

Osteotomy for Osteoarthritis of the Knee

항법 장치 시스템을 이용한 개방형 근위 경골 절골술

선종근 • 김하성 • 김도연 • 송은규[✉]

화순전남대학교병원 관절센터, 정형외과

Navigation Guided Open Wedge High Tibial Osteotomy

Jong-Keun Seon, M.D., Ph.D., Ha-Sung Kim, M.D., Do-Youn Kim, M.D., and Eun-Kyoo Song, M.D., Ph.D.[✉]

Department of Orthopaedic Surgery, Center for Joint Disease, Chonnam National University Hwasun Hospital, Hwasun, Korea

Navigation systems are currently being widely used in orthopedic surgery. The mechanical axis alignment can be judged accurately via a navigation system. High tibial osteotomy (HTO) is a procedure that aims to change the mechanical axis of the lower limb, transferring the body weight across healthy articular cartilage. Several studies have shown that accurate correction is the leading predictor for success. And, by using a navigation system, accurate multiplane measurements of the lower limb alignment can be performed intraoperatively in real time, and alignment adjustments can be made as the surgeon desires. Compared with the conventional cable-method, computer navigation significantly improves the accuracy of postoperative leg axis, reduces correction variability with fewer outliers, and reduces radiation time. This paper reviews the advantages, clinical results, complications, pitfalls, and posterior tibial slope control in navigation guided open wedge HTO.

Key words: navigation, computer-assisted surgery, knee, osteotomy

서 론

근위 경골 절골술(high tibial osteotomy, HTO)은 상대적으로 젊은 환자군에서 내반변형이 동반된 단일구획 골관절염에 대하여 정립된 치료방법으로 최근에는 연골 손상뿐만 아니라 박리성 골연골염(osteochondritis dissecans)이나 대퇴과의 골괴사(osteonecrosis)에 이르기까지 다양한 영역에서 좋은 치료 결과를 보고하고 있다.¹⁻⁶⁾ 성공적인 HTO를 위해서는 적절한 환자의 선택, 정확한 교정각을 위한 수술 전 계획과 정밀한 수술 술기, 적절한 재활 치료의 중요성이 강조된다.⁷⁾ 교정각을 정하는 방법으로 수술 전 방사선 사진상 교정각과 췌기(wedge)의 크기를 측정하는 방법, 수술 중 고관절 중심과 족관절 중심을 잇는 케이블(cable) 선을 이용

하는 방법 등이 있지만, 방사선 사진에서 하지의 회전에 의한 부정확한 교정각의 측정,⁸⁾ 방사선 사진 계측 시의 영상 시차,⁹⁾ 절골면의 위치,¹⁰⁾ 절골할 경골 직경의 차이¹¹⁾ 등으로 고식적 방법의 한계에 대해 보고되고 있다. 최근 수술의 정확성, 정밀성, 재현성을 높이기 위해 컴퓨터를 이용한 수술방법(computer assisted orthopaedic surgery, CAOS)이 개발되었다. 이로 인해 수술 중 하지 기계적 축의 실시간 모니터링이 가능해졌고 과교정 및 저교정으로 인한 오차범위를 줄여 정확한 교정을 할 수 있게 되었으며 수술 중 기록(documentation)이 가능하여 연구 자료로 활용될 수 있게 되었다.

컴퓨터를 이용한 슬관절 수술은 1990년대 인공관절 치환술에 처음 도입되었으며 1997년에는 Saragaglia가 Orthopilot® (B/BRAUN-Aesculap, Tuttlingen, Germany)을 이용하여 영상이 없이도 수술을 할 수 있는 항법 장치 시스템(navigation system)을 개발하였다. 컴퓨터 수술 시스템은 크게 수행행위에 따라 수동형과 능동형으로, 영상의 필요성에 따라 영상 비의존형 장치(image free system)와 영상 의존형 장치(image based system)로 구분할 수

Received November 14, 2013 Revised January 22, 2014

Accepted March 21, 2014

[✉]Correspondence to: Eun-Kyoo Song, M.D., Ph.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Chonnam National University Hwasun Hospital, 322 Seoyang-ro, Hwasun-eup, Hwasun-gun 519-763, Korea

TEL: +82-61-379-7676 FAX: +82-61-379-7681 E-mail: eksong@chonnam.ac.kr

있다. 수동형은 수술이 술자에 의하여 전적으로 시행되고 컴퓨터 시스템은 수술을 유도만 하는 형태이며 대표적으로 항법 장치 시스템을 이용한 수술을 들 수 있다. 능동형은 수술 준비 및 시행 과정의 일부 또는 전부를 컴퓨터 시스템이 시행하는 형태로서 대표적으로 ROBODOC® (Integrated Surgical Systems, Davis, CA, USA)을 이용한 수술을 들 수 있다. 본 종설에서 기술하고자 하는 항법 장치 시스템이란 수동형, 영상 비의존형 장치로서 컴퓨터에 수술을 위한 환자의 정보를 등록시켜 주면 컴퓨터가 이를 이용하여 수술 중 필요한 정보를 제공해 주며, 술자는 컴퓨터의 유도에 따라 골 절제를 하거나 인대 재건술에서 이식건의 터널위치를 결정할 수 있게 된다. 컴퓨터를 이용한 항법 장치 시스템으로는 광학적 항법 장치 시스템(Fig. 1), 전자기장 항법 장치 시스템(Fig. 2), 그리고 최근 초음파를 이용한 항법 장치 시스템 등이 있으며 이들은 실험적으로 대부분 1 mm 혹은 1도 미만의 오차 범위를 갖는다고 보고되고 있다.¹²⁻¹⁵⁾

광학적 항법 장치 시스템의 장점은 빠르고 정확도가 높다는 것이다. 단점으로는 적외선 카메라의 시야를 가리지 않아야 하기 때문에 수술자 및 수술 보조자의 위치 선정에 신경을 써야 하며 수술실의 조도에도 영향을 받을 수 있다는 점이다. 전자기장 항법 장치 시스템은 기존의 광학적 항법 장치 시스템에 비하여 추적자(tracker)가 상대적으로 작아 기존의 수술 절개를 이용하여 장착할 수 있고 장비나 손에 의해 카메라와 추적자가 가려지는 현상이 없는 장점이 있으나 강자성 금속성 기구에 영향을 받을 수 있어 특수한 수술 기구를 사용하여야 하는 단점이 있고 수술실 환경에서 사용되는 여러 전자 장치와 기계들에 의한 전자기장 영향은 여전히 수술실 환경 아래서 그 정확성에 대한 불신이 있는 것이 사실이다. 실험적 환경에서 전자기장 항법 장치 시스템도 비교적 정확함이 확인되었지만¹⁶⁾ 실제로 수술실 환경에서 두 항법 장치 시스템은 약 15%에서 3도 이상 기계적 축의 측정값의 차이를 보였는데 이는 실제 환자에서 보이는 해부학적 등록지점

