



보행 시 퇴행성 관절염 환자의 동적 안정성 분석

Dynamic Stability Analysis of Patients with Degenerative Osteoarthritis during Walking

류지선*(한국체육대학교)

Ryu, Ji-Seon*(Korea National Sport University)

국문요약

이 연구는 60대 남자 노인의 정상인들과 무릎 관절염 환자들 사이에 보행 시 국부적인 안정성을 비교하기 위해 선형기법의 변이 계수와 비선형 시계열 동역학 기법의 Lyapunov지수(LyE) 및 상관차원(correlation dimension, COD) 방법을 적용해 분석했다. 분석 결과 선형 운동인 발목의 수직 변위를 통해 관찰한 국부적 안정성은 선형 기법의 변이 계수를 통해 관찰한 결과 정상인 집단이 무릎관절염 환자 집단보다 불안한 것으로 나타난 반면에 비선형 기법 관찰에서는 두 집단 차이가 없는 것으로 나타났다. 한편 각형 운동인 무릎의 각 변위를 통해 분석된 국부적 안정성은 선형 분석 결과는 두 집단 차이점을 보이지 않았지만, 비선형 기법 결과인 COD 지수는 무릎 관절염 환자가 크게 나타나 결과적으로 보행 시 국부적 불안을 보였다. 이상 본 연구 결과를 종합해 보면 선형 기법의 결과와 비선형 기법의 결과는 일치하지 않았으며, 또한 무릎 관절염 환자의 보행 시 불안정은 발목의 수직 변위인 선형에서 보다 무릎 관절 각 변위인 각형에서 뚜렷하게 나타났다.

ABSTRACT

J. S. RYU, *Dynamic Stability Analysis of Patients with Degenerative Osteoarthritis during Walking*, *Korean Journal of Sport Biomechanics*, Vol. 18, No. 1, pp. 21-30, 2008. The purpose of this study was to investigate the variability to compare local dynamic stability via a linear and nonlinear analysis during walking. Twenty four elderly males, 12 healthy elderly and 12 patients with osteoarthritis walked on a treadmill for 100 consecutive strides. Lyapunov exponent and correlation dimension and coefficient variation were calculated for the kinematic parameters to determine the dynamic stability during walking. The linear measures indicated that the healthy elderly demonstrated significantly higher variability in the ankle joint displacement. The nonlinear analysis revealed that COD for the knee joint angle were higher in patient with osteoarthritis. There were no coincidence in results between linear and nonlinear techniques over two groups. In light of nonlinear analysis, it was concluded that patients with osteoarthritis showed higher local instability during walking.

KEYWORDS : VARIABILITY, LOCAL DYNAMIC STABILITY, LYAPUNOV EXPONENT, COD

I. 서론

인간은 일상생활을 영위하기 위해 걷기와 달리기와 같은 이동 운동을 반복적으로 수행하고 있다. 인간의 이동 운동을 역학적으로 규명해 특징을 밝히는 것은 신경근 조절을 이해하기 위해 필요한 일이다 (Dingwell & Cusumano, 2000). 인간 이동 운동 시 동적 안정성은 운동 수행을 판단하는 중요한 요인으로 활용된다.

즉 이동 운동 시 동적 안정성을 정량화하는 것은 움직임의 특성을 파악해 낙상과 같은 잠재적인 원인을 예측하는데 필요한 일이다. 그러므로 이동운동에 상대적으로 불편을 느끼는 노인과 환자들을 대상으로 연구하는 것은 큰 의미가 있다 하겠다. 이동운동 시 동적 안정성은 크게 전신 안정성과 국부 안정성으로 구분할 수 있는데 전자는 미끄러짐과 같은 유한 크기의 동요에 대해 저항하기 위한 이동운동계의 역량과 관련되며, 후자는 작은 동요에 대한 계의 감각과 관련되는 것으로 알려지고 있다 (Dingwell, Cusumano, Sternad, & Cavanagh, 2000). 이동 시 반복적으로 일어나는 스텝(step) 혹은 스트라이드(stride)별 변화를 관찰하는 것은 계의 감각과 관련된 국부 안정성을 판단하는 중요한 척도이다. 운동 시 안정성을 평가하는 척도로는 전통적으로 variability를 이용한 선형기법과 비선형기법이 활용되고 있다.

선형기법은 반복적으로 수행되는 이동 운동 중에서 몇몇 스트라이드를 분리해 이를 시간 표준화해 스트라이드 전체를 관찰한다든가 혹은 스트라이드를 특정 국면으로 구분해 변화를 관찰하는 방법이다. 이 방법은 연구자들에게 상대적으로 적은 자료를 이용해 이동운동의 특성을 파악하는데 유리하므로 건강한 자와 환자 간, 남녀 간, 노소년 등 다양한 조건 사이에 보행패턴 특성을 분석해 조건간의 차이점과 특징을 판단하는 수단으로 연구되고 있다 (Guimaraes & Isaacs, 1980; Goldberger et al., 1986; Rapp et al., 1986; Goldberger et al., 1988; Pool, 1989; Hausdorff et al., 1994; Heiderscheit et al., 2002; 류, 2006a; 류, 2006b). 특히 이동 장애와 같은 연구에서 임상학적 의문을 밝히는데 용이하게 활용되고 있다 (Maki, 1997). 그러나 이 선형

기법은 대상자내 혹은 대상자간 비교를 위해 시간 표준화 작업을 거쳐야 하는데 이로 인해 원래 자료를 늘리고 당기는 작업으로 인해 그 결과 운동 패턴의 일시적인 변동이 초래될 수 있어 필연적으로 자료의 왜곡을 가져올 수 있다. 또한 한 스트라이드에서 다음 스트라이드까지 어떻게 신경근 계가 관여하는가를 규명하는 이동운동의 고유한 역학적 특성을 밝힐 수 없기 때문에 분석 기법으로 한계점을 가지고 있다. 이런 선형기법의 한계를 해결할 방안으로 비선형 동역학 기법을 이용해 인간 움직임을 분석하는 연구가 최근에 와서 활발하게 이루어지고 있다 (Hausdorff et al., 1996; Dingwell et al., 2000; Buzzi, Stergio, Kurz, Hageman, & Heidel, 2003).

