

호흡 운동에 의한 내부 장기의 움직임 감소에 관한 연구

*원자력의학원 방사선의학연구센터, †방사선종양학과, ‡국립의료원 치료방사선과

김재균* · 이동한*† · 이동훈*† · 김미숙*† · 조철구*† · 류성렬† · 양광모† · 오원웅† · 지영훈*†

선형 가속기를 통한 세기변조방사선치료(Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT), IGRT, 3D-CRT (Three-Dimensional Conformal Radiotherapy) 및 사이버 나이프를 통한 치료와 같은 3차원 방사선 치료에서 호흡에 의해 발생하는 종양의 움직임은 실제 치료에 있어 매우 중요한 요소이다. 이와 관련하여 움직이는 종양에 보다 정확한 방사선량을 조사시키기 위하여 ABC (Active Breathing Control), 호흡동기 방사선 치료 등의 여러 방법들이 사용되고 있다. 본 연구에서는 방사선 치료 시 호흡에 따른 내부 장기의 움직임 감소 장치를 개발하여 내부 장기 중 횡격막 운동이 얼마나 효율적으로 감소하였는지에 대한 연구를 시행하였다. 4개의 벨트로 구성된 움직임 감소 장치를 환자에게 장착시키고, 환자의 복부 위에 작은 진공 쿠션(Vacuum cushion)을 놓아 최대한 호흡을 내쉬게 한 후, 벨트로 환자의 횡격막 주위를 묶는 방법을 사용하였다. 이때 횡격막에 움직임 감소 장치를 사용한 경우와 사용하지 않는 경우로 나누어 투시영상(fluoroscopy)에 나타난 횡격막의 움직임을 디지털 카메라 동영상 모드로 촬영하였다. 이 파일을 퍼스널 컴퓨터에 연결 후 포토샵 6.0 소프트웨어 프로그램을 통하여, 횡격막의 가장 높은 지점이 움직이는 최대점과 최소점을 관찰하여 횡격막 운동의 범위를 측정하였다. 움직임 감소 장치를 사용하지 않은 경우 횡격막 움직임의 범위는 최소 1.14 cm에서 최대 3.14 cm였고, 그 평균값은 2.14 cm였다. 그러나 횡격막에 움직임 감소 장치를 사용한 결과 그 범위는 0.72~1.95 cm로, 평균값은 1.16 cm로 감소하였다. 횡격막 운동은 20~68.4% (평균 44.9%) 감소효과가 있었다. 횡격막 운동의 주기의 경우에는, 움직임 감소 장치를 사용한 결과 호흡 주기의 평균값이 4.4초에서 3.07초로 줄어들어 호흡이 빨라졌음을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통하여 움직임 감소 장치를 사용함으로써 내부 장기 중 횡격막 움직임의 범위가 감소함과 동시에 CTV-PTV 마진이 크게 줄어드는 결과를 확인하였다. 이 결과를 통하여 흉부 또는 복부에 종양을 가진 환자 치료 시 더욱 질 높은 방사선 치료가 실현될 것으로 기대한다.

중심단어: 횡격막 운동, 움직임 감소 장치, 호흡 주기, CTV-PTV 마진

서 론

방사선 치료의 목표는 치료하고자 하는 병변 주위에 정확한 선량이 전달되고, 정상조직에는 최소한의 선량이 들어가지게 하는 것이라 볼 수 있다.

이를 실현하기 위해서는 여러 가지 변위 오차들을 고려해야 한다. 그러한 변위 오차에는 조사면 배치, 차폐체 배치의 부정확성, 환자의 움직임 그리고 호흡에 따른 내부 장기들의 움직임 등을 들 수 있다.¹⁾

특히, 환자의 치료 부위가 움직이는 장기이거나, 움직이는 장기 주변이라면 위 변위 오차 중 호흡에 따른 내부 장기의 움직임은 3D-CRT (Three-Dimensional Conformal Radiotherapy),²⁾ CyberKnife³⁾를 통한 치료 등에서 치료 용적 체적을 설정하는 데 매우 중요한 요소라 볼 수 있다. 이를 위하여 여러 가지 호흡 운동 조절 방사선 치료 기술이 부각되고 있다. 이 기술에는 내부 장기를 추적하는 방법과 체표면의 움직임을 획득하여 호흡 주기와의 동기 부여를 통해 조절하는 방법 등이 있다. 이 중 DIBH (Deep Inspiration Breath Hold)⁴⁻⁶⁾방법의 경우, 환자에 따라 breathing-holding rate가 달라 치료하기가 어렵고, 치료 시 일정한 시간동안 breath-hold 상태를 유지하지 못하는 환자의 경우, 방사선 치료를 거의 할 수 없는 상황이 발생하게 된다. ABC (Active Breathing Control)^{7,8)} 방법의 경우, 환자 치료의 질이 중요시 되는 현 시점에 있어서 환자에게 많은 부담을 주게 되어 의료의 질을 저하시킨다는 보고가 있다.⁹⁾

따라서 본 연구에서는 이와 같은 DIBH, ABC 방법의 단

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발중장기계획사업의 연구비지원에 의해 수행되었음.

이 논문은 2004년 11월 9일 접수하여 2004년 11월 30일 채택되었음.

