

FDTD를 이용한 인체 두부모델의 SAR 분포특성 해석

홍동욱[†] · 김두현 · 강동규

충북대학교 안전공학과

(2003. 12. 11. 접수 / 2004. 2. 24. 채택)

Analysis of SAR Distribution Characteristics in a Head Model using FDTD

Dong-uk hong · Doo-hyun kim · Dong-kyu kang

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received December 11, 2003 / Accepted February 24, 2004)

Abstract : This paper presents an analysis of SAR(Specific Absorption Rate) distribution characteristics in a head model using FDTD(Finite Difference Time Domain). In this study human head was modelled in four elements-layered structure, consisting of skin, fat, skull and brain. To calculate the electromagnetic fields within the head model, FDTD method was used. In the FDTD method, the electromagnetic wave is analyzed by solving a Maxwell's equations repeatedly. For the calculation, distance between power source and head model increased by 10[m]. Power density and incident electric field intensity were calculated. Based on the incident electric field, the program which calculate internal electric fields intensity and SAR calculation of the head model were developed. The results of developed program using FDTD were compared with those of a commercial programs, which showed the availability and usefulness of the suggested scheme in this paper.

Key Words : SAR distribution, FDTD method, maxwell's equations, head model.

1. 서 론

전자기술의 진보에 따라 일상생활 주변에서 전자파가 인체에 미치는 영향과 안전노출 허용한계에 대한 관심이 커지고 있다. 비흡수율(Specific Absorption Rate : SAR)은 일반적으로 전자파 흡수율로 정의되고 주로 100[kHz]에서 10[GHz] 사이의 주파수 대역에서 전자파가 생체조직에 미치는 영향을 평가할 때 쓰이는 기본한계가 된다¹⁾. 레이더 송신소, 방송 송신소, 이동 통신 기지국 주변에서는 수 [kW]에서 수천 [kW]에 이르는 고전력의 송신 출력과 10[kHz]에서 10[GHz]의 고주파의 전자파가 송신되고 있으며 이러한 환경 하에서 근무하는 작업자에 대한 안전성 확보는 매우 중요한 문제이다. 고주파의 전자계가 인체에 미치는 영향은 주로 열에너지의 작용으로 조사되고 있다. 국제적으로는 1992년

ICNIRP(International Commission on Non Ionizing Radiation Protection)가 발족되어 전자파에 대한 인체 노출 허용한계를 수립하였고 미국, 일본 등은 각 국가별로 독립된 노출 허용한계를 가지고 있다. 우리나라에서는 1998년부터 전자파학회를 중심으로 전자파가 인체에 미치는 영향에 대해 본격적으로 연구가 진행되어 오고 있지만 휴대전화에 대한 연구 이외에는 실험데이터와 이론적인 연구가 부족한 실정이다. 전자파가 인체에 미치는 영향은 크게 두 가지 관점으로 접근할 수 있다. 첫째는 노출된 인체에 나타나는 생리현상의 변화이고, 두 번째는 유기되는 에너지의 양이다. 전자의 경우 SAR의 전신 평균치가 4[W/kg]이상이 되면 내부 체온이 상승하여 여러 가지 생리현상의 변화가 일어나고 고주파 대역에서는 환청효과가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 후자의 경우 인체에 유기되는 에너지의 양과 분포 특성을 알기 위한 많은 연구들이 있었다. C.M. Weil,²⁾ H.N. Kritikos³⁾ 등은 다층구조를 가진 구형 모델

[†]To whom correspondence should be addressed.
hongdw@hanmir.com

의 전계강도(E)를 계산하여 인체내 전계분포 특성을 해석하였으나 전자기장의 산란문제를 단순화함으로써 분포특성 이외에 유기되는 에너지의 양에 대해서는 신뢰할 수 없었다. A. Taflove⁴⁾는 전자기장의 산란문제를 시간영역 유한차분식(Finite Difference Time Domain : FDTD)으로 초기화하여 해석하였다. D.M. Sullivan, O.P. Gandhi^{5,7)}는 FDTD를 이용하여 전자계에 노출된 인체 조직을 격자 면으로 나누고 각각의 격자 점에 대한 전계강도를 계산한 뒤 일정한 간격으로 구성된 인체의 단면별 SAR을 계산하였다.