비선형 기법은 선형기법과 달리 비교적 긴 시간에 대해 스트라이드-스트라이드 운동 패턴 변화가 어떻게 일어나는지를 관찰하는데 비중을 두고 있다 (Dingwell & Cusumano, 2000; Hausdorff et al., 1997). 따라서 이동 운동 시 근신경 조절과정의 변화를 관찰할 수 있는 통찰력을 제공하므로 ((Dingwell & Cusumano, 2000) 전통적으로 운동역학에서 분석되어 온 선형 분석 방법의 문제점을 어느 정도 해결할 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 선형기법에서 이루어지는 시간 표준화 작업이 없으므로 원 자료의 구조는 보존되는 장점이 있다.

퇴행성 무릎관절염은 인간뿐만 아니라 모든 척추동물에서 나타나는 관절 질환 중 가장 흔한 질환으로 연령에 따라 발생 빈도가 증가해 55세 이상에서는 약 80%, 75세 이상에서는 거의 모든 인구에서 퇴행성관절염의 소견이 나타나는 현상을 보이는 것으로 보고되고 있다 (고영진, 2000). 이 질환은 관절의 가동을 부드럽게 해주고 충격을 흡수하는 기능을 갖고 있는 관절 연골(cartilage)이 파괴되어 발생하는 질환이다. 이 연골은 스폰지와 같은 역할을 하는데, 관절이 압박 받고 있지 않을 때는 관절 액을 끌어들이다가 보행이나 운동 때와 같이 압력이 가해지면 관절 액이 빠져나가 충격을 흡수하는 작용을 하게 된다.

이런 중요한 연골 조직이 파괴되어 정상적인 연골의 완충 작용이 저하되면 충격을 흡수할 수 있는 기능을 상실하게 됨으로써 동통과 관절 운동 시 불편함이 동

반된다. 따라서 정상적인 보행에 불편을 느끼는 퇴행성 무릎관절염 환자들의 보행 시 시계열에 따른 동적 안정성을 분석·구명(究明)하는 것은 무릎관절염 질환의 진행을 역학적 측면에서 이해함은 물론 근 신경 조절 과정을 살펴보는 의미 있는 일이라 하겠다. 그동안 무릎 관절염 환자를 대상으로 보행 변화를 운동역학적으로 정량화한 연구는 미진한 편이다.

Stautter (1997)은 보행 시 무릎 관절염 환자를 대상으로 운동학적 분석에서 이들 환자들은 정상인에 비해 시상면에서 무릎 움직임이 감소했다고 보고하고 있으며, Schnitzer et al. (1993)과 Sharma et al. (1998)은 무릎의 정렬상태와 무릎 내전 모멘트 및 무릎 관절염 질병 사이의 관계를 보고하고 있다. 최근에 Kaufman et al.(2001)등은 초기 퇴행성관절염 환자를 대상으로 한 보행 연구에서 초기 관절염 환자들은 보행 시 관절운동의 각도는 정상인과 큰 차이가 없지만 무릎 관절 내측 신전모멘트는 감소해 무릎 관절의 부하를 감소시킨다고 주장했다. 또한 류(2008)는 무릎 관절염 환자와 정상인의 발목 관절에 작용하는 상하의 힘을 비교한 결과 무릎 관절염 환자에서 크게 나타났다고 보고하고 있다. 이상 선행 연구에서 살펴본 바와 같이 무릎 관절염 환자의 보행 동작을 운동학적 및 운동역학적으로 무릎 관절과 발목 관절에 대해 정량화한 연구는 간간이 이루어지고 있지만, 비선형 기법을 통해 이들 환자들의 보행 시 동적 안정성을 관찰해 근 신경 패턴을 이해하기 위한 연구는 전무한 상태이다.

이에 본 연구는 선행 연구에서 중점적으로 관찰한 보행 시 무릎의 각 (Stautter, 1997; Kaufman et al.(2001)과 발목 상하 힘의 결과로 나타나는 발목의 수직변위를 선정 (류지선,2008)해 선형과 비선형 시계열 동역학 기법을 이용 퇴행성 무릎 관절염 환자 보행의 국부적인 안정성을 분석했다. 이를 위해 다음과 같은 구체적인 내용들은 산출됐다. 1) 족관절의 수직 변위와 시상면 무릎 관절 각을 산출했다. 2) 1)의 값에 대해 변이 계수 (coefficients of variation, CV)와 Lyapunov 지수 (LyE) 및 상관차원 (correlation dimension, COD)을 산출했다. 본 연구의 가정은 분석된 지수의 차이는 무릎 관절염으로 인해 발생하는 차이로 판단했다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 실험에 이용된 대상자는 방사학적 검사를 통해 등급-II 퇴행성 무릎 관절염 환자 12명 (체중: $66.9 \pm 11.3\text{kg}$, 신장: $164.5 \pm 7.0\text{cm}$, 나이: $62.1 \pm 2.9\text{yrs.}$)과 이들 연령과 상응한 무릎에 질환이 없는 12명 (신체 질량: $66.4 \pm 12.1\text{kg}$, 신장: $164.6 \pm 6.2\text{cm}$, 연령: $62.5 \pm 2.2\text{yrs.}$)을 대상으로 했다.

