

생물 복잡계와 카오스

· 한 승 기 | 충북대학교 물리학과, 교수 / e-mail : skhan@chungbuk.ac.kr

이 글에서는 생물 복잡계의 카오스 리듬과 생체리듬의 동기화현상 등에 대해 설명하여 생물 복잡계와 카오스에 대해 알아본다.

연주회장에서 공연이 끝나면 청중은 박수 갈채로 연주에 감사하는 마음을 표현한다. 이때 감사하는 정도는 박수의 세기와 리듬으로 잘 표현된다. 연주가 보통인 경우에는 의례적인 박수로 끝나지만, 훌륭한 연주인 경우에 먼저 우레와 같은 박수 갈채가 터져 나온다. 이러한 열광적인 박수 갈채는 계속되기가 너무 힘이 들어서 박수의 템포가 서서히 느려진다. 리듬이 늦어지면 청중들끼리의 상호 교감에 의해서 박수 리듬이 맞추어져 모든 청중이 다함께 박자를 맞추어 박수를 보내는 동기화 리듬으로 변화한다. 이때 "앵콜! 앵콜!"이라는 연호를 곁들이게 되면 동기화는 더 잘 일어날 수 있다. 모든 청중이 다함께 치는 박수에 자극을 받아서 청중은 다시 열렬한 우레와 같은 박수로 반응하고, 이어서 동기화 리듬으로 이어지는 것이 몇 번 반복된 이후에야 비로소 박수 달레가 끝나게 된다. 이러한 현상은 대부분의 연주회장에서 흔히 경험할 수

있는 것으로서 청중, 시간 그리고 장소에 상관없이 일어나는 아주 보편적인 현상이다. 청중이 다함께 만들어내는 리듬은 소음이나 다른 리듬에 의해서 쉽게 깨어지지 않는 안정성이라는 좋은 특성도 가지고 있다. 순전히 청중들 사이의 상호작용으로 자발적으로 조직화되어 일어나는 이러한 리듬은 어떻게 가능하며, 구성원이 다양하게 구성되었음에도 불구하고, 또한 장소와 시간이 다름에도 불구하고 유사한 일이 계속 일어날 수 있는가? 이러한 질문이 수많은 개체로 구성된 복잡계에 과학자들이 높은 관심을 가지게 되는 동기가 된다.

자연에는 이와 같은 동기화현상이 다양한 형태로 나타난다. 일례로 동남아시아에서 흔히 볼 수 있는 현상으로서 저녁 무렵이 되면 수만 마리의 반딧불이 가로수에 불어서 제각기 다른 리듬으로 불빛을 반짝이다가 시간이 지남에 따라서 서서히 동기화현상이 나타난다. 두뇌 대뇌 피질에서는

동시에 발화하는 신경 세포들의 발화 리듬을 이용하여 감각 정보가 처리되기도 한다. 또 어떨 때는 너무 과도하게 수많은 뉴런들이 발화를 하여 정상적인 운동이 불가능하게 되는 간질현상으로 발전될 수도 있다. 연주회장에 모인 관객이 박수를 치는 주기는 일반적으로 모두 같지 않을 것이다. 마찬가지로 개뿔벌레의 반딧불 주기, 신경 세포의 발화주기도 제각기 다를 것이다. 그럼에도 불구하고 모든 개체가 만들어내는 공통된 리듬은 어떻게 형성될까?

자연에서 관측할 수 있는 여러 가지 리듬은 제각각 다른 리듬을 가진 개체들 사이의 상호작용으로 개체 단위에서는 볼 수 없는 전체 단위의 새로운 리듬으로 형성될 때가 많다. 복잡계, 특히 생물 복잡계에서 각 구성 개체들 사이의 상호작용에 의하여 자발적으로 형성되는 창발적 집단현상이 형성되는 과정을 이해하는 것이 최근 자연 과학의 주요한 연구 방향이 되고 있다. 이러한 현상은

일찍이 화학-반응계에서 보여주는 다양한 문양의 형성, 레이저 발진, 그리고 초전도체현상 등 다양한 물리-화학계에서 관측되었던 현상들이다. 복잡계에 대한 연구는 최근 자연과학뿐만 아니라, 경제계, 사회계 등에서 일어나는 거시적 현상을 이해하려는 시도로 활발하게 진행되고 있다.

