

생체신호 처리에서의 혼돈 이론의 응용

朴 光 錫
서울대학교 醫科大學

I. 서론

생체 또는 인체의 특성 및 그 상태를 분석하여 그 근원 및 기전을 이해하고 응용하며, 나아가 질병들의 치료에 이용하기 위하여서, 생체에서 발생하는 각종 신호에 대하여 신호처리의 방법을 적용하기 시작한 것은 매우 오래되어, 그 역사는 거의 생체신호의 측정에 관한 역사와 비슷하다고도 할 수 있다. 이러한 생체 신호에 대한 신호처리는 신호의 증폭 및 필터링 등을 포함하는 광범위의 것으로도 생각할 수 있으나, 일반적으로 생체 신호의 처리라고 하면 생체신호에 대하여 전용 회로를 이용하거나, 수학적 방법 등을 적용하여서 신호를 변형 시키거나 새로운 형태의 신호 또는 파라미터들을 도출하는 과정이라고 할 수 있다. 생체신호 처리에 관한 연구는 그동안 비교적 활발하게 연구 되었고 할 수 있다. 통신 및 기타 신호처리 분야에서 사용되었던 대부분의 신호처리 방법들이 생체신호의 신호처리에 적합하게 변형되어 응용되어 왔다. 이들 중에서 스펙트럼 분석 방법처럼 여러 종류의 생체신호에 적용되어 활용되고 있는 경우도 있으나, 대부분 각각의 생체신호의 특성과 사용의 목적을 고려하여 적합하게 고안된 신호처리의 방법들이 사용되고 있다.

이러한 대부분의 신호처리 방법들은 신호처리를 적용하려는 신호 자체가 생체에서 발생한 것이라는 특수한 사실에 커다란 의미를 부여하지 않고, 처리하는 신호를 다른 분야의 신호처리의 경우와 유사하게 신호처리의 방법들을 적용하게 된다. 그러나 생체신호는 통신 등 일반적인 공학적 응용분야에서 접하게 되는 많은 종류의 신호들이 인공적인 신호인 것과는 달리 전혀 인공적이지 아니라는 것이다. 이것은 인공적인

신호들에 비교하여 볼 때 더욱 복잡하다는 특성을 지니고 있으며, 보다 많은 요인들에 의하여서 영향을 받을 수 있다는 것이고, 그 영향을 미치는 정도 및 인과관계 등이 일반적으로 명확하게 분석되어 있지 못하다. 대표적인 특성 중의 하나가 비선형적 특성이다. 예를 들어 혈압 강하제에 의한 혈압의 감소분이 투약한 약제의 분량에 결코 선형적으로 비례한다고 볼 수 없다. 이러한 비선형적 특성은 생체신호의 경우 매우 일반적인 것으로, 선형적 원리에 의한 신호처리의 방법을 적용하기 어렵게 만드는 원인이 되고 있다.

이러한 생체 신호의 특성은 생체신호의 처리에 적합한 신호처리의 방법을 요구하게 되었고, 비선형적 동역학에 근거하여 신호 및 현상을 해석하는 혼돈이론은 생체신호의 처리에 적합한 방법으로 등장하게 되었으며, 생체 신호처리 분야 적용하여 많은 결과를 기대하게 하고 있다. 여기에서는 생체 신호의 처리에서의 혼돈이론의 응용에 관하여서 설명하고자 한다.

II. 혼돈이론(混沌: CHAOS)

혼돈이론에 대하여 자세한 지식을 갖고 있지 않은 사람이라도, 최근의 "카오스 세탁기"나 영화 "쥬라기 공원" 등을 통하여서 한 두 번 "혼돈"이라는 학문적 단어에 접했을 법하기도 하다. 혼돈이론에서 말하는 혼돈을 간단하게 설명하기는 쉽지 않으나, 아마 "외형적인 불규칙성에 내재하여 있는 규칙성"이라고 설명할 수 있을 것이다. 이것은 우리가 여지껏 혼돈이라는 단어에 대하여 부여하였던 "어지럽고 불규칙한 상태"라는 다소 부정적인 의미와는 반대되는 긍정적인 의

미가 있다고도 할수 있다. 즉, 외형적 현상 또는 신호의 단순한 관찰 만으로는 도저히 규칙적이라고 볼수 없는 것들이, 규칙적인 내부의 기전에 의하여 발생할 수 있다는 것이다. 즉 혼돈적 특성을 갖는 시스템인 경우에는 그 발생 기전이 비록 매우 간단하게 주어 지는 경우에도, 외형적으로는 결코 반복되지 않는 비주기적 불규칙성을 갖게 되는 것이다. 이러한 현상은 선형적인 시스템에서는 도저히 불가능한 것이므로 혼돈적 시스템인 경우는 비선형적 시스템이 될수 밖에 없다. 물론, 비선형적 시스템이라고하여, 전부 혼돈적 특성을 나타내지는 않는다.

혼돈적 특성을 나타내는 대표적인 예인 logistic map의 한 경우를 예로 들어 보자.

현 세대의 생물체의 수를 정규화한 값 X_n (0과 1사이의 값)으로 나타내는 경우 다음 세대의 생물체의 수를 (1)식과 같이 계산 할수 있다고 하자.

$$X_{n+1} = 3.8 * X_n * (1 - X_n) \tag{1}$$

즉 다음 세대의 생물체의 수(X_{n+1})는 현 세대의 생물체의 수에 비례하는 부분(X_n)과, 먹이 등의 제한성으로 인하여 생물체의 증가가 다음 세대의 생물체의 수에 감소로 나타나게 되는 항($1-X_n$)으로 구성되어 있다. 이수식은 비선형성항을 포함하고 있으며, 실제의 생물체의 세대별 수적 변동에 제법 정확하게 맞고 있다. 그러면, 임의의 초기값 X_0 에 대한 X_n 의 값의 변동을 살펴보자. 표1에 초기값이 0.5인 경우와 0.5001인 경우에 대하여 n 의 값에 따른 X_n 의 값의 변동 상태를하여 나타내었다. 이표를 보면 $n=50$ 까지 전혀 주기성을 볼 수 없으며, 이것은 그 이후의 n 의 값에 관하여 관찰하여도 마찬가지이다. 표1의 데이터만 갖고 볼때는 그것이 (1) 식과 같은 간단한 식에 의해서 발생한 것이라고 도저히 생각할 수 없을 정도로 불규칙한 특성을 보인다. 또하나의 특성은 미세한 초기조건의 차이에 따라서 결과가 매우 크게 차이가 난다는 것이다. 표1에 초기 값이 0.5인 경우와 0.5001인 두가지의 경우에 대하여 그 결과를 보여주고 있다. 초기값의 크기가 만분의 1정도, 비율로는 0.02%밖에 차이가 나지 않는데도 그 결과를 보면 n 의 값이작은경우에는 값이 표시된 범위내에서 같거나 근사한 수치를 나타내지만 그차이가 점차 증가하여 n 이 30 이상에서는 전혀다른 값을 나타내고 있음을 볼수 있다. 즉, 매우 근사한 초기 조건에서 출발했다고 보기 어려울 정

