

## 사이버나이프에서 폐종양 추적 시스템의 정확도 분석

\*인하대학교 의과대학 방사선종양학교실, †한양대학교 대학원 원자력공학과,  
 ‡한양대학교 의과대학 방사선종양학교실, §을지대학교 의과대학 방사선종양학교실,  
 ||건양대학교 의과대학 방사선종양학교실, ¶순천향대학교 의과대학 방사선종양학교실,  
 \*\*관동대학교 의과대학 방사선종양학교실, ††가천의과학대학교 길병원 방사선종양학교실,  
 ‡‡고신대학교 의과대학 방사선종양학교실, §§경기대학교 대학원 의학물리학과,  
 |||경희대학교 의과대학 방사선종양학교실

허현도\* · 최상현\*† · 김우철\* · 김현정\* · 김성훈‡ · 조삼주§ · 민철기 || §§  
 조광환¶ §§ · 이상훈\*\* §§ · 최진호 †† · 임상욱 ‡‡ · 신동오 || ||

사이버나이프 로봇 방사선 수술 시스템은 환자를 치료하는 동안 환자의 내부 기준 마커를 이용하여 종양의 위치를 실시간으로 추적 할 수 있는 시스템이다. 최근 폐종양 치료의 경우 기준 마커의 삽입 없이 폐종양의 밀도 차이를 이용하여 실시간 종양 추적을 할 수 있는 폐종양추적시스템이 개발되어 치료에 적용되고 있다. 최근 개발되어 국내 최초 도입된 폐종양 추적치료시스템의 위치 추적 정확도의 분석은 동적흉부 팬톰과 GafChromic film을 이용하였다. 폐종양추적시스템을 이용하여 종양의 위치 추적 정확도는 평균 오차 0.85±0.22 mm로 분석되었다. 기준마커 삽입 없이 폐종양추적시스템을 이용하여 폐종양 치료에 매우 유용한 것으로 판단되었다.

**중심단어:** 폐종양 추적 시스템, 기준 마커, 사이버나이프

### 서 론

최근 들어 방사선 치료분야에서 세기조절방사선치료(Intensity modulation radiation therapy, IMRT), 영상유도방사선치료(Image guided radiation therapy, IGRT), 정위적방사선수술(Stereotactic radiosurgery, SRS), 실시간종양추적시스템(Real time tumor tracking system, RTRT) 등과 같은 새로운 많은 기술들이 개발되어 임상에 적용되고 있다.<sup>1-5)</sup> 방사선 치료의 궁극적 목표는 종양을 제어 할 수 있는 충분한 선량을 조사하고 주요 장기에는 최소한의 선량이 조사되어 장기의 기능을 보전하는 것이다. IMRT 치료법은 종양에 높은 선량을 조사하면서 주요장기에는 낮은 선량을 조사할 수 있는 방법 중에 하나이다. 그러나 폐와 복부에 위치하여 호흡에 따라 움직이는 종양일 경우 방사선 조사의 정확도

가 낮아진다.<sup>6)</sup> 따라서 정확도를 높이기 위하여 호흡에 따라 종양의 움직임을 고려하여 목표점을 크게 잡거나 호흡 억제 도구(Breathing hold tool) 등을 사용하여 종양의 움직임을 최소로 하여 치료를 실시한다.<sup>6)</sup> ICRU 보고서 62에서 4D CT 영상을 이용하여 얻어진 데이터를 바탕으로 호흡에 의한 종양 움직임을 변화를 설명하는 ITV (Internal target volume)를 제시하고 있다.<sup>7,8)</sup> 이러한 자료를 바탕으로 종양의 움직임을 따른 치료 오차를 줄이고 치료조사 면적을 줄여주는 방법들이 보고되고 있다. Jurgen 등<sup>9)</sup>은 적응종양추적시스템(Adaptive tumor tracking system, ATTS)을 적용한 치료법을 보고하였다. 이것은 6개의 방향으로 움직이는 로봇 치료 테이블을 이용하여 실시간 종양을 추적 치료할 수 있는 시스템이다. 로봇 사이버나이프(Accuray, Sunnyvale, USA)는 로봇을 이용하여 실시간 종양을 추적하여 방사선 수술 및 치료를 할 수 있도록 개발되어 임상에 적용하고 있다.<sup>10,11)</sup>

