

인공무릎관절에 있어서 임플란트의 재료 및 고정방법에 따른 응력분석

조철형, 조용균, 최재봉, 최귀원
한국과학기술연구원 의과학연구소

Stress Analysis of Total Knee System Depending on Implant Materials and Fixation Methods

C.H. Cho, Y.K. Cho, J.B. Choi, K. Choi
Biomedical Research Center, Korea Institute of Science and Technology

Abstract

Three-dimensional finite element analyses were used to compare the stress distribution and the stability of the fixation among seven different tibial components and to investigate the effect due to implant materials in total knee arthroplasty.

The components included an intact tibia(Type I), Cemented Cobalt-Chromium tibial tray implanted with a PMMA cemented Co-Cr stem(Type II), Cemented Co-Cr tibial tray with a uncemented Co-Cr stem(Type III), Cemented Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) tibial tray with a cemented UHMWPE stem(Type IV), Cemented UHMWPE tray with a uncemented UHMWPE stem(Type V), Cemented Co-Cr tray without a stem(Type VI), and Cemented UHMWPE tray without a stem(Type VII).

Uncemented components were assumed to have complete bony ingrowth and a rigid state of fixation between component and bone. The interface between bone/cement/component of cemented components was also assumed to be fully bonded. Bi-condylar forces were applied.

The results indicated that Uncemented stem components provided lower bone stress shielding and stress concentration. The UHMWPE tray and stem component showed better agreement with the intact tibia than the Co-Cr Alloy tray and stem components. If the implant tray can be fixed firmly without a stem, Cemented PE tray without a stem(Type VII) may be recommended to give the best characteristics in the sense of stress distribution and stability.

Key words : Total Knee Arthroplasty(인공무릎관절 대체술), UHMWPE (초고분자량 폴리에틸렌), PMMA (Polymethylmethacrylate) Bone Cement, Finite Element Method(유한요소법)

서론

경골(Tibia)의 인공대체물 중 Stem은 Knee implant의 안정성에 있어서 중요하지만, 근위부경골(Proximal tibia)에 Stem을 Bone cement(PMMA)로 삽입하는 방식은 골재형성(Bone remodeling)에 역효과를 나타낼 수 있다고 보고되어 지고 있다

[1,2,3,4]. 이러한 뼈의 이상발달로 시술 후 몇 년이 지나면 인공대체물이 헐거워지는 해리(loosening) 현상이 생기게 되는데, 이는 임상적인 실패와 인공 무릎관절을 재시술하게되는 주된 요인으로 알려져 왔다. 이러한 해리현상은 주로 경골의 인공대체물에서 일어나는데[5] Trabecular bone과 Bone cement의 접촉면에서 주로 일어난다[6]. 따라서 인공무릎관절 설계시 주변의 골조직에 최적의 응력이 전달되게 하는 것이 중요하다. 이는 잘 알려져 있듯이 뼈에 작용하는 응력이 골 재형성(Bone remodeling)에 중요한 역할을 하기 때문이다. 뼈에 충분한 힘이 전달되지 않으면 용혈작용으로 뼈의 손실이 발생하며, 응력이 집중되면 뼈의 이상발달을 일으켜 뼈의 손실이 유발하게 된다.

최근에 인공무릎관절의 수명을 연장시키기 위한 많은 노력들이 이루어지고 있다. 시멘트 삽입기술의 발달 및 뼈가 직접 인공관절의 porous coated된 금속표면에 자라 들어가게 하는 방법(Bony ingrowth fixation)이 널리 이용되고 있다. 초기 안정성을 도모하기 위하여 Uncemented 관절에는 Screw나 핀 혹은 Tibial plateau의 뼈 접촉 표면을 달리하는 방법이 사용되고 있다.

인공무릎관절 설계시 또 다른 중요 요인은 Articular condyle로 쓰이는 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE)의 형상 및 두께 변화이다. 두께에 따른 마모의 영향은 아주 광범위하게 연구되고 있으며 현재 인공관절 연구분야의 최대 관심사로 부각되고 있다. 이는 고분자 재료의 마모로 인한 Wear particle이 체내에 축적되어 인공관절 주변의 조직이 괴사되어 실패의 원인으로 작용되기 때문이다. Bartel 등[7]의 연구에 따르면 UHMWPE층의 두께를 8-10mm로 주는 것이 적합하다고 보고된바 있다. 또한 현재 시술에서 이러한 모델이 사용되어지고 있다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 7가지 Implant 유형의 근위부 경골(Proximal tibia) 모델에 대한 골 내에서의 힘의 전달기전(Load transfer mechanism)과 골-stem 구조물의 접촉면에서의 응력과 미세운동(Micromotion)을 분석하여, 초기 인공무릎관절 대체술에서 시멘트 된 Stem과 시멘트 되지않은 Stem이 골에 미치는 영향과 이것이 시멘트된 경골 금속 Tray의 안정성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