본 논문에서는 1966년 Yee에 의해 소개된 FDTD식을 바탕으로 전자파의 난반사가 발생하지 않도록 흡수 경계조건(PML)을 적용하여 이를 구형태로 프로그래밍하여 계산하는데 첫째, 수백 [kW]의 고전력원으로부터 인체 두부모델까지의 거리변화에 대한 전력밀도 변화를 계산하고 이것을 IEEE Std-28에서 제시하는 전력밀도의 허용한계치에 대입하여 작업 안전거리를 평가하고자 한다. 둘째, FDTD식을 이용하여 전계와 자계가 상호 연관성을 가지면서 안정된 사인 입사 파형을 얻을 때까지 시간적분한 뒤 그 결과 값을 바탕으로 프로그램을 작성하여 SAR값을 계산한다. 셋째, 주파수와 거리를 변화시키면서 입사 전계강도와 Total SAR을 계산하여 노출허용한계에 영향을 미치는 요소를 평가한다. 넷째, 각 주파수별로 유기 되는 전계값을 계산하고 두부모델 중심에서의 전계분포 특성을 분석한다. 프로그램의 결과, 각 주파수별로 계산된 인체 두부모델 내부에서의 전계분포 및 SAR 분포에 대한 해석결과를 검증하기 위하여 상용 프로그램을 사용하여 3차원 구형태를 모델링하고 그 결과를 비교한다.

2. 모사방법

전자파 발생 조건은 고출력, 고주파수의 전자파 작업환경에서 작업자가 전자파에 직접적으로 노출될 위험성을 고려하여 모의 실험에서는 전자파가 안테나로부터 인체 두부에 직접 유기되는 것으로 가정한다. 이를 위해 안테나의 높이를 1.75[m]에 고정시켜 인체 두부가 안테나 빔의 정 중앙에 위치하게 하고 주파수와 거리를 각각 1.0, 1.5, 2.0[GHz]와 10~100[m]로 변화시키면서 각 지점에서의 전계강도와 SAR을 구한다. 계산을 위해 안테나의 출력은 450[kW]로 고정시킨다. 인체의 두부 모델은 C. M.

Weil²⁾의 다층구조로 된 구형모델과 동일하지만 본 논문에서는 인체 두부를 유전율과 투자율을 지정한 피부, 지방, 뼈, 뇌조직으로 구성하여 체내에 전이되는 에너지의 분포를 계산하였다. 논문에서사용한 조직의 유전율 및 도전율은 Table 1에서 제시하는 Gabriel의 조직 특성치를 사용하였다. 피부의 경우는 젖은 상태에서의 유전율값을 취하고 뼈의 유전율은 골수를 포함한 값으로 가정하였다. 이것은 전파의 도전율을 더욱 크게 함으로써 계산과정에서의 안정도와 정확도를 높여준다. 기존에는 완벽한 대칭구조의 구를 사용하여 흡수특징을 계산하였으나 본 논문에서는 인체의 두부를 다층구조의 구형태로 가정하고 여기에 지속 사인파를 입사시켜 손실성 매질내에 에너지 변화율을 계산한다. 구의 크기는 성인의 두부크기를 가정하여 지름 16 [cm]로 정했으며 한 셀의 크기는 1.0~2.0 [GHz] 주파수에 대해 0.2~0.5 [cm]까지 변화시켰다. 전계는 입사되는 평면파에 대해 수직일 때 가장 좋은 흡수가 발생하기 때문에 z축 방향으로 편파되도록 하였고, TM(Transverse Magnetic)파를 가정하였기 때문에 자계성분은

Table 1. Gabriel's parameters of human tissues according to various frequencies.

