

인공 슬관절 전치환술 시뮬레이션을 위한 형상 모델링

서정우*(세종대학교 대학원 기계공학과), 전용태(세종대학교 기계공학과),
박세형(KIST CAD/CAM 연구센터), 최귀원(KIST 의과학 연구센터)

A Total Knee Arthroplasty Simulation Using 3D Medical Images.

Jeongwoo Seo*(Dept. of Mechanical Eng., Sejong Univ.), Yongtae Jun(Dept. of Mechanical Eng., Sejong Univ.),
Sehyung Park(CAD/CAM Research Center, KIST), Kuiwon Choi(Biomedical Research Center, KIST)

ABSTRACT

An orthopedic surgeon normally gets the operational parameters of total knee arthroplasty from medical images(CT, MRI). Anatomical axis, mechanical axis, the width and height of femur, or tibia are the most important parameters related with accomplishment of TKA. This paper presents a methodology of simulation that virtually operates TKA according to 2D medical images. Using this simulator, some important parameters for operation can be achieved before hand. The simulator provides the 3D computational model of a knee joint and then derives the proper size of implant corresponding to the joint. The whole process of TKA can be simulated such as clipping a knee joint, assembling the joint and its implants, visualizing all the operation steps, deriving some crucial parameters such as anatomical axis and cutting thickness, and predicting the result of TKA. Some examples are given and discussed to validate the methodology.

Key Words : Simulation(모의 수술), Total Knee Arthroplasty(인공슬관절 전치환술), Parameters(변수)

1. 서론

의학분야가 발달하면서 인공장기 대치술도 크게 발전하고 있다. 그 중 인공슬관절 전치환술(TKA: Total Knee Arthroplasty)은 많이 시술되고 있는 인공장기 대치술이다. 인공관절 전치환술이란, 관절염이나 특정 질환 또는 외상에 의해 더 이상 무릎 관절의 기능을 나타내지 못하는 경우, 파괴된 뼈의 일부분을 제거하고 그 부위에 특수합금과 고분자 재료로 만들어진 인공관절을 삽입하여 통증을 없애고 무릎관절의 기능을 복원시켜 주는 수술이다. 전치환술을 주로 하게 되는 원인은 나이가 들면서 퇴행성 관절염이나 류마치스성 관절염의 경우나 젊은 나이층에서는 무리한 운동을 통한 외상성 관절염의 경우가 많다.

Fig.1 은 대퇴골단과 경골단 사이에 삽입된 인공 슬관절을 보여준다.

현 인공슬관절 전치환술에서는 의사가 환자의 의

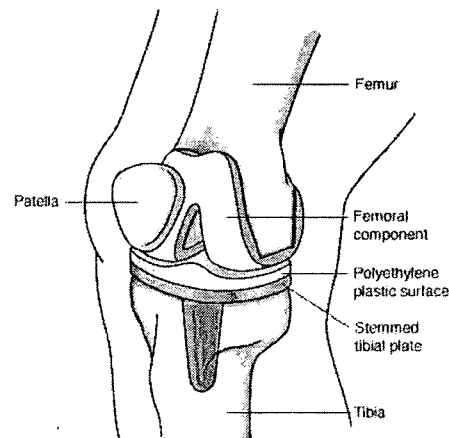


Fig. 1 Knee joint after total knee arthroplasty

료영상을 통하여 환자의 상태를 진단하고 진단 과정에 얻어진 정보를 통하여 수술계획을 수립한다. 수술계획 중에는 인공관절의 선택과 수술부위 설정 등을 한다. MRI 또는 X-ray 영상으로부터 얻은 뼈의 2 차원 절단면 영상을 통하여 인공관절을 선택하게 되는데 2 차원 영상만을 이용하여 정확히 절단될 면을 선정하기가 어렵기 때문에 보완책으로 보통 수술 전에 2-3 개 종류의 인공관절을 미리 준비한다. 또한 의료영상으로부터 인공관절과 뼈의 결합각을 찾아야 한다. 절단각은 보통 anatomical axis 를 찾아 이 각의 95-97 도 정도로 하는 것이 적당하다[3]. 이러한 특정한 각으로 절단시에는 슬관절의 내측과 외측에 고른 압력분포를 만들어 인공관절 수명과 환자의 회복에 좋은 결과를 얻을 수 있다. 얻어진 각을 통하여 수술계획이 이루어지지만 실제 수술에서는 가이드 수술 도구를 이용하여 골단에서부터 보정하면서 절단각을 찾아간다. 그렇기 때문에 골단의 절단 위치에 따라 인공관절의 크기가 달라질 수 있다. 결합각 역시 한번에 찾는 것이 아니라 수술 도구를 사용해 보정하는 것이기 때문에 의사들의 손기술이 중요한 수술 성공 요인 중 하나이다.

