

체부 정위방사선치료 시 호흡운동 감소를 위한 복부 압박기구 개발 및 유용성 평가

한국원자력의학원 방사선종양학과, ¹한국원자력의학원 사이버나이프

황선봉 · 김일환 · 김 웅 · 임형서 · 강진목 · 정성민 · 김기환 · 이아람 · 조유라¹

목적: 체부 정위방사선치료 시 치료 효과 향상을 위해서는 병소 부위의 정확한 위치 파악과 함께 호흡에 의한 종양의 움직임 최소화하는 것이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 기존에 자체 개발하여 사용 중인 호흡운동 감소기구를 보다 사용이 편리하고 효과적하도록 개선하여, 체부 정위방사선치료에 있어서 임상 적용의 유용성을 평가하였다.

대상 및 방법: 자체 개발하여 사용 중이던 기존 호흡운동 감소기구의 장단점을 분석하여 재현성과 사용 정확도를 개선하였다. 그리고 개선된 호흡운동 감소기구를 체부 정위방사선치료에 활용하기 위한 유용성 평가 방법으로 첫째, 8명의 폐종양 환자에 대해 들숨(inhalation)과 날숨(exhalation) 상태에서 획득한 고속(spiral) 전산화단층촬영 영상을 통해, 호흡에 따른 종양 움직임을 3차원적으로 정량 분석하였다. 둘째, 선량 평가를 위해 EBT2 필름(Gafchromic, ISP, USA)을 장착할 수 있는 폴리에틸렌 팬텀과 3차원적 종양 움직임을 재현하기 위한 2축의 직교좌표 로봇(Cartesian Robot-2Axis, FARA RCM4H, Samsung Mechatronics, Korea)을 제작하였다. 그리고 전산화단층촬영에서 획득한 결과를 바탕으로 호흡운동을 재현하여, 등선량 곡선 및 2차원 등선량 프로파일을 분석하였다.

결과: 벨크로 벨트로 제작된 사용이 편리하고 재현성이 우수한 호흡운동 감소기구를 개발하였다. 전산화단층촬영 영상으로 분석한 폐암환자의 호흡에 따른 3차원적인 종양의 움직임은 좌우, 전후, 두미측 방향에 따라 평균 3.2 mm, 4.3 mm, 13.0 mm로 나타났다. 팬텀과 직교좌표 로봇을 이용한 호흡에 의한 선량분포 특성변화의 결과로는, 치료계획 선량보다 방사선을 적게 받은 영역은 두미측 방향으로 각각 8.0%와 16.8%, 좌우측 방향으로 각각 8.1%와 10.9%로 후미측 방향의 선량 왜곡이 가장 크게 나타났고, 길이는 평균 4.2 mm이었다. 호흡주기에 따른 선량 왜곡의 변화는 크게 나타나지 않았다.

결론: 본 연구를 통해 장기의 움직임을 최소화할 수 있는 사용이 편리하고 효과적인 호흡운동 감소기구를 개발하였다. 개발된 기구를 사용할 경우 평균 6 mm 정도의 CTV-PTV 마진을 사용하면 호흡에 따른 과소선량(underdose)을 극복할 수 있을 것으로 결과를 통해 확인하였다. 이로서 개발된 호흡운동 감소기구는 체부 정위방사선치료에 있어서 호흡동조 방법을 병행할 수 있는, 임상 적용이 용이한 효과적인 보조기구로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어: 체부 정위방사선치료, 복부 압박기구

서 론

영상 과학 및 컴퓨터의 발달에 힘입어 3차원 입체조형방사선치료(3-Dimensional Conformal Radiotherapy, 3D-CRT), 세기조절방사선치료(Intensity Modulated Radiotherapy, IMRT), 영상유도방사선치료(Image Guided Radiotherapy, IGRT), 호흡조절방사선치료(Respiration Gated Radiotherapy, RGRT) 등 방사선 치료에 있어서 다양한 최신 치료기술들이 개발되어 임상에 적용되고 있으며, 이러한 추세를 바탕으로 최근

