

휴대전화의 전자파 노출에 대한 수치해석

이애경 · 최형도 · 조광운

한국전자통신연구원
무선방송기술연구소

I. 서 론

휴대전화에 의한 인체영향을 공학적으로 접근하기 위해서는 흔히 실험적 방법과 수치해석 방법이 사용되고 있다. 이 두 가지의 접근 방법들은 제각기 장단점을 갖고 있다. 실험적 방법은 인체 외형을 본떠 만든 형상을 갖는 유전체 외피 내에 인체 조직과 유사한 전기적 특성을 갖는 유동액을 넣고 그 유동액 내에 전기장 프로브를 삽입하여 전기장을 측정 후 그 전기장 값 (rms)으로부터 전자파흡수율(SAR)을 추정하는 절차가 대부분 사용되고 있다. 현재 적합성 평가에 실험적 방법이 널리 사용되고 있으나 현재 실험용 인체 팬텀과 있어 다조직을 갖는 인체와는 많은 차이가 있어 연구의 여지가 아직 많이 남아 있다. 그리고 최근 의학분야의 자기공명(MR)에 의한 진단기술 수준이 높아지고 컴퓨터 재원의 눈부신 발전이 어우러져 사실적 인체에 매우 근접한 수치 모델의 개발이 가능해짐에 따라 휴대전화에 의한 인체 노출 수치해석은 풍요로운 전환기를 맞이하게 되었다. 그러나 휴대전화의 내부 회로기관 모델링, 외부 케이스가 이루는 곡선 모델링, 안테나의 세부구조 모델링, keypad의 상세한 모델링이 매우 어렵거나 때로는 내부 부품의 경우에는 모델링이 거의 불가능하다는 단점을 갖고 있다.

휴대전화의 인체 영향에 관련된 수치해석 연구는 다른 보조장비가 전혀 요구되지 않고 개인용 컴퓨터만으로도 충분한 연구가 가능하기 때문에 수많은 대학과 연구소 등으로부터 방대한 연구결과를 접할 수 있다. 한국전자통신연구원에서는 지난 '97년 이

동통신단말기의 인체 영향 관련 사업의 일환으로 평면파 및 휴대전화의 수치해석 기초연구를 시작하였다. 본 고에서는 현재 현안이 되고 있는 이 분야의 연구 동향을 언급하고 당 연구원에서 그 동안 연구되어 온 수치해석 방법을 이용한 연구 주제들과 그 결과들을 살펴보고자 하겠다.

II. 수치해석 동향

현재 CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization, 유럽 전자기술 표준위원회)^[1]과 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 미국 전기·전자학회)는 휴대전화의 전자파흡수율(SAR) 평가 표준을 마련하고 있으며, 그 중 IEEE SCC(표준조정위원회)34 SC(소위원회)2는 실험적 방법 이외에 해석적 방법에 대해서도 표준화를 꾀하고 있다. 아직 완료되어야 할 많은 과제를 안고 있지만 본 절에서는 관련된 연구 논문들과 IEEE의 표준화 동향을 중심으로 수치해석에 의한 휴대전화의 인체영향 평가 시에 고려하여야 할 사항에 대해 기술하고자 한다.

연구 논문들은 기기의 적합성 평가를 위한 연구 이외에 통화 중 머리 내의 체온 상승, 주변의 전자기학적 환경영향, 통화 중이 아닌 시험위치에 대한 노출량 고찰 등 연구 범위가 매우 다양하다. 여기에서는 해당 인체보호기준인 국부 전자파흡수율 평가와 관련된 현안들을 주로 다루기로 하며, 전자파 흡수율 기준값에 대해서는 여러 문헌들을 참고하기 바란다^{[1]-[4]}.

IEEE SCC34 SC2 WG2에서는 무선통신기기로 인한 인체 내 전자파 흡수율 첨두치 결정을 위한 수치해석 방법의 실행권고 초안을 마련 중이다. 이 초안은 비공식적이므로 언제든지 변경될 수 있으며, 계속하여 검토, 수정 중에 있으나 여기에 관련된 회원들만 수십 명에 달하고 실험적 방법 표준화가 진행되는 WG1의 연구결과와 긴밀한 관계 하에 진행되고 있기 때문에 현재로서는 가장 집결된 연구동향을 엿볼 수 있다.