수술에 필요한 주요한 수술 변수를 3 차원 의료영상을 통해 정밀하게 계산하고 미리 가상 수술을 할 수 있는 시스템을 제안하여 수술의 정확성과 효율성을 높이고자 한다[1-2]. 본 시스템을 통하여 환자 개인의 특정 정보를 바탕으로 환자에 맞는 수술을 제공할 수 있게 될 것이다.

2. System Overview

2.1 인공슬관절 전치환술 과정

인공슬관절 전치환술 과정은 개략적으로 다음과 같다. 우선 환자를 통해 임상병리학적, 방사선학적, 생물학적 등의 진단을 하게 된다. 각종 검사를 토대로 의사의 전문적인 견해와 진단을 통해 수술계획을 수립한다. 수술계획이 끝난 후, 수술실로 이동하여 수술계획을 토대로 수술부위 절개를 하고 뼈를 절단하게 된다. 인공슬관절을 절단된 부위에 삽입하고 조직들간의 균형과 슬관절의 운동을 통한 결합 및 적합성을 판별하게 된다. 판별 후 적합할 경우에 인공슬관절을 골시멘트를 이용하여 접합하게 된다[3-4]. Simulation 에서는 위와 같은 모든 processing 과정이 제공되어야 한다[7].

2.2 System 구성

본 연구의 전체적인 흐름도는 fig. 2 와 같이 볼 수 있는데 인공슬관절의 파라미터를 정하고 가상 수술 및 조립까지에 이르는 큰 뼈대를 simulation 부분에서 차지하고 있다. Simulation 는 말 그대로 2.1 절에서 소개한 수술 과정이 완벽히 제공하여야 한다. Simulation system 역시 수술과정과 흐름도와 같은 총 순서를 따르게 된다.

Simulation 은 이전에 이루어진 수술로부터 나온 data base 와 현재 환자의 영상 정보로 바탕으로 구현된다. 환자의 뼈의 형상으로부터 인공관절 선택을 위해서 필요한 뼈의 형상 정보를 얻어야 한다. 뼈의 형상 정보를 통해서 뼈에 적합한 인공슬관절을 채택 또는 설계할 수 있다. 여기서는 뼈의 형상 정보와 인공슬관절의 형상정보 간의 관계가 필요하다. 또한 인공슬관절 선택을 위한 형상 정보 이외에 수술에 필요한 정보도 얻어야 한다. 수술에 필요한 정보는 anatomical axis 와 mechanical axis, 그리고 절단 두께와 위치 등이 있다. 위의 과정에서 얻어진 정보를 토대로 절단을 하고 인공슬관절을 조립한다. 수술이 끝난 후, 형상적인 결합조건을 판별하여 이상이 없으면 그를 바탕으로 각종 해석 프로그램을 이용하여 simulation 한 자료를 기계적 해석이나 동적 해석을 한다[5-6]. 이러한 해석은 인공슬관절 전치환술을 평가 및 인공슬관절을 분석 및 개발을 통해 data base 를 구성하게 된다.

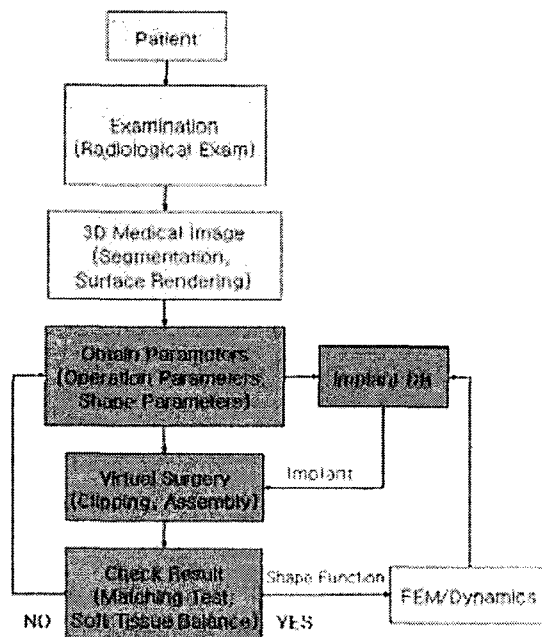


Fig. 2 System architecture of the proposed system.