2. 실험절차

자료 수집에 앞서 반사 마커들은 오른쪽 하지의 대전자, 외측 대퇴 과, 외측 과에 부착했으며, 대상자들은 자신의 선호 속도 (환자 집단 평균: $1.5 \pm 0.5\text{km/h}$, 정상 집단: $1.5 \pm 0.3\text{km/h}$)로 트레이드밀 (treadmill)을 걷도록 했다. 촬영에 앞서 대상자는 숙달된 트레이드밀 운동 패턴을 얻기 위해 충분한 연습 시간이 주어졌다(Jeng et al., 1997). 각 대상자의 선호 속도는 트레이드밀위에서 속도를 임의적으로 증가와 감소를 반복해 각 대상자가 가장 편하게 느끼는 속도로 선정했으며, 이를 3번 반복해 평균 속도로 정했다. 실제 실험은 각 대상자들이 연습한다고 인식할 때 운동학적 자료는 100 스트라이드에 대해 기록되었다. 이동 시 하지의 운동학적 자료를 얻기 위하여 3대의 고속 디지털 카메라 (MCU 240, Qualisys, Switzerland)가 이용되었으며, 이때 신체 오른쪽 하지가 적어도 두 대의 카메라에 기록되도록 설치되었으며, 카메라는 컴퓨터에 연결해 Qualisys 프로그램에 의해 조절되었다. 길이가 알려진 4개의 표식점을 갖고 있는 L-틀 (frame) 강체는 트레이드 밀의 오른쪽 구석에 놓아 전역 좌표 시스템 (room coordinate system)으로 정의했으며, 축은 상방 수직 쪽을 +Z, 운동 방향 쪽을 +Y, +Y에서 +Z의 외적(cross)쪽을 +X로 취했다. 알려진 두 표식 Wand는 놓여진 L-틀을 중심으로 촬영 범위의 각 카메라 시각을 Scale하기 위해 캘리브레이션 (calibration)에 이용되었으며, 이때 카메라의 촬영 속도는 100Hz로 설정했다.

3. 자료분석

퇴행성 무릎 관절염 환자와 정상인과의 국부적 안정성을 비교하고자 허리, 무릎, 발목 관절 마커들에 대한 운동학적 자료 수집은 오른발 발꿈치가 접지 순간(heel-strike)부터 다음 오른발 접지 순간까지인 100스트라이드에 대해 부착된 신체 랜드마크 마커의 3차원 좌표는 NLT (nonlinear transformation) 방법을 이용해 얻었다. 각 대상자들에 대한 선과 각운동 파라메타들의 평가를 하기 위해 발목관절의 Z 좌표 (수직 변위)에 대한 시계열 연속 자료와 상대 무릎 각을 분석했다.

연속 이동 100사이클은 각 변인에 대해 걷기는 정상인 집단의 경우 평균 11,576, 환자 집단의 경우 평균 10,822 데이터 점을 분석을 했다. 시계열의 필터링은 비선형 도구들의 계산들에 영향을 줄 수 있기 때문에 피해야만 한다는 선 행 연구에 기초해 (Papp, 1994) 자료는 시스템내 variability의 더 정확한 제시를 위해 필터 되지 않은 상태에서 분석했다 (Kantz & Schreiber, 1997). 같은 조건에서 모든 대상자들에게 자료를 얻었기 때문에 기기에서 오는 노이즈의 상태는 모든 대상자들에게 일정한 것으로 간주했다. 따라서 분석 결과 차이점들은 시스템 자체 내의 변화로 간주했다 (Kaplan & Glass, 1995).

앞서 밝힌 바와 같이 보행 시 국부적 안정성을 관찰하기 위한 목적으로 선형 분석은 관찰된 시계열 자료에서 각 대상자에 대해 임의적으로 3부분의 스트라이드를 추출해 스트라이드의 최대 피크와 피크 사이를 중심으로 시간 표준화한 후 이들의 변이 계수를 산출해 variability의 크기로 보아 안정성 여부로 판단했다. 비선형 분석은 자연적인 스트라이드-스트라이드와 같은 적은 변동에 시스템의 민감도를 분석하고자 (Dingwell & Cusumano, 2000; Dingwell et al., 2000) 다음과 같은 절차를 따랐다.

우선 원래 자료와 지연된 시간을 이용해 각 시계열에 대해 적당한 상태 공간구축을 위해 다음 공식을 이용했다 (Takens, 1981; Sauer et al., 1991).

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

여기서 $X(t) = d_E$ 차원 상태 벡터, $x(t) =$ 원래 1차원

데타, $T=$ 시간 지연, $d_E=$ 끼워넣기 차원. 시간 지연들은 시간 지연 범위에 대해 두 데타 사이의 공유된 정보의 양을 평가하는 평균 상호정보 (average mutual information; AMI)의 첫 번째 최소 함수 (Fraser, 1986)로부터 계산되었다. 이는 일반적으로 끼워 넣기 하며 시간 지연을 구할 때 점들 간 상관성이 가장 적게 만들어지는 시간을 의미한다. 이를테면 시계열이 $X(t)=(x(1), x(2), \dots, x(n))$ 이라고 할 때 시간지연을 T , p 는 점들 이라하면, $X(t)$, $X(t+T)$ 간에 상호정보는 $I(T) =$

$$\sum_{ij} p_{ij}(T) \ln p_{ij}(T) \ln p_{ij}(T) - \sum_i p_i \ln p_i$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $I(T)$ 가 최소가 되는 T 를 시간 지연으로 결정한다. 이것은 $X(t)$ 와 $X(t+T)$ 간의 상관을 동적 측면에서 최소가 되게 한다는 의미이다. AMI의 처음 최소를 선택하는 것은 최소 과잉을 인접 지연좌표에 제공하는 것이다. 끼워 넣기 차원들은 (d_E) 연속적으로 보다 높은 차원에서 인접 궤도사이의 거리들을 비교하는 Global False Nearest-neighbors (GFNN) 알고리즘 (Kennel et al., 1992)은 연속적으로 보다 높은 차원에서 인접궤도사이의 거리들을 비교하기 위해 사용되었다.

