J. Biomed. Eng. Res.
Vol. 25, No. 6, 455-464, 2004

컴퓨터 응용 인공고관절 모사 시술 방법 연구

김상후, 한승무

경희대학교 동서의학대학원 의료공학 전공
(2004년 2월 3일 접수, 2004년 12월 10일 채택)

A Study on Computer Aided Surgical Simulation Method for Total Hip Arthroplasty

Sang Hoo Kim, Seung Moo Han

Department of Medical Engineering, Graduate School of East-West Medical Science, Kyung Hee University
(Received February 3, 2004. Accepted December 10, 2004)

요 약 : 현재 인공고관절 전치환 수술 과정의 높은 난이도 때문에 숙련된 의사의 경험에 상당히 의존하고 있는 실정이다. 비구컵과 대퇴 임플란트의 위치 선정은 수술의 성공 여부와 밀접한 관계가 있지만 아직까지는 의사의 눈대중에 의해 이루어지는 경우가 많다. 이러한 이유로 인하여 인공삽입물(비구컵, 대퇴시스템) 삽입의 정확성이 낮아서 재치환술을 해야 하는 경우가 자주 발생한다. 본 연구에서는 환자 골반골(pelvis)과 대퇴골(femur)의 3차원적인 고유 기하학적 정보를 이용하는 모사 시술을 통하여 비구컵과 대퇴 임플란트의 정확한 위치를 선정하는 방법을 결정하였다. 이를 위하여 우선 비구컵의 위치 변화에 따른 대퇴 전염각 및 대퇴 경간각의 변화 양상을 살펴보았고 또한 대퇴 임플란트의 삽입 위치에 따른 대퇴스템 경부 길이 및 대퇴스템각의 변화 양상을 조사하였다. 본 연구에서 다양한 모사 시술을 통한 기하학적 정보의 분석 결과 비구컵과 대퇴 임플란트의 정확한 위치 선정이 가능함을 확인하였다. 본 연구의 모사 시술 방법을 이용하여 의사가 인공고관절 수술을 선행한다면 수술의 정확도와 숙련도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract : Total hip arthroplasty(THA) considerably depends on high-experienced doctors because of high difficulty of the operation. Selection of acetabular cup's and femoral implant's position is closely related with success or failure of THA. Nevertheless the selection has usually depended on doctor's eye measurement, which makes the position accuracy of artificial joint lower after THA, often resulting in revision of THA. The present study determined a method to select accurately the position of acetabular cup and femoral implant through surgical simulation with 3D characteristic geometrical information of patient's pelvis and femur. We examined the change of femoral anteversion angle and neck-shaft angle accompanied by the change of acetabular cup's position and the insertion position of femoral implant. As result of analyzing geometrical information through different surgical simulations, we found that it was possible to select the accurate position of acetabular cup and femoral implant. It is expected to help doctors get experienced in THA operation through repetitive surgical simulations using the method suggested in the study.
Key words : Total hip arthroplasty, Acetabular cup, Femoral implant, Surgical simulation

INTRODUCTION

현재 인공고관절 전치환술은 수술 과정의 높은 난이도 때문에 숙련된 의사의 경험에 상당히 의존하고 있는 실정이다. 비구컵과 대퇴 임플란트의 위치 선정은 수술의 성공 여부와 밀접한 관계가 있지만 아직까지는 의사의 눈대중에 의해 이루어지는 경우가 많다. 이러한 이유로 인하여 수술 후의 인공삽입물 삽입의 정확성이 낮아서 재치환술을 해야 하는 경우가 자주 발생한다[1]. 인공고관절 전치환술은 고정방법 에 있어서 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 대퇴골에 임플란트를 삽입시 골시멘트(bone cement)를 사용하는 방법(cement THA : 시멘트형 치환술)과 골시멘트를 사용하지 않는 방법(cementless THA : 무시멘트형 치환술)이 있다. 최근에는 골시멘트의 인체 부작용 문제가 대두되면서 골시멘트를 사용하지 않는 시술법이 널리 사용되고 있다[2]. 골시멘트를 사용하지 않고 시술하는 전치환술은 대퇴골(femur)과 골반골(pelvis)의 전처리 해부학적 위치와 인공삽입물 비구컵과 대퇴 임플란트(acetabular cup and femoral implant) 삽입 위치의 일치도가 30% 미만으로 낮아 수술 후 환자의 회복을 더디게 하고, 인공관절의 수명을 단축시켜 재수술을 받는 시기를 앞당기게 한다[3]. 따라서 인공고관절 전치환술시 골반골 부분에 삽입되는 비구컵의 크기 및 삽입 위치 선정이 매우 중요하며, 또한 대퇴골

통신저자 : 한승무, (449-701) 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1
경희대학교 동서의학대학원 의료공학 전공
Tel. 031-201-2171, Fax. 031-204-6117
E-mail. smhan@khu.ac.kr

부분에서는 삽입될 임플란트의 위치 선정, 임플란트를 삽입할 대퇴골수강 내의 대퇴 임플란트의 최적 선택이 수술 후 환자의 회복과 인공관절의 수명에 큰 영향을 미친다[4]. 이와 같이 비구컵과 대퇴 임플란트의 삽입위치 결정은 골시멘트를 사용하지 않고 시술하는 인공고관절 전치환술의 성공 여부를 결정하는 중요한 요소가 된다. 그러므로 환자 골반골과 대퇴골의 3차원적인 기하학적 정보를 제공하는 모사 시술을 이용하여 비구컵과 대퇴 임플란트의 정확한 삽입 위치를 선정하여야 한다.

이와 같이 인공고관절 전치환술시 환자의 대퇴골에 대한 고유한 기하학적 정보의 정확한 측정은 수술의 성공과 직결되는 요소이지만 아직까지는 2차원 CT 영상 분석을 통하여 그 측정이 이루어지고 있어서 정확한 기하학적 데이터를 획득하기가 어렵다. 환자 골반골과 대퇴골의 주요 기하학적 정보에는 골반골의 외측 경사각(pelvic lateral tilt angle), 대퇴 전염각(femoral anteversion angle)과 대퇴 경간각(femoral neck-shaft angle)이 있으며, 이는 2차원측정만으로는 그 결과의 신뢰성을 기대할 수 없다. 골반 골의 외측 경사각은 골반골의 비구면이 기울어진 정도를 말하며 일반적으로 관상면상에서 횡단면과 비구면이 이루는 각도를 말한다. 대퇴 전염각은 대퇴골의 뒤틀림 정도를 나타내며 주로 대퇴골의 길이 방향을 기준으로 대퇴골 양과축(femoral condylar axis)에 대한 대퇴경부의 기울어진 각도를 말한다[5]. 그리고 대퇴 경간각은 대퇴골의 상하 벌어진 정도를 나타내며 대퇴골의 장축 방향과 대퇴 경부축과의 기울어진 각도를 말한다[6].

기존의 대퇴 전염각과 대퇴 경간각 측정법은 X-ray/CT/MRI 등과 같은 2차원 단면 영상을 이용한 2차원 측정법과 최근에 부각되고 있는 연속으로 촬영해서 얻은 2차원 CT 영상을 이용한 3차원 측정법이 있다. 2차원 측정법은 대퇴골의 전체 길이 방향에 대한 고려를 할 수 없으므로, 환자의 자세 설정 및 정확한 기준 위치 설정이 가장 큰 문제점이 되고 있다. 이에 정확한 환자 골반골과 대퇴골의 3차원인 고유의 기하학적 정보를 얻기 위해서는 연속적으로 촬영해서 얻은 CT 영상을 이용한 3차원 대퇴골 모델의 형성시 각 slice의 윤곽 좌표와 고유점 및 기본축을 자동으로 지정함으로써, 수작업과 측정자의 주관에 따라 이루어지게 되는 기존 방법의 단점이 개선되어야 한다. 그러므로 실제 골반골 및 대퇴골을 컴퓨터상의 가상공간에 재구성하여 3차원적인 형상을 분석하고 빠른 시간내에 자동으로 환자 고유의 정확한 기하학적인 정보를 얻을 수 있어야 한다.

