

< 본 문 >

# 전방십자인대 재건수술 환자와 정상인의 보행 연구

고재훈\* · 손 권† · 문병영\*\* · 서정탁\*\*\*  
(2005년 10월 14일 접수, 2006년 2월 15일 심사완료)

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

Jae Hun Ko, Kwon Son, Byung Young Moon and Jeung Tak Suh

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

### Abstract

The anterior cruciate ligament(ACL) is an important stabilizer of knee joint. The ACL injury of knee is common and a serious ACL injury leads to ligament reconstruction surgery. Gait analysis is essential to identify knee condition of patients who display abnormal gait. The purpose of this study is to evaluate and classify knee condition of ACL deficient patients using a nonlinear dynamic method. The nonlinear method focuses on understanding how variations in the gait pattern change over time. The experiments were carried out for 17 subjects(12 healthy subjects and five subjects with unilateral deficiency) walking on a motorized treadmill for 100 seconds. Three dimensional kinematics of the lower extremity were collected by using four cameras and KWON 3D motion analysis system. The largest Lyapunov exponent calculated from knee joint flexion-extension time series was used to quantify knee stability. The results revealed the difference between healthy subjects and patients. The deficient knee was significantly unstable compared with the contralateral knee. This study suggests an evaluation scheme of the severity of injury and the level of recovery. The proposed Lyapunov exponent can be used in rehabilitation and diagnosis of recoverable patients.

### 1. 서 론

스포츠 인구 및 각종 사고의 증가로 전방십자인대의 손상으로 인한 전방십자인대 재건술의 빈도가 증가하고 있다.<sup>(1)</sup> 미국 통계에 의하면 매년 약 10,000여건이 시행된다. 전방십자인대 재건술 후의 장기 추시 결과에서 수술 후의 기능적 안정성의 회복은 70-90%로 보고되고 있다.<sup>(2)</sup>

수술의 결과는 검사자의 주관에 개입될 수 있는 이학적 검사, 단순 방사선 사진에서의 하지 정렬상태, 환자의 주관적 동통의 호전 정도 등으로 평가하여 왔다.<sup>(3)</sup> 전방십자인대 재건수술의 결과를 판단할 때 주관적인 의견을 배제하고 무릎의 상태를 정량적으로 분석하기 위해 보행분석을 수행한다.

지금까지 보행에 관해서는 다양한 연구들이 계속되어 왔다.<sup>(4-13)</sup> 보행주기와 관련된 기본적인 기술 연구에서 시작하여, 다양한 수학적 모델링 기법을 사용한 최근의 연구까지 독특한 영역을 구축하며 꾸준히 발전해 왔다. 보행분석은 병적인 보행을 나타내는 환자에게서 정확한 원인과 이상 부위를 찾아내어 객관화 및 수치화하여 비교, 평

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : kson@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-3066 FAX : (051)512-9835

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* 부산대학교 동남권부품소재 산학협력혁신사업단

\*\*\* 부산대학교 의과대학 정형외과

가하는데 필수적이다. 뿐만 아니라 정상적인 보행분석 데이터를 수집하고 정상 성인의 보행패턴을 객관화하는 것이 필요하다. 그러나 보행 분석에 의한 기존의 방식은 관절의 최대 및 최소 굴곡각도, 주기 등을 비교하여 판별하는 방법으로 무릎의 상태에 따른 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 없다.<sup>(4)</sup> 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 카오스 이론을 적용한 보행 분석 방법이 널리 적용되고 있다.

