

사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적 장치를 이용한 폐종양 방사선수술의 유용성 평가

— Evaluation on the Usefulness of Lung Tumor Stereotactic Radiosurgery Applying
the CyberKnife Synchrony™ Respiratory Tracking System —

극동대학교 방사선학과 · 건양대학교 방사선학과¹⁾ · 주성대학 방사선과²⁾

김가중 · 배석환¹⁾ · 최준구 · 채홍인²⁾

— 국문초록 —

본 연구는 사이버나이프 Synchrony 호흡추적 장치를 이용하여 방사선 수술을 시행한 폐종양 환자 48명을 대상으로 전 치료기간 중 종양의 움직임과 방사선수술의 정확성을 평가하였다. 폐종양의 움직임은 종양이나 종양주변에 삽입된 금침의 좌표를 사이버나이프 영상유도 장치로 측정하였으며, 방사선수술의 정확성은 움직임 추적 컴퓨터(MTS)로 계산된 상관관계 오차로 평가하였다. 폐종양의 움직임은 두미방향으로 평균 2.63±1.87 mm며, 좌우방향 1.13±0.71 mm, 전후방향 1.74±1.16 mm의 움직임을 보였으며, 회전 움직임 정도는 X축 1.66±1.66°, Y축 1.20±0.97°, Z축 1.18±0.73°로 측정되었다. 직선 움직임의 벡터 값은 평균 3.78±2.00 mm값을 나타냈다. 연구 결과에서 두미방향(p<0.001)과 전후방향(p<0.029), 3차원 벡터 값(p<0.002)들은 종양의 위치가 상부보다 하부의 움직임이 크게 나타나 통계적 유의성을 보였다. 사이버나이프 Synchrony 호흡추적 장치를 이용한 폐종양의 방사선 수술시 상관관계 오차는 전체 평균 0.95±0.62 mm로 매우 정확한 조사로 종양의 움직임을 보상하여 방사선 수술이 이루어졌으며 그 유용성을 확인할 수 있었다.

중심 단어: 사이버나이프 방사선수술, Synchrony 호흡추적 장치, 폐종양

I. 서 론

최근 우리나라의 폐암 발생률은 흡연과 인구의 고령화, 환경적 요인에 의해 증가되고 있으며 2008년에 발표된 한국중양암등록본부 자료에 의하면 폐암은 남녀를 합쳐서 전체 암 발생의 12.1%로 2위를 차지하였다. 남녀의 성비는 3.51:1로 남자에게서 더 많이 발생하였다. 조직학적으로는 2007년의 폐암 전체 발생 건수 17,834건 가운데

암(Carcinoma)이 80.6%, 육종(Sarcoma)이 0.2%를 차지하였다. 암 중에서는 선암(Adenocarcinoma)이 31.7%로 가장 많고, 편평 세포 암(Squamous cell carcinoma)이 26.0%, 소 세포 암(Small-cell carcinoma)이 11.1%를 차지하였다¹⁾.

이러한 폐암의 치료방법에서 수술이나 항암요법과 더불어 방사선치료의 역할이 더욱 증대되고 있다. 폐암의 방사선치료에서 호흡에 따른 표적 종양의 움직임은 치료의 정확성을 감소시키는 원인이 되며 정상조직의 손상확률(Normal Tissue Complication Probability, NTCP)을 증가시키고 있다. 호흡으로 인한 폐종양의 움직임은 종양의 위치에 따라 두미방향과 전후방향, 좌우방향에서 차이를 보이며 주로 호흡에 의한 움직임이 크지만 심장이나

*접수일(2010년 10월 29일), 심사일(2010년 11월 9일), 확정일(2010년 12월 3일)

교신저자: 김가중, (369-700) 충청북도 음성군 감곡면 왕장리
극동대학교 방사선학과
Tel : 043-879-3690, Fax : 043-879-3730
E-mail : linac@kdu.ac.kr

대동맥의 영향도 받고 있다. Plathow 등은 자기공명영상(Dynamic MRI)을 이용하여 흉부종양을 측정한 결과 하엽에서 두미방향으로 9.5 mm, 전후방향 6.1 mm, 좌우방향 6.0 mm의 움직임을 보였으며, 중엽에 위치한 경우 두미방향 7.2 mm, 전후방향 4.3 mm, 좌우방향 4.3 mm의 움직임을 보였고, 상엽의 경우 두미방향으로 4.3 mm, 전후방향 2.8 mm, 좌우방향 3.4 mm의 움직임을 측정하였다²⁾.

