

청각자극의 반송 주파수에 따른 뇌전위 신호의 해석

최정미 · 배병훈 · 김수용

=Abstract=

The Analysis of EEG Signal Responding to the Pure Tone Auditory Stimulus

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

Chaotic analysis of EEG signal responding to auditory stimulus with various carrier frequency and constant triggering frequency is given in this paper. The EEG signal is obtained from the digital 12channel EEG system made in our laboratory. The carrier frequency is varied from 1 kHz to 3 kHz by 0.5 kHz step. Chaos analysis such as pseudo phase space portrait, Lyapunov exponent, and so on is done on the auditory stimulated evoked potential. This result is found to be quite consistent with the well known results from the psychological perception theory.

Key words : EEG Signal, Pure tone auditory stimulus

서 론

사람의 뇌가 외부자극에 대한 반응 mechanism을 이해하고자 하는 노력은 인지심리학과 생리학등의 분야에서 이뤄지고 있고¹⁻⁵⁾, 이는 뇌 기능 규명, 뇌 병변 진단을 목적으로 한다. 그러나, 이러한 실험들은 방법에 있어서, 피검자의 '느낌'의 정도를 말로 표현하는 방식이 사용되기 때문에 실험시의 피검자의 심리적인 상황 등에 심하게 의존하여 객관성을 많이 상실하게 되고, 정량화하기 힘든 단점이 있다. 본 연구에서는 자극을 받는 동안 사람의 뇌전위 측정 및 분석에 의해 물리적으로 기술되는 자극의 매개변수와 사람이 인지하는 감각의 정도와의 관계에 대한 객관적인 검사방법으로써의 가능성을 제시하려고 한다. 그 중에서 청각자극에 대해서는 소리의 물리적인 주파수(pure tone)와 사람의 느낌의 정도를 관련짓는 인지 심리학적 실험에 의한 많은 실험결과들이 있기 때문에^{6,7)}, 뇌전위의

측정 및 분석에 의한 결과를 이와 비교하기 위해서 자극의 종류를 청각자극에 국한시켰다. 이처럼 뇌전위측정에 의한 감각인지와 관련한 연구는 주로 순간적인 자극에 의한 유발전위를 검출⁸⁾하여 이상파형 검출에 의한 신경계의 이상 유무를 판별하는 연구 등이 있고, 유발전위를 이용한 뇌의 감각인지 영역을 찾는 신경전류추적기술 등이 있다⁹⁾. 그러나, 아직까지는 소리의 주파수변화에 의존하는 뇌전위의 특성변화를 해석한 연구는 보고되고 있지 않다.

본 연구에서는 청각자극의 물리적인 주파수(pure tone)에 따른 뇌의 반응 mechanism을 조사하기 위해 소리의 주파수 변화에 따라 반응하는 사람의 뇌전위를 측정 후, 먼저 pseudo phase space를 통해 그 진폭특성을 조사하였다. 여기서 뇌전위는 1 ms sampling time, 8 bit A/D converter를 내장한 디지털 EEG 장치에 의해 측정하였고, 뇌전위의 진폭 특성을 정확히 파악하기 위해서는 되도록 작은 delay time이 요구되므로, delay time이 1 ms 인 pseudo

phase space를 조사하였다. 분석된 결과는 반송 주파수에 따른 청각 자극의 세기에 대해 실제로 알려진 생리학적 상황과 일치하였다. 그 다음은, Lyapunov exponent value를 통해 신호의 발산 특성을 조사하였는데, 신호의 발산 특성을 정량화한 Lyapunov exponent값들은 컴퓨터 계산을 통해 실험 데이터에서 얻었다. Pseudo phase space에 의한 분석과 마찬가지로, Lyapunov exponent 해석도 역시 생리학적 사실과 일치하였다.

본 론

2. 1 실험 방법

고정된 60 Hz의 단속 주파수를 지닌 청각 자극의 반송주파수를 1kHz에서 3 kHz까지 0.5 kHz단위로 증가시키면서 피검자에게 가하였다. 이러한 자극에 반응하는 뇌전위 신호를 본 실험실에서 직접 설계, 제작한 12ch 디지털 EEG 측정장비⁸⁾를 이용하여 컴퓨터로 데이터를 전달하였다(그림 1). 측정부위는 10/20 international electrode system에서 O2, T5로 2개의 채널이 동시에 사용되었다. 여기서 각 채널의 위치는 청각 자극에 대해 가장 잘 반응¹⁰⁾하는 부분 주위로 정해진 것이다.