실시간 종양추적시스템인 사이버나이프는 부위에 따라 적용하는 방법이 여러 가지로 구성되어 있다. 간, 폐, 전립선 등에 적용하는 기준 마커 추적시스템(Fiducial marker tracking system), 뇌종양 등을 치료하는 두부 골 추적시스템(Skull tracking system), 척추 및 척추 부근 등에 위치한 종

본 연구는 2009년 식품의약품 안전청 용역연구개발사업의 연구비 지원(09142 방사선502)에 의해 수행되었음.  
 이 논문은 2009년 8월 29일 접수하여 2009년 9월 15일 채택되었음.  
 책임저자 : 신동오, (130-702) 서울시 동대문구 회기동 1  
 경희대학교 의과대학 방사선종양학교실  
 Tel: 02)958-8665, Fax: 02)958-8336  
 E-mail: ohsd32@naver.com

양 등에 적용하는 척추 추적시스템(Spine tracking system)과 최근에 개발된 폐종양 치료에 적용하는 폐종양추적시스템(X-sight lung tracking system)이 있다.<sup>12,13)</sup>

본 연구에서 새롭게 개발되어 국내 최초로 도입되어 임상에 적용하고 있는 폐종양추적치료시스템(X-sight Lung Tracking system)을 대상으로 종양 위치 추적의 정확도 및 유용성을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 폐종양추적시스템(X-sight Lung Tracking System)

폐종양추적시스템은 기준 마커 삽입 없이 폐종양과 정상적인 폐 조직의 밀도 차이를 이용하여 종양을 추적하는 방법이다. 실시간 추적은 환자의 외부 마커(Marker)에서 얻어진 실시간 호흡 주기의 신호와 호흡에 따라 움직이는 종양의 위치를 진단용 엑스레이 영상을 획득하여 상호관계를 설정하여 실시간으로 추적하는 것이다(Fig. 1). 신호 전달과 로봇이 종양을 추적하는 시간 지연은 약 115 ms이다. 이를 보상하기 위하여 실시간 외부 호흡 주기 예상 값을 모델로 로봇은 115 ms 먼저 움직이게 된다.<sup>11)</sup> 치료 과정은 일반적인 추적 시스템과 다르게 두 단계 과정을 거쳐 시행된다. 첫 번째 폐종양 부근의 척추 골 추적시스템을 이용하여 환자의 자세를 맞춘다. 두 번째 환자의 자세가 정확히 맞추어지면 폐종양추적시스템으로 이동되어 치료가 실시된다

(Fig. 2).

### 2. 측정

폐종양추적시스템의 정확도는 동적흉부 팬텀을(CIRS, Accuray, USA) 이용하여 목표 점(Target)에 Gafchromic film (MD-55)을 서로 교차되게 2장을 삽입하여 측정하였고 동일한 방법으로 내부 기준 마커 추적 방법을 이용하여 동일 방법으로 각각 10회 측정하여 정확도를 비교 분석하였다. 조사 방법은 동적흉부 팬텀을 1.5 mm 간격으로 CT 영상을 획득한 후 치료계획 시스템(Multi plan, ver.2.1.0, Accuray)을 이용하여 15 mm 콘(cone)을 사용 목표점(Target)에 75%에 95%가 포함되도록 25 Gy를 조사하였다. 필름 분석은 사이버나이프 제조사에서 제공된 End to End test (Accuray, USA) 프로그램을 사용하였다(Fig. 3).

최종 목표점 오차(Target error)는 다음과 같이 제곱근(Root mean square) 수식을 이용하여 분석하였다.

Target error =

$$\sqrt{(dev_{sup-inf})^2 + (dev_{Right-Left})^2 + (dev_{ant-post})^2}$$

dev는 목표점을 벗어난 정도이고, *sup-inf*는 환자의 머리에서 발 방향, *Right-Left*는 환자의 오른쪽에서 왼쪽방향, *ant-post*는 환자의 앞에서 뒤쪽방향이다.

