

Robotic TKA의 현재와 미래



안 지 현 성균관의대 강북삼성병원

AT A GLANCE

로봇을 이용한 슬관절 전치환술은 실시간으로 슬관절 정렬에 대한 정보를 제공하며 보다 정확한 각도 및 위치에서의 골 절삭을 가능하게 한다. 이러한 로봇 전치환술은 기존 수술 방법보다 수술 시간이 더 길어지고 수술 비용이 증가할 수 있다. 하지만, 수술 전 세워진 계획대로 정확한 수술이 가능하며, 특히 관절 외 변형 등이 동반된 특수한 경우에서의 슬관절 전치환술에서 예상치 못한 오류를 줄일 수 있다.

| 서론 |

슬관절 전치환술 후 환자 만족도와 장기적 생존율을 높이기 위한 필수적인 조건 중 하나가 정확한 슬관절 정렬이다. 기본적으로 하지의 기계적 축에 대하여 직각으로 골 절삭을 시행하여 전치환술 후 중립정렬(neutral alignment)을 얻기 위하여 기존의 골수강 내 및 골수강 외 가이드를 이용하여 대부분의 전치환술이 시행되어왔다. 하지만 기존의 수술에서 10~20% 내외의 수술 후 부정정렬이 보고되어져 왔으며 이를 극복하기 위하여 computer

assisted surgery(CAS)가 도입되었으며 로봇 전치환술이 대표적인 예라고 할 수 있다.

로봇 치환술의 과거

로봇을 이용한 슬관절 전치환술은 1986년도에 처음 보고되었다. 1990년대 들어서도 유사한 방법의 로봇 전치환술이 시행되었는데 기본적인 방법은 수술 전 CT 검사를 이용하여 대퇴골 및 경골의 삼차원 영상을 구성하여 골 절삭을 위한 가이드의 위치를 결정하고 실제적인 골 절삭은 수술자가 기존의 기계적 톱을 이용하여 시행하는 방식이었다.

2000년에 독일에서 ROBODOC과 CASPAR라는 기존과는 다른 개념의 로봇 치환술이 개발되었다. 이는 골 절삭 과정을 수술자 대신에 능동형 로봇이 대신하여 수행하게 되며, 산업용 로봇을 기반으로 수정 개발되었다. ROBODOC 시스템은 가장 먼저 개발되었으며 실제 임상에서도 상용화에 가장 성공한 모델이다(그림1). ORTHODOC이라는 컴퓨터 프로그램이 수술 계획을 수립하고 이에 따라 로봇암이 실제 수술을 시행하는 형태로 구성되어 있다. 수술 전에 CT 검사를 이용하여 환자의 해부학적 형태에 따라 ORTHODOC이 치환물의 크기와 적정 위치를 결정하고 이를 바탕으로 ROBODOC의 로봇암이 능동적으로 골 절삭을 하게 된다.



그림 1. 로봇 슬관절 치환술의 초기 발전을 이끌었던 ROBODOC 시스템

*출처: http://www.curexo.com/english/medical/sub01p01.php?P_HPSESSID=dbd1219d44b69574e8813cbe851b3e93

이러한 ROBODOC 시스템의 장점은 수술 전 계획을 정확하게 실현할 수 있고, 수술 후 이상적인 하지의 역학적 축을 제공할 수 있으며 치환물의 크기나 배치도 이상적인 방향으로 설정할 수 있다는 점이다. 수술자가 기존의 기계적 톱을 이용하여 절삭하는 경우 발생 가능한 신경 및 혈관 손상 등도 로봇암의 능동적 골 절삭을 통하여 거의 피할 수 있다. 특히, 후방십자인대 보존형 치환술에서 후방십자인대 부착부의 견열 골절을 최소화 할 수 있다. 정확한 수술 전 계획에 의하여 절삭되는 뼈도 최소화하여 향후 재치환술을 보다 용이하게 할 수도 있다. 가장 큰 장점으로서는 네비게이션 시스템을 이용할 수 있어서 관절 외 골 변형 등의 기존 질환이 있는 환자에서 발생 가능한 수술 후 부정정렬을 최소화 할 수 있다는 점이다.

단점으로는 수술 시간의 지연과 고비용을 들 수 있다. 다수의 연구에서 기존 치환술에 비하여 약 30분 이상의 추가 시간이 필요하다고 하였으며 로봇암의 작업 공간 확보를 위하여 비교적 큰 절개창이 필요할 수 있다고 하였다. 또한 추가적인 비용이 발생하게

되어 이러한 단점들을 고려 시 기존 치환술 방법과 비교 시, 큰 장점이 없다는 다수의 의견도 있어 왔다.

ROBODOC 시스템의 효용성에 대한 여러 반론이 있었지만, 비교적 상용화에 성공한 로봇 치환술로 알려져 있으며 지금도 다수의 국내외 기관에서 실제 수술에 이용되고 있다.

로봇 치환술의 현재와 미래

최근에 주목받고 있는 로봇 치환술은 반능동형 시스템이다. 로봇암이 직접 골 절삭에 참여하는 노동형 시스템과는 달리, 반능동형에서는 수술자가 로봇암을 직접 다루어서 절삭부위로 이동 시켜 골 절삭이 이루어진다. 반능동형 로봇은 수술 전 계획된 범위 안에서 절삭 도구가 작동할 수 있게 제어하며 제한 범위를 넘어서는 위치로 수술자기 로봇암을 이동하는 경우에는 골 절삭이 즉시 중단되도록 설계되어 있다. 최근 소개되어 사용되고 있는 대표적인 반능동형 로봇 시스템은 MAKO 시스템(그림2)과 NAVIO 시스템(그림3) 등이 있다. 대표적인 인공관절 제작사인 Stryker와 Smith&Nephew company에서 로봇 시스템 제조사를 각각 인수하여 자사 제품에 특화된 형태로 개발되었다. 초기 로



그림 2. 반능동형 로봇인 MAKO 시스템을 이용한 슬관절 전치환술

*출처: Arthroplast Today, 2019 Jun 27;5(4):465-470, doi: 10.1016/j.artd.2019.04.007, eCollection 2019 Dec.



그림 3. 반능동형 NAVIO 로봇 치환술 시스템

*출처: <https://www.smith-nephew.com/professional/microsites/navio/navio-7/navio-7/>

봇 수술에서 로봇이 수술 계획부터 시행까지 전담하는 것과 달리 이러한 반능동형 로봇 수술은 로봇의 프로그램을 이용해 집도의가 환자맞춤형 수술을 설계하고, 의료진이 직접 로봇 팔을 잡고 주도적으로 수술을 집도하는 것이 특징이다. 후발주자라고 할 수 있는 NAVIO 시스템은 자체 이미지 플랫폼을 이용하여 실시간으로 골조직에 대한 3차원 영상 데이터를 수집하여 수술 전 CT 검사 없이도 수술 전 계획을 완성할 수 있다는 특징이 있다. ROBODOC 시스템과 비교 시, 반능동형 로봇 시스템은 실제 골 절삭을 시행하는 로봇암이 작은 가동범위 내에서도 수술 시행이 가능하여 보다 작은 절개창을 가지고도 전치환술을 가능하게 하여 최소침습 전치환술에서도 적용 가능하다는 장정도 있다. 하지만, 수술 시간의 지연과 추가적인 비용 발생 등은 여전히 단점으로 알려져 있고, 골조직에 대한 정보 등록을 위하여 추가적인 핀 고정이 필요하다는 점도 해결되지 않은 문제점이다.

현재까지 사용되어온 로봇 슬관절 치환술을 바탕으로 미래의 로봇 수술은 다음과 같은 관점에서 발전될 것으로 기대된다. 첫째, 증강현실 기법과의 기술적 접목으로 현재 대부분의 로봇 수술에서 필요한 추가적인 핀 고정 없이도 가능한 로봇 치환술의 개발이다. 둘째, 현재까지의 로봇 치환술이 정확한 골

절삭을 주요 관점으로 발전하였다면 향후 로봇 시스템의 발전은 이상적인 인대 균형을 위한 시술과 평가도 가능하도록 개발될 가능성이 크다. 셋째, 많이 간소화되었지만, 아직도 상당한 크기를 유지하고 있는 치환술 로봇의 소형화가 발전 방향이 하나가 될 것이다. 넷째, 기존 수술에 비하여 여전히 긴 수술 시간을 줄이기 위하여 골조직 정보 등록이나 골 절삭 과정을 보다 빠르게 진행할 수 있게 발전될 가능성이 크다. 다섯째, 수술 전 계획에서 결정된 적절한 치환물의 크기나 적정 위치를 바탕으로 기존의 인공관절 제조사에서 수치화시킨 일물적인 크기가 아닌 환자 개개인마다 다른 맞춤형 치환물이 개발될 가능성이 크다. 이는 로봇 수술의 발전과 함께 물류비용을 최소화할 것이다.

| 결론 |

최근 로봇을 이용한 슬관절 전치환술은 실시간으로 슬관절 정렬 정도를 알려주고, 수술 전 계획을 통하여 기존 수술과 비교 시, 보다 정확한 치환물의 크기와 위치 선택이 가능하도록 하였다. 비록 대다수 연구에서 로봇 수술과 기존 치환술의 수술 후 임상적 결과에서는 큰 차이가 없다고 보고하고 있지만, 슬관절 정렬 등의 평가 지표에서 허용 범위를 벗어나는 수술 후 오류를 최소화 할 수 있다는 로봇 치환술의 장점도 부정할 수는 없다. 향후 수술용 로봇이 간소화되고 대량 사용에 의하여 전체적인 비용이 낮아진다면 로봇 치환술이 보다 보편화 될 것으로 기대된다. **JoinOS**

References

1. Early experiences with robot-assisted total knee arthroplasty using the DigiMatch ROBODOC surgical system. Liow MH, Chin PL, Tay KJ, Chia SL, Lo NN, Yeo SJ. *Singapore Med J*. 2014 Oct;55(10):529-34. doi: 10.11622/smedj.2014136.18
2. Robot-Assisted Total Knee Arthroplasty Does Not Improve Long-Term Clinical and Radiologic Outcomes. Jeon SW, Kim KI, Song SJ. *J Arthroplasty*. 2019 Aug;34(8):1656-1661. doi: 10.1016/j.arth.2019.04.007. Epub 2019 Apr 9.
3. Robotic-assisted total knee arthroplasty may lead to improvement in quality-of-life measures: a 2-year follow-up of a prospective randomized trial. Liow MHL, Goh GS, Wong MK, Chin PL, Tay DK, Yeo SJ. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2017 Sep;25(9):2942-2951. doi: 10.1007/s00167-016-4076-3. Epub 2016 Mar 26.
4. Robot-assisted total knee arthroplasty accurately restores the joint line and mechanical axis. A prospective randomised study. Liow MH, Xia Z, Wong MK, Tay KJ, Yeo SJ, Chin PL. *J Arthroplasty*. 2014 Dec;29(12):2373-7. doi: 10.1016/j.arth.2013.12.010. Epub 2013 Dec 14.
5. Accuracy of Bone Resection in MAKO Total Knee Robotic-Assisted Surgery. Sires JD, Craik JD, Wilson CJ. *J Knee Surg*. 2019 Nov 6. doi: 10.1055/s-0039-1700570.
6. MAKO CT-based robotic arm-assisted system is a reliable procedure for total knee arthroplasty: a systematic review. Batailler C, Fernandez A, Swan J, Servien E, Haddad FS, Catani F, Lustig S. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2020 Sep 25. doi: 10.1007/s00167-020-06283-z.
7. The three-year survivorship of robotically assisted versus non-robotically assisted unicompartmental knee arthroplasty. St Mart JP, de Steiger RN, Cuthbert A, Donnelly W. *Bone Joint J*. 2020 Mar;102-B(3):319-328. doi: 10.1302/0301-620X.102B3.BJJ-2019-0713.
8. Preliminary experience with an image-free handheld robot for total knee arthroplasty: 77 cases compared with a matched control group. Bollars P, Boeckxstaens A, Mievis J, Kalaai S, Schotanus MGM, Janssen D. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2020 May;30(4):723-729. doi: 10.1007/s00590-020-02624-3. Epub 2020 Jan 16.
9. Initial Experience with the NAVIO Robotic-Assisted Total Knee Replacement-Coronal Alignment Accuracy and the Learning Curve. Collins K, Agius PA, Fraval A, Petterwood J. *J Knee Surg*. 2021 Jan 28. doi: 10.1055/s-0040-1722693.