IEEE SCC34는 1995년 6월에 설립되었으며, 휴대용 무선 송수신기, 무선 LAN 및 유사 기기 등 특정 휴대용 무선 기기들이 특정한 SAR 기준을 충족시키는지 평가하기 위한 프로토콜 개발을 위해, SC2가 1997년 2월에 설립되었다. SC2 (이하 "IEEE"라 언급하도록 함)가 다양한 범위의 기기들을 커버하지만 현재 진행 중인 실행권고 초안은 전적으로 셀룰러, PCS 등 개인 무선 통신 서비스에 사용되는 휴대용 무선 전화 평가에만 국한한 것이다.

최근 연구 논문들의 90% 이상이 전자파 흡수율 분석을 위한 수치해석 방법으로 시간영역 유한차분법(FDTD) 알고리즘을 사용하고 있으며, IEEE도 FDTD 기법으로 제한하고 있다. 전자파흡수율 분석을 위해서는 다른 수치해석 기법도 사용 가능하지만 현재 국부 흡수량 평가를 위해 해부학적 인체 모델을 해석하는 데에는 FDTD기법이 가장 적절한 기법이며, 기법 자체의 장단점이라든가 다른 기법과의 차이점을 여기서 언급하지는 않도록 한다. FDTD기법에 의한 휴대전화의 전자파 흡수율 해석이란 휴대전화와 인체의 수치적 모델을 마련하고 이들의 적절한 상대배치 하에서 재편성된 메쉬(mesh)를 생성한 후 계산공간 내의 전자기장 분포를 FDTD 알고리즘에 따라 계산한 후 후처리 과정, 즉 인체 모델 내의 모든 계산 점에서의 전기장 값을 전자파 흡수율 값으로 변환하고 국부 질량 (1 g 또는 10 g)에 대해 평균된 전자파 흡수율의 최대값을 얻는 과정

을 이르는 것이다. 이 과정에서 표준화를 위해 거론되거나 기타 논문에서 논의되는 사항들 중에 FDTD 기법에서의 관련 문제들과 모의인체를 중심으로 기술한 뒤 기타 시험위치, 질량 평균 전자파 흡수율 계산 과정 등에 대해 언급하도록 하겠다.

휴대전화에 의한 전자파 흡수율 계산과 관련하여 FDTD 기법 자체에 대해 자주 논의되고 있는 사항으로 FDTD cell 크기 및 형태에 대한 조건, 경계조건, 수렴조건 등을 들 수 있다. 현재 이들 조건에 대해 완성된 표준은 없으나 FDTD cell 크기의 상한은 흔히 관심 대역에서 최단 파장의 1/10이다. 이것은 FDTD 그리드 상의 수치적 분산이 받아들일 만한 수준 내로 제한됨을 보장한다. 그러나 이보다 훨씬 짧은 그리드 크기가 실제 문제에서 요구될 수 있다. 휴대용 무선기기의 몸체와 안테나, 인체 모델이 종종 고정된 직교 그리드에 적합하지 않는 세밀한 생김새와 복잡한 기하학적 형상을 갖기 때문에 이들의 수치적 모델링에 대한 문제가 흔히 제기된다. 크게 두 가지 형태의 모델링 오차를 제기할 수 있는데 첫번째 형태는 매질 경계의 계단식 근사에 기인한다 (예를 들면, 헬리컬 안테나를 모델링할 때에 곡선 구조를 직교 그리드에 적용, 조직 층의 두께와 굴곡이 매우 다양한 인체의 외곽면 또는 조직간의 경계면의 계단식 근사 등). FDTD에서 계단식 오차에 대해서는 [5]에 잘 문서화되어 있다. 인체 모델의 FDTD cell의 크기는 해부학적 모델을 사용할 경우 MR(Magnetic Resonance), CT와 같은 이미지의 정밀도와 근본적으로 관계되므로 이들 이미지를 확보할 때 해상도를 적절히 조정할 필요가 있다. 기존의 생체 모델을 구입 또는 다운로드 받아서 사용할 경우, FDTD cell 한 개에 대해 Δx , Δy , Δz 간의 차이가 큰 경우 (보통 2배 이상)에는 적절히 데이터를 가공하여 가능한 오차를 줄이도록 할 필요가 있다. 두 번째 형태의 모델링 오차는 그리드 크기보다 더 작은 크기의 대상물 (예를 들면, 가는 도선, 박막(薄