본 연구에서는 3차원 모델링을 통하여 얻어진 환자 고유의 기하학적 정보를 이용하여 우선 비구컵의 위치 변화에 따른 대퇴 전염각과 대퇴 경간각의 변화 양상을 살펴보고, 또한 대퇴 임플란트의 삽입 위치에 따른 대퇴스템 경부 길이(neck-stem length) 및 대퇴스템각(stem angle)의 변화 양상을 조사하였다. 이와 같이 다양한 기하학적 정보를 분석한 결과를 활용하여 인공고관절 전치환술시 비구컵과 대퇴 임플란트의 정확한 삽입 위치 선정이 가능한 최적의 모사 시술 방법을 제시하고자 한다.

METHODS

인공고관절 전치환술의 시뮬레이션(simulation : 모사)를 위해 먼저 환자의 2차원 영상을 얻어 3차원 모델링을 한다. 3차원 모델을 바탕으로 환자 고유의 기하학적 정보를 추출한 후 인공고관절 전치환술의 과정을 모사하였다. 모사과정에서 수술의 정확도와 인공관절의 위치 정밀도에 영향을 미치는 비구컵과 대퇴 임플란트의 삽입 위치의 변화를 살펴보았다. 비구컵의 삽입시에는 위치의 변화에 따른 환자 고유의 기하학적 정보 변화 양상을 분석하였고, 대퇴 임플란트의 삽입시에는 환자 고유의 기하학적 정보를 유지하기 위한 대퇴 임플란트 제원의 변화를 분석하였다.

1. 3차원 모델링 및 기하학적 정보 추출

인공고관절 전치환술을 위한 고관절의 3차원 영상화는 그림 1과 같이 이루어진다. 먼저 시술할 환자의 횡단면 2차원 CT 영상을 획득하여 전처리하고 관심영역(Region of Interest)을 추출(Segmentation)한다. 이렇게 추출된 윤곽선 데이터에서 3차원 좌표를 얻고 2차원 관심영역 영상에서 시상축(sagittal axis) 방향으로 적층하여 이를 3차원 Voxel reconstruction과 surface rendering을 통해 3차원적으로 재구성(3D Reconstruction)하여 뼈의 3차원 모델을 얻게 된다. 그리고 골반골과 대퇴골의 기하학적인 정보 추출을 위해 분할(segmentation)과정에서 윤곽선의 데이터를 획득(chain code 알고리즘 적용)해서 획득된 윤곽선 데이터를 연결하여 polygon으로 구성하고, 이를 이용하여 각 특이점(H, P, G, D, Lc, Mc 점)의 정의가 이루어진다. 각 단면의 polygon을 적층시켜서 정의된 각 고유점의 3차원 공간 좌표를 추출하여 고유점 O 를 정의하고 대퇴 전염각과 대퇴 경간각의 정의를 위한 기준 축(대퇴 장축: femoral shaft axis, 대퇴 경부축: femoral neck axis, 대퇴 양과축: condylar axis)의 정의가 이루어진다.

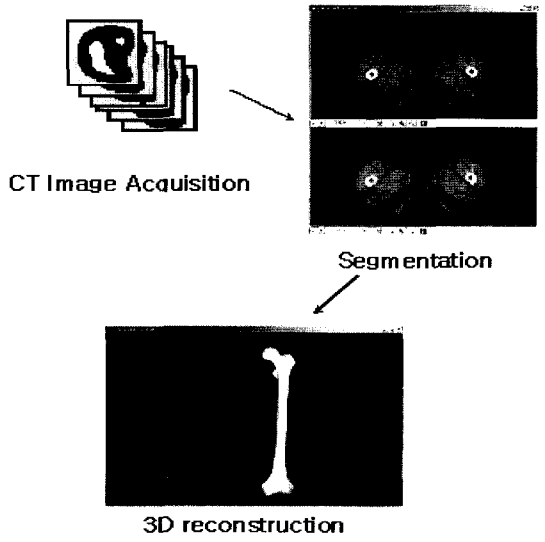

그림 1. 3차원 모델링 과정
Fig. 1. 3D modelling processes.

1) 고유점 및 기하학적 정보 추출 과정

그림 2는 2차원 CT 영상에서 대퇴골의 3차원적인 기하학적 정보를 얻기 위해 3차원으로 적층하기 위한 과정 중에 각 고유점을 정의하는 방법을 나타내고 이를 통해 대퇴 경간각을 추출하는 과정을 나타내고 있다. 각 고유점의 정의 방법은 윤곽선 데이터 전처리 과정을 통하여 2차원 CT 영상을 분석하여 이루어졌으며 그 방법은 아래와 같다.

① H 점 : 대퇴 골두 CT 영상에서 윤곽 데이터들이 이루는 폐곡선의 면적이 가장 큰 영상을 추출한다. 그리고 그 추출된 윤곽선의 데이터들와 가장 근접한 원으로 근사시킨 후 근사된 원의 중심점을 읽어 H 점으로 저장한다.
② P 점 : 대퇴 양과(femoral condylar) 부분의 CT 영상에서 윤곽 데이터들이 이루는 폐곡선의 면적이 가장 큰 영상을 추출한다. 윤곽선 데이터들에서 각 데이터들 중 서로 간의 거리가 가장 멀리 있는 좌표들을 읽어 그 두 점을 잇는다. 이은 선분의 크기의 중심이 되는 점을 읽어 P 점으로 저장한다.
③ G 점 : 시상면으로 대칭(이 선을 Y축이라 정의한다)되는 양쪽 대퇴골을 나누었을 때 데이터의 분포가 원의 형태와 비슷한 영상들 중에서 최초로 시상면 중심(X축)과의 거리가 가장 멀리 있는 점이 나타나기 시작하는 점을 G 점으로 저장한다.
④ D 점 : 골반골이 끝나는 CT 영상에서 대퇴골의 윤곽선 데이터들과 시상면 중심과의 거리가 가장 가까운 점을 D 점으로 저장한다.
⑤ Lc, Mc 점 : 대퇴 양과 부분의 CT 영상에서 윤곽선 데이터들이 이루는 폐곡선의 면적이 가장 큰 영상을 추출한다. 정의된 Y축과 수직인 X축 방향에서 최소가 되는 두 점을 Lc, Mc(Lat, Med condylar)으로 저장한다.
⑥ O 점 : 각 단면의 polygon을 적층하여 3차원 좌표에 의해 저장된 G 점와 D 점을 이은 선분에 수직한 평면을 만든다. 만들어진 평면과 대퇴 경부를 원통으로 근사시켜서 그 원통의 중심축과의 교점을 O 점으로 저장한다.
각 정의된 고유점 정보를 바탕으로 대퇴 경간각(femoral neck-shaft angle, β)은 $\overrightarrow{PO}$ 벡터(대퇴 장축)와 $\overrightarrow{OH}$ 벡터(대퇴 경부축)가 이루는 각도로 계산되었다.

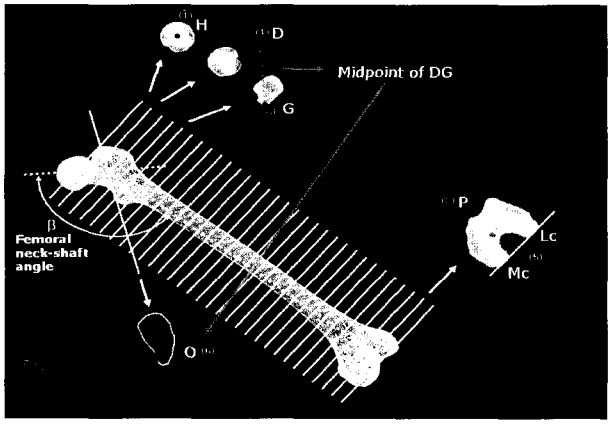

그림 2. 대퇴골의 고유점과 대퇴 경간각 추출
Fig. 2. Detection of femoral characteristic point and neck-shaft angle.

