



사이버나이프 로봇형 방사선수술장치를 이용한 암 치료

Cyberknife Robotic Radiosurgery System for Cancer Treatment

김 연 실 | 가톨릭의대 방사선종양학과 | Yeon Sil Kim, MD

Department of Radiation Oncology, The Catholic University of Korea College of Medicine

E-mail : yeonkim7@catholic.ac.kr

J Korean Med Assoc 2008; 51(7): 630 - 637

Abstract

The Cyberknife is an integrated image-guided, frameless radiosurgery system. The physical component includes a compact 6 MV X-band linear accelerator mounted to the mobile arm of a robotic manipulator and a real-time imaging system connected to a remote image registration console. Two orthogonally positioned diagnostic x-ray cameras provide real time images of the patient's internal anatomy during treatment. The images are processed automatically to identify radiographic features, such as skull bone landmarks or implanted fiducials and are then automatically compared with digitally reconstructed image of the patient's planning CT. In this processing, the direction of the radiation beam is continuously re-adjusted to reflect any changes in the patient position. An analysis of the accuracy of the Cyberknife radiosurgery system found that the machine has a clinically relevant accuracy of 1.0 ± 0.3 mm. While clinical results with intracranial lesions are comparable to frame-based radiosurgical technique using gamma-knife or linac, recent experiences demonstrate the potential to broadly expand the scope of radiosurgery to many extracranial sites especially for cancer patients. The major potential benefit of radiosurgical ablation of malignant tumors are relatively short treatment time in an out-patients setting combined with better local control of the tumor with minimal risk of side effects. Cyberknife radiosurgery offers a new and alternative therapeutic modality for the medically inoperable early cancers, previous irradiated sites, and difficult lesions not amenable to open surgery, as a boost therapy with surgery or external radiation therapy or for rapid symptom relief of palliative care patients. While we are encouraged by excellent local control of early clinical experiences of Cyberknife, we also stressed the importance of long term follow-up results.

Keywords: Cyberknife; Robotic radiosurgery; Image-guided radiotherapy

핵심용어: 사이버나이프; 로봇형 방사선수술; 영상유도 방사선치료

서론

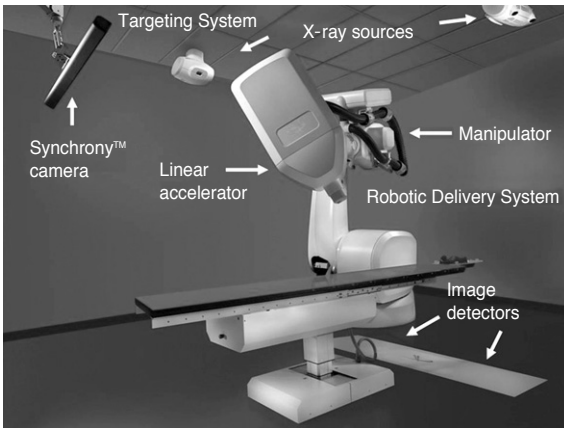
암을 극복하고자 하는 우리 인간의 노력은 과히 무한도 전 시대라고 할 수 있다. 방사선종양학 분야에서도

세기변조 방사선치료(IMRT), 세기변조양성자치료(IMPT), 영상유도방사선치료(IGRT) 및 적응방사선치료(Adaptive RT) 등이 낫설지 않은 친숙한 말이 되었다. 방사선수술은 적은 부위에 고선량의 방사선량을 집중 조사하는 방법으로

Table 1. Comparison of conventional radiotherapy and radiosurgery

	Conventional Radiotherapy	Radiosurgery
Target volume	gross tumor volum + microscopic extension	gross tumor volume only
Irradiation time	within 10min	30 minutes~several hours
Treatment duration	2 weeks~2 months	1 day~1 week
Fraction number	about 10~40 fractions	about 1~5 fractions
Machine	general linear accelerator	linear accelerator with RS* option Gamma knife Cyberknife
Dose per fraction	about 2Gy	5~30Gy
Beam Numbers	about 5~6 beams	dozens~hundreds

* Radiosurgery

**Figure 1.** The Cyberknife is an integrated image guided, frameless radiosurgery system. The physical component includes a compact 6 MV X-band linear accelerator mounted to the mobile arm of a robotic manipulator and a real-time imaging system.

