

슬관절 전치환술에서 네비게이션 장치의 다양한 적용

김상균 · 윤정로* · 양재혁[‡]

국립중앙의료원 정형외과, *중앙보훈병원 정형외과, †한양대학교구리병원 정형외과

Versatile Application of Navigation System for Total Knee Arthroplasty

Sang-Gyun Kim, M.D., Jung-Ro Yoon, M.D., Ph.D.*, and Jae-Hyuk Yang, M.D., Ph.D.[‡]

Department of Orthopedic Surgery, National Medical Center, *Department of Orthopedic Surgery, VHS Medical Center, Seoul,

†Department of Orthopedic Surgery, Hanyang University Guri Hospital, Guri, Korea

The navigation system helps to perform an accurate and reproducible operation by real-time continuous feedback during total knee arthroplasty (TKA). Although the incidence of malalignment after conventional TKA had been reported to be up to 20%–30%, navigation-assisted TKA has shown excellent radiologic results in terms of accurate implant position and mechanical alignment. In addition, the navigation system provides continuous feedback on the extension and flexion gaps that change depending on the bone resection and soft tissue release. Furthermore, the navigation system can be useful in patients with extra-articular deformity or retaining instruments. Robot-assisted TKA is a newly developed surgical method that combines the navigation registration technique with bone resection using a robotic arm. A postoperative change in the kinematic axis can be evaluated by comparing the pre- and postoperative functional flexion axis using navigation data. If the functional flexion axis can be provided in real-time in the navigation system, it is expected to be used as a new surgical parameter for the rotational alignment of the femoral component and help restore the patient's flexion axis postoperatively.

Key words: total knee arthroplasty, surgical navigation, robot-assisted surgery

서론

컴퓨터를 이용한 슬관절 수술은 1990년대 슬관절 전치환술(total knee arthroplasty)에 처음 도입되었으며, 1997년에는 Sara-gaglia가 Orthopilot[®]을 이용하여 영상이 없이도 수술을 할 수 있는 네비게이션 장치(navigation system)를 개발하였다.¹⁾ 슬관절 전치환술에서 적절한 치환물의 위치와 하지 정렬, 균형 관절 간격은 환자의 만족도와 장기 생존에 필수적인 요소로 인식되었다.^{2,3)} 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술은 수술 중 환자의

해부학적 지표와 정렬 및 관절 간격의 변화에 대한 정보를 확인할 수 있어 수술 중 발생할 수 있는 오차를 줄이는 데 도움을 준다.⁴⁾

또한 네비게이션을 이용하면 슬관절 전치환술 중 골수강 내 지침자를 사용하지 않아도 되기 때문에 대퇴골의 관절 외 변형이 있거나, 대퇴골에 내고정물이 삽입되어 있는 환자에게 도움이 될 수 있다.⁵⁻⁸⁾ 최근 많은 관심을 끌고 있는 로봇 이용 슬관절 전치환술(robot-assisted total knee arthroplasty)도 네비게이션을 이용한 계측과 정보 등록에 기반을 둔 수술 방법이라고 할 수 있으며, 운동학적 정렬(kinematic alignment)을 이용한 슬관절 전치환술에서도 네비게이션의 역할이 점차 증가할 것으로 기대된다. 저자들은 슬관절 전치환술에서 이와 같은 네비게이션 장치의 다양한 적용 및 유용성에 대해 기술하고자 한다.

Received July 13, 2021 Revised September 1, 2021

Accepted October 12, 2021

[‡]Correspondence to: Jae-Hyuk Yang, M.D., Ph.D.

Department of Orthopedic Surgery, Hanyang University Guri Hospital, 153 Gyeongchun-ro, Guri 11923, Korea

TEL: +82-31-560-2184 E-mail: jaekorea@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8853-1997>

Sang-Gyun Kim and Jung-Ro Yoon contributed equally to this work as co-first authors.

본 론

1. 슬관절 전치환술에서 정확한 치환물 정렬과 중립 하지 정렬의 복원을 위한 네비게이션의 활용

슬관절 전치환술은 전통적으로 관상면(coronal plane)의 역학적 축에 수직이 되도록 치환물을 삽입하여 결과적으로 중립적인 하지 정렬을 얻는 것을 목표로 하였으며, 치환물의 적절한 위치와 하지 정렬은 환자의 만족도 및 장기 생존에 영향을 주는 것으로 보고되어 왔다.^{2,3)} 하지만, 고식적인 방법을 이용한 슬관절 전치환술 시 부정 정렬을 가지는 빈도가 20%~30%로 매우 높다는 연구 보고들도 있다.^{9,10)} 네비게이션을 이용한 컴퓨터 보조 수술(computer assisted surgery)은 고식적인 수술 방법에서 발생할 수 있는 부정 정렬을 최소화하고, 보다 정확하고 재현성 높은 수술을 위해 개발되었다. 네비게이션 장치는 카메라와 추적 장치로 구성되어 있으며, 네비게이션 장치는 슬관절 전치환술 시 입력된 환자 정보(하지 관절 중심 및 대퇴골과 경골의 해부학적 지표)를 통해 3차원적인 모델을 형성한다. 이를 통해 네비게이션은 수술 중 해부학적 위치 및 역학적 축에 대한 정보를 실시간으로 제공하며, 다양한 각도에서 하지 정렬을 확인할 수 있다(Fig. 1). 이러한 정보를 통해 집도되는 수술 중 정확한 골 절제 및 치환물 삽입에 대한 안내를 받으며 수술을 시행할 수 있다.⁴⁾