재료 및 방법

1) 유한요소 모델링

경골(Tibia)의 영상자료는 전산화 단층촬영기(CT Scanner, GE 9800)를 이용하여 한국 정상인의 경골을 3mm 간격으로 단층촬영하여 영상을 얻었다. 이 영상을 Sun사의 Workstation에서 CT 영상처리 프로그램(Extract, Cornell)을 이용하여 경골의 각 단면에 대해 바깥 경계와 안쪽 경계의 백터화된 영상을 얻었다(Fig. 1). 이 영상자료를 이용하여 경골의 근위부(Proximal tibia)를 3차원으로 재구성하였고(Fig. 2), 이를 I-DEAS 와 Hypermesh 프로그램으로 전처리(Preprocessing)와 후처리(Post-processing)를 하였으며 MSC-NASTRAN 프로그램을 이용하여 Linear-static 분석을 하였다.

경골의 인공관절 모델링에는 I-DEAS 프로그램을 이용하여 일반적으로 널리 사용되는 Unicompartement형 Condylar와 35mm 테이퍼된 금속지지대(35mm tapered short stem)가 모델링(Fig. 3) 되었으며, 금속지지대 고정(Stem fixation) 방법에 따른 Cemented fixation과 Cementless fixation 방법의 경우를 실험하기 위하여 stem의 길표면에 1.5mm의 Bone cement 층을 모델링하였다(Fig. 4).

연골(Condyle)의 재료로 가장 널리 쓰이는 UHMWPE의 두께는 현재 시술에 사용되는 8mm [Bartel, 1986]로 하였고, 금속 Tray는 3mm의 두께로 모델링을 하였다.

유한요소 모델은 4840개의 절점과 23,467개의 사면체(Tetrahedron)요소가 사용되었고, 경골 근위부의 물성값은 Murase등[8, 9, 10, 11, 12]의 자료를 이용하여 23개의 다른 물성치를 주었으며(Fig. 5), 재료의 특성은 모두 등방성(Isotropic)이며 균질한(Homogeneous)것으로 가정하였다.

2) 하중 및 경계조건

경계조건은 하단부를 완전 고정시켰으며, 하중은 Harrington등[13]의 문헌을 참조하여 사람이 실제 한 발로 서 있을 때와 유사한 2,500N의 하중을 장골 원위부(Distal femur)의 연골(Condyle)과 접촉되는 경골 근위부(Proximal Tibia)의 Medial condyle 접촉면에 55%의 하중을, 그리고 Lateral condyle 접촉면에 45%의 생리학적 하중(Physiological loading)을 주었다. 시멘트형 Implant의 경우 implant와 뼈 그리고 bone cement는 완전히 집합(Fully bonded)된 것으로 가정하였으며, 무시멘트형 Implant의 경우도 Porous coated implant가 Bony ingrowth fixation에 의해 뼈와 Implant가 완전히 고정된 것으로 가정을 하였다.

3) 인공대체물 유형(Implant types)

본 연구에서는 7가지 종류의 모델이 구현되었다. 그 종류로는 Implant가 고정되지 않은 원래의 Intact 모델(Type I), 35mm의 금속(Co-Cr Alloy) Central stem이 시멘트된 Cemented metal stem & tray 모델(Type II), Stem이 시멘트되지 않고 Tray만 Cement된 Uncemented metal stem & cemented tray 모델(Type III), Metal 대신에 UHMWPE만으로 Stem과 Tray가 만들어져 시멘트된 Cemented PE stem & tray 모델(Type IV), Tray만 시멘트된 Uncemented PE stem & cemented PE

tray 모델(Type V), Stem없이 Metal tray만이 시멘트된 No stem(cemented metal tray) 모델(Type VI), Stem없이 PE tray만으로 시멘트된 No stem(uncemented PE stem) 모델(Type VII)이며, 각 모델에 대해 뼈와 Implant 사이 접촉면(Interface)과 치밀골(Cortical bone)에서의 응력분포에 대한 해석이 수행되었다.