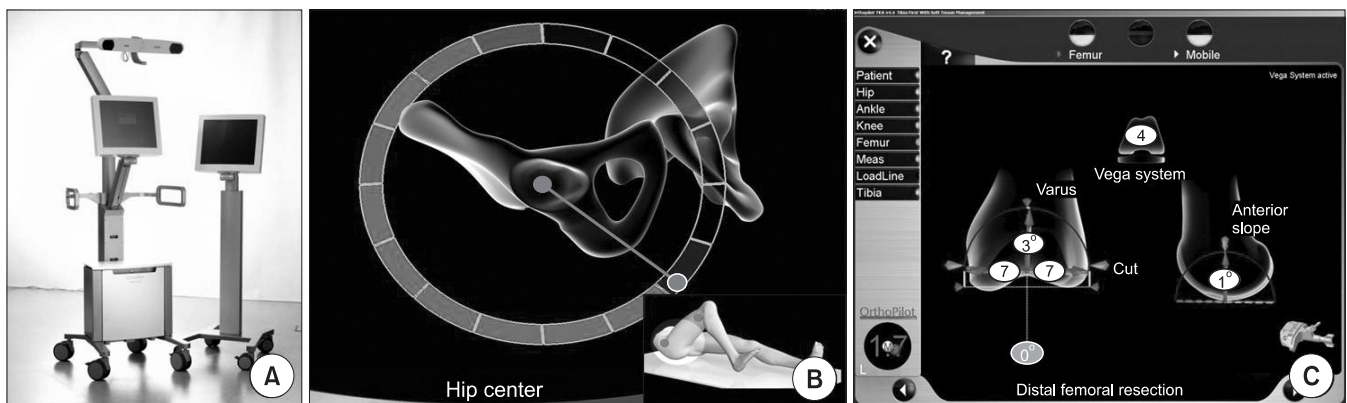


Figure 1. Optical navigation system. Appearance (A), monitor (B, C).

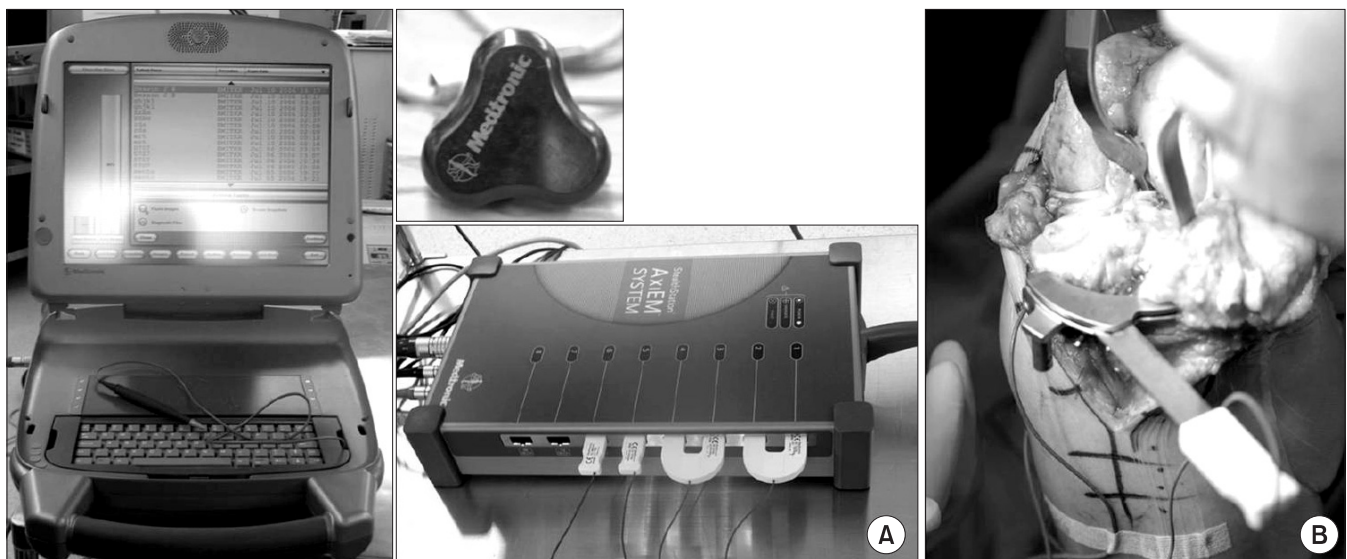


Figure 2. Electromagnetic navigation system. (A) A structure: monitor, detector. (B) Intraoperative instrument.

의 모호함과 이에 따른 등록의 오류, 등록 오류 시 기계적 축에 영향을 더 많이 받는 전자기장 항법 장치 시스템의 등록 시스템 등에 기인하는 것으로 생각된다. 현재까지 광학적 항법 장치 시스템이 가장 보편화되고 10년 이상의 임상 경험을 가지고 있어 좀 더 인정되고 있으며¹⁷⁾ 두 항법 장치 시스템이 모두 잘못된 등록에 의하여 그 정확성이 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었고 이러한 부정확성은 전자기장 항법 장치 시스템에서 보다 높았다.¹⁸⁾ 최근 수년 동안 항법 장치 시스템은 정형외과 수술 분야에서 폭넓게 사용되고 있어 이를 통해 변형에 대한 세밀한 조사와 수정이 가능하며, 수술 도중에 실시간으로 이에 대한 교정을 할 수 있게 되었다.¹⁹⁾

저자는 항법 장치 시스템을 이용한 개방형 HTO (open-wedge HTO)의 소개, 수술 방법 및 임상 적용, 수술 시 주의할 사항 및 경골 후방 경사각의 조절, 그리고 임상결과에 대하여 기술하고자 한다.

본 론

1. 개요

HTO는 활동적이고 슬관절 가동성이 좋은 비교적 젊은 환자군에서 내반변형이 동반된 단일구획 골관절염에 대한 정립된 치료방법으로서 또한 박리성 골연골염 및 대퇴과의 골괴사 등과 같은 국소적인 내측 골연골의 결함이 있는 경우의 치료에도 이용될 수 있다.²⁴⁾

초기에는 외측에서 시행하는 폐쇄형 HTO가 선호되었으나 현재는 더 간단하며, 관상면과 시상면 모두의 조절이 가능한, 내측에서 시행하는 개방형 HTO가 더욱 많이 시행되고 있고, 개방형 HTO는 근위 경비골관절 및 비골신경 등의 손상을 피할 수 있다는 장점이 있다.¹⁻³⁾ HTO의 장기 추시 결과는 교정각의 정도와 밀접하게 연관되어 있는데 수술 중 하지의 기계적 축이 부정확하게

측정되면 저교정 또는 과교정을 초래할 수 있으며 술자들은 이러한 교정의 정도를 개인적인 경험에 근거하여 해결해 나가야만 했다.^{5,20)} 그러나 지난 몇년간 항법 장치 시스템들이 정형외과의 수술 영역에 도입되기 시작하였으며 이러한 시스템의 개발에 힘입어 기계적 축의 변화에 대한 더욱 정확한 평가와 수술 중 교정된 축의 값들에 대한 실시간 조절이 가능하게 되었다.²¹⁻²³⁾