카오스 이론은 결정론적 비선형 동역학 시스템을 다루는 학문이다. 이러한 비선형 동역학 이론에 관한 많은 연구와 발전이 있었고,<sup>(14-20)</sup> 보행 시 무릎 굴곡각을 이용한 시계열(time series)에 대한 새로운 연구 방법이 국외에서 활발히 연구되고 있다. Stergiou 등<sup>(5)</sup>은 전방십자인대 손상이 발생한 무릎의 상태를 보행분석을 통한 리아프노프 지수로 무릎의 안정성을 평가하였다. Dingwell 등<sup>(6)</sup>과 Dingwell과 Cusumano<sup>(7)</sup>는 트레드밀과 지면 보행의 차이점, 말초신경장애환자의 보행특성을 비선형 시계열 분석방법으로 분석하였다. Buzzi 등<sup>(8)</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 생체신호 처리 등의 심전도, 호흡, 혈압, 뇌파 등 생체 신호에만 한정적으로 적용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 정상인과 전방십자인대 재건수술후의 환자에 대한 보행 분석을 실시하고 무릎의 안정성을 평가하고자 한다. 무릎 굴곡각 시계열로부터 끌개(attractor)와 리아프노프 지수(Lyapunov exponent)를 구하고 이를 바탕으로 정상인과 환자에 대한 수치적 차이를 정량적으로 규명하고자 한다. 또한 재활 진단 시스템의 개발에 필요한 정상인의 범위를 제시하고자 한다.

## 2. 실험대상 및 방법

### 2.1 실험 대상

실험은 전방십자인대 재건수술을 받은 5명의 환자와 정상인 12명(남자 6, 여자 6)을 대상으로 하였다. 정상인은 무릎 관절의 변형이나 질환이 없는 사람을 의미한다. 피 실험자의 연령, 키, 몸무게는 Table 1과 같다.

Table 1 Subjects of the test

Subject	Age	Height(cm)	Weight(kgf)	Remark
WS1	24	164	60	Healthy subjects
WS2	24	160	53	
WS3	24	165	52	
WS4	24	163	58	
WS5	23	161	45	
WS6	25	160	48	
MS1	32	181	76	
MS2	27	174	66	
MS3	28	180	74	
MS4	33	170	82	
MS5	26	171	90	
MS6	27	180	90	
P1	35	179	71	ACL deficient patients
P2	24	183	81	
P3	36	168	74	
P4	26	174	71	
P5	32	175	69	

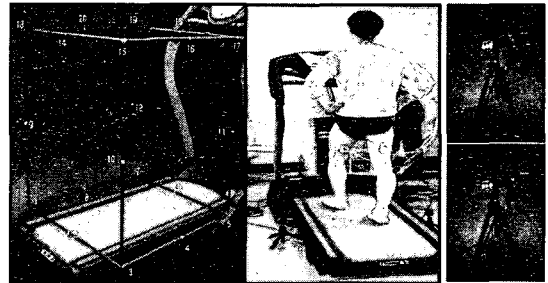


Fig. 1 Experimental set-up

### 2.2 실험 방법

보행 실험은 정상인과 전방십자인대 재건수술후의 환자에 대하여 평소대로 걷도록 하였다. Fig. 1과 같이 3차원 운동 측정 장치를 구성하여 하지 요소와 무릎의 굴곡각 자료를 획득하였다. 실험 장치는 영상획득 장치(DCR-VX2100) 4대, 트레이드 밀, 3차원 공간자, KWON 3D(Visol Corp., Korea) 동작분석 프로그램으로 구성하였다. 카오스 이론을 적용한 보행 분석을 위해서는 충분한 수의 굴곡각 데이터가 요구되어진다. 이를 위해서 보행실험은 트레이드 밀에서 수행하였다.

하지의 운동을 기록하기 위해 Fig. 2와 같이 양쪽 하지의 대전자(greater trochanter), 외측상과(lateral femoral epicondyle), 외과(lateral malleolus) 세 곳의 피부 표면에 표식을 부착시켰다. 보행은

피 실험자마다 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>(5)</sup>

보행이 안정된 상태에서 표식의 운동을 4대의 영상획득 장치를 이용하여 120초 동안 획득하였다. 얻어진 영상 자료는 KWON 3D 동작 분석 프로그램을 사용하여 표식의 3차원 좌표 데이터를 계산하고 무릎 굴곡 각을 얻어냈다.

### 3. 비선형 해석

무릎의 안정성을 평가하기 위하여 시상면(sagittal plane)의 무릎 굴곡 각을 이용하여 시계열을 구성하였다. 시상면의 굴곡 각을 선정한 이유는 굴곡-신전이 무릎 관절에서 가장 큰 운동 범위를 가지고 있기 때문이다. 굴곡-신전과 동반되어 일어나는 내외회(internal-external rotation)나 내외반(varus-valgus) 운동은 그에 비하여 운동 범위가 작고 사람마다 차이가 크기 때문에 본 연구에서는 사용하지 않았다.

