

## Orthopedic Application of CAS

## 항법장치를 이용한 골종양 수술

조환성\* · 양석훈 · 박해봉\* · 한일규 · 김한수<sup>✉</sup>

서울대학교 의과대학 서울대학교병원 정형외과학교실, \*분당서울대학교병원 정형외과

## Navigation-Assisted Orthopedic Surgery in Bone Tumor

Hwan Seong Cho, M.D.\*, Seok Hoon Yang, M.D., Hae Bong Park, M.D.\*, Ilkyu Han, M.D., and Han-Soo Kim, M.D.<sup>✉</sup>

Department of Orthopedic Surgery, Seoul National University Hospital, Seoul National University College of Medicine, Seoul,

\*Seoul National University Bundang Hospital, Seongnam, Korea

The usefulness and accuracy of computer-assisted surgery have been evaluated clinically in many orthopedic fields, including joint replacement arthroplasty, pedicle screw placement, and cruciate ligament reconstruction of the knee joint. Since several preliminary reports on application of navigation to bone tumor resection and reconstruction surgery have recently been issued, navigation-assisted surgery for bone tumors has received significant attention with regard to its usefulness. In particular, navigation can be helpful during surgery for musculoskeletal tumors, because it can maximize the accuracy of resection and minimize the unnecessary sacrifice of normal tissue by providing precise intraoperative three-dimensional radiological information. In addition, it is helpful in prosthetic reconstruction, because preoperative virtual simulation makes it possible to estimate size and location of bone defect to be left after tumor resection. Surgeons should recognize that use of navigation systems in bone tumor surgery has some hidden pitfalls. Here, based on our clinical results, we describe the surgical techniques that we have used and include some cautionary notes.

**Key words:** bone tumor, navigation

## 서론

정형외과 영역에서 수술용 항법장치의 효용성은 주로 인공관절 치환술, 척추경 나사 삽입술, 십자인대 재건술 등에서 평가되어 왔다.<sup>1-3)</sup> 최근 골종양 수술에서 수술용 항법장치의 이용이 소개되었고, 그 유효성에 대한 평가가 보고되고 있다.<sup>4-9)</sup> 항법 장치를 이용한 골종양 수술의 장점은 컴퓨터 단층촬영(computed tomography, CT)나 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI) 등의 영상에 나타난 종양의 경계를 수술 중 실시간으로 추적할 수 있도록 하여 정상 조직의 손실을 최소화하면서도 종양의 안전한 절

제를 가능하게 하는 데에 있다. 골간단부에 발생한 악성 골종양의 경우 보편적으로는 광범위 절제연을 안전하게 확보하기 위해 인접한 관절을 종양과 함께 절제하지만 수술용 항법장치를 적절히 이용하면 관절의 일부 혹은 전체를 보존하면서 종양의 안전한 절제가 가능할 수 있다.<sup>10)</sup>

본 논문에서는 골종양 치료에서 수술용 항법장치의 사용 방법에 대해 간단하게 설명하고 최근까지 보고된 문헌의 고찰을 통해 그 유효성에 대해 논의하고자 한다.

## 수술방법

## 1. 수술 전 계획

일반적인 골종양 수술과 마찬가지로 수술 전 계획을 철저히 세워야 한다. 종양의 범위, 조직적 악성도, 술 전 항암 약물치료의 반응 정도 및 종양의 절제 범위에 따른 골결 및 연부조직 재건 방법을 고려하여 절제연을 결정한다. 악성 골종양의 수술에서 항법장

Received October 9, 2013 Revised December 5, 2013

Accepted December 5, 2013

✉Correspondence to: Han-Soo Kim, M.D.

