

Phantom을 이용한 사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적장치의 정확성 평가

김가중^{*,†}, 배석환[†], 임창선[†], 김종일^{*}

^{*}건양대학교병원 방사선종양학과, [†]건양대학교 방사선학과, [‡]전북대학교 방사선과학교술학과

2009년 6월 16일 접수 / 2009년 7월 20일 1차수정 / 2009년 8월 18일 2차수정 / 2009년 8월 21일 채택

본 연구는 호흡에 따라 움직임이 큰 흉부나 복부 장기의 방사선 수술에 적용되는 사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적장치의 정확성을 평가하였다. Synchrony™ 호흡 추적장치의 정확성 평가를 위해 금침이 삽입된 움직임 Phantom을 이용하였고, Phantom은 아크릴 볼이 들어 있는 정육면체에 Radiochromic 필름을 삽입하여 가상의 치료용적인 아크릴 볼에 21 Gy, 70% 등선량곡선으로 처방하였다. 고정된 Phantom의 금침추적방법과 움직임 Phantom의 Synchrony™ 호흡추적 방법으로 나누어 각각 5회 측정된 정확성 평가는 고정된 Phantom 추적 시 총 에러는 0.0195~0.652 mm, 총 에러 평균은 0.3926 mm로 나타났으며, 움직임 Phantom을 이용한 Synchrony™ 호흡 추적 방법의 결과로 총 에러는 0.4405~0.7665 mm, 총 에러 평균은 0.5673 mm로 나타나 두 방법에 유의한 차이가 없었다. 본 연구를 통해 사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적 장치의 정확성을 평가하였으며, 체부의 방사선 수술 적용 시 그 유용성을 확인할 수 있었다.

중심어: 사이버나이프, Synchrony™, 호흡 추적장치, 체부 방사선 수술, 정위적 방사선수술

1. 서론

방사선 치료의 목적은 정상 조직의 장해를 최소화하여 방사선에 의한 독성을 줄여주며, 종양에 정확한 치료 선량을 전달시켜 암을 치료하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 방사선 치료 분야는 컴퓨터와 공학기술의 발달로 최신의 영상 유도 시스템과 치료계획, 장치의 자동화를 갖추며 급속히 발전하였고, 이 최첨단의 기술을 신속하게 임상에 응용하면서 치료효과를 극대화 할 수 있게 되었다.

최근에는 정확하게 종양에만 국소적으로 고선량의 방사선을 조사함으로써 기존의 일반적인 다분할 조사법이 아닌 1회나수회(3~5회)에 걸쳐 정밀도가 높은 좁은 선속빔으로 조사하는 방사선 수술(Stereotactic Radiosurgery, SRS)의 개념이 적용되고 있다. 방사선 수술은 감마선을 방출하는 코발트-60 방사성동위원소를 이용한 γ -Knife장치와 기존의 선형가속장치(Linear accelerator)를 이용한 방사선수술 장치, 양자선에 의한 Bragg Peak 곡선의 특성을 이용한 Proton 방사선수술 장치, 로봇에 6 MV의 X선을 발생시킬 수 있는 소형의 가속장치가 장착된 사이버나이프 장치(Accuray Inc, Sunnyvale, CA), Novalis(Brain LAB, Munich, Germany), TomoTherapy Hi-Ait(Tomotherapy, Inc, Madison, WI)등이 이용되고 있다[1].

이러한 방사선 수술은 고도의 정밀성이 요구되어 두개내(Intracranial)의 종양에만 국한되어 왔으며 움직임이 큰 체부의 방사선 수술에는 적용하기가 어려웠다.

