

인공슬관절 치환술에서 임플란트 경골 기저에 나타나는 회전오정렬의 생체역학적 영향

English Biomechanical Effect of Rotational Malalignment on tibia-base of Implant in Total Knee Replacement

*김상훈¹, #김윤혁(yoonhkim@khu.ac.kr)², 박원만¹, 이순걸¹

*S. H. Kim¹, Y. H. Kim², W. M. Park¹, S. G. Lee¹

¹ 경희대학교 테크노공학대학, ² 경희대학교 테크노공학대학, 산학협력기술연구원

Key words : Total knee replacement, Posterior stabilized, Implant, Rotational Malalignment, Finite element analysis

1. 서론

인공슬관절 치환술에서는 Standard type과 Posterior Stabilized type의 임플란트가 사용되고 있다. 최근에는 PCL의 대체로서 Cam-기둥(Post)의 역할, 다리가 심하게 휜 사람의 수술시 교정의 안정성, 지속적이고 높은 평균 운동범위, 상대적으로 낮은 마모율을 가진 Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)의 사용, 경골의 후방 아탈구 방지, 무릎 굽힘 시 대퇴골의 이탈을 자동적으로 막아줄 수 있도록 유도하는 롤백(Rollback) 효과 등의 장점을 지닌 PS type 임플란트를 사용하는 후방안정 슬관절 전치환술(PS-TKR)의 시술이 증가하고 있다. 그러나 임플란트의 오정렬 상태로 인하여 집중 응력이 발생하며 마모가 발생하고, 마모 상태에서 더 많은 응력이 걸리면 경골 기저(Tibia-Base)의 일부분이 떨어져 나와 파편이 생기며, 심한 경우 기둥이 떨어져 나오는 경우가 발생하는 문제점이 임상적으로 보고되었다. 이런 경우 임플란트의 기능이 상실되며 환자의 재수술이 긴급히 요구된다.^{1,2,3} 본 연구의 목적은 PS-TKR에서 임플란트의 경골 기저에 나타나는 회전오정렬의 생체역학적 영향을 수행하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 유한요소 모델 개발

본 연구의 슬관절은 175cm의 병변이 없는 26세 남성의 왼쪽 다리를 대상으로 하였으며, 1mm 간격으로 촬영된 대퇴골과 경골의 CT 이미지를 바탕으로 각각의 경계선을 추출하여 3D 그래픽 이미지를 만들었다. 제작된 그래픽 이미지는 RapidForm™(Inus Technology Inc., Korea)을 통해 활용 가능한 3D CAD 모델로 변환한 후, 유한요소해석용 전/후처리기인 FEMAP®(V8.2, EDS Corp., U.S.A.)을 이용하여 유한요소 해석 모델로 개발하였다.

대퇴골과 경골 모델은 CT 이미지 명암 차이로 나타난 윤곽선으로 피질골과 해면골로 나누어 개발하였고, 정확한 해석을 위해 피질골의 안쪽 면과 해면골의 바깥 면을 접합시키고 서로 다른 물성치를 적용하였다. 유한요소 해석용 슬관절 모델은 대퇴골 원위부로부터 전체의 1/3이 되는 부분과 경골의 근위부로부터 전체의 1/3이 되는 부분까지를 고려하였다.

본 연구에 사용된 임플란트의 기본 모델은 United Orthopedic Corporation의 모델이며 Tibial insert 부분에서 AP(Anterior-Posterior) 49.5mm, ML(Medial-Lateral) 72mm와 Femoral component 부분에서 AP 63mm, ML 72mm의 size를 가지고 있다.

경골(Tibia) 삽입부의 모델링을 위해서 3차원 CAD 프로그램인 Solidworks®를 이용하였고 경골과 대퇴골(Femur) 부분으로 나누어서 모델을 제작하였다. 여기서 제작한 모델을 FEMAP을 이용하여 유한요소 해석 모델로 제작하였으며 해석 시에는 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS®를 사용하였다. 경골의 삽입물은 선형 탄성 요소로 개발되었고 Femur component는 Co-Kr, Tibia-Base 부분은 UHMWPE, Tibia-Tray 부분은 Co-Cr-Mo 재질로 가정하였다.

