

# 이동통신 단말기의 복사전자기장이 인체에 미치는 영향

김 남\*, 이에경\*\*

\*충북대학교 전기전자공학부  
\*\*한국전자통신연구원  
무선·방송기술연구소

## I. 서 론

최근 개인휴대통신 기술의 발달과 이동통신 전화기의 급속한 보급으로 현재 국내의 이동통신 휴대폰의 가입자 수가 2,000만을 넘어서고 이동통신 단말기의 인체영향에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 이에 따라 국내외적으로 전자파의 인체노출에 대한 규정을 확립하려는 움직임과 그 근거 마련을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전자파가 인체에 미치는 영향을 연구하는 분야를 크게 분류해 보면 SAR(비흡수율) 등을 중심으로 하는 열적 작용을 연구하는 분야와 전자파와 인체 세포의 상호 작용, 역학 조사를 통한 연구, 전자파와 암 유발의 관계 등의 비열작용을 연구하는 분야로 나눌 수 있다.

전자파에 의해 인체에 발생하는 여러 작용 중에 열적 작용을 대변하는 SAR이 전자파에 의한 인체 노출 제한의 근거로 채택되고 있으며 FCC(Federal Communications Commission)에서 1g 평균 SAR 침투값에 대한 한계치로 1.6 W/kg, ICNIRP(International Commission on Nonionizing Radiation Protection)에서 10g 평균 SAR 침투값에 대한 한계치로 2.0 W/kg이 넘지 않을 것을 권고하고 있다<sup>[1],[2]</sup>. SAR을 검출하는 방법으로 MRI(magnetic resonant image)를 이용하거나 해부학적 또는 인체 팬텀(phantom)을 이용하는 방법 등이 연구중이고 최근 컴퓨터 기술의 발달과 알고리즘의 개발로 전자파 연구에 수치해석적인 방법을 응용하는 연구 범위도 크게 확대되어 가고 있다<sup>[3],[4]</sup>.

본 논문에서 이동통신 단말기에 의해 인체 두부

에 유기되는 SAR의 분석에 대한 내용을 다루었다. 수치해석적 방법으로 FDTD(finite difference time domain)법을 이용하였고 이동통신 단말기의 안테나로 기존의 모노폴 안테나(monopole antenna)와 평면형 구조의 PIFA(planar inverted F antenna)를 채택하였다. 이와 더불어 이동통신 단말기의 안테나 위치, 손의 모양 및 잡는 형태에 따른 SAR 분포를 해석하였다. 또한 이동통신 단말기의 구조와 안테나의 종류에 따라 1g 및 10g 평균 SAR의 침투값을 비교·분석하였다.

## II. FDTD법을 이용한 SAR의 분석방법

### 2-1 FDTD 계산방법

전자계 에너지를 이용하는 장비들의 안전성과 관련하여 최근 IEEE의 SCC-34에서 SAR의 측정과 분석에 관하여 실험적 방법과 수치해석적 방법으로 나누어 설명하고 있다<sup>[1]</sup>. 이 권고안은 무선 송수신기, 이동통신용 전화기, 개인 통신용 장비 등을 포함하는 400MHz에서 3GHz까지의 사용주파수를 갖는 장비들에 의해 인체에 유기되는 공간 평균 침투 SAR의 측정과 해석적 방법에 관하여 기술하고 있다.

본 논문에서 IEEE SCC-34의 분과위원회 2(WG2)에서 명시하고 있는 계산적인 방법을 채택하였고 FDTD법을 이용하여 이동통신 단말기에 탑재된 모노폴 안테나와 PIFA의 성능 분석 및 인체두부에서 형성되는 SAR에 관하여 알아보았다<sup>[3]</sup>.

1966년 K. Yee에 의해 처음으로 제시된 유한차

분시간영역해석법(FDTD)은 전자기 현상의 해석에 광범위하게 이용되고 있다. FDTD 해석법은 고성능의 컴퓨터를 필요로 하는 단점에도 불구하고 복잡한 구조의 전자파 간섭문제에 적용할 수 있고 손실성 유전체와 자계성 물질의 침투성 문제에도 적용이 가능하다는 이유로 근래에 많은 관심의 대상이 되고 있다. 식 (1)과 식 (2)에 시변계에서 표현되는 맥스웰의 미분형 방정식을 나타내었다.

