

제 출 문

본 보고서를 「전자파 인체 유도전류 및 SAR 계산 모델링 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2003 . 12 . 30 .

연구책임자 : 육종관 (연세대학교)

연 구 원 : 이명원 (연세대학교)

김정민 (연세대학교)

연구보조원 : 조한신 (연세대학교)

김우태 (연세대학교)

위상혁 (연세대학교)

이경원 (연세대학교)

요 약 문

1. 과 제 명

전자파 인체 유도전류 및 SAR 계산 모델링 연구

2. 연 구 기 간

2003년 2월 1일 ~ 2003년 12월 31일

3. 연구책임자

육 중 관 (연세대학교 전파통신연구실)

4. 계획 대 진도

가. 월별 추진내용

세부연구내용	연구자	월별 추진일정												비고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1) 자료 조사														
-국내외 논문 조사	위상혁													
-인체 모델링에 관한 자료 수집	조한신													
-수집된 자료의 분석 및 검증	김우태													
2) 인체 모델링과 휴대폰 모델링														
-FDTD 해석을 위한 모델링 · CAD 파일을 이용한Folder type 휴대폰 및 SAM phantom 모델링	이명원													
-모델링의 적합성 검증	김정민													
3) 인체 유도 전류 연구														
-개발한 인체 모델링에 수치 해석으로 적용 가능한 인체 유도 전류의 수식을 연구	김정민													
4) SAR 계산을 위한 FDTD 해석														
-SAM phantom 및 휴대폰 모델을 이용하여 FDTD 방법으로 SAR 계산 및 결과 분석	김우태													
분기별 수행진도 (%)		20%			20%			30%			30%			

나. 세부 과제별 추진사항

1) 자료 수집 및 분석

(1) 인체 두부 모델링에 관한 국내외 논문 조사

- 인체 두부에 대한 모델은 주로 세부적인 항목까지 고려
뼈, 뇌, 안구, 피, 피부조직 등
- Magnetic image(MR)을 이용한 인체두부 모델

(2) 폴더형 휴대폰의 SAR에 관한 논문 조사

- 현재 SAR의 관한 연구에 대한 경향 조사.
- 폴더형 휴대전화는 주로 도체 박스로 모델

(3) 인체 유도 전류에 관한 논문 조사

- 인체 전신에 유도된 전류 계산.
- Debye 방정식을 이용한 해석.

2) 모델링 작업 및 인체유도전류 연구

(1) 구형 두부 모델에 관한 전자파 흡수율 계산 및 SAM 팬텀 데이터 보정

① 구형두부 모델에 관한 전자파 흡수율

- 주파수에 따른 SAR 분포 변화
- 입력 전원의 위치변화에 따른 인체 두부내 SAR 계산

② SAM 팬텀 데이터 보정

- 인체의 윗부분을 보정.
- SAR 계산을 위한 물질을 채움.

(피부조직 및 내부물질로 나워어지는 2가지 물질로 모델링)

(2) 인체 모델링 및 휴대폰 모델링

- 인체 모델 및 휴대폰 모델 적합성 검토

(3) 인체 유도 전류에 관한 수식을 정리하여 FDTD 해석

① $(FD)^2TD$ 를 이용하여 $E \rightarrow H \rightarrow D$ 로 이어지는 loop 상태까지 반복

- 기본적인 맥스웰 방정식으로 유도.
- 두 개의 시상수를 가지는 Debye 방정식을 통한 유도.

② 유도전류 계산 (D를 이용)

-loop type current meter 방법

-the convolution 방법

- 3) 인체모델과 휴대폰 모델을 이용하여 FDTD방법으로(XFDTD tool) SAR 계산 및 결과 분석

5. 연구 결과

- 1) 휴대폰의 전파흡수율에 관한 논문 조사를 통해 해석 동향 파악
- 2) 국내외 법규화 조사를 통한 전자파 발생 기기에 대한 기준 조사
- 3) 구형 두부 모델에 대한 전파흡수율 계산
- 4) 인체 유도 전류에 관한 수식을 정리하여 FDTD 해석이 가능해짐
- 5) 인체 모델이나 휴대폰 모델을 CAD를 사용하여 있는 그대로 design 함으로써 SAR 오차를 줄임
- 6) SAR 해석에 많이 사용되고 있는 FDTD방법을 이용(XFDTD tool 사용)함으로써 SAR 계산 및 인체 유도전류의 값의 신뢰도를 높임

6. 기대 효과

- 기존의 간단한 폴더형이나 막대형을 가지고 구하는 SAR 값 보다는 CAD로 완전히 design된 폴더형태를 가지고 SAR을 구함으로써 폴더형태의 SAR 기준값을 마련하도록 함.

7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규격	수량	용도	보유현황	비고
IBM-PC	Pentium4	20	CAD 파일 보정	보유	
Laser Printer	HP4200	1	출력용	보유	

8. 기타사항

없음

SUMMARY

In this study, we have performed numerical simulations for specific absorption rate (SAR) values inside a human head model due to a folder-type cellular phone. The mobile phone has been CAD modeled from a commercially available device operating at 835 MHz. To compare the SAR values between the folder-type phone and bar-type one, the SAR value has also been computed for the bar-type phone under the same condition with the folder-type. In this work, the IEEE standard phantom model has been used as a head model and it is slightly modified to improve accuracy.

Today's mobile phones require proof of compliance to standard limits of the specific absorption rate before they can be allowed onto the market. SAR is obtained from calculation of the power absorbed by tissue. It is obvious that as the impinging electromagnetic fields increases on the human head the SAR is proportionally increases. As a result, standard value is determined by regulation regarding the human body's SAR and various researches are in progress to develop ways of reducing SAR values. Accordingly, it would be beneficial to develop a technique reducing SAR if we have accurate method of estimating SAR values in the human body.

To know tendencies and analyze data of the SAR, we have investigated various reports and published documents regarding phantom modeling, SAR of folder-type phone, and SAR calculations., and those results on numerical formula of currents induced in human body are summarized. These are based on research and analysis of the SAR calculation.

We modeled cellular phone and phantom in CAD. In the cellular phone, both external and internal parts of a folder-type phone are

modeled in detail by using computer aided design (CAD) software. The phantom is composed of two materials: inside material and the outside skin material. To calculate the SAR using the Finite-Difference Time-Domain method, we converted them into FDTD cell domain.

We performed the SAR calculation using commercial XFDTD tool and a commercially available phone modeled is used in CAD form and obtained the more accurate SAR values for folder-type phone. We have found that the SAR of folder-type phone is much smaller than that of bra-type phone, and the maximum SAR position of the folder-type phone is farther than that of the bar-type phone from a human brain. We wish this work could become a basic material for an accurate SAR analysis and help to make a standard limit of the SAR.

목 차

표 목 차

그림목차

제 1장 서론	1
제 2장 전자파의 인체영향과 SAR 해석동향	2
제 1절 국내외의 연구 동향	2
제 2절 SAR 해석 동향	10
제 3장 전자파-인체보호 기준의 법제화 현황	15
제 1절 외국의 전자파 규제 현황	15
제 2절 국내의 전자파 및 인체보호기준에 대한 현황	17
제 4장 인체유도 전류 연구	22
제 1 절. (FD) ² TD (Frequency Dependent Finite Difference Time Domain) 방법	22
제 2 절. 유도 전류 계산	24
제 3 절. Specific Absorption 계산	26
제 4 절. 총 에너지 계산	27
제 5장 SAM Phantom(인체두부모델) 및 휴대폰 모델링	28
제 1절 SAM Phantom(인체두부모델) 모델링	28
제 2절 휴대폰 모델링	32

제 3절 Antenna 설계	35
제 4절 인체두부와 휴대폰의 병합	44
제 6장 XFDTD를 이용한 SAR 계산 및 결과	45
제 7장 결 론	52
참고문헌	53

표 목 차

표 3-1. 전자기장 강도기준(일반인)	19
표 3-2. 전자기장 강도기준(직업인)	20
표 3-3. 국부노출에 대한 전자파 흡수율	20
표 5-1. 주파수 835 MHz 인 정상모드 helical 안테나의 계산 값	42
표 6-1. 시뮬레이션 조건	45
표 6-2. 1W 로 정규화 시킨 SAR (1 mm, 2 mm)	48
표 6-3. Cell size에 따른 SAR 비교(1 W 정규화)	48
표 6-4. 실제 인가되는 전력 24 dBm을 고려한 SAR (1 mm, 2 mm)	49
표 6-5. Cell size에 따른 SAR 비교 (24 dBm 정규화)	49
표 6-6. 1W 로 정규화 시킨 SAR (folder-type, bar-type)	53
표 6-7. Folder-type과 Bar-type phone 의 SAR 비교(1 W 로 정 규화) 시킨	53
표 6-8. 실제 인가되는 전력 24 dBm을 고려한 SAR (folder-type, bar-type)	54
표 6-9. Folder-type과 Bar-type phone 의 SAR 비교(24 dBm 로 정규화)	54

그 립 목 차

그림 5-1.	상단부가 개방된 Phantom	29
그림 5-2.	보정된 Phantom	29
그림 5-3.	Phantom 내부의 전기장 측정	29
그림 5-4.	보정된 Phantom의 전체 모습	30
그림 5-5.	Solid-type의 인체모델 전면부	31
그림 5-6.	Solid-type의 인체모델 하반부	31
그림 5-7.	XFDTD tool에 import 되기 전의 휴대폰	32
그림 5-8.	XFDTD에 import 되기 전의 안테나 분리도 및 조립 도	33
그림 5-9.	2mm로 import된 휴대폰과 1mm remesh 한 후 보정 된 휴대폰	34
그림 5-10.	보정된 휴대폰의 전체적인 모습	34
그림 5-11.	Helical 안테나의 기하구조의 크기. 왼손방향으로 감은 helix	35
그림 5-12.	Helical 안테나의 한 권선을 펼친 모델	36
그림 5-13.	소형 루프와 이상적인 다이폴로 근사화한 정상모드 helical의 한 권선	37
그림 5-14.	정상모드 helical 안테나와 방사패턴	38
그림 5-15.	XFDTD에서 design된 안테나와 방사패턴	42
그림 5-16.	시간 변화에 따른 전계 변화	43
그림 5-17.	인체두부와 휴대폰의 병합	44
그림 6-1.	최대 SAR 위치	46
그림 6-2.	최대 SAR 위치에서의 전기장의 크기	47
그림 6-3.	최대 SAR 위치에서의 전도전류의 크기	47
그림 6-4.	휴대폰 몸체의 dimension	50

그림 6-5. Bar 형태의 안테나 방사패턴	51
그림 6-6. Bar 형태의 시간에 따른 안테나의 전계 변화	51
그림 6-7. Bar 형태 휴대폰의 최대 SAR 위치(xz plane)	52
그림 6-8. Bar 형태 휴대폰의 최대 SAR 위치(yz plane)	52

제 1 장 서 론

최근 무선 통신 기기가 발달하면서 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 국내외적으로 이에 대한 연구가 진행되고 있지만, 인체 유해여부에 대한 결론이 아직 나지 않은 상태이다. 이에 각국은 인체의 전파파흡수율(Specific Absorption Ratio ; SAR)에 관한 기준을 정하여 규제하고 있으며, 정확한 기준을 마련하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 우리나라 역시 SAR에 대한 규정을 2000년 전파법에 명시하고 전자파 발생기기에 대한 인체흡수 정도를 규제하고 있으며 SAR을 저감하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. SAR 저감 기술을 개발하기 위해서는 SAR의 정확한 해석이 선행적으로 이루어져야 한다.

현재 SAR을 해석하기 위해 다양한 수치해석기법이 사용되고 있는데 그 중에서 가장 많이 사용되고 있는 것은 FDTD(Finite Difference Time domain) 해석법이다. FDTD 해석법은 쉬운 알고리즘을 바탕으로 다른 수치해석기법보다 정확한 SAR 값 해석이 가능하다. FDTD 해석 초창기에는 인체두부를 간단한 형태의 모델(구형이나 평면형)로 사용하였지만, 오늘날에는 해부학적인 기법의 발달로 인체 모델을 실제적으로 구현할 수 있게 되었다. 또한 휴대폰에 대한 모델링 역시 모노폴 안테나와 도체박스가 결합된 초창기 형태에서 실제 설계도인 CAD 파일을 이용하여 실제 휴대폰에 가까운 모델을 사용할 수 있게 발전하였다. 휴대폰의 형태 역시 변형되어 과거에는 플립형이나 막대기형의 휴대폰이었지만 오늘날 휴대폰의 대부분은 폴더형태로 시장에 출시되고 있다. SAR 해석 역시 과거에는 플립형이나 막대기형에 대한 해석이 진행되었고 오늘날 폴더형에 대한 SAR 해석은 간단한 도체 박스 두개를 연결한 형태 모델에 대해서 이뤄지고 있는 상태이다.

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 폴더형 휴대폰의 CAD 파일을 이용하여 실제 휴대폰에 가까운 모델을 디자인하였다. 수정된 인체두부모델과 휴대폰 모델에 대해 FDTD 알고리즘 기반의 XFDTD를 이용하여 SAR와 인체유도전류를 계산하였다. 실제에 가깝게 구현된 휴대폰 모델을 이용함으로써 기존의 결과 보다 정확한 SAR 값을 얻어낼 수 있었다. 그리고 셀 크기에 따른 SAR값 비교와 간단한 막대형 휴대폰의 SAR 값을 비교하여 연구 결과를 폴더형 휴대폰의 SAR 기준 자료로 이용할 수 있도록 하였다.

제 2 장 전자파의 인체영향과 SAR 해석동향

제 1 절 국내외 연구 동향

무선 이동 통신 기기의 보급으로 무선 기기에 의한 인체유해에 관한 관심과 우려가 높아지고 관련 분야의 측정 기술이 발전하면서, 각 국가기관 또는 국제기구 등에서는 점차 모바일 휴대폰 같은, 인체에 밀착하여 사용하는 기기에 대해서 인체전자파흡수율(specific absorption rate 이하 SAR)의 제한을 규정하고 있다.

미국 및 일부 선진국들은 전자파가 인체에 유해 할 수도 있다는 가정 하에 협회나 학회 등 민간기관을 통해 전자파 노출에 대한 인체 보호 기준을 마련하여 권고기준으로 시행하고 있으며 일부 국가에서는 이를 강제 기준으로 적용하여 시행하고 있다. 따라서 이번 절에서는 주요 국가들의 전자파 인체영향 연구와 국제적 연구 동향에 대해서 살펴보았다.

1.WHO의 EMF 프로젝트

정전기장 및 시변전기장 노출의 잠재적인 영향은 일반인과 직업인의 건강에 대해 상당한 관심을 불러일으키고 있으며, 과학적으로 명확히 규명할 필요가 있다. 전자기장(EMF)은 우리 생활에 영향을 미치는, 가장 일반적이고, 가장 빨리 성장하고 있는 환경요인들 중의 하나로서 이에 대한 불안과 걱정이 확산되고 있다. 암, 행동양태의 변화, 기억상실, 파킨슨씨병, 치매, 그리고 많은 다른 질병과 같은 건강상의 영향들이 전자기장에 대한 노출이 원인인 것으로 제기되어 왔다.

이러한 관심사를 다루기 위해, 세계보건기구(WHO)는 국제 EMF 프로젝트를 만들고, 국제비전리복사방호위원회(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer), 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission), 국제노동기구(International Labor Office), 국제전기통신연합(International Telecommunication Union), 유엔 환경프로그램(United Nations Environment Programme), 북대평양조약기구(North Atlantic Treaty Organization), EC (European Commission)의 40개 이상의 국가기관, 그리고 영국 국립복사방호국(National Radiological Protection Board), 독일 연방복사방호국(Bundesamt für Strahlenschutz), 스웨덴 카롤린스카연구소

(Karolinska Institute) 및 환경의약연구소(Institute of Environmental Medicine), 미국 식품의약청(Food and Drug Administration), 미국 국립환경건강과학연구소(National Institute of Environmental Health Sciences) 및 미국 국립직업건강연구소(National Institute of Occupational Health), 일본 국립환경연구소(National Institute for Environment Studies)등과 협력하여 국제 EMF프로젝트를 추진하고 있다.

국제 EMF 프로젝트는 0~300 GHz 주파수 영역의 정전자기장 및 time harmonic 전자기장에 대한 노출이 건강에 미치는 영향을 평가하는 연구계획으로 주파수 영역은 정전기장(0 Hz), 극저주파수(ELF, > 0~300 Hz) 및 무선주파수(RF, 300 Hz~300 GHz)등 세 개의 영역으로 나누어져 있다. 이 프로젝트는 1996년 WHO에서 시작하여 2005년까지 연구를 진행하도록 되어 있다.

가. EMF프로젝트의 연구 목표

- (1) EMF 노출이 야기할 수 있는 건강영향에 관한 관심사에 대해 사전 조정된 국제적인 견해의 제공.
- (2) 과학분야 문헌에 대한 평가와 건강영향에 대한 현황보고.
- (3) 보다 나은 건강위험 평가를 위한 연구 요망 분야의 모색
- (4) 중요 지식의 공백을 메우기 위하여 집중 연구 프로그램을 장려.
- (5) 연구 결과를 WHO의 환경건강기준(EHC) 문서에 반영하여 EMF 노출에 대한 공식적인 건강위험성을 평가.
- (6) EMF와 관련한 위험성 인지, 위험성 공지 및 위험성 관리에 대한 정보 제공.
- (7) 국가 당국자들에게 EMF 문제에 대한 조언 및 출판물을 제공.
- (8) 국제적으로 수용 가능한 EMF 노출에 대한 표준 개발

나. EMF프로젝트의 주파수 대역별 연구 진행 및 결과

(1) 무선주파수장(RF)

- (가) 높은 강도의 무선 주파수장(RF)은 인체조직을 가열하면서 건강상에 나쁜 결과를 야기시킬 수 있음을 입증.
- (나) 침투값의 세기가 강한 펄스와 약한 펄스가 혼합된 펄스형 무선 주파수 전자기장에 의해 발생하는 생물학적 영향을 확인하기 위한 연구 필요.
- (다) 이동전화시스템에 적용할 수 있는 향후의 연구는 900~2000MHz

와 적절한 펄스 및 변조패턴에 집중되어야 함.

