

# 카오스 해석법을 이용한 전방십자인대 재건수술 환자와 정상인의 보행연구

고재훈\*, 손권#, 박정홍\*, 서정탁\*\*

## Gait Study on the Normal and ACL Deficient Patients after Ligament Reconstruction Surgery Using Chaos Analysis Method

Jae Hun Ko\*, Kwon Son#, Jung Hong Park\* and Jeung Tak Suh\*\*

### ABSTRACT

Anterior cruciate ligament(ACL) injury of the knee is common and a serious ACL injury leads to ligament reconstruction surgery. Gait analysis is used to identify the result of surgery. The purpose of this study is to numerically evaluate and classify knee condition of patients through the chaos analysis. Experiments were carried out for 13 subjects (8 healthy subjects, 5 ACL deficient patients) walking on a treadmill. Sagittal kinematic data of the right lower extremity were collected by using a 3D motion analysis system. The recorded gait patterns were digitized and then coordinated by KWON3D. The largest Lyapunov exponent from the measured knee angular displacement time series was calculated to quantify local stability. It was found that the Lyapunov exponent becomes larger as the knee condition becomes worse. This study suggested a method of the severity of injury and the level of recovery. The proposed method discerns difference between healthy subjects and patients.

**Key Words** : Chaos (카오스), Lyapunov Exponent (리아프노프 지수), Knee Flexion-Extension (무릎 굴곡 신전), ACL (전방십자인대), Ligament Reconstruction Surgery (전방십자인대 재건술)

### 1. 서론

보행은 이동 운동의 한 형태로 신체를 한 장소에서 다른 장소로 진행시키는 동작이다. 보행시 인체의 하지에 무리한 동작을 수행할 경우 하지 관절, 인대, 근육 등에 상당한 하중이 전달되어 여러 가지 질병이나 부상을 초래할 수 있다. 보행에 관한 연구는 정형외과, 신경과학, 재활의학, 생체역학

등 많은 전문분야에서 활발하게 연구되고 있다.

지금까지 보행에 관해서는 다양한 연구들이 계속되어 왔다.<sup>1-7</sup> 보행주기와 관련된 기본적인 기술연구에서 시작하여, 복잡하고 다양한 측정도구와 방법을 사용하거나, 다양한 수학적 모델링 기법을 사용한 최근의 연구까지 독특한 영역을 구축하며 꾸준히 발전해 왔다. 보행분석은 병적인 보행을 나타내는 환자에게서 정확한 원인과 이상부

\*\*\* 접수일: 2005년 7월 22일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

# 교신저자: 부산대학교 기계공학과

E-mail kson@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2308

\*\* 부산대학교 의과대학 정형외과

위를 찾아내어 객관화 및 수치화하여 비교, 평가하는데 필수적이다. 뿐만 아니라 정상적인 보행분석 데이터를 수집하고 정상 성인의 보행패턴을 객관화하는 것이 필요하다.

무릎 관절에서 전방십자인대는 안정성에 있어 중요한 역할을 담당하고 있다. 무릎은 인체의 최대 관절중의 하나로 스포츠나 교통사고 등 광범위한 신전 운동이나 충격으로 인한 손상이 빈번히 나타나고 있다.<sup>2</sup>

무릎의 파손이나 변형의 정도가 큰 경우에는 인공 삽입물을 이용하여 관절을 대체하는 인공 관절 치환술이나 타인의 인대를 이식하는 인대 재건술 등을 널리 시행하고 있다.<sup>3</sup> 수술후의 경과를 검사하는 방법으로는 검사자의 주관이 개입될 수 있는 이학적 검사, 단순 방사선 사진에 의한 하지의 정렬상태, 환자가 느끼는 정도에 의하여 평가하여 왔다.<sup>4</sup> 그러나 보행 분석에 의한 기존의 방식은 관절의 최대 굴곡각도, 보행의 주기 등을 비교하여 판별하는 방법으로 무릎의 상태에 따른 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 없다.<sup>5</sup> 이 문제를 해결하기 위하여 최근 카오스 이론에 근거한 비선형 동역학 이론을 적용한 보행 분석 방법이 사용되고 있다.

