

# FDTD를 이용한 인체두부 모델내의 SAR 분포 특성 해석

김두현 · 홍동욱

충북대학교 안전공학과

## 1. 서 론

전파기술의 진보에 따라 일상생활 주변에서 전자파가 인체에 미치는 영향과 안전노출 허용한계에 대한 관심이 커지고 있다. 비 흡수율(Specific Absorption Rate)은 일반적으로 전자파 흡수율로 정의되고 주로 100 [kHz]에서 10 [GHz] 사이의 주파수 대역에서 전자파가 생체조직에 미치는 영향을 평가할 때 쓰이는 기본적인계가 된다. 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 환경하에서 근무하는 작업자에 대한 안전성 확보는 매우 중요한 문제이다. 본 논문에서는 전력원을 450 [kW]로 지정하고 인체 두부모델까지의 거리변화에 대한 전력밀도 변화를 계산하여 이것을 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)Std 28에서 제시하는 전력밀도의 허용한계치를 대입함으로써 작업 안전거리를 평가한다.<sup>[1]</sup> 입사되는 전파는 지속 사인파로 가정하여 각 주파수별로 한 지점의 입사 전계강도값을 계산한다. 또한 FDTD식을 이용하여 거리에따른 SAR값을 구하여 주파수별 분포 특성을 분석하고 거리변화에 대한 전계강도와 SAR변화값을 구한다. 전계와 자계가 상호 연관성을 가지면서 안정된 사인 입사파형을 얻을때까지 시간적분한 뒤 그결과값을 바탕으로 SAR을 계산하도록 프로그램을 작성하면 그 결과로 각 주파수별로 인체 두부모델 내부에서의 전계분포 및 SAR 분포를 해석할 수 있다. 해석결과를 검증하기 위하여 상용 프로그램인 SEMCAD를 사용하여 3차원 구형태를 모델링하고 그결과를 비교한다.

## 2. 모사 방법

### 2.1 인체 두부 모델링

논문에서 취한 인체의 두부 모델은 C. M. Weij<sup>[2]</sup>의 다층구조로 된 구형모델과 동일하지만 본 논문에서는 인체 두부를 피부, 지방, 뼈, 뇌조직으로 구성하여 체내에 전이되는 에너지의 분포를 계산하였다. 모델은 4개의 구로 이루어졌는데 바깥쪽부터 피부, 지방, 뼈, 뇌조직을 나타낼수 있도록 유전율과 투자율을 지정하였다. 구의 크기는 성인의 머리크기를 가정하여 지름 16 [cm]로 정했으며 평면파는 z축 방향으로 편파되어 y축 방향으로 전파되었다. 논문에서 사용한 조직의 유전율 및 도전율은 Gabriel의 조직 특성치를 사용하였다. 피부의 경우는 젖은 상태에서의 유전율값을 취하고 뼈의 유전율은 꿀수를 포함한 값으로 가정하였다. 이것은 전파의 도전율을 더욱 크게 함으로써 계산

프로그램의 안정도와 정확도를 얻게해준다. 두부모형을 구성하는 셀의 크기는 파장의 1/10로 계산하였고 시간적분의 횟수는 안정된 사인파형을 얻기위해 D.M. Sullivan의 계산식을 따랐다.<sup>[3]</sup> 전자파는 전력원으로부터 y축 방향을 따라 진행하면서 인체 두부모델에 입사되는데 FDTD식 계산에 사용된 전자파는 계산을 단순화하고 가능한 많은양의 전자파가 유기되도록 하기위해 횡자기파( TM )를 선택했다. TM파의 구성은  $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$  성분으로 되어있어 지면에 대해 수직으로 편향된 전계성분이 입사되는 것으로 가정할수 있다. 인체 두부모델은 성인의 평균적인 두부크기를 지름 16 [cm]의 구형태로 가정하였고 구형태는 완전히 대칭이기 때문에 프로그램에서 전자파 편파의 영향은 무시할수 있었다.

## 2.2 FDTD식을 이용한 인체두부모델의 SAR 계산

기존에는 완벽한 대칭구조의 구를 사용하여 흡수특징을 계산하였으나 본 논문에서는 인체의 두부를 다층구조( 피부, 지방, 뼈, 뇌)의 구형태로 가정하고 여기에 지속 사인파를 입사 시켜 손실성 매질내에 에너지 변화율을 계산한다. Fig. 2는 유한차분식을 이용한 산란성 매질내에서의 전자계 해석에 대한 flow chart 이며 해석절차는 다음과 같다.

