

카오스-심전도 분석기의 설계 및 응용에 관한 연구

이 병 채 · 이 명 호

=Abstract=

A Study on Design of a Chaos-ECG Analyzer and Its Applications

Byungchae Lee, and Myoungcho Lee

This paper describes design of a Chaos analyzer and its applications to analysis of nonlinear characteristics of ECG. The proposed system can easily distinguish chaotic system among the various dynamical systems by chaotic quantitative and qualitative analysis and also chaotic characteristics which represents states of nonlinear dynamical system. And we have also proposed new possibilities to recognize abnormal state of ECG signal using the chaotic characteristics.

1. 서 론

카오스 이론은 결정론적 비선형 동역학 시스템(deterministic nonlinear dynamic system)을 다루는 학문이다. 최근에 카오스 이론이 복잡한 시스템의 분석 및 예측에 응용될 수 있다는 가능성이 대두되면서부터, 확률론적 처리 방법에 의존하던 자연계의 불규칙 현상들에 대한 고전적인 개념 자체가 바뀌게 되었고, 물리학, 수학 분야 뿐만 아니라 공학에서도 매우 광범위한 응용연구가 진행되고 있다.

또한 심전도와 같은 생체신호도 예외는 아니어서 일찍부터 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 생체 시스템, 즉 심장에서 측정되는 전기적 신호인 심전도는 외관상 주기적이거나 어느 범위내에서 랜

덤한 변화를 보이는데 이러한 변화가 외부 잡음의 영향인지 또는 생체 시스템의 비선형적인 특성인가의 의문에서 출발하여, 심장의 상태나, 질병, 스트레스등 변화의 발생원인이라고 추측되어 왔던 다양한 자극에 따른 심장 시스템의 비선형 동역학적 특성을 해석하고, 진단, 예측, 제어를 위한 모델링이 주된 연구의 목적이다.

80년대 후반까지의 대부분의 연구는 심장의 행태가 과연 카오스적인 신호인가하는 의문이었다. 논란의 여지가 없는 것은 아니었지만 심전도 신호가 카오스 신호임이 정설로 받아 들여지고 있다 [1]. 현재까지의 주된 연구 방향은 심장의 상태에 따른 혼돈적 특성의 해석이었고, 건강한 사람일수록 혼돈도가 크다는 사실을 실험적으로 입증하였다 [2]. 또한 심장의 박동을 비선형 시스템으로 모델링 하여 이상 상태를 예측하려는 시도이다. 이미 몇몇 연구자들에 의해 일부 특정 상태에 대한 모델링이 이루어졌다 [3]-[5]. 그러나 이러한 심장 모

<접수 : 1993년 12월 9일>

연세대학교 전기공학과

Dept. of Electrical Engineering, Yonsei Univ.

델팅이 실제 데이터와는 차이가 있어 큰 의미를 부여하기는 어려운 실정이며 앞으로 연구의 여지가 많이 남아 있다.

본 연구에서는 생체신호 뿐만 아니라 다양한 분야에서 카오스 이론 및 응용 연구에 필수적으로 사용되어질 카오스-심전도 분석기(Chaos-ECG Analyzer)를 설계하고 이를 설명하였다. 또한 초기 응용연구로서, 제안된 분석기를 이용하여 입력된 생체 신호가 카오스 신호임을 입증하고, 정상 심전도와 비정상 심전도 신호의 비선형적 특성을 분석함으로써 패턴인식등 진단의 가능성을 알아 보고자 한다.

2. 카오스 이론 과 심전도 비선형 특성 해석

외관상 인과 관계가 없는 것처럼 보이던 많은 현상들을 과학자들은 오랫동안 잠음 또는 랜덤한 시스템으로 이해하였고, 그들로서는 계산해 낼 수 없었던 현상이었으므로, 이에 대한 해석이나, 모델링 자체를 애써 외면해 왔다.

카오스 이론의 창시자인 프랑스의 수학자 포앙 카레는 간단한 결정론적 방정식에서 예측 불가능한 비결정론적 해를 얻어냄으로써 결정론적 시스템은 예측 가능하다는 고전적 개념을 뒤집어 놓았다(6).

