

電磁波에 노출된 生體頭部の 전기생리적 변화의 측정에 관한 연구

이준하, 신현진, 이상학, 유동수, 이무영*, 김성규**

영남대학교 의료원 생체의공학과

영남대학교 공과대학 전자공학과*

영남대학교 의과대학 치료방사선과학교실**

초 록

전자파가 일상생활에서 생체에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 실제로 그 영향을 정성, 정량적으로 규명하는 것은 용이하지 않다. 본 연구에서는 생체의 전기적 신호를 이용하여 2.45GHz의 전자파에 노출시킨 토끼의 두부에 대한 영향을 측정하는 방법을 검토하였다.

연구결과, 두부모델의 손상정도는 뇌전위의 연속적인 FFT 신호처리에서 뇌활성도 저하를 관찰할 수 있었으며, 특정 주파수와 강도(최소허용전력과 치사전력)에 대한 기준 설정에 필요한 요소를 제시할 수 있었다.

I. 서 론

최근 전자장비 및 정보 통신 기술의 급속한 발전으로 이에 사용되는 주파수의 광범위해지고 그 출력의 강도가 커짐에 따라 발생하는 EMC(Electro-magnetic Susceptibility)의 대상을 각종 전자 기기나 통신시스템의 장비만을 한정하여 생각하기 쉬우나 인간이나 동물의 생체에 영향을 주는 'Biological Hazard'를 간과할 수 없다. 인위적으로 만들어낸 방사선에 대해서도 그 허용치가 정해져 있듯이 생체환경에서 전자파의 복사량에 대해서도 이미 각국에서 오래전 부터 한계를 규정하고 있다. 그러나 이러한 기준도 객관성에 입각한 정량적인 근거제시가 미비한 실정이다.

예를 들어, 미국표준협회인 ANSI(American National Standards Institute)가 제시한 기준과 구소련(USSR)의 기준을 비교해 볼때 구소련의 경우가 수십~백 여배 엄격하다는 점¹⁾을 보더라도 어느 정도 강도의 어떤 주파수를 가진 전자파가 생체에 어떤 정도의 영향을 미칠 수 있는가하는 문제에 대한 보다더 정확하고 폭넓은 연구가 요구된다는 점을 알 수 있다. 이러한 이유로 지금까지의 진행된 연구는 대개 비공개적이고 제한된 군사적 목적에서 주로 이루어져 왔고, 체계적인 연구의 진행이나 측정방법의 모색에 있어서 자료가 부족하다.

생체에서 주로 이루어진 실험은 특정 주파수와 강도에서 치사율²⁾이나 신체각부의 온도변화, 생화학적 변화, 조직세포의 현미경적 관찰이 대부분이지만 전자파가 미치는 영향에서 생체를 신호발생원으로 보고, 신체의 특정부위에서 발생하는 전기생리적 신호를 대상으로 측정할 경우 공학적인 처리가 필요하다. 전자파의 노출에 따른 생체의 영향은

비열작용과 열작용에 의한 영향으로 크게 분류되나, 생체를 복합적인 매질을 지닌 물질로 보고, 발생하는 열작용의 공학적인 해석과 더불어 발생하는 전기적 신호의 변화를 계측으로 열작용에 대한 연구가 가능하다^{3,4)}고 생각된다.

본 연구에서는 전자파에 노출된 생체의 영향을 측정하는 방법을 연구함에 있어서 일상생활에서 빈번히 사용되는 전자파 발생원을 이용하여 제한된 출력으로 동물의 생체에 노출시켜 그 변화를 전기생리적 신호로서 추출처리함으로써 전자파에 의한 생체의 두 부손상에 따른 변화를 측정하는 방법을 제시하고자 한다.

II. 전자파와 생체신호

1. 전자파 흡수 에너지와 전자계 강도

자유공간에서 생체(V_1)에 흡수되는 전자파 발생원(V_2)의 전류밀도가 $J(A/m)$ 이면 V_1 에는 방사되는 전자파는 직접 반사되는 전계와 자계인 E_i, H_i 성분과 산란되는 E_s, H_s 성분의 합하여 $E=E_i+E_s$, $H=H_i+H_s$ 로 표현될 수 있고(Fig. 1), 전파되는 매질(조직)의 도전율(σ)이 유한이므로 생체에는 $J=\sigma E$ 에 해당하는 도전전류가 흘러 Joule열이 발생한다.

