

로봇사이버나이프를 이용한 간 종양의 실시간 움직임 측정과 방사선수술 시 호흡추적장치의 정확성 평가

건양대학교 의과대학 방사선종양학교실, 암센터

김가중 · 심수정 · 김정호 · 민철기 · 정원규

목적: 본 연구에서는 로봇 사이버나이프의 호흡추적장치(Synchrony™ Respiratory motion tracking system)를 이용하여 방사선수술을 시행한 간 종양환자를 대상으로 치료 중 실시간 종양의 움직임을 정량적으로 측정하고 방사선수술시 호흡추적장치의 정확성을 평가하고자 한다.

대상 및 방법: 사이버나이프 치료를 시행한 간 종양 환자 24명을 대상으로 호흡추적 장치를 이용하여 총 64회의 수술을 시행하였다. 모든 환자에서 초음파를 이용하여 간 종양 근처에 4~6개의 금침을 삽입하였고 치료계획용 컴퓨터 단층촬영 영상을 이용하여 치료계획을 세웠다. 매 치료 시 금침의 위치는 치료계획 시 만들어진 디지털 재구성 방사선 영상(Digitally Reconstructed Radiography; DRR)과 실시간으로 촬영되어진 방사선영상(X-ray Image)으로 확인하고, 이 결과를 MTS (Motion Tracking System)을 통해 Mtsmain.log 치료파일 형식으로 저장하여 종양의 움직임을 측정하였다. 또한 사이버나이프를 이용한 방사선 수술 시 호흡추적장치의 정확성은 실시간 금침의 위치와 미리 예측된 좌표 사이의 상관관계 오차(Correlation Error)로 평가하였다.

결과: 간 종양의 직선형태 움직임은 SI (Superior-Inferior)방향으로 최대 23.5 mm, 평균 13.9±5.5 mm, LR (Left-Right)방향으로 최대 3.9 mm, 평균 1.9±0.9 mm, AP (Anterior-Posterior)방향으로 최대 8.3 mm, 평균 4.9 ± 1.9 mm였으며 간 종양의 회전 운동 정도는 X (Left-Right)축 회전은 최대 3.3°, 평균 2.6±1.3°, Y (Cranio-Caudal)축 회전은 최대 4.8°, 평균 2.3±1.0°, Z (Anterior-Posterior)축 회전은 최대 3.9°, 평균 2.8±1.1°로 측정되었다. 또한 치료의 정확성을 평가하는 상관관계 오차는 평균 1.1±0.7 mm였다.

결론: 본 연구에서 방사선 수술 중 간 종양의 실시간 움직임을 정량적으로 확인할 수 있었고 로봇 사이버나이프의 호흡추적 장치를 이용한 방사선 수술의 정확성을 평가할 수 있었다. 이를 토대로 간 종양의 방사선 수술이나 일반적인 방사선치료에 있어서 치료용적의 결정과 움직임에 대한 유용한 정보를 제공할 것이라 생각된다.

핵심어: CyberKnife, Radiosurgery, Synchrony™, Respiratory motion tracking system, Liver tumor

서 론

방사선치료의 궁극적 목표는 정상조직의 장해를 최소화함과 동시에 종양조직에 정확한 선량을 집중 조사하는 것이다. 이런 목표를 달성하기 위해 치료장비나 기술, 컴퓨터의 급속한 발전으로 정확한 방사선량을 조사하는 방법들이 개발되었다. 새로운 기술로 3차원 입체조형치료(3D Conformal Radiotherapy), 세기변조 방사선치료 (Intensity Modu-

lated Radiation Therapy: IMRT)등 종양의 형태에 맞도록 집중 조사를 실시 할 수 있으며 최근에는 수술과 같은 효과를 얻을 수 있는 방사선수술이 도입되어 보다 많은 선량을 정확하게 종양에 집중 조사할 수 있게 되었다.¹⁾

방사선 수술 장치의 하나인 감마나이프 치료법은 201개의 방향에서 표적용적에 방사선을 집중 조사함으로써 주위 조직의 방사선량을 최소화하는 새로운 치료법이다.²⁾ 그러나 감마나이프 치료법은 적용부위가 뇌 부위에 국한되어 체부의 방사선수술은 불가능하다. 최근 로봇 기술의 발전과 소형화된 선형가속기 장치를 이용한 실시간 영상 추적 기술이 가능한 사이버나이프 치료기(Accuray, Incorporated, Sunnyvale, CA)의 개발은 뇌 부위의 종양뿐만 아니라 방사선 수술 영역을 전신으로 확대하여 적용할 수 있게 되

이 논문은 2008년 4월 18일 접수하여 2008년 10월 1일 채택되었음.
책임저자: 정원규, 건양대학교 의과대학 방사선종양학교실, 암센터
Tel: 042)600-6720, Fax: 042)600-9468
E-mail: llinac@kyuh.co.kr

