

단속 주파수를 변화시킨 청각 자극에 반응하는 뇌전위신호의 카오스 분석

최정미^o, 배병훈, 김수용
한국과학기술원, 물리학과*

Chaotic dynamics in EEG signals responding to auditory stimulus with various triggered frequencies

J.M.Choi, B.H.Bae, S.Y.Kim
Department of physics, KAIST

요약

1Hz에서 20Hz까지의 단속 주파수를 지닌 청각자극을 가해 얻은 EEG신호에서 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 등)이 확인되었다. 유발전위에 대해서는 자극의 주파수에 따른 주기 배증을 경유한 카오스로 가는 길(route to chaos)과 2차원 pseudo-phase portrait의 뿌앙까래 단면에서의 기하학적 모양(topological property)의 변화가 관찰되어졌고, 자발전위가 포함된 유발전위에 대해서는 적절한 bases를 지닌 3차원 phase space 에서 기이한 끌개(chaotic attractor)가, 유발전위의 정보를 지닌채 보여졌다. 끝으로 자극 주파수(단속 주파수와 반송 주파수) 변화와 측정이 이루어진 머리표면에서의 공간적 위치에 따른, lyapunov exponent 값 변화가 의미있게 해석되어졌다. 이 결과는 무질서하게 보이는 뇌전위신호에서 주어진 청각자극에 대한 정보를 얻는 새로운 방법을 제시하게 된다.

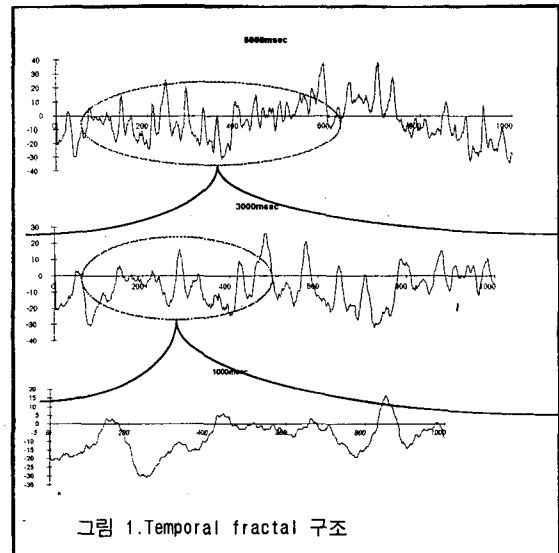
1. 서론

소산적인 비선형 시스템이 결정적인 카오스 상태를 확신하게 하는 다양한 근거들이 최근 실험들에서 폭넓게 제시되고 있다. [1-5] 즉 카오스를 찾아서 정량화하는 문제가 중요하게 평가되고 있다. 본 논문에서는 2Hz에서 20Hz까지 2Hz간격으로 단속 주파수를 지닌 청각 자극에 반응하는 뇌전위 신호를 크게 세 가지 영역에서 다루고자 한다. 먼저 뇌전위 신호 전반에 걸쳐 나타나는 카오스 특징을 제시하고, 다음은 외부자극인 청각 자극에 의한 반응만을 고려한 유발전위에 대해서 분석하였다. 끝으로 뇌의 내부에서 자발적으로 발생하는 자발전위가 포함된 뇌전위를 다룬 후, 그 결과를 유발전위와 비교 분석하였다. 뇌전위 신호에서의 진동은 자발적인 신경계의 활동에 주요하게 기인되므로, EEG 신호에서의 카오스는 뇌 신경계의 움직임을 반영해야 한다. 더욱 더 간단한 기관의 신경계에서조차 결정적인 카오스가 확인되어지고 있다. [6] [7] 일반적으로 생체와 관련된 신호의 경우 카오스 상태가 정상적이라고 여겨지고 있으며 EEG 신호의 경우에도 이러한 사실이 이미 임상적으로 확인이 되어진 상황이다. [8] 이러한 비선형적인 복잡성의 상실정도를 분산과 같은 통계적인 방법에 의해서 정량화하기는 힘들므로, phase space portrait, lyapunov exponent, fractal mechanism, 기이한 끌개의 위상 특성(topological property) 등과 같은 카오스 분석이 요구되어진다.

