

電磁波에 露出된 生體의 局所部位의 溫度 特性

A Characteristics of Temperature of the Local Tissue in the Human Body under Local Exposure of Electromagnetic Wave

박주태*
Ju-Tae Park*

<Abstract>

There has been an increase in the public concern about possible health risks by electromagnetic exposure from mobile phones. Recently, increase in the use among young children of portable telephones public concern regarding potential health hazards due to a hot spot appearing inside the infant head, has been growing. Since the biological hazards due to RF exposure are caused mainly by a temperature-rise in tissue, the effect of localized SAR for portable telephones should also be related to the temperature-rise in the human head. In this paper, it was measured that in the actual use of portable telephone the temperature of the local tissue in the human-head change. As a result, it should be noted that the mean temperature of human-body and localized tissue is rising from beginning call. However the temperature variation of localized tissue is recovered rapidly as normal temperature, although the mean temperature of human-body rising continuously at ending call of portable telephone.

Key Words : Health risks, Hot spot, Biological hazards, Local tissue, SAR

1. 서 론

전자, 전기기기의 사용이 급증하면서 이들 기기에서 복사되는 전자파에 의한 건강 위해에 관한 관심과 우려가 높아지고 있어, 이와 관련하여 건강 영향에 대한 위험 가능성 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다. 특히 인체와 가장 가까이 접촉하여 사용하고 있는 휴대

전화기의 폭발적인 보급으로 전화기가 발산하는 전자파의 인체영향이 대중적인 문제로 산되고 있는 실정이다. 전자파가 생체에 조사되었을 때 주파수대역이나 조사강도의 차이에 의해 물리적 효과나 생물학적 손상정도가 달라질 수 있고, 동일한 전자파라도 조사시간에 따라 영향의 정도가 달라질 수 있다. 전자파의 생체 영향에 대한 기본적인 고려는 주로 국제

* 정회원, 영남이공대학 전자정보계열 교수, 工博
e-mail: jtpark@ync.ac.kr

* Prof., Dept. of Electronic & Infomation,
Yeungnam College of Science & Technology

(이 논문은 2002학년도 영남이공대학 연구조성비 지원에 의한 것임.)

적인 안전기준의 차이에서 반영되어 나타난다. 구 소련의 기준(1958년)에 의하면 동일한 전자파라도 시간이 증가함에 따라 단위면적당 조사전력의 안전레벨도 낮추어 설정하고 비열효과에 근거를 둔 엄격한 안전한계를 제시하였고,^[1] 이에 비해 전자파의 열적효과에 기본적인 개념을 둔 ANSI(american national standards institute)의 기준은 인체의 전자파 흡수율(SAR: specific absorption rate)을 기준으로 하여 안전한계를 제시함과 동시에 전자파가 조사된 시간도 고려된 기준을 도입하였다.^[2] 두 기준이 동일한 전자파 조건에서도 현저하게 안전레벨의 차이가 있었던 이유는 열적효과와 비 열적효과에 따른 생물학적 영향에 대한 견해차이로 볼 수 있다. 그러나 해석상의 문제에서 비열적 효과는 주로 생체 실험적 결과나 경험을 통하여 예측해야 하는 어려움이 있고 열적효과는 비열적 효과에 비해 비교적 쉽게 모형화 하거나 수치화할 수 있다.

한편, 휴대전화기 등에 의한 국소폭로에 관해서는 전신평균 SAR의 지침치는 세계 각국의 안전기준에 비하여 아주 낮지만 안테나 부근의 전자계가 의외로 강하고 전화기의 사용형태에 따라서는 안테나에 가까운 두부 표면에서의 국소 SAR이 현저하게 증가할 가능성이 지적되고 있다.^[3] 이런 배경에서 최근 휴대전화기를 대상으로 한 국소흡수지침이 미국, 유럽, 일본에서 연이어 제정되고 있고, 우리나라에서도 계획 추진 중에 있다. 그러나 SAR지침치의 생리학적 근거는 전자파를 전신에 조사한 경우의 심부 온도상승에 대응하는 전신 평균 SAR에서만 있고 국소 SAR에는 없다. 현재 사용하고 있는 기준의 가장 엄격한 국소 SAR지침치는 전신폭로에 대한 국소 피이크 SAR값이 전신평균치의 20배를 넘지 않는다고 하는 가정 하에서 정해져 있을 따름이다.