일반적으로 흉부나 복부의 기관들은 양쪽의 횡격막과 늑간의 수축과 팽창으로 폐의 호흡을 도와주며 이로 인해 장기의 움직임이 발생한다[2]. Shirato 등은 21개의 종양을 대상으로한 연구에서 일반적인 호흡을 하는 동안 가장 심하게 움직이는 방향은 두미(Cephalocaudal) 방향이며 특히 폐의 하엽에 위치하고 주위 흉벽이나 척추에 붙어 있지 않는 경우가 움직임이 크다고 하였다[3]. Murphy는 횡격막의 두미(Cephalocaudal) 축 방향의 움직임으로 허부 폐나 상복부, 복막내 장기들이 20~30 mm의 움직임이 발생하고 있다고 보고하였으며, Langen 등은 호흡으로 인한 흉부나 복부 장기의 움직임이 40 mm 정도 움직인다고 보고하였다[4,5]. 이와 같이 움직임이 큰 체부의 방사선 치료나 방사선수술의 적용은 종양에 조사되는 고선량의 방사선으로부터 건강한 조직이나 정상 장기의 방어를 위해 호흡 운동에 따른 움직임의 보상이 근본적으로 이루어져야 한다[6]. 따라서 이러한 움직임이 큰 종양의 오차를 줄이기 위한 여러 가지 치료 기술이 이용되고 있다. 간단한 방식으로 호흡을 멈추어 종양의 움직임을 최소화하는 기법(Active Breath Holding Technique)[7,8]과 환자의 호흡주기 중에 일정한 상태(호기)에 방사선을 조사하도록 미리 결정하는 방식의 호흡 조절 방사선 치료(Respiration Gating Radiotherapy)가 있다[9,10]. 가장 직접적인 방법으로는 방사선 치료 동안 X선 투시로 종양을 추적하는 기술이 이용되었으나, X선의 과도한 노출로 환자의 피폭이 증대 되는 단점이 있다[11].

책임저자: 김가중, linac@kyuh.co.kr, 건양대학교병원 방사선종양학과 대전광역시 서구 가수원동 685 건양대학교병원 방사선종양학과

최근 사이버나이프의 Synchrony™ (Accuray Inc, Sunnyvale, CA) 시스템은 호흡주기에 따른 종양의 움직임을 실시간으로 추적할 수 있는 새로운 개념의 방사선수술이 도입되었다. 사이버나이프의 Synchrony™ 호흡 추적 장치를 이용한 기술은 외부 호흡 패턴에 따른 인체내 종양의 움직임을 실시간으로 추적하는 방식으로 흉부나 복부 장기의 치료에 있어서 매우 정확한 선량을 조사할 수 있으며, 정상조직이나 장기의 장해를 최소화 할 수 있게 되었다[12,13].

본 연구는 사이버나이프 ACCURAY사에서 제공된 2차원 움직임 Phantom (Accuray Inc, Sunnyvale, CA)을 이용하여 사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적 장치 (Respiratory Tracking System)에 대한 정확성을 측정하고, 임상적용에 있어서 그 유용성을 평가하고자 한다.

2. 재료와 방법

2.1 사이버나이프 방사선 수술 장치의 소개

사이버나이프는 소형의 선형가속장치를 로봇에 장착시킨 영상유도 방사선수술 장비 (Image Guided Radiotherapy, IGRT)이다. 선형가속장치는 X-Band형식으로 9300 MHz의 주파수를 가지며 선량률은 800 Mu/min으로 6 MV X선을 발생시킨다[14]. 사이버나이프에 사용되는 원형의 콘 (Cone)은 직경이 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60 mm로 종양의 크기와 용적에 따라 선택되며 치료계획 시 1개 또는 그 이상을 사용하여 치료를 하고 있다. 로봇 (Kuka) 팔은 6개 축을 가지고 있어 자유로운 공간적 위치에서 약 1200개 빔을 어느 방향에서든 방사선을 조사할 수 있으며, 일반적인 동중심점 (Isocentric Technique)을 기준으로 하는 치료방식과 더불어 비동일중심점 (Nonisocentric Technique) 방식으로 불규칙한 형태의 종양을 정확하게 치료할 수 있다. 좌표의 인식은 치료계획용 컴퓨터 단층촬영 (CT)으로 얻어진 디지털 재구성 방사선 영상 (Digital Reconstructed Radiography, DRR)과 치료실 천정에 대각선 방향으로 직교하는 진단용 X선 발생장치로 실시간 얻어진 영상을 비교하여 좌표인식 컴퓨터 (Target Locating System Computer, TLS PC)에서 계산한다. 인식된

좌표는 AXUM Couch (Accuray Inc, Sunnyvale, CA)에 의해 6개 방향 (X, Y, Z, Roll, Pitch, Yaw)으로 교정이 가능하며 로봇은 좌표를 3차원적으로 보정 (Correction)하여 정밀한 방사선 수술이 시행된다.

최근 4세대 사이버나이프는 호흡에 따른 표적장기의 움직임을 보상해주는 Synchrony™ 장치가 개발되어 체부의 방사선 수술 (Stereotactic Body Radiotherapy, SBRT)이 가능해 졌다.

