

이동통신단말기의 전자파 노출량 평가

최형도 · 이해경 · 조광윤

한국전자통신연구원 무선방송
기술연구소 전파기술연구부

I. 서 론

정보화의 눈부신 발달로 전파의 이용은 그 수요가 높아지고, 통신, 방송 분야뿐만 아니라 의료, 교통 및 주변의 일상 생활에서 폭 넓게 사용되고 있다. 이와 같이 전자, 전기기기의 사용이 급증하면서 이들 기기에서 복사되는 전자파에 의한 건강위해에 관한 관심과 우려가 높아지고 있어, 이와 관련하여 건강 영향에 대한 위험 가능성 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다. WHO에서는 전자기장 노출에 대한 국제적인 지침을 개발하기 위해 정적 및 시간변화 전자기장(0~300 GHz)의 노출에 대한 건강과 환경 영향을 연구과제로 하여 1996년부터 2005년까지 10개년 계획으로 휴대폰과 뇌압과의 위험성 관계 규명을 위한 역학조사, 전자기장 노출 영향에 관한 연구결과, 자료 수집 등을 수행하고 있다^[1]. 휴대폰 관련 생체영향 연구는 16개국 38개 관련기관에서 크게 5개 분야(역학조사, 세포실험, 생체실험, 인체연구, 그리고 노출량측정)로 나누어 1999년 현재 65개 연구과제에 대한 결과가 보고되었으며, 70개의 과제가 진행중에 있고, 자원을 통한 인체영향 연구 등의 계획이 추진되고 있다. 한편, 무선 복사 기기에 의한 기기의 경우, 관련 측정 분야의 기술이 발전하면서, '셀룰라 폰의 노출량 측정'이라는 새로운 연구분야가 만들어질 정도로 최근 활발히 진행되고 있다. 국가 기관 또는 국제 기구 등에서는 점차 이동통신단말기와 같이 인체에 밀착하여 사용하는 기기에 대해서 인체의 전자파 흡수율(SAR, specific absorption rate)을 규정하고 있으며, 미국 FCC에서는 '97년 이후

이를 법적으로 규제하고 있어^[2] 이 분야의 연구를 촉진시키는 계기가 되었다.

여기서 규정하는 SAR은 생체가 전자기장에 노출됨에 따라 생체에 흡수되는 단위질량당의 흡수 전력으로 다음과 같이 표현된다.

$$SAR = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\rho} |E_i|^2$$

여기에서 σ 는 인체편트의 도전율, ρ 는 밀도이며, $|E_i|$ 는 국부 전기장 벡터의 첨두치 크기를 나타낸다. 생체조직에서 SAR은 조직내 전기장 강도의 제곱에 비례하며, 입사 전자기장의 매개변수인 주파수, 강도, 전자기장의 방향 및 발생원과 대상물체의 상대적인 위치, 노출된 인체의 특성 조직의 유전적 성질 그리고 지면의 영향 및 노출환경 등에 의해 결정된다. 평균 SAR과 SAR 분포는 계산 또는 실험으로부터 결정된다.

이와 같은 SAR에 의한 이동통신단말기에 대한 규제는 전자기장에 대한 인체노출 기준 중 국부적 노출원에 대한 것으로 이해를 돕기 위해, 먼저 노출기준의 근거와 레벨을 간단히 언급하고 이 기준에 따른 평가 동향을 살펴보도록 하겠다. 현재까지의 대부분 전자기장에 대한 인체노출 기준들은 모두 단기간 노출에 있어 역학조사, 자원자 연구, 동물 실험 등을 통해 나타나는 생물학적 영향을 근거로 하고 있으며, 약 100 kHz~10 GHz 범위의 주파수 대역에서 확립된 생물학적 영향 및 건강 영향은 1°C 이상의 체온상승에 의한 반응과 밀접한 관련이 있다. 이 레벨의 체온상승은 적당한 환경조건 하에서 약 4 W/kg의 전신 SAR에 해당하는 전

자기장에 약 30분간 노출한 경우에 해당한다. 따라서 직업적 노출에 대한 적절한 보호를 위해서는 0.4 W/kg의 전신평균(whole-body average) SAR이 기본적인계로 선택되었다. 일반대중의 노출에 대해서는 이것의 5배 안전계수를 취하여 0.08 W/kg의 전신평균 SAR를 기본적인계로 하였다. 일반대중의 기본적인계를 낮게 잡은 것은 일반대중의 연령구성, 건강상태 등이 직업인과는 상당히 차이가 나는 사실을 고려하였기 때문이다. 대부분의 인체 보호 기준들은 상기의 전신 기본적인계를 기본으로 하여 국부 SAR에 대한 기준(평균하는 조직 질량, 레벨)을 정하고 있으나 연구결과로부터 얻는 결론, 관점의 차이로 인해 <표 1>에서 보는 바와 같이 인체 부위에 따른 기준에 약간의 차이를 보이고

있다. 국내에서도 1999년 5월 한국전자통신연구원의 위탁연구 결과로 한국전자과학회에서 국제비전리방사보호위원회(ICNIRP)의 지침을 근간으로 하여 국내 전자기장에 대한 인체보호기준을 수립하였으며, 이 기준을 바탕으로 이동통신단말기에 대해 인체노출량 평가방법을 '99년도부터 3년 계획으로 한국전자통신연구원에서 연구가 수행되고 있다.

이동통신단말기에 대한 전자파 노출량 평가 방법은 크게 수치해석 기법을 이용하는 계산적 방법과 인체 팬텀 내에서 전자계 프로브를 이용하는 실험적 방법이 있으며, 이들은 서로 독립적인 평가 방법이며서도 실제 평가방법에 대한 연구단계에서는 이 두 가지가 보완적인 역할을 하면서 재현성

<표 1> SAR 기준

노출 특성		전신 평균 SAR(W/kg)	국부 SAR (W/kg) (영역 A)	평균하는 조직 질량/형상	국부 SAR (W/kg) (영역 B)	평균하는 조직 질량/형상
직업인	ICNIRP ¹	0.4	10 (두부 및 몸통)	10 (contiguous tissue)	20 (사지)	10 (contiguous tissue)
	IEEE C95.1 ^[4]	0.4	8 (B 영역 이외)	1 (cube)	20 (손,손목,발,발목)	10 (cube)
	CENELEC ²	0.4	10 (B 영역 이외)	10 (cube)	20 (손,손목,발,발목)	10 (cube)
	일본	0.4	10 (B영역 제외)	10 (any tissue)	20 (사지)	10 (any tissue)
일반인	ICNIRP	0.08	2 (두부 및 몸통)	10 (contiguous tissue)	4 (사지)	10 (contiguous tissue)
	IEEE C95.1	0.08	1.6 (B 영역 이외)	1 (cube)	4 (손,손목,발,발목)	10 (cube)
	CENELEC	0.08	2 (B 영역 이외)	10 (cube)	4 (손,손목,발,발목)	10 (cube)
	일본	0.08	2 (B영역 제외)	10 (any tissue)	4 (사지)	10 (any tissue)