계열의 끼워넣기 차원을 결정한 후 국부안정성의 추정 은 Lyapunov 지수계산에 의해 수행되었다 (Wolf et al., 1985). LyE들은 상태 공간에서 인접하는 궤도들의 발산의 평균 지수율을 정량화한다. 이는 국부 동요들에 대한 계의 민감도의 직접적인 척도를 제공하는 것 (Kantz & Schreiber, 1997)으로 양의 지수들은 국부 불안정성을 나타내고 보다 큰 지수는 국부 동요에 대해 보다 큰 민감도를 의미한다. 움직임 계에 대한 최대 LyE (λ_1)는 다음과 같이 정의 되었다.

$$d(t) = D e^{\lambda_1 t} \quad (2)$$

여기서 $d(t)$ 는 시간 t 에서 상태 공간 내 인접하는 궤도 사이에 평균 변위이고, D 는 최초 인접한 점들 사이의 간격이다. 위 공식에서 양변에 로그를 취하면 LyE 은 다음과 같이 정의 된다.

$$\ln[d_j(i)] \approx \lambda^*(i \Delta t) + \ln[D_j], \quad (3)$$

여기서 $d_j(i)$ 는 i 이산 시간 간격 후(즉 $i \Delta t$ 초) 가장 인접한 j 번째 쌍 사이의 거리를 나타낸다. 상태 공

간에서 인접한 궤도들 사이에 유클리드 거리는 시간 함수와 가장 인접한 모든 쌍들에 대해 평균했다.

$$y(i) = \frac{1}{\Delta t} \langle \ln[d_j(i)] \rangle, \quad (4)$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 j 의 모든 값에 대해 평균을 나타낸 것이다. LyE들 (λ^*)은 위 공식 (3)에 의해 정의된 곡선의 수렴 값으로 추정했다.

걷기 시 국부 안정성을 판단하는 또 다른 한 비선형 수단으로 본 연구에서는 COD 이용했다. COD는 벡터 공간 내에서 어떻게 동적 계의 데이터 점들이 조직되어 있는가를 측정하는 즉 동적계의 차원의 측정으로 다음과 같은 알고리즘을 이용해 계산 했다(Buzzi, et al, 2003; Stergiou, 2004).

$$CoD = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{d \log C(r)}{d \log r} \quad (5)$$

여기서 $C(r)$ 은 상관 적분으로 다음과 같이 계산되었다.

$$C(r) = const \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+\mu}^N \Theta(r - |x(i) - x(j)|) \quad (6)$$

여기서 $x(i)$ 는 상태 공간에서 재구축된 끼워 넣은 상태를 나타내고, Θ 는 r 의 반경을 가진 점들의 쌍들을 계산하기 위해 적용된 함수이다. μ 는 상호 관련이 있는 일시적인 점들을 배제하기 위해 적용된 Theiler 보정 값이다. $\log[C(r, N)]$ 와 $\log[r]$ 사이의 선형관계는 국부 기울기를 계산함으로써 결정될 수 있다.

각 대상자에 대해 발목관절 수직 변위와 무릎각의

변인에 대해 최대 피크의 variability를 판단하기 위해 계산된 변이 계수와 이들 변인의 LyE, COD 지수에 대해 정상인 집단과 무릎관절염 환자 집단 간 평균차를 비교하기 위해 t검정을 실시했다. 유의 수준은 $\alpha = .05$ 에서 설정되었다.

III. 연구결과

보행 시 정상인과 무릎관절염 환자들의 동적 안정성을 구명(究明)하기 위해 선형 방법의 변이 계수와 비선형 방법의 LyE 및 COD를 통해 산출된 결과에 대해 비교한 내용은 다음과 같다.

<그림 1, 2>는 선형 분석을 위해 정상인과 무릎 관절염 환자들의 보행 시 발목 수직 변위와 무릎 각 변위의 피크 사이를 표준화한 것을 나타낸 것이며, <그림 3>은 무릎 관절염 환자의 한 대상자에 대한 발목 수직변위와 무릎 각 변위의 100 스트라이드 시계열 자료를 제시한 것이다.

<그림 4>는 이들 두 변인에 대한 무릎 관절염 환자의 시계열 자료를 벡터 공간으로 구축해 나타난 것이다. <표 1>은 두 집단의 변이계수와 리아프노프 지수 및 상관 차원을 보인 것이다.

이들 결과에 의하면 발목 수직 변위의 피크 운동 범위는 대략적으로 정상인 집단이 350-600mm 사이로 환자들의 350-450mm보다 큰 피크의 움직임을 보였다.

무릎 관절각의 운동 범위 역시 정상인 집단이 대략

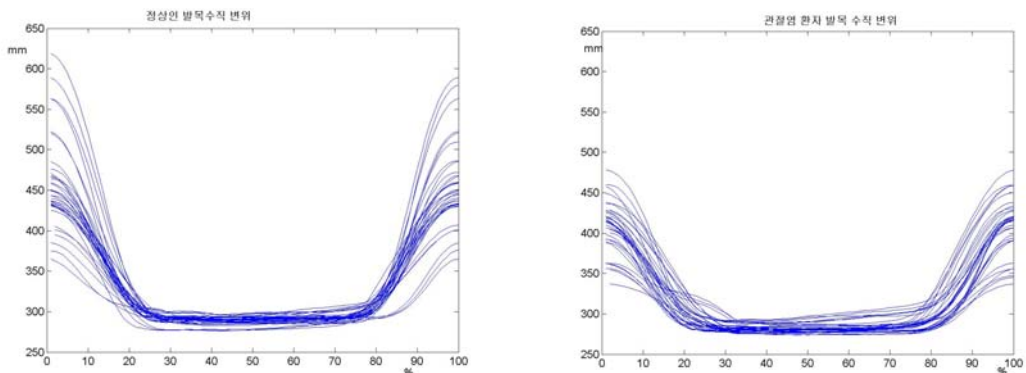


그림 1. 정상인과 무릎 관절염 환자들의 보행 시 표준화된 발목 수직 변위 피크.

