

당뇨발 환자의 보행 시 발바닥 전단응력 및 압력분포 분석

황성재*(연세대 대학원 의공학과), 박선우(연세대 의공학부),
김영호(연세대 의공학부, 연세의료공학연구원)

The analysis of plantar shear stress and pressure of diabetic foot patients during walking

S. J. Hwang(Biomedical Eng. Dept., YSU), S. W. Park(Biomedical. Eng. Dept., YSU)
Y. H. Kim(Biomedical Eng. Dept., YSU, Institute of Medical Eng., YSU)

ABSTRACT

In this study, we analyzed the plantar shear stress and pressure of diabetic foot patients during walking by using in-shoe local shear force and plantar pressure measurement system. Twelve normal subjects and three diabetic foot patients with diabetic neuropathy in lateral heel were participated in this study. The center of pressure in diabetic foot patients moved more medially and directed toward 1st, 2nd metatarsal heads and hallux during late stance period, making pressure at the medial heel and 2nd metatarsal head significantly higher than in the normal. Shear stress at the heel were changed significantly in early stance and the magnitude of shear stresses in each metatarsal head were also changed. Further studies would be very helpful to design foot orthoses in patients with diabetic neuropathy or other diseases.

Key Words : Diabetic foot(당뇨발), Shear stress(전단응력), Plantar pressure(발바닥 압력분포)

1. 서론

보행 시 직접 지면과 접촉을 이루고 있는 발은 많은 시간동안 신체를 지지하고 있으며, 바닥면과 접촉하여 기계적인 응력을 받는다. 정상인의 경우 보행 중에 작용되는 기계적 자극에 대하여 적절한 보호기전을 발휘하여 신체를 보호하나, 신경병성 장애나 말초 질환 장애를 갖는 환자의 경우에는 자극에 적절히 대응하지 못하고 상해를 입게 된다. 특히 당뇨발(diabetic foot) 환자들은 상해를 입은 부위의 감염 위험도가 높고 궤양으로 쉽게 전이되어 그 치료가 어려울 뿐만 아니라 그 예후가 좋지 않아 절단에 이르는 경우도 많다¹.

보행 중에 발에 작용되는 기계적 자극은 발바닥에 작용되는 압력(plantar pressure)과 전단응력(shear stress)으로 이들에 대한 국부적 분포가 중요하게 고려된다. 인체조직에 작용되는 전단력(shear force)의 영향에 대하여 첫 연구는 Reichel 등²에 의하여 이루어졌으며, Dinsdale 등³은 동물실험을 통해서 압력보다 전단응력으로 인하여 궤양이 발생된다고 보고하였

다. 그러나 보행 시 발바닥에 작용되는 전단응력 분포에 대한 분석은 측정기술의 어려움으로 인하여 선행연구가 미비한 실정이다. 발바닥에 작용되는 전단력을 측정하기 위해서, Tappin 등⁴은 magnetic-resistive 원리를 이용하여 디스크 형태의 전단력 센서를 최초로 고안하여 한 방향의 전단력을 측정하였고 정임숙⁵은 내·외측 및 전·후방향의 전단력을 측정할 수 있는 센서를 고안하였다.

한편 보행 중에 작용되는 발바닥 압력분포에 대한 연구는 비교적 많이 진행되었다. Kornozeck 등⁶은 성인군과 노인군의 보행 시에 나타나는 발바닥 압력분포를 비교한 바 있고, 권치호 등⁷은 편평족과 요족 등의 발 질환자에 대한 발바닥 압력분포를 분석하였다. 그러나 당뇨발 환자의 보행 시 발바닥 전단력과 압력분포에 관한 연구는 진행된 바가 거의 없다.

본 연구에서는 발바닥 국부 전단력 측정시스템을 이용하여 정상인 및 당뇨발 환자에 대하여 보행 시 발바닥에 발생하는 전단력을 측정하고 압력분포 측정장비를 이용하여 얻은 발바닥 압력분포와의 상관관계를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 전단력 측정시스템

Fig. 1은 발바닥의 국부 전단력을 측정할 수 있는 전단센서이고, Fig. 2는 전단센서가 삽입된 인솔형 국부 전단력 측정 시스템이다⁵. 전단력 센서의 삽입 방향은 센서에 작용되는 전단력이 앞쪽 또는 내측으로 작용될 때 센서의 출력 값이 양(+)이 되도록 하였다.

