

## 단속 주파수를 변화시킨 청각자극에 반응하는 뇌전위신호의 카오스 분석

최정미·배병훈·김수용

=Abstract=

### Chaotic Dynamics in EEG Signal Responding to Auditory Stimulus with Various Sound-Cutting Frequencies.

J. M. Choi, B. H. Bae, S. Y. Kim

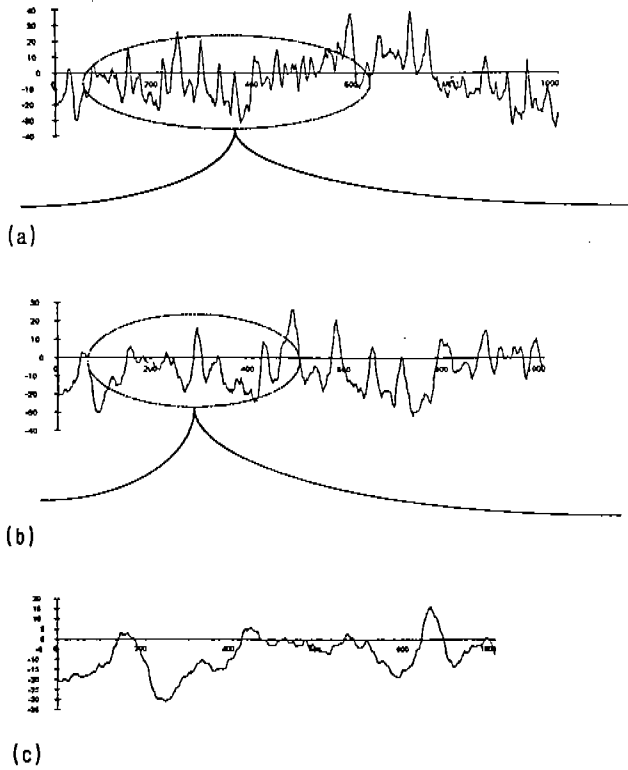
We investigated the qualitative and quantitative properties in EEG signal which responds to auditory stimulus with increasing the sound-cutting frequency from 2 Hz to 20 Hz by 2 Hz step units, by chaotic dynamics. To begin with, general chaotic properties such as fractal mechanism,  $1/f$  frequency spectrum and positive Lyapunov exponent are discussed in EEG signal. For evoked potential with given auditory stimulus, the route to chaos by bifurcation diagram and the changes in geometrical property of Poincare sections of 2-dimensional pseudo-phase space is observed. For that containing spontaneous potential, seen as the random background signal, the chaotic attractors in 3-dimensional phase space are found containing the same information as the above mentioned evoked potential. Finally the changes of Lyapunov exponent by various sound-cutting frequencies of stimulus and by the various spatial positions (occipital region) in a brain surface to be measured, are illustrated meaningfully.

**Key words :** EEG signal, Chaotic dynamics, Evoked potential

### 서 론

소산적인 비선형 시스템이 결정적인 카오스 상태임을 확신하게 하는 다양한 근거들이 최근 실험들에서 폭넓게 제시되고 있다<sup>1-5)</sup>. 즉 카오스를 찾아서 정량화하는 문제가 중요하게 평가되고 있다. 본 논문에서는 2 Hz에서 20 Hz까지 2 Hz간격으로 단속 주파수를 지닌 청각 자극에 반응하는 뇌전위 신호를 크게 세 가지 영역에서 다루고자 한다. 여기서 단속 주파수란 3 kHz의 pure tone의 소리를 1초에 반복해서 끊었다가 다시 내는 횟수를 의미한다. 먼저 뇌전위 신호 전반에 걸쳐 나타나는 카오스 특징을 제시하고, 다음은 외부자극인 청각 자극에 의한 반응만을 고려한 유