1. ICNIRP : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

2. CENELEC : The European Committee for Electrotechnical Standardization

과 정확도를 개선하게 된다. 현재 평가방법의 표준화 활동이 IEEE SCC(Standard Coordinate Committee) 34 SC-2(Subcommittee)의 WG^[3]에서 활발히 진행되고 있고, 이동통신단말기의 SAR 측정 시스템 및 측정방법에 대한 표준화 연구는 IEEE SCC 34 SC-2 WG 1에서 하고 있으며, IEEE SCC34 SC-2의 WG2에서는 Maria Stuchly, Om Gandhi, Ray Luebbers, Q. Balzano 등, 수차례석과 단말기 안테나 전문가들로 구성되어 SAR 해석에 대한 표준화 활동을 하고 있다.

이동통신단말기에 대한 전자파 인체 적합성 시험은 미국의 PC TEST Engineering Lab, M. Flom Associates, Inc., ITS (Intertek Testing Services), 캐나다 APREL Lab, 그리고 독일의 IMST 등의 측정기관에서 평가하여 FCC로 부터 인증을 받고 있다.

본 고에서는 이동통신단말기의 전자파 노출량 평가를 위한 해석 표준화 동향을 설명하고, 측정 요소기술 및 측정 표준화 동향, 측정방법 그리고 대표적인 측정 결과에 대해 소개하고자 한다.

II. SAR 해석

현재 셀룰라 전화기와 기타 개인통신 서비스의 사용과 향후 이와 관련한 지속적인 RF 무선 통신 시스템의 사용증가가 예측됨으로써, 핸드셋(handset) 상의 안테나와 인체간의 상호작용에 상당한 관심과 연구 노력을 기울여 왔다. 이러한 활동들은 다음 두 가지 요인이 동기가 된다고 할 수 있다: 1) 안테나 성능의 악화 평가와 개선된 안테나 개발의 필요성; 그리고 2) 잠재적인 건강 위해와 기준, 예를 들어 미국 FCC 기준과의 적합성 시험을 위해 SAR (specific absorption rate)라 불리는 RF 에너지 흡수의 비율을 평가해야 하는 필요성 등이다.

최근 컴퓨터 기술의 진보는 비균질의 해부학적

두부 모델이 실제의 휴대 단말기 모델과의 전자장 상호 작용을 수치적으로 계산하는 FDTD 기법의 사용을 가능케 하였으며, 이 결과들은 인체 두부와 단말기 상호작용에 대한 우리의 이해를 향상시켰으나 이러한 상호작용은 안테나 종류, 조직의 전기적 특성, 두부 모델의 기하학적 구조, 그리고 장치를 쥐고 있는 손의 위치와 같은 다양한 노출조건에 의존한다. 그러므로 이러한 복잡한 노출조건에 있는 단말기로부터 복사되는 전자기장에 노출되는 두부 모델 내의 전력흡수 특성에 대한 연구들의 전체적인 동향 분석이 중요하며, 분석결과로부터 평가를 위한 기법의 발전과 표준화를 위한 노력이 수반되어야 할 것이다.

기존의 관련 해석 사례들은 균질의 구형(spherical) 두부에서부터 MRI(magnetic resonance imaging)에 기초한 해부학적으로 수정된 비균질 모델에 이르기까지 다양하다. 안테나 복사패턴에 대한 인체 두부의 영향이 어느 정도로 박스나 구 형태로 모의될 수 있을까, 다양한 두부 모델로 얻어진 SAR은 실제 두부내의 SAR을 얼마나 잘 예측할 수 있을까, 안테나 패턴에 대한 두부 영향, 두부에 흡수되는 전체전력(또는 두부가 존재할 때 안테나 효율), 조직 1g과 10g 내의 peak SAR 또는 maximum SAR을 구하는데 있어 두부 모델의 질과 정밀도가 얼마나 중요한가, 그리고 안테나와 두부 간의 거리는 SAR의 peak 값과 위치에 어떠한 영향을 주는가 등에 대한 고찰이 이루어져 왔다.

본 절에서는 현재 SAR 평가 해석기법의 표준화 활동이 가장 활발한 IEEE 표준조정위원회 (SCC34 SC2)의 표준화 동향에 대해 살펴보도록 하겠다. 기존의 RF 조사량 측정 계산 방식에는 모멘트 법(MoM), 일반화 다극자 기법 (GMT-Generalized Multipole Technique), 시간 영역 유한 차분 방식(FDTD), 유한 요소 방식(FEM)과 기타 혼성 방식이 포함된다. RF 노출 요구 사항을 충족시키는

계산 기법을 이용하면 자유 공간의 전기장 및 자기장 강도나 전력 밀도뿐 아니라, 조직에서의 전자기 에너지 흡수 또는 SAR을 측정할 수 있다. 셀룰러와 PCS 주파수에서는 계산 및 실험 방법 둘다 RF 노출 평가에 사용할 수 있다. 2.5 GHz 등의 보다 높은 주파수에서는 전기장 프로브의 부적절한 반응으로 인해 SAR 측정이 어려워지므로 수치 기법이 더 바람직해진다. 특히 근거리장에서 노출 평가를 위해 전력 밀도를 사용할 때에는 계산 기법은 측정 상의 어려움을 극복할 수 있는 장점이 있다. 원칙상으로는 무선 송신기의 복사체 노출된 인체 모델 내 SAR의 수치 계산은 많은 방식으로 수행될 수 있다. 그러나 실제로는 단순한 모델에는 몇 가지 적합한 방식이 있어서 구(sphere)나 층화구(stratified spheres)와 같은 인체나 그 일부의 모델을 사용했으나, 보다 현실적이고 해부학적으로 도출한 인체 모델에서는 SAR 평가를 위해 사용될 수 있는 방식이 거의 없다. 가까운 안테나로부터 나오는 구형 두부 모델의 SAR을 측정하기 위해 사용된 방식들 중에는 EEM(Eigenfunction Expansion Method), 구형 확장 기법(Spherical Expansion Technique)과 GMT가 있다. 최근에는 뛰어난 혼성 방식도 제안되었다.