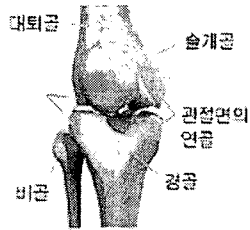


Fig. 3 The schematic diagram of knee joint

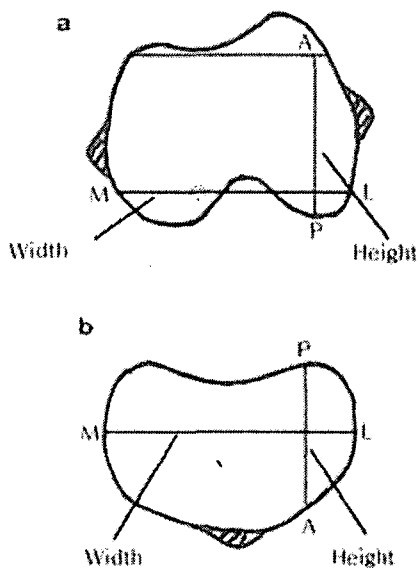


Fig. 4 Parameters of knee joint (a) femur and (b) tibia

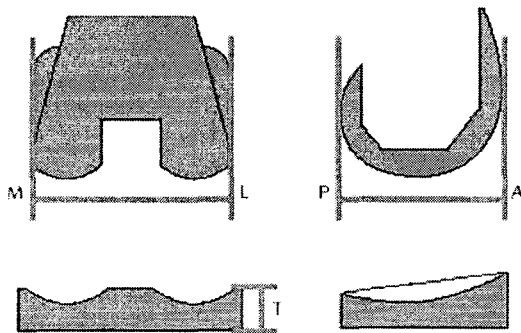


Fig. 5 Parameters of implant

3. 인공관절 설계 및 선택

3.1 인체 슬관절과 인공관절의 형상

3.1.1 슬관절 구조

슬관절은 fig. 3 과 같이 대퇴골, 경골, 슬개골의 세 부분으로 되어 있다. 대퇴골은 골반을 받쳐주고 있으며 대퇴골체로 이어져 골단에 이르러 경골부와 맞닿아 있다. 경골과 대퇴골이 맞닿는 부분에는 연골이 있어 두 뼈의 윤활작용을 하고 있다. 바로 이 연골이 손상될 경우에 전치환술을 시행하게 되는 것이다. 그리고 대퇴골과 경골 앞부분에는 슬개골이 위치하고 있으며 슬개골은 무릎관절을 보호하고 있으며 움직일 시에 지렛대 역할도 하고 있다.

3.1.2 슬관절의 주요 형상 정보

슬관절 주요 형상정보는 슬관절 구조와 같이 세 부분으로 나누어지게 된다. 우선 대퇴골부분에서는 대퇴골단의 부분을 누인 후 앞에서 봤을 때, 형상정보를 얻게 된다. Fig. 4 (a)에서 보는 것과 같이 대퇴골단의 평면도에서 절단면 중 가장 큰 폭을 너비로 잡게 된다. 위쪽 골짜기에서 양쪽 돌기를 이은 선을 3 도 외회전하여 절단하게 되는데 밑 쪽 끝단에서 이 절단면까지를 높이의 정보로 선택한다.

경골부분에서는 평면도 측에서 보면 fig. 4 (b)에서와 같다. 대퇴골부분에 비해 간단하고 대칭 모양인 것을 알 수가 있다. 여기서 가장 큰 폭을 너비로 정할 수 있고, 그 너비의 수직인 선 중에 가장 긴 축을 높이로 잡고 있는데 보통 가운데 축에서 살짝 벗어난 위치의 길이이다[4].

마지막 슬개골의 부분은 원 모양이기 때문에 지름의 크기를 형상 정보로 선택한다. 실제로 의사들이 인공슬관절을 선택하기 위한 뼈의 형상 파라미터로 측정하는 값들이다.