1967년 Leksell에 의해 감마나이프 치료기가 도입되어 두개내 병변의 방사선수술을 시행한 이래 다양한 종류의 두개내 종양 및 혈관기형을 비수술적 방법으로 제거(ablation)하는 효과적인 치료 방법으로 사용되어 왔다.

그러나 침습적인 고정기구를 장착해야 하며 이로 인한 환자의 불편감이 크고 1회에 치료를 끝내야 하는 제한 때문에 두개내 악성종양이나 두개의 병변에 대해서는 매우 제한적으로 사용되었다. 사이버나이프는 이러한 기존 방사선수술의 한계점을 극복한 신 치료법(novel treatment)이라고 할 수 있다.

사이버나이프 방사선수술장비의 특징

사이버나이프의 특징은 미사일항공법에 기초한 선형가속기 말단의 로봇 조사방법과 영상유도장치이다. 사이버나이프 방사선수술장비의 중요 구성요소는 매우 자유롭게 움직이는 로봇 말단기를 포함한 약 130Kg의 콤팩트한 6MV 선형가속기(분당조사선량을 300~600MU)와 실시간 치료영상을 얻을 수 있는 X-ray 영상촬영기 및 영상감지 카메라, 호흡운동감지 카메라이다(Figure 1).

사이버나이프 방사선수술 장치의 가장 차별화된 특징은 기존의 침습적인 고정기구 없이 신체골격영상(두개골, 척추골) 및 신체 내에 주로 종양내부나 근처에 삽입된 금침의 좌표를 실시간 영상 촬영하여 종양의 위치를 감지하고 추적해서 방사선을 조사한다는 점이다.

즉, 표적의 실제 위치를 쫓아서 라이낙 로봇말단기가 움직이도록 제어하는 컴퓨터 알고리즘에 따라 계산된 좌표만큼 사이버나이프의 로봇 말단부가 움직여서 $1.0 \pm 0.3\text{mm}$ 오차범위 이내에서 정확하게 방사선수술이 가능하다는 점이다.

사이버나이프 방사선수술장비의 장점

기존의 뇌 방사선수술 장비와는 달리 침습적인 고정틀을 사용하지 않으면서도 실시간 종양 부위의 영상촬영을 통해 동일한 정도의 초정밀 방사선수술이 가능하고 침습적인 고정틀을 사용하지 않기 때문에 통원치료가 가능하며 뇌종양 뿐만 아니라 금침 삽입이 가능한 부위라면 어디든 전신 암치료를 사용할 수 있다. 또한 수 회에 나누어 분할 방사선수술을 할 수 있어 기존의 1회에 시행하던 방사선수술에 비해 방사선 손상이나 부작용의 관점에서 보다 안전하다고 할 수 있다.

