} \left(\frac{\Delta t}{\mu} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

전자계의 다른 성분도 유사하게 유도할 수 있다. 완전도체인 경우 σ 가 ∞ 이므로 식 (7)에서 산란전계 $E_x^s(I, J, K)^n = -E_x^s(I, J, K)^n$ 가 되어 총전계는 결국 0이 되므로 완전도체 표면에서 전계접선 성분이 0인 경계조건을 만족함을 알 수 있다.

본 논문에서는 Mur의 2차 흡수경계조건을 사용하여 산란체에 대한 해석경계면에서의 흡수문제를 해결하였다. 식 (9)는 예로 x축의 경계면에서의 field를 나타낸 것으로 경계면이 각각 $x=0$ 과 $x=IMAX$ 에 존재한다고 하면, $x=0$ 에서는 식 (9-1) 그리고 $x=IMAX$ 에서는 식 (9-2)를 사용하여 전계 y 및 z 성분을 계산한다.

$$\begin{aligned} W_{0,j,k}^{n+1} &= -W_{1,j,k}^{n-1} + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} (W_{1,j,k}^{n+1} + W_{0,j,k}^{n+1}) \\ &+ \frac{2\Delta x}{c\Delta t + \Delta x} (W_{0,j,k}^n + W_{1,j,k}^n) \\ &+ \frac{(c\Delta t)^2 \Delta x}{2\Delta y^2 (c\Delta t + \Delta x)} (W_{0,j+1,k}^n - 2W_{0,j,k}^n \\ &+ W_{0,j-1,k}^n + W_{1,j+1,k}^n - 2W_{1,j,k}^n + W_{1,j-1,k}^n) \\ &+ \frac{(c\Delta t)^2 \Delta x}{2\Delta z^2 (c\Delta t + \Delta x)} (W_{0,j,k+1}^n - 2W_{0,j,k}^n \\ &+ W_{0,j,k-1}^n + W_{1,j,k+1}^n - 2W_{1,j,k}^n + W_{1,j,k-1}^n) \end{aligned} \quad (9-1)$$

$$\begin{aligned} W_{imax,j,k}^{n+1} &= -W_{imax-1,j,k}^{n-1} + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} \\ &(W_{imax-1,j,k}^{n+1} + W_{imax,j,k}^{n-1}) + \frac{2\Delta x}{c\Delta t + \Delta x} \\ &(W_{imax,j}^n + W_{imax-1,j}^n) \\ &+ \frac{(c\Delta t)^2 \Delta x}{2\Delta y^2 (c\Delta t + \Delta x)} (W_{imax,j+1,k}^n - 2W_{imax,j,k}^n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+W \Big|_{i_{\max,j-1,k}}^n + W \Big|_{i_{\max-1,j+1,k}}^n - 2W \Big|_{i_{\max-1,j,k}}^n \\
 &+ W \Big|_{i_{\max-1,j-1,k}}^n + \frac{(c\Delta t)^2 \Delta x}{2\Delta z^2(c\Delta t + \Delta x)} \\
 &\left(W \Big|_{i_{\max,j,k+1}}^n - 2W \Big|_{i_{\max,j,k}}^n + W \Big|_{i_{\max,j,k-1}}^n \right) \\
 &+ W \Big|_{i_{\max-1,j,k+1}}^n - 2W \Big|_{i_{\max-1,j,k}}^n + W \Big|_{i_{\max-1,j,k-1}}^n \Big)
 \end{aligned} \tag{9-2}$$

나머지 경계면에서도 유사한 적용이 가능하다. 본 논문에서 공간 cell 크기는 모두 3 mm, Δt 는 Courant limit의 0.8배로 두고 FDTD 알고리즘을 적용하였다.

2-2 비흡수율(specific absorption ratio, SAR)^{[3],[9]}

생물학적 조직 및 생체의 RF(radio frequency) field의 상호작용은 많은 변수들과 관계된 복잡한 함수들이다. 노출측정 연구들은 이러한 상호작용들의 정량화를 시도한다. 자유공간 내의 RF 파는 주파수, 전기장도(E) 및 자기장도(H) 그리고 편파로 특징지어진다. 그러나 조직 및 생체내부 전자계만이 그들과 상호작용할 수 있으므로 실험적으로 얻어진 생물학적 데이터의 의미있고 일반적인 정량화를 위해 이러한 field들을 구할 필요가 있다.

기지의 외부 전자장에 노출된 생체 내의 field는 주어진 경계조건에 지배되는 Maxwell 방정식을 풀어서 계산될 수 있다. 생체는 그 전기적 특성이 복소 유전율로 표현되는 비균질의 손실성 유전체이다. 비균질의 유전체 특성과 형태의 복잡성 등으로 인하여 문제의 해를 정확히 구하는 것은 매우 어렵다. 따라서 단지 아주 간단한 상황 및 모델만이 해석 가능하다. 다른 접근법은 실험적인 방법인데 이 또한 상당한 제한점을 가지고 있다.

내부 field는 외부 field, 주파수, 강도 그리고 편파의 변수와 노출된 생체의 크기, 형태, 유전적 특성 그리고 노출원(source)과 피노출체 간의 공간적 구성 및 근방의 타 개체의 존재 등에 의존하며,

다양한 방법으로 정량화될 수 있다. 대부분 생체 조직의 자성 투자율은 자유공간과 동일하므로 높은 RF 대역에서 모든 기지의 예측되는 상호작용은 E-field에 관련된 메카니즘을 통해 발생한다. 그러므로 노출된 생체 전영역에서의 E-field 벡터 또는 그 분포는 노출 field와 조직간의 상호작용을 묘사한다. 널리 채택되어온 노출측정법(dosimetric measure)은 “주어진 밀도(r)인 체적분(dV)내의 질량 증분(dm)내에서 소실된 또는 그 질량 증분(dm)에 의해 흡수된 에너지 증분(dW)의 시간 미분”으로서 정의되는 SAR이다.

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left[\frac{dW}{\rho(dV)} \right] \tag{10}$$

정현적으로 변화하는 전자장에 대해 Poynting vector 정리를 사용하면 다음 식들을 사용하여 계산될 수 있다.

