

Evaluation of Real-time Target Positioning Accuracy in Spinal Radiosurgery

Dong Joon Lee

Department of Neurosurgery, Ilsan Paik Hospital, College of Medicine, Inje University, Goyang, Korea

Stereotactic Radiosurgery require high accuracy and precision of patient positioning and target localization. We evaluate the real time positioning accuracy of isocenter using optic guided patient positioning system, ExacTrac (BrainLab, Germany), during spinal radiosurgery procedure. The system is based on real time detect multiple body markers attached on the selected patient skin landmarks. And a custom designed patient positioning verification tool (PPVT) was used to check the patient alignment and correct the patient repositioning before radiosurgery. In this study, We investigate the selected 8 metastatic spinal tumor cases. All type of tumors commonly closed to thoracic spinal code. To evaluate the isocenter positioning, real time patient alignment and positioning monitoring was carried out for comparing the current 3-dimensional position of markers with those of an initial reference positions. For a selected patient case, we have check the isocenter positioning per every 20 millisecond for 45 seconds during spinal radiosurgery. In this study, real time average isocenter positioning translation were 0.07 ± 0.17 mm, 0.11 ± 0.18 mm, 0.13 ± 0.26 mm, and 0.20 ± 0.37 mm in the x (lateral), y (longitudinal), z (vertical) directions and mean spatial error, respectively. And body rotations were $0.14 \pm 0.07^\circ$, $0.11 \pm 0.07^\circ$, $0.03 \pm 0.04^\circ$ in longitudinal, lateral, table directions and mean body rotation $0.20 \pm 0.11^\circ$, respectively. In this study, the maximum mean deviation of real time isocenter positioning translation during spinal radiosurgery was acceptable accuracy clinically.

Key Words: Target positioning accuracy, Real time monitoring, Spinal radiosurgery

서 론

최근 급속하게 발전한 첨단 의료과학기술은 방사선수술 대상의 범위를 뇌에 발생한 병소 이외에 환자의 체부에 발생한 병소로 넓혀가고 있다. 특히 척추에 전이된 암은 대부분 척추를 파괴시키고 동시에 척추신경을 압박하면서 극심한 암성통증과 함께 신체 마비를 유발하는데, 척추는 호흡으로 인한 움직임이 거의 없고 방사선수술은 고 선량으로 한차례 혹은 수차례로 치료하는 방법이므로 국소적으로 전이된 척추 암은 방사선수술에 적절한 적응증이며 신속하고 탁월한 치료효과가 있는 것으로 보고되고 있다.^{1,2)}

이미 알려진 바와 같이 척추 방사선수술은 비 침습적 수술이므로 MRI와 CT 영상 등 방사선영상과 병소위치추적 장치의 도움으로 수술하기 때문에 환자 고정 장치 및 병소 국제방법 선택, 수술하는 동안 방사선영상 획득 후 방사선 수술 시 재위치 혹은 적은 움직임이라 할지라도 환자의 호흡 및 내부 장기운동 등으로 인한 병소 위치변이는 수술결과에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 그러므로 척추 방사선 수술에서 환자의 수술대 위 동일한 재위치 확인 및 수술 대상 병소에 대한 국제 정확도(localization accuracy)는 수술의 성공여부에 결정적인 역할을 하는 요소이다.³⁻⁶⁾

본 연구에서는 병소 국제 정확도 향상을 위한 방법을 모색하기 위하여 환자 수술 자세 재 위치확인 기구를 고안하여 임상에 부가적으로 적용하고 수술하는 동안 병소의 isocenter를 실시간 추적하여 척추 방사선수술의 정확도를 측정 평가하였다.

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(한국연구재단-기초공동연구소사업-No. 2009-0078392).