- (라) 무선 주파수장(RF) 노출의 정확한 평가가 향후의 모든 연구의 필수적인 요소가 되고, 모든 연구팀에 RF 노출량 평가 전문가를 포함시키는 것이 연구의 수준을 유지하는데 필요함.
- (마) 장기간의 RF에 대한 각 개인의 노출을 편리하고 정확히 측정할 수 있는 기기나 평가방법의 개발은 향후의 역학 연구에 있어 우선 순위가 높은 사안임.

(2) 극저주파(ELF)전자기장

- (가) 일부 역학 연구들은 송전선 가까이 살고 있는 어린이들의 백혈병에 대한 위험성 증가를 시사하였으나, 이것이 극저주파 전자기장에 의한 것인지, 다른 환경요소 때문인지는 아직 결론이 나지 않음.
- (나) 50/60Hz 전자기장에 통상 중첩되는 고주파수의 고조파장 전자기장의 노출에 대한 가능한 생물학적 영향을 구체적으로 조사된 연구는 아직 발표된 것이 없음.
- (다) 이론적 근거를 바탕으로 할 때 과도현상 또는 고주파수의 고주파 전자기장은 정현파(50/60 Hz) 전자기장보다 생물학적 영향을 일으킬 가능성이 더 높음.
- (라) 실제 전자기장의 특성을 더 잘 묘사하고 환경에서 그 보편성을 판단하기 위하여 50/60Hz 전자기장의 과도현상과 다른 섭동에 대한 철저한 연구가 필요.

(3) 정전기장

- (가) 정자기장은 매우 높은 세기의 전자기장에서만 인체 건강에 영향을 주는 것으로 알려져 있음.
- (나) 정자기장의 노출로 인한 건강에 대한 장기간 영향에 관해서는 더 많은 정보가 필요함.
- (다) 현재까지의 연구들은 정전자기장이 환경이나 작업장에서 볼 수 있는 레벨에서는 유해한 건강영향을 주지 않으므로 추가 연구는 없음.

2. 미국

미국은 82년부터 민간기구인 미국표준협회(ANSI)와 국가방사보호위원회(NCRP)에서 인체보호 기준을 발표하였으며 미연방통신위원회(FCC)는 미국표준협회의 기준을 토대로 의견수렴을 거쳐 96년도에 방송국 등 출력전력이 큰 무선국에 한해 인체보호기준을 초과하는 지역은 민간인 출입통제를 의무화하도록 하였고, 인체보호기준을 초과하는 휴대전화는 시장출하를 금지하는 등 FCC규정으로 법제화 하였다.

또한 IEEE SCC34 SC-2 WG에서 이동통신단말기의 측정시스템 및 측정방법 등, SAR에 대한 표준화 연구를 주도적으로 진행하고 있다.

3. 유럽

유럽에서는 4년 주기로 계속되는 Framework Programme(FP)을 통하여 연구기술 개발활동(RTD; Research, Technological development and demonstration)을 지원하고 있으며, 이미 1998년에 "5차 FP"가 시작되어 2004년까지 4년의 계획으로 RTD지원활동을 전개 하고 있다. 주요 국가들에 대한 연구 활동을 살펴보면 다음과 같다.

가. 영국

영국은 2명의 전문가로 구성된 특별위원회에서 미성년자를 상대로 한 휴대전화 관측 행위를 금지하고 기지국을 설치할 때 정부 승인을 받도록 하였으며 전자파에 대한 경고문(사용장소, 사용시간, 인체 유해성 등)을 휴대폰 단말기에 명시하는 것을 제안하였다. 이에 영국 정부는 이들이 권고한 전자파흡수율(SAR) 및 인체유해 가능성에 대한 휴대폰 경고문 부착과 더불어 전자파 흡수율(SAR) 수치를 단말기에 부착하도록 하였다. 그리고 이와 더불어 휴대전화의 유해성을 학생들을 대상으로 한 정식 교육과정에 포함시켰다.

나. 독일

독일의 연방 방사보호국(Federal Radiation Protection Office)은 2002년 1월부터 연방 환경부(Federal Environment Ministry)의 협조와 감독 아래 4년 동안 휴대폰 안전에 대한 새로운 15개의 연구 프로그램에 대해 850만 유로의 예산을 시행하고 있다.

○ 주요 연구 프로젝트:

- (가) “Repacholi 연구”로 알려져 있는 호주 쥐의 임파암 실험의 재현. 쥐들에게 노출시키는 전자파흡수율(SAR)은 ICNIRP의 제한치보다 적거나 비슷한 수준으로 해야함(50 Hz EMF 이용)
- (나) 쥐의 눈과 귀에 GSM과 UMTS(3G) 신호를 노출시켰을 때의 영향과 여러 세대에 걸친 노출의 유전학적 또는 기타 요인들을 조사
- (다) 다양한 노출 환경에서의 송과체(pineal gland)에 대한 영향 조사
- (라) 펄스파와 연속파에 노출된 여러 종류의 세포들의 단백질 형태, 신호전달, 그 밖의 다른 기능들에 대한 연구
- (마) 고출력의 라디오파/마이크로파에 노출되는 직업인들 사이에서의 건강 위험도 연구에 대한 가능성 평가
- (바) 휴대폰 중계기에서의 노출과 건강 상태에 대한 파일럿 연구로서의 역학조사

다. 스위스

스위스는 연방 환경산림국토청(Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape: SAEFL)이 전자기장(electromagnetic field)에 관한 법안, 강제규정, 이에 필요한 활동들을 관장하고 있다. 스위스 연방법은 아직 전자기장을 소음이나 진동과 같이 ‘이질적인 효과(extraneous effects)’를 가지는 존재로 정의하고 있다.

스위스에서는 이와 같은 요소들을 2가지 단계로 나누어 처리를 하기로 방침이 정해져 있다. 첫째는 비록 인간에게 해를 준다는 것이 확실하게 밝혀지지 않았으나 가능한 추가 비용 없이 발생원 자체를 최대한 억제하여 방출을 못하게 하는 것이고 두번째는 인체에 해를 입히거나 문제를 발생시킨다는 것이 밝혀졌을 경우 연방 환경산림국토청(SAEFL)에서 과학적인 조사를 통해 노출한계 등을 준비하고 연방 자문회의에서 위험 수치를 정하여 권고치를 마련하기로 되어 있다.

○ 주요 연구 프로젝트 및 연구기관:

- (가) 전자파에 민감한 사람들(electrosensitive people)에 대한 연구
(Institute of Hygiene and Applied Physiology)
- (나) 휴대폰에서 인간의 두부에 전달되는 에너지를 측정하고 계산하는 연구(Laboratory of Electromagnetic Fields and Microwave Electronics)

- (다) 일반인들의 저주파 자기장(low-frequency magnetic field) 노출에 관한 연구(Paul Scherrer Institute, PSI)
- (라) 전기 자동차(electric car)에서의 전자기장 노출에 관한 연구 (School of Engineering Biel-Bienne)
- (마) 휴대폰이 인공심장 박동기에 미치는 영향에 대한 연구 (Swiss Telecom)
- (바) 마이크로파 노출시, Yeast cell의 성장 변화에 대한 연구 (Institute of General Microbiology, University of Bern)

라. 네덜란드

네덜란드에서는 주택공간계획환경부(Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment; VROM)에서 관장하고 있다. VROM이란 네덜란드어의 약자로서 “housing, land-use planning and environmental management”의 약자이다.

예방원리에 따라서 전자파 방사는 최소한으로 유지하도록 하고 있으며 제한이 더 엄격해진 네덜란드 방사선 시행 지침(the Dutch Radiation Performance Index)이 2002년에 만들어져서 2003년에 법안으로 시행될 것이다. 그 법안에는 전자기장에 대한 표준은 고압선에 관한 부분과 GSM 스테이션에서 발생하는 라디오 주파수 대역 방사에 대해서 자세하게 나타나 있다.

마. 러시아

러시아에서는 “Discussion of Results of Experiment with Chronic EMF Exposure Conducted Several Years Ago in the USSR, Which Serve as the Basis for EMF Standards in the USSR and Russia” 라는 제목으로 향후 러시아의 전자파 표준안을 위한 기초 작업으로서 과거 舊소련(USSR)에서 진행되었던 만성적인 전자파 노출에 대한 연구/실험 결과를 논의하였다. 그리고 이를 바탕으로 세계보건기구(WHO)이 만든 전자파 표준과 자국의 표준 시안을 비교, 조율을 통해 범세계적인 표준안 제정을 목표로 연구가 진행되고 있다.

4. 일본

일본의 전자파 환경 문제에 대한 모든 업무는 총무성 우정사업청 전파환경과에서 담당하고 있다. 주 업무는 전자파적합성(EMC: Electromagnetic Compatibility)과 국제무선장해특별위원회(CISPR)에 관계된 전자파 인체 영향 관련 정책 등을 수행하고 있다. 이들 업무와 관련하여 전파 환경과는 우정성에 대한 답신.자문 역할을 하는 통신기술위원회(Telecommunication Technology Council, TTC)와 각 지역 통신국을 국내 11개 지역에 배치하고 있으며, 연구 기관으로는 요코스카에 통신연구 실험실(Communications Research Laboratory, CRL)을 두고 있다.

인체의 전자파 보호에 대한 우정성의 정책흐름은 90년 통신기술위원회의 답신으로 시작되었다. 1998년 3월, 우정성 연구 그룹은 정부가 현존의 라디오 방사보호지침안(Radio-Radiation Protection Guidelines)을 정부 강제기준으로서 권고해야한다는 내용의 보고서를 우정성에 제출하였으며 이를 위해 1998년 10월 1일 전파법 시행을 위해 새로이 개정된 규칙을 선포하였다. 이 규칙은 1999년 10월 1일 제정되었다.

그리고 일본 우정성은 지난 97년, 새로이 “전자파 인체노출 연구 위원회(Committee of the Study on Human Exposure to EMF)”를 조직해서 국가 주도로 전자파에 대한 본격적인 연구를 시작하였다.

○ 전자파 인체노출 연구 위원회

(Committee of the Study on Human Exposure to EMF)

(가) 목적: 휴대단말기에 대한 인체 영향을 과학적으로 규명함.

(5년 계획으로 동물실험 등을 수행)

(나) 위원: 17인(공학, 생물학, 의학의 전문가 그룹과 서비스 업체, 그리고 관련정부처장으로 구성)

(다) 현재 장기간 노출에 대한 연구, 이동전화 사용에 관한 역학조사 등, WHO 국제 공동프로젝트에 관한 연구를 진행하고 있다.

(라) 또한 정부부처와 연계하여 후생성과는 극저주파 인체노출에 관한 연구, 과학기술청과는 극저주파 노출에 관한 역학조사연구, 환경청과는 WHO국제 공동 프로젝트에 관한 연구, 노동청과는 작업장 내 극저주파 노출에 관한 연구를 진행하고 있다.

5. 국내 연구동향

1990년대 후반 송전탑과 이동전화기지국 주변 사람들의 민원이 다수 발생하면서 사회적으로 전자파의 유해여부가 커다란 논란이 되었다. 이러한 사회적 반응은 국민들에게 전자파에 대한 막연한 두려움을 갖게 하였다. 1996년 한국전자과학회 내에 의학·공학 전문가들로 구성된 ‘전자장과 생체관계 연구회’를 중심으로 국내에서 전자파에 대한 연구는 시작되었다. 이 연구회에서는 인체에 대한 전자파의 영향에 관한 연구뿐만 아니라 인체 보호 기준을 제정하는 등 전자파 규제에 대한 활동을 진행하게 되었는데 이것이 우리나라 최초의 전자파 인체보호기준이 되었다.

정부 역시 전자파에 대한 규제에 나서게 되었는데 1999년 국회 산하에 ‘전자파유해문제대책위원회’가 구성되었고 이 위원회를 중심으로 2000년 전파법을 제정하게 되었다. 또한 정부는 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성을 제기되어 정부산하 기관 연구소에서 관련 연구를 진행하고 있다. 또한 정보통신부에서는 전자파 인체 영향 연구 기본계획을 수립하고 우선 2000년부터 2004년까지 100억원을 투자하여 송신소 및 송전선 주변 주민들을 대상으로 역학 연구, 지원자 연구, 동물실험을 하여 전자파가 암세포, 뇌종양 등에 미치는 영향을 알아보는 ‘전자파 생체 영향 연구’와 ‘전자파 인체보호기준 제정’을 위한 업무를 추진하고 있다. 또한 정확한 SAR를 측정하기 위한 연구 역시 진행되고 있는 중이다.

제 2 절 SAR 해석동향

현재 셀룰러 전화기와 기타 개인통신 서비스의 사용과 향후 이와 관련된 지속적인 RF 무선 통신 시스템의 사용증가가 예측됨으로써, 핸드셋(handset)상의 안테나와 인체간의 상호 작용에 상당한 관심과 연구노력을 기울여 왔다. 이러한 활동들은 다음 두가지 요인이 동기가 된다. ①안테나 성능의 악화 평가와 개선된 안테나 개발에 필요성, ②잠재적인 건강 위해와 기준, 예를들어 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 해부학적인 두부모델이 실제의 휴대단말기 모델과의 전자기장 상호작용을 수치적으로 계산하는 FDTD기법의 사용을 가능케 하였으며, 이 결과들은 인체두부와 단말기 상호작용에 대한 이해를 향상 시켰다.

기존의 관련 해석 사례들은 균질의 구형 (spherical) 두부에서부터 MRI (Magnetic Resonance Imaging)에 기초한 해부학적으로 수정된 비균질 모델에 이르기까지 다양하다. 안테나의 복사패턴에 대한 인체두부의 영향이 어느 정도로 박스나 구 형태로 모의될 수 있을까, 다양한 두부모델로 얻어진 SAR은 실제 두부내의 SAR을 얼마나 잘 예측할 수 있을까 안테나 패턴에 대한 두부 영향, 두부에 흡수되는 전체전력, 조직 1g 과 10g 내의 peak SAR 또는 maximum SAR을 구하는데 있어 두부 모델의 질과 정밀도가 얼마나 중요한가, 그리고 안테나와 두부 간의 거리는 SAR peak 값과 위치에 어떠한 영향을 주는가 등에 대한 고찰이 이루어져왔다.

IEEE SCC 34는 1995년 6월에 설립되어 휴대용 무선 송수신기, 무선 송수신기, 무선 LAN 및 유사기기 등 특정 휴대용 무선기기들이 SAR 기준을 충족시키는지를 인증하기 위한 프로토콜 개발을 위해 소위원회(SC)2가 1997년 2월에 설립되었다. 소위원회2에서는 무선기기에 대한 인체 SAR을 해석하기 위한 기법으로는 어떠한 것들이 존재하고 시간 영역 유한 차분 방식(FDTD 기법)이 왜 적절한가, SAR 평가시 수치기법 상 고려하여야 할 문제에는 어떠한 것들이 있는지 등을 검토하였다.

기존의 RF 조사량 측정 계산 방식에는 모멘트 법(MoM), 일반화 다극자 기법(GMT: Ge-neralized Multipole Technique), 시간 영역 유한 차분 방식(FDTD), 유한 요소 방식(FEM)과 기타 혼성 방식이 포함된다. RF 노출 요구사항을 충족시키는 계산 기법을 이용하면 자유 공간의 전기장 및 자기장

강도나 전력 밀도뿐 아니라, 조직에서의 전자기 에너지 흡수 또는 SAR을 계산할 수 있다. 셀룰러와 PCS 주파수에서는 계산 및 실험 방법, 둘 다 RF 노출 평가에 사용할 수 있다. 2.5GHz 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 측정상의 어려움을 극복할 수 있는 장점이 있다. 원칙상으로는 무선 송신기의 복사에 노출된 인체 모델 내 SAR의 수치계산은 많은 방식으로 수행될 수 있다. 그러나 실제로는 단순한 모델에는 몇가지 적합한 방식이 있어서 구(sphere)나 층화 구(stratified sphere)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 계산하기 위해 사용된 방식들 중에는 EEM (Eigenfunction Expansion Method), 구형 확장 기법 (spherical expansion technique)과 GMT가 있다. 최근에는 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 차분(FDTD)방식이다. FEM에서 문제의 해는 원칙적으로 1개의 주파수 체서 얻어진다. FDTD 방식은 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 계산은 그 방식과 기존의 해석기와 호환 가능한 모델 개발과 관련된 어려움으로 인해 수행되지 않았다. 인체의 SAR 평가에 FEM을 적용한 적은 몇 번 있었으나, 계산상의 효율성과 어려움의 측면에서 볼 때 FEM은 복잡할뿐더러 계산상 노력도 많이 든다(컴퓨터 저장과 계산시간). 그러나 이것은 부드러운 표면과 매우 다양한 크기를 갖는 구조를 훌륭하게 모델링한다. FDTD 방식은 단순하고 유연하며 문제 기하형 (problem geometry)과의 호환성 및 광대역 해결책으로 인해 뛰어난 방식이 되었으며, 압도 현재까지는 무선통신 기기로부터 발생하는 SAR의 수치해석에 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. 위와 같은 FDTD의 특성으로 인해 IEEE 표준조정위원회에서는 FDTD기법을 이동통신기기에 의한 인체 두부 내의 SAR 평가시 가장 적합한 모의방법으로 판단하고 평가 표준을 위해 다

음에 기술하는 상들을 고려하고 있으며, 이 중 상당 부분은 현재에도 진행중이다.