도로 다른 변화를 보이고 있다. 이것이 홍콩에서의 나비의 미세한 날개짓도, 뉴욕에서의 커다란 폭풍으로 결과 될수 있다는 이른바 나비효과(butterfly effect)를 말하는 것이다. 혼돈이론에 관한 보다 자세한 내용, 분석방법등에 관하여서는 참고문헌을 이용하기로 하고 ^[1,2,4,6,11,12,13,21] 여기에서는 혼돈적인 시스템이 나타내는 대표적인 특성을 요약하여 보기로 하자.

표 1. 초기값 변화에 따른 logistic map의 변동상태

n	X_n	X_n'	$X_n - X_n'$
0	0.5000	0.5001	-0.0001
1	0.9500	0.9500	0.0000
2	0.1805	0.1805	0.0000
3	0.5621	0.5621	0.0000
4	0.9353	0.9353	0.0000
5	0.2298	0.2298	0.0000
6	0.6726	0.6726	0.0000
7	0.8369	0.8368	0.0000
8	0.5188	0.5188	0.0000
9	0.9487	0.9487	0.0000
10	0.1851	0.1851	0.0000
11	0.5732	0.5732	0.0000
12	0.9297	0.9297	0.0000
13	0.2485	0.2485	0.0000
14	0.7097	0.7097	0.0000
15	0.7829	0.7829	0.0000
16	0.6458	0.6458	0.0000
17	0.8693	0.8692	0.0001
18	0.4319	0.4320	-0.0001
19	0.9324	0.9324	-0.0001
20	0.2396	0.2394	0.0002
21	0.6924	0.6919	0.0005
22	0.8093	0.8101	-0.0007
23	0.5864	0.5847	0.0017
24	0.9217	0.9228	-0.0011
25	0.2744	0.2708	0.0035
26	0.7565	0.7504	0.0061
27	0.7000	0.7117	-0.0118
28	0.7981	0.7797	0.0184
29	0.6124	0.6528	-0.0404
30	0.9020	0.8613	0.0408
31	0.3359	0.4541	-0.1182
32	0.8477	0.9420	-0.0943
33	0.4907	0.2076	0.2830
34	0.9497	0.6252	0.3245
35	0.1816	0.8904	-0.7088
36	0.5648	0.3708	0.1941
37	0.9340	0.8865	0.0475
38	0.2341	0.3822	-0.1481
39	0.6814	0.8973	-0.2159
40	0.8249	0.3502	0.4747
41	0.5488	0.8647	-0.3159
42	0.9409	0.4445	0.4965
43	0.2111	0.9383	-0.7271
44	0.6329	0.2201	0.4129
45	0.8828	0.6522	0.2307
46	0.3930	0.8620	-0.4689
47	0.9065	0.4521	0.4544
48	0.3220	0.9413	-0.6193
49	0.8296	0.2100	0.6196
50	0.5371	0.6305	-0.0934

혼돈적 특성을 보이는 시스템은 주기적특성을 보이는 시스템 또는 불규칙성 특성을 보이는 시스템과 다른 여러가지의 특성을 나타내고 있다. 그 중 중요한 특성은 다음과 같다. [3,12]

1) 혼돈은 결정론적(deterministic) 이면서 비주기적(aperiodic)이다.

앞에서 언급하였듯이 혼돈적 시스템의 가장 대표적인 특성은 외형적인 비주기성, 또는 불규칙성에 불구하고, 그 내부에 존재하는 결정론적 규칙성을 들수 있다. 기존의 뉴우톤 역학으로 나타내어지는 다른 시스템과 마찬가지로, 시스템의 동태를 제어하고, 나타내는 수학적인 방정식들이 존재한다. 즉, 이들 방정식들과 초기조건만 안다면, 그 이후의 시스템의 정확한 동태를 예측할 수 있다. 그러나, 뉴우톤 역학적 시스템들과는 달리 이것은 그 자신의 상태를 반복하는 형태로 결코 나타나지는 않는다. 시스템이 일정한 주기를 갖고 반복하는 경우를 관찰할 수 없다. 외형적으로 나타나는 현상과 신호만으로는 규칙적인 신호 또는 현상이 아니라는 것은 쉽게 알수 있지만 불규칙 신호 또는 현상과는 구별하기 어렵다.

2) 혼돈 시스템은 초기 조건(initial condition)에 민감하게 종속(sensitive dependent)된다.

이것은 초기조건의 미세한 차이가 상당한 시간후에 매우 커다란 차이를 발생한다는 것을 의미한다. 앞의 표1 에 초기값이 0.5인 경우와 0.5001인 두가지 경우의 시스템의 동태를 나타낸 것이다. 두 경우의 동태를 보면 처음에는 거의 비슷하게 나아가나, 일정시간이 지나면 달라지기 시작하여 초기조건의 차이가 만분의 일 정도 밖에 되지 않았음에도 불구하고 서로 발산하게 된다. 만약 그 차이가 조금이라도 더 크면 발산속도는 더욱 빠르게 된다. 시스템의 미래의 값을 예측하기 위해서는, 그 시스템의 상태를 예측하여 주는 규칙 또는 방정식과 초기 조건을 알면 되는데, 혼돈적 시스템인 경우에는 이와 같이 초기 조건의 미세한 변화에도 매우 큰 변화를 나타내게 되므로, 초기 조건을 무한대의 정확도로 측정할수 있지 않는 한 혼돈 시스템인 경우 장기간후의 값을 예측하는 것이 불가능하다는 것을 의미한다. 기상상태의 분석의 경우에 혼돈이론이 적용되고 있는데, 이와같은 초기 조건에 의 민감한 종속성으로 인하여 현재의 기상상태가 무한대의 정확도를 갖고 측정되지 않는한 장기간의 일기 예보는 의미가 없는 것으로 판단되고 있다.