Tissues	Frequency [GHz]	Permittivity(ε)			Conductivity(σ)		
		1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0
Skin(wet)		45.7	44.4	43.5	0.88	1.09	1.34
Fat		11.3	11.1	11.0	0.12	0.16	0.21
Skull		11.2	10.9	10.6	0.24	0.30	0.38
Brain		52.3	50.7	49.7	0.99	1.23	1.51

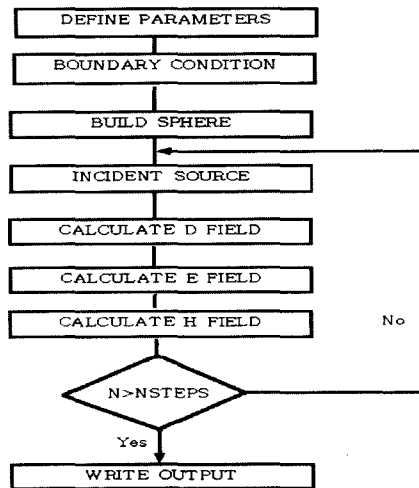


Fig. 1. Diagram of electromagnetic field analysis program.

x축 방향으로 발생하고 평면파는 y축 방향으로 전파되었다. 불필요한 반사파에 의한 영향을 최소화하기 위해 외곽 경계 조건으로는 PML(Perfectly Matched Layer) 조건을 사용하였다. Fig. 1은 유한차분식을 이용한 산란성 매질내에서의 전자계 해석절차를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전력밀도(S)의 변화

IEEE std-28에서는 전력밀도에 대한 최대노출허용한계를 1.0~2.0[GHz] 사이에서 $f/300$ [mW/cm^2]와 같이 주파수의 함수로 규정하고 있다. 이 식에 따르면 1.0, 1.5, 2.0[GHz] 각각에 대해 3.33, 5, 6.67 [mW/cm^2]의 노출 허용한계값을 갖는다. 그러나 안테나 이득을 고려하지 않은 등방형 점원에 대한 전력밀도값은 주파수와는 무관하고 단지 거리에 대해서만 영향을 받는다. Fig. 2는 전력원으로부터 10[m] 간격으로 떨어진 지점에서의 전력밀도를 나타내고 있으며 거리가 증가함에 따라 전력밀도값은 기하급수적으로 감소하였다. 계산결과 전력이 450[kW]일 때 전력원으로부터 10~50[m] 이격된 지점의 전력

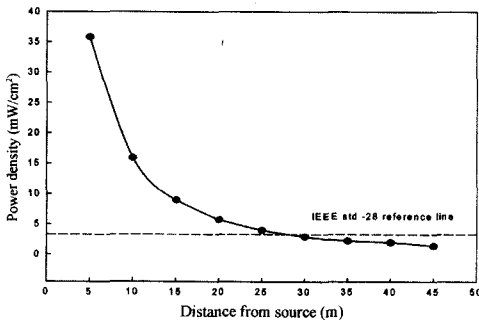


Fig. 2. Power density according to distance.

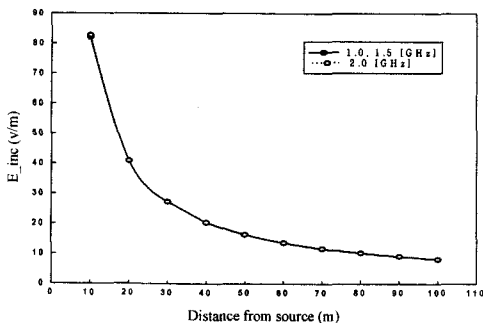


Fig. 3. Electric field intensity according to distance.

밀도는 35.83~1.43 [mW/cm^2]의 값을 갖는다. 이 값을 IEEE std-28 규정의 허용한계값에 대입해서 비교해 보면 허용한계가 가장 낮은 1.0[GHz]의 노출허용한계를 만족하기 위해서는 전력원으로부터 35[m] 이상 이격이 되어야 안전거리가 확보됨을 알 수 있다. 따라서 안전한 측면을 고려할 때 다수의 주파수가 공존하는 레이더 송신소, 방송 송신소와 같은 환경에서 10[kHz]이상의 고주파에 대한 안전 작업거리를 결정하기 위해서는 최대 노출허용한계치가 가장 낮은 주파수를 선택하여 거리에 따라 계산된 전력밀도값을 기준으로 안전거리를 계산하여야 한다.