- (1) 원하는 주파수의 파장으로부터 셀을 크기와 Time stepping의 횟수, 입사전력의 방향 및 값등을 계산하여 필요한 변수값들을 지정해준다. 이때 셀의 크기는 계산의 정확도를 향상시키기위해 파장의 1/10 크기로 설정해준다.
- (2) 구형태의 인체두부를 다층구조로 모델링하여 각각의 매질에 따른 유전율과 도전율을 지정해준다.
- (3) 맥스웰 curl 방정식을 시간영역에서 중앙차분식으로 해석하여 전계의 산란장을 각 성분별로 계산해준다.
- (4) 산란파는 설정영역 끝부분에 도달시 단순히 소멸되지는 않기 때문에 경계부분에서 마치 벽에 부딪히는 것같은 효과가 발생하게 된다. 따라서 원하지 않는 반사파의 영향을 최소화 하기위해서는 외곽경계에서 산란되어오는 파를 모두 흡수할수 있도록 외곽 경계 조건을 지정해 주어야한다. 여기서는 PML 흡수경계조건을 사용한다.
- (5) YEE 셀 내에서 구조적으로 전계와 자계는 시간적 차이를 가지고 있기 때문에 시간영역을 1/2 만큼 이동시킨후 맥스웰 방정식을 이용하여 자계를 각 성분별로 계산해준다.
- (6) 지속적인 사인파 형태를 입사파 전계값으로 계산한다음 산란장과 입사장을 더하여 줌으로써 매질내의 총 전계 및 자계값을 계산해준다
- (7) 위에서 계산된 전자계값에서 체적내 밀도를 나누어줌으로써 각 지점별로 체내 에너지 흡수 변화율을 계산한다. 각 지점별로 계산된 값을 평면상에서 모두 더해줌으로써 각층별 에너지 흡수 변화율이 계산된다.
- (8) 결과값을 저장하고 파형이 안정된 상태에 도달할때까지 다시 (2) - (6)을 반복해준다.

### 3. 결과 및 고찰

1. IEEE std-28에서 규정하고있는 전력밀도에 대한 최대노출허용한계는 1, 1.5, 2 [Ghz]에서 각각 3.33, 5, 6.67 [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ]의 한계값을 갖는다. Fig. 1은 계산된 전력밀도값을 나타내는데 전력원으로부터 10 ~ 50 [m] 이격된지점에서 35.83 ~ 1.43 [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ]의 값을 갖는다. 이값을 IEEE std-28 규정의 허용한계값과 비교해서 대입해보면 노출허용한계를 만족하기 위해서는 전력원으로부터 35 [m] 이상 이격이 되어야 안전거리를 확보할 수 있다.
2. Fig. 2에서 입사전계값은 주파수별로 거리에 따라 기하급수적으로 감소하였고 입사전계강도는 각 주파수별로 별 차이가 없었다. 인체 두부모델에 유기되는 입사전계값은 전계강도와 마찬가지로 전력원으로부터의 이격거리에 대해서만 영향을 받았다.
3. Fig. 3은 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 이격이되면 주파수에 관계없이 Total SAR값이 비슷해졌다.
4. Fig. 4에서 두부모델 전면 피부층의 전계강도는 1, 1.5, 2[Ghz]에서 각각 56, 65, 77 [v/m]로 주파수가 높을수록 전계강도가 높았다. 또한 전계강도와 SAR은 두부모델의 전면부에서 높고 내부로 진행될수록 낮게 나타났는데 주파수가 높을수록 두부모델 전면부에서의 전계강도와 SAR은 크지만 내부로 갈수록 그 값은 급격하게 감소 되었다. 반면 주파수가 낮을수록 전면부에서의 값은 작지만 더 깊은거리까지 전계와 SAR이 유기되었다.