카오스 이론은 결정론적 비선형 동역학 시스템을 다루는 학문의 하나로 푸앙카레에 의해 처음 발견되었다. 이러한 비선형 동역학 이론에 관한 많은 연구와 발전이 있었고 보행시 무릎 굴곡각을 이용한 시계열(time series)에 대한 새로운 연구 방법이 국외에서 활발히 연구되고 있다. Stergiou 등<sup>6</sup> 전방십자인대 손상이 발생한 무릎의 상태를 보행 분석을 통한 리아프노프 지수로 무릎의 안정성을 평가하였다. Dingwell 등<sup>7,8</sup> 은 트레이드밀과 지면 보행의 차이점, 말초신경장애환자의 보행특성을 비선형 시계열 분석방법으로 분석하였다. Buzzi 등<sup>9</sup> 은 비선형 동역학 이론을 이용하여 나이에 따른 무릎의 안정성을 평가하였다. 비선형 동역학 이론을 적용한 보행 분석에 대한 해외의 활발한 연구에도 불구하고 국내에서는 비선형 동역학 분석을 생체 신호 처리등의 심전도, 호흡, 혈압, 뇌파 등 생체 신호에만 한정적으로 적용하고 있다.

본 연구에서는 정상인과 전방십자인대 재건 수술을 받은 환자에 대한 무릎의 굴곡각에 대한 시계열 데이터를 분석하여 무릎의 안정성을 평가하고자 한다. 시계열로부터 끌개(attractor)를 구성하고 얻어진 리아프노프 지수로 정상인과 환자에 대한

차이점을 명확히 규명하고자 한다.

## 2. 실험 대상 및 방법

### 2.1 실험 대상

실험은 전방십자인대 재건수술을 받은 5 명의 환자군과 정상인 8 명을 대상으로 하였다. 정상인은 과거에 무릎 관련 질환으로 수술을 받은 이력이 없고 일상생활에서 무릎 관절의 불편함이 없다고 하였다. 피 실험자의 연령, 키, 몸무게는 Table 1 과 같다.

### 2.2 실험 장치 및 방법

보행 실험은 정상인에 대한 정상보행과 비정상보행을 실시 하였다. 정상인의 비정상 보행은 자신이 무릎에 통증을 느낀다고 가정하고 의도적으로 절뚝거리며 걷도록 했다. 전방십자 인대 재건 수술 후의 환자에 대해서는 평소대로 걷도록 하였다.

카오스 이론을 적용한 보행 분석에 있어서 충분한 무릎 굴곡각 데이터를 필요로 하기 때문에 보행실험은 트레이드밀에서 수행하였다. 하지 요소와 무릎의 굴곡각 자료는 3 차원 운동 측정 장치로부터 얻었다. 3 차원 운동 측정 장치는 3 차원 공간자, 해석 소프트웨어, 영상획득 장치(DCR-VX2100) 2 대로 구성되어 있다.

Table 1 Subjects of the test

Subject	Age	Height(cm)	Weight(kgf)	Remark
S1	27	169	66	Healthy subject
S2	32	181	76	
S3	28	175	70	
S4	33	170	82	
S5	26	174	66	
S6	27	180	90	
S7	28	178	75	
S8	29	174	80	
ACL D1	35	179	71	ACL deficient patients
ACL D2	24	183	81	
ACL D3	36	168	74	
ACL D4	26	174	71	
ACL D5	32	175	69	

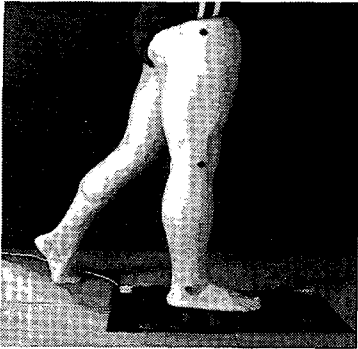


Fig. 1 Marker positions of the right leg

하지 운동을 기록하기 위하여 Fig. 1 과 같이 오른쪽 하지의 대전자(greater trochanter), 외측상과(lateral femoral epicondyle), 외과(lateral malleolus) 3 곳의 피부 표면에 표식을 부착시켰다. 보행은 피실험자마다 느끼는 안정한 속도로 보행하도록 하였다. 사람이 느끼는 가장 안정한 보행속도는 사람마다 다르며 기존의 연구에 의해 보행에서의 속도는 안정성에 영향을 미치지 않는 것이 증명되어 속도는 각각의 실험자가 안정하다고 느끼는 속도에서 수행하였다.<sup>6</sup>

측정의 오차를 줄이고 안정된 데이터를 얻기 위해 보행이 안정된 상태에서 표식의 운동을 2 대의 영상획득 장치를 이용하여 초당 60 프레임으로 120 초 동안 획득하였다. 얻어진 결과를 Fig. 2 와 같이 사전에 기록해 놓은 3 차원 공간자를 기준으로 직접 선형 변환 기법을 이용한 응용 소프트웨어인 KWON3D 를 사용하여 표식의 3 차원 좌표 데이터를 획득하고 무릎의 굴곡각을 얻어냈다. 이는 비선형 분석에 필요한 시계열이 자료가 된다.