슬관절의 정보는 measurement tool 을 이용하여 측정할 수 있도록 제공한다. 이를 통하여 더욱 정량적인 파라미터 값을 제공할 것이다.

3.1.3 인공 슬관절 형상 파라미터

인공슬관절은 Femoral component, tibial component, PE insert, patella component 로 네 부분으로 구성된다. 모든 부분들이 아직 정해진 표준은 없으나 기본적으로 제조 회사에서 M-L(Medial-Lateral), A-P(Anterior-Posterior) 파라미터를 통한 6~7 개의 크기를 제공하고 있다. Femoral component, tibial component 는 보통 가로, 세로 길이가 정해진 타입으로 되어 있다. Table 1 과 Table 2 는 한 인공슬관절 제조 회사의 femoral component 와 tibial component 의 제품표다[4].

상용되는 제품을 따라서 인공슬관절에서는 fig. 5 에서와 같이 인공슬관절의 가로 폭(M-L)과 세로 높이(A-P), 그리고 두께를 인공관절 선택 파라미터로 정했다.

PE insert 부분은 femoral component 와 직접 맞닿는 부분이기 때문에 짝지어 나오는 경우가 대부분이다. 수술후 대퇴골과 경골부의 간격과 조직간의 soft tissue balance 를 검사해야 하기 때문에 보통 여러

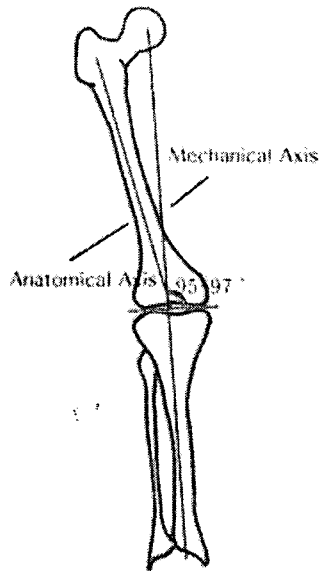


Fig 6. Anatomical axis and mechanical axis

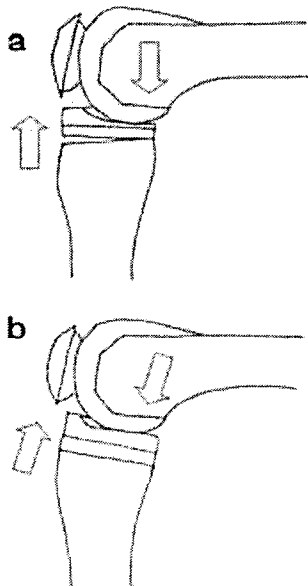


Fig. 7 Balancing the posterior cruciate ligament : a) cutting angle 0°, b) cutting angle 5°

가지 두께의 PE insert 를 제공하고 있다.

3.2 수술 파라미터

형상적인 정보중에는 수술을 하는데 도와주는 정보도 있다. 그것을 수술 파라미터로 정하였는데, 수술의 성과와 환자의 회복과 연관이 깊은 파라미터로는 anatomical axis 와 mechanical axis 가 있다. Simulation 의 마지막 부분인 적합성 관점에서 중요한 요인으로 미치는 cutting thickness 가 있다.

3.2.1 Anatomical axis

Anatomical axis 는 해부학적인 대퇴골의 중심축이다. Fig. 6 과 같이 대퇴골의 중심을 지나는 선이 anatomical axis 이며 대퇴골두와 대퇴골단의 골짜기를 연결한 선이 관절 운동과 연관이 있는 mechanical axis 이다. Anatomical axis 는 대퇴골체의 중심축이다. 이 축은 X-ray 영상을 통해서 대퇴골체의 중심을 그어서 찾거나 대퇴골단의 두 돌출부분을 이은 선에서 95~97 도 벗어난 선으로 정하기도 한다[3]. 인체해부학상 대퇴골의 중간 부분 절단면에는 내부에 원형 공간이 생긴다. 이 공간이 원통을 이루는 것을 확인할 수 있다. Simulation 에서는 중간부분의 몇 개의 절단면을 sampling 하여 원형보간 후 중심축을 찾는다. 이러한 anatomical axis 는 대퇴골의 중앙부분을 통하여 나온 정보이므로 전체적인 대퇴골을 보았을 때 수정되어야 할 가능성이 있으므로 의사들이 전문적인 견해를 통해 수정 가능하도록 되어야 한다.