2) 기준축 및 기하학적 정보 추출 과정

그림 3은 대퇴골의 각 단면 polygon을 적층하여 3차원 좌표를 결정한 후 각 고유점 정보를 이용하여 기준 축(대퇴 양과축, 대퇴 장축, 대퇴 경부축)을 추출하는 과정을 나타낸다. 기준 축의 정의 방법은 아래와 같다.

⑦ femoral shaft axis : 저장된 P 점과 O점을 이은 선분의 연장선을 대퇴 장축으로 정의한다.
⑧ femoral neck axis : 저장된 H 점과 O 점을 이은 선분의 연장선을 대퇴 경부축으로 정의한다.

이를 바탕으로 대퇴 전염각(femoral anteversion angle, Θ)은 $\overrightarrow{LcMc}$ 벡터(대퇴 양과축에 평행)와 $\overrightarrow{OH}$ 벡터(대퇴 경부축)가 이루는 각도로 계산되었다.

골반골의 외측 경사각은 먼저 CT 단면 영상에서 골반이 끝나는 두 점을 정의하여 저장하고, 두 점을 연결한 선분을 포함하고 관상면에 수직인 방향의 데이텀 평면을 생성한다. 그리고 적층된 3차원 모델을 관상면상에서 바라본 방향으로 orientation 시켜 2차원 영상에서 H점으로부터 비구부의 움푹 파인 구면까지의 거리를 360° 회전시켜 구한다. 이 때 구해진 거리를 프로파일시켜서 H점에서 비구부의 구면까지의 거리가 일정한 시작점과 끝점을 저장한다. 저장된 두 점을 이은 선분의 벡터와 골반골 양 끝점에서 저장된 선분의 벡터가 이루는 각으로 골반골의 외측 경사각을 계산하였다.

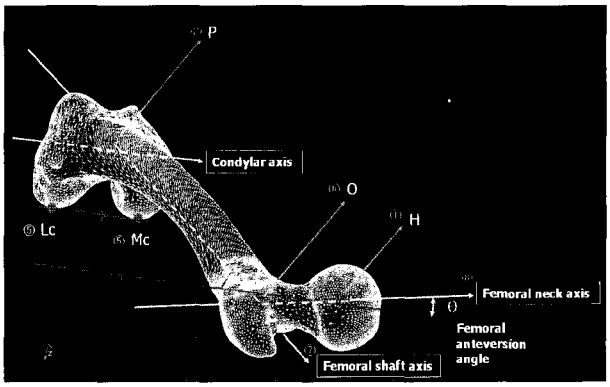

그림 3. 대퇴골의 기준 축과 대퇴 전염각 추출
Fig. 3. Detection of femoral basic axes and anteversion angle.

3) 3차원 기하학적 정보 추출

환자의 정확한 기하학적 정보를 추출하기 위해서는 대퇴골과 골반골의 해부학적 형상을 고려한 고유점과 대퇴 장축(femoral shaft axis), 대퇴 경부축(femoral neck axis), 대퇴 양과축(condylar axis), 골반골 비구부의 외측 기울기(lateral inclination : tilt)의 정의가 중요하다. 각 고유점 및 축의 정의와 대퇴 전염각(femoral anteversion angle), 대퇴 경간각(femoral neck-shaft angle), 골반골 비구부의 외측 경사각(lateral tilt angle)을 3차원 기하학적 측면에서 정의하였다. 이렇게 정의된 기하학적 정보를 3차원 모델링에 적용하였다.

인공고관절 전치환술을 위한 3차원 모델링은 시술할 환

자의 2차원 CT 횡단면 영상을 획득하고, 이들 영상의 각 단면 영상을 전처리하고 분할(segmentation) 하였다. 이 과정에서 윤곽선 데이터를 추출하고 추출된 데이터들로부터 앞서 정의한 기하학적 정보의 고유점을 저장하였다. 또한 전처리된 각 2차원 영상들을 적층시켜 3차원 공간상의 좌표에서 얻을 수 있는 고유점 및 기준 축을 추출하였다. 이렇게 추출된 고유점들과 각 축간의 상관관계에 의해서 환자 고유의 기하학적 정보인 대퇴 전염각(Θ), 대퇴 경간각(β), 외측 경사각(α)을 추출하였다.

2. 수술과정 모사

추출된 환자 고유의 기하학적 정보를 바탕으로 수술과정을 모사하였는데, 인공고관절 전치환술에서는 수술 전 환자의 고유한 기하학적 정보를 수술 후에도 그대로 유지시켜 주는 것이 수술의 정확도를 높이는데 중요하다. 따라서 모사 후 대퇴 전염각, 대퇴 경간각, 외측 경사각을 그대로 유지시키기 위한 비구컵과 대퇴 임플란트의 삽입 위치를 모사하였다.

1) 비구컵의 삽입과정

그림 4와 같이 비구컵의 삽입은 골반골의 비구부 구면과 비구컵 구면을 일치(mate)시키고, 움푹 파인 반구 형태의 비구부에서 외측 경사면(lateral tilt)에 수직인 법선 벡터중에 비구부 중심을 통과하는 벡터를 비구부의 중심축으로 정의하였다. 그런 후 정의된 축과 반구 모양의 비구컵 축을 일치(alignment)시켰다.

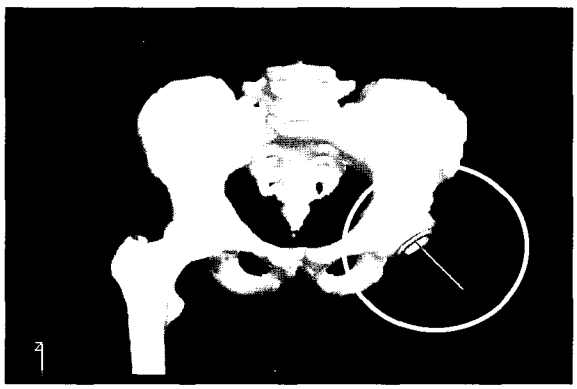

그림 4. 비구컵의 삽입 과정 모사
Fig. 4. Simulation of acetabular cup's insertion process.

2) 대퇴 임플란트의 삽입과정

그림 5와 같이 대퇴 임플란트의 삽입은 임플란트의 경부축에 수직인 경부 끝단의 평면을 대퇴골두 제거 시 잘려진 평면과 일치(mate)시키고, 대퇴스템축과 대퇴 장축을 일치(alignment)시켰다.

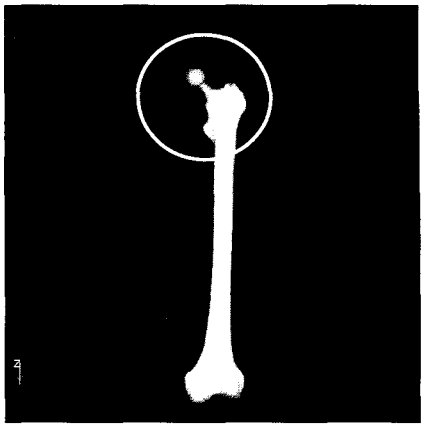

그림 5. 대퇴 임플란트의 삽입 과정 모사
Fig. 5. Simulation of femoral implant's insertion process.

3. 모사 시술에 따른 기하학적 정보 변화 양상 분석

모사 시술 전후 환자의 수술 상태를 파악하여 최적의 비구컵과 대퇴 임플란트의 위치를 선정하기 위하여 비구컵의 위치 변화에 따른 기하학적 정보를 변화시켰고, 기하학적 정보 유지를 시키기 위해서 대퇴 임플란트 삽입 깊이에 따른 대퇴스템 경부 길이의 변화를 살펴보았다.