3.2. 입사 전계 강도 변화

전력원으로부터 발산되는 전파는 지속 사인파이므로 인체 두부로 입사되는 입사전계(E_i)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^{5,8)}

$$E_i = E_o \times \sin(2 \pi ftN) \quad (1)$$

일정한 거리가 이격된 지점의 전계강도(E_o)와 해당 주파수(f), 셀의 크기(N)를 식 (1)에 대입해서 그 지점에서의 입사 전계값을 계산했다. 여기서 구해진 입사 전계값을 FDTD식을 이용한 프로그램에서 시간 적분과정을 거치는 동안 특정 위치에 지정해줌으로써 사인파가 지속적으로 입사되는 것을 모사할 수 있었다. Fig. 3은 주파수별로 거리에 따른 입사 전계강도를 나타내고 있다. 그 값은 1.0, 1.5, 2.0 [GHz]에서 거리에 따라 기하급수적으로 감소하였는데 이것은 입사전계강도가 거리의 제곱에 반비례하는 전계강도값에 의해 영향을 받기 때문이다. 또한 사인함수임에도 불구하고 입사 전계값이 각각의 주파수에서 거의 동일한 값을 보였는데 이것은 주파수와 셀의 크기가 서로 반비례하여 사인함수에 별다른 변화가 발생하지 않기 때문이다. 따라서 인체 두부 모델에 유기되는 입사전계값은 전계강도와 마찬가지로 전력원으로부터의 이격거리에 대해서만 영향을 받음을 알 수 있다.

3.3. 전자파 흡수율(SAR)의 변화

비흡수율(SAR)은 일반적으로 전자파 흡수율로 정의되고 주로 100[kHz]에서 10[GHz] 사이의 주파수 대역에서 전자파가 생체조직에 미치는 영향을 평가할 때 쓰이는 기본한계가 된다. SAR은 인체내부의 생체작용과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문

에 미국의 IEEE std-28을 비롯하여 세계각국에서는 전자파에 대한 인체 안전성 확보를 위해 SAR에 대한 제한치를 규정하고 있다. IEEE std 28에서 제시하는 국부(두부, 몸통) SAR 허용한계치는 일반인의 경우는 1.6[W/kg]으로 직업인의 경우는 8.0[W/kg]으로 제한하고 있다. 본 논문에서는 IEEE std-28에서 제시한 SAR허용 한계치를 기준으로 직업인에 대한 안전 작업거리를 계산하였다¹⁾. Fig. 4는 전력원의 주파수가 1.0[GHz] 일 때 거리에 따른 Total SAR값의 변화를 나타낸다. 거리를 10~100[m]까지 10[m] 간격으로 변화시킬 때 Total SAR은 66.77~0.67[W/kg]으로 계산되었다. 전파원으로부터 30[m]이상 이격되어 있으면 SAR값은 일반인에 대한 허용치인 1.6 [W/kg]을 만족하지는 못하지만 직업인에 대한 허용한계치인 8.0[W/kg]을 초과하지는 않았다. IEEE std-28에서 규정하고있는 SAR의 허용 한계치와 비교해보면 일반인의 경우는 거리가 60[m] 이상 이격이 되어야만 허용치를 만족했다. Fig. 5는 주파수별로 거리에 따른 Total SAR의 변화를 나타낸다. 주파수가 높을수록 유기되는 Total SAR값은 크게 나타났지만 거리가 증가함에 따라 Total SAR값의 감소율도 훨씬 커서 60[m] 이상 이격이 되면 주파수에

관계없이 Total SAR값이 비슷해졌다. 따라서 주파수가 높을수록 요구되는 작업 안전거리는 더 증가되지만 일정거리이상 이격이 되면 허용한계치와 주파수는 상관관계가 거의 없음을 알 수 있었다. 만약 허용한계치 이하를 유지하는데 필요한 공간을 충분히 확보하기 어려운 작업환경이라면 유기되는 SAR 값을 최소화하기 위해 작업자가 안테나 빔의 중앙에 위치하지 않도록 장비와 인원사이에 충분한 수직적 공간분리도 고려해야한다.