본 실험에서 반송 주파수를 1kHz~3kHz의 범위에만 국한시킨 이유는 다음과 같이 이미 밝혀진 생리학적인 사실에 근거한다. Pitch란 사람이 인식할 때 소리가 얼마나 높은지 낮은지에 대한 주관적인 양인데, 대체적으로 고음역에 의해 high-pitch가 되고 저음역에 의해 low-pitch가 된다. 이러한 pure tone의 pitch에 소리의 세기가 미치는 영향이 Stevens(1985)에 의해 처음으로 150 Hz에서 12,000 Hz영역에서 조사되었다⁶⁾. 그리하여 3000 Hz 이상의 높은 주파수에서는 소리의 세기가 감소되면서 일정한 pitch가 유지되고, 500 Hz 미만의 낮은 주파수에서는 소리의 세기가 증가되면서 역시 일정한 pitch가 유지되며, 그 사이의 주파수 영역(500 Hz~3000 Hz)에서는 소리의 세기가 pitch에 미치는 영향이 가장 작게됨을 밝혔다. 이는 본 실험에서 선택한 1000 Hz~3000 Hz 주파수 범위내에 있는 소리가 큰 왜곡없이 주파수의 정보를 auditory nerve system에 전달시키고있음을 의미한다. 본 실험에서 500 Hz의 간격으로 반송 주파수를 증가시킨 사실 또한 다음과 같은 생리학적 사실에 그 근거를 둔 결과이다. 즉, 1000 Hz~10,000 Hz 범위 내에서 사람이 주파수 변화를 인지하기 위해서는 최소한 Weber fraction으로 알려진 값($\Delta f/f$ 가 대략 0.004 임)이상의 주파수 차이가 있어야 한다는 사실이다. 따라서 본 실험에서의 최대 주파수인 3000 Hz의 경우에 대해 계산

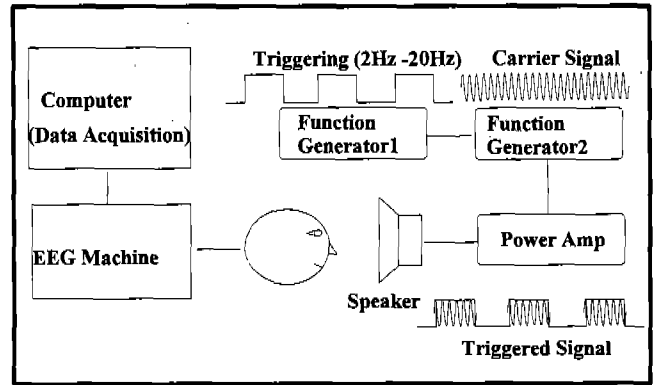


그림 1. 청각자극기와 디지털 뇌파측정 시스템의 구성
Fig. 1. Acoustic stimulator and EEG measurement system.

하면 최소 12 Hz이상의 주파수 간격이 요구되며 따라서 본 실험에서 결정된 500 Hz 간격은 충분히 적절하다고 볼 수 있다.

2. 2 뇌전위 특성 해석

(1) Pseudo phase space 해석

실험을 통해 얻은 각 뇌전위 신호의 자극의 세기에 따른 진폭특성을 합리적으로 파악하기 위해 pseudo phase space를 조사한다. 여기서 신호의 진폭을 신호의 최대, 최소값의 차 또는 통계적인 분산값 등으로 결정할 수 있으나, EEG 신호의 noise, offset, outlier에 의해 많이 좌우되므로, 충분히 많은 샘플링한 점들을 phase space에 그려 공간상에 연결된 길이를 한 축에 투영시켜 신호의 진폭값을 결정하였다. 이때 공간에서 가능한 한 많은 점들이 있어야 그 특징파악이 용이하므로 delay time이 작을수록 좋다. 따라서 본 분석에서는 샘플링 시간 1ms를 delay time으로 결정한 후 pseudo phase space를 그렸다.