고식적인 수술방법에 비해 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술이 효과적이지에 대하여 많은 임상 연구들이 진행되었으며,

수술 후 방사선학적 평가에서 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술이 치환물 정렬의 정확도와 역학적 정렬에 있어 비슷하거나 우수하다는 결과를 보고하였다. Kinney 등¹¹⁾은 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술이 고식적인 수술방법에 비해 치환물의 3° 이상 부정 정렬이 발생하는 비율이 유의하게 적었다고 하였고 (4.0% vs. 36.0%), 치환물 정렬의 변동성이 감소하였다고 하였다. Ueyama 등¹²⁾의 연구에서도 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술에서 수술 후 하지 정렬이 우수하였고, 치환물 정렬의 불량(outlier)을 가지는 빈도가 감소하였다고 하였다. 한편, Kim 등¹³⁾의 연구와 Zhu 등¹⁴⁾의 연구에서는 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술이 치환물 정렬의 정확도 및 하지 정렬 면에서 고식적인 수술 방법과 차이가 없다는 보고하였다. 최근 발표된 메타분석 연구에서는 대퇴 치환물의 시상면 정렬 및 경골 치환물의 관상면 정렬이 우수한 것으로 보고하였으나, 기타 치환물의 정렬 및 하지 정렬에서는 유의한 차이가 없음을 보고하였다.¹⁵⁾

2. 슬관절 전치환술에서 적절한 관절 간격 균형을 위한 네비게이션의 활용

성공적인 슬관절 전치환술을 위해서는 적절한 치환물 정렬 및 하지 정렬을 얻는 것 외에, 균형있는 굴곡-신전 관절 간격 및 내외측 관절 간격을 얻는 것도 중요하다.¹⁶⁾ 슬관절 전치환술 시 내외측 관절 간격의 불균형은 폴리에틸렌의 비정상적인 마모를 유발할 수 있고, 굴곡-신전 간 관절 간격의 차이는 수술 후 관절 불안

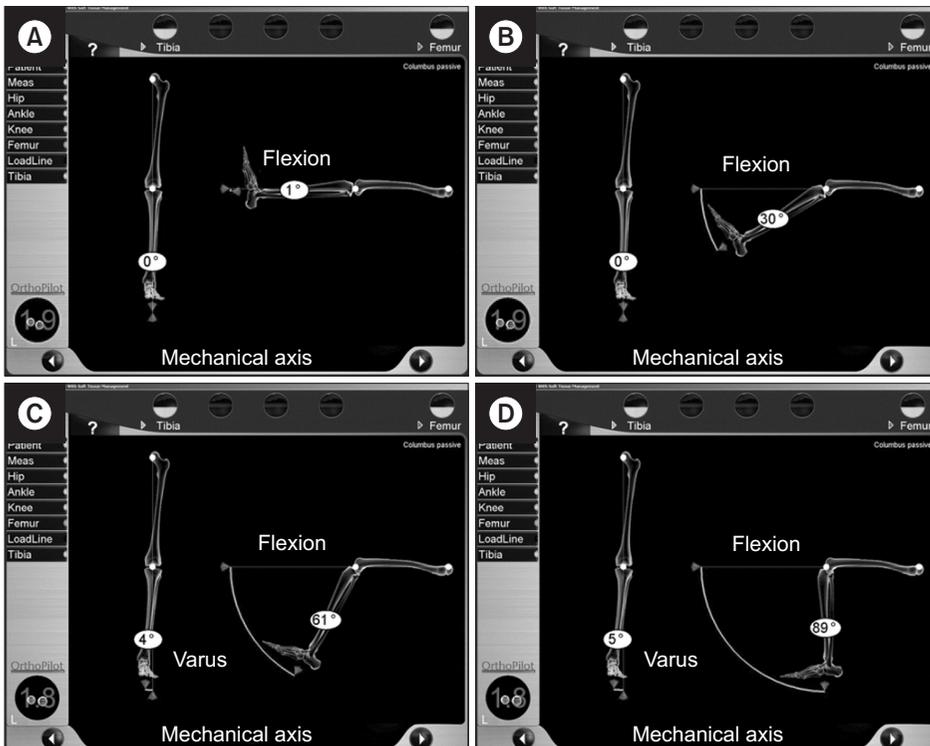


Figure 1. Evaluation of lower extremity alignment in various degree of knee flexion. (A) Full extension. (B) 30° of knee flexion. (C) 60° of knee flexion. (D) 90° of knee flexion.

치환물이 역학적 축에서 굴곡 삽입되도록 골 절제를 하여 절흔이 발생하는 것을 예방하여야 한다.