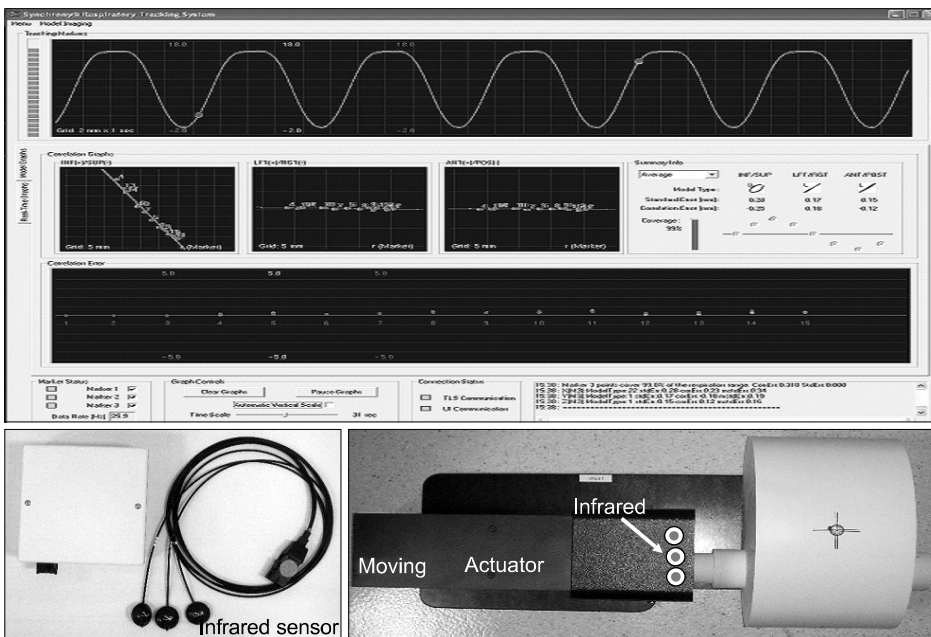


Fig. 1. Moving thoracic phantom, this shows the actual trace of the lung tumor motion from the infrared sensor and X-ray image during treatment therapy.

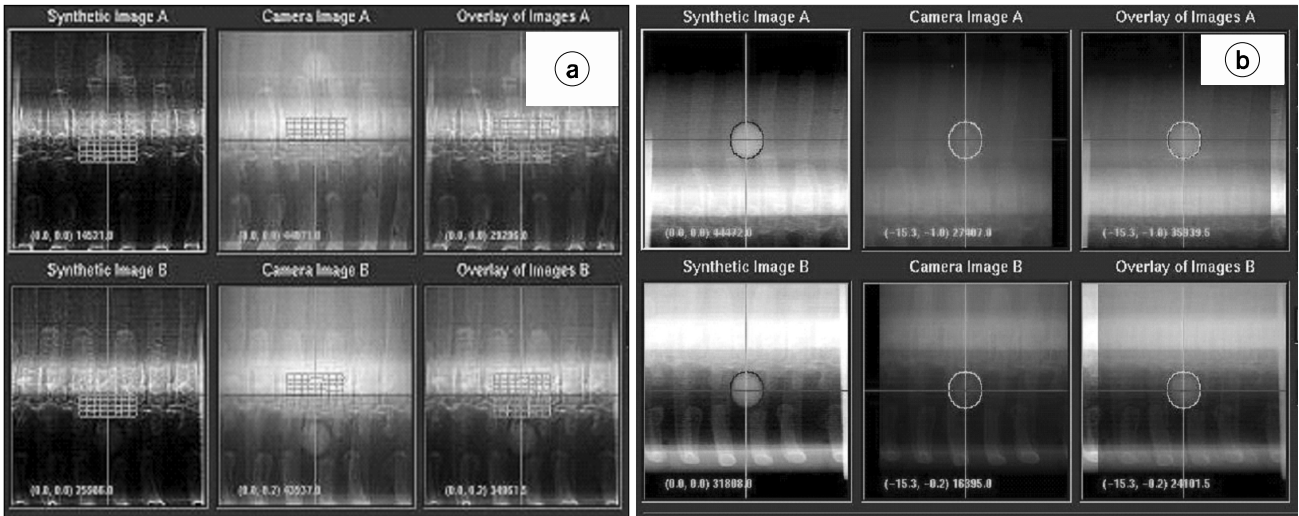


Fig. 2. X-sight lung tracking system procedure, (a) setting up using X-sight spine tracking system, (b) is to use X-sight lung tracking system.