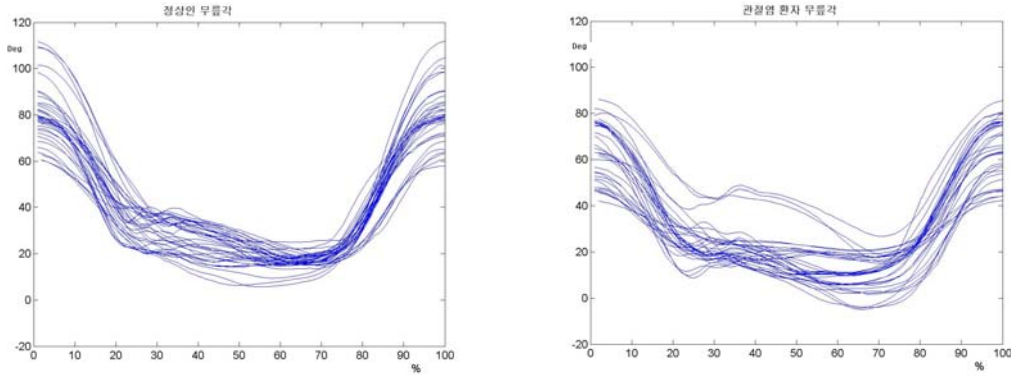


그림 2. 정상인과 무릎 관절염 환자들의 보행 시 표준화된 무릎 각 피크.

표 1. 두 집단의 변이계수와 리아프노프 지수 및 상관 차원 값

	무릎 각 변위						발목 수직 변위					
	C.V		LyE		CoD		C.V		LyE		CoD	
	정상인	관절염	정상인	관절염	정상인	관절염	정상인	관절염	정상인	관절염	정상인	관절염
	0.8	0.9	1.639	1.719	1.135	0.880	0.6	0.4	2.238	1.410	0.625	0.752
	2.2	3.8	1.749	1.757	1.303	1.369	1.7	2.1	1.631	2.565	0.841	0.749
	5.2	7.0	1.693	1.253	0.913	1.448	4.8	3.1	1.756	1.871	0.781	1.041
	3.9	2.1	1.553	1.561	0.990	1.119	3.1	2.3	2.320	2.409	0.668	0.692
	2.3	2.0	1.120	1.759	0.978	1.102	2.1	1.3	1.650	2.411	0.690	0.812
	2.1	0.5	1.990	1.743	0.660	0.917	1.5	0.7	1.977	2.002	0.744	0.887
	2.1	1.0	1.487	1.522	0.974	1.174	2.0	1.2	2.056	2.425	0.978	0.806
	5.6	1.9	1.561	1.576	1.025	1.214	6.9	0.8	1.899	1.531	0.957	0.698
	3.0	3.1	1.069	1.801	1.011	1.123	2.3	2.4	1.670	2.521	0.750	0.814
	2.1	0.8	1.068	1.855	0.933	0.940	0.8	0.1	2.354	1.840	0.785	0.853
	1.9	0.7	1.736	0.953	1.165	0.960	0.6	0.5	2.102	1.615	0.645	0.591
	3.8	3.8	1.772	1.834	1.163	1.484	1.4	2.4	2.587	1.698	0.919	1.261
평균	2.9	2.3	1.535	1.611	1.020	1.144	2.3	1.4	2.020	2.024	0.781	0.829
t	0.98		1.25		2.06*		1.8*		0.01		0.18	

*: p<.05

적으로 50-110도 사이에 무릎 굴곡 피크가 일어나 환자집단의 40-90도 보다 크게 굴곡 되었다.

한편 보행 시 국부적 안정성을 관찰하기 위해 정량화한 선형 기법과 비선형 기법의 결과들을 살펴보면, 발목의 수직 변위의 경우 정상인들은 선형 분석 방법의 변이계수 값의 전체 평균이 2.3로 무릎관절염 환자들의 1.4보다 평균적으로 큰 값을 보였다(p<.05).

비선형 방법의 리아프노프 지수 값과 상관차원 값은 정상인 집단이 각각 평균 2.020, 0.781로 환자집단의 평균 2.024, 0.829보다 적은 값을 보였으나, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이와 같이 선형 과 비선형 두 방법 간 결과가 일치하지 않았다. 대표적 각형으로 분석된 무릎 관절각의 경우 선형기법의 변이 계수 값은 정상인 집단이 2.9로 환자 집단의 2.3보다 평균적