4. 대퇴골의 내고정물이 있는 환자에서 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술

고식적인 슬관절 전치환술에서는 원위 대퇴골의 골 절제를 위해 골수강 내 지침자(intramedullary guide)를 사용하지만, 고관절 치환술 또는 골절 수술로 인해 내고정물이 삽입되어 있는 경우에는 골수강 내 지침자를 사용하기 어렵고 골수강 외 지침자는 정확도가 떨어져 치환물 및 하지 정렬이 집도의의 경험에 영향을 받을 수 있다는 단점이 있다. 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술에서는 골수강내 지침자를 이용하지 않고, 고관절의 운동의 중심과 슬관절의 해부학적 지표를 이용하여 원위 대퇴골의 절제 각도가 결정되기 때문에 대퇴골에 삽입된 내고정물의 영향을 받지 않고 수술을 시행할 수 있다는 장점이 있다.

Kim 등⁸⁾은 대퇴골 골절로 인해 골수강 내 금속정 또는 금속판이 삽입된 환자에서 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술을 시행하여 성공적인 결과를 얻었다고 하였다. 또한 Manzotti 등²⁵⁾의 연구에서도 대퇴골의 내고정물을 제거하지 않은 상태로 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술을 시행한 경우, 임상적 결과 및 방사선학적 결과가 내고정물이 없는 관절염 환자에서 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술을 시행한 경우와 비교하여 유의한 차이가 없다고 하였다.

5. 로봇 이용 슬관절 전치환술에서 네비게이션의 역할

로봇 이용 슬관절 전치환술은 로봇 팔(robotic arm)을 이용하여 골 절제를 시행함으로써 집도의가 수기로 골 절제를 하였을 때보다 골 절제의 정확도를 높이고 혈관 및 신경 손상의 위험을 줄이기 위한 수술 방법이다.²⁶⁾ 즉, 로봇 이용 슬관절 전치환술은 네비게이션을 통한 해부학적, 운동학적 위치의 정확한 계측과 로봇 팔을 통한 정확한 골 절제를 결합한 수술 방법이라고 할 수 있다.

ROBODOC[®] (Curexo Technology, Fremont, CA, USA) 및 ORTHODOC[®] (Integrated Surgical Technology Corp., Davis, CA, USA) 등 초기 로봇 이용 슬관절 전치환술은 수술 전 컴퓨터 단층촬영(computed tomography, CT)을 통해 환자의 영상을 입력시키고, 컴퓨터 소프트웨어를 통해 수술 중 골 절제량, 절제 각도 및 치환물의 정렬을 미리 결정한다.²⁷⁾ 하지만, 수술 전 CT로 인한 추가적인 비용과 방사선 노출 등이 단점으로 지적되고 있다.²⁸⁾ 최근 개발된 ROSA[®] (Zimmer-Biomet, Warsaw, IN, USA) 로봇 장치는 수술 전 촬영한 하지 전장 X-ray를 소프트웨어를 통해 수술 중 3차원 영상으로 변경하여 수술을 진행하고, NAVIO[®] (Blue Belt Technologies, Plymouth, MN, USA) 등과 같이 수술 중 입력된 해부학적 지표를 이용하여 수술 전 영상검사 없이(imageless) 로봇 이용 슬관절 전치환술을 시행할 수 있

는 제품도 개발되었다.²⁹⁾

고식적인 방법 및 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술에 비해 로봇 이용 슬관절 전치환술의 역사가 짧기 때문에 임상 결과에 대한 연구가 상대적으로 많지 않다. 하지만 발표된 문헌에 의하면 로봇 이용 슬관절 전치환술은 수술 전 계획했던 이상적인 하지정렬 및 치환물 배열을 얻을 수 있어 정확하고, 재현성이 높은 수술 방법으로 보고되고 있다. Song 등³⁰⁾은 2013년 고식적인 슬관절 전치환술과 ROBODOC[®]을 이용한 슬관절 전치환술의 결과를 비교한 무작위 대조 연구에서, 임상 스코어(Western Ontario and McMaster Universities Arthritis Index [WOMAC] score and Hospital for Special Surgery [HSS] knee score) 및 관절 가동 범위의 차이는 없었으나 로봇을 이용한 슬관절 전치환술에서 우수한 하지 정렬을 얻을 수 있었다고 하였다. 또한, 로봇 이용 슬관절 전치환술은 평균 25분의 수술 시간이 더 필요하였으나 실혈량은 더 적었으며 기타 합병증에 유의한 차이는 없었다고 하였다.³⁰⁾ 같은 저자들은 이후 10년 이상 장기 추시 결과를 보고하였는데, 로봇 이용 슬관절 전치환술에서 치환물의 위치 및 하지 정렬의 불량률이 적었다고 하였다.³¹⁾ 하지만, 두 수술 방법 모두 좋은 임상 결과를 보였으며 임상 결과 및 생존율에는 차이가 없었다고 하였다.³¹⁾ 또한, Kim 등³²⁾의 무작위 대조 연구에서도 ORTHODOC[®]을 이용한 슬관절 전치환술과 고식적인 슬관절 전치환술을 10년 이상 추시 비교하였을 때 기능적 결과, 장기 생존 및 합병증에 차이가 없었으며, 추가적인 비용 및 수술 시간을 고려하였을 때 로봇 이용 슬관절 전치환술을 권장할 수 없다고 하였다.

