Computer Assisted Surgery(CAS)를 이용한 개방형 근위경골절골술 시 전내측피질골경사각이 경골후방경사각에 미치는 영향

이호상*, 김재정*, 왕준호**, 김철웅***†

* 한양대학교 기계공학과, ** 성균관대학교 의과대학 삼성서울병원 정형외과, *** 고려대학교/(주)트리플씨메디칼

Effect of Anteromedial Cortex Oblique Angle on Change of Tibial Posterior Slope Angle in High Tibial Osteotomy Using Computer Assisted Surgery (CAS)

Ho-Sang Lee*, Jay-Jung Kim*, Joon-Ho Wang** and Cheol-Woong Kim***†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

** Dept. of Orthopedics, Samsung Medical Center Sungkyunkwan Univ. School of Medicine

*** RITE, Korea University / Triple-C Medical Corp.

(Received November 9, 2011 ; Revised January 6, 2012 ; Accepted January 7, 2012)

Key Words: High Tibial Osteotomy(근위경골절골술, HTO), CT Image Reconstruction(CT 이미지 재건술), Posterior Slope Angle(후방경사각), Hinge Axis Angle(힌지축각), Anteromedial Cortex Oblique Angle(전내측피질골 경사각), Gap Angle(개방각), Wedge Angle(췌기각)

초록: 슬관절 내반술과 외반술의 부정정렬을 교정하는 방법 중 대표적인 수술법이 근위경골절골술이다. 개방형 췌기 근위경골절골술(OWHTO)의 경우 근위비골 인접부의 경골외측 비골신경을 손상시킬 우려가 없고, 수술도중 교정각의 개방 정도를 임의대로 조절 변경 가능한 장점으로 최근 선호되고 있다. 그러나 술후 관상면에서의 외반 및 내반 교정은 바르게 이루어지는 반면, 시상면에서는 수술자가 의도하지 않은 경골내측고평부의 후방경사각(PSA) 변화가 발생한다는 문제점이 있다. 저자들은 이와 같은 문제의 극복을 위해 Computer Assisted Surgery를 이용한 근위경골절골술 기법을 자체적으로 개발하였고, 근위경골부의 CT 이미지 3차원 재건과 컴퓨터를 이용한 가상절골술을 수행하였다. 또한 술후에도 후방경사각(PSA)이 변화하지 않는 수술기법에 대해 제시하였다. 본 연구결과는 환자고유의 전내측피질골 경사각(ACOA)과 후방경사각(PSA)의 명확한 관계성에 대해 제시해줄 것이며 환자마다 다른 최적의 후방경사각 결정법에 대해 제시해 줄 것으로 판단된다.

Abstract: The leading surgical method for correcting the misalignment of the varus and valgus in the knee joint is the high tibial osteotomy (HTO). In the opening wedge HTO (OWHTO), there is no concern about damaging the peroneal nerve on the lateral tibia of the proximal fibula. OWHTO has been the preferred choice, as the opening of the correction angle can be modulated during the operation. The correction of the varus and valgus on the coronal plane are performed adroitly. Nevertheless, there have been numerous reports of unintended changes in the medial tibial plateau and posterior slope angle (PSA). The authors have developed an HTO method using computer-assisted surgery with the aim of addressing the abovementioned problems from an engineer's perspective. CT images of the high tibia were reconstructed three-dimensionally, and a virtual osteotomy was performed on a computer. In addition, this study recommends a surgical method that does not cause changes in the PSA after OWHTO. The results of the study are expected to suggest a clear relationship between the anteromedial cortex oblique angle of each patient and the PSA, and an optimal PSA selection method for individuals.

- 기호설명 -

σ : 후방경사각(Posterior Slope Angle, PSA)
 θ : 힌지축각(Hinge Axis Angle, HAA)
 δ : 전내측피질골경사각(Anteromedial Cortex Oblique Angle, ACOA)

α : 개방각(Gap Angle, GA)
 β : 췌기각(Wedge Angle, WA)
 λ : 내측고평부선(Medial Plateau Line, MPL)

1. 서 론

내반술(genu varum, varus) 및 외반술(genu valgum, valgus)은 대퇴경골부의 관절연골(articular cartilage)과

† Corresponding Author, woong25@korea.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