전자파에 의한 인체영향을 연구하기 위해 실험대상을 인체로 하는 경우 사회 윤리적인 문제를 초월하여 직접적인 실험대상으로 할 수 없다는 한계성 때문에 가역적인 회복여부가 불확실한 최대 임계값까지의 실험이나 인체해부나 위해가 될 수 있는 방법을 통한 결과 검증이 불가능한 실정이다. 이러한 문제를

벗어나 연구할 수 있는 기법의 하나로 통계학적 차원에서의 역학조사를 들 수 있거나 일상의 동일한 환경에서 발생된 전자파 장애나 질병이라 하더라도 노출 당시의 개별적인 상황이나 다른 환경요인 등에 따른 여러 가지 요소들의 재현성 면에서 전자파의 영향만을 분리하여 해석하기가 용이하지 않다. 그래서 인체의 특정조직이나 평균조직 특성을 갖는 유동적인 균질한(homogeneous) 매질로 제작된 인체모형을 대상으로 온도센서를 삽입하여 의사모형 계측법을 많이 이용하는데 이런 연구는 비균질적(inhomogeneous)이면서 역동(dynamic) 인체의 구조와 전기정수의 모형화가 힘들고 모델링을 통해 생체만이 가질 수 있는 대사작용(metabolism)과 적응적인(adaptive) 생리기능을 그대로 반영하기란 상당한 한계점이 있다. 최근에는 유한차분 시간영역(FDTD: finite difference time domain)이라는 전자계 해석법을 이용하여 자기공명영상(MRI:magnetic resonance imaging)에서 획득한 해부학적 영상에서 나타난 비 균질 형태의 매질을 분류한 후 다층 블록으로 모델링하여 계산하는 방법이 주류를 이루고 있다. 그러나 이러한 방법으로 해석된 국부 SAR이 실제 생리적 효과와의 연관성에 대한 확인이나 비교된 연구는 거의 없는 실정 이므로 유사한 조건하에서의 생체계측을 통해 관찰된 결과를 종합분석하여 보완한다면 보다 유용한 기준치가 결정될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 현재 널리 사용되는 휴대전화기에 의한 생체장애를 추정함에 있어서 실제 사용환경 하에서 자원자를 대상으로 생체계측을 통한 두부의 온도변화를 측정하였다. 측정된 두부의 온도변화와 이에 따른 생체가 겪게 되는 전자파 증후군과의 상관관계를 규명하는 데는 공학적으로 한계가 있거나 현재의 휴대전화기 신드롬을 제거하는데 일조가 될 수 있으리라 사료된다.

2. 전자파에 대한 생체 특성

2.1. 주파수와 강도에 따른 특성

전자파는 신체의 크기에 따라서 특정 주파수에서 공진현상(표준신장 175[cm]일 경우 전

신은 70[MHz] 부근에서, 팔은 300[MHz] 부근에서 공진)을 일으켜 같은 출력에서도 흡수전력이 10배나 될 수 있다.^[4] 이러한 현상은 전자파의 주파수에 따른 파장길이나 노출 대상의 크기가 흡수전력의 차이로 나타나며 통신용 안테나에서 수신 전자파의 파장과 관련하여 안테나의 길이에 따라 전력이득이 달라진다는 사실로 설명된다. 이러한 사실은 동일한 주파수의 전자파가 생체내에서 흡수되는 전력이나 영향의 정도는 각기 다른 조직이나 해부학적 구조로 이루어진 기관들의 크기에 따라 달라질 수 있음을 의미한다. 전자파의 열적효과는 생체에서 균일하게 분포하는 것이 아니라 동일한 기관에서도 주파수의 변화에 따라 공진하는 부위도 변하고 이에 따른 열점(hot-spot)이 집중되기도 한다.^[5] 따라서 동일한 강도나 주파수를 가진 전자파에 대해서도 부위별 해부학적 구조나 조직성분에 따라 각 부분의 흡수전력이나 효과도 달라질 것이다.^[6] 대표적인 조직에서의 주파수에 따른 전자파의 투과특성을 그림 1에 나타내었는데, 여기서 단파대역의 전자파는 대부분의 생체조직을 통과하나 그 이상의 대역에서는 조직의 종류나 주파수에 따라 투과하는 정도가 다를 수 있다.