1. 벤치마크 확인 모델

벤치마크들은 무선 송수신기로 인한 인체 두뇌 모델내의 SAR 평가를 위해 개발된 계산 도구가 수락 가능한지를 알기 위한 목적으로 사용될 수 있다. 일반적인 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 요구사항을 가지고 계산되어야 한다.

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 모델로부터 도출한 인체의 균질 모델을 위해서도 사용될 것이다. 이러한 실험의 목적은 이 모델이 SAR을 과대 추정할 것인지 여부와 그 정도를 알기 위함이다. 이 실험의 또 다른 목적은 SAR측정을 위해 균질 모델의 사용이 정당화 되는지 여부를 판단하기 위함이다. FDTD 생물학적 mesh의 기초로서 적합한, 평판이 좋은 해부학적 자료 출처는 미국 의료 도서관의 가시

인체 프로젝트(Visible Human Project)이다.

3. 조직 유전체 특성과 밀도 데이터베이스

다양한 조직에 대해 가정되는 전기적 특성(유전 상수 ϵ 과 도전율 σ 은 세부적인 SAR 분포에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 1g 의 조직에 걸친 적분(integration)으로 인해 1g SAR에 대한 영향은 다행이도 다소 적다. 다양한 조직들의 전기적 특성의 데이터베이스는 이 특성들에 관한 가장 최신의 사용 가능한 과학 데이터로 갱신되어야 한다.

4. 시험기기 모델링

FDTD 방식은 안테나 성능과 송수신기와 그 유사 기기에 대한 안테나에 의한 인체 SAR과 안테나 성능평가에 아주 적합할 뿐만 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 관련이 되어 있다. 또한, 인체 두부 모델의 품질과 해부학적 정확성은 SAR 계산의 신뢰성에 영향을 미친다. 두부 모델에 관해 귀를 모델화하기 위한 필요가 강조되기도 한다.

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 사용될지 여부, 조직 인터페이스가 포함되어 있거나 외부(대기)경계에 있을 때는 어떻게 사용할 것인지, 서로 다른 셀의 해상도가 하나의 계산공간에서 사용하여 결과를 얻을 때 정확한 위치나 보삽 위치가 상이한 전자기장 값을 낳을 수 있다. 이 항목은 각 계산 점에서 SAR과 전자기장의 보삽, 전신 평균 SAR, 1g 또는 10g 평균 SAR 등 평가의 최종적인 보고 항목을 얻는 것과 직접적 관련이 있어 다른 항목에 비해 상당 부분을 차지하고 있다.

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 준수여부를 결정하기 위해 SCC-28이 추천한 계산 방식 중의 하나이다. 수치 알고리즘 실행과 사용의 특정한 변형들은 컴퓨

터 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 절약을 위한 해석 모델의 절단 등을 다루고 있다.

제 3 장 전자파-인체보호 기준의 법제화 현황

제 1 절 외국의 전자파 규제 현황

전자파인체보호기준은 미국(연방통신위원회; FCC), 호주(통신국; ACA), 캐나다(보건부; Health Canada, 산업부; Industry Canada), 일본(우정성; MPT) 및 스위스(연방환경산림국토청; SAEFL) 등에서 법제화하여 강제적으로 규제하고 있다.

1. 미국

미국은 1997년 10월부터 위성통신 및 방송, 일정 출력 이상의 육상과 해상의 이동 및 고정 통신용 송신시설, 아마추어 무선국(타 시설에 비해 다소 늦게 시행) 시설의 허가 전 초기 환경평가(EA; Environment Assessment)와 사후의 정기적 환경평가를 받도록 하고 있다. 휴대전화의 전자파흡수율 규제와 관련하여서는 1997년 1월부터 미연방통신위원회(FCC)에서 규제하고 있으며, 구체적인 규제내용은 휴대전화의 FCC 승인을 위한 시험항목에 SAR을 추가하고, SAR 시험성적서를 제출하지 않을 경우, FCC 인증서가 발급되지 않으므로 판매가 불가능하게 하고 있다.

2. 호주(Australia)

주관기관은 호주통신국(ACA; Australian Communication authority)으로서 SAR 기준은 미국과 동일한 1g 평균 1.6 W/kg (국부노출)이며, 측정방법은 AS/NZS 2772.1- 1998(잠정표준)에 기술되어 있으며 현재 ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency)에서 개정작업 중이다. 휴대전화의 SAR에 대해서는 99년 1월부터 강제 규제에 들어간 상태이다. 금년(2000년) 6월에 개정된 ACA Standard의 Radiocommunication (Electromagnetic Radiation-Human Exposure) Standard 1999에 따르면 대상기기는 800 MHz~2.5 GHz 대역에서 작동하는 모든 cellular mobile, cordless and satellite handsets을 포함하고 있다.

3. 캐나다

캐나다의 SAR 기준은 미국과 동일한 1g 평균 1.6 W/ kg (국부노출)으로서 Health Canada (캐나다 보건부) 주관법인 Safety Code 6에서 규정하고 있다. SAR 측정조건, 이동용 송신기의 인증조건 등에 관해서는 Industry Canada에서 주관하는 Radio Standards Specification (RSS- 102: RF exposure from mobile radio transmitter s) 1999 에 정의하고 있다. 즉, 기기의 인증을 위해서는 DoC (Declaration of Conformity)를 Industry Canada 에 제출해야 한다.

4. 유럽

EU는 일반인에 대한 인체보호기준 권고안을 회원국내 기준의 합일화를 목표로 EC 지침을 제정, 발표하였으나, 현재 각국은 나름대로의 기준을 채택하고 있다. 그리고 유럽전자기술표준화위원회 (CENELEC)에서 1997 년부터 SAR 측정방법에 대한 표준화 작업을 진행하였고, 1999년 5월에는 전자파 인체보호기준에 대한 최종안을 발표 하였다.

5. 일본

일본은 1998 년 1월, 전파산업협회(ARIB)에서 휴대전화 단말기에 대한 전자파흡수율 측정 권고안을 발표하였고, 주관기관은 우정성으로서 SAR 기준은 유럽과 동일하게 10 gram 평균 2W/kg(국부노출)을 채택하고 있다. 2001 년 상반기부터 우정성에서 규제할 예정입니다. 2001년에는 강제규제에 들어갔다. 즉, 새 모델의 전화에 대해서는 SAR 성적서를 제출토록 하고 기준을 초과한 제품에 대해서는 판매를 금지하고 있다.

제 2 절 국내의 전자파 및 인체보호기준에 대한 현황

우리가 일상생활 속에 접하고 있는 TV, 라디오 등의 방송매체와 휴대 전화, 냉장고, 의료기기 등 모든 전기, 전자제품과 정보통신기기에서는 전자파가 나오고 있으며 심지어 지구상의 모든 생물에게 에너지를 공급하는 태양에서도 전자파가 나오고 있다. 이렇듯 전자파는 우리의 현대생활에 없어서는 안 될 소중한 자원이지만 일부에서 전자파가 인체에 유해할 수도 있다는 연구내용이 발표됨에 따라 국민들은 막연한 불안감을 느끼고 있는 것이 사실이다.

미국, 유럽 등 선진국들은 '80년대부터 전자파가 인체에 미치는 영향을 연구하고 있으나 아직까지 전자파가 인체에 유해하다는 것을 과학적으로 규명하지 못하고 있는 상태이다. 그러나 전자파에 대한 인체영향문제가 세계적인 관심사로 대두됨에 따라 미국, 호주, 캐나다, 일본, 스위스 등 선진국에서는 예방적 차원 (Precautional Approach)에서 인체보호기준 등을 제정하여 시행해 오고 있다.

우리나라에서는 '95년경부터 TV, 신문 등 언론매체를 통하여 전자파의 인체 유해론이 보도됨에 따라 송전탑, 이동통신기지국 주변에 살고 있는 주민들로부터 많은 민원이 제기되고 있으며, '99. 7월 한국교육방송에서 생방송으로 실시한 국민여론 조사에서도 전자파는 유해하다고 생각하고 있으며 전자파를 규제하는 법을 제정하는 것에 대부분 찬성하고 있는 것으로 나타났다. 정보통신부는 국민들의 이러한 궁금증을 해소시키고 전자파의 인체영향을 심층적으로 연구하기 위하여 96년부터 한국전자파학회, 한국전자통신연구원 및 전파연구소 등에서 전자파에 대한 전문적·학술적인 연구를 수행하도록 하였다. '98년부터는 미국, EU 등 45개 국가와 국제전기통신연합(ITU) 등 8개 국제기구가 공동으로 수행하는 세계보건기구(WHO)의 전자파 인체영향 연구 국제공동연구 프로젝트에 참여하여 관련 연구를 수행하여 왔다.

한편, 전자파가 인체에 영향을 끼친다는 과학적인 규명은 아직까지 되지 않았지만 예방적 차원에서 전자파에 과다 노출시 규제를 위한 전자파 인체보호기준 제정 근거가 2000. 1월 공포된 전파법에 마련되었다. 주요내용은 정보통신부장관이 “전자파인체보호기준”, “전자파강도측정기준”, “전자파흡수율 측정기준” 및 “측정대상기기·측정방법을 정하여 고시하도록 한 것이다. 정통부는 인체보호기준을 제정하여야 하는 법적인 근거가 마련됨에 따라 2000년부터 2004년까지 100억원(정부출연금85억원, 민간출연금 15억원)을 투입하여 인체보호기준 등 제도적인 측면과 동물실험, 역학조사 등을 통하여 전자파가

암세포, 뇌종양 등에 미치는 영향연구와 전자파가 적게 나오는 안테나 등을 개발하도록 하였다.

○ 전자파 인체영향연구 기본계획 수립 시행(2000. 3)

- (가) 주요 연구내용(2000년~2004년, 5년간)
- (나) 인체보호기준 및 전자파 노출량 측정기준 등 연구
- (다) 전자파인체영향 규명을 위한 동물실험, 역학연구 수행
- (라) 전자파 인체보호 대책기술 연구 및 국제협력 강화

○ 전자파 인체보호기준 등 확정 고시(2000. 12)

- (가) 전자파인체보호기준, 전자파강도 및 전자파흡수율을 측정하기 위한 기준 제정
- (나) 주파수(300GHz이하)를 구분하여 전기장, 자기장, 전력밀도의 세기를 국제수준으로 기준을 정함
- (다) 이동전화단말기의 전자파흡수율(SAR)은 1.6 W/kg으로 정함
(미국, 한국은 1.6 W/kg, 유럽, 일본은 2 W/kg)

○ 휴대폰 전자파흡수율(SAR) 제한

- (가) 국내 유통 중인 이동전화단말기 33기종에 대한 전자파흡수율(SAR)을 전파연구소에서 측정한 결과 기준치(1.6W/kg) 이내인 것으로 확인됨(2001. 12. 20. 공개)
- (나) 국민 건강 보호를 위한 예방적 차원에서 2002년 4월부터 휴대폰 형식등록시 전자파흡수율 적합성 심사 조항을 추가하여 기준치(1.6 W/kg)를 초과하는 경우 시장판매를 금지하고 있음

○ 전파법 제47조의 2항 (전자파 인체보호기준 등)

- (가) 정보통신부장관은 무선설비 등에서 발생하는 전자파가 인체에 미치는 영향을 고려하여 전자파인체보호기준, 전자파강도측정기준, 전자파흡수율측정기준 및 측정대상기기, 측정방법 등을 정하여 고시하여야 한다.
- (나) 무선설비의 시설자 또는 무선설비의 기기를 제작·수입하고자 하는 자는 무선설비로부터 방사되는 전자파의 강도가 전자파 인체보호기준을 초과하지 아니하도록 하여야 하며, 그 기준을 초과하는 장소에는 취급자외의 자가 출입할 수 없도록 안전시

설을 설치하여야 한다.

1. 인체보호기준 등의 주요내용

가). 전자파인체보호기준

주파수(0Hz~300GHz) 대역별로 전기장의 세기(V/m), 자기장의 세기(A/m) 및 전력밀도(W/m²)의 세기를 나타내며 전자기장에 노출되고 있음을 알고 있으며 이의 잠재적인 위험성에 대하여 적당히 주의하도록 훈련받은 직업인과 전자기장에 노출되고 있는 사실을 모르거나 조치를 취할 수 없는 일반인으로 구분하여 기준치를 정하였다.

동 기준은 인체에 흡수된 전자기장 에너지의 열적작용과 전자기장의 유도전류에 의한 자극작용은 고려하였으나 미약한 전자기장의 장기간 누적효과인 비열적 작용은 아직 세계적으로도 과학적 규명이 안되어 있어 고려하지 않았다.

또한 동 기준은 ICNIRP 국제기준, 미국의 IEEE/ANSI, FCC 기준과 일본의 전파산업협회기준, 유럽의 CENELEC 기준 중 가장 엄격한 ICNIRP 기준을 토대로 하여 마련한 것이다. (표1, 2참조)

표 3-1. 전자기장 강도 기준(일반인)

주파수 범위	전기장 강도 (V/m)	자기장 강도 (A/m)	자속밀도 (μ T)	평면파 전력밀도 (W/m ²)
1 Hz 이하	-	3.2×10^4	4×10^4	
1 Hz ~ 8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	
8 Hz ~ 25 Hz	10,000	4000/f	5000/f	
0.025 kHz ~ 0.8k Hz	250/f	4/f	5/f	
0.8 kHz ~ 3 kHz	250/f	5	6.25	
3 kHz ~ 150 kHz	87	5	6.25	
0.15 MHz ~ 1 MHz	87	0.73/f	0.92/f	
1 MHz ~ 10 MHz	$87/f^{1/2}$	0.73/f	0.92/f	
10 MHz ~ 400 MHz	28	0.073	0.092	2
400 MHz ~ 2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	f/200
2 GHz ~ 300 GHz	61	0.61	0.20	10

표 3-2. 전자기장 강도 기준(직업인)

주파수 범위	전기장 강도 (V/m)	자기장 강도 (A/m)	자속밀도 (μ T)	평면파 전력밀도 (W/m ²)
1 Hz 이하	-	1.63×10^5	2×10^5	
1 Hz ~ 8 Hz	20,000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	
8 Hz ~ 25 Hz	20,000	$2 \times 10^4 / f^2$	$2.5 \times 10^4 / f$	
0.025 kHz ~ 0.8 kHz	500/f	20/f	25/f	
0.8 kHz ~ 3 kHz	610	24.4	30.7	
3 kHz ~ 150 kHz	610	1.6/f	2.0/f	
0.15 MHz ~ 1 MHz	610/f	1.6/f	2.0/f	
1 MHz ~ 10 MHz	61	0.16	0.2	10
10 MHz ~ 400 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	f/40
400 MHz ~ 2,000 MHz	137	0.36	0.0045	50

표 3-3. 국부노출에 대한 전자파 흡수율(W/kg)

주파수 범위	전자파 흡수율(W/kg)
100kHz~10GHz	1.6(1g평균)

우리나라 국민 2명당 1명이 가지고 있는 휴대폰에 대한 전자파흡수율(SAR, W/kg : 생체조직에 흡수되는 단위질량 당 에너지 율을 말함)은 유럽, 일본 등에서 기준으로 정하고 있는 2.0W/kg과 미국, 호주, 캐나다 등에서 기준으로 정하고 있는 1.6W/kg중 가장 엄격한 1.6W/kg을 우리나라 기준으로 채택하였다(표3참조). 동 기준의 시행 시기는 관련업계의 준비기간 등을 고려하여 2002. 1월부터 시행하도록 하였다.

2. 전자파강도측정전자파 강도 측정 기준

인체보호기준에서 정한 전기장의 세기, 자기장의 세기 및 전력밀도 등을 실제 측정하기 위한 표준방법을 정하고 있는데 유럽전기기술표준위원회(CENELEC)의 기준을 토대로 작성하였다.

3. 전자파흡수율(SAR)측정

전자파흡수율(SAR)측정 기준은 이동통신단말기 등에서 나오는 전자파가 인체두부(頭部)에 흡수되는 양을 측정하는 표준방법으로서 측정을 위한 표준환경, 피시험기기의 조건과 배치, 측정 프로브의 성능 및 측정절차 등에 대한 표준방법을 정하고 있다.

4. 전자파강도 및 전자파흡수율 측정 대상기기

전자파강도 및 전자파흡수율 측정 대상기기는 전자파를 발생시키는 기기, 장치 및 설비 등에 적용하되 이동하는 무선국의 무선설비와 비상시 사용하기 위하여 개설했던 무선국의 무선설비, 미약전파 및 특정소출력무선국용 무선기기는 제외하기로 하고 전자파 흡수율 측정 대상기기는 이동가입무선전화(셀룰러)와 개인휴대통신용 무선설비(PCS)로 하였다.