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} |E_i|^2 \tag{11}$$

여기서 σ 는 S/m단위의 조직 도전율, ρ 는 kg/m³ 단위의 조직 밀도이고 E_i 는 내부 field의 peak value이다. SAR은 watts per kilogram(W/kg) 또는 (mW/g)으로 표현된다. 평균 SAR은 노출된 생체내에 흡수된 총전력과 그 질량의 비로서 정의되고 국부 SAR은 정의된 단위 체적 또는 단위 질량 내의 값을 말한다. 본 논문에서는 ANSI 지침에 따라 1 g 국부 SAR을 계산하고 두부내의 평균과 각 조직 평균 SAR을 계산한다.

2-3 인체 두부 모델

서론에서 언급하였듯이 두부는 크게 세 가지의 모델이 사용된다. 구형의 두부에 원통형 목을 고려한 모델, 형상은 실제적인 두부와 목 그리고 약간의 어깨를 포함하지만 조직이 균질인 모델 그리고 비

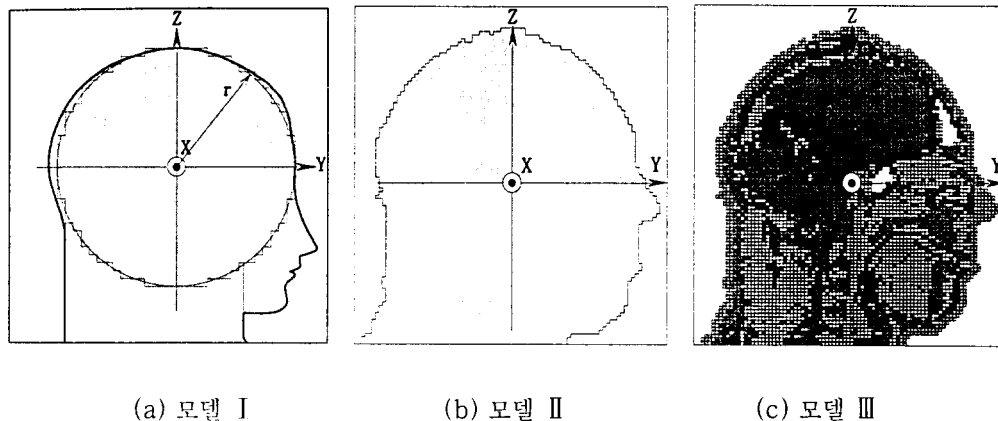


그림 1. 두부 모델
Fig. 1. Head models.

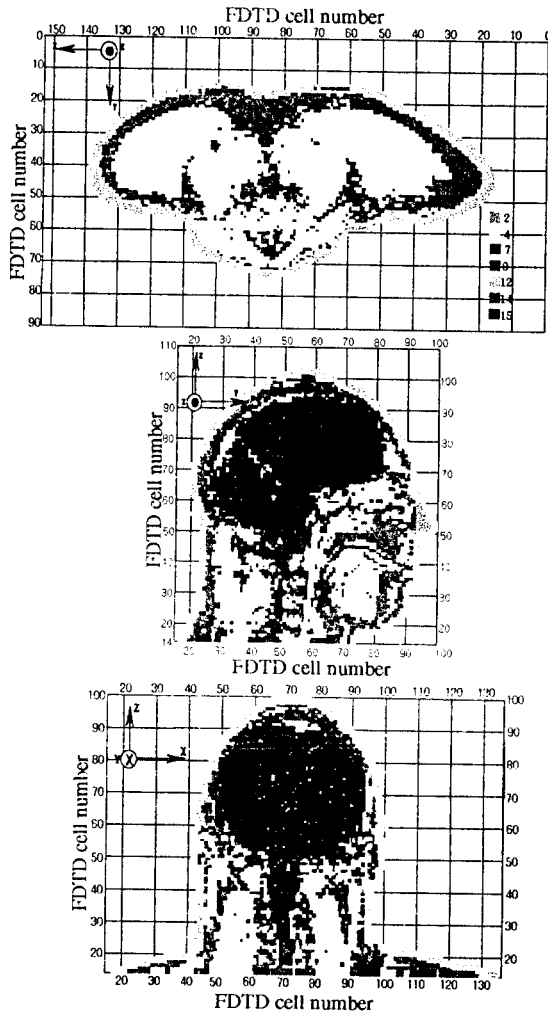
균질의 실제적인 두부 모델 세가지이다.

그림 1(a)의 목이 있는 두부 모델의 두부는 반경 9.6 cm의 구형, 목은 반경 6.0 cm의 원통으로 각각 모델링하고 원통의 끝은 흡수경계조건으로 처리하였다.

그림 1(b) 모델은 (c) 모델과 동일한 물리적 외형을 갖지만 내부 조직을 구형모델과 같은 균질 조직으로 가정한 경우이다.

그림 1(c)의 세번째 비균질 모델은 미국의 NLM (National Library of Medicine)이 후원한 Visible Human Project에서 얻은 것으로 성인 남자에 대해 MRI, CT 그리고 해부 영상을 인체 길이 방향으로 각각 4 mm, 1 mm, 그리고 1 mm의 정밀도로 얻은 다음 3 mm 간격으로 재편집된 문자 데이터 파일이다^[10]. 따라서 본 논문에서 FDTD 기법에 사용되는 cell 크기는 $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ 의 정방형이고 전체 구조 데이터 셀트는 $153 \times 118 \times 120$ 개의 cell로 구성되어 있으며, 두부 위 부분과 옆 부분으로는 흡수경계면까지 15개의 cell이 존재한다. 이 모델의 공간 정밀도가 3 mm이므로 인체조직 중 대체로 높은 유전율을 갖는 눈이나 혈액조직의 경우에도 비유전율이 거의 80을 넘지 않으므로 최소한 1 GHz의 주파수까지는 해석이 가능하다. 고려하는