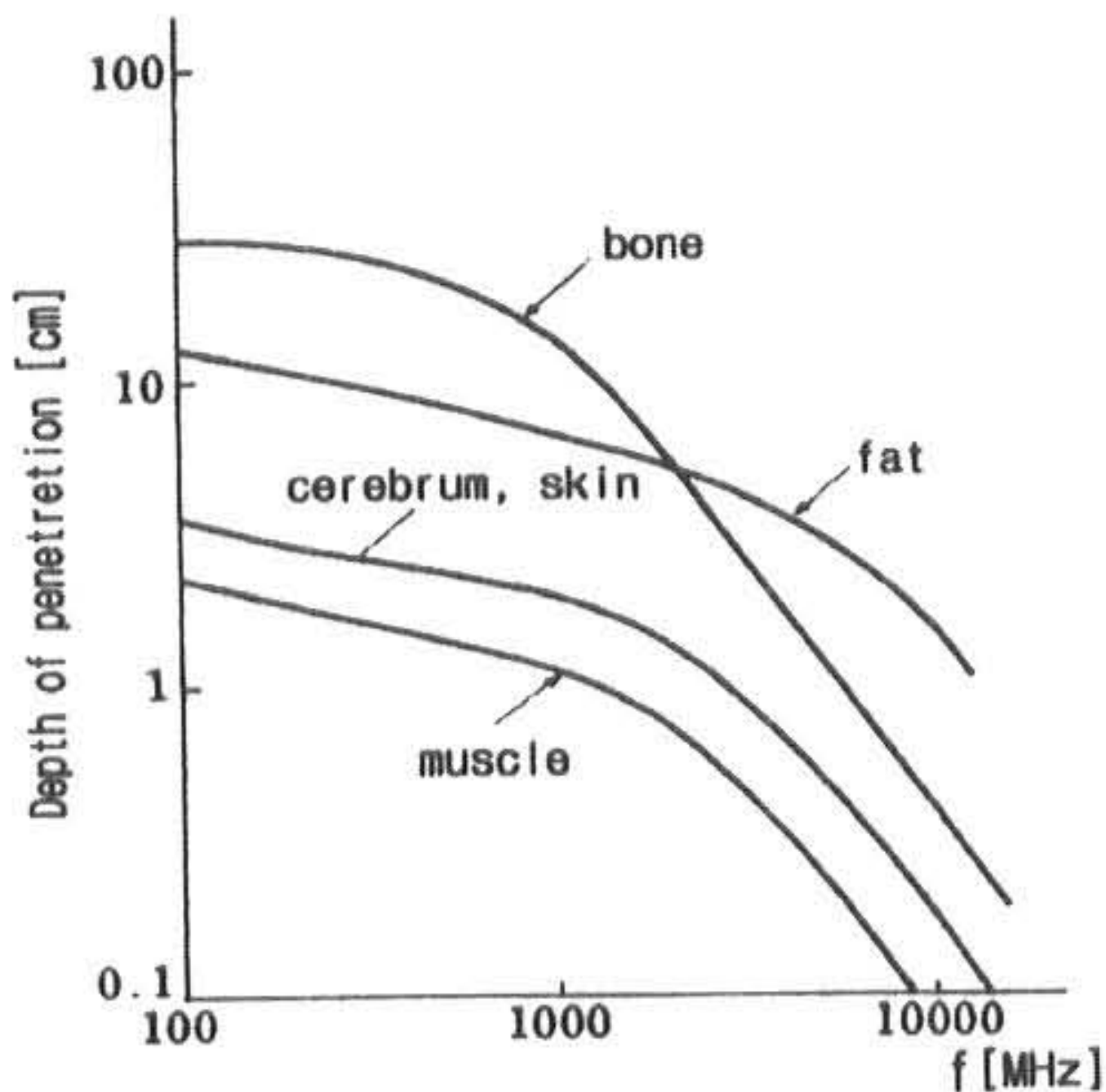


Fig. 1 Absorption characteristics of electromagnetic wave with frequency

한편 전자파의 강도는 전자파원의 출력강도보다 노출대상에게 도달되는 단위면적에 환산

된 전력밀도가 실질적인 영향에 관계되는 강도로 볼 수 있다. 구 소련의 안전기준에서 나타난 해석은 3[GHz]의 전자파를 동물실험을 통해 1[cm²]당 1[mW]의 출력으로 1시간동안 노출시키면 기능장애가 일어나고 동일한 주파수의 전자파에 1[cm²]당 0.1[mW]로 10시간 노출시키면 같은 변화가 일어난다고 한다. 이러한 현상에서 보면 전자파의 강도는 클수록 생체에서의 영향도 증가되고 동일한 강도에서 노출시간이 길어지면 영향도 증가되므로 생체에 흡수되는 에너지량의 크기를 전자파 강도개념으로 생각할 수 있다.^[7] 그러나 예를 들어 전자파를 이용하는 전자렌지의 출력이 클수록, 시간이 길수록 취사열량에 빠르고 충분하게 도달한다는 단순한 개념보다 이러한 전자파의 출력강도와 시간경과가 달라짐에 따라 어떤 변화가 얼마만큼 일어날 것인가 하는 개념이 도입되어야 생체에 미칠 수 있는 전자파의 영향을 정확하게 해석할 수 있을 것이다.

2.2. 열점 (Hot-spot)

일반적으로 열점(hot-spot)이란 전자파에 노출된 인체의 두부내에서 발생하는 흡수전력이 가장 높은 영역을 말한다. 이 현상은 Kritikos와 Schwan이 두부의 균질구모델에 대해서 이론적으로 처음 발견한 것이고, 반경이 10[cm]의 구모델에는 열점이 발생하지 않지만 반경 5[cm]에서는 250[MHz]에서 2.8[GHz]에 이르는 넓은 주파수범위에서 열점이 두부내부에 발생한다고 하였다.^[8] 더구나 그들은 평면파를 조사한 균질구모델에 대해서 열점을 상세하게 해석하고 반경 0.1[cm]에서 8[cm]의 구모델에 대해서는 주파수 300[MHz]에서 12[GHz]의 주파수범위에서만 열점이 형성되지 않는 것을 밝히고 있다. 또, 고바야시(小林)는 균질구모델을 반파장 다이폴안테나의 근방전자계에 노출시켰을 때 열점을 안테나와의 거리 관계에서 해석하고 이 경우의 형성조건을 찾고 있다.^[9] 예를 들면, 주파수가 1.5[GHz]에서는 반파장 안테나를 두부에서 10[cm] 떨어지면 구 반경이 1~5.5[cm]인 때에 열점이 생긴다고 하였다. 한편, 두부의 실제모델에 대해서는 그 크기나 주파수가 열점 형성조건을 만족시킨다해도 형상의 불균일성