었다. 사이버나이프의 호흡 추적장치(Synchrony™ Respiratory Motion Tracking System)를 이용한 방법으로 호흡 패턴에 따른 종양의 움직임을 실시간 추적하여 간이나 폐 등 호흡에 따라 움직이는 기관의 치료에 있어 매우 정확한 선량을 조사할 수 있다.^{4~6)}

간은 호흡에 따라 움직임이 매우 큰 장기로 방사선 치료 중에 간의 움직임을 예측하는 것이 중요하다. 과거 간 종양의 방사선치료는 전체 간의 허용선량이 30 Gy로 작아서 그 치료 반응이 기대에 미치지 못하여 보편적으로 시행되지 않았으나 3차원입체조형 방사선치료기술의 발달로 간의 일부분에 방사선조사가 가능해지면서 방사선량을 증가시켜 치료효과가 높아졌다. 이러한 3차원입체조형 치료는 실질적인 종괴의 축소를 유도하는 치료로 많이 사용되고 있다.^{7~9)} 또한 호흡에 따른 간의 움직임을 연구한 논문에 의하면 최소 1.5 cm의 오차가 있으므로 치료계획 용적(Planning Target Volume; PTV)를 1.0 cm 이상 여유를 두고 치료를 하고 있으며 종양이 큰 경우 정상간에 많은 방사선량이 조사되어 총 선량 증가에 제한을 주는 경우가 많다.

이런 경우 최근 사이버나이프의 호흡추적장치(Synchrony™)를 이용한 방사선 수술을 시행하면 간 독성을 최소화하고 방사선량을 극대화시키는 효과가 있을 것이라고 생각된다.

본 연구는 사이버나이프를 이용하여 간 종양의 움직임을 보다 정량적으로 측정하여 방사선수술에 있어 치료계획범위 결정에 도움을 주고 간 종양 방사선 수술에 이용되는 사이버나이프 호흡추적장치의 정확성을 평가하고자 한다.

대상 및 방법

1. 대 상

2007년 7월부터 12월까지 6개월 동안 간 종양으로 사이버나이프를 실시한 24명의 환자를 대상으로 간 종양의 움직임을 측정하였다. 간 종양의 사이버나이프 수술을 한 환자들은 총 선량은 24~52 Gy로 3~4회 분할하였으며 각각의 환자들의 방사선 수술 시 평균 방사선 빔 수는 242개로 조사를 실시 하였다(Fig. 1). 본 연구에서는 63회의 치료 결과로 움직임과 수술의 정확성을 분석하였다.



Fig. 1. Treatment plan for liver tumor by CyberKnife Radiosurgery (MultiPlan™). Use the evaluate step to review and modify detail of a plan, to perform a high resolution dose calculation, and to save the plan as deliverable.

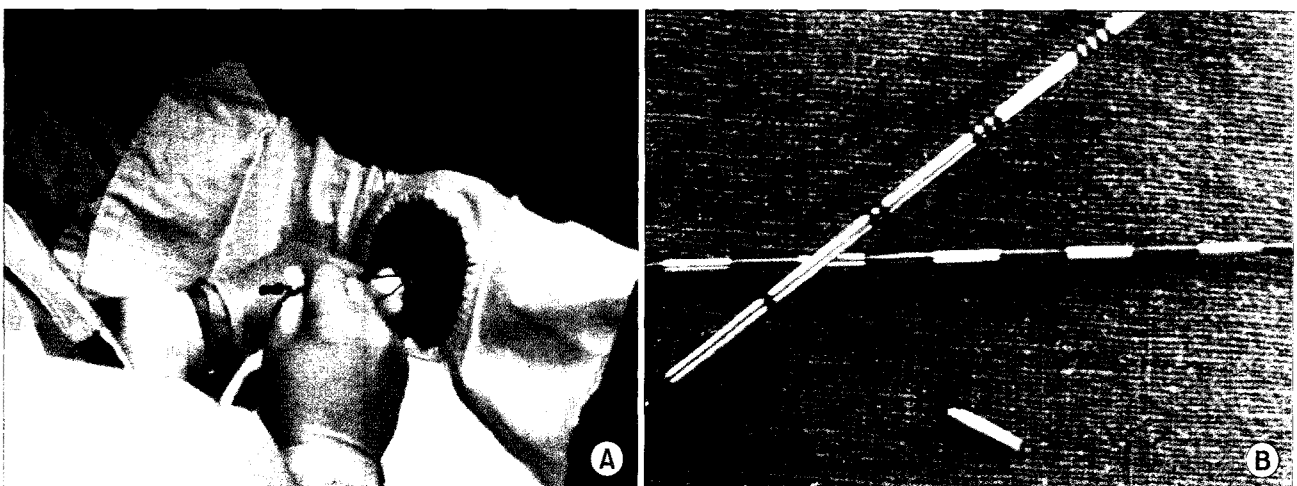


Fig. 2. Fiducials are placed percutaneously around the lesion in liver tumor using ultrasonographic guidance. Fiducial define a target's position during treatment delivering.