조직(tissue)의 종류는 연골, 근육, 눈, 뇌, 피부, 지방/뼈, 혈액 조직 등 7가지이며, 인체 조직을 나타내는 전체 FDTD cell 수는 약 25만개 정도이다. 그림 1(c) 모델의 FDTD 기법 적용을 위한 각 단면의 형상은 그림 2와 같다. 그림 2(a)로부터 어깨가 시작되는 부분까지 해석될 것임을 알 수 있으며, 2(b)의 두부 내 빈 공간은 전두동(frontal sinus)과 접형동(sphenoid sinus)으로 보인다. 인체 전체를 해부, CT 및 MRI 촬영에 바탕하여 구조 데이터를 얻음으로써 그림에서 보는 바와 같이 인체의 좌우가 약간 비대칭임을 볼 수 있다. 그림 2(a)는 $K=1$ 인 평면의 FDTD 알고리즘 적용을 위한 단면 조직 구성도이다. 그림 1(c)모델의 구조 데이터는 본래 어깨 아래부분이 14개의 자유공간 cell로 구성되어 있었으나 인체 구조는 어깨이하로 계속되므로 자유공간 cell을 제외하고 z방향 15번째 cell을 1번째 cell로 이동시키고 $K=1$ 인 평면을 흡수경계조건으로 처리하고자 바닥면을 자유공간으로 처리하지 않고 인체 구조 절단면을 그대로 두었다. 그리고 그림 2(b)와 2(c)는 $I=71$ 인 평면(시상면, sagittal plane)과 $J=49$ 인 평면(전두면, frontal plane)의 구성도이다. 그림 내의 조직은 그림 2(a)의 번호로 표시되어 있으며, 각 번호의 조직 이름과 전기적



(a) 수평면 (K=1) (a) horizontal plane (K=1)
 (b) 시상면 (I=71) (b) sagittal plane (I=71)
 (c) 전두면 (J=49) (c) frontal plane (J=49)

그림 2. 모델 III의 FDTD 메쉬
 Fig. 2. FDTD mesh of model III.

특성은 표 1과 같다. 그림 1(a) 및 1(b) 모델은 주파수 350 MHz에서는 σ 와 ϵ_r 를 각각 0.95 S/m와 38.0^[10] 그리고 900 MHz에서는 0.8 S/m와 43^[11]으로 가정하였다.

상기 세 가지 모델은 350 MHz와 900 MHz의 평

표 1. 모델 III의 전기정수^[10]

Table 1. Electrical properties of model III^[10].

조직 타입 (그림 2에서 표기된 번호)	밀도 (kg/m ³)	350 MHz		900 MHz	
		σ	ϵ_r	σ	ϵ_r
cartilage (2)	1000	0.09	8.3	0.07	5.1
muscle (4)	1020	0.92	57.0	1.0	52.6
eye (7)	1000	1.70	74.0	1.9	70.0
nerve, brain (9)	1050	0.61	55.0	0.75	44.0
skin (12)	1000	0.92	57.0	1.0	52.6
fat, bone (14)	1200	0.09	8.3	0.07	5.1
blood (15)	1000	1.19	74.0	1.18	62.0

면파에 노출된 경우에 대해 다루어질 것이다. 표 1의 350 MHz에서의 σ 와 ϵ_r 전기정수는 300 MHz에서의 값이지만 두부 공진이 일어나는 것으로 보고된 350 MHz를 다루기 위해 350 MHz의 값을 적용하기로 한다^[12].

III. 해석 결과 및 고찰

그림 1의 모든 두부 모델의 외부 경계면에는 Mur의 2차 경계조건을 적용하였다. 모의되는 평면파는 전계로 여기하며 z 편파이면서 y축(인체의 뒤→앞, 후방입사) 및 -y축(인체의 앞→뒤, 전방입사)으로 진행하는 두 가지의 경우에 대해 모의한다. 해석 절차는 그림 1의 세 가지 두부 모델에 대해 주파수, 입사 조건(후방입사, 전방입사)을 정한 뒤 그림 3의 순서를 따른다. 고려되는 모든 모델과 입사조건에 동일한 시간스텝까지 해석할 필요는 없으므로 그림 3에서 안정된 응답의 판단은 가장 늦게 입사파가 도달하는 인체 부위에서의 응답을 관측하여 비슷한 크기를 갖는 파가 약 3주기를 통과하면 계산을 끝내도록 하였다.

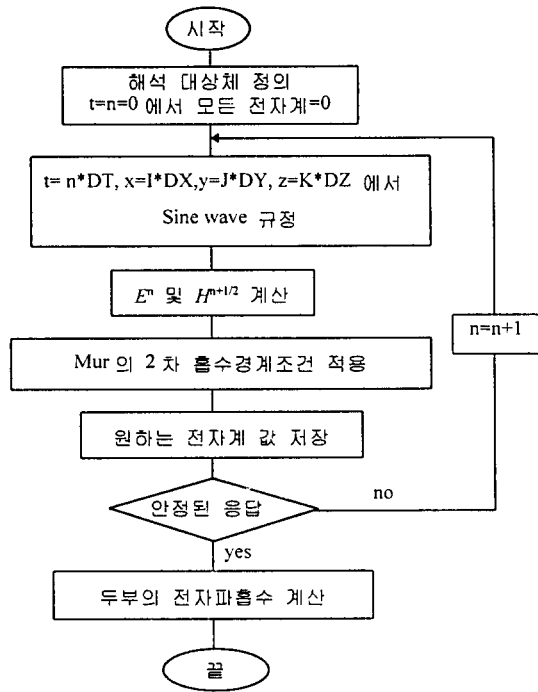


그림 3. 해석 절차

Fig. 3. Analysis procedure.