복잡한 형태와 분할된 다양한 조직을 가진 인체의 비균질 모델의 경우, 두 가지 방식과 그 변형이 사용될 수 있다. 즉, 유한 요소 방식(FEM)과 시간 영역 유한 차분(FDTD) 방식이다. 비록 최근에 FEM의 시간 영역 버전이 개발 중이긴 하나 FEM에서 문제의 해는 원칙적으로 1개의 주파수에서 얻어진다. FDTD방식은 한 번의 계산으로부터 임의의 많은 주파수 점에서 해를 얻을 수 있는 시간 영역 방식이다. 그러나 FDTD는 고조파 여기 소스(harmonic excitation source)의 사용을 통해 한 개의 주파수에서 해를 얻는 데 사용될 수도 있다. FEM을 사용하여 무선 안테나에 대한 실제 인체

모델의 SAR 측정은 그 방식과 기존의 해석기와 호환 가능한 모델 개발과 관련된 어려움으로 인해 수행되지 않았다. FEM은 부드러운 표면과 매우 다양한 크기를 갖는 구조를 훌륭하게 모델링하는 반면 계산이 복잡하고 계산상 자원(메모리와 수행 시간)이 많이 필요하다. FDTD 방식은 단순하고 유연하며 문제 기하형(problem geometry)과의 호환성 및 잦은 광대역 해결책으로 인해 뛰어난 방식이 되었으며, 아마도 현재까지는 무선 통신 기기로부터 발생하는 SAR의 수치 해석에 사용되는 유일한 방식일 것이다. 또한 많은 과학자들과 엔지니어들이 FDTD방식을 다양하게 응용하고 있어 이 방식은 급속히 발전하고 있으며 수요가 발생하는 대로 새로운 알고리즘이 개발, 개량되고 있다. 따라서 수치해석 기법을 이용하여 SAR을 평가하는 경우, 대부분 FDTD 기법을 적용하고 있으며, 그 이유는 FDTD 기법이 다중 매질로 구성된 두부의 모델링이 용이하고 효율적인 메모리 사용이 가능하여, 인체 두부와 단말기를 포함하는 계산영역을 커버할 수 있는 큰 규모의 cell 수를 모델링할 수 있기 때문이다. 그러나 동일한 FDTD 기법을 사용하여 해석하는 경우에도 모델링하는 두부의 형태(박스, 구, 해석적 모델), 두부를 구성하는 조직의 수, 조직의 전기적 구성 파라미터 수치, 안테나 모델링 방법 등에 따라 각기 다른 SAR이 산출될 수 있으므로 기법의 표준화를 이를 필요가 있으며, 이는 법적 규제를 할 경우 더욱 절실히 요구되는 중요한 문제이다.

2-1 이동통신단말기의 SAR 계산을 위한 FDTD 방식

유한차분 시간영역(FDTD) 기법은 맨 처음 Yee^[5]에 의해 제안된 후 많은 연구자들에 의해 발전되었다. 이 방법은 수렴된 해가 얻어질 때까지

유한 체적에 걸쳐 Maxwell의 시간 의존 curl 방정식을 이산화하고 매시간 단계마다 유한공간에 대해 반복 진행을 산출하도록 하는 것이다. 특히 이 기법은 다중 매질간의 전자파 현상을 해석하기가 용이하므로 최근 전자파에 의한 인체의 전력흡수 연구에 많이 활용되고 있다. FDTD 방식은 Maxwell 방정식의 직접적 풀이 방법으로 6개의 부분 미분 방정식으로 이루어진 3 차원의 전자기장 상호 작용으로 부터 해를 구한다. 결과적으로 유한 차분 방정식은 그 이전의 time step으로부터, 단위 셀 주변의 이웃한 전자기장 성분을 고려한다. time-stepping 동안의 알고리즘 안정도를 보장하기 위해, 직각 좌표계에서 3 차원 격자의 셀 모서리의 길이가 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 각각은 $\lambda/10$ 이하, time step은 Courant 조건을 충족시켜야 한다. 여기서 λ 는 관심 대역 최고 주파수에 대한 파장이다. FDTD 계산은 전압과 전류 소스를 포함하여, 다양한 소스들에 의해 여기될 수 있으며, 이 소스들은 메쉬 모서리에서 한 개 또는 그 이상의 전기장들이 가우시안 펄스나 사인파 등의 시간 해석 함수로 결정되는 일이 대부분이다. 이것은 전압 동작원으로 작용하는데 예컨대, 이것은 무선 송수화기이나 무선기의 모델에서 짧은 단극자(monopole)와 같은 안테나를 여기하는데 사용될 수 있다. 이 단극자는 금속 상자 위의 안테나 기저부에 있는 메쉬 모서리를 따라 위치한 전압원에 의해 동작될 수 있다.

유용한 FDTD의 방식을 위해 전파-객체 상호 작용이 개방 영역에서 고려되어야 하는 기하형태의 경우, 계산 공간은 흡수 경계 조건(ABCs)에 의해 절단(truncate)되어야 한다. 이상적인 ABC는 반사 없이 임의의 각도에서 발생하는 파(wave)를 흡수한다. 수많은 ABC들이 개발, 실험되어 왔으며 그들의 유용성은 특정 응용 프로그램에 따라 달라지는 일이 자주 있다. 가장 자주 사용되는 ABC는 Mur^[6] 1차와 2차, Engquist-Maida^[7], Higdon^[8,9],

Liao^[10], Mei-Fang^[11]이다. 이 ABC들은 보통 적용되는 파와 기하 형태에 대해 0.5 내지 5퍼센트 범위의 효과적인 반사 계수를 제공한다. 1994년에 Berenger은 완벽 일치 층(PML:perfectly matched layer)^[12]이라는 경계면 절단의 새로운 형태를 도입했다. 적절히 설계된 PML 절단은 매우 낮은 반사와 그 공식의 단순성, 그리고 낮은 계산 비용으로 인해 그것을 도입한 이후로 조사와 개선이 급속히 이루어졌다. PML의 가장 중요한 특성은 경계면이 낮은 반사를 유지하면서도 RF 소스와 산란체로부터 한 개나 두 개 격자만 떨어져서 위치할 수 있다는 것이다. 그러나, PML의 반사를 낮게 하기 위해서는 그 횡단면과 층의 수를 적절히 선택해야 한다. 매질 특성과 복잡한 형상, 안테나 성분 등의 정확하고 효율적인 모델링을 제공하는 FDTD에는 몇 가지 다른 전문화된 알고리즘이 있다. 이 분야는 현재 계속적으로 제안되고 있는 새롭고 매력적인 해들로 급속히 발전하고 있다.