현재까지 여러 연구들이 보고되었지만 장기 추시 결과상 가장 기능적이고 성공적인 값을 보이는 이상적인 교정 정렬 값에 대한 결론은 아직 없는 상태이며 대부분의 연구에서 외반에 대한 약간의 과교정이 교정의 지속과 내반 변형의 재발을 막기 위해 필수적인 것으로 밝혀졌다.^{5,6)} 이는 정상적인 정렬을 보이는 슬관절에서도 보행 시 체중 부하의 60%가 내측 구획을 통하여 이루어지기 때문에 약간의 외반 과교정을 시행을 목표로 교정을 시행하는 것이 추천된다.²⁾

추천되는 교정 값은 기계적 축에서 2-5도의 외반,²⁰⁾ 또는 기계적 축이 경골의 중심점을 기준으로 약 10%-35% 외측 지점을 지날 때로 다양하다.⁵⁾ HTO가 시행된 지 수십 년이 지났음에도 불구하고 아직 이상적인 축에 대한 명확한 값은 제시되지 않고 집단의들이 의도한 교정 각과 골절술 후 측정되는 실제 교정된 각이 다르며²⁴⁾ 더욱이 외반 정렬된 HTO 후의 실제 체중 부하의 분산 정도는 아직 명확하게 규명되지 않았다.

하지의 기계적 축에 대한 부정확한 평가는 저교정 또는 과교정의 가장 중요한 원인으로서 지금까지 수술 중에 시행하였던 하지 정렬 축의 평가방법은 다소 대략적인 방법으로 부정확하게 평가되어 왔다. 주로 쓰이는 방법은 케이블을 이용한 술기로 정렬 막대나 Bovie cable 등과 같은 일직선상의 방사선 비투과성 물체를 이용하여 고관절 중심과 족관절 중심을 지나게 위치시킨 후 슬관절 부위를 지나는 정도를 영상 증폭 장치(fluoroscopy)를 이용하여 평가한다(Fig. 3).²⁵⁾ 이 외의 대체 방법으로는 방사선 비투과성



Figure 3. The cable method for assessment of intraoperative leg alignment is not accurate because it depends on limb rotation and alignment guide position.

참조선(radio-opaque reference line)들이 있는 격자판을 이용하거나 수술 중 고식적 방사선 사진을 통해 교정 각도를 측정하는 방법이 있으나 이러한 방법들은 하지 회전, 정렬의 기준 자세,²⁶⁾ 그리고 엑스레이의 증폭 정도 및 품질,²¹⁾ 빛의 투사각도²³⁾ 등에 영향을 받아 정확도가 일정하지 않다는 단점이 있다.

2. 수술 방법

현재 컴퓨터 항법 장치 시스템은 카메라와 추적 시스템(tracker system)으로 구성되어 있다. HTO 시에 컴퓨터용 소프트웨어를 제공하는 회사들은 여러 곳이 있으며 각각 요구되는 하지의 위치 및 자세는 다양하다. 여러 문헌에서 보고되고 있는 항법 장치 시스템으로는 OrthoPilot™ (B/BRAUN-Aesculap),²⁷⁻³⁰⁾ VectorVision™ (Brainlab Inc., Heimstetten, Germany)³¹⁾ 그리고 SurgiGATE™ fluoroscopy based navigation module (Medivision, Oberdorf, Switzerland) system²¹⁾이 있으며, 저자들은 HTO version 1.4 OrthoPilot™ navigation system (B/BRAUN-Aesculap)을 사용

한 경험에 대해 논의하겠다. 항법 장치의 추적기들은 자창(stab wound)을 통해 대퇴골과 경골에 고정하고, 고관절, 슬관절, 족관절의 관절 운동을 시행하여 항법 장치 시스템이 각 관절의 중심점을 찾도록 등록한다. 이후 탐침(probe)을 이용하여 슬관절 주위의 해부학적인 구조물(근위 경골의 관절면, 원위 경골, 경골 결절, 대퇴골 내·외상과 등)을 피부를 통해 등록한다. 그리하여 컴퓨터 항법 장치 시스템은 수술 전 하지의 모델을 형성하고 기계적 축을 계산해낸다.

이러한 과정을 통해 수술 전 내반 변형의 각도와 경골 고평부에서의 기계적 축의 교차지점에 대한 평가 및 현재 관절의 굴곡 범위에 대한 정보를 제공하며 이를 바탕으로 개방형 HTO를 시행할 수 있게 한다(Fig. 4A).

개방형 HTO를 시행하기 위해 비스듬한 사선방향으로 경골 결절의 절골술과 함께 개방형 불완전 외반 췌기 형식의 절골술을 시행한다. 절골술은 내측 관절선(normal posterior slope)에서 3 cm 원위부 내측 피질에서 시작하여 피질의 외측 5 mm를 남기면서