국제 방사선 단위측정 위원회(ICRU) 보고서 62에서는 방사선치료계획 시 환자의 움직임과 장기의 움직임, 치료체위의 변화를 고려하여 충분한 여유 폭(Margin)을 주어 종양부위가 치료조사 영역을 벗어나지 않도록 권고하고 있으나, 조사 범위의 증가와 정상조직의 장해가 커져 충분한 선량을 치료표적에 전달하기가 곤란하다³⁾.

방사선 치료 분야는 의료장비와 기술, 컴퓨터의 급속한 발전으로 정확한 방사선량을 조사하는 방법들이 개발되어 활발히 응용되고 있다. 새로운 기술로 3차원 입체조형치료(3D Conformal Radiotherapy), 세기변조 방사선치료(Intensity Modulated Radiation Therapy: IMRT) 등 종양의 형태에 맞도록 선량분포를 만들어 집중조사 할 수 있으며, 호흡에 따른 종양의 움직임을 보상하기 위한 방법으로 호흡조절 방사선치료법(Active Breathing Control, ABC)과 호흡 동기화 치료법(Respiration Gated Radiotherapy)이 이용되어 종양에 방사선량을 집중 조사하고 정상조직의 장해를 최소화 하고 있다⁴⁾.

최근 정상조직의 장해를 최소화하며 방사선수술과 같은 효과를 얻을 수 있는 치료 장치들이 적용되고 있다. 본 연구에서 사용된 4세대 사이버나이프(Accuray Inc, Sunnyvale, CA) Synchrony™ 호흡추적 방사선수술법은 영상유도 장치를 이용하여 호흡에 따른 종양의 위치를 미리 예측하고 선형가속장치를 장착한 로봇이 자유로운 호흡 하에 종양을 추적하여 역동적인 방사선을 조사할 수 있게 되었다. 사이버나이프 Synchrony 호흡 추적 방사선 수술은 움직이는 장기에 대한 정확성을 더욱 증가시켜 체부의 방사선 수술(Stereotactic Body Radiosurgery)에 적용하게 되었으며, 본 연구는 실시간 종양추적 시스템인 사이버나이프 Synchrony를 이용한 폐종양 치료의 유용성을 평가하고자한다^{5,6)}.

II. 재료 및 방법

1. 사이버나이프 소개

사이버나이프 장치는 선형가속장치를 소형화하여 로봇

에 장착시킨 영상유도 기술(Image Guided Radiotherapy, IGRT)로 종양을 추적하는 방사선수술 장치이다. 선형가속장치는 X-Band형식으로 9,300 MHz의 주파수를 가지며 선량률은 800 MU/min으로 6 MV X선을 발생시킨다⁷⁾. 선형가속장치를 부착시킨 로봇(Kuka, Augsburg, Germany)은 6개축을 가지고 있어 자유로운 공간적 위치에서 약 1,200개 빔을 어느 방향에서든 방사선을 조사할 수 있다. 사이버나이프 방사선수술의 영상유도장치는 치료실 천정에 대각선 방향으로 직교하는 진단용 X선 발생장치와 바닥에 내장된 분해능이 0.4 mm/pixel인 아모퍼스 실리콘 검출기(Amorphous silicon detector)로 실시간 얻어진 영상을 통하여 환자의 움직임과 종양 좌표를 측정하게 된다. 측정된 영상은 치료계획용 컴퓨터 단층촬영(CT)으로 얻어진 디지털 재구성 방사선 영상(Digital Reconstructed Radiography, DRR)과 비교하여 좌표인식 컴퓨터(Target Locating System Computer, TLS PC)에서 종양의 좌표를 계산한다. 영상유도 장치에서 측정되고 계산된 좌표는 자동조절 치료대(AXUM, Accuray Inc, Sunnyvale, CA)에 의해 6개 방향(X, Y, Z, Roll, Pitch, Yaw)으로 교정이 가능하다. 사이버나이프 방사선수술 장치는 두미방향(X축)과 좌우방향(Y축), 전후방향(Z축)의 3차원 직선적 움직임 좌표뿐만 아니라 종양의 X축 회전(Roll), Y축 회전(Pitch), Z축 회전(Yaw)으로 3방향의 회전 움직임 좌표를 정량적으로 측정하고 교정이 가능하다.