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

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

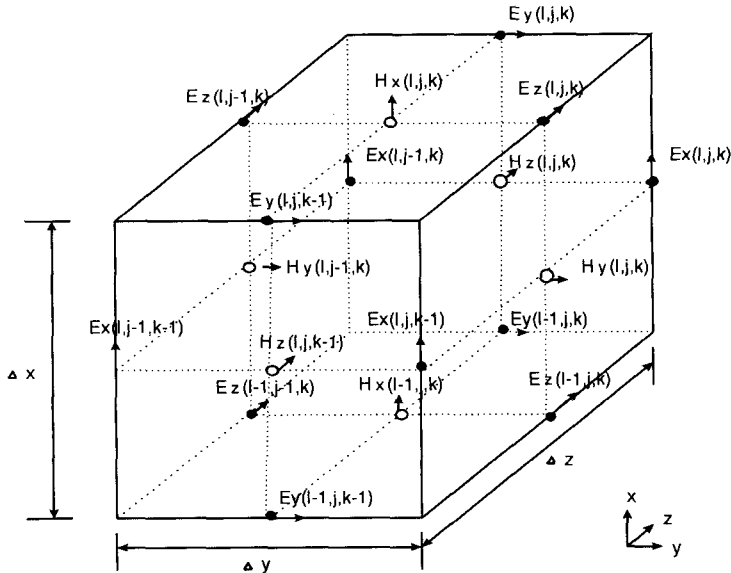
FDTD 해석법은 맥스웰의 시간 영역 curl 방정식에 대한 직접적인 해법이다. 이 방법에서는 벡터 포텐셜을 적용하여 파동방정식에 대한 일반해를 구하는 방법을 이용하지 않고 해석 대상체에 대한 유한 계산 영역에서 주기적으로 이산화된 시간 간격만큼의 시간마다 계에 대한 전계 및 자계의 세

기를 갱신하는 방법을 취하고 있다<sup>[5]</sup>. K. Yee에 의해서 제안된 방식에서 grid로 표현된 공간의 기본적인 계산 단위를 [그림 1]에 나타내었다. FDTD 해석법은 이들 식에 대하여 공간적·시간적으로 표본화(sampling)를 요하므로 식 (3) 및 식 (4)와 같이 이산화된 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{x\ i,j,k}^{n+1/2} &= E_{x\ i,j,k}^{n-1/2} \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} (E_{y\ x,j,k}^n - E_{y\ i,j,k-1}^n) \\ &- \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} (E_{z\ i,j,k}^n - E_{z\ i,j-1,k}^n) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_{x\ i,j,k}^{n+1} &= E_{x\ i,j,k}^n \\ &+ \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} (H_{y\ i,j,k+1}^{n+1/2} - H_{y\ i,j,k}^{n+1/2}) \\ &- \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} (H_{z\ i,j+1,k}^{n+1/2} - H_{z\ i,j,k}^{n+1/2}) \end{aligned} \quad (4)$$

[그림 1]에서 계산의 기본단위를 이루는 한 cell



[그림 1] (i, j, k) 좌표의 cell에 대한 전계성분과 자계성분  
[Fig. 1] E and H field at cell of point(i, j, k).

은 직육면체의 각 변이 1/2로 나누어져 전계와 자계를 계산하는 참조점이 서로 다른 것을 알 수 있다. 이와 같은 방식은 한 시간 간격마다 계산이 이루어지며 전체 공간에 대하여 curl 방정식의 주회 적분(contour integral)을 가능하게 하는 leap-frog 방법이다<sup>[6]</sup>.

지금까지 설명된 FDTD 해석법은 모노폴 안테나의 굵기를 고려하여 sub-grid로 구현된 가는 선 또는 적분 방정식을 도입하여 급전문제를 다루는 경우 등을 제외한 모든 공간에 대하여 공통적으로 적용이 가능하다<sup>[6],[7]</sup>.