생물 복잡계의 특성을 이해하기 위한 노력은 다음의 두 단계로 나누어 볼 수 있다. 먼저, 생물 복잡계에서 관측되는 다양한 리듬, 특히 카오스 신호의 특성을 분석하고자 하는 시도를 들 수 있다. 비선형 시계열 분석, 동기화 분석 그리고 시공간 패턴 분석 등이 최근에 많이 적용되고 있는 분석 방법이라고 볼 수 있다. 두 번째는 이러한 리듬이 각 개체 단위에서 어떻게 만들어지고, 전체 계에서는 어떻게 될 것인지를 이해하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 생물 복잡계를 구성하고 있는 개체들 사이에 형성되어 있는 네트워크의 구조적 연결 특성을 이해하는 것이 필수적이다. 궁극적으로는 이 두 가지 측면은 하나로 통합된 시스템에서 분석이 되어야 하는데, 최근에는 다양한 생물 복잡계에 대한 대규모 시뮬레이션을 통하여 복잡계의 현상을 이해하려는 시도가 활발히 진행되고 있다.

생물계의 카오스 리듬

병원에서 환자 옆에 놓여 있는 심전도에서 들려오는 규칙적인 맥박 신호는 어떨 때는 너무 단조

로울 때가 있다. 그러나 그 맥박이 멈춤과 함께 생명이 멈추는 광경을 목격하게 되면, 심전도에서 규칙적으로 나타나는 펄스신호에 어떤 의미로는 경외감을 느끼게 된다. '리듬=생명력'이라는 인식은 생체계가 보여주는 여러가지 리듬의 발생과 소멸 과정에 관심을 갖게 되는 동기가 된다.

일반적으로 비선형 동역학 계가 보여주는 동역학 특성은 세 가지 끌개, 즉, 고정점 끌개, 주기적 끌개, 카오스 끌개로 나뉘 수 있다. 여기서 끌개라고 하는 것은 처음 상태는 다르지만 최종적으로 접근하게 되는 위상 공간상의 구조적 특성을 이야기한다. 고정점 끌개는 시간이 경과함에 따라서 최종적인 상태가 시간에 따라서 변화가 없는 일정한 상태로 도달하는 것이다. 위상 공간에서 이것은 하나의 점으로 표시되기 때문에 고정점 끌개라고 한다. 주기적 끌개는 최종 상태가 시간에 따라서 주기적으로 반복되는 상태를 의미하며, 카오스 끌개는 최종 상태가 특정한 상태에 도달하지 못하고 초기 조건에 민감한 불규칙적인 리듬이 반복되는 상태에 속한다.

많은 경우에 생체계에서 관측되는 신호는 비선형계에서 관측하는 뚜렷한 끌개 구조를 보여주지 못하는 경우가 많다. 그림 1은 간질 환자의 두피 내 뇌파를 간질이 발생하기 이전에 측정된 것이며, 그림 2는 간질이 발생하기 직전에 측정된 뇌파는 매우 불규칙하여 특정한 동역학 특성이

있는지 파악하기 어렵다. 반면, 간질 기간 동안의 뇌파는 뇌파의 진폭이 클 뿐 아니라, 매우 규칙적인 리듬을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 주기적 리듬도 시간에 따라서 시시각각 변화하는 불규칙성이 있는 카오스 신호라는 것을 알 수 있다. 생체 신호의 카오스 특성을 분석하는 방법의 하나로 시계열 신호 $X(t)$ 를 이용하여 카오스 끌개를 재구성할 수 있다. 원래의 시계열 $X(t)$ 와 시간 지연 항을 이용하여 구성한 위상 공간 좌표계 ($X(t), X(t+\tau), X(t+2\tau), \dots, X(t+(n-1)\tau)$)을 이용하여 n -차원 위상 공간에서 원래의 끌개 구조를 재생할 수 있다. 시간 지연 τ 는 $X(t)$ 의 자기상 관관계가 영으로 접근하는 값으로 택하며, 카오스 상태를 탐다하고자 하는 위상 공간의 매립 차원 n 은 저차원에서 시작하여 구조적 특성(예를 들면 실제로는 위상 공간에서 이웃하는 점들이 아니나, 저차원 위상 공간에서 매립하는 경우 잘못 이웃한 점으로 인식되는 점들의 수)이 더 이상 변화하지 않는 충분히 큰 값으로 잡으면 된다. 그림 1의 재구성 그림에서 보여주는 바와 같이 정상 상태에서는 뇌파의 높은 복잡성을 보여주는 구조로서 잡음과 거의 구별이 되지 않는다. 그러나 간질 발작 기간 동안의 뇌파(그림 2)의 위상 공간 재구성에서는 뚜렷한 위상 공간 구조를 보여준다.

