

## Navigation Assisted Total Knee Arthroplasty: Pros & Cons

배지훈 고려의대 고려대학교구로병원



### AT A GLANCE

현재 슬관절 전치환술에서 내비게이션은 치환물/하지 관상면 정렬의 정확도 및 재현성은 전통적인 수술 방법에 대해 더 신뢰할 수 있는 방법으로 보고되고 있으나, 임상 결과가 더 우월한지는 입증하지 못하였다. 하지만 인공 자능과 같은 과학 기술이 통합된다면 내비게이션 성능은 획기적으로 발전할 수 있으며, 미래의 디지털 시대에 최소 침습 수술, 환자 맞춤형 수술, 교육, 연구 등에서 내비게이션의 사용 가치는 매우 높아 보인다.

### | 서론 |

슬관절 전치환술에서 컴퓨터 보조 항법 장치(Computer assisted navigation, 이하 내비게이션이라 기술한다)는 치환물 및 하지 정렬의 정확성과 정밀도를 향상시키기 위해 개발되었으며, 1990년대에 도입되어 현재까지 많은 발전을 이루었다. 내비게이션을 이용하는 것이 전통적인 슬관절 전치환술에 비해 더 정확하고, 치환물의 생존율을 높이고, 임상 결과가 더 우월한가에 대해서는 여전히 논쟁 중이지만, 지난 20여 년 동안 슬관절 전치환술에서

내비게이션을 사용한 경험은 그 가치가 단순히 치환물 및 하지 정렬의 정확도를 높이는 것 이상으로 훨씬 더 크다는 것을 입증했다. 저자는 내비게이션의 현주소와 개인적인 사용 경험, 미래 방향을 기술하고자 한다.

#### 1. 내비게이션의 역할 및 종류

슬관절 전치환술에서 사용하는 내비게이션은 자동차 내비게이션의 길 안내처럼 수술 시 골절제량, 치환물 및 하지의 정렬 상태, 인대 균형에 대한 정보를 실시간으로 제공해준다. 수술은 수술자에 의해 모두 시행되고 내비게이션은 수술 정보만 알려주기 때문에 수술자에 의한 오류가 발생할 수 있지만, 수술자는 내비게이션에서 제공해주는 정보를 실시간으로 확인할 수 있어, 수술 중에 발생할 수 있는 다양한 오류들을 예방하고 교정하여 부정 정렬의 빈도를 줄일 수 있다. 이를 위해서는 환자의 해부학적 정보를 컴퓨터에 정확하게 등록을 하는 것이 중요하고, 골절제 및 인대 균형 상태를 실시간으로 추적할 수 있는 시스템이 필요하다. 내비게이션은 환자의 해부학적 정보를 등록하기 위해 수술 전 자기공명영상 또는 컴퓨터 단층 촬영 영상을 이용하는 방법으로 개발되었으나 과정이 복잡하고 수술 전 영상을 얻어야 하는 번거로운 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 수술 전 영상을 등록하는 방법대신 수술

중 관절 운동을 통하여 고관절/슬관절/족관절 중심을 계산하고 관절 표면의 해부학적 중요 위치를 지침자로 등록하여 컴퓨터가 환자의 관절 모양을 구현하는 역학적 등록 방법이 개발되었다. 내비게이션 장비는 대형 콘솔의 형태로 컴퓨터, 모니터, 추적 시스템 카메라가 장착되어 있고, 환자의 슬관절 주위 대퇴골 및 경골에 추적기를 고정하여 수술이 진행되는 동안 골절제량, 정렬상태, 인대 균형에 대한 정보를 생성하게 된다(그림1A). 최근에는 대형 콘솔 모니터없이 OrthAlign(OrthAlign Inc., Aliso Viejo, 그림1B) 및 iASSIST(Zimmer CAS, Montreal)와 같은 가속도계-기반 휴대용 내비게이션 시스템이 개발되어 사용되기 시작했다. 휴대용 내비게이션은 아직은 정확성과 정밀도에 대한 검증과 개선이 필요하지만, 수술 필드 외부에 대형 콘솔 및 가시선 등이 필요 없어 좀 덜 복잡하고, 상대적으로 저렴한 장비 비용 등의 장점이 있다.