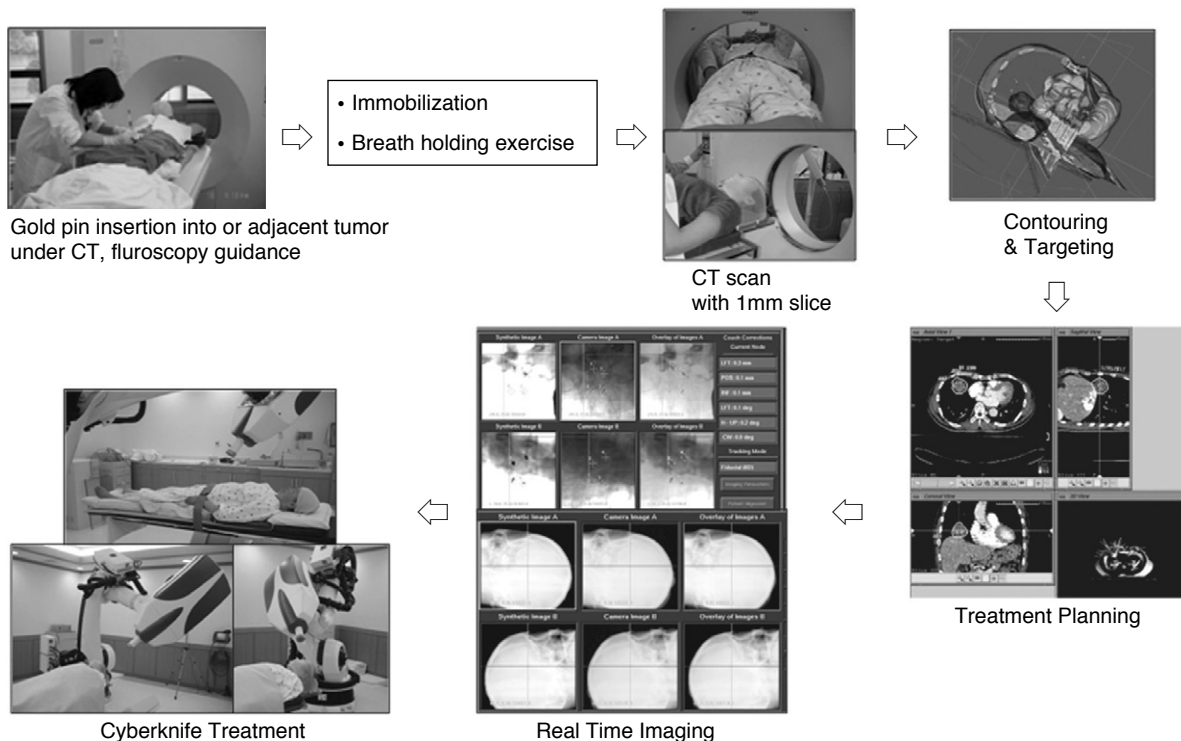


Figure 2. Procedures of Cyberknife radiosurgery.

방사선수술과 일반 방사선치료의 차이

Table 1은 사이버나이프 방사선수술을 포함한 방사선수술기법과 일반 방사선치료의 차이점을 비교한 것이다.

사이버나이프 방사선수술장비의 발전

사이버나이프는 Accuray사(Sunnyvale, California, USA)에 의해 개발되어 1994년도 미국 스탠포드대학에 초기 모델의 사이버나이프가 설치되었으며 2001년도 전신의 암을 치료할 수 있는 방사선치료기로 미국 FDA의 승인을 받았다. 2004년도에 로봇 말단부가 호흡운동주기에 따라 종양의 움직임을 추적하며 방사선수술을 시행할 수 있는 Synchrony 시스템이 미국 FDA의 승인을 얻어 현재 널리 사용되고 있다.

2006년도에는 제4세대 사이버나이프가 개발되어 분당 선량률이 600MU/분으로 증가하여 방사선수술 시간이 단축되었으며 치료 테이블 밑에 위치하던 실시간 영상감지 카메라가 치료실 바닥에 내장되어 좀 더 광범위한 로봇 말단부의 움직임이 가능해졌다. 이 외에도 두개골 뿐 아니라 비교적 움직임이 적은 척추골의 영상추적이 가능해지면서 척추 및 척추 주변 병변의 치료에는 금침 삽입이 필요치 않게 되어 고정밀 방사선치료기로서 여러 가지 기술적인 진보가 이루어졌다.

사이버나이프 방사선수술 과정

간단하게 사이버나이프 치료과정을 요약하면 아래와 같다 (Figure 2).