1) 비구컵 위치의 변화 양상 분석

그림 6은 모사 과정에서 그림 4와 같이 비구컵이 삽입된 상태에서 비구컵 위치 변화에 따른 환자 고유 기하학적 정보인 대퇴 전염각(Θ)과 대퇴 경간각(β)의 변화를 알아보기 위한 그림으로 비구컵의 위치를 변화시켰다. 비구부와 비구컵의 구면이 서로 일치되어 있기 때문에 각도에 대한 조향으로 위치 변화를 주었다. 위치 방향으로는 외측 경사각(Ax, α)방향으로 - 10°에서 + 10°로 조향시켰고, Ay(Ax 방향의 수직인 방향)방향으로 - 30°에서 + 30°로 조향시켰다.

모사 수술전 저장된 환자의 고유점 중 다른 고유점들은 변하기 않으나 H점은 대퇴골두가 대퇴 임플란트의 ball로 대체되고 비구컵이 전후 좌우로 조향됨에 따라 변하게 되는데 이렇게 변한 점을 다시 H′점으로 저장하였다. 모사 수술후 새롭게 저장된 H′점을 기준으로 다시 대퇴 전염각과 경간각을 구하였다.

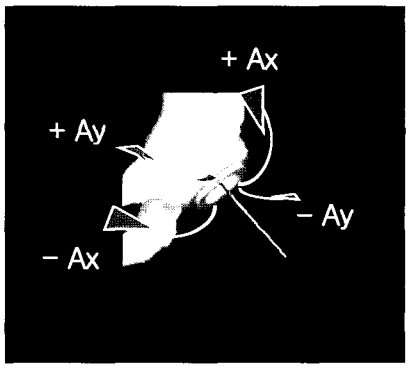

그림 6. 비구컵의 위치 변화
Fig. 6. Change of acetabular cup's position.

2) 대퇴 임플란트의 변화 양상 분석

수술의 모사과정에서 그림 5와 같이 대퇴 임플란트가 삽입된 상태에서 모사 시술 전후 환자 고유의 대퇴 전염각과 대퇴 경간각을 유지시키는 것이 무엇보다 중요하다. 이에 그림 7은 의사의 주관이 많이 반영되어 있는 대퇴 임플란트 삽입 시 그 삽입 깊이를 변경시키고 규격화되어 있는 대퇴 임플란트의 대퇴스템각(C)을 임의로 변경시켰을 때 대퇴스템 경부의 길이 보정을 알아보기 위한 것이다. 이런 과정을 통하여 모사 시술 전후 환자의 수술 상태를 파악하고 환자 고유의 기하학적 정보를 고정시켜 놓은 후 최적의 대퇴 임플란트 위치를 선정하였다.

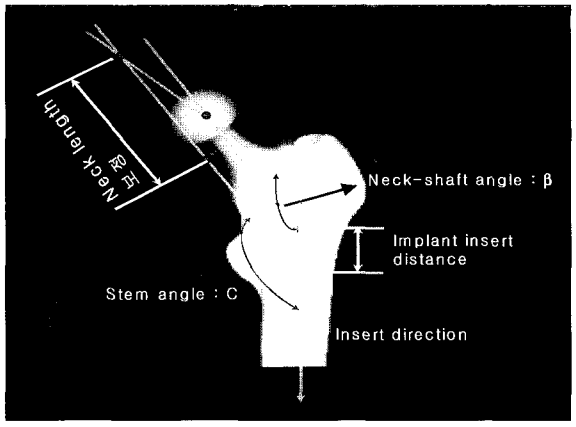

그림 7. 대퇴 임플란트 삽입 깊이와 대퇴스템각의 변화에 따른 대퇴스템 경부 길이의 보정

Fig. 7. Revision of neck stem length by the change of insertion position of femoral implant and stem angle.

4. 임상 실험

수술 모사 소프트웨어의 정확성 및 검증 평가를 위해 임상 장치를 구성하고 임상 데이터를 수집하여 모사를 수행하였다. 그림 8은 임상 장치의 개략도를 나타내고 있는 그림으로 임상 장치는 CT 단면 영상과 소프트웨어 구동을 위한 PC로 이루어져 있으며, 데이터 전송은 TCP/IP로 이루어졌다.

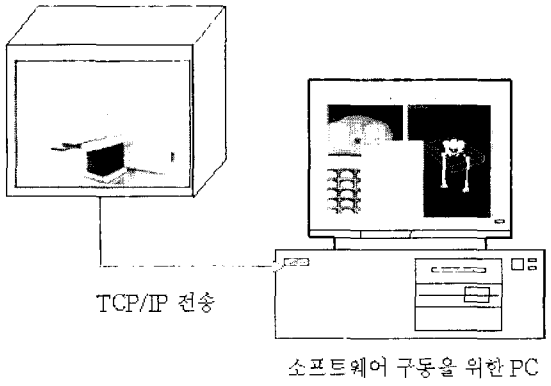

그림 8. 구성 장치의 개략도

Fig. 8. Schematic diagram of simulation system.

RESULTS

본 모사 시술 방법의 3차원 모델 측정법에 의해 계산되어진 환자 고유의 기하학적 정보인 대퇴 전염각 Θ, 대퇴 경간각 β, 비구부의 외측 경사각 α를 바탕으로 비구컵의 위치와 대퇴 임플란트의 변화 양상을 분석하였다.

1. 환자의 기하학적 정보 추출 결과

구성된 3차원 모델링 소프트웨어를 이용해서 고관절 질환을 가진 환자의 인공고관절 전치환술을 위해 고관절의 3차원 형상의 재구성이 이루어졌으며, 이를 이용하여 대퇴골의 기하학적 정보가 수집되었다. 2차원 CT 영상으로부터 3차원 공간 좌표를 설정하고 알고리즘에 의해 정의된 각 고유점과 대퇴 장축 및 대퇴 경부축을 이용하여 3차원 공간상에서 대퇴 전염각과 대퇴 경간각을 계산하였다. 그 중 한 명인 대퇴골두 무혈성 괴사 질환을 가진 31세 남성 환자의 경우에 대해서 그 결과를 아래에 그림과 같이 도시하였다. 상기 환자의 경우는 최적의 대퇴 전염각(Θ)은 19° 였고, 대퇴 경간각(β)은 128°, 외측 경사각(α)은 40° 로 얻어졌다(그림 9).

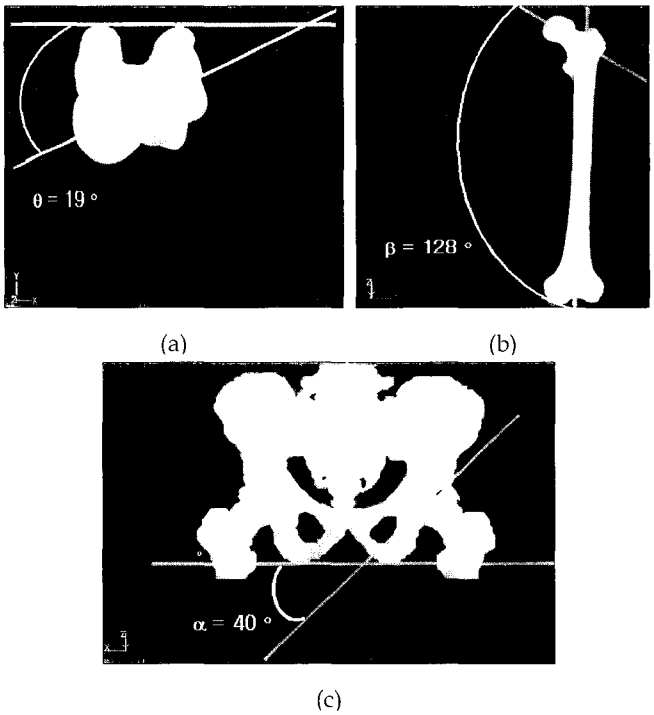

그림 9. 계산된 대퇴골과 골반골의 기하학적 정보 추출 (a) 횡단면상에서 바라 본 대퇴 전염각 (b) 관상면에서 바라 본 대퇴 경간각 (c) 관상면에서 바라 본 외측 경사각

Fig. 9. Detection of characteristic geometrical information of patient's femur and pelvis (a) Femoral anteversion angle in transverse plane (b) Femoral neck-shaft angle in coronal plane (c) Lateral tilt angle in coronal plane.