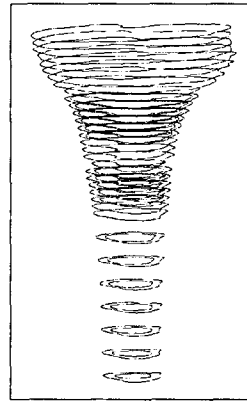


Fig. 1. Image from CT scan

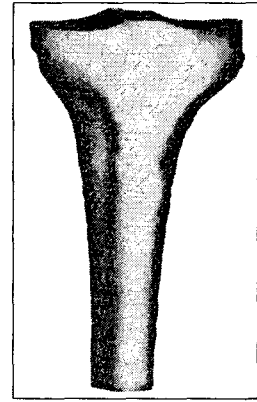


Fig. 3. Finite Element Model of the Proximal Tibia

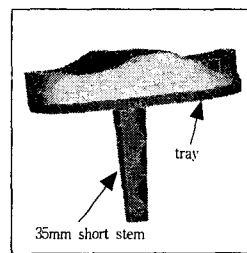


Fig. 3. FEM Model of UHMWPE Condylar & Co-Cr Alloy Stem

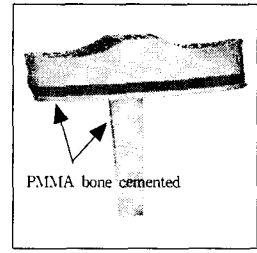


Fig. 4. FEM Model of UHMWPE Condylar & Co-Cr Alloy Stem (Cemented Tray & Stem : Type II)

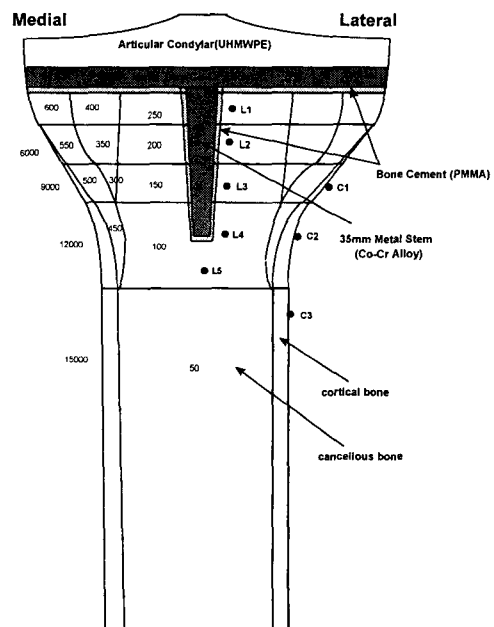


Fig. 5. Material Regions & Properties(MPa) and Data Analysis Locations(L1~L6, C1~C3) of the Proximal Tibia

결과 및 고찰

Fig. 6는 Bone과 Implant stem 사이 접촉면 (Interface)을 따라 근위부(Proximal)에서 원위부(Distal) 방향으로 Von Mises stress 분포를 보여 준다. Intact 모델(Type I)의 경우 처음에 망상골(Trabecular bone)으로 전달된 응력이 Distal 방향으로 갈수록 탄성계수가 높은 Cortical bone으로 힘이 전달되어 Cancellous bone안에서의 응력은 Distal 방향으로 갈수록 감소하는 경향을 보여준다. 이는 하중은 탄성계수가 높은 물질로 전달된다는 생역학적 사실로 설명된다.

Cemented metal stem의 경우(Type II) Metal implant tray의 높은 탄성계수로 인해 Tray 밑(L1)에서의 응력은 Stress shielding 효과로 낮은 응력을 보여주며 전달된 힘은 Stem을 따라 아래로 전달되어 Stem의 끝단(Tip)에서는 응력이 집중되는 현상 (Stress concentration)을 보여주었다. 이는 Intact tibia의 응력분포와 상반된 결과로 이러한 Stress shielding 효과와 Stress concentration은 위에서 언급했듯이 Bone에 이상발달을 일으켜 Knee implant의 수명을 단축시키는 결과를 초래하게 된다.

Uncemented metal stem의 경우(Type III)도 Cemented metal stem(Type II)의 경우와 유사한 응력분포를 보여주었으나 Fig. 6에서 볼수있듯이 Uncemented metal stem의 경우 Implant tray 밑에서의 응력이 Cemented metal stem 보다 상대적으로 높은 값을 보여주고 Stem tip에서의 응력집중 (Stress concentration)은 상대적으로 낮은 값을 보여주어 Intact tibia(Type I)의 응력분포에 조금 더 가까운 유형으로 나타났다. 따라서, Uncemented stem이 cemented stem 보다 생체역학적인 관점으로 볼때 더 적합하다고 볼 수 있다.