반월상연골(articular meniscus)간의 접촉압을 비정상적으로 증가시키고 결국 골관절염(osteoarthritis)을 유도한다. 즉 Fig. 1(a)와 같이 해부학적 축(anatomical axis)과 기계적 축(mechanical axis)의 불일치가 지속되면서 골소주(trabecular bone)에 체중부하가 집중적으로 유도되고 대퇴경골 내측의 연골손상이 촉진된다. 이러한 슬관절의 내반슬과 외반슬의 부정정렬을 교정하는 방법 중 대표적인 수술법이 Fig. 1(b)와 같은 근위경골절골술(High Tibial Osteotomy, 이하 HTO)이다.⁽¹⁻³⁾ HTO는 크게 폐쇄형 췌기 근위경골절골술(Closing Wedge High Tibial Osteotomy, 이하 CWHTO)과 개방형 췌기 근위경골절골술(Opening Wedge High Tibial Osteotomy, 이하 OWHTO)로 구분된다. CWHTO는 상부 경비골 관절을 분리시킨 후 경골근위부를 췌기모양으로 일부 제거하여 대퇴경골간의 각도를 교정하는 수술법이고, OWHTO는 경골 전내측(tibial anteromedial part)에서 절개가 이루어져서 근위부(proximal part)와 원위부(distal part)를 분리·개방하여 부정정렬을 교정하는 수술법이다. CWHTO는 OWHTO에 비해 회복기간이 빠르지만 다음과 같은 단점이 있다. 1) 경골외측 절제로 인한 하지의 단축 발생, 2) 추후 인공슬관절 전치환술(Total Knee Arthroplasty, TKA)등의 추가적 수술 필요시 부정정렬의 회복이 어려움, 3) 경골외측 절개로 인한 비골신경(peroneal nerve) 손상 가능성 증가, 4) 절골 후 교정각의 수정 불가능 등의 단점들이 보고되고 있다.⁽²⁾ 반면, OWHTO의 경우에는 근위비골 인접부의 경골외측 비골신경을 손상시킬 우려가 없고, 수술도중 교정각의 개방 정도를 임의대로 조절하여 변경할 수 있다는 장점을 가지고 있어 최근 선호되고 있다. 그러나 술후 관상면(coronal plane)에서의 외반 및 내반의 교정은 빠르게 이루어지는 반면, 시상면(sagittal plane)에서는 Fig. 2와 같이 수술자가 의도하지 않은 경골내측고평부(medial tibial plateau)의 후방경사각(Posterior Slope Angle(σ), 이하 PSA)의 증가가 발생한다는 문제점이 다수 보고되고 있다.^(3,4) 특히 OWHTO 술후에는 PSA(σ)가 증가하고, CWHTO 술후에는 PSA(σ)가 감소하는 결과가 나타난다. Fig. 2 우측그림과 같이 PSA(σ)가 증가할 경우, 대퇴골 내측관절융기(medial condyle)는 경골내측 고평부와와의 접촉에 의한 Roll-back 모션시 경골내측 고평부의 경사각이 후방으로 전환되고 보행 시 전방십자인대(Anterior Cruciate Ligament, ACL)에 무리한 인장력을 가하게 되어 급성 ACL 손상을 야기할 수 있다. 반면

Fig. 1 The structure of varus on coronal plane and high tibial osteotomy (HTO) using manipulation fixation device of post-operation

Fig. 2 Sagittal plane of change in slip direction with increase of posterior tibial slope angle after high tibial osteotomy (HTO)

에 PSA(σ)가 감소할 경우 대퇴골 내측관절융기의 경사각이 전방으로 전환되어 상기와 유사한 기전으로 후방십자인대(Posterior Cruciate Ligament, PCL)의 손상을 발생시킬 수 있다. 이와 같은 심각한 휴유증을 방지하기 위해 HTO 술후에도 PSA(σ)가 변화하지 않는 수술기법에 대해 국내외적으로 다양한 연구가 시도되고 있다. Hohmann E. 등⁽⁵⁾과 Kawakami H. 등⁽⁶⁾은 췌기의 3차원적 위치의 오류로 인한 절골술 후 PSA(σ)의 변화나 경골 회전 변형에 대한 연구를 수행한 바 있다. Kendoff 등⁽⁷⁾은 사체를 이용한 OWHTO 연구에서 보존된 비골은 힌지축 밖에 위치하여 췌기 개방시 외측측부인대는 기능적으로 이완되므로 양와위에서는 외측구획이 벌어지고, 전체중부하시 외측 구획이 좁아지게 되어 교정각이 증가한다고 보고하였다. 또한 Shaw 등⁽⁸⁾은 CWHTO의 경우 술후 5 파운드의 외반외력

을 가할 시 교정각이 감소된다고 보고하였고, 술중 네이게이션 상의 체중부하 모의실험(weight bearing simulation)이 필요하다고 주장하였다. Frank R. Noyes 등⁽¹⁾ 및 Marti C.B. 등⁽⁹⁾은 OWHTO 시 PSA(σ)의 증가를 피하기 위해 신연기나 고정 금속판을 후방에 위치시키는 방법, 충분한 후방연부조직 박리를 시행하는 방법, 후방췌기의 비정방형 추가 확장(asymmetrical opening) 등을 주장한 바 있다. 한편 국내에서는 Bae 등⁽¹⁰⁾이 CAS를 이용한 OWHTO 및 CWHTO에서 네비게이션 장치와 방사선 사진상의 계측치 비교연구를 수행하였고, Song

Fig. 3 Seven geometric factors that prevent posterior slope angle change after high tibial osteotomy

등⁽¹¹⁾은 Aescula[®] 금속판을 이용하여 OWHTO와 전방십자인대재건술(ACL recon.)의 동시수술 상호영향성 연구에서 동시수술 시에도 하지 정렬의 회복과 PSA(σ) 유지가 가능하였고, 주요 합병증이 거의 없는 안전한 술식이라고 보고한 바 있다. 본 저자들은 HTO의 공학적 접근법으로 Computer Assisted Surgery(이하 CAS)를 이용한 HTO 기법을 자체적으로 개발하였고, 근위경골부의 CT 이미지 3차원 재건과 컴퓨터를 이용한 가상절골술을 수행하였다. 선행연구⁽¹²⁾를 통해 Fig. 3과 같은 PSA(σ) 변화에 직접적으로 영향을 미치는 인자에 대해 분류하였다. 따라서 본 연구에서는 다음의 내용을 구체적으로 수행하였다. 1) 힌지축각(HAA)과 후방경사각(PSA)의 관계 평가, 2) 힌지축각(HAA)과 췌각(WA)의 관계 평가, 3) 전내측피질골경사각(ACOA)이 후방경사각(PSA)에 미치는 영향, 그리고 마지막으로 4) 실제 근위경골절골술(HTO)에서 발생하는 경골후방경사각(PSA) 증가를 원천적으로 방지하는 방법에 대해 상세히 평가하였다. 본 연구 결과는 환자마다 차이가 나타나는 고유의 전내측피질골경사각(Anteromedial Cortex Oblique Angle(δ), 이하 ACOA))과 PSA(σ)의 명확한 관계성에 대해 제시해 줄 것이며 환자마다 다른 최적의 PSA(σ)

Fig. 4 Illustration of 3-dimensional CT image reconstruction on proximal tibia using computer assisted surgeries

Fig. 5 Schematic view of details about 3D reconstruction by CT images in proximal tibia part

결정법에 대해 제시해 줄 것으로 판단된다.