발전위에 대해서 분석하였다. 끝으로 뇌의 내부에서 자발적으로 발생하는 자발전위가 포함된 뇌전위를 다룬 후, 그 결과를 유발전위와 비교 분석하였다. 뇌전위 신호에서의 진동은, 외부에서의 특별한 자극이 없어도 항상 자체적으로 발생하는 자발적인 신경계의 활동에 주요하게 기인되므로, EEG 신호에서의 카오스는 뇌 신경계의 움직임을 반영해야 한다. 더욱 더 간단한 기관의 신경계에서조차 결정적인 카오스가 확인되어지고 있다<sup>6-7)</sup>. 일반적으로 생체와 관련된 신호의 경우 카오스 상태가 정상적이라고 여겨지고 있으며 EEG 신호의 경우에도 이러한 사실이 이미 임상적으로 확인이 되어진 상황이다<sup>8)</sup>. 이러한 비선형적인 복잡성의 상실정도를 분산과 같은 통계적인 방법에 의해서



**그림 1.** Temporal fractal 구조. (a) 6 sec 일때 time series, (b) 3 sec 일때 time series, (c) 1 sec 일때 time series  
**Fig. 1.** The graph of self-similar fluctuations on multiple scales of time in EEG signal. (a) the time scale is 6000 msec. (b) the time scale is 3000 msec. (c) the time scale is 1000 msec.

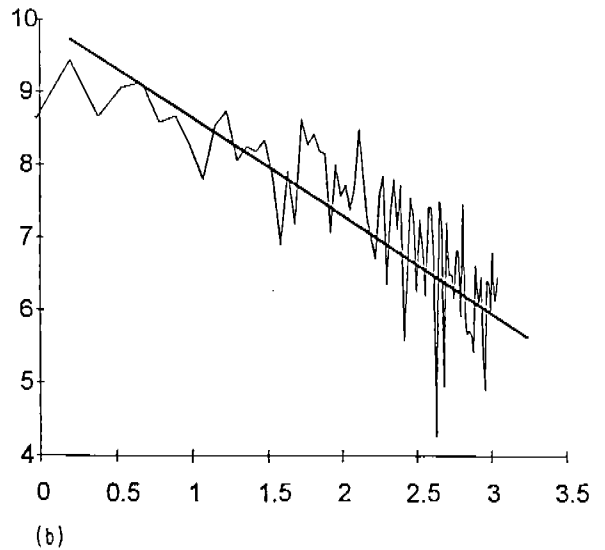
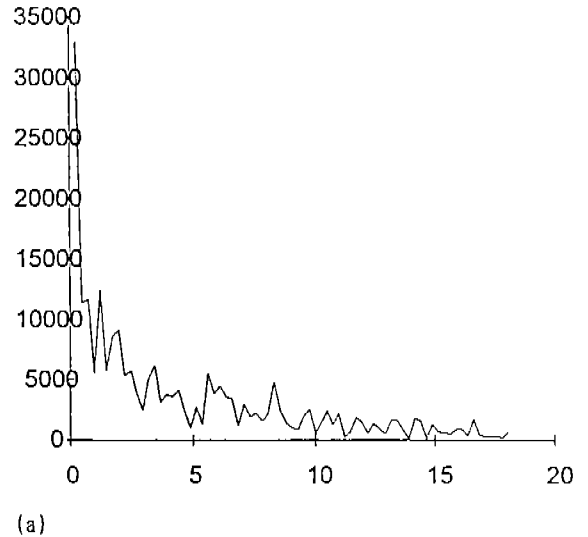
정량화하기는 힘드므로, phase space portrait, Lyapunov exponent, fractal mechanism, 기이한 끌개의 위상 특성 (topological property) 등과 같은 카오스 분석이 요구되어진다. 참고로, 본연구에서 제시된 모든 EEG 신호는 1msec sampling time으로 총 7 sec 동안 8-bit A/D converter가 내장된 EEG 측정장치를 통해 얻어졌다.

### 분석방법 및 결과

#### 1. 일반적인 EEG 신호

뇌전위신호에 전반적으로 나타나는 카오스관련 현상으로 그림 1과 같은 temporal fractal이 관찰가능하다. 여기서 temporal fractal이란 시간의 특정한 크기에 상관없이 진동이 나타나는 구조로 정의되어진다.