2-2 FDTD 기법의 표준화 요구사항

상기와 같은 FDTD의 특성으로 인해 IEEE 표준조정위원회에서는 FDTD기법을 이동통신기기에 의한 인체 두부 내의 SAR 평가 시 가장 적합한 모의방법으로 판단하고 평가 표준을 위해 다음에 기술하는 사항들을 고려하고 있으며, 이 중 상당 부분은 현재에도 진행 중이다.

2-2-1 벤치마크 확인 모델

벤치마크들은 무선 송수신기로 인한 인체 두뇌 모델 내의 SAR 평가를 위해 개발된 계산 도구가 수락 가능한지를 알기 위한 목적으로 사용될 수 있다. 일반적으로 수치적 절차를 확인하고 특정 응용 프로그램을 위한 오차 마진이 결정된 후에는 계산 알고리즘에 변화가 있을 때만이 추가 확인이

필요하다. 수치 알고리즘과 계산 절차는 보통 특정한 계산 시스템을 계속 운용하기 위해 실행되고 최적화되기 때문에 이 벤치마크들은 SAR 평가에 사용되는 계산 기법과 절차를 위한 최소 요구 사항을 확립할 몇 가지 수단을 제시한다. 이것은 또한 사용자들이 프로토콜에서 제안한 오류 마진을 충족하는 제한된 계산 자원만을 이용하여 수치 기법과 알고리즘을 실험할 수 있도록 하고 있다. 알려진 벤치마크 모델로는 두 계층(two-layered) 반공간(half-space) 근처의 다이폴 안테나, 두뇌 모의 매질로 채워진 아크릴 박스 근처의 반파장 다이폴, 손실이 있는 구체 근처의 다이폴 안테나, 자유 공간에서의 $\lambda/2$ 다이폴(이 모델은 계산 영역을 단절하기 위해 사용되는 흡수 경계 조건을 포함하여, 기본 FDTD 알고리즘이 전자기 흡수 계산을 수행하기에 수락 가능한지 여부를 결정하기 위한 단순 모델로 사용되어 왔다) 등이 있으며, 벤치마크 모델은 실험 측정치와 함께 비교되어야 한다. 결과들은 고려되는 측정치나 계산치의 불확실성과 비교되어야 한다. 벤치마크 계산은 벤치마크 모델에 기술된 최소 요구 사항을 가지고 계산되어야 한다.

2-2-2 조직모델 요구사항

SAR 계산을 위해 사용되는, 예컨대 시간 영역 유한 차분(FDTD) 방식 같은 수치 절차는 한 개 또는 두 개의 손실이 있는 정규 기하형태에서 계산된 SAR 분포를 해석적 해나 측정 또는 양 쪽 모두에 의해 얻어진 분포와 함께 비교함으로써 정확성을 검토할 것이다. 이렇게 확인된 수치 방식은 각 조직이 뇌 조직과 일치하는 전기적 특성을 가지는 것으로 가정할 경우, 분할 형상 모델(segmented shaped model)로부터 도출한 인체의 균질 모델을 위해서도 사용될 것이다. 이러한 실행의 목적은 이 모델이 SAR을 과대 추정할 것인지 여부

와 그 정도를 알기 위함이다. 이 실행의 또 다른 목적은 SAR측정을 위해 균질 모델의 사용이 정당화되는지 여부를 판단하기 위함이다. FDTD 생물학적 mesh의 기초로서 적합한, 평판이 좋은 해부학적 자료 출처는 미국 국립 의료 도서관의 가시인체 프로젝트[Visible Human Project]이다. 다양한 형태의 데이터들을 구할 수 있으며 아마도 가장 유용한 것은 단면(cross sections)일 것이다. 이것은 남성의 경우 두께 1mm 조각, 여성의 경우 0.33mm 짜리 조각이다. 양쪽 다 0.33mm의 단면 해상도를 가지고 있다.

2-2-3 조직 유전체 특성과 밀도 데이터베이스

다양한 조직에 대해 가정되는 전기적 특성(유전상수 ϵ 과 도전율 σ)은 세부적인 SAR 분포에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 1g의 조직에 걸친 적분(integration)으로 인해 1-g SAR에 대한 영향은 다행히도 다소 적다. 다양한 조직들의 전기적 특성의 데이터베이스는 이 특성들에 관한 가장 최신의 사용 가능한 과학 데이터로 갱신되어야 한다. FCC가 수락 가능한, SAR 평가를 위한 권고 조직 특성은 FCC 웹 사이트에서 구할 수 있다. 그 자료는 Gabriel^[13]이 최근에 보고한 다양한 포유류 조직의 최신 전기 특성과 유사하며, SAR 분포의 계산을 위해 당분간 사용될 수 있다.

2-2-4 시험 기기 모델링

FDTD 방식은 안테나 성능과 송수신기와 그 유사 기기에 대한 안테나에 의한 인체 SAR과 안테나 성능 평가에 아주 적합할 뿐 아니라 간단하고 유연하며, 효율적이고 정확하다. 그럼에도 불구하고 훌륭한 상용 FDTD 컴퓨터 코드조차 아무런 문제의 징후를 나타내지 않고, 부정확한 해답을 쉽게

제공할 수 있다. 이러한 주된 어려움은 안테나와 송수신기의 적절한 모델링과 관련되어 있다. 또한, 인체 두부 모델의 품질과 해부학적 정확성은 SAR 계산의 신뢰성에 영향을 미친다. 두부 모델에 관해 귀를 모델화를 위한 필요가 강조되기도 한다.

2-2-5 데이터 조작과 변환

FDTD 셀의 한 쪽 모서리의 3개의 전기장 성분이나 모든 인접 셀 격자의 교차점에서 6개의 성분들이 해당하는 셀의 유효 전자기장 값을 결정하기 위해 사용될 지 여부, 조직 인터페이스가 포함되어 있거나 외부(대기) 경계에 있을 때는 어떻게 할 것인지, 서로 다른 셀의 해상도가 하나의 계산공간에서 사용하여 결과를 얻을 때 정확한 위치나 보삽 위치가 상이한 전자기장 값을 낳을 수 있다. 이 항목은 각 계산점에서 SAR과 전자기장의 보삽, 전신 평균 SAR, 1-g 또는 10-g 평균 SAR 등 평가의 최종적인 보고 항목을 얻는 것과 직접적 관련이 있어 분량면에서 다른 항목에 비해 상당 부분을 차지하고 있다.

