

# 후방십자인대 재건술의 후방 안정성 평가

\*김소연<sup>1</sup>, 김재열<sup>1</sup>, 이병학<sup>1</sup>, 이경원<sup>2</sup>, 김윤혁<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 경희대학교 테크노공학대학  
<sup>2</sup> 민족사관고등학교

## Evaluation of Posterior Stability of Posterior Cruciate Ligament Reconstruction

\*S. Y. Kim<sup>1</sup>, J. Y. Kim<sup>1</sup>, B. H. Lee<sup>1</sup>, K. W. Lee<sup>2</sup>, Y. H. Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Adv. Tech., Kyung Hee Univ., <sup>2</sup> Korean Minjok Leadership Academy

Key words : Posterior cruciate ligament, PCL reconstruction, PCL augmentation, Posterior stability, Finite element analysis

### 1. 서론

최근까지 인대손상 중 후방십자인대 손상은 별로 중요하지 않은 것처럼 인식되어 왔는데, 이러한 이유는 특히 후방십자인대 손상을 받은 환자에서 장기간 임상추적을 실시한 연구나 혹은 이 인대의 정확한 해부와 이에 따른 생체역학적 기능에 대하여 많이 알려져 있지 않았기 때문이다.

Shearn 등의 후방십자인대에 대한 유한요소해석 연구에서는 정상 후방십자인대, 후방십자인대 제거, 단일 고리 후방십자인대 재건술(Single-Bundle Reconstructon), 이중 고리 후방십자인대 재건술(Double-Bundle Reconstruction)을 시행한 모델을 개발하고, 0~90도까지 굽힘 상태에서 접촉압력을 비교하였다.<sup>1</sup> Kim 등은 후방십자인대 재건술 시 경골 터널의 방향에 따른 von-mises 응력과 전단 응력 등을 비교하여, 최저의 경골 터널 방향을 결정하였다.<sup>2</sup> 최근 Yoon 등은 동중 아킬레스건을 이용한 후방십자인대의 이중 고리 확대술(Double-Bundle Augmentation)에 대하여 발표하였는데, 후방십자인대의 이중 고리 확대술은 수술과정은 까다롭지만 수술 후 이식건이 파열되었을 때에도 이중 고리 재건술에 비하여 후방 안정성을 확보할 수 있다고 한다.<sup>3</sup> 하지만 아직까지 이중 고리 확대술과 이중 고리 재건술을 의학적, 생체역학적으로 비교, 평가할 수 있는 자료가 부족하다.

본 연구에서는 후방십자인대 재건술의 생체역학적 분석을 위하여, 정상적인 후방십자인대를 가진 슬관절 모델을 개발하였다. 개발한 정상 슬관절 모델에 대하여 전후방 전위 검사를 통하여 모델의 타당성을 검증하였다. 또한 후방십자인대 단독 손상을 입은 모델과 아킬레스건을 이용한 후방십자인대의 단일 고리 재건술, 이중 고리 재건술, 이중 고리 확대술이 시행된 모델들을 개발하여 재건술이 시행된 모델들의 후방 안정성을 평가하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2. 1. 유한요소 모델링

##### 1) 슬관절 경조직의 유한요소 해석 모델 개발

26세 남성의 정상 슬관절을 컴퓨터 단층촬영(Computed Tomography)한 후 FEMAP<sup>®</sup>(Electronic Data System Corp., USA, version 8.20)을 이용하여 유한요소 해석을 위한 대퇴골, 경골, 슬개골 모델을 개발하였다. 비골은 경골과 같이 거동한다는 가정에 의하여 해석에서 제외되었다. 각각의 모델은 피질골(cortical bone)과 해면골(cancellous bone), 골수강(canal)으로 구분하여 개발하였다. 각각의 요소는 서로 다른 물성치를 가지도록 모델링되었다. 본 연구에서는 뼈의 변형을 고려하지 않기 때문에, 대퇴골과 경골은 강체로 가정하였다.

