

혈중 알코올 농도에 따라 반응하는 뇌활동도의 카오스분석

오영직\*, 이종호  
 인하대학교 공과대학 전기공학과

Chaotic Analysis of Brain Activity with Varying Blood-Alcohol Level

Young Jik Oh\*, Chong Ho Lee  
 Department of Electrical Engineering, In-Ha University

**Abstract** - 본 논문의 목적은 음주섭취로 인한 혈중 알코올 농도에 따른 뇌의 활동도변화를 측정, 분석하는데 있다. 1차원 시계열데이터인 EEG신호는 생체 비선형 동역학 시스템으로부터 발생하는 Deterministic Nonlinear Chaos신호로써 무작위적인 신호와는 구분되어질 수 있다. EEG시계열데이터를 위상공간에 적절한 어트랙터로 재구성하여 상관차원, 최대발산지수 등의 카오스 지수들을 추출하여보면, EEG시계열데이터가 무작위적인 계에서 발생하는 랜덤한 신호가 아닌 카오스계에서 기인함을 알 수 있고, 인간의 정신상태에 따른 뇌의 활동도를 정성적, 정량적으로 판별해 볼 수 있다. 이러한 카오스 분석방법을 토대로 음주전의 뇌의 활동도와 음주후 혈중알코올 농도에 따른 뇌의 활동도변화를 EEG의 카오스 지수들의 변화를 통해 분석해 보았다.

신호를 시간에 따라 측정된 데이터는 그 계의 동력학적 정보를 갖는데 1차원 측정 시계열을 위상공간에 적절히 재구성하는 과정을 매립이라고 말하고, 위상공간에 재구성하는 방법은 Ruelle-Takens 정리에 의한 지연좌표방법을 이용한다. m차원 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{X} = \{x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1) \cdot \tau)\} \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 지연시간, m은 매립차원이고 시스템의 모든 상태는 위상공간에서 점인  $\vec{X}$  로써 표현되어진다.

1. 서론

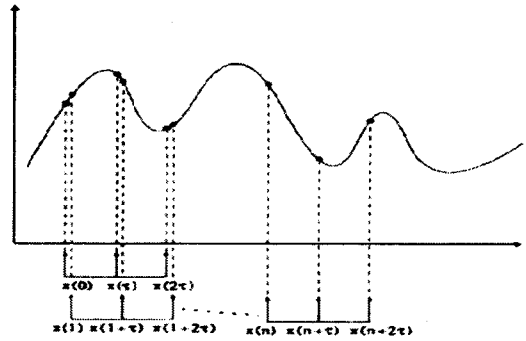
비선형적인 특성을 보이는 뉴런으로 구성된 뇌와 같은 생체 동역학 시스템을 이해하고 해석하는데 비선형적인 분석방법이 요구되어진다. 카오스 분석을 통해 간과되던 쉬운 신호의 복잡한 변화 속에 숨겨진 동역학정보를 얻어냄으로써 진단, 치료 등에 다양한 정보를 제공할 수 있다. 의학계에서는 항상성을 근거로 하여 건강한 생체의 다이내믹스는 규칙적이고 예측 가능하다고 생각하였으나 최근의 연구에 의하면 건강한 생체 시스템의 동역학적 특성은 카오스이며, 질병, 약물중독, 노화 등으로 카오스가 감소한다는 결과들이 보고되고 있다.

본 논문에서는 시계열 분석 방법으로 자주 사용되는 푸리에 변환에 의한 파워 스펙트럼 분석이나 상관함수 등의 선형이론으로 비선형적인 카오스 역학계의 성질을 이해하는데 한계가 있다고 보고, 카오스 역학계의 특징인 초기조건 민감성에 의한 궤도 불안정성, 장기 예측 불가능성, 자기 상사성 등을 정량화 한 상관차원, 최대발산지수 등의 지수들을 이용하여 혈중 알코올 농도에 따른 뇌의 활동도 변화를 분석해 본다. 혈중 알코올 농도는 음주측정기로 측정하여 1단계(0.02~0.04%)와 2단계(0.05~0.09%)로 나누어 변화를 관찰한다.