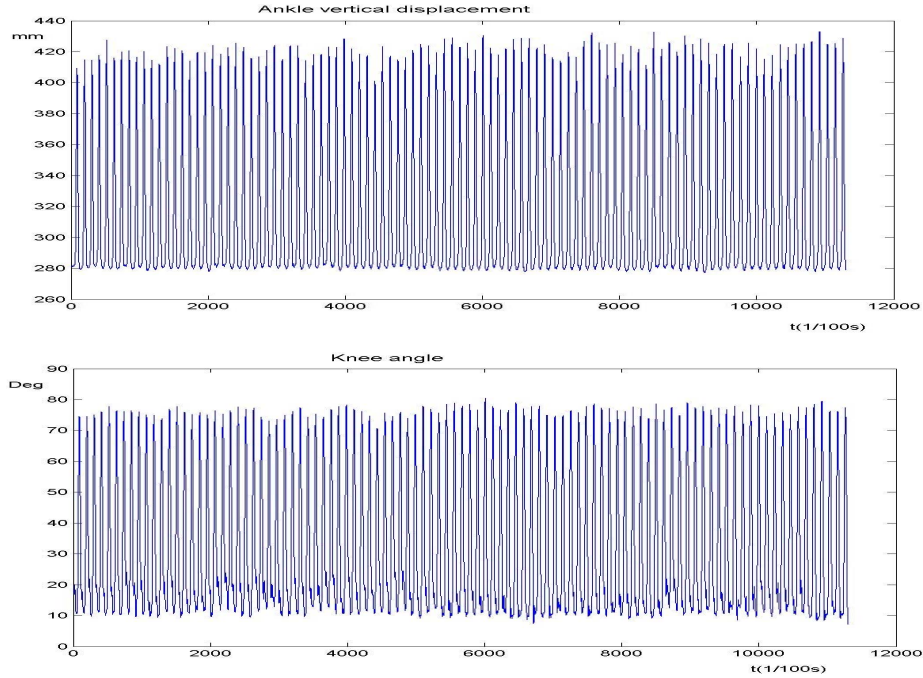


그림 3. 무릎 관절염 환자의 한 대상자에 대한 발목 수직변위와 무릎 각 변위의 100 스트라이드 시계열 자료.

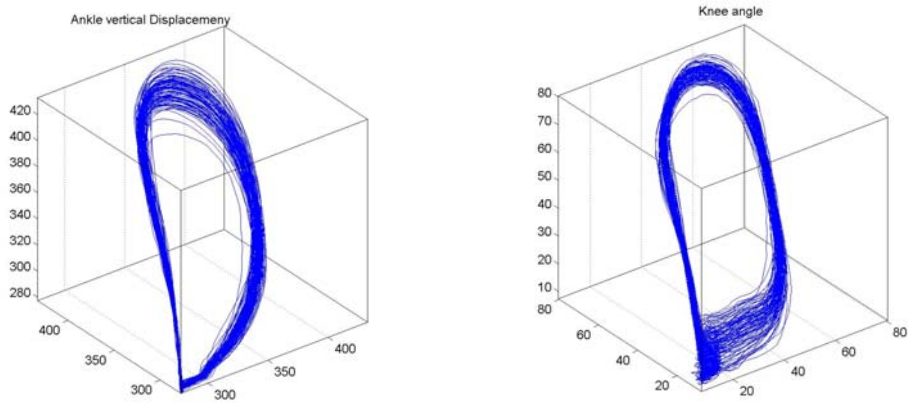


그림 4. 무릎 관절염 환자의 발목 수직 변위와 무릎각 변위의 벡터 공간.

으로 큰 값을 보였으나, 통계적 유의한 차이는 보이지 않았다.

그러나 비선형기법의 상관차원 값은 정상인 집단 평균 1.020이 무릎 관절염 환자 집단의 1.144보다 통계적으로 유의하게 적은 값을 보였다($p < .05$). 무릎 각 변위 역시 선형 기법과 비선형 기법의 특징이 일치하지 않는 현상을 보였다.

IV. 논의

보행 운동 시 상해의 원인을 찾기 위한 일환으로 낙상 자체와 관련된 연구뿐만 아니라 낙상을 야기시킬 수 있는 국부적 불안정성을 판단하는 연구들이 이루어지고 있다. 이들 연구들은 보행 시 하지의 운동학적 변

인들의 관찰뿐만 아니라 운동역학적 변인들을 관찰해 안정성 유무를 판단하고 있다.

이들 안정성은 그동안 전통적으로 선형 기법을 통한 variability를 이용해 연구되고 있다 (Holt et al., 1995; Maki, 1997; Winter, 1989; Yack & Berger, 1993; Heiderscheit, Hamill, & Van Emmerik, 2002; 류지선, 2006b). 즉 보행 시 특정 시간 몇몇 스트라이드를 임의적으로 추출해 관련된 역학적 변인들의 변이계수 혹은 표준편차의 평균 등을 이용해 variability를 산출한다. 따라서 이 기법은 적은 양의 자료를 활용해 보행의 특징을 파악하는 장점을 가지고 있는 반면에, 이들 선형 기법의 variability은 단지 특정 순간에 치중되어 있는 통계적 측정이므로 시계열 자료의 시공간적 구조가 고려되지 않는 단점이 있다.

또한 대상자 내, 간 비교를 위한 표준화 작업으로 인해 자료가 가지고 있는 원천적인 특징이 왜곡될 수 있는 한계점을 지니고 있다. 이런 이유로 보행 운동 시 어떤 동요에 대한 이동 계의 민감도를 시계열적으로 관찰할 수 없다. 이런 문제점의 해결로 비선형 동역학 기법이 활용되고 있다. 비선형 기법은 비교적 긴 시간 내에서 보행 시 선정된 역학량들을 분석해 안정성을 판단하는 방법으로 많은 자료를 분석하는 번거로움을 가지고 있지만, 변화의 특징을 시계열적으로 관찰하기 때문에 보다 신뢰할 수 있는 충실한 관찰 방법이라 할 수 있다. 비선형 분석은 여러 기법이 있지만, 벡터공간에서 시간에 따라 인접하는 궤도들의 평균 로그 (대수) 분산의 기울기로 계산되는 (Dingwell & Cusumano, 2000) LyE는 불안정성을 측정하는 수단으로 널리 이용된다. 또한 벡터 공간 내에서 어떻게 동적 계의 데이터 점들이 조직되어 있는가를 측정하는 상관차 방법이 활용되고 있다.