에서 흡수전력이 두부내부의 특정영역에는 집중되기 어렵고 원방계나 근방계에 대해서도 열점은 형성되지 않는다고 알려져 있다.^[10] 실제로 Gandhi는 835[Mhz]와 1.8[Ghz]의 휴대전화기 사용시의 10세와 5세 아동에 상당하는 두부 실제모델에 대해서 SAR을 계산했는데 실사용 상태에서는 국소SAR의 피이크값은 두부표면에 생기고 내부에는 열점이 나타나지 않는다는 것을 보고하고 있다.^[3] 그러나, 두부의 균질 구모델에 대해서는 평면파나 반파장 다이폴안테나에서도 열점을 발생시키는 경우가 확실히 존재하고 있기 때문에 휴대전화기의 사용상태에 따라서 두부 실제모델내부에 열점이 형성될 가능성을 부정할 수 없다.

2.3. 상승온도 계산

휴대전화기에 의한 두부내 SAR을 발열원으로 한 열전도방정식은 FDTD법으로 해석해서 두부내의 상승온도를 구한다. 열평형상태에 있는 두부에 대해서 시각 t=0에서 step전자파가 조사된 것으로 하면 두부내 온도 T[°C]는

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + \rho \cdot SAR - b \cdot (T - T_b) \quad (1)$$

라는 지배(支配) 방정식을 만족시킨다. 여기서, ρ 는 조직의 밀도[kg/m³], C_p 는 비열[J/kg · °C], K 는 열전도율[W/m · °C], b 는 혈류에 관한 정수[W/m³ · °C] (수치가 클수록 혈류량이 많다.), T_b 는 혈류의 온도[°C]를 나타낸다. 또, 경계조건은,

$$h \cdot (T - T_a) = -K \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

로 나타낸다. 단, h 는 열전달율[W/m² · °C], T_a 는 외부의 온도[°C], n 는 두부표면의 법선방향의 단위 벡터를 나타낸다. 식(1)에 열발생원의 SAR은 두부실제모델내의 각 cell의 SAR값을 이용하기 위한 것이고, 두부내 상승온도분포는 식(1),(2)를 시간과 공간에 관해 차분화 함에 따라서 수치적으로 구할 수 있다. 시간 step δ_t 와 공간차분 δ 에 관한 차분해의 안정화조건은 차분화된 위 식의 열전도방정식으로 Von Neumann의 조건을 적용하는 것으로 도출할 수 있고, 두부내 각 조직의 열적정수는 문헌[11]에서 인용했으며, 그들의 수치를 표 1

에 정리해서 나타내었다. 여기서 각 조직의 수치는 조직 내에서 일정하게 하고 있지만 열전달을 h 에 관해서는 두부표면의 외부온도에 접한 부위(h_a)와 계산공간 내에 접하는 부위(h_b)로 구별하고 있다.^[12]

Table 1. Electric numbers of head tissue (900MHz)

tissue electric numbers	Bone	Brain	Muscle	Eyeball	Fat	Skin
relative permeability ϵ_r	17.4	44.1	51.8	74.3	10.0	39.5
conductivity σ [S/m]	0.19	0.89	1.11	1.97	0.17	0.69
tissue density [kg/m ³]	1850	1030	1040	1050	1010	1100

또, 이 계산에서는 전자파를 받기 전의 두부내 온도를 $T_0 = T_0(x,y,z,0)$ 로 하고 상승온도 $u = T - T_0$ 를 구한다. 단, T_0 는 식(1)에서 SAR = 0로 하고,

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T - b \cdot (T - T_b) \quad (3)$$

를 수치해석하는 것으로 구한다.

또 두부내 각 조직의 피이크 상승온도 $u = T - T_0$ 와 그 장소의 국소 SAR과의 관계는 열적 정상상태에 있어서의 $\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 가 되므로 식(1)에서

$$K \nabla^2 u + \rho \cdot SAR - b \cdot u = 0 \quad (4)$$

가 되지만, 지금 식(4)의 좌변 제1항이 제2항보다도 충분히 작다고 가정하면,

$$b \cdot u \approx \rho \cdot SAR = \frac{1}{2} \sigma E^2 \quad (5)$$

과 같은 관계식이 성립된다. 여기서 식(5)의 우변은 가열 포텐셜이라고 부르는 열손실이다.(E 는 조직내부의 전기장). 식(5)는 각 조직에 있어서 피이크 상승온도가 그 조직의 혈류(b)와 가열포텐셜에 의해 정해진다.