2. 금침의 삽입

간 종양의 치료를 위한 기준 좌표는 직경 1 mm, 길이 5 mm의 금침(Fiducial)을 4~6개를 종양과 종양 근처에 삽입하였다. 금침은 초음파나 컴퓨터 단층촬영을 이용하여 삽입하였으며(Fig. 2) 금침간의 거리는 20 mm, 종양과의 거리는 최소 65 mm이하가 되도록 하여 3개 이상의 금침간 삼각형의 각도는 15° 이상이 되도록 권고하고 있다. 치료계획을 위한 컴퓨터 단층촬영은 금침이 조직에 고정되도록 1주일 후에 촬영하였다.

3. 종양의 좌표인식을 위한 영상 획득

사이버나이프 수술에서 표적(Target)의 위치 측정은 치료계획을 위한 컴퓨터 재구성 방사선 영상(Digitally Reconst-

ructed Radiography; DRR)과 실제 치료 시 얻어지는 방사선 영상(Live X-ray image)을 TLS (Target Locating System)를 통해 6개 방향(X, Y, Z, roll, pitch, yaw)에 대한 오차 값을 메인 컴퓨터에 표기한다. 최초 표적의 조절은 메인 컴퓨터에 표기된 6개 방향의 오차를 AXUM Couch가 보정해 주고, 치료 시 표적의 오차는 로봇을 통해 보정되어지며 정확한 치료가 시행된다(Fig. 3). 치료계획을 위한 컴퓨터 단층 촬영은 본원의 필립스 16채널 컴퓨터 단층촬영 장치를 이용하여 1.5 mm 절편두께(Slice thickness)로 260~300개 영상 획득하였다. 사이버나이프 수술의 치료계획은 MultiPlan™을 이용하여 컴퓨터 재구성 방사선영상을 만들었다. 실시간 방사선영상은 치료실 천장에 45°, 315° 방향으로 서로 직교하는 일반 방사선 발생장치를 이용하여 영상을 획득하였다.

4. 호흡추적 장치: Synchrony Respiratory Motion Tracking System

호흡에 따른 종양의 실시간 추적(Tracking)은 CyberKnife Robotic Radiosurgery System의 호흡추적 장치를 이용하여 분석하였으며 실시간으로 역동적 빔(Dynamically Beam)을 종양에 조사할 수 있다.

호흡추적 장치는 3개의 발광다이오드(light emitting diodes; LED)에서 나오는 신호를 연속적인 호흡운동을 주기에 따라 외부호흡 패턴을 인식하고, 내부 장기의 움직임은 호흡의 패턴에 따른 금침의 위치를 직교하는 방사선 영상을 이용하여 측정하였다. 로봇은 호흡에 따른 금침의 위치를 미리 예측하여 직선운동으로 종양을 실시간(Real time)으로 추적 치료하는 방식이다(Fig. 4).

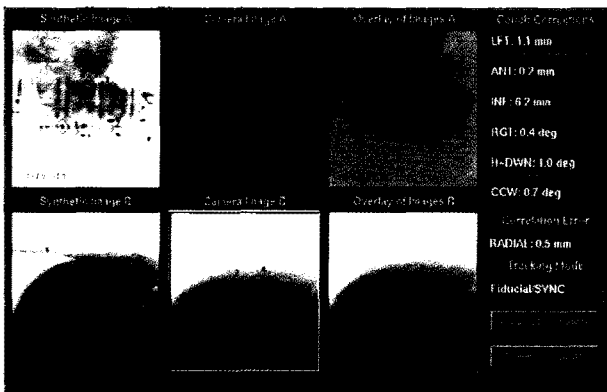


Fig. 3. All four fiducials are tracked for liver lesions using real-time image guidance. Orthogonal digitally reconstructed radiography (DRRs) are generated from the original CT. Throughout the treatment, the system correlates the original DRRs to the live images generated from the amorphous silicon detectors.



Fig. 4. External optical markers (LED) and detector used in the Synchrony system to provide a breathing signal.

5. 간 종양의 움직임 측정

간 종양의 움직임을 정량적으로 평가하기 위해서 매번 방사선 빔을 조사할 때 마다 방사선 영상을 획득하여 금침 좌표를 계산하고 MTS (Motion Tracking System)을 통해 얻어진 Mtsmain.log파일을 분석하였다. 종양의 위치를 SI (Superior-Inferior)방향, LR (Left-Right)방향, AP (Anterior-Posterior)방향의 직선방향 및 X (Left-Right)축, Y (Cranio-Caudal)축, Z (Anterior-Posterior)축 회전 움직임을 측정하였고, 이 결과값을 이용하여 각각의 평균 움직임과 벡터 값을 측정하였다.