## 2-2 SAR의 정의

우선 SAR을 정의하자면 식 (5)와 같다.

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (5)$$

- $\sigma$  = 인체조직의 도전율(S/m)
- $\rho$  = 인체조직의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $E$  = 전계강도의 rms값(V/m)

또한 SAR은 일정 지점에 대해 열의 증가량과 밀접한 관련을 갖는다. 시간에 대한 열의 변화량으로 나타내면 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$SAR = \frac{c \Delta T}{\Delta t} \quad (6)$$

- $\Delta T$  = 열의 변화량(°C)
- $\Delta t$  = 노출 시간(seconds)
- $c$  = 비열 용량(J kg<sup>-1</sup> degree C<sup>-1</sup>)

식 (6)은 인체에서 열의 확산, 열의 방출, 체온 조절 등의 외부영향에 의해 영향을 받지 않는 이상적인 환경을 가정한 것이다. 이러한 가정은 인체 펜텀을 이용하여 실제 측정을 행하는 경우와 마찬가지로

계산적인 방법에 의한 SAR의 분석 방법도 많은 제약을 받는 이유이다<sup>[3]</sup>.

## Ⅲ. 인체 두부와 이동통신 전화기의 모델링

### 3-1 인체두부 모델

SAR 계산을 위한 FDTD 인체두부 모델은 한두가지의 물질로 구분된 간단한 모델에서 해부학적 이미지로부터 얻은 정밀한 모델에 이르기까지 다양하다. FCC에서 권고하고 있는 인체 조직의 모델은 grid의 한 변의 길이가 관심 주파수의 최소 파장에 대해 1/4 또는 그 이하인 것을 요하고 있다. 그러나 FDTD의 안정조건이 1/10에서 1/20 사이의 grid 간격을 요구하는 점을 감안하면 더 적은 값을 필요로 한다<sup>[3],[8]</sup>.

논문에서는 비균질인 각 부위마다 다른 밀도와 다른 전도율 등의 전기적 특성을 갖는 인체의 이산화 된 모델로서 NLM(National Library Medicine)의 후원하에 Visible Human Project에서 제시한

<표 1> 인체두부 모델의 각 조직에 대한 밀도와 전기적 특성.

<Table 1> Electrical characteristics and density of human head organization.

특 성 인체 조직	밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma$ (도전율)	$\epsilon_r$ (유전율)
지방조직, 뼈	1200	0.07	5.1
근육	1050	1.0	52.6
신경조직, 뇌조직	1050	0.75	44.0
눈	1000	1.90	70.0
혈액	1000	1.18	62.0
연골	1000	0.07	5.1
피부	1000	1.0	52.6



[그림 2] 인체두부모델

[Fig. 2] Human head model.

모델을 사용하였다. 어깨가 포함된 두부에 대한 이 모델은 성인 남성을 기준으로 하였고 MRI와 CT 그리고 해부학적 방법을 통해 얻어진 영상을 grey scale로 처리하여 다단계로 분류한 것이다. 각 셀은 공간이산간격 1.5 mm의 균일한 크기로 이산화 되었고 <표 1>과 같이 7가지의 인체조직으로 분류되었다.

안정된 주파수 응답을 얻기 위해서는 인체조직 중에 상대 유전율이 가장 높은 부위인 눈에서 전파의 진행속도를 고려할 필요가 있다. 그와 더불어 FDTD 안정조건을 고려하여 셀의 크기를 최단파장의 1/10 이내로 설정하여야 한다. 안정된 응답을 얻기 위해 설정해야 할 공간 이산간격은 다음 식 (7)에 따른다.

$$\frac{\lambda_{\min}}{20} \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\max}}} \leq \Delta \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\max}}} \quad (7)$$