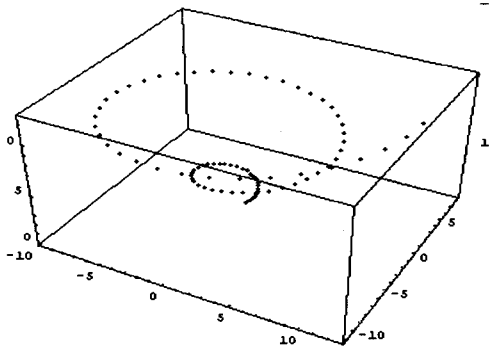
2. 본론

2.1 어트랙터 재구성

동역학 시스템의 상태를 매 순간 위상공간의 점으로 상상하여 관찰하면 시스템의 초기 조건이 주어지고 천이상태와 안정 상태가 유한할 때, 안정한 시스템은 고정점(Fixed Point)을 향해 궤적을 그리다가 이 점으로 수렴하게된다. 주기적인 신호는 완전한 폐곡선(Limit Cycle)을 그리고 여러 주기를 갖는 시스템은 고리 모양의 궤적(Torus)등을 보이는데 이러한 어트랙터는 예측 가능한 시스템이 된다. 특이한 모양의 궤적으로 보이지만 비정수의 dimension을 갖는 카오스 어트랙터는 초기조건에 민감하여 초기에 가까운 두 점이라도 시간이 지남에 따라 지수 함수적으로 그 거리가 멀어진다.



(a) 시계열공간



(b) 위상공간

그림1. 시계열공간에서 위상공간으로 매립되는 과정

위상공간 재구성에 있어서 적절한 지연시간을 결정하는 것이 중요하고, 지연시간의 선택이 위상공간에서 궤적의 분포에 영향을 준다. 스칼라 시계열을 m차원 위상공간에 재구성하기 위해서는 시계열의 시간적 관련성이 최소가 되는 값으로 독립적인 좌표를 설정해야 한다.

일반적으로 지연시간을 너무 작게 설정하면 위상공간에 재구성된 m차원 상태벡터들의 상호관련성이 커져서 어트랙터가 대각방향으로 분포하고, 반대로 지연시간을 너무 크게 하면 상태벡터들의 관련성이 없어서 어트랙터가 전체 위상공간에 퍼지게 된다.

지연시간을 결정하기 위해서 자기상관함수를 구하여 최초로 '0'이 되는 시간을 기준으로 한다.

### 2.2 상관차원 (D2)

상관차원은 카오스 시스템을 정량적으로 분석하는 방법으로 대표적인 것이다. 위상공간 상에 있는 어트랙터의 프랙탈 차원으로 어트랙터의 전역적인 기하학적 구조를 정량화 하는 양이다. 매립차원은 그 계의 미분방정식의 수와 관계가 있고, 상관차원은 케적들에 의해 점유되는 위상공간의 영역으로 정의된다. 따라서 상관차원이 큰 계열수록 복잡한 구조를 가진다.

$$C(R) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N H(R - |\vec{X}_i - \vec{X}_j|) \quad (2)$$

상관차원은 식(2)의 상관적분을 통해서 얻어질 수 있다. 여기서 N은 위상공간에서의 전체 데이터의 개수이고, H(y)는 Heaviside function (1 if y ≥ 0, 0 if y < 0)으로, 상관적분 C(R)은 반지름 R에서 point의 평균 비율이 된다. 어트랙터가 2차원 평면이라면 C(R) ~ R<sup>2</sup> 가 되고, 고정점(Fixed point)이라면 C(R) ~ R<sup>0</sup> 이 되는데 이를 일반화 시키면 C(R) ~ R<sup>D2</sup> 가된다. 데이터의 개수와 매립차원이 충분히 크다면, 다음과 같이 상관차원을 얻을 수 있다.

$$D_2 = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\log C(R)}{\log R} \quad (3)$$

즉, 상관적분값을 반경 R에 대하여 log-log 그래프로 나타낼 때의 기울기이다.

어트랙터의 정확한 상관차원을 얻기 위해서는 여러 매립차원에서의 변화율을 측정하는데 결정계에서 나온 신호에서 얻은 어트랙터라면 변화율이 수렴된다. 그 수렴되는 매립차원에서의 변화율을 상관차원으로 추출한다.

### 2.3 최대발산지수(Primary Lyapunov Exponent)

상관차원이 카오스 역학계의 기하학적 구조를 정량화 한 양이라면 최대발산지수는 역학적인 성질을 정량화 한 값이다.