2-2-6 데이터 보고

이 항목은 평가 결과 보고에 대한 부분으로 실험 절차의 중요한 부분은 결과를 뒷받침할만한 충분한 증거 자료를 제공하는 것이다. FDTD는 휴대용 무선 송수신기의 RF 노출 준수 여부를 결정하기 위해 SCC-28이 추천한 계산 방식 중의 하나이다. 수치 알고리즘의 실행과 사용의 특정한 변형들은 컴퓨터 시스템과 모델링 절차에 따라 달라질 수 있다. 시험 절차의 적합성을 증명하기 위해서는 실험 결과를 뒷받침하기 위해 계산 기법의 상세한 기술, 조직과 단말기 모델에 대한 구체화된 보고서가 필요하다.

이외에도 수치기법 상의 특수 기법, 메모리 및 수행 시간 절약을 위한 해석 모델의 절단 등을 다루고 있다.

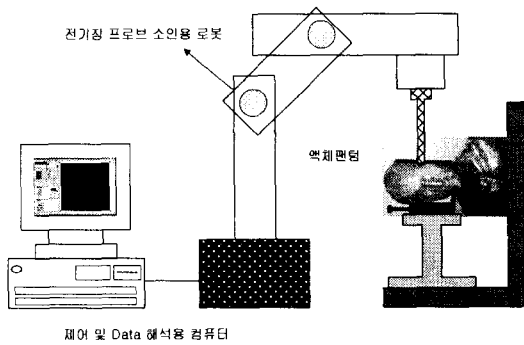
III. SAR 측정

이동통신단말기의 인체 전자파 노출량은 실제로 인체를 대상으로 직접적인 측정이 곤란하기 때문에 인체조직과 유사한 전기정수를 갖는 소위 인체팬텀을 만들어 이에 전자파를 조사했을 때의 전기장 프로브를 이용하여 팬텀내의 전기장 분포를 측정하거나 적외선 카메라를 이용하여 온도 분포를 측정함으로써 평가하고 있다. 이때, 인체팬텀은 조직과 동일한 크기와 외형을 갖고 각 측정주파수에 대하여 조직의 비유전율, 도전율 그리고 밀도가 동일한 재료로 구성하며, 현재 보고된 인체팬텀은 액체 및 준액체 형태와 고체형태의 팬텀이 있으며, 인체팬텀의 종류에 따라 적용방법이 다양하다. CENELEC과 일본의 기준은 거의 유사하며, FCC가 조직 1g에 대한 국부 SAR 값이 1.6 W/kg인 반면, CENELEC과 일본은 조직 10g에 대해 2 W/kg인 것이 FCC와 다르고, 측정위치에 대한 정의 등 약간의 차이가 있다. 이동통신단말기의 전자파 노출량 측정시 고려되어야 할 사항은 측정주파수, 스캔 영역, 크기 및 스캔 해상도, SAR 측정시간, 최악조건 측정결과에 대한 SAR 분포(주파수, 안테나 위치, 안테나 상태), SAR 측정시스템 구성, 첨두 SAR 위치 판정, SAR 시험 위치, 그리고 1g 평균 SAR 절차와 인체팬텀 표면까지의 외삽 절차 등이다. 이러한 측정변수에 따라 측정의 재현성과 측정결과와의 과대 혹은 과소 평가의 원인이 되므로 이들에 대한 표준화된 절차가 요구되고 있다.

3-1 SAR 측정시스템

이동통신단말기의 전자파 노출량 평가에 주로 사용되고 있는 것은 전지장 프로브를 이용한 전기장 분포 측정 방법으로 전기장 프로브를 이용한 SAR 측정시스템의 요소기술은 측정프로브, 인체팬텀 그리고 프로브의 위치를 조절하는 로봇으로 그 구성을 [그림 1]에 나타내었다.

SAR 측정시스템은 휴대전화기와 팬텀을 실제



[그림 1] SAR 측정시스템 구성도

사용조건으로 모의한 상태로 설치하여 팬텀내에 전계 등의 물리량을 프로브로 계측하는 것으로써 인체팬텀, 프로브시스템, 팬텀내의 정확한 위치를 제어하기 위한 다관절 로봇, 그리고 계측량을 저장하고 위치를 정확히 조절할 수 있는 제어 SW로 구성되어 있다.

3-2 전기장 프로브

전기장 분포를 측정하기 위한 전기장 프로브는 기본적으로 다이폴, 검파회로, 전송선로로 구성되고 입사파는 다이폴과 검파회로에 의해 직류전압으로 변환되어 전송선로에 의해 신호처리부에 공급된다. 적용주파수는 100 MHz~3 GHz대역에서의 전기장에 응답하고, 자기장에 대한 응답이 없는 것으로 한다. SAR 측정을 위한 프로브의 요구사항은 광대역의 높은 민감도와 선형성을 유지해야 하며, 조직 1g 혹은 10g 당 SAR값을 측정하기 위해서는 고정밀의 공간분해능이 요구되고, 인체조직의 유전율을 고려하여 가능한 작아야 한다. 팬텀의 비중을 고려하여 1g 및 10g의 조직을 취하기 위

<표 2> 전기장 프로브 요구사항^[14]

Parameter	Specification
주파수 밴드	800~2200 MHz
센서 길이	1~2 mm
센서 mounting 모양	삼각형
반구에 대한 등방성 불확실성	15%
공간 해상도	7~9mm
탐침기 측정 범위	10 mW/kg~100 W/kg 10 mW/kg~20 W/kg (통상)
선형성 (보상한 값)	측정영역에서 ±1%
Offset 오차	5 mW/kg 이하
탐침기 enclosure 지름	7 mm 이하

〈표 3〉 뇌조직의 전기정수 및 구성성분

	조성(중량비)			
	835~925 MHz		1,800 MHz 대	
뇌 조직	물	40.4	물	45.0
	설탕	56	설탕	53.9
	소금	2.5	소금	.
	셀룰로이즈	1.0	셀룰로이즈	1.0
	방부제	0.1	방부제	0.1
유전율	41.8~46.2		38~41	
도전율	0.74~0.95(S/m)		1.2~1.5(S/m)	

해서는 조직의 한 번이 약 9mm 혹은 20mm인 입방체에 해당하기 때문에 미소 다이폴의 크기는 이 길이보다는 작아야 할 것이다. 현재 시판되는 프로브(Narda, DASY, IDX system 등)의 다이폴의 길이는 약 2~4mm 정도이므로 1g 및 10g 공통으로 사용할 수 있을 것이다. SAR 측정에 사용되는 전기장 프로브의 요구사항을 요약하면 〈표 2〉와 같다.