2.2 Synchrony™ 호흡 추적 장치

사이버나이프는 호흡에 따른 실시간 표적의 움직임을 추적 (Tracking)하여 역동적인 방사선 빔 (Dynamic beam)을 종양에 정밀하게 조사 할 수 있다. 호흡추적 방사선 치료를 위해 종양이나 그 주변에 4-6개의 금침 (Gold Fiducial)을 삽입하여 내부 종양의 움직임을 대신하여 측정한다. 금침은 직경 1 mm, 길이 5 mm의 크기로 컴퓨터 단층촬영 (CT)나 초음파 (Sonography)를 이용하여 삽입하고 1주일 후에 치료계획을 위한 컴퓨터 단층 촬영을 실시한다. 치료계획 시 대각선 방향의 2개의 컴퓨터 재구성 방사선 영상 (DRR)을 만들어 실제 치료 시 같은 방향의 직교하는 X선 실제 영상과 중첩하여 계산하고 종양의 위치를 추적한다.

호흡 추적장치는 흉부나 복부에 부착시킨 3개의 발광 다이오드 (light emitting diode, LED)로부터 호흡의 패턴을 움직임 추적 장치 (Motion Tracking System, MTS) 컴퓨터에 저장하고 호기와 흡기 때 종양의 위치를 호흡의 패턴과 일치 (Correspondence Model) 시켜준다. 일치된 패턴은 움직임 추적 장치 (MTS) 컴퓨터가 종양의 위치를 미리 예측하고 로봇은 3차원 직선운동 (X, Y, Z축 방향)으로 종양의 움직임을 실시간 추적하여 연속적인 방사선 빔을 조사한다.

2.3 Phantom을 이용한 정확성평가

2.3.1 움직임 Phantom (Synchrony motion Phantom, Accuray Inc, Sunnyvale, CA)

움직임 Phantom은 직경 31.75 mm의 구형 아크릴 볼 (Acrylic ball)을 중심에 위치하는 고체의 정육면체 (Solid water cube)로 표적의 좌표를 인식할 수 있도록 4개의 금침이 삽입되어 있다. 고체 정육면체는 4개의 단면으로 분리되어 수직으로

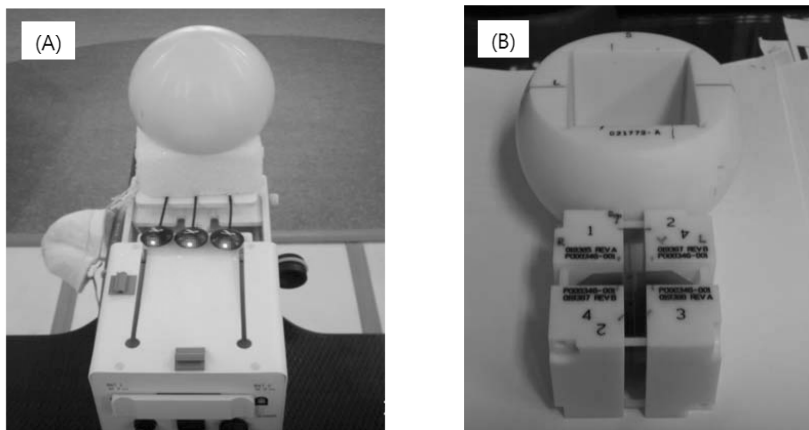


Fig. 1. Synchrony™ moving Phantom where LED attaches (A) and radiochromic film inserted in the acrylic ball cube (B).

