

동적 팬텀을 이용한 사이버나이프 호흡동기 추적장치의 위치 정확성 평가

*우리들병원 사이버나이프클리닉, †가톨릭대학교 의과대학 방사선종양학교실,
‡가톨릭대학교 의과대학 서울성모병원 사이버나이프센터, §인천성모병원 방사선종양학과,
||인제대학교 일산백병원 신경외과, ¶경기대학교 대학원 의학물리학과

서재혁*[¶] · 강영남[†] · 장지선^{‡¶} · 신현주*[¶] · 정지영[§] · 최병옥[†] · 최일봉* · 이동준^{||} · 권수일[¶] · 임종수[¶]

본 연구에서는 정위방사선수술시 움직이는 목표점에 대한 사이버나이프 호흡동기추적장치의 위치 정확성 및 유용성을 평가하고자 한다. 본 연구를 위해 움직이는 목표점을 재현할 수 있는 동적팬텀을 사용하였으며 움직이는 목표점 추적을 위하여 사이버나이프의 호흡동기추적장치인 Synchrony™ 시스템을 사용하였다. 움직이는 목표점의 치료계획을 위하여 4D CT를 이용한 영상획득을 하였고 움직이는 목표점에서의 선량분포와 점선량 측정을 위하여 gafchromic EBT 필름과 0.62 cc 이온 전리함을 사용하였다. 호흡동기추적장치의 정확성을 평가하기 위하여 팬텀의 목표점을 움직였을 때와 정지상태일 때 목표점에서의 선량분포(처방선량기준 선량분포의 80%)를 비교하였으며 목표점에서의 점선량을 측정하였다. 위치추적장치와 호흡동기추적장치 상호간의 동기화에 의한 정확성은 동기화 되지 않을 경우 평균 11.5±3.09 mm였으며 동기화 되었을 경우 0.14±0.08 mm의 차이를 나타내었다. 목표점 정지상태시의 영상과 4D CT를 이용한 움직이는 목표점에 대한 영상을 이용하여 치료계획상의 정확성은 평균 0.18±0.06 mm의 차이를 나타내었다. 또한 호흡동기추적장치의 정확성은 1 mm 이하로 나타났다. 호흡동기추적장치의 유효성을 확인하기 위하여 움직이는 목표점에 대하여 호흡동기추적장치를 중지하여 측정할 결과 평균 17.39±0.14 mm였으며 가동하였을 때 1.37±0.11 mm로 나타났다. 목표점에서의 선량값을 비교한 결과 목표점이 정지상태일 때 0.68±0.38%, 호흡동기추적장치를 이용한 움직이는 목표점에서는 1.31± 0.81%의 차이를 나타내었다. 위치추적장치와 호흡동기추적장치 상호간의 동기화에 의한 정확성 확인에서 장치사이에서 동기화가 매우 정확하게 수행됨을 확인하였다. 본 연구의 결과 움직이는 목표점에 대한 정위방사선수술시 호흡동기추적장치를 필수적으로 사용해야하며 본 연구에서 사용된 사이버나이프의 호흡동기추적장치인 Synchrony 시스템의 유용성과 정확성을 평가한 결과 매우 정확함을 확인하였다.

중심단어: 정위방사선수술, 동적 팬텀, 사이버나이프, 호흡동기추적장치, 위치추적장치

서 론

사이버나이프를 비롯한 정위방사선수술의 목적은 최적의 선량을 목표점에 전달하고 주위 정상조직의 방사선피해는 최소화 하는데 있다.^{1,2)} 호흡에 의해 움직이는 목표물에 대한 기존의 치료방법은 환자가 호흡을 정지한 상태에서 치료하는 방법(breath holding method)과 환자의 호흡을 실