3) 혼돈 시스템의 동태는 상대적으로 좁은 영역으

로 제한되어 있다.

비록 혼돈 시스템의 외형적 동태가 불규칙적인것처럼 관찰 된다고 하더라도, 이것이 모든값을 갖을수 있고 무한대까지 퍼져 있다는 것을 의미하지는 않는다. 혼돈시스템의 경우에는 불규칙적인 신호들과는 달리 상대적으로 좁은 영역에 제한되어 있다. 일반적으로 혼돈적 시스템은 늘림과 접힘의 과정이 혼합되어 반복 되는데, 늘림의 과정은 인접한 두개의 값을 더욱 차이나게하는 효과를 발생시키지만, 접힘의 과정은 이렇게 늘림의 과정을 통하여 커진 값들을 무한대로 발산하지 않고 다시 원래의 범위로 돌아오게 하여 주는 역할을 한다. 즉 비선형적 시스템중 혼돈의 특성을 나타내는 경우는 이와같은 늘림과 접힘의 특성을 갖게되고, 그로 인하여, 동작영역은 모든범위에 걸쳐 나타나는데가 아니라, 상대적으로 좁은영역에 제한되어 있게된다. 이 특성은 혼돈적 특성을 보이는 신호를 불규칙 신호로부터 구별하여주는 중요한 특성이다.

4) 혼돈시스템의 동태는 독특한 형태를 지니고 있다.

혼돈시스템의 동태는 영역적으로 제한되어 있음과 동시에 독특한 패턴을 갖고 있다. 쉬운 예는 커피속에 섞이는 크림의 뎀들이, 방안에서 올라가는 담배연기의 패턴, 흐르는 물이 급류로 바뀔때의 패턴 같은 것들이다. 이들 패턴은 종종 동태가 발생하는 영역인 "밴드(band)"와 동태가 전혀 발생하지 않는 영역인 "금지구역(forbidden zone)"으로 형태로 나누어져 구성된다. 건포도빵의 경우 건포도가 골고루 퍼지지 않고 층을 이루어 나타나는 것이 이경우에 해당하며, logistic map에서는그 패턴이 포물선 형태로 나타나게 되는 것이다. 이와같이 각 혼돈 시스템에 독특하게 나타나는 패턴을 strange attractor 라고하며, 비록 초기 조건에 따라서 시스템의 동태는 크게 달라도, 그것을 공간상에 분포시켜놓고 보면 이 strange attractor로 수렴하게 된다는 것이다. 즉 이와 같은 독특한 패턴을 갖는 경우에는 이것만으로 결정적으로 그 시스템이 혼돈계라고는 할수는 없어도, 그 시스템이 불규칙 시스템이 아니라 혼돈적 시스템일 것이라는 가정을 할 수 있게 된다.

III. 혼돈이론이 특히 생체신호 처리에 적합한 이유

혼돈이론이 생체 신호의 처리등 생체시스템의 분석

에 특히 적합한 이유를 생각하여 본다면 다음과 같은 이유를 들수 있겠다.

1) 생체 시스템은 만들어진 것이 아니라 (not made) 발생(generated)되는 것이라는 사실이다. 발생의 과정은 일반적으로 자기유사성(self similarity)을 갖는 단위과정의 확대, 축소 또는 변형된 반복으로 볼수 있다. 즉, 발생되는 과정은 같은 기전에 의하여 진행되는 것이나, 그 결과로 발생된 시스템은 각 개체별로는 차이점이 있으면서 각 개체군은 다른 개체군으로부터는 뚜렷하게 구별되는 특성을 지니고 있다. 이러한 특성은 혼돈적인 시스템에서의 strange attractor로 해석할 수 있다. 이 attractor는 각 개체군마다 다른 개체군과 구별되는 뚜렷한 패턴을 지니고 있다. 각 개체군이 다른 개체군과 구별될 수 있는 것은 발생 과정의 결과로 나타나는 모습이 서로 다른 attractor로 수렴되기 때문이라고 볼수 있다.

예를들어, 벚나무를 소나무와 비교하여 보자. 각각의 벚나무를 보면 그것이 벚나무이라는것은 분명히 알지만 어느 두그루도 똑같은 모습을 하고 있는것이 없다. 아마 각각 벚나무간의 수학적인 상관계수를 구한다면 0.5를 넘기 어려울것이다. 이렇게 수학적으로 답지않은 두그루의 벚나무에 대하여 우리가 같은 군이라고 분명하게 인식 할수 있는것은 그것이 같은 모습의 attractor로 수렴하였기때문이다. 벚나무와 소나무를 구별할 수 있는것도 그것이 서로 다른 attractor로 수렴하였기 때문이라고 할 수 있다. 한편 개체군내에서의 차이는 미세한 초기조건의 차이에 의한 결과된 모습의 차이라고 해석할수 있을 것이다. 발생초기의 조건의 미세한 차이는 같은 기전에 의한 시스템이라고 하더라도 그 결과에 커다란 차이를 발생 시킬수는데 이것으로 각 개체간의 차이를 설명할 수 있겠다. 두그루의 벚나무의 차이를 초기조건의 차이로 설명할 수 있게 된다

2) 생체시스템의 경우 시간에 따라서 수시로 변화하는 역학적 시스템(dynamical system)이라고 할 수 있다. 일반적으로, 생체 시스템 이외의 신호의 분석에 적용되는 이론은 많은 경우 정상상태 (steady state)를 가정하고, 그 가정하에서 여러가지 분석의 방법들을 적용하여 왔다. 생체신호의 분석의 경우에도 분석방법을 적용하는 동안에 생체시스템이 steady state 또는 stationary state를 가정하고 접근을 시도하고 있다. 현재의 방법하에서는 그 정도의 접근 밖에 가능하지 않았기 때문일 것이다. 그러나,

생체시스템과 생체시스템에서 발생하는 신호들이 과연 얼마나 오랜 기간동안 steady state에 있고, stationary하다고 가정할수 있을까? 생체 시스템이란 너무나도 많은 변화 요인에 의하여서 수시로 변화하는 시스템이 아닌가? 변화하는것이 과도적특성이 아니고, 본질적인 특성인 시스템이 아닌가? 우리가 stationary 하다고 가정하고 있는 상황하에서도 변화하고 있다고 봐야하지 않을까? 생체시스템에서의 steady state라는 것은 죽음밖에 더 있겠는가? 살아 있기 때문에 변화하는 시스템, 그 변화하는 형태가 복잡하게 보여 그동안 여러가지 신호처리 방법이 어렵거나 불가능해 보였던 시스템이기 때문에 혼돈이론을 이용한 새로운 접근방법에 기대를 하여볼 수 있게 한다.