3-3 인체팬텀

인체팬텀의 물리적 특성, 크기와 형태는 휴대폰 사용자와 유사하여야 하고, 측정모델은 적어도 두부와 목이 포함되어야 한다. 휴대용 기기에 의한 RF 에너지 흡수 측정에 있어서 가장 중요한 조직은 뇌로 두부 모델에 대한 조직의 전기정수를 뇌조직으로 맞추어 모의조직을 만들어야 한다. 인체팬텀 셀에 채우는 모의조직의 액체 용액 깊이는 액체 표면에서의 반사를 최소화하기 위해 적어도 10cm 이상이다. 두부의 모델은 비균질모델과 균질모델로 구분되며, 비균질 모델이 물리적으로 더 적합하지만 일반적으로 균질모델이 많이 사용된다. 왜냐하면 다조직(피부, 두개골, 뇌, 눈 그리고 손)

의 비균질모델은 구성이 매우 어렵고, 또한 적합성 평가는 가능한 '최악의 조건'에서 고려되므로, 비균질모델보다 균질모델이 SAR값을 과대 평가하기 때문에 일반적으로 균질모델을 사용한다. 뇌조직의 균질두부모델을 구성하기 위한 조직의 전기정수는 Gabriel에 의해 조사된 결과를 사용하며, 모의 뇌조직은 물, 염화나트륨, 설탕, HEC(셀룰로이즈), 그리고 방부제로 구성되고, 이들 조성과 전기정수 값은 〈표 3〉과 같다.

뇌조직으로 모의된 액체용액을 담은 인체팬텀 셀은 두께가 통상 1.5~2mm인 유리섬유로 만들어지며, 유전율은 5이하이다. 인체팬텀 셀은 디자인에 따라 평판형 팬텀 셀, 구형 팬텀 셀, 인체모형 팬텀 셀 그리고 표준화를 위한 기준 두부 팬텀 셀이 있으며, 평판형 팬텀 셀은 두부 이외의 다른 부분에 대한 영향을 평가하거나, 전기장 프로브의 교정 등에 사용되며, 구형팬텀 셀의 경우 해석과 비교를 위한 두부 시뮬레이션 용으로 사용된다. 이동통신단말기의 전자파 노출량 평가용으로 사용되는 셀이 인체모형의 팬텀 셀이며, 이에 대한 재현성 문제 등을 보완하기 위해 Spectrum Science Institute에서 제안하는 것이 기준두부 팬텀 셀이다^[15]. FCC에서는 인체팬텀 셀의 유전율이 3~4정도의

값을 갖는다고 정의하고 있으며, 전도도는 뇌의 전도도에 비해 매우 작아야 한다고 정의하고 있다. 모델의 크기와 형태는 참고문헌 [16]과 [17]에 나타내고 있다.

팬텀의 크기와 형태에 따라 인체팬텀과 측정기기 사이의 거리 차이로 인하여 두부로 흡수된 에너지의 양이 영향을 받는다. Schonborn^[18] 등의 결과에 의하면, 성인에 대한 모델이 소아의 모델에 비해 더 최악조건을 나타낸다고 하였다. 한편 Gandhi의 FDTD 수치해석 결과, 소아의 경우가 더 작은 귀의 크기 때문에 더 높은 SAR 값을 나타낸다고 보고하였다. 이와 같은 상반된 결과를 갖음에도 불구하고, 일반적으로 두부모델의 크기가 클수록 높은 SAR 값을 나타내므로 두부가 클수록 최악조건을 표현할 수 있을 것이다.

이동통신기기에 대한 SAR 측정시 인체팬텀의 귀와 손은 이동통신기기와 직접적인 접촉을 하고 있고 안테나와 상당히 근접한 상태에 있으므로 전자기적으로 강하게 결합하고 있다고 판단할 수 있으며, 귀와 손의 형상과 위치에 따라 두부에 발생하는 SAR 분포도 강한 영향을 받을 것으로 예측된다. 귀가 없는 경우, 이동통신기기가 직접 두부와 접촉하고 있어 그 결과 두부에서 SAR 값이 높게 나타날 것이다. 따라서 인체팬텀 모델에 손실재료를 사용한 귀나 혹은 귀 이격공간을 사용해야 하며, 적당한 귀의 모델링이 필요하다. 현재까지 SAR 측정이 외부 귀의 작은 공간에서 전계프로브로 측정이 곤란하고, 컷볼의 조직성분과 울퉁불퉁한 신체 일부를 표현하기가 현실적으로 곤란하기 때문에, 손실이 없는 귀 이격기로 대신한다. 귀 이격기는 약 6mm로 외부 귀조직의 평균 두께를 나타낸다. 손실이 있는 귀볼이 손실이 없는 귀 이격기보다 더 높은 흡수가 일어나므로 귀 이격기가 뇌에서의 최악조건을 흡수를 나타낸다. 따라서 일반적으로 적합성 평가시 6 mm ear spacer를 사용

을 권장하고 있고, 휴대폰과 인체팬텀 사이의 최소 거리는 6 mm이다. 한편 손의 영향에 대해서는 손에서의 에너지 흡수에 대한 안전기준(조직 10g에서 4 W/kg)이 두부(1.6 W/kg)에 비해 높고, 수치해석과 실험결과 손에서의 흡수량이 두부와 비교하여 매우 작다고 보고되었으며^[19], 손이 없는 것에 의한 두부의 SAR 값의 과대 평가가 5 % 미만이라고 기술되어 있다. 또한 다양한 손가락의 위치와 사용자들의 휴대폰 잡는 습관이 다양하기 때문에 표준 방법을 설정하는 것이 매우 어렵다. 따라서 현재 SAR 측정시 손의 모델을 고려하지 않는다. 그러나 단말기의 안테나 형태에 따라 손의 영향이 무시할 수 없는 경우가 있기 때문에 이 부분에 대한 연구가 필요하다.

3-4 이동통신단말기의 표준 측정 위치

측정변수 중 가장 민감한 것이 단말기의 측정위치로 측정 위치에 따른 재현성 등이 중요한 과대 혹은 과소 평가의 원인이 된다. 따라서 각 평가기준에서는 단말기에 대한 측정 위치를 권고하고 있으며, 단말기 측정을 위한 위치의 표준화가 진행중에 있다. 이동통신단말기의 인체에 대한 상대적인 위치는 ear piece와 microphone의 위치를 기준으로 정의된다. 송수화기는 보통 사용자의 손에 주어진 상태로 사용자의 머리에 위치하며, 이동통신단말기의 축이나 머리로 부터의 안테나의 기울기와 관련하여 불확실성을 피하기 위해 위치에 대한 세밀한 정의가 필요하다. <표 4>는 각 기준별 단말기 위치에 대한 장단점 등을 비교 분석한 것이다.