膜), 그리고 좁은 슬롯)이 포함되는 경우에 발생한다. 기존의 FDTD 알고리즘은 이러한 대상물의 존재를 무시하거나 또는 그들이 셀 전체 부피를 차지한다고 가정하게 된다. 어느 쪽 접근 방법이든 분명히 오차를 발생시킬 것이다. 그 대상물의 크기 (예를 들면, 도선 반경)가 너무 작아서 더 세밀하게 이산화시키거나 그리드 내로 대상물을 완벽하게 포함하도록 하위-그리드 (sub-grid)를 사용하기도 하나 이런 경우 계산 시간 및 자원 측면에서 실용적이지 못한 단점을 갖기도 한다.

휴대전화와 인체 모델을 포함하는 개방공간에 대한 경계조건으로는 인체 매질 내에서는 전자파가 잘 감쇄하므로 Mur 2차 경계조건 정도를 사용하여도 다른 오차를 발생시키는 요인에 비해서는 문제점이 없는 것으로 판단된다. 완전정합층을 갖는 흡수경계조건 (PML Absorbing Boundary Condition)을 사용하는 경우에는 산란체로부터 경계조건 적용면까지의 거리를 매우 짧게 두어도 경계면으로부터의 반사를 거의 완벽하게 구현할 수 있는 장점이 있는 반면 흡수층의 적절한 두께와 계산 자원 등을 고려하여야 한다. 최근 Gianluca Lazzi 등^[6]은 계산 자원의 감소를 위해 해석 대상인 팬텀을 일부 절단하여 절단면에 완전정합층을 갖는 흡수경계조건 (PML Absorbing Boundary Condition)의 사용을 시도하기도 하였다. 그러나 이 경우에는 머리형상의 차에서 유발되는 SAR 값의 변화를 감지할 수 없다는 단점이 있기도 하다. 기타 전자기 소스 인가에 대해 결과 값이 수렴하는지 여부를 판단하는 조건과 방법 등에 대해서는 현재 IEEE에서 고려 중에 있다.

해석에서 사용되는 모의 인체는 '90년대 이후 해부학적 모델을 많이 사용하고 있으나 해부학적 모델은 개인 컴퓨터 상에서 직접 구현할 수 있는 것이 아니라 MRI나 CT 또는 해부에 의한 실제적인 이미지에 바탕하여 적절한 가공을 통해 얻을 수 있다.

현재 휴대전화에 대한 객관적 평가를 위한 국제적인 표준모델이 규정된 바는 없으나 IEEE나 CENELEC에서는 동일한 팬텀으로 추진 중이며, 그 모델은 미국 군인집단 체위의 상위 90 %를 표준모델로 삼고 있어 우리의 성인 남성의 머리 모델과는 다소 차이가 있다. 이것은 어디까지나 적합성 시험을 위해 측정과 해석에서 모두 동일한 결과를 얻도록 하며, 최악의 경우를 모의하기 위해 식 (1)과 (2)에 의해 300~3,000 MHz 대역에서 머리의 평균적인 유전율과 도전율을 채택한 것이므로 다조직을 갖는 실제적인 모델과는 별개의 것으로 생각할 수 있다. 우리의 전자파 흡수율 측정기준에서도 동일한 모델을 채택하고 있다^[7].

$$\epsilon_r = 46.52 - 0.006(f) + 1.59 \times 10^{-6}(f)^2 - 1.40 \times 10^{-10}(f)^3 \quad (1)$$

$$\sigma(S/m) = 0.8054 + 0.00015(f) + 4.12 \times 10^{-8}(f)^2 + 2.87 \times 10^{-11}(f)^3 \quad (2)$$

여기에서 주파수 f 의 단위는 MHz이다.