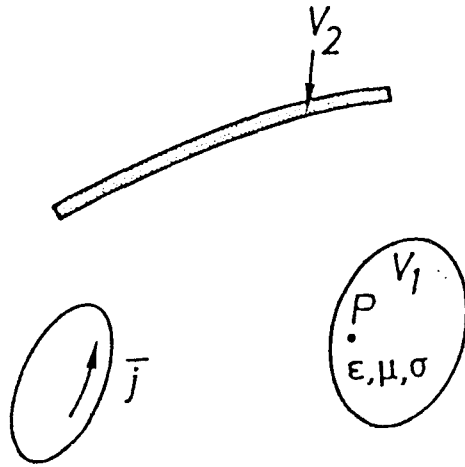


Fig. 1 Bio-electromagnetic situation

이때 단위체적당 흡수된 에너지는

$$P = \sigma |E|^2 \text{ W/m}^3$$

가 되고 생체에서 전자파 비흡수율 SAR(Specific Absorption Rate)은

$$SAR = \sigma |E|^2 / \rho \text{ (W/kg)}$$

로 표시된다.

SAR은 생체가 비선형적(non-linear)이고 비동일한(in-homogeneous)매질이므로 ρ 는 생체의 질량(mass)에서 체적(volume)을 나눈 평균값을 도입한 개념으로 볼 수 있다.⁵⁾ 또 전력 밀도(power density) $P_D = E \times H \text{ (W.m}^2)$ 에서 자유공간이 Wave impedance $z = 120 \pi = 377 \text{ ohm}$ 을 적용 하면, $z = E/H$ 이므로

$$P_D = |E|^2 / 377 = 377 \times |H|^2$$

이 되고, 이때 노출된 전자파의 전계강도 E(V/m)와 자계강도 H(A/m)을 각각 구할 수 있다.⁶⁾

2. 생체의 전기생리적 신호추출을 위한 시스템 구성

뇌사상태를 확인하거나 두부의 활성도는 뇌파의 형태(주파수, 진폭)에서 파악할 수 있는데 모든 중추의 중심이 되는 뇌의 피질은 생체의 활동상태(개안, 폐안, 수면, 흥분등)을 미세하게 반영하는 주파수 1~30Hz로 10~100μV의 전위가 연속적으로 나타난다. 이 신호는 뇌의 부위에 따라 신체각부의 감각 및 운동에 반영한 유발전위를 발생하기도 하는데 일반적으로 두부의 통증이나 손상정도에 대한 변화는 직접적으로 반영하여 민감하게 나타낸다.

뇌전위를 증폭시키기 위한 pre-amplifier는 정상적인 신호의 크기가 50μV 내외이므로 CMRR(100dB)과 입력저항(10M ohm이상) 높아야 유리하므로 차동증폭회로를 선택하고 있으며 신호대역은 0~30Hz의 차단주파수를 가진 저역통과 필터를 거치고 고역필터와 60Hz notch필터를 거쳐 잡음을 제거하고 이득조절 가능한 주증폭기를 통해 신호가 최대 증폭된다.

일반적인 뇌전도계는 증폭기에서 출력하는 analog 신호 그대로 galvano-meter 를 통해 잉크펜으로 real time wave로 그려져 사용된다.⁷⁾ 이러한 경우, Paper-speed는 30mm/sec이상 진행 시켜야 해독가능하므로 장기간 동안 파형을 관찰이 필요할 때는 기록지의 분량이 방대하여 판독이 용이하지 않다. 이러한 신호를 본 연구에서는 A/D 변환하여 Digital Analyzer전용 computer syste(Germany, Dr.Richard Wiess Neuro-monitor-8bit computer)를 이용하여, 전자파 노출 전파 노출시 그리고 노출후의 생체신호를 FFT로 처리, 연속적인 신호에 대한 3차원(x,y,z-주파수, 시간, 진폭)의 power spectrum으로 출력하였다.

시스템의 구성은 (Fig.2)에 블럭선도로 나타내었다.