사이버나이프 장치는 방사선 치료동안의 좌표변화를 실시간 영상유도장치로 측정하여 좌표인식 컴퓨터로 계산되어 지면 로봇이 변화된 3차원적 좌표를 보정(Correction)하여 정밀한 방사선 수술이 시행된다(Fig. 1).

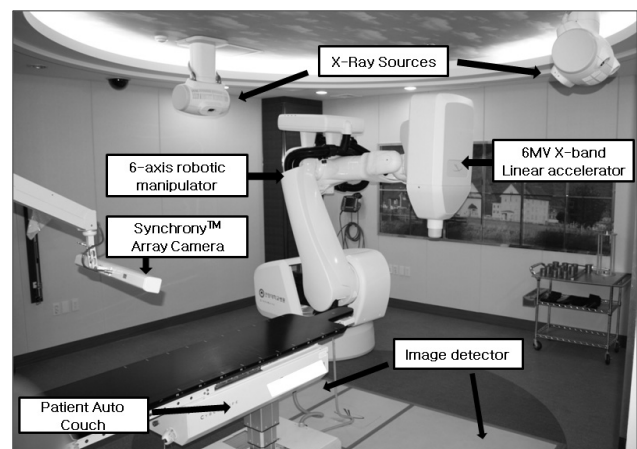


Fig. 1. Component of CyberKnife Stereotactic Radiosurgery systems. CyberKnife image-guided targeting and robotic treatment delivery system

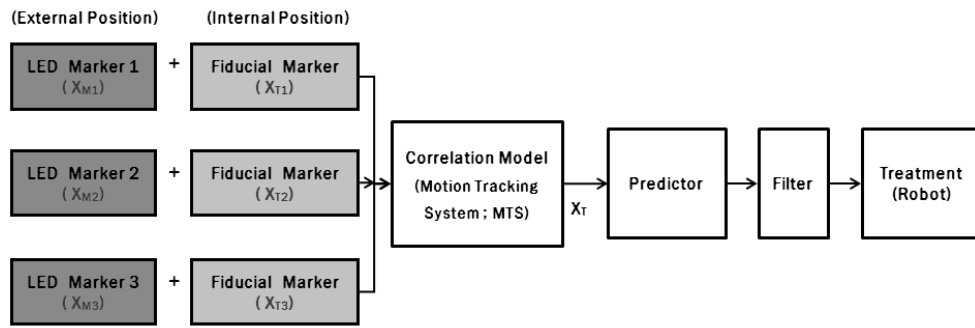


Fig. 2. Block diagram of the Synchrony Respiratory Tracking System

2. 사이버나이프 Synchrony 호흡 추적 장치

사이버나이프 Synchrony 호흡추적 장치는 호흡에 따른 실시간 표적의 움직임을 추적(Tracking)하여 방사선 빔(Dynamic beam)을 종양에 정밀하게 조사 할 수 있다. 이러한 호흡 추적 장치의 가장 큰 장점은 자유로운 호흡 하에 로봇이 역동적인 방사선을 조사할 수 있다는 것이다. Synchrony 호흡추적 장치는 흉부나 복부 피부의 움직임이 폐의 움직임이나 호흡에 따라 움직이는 장기와 선형적인 상관관계가 있으며, 이러한 개념을 토대로 외부마커(LED Marker; X_M)의 위치와 내부종양(Fiducial Marker; X_T)의 위치를 일치시켜 상관관계를 모델화(Correlation Model)하는 것이다. 호흡추적 방사선 치료를 위해 종양이나 그 주변에 4~6개의 금침(Gold Fiducial)을 삽입하여 내부 종양의 움직임을 대신하여 측정한다. 금침은 직경 1mm, 길이 5mm의 크기로 컴퓨터 단층촬영이나 초음파를 이용하여 종양에 삽입한다. 삽입 후 금침이 조직에 자리 잡히는 약 1주일 후에 치료계획을 위한 컴퓨터 단층 촬영을 실시한다. 치료계획 시 대각선 방향의 2개의 컴퓨터 재구성 방사선영상(DRR)을 만들어 실제 치료 시 같은 방향의 직교하는 X선 실제 영상과 중첩하여 계산하고 종양의 위치를 추적한다⁸⁾.