Imageless 로봇 이용 슬관절 전치환술은 특성상 집도의가 수술 중 등록하는 해부학적 지표의 정확성에 따라 수술 결과에 영향을 줄 수 있고, 특히 심한 골 변형이나 마모가 있는 환자에서 해부학적 지표를 등록하는 데 오류가 발생할 수 있다는 우려가 있다. 하지만, 기존 연구에서는 CT 기반 로봇 이용 슬관절 전치환술과 imageless 슬관절 전치환술을 비교하였을 때, 해부학적 지표 등록 및 치환물 정렬의 신뢰도(reliability) 면에서 유의한 차이가 없다고 하였다.³³⁾ 또한 Vaidya 등³⁴⁾은 62명의 환자를 대상으로 수술 전 영상이 필요하지 않은 NAVIO[®] 장치를 이용하여 로봇 슬관절 전치환술을 시행한 결과 우수한 치환물 정렬과 하지 정렬을 보고하기도 하였다.

6. 슬관절 전치환술에서 네비게이션을 이용한 수술 전후 기능적 굴곡 축의 확인

정확한 대퇴 치환물의 회전 정렬은 슬개대퇴관절의 운동학적 정렬과 굴곡 각도의 내외측 균형에 영향을 준다.^{35,36)} 역학적 축을 이용한 슬관절 전치환술에서는 적절한 회전 정렬을 위하여 대퇴골 수술적 상과간 축(surgical transepicondylar axis), 후과간 축(posterior condylar axis), 전후방 축(anteroposterior axis)

등의 해부학적 골 지표를 이용하거나, 내외측 굴곡 간격을 일치하도록 하는 방법이 사용되고 있다.^{37,38)}

최근에는 운동학적 정렬을 이용한 슬관절 전치환술의 개념이 도입되면서, 굴곡-신전 운동의 회전축에 해당하는 기능적 굴곡 축(functional flexion axis)이 대퇴골 회전 정렬의 새로운 지표로 대두되고 있다.³⁹⁾ 운동학적 정렬을 이용한 슬관절 전치환술은 환자가 관절염 이전에 가지고 있던 대퇴골 및 경골의 관절면과 하지정렬을 복원하도록 골절제 후 치환물을 위치시키는 방법이다. 마모된 관절 표면을 치환(resurfacing)하는 개념으로, 치환물의 두께만큼 골절제를 시행하며 연부조직의 유리를 최소화한다. 이를 통해 굴곡 및 신전 운동 시에 정상 관절의 회전축을 슬관절 전치환술 후에도 유지하는 것이 운동학적 정렬의 목적이다.^{40,41)}

여러 연구에서 해부학적 지표 중 수술적 상과간 축이 관절 운동 시 고정된 기능적 굴곡 축과 가장 유사한 것으로 보고하였다.^{42,43)} 하지만, 수술 중 대퇴골의 내외측 상과의 위치를 정확히 확인하기 어려운 경우가 많고, 집도의의 경험에 따라 차이가 발생할 수도 있다.⁴⁴⁾ 또한 관절염이 있는 환자에서는 상과간 축과 기능적 굴곡 축이 일치하지 않는다는 연구 결과도 보고되었다.⁴⁵⁾ 부정확한 해부학적 지표를 이용한 대퇴 치환물의 회전 정렬은 결과적으로 부적절한 기능적 굴곡 축을 유발하게 된다. 또한, 일부 저자들은 원통형으로 생긴 대퇴골의 내측 및 외측 후과(medial and lateral posterior condyles of femur)의 공동 축인 원주형 축(cylindrical axis)이 기능적 굴곡 축에 더 가깝다고 발표하기도 하였다.⁴⁶⁾

수술 중 관절 운동시 입력된 추적기(tracker)의 3차원적인 위치 정보를 수술 후 네비게이션 소프트웨어에 입력하면 수술 전후 기능적 굴곡 축을 도출할 수 있으며,⁴⁷⁾ 여러 연구에서 네비게이션을 통해 확인된 기능적 굴곡 축은 해부학적 지표를 이용해 확인된 상과간 축이나 원주형 축에 비해 정확하고 신뢰할 만한 것으로 보고되었다(Fig. 4).^{44,48,49)} 하지만 아직까지는 수술 전후 기능적 굴곡 축의 변화 여부만 확인할 수 있고, 수술 중 기능적 굴곡 축에 대한 정보를 실시간으로 제공하지는 못하기 때문에 대퇴 치환물의 회전 정렬을 결정하는 지표로 사용할 수는 없다. 향후

이를 위한 네비게이션 프로그램이 개발되고 수술 후 기능적 굴곡 축을 유지할 수 있는 치환물 디자인이 개발된다면, 환자가 수술 전 가지고 있던 운동학적 정렬을 복원하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