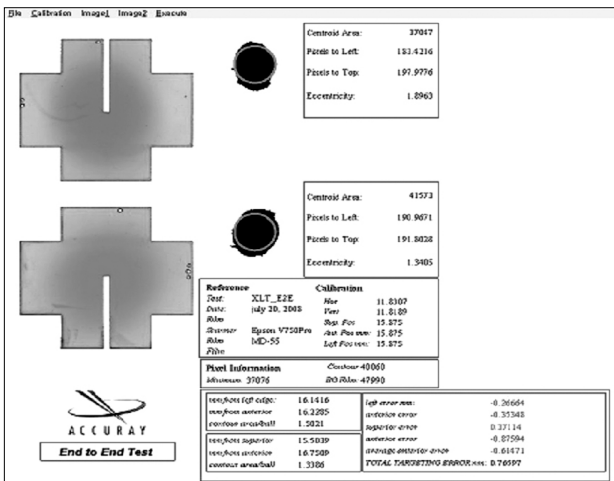


Fig. 3. Illustration of the phantom measurement, end 2 end software analysis of the films used in the X-sight lung system phantom.

## 결 과

움직이는 목표점(Target)을 대상으로 폐종양추적시스템(X-sight Lung tracking system)과 내부 삽입 기준 마커 추적 시스템(Fiducial tracking system)을 이용하여 선량을 조사하였다. 조사 후 전산화 치료계획 시스템에서 구현된 목표점의 등 선량분포곡선과 팬텀에서 측정된 목표점의 선량분포곡선을 비교하여 오차를 비교 분석 하였다. 폐종양추적시스템의 경우 머리에서 발 방향(Superior to Inferior, SI)이

0.50±0.30 mm이었고, 왼쪽에서 오른쪽방향(Right to Left, LR)은 0.41±0.28 mm이었고, 앞쪽에서 뒤쪽 방향(Anterior to posterior, AP)은 0.42±0.21 mm의 오차를 나타내었다. 내부 기준 마커 추적시스템에서는 각각 0.42±0.37 mm, 0.24±0.19 mm, 0.15±0.08 mm이었다(Fig. 4). 그리고 최종 목표점 평균 오차는 각각 0.85±0.22 mm와 0.55±0.32 mm이었다(Table 1).

폐종양추적시스템이 내부 삽입 기준 마커 추적시스템 보다 오차가 높게 나타났다. 그러나 제조사 권고치 1.5 mm 이내에 포함되므로 목표점 위치 추적 치료에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

## 고찰 및 결론

사이버나이프에서 환자의 호흡에 따라 움직이는 종양을 로봇이 실시간으로 종양을 추적하여 병소에 계획된 방사선량을 정확히 조사하는지 검증하는 것은 매우 중요하다. 종양을 추적하기 위해서는 수술 및 치료 부위에 따라 내부 기준 마커 삽입이 필요하다. 폐종양의 경우 종전의 방법에서는 기준 마커를 최소한 3개 이상을 삽입하여 시행하였다.<sup>3,13)</sup> 이러한 경우 환자의 폐 기흉 등의 부작용 등이 동반될 수 있다. 특히 고령의 환자는 치료 대상에서 제외되는 경우도 있다. 또한 환자 자신이 기흉과 같은 부작용을 우려하여 치료를 기피하는 경우도 있다. 폐종양추적시스템은 내부 기준 마커 삽입 없이 폐종양의 밀도차이를 이용하여