그림2에서와 같이 자극의 반송 주파수가 높아질수록 반응하는 뇌전위 신호의 진폭이 커지고 있음을 확인할 수 있다. 구체적으로 자극의 세기와 신호의 진폭이 어떠한 관련을 가지고 있는지를 파악하기 위해, phase space을 이용하여 구해진 각 자극에서의 진폭전압을 그림 4와 같이 그렸다.

그림 4에서와 같이 실험에서 얻어진 뇌전위의 크기가 주어진 자극주파수와 특정한 상관관계를 가지면서 커짐을 알 수 있다. 이러한 특성은 다음의 생리학적 근거에 의해 설명된다.

인간의 청각은 반송 주파수가 다른 pure tone의 소리에 민감하다. 각 주파수는 각각 자신의 threshold 값을 지니고

최정미 외 : 청각자극 뇌전위 신호의 해석

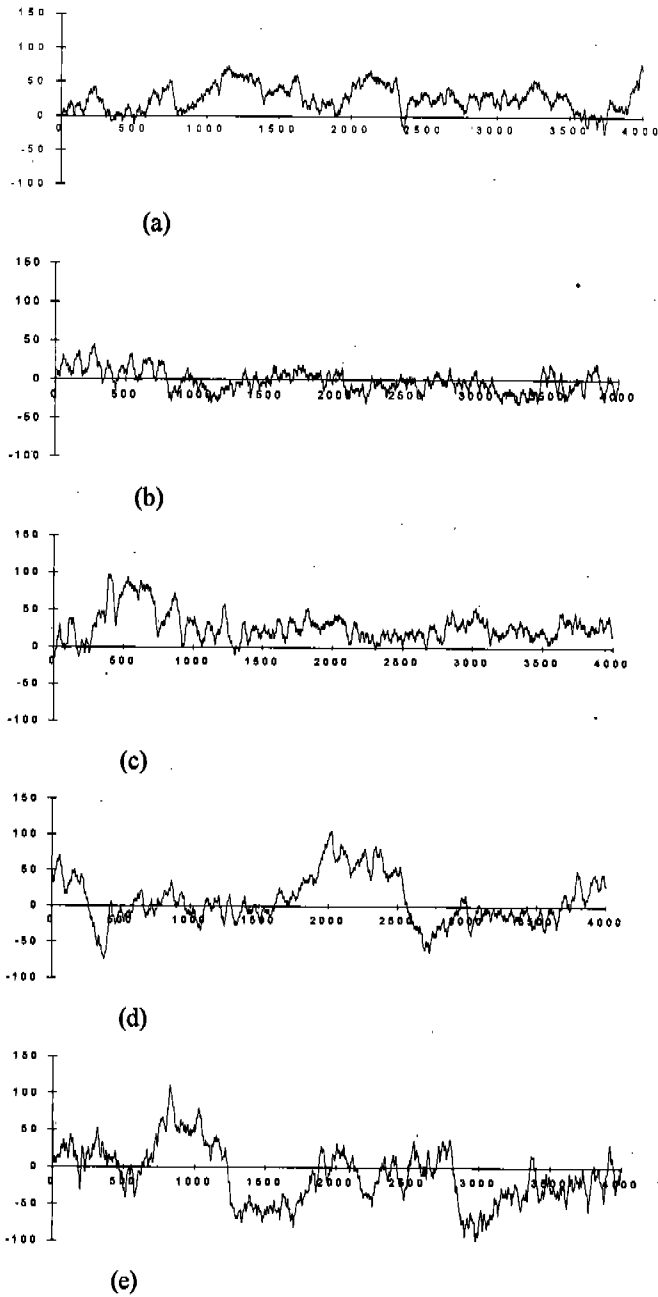


그림 2. 각 pure tone 청각자극의 반응주파수에 따른 뇌전위 신호의 time series

(a) 1kHz (b) 1.5kHz (c) 2kHz (d) 2.5kHz (e) 3kHz 일 때.

(y축: 뇌전위(arbitrary unit), x축: 시간(ms))

Fig. 2. Time series of EEG signal responding to auditory stimulus of each pure tone.