생체 신호의 분석에서 중요한 관심의 대상은 측정된 생체 신호가 비선형 동역학계의 결정론적 특성을 가지고 있는지, 아니면 확

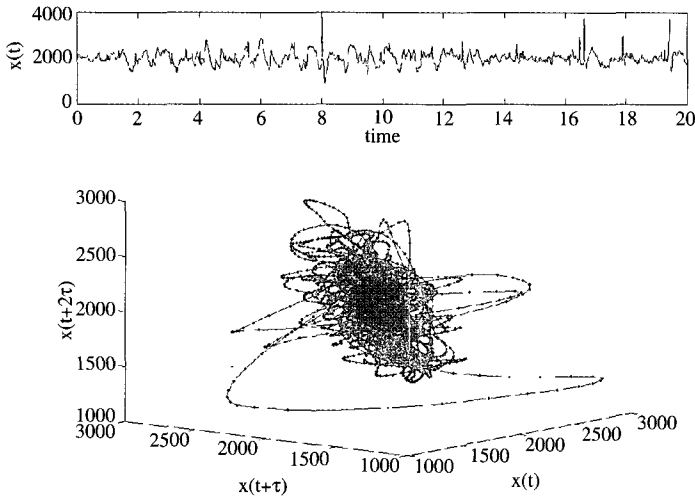


그림 1 간질 발생 직전의 뇌파와 3차원 위상 공간에서의 재구성

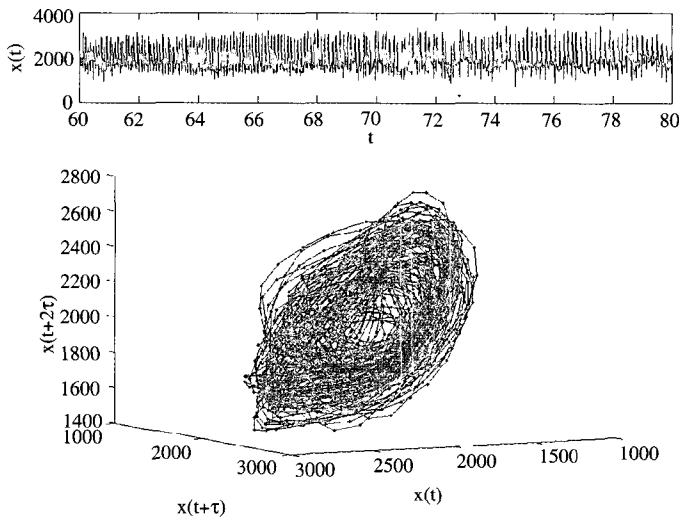


그림 2 간질 발작 시기의 뇌파와 3차원 위상 공간에서의 재구성

를 과정에 의해서 형성되는 무작위적 특성이 있는지를 밝히는 것이다. 이것을 정량화하기 위한 지표로서 현 시점 이전의 신호를 이용하여 가까운 미래의 신호를 얼마나 잘 예측할 수 있는지 여부를 채택할 수 있다. 그림 1의 재구성처럼 간질 발생 이전의 뇌파는 위

상 공간 경로가 복잡하게 얽혀 있으므로 현 지점 이후에 경로가 어디로 이동할지 예측하기가 어렵다. 이로 미루어 발작 발생 이전의 뇌파는 확률 과정에 의해서 형성되는 무작위성을 가지고 있거나, 아니면 비선형 동역학계에 의해서 형성되었다 하더라도 뇌파

에 섞여 있는 여러가지 잡음에 비하여 신호가 너무 낮아서 동역학 특성을 구분하기 어려운 경우일 수도 있다. 따라서 생체 신호 분석에서는 생체 신호에 내재하는 여러 가지 잡음의 효과를 분리하여 생체 신호 고유의 동적 특성을 밝히는 것이 중요한 관건이 된다.