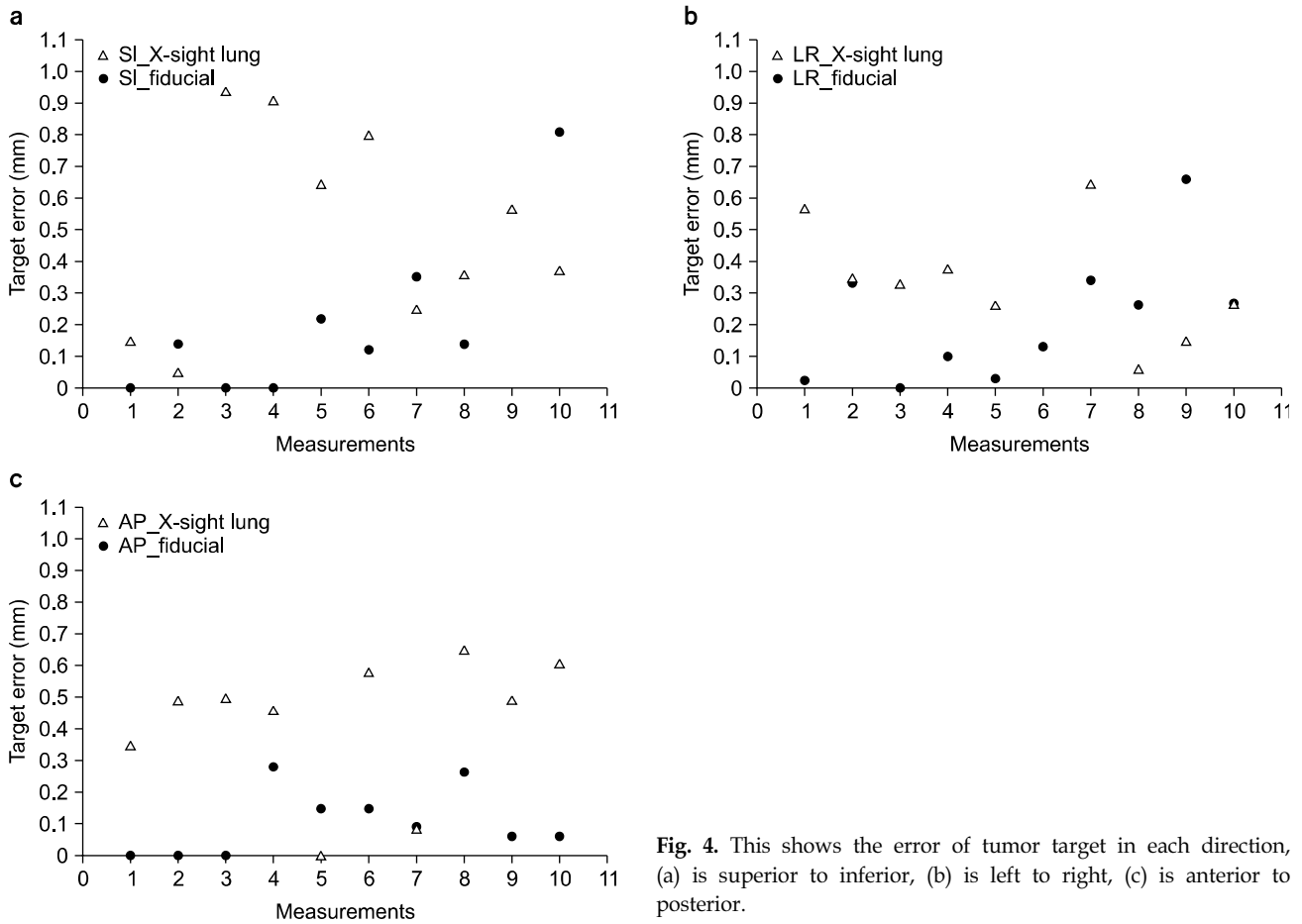


Fig. 4. This shows the error of tumor target in each direction, (a) is superior to inferior, (b) is left to right, (c) is anterior to posterior.

Table 1. Total tumor target error of X-sight lung tracking and fiducial tracking.