3. 실험 및 고찰

3.1. 실험

3.1.1. 전자파원

전자파원으로 이용된 휴대용전화기는 시중에서 유통되는 국산제품으로서 실사용 환경조

건에서 이 휴대전화기의 전계강도와 주파수를 전자파 측정용 EMC analyzer (HP8094EM)을 이용하여 측정한 결과 전계강도의 피크값은 60.7[V/m], 주파수는 834.85[Mhz]이었다. 또 휴대전화기는 주로 두부에 근접 밀착하여 사용하는데 일반적으로 통화시간이 일정 시간 이상 경과하면 송수신부 부근의 표면온도가 상승하는 것을 알 수 있는데 이러한 온도상승 요인은 출력소자들의 온도변화, 전자파에 의한 외장 케이스의 전력흡수, 전원공급용 축전지 소모에 의한 발열 등으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 요소들을 구분하지 않고 온도변화를 알아보기 위해 수신부의 측면에 온도센서를 부착하여 사용시간 경과에 따른 변화만 살펴보았다.

3.1.2. 실험방법

시간경과에 따른 온도변화를 측정하기 위해 센서부착 부위(두부표면)에 알코올로 기름기나 이물질 제거 후 온도센서를 부착하였다. 센서에서 얻어지는 데이터값은 입력저항이 10 [MΩ] 이상인 차동증폭기에 의해 증폭시키고 통상적인 교류전원에서 유기되는 잡음을 분리하기 위해 60[Hz]의 notch-filter를 사용했으며, Fig. 2와 같이 전치증폭기에서 얻어진 증폭된 아날로그신호를 A/D 변환기를 통해 디지털신호로 변환하여 저장하고 분석을 위하여 FFT (fast fourier transformation)처리하여 출력하였다.

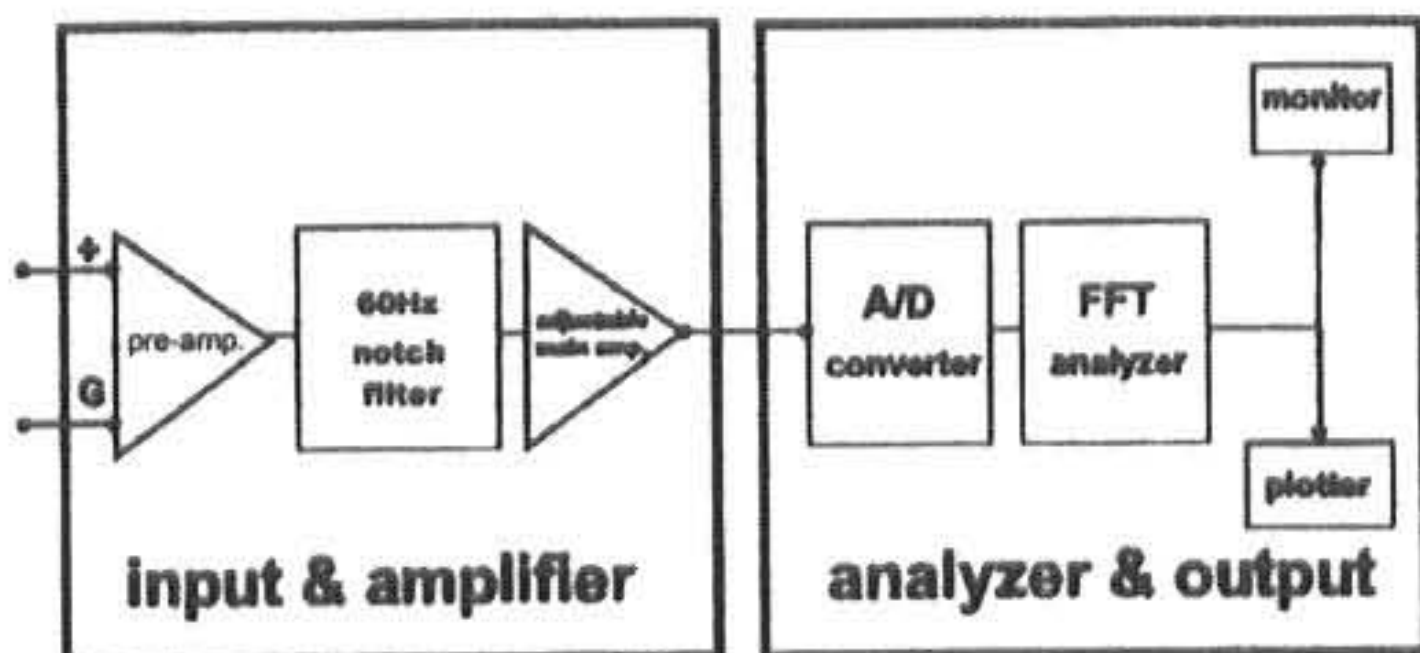


Fig. 2 Schematic diagram of the measurement system

온도변화의 기록시간은 1회를 진행하는 총시간을 90분으로 하고, 휴대전화 사용전 정상상태 (pre-exposure) 에서 30분, 사용상태(exposure) 30분, 사용 후(post-exposure) 30분을 연속적으로 측정하였다. 실험대상의 심리적 안정 및

실험환경의 적응을 위해 실험장소에 도착 후 30분 이상 휴식을 취하게 하고 계측 시 실험대상의 자세는 사무용 의자에 앉은 상태에서 이루어졌고, 실험시간 동안 각성상태와 통상적인 사용환경을 유지하기 위해 실험대기자와 일상적인 대화를 계속 유도하였다. 실험대상자는 남녀 자원자 24명에게 시행했으며 실험결과에 영향을 줄 것으로 예상되는 요인을 가급적 줄이기 위해 질병의 유무(감기나 기타 질병)를 확인하였고 실험실의 환경은 실온(22℃~25℃)과 환기가 잘되는 쾌적한 환경을 유지하였다.