2. Computer Assisted Surgery(CAS)를 이용한 CT 이미지 3차원 재건

2.1 근위경골 CT 이미지의 3차원 모델링

본 연구에서는 총 5구의 사체 양하지에서 좌우측 대퇴경골 10개를 채취하였다. 이후 근위경골부를 1mm 간격으로 컴퓨터단층촬영(CT) 하였고, 시편당 143개의 DICOM 이미지를 생성하였다. 이후 Fig. 4와 같이 단색 명암의 차이와 threshold기법(색상과 채도를 최소화해서 단순히 명암의 차이로 나타내는 기술)를 이용하여 DICOM 이미지상의 피질골과 해면골을 선택하였고 각 단면에서 선택된 영역들을 적층하여 3D 모델을 완성하였다. 근위경골부의 3D 모델 과정을 좀 더 상세히 설명하면 Fig. 5와 같은 순서로 진행되었다. Mercury社의 Amira version 5.2를 이용하여 CT 이미지를 1mm 간격으로 적층하고, threshold를 이용하여 Tibia와 Fibula의 점군데이터(point clouds)를 얻은 후 저장한다(Fig. 5(c)). 이후 역설계 프로그램인 RapidForm 2006을 이용하여 Amira에서 얻어진 점군데이터를 메쉬로 3-D mesh(polygon) 데이터를 생성(Fig. 5(d))하고, 생성된 데이터의 노이즈 제거, 데이터 최적화를 실시한 이후 Surface를 생성(Fig. 5(g))하여 솔리드 모델링을 한다(Fig. 5(h)). 완성된 3D 근위경골 모델은 제작자의 주관에 따라 미세한 피질골 경계면의 차이가 발생할 수 있으므로 슬관절 전문의들

의 엄밀한 검토를 통해 정확성을 향상시켰다. 이후, SolidWorks를 이용하여 생성된 Solid model을 불러와 가상수술을 실시한다. 절골방법은 관상면(coronal plane)에서 내측면 고평부(medial tibial plateau)와 일치하는 평면을 그린후 하단부 40mm지점으로 평면을 이동한다. 횡단면(transverse plane) 상에서 이동된 평면과 anteromedial cortex의 교선에서 외측면 고평부(lateral tibial plateau) 하단 20mm지점으로 절골을 실시한다. PSA를 측정한 방법으로는 변화의 절대값을 측정하기 위하여 내측면 방사선 사진과 동일한 시상면(sagittal plane) 방향에서 실시하였다. 먼저 절골술 실시 전 내측면고평부(Medial plateau)와 평행한 2개의 직선을 긋고, 한 개의 직선만 구속시킨 후 절골술을 실시하여 두 직선 사이의 각도를 측정하였다.

2.2 Computer Assisted Surgery (CAS)를 이용한 개방형 쇄기 근위경골절골술 (OWHTO)

앞 절에 언급한 근위경골의 DICOM 3차원 모델을 이용하여 본 저자들이 개발한 Computer Assisted Surgery(CAS) 기법으로 OWHTO를 수행하였다. 이때 절골에 의해 분리되는 근위경골 상하부 파단면을 연결하는 힌지축 및 힌지축각(HAA(θ))은 Fig. 6과 같이 정의할 수 있다. HAA(θ)는 내외측선(mediolateral line)과 힌지축간에 이루는 각으로 $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=45^\circ$, $\theta_3=60^\circ$, $\theta_4=75^\circ$, $\theta_5=90^\circ$ 로 정의하였다. 본 연구에서는 $\theta_2=45^\circ$ 및 $\theta_5=90^\circ$ 의 두 조건에서 OWHTO를 수행하였다. 특별히 두 조건의

Fig. 6 Illustration of A-A' cross-section (left picture) and the definition of Hinge Axis Angle (HAA, θ_{1-5}) with the angles $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=45^\circ$, $\theta_3=60^\circ$, $\theta_4=75^\circ$ and $\theta_5=90^\circ$

Fig. 7 Horizontal planes far from tibiofemoral joint plane to distal tibia

HAA(θ)를 선택한 이유는 Fig. 8과 같이 정상인의 전내측피질골경사각(Anteromedial Cortex Oblique Angle, ACOA(δ))은 $\theta_2 = 45^\circ$ 와 거의 평행한 HAA(θ)를 유지하고 있으며, 현재 OWHTO 수술시 가장 많이 적용되는 방식이기 때문이다. 또한 $\theta_5=90^\circ$ 를 비교한 이유는 근위경골 절골면 특징상 PSA(σ) 변화를 최소화 할 수 있는 HAA(θ)이기 때문이다. 절골면(osteotomy plane)은 Fig. 7과 같이 PSA(σ)의 측정기준이 되는 내측경골고평부(medial tibial plateau)로부터 원위방향 40mm 지점의 전내측피질골(anteromedial cortex part)까지를 기준으로 하며, 경골외측 고평부 하단 10mm 지점까지 연결한 선을 기준으로 형성되었다. 이후 절골면을 따라 근위경골 근위부와 원위부를 각각 분리시키고, 분리된 경골의 근위부 단면과 원위부 단면이 이루는 각을

Fig. 8 Definition of anteromedial cortex oblique angle (ACOA(δ)) on horizontal plane of osteotomy site

Fig. 9 Various references lines for exact measurements of Posterior Slope Angle (PSA(σ))

개방각(Gap Angle(α), 이하 GA, Fig. 11 참조)이라 정의하고 GA(α)= 5° 부터 20° 까지 1° 씩 증가시키며 경골의 PSA(σ)의 변화를 측정하였다.