Synchrony 호흡추적 장치는 흉부나 복부에 부착시킨 3개의 발광 다이오드(Light emitting diode, LED) 신호를 전하결합소자(Charge Coupled Device, CCD) 카메라로 측정하여 외부 호흡의 패턴을 측정하고, 움직임 추적 장치(Motion Tracking System, MTS) 컴퓨터에 저장한다. 측정된 외부 호흡 패턴과 영상유도 장치인 대각선 X선 영상을 이용하여 측정된 종양좌표(내부 마커)를 일치시켜주고 상관관계를 계산한다. 외부마커(X_M)와 내부 마커(X_T)의 일치모델(Correspondence Model)은 1회 호흡주기 동안 최소 8개 좌표(흡기 주기: 4개, 호기 주기: 4개),

최대 15개 좌표를 이용하여 계산되며 치료동안 최신 좌표로 계속 개선해 나간다(First in-First out method). 일치된 패턴은 움직임 추적 장치 컴퓨터가 로봇의 지연시간(Delay time)을 계산하여 종양의 위치를 미리 예측하고 로봇은 3차원 직선운동(X, Y, Z축 방향)으로 종양의 움직임을 실시간 추적하여 연속적인 방사선 빔을 조사한다⁵⁾(Fig. 2).

사이버나이프 Synchrony 호흡추적 장치는 종양조직과 정상조직의 여유폭(Margin)을 줄여 정상조직의 장해를 최소화할 수 있게 되었고, 호흡주기에 따라 움직이는 모든 종양에 영상유도를 통하여 역동적인 추적으로 정확한 방사선을 조사할 수 있게 되었다. 특히 복잡한 호흡동기 방사선치료나 호흡을 강제로 조절하는 방법과 달리 자유로운 호흡동안 결정 장기나, 위험성이 높은 장기의 방사선 피폭을 최소화 할 수 있다⁹⁾(Fig. 3).



Fig. 3. Treatment plan image for lung tumor by CyberKnife Radiosurgery(Multiplan)

3. 사이버나이프 Synchrony 호흡 추적 장치를 이용한 폐암 치료 시 종양의 움직임과 치료 정확성 평가

2008년 8월부터 2010년 2월까지 사이버나이프 방사선 수술을 시행한 48명의 폐암 환자를 대상으로 치료 로그 데이터를 분석하고 평가하였다. 사이버나이프 체부 방사선 수술은 영상유도장치를 통해 호흡에 따른 종양의 움직임 좌표를 매번 빔 조사 시 측정하며 추적 오차를 보정한다. 본 연구는 사이버나이프 방사선 수술 전 치료과정 중의 종양의 움직임을 정량적으로 분석하였으며, 체부 방사선 수술의 정확성을 상관관계 오차로 평가하여 임상 적용에 그 유용성을 파악하고자 한다.

1) 사이버나이프 체부방사선수술 시 폐 종양의 움직임 측정

사이버나이프 Synchrony 호흡추적 방사선수술은 영상유도기술을 이용하여 직교된 방사선발생장치에 의해 종양의 움직임 좌표를 정량적으로 측정할 수 있으며, 매번 방사선 빔을 조사할 때 마다 방사선 영상을 획득하여 금침좌표를 계산하게 된다. 계산된 좌표는 호흡의 파형과 일치시켜 종양의 움직임을 로봇이 보상하게 된다. 본 연구에서는 종양의 움직임 추적장치를 통해 얻어진 Mtsmain.log파일을 엑셀 파일로 변환하여 분석하였다. 종양의 움직임을 두미(Cranio-Caudal, CC)방향, 좌우(Left-Right, LR)방향, 전후(Anterior-Posterior, AP)방향의 직선방향(Translation)과 X(Left-Right)축, Y(Cranio-Caudal)축, Z(Anterior-Posterior)축 회전 움직임(Rotation)을 측정하였고, 이 결과 값을 이용하여 각각의 평균 움직임과 벡터 값을 측정하였다.

2) 폐암 환자의 사이버나이프 체부방사선수술 시 치료 정확성 평가

사이버나이프의 Synchrony 호흡추적 장치는 외부 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 사이버나이프 방사선 수술 시 호흡추적 장치의 정확성을 상관관계오차로 평가하였다.

상관관계 오차는 종양 추적에 있어 변위 벡터의 길이로 정의할 수 있으며, 두미방향, 좌우방향, 전후방향의 변위 차를 나타낸다. 본 연구에서 각각의 방사선수술시 전 치료시간 중 상관관계 오차 값 또한 Mtsmain.log파일로 측정하여 분석하였다(Fig. 4).