## 2. 내비게이션의 장점

슬관절 전치환술 시 중립 정렬이 치환물의 생존에 유리한 지에 대해서 여전히 논쟁의 여지가 있지만



그림 1. (A) Typical large console computer navigation systems; (B) OrthAlign handheld computer navigation system

\*출처: The Journal of Arthroplasty 33 (2018) p1989 -1993, Fig 2

최근 연구 결과들에 의하면 내비게이션을 이용한 슬관절 전치환술이 기존의 골수내/외 정렬 가이드를 이용한 술기에 비해 목표로 하는 하지 정렬(특히 관상면 정렬)을 달성하는 데 있어 더 신뢰할 수 있다. 수술을 진행하는 동안 여러 단계(정렬 가이드 및 골절제 가이드 설치, 골절제, 인대 균형, 치환물 고정 등)에서 오류가 발생할 수 있고, 최종적으로 치환물/하지 정렬이 정확하지 않을 수 있는데, 전통적인 슬관절 전치환술에서는 각 단계의 정확도를 객관적인 방법으로 확인할 수 없고, 수술자의 눈과 손의 느낌(?)으로 판단할 수밖에 없다. 경험이 많은 수술자도 오류가 발생할 수 있는데 내비게이션은 슬관절 전치환술의 각 단계에서 실시간으로 골절제량, 정렬 상태, 인대 균형 상태를 제공함으로써 수행되는 술기의 정확도를 확인할 수 있다(그림2). 내비게이션을 사용하면 초심자도 부정 정렬의 빈도를 줄이고 오차 범위내에 인대 균형을 맞출 수 있다. 이외에도 골수의 가이드를 사용하므로 수술 시 출혈이 적고 지방색전증의 빈도가 적다는 보고가 있으며, 제거가 어려운 고정물이 있는 경우, 관절의 변형이 심한 경우 등 골수내 정렬 가이드를 사용하기가 어려운 경우에 내비게이션을 사용하여 수술을 시행할 수 있다.



그림 2. 대퇴골 절제 전, 신전/굴곡, 대퇴 치환물의 크기, 회전 정렬에 대한 정보를 보여주는 사진

또 다른 중요한 장점은 전공의 및 슬관절 전치환술을 시작하는 초보자들에게 수술의 방법을 이해하고 정확하게 수행할 수 있도록 교육할 수 있는 시각적인 정보를 제공하는 것이다. 느낌과 말로 전달되어 머릿속으로 상상하는 것보다는 시각적인 데이터를 보고 해석함으로써 수술 방법에 대한 이해를 높일 수가 있다. 또한 수술 시 발생한 방대한 데이터들은 컴퓨터에 저장되어 슬관절 전치환술 관련 연구에 사용할 수 있다. 미래에는 교육과 연구를 위한 다양한 응용프로그램이 개발되어 교육/연구 도구로 더 자주 사용할 수 있을 것이다.

### 3. 내비게이션의 단점

내비게이션을 이용한 슬관절 전치환술의 단점은 장비 사용에 대한 추가 비용, 수술 시간 증가, 수술 설정을 복잡하게 하는 광학 추적 및 가시선 문제, 수술에 참여하는 인력에 대한 필수 전문 교육 필요, 시상면 정렬과 회전 정렬에 대한 정확도 부족 등이다. 무엇보다도 임상 결과의 우월성이 불확실한 것인데 새로운 기술을 도입하는 목적은 수술의 오류를 줄이려는 것도 있겠지만 환자가 느끼는 만족도 및 기능 개선, 치환물의 장기 생존을 향상이 중요하다. 내비게이션이 치환물/하지 정렬을 목표 범위내로 달성하는 데 정확하고 재현성이 좋다고 보고되고 있지만, 대부분의 연구에서 단기 또는 장기적인 임상 결과가 전통적인 방법에 비해 더 우월한지는 입증되지 않았다. 숙련된 수술자도 수술 오류가 발생할 수 있다고 했지만, 빈도는 낮으므로, 임상 결과에 있어 우월한 점이 없다면 비용-효용 측면에서 비싼 비용과 추가 시간을 들여 사용할 만한 의학적 근거가 부족한 것이다.

내비게이션을 사용하더라도 여러 단계에서 오류가 발생할 수 있다. 수술 중 컴퓨터 시스템의 오류로 인해 역학적 등록이 잘 안 되거나 부정확하게 등록