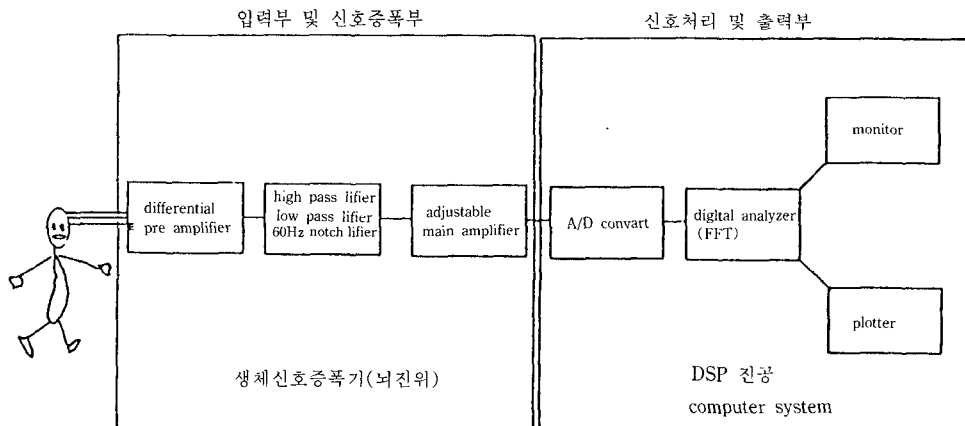


Fig. 2 Block diagram of bio-electric signal processing system

III. 실험

1. 실험장치 및 환경

(1) 주파수의 측정

전자파 발생장치는 정격 주파수 2450MHz, 출력 650W 인 가정용 전자레인지를 개조하여 제작하였으며 실험실 밖에서 노출시간의 조절이나 출력의 on/off가 가능하도록 원격장치를 만들었다.

주파수의 측정은 전자파 무반향실에서 전자파 발생장치 3m 거리의 정면에 10dB 감쇄를 갖는 Horn형 안테나를 통해 50dB감쇄기를 거쳐 Spectrum Analyzer(HP)를 사용하여 측정한 결과 (Fig.3)과 같다.

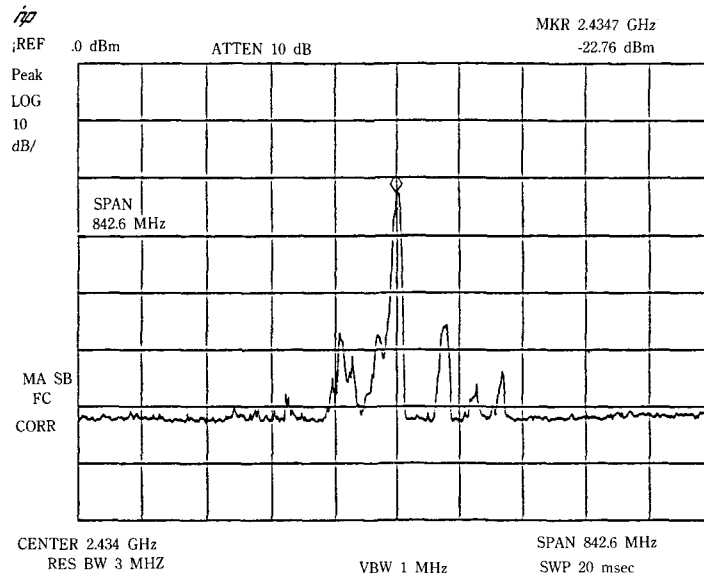


Fig. 3 Frequency measurement of RF generator

(2) 실험환경, 피폭 출력 설정, 뇌전위 유도방법

생체가 전자파에 노출될 실험환경은 7m×7m×7m의 정방형 공간으로 6면이 콘크리트 옹벽으로 차폐되고 출입문은 금속재질로 접지하여 전자파의 외부방출을 막아 실험자에게 방사되지 않도록 고려 하였으며, 정방형 모서리 지면 1m 높이의 전자파의 반사가 작은 목재 실험대를 위에 전자파 발생장치를 설치하고 목재로 된, 두부만 노출될 수 있는 동물고정대를 전자파 방사개구부 정면 30cm에 설치하였다. 그리고 전극 유도선과 pre amp.는 알미늄 박막으로 차례접지하여 가능한 고주파 간섭을 배제하기 위해 노력하였다(Fig.4).