6. 간 종양의 방사선 수술의 정확성 평가

사이버나이프의 호흡 추적장치(Synchrony System)는 외부 체표면의 호흡(External Marker)에 따른 일정한 파형을 만들어 주고, 그 파형에 내부에 삽입된 금침(Internal Marker)의 좌표를 측정하여 호흡패턴에 따른 표적의 위치를 미리 정해주고, 이 예측된 표적의 좌표를 이용하여 소형 선형가속기를 장착한 로봇 팔이 실시간으로 종양을 추적하며 치료를 시행하게 된다. 이때 예측된 공간적 좌표와 실제 내부에 삽입된 금침 좌표의 오차 정도를 상관관계오차 (Correlation error)라고 하며 간 종양에서 방사선 수술 시 호흡추적장치의 정확성은 상관관계오차로 평가하였다.

상관관계 오차(Correlation error)는 종양 추적에 있어 변위 벡터의 길이로 정의할 수 있으며, 3개의 방향 SI (Superior-Inferior), LR (Left-Right), AP (Anterior-Posterior) 변위차를 나타낸다. 본 연구에서 각각의 간 종양 방사선수술 시 전 치료시간 중 상관관계 오차 값 또한 Mtsmain.log파일로 측정되어 분석하였다.

$$Correlation\ error = \sqrt{(dev_{Sup-Inf})^2 + (dev_{Rt-Lt})^2 + (dev_{Ant-Post})^2}$$

$dev_{Sup-Inf}$: SI (Superior-Inferior)방향의 예측된 금침좌표와 실제 금침좌표의 변위 차

dev_{Rt-Lt} : LR (Left-Right)방향의 예측된 금침좌표와 실제 금침좌표의 변위 차

$dev_{Ant-Post}$: AP (Anterior-Posterior)방향의 예측된 금침좌표와 실제 금침좌표의 변위 차

결 과

24명의 간 종양환자에서 간으로 전이된 환자는 12명이었고, 간세포암(Hepato Cellular Carcinoma: HCC)환자 9명, 나머지 3명은 담도암(Cholangiocarcinoma)였다.

Table 1. Summary of Patients with Lesions

Case	Sex	Age	Diagnosis	Tumor location	Tumor volume (cc)
1	M	49	HCC*	Lt lobe	438
2	M	76	Metastasis (AGC) [†]	S1	16
3	M	65	HCC	Lt lobe	37
4	M	42	Metastasis (AGC)	Lt lobe	275
5	M	46	Metastasis (Rectal)	S8	11
6	M	69	HCC	S6	45
7	F	68	Metastasis (GB)	S4	581
8	M	62	HCC	S6	65
9	M	54	Cholangiocarcinoma	S4	1193
10	M	61	HCC	S4	25
11	M	48	HCC	S6	128
12	M	44	Metastasis (NPC) [‡]	S8	396
13	M	43	HCC	Lt lobe	974
14	M	58	Metastasis (Rectal)	S7	20
15	F	70	Metastasis (Rectal)	S6	128
16	M	59	Metastasis (Rectal)	S6	5
17	M	58	Cholangiocarcinoma	S1	124
18	M	65	HCC	S6	620
19	M	45	Cholangiocarcinoma	S1	75
20	F	54	Metastasis (Rectal)	S6	296
21	M	58	Metastasis (Rectal)	S6	25
22	M	45	Metastasis (GB) [§]	S4	963
23	F	36	Metastasis (Breast)	S4	189
24	M	54	HCC	S6	39

*HCC (Hepato Cellular Carcinoma), [†]AGC (Advanced Gastric Cancer), [‡]NPC (Nasopharyngeal Carcinoma), [§]GB (Gallbladder)

치료용적은 평균 278 cc였으며, 분할 횟수는 3~4회로 나누어 방사선 시술을 시행하였다(Table 1).

간 종양의 움직임은 각 환자의 분할 조사된 총 치료시간 동안의 좌표를 분석하여 움직임을 최대범위와 평균, 표준편차로 분석하였다. 간 종양은 SI (Superior-Inferior)방향으로 최대범위가 23.5 mm, 평균 13.9±5.5 mm, LR (Left-Right) 방향으로 최대범위 3.9 mm, 평균 1.9±0.9 mm, AP (Anterior-Posterior)방향으로 최대범위 8.3 mm, 평균 4.9±1.9 mm 움직임을 알 수 있었다. 직선운동의 치료보장을 위한 벡터 값은 최대범위 15.0 mm, 평균 5.3±3.6 mm값을 나타냈다(Table 2). 간 종양의 움직임을 정량적으로 분석하기 위해 본 연구에서는 종양의 회전 정도를 측정하였고, 그 결과는 X (Left-Right)축 회전은 최대범위 3.3°, 평균 2.6±1.3°, Y (Cranio-Caudal)축 회전은 최대범위 4.8°, 평균 2.3±1.0°, Z (Anterior-Posterior)축 회전은 최대범위 3.9°, 평균 2.8±1.1°로 측정되었다(Table 3).