이 되는 경우, 수술 중 내비게이션이 잘못된 정보를 제공해줄 수 있다. 또한, 역학적 등록 방법에서 관절 운동의 중심이 역학적 중심과 달라 시상면에서의 치환물 정렬이 과신전되는 경향이 있고, 회전 정렬에 대한 정확도는 낮아 개선이 필요하다. 실시간 추적을 위해 콘솔내 카메라를 장착하고 환자 신체에 추적기를 부착해야 하는데, 두 장치 사이에 반응하는 가시선이 제한되어 있어 수술에 참여하는 사람들에 의해 가시선이 방해받거나 추적기 및 카메라의 위치에 따라 신호가 전달이 안 되는 경우, 수술이 지연될 수 있다. 두 장치를 유선으로 연결하는 시스템인 경우, 수술 필드가 복잡해지기도 하고 소독의 문제도 발생한다. 또한 추적기 부착을 위해 대퇴골 및 경골에 핀을 삽입하는 시스템은 통증, 상처 배액, 감염, 드물게 발생하는 골절을 포함한 핀 부위 합병증을 유발할 수 있다. 환자가 비만인 경우, 골다공증이 있어 핀고정이 불안정한 경우 등에도 추적 시스템의 문제로 내비게이션 사용이 어려울 수 있다. 내비게이션은 정보만 알려줄 뿐 수술은 수술자에 의해 진행되므로 내비게이션을 이용하는 수술도 여전히 수술자의 지식, 술기의 정확성, 문제가 발생했을 경우 해결 능력 등에 따라 수술의 결과가 달라질 수 있다.

### 4. 필자의 내비게이션 사용 경험

필자는 군의관 복무를 마치고 슬관절 전임의를 시작할 무렵, 지도교수이신 임홍철 교수님께서 내비게이션을 이용한 수술(슬관절 전치환술, 근위경골 절골술)을 열정적으로 하셨기 때문에 자연스럽게 내비게이션을 접하게 되었다. 수술 중 실시간으로 제공되는 정보는 슬관절 전치환술을 본격적으로 배우는 필자에게 수술 방법을 이해하는데, 특히 적절한 굴곡/신전 간격을 위해 인대 균형을 맞추는 다양한 술기를 이해하고 습득하는 데 많은 도움이 되었다. 전임의를 마치고 독립적으로 슬관절 전치환



술을 시작할 때부터 연수를 가기 전까지 약 7년간 대부분의 슬관절 전치환술을 내비게이션을 이용하여 시행하였다. 내비게이션을 사용하면서 치환물/하지 정렬은 대부분 목표 범위내에 달성할 수 있었고, 내비게이션 사용으로 인한 심각한 합병증은 발생하지 않았다. 전통적인 방법으로 슬관절 전치환술을 거의 하지 않았기 때문에 내비게이션을 이용한 슬관절 전치환술의 수술 시간이 더 많이 든다는 것을 체감하지는 못하였다. 물론, 임상 결과가 더 우월하다는 느낌도 체감할 수 없었다. 간혹 등록 과정에 오류가 생기거나 골절제 후 내비게이션에서 보여주는 정보가 예상과 달라 시간이 더 소요되는 증례도 있긴 하였지만, 극히 드물었다. 수술 중 저장된 방대한 데이터는 전통적인 방법으로 할 수 없는 연구를 하는 데 도움이 되었다. 당시에 내비게이션을 사용하면서 가장 아쉬웠던 점은 소프트웨어가 타회사 제품과 호환이 되지 않아 내비게이션 장비를 제작하는 회사에서 만든 치환물만 사용할 수 있었다는 것이다. 연수를 다녀온 이후부터는 다른 제품들을 사용해보고 싶은 마음에 내비게이션 없이 수술을 하게 되었고, 익숙해지다 보니 현재까지 내비게이션 없이 수술을 하고 있다. 사용했던 시기는 다르고 객관적인 데이터를 분석한 것은 아니지만 필자의 경험도 앞서 기술한 내비게이션의 장단점과 크게 다르지 않다. 다만 수술 증례가 과거보다는 많아지면서 수술 시간에 대한 부담이 생겨 내비게이션 사용을 주저하게 되었고 경험이 많아지면서 필자의 느낌을 더 믿게 되는 오만함이 생긴 것 같다. 다양한 제품을 사용할 수 있다는 것과 수술 시간을 단축할 수 있는 것, 내비게이션 수술을 위한 여러 복잡한 과정을 거치지 않는 것들이 현재 전통적인 방법을 고수하는 이유인 것 같기도 하다. 최근에는 ‘인대 균형을 어떻게 잘 맞출 수 있을까?’ 고민을 하며 수술을 하고 있는데, 내비게이션을 계속 사용하였다면 지금 현재 필자의 인대 균형을 맞추는 술

기가 더 발전했을 수도 있겠다는 생각이 들기도 한다. 이 원고를 작성하면서 과거의 경험들이 새록새록 떠오르며, 스마트 디지털 시대에 내비게이션의 발전 가능성은 높기 때문에 향후 내비게이션 사용을 고려해보고 있다.