3.4. 두부모델 중심에서의 전계 분포

인체에 유기되는 SAR은 전계강도로부터 계산되기 때문에 전계강도값과 전계 분포특성을 계산하는 것은 중요하다. Fig. 6은 두부 모델 중심단면에 유기되는 전계강도와 분포에 대해 FDTD식을 이용한 프로그램과 상용프로그램의 결과를 비교한 것이다. 전계강도값은 미세한 차이를 나타내고 있지만 전체적으로 결과치와 분포곡선은 거의 일치하고 있다. Fig. 7은 각 주파수별로 전파의 진행방향을 따라 유기되는 전계값과 전계분포를 나타낸다. 프로그램 실행결과 두부 모델 전면 피부층의 전계강도는 1.0, 1.5,

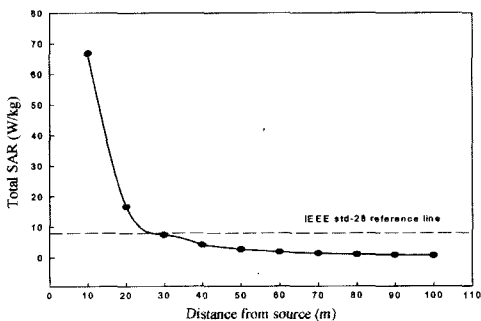


Fig. 4. Total SAR according to distance (1.0GHz).

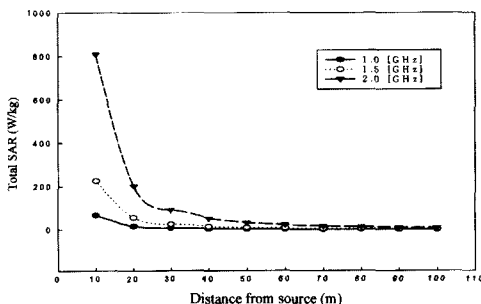


Fig. 5. Total SAR with various frequencies according to distance.

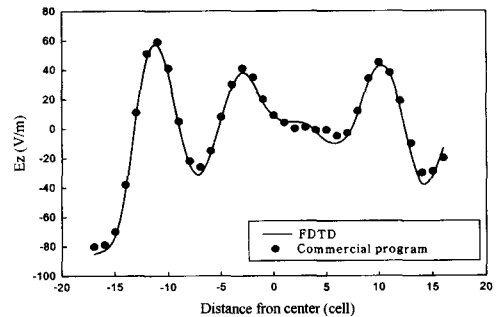


Fig. 6. Comparison of Ez field intensity from FDTD-based program and commercial program (1.0GHz).

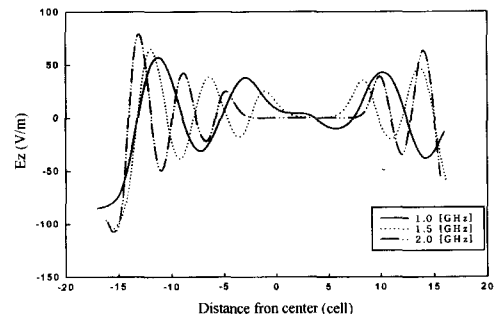


Fig. 7. Electric field intensity with various frequencies in a center layer.

2.0[GHz]에서 각각 56, 65, 77[V/m]로 주파수가 높을수록 전계강도가 높았다. 또한 전계강도는 두부 모델의 전면부에서 높고 내부로 진행될수록 낮게 나타났는데 이것은 10[kHz]이상의 고주파인 경우 전자파가 두부 모델에 유기되면서 입사전계가 대부분 피부층에서 흡수되고 일부만 계속 진행하기 때문이다. 주파수가 높을수록 두부 모델 전면부에서의 전계강도는 크게 나타났지만 내부로 진행될수록 낮은 주파수에 비해 더 큰 감소율을 보였다. 반면 주파수가 낮을수록 전면부에서의 전계강도는 작지만 더 깊은 거리까지 전계가 유기 되었는데 이것은 고주파일수록 조직 침투율이 낮아지기 때문이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 1.0[GHz]와 1.5[GHz]에서 두부 모델을 xy면으로 절단하여 모델의 중심단면에 유기되는 전계분포를 2차원으로 나타낸 것이다. x, y축은 FDTD식을 이용한 프로그램에서 셀의 개수로 나타낸 계산영역을 의미하고 z축은 각 지점에서의 전

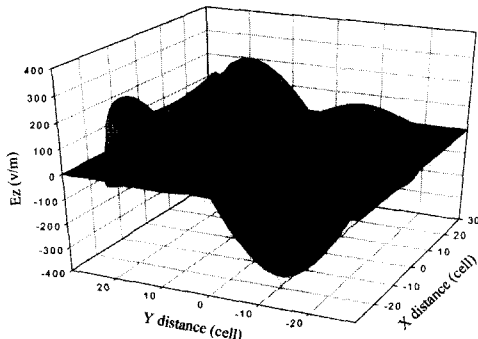


Fig. 8. Electric field intensity distribution in a spherical center (1.0GHz).