3-5 이동통신단말기의 전자파 노출량 측정 절차 및 불확실성

SAR 측정시스템은 전기장 프로브를 로봇으로

〈표 4〉 인체 두부에 대한 이동통신단말기의 상대적 위치 비교

	FCC [20]	일본	CENELEC
휴대폰 위치	<ul style="list-style-type: none"> 표준위치 ear canal에 ear piece의 중앙을 위치시킴. 양귀와 입 중앙을 잇는 세선을 포함하고 있는 가상면에 휴대폰의 중앙선을 위치시킴. 이 배열을 유지하며, 휴대폰 정면이 팬텀의 뺨과 일치할 때까지 서서히 휴대폰을 이동시킴. 	<ul style="list-style-type: none"> 정상사용위치 수화구의 중심이 이도(耳道, auditory canal)의 중심에 위치. Reference line¹이 reference plane²내에 위치하도록 함. 입과 귀를 사용하는 경우 인체 팬텀에 평행되게 위치시킴. Reference 위치는 각 α에 의해 정의됨³. 	<ul style="list-style-type: none"> 4 test positions 1. 의도된 사용위치: 각 α가 80°로 정의된 위치. 만약 이러한 위치를 적용할 수 없는 경우 제조자에 의해 정의. 2. 부가적인 동작 위치 1) touch position: 휴대폰이 팬텀 얼굴에 접촉될 때까지 각 α를 줄인다. 2) 각 α를 100° 까지(안테나가 두부와 접촉되지 않을 때까지) 증가시킴. 3) Reference plane을 신체축방향으로 30° 회전시킨 후 각 α를 90°로 위치시킴.
장점	<ol style="list-style-type: none"> 모든 휴대폰에 적용할 수 있음. 특별히 고안된 지지대가 필요하지 않음. 	<ol style="list-style-type: none"> 인체팬텀 셀의 두께에 무관 위치에 대한 재현성이 있음. 뺨의 형상에 적당히 의존함. 	<ol style="list-style-type: none"> Touch position을 제외한 모든 위치에 대한 재현성이 좋음. 휴대폰의 휨부분이 많아 정의가 애매한 경우를 제외하고 대부분의 휴대폰에 적용할 수 있음.
단점	<ol style="list-style-type: none"> 귀나 spacer의 형상에 따라 SAR값이 크게 의존 뺨 영역의 형상에 따라 SAR 값이 크게 의존 인체 팬텀 셀의 두께에 의존 	<ol style="list-style-type: none"> 정교한 지지대가 필요함. 귀의 형태와 인체 두부의 뒤통수의 형태에 적당히 의존함. 	<ol style="list-style-type: none"> 휴대폰당 추가적인 측정이 요구됨. 한 위치의 경우보다 4배의 노력 필요. 정교한 지지대가 필요함. 휴대폰의 위치에 대한 정밀도 필요. 귀의 형태뿐만 아니라 뺨과 뒷통수의 두부 형태에 의존함.

주1) 휴대폰의 reference line : ear piece 중앙부분과 휴대폰의 바닥의 중심과 잇는 선으로 팬텀으로 향해 잇는 휴대폰 표면의 접선, 통상 ear piece 중앙과 송화기의 중앙과 연결하는 선으로 정의됨.

주2) reference plane : 양귀의 이도(耳道)와 닫힌 입의 중앙을 세 점에 의해 정의되는 면.

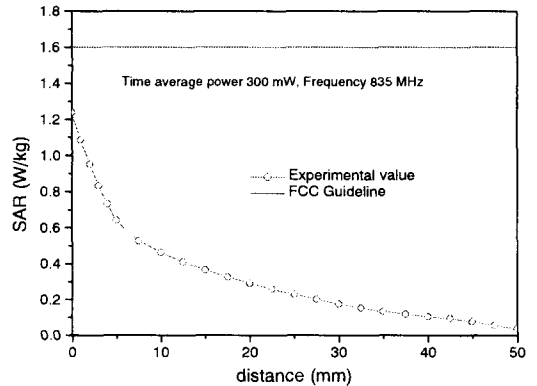
주3) 각도 α 는 양귀의 이도의 중심을 잇는 선과 휴대폰의 reference line사이의 각.

삼차원적으로 위치이동을 시키며, 인체 두부 팬텀 내의 각 지점에서 휴대폰에 의해 근거리에서 복사되는 전기장 세기를 전기장 프로브를 사용하여 측정함으로써 SAR 값을 산정한다. 침투 SAR 값은 휴대폰에서 방사하는 전계의 측정으로 얻어지는 것에 상응하는 전압 값들로부터 얻어진다. 먼저 휴대폰을 3.3절에 나타난 위치에 고정하고 다음 세 종류의 측정 스캔에 의해 팬텀 표면을 따라 전기장 세기 분포를 측정한다. 즉 세가지 스캔은 영긴

스캔, 미세 스캔, 그리고 조직 1g 및 10g 평균 SAR 스캔으로, 측정 영역은 일정하게 나누어진 격자선에 의하여 선정된 작은 정사각형으로 분리되고 실제 측정 과정에서 프로브는 격자선을 따라서 움직이며, 격자선의 교차점에 대하여 규칙적으로 전기장 세기를 기록한다. 인체 두부 팬텀내의 침투 SAR 위치를 추정하기 위해 두부내의 전기장 분포를 팬텀 표면의 곡면을 따라 먼저 900 MHz이상이면 공간의 간격을 1cm 정도로 하여 영긴 측

정을 한다. 영긴 스캔에서 침두치를 갖는 위치를 중심으로 더 높은 공간분해능으로 미세 스캔을 수행하여 침두 SAR 값(hot spot)을 찾아낸다. 이 때 격자의 간격은 로봇의 제어기능과 프로브의 공간 분해능에 의존한다. 이 hot spot에서 조직 평균 SAR 값을 결정한다. 이 때 대부분의 전기장 프로브는 프로브 선단과 2~5 mm 떨어진 곳에 다이폴이 위치하고 있으며, 또한 측정오차를 줄이기 위해 프로브의 끝을 팬텀 표면에 붙인 상태로 측정하지 않는다. 따라서 팬텀 표면에서 SAR 값은 미세 스캔 영역에서 가장 큰 감쇠가 나타나는 방향으로 최대 피크 SAR 위치에서 실제 측정 값에 따라 외삽해야 하며, 이 외삽 알고리즘은 측정값에 대해 최소자승으로 측정값이 fitting된 지수함수 또는 다항식 함수(4차)를 적용하여 외삽한다. 상기 절차에 따라 측정 CDMA에 대한 측정결과를 예를 [그림 2]에 나타내었다. 주파수 835 MHz에서 CW로 휴대폰을 전환시켜 팬텀내의 전기장 분포로부터 1g 평균 SAR 값을 산출한 것으로 300 mW의 경우 FCC 기준보다 상당히 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 여기에서 실제 측정된 값은 5 mm 까지의 결과이고 0~5 mm 까지는 다항식(4차)을 이용하여 외삽시킨 결과 값이다.