체부 정위방사선치료(Stereotactic Body Radiotherapy, SBRT)가 널리 시행되고 있다.¹⁾ 정밀한 방사선 치료를 위해서는 병소 부위의 정확한 위치 파악과 함께 호흡에 의한 종양 움직임을 최소화하는 것이 필수적이다.^{2,3)} 종양의 움직임을 제한하기 위해 시행되는 방법으로는 ABC (Active Breathing Coordination), 복부 압박(Abdominal Compression, AC), 역동적 추적 치료(Dynamic tracking), 호흡동조 방사선치료(Gating) 등이 있다.⁴⁾ 본원에서도 폐암, 간암 등 호흡에 의해 종양의 움직임이 발생하는 경우에 있어 호흡동조 방사선치료를 시행하고 있으나, 치료가 비교적 어렵고 치료시간이 길다는 단점으로 인해 일부 환자에 있어서 자체적으로 개발한 복부 압박기구를 사용하여 치료하였다. 자체 개발한 복부 압박기구를 사용하였을 경우 호흡에 따른 장기의 움직임은 횡

이 논문은 2010년 9월 24일 접수하여 2010년 12월 26일 채택되었음.
책임저자 : 황선봉, 원자력의학원 방사선종양학과
Tel: 02)970-2478, Fax: 02)970-3412
E-mail: hsb5974@naver.com

격막의 경우 20.0~68.4%의 범위 내에서 평균 44.9% 감소하였고, 호흡주기는 평균 4.4초에서 3.07초로 단축되었다고 보고한 바 있다.^{5,6)} 하지만 자체 개발한 복부 압박기구의 임상 적용에 따른 편리함과 유용성에도 불구하고, 분할치료에 따른 재현성 확보에 애로가 있어 사용상 세심한 주의가 필요하였다.

이에 본 연구에서는 기존에 자체 개발하여 사용해왔던 압박기구를 보다 사용이 편리하고 효과적이도록 개선하였다. 그리고 영상유도 방사선치료에 있어서 호흡에 의한 선량분포 특성의 변화를 파악하여 정상조직에 가해지는 선량을 최소화하고, 종양에는 방사선 조사 영역을 줄이면서 동시에 최대한의 선량을 투여할 수 있는 치료 방법론을 모색하여 치료 효과를 높이고자 한다.



Fig. 1. The developed abdominal compression belt.

대상 및 방법

본 실험에서 개발된 호흡운동 감소기구를 실제 치료에서 효율적으로 적용하기 위해, 체부 정위방사선치료 시 종양의 움직임 확인하기 쉬운 8명의 폐암 환자를 대상으로 복부 압박을 시행하여 종양의 움직임을 분석하였다. 치료 준비 과정이 간단하고 사용하기 편리한 호흡운동 감소기구 개발하였다(Fig. 1). 벨크로 벨트로 제작된 움직임 감소기구를 환자에게 장착시키고 환자의 체위 상하에 진공쿠션을 놓아 체위를 고정할 후, 최대한 호흡을 내쉬게 하여 벨트로 환자의 횡격막 주위를 묶는 방법을 사용하였다.

전산화 단층 촬영장치(Emotion, Siemens, Germany)를 이용해 2.0 mm 절편 간격을 주어 영상을 얻었으며, 이 때 호흡에 의한 최대 종양의 위치 변화를 측정하기 위하여 들숨(inhalation)과 날숨(exhalation) 상태에서 고속(spiral) 전산화 단층촬영을 통해 2단계 영상을 얻었다. 보다 정확한 분석을 위해 척추에 삽입한 금침을 이용하여 기준 좌표를 중심으로 종양의 움직임을 3차원적으로 정량 분석하였다. 아울러 호흡에 의한 선량왜곡과 저선량영역의 발생 정도를 평가하기 위해 호흡을 재현한 상황 하에서 방사선량을 평가하였다. 방사선 조사에는 영상유도 시스템이 장착된 의료용 선형가속기(21-iX, VARIAN, USA)가 사용되었고, 방사선 검출기로 사용할 EBT2 필름(Gafchromic, ISP, USA)이 장착 가능한 폴리에틸렌 팬텀을 제작하였다(Fig. 2). 팬텀은 각각 2.5×2.5×5 inch의 직육면체 4개를 조합하여 5×5×5 inch의 크기의 정육면체로 제작하였으며, 폴리에틸렌 재질의 볼트와 너트로 서로 고정하였다. 팬텀 속에는 필름을 서로 교차시켜 두 장