1. 종양 내부 혹은 주변에 금침(Gold fiducials)을 삽입한

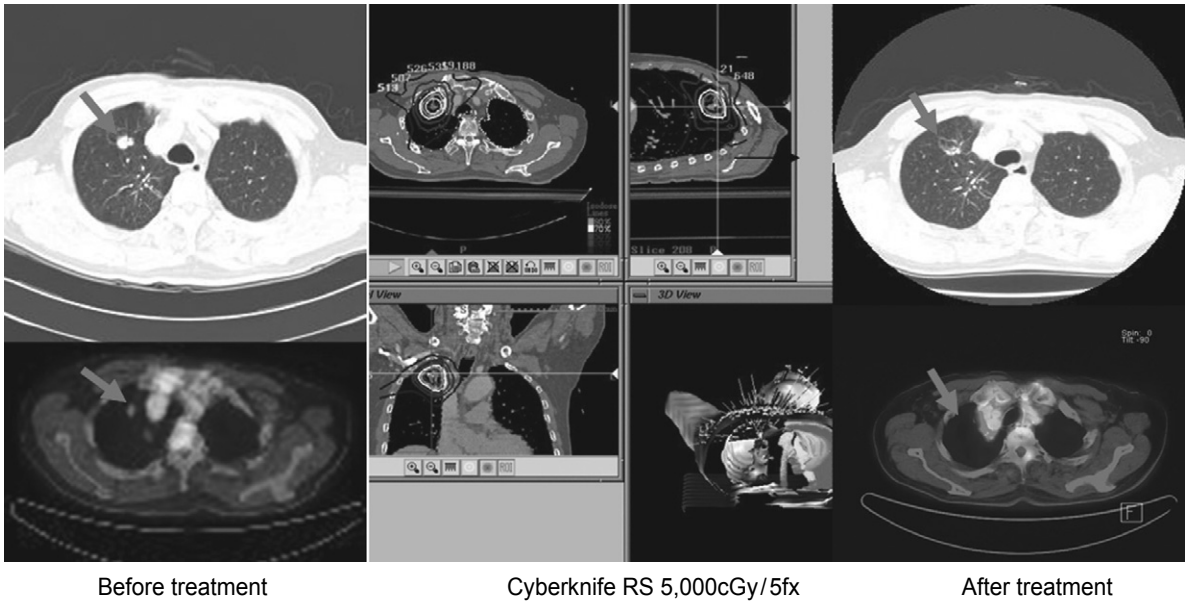


Figure 3. Typical demonstration of medically inoperable early stage non-small cell lung cancer (T1N0M0) treated with Cyberknife radiosurgery. He was 90 years old man having another 2nd primary glottic cancer.

다. 초음파, X선 투시기 혹은 CT로 종양 부위를 확인하면서 삽입하고 정확한 종양위치 추적에 위해서는 3개 이상의 금침이 종양 중심으로부터 5cm 이내에 삽입되는 것이 이상적이다. 제4경추 상부의 병변에서는 두개 골영상을 이용하여 종양의 위치를 추적하므로 금침 삽입이 필요없다.

2. 치료 부위에 따라 치료 자세를 고정하기 위한 장치를 만든다.
3. 흉강, 복강내 종양의 경우에는 호흡에 따른 종양의 움직임을 최소화하기 위해 안정된 호흡 연습을 한다.
4. 체위 고정장치를 하고 연습한 안정된 호흡상태에서 치료계획용 CT를 촬영한다. 두경부, 뇌 종양의 경우에는 치료계획용 MRI도 함께 촬영하여 영상혼합(image fusion)을 한다.
5. 사이버나이프 방사선수술을 실시할 표적종양과 인접 정상장기를 치료팀이 함께 결정하고 전문 물리학자와 컴퓨터 치료계획을 세워 최적의 치료계획을 선택한다. 가장 복잡한 고난이 과정으로 약 24시간이 소요된다.
6. 선택된 치료 계획 대로 실시간 종양 위치를 추적하면

서 사이버 나이프 방사선 수술을 시행한다. 뇌, 두경부의 경우 약 30분~1시간이 소요되고 호흡조절이 필요한 부위의 치료는 호흡조절의 방법에 따라 약 1~2시간이 소요된다.