3-1 해석적 해와의 비교

그림 1의 모델들의 해석에 앞서 적용하게 될 프로그램의 정확도를 진단하기 위해 cell의 크기에 비해 비교적 고주파수인 경우의 구형모델을 해석하고 Mie의 series 해와 비교하였다. 구형은 직경이 10 cm, FDTD cell 크기는 2 mm이고 매질은 $\epsilon_r=29.0$, $\sigma=3.15$ (S/m)를 취하였다. 그 결과 그림 4에서 보는 바와 같이 구의 축을 따라 관측할 때 축의 양 쪽 끝의 최고 값과 중심의 최저값은 잘 일치한다. 그러나 최고 값과 최저 값 사이에서 경향은 유사하나 FDTD 방법으로 해석한 값이 조금 떨어진 다. O.P. Gandhi의 해석 결과와는 동일한 경계조건의 FDTD 기법임에도 불구하고 약간 차이를 관찰할 수 있었다¹³⁾. 이는 O.P. Gandhi의 전자계

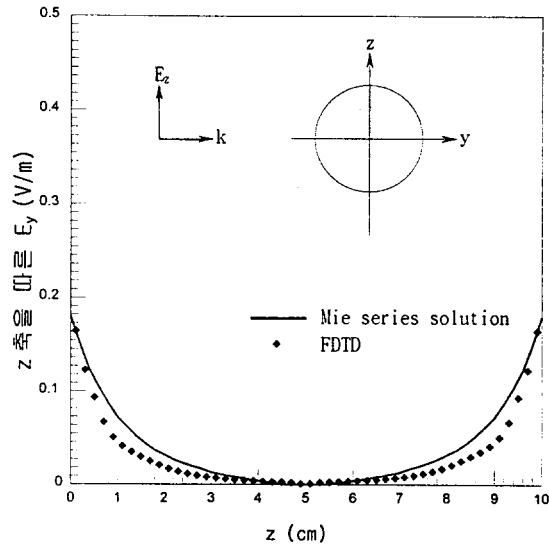


그림 4. 구형 산란체에 대해 FDTD 기법을 이용한 경우와 해석적 해의 비교

Fig. 4. The comparison between the solution using FDTD method and analytic solution.

를 구하는 과정이 산란 field 기준이 아니고 총 field 수식을 사용한 때문으로 여겨진다.

3-2 세 모델의 결과치 비교

이제 그림 1의 세 모델에 대한 해석결과를 보이고 논의하겠다. 그림 5~10은 입사 평면파의 형태 (주파수, 진행방향)와 각 모델에 따라 1 W/m^2 의 전력밀도를 갖는 평면파에 대해 그림 2의 (b)의 조직 단면에 해당하는 단면 SAR 분포를 W/kg 단위로 나타낸 것이다. 이때 각 색상의 값은 모두 그림 5와 6에 나타낸 칼라 스케일과 동일하다.

표 2와 3에서는 ANSI 지침에서와 같이 W/m^2 당 1 g 국부 최대치, 각 조직별 평균치, 또는 두부 전체 평균치를 W/kg 의 SAR로 표현하였다. 그리고 수치기법의 특성에 따라 FDTD cell 당 포함되는 최대 에너지가 위치하는 점과 그 위치에서의 SAR 값을 제공한다. 한 개의 FDTD cell은 $3 \times$

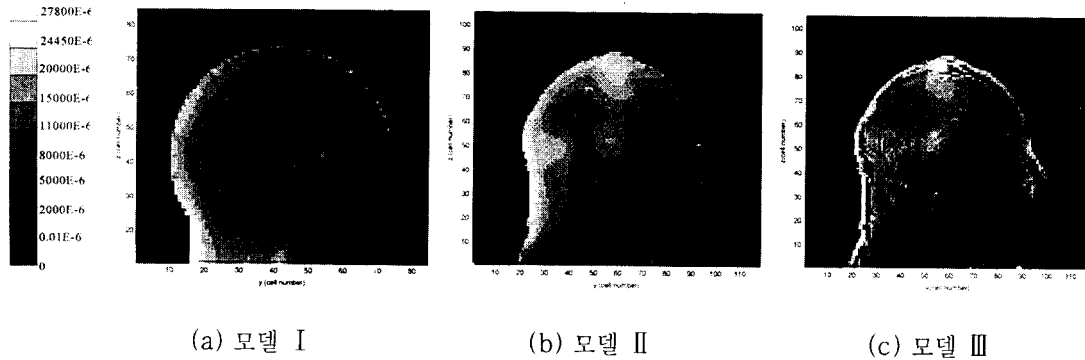


그림 5. 후방입사 평면파에 대한 시상면SAR 분포 (900 MHz)

Fig. 5. SAR distribution on the sagittal plane for the planewave propagating from the back (900 MHz).

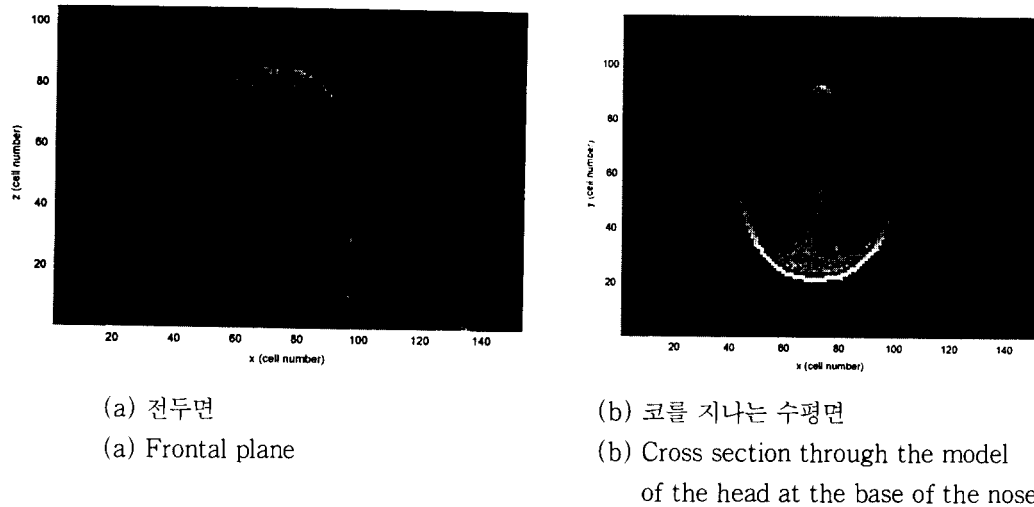


그림 6. 후방입사 평면파에 대한 모델 III의 SAR 분포 (900 MHz)

Fig. 6. SAR distribution of model III for the planewave propagating from the back (900 MHz).