Correlation error =

$$\sqrt{(dev_{Sup-Inf})^2 + (dev_{Rt-Lt})^2 + (dev_{Ant-Post})^2} \dots\dots (식 1)$$

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

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

$dev_{Ant-Post}$: AP(Anterior-Posterior)방향의 예측된 금침좌표와 실제금침좌표의 변위차

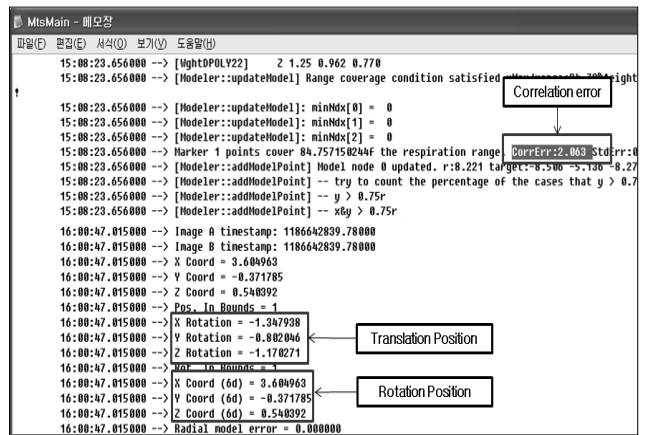


Fig. 4. Correlation error is measured as coordinates of Mtsmain.log file in CyberKnife Synchrony Radiosurgery

III. 결 과

1. 사이버나이프 Synchrony 호흡추적 방사선 수술을 적용한 폐암 환자 정보

사이버나이프 Synchrony 호흡추적 방사선수술을 시행한 폐종양환자는 48명으로 남자가 33명(68.8%), 여자가 15명(31.3%)이었으며, 연령대는 60대가 13명(27%)으로 가장 많았으며, 50대가 12명(25.0%), 70대 10명(20.8%) 순으로 많았다. 병기는 4기가 45.8%로 가장 많았으며, 3기, 1기가 각각 20.8%의 순으로 나타났다.

종양의 위치는 좌하엽(LL)이 29.2%로 가장 많았으며,

좌상엽(LUL)이 20.8%, 우하엽(RLL)이 18.8%의 순으로 많았다. 종양의 체적은 1.6~611.9 cc로 평균 96.45 cc였으며, 치료빔 수는 평균 226개 방향, 평균 치료시간은 75.55분이었다(Table 1).

Table 1. Information of the patient who treats the CyberKnife Synchrony Respiratory Tracking system

List	Frequency (%)	Minimum	Maximum	Average	SD
Sex	M	33(68.8)			
	F	15(31.2)			
age	30-39	4(8.3)			
	40-49	5(10.4)			
	50-59	12(25)			
	60-69	13(27.1)			
	70-79	10(20.8)			
	80≤	4(8.3)			
stage	I	10(20.8)			
	II	6(12.5)			
	III	10(20.8)			
	IV	22(45.8)			
site	RUL	7(14.6)			
	RML	8(16.7)			
	RLL	9(18.8)			
	LUL	10(20.8)			
	LLL	14(29.2)			
Tumor Volume		1.60(cc)	611.90(cc)	96.45(cc)	125.92
Number of Beam		108	272	226.04	43.87
Treatment Time		30(min)	90(min)	75.55 (min)	15.41 (min)
Total		46(100)			

RUL(Right Upper Lobe), RML(Right Middle Lobe), RLL(Right Lower Lobe), LUL(Left Upper Lobe), LLL(Left Lower Lobe)

2. 사이버나이프 체부방사선수술 시 폐종양의 움직임 측정 결과

사이버나이프 방사선 수술을 시행한 폐종양 움직임은 자유로운 호흡하에 각 환자의 분할 조사된 총 치료시간 동안의 좌표를 무작위(Random)로 분석하였다.

전체 폐종양의 두미방향 움직임은 평균 2.63±1.87 mm며, 좌우방향으로 평균 1.13±0.71 mm, 전후방향으로 평균 1.74±1.16 mm 움직임을 알 수 있었다. 폐 종양의 움직임을 정량적으로 분석하기 위해 본 연구에서는 종양의 회전 정도를 측정하였고, 그 결과는 X축 회전은 평균 1.66±1.66°, Y축 회전은 평균 1.20±0.97°, Z축 회전은 평균 1.18±0.73°로 측정되었다. 직선운동의 치료보정을 위한 벡터 값은 평균 3.78±2.00 mm값을 나타냈다. 연구 결과에서 두미방향(p<0.001)과 전후방향(p<0.029), 3차원 벡터 값(p<0.002)들은 종양의 위치가 상부(Upper lobe)보다 하부(Lower lobe)의 움직임이 크게 나타나 통계적 유의성을 보였다(Table 2).