3) 혼돈이론을 적용하기 위하여서는 비선형성과 궤환이 필수적인데 이 두가지 특성이 바로 생체 시스템의 기본적 특성이기 때문이다. 생체내의 모든기관 및 여기에서 발생하는 신호들은 신경계및 호르몬계에 의하여 제어되어지고 있다. 신경계와 호르몬계의 기본적인 동작및 제어특성을 보면 많은 부분이 비선형적임을 알수 있다. 이러한 비선형적 부분을 선형적으로 근사화 하여 그 특성을 분석하려는 시도가 많이 있었으나, 비선형적 특성을 고려하여 그특성을 분석하려고 하는 시도는 기본적 이론의 부재와 방법상의 어려움으로 극히 제한 되었었다. 또한 생체시스템인 경우 주위의 환경과 생체시스템의 상태에 따라서 부궤환 또는 정궤환의 궤환특성을 기본적으로 갖고 있는데, 이것은 혼돈적 시스템에서 요구되는 접힘의 과정과 늘림의 과정에 해당되기 때문에 혼돈이론을 응용하기 위한 적합한 대상이라고 할수 있다.

4) 생체 시스템은 다른 공학적 시스템과는 달리 신체의 여러기관들이 매우 복잡적이고 복잡하게 연관되어 있다. 대부분의 종래의 분석 방법들은 분석하고자 하는 시스템을 가능한한 작게 분리하여 내고, 그 분리된 시스템에 대하여 여러가지의 가정을 적용시킨후 신호처리 등의 분석방법을 적용한 것이 일반적이다. 생체 시스템의 경우 각각의 신체 기관의 역할을 작은 규모로 분리 시키기가 어려운 경우가 대부분이며, 다른 시스템의 영향을 무시하거나 근사화하여 나타내는 것이 무리한 경우가 많다. 그러나 혼돈시스템의 경우 시스템을 각각 분리하여 분석하는 것보다, 전체의 시스템을 하나로하여 전일적(全一的)으로 분석하는 것을 목표로 하고 있으며, 이에 적합한 여러가지의 분석방법을 제공하고 있다. 이러한 혼돈이론의 특성에

의하여볼때 생체신호의 신호처리 및 분석에는 혼돈이론의 이용이 매우 적합한것으로 인식되고 있다.

5) 생체의 여러가지 신호및 리듬을 관찰해 보면, 일견 주기적인 특성을 갖고 있는것 같으나, 실은 정확한 주기성을 갖고 있지 못하다. 생활 리듬도 24시간을 주기로 반복 한다고 할수 있을지모르나, 하루하루가 정확히 반복되는 주기적인 리듬은 아니다. 이것은 단지 혼돈적 신호에 대한 인식이 없는 상황에서, 불규칙리듬 보다는 규칙적 리듬에 보다 가까웠기 때문일 것이다. 실제 우리가 규칙적이라고 간주했던 심장의 박동수도 외부로부터 아무런 간섭이 없어도 변화하는 현상을 보이고 있다. 이와같이 주기성에서 벗어나서 불규칙적 특성을 나타내는 신호들을 처리하고 분석하기에는 혼돈이론의 이용이 적합하다고 할 수 있다.

IV. 생체신호처리에서의 응용

혼돈이론에 대한 연구는 1980년대에 활발하게 진행되었으며, 다른분야와 마찬가지로 생체신호의 처리 분야에도 응용되기 시작하였다. 혼돈이론의 생체 신호의 처리 및 분석에 이용된 예를 열거하면 다음과 같다.

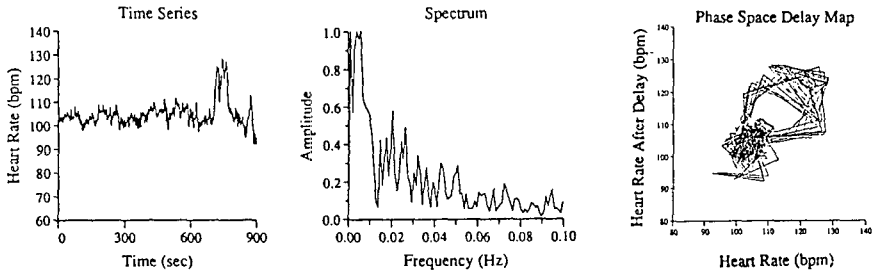
- 심전도 신호에대한 처리및 분석 ^[3,9,10]
- 뇌파신호의 처리에 적용하여 뇌의 상태분석및 각종 뇌질환의 진단. ^[2,14]
- 신경전위의 처리를 통한 생체신경계의 활동기전 연구. ^[14]
- 맥파의 신호처리및 분석 ^[20]
- 노화에 관한 연구 ^[7,19]
- Echocardiographic signal analysis ^[15]
- Sperm motion analysis ^[16]
- Cell activity analysis ^[17]
- Blood flow signal analysis ^[18]

이 이외에도 여러종류의 생체 신호의 처리에 응용이 되고 있으며, 신호처리 이외에도 생체 시스템의 모델링 및 분석에 넓은 응용범위를 갖고 있다. 여기에서는 이들 생체 신호의 처리중 심전도 신호의 처리와 뇌파신호의 처리 등에 적용한 혼돈이론의 응용에 대하여 설명하여 보고자 한다.