제 4 장 인체유도 전류 연구

제 1 절 (FD)²TD (Frequency Dependent Finite Difference Time Domain) 방법

FDTD에 사용되는 시변계에서의 맥스웰 curl 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{식. 4-1})$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{식. 4-2})$$

전속밀도벡터 D 는 (식. 4-3)처럼 국부 조직에서 가지는 복소 유전율과 field E 와의 곱으로 나타내어진다.

$$D = \epsilon^*(w)E \quad (\text{식. 4-3})$$

FDTD는 (식. 4-1)과 (식. 4-2)을 시간영역에서 반복해서 풀기 때문에, (식. 4-3)는 시간영역에서 표현되어진다. 이 계산은 (식. 4-4)처럼 두개의 상수를 가지는 Debye 방정식과 같은 $\epsilon^*(w)$ 에 대한 관계방정식을 선택함으로써 행해지게 된다.

$$\epsilon^*(w) = \epsilon_0 \left[\epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{s1} - \epsilon_\infty}{1 + jw\tau_1} + \frac{\epsilon_{s2} - \epsilon_\infty}{1 + jw\tau_2} \right] \quad (\text{식. 4-4})$$

(식. 4-4)를 (식. 4-3)에 대입하여 다시 써보면

$$\begin{aligned} D(w) &= \epsilon^*(w)E(w) \\ &= \epsilon_0 \frac{\epsilon_s + jw(\epsilon_{s1}\tau_2 + \epsilon_{s2}\tau_1) - w^2\tau_1\tau_2\epsilon_\infty}{1 + jw(\tau_1 + \tau_2) - w^2\tau_1\tau_2} E(w) \quad (\text{식. 4-5}) \end{aligned}$$

zero frequency 유전 상수(ϵ_s)는 다음 (식. 4-6)과 같다.

$$\epsilon_s = \epsilon_{s1} + \epsilon_{s2} - \epsilon_{\infty} \quad (\text{식. 4-6})$$

time harmonic이라고 가정하면, (식. 4-5)를 시간영역에서 다음과 같은 미분 방정식 형태로 쓸 수 있다.

$$\tau_1 \tau_2 \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{\partial D}{\partial t} + D = \epsilon_0 [\epsilon_2 E + (\epsilon_{s1} \tau_2 + \epsilon_{s2} \tau_1) \frac{\partial E}{\partial t} + \epsilon_{\infty} \tau_1 \tau_2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}] \quad (\text{식. 4-7})$$

(FD)²TD방법은 (식. 4-7)을 이용하여 E-field를 구하고 (식. 4-1)을 이용하여 H-field를 구한 다음 마지막으로 (식. 4-2)를 통해 D 를 구하게 된다. 이 $E \rightarrow H \rightarrow D$ 로 이어지는 loop는 정상 상태가 될 때까지 반복하게 된다.

제 2 절 유도 전류 계산

인체 두부의 k번째 layer에 흐르는 총전류는 아래 두 가지 방식중 하나로 계산 되어 진다.

1. loop type current meter를 이용한 방법

이 방법은 (식. 4-8)을 이용하여 layer 둘레의 loop-type current meter에 의해 전류를 계산한다.

$$I_{s,k}(t) = \delta^2 \sum_{i,j} \frac{\partial D_s(i,j,k)}{\partial t} \quad (\text{식. 4-8})$$

δ 는 FDTD의 cell size이다. 그리고 summation은 주어진 layer에서의 모든 cell들을 계산한 것이다.

광대역 펄스가 입사되었을 경우 layer의 부분들은 양의 방향의 전류를 가질 것이다. 반면에 다른 부분들은 음의 방향의 전류를 가지게 될 것이다. 이 전류들은 (식. 4-8)에서의 summation에서 서로 상쇄 되어진다. 따라서 총 전류의 값은 상대적으로 낮아지게 된다.

2. 총 전류분포 계산

$$I_{s,k}(t) = \delta^2 \sum_{i,j} \left| \frac{\partial D_s(i,j,k)}{\partial t} \right| \quad (\text{식. 4-9})$$

이 방법은 더 나은 측정 결과 값을 얻으며, 총전류 값은 (식. 4-8)에서 계산된 값과 같거나 더 크게 나올 것이다.

3. The Convolution 방법

Convolution 방법은 임펄스 여기를 가지는 단일 FDTD 또는 (FD)²TD의 simulation을 사용하는 몇 가지 다른 파형에 대한 몸의 response를 계산하는 데에 사용된다.

관심 파형(즉, E_{des})에 의한 각 layer에 유도된 전류는 다음 (식. 4-10)으로부터 구한다.

$$I_{des}(t) = F^{-1} \left\{ \frac{F\{E_{des}(t)\}F\{I_{imp}(t)\}}{F\{E_{imp}(t)\}} \right\} \quad (\text{식. 4-10})$$

$E_{des}(t)$: desired time domain incident waveform

$E_{imp}(t)$: impulse time domain incident waveform(rectangular pulse)

$I_{imp}(t)$: impulse response current

$I_{des}(t)$: desired response current

$F\{\}$: Fourier transform

Convolution 방법의 사용은 단지 둘 또는 그 이상의 파형을 해석하는 데에 유용하다.

제 3 절 Specific Absorption 계산

k번째에 대한 layer당 평균 specific absorption은 다음과 같이 주어진다.

$$SA_{layer, k} = \frac{\delta t}{N_k} \sum_t \sum_{i, j} \left\{ \frac{E(i, j, k, t)}{\rho(i, j, k)} \cdot \frac{\partial D(i, j, k, t)}{\partial t} \right\} \quad (\text{식. 4-12})$$

δt : the time step used for time-domain.

N_k : number of cells in the kth layer of the body.

$\rho(i, j, k)$: the mass density in kg/m^3

k번째 layer에서의 layer averaged specific absorption rate은 다음과 같이 계산된다.

$$SAR_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i, j} \frac{\sigma_{i, j, k}}{\rho_{i, j, k}} \left[\frac{|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2}{2} \right]_{i, j, k} \quad (\text{식. 4-13})$$

dx : cell size(m)

$\sigma_{i, j, k}$: electrical conductivity(S/m) in the i, j, k th cell

$\rho_{i, j, k}$: mass density (kg/m^3) in the ijk th cell

N_k : number of tissue cells in the k th layer

제 4 절 총 에너지 계산

몸에 흡수된 총 에너지 W 는 다음 식으로 계산 되어진다.

$$W = \delta t \cdot \delta^3 \Sigma_t \Sigma_{i,j} \{ E(i, j, k, t) \cdot \frac{\partial D(i, j, k, t)}{\partial t} \} \quad (\text{식. 4-13})$$

(FD)²TD는 주파수에 따라 변화하는 유전율을 갖는 매질의 해석을 위해 FDTD방식에 약간의 변형을 준 형태로써 주파수의 함수로 표현되는 유전율을 대입하여 수식을 전개한 것이다. 그리고 Debye 매질은 시상수 2개를 가지는 Debye equation로 나타내어지는 매질로서 heterogeneous한 인체모델의 매질로 나타낼 수 있다. 이 두 가지 사실을 이용하여 인체에 유도 되는 전류, SAR 흡수된 에너지 및 총에너지에 대한 수식을 유도하였다.

이 유도된 수식들을 가지고 전자파가 인체에 흡수되는 정도를 정량화 시킬 수 있으며 이 정량화 된 물리량들은 인체 보호기준의 기본 한계를 나타내는 자료로 사용된다.

제 5 장 SAM Phantom(인체두부모델) 및 휴대폰 모델링

제 1 절 SAM Phantom(인체두부모델) 모델링

모바일 기기에 의한 SAR를 해석하기 위해서는 전자파가 흡수되는 인체두부를 모델링 할 필요가 있다. 그래서 인체 두부 모델은 실제 측정할 때 사용하는 phantom을 모델링하기로 하였다. 이 phantom은 전파 연구소가 보유하고 있는 SAR측정 기기인 DASY3 시스템에 사용되는 모형으로 CAD파일을 제공하고 있다. 하지만 이러한 CAD파일은 시뮬레이션에 바로 사용될 수 없는데 그림 5-1에서 보듯이 phantom의 머리 윗부분이 비어 있는 형태(점선부분)로 CAD파일이 제공되기 때문이다. 윗부분이 열린 이유는 이 부분을 통해 로봇 팔의 프로브가 움직여 두부 내부에서의 전기장을 측정하도록 되어 있어(그림5-3) phantom의 CAD파일을 이용해 두부 모델링을 할 때에는 이 열린 부분에 대한 보정이 필요하게 된다.

이 부분의 보정에 있어서 정확한 측정을 하지는 않았는데 그 이유는 보정이 필요한 부분이 머리 상단부로 휴대폰이 위치한 귀로부터 멀리 떨어진 부분으로 SAR 분포나 전체 평균에 있어서 커다란 영향을 미치지 않을 것으로 판단하였다. 그래서 열린 부분에 대한 보정방법은 해부학적 방법 같은 정확한 방법이 아니라 그림 5-2처럼 머리 꼭지점, 즉 정수리 부분과 열린 부분의 경계사이를 잇기 위해 보간법을 사용하였다.

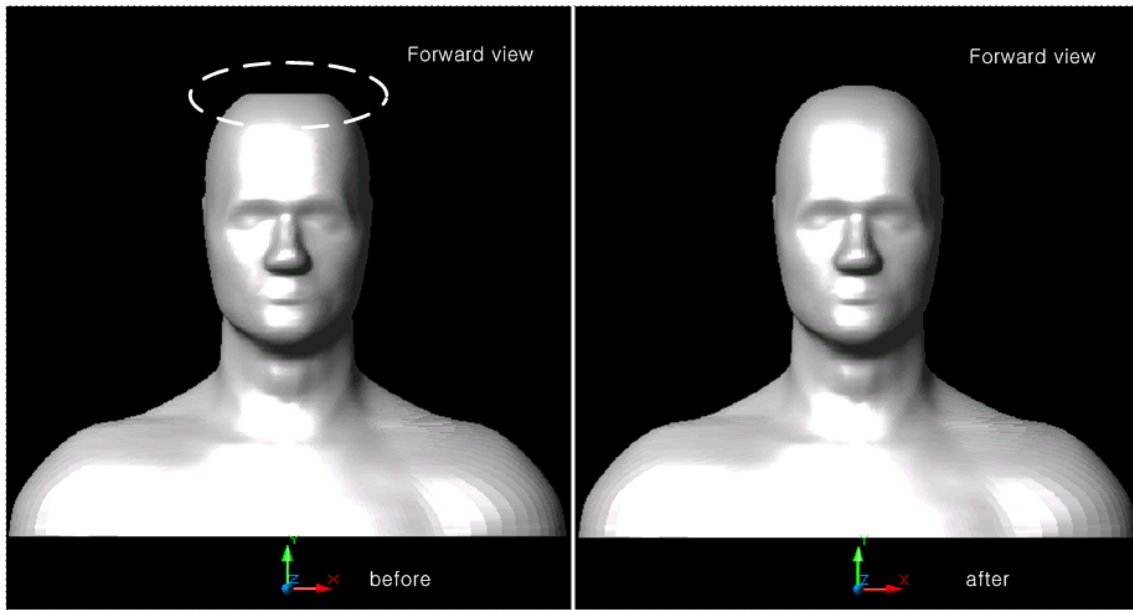


그림 5-1. 상단부가 개방된 phantom

그림 5-2. 보정된 phantom

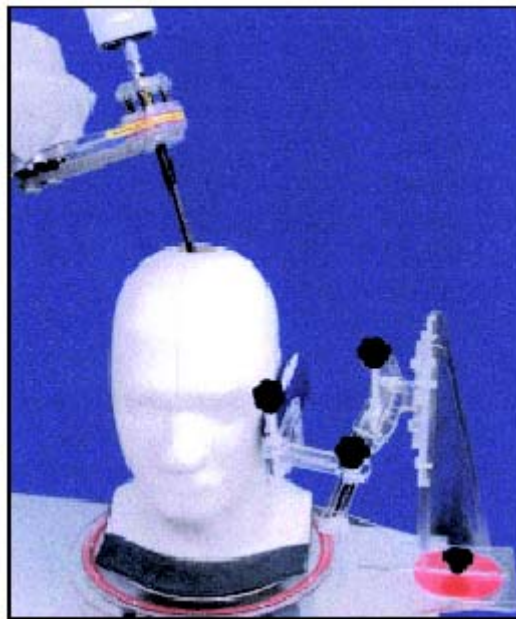


그림 5-3. phantom 내부의 전기장 측정

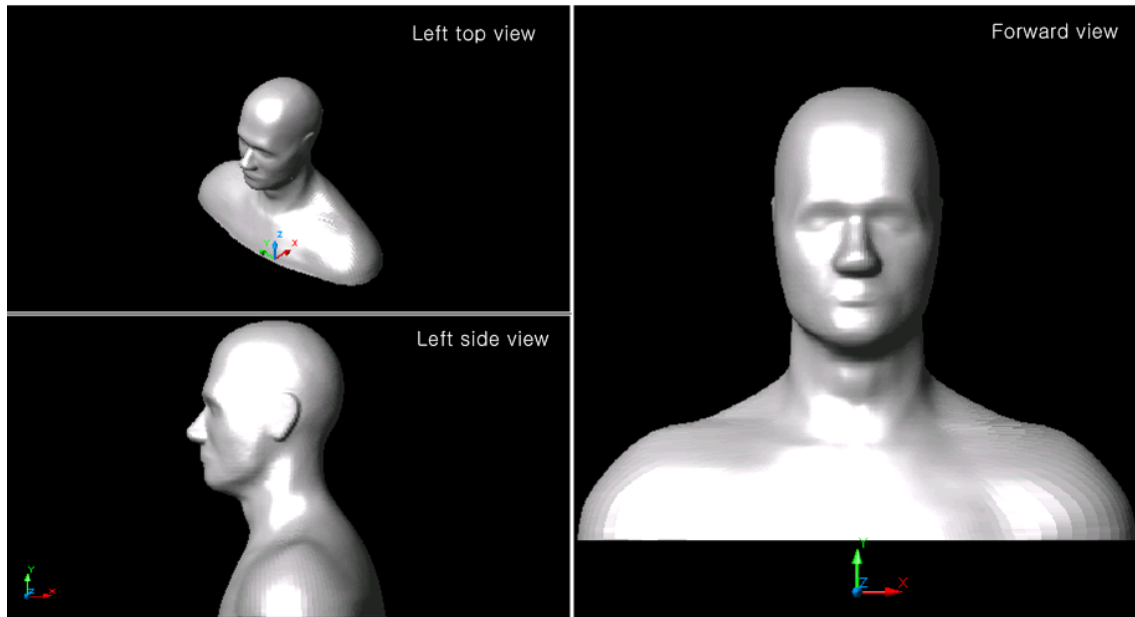


그림 5-4. 보정된 phantom의 전체 모습

위와 같이 보정된 phantom은 면과 선으로만 구성되어 있기 때문에 바로 시뮬레이션에 사용될 수 없다. 따라서 시뮬레이션 환경에서 사용되기 위해서는 선과 면으로 구성되어 있는 인체두부의 안을 물질로 채워 solid-type로 변환시키는 작업이 필요하다. 여기서 주의할 점은 인체 피부 면과 안쪽 부분의 두 부분으로 나누는 것이다. 인체 피부의 두께는 2mm로 한다. (2mm 크기는 IEEE SCC34 Std)

phantom을 solid-type으로 변환 시킨 후 시뮬레이션 tool에서 인식할 수 있는 확장자 변환이 필요하다.

CAD에서 그려진 확장자는 dwg파일이다. 이 확장자를 가진 파일들을 SAR 해석 시뮬레이션 tool(SEM-CAD, XFDTD)에서 사용하기 위해서는 sat 확장자로의 변환이 필요하며 이 변환된 파일들을 import 시킴으로써 tool 내에서 사용이 가능하게 된다.

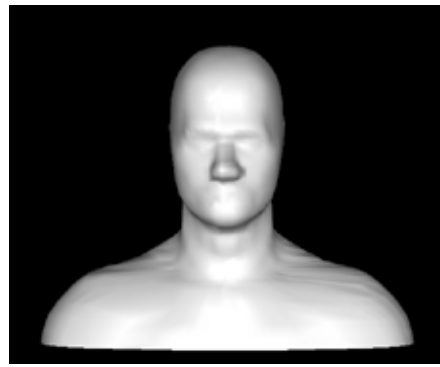
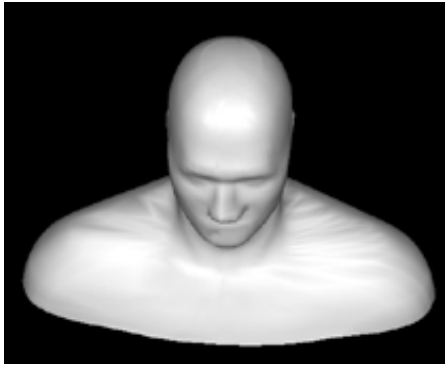


그림 5-5. solid-type의 인체모델 전면부

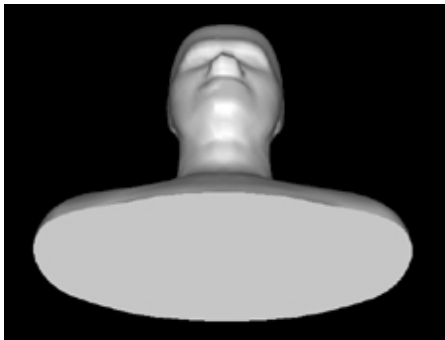


그림 5-6. solid-type의 인체모델 하반부

제 2 절 휴대폰 모델링

1. CAD를 이용한 휴대폰 design

SAR 해석에 사용되는 기존의 휴대폰 모델은 bar-type의 경우 네모난 박스 위에 안테나가 있고 폴더타입의 경우 박스 두개를 붙인 구조로 아주 간단한 모델이었다. SAR에 대한 관심이 높아지면서 실제 측정값과 시뮬레이션의 값의 오차를 줄이고 정확한 SAR의 값을 구하려고 노력 하였다. 이에 휴대폰의 모델을 자세하고 정확하게 design하여 시뮬레이션에 사용하게 되었다.

bar-type 플립형의 경우 전파연구소에서 SAR 연구를 수행하였고, 이번 연구에서는 폴더형의 정확한 design을 통한 SAR 연구를 수행하게 되었다.