상기의 기술 내용 이외에도 개개인들의 수치 계산 도구가 인체 머리모델 옆에 위치한 휴대전화의 SAR 적합성 평가에 적절한지 알아보는 데 목적을 갖는 벤치마크 모델과 오차 마진의 평가, 머리모델과 휴대전화의 재현성 있는 배치 (또는 시험위치) 방법, 머리와 휴대전화를 포함하는 계산공간에서의 전자기적 분포 계산 후의 후처리 과정, 즉, 시간영역 전기장 값으로부터 적절한 시간 평균 전자파 흡수율로의 변환 및 질량 평균된 전자파 흡수율의 적절한 계산 과정^[8] 등이 표준화를 위해 논의되고 있다.

III. 휴대전화에 대한 수치해석

앞 절에서는 휴대전화의 전자파 흡수율과 관련된

국제적인 표준화 연구동향 및 현안 사항을 간단히 기술하였다. 한국전자통신연구원에서는 지난 '97년부터 전자기장에 대한 생체 영향 연구 사업을 시작하였으며, 유사한 시기에 국내에서 RF대역 인체의 전자기장 노출 수치해석 분야는 전파연구소, 한국과학기술원, 표준과학연구원, 포항공대, 충북대, 숭실대, 전남대 등에서 휴대전화 노출에 대해 SAR 또는 온도 상승 측면에서 연구를 수행하여 왔으며, SK Telecom, 삼성전자에서 이동통신 기지국 및 휴대전화에 대한 측정(실험) 분야의 연구를 수행한 바 있다.

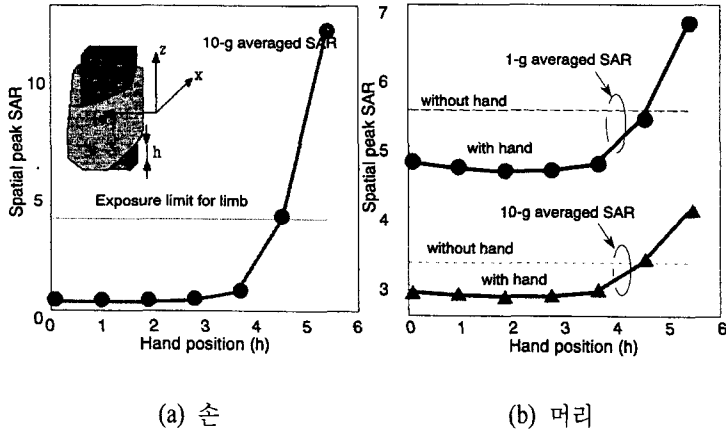
현재 국외, 특히, 선진국에서는 자국의 인체모델, 통신 대역 등을 대상으로 수치계산 평가기술 및 방법 등을 개발하고 있다. 이동통신기술산업에서 소위 선진국이라 할 수 있는 우리나라는 국민 체위에 있어 서양인과 매우 다르며, 더구나 휴대전화 사용 연령이 더욱 낮아지고 다양한 디자인을 추구하고 있어 이에 따른 노출 다양성은 반드시 비교되어야 하고 또한 고유의 대책 개발이 요구된다. 당 연구원은 휴대전화와 관련된 인체 노출기준의 적합성 평가기준 마련에 따른 기초 연구를 목적으로 '98년도부터 수치해석적 접근을 시작하였으며, 두부 크기 및 형태, 손에 위치, 시험위치 등에 따른 전자파 흡수율 분석과 기타 평가 표준화와 관련된 연구 주제들이 고려되었었다.

최근 영국에서는 청소년에 대한 휴대전화 사용 제한을 권고한 바 있어 어린이, 노약자에 대한 휴대전화 사용이 건강에 미치는 영향이 더 높지 않을까 하는 우려를 가중시키고 있다. 더구나 동서양인의 다른 체위를 감안한다면, 우리로서 이러한 체위의 차에 의한 노출량 차이는 반드시 연구되어야 할 분야로 볼 수 있으며, 또한 적합성 시험에서 최악의 조건을 취하기 위해서는 두부의 형태별 고찰은 필수적인 연구라 할 수 있다. 당 연구원에서는 산업자원부 산하 기술표준원의 국민표준체위조사를 근거로 하여, 국내 표준 체위에 근접하는 자원자를 선정,

MR 이미지를 획득한 후 해부학 전문가에 의해 조직분류를 수작업으로 구현한 해석 인체 모델과 미국 NLM(National Library of Medicine)의 Visible Human Project에서 얻은 이미지를 바탕으로 제작된 흑인 성인 모델에 대한 노출량이 비교된 바 있으며^{[9],[10]}, 이 연구를 기초로 노출 대상의 인종, 연령 등에 따른 비교 연구가 진행되고 있다.