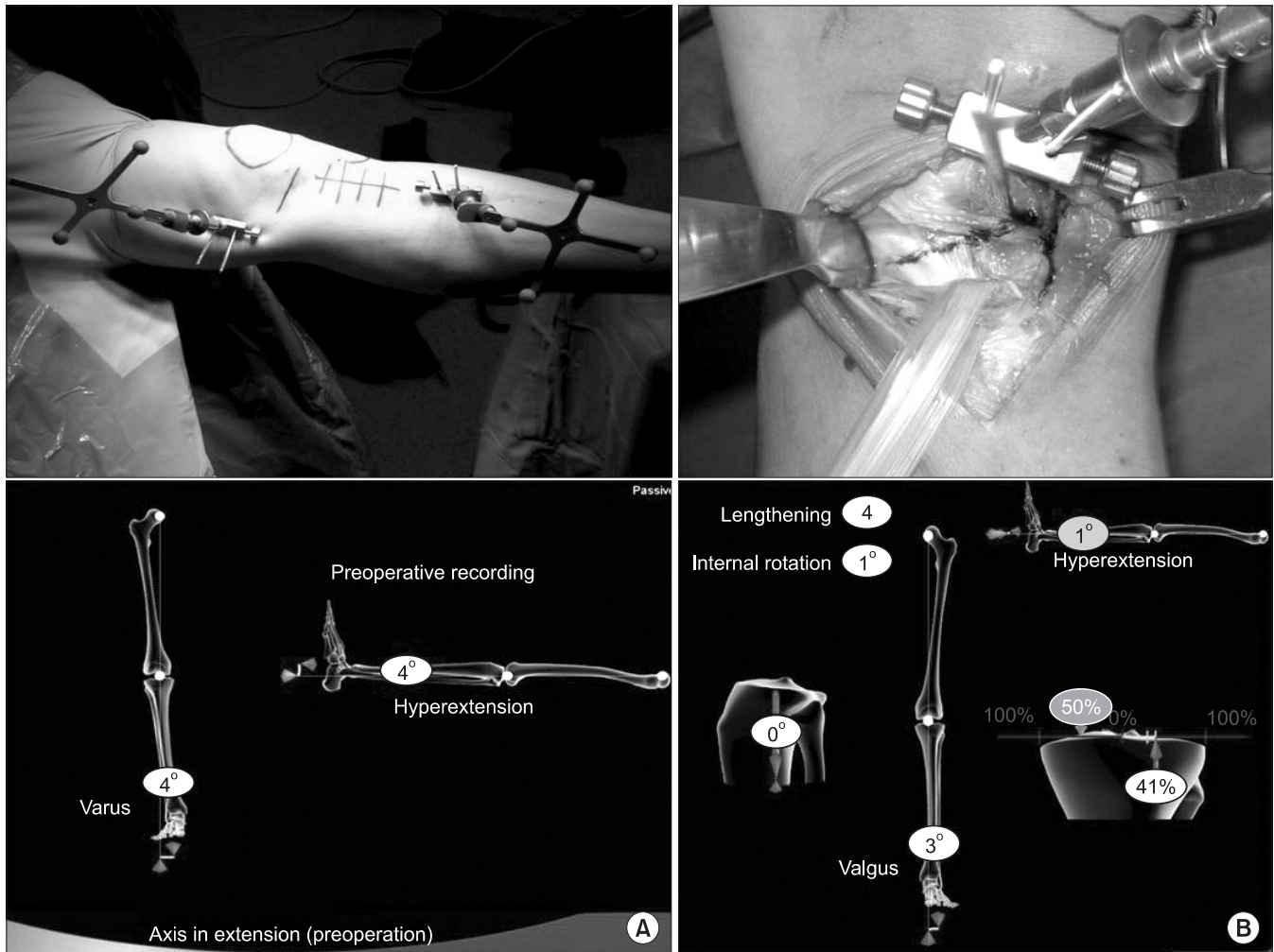


Figure 4. Intraoperative leg alignment measured using a navigation system before (A) and after valgus opening (B). The mechanical axis was adequately corrected without increasing posterior slope.

비골두를 삼등분하였을 때 근위부 약 1/3 지점을 향하여 진행한다. 절골선이 상방으로 이동하여 관절 내 골절로 진행하는 것을 방지하기 위해서 3개의 끌(chisels)들을 단계별로 주입하면서 조심스럽게 외반화(valgization)을 시행하여 관절 내 골절의 발생을 피해야 한다. 이 때 개구부는 췌기 형태로 내측 전방부 개방 정도는 내측 후방부 개방 간격의 대략 67%가 되도록 하여야 하는데³²⁾ 이는 의도치 않는 경골 후방 경사각의 증가를 막기 위해서이다. 기계적 축은 모든 과정 내내 모니터를 통해 지속적으로 관찰할

수 있으며, 이를 통해 평균 3도의 외반(2-4도의 외반술)을 교정 목표로 삼아 수술을 시행하였다(Fig. 4B). 계획된 교정각이 얻어졌을 때 절골술은 고정기구를 이용하여 고정할 수 있으며 저자는 2개의 개방형 췌기모양 금속판(open wedge plates) (Aescula® open wedge plate; Medyssey, Dongducheon, Korea) (Fig. 5)을 사용하였다. 후방 금속판은 가능한 한 경골 근위부 후내측에 위치시키고, 전방 금속판은 비스듬하게 경골 절절 절골술을 시행한 부위 후방쪽에 위치시킨다. 원래의 경골 후방 경사각을 유지하기 위해서,

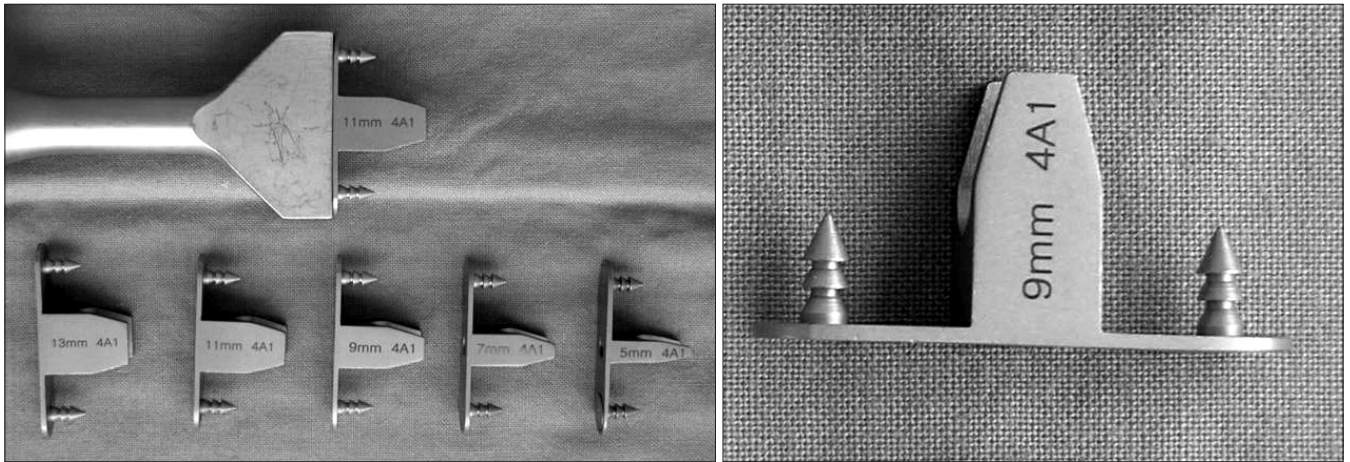


Figure 5. Aescular open wedge plate system.

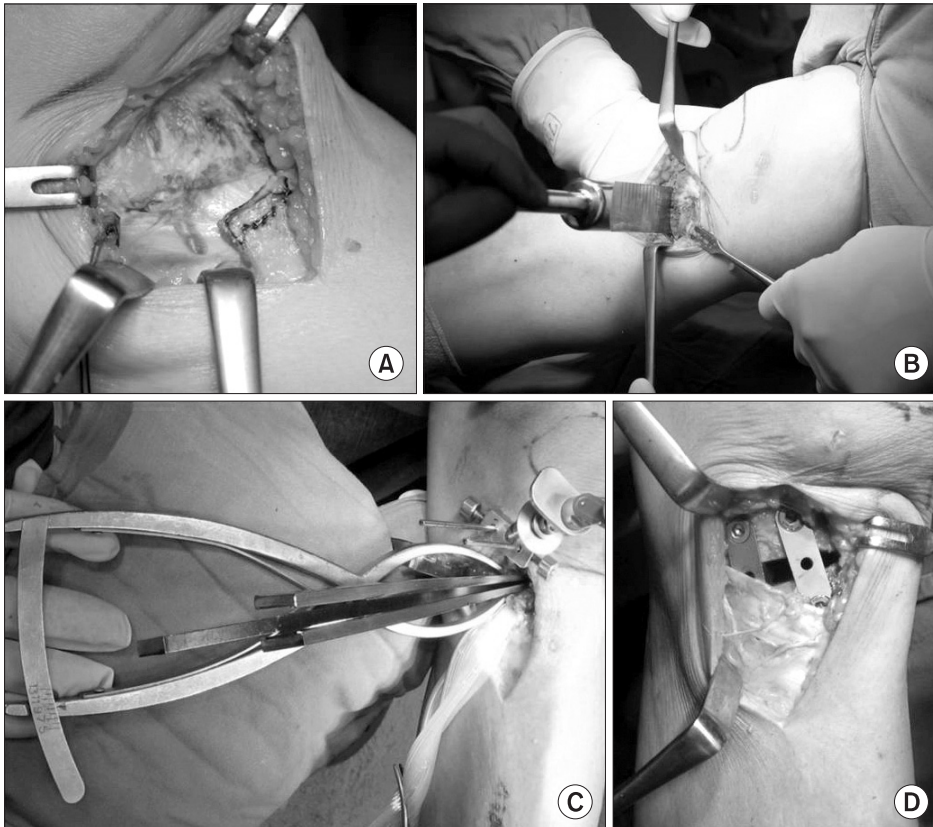


Figure 6. The surgical procedures. (A) The Pes anserius was retracted and the superficial medial collateral ligament was clearly visualized. (B) Oblique tibial tuberosity osteotomy. (C) Valgization by the stepwise insertion of three coupled chisels, and measurement of the opening gap. (D) Wedge shaped opening and open wedge plates.