Department of Orthopedic Surgery, Seoul National University Hospital, 101 Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul 110-744, Korea

TEL: +82-2-2072-2368 FAX: +82-2-764-2718 E-mail: hankim@snu.ac.kr

치를 사용하는 경우, 종양의 범위를 수술 도중 실시간으로 확인할 수 있기 때문에, 종양의 위치를 머리모만 예측하여 수술을 시행하는 일반적인 방법에 비하여 계획하였던 절제를 보다 정확하게 수행할 수 있다. Cartiaux 등<sup>11)</sup>은 sawbone을 이용한 골반골 악성 골종양 모의 절제에서 골반골 수술 전문가라 하더라도 1 cm 오차 범위 내의 정확한 절제는 50% 정도에서만 가능하였다고 보고하면서 이러한 한계를 극복하기 위해서는 항법장치나 로봇의 도움이 필요할 것이라고 주장하였다. 골종양 수술에서 항법장치가 최대한 뼈를 보존하면서 불필요한 절제를 최소화하는 데 도움이 된다는 것은 큰 장점이다. 그러나 그렇다고 해서 종양의 완벽한 제거와 또 재발 가능성을 줄이기 위하여 안전한 절제면 확보의 중요성을 무시해서는 안된다. Enneking과 Dunham<sup>12)</sup>이 보고한 절제면에 따른 절제방법 분류에 의하면 원발성 악성 골종양의 경우 광범위 절제면을 확보하여야 한다. 항법장치를 이용한 수술을 계획하는 경우에는 종양의 안전한 절제를 위해 필요한 최소한의 절제면을 확보한 후 불필요한 절제를 최소화할 계획을 세워야 한다. 다시 말해 항법장치를 사용한다 하더라도 종양의 안전하고 완벽한 절제를 우선으로 하고 기능의 보존은 그 다음으로 고려해야 할 사항이다.

## 2. Registration

항법장치를 사용하기 위해서는 환자-영상 간 정합(patient-to-image registration; 환자의 실제 해부적 구조물과 영상의 해부적 구조물을 matching시키는 작업)이 필요한데, 그 방법은 크게 paired-point registration과 surface-matching registration의 두 가지로 나눌 수 있다. Paired-point registration은 독도법과 같은 원리로 3군데 이상의 실제 해부적 위치와 영상상의 위치를 matching하여 registration하는 방법이다. 실제 수술에서 paired-point registration을 하는 방법은 수술 중 절절부나 외상과와 같이 돌출된 해부적 구조물(anatomical landmark)을 이용하는 방법과 수술 전 미리 fiducial marker를 부착시키고 영상을 촬영한 후 수술 시 환자 몸에 부착된 fiducial marker와 영상 속의 fiducial marker를 matching하는 방법이 있다. Surface-matching registration이라 함은 수술 중 임의의 피질골을 노출시킨 후 항법장치에 여러 개의 점을 인식시켜 하나의 표면을 완성하면 영상에서 그와 일치하는 위치를 찾아내는 방식으로 registration하는 방법이다. 각각의 방법마다 장단점이 있지만 surface-matching registration을 사용하기 위해서는 피질골이나 관절면의 노출이 필요한데 이럴 경우 종양이 노출될 가능성이 있고, 이를 피하기 위해서는 수술 절개선 이외의 추가 절개와 연부조직 손상이 필요할 수 있다. Paired-point registration 중 해부적 구조물을 이용하는 방법은 실제 뼈의 한 점과 영상 위



Figure 1. An 18-year-old girl with an osteosarcoma of the right distal femur (A) underwent joint-preserving limb salvage surgery under navigation guidance (B, C). (D) At postoperative five years, she had no evidence of disease and no functional impairment of the knee.