3. 폐암 환자의 사이버나이프 체부방사선수술 시 치료 정확성 평가 결과

사이버나이프 Synchrony 호흡추적 방사선수술을 시행한 48명의 폐암 환자의 정확성 평가를 전 치료 과정 중 움직임 추적 컴퓨터에 의해 계산된 상관관계 오차로 측정하였다. 전체 환자의 최소 오차는 0.77 mm, 최대오차는 1.13 mm였으며, 평균 상관관계 오차는 0.95±0.62 mm이었다(Table 3).

ACCURAY사에서는 사이버나이프 Synchrony 호흡추적 체부방사선 수술 시 최적의 상관관계 오차를 2 mm 이하로 정의하였으며, 최대 허용 오차는 5 mm로 정의하였다. 본 연구에서 48명의 폐종양 환자의 상관관계 오차 평균은 2 mm를 넘지 않아 비교적 Synchrony 호흡추적 정확성이 높음을 알 수 있었으며, 임상적용에서의 그 유용성을 확인할 수 있었다.

Table 2. The Correlation error values were compared, depending on the error value of patients who underwent the CyberKnife Synchrony radiosurgery, age of patient, location and volume of tumor

index	N	mean	SD	S.E	confidence interval 95%		t	p-value		
					min	max				
Translation (mm)	CC**	upper	21	3.20	2.48	0.79	-0.33	2.62	1.60	
		lower	27	2.06	1.25	0.30	-0.70	2.98		1.36
		total	48	2.63	1.87	0.55	-0.52	2.80		
	LR	upper	21	1.16	0.75	0.24	-0.51	0.64	0.23	
		lower	27	1.10	0.67	0.16	-0.54	0.67		0.22
		total	48	1.13	0.71	0.20	-0.53	0.65		
	AP*	upper	21	2.25	1.75	0.55	0.08	1.96	2.22	
		lower	27	1.24	0.57	0.14	-0.26	2.29		1.78
		total	48	1.74	1.16	0.35	-0.09	2.12		
Rotation (°)	X-axis	upper	21	1.50	1.16	0.37	-1.86	1.20	-0.44	
		lower	27	1.82	2.16	0.52	-1.65	0.99		-0.51
		total	48	1.66	1.66	0.45	-1.75	1.10		
	Y-axis	upper	21	1.28	1.09	0.34	-0.62	0.93	0.41	
		lower	27	1.12	0.86	0.21	-0.70	1.01		0.38
		total	48	1.20	0.97	0.28	-0.66	0.97		
	Z-axis	upper	21	1.25	0.85	0.27	-0.44	0.71	0.48	
		lower	27	1.12	0.60	0.15	-0.52	0.79		0.44
		total	48	1.18	0.73	0.21	-0.48	0.75		
Translation (mm)	Vector**	upper	21	4.54	2.90	0.92	-0.09	3.11	1.94	
		lower	27	3.02	1.10	0.27	-0.60	3.63		1.58
		total	48	3.78	2.00	0.59	-0.35	3.37		

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$ **Table 3.** Correlation error during lung tumor treatment using CyberKnife Synchrony Respiratory Tracking Radiosurgery

index	N	Correlation error (mm)					F	P-value	
		average	SD	SE mean	confidence interval 95%				
					min	max			
site	RUL	7	0.92	0.58	0.22	0.38	1.45	0.767	0.553
	RML	8	0.74	0.30	0.11	0.49	0.98		
	RLL	9	1.24	0.94	0.31	0.52	1.97		
	LUL	10	0.89	0.46	0.15	0.56	1.22		
	LLL	14	0.94	0.62	0.17	0.59	1.30		
	TOTAL	48	0.95	0.62	0.09	0.77	1.13		
age	30-39	4	0.84	0.26	0.13	0.42	1.25	1.632	0.173
	40-49	5	1.50	1.12	0.50	0.11	2.89		
	50-59	12	0.65	0.26	0.07	0.49	0.81		
	60-69	13	1.04	0.53	0.15	0.72	1.37		
	70-79	10	1.02	0.74	0.23	0.49	1.55		
	80-	4	0.80	0.47	0.24	0.05	1.54		
TOTAL	48	0.95	0.62	0.09	0.77	1.13			
volume	1-50	26	1.09	0.69	0.14	0.81	1.37	1.809	0.176
	51-100	5	0.62	0.24	0.11	0.33	0.92		
	>100	17	0.83	0.52	0.13	0.56	1.09		
	TOTAL	48	0.95	0.62	0.09	0.77	1.13		
Total Correlation error	48	0.95	0.62	0.09	0.77	1.13			