Fig. 7에서 Type IV는 Stem과 Tray가 UHMWPE으로만 만들어져 시멘트된 유형으로 이 모델의 경우 응력을 분석한 결과 Intact 모델의 응력분포와 거의 흡사한 분포를 보여주었다. 이는 UHMWPE의 탄성계수가 Trabecular bone의 물성치와 비슷하기 때문인 것으로 사료된다. 마찬가지로 UHMWPE으로만 만들어지고 stem이 시멘트되지 않은 유형(Type V)은 시멘트된 Type IV보다 더 나은 결과로 intact tibia의 응력분포에 가장 가까운 유형으로 나타났다.

반면, Fig. 8에서 볼수 있듯이 Stem이 없이 Metal tray만 시멘트된 모델(Type VI)의 경우는 Proximal interface에서는 Intact tibia의 응력분포보다 낮은 응력을 보였지만 Distal 방향으로 갈수록 거의 유사한 분포를 보였다. Implant tray가 PE으로만 된 모델(Type VII)은 Intact tibia의 응력 분포와 가장 흡사한 경향을 보여주었다. 따라서 Implant tray가 안정적으로 고정될 수 있다면, 즉 안정적으로 고정된다면 Stem이 없는 PE으로만 된 유형이 가장 적합한 모델이라 사료된다.

Cortical bone에서의 응력분포는 Fig.9, 10, 11, 12에서 볼 수 있듯이 Distal 방향으로 갈수록 응력이 증가함을 알 수 있다. 이는 위에서 언급했듯이 초기 하중이 Trabecular bone으로 전달되었다가 distal 방향으로 갈수록 탄성계수가 높은 Cortical bone으로 전달되기 때문이다. 전체적으로 응력분포를 볼 때, Medial 과 Lateral side에서의 응력분포는

서로 비슷한 경향을 보여주었고, Anterior side에서는 상대적으로 낮은 응력값을, Posterior side에서는 높은 응력값을 보여주었다. 이는 경골의 형태학적 특성에 기인한 것으로 사료된다. 그림에서의 결과처럼 시멘트되지 않은 Stem이 시멘트된 Stem보다 Stress shielding과 concentration을 줄일수 있는 유형으로 나타났다.

