

보행속도와 관절 이상이 다리 관절 강성에 미치는 영향

The effect of speed and knee osteoarthritis on leg and joint stiffness in human walking

*박희원¹, #박수경²

*H. W. Park¹, #S. K. Park(sukyungp@kaist.ac.kr)²

^{1,2} 한국과학기술원 기계공학과

Key words : Human walking, Joint stiffness, Knee osteoarthritis, Inverse dynamics

1. 서론

보행 보조 시스템 및 이족 보행 로봇 등의 분야에 있어서 인체 보행 과정을 설명하는 모델의 필요성이 점차 높아지고 있다. 이상적으로는 간단한 모델을 사용하여 보행 과정을 재현하는 것이 성공적인 모델 구축이라 할 수 있지만 질병, 노화 등의 인체 요소와 속도, 지면 상태 등과 같은 여러 보행 요소로 인해 통합된 모델을 제안하는 것에 있어 큰 어려움이 있다.

보행 동특성을 묘사하기 위해 스프링 다리 모델(spring-like leg model)을 이용하여 인체 보행 과정을 설명하는 연구들이 보고되고 있다.^{1,3} 기존 역진자 모델에서는 할 수 없었던 M 자 모양의 수직 지면 반력 등의 인체 보행 동특성을 재구현할 수 있다. 그로 인해 스프링 다리 모델의 주요 변수인 선형 다리 강성(stiffness)을 통해 인체 보행 변화를 설명하였고, 보행속도와 강성 간의 관계가 보행 추진에너지를 최대화하도록 결정된다고 보고하였다.^{2,3}

그러나 인체 하지는 선형이 아닌 다관절의 관절토크가 작용하는 복잡한 구조이기 때문에 전체 다리의 선형 강성으로 인체 보행 메커니즘을 설명하는데 한계가 있다. 또한 특정 하지 관절에 이상이 있는 경우에는 전체 다리 강성뿐만 아니라 보행 중 관절 특성의 변화에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 정상군과 무릎 관절 이상군에 대하여 보행 속도에 따른 하지 관절 변화를 관찰하고 비교하고, 관절 강성이 전체 다리 강성에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 정상군 8 명과 무릎 관절 이상군 6 명의 피험자가 참여하였다. 12 미터 길이와 1 미터 너비로 이루어진 보행로를 맨발로 걷게 하여 총 4 가지 속도에 대한 지면 반력과 인체 운동 정보를 수집하였다. 21 개의 마커로 이루어진 Helen Heyes 마커 세트를 부착하여 보행 중 양쪽 발, 정강이, 허벅지, 그리고 상체 움직임을 계산하였다.

실험을 통해 얻어진 피험자의 지면 반력 및 마커 데이터는 Butterworth 5 차 저주파 통과 필터링을 하였다. 인체 보행 운동의 경우 일반적으로 5 Hz 미만의 주파수 특성을 가지며 인체 보행의 지면 반력 정보의 경우 15 Hz 미만의 주파수 특성을 갖기 때문에 각각 10 Hz, 30 Hz 의 차단 주파수를 사용하였다.

인체의 보행주기는 기준이 되는 다리가 지면에 닿아있는지를 기준으로 지지구간(stance phase)과 스윙 구간(swing phase)으로 나뉜다. 더 나아가 지지구간은 양발 지지구간 및 한발 지지구간으로 이루어져 있다. 이 보행 구간 들은 지면 반력 데이터를 이용하여 정의하였다.

지면 반력 정보와 각 관절 움직임을 기반으로 역동역학을 이용하여 하지 관절에서 발생된 모멘트를 계산하였다. 역동역학 모델은 양 발, 정강이, 허벅지, 그리고 상체로 총 7 개의 분절로 이루어져있다. 정중면(sagittal plane)만을 고려하여 운동방정식을 얻었다. 각 관절의 운동방정식을 바탕으로 지지 다리의 압력중심(center of pressure)과 지면 반력을 이용하여 발목, 무릎, 허리 순으로 각 관절 모멘트를 계산하였다.