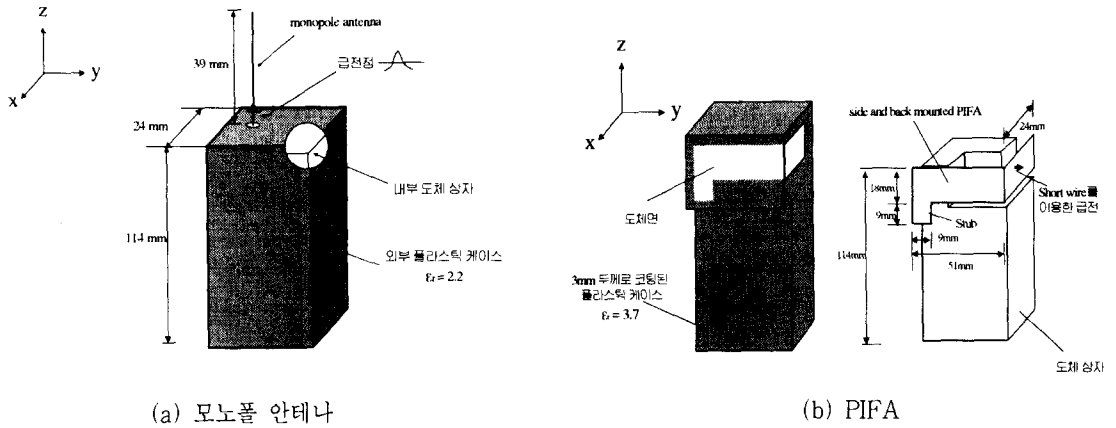
식 (7)의  $\lambda_{\min}$  은 유전체가 포함되지 않은 구조에서 최소 파장을 의미하며  $\Delta$  는 포함된 유전체의 최대 상대유전율이  $\epsilon_{\max}$  인 경우 공간 이산간격을 의미한다. PCS용으로 사용되는 주파수를 고려하여 2 GHz의 최대 사용 주파수를 갖는 구조에 대해 시뮬레이션을 행할 경우, 눈을 구성하는 매질

의 상대 유전율  $\epsilon_{\max}$  가 70인 매질에 대하여 안정된 응답을 얻기 위해 공간 이산간격은 약 1.8 mm 이내로 설정해야 한다<sup>[9],[10]</sup>.

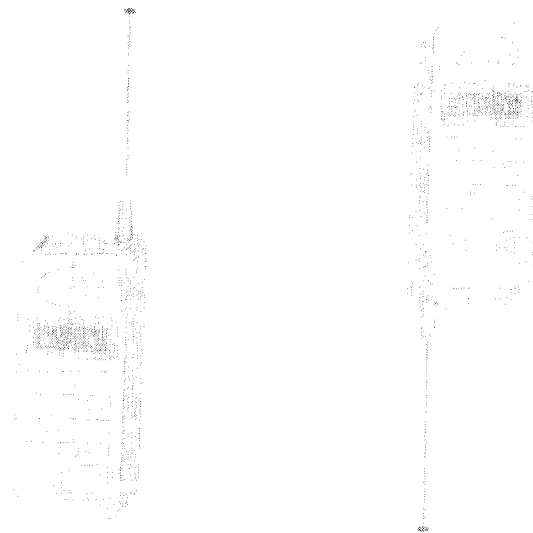
전체 해석영역의 크기에 대한 FDTD 해석은 매우 많은 시간이 소요되므로 이 문제를 해결하기 위해 우선 안테나 해석에 대해 주파수 영역의 계산을 하여 여기서 주어진 공진주파수를 갖는 정현파를 인체조직이 포함된 해석 공간에 적용시키는 2단계의 과정을 거쳐 시뮬레이션을 하였다<sup>[11]</sup>.

### 3-2 이동통신 전화기 모델

[그림 3]에 이동통신 단말기에 탑재된 안테나의 종류에 따른 SAR의 분석을 위해 제시된 두 가지 종류의 안테나를 나타내었다. [그림 3]의 (a)에서 나타낸 구조는 도체상자와 그에 탑재된 모노폴 안테나로 구성된다. 도체상자는 플라스틱 케이스로 코팅된 구조를 가정하였고 안테나의 접지역할을 한다. 이에 탑재된 모노폴 안테나는 가는 도선(thin wire)으로 기저부에서 급전이 이루어지는 전형적인 모양을 띠고 있다. [그림 3]의 (b)에 나타낸 구조는 도체상자와 전면에 탑재된 PIFA로 구성되어 있다. 평면형 안테나인 PIFA는 측면에서 급전이 이루어지며 안테나의 위치는 이동통신 전화기가 사용



[그림 3] 이동통신 전화기의 구조  
 [Fig. 3] Structures of handheld telephone.