3차원의 재구성은 정확히 이루어졌으며, 공간상의 3차원 평면에 대한 View Orientation의 변경, Rotation, Translation, Tilt, Zoom 등의 기능을 통해 구해진 대퇴 전염각과 대퇴 경간각의 검토가 이루어졌다. 그림 9는 알고리즘 상에 정의된 각 고유점과 축에 의해서 대퇴 전염각과 대퇴 경간각을 계산한 결과를 도시하고 있다. 그림 9의 (a)는 횡단면상에서 대퇴골을 바라 볼 수 있게 orientation을 변경시킨 그림이고 그림 9의 (b)도 대퇴골의 위치를 관상면상에서 바라 본 방향으로 orientation을 변경하여 위치시켰다. 그리고 그림 9의 (c)는 그림 9의 (b)와 마찬 가지로 골반골의 위치를 관상면상에서 바라 본 방향으로 orientation을 변경시켰다.

2. 비구컵 삽입 위치에 따른 기하학적 정보의 변화 양상

비구컵의 삽입 위치를 비구컵 중심에서 비구부면을 따라 전후 좌우 각도로 조향시켜 수술을 모사하여 최적의 비구컵 위치를 선정하였다.

1) 대퇴 전염각

그림 10은 모사 수술 과정시 비구컵의 삽입 위치를 비구컵 중심에서 비구부면을 따라 전후 좌우 각도로 조향됨에 따라 대퇴 전염각의 변화를 나타내는 그래프이다. Ax 방향에서 보다 Ay 방향으로 대퇴 전염각이 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

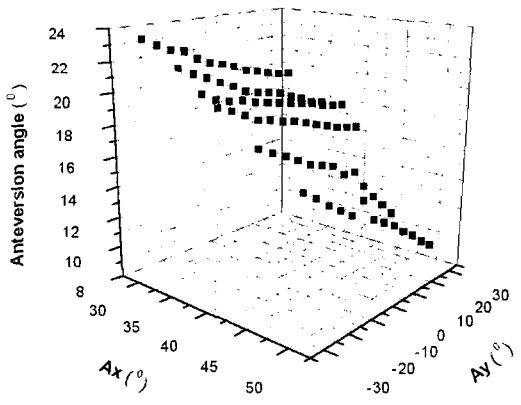

그림 10. 비구컵의 Ax, Ay 변화에 따른 대퇴 전염각 변화 그래프
Fig. 10. Graph of the change in femoral anteversion angle due to the change of acetabular cup's Ax, Ay.

2) 대퇴 경간각

그림 11은 그림 10과 같은 방법으로 비구컵을 Ax, Ay 방향으로 조향시켜 대퇴 경간각의 변화를 살펴보았다. 대퇴 전염각보다 다소 일정하게 변화하였으며, 양방향 대해서 대퇴 경간각은 균일하게 변화하였다.

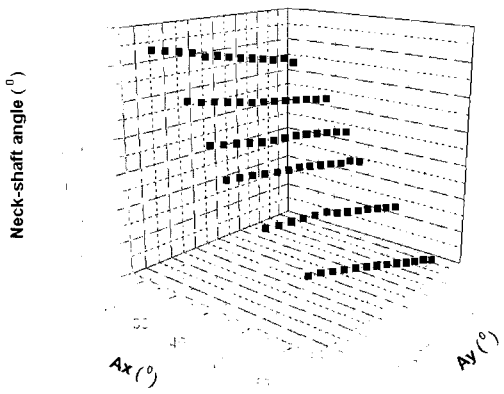

그림 11. 비구컵의 Ax, Ay 변화에 따른 대퇴 경간각 변화 그래프
Fig. 11. Graph of the change in femoral neck-shaft angle due to the change of acetabular cup's Ax, Ay.

3) 분석 결과

수술전 환자의 기하학적 정보인 대퇴 전염각과 대퇴 경간각을 각각 Θ와 β로 두고 Ax, Ay 변화에 따른 각을 Θ1, β1 로 두었다. 이 때 비구컵 위치의 변화에 따라 나타나는 대퇴 전염각의 오차(EΘ = Θ - Θ1)와 대퇴 경간각의 오차(Eβ = β - β1)를 계산하였다. 상기 특정 환자(남, 31세)의 경우, 대퇴 전염각(Θ)은 19°, 대퇴 경간각(β)은 128° 로 계산되었는데, 이 결과를 토대로 오차를 계산하였을 때 최소 오차를 가지는 대퇴 전염각 Θ1은 18.9° 였고, 대퇴 경간각 β1은 127.9° 였다. 이 때 비구컵의 위치는 비구부의 외측 틸트각 기준으로 Ax = - 2°, Ay = 5° 였다. 따라서 이 환자의 경우는 기하학적 정보를 유지시키기 위해 최소의 오차를 가지는 대퇴 전염각과 대퇴 경간각의 값으로 볼 때 최적의 비구컵 위치는 외측 경사각(α)을 기준으로 38°(= α + Ax)이고 그의 수직 방향으로 + 5°(= Ay) 인 곳이다.

3. 대퇴 임플란트 삽입 깊이에 따른 기하학적 정보의 변화 양상

모사 시술 전 환자의 수술 상태를 파악하고 환자 고유의 기하학적 정보를 고정시켜 놓은 후 수술을 모사하여 최적의 대퇴 임플란트의 위치를 선정하였다.

1) 대퇴 임플란트 삽입 깊이와 대퇴스템각 변화에 따른 대퇴스템 경부 길이 보정

인공고관절 전치환술시 대퇴 임플란트를 삽입할 때 의사의 주관과 실수가 많이 반영되어 있어서 임의로 대퇴 임플란트의 삽입 깊이를 10 mm 더 증가시켰다. 그리고 가장 보편적으로 사용되는 대퇴스템각 값인 135°를 적용시켰을 때 앞서 예시한 환자의 경우(Θ = 19°, β = 128°)에 대퇴스템 경부 길이는 그림 12에 의해 + 65 mm 로 보정되었다.

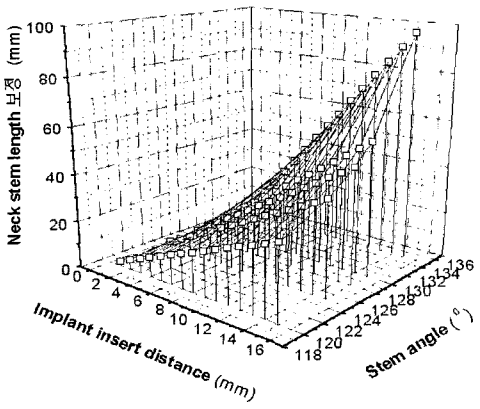

그림 12. 대퇴 임플란트 삽입 깊이와 대퇴스템각 변화에 따른 대퇴스템 경부 길이 보정 그래프
Fig. 12. Graph of revised neck-stem length by the change of insertion position of femoral implant and stem angle.

2) 분석 결과

① 대퇴스템각과 대퇴스템 경부 길이의 동시 보정(과도한 보정 발생)

그러나 환자의 하체에 대한 기하학적 형태로 보았을 때 + 65 mm 는 너무도 과도한 보정 값이 된다. 따라서 이는 그림 13과 같이 대퇴 임플란트의 대퇴스템각 값이 보정되어야 하고 이에 따라 다시 대퇴스템 경부 길이가 보정되어야만 수술 전·후 환자의 대퇴골 및 골반골의 기하학적 정보를 유지할 수 있고, 동시에 하체에 대한 기하학적 형태를 유지할 수 있게 된다.