사이버나이프를 이용한 간 종양의 방사선 수술 시 호흡 추적장치의 정확성을 상관관계오차(Correlation error)로 평가하였는데, 측정값은 평균 1.1±0.7 mm로 정밀한 방사선

Table 2. The Translational and Vectorial Movement for Liver

Case	SI (mm)*			LR (mm) [†]			AP (mm) [‡]			VECTOR (mm)		
	Range	Mean	Stdev	Range	Mean	Stdev	Range	Mean	Stdev	Range	Mean	Stdev
1	28.8	17.5	6.2	6.5	2.5	1.3	7.0	4.3	1.5	20.0	6.0	4.3
2	22.5	14.1	5.6	4.9	3.4	0.9	6.6	4.5	1.6	14.9	4.7	3.5
3	34.6	22.1	5.5	6.9	3.1	1.2	12.1	8.5	1.9	21.1	7.1	4.3
4	24.9	16.1	5.8	7.6	4.7	1.8	7.3	4.4	1.6	14.3	5.4	3.3
5	17.9	11.0	4.1	3.6	1.8	0.7	4.2	2.5	0.8	11.5	3.9	2.6
6	26.6	15.1	5.3	2.6	1.3	0.6	4.7	1.9	1.0	14.5	5.7	3.5
7	26.8	16.9	6.9	2.8	1.1	0.7	14.1	9.1	3.4	22.8	6.7	5.7
8	34.1	20.1	8.0	5.9	2.7	1.3	16.1	9.0	3.6	21.6	7.3	4.9
9	24.5	14.5	5.1	3.7	1.5	0.8	6.9	4.3	1.3	14.1	4.4	3.0
10	20.9	14.4	5.2	5.1	1.9	1.3	11.5	8.2	2.4	14.8	6.6	4.1
11	10.6	5.7	2.7	4.7	2.3	1.2	4.9	2.7	1.2	7.2	2.9	2.0
12	21.3	12.0	5.2	1.5	0.7	0.3	7.9	4.7	1.8	15.7	6.0	3.9
13	13.3	8.5	3.4	2.2	1.1	0.5	2.5	1.4	0.5	9.8	3.0	2.3
14	16.2	9.7	4.6	3.8	1.7	0.9	6.6	4.0	1.7	15.1	5.3	4.2
15	12.8	7.9	3.7	1.7	0.7	0.4	3.0	1.7	0.7	9.2	3.3	2.9
16	33.2	20.1	8.7	5.0	3.3	1.1	9.4	5.6	2.3	22.1	7.0	5.2
17	38.2	22.7	9.7	5.4	2.9	1.2	12.6	7.8	2.8	22.3	8.4	5.2
18	43.4	25.3	11.7	3.4	1.7	0.9	16.0	8.8	4.1	23.0	9.5	7.0
19	7.0	3.9	1.5	4.0	1.5	0.8	5.9	3.4	1.2	5.6	2.8	1.4
20	30.9	16.7	6.7	6.3	2.7	1.2	10.1	5.7	2.2	17.7	6.3	4.1
21	35.7	18.7	7.6	2.1	1.3	0.4	6.4	4.0	1.3	20.4	5.8	4.7
22	12.9	9.7	2.6	2.2	0.5	0.4	5.1	1.8	1.4	7.8	3.6	1.3
23	23.2	10.9	5.7	1.6	1.2	0.3	14.4	6.9	3.4	10.6	3.5	3.1
24	2.5	1.1	0.4	1.1	0.6	0.2	3.2	1.9	0.7	3.6	1.8	0.7
Average	23.5	13.9	5.5	3.9	1.9	0.9	8.3	4.9	1.9	15.0	5.3	3.6

*SI (Superior-Inferior), [†]LR (Left-Right), [‡]AP (Anterior-Posterior)