Number	Total tumor target error	
	X-sight lung tracking (mm)	Fiducial tracking (mm)
1.00	0.68	0.47
2.00	0.61	0.36
3.00	1.12	0.69
4.00	1.09	0.45
5.00	0.71	0.27
6.00	1.30	0.23
7.00	0.71	0.50
8.00	0.74	0.40
9.00	0.77	1.31
10.00	0.77	0.85
Average	0.85±0.22	0.55±0.32

종양을 추적하는 시스템이므로 이러한 문제를 해결할 수 있다.

사이버나이프 종양위치 추적시스템의 정확도를 여러 문헌에서 보고되고 있는데, Mikado 등<sup>14)</sup>은 내부 기준 마크 추적시스템을 이용하여 호흡으로 인한 종양의 움직임 추적의 정확도를 검증하였고, Dongshan 등<sup>15)</sup>은 두부 골 추적시스템에서 영상유도를 통한 뇌종양 수술의 정확도를 검증하였다. Iris 등<sup>2,16)</sup>은 척추 골 추적시스템에서 척추 및 움직임이 적은 종양의 조사에서도 정확도를 보고하였다. 본 연구에서도 폐종양추적시스템도 제조사 권고치 최대오차 1.5 mm 이내로 종양 추적이 정확한 것으로 분석되었다. 그러나 폐종양 추적시스템은 다음과 같은 경우에 적용이 제한되는 것으로 예상된다. 움직임이 다른 부위에 비하여 상대적으로 큰 횡경막 부근에 위치한 5 mm 이내의 작은 종양이나 종양이 진단용 영상에서 흑화도 차이를 구별하기 어려운 심장 부근에 위치한 5 mm 이내의 일 경우 임상 적용이 어려울 것으로 사료된다. 이런 경우 최소한 1개 이상의 내부

기준 마커를 삽입하여 종양을 추적하는 것이 정확도를 높이는 것으로 예상된다. 이러한 추정되는 문제점은 실제 환자를 대상으로 계속해서 검증이 이루어져야 된다고 사료된다. 그리고 영상의 흑화도 구분이 어려운 작은 종양에도 제한 없이 적용 될 수 있는 프로그램 개발이 시급하다고 사료된다.

본 연구 결과 사이버나이프에서 폐종양추적시스템의 종양 위치 추적 정확도는 매우 높은 것으로 분석되었다. 폐기능이 저하된 환자, 고령의 환자, 기흉 등의 부작용을 우려하여 치료를 기피하는 환자에서도 내부 기준 마커 삽입없이 방사선 수술 및 치료를 충분히 시행 할 수 있는 것으로 예상되어 폐종양 방사선 치료에 매우 유용한 시스템으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Quiwen W, Radhe M: Algorithms and functionality of an intensity modulated radiotherapy optimization system. *Med Phys* 27:701-711 (2000)
2. Iris CM, Pimkhuon K, Mi-Ryenong R, et al: Image-guided robotic radiosurgery for spinal metastases. *Radiotherapy and Oncology* 82:185-190 (2007)
3. Richard IW, Richard C, Martin JM, et al: The annals of thoracic surgery. *Ann Thorac Surg* 75:1097-1101 (2003)
4. Hiroki S, Shinnichi S, Tatsuya K: Physical aspects of a real-time tumor-tracking system for gated radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Phys* 48:1187-1195 (2000)
5. Norio K, Rikiya O, Yusuke S, et al: Real time tumor tracking radiotherapy for adrenal tumors. *Radiotherapy and Oncology* 87:418-424 (2008)
6. Stece BJ: Technical aspects of image-guided respiratory-gated radiation therapy. *Med Dosim* 31:141-151 (2006)
7. Jing Cai, Paul WR, Ke S: The effect of respiratory motion variability and tumor size on accuracy of average intensity projection from four-dimensional computed tomography: an investigation based on dynamic MRI. *Med Phys* 35:4974-4981 (2008)
8. ICRU Report 62: *Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy*. Internal Commission on Radiation Unit and Measurements, Bethesda (1999)
9. Jurgen W, Jurgen M, Kurt B, et al: Tumor tracking and motion compensation with an adaptive tumor tracking system (ATTS): system description and prototype testing. *Med Phys* 35:3911-3921 (2008)
10. Cihat O, Cheng B, Saw, et al: Synchrony- Cyberknife respiratory compensation technology. *Med Dosim* 33:117-123 (2008)
11. Mischa H, Jean BP, Joost N, et al: Clinical accuracy of the respiratory tumor tracking system of the cyberknife: assessment by of log files. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 74:297-303 (2009)
12. Harold C: *Treating Tumors that Move with Respiration*. 1st ed. Springer Berlin Heidelberg, New York (2007), pp.265-282
13. Martin JM: Fiducial-based targeting accuracy for external-beam radiotherapy. *Med Phys* 29:334-344 (2002)
14. Mikado I, Kochi Y, Hiroki S, et al: Insertion and fixation of fiducial markers for setup and tracking of lung tumor in radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 63:1442-1447 (2005)
15. Dongshan F, Gopinath K, Vladimir M, et al: Automated skull tracking for the cyberknife image-guided radiosurgery system. *Proc of SPIE* 5744:366-377 (2005)
16. Cynthia C, Arjun S, Letitia L, et al: Effects of residual target motion for image-tracked spine radiosurgery. *Med Phys* 34:4484-4490 (2007)