(a) ORP(Original Retractable Phone)      (b) ISP(Inversely Shaped Phone)

[그림 4] 모노폴 안테나가 장착된 이동통신 전화기의 구조  
 [Fig. 4] Structures of handheld telephone mounting monopole antenna.

될 때 바깥쪽을 향하게 설계되었다<sup>[8],[12],[13]</sup>.

안테나의 종류에 따른 분석에 더불어 모노폴 안테나의 위치에 따른 SAR의 분석을 위해 제시된

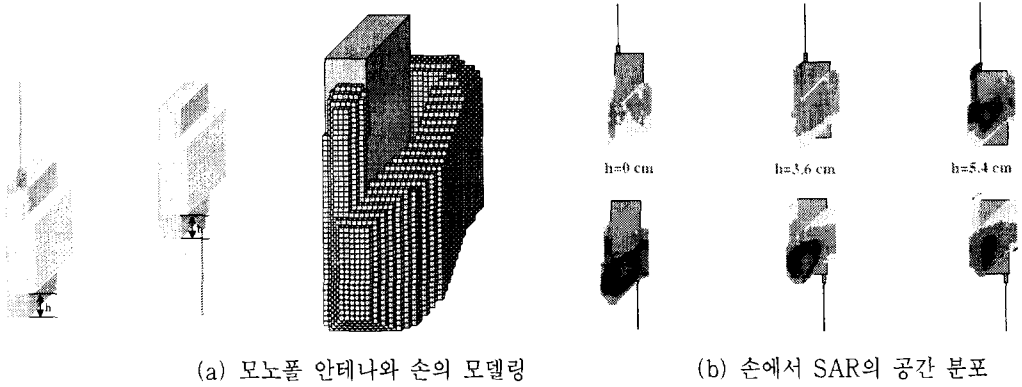
두 구조를 [그림 4]에 나타내었다. 두 이동통신 단말기의 차이는 모노폴 안테나의 장착 위치에 따른 것으로 ORP는 전형적인 모양을 띠고 ISP는 모노

폴 안테나가 도체상자의 아래에 탑재된 차이를 나타낸다.