이 논문은 2013년 12월 10일 접수하여 2013년 12월 16일 채택되었음.
책임저자 : 이동준, (411-706) 경기도 고양시 일산서구 대화동 2240
인제대학교 일산백병원 신경외과학교실
Tel: 031)910-7732, Fax: 031)915-0885
E-mail: djlee@paik.ac.kr

재료 및 방법

1. 병소위치 추적 준비

1) **환자고정**: 척추방사선수술시 환자고정과 병소 위치 추적은 일체형 방사선 수술장비 Novalis와 실시간 병소추적장치인 영상유도 ExacTrac3.5 (BrainLab, Germany)을 사용하였다. 환자 고정을 위하여 환자 체형에 맞추어 진공쿠션으로 모형틀을 제작하였으며 모형틀은 CT 영상확득 시와 치료계획 후 방사선수술시 환자의 재위치에 동일하게 사용하였고 동시에 머리부분에 열경화성 마스크를 제작 사용하여 치료대 위의 환자 체위가 횡단면축이나 종단면축 방향으로 미동 할수 있는 원인을 최소화 하도록 하였다. 마스크 내부에는 치아틀을 부착하여 환자의 머리위치 변이를 방지 하도록 하였다. 한편 마스크는 환자의 병소위치가 경추 혹은 흉추 상단 부위에 위치한 경우 환자 턱 부위의 마스크 표면에 실시간 병소위치 추적에 사용하는 적외선 반사구슬 (InfraRed Body Marker; IRBM, 이하 반사구슬)을 부착하는 용도로도 사용하였다. 반사구슬은 앙와위 자세(supine position)의 턱, 쇄골, 흉곽, 흉골, 골반 부위 등에서 비교적 호흡으로 인한 변이가 적은 곳을 선택하여 병소의 위치에 따라 8~9개를 고루 분포하며 부착하였다.

2) **환자 재위치 확인장치(PPVT; Patient Positioning Verification Tool)**: 환자를 진공쿠션으로 고정 후 CT촬영이나 저분할 방사선수술로 인하여 재위치 시킬 경우 환자 체위를 재확인하고 보정하기 위해 '환자 재위치 확인장치

(PPVT; Patient Positioning Verification Tool; Patent 10-0949811)'를 고안하여 사용하였다. PPVT는 Fig. 1과 같이 탁자 모양의 아크릴 판 3면과 고르게 배열된 홀의 깊이를 측정하는 깊이 측정봉으로 구성되어 있다. 아크릴판의 상판 좌우편과 측면판에는 각각 매트릭스 형태로 직경 8 mm의 홀을 5×5개씩 배열하여 환자가 진공 쿠션에 재위치하여 고정되었을 때마다 환자 체위 표피에 약속된 지점좌표의 위치 및 깊이를 측정하여 환자 재위치를 확인하고 보정할 수 있도록 하였다.

2. 적외선반사구슬 및 병소 isocenter 위치변이 추적

방사선수술 중 병소위치 추적을 평가를 위하여 전이성 암이 흉추 전이된 환자의 종양 8례를 선택하였다. 환자의 방사선수술계획에 사용한 영상은 영상촬영 장비로부터 발생하는 왜곡현상을 감소시키고 해부학적 정보를 얻기 위해 조영 증강된 CT 영상과 자기공명영상으로 T1, 조영증강 T1, T2 영상을 융합하여 사용하였다. 종양의 경계면이 방사선에 민감한 기관인 척수신경 등 OAR (Organ At Risk)에 근접 혹은 밀착되어 있는 경우 OAR의 방사선수술 허용치를 참고하며⁷⁾ 세기조절 방사선수술 방법으로 치료계획을 완성하였다.⁸⁾

방사선수술 중 환자 전면에 부착한 반사구슬 각각의 위치변이를 측정 평가하였다.⁹⁻¹²⁾ 대상 환자는 본 연구를 위하여 선택한 흉추에 전이된 종양 8례 중 9번 흉추에 위치하여 상대적으로 호흡의 영향이 크다고 생각되는 1례를 각 적외선 반사구슬의 위치변이를 45초 동안 추적하고 평가

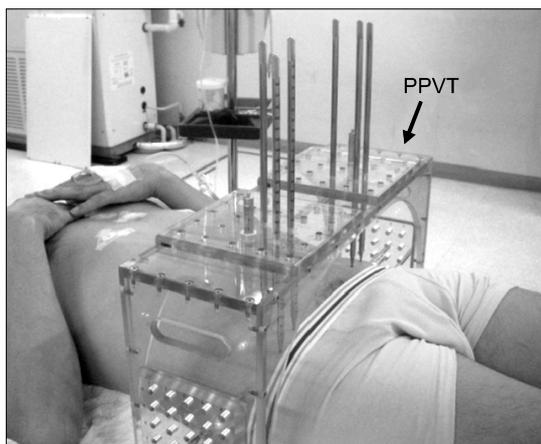


Fig. 1. Custom designed Patient Positioning Verification Tool (PPVT) used to alignment and correct repositioning of the patient.



