뇌파의 연령별 스펙트럼 및 비선형적 분석

*이화여자대학교 의과대학 목동병원 신경과학교실, 이화 의과학센터, 대전대학교 전자공학부**

주은연 · 김응수* · 박기덕 · 최경규

Spectral and Nonlinear Analysis of EEG in Various Age Groups

Eun-Yeon Joo, M.D., Eung-Su Kim, Ph.D.*, Ki-Duck Park, M.D., Kyoung-Gyu Choi, M.D.

Department of Neurology, Ewha Medical Research Center,
College of Medicin, Ewha Womans University
Division of Elec. Info. & Comm. Engineering , Daejon University*

- Abstract -

Background & Objectives : Fractal Dimension(FD) could be an index of correlation between variable parameters in non-linear chaotic signals. We tried to demonstrate that EEG wave is compatible with chaotic waves by measuring the Lyapunov exponent index and compared the difference of FD between variable age groups(teens, 30 's, 50 's)

Methods : We estimated the Lyapunov exponent index and the FD from digital EEG data among five persons in each normal age groups by using the software which is programmed in our laboratory. Statistical analysis was done with SPSS win 8.0. The statistical differences of Lyapunov exponent index and FD between each electrodes and each age groups were done with ANOVA and paired sample t-test.

Result : The Lyapunov exponent indexes were larger than 1 in each electrode and age group. There is no statistical difference in FD between each electrodes and each age groups. Except in 30th age group. In this group the FD of right hemisphere is larger than that of left hemisphere.

Conclusion : The result of Lyapunov exponent index means EEG wave is a non-linear chaotic signal. And the results of FD suggest that chaotic parameters of right hemisphere is larger than those of left hemisphere at rest at least in younger people. We think that chaotic parameters can be a useful tool in investigating the variable diseases or brain states .

Key Words : Elelectroencephalograph, Spectral, Nonlinear

서 론

최근 컴퓨터시스템의 발달과 함께 카오스를 포함한 비선형 이론이 대두되었으며, 뇌파를 정량적으로 분석할 수 있는 방법이 소개되면서 뇌 과학에도 이러한 이론을 적용하여 뇌기능에 관련된 뇌파신호의 역동적인 면을 정량적으로 그리고 비선형적으로 분석해 이전의 기록방식으로는 확인할 수 없었던 뇌파신호의 차이를 확

교신저자 : 최 경 규
서울특별시 양천구 목동 911 - 1
이화여자대학교 의과대학 신경과학교실
TEL) 02 - 650 - 5036, FAX) 02 - 650 - 5162, e - mail) kgyuchoi@hotmail.com

* This study was supported by a grant(#hmp - 98 - n - 1 - 0025) of the Good Health, R & D Project, Ministry of Health & Welfare, R.O.K

인하려는 시도가 진행되고 있다.[1-3]

정량적 뇌파의 많은 분석방법 중 Fast Fourier Transform(FFT)를 이용한 스펙트럼 분석(spectral analysis)이 대표적인 방법이나 스펙트럼 값은 크기(power)와 주파수(frequency)만을 나타내므로 스펙트럼 분석만으로는 뇌파의 역동성을 분석하기에는 한계가 있다.

최근에는 뇌파신호를 만들어내는 우리 뇌의 신경망(neural network)은 비선형적 역동학(non linear dynamics)의 복합체(complex system)로 이루어져 있다는 가설이 인정 받고 있으며, 카오스 이론(chaos theory)으로 주장되고 있다. 이 이론을 바탕으로 정량적 뇌파의 분석방법이 더 다양해지고 있다.[4,5]

본 연구는 정상 뇌파신호는 카오스 역동(chaotic dynamics)을 갖는 복합체에서 발견할 수 있는 불규칙적 진동(irregular oscillations)이라는 가정 하에[6], 뇌 기능의 비선형적 접근으로 뇌파분석을 시도하였으며, 계의 복합성을 측정하는 자유도 정도의 근사값인 프랙탈 차원(Fractal dimension, FD)과 결정론적 카오스 끌개(deterministic chaotic attractor)의 기본적 특성을 측정하는 리아프노프 지수(Lyapunov exponent)의 값을 건강한 정상인의 연령별(10대, 30대 50대) 및 전극별(20개 채널-Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6, A1, A2, Fz, Cz)로 계산하여 이들의 통계학적인 분석을 통해, 뇌파 신호의 연령별, 부위별 차이를 측정하였다.