Table 3. The Rotational Movement and Correlation Errors for Liver Tumor

Case	X-Axis (°) *			Y-Axis (°) [†]			Z-Axis (°) [‡]		
	Range	Mean	Stdev	Range	Mean	Stdev	Range	Mean	Stdev
1	3.1	2.4	1.1	3.4	1.8	0.7	3.2	3.0	1.0
2	3.8	2.7	1.8	1.8	0.6	0.4	3.2	2.9	1.2
3	2.8	2.0	0.9	4.8	2.5	1.0	4.0	3.0	1.1
4	3.6	2.7	1.6	6.4	2.0	1.4	3.8	3.1	1.1
5	1.8	1.4	0.7	4.3	2.1	0.8	3.4	1.4	0.6
6	2.8	2.2	0.8	5.5	3.0	1.3	4.6	4.0	1.7
7	4.6	3.2	2.0	4.9	2.7	1.2	2.8	1.9	0.7
8	4.3	2.8	1.9	5.2	3.1	1.0	4.2	3.4	1.4
9	3.2	2.7	1.2	1.8	0.9	0.4	4.7	4.0	1.2
10	2.0	1.8	0.8	5.6	2.5	1.1	3.7	2.3	1.2
11	1.8	1.7	0.8	4.7	2.5	1.1	3.3	2.1	0.8
12	5.2	3.6	2.0	3.3	1.3	0.8	3.4	2.8	1.1
13	1.2	1.0	0.4	2.5	1.2	0.5	3.3	2.2	0.9
14	2.2	2.0	0.8	4.1	2.0	0.7	2.8	1.8	0.7
15	1.6	1.4	0.5	7.3	2.5	2.1	4.6	2.4	1.4
16	5.5	4.7	2.7	5.9	3.0	1.3	4.7	2.3	1.0
17	5.6	4.9	2.4	9.5	6.3	1.6	6.8	6.2	2.7
18	N	N	N	N	N	N	N	N	N
19	N	N	N	N	N	N	N	N	N
20	3.3	2.9	1.2	7.0	3.5	1.4	4.5	3.8	1.4
21	4.0	3.1	1.8	6.0	1.9	1.3	4.2	4.0	1.4
22	4.3	4.1	0.9	5.6	1.9	1.3	2.7	1.7	0.5
23	N	N	N	N	N	N	N	N	N
24	1.7	1.3	0.5	1.9	1.0	0.4	3.7	1.3	0.9
Average	3.3	2.6	1.3	4.8	2.3	1.0	3.9	2.8	1.1

*X (Left-Right)-Axis, [†]Y (Cranio-Caudal)-Axis, [‡]Z (Anterior-Posterior)-Axis

Table 4. Correlation Errors during Liver Tumor Treatment using CyberKnife Synchrony

Case	Range (mm)	Mean (mm)	Stdev	Case	Range (mm)	Mean (mm)	Stdev
1	3.9	1.1	0.7	13	2.1	0.7	0.4
2	4.9	1.3	1.0	14	3.4	1.0	0.7
3	3.6	1.0	0.6	15	2.0	0.5	0.4
4	3.4	1.0	0.7	16	5.1	1.3	0.9
5	3.6	0.9	0.6	17	8.2	1.6	1.3
6	3.6	1.1	0.7	18	7.0	2.3	1.7
7	2.8	1.1	0.7	19	2.8	0.7	0.5
8	6.5	1.6	1.1	20	5.2	1.4	0.9
9	2.8	0.9	0.6	21	3.8	1.1	0.7
10	5.4	0.9	0.8	22	3.1	0.8	0.5
11	2.3	0.7	0.5	23	3.7	1.3	0.8
12	2.2	0.6	0.5	24	1.2	0.4	0.3
Average				3.9	1.1	0.7	

치료가 시행되었음을 알 수 있었다(Table 4).

고안 및 결론

본 연구에서는 사이버나이프의 호흡추적 장치(Synchrony™)를 이용하여 간 종양의 움직임과 방사선 수술 시 호흡추적치의 정확성을 분석하였다. 간 움직임에 대해서 Shimizu 등¹⁰⁾은 누운 상태의 환자가 정상 호흡 하에 MRI로 간 종양을 촬영한 결과 평균적으로 SI (Superior-Inferior)방향으로 21 mm, LR (Left-Right)방향으로 9 mm, AP (Anterior-Posterior)방향으로 8 mm의 이동이 있었다고 보고하였으며, Weiss 등¹¹⁾은 호흡상태에 따라 간의 위치가 12~75 mm까지 움직인다고 보고 하였다. 본 연구에서 간 종양의 직선 움직임은 SI (Superior-Inferior)방향으로 평균 13.9±5.5 mm, LR (Left-Right)방향으로 평균 1.9±0.9 mm, AP (Anterior-Posterior)방향으로 평균 4.9±1.9 mm 으로 기존에 보고한 종양의 움직임과 약간의 차이를 보였으며 회전운동은 X (Left-Right)축 회전은 평균 2.6±1.3°, Y (Cranio-Caudal)축 회전은 평균 2.3±1.0°, Z (Anterior-Posterior)축 회전은 평균 2.8±1.1°임을 확인할 수 있었다. 종양의 직선적 움직임에 대해서 여러 논문에서 분석하였지만 회전운동까지 측정된 보고는 거의 없었다. 이 연구에서는 회전 운동을 정량적으로 평가함으로써 간 종양의 다양한 움직임을 명확히 알 수 있었다. 그러나 아직까지 호흡추적장치(Synchrony™)를 이용하여 종양의 호흡에 따른 회전이나 변형까지 보정하기는 어려운 것이 현실이다. 현재 활발하게 연구되어 치료에 적용하고 있는 4차원 전산화 단층촬영을 이용한 치료계획과 4차원