##### 2) 슬관절 연조직의 유한 요소 해석 모델 개발

슬관절의 연조직은 연골(cartilage), 반월판(meniscus), 섬유질(collagen fibres), 인대(ligament)들로 되어있다. 대퇴골과 경골, 슬개골의 골단부 표면에서 연골의 형상을 따른 후 연골의 두께만 큰 부분별로 오프셋을 한 후 두 표면을 연결하여 연골 제작하였다.<sup>4</sup> 그리고 연골과 접촉부분을 고려하여 반월판을 만드는데 반월판을 감싸는 섬유질(collagen fibres)은 물성치가 다른 두 개로 이루어졌다. 슬관절의 주요 인대는 ACL, PCL, MCL, LCL의 4개 인대와 슬개건으로 이루어져있는데, 과거 문헌을 참고하여 비선형 스프링 요소로 모델링하였다.<sup>1</sup>

#### 2. 2. 정상모델 검증

본 연구에서 개발된 대퇴골-경골 모델을 완전 신전 상태로 놓고, 슬관절의 중앙에서 전·후방으로 0N~100N의 힘으로 밀어 후방 전위량을 살펴보았다.

#### 2. 3. 하중 및 구속 조건

임상에서 사용하는 KT-2000 슬관절계를 이용한 후방 안정성 평가 방법에 의하여, 슬관절을 70° 굽힌 상태에서, 하중 조건은 슬관절 중심에 89N의 하중이 작용한다고 가정하였다.<sup>3</sup> 또한 후방 안정성 평가 방법대로 시뮬레이션하기 위하여 대퇴골의 6자유도 모두를 구속시켰으며, 경골은 Flexion-Extension을 고정하였다.<sup>1</sup>

#### 2. 4. 재건술 모델링

유한요소 해석은 상용 소프트웨어인 ABAQUS/Standard 6.3 software (Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc, Pawtucket, Rhode Island, USA)를 사용하였다. 본 연구에서는 확립된 정상 모델을 변형하여 Intact, Deficit, One-Bundle Reconstruction, Double-Bundle Reconstruction, Double-Bundle Augmentation 등 5개의 모델을 만들었다. 이식건은 직경 6mm의 동중 아킬레스건을 사용하였다.<sup>2</sup>

a) Intact : 정상 슬관절 모델

b) Deficit : PCL 손상을 입은 모델로, 정상 슬관절 모델에서 PCL을 제거

c) One-Bundle Reconstruction : PCL 단일 고리 재건술

d) Double-Bundle Reconstruction : PCL 이중 고리 재건술

e) Double-Bundle Augmentation : PCL 이중 고리 확대술

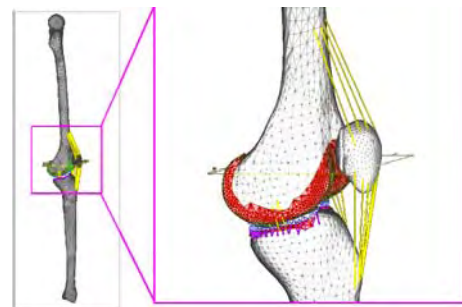


Fig. 1 Three-dimensional finite element model of lower extremity with ligaments, meniscus, and cartilage

### 3. 결과

#### 3. 1. 정상모델 검증

본 연구에서는 개발한 모델의 타당성 검증을 위하여 대퇴골-경골 모델을 완전 신전 상태로 놓고 슬관절의 중앙에서 전방 -100N~100N의 힘을 가하여 해석한 결과를 기존 해석 연구결과, 실험 연구결과와 비교하였다. 100N일 때 전방 전위 값은 2.89mm로 Li 등의 해석 및 실험 결과 2.55mm, 2.43mm와 비슷하였다. -100N의 힘을 주었을 때, 즉 후방으로 100N의 힘을 주었을 때 후방 전위 값은 -4.10mm로 해석 및 실험 결과 -4.86mm, -5.28mm와 125 비슷하였으며, 정상인의 범위 안에 들었다.