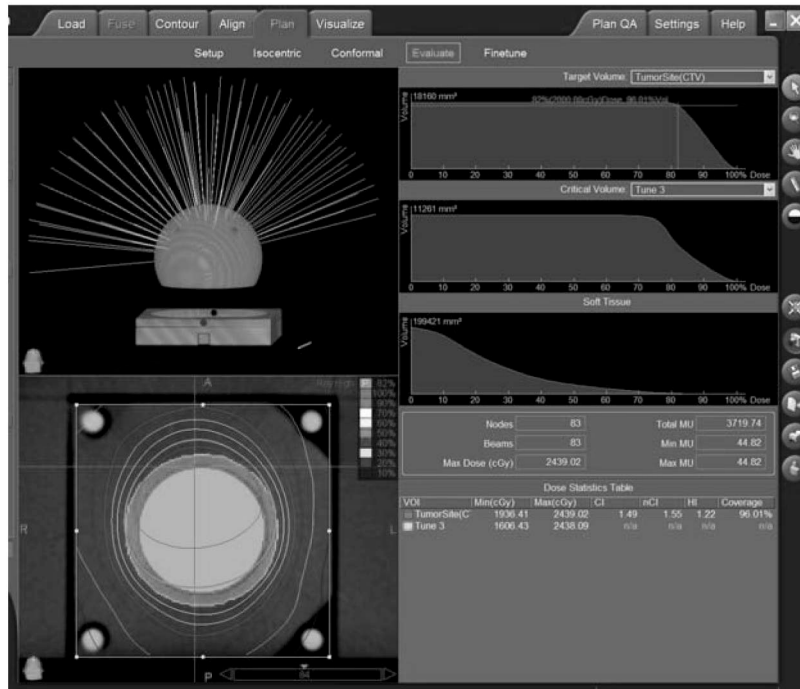


Fig. 2. Image for a Synchrony™ plan of moving Phantom. Prescription dose to the 70% isodose line with 21 Gy. It shows the Dose-Volume histogram (DVH) and 3 Dimension beam direction.

교차시킨 Radiochromic 필름(Gafchromic MD-55, International speciality products, Wayne, NJ, USA)을 삽입하여 배열하였다 (Fig. 1). 움직임 Phantom은 환자의 동일한 호흡 과정을 측정할 수 있도록 뒷면 지지대에 발광다이오드(LED)를 부착할 수 있으며 15 Cycle/min으로 움직이도록 설정하였다. Synchrony™ 호흡 추적 장치의 정확성을 측정 하는 동안은 Phantom은 호흡 주기에 따라 두미(Superior-Inferior)방향으로 대략 25 mm의 2 차원 직선운동을 하도록 고안되었다.

2.3.2 표적의 정확성 평가 방법

표적의 정확성 평가를 위해 Phantom을 컴퓨터단층촬영 (Computed Tomography, CT) 장치로 1.5 mm 절편두께의 영상을 획득하였으며, 획득된 CT영상을 이용하여 사이버나이프 MultiPlan™(Accuray Inc, Sunnyvale, CA)으로 치료계획을 세웠다. 표적의 정확성 평가를 위한 치료계획은 일반적인 환자의 치료계획과 동일한 조건으로 Phantom 중심에 위치한 가상의 치료 용적(Target Volume)인 아크릴 볼에 20 mmφ 콘을 사용하여 21 Gy 선량을 70% 등선량곡선(Isodose line)을 선택하여 처방하였고, 동중심점 치료기술(Isocentric Treatment Technique)로 치료계획을 세웠다(Fig. 2). 치료계획 후 Phantom 중앙에 직교로 위치시킨 Radiochromic 필름에 계획된 빔의 방향으로 사이버나이프 방사선수술 장치를 이용하여 6 MV X선을 조사하였다. 조사된 필름은 치료계획의 전 과정과 선량 조사를 통해 표적의 정확도를 평가하기 위해 사이버나이프 ACCURAY사에서 고안된 End to End Test 프로그램(Version 2.0, Accuray Inc, Sunnyvale, CA)을 이용하여 평가하였다. End to End Test는 Phantom에 직 교로 교차시켜 조사된 2개의 Radiochromic 필름과 조사되지 않은 기준 필름(Reference film)을 해상도 300×300 DPI(Dots