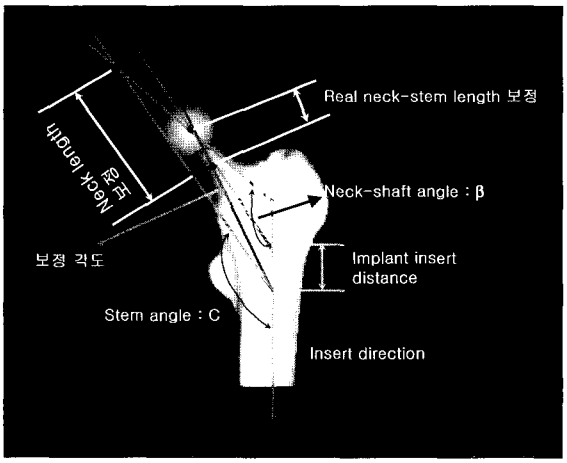

그림 13. 대퇴스템각과 대퇴스템 경부 길이의 동시 보정
Fig. 13. Simultaneous revision of stem angle and neck-stem length.

② 대퇴 임플란트 삽입 깊이와 보정 각도에 따른 대퇴스템 경부 길이 보정

예시한 환자의 경우(Θ = 19°, β = 128°)를 다시 앞에서 서술한 조건으로 했을 때 그림 14에 의해서 대퇴스템각 값의 보정 각도는 + 9.44°, 대퇴스템 경부 길이는 + 7.11 mm 로 보정되었다. 따라서 상기 환자의 경우에서처럼 기하학적 정보를 유지시키기 위해서는 대퇴스템의 위치 선정이 매우 중요함을 알 수 있었다. 그리고 의사의 주관이나 실수로 인하여 대퇴스템의 삽입 깊이가 크게 증가되었다면 최적의 대퇴스템은 보정 각도를 통해 대퇴스템 경부 길이의 보정을 고려해야 한다.

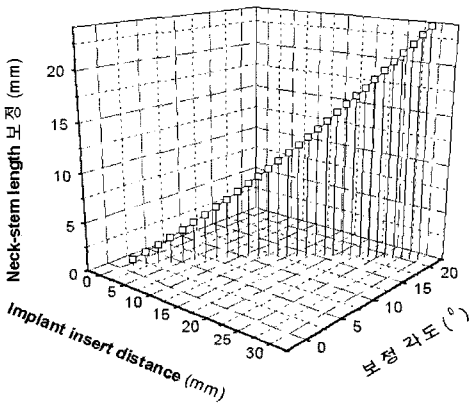

그림 14. 대퇴 임플란트 삽입 깊이와 보정 각도에 따른 대퇴스템 경부 길이 보정 그래프
Fig. 14. Graph of revised neck-stem length by the change of insertion position of femoral implant and revision angle.

DISCUSSIONS

본 연구에서 구해진 골반골과 대퇴골의 기하학적 정보를 추출하기 위해 오래 전부터 많은 방법들이 제시되었는데, 초기 2차원 측정법인 X-ray 영상을 이용한 방법으로는 투시법(fluoroscopic method), 양면 방사선법(biplanar roentgenography)과 축 방사법(axial roentgenography) 등이 있다[7-14]. X-ray 영상을 통한 측정 방법은 아직까지도 많이 사용하고 있지만, 각각의 방법에는 방사선 피폭량이 많고 연부조직의 두께 및 대퇴골의 길이로 인하여 방사선 사진이 선명하지 않으며, 검사자간의 측정 재현성이 떨어지고 환자의 자세에 따른 측정 오차가 크다는 단점 등의 많은 문제점을 가지고 있다. 조금 더 발전한 측정법으로서 Dunlap k. et al[15]이 제시한 방법은 방사선의 조사 방향이 환자 대퇴골 장축의 방향과 평행하도록 놓고 촬영을 하여 얻어진 2차원 영상에서 대퇴 골두의 중심과 대퇴 경부의 중심을 이어서 대퇴 전염각을 측정하는 것이다[15,16]. 그러나 이 방법은 환자 대퇴골의 위치가 잘못 놓인 경우에 큰 오차를 발생시킬 수 있으며 방사선 노출로 인해 환자에게 피해를 줄 수 있다[17,18]. 그 이후로 연구된 CT 영상 측정법, 자기공명영상장치(MRI), 초음파(Ultrasound)영상 진단장치를 이용한 측정법이 사용되고 있는데[17-22] 이러한 2차원 측정법은 대퇴골의 전체 길이 방향에 대한 고려를 할 수 없으므로, 환자의 자세 설정 및 정확한 기준 위치 설정이 가장 큰 문제점이 되고 있다.

최근에는 하드웨어 기술의 급속한 발달로 이러한 단점을 극복하기 위하여 대퇴골 전체 구조를 고려한 3차원 측정법이 소개되었다[23]. 이 방법은 대퇴골 전체에 대하여 대퇴골의 근위부(proximal part)와 원위부(distal part)를 세밀하게 촬영하고 골반부(diaphysis part)를 두께가 크게 촬영된 영상들에 렌더링을 수행하여 실제 환자의 대퇴골을 컴퓨터상에 가상의 3차원 형상으로 재구성시킨 것이다. 이렇게 구성된 3차원 형상을 이용하여 측정자가 수작업을 통해

대퇴 전염각 및 경간각을 측정하였다. 이 방법은 실제 골반골과 대퇴골을 컴퓨터상의 가상 공간에 재구성하여 3차원 형상을 분석할 수 있는 장점은 있지만 모든 과정이 수작업으로 이루어지므로 측정자의 주관성에 따라 다른 결과를 가져올 수 있으며, 많은 시간이 걸리는 단점이 있었다. 최근 국내에서는 측정자의 주관성을 배제하고 인공삽입물의 위치 정밀도를 높이기 위해 3차원 의료영상을 기반으로 하여 인공고관절 전치환 모의시술시 인공고관절 삽입의 정합도 향상을 위한 연구를 시도하였다[24]. 이 연구는 인공고관절 시술에 앞서 정합도 측정을 통하여 환자에게 가장 적합한 인공고관절을 선택하고 아울러 최적의 시술 방향과 깊이를 찾기 위한 모의시술 시스템에 적용하는 것이였는데, 이는 환자가 가지고 있는 3차원적인 고유의 기하학적 정보를 이용한 것이 아닌 대퇴 임플란트 삽입시 삽입깊이에 따른 인공고관절사이 거리의 분산값을 적용하여 비구컵과 대퇴 임플란트의 정합도의 변화를 통하여 모사시술을 하는 것이였다. 그러나 실제 정형외과에서는 인공고관절 전치환술시 환자의 수술을 위해 수술계획을 세울 때 대퇴전염각, 대퇴경간각 그리고 외측 경사각을 더 중요한 요소로 인지하고 수술중에는 대퇴전염각 등을 측정하여 수술의 성공여부를 진단하므로 이 연구는 수술시 의사들의 객관적 성향을 간과하고 있다는 단점이 있었다. 이에 반하여 국내 연구진에 의해서 대퇴골의 기하학적 정보를 이용하여 한국인의 대퇴골 형상에 관련한 연구[25]가 있었는데, 상기 연구에서는 인공고관절 전치환술시 환자의 3차원적인 고유의 기하학적 형태가 중요함을 인지하여 38구의 사체에서 추출한 한국인 대퇴골의 CT 영상과 200개의 정상적인 대퇴골의 CT 영상을 3차원적인 형상으로 재구성하고 비교하여 한국인 대퇴골 형상의 표본 데이터를 연구하였다. 본 연구와 상기 연구의 결과를 비교해 보면 상기 연구의 결과인 대퇴 전염각의 분포범위(2° ~ 30°)의 측면에서 볼 때 본 연구와 상당히 부합되고 있음을 알 수가 있다. 이러한 대퇴골 형상에 관련한 연구를 바탕으로 인공고관절 모사시술을 위해서는 대퇴전염각 뿐만 아니라 대퇴경간각과 외측 경사각을 이용하여 인공고관절 모사 시술시 적용한다면 좀더 객관적이고 정확한 모사 시술이 될 것이라 예상된다.