또한 노출 상태에 따른 노출량을 분석하기 위해 휴대전화를 잡고 있는 손의 위치와 휴대전화에 대한 두부의 배치 (시험위치)가 고려되었었다^[11]. 손의 위치에 따른 국부 전자파 흡수율 분석을 위한 시험 위치는 직립한 머리에 대해 휴대전화를 양 쪽 귀를 잇는 축에 대해 60° 정도 회전하여 송화부가 입에 가까이 가도록 한 위치이므로 비교적 높은 전자파 흡수율 값이 산출되었다. 이 연구의 목적은 적합성 평가 시에 손의 고려 여부의 적절성 및 손의 위치에 따른 머리의 국부 전자파 흡수율 값을 고찰하고자 한 것이다. [그림 1]에서 보는 바와 같이 휴대전화 위쪽을 잡을 경우 손의 SAR도 높아질 뿐 아니라 머리의 전자파 흡수율도 일정범위를 넘으면, 손의 존재를 고려하지 않은 경우보다 더 높게 올라 갈 수 있다. 그러나 고려된 대부분의 손의 위치들의 결과에서 손을 고려하지 않은 경우가 더 최악의 조건으로 볼 수 있어 현재의 적합성 시험에서 손을 고려하지 않아도 큰 문제가 없음을 시사한다. 그러나 손 자체의 전자파 흡수율 시험은 현재 시행하지 않고 있는 데 이에 대해서는 향후 새로운 형태의 휴대전화 및 안테나 디자인 등을 고려한다면, 시험의 필요성이 제기될 수 있고 측정방법 등에 대한 연구의 여지가 충분히 있다.

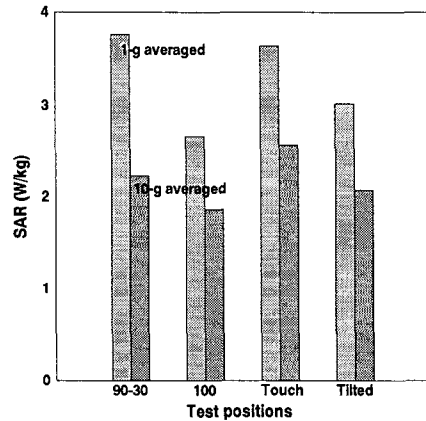
그리고 머리에 대한 휴대전화의 다양한 시험위치가 고려되었으며, 그 중 IEEE나 CENELEC에서 표준화를 위해 거론되어온 몇 가지 시험위치들에 대한 해석 결과를 [그림 2]에 나타내고 있다. 해석된 시험위치는 양 귀와 입을 잇는 가상 평면 상에 휴대



[그림 1] 손의 위치에 따른 국부 전자파 흡수율 (휴대전화의 복사전력=0.6 W).

전화를 귀에 부착하면서 송수화부를 포함하는 면을 인체의 시상면(sagittal plane)에 평행하게 위치시킴으로써 휴대전화의 장축과 양 귀를 잇는 선이 이루는 각이 90°가 되게 한 후 수화부를 중심으로 양 귀를 잇는 축에 대해 아래로 30° 회전시킨 위치(90°-30° 위치), 휴대전화의 장축과 양 귀를 잇는 선이 이루는 각이 100°가 되게 하는 위치(100° 위치), 90° 위치에서 뺨에 닿을 때까지 전화를 입으로 이동시킨 위치(접촉 위치), 그리고 접촉 위치에서 수화부를 중심으로 머리 쪽으로 15° 회전시킨 위치(경사 위치) 등 4가지이다. 그림에서 접촉 위치와 90°-30° 위치가 가장 높게 나타나며, 그 다음 경사 위치, 100° 위치 순으로 국부 전자파 흡수율이 나타난다. 머리의 형태에 따라 시험위치에 따른 국부 전자파 흡수율은 다르게 나타날 수는 있으나 아무튼 현재 IEEE나 CENELEC, 그리고 우리의 시험기준^[7]에서 채택하고 있는 시험위치인 접촉위치와 경사위치에서 대체로 국부 전자파 흡수율이 높게 산출되고 있어 시험기준이 최악의 상황을 고려한다고 할 수 있다.