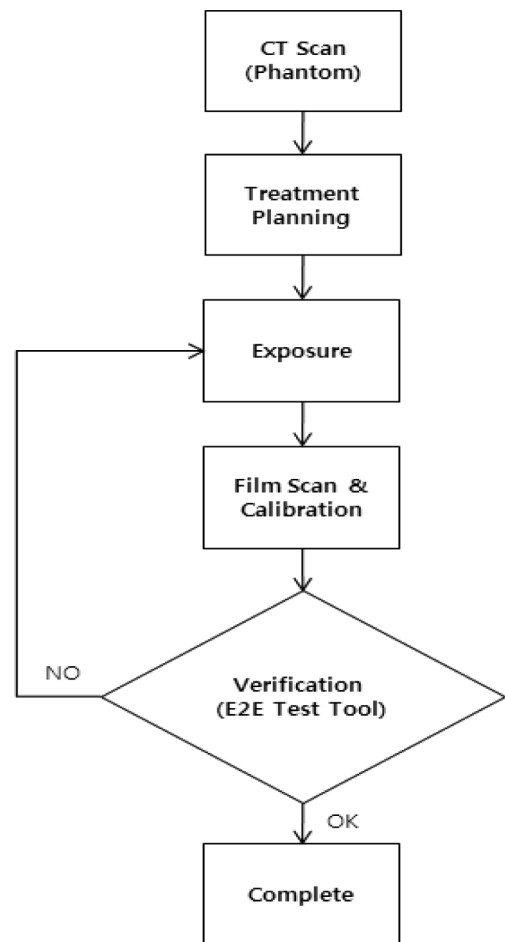


Fig. 3. The flowchart which verifies the accuracy of CyberKnife Synchrony™ Respiratory Tracking System which use Phantom.

per inch)로 설정하여 스캔한 후 전후(Anterior-Posterior)방향, 좌우(Left-Right)방향, 두피(Superior-Inferior)방향의 에러 값과 각각의 방향에서 나타난 에러의 제곱 평균 값(Root mean square)인 총 에러 값을 측정할 수 있다. ACCURAY사에서는 End to End Test로 측정된 총 에러가 고정된 Phantom을 이용한 추적 시 0.95 mm이하, 움직임 Phantom을 이용한 추적 시 1.5 mm 이하가 되도록 정도관리(QA)를 실시하고 있다(Fig. 3).

Phantom의 정확성 평가는 1개월의 주기로 각각 새로운 치료계획을 수립하여 고정된 Phantom에 단순 금침추적(Fiducial Tracking method) 시 표적 정확성 평가와 움직임 Phantom에 Synchrony™ 호흡 추적장치를 이용하여 종양의 움직임을 보상하는 두 가지 추적 방법으로 나누어 각각 5회씩 총 10회 실시하였다.

Synchrony™ 호흡 추적장치의 유용성을 비교하기 위해 움직임 Phantom을 이용한 추적 방법과 고정된 Phantom의 단순 금침추적방법 시 에러 값을 대응표본 T 검정(paired t-test)을 실시하였으며, 본 연구에 사용된 통계프로그램은 SPSS V12.0 이며 자료는 정규성을 가정하지 않기 때문에 비모수적 대응 2표본 방법으로 분석하였다.

3. 결과

3.1 고정된 Phantom을 이용한 금침추적 방법의 표적 정확성 평가 결과

고정된 Phantom을 이용한 금침추적 방법으로 조사된 Radiochromic 필름의 표적 정확성은 전후 방향에서는 최소 0.0666 mm, 최대 0.4429 mm 에러를 보였으며, 좌우 방향은 최소 0.0383 mm, 최대 0.5332 mm, 두피 방향은 최소 0.0288 mm 최대 0.3239 mm의 에러 값을 나타냈으며 각각의 방향에서 나타난 에러 값을 제곱 평균값을 취한 총 에러는 최소 0.0195 mm, 최대 0.652 mm로 측정되었다. 고정된 Phantom을 이용한 금침추적 방법을 이용한 5회 측정결과 평균 에러 값은 전후 방향에서 0.2098 mm, 좌우 방향 0.1679 mm, 두피 방향 0.1780 mm, 총 에러 평균은 0.3926 mm로 나타났다(Table 1).

3.2 움직임 Phantom을 이용한 Synchrony™ 호흡추적 방법의 표적 정확성 평가 결과

움직임 Phantom을 이용한 Synchrony™ 호흡 추적 방법의 표적 정확성 평가 결과는 전후 방향에서는 최소 0.0834

Table 1. Fiducial Tracking Method Error Using a Fixation Phantom.

Trial	Fiducial Tracking Method Error (mm)			
	A(+)/P(-)*	L(+)/R(-)†	S(+)/I(-)‡	Total error§
1	-0.4429	0.1438	-0.1909	0.5033
2	0.2191	-0.0958	0.2036	0.314
3	-0.1894	-0.5332	-0.3239	0.652
4	-0.0666	0.0383	-0.0288	0.2979
5	-0.1308	-0.0286	-0.1427	0.1957
Average	0.2098	0.1679	0.1780	0.3926
SD	0.1428	0.2094	0.1068	0.1827

*A-P(Anterior-Posterior), †L-R(Left-Right), ‡S-I(superior-Inferior)

§ Total error = $\sqrt{(A/P\ error)^2 + (L/R\ error)^2 + (S/I\ error)^2}$

Table 2. Synchrony™ Tracking Method Error Using Moving Phantom.

