

SAR 저감을 위한 휴대폰 설계

Hand-Held Mobile Phone Design for SAR Reduction

홍수원* · 오학태* · 박천석**

Soo-Won Hong* · Hak-Tae Oh* · Cheon-Seok Park**

요 약

휴대폰을 개발할 때 설계 단계에서부터 SAR 적합성 시험을 고려할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 이 방법이 가능한 이유는 phantom과 휴대폰을 실제와 거의 동일하게 모델링 한 1 mm의 고해상도 모델을 사용하여 신뢰성이 검증된 FDTD로 계산하기 때문이다. 제안한 제조 공정을 이용하여 SAR 적합성 시험에서 문제가 된 휴대폰의 SAR을 저감시키는 과정을 소개한다. 본 논문에서는 사용시 인체두부로부터 휴대폰 또는 안테나가 멀어지는 형태가 되도록 하므로써 SAR을 저감시켰다. 그러므로, 새로운 모델의 휴대폰을 개발할 때 시제품을 만들어 SAR 적합성 시험을 위한 시행착오를 반복하면서 원하는 특성의 휴대폰을 개발하는 것이 아니라 CAD 디자인, 복사 패턴, SAR 모두를 하나의 공정으로 묶어 컴퓨터 시뮬레이션으로 일괄처리함으로써 개발 효율과 비용 절감을 동시에 이룩하였다.

Abstract

We propose the new method that is able to consider the SAR compliance test from the very beginning step of developing the mobile phone. The reason this new method is plausible is that we adopt the certified FDTD for the reliability of calculation, utilizing 1 mm high resolution model that is to model the phantom and the mobile phone almost identically to the reality. In this paper we introduce the process that will apply the proposed method in order to reduce the SAR of the mobile phone that has been problematic in satisfying the SAR compliance test. It results in dropping in the SAR that we keep the mobile phone or its antenna while we use it. Therefore here we make a claim as follows. When we develop the new mobile phone, we should use the computer simulation combining the CAD design and radiation pattern rather than make a prototype and then use the trial and error method. Moreover the former way leads us to boost up the developing efficiency and reduce the cost.

I. 서 론

SAR(Specific absorption rate)은 RF와 MW 영역의 전자파에 의한 위험을 나타내는 척도로 널리 사용되고 있다. ANSI/IEEE C95.1-1992 RF 안전 지침서에 따르면 사용자가 근거리에서 사용하는 RF 장비에 대하여 안전을 유지하려면, 몸 전체에 대해서 평균한 SAR 값이 0.08 W/kg 이하일 것과, 임의의

인체 조직의 SAR 값을 정육면체 모양으로 1 g 평균을 취한 SAR 값이 1.6 W/kg을 초과하지 않을 것, 손, 손목, 발, 발목은 10 g 평균을 취했을 경우에 4 W/kg 이하일 것으로 규제하고 있다.

인체의 SAR 값을 도출하는데 있어서 가장 문제가 되는 것은 직접적인 임상 실험이 불가능하다는 것이다. 실험을 목적으로 전자파를 사람에게 직접 노출시킬 수 없고, 인체 각 부위의 SAR 값도 직접

*정보통신부 전파연구소 전파환경 연구과 (Dept. of Radio Environment Research, RRL)

**성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 (School of Electrical & Computer Eng., Sungkyunkwan Univ.)

· 논문 번호 : 20001011-112

· 수정완료일자 : 2001년 1월 30일

측정하기가 어렵기 때문에, 인체 조직과 같은 전기적 특성을 가지는 매질을 이용한 Phantom 모델을 제작하여 온도나 전기장 분포를 측정하는 방법^{[1]~[3]}과 MRI 데이터를 이용한 해부학적 모델을 이용하여 인체 각 부위의 전자기장을 계산해서 SAR 값을 평가하는 방법^{[4]~[6]}이 널리 사용된다. 하지만, 이러한 방법들은 휴대폰을 설계하는데 있어서는 크게 도움이 되지 못한다. 왜냐하면, SAR 적합성 시험은 인체두부 모양의 Phantom에 시험대상 휴대폰의 사용주파수에 해당하는 뇌조직의 전기적 특성을 갖는 액체를 채워 넣어 실험하는 것이 일반적인 방법이기 때문이다.