계의 상태는 위상공간의 각 점으로 대응되어져 시간이 지남에 따라 케적을 형성하게 되는데, 카오스계인 경우가 케적은 초기값이 약간만 달라지더라도 달라지기전의 케적과는 매우 다른 케적을 따라 움직이는 특징이 있다. 이를 초기조건에 대한 민감성이라고 한다. 초기 위치에서의 작은 거리 차이가 시간이 경과함에 따라 얼마나 지수 함수적으로 멀어지면서 발산하는지를 정량화하는 양을 최대발산지수라고 하고 구하는 식은 다음과 같다.

$$L_1 = 1/(t_k - t_0) \sum \log \frac{L'(t_i)}{L(t_{i-1})} \quad (4)$$

초기에 가까운 두 점사이의 거리 L 이 결정되고, 정해진 전개시간 k가 흐른 후 두 점사이의 새로운 거리 L' 을 계산한다. 이러한 작업을 케적위의 모든점에서 반복하여 그 평균값을 취한다. 주기적인 신호의 경우에는 0 을 나타내며 카오스 신호의 경우엔 양의 값을 나타낸다. 무작위적 신호의 경우에도 양의 값을 나타내지만 매립차원에 따른 상관차원값의 수렴성은 보이지 않는다.

## 3. 실험결과 및 고찰

뇌파신호의 추출과정과 분석과정을 도식화해 보면 다음과 같다.

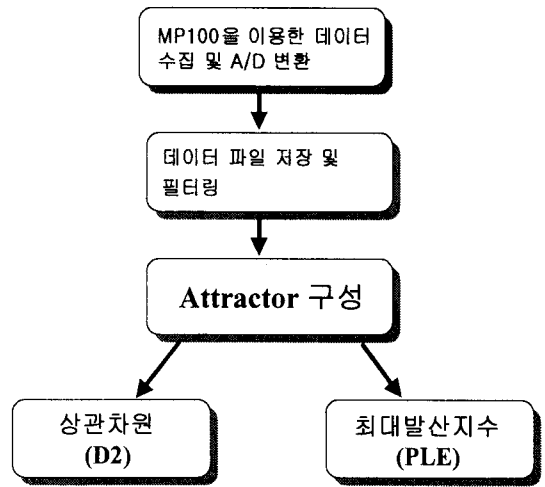


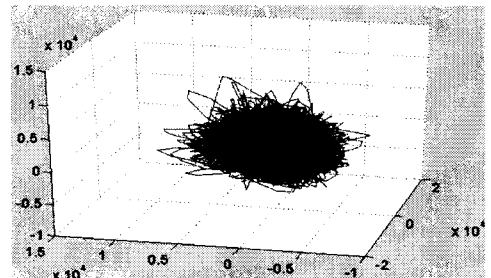
그림2. 뇌파 분석과정

실험은 MP100을 통해 피 실험자가 23%의 알코올농도를 갖는 술을 섭취하기전과 술을 섭취한 후 혈중 알코올 농도를 1단계(0.02~0.04%)와 2단계(0.05~0.09%)로 나누어 측정해 가면서 뇌파를 수집하였다. 전극은 공인된 전극 배치법인 10-20시스템에 따라 F3과 F4의 위치에서 각각의 뇌파를 측정하였다.

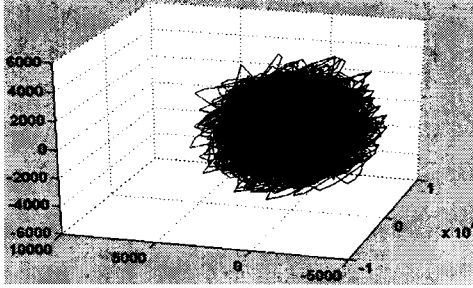
혈중 알코올 농도는 음주측정기로 측정을 하였고, 정확한 혈중 알코올 농도를 위해서 피 실험자가 술을 섭취한 후 20분 후에 측정을 하였다.

뇌파수집시 술을 섭취하기 전과 섭취한 후에 피 실험자가 같은 조건에 있게 하기 위해서 눈을 감게 하고 클래식음악을 들려주어 최대한 편안한 상태가 되도록 하였다. 각각의 상태에서 뇌파는 256Hz의 주파수로 A/D변환을 하였으며 artifact의 영향을 고려하여 0.5Hz이하의 저주파부분과 50Hz의 고주파부분을 필터링해서 제거하였다. 이렇게 하여 각 전극당 약 61,000개(240초)의 데이터를 수집하였다.