### 5. 내비게이션의 미래

슬관절 전치환술에서 내비게이션에 대한 현재의 평가는 치환물 및 하지 정렬을 맞추는 데 분명하게 도움이 되지만 정확하고, 최적의 슬관절 기능을 얻고, 내구성 있고, 성공적인 수술 결과를 얻는데 반드시 필수적인 것은 아니라는 것이다. 그러나 지난 20여 년 동안 개발 및 사용된 내비게이션 기술을 기반으로 하드웨어 및 소프트웨어는 점점 진화해가고, 장비가 간소화되고 딥러닝과 같은 인공 지능 기술이 더해지면 내비게이션 시스템은 획기적으로 발전하여 슬관절 전치환술의 일부가 될 수 있을 것이다. 하드웨어 측면에서는 전자기와 같은 기술을 사용하는 무선 시스템의 도입으로 컴퓨터와 하지 사이에 가시선을 유지해야 하는 문제점을 해결하고, 추적기 크기 및 부착 방법 개선 등으로 휴대용 내비게이션이 사용되어 수술 필드가 덜 복잡하고 자유롭게 수술할 수 있도록 해야 한다. 소프트웨어 측면에서는 해부학적 정보를 등록하는 방법의 개선, 치환물의 회전 정렬의 정확도 및 인대 균형을 더 정밀하게 맞추는 방법 등 현재 내비게이션으로 시행할 수 없는 부분들에 대한 개선이 필요하다. 인공 지능 및 딥러닝 기술이 통합되어 다양한 증례가 내비게이션 시스템에 인식이 되고 수술의 결과가 인공 지능에 의해 학습이 된다면 향후 유사한 증례를 수술할 때 내비게이션이 완벽한 인대 균형을 위해 정확한 골절제량과 연부조직 유리술 정도를 제시해줄 수 있을 것이다. 또한 단일 내비게이션 시스템에 여러 회사의 제품을 수용할 수 있는 소프트웨어 허용, 환자 맞춤형 수술, 최소 침습적 수술 등 정형외과의

사에게 좀 더 사용 편리한 도구로 발전해야 한다. 교육, 연구를 위한 보조 도구로써도 다가오는 미래에 내비게이션의 사용 가치는 높고, 관련된 다양한 응용프로그램 개발을 위해서는 정형외과 의사와 개발자간에 적극적인 협력이 필요하다. 내비게이션 사용이 보편화되고 활성화된다면 장비 개선과 프로그램 개발을 위해 더 많은 투자가 가능해질 것이다. 현재 진행 중인 많은 개발이 이러한 예측을 조만간 현실화할 수 있을 것으로 생각되고, 현재 시스템보다 더 스마트하고, 덜 번거롭고, 더 효율적이고, 친숙한 내비게이션의 출현을 기대해 본다. [JoinOS](#)

## References

1. Bouche PA, Corsia S, Dechartres A, Resche-Rigon M, Nizard R. Are There Differences in Accuracy or Outcomes Scores Among Navigated, Robotic, Patient-specific Instruments or Standard Cutting Guides in TKA? A Network Meta-analysis. *Clin Orthop Relat Res* 2020;478:2105-2116.
2. Budhiparama NC, Lumban-Gaol I, Ifran NN, Parratte S, Nelissen R. Does Accelerometer-based Navigation Have Any Clinical Benefit Compared with Conventional TKA? A Systematic Review. *Clin Orthop Relat Res* 2019;477:2017-2029.
3. Jones CW, Jerabek SA. Current Role of Computer Navigation in Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty* 2018;33:1989-1993.
4. Lee SY, Lim HC, Jang KM, Bae JH. What Factors Are Associated With Femoral Component Internal Rotation in TKA Using the Gap Balancing Technique? *Clin Orthop Relat Res* 2017;475:1999-2010.
5. Lei K, Liu L, Chen X, Feng Q, Yang L, Guo L. Navigation and robotics improved alignment compared with PSI and conventional instrument, while clinical outcomes were similar in TKA: a network meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2021.
6. Li JT, Gao X, Li X. Comparison of iASSIST Navigation System with Conventional Techniques in Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis of Radiographic and Clinical Outcomes. *Orthop Surg* 2019;11:985-993.
7. Lim HC, Bae JH, Kim SJ. Postoperative femoral component rotation and femoral anteversion after total knee arthroplasty in patients with distal femoral deformity. *J Arthroplasty* 2013;28:1084-1088.
8. Sezer HB, Bohu Y, Hardy A, Lefevre N. Knee Prosthesis in the Computer Era. *Orthop Surg* 2021.
9. Shatrov J, Parker D. Computer and robotic - assisted total knee arthroplasty: a review of outcomes. *J Exp Orthop* 2020;7:70.
10. van der List JP, Chawla H, Joskowicz L, Pearle AD. Cur-

rent state of computer navigation and robotics in unicompartmental and total knee arthroplasty: a systematic review with meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016;24:3482-3495.