먼저, 폴더형의 정확한 design을 위해 먼저 현재 사용되고 있는 휴대폰의 제품을 선정하였고, 선정된 제품을 CAD로 design 하였다. CAD로 design 할 때 시뮬레이션의 tool에서 사용 할 수 있도록 solid-type으로 design 하였고, 인체 두부 모델링에서와 마찬가지로 CAD 확장자 dwg에서 시뮬레이션 확장자 sat 파일로 변환하였다.

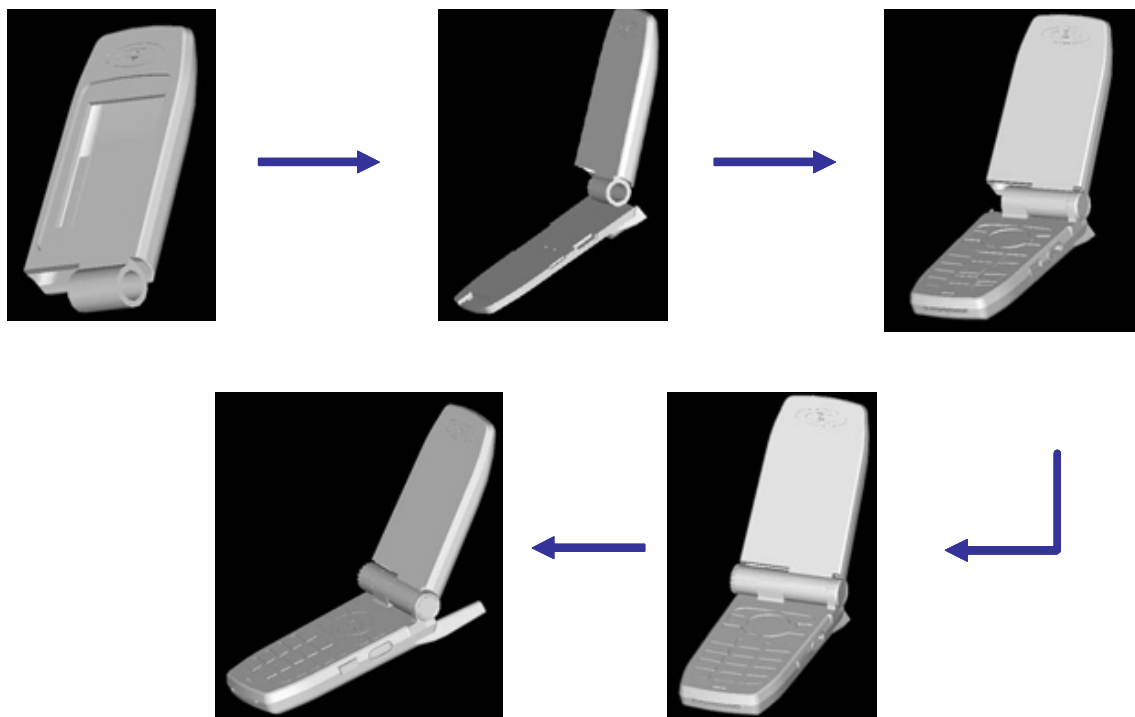


그림5-7. XFDTD tool에 import 되기 전의 휴대폰

그림 5-7은 CAD에서 593개의 object로 design 된 것을 sat 파일로 변환시켜 XFDTD tool에서 import 되기 전의 모습이며 물질의 정보는 없는 형태만 가지는 휴대폰 모형이다. 다음 그림 역시 휴대폰의 일부분인 안테나의 분리도 및 조립도이다.

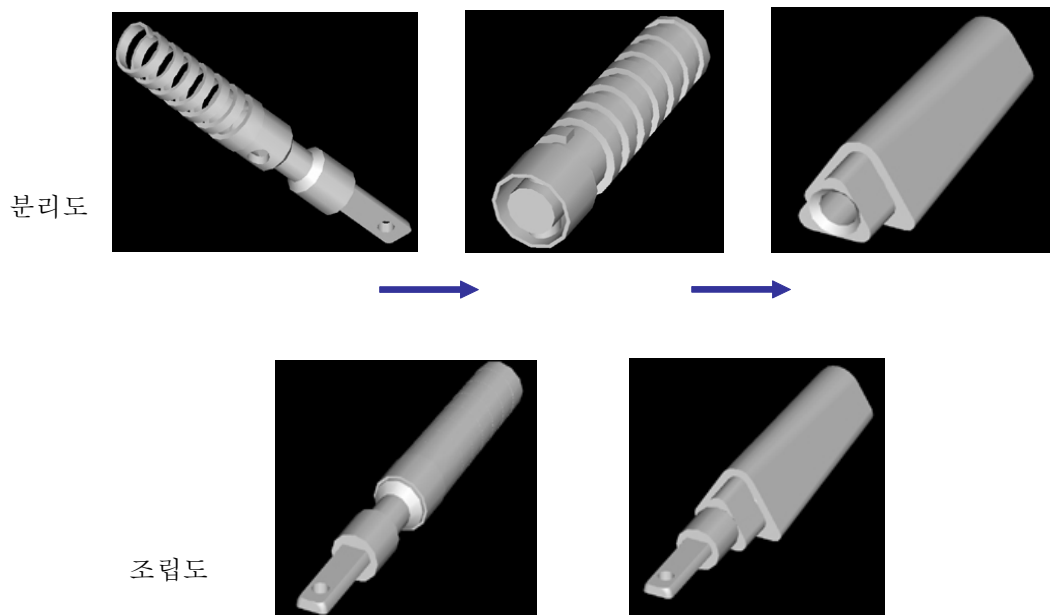


그림 5-8. XFDTD에 import 되기 전의 안테나 분리도 및 조립도

2. XFDTD로의 import 과정

CAD에서 design된 휴대폰을 시뮬레이션 tool(XFDTD)에서 사용할 수 있도록 하기 위해서 import 과정이 필요하다. 이 import 과정 때문에 CAD의 확장자 dwg에서 sat로의 변환이 필요하다. import 과정이란 FDTD 계산을 하기 위해 휴대폰을 구성하고 있는 object들을 1mm mesh 또는 2mm mesh로 나눠 계산영역으로 불러들이는 것이다.

이번 연구에서는 1mm mesh로 나누는 과정에서 메모리 관한 error 때문에 2mm mesh로 나누었다. 하지만 휴대폰을 2mm로 import 시키는 과정에서 593개의 object들이 휴대폰의 모양을 제대로 유지하지 못하고 약간의 변형이 생기거나 2mm size보다 작은 object들은 소멸된 상태로 import 되었다. 안테나 역시 제대로 import 되지 않아 안테나 특성이 제대로 나타나지 않았다. 따라서 휴대폰에 대한 보정과 안테나의 대한 설계가 필요하였다. 다음 그림은 휴대폰을 보정한 그림이다.

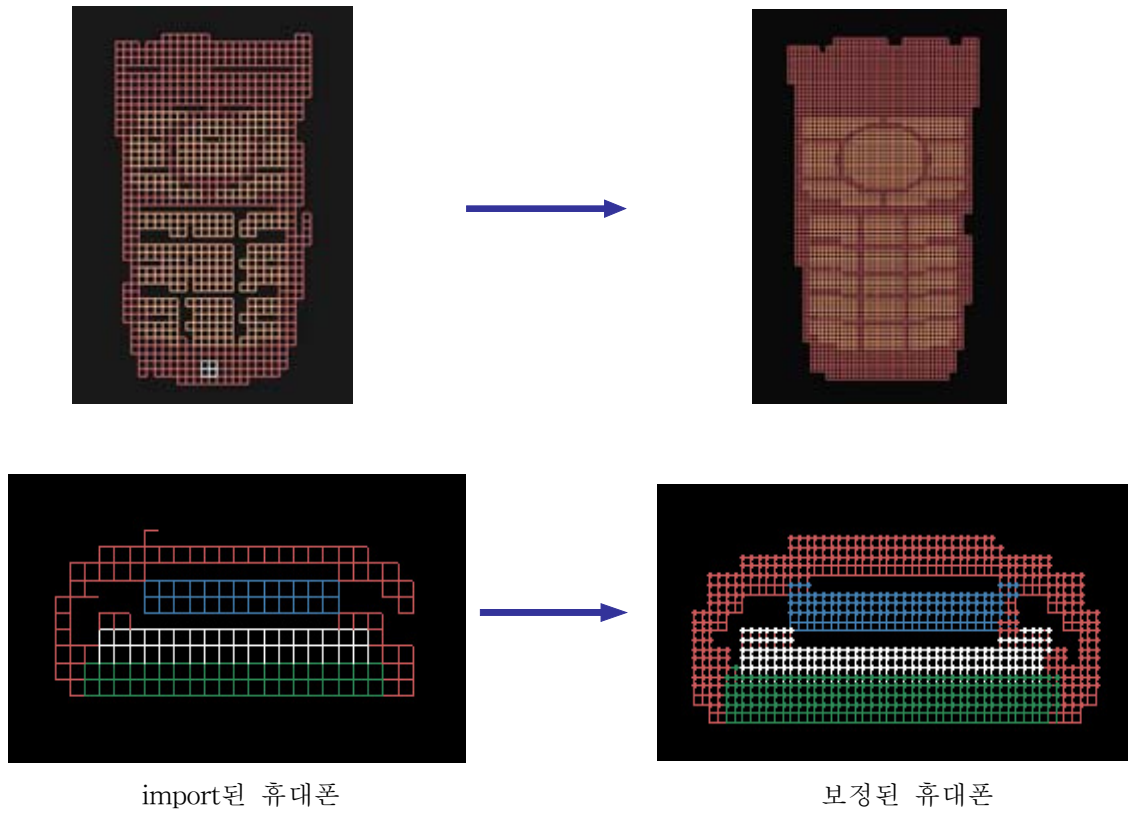


그림 5-9. 2mm로 import된 휴대폰과 1mm로 remesh 한 후 보정된 휴대폰

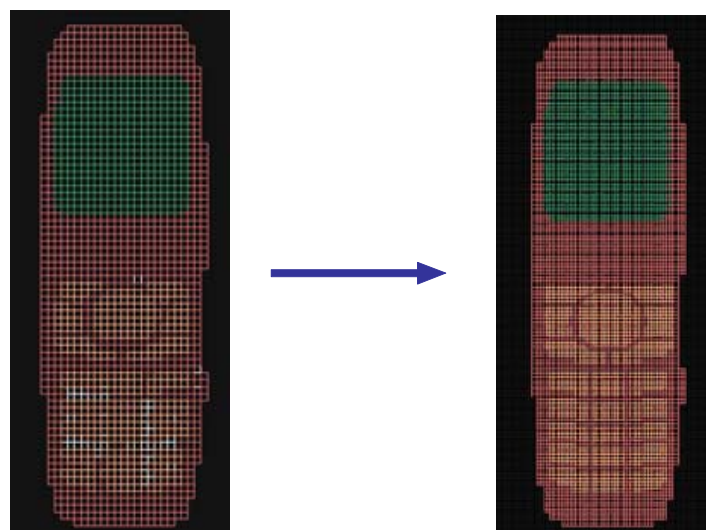


그림 5-10. 보정된 휴대폰의 전체적인 모습

제 3 절 Antenna 설계

Import되는 과정에서 안테나의 특성이 제대로 나오지 않고, 선정된 휴대폰의 안테나는 dual band (PCS 대역과 Cellular 대역)이기 때문에 XFDTD에서 구현하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 single 대역(cellular 대역: 835MHz)으로 선택하여 helical 안테나를 설계하였다. dual band 안테나에 대한 연구는 차후에 필요하다고 생각한다.

1. helical 안테나

도체가 나선형태로 감겨져 있고, 적절히 급전된다면, 이를 helical antenna 또는 helix라고 한다. helical 안테나의 전형적인 기하구조는 다음과 같다.

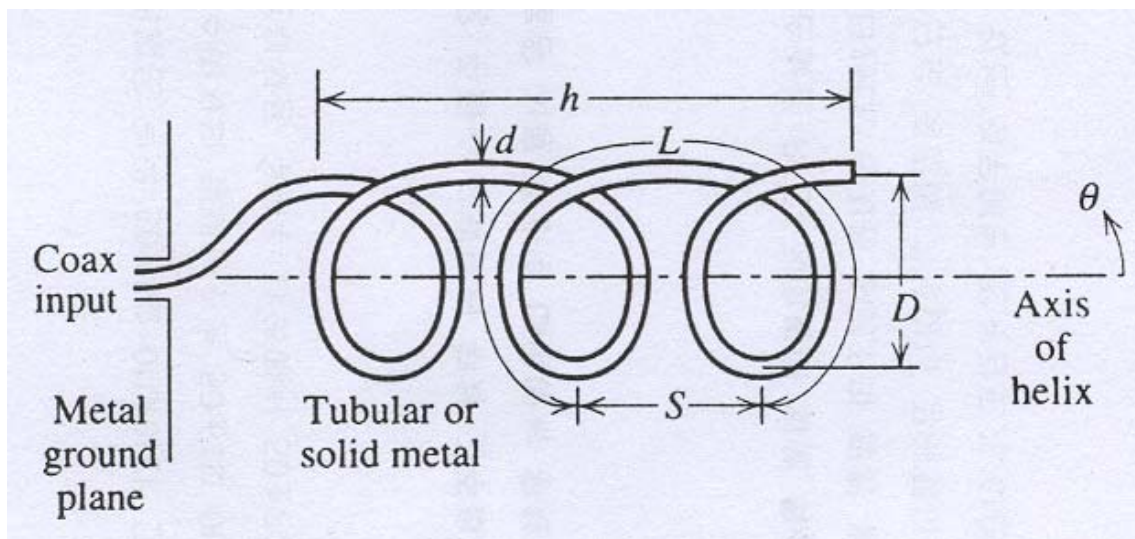


그림 5-11. helical 안테나의 기하구조의 크기. 왼손 방향으로 감은 helix

만약 helical 안테나의 한 개의 권선을 펼친다면, 그림 5-12에서 보는 것처럼 여러 helical 안테나의 여러 가지 파라미터 사이의 관계가 나타난다.

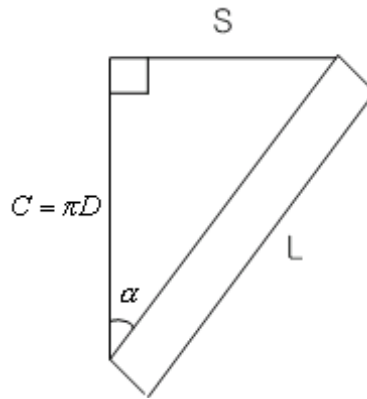


그림 5-12. helical 안테나의 한 권선을 펼친 모델

helical 안테나의 기호는 다음과 같다.

D = 나선의 지름

C = 나선의 원주길이 $= \pi D$

S = 권선 간격 $= C \tan \alpha$

α = 피치각 $= \tan^{-1} \frac{S}{C}$

L = 한 권선의 길이 $= \sqrt{C^2 + S^2}$

N = 권선 수

L_w = 나선 코일의 길이 $= NL$

h = 높이 = 축의 길이 $= NS$

d = 나선 도체의 지름

$S=0$ ($\alpha=0^\circ$)일 때, helical 안테나는 루프 안테나로 축소되며, $D=0$ ($\alpha=90^\circ$)일 때, 그것은 선형 안테나로 감소한다.

helical 안테나는 두 가지 모드에서 동작한다. 그것은 정상모드와 축모드이다. 정상모드는 helical 안테나 축의 법선방향으로 가장 강한 방사를 만든다. 이는 나선의 지름이 파장에 비해 작을 때 일어난다. 축모드는 helical 안테나의 축을 따라 최대 방사를 만든다. 나선의 원주가 파장 정도일 때, 축모드가 발생한다.

가. 정상모드 helical 안테나

정상모드로 동작할 때, 방사장은 나선 축의 법선방향에서 최대가 되며, 어

던 기하학적인 구조에 대해서는 이론적으로 원형편파가 방사되기도 한다. 정상모드의 동작에 대해 나선의 지름은 파장에 비해 작아야 한다. 즉 $D \ll \lambda$, 그리고 보통 $L \ll \lambda$ 이다. 정상모드 helical 안테나는 전기적으로 소형이므로 효율은 낮다.

helical 안테나는 소형이므로 전류는 안테나의 길이에 대해 진폭과 위상이 일정하다고 가정한다. 원거리장 패턴은 권선 수에 무관하며, 한 권선을 조사해 얻을 수 있다. 한 권선은 그림 5-13에서 보는 것처럼 소형 루프와 이상적인 다이폴로 근사화될 수 있다.