현재 새로운 휴대폰을 개발할 때 설계부터 SAR을 고려하지 못하고 단지 경험에 의존하거나, 거의 완성단계에서 SAR 적합성 시험을 통과하기 위해 별개의 작업이 이루어지므로 최적화가 끝난 다른 특성, 예를 들어 통화품질이나 기구 외형이 악화되는 경우가 많아 시간과 금전적 손실이 크다. 따라서 빠른 모델링과 정확한 계산을 위하여 상용 Computer Aided Design (CAD)인 PATRAN을 이용하여 3차원으로 설계한 휴대폰을 1 mm 해상도의 FDTD 모델링으로 직접 변환시키는 방법을 제안하였으며, 이 방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 3차원 과도 원거리 영역 변환법^[7]으로 계산한 복사패턴과 무반사실에서 이득비교법으로 측정된 결과를 비교하였을 때 그 차이는 0.5 dB 이내였다^[8]. 그리고, CAD 파일을 Finite Difference Time Domain method (FDTD) 입력 데이터로 변환한 휴대폰과 SAR 적합성 시험에서 사용되는 Phantom을 모델링한 것을 이용하여 측정상황을 컴퓨터 시뮬레이션으로 재연이 가능함을 확인하였다^[9].

본 논문에서는 위의 선행연구결과^{[8],[9]}로부터 설계시 통화품질을 고려한 복사패턴과 SAR을 동시에 고려할 수 있는 새로운 설계 방안을 제안하였다. 제안된 방법을 사용하여 SAR 적합성 시험을 통과하지 못한 휴대폰의 정량적인 분석뿐만 아니라 SAR을 저감시킬 수 있는 구조를 설계할 수 있었다.

II. 새로운 휴대폰 설계 방법

참고문헌 [8]과 [9]의 결과로부터 휴대폰을 개발

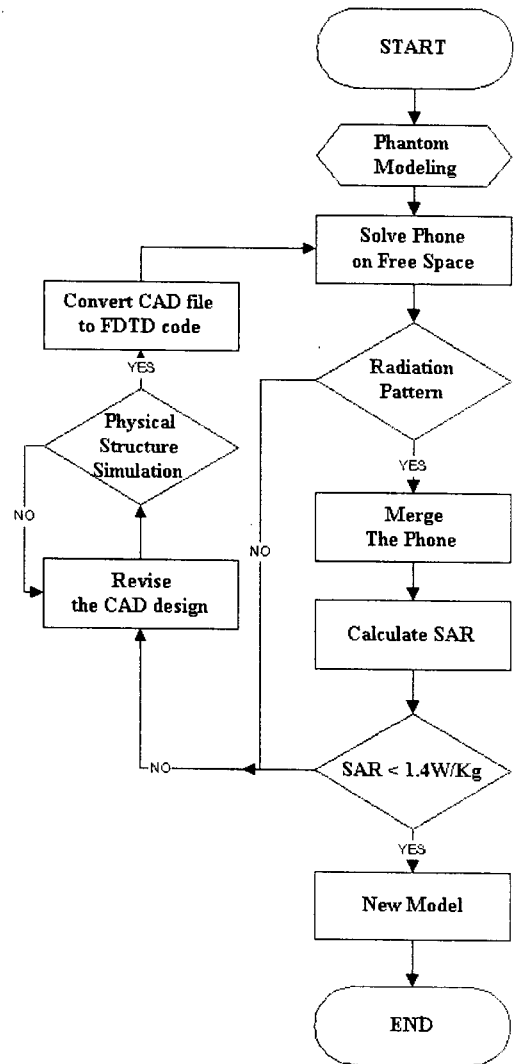


그림 1. 휴대폰 디자인을 위한 새로운 방법
Fig. 1. New method for mobile phone design.

시 설계 단계에서부터 SAR 적합성을 고려할 수 있는 새로운 방법을 그림 1과 같이 제안하였다.