치료는 종양의 회전, 변형도 좀더 보정이 가능하게 될 것이다.^{12,13)}

방사선치료의 범위를 결정하는데 있어서 호흡에 따른 종양의 움직임에 따라 치료계획을 위한 용적(PTV)을 정하는데, 용적이 커질수록 정상 조직에 들어가는 방사선량이 많아지며, 이에 따라 충분한 양의 방사선을 조사하는데 한계가 있다. 따라서, 간 종양의 방사선 치료 시 호흡조절 방사선치료(Respiration Gating Radiotherapy)나 호흡운동 보정장치(Active Breathing Control System)을 이용하여 호흡을 조절하며 치료를 시행하는 기술이 개발되어 현재 이용되고 있다.^{14,15)} 하지만 위의 기술들은 인위적 호흡으로 인해 환자의 불편함과 치료시간의 증가라는 단점이 있다. 최근 개발된 사이버나이프의 호흡추적 장치(Synchrony™ Respiratory Motion Tracking System)은 환자가 자유롭게 숨쉬는 가운데 외부 호흡의 움직임과 종양 내부에 삽입된 금침(Internal marker)의 움직임을 고려해 추적하도록 고안되어 실시간 역동적 치료를 시행할 수 있다. 호흡추적 시스템을 이용한 방사선 수술은 움직임이 큰 간 종양 치료에 매우 유용한 방법이라고 생각된다.

Kitamura 등¹⁶⁾은 실시간 종양 추적 시스템(Real-time tumor-tracking system)을 통하여 간 부위 종양의 치료 중 움직임에 대하여 분석하면서 종양의 위치가 우엽일 때, 간 경변증이 있을 때, 이전에 간 수술을 시행하지 않았을 경우 움직임이 유의 있게 크게 나타난다고 보고하였다. 본 연구에서는 이런 여러 가지 요인에 따른 분석을 시행하지는 않았으나 향후 유의 있는 요소를 분석하고 평가해 보고자 한다.

호흡추적 방사선 수술(Synchrony)은 외부 호흡의 파형과 내부 금침의 움직임을 실시간 분석하여 치료 중에 호흡에 따른 종양 움직임을 추적하며 방사선 조사가 이루어지도록 고안된 장치로서, 치료에 대한 정확성을 상관관계 오차(Correlation error)의 값으로 평가하였다. 보통은 이 오차 값을 최대 5 mm 이내로 허용하고 있으며, 대부분이 2 mm 내로 유지되도록 치료하고 있다. 실제로 치료한 환자에서 이 값을 측정된 결과 평균 1.1±0.7 mm로 치료의 정확성을 확인할 수 있었다. 따라서 사이버나이프 방사선수술은 치료계획 용적을 줄여서 정상 간을 보호하면서 방사선량을 높일 수 있는 방법으로 유용할 것으로 생각된다.

본 연구에서 사이버나이프 호흡추적 장치(synchrony™ respiratory motion tracking system)를 이용하여 간 종양의 움직임을 안정된 호흡 하에 영상유도장치를 통해 실시간으로 위치를 측정할 수 있었으며 간 종양의 직선운동뿐만 아니라 종양의 회전운동까지도 정량적으로 확인할 수 있었다. 로봇 사이버나이프의 호흡추적 장치를 이용한 방사선

수술 시 평균오차가 비교적 적어 간 종양의 방사선 치료 적용 시 그 유용성을 평가할 수 있었다. 이를 토대로 방사선 수술이나 일반적인 방사선치료에 있어 치료용적의 결정에 매우 유용한 정보를 제공할 것이라 생각된다.