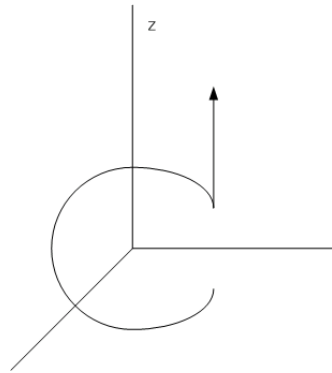


그림 5-13. 소형 루프와 이상적인 다이폴로 근사화한 정상모드 helical의 한 권선

$$E = \frac{I\Delta z}{4\pi} j\omega\mu \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \hat{\theta} \quad (\text{식. 5-1a})$$

$$H = \frac{I\Delta z}{4\pi} j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \hat{\phi} \quad (\text{식. 5-1b})$$

식 4-1a 으로부터 이상적인 다이폴 안테나의 원거리 전장은 다음과 같다.

$$E_D = j\omega\mu IS \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \sin\theta \hat{\theta} \quad (\text{식. 5-2})$$

여기서 helical 안테나의 권선 사이의 간격인 S는 그림 5-13의 이상적 다이폴 안테나의 길이이다. 소형 루프 안테나의 원거리 전장은 다음과 같다.

$$E_L = \eta\beta^2 \frac{\pi}{4} D^2 I \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \sin\theta \hat{\phi} \quad (\text{식. 5-3})$$

여기서 $\pi D^2/4$ 는 루프의 면적이다. 그림 5-13에서 모델링된 것처럼 한 권선에 대한 총 방사장은 (식. 5-2)와 (식. 5-3)의 장들의 벡터합이다. 두 성분 모두 $\sin\theta$ 패턴을 가지며(그림 5-14참조) 90° 만큼 위상차를 가진다. 전장성분의 비는 다음과 같다.

$$\frac{|E_\theta|}{|E_\phi|} = \frac{4w\mu S}{\sqrt{(\mu/\epsilon)}w\sqrt{\mu\epsilon}(2\pi/\lambda)\pi D^2} = \frac{2S\lambda}{\pi^2 D^2} = \frac{2\frac{S}{\lambda}}{(\frac{C}{\lambda})^2} \quad (\text{식. 5-4})$$

이 식은 1보다 큰 값을 가질 때 타원편파의 축비(axial ratio)와 동일하고, 1보다 작을 때는 축비가 역수가 된다. 극한적인 경우로 (식. 5-4)의 값이 0($s=0$)일 때는 수평편파를 가지는 소형루프에 대응하고, ∞ ($D=0$)일 때는 수직편파를 가지는 단형 다이폴에 대응된다.

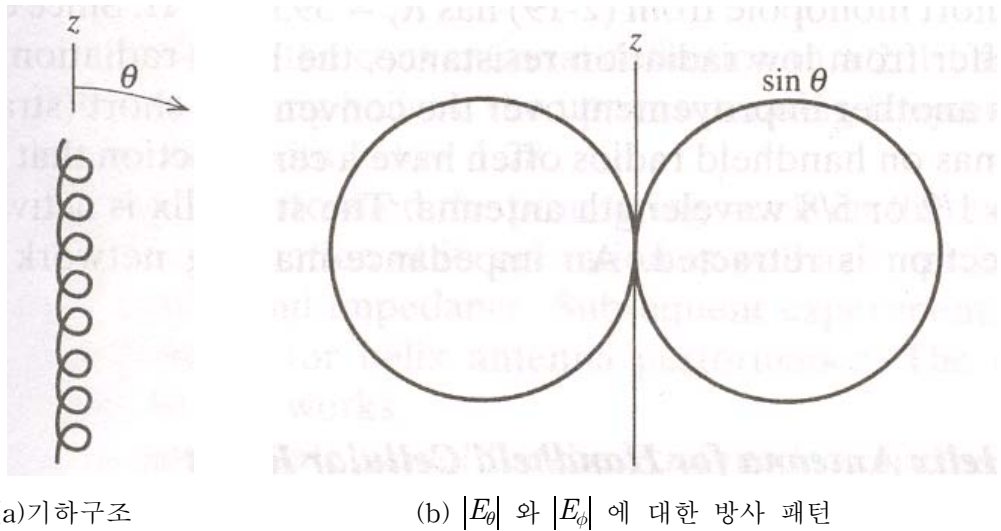


그림 5-14. 정상모드 helical 안테나와 방사패턴

선형(수직)성분들은 90° 의 위상차를 가지므로, 원형편파는 축비가 1일 때 얻어진다. 이것은 (식. 5-4)을 1과 같다고 놓으면 얻어진다.

$$C = \pi D = \sqrt{2S\lambda} \quad (\text{식. 5-5})$$

이러한 원형편파는 패턴이 0이 되는 방향 (helical 안테나의 축을 따라)을 제외하고 전방향에 대해 얻을 수 있다. 그림 5-12으로부터, 다음 식들이 성립됨을 알 수 있다.

$$L \sin \alpha = S \quad \text{또는} \quad \alpha = \sin^{-1} \frac{S}{L} \quad (\text{식. 5-6})$$

그리고

$$C^2 + S^2 = L^2 \quad (\text{식. 5-7})$$

정상 모드에서 동작하는 원형편파에 대해, helical 안테나의 원주는 (식. 5-7)에 (식. 5-5)를 이용해 다음과 같이 주어진다.

$$S_{CP}^2 + 2S_{CP}\lambda - L^2 = 0 \quad (\text{식. 5-8})$$

이것은 다음 식과 같이 S에 대해 풀 수 있는 2차 방정식이다.

$$S_{CP} = \frac{-2\lambda \pm \sqrt{4\lambda^2 + 4L^2}}{2} = \lambda \left[-1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2} \right] \quad (\text{식. 5-9})$$

물리적인 길이 S를 양수로 하고자 양의 부호를 선택하고, 이를 (식. 5-6)에 대입하면 원형편파가 요구되는 피치각을 얻을 수 있다.

$$\alpha_{CP} = \sin^{-1} \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2}}{\frac{L}{\lambda}} \right] \quad (\text{식. 5-10})$$

보통 정상모드 helical 안테나가 수직으로 향하고, (식. 5-4)의 비가 1보다 더 커지므로, 동작하면 주로 수직편파된 방사가 일어난다. 이 안테나는 휴대용 개인 라디오와 같은 소형 송수신기로 널리 쓰인다. 이러한 응용에서 도선의 길이 L_w 는 파장의 1/4이며, 안테나는 접지면에 대해 급전된 모노폴 안테나처럼 동작한다. 이러한 맥락에서 이 안테나는 정상모드 helical 안테나 (NMHA : normal mode helix antenna) 또는 공진 ($\lambda/4$) 스테브 helical 안테나라고 자주 언급된다. 패턴은 물론 전 방향성이다. 동일 높이를 갖는 기존의 직도선 모노폴 안테나에 비해 스테브 helical 안테나의 장점은 나선형 도선이 전기적 단형안테나에서 고유 커패시턴스 성분을 제거하는 경향이 있는 인덕터로 동작한다는 점이다. helical 안테나의 도선을 따라 흐르는 전류는 근사적으로 사인파의 형태이다. $\lambda/8$ 이하의 높이에서 완전 접지면 위의 공진

스터브 helical 안테나의 방사 저항은 다음과 같다.

$$R_r \approx 640 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \Omega \quad \text{공진 스텔브 helical 안테나} \quad (\text{식. 5-11})$$

나. 축모드 helical 안테나

축모드 helical 안테나는 약 15dB 정도 이상의 적당한 이득과 원형편파가 요구될 때 사용된다. helical 안테나는 비교적 작은 단면적을 가지므로 UHF 주파수대에서 인기가 있고 위성 통신용으로 폭넓게 사용된다. 축모드에서, helical 안테나는 나선의 축 (그림 5-11에서 +z 방향)을 따라 단일 주빔을 갖는 엔드파이어 안테나처럼 방사한다. 방사는 축 근처에서 원형편파에 가깝다. 더구나 주빔은 나선의 권선 수가 증가할 때 좁아진다. 축 모드는 나선의 원주 C가 한 파장 정도 일 때 발생한다. 권선 수가 2~3회 정도인 helical 안테나들은 (식.5-12)에 대응하는 주파수 범위에서 좋은 성능을 나타낸다.

$$\frac{3}{4}\lambda \leq C \leq \frac{4}{3}\lambda \quad (\text{식. 5-12})$$

이것은 다음과 같은 대역폭 비를 준다.

$$B_r = \frac{f_U}{f_L} = \frac{c/\lambda_U}{c/\lambda_L} = \frac{4/3}{3/4} = \frac{16}{9} = 1.78 \quad (\text{식. 5-13})$$

이 값은 광대역 안테나에 대한 2:1 대역폭 비의 기존의 정의에 근접한다. 긴 helical 안테나에 대해 동작주파수의 상한값은 $4/3\lambda$ 보다 더 낮으며, 대역폭은 1.78이하로 감소시킨다.

축모드 helical 안테나의 근사모델은 helical 안테나가 급전점에서 순수한 진행파를 전송한다고 가정한다. 이러한 진행파와 연관된 전장은 어떤 원안에서 회전하며 나선의 종단을 떠날 때 거의 원형편파가 되는 방사를 만든다.

감겨진 나선에 대해 위상이 거의 균일한 전류를 갖는 정상모드 helical 안테나와 대조적으로 축모드 helical 안테나에 흐르는 전류위상은 진행파의 특성인 나선을 따라서 연속 천이하게 된다. 원주가 한 파장에 가깝기 때문에 한 권선의 대칭되는 점에서의 전류는 약 180° 위상차를 보인다. 이는 반 바퀴 회전에 의해 전류방향이 반전되는 것을 상쇄시켜 준다. 따라서 나선의 대칭

점에서 일어나는 방사는 거의 동위상이며, 원거리장에서 축을 따라 강화 된다. 축모드 helical 안테나의 방사패턴은 각각의 권선이 배열소자가 되므로 배열이론을 사용해 모델링할 수 있다. 소자 패턴은 한파장 루프의 패턴을 근사화함으로 $\cos\theta$ 이다. 배열성분은 간격 S와 전진적인 위상 α_h 을 가지는 N개의 등간격 소자들에 대한 것이다. 권선들에 대한 전류 크기는 이런 간단한 모형에서 균일하다고 생각한다. 따라서 전체 패턴은 다음과 같다.

$$F(\theta) = K \cos\theta \frac{\sin(N\psi/2)}{N \sin(\psi/2)} \quad (\text{식. 4-14})$$

$$\psi = \beta S \cos\theta + \alpha_h \quad (\text{식. 4-15})$$

여기서 K는 정규화 상수이다.

나선을 따라서 진행하는 파는 나선 축(z축)을 따라 엔드파이어의 빔을 만든다. helical 안테나는 일반 엔드파이어 배열로 모델링 할 수 있다고 가정한다. 그러면 주빔의 최대값은 $\psi = 0$ 에 대해 $\theta = 0$ 인 방향에서 발생하며, (식. 4-15)로부터 $\alpha_h = -\beta S$ 임을 얻는다. $-\beta S$ 위상은 한 권선에 대해 축 방향을 따라서 거리 S에 대응하는 축방향 전파에서 생기는 위상지연이다. 그러나 전류파는 나선을 따른다. 이것은 원주가 약 한 파장이므로 또 다른 -2π 의 위상천이를 가져온다. 따라서 일반적인 엔드파이어에 대해 $\alpha_h = -\beta S - 2\pi$ 이다. 흥미롭게도 축 모드 helical 안테나의 진행파 모드는 거의 자연적으로 발생하는 지향성이 증가된 한센-우드야드(Hansen-Woodyard) 엔드파이어 배열에 대응한다는 것이 밝혀졌다. 이 효과는 일반적인 엔드파이어 안테나의 경우에 대해 $-\pi/N$ 위상지연을 추가함으로써 고려된다. 따라서 소자 대 소자 간의 위상천이는 다음과 같다.

$$\alpha_h = -(\beta S + 2\pi + \frac{\pi}{N}) \quad (\text{식. 4-16})$$

축모드 helical 안테나의 전기적 성능은 기하학적 파라미터 값들의 영향을 받는다. helical 안테나는 피치각의 넓은 범위에 걸쳐서 잘 동작하나 $12^\circ < \alpha < 14^\circ$ 에서 최적의 조건이 되며, 나선들은 보통 $\alpha = 13^\circ$ 를 가지도록 구성된다. 더 많은 권선이 추가될 때, 이득은 증가하고, 편파 축비는 감소한다.

다. 본 연구에 적용된 helical 안테나

본 연구에서 적용된 안테나는 앞에서 설명한 정상모드 helical 안테나이다. 앞에서 언급된 식들을 가지고 주파수가 835MHz인 helical 안테나에 대해서 계산해보면 다음과 같다.

표 5-1. 주파수 835MHz인 정상모드 helical 안테나의 계산 값

S(권선 간격)	D(나선의 지름)	C(나선의 원주 길이)	N(권선 수)
1	4.27 mm	13.41 mm	6.68
2	6.04 mm	18.97 mm	4.72
3	7.40 mm	23.24 mm	3.84

XFDTD 로 import된 휴대폰의 안테나 크기에 따라 S가 2인 helical 안테나로 design 하였다.

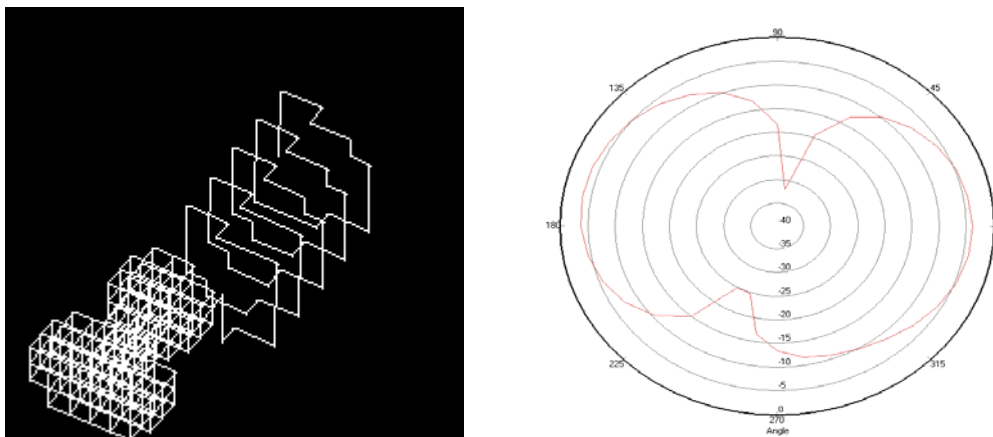


그림 5-15. XFDTD에서 design된 안테나와 방사패턴

그림 5-15는 XFDTD에서 design된 helical 안테나와 방사패턴이다. 여기서 방사패턴의 경우 오른쪽으로 기울어져 있는데 이것은 휴대폰의 액정이 있는 위쪽 부분의 영향으로 기울어진 것이다. 즉, 방사패턴의 왼쪽 부분이 위로 반사된 것이다.

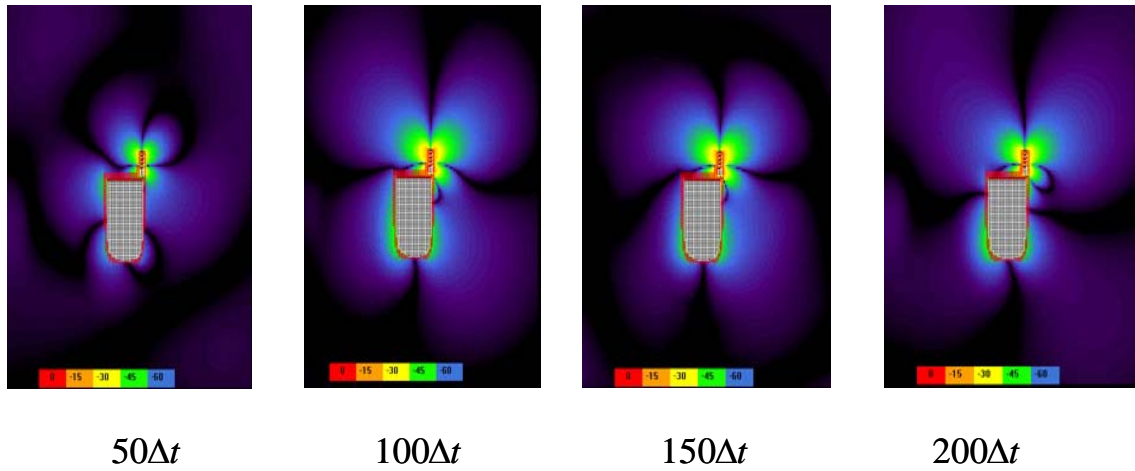


그림 5-16. 시간 변화에 따른 전계 변화

그림 5-16 은 XFDTD에서 휴대폰을 시뮬레이션하여 시간에 따른 전계변화를 나타낸 것이다. 입력파가 사인파이기 때문에 위의 전계변화가 연속적으로 반복해서 일어나게 된다.

제 4 절 인체두부와 휴대폰의 병합

정확한 SAR 계산 작업을 수행하기 위해서 먼저 선행되어야 하는 것이 인체 두부와 휴대폰의 병합 작업이다. 인체두부와 휴대폰의 병합란 휴대폰을 인체 두부의 귀부분에 정확하게 붙이는 작업이다. 이 작업을 위해서 XFDTD 내에 있는 좌표이동과 회전이란 명령어를 사용한다. 인체두부와 휴대폰의 병합 작업 시에 고려해야 할 점은 인체두부와 휴대폰을 같은 cell size 로 하는 것과 좌표이동과 회전시 휴대폰이 아닌 인체두부를 가지고 수행해야 한다는 점이다.

같은 cell size가 아닐 경우 실제 크기와 달라져서 정확한 시뮬레이션을 기대할 수 없다. 그리고 좌표이동이나 회전시 인체두부를 가지고 해야 하는 이유는 구조변화에 대한 문제점이 거의 없다는 점이다. 만약 휴대폰을 가지고 하는 경우 구조변화를 생기게 될 뿐 아니라 안테나 부분 역시 변화되어 보정 작업이 필요하게 된다. 그림 5-17은 인체 두부의 왼쪽 귀부분에 휴대폰을 병합 시킨 그림이다.