3×3 mm³의 정방형 cell로서 조직에 따라 밀도가 조금씩 다르지만 대략 1000 kg /m³이라 두면 약 0.027 g 정도이다. 1 g 평균치는 FDTD cell을 x, y, z 방향에 대해 3×3×4(약 0.972 g)개의 입방형에 대해 평균을 취하여 얻었다. 그리고 모델 III의 동일조직 전체 평균치는 연골, 근육, 피부 등 각 조직별 평균치를 나타내고 있고 그 아래 %로 표시된 것은 전체 두부 모델에 대한 각 조직의 부피를 나타내고 있다. 즉, 조직 평균치는 그 해당 부피에 대한

평균 SAR 값이다.

표 2와 3, 그리고 그림 5~10을 통해 결과를 살펴 보고 이와 유사한 경우에 대한 다른 연구결과와 비교, 논의하겠다. 먼저 표 2의 900 MHz 평면파 입사의 경우 후방 입사시 그림 5와 6에서 보는 바와 같이 세 모델 모두 뒷 목의 피부 및 혈관 조직에서 “hot spot”이 나타남을 볼 수 있다 “hot spot”의 위치는 표에서 조직별 FDTD cell 국부 최대치의 피부/혈관조직에 대한 SAR 값 아래 표기된 FD-

표 2. 900 MHz에서의 SAR 값 (W/kg per W/m²)
 Table 2. SAR values at 900 MHz (W/kg per W/m²).

주파수 (MHz)	입사평면파	모델 I		모델 II		모델 III				
		cartilage	muscle	eye	nerve, brain	skin	fat, bone	blood		
900	E z k y (후방입사)	3.13E-02	3.16E-02	9.73-03	3.65E-02	1.40E-03	3.37E-02	4.95E-02	3.67E-02	4.59E-02
				조직별 1 g 국부 최대치						
		6.00E-03	6.04E-03	2.22E-03 (0.12%)	4.75E-03 (28.29%)	1.86E-03 (0.24%)	5.30E-03 (21.14%)	1.29E-02 (13.5%)	3.98E-03 (12.99%)	5.74E-03 (23.71%)
				동일조직 전체 평균치						
		4.66E-02	7.80E-02	3.60E-02 (70, 96, 59)	0.103 (90, 32, 29)	4.16E-03 (64, 84, 66)	5.64E-02 (81, 24, 62)	0.117 (88, 30, 29)	5.85E-02 (62, 26, 41)	0.117 (88, 30, 29)
				조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치						
	E z k y (전방입사)	3.09E-02	0.135	1.04E-01	9.77E-02	2.65E-02	1.64E-02	0.168	9.47E-02	0.109
				조직별 1 g 국부 최대치						
		6.38E-03	6.79E-03	2.78E-02 (0.12%)	5.81E-03 (28.29%)	1.78E-02 (0.24%)	4.9E-02 (21.14%)	0.168 (13.5%)	9.47E-02 (12.99%)	0.109 (23.71%)
				동일조직 전체 평균치						
		5.47E-02 (39, 56, 14)	0.227	0.332 (70, 96, 45)	0.368 (73, 91, 46)	4.84E-02 (61, 87, 54)	6.18E-02 (81, 80, 72)	0.372 (72, 94, 45)	0.244 (74, 95, 37)	0.309 (73, 93, 43)
				조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치						

표 3. 350 MHz 에서의 SAR 값 (W/kg per W/m²)
 Table 3. SAR values at 350 MHz (W/kg per W/m²).

주파수 (MHz)	임사평면과	모델 II				모델 III									
		모델 I	모델 II	cartilage	muscle	eye	nerve, brain	skin	fat, bone	blood					
350	Ez kly (후방입사)	6.41E-02	7.55E-02	1.35E-02	6.54E-02	1.91E-03	1.96E-02	7.61E-02	6.70E-02	7.61E-02					
											조직별 1g 국부 최대치				
											동일조직 전체 평균치				
											조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치				
											조직별 1g 국부 최대치				
	Ez kly (전방입사)	9.13E-03	8.40E-03	1.81E-03	7.93E-03	1.55E-03	6.96E-03	1.43E-02	5.35E-03	8.68E-03	8.68E-03				
												(0.12%) (0.24%) (21.14%) (13.5%) (12.99%) (23.71%)			
												조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치			
												조직별 1g 국부 최대치			
												조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치			
Ez kly (전방입사)	0.101	(29, 21, 22)	(93, 36, 29)	(98, 49, 49)	0.192	7.28E-3	5.62E-2	0.204	9.09E-2	0.204	0.204				
												(82, 30, 60) (94, 41, 29) (93, 36, 29) (88, 30, 29)			
												조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치			
												조직별 1g 국부 최대치			
												조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치			
Ez kly (전방입사)	0.106	6.84E-02	1.76E-02	9.94E-02	2.20E-02	1.22E-02	7.77E-02	9.77E-02	0.104	0.104					
											조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치				
											조직별 1g 국부 최대치				
											조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치				
											조직별 1g 국부 최대치				
Ez kly (전방입사)	9.199E-03	8.11E-03	7.40E-03	9.51E-03	1.44E-02	4.02E-03	1.27E-03	5.49E-03	9.52E-03	9.52E-03					
											(0.12%) (0.24%) (21.14%) (13.5%) (12.99%) (23.71%)				
											조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치				
											조직별 1g 국부 최대치				
											조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치				
Ez kly (전방입사)	0.192	(39, 56, 14)	(55, 70, 21)	(74, 93, 51)	0.207	4.08E-02	3.83E-02	0.152	0.204	0.257	0.257				
												(66, 74, 20) (86, 83, 63) (57, 83, 63) (84, 71, 20) (75, 75, 20) (73, 74, 20)			
												조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치			
												조직별 1g 국부 최대치			
												조직별 FDTD cell(약 0.027 g) 국부 최대치			