3.2. 결과 및 고찰

3.2.1. 전자파원의 온도변화

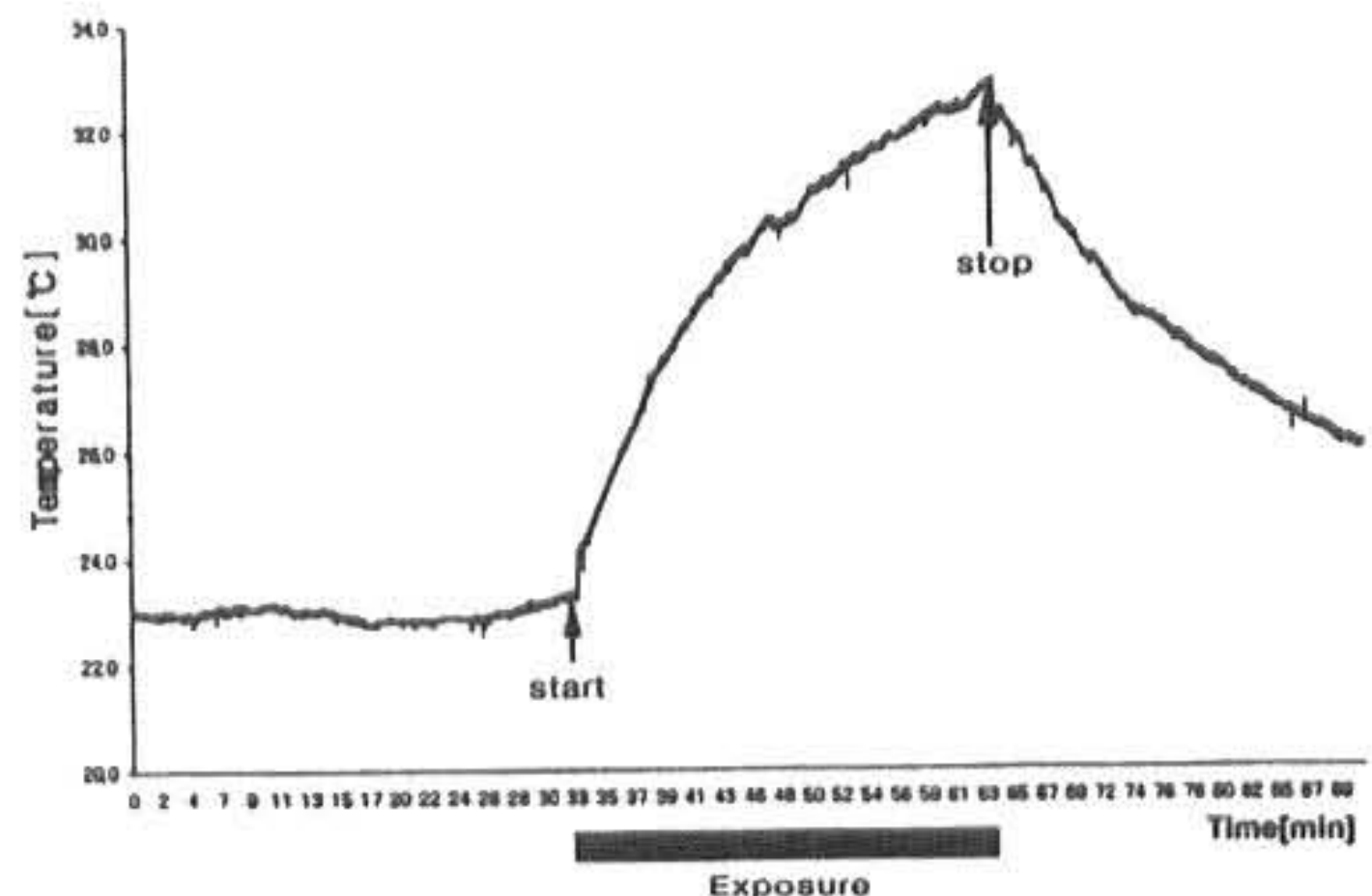


Fig. 3 Temperature characteristics of the source

실험에 전자파원으로 이용된 휴대전화기의 온도변화는 Fig. 3과 같고, 계측조건은 생체실험의 노출조건(30분 사용시)과 동일하며 수신부 표면의 온도변화를 기록하였다. 휴대전화기의 수신부 표면온도는 사용 전(power on, 수신대기 상태)에는 상온(23℃)부근의 온도를 유지하다가 사용 시작(통화 상태)후 계속 상승하여 30분 동안 약 9[℃]까지 상승 변화하였다.