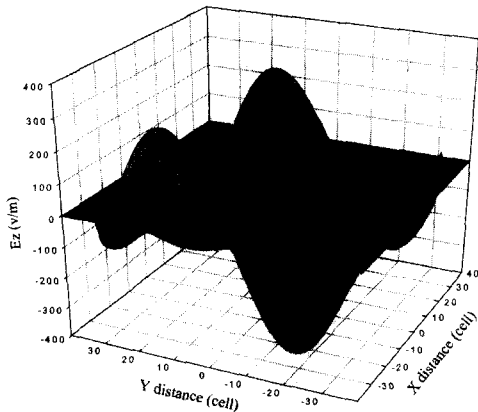


Fig. 9. Electric field intensity distribution in a spherical center (1.5GHz).

계강도를 의미한다. 성인의 인체 두부를 16[cm]로 가정하고 이를 모델링하기 위해 1.0[GHz]에서는 60개의 계산영역 셀을 x, y축에 나타냈고 셀 하나의 크기는 0.5[cm]로 정했다. 여기서 32개의 셀은 인체 두부를 모델링하여 조직별 유전율과 도전율을 지정하였으며 좌,우 28개의 셀은 외곽 경계조건을 구성하기 위한 PML 층으로 지정하였다. 1.5[GHz]의 경우 계산영역의 셀 수는 80개 셀의 크기는 0.3[cm]로 정했다. 마찬가지로 53개의 셀에는 인체 두부조직별 유전율과 도전율을 지정했고 나머지 27개 셀은 PML 층으로 구성하였다. 입사되는 전파는 지속 사인파로써 두부모델의 우측에서 좌측으로 진행되면서 두부모델 내부에서 일부는 흡수되고 일부는 반사되거나 계속 진행되었다. Fig. 8에서는 두부모델을 통과하고 나서도 입사파의 한 주기가 지속되고 있는 반면 Fig. 9에서는 두부모델을 통과하면서 한 주기가 끝났는데 이것은 고주파일수록 파장이 짧아지기 때문이다. 전계강도는 1.5[GHz]에서 더 높았지만 전파의 침투깊이는 1.0[GHz]의 경우가 더 길었다.

3.5. 두부모델 중심에서의 SAR 분포

인체가 균일한 전자기장의 평면파에 노출되는 경우에도 그 내부에서는 매우 불균일한 에너지 축적과 분포가 발생한다. 따라서 에너지 축적량과 분포 특성을 알아보는 것은 작업간 안전을 확보하기 위해 매우 중요하다. Fig. 10는 두부모델 중심단면에서 전파의 진행방향을 따라 유기되는 SAR 값과 분포를 주파수별로 나타낸다. 전력원으로부터 두부모델까지의 거리는 10[m]로 고정시키고 중심 단면을 가정하기 위해 지름은 16[cm]로 계산하였다. 중심 단면의 전계강도를 계산한 뒤 프로그램에 대입하여 SAR 값을 계산했다. SAR 값이 한 주기의 사인파형을 가진 전계강도에 대해 두 개의 극한값을 갖는 것

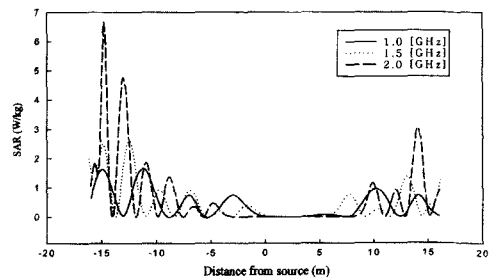


Fig. 10. SAR distribution with various frequencies in a center layer.