사이버나이프 방사선수술의 적응증 및 치료 예

최근 평균 생존기간이 길어지고 인구의 노령화에 따라 고연령의 환자에서 암 진단율이 늘고 있다. 그러나 이같은 노령환자에서 심폐기능 저하 및 동반된 질환들로 수술 등 적극적인 암치료를 시행하기 어려운 상황에 직면하게 된다. 3차원 입체조형방사선치료 및 세기변조방사선치료의 임상치료 성적이 매우 우수하지만 모의치료과정, 치료준비과정(set-up), 치료기간이 길어서 노령환자에 적용하기에는 적절치 못한 경우가 있다. 이러한 환자들에서 사이버나이프 방사선 수술은 기존의 방사선치료방법보다 비교적 안전하게 고선량의 방사선을 짧은 기간 내에 투여할 수 있는 편리한 방법으로 노령환자 및 수술이 불가능한 초기 암 환자에서 수술을



Figure 4. Thirty four years old young woman was diagnosed with adenoid cystic carcinoma of right. salivary gland. She refused orbital exenteration of right eye. After combined therapy of external radiation therapy 45Gy and Cyberknife radiosurgery 25Gy, she gained complete response (CR) and maintained CR for 17 months.

대체할 수 있는 치료이다(Figure 3). 또한 기존에 방사선치료, 항암제, 수술을 시행받은 환자에서 국소적으로 종양이 재발하였거나 잔류종양이 남은 경우 좋은 구제치료의 방법이 될 수 있다. 뿐만 아니라 체내 심부에 위치하거나 중요한 장기에 인접해있어 수술이 어려운 경우에도 사이버나이프 방사선수술을 1차 치료방법으로 시도해 볼 수 있다(Figure 4). 최근 원발 종양은 치유되었거나 치유 가능성이 높은 상태이나 재발된 숫자의 전이종양이 발견된 경우에 흔히 전이종양을 수술로 제거하는 경우가 있는데 이러한 전이종양을 수술 대신 사이버나이프 방사선수술로 치료할 수 있다. 사이버나이프와 같은 고난이 고정밀 방사선치료를 고식적 환자치료 목적으로 사용하는 것은 의료비용-효과 측면에서 숙고해 볼 사항이지만 임상증상 조절이 시급히 필요한 경우 여타 다른 방법으로 증상 조절이 안될 때 주치의의 판단에 따라 시행할 수 있다. 일반적인 사이버나이프 수술이 가능한 종양의 크기는 5cm 미만으로 이보다 큰 종양에서는 주변 조직의 방사선량을 줄이기 어려워 방사선수술로서의 이

득을 기대하기 어렵다.

2006년도 미국 스탠포드대학 통계(1)에 의하면 체부 사이버나이프 수술빈도는 척추, 췌장, 전립선, 폐, 두경부 및 간 순이었다. 국내에는 2002년도에 이어 2003년도에 사이버나이프 치료가 도입되어 양 임상기관에서 이제까지 각각 약 1,800예와 1,000예의 임상경험을 축적하게 되었으며 국내 치료환자의 분포는 양 기관에서 차이를 보였으나 전체적으로 신경-두부보다는 체부종양의 치료 건수가 높아 약 60~70%를 차지하였다. 체부종양의 경우 두경부종양이 두 기관에서 가장 높은 치료 빈도(약 20%)를 보였으며 전이된 림프절, 원발성 간암 및 간 전이암, 폐암 및 폐전이암, 췌장암 순으로 높은 치료빈도를 보였고 한 기관에서는 골전이암의 치료 건수도 13.3%로 높았다. 신경두부종양 중에는 원발성 뇌종양보다는 전이암의 치료 빈도가 월등히 높았다. 최근 체부 정위적방사선수술에 대한 관심이 점점 높아지고 있으며 신경두부 종양 뿐 아니라 체부 방사선수술을 동시에 시행할 수 있다는 장점 때문에 2007년도와 2008년도에 결

쳐 3대의 사이버나이프 치료기가 추가로 국내에 도입되어
체부 방사선수술의 치료 건수는 점차 늘어날 전망이다.