3.2.2 Cutting thickness

절단 두께는 양쪽 다리의 균형과 soft tissue balance 를 체크하고 PE insert 를 정하는 파라미터 중에 하나이다. 정면에서 봤을 때는 골단의 골짜기 부분을 중심으로 offset ±2mm 정도를 주어 cutting block 을 고정 시킨 후, 가이드 라인에 맞추어 자른다. 절단 후, soft tissue balance 를 체크하여 한쪽으로 치우친 곳 없이 평행한 공간이 생기도록 더 자른다.

Table 1 Femoral implant specification

Size	M-L	A-P
1	60 mm	48 mm
2	65 mm	52 mm
3	67 mm	56 mm
4	69 mm	59 mm
5	73 mm	63 mm
6	78 mm	68 mm
7	83 mm	73 mm

Table 2 Tibial implant specification

Size	M-L	A-P
1	61 mm	42 mm
2	65 mm	45 mm
3	70 mm	48 mm
4	75 mm	51 mm
5	80 mm	55 mm
6	85 mm	58 mm
7	91 mm	61 mm

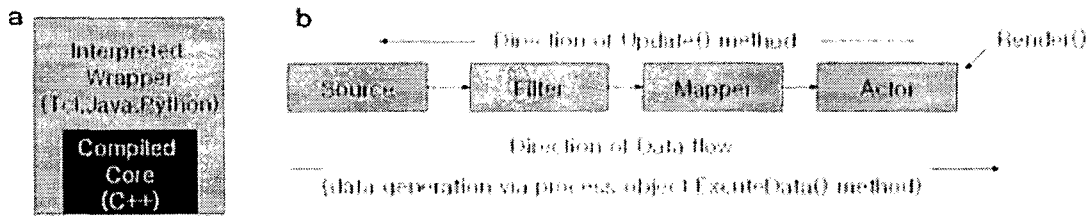


Fig. 8 a) Consist of a compiled core wrapped with various interpreted language, and b) Conceptual overview of pipeline execution

A/P cutting block 을 통해 앞뒤 부분을 자른다. A/P cutting block 을 대퇴골단의 장축에 맞추어 soft tissue balance 를 체크하여 block 이 안내해주는 라인을 따라 전후방을 절단하게 된다. 경골에서는 경골부의 mechanical axis 에 가이드 도구를 연결한 후에 tibial cutting block 을 연결하여 그 축에 수직이 되도록 자른다. Soft balance 와 연관하여 0~10mm 의 offset 을 제공하나 8~10mm 를 보통 권장하고 있다 [3].

3.2.3 인공슬관절의 적합성

인공관절을 삽입 후에 적합성을 판단해야 한다. 다리를 폈을 때 0 도에서 굽혔을 때 145 도 까지 되도록 수술이 되어야 한다. Fig. 7 (a)와 같이 측면에서 수직으로 자르게 되면 무릎을 90 도 굽혔을 때 전방의 tibial component 가 떠오르게 되거나 힘을 받게 된다. 또한 주위의 조직에 의해 조여지기 때문에 운동에 장애가 따르게 된다. 좀 더 유연성을 두기 위해선 3~5 도 후방으로 기울여 잘라주어야 한다. Fig. 7에서 보는 것과 같이 후방에서 만나는 점을 경계로 하여 운동에 대해 적합성을 판단해보아야 한다[4]. 또한 수술 전의 영상을 통해 다리 길이 변화와 대퇴골과 경골 사이의 공간을 미리 예측해보아 soft tissue balance 를 고려해야 한다. 절단 두께가 얇거나 인공슬관절의 두께가 두꺼운 경우처럼 다리 길이가 무리하게 길어지면 주위 조직이 팽팽해지므로 운동의 장애를 야기 시킨다. 정확한 적합성을 판단하기 위해선 주위의 조직의 material property 와 모델링이 필요하다. 실제로는 형상이 변하는 조직이라 정확한 구현이 어렵기 때문에 모든

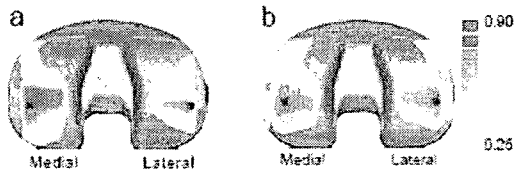


Fig. 9 a)insert damage predicted by computational modeling, and b)insert damage upon retrieval.