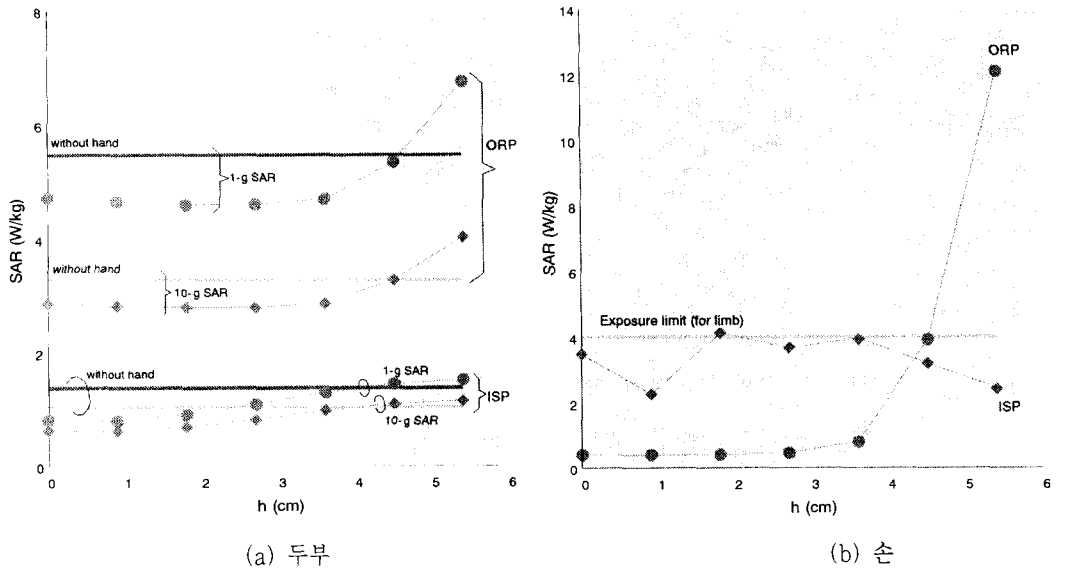
#### IV. SAR의 분석

#### 4-1 ORP와 ISP에 의한 SAR 분석

[그림 5]에 손의 FDTD 모델과 이동통신 전화기에 의해 근역장에서 유기되는 전계의 분포를 나타내었다. FDTD법을 이용하여 인체 두부에 유기



[그림 5] 손의 모델과 ORP와 ISP에 의한 SAR의 공간 분포  
[Fig. 5] Hand model and SAR distribution by ORP and ISP.



[그림 6] 두부와 손에서 SAR의 공간분포

[Fig. 6] Spatial peak SAR on head and hand.

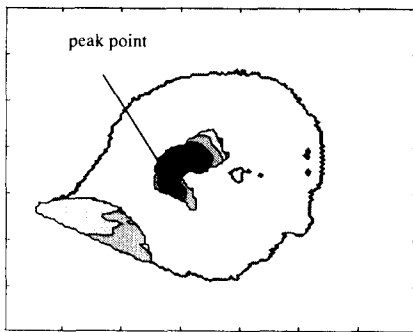
되는 SAR의 분석에서 손의 모델이 추가되면 손의 모델에 의한 공진 주파수의 이동현상(detuning effect)이 고려되고 손에 의한 전력의 흡수량이 두 부쪽에 유기되는 SAR의 침투값에 미치는 변화에 대해서도 좀 더 세밀한 결과를 얻을 수 있다. 실제로 SAR의 침투값은 손 모델의 존재 여부에 따라 차이를 나타내고 있다. 그림에서 h는 이동통신 단말기 몸체의 기저에서부터 손까지의 거리를 나타낸다.

[그림 6]은 인체 두부와 손에서 SAR의 공간적

분포를 나타낸다. ORP에서 머리와 손에 유기되는 SAR의 h에 따른 크기 변화가 ISP에 의한 것보다 더 크게 나타난다. 두부와 손에 유기되는 SAR 값이 h가 4cm를 넘어서면 SAR의 공간 침투값이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

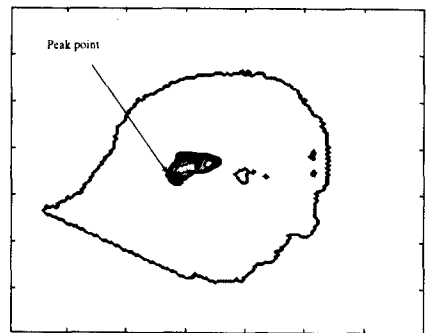
#### 4-2 모노폴 안테나와 PIFA에 의한 SAR의 분석

[그림 7]에 모노폴 안테나와 PIFA에 의해 인체



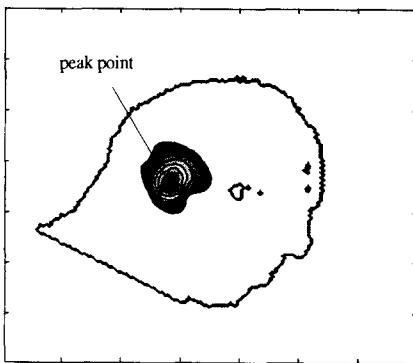
Peak SAR : 1.3979 [W/kg]

(a) 1g 평균 SAR분포(monopole)



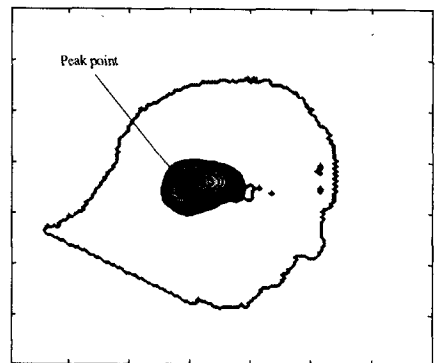
Peak SAR : 1.1434 [W/kg]