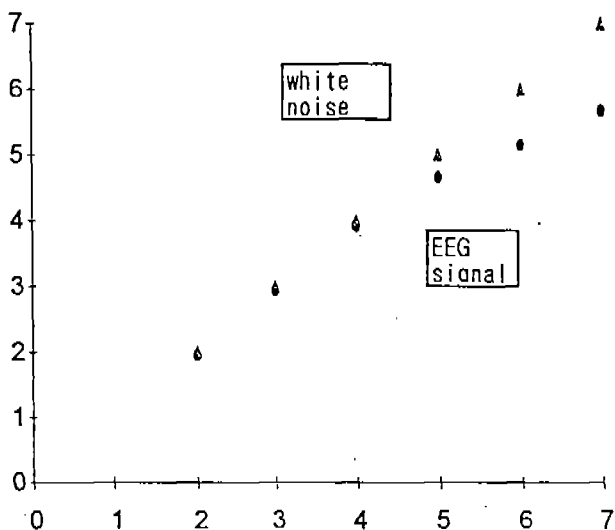
이러한 특성은 그림 2에서처럼 다양한 진동수를 가지는 넓은 영역의 1/f-frequency spectrum에 역시 반영되어지며,



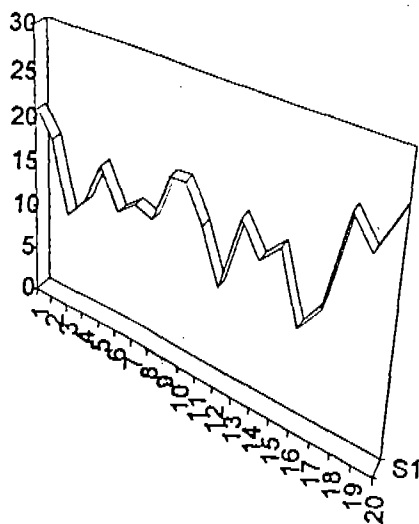
**그림 2.** (a) 1/f 모양의 broadband frequency spectrum (inverse power law), (b) log axes로 (a)를 다시 그린 그림 (negative slope 로의 fitting을 통해 1/f 모양임이 확인 가능 하다).  
**Fig. 2.** The graph of the frequency spectrum in EEG signal. (a) a 1/f-like (inverse power law) distribution, (b) The spectral data replotted on double log axes.

log scale로 그렸을 때, 음의 기울기를 관찰함으로써 확인 가능하다<sup>9-10</sup>.

카오스에 대한 추가적인 테스트로 유한한 capacity dimension<sup>11)</sup>과 양의 값을 가지는 한개 이상의 Lyapunov exponent<sup>12)</sup>가 필요한데, 이는 그림 3에서 확인되어진다. 구체적으로, 얻어진 EEG 신호의 모든 경우에 dimension 값



(a)



(b)

그림 3. (a) finite capacity dimension versus n (depending on box size) value, (b) maximum Lyapunov exponent versus frequency (세로축 단위는 arbitrary 럽)

Fig. 3. The graph of a finite capacity dimension and Lyapunov exponents. (a) a finite capacity dimension versus n value. (b) maximum Lyapunov exponent versus frequency.

의 기울기가 대략 4.5와 5.0사이에서 줄어들기 시작하였으므로, 뇌전위신호의 평균 차원은 대략 4.7정도로 볼 수 있으며, 이렇게 수렴하는 현상은 계가 임의적이 아닌, 결정적임 (deterministic)을 의미한다. 여기서 capacity dimension은 다음과 같은 box-counting method에 의해 계산되어졌다.

$$D(\text{dimension}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \log N(r) / 2 \log n$$

n: box size에 의존하는 값으로 n이 커질수록 box size가 처음크기의 1/2<sup>n</sup>로 줄어들게 된다.

N(r): 1개이상의 점을 포함하고 있는 box의 수

## 2. 유발전위

먼저 유발전위를 얻기 위해서는 잡음을 제거하기 위한 frequency filtering과 자발전위를 없애기 위한 summation 작업이 수행되어야 한다. 이렇게 얻어진 유발전위에서 각 국부적인 최대값들이 pseudo-phase space 상에 그려지는데, 이때 아주 작은 분산을 보이는 점들은 부분적으로 공간적인 average에 의해 중심의 한점으로 대응되어진다. 그림 4는 각 단속주파수에서의 유발전위와 그려진 pseudo-phase space에서의 뿌양까레 단면을 보여주는 데, 8Hz와 16Hz에서의 카오스 상태로의 변화가 주목할 만하다. 뿐만 아니라 주파수 값에 따라 나타나는 각각의 상태를 그림 5와 같은 bifurcation diagram을 통해 살펴보면, 뇌 시스템이 이러한 자극에 대해 어떠한 경로를 거쳐 카오스 상태로 가는지<sup>13)</sup>를 부분적으로 확인할 수 있다. 즉, 주기배중 (period coupling)을 거쳐 주기 3인 상태가 되었다가 마침내 카오스 상태가 되는 어느 정도 일반적인 경로가 관찰되어진다.