시간으로 확인하며 고정치료범위 안에 목표물이 포함 되었을 때 치료하는 방법(gating method)이 주된 치료방법이었다.³⁻⁵⁾ 4세대 사이버나이프 장치에서는 호흡에 의해 움직이는 목표물을 추적하여 치료하는 호흡동기추적장치(respiratory tracking system)인 싱크로니(Synchrony™, Accuray, USA)를 개발하였다. 이는 치료 중 목표물의 위치를 관찰하여 환자의 호흡주기에 따라 실시간으로 로봇팔의 움직임을 확립하고, 호흡주기를 통해 환자의 호흡을 보상하며 목표물을 추적한다.⁶⁻⁸⁾ 호흡동기추적장치는 환자의 내부에 삽입한 금침표식자를 이용하여 목표물의 위치를 확인할 수 있으며 환자의 호흡주기는 외부추적표식자의 움직임으로 확인할 수 있다.⁹⁻¹¹⁾ 본 연구에서는 움직이는 목표물을 재현할 수 있는 동적팬텀을 사용하여 사이버나이프의 호흡동기추적장치인 Synchrony 시스템의 정확성과 유용성을 평가하고자

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 연구지원프로그램으로 지원받아 수행되었음(연구과제 관리코드: M20709005484-08B0900-48410).

이 논문은 2009년 11월 23일 접수하여 2009년 12월 11일 채택되었음.
책임저자 : 강영남, (137-701) 서울시 서초구 반포동 505번지

가톨릭대학교 의과대학 서울성모병원 방사선종양학교실
Tel: 02)2258-1515, Fax: 02)2258-1532
E-mail: k3yn@catholic.ac.kr

한다.

재료 및 방법

1. 사이버나이프

1) 사이버나이프: 정위방사선수술 장비인 사이버나이프는 6개의 자유도를 가지고 있는 로봇팔(KUKA, Germany)에 6 MV X선이 방출되는 선형가속기와 영상유도장치(Target Localization System: TLS), 그리고 호흡동기추적장치(Synchrony™)로 구성되어 있다. 영상유도장치에 사용되는 두 개의 X선 선원과 두 개의 비결정질의 실리콘 검출기(Amorphous silicon detector)를 이용하여 목표물의 위치를 파악한 후 실시간으로 추적한다.^{12,13)} 영상유도방법으로는 두개골의 위치를 추적(Skull Tracking)하는 방법과 몸속에 삽입된 금침표식자의 위치를 추적(Fiducial Tracking)하는 방법, 척추의 위치와 모양을 추적(Xsight Spine Tracking)하는 방법, 그리고 폐의 병변의 위치와 모양을 추적(Xsight Lung Tracking)하는 방법, 그리고 호흡동기추적(Synchrony Tracking) 방법 등이 있다.^{2,3)}

2) 싱크로니 시스템: 호흡동기추적장치인 싱크로니의 기본적인 시스템은 실시간 X선 영상과 적외선추적장치의 조합이다. 호흡에 의한 환자 횡격막 위치의 복부 표면 움직임은 적외선센서를 이용하여 추적하며 내부표식자는 X선을 이용한다. X선 영상은 내부 목표점의 위치를 추적하며, 실시간 호흡에 의한 목표물의 움직임의 대한 정보는 얻을 수 없다. 호흡에 의한 목표물의 움직임은 환자표면의 움직임을 추적하는 초고속 적외선센서를 이용하여 추적할 수 있다. 호흡동기추적장치인 싱크로니는 X선 영상으로부터의 정보와 적외선 센서로부터의 정보를 동기화한다. 외부와 내부의 움직임이 동기화된 정보로부터 목표물 움직임의 형태를 모델링한다(Fig. 1). 모델링된 정보가 로봇으로 전달되어 로봇을 목표점의 움직임과 동일한 진폭과 속도로 움직이도록 한다.

2. 측정 장비

1) 팬텀(Respiratory gating platform securing kit): 본 실험에서는 목표물의 움직임을 재현하기 위하여 목표점 움직임에 대하여 주기와 진폭을 설정할 수 있는 팬텀(Stan-