본 연구는 정상인과 퇴행성 무릎관절염 환자들의 보행 시 국부적 안정성을 비교하고자 선형 기법의 변이계수를 산출한 variability와 비선형 기법의 LyE와 COD 방법을 이용한 지수를 산출했다. 보행 시 선형의 발목 수직 변위의 피크 변이계수를 관찰한 결과 정상인 집단이 환자 집단보다 큰 값을 보였다. 따라서 선형분석 시각에서 정상인 집단이 관절염 환자 집단보다 보행 시 국부적 불안성이 크다고 해석할 수 있

의 결과를 보였다. 각형의 무릎 굴곡 각도의 피크에 대한 variability를 분석한 결과 선형기법의 변이계수는 통계적 의미는 없지만, 무릎 관절염 환자 집단이 정상인 집단보다 큰 값을 보였으나, 비선형 기법의 LyE나 COD 지수는 정상인보다 무릎관절염 환자 집단이 통계적 의미를 떠나 큰 값을 보였다. 이는 환자 집단이 보행 시 무릎의 관절염으로 인해 근력 제한이나 혹은 관절 이완, 감각 능력 등과 같은 보행 기능의 속박 조건이 큰 것으로 생각된다(Kaplan & Glass, 1995).

본 연구의 전반적인 맥락으로 볼 때 정상인보다 관절염 환자 집단이 불안정하게 보행을 수행하고 있다고 판단된다. 향후 다양한 관절의 선형과 각형 변인들을 더 관찰할 필요성이 전제되지만, 본 연구 결과 비선형 측면에서 무릎 관절염 환자의 보행 시 국부적 불안정은 관절의 선형 변인보다 각형 변인에서 두드러진 현상을 보였다. 한편 두 변인에 대한 선형과 비선형 결과가 일치하지 않는 현상을 보였다. 앞서 기술한 바와 같이 발목 변위에 대한 선형 기법의 결과는 정상인 집단이 무릎 관절염 환자 집단보다 variability가 컸으나, 비선형 기법의 결과인 LyE나 COD 지수는 통계적으로 유의하지는 않지만, 무릎 관절염 환자 집단이 큰 값을 보이는 상반된 결과를 나타냈다. 무릎 각에 대한 값은 발목 수직 변위와 달리 선형 결과는 두 집단 유의한 차이를 보이지 않았지만, 비선형 COD 결과에서는 환자 집단이 큰 값을 보였다.

이와 같은 결과는 선행 연구 결과와 다른 양상을 보이고 있다. Buzzi et al.,(2003)은 노인과 젊은 사람을 대상으로 고관절, 무릎 관절, 발목 관절의 최대 및 최소 변위의 변이 계수와 무릎 관절각의 최대 및 최소 변이 계수를 분석한 결과 모두 노인 집단이 큰 값을 보였다고 주장했으며, 또한 비선형 기법의 LyE와 COD 지수 값도 노인 집단이 젊은 집단보다 크게 나타났다고 제시해 선형 결과와 비선형 결과의 일치를 주장했다. 본 연구 결과와 선행 연구 결과와의 차이의 원인을 찾는 것은 선행 연구에서 선형기법에 대한 적용된 방법의 자세한 기술의 한계로 어려움은 있지만, 근원적인 원인은 선형 분석을 위한 보행 스트라이드 혹은 스텝의 추출 문제가 아닌가 생각된다. 즉 보행 시 스트라이드-스트라이드 마다 일정한 패턴을 보인다고 볼 수 없

으므로 어느 스트라이드를 추출해 분석하느냐에 따라 다른 결과를 얻을 수 있다고 보여진다. 따라서 본 연구 결과와 선행 연구와의 차이는 이 문제가 크게 작용하지 않았나 생각된다. 이것은 선형 분석에서 스트라이드 혹은 스텝 간 대두되는 variability 문제를 해결할 수 없는 한계에서 오는 차이라고 설명할 수 있다. 이에 비해 비선형 분석에서는 variability 문제가 상대적으로 적게 작용하기 때문에 이들 간의 variability 작용차가 두 기법 간 다른 결과를 나타낸 것으로 볼 수 있다.

이런 이유로 인간 이동운동의 국부적 안정성을 판단하는 수단으로 몇몇 스트라이드나 스텝구간에서 추출된 평균 변이 계수나 혹은 표준편차를 이용해 variability를 산출하는 선형 기법을 적용 분석하고자 할 때는 대상자 내의 variability를 통제할 필요성이 요구된다 할 수 있다. 본 연구는 단지 두 변인에 대해 분석했지만, 선형 기법이 보행 시 동적 안정성을 판단하는 수단으로 활용할 가치 있는가, 여부를 명확히 판단하기 위해서는 보다 다양한 변인에 대해 두 기법의 결과를 분석할 필요성도 요구된다 할 수 있다.

V. 결론 및 제언

이 연구는 60대 남자 노인의 정상인들과 무릎 관절염 환자들 사이에 보행 시 국부적인 안정성을 비교하기 위해 선형기법의 변이 계수와 비선형 시계열 동역학 기법의 LyE와 COD 방법을 이용해 분석했다.

분석 결과 선형 운동인 발목의 수직 변위를 통해 관찰한 국부적 안정성은 선형 기법의 변이 계수를 통해 관찰한 결과 정상인 집단이 무릎관절염 환자 집단보다 불안한 것으로 나타난 반면에 비선형 기법 관찰에서는 두 집단 차이가 없는 것으로 나타났다. 한편 각형 운동인 무릎의 각 변위를 통해 분석된 국부적 안정성은 선형 분석 결과는 두 집단 차이점을 보이지 않았지만, 비선형 기법 결과인 COD 지수는 무릎 관절염 환자가 크게 나타나 결과적으로 보행 시 국부적 불안을 보였다.