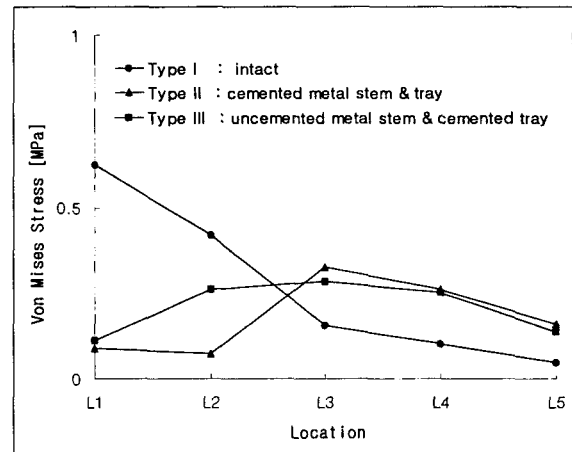


Fig. 6. Von Mises Stress at the bone/implant interface

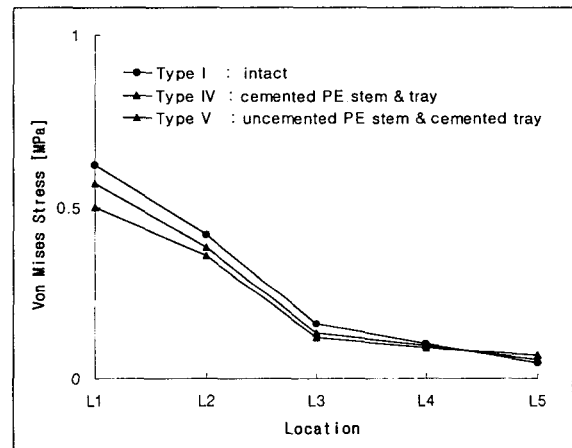


Fig. 7. Von Mises Stress at the bone/implant interface

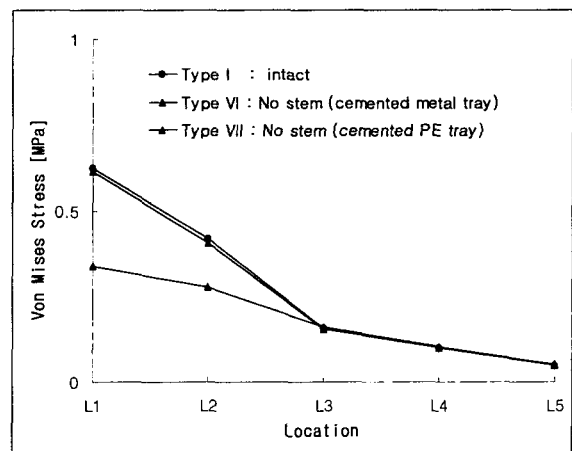


Fig. 8. Von Mises Stress at the bone/implant interface

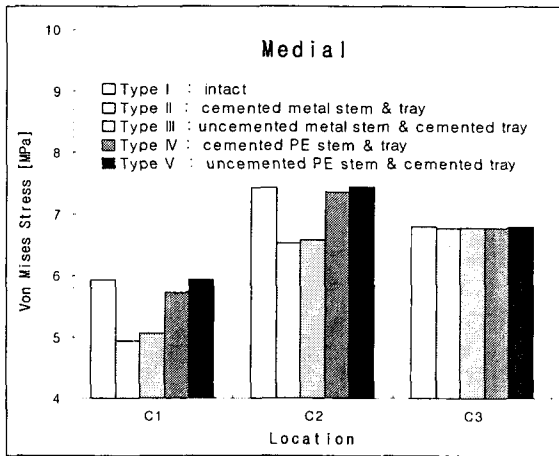


Fig. 9. Von Mises Stress on the cortical bone (medial side)

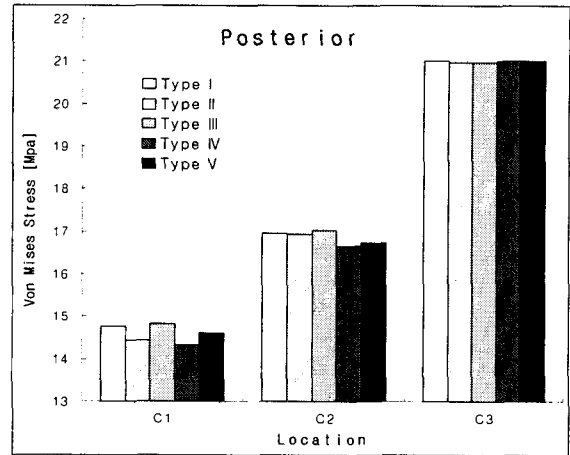


Fig. 12. Von Mises Stress on the cortical bone (posterior side)

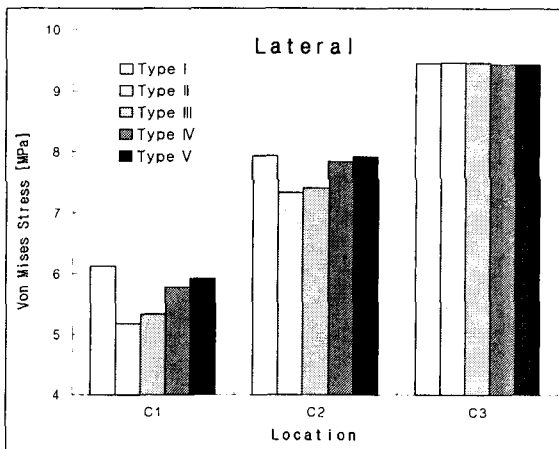


Fig. 10. Von Mises Stress on the cortical bone (lateral side)

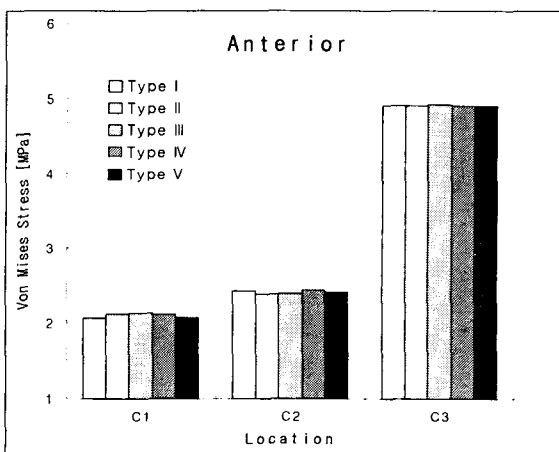


Fig. 11. Von Mises Stress on the cortical bone (anterior side)

결론

인공무릎관절 대치술에서 Implant stem의 응력 분포는 기존의 연구결과와 크게 차이가 없었다. 하지만 Uncemented stem type과 Cemented stem type의 3차원 응력해석 결과의 분포양상은 Uncemented stem type이 Cemented stem type 보다 Proximal 위치에서의 Stress-shielding과 Stem tip에서의 Stress concentration을 더 줄일 수 있는 type로 나타났다. 본 연구결과는 다른 연구팀의 In vitro 실험결과[4]와 유사한 결과를 얻었다.