IV. 결론 및 고찰

사이버나이프 Synchrony 호흡추적 방사선수술은 호흡 주기에 따른 종양의 움직임을 자유로운 호흡하에 실시간으로 보상하여 기존의 방사선수술의 개념을 체부로부터 넓게 확대시켜 주게 되었다. 본 연구는 48명의 폐종양 환자를 대상으로 사이버나이프 영상유도 장치를 이용하여 폐종양의 움직임을 3차원 직선움직임과 회전움직임을 정량적으로 평가하였다. Errige 등은 비소세포성 폐암 환자의 치료확인 영상(Portal image)을 이용한 움직임이 두미방향으로 12.5 mm, 좌우방향으로 7.3 mm, 전후방향으로 9.4 mm로 측정되었으며, Hanley 등은 폐종양의 움직임이 두미방향 12 mm, 좌우방향 1 mm, 전후방향 5 mm의 움직임을 보인다고 하였다^{10,11)}. 본 연구는 자유로운 호흡에서 무작위로 폐종양 움직임의 측정을 실시하였으며, 종양 체적이나 병변의 진행정도가 큰 환자가 많아 비교적 움직임이 적게 나타난 것을 알 수 있었다. 또한 사이버나이프 Synchrony 호흡추적 장치를 이용한 종양의 움직임을 직선운동 뿐만 아니라, 종양의 회전 움직임까지 정량적으로 측정하여 종양의 다양한 움직임을 명확히 알 수 있었으며, 종양의 움직임에 따른 정확한 치료범위의 결정으로 표적의 정확성을 높이는 것과 동시에 정상조직의 장해손상을 최소화하여 방사선 치료의 질을 높일 수 있을 것이다.

사이버나이프 Synchrony 호흡추적 장치를 이용한 폐종양의 방사선수술의 유용성을 평가하기 위한 상관관계 오차는 전체 환자 평균이 0.95 ± 0.62 mm로 매우 정확한 조사로 종양의 움직임을 보상하여 방사선 수술이 이루어졌음을 알 수 있었다. Shirato 등은 폐종양 움직임이 환자의 나이, 체중, 신장, 성별, 환자의 전신상태 등에 따라 다르며, 특히 종양의 위치가 폐의 상엽보다 하엽에 위치할 때 움직임이 크므로 방사선 치료계획 시 정확한 선량 전달을 위해 이를 고려하여 치료계획용 종양체적을 결정하도록 하였다^{12,13)}. 본 연구는 상관관계 오차 발생에 영향을 줄 수 있는 요인을 분석하기 위해 종양의 위치, 연령, 병변의 체적(Volume)에 따른 변수를 두어 오차와의 관계를 평가하였다. 그 결과 통계적 유의성은 나타나지 않았지만 종양의 위치가 폐의 하엽에 존재할 경우 상엽에 위치한 종양보다 상관관계오차 값이 크게 나타났으며, 종양의 체적에 따른 상관관계 오차는 체적이 클수록 오차가 적게 나타났다. 이는 횡격막의 움직임과 더불어 종양의 움직임이 상엽보다 하엽에서 더 크게 나타나기 때문에 종양 추적의 오차가 더 증가하였고, 종양의 크기가 클수록