Trial	Synchrony™ Tracking Method Error(mm)			
	A(+)/P(-)*	L(+)/R(-)†	S(+)/I(-)‡	Total error§
1	-0.0986	0.4107	0.3867	0.5726
2	-0.5284	0.0413	0.0699	0.5346
3	0.0834	0.0823	0.4246	0.4405
4	-0.1684	0.7302	0.1608	0.7665
5	0.4444	0.2687	-0.0566	0.5224
Average	0.2646	0.3066	0.2197	0.5673
SD	0.2071	0.2795	0.1749	0.1213

*A-P(Anterior-Posterior), †L-R(Left-Right), ‡S-I(Superior-Inferior)

§ Total error = $\sqrt{(A/P\ error)^2 + (L/R\ error)^2 + (S/I\ error)^2}$

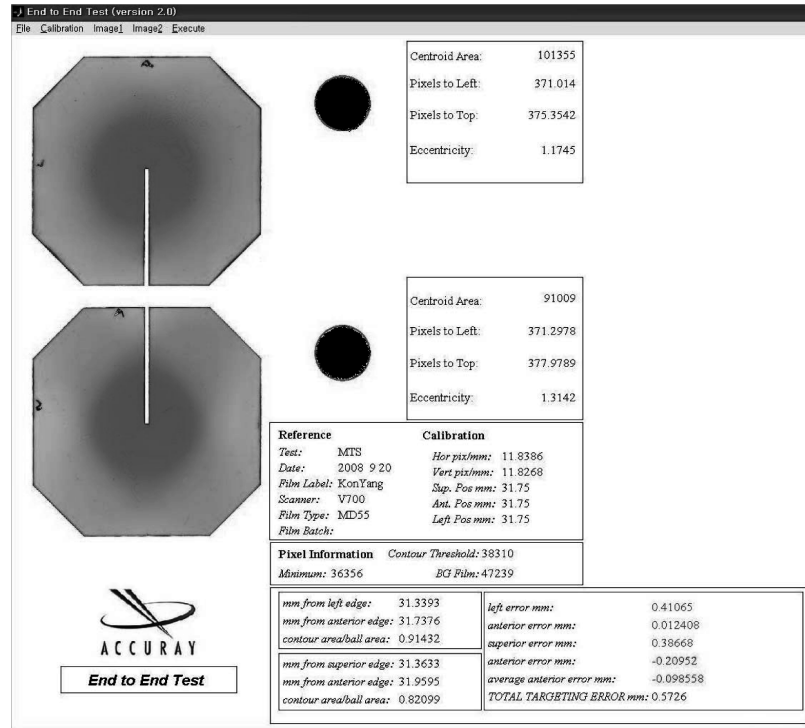


Fig. 4. Result of analysis by the End to End test program. Figure shows the Radiochromic film which scans and error price of each direction (anterior-posterior error, left-right error, superior-inferior error, total targeting error).

Table 3. Comparison of Two Tracking (Fiducial Tracking and Synchrony Tracking) Methods Using a Statistical Programs (SPSS ver12.0).

Variables	Average	SD	t	P
A/P error	0.05486	0.28245	0.434	0.686
L/R error	0.13870	0.42352	0.732	0.505
S/I error	0.04176	0.14358	0.65	0.551
Total Tracking Error	0.17474	0.26068	1.499	0.208

mm, 최대 0.5284 mm 에러를 보였으며, 좌우 방향은 최소 0.0413 mm, 최대 0.7302 mm, 두피 방향은 최소 0.0566 mm, 최대 0.4246 mm의 에러 값을 나타냈다. 각각의 총 에러는 최소 0.4405 mm, 최대 0.7665 mm로 측정되었다. 움직임 Phantom을 이용한 Synchrony™ 호흡 추적 방법을 이용한 5 회 측정결과 평균 에러 값은 전후 방향에서 0.2646 mm, 좌우 방향 0.3066 mm, 두피 방향 0.2197 mm, 총 에러 평균은 0.5673 mm로 나타났다(Table 2)(Fig. 4).

움직임이 없는 고정된 Phantom을 이용한 금침 추적방법 시 표적 에러 값은 사이버나이프 ACCURAY사에서 제공하는 성능 평가 오차범위인 0.95 mm 이하의 값을 나타냈으며, 마찬가지로 Synchrony™ 호흡 추적장치를 이용한 추적방법도 오차범위 1.5 mm 이하로 나타났다.