연구대상 및 방법

1. 연구 대상

건강한 15명을 대상으로 하였으며, 연령은 10대, 30대, 50대 각각 5명씩 이었다. 모든 연구대상은 동일한 장소에서 동일한 조건아래 침대에 편안히 누운 자세로 뇌파를 실시하였다.

2. 연구 방법

A. 디지털 뇌파기

연구대상 15명은 "Compumedics video-EEG monitoring 37 channel, model E"를 사용하여 international 10~20 system을 기본으로 20개 채널(Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6, A1, A2, Fz, Cz) 전극의 뇌파신호를 기록하였다. 연구 대상자는 소리와 전파에 방해를 받지 않게 하기 위해 차단된 방에서 뇌파검사를 시행했고 편안히 침대에 눕게 한 후 입을 가볍게 다물고 몸을 이완시켜 근육에 의한 인공파(artifact)를 줄이고 먼저 눈을 감게 한 후 가능한 한 눈동자를 움직이지 말도록 하였다. 뇌파검사는 표본추출주파수(sampling frequency)는 256 Hz, 민감도(sensitivity)는 7 uV/mm, 고주파여과(high frequency filter) 70 Hz, 저주파여과(low frequency filter) 1 Hz로 설정하였다. 뇌파의 모양을 검사자가 뇌파기의 화면으로 직접 보며 기록하였고 디지털 뇌파기 하드웨어에 데이터를 저장하였다.

B. 비선형적 분석

디지털 뇌파기에 저장된 데이터를 ASCII file 형식으로 변환시켜 CD R/W에 다시 저장하고 정량적 뇌파분석 소프트웨어인 "CHASIM"을 이용하여 불러낸다. 이 때 사용하는 뇌파신호는 4초에 해당하는 epoch이며, 데이터는 화면에 뇌파검사시의 뇌파신호와 유사하게 나타나므로, 말을 하거나 눈동자를 움직임으로 생기는 인공파가 없는 부분을 선택하여 분석할 수 있다. 비선형 분석에 앞서 우선 자기상관(auto correlation)을 시행하여 지연값(delay number)을 구할 수 있으며, 거의 모든 전극에서의 지연값은 10으로 이것을 참고로 1~10까지의 embedding dimension에서 프랙탈 차원과 리아프노프 지수를 구한다. 이에 대한 알고리즘은 발표된 논문에 상세히 설명되어져 있다.[2]

3. 통계처리

CHASIM program을 통해서 얻은 프랙탈 차원값과 리아프노프 지수값을 SPSS for windows(9.0)를 이용하여 분석하였다. 각 연령군의 전극 별 평균치를 구하는데 있어, 이 두 파라미터 값을 의존 변수(dependent variable)로 둔 후, univariate ANOVA의 방법을 사용하였으며, 파워 스펙트럼(power spectrum)의 경우 위의 계산으로 얻은 데이터의 주파수를 0.5 hz 이하는 low, 0.5~4 hz는 delta, 4~8 hz는 theta, 8~12 hz는 alpha, 12~20 hz는 beta, 20~40 hz는 gamma, 40 hz 이상은 high 파로 구분하여, 우선 각 연령군의 전극별 값과 각 주파수간의 비교분석은 univariate ANOVA로, 각 연령과 주파수, 각 전극과 주파수와의 비교분석은 oneway-ANOVA로 시행하였다. 허용오차 한계는 $P<0.05$로 하였다.

연구결과

각 연령과 전극에서의 프랙탈 차원과 리아프노프 지수값을 통계분석한 결과 신뢰구간 95%로 하였을 때, 10대, 30대, 50대 연령군 모두에서 유의한 차이가 없었다.