## 3. 자발전위가 포함된 뇌전위

자발전위는 흔히 무질서해 보이고 이러한 자발전위를 포함한 신호는 항상 카오스상태임이 앞에서 설명되어졌다. 하지만 같은 카오스 상태일지라도 발산정도를 특징지워주는 Lyapunov exponent 값이나 다차원에 나타나는 chaotic attractor의 위상특징을 조사함으로써 자극 신호의 단속 주파수 변화에 대한 특정한 반응이 파악가능하다. 먼저 Karhunen-Loeve method<sup>14)</sup>을 이용하여—여기서 time delay ( $\tau_w = 0.05 \text{ sec}$ )는 논문<sup>14)</sup>에서 함께 제시된 correlation method에 의해 구해졌다—우리는 그림 6에서와 같은 3차원 끌개를 찾아냈고, 그림 4에서 언급한 8Hz와 16Hz에서 주목할 만한 변화를 관찰함으로써 무질서해 보이는 뇌전위 신호가 자극에 대한 정보를 포함하고 있음을 확신할 수 있었다.

한편, 그림 7과 같이 머리 뒤부분의 표면에 4개의 전극을 부착하여 측정이 이루어 졌는데, 각 채널에서 Lyapunov exponent 값의 특징이 보여졌다. 즉, 단속 주파수를 지닌 청각 자극에 대해 채널 1과 3이 거의 비슷한 양상을