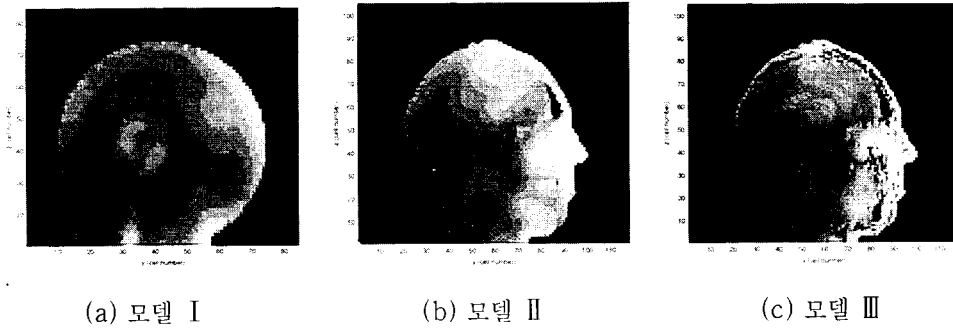


그림 7. 전방입사 평면파에 대한 시상면에서의 SAR 분포 (900 MHz)

Fig. 7. SAR distribution on the sagittal plane for the planewave propagating from the front (900 MHz).

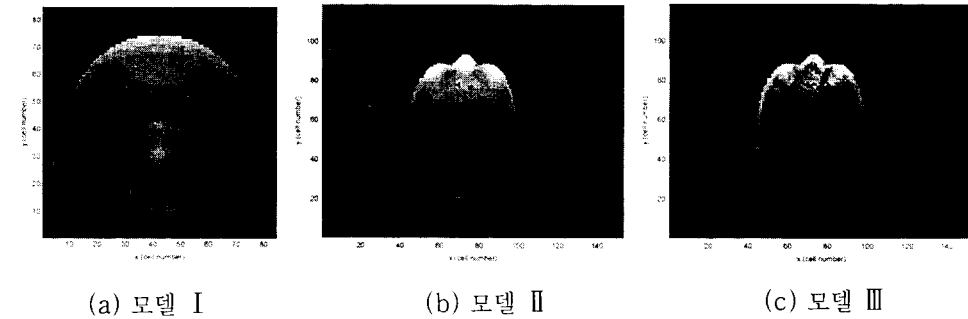


그림 8. 전방입사 평면파에 대한 코를 지나는 수평면에서의 SAR 분포 (900 MHz)

Fig. 8. SAR distribution on cross section through the model of the head at the base of the nose for the planewave propagating from the front (900 MHz).

TD cell 위치와 그림 2의 조직 단면도를 참조하면 확실한 위치를 알 수 있다. 피부와 혈관조직에서의 “hot spot” 위치가 동일한 점으로 보아 이 위치가 이 두 조직의 경계상에서 나타난 것으로 보인다. 그리고 조직별 1 g 국부 최대치는 모델 I과 모델 II는 거의 비슷한 값을 가지나, 모델 III의 0.0459 W/kg 보다 낮다. 모델 I, II의 전체 평균 SAR은 모델 III의 0.00508 W/kg과 거의 유사하다. 균질 매질로서 모델링된 I, II 모델의 경우에는 전체 평균치가 비슷함에도 불구하고 FDTD cell 국부 최대치는 비교적 낮았다.

900 MHz 평면파 전방 입사의 경우에는 표 2에서 전체적으로 SAR 분포가 후방 입사의 경우에 비

해 높게 나타났다. 특히 주목할 점은 전방 입사의 경우 그림 7과 8에서 인체의 형상 중 코가 영향을 매우 크게 받는 것을 알 수 있다. 각 모델들의 전체 평균 SAR은 후방 입사의 경우와 비교해 큰 변화가 없으나 국부 SAR의 경우에는 모델 I과 II가 매우 다름을 알 수 있다. 구형 모델인 경우에는 두부 내부 및 목 내부에 조금 강한 정재파가 보이는 반면, 모델 II와 III에서는 후방 입사의 경우 평균 SAR 값에 비해 크게 두드러지지 않던 국부 SAR이 전방 입사시 두부의 코에 매우 강하게 “hot spot”이 나타남을 관찰할 수 있다. 그리고 세 모델 모두 공통적으로 후방 입사에 비해 국부 SAR값이 다소 높게 나타났다. 따라서 900 MHz 평면파 입사의 경우

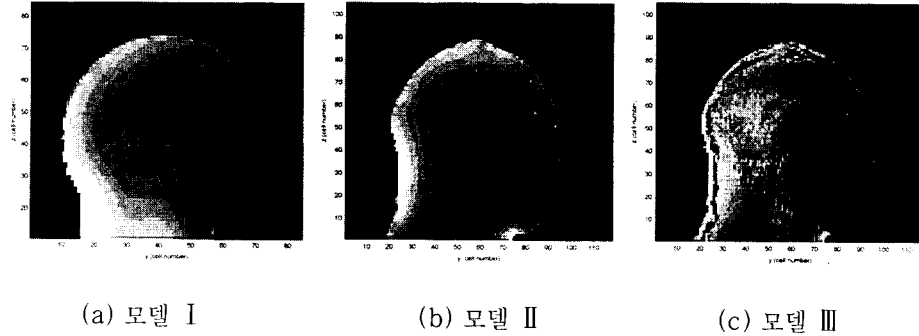


그림 9. 후방입사 평면파에 대해 시상면에서의 SAR 분포 (350 MHz)

Fig. 9. SAR distribution on the sagittal plane for the planewave propagating from the back (350 MHz).

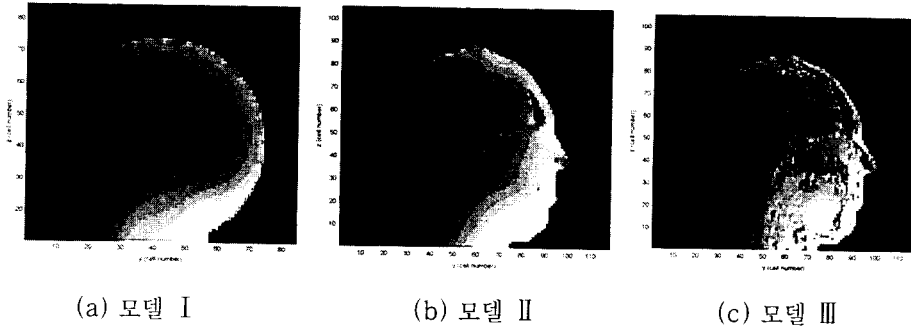


그림 10. 전방입사 평면파에 대해 시상면에서의 SAR 분포(350 MHz)

Fig. 10. SAR distribution on the sagittal plane for the planewave propagating from the front (350 MHz).