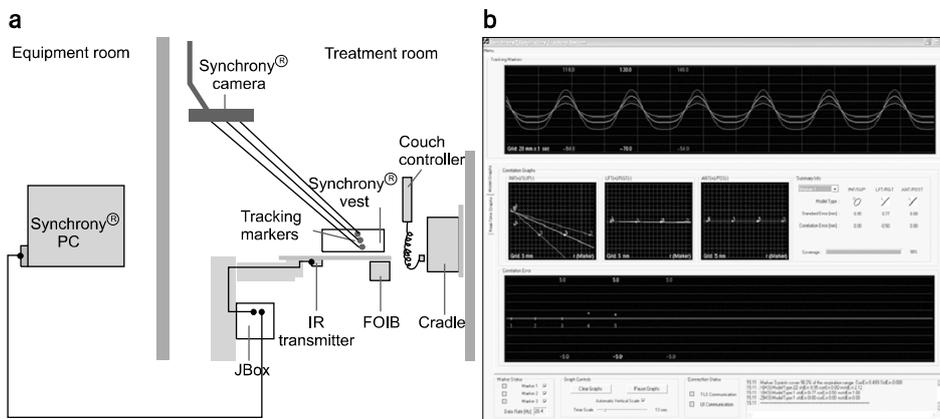


Fig. 1. Diagram of CyberKnife Synchrony system and accuracy of correlation and synchronization. (a) Diagram of Synchrony system in Cyberknife. (b) Analysis of correlation and synchronization error.

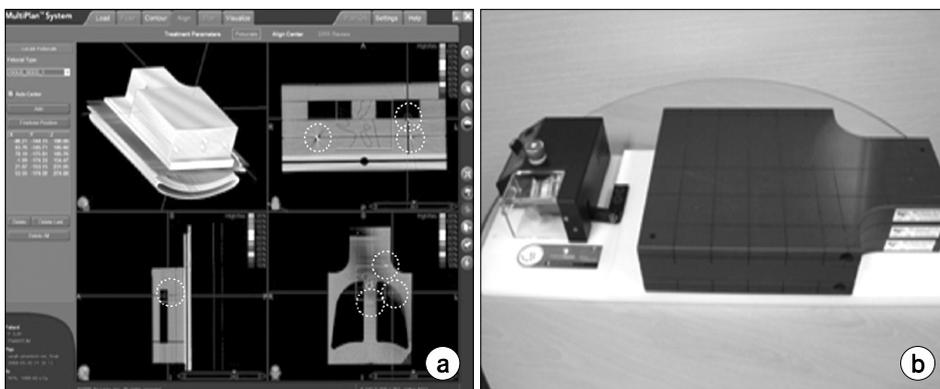


Fig. 2. Moving phantom with IMRT phantom. (a) Verification of Gold marker position. (b) Moving Phantom (Standard Imaging Inc. USA).

dard Imaging Inc., USA)을 사용하였다. 조직등가물질로 구성되어 있으며 이온 전리함과 필름을 장착하여 측정할 수 있다(Fig. 2).

2) 필름과 이온전리함: 선량분포 확인을 위한 필름은 측정선량 범위가 100 cGy에서 800 cGy까지 가능한 Gafchromic EBT 필름(International Specialty Products, NJ, USA)을 사용하였다. 임의의 점에서의 선량 확인을 위해 0.62 cc 이온전리함(A19, Standard Imaging Inc., USA)을 사용하였다.

3. 치료계획 및 측정

1) 영상획득 및 치료계획: 호흡동기장치가 장착된 CT (4-Dimensional CT)를 이용하여 각각의 주기에 대하여 영상을 획득하였다. 4D CT는 환자의 호흡을 측정하여 각각의 호흡주기에서 영상을 획득할 수 있다. 각각의 주기(각각의 시간과 위치)에서 분류된 영상을 재구성함으로써 임의의 시간에서의 정지영상을 획득할 수 있으며 대부분의 호흡동기추적장치를 이용한 치료에서는 움직임이 가장 안정적인 최대 날숨(maximum-exhale, 0% phase)에서의 영상을 재구성

하여 치료계획에 사용한다. 본 연구에서는 호흡동기추적장치로는 Anzai gating system을 사용하였으며 날숨(0% phase)에서의 영상을 사용하였다(Fig. 3).

본 연구에서 목표점은 길이 30 mm, 직경 20 mm의 원통형이며 8.6 cc 체적에 20 mm cone을 이용하여 목표점에서의 선량분포도는 처방선량 80%에 500 cGy로 치료계획을 수립하였고 목표점에서의 절대선량값을 위해서 처방선량 80%에 1,000 cGy로 치료계획을 수립하였다.

치료계획은 사이버나이프 치료계획 시스템(Multiplan™, Accuray, USA)을 사용하였다(Fig. 4).