기타 FDTD 알고리즘에 의한 시간영역 전자기장 해석 후 전기장으로부터 질량 평균된 전자파 흡수



[그림 2] 시험위치와 머리의 최대 국부 전자파 흡수율 (휴대전화의 복사전력=0.6 W).

율 계산 알고리즘의 적절성 등이 분석된 바 있으며^[12], 향후의 무선통신 서비스에 따른 휴대전화의 노출환경 변화를 고려하여 화상통화 상태에서의 노출량 평가를 고려 중에 있다. 이제까지 시험위치나 머리 형상 등은 귀(외이)와의 관계를 보다 명확히 하는데 역점을 두었으며, 그것은 현재 서비스되는 음성 통화시의 사용자 자세와 관계가 있기 때문이다. 그러나 향후 서비스 계획 하에 있는 IMT2000의 경우에는 사용 주파수도 높아지고 화상 통화를 하는

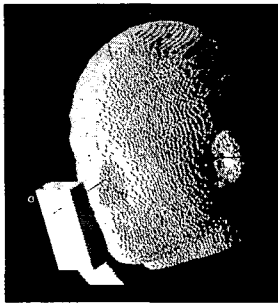
경우 통화 자세도 달라지기 때문에 피부 표면 또는 눈에 영향을 고려하는 것이 바람직하며, 모의 인체 모델도 표준화 측면에서 재검토되어야 할 것이다. 이 연구의 일부 결과로서 화상 통화 자세에서 전화기와 인체 간의 거리에 따른 최대 국부 전자파흡수율 [그림 3]에서 보여준다. 휴대전화 몸체와 안테나 형태는 기존의 모델과 유사하게 가정하며, 1.0 W의 복사전력을 기준으로 모든 결과를 출력하도록 하였다. 동작 주파수는 모두 2.0 GHz로 하고 화상통화

를 가정하여 눈의 명시거리를 변화시키면서 정면에 전화기를 위치시킨 경우에 대해 $1 \text{ g}/10 \text{ g}$ SAR을 비교하고 있으며, 약 6 cm 이상의 이격거리에서는 전자파흡수율 값이 10^{-5} 이하로 떨어져, 전혀 건강에 영향을 주지 않을 것으로 보이지만, 휴대전화의 형태가 현재의 개념과는 전혀 다른 안부(眼部)에 착용하는 화상 전화기 등 새로운 모델의 출현을 고려한다면 모의 인체를 포함한 제반적인 추가 연구가 요망된다.

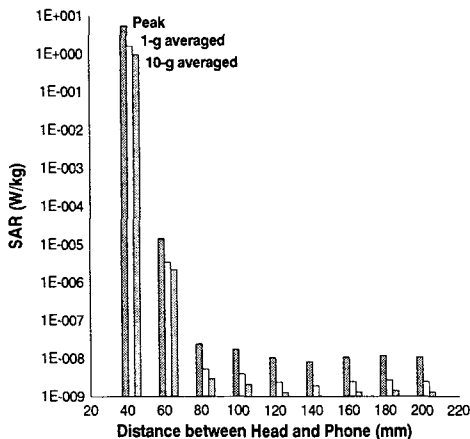
상기의 연구주제들은 일부 완료되거나 현재 진행 중에 있으며, 이러한 제반적인 수치해석을 재현성 있고 편리하게 추진하기 위해서는 기본적으로 FCC나 CENELEC에서 요구하는 자유로운 시험위치와 다양한 해부학적 모델의 DB화, 간단한 휴대전화의 디자인, 쉽게 알 수 있는 결과 표현 등의 기능이 제공되는 사용자 SW를 구비하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이러한 기본적인 욕구를 충족하기 위해 당 연구원에서는 현재 SAR 계산 SW (SARCAS)를 개발 중에 있다. 이는 주로 휴대전화의 전자파흡수율 평가를 목적으로 하며, 향후 휴대전화 외부 디자인, 광범위한 시험 위치, 기타 ERP (유효복사전력)와 복사 패턴의 효과적 표현 등 몇 가지 실용적인 기능을 추가할 계획이다.