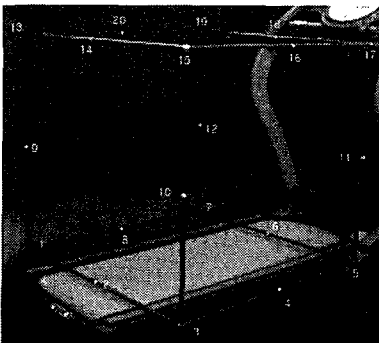


Fig. 2 Calibration frame

### 3. 시계열 구성 및 분석 방법

#### 3.1 시계열의 구성

본 연구에서는 시상면(sagittal plane)의 무릎 굴곡각을 이용하여 시계열을 구성하였다. 생체 신호 처리 등의 연구에서는 측정된 시계열을 수정하여 사용하는 연구 기법을 이용하고 있으나 본 연구에서는 얻어진 고유의 데이터를 시계열로 이용하였다. 이는 데이터에 수정을 가할 경우 중요한 정보가 제거되거나 시스템 고유의 정보가 제거되어 정확한 분석이 어렵기 때문이다.

Fig. 3 은 시계열 수의 변화에 따른 리아프노프 지수의 변화를 나타낸다. 모든 실험자의 그래프를 분석한 결과 시계열수가 5000 개 정도에서 리아프노프 지수는 수렴해 가고 있다. 그래서 본 연구에서는 시계열의 수를 5000 개로 구성하였고 이는 비선형 해석법을 위한 충분한 수이다.

얻어진 시계열 데이터를 바탕으로 카오스 해석을 하기 위해서 측정된 시계열을 바탕으로 지연 시간과 임베딩 차원을 계산하였다. 이를 이용하여 비선형 끌개를 구성하고 리아프노프 지수를 계산하여 정상인의 정상보행과 비정상보행, 전방십자인대 재건수술 후의 환자에 대해 무릎의 안정성을 비교 분석하였다.

#### 3.2 지연시간의 설정

지연시간의 결정은 임베딩 차원을 계산하여 끌개의 특성을 결정짓는데 중요한 역할을 한다.

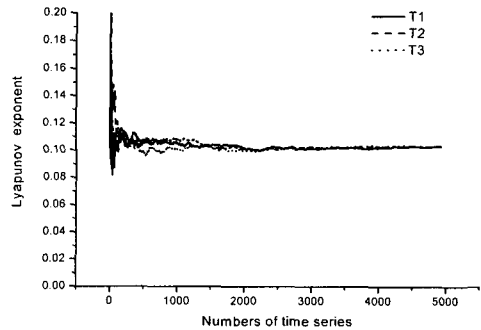


Fig. 3 Comparison of Lyapunov exponent for various numbers of time series

N 개의 샘플링 개수를 갖는 시계열 데이터  $x[1], x[2], \dots, x[N-1], x[N]$  을 이용하여 n 차원 벡터의 시계열 데이터( $x[1], x[1+T], x[1+2T], \dots, x[1+(n-1)T]$ )로 만들어야 한다. 여기서 T 는 지연시간이다. 지연시간이 1 인 즉, 연속으로 n 개의 값을 추출하여 n 차원 시계열 벡터를 구성하면 정보가 사라져 직선형태의 왜곡된 궤적이 만들어진다. 반대로 T 값이 너무 크게 정하면 불규칙한 특성이 나타나서 부드럽고 연속적인 궤적이 나타나지 않는다. 따라서 n 차원의 시계열 벡터를 구성함에 있어서 각 항목 사이의 관계를 계산하여 너무 크지도 작지도 않은 지연시간을 결정해야 한다.