2.3 개방형 췌기 근위경골절골술 (OWHTO) 후 후방경사각(PSA) 변화 측정

ACOA(δ)는 Fig. 7에서 경대퇴관절면(tibiofemoral joint plane)에서 원위부 40mm 지점에 형성된 x축 평면상에서 전내측피질골의 접선과 시상면 평행축인 전후방선(anteroposterior line)이 이루는 각으로 Fig. 8에 제시된 바와 같다. 또한 Fig. 10의 K-wire가 삽입되는 각과 시상면 사이에 이루는 각과 엇각관계이다. PSA(σ)의 변화를 측정하는 방법은 Fig. 9와 같다. 경골 해부학적 축(tibial anatomical axis, Fig. 9(a)), 경골후방피질부 접선(tibial posterior

Fig. 10 (a) Three K-wires were inserted through the transverse line on the anteromedial surface of tibia, (b) Osteotomy gap was spread with spreader. Posterior gap was wider than anterior gap although there was no bigger force applied on the posterior gap

cortex line, Fig. 9(b)), 경골 전방피질부 접선(tibial anterior cortex line, Fig. 9(c)), 비골 해부학적 축(fibular anatomical axis line, Fig. 9(d)), 비골 후방피질부 접선(fibular posterior cortex line, Fig. 9(e)), 비골 전방피질부 접선(fibular anterior cortex line, Fig. 9(f))을 기준으로 측정하는 방법이 통상적으로 사용되고 있다.^(3,4) 본 연구에서는 경골의 근위부분만을 선택적으로 모델링하였기 때문에 하지전장 x-ray 이미지로부터 얻을 수 있는 경골 및 비골의 해부학적 축을 선정하는데 한계성이 있었다. 또한 ACOA(δ)는 사체 고유의 경골조면(Tuberosity of Tibia, TT)의 고저 위치에 따라 차이가 발생하므로 채취된 사체별로 근소한 차이만 발생하는 경골후방피질부 접선(Fig. 9(b))을 기준으로 PSA(σ)를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 힌지축각(HAA)과 후방경사각(PSA)의 관계

실제 OWHTO 수술 중 전내측피질골에서 3개의 K-wire를 비골방향으로 경사지게 삽입하여 절골면을 형성해가는 과정을 Fig. 10(a)에 제시하였고, 전내측피질골면으로부터 근위 절골면을 상승시켜 개방각(GA(α))을 형성해가는 과정을 Fig. 10(b)에 제시하였다. Fig. 10과 같이 실제 수술상의 OWHTO에 대한 이해를 돕기 위해 저자들이 개발한 Computer Assisted Surgery(CAS)를 이용한 개방각(GA(α)) 및 썬기각(WA(β))의 형성을 Fig. 11에 제시하였다. Fig. 11은 Fig. 8 horizontal plane을 시계방향으로 약 30도 이동한 후 coronal plane 상에서 바라본 근위 경골모델이다. Fig. 11을 통하여 힌지축각(HAA(θ)), 개방각(GA(α)), 썬기각(WA(β)), 후방경사각(PSA(σ)), 전내측피질골 경사각(ACOA(δ)) 등의 관계를 거시적으로 파악할 수 있다. 또한 HAA(θ)와 절골

Fig. 11 Definitions of Anteromedial Cortex Oblique Angle(ACOA(δ)), Hinge Axis Angle(HAA(θ)), Gap Angle(GA(α)), Wedge Angle(WA(β)) on proximal tibia in the case of HAA(θ_2)=45°

(a) Hinge axis angle, HAA(θ_2) = 45°

(b) Hinge axis angle, HAA(θ_3) = 90°

Fig. 12 Difference between HAA(θ_2)=45° and HAA(θ_3)=90° on horizontal plane in OWHTO

(a) Hinge axis angle, $HAA(\theta_2) = 45^\circ$ (b) Hinge axis angle, $HAA(\theta_5) = 90^\circ$ **Fig. 13** Variation of posterior tibial slope angle (PSA(σ)) with respect to the Gap Angle (GA(α))

면 형성 관계에 대한 이해를 돕기 위해 Fig. 12를 제시하였다. Fig. 12(a)는 기존 고식적 수술법인 $HAA(\theta_2)=45^\circ$ 인 경우이고, Fig. 12(b)는 본 논문에서 제안하는 PSA(σ)의 변화를 최소화할 수 있는 $HAA(\theta_5)=90^\circ$ 인 경우이다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 $HAA(\theta_2)=45^\circ$ 인 경우, 전내측피질골선과 힌지 축선의 관계가 거의 평행함을 알 수 있다. PSA(σ) 변화는 $HAA(\theta)$ 뿐만 아니라 GA(α)의 변화에도 크게 영향을 받는다. 실제 OWHTO 수술시 GA(α)는 $10^\circ \sim 20^\circ$ 사이에서 결정된다. 그러나 수술시 GA(α)변화에 따른 PSA(σ) 관계를 정확한 시뮬레이션 예측 후 결정하는 것은 현실적으로 불가능하므로 OWHTO 전문의들은 수술적 경험에 기반을 두고 GA(α)를 결정한다. 그러나 CAS를 이용하여 GA(α)를 측정하고 실제 수술의 경우와 비교해보는 과정은 OWHTO 후유증을 최소화하기 위해 매우

