외발착지 동작시 대퇴골 연골의 응력분포

Stress Concentration Patterns of Femoral Articular Cartilage during Single leg landing-A 3D finite element analysis

*이승훈 [1], #신충수 [1]

*S. H. Lee[1], #C. S. Shin(cshin@sogang.ac.kr)[1]

[1] 서강대학교 기계공학과

Key words : articular cartilage, osteoarthritis, finite element analysis, knee kinetics,

1. 서론

인체의 관절 중 가장 큰 가동관절인 슬관절의 부상은 빈번하게 일어나며 사회적, 경제적 손실을 초래한다. 그 중 대표적인 슬관절의 부상은 전방십자인대(ACL)의 파열이 있다. 이러한 전방십자인대 부상환자 대부분은 수년 사이에 관절염(osteoarthritis)을 동반한다고 알려져 있으며 관절염은 대부분 내측연골이 손상되는 경우가 많이 존재한다[1].

슬관절을 실제와 유사하게 모델링하여 유한요소해석(finite element analysis)을 통한 생체 내 뼈, 인대, 연골 등의 해부학적 거동, 응력(stress) 및 변형률(strain)의 분포를 예측하려는 많은 연구가 수행되었다. 하지만 대부분의 연구에서 매우 한정적인 하중 조건만을 고려하므로 실제 슬관절에 부상을 야기하는 경우와 상이한 결과를 도출할 수 있다. 실제 슬관절에 과도한 하중이 작용하는 경우에 대하여 응력과 변형률의 분포는 알려져 있지 않으며, 이러한 연구는 슬관절 부상의 예방 및 치료의 방법으로 사용될 수 있다.

따라서 이 연구의 목적은 외발착지 동작(single-leg-landing)시 슬관절에 최대힘과 모멘트가 작용하는 경우 내외측 대퇴골 연골의 응력과 변형률을 분포를 보이고 내측연골의 응력과 변형률에 남녀간 차이가 있음을 밝히는 것이다.

2. 재료 및 방법

근골격계 이상이 없는 건강한 남성(height: 1.74m, mass: 67kg)의 하지를 3 테슬라의 MRI(Siemens, Germany)를 사용하여 시상면의 MR 영상(T2-FSE, 512x512, slice thickness 1.5mm, FOV 16cm)을 얻었다. 모든 슬라이스의 점 데이터를 이용하여 세그멘테이션을 통해 슬관절 모델을 형성하였다.

형성된 슬관절 모델로 유한요소해석(Ansys workbench v13.0, USA)을 수행하였다(Fig. 1). 뼈의 물성은 등방성 탄성재료로 탄성계수 20GPa, 푸아송비 0.2, 밀도 1100kg/m^3 이다. 연골 또한 등방성 탄성재료로 탄성계수 15Mpa, 푸아송비 0.475, 밀도 1000kg/m^3 이다. 반월상 연골은 횡단면으로 등방성인 물질로 선형탄성 재료이다. 원주방향, 축방향, 반경방향으로 탄성계수(E_c: 150Mpa, E_a: 20Mpa, E_r: 20Mpa)와 푸아송비(ν_c: 0.2, ν_a: 0.3, ν_r: 0.2)를 지정해 주었다. 그리고 총 스프링 상수 2000N/mm 을 갖는 다수의 스프링을 이용하여 반월상 연골의 horn 과 경골에 부착되었다.

슬관절에 작용하는 힘과 모멘트를 측정하기 위하여 하지에 질병의 병력이 없는 건강한 대학생 16 명(male: 8, female: 8)의 피실험자(male: height 1.76±0.046m, weight 71.63±4.88kg, female: height 1.62±0.034m, weight 52.25±5.09kg)에 대하여 외발착지동작 실험을 수행하였다. 동작분석시스템과 지면반력기를 이용하여 운동학(400Hz)과 지면반력(1200Hz)을 측정하였으며 자체적으로 개발한 마커셋을 활용하였다. 측정된 데이터를 역동역학 (inverse dynamics)방법으로 슬관절의 운동역학(kinetics) 데이터를 얻었으며 결과는 몸무게와 키로 표준화(normalize) 하였다. 슬관절의 최대힘과 최대모멘트가 일어나는 순간을 유한요소해석의

경계조건으로 사용하여 해석을 수행하였다.