로렌츠(7)는 초기값 민감성에 의한 예측 불가능이라는 카오스의 중요한 특성을 발견하였다. 또한 이러한 혼돈스런 수많은 해들이 모두 임의적인 것이 아니라 임의성은 가능한 범위에 한정되어 있다는 사실을 밝혀 내기도 하였다.

메이는 곤충수의 변화 모델에 기본적인 비선형 방정식을 사용하였으나, 곤충수는 완전한 카오스이며, 예측불가능 하였다. 요크와 리가 “카오스”란 단어를 처음으로 정의 하였으며, 파이젠바움은 주기적으로 배가되어 발생하는 카오스에 관련된 어떤 방정식도 그 결과와 비율이 같다고 결론지음으로써 카오스이론에 돌파구를 마련하였다(8).

카오스는 결정론적 시스템에서도 예측하지 못하는 비결정론적, 비주기적인 해가 발생한다는 것으로, 공학에서의 응용은 어느 정도 예측이 가능한 결정론적 카오스(deterministic chaos)를 다루게 된다. 즉 한정된 영역에 국한된 비선형적인 현상을 규명하고자 하는 시도인 것이다.

카오스 신호는 주기함수 및 랜덤함수와 비교되는 특징을 가지고 있다. 즉 초기조건에 매우 민감

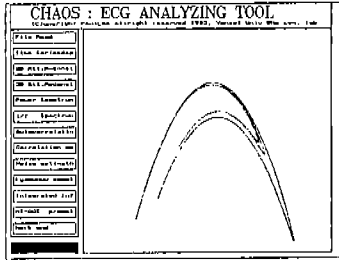
하여 초기치가 거의 같은 시스템이라 할지라도 시간이 지날 수록 전혀 다른 동작특성을 보인다. 자기유사성이 존재하며, 궤도는 어느 범위안에서 운동을 한다.

심장은 하나의 비선형 동력학 시스템이며, 완전한 주기 함수나, 랜덤 함수도 아닌 시스템이라면, 이러한 시스템의 응답을 해석하려는 연구의 첫번째 단계로서는 시스템의 신호가 카오스신호 인지 노이즈인지를 구분해야 하며, 데이터 획득시의 샘플링 및 시간부터 조정이 되어야 한다. 이것은 샘플링 시간에 따라서 또는 데이터의 갯수에 따라서 카오스적 동태가 다르게 나타날 수 있기 때문이다. 또한 심전도 신호와 같은 생체 신호에서의 잠음 혼입에 따른 카오스 동태도 무시 할 수 없는 요소이므로 기저선 변동, 전원잡음등의 필터링도 함께 고려해야 한다. 어트랙터 재구성에 의한 위상평면도, 자기상관계수, 스펙트럼 분석등의 정상적 분석과 함께 상관차원(correlation dimension), lyapunov exponent, k-entropy 등의 정량적 분석으로 결정론적 카오스 동태를 구분하며, 특성을 검출해 낼 수 있다. 두번째 단계로서는 이러한 분석을 통해 시스템을 모델링 하는 것이다. 세번째 단계는 모델링 데이터와 실제 데이터를 비교한다. 이 과정을 이용하여 시스템의 동태를 어느 정도 예측 가능하도록 하며 오랫동안 잠음으로 인식하여 버려 두었던 카오스 신호를 제어 할 수 있게 된다.

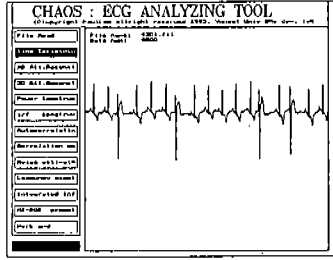
3. 카오스-심전도 분석기의 설계

카오스 이론 및 응용연구, 특히 심전도 신호의 비선형적 특성을 분석하기 위해 카오스-심전도 분석기를 설계하였다. 이를 통해 카오스적 특성을 추출하며, 장기적으로는 심장질환의 진단 및 심장 상태의 예측을 위한 기초 정보를 획득할 수 있다.