슬관절에 임플란트를 삽입하기 위해 대퇴골 원위부의 내외측 돌기의 중심점을 연결한 중간점을 중립점으로 선정하였다. 중립축을 슬관절의 기계학적 축과 일치시키기 위해 임플란트를 시상 면에서 외반을 5° 만큼 회전시켰다.²⁴ 측면에서 임플란트는 중립

축에 수직인 후방각 0° 를 적용하였으며 대퇴골 원위부는 중립점에서 근위부 방향으로 9mm 제거한 후 대퇴골 삽입물 형상에 맞추었다. 경골 근위부는 중립점에서 원위부 방향으로 10mm 제거하였으며 경골 삽입물 형상에 맞추어 접합하여 고정시켰고, 탁반(Tray) 윗면은 UHMWPE과 완전히 접합되었다고 가정하였다. 대퇴골 삽입물과 대퇴골은 완전히 접합하여 고정시켰고 UHMWPE와는 접촉이 이루어지게 하였다. 본 연구의 모델에서는 PS-TKR 시술 방법에 따라 무릎 인대 중에서 MCL, LCL만을 고려하였다. 연골과半月판을 제외한 연조직은 비선형 스프링 요소로 모델링하였다.

2.2 유한요소해석

개발된 PS-TKR 모델에 축방향 3000N의 하중을 가하여 Liao 등의 연구와 비교하였다.⁵ Standard type으로 가정한 Liao 등의 연구 결과는 최대 접촉 압력 32.6MPa과 최대 von-Mises 응력 13.6MPa이었으며, 같은 조건에서 본 모델은 최대 접촉 압력 30.3MPa과 최대 von-Mises 응력 11.2MPa였다. PS-TKR 모델은 Liao의 연구 결과보다 평균 2.5MPa 작았는데, 이는 기둥에서 접촉이 일어나 접촉 압력이 분산되고 응력이 배분되었기 때문이다. 이러한 결과는 본 연구의 모델이 유한 요소 해석 실험에서 타당한 값을 제시할 수 있음을 뒷받침한다.

경골에 작용하는 하중조건은 정상(Neutral) 상태와 가장 비슷한 보행 주기(Gait cycle) 40% 지점에서 측정된 압축하중 2000N, 후방하중 25N, 내회전 토크 6.5Nm를 중립점에 작용시켰다. 근위부 대퇴골을 고정하였으며 경골의 굽힘과 긴장 상태에 대한 회전을 구속하였다. 이 하중에 대하여 정상인 경우와 3° 외회전 오정렬이 발생한 경우의 접촉 압력과 von-Mises응력을 평가하였다.

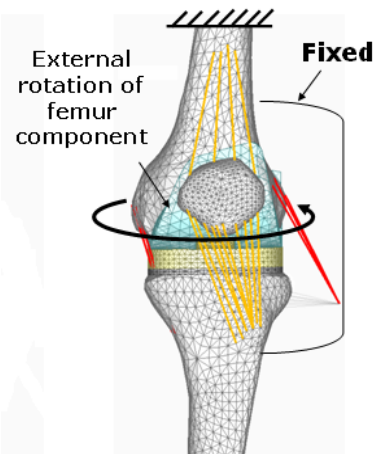
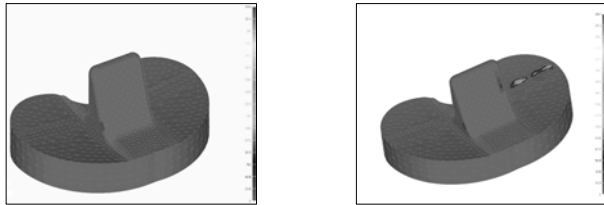


Fig. 1 Finite element model of knee of rotational malalignment case.

3. 결과

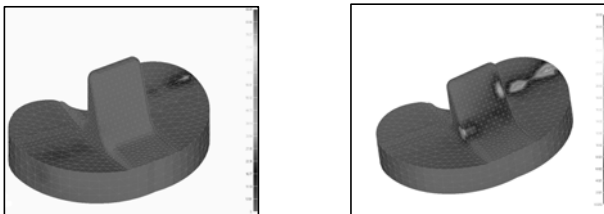
정상 상태와 오정렬 상태의 접촉압력 및 응력의 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 기둥(Post)과 UHMWPE의 접촉압력 및 응력 분포는 정상 상태일 때는 경골 기둥의 앞부분에 집중되어 나타났지만 회전오정렬일 때는 경골기둥의 앞부분과 경골 기저의 외측부분에 집중되어 나타났다.