이에 본 연구에서는 인공고관절 전치환술시에 필요한 대퇴골과 골반골의 기하학적 정보를 획득하고 해부학적 형상 추출 알고리즘을 적용하여 정확한 대퇴 전염각과 경간각, 골반골 외측 경사각의 추출을 하였다. 그리고 기존의 수작업에 의한 대퇴 전염각과 경간각의 계산을 통해 발생할 수 있는 문제를 개선하기 위해 2차원 CT 영상 처리와 3차원 좌표 추출 및 형상 재구성을 통해 각 고유점 및 기준축을 자동으로 정의하였다. 또한, 대퇴골이 잘못 놓인 경우에 2차원 CT 영상의 분석에서 발생할 수 있는 측정 위치상의 오류가 3차원 공간상의 재구성을 통해 근본적으로 제거될 수 있었다. 그리고 이를 통하여 인공고관절 전치환술시에 대퇴골의 기하학적 정보를 서로 비교해 봄으로써 환자의 수술 상태를 정확하게 알아 낼 수 있었다. 또한, 실제 인공고관절 전치환술은 삽입물 위치 정밀도를 향상시키더라도 수술 과정이 어렵고 의사의 경험과 숙련도에만 의존하게 되어 의사는 수술에 대한 전반적인 상황을 관망하여 예비 계획을 세우고, 수술시의 모든 상황들을 고려해서 실제 수술과 같은 조건으로 예비 시술하여 인공고관절 전치환술을 개선하고 발전시키고자 하는 시도가 증가하고 있다.

이에 본 연구에서는 인공고관절 전치환술시 인공삽입물의 삽입 위치 정밀도 개선과 반복적인 모사 시술을 통해 의사에게 수술의 정확도를 높이고 숙련도를 향상시킬 수 있도록 예비 수술 환경을 제공하고, 인공고관절 전치환술시 발생 가능한 다양한 문제를 분석하기 위해 환자 고유의 기하학적 정보를 이용하여 수술을 모사하였다. 그리고 인공고관절 수술 과정 시 비구부와 대퇴부에서 중요한 인공삽입물의 삽입 위치 정밀도 향상을 위해 비구부에 비구컵을 삽입시 삽입 위치가 변함에 따라 환자 고유의 기하학적 정보가 어떻게 변하는지, 대퇴골에 대퇴 임플란트를 삽입시 삽입 깊이에 따라 대퇴 임플란트가 어떻게 변하는지를 분석하여 위치 정밀도 개선과 수술의 정확도를 위한 최적의 위치 선정을 제시하고자 하였다. 또한 환자 고유의 기하학적 정보 추출을 위해 재구성된 3차원 모델의 기하학적 정보는 최적의 대퇴 임플란트의 설계 및 선정에 중요한 정보를 제공하며, 수술 후 인공고관절의 수명 예측 및 재수술의 시기 등에 대한 해석 수행에 적극 활용될 수 있다. 뿐만 아니라 수술 전, 후에서 환자의 고유한 기하학적 정보(대퇴 전염각, 대퇴 경간각, 비구부의 외측 경사각)의 비교를 수술 전에 해봄으로써(모사 시술), 수술의 정확도를 개선시킬 수 있으며, 인공고관절 전치환술시 수술의 중요한 변수로써 작용하는 비구컵과 대퇴 임플란트를 삽입할 때 서로 상호간 최적의 삽입 위치를 알아 낼 수 있어 수술 후 인공관절의 삽입 위치 정밀도 및 수술 정확도를 높일 수가 있다.

본 연구에서는 이러한 환자 대퇴골과 골반뼈의 기하학적 정보의 정확한 추출로 비구컵과 대퇴 임플란트의 최적 삽입 위치 선정에 중요한 요소가 됨을 확인할 수 있었다. 또한 비구컵과 대퇴 임플란트의 정확한 삽입 위치 선정은 인공고관절 전치환술의 성공 여부에 중요한 요소임을 알 수 있었다. 또한 이런 환자의 기하학적 정보를 토대로 비구컵의 삽입 위치를 비구컵 중심에서 비구부면을 따라 전후, 좌우 각도로 조향시켜 수술을 모사하여 최적의 비구컵 위치를 선정하였다. 모사 수술 전에 미리 대퇴 전염각 Θ, 대퇴 경간각 β, 비구부의 외측 경사각 α를 측정한 환자의 비구컵에 대한 최적의 위치는 수술 전·후 환자의 기하학적 정보를 비교해 볼 때, 원래 비구부의 외측 경사각에서 비구컵 삽입에 대한 최적의 위치가 선정되어야 한다. 그러나 규격화된 대퇴 임플란트와 비구컵내의 shell 및 liner의 영향과 비구부와 비구컵의 크기가 다르기 때문에 비구컵의 최적 위치가 보정되어야 할 것으로 생각된다. 그리고 의사의 주관이 많이 반영되어 있는 대퇴 임플란트의 삽입시 일어날 수 있는 조건을 삽입 깊이로 두어 이를 변경하면서 수술을 모사하여 최적의 대퇴스템 경부 길이를 보정하였다. 삽입 깊이가 작은 경우에는 문제가 없었으나 삽입 깊이가 큰 경우에 과도한 보정치 문제가 발생하였고 이는 환자의 하체에 대한 기하학적 형태로 보았을 때 잘못된 대퇴 임플란트가 설계되었고 삽입되었음을 의미한다. 따라서 이와 같은 경우에는 대퇴 임플란트의 대퇴스템각과 대퇴스템 경부 길이의 동시 보정이 고려되어야 하고 이를 통해 최적의 보정 값을 선정하여 다시 대퇴 임플란트를 설계하여야 한다. 이와 같이 최적의 대퇴 임플란트 위치는 삽입 깊이에 따라 대퇴 임플란트를 다시 설계하여야 하므로 신중히 대퇴 임플란트를 삽입해야 한다. 또한, 대퇴 임플란트를 삽

입시 대퇴 전염각 방향으로의 오차는 수술 전 환자 고유의 기하학적 정보를 유지시킬 수 없기 때문에 대퇴골에 대퇴 임플란트를 삽입시 대퇴 장축 방향으로 정확히 넣어야 하며 좌우로 흔들리면 안 된다.

본 연구의 모사 시술 방법을 이용하여 인공고관절 전치환술시 발생하는 다양한 수술을 시행할 때에 기하학적 정보를 분석한 결과를 활용하여 비구컵과 대퇴 임플란트의 정확한 삽입 위치를 선정할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 모사 시술 방법을 이용하여 의사가 반복적인 예비 수술을 선행한다면 수술의 정확도와 숙련도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

CONCLUSIONS

현재 정형외과에서 인공고관절 전치환술시 대퇴골과 골반골에 인공관절을 삽입하기 위해서 공간을 가공하고 비구컵과 대퇴 임플란트를 삽입하여야 하는데, 환자의 기하학적 정보의 정확한 계측이 힘들어 비구컵과 대퇴 임플란트의 삽입시 의사의 경험과 숙련도에만 의존하여 많은 문제점을 안고 있다. 이에 수술의 객관화와 예비 수술에 대한 관심이 증대됨에 따라 많은 환자들을 빠른 시일 내에 시술할 수 있는 방법과 치료에 대한 객관성을 확보하여 인공고관절 전치환술을 개선하고 발전시키려는 시도가 증가하고 있다. 또한 환자들이 쉽게 수술을 받을 수 있도록 의사는 수술에 대한 전반적인 상황을 관망하고 수술시의 모든 상황들을 고려해서 실제 수술과 같은 조건으로 예비 시술하고자 하는데 많은 관심을 기울이고 있다.