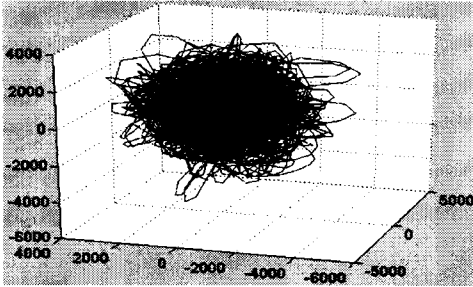
그림3은 F3전극에서의 각 상태별 뇌파신호를 3차원 위상공간으로 사상한 후 어트랙터를 구성한 결과이다. 미분 방정식으로부터 발생된 Lorenz 어트랙터나 Henon어트랙터 등과 같은 일관되고 뚜렷한 형태는 보이지 않지만, 술을 섭취한 후 뇌파의 어트랙터가 술을 섭취하기 전 뇌파의 어트랙터보다 좀더 작은 크기의 직경을 갖고 분포를 함을 알 수 있었다.



(a) 알코올 섭취 전



(b) 알코올 섭취 후 1단계



(c) 알코올 섭취 후 2단계

그림3. 각 상태에서의 뇌파의 어트랙터

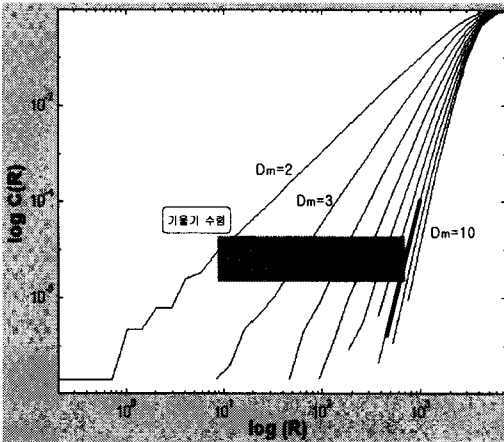


그림4. 매립차원에 따른 뇌파의 상관적분 곡선

그림4는 매립차원(Dm)을 2차원부터 10차원까지 변화 시켜가면서 R에 따른 C(R)의 변화를 log-log plot한 것이다. 곡선의 기울기를 선형 증가구간에 대해 직선 fitting하여 보면, 매립차원이 증가되면서 기울기가 포화되는 특성을 보인다. 이때의 포화되는 기울기를 상관차원값으로 취한다.

표1은 피실험자 6명의 상관차원값과 최대발산지수를 각 전극에 대해 평균하여 나타낸 것이다. 알코올 섭취 후의 상관차원값이 섭취 전보다 낮게 나왔음을 알 수 있다. 일반적으로 뇌의 활동도가 높을수록 상관차원의 값이 낮게 나오는 특성으로 미루어 볼 때, 알코올 섭취 후의 뇌활동도가 섭취 전보다 증가됨을 알 수 있다. 최대발산지수는 그다지 큰 차이를 보이지는 않았으나, 양의 값을 확인함으로써 측정전극에서의 뇌파가 카오스 특성을 보임을 확인하였다.

표1. 알코올농도에 따른 상관차원과 최대발산지수의 변화

알코올 전극 농도	상관차원 (D2)		최대발산지수 (PLE)	
	F3	F4	F3	F4
알코올 섭취 전	6.3760	6.2798	0.0833	0.0704
알코올 섭취 후 1단계	5.5442	5.6965	0.0860	0.1024
알코올 섭취 후 2단계	5.1708	5.2042	0.0791	0.0799

본 논문에서는 알코올 섭취 전과 섭취 후 뇌파를 카오스 지수를 통해 뇌활동도의 변화를 살펴보고 알코올이 뇌기능에 영향을 미침을 확인 할 수 있었다. 앞으로 다양하고 많은 실험을 한다면, 인간의 뇌기능에 영향을 미칠 것으로 예상되는 각종약물에 대한 뇌활동도 변화양상을 카오스 지수로써 보다 객관적인 지표를 수립할 수 있을 것이다.

(참 고 문 헌)

[1] Rodrigo Quian Quiroga, "Quantitative analysis of EEG signals : Time-frequency methods and Chaos theory", 1998  
 [2] G. L. Baker and J. P. Gollub, "Chaotic Dynamics", 1996  
 [3] Kathleen T. Alligood, Tim D. Sauer, James A. Yorke, "Chaos -An Introduction to Dynamical System", 1997  
 [4] 김택수 외4, "카오스 특성에 의한 뇌의 활동도분석", 전기학회논문지, 제48권, pp 478~485, 1999  
 [5] Alessandra Celletti, "Low-dimensional chaotic attractors in the rat brain", Biological Cybernetics, 74:pp 387~393, 1996  
 [6] Grassberger P. Procaccia I, "Measuring the strangeness of strange attractors", Physica D 9:189~208, 1983