이상 본 연구 결과를 종합해 보면 선형 기법의 결과와 비선형 기법의 결과는 일치하지 않았으며, 또한 무

릎 관절염 환자의 보행 시 불안정은 발목의 수직 변위인 선형에서 보다 무릎 관절 각 변위인 각형에서 뚜렷하게 나타났다.

향후 이와 유사한 연구에서 고려될 사항은 분석할 대상자의 다양성뿐만 아니라 역학량도 운동학적 요인에 국한할 것이 아니라 운동역학적 요인 등 다양한 변인들에 대해 살펴볼 필요성이 요구되며, 보행 시 국부적 안정성을 판단하는 수단으로 선형 기법을 이용할 경우 대상자 내 variability를 통제하기 위해 자료의 시도수를 적절히 증가시키는 것을 고려해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 고영진(2000). 퇴행성 관절염의 병인 및 진단. 대한재활의학회 2000년 추계 학술대회, 3-12.
- 류지선(2008). 퇴행성 무릎 관절염 환자와 정상인 보행의 관절 충격과 내력 비교. 한국체육학회지, 47(1), 435-448.
- 류지선(2006a). 노인 보행 시 발과 경골 Coupling 패턴과 Variability. 한국체육학회지, 45(1), 747-756.
- 류지선(2006b). 노인보행 시 지면 반력 신호의 주파수 크기와 Variability 비교. 한국체육학회지, 45(5), 457-464.
- Buzzi, U.H., Stergiou, N., Kurz, M., Hageman, P.A., & Heidel, J. (2003). Nonlinear dynamics indicates aging affects variability during gait. *Clinical Biomechanics*, 18, 435-443.
- Dingwell, J.B., & Cusumano, J.P. (2000). Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking. *Chaos*, 10(4), 848-863.
- Dingwell, J.B., Cusumano, J.P., Sternad, D., & Cavanagh, P.R. (2000). Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamics stability of continuous overground walking. *Journal of*

- Biomechanics*, 3, 1269-1277.
- Fraser, A.M. (1986). *Using mutual information to estimate metric entropy*. In: Mayer-Kress, G.(Ed), *Dimensions and Entropies in Chaotic Systems*. Springer, Berlin, 82-91.
- Goldberger, A., Bhargava, V., West, B., & Mandell, A.J. (1986). Some observations on the question: is ventricular fibrillation "chaos"? *Physica*, 19, 282-289.
- Goldberger, A.L., Rigney, D.R., & Mietus, J. (1998). Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome: heart rate oscillations and bifurcations. *Experientia*, 41, 983-987.
- Guimaraes, R.M., & Isaacs, B. (1980). Characteristics of gait in old people who fall. *Int. Rehabilitation Medicine*, 2, 177-180.
- Hausdorff, J.M., Mitchell, S.L., Firtion, R., Peng, C.K., Cudkovicz, M.E. Wei, J.Y., & Goldberger, A. L. (1997). Altered fractal dynamics of gait: Reduced stride interval correlations with aging and Huntington's disease. *Journal Applied. Physiology*, 82(1), 262-269.
- Hausdorff, J.M., Rios D.A., & Edeberg, H.K. (2001). Gait variability and fall risk in community-living older adults: a 1-year prospective study. *Arch Physic Medicine Rehabilitation*, 82, 1050-1056.
- Heiderscheit, B.C., Hamill, J., & Van Emmerik, R.E. A. (2002). Variability of stride characteristics and joint coordination among individuals with unilateral patellofemoral pain. *Journal of Applied Biomechanics*, 18, 110-121.
- Jeng, S.F., Liao, H.F., Lai, J.S., & Hou, J.W. (1997). Optimization of walking in children. *Medicine Science Sports Exercise*, 29, 370-376.
- Kantz, H., & Schreiber, S. (1997). *Nonlinear time series analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Kaufman, K.R., Hughes, C., Morrey, B.F., Morrey, M., & An, K. (2001). Gait characteristics of patients with knee osteoarthritis. *Journal. of Biomechanics*, 34, 907-915.
- Kennel, M.B., Brown, R., & Abarbanel. (1992). Determining minimum embedding dimension using a geometrical construction. *Physics. Review*, A45, 3403-3411.
- Maki, B.E. (1997). Gait changes in older adults: predictors of falls or indicators of fear? *Journal of the American Geriatric Society*, 45, 313-320.
- Pool, R. (1989). Is it healthy to be chaotic? *Science*, 243, 604-607.
- Sauer, T., Yorke, J.A., & Casdagli, M. (1991). Embedology. *Journal of Statistical Physics*, 65(3/4), 579-616.
- Schnitzer, T.J., & Popovich, J.M. (1993). Effect of piroxicam on gait in patients with osteoarthritis of the knee. *Arthritis and Rheumatism*, 36(9), 1207-1213.
- Sharma, L., & Hurwitz, D.E. (1998). Knee adduction moment, serum hyaluronan level, and disease severity in medial tibiofemoral osteoarthritis. *Athritits and Reumatism*, 41(7), 1233-1240.
- Stauffer, R.N., & Chao, E.Y.S. (1997). Biomechanical gait analysis of the diseased knee joint. *Clinical Orthopedics and Related Research*, 126, 246-255.
- Stergiou, N. (2004). *Innovative analyses of human movement*, Human Kinetics, 73-76.
- Takens, F. (1981). *Detecting strange attractors in turbulence*. In: Rand, D., Young, L.S.(Eds.), *Dynamical systems and Turbulence*, Warwick(1980). Springer, Berlin V. 898, 366-381.
- Wolf, A., Swift, J.B., Swinny, H.L., & Vastano, J.A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica*, 16, 285-317.

투 고 일 : 1월 27일
 심 사 일 : 2월 4일
 심사완료일 : 3월 19일