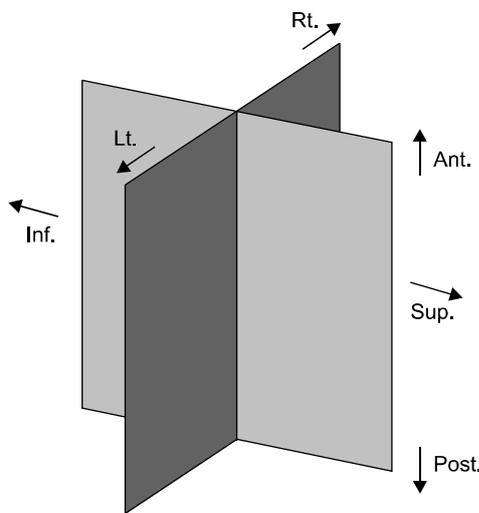
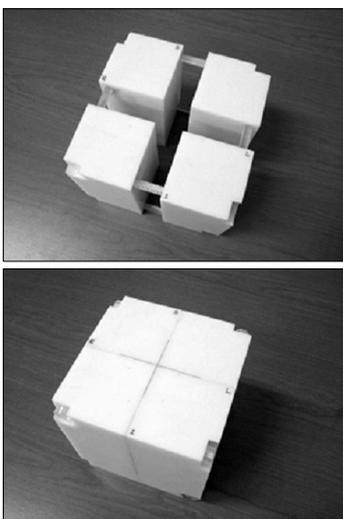


Fig. 2. Cubic phantom and the location of films in the cubic phantom.



Fig. 3. 2-axis cartesian robot.

의 필름으로 3차원 좌표의 선량 분포를 평가하였다.

3차원적인 종양의 움직임은 제작한 2축의 직교좌표 로봇 (Cartesian Robot-2Axis, FARA RCM4H, Samsung Mechatronics, Korea)을 통해 재현하였다(Fig. 3). 이 로봇은 로봇 컨트롤러(Series Robot controller Plus SRCP, Samsung Mechatronics, Korea)로 구동하였고 로봇 컨트롤러와 터치 펜던트를 사용하여 호흡 재현의 위상과 이동 거리, 구동 속도를 프로그래밍하여 입력하였다. 이를 통해 20단계의 속도 제어가 가능하고 ± 0.03 mm의 구동 정확도를 가지게 된다. 구성된 로봇의 제원은 전고가 68 cm, 전장이 71 cm로 치료 테이블 위에 놓을 시 치료 장비와의 충돌 가능성이 있어 치료실 바닥면에 위치시켰다. 종양의 움직임은 전산화단층촬영 분석의 결과를 토대로 좌우, 전후, 두미 방향으로 각각 5, 10, 20 mm 움직이도록 재현하였다. 전후와 두미 방향은 2축의 직교좌표 로봇으로 직접 구현하였고, 치료 축을 기준으로 팬텀과 로봇을 반시계 방향으로 14도의 각도를 주어 좌우로 5 mm의 변위를 갖도록 하였다. 호흡 주기에 따른 선량분포의 변화를 보기 위해, 호흡을 재현한 방사선 조사는 이전 결과를 통해 압박 시 횡격막의 호흡 주기와 같은 3초와 주기를 1.5배 증가시킨 4.5초로 2회 실시하였다. 호흡의 재현은 실제 호흡과 유사하도록 3초 주기 운동에서는 흡기 시 0.1초, 호기 시 0.3초의 지연 시간을 두었고, 4.5초 주기 운동에서 각각 0.15초, 0.45초의 지연 시간을 두었다(Fig. 4).