그러나 현재 환자 고유의 기하학적 정보를 제대로 추출하지 못하는 X-ray와 같은 2차원 영상으로만 예비 수술 계획을 세우기 때문에 여전히 인공고관절 전치환술 후 인공관절의 위치 정밀도가 낮아서 재치환술의 발생 빈도가 매우 높고 수술의 성공률도 낮게 나오고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 정확한 환자 고유의 기하학적 정보들을 추출하기 위해 연속된 CT 영상을 활용한 뼈의 3차원 모델링이 이루어졌고, 이를 통해 수작업과 측정자의 주관에 따라 이루어지는 기존의 2차원 측정 방법의 단점을 개선하고 빠른 시간 내에 자동으로 환자 고유의 뼈에 대한 정확한 기하학적 정보를 3차원 공간 좌표상에서 정확히 추출하는 새로운 방법을 제시하였다.

그리고, 제시된 방법의 검증을 위해 12인의 인공고관절 전치환술 환자의 데이터를 이용하여 각 환자 골반골과 대퇴골의 3차원 모델링 및 3차원 기하학적 정보를 추출하여 보았다.

또한, 모델링된 골반골 및 대퇴골과 추출된 기하학적 정보를 활용하여 3차원 공간에서 인공고관절 전치환술을 모사하기 위하여 수술 후 환자의 회복과 인공관절의 수명에 큰 영향을 주는 골반골 부위에 삽입되는 비구컵의 위치와 대퇴골 부위에 삽입되는 대퇴 임플란트의 위치가 변화하는 양상을 알아보았다.

이에 본 연구의 모사 시술 방법을 이용하여 인공고관절 전치환술시 발생하는 다양한 모사 시술을 시행할 때에 새로운 방법으로 추출된 기하학적 정보를 분석한 결과를 활용하여 최적의 비구컵과 대퇴 임플란트의 위치를 선정할 수 있음을 확인하였다. 그 결과 의사의 숙련도에 전적으로 의존하지 않고도 인공고관절 전치환술시 일어날 수 있는 각 문제에 대한 대처 방법을 얻을 수 있었다. 앞으로 좀 더 많은 조건들을 포함하고 분석하여 재치환술에서 오는 경제적 비용의 절약과 환자에게 정확한 치료 과정과 수술 방법을 설명할 수 있게 하여 수술에 대한 두려움을 가지지 않게 해 줄 뿐만 아니라 수술 중에도 실시간으로 활용할 수 있는 수술 보조적인 모사 방법이 모색되어야 할 것으로 생각되어진다.

REFERENCES

1. Knight JL, Atwater RD, "*Preoperative planning for total hip arthroplasty: quantitating its utility and precision*", J. Arthroplasty, 7: pp. 403-409, 1992
2. Bargar, W. L., "*Shape the implant to the patient, A raionale for the use of custom-fit cementless total hip implants*", Clinical orthopaedics and related research, 249: pp. 73-78, 1989
3. Terosch T, Peuker E, von Hasselbach C, Lahmer A, Filler T, Witzel U, "*Computer assisted implantation of the femoral stem in THA - an experimental study*", Int Orthop, 23(4): pp. 224-226, 1999
4. Bongini, D., Carfagni, M., et al., "*Hippin: a semiautomatic computer program for selecting hip prosthesis femoral components, Computer methods and programs in biomedicine*", 2(63): pp. 105-115, 2000
5. Leonard Ruby, Morisder A. Mital, John O'connor, Upendra Patel, "*Anteversion of the Femoral Neck*", The journal of Bone and Joing Surgery, pp. 46-51, 1979
6. Miller, F., Merlo, M., Liang Y., Kupcha, P., Jamison, J., Harke, T., "*Femoral version and neck shaft angle*", Journal of Pediatric Ortopaedics, 13: pp. 382-388, 1993
7. Rogers, S.P, "*A Method for Determining the Angle of Torsion of the Neck of Femur*", J. Bone Joint Surg., Vol. 13, pp. 821, 1981
8. LaGasse, D.J. and Staheli, T.L, "*The Measurement of Femoral Anteversion*", Clin. Orthop., Vol. 86, pp. 13, 1972
9. Rubby L., Mital, M.V., O'conner, J. and Patel, U., "*Anteversion of the Femoral Neck*", J. Bone Joint Surg, Vol. 61, No. A, pp. 46, 1976
10. Dunlap, C.K., Shands, A.R. Jr., Holister, L.C. Jr., Gaul, J.S. Jr. and Streit, H.A, "*A New Method for Determination of Torsion of the femur*", J. Bone and Joint Surg, Vol. 35, No. A, pp. 289, 1953
11. Magilligan, D.J, "*Calculation of the Angle of Anteversion by means of Horizontal Lateral Roentgenography*", J. Bone and Joint Surg, Vol. 38, No. A, pp. 1231, 1956
12. Ryder, C.T. and Crane, L., "*Measuring Femoral Anteversion. The Problem and a Method*", J. Bone and Joint Surg, Vol. 35, No. A, pp. 321, 1953
13. Schultz., J, "*Die Darstellung der Torsiomswinkel vom Femur mit llilfe von Rontgenstraheln*", Z. Orthop. Chir, Vol. 44, pp. 325, 1924

14. Dunn, D.M, "*Anteversion of the Neck of the Femur. A Method of Measurement*", J. Bone and Joint Surg., Vol. 34, No. B, pp. 181, 1952
15. Dunlap K., Shands Jr A. J., Hollister Jr L. C, Gaul Jr J. S. and Streit H. A., "*A new method for determination of torsion of the femur*", The Journal of Bone Joint Surgery, Vol. 35, No. A, pp. 289, 1953
16. Budin, E. and Chandler, M.E., "*Measurement of Femoral Neck Anteversion*", Radiology, Vol 69, pp. 209, 1957
17. Dennis S. Weiner and Albert J. Cook, "*Practical considerations in the use of computed tomography in the measurement of femoral anteversion*", The Journal of Medical Science, Vol. 16, No. 1, pp. 288 ~ 294, 1980
18. A. Hoiseth, O. Reikeras and E. Fonstelien, "*Evaluation of three methods for measurement of femoral neck anteversion*", Acta Radiologica, Vol. 30, No. 1, pp. 6 9 ~ 73, 1989
19. O. Reikeras, A. Hoiseth and A. Reigstad, "*Femoral anteversion measured by the dunlap/Rippstein and norman methods*", Acta Radiologica Diagnosis, Vol. 26, No. 3, pp. 303 ~ 305, 1985
20. Reinhard J. Tomczak, Klaus P. Guenther, Andrea Rieber, Patricia Mergo, Pablo R. Ros, Hans-Joachim Brambs, "*MR imaging measurement of the femoral anteversion angle as a new technique: comparison with CT in Children and Adults*", The American Journal of Radiology, Vol. 168, pp. 791 ~ 794, 1997
21. B. Schneider, J. Laubenberger, S. Jemilish, K. Groene, HM. Weber, M. Langer, "*Measurement of femoral antetorsion and tibial torsion by magnetic resonance imaging*", The British Journal of Radiology, Vol. 70, pp. 575 ~ 579, 1997
22. Terje Terjesen, Svein Anda, "*Ultrasound measurement of femoral anteversion*", Journal of Bone and Surgery[Br], Vol. 72, No. B, pp. 726 ~ 727, 1990
23. Hui Taek Kim, and Dennis R. Wenger, "*Functional retroversion of the femoral head in Legg-Calve-Perthes disease and epiphyseal Dysplasia: Analysis of Head-Neck deformity and its effect on limb position using three-dimensional computed tomography*", Journal of Pediatric Orthopaedics, Vol. 17, No. 2, pp. 240 ~ 246, 1997
24. 김용호, 최귀원, 김중규, "*3차원 의료영상에 기반한 인공고관절 모의시술시스템 개발 및 새로운 정합도 측정방법에 관한 연구*", 대한의용생체공학회 의공학회지, 21권, 2호, 201 ~ 212, 2000
25. Khang Gon, Choi Kuiwon, Kim Cheol-Sang, Yang Jong Soo and Bae Tae-Soo, "*A Study of Korean Femoral Geometry*", Clinical Orthopaedics & Related Research, Vol. 1, No. 406, pp. 116 ~ 122, 2003