본 연구에서는 최적의 지연시간을 결정하기 위하여 AMI(Average Mutual Information) 방법을 이용하였다.

$$I_{x(t),x(t+T)} = \sum P(x(t),x(t+T)) \log_2 \left[ \frac{P(x(t),x(t+T))}{P(x(t))P(x(t+T))} \right] \quad (1)$$

여기서 T 는 지연시간,  $x(t)$  는 원래 데이터,  $x(t+T)$  는 시간지연 데이터, 그리고  $P(x(t))$  는  $x(t)$  의 확률분포 함수이다. AMI 를 구하는 방법은 지연시간을 반복적 순차적으로 넣어 시계열 데이터를 만든 후 첫 번째 최소가 되는 점을 지연 시간으로 결정하였다.

Fig. 4 는 보행실험으로 얻어진 무릎 굴곡각의 시계열을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 트레이드밀에서 일정한 속도로 보행하는 경우에 허벅지와 종아리 사이의 굴곡각은 평균값에서 다소의 변동을 나타내는 불규칙적인 카오스 성질을 가지고 있다. 마치 주기적으로 보이는 사람의 보행 동작도 심전도나 뇌파와 같은 생체신호처럼 정확하게 주기적인 것은 아니다.

Fig. 5 는 시간지연의 계산과정을 나타낸다. 계산된 지연시간은 실험자마다 다르게 나타났다.

### 3.3 최소 임베딩 차원의 설정

임베딩 차원은 위상궤적을 그릴 공간을 구성하는 축의 개수를 의미한다. 동역학 방정식이 제대로 알려지지 않은 시스템에서 발생한 시계열 데이터의 경우 위상 궤적을 왜곡시키지 않고 제대로 반영하기 위한 임베딩 차원을 설정하는 것은 중요하다. 임베딩 차원의 설정에 있어서 모든 궤적을 모두 임베딩 할 수 있는 무한대에 가까운 아주 큰 값을 무작위로 설정해도 되겠지만, 매우 큰 임베딩 차원의 경우 위상궤적의 관계 계산에 있

어 많은 시간이 소요된다.

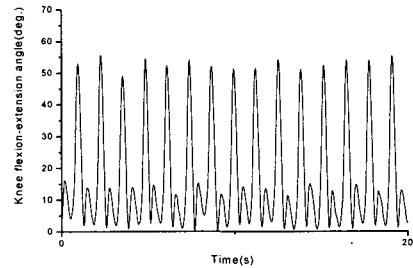


Fig. 4 The time series of knee flexion-extension angle

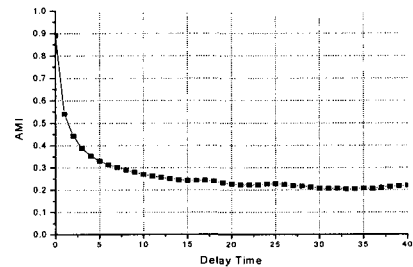


Fig. 5 Delay time by AMI

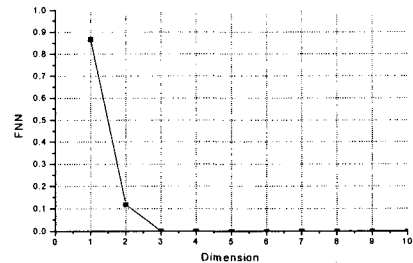


Fig. 6 Embedding dimension by FNN

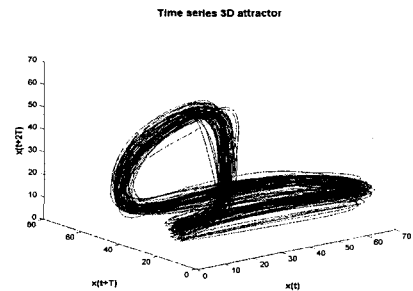


Fig. 7 Three-dimensional state space created by the time series

본 연구에서는 FNN(False Nearest Neighbor) 알고리즘을 이용하여 시계열의 차원을 계속 증가시키면서 FNN의 비율을 조사했을 때 그 비율이 최초로 0이 되는 점을 최소 임베딩 차원으로 결정하였다.

그림 Fig. 6은 FNN 알고리즘을 이용하여 최소 임베딩 차원을 계산한 그림이다. 모든 실험자에 대해 최소 임베딩 차원은 4차원으로 계산되었다.