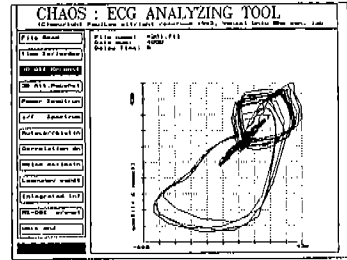
본 연구에서 설계한 카오스-심전도의 분석기는 심전도 신호의 획득, 시계열 데이터 표시, 바라보는 시각의 변환이 가능한 2차원, 3차원 위상평면에 의한 어트랙터의 재구성, 회귀도(return map), 주파수 스펙트럼 분석, 1/f 스펙트럼, 자기상관계수를 통한 정성적 분석 및 상관차원과 같은 정량적 분석 정보를 한 화면에서 편리하게 얻을 수 있도록 하는 시스템으로써, 시스템이 카오스 시스템 인지를 구분해 낼수 있을 뿐만 아니라 카오스 특성 정보를 추출할 수 있다. 더우기 본 분석기는 카오스 이론 연구와 여러 응용분야 연구에 필수적인



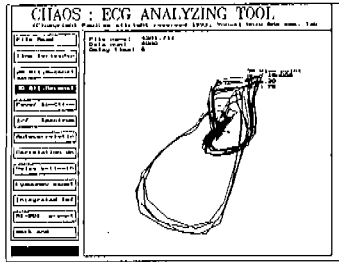
(a) 분석기의 초기화면



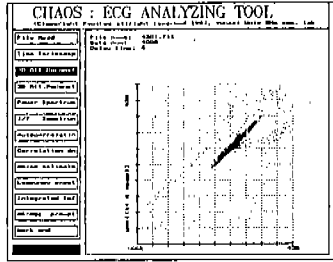
(b) 시계열 데이터 디스플레이



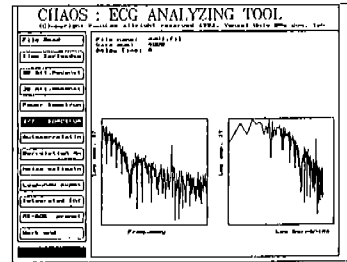
(c) 2 차원 어트랙터 재구성



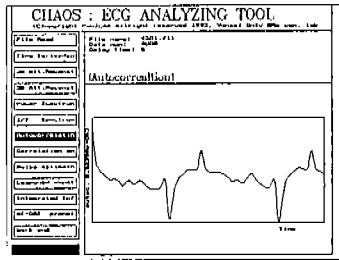
(d) 3차원 어트랙터 재구성



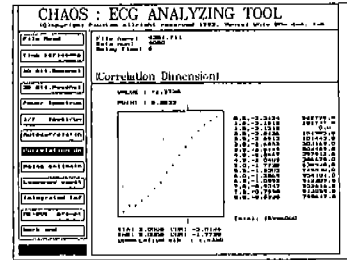
(e) 회귀도



(f) 주파수 스펙트럼(1/f)



(g) 자기상관계수



(h) 상관차원 및 잡음평가

카오스-심전도 분석기

Time Series display	
Attractor Reconstruction	Embedding 1
	Embedding 2
	Return map
Frequency Analysis	Power spectrum 1/f
Autocorrelation	
Correlation dimension	
Noise estimation	