2. 분석 방법 및 결과

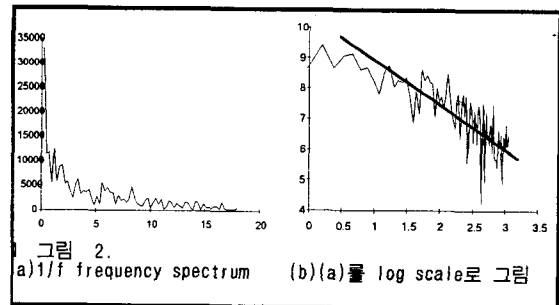
1) 일반적인 EEG 신호

뇌전위신호에 전반적으로 나타나는 카오스관련 현상으로 그

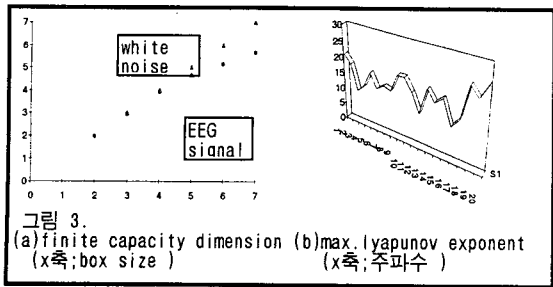


림.1과 같은 temporal fractal이 관찰가능하다. 여기서 temporal fractal이란 시간의 특정한 크기에 상관없이 진동이 나타나는 구조로 정의되어진다.

이러한 특성은 그림2.에서처럼 다양한 진동수를 가지는 넓은 영역의 1/f-frequency spectrum 에 역시 반영되어지며, log scale 로 그렸을 때, 음의 기울기를 관찰함으로써 확인가능하다. [9] [10]

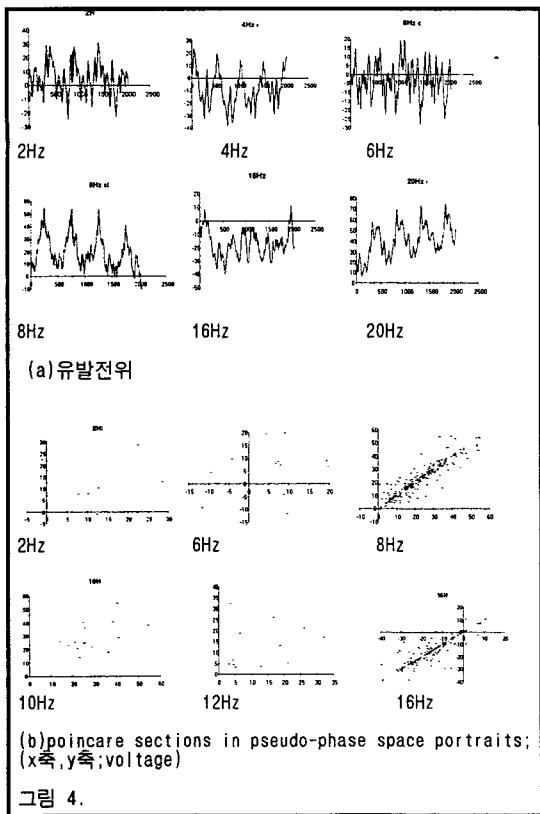


카오스에 대한 추가적인 테스트로 유한한 capacity dimension [11]과 양의 값을 가지는 한개 이상의 Lyapunov exponent [12]가 필요한데, 이는 그림 3.에서 확인되어진다. 즉, 뇌전위신호의 평균 차원은 대략 4.7정도이며, 이렇게 수렴하는 현상은 계가 임의적이 아닌, 결정적(deterministic)을 의미한다.