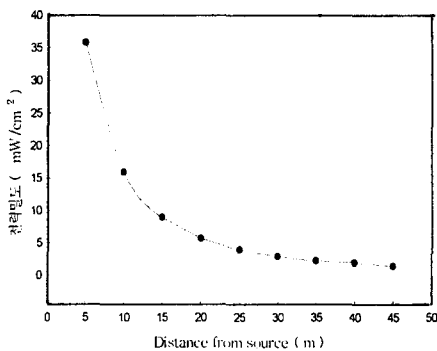


Fig. 1 Power density according to the distance

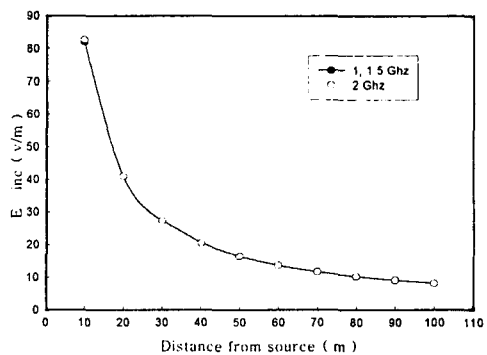


Fig. 2 Electric field intensity according to the distance

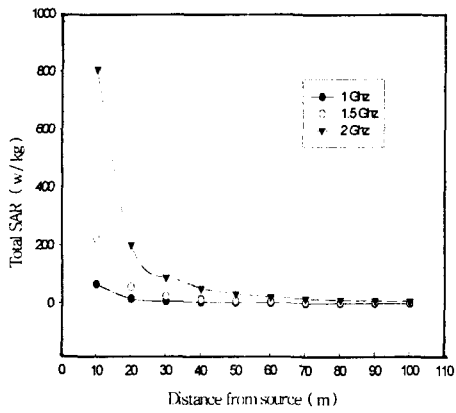


Fig. 3 Total SAR with various frequencies according to the distance

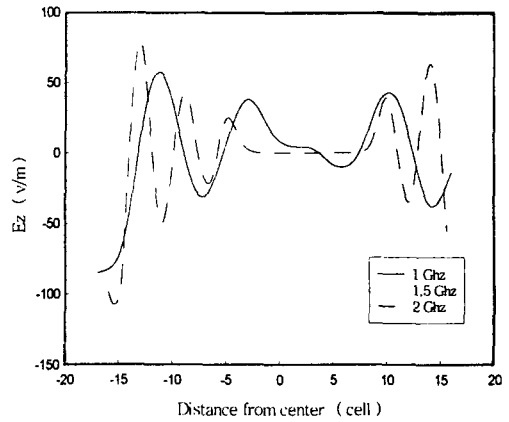


Fig. 4 Electric field intensity with various frequencies in a center layer

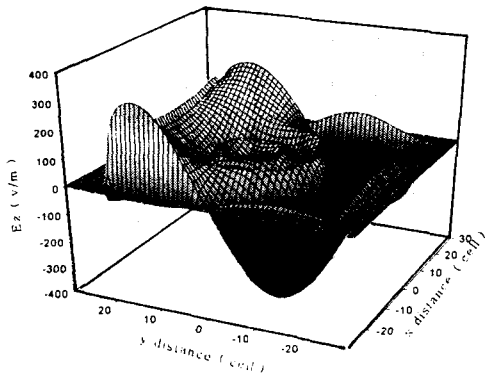


Fig. 5 Electric field intensity distribution in a spherical center(1.0 Ghz)

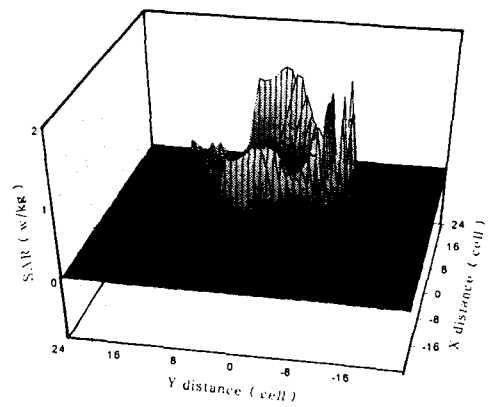


Fig. 6. Specific absorption rate distribution in a spherical center ( 1.0 Ghz )

#### 4. 결 론

IEEE std-28에서는 전력밀도에 대한 최대노출 허용한계를 주파수의 함수로 제시하고 있는데 계산결과 주파수가 일정할 때는 전력밀도값이 거리에 따라 기하급수적으로 감소하였다. 따라서 다수의 고주파수가 공존하는 레이더 송신소, 방송 송신소와 같은 환경에서의 작업 안전거리를 설정할때는 최대 노출허용한계치가 가장 낮은 주파수를 선택하여 거리에 따라 계산된 전력밀도값을 기준으로 안전거리를 결정할 수 있다. 인체 두부모델에 입사되는 전계강도는 주파수에 따라 값이 변하는 사인함수임에도 불구하고 동일한 거리에서는 각각의 주파수별로 전계강도가 큰 차이를 보이지 않았는데 이것은 주파수와 계산영역내 셀의 크기가 서로 반비례하여 사인함수에 별다른 변화가 발생하지 않기 때문이다. 따라서 인체 두부모델에 유기되는 입사전계값은 주파수보다는 전력원 으로부터의 이격거리에 대해 더 큰 영향을 받았다. 동일한 거리에서의 입사 전계강도는 주파수별로 큰 차이를 보이지 않았지만 SAR값은 큰 차이를 보였다. 따라서 두부모델에 유기되는 SAR값을 계산할때는 이격거리뿐만 아니라 주파수역시 중요한 변수가 된다. 송신출력과 이격거리가 동일할 때 전계강도와 SAR값은 주파수가 높을수록 두부모델 전면부에서 크게 나타났고 내부로 진행될수록 낮은 주파수에 비해 더 급격하게 감소했다. 반면 주파수가 낮을수록 전면부에서의 전계강도와 SAR 값은 작지만 더 깊은거리까지 에너지가 유기되었다. 따라서 주파수가 높을수록 에너지는 표면으로 집중되고 주파수가 낮으면 인체 내부조직도 전자파에 대해 일정한 영향을 받을수 있음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 [kHz] to 300 [GHz]", IEEE Standard Coordinating Committee 28 on Non Ionizing Radiation Hazards, 1999
2. C. M. Weil, "Absorption Characteristics of Multilayered Sphere Models Exposed to UHF/Microwave radiation", IEEE Trans. on Biomedical , Vol. 22, No. 6, 1975.
3. 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
4. M. N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press, 2000
5. K. S. Kunz and R. J. Luebbers, "Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics", CRC Press, 1993
6. 정낙삼외 22인, "전자파 장애 측정 사업 최종 보고서", pp 281-286, pp 457- 478, 1998