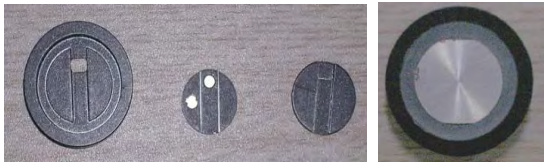


Fig. 1 Photographs of a local shear force transducer



Fig. 2 Insoles in which shear sensors were inserted

2.2 보행 실험

본 연구를 위해 발에 질병이나 외과적인 상해가 없으며 신경 병력이 없는 12명의 정상보행자와 Fig. 3과 같이 외측 뒤꿈치부위에 신경병성 당뇨병이 있는 당뇨병 환자 3명이 실험에 참여하였다. 피험자들의 특성은 Table 1과 같다.

피험자가 8m의 보행로를 걸을 때 보행로 중앙부분 5m를 보행하는 동안 측정이 이루어졌으며 총 5회를 반복 실험하였다. 매 측정 전에 피험자의 체중을 이용하여 각 발의 센서를 보정하는 작업을 거쳤다. Fig. 4와 같이 전단센서가 삽입된 인솔을 신발에 넣고 신호처리와 무선 전송을 위한 전자부를 피험자의 몸에 착용시킨 후, 충분한 보행 훈련을 실시하였다. 삼차원 동작분석시스템 (Vicon Motion System, 영국)와 4개의 힘측정판(Kistler, 스위스; AMTI, 미국)을 이용하여 보행실험을 동시에 수행함으로써 보행주기를 구분하였다.

보행 중 측정된 12채널의 전단센서 출력신호는 MATLAB(Mathworks, 미국)을 이용하여 10Hz의 9차 저역대역필터를 적용하였다. 필터를 거친 신호는 보정식에 의하여 전단력으로 환산되고, 삼차원 동작분석시스템에 의해 구분된 각 발의 보행주기별로 구분하여 분석되었다.

Table 1 Characteristics of participated subjects

Characteristics	Normal	Diabetic foot
Age (years)	23.44±1.74	53.33±4.16
Body mass (kg)	78.21±9.15	72.13±9.59
Height (cm)	175.64±4.22	175.66±10.69
Foot length (cm)	26.02±0.62	25.83±7.63



Fig. 3 Diabetic foot patient



Fig. 4 The insole type local shear stress measurement

2.3 압력분포 분석

압력측정시스템(Matscan, 미국)을 이용하여 보행 시 동일한 정상인과 당뇨병 환자의 발바닥 압력분포를 측정하였다. 발바닥 압력분포의 분석을 위해 Fig. 5와 같이 엄지발가락(hallux), 제 2중족골두(2nd metatarsal head), 뒤꿈치 외측(lateral heel), 뒤꿈치 내측(medial heel)의 주요 영역 4개를 정의하였다. 보행주기 중 하중수용기, 중간입각기, 말기입각기, 전유각기에 대하여 정상인과 당뇨병 환자의 압력분포를 비교, 분석하였다.

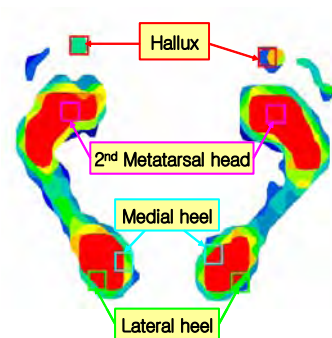


Fig. 5 Definition of four regions to analyze plantar pressure

3. 결과

3.1 발바닥 전단응력

Fig. 6과 Fig. 7은 정상인과 당뇨발 환자에 대하여 발의 주요 영역에서 측정된 한 보행주기 동안의 전후 및 내외측 방향의 전단응력이다. 그림은 각 영역에서의 전단응력의 평균값과 편차로 나타내었다. 전후 방향의 전단응력 그래프에서 양(+)의 값은 앞쪽 방향으로 작용되는 응력을 의미하며, 내외측 방향의 전단응력 그래프에서 양(+)의 값은 내측으로 작용되는 응력을 나타낸다.

정상인과 마찬가지로 당뇨발 환자의 경우에도 초기접지기와 하중수용기동안 발뒤꿈치에 큰 전단력이 작용되었으나 그 크기는 정상인에 비하여 작음을 알 수 있었다. 중족골두에 전단응력이 가장 크게 작용되는 시기는 전유각기에 발로 지면을 밀어내는 시점으로, 각 방향에서 발생한 전단응력의 방향은 정상인의 경우와 유사하나, 각 중족골두에서의 전단응력 크기가 변화됨을 알 수 있었다. 특히 당뇨발 환자의