### 3.4 위상 공간의 구성

위상공간은 1차원 시계열 데이터와 시간지연 데이터를 이용하여 한계적 기하학적 구조를 상태 공간에 나타낸 것을 의미하며 끌개라고 부르기도 한다. 일반적으로 시스템의 동역학적 규칙을 정확히 알지 못하는 경우 시스템의 정보를 알기 위해 이용한다. 이는 위상공간이 시스템의 모든 정보를 나타내는 특징을 가지고 있기 때문이다.

$$y(t) = [x(t), x(t+T), \dots, x(t+(d_c-1)T)] \quad (2)$$

식 (2)는 임베딩 차원을 고려하여 구성된 시계열 집합의 식을 나타낸다.  $x(t)$ 는 1차원 무릎 굴곡각 시계열을 나타내며 지연시간과 임베딩 차원을 고려하여 끌개를 구성하기 위한 시계열 집합을 구한다. 이를 이용하여 Fig. 7과 같이 끌개를 구성하였다. 이렇게 구성된 끌개는 한정된 공간에서 겹치지 않고 다른 궤적을 그리고 있어 무한대의 다양한 상태가 반복됨을 알 수 있다.

### 3.5 리아프노프 지수의 계산

시계열로부터 위상궤적을 구현한 후, 위상궤적의 동역학적 특성을 구한다. 본 연구에서는 위상궤적 위에서 서로 가까이 있는 두 점이 시간이 지남에 따라 얼마나 멀어져 가는지를 정량화한 변수인 리아프노프 지수를 사용하였다.

리아프노프 지수를 설명하기 위해서는 카오스 계에 대한 설명이 필요하다. 카오스계란 예측이 불가능한 결정론적 계를 의미하며 자연계의 많은 현상에서 이러한 특징을 발견할 수 있다. 이러한 카오스 계는 초기 조건에 민감한 특징을 가지고 있는데 이러한 이유로 예측이 불가능한 원인이 된다. 이러한 초기조건에 민감성의 정도를 반영하는 지표의 하나로 시계열이 투사된 위상공간의 두 점이 시간이 지남에 따라 지수 함수적으로 멀어지는 정

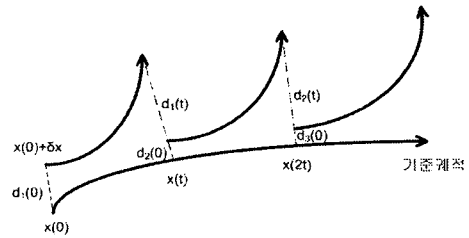


Fig. 8 A section of the state phase where the divergence of neighboring trajectories is outlined

도를 나타내는 지표로 최대 리아프노프를 사용한다. 예를 들어 이 수치가 음수이면 위상공간의 점은 한 점으로 수렴하는 계가 되며, 양수인 경우에는 인접한 점들이 서로 분리되어가는 계가 되며 카오스 계가 여기에 속한다.

기존의 연구에 따르면, 랜덤한 신호는 0.469 정도의 수치를 가지며 예측이 불가능하며 발산하게 된다. 카오스 계의 경우는 0.105 정도의 수치를 가지며 비선형 카오스 분석을 하기 위해서는 우선적으로 이 수치를 바탕으로 카오스 계인 것을 증명해야 한다.

Fig. 8은 리아프노프 지수의 계산을 위한 블록 선도를 나타낸 것이다. 첫 번째 데이터 점인  $x(0)$ 와  $d_0$ 만큼 떨어져 있는 가장 가깝게 이웃한  $x(0)+\delta x$ 에서 시작한다. 이 두 점은 시간 간격  $t$ 에 따라, 두 점 사이의 거리  $d_1(0)$ 가 임의의 값인  $\epsilon$ 보다 작은 경우 계속 진행되다가 보다 크게 되는 순간 진행된 첫 번째 데이터 점  $x(t)$ 는 보존하고 새로운 이웃 점  $x(0)+d_2(0)$ 를 찾아낸다. 이러한 과정으로 끌개를 분석하는데 이를 이용한 Wolf의 알고리즘은 다음과 같다.<sup>10</sup>

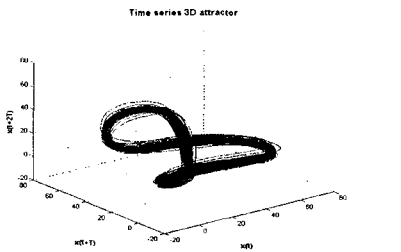
$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{d_i(t)}{d_i(0)} \quad (3)$$

여기서  $\lambda$ 는 최대 리아프노프 지수,  $t$ 는 시간 간격,  $n$ 은 전체 시간 간격의 수,  $d_i$ 는 기준 궤적에서 가장 근접한 궤도의 거리를 의미한다.