그림 1에서 제시한 방법은 먼저, SAR 적합성 시험에서 이용될 휴대폰을 자유 공간의 중심에 두고 모든 공간에서 E 필드와 H 필드를 계산하고, 이로부터 복사 패턴들을 계산하여 원하는 이득 특성이 나오는지 확인한다. 또한 모델링된 phantom에 FDTD 입력 데이터로 변환시킨 휴대폰을 시험 상황과 동일하게 하고 phantom의 모든 영역에서 SAR을 계산하여 1 g 평균한 침투치가 1.4 W/kg 이하로

설정하여 휴대폰을 설계한다. 여기서 SAR 기준이 1.6 W/kg인데 1.4 W/kg을 제시하는 이유는 제품의 제작, 측정 및 계산시 발생할 수 있는 모든 오차를 고려한 값이다. 만약 복사 패턴이나 SAR의 계산 결과가 원하는 값을 만족 못하면, CAD 작업을 다시 수행한다. 이 때 변하게 되는 물리적 특성(stress와 strain 등에 대한 기구 내구성)이 원하는 값이 나올 때까지 반복 작업을 한다. 이렇게 새로 만들어진 휴대폰 CAD 파일을 FDTD 입력데이터로 변환하여 다시 복사 패턴과 SAR을 계산하면서 처음과 동일한 과정을 반복한다. 이 방법에 대한 타당성을 phantom과 휴대폰을 실제와 거의 유사하게 모델링한 1 mm의 고해상도 모델을 사용하여 FDTD로 검토하였다. 즉 SAR 적합성 시험을 통과하지 못한 휴대폰

을 제안된 방법을 사용하여 개선한 결과를 그림 2에 나타내었으며, 개선 전후의 외관을 비교한 것으로 수화부 일부를 2 cell 정도 돌출시키는 구조로 설계할 경우 SAR을 감소하였다. 이것은 안테나부와 인체와의 거리가 멀어지면 두부로 흡수되는 전력은 감소한다는 일반적인 이론을 사용하여 검증한 결과로 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 입증하였다. 그림 2에서 설계된 휴대폰의 복사패턴과 SAR은 다음 장에서 논의하고자 한다.

Ⅲ. 복사패턴 분석

FDTD 계산을 위한 흡수경계조건은 8층의 PML (perfectly matched layer)^[10]을 적용하였으며, 본 논문에서 사용된 FDTD 셀의 크기는 1.0 × 1.0 × 1.0 mm이고, 시간 스텝은 $\Delta t = 1.93$ ps가 되게 하여 Courant 안정 조건을 만족시켰다.

본 논문에서 사용된 휴대폰의 주파수영역은 약 Tx : 824 MHz~849 MHz, Rx : 869 MHz~894 MHz 이고, 최고 출력(최악의 SAR을 고려함)은 아날로그 방식에 해당하는 600 mW이다. 통신 방식이 디지털인 경우에는 최고 출력이 이보다 작은 200~300 mW이기 때문에, 본 논문에서는 언급하지 않는다. 따라서 본 논문에서는 복사 전력이 600 mW이고, Tx 주파수 대역의 중심 주파수 835 MHz의 조건으로 계산 및 측정을 하였다.

복사 패턴으로부터 이득을 분석함으로써 실제 제작시 휴대폰의 통화품질을 예측할 수 있다. 따라서, 복사 패턴을 $\psi=0$ (X-Z 평면)와 $\theta=0$ (X-Y 평면)에 대하여 자유공간에서 측정하고 계산하여 그 결과를 상호 비교하였다. 측정은 감쇠특성이 FCC-OET-55를 만족하고, 차폐효율이 120 dB이며, 폭 10.4 m, 길이 8.2 m, 높이가 8.1 m인 무반사실에 실시하였다. 일반인의 실제 통화상황을 고려하여 반경이 0.9 m이고 회전가능한 디스크 중심의 바닥으로부터 1.5 m의 높이에서 휴대폰을 테스트 모드로 동작시켜 놓은 상태에서 10°씩 회전시키면서 측정하였다. 정량적으로 이득을 얻기 위해서 이득비교법(Gain Comparison method)으로 측정하였으며, 이때 기준으로 사용한 안테나는 ROHDE & SCHWARZ사의 대수주기 안테나 HUF-Z3이다. 계산에서는 원거리장을 한