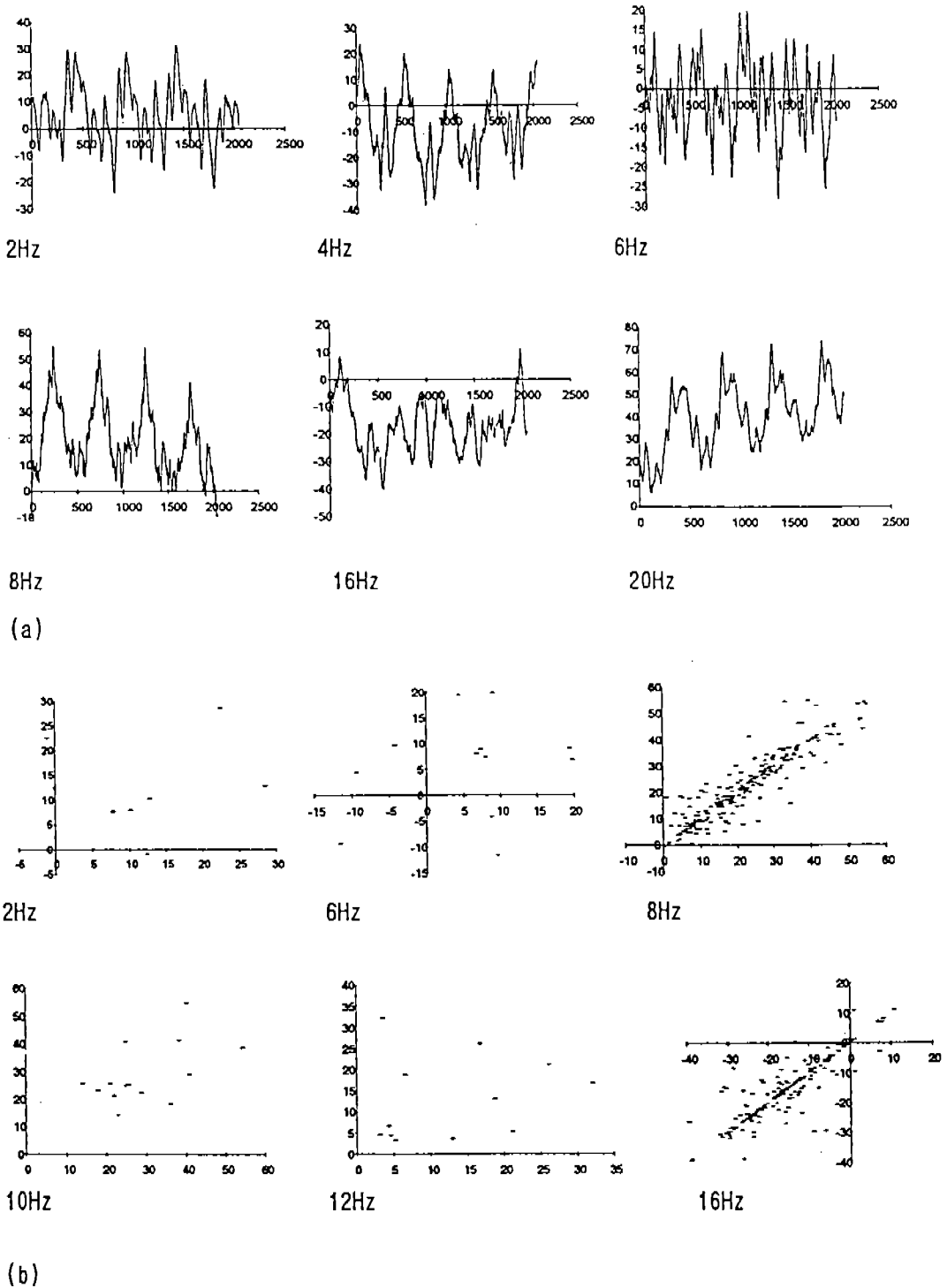


그림 4. (a) 각 단속 주파수를 지닌 청각자극에 대한 유발전위의 time series (b) (a)의 각각에 대한 뿌앙가레 단면  
 Fig. 4. The graph of the evoked potential with stimulus increasing sound-cutting auditory frequency from 2Hz to 20Hz by 2Hz step size. Each figure has characteristic geometric shape. (a) forms of time series, (b) Poincaré sections in pseudo-phase space portraits of evoked potentials at each sound-cutting frequency.