2) 측정: 목표점의 위치 확인을 위하여 금침표식자를 팬텀에 부착하였으며 X선 영상을 이용하여 이온전리함의 위치와 금침의 위치를 확인하였다. 선량분포도 확인을 위하여 팬텀의 중심에 필름을 장착하였다(Fig. 2).

목표점은 동적팬텀의 평균값인 진폭 20 mm, 주기 4 sec로 움직임을 설정하였으며 호흡동기위치추적장치를 이용하여 목표점의 위치 추적을 설정한 후 방사선조사를 실시하였다.

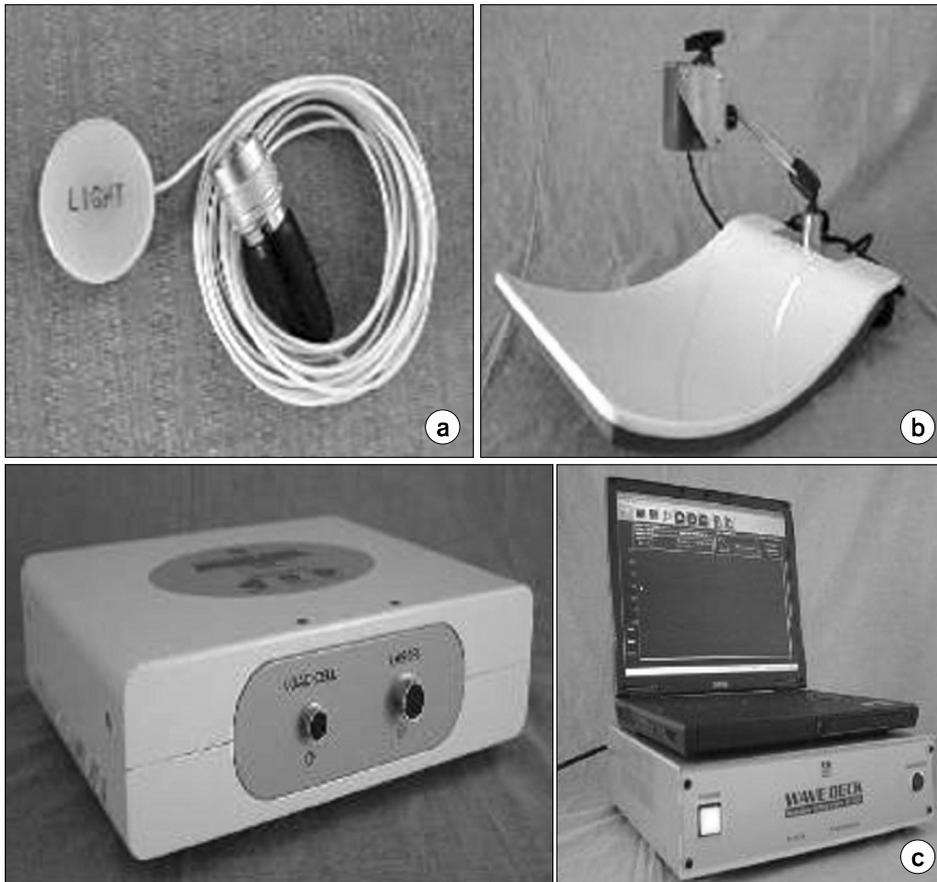


Fig. 3. Respiratory gating system (Anzai Inc. Japan). (a) Pressure sensor. (b) Laser sensor. (c) Receiver and amplifier.

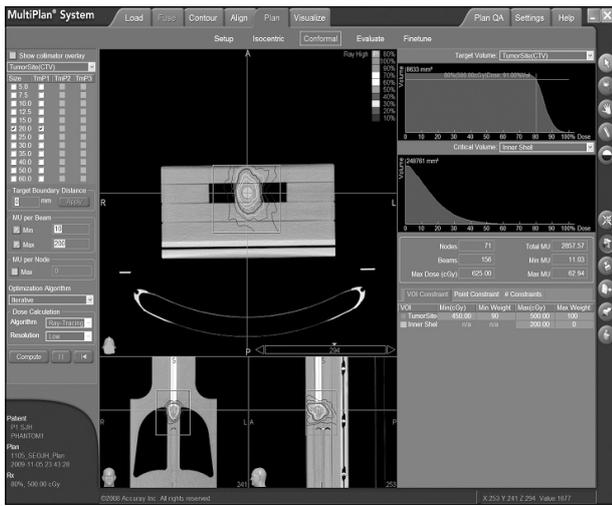


Fig. 4. Plan using 4D CT images and target optimization. 500 cGy prescription at 80% isodose line for film measurement and 1,000 cGy prescription at 80% isodose for ionchamber.