모든 통계적 비교(SPSS v18.0, USA)는 유의수준을 0.05 로 비교하였다.

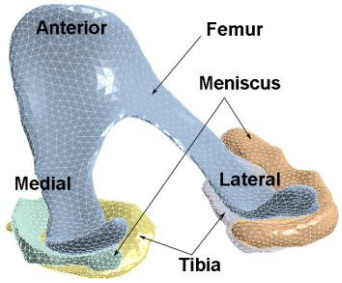


Fig. 1 Constructed tetrahedral finite element mesh of a knee joint.

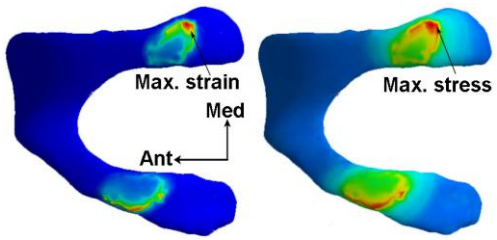
3. 결과

표준화된 운동역학 정보를 유한요소모델의 입력조건으로 사용하여 Von-Mises 조건에서 대퇴골 연골의 최대변형률과 최대응력을 구한 결과 대퇴골의 내측연골에서 최대변형률과 최대응력이 나타나는 것을 볼 수 있다(Fig. 2).

내측연골에서 최대 변형률에는 남녀간에 유의할 차이(p=0.02)가 있었으며 여성의 경우에서 50% 정도 크다. 최대 응력 또한 여성의 경우 남성보다 30% 큰 값을 가지며 유의할 차이가 존재하였다(p=0.03).

Table 1. Comparison of maximum strain and stress.

	male	female
Strain	0.76(0.49)	1.55(1.18)
Stress(Mpa)	9.53(4.11)	13.7(4.84)



(a) (b)

Fig. 2 (a) Von Mises strain and (b) stress of femoral cartilage with peak force and peak moment.

4. 결론

외발착지 동작 중 슬관절에 가장 큰 힘이 가해지는 경우 대퇴골 연골의 변형률과 응력의 분포는 외측부보다 내측부에서 하중을 더욱 많이 지지한다는 점을 보여준다. 이러한 하중분포의 차이는 내측 부 연골에 더욱 많은 손상을 일으킬 것으로 예상할 수 있으며 그 결과 관절염과 같은 질병을 유발할 수 있다.

슬관절의 정상적인 회전 및 변위의 특성이 변화하면 내측부 연골에 관절염을 일으킬 수 있다. 특히 전방십자인대 재건술을 받은 환자에게서 슬관절의 운동학적 특성의 변화로 대퇴골에 대한 경골의 전방변위, 내회전 그리고 외전각의 증가로 인한 관절염의 발병 가능성이 높아진다[1][2].

성별의 차이 또한 응력과 변형률의 차이를 유발할 수 있다. 여성의 경우 최대 변형율과 최대 응력이 남성에 비해 각각 2.05 배, 1.43 배 높게 나타났다. 이는 여성에게 관절염의 발생률이 높아질 수 있다는 점을 의미한다.

이 연구에서는 슬관절이 완전한 신전상태로 정렬한 경우에 대하여 해석을 수행하였으며 피실험자 개개인의 해부학적 특성정보를 고려하지 않은 제한점이 존재한다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 기초연구사업임 (No. 2010-005704).

참고문헌

1. Li RT., Lorenz S., Xu Y., Harner CD., Fu FH., and Irrgang JJ., “Predictors of radiographic knee osteoarthritis after anterior cruciate ligament reconstruction,” Am J Sports Med, **39**(12), 2595-2603, 2011.
2. Andriacchi TP., Briant PL., Bevill SL., and Koo S., "Rotational changes at the knee after ACL injury cause cartilage thinning," Clin Orthop Relat Res, 39-44, 2006.