(a) 1kHz (b) 1.5kHz (c) 2kHz (d) 2.5kHz (e) 3kHz

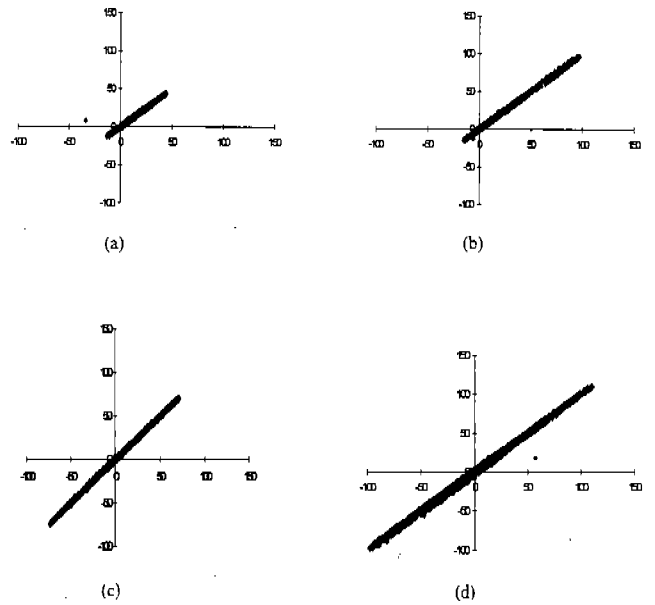


그림 3. 각 주파수에 따른 뇌전위 신호의 pseudo-phase space (x축, y축: 뇌전위(arbitrary unit))

(a) 1.5kHz (b) 2kHz (c) 2.5kHz (d) 3 kHz 일 때

Fig. 3. Pseudo-phase space of EEG signals responding to auditory stimulus of each pure tone.

(a) 1.5kHz (b) 2kHz (c) 2.5kHz (d) 3kHz

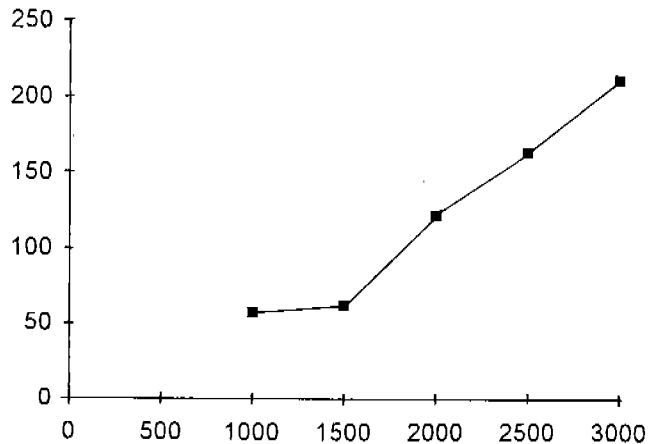


그림 4. 각 주파수에 따른 뇌전위 신호의 진폭전압관계 (y축: 진폭 x축: 반응 주파수(Hz))

Fig. 4. The graph of experimental relation each pure tone frequency to the magnitude of EEG signal.

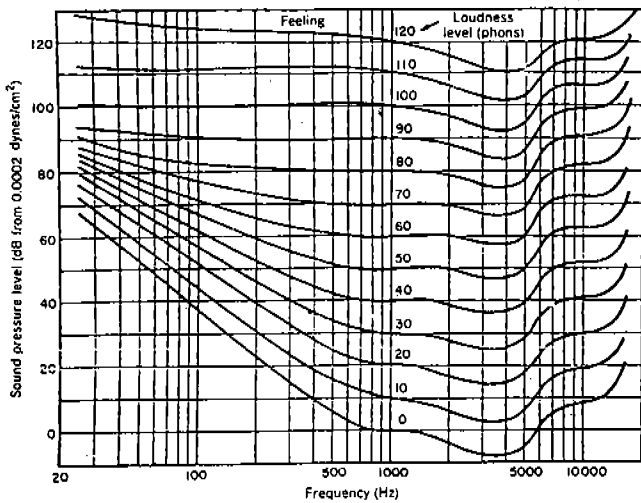


그림 5. 청각 자극의 주파수, 물리적인 세기에 대한 loudness와의 관계

Fig. 5. The graph of relation each pure tone frequency to loudness of auditory stimulus.