구현이 완벽하기 전에는 인공슬관절이 결합된 뼈의 길이로만 적합성을 판단한다.

3.2.4 정적/동적 해석 (FEM/Dynamics)

가상수술이 끝나고 나면 가상수술을 통해서 출력된 3 차원 의료영상정보를 export 시켜 정적/동적 해석(FEM/Dynamics)을 한다. 해석을 하기 위해선 인공관절 각 파트와 뼈에 각 material property 를 대입하고 각 결합부분에 경계조건을 주어 기계적 하중과 운동시의 반복하중 등을 고려하여 해석을 하게 된다. Fig. 6 과 같이 femoral component head 부분의 응력을 계산하고 그에 따른 PE insert 의 마모를 예상하는 것이다. 양쪽 응력이 고루 분포하지 않을 시에는 PE insert 의 한쪽 부분이 먼저 마모를 일으켜 균형이 파괴되면서 수명을 크게 단축시킨다[8-9]. 해석을 통하여 응력이 고르게 잘 분포되어 있는 지 확인을 통하여 성과 및 데이터를 얻을 수 있다. 이러한 해석은 인공관절의 수명과 설계를 판단할 수 있으며 다시 역으로 수술 파라미터와 수술과의 관계도 고려할 수 있다.

4. Implementation & Example

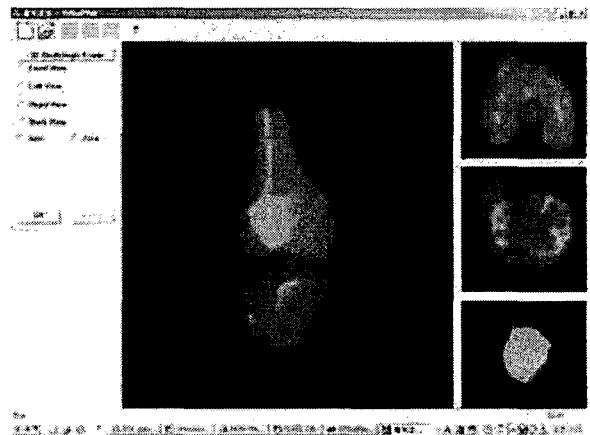


Fig. 10 Visualization of knee joint : femur, tibia, and patella

4.1 Implementation

본 가상 수술 simulation 은 윈도우 체제에서 구현되었다. 구현 언어로는 Visual C++ MFC 를 사용하였으며 VTK 를 이용하여 구현을 하였다.

VTK 는 3D visualization 를 위한 여러 가지 library 를 제공하고 있다. 기본적으로 C++을 이용하여 코딩된 프로그램이기 때문에 기본적인 GUI 를 제공하고 있다. 또한 OpenGL 을 바탕으로 만들어졌기 때문에 기존의 프로그램이나 응용분야에서 호환이 좋다. VTK 는 fig. 8 과 같은 구조와 데이터 처리 과정을 가지고 있다[10].

4.2 Example

기존의 의료영상처리 프로그램을 사용하여 segmentation 과 surface rendering 을 통하여 STL file format 데이터 추출한 다음, knee joint 를 3 차원 영상으로 구현하였다. Fig. 10 은 256 by 256, 18 slices 를 통하여 얻어진 자료이다. Fig. 10 과 같이 파라미터를 측정하기 편이한 평면 측에서 본 3 차원 영상을 보여준다. 평면측 영상에서 measurement tool 을 이용하여 각종 파라미터를 얻을 수 있고, 자동 또는 수동으로 anatomical axis 와 mechanical axis 등의 파라미터를 추출할 수 있다. Fig. 11 는 슬관절과 인공슬관절을 3 차원 형상화한 것이다. 시각화된 슬관절과 인공슬관절을 결합하여 수술의 상태를 확인할 수 있다.