에서 그에 해당하는 한 점을 정확하게 일치시키는 일은 거의 불가능하다. 또한 돌출된 해부적 구조물이 종양에 의해 침범되어 있는 경우에는 이를 registration에 이용할 수 없다.<sup>4)</sup> 따라서 저자들은 fiducial marker를 이용하는 방법을 선호하는데, registration 오차를 최소화할 수 있고 종양 오염의 위험성도 없다는 장점이 있는 반면 피질골에 fiducial marker를 삽입하기 위한 시술이 따로 필요하다는 단점이 있다. Fiducial marker를 이용한 paired-point registration은 머리 수술 같은 경우는 두피에 fiducial marker를 붙이고 CT나 MRI와 같은 3차원 영상을 얻은 후 시행할 수 있지만, 팔다리나 골반부의 수술에서는 fiducial marker를 피부에 붙이는 방법을 사용할 수 없다. 두피의 경우에는개골과 거리가 가깝고 비교적 단단히 붙어 있어서 마커가 바로 밑에 있는 피질골의 위치를 반영할 수 있으나, 사지나 골반에서는 피부가 밑에 있는 피질골에 붙어 있지 않고 거리가 있으므로 인접 관절을 움직이면 운동에 따라서 피부와 피질골 간의 위치 관계가 달라지게 된다. 따라서 사지와 골반에서는 fiducial marker를 반드시 피질골의 어느 지점에 위치시키고 영상을 얻어야 한다.

### 3. 수술

수술 중 사지의 움직임을 감지하기 위해서는 dynamic reference-base (DRB)를 수술하는 뼈에서 절제해내려고 하는 영역의 밖의 뼈 부분에 위치시켜야 한다 고정시켜야 한다. 항법장치를 이용하는 동안에는 DRB가 움직이지 않게 견고하게 고정하는 것이 필수적이다. 만약 고정이 견고하지 않아 수술 도중 헐거워지면 다시 고정하고 registration 과정을 반복하여야 한다.<sup>13)</sup> DRB를 고정하고 난 후 가장 먼저 해야 할 일은 실물 세계(환자의 뼈)의 좌표계와 컴퓨터 내의 영상(CT와 이의 다평면 재구성 및 3차원 재구성 영상)의 좌표계를 일치시키는 과정인데, 이러한 두 개의 좌표계를 일치시키는 과정을 환자-영상 간 정합(patient-to-image registration)이라고 한다. 피부절개와 연부조직 박리는 통상적인 방법으로 시행하고, 절골 시에 navigation을 사용하게 된다. 수술하는 부위에 따라 아래에 기술된 각각의 주의점을 염두에 두고 시행한다 (Fig. 1).

## 4. 주의점

### 1) Fiducial marker placement

Fiducial marker로 이용될 금속강선을 삽입하는 위치 선정이 navigation을 이용한 골종양 수술에서 가장 중요한 과정 중 하나이다. 금속강선은 종양 오염을 방지하기 위해 계획된 절제면 밖에 위치시켜야만 한다. 또한 시상면, 관상면, 횡단면 모두에서 관심부위(region of interest)를 포함하도록 위치시켜야 한다. 금속강선이 관심부위의 한 쪽에 치우치게 위치하면 navigation상에 나타나는 registration 오차보다 실제 오차는 커지게 된다(Fig. 2). 종양

이 뼈의 말단에 위치한 경우에는 금속강선을 관심부위 모두가 포함되게 위치시키기 불가능할 수 있다. 이 때는 실제 navigation 오차가 registration 오차보다 커질 수 있음을 염두에 두어야 한다. 피부와 뼈 사이의 거리가 멀지 않은 곳을 선정하여 수술 시에 강선을 찾을 때 최소한의 피부절개를 하는 것이 바람직하고 되도록 관절 속에 위치하지 않도록 한다. Fiducial로 사용된 금속강선의 위치를 정확하게 찾기 위해서는 금속강선이 삽입된 피질골을 완전하게 노출하여야 하는데, Cho 등<sup>14)</sup>은 최근 피질골 노출 없이 registration하는 방법을 고안하였다. Registration에 사용되는 probe를 속이 빈 철심(hollow pin)으로 하여 fiducial로 사용된 금속강선 위로 통과시켜 피질골에 닿을 때까지 피부 속으로 삽입하면 된다. 이 방법을 이용하면 금속강선 주위로 추가의 피부절개나 연부조직 박리 없이 registration할 수 있다.