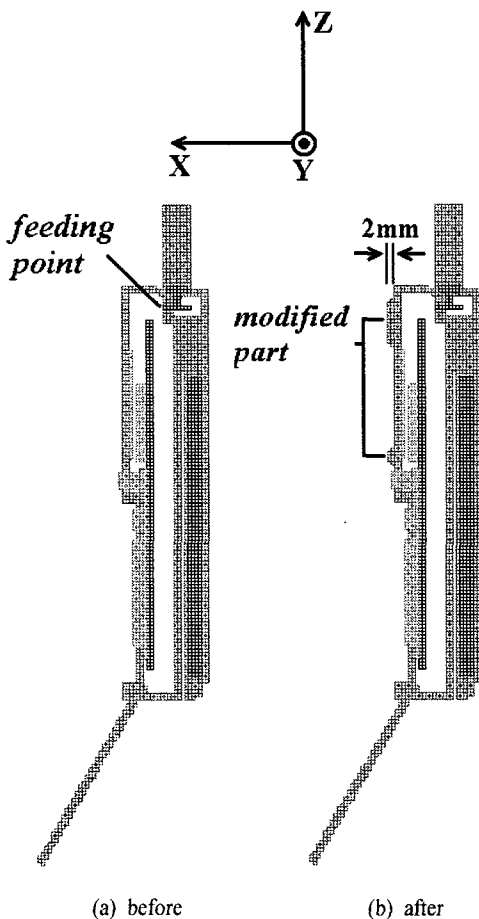


그림 2. SAR 저감을 위한 휴대폰 설계
Fig. 2. Mobile phone design for SAR reduction.

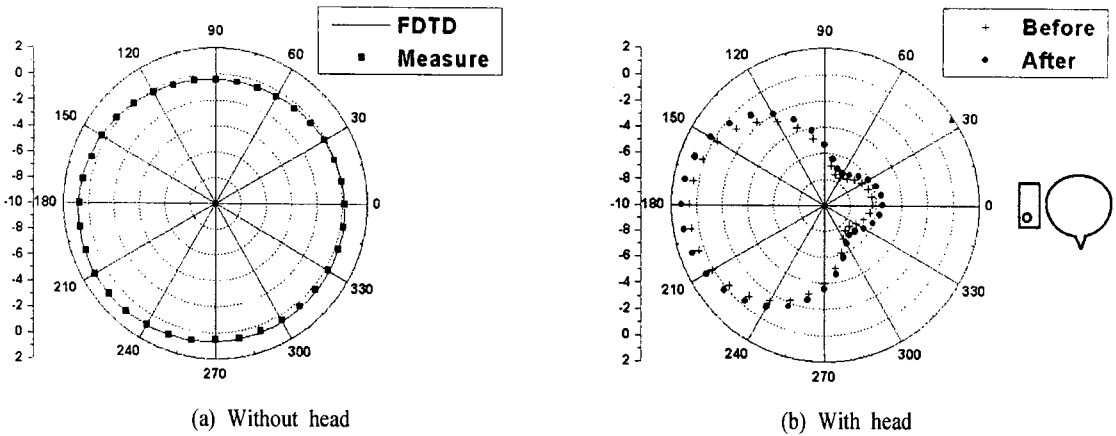


그림 3. 계산과 측정에 의한 835 MHz 휴대폰 복사 패턴

Fig. 3. Calculated and measured radiation pattern at 835 MHz.

표 1. 복사전력 효율

Table 1. Radiation power efficiency.

	η (%)
Phone (without head)	100
Before (with head) , Fig. 2 (a)	47.94
After (with head) , Fig. 2 (b)	52.98

번의 FDTD 계산으로 모든 방향의 복사패턴을 쉽게 얻을 수 있는 3차원 과도 원거리 영역 변환법이 사용되었다.

자유공간에서의 복사 패턴은 측정과 계산이 모두 가능한 반면, 실제 휴대폰 사용상황이나 SAR 측정 상황을 고려하기 위한 휴대폰과 팬텀을 병합시켰을 때의 복사 패턴 측정은 불가능하다. 그 이유는 본 논문에서 SAR 측정시 사용된 phantom의 구조적인 문제로써 실제처럼 인체 두부 전체를 하나로 완전히 표현한 것이 아니라 좌, 우측면을 별개로 표현한 것이기 때문이다. 그러나, 자유공간에서의 계산과 측정 결과 차이가 0.5 dB 이내인 것^[8]을 확인하였으므로, 병합시킨 상황에 대한 복사 패턴을 계산에 의해 수행하였다.