방사선 치료 계획 프로그램인 Eclipse 8.5를 이용하여 전산화 촬영한 팬텀 영상에 영상 분석이 용이하도록 5 cm의 원형 종양을 그리고 입체세기조절회전방사선치료(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 기법을 통해 2개의 Arc를

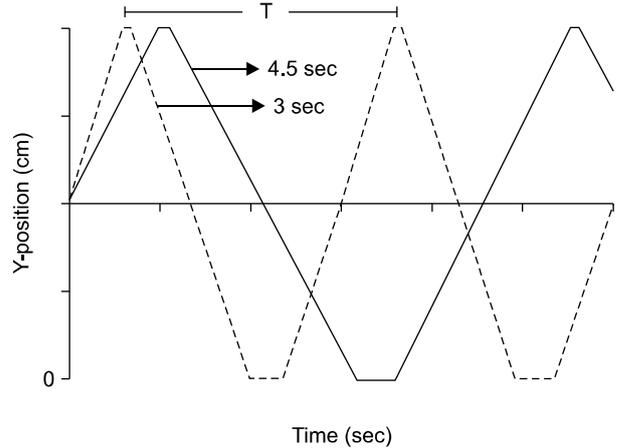


Fig. 4. The robotic system was set-up to move at 3.5 and 4.5 seconds to simulate the respiration cycle.

Table 1. Lung tumor's motion on each axis during compression

Number	Tumor location (lobe)	R-L (mm)	A-P (mm)	S-I (mm)
1	Right upper	7	8	2
2	Right middle	2	1	12
3	Right middle	2	4	7
4	Right lower	4	8	25
5	Right lower	4	10	24
6	Left upper	5	6	2
7	Left middle	1	2	15
8	Left lower	2	8	20

사용한 치료 계획을 수립하였다. 이 때 조사조건은 6 MV 광자선으로, 조사면 크기는 8×8 cm², 갠트리 회전 각도는 120~270도, 240~90도로 2번 시행, 콜리메이터 각도는 45도로 설정하였고, 종양에 총 10 Gy의 선량이 전달되도록 하였다. 방사선 조사 후 EBT2 필름의 영상 분석을 위해 Epson 1680 pro 스캐너를 이용하여 필름을 스캔하였고, Verisoft (Ver.3.0, PTW, Germany), Image J (Ver. 1.41o, Wayne, USA) 등의 영상 분석 프로그램과 Photoshop 7.0 영상 처리 프로그램으로 선량 분포 변화를 평가하였다. 이 때 고정 상태의 팬텀에서 획득한 필름 이미지의 최대 흑화도를 100%로 간주하고 사용하지 않은 필름의 흑화도 평균값을 0%로 하였다.

결 과

방사선 치료를 위해 전산화 단층촬영을 시행한 8명의 폐암 환자의 종양 움직임을 종양이 위치한 부위에 따라 좌우, 전후, 두미측 방향에서 분석하였다. 종양은 좌우, 전후, 두미측

방향에 따라 각각 1~7 mm, 1~10 mm, 2~25 mm로 평균 3.2 mm, 4.3 mm, 13.0 mm의 움직임을 나타냈으며, 개인적인 차이는 있으나, 우하엽에 위치한 종양이 두미방향으로 가장 많이 움직이며 우상엽이 가장 적은 움직임을 보이는 것을 확인할 수 있었다(Table 1).

