

보행시 발과 족관절의 운동학적 분석

이운섭 · 신형수*

경운대학교 작업치료학과 · 경운대학교 물리치료학과*

Kinetic Analysis of The foot and ankle during walking

Yun-Seob Lee, P.T., M.S., Hyung-Soo Shin, P.T., M.S.*

Dept. of Occupational Therapy, Kyungwoon University

*Dept. of Physical Therapy, Kyungwoon University**

1)

<Abstract>

Purpose : This study shows the movements of the ankle and the foot in walking stages, and helps to diagnose and treat the problems of the ankle and the foot. The foot in human is a mean of the transportation, body support, and shock absorber. However, the slightest changes in the anatomical position can cause a significant increase of the stress and force in the ankle and the foot.

The regular compressive force in the ankle of the normal person is generated by the contraction of the gastrocnemius and popliteus muscles, and transmitted to the achilles tendon.

The plantar flexion about 10 degrees occurs immediately after the heel strike, getting ready for the weight acceptance. The shear force about 80 % of the body weight is generated immediately after the heel off of the mid stance phase. In those who have a problem in the ankle, the compression force at the ankle decreased to 1/3 of the body weight, and the shear force decreased, and the compressive force was reached at their maximum level earlier than the normal people.

Conclusion : Analysis of the movements at the ankle and the foot in walking phase can make the effort to diagnose and treat the ankle and foot with the problems. However, the further study is necessary.

Key Words : Gait, Anatomical position, Analysis of the movement

I. 서 론

선진 외국에서는 이미 오래전부터 족부 문제에 대해서 관심을 가지고 이에 대한 연구가 활발한 상태이며 족부학이 임상 의학의 한 분야로서 자리 잡고 있는 상태이다(문재호 등, 1996). 족관절과 족부의 문제를 다루는 족부 전문가(podiatry)가 의학의 한 영역에 있다는 것은 족관절과 족부의 복잡한 구조로 과중한 체중과 외부의 스트레스로 인해 질병의 유병이 높음을 알 수 있다.

발과 족관절의 복합적인 구조와 관절들로 인해서 문제가 발생하였을 경우 초기에는 어디서 시작하여 이차적으로 근위에 혹은 원위에 통증이 생겼다는 것을 구분하기 어려웠고 스포츠와 관련하여 발과 족관절 문제에 관심을 가지는 사람들이 증가하게 되었다. 이러한 경향에 맞추어 신발에 관한 기술의 발달과 연구 경향이 생겨나게 되었다(Norkin, 1992).

미국의 경우 성인의 약 40%에서 발 질환을 갖고 있으며, 이들의 대다수에서 무지 외반증, 건막류(bunion), 추상족지(hammer toe) 등이 발견된다는 보고가 있고, 특히 40대에서 60대의 여성에서 무지 외반증과 동반된 건막류의 유병률이 높다고 보고하였다(Coughlin MJ 등, 1984). 또한 여러 가지 형태의 신발을 착용함으로 인하여 발의 여러 가지 변형과 비정상적인 보행을 일으키기도 한다.

무지 외반군과 정상인군 간의 족관절 근력비교 연구에서 무지 외반인 군에서 족관절 거굴근에서 근력 약화가 나타났으며 그 원인으로 무지 외반증 환자의 보행시 압력이 정상적 보행시 압력보다 더 내측으로의 이동되어 족관절 축에 대한 하퇴삼두근의 수축방향인 저굴·회내보다 저굴·회외 방향의 운동이 일어난다고 보고하고 족관절 축이 내측으로 더 회전되고 족관절 회외근의 수축력이 상대적으로 증가되고 하퇴삼두근의 수축은 감소되어 정상인 군에 비해 무지외반인 군의 경우에서 족관절 저굴근력의 약화가 발생할 것으로 주장하였다(이윤섭, 2001).

발은 인간의 이동수단인 동시에 지면으로부터 체중을 지지해주고 충격을 흡수하기도 한다.

발과 족관절의 안정성은 보행 시 에너지소모를 감소시켜주고 다양한 자세 변화를 유지하기 위한 기저면을 제공한다. 그러나 발과 족관절은 해부학적

인 구조가 조금만 변화되어도 체중을 지지하기 때문에 다른 관절보다 더 많은 힘과 스트레스를 받게 되기도 한다.