그림 3은 XY 평면에 대한 복사 패턴으로, 그림 3의 (a)에서와 같이 자유 공간에서는 거의 등방성이던 복사 패턴이 그림 3의 (b)에서와 같이 휴대폰과 팬텀이 병합이 된 조건에서는 팬텀방향의 패턴이

많이 왜곡됨을 확인할 수 있었다. 특히, 그림 3(b)에서와 같이 제안한 설계 방법을 이용하기 전과 후의 방사패턴을 비교한 결과, 수정된 휴대폰의 경우 최대이득이 약 1 dB 향상됨을 알 수 있었다. 병합 조건은 실제 휴대폰을 사용하는 상황에 해당된다. 이 경우에 휴대폰의 복사패턴으로부터 통화품질을 예측하기 위하여 비례값으로 복사전력 효율은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}}$$

$$P_{in} = P_{abs} + P_{rad}$$

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \int_v (\sigma |E|^2 + \sigma^* |H|^2)$$

여기서 P_{in} 은 휴대폰의 안테나 하단부에서 인가해주는 전압원에서 전달되는 입력전력이며, P_{rad} 은 외곽으로 복사되는 전력이고, P_{abs} 손실이 있는 유전체가 있을 때 유전체 내부에서 흡수되는 전력이다. 만약 계산 공간 내부에 손실이 있는 매질이 없는 경우, 예를 들면 완전도체로만 되어 있는 안테나의 경우에는 손실이 없으므로 η 가 100 %일 것이고, 손실이 있는 유전체가 안테나 부근에 있을 경우(본 논문에서 휴대폰과 팬텀($\epsilon_r=42.5$, $\sigma=0.85$)이 병합된 조건)에는 그보다 작은 값을 보일 것이다. 그 계산 결과가 표 1로써, 자유공간에서 휴대폰만 두고 계산했을 때는 η 가 100 %였고, 병합 조건에서는 인가된 전력 중 거의 절반 정도가 Phantom에서 소모됨

을 확인할 수 있었다. 그리고, 제안된 방법의 사용 전후를 비교하면 사용 후가 약 5 % 정도 복사 효율이 좋아지므로 그 만큼 통화품질이 향상될 것으로 예상할 수 있다.

IV. SAR 분석

사용자가 휴대폰을 어떤 자세로 사용하느냐에 따라 두부와 휴대폰 안테나와의 거리가 달라지므로 SAR값에 영향을 준다. 그러므로 본 논문에서는 동일한 휴대폰을 오른손으로 사용할 때와 왼손으로 사용할 때로 나누고, 휴대폰 사용 자세를 두가지로 하여 모두 네가지 경우에 대하여 계산과 측정값을 비교하였다. 첫째, 휴대폰을 phantom에 수직으로 위치시킨 경우(vertical condition), 둘째, 휴대폰이 귀와 입에 연결될 수 있도록 휴대폰을 35° 기울인 다음 10° 정도 안쪽으로 비틀어 입쪽으로 가까이 갖다 댄 경우(tilted condition)^[11]로 나누어 제안한 설계 방법의 사용 전후에 대하여 측정과 계산을 수행하였다.

Phantom은 Schmid & Partner사(Swiss)의 DASY3에서 Generic Twin Phantom을 사용하였으며 동일한 휴대폰 4대를 제작하여 계산에서 사용된 동일한 조건으로 SAR 측정을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 SAR 측정시스템은 0.02 mm의 고정밀 6축 로봇과, 광센서 및 액체 내에서의 전기장을 측정할 수 있는 등방성 프로브 그리고 fiberglass 재질의 Generic Twin Phantom으로 구성되어 있다. 측정 프로브의 주파수 범위는 100 MHz에서 3 GHz까지이며, dynamic range는 2 V/m에서 900 V/m이고 0.2 dB 이하의 선형 오차를 갖는다. 여기에서 SAR은 모의인체 내의 전기장도를 측정하고 액체의 전기전도도와 질량밀도로부터 계산된다.