반면, 그림 2의 재구성처럼 간질 기간의 뇌파는 뚜렷한 위상 공간 구조를 가지고 있으므로 비선형 동역학계의 결정론적 특성을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이로써 간질 기간의 뇌파는 비교적 저차원 카오스 특성을 가지는 것으로 볼 수 있다. 간질이 발생하기 전에는 높은 복잡도를 가지는 뇌파가 간질 발작 기간 동안에는 낮은 저차원 카오스로 뇌파의 복잡도가 낮아지는데, 그 이유는 무엇일까? 뇌파를 형성하는 두뇌 신경계는 무수히 많은 신경세포들이 참여하고 있는 모듈들의 네트워크로 구성되어 있으며, 각각의 모듈은 기능에 따라서 다양한 리듬을 발생할 수 있다. 따라서 다양한 리듬으로 구성된 정상시의 뇌파는 고차원 복잡도를 가지는 것으로 볼 수 있다. 그런데 간질 발작 기간 동안에는 이런 리듬들이 하나의 리듬으로 통일되어 뇌파의 진폭도 클 뿐 아니라, 동역학 특성도 복잡도가 낮은 저차원 카오스 특성을 가지는 것으로 본다.

일반적으로 생물계는 대부분 무수히 많은 개체로 구성되어 있다. 각 개체가 각기 약간씩 다른 리듬을 보인다면 일반적으로 엄

참나게 복잡한 리듬이 될 수밖에 없다. 그러나 실제 관측되는 생체 신호는 복잡하지만 어느 정도 규칙성을 가지고 반복적으로 나타나며, 또한 어떻게 시작하더라도 최종 상태는 거의 일정한 끌개 구조를 가지고 있다. 무엇이 많은 개체로 구성된 계에서 비교적 저차원의 간단한 리듬을 만들어내는 역할을 하는가? 이것은 각 개체 상호 간의 상호작용에 의하여 저절로 형성되는(창발적) 전체적인 협동현상으로 그 근간에는 서로 다른 리듬 사이의 동기화 현상이 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다.

생체 리듬의 동기화현상

생물계에서 발생하는 다양한 리듬은 많은 경우에 독립적으로 존재하지 못하고 다른 리듬과 서로 영향을 주고받는다. 걸어가갈 때 양팔의 리듬은 비교적 규칙적이다. 만약 한쪽 팔을 고정시키고 걸어가면 나머지 팔의 움직임이 훨씬 더 불규칙적으로 된다. 이것은 양팔 움직임이 서로 영향을 미치는 것을 의미한다. 심장은 일본간에 대략 20번 정도 박동하며, 호흡수는 대략 60번 정도이지만 활동 상태에 따라서 맥박이나 호흡수는 변화한다. 예를 들어, 운동을 할 때에는 신체 근육에 많은 에너지를 공급하기 위하여 혈액의 공급을 늘리기 위하여 맥박수가 증대하고, 따라서 호흡수도 증대하게 하며, 명상 중이거나 수면 중에는 감소하게 된다. 이것은 두 계가 서로 직접적이건, 혹은 간접

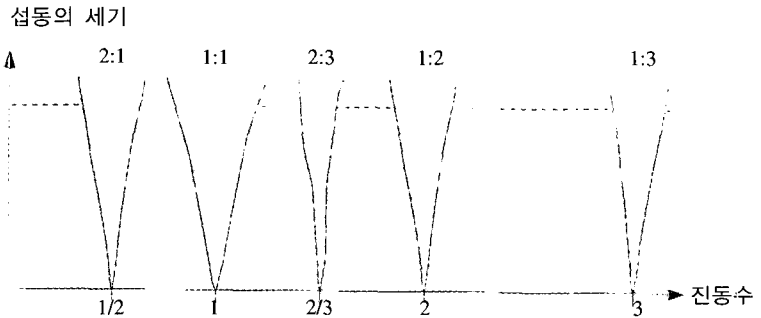


그림 3 주기적 섭동을 받는 circle map에서 형성되는 동기화 영역. 각 진동수 ω 와 섭동의 세기 ϵ 에 따라서 섭동 주기와 실제 회전 주기의 비를 표시함

적인 건 어떤 경로를 통하여 서로 상호작용하고 있음을 의미한다. 서로 영향을 미치고 있는 두 신호를 동시에 측정하였을 때, 둘 사이의 상호작용 효과는 어떻게 나타날까?