각 연령군에서 각 전극의 파를 power spectrum으로 변

Table 1. *Average values of Fractal dimension according to various age groups*

Age	N	Subset 1
30's	100	4.10480
10's	100	4.24986
50's	100	4.25439
Sig.(p<.05)		.339

Table 2. *Average values of Lyapunov exponent according to various age groups*

Age	N	Subset 1
30's	100	.65351
50's	100	.69664
10's	100	.72361
Sig.(p<.05)		.184

환하여 이의 평균치를 비교 분석하면. theta파와 같은 서파가 30대나 50대보다 10대 연령 군에서 통계학적으로 의의 있게 많이 나타났으며, beta와 gamma 같은 빠른 파들은 10대나 30대보다 50대에서 많이 나타나, 기존의 개념과는 좀 다른 결과가 나왔다. 또한 각 파를 전체(total) 값으로 나눈 betatot, thetatot, gamatot band에서도 같은 결과를 보였다.

비선형 파라미터(non-linear parameter)인 프랙탈 차원과 리아프노프 지수 값과 delta, theta, alpha, beta 등의 wave bands와의 Pearson 상관분석을 시행하였더니 프랙탈 차원과 delta, alpha, beta, gamma, total 값만이 매우 강한 상관관계를 보임을 알 수 있으며, 다른 값에서는 유의한 차이가 없었다.

고 찰

Hans Berger에 의해 처음 사람의 뇌에 적용된 뇌파는 경련성 질환을 비롯한 많은 중추신경계의 진단에 기본적인 검사방법으로 사용되고 있다. 근래에 전기생리학적 연구결과에 의하면 7~14 Hz의 주파수를 갖는 방추 진동(spindle oscillations)은 시상의 GABA(gamma aminobutyric acid) 신경원인 망양핵에서 기원하며 이 방추파는 다시 0.1~0.2 Hz의 리듬으로 반복되며, 제 2기 수면의 파의 모양을 이룬다고 한다.[1] 이 활성화된 전기생리적 상태는 배측 시상핵을 거쳐 시상-피질 경로를 통해 우리가 일반적으로 행하는 뇌파 기록지에 나타나게 된다. 각성상태에서 이 망양핵의 방추는 뇌간의 망양체 형성의 콜린성 신경원에 의해 억제되어 대뇌피질로 투사하는 시상세포 또는 대뇌피질에서 기원하리라고 생각되는 20~40 Hz의 빠른 파형이 나타날 수 있다. 중격핵과 entorhinal cortex에서 기원하는 원심성 섬유가 해마를 자극하여

Table 3. *The comparison of wave bands between various age groups*

Wave bands	Age
theta	10대> * 50대 >*30대
	10대>**30대
alpha	10대>*30대, 50대>*30대
beta	50대>**10대, 50대>**30대
gamma	50대>**10대, 50대>**30대
Thetot(theta/tot)	10대>**30대, 10대>**50대
Betot(beta/total)	50대>**30대>*10대
	50대>**10대
Gamtot(gam/tot)	50대>**10대

* p<0.05 ** p<0.01

Table 4. *The correlation bewteen Fractal dimension and wave bands*

Wave bands	delta	Alpha	beta	gamma	total
Fractal dimension	–.579	.506	.614	.552	.468

theta 파를 내보내게 한다. 알파파(Alpha rhythm)는 아직 논란의 여지는 있으나, 주로 대뇌피질에서 기원하여 파급되는 것으로 알려져 있다. 그러나, 이러한 세포수준에서의 전기적 현상이 직접적으로 뇌파의 형태를 결정하게 되는 것은 아니고 세포들의 집단이 회로망을 이루면서 보다 큰 단계의 망조직을 형성하여 우리가 보는 파를 형성하게 되는데, 보통 2~3 m^3의 부피에 10^4~10^7개의 신경원이 한 집단을 이루게 되어 1) 신경연접의 시간상수 2) 신경원 사이의 거리 3) 상호작용의 강도 등에 따라 두개 밖에서 감지하는 파의 모양을 이루게 된다.[1] 알파파는 주파수 8~13/s 범위내의 생리학적인 자발 뇌파 활성으로 이 리듬은 후반구에 국한되며, 눈을 감고 시각적 정보가 제거된 상태에서 발생하며, 정신 이완에 의해 강화되고 주위집중에 의해 차단된다. 유사 활성으로 10 Hz 정도의 소위 rolandic mu-rhythm이 두피의 중심부 근처에서 발생하는 것으로 알려졌으며, 감각운동 자극에 반응한다.[7] Theta 활성 또는 rhythmic slow activity(3~8/s)은 대부분은 해마에서 뚜렷하지만, 모든 변연계의 finger prints로 간주되며 해마와 target structure의 회로를 통한 정보의 흐름에 있어 gating function을 담당한다.[8] Theta 파의 기능적 중요성은 복합 신경망(complex neuronal networks)에서 협조적 행동(cooperative behavior)발생의 기전으로 생각된다.[8]