7. 네비게이션 장치를 이용한 슬관절 전치환술의 한계와 발전 방향

대부분의 연구에서 네비게이션 장치를 이용한 슬관절 전치환술은 고식적 방법에 비해 치환물의 정렬 및 하지 정렬 등 방사선학적 결과에서 우수한 것으로 보고되고 있지만, 주관적인 임상 스코어 및 장기 생존율에서 보다 우수한 결과를 보장하는지에 대해서는 이견이 있으며 최근 발표된 메타분석 연구에서는 두 수술 방법 간에 유의한 차이가 없는 것으로 발표되었다.^{15,50)} 네비게이션을 이용할 때 필요한 추가적인 비용과 시간, 장치 등을 고려하면, 비용 대비 효과 면에서 모든 슬관절 전치환술 시 네비게이션 장치의 사용이 필요한가에 대한 논란이 있다.

또한, 집도의의 경험이 부족한 경우, 환자의 해부학적 지표가 명확하지 않거나 관절 강직이 심한 경우 및 추적기 고정 핀이 헐거워진(loosening) 경우, 등록 오류(registration error)가 발생하여 수술 결과에 영향을 줄 수 있다는 점도 네비게이션 장치를 이용한 슬관절 전치환술의 한계점으로 지적되고 있다.⁵¹⁾ 또한, 네비게이션 장치의 거대한 콘솔(console)이 필요하며, 추적기 삽입으로 인한 추가적인 절개와 감염 및 골절 등 합병증이 발생할 수 있다는 단점이 있다.^{52,53)} 최근에는 개발되어 사용되고 있는 가속센서 기반 휴대용(accelerometer-based handheld) 네비게이션 장치는 이러한 단점을 보완하였으며 여러 연구에서 우수한 임상 결과를 보여주고 있다.^{54,55)}

향후 네비게이션 장치는 환자 맞춤형 기구(patient specific instrument), 3차원 프린팅(3-dimensional printing) 또는 센서 기술(sensor technology) 등과 접목되어 한걸음 더 발전될 것으로 기대된다. 또한, 기능적 굴곡 축에 대한 정보가 수술 중 실시간으로 제공된다면 역학적 정렬뿐 아니라 운동학적 정렬을 복원하는 데 도움을 줄 것이다. 최근 개발되어 사용되고 있는 로봇이

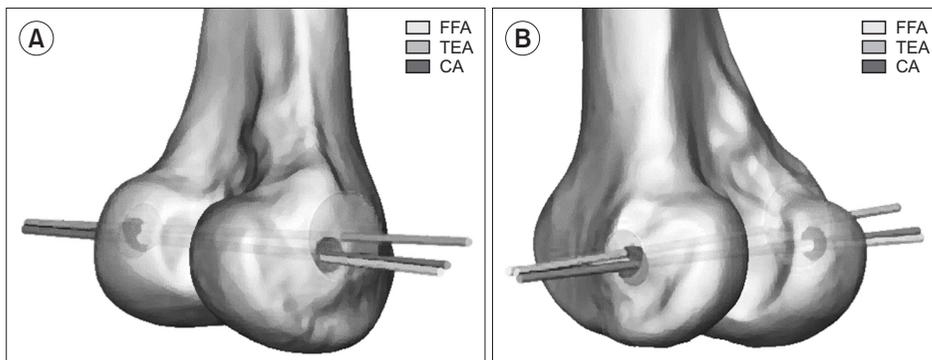


Figure 4. Illustrations showing the functional flexion axis and two anatomical axes. (A) Posteromedial view. (B) Posterolateral view. FFA, functional flexion axis; TEA, transepicondylar axis; CA, cylindrical axis.

용 슬관절 전치환술이나 가속센서 기반 휴대용 슬관절 전치환술의 증장기 임상결과 및 기존 네비게이션 슬관절 전치환술과의 비교 연구 결과가 발표되면 향후 네비게이션 장치를 이용한 슬관절 전치환술의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

결론

네비게이션에서 제공되는 객관적이고 수치화된 자료를 통해 슬관절 전치환술 중 치환물을 정확한 위치에 삽입하고 적절한 하지 정렬 및 관절 간격을 얻는 데 도움을 받을 수 있다. 특히 대퇴골의 관절 외 변형이 있거나, 내고정물이 삽입되어 있어 골수강 내 지침자를 사용하기 어려운 환자에서 유용한 방법이다. 최근, 로봇을 이용한 슬관절 전치환술 역시 네비게이션을 이용한 해부학적, 운동학적 위치 등록과 로봇 팔을 이용하여 골 절제를 결합한 수술 방법이라고 할 수 있다. 또한 네비게이션을 이용하면 수술 전후 대퇴골의 기능적 굴곡 축을 비교하여 슬관절의 운동학적 정렬의 변화를 확인할 수 있다. 향후 수술 중 기능적 굴곡 축에 대한 실시간 정보 제공이 가능하다면, 대퇴 치환물 정렬의 새로운 지표로 이용되어 수술 후 환자 개인의 운동학적 정렬을 복원하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors have nothing to disclose.