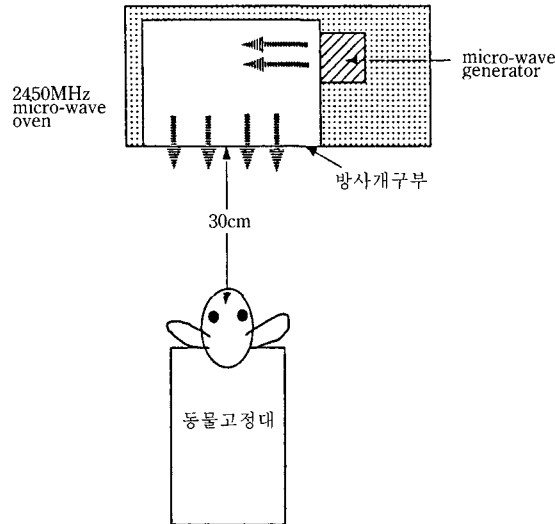


Fig. 4 Schematic diagram of exposure position

피폭거리를 설정하기 위해 심전위계와 폐쇄회로 카메라를 설치하여 1.8~2kg의 건강한 토끼(뉴질랜드 화이트)를 10마리를 우선 선정하여, 전자파발생원에서 떨어진 거리별로 배치하여 1시간이상 관찰하면서 죽을때 까지 연속적으로 피폭시켜 치사점(lethal point : 방사개구 30cm 거리에서 약 35분)에 이르는 시간을 찾은 뒤, 최대피폭시간을 30분기준으로 하고 10분, 20분, 30분간 노출시키는 3가지 조건에서 약 120마리 정도(각 조건별로 40마리씩)를 사용하여 피폭시키는 실험을 시행 하였다.

실험동물의 뇌전위도 유도는 쌍극지 유도(bipolar lead)로 하였으며, 좌측전두부에 두골을 뚫고 3mm간격으로 두개의 백금(Pt)으로 된 직경 0.3mm의 바늘형 전극(electrode)을 식입하여 봉합하고, 두극간의 기준전위를 유도하기 위해 귓볼부분에 은 염화은(Ag-Agcl)으로 된 컵형(cup type) 전극을 부착하였다.

2. 방사전력 측정과 SAR의 계산

방사되는 전력의 측정은 실험동물의 두부와 동일한 위치에서 calorimeter에 의한 측정법⁸⁾을 이용하여 조절된 Q와 ΔT를 측정된 결과, P=1.2(W)를 얻을 수 있었다. 이때 노출된 입사면적당 전력량을 계산하여, 전력밀도 $P_D = 40\text{mW/cm}^2$ 을 구하였다.

$$|E|^2 = P_D \times 377 \approx 150800(\text{V}^2/\text{m}^2)$$

두부전체의 평균 σ 은 F=2450Mhz에서 근육 σ 의 값⁹⁾ 2.2(s/m)를 2/3로 환산하면¹⁰⁾ $\sigma = 1.47(\text{s/m})$ 가 되고, 조직의 밀도 ρ 는 뇌실부피 9cm³의 실측 결과 32g이므로 $\rho = 3.56 \times 10^3(\text{kg/m}^3)$ 구했다.

생체에 흡수된 에너지는 $P = \sigma |E|^2$ 이므로 $22.2 \times 10^3 \text{J/m}^2$ 가 되고 피폭지점(30cm)에서의 SAR은 $\sigma |E|^2 / \rho$ 이므로 6.23(W/kg)로 계산할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

생체에 전자파를 노출 후 뇌전도 주파수와 진폭의 변화는 노출시간에 따라 차이는 있으나

전반적으로 나타났고, 25Hz 부근에 나타난 연속적이고 규칙적이고 높은 power분포는 전자파 노출에 따른 안면근육의 흥분(스트레스)으로 인한 강한 근전위가 혼입되어 발생한 잡음신호이다.(노출하는 시간을 중심으로 세력이 커지거나 작아져 아주 없어지는 경향을 보임)

노출 시간별로 보면 10분 피폭된 생체는 (Fig.5) 주파수의 변이나 진폭의 변화를 거의 발견하기가 어렵고, 20분(Fig.6)과 30분(Fig.7) 피폭된 생체는 비교적 쉽게 변화를 알 수 있었고, 노출되는 시간이 길수록 신호의 변화가 노출전후를 명확히 구분 할 수 있게 나타났다.