일찍이 17세기 네덜란드 과학자 호이겐스는 주기가 약간 다른 두 개의 추시계의 움직임을 관측하고 있었다. 가까이 있는 두 개의 추시계는 점차 시간이 지남에 따라서 점차 동기화가 되는 것을 관측하였다. 두 시계 사이의 공기의 진동, 벽의 진동을 통하여 두 추시계는 상대방에 영향을 미치게 되는데, 이것이 두 추시계가 동기화가 되는 원인이 됨을 밝혔다. 제일 간단한 물리적 주기 진자인 두 개의 추시계가 서로 상호작용에 의해서 동기화된다는 것은 일반적으로 다른 형태의 주기적 리듬, 즉 생물학적 생체 리듬 사이에서도 동기화가 가능함을 의미한다. 어떻게 주기가 다른 두 개의 진동자가 동기화가 될까?

두 진동자 사이의 동기화 현상을 분석하기 위하여, 각속도가 ω

인 진동자를 일정한 지점마다 섭동을 가했을 때 진동자와 섭동 사이의 위상 관계를 간단히 일차원 원사상 $\Theta(n+1) = \Theta(n) + \omega + \epsilon/2\pi \sin(2\pi \Theta(n))$ 을 이용하여 간단하게 기술할 수 있다. 이 식에서 Θ 는 진동자의 위상각을 나타내고, ω 는 진동자의 각속도를 나타낸다. 섭동은 세 번째 비선형 항으로 나타내는 데, 진동자의 위상 Θ 에 따라서 섭동의 크기가 규칙적으로 변화한다. 섭동의 세기는 변수 ϵ 로 조절된다.

그림 3은 진동수 ω 와 섭동의 크기 변수 ϵ 에 따라서 평균 회전수가 어떻게 되는가를 보여주는 그림이다. 변수 ϵ 가 영이면, 진동자는 매 시간마다 일정한 위상각 ω 만큼 증가하므로 오랜 시간이 경과하였을 때 실제 회전각은 경과한 시간에 진동수 ω 를 곱한 값으로 주어진다. 따라서 이 기간의 평균 회전수는 회전각을 경과한 시간으로 나눈 값, 즉 ω 가 된다. 그런데, 변수 ϵ 가 영이 아니면 비선형 항에 의해서 예기치 않았던 현상이 일어난다. 그림에서 ω 가

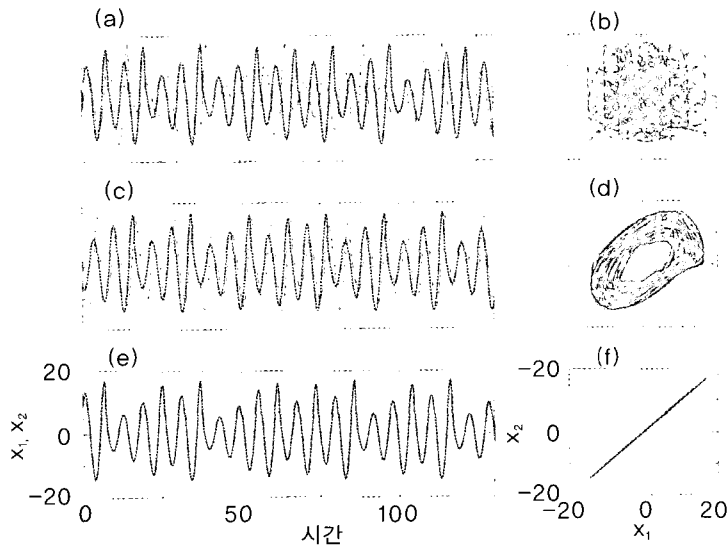


그림 4 두 카오스 신호 사이의 동기화. (a) 상호 결합이 작으면 두 신호 X_1 과 X_2 사이에는 상관관계가 없는 비동기화가 되며, (b) X_1-X_2 평면에 그린 경로는 전체 평면을 다 채우게 된다. (c) 상호 결합이 커지면 두 신호의 크기 사이에는 상관관계가 없지만 일정한 위상관계를 유지하는 위상동기화가 되며, (d) X_1-X_2 평면에 그린 경로는 원형을 그리며, 둘 사이에는 일정한 위상관계가 유지된다. (e) 상호 결합이 충분히 커지면 두 신호의 크기가 완전히 일치하는 완전동기화가 되며, (f) X_1-X_2 평면에서는 대각선 상에 놓이게 된다.