은 SAR 값이 전계강도의 위상값으로부터 계산되기 때문이다. 프로그램 실행결과 두부모델 전면에서의 SAR 값은 1.0, 1.5, 2.0[GHz]에서 각각 1.6, 1.9, 6.6 [W/kg]으로 주파수가 높을수록 SAR 값도 높았다. 전계강도와 달리 2.0[GHz]에서의 SAR 값은 1.0, 1.5 [GHz]에 비해 훨씬 높았다. 주파수가 높을수록 두부 모델 전면부에서의 SAR 값이 크지만 내부로 갈수록 SAR 값은 낮은 주파수에 비해 급격하게 감소되었다. 반면 주파수가 낮을수록 전면부에서의 SAR 값은 작지만 더 깊은 거리까지 에너지가 유기 되었는데 이것은 전자파의 주파수가 높아질수록 조직 침투율은 낮아지고 열에너지가 인체 피부면에서 대부분 흡수되기 때문이다. 반면 주파수가 낮아지면 유기되는 SAR 값은 적지만 조직 침투율이 높기 때문에 인체 내부기관에 일정한 영향을 줄 수 있다.

Fig. 11, 12는 두부모델을 xy면으로 절단하여 각 주파수별로 모델의 중심단면에 유기되는 SAR 분포를 3차원으로 나타낸 것이다. x,y축은 두부모델 중앙으로부터의 셀의 갯수를 나타내고 z축은 각 지점의 SAR 값을 나타낸다. FDTD식을 이용한 프로그램 계산영역과 셀의 크기는 Fig. 8, 9와 동일하게 지정했다. FDTD식은 격자구조내의 절점에서 전자계가 계산되기 때문에 두부모델과 같이 최외곽의 경계가 구형태를 지니는 경우나 각 조직 사이의 경계가 한 셀 내에 존재하는 계산에서는 에러가 생길 수 있다. 이를 방지하기 위해 두부모델과 계산영역 사이 또는 각 조직과 조직 사이의 경계에 대해서는 한 셀로 된 격자를 3×3로 세분화하고 세분화된 격자내의 유전율과 도전율은 격자에 포함된 조직의 백분율 평균값으로 취했다. 두부모델내로 유기되는 에너지는 모델의 전면부와 측면부에서 가장 크고 내부로

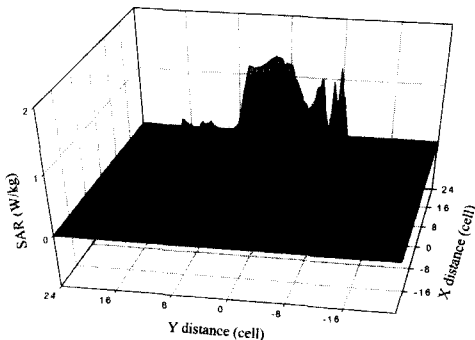


Fig. 11. Specific Absorption Rate distribution in a spherical center (1.0GHz).

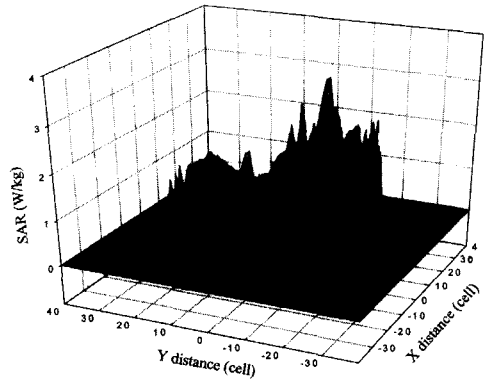


Fig. 12. Specific Absorption Rate distribution in a spherical center (1.5GHz).

갈수록 급격히 감소하여 중앙부에서는 거의 나타나지 않았다. 측면부에서 에너지가 크게 나타난 것은 두부모델측면을 통과하는 입사 사인파가 측면에서 표면층으로 유기 되었기 때문이다. 주파수가 높을수록 두부모델의 표면쪽에 많은 양의 에너지가 유기되었는데 이것은 고주파일수록 조직 내부로의 전자파 침투율은 낮아지고 대부분이 표면조직에 흡수되어 열을 발생시키기 때문이다.