Fig. 3은 비선형 해석에서 리아프노프 지수를 구하는 흐름도를 나타낸다. 무릎 굴곡 각 시계열 데이터를 바탕으로 지연시간과 임베딩 차원을 설정하였다. 그리고 끌개를 그리기 위한 위상공간을 구성하고 리아프노프 지수를 계산하였다.

#### 3.1 끌개의 구성

Fig. 4는 보행실험으로부터 얻어진 무릎 굴곡각의 시계열을 나타낸 것이다. 기존의 연구를 통해 시계열수 N이 5,000 이상이면 리아프노프 지수가 수렴함을 확인하였다.<sup>(12)</sup> 따라서 본 연구에서는 시계열의 수 N을 5,000으로 설정하여 비선형 해석을 수행하였다.

시계열 데이터로부터 얻어지는 지연시간 및 임베딩 차원은 끌개의 특성을 결정짓는데 중요한 역할을 한다.<sup>(12,13)</sup> 본 연구에서는 최적의 지연시간을 결정하기 위하여 AMI(Average Mutual Information) 방법을 이용하였다.<sup>(6,18)</sup>

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

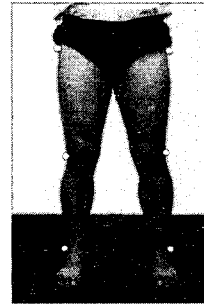


Fig. 2 Marker positions of the lower extremities

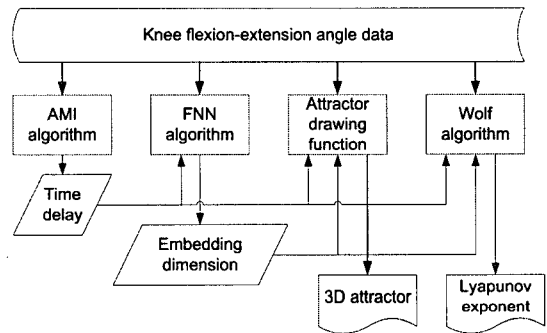


Fig. 3 Flowchart to calculate Lyapunov exponent

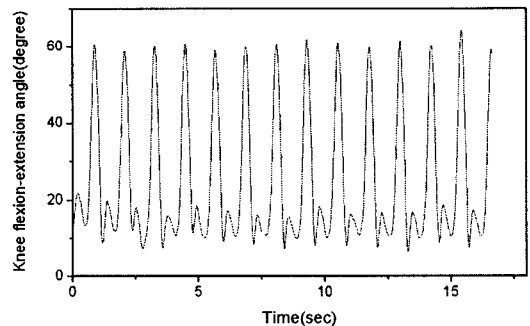


Fig. 4 The time series of knee flexion-extension angle

여기서 T는 지연시간, x(t)는 원래 데이터, x(t+T)는 시간지연 데이터, 그리고 P(x(t))는 x(t)의 확률 분포함수이다. AMI 방법은 지연시간을 반복적 순차적으로 넣어 시계열 데이터를 만든 후 첫 번째 최소가 되는 점을 지연 시간으로 결정하는 것이다.

FNN(False Nearest Neighbor) 알고리즘을 이용하여 최소 임베딩 차원을 선정하였다.<sup>(6,19)</sup> 시계열

벡터의 차원을 계속 증가시키면서 FNN의 비율이 최초로 0이 되는 점이 최소 임베딩 차원이다. 계산한 결과, 모든 실험자에 대한 최소 임베딩 차원은 4임을 알 수 있었다.

임베딩 차원을 고려하여 구성한 시계열 집합의 식은 다음과 같다.

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

여기서  $x(t)$ 는 1차원 무릎 굴곡각 시계열을 나타내며, 자연시간과 임베딩 차원을 고려하여 끌개를 구성하기 위한 시계열 집합을 구한다. 구성된 3차원 끌개는 Fig. 5와 같이 한정된 위상공간에서 겹치지 않는 궤적을 무한히 그려 카오스 성질이 나타남을 알 수 있다.