## Verification of X-sight Lung Tracking System in the CyberKnife

Hyun Do Huh\*, Sang Hyoun Choi\*<sup>†</sup>, Woo Chul Kim\*, Hun Jeong Kim\*, Seong Hoon Kim<sup>†</sup>,  
 Sam Ju Cho<sup>§</sup>, Chul Ki Min<sup>||</sup><sup>§§</sup>, Kwang Hwan Cho<sup>||</sup><sup>§§</sup>, Sang Hoon Lee<sup>\*\*</sup><sup>§§</sup>,  
 Jinho Choi<sup>††</sup>, Sangwook Lim<sup>††</sup>, Dong Oh Shin<sup>||</sup>

\*Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Inha University, Incheon,

<sup>†</sup>Department of Nuclear Technology, Hanyang University,

<sup>†</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Hanyang University,

<sup>§</sup>Department of Radiation Oncology, Medical Center, Eulji University, Seoul,

<sup>||</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Konyang University, Daejeon,

<sup>¶</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Soonchunhyang University, Seoul,

\*\*Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Kwandong University, Kangrung,

<sup>††</sup>Department of Radiation Oncology, Gachon, Medical School, Gil Medical, Incheon,

<sup>††</sup>Department of Radiation Oncology, Kosin University Gospel Hospital, Kosin University College of Medicine, Busan,

<sup>§§</sup>Department of Medical Physics, Kyonggi University, Suwon,

<sup>||</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, KyungHee University, Seoul, Korea

To track moving tumor in real time, CyberKnife system imports a technique of the synchrony respiratory tracking system. The fiducial marker which are detectable in X-ray images were demand in CyberKnife Robotic radiosurgery system. It issued as reference markers to locate and track tumor location during patient alignment and treatment delivery. Fiducial marker implantation is an invasive surgical operation that carries a relatively high risk of pneumothorax. Most recently, it was developed a direct lung tumor registration method that does not require the use of fiducials. The purpose of this study is to measure the accuracy of target applying X-sight lung tracking using the Gafchromic film in dynamic moving thorax phantom. The X-sight Lung Tracking quality assurance motion phantom simulates simple respiratory motion of a lung tumor and provides Gafchromic dosimetry film-based test capability at locations inside the phantom corresponding to a typical lung tumor. The total average error for the X-sight Lung Tracking System with a moving target was  $0.85 \pm 0.22$  mm. The results were considered reliable and applicable for lung tumor treatment in CyberKnife radiosurgery system. Clinically, breathing patterns of patients may vary during radiation therapy. Therefore, additional studies with a set real patient data are necessary to evaluate the target accuracy for the X-sight Lung Tracking system.

**Key Words:** X-sight lung tracking, Fiducial, CyberKnife