인간의 뇌에서 서로 다른 뇌파의 근원을 국소화하려는 시도는 여러 차례 진행되어 왔으며[9], 시상 진동(thalamic oscillations)에 이론에 의하면 만일 시상 세포가 탈분극되면, 알파 주파수 내(at 10 Hz)에서 진동할 것이고, 이 시상 세포가 과분극되면 theta 주파수 내에서(at 6 Hz)에서 진동할 것이다.[10] 그러나 최근에는 알파파의 생성에 있어 비선형적 과정이 중요한 역할을 한다는 가설에 근거,

많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중 주목할 만한 연구로 98.75%의 알파 리듬 중 알파 에포크(alpha epoch)는 걸러진 소음(filtered noise)와 구분할 수 없으며, 이 활성 동안 두뇌는 무작위 과정과 구분할 수 없는 고복합성을 가지며 근접 선형성 끌개법(approximately linear point attractor regimen)을 반영하므로 type I alpha로 명명하였고, 나머지 1.25%는 좀더 간단한 형태인 비선형 제한주기(nonlinear limit cycle)와 유사하여 이 비선형 "분기(bifurcational)"형 알파파를 type II로 명명하여, 역동학적인 측면에서 알파파의 이질성(heterogeneous nature)과 복합성을 주장한 연구도 있었다.[11] 또한 임상적으로 두뇌내의 공간 점유 병변(spaceoccupying lesion)시 localized delta 또는 theta activity 가 지속적으로 나타나며, 병변이 심할수록 신호의 주파수는 느려지고, 특히 뇌파 중 delta power는 병변의 부피와 부합되고, theta power는 뇌부종의 부피와 연관성이 있는 것으로 미루어, 두 비정상적 뇌파활성은 서로 다른 독립적인 병리생리학적 과정의 대응물(counterpart)일 것이라고 주장하는 최근의 연구도 있었다.[12] 최근에는 파충류인 도마뱀의 slow-wave sleep 뇌파를 이용하여 뇌파의 복합성을 나타내는 비선형적 파라미터인 상관차원(correlation dimension, D2)과 예상도(predictability)를 나타내는 largest Lyapunov exponent(L1)을 계산하여 스펙트럼 분석을 통하여 뇌파 스펙트럼과 프랙탈 차원값을 구하여 파충류의 각성이 포유류의 slow-wave sleep (SWS)으로 발전한다는 가설을 증명한 동물 실험연구도 있다.[13] 인간에서는 정상 성인에서 각성과 수면기간동안 coarse graining 스펙트럼 분석을 통해 프랙탈 차원과 surrogate data 방법을 이용하여 상관차원의 값을 구하여 뇌파의 카오스적 특성을 증명한 연구와,[14] 반구 뇌졸중(hemisphereic infarct)의 급성기와 회복기에 스펙트럼 뇌파분석을 시행하여 electrical diaschisis phenomenon를 설명한 연구도 있었다.[15] 그 외 의식적인 행동과 40 Hz 뇌파와의 관계, 뇌파의 시계열적 진행과정에서의 자기 상관관계와 자기회귀관계 등으로 주로 추출된 뇌파에서의 비선형성과 카오스적 성격의 규명에 이루어져 있고 국내에서도 이를 이용한 연구들이 진행되고 있다.[2,17]

상관차원과 리아프노프 지수는 비선형분석의 두개의 파라미터이며, 상관차원은 자유도의 정도를 측정하는 뇌파 복합성의 척도이며, 예를 들어 눈을 감거나 뜬 상태, 정신적 과제(mental task)의 수행 동안과 수면주기와 같은 다양한 행동양상에서의 체계적 변화를 보여주고 알파 코마, 정신분열증, 치매, 파킨슨 병, 간질와 같은 다양한 뇌병리의 분석에 사용되기도 한다.[16-22] 프랙탈 차원은 복합성과 사물의 자기-유사성(self-similarity of object)을 정량화 하는데 사용되며, 그 값을 구하는 공식은 affine self-similar S 값을 k congruent pieces로 나누어 각각을 factor M으로 확대하여 whole set S 의 값을 구하며 이후 다음의 공식을 통하여 전체 S의 프랙탈 차원(D)를 구한다.