### 3.2 리아프노프 지수의 계산

시계열로부터 위상궤적을 얻어 그로부터 동역학적 비선형 특성을 구한다. 본 연구에서는 위상궤적 위에서 인접한 두 점이 시간이 지남에 따라 멀어져 가는 정도를 정량화한 척도인 리아프노프 지수를 사용하였다. 무릎 굴곡 각에 대해서 리아프노프 지수가 0이면 주기함수와 같이 규칙적인 운동, 0.100 이상의 경우는 카오스적인 운동, 그리고 0.469 이상은 불규칙적인 운동을 나타낸다고 알려져 있다.<sup>(5)</sup>

Fig. 6은 최대 리아프노프 지수 계산을 위한 원리를 2차원 위상공간에서 나타낸 것이다. 첫 번째 데이터 점인  $x(0)$ 와  $d_1(0)$  만큼 떨어져 있는 가장 가깝게 이웃한  $x(0)+\delta x$ 에서 시작한다. 이 두 점은 시간 간격  $t$ 에 따라, 두 점 사이의 거리  $d_1(t)$ 가 임의의 값  $\epsilon$  보다 작은 동안에는 계속 진행된다. 거리가  $\epsilon$  보다 크게 되는 순간에 진행된 첫 번째 데이터 점  $x(t)$ 는 보존되나 새로운 이웃 점  $x(t)+d_2(0)$ 를 찾는다. 이러한 과정으로 끌개를 분석하는데 이용한 Wolf의 알고리즘은 다음과 같다.<sup>(14)</sup>

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

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.

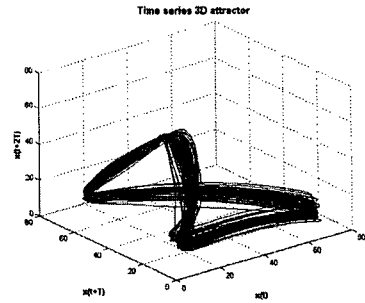


Fig. 5 Three-dimensional state space created by the time series

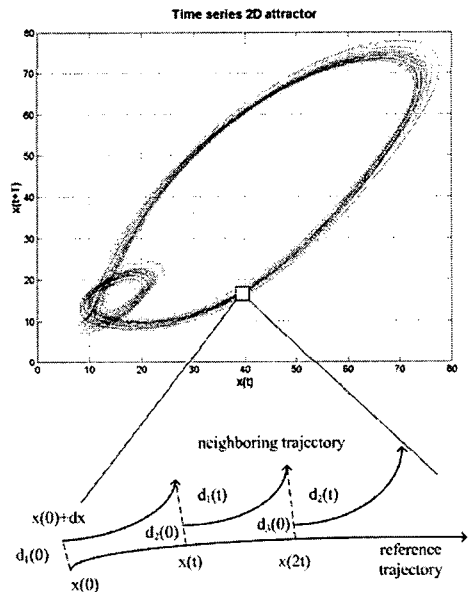


Fig. 6 A section of the state space where the divergence of neighboring trajectories is outlined

## 4. 실험 결과

실험은 정상인과 전방십자인대 재건수술 후 회복단계에 있는 환자를 대상으로 정상 보행을 실시하였다. 정상인과 전방십자인대 재건수술을 받은 환자의 보행분석 결과는 다음과 같다.

Fig. 7에서는 수술 후 회복 단계에 있는 환자와 정상인의 정상 보행에 대한 끌개를 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 정상인에 대한 오른쪽과 왼쪽하지

의 끝개를 비교한 것이다. 정상인의 경우 오른쪽과 왼쪽의 끝개의 형상이 동일한 형태를 가지며 유사한 경향으로 증가해 나가는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 규칙적인 궤적이 나타나 다음 궤적의 예측이 가능하고 끝개사이의 간격은 일정한 규칙을 가지고 있다. 이는 보행이 안정되어 있다는 것을 의미한다. Fig. 7(b)와 (c)는 전방십자인대 재건 수술 후의 환자에 대한 오른쪽과 왼쪽의 끝개를 비교한 것이다. Fig. 7(b)의 끝개는 오른쪽과 왼쪽의 형상이 일치하지 않는데 이 경우는 전형적인 비정상 보행임을 알 수 있다.