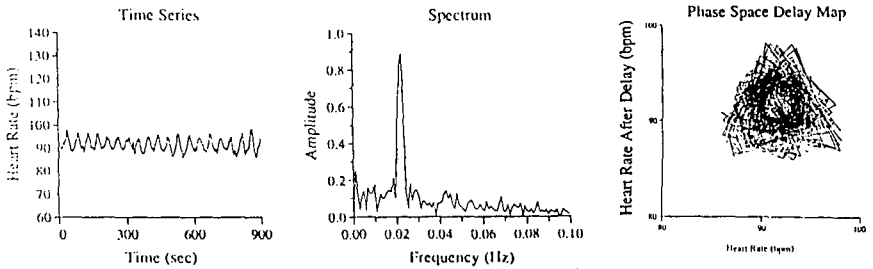
1. 심전도 신호에대한 혼돈이론의 응용

혼돈이론의 생체신호에의 응용은 심장의 동태분석의 경우에 먼저 적용되기 시작하여 여러가지 형태로 연구가 진행되고 있다. 심장의 박동상태 등 그 활동상태는 정상적인 경우에는 규칙적이고, 이 규칙적인 리듬이 깨어지면 이것은 비정상적이고, 질병과 관련이있을것 으로 간주 하여 왔다. 그러나 심장의 박동상태를 살펴보면, 이상 상태뿐만 아니라 정상상태에서도 매우 복잡하게 나타나고 있다. 심전도 신호등 임상적으로 측정되는 데이터들에서 관찰되는, 이러한 복잡한 동적특성은 기존의 선형적 분석방법에 근거한 방법보다 비선형적 역학에 근거하여 발전한 혼돈이론을 이용하여 처리하기에 적합하다. 정상적 상태에는 심장의 박동이 규칙적이고 주기적으로 될 것이라고 일반적으로 생각하고 있는것과는달리 매분당의 박동수를 위상평면도에 나타내어보면, 주기적인 특성이 나타나지않고 혼돈적 시스템에서 나타나는 독특한 패턴이 보이고 있다. ^[9] 이것은 정상적인 심장의 동적상태가 혼돈적이라는 것을 의미한다. 이러한 정상적 심장에서의 심장박동간 간격이 혼돈적 특성을 나타내며 변동하는 현상은 심방동수를 제어하는 자율신경계에 의한것으로 유추된다. 이 자율 신경계는 교감 신경과 부교감 신경의 두 부분으로 나누어져 이루어져 있다. 교감신경의 자극은 심박동수를 증가시키는 작용을 하고, 부교감신경은 그와 반대의 작용을하고 있다. 이 두개의 신경의 작용은 혼돈시스템에서 그특성을 나타내게하여주는 늘림과 접힘의 역할과 비슷한 역할을 하여 심박수의 동적상태가 혼돈적 특성을 나타내는 것으로 추측되고 있다.

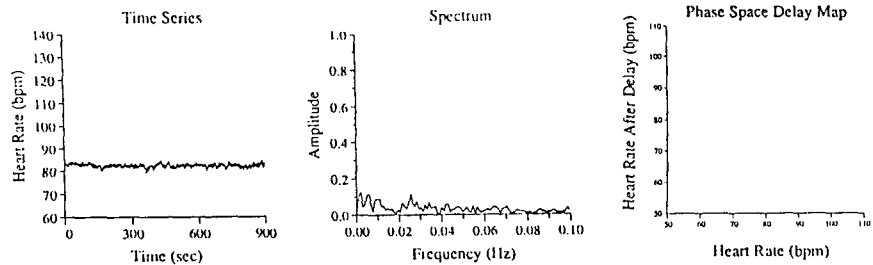
이와같은 특성은 그림 1에 보인 비정상적인 경우와 비교하여 볼때 더욱 뚜렷함을 알수 있다. 그림 1은 심장마비를 일으키기 13시간전과, 8일전, 그리고 정상적 심장상태에서의 심박동수의 변화에 대한 시계열 데이터와 스펙트럼과, 위상평면도를 나타낸 것이다. 여기에서 보면 정상적인 경우에 심박동수의 변화 패턴이 거의 불규칙하게 변화하고, 스펙트럼상에서는 1/f의 특성을 갖으며 넓은 영역에 분포하고 있으며, 위상평면도에서는 “밴드”와 “금지구역”을 보이는 혼돈시스템의 패턴을 보이고 있다. 그러나 심장마비 8일전의 데이터는 심방동수가 거의 주기적인 울동을 갖고 진동하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 스펙트럼상에서 커다란 스파이크로 나타나고, 위상평면도에서는 중첩된 궤적으로 나타나고 있다. 더우기 심장마비



(a) 정상적인 경우의 심장박동수 변화 상태



(b) 심장 마비 8일전의 심장박동수 변화 상태



(c) 심장마비를 일으키기 13시간전의 심장 박동수 변화상태

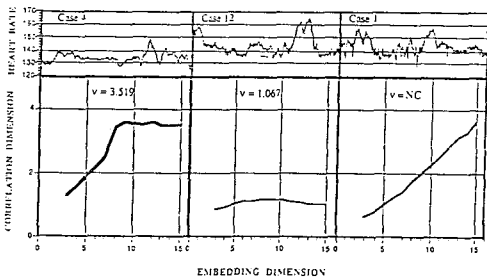
그림 1. 심장박동수 변화의 분석결과

13시간 전의 데이터는 박동수가 거의 일정하게 유지되고 있으며, 스펙트럼과 위상평면도에서도 그 특성을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 여기서의 결과를 볼 때 정상적인 심장의 경우에는 혼돈적으로 변화하는 특성을 갖고 있으며, 그러한 특성이 약화되는 것은 심장의 정상적 기능이 저하되어가는 것으로 분석될 수 있음을 알 수 있다.

D.G. Chaffin 등은 분만중인 태아의 건강상태를 분석하기 위한 방법으로 심장 박동수에 대한 분석을 시도하였다.^[10] 아직 심장박동수의 변화 상태에 대한 정확한 원인의 규명은 되지 않았지만, 태아의 심장동

상태의 구별은 임상적으로 중요한 의미를 부여할 수 있다. 정상적으로 분만된 12명의 태아에 대하여 embedding dimension의 변화에 따른 상관차원^[8]의 변화를 분석하여 그림 2와 같이 3가지 부류의 전형적인 변화 특성을 나타내고 있음을 판단하였다. 이와같은 분류를 근거로하여 태아의 심장박동수의 변화는 비선형적 특성을 갖고 있으며, 이들을 위상공간이나, 상관차원의 방법들을 이용하여서 특성화하고 구별할 수 있음을 보여주고 있다. 이러한 차이점은 심장박동수를 제어하는 내부기전의 생리학적인 차이를 의미하며, 태아의 건강상태의 분석에 보다 정량적이고 분석

적인 방법을 제공하여 주고 있다.