D = log(k)/log(M) = log(number of pieces)/log(magnification factor)

차원의 값이 높을수록 그 계를 구성하는 파라미터의 수가 많음을 의미한다. 뇌파가 변동(fluctuation)할수록 평면(plane)은 더욱 "덮여지고(covered)" 파동의 분절성(fragmentation)이 커질수록 프랙탈 차원이 증가한다는 것을 알 수 있다. 리아프노프 지수는 초기 조건에서의 시간적 변동에 예민하게 의존하는 지수이다. 또한 결정론적 카오스 끌개의 근본적인 특성을 측정하는 값으로 시계열이 얼마나 카오스적인지를 나타내는 지표가 된다. 계의 상태는 위상공간의 한 점으로 대응되어져 시간이 지남에 따라 궤적을 형성하고, 카오스계에서 이 궤적은 초기값이 약간만 달라져도 이전의 궤적과는 매우 다른 궤적을 따라 움직이게 된다. 이때 위상공간에서 다른 초기위치사이의 작은 거리가 시간이 지남에 따라 얼마나 지수함수적으로 멀어지면서 발산하는지를 정량적으로 나타낸 값이다.

Lyapunov exponent(λ) = $\lim 1/n \Sigma \log e|f(xi)|$

λ이 0 보다 클 때, 카오스계에서는 충분한 시간이 흐른 후에는 임의적으로 근접한 계의 서로 다른 state가 더 멀어지게 된다. 그러므로 지수의 값이 0 이상이면 발산이라고 하며, 양의 값이 클수록 카오스적이다라고 할 수 있다.[2]

Pereda 등은 최근 건강한 성인의 뇌파에서 각성과 수면시에 양 반구에서 뇌파의 주요 스펙트럼 파에서의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)와 프랙탈 차원과 상관차원 및 리아프노프 지수의 값을 비교하여, 눈감은 상태와 수면 I, II 기에는 우반구가 더 예측 가능하나 좀 더 복잡하고, 이런 특성은 slow-wave sleep(SWS)시에는 좌반구쪽으로 변한다는 결과를 얻은 바 있다.[14] Roschke 등은 theta와 alpha 파의 차원을 측정하여 여러 개 전극(F3, F4, Cz, P3, P4, O1, 02)에서의 프랙탈 차원과 리아프노프 지수를 계산하여 그 역동성을 비교해본 결과 전두 알파파 활성의 역동성은 다른 위치에서 측정된 알파 활성과는 기능적으로 다르다는 것을 입증한 바 있다.[6] Brenner 등에 의하면 노인 남녀의 뇌파를 스펙트럼 분석을 하였더니, 여성에서 parasagittal mean frequency, beta 1와 beta 2의 값이 통계학적으로 유의하게 증가하였으나, alpha 2와 theta-beta 값은 감소함을 알 수 있었다고 보고하였고,[23] Juarez 등도 성인 쥐에서의 연구에서 각 뇌파 곡선 띠(band)의 power값에서 절대치와 상대치를 반구간에 상관 분석하였는데, power 비대칭성이 여러 띠에서 관찰되어 성별간 서로 다른 뇌 구성(brain organization)의 가설을 뒷받침하였으며, 호르몬 주기와는 관계가 없다는 결론만 낸 바 있다.[23] 이와 유사한 결과가 정상 소아 군에서도 보고되었다.[24]

그러나, 본 연구에서는 각 연령층에서 성별간의 별 차이가 없었기 때문에 통계분석에 넣지 않았고, 그 원인은 아직 뚜렷하지 않다.