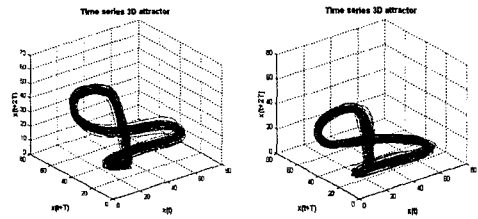
Fig. 7(c)는 끝개의 형상이 정상인의 보행과 유사한 경향을 보이기는 하지만 수술을 받은 오른쪽의 끝개 사이 간격이 규칙적이지 않음을 알 수 있다. Fig. 7(a), (b), (c)를 비교해 보면 정상 보행에 가까울수록 오른쪽과 왼쪽 하지의 끝개는 유사한 형상과 간격을 보인다. 뿐만 아니라 Fig. 7(b)의 경우처럼 수술 후 회복의 정도가 미진할수록 끝개의 형상에는 차이를 보임을 알 수 있다.

Fig. 7과 같은 끝개의 형상으로 보행의 불안정 정도를 확인 할 수는 있었지만 이를 정량적으로 나타내는 데는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 리아프노프 지수를 구하여 안정성을 정량적으로 평가하였다.

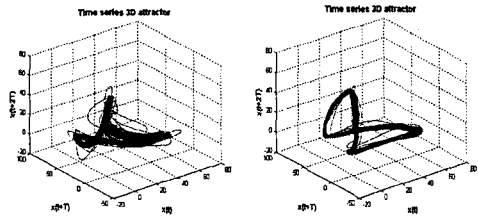
본 연구에서는 전방십자인대 재건수술후의 환자에 대해 회복의 정도를 매달 간격으로 리아프노프 지수를 이용해 평가하고자 하였다. 그러나 대상자의 부족으로 그들의 자료를 정확히 획득할 수 없었다. 본 연구의 결과로 얻어진 결과를 검증하기 위해 이전의 연구 결과를 검토하면 다음과 같다.

Stergiou 등<sup>(5)</sup>에 의하면 평균적으로 정상무릎에서는 0.108, 전방십자인대가 손상된 무릎에서는 0.118의 리아프노프 지수를 갖는다. Buzzi 등<sup>(8)</sup>의 연구에 의하면 리아프노프 지수가 나이에 따라 달라지는데 젊은 사람의 경우는 0.107, 70세 이상의 노년층은 0.154의 값을 보인다고 발표하였다. 이 두 결과는 무릎의 상태가 정상인 경우에 비해 불안정 할수록 리아프노프 지수가 증가한다는 본 연구 결과와 일치함을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 전방십자인대 재건수술을 받은 환자의 진단을 위한 새로운 기준을 다음과 같이 제시하였다.

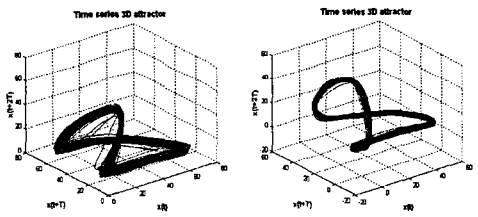
Table 2는 각각의 대상에 대한 정상 보행을 3



(a) Healthy subject MS1



(b) ACL deficient patient P3



(c) ACL deficient patient P5

Fig. 7 Comparison of attractors

회색 실시하여 최대 리아프노프 지수를 평균하여 나타낸 것이다. 정상인의 경우 양발의 리아프노프 지수가 비교적 유사한 값을 가졌다. 전방십자인대 재건수술후의 환자는 수술을 받은 하지가 반대편보다 높은 리아프노프 지수를 나타내었다. 이는 무릎의 상태가 불안정할수록 리아프노프 지수가 증가한다는 것을 나타낸다.

Table 3은 각각의 피 실험자에 대한 리아프노프 지수를 3개의 군으로 나누어 계산한 평균값을 나타낸다. 정상인의 경우 양발의 평균 지수 차이가 0에 가까운 값을 나타내었고, 전방십자인대 재건수술을 받은 환자의 경우는 0.01 정도의 지수 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 얻은 결과인 양발의 지수 차이는 정상 보행의 여부를 판별하는 기준으로 사용할 수 있다고 판단된다.