심한 염좌에 의한 운동적인 제동과 구조적인 제동이 없어지게 되면 발과 족관절의 안정에 심한 영향을 미쳐 발과 족관절에 부정 배열이 일어날 수 있으며 이러한 부정 배열은 심한 병적 변화를 초래할 수 있다(한수봉, 1985).

따라서, 본 연구의 목적은 보행시 발생하는 족관절과 발의 움직임의 알아보고 임상에서 족관절과 발의 질환의 진단과 치료에 도움이 되고자 한다.

보행시 족관절과 발의 운동분석

1. 보행

보행을 정의하기는 쉽지는 않지만 일반적으로 걸음과정 그 자체라기 보다는 걸음의 형태 또는 태도를 나타낸다. 인간의 보행은 가장 개인적이고 개인의 독특한 보행 형태를 나타낸다. 보행은 그 사람의 직업, 인체구조, 건강상태등 신체적이고 심리적인 특성을 나타내기도 한다(Norkin, 1992).

또한 입각기의 안정된 상태 동안 몸을 앞으로 움직이기 위한 체지의 연속이고 반복된 동작을 수행하며 전체 몸과 두 개의 다 분절화 된 하지 사이의 일련의 상호작용이다. 몸의 진전은 전진과 안정성이 결합된 방식으로 이 힘의 방향을 수정함으로써 이루어진다. 입각기 신체 전체의 진전을 위한 필수 요소는 발과 발목에 의한 Rocker의 활동이다.

Rocker는 Heel Rocker, Ankle Rocker, Forefoot Rocker가 있으며 Heel Rocker는 종골조면의 둥근 표면과 족관절의 중심사이의 뼈분절은 체중이 발로 떨어짐에 따라 땅쪽으로 구르는 불안정한 지렛대로의 역할을 한다. 경골 전면 근육들에 의한 활동이 발쳐짐(foot drop) 비율을 제한하여 하퇴를 앞으로 당기는 경골과의 결합을 생성하게 된다.

Ankle Rocker는 가자미근 활동을 질적으로 생성한다. 바닥에 전족이 닿으면 발목은 계속적인 진전을 위해 지렛대의 받침이 되고 발이 정지된 채로 경골은 현재 운동량에 대한 반응에 있어 수동적 발목 배굴에 의해 계속적으로 전진한다. 이 기간동안 신체 벡터는 종족골두까지 발의 길이를 따라 전진

한다.

Forefoot Rocker는 중족골의 등근 외형이 신체 벡터 기저가 중족골두에 도달하고 뒤꿈치가 들릴 때 작용하게 된다. 보행기간 동안 가장 강한 추진력을 생성하고 전유각기에 가속화된 체지 진전을 위한 기저로 작용한다. 신체 벡터의 기저는 중족골두에 있고 그 다음 슬관절의 중심을 지나게 된다 (Jacquelin, 1992).

2. 관절범위

족관절의 총 운동 범위는 약 45°로 개인이나 연령에 따라 광범위하게 변화될 수 있으며 일반적으로 배굴 10-20°, 족저 25-35°의 운동이 일어난다 (Margareta et al, 1989).

발뒤꿈치 닿기 시 족관절은 약간 족저굴곡 위치에 있다가 발바닥 닿기까지 족저굴곡이 진행된다. 몸체가 지지하는 중간 입각기동안 빨리 배굴로 변하고 입각기 말기에 발뒤꿈치 떼기 후에는 다시 저굴이 일어난다. 유각기의 시작인 발가락 떼기에서는 저굴이 되다가 유각기 중기에는 배굴로 바뀌고 발뒤꿈치 닿기에서는 약간 저굴로 변한다(Jacquelin, 1992).

발뒤꿈치 닿기시 족저굴곡의 정도는 신는 구두의 뒤축 높이에 좌우되고 뒤축이 높을수록 족저굴곡의 정도가 크게된다(한수봉, 1985).