경우 두 번째 중족골두의 내측 방향의 전단응력이 정상인에 비해 크게 나타났는데, 이는 정상인의 경우 발바닥 압력중심선이 발의 아치를 따라 이동하다가 첫 번째와 두 번째 중족골두 사이로 이동하는 반면에 당뇨발 환자의 경우 발뒤꿈치 내측에서부터 거의 일직선의 형태로 진행하여 첫 번째 중족골두쪽으로 치우쳐 이동하기 때문으로 생각된다. 두 번째 중족골두의 전후방향 전단응력도 정상인에 비해 당뇨발 환자의 경우에 더 크게 나타났는데, 이는 환부의 위치에 의해 발뒤꿈치에 작용하는 압력이 작아지기 때문에 발뒤꿈치 대신 압력중심선의 이동경로에 위치한 두 번째 중족골두에 작용하는 압력이 증가하여 전단응력이 크게 발생한 것이다. 네 번째 중족골두의 전후방향 전단응력은 정상인에 비해 당뇨발 환자가 더 작게 나타남 것을 확인할 수 있었는데, 이는 발의 압력중심선의 변화되어 발의 외측에 작용하는 압력들이 첫 번째와 두 번째 중족골두에 대부분 작용하기 때문으로 생각된다.

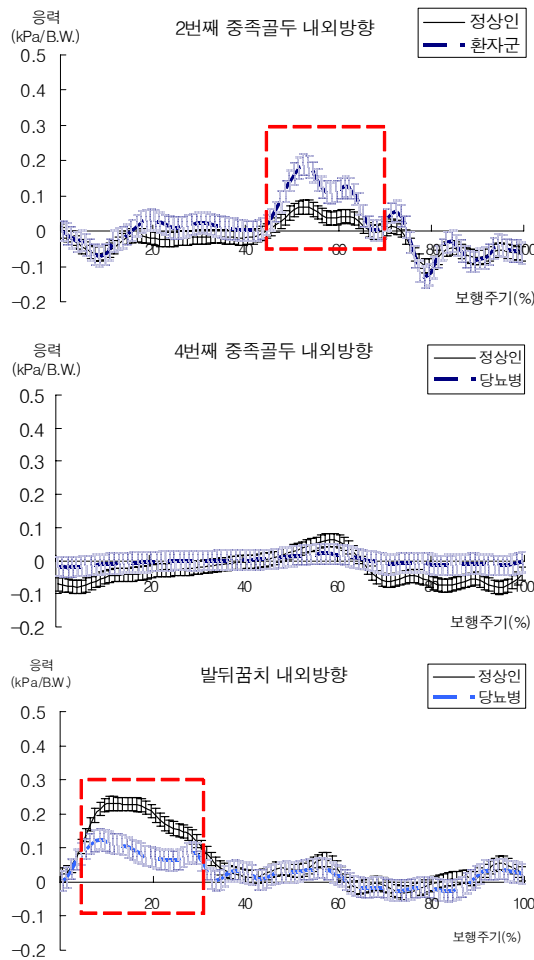


Fig. 6 Mediolateral shear stresses in the foot

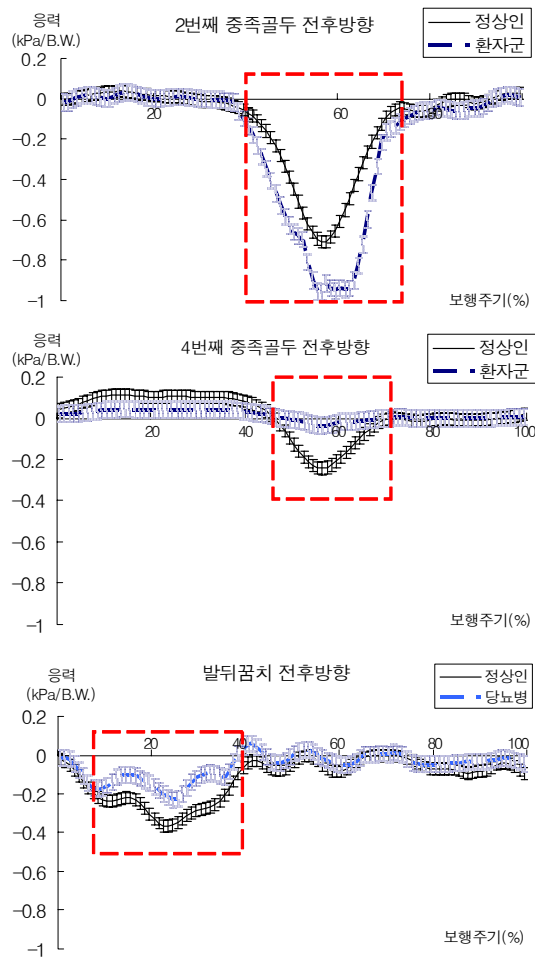


Fig. 7 Longitudinal shear stresses in the foot

Fig. 8은 정상인과 당뇨병 환자의 보행 시 압력중심(COP)의 궤적을 분석한 것이다. 정상인의 경우, 정상인의 경우, 압력중심 궤적은 발 뒤꿈치 부위에서 시작하여 발의 약간 외측 대각선쪽으로 진행하다가 입각기 말기에 급격히 내측으로 움직여서 엄지발가락 쪽으로 진행되었다. 이에 반해, 당뇨병 환자의 경우 당뇨병 환자의 경우는 뒤꿈치 내측에서 압력중심(COP) 궤적이 시작하여 거의 일직선으로 발의 내측으로 진행하다가 제1,2 중족골두와 엄지발가락부위로 진행을 끝냈다. 이는 당뇨병 환자의 환부가 발뒤꿈치 외측에 위치하고 있기 때문에 환자들은 상대적으로 발의 내측으로 보행을 하고 뒤꿈치 부위와 중족골 부위에는 거의 압력을 분포되지 않고 중족골두와 발가락부위에 많은 압력이 집중되는 특징을 보이는 것이다.

Fig. 9는 보행주기에 따른 당뇨병 환자와 정상인의 발바닥의 영역별 평균압력 차이를 나타낸 것이다. 당뇨병 환자의 경우 정상인에 비해 외측에 낮은 압력이 분포되고 내측에 높은 압력이 분포되었다. 또한 전유각기에 당뇨병 환자는 제2 중족골두와 엄지발가락 영역에 정상인에 비해 매우 낮은 압력이 분포되었는데, 이는 당뇨병 환자의 환부가 발뒤꿈치 외측에 있기 때문에 이를 피해서 보행을 하고 push-off를 거의 하지 않기 때문이다.

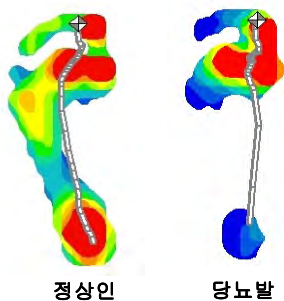


Fig. 8 Center of pressure trajectory