있게 된다. 이러한 각 주파수의 소리가 auditory nerve system에 전달되어 최종적으로 impulse firing에 기여하는 정도를 살펴보면 정상적인 사람의 경우 0.25kHz 미만, 8 kHz 이상에서는 급격히 줄어들고 0.5kHz~2kHz 사이에서는 거의 일정하며 2kHz~3kHz에서는 서서히 커지게 된다. 이는 귀의 내부기관의 물리적 공명구조에 의한 선택적인 주파수의 수용에 기인한다. 한편 일반적으로 maximal sensitivity는 3kHz의 영역일때이다. 따라서 소리의 물리적인 세기가 일정할 때, 3kHz의 소리가 다른 영역의 주파수를 지닌 소리보다 더 크게 들린다. 이처럼 loudness는 소리의 물리적인 크기에 의해서만 결정되는 것이 아니고 소리의 주파수에도 의존한다. 주파수에 대한 loudness의 의존성은 그림 5의 curve를 보면 잘 알 수 있다. 이 curve는 equal-loudness contours, 또는 isophonic curves, 또는 Fletcher-Munson curves라고 일컬어진다⁶⁾.

여기서 우리가 관심있는 영역인 1kHz~3kHz에서의 주파수와와의 관계만을 살펴보면 1kHz~2kHz사이에서는 loudness가 거의 증가되지 않았고, 2kHz~3kHz사이에서 심하게 증가됨을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 분석된 실험 결과 및 이론적 해석과 잘 일치한다.

(2) Lyapunov exponent 해석

실험을 통해 얻은 각 뇌전위 신호의 자극의 반송 주파수에 따른 변화에의 민감성인 발산특성을 합리적으로 파악하기 위해 Lyapunov exponent value를 조사한다. 이때 테

이터의 갯수가 많을 수록 더 정확한 값이 얻어지므로 테이터의 개수를 6000개로 하였다. 방정식이 아닌 실험적인 결과로부터 Lyapunov exponent value를 계산하기 위해 논문¹¹⁾에서 제시된 방법을 적용하였다. 간단히 그 방법을 소개하면 다음과 같다. 먼저 time series 형태의 뇌전위 신호를 앞서 언급된 pseudo-phase space에 2차원으로 구현한 다음에 처음에 찍혀지는 점에서 출발하여 6000번째로 찍혀지는 점까지 진행하면서, 매 진행마다 다음과 같은 계산을 한다. 즉 해당되는 점에서 가장 가까운 점을 먼저 scanning을 통해 찾아낸 후 그 점까지의 거리를 계산하고, 각각 한 단계씩 진행시킨 점을 또 찾은 후 역시 두 점사이의 거리를 측정하여 두 거리의 비를 구한다. 이 작업을 본 연구에서는 6000번까지 진행하면서 매번 계산한 후 최종적으로 진행한 횟수로 나누어 그 평균값을 얻었다. 이 값이 바로 Lyapunov exponent value가 된다. 따라서 이 값으로 부터 pseudo phase space내에서 신호의 궤적이 얼마나 초기의 작은 변화에 따라 민감하게 변하는지(발산 특성)를 정량적으로 파악할 수 있다.

그림 6을 보면 자극의 반송 주파수가 커질수록 O2에 비해 T5부분의 뇌전위 신호의 발산정도(Lyapunov exponent)가 두드러진 dynamics를 보임이 확인된다. 또 하나의 특징은 T5부분의 Lyapunov exponent value가 반송 주파수가 커짐에 따라 함께 커져서 반송 주파수가 3kHz일 때 가장 커진다는 점이다. 이러한 두 가지 특성은 다음의 생리학적으로 밝혀진 상황과 관련지어 해석할 수 있다. 참고로 그림 7에서와 같이 청각 자극의 단속 주파수를 변화시켰을 때에는 앞에 언급된 두번째 특징이 나타나지 않음이 이미 조사되어져 있다¹²⁾.