1보다 약간 적거나 약간 큰 경우에(그림에서 진동수 1위에 형성된 역삼각형 영역) 평균 회전수는 모두 1로 고정되는 것을 알 수 있다. 따라서 이 영역에서는 진동수 ω 가 1과 약간 다르나 평균 회전수가 중심으로 약간씩 벗어난 영역에서도 비선형 항에 의해서 평균회전수가 1로 고정되어서 주기적인 섭동 주기와 실제 회전 주기가 1:1을 유지한다. 마찬가지로 $\omega=1/2$ 근처에서는 섭동과 회전이 2:1이 되는 영역이 존재한다. 그리고 $\omega=2$ 근처에서는 1:2의 동기화 영역이 형성된다. 이외에 무수히 많은 동기화 영역이 나타나며, 이런 구조를 아놀드 혀라고 부른다. 이러한 현상은 여러가지 비선형 진동자에 대해

서 일반적으로 나타나는 보편적인 현상임이 밝혀졌다. 이것이 자연계에서 나타나는 다양한 진동자 사이에 동기화가 가능함을 보여주는 명확한 증거가 된다.

그런데, 이 분석은 주기적인 진동자 사이의 동기화를 설명하는데 국한된다. 매우 불규칙적인 형태를 보여주는 카오스 사이에도 동기화가 가능할까? 많은 생체 시스템에서 보여주는 리듬이 카오스 성질을 가지고 있으므로 카오스 신호가 동기화가 가능한지 여부는 매우 중요한 의미를 가진다. 카오스 사이의 동기화는 최근에 많은 물리학적 연구 대상이 되었는데, 상호 작용의 크기에 따라서 위상 동기화, 완전 동기화 등 다양한 형태의 동기화가 가능함

이 밝혀졌다.

카오스 신호는 단순 진동자와 두 가지 다른 특성을 가지고 있다. 먼저 진동의 주기가 일정한 것이 아니라 시간에 따라서 변화한다는 것이다. 두 번째는 진동의 진폭도 매 주기마다 변화한다는 것이다. 상호작용을 하지 않은 두 카오스 신호는 매 시간마다 주기도 다르며, 진폭의 크기도 다를 것이다. 상호 작용을 하게 되면 주기와 진폭에 어떻게 영향을 미칠 것인가?

그림 4는 두 개의 카오스 신호가 상호 작용할 때의 시계열을 보여준다. 상호작용의 크기가 작으면, (a)에서 보는 바와 같이 두 시계열의 사이의 상관 관계를 진폭이나 주기에서 찾아볼 수 없다. 그러나 (c) 상호작용의 크기가 증가하면, 먼저 두 카오스 사이의 크기는 상관 없이 크기가 증가하고 감소하는 리듬(리듬 사이의 간격이 한 주기가 되며, 한 주기는 위상으로 360도로 정의할 수 있음)은 일치하는 것을 알 수 있다. (e) 상호작용이 더 커지게 되면, 리듬뿐만 아니라 크기도 완전히 일치하게 된다. 즉, 두 카오스 신호 사이의 상호작용이 점차 증가함에 따라서 먼저 위상이 일치하게 되는 위상동기화 현상이 나타나고, 상호작용이 더 증가함에 따라서 위상뿐만 아니라 크기도 완전히 일치하게 되는 완전동기화가 일어난다. 생체계에서 발생하는 신호는 대개 각자의 리듬을 유지하면서 서로 약한 상호작용을 하는 것이 일반적인 현상이다. 그런 점에서 완전동기

화보다는 위상동기화가 생체 신호계에서 흔히 관측할 수 있는 현상일 수 있다.

생체계가 보여주는 위상동기화의 한 예로 심장-혈류압 사이의 상호작용을 들 수 있다. 그림 5에서 왼쪽 상단과 중간 그래프는 소아 심전도의 맥박 간격(R-R 간격)과 혈류압의 피크 시점을 각각 500초 동안 측정된 신호이다. 심장의 맥박 간격은 상당히 불규칙적이지만, 두 신호는 일정한 범위 내에서 유지되는 항상성을 유지하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 심장 박동과 혈류압은 서로 상호 영향을 주는 것을 잘 알고 있다. 두 신호에 이런 상호작용의 효과가 어떻게 나타날까? 이를 위하여 다음과 같이 위상 분석 방법을 도입한다. 먼저 맥박