일반적으로 SAR 측정에 있어서 불확실성은 다음과 같다. 오차 발생이 가장 큰 것이 전자기장 측정에 따른 오차($\pm 13\%$)가 가장 크며, 공간 침두 SAR 평가에 따른 오차($\pm 7\%$)이고, 끝으로 부가적인 오차로 전기정수 측정에 따른 오차($\pm 5\%$)이다. 전자기장 측정에 따른 오차에서는 프로브 교정의 불확실성이 $\pm 10\%$ 정도로 가장 큰 비중을 차지하며, 공간 침두 SAR 평가에 따른 오차에 있어서는 외삽과 내삽에 따른 오차와 위치오차가 가장 크게 나타난다. 따라서 위의 불확실성을 줄일 수 있는 방법연구와 외삽과정과 측정시간의 단축 그리고 단말기의 보다 정확한 위치 및 결과 표현



[그림 2] 이동통신단말기 SAR 측정결과(출력 300 mW, 주파수 835 MHz)

방법 등이 논의되어야 할 것이다.

IV. 맺음말

현재 미국시장에 수출하는 이동통신단말기는 SAR 평가 결과를 요구하고 있어 이동통신단말기에 대한 인체 전자파 노출량 평가는 단말기 제조업 뿐만 아니라 통신사업에 있어서 넘어야 할 새로운 관문 중의 하나가 되고 있다. 휴대폰에 대한 노출량 측정은 새로운 연구분야로 자리잡을 정도로 활발한 연구가 진행되고 있고, 휴대폰 모델링 방법, 인체팬텀 크기와 형상, 전기장 프로브, 측정위치 그리고 차세대 이동통신기기에 대한 측정방법 등 아직 국제적으로 해석 및 측정 표준화가 이루어 지지 않아 이에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 고는 이동통신단말기에 대한 SAR 해석 및 측정에 대한 기초자료의 제공과 전반적인 이해를 돕기 위해, FCC, 일본, 그리고 유럽 등의 해외의 동향, 국제 표준화 활동 및 SAR 평가 방법 등을 간략하게 소개함으로써, 전자기장 인체노출 보호기준 등과 같이 처음 접하게 되는 용어에 대한 관련 종사자들의 이해를 돕고, 기준을 만족시

키는 새로운 이동통신단말기 개발 등에 다소 도움이 되고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] WHO WEB SITE <http://www.who.ch/>
- [2] FCC 47 CFR § 2.1091 and 47CFR § 2.1093
- [3] <http://grouper.ieee.org/groups/scc34/sc2/>
- [4] IEEE Std C95.1-1991, IEEE Standard for Safety Levels with respect to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz
- [5] Yee, K. S., "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 14(3), 302, 1966.
- [6] Mur, G., "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 23, pp. 377-382, 1981.
- [7] Engquist, B., and Majda, A., "Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves", *Mathematics of Computation*, vol. 31, pp. 629-651, 1977.
- [8] Higdon, R. L., "Absorbing boundary conditions for difference approximations to the multi-dimensional wave equation", *Mathematics of Computation*, vol. 47, pp. 437-459, 1986.
- [9] Higdon, R. L., "Numerical absorbing boundary conditions for the wave equation", *Mathematics of Computation*, vol. 49, pp. 65-90, 1987.
- [10] Liao, Z. P., Wong, H. L., Yang, B. P. and Yuan, Y. F., "A transmitting boundary for transient wave analyses", *Scientica Sinica* (series A), vol. XXVII, pp. 1063-1076, 1984.
- [11] Mei, K. K. and Fang, J., "Superabsorption - a method to improve absorbing boundary conditions", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, pp. 1001-1010, 1992.
- [12] Berenger, J-P., "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves", *J. Computational Physics*, vol. 114, pp. 185-200, 1994.
- [13] Gabriel, C., "Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies," Final technical Report, Occupational and Environmental Health Directorate, RFR Division, Brooks AF Base, TX 78235-5102, AL/OE-TR-1996-0037, June, 1996.
- [14] K. Joyner, "RF Dosimetry for mobile telephone handsets" 제3회 전자장과 생체영향에 관한 워크샵 July, 1999.
- [15] SSI/DRB TP-D01-031, "Phantom Design Requirement", Spectrum Science Institute, RF Dosimetry Research Board, Canada, March 1998.
- [16] ARIB STD-T56, Version 1.0, "SAR Estimation for Cellular Phone", Association of Radio/Industry and Business, Japan, Jan. 1998.
- [17] 최형도, "이동통신단말기의 비흡수율(SAR) 측정기술" 전파진흥, vol. 9, no. 3, 1999.
- [18] F. Schonborn, M. Burkhardt, and N. Kuster, "Difference in Energy Absorption Between Heads of Adults and Children in the Near

Field of Source", *Health Physics*, vol 74, pp.160-168, 1998.

- [19] S. Watanabe, M. Taki, and O. Fujiwara, "Characteristics of the SAR distribution in a head exposed to electromagnetic fields radiated by a hand-held portable radio", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-44*,

pp. 1874-1883, 1996.

- [20] FCC OET Bulletin 65, "Evaluating compliance with FCC guideline for human exposure to radio frequency electromagnetic field", *Federal Communication Commission, Office of Engineering & Technology*, Aug. 1997.

≡필자소개≡

최 형 도

1986년 2월: 고려대학교 재료공학과(공학사)

1989년 8월: 고려대학교 대학원 재료공학과(공학석사)

1996년 8월: 고려대학교 대학원 재료공학과(공학박사)

1997년 1월 ~ 현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 전파기술연구부 선임연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, 전자파 인체영향



조 광 윤

1993년 2월: 광운대학교 전자통신학과(공학석사)

1980년 ~ 현재: 한국전자통신연구원 전자파환경연구팀장 (책임연구원)

이 매 경

1990년 2월: 중앙대학교 전자공학과(공학사)

1992년 2월: 중앙대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1992년 2월 ~ 현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 전파기술연구부 선임연구원

[주 관심분야] EMC 현상의 이론적 현상, 전자파 인체영향 등