Table 1. Difference of synchronization* between synchrony and TLS (target localization system).

Synchronization (mm)	Desynchronization (mm)
0.14±0.08	11.5±3.09

*Difference of synchronization = $\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$: x, y, z from TLS and x', y', z' from Synchrony.

4. 분석방법

사이버나이프 위치추적장치와 호흡동기추적장치 상호간의 동기화에 의한 위치 정확성을 확인하기 위하여 세부적 방법으로 첫째, 목표점 위치추적장치의 위치와 호흡동기추적장치의 작동 유무에 대하여 비교하였다. 둘째, 4D CT 사용의 유용성 평가를 위해 목표물 정지상태시의 영상과 4D CT를 이용한 움직이는 목표물에 대한 영상을 이용하여 치료계획상의 정확성을 비교 및 분석하였다. 셋째, 호흡동기추적장치의 위치 정확성을 확인하기 위하여 목표물이 정지상태의 측정 선량 분포와 호흡동기추적장치를 이용한 움직이는 목표물의 측정 선량 분포사이의 차이를 비교하였다. 그리고 사이버나이프 호흡동기추적장치의 유효성을 확인하기 위하여 4D CT를 이용한 영상으로 치료계획 후 움직이는 목표물에 대하여 호흡동기추적장치를 가동하였을 때와 중지하였을 때의 측정값을 비교하였으며 목표점에서의 선량값을 비교하였다. 각각의 경우에 대하여 측정은 필름

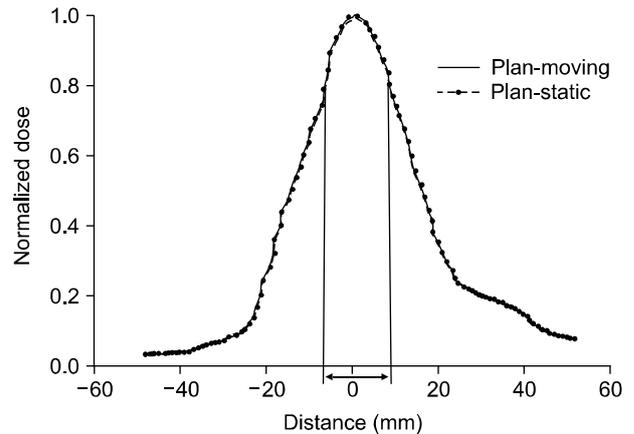


Fig. 5. Difference of dose distribution in central axis at sagittal plane. Comparison of static target and moving target plan at 80% isodose.

Table 2. Difference of static and moving for target.

	Static-target (mm)	Moving-target (mm)	Difference (mm)
Plan	14.68	14.86	0.18±0.06
Film (measurement)	14.12	13.49	0.63±0.09
Difference (mm)	0.56±0.08	1.37±0.11	

In moving target, it used 4D CT image and Synchrony. Difference is the value of analyzed 80% isodose line for prescription dose (500 cGy).

과 이온 전리함을 이용하였으며 측정된 필름의 80% 선량 분포도를 분석하여 비교하였다.

결 과

위치추적장치와 호흡동기추적장치 상호간의 동기화에 의한 정확성을 확인하기 위하여 목표점 위치추적장치상의 위치를 호흡동기추적장치의 동기화 유무에 대하여 비교한 결과 움직이는 목표물에 대하여 동기화 유무에 대하여 큰 차이를 나타내었으며 동기화 되지 않을 경우 평균 11.5±3.09 mm였으며 동기화 되었을 경우 0.14±0.08 mm의 차이를 나타내었다(Table 1).

목표물 정지상태시의 영상과 4D CT를 이용한 움직이는 목표물에 대한 영상을 이용하여 치료계획상의 정확성을 비교하기 위해 치료계획상 80% 선량분포를 비교한 결과 평균 0.18±0.06 mm의 차이를 나타내었으며 4D CT에 의한 움직이는 목표물의 영상이 매우 정확함을 알 수 있었다(Fig.