그림 3. 1 카오스-심전도 분석기의 화면 표시

Fig. 3. 1 Screen configuration of Chaos-ECG analyzer

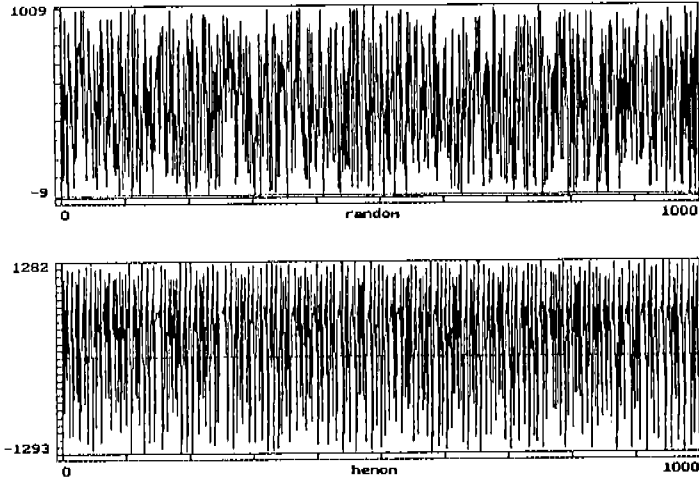
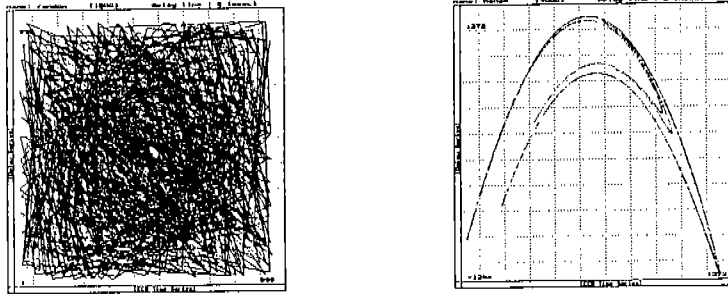


그림 3. 2 랜덤 신호 및 카오스 신호의 시계열 데이터
Fig. 3. 2 Random and Chaos signal time series



(a) 랜덤 신호
그림 3. 3 어트랙터 재구성
Fig. 3. 3 Attractor reconstruction

(b) Henon Map

도구로서도 사용될 수 있다. 그림 3. 1은 본 연구에서 설계한 카오스-심전도 분석기의 화면 표시를 나타낸 것이다.

3. 1 위상평면도

동력학 시스템은 autonomous 시스템과 nonautonomous 시스템으로 나뉘는데 다음과 같은 상태방정식으로 나타낸다[9].

$$\begin{aligned} \text{autonomous system : } \dot{x} &= f(x), \quad x(t_0) = x_0 \\ (\text{where } x &= \frac{dx}{dt}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Nonautonomous system : } \dot{x}f(x, t) \quad x(t_0) = x_0 \quad (2)$$

상태공간 개념을 도입하여 시스템의 동력학적 특성을 해석한다. 시스템의 초기 조건이 주어지면 천이상태와 안정상태의 해를 얻을 수 있게 된다. 시스템의 안정상태가 유한하면, 시스템의 상태가 매 순간에 상태 공간위의 점으로 표현되며 특정한 형태를 갖게 된다.

안정된 시스템은 이 고정점을 향해 궤적을 그리며 고정점에서 안정하게 된다. 주기적 신호는 완전한 폐곡선을 그리고, 여러개의 주기를 갖는 시스템은 몸통모양의 궤적을 그리게 되며, 카오스 시스템인 경우에는 이외의 특수한 모양을 띄게 된다. 궤적의 모양은 시스템이 이러한 궤적을 그리도록 하는 어트랙터의 영향 때문이다.

어트랙터는 시스템이나 방정식을 최종상태로 이끄는 경향 때문에 붙여진 이름으로, 평형점(equi-

librium point), 폐곡선(limit cycle), 몸통모양(torus, tori) 등의 어트랙터는 예측가능한 시스템이며, 한정된 공간내에서 특수한 모양을 갖는 카오스 시스템의 어트랙터는, 잡음과는 구분된다. 이것을 보이기 위해 그림 3.2에는 랜덤신호와 카오스 신호의 시계열 데이터를 나타내었으며, 그림 3.3은 이 시계열 데이터의 어트랙터를 재구성한 위상 평면도이다.