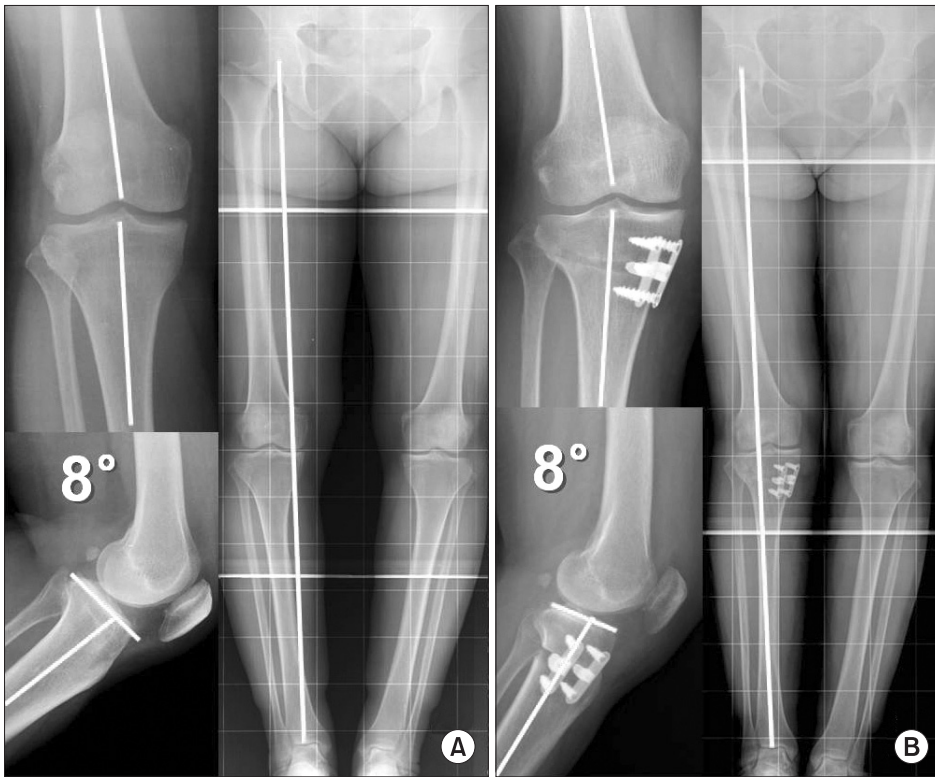


Figure 7. Preoperative (A) and post-operative (B) radiographs showing satisfactory alignment without change in posterior slope; 6 mm anterior and 9 mm posterior plates were used.

전방 개방 간격이 후방 개방 간격의 대략 67%가 되어야 하므로 전방 금속판은 후방 금속판에 비해 약 70% 정도로 짧아야 한다 (Fig. 6, 7). 1 mm의 전방 간격의 오차는 경골 후방 경사각에 대략 2도의 차이를 유발할 수 있다. 성공적인 항법 장치를 이용한 HTO를 위하여 주의해야 할 몇 가지 사안이 있다. 첫째, 가장 중요한 것은 등록과정이다. 등록과정은 오차 범위를 줄이기 위해 아주 정확해야 하며 집도의들은 정확한 정보를 얻기 위하여 충분한 시간과 노력을 들여 해부학적 등록 및 기계적 축을 등록해야 한다. 둘째, 술 전 체중 부하 영상촬영과 수술 중 항법 장치의 비체중 부하 영상촬영 상에 하지 축의 차이가 존재할 수 있기 때문에 수술 전 내반 및 외반 부하 항법 장치의 촬영을 하여 하지 축의 변화를 검사하는 것도 중요하다. 더욱이 슬관절의 내반 혹은 외반 변형으로 인하여 내측과 외측의 연부조직 상태가 다를 수 있으며, 술 후 시행하는 항법 장치의 내반과 외반 부하 촬영 검사와 발땀꿈치를 밀면서 축의 변화를 관찰하는 것으로 체중 부하 시 술 후 안정성과 측부인대 상태, 그리고 하지의 기계적 축에 대하여 예상할 수 있다.³³⁾ 셋째, 수술 중 정확히 하지의 기계적 축을 얻고, 수술 후 경골 후방 경사각의 증가를 예방하기 위하여 슬관절 최대 신전 자세를 얻는 것은 절대적으로 필요하다.

3. 임상적 적용

퇴행성 관절염에서 개방형 HTO는 고정기구의 발달로 최근 많이 시행되고 있다. 교정각의 크기를 정하는 고식적인 방법들은 여러 가지가 있지만, 방사선 사진상 하지의 회전에 의한 교정각 측

정의 부정확성, 방사선 사진 계측 시 영상시차, 절골면의 위치, 경골 직경의 차이 등으로 고식적 방법의 한계에 대해 보고되고 있다.^{21,26)}

이에 최근 수술의 정확성, 정밀성, 재현성을 높이기 위해 항법 장치 시스템을 이용하여 개방형 근위 경골 절골술이 시행되고 있으며, 좋은 임상적 결과가 보고되고 있다.³³⁾ 항법 장치 시스템을 이용한 개방형 HTO는 수술 중에 기계적 축을 정확히 측정할 수 있어 하지 축 정렬을 수술자가 원하는 대로 교정할 수 있으며, 방사선 노출 시간도 현저히 감소시킬 수 있는 장점이 있다.²⁷⁾ 수술 후 하지의 기계적 축에 대한 연구에서 컴퓨터 단층촬영 scan을 통해 측정된 기계적 축을 기준으로 항법 장치 시스템을 이용한 방법과 고식적인 케이블 선 방법(cable line method)을 비교할 때 항법 장치 시스템이 훨씬 더 우수한 결과를 보여주었으며, 교정각에 대한 기계적 축의 재현성(reproducibility)을 비교한 연구에서도 고식적인 방법이 71%, 항법 장치 시스템을 이용한 방법이 96%로 항법 장치 시스템 방법에서 더 우수한 재현성을 보여주었다.^{34,35)} 사체 연구에서도 HTO에서 컴퓨터 항법 장치가 수술 중 측정의 정확도와 하지 축 교정의 정확도를 향상시키고 방사선 노출 시간도 단축시킬 수 있음이 증명되었고^{32,34-36)} 또한 Baur와 Schuh,³⁵⁾ Mauer와 Wassmer,³⁶⁾ 그리고 Song 등³⁴⁾의 연구 또한 OrthoPilot™ navigation system (B/BRAUN-Aesculap)을 이용 시 원하는 교정각을 보다 정확하게 얻을 수 있고 오차 범위 및 이상치(outliers)를 줄이며 교정의 정밀도를 증가시킨다고 보고하고 있다. 이처럼, 항법 장치 시스템을 이용한 개방형 HTO는 수술 중 정밀하고 연속

적인 하지 정렬의 확인이 가능하며, 수술 전 계획의 부족한 점을 보완할 수 있고, 술 전 목표로 하는 최적의 교정 값을 얻을 수 있는 방법으로 생각된다.