Fig. 2. Representative spinal radiosurgery plan with radiation dose distribution. Tumor located left side of 9th thoracic spine include vertebral body.

하였다. 종양은 간암에서 전이한 것으로 진단되었으며 Fig. 2와 같이 척추 신경에 근접하여 발생하였고 체적은 28.6 cm³이었다.

병소 isocenter위치 추적을 위하여 선택한 8명의 환자는 모두 양와위 상태로 방사선수술 하였으며 반사구슬에 의해 실시간 추적되는 isocenter 좌표변이를 20 msec 간격으로 45 초씩 기록하여 분석하고 평가 하였다. 척추 방사선 수술 동안 모니터 상으로 계속 관찰하여 실시간 공간오차가 허용 값 이상이 될 때는 수술을 즉시 중단하고 환자 위치를 보정 후 수술을 재개하였다.

결과 및 고찰

1. 적외선반사구슬의 실시간 위치변이

반사구슬 위치변이 측정대상인 흉추 9번에 종양이 위치

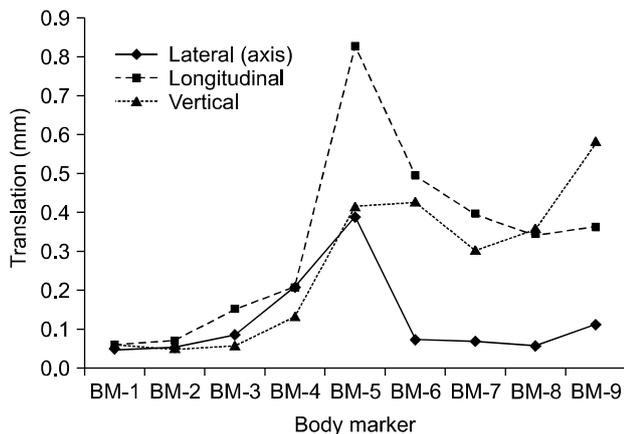


Fig. 3. InfraRed BodyMarker (IRBM) translations defined by real time monitoring during spine radiosurgery for selected metastatic spine tumor.

한 환자에 대하여 척추방사선수술 중 환자 전면에 부착한 9개 반사구슬의 위치변이를 측정하고 평가하였다. 반사구슬은 Table 1에서와 같이 환자 전면부의 골반 부위에 4개와 흉곽 부위 5개 등 총 9개를 부착하고 실시간 위치변위를 추적하였다. Fig. 3은 Table 1을 그래프로 시각화한 것이며 그림에서와 같이 반사구슬의 위치변이는 반사구슬 번호 BM-1, BM-2, BM-3, BM-4의 골반부위 보다 흉곽을 포함하는 부위의 반사구슬 BM-5, BM-6, BM-7, BM-8, BM-9의 변이가 상대적으로 커져있어 환자의 횡경막 움직임에 따른 것으로 생각된다. 또한, 횡경막 움직임의 폭이 상대적으로 큰 부위의 BM-5, BM-6, BM-7에서 횡단면(lateral) 축 방향과 과 종단면(longitudinal) 축 방향의 변이가 컸으며 흉곽 상단부위의 BM-9은 흉곽의 팽창 방향에 따라 종단면 축 방향과 수직면 축 방향의 변이가 크게 나타남에 따라 환자의 호흡이 구슬위치 변위의 주된 원인임을 알 수 있었다. Fig. 4는 선택된 흉추 9번에 종양이 위치한 환자의 병소