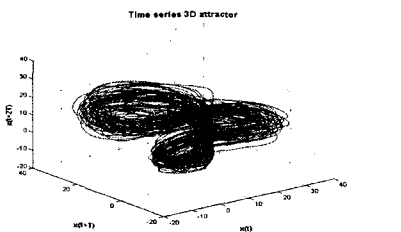
## 4. 실험 결과

정상인에 대해서 정상보행과 비정상보행을 수행하였다. 그리고 전방십자인대 재건수술 후의 환자에 대해서는 보행 실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

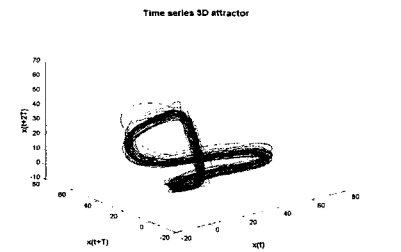
Fig. 9 에서는 수술 후 회복 단계에 있는 환자의 정상보행과 정상인의 정상보행, 비정상 보행에 의한 끌개를 나타내고 있다. (a)는 정상인의 정상보행에 대한 끌개를 나타내었다. 정상보행의 경우 규칙적인 궤적에 대해 나타내어 다음 궤적의 예측이 가능하고 끌개 사이의 간격은 일정한 규칙을 가지고 있다. 이는 보행이 안정되어 있다는 것을 의미한다. (b)는 정상인이 비정상적으로 걷는 경우의 끌개를 나타낸다. 비정상인 경우는 보행이 안정되지 않아 끌개의 형상이 불규칙하였다. (a)와 (b)를 비교 분석해 보면 보행이 안정적이고 규칙적인 경우에는 끌개의 형상에 일관성이 나타남을 알 수 있었다. (c)는 전방십자인대 재건수술을 받은 환자의 보행에 대한 끌개를 나타낸다. 끌개의 형상이 정상인의 보행과 유사한 경향을 보이지만 끌개 사이의 간격이 규칙적이지 않음을 알 수 있다.



(a) Normal walking of healthy subject



(b) Abnormal walking of healthy subject



(c) ACL deficient patients

Fig. 9 Comparison of attractors

Table 2 Lyapunov exponent of participants

Subject	Lyapunov exponent of normal walking	Lyapunov exponent of abnormal walking
S1	0.107	0.132
S2	0.100	0.116
S3	0.104	0.132
S4	0.103	0.165
S5	0.104	0.126
S6	0.103	0.134
S7	0.116	0.154
S8	0.118	0.150
ACL D1	0.135	
ACL D2	0.087	
ACL D3	0.151	
ACL D4	0.132	
ACL D5	0.111	

Fig. 9 과 같은 끌개의 형상만으로는 보행의 안정성을 정량적으로 나타내는 데는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해서 궤적 사이의 멀어져 가는 정도를 나타내는 리아프노프 지수를 구하였다.

Table 2 는 보행실험에 참여한 모든 실험자에 대한 리아프노프 지수를 나타낸다. 정상인이 정상보행을 하는 경우의 리아프노프 지수는 평균 0.106 정도로 모두 양의 값을 가졌다. 이 값은 무릎 관절 시스템이 카오스적 성질을 가지고 있음을 말할 수 있었다. 따라서 이 시스템에 카오스 분석을 수행하는 것이 적합하다는 것을 나타내고 있었다.

본 연구에서는 전방십자인대 수술후의 환자에 대해 회복의 정도를 매달 간격으로 리아프노프 지수를 이용해 평가하고자 하였다. 그러나 대상자들이 이 실험에 참여하기를 꺼려 그들에 대한 자료를 획득할 수 없었다. 본 연구의 결과로 얻은 리아프노프 지수를 검증하기 위해 이전의 연구를 검토한 결과는 다음과 같다.

Stergiou 등<sup>6</sup>에 의하면 평균적으로 정상무릎에서는 0.108, 전방십자인대가 손상된 무릎에서는 0.118 의 리아프노프 지수를 갖는다. Buzzi 등<sup>9</sup>의 연구에 의하면 리아프노프 지수가 나이에 따라 달라지는데 젊은 사람의 경우는 0.107, 70 세 이상의 노년층은 0.154 의 값을 보인다고 발표하였다. 이 두 결과는 무릎의 상태가 정상인 경우에 비해 불

안정 할수록 리아프노프 지수가 증가한다는 본 연구 결과와 일치함을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 실험대상자 선정의 문제를 극복하고 재건수술을 받은 환자의 진단을 위한 새로운 기준을 다음과 같이 제시하였다.