김덕용 등(2001)의 계단오르기 동작과 평지 보행과의 운동형상적 및 운동역학적 비교 분석연구에 따르면 초기접지시의 족관절 배측굴곡각도는 평균 1.87° 배측굴곡되어 있었고 최대 족관절 족저 굴곡 각도는 평균 11.25° 족저굴곡되어 있었다. 그리고 입각기 동안의 최대 족관절 배측굴곡이 일어나는 시기는 평지 보행 시 평균 50.42%에서 나타났다고 보고하였다.

입각기 시기의 평균 족관절의 범위는 25°정도이고 배굴은 평균 10.2°, 저굴은 평균 14.2°이다. 발뒤꿈치 닿기 시 족관절은 0°이고 입각기의 10% 동안 약간 저굴(5°)로 진행되고 점차 최대 배굴로 일어나고 입각기 70%에서 거의 발끝떼기까지 최대 저굴이 빠른 속도로 발생되고 이후에 다시 발뒤꿈치 닿기전까지 배굴이 발생한다(gordon W, 1990).

발에서의 운동은 주로 3관절(거골하관절, 족근중

간관절, 중족지절관절)에서 이루어진다.

후족부의 운동은 발뒤꿈치 닿기 시에 편안히 서 있을 때 보다 더 회내되어 있고 발뒤꿈치 닿기 직후는 회내되고 중간입각기동안 다시 회내되는 양상을 보인다. 발끝떼기 시에 최대 회내가 이루어진다(Nester, 2000).

Mark등(1999)은 입각기동안 주상골의 평균 최대 회외각도는 $-3.9^{\circ}(\pm 2.4^{\circ})$ 이고 시기는 $48.2(\pm 14.2)\%$ 로 보고하였다.

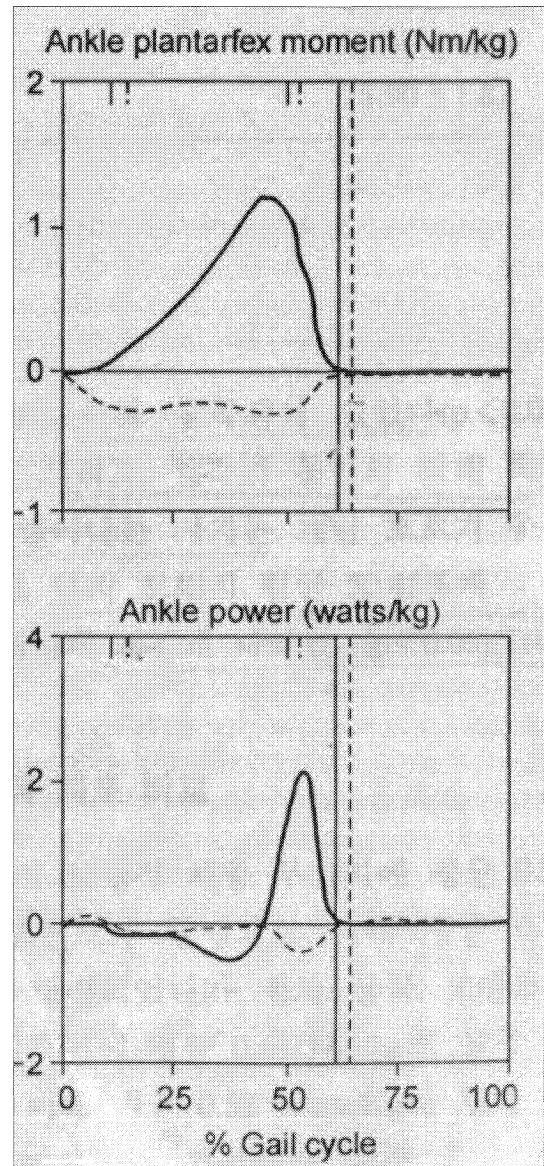


그림 1. 보행시 족관절의 시상면 운동학적 분석

3. 근 작용

보행 시 발과 족관절 운동에 있어 근육의 활동을 시상면적 분석을 보면 발뒤꿈치 닿기에서 발바닥 닿기까지 전경골근이 저축굴곡요소에 대응하여 저굴을 조절하여 발이 지면에 털썩 떨어지는 것을 제한하게 된다.