현재까지 사이버나이프 방사선수술성적 및 향후 방향, 제한점

사이버나이프를 이용한 암치료 경험은 아직까지 전 세계적으로 많지 않다. 2006년도 말까지 약 160개 사이버나이프 치료센터에서 약 2만명의 환자가 사이버나이프를 치료 받았으며 약 160개의 임상 결과 혹은 사이버나이프의 기술적 측면에 관한 논문이 출간되었다고는 하나 아직까지 임상에서 개개의 암환자 치료의 확실한 지침으로 삼을 만한 장기간에 걸친 치료성적의 결과가 부족한 실정이다. 현재까지 전 세계적으로 가장 많은 임상결과가 발표된 것은 뇌전이암, 척추병변, 초기 원발성 폐암 및 전이성 폐암에 대한 치료 결과이다. 425명의 척추병변을 사이버나이프를 치료한 Pittsburgh 대학의 Gerszten 등의 결과(2)에 의하면 92%의 환자에서 통증의 감소가 있었고 수술전 신경학적 휴유증이 있었던 환자의 86%에서 신경학적 휴유증이 감소 혹은 소실되었다. 이 외에도 이전에 척추에 방사선치료를 받았던 107명의 환자에서 사이버나이프 방사선수술을 다시 시행하였던 Georgetown University의 치료 결과(3)도 신경학적 휴유증 없이 95%의 환자에서 통증이 감소하였고 완전반응을 보인 환자도 77%에 달했다. 초기 원발성 폐암 혹은 전이성 폐암에 대한 치료 결과도 매우 고무적이며 Miami 사이버나이프센터의 Brown 등(4)의 최근 발표 결과에 의하면 15~65Gy를 1~5회 분할치료 결과, 거의 대부분의 환자에서 부분반응 이상의 반응을 보였으며 1년 후 국소제어율이 75%였고 2.8%의 환자에서만 정도 3 이상의 방사선폐렴이 관찰되었다.

국내의 주요 질환에 대한 치료성적을 보면 자궁경부암 혹은 대장암의 림프절 전이에 대한 치료성적이 우수하였다. 이는 종양의 경계가 매우 확실하고 비교적 움직임이 적은 부위이기 때문일 것으로 생각된다. 또한 수술이 불가능한 초기 폐암 혹은 1~3개의 제한된 수의 전이성 폐암의 치료성적도 우수하여 2007년도 유 등(5)의 발표에 의하면 약 96.7%

의 환자에서 부분반응 이상의 초기 반응을 보였으며 17개월의 평균 추적기간 동안 76.7%의 환자에서 종양제어를 보였다. 특히 총 방사선 조사선량과 반응률과의 연관관계가 있어 4cm 미만의 종양에서 BED 100Gy 이상 충분한 방사선량이 조사된 경우가 그보다 낮은 선량을 조사한 경우보다 종양제어율에 현저히 차이가 있어 기존의 Onishi 등(6)의 정위적 방사선치료 결과와 유사하였다. 국소진행된 췌장암에서 33~39Gy를 3회 분할 치료한 사이버나이프 단독치료 결과도 1년 생존율이 36.8%, 평균생존기간이 11개월로 방사선-항암제 병용치료 결과들과 거의 유사하거나 우월하였고 정도 3도 이상의 심각한 부작용은 관찰되지 않았다(7). 국소진행된 췌장암과 같이 평균생존기간이 짧은 종양에서 사이버나이프 방사선수술은 치료기간을 단축하여 편리하며 환자의 삶의 질을 향상시킬 수 있는 치료 방법으로 추천될 수 있다. 이 외에도 절제가 불가능한 두경부암의 재발에서 사이버나이프 방사선수술은 69~80%의 높은 반응을 보였고(8, 9) 특히 근치적으로 방사선치료를 시행한 국소진행한 두경부암에서 외부 방사선치료와 사이버나이프 방사선수술을 병합치료하여 반응률이 100%로 매우 고무적인 결과를 보였다(10). 이 외에도 국내에서 더 많은 치료가 이루어지고 있는 간암의 경우 3~4cm 미만의 단일결절의 경우 1년 국소제어율 85%, 1년 생존율 100%의 결과를 보이고 있다.