### 2) Pelvic ring osteotomy

Navigation의 사용은 골반골과 같이 해부적 구조가 복잡한 뼈에서 매우 유용하다. 특히 비구 주위에 종양이 발생하였을 경우 고관절 보존이 가능할 수도 있어 기능에 큰 손상 없이 종양을 제거할 수 있다. 그러나 골반골은 좌우 골반골과 천골이 합쳐져 하나의 고리 구조로 되어 있기 때문에 한 곳에 파손이 일어나면 원래의 고리 모양과 다른 변화가 생길 수 있다. 그렇게 되면 항법장치에서는 그 변화를 인식하지 못하고 원래의 위치에 있는 것으로 인식하기 때문에 항법장치의 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 navigation을 이용한 골반골 절골술을 시행할 때에는 한 곳에 절골술을 시행하면 다른 곳의 절골술 시에는 navigation의 정확도가

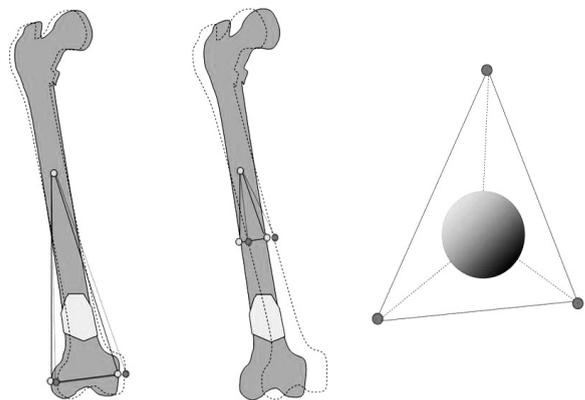


Figure 2. The registration error is not the same as the navigation error. When fiducials are concentrically located around the tumor, navigation errors at the area of concern are largely due to registration errors. However, if fiducials are eccentrically located, navigation error is greater than the registration error. Theoretically, at least four wires are necessary for concentric location of fiducials in all planes. Reproduced from the article of Cho et al. (J Korean Bone Joint Tumor Soc 2009;15:1-5) with permission of the copyright holder.

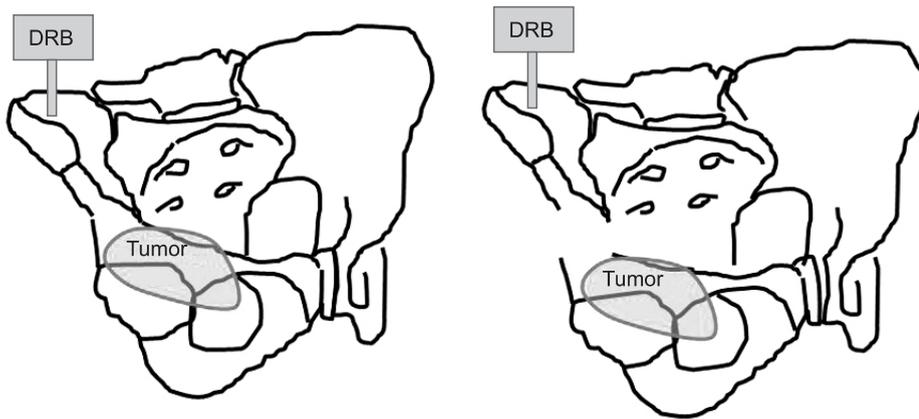


Figure 3. An osteotomy of the pelvic ring may disrupt the previously set spatial relationship between the registration points and the reference frame. DRB: dynamic reference-base.