Takens[10]에 의해 제안되고 증명된 어트랙터의 재구성법에 의해 시스템의 한상태에서 다른 상태와의 관련성을 찾을 수 있고 1차 상태공간에서 n 차의 상태공간으로의 어트랙터 재구성을 통해 어느정도 시스템의 동태를 확인할 수 있게 된다.

본 연구에서 설계한 분석기는 회귀도를 포함하여 2차원 및 시간 변환 가능한 3차원 공간에서의 어트랙터를 표현하도록 하여 다양한 측면의 해석이 가능하도록 하였다.

3. 2 정성적 분석

주파수 특성 해석은 주기, 비주기 신호 구분에 유용하게 사용되며, 이를 통해 쉽게 주기신호임을 판별해 낼 수 있다. 잡음은 전대역에 걸쳐 일정한 주파수 성분이 존재하며, 카오스 신호인 경우도 거의 같은 특성을 보이나, 특정한 경우 log harmonic 으로 표현한 스펙트럼의 기울기를 통해, 1/f 특성을 나타냄으로써 카오스적인 특성을 발견하기도 한다. 그렇지만 아직까지는 논란의 여지가 많다[11], [12].

자기상관계수(autocorrelation)는 카오스 신호인 경우, 초기값에서 멀어짐에 따라 점진적으로 줄어드는 특성을 보인다. 주기적 신호인 경우는 자기상관계수 역시 주기적인 특성을 갖는다.

3. 3 정량적 분석

인간의 직관적 판단에 의존하는 정성적인 분석과는 달리 카오스 시스템을 정량적으로 분석하는 방법으로, 대표적인 것이 상관차원이다. 상관차원은 카오스 시스템의 자기유사성을 측정하는 척도로서, 심전도 신호와 같은 시계열 데이터를 실험 대상으로 삼는 경우 매우 편리하게 계산됨으로 가장 많이 이용하는 방법이다.

계산의 편의성을 위해 상관차원을 다음과 같이 정의한다.

$$D_c = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\ln C(r)}{\ln(r)} \text{ 여기서 상관함은 다음과 같다 (3)}$$

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} (\text{the number of pairs of points } X_i, X_j \text{ such that } |X_i - X_j| < r) \quad (4)$$

카오스 시스템 이론과 시스템의 동작특성에 의하면 시스템의 안정상태 해와 차원과의 관계는 표 3.1과 같이 요약 할 수 있다.

표 3. 1 시스템의 안정상태 해와 차원과의 관계

Table 3. 1 The relationship between the steady state of a system and its parameters

Steady-state of a system	Dimension
equilibrium point	0
1-periodic	1
k-periodic	k
chaotic	noninteger

이 외에도 기하학적 차원, 정보차원등이 있고, 카오스 신호의 대표적인 특성중의 하나인 초기값 민감도 정도를 표현하는 Lyapunov 계수 등이 있다. 이러한 정량분석법등은 현재 본 분석기의 업그레이드 과정에서 쓰여질 예정이다.

4. 실험 및 분석

4. 1 실험 방법

본 연구에서는 미국심장학회(American Heart Association)에서 구축한 부정맥 데이터 베이스의 심전도 신호를 본 연구에서 제안한 카오스-심전도 분석기를 이용하여 비선형적 특성을 분석함으로써 심전도 신호가 카오스 신호임을 확인하고 이의 특성을 이용하여 진단의 가능성이 있음을 보였다.

일반적으로 쉽게 얻을 수 있으며 정확성이 높은 심박수를 제외하고는, 파라미터등의 특성 추출에 의한 특성해석은 퍼지이론, 신경회로망이론에서와 같이 추출시의 부정확성등의 문제점을 야기할 수 있으므로 본 응용연구에서는 일단 배제 하였다. 또한 심박수 변화 분석에 있어서는, 잡음에 의한 심박수 계산의 오차를 없애기 위해서 심박수 검출 알고리즘을 이용하지 않고, 임상 의사에 의한 QRS complex의 정확한 위치가 데이터 베이스화 되어 있는 AHA 주석 파일을 함께 이용하여, 정확성을 기했다.