수학적인 운동 방정식으로 기술되는 계의 안정성, 불안정성을 파악하기 위해 이용하는 Lyapunov exponent 값은 물리적으로 비선형적인 계에서의 혼돈 상태를 규정짓기 위해서도 적용된다^{13, 14)}. 즉, 한 개 이상의 양의 값을 갖는 Lyapunov exponent가 존재하면 그 계가 비선형인 경우 아주 불안정해지며 약간의 섭동에 대해서도 민감하게 반응하게 된다. 이는 위상공간내의 가까이 위치한 두 점이 급격히 서로 멀어지게 됨을 의미하기도 한다. 따라서 앞 단락에서 분석된 뇌전위 신호의 Lyapunov exponent의 특성에 대해 다음과 같이 해석된다.

첫째, T5에서 측정된 Lyapunov exponent값이 반송주파수값에 따라 역동적인 움직임을 보였다는 사실은 T5부분이 O2부분에 비해 더 다양한 혼돈적인 상태를 지니며 각 반송 주파수에 대한 정보를 잘 반영한다고 말할 수 있다. 둘째, Lyapunov exponent값의 변화가 청각자극의 반송 주

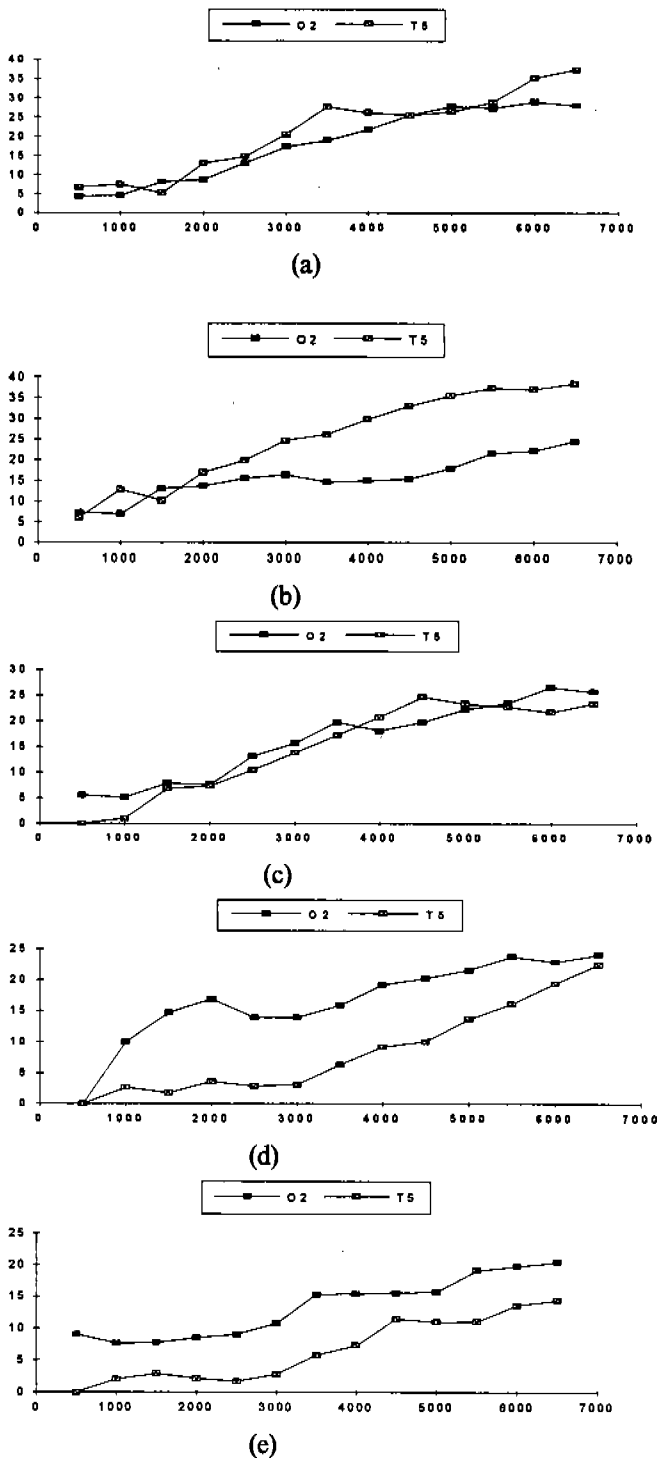


그림 6. 각 주파수에 따른 뇌전위 신호의 Lyapunov exponent value (y축: 임의 단위의 Lyapunov exponent value, x축: 샘플링 데이터갯수)

(a) 1kHz (b) 1.5kHz (c) 2kHz (d) 2.5kHz (e) 3kHz

Fig. 6. Lyapunov exponent of EEG signal responding to auditory stimulus of each pure tone.