책임저자 : 지영훈, (139-706) 서울특별시 노원구 공릉동 215-4

원자력의학원 방사선의학연구센터

Tel: 02)970-1371, Fax: 02)970-2412

E-mail: jyh328@kocch.re.kr

점을 극복하기 위해, 내부 장기의 움직임 감소 장치를 개발하였다. 이 장치는 환자의 흉부에 약간의 압박이 가해지지만, 자유롭게 호흡을 할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 환자의 입장에서는 치료 시, 가만히 누워만 있어도 치료가 이루어져 환자에게 치료의 부담감을 덜어 주게 된다. 이는 결국 환자 치료의 질을 높이는 데 기여할 것이다. 이 장치를 통하여 흉부 또는 복부에 종양을 가진 방사선 치료 환자 10명을 대상으로 내부 장기 중 횡격막의 움직임을 관찰하였다. 그리고 관찰된 결과를 통하여 호흡에 따른 종양의 움직임을 보정하고자 하였다.

이론 및 방법

방사선 치료기를 통하여 암 환자를 치료할 경우, 움직이지 않는 부위의 종양은 환자의 전신이 고정된다면, 치료가 원활하게 이루어질 수 있다. 그러나 흉부 또는 복부 등의 움직이는 장기 또는 그 주변의 종양은 호흡에 따른 내부 장기의 움직임의 오차 보정 없이는 원활한 치료가 이루어질 수 없다. 여기에서 CTV-PTV 마진은 호흡에 의한 움직이는 장기 또는 그 주변의 종양을 치료하는 데 있어 중요한 요소로서, Antolak와 Rosen,¹⁰⁾ Vedam¹⁾은 그들의 논문에서 CTV를 통한 PTV 마진을 결정하는 방법을 아래와 같은 식 (1)과 식 (2)를 통하여 제시하였다.

$$M = 1.65 \times \sqrt{\sigma_{setup}^2 + \sigma_{F_{act}}^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$M = 2 \times \sqrt{\sigma_{setup}^2 + \sigma_{F_{act}}^2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 M 은 CTV-PTV 마진이고, σ_{setup} 은 환자 위치의 변화 즉 setup 에러이다. 그리고 $\sigma_{F_{act}}$ 는 횡격막의 움직임의

변화이다.

위 식들에 의하면, 횡격막 움직임의 변화가 CTV를 통한 PTV 마진을 결정하는데 매우 중요한 요소임을 확인해 볼 수 있다. 물론, CTV를 어떻게 설정하는가에 따라 CTV-PTV의 마진은 달라질 수 있다. 그러나 횡격막 움직임의 변화가 CTV-PTV 마진에 영향을 미친다는 것과, 횡격막 움직임의 감소가 CTV-PTV 마진을 감소시킨다는 것은 이미 여러 논문을 통하여 보고된 바 있다.^{1,10)} 따라서 이와 같은 내부 장기의 움직임이 보정된다면, 흉부 또는 복부에 종양을 가진 환자에게 더욱 더 원활한 방사선 치료가 이루어질 것이다.

1. 움직임 감소 장치 제작 및 장착

진공쿠션(Vacuum cushion)을 사용하여 체위 고정 장치를 제작할 때 흉부 또는 복부에 종양을 가진 암 환자에게 4개의 벨트로 이루어진 움직임 감소 장치를 장착시키게 된다. 그리고 흉부 또는 복부 위에 작은 진공쿠션(Vacuum cushion)을 놓아 최대한 호흡을 내쉬게 한 후, 벨트로 환자의 횡격막 주위를 묶는 방법을 사용하였다(Fig. 1).

실험 과정은 Fig. 2와 같다.

그리고 이 실험에 참여한 환자정보는 Table 1과 같다.

2. 움직임 감소 장치 미장착시 횡격막 측정

움직임 감소 장치를 환자에게 장착하지 않고, 모의치료실에서 횡격막의 움직임을 관찰하였다. 일단, 환자를 양와위(supine)상태로 모의치료실의 치료침대 위에 위치시키고, 편안한 상태를 유지하도록 한다(Fig. 3).

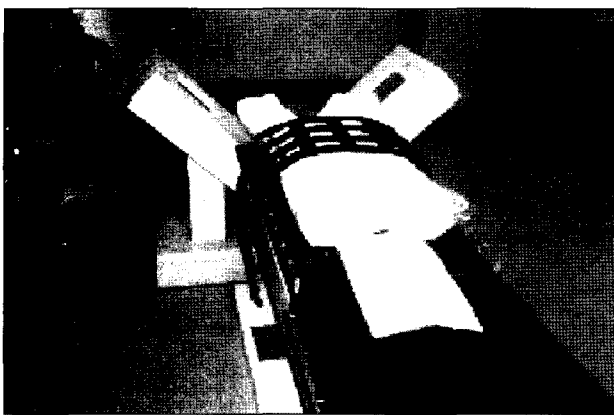


Fig. 1. The decreasing device of position conversion on the couch.

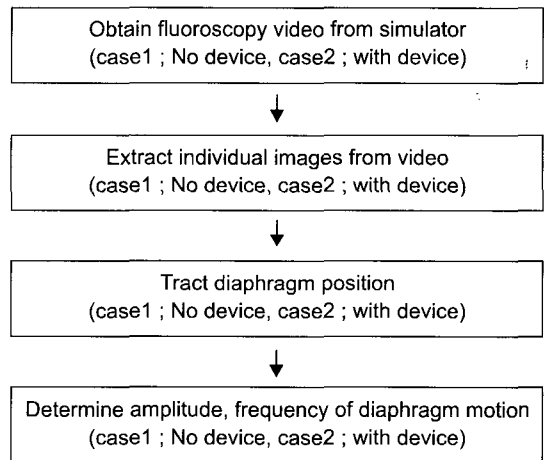


Fig. 2. A flow chart of the process of an experiment.

호흡은 편안한 상태에