팬텀과 직교좌표 로봇을 이용한 호흡에 의한 선량 분포 특성 변화의 결과는 다음과 3초 주기로 운동하는 팬텀의 경우 두미측으로 나누어 분석한 저선량영역은 각각 같다. 전체 면

적의 9.27%와 15.97%로 전체 종양의 25.24%가 계획된 선량보다 낮게 조사되었으며, 좌우측에서는 각각 7.10%와 9.91%가 저선량영역이 되었다. 또한 팬텀이 4.5초의 주기를 가지고 운동한 경우의 저선량영역은, 두미측으로 전체 면적의 각각 6.75%, 17.64%였고 좌우측에서는 각각 11.9%, 9.14%였다(Table 2). 좌우, 전후의 방향과 두미측 및 전후 방향으로 팬텀 내 위치해 있는 2장의 필름에 팬텀을 움직인 경우와 움직이지 않은 경우에서 등선량 곡선 및 2차원적 선량 분포 파일

Table 2. Analysis for underdose area and ratio according to moving time and direction

	Film orientation	Analysis orientation	Tumor area (mm ²)	Underdose area (mm ²)	Underdose ratio (%)	Underdose length* (mm)
Moving (3 sec)	S-I	Superior	1962.5	181.8	9.27	4.2
		Inferior		313.4	15.97	6.3
		Anterior				1.9
		Posterior				3.9
		I-P 45°				6.6
	R-L	Right	1962.5	194.4	9.91	3.0
		Left		139.3	7.10	2.1
		Anterior				5.1
		Posterior				3.2
		L-P 45°				3.0
Moving (4.5 sec)	S-I	Superior	1962.5	132.5	6.75	3.1
		Inferior		346.2	17.64	6.0
		Anterior				2.0
		Posterior				3.9
		I-P 45°				7.9
	R-L	Right	1962.5	233.5	11.90	2.1
		Left		179.4	9.14	3.1
		Anterior				4.6
		Posterior				5.0
		L-P 45°				6.6

*Length between planned and distorted isodose curve due to movement.

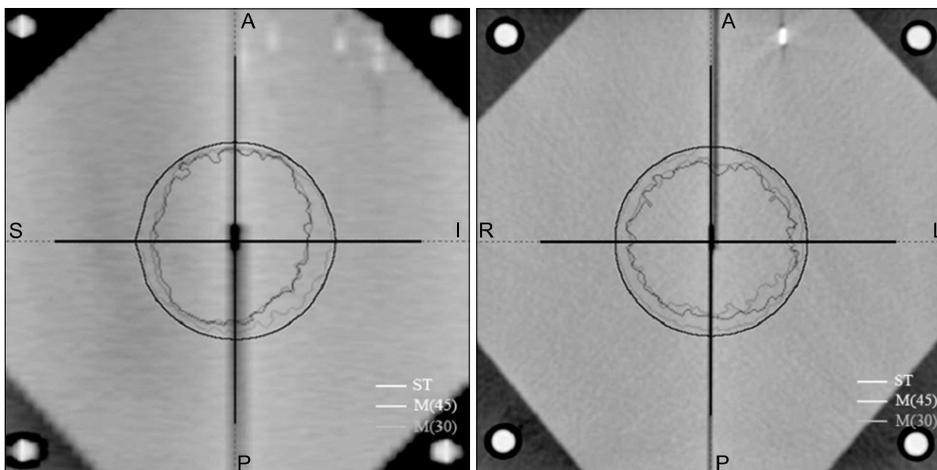


Fig. 5. Overlapping images on a planned dose and EBT2 film.

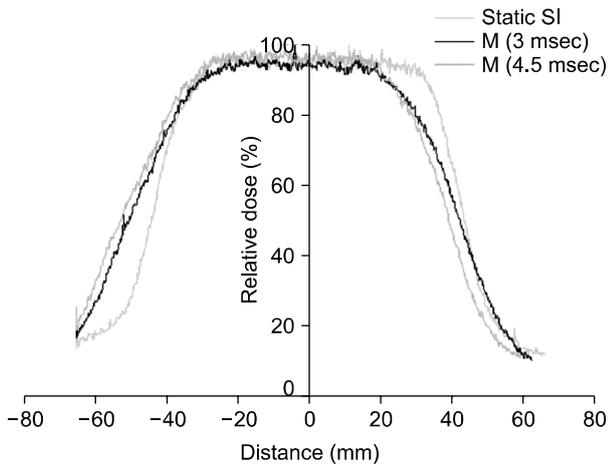


Fig. 6. 2-dimentional dose profile when the tumor was moving at SI direction.