매질의 영향보다는 두부의 형상 중 돌출된 부분에 에너지가 강하게 집중되는 것으로 보인다.

350 MHz 평면파 후방입사의 경우에는 그림 9에서 보는 바와 같이 900 MHz와 거의 동일한 위치에 “hot spot”이 나타나지만 에너지가 두부와 목 내부로 더 깊이 침투하고 있고 표 3을 통해 전체적인 레벨, 특히 FDTD cell 국부 최대치는 900 MHz의 경우에 비해 훨씬 더 높음을 볼 수 있다. 두부의 경우 300~400 MHz 대역에서 내부 공진으로 전력 흡수가 가장 높은 것으로 알려져 있다^[9]. 모델별로 살펴보면, 모델에 대한 전체 평균 SAR은 모델 I의 경우가 약간 더 높았으나 국부 SAR은 모델 II가 더 높은 것으로 나타났다.

350 MHz 평면파 전방입사의 경우에는 표 3에서

각 모델들의 평균 SAR 값은 큰 변화가 없으나 국부 SAR에 있어서는 모델 I과 III의 SAR값이 후방입사의 경우에 비해 대체로 높게 나타났다. 그리고 900 MHz의 경우 코 주변에 “hot spot”이 나타난 반면, 350 MHz의 경우에는 그림 10에서 코보다는 주로 코 아래 및 턱 주변에 에너지가 집중되는 현상이 보인다.

결과에 대한 비교 데이터로는 [5],[6] 그리고 [14]를 들 수 있으나 [5]와 [6]은 입사파의 조건은 본 해석의 350 MHz인 경우와 동일하나 실험결과이기 때문에 1 g 및 전신 평균 SAR 등으로 제공하지 못하여 전체적인 SAR 분포의 경향은 일치하였으나 구체적으로 비교하기가 어려웠다. 그리고 [14]는 FDTD 기법을 이용한 해부학적 모델을 해

표 4. ANSI 제한치와의 비교^{[1], [3]}

Table 4. Comparison with ANSI limit^{[1], [3]}.

주파수 (MHz)	ANSI			해석결과						
	전력밀도 허용치 (mW/cm ²)	SAR허용치 (W/kg)		평면파 전력밀도 (mW/cm ²)	SAR 계산치 (W/kg)					
		전신	국부		두부 전체(후방/전방입사)			국부(후방/전방입사)		
					모델 I	모델 II	모델 III	모델 I	모델 II	모델 III
350	1.17	0.4	8	1.17	0.11/0.11	0.10/0.09	0.10/0.10	0.75/1.24	0.88/0.80	0.89/1.22
900	3.0	0.4	8	3.0	0.18/0.19	0.18/0.20	0.18/0.20	0.94/0.93	0.95/4.05	1.38/5.04

석한 논문이나 1 g에 대한 국부 SAR만을 나타내고 있다. 이 연구의 두부 모델은 1 inch 단위의 해부 영상 데이터를 바탕으로 하였기 때문에 본 연구의 모델 III보다는 덜 정밀한 모델이나 고려된 조직수는 8가지로서 좀 더 상세하다. 결과를 비교하면, 후방입사의 경우 1 g 조직 국부 SAR은 0.057 W/kg (800 MHz), 0.062 W/kg (1 GHz)이고 전방입사의 경우 0.089 W/kg (800 MHz), 0.067 W/kg (1 GHz)로서 본 연구결과의 모델 III와 비교하면 두부 전체 공간에서 1 g 국부 SAR 최고값인 0.0459 W/kg(후방입사)와 0.168 W/kg(전방입사)은 유사하기는 하나 본 연구결과값이 후방입사의 경우에는 낮고, 전방입사의 경우에는 더 높게 나타났다. 그러나 후방입사에 비해 전방입사하는 경우가 흡수 전력이 더 크게 나타나는 경향은 일치한다.

3-3 ANSI 지침과의 비교

본 논문에서의 결과는 매우 제한적인 노출조건에 대한 것이지만 그럼에도 불구하고 해석 결과치와 ANSI 지침^[1]의 허용치를 함께 살펴보기 위해 표 2와 3의 결과를 ANSI 기준으로 환산하여 표현하면 표 4와 같다. 언급되는 전력밀도 및 SAR 허용치는 직업인을 기준한 것이며, SAR 허용치의 전신에 대한 것은 본 논문 결과 중 두부 전체의 평균 SAR 값을 대신하여 표기하였다. ANSI 허용치와 본 해석 결과를 비교하면, 먼저 전신에 대한 SAR 계산 결

과는 세 모델과 두 가지 입사의 경우 모두에 있어 허용치의 0.5배 이하를 보이며, 국부에 대해서는 약 0.6배 이하를 보이고 있어 대체로 본 논문의 노출상황에 대한 계산결과로 보아서는 ANSI 지침의 공간 전력허용치에 대한 각 모델의 SAR 값은 많은 여유를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 눈에 띄는 결과는 모델 III에서 평균 SAR이나 국부 SAR이 높게 나타나는 것으로 보아 모델 I에서 기존의 구형 모델과는 달리 인체의 목을 고려하더라도 실제의 두부 모델보다는 경우에 따라 낮은 SAR 값을 산출함을 알 수 있으며, 단순 구형을 다룬 [15]에서도 비슷한 결과를 보인다. 모델 II에서는 형상은 실제 두부와 동일하더라도 조직을 균일하게 사용한 경우에는 비균질 조직을 갖는 해부학적 모델 III에 비해서 역시 SAR 값이 낮게 계산될 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 이 결과는 매우 제한적인 노출 상황에 대한 것이고 또한 신체 전부를 다루지 않고 두부만을 대상으로 한 결과이므로 다른 노출 상황, 다른 인체 모델의 경우에는 또 다른 결과를 가져올 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전자파와 생체의 결합을 계산하는 기초 연구로서 매우 제한적이기는 하지만 기본 노출조건인 평면파원에 대한 두부의 전력 흡수 문제를 다루었다. 인체 두부는 자체의 세밀한 구조와 비균질의 해부학적 모델로 인해 그 내부의 SAR 분포