Table 3 은 각각의 피실험자에 대한 리아프노프 지수를 세 개의 군으로 나누어 계산한 평균값과 표준편차를 나타낸다. 평균값을 바탕으로 세가지 경우의 결과를 분석해 보면 다음과 같다.

리아프노프 지수의 평균값은 정상 보행에서 평균 0.106, 비정상 보행에서 0.138 의 값을 갖는다. 이 두 평균값의 차이는 Stergiou 등<sup>6</sup>의 연구에서 발표한 리아프노프 지수의 차이보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 얻은 0.106 과 0.138 의 값을 정상보행여부를 판별하는 기준으로 사용할 수 있다고 판단된다.

전방십자인대 재건수술을 받은 환자군의 평균값은 0.123 이다. 이 값은 전체적으로 전방십자인대의 기능이 회복되지 않았다는 것을 나타낸다. 재건수술을 받은 피실험자 ACLD 5 는 정상 보행으로 회복되었다. 반면에 ACLD 1, ACLD 3, ACLD 4 의 경우는 정상인의 비정상적인 보행과 유사한 리아프노프 지수를 나타내고 있어 수술 후에 회복이 덜 되었음을 알 수 있다.

통계학적으로 검증하기 위해 정상, 비정상, 재건환자의 세 보행그룹에 대하여 ANOVA 테스트를 수행하였다. 95 %의 신뢰 구간으로 각 그룹별 리아프노프 지수값에 대한 유의 수준을 확인한 결과, 정상과 비정상 그룹은 통계학적으로 차이(유의수준  $p=0.001$ )가 났다. 그러나 정상과 재건환자, 비정상과 재건환자 그룹간의 유의수준은 각각  $p=0.090$ ,  $p=0.107$  로 통계학적으로 차이가 없다고 밝혀졌다. 따라서 재건환자의 경우 그 재활 정도에 따라 정상으로 회복되었거나 아직도 비정상 보행을 한다는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 3 Lyapunov exponent by walking pattern

Subject		Lyapunov exponent
Healthy subject	Normal walking	0.106(±0.0061)
	Abormal walking	0.138(±0.0151)
ACL deficient patients		0.123(±0.0221)

임상적으로 전방십자인대 재건후의 완치율은 정상인의 기능에 비해 75-90%정도라고 예측하고 있으나 이를 정량적으로 평가하지는 못하였다.<sup>11</sup> 그러나 본 연구에서는 재건 수술을 받은 환자에 대해 재활 및 진단 시스템 개발을 위한 정량적인 분석 방법을 제시하였다. 제시된 방법에 의하면 5 명의 환자 중에서 1 명이 완전히 정상으로 회복되었음을 알 수 있다. ACLD 2 의 경우는 0.087 의 값을 나타내 보행에 형태가 주기적 특성을 보임을 알 수 있다. 이 환자는 전방십자인대 뿐만 아니라 후방 십자인대까지 재건한 환자였다. 이러한 경우에는 더 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 정상인과 전방십자인대 재건수술을 받은 환자에 대한 보행 분석을 통해 무릎의 안정성을 평가하였다. 그리고 재건수술을 받은 환자에 대해 회복의 정도를 정량적으로 진단하기 위하여 카오스 이론을 이용한 새로운 진단법을 제시하였다. 보행분석을 통하여 시계열을 얻은 후에 데이터의 규칙성을 평가하기 위하여 지연시간과 임베딩 차원을 계산하였다. 이를 바탕으로 끌개를 구성하고 리아프노프 지수를 계산하였다.

이러한 과정을 카오스 보행분석 시스템으로 구현하고, 제안된 분석 시스템을 이용하여 정상인과 재건수술을 받은 환자의 보행분석을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 무릎의 굴곡각은 혼돈게임에도 불구하고 일정한 결정론적인 규칙을 가지고 있어 카오스적 성질을 가지고 있음이 입증되었다. 따라서 무릎의 굴곡각 해석에 카오스 이론을 적용할 수 있었다.

(2) 카오스 이론을 적용하여 리아프노프 지수 값을 계산해 보면 무릎의 상태에 따른 보행 패턴에서 그 차이를 확인할 수 있다. 그리고 비정상적인 보행에서는 리아프노프 지수가 증가함을 알 수 있었다.