은 Fig. 5와 6에서 제시하였다. Fig. 5에서 검은 선은 가상의 종양이며 하늘색과 분홍색, 연두색은 각각 정지 상태, 3초 주기운동 상태와 4.5초 주기운동 상태에서 방사선 조사를 시행한 후 등선량 곡선을 비교한 것으로, 호흡주기에 따른 선량 왜곡의 변화는 크지 않았다. 또한 2차원적 선량 분포 파일을 분석한 결과 허방에서 저선량 면적이 보다 큰 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6).

고안 및 결론

본 연구를 통해 기 개발된 호흡운동 감소기구를 개선하여 장기의 움직임을 최소화할 수 있는 사용이 편리하고 효과적인 복부압박기구를 개발하였다. 기구를 착용한 상태에서 환자의 자유 호흡을 유도하여 치료의 편리함을 추구함과 동시에, 종양의 위치 변화가 평균 44.9% 감소하여 CTV-PTV 마진이 크게 줄어드는 이전의 결과를 재확인하였다. 8명의 폐암 환자의 종양의 위치변화를 추적한 결과, 환자의 호흡에 따른 종양의 움직임은 좌우, 전후, 두미측 방향에 따라 평균적으로 각각 3.2 mm, 4.3 mm, 13.0 mm의 위치변화를 나타내는 것을 확인하였다. 이를 기준으로 직교좌표 로봇을 이용하여 실제 환자의 호흡과 유사한 주기로 팬텀을 구동한 후, 필름을 이용한 3차원 선량 분포 결과, 실제 치료계획보다 낮은 선량을 나타낸 영역을 측정한 결과 두미측 방향으로 각각 8.0%, 16.8%, 좌우측 방향으로 각각 8.1%와 10.9%의 결과를 얻었다. 따라서 상대적으로 많은 선량을 받는 후미측은 저선량 영향을 많이 받게 되며 이로 인해 선량 왜곡이 가장 크게 발생함을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 환자의 호흡과 유사한 양상의 장기 움직임에서 실제 치료에서와 마찬가지로 후

미측 방향의 저선량 영역이 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 좌우, 전후, 두미측에서 3초와 4.5초 주기운동 상태에서의 등선량 곡선(isodose curve)과 선량 프로파일을 비교한 결과, 호흡 주기에 따른 선량 왜곡의 큰 변화는 관찰할 수 없었고, 선량 프로파일을 통해 호흡에 의한 두미측으로 이동을 확인함으로써 후미측의 저선량영역이 증가함을 확인할 수 있었다.

일반적으로 방사선 치료 시, 호흡에 의해 발생하여 선량 분포와 관련된 효과로 선량 blurring 효과와 interplay 효과가 있다. 선량 blurring 효과는 종양이 조사면의 가장 자리에 위치하고 있어 움직임에 따라 조사면을 벗어나지 않을 시 환자의 움직임에 의한 선량 분포의 차이는 거의 발생하지 않기 때문에 무시할 수 있는 효과이다. 다음은 interplay 효과인데, 이 효과는 일반 방사선 치료와 달리 다엽 콜리메이터를 이용하여 세기조절 방사선치료나 토모치료와 같이 콜리메이터의 역동적인 움직임을 이용했을 때만 발생하는 경우이다. 즉 콜리메이터가 움직일 때 조사면 또한 동시에 움직이기 때문에 발생하는 현상이다. 본 연구에서는 다엽콜리메이터의 역동적인 움직임이 거의 없었기 때문에 interplay 효과보다는 일반 방사선 치료에서 나타나는 선량 blurring 효과만 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 연구에서 사용했던 비정형적인 모양의 종양 대신에 보다 정확하고 쉬운 정량적 선량 분석을 위해 구 형태의 가상 종양모양을 이용하였기 때문이라 생각된다. 개발된 기구를 이용한 체부 정위방사선치료 시 평균 6 mm 정도의 CTV-PTV 마진을 사용하면 호흡에 따른 저선량 영역 현상을 극복할 수 있을 것으로 판단되며, 호흡 주기에 의한 저선량영역은 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