IV. 결 론

이제 우리 국민들의 상당 수는 유선전화 못지 않게 휴대전화 사용 빈도가 높으며, 특히 청소년들 사이의 휴대전화 보급율은 상당히 높다. 향후 무선통신은 지속적으로 새로운 서비스가 전개되면서 발전을 거듭할 것이다. 이에 역기능적으로 항상 제기되는 문제들 중 하나가 건강 상의 안전 문제이며, 이에 대한 간접적인 평가 방법으로서 수치해석 또한 제 몫을 하기 위해 거듭 발전되어야 한다. 또한 평가 방법 및 노출 기준은 새로운 무역장벽으로 작용



(a) 시험위치



(b) 이격 거리에 따른 최대 전자파 흡수율

[그림 3] 화상통화 자세와 국부 전자파흡수율 (휴대전화의 복사전력= 1.0 W).

할 소지가 있기 때문에 항상 국제적 흐름과 관련 정보교류에 적극적이어야 할 것이다.

당 연구원은 휴대전화의 수치해석에 대한 국제적 표준화 동향 검토와 적절한 평가 기능을 제공하는 수치해석 도구 마련에 연구의 주안점을 두고 있으나, 무선 통신 대역의 상향화 및 기지국/방송국 송신소 주변의 노출 등 보다 광범위한 노출 상황 등을 고려하기 위해서는 현재까지의 평가 방법을 확장하고, 다른 개념의 수치해석 기법도 도입할 필요가 있다.

V. 감사의 글

본 연구는 정보통신부 전파감리과의 '전자파 인체영향연구' 지원을 통해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 정보통신부 고시 제2000-91호 "전자파인체보호기준", 2000.
- [2] ICNIRP, "International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [3] CENELEC, *DD ENV 50166-2*, Human exposure to electromagnetic fields- High-frequency (10 kHz~300 GHz), 1995.
- [4] ANSI, *ANSI/IEEE C95.1-1992*: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, New York, IEEE, 1992.
- [5] Andreas C. Cangellaris et. al, "Analysis of the numerical error caused by the stair-stepped approximation of a conducting boundary in FDTD simulations of electromagnetic phenomena," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no. 10, pp. 1518-1525, 1991.
- [6] Guianluca Lazzi, et. al, "Use of PML absorbing layers for the truncation of the head model in cellular telephone simulations", *IEEE Trans. on MTT*, vol. 48, no. 11, pp. 2033-2039, Nov., 2000.
- [7] 정보통신부 고시 제2000-93호 "전자파흡수율 측정기준", 2000.
- [8] Kris Caputa, Michal Okoniewski, and Maria A. Stuchly, "An Algorithm for computations of the power deposition in human tissue", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 102-107, Aug., 1999.
- [9] 이애경 외, "이동통신단말기에 노출된 인체 두부에 따른 전자파 비흡수율 비교," 대한전자공학회 논문지 제 37권, TC편, 제11호, pp 33-41, 2000.
- [10] A. K. Lee et. al, "Effect of the outer shape of a head on SAR evaluation of a mobile phone," *BEMS Twenty-second Annual Meeting, Abstract Book*, 130-131, June, 11-16, 2000.
- [11] 이애경 외, "이동통신단말기 안테나 배치에 따른 두부의 전자파 흡수율," 한국전자파학회 논문지 제10권, 제7호, pp. 1095-1103, 1999.
- [12] A. K. Lee et al, "Electromagnetic energy absorption in a human head for a cellular phone at 835 MHz," *Proceedings of 1998 APMC(Asia-Pacific Microwave Conference)*, vol. 2, pp 873-876.

≡ 필자소개 ≡

이 애 경

한국전자통신연구원
무선방송기술연구소
전파기술연구부

조 광 윤

한국전자통신연구원
무선방송기술연구소
전파기술연구부

최 형 도

한국전자통신연구원
무선방송기술연구소
전파기술연구부