과거에는 인대 불안정성이 있는 환자에서 HTO가 적응이 되지 않았으나 최근 인대 불안정성 환자에서의 수술 시행에 대해 보고되고 있다.⁶⁾ 몇몇 저자들은 인대 재건술을 먼저 시행한 후 순차적으로 개방형 HTO를 시행하거나 한 번에 시행한 것을 보고하고 있는데³⁷⁾ 수술 중 술자는 경골 후방 경사각이 변화하는 것을 막기 위해 여러 측면에서 신중을 기해야 하고 시상 및 관상 정렬에 대해 항법 장치 시스템을 이용하여 정확한 시상 및 관상 교정각을 얻어야 한다. 더욱이 경골 후방 경사각의 변화는 불안정한 슬관절에서 시상 정렬에 중요한 요소라고 알려져 있는데 만성적인 후방 십자인대 결손, 전반슬, 과신전 내반슬 환자들에서 HTO로 인한 관상면 및 시상면의 양평면에서의 교정은 널리 사용되고 있는 술식이다.³⁸⁾

가장 이상적인 경골 후방 경사각 및 기계적 축의 교정 값과 관련된 생역학적인 연구 및 조사가 더욱 필요할 것으로 생각되며 항법 장치 시스템은 이를 위한 좋은 도구로 생각된다.

4. 주의점

내측 개방형 HTO는 외측 폐쇄형 HTO에 비하여 더 적은 합병증을 가진다. 하지만 내측 개방형 HTO에서도 불유합, 지연유합, 변형의 저교정 또는 과교정, 내고정물 실패, 내반 변형의 재발, 교정 상실 등이 발생할 수 있다. 전신적인 합병증으로는 감염(2.3%~4.5%), 심부정맥 혈전증(1.3%~9.8%), 혈관 손상(0.4%)도 포함한다.³³⁾ 그러나 개방형 HTO에서 비골신경 마비, 구획 증후군 등은 드물게 나타난다.⁶⁾

항법 장치 시스템을 이용한 개방형 HTO는 고식적인 방법에 비해 등록 과정을 위한 추가적인 시간 및 부가적인 추적자 부착을 위한 대퇴골과 경골의 절개가 필요하며 추적자 부착 시의 pin 및 wire 등에 의한 감염이나 골절의 가능성도 있다.³³⁾ 정확한 해부학적 위치를 골에 등록하지 않고 피부를 통해 등록하는 과정에서 생기는 결과의 차이는 항법 장치 시스템의 정확성을 위해 개선해 나가야 할 과제이기도 하다. 또한 체중 부하 하지 전장 방사선 사진에서 얻은 하지의 기계적 축과 체중 부하를 하지 않은 상태의 항법 장치 시스템을 이용하여 구한 술 전 하지의 기계적 축 사이에는 차이가 발생할 수 있으므로 술 전에 내반, 외반 긴장 검사에서 기계적 축의 변화를 확인해야 한다. 수술 중 슬관절을 완전 신전 상태로 유지해야 정확한 기계적 축을 얻을 수 있으며 수술 후 경골 후방 경사각의 증가도 방지할 수 있다.²⁴⁾

비록 항법 장치 시스템이 1도, 1 mm 내의 범위로 정교함을 갖더라도 등록 오류 혹은 기계적 결함이나 software 기능불량 등의 기술적인 함정이 발생할 수 있다. 추적자의 불안정성 또는 수술 중의 위치 변화는 정교함을 감소시키고 심지어는 항법 장치 시

템의 작동을 중단시킬 수 있다.^{21,34)}

5. 경골 후방 경사각

해부학적으로 경골의 근위부는 삼각형 모양의 3차원적 구조로 되어 있으며, 이로 인해 개방형 HTO는 관상면과 시상면에서 기계적 축의 변화가 발생하게 된다.^{39,40)} 몇몇 연구에서 개방형 HTO는 경골 후방 경사각이 증가되는 경향을 가진다고 보고하였으며 이로 인해 슬관절의 운동학(kinematics), 안정성, 관절 접촉면의 압력에 영향을 줄 수 있다고 하였다.^{4,39-42)} Noyes 등¹⁹⁾은 경골 절절에서 개방간격은 경골의 후·내측 면의 개방간격에 대해 약 1/2이 되어야 정상적인 경골 후방 경사각을 유지할 수 있다고 보고하고 있고 1 mm의 gap 오차는 경골 후방 경사각에서 2도 정도의 차이를 가져온다고 했다. 저자들은 3차원 컴퓨터 가상 수술을 통해 원래의 경골 후방 경사각을 유지하기 위해서는 전·후방 개방간격의 비율이 0.67이 되어야 함을 보고하였는데³⁴⁾ Noyes 등¹⁹⁾의 연구와 다른 이유는 전방의 참고 수치가 다르기 때문으로 Noyes 등¹⁹⁾은 전방 간격을 경골 절절의 끝부분에서 계산했으며, 저자는 비스듬히 절절의 절골술을 시행한 후에 후내측에서 계산했다. 경골 후방 경사각이 증가되는 것을 방지하기 위해서는 (1) 절골술은 시상면에서 관절선과 평행하게 시행되어야 하며, (2) 적절한 후·내측부 연부조직 유리가 필요하고, (3) 후·내측부 금속판은 가능한 후방에 위치해야 하며, (4) 수술 과정 중 동일한 각도의 완전 신전이 유지되어야 하고, (5) 경골 절절 뒷부분의 전방 개방 간격은 가장 후·내방 구석의 후방 개방 간격의 약 67%를 유지하는 것이 필요하겠다.