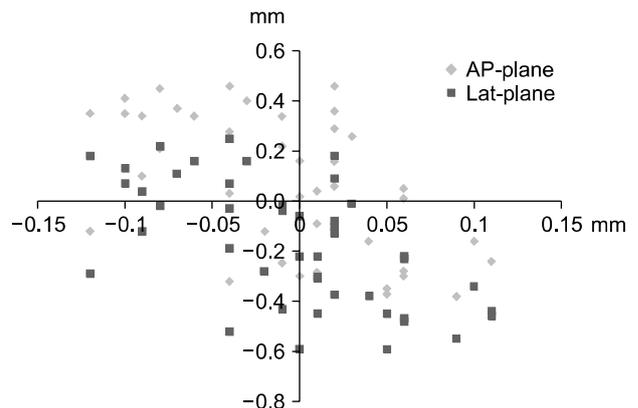


Fig. 4. Isocenter positioning displacement defined by IRBD monitoring checked per every 20 millisecond for 45 seconds.

Table 1. InfraRed BodyMarker (IRBM) translations defined by real time monitoring during spine radiosurgery for selected metastatic spine tumor. IRBM were placed on the patient's skin of the supine position.

IRBM	No.	Location	Translations (mm)			Translations mean (mm)
			Lateral	Longitudinal	Vertical	
	1	Pelvis-1	0.05	0.06	0.03	0.08±0.01
	2	Pelvis-2	0.05	0.07	0.05	0.10±0.01
	3	Pelvis-3	0.08	0.15	0.58	0.18±0.03
	4	Pelvis-4	0.21	0.21	0.13	0.32±0.10
	5	Chest-1	0.39	0.83	0.42	1.00±1.01
	6	Chest-2	0.07	0.39	0.34	0.66±0.43
	7	Chest-3	0.07	0.39	0.30	0.51±0.25
	8	Chest-4	0.06	0.34	0.36	0.50±0.29
	9	Chest-5	0.11	0.36	0.58	0.70±0.48

isocenter 위치변이를 45초 동안 20 msec 간격으로 환자의 AP면과 Lateral 면에 점으로 표시한 그림이다.

2. 병소 isocenter의 실시간 위치변이

전이성 암이 흉추에 전이된 종양 8례에 대하여 척추방사선수술 시 병소목표점 좌표의 실시간 위치변이를 추적하여 분석하고 평가하였다. 또한 환자를 양와위 자세로 고정시키고 환자 재위치 확인장치(PPV)와 병소위치에 따른 8-9개의 반사구슬을 환자 전면에 부착하였다. 반사구슬의 부착 위치는 종양의 위치를 고려하여 가능한 한 종양의 중심에 대칭되면서 호흡으로 인한 영향이 적은 곳으로 선택하였다.

본 연구에서는 흉추 전반에 폭 넓게 분포한 종양들에 대한 방사선수술 중 병소 isocenter 위치변이 추적 평가를 위하여 Table 2에서와 같이 흉추 1번, 2번, 3번, 8번, 9번, 11번에 전이된 종양 8례를 선택하였다. 종양의 체적평균은 36.1 cm³이었고 척추신경을 OAR로 지정하여 구속하였으며 8례의 종양들과 위치관계는 척추신경에서 3 mm 이상 떨어져 있는 type-A 2례, 3 mm 이내로 근접해 위치한 type-B 5례, 척추신경과 맞 닿아있는 type-C 1례이었다.

병소 종양의 isocenter 위치변이는 반사구슬의 위치변이를 실시간 추적결과 횡단면 축 방향으로 0.07±0.17 mm, 종단면 축 방향으로 0.11±0.18 mm, 수직면 축 방향으로 0.13±0.26 mm이었으며 평균 공간오차는 0.20±0.37 mm이었다. 이와 동시에 병소 isocenter의 회전오차(body rotation)는 종단면(longitudinal) 축 방향 0.14±0.07°, 횡단면(lateral) 축 방

향 0.11±0.07°, 환자테이블 각 이동 0.03±0.04°로 평균오차는 0.20±0.11°이었다. 본 연구결과 영상유도 국제방법을 이용한 척추방사선수술에서의 병소목표점 국제 평균오차는 임상적으로 허용할 수 있는 오차범위 이내임을 확인하였다.