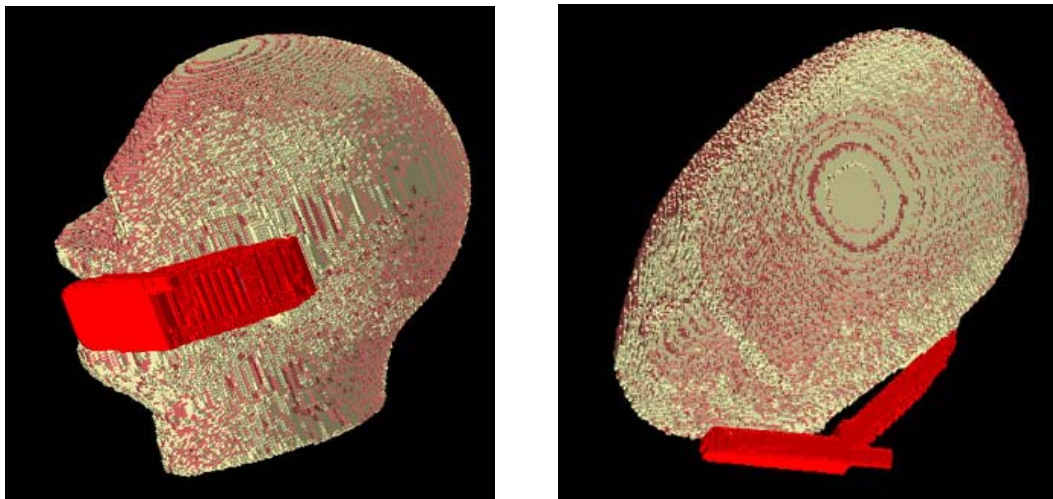


그림 5-17. 인체두부와 휴대폰의 병합

제 6 장 XFDTD를 이용한 SAR 계산 및 결과

시뮬레이션 조건

앞에서 병합 시킨 인체두부와 휴대폰을 가지고 cell size 따라(2mm, 1mm) 시뮬레이션 하였으며 폴더타입과 bar 타입을 비교하기 위해 수작업으로 간단하게 bar 타입을 design 하여 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

표 6-1. 시뮬레이션 조건

	Cell size(2 mm)	Cell size(1 mm)	bar 타입 (Cell size 2mm)
Time step	6000	12000	6000
Frequency	835 MHz	835 MHz	835 MHz
계산영역크기	149 dx 192 dy 184 dz	296 dx 383 dy 367 dz	118 dx 148 dy 151 dz
계산시간	2시간 30분	19시간 30분	1시간
Memory requirement	9 GByte	67 GByte	5 GByte

Time step은 입력전원의 사인파가 20주기 이상이 되어 steady-state 상태가 되도록 정하였다. 그리고 주파수는 앞에서 언급한 것과 같이 dual band (1.8 GHz 와 800 MHz)는 고려하지 않고 single band (800 MHz)만 고려 하였다. 그리고 결과으로 나온 SAR값을 1 W와 24 dBm으로 정규화 하여 비교 하였다. 1 W로 정규화 하는 것은 휴대폰의 출력 power의 어떠한 손실도 없다는 것을 말한다. 그리고 24 dBm은 현재 사용되고 있는 상업용 휴대폰의 출력 power이다. (CDMA standard)

시뮬레이션 결과

1. 최대 SAR 위치와 cell size 가 1 mm와 2 mm일때의 SAR 비교

i) 인체 두부의 최대 SAR 위치와 최대 위치에서의 전기장 및 전도전류 (2mm)

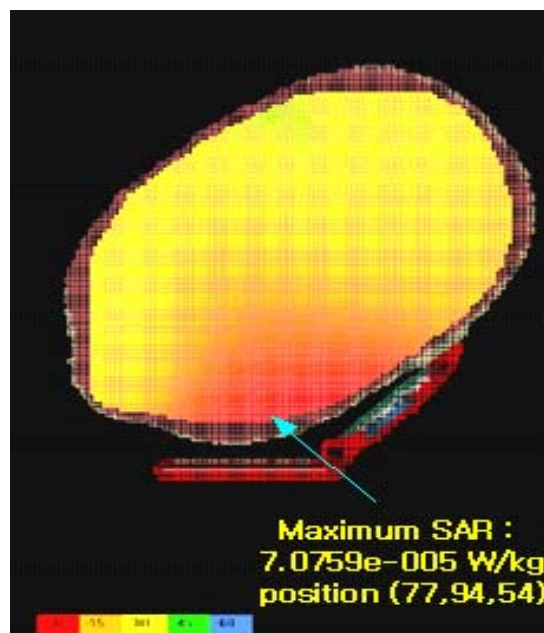
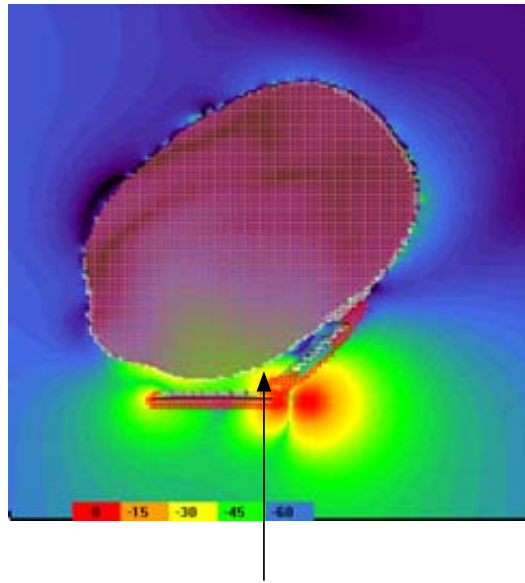
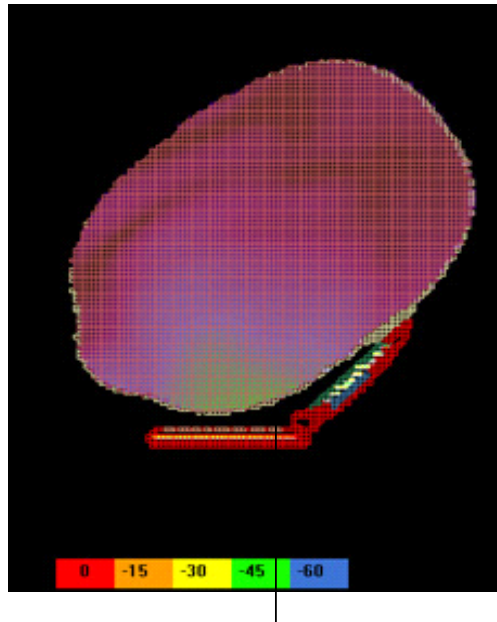


그림 6-1. 최대 SAR 위치



최대 SAR 위치
(77,94,54)에서의
E-field의 크기

그림 6-2. 최대 SAR 위치에서의 전기장의크기



최대 SAR 위치
(77,94,54)에서의
전도 전류의 크기 0.1257A/m

그림 6-3. 최대 SAR 위치에서의 전도전류의 크기

ii) 1 mm와 2 mm 의 최대 1 g 평균 SAR 및 10 g 평균 SAR

표 6-2. 1 W 정규화 시킨 SAR(W/kg) (1 mm, 2 mm)

	2 mm mesh	1 mm mesh
계산된 입력 전력	0.012 mW	0.0384 mW
최대 1g 평균 SAR	4.218 W/kg	5.56 W/kg
최대 10g 평균 SAR	3.264 W/kg	4.24 W/kg
최대 SAR	5.865 W/kg	7.85 W/kg

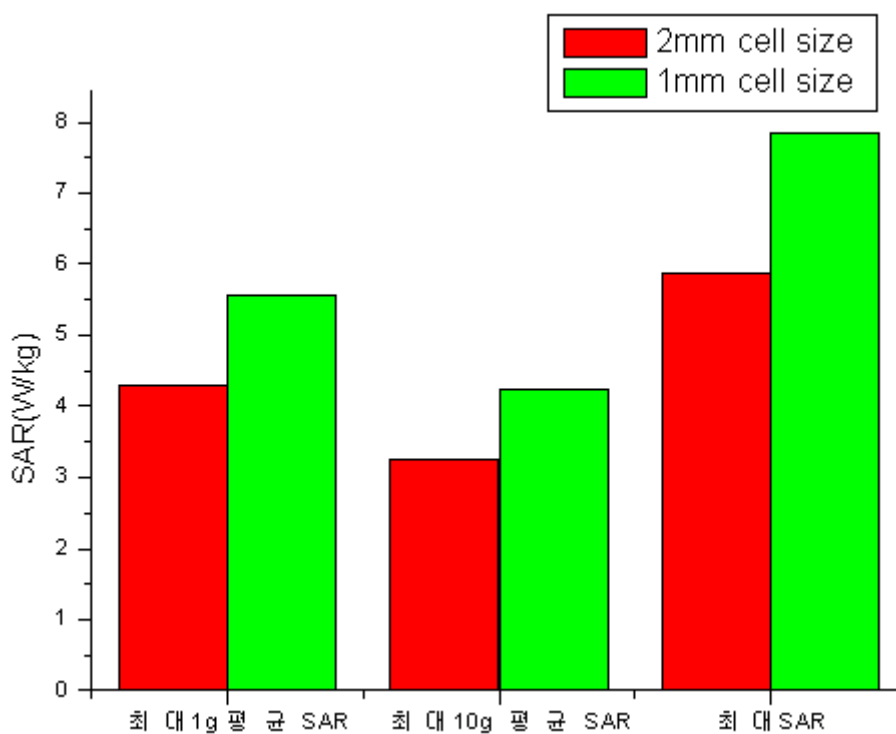


표 6-3. Cell size에 따른 SAR 비교 (1 W 정규화)

표 6-4. 실제 인가되는 전력 24 dBm을 고려한 SAR (W/kg) (1 mm, 2 mm)

	2 mm mesh	1 mm mesh
최대 1 g 평균 SAR	1.076 W/kg	1.39 W/kg
최대 10 g 평균 SAR	0.82 W/kg	1.065 W/kg
최대 SAR	1.474 W/kg	1.972 W/kg

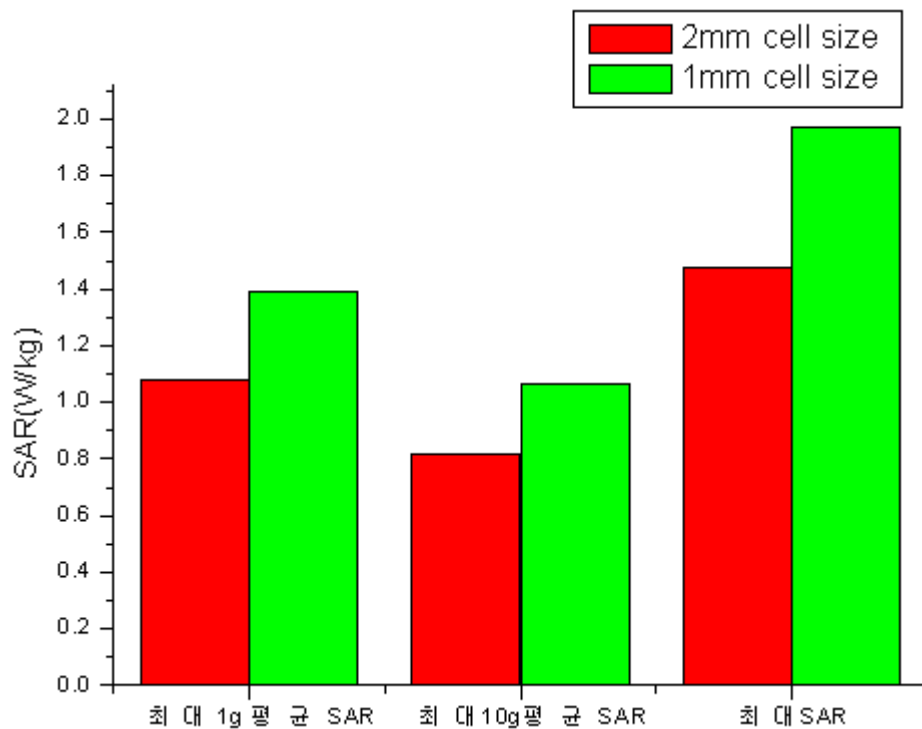


표 6-5. Cell size에 따른 SAR 비교 (24 dBm 정규화)

위 결과 그림들을 보면 모두 얼굴 안면의 부분에서 최대 SAR 값이 나타남을 볼 수 있으며, 최대 SAR 위치 부분에서 전도 전류나 E-field의 최대 값이 나타남을 알 수 있다. 이것은 안테나의 위치에 많은 영향을 받는다.

CAD로 design된 실제 휴대폰의 최대 1g 평균 SAR의 값은 1.24 W/kg으로 위의 표와 비교하면 1 mm는 1.24 W/kg 보다 크고 2 mm는 1.24 W/kg 보다 작음을 알 수 있다.

2. Cell size 2 mm인 bar 형태와 폴더 형태의 SAR 비교

i) bar 형태의 휴대폰

일반적으로 bar 형태의 휴대폰들은 안테나가 모노폴 안테나로서 몸체와 연결되어 실제로는 다이폴 안테나의 역할을 하는 것이다. 본 연구에서는 IEEE의 논문 및 자료를 참고하고 835MHz에 맞게 계산하여 휴대폰의 몸체를 design 하고 안테나는 폴더 형태의 휴대폰에서 사용된 helical 안테나를 사용 하였다. 그리고 시뮬레이션 조건은 앞에서 적용된 것과 마찬가지로 수행하였다.

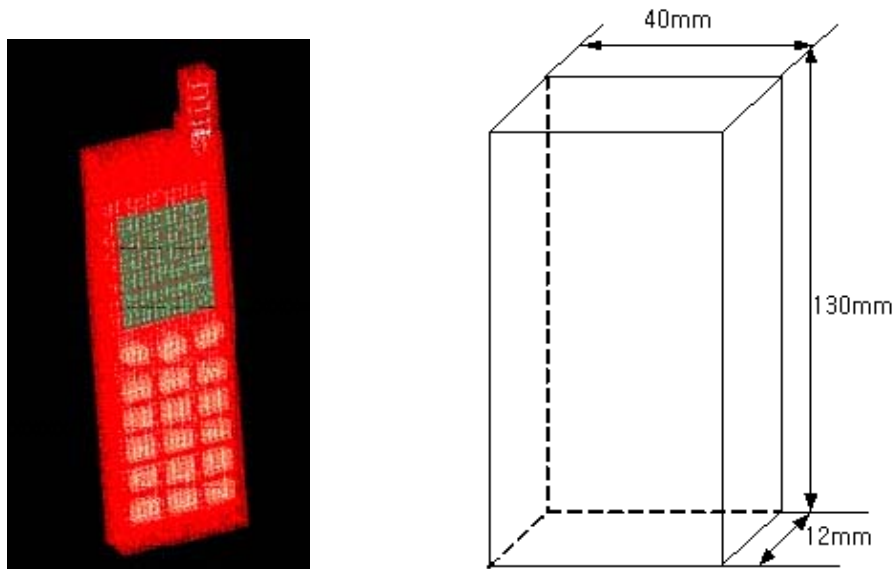


그림 6-4. 휴대폰 몸체의 dimension

ii) bar 형태 휴대폰의 안테나 방사 및 시간에 따른 전계 변화

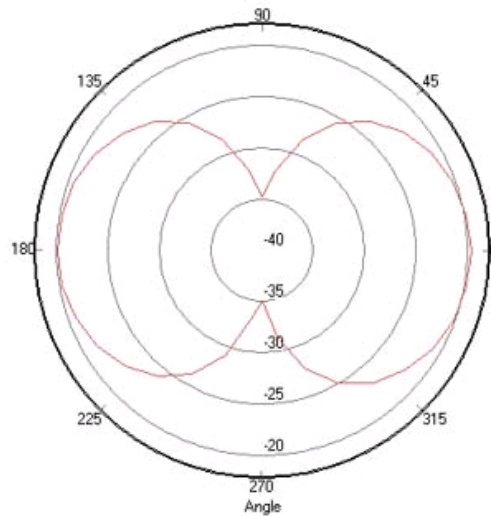


그림 6-5. bar 형태의 안테나 방사패턴

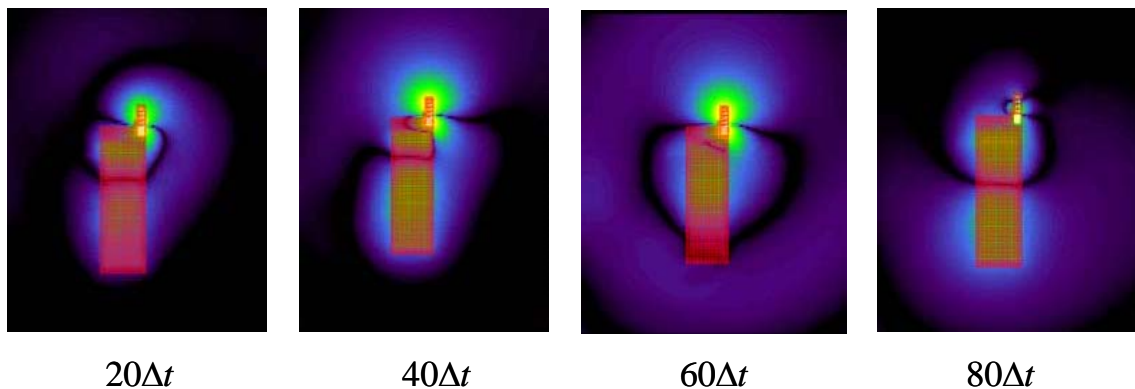
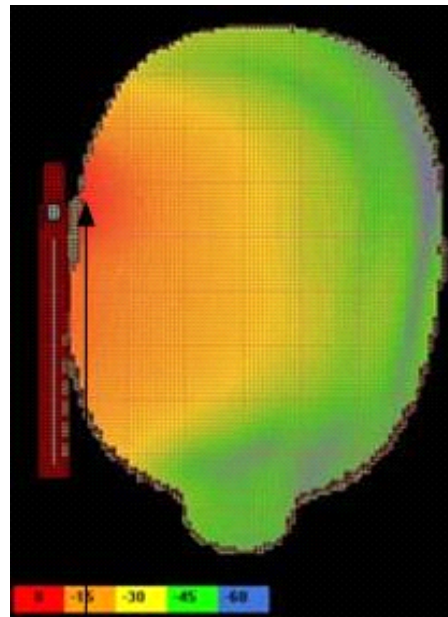