본 연구에서는 프랙탈 차원과 리아프노프 지수 값을 연령별 및 4개의 곡선 띠별로 구하여, 연령에 따른 곡선 띠의 분포도 및 두개의 값과 곡선 띠간의 상관분석을 시도하였다는 점에서 기존의 연구와는 차별된다.

본 결과에서는 연령이 감소할수록 theta와 같은 서파가 증가하고, beta와 gamma 같은 빠른 파들이 감소하는 양상을 보였으며, 이는 Hartikainen 등이 보고했던 결과와는 차이가 있다.[25] 그들은 연령이 뇌파 스펙트럼에 미치는 영향을 보기 위해 T5-O1 전극에서 각 곡선 띠의 절대 진폭(absolute amplitude)와 power 및 양(amount)을 측정하였고, 연령은 delta와 theta의 양에 반비례적으로 관련성이 있음으로 미루어 건강한 상태에서는 서파가가 연령에 따라 증가하지 않음을 알 수 있었다고 하였고, 여성이 남성에 비해 beta activity가 많았으며, beta와 alpha 띠의 양은 연령이 증가함에 따라 감소하는 양상을 보였다고 한다.[25] 또한 Duffy 등도 지적하였듯이 건강한 성인에서는 나이가 들수록 서파(delta, theta)는 감소하고 빠른 파(alpha, beta)는 증가하는 경향을 보인다고 하였으며, 나이가 들수록 비동기화(desynchronization)가 증가하는 뚜렷한 이유를 밝히지는 못하였고, 다만 뇌 영역간에 일관성(coherence)이나 피질 결합(cortical coupling)이 감소하기 때문일 것으로 설명하였다.[26]

이전의 연구와 본 결과와의 이런 차이를 보였던 이유는 다른 연구에서는 하나의 전극을 사용하였으나, 본 연구에서는 전극 20개를 다 분석하였고, 대상자 모두 건강한 상태였기 때문으로 생각되고, 그 외의 밝혀내지 못한 다른 요소들, 예를 들어 피할 수 없었던 artifact들- 눈깜박임(blinking), 근육 연축(muscle twitching), 잡음(noise) 등도 관여했으리라 생각되며, 이에 대한 좀더 포괄적인 연구가 필요하리라고 생각된다. 또한 프랙탈 차원과 delta, alpha, beta, gamma파와는 서로 강한 상관관계가 있다는 것으로 미루어, 빠른 파가 많을수록 차원이 높아진다는 것을 시사함을 알 수 있다.

결 론

정상 10대, 30대, 50대 연령군에서 각각 5명씩 총 15명을 대상으로 디지털 뇌파기를 이용하여 각 전극별로 산출된 비선형 데이터를 통계적으로 분석해 그 의미를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째 프랙탈 차원과 리아프노프 지수는 연령별, 전극별 차이가 없었다.

둘째 theta 파 같은 느린 파가 10대에서 가장 많았고, beta, gamma 파 같은 빠른 파는 50대에서 가장 많이 나타났다.

셋째 프랙탈 차원과 delta, alpha, beta, gamma파와는 서로 강한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

각 연령층의 정상인의 뇌파에서 비선형적 분석을 실시하여, 정량적으로 분석된 이 카오스 파라미터들이 여러가지 다양한 질환과 아직은 잘 밝혀지지 않은 정상 또는 병적 상태를 연구하는데 유용한 지표가 될 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