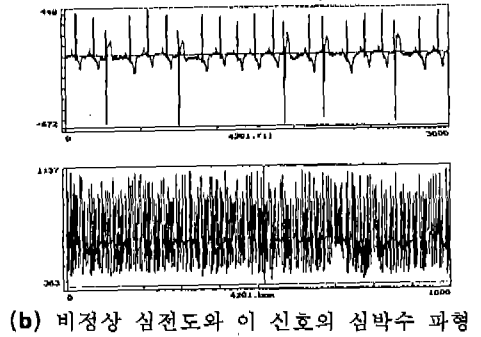
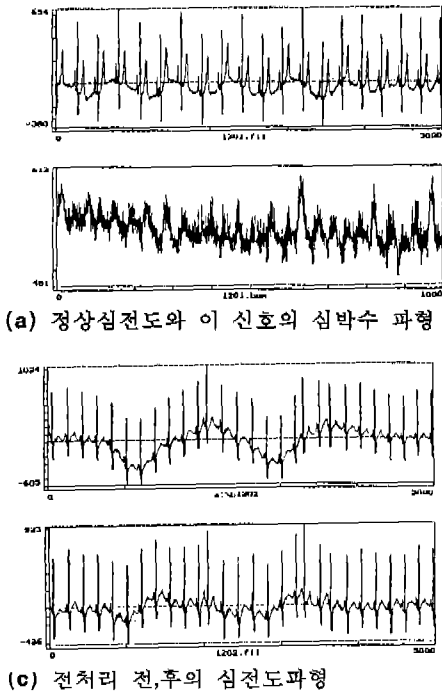


그림 4.1 사용된 심전도 신호와 심박수

Fig. 4.1 Various ECG signals and its heart rate variability

AHA 부정맥 데이터베이스는 250 샘플/초로 샘플링된 각종 부정맥 및 정상 심전도로 이루어진 약 30분 분량의 80여 파일로 구성되었다.

AHA 부정맥 데이터 베이스의 데이터중 ventricular ectopic beat 가 없는 1200계열의 데이터를 정상파형이라고 하고, 1200계열을 제외한 나머지 파일중, 이상파형의 밀도가 높은 데이터를 선택하여 이를 비정상파형으로 분류하였다.

시뮬레이션에서는 정상,비정상 심전도 신호와 이 신호들의 심박수의 변화를 파형, 두 종류의 데이터를 입력 신호로 하였다.

표 4. 1은 AHA 부정맥 데이터베이스의 대표적 파일을 나타낸다.

표 4. 1 부정맥 데이터 베이스의 분류

Table 4. 1 Normal and abnormal signal in AHA database

정상파형	비정상파형
1201,1202,1203,1204,1205, 1206,1207,1208,1209,1210	2201,3101,4201,5201,6201, 7201,8201

또한 심전도 신호 분석시에, 어트랙터 재구성등 시스템 특성 해석에 미치는 외부 잡음의 영향을 평가하기 위하여, 전처리 과정 실시여부를 평가 하

였는데 이때에는 필터링에 의한 파형의 왜곡을 최소화 하기위해 본 연구진에 의해 개발된 위상보정 필터를 이용하여 기저선 변동을 제거 하였다.

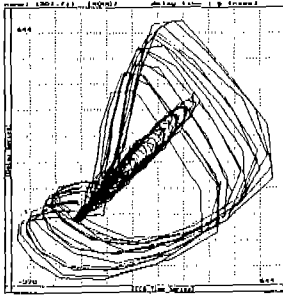
4. 2 결과 및 고찰

그림 4. 1에 입력신호로 사용된 데이터의 심전도 시계열 데이터 및 심박수 데이터를 나타내었다.