3.2.2. 두부표면의 온도변화

Fig. 4는 현재 널리 사용되고 있는 휴대전화기를 남자 자원자 12명(평균 나이 21세, 신장 173cm, 체중 64kg)을 대상으로 30분간 통화하게 한 후 통화 할 때(Exposure)와 통화가 끝난 후(Post-exposure)의 국소부위(귀 뒷부분: 유양돌기 부위)의 온도와 전신체온(겨드랑이 부위)을 측정한 결과의 평균값이다. 남녀 구

별없이 모두 국소부의 온도는 통화가 종료되는 시점에서 급격히 감소하기 시작하여 빠른 시간 내에 통화하기 전 상태로 회복되지만 전신의 체온을 대표하는 겨드랑이부분의 온도는 상승하는 추세를 나타내었다. 실험에 참여한 대부분의 사람들이 전자파 노출시간을 15분 정도 경과하면서 두부에 대한 자각적인 열감을 호소하였으며 Fig. 3을 참고하면 휴대전화기의 수신부 온도가 약 4.2[°C]정도 상승되는 시간이다. 그래서 실험에서 전자파에 의한 열감을 경험한 대상에게 실제 실온보다 5[°C]정도 높은 물체를 두부에 수분간 밀착시키는 실험을 시행한 결과 동일한 열감을 호소했다. 또 전자파에 노출되기 전보다 노출시간이 경과함에 따라 국소부위의 온도는 빠른 회복력을 보이지만 두부 중 특히 비강을 중심으로한 안면부위의 온도변화는 오히려 증가하는 양상을 보였다.