결 론

척추방사선 수술은 비 침습적 수술로서 영상자료와 함께 광학적 병소추적 장치를 이용하여 수술하므로 장비의 역학적 정확도와 병소 isocenter의 국제 정확도(localization accuracy)가 임상결과를 좌우하는 중요한 요인 중의 하나이다. 본 연구에서는 이들 정확도를 극대화시키기 위하여 환자 재위치 확인장치(PPVT)와 병소위치에 따른 적외선 구슬 분포 프로토콜을 개발하였고, 이들을 적용하여 선택된 흉추에 전이된 종양 8례의 환자완자에 대하여 척추방사선수술 동안 병소 isocenter의 국제정확도를 0.5 mm 내외로 유지시켰다. 이는 이미 알려진 노발리스장비의 기계적 오차 0.5 mm를 고려하더라도 척추방사선수술 동안 실시간 병소 isocenter의 변이는 최대 1.5 mm 이내임을 의미한다. 또한 이 결과는 병소가 척추신경에 밀착되어 있는 고난이도 방사선수술 경우에서도 1회 혹은 수회로 시술하는 저 분할 방사선수술을 세기조절방사선수술(IMRS) 방법으로 사용할 수 있음을 의미한다. 즉, 척추방사선수술에서 환자 고정 장치 와 재위치 확인장치 및 수술시 실시간 추적 장치의 적합한 조합을 이용하면 고난이도 수술 환자에게도 척추신경에는 허용치 이하의 방사선 피폭인 동시에 병소는 피사

Table 2. Three dimensional target translations of selected 8 spinal tumor cases defined by Infrared body marker (IRBM).

Tumor location	CTV (cm ³)	OAR type	No. of IRBM	Isocenter shift (mm)			Body rotation (degree)		
				mean±SD			mean±SD		
				Lateral direction	Longit. direction	Vertical direction	Longit. direction	Lateral direction	Table direction
T9	29.1	C	8	0.13±0.24	0.15±0.18	0.00±0.43	0.11±0.07	0.00±0.09	0.02±0.06
T2	19.3	A	8	0.06±0.15	0.04±0.10	0.02±0.09	0.02±0.07	0.10±0.08	0.03±0.03
T11	41.3	B	8	0.04±0.26	0.14±0.16	0.14±0.37	0.13±0.05	0.01±0.09	0.00±0.01
T3	23.0	B	8	0.03±0.09	0.10±0.10	0.12±0.19	0.09±0.09	0.03±0.05	0.09±0.07
T1	58.3	B	8	0.04±0.19	0.06±0.25	0.18±0.21	0.50±0.17	0.23±0.12	0.06±0.11
T8	39.9	B	9	0.08±0.15	0.03±0.16	0.10±0.19	0.06±0.02	0.14±0.04	0.03±0.01
T9	49.5	A	9	0.09±0.18	0.31±0.19	0.21±0.32	0.00±0.05	0.17±0.06	0.04±0.03
T8	28.8	B	9	0.09±0.06	0.08±0.29	0.26±0.30	0.17±0.04	0.16±0.02	0.00±0.01
Mean	36.1			0.07±0.17	0.11±0.18	0.13±0.26	0.14±0.07	0.11±0.07	0.03±0.04
Mean spatial error					0.20±0.37			0.20±0.11	

OAR: spinal cord and cauda equina, OAR type (distance from OAR to tumor), type-A (isolated), type-B (<3 mm closed), type-C (contact).