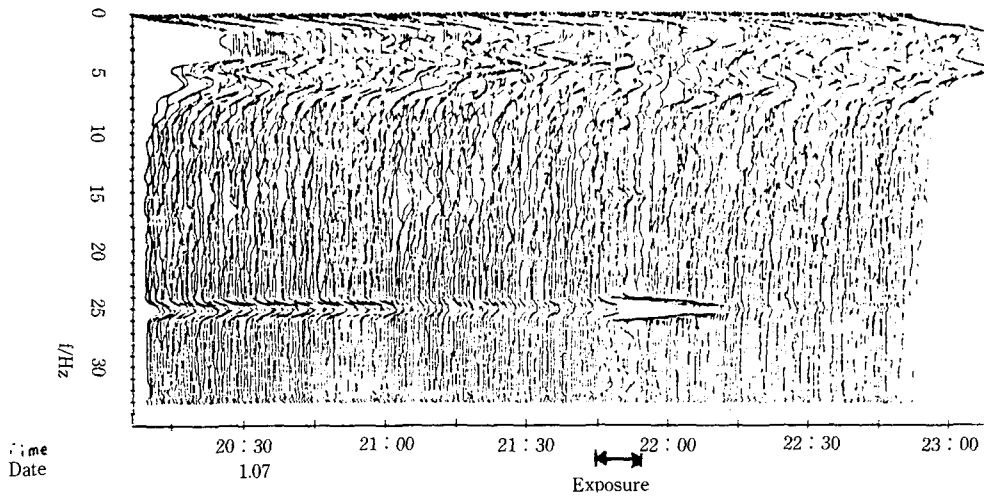


Fig. 5 Power spectrum of EEG-before & after 10minutes exposure

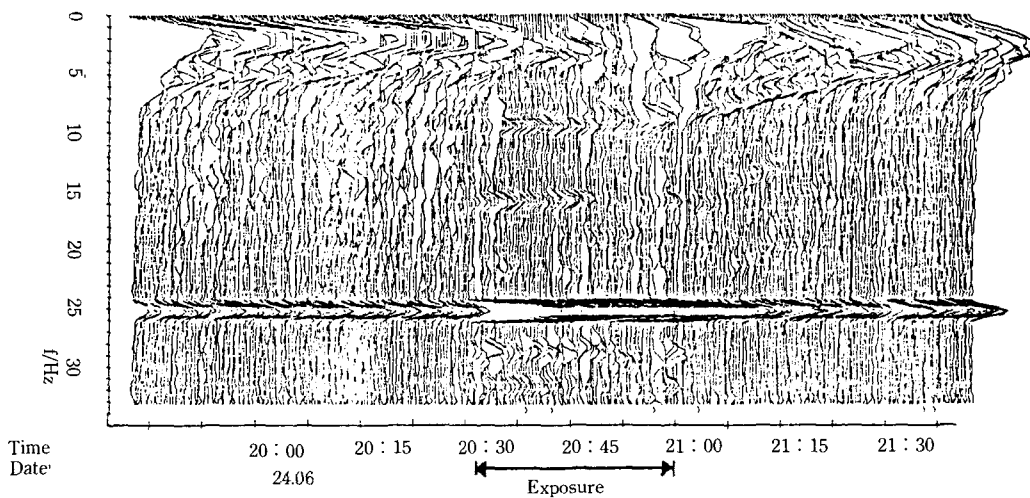


Fig. 6 Power spectrum of EEG-before & after 20minutes exposure

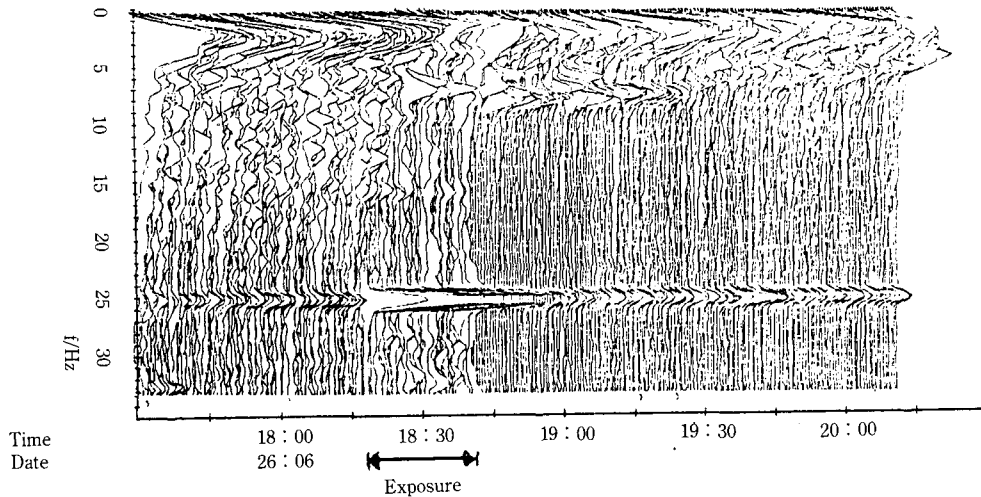


Fig. 7 Power spectrum of EEG-before & after 30minutes exposure

이러한 변화는 전계강도와 노출시간경과에 관계된 흡수 에너지크기에 따라서 뇌전위 변화의 문턱값(10분이하 노출)을 추정할 수 있으며, 치사적전의 변화(30분이상 노출)를 알 수 있다.