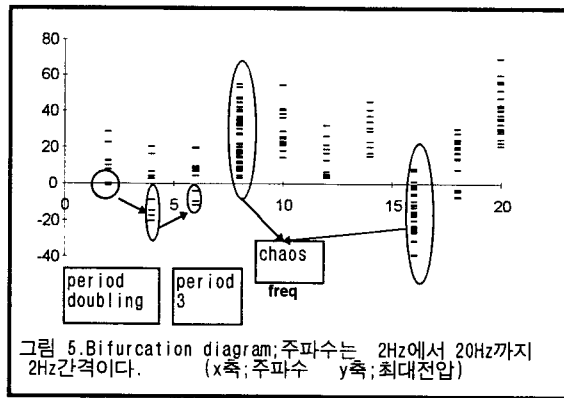


2) 유발전위

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 그려지는 데, 이때 아주 작은 분산을 보이는 점들은 부분적으로 공간적인 average에 의해 중심의 한점으로 대응되어진다. 그림 4. 는 각 단속주파수에서의 유발전위와 그려진 pseudo-phase space에서의 모양까지 단면을 보여주는 데, 8Hz와 16Hz에서의 카오스 상태로의 변화가 주목할 만하다.

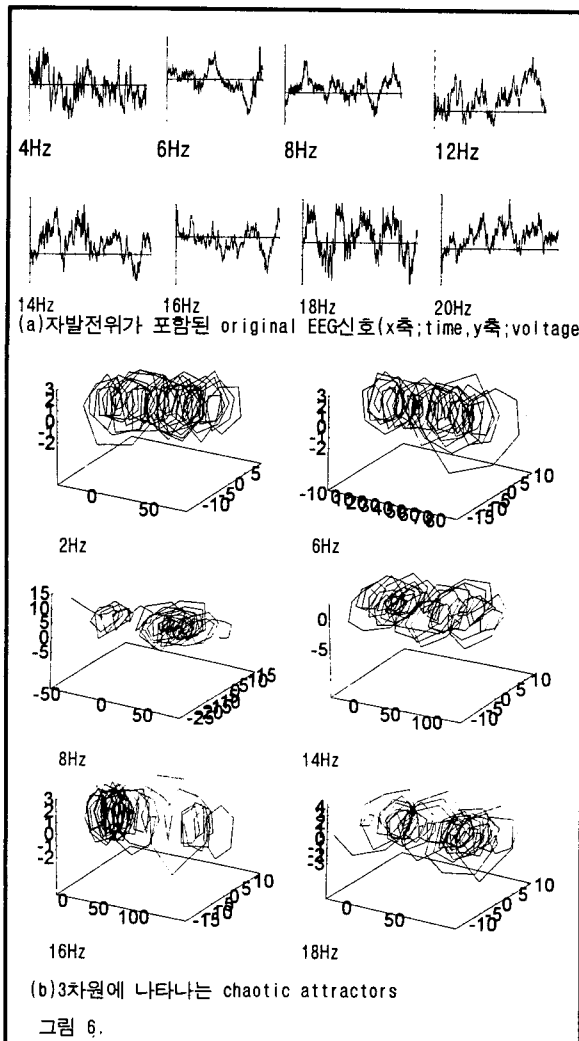


뿐만 아니라 주파수값에 따라 나타나는 각각의 상태를 그림 5. 과 같은 bifurcation diagram을 통해 살펴보면, 뇌 시스템이 이러한 자극에 대해 어떠한 경로를 거쳐 카오스 상태로 가는지 [13]를 부분적으로 확인이 가능하다. 즉, 주기배중(period coupling)을 거쳐 주기 3인 상태가 되었다가 마침내 카오스 상태가 되는 어느 정도 일반적인 경로가 관찰되어진다.