사이버나이프를 사용한 방사선수술을 임상에서 암환자 치료에 널리 이용하기 위해서는 몇 가지 해결해야 할 문제가 있다. 첫째로 적절한 조사선량과 분할조사 횟수를 결정하는 것이다. 여기에는 원발병소의 크기, 원발조직의 방사선생물학적 특징 및 주변 정상조직에 조사되는 방사선량, 재발 환자의 경우 과거 방사선치료의 병력 등을 고려하여 신중하게 결정할 문제이나 이제까지 체부 정위적 방사선치료의 임상 결과가 많지 않아 현재까지는 방사선이 조사되는 조직의 α/β 에 따라 생물학적 등가 선량(BED)에 기준하여 조사선량 및 분할 횟수를 결정하고 있으나 종양을 제거(ablation)하면서 주변 정상조직에 만성 휴유증을 최소화하기 위한 적합한 조사선량 및 분할 횟수를 제시하기 위해서는 일반적인 분할 방사선치료가 아닌 고선량의 저분할

(large fraction, hypofraction) 치료에 대한 방사선생물학적 연구 및 긴 기간의 임상경험의 축적이 필요하다고 하겠다. 둘째는 호흡에 의한 종양의 움직임과 주변장기의 움직임에 의한 종양의 움직임을 제어하는 일이다. 일반 방사선 치료의 경우 호흡주기 및 종양의 움직임을 고려하여 종양 주변에 충분한 여유를 두고 방사선조사야를 결정하지만 사이버나이프 수술은 원칙적으로 종양에만 방사선이 집중되도록 해야 하므로 최소한의 여유만을 두게 된다. 종양에 금침을 삽입하여 실시간으로 종양위치의 영상을 얻어 교정하면서 치료한다 해도 호흡에 의한 종양의 움직임을 제어하는 일은 고정밀 방사선수술을 위해서 기본 조건이다. 현재까지 호흡에 의한 종양의 움직임을 제어하는 방법은 synchrony와 같이 호흡패턴에 따라 종양의 움직임을 추적하여 로봇 말단부가 움직여 주는 방법이 있고 환자의 호흡주기를 모니터링하면서 미리 정해진 호흡주기에만 방사선을 투여하는 호흡동조치료(respiratory gating), 이 밖에도 호흡운동을 억제하기 위한 복부 압박장치를 사용하는 방법들이 임상에서 시도되고 있다.

종양의 움직임은 호흡에 의해서 뿐 아니라 내부 장기의 움직임에 의해서 random pattern으로 발생하므로 이러한 종양의 움직임을 추적해서 방사선을 조사하는 영상유도방사선 치료기술이 더욱 발전된다면 체부 방사선수술의 정밀도는 더욱 향상될 것으로 기대된다.

결 론

사이버나이프는 미사일항공법에 기초한 선형가속기의 말단의 로봇 조사방법과 영상유도장치를 이용한 첨단 고정밀 방사선수술기법이다. 2001년도 미국 FDA의 승인을 얻은 이래 5cm 미만의 비교적 크기가 작고 경계가 분명한 종양에서 수술을 대치하는 방사선치료기법으로서 근치적 혹은 고식적 목적으로 사용될 수 있다.

기존의 방사선수술처럼 침습적인 고정틀을 사용하지 않아 환자에게 좀 더 편안하고 수 회로 분할 방사선수술이 가능하므로 보다 안전하게 전신의 암치료에 사용할 수 있다 향후 암치료에서 사이버나이프 방사선수술의 효능과 안전

성을 확인하기 위해서는 좀 더 많은 수의 환자에서 장기간의 임상 결과의 축적이 필요하다.