(a) 1kHz (b) 1.5kHz (c) 2kHz (d) 2.5kHz (e) 3kHz

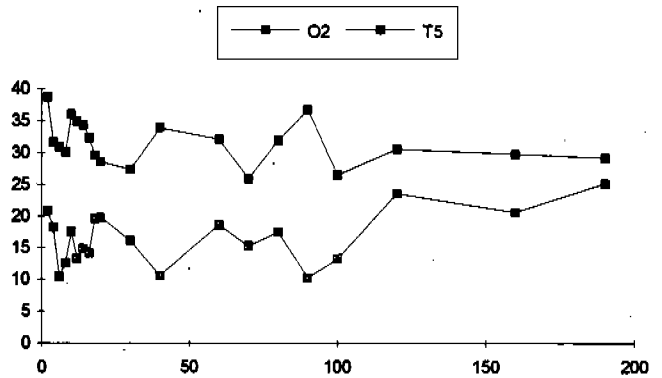


그림 7. 청각 자극의 단속 주파수에 따른 Lyapunov exponent value (y축: 임의 단위의 Lyapunov exponent value, x축: 각 단속 주파수의 값(Hz))

Fig. 7. Lyapunov exponent of EEG signal responding to auditory stimulus with each triggering frequency.

파수가 커질수록 함께 커지는 일정한 경향을 나타내는데, 이는 1kHz~3kHz범위 내에서 반송 주파수가 커질수록 각 혼돈 상태의 발산정도가 역시 커짐을 의미한다. 따라서 더 높은 반송 주파수를 지닌 소리의 변화는 더 큰 발산성을 지닌 비선형적인 뇌 신경계의 혼돈 상태에 의해 더욱 크게 되어 그 차이를 예민하게 느끼는 것으로 해석된다.

대뇌 피질에서 T5 부분이 O2에 비해 청각 인지 영역과 더 가까운 위치에 있으며, 청각 기관의 자극의 수용은 소리의 자극세기가 변하는 정도와 관련된다. 여기서 구별가 능한 최소한의 자극 세기의 차이는 differential threshold라 일컬어지며 ΔI 로 표기한다. 이 값의 여러가지 요소, 즉 주파수, 지연시간, base intensity level, pure 또는 complex sound의 종류 등에 의해 영향을 받는다. 주파수에 대한 differential sensitivity에 관련된 실험적인 결과는 다음과 같이 이미 잘 밝혀져 있다. Differential sensitivity가 가장 큰 주파수 영역은 대략 2.5kHz~3kHz이며, 이는 maximal sensitivity가 발생하는 영역과 일치한다. 그리고 주파수가 이 영역보다 높거나 낮아지면 differential sensitivity는 점차 줄어들게 된다. 또한 threshold detection에 대한 minimal intensity를 지닌 주파수 영역이 가장 큰 differential sensitivity를 지닌 영역과 같다. 이러한 사실은 Lyapunov exponent에 의해 나타나는 특징과 일치된다. 즉 2.5kHz~3kHz부분이 반송 주파수 변화에 대한 자극 수용이 가장 민감한 것이다.