그림 6-6. bar 형태의 시간에 따른 안테나의 전계 변화

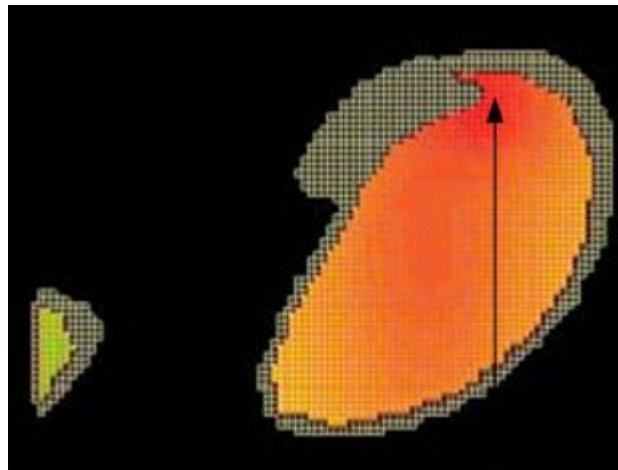
그림 6-5는 bar 형태 휴대폰의 방사패턴을 보인 것이다. 폴더 형과는 달리 방사패턴이 기울어지지 않고 양쪽으로 대칭임을 알 수 있다. 그림 6-6은 시간의 따른 전계변화를 나타내고 있다. 위에서 보듯이 helical 안테나에서 방사가 되기 시작하면 bar에서도 마찬가지로 약하게 방사가 된다. 이것은 앞에서 설명한 것과 마찬가지로 dipole 안테나의 역할을 함을 알 수 있다. bar 형태의 결과에서 보겠지만 폴더형의 최대 SAR 위치와는 달리 bar 형태의 최대 SAR 위치는 귀 윗부분인 곳에서 최대 SAR 위치가 생김을 알 수 있다.

iii) bar 형태 휴대폰의 최대 SAR 위치



Maximum SAR
Position (29,83,97)

그림 6-7. bar 형태 휴대폰의 최대 SAR 위치(xz plane)



Maximum SAR
Position(29,83,97)

그림 6-8. bar 형태 휴대폰의 최대 SAR 위치(yz plane)

iv) 폴더형태 휴대폰과 bar 형태 휴대폰 최대 1g 평균 SAR 및 10g 평균 SAR

표 6-6. 1 Watt로 정규화 시킨 SAR (folder-type, bar-type)

	폴더형태 휴대폰	bar 형태의 휴대폰
계산된 입력 전력	0.012 mW	0.013 mW
최대 1g 평균 SAR	4.281 W/kg	17W/kg
최대 10g 평균 SAR	3.264 W/kg	10.23W/kg
최대 SAR(W/kg)	5.865 W/kg	41.3 W/kg

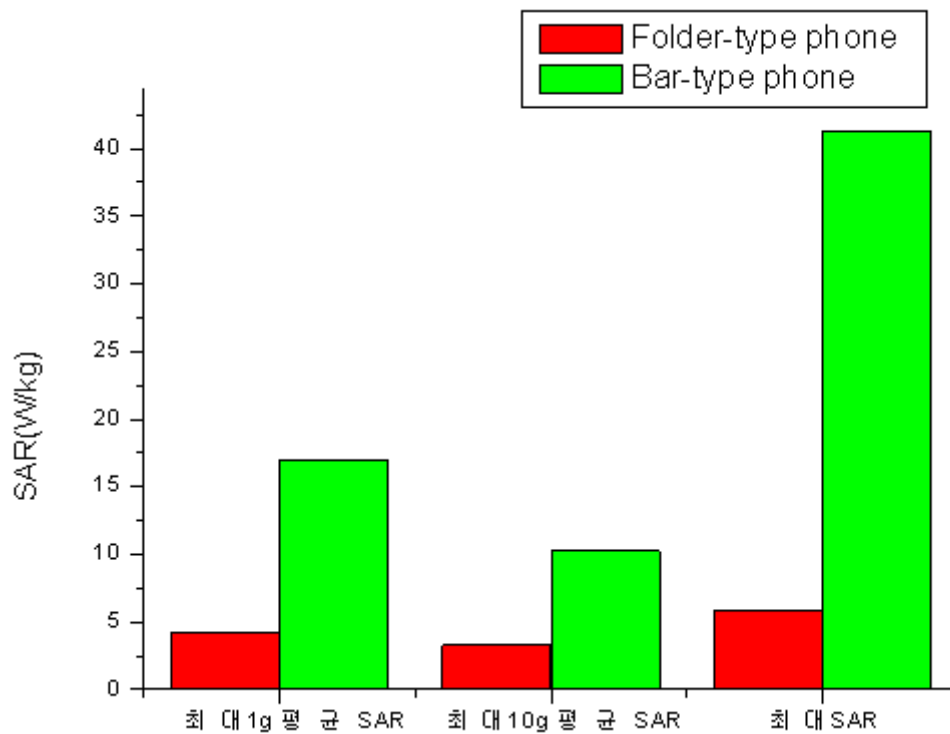


표 6-7. 막대그래프를 이용한 Folder 와 bar-type phone의 비교(1 W로 정규화)

표 6-8. 실제 인가되는 24 dBm 고려한 SAR (folder-type, bar-type)

	폴더형태 휴대폰	bar 형태의 휴대폰
최대 1g 평균 SAR	1.076 W/kg	4.27 W/kg
최대 10g 평균 SAR	0.820 W/kg	2.57 W/kg
최대 SAR (W/kg)	1.474 W/kg	10.38 W/kg

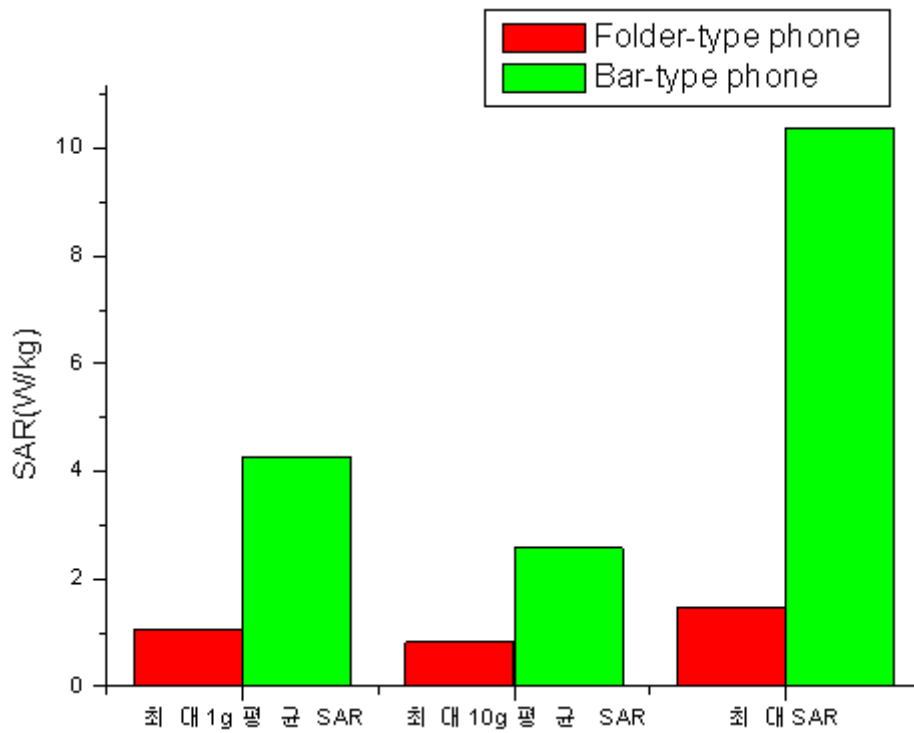


표 6-9. 막대그래프를 이용한 Folder 와 bar-type phone의 비교(24 dBm으로 정규화)

제 7 장 결 론

현재 국내외적으로 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지면서 전자파에 대한 규제를 법제화하였고, 이에 대한 정확한 기준을 만들기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 전자파 비흡수율 (SAR : Specific Absorption Rate)은 전자파의 인체 흡수정도를 나타내는 값으로서 인체보호 기준으로서 널리 이용되고 있다.

휴대폰 전자파에 의한 SAR의 저감을 위해서는 SAR의 정의 및 기준의 근거를 명확하게 이해해야하며, 국내외의 연구동향에 대한 흐름을 정확하게 파악해야한다. 따라서 본 연구에서는 SAR과 관련된 논문 및 연구 보고서를 통해 국내외 연구동향과 수치해석연구 동향 및 국내외 기준안을 정리하여, SAR 연구에 관한 방향과 기준을 마련할 수 있도록 하였으며, 실제 사용되는 폴더 형태의 휴대폰을 똑같이 CAD로 설계하여 시뮬레이션 함으로써 단순한 도체박스형태의 휴대폰 SAR 값보다 신뢰할 만한 SAR값을 얻을 수 있었다. 앞의 시뮬레이션 결과들을 정리하면, 폴더형태의 셀 크기가 1 mm 나 2 mm 의 SAR값이 약간의 차이가 있었지만 기준치 1.6 W/kg의 값보다 작게 나왔으며, 실제 측정된 1 g의 SAR 값 1.24 W/kg과 비슷한 값이 나왔음을 알 수 있다. 이에 따라 측정 전에 시뮬레이션으로 근사적인 값을 얻을 수 있음을 알 수 있고 미리 예측함으로써 좀 더 정확한 SAR값을 얻는데 큰 도움이 될 것이라는 것을 알 수 있다. 셀 크기에 따른 오차는 2 mm에서 1 mm로 re-mesh 하는 과정에서 약간의 구조변화 차이에서 생긴 것일 수 있으며, 향후 이에 대한 연구가 좀 더 필요한 것 같다.

한편 막대 형태 휴대폰의 SAR 값과 폴더형태의 SAR 값을 비교함으로써 막대 형태보다 폴더형태의 휴대폰의 SAR이 작음을 확인할 수 있었으며, 막대 형태의 경우 귀 위쪽 부분에서 폴더형태의 경우 얼굴 안면의 부분에서 최대 SAR 값이 나타남을 알 수 있었다. 즉, 인간의 뇌를 기준으로 할 때 폴더의 경우 좀 더 먼 곳에서 최대 SAR 위치가 나타남을 알 수 있다. 여기서 폴더형태나 막대 형태에 따라 최대 SAR 위치가 다른 것은 휴대폰 안테나의 위치에 따라 최대 SAR 위치가 변함을 알 수 있다. 따라서 막대형태 휴대폰 보다 폴더형태의 휴대폰의 SAR이 더 작음을 알 수 있으며 안테나의 위치에 따라 최대 SAR 위치가 변화함을 알 수 있었다. 앞으로도 휴대폰의 안테나의 위치, SAR의 줄이기 위한 방법, 인체와 휴대폰의 정확한 모델링 등 SAR의 대한 많은 연구가 필요하다.

앞으로도 국내외적으로 SAR 저감에 대한 연구와 전자파에 대한 정확한

기준을 만들기 위한 노력이 지속될 전망이다. 본 연구에서는 좀 더 정확한 SAR값을 얻기 위한 방법을 제시 했으며, 앞으로의 SAR에 관한 연구에 도움이 되었으면 한다.

참고 문헌

- [1] 이애경, 최형도, 김진석, “셀룰라 휴대폰에 의한 인체 두부의 SAR 해석”, 한국전자과학회논문지 vol. 9, no. 6, pp. 776-786, 1998
- [2] 홍수원, 김기회, 오학태, “한국인 인체두부모델을 이용한 SAR 계산”, 제3회 전자장의 생체영향에 관한 워크숍 발표집, pp. 89-98, 1999
- [3] 박주덕, 김남, “PCS 전화기의 안테나에 의해 인체 두부에 유기되는 SAR 분석”, 한국전자과학회논문지 vol. 10, no. 7, pp. 985-997, 1999
- [4] 이애경, 김진석, 이광천, 조광윤, “이동통신단말기 안테나 배치에 따른 두부의 전자파 흡수율”, 한국전자과학회논문지 vol. 10, no. 7, pp. 1095-1103, 1999
- [5] 김현경, 박주덕, 김남, 윤재훈, “SAR 저감을 위한 PCS 단말기의 PIFA 설계”, 한국전자과학회논문지 vol. 11, no. 1, pp. 46-54, 2000
- [6] 김현경, 박주덕, 김진석, 김남, “PCS 전화기의 안테나 구조에 따른 SAR 분석”, 한국전자과학회 종합학술발표회 논문집 vol. 10, no. 1, pp. 306-310, 2000
- [7] 정민석, 이범선, “SAR 저감을 위한 이동통신 단말기 안테나 연구”, 한국전자과학회 종합학술발표회 논문집 vol. 11, no. 1, pp. 123-126, 2001
- [8] 최윤희, 김남, 박주덕, “SAR 저감용 IMT-2000 단말기의 안테나 설계”, 한국전자과학회 종합학술발표회 논문집 vol. 11, no. 1, pp. 132-135, 2001
- [9] 홍수원, 오학태, 박천석, “SAR 저감을 위한 휴대폰 설계”, 한국전자과학회논문지 vol. 12, no. 3, pp. 352-359, 2001
- [10] 최형도, 이애경, 조광윤, 오학태, “휴대전화의 시험위치에 따른 SAR 분석”, 한국전자과학회논문지, vol. 12, no. 7, pp. 1199-1205, 2001
- [11] 정민석, 이범선, “이동통신단말기 SAR 저감 방안 분석”, 한국전자과학회논문지, vol. 13, no. 2, pp. 155-163, 2002
- [12] Juhjung Lee, Joonho Byun, Sangwook Nam, “FDTD Calculation of SAR for the Monopole Antenna on the Conducting Box with the Metallic Folder”, Antennas and Propagation Society, 2001 IEEE International Sym , vol. 2 , pp. 80-83, July 2001
- [13] Ae-kyung Lee, Hyung-do Choi, Hyung-soo Lee, Jeong-ki Park “Human Head Size and SAR Characteristics for Handset Exposure” ETRI Journal, Volume 24, Number 2, April, 2002

- [14] O. P. Gandhi, J. Y. Chen, C. M. Furse, "A Frequency-Dependent FDTD Method For Induced Current Calculations For A Heterogeneous Model Of The Human Body" IEEE MTT-S pp1283-1285, 1992
- [15] Cynthia M. Furse, Jin-Yuan Chen, Member, IEEE, and Om P. Gandhi, Fellow, IEEE, " The Use of the Frequency-Dependent Finite-Difference Time-Domain Method for Induced Current and SAR Calculations for a Heterogeneous Model of the Human Body" IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, VOL. 36, NO. 2, MAY 1994
- [16] O. P. Gandhi and Cynthia M. Furse " Currents Iduced in the Human Body for Exposure to Ultrawideband Electromagnetic Pulses" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, VOL.39, NO.2, MAY 1997
- [17] 기술정보센터, 주간기술동향 통권 907호, 1999. 8. 4
- [18] Antonios Drossos, Member, IEEE, Veli Santomaa, Senior Member, IEEE, Niels Kuster, Member, IEEE "The Dependence of Electromagnetic Energy Absorption Upon Human Head Tissue Composition in the Frequency Ranged of 300-3000 MHz" IEEE Ttans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 48, NO. 11, Nov. 2000.
- [19] Kacarska M., Ololoska L., Loakovska S., Grcev L. "Visualization of Induced Currents and SAR in Human's Head in Cellular Telecommunications" IEEE 1999.
- [20] S.I. Watanab "Charateristics of the SAR Distributions in Head Exposed to Electromagnetic Fields Radiated by a Hand-Held Portable Radio" IEEE MW theory and technique 1996.
- [21] Kacarska M., Ololoska L., Loakovska S., Grcev L. "Visualization of Induced Currents and SAR in Human's Head in Cellular Telecommunications" IEEE 1999.
- [22] P.J. Dimbylow and S. M. Mann "SAR Calulations in an Anatomically Realistic Model of the Head for Mobile Communication Transceivers at 900MHz and 1.8GHz" phy. Med. Biol. 39 (1994) 1537-1553. Printed in the UK.

- [23] Michael Kanda, Quirino Balzano, Senior Member, IEEE, Paola Russo, Member, IEEE, Antonio Faraone, Member, IEEE, and George Bit-Babik. "Effects of Ear-Connection Modeling on the Electromagnetic-Energy Absorption in a Human-Head Phantom Exposed to a Dipole Antenna Field at 835MHz" IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 44, NO. 1, FEBRUARY 2002.
- [24] Outi Kivekäs, Jani Ollikainen, Tuukka Lehtiniemi and Pertti Vainikainen. "Effect of the Chassis Length on the Bandwidth, SAR, and Efficiency of Internal Mobile Phone Antenna" MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS / Vol. 36, No. 6, March 20 2003.
- [25] L. C. Fung, S. W. Leung, and K. H. Chan. "Experimental Study of SAR Reduction on Commercial Products and Shielding Materials in Mobile Phone" MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS / Vol. 36, No. 6, March 20 2003.
- [26] Hsing-Yi Chen and Kun-Yi Shen. "Reduction of SAR in a Human Head Model Wrapped in Clothing Materials" MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS / Vol. 37, No. 4, May 20 2003

주 의

1. 이 연구보고서는 전파연구소의 연구개발사업비 재정 지원으로 이루어진 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 전파연구소 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다