3) 자발전위가 포함된 뇌전위.

자발전위는 흔히 무질서해 보이고 이러한 자발전위를 포함한 신호는 항상 카오스상태임이 2.1)에서 설명되어졌다. 하지만 같은 카오스 상태일지라도 발산정도를 특징지워주는 lyapunov exponent 값이나 다차원에 나타나는 chaotic attractor의 위상특징을 조사함으로써 자극의 변화에 대한 특정한 반응이 파악가능하다. 먼저 Karhunen-Loeve method [14]을 이용하여 우리는 그림 6. 에서와 같은 3차원 끌개를 찾아냈고, 2.2)에서 언급한 8Hz와 16Hz에서 주목할 만한 변화를 관찰함으로써 무질서해보이는 뇌전위 신호가 자극에 대한 정보를 포함하고 있음을 확신할 수 있었다.



단속 주파수를 변화시킨 청각 자극에 반응하는 뇌전위신호의 카오스 분석

한편, 그림 7. 과 같이 머리 뒤부분의 표면에 4개의 전극을 부착하여 측정이 이루어 졌는데, 각 채널에서 Lyapunov exponent값의 특징이 보여졌다. 즉, 단속 주파수를 지닌 청각자극에 대해 채널 1과 3이 거의 비슷한 양상을 나타냈고, 채널2와 채널4는 각각 가장 큰값과 가장 작은 값을 일관되게 보여주었다.

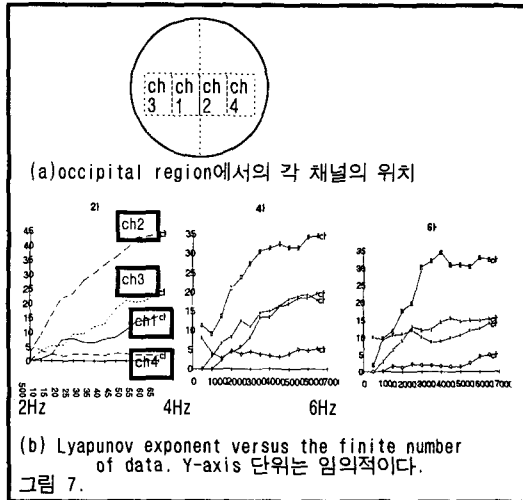
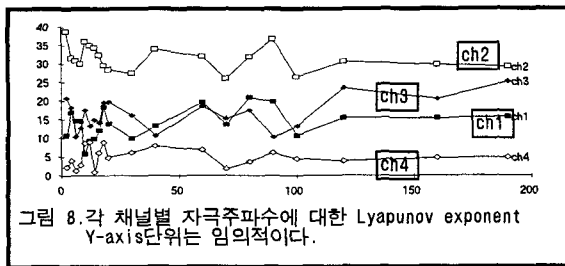


그림 8. 는 단속주파수의 변화에 따라 6000개의 유한한 데이터 갯수에서의 Lyapunov exponent값을 그렸는데, 각 채널이 같은 변화양상을 보이는 사실로부터 뇌 시스템이 source(자극)의 변화를 감지하고 있으며, 이 정보가 EEG신호에 포함되어 있다고 볼 수 있다.



3. 결론

카오스분석에 의해 무질서해 보이는 EEG신호에서 몇가지 특징을 추출할 수 있었다. 2.1)에서 뇌전위신호가 deterministic chaos임을 확인하였고 2.2)와 2.3)으로부터 8Hz와 16Hz 정도의 주파수에서 위상 특징과 주기배증으로부터 주기3을 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.

참고 문헌

[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 Medicine 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] 이창선, 노재영, *뇌과학 입문*, 현대의학서적사, 1986.

[9] Francisc. Moon, *Chaotic Vibration*, John Wiley & Sons, Inc., 1987.

[10] William Deering, Bruce J. West, "Fracta; 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.