ORCID

Sang-Gyun Kim, <https://orcid.org/0000-0002-1808-1094>

Jung-Ro Yoon, <https://orcid.org/0000-0002-4105-8482>

Jae-Hyuk Yang, <https://orcid.org/0000-0001-8853-1997>

REFERENCES

1. Saragaglia D. More than 20 years navigation of knee surgery with the orthopilot device. In: Abedin-Nasab MH, ed. *Handbook of robotic and image-guided surgery*. Amsterdam: Elsevier; 2020. 425-41.
2. Oh SM, Bin SI, Kim JY, Lee BS, Kim JM. Impact of preoperative varus deformity on postoperative mechanical alignment and long-term results of "mechanical" aligned total knee arthroplasty. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2019;105:1061-6.
3. Park JK, Seon JK, Cho KJ, Lee NH, Song EK. Is immediate postoperative mechanical axis associated with the revision rate of primary total knee arthroplasty? A 10-year follow-up study. *Clin Orthop Surg*. 2018;10:167-73.
4. Jeong HJ, Park YB, Lee HJ. Computer-assisted navigation in total knee arthroplasty. *J Korean Orthop Assoc*. 2018;53:478-89.
5. Catani F, Digennaro V, Ensini A, Leardini A, Giannini S. Navigation-assisted total knee arthroplasty in knees with osteoarthritis due to extra-articular deformity. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2012;20:546-51.
6. Chou WY, Ko JY, Wang CJ, Wang FS, Wu RW, Wong T. Navigation-assisted total knee arthroplasty for a knee with malunion of the distal femur. *J Arthroplasty*. 2008;23:1239.e13-9.
7. Kim CW, Lee CR. Effects of femoral lateral bowing on coronal alignment and component position after total knee arthroplasty: a comparison of conventional and navigation-assisted surgery. *Knee Surg Relat Res*. 2018;30:64-73.
8. Kim KK, Heo YM, Won YY, Lee WS. Navigation-assisted total knee arthroplasty for the knee retaining femoral intramedullary nail, and distal femoral plate and screws. *Clin Orthop Surg*. 2011;3:77-80.
9. Mahaluxmivala J, Bankes MJ, Nicolai P, Aldam CH, Allen PW. The effect of surgeon experience on component positioning in 673 Press Fit Condylar posterior cruciate-sacrificing total knee arthroplasties. *J Arthroplasty*. 2001;16:635-40.
10. Mihalko WM, Boyle J, Clark LD, Krackow KA. The variability of intramedullary alignment of the femoral component during total knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2005;20:25-8.
11. Kinney MC, Cidambi KR, Severns DL, Gonzales FB. Comparison of the iAssist handheld guidance system to conventional instruments for mechanical axis restoration in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2018;33:61-6.
12. Ueyama H, Minoda Y, Sugama R, et al. An accelerometer-based portable navigation system improved prosthetic alignment after total knee arthroplasty in 3D measurements. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2019;27:1580-6.
13. Kim YH, Park JW, Kim JS. The clinical outcome of computer-navigated compared with conventional knee arthroplasty in the same patients: a prospective, randomized, double-blind, long-term study. *J Bone Joint Surg Am*. 2017;99:989-96.
14. Zhu M, Ang CL, Yeo SJ, Lo NN, Chia SL, Chong HC. Minimally invasive computer-assisted total knee arthroplasty compared with conventional total knee arthroplasty: a prospective 9-year follow-up. *J Arthroplasty*. 2016;31:1000-4.
15. Rhee SJ, Kim HJ, Lee CR, Kim CW, Gwak HC, Kim JH. A