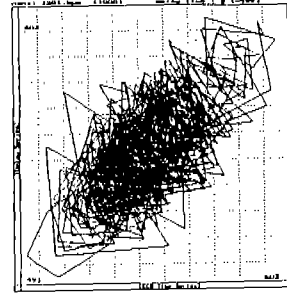
그림 4. 2는 그림 4. 1의 데이터의 어트랙터를 재구성한 것이다. 시계열 데이터로는 볼수 없었던 독특한 특성을 쉽게 이해할 수 있다. 그림 4. 2의 (a),(b),(c),(d) 에서와 같이 심박수 변동의 어트랙터를 재구성한 위상평면도를 통해 쉽게 부정맥의 발생여부 및 정도를 판별할 수 있는 도구로도 사용될 수 있다.

그림 4. 2의(e),(f)는 심전도 신호의 전처리 전후의 관계를 나타내었는데, 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 외부적 요인에 의한 기저선 변동은 동태 해석에 많은 영향을 미치며, 상관차원 계산에 있어서도 커다란 차이를 보였다.

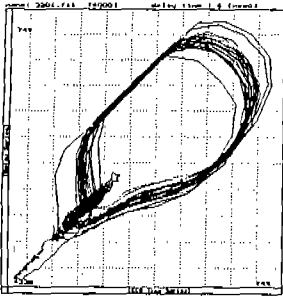
표 4. 2에는 Grassberger 알고리즘에 의한 심전도 신호와 심박수 신호의 상관차원을 나타내었다. 심전도 파형인 경우에는 기저선 변동등의 다양한 외부적 원인으로 별다른 차이를 얻어내지 못하였다. 심실 이상 파형의 밀도가 높은 심전도 신호의



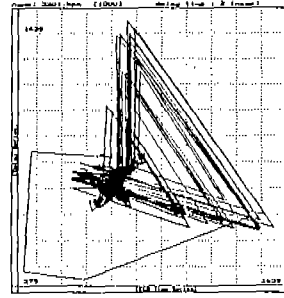
(a) 정상 심전도 신호의 어트랙터



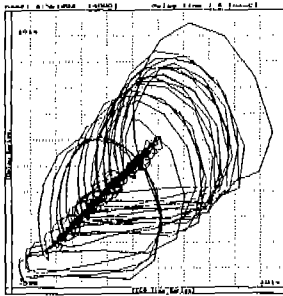
(b) 정상심전도 신호에 대한 심박수 파형의 어트랙터



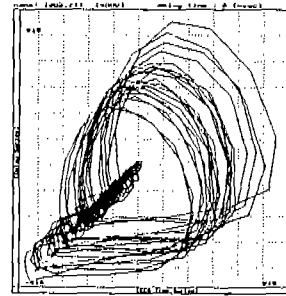
(c) 부정맥 신호의 어트랙터



(d) 부정맥 신호에 대한 심박수파형의 어트랙터



(e) 전처리 전 심전도 신호의 어트랙터



(f) 전처리 후 심전도 신호의 어트랙터

그림 4.2 어트랙터의 재구성

Fig. 4.2 Attractor reconstruction

표 4.2 상관차원

Table 4.2 Correlation dimension

분 류	상 관 차 원
정 상 심전도	3.6497-4.6870
비정상 심전도	3.2821-4.7018
정상 심전도의 심박수 변화율	4.0833-6.1078
비정상 심전도에 대한 심박수 변화율	6.0191-6.9349

심박수 변화율에 대한 상관차원은 일부 상관차원이 수렴하지 않는 경우도 발생하였지만 정상파형에 대한 심박수 변화율 보다 불규칙성이 심하였으므로,

상관차원이 정상 심전도에 대한 심박수 보다 높게 분포되었다. 이러한 경우는 대부분 높은 차원(embedding dimension)에서 수렴하는 현상을 보였다.

5. 결 론

본 논문은 카오스 이론 및 응용연구에 유용한 카오스-심전도 분석기의 설계 및 이를 이용한 심전도 신호의 비선형적 특성 해석에 관한 연구로서, 심전도 신호의 비선형적 특성을 실험적으로 분석하였다.

본 논문에서 설계한 카오스-심전도 분석기를 이용하여 AHA 데이터 베이스의 정상 심전도와 비정상 심전도 신호에 대한 비선형적 특성을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 심전도 신호 및 이의 심박수 변화율 신호는 어트랙터의 재구성, 주파수 스펙트럼, 자기상관계수, 상관차원등의 정량적, 정성적 분석을 통해 카오스 신호임을 확인 하였다.