SAR 적합성 시험에서 문제가 된 그림 2(a)의 휴대폰을 제안한 방법으로 앞서 언급한 바와 같이 사용시 인체 두부로부터 휴대폰 또는 안테나가 멀어지는 형태가 되도록 함으로써 SAR을 저감시키는 방법을 사용하였다. 이것은 Phantom에서 휴대폰의 거리가 멀어질수록 SAR이 작아지는 것이 측정과 계산에서 확인된 것이며, 가장 단순하면서도 확실한 방법이다. 하지만, 이때 중요한 점은 아무리 SAR

기준을 만족시키는 휴대폰이라 하더라도, 만약 디자인이 소비자에게 선택받지 못하고 외면을 당하게 된다면 안되므로, 최대한 미려한 외관이 유지될 수 있도록 노력해야 한다. 그리고 SAR 적합성 시험에서 문제가 되었던 휴대폰의 SAR이 약 1.85~1.88 W/kg 정도로 SAR 기준(1.6 W/kg)을 크게 넘지 않기 때문에 다른 부분은 그대로 두고 [9]의 결과를 근거로 그림 1의 방법을 반복수행하여 휴대폰 전면부의 LCD나 스피커 주변을 휴대폰 케이스와 동일한 재질(poly carbonate)로 2 mm정도 돌출시켜 SAR이 1.4 W/kg 이하가 되도록 하였다.

마지막으로 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 제안한 방법의 사용 전후 Phantom 내부 모든 영역에서 1 g 평균한 SAR 분포를 나타낸 것이 그림 4이다. 그림 4의 상단의 두 개 그림은 개선 전후 SAR 1 g 평균된 침두치가 위치한 XZ평면에서의 SAR 분포를 나타낸다. 가로축과 세로축은 1mm 사이즈의 셀을 270 × 291 × 250로 계산한 위치 좌표이며, 하단에 나타낸 그래프는 침두치로부터 거리가 멀어질수록 Phantom 내부에서 어떤 식으로 SAR이 감쇠를 하는지를 나타낸다.

먼저 상단의 그림을 살펴보면 침두치 위치는 제안된 방법의 사용 전후의 차이가 거의 없지만, 동일한 SAR을 값을 가지는 위치를 이은 선이 사용 전에 훨씬 조밀하게 분포함을 알 수 있다. 하단의 그래프에서 가로축은 침두치로부터 거리(mm)이고, 세로축은 SAR 값이다. 이 경우 역시 침두치가 위치한 곳으로부터 약 30 mm 정도 떨어진 내부만 보더라도 개선 전후의 값의 차이가 거의 없다. 그리고 좀 더 내부 측, 침두치가 위치한 곳으로부터 100 mm 정도 떨어져도 SAR값 자체를 정의하는 것조차 어려워질 만큼, 팬텀 표면 주변에서 거의 대부분의 전력이 소모됨을 알 수 있다.

제안된 방법을 바탕으로 표 2에 보인 바와 같이 문제가 되었던 휴대폰을 개선하여 원하는 특성을 갖는 휴대폰을 설계할 수 있었다. 이때 제안된 방법의 사용 전후에 대하여 동일한 휴대폰을 각각 4개씩 만들어 다양한 조건에서 측정함으로써 기구성형이나 조립 등 제품 제작과정 중 발생할 수 있는 오차도 고려하였다. 표 2에 나타낸 다양한 조건은 [9]에서 언급하였듯이 휴대폰의 사용 자세에 따라 두부