가 두부 형태, 주파수, 그리고 조직의 전기적 특성 등에 의존하는 매우 복잡한 함수가 된다. 여기서 해석한 두 주파수의 결과를 비교할 때 눈에 띄는 차이점은 900 MHz에 비해 350 MHz에서 두부의 중심부 쪽으로 더 깊이 침투하는 현상을 보였다. 그리고 후방입사보다 전방입사의 경우가 더 높은 침투를 보였으며, 후방입사의 경우에는 두 주파수 모두 두부의 목 뒷부분에 "hot spot"이 나타나고 전방입사의 경우에는 350 MHz에서는 코 아래에서부터 턱까지 그리고 900 MHz에서는 코 주변에 "hot spot"이 보였다. 모델별로 비교하면 거론된 세가지의 모델에 있어 평균 SAR 값은 큰 차이가 없으나 국부 SAR은 그 위치나 값에 있어 차이를 보이며, 특히 전방입사의 경우 900 MHz에서는 모델 간에 심각한 값의 차이를 보였다. 균질한 매질로 모델링된 모델 II의 국부 SAR의 위치는 유사하나 SAR 값에서는 비균질 모델과 차이를 보인다. 따라서 국부 SAR 위치 및 그 값을 정확히 다루기 위해서는 모델 III과 같은 비균질의 실제적인 모델이 가장 적합하다고 생각된다. 그리고 비균질의 실제적인 모델이라 하더라도 생체 각 조직의 전기적 특성들을 어떤 값으로 가정하느냐 또는 생체 조직을 어느 정도로 세밀하게 구성하느냐 하는 문제도 깊이 있게 다루어져야 보다 바람직한 연구결과를 보장할 수 있다고 본다.

본 논문의 결과로부터 향후 전자파원과 인체 간의 결합관계를 계산하는 데 있어 진행되어야 하는 과제는 다음과 같다. 전자파원 모델을 다양하게 확대할 필요가 있고 인체모델에 있어서는 전신 모델, 또는 국내인을 대상으로한 국내표준 인체 모델을 도입하는 등 보다 실제적이고 일반적인 노출상황을 다룰 필요가 있으며, 신체 기관 또는 조직의 전기적 특성 등도 여러 연구결과들을 조합, 검토되어야 하는 문제이다. 그리고 무엇보다 가장 근본적인 문제는 인체 모델과 같은 산란체에 대한 수치기법 자체의 검증이 필요하다. 검증 방법은 측정결과와의 비교도 한 가지 방법이겠으나 현재 측정방법 또한 많은 문제를 안고 있으므로 앞에서 언급되었던 해석

적으로 접근 가능한 단순 구형 산란체에 대한 수치기법의 여러 조건이 다각적으로 검토되어야 바람직하다고 본다.

참고 문헌

- [1] ANSI, 1991, Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, American National Standard C95.1, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, USA.
- [2] 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
- [3] 전자파 안전기준(안), 한국전자통신연구소, 1993.1.
- [4] George Franceschetti, Om P. Gandhi, and Martino Grandolfo, *Electromagnetic Biointeraction*, Plenum Press, New York, 1989.
- [5] Jorn Toftgard, Sten N. Hornsleth, and Jorgen Bach Anderson, "Effects of Portable Antennas of the Presence of a Person", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 41, No. 6, June 1993
- [6] Andrzej Kraszewski, Maria A. Stuchly, Stanislaw S. Stuchly, George Harts-grove, and Daniel Adamski, "Specific Absorption Rate Distribution in a Full-Scale Model of Man at 350 MHz," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-32, No.8, Aug. 1984.
- [7] Ronald J. Spiegel, M.B.A. Fatmi,

Stanislaw S. Stuchly, and Maria A. Stuchly, "Comparison of Finite-Difference Time-Domain SAR Calculations with Measurements in a Heterogeneous Model of Man," *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, vol. 36, No. 8, Aug. 1989.

[8] Karl S. Kunz and Raymond J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, 1993.

[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] 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.

[12] M.J. Hagmann, O.P. Gandhi, J.A. D'Andrea, and I. Chatterjee, "Head reson-

ance: Numerical solutions and experimental results," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, pp. 809-813, 1979.

[13] Om P. Gandhi, and Jin-Yuan Chen, "Electromagnetic Absorption in the Human Head from Experimental 6-GHz Hand-held Tranceivers", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, No. 4, Nov. 1995.

[14] P.J. Dimbylow and O.P. Gandhi, "Finite-difference time-domain calculations of SAR in a realistic heterogeneous model of the head for plane-wave exposure from 600 MHz to 3 GHz", *Phys. Med. Biol.*, vol. 36, No.8, pp. 1075-1089, 1991.

[15] Osamu Fujiwara, "Biological Effects of Radio-Wave and SAR Calculation", *IEICE Tech. Rep. AP94-127*, pp65-70, Feb. 1995.

이 애 경



1990년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
 1992년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 전자파공학연구실 선임연구원

[주관심 분야] EMC 현상의 이론적 해석, 전자파 인체영향 등

조 광 윤

1993년 2월 : 광운대학교 전자통신(공학석사)
 1980년~현재 : 한국전자통신연구원 전자파공학연구실장(책임연구원)

이 혁 재

1947년 11월 20일생
 1970년 2월 : 서울대 전자공학과(공학사)
 1977년 : Oregon State Univ. 전자공학과(공학석사)
 1982년 : Oregon State Univ. 전자공학과(공학박사)
 1970년~1973년 : 해군기술장교
 1976년~1982년 : Oregon State Univ. 연구조교 및 Teaching Assistant.
 1983년~현재 : 한국전자통신연구원 전파공학연구부장