Phantom을 이용한 금침추적 방법과 Synchrony™ 호흡 추적방법에 대한 각각의 차이를 알아보기 위해 대응표본 T 검정을 실시하였으며, 각각의 방향의 에러 값은 정규성을 가정하지 않기 때문에 비모수적 대응 2표본 방법으로 하였다.

분석결과 전후 방향과 좌우 방향, 두피 방향 및 총 추적 에러 값이 유의한 차이점이 없는 것을 알 수 있었다(Table 3).

4. 고찰

움직임이 큰 흉,복부 장기의 방사선 치료계획은 일반적으로 종양용적에 충분한 여유폭(Planning Target Volume, PTV)을 주거나 낮은 등선량곡선(Percentage Depth Dose, PDD)을 선택하여 종양에 선량분포가 완전히 포함되도록 조사하는 방식을 이용해 왔다. 특히 체부의 방사선수술 적용 시 기존의 치료계획은과도한 방사선량 조사로 인한 독성이나 정상 장기에 심각한 손상을 초래할 수 있어 적용하기가 어려웠다. 그러나 4세대 사이버나이프 Synchrony™ 장치는 호흡에 따른 장기의 움직임을 로봇이 보상해 줌으로써 실시간으로 종양을 추적하여 정상조직의 장애를 최소화하며 종양치료를 탁월한 효과를 나타내고 있으며, 정밀도 높은 방사선을 조사할 수 있어 방사

선 수술의 적용 범위를 체부까지 가능케 하였다.

본 실험결과 움직임 Phantom을 이용한 Synchrony™ 호흡추적 장치의 표적 정확성 평가에서도 총 에러 평균이 0.5673 mm로 움직이는 장기의 추적이 잘 이루어지고 있음을 확인하였다. 하지만 실제 환자의 적용에 있어서는 여러 가지 변수들이 작용하게 되어 Phantom을 이용한 측정치보다 정확성을 보장하기에는 어려움이 있을 것으로 생각한다.

실제 치료 시 환자의 호흡추기는 Phantom처럼 규칙적이지 못하여 미리 예측된 종양좌표의 위치와 실제 좌표는 차이를 보이며 로봇의 추적 오차도 조금 더 크게 나타났다. 최근 사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적장치를 이용한 24명의 간 종양 환자의 치료결과를 분석한 연구에서 정확성의 오차가 범위가 최대 3.9 mm, 평균 1.1 mm로 보고되었다[15].

다른 변수로 사이버나이프 Synchrony™ 장치는 종양의 3차원적인 직선 방향의 움직임에 대한 보상은 가능하나 종양의 회전 움직임이나 호흡에 따른 변형을 보정하기는 어렵다.

이런 문제점을 보완하기 위해 최근 4차원 컴퓨터 단층영상(4D CT)를 이용한 치료 계획을 통하여 종양 움직임이나 정상장기의 움직임에 따른 불확실성을 줄여 보다 정확한 방사선 수술이 시행되고 있다[16,17].

사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적장치는 기계적인 정확성은 정도관리(QA)와 여러 연구에 의해 어느 정도 인정이 되었으나, 실제 치료 시 환자의 협조가 없이는 흉,복부 장기의 방사선수술에 성공을 장담할 수 없다. 따라서 환자는 치료 도중 움직임을 최소화시켜야 하며, 호흡추기를 규칙적으로 하도록 노력해야 할 것이다. 이를 위해 시술에 대한 이해와 방법에 대한 교육이 선행되어야 한다.

5. 결론

본 연구는 체부의 방사선 수술에 적용하도록 개발된 사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적장치의 정확성을 움직임 Phantom을 이용하여 평가하였으며 에러 범위가 매우 적음을 알 수 있었다. 또한 기존의 움직임이 없는 Phantom을 이용한 방사선수술 시 표적 정확성 평가 결과와 비교하여도 차이가 없어 그 유용성을 확인할 수 있었다.

사이버나이프 Synchrony™ 호흡 추적장치는 움직이는 종양에 정밀도가 높은 방사선을 조사할 수 있어 정상 장기에 방사선 장해를 최소화 할 수 있는 보다 진보된 체부 방사선 수술이라 할 수 있다.