유효하지 못할 수 있다는 사실을 염두에 두어야 한다(Fig. 3). 그러므로 반드시 절골술을 시행하기 전에 필요한 모든 절골술의 위치와 방향을 모두 표시해 두는 것이 바람직하다. 또한 가장 중요한 절골술을 먼저 시행하는 것이 좋다.<sup>4)</sup>

## 고 찰

### 1. 골반골 종양

골반부는 주요 신경과 혈관, 내부 장기가 인접하여 있어 수술 시 손상의 위험성이 높고 종양과 함께 제거할 경우 기능의 손실이 심각할 수 있다. 또한 골반골은 고관절을 비롯하여 골격 자체가 체중부하와 보행에 중요한 역할을 하기 때문에 불필요한 절제를 최소화하는 것이 수술 후 기능 장애를 최소화할 수 있다. 그러나 골반골에 발생한 악성 종양의 수술에서 많은 경우에 주요 해부적 구조와 골격을 절제하고서도 안전한 절제연을 확보하지 못하는 경우가 발생하고 이는 곧 환자의 종양학적 결과에 나쁜 영향을 미치게 된다. 골반골의 악성 골종양은 치료 결과가 매우 불량한 것으로 유명하다. Ozaki 등<sup>15)</sup>이 보고한 바에 의하면 골반골에 발생한 골육종의 경우 5년 생존율이 27%였고, 국소재발은 전체 수술 환자의 70%에서 발생하였다. 낮은 생존율의 이유로 높은 국소 재발률을 꼽았고, 이는 사지골에 발생한 골육종의 국소재발률이 10% 미만인 점과 비교하면 매우 높은 수치라고 보고하였다.

수술용 항법장치는 특히, 해부적 구조가 복잡한 골반골이나 천골에 발생하는 악성 골종양의 절제에 유용하다. 골반골 내의 종양의 위치뿐만 아니라 골 주위 주요 해부적 구조물과 종양과의 관계도 수술 중 실시간으로 확인할 수 있게 한다. 2004년 Hüfner 등<sup>5)</sup>에 의해 처음으로 골반골 종양의 수술에 항법장치의 사용이 보고된 이후 몇몇 증례보고를 포함해 소규모 연구가 있었으나 골반골에 발생한 악성 원발성 골종양의 치료에서 그 종양학적 결과에 대해서는 아직 장기적인 결과가 보고된 바는 없다. 최근 Cho 등<sup>9)</sup>에 의한 중장기 보고에서 10예의 골반골 종양 환자 중 2예에서 재발이 발생하였고, 이는 모두 연부조직에서 기인하였다고 보고

하였다. Wong과 Kumta<sup>16)</sup>는 2013년 연구에서 7예의 골반골 종양 환자와 5예의 천골 종양 환자 중 천골 종양 3예에서 재발이 발생하였다고 보고하였다.

### 2. 관절 보존 사지구제술

사지구제술에서 관절의 보존 여부는 수술 후 기능적인 측면에서 매우 중요한 요소로 수술을 시행할 때 가능하면 관절을 살리고자 노력한다. 그러나 악성 종양의 수술을 시행할 때에는 수술 후 기능적인 면을 고려하기 전에 우선시되어야 할 것이 종양의 안전하고 완전한 절제이며, 종양이 관절 근처에 있을 때에 관절을 보존하려고 욕심을 내다보면 자칫 종양을 남길 수 있기 때문에 통상적인 방법은 관절을 포함하여 종양을 절제한다. 이러한 상황에서 항법장치는 큰 도움이 된다. 종양과 관절면 사이에 어느 정도의 거리가 있는 경우 항법장치를 사용하여 관절면을 보존하면서도 종양을 안전하게 절제할 수 있다. Cho 등<sup>9,10)</sup>은 영상적으로 술 전 항암치료의 효과가 좋을 것으로 기대되면서 종양과의 거리를 1 cm 이상 확보할 수 있는 경우를 항법장치를 사용한 관절면 보존 수술의 적응증으로 보고하였다.