따라서 Metal stem의 경우는 무시멘트형을 사용하여 최근 널리 이용되는 Porous coated된 Implant를 사용하여 뼈가 금속표면에 자라 들어가게 하여 조기에 견고한 고정을 유도하고, Metal tray의 경우는 Bone cement로 고정시키는 복합형(Hybrid type) 고정방법을 이용하면 좋으리라 사료된다.

또한 Stem없이 Implant tray가 안정적으로 고정될 수 있다면 Stem을 사용하지 않는 유형이 바람직하다고 생각하며, Stress shielding과 concentration을 줄이고 뼈에 최적의 응력이 전달될 수 있도록 하기 위해 기존의 상용 Stem 설계를 재고해 볼 필요가 있다.

완전히 UHMWPE으로만 만들어진 Implant의 경우 Stress shielding이 거의 없었으며, Intact tibia의 응력분포와 가장 유사한 분포를 보여주어 적합한 유형으로 판단된다. 하지만 의료용 접착제인 아크릴 시멘트(PMMA)와의 접착력이 없는 관계로 UHMWPE를 고정시키는데 어려움이 따른다. 현재 UHMWPE의 Bone cement 재료인 PMMA와의 접착력 향상과 마모특성을 향상시키기 위한 많은 노력들이 이루어지고 있으며 이러한 연구 노력은 인공관절의 수명 연장에 큰 기여를 할 수 있으리라 생각한다.

앞으로 동하중(Dynamic loading)을 받는 경골의 응력분포를 Static analysis와 비교, 분석할 예정이며, 시술후 발생하는 해리현상을 Gap 요소를 이용하여 모델을 구현한 뒤, 해리현상이 경골의 응력분포와 골에 미치는 영향을 분석할 예정이다.

참고문헌

1. Reilly et al., Clin. Orthop. 165: 273, 1982
2. Bourne et al., Clin. Orthop. 208: 95, 1986
3. Murase et al. J. of Biomechanics 16(1):13, 1983
4. Seki, T, Bourgeault C, et al., ORS, Feb., 1997
5. Insall, JN, Tria AJ, Scott WN, "The Total Condylar Knee Prosthesis", Clinical Orthopaedics, Vol 145, 1979
6. Hori RY, Lewis JL, Wixson RL, "An Analysis of 130 Removed Total Hips & Knees" Material & Biological Analysis, 1980
7. Bartel, DL, Bicknell, VL, Wright, TM, "The Effect of Conformity, Thickness, and Material on Stresses in Ultra-High Molecular Weight Components for Total Joint Replacement", Journal of Bone & Joint Surgery, Vol.68-A, 1986
8. Murase, K, Crowninshield, RD, Pedersen, DR, Chang, TS, "An Analysis of Tibial Component Design in Total Knee Arthroplasty", Journal of Biomechanics : Vol.16, 1982
9. Lewis, JL, Askew, MJ, Jaycox, DP, "A Comparative Evaluation of Tibial Component Designs of Total Knee Prostheses", Journal of Bone and Joint Surgery, Vol.64-A, 1982
10. Little, RB, Wevers, HW, Siu, D, Cooke, TDV, "A Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Upper Tibia", Journal of Biomechanical Eng., Vol.108, 1986
11. Vasu, R, Carter, DR, Schurman, DJ, Beaupre, GS, "Epiphyseal-Based Designs For Tibial Plateau Components", Journal of Biomechanics, Vol.19, 1986
12. Cheal, EJ, Hayes, WC, Lee, CH, Snyder, BD, Miller, J, "Stress Analysis of a Condylar Knee Tibial Component Influence of Metaphyseal Shell Properties and Cement Injection Depth", Journal of Orthopaedic Research, Vol3, 1985
13. Harrington, IJ, "A Bioengineering Analysis of Force Actions at the Knee in Normal and Pathological Gait", Journal of Biomedical Engineering, Vol.11, 1976