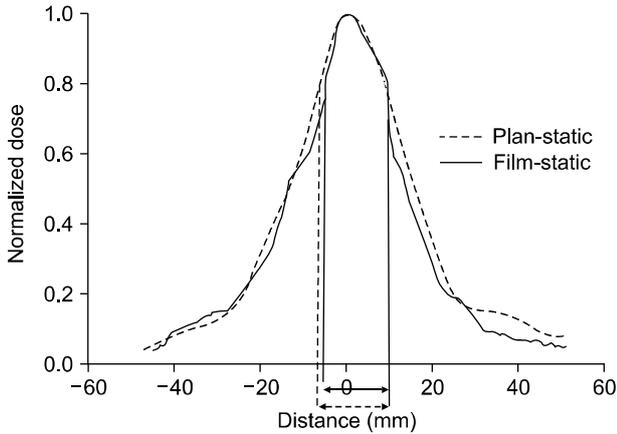


Fig. 6. In static target, difference of dose distribution in central axis at sagittal plane. Comparison of plan and measurement at 80% isodose.

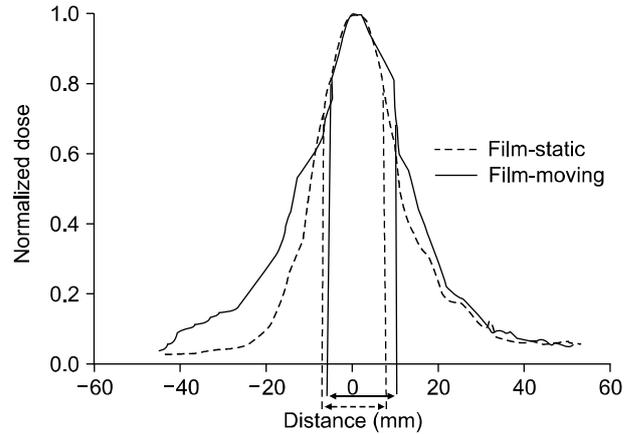


Fig. 8. Difference of dose distribution in central axis at sagittal plane. Comparison of static and moving target measurement at 80% isodose.

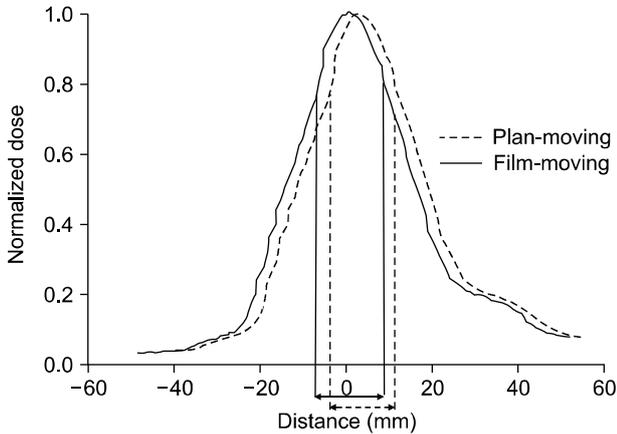


Fig. 7. In moving target, difference of dose distribution in central axis at sagittal plane. Comparison of plan and measurement at 80% isodose.

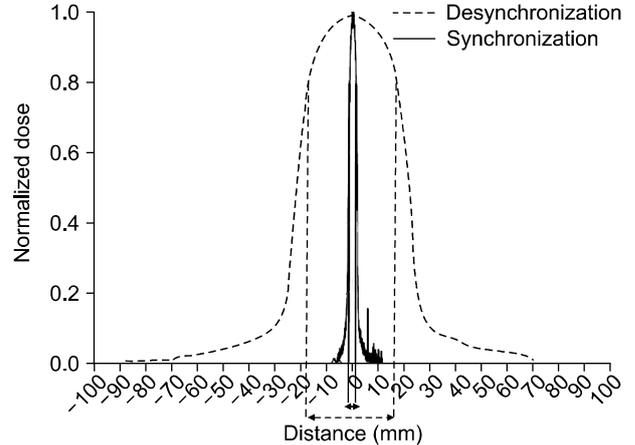


Fig. 9. Difference of dose distribution in central axis at sagittal plane. Comparison of synchronization and desynchronization at 80% isodose.