(a) Hinge axis angle, $HAA(\theta_2) = 45^\circ$ (b) Hinge axis angle, $HAA(\theta_5) = 90^\circ$ **Fig. 14** Change of Wedge Angle (WA(β)) with respect to the Gap Angle (GA(α))

중요한 과정이라고 생각한다. Fig. 13과 같이 GA(α)를 $1^\circ \sim 20^\circ$ 까지 1° 씩 증가시켰을 때 $HAA(\theta_5)=90^\circ$ 인 경우는 $HAA(\theta_2)=45^\circ$ 인 경우보다 PSA(σ)의 변화량이 적게 나타났다. GA(α)를 증가시키지 않은 상태에서의 PSA(σ)는 근위경골 시편 10개 모두 약 -2° 에서 13° 까지 각각 다르게 나타났다. Fig. 13에서 사체에 따라 PSA(σ)가 다른 이유는 전내측피질골선(anteromedial cortex line)과 전후방선(anteroposterior line) 간에 이루는 각도인 전내측피질골경사각(ACOA)이 사체마다 선천적으로 차이가 있기 때문이다. $HAA(\theta_2)=45^\circ$ 인 경우와 $HAA(\theta_5)=90^\circ$ 인 경우 모두 GA(α)에 따른 시편의 PSA(σ) 증가량은 1번 시편과 10번 시편을 제외하고 유사한 기울기를 나타냈다. $HAA(\theta_2)=45^\circ$ 인 경우 PSA(σ) 증가량이 가장 컸던 10번 시편은 GA(α)가 1° 씩 증가할 때 PSA(σ)는 0.81° 씩 증가하였고, PSA(σ) 증가량

이 가장 적었던 1번 시편은 $GA(\alpha)$ 가 1° 씩 증가할 때 $PSA(\sigma)$ 는 0.54° 씩 증가하였다. 10개 시편의 평균 기울기는 $GA(\alpha)$ 가 1° 씩 증가할 때 $PSA(\sigma)$ 는 0.68° 씩 증가하였다. 만약 OWHTO 시 실제 수술각 $GA(\alpha)$ 인 $10\sim 20^\circ$ 으로 교정하게 되면 $PSA(\sigma)$ 는 $7^\circ\sim 14^\circ$ 로 증가함을 예측할 수 있다. $HAA(\theta_5)=90^\circ$ 인 경우 $PSA(\sigma)$ 가 증가한 시편은 5번, 6번, 9번이었고, 나머지 7개의 시편은 미세한 증가만 발생하였음을 알 수 있었다. 따라서 $HAA(\theta_5)=90^\circ$ 인 경우 $GA(\alpha)$ 1° 증가 시 평균 0.03° 의 매우 미세한 $PSA(\sigma)$ 증가가 발생되어 실제 OWHTO에서 $GA(\alpha)$ 를 20° 증가시켜도 $PSA(\sigma)$ 는 겨우 0.6° 정도의 증가만 발생되어 술후 $PSA(\sigma)$ 변화에 거의 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

3.2 힌지축각(HAA)과 썰기각(WA)의 관계

개방각($GA(\alpha)$)을 1° 씩 증가시켜 20° 까지 증가시켰을 경우 썰기각($WA(\beta)$)은 Fig. 14와 같은 거동을 나타낸다. 여기서 썰기각($WA(\beta)$)이란 근위 경골의 전내측피질골 절골시 생성되는 상하부 전내측피질골 간에 이루는 각(Fig. 11 참조)으로 Fig. 14(a)는 $HAA(\theta_2)=45^\circ$ 경우이고, Fig. 14(b)는 $HAA(\theta_5)=90^\circ$ 경우이다. Fig. 14(a)의 $HAA(\theta_2)=45^\circ$ 인 경우 $WA(\beta)$ 가 가장 크게 증가한 시편은 6번으로 기울기가 $GA(\alpha)$ 1° 증가 시 $WA(\beta)$ 는 0.266° 씩 증가하였다. 또한 가장 적게 증가한 시편은 8번으로 $GA(\alpha)$ 1° 증가 시 $WA(\beta)$ 는 0.0025° 씩 증가하는 경향을 나타냈으며 10개 시편의 평균은 $GA(\alpha)$ 1° 증가 시 $WA(\beta)$ 는 0.105° 씩 증가하였다. 반면 Fig. 14(b)의 $HAA(\theta_5)=90^\circ$ 인 경우 $WA(\beta)$ 가 가장 크게 증가한 시편은 10번으로 $GA(\alpha)$ 1° 증가 시 $WA(\beta)$ 는 0.697° 씩 증가하여 $GA(\alpha)$ 가 20° 증가하였을 경우 $WA(\beta)$ 는 14.69° 까지 증가하였다. 또한 가장 작게 증가한 시편은 6번 시편으로 $GA(\alpha)$ 1° 증가 시 $WA(\beta)$ 는 0.454° 씩 증가하였다. Fig. 14(a),(b)를 동시에 비교해 보았을 때 기울기 차이가 명백히 나타나는 5개의 시험편은 $HAA(\theta_2)=45^\circ$ 에서 6번, 4번, 3번, 9번, 1번의 순서로 나타났고 $HAA(\theta_5)=90^\circ$ 에서는 역순으로 나타났다. 따라서 $HAA(\theta)$, $GA(\alpha)$, $WA(\beta)$ 는 간단한 삼각함수의 관계가 성립됨을 알 수 있다. 그 상세한 내용은 3.4절에서 언급하기로 하며, 개인간 ACOA 차이를 보정하기 위한 모델은 추후 논문에서 상세히 언급하기로 한다.