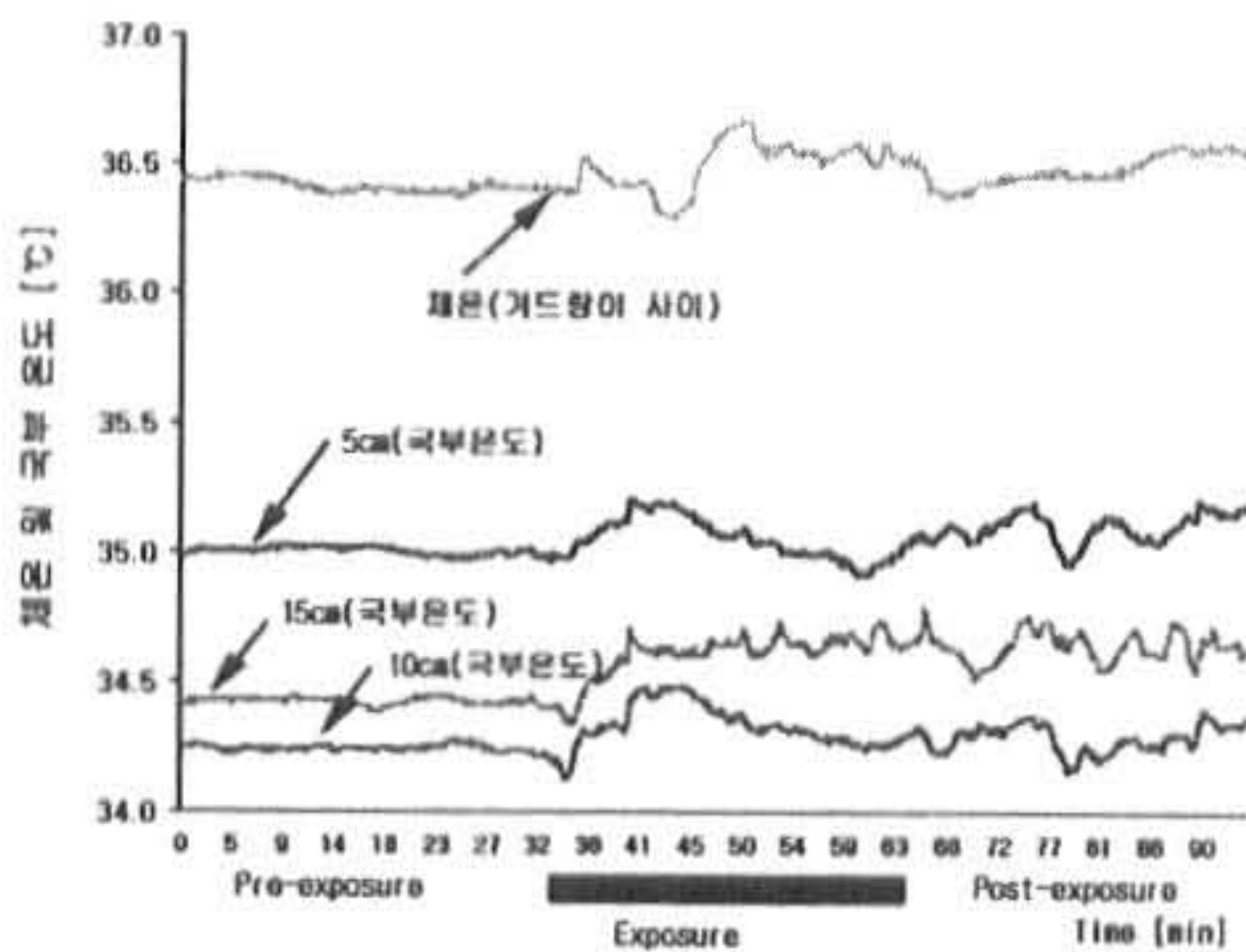


Fig. 4 Temperature variation on human body of exposure and post-exposure

전자파 노출에 의한 체온 상승의 병리학적 인 전자파 증후군에 관해서는 공학적인 한계성 때문에 향후 의학 전문가와의 공동연구가 필요할 것으로 사료된다. 그리고 두부 국소 노출에 따른 영향에 의해 두부 안면의 열상과 혈류변화가 관찰되었는데 이것은 휴대전화기 사용 후 즉시 회복되었으며, 실제 휴대전화기를 사용할 때의 통화내용에 따라 개인간의 온도차이는 다소 보였지만 실험 자원자의 성격과 생리적 적응에 따른 상관관계가 있는 것으로 추정하여 본 연구와 관련하여 이유를 규명하지 않았으므로 논외로 한다.

4. 결 론

전자, 전기기기에서 복사되는 전자파에 의한 건강 위해에 관한 관심과 우려가 높아지고 있고, 이와 관련하여 인체영향에 대한 위험 가능성 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다. 특히 휴대전화기의 폭발적인 보급에 따라 그것이 발생시키는 전자파에 의한 두부내의 국소SAR가 주목을 받고 있다. 더구나 최근에는 저 연령층의 휴대전화기 사용자가 증가하고 있고 유아에게도 열점 형성문제가 염려되고 있는 실정이다. 전자파의 인체영향이 체온상승의 열적작용에 의한 것이라고 가정한다면 국소SAR의 인체영향은 두부내의 온도 변화와의 관계에서 생기는 것이라고 추정된다. 더구나 두부내의 열점의 최대치가 두부표피부근에 형성됨을 필자가 일전에 확인한 바가 있는데, 이때 그 발생위치가 신체기능에 민감한 영향을 미치는 기관의 위치에 일치한다면 비록 전신 평균SAR가 미약한 값이라도 생체의 기능은 현저하게 저하될 것이다. 본 실험결과에서도 추정할 수 있듯이 국소적으로는 온도 회복력이 빠르지만 전신의 평균체온은 상승함을 확인할 수 있었다. 그러나 이 결과의 의학적인 병리현상을 공학적으로 정확하게 규명하는데는 한계가 있기 때문에 여기서는 휴대전화기의 실사용 상황에서 측정된 온도변화 특성으로 생체가 겪게 되는 전자파증후군에 대한 정량적인 상관관계를 규명하기 위한 기초자료로 활용하고 나아가 인체의 최대허용노출량(MPE : maximum permissible exposure)산출에 응용할 수 있는 근거를 마련하고 현재의 휴대전화기 신드롬을 제거하는데 일조가 될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) H. Repacholi.: Radiofrequency electromagnetic field exposure standards, *IEEE Engineering in medicine and biology magazine*, Vol.6, No.1, pp.18-22, March,(1981)
- 2) American national standards Institute: American national standard of safe levels with respect to human exposure to radio-

- frequency electromagnetic fields, 3kHz to 300 GHz, *ANSI C95.1*, July, (1990)
- 3) O.P. Gandhi, G. Iazzi and C.M. Furse: Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900MHz, *IEEE Trans. MTT-44*, No.10, pp.1884-1897, Oct. (1996)
- 4) C. Durney: Electromagnetic dosimetry for models of human and animals, *Proc.IEEE*, pp.35-37, Jan. (1980)
- 5) A. Richardson et. al: Experimental cataract produced by three centimeter pulsed microwave irradiations, *Arch. Opthh.*, Vol.45, pp382, (1981)
- 6) H.J. Shin: Changes of activity for human brain under local exposure of electromagnetic wave with 800MHz, Yeungnam univ. *Ph.D.Thesis*, Dec. (1998)
- 7) 徳丸 仁: 電波は危なくないか : 心配される人体への障碍, 日本, 『請談社』 B773 (1989)
- 8) H.N. Kritikos and H.P. Schwan: Hot spots generated in conducting spheres by electromagnetic waves and biological implications, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol.19, No.1, pp.53-58, (1972)
- 9) T. Kobayashi, T. Nojima, K. Yamada, and S. Uebayashi: Dry phantom composed of ceramics and its application to SAR estimation, *IEEE trans. MTT-41*, No.7, pp.136-140, (1993)
- 10) A.W. Guy, J.F. Lehmann and J.B. Stonebridge: Therapeutic applications of electromagnetic power, *Proc. IEEE*, Vol. 62, No.1, pp.55-75, Jan. (1974)
- 11) 晴山, 勝井, 酒本, 金井: 電磁誘導ハイパーサーミアによる頭部加温の基礎検討, 医用電子と生体工学, Vol.34, No.3, pp.230-237, (1996)
- 12) H.N. Kritikos, K.R. Foster and H.P. Schwan: Temperature profiles in spheres due to electromagnetic heating, *J. Microwave Power*, Vol.16, No.3&4, pp.327-344, (1981)

(2002년 8월 20일 접수, 2002년 11월 4일 채택)