5, Table 2).

또한 호흡동기추적장치의 정확성을 확인하기 위하여 목표물이 정지상태의 측정 선량 분포와 호흡동기추적장치를 이용한 움직이는 목표물의 측정 선량간의 차이도 1 mm 이하로 매우 정확하게 나타났다(Table 2, Fig. 6~8).

호흡동기추적장치의 유효성을 확인하기 위하여 4D CT를 이용한 영상으로 치료계획 후 움직이는 목표물에 대하여 호흡동기추적장치를 가동하였을 때와 중지하였을 때의 측정값을 비교한 결과 호흡동기추적장치를 중지하여 측정 한 결과 80% 선량분포에 대하여 평균 17.39±0.14 mm였으며 가동하였을 때 1.37±0.11 mm로 나타내었다(Table 3, Fig. 9).

목표점에서의 선량값을 비교한 결과 목표물이 정지상태

Table 3. Difference of synchronization and desynchronization for moving target.

	Plan (mm)	Film-measurement (mm)	Difference (mm)
Synchronization	14.86	13.49	1.37±0.11
Desynchronization	14.86	32.25	17.39±0.14

Plan used 4D CT image. Difference is the value of analyzed 80% isodose line for prescription dose (500 cGy).

일 때 0.68±0.38%, 호흡동기추적장치를 이용한 움직이는 목표물에서는 1.31±0.81%의 차이를 나타내었다(Table 4).

Table 4. Difference of absolute dose in target.

	Static-target (cGy)	Moving-target (cGy)	Difference (%)
Plan	1,030.49	1,043.79	1.29±0.56
Measurement	1,037.51	1,057.43	1.92±0.97
Difference (%)	0.68±0.38	1.31±0.81	

In moving target, it used 4D CT image and Synchrony. Difference is the value of analyzed 80% isodose for prescription dose (1,000 cGy).

고찰 및 결론

위치추적장치와 호흡동기추적장치 상호간의 동기화에 의한 정확성 확인에서 위의 두 장치 사이는 동기화가 매우 정확함을 확인하였다.

이것으로 4D CT를 이용한 움직이는 목표물에 대한 영상을 얻은 결과 모든 움직이는 목표물을 치료하기 위해서는 4D CT를 이용한 치료계획을 세워야 한다는 것을 알 수 있었다.

4D CT를 이용한 치료계획과 측정을 통하여 평가한 결과 목표물이 정지하였을 때와 호흡동기추적장치를 이용하였을 때의 결과에 큰 차이를 볼 수 없었으며 이 결과로서 호흡동기추적장치가 움직이는 목표물의 위치를 매우 정확하게 추적하는 것을 알 수 있었다.

본 실험의 결과 호흡에 따라 움직이는 종양 등의 목표물에 대한 정위방사선치료시 호흡보정 치료장치를 필수적으로 사용해야 하며 본 연구에서 사용된 사이버나이프의 호흡동기추적장치인 Synchrony 시스템의 유용성과 정확성을 평가한 결과 매우 정확하며 정위방사선치료에 유용함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Jang JS, Kang YN, Shin DH, et al: Analysis of relative out-

put factors for Cyberknife: Comparison of ion chambers, diode detector and film. *Korean J Med Phys* 17:47-53 (2006)

2. Seppenwoolde Y, Jansen D, Marijnissen H: Accuracy of predicting respiratory tumor motion with the Synchrony/Cyber-Knife tumor tracking system. *Pre-Meeting Workshop on "Image-Guided Radiotherapy" 8th Biennial Estro Meeting on Physics and Radiation Technology for Clinical Radiotherapy and Oncology*. 2005, Lisbon, pp. S91

3. 장지선, 이동한, 강영남 등: 사이버나이프 품질관리 절차서 개발. *대한방사선종양학회지* 24:185-191 (2006)