폐종양의 움직임이 작아지므로 Synchrony 호흡추적 방사선수술의 오차가 작아지는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 사이버나이프 Synchrony 호흡추적 방사선수술의 유용성을 확인할 수 있었으며, 폐종양 뿐만 아니라 호흡에 따라 움직이는 흉·복부 종양에 최적의 방사선을 조사하여 정상조직의 장해 손상을 최소화시키며 정밀도 높은 체부 방사선수술을 시행할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 중앙암등록본부, 국가 암 등록 사업 연례보고 2008
2. Plathow C, Ley S, Fink C, et al.: Analysis of intrathoracic tumor mobility during whole breathing cycle by dynamic MRI. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 59(4), 952-959, 2004
3. International Commission on Radiation Units and Measurements(ICRU): Prescribing, Recording and Reporting Photon Beam Therapy. ICRU Report 62, 1999
4. Webb S.: Optimization of conformal radiotherapy dose distribution by simulated annealing. *Phy Med Biol*, 34, 1349-1370, 1989
5. Cihat O, Cheng B, Hungcheng C, et al.: SYNCHRONY-CyberKnife Respiratory Compensation Technology. *Medical Dosimetry*, 33(2), 117-123, 2008
6. Schweikard A, Shiomi H, Adler J.: Respiration tracking in radiosurgery. *Med Phys*, 31, 2737-2741, 2004
7. Schweikard A, Glosser G, Bodduluri M.: Robotic motion compensation for respiratory movement during radiosurgery. *Comp Aided Surg*, 5, 263-277, 2000
8. Whyte RI, Crownover R, Murphy MJ, et al.: Stereotactic radiosurgery for lung tumor: preliminary report of a phase I trial. *Ann Thorac Surg*, 75, 1097-1101, 2003
9. Nuttens JJ, Prevost JB, Praag J, et al.: Lung tumor tracking during stereotactic radiotherapy treatment with the CyberKnife: Marker placement and early results. *Acta Oncol*, 45, 961-965, 2006
10. Erridge SC, Seppenwoolde Y, Muller SH, et al.: Portal imaging to assess set-up errors, tumor motion and tumor shrinkage during conformal

- radiotherapy of non-small cell lung cancer. *Radiat Oncol*, 66(1), 75-85, 2003
11. Hanley J, Debois MM, Mah D, et al.: Deep inspiration breath hold technique for lung tumors: The potential value of target immobilization and reduced lung density in dose escalation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 45(3), 603-611, 1999
12. Shirato H, Seppenwoolde Y, Kitamura K, et al.: Intrafractional tumor motion: lung and liver. *Semin Radiat Oncol*, 14, 10-18, 2004
13. de Koste JR, Lagerwaard FJ, de Boer HC, et al.: Are multiple CT scans required for planning curative radiotherapy in lung tumors of the lower lobe. *Int J radiat Oncol Biol Phys*, 55, 1394-1399, 2003

• Abstract

Evaluation on the Usefulness of Lung Tumor Stereotactic Radiosurgery Applying the CyberKnife Synchrony™ Respiratory Tracking System

Gha-Jung Kim · Seok-Hwan Bae¹⁾ · Jun-Gu Choi · Hong-In Chae²⁾

Department of Radiological Science, FAREAST University

¹⁾*Department of Radiological Science, Kongyang University*

²⁾*Department of Radiology, Juseong University*

This study evaluated the motion of tumors during the entire period of therapy and the accuracy of radiosurgery among forty eight lung tumor patients who were underwent radiosurgery using the CyberKnife Synchrony Respiratory Tracking System. The motion of lung tumor was measured by the coordinates of a gold acupuncture needle inserted into the tumor or the area around the tumor using the CyberKnife image guided system. Then the accuracy of radiosurgery was evaluated based on the error of correlation computed with the motion tracking system. The lung tumor motion is Cranio-Caudal direction by an average of 2.63 ± 1.87 mm, moved left-right direction by 1.13 ± 0.71 mm, and anterior-posterior direction by 1.74 ± 1.16 mm. The degree of rotational movement was $1.66 \pm 1.66^\circ$ on X axis, $1.20 \pm 0.97^\circ$ on Y axis, and $1.18 \pm 0.73^\circ$ on Z axis. The vector of translation movement was measured to be 3.78 ± 2.00 mm on the average. The results show that directions of Cranio-Caudal ($p < 0.001$), anterior-posterior direction ($p < 0.029$), and three dimensional vector value ($p < 0.002$) showed statistical significance, because the lower side of tumor showed more intensive movement compared to the upper side of tumor. The radiosurgery was carried out by compensating the motion of tumor after accurate investigation of the correlation error with the average of 0.95 ± 0.62 mm during the lung tumor radiosurgery with the CyberKnife Synchrony Respiratory Tracking System.

Key Words: CyberKnife Radiosurgery, Synchrony Respiratory Tracking System, Lung tumor