본 연구는 실험 진행상 시간적 계약을 고려하여 최대노출시간을 30분으로 설정하였으나 일상적인 생활중에서 생체에 미치는 전자파 장애는 주로 장시간, 낮은 강도의 전자파에 노출 되는 -long term, low level- 환경의 실험이 필요하므로 소형화된 휴대용 장시간 신호 기록장치나 Telemetry system의 개발이 요구되며, 전자파 발생장치의 주파수와 강도도 조정되어야 할 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 제안된 측정 방법과 시스템을 이용하여 생체전기적 신호측정 및 처리에 의한 전자파의 생체손상에 대한 계측을 할 수 있었고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 전자파의 영향에 의한 손상을 생체 전기적 신호를 이용하여 변화를 연속적으로 관찰할 수 있고,
- 2) 노출 에너지량에 따른 손상정도 및 회복에 필요한 최소 및 최대 문턱값 추정이 가능하며
- 3) 특정 주파수 및 전계강도에서 생체의 안전성에 관한 정성, 정량적 표준이나 최소 노출 한계의 설정에 있어서 객관적인 기준을 제공할 수 있다.

참 고 문 헌

1. H. R. Michael : Radiofrequency electromagnetic field exposure standard, IEEE engineering in medicine and biology magazine ; effect of EM radiation, 6(1), pp. 18-21 (1987)

2. R. J. Donald : EMI control methods and techniques ; A hand book series on electromagnetic interference and compatibility, DON WHITE CONSULTANTS, Inc., (1973)
3. 申 鉉珍의 5人 : 가토 뇌실질에 단극 전기응고후 조직변화와 뇌전도 변화 범위에 관한 연구 : Journal of korean neurosurgical society, 17(4), pp. 731-736 (1988)
4. R. a. Eleanor : Thermophysiological effects of electromagnetic radiation : IEEE engineering in medicine and biology magazine ; effect of EM radiation, 6(1), pp. 37-41, (1987)
5. J. Van Bladel : Electromagnetic fields and neurobehavioral function ; The nature of electromagnetic stimuli., Alan R. Liss, Inc., (1988) pp. 1-21
6. ANSI C95-1-1991 : IEEE, (1992) pp. 10-11
7. 李明鎬 : 生體 電氣現象의 計測原理와 應用 : 乙支文化社, (1983)
8. 李茂永의 1人 : 마이크로波 工學, 東明社, (1972), pp. 129-130
9. A. W. Guy : Study of effects of long-term low-level RF exposure of rats : Proceedings of IEEE, 68-1 (1981)
10. C. H. Durney : RF Radiation Dosimetry Handbook, SAM-TR-78-22. 2nd Ed. (1978)

Mesuerment of electro-physiological changes in the brain exposed to eletromagnetic wave radiation

Joonha-Lee, Hyounjin-Shin, Sanghag-Lee, Dongsu-Yu

Muyoung-Lee*, Sungkyu-Kim**

Dept. of Bio-medical Eng., Yeungnam University Medical Center

Dept. of Eletronics Eng., College of Engineerings, Yeungnam University.*

Dept. of Radiation Oncology, Yeungnam University College of Medicine.**

Abstract

Electromagnetic wave may induce effect and damage on the bio-body, either by electric fields of magnetic fields. We measure electrophysiological changes in rabbit's brain exposed to 2.45GHz micro wave(power density $40\text{mW}/\text{cm}^2$) which distance 30cm from the source. In order to process the bio-electrical signal (EEG), used pre-amplifier module with self-made and Digital analyzer computer system.

Spectral analysis of the EEG showed variable power in the frequency range(1~30Hz) through each exposure time(10min, 20min, 30min) before and after. In effectively measured by the bio-electrical signal processing and can found threshold of minmal permissible exposure and lethal exposure.

Key words : Electromagnentic wave, Spectral analysis