1. KG Choi. Spectral analysis of EEG patterns in normal adults. *J of the Korean Neurological Association,* 1999;17(3):384-388.
2. SH Chae, JY Oh, EY Joo, KG Choi. Nonlinear analysis of EEG in various mental states of normal person. *J of the Korean Neurological Association,* 2000;18(5):581-588.
3. McKeown MJ, Young GB. Digital conversion of paper electroencephlaograms using a hand scanner. *J Clin Neurophysiol* 1997;14:406-413.
4. Pradhan N, Dutt DN. A nonlinear perspective in understanding the neurodynamics of EEG. *Computer and Biological Medicine,* 1993;23:425-442.
5. Pritchard WS, Dennis W. Duke, Kelly K.Krieble, Dimensional analysis of resting human EEG II: Surrogate-data testing indicates nonlinearity but not low-dimensional chaos., *Psychophysiology,* 1995;32:486-491.
6. J Roschke, J Fell, K Mann. Non-linear dynamics of alpha and theta rhythm: correlation dimension and Lyapunov exponents form healthy subject's spontaneous EEG. *Int J Psychophysiol* 1997;26(1-3):251-61.
7. Arroyo S, Lesser RP, Gordon B, Uematsu S, Jackson D and Webber R. Functional significance of the mu rhythm of human cortex: an electrophysiologic study with subdural electrodes. *Electroencephalogra Clin Neurophysiol,* 1993;87(3):76-87.
8. Lopes da Silva F. Neuronal mechanisms underlying brain waves: from neural membranes to networks *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1991;79(2):81-93.
9. Lehmann D, Michel CM. Intracerebral dipole source localization for FFT power maps *Electroencephalogra Clin Neurophysiol* 1990;76(3):271-6.
10. Llinas RR, The intrinsic electrophysiological properties of mammalian neurons: insights into central nervous system function. *Science,* 1988;242:1654-64.
11. CJ Satm, JPM Pijn, p Suffczynski, FH Lopes da Silva. Dynamics of the human alpha rhythm, evidence for non-linearity? *Clin Neurophysiol* 1999;110(10):1801-13.
12. A Fernandez-Bouzas, T Harmony, J Bosch, E Aubert. Sources of abnormal EEG activity in the presence of brain lesions *Clin Electroencephalogra* 1999;30(2):46-52.
13. J Gonzalez, A Gamundi, Ruben Rial, M Cristina Nicolau. Nonlinear, fractal, and spectral anaysis of the EEG of lizard,

Gallotia galloti Am. *J Physiol* 1999;277(1 pt 2):R 86-93.
14. E Pereda, A Gamundi, R Rial, J Gonzalez. Non-linear bahavior of human EEG: fractal exponent versus correlation dimension in awake and sleep stages *Neurosci Lett* 1998(3);250(2):91-4
15. Juhasz C, Kamondi A, Szirmai I. Spectral EEG analysis following hemispheric stroke *Acta Neurol Scand* 1997;96(6):397-400.
16. Dj Kim, JS Jeong, BM Choi. An estimation of the first positive Lyapunov exponent of the EEG in patients with schizophrenia Psychiatry Research: *Neuroimaging Section* 98, 2000;177-189.
17. Pritchard WS, Dennis W. Duke, Kelly K. Krieble. Dimensional analysis of resting human EEG II: Surrogate-data testing indicates nonlinearity but not low-dimensional chaos., *Psychophysiology*, 1995;32:486-491.
18. Wolf A, Swift JB, Swinney HL,Vastano JA. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D.* 1985;16:285-317.
19. Babloyantz A, Salazar JM, Nicolis C. Evidence of chaotic dynamics of brain activity during the sleep cycle., *Phy Lett*, 1985;111(A):152-156.
20. Frank GW, Lookman T, Nerenberg MAH, Essex C, Lemieux J, Blume W. Chaotic time seires analysis of epileptic seizures. *Physica D*, 1990;46:427-38.
21. Babloyantz A, Destexhe A. Low-dimensional chaos in an instance of epilepsy, *Proc Natl Acad USA*, 1986;83:3513-3517.
22. RP Brenner, RF Ulrich, CF Reynolds. EEG spectral findings in healthy, elderly men and women- sex differences *Electroencephalogra Clin Neurophysiol*, 1995;94(1):1-5.
23. J Juarez, M Corsi-Cabrera. Sex differences in interhemispheric correlation and spectral power of EEG activity *Brain Res Bull* 1995;38(2):149-51.
24. E Marosi, T Harmony, J Becker, J Bernal. Sex differences in EEG coherence in normal children Int *J Neurosci*, 1993;72(1-2):115-21.
25. Hartikainen P, Soininen H, Partanen J, Helkala EL, Riekkinen P. Aging and spectral analysis of EEG in normal subjects: a link to memory and CSF AchE *Acta Neurol Scand* 1992;86(2): 148-55.
26. FH Duffy, GB Mcanulty, MS Albert. Effects of age upon interhemispheric EEG coherence in normal adults. *Neurobiol Aging*, 1996;17(4):587-99.