초기 항법 장치 시스템은 시상면의 교정을 직접적으로 측정할 수 없었고 경골 후방 경사각 변화를 간접적으로밖에 측정할 수 없었기에 절골술 전, 후의 최대 신전의 변화 또한 측정할 수 없었다. 하지만 최근 도입된 3차원 항법 장치 시스템을 이용할 경우 술 중 실시간으로 관상면뿐만 아니라 시상면, 측상면까지 축의 변화양상의 관찰이 가능하여 술 전의 경골 후방 경사각을 유지할 수 있다고 보고되고 있다.⁴³⁾

6. 임상적 결과

Saragaglia와 Roberts⁴³⁾는 고식적 방법을 사용한 28예와 항법 장치 시스템을 이용하여 HTO를 시행한 28예를 비교하였는데, 항법 장치 시스템을 이용한 경우 더 나은 수술 결과를 보였다고 보고하였으며, Kim 등³⁰⁾도 역시 총 90예의 환자에서 HTO를 시행하였을 때, 항법 장치 시스템을 이용한 군에서 교정된 기계적 축이 더 좋은 결과를 보여주었고, 임상적 결과도 고식적 방법을 시행한 군에 비해 더 좋은 결과를 얻었다고 보고한 바 있다. Bae 등³¹⁾은 50예의 고식적 방법을 사용한 군과 50예의 항법 장치 시스템을 이용하여 HTO를 시행한 군을 비교하였을 때 기계적 축이 항법 장치 시스템을 사용한 군에서 훨씬 좋은 값으로 교정할 수 있었다

Table 1. Current Outcome Studies of Comparison between Navigational High Tibial Osteotomy and Conventional High Tibial Osteotomy

Study (year)	Patient (n)	Type of group	Mechanical axis (°)	Clinical results	Finding	Complication related to navigation
Saragaglia and Roberts ⁴³⁾ (2005)	28	Conventional	4±2	No mention	Navigation group – Similar correction of mechanical axis, better reproducibility	No mention
	28	Navigational-Orthopilot	3±1	No mention		
Kim et al. ³⁰⁾ (2009)	47	Conventional	2.7±2.2	HSS score -79±7	Navigation group – better correction of mechanical axis, better functional score. No difference in tibial slope in either group	2 cases of delayed union, 1 case of varus collapse
	43	Navigational-Orthopilot	3.9±1.0	HSS score -84±8		
Bae et al. ³¹⁾ (2009)	50	Conventional	0.1±3.7	No mention	Navigation group – better correction of mechanical axis and better control of tibial slope	None
	50	Navigational-Vectorvision	2.1±2.3	No mention		
Akamatsu et al. ²⁹⁾ (2012)	31	Conventional	Femoro-tibial 170.9±3.4	Lysholm score 96±6	Navigation group – less undercorrection of femorotibial angle and tibial slope preserved better	None
	28	Navigational-Orthopilot	Femoro-tibial 169.3±2.0	Lysholm score 95±5		
Iorio et al. ²⁷⁾ (2013)	10	Conventional	Reproducibility 23%	KS score 79.4±6.2	Navigation group – better reproducibility, better functional score but statically no differences	2 cases of broken screws
	10	Navigational-Orthopilot	Reproducibility 86%	KS score 85.1±7.3		

Values are presented as number or mean±standard deviation.

고 하였으며, 경골 후방 경사각 또한 교정하기 용이하였다고 보고하였다. Akamatsu 등²⁹⁾은 총 59예의 근위 경골 절골술을 시행한 환자 중 항법 장치 시스템을 이용한 군에서 기계적 축이 저교정(undercorrection of mechanical axis)되었다고 보고하였으나 경골의 후방 경사각은 고식적인 방법에 비해 더 나은 결과를 보였으며, 수술 시간은 고식적 방법을 사용한 군에 비해 평균 16분 정도 오래 걸렸다고 보고하였다. Iorio 등²⁷⁾은 고식적 방법을 사용한 10예와 항법 장치 시스템을 이용한 10예를 비교하였고, 두 군 모두 기계적 축의 교정과 임상적 결과가 우수하였다고 보고하였다 (Table 1).

결론

항법 장치 시스템은 수술 중 실시간으로 해부학적 위치에 대한 정보(intraoperative information)를 제공하여 원하고자 하는 교정각을 보다 정확하게 얻을 수 있고, 오차 범위 및 이상치를 줄이며 교정의 정밀도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 이로 인한 임상적 결과와의 상관관계는 추가적인 연구 및 장기 추시가 필요하다. 또한 연골, 반월연골판, 슬관절의 인대 안정성 등에 가

장 이상적인 관상면, 시상면에서의 정렬에 대해서도 추가적인 생역학 연구가 요구된다.

REFERENCES

- Amendola A, Panarella L. High tibial osteotomy for the treatment of unicompartmental arthritis of the knee. *Orthop Clin North Am.* 2005;36:497-504.
- Jakob RP, Jacobi M. Closing wedge osteotomy of the tibial head in treatment of single compartment arthrosis. *Orthopade.* 2004;33:143-52.
- Dowd GS, Somayaji HS, Uthukuri M. High tibial osteotomy for medial compartment osteoarthritis. *Knee.* 2006;13:87-92.
- Marti CB, Gautier E, Wachtl SW, Jakob RP. Accuracy of frontal and sagittal plane correction in open-wedge high tibial osteotomy. *Arthroscopy.* 2004;20:366-72.
- Hernigou P, Medevielle D, Debeyre J, Goutallier D. Proximal tibial osteotomy for osteoarthritis with varus deformity. A ten to thirteen-year follow-up study. *J Bone Joint Surg Am.*