(a) (b) (c)

그림 2. 태아 심박동수 변화의 전형적인 세가지 변화 패턴 (a)embedding dimension이 증가함에 따라 상관차원의 값이 3.519 부근에서 포화됨 (b)embedding dimension이 증가함에 따라 상관차원의 값이 1.067 부근에서 포화됨 (c)embedding dimension이 증가함에 따라 상관차원의 값이 포화되지 않고 계속 증가함

2. 뇌파신호에 대한 혼돈이론의 응용

뇌파신호의 처리 및 분석을 통한 뇌의 기능 상태 분석에 관한 연구는 뇌파신호가 측정되기 시작한 이후 계속 생체신호처리 분야의 중요한 관심사였다. 그동안 많은 분석적 방법들이 적용되었음에도 불구하고 아직도 많은 부분이 알려지지 않은채로 남아, 새로운 형태의 생체 신호를 처리를 통한 보다 좋은 결과를 기대할 수 있는 분야로 인식되어 오고 있다. 앞에서 기술한 혼돈이론의 특성에 근거하여 볼때 뇌파신호의 분석은 혼돈이론을 이용한 신호처리가 가장 적합한 분야로 생각할 수 있다.

뇌파신호에 대한 혼돈이론의 응용은 여러가지 형태로 이루어지고 있다. 뇌파신호가 과연 혼돈적 특성을 나타내고 있는가, 혼돈적 시스템으로 간주할 경우 그 상관차원은 뇌의 기능적 상태에 따라서 어느정도 범위의 값을 갖게되며, 그상태의 변화에 따라서 그 값들은 어떻게 변화하는가, 이러한 값들을 이용해서, 뇌의 기능적상태 또는 질병 및 이상상태를 구별하여 낼수 있는가하는 분야 등 여러가지 형태의 연구가 진행되어 왔다. 특히 뇌파신호는 심전도 신호와는 달리 정형적인 파형의 패턴을 보이고 있지 않기 때문에 불규칙신호에 주로 이용되는 통계적 처리방법이나 스펙

트럼 분석방법이 많이 사용되어왔다.

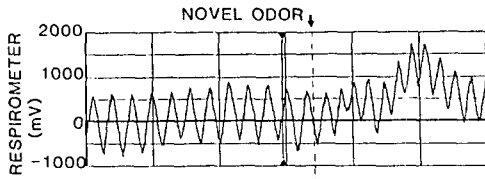
혼돈이론을 적용하는 경우에는 기존의 방법들과는 다른 형태로 뇌파신호를 처리하고 분석할 수 있게 된다. 혼돈이론에 근거하여, 정상적인 경우의 뇌의 활동상태와 간질 등 뇌질환이 있는 경우 등을 포함한 뇌의 여러가지 상태에 대하여 뇌파신호를 기록하고, 이 데이터들을 분석하여 뇌의 기능및 질병의 상태를 분석할수있다. 뇌파신호는 일견 보기에 불규칙 신호들 처럼 보이나, 위상평면도 및 상관차원을 계산하여 분석하여 보면 혼돈적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. [2] 표 2에는 뇌의 여러가지 상태에서 기록된 뇌파신호로 부터 앞에서 소개한 방법 [6] 으로 상관차원을 계산한 결과를 보여주고 있다.

표 2 뇌의 기능 상태에 따른 상관차원의 변화

뇌의 기능적 상태	상관차원
깨어있는 상태 (alpha activity)	6.1
(beta activity)	계산불가능
2단계 수면상태	5.03
4단계 수면상태	4.0-4.4
REM 수면상태	계산불가능
간질(소발작)	2.05

깨어있는 상태(beta activity)와 REM(Rapid Eye Movement: 꿈을 꾸는 수면상태)수면상태에서는 혼돈적 특성을 관찰하지 못하고 상관차원을 계산할 수 없었으나, 나머지 뇌의 기능적 상태에서는 혼돈적 특성을 위상평면도에서 관찰할 수 있으며, 상관차원을 계산해 낼 수 있었다. 2단계의 수면상태와 4단계의 수면 상태에서는 실험대상자들에 대하여 각각 비슷한 상관차원 값이 계산되어져 나와 그 유효성을 관찰할 수 있으며, 간질의 소발작시에는 이 값이 크게 차이나는것을 볼수 있다. 위상평면도상에 나타나는 패턴의 구조적 차이와 이것을 정량화한 상관차원을 이용해서 뇌의 기능적 활동 상태를 구별할 수가 있고, 간질 등의 질환의 가능성을 진단하는 방법으로 이용할 수 있음을 볼 수 있다. 이러한 분석방법을 통하여서 우리는 뇌의 정상적인상태 및 병리학적인 상태에서 복잡한 형태이지만 결정론적인 역학이 존재함을 유추할 수 있다.

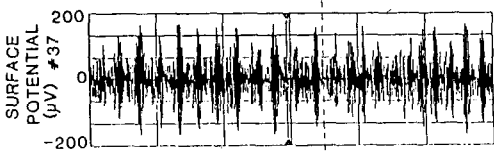
그림 3은 토끼의 뇌중 냄새를 감각하는 후구(嗅球: olfactory bulb)에서 측정한 뇌표면전 위에서의 새로



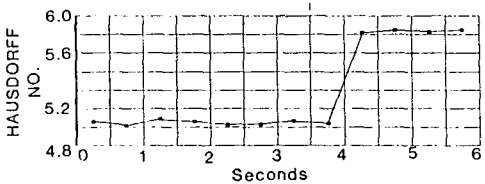
(a) 호흡량의 변화곡선



(b) 순간호흡률



(c) olfactory bulb에서 측정된 뇌표면전위



(d) 뇌표면 전위로 부터 계산한 상관차원의 변화곡선

그림 3. 후각 자극에 의한 생체신호의 변화

은 냄새에 대한 변화를 보여주고 있다. 새로운 냄새 (여기서는 butanol)로 자극시킨 후의 호흡량, 호흡수, 뇌표면전위, 상관차원의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다.

