

유한요소법에 의한 구두 굽 높이가 발에 미치는 영향 평가 Evaluation of heel height's effect on foot using FEM

*박상백¹, 이해아¹, #채수원²

*S. B. Park¹, H. A. Lee¹, #S. W. Chae(swchae@korea.ac.kr)²

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과, ² 고려대학교 기계공학부

Key words : FEM, foot model, high heel

1. 서론

현대인의 건강에 대한 관심은 사람의 수명을 늘리는 것에서 더 나아가 인체를 건강하게 오래 유지함으로 삶의 질을 높이는 것으로 확장되고 있다. 인체의 여러 부위 중에도 특히 발은 일상생활에서 거의 항상 인체의 모든 하중을 지지하는 부위이며, 인대 과열이나 염좌 등 물리적 상해를 쉽게 입는 부위이다. 특히 다른 인체의 부위와는 달리 인체 외부 물체인 신발과 상호작용을 하는데 이는 발의 부상을 야기시키기도 하고 반대로 발을 보호하는 작용을 하기도 한다. 따라서 발의 부상을 방지하기 위한 목적으로 발과 신발의 상호작용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. [1]

발과 신발의 상호작용을 평가하는데 있어 발 내부의 응력과 변형율, 족궁의 변형등은 안락감 및 발의 부상을 평가하는 중요한 요소이다. 그러나 생체내에서 발 내부의 역학적 상태를 실험을 통하여 측정하는 것은 한계가 있다. 따라서 유한요소를 이용한 발 모델은 인체와 상호작용하는 다양한 제품들에 의한 인체 내부의 응력과 변형률에 대한 영향을 예측하는데 유용한 방법이다. 본 연구에서는 이런 생체역학적 지수들을 측정하기 위해 유한요소법을 이용한 발 모델을 사용하였다.

발과 상호작용하는 신발은 그 쓰임만큼이나 다양한 형상과 물성치를 갖고 있다. 본 연구에서는 Fig.1 과 같이 각기 다른 높이의 굽을 갖는 구두의 형상을 이용하여 유한요소 발 모델을 착화 시켜 하이힐의 굽 높이에 따른 발의 영향을 분석하였다. 또한 압력 패드를 이용하여 발바닥 면의 압력 분포 실험을 통하여 유한요소 해석 결과를 검증하였다.



Fig. 1 Shoes with 7cm heel height(left), 3cm heel height(right)

2. 착화 시뮬레이션

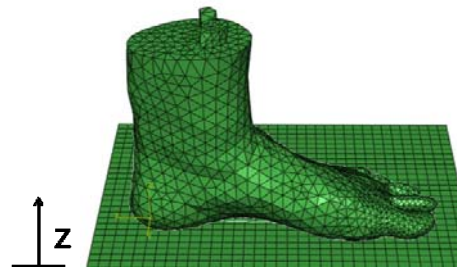
본 연구에서는 발과 신발의 상호작용 평가를 위하여 유한요소 발 모델을 자기공명영상(MRI)과 컴퓨터 단층촬영(CT)영상을 이용하여 구성하였다. 유한요소 발 모델은 20대 여성 평균 발 사이즈인 235mm 를 기준으로 모델링하였다. 인체의 발과 발목 부위의 뼈와 경골(tibia)와 비골(fibula)를 포함한 26 개의 뼈로 이루어진 골격구조와 이를 지지하는 100 여개의 인대를 포함하고 있으며 이들은 근육과 연조직을 포함하는 살(flesh)로 둘러 쌓여 있다. 인체 각 요소의 물성치는 기존 연구를 참고하여 table 1 과 같이 적용하였다.[2,3,4] 이 중 살(flesh)의 경우 table 2 와 같이 hyper-elastic 물성을 적용하였다.