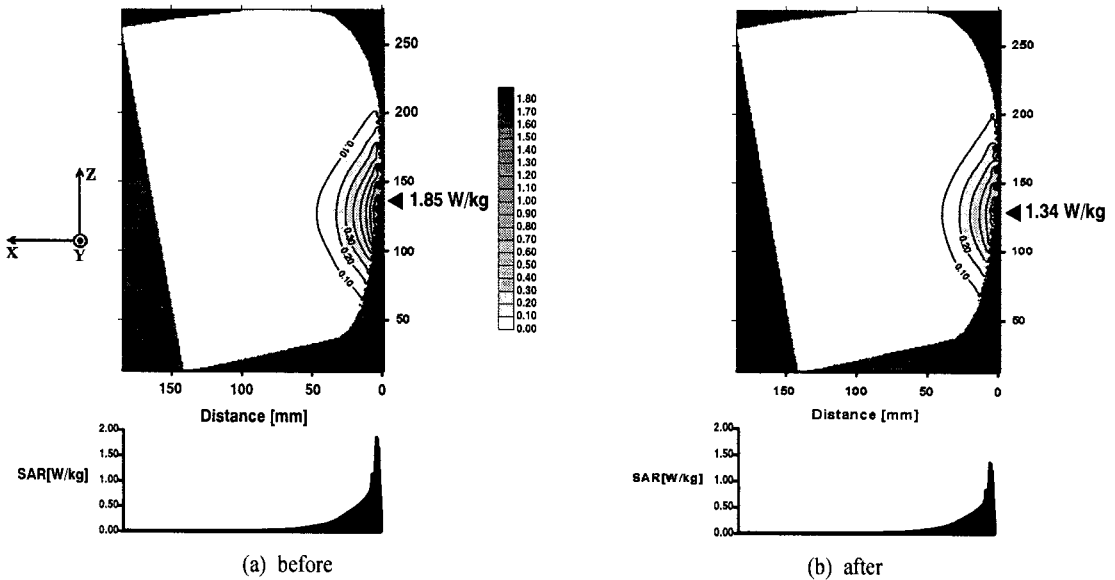


그림 4. SAR 분포
Fig. 4. SAR distribution.

표 2. 수치해석적 방법과 측정결과의 SAR 비교

Table 2. Comparison of SAR of experimental and numerical methods.

(unit : W/kg)

	Before Fig. 2(a)						After Fig. 2(b)					
	Measurement					FDTD	Measurement					FDTD
	Each				Avg. ±SD.		Each				Avg. ±SD.	
Right V	1.84	1.79	1.85	1.93	1.85 ± 0.06	1.71	1.45	1.39	1.56	1.48	1.47 ± 0.07	1.29
Left V	2.17	2.12	2.18	2.26	2.18 ± 0.06	2.04	1.73	1.81	1.69	1.78	1.75 ± 0.05	1.63
Right T	1.33	1.31	1.43	1.38	1.36 ± 0.05	1.32	1.07	1.02	1.11	1.09	1.07 ± 0.04	1.01
Left T [†]	1.84	1.79	1.93	1.95	1.88 ± 0.08	1.85	1.35	1.33	1.45	1.30	1.38 ± 0.05	1.34

Right V : vertical condition with right head, Left V : vertical condition with left head,
 Right T : tilted condition with right head, Left T : tilted condition with left head,
 † : SAR compliance test condition

와 휴대폰 안테나와의 거리가 달라지므로 본 논문에서는 2가지 경우의 휴대폰 사용 자세를 고려하였다. 첫째, 휴대폰을 phantom에 수직으로 위치시킨 경우(vertical condition), 둘째, 휴대폰이 귀와 입에 연결될 수 있도록 휴대폰을 35° 기울인 다음 10° 정도 안쪽으로 비틀어 입쪽으로 가까이 갔다 댄 경우(tilted condition)에 대하여 측정과 계산을 수행하였다.

그러므로, 새로운 모델의 휴대폰을 개발할 때 한번에 \$150,000 ~ \$200,000씩 하는 금형 작업으로 시제품을 만들어 놓고 SAR 적합성 시험을 위한 시행착오를 반복하면서 원하는 특성의 휴대폰을 개발하는 것이 아니라 본 논문에서 제안한 방법을 사용하면, CAD 디자인, 복사 패턴, SAR 모두를 하나의 공정으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 일괄처리함으로써 개발 효율과 비용 절감을 동시에 효과를 얻을

수 있을 것이다.

V. 결 론

휴대폰의 정확한 모델링을 위하여 CAD로 설계된 휴대폰을 1 mm 해상도의 FDTD 모델로 변환시켜 방사패턴과 SAR의 계산 결과가 측정값과 잘 일치함을 확인하였다. 이로써 단지 경험에 의존하거나, 제품의 완성단계에서 별개의 작업으로 SAR 기준을 만족시키는 것이 아니라, 설계 단계에서부터 정량적으로 복사패턴과 SAR이 고려된 휴대폰을 개발할 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, 제안된 설계 방법을 이용하면 통화품질과 SAR을 동시에 만족시킬 수 있는 양질의 휴대폰 개발이 가능하며, 새로운 휴대폰 개발시 소요되는 비용과 시간을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다.