호흡량의 변화 및 호흡수의 변화에서도, 후각적 자극이후의 상태의 변동을 관찰할 수 있으나, 뇌에서 측정된 표면 전위에 대하여서 상관차원을 계산하여 보면 약 1초간의 시간 지연후에 그값이 상승하는 것을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 이와 같은 신호처리의 방법은 사건(event)과 관련된 뇌의 기능상태의 분석 등에도 혼돈이론을 이용하여 정량적인 분석결과를 얻

을수 있음을 보여주고 있다.

뇌파신호에 대한 혼돈 이론의 응용에 관한 연구의 동향을 사항을 종합하여 보면 다음과 같다.

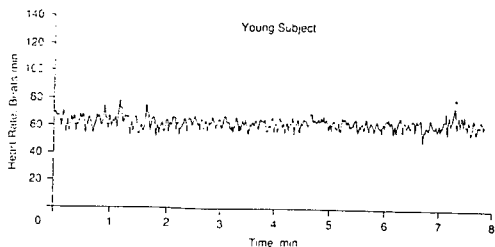
1) 뇌파신호에 대한 혼돈이론의 응용은 이것을 “뇌파신호의 르네상스”라고 불리울 정도로 각광을 받고 있다고 할수 있다. 뇌파신호는 여지껏 잡음성으로 간주 되었던 것과는 달리, 때때로는 잡음성 특성을 나타내어 불규칙하게 표현되지만, 여러가지 경우에 혼돈이론을 응용하여 분석될 수 있는 혼돈적 상태로 표현된다. 이것은 뇌가 여러가지의 구조로 구성되었다는 것을 의미할 수 있으며, 외부적으로 나타나는 뇌파가 불규칙적인 잡음이 아닌 여러가지의 뇌의 기능상태를 갖고 있다는 것을 의미한다. 이와같은 사실은 인지과학, 신경과학을 포함한 뇌파신호의 응용의 여러분야에 중요한 돌파구를 제공하는 것이다. 이와같은 혼돈이론의 방법등이 적합하고 효율적으로 응용이 된다면 EEG 또는 MEG를 이용하여 측정된 뇌파신호는 현재의 임상 및 여러분야에서 사용되고 있는 이상으로 뇌의 기능상태 연구에 활발하게 이용될 수 있을것이다.

2) 뇌파신호의 변화는 이에 대응하는 뇌의 병리학적 변화 또는 인식적 정보처리과정의 변화에 의하여 나타난다고 간주할 수 있다. 이와같은 상태는 혼돈이론적 특성을 정량하여내는 방법인 상관차원 등을 이용하여 구별하여낼 수 있다.

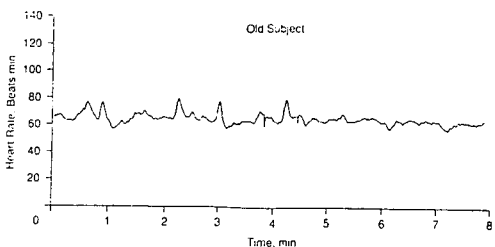
3) 중추신경계의 통합적 시스템 또한 혼돈이론의 응용이 요구되는 적합한 분야라고 할 수 있다.

3. 노화에 관한연구

혼돈이론의 응용은 생체신호의 복잡한 동태의 변화를 정량적으로 나타내어 주고 있어, 노화에 대한 척도로도 이용되고 있다. 정상인의 경우 신체내의 여러기관이 복잡하게 연관되어 있으며, 다중의 제어기전에 의하여 특성화 되어있어, 생활중의 외부의 환경 변화 또는 자극에 적절하게 반응하도록 되어 있다. 노화 현상은 이러한 신체내의 여러기관의 기능적 퇴화를 가져오게 되고, 이것은 신체각 기관의 활동범위가 줄어드는 것을 의미하며 결과적으로 외부의 환경 또는 자극에 적응할 수 있는 능력을 그만큼 감소시키는 결과가 된다. 그러면, 어떻게 이러한 과정을 정량화하여 분석할수 있을까? 크리아틴 소모율, 호흡량, 신경전달속도, 인슐린 감도 등 여러가지 변수의 평균값이 이러한 과정을 정량화하기 위한 객관적인 척도



(a)



(b)

그림 4. 연령에 따른 심박동수의 변화 패턴 (a) 22세 여성의 심박동수 변화 패턴 평균 : 64.7, 표준편차 : 3.9 (b) 73세 남성의 심박동수 변화 패턴 평균 : 64.5, 표준편차 : 3.8 두 신호간의 평균값과 표준편차는 비슷함에도 불구하고 신호의 복잡성의 차이를 뚜렷하게 관찰할 수 있다.

로 연구 되었으나, 유전적 배경, 영양상태 및, 활동 상태등에 따라서 심한 편차를 나타내고 있기 때문에, 적합한 척도로 인정되지 못하고 있다. 또한 이러한 변수의 평균값을 사용하는 경우에는 신호 자체가 포함하고 있는 시간에 따른 동적 변화상태를 적절하게 나타내어주지 못하고 있다. 그림 4에는 각각 건강한 22세 여성과 73세 남성의 심박동수의 변화를 보여주고 있다. 이 심박동수의 변화 곡선을 보면 혼돈적 시스템에서의 신호의 특성을 나타내고 있는 것을 관찰할 수 있어, 혼돈적인 시스템을 분석하는 방법을 이용하여 심박동수의 파형에서 나타나는 변화도 또는 복잡성을 정량화하여 나타낼수있다. 연령에 따른 심박동수의 변화를 정량화 하기 위하여서, Kaplan등^[22]은 혼돈적 신호의 분석에 많이 사용되고 있는 상관차원을 이용한 분석방법을 사용하였다. 이방법을 젊은 연령층(21세부터 35세까지 평균 28세)와 노년층(62

세부터 90세까지 평균 75세)의 두 연령 그룹에 대하여 적용하여 표3의 결과를 얻을수 있었다. 드러누어, 메트로놈에 맞추어 호흡하는 경우와, 조용히 자발적으로 호흡하는 경우, 그리고, 드러누어 고개를 60도 정도 치켜들고 자발적으로 호흡하는 세가지 경우에 대하여, 심박동수와 혈압파형의 변동상태를 상관차원의 방법으로 정량화 한것이다. 여기서 보면, 각각의 경우 두 그룹간의 차이가 분명하게 나타나는것을 알 수 있다. 즉, 노화 현상에 의한 신체 각기관의 활동도의 저하에 따른 생체신호상에서의 복잡성의 저하를 이와 같은 방법으로 측정하여서 노화 현상에 대하여서 나름대로 정량화할 수 있음을 통하여, 혼돈이론을 이용한 생체신호의 처리의 한 부분을 보여주고 있다.