Table 1 Material Properties and element

| Component | Element type | Young's modulus (MPa) | Poisson's ratio |
|-------------|--------------------|-----------------------|--|
| Bone | Tetrahedral 4-node | 7,300 | 0.3 |
| Soft tissue | Tetrahedral 4-node | Hyper-elastic | |
| Ligament | Truss 2-node | 260 (tension-only) | Cross-sectional area : 18.4mm ² |
| Fascia | Truss 2-node | 350 (tension-only) | Cross-sectional area : 58.6mm ² |

Table 2 The coefficients of the 2nd polynomial hyperelastic material for soft tissue

| C ₁₀ | C ₀₁ | C ₂₀ | C ₁₁ | C ₀₂ | D ₁ | D ₂ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 0.0856 | -0.0584 | 0.0390 | -0.0232 | 0.0085 | 3.6527 | 0.0000 |



(a) Flat surface



(b) 3cm heeled shoe



(c) 7cm heeled shoe

Fig. 2 Finite element foot model with shoes

유한요소를 이용한 해석은 7cm 굽의 하이힐과 3cm 굽의 낮은 굽 구두 그리고 평판의 3 가지 바닥 위에 인체가 서있을 때를 기준으로 진행되었다. fig.1의 구두를 3D 스캔하여 얻을 3 차원 데이터를 사용하여 유한요소 모델화하였으며 완성된 유한요소 발 모델과 frictionless contact 조건을 적용하여 해석하였다. 해석 조건은 경골과 비골의 절단면을 고정하였고 신발의 바닥면을 z 방향으로 변위를 주어 해석하였다. 또한 아킬레스건의 힘 작용은 표면 근전도(surface electromyograph, EMG) 실험을 통하여 예측하였으며 3 가지 경우의 해석에 각각 적용하였다.[5,6] 고정단의 반력이 인체모델의 무게가 될 때까지 해석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

유한요소 모델의 검증은 위하여 novel 사의 신발 압력패드를 사용하여 20 대 평균 체중 여성의 서있는 자세에서 신발면 위의 압력분포실험을 수행하였다. 실험은 시뮬레이션과 같이 7cm 굽 하이힐, 3cm 구두, 평면 3 가지 경우에 대하여 수행하고 결과를 fig. 3 과 같이 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

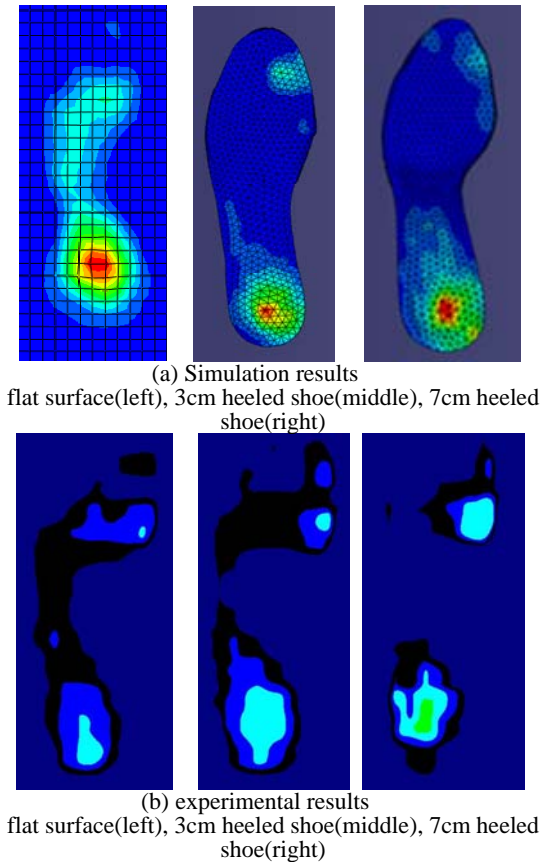


Fig. 3 Pressure distribution

유한요소를 이용한 시뮬레이션과 실험의 압력분포는 모두 발 허리부분에서 확인한 차이를 발견할 수 있다. 굽의 높이가 높을수록 발 허리부분에 압력이 적게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 또한 굽의 높이가 높을수록 발가락 쪽과 뒤꿈치 부분에 압력이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 신발의 굽이 높아질수록 압력분포가 고르지 못한 것은 인체 특정 부위에 응력이 집중되어 정상적인 인체 보다 변형이 일어날 수 있음을 의미한다.