- comparison of long-term outcomes of computer-navigated and conventional total knee arthroplasty: a meta-analysis of randomized controlled trials. *J Bone Joint Surg Am.* 2019;101:1875-85.
16. Insall J, Scott WN, Ranawat CS. The total condylar knee prosthesis. A report of two hundred and twenty cases. *J Bone Joint Surg Am.* 1979;61:173-80.
 17. Wasielewski RC, Galante JO, Leighty RM, Natarajan RN, Rosenberg AG. Wear patterns on retrieved polyethylene tibial inserts and their relationship to technical considerations during total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 1994;299:31-43.
 18. Pagnano MW, Hanssen AD, Lewallen DG, Stuart MJ. Flexion instability after primary posterior cruciate retaining total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 1998;356:39-46.
 19. Joseph J, Simpson PM, Whitehouse SL, English HW, Donnelly WJ. The use of navigation to achieve soft tissue balance in total knee arthroplasty - a randomised clinical study. *Knee.* 2013;20:401-6.
 20. Pang HN, Yeo SJ, Chong HC, Chin PL, Ong J, Lo NN. Computer-assisted gap balancing technique improves outcome in total knee arthroplasty, compared with conventional measured resection technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2011;19:1496-503.
 21. Lee DH, Park JH, Song DI, Padhy D, Jeong WK, Han SB. Accuracy of soft tissue balancing in TKA: comparison between navigation-assisted gap balancing and conventional measured resection. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2010;18:381-7.
 22. Nam JH, Song SK, Cho MR, Kang DW, Choi WK. The advantage of navigation for knee with lateral femoral bowing in total knee arthroplasty. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2020;28:2309499020965679.
 23. Ko JH, Han CD, Shin KH, et al. Femur bowing could be a risk factor for implant flexion in conventional total knee arthroplasty and notching in navigated total knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016;24:2476-82.
 24. Lee JH, Wang SI. Risk of anterior femoral notching in navigated total knee arthroplasty. *Clin Orthop Surg.* 2015;7:217-24.
 25. Manzotti A, Chemello C, Pullen C, Cerveri P, Confalonieri N. Computer-assisted total knee arthroplasty after prior femoral fracture without hardware removal. *Orthopedics.* 2012;35(10 Suppl):34-9.
 26. Ross KA, Wiznia DH, Long WJ, Schwarzkopf R. The use of computer navigation and robotic technology in complex total knee arthroplasty. *JBJS Rev.* 2021;9:e20.00200.
 27. Hananouchi T, Nakamura N, Kakimoto A, Yohsikawa H, Sugano N. CT-based planning of a single-radius femoral component in total knee arthroplasty using the ROBODOC system. *Comput Aided Surg.* 2008;13:23-9.
 28. Siddiqi A, Horan T, Molloy RM, Bloomfield MR, Patel PD, Piuze NS. A clinical review of robotic navigation in total knee arthroplasty: historical systems to modern design. *EFORT Open Rev.* 2021;6:252-69.
 29. Siddiqi A, Hardaker WM, Eachempati KK, Sheth NP. Advances in computer-aided technology for total knee arthroplasty. *Orthopedics.* 2017;40:338-52.
 30. Song EK, Seon JK, Yim JH, Netravali NA, Bargar WL. Robotic-assisted TKA reduces postoperative alignment outliers and improves gap balance compared to conventional TKA. *Clin Orthop Relat Res.* 2013;471:118-26.
 31. Yang HY, Seon JK, Shin YJ, Lim HA, Song EK. Robotic total knee arthroplasty with a cruciate-retaining implant: a 10-year follow-up study. *Clin Orthop Surg.* 2017;9:169-76.
 32. Kim YH, Yoon SH, Park JW. Does robotic-assisted TKA result in better outcome scores or long-term survivorship than conventional TKA? A randomized, controlled trial. *Clin Orthop Relat Res.* 2020;478:266-75.
 33. Foley KA, Muir JM. Improving accuracy in total knee arthroplasty: a cadaveric comparison of a new surgical navigation tool, Intellijoint KNEE, with computed tomography imaging. Kitchener: Intellijoint Surgical, Inc.; 2019.
 34. Vaidya N, Jaysingani TN, Panjwani T, Patil R, Deshpande A, Kesarkar A. Assessment of accuracy of an imageless hand-held robotic-assisted system in component positioning in total knee replacement: a prospective study. *J Robot Surg.* Published online May 4, 2021; doi:10.1007/s11701-021-01249-w.
 35. Verlinden C, Uvin P, Labey L, Luyckx JP, Bellemans J, Vandenuecker H. The influence of malrotation of the femoral component in total knee replacement on the mechanics of patellofemoral contact during gait: an in vitro biomechanical study. *J Bone Joint Surg Br.* 2010;92:737-42.
 36. Romero J, Stähelin T, Binkert C, Pfirrmann C, Hodler J, Kessler O. The clinical consequences of flexion gap asymmetry in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2007;22:235-40.
 37. Miller MC, Berger RA, Petrella AJ, Karmas A, Rubash HE. Optimizing femoral component rotation in total knee arthro-