결 론

본 연구에서 청각 자극의 다양한 반송 주파수에 반응하는 뇌전위 신호를 측정된 후 먼저 pseudo phase space의 분석을 통해 뇌전위가 자극의 반송 주파수와 특정한 상관관계를 지니며 그 진폭이 커짐을 파악하였다. 그리고 이러한 자극 세기 인지와 주파수 간의 상관 관계에 대해 이미 밝혀져 있는 생리학적 상황과 비교하여 잘 일치함을 보임으로써 생리학적 근거를 제시하였다. 그리고, Lyapunov exponent value의 계산을 통해 뇌전위가 pure tone의 청각 자극의 주파수에 따라 두 가지 특성이 있음을 파악하였다. 첫째 특징은 T5부분에서 얻은 신호가 O2에서 얻은 신호와 달리 반송 주파수 변화에 따라 두드러지게 변한다는 것이고 둘째 특징은 그 값이 주파수의 값이 커질 수록 점점 커져 3kHz일때 가장 크게 된다는 사실이다. 이 결과는 이미 밝혀져 있는, T5부분이 대뇌 피질의 청각인지 영역에 아주 가까우며 사람이 3kHz의 반송 주파수에서 다른 주파수에 비해 가장 민감하게 인지한다는 생리학적 사실과 관련지어 설명된다. 따라서 본 연구를 통해 청각 자극의 주파수를 인지하는 뇌의 mechanism을 뇌전위의 측정 및 분석에 의해서 조사 가능함을 보였고, 이는 이미 인지 심리학적으로 밝혀진 사실과도 일치함을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. H. Haken, Complex Systems-Operational Approaches in Neurobiology, Physics, and Computers, New York; Springer-Verlag, 1985.
2. Claire Koch, Reinhard A. Palovcik, Basim M. Uthman, Jose C. Principe, "Chaotic Activity During Iron-Induced 'Epileptif-

- orm' Discharge in Rat Hippocampal Slice", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, vol. 39, No. 11, November, 1992.
3. 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.
4. William Deering, Bruce J. West, "Fracta Physiology", *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, pp. 40-46, June, 1992.
5. D. S. Broomhead and Gregory P. King, "Extracting qualitative dynamics from experimental data", *Physica D*, vol. 20, pp. 217-236, 1986.
6. H. R. Schiffman, *Sensation and Perception*, John Wiley & Sons, 3rd ed., 1990.
7. John R. Carmeron, James G. Skofronick, *Medical Physics*, John Wiley & Sons, 1986.
8. B. H. Bae, J. M. Choi, W. Han, S. Y. Kim, C. Y. Park, C. H. Kim, S. T. Kim, "Studies on the Detection of Visual-TEP with Average Method & the Improvement of TEP with DC-Drift Elimination", *Journal of KOSOMBE*, vol. 15, pp. 135-142, 1994.
9. Richard Srebro, Rose M. Oguz, Keith Hughlett, Philip D. Purdy, "Estimating Regional Activity from Evoked Potential Fields on the Scalp", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-40, pp. 509-516, June, 1993.
10. Marjorie A. England, Jennifer Wakely, *Color Atlas of the BRAIN & SPINAL CORD*, Mosby-Year Book, 1991.
11. Alan Wolf, Jack B. Swift, Harry L. Swinney, and John A. Vastano, "Determining Lyapunov exponents from a time series", *Physica D*, vol. 16, pp.285-317, 1985.
12. J. M. Choi, B. H. Bae, S. Y. Kim, "Chaotic dynamics in EEG signals responding to auditory stimulus with various triggered frequencies", *Journal of KOSOMBE*, vol. 15, pp. 237-243, 1994.
13. Francis. C. Moon, *Chaotic Vibration*, John Wiley & Sons, 1987.
14. G. L. Baker, J. P. Gollub, *Chaotic Dynamics*, New York; Cambridge University Press, 1990.

=국문초록=

일정한 단속 주파수(triggered frequency)를 지닌 청각자극의 반송 주파수(carrier frequency, pure tone)를 1kHz에서 3kHz까지 0.5kHz단위로 증가시키면서, 이에 반응하는 뇌전위를 디지털 EEG 측정장치를 이용하여 총 7초 동안 1kHz의 sampling frequency로 컴퓨터로 전송하였다. 먼저 신호의 pseudo-phase space 분석을 통해 뇌전위의 진폭특성을 파악하였다. 이러한 해석은 생리학적으로 밝혀진 소리의 반송주파수와 소리의 크기 인지사이의 상관관계와 잘 일치함이 확인되었다. 또한 이 신호의 Lyapunov exponent 분석을 통해 신호의 발산 특성을 물리적으로 파악하고, 이러한 특성을 이미 여러가지 접근법에 의해 밝혀져 있는 생리학적 실험결과와 관련지어 해석함으로써 반송 주파수에 반응하는 뇌의 mechanism을 뇌전위 측정에 의해서 검출이 가능함을 확인 할 수 있었다.