발바닥 닿기에서 중간입각기동안 정상근의 활동은 비복근과 가자미근이 배측굴곡 요소에 대응하고 경골전진 조절을 위해 원심성으로 수축하게 된다. 중간입각기에서 발뒤꿈치 떼기까지도 전단계와 마찬가지로 비복근과 가자미근의 원심성수축이 계속된다.

발뒤꿈치 떼기에서 발가락 떼기 동안은 비복근, 가자미근, 단비골근, 장비골근, 장무지굴근이 수축하여 발을 저굴시키면서 몸의 추진력을 제공한다.

유각기동안의 정상근의 활동은 배측굴곡근이 족관절을 중립위로 오도록하고 발가락이 지면에 끌리는 것을 방지하기 위해 수축하게 된다(Jacquelin, 1992).

4. 지면 반발력

지면 반발력은 지면에 의해서 발에 영향을 미치는 힘으로 정의한다.

지면 반발력을 나타내는 종류에는 수직부하, 전후전단력, 내외전단력으로 3차원적으로 구성되어 있다(Tomas 등, 1997).

수직부하는 중력에 반대하는 힘뿐만 아니라 한발 짝에서 신체 중심을 위아래로 움직일 때 필요로 하는 힘을 포함한다. 초기 발뒤꿈치 닿기에서부터 발끝떼기 까지 작용하며 최대 힘의 크기는 자기 체중을 초과한다. 입각기 25%에서 자기체중의 112%의 최대 힘이 증가된다(Gary L. Smidt, 1990). 수직부하의 첫 번째 정점은 부하 반응 동안 체중-수용결과에 반응하는 중간입각기의 초기에 발생한다. 이때 신체의 중력 중심은 빠르게 떨어지고 체중에 대한 가속도의 힘이 더해져서 발생하게 된다. 중간입각기 후기에 지면 반발력의 감소는 신체가 정지한 발을 넘어서 앞으로 구를 때 중력 중심의 상승으로 이루어진다. 두 번째 정점은 말기 입각기 후기에 일어나며 체중이 말기 입각기에 forefoot rocker를

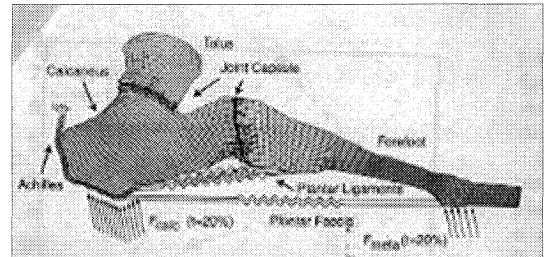
넘어서 앞으로 떨어질 때 하향속도와 중력 중심의 아래로 향하게 된다.

보행 평면에 평행하여 생성되는 힘을 전단력이라 한다.

전후전단력은 수직으로부터 지면 반발력 벡터가 편위될 때 발생하고 내외 전단력은 한쪽체지로부터 다른 쪽으로 체중의 변경이 일어날 때 발생하게 된다. 발과 바닥 계면에서 적절한 마찰이 없을 때 이러한 전단력 양상은 미끄러짐과 안정성에 대한 잠재력을 위협하게 된다. 그러나 수직 부하와 비교할 때 전단력은 적게 나타난다.

내외측 전단력의 크기는 가장 작고 체중의 10% 미만이다. 최대 내측 전단력(체중의 5%)은 중간부하 반응시에 나타나고 외측 전단력(체중의 7%)은 말기 입각기에 최고가 된다.

전후 전단력은 체중의 25% 미만 정도로 나타난다. 초기 발뒤꿈치 닿기에서 주로 순간적 전방 전단력(체중의 13%)이 발생이 되고 말기입각기를 통해 후방 힘이 체중의 23%까지 빠르게 상승한다.