3. 결과 및 토의

한발 지지구간에서 모든 관절과 전체 다리에서 일정한 강성값들이 관찰되었다. 전체 보행 주기에서 하나의 강성값으로 인체 보행 특성을 설명할 수 없지만 한발 지지구간에서 각 관절의 변위와 모멘트, 무게중심의 높이와 수직 지면 반력 간의 큰 연관성이 있는 것을 확인하였다.

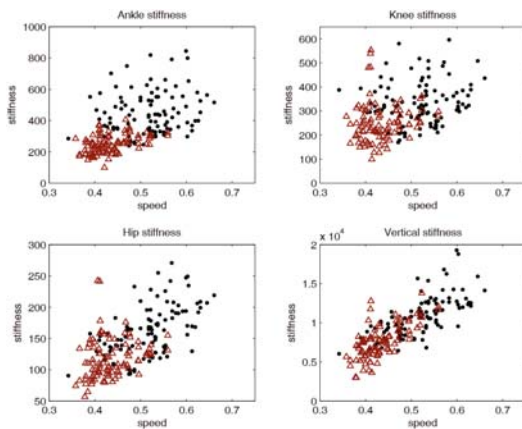


Fig. 1 Leg stiffness and lower limb joint stiffness with gait speed (filled circle means normal subjects and hollow triangle means subjects with knee osteoarthritis)

발목과 무릎의 경우에는 보행 속도에 따라 관절 강성이 큰 영향을 받지 않지만 전체 다리와 허리는 보행 속도가 증가할수록 강성이 증가하는 것을 알 수 있다. 발목과 무릎의 경우, 정상군과 무릎 관절 이상군 모두 보행 속도에 대한 연관성이 없었다. 그러나 무릎 관절 이상군의 발목과 무릎 강성의 평균치가 정상군에 비해 크게 작은 것을 확인할 수 있다.

한발 지지구간에서의 일정한 강성값이 전체 지지구간의 보행 동특성을 설명할 수는 없지만 초반 양발 지지구간에서는 무릎 관절이, 후반 양발 지지구간에서는 발목 관절이 스프링과 흡사하게 움직이는 것을 확인할 수 있다. (Table 1) 이를 통해 지지구간 초반부에는 무릎이 스프링과 같이 구동되고 후반부에는 점차 발목이 스프링과 같은 움직임을 보이는 것을 알 수 있다.

Table 1. Goodness of fit

Table legend	Early DSP	SSP	Late DSP
Ankle R ²	0.5127	0.8665	0.9641
Knee R ²	0.9583	0.9030	0.5656
Hip R ²	0.2603	0.9098	0.3282

4. 결론

본 연구에서는 정상군과 무릎 관절 이상군을 대상으로 보행 중 나타나는 전체 다리 및 관절 강성을 관찰하였다. 한발 지지구간에 대해 두 실험군 모두 일정한 강성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 전체 다리 강성의 경우, 기존 연구들에서 보고된 바와 같이 속도에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 속도에 따른 허리 관절 강성의 증가는 한발 지지구간에서 허리를 통해 부족한 에너지를 보상함으로써 인한 결과로 볼 수 있다.

발목과 무릎 관절 강성은 속도에 따른 영향은 없었고, 노화와 질병으로 인한 관절 토크의 감소로 무릎 관절 이상군이 정상군에 비해 낮은 강성값을 보였다.

후기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0020939)

참고문헌

- Lipfert, S., Seyfarth, A., and Blickhan, R., "Leg stiffness in walking and running," American Society of Biomechanics 29th Annual Meeting, 35, 2005.
- Kim, S. and Park, S., "Leg stiffness increases with speed to modulate gait frequency and propulsion energy," Journal of Biomechanics, **44**, 1253-1258, 2011.
- Hong, H., Kim, S., Kim, C., Lee, S., and Park, S., "Spring-like gait mechanics observed during walking in both young and older adults," Journal of Biomechanics, **46**, 77-82, 2013.