4. 결론

본 논문에서는 고전력, 고주파의 전자파환경에 노출된 채로 근무하는 작업자에 대한 안전성 확보를 위해 IEEE std-28에서 제시하고 있는 최대노출허용한계값과 논문에서 계산된 전력밀도를 비교하여 전력에 따른 안전거리를 계산하였다. 또한 인체 두부모델에 유기되는 전계와 SAR분포를 해석하기 위해 FDTD를 이용하여 개발한 프로그램과 상용프로그램을 이용한 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) IEEE std-28에서는 전력밀도에 대한 최대노출허용한계를 주파수의 함수로 제시하고 있는데 계산 결과 전력밀도는 주파수에 무관하게 거리가 증가할수록 기하급수적으로 감소하였다. 따라서 다수의 주파수가 공존하는 레이더 송신소, 방송 송신소와 같은 환경에서의 작업 안전거리를 설정할 때는 최대노출허용한계치가 가장 낮은 주파수를 선택하여 거리에 따라 계산된 전력밀도값을 기준으로 안전거리를 결정해야 한다.

2) 인체 두부모델에 입사되는 전계강도는 주파수

의 함수임에도 불구하고 거리가 일정한 경우에 주파수에 따라 전계강도가 큰 차이를 보이지 않았는데 이것은 주파수와 계산영역내 셀의 크기가 서로 반비례하여 입사 전계강도에 별다른 변화가 발생하지 않기 때문이다. 따라서 인체 두부모델에 유기되는 입사전계값은 주파수보다는 전력원으로부터의 이격거리에 대해 더 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

3) 거리가 일정한 경우에 입사 전계강도는 주파수별로 큰 차이를 보이지 않았지만 SAR값은 큰 차이를 보였다. 따라서 두부모델에 유기되는 SAR값을 계산할 때는 이격거리뿐만 아니라 주파수 또한 중요한 변수가 된다.

4) 송신출력과 이격거리가 동일할 때 전계강도와 SAR값은 주파수가 높을수록 두부모델 전면부에서 크게 나타났고 내부로 진행되면서 낮은 주파수에 비해 더 급격하게 감소했다. 반면 주파수가 낮을수록 전면부에서의 전계강도와 SAR 값은 작지만 더 깊은 거리까지 에너지가 유기되었다. 따라서 주파수가 높을수록 에너지는 표면으로 집중되고 주파수가 낮으면 인체 내부조직도 전자파에 대해 일정한 영향을 받을 수 있음을 알았다.

참고문헌

- 1) "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz", IEEE Standard Coordinating Committee 28 on Non Ionizing Radiation Hazards, 1999.
- 2) C. M. Weil, "Absorption Characteristics of Multi-

- layered Sphere Models Exposed to UHF/Microwave radiation", IEEE Trans. on Biomedical, Vol. 22, No. 6, 1975.
- 3) H. N. Kritikos and H. P. Schwan, "Formation of Hot Spots in Multilayer Spheres", IEEE Trans. on Biomedical, Feb. 18, 1975.
- 4) A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical Solution of Steady-state Electromagnetic Scattering Problems Using the Time Dependent Maxwell's Equations", IEEE Trans. on Microwave, Vol. 23, pp. 623~630, 1975.
- 5) D. M. Sullivan, D. T. Borup, and O. P. Gandhi, "Use of the Finite Difference Time Domain Method for Calculating EM Absorption in Human Tissues", IEEE Trans. on Biomedical, Vol. 34, No. 2, 1987.
- 6) D. M. Sullivan and O. P. Gandhi, "Use of the Finite Difference Time Domain Method for Calculating EM Absorption in Man Models", IEEE Trans. on Biomedical, Vol. 35, No. 3, 1988.
- 7) C. M. Furse, J. Yuan, and O. P. Gandhi, "The Use of the Frequency Dependent Finite Difference Time Domain Method for Induced Current and SAR Calculations for a Heterogeneous Model of the Human Body", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility Vol. 36, No. 2, 1994.
- 8) "A Practical Guide to the determination of Human exposure to Radiofrequency fields", NCRP Report, 1993.
- 9) D. M. Sullivan, "Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method", IEEE Press Series on RF and Microwave Technology, 2000.