<A>

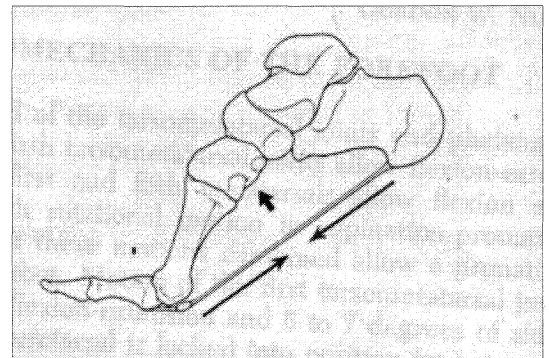


그림 2. A : 보행시 입각기 20%지점에서 지면과의 상대, 종골과 중족골 두 지점의 부하. B : 입각기 말기의 발가락의 배측굴곡으로 인한 족저막의 긴장도 증가로 인한 족궁의 상승

또한, 발에서 일어나는 중요한 요소는 체중과 지면 반발력과의 충격을 흡수하는 역할이라 할 수 있다.

족관절 저골은 뒤꿈치에 의한 초기 바닥 닿기의 즉각적인 반응으로 대부분의 최후 10°는 짧은 발의 떨어짐으로 일어난다. 경골 전면 근육들의 활동은 동작을 유의하게 제한하고 즉각적으로 나타난다기 보다는 오히려 보행주기에 8% 지점까지 전축에 의한 바닥접촉을 지연시킨다. 떨어지는 체중은 점차 감소되고 두 번째로 충격을 흡수하는 기전은 슬관절에서 흡수한다(Jacquelin, 1992).

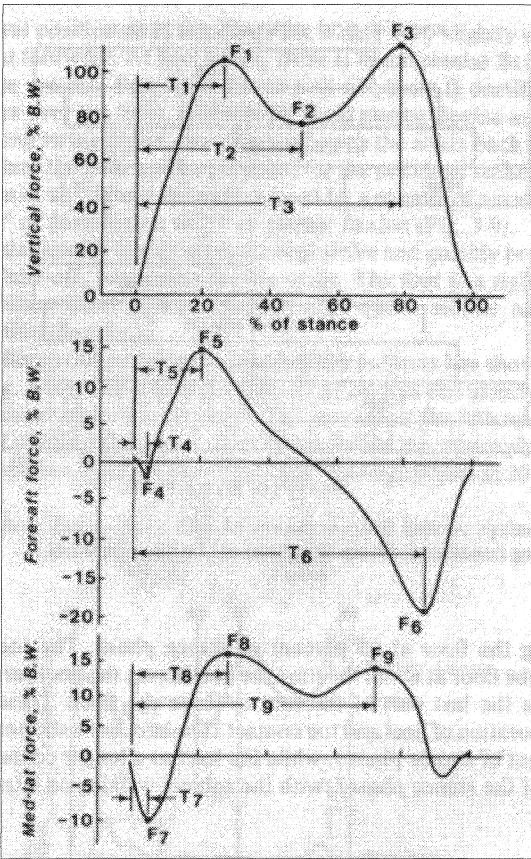


그림 3. 지면 반발력(수직 부하, 전후, 내외측 전단력)

5. 동력학

정상인에서 보행시 족관절에 미치는 기본 압박력은 비복근과 슬와근의 수축에 의해 일어나며 아킬레스건을 통해 전달된다. 전경골근의 수축에 의해 발생하는 힘은 보행의 초기 정지시기에만 체중의

약 20%미만의 힘만이 작용한다.

아킬레스건의 힘은 발뒤꿈치 들기시 아킬레스건이 저골을 위한 우력을 발생하기 시작할 때, 보행정지시기의 말기에 많이 발생한다. 보행주기의 이 시점에서 체중의 약 5배까지 압박력이 가장 크게 발생한다.

이 경우에 전단력은 최고체중의 0.8배 까지가 발뒤꿈치 들기(heel off)하는 보행의 중기 정지시기 직후에 발생한다. 족관절에 질환이 있는 환자에서는 체중의 약 3배로 관절 압박력이 감소되었고 또한 최대 압박력이 정상인에서보다는 약간 초기에 발생하였으며 전단력도 역시 감소를 보였다(한수봉, 1985).

Stauffer 등(1977)은 정상인에서 족관절의 반응력에 대한 보행속도의 영향에 대해 연구에 따르면 보행속도에 따라 약간 차이가 있으나 최대 힘의 크기는 동일하다고 주장하였다.

빠른 보행 시에는 초기 보행 정지시기와 후기 보행 정지시기에 각각 체중의 3배에서 5배의 두 최대력을 나타내었고 느린 보행 시에는 후기 보행 정지시기에 단 한번 체중의 약 5배에 해당하는 최대력을 나타내었다고 하였다.