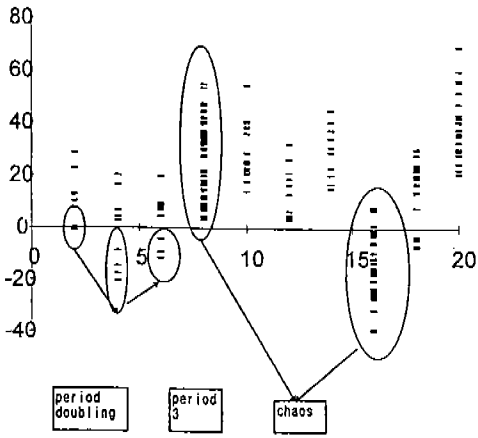
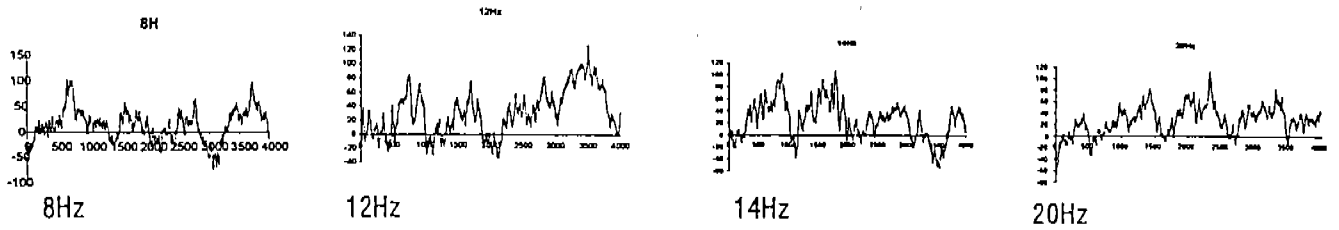
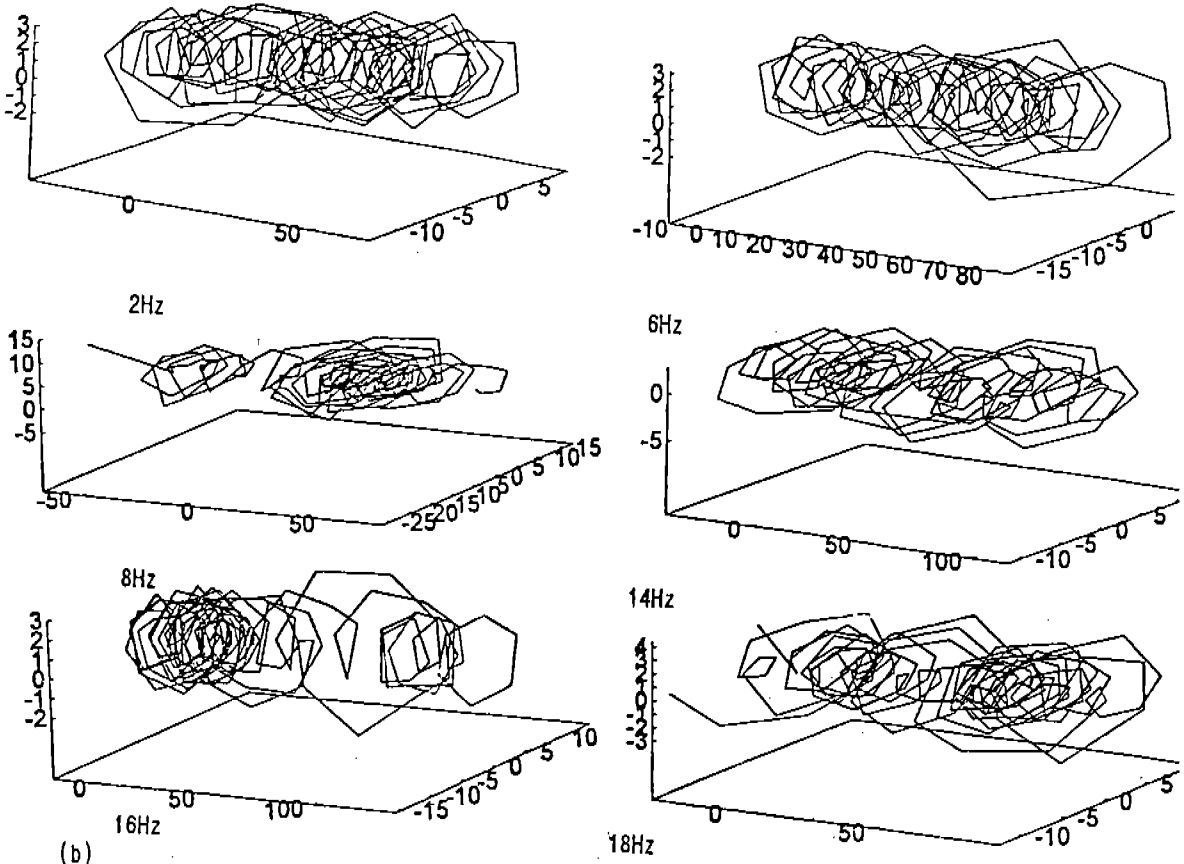


그림 5. 조절변수인 자극의 주파수에 대한 Bifurcation diagram (가로축: 단속 주파수, 세로축: 유발전위의 local maximum values)

Fig. 5. The graph of the bifurcation diagram versus sound-cutting frequency; The route to chaos from period doubling to chaotic state via period 3 is observed.



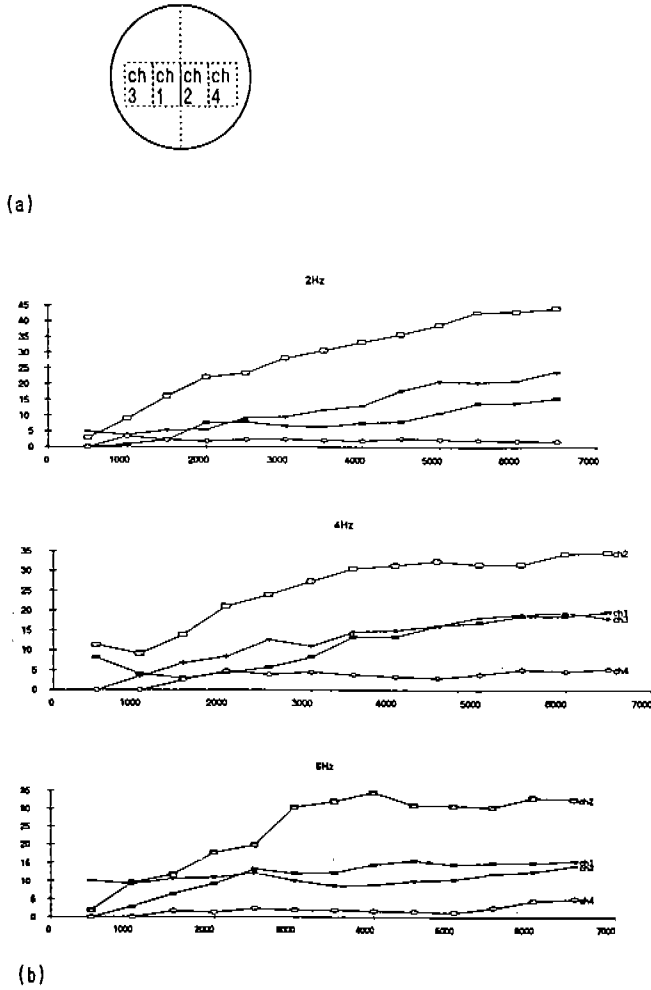
(a)