뿐만 아니라, 사전에 수술을 계획할 때 종양 절제의 시뮬레이션을 할 수 있어 이를 토대로 환자 맞춤형 종양 대체물을 사전에 주문 제작함으로써 실제 수술 후 발생하는 골격 결손에 사용할 수 있게 되었다.<sup>17)</sup>

### 3. 양성 골종양

양성 골종양이 관절면 근처에서 발생한 경우 소파술을 시행할 때 관절면의 천공이 발생할 수 있다. Lee 등<sup>18)</sup>은 이러한 경우에 수술용 항법장치를 이용하여 관절면의 천공 없이 소파술을 시행할 수 있었다고 보고하였다. 또한 Wong 등<sup>19)</sup>은 항법장치와 관절경을 동시에 사용하여 피부절개를 최소화하며 종양의 소파술을 시행하였다고 보고하였다. 종양의 위치를 항법장치로 확인하면서 실제 소파술은 관절경 시야하에서 시행할 수 있기 때문에, 관절경 삽입을 위한 절개만으로도 소파술이 가능하였다. 유골골종에서

항법장치가 유용하게 사용되었다는 보고도 있다. 유골골종은 수술적 치료를 시행하거나 CT-guided percutaneous radiofrequency ablation (RFA)을 시행하여 치료한다. 보통은 RFA가 우선적으로 고려될 수 있는 치료법이나 종양 주위에 주요 신경-혈관이 지나가거나 척수에 근접한 경우 혹은 관절면에 연해 있는 경우 등에서는 RFA 시에 발생하는 열로 인한 손상의 위험 때문에 그 사용이 제한적이다. 이러한 경우 수술적 치료로 소파술을 시행하게 되는데 수술 시야에서 종양의 위치를 정확하게 파악하기가 매우 힘들다. CT나 fluoroscopy를 사용하지 않고 항법장치를 이용하여 수술실에서 유골골종의 위치를 확인하고 최소절개로 핵(nidus)을 제거하는 수술이 가능하다.<sup>20)</sup>

#### 4. 종양학적 결과

수술용 항법장치의 효용성은 인공관절 치환술, 척추경 나사 삽입술, 십자인대 재건술 등에서 많은 평가가 있었고, 아직도 논란의 여지가 있다. 그러나, 골종양 수술에서 항법장치의 효용성은 질환이 가지는 특수성 때문에 수술 후 기능과 같은 비교적 단기간의 결과뿐 아니라, 환자의 생존이라는 장기간의 종양학적 결과 측면에서 평가가 더욱 중요하다. 골종양 분야에서 수술용 항법장치의 이용이 비교적 최근에 시작되었다는 점에서 장기 추시에 대한 보고는 매우 드물다. 최근 Cho 등<sup>9)</sup>은 원발성 악성 골종양의 수술에서 항법장치를 이용하였던 18예에 대해 최소 3년 이상의 중장기 결과를 보고하였다. 모든 환자가 Enneking 병기 IIB이었고, 10예의 골반골 종양과 8예의 사지골 종양 수술에서 항법장치를 사용하였다. 사지골 종양은 모두 인접 관절의 희생 없이 관절보존 사지구제술을 시행하였다. Kaplan-Meier 3년 생존율은 88.9% (95% 신뢰구간: 75.4%-100.0%)였고, 국소재발은 2예에서 발생하였다. 최종추시 시의 평균 International Society of Limb Salvage (ISOLS) 기능 점수는 26.7점/30.0점이었다. 이는 통상적인 원발성 악성 골종양의 종양학적 및 기능적 결과보다 우수한 치료 성적으로 볼 수 있다. 그러나 이 연구는 포함된 대상 환자의 많은 수가 술 전 항암치료를 하였고, 항법장치의 적응증이 술 전 항암치료를 하였을 경우 잘 반응하였을 것이라고 예상되는 환자만으로 하였다는 점이 종양학적 결과에 selection bias로 작용하였을 수 있다. 골종양에서 항법장치를 이용한 수술의 종양학적 결과에 대한 보고를 해석할 때는 또 다른 selection bias를 고려하여야 하는데, 많은 보고에서 종양이 관절 주위에 있을 때 관절을 보존하기 위해 항법장치를 이용한다는 점이다. 다시 말해 관절을 보존하기 위해서는 종양이 관절을 직접 침범하지 않고 관절과 어느 정도의 거리를 두고 있다는 것인데 이러한 종양은 일반적으로 종양의 크기가 작다. 특히 골반골에 발생한 악성 원발성 골종양의 경우 발견 당시 크기가 매우 크고 고관절 비구를 모두 침범한 경우가 많지만, 항법장치가 이용되는 경우는 고관절을 직접 침범하지 않았거나 일부만 침범하여 비구의 일부 혹은 전체를 보존하기 위해서이