재건수술을 받은 피 실험자 P5는 정상 보행으

Table 2 Lyapunov exponents for participants

Subject	Right lower extremity	Left lower extremity	Difference
WS1	0.117	0.110	0.007
WS2	0.116	0.113	0.003
WS3	0.102	0.101	0.001
WS4	0.110	0.115	0.005
WS5	0.114	0.112	0.002
WS6	0.118	0.126	0.008
MS1	0.104	0.103	0.001
MS2	0.110	0.106	0.004
MS3	0.104	0.105	0.001
MS4	0.123	0.125	0.002
MS5	0.105	0.113	0.008
MS6	0.108	0.104	0.004
P1	0.135	0.115	0.020
P2	0.087	0.124	0.037
P3	0.151	0.103	0.048
P4	0.132	0.116	0.016
P5	0.111	0.108	0.003

Table 3 Comparison of Lyapunov exponents

Subject		Lyapunov exponent	
Healthy subjects	Women	Right	0.113 ( $\pm 0.006$ )
		Left	0.113 ( $\pm 0.008$ )
	Men	Right	0.109 ( $\pm 0.007$ )
		Left	0.109 ( $\pm 0.008$ )
ACL deficient patients		Right	0.123 ( $\pm 0.025$ )
		Left	0.113 ( $\pm 0.008$ )

로 회복되었다. 반면에 P1, P3, P4의 경우는 큰 지수 차이를 나타내고 있어 수술 후에 회복이 덜 되었음을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서는 전방십자인대 재건수술을 받은 환자에 대해 재활 및 진단 시스템 개발을 위해 정량적인 분석 방법을 제시하였다. 제시된 방법에 의하면 5명 중 1명은 완전히 정상으로 회복되었음을 알 수 있다. 그러나 P2의 경우처럼 복합적인 무릎과 인대의 손상에 대해서는 더 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 정상인과 전방십자인대 재건수

술을 받은 환자에 대한 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. 보행실험을 통해 얻어진 무릎의 운동 데이터를 바탕으로 시계열을 구성하고, 각각의 지연시간과 임베딩 차원을 구하였다. 이를 바탕으로 끌개를 구성하고 리아프노프 지수를 구하였다. 구해진 리아프노프 지수는 무릎의 안정성을 평가하는 지표가 되고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 무릎의 굴곡각은 복잡해 보이지만 일정한 규칙을 가지고 있어 카오스 분석법의 적용이 가능한 시스템이다.

(2) 무릎의 상태에 따라 얻어진 리아프노프 지수를 이용하여 안정성을 평가할 수 있었다. 정상인과 환자를 비교해 본 결과, 무릎의 상태가 불안정할수록 리아프노프 지수가 증가함을 알 수 있었다.

(3) 정상적인 한국인의 보행에서 남자는 0.109, 여자는 0.113의 리아프노프 지수 값을 가졌다. 이 수치를 이용하여 환자에 대해 정상보행여부를 판별하는 기준으로 사용할 수 있었다.