하도록 시술 할 수 있어 임상결과를 향상 시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Gerstzen PC, Ozhasoglu C, Button SA, et al: Cyberknife frameless stereotactic radiosurgery for spinal lesions: Clinical experience in 125 cases. *Neurosurgery* 55(1):89-99 (2004)
2. Ryu S, Yin FF, Rock J, et al: Image-Guided and Intensity-Modulated Radiosurgery for Patients with Spinal Metastasis. *Cancer* 97(8):2013-2018 (2003)
3. Yin FF, Ryu S, Ajlouni M, et al: Image-guided procedures for intensity-modulated spinal radiosurgery. *J Neurosurg* 101 (Suppl):89-99 (2004)
4. Agazaryan N, Tenn SE, Desalles AAF: Image-guided radiosurgery for spinal tumors: methods, accuracy and patient intrafraction motion. *Phys. Med. Biol* 25:1715-1727 (2008)
5. Kim SY, Jin HS, Yang H, Amdur RJ, et al: A study target positioning error and its impact on dose variation in image-guided stereotactic body radiotherapy for the spine. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 73(5):1574-1579 (2009)
6. Linthout N, Verellen D, Tournel K, Storme G: Six dimensional analysis with daily stereoscopic x-ray imaging of intrafraction patient motion in head and neck treatments using five points fixation masks. *Med Phys* 33(2):504-513 (2006)
7. Benedict SH, Yenice KM, Followill D, et al: Stereotactic body radiation therapy: The report of AAPM Task Group 101. *Medical Physics* 37(8):4078-4101 (2010)
8. Andrews DW, Bednarz G, Evans JJ, Downes B: A review of 3 current radiosurgery systems. *Surgical Neurology* 66: 559-564 (2006)
9. Stock M, Kontrisoova K, Dieckmann K, et al: Development and application of a real-time monitoring and feedback system for deep inspiration breath hold based on external marker tracking. *Med. Phys* 33(8):2868-2877 (2006)
10. Liu W, Wiersma RD, Mao W, et al: Real-time 3D internal marker tracking during arc radiotherapy by the use of combined MV-kV imaging. *Phys Med Biol* 53:7197-7213 (2008)
11. Baroni G, Ferrigno G, Orecchia R, et al: Real-time three-dimensional motion analysis for patient positioning verification. *Radiotherapy and Oncology* 54:21-27 (2000)
12. Medin PM, Solberg TD, DeSalles AAF, et al: Investigations of minimally invasive method for treatment of spinal malignancies with linac stereotactic radiation therapy: Accuracy and animal study. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 52(4):1111-1122 (2002)

척추방사선수술시 실시간 추적검사에 의한 병소목표점 위치변이 평가

인제대학교 의과대학 일산백병원 신경외과학교실

이 동 준

방사선수술은 고 용량의 방사선을 병소의 목표점에 정확하게 주위의 정상조직을 보호하면서 한 번에 혹은 수 차례 거쳐 전달하는 방법이므로 병소 국재에 대한 오차의 크기는 방사선수술에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 영상 유도 국재 장비인 ExacTrac (BrainLab, Germany)을 이용한 척추방사선수술에서 병소 목표점 국재의 오차를 평가하였다. 국재 오차를 최소화 하기위하여 방사선수술 전 '환자위치 확인장치(PPVT)'를 고안하여 부가적으로 사용하였다. 실시간 목표점오차 평가를 위하여 흉추에 전이된 종양에 대한 방사선수술 8례를 대상으로 평가하였다. 그 결과 isocenter 목표점 오차는 횡단면(lateral) 축 방향, 종단면(longitudinal) 축 방향, 수직면(vertical) 축 방향으로 각각 0.07 ± 0.17 mm, 0.11 ± 0.18 mm, 0.13 ± 0.26 mm이었으며 평균 공간오차는 0.20 ± 0.37 mm이었다. 병소 isocenter의 회전오차(body rotation)는 종단면(longitudinal) 축 방향 $0.14 \pm 0.07^\circ$, 횡단면(lateral) 축 방향 $0.11 \pm 0.07^\circ$, 환자테이블 각 이동 $0.03 \pm 0.04^\circ$ 로 평균오차는 $0.20 \pm 0.11^\circ$ 이었다. 본 연구결과 영상유도 국재방법을 이용한 척추방사선수술에서의 병소목표점 국재 평균오차는 임상적으로 허용할 수 있는 오차범위 이내임을 확인하였다.

중심단어: 환자위치 고정, 실시간 추적검사, 척추방사선수술