김덕용 등(2001)은 평지 보행 시 말기 입각기에 평균 1.28Nm/kg의 최대 족저 굴곡 모멘트를 보이고 전유각기에 평균 2.38 Watt/kg의 힘이 발생하였다고 보고하였다.

요 약

발뒤꿈치 닿기 시 족관절은 약간 족저굴곡 위치에 있다가 발바닥 닿기까지 족저굴곡이 진행된다. 몸체가 지지하는 중간입각기동안 빨리 배굴로 변하고 입각기 말기에 발뒤꿈치 떼기 후에는 다시 저골이 일어난다. 유각기의 시작인 발가락 떼기에서는 저골이 되다가 유각기 중기에는 배굴로 바뀌고 발뒤꿈치 닿기에서는 약간 저굴로 변한다.

후족부의 운동은 발뒤꿈치 닿기 시에 편안히 서 있을 때보다 더 회내되어 있고 발뒤꿈치 닿기 직후는 회내되고 중간입각기동안 다시 회내되는 양상을 보인다. 발끝떼기 시에 최대로 회내가 이루어진다. 발에서 일어나는 중요한 요소는 체중과 지면 반발력과의 충격을 흡수하는 역할이라 할 수 있다.

족관절 저골은 뒤꿈치에 의한 초기 바닥 닿기의

즉각적인 반응으로 대부분의 최후 10°는 짧은 발의 떨어짐으로 일어난다. 경골 전면 근육들의 활동은 동작을 유의하게 제한하고 즉각적으로 나타난다기 보다는 오히려 보행주기에 8% 지점까지 전축에 의한 바닥접촉을 지연시킨다. 떨어지는 체중은 점차 감소되고 두 번째로 충격을 흡수하는 기전은 슬관절에서 흡수한다. 위와 같이 보행 시에 발과 족관절의 운동성은 다양하다. 그러나 아직 임상에서는 발과 족관절에 대한 연구가 미흡하다.

따라서 발의 역학적인 범위의 다양성과 발의 내적인, 외적인 부하 사이의 관련성을 위한 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 김덕용, 박창일, 장용원 등. 계단오르기 동작과 평지 보행과의 운동형상학적 및 운동역학적 비교 분석, 대한재활의학회지, 25(6), 2001.
- 문재호, 이한수, 정광익 등. 정상군과 무지외반증 및 편평족 환자군의 족저압 비교. 대한재활의학회지, 20(3), 1996.
- 이운섭. 무지외반이 족관절 저굴근과 배굴근에 미치는 영향. 학위논문. 2001
- 한수봉. 족관절의 생역학. 대한스포츠의학회지, 3(2), 1985.
- Coughlin MJ, Hallux. Causes evaluation and treatment. Postgrad Med, 75. 1984.
- Cynthia C, Norkin, Pamela K. Levangie.. Joint structure & Fuction : F.A Davis. 1992.
- Gary L, Smidt. Gait in Rehabilitation. Churchill Livingstone, 13(2), 1990.
- Margareta Nordin, Victor H, Frankel. Basic Biomechanics of The Musculoskeletal system. Lea & Febiger second edition. 1989.
- Mark W, Cornwall, Thomas G. Mcpoil. Relative Movement of Navicular Bone During Normal Walking. Foot & Ankle International, 20(8), 1999.
- Nester, Hutchins, Bowker P. A Measure of Rearfoot Motion During Normal Walking. Foot & Ankle International, 21(7), 2000.
- Perry. Gait Analysis(Normal and Pathological Function). 20(8), 1992.
- Stauffer RN, Chao, Brewster RC. Force and motion analysis of normal, diseased, and prosthetic ankle joint. Clin. Orthop., 127. 1977.
- Thomas M, Kevin P, Farrell et al. Wiger. Effects of Restricted Knee Flexion and Walking Speed on the Vertical Ground Reaction Force During Gait. Josp. 25(4). 1997.
- Verginal L, Giddings, Gary et al. Calcaneal loading during walking and running, Medicine & Science in Sports & Exercise 32(3), 2000.