- 1987;69:332-54.
6. Parker DA, Viskontas DG. Osteotomy for the early varus arthritic knee. *Sports Med Arthrosc.* 2007;15:3-14.
7. Bae DK, Yoon KH, Kwon OS, Kim YC, Shin DJ. Results and survivorship of high tibial osteotomy. *J Korean Orthop Assoc.* 2002;37:357-63.
8. Ellis RE, Tso CY, Rudan JF, Harrison MM. A surgical planning and guidance system for high tibial osteotomy. *Comput Aided Surg.* 1999;4:264-74.
9. Wright JG, Treble N, Feinstein AR. Measurement of lower limb alignment using long radiographs. *J Bone Joint Surg Br.* 1991;73:721-3.
10. Dahl MT. Preoperative planning in deformity correction and limb lengthening surgery. *Instr Course Lect.* 2000;49:503-9.
11. Moreland JR, Bassett LW, Hanker GJ. Radiographic analysis of the axial alignment of the lower extremity. *J Bone Joint Surg Am.* 1987;69:745-9.
12. Amin DV, Kanade T, DiGioia AM 3rd, Jaramaz B. Ultrasound registration of the bone surface for surgical navigation. *Comput Aided Surg.* 2003;8:1-16.
13. Chen TK, Abolmaesumi P, Pichora DR, Ellis RE. A system for ultrasound-guided computer-assisted orthopaedic surgery. *Comput Aided Surg.* 2005;10:281-92.
14. Pitto RP, Graydon AJ, Bradley L, Malak SF, Walker CG, Anderson IA. Accuracy of a computer-assisted navigation system for total knee replacement. *J Bone Joint Surg Br.* 2006;88:601-5.
15. Rosenow JM, Sootsman WK. Application accuracy of an electromagnetic field-based image-guided navigation system. *Stereotact Funct Neurosurg.* 2007;85:75-81.
16. Stiehl JB, Heck DA. Six sigma analysis of computer-assisted surgery tracking protocols in TKA. *Clin Orthop Relat Res.* 2007;464:105-10.
17. Stulberg SD, Loan P, Sarin V. Computer-assisted navigation in total knee replacement: results of an initial experience in thirty-five patients. *J Bone Joint Surg Am.* 2002;84 Suppl 2:90-8.
18. Song EK, Seon JK, Park SJ, Yoon TR, Park KS, Kim SK. Comparison of accuracy of navigation between infrared optical and electromagnetic systems. *J Korean Orthop Assoc.* 2009;44:68-75.
19. Noyes FR, Goebel SX, West J. Opening wedge tibial osteotomy: the 3-triangle method to correct axial alignment and tibial slope. *Am J Sports Med.* 2005;33:378-87.
20. Paley D, Herzenberg JE, Tetsworth K, McKie J, Bhav A. Deformity planning for frontal and sagittal plane corrective osteotomies. *Orthop Clin North Am.* 1994;25:425-65.
21. Hankemeier S, Hufner T, Wang G, et al. Navigated open-wedge high tibial osteotomy: advantages and disadvantages compared to the conventional technique in a cadaver study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2006;14:917-21.
22. Iorio R, Vadalà A, Giannetti S, et al. Computer-assisted high tibial osteotomy: preliminary results. *Orthopedics.* 2010;33: S82-6.
23. Keppler P, Gebhard F, Grützner PA, et al. Computer aided high tibial open wedge osteotomy. *Injury.* 2004;35 Suppl 1:S-A68-78.
24. Lee DH, Nha KW, Park SJ, Han SB. Preoperative and postoperative comparisons of navigation and radiologic limb alignment measurements after high tibial osteotomy. *Arthroscopy.* 2012;28:1842-50.
25. Krettek C, Miclau T, Grün O, Schandelmaier P, Tschern H. Intraoperative control of axes, rotation and length in femoral and tibial fractures. Technical note. *Injury.* 1998;29 Suppl 3:C29-39.
26. Kawakami H, Sugano N, Yonenobu K, et al. Effects of rotation on measurement of lower limb alignment for knee osteotomy. *J Orthop Res.* 2004;22:1248-53.
27. Iorio R, Pagnottelli M, Vadalà A, et al. Open-wedge high tibial osteotomy: comparison between manual and computer-assisted techniques. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013; 21:113-9.
28. Reising K, Strohm PC, Hauschild O, et al. Computer-assisted navigation for the intraoperative assessment of lower limb alignment in high tibial osteotomy can avoid outliers compared with the conventional technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013;21:181-8.
29. Akamatsu Y, Mitsugi N, Mochida Y, et al. Navigated opening wedge high tibial osteotomy improves intraoperative correction angle compared with conventional method. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2012;20:586-93.
30. Kim SJ, Koh YG, Chun YM, Kim YC, Park YS, Sung CH. Medial opening wedge high-tibial osteotomy using a kinematic navigation system versus a conventional method: a 1-year retrospective, comparative study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17:128-34.
31. Bae DK, Song SJ, Yoon KH. Closed-wedge high tibial osteotomy using computer-assisted surgery compared to the con-

- ventional technique. *J Bone Joint Surg Br.* 2009;91:1164-71.
32. Hankemeier S, Hufner T, Wang G, et al. Navigated intraoperative analysis of lower limb alignment. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2005;125:531-5.
 33. Song EK, Seon JK, Park SJ, Seo HY. Navigated open wedge high tibial osteotomy. *Sports Med Arthrosc.* 2008;16:84-90.
 34. Song EK, Seon JK, Park SJ. How to avoid unintended increase of posterior slope in navigation-assisted open-wedge high tibial osteotomy. *Orthopedics.* 2007;30:S127-31.
 35. Baur H, Schuh A. CT-free computer navigated high tibial osteotomy (HTO) in medial osteoarthritis of the knee. *J Bone Joint Surg Br.* 2006;88:S98.
 36. Maurer F, Wassmer G. High tibial osteotomy: does navigation improve results? *Orthopedics.* 2006;29:S130-2.
 37. Dejour D, Bonin N, Locatelli E. Tibial anticurvatum osteotomies. *Oper Tech Sports Med.* 2000;8:67-70.
 38. Giffin JR, Vogrin TM, Zantop T, Woo SL, Harner CD. Effects of increasing tibial slope on the biomechanics of the knee. *Am J Sports Med.* 2004;32:376-82.
 39. Hohmann E, Bryant A, Imhoff AB. The effect of closed wedge high tibial osteotomy on tibial slope: a radiographic study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2006;14:454-9.
 40. Agneskirchner JD, Hurschler C, Stukenborg-Colsman C, Imhoff AB, Lobenhoffer P. Effect of high tibial flexion osteotomy on cartilage pressure and joint kinematics: a biomechanical study in human cadaveric knees. Winner of the AGA-DonJoy Award 2004. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2004;124:575-84.
 41. Lobenhoffer P, Agneskirchner JD. Improvements in surgical technique of valgus high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2003;11:132-8.
 42. Yim JH, Seon JK, Song EK. Posterior tibial slope in medial opening-wedge high tibial osteotomy: 2-D versus 3-D navigation. *Orthopedics.* 2012;35:S60-3.
 43. Saragaglia D, Roberts J. Navigated osteotomies around the knee in 170 patients with osteoarthritis secondary to genu varum. *Orthopedics.* 2005;28:S1269-74.

슬관절 퇴행성 관절염에서의 절골술

항법 장치 시스템을 이용한 개방형 근위 경골 절골술

선종근 • 김하성 • 김도연 • 송은규[✉]

화순전남대학교병원 관절센터, 정형외과

퇴행성 관절염에서 개방형 근위 경골 절골술은 고정기구 및 수술 기법의 발달로 많이 시행되고 있다. 또한 과거엔 고식적인 방법으로 술자의 경험에 의존하여 기계적 축을 변화시켰지만 최근 수술 술기 및 과학 기술의 발달로 항법 장치 시스템을 이용하여 술자가 원하는 각도로 기계적 축을 교정함으로써 수술의 정확성 및 정밀성 향상과 함께 좋은 임상 결과가 보고되고 있다. 또한 이러한 항법 장치 시스템은 실시간 모니터링을 통해 수술 중 하지 축 정렬을 수술자가 원하는 대로 교정할 수 있을 뿐만 아니라 방사선 노출 시간도 현저히 감소시킬 수 있다. 하지만 고식적 방법에 비해 수술 시간 연장 및 추적자(tracker) 사용에 따른 추가적 절개와 그로 인한 감염이나 골절의 가능성도 있다. 또한, 체중 부하 하지 전장 방사선 사진에서 얻은 하지의 기계적 축과 체중부하를 하지 않은 항법 장치 시스템을 이용한 술전 하지의 기계적 축 사이에는 차이가 발생할 수 있으며 등록 오류나 기계적 결함 등 기술적인 함정이 발생할 수 있다는 단점 또한 지니고 있다. 이번 중설에서는 항법 장치 시스템을 이용한 개방형 근위 경골 절골술의 소개, 수술 방법 및 임상적용, 수술 시 주의할 사항 및 경골 후방 경사각 조절, 그리고 임상결과에 대해 알아보도록 하겠다.

색인단어: 항법 장치 시스템, 컴퓨터를 이용한 수술, 슬관절, 절골술

접수일 2013년 11월 14일 수정일 2014년 1월 22일 게재확정일 2014년 3월 21일

[✉]책임저자 송은규

화순군 화순읍 서양로 322, 화순전남대학교병원 관절센터, 정형외과

TEL 061-379-7676, FAX 061-379-7681, E-mail eksong@chonnam.ac.kr