4. Accuray Rev. H: Cyberknife SRS system acceptance tests. 2004

5. Adler JR Jr, Murphy MJ, Chang SD, et al: Image-guided robotic radiosurgery. *Neurosurgery* 44:1299-1307 (1999)

6. Casamassima F, Cavedon C, Francescon P, et al: Use of motion tracking in stereotactic body radiotherapy: Evaluation of uncertainty in off-target dose distribution and optimization strategies. *Acta Oncologica* 45:943-947 (2006)

7. Kuo JS, Yu C, Petrovich Z, et al: The CyberKnife stereotactic radiosurgery system: description, installation, and an initial evaluation of use and functionality. *Neurosurgery* 52:1235-1239 (2003)

8. Kang YN, Jang JS, Choi BO, et al: Evaluation of the Gating System Using Moving Phantom in CyberKnife. *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. 2006, Seoul, pp. 3446

9. Jang JS, Kang YN, Choi BO, et al: Evaluation of the Accuracy of the CyberKnife. *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. 2006, Seoul, pp. 2024

10. 김재균, 이동한, 이동훈 등: 호흡 운동에 의한 내부 장기의 움직임 감소에 관한 연구. *의학물리* 15:179-185 (2004)

11. Chang SD, Main W, Martin DP, et al: An analysis of the accuracy of the Cyberknife, A Robotic Frameless stereotactic radiosurgical system. *Neurosurgery* 52:140-146 (2003)

12. Martin JM, Richard SC: The accuracy of dose localization for an image-guided frameless radiosurgery system. *Med Phys* 23:2043-2049 (1996)

13. Yu C, Main W, Taylor D, et al: An anthropomorphic phantom study of the accuracy of Cyberknife spinal radiosurgery. *Neurosurgery* 55:1138-1149 (2004)

Estimation of CyberKnife Respiratory Tracking System Using Moving Phantom

Jae-Hyuk Seo^{*¶}, Young-Nam Kang[†], Ji Sun Jang^{†¶}, Hun-Joo Shin^{*¶}, Ji-Young Jung[§],
Byong-Ock Choi[†], Ihl-Bohng Choi^{*}, Dong-Joon Lee^{||}, Soo-Il Kwon[¶], Jong-Soo Lim[¶]

^{*}Cyberknife Clinic, Wooridul Spine Hospital, [†]Department of Radiation Oncology,
[¶]Cyberknife Center, Seoul St. Mary's Hospital, The Catholic University of Korea College
of Medicine, Seoul, [§]Department of Radiation Oncology, Incheon St. Mary's Hospital, Incheon,
^{||}Department of Neurosurgery, Ilsan Paik Hospital, College of Medicine, Inje University, Goyang,
[¶]Department of Medical Physics, Graduate School of Kyonggi University, Suwon, Korea

In this study, we evaluated accuracy and usefulness of CyberKnife Respiratory Tracking System (Synchrony™, Accuray, USA) about a moving during stereotactic radiosurgery. For this study, we used moving phantom that can move the target. We also used Respiratory Tracking System called Synchrony of the Cyberknife in order to track the moving target. For treatment planning of the moving target, we obtained an image using 4D-CT. To measure dose distribution and point dose at the moving target, ion chamber (0.62 cc) and gafchromic EBT film were used. We compared dose distribution (80% isodose line of prescription dose) of static target to that of moving target in order to evaluate the accuracy of Respiratory Tracking System. We also measured the point dose at the target. The mean difference of synchronization for TLS (target localization system) and Synchrony were 11.5 ± 3.09 mm for desynchronization and 0.14 ± 0.08 mm for synchronization. The mean difference between static target plan and moving target plan using 4D CT images was 0.18 ± 0.06 mm. And, the accuracy of Respiratory Tracking System was less 1 mm. Estimation of usefulness in Respiratory Tracking System was 17.39 ± 0.14 mm for inactivity and 1.37 ± 0.11 mm for activity. The mean difference of absolute dose was $0.68 \pm 0.38\%$ in static target and $1.31 \pm 0.81\%$ in moving target. As a conclusion, when we treat about the moving target, we consider that it is important to use 4D-CT and the Respiratory Tracking System. In this study, we confirmed the accuracy and usefulness of Respiratory Tracking System in the Cyberknife.

Key Words: Stereotactic Radiosurgery (SRS), Moving phantom, Cyberknife, Respiratory Tracking System (Synchrony), Target localization system (TLS)