(b)

그림 6. (a) 각 단속 주파수에서 자발전위를 포함한 유발전위의 time series, (b) Karhunen-Loeve method에 의한 3차원 chaotic attractor

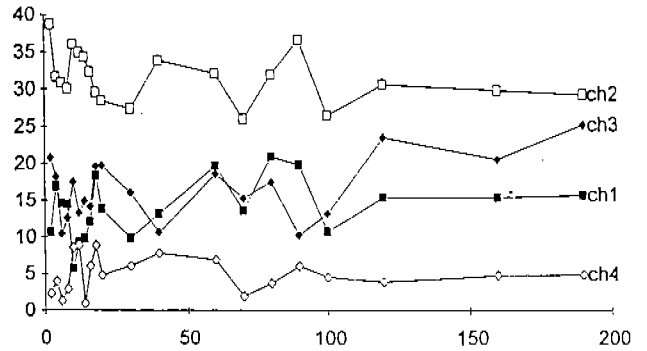
Fig. 6. The graph of the evoked potential containing the spontaneous potential. (a) forms of time series, (b) the trajectory of brain potential with given three orthogonal basis. The noticeable chaotic attractors, compared with others, in 8Hz and 16Hz is shown.



**그림 7. (a)** 뇌전위 측정시 각 전극의 위치를 나타냄(전극수:4개, ch1:O1 ch2:O2 ch3:T5 ch4:T6), **(b)** 데이터 갯수의 증가에 따른 Lyapunov exponent의 변화; 각 2, 4, 6Hz 일때(가로축: 데이터 갯수, 세로축: 단위가 arbitrary한 Lyapunov exponent 값)  
**Fig. 7 (a)** The graph of each channel which is situated symmetrically in occipital region(ch1:O1 ch2:O2 ch3:T5 ch4:T6). The total number of channel used to measure simultaneously the brain potential is 4. **(b)** The graph of Lyapunov exponent versus the finite number of data with fixed 3kHz carrier frequency. Lyapunov exponent value has an arbitrary unit in this figure.

나타냈고, 채널 2와 채널 4는 각각 가장 큰 값과 가장 작은 값을 일관되게 보여주었다.

그림 8은 단속주파수의 변화에 따라 6000개의 유한한 데이터 갯수에서의 Lyapunov exponent 값을 그렸는데, 각 채널이 같은 변화양상을 보이는 사실로부터 뇌 시스템이 source(자극)의 변화를 감지하고 있으며, 이 정보가 EEG 신호에 포함되어 있다고 볼 수 있다.



**그림 8.** 각 단속주파수에서의 Lyapunov exponent 값(데이터 갯수가 6000개 일때의 Lyapunov exponent 값을 취함)  
**Fig. 8.** The graph of Lyapunov exponent versus sound-cutting frequency. Lyapunov exponent value has arbitrary unit and is calculated when the finite number of data is 6000.

### 결 론

카오스분석에 의해 무질서해 보이는 EEG 신호에서 몇 가지 특징을 추출할 수 있었다. 뇌전위신호가 deterministic chaos임을 확인하였고 8Hz와 16Hz 정도의 주파수에서 위상 특징과 주기배증으로부터 주기 3을 경유하여 카오스로 가는 경로가 관찰되어졌으며, 채널의 공간적인 위치에 따라 카오스의 대표적인 특징인 발산정도가 다름이 확인되었다.