Table 1 Anteromedial cortex oblique angles

Cadaver number	ACOA, δ ($^\circ$)
1	43.68
2	45.22
3	29.84
4	29.50
5	38.92
6	25.98
7	45.57
8	44.88
9	33.84
10	48.00

(a) Hinge axis angle, $HAA(\theta_2) = 45^\circ$

(b) Hinge axis angle, $HAA(\theta_5) = 90^\circ$

Fig. 15 Relationship between hinge axis, medial tibial plateau line, and anteromedial cortex oblique line with respect to hinge axis angle

3.3 전내측피질골경사각(ACOA)이 후방경사각(PSA)에 미치는 영향

본 연구에 적용된 총 5구의 사체 양하지 근위경골부는 Table 1에 제시한 바와 같이 전내측피질골경사각(ACOA(δ))이 약 25~48°로 사체 양하지 시편별로 그 차이가 비교적 크게 나타났으며 동일사체의 양하지 좌우측에서도 ACOA의 차이가 나타났다. 그러므로 Fig. 14와 같이 WA(β) 증가량 차이가 현저한 이유는 사체마다 다른 고유의 ACOA(δ)가 직접적으로 영향을 미쳤기 때문이다. Fig. 14(a)에서 기울기가 가장 크게 나타나고, Fig. 14(b)에서 가장 작게 나타났던 6번 시편의 경우 ACOA(δ_6)=25.98°로 가장 낮게 측정되었고, 4번 시편은 ACOA(δ_4)=29.50°, 3번 시편은 ACOA(δ_3)=29.84°, 9번 시편은 ACOA(δ_9)=33.84°, 1번 시편은 ACOA(δ_1)=43°의 순으로 측정되어 Fig. 14 그래프의 기울기와 ACOA(δ)는 1차 함수의 관계가 있음을 예측할 수 있다. 따라서 Fig. 14 그래프 결과와 ACOA(δ)의 관계를 Fig. 15를 통해 설명하고자 한다. Fig. 15는 WA(β)를 측정할 때 기준이 되는 전내측피질골경사선(anteromedial cortex oblique line, 이하 ACOL)과 췌기축(hinge axis)과 PSA(σ)를 측정할 때 기준이 되는 내측 경골고평부 접선(medial tibial plateau line)을 포함한 총 3개의 해부학적 선의 관계를 설명하고 있다. Fig. 15에서 a_1 , a_2 는 췌기축선으로부터 내측 경골고평부 접선까지의 거리이며 a_1 및 a_2 는 각각 후방부 및 전방부의 수선이다. 또한 b_1 과 b_2 는 췌기축에서부터 경골 전내측피질골 경사선까지의 거리를 나타낸다. HAA(θ_2)=45°인 경우와 HAA(θ_3)=90°인 경우를 비교하면, HAA(θ_2)=45°에서 PSA(σ)의 변화가 크게 나타남을 예측할 수 있다. 이러한 관계는 Fig. 15에 제시된 절골단면 상에서의 췌기축과 각각의 선들까지의 거리(a_1 , a_2 , b_1 , b_2) 관계로 풀이할 수 있다. PSA(σ)를 측정할 때 기준이 되는 경골내측고평부(medial plateau) 접선은 Fig. 15에서 (a) HAA(θ_2)=45°인 경우는 평행하지 않고, (b) HAA(θ_3)=90°인 경우에만 평행하다. 경골내측고평부 접선의 전방 부분에서 췌기축까지의 수직거리를 a_1 , 경골내측 고평부 접선의 후방부분에서 췌기축까지 수직거리를 a_2 라고 가정하였을 경우 Fig. 15(b), HAA(θ_3)=90°에서 $a_1=a_2$ 가 성립된다. 따라서 $a_1=a_2$ 조건에서 췌기축을 회전중심으로 개방하면 경골내측 고평부 접선의 전방과 후방이 동일하게 개방되기 때문에 경골췌기축이 90°로 형성된 경우

Fig. 16 Measurement of wedge angle after high tibial osteotomy

는 PSA(σ)의 변화가 거의 나타나지 않게 된다. 반면에 HAA(θ_2)=45°인 경우는 $a_1 \neq a_2$ 이므로 췌기축을 회전중심으로 개방하였을 경우 경골은 후방으로 경사도가 증가하고 결국 PSA(σ)는 증가하게 된다. WA(β)는 PSA(σ)와 상반되게 WA(β_1)=45°인 경우는 $b_1=b_2$ 가 성립되고, WA(β_2)=90°인 경우는 $b_1 \neq b_2$ 가 성립된다. 따라서 P_1 지점에서의 높이 h_1 과 P_2 지점에서의 높이 h_2 가 다르게 형성이 되며 WA(β)가 다르게 나타나게 된다.