(b) 1g 평균 SAR 분포(PIFA)



Peak SAR : 0.7112 [W/kg]

(c) 10g 평균 SAR분포(monopole)

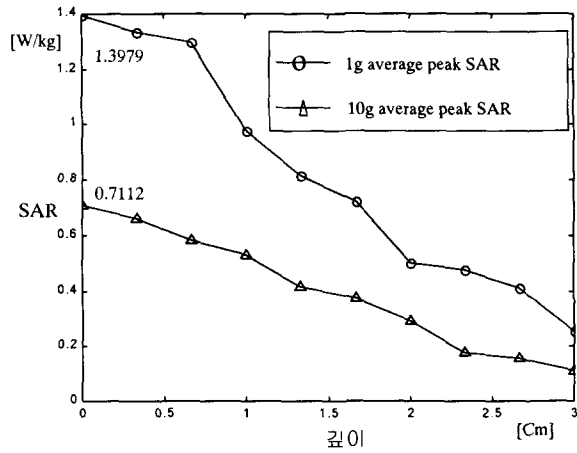
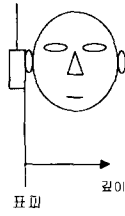


Peak Sar : 0.4866 [W/kg]

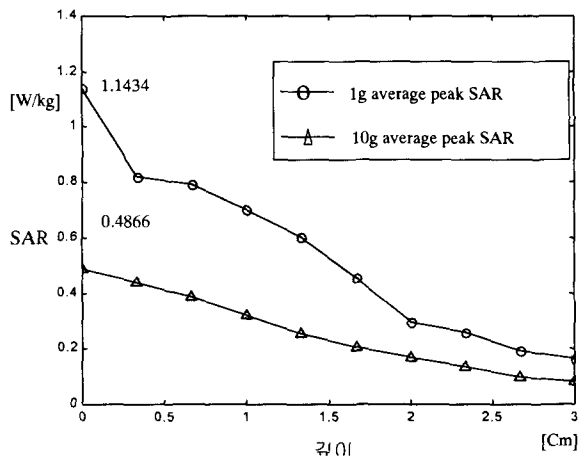
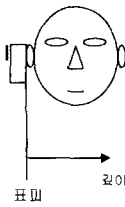
(d) 10g 평균 SAR 분포(PIFA)

[그림 7] 모노폴 안테나와 PIFA에 의한 인체 두부 근처의 SAR 분포

[Fig. 7] Sar distribution near the human head caused by monopole antenna and PIFA.



(a) 모노폴 안테나



(b) PIFA

[그림 8] 모노폴 안테나와 PIFA에 의한 인체 두부의 깊이에 따른 peak SAR의 변화

[Fig. 8] Variation of Peak SAR vs. depth of human head caused by monopole antenna and PIFA.

두부에 유기되는 SAR의 침투값을 나타내었다. 검출된 1g 평균 침투 SAR은 모노폴 안테나가 적용된 구조에서 1.3979 W/kg, PIFA가 적용된 구조에서 1.1434 W/kg으로 나타났으며 10g 평균 침투 SAR은 각각의 구조에 대해 0.7112 W/kg과 0.4866 W/kg으로 1g 평균 침투 SAR에 비해 50% 내외

의 값으로 나타났다. 최고점의 공간적 위치는 모두 안테나와 가까운 방향으로 귀 부위의 표피에서 발견되었다.

[그림 8]에 나타난 인체 두부의 내부로 들어가면서 검출된 SAR의 분포를 살펴보면 1g 평균의 경우 내부 지점 0.5cm 부근에서 급격한 감소를 보



였으며 2cm 내부에서는 그 값이 0.5 W/kg 이하까지 감소하였다. 이에 반해 10g 평균 SAR의 값에 따른 분포는 1g 평균 SAR에 비해 낮은 값의 분포를 보였으나 완만하게 감소하는 것으로 나타났다.