이 방법은 외형의 특성상, 안테나와 인체 두부 사이의 거리가 자연스럽게 멀리 떨어지게 되는 폴더형보다는 사용시 안테나가 인체 두부에 밀착되어 SAR이 상대적으로 더 높을 것으로 예상되는 바형이나 플립형의 휴대폰을 설계시 보다 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

물론, 아직 SAR 측정 방법에 대한 정확한 표준이 정해져 있지 않은 상황이지만 제안된 방법으로 휴대폰을 설계하고 제작한다면 앞으로 발표될 어떠한 측정 방법이나 조건에도 대응할 수 있다.

뿐만 아니라, 파장 단축율을 고려하더라도 본 논문에서 제안한 모델링 방법의 메시 사이즈가 1 mm 이므로 더 높은 주파수의 이동통신서비스 즉, PCS와 IMT-2000 뿐만 아니라 미래의 이동통신서비스에 대해서도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] Quirino Balzano, Oscar Garay, and Thomas J. Manning, Jr., "Electromagnetic Energy of Simulated Users of Portable Cellular Telephones", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 390-403, Aug., 1995.
 [2] Niels Kuster, Ralph Kastle, and Thomas Sch-

mid, "Dosimetric Evaluation of handheld Mobile Communications Equipment with Known precision", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E80-B, pp. 645-652, May, 1997.

- [3] Qishan Yu, Magnus Aronsson, Ding Wu, and Om P. Gandhi, "Automated SAR Measurements for Compliance Testing of Cellular Telephones", *Proceeding of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4, pp. 1980-1983, 1998.
 [4] Mark J. Hagmann, Om P. Gandhi, and Carl H. Durney, "Numerical Calculation of Electromagnetic Energy Deposition for a Realistic Model of Man", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-27, no. 9, pp. 804-809, September, 1979.
 [5] Niels Kuster, Quirino Balzano, and James C. Lin, *Mobile Communications Safety*, Chapman & Hall, pp. 17-19, 1997.
 [6] 홍수원 외 2명, "한국인 인체두부모델을 이용한 SAR 계산", 제3회 전자장의 생체영향에 관한 워크숍 발표집, pp. 89-98, 1999. 7.
 [7] Karls S. Kunz, and Raymond J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press Inc., Chapter 7, 1993.
 [8] 홍수원의 4명, "휴대폰의 3차원 CAD 파일을 이용한 FDTD 모델링", 한국전자과학회 논문지, 11(3), pp. 437-444, 2000. 4.
 [9] 홍수원의 2명, "FDTD 계산과 측정에 의한 휴대폰 SAR 비교", 한국전자과학회 논문지, 11(7), pp. 1161-1167 2000. 10.
 [10] J. P. Bérenger, "A perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic waves", *Journal of Computational Physics*, vol. 114, no. 2, pp. 185-200, Oct., 1966.
 [11] *Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields*, FCC OET Bulletin 65 (Edition 97-1).

홍 수 원



1995년 2월: 성균관대학교 물리학과(이학사)
1997년 2월: 성균관대학교 대학원 물리학과(이학석사)
1999년 3월~현재: 성균관대학교 대학원 전자공학과 박사과정
1997년 6월~현재: 정보통신부 전

파연구소 공업연구사

[주 관심분야] 전자파 인체영향, 전자장 수치해석

박 천 석



1988년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학사)
1990년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과(공학석사)
1995년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과(공학박사)
1995년~현재: 성균관대 전기전자

및 컴퓨터 공학부 교수

[주 관심분야] 전자장 수치해석, 마이크로파 능동 및 수동 소자, 안테나

오 학 태



1986년 2월: 부산대학교 물리학과(이학사)
1989년 2월: 부산대학교 물리학과(이학석사)
1993년 2월: 부산대학교 물리학과(이학박사)
1994년 1월~1996년 1월: 일본 오

오사카 대학 물리학과 객원연구원

1995년 6월~1996년 11월: 공업기술원 전자정보과

1996년 11월~현재: 정보통신부 전파연구소 공업연구관

[주 관심분야] 전자파 인체영향, EMI/EMC