2) 심전도 신호의 분석시에 기저선 변동은 시스템의 동태해석에 많은 영향을 주므로 정확한 해석을 위해서는 전처리 과정이 필요하다.

3) 심전도 신호에서의 비선형적 특성은 부정맥과 정상심전도 사이에 커다란 차이를 보이지 않으나, 불규칙적인 부정맥이 발생하는 경우에는 정상 심전도의 심박수 변화율보다 상관차원이 대체적으로 높게 분포됨을 알수 있었다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 패턴 인식등의 진단으로의 응용 가능성이 있음을 확인 하였다.

4) 본 논문에서 설계한 카오스-심전도 분석기는 심전도 신호 뿐만 아니라 일반 이론 연구 및 응용 연구에 유용하게 사용될 수 있다.

본 논문에서는 실험 대상을 부정맥으로 한정하였지만, 앞으로의 연구과제로서 비선형적 특성의 발생원인 이라고 추측되어지는 다양한 영향에 따른 특성 평가를 진행 할 것이다. 즉, 각종질병, 약물의 영향, 노화, 스트레스등에 따른 발생기전 및 이에따른 카오스적 특성을 해석해 나가고자 한다.

현재의 카오스 연구는 시스템 모델링의 첫단계인 특성 해석의 단계로서, 앞으로 더욱더 다양한 측면의 특성 해석이 요구되고 있으므로, 실험 방법의 정량화와 실시간 분석법등을 연구해야 하며, 정량적인 측면에서뿐만 아니라 정성적인 특성의 정량화 연구를 진행해야 한다.

참 고 문 헌

- 1) T.A. Denton et. al., "Fascinating Rhythm : A Primer on Chaos Theory and its Application to Cardiology", American Heart Journal, vol. 120, no. 6, pp. 1419-1440, Dec., 1990.
- 2) Ary L. Goldberger, "Fractal Mechanisms in the

- Electrophysiology of the Heart", IEEE Eng. in Medicine and Biology Magazine, pp. 47-52, Jun, 1992.
- 3) M.R. Guevara et al., "Phase-locked rhythm in periodically Stimulated Heart Cell Aggregates", American Journal of Physiology, vol. 254, pp. H1-H10, 1988.
- 4) A.L. Rizenberg et al., "Period multipling : "evidence for nonlinear behaviour of the Canine Heart", Nature, vol. 307, no. 12, pp. 159 : 161, 1984.
- 5) A. Shrier et. al., "Prediction of Complex Atrioventricular Conduction Rhythm in Humans with use of atrioventricular nodal recovery curve", Circulation, vol. 76, no. 6, pp. 1196 : 1205, 1987.
- 6) H. Poincare "New methods of celestial mechanics", *History of Mode Physics and Astronomy*, American Institute of Physics, vol. 13, 1993.
- 7) E. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow", Journal Atmosphere Science, vol. 20, no. 2, pp. 130-141, 1963.
- 8) J.P. Crutchfield, et.al "Chaos", *Scientific American*, pp. 38 : 49.
- 9) T.S. Parker and L.O. Chua, "Chaos : A Tutorial for Engineers", Proc. IEEE, vol. 75, no. 8, pp. 982-1008, Aug., 1987.
- 10) F. Takens, "Detecting strange attractors in turbulence" Warwick 1980 Lecture Notes in Mathematics, vol. 898, Springer, pp. 366-381, 1980.
- 11) A.L. Goldberger, "Comments on 1/f Power Spectrum of the QRS Complex revisited" Biophysiological Journal(letter), vol. 60, pp. 1301-1302, Nov., 1991.
- 12) D.R. Chialvo and Jose Jalife, "1/f Power Spectral Density of the Cardiac QRS Complex is not Associated with a Fractal Purkinje System" Biophysiological Journal(letter), vol. 60, pp. 1303-1305, Nov., 1991.