참고문헌

1. Gibbs IC, Chang SD, Adler JR. Cyberknife radiosurgery experiences at Stanford University. In: Mould RF, ed. Robotic Radiosurgery. 1st ed. Sunnyvale: The Cyberknife Society Press, 2005: 3-38.
2. Gerszten PC, Burton SA, Ozhasoglu C, Vogel WJ, Quinn AE. Cyberknife radiosurgery: Single fraction therapy for spinal tumor. In: Mould RF, ed. Robotic Radiosurgery 1st ed. Sunnyvale: The Cyberknife Society Press, 2005: 171-186.
3. Gagnon GJ, Henderson FC, Collins BT, McRac DA. Radiosurgery in previously irradiated spines. In: Mould RF, ed. Robotic Radiosurgery 1st ed. Sunnyvale: The Cyberknife Society Press, 2005: 161-170.
4. Brown WT, Wu X, Wen BC, Fowler JF, Fayad F, Amendola BE, Garcia S, De La Zerda A, Huang Z, Schwade JG. Early results of Cyberknife image-guided robotic stereotactic radiosurgery for treatment of lung tumors. Comput Aided Surg 2007; 12: 253-261.
5. Yoo EJ, Kim YS, Park HJ, Yoon SC, Jang HS, Chung SM. Cyberknife radiosurgery for primary or metastatic lung cancer, early clinical results of Catholic Medical Center. J Kor Soc Ther Radiol Oncol 2007; 25(S).
6. Onishi H, Shirato H, Nagata Y, Hiraoka M, Fujino M, Gomi K, Niiibe Y, Karasawa K, Hayakawa K, Takai Y, Kimura T, Takeda A, Ouchi A, Hareyama M, Kokubo M, Hara R, Itami J, Yamada K, Araki T. Hypofractionated stereotactic radiotherapy (Hypo-FxSRT) for stage I non-small cell lung cancer: Updated results of 257 patients in Japanese multi-institutional study. J Thoracic Oncology 2007; 2: 94-100.
7. Choi CW, Kim MS, Cho CG, Yoo SY, Yang KM, Yoo HJ, Lee DH, Ji YH, Han CJ, Kim YH. Locally advanced, unresectable pancreatic cancer treated by stereotactic radiation therapy. J Kor Soc Ther Radiol Oncol 2006; 24: 11-20.
8. Suh YS, Yoo SY, Cho CK, Kim MS, Yang GM, Yoo HJ, Choi CW, Lee DH. Cyberknife radiosurgery results for head and neck cancer. Proceeding of the 3rd Annual meeting of the Korean Radiosurgery Society, 44(S).
9. Kim YS, Jang JS, Kim MS, Kang JH, Yoon SC, Chung SM, Jang HS. Cyberknife radiosurgery for locally recurrent head and neck cancer. Proceeding of 6th annual Cyberknife user's meeting.
10. Kim YS, Jang JS, Kim MS, Sun DI, Kang JH, Jung SR, Yoon SC. Improving local control with Cyberknife radiosurgery boost after external RT in locally advanced head and neck cancers. Proceeding of the 3rd Annual meeting of the Korean Radiosurgery Society, 50(S).



Peer Reviewers Commentary

본 논문은 최근에 많은 관심을 끄는 방사선수술 장비인 로봇 사이버나이프에 대한 장비 소개와 치료 과정, 방법 또 앞으로 개선할 점까지 잘 서술하고 있다. 사이버나이프는 뇌 뿐만 아니라 체부에도 적용할 수 있는 방사선수술 전용 장비로 호흡동조 방사선치료 등 영상유도 방사선치료도 할 수 있는 첨단 장비임이 분명하다. 통상적인 방사선치료 때보다 훨씬 많은 양의 방사선을 수 회에 걸쳐서 조사함으로써 기존 치료에 내성을 보이거나 추가적인 방사선이 필요한 경우에 획기적인 치료 결과를 보이고 있다. 또한 증상 완화 및 삶의 질 향상을 위한 고식적 치료에도 큰 효과를 보이고 있다. 그러나 5cm 이하의 크지 않은 육안적 종양만을 치료하는 국소적 치료법이기 때문에 더 좋은 암치료 효과를 얻기 위해서는 통상적인 방사선치료, 항암화학요법, 수술 등 다른 암치료 방법들을 적절히 병합하여야 할 것이다. 또한 큰 분할선량에 따른 만기 합병증의 우려에 대한 연구가 충분치 않으므로 적용에 신중을 기하여야 할 것이고 고가의 치료법인 만큼 보다 효과적인 임상 적용을 위해서는 더 많은 연구와 시간이 필요하리라 생각한다.

[정리: 편집위원회]