참 고 문 헌

1. **Webb S.** Optimization of conformal radiotherapy dose distribution by simulated annealing. *Phy Med Biol* 1989;34:1349-1370
2. **Leksel L.** The stereotactic method and radiosurgery of the brain. *Acta Chir Scand* 1951;102:316-319
3. **Wong JW, Sharpe MB, Jaffray DA, et al.** The use of active breathing control(ABC) to reduce margin for breathing motion. *Int J Radat Oncol Biol Phys* 1999;44:911-919
4. **Schweikard A, Glosser G, Bodduluri M.** Robotic motion compensation for respiratory movement during radiosurgery. *Comp Aided Surg* 2000;5:263-277
5. **Schweikard A, Shiomi H, Adler J.** Respiration tracking in radiosurgery. *Med Phys* 2004;31:2737-2741
6. **Shimizus, Shirato H, Kitamura, et al.** Use of an implanted marker and real-time tracking of the marker for the positioning of prostate and bladder cancers. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2000;48:1591-1597
7. **Stillwagon GB, Order SE, Guse C, et al.** 194 hepatocellular cancers treated by radiation and chemotherapy combinations: toxicity and response: a Radiation Therapy Oncology Group Study. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1989;17:1223-1229
8. **Dawson LA, McGinn CJ, Normolle D, et al.** Escalated focal liver radiation and concurrent hepatic artery fluorodeoxyuridine for unresectable intrahepatic malignancies. *J Clin Oncol* 2000;18:2210-2218
9. **Cheng JC, Chuang VP, Cheng SH, et al.** Local radiotherapy with or without transcatheter arterial chemoembolization for patients with unresectable hepatocellular carcinoma. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2000;47:435-442
10. **Shimizu S, Shirato H, Xo B, et al.** Three-dimensional movement of a liver tumor detected by high-speed magnetic resonance imaging. *Radiotherapy and Oncol* 1999;50:367-370
11. **Weiss PH, Baker JM, Potchen ET.** Assessment of hepatic respiratory excursion. *J Necl Med* 1972;13:758-759
12. **Underberg RW, Lagerwaard FJ, Cuijpers JP, et al.** Four dimensional CT scans for treatment planning in stereotactic radiotherapy for stage I lung cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2004;60:1283-1290
13. **Xing L, Thorndyke B, Schreiber E, et al.** Overview of image-guided radiation therapy. *Med Dosim* 2006;31:91-112.
14. **Kubo HD, Hill BC.** Respiration gated radiotherapy treatment. A technical study. *Phys Med Biol* 1996;41:83-91
15. **Balter JM, Brock KK, Litzenberg DW, et al.** Daily targeting of intrahepatic tumors for radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2002;52:266-271
16. **Kitamura K, Shirato H, Seppenwoolde Y, et al.** Tumor location, cirrhosis, and surgical history contribute to tumor movement in the liver, as measured during stereotactic irradiation using a real-time tumor tracking radiotherapy system. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2003;56:221-228

Abstract

Evaluation of Real-time Measurement Liver Tumor's Movement and Synchrony™ System's Accuracy of Radiosurgery using a Robot CyberKnife

Gha jung Kim, M.S., Su Jung Shim, M.D., Jeong Ho Kim, Chul Kee Min, M.S.
and Weon-kuu Chung, M.D., Ph.D.

Department of Radiation Oncology, CyberKnife Center, Konyang University Hospital, Daejeon, Korea

Purpose: This study aimed to quantitatively measure the movement of tumors in real-time and evaluate the treatment accuracy, during the treatment of a liver tumor patient, who underwent radiosurgery with a Synchrony Respiratory motion tracking system of a robot CyberKnife.

Materials and Methods: The study subjects included 24 liver tumor patients who underwent CyberKnife treatment, which included 64 times of treatment with the Synchrony Respiratory motion tracking system (Synchrony™). The treatment involved inserting 4 to 6 acupuncture needles into the vicinity of the liver tumor in all the patients using ultrasonography as a guide. A treatment plan was set up using the CT images for treatment planning uses. The position of the acupuncture needle was identified for every treatment time by Digitally Reconstructed Radiography (DRR) prepared at the time of treatment planning and X-ray images photographed in real-time. Subsequent results were stored through a Motion Tracking System (MTS) using the Mtsmain.log treatment file. In this way, movement of the tumor was measured. Besides, the accuracy of radiosurgery using CyberKnife was evaluated by the correlation errors between the real-time positions of the acupuncture needles and the predicted coordinates.

Results: The maximum and the average translational movement of the liver tumor were measured 23.5 mm and 13.9 ± 5.5 mm, respectively from the superior to the inferior direction, 3.9 mm and 1.9 ± 0.9 mm, respectively from left to right, and 8.3 mm and 4.9 ± 1.9 mm, respectively from the anterior to the posterior direction. The maximum and the average rotational movement of the liver tumor were measured to be 3.3° and $2.6 \pm 1.3^\circ$, respectively for X (Left-Right) axis rotation, 4.8° and $2.3 \pm 1.0^\circ$, respectively for Y (Cranio-Caudal) axis rotation, 3.9° and $2.8 \pm 1.1^\circ$, respectively for Z (Anterior-Posterior) axis rotation. In addition, the average correlation error, which represents the treatment's accuracy was 1.1 ± 0.7 mm.

Conclusion: In this study real-time movement of a liver tumor during the radiosurgery could be verified quantitatively and the accuracy of the radiosurgery with the Synchrony Respiratory motion tracking system of robot could be evaluated. On this basis, the decision of treatment volume in radiosurgery or conventional radiotherapy and useful information on the movement of liver tumor are supposed to be provided.

Key Words: CyberKnife, Radiosurgery, Synchrony, Respiratory motion tracking system, Liver tumor