## V. 결 론

본 논문은 이동통신단말기의 안테나 배치가 반대인 전화기 형상에 대한 두부 내 전자파 흡수율을 기존의 단말기 형상의 것과 비교하고 기존의 모노폴 안테나와 다른 구조를 갖는 안테나 구조를 적용하여 인체 두부에 유기되는 1g과 10g 평균 SAR을 계산하여 분석하였다.

안테나 위치를 바꾸어 분석된 데이터는 안테나의 이 같은 배치가 인체 두부 내에 국부 SAR을 상당히 감소시킴을 보였고 1.8GHz 부근의 주파수 대역에서 공진이 이루어지게 설계한 모노폴 안테나와 PIFA를 비교 분석한 결과, 1g 및 10g 평균의 첨두 SAR이 기존의 모노폴이 탑재된 출력 320mW인 PCS 이동통신 전화기에 의해 각각 약 1.4 W/kg, 0.7 W/kg이 검출되었고 PIFA가 탑재된 PCS 이동통신 전화기에서는 1.1434 W/kg, 0.4866 W/kg으로 나타났다.

결과적으로 이동통신 전화기에 의해 유기되는 SAR 저감을 위해 시행한 본 연구에서 안테나의 위치가 바닥에 위치한 구조와 PIFA가 탑재된 이동통신 전화기에 의해 유기되는 SAR이 기존의 이동통신 전화기에 의해 유기되는 SAR 보다 더 적게 나타남을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

[1] IEEE C95.1-1991, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to

Ratio Frequency Electromagnetic Field, 3 kHz to 300 GHz(Revision of ANSI C95.1-1992), 1992.

- [2] CENELEC, Considerations for Human Exposure to EMFs from Mobile Telecommunication Equipment(MTE) in the Frequency Range 30 MHz~6 GHz, European Committee for Electrotechnical Standardization SECRETARIAT SC 211/B WAMTE, Feb., 1997.
- [3] IEEE SCC-34, Product Performance Standards Relative to the Safe Use of Electromagnetic Energy, June, 6, 1999.
- [4] N. Kuster, R. Kastle, and T. Schmid, "Dosimetry evaluation of handheld mobile communications equipment with known precision," *IEICE Trans. on Communications*, vol. E80-B, no. 5, pp. 645-652, May, 1997.
- [5] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, 1993.
- [6] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problem including Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, no. 3, pp. 302-307, May, 1966.
- [7] A. Taflov, *Computational Electrodynamics*, Artech House, Boston · London, 1995.
- [8] M. A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "Performance analysis of antennas for hand-held transceiver using FDTD," *IEEE Trans. on Ant. and Propag.*, vol. 42, no. 8, pp. 1106-1113, Aug., 1994.
- [9] Human Head and Shoulders Mesh with 3mm cells, REMCOM inc.
- [10] 이애경, "평면파에 노출된 인체 두부의 전력

- 흡수 해석”, 한국전자과학회논문지, vol. 8, no. 6, pp. 665-680, 1997년 12월.
- [11] O. P. Gandhi, “Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz”, *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1884-1897, Oct., 1996.
- [12] M. A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, “EM

interaction of handset antennas and a human in personal communications,” *Proceeding of the IEEE*, vol. 83, no. 1, pp. 7-17, Jan., 1995.

- [13] 박주덕, “휴대용 이동통신 전화기에 탑재된 모노폴 안테나와 PIFA 안테나의 특성 해석”, 한국전자과학회논문지, vol. 10, no. 1, pp. 31-40, 1999년 2월.

≡필자소개≡

김 남

1981년: 연세대학교 전자공학과(공학사)  
 1983년: 연세대학교 전자공학과(공학석사)  
 1988년: 연세대학교 전자공학과(공학박사)  
 1989년~현재: 충북대학교 전기전자공학부 교수  
 1996년~현재: 한국전자과학회 전자장과 생체관계연구회  
 위원  
 1996년~현재: 한국전자과학회 편집위원

이 애 경

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



[주 관심분야] EMC 현상의 이론적 해석, 전자파 인체영향 등