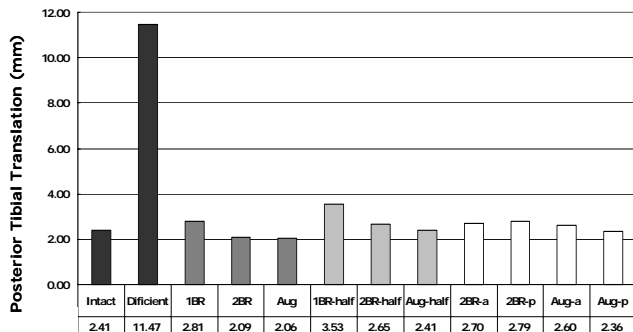
3. 2. 후방전위 검사

1) 경골 후방 전위량(Posterior tibial translation)

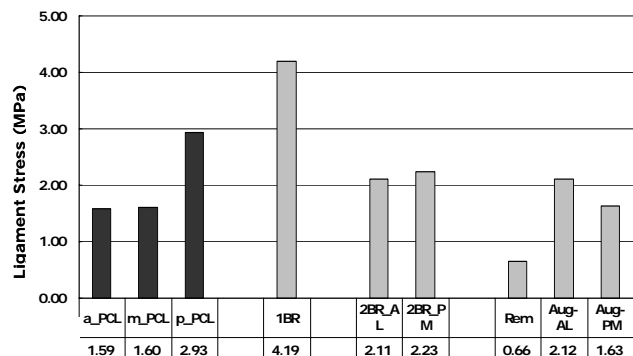
Fig. 2(a)는 65° 굽힘 상태에서 슬관절 중심에 89N의 힘을 가하였을 때, 경골의 후방 전위량을 나타낸다. 후방십자인대가 정상적인 상태(Intact)에서 후방 전위량은 2.41mm였으며, 후방십자인대가 손상을 입은 경우, 즉 수술 전 모델의 후방 전위량은 11.47mm였다. 단일 고리 재건술을 시술한 모델의 후방 전위량은 2.81mm로 정상모델에 비하여 67%의 후방 안정성을 확보하였으며, 이중 고리 재건술을 시술한 모델의 후방 전위량은 2.09mm로 정상모델에 비하여 113%의 후방 안정성을 확보하였다. 마지막으로 후방십자인대의 이중 고리 확대술을 시술한 모델은 2.06mm로 정상모델에 비하여 115%의 후방 안정성을 확보하였다. 이식건이 50%의 손상을 입은 경우 단일 고리 재건술, 이중 고리 재건술의 후방 전위량은 각각 3.53mm, 2.65mm였으나, 이중 고리 확대술의 경우 2.41mm로 정상 상태와 같은 후방 전위량을 보였다.

2) 인대의 응력(Ligament Stress)

Fig. 2(b)는 65° 굽힘 상태에서 슬관절 중심에 89N의 힘을 가하였을 때, 후방십자인대와 이식건에 작용하는 응력을 표시하였다. 정상 상태에서 후방십자인대 세 개의 다발에 각각 1.59MPa, 1.60MPa, 2.93MPa의 하중이 작용했다. 단일 고리 재건술의 경우 이식건에 4.19MPa의 응력이 작용했으며, 이중 고리 재건술은 두 가닥의 이식건에 각각 2.11MPa, 2.23MPa의 응력이 작용했다. 이중 고리 확대술은 두 가닥의 이식건과 후방십자인대의 남은 가닥에 하중이 작용하기 때문에 이중 고리 재건술보다 적은 0.66MPa, 2.12MPa, 1.63MPa의 응력이 작용했다. 정상 상태에 추가되는 응력을 100%라 하였을 때, 단일 고리 재건술의 이식건에 걸리는 응력은 217%, 이중 고리 재건술의 이식건에 걸리는 응력은 115%, 이중 고리 확대술의 이식건에 걸리는 응력은 정상 PCL의 84%였다.