다. 종양의 크기는 예후와 직접적인 관계가 있는 인자로서 항법장치를 이용한 종양 수술의 결과는 selection bias를 감안하여 해석하여야 할 것이다. 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 randomized controlled clinical trial이 바람직하겠지만, 종양 환자라는 특성상 윤리적인 문제로 실제로 그러한 연구를 하기는 힘든 실정이다.

분명한 점은 관절 주위에 발생한 원발성 악성 골종양의 수술에서 인접한 관절을 보존하면서도 재발의 위험성을 최소화하여 수술 후 기능에 도움을 줄 수 있다는 점과 골반골과 같이 해부적 구조가 복잡한 곳에 발생한 악성 골종양의 수술 시 종양의 위치를 실시간으로 모니터링함으로써 안전하고 완벽한 종양 절제를 돕고 궁극적으로는 재발의 위험성을 줄일 수 있다는 점이다.

## 결론

1. 악성 골종양의 수술적 치료에서 수술용 항법장치는 종양의 경계를 실시간으로 모니터링할 수 있게 함으로써 종양의 안전한 절제를 돕고 불필요하게 절제될 정상 조직을 최소화하는 데 도움을 줄 것으로 기대된다.
2. 항법장치를 이용하는 수술은 수술 전에 시뮬레이션을 가능하게 하고 종양 절제 후에 남게 될 결손 부위와 모양을 미리 예측할 수 있어 사전 주문형 종양대치물을 이용한 골격재건을 할 수 있다.
3. 또한 수술 전 시뮬레이션을 재현하여 종양의 절제가 가능하도록 환자 맞춤형 도구가 개발되고 있다.
4. 이러한 장점이 종양의 재발률을 낮추고 동시에 기능 손실을 최소화하는 데에 기여하는지를 확인하기 위해서는 장기적인 추시 연구가 필요할 것이다.

## REFERENCES

1. Amiot LP, Lang K, Putzier M, Zippel H, Labelle H. Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2000;25:606-14.
2. Hart R, Krejzla J, Sváb P, Kocis J, Stipcák V. Outcomes after conventional versus computer-navigated anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*. 2008;24:569-78.
3. Jolles BM, Genoud P, Hoffmeyer P. Computer-assisted cup placement techniques in total hip arthroplasty improve accuracy of placement. *Clin Orthop Relat Res*. 2004;426:174-9.
4. Cho HS, Kang HG, Kim HS, Han I. Computer-assisted sacral tumor resection. A case report. *J Bone Joint Surg Am*. 2008;90:1561-6.
5. Hüfner T, Kfuri M Jr, Galanski M, et al. New indications for