이로써, 개발된 호흡운동감소기구는 환자의 자유 호흡을 유도하고, 불규칙한 환자 호흡에 따른 장기의 움직임을 최소화하여 보다 높은 치료효과를 예상할 수 있으리라 생각되며, 차후에 체부 정위방사선치료에 있어서 Gating 방법과 병행할 수 있는, 임상 적용이 용이한 효과적인 보조기구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Brahme A: Optimization of stationary and moving beam radiation therapy techniques. *Radiother Oncol* 1988;12:204-208
2. Balter JM, Dawson LA, Kazanjian S, et al.: Determination of ventilatory liver movement via radiographic evaluation of diaphragm position. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1998;41: 267-270
3. Davies SC, Hill AL, Holmes RB, Halliwell M, Jackson PC: Ultrasound quantitation of respiratory organ motion in the up-

- per abdomen. Br J Radiol 1994;41:1096-1102
4. Wong JW, Sharpe MB, Jaffray DA, et al.: The use of active breathing control (ABC) to reduce margin for breathing motion. Int J Radiat Oncol Biol Phys 1999;44:911-919
 5. Kim JG, Lee DH, Lee DH, et al.: A study on the reduction of organ motion from respiration. Kor J of Med Phy 2004; 15:135-142
 6. Kim MS, Ha SH, Lee DH, et al.: Distortion of the dose profile in a three-dimensional moving phantom to simulate tumor motion during image-guided radiosurgery. Radio Oncol 2007; 25:268-277

Abstract

Development of Abdominal Compression Belt and Evaluation of the Efficiency for the Reduction of Respiratory Motion in SBRT

Seonbung Hwang, Ilhwan Kim, Woong Kim, Hyeongseo Im, Jinmook Gang,
Seongmin Jeong, Gihwan Kim, Ahram Lee, Yura Cho¹

Department of Radiation and Oncology, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences,

¹Department of Cyberknife, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, Seoul, Korea

Purpose: It's essential to minimize the tumor motion and identify the exact location of the lesions to achieve the improvement in radiation therapy efficiency during SBRT. In this study, we made the established compression belt to reduce respiratory motion and evaluated the usefulness of clinical application in SBRT.

Materials and Methods: We analyzed the merits and demerits of the established compression belt to reduce the respiratory motion and improved the reproducibility and precision in use. To evaluate the usefulness of improved compression belt for respiratory motion reduction in SBRT, firstly, we reviewed the spiral CT images acquired in inspiration and expiration states of 8 lung cancer cases, respectively, and analyzed the three dimensional tumor motion related to respiration. To evaluate isodose distribution, secondly, we also made the special phantom using EBT2 film (Gafchromic, ISP, USA) and we prepared the robot (Cartesian Robot-2 Axis, FARARCM4H, Samsung Mechatronics, Korea) to reproduce three dimensional tumor motion. And analysis was made for isodose curves and two dimensional isodose profiles with reproducibility of respiratory motion on the basis of CT images.

Results: A respiratory motion reduction compression belt (Velcro type) that has convenient use and good reproducibility was developed. The moving differences of three dimensional tumor motion of lung cancer cases analyzed by CT images were mean 3.2 mm, 4.3 mm and 13 mm each in LR, AP and CC directions. The result of characteristic change in dose distribution using the phantom and rectangular coordinates robot showed that the distortion of isodose has great differences, mean length was 4.2 mm: the differences were 8.0% and 16.8% each for cranio-caudal and 8.1% and 10.9% each for left-right directions in underdose below the prescribed dose.

Conclusion: In this study, we could develop the convenient and efficient compression belt that can make the organs' motion minimize. With this compression belt, we confirmed that underdose due to respiration can be coped with when CTV-PTV margins of mean 6 mm would be used. And we conclude that the respiratory motion reduction compression belt we developed can be used for clinical effective aids along with the gating system.

Key words: stereotactic body radiotherapy (SBRT), abdominal compression belt