(3) 한국인의 정상적인 보행에서는 평균 0.106 정도의 리아프노프 지수를 얻었고, 비정상적인 보행에서는 0.138 의 값을 얻었다. 이 두 값을 이용하여 환자에 대해 정상보행여부를 판별하는 기준으로 사용할 수 있었다.

본 연구에서는 피실험자의 수의 제한으로 인하여 환자에 대한 통계학적인 자료를 얻어내지 못

하였다. 추가적으로 환자에 대한 실험을 통하여 리아프노프 지수의 차이를 얻어서 재활등급의 분류에 활용하는 연구가 필요하다. 또한 실험 데이터 처리를 자동화하여 임상적용이 가능한 진단 시스템의 개발에 대한 연구가 요망된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 R01-2002-000-00120-0 의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Craik, R. L. and Oatis, C. A., "Gait Analysis theory and application," Mosby-Year Book. Inc, pp. 12~38, 1995.
2. Moon, B. Y., Son, K., Park, J. H. and Suh, J. T., "A Method to Describe and Analyze Human Knee Joint Motion," J. of KSPE, Vol. 20, No. 10, pp. 233~239, 2003.
3. Park, K. B., Kim, K. B., Son, K., Suh, J. T. and Moon, B. Y., "Construction and Measurement of Three-Dimensional Knee Joint Model of Koreans," Trans. of KSME (A), Vol. 28, No. 11, pp. 1664~1671, 2004.
4. Chung, C. Y., Lee, M. C., Moon, Y. W., Kim, T. G., Lim, S. T. and Seong, S. C., "Gait Analysis after Total Knee Arthroplasty," J. of Korean Orthop. Assoc, Vol. 32, No. 5, pp. 1290~1301, 1997.
5. Hausdorff, J. M., Edelberg, H. K., Mitchell, S. L. and Goldberger, A. L., "Increased Gait Unsteadiness in Community-Dwelling Elderly Fallers," J. Arch. Phys. Med. Rehab., Vol. 78, No. 3, pp. 278~283, 1997.
6. Stergiou, N., Moraiti, C., Giakas, G., Ristanis, S. and Georgoulis, A. D., "The effect of the walking speed on the stability of the anterior cruciate ligament deficient knee," Clin. Biomech, Vol. 19, No. 9, pp. 957~963, 2004.
7. Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., Sernad, D. and Cavanagh, P. R., "Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamic stability of continuous overground walking," J. of Biomech, Vol. 33, No. 10, pp. 1269~1277, 2000.
8. Dingwell, J. B. and Cusumano, J. P., "Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking," Chaos, Vol. 10, No. 4, pp. 848~863, 2000.
9. Buzzi, U. H., Stergiou, N., Kurz, M. J., Hageman, P. A. and Heidel, J., "Nonlinear dynamics indicates aging affects variability during gait," Clin. Biomech, Vol. 18, No. 5, pp. 435~443, 2004.
10. Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L. and Vastano, J. A., "Determining Lyapunov exponents from a time series," Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol. 16, No. 3, pp. 285~317, 1985.
11. Kaplan, M. J., "Anterior cruciate ligament reconstruction using quadriceps patellar tendon graft," sport review. Am J Sports Med 19:458~462, 1995.
12. Perry, J., "Gait Analysis : Normal and pathological function," SLACK Inc, 15~21, 1992.
13. Sutherland, D. H., Olshen, R. A., Biden, E. N. and Wyatt, M. P., "The development of mature walking," London, Mac Keith Press, pp. 20~35, 1988.
14. Reinschmidt, C., Bogert, A. J., Murphy, N., Lundberg, A. and Nigg, B. M., "Tibiocalcaneal motion during running, measured with external and bone markers," Clin. Biomech, Vol. 12, No. 1, pp. 8~16, 1997.
15. Rapp, P. E., "A guide to dynamical analysis," Integr. Physiol. Behav. Sci, Vol. 29, No. 3, pp. 311~327, 1994.
16. Rhodes, C. and Morari, M., "The false nearest neighbors algorithm: An overview," Computers & Chemical Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 1149~1154, 1997.
17. Moon, H. T., "Chaos and Nonlinear Dynamics," Seoul National University Press, Seoul, pp. 4~18, 2001.
18. Lee, I. K., Kang, S. Y. and Ha, C. K., "The Changes of EEG Nonlinear Parameter in Sleep and Wakefulness States," J. of Korean Neurological Association, Vol. 18, No. 1, pp. 50~53, 2000.