Fig. 9 Differences of plantar pressure between diabetic foot and normal

4. 결론

본 연구에서는 발바닥 국부 전단력 측정 시스템을 이용하여 정상인 및 당뇨병 환자의 보행 시 발바닥에 발생하는 전단력을 측정하고 발바닥 압력분포와의 상관관계를 분석하였다.

발뒤꿈치 외측에 환부가 있는 당뇨병 환자의 경우 보행 시 정상인에 비해 중족골두와 발가락 부위에 많은 압력을 집중시키면서 보행을 하여 압력중심 궤적이 제1,2 중족골두와 엄지발가락부위로 진행을 끝내는 특성을 보였다. 이로 인해 초기접지기와 하중수용기에 발뒤꿈치 전단응력이 정상인에 비해 작게 나타나고 각 중족골두의 전단응력의 크기가 변화하였다. 즉, 환부를 피해서 걸으려는 반사적인 행동에 의해 압력중심선의 형태가 변화되고, 그에 따라 발의 각 부위에 작용하는 전단응력의 크기도 변화되었다.

후기

본 연구는 한국산업기술재단 지원의 지역혁신인력양성사업에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Kim Y. G., "The diabetic foot lesions," Diabetologia, Vol. 19, No. 1, pp. 1-5, 1995.
2. Reichel S. M., "Shearing force as a factor in decubitus ulcers in paraplegics," Arch. Phys. Med. Rehab., Vol. 166, No. 3. pp. 762-763, 1958.
3. Dinsdale S. M., "Decubitus ulcers : role of pressure and friction in causation," Arch. Phys. Med. Rehab., Vol. 55, No. 4. pp. 147-152, 1974.
4. Tappin J. W., Pollard, J., and Beckett, E., "A method of measuring shearing forces on the sole of the foot," Clin. Phys. Physiol. Meas., Vol. 1, No. 1, pp. 80-85, 1980.
5. 정임숙, "인솔형 국부 전단력 측정시스템의 설계 및 평가[석사학위논문]," 연세대학교 대학원, 2004.
6. Kernozek. T. W., Lamott. E. E., "Comparisons of Plantar Pressures between the Elderly and Young Adults," Gait and Posture, Vol. 3, No. 3, pp. 143-148, 1995.
7. 권치호, 박시복, 김영호, "족부질환에 따른 동적 발바닥 압력분포 특성: 편평족과 요족," 대한의용생체공학회 춘계학술대회, 제18권, 제4호, pp. 439-446, 1997.