유한요소 해석 결과에서 발 내부의 골격계는 3 가지 경우 모두 거골(talus)에 가장 큰 응력이 발생하였다. 거골에는 7cm 에서 11MPa, 3cm 에서 9.5MPa, 평면에서 7.5MPa의 응력이 발생하였으며, 종골(calcaneus)에는 각각 5MPa, 3.5MPa, 2.7MPa의 응력이 발생하여 굽 높이에 따른 경향성

을 확인할 수 있었다. 발 허리뼈들(metatarsal)에는 7cm 와 3cm 가 1~2.5MPa의 응력이 발생한 반면 평판의 경우 가장 큰 7MPa의 응력이 발생하였다. 이는 바닥면 압력분포 결과에서 평판에서 발 허리부분에 압력이 고르게 분포한 것과 같은 결과이다. 또한 발가락 뼈들의 경우에도 굽이 높은 신발을 신은 경우 응력이 높은 것을 확인할 수 있었다. 인체 내부에서 뼈에 발생한 응력은 굽이 높아질수록 발가락 부위와 발 뒤꿈치 부위의 뼈들에 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 세가지 굽 높이가 모두 족저근막(plantar fascia) 중 첫 번째 족저근막에 발생한 변형률이 가장졌으며 굽이 높을수록 변형률이 큰 것을 확인할 수 있었다.(fig. 4)

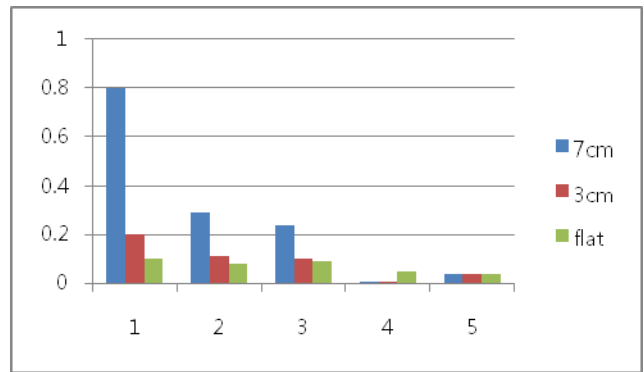


Fig. 4 Stain(%) of plantar fascia

4. 결론

유한요소를 이용한 인체 발 모델을 개발하여 실험적인 측정이 불가능한 인체 내부구조의 응력과 변형률을 예측하였다. 또한 서로 다른 굽 높이를 가지는 신발과의 상호작용을 분석함으로써 굽의 높이가 높아질수록 발가락 부위와 발 뒤꿈치 부위에 응력이 집중됨을 확인하였다. 또한 굽의 높이가 높은 신발일수록 족저근막의 변형에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0001648).

참고문헌

1. Jason Tak-Man Cheung, Ming Zhang, Kai-Nan An, Effect of achilled tendon Loading on plantar fascia tension in the standing foot, Clinical Biomechanics, 2006
2. S. Siegler, J. Block, C.D. Schneck, "Mechanical Characteristics of the Collateral Ligament of the Human Ankle Joint," Foot & Ankle, Vol.8, No.5, 234-242, 1988
3. S. Nakamura, R.D. Crownshield, R.R. Cooper, "An analysis of soft tissue loading in the foot-a preliminary report", Bulletin of Prosthetic Research, Vol.18, pp.27-34, 1981
4. G. Wright, D.C. Rennels, "A study of the elastic properties of plantar fascia," The Journal of bone and joint surgery, vol.46, pp.482-492, 1964
5. Simkin A., Structural analtsis of the Human Foot in standing posture, Thesis of PhD, Tel-Aviv Univ.
6. Bell D.G. The influence of air temperature on the EMG/force relationship of the quadriceps, Applied Physiology, 1993