3.4 실제 근위경골절골술(HTO)에서 발생하는 경골후방경사각(PSA) 증가의 원천적 방지법

HAA(θ_3)=90°의 조건으로 근위경골절골술(HTO)을 수행하면 PSA(σ)의 변화를 방지할 수 있지만, 대부분의 OWHTO는 경골의 전내측피질골면과 직교하는 방향으로 절골을 수행하여 교정하기 때문에 HAA(θ_2)=45°의 조건으로 수술이 수행되고 있다.^(13,14) 따라서 HAA(θ_2)=45° 조건에서 OWHTO 술 후 발생하는 PSA(σ)의 증가를 방지하기 위한 노력이 필요하다. 본 문제 해결을 위해 타 연구그룹^(15,16)에서는 테이퍼 고정물을 이용하여 인위적인 WA(β) 변화를 유도한 후 수술을 진행하고 있으나, 술 후 PSA(σ) 변화를 방지하는데 크게 도움이 되지는 못하는 실정이다. 그 이유는 본 연구에서 추구하는 HAA(θ_3)=90°의 조건으로 수술이 시행되지 않고, 고식적 방법인 HAA(θ_2)=45°의 조건에서 테이퍼 고정물을 이용한 절골틈새, 즉 WA(β)의 인위적 변형만을 추구하기 때문에 근본적으로 PSA의 변화를 방지하기보다는 단편적인 술기의 미봉책으로 그 결

과가 나타나는 사례가 많기 때문이다. 따라서 PSA(σ)의 변화를 방지하기 위해서는 경골의 근위부와 원위부를 분리시켜 개방한 후 PSA(σ)가 변화하지 않는 WA(β)가 산출되어야 한다. 본 연구에서는 PSA(σ)가 변화하지 않는 WA(β)의 조건을 파악하기 위해 HAA(θ_5)=90°일 때의 WA(β) 값을 구하여 이를 HAA(θ_2)=45°에 반영함으로써 PSA(σ)의 변화를 방지할 수 있음을 주장하고자 한다. WA(β)는 다음과 같은 간단한 식을 이용하여 술전에 미리 예측할 수 있다. Fig. 15 및 Fig. 16을 함께 살펴보면, 경골전내측접선의 전방부에서 췌기축까지의 수직거리를 x_1 , 경골전내측접선의 후방부에서 췌기축까지의 수직거리를 x_2 라고 하였을 때, Fig. 16의 GA(α)에 따라 발생하는 높이 h_1 , h_2 는 식 (1), (2)와 같다.

$$h_1 = x_1 \sin \alpha \quad (1)$$

$$h_2 = x_2 \sin \alpha \quad (2)$$

또한 Fig. 15의 P_1 및 P_2 지점까지의 거리를 l 이라고 할 때 WA(β)는 식 (3)을 이용하여 간단히 구할 수 있다.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{(\sin \alpha (x_2 - x_1))}{l} \right) \quad (3)$$

이상의 내용들을 종합하여 OWHTO 시 PSA(σ)의 변화를 방지하기 위한 수술계획을 수립해보면, 1) PSA(σ) 변화를 방지하기 위해 먼저 췌기축 90°의 환경에서의 이상적인 WA(β)를 산출해야한다. 즉, WA(β)를 구하기전 CAS를 이용하여 환자의 외반 또는 내반 변형에 따라 HAA(θ_5)=90°의 수술법을 적용하여 적절한 교정각을 선택한다. 2) CT 이미지 통해 3D 재건된 환자의 근위경골을 CAS를 이용하여 경골전내측접선과 췌기축까지의 거리 x_1 과 x_2 를 각각 측정하고 식 (3)을 이용하여 WA(β)를 산출한다. 3) HAA(θ_2)=45° 환경에서 환자의 내반 및 외반 정도에 따라 새롭게 교정각을 선택하고, 식 (3)을 통하여 산출된 WA(β)가 적용된 고정물로 개방형 췌기 경골근위절골술을 수행한다. 이상의 내용 외에도 본 저자는 ACOA(δ), HAA(θ), GA(α), WA(β) 등의 상관관계를 이용하여 3차원 공간에서의 기하학적 함수 관계를 이용한 HTO Tetragonal Model (HTM) 및 Woong's Eq. 등을 개발하였다. 이에 대해서는 추후의 논문에서 상세히 거론하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 개방형 췌기 근위경골절골술(OWHTO) 후 발생하는 근위경골 내측고평부의 후방경사각(PSA) 변화를 사전에 방지하기 위한 Computer Assisted Surgery를 개발하고 가상절골술을 수행하였다. 그 결과 (1) 힌지축각(HAA(θ))과 후방경사각(PSA(σ))의 관계, (2) 힌지축각(HAA(θ))과 췌기각(WA(β))의 관계, (3) 전내측피질골경사각(ACOA(δ))과 후방경사각(PSA(σ))의 관계를 파악할 수 있었으며, 실제 근위경골절골 시 발생하는 경골후방경사각 증가를 원천적으로 방지할 수 있는 방법에 대해 제시할 수 있었다. 그 세부적인 사항들은 다음과 같다.

(1) 힌지축각(HAA)과 후방경사각(PSA)의 관계에서 HAA(θ_5)=90°인 경우에는 실제 OWHTO 경우처럼 GA(α)=20°로 증가시켜도 PSA(σ)는 0.6° 정도의 미세한 증가만 발생되어 술후 PSA(σ) 변화에 거의 영향을 미치지 않았다.

(2) 힌지축각(HAA(θ))과 췌기각(WA(β))의 관계에서 HAA(θ_2)=45°와 HAA(θ_5)=90°는 서로 역순의 관계가 성립되었다. 이를 통해 HAA(θ), GA(α), WA(β)는 삼각함수의 관계가 성립됨을 알 수 있었다.