(a) Anterior-posterior tibial translation



(b) Ligament stress

Fig. 2 Comparison of (a) anterior-posterior tibial translation and (b) ligament stress in response to anterior-posterior tibial load

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 정상 슬관절 모델을 개발하여, 전후방으로 힘을 가하여 전후방 전위량과 인대의 응력 등으로 모델을 검증하였다. 개발된 모델은 후방십자인대를 제거한 모델과 동종 아킬레스건을 이용한 단일 고리 재건술, 이중 고리 재건술, 이중 고리 확대술을 시행한 모델로 수정하고, 후방전위 검사와 같은 상황을 재현하여 늘어난 인대의 길이, 인대의 응력을 비교하였다.

PCL 손상 모델이 가장 낮은 후방 안정성을 보였으며, 이중 고리 확대술이 가장 높은 후방 안정성을 보였다. 손상을 입은 후방십자인대 모델과 단일 고리 재건술을 시술한 모델은 정상 후방십자인대 모델보다 낮은 후방 안정성을 보이며, 이중 고리 재건술을 시술한 모델과 이중 고리 확대술을 시술한 모델은 정상 후방십자인대 모델보다 더 나은 후방 안정성을 확보할 수 있었다. 이중 고리 재건술과 확대술의 안정성은 2% 차이로 거의 같다고 볼 수 있다. 하지만 이식건이 손상을 입은 경우 이중 고리 확대술은 다른 모델에 비하여 안정성이 우수하였다. 또한 각 모델의 후방십자인대와 이식건에 작용하는 응력을 비교하였다. 후방십자인대와 이식건에 작용하는 응력은 단일 고리 재건술이 가장 크며, 이중 고리 확대술이 가장 작았다. 이중 고리 확대술의 경우 정상 모델보다 작은 응력이 부가되므로, 부가되는 응력만 비교한다면, 정상 모델보다 이식건이 손상을 입을 우려가 적다.

본 연구는 후방십자인대의 단독 손상만을 고려하였으나, 실제로 후방십자인대의 손상은 슬개골 파열, 전방십자인대 파열 등 다른 부위의 손상과 함께 발생하므로, 향후 다른 부위와 동반손상 되었을 때의 영향도 연구되어야 할 것이며, 아직까지 논란이 되고 있는 이식건의 종류, 부착 위치, 두께 등에 따른 연구도 수행되어야 할 것이다.

후기

이 연구는 한국과학기술정보연구원(KISTI)과 가톨릭응용해부연구소(CIAA)가 제공하는 디지털 코리안 인체 정보를 사용하였습니다.

참고문헌

1. Shearn, J. T., Grood, E. S., Noyes, F. R. and Levy, M. S., "Two-bundle posterior cruciate ligament reconstruction: how bundle tension depends on femoral placement", *Journal of Bone and Joint Surgery*, 86, 1262-1270, 2004.
2. Kim, S. J., Shin, J. W., Lee, C. H., Shin, H. J., Kim, S. H., Jeong, J. H. and Lee, J. W., "Biomechanical comparison of three different tibial tunnel directions in posterior cruciate ligament reconstruction", *Journal of Arthroscopic and Related Surgery*, 21, 286-293, 2005.
3. Yoon, K. H., Bae, D. K., Song, S. J. and Lim., C. T., "Arthroscopic double-bundle augmentation of posterior cruciate ligament using split achilles allograft", *Journal of Arthroscopic and Related Surgery*, 21, 1436-1442, 2005.
4. Li, G., Gil, J., Kanamori, A. and Woo, S. L. Y., "A validated three-dimensional computational model of a human knee joint", *Journal of Biomechanical Engineering*, 121, 657-662, 1999.