Neutral

External rotation 3°

(a) Contact pressure



Neutral

External rotation 3°

(b) von-Mises stress

최대 접촉압력 및 응력의 크기는 경골기둥 앞부분에서 정상 상태는 71.5MPa, 18.3MPa, 3° 외회전 오정렬일 때는 91.7 MPa, 19.3MPa였으며, 3° 외회전오정렬 상태에서 경골 기저의 외측부분에서 나타나는 최대 접촉압력 및 응력의 크기는 268.7 MPa, 32 MPa이었다. 임플란트의 회전오정렬이 생김에 따라 최대 접촉압력은 모두 크기가 증가하였다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 PS-TKR에서 임플란트의 경골 기둥 앞부분에 접촉압력과 응력이 집중되고 회전오정렬일 경우 경골 기저 외측부분에 접촉압력과 응력이 집중되며, 회전오정렬이 생김에 따라 그 크기가 증가함을 정량적으로 분석하였다. 본 연구에 사용한 임플란트 모델은 경골의 기둥이 Femoral cam안으로 들어간 모델이다. UHMWPE로 이루어진 경골의 기둥은 Cam안으로 삽입됨으로써 무릎이 굽혀질 때 롤백 현상이 발생하여 후방십자 인대의 역할을 한다.³ 하지만 후방 전위가 일어날 때 제한이 있어 경골 기둥과 Cam 사이에서 과도한 접촉상태가 발생할 수 있으며 회전 오정렬이 생길 경우 경골 기둥이 Cam에 끼인 상태에서 토크와 유사한 힘을 받아 경골 기저에서도 과도한 접촉 상태가 발생할 수 있다. 이는 걸을 때나 서 있을 때 임플란트에서 균형을 맞추기 위한 작용이 일어나서 두 부분에 충돌이 생길 수 있음을 증명하는 사실이 된다.⁷ 이때 발생하는 문제는 Femoral cam이 무릎의 굽힘 시에 경골의 기둥을 들어 올리는 현상과 함께 기둥의 앞부분에 집중 하중이 걸려 피로를 일으키게 된다. 이로 인해 경골 기둥에 마모가 생기고 조각이 떨어져 나올 수 있으며 극단적인 경우에는 기둥의 분리와 경골 기저부분의 파단이 일어날 수 있다. 따라서 임플란트 회전오정렬은 경골 기둥 및 경골 기저의 파손 가능성 증가의 원인이 될 것이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2006-000-11209-0)와 BK사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Clarke, H. D., Math, K. R. and Schderi, G. R., "Polyethylene Post Failure in Posterior Stabilized Total Knee Arthroplasty", *Journal of Arthroplasty*, 19, 652-657, 2004.
2. Matsuda, S., Miura, H., Nagamine, R., Urabe, K., Harimaya, K., Matsunobu, T. and Iwamoto, Y., "Change in Knee Alignment after Total Knee Arthroplasty", *Journal of Arthroplasty*, 14, 566-570, 1999.
3. Chiu, Y.-S., Chen, W.-M., Huang, C.-K., Chiang, C.-C. and Chen, T.-H., "Fracture of the Polyethylene Tibial Post in a NexGen Posterior-Stabilized Knee Prosthesis", *Journal of Arthroplasty*, 19, 1045-1049, 2004.
4. Werner, F. W., Ayers, D. C., Maletsky, L.P., Rullkoetter, P. J., "The effect of valgus/varus alignment on load distribution in total knee replacements", *Journal of Biomechanics*, 38, 349-355, 2005.
5. Liao, J.-J., Cheng, C.-K., Huang, C.-H. and Lo, W.-H., "The effect of malalignment on stresses in polyethylene component of total knee prostheses - a finite element analysis", *Clinical Biomechanics* 17, 140-146, 2002.
6. Halloran, J. P., Petella, A. J. and Rullkotter, P.J., "Explicit finite element modeling of total knee replacement mechanics", *Journal of Biomechanics*, 38, 323-331, 2005.
7. Callaghan, J. J., O'Rourke, M. R., Goetz, D. D., Schmalzried, T. P., Campbell, P. A. and Johnston, R. C., "Tibial Post Impingement in Posterior - Stabilized Total Knee Arthroplasty", *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 404, 83-88, 2002.
8. Puloski, S. K. T., McCalden, R. W., MacDonald, S. J., Rorabeck, C. H. and Bourne, R. B., "Tibial Post Wear in Posterior Stabilized Total Knee Arthroplasty: An Unrecognized Source of Polyethylene Debris", *Journal of Bone Joint Surgery*, 83A, 390-397, 2001.