- plasty. *Clin Orthop Relat Res.* 2001;392:38-45.
38. Olcott CW, Scott RD. A comparison of 4 intraoperative methods to determine femoral component rotation during total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2000;15:22-6.
 39. Hutt JR, LeBlanc MA, Massé V, Lavigne M, Vendittoli PA. Kinematic TKA using navigation: surgical technique and initial results. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2016;102:99-104.
 40. Howell SM, Hull ML. Kinematic alignment in total knee arthroplasty. In: Scott WN, ed. *Insall and Scott surgery of the knee.* 5th ed. Philadelphia: Elsevier; 2012. 1255-68.
 41. Howell SM, Shelton TJ, Hull ML. Implant survival and function ten years after kinematically aligned total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2018;33:3678-84.
 42. Asano T, Akagi M, Nakamura T. The functional flexion-extension axis of the knee corresponds to the surgical epicondylar axis: in vivo analysis using a biplanar image-matching technique. *J Arthroplasty.* 2005;20:1060-7.
 43. Eckhoff D, Hogan C, DiMatteo L, Robinson M, Bach J. Difference between the epicondylar and cylindrical axis of the knee. *Clin Orthop Relat Res.* 2007;461:238-44.
 44. Doro LC, Hughes RE, Miller JD, Schultz KF, Hallstrom B, Urquhart AG. The reproducibility of a kinematically-derived axis of the knee versus digitized anatomical landmarks using a knee navigation system. *Open Biomed Eng J.* 2008;2:52-6.
 45. Colle F, Bignozzi S, Lopomo N, Zaffagnini S, Sun L, Marcacci M. Knee functional flexion axis in osteoarthritic patients: comparison in vivo with transepicondylar axis using a navigation system. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2012;20:552-8.
 46. Hancock CW, Winston MJ, Bach JM, Davidson BS, Eckhoff DG. Cylindrical axis, not epicondyles, approximates perpendicular to knee axes. *Clin Orthop Relat Res.* 2013;471:2278-83.
 47. Woltring HJ, Huiskes R, de Lange A, Veldpaus FE. Finite centroid and helical axis estimation from noisy landmark measurements in the study of human joint kinematics. *J Biomech.* 1985;18:379-89.
 48. Oussedik S, Scholes C, Ferguson D, Roe J, Parker D. Is femoral component rotation in a TKA reliably guided by the functional flexion axis? *Clin Orthop Relat Res.* 2012;470:3227-32.
 49. Yin L, Chen K, Guo L, Cheng L, Wang F, Yang L. Identifying the functional flexion-extension axis of the knee: an in-vivo kinematics study. *PLoS One.* 2015;10:e0128877.
 50. Baier C, Wolfsteiner J, Otto F, et al. Clinical, radiological and survivorship results after ten years comparing navigated and conventional total knee arthroplasty: a matched-pair analysis. *Int Orthop.* 2017;41:2037-44.
 51. Novoa-Parra CD, Sanjuan-Cerveró R, Franco-Ferrando N, Larrainzar-Garijo R, Egea-Castro G, Lizaur-Utrilla A. Complications of computer-assisted navigation in total knee replacement: retrospective cohort of eight hundred and seventy eight consecutive knees. *Int Orthop.* 2020;44:2621-6.
 52. Berning ET, Fowler RM. Thermal damage and tracker-pin track infection in computer-navigated total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2011;26:977.e21-4.
 53. Jung HJ, Jung YB, Song KS, Park SJ, Lee JS. Fractures associated with computer-navigated total knee arthroplasty. A report of two cases. *J Bone Joint Surg Am.* 2007;89:2280-4.
 54. Thiengwittayaporn S, Fusakul Y, Kangkano N, Jarupongprapa C, Charoenphandhu N. Hand-held navigation may improve accuracy in minimally invasive total knee arthroplasty: a prospective randomized controlled trial. *Int Orthop.* 2016;40:51-7.
 55. Gao X, Sun Y, Chen ZH, Dou TX, Liang QW, Li X. Comparison of the accelerometer-based navigation system with conventional instruments for total knee arthroplasty: a propensity score-matched analysis. *J Orthop Surg Res.* 2019;14:223.

슬관절 전치환술에서 네비게이션 장치의 다양한 적용

김상균 · 윤정로* · 양재혁[†]

국립중앙의료원 정형외과, *중앙보훈병원 정형외과, †한양대학교구리병원 정형외과

네비게이션 장치는 슬관절 전치환술 중 환자의 해부학적 위치와 정렬에 대한 지속적인 피드백을 통해 정확하고 재현성 높은 수술을 하는 데 도움을 준다. 고식적인 슬관절 전치환술 후 부정 정렬을 가지는 환자의 빈도가 20%~30%로 매우 높다는 연구 보고가 있으나, 네비게이션을 이용한 슬관절 전치환술은 치환물 정렬의 정확도와 역학적 정렬에 있어 우수한 결과를 얻고 있다. 또한, 네비게이션을 이용하면 수술 중 골 절제 및 치환물 정렬에 따라 예상되는 관절 간격을 미리 확인할 수 있고, 수술 중 골 절제와 연부 조직 유리에 따라 변화하는 관절 간격에 대해 지속적인 피드백을 받을 수 있기 때문에 적절한 관절 간격을 얻기 위한 유용한 방법이다. 그 밖에 관절 외 변형이 있거나 대퇴골에 내고정물이 삽입되어 있어 고식적인 수술 기구를 이용한 슬관절 전치환술이 어려운 경우에도 네비게이션이 유용하게 이용될 수 있다. 최근 많은 관심을 받고 있는 로봇 이용 슬관절 전치환술은 네비게이션을 이용한 계측과 로봇 팔을 통한 골 절제를 결합한 수술 방법으로 볼 수 있다. 또한, 네비게이션 데이터를 이용하면 수술 전후 대퇴골의 기능적 굴곡 축을 비교하여 슬관절의 운동학적 정렬의 변화를 확인할 수 있다. 향후 수술 중 기능적 굴곡 축에 대한 실시간 정보 제공이 가능하다면, 대퇴 치환물 정렬의 새로운 지표로 이용되어 수술 후 환자 개인의 운동학적 정렬을 복원하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

색인단어: 슬관절 전치환술, 수술용 네비게이션, 로봇 이용 수술

접수일 2021년 7월 13일 수정일 2021년 9월 1일 게재확정일 2021년 10월 12일

책임저자 양재혁

11923, 구리시 경춘로 153, 한양대학교구리병원 정형외과

TEL 031-560-2184, E-mail jaekorea@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8853-1997>

김상균 저자와 윤정로 저자는 본 연구에서 공동 제1저자로 기여하였음.