(3) 전내측피질골경사각(ACOA(δ))과 후방경사각(PSA(σ))의 관계를 살펴보면, HAA(θ_5)=90°일 때 췌기축을 중심으로 개방하면 경골내측 고평부 접선의 전방과 후방이 일정하게 개방되기 때문에 PSA(σ)의 변화가 거의 나타나지 않게 된다. 반면에 HAA(θ_2)=45°인 경우는 경골고평부 후방으로 경사도 증가가 발생된다.

4) 후방경사각(PSA(σ)) 변화를 방지하기 위해 HAA(θ_2)=45°의 환경에서의 이상적인 췌기각(WA(β))을 산출하고 CAS를 이용하여 경골전내측접선과 췌기축까지의 거리를 측정한 후 WA(β)를 산출한다. 이후 HAA(θ_2)=45°에서 내반 및 외반 정도에 따라 새롭게 교정각을 선택하고, 산출된 경골췌기각이 적용된 고정물로 개방형 췌기 경골근위절골술을 수행한다.

후 기

본 연구는 보건복지부 보건의료연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임. (과제고유번호 : A110657)

참고문헌

- (1) Noyes, F. R., Goebel, S. X. and West, J., 2005, "Opening Wedge Tibial Osteotomy : The 3-Triangle Method to Correct Axial Alignment and Tibial Slope," *American Journal of Sports Medicine*, Vol.33, No.3, pp.378~387.
- (2) Song, E. K., 2004, "High Tibial Osteotomy for Osteoarthritis of the Knee," *J. of Korea Orthop. Assoc.*, Vol.39, No.1, pp.104~107.
- (3) Yoo, J. H., Chang, C. B., Shin, K. S., Seong, S. C. and Kim, T. K., 2008, "Anatomical Reference to Assess the Posterior Tibial Slope in Total Knee Arthroplasty : A Comparison of 5 Anatomical Axes," *The Journal of Arthroplasty*, Vol.23, No.4, pp.586~592.
- (4) Brazier, J., Migaud, H., Gougeon, F., Cotten, A., Fontaine, C. and Duquennou, A., 1996, "Evaluation of Methods for Radiographic Measurement of the Tibial Slope. A Study of 83 Healthy Knees," *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*, Vol.82, No.3, pp.195~200.
- (5) Hohmann, E., Bryant, A. and Imhoff, A., 2006, "The Effect of Closed Wedge High Tibial Osteotomy on Tibial Slope : a Radiographic Study," *Knee Surg. Sports Traumatol Arthrosc.*, Vol.14, pp.454~459.
- (6) Kawakami, H., Sugano, N. and Yonenobu, 2004, "Effect of Rotation on Measurement of Lower Limb Alignment for Knee Osteotomy," *J. Orthop. Res.*, Vol.22, pp.1248~1253.
- (7) Kendoff, D., Citak, M. and Pearle, A., 2007, "Influence of Lower Limb Rotation in Navigated Alignment Analysis: Implications for High Tibial Osteotomies," *Knee Surg. Sports Traumatol Arthrosc.*, Vol.15, pp.1003~1008.
- (8) Shaw, J.A., Dungy, D.S., and Arsht, S.S., 2004, "Recurrent Varus Angulation After High Tibial Osteotomy: An Anatomic Analysis," *Clin. Orthop. Relat. Res.*, Vol.420, pp.205~212.
- (9) Marti, C.B., Gautier, E., Wachtl, S.W. and Jakob, R.P., 2004, "Accuracy of Frontal and Sagittal Plane Correction in Open-wedge High Tibial Osteotomy," *Arthroscopy*, Vol.20, pp.366~372.
- (10) Bae, D. K., Song, S. J., Yoon, K. H. and Kwak, S. J., 2009, "A Comparative Study of the Navigated and Radiographic Measurements in Open and Closed Wedge High Tibial Osteotomy with Computer Assisted Surgery," *J. Korean Orthop. Assoc.*, Vol.44, No.5, pp.499~506.
- (11) Song, E.-K., Seon, J.-K., Park, S.-J. and Jeong, M.-S., 2009, "One-Stage Open-Wedge High Tibial Osteotomy and Anterior Cruciate Ligament Reconstruction," *J. Korean Orthop. Assoc.*, Vol.44, No.5, pp.548~555.
- (12) Wang, J. H., Bae, J. H., Lim, H. C., Shon, W. Y., Kim, C. W. and Cho, J. W., 2009, "Medial Open Wedge High Tibial Osteotomy: The Effect of the Cortical Hinge on Posterior Tibial Slope," *The American Journal of Sports Medicine*, Vol.37, No.12, pp.2411~2418.
- (13) Flower, P. J., Tan, J. L. and Brown, G. A., 2000, "Medial Opening Wedge High Tibial Osteotomy : How I Do It," *Operative Techniques in Sports Medicine*, Vol.8, No.1, pp.32~38.
- (14) Franco, V., Cerullo, G., Cipolla, M., Gianni, E. and Puddu, G., 2005, "Osteotomy for Osteoarthritis of the Knee," *Current Orthopaedics*, Vol.19, No.10, pp.415~427.
- (15) Kendoff, D., Lo, D., Goleski, P., Warkentine, B., Loughlin, P.F.O. and Pearle, A.D., 2008, "Open Wedge Tibial Osteotomies Influence on Axial Rotation and Tibial Slope," *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, Vol.16, No.5, pp.904~910.
- (16) Hohmann, E. and Bryant, A., 2007, "Closing or Opening Wedge High Tibial Osteotomy : Watch Out for the Slope," *Operative Techniques in Orthopaedics*, Vol.17, No.1, pp.38~45.