이 결과들은 뇌의 생물학적인 상황과 어느 정도 관련성을 지니면서 해석이 가능하나 이 점에 대해서는 좀 더 깊은 연구가 요구되어진다.

### 참 고 문 헌

1. H. Haken, *Complex Systems-Operational Approaches in Neurobiology, Physics and Computers*, New York:Springer Verlag, 1985.
2. Mingzhou Ding, Celso Grebogi, Edward Ott, Tim Sauer, James A. Yorke, "Estimating correlation dimension from a chaotic time series: when does plateau onset occur?", *Physica D*, vol. 69, pp. 404-424, 1993.
3. Barteld Braaksma, Johan Grasman, "Critical dynamics of the Bonhoeffer-van der Pol equation and its chaotic response to periodic stimulation", *Physica D*, vol. 68, pp. 265-280, 1993.
4. Hans E. Schepers, Johannes H. G. M. van Beek, James B. Bassingthwaite, "Four Methods to Estimate the Fractal Dimension from Self-Affine signals", *IEEE Engineering in Medi-*

- cine and Biology, pp. 57-71, June, 1992.
5. Claire D. Koch, Reinhard A. Palovcik, Basim M. Uthman, Jose C. Principe, "Chaotic Activity During Iron-Induced 'Epileptiform' Discharge in Rat Hippocampal Slice", IEEE Trans. on Biomedical Engineering, vol. 39, no. 11, November, 1992.
  6. Ary L. Goldberger, "Fractal Mechanisms in the Electrophysiology of the Heart", IEEE Engineering in Medicine and Biology, pp. 47-52, June, 1992.
  7. H. Y. Bauer, K. Pawelzik, "Alternating Oscillatory and Stochastic Dynamics in a Model for a Neuronal Assembly", Physica D, vol. 69, pp. 380-393, 1993.
  8. 이창섭, 노재영, 뇌과학 입문, 현대의학서적사, 1986.
  9. Francisc. Moon, Chaotic Vibration, John Wiley & Sons, Inc., 1987.
  10. William Deering, Bruce J. West, "Fractal; Physiology", IEEE Engineering in Medicine and Biology, pp. 40-46, June, 1992.
  11. G. L. Baker, J. P. Gollub, Chaotic Dynamics, New York; Cambridge University Press, 1990.
  12. Alan Wolf, Jack B. Swift, Harry L. Swinney, John A. Vastano, "Determining Lyapunov exponents from a time series", Physica D, vol. 16, pp. 285-317, 1985.
  13. Pierre Berge, Yves Pomeau, Christian Vidal, Order within Chaos, Paris; Hermann, 1984.
  14. D. S. Broomhead and Gregory P. King, "Extracting qualitative dynamics from experimental data", Physica D, vol. 20, pp. 217-236, 1986.

**=국문초록=**

1 Hz에서 20 Hz까지의 단속 주파수를 지닌 청각자극을 가해 얻은 EEG 신호에서 자극에 따른 신호의 정성적이고 정량적인 특성을 카오스 분석방법을 통해 밝혔다. 먼저, 뇌전위 신호에 전반적으로 나타나는 일반적인 카오스 특징(fractal mechanism, 1/f frequency spectrum, positive Lyapunov exponent 등등)을 확인하였다. 유발전위에 대해서는 자극의 주파수에 따른 주기배증을 경유한 카오스로 가는 길(route to chaos)과 2차원 pseudo-Phase portrait의 뿌양까레 단면에서의 기하학적 모양(topological property)의 변화를 관찰하였고, 자발전위가 포함된 유발전위에 대해서는 적절한 bases를 지닌 3차원 phase space에서 기이한 끌개(chaotic attractor)가, 유발전위의 정보를 지닌채 보여졌다. 끝으로 자극 주파수(단속 주파수)변화와 측정이 이루어진 머리표면에서의 공간적 위치에 따른 Lyapunov exponent 값 변화를 의미있게 해석하였다. 이 결과는 무질서하게 보이는 뇌전위신호에서 주어진 청각자극에 대한 정보를 얻는 새로운 방법을 제시하게 된다.