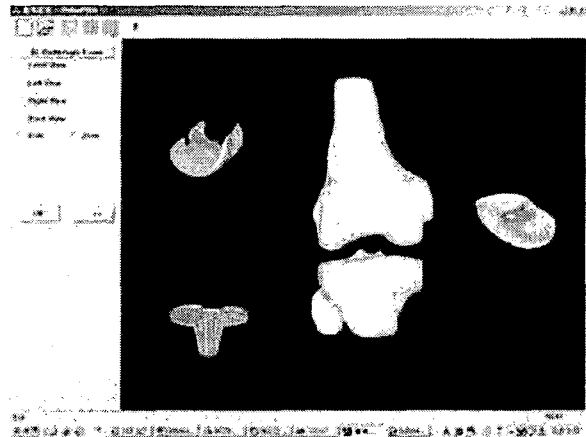


Fig. 11 Visualization of tibial Component, femoral component, PE insert

은, 가능하나 주위 조직 형상과의 조건은 구현하기 어렵다. 하지만 운동을 통한 적합성 관정을 위해서는 soft tissue 부분의 프로그램 구현 방안이 요구된다.

현재 프로그램은 더욱 좋은 interface 와 적합 및 교합에 대한 시험을 개발 중이며, 또한 더 많은 표본의 뼈에 따른 여러 종류 인공슬관절의 선택 사항과 선택에 연관된 파라미터에 대해 연구 개발을 계획하고 있다.

후기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 실버의료기기 핵심기술개발 사업 중 노인 관절기능 복원 기술개발' 과제의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Nofrini L., La Palombara F., Marcacci M., Martelli S., Iacono F., **Planning of Total Knee Arthroplasty: Analysis of the Critical Parameters Influencing the Implant?** Proc. Of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, WE-CXH-107, July 23-28, 2000 Chicago (USA).
2. H. Croitoru, M. Sc., R. E. Prihar, C. F. Small, **Digitally Assisted Distal Radius Osteotomy?** The Journal of Hand Surgery, Volume 28, Issue 6, Pages 951-958 G. Athwal.
3. Leo A. Whiteside, M.D., **Navigation : Total Knee System?** Smith & Nephew. Inc., 1998.
4. Chitranjan S. Ranawat, M.D., **Navigation Total Knee System? Cruciate Substituting Procedure,** Johnson &

5. 결론

본 연구를 통하여 인공슬관절 전치환술의 주요 과정을 구현하는 simulation 을 위한 framework 를 제안하였다.

Simulation 을 통하여 수술후의 3 차원 영상을 시각적으로 보여질 수 있다. 뿐만 아니라 프로그램으로 통해 구해진 파라미터를 변경해 보아 더 좋은 결과가 어떠한 것인지 미리 확인해 볼 수 있다. 변수에 따른 수술 결과를 통해 수술에 필요하고 가장 적절한 주요 파라미터를 획득하는데 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 한가지 예를 통해서 구현을 예시하였으나 여러 가지 경우의 수술데이터를 통하여 구현을 통하여 파라미터를 선정할 수 있는 지표도 마련할 수 있을 것이다. 그러기 위해서는 여러 가지의 미리 행해진 수술을 통하여 data base 가 구축되어 있어야 할 것이다.

Simulation 을 통해 전문의의 시각적인 판단도 중요하지만 적합성에 대해서는 좀더 수치적인 면이 필요하다. 단순한 형상적인 경계조건을 통한 구현

- Johnson Orthopedic, 1998.
5. 최귀원, 인공관절과 공학기술? Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 11, November 2000.
 6. 이문규, 김종민, 김동민, 최귀원, 햅imulator 를 이용한 인공무릎관절 접촉면의 압력분포 및 운동성 분석? J. Biomed. Eng. Res : Vol. 24, No. 4, 2003.
 7. S. Martelli, L. Nofrini, P. Vendruscolo, A. Visani, " Criteria of interface design and evaluation for computer assisted surgery systems", International Journal of Medical Informatics, Vol. 72, No 1-3, 35-45, December 2003.
 8. Benjamin J. Fregly 햅three Dimensional Compliant Contact Model for Dynamic Simulation of Total Knee Athroplastys? Depart of Aerospace, Mechanics, and Engineering Science University of Florida, 1999.
 9. Fregly, B J; Sawyer, W G; Banks, S A, 햅redicted Sensitivity of Knee Implant Wear to Insert Thickness and Body Mass? 50th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, Poster No. 1465, 2004.
 10. Lisa S. Avila, Sebastien Barre, Rusty Blue, Berk Geveci, Amy Henderson, William A. Hoffman, Brad King, C. Charles Law, Kenneth M. Martin, William J. Schroeder, 햅TK User 햅 Guide? Kitware, <http://www.kitware.com>, 2004.