(4) 양발의 리아프노프 지수를 비교해 본 결과 정상인은 지수의 차이가 거의 없으나, 전방십자인대 재건 수술을 받은 환자는 평균 0.01정도의 큰 차이를 보였다. 이는 정상인의 자료가 없는 경우에 환자만으로 정상 보행 여부를 판별할 수 있는 기준으로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 피 실험자의 수의 제한으로 인하여 환자에 대한 통계학적인 자료를 얻어내지 못하였다. 따라서 본 논문에서 얻어진 연구 결과를 바탕으로 계속적인 임상실험을 수행하여 재활 등급 분류에 활용하는 연구가 요구된다. 또한 실험 데이터의 처리 과정을 자동화 하여 많은 양의 데이터를 일괄 처리하는 연구가 요망된다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술 연구비(2년)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Moon, B. Y., Son, K., Park, J. H. and Suh, J. T., 2003, "A Method to Describe and Analyze Human Knee Joint Motion," *Journal of KSPE*, Vol. 20, No. 10, pp. 233~239.
- (2) Kaplan, M. J., 1995, "Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Using Quadriceps Patellar Tendon Graft," *American Journal of Sports and Medicine*, Vol. 19, pp. 458~462.
- (3) Chung, C. Y., Lee, M. C., Moon, Y. W., Kim, T. G., Lim, S. T. and Seong, S. C., 1997, "Gait Analysis after Total Knee Arthroplasty," *Journal of Korean Orthopedic Association*, Vol. 32, No. 5, pp. 1290~1301.
- (4) Hausdorff, J. M., Edelberg, H. K., Mitchell, S. L. and Goldberger, A. L., 1997, "Increased Gait Unsteadiness in Community-Dwelling Elderly Fallers," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Vol. 78, No. 3, pp. 278~283.
- (5) Stergiou, N., Moraiti, C., Giakas, G., Ristanis, S. and Georgoulis, A. D., 2004, "The Effect of the Walking Speed on the Stability of the Anterior Cruciate Ligament Deficient Knee," *Clinical Biomechanics*, Vol. 19, No. 9, pp. 957~963.
- (6) Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., Sernad, D. and Cavanagh, P. R., 2000, "Slower Speeds in Patients with Diabetic Neuropathy Lead to Improved Local Dynamic Stability of Continuous Overground Walking," *Journal of Biomechanics*, Vol. 33, No. 10, pp. 1269~1277.
- (7) Dingwell, J. B. and Cusumano, J. P., 2000, "Nonlinear Time Series Analysis of Normal and Pathological Human Walking," *Chaos*, Vol. 10, No. 4, pp. 848~863.
- (8) Buzzi, U. H., Stergiou, N., Kurz, M. J., Hageman, P. A. and Heidel, J., 2004, "Nonlinear Dynamics Indicates Aging Affects Variability During Gait," *Clinical Biomechanics*, Vol. 18, No. 5, pp. 435~443.
- (9) Chung, C. Y., Lee, M. C., Moon, Y. W., Kim, T. G., Lim, S. T. and Seong, S. C., 1997, "Gait Analysis after Total Knee Arthroplasty," *Journal of Korean Orthopedic Association*, Vol. 32, No. 5, pp. 1290~1301.
- (10) Perry, J., 1992, *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*, SLACK Inc, pp. 15~21.
- (11) Sutherland, D. H., Olshen, R. A., Biden, E. N. and Wyatt, M. P., 1988, *The Development of Mature Walking*, London, Mac Keith Press, pp. 20~35.
- (12) Ko, J. H., Son, K., Park, J. H. and Suh, J. T., 2006, "Gait Study on the Normal and ACL Deficient Patients after Ligament Reconstruction Surgery Using Chaos Analysis," *Journal of KSPE*, Vol. 23, No. 2, pp. 164~171.
- (13) Park, K. B., Ko, J. H., Son, K., Moon, B. Y. and Suh, J. T., 2006, "Application of Chaos Theory to Gait Analysis," *Transection of KSME (A)*, Vol. 30, No. 2, pp. 194~201.
- (14) Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L. and Vastano, J. A., 1985, "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 16, No. 3, pp. 285~317.
- (15) Rapp, P. E., 1994, "A Guide to Dynamical Analysis," *Integr. Physiol. Behav. Sci.*, Vol. 29, No. 3, pp. 311~327.
- (16) Abraham, N. B., Albano, A. M., Das, B., Guzman, G. D. and Yong R., S., 1986, "Calculating the Dimension of Attractors from Small Data Sets," *Phys. Lett. A*, Vol. 114, No. 5, pp. 217~221.
- (17) Baker, G. L. and Gollub, J. P., 1996, *Chaotic Dynamics*, Cambridge University Press, New York, pp. 30~65.
- (18) Jeong, J., Gore, J. C. and Peterson, B. S., 2001, "Mutual Information Analysis of the EEG in Patients with Alzheimer's Disease," *Clinical Neurophysiology*, Vol. 114, No. 5, pp. 827~835.
- (19) Rhodes, C. and Morari, M., 1997, "The False Nearest Neighbors algorithm: An Overview," *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 1149~1154.
- (20) Moon, H. T., 2001, *Chaos and Nonlinear Dynamics*, Seoul National University Press, Seoul, pp. 4~18.