참고문헌

- Benedict SH, Bova FJ, Brenda Clark, Goetsch SJ, et al. Anniversary Paper: The role of medical physicists in developing stereotactic radiosurgery. *Med. Phys.* 2008 Sep;35(9):4262-77.
- Sixel K, Ruchin M, Tirona R, et al. Digital fluoroscopy to quantify lung tumor motion: Potential for patient-specific planning target volumes. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2003;57:171-173.
- Shirato H, Seppendwoolde Y, Kitamura K, et al. Intrafractional tumor motion: Lung and liver. *Semin. Radiat. Oncol.* 2004;14:10-18.
- Murphy MJ. Tracking moving organs in real time. *Semin. radiat. oncol.* 2004;14:91-100.
- Langen KM, Jones DTL. Organ motion and its management. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2001;50:265-275.
- Ozhasoglu C, Cheng B, Saw, et al. SYNCHRONY-Cyberknife Respiratory Compensation Technology. *Medical Dosimetry* 2008;33(2):117-123.
- Mah, D, Hanley J, Rosenweig KE, et al. Technical aspects of the deep inspiration breath-hold technique in the treatment of thoracic cancer. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2000;48:81-85.
- Rosenweig KE, Hanley J, Mah D, et al. The deep inspiration breath-hold technique in the treatment of inoperable non-small-cell lung cancer. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2000;48:81-7.
- Kubo HD, Hill BC. Respiration gated radiotherapy treatment: A technical study. *Phys. Med. Biol.* 1996;41:83-91.
- Li XA, Stepaniak C, Gore E. Technical and dosimetric aspects of respiratory gating using a pressure-sensor motion monitoring system. *Med. Phys.* 2006;33:145-54.
- Shirato H, Shimizu S, Kunieda T, et al. Physical aspects of a real-time tumor-tracking system for gated radiotherapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2000;48:1187-95.
- Schweikard A, Glosser G, Bodduluri M. Robotic motion compensation for respiratory movement during radiosurgery. *Comp. Aided. Surg.* 2000;5:263-277.
- Schweikard A, Shiomi H, Adler J. Respiration tracking in radiosurgery. *Med. Phys.* 2004;31:2737-2741.
- Adler JR, Murphy MJ, Chang S, et al. Image-guided robotic radiosurgery. *Neurosurgery* 1999;44:1299-306.
- 김가중, 심수정, 김정호, 민철기, 정원규. 로봇사이버나이프를 이용한 간 종양의 실시간 움직임 측정과 방사선수술 시 호흡 추적 장치의 정확성 평가. *대한방사선종양학회지* 2008;26(4):263-270.
- 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. Oncol.* 2006;45:943-947.
- Schlaefe A, Fisseler J, Dieterich S, et al. Feasibility of four-dimensional conformal planning for robotic radiosurgery. *Med. Phys.* 2005;32:3786-3792.

Accuracy Evaluation of CyberKnife Synchrony™ Respiratory Tracking System Using Phantom

Gha-Jung Kim^{**}, Seok-Hwan Bae[†], Chang-Seon Lim[†] and Chong-Yeal Kim^{*}

^{*}Department of Radiological Oncology, Konyang University Hospital, [†]Radiological Science, Konyang University,

^{**}Radiological Science & Technology, Chonbuk National University

Abstract - This study was conducted to evaluate the accuracy of CyberKnife Synchrony™ respiratory tracking system which was applied to Stereotactic Radiosurgery (SRS) for moving tumors in chest and abdomen with breathing motion. For accurate evaluation,

gold fiducial marks were implanted into a moving phantom. The moving phantom was a cube imbedding an acryl ball as a target. The acryl ball was prescribed to 20 Gy at 70% of isodose curve in a virtual treatment and radiochromic films were inserted into the acryl ball for dose verification and tracking accuracy evaluation. The evaluation of position tracking consists of two parts: fiducial mark tracking in a stationary phantom and Synchrony™ respiratory tracking in a moving phantom. Each measurement was done in three directions and was repeated to 5 times. Range of position error was 0.1957 mm to 0.6520 mm in the stationary phantom and 0.4405 mm to 0.7665 mm in the moving phantom. Average position error was 0.3926 mm and 0.5673 mm in the stationary phantom and the moving phantom respectively. This study evaluates the accuracy of CyberKnife Synchrony™ Respiratory tracking system, and confirms the usefulness when it's used for Stereotactic Radiosurgery of body organs.

Keywords : CyberKnife, Synchrony™, Respiratory tracking system, Stereotactic Body Radiotherapy, Stereotactic Radiosurgery