표 3. 연령에 따른 상관차원의 변화

괄호안은 표준편차이고, * 표시된 것은 $p < 0.02$ 의 범위내에서 통계적으로 유의함

상태	신호	노년층	젊은층
메트로놈호흡	심박동수	3.82(0.41) *	4.43(0.31)
	혈압파형	3.89(0.71)	3.70(0.73)
자발적 호흡	심박동수	3.41(0.57) *	4.20(0.53)
	혈압파형	3.12(0.61) *	3.61(0.46)
고개를 치켜든 상태에서 자발적 호흡	심박동수	3.69(0.07)	3.88(0.42)
	혈압파형	3.23(0.73) *	3.94(0.43)

V. 결론

상대성이론, 양자역학과 함께 20세기의 3대 주요 과학분야라고 일컬어 지고 있는 혼돈이론은 과학의 다른 여러분야와 함께 생체신호의 처리를 포함한 의공학분야, 의학 분야등 생체를 취급하는 과학분야에 여러가지 형태로 활용되고 있다. 특히 혼돈이론은 생체에서 나타나는 비선형적 특성, 자기유사성, 전일적분석등 생체신호의 처리에 적합한 특성을 갖고 있어, 뉴우튼의 역학에 기본을 둔 기존의 분석 방법들에서 제공하지 못하였던 여러가지 생체 현상에 관한 분석을 가능하게 하여, 생체 신호처리를 통한 인체 및 생체의 기전연구와 이를 이용한 각종 질병의 진단분야

에서 활발한 연구 성과가 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] T.S. Parker, L.O. Chua, "Chaos: A Tutorial for Engineers.", *Proc. IEEE*, vol. 75, no. 8, pp. 982-1008, Aug, 1987.
- [2] A. Babloyantz, A. Destexhe, "Low - dimensional Chaos in Instance of Epilepsy", *Proc. Natl. Acad. Sca. USA*, vol. 83, pp 3513-3517, May, 1986.
- [3] T.A. Denton, G.A. Diamond, R.H. Helfant, S.Khan, H. Karagueuzian, "Facinating Rhythm: A Primer, on Chaos, Theory and Its Application to Cardiology", *American Heart Journal*, vol. 120, no. 6 pp. 1419-1440, Dec., 1990.
- [4] J. Gleick, "Chaos: Making a New Science", New York: Viking Penguin Inc., 1987.
- [5] E.N. Lorenz, "Deterministic Nonperiodic Flow", *J. Atmospheric Sci.*, vol. 20, no. 2, Mar., 1963.
- [6] R. Pool, "Is It Chaos, or Is It Just Noise", *Science*, vol. 243, pp. 25-28, Jan., 1989.
- [7] R. Pool, "Is It Healthy to Be Chaotic", *Science*, vol. 243, pp. 604-607, Feb., 1989.
- [8] P. Grassberger, I. Procaccia, "Measuring the Strangeness of Strange Attractors", *Physica D*, vol. 9, pp. 189-208, 1983.
- [9] A.L. Goldberger, D.R. Rigney, B.J. West, "Chaos and Fractal in Human Physiology", *Scientific American*, pp. 35-41, Feb, 1990.
- [10] D. G. Chaffin, et. al., "The dimension of chaos in the fetal heart rate", *Am. J. Obstet. Gynecol.*, vol. 165, no. 5, pp. 1425-1429, Nov, 1991.
- [11] D. Gulick, "Encounters with Chaos", McGraw-Hill, Inc., 1992.
- [12] N. B. Tufillaro, T. Abbott, J. Reilly, "Nonlinear Dynamics and Chaos", Addison-Wesley Inc. 1992.
- [13] J.P. Crutchfield, J.D. Farmer, N.H. Packard, R.S. Shaw, "Chaos", *Sci. Am.* vol. 255, pp. 46-57, 1986.
- [14] Erol Basar (Ed), "Chaos in Brain Fuction", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [15] Ichiyasu H., et al., "New echocardiographic observation in a patient with dissimilar atrial rhythms", *Arch-Intern-Med*, vol. 142, no. 12, pp. 2215-7, 1980
- [16] Craig T, et. al., "Motility analysis of circulary swimming bull spermatozoa by quasi-elastic light scattering and cinematography", *Biophysics-J.*, vol. 38, no. 1, pp 63-70, 1980.
- [17] Lebrun P, Atwater I, " Chaotic and irregular bursting electrical activity in mouse pancreatic B-cells", *Biophysics - J.*, vol. 48, no. 3, pp. 529-31, Sep., 1985.
- [18] Yip K. P. et. al., "Chaos in blood flow control in genetic and renovascular hypertensive rats", *Am -J -Ohysiol.*, vol. 261, no. 3, pp. F400- 8, 1991.
- [19] Lipsitz L. A., Goldberger A.L., "Loss of complexity and aging", *JAMA*, 267 (13), pp 1806-9, Apr. 1992.
- [20] T. Yambe, et. al. . " Chaos and fractals in pulse diagnosis", 2nd FECMBE proceeding, p 243, 1993.
- [21] 박광석, " 의공학분야에서의 혼돈과학 " , 전기공학회잡지 . July, 1993.
- [22] Kaplan D.T. et. al., "Aging and the complexity of cardiovascular dynamics. ", *Biophysics J.* vol. 59, pp 945-949, 1991. ☉

筆者紹介



朴光錫

1957年 5月 21日生

1980年 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)

1985年 서울대학교 대학원 (공학박사)

1985年 ~ 현재 서울대학교 의과대학 의공학교실 조교수