간격을 2π 위상 간격으로 정의하고, 중간 지점에서는 선형적으로 위상이 증가하는 것으로 정의한다. 혈류압의 피크에 대해서도 같은 방법으로 위상을 정의할 수 있다. 그림 5의 왼쪽 하단의 그래프는 이렇게 정의한 두 신호 사이의 위상차를 시간에 따라서 그린 것이다. 상당히 오랜 기간 동안 거의 위상 차이가 0도를 유지하다가 순간적으로 90도의 위상 차이를 유지하는 것을 알 수 있다. 그림 5 오른쪽의 그래프는 위상차의 분포도로서 특정 위상 차(0도와 90도 근처)에만 분포도가 몰려 있다는 것은 두 신호 사이의 위상동기화가 있음을 의미한다. 위상차의 정도는 이 분포도가 특정한 값을 중심으로 얼마나 밀집된 정도로 정량화할 수 있다.

최근의 연구에서는 비선형계에서 잡음의 역할에 대한 다양한 새로운 관측 결과가 나타나고 있다. 예를 들면, 가혹분성 비선형계에 외부의 주기적인 신호가 가해졌을 때 가한 신호의 크기가 충분히 크지 않으면 가혹분성계는 문턱치를 넘어서 발화를 하지 못하게 된다. 이럴 때 잡음을 가하면 문턱치를 넘는 것이 가능하게 된다. 흥미로운 사실은 이때 가하는 잡음의 크기가 너무 작으면 문턱치를 넘는데 잡음이 전혀 도움이 못되고, 또한 잡음의 세기가 너무 크게 되면 무작위로 문턱치를 넘게 되어서 주기적인 발화가 불가능하게 된다. 종간의 적절한 잡음의 세기에 대해서 외부의 주기적인 신호와 잡음이 공명에 의한 동기화가 가능하게 된다. 빙하기가

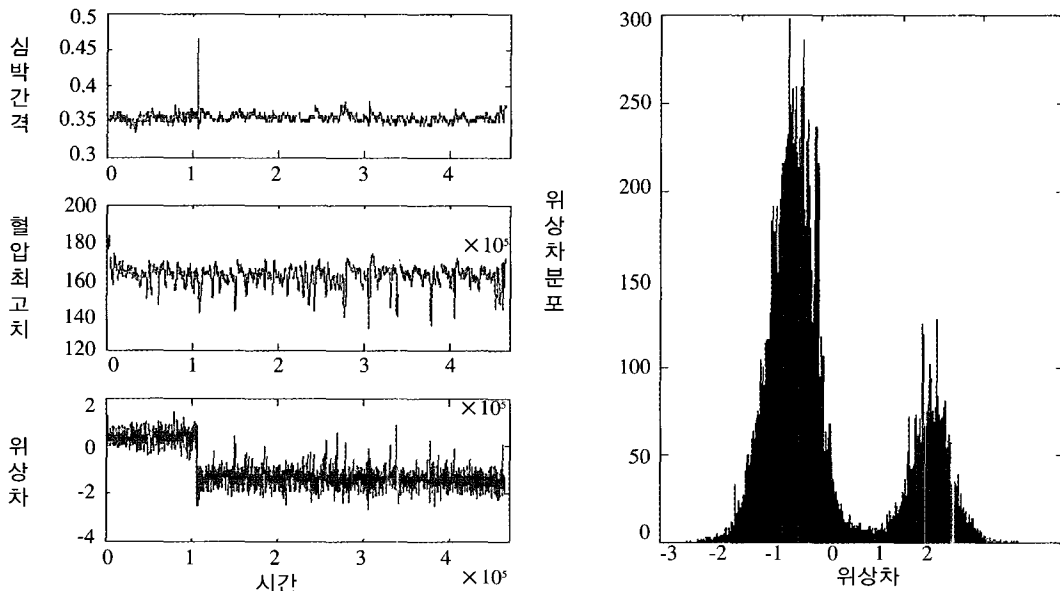


그림 5 심전도와 혈류압 사이의 위상동기화. 왼쪽 상단과 중간에는 심전도의 R-R 간격과 혈류압의 크기를 그렸으며, 하단에는 두 신호 사이의 위상차를 그렸음. 오른쪽에는 두 신호 사이의 위상차 분포를 그렸는데, 위상차가 특정한 범위에만 국한되었다는 것은 두 신호 사이에 위상동기화가 있음을 의미한다.

주기적으로 나타나는 현상을 이렇게 설명할 수 있다는 재미있는 연구 결과가 있으며, 한편 가재와 같은 소형 물고기가 대형 물고기가 접근하는 것을 이 현상으로 관측하는 것으로도 알려졌다. 어떤 점에서 생물계에서 관측되는 생체 신호는 비선형계와 잡음의 공동 역할에 의해서 형성된 것으로 보는 것이 더 적절할 수 있다. 따라서 비선형계의 동기화를 현상을 잡음에 의해서 구동되는 확률계에서도 적용하고자 하는 시도가 활발히 진행되고 있다.

맺음말

생물학 복잡계가 보여주는 다양한 리듬은 근본적으로 개체 하나의 동적 특성에 의해서 발생하는 것이 아니라 전체적으로 상호 연결되어 있는 네트워크에서 각 개체들 사이의 동기화현상에 의하여 새로운 리듬이 형성된다고 볼 수 있다. 따라서 생물 복잡계의 기능을 이해하기 위해서는 구성 개체뿐만 아니라 이들 상호간의 작용에 의해서 네트워크가 어떻

게 형성되는지를 알아야한다. 그런데 생물 복잡계의 네트워크 구조를 밝히는 일은 쉬운 일은 아니다. 두뇌 신경계의 다양한 기능을 이해하기 위하여 전기신경생리실험, 다중영상장치 등을 이용하여 두뇌 신경계 전체의 활동을 분석하는 작업은 두뇌 신경계의 네트워크 구조를 밝히기 위한 일환으로 볼 수 있다.

생명체는 생명을 유지하기 위해서 세포 내에서 꾸준히 대사 과정을 통하여 에너지를 흡수하고, 또 이 에너지를 이용하여 새로운 조직을 만들어 세포가 증식하기도 한다. 생명체의 유지에 필요한 모든 조절작용은 세포 내에서 유전자의 조절에 의하여 단백질 합성되고, 단백질의 효소 작용에 의하여 여러가지 대사 과정이 조절되는 등 유전자-단백질-대사물질 사이의 다양한 연결 고리에 의해서 가능한 것으로 알려지고 있다. 최근에 인간유전체사업을 통하여 밝혀진 바와 같이 인간의 유전자 수는 3만 내지 4만 정도가 된다. 앞으로의 과제는 이 유전자들이 다양한 단백질을 생성하기

위하여 작동하는 유전자 네트워크의 특성을 밝히는 것이 급선무가 되고 있다. 따라서 예전과 같이 유전자 하나 하나의 발현이 아니라 세포 내의 전체 유전자가 발현되는 패턴을 분석함으로써 전체 유전자 네트워크를 형성하고자 하는 시도가 진행되고 있다. 궁극적으로는 유전자-단백질-대사물질의 네트워크를 형성되고, 여기에 생화학 반응에 의한 동력학 특성을 포함시켜서 실제 세포와 유사한 환경 하에서 가상적으로 세포를 시뮬레이션할 수 있는 '가상 세포'를 구성하고자 하는 시도도 있다. 분자생물학의 기술과 함께 대규모 관측이 가능하게 되어 실제 생물복잡계의 특성을 관측하고 이를 이해하고자 하는 연구 활동은 더욱 더 가속화될 것으로 본다. 이런 종합적인 분석을 통하여 단순히 생물계에서 리듬이 어떻게 만들어지는지에 대한 의문을 벗어나서 근본적으로 생물복잡계의 다양한 리듬이 생명체의 유지에 어떤 기능과 역할을 할 것인지 밝힐 수도 있을 것이다.

핵심어와 키워드

코륨(Corium)

원자력 발전소에서 중대사고가 일어나면 노심이 손상되게 된다. 이때 노 내의 핵연료와 구조물이 용융되어 섞이게 되는데 이 혼합물을 통칭하는 조어로 코륨이라는 용어를 쓴다. 이 혼합물의 성분은 핵연료 물질인 우라늄, 핵연료 집합체를 구성하는, Zr 원자로 구조물인 철 등이다. 이 구성 성분들이 용융

도중 대부분 산화가 되어서 주 성분은 UO_2 , ZrO_2 , Fe_2O_2 이며, 산화가 되지 않은 Zr, 스테인리스 강 등을 일부 포함한다. 물론 사고 경위나 원자로 핵연료의 특성에 따라 다소 다른 조성성분을 가진다. 가압형 경수로의 경우에는 UO_2 와 ZrO_2 가 주요성분이며, 약 80대 20의 무게 비율을 가진다.