- computer-assisted surgery: tumor resection in the pelvis. *Clin Orthop Relat Res.* 2004;426:219-25.
6. Pappas IP, Puja M, Styner M, Liu J, Caversaccio M. New method to assess the registration of CT-MR images of the head. *Injury.* 2004;35 Suppl 1:S-A105-12.
  7. Wong KC, Kumta SM, Antonio GE, Tse LF. Image fusion for computer-assisted bone tumor surgery. *Clin Orthop Relat Res.* 2008;466:2533-41.
  8. Wong KC, Kumta SM, Chiu KH, Antonio GE, Unwin P, Leung KS. Precision tumour resection and reconstruction using image-guided computer navigation. *J Bone Joint Surg Br.* 2007;89:943-7.
  9. Cho HS, Oh JH, Han I, Kim HS. The outcomes of navigation-assisted bone tumour surgery: minimum three-year follow-up. *J Bone Joint Surg Br.* 2012;94:1414-20.
  10. Cho HS, Oh JH, Han I, Kim HS. Joint-preserving limb salvage surgery under navigation guidance. *J Surg Oncol.* 2009;100:227-32.
  11. Cartiaux O, Docquier PL, Paul L, et al. Surgical inaccuracy of tumor resection and reconstruction within the pelvis: an experimental study. *Acta Orthop.* 2008;79:695-702.
  12. Enneking WF, Dunham WK. Resection and reconstruction for primary neoplasms involving the innominate bone. *J Bone Joint Surg Am.* 1978;60:731-46.
  13. Kendoff D, Gardner MJ, Krettek C, Hüfner T, Citak M. Reference markers in computer aided orthopaedic surgery: rotational stability testings and clinical implications. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2008;128:633-8.
  14. Cho HS, Park IH, Jeon IH, Kim YG, Han I, Kim HS. Direct application of MR images to computer-assisted bone tumor surgery. *J Orthop Sci.* 2011;16:190-5.
  15. Ozaki T, Flege S, Kevric M, et al. Osteosarcoma of the pelvis: experience of the Cooperative Osteosarcoma Study Group. *J Clin Oncol.* 2003;21:334-41.
  16. Wong KC, Kumta SM. Computer-assisted tumor surgery in malignant bone tumors. *Clin Orthop Relat Res.* 2013;471:750-61.
  17. Bellanova L, Paul L, Docquier PL. Surgical guides (patient-specific instruments) for pediatric tibial bone sarcoma resection and allograft reconstruction. *Sarcoma.* 2013;2013:787653.
  18. Lee HI, Shim JS, Jin HJ, Seo SW. Accuracy and limitations of computer-guided curettage of benign bone tumors. *Comput Aided Surg.* 2012;17:56-68.
  19. Wong KC, Kumta SM, Tse LF, Ng EW, Lee KS. Navigation Endoscopic Assisted Tumor (NEAT) surgery for benign bone tumors of the extremities. *Comput Aided Surg.* 2010;15:32-9.
  20. Kang HG, Cho CN, Kim KG. Percutaneous navigation surgery of osteoid osteoma of the femur neck. *Minim Invasive Ther Allied Technol.* 2013 [Epub ahead of print].

## 컴퓨터 적용 수술의 정형외과 사용

## 항법장치를 이용한 골종양 수술

조환성\* · 양석훈 · 박해봉\* · 한일규 · 김한수<sup>✉</sup>

서울대학교 의과대학 서울대학교병원 정형외과학교실, \*분당서울대학교병원 정형외과

정형외과 영역에서 수술용 항법장치는 인공관절 치환술, 척추경 나사 삽입술, 십자인대 재건술 등에서 그 효용성이 인정되어 왔으나 최근 골종양의 절제와 종양 절제 후 발생한 골결손 재건술에 대해 적용된 사례가 보고되면서 점차 유효성이 인정되고 있다. 특히 악성 골종양의 수술적 치료에서 종양의 경계를 실시간으로 모니터링할 수 있게 함으로써 종양의 안전한 절제를 돕고 정상조직의 불필요한 절제를 최소화하는 데 도움이 될 것이다. 또한 수술 전 시뮬레이션이 가능하게 되고 종양 절제 후 결손 부위와 모양을 미리 예측할 수 있어 사전 주문형 종양대치물을 이용한 골격재건에 큰 도움을 줄 것으로 기대된다. 그러나 항법장치를 골종양에 이용하기 위해 서는 사용방법에 대한 완벽한 이해와 정확성 뒤에 숨어 있는 오차에 대하여 숙지해야 한다.

**색인단어:** 골종양, 항법장치

접수일 2013년 10월 9일 수정일 2013년 12월 5일 게재확정일 2013년 12월 5일

<sup>✉</sup>책임저자 김한수

서울시 종로구 대학로 101, 서울대학교병원 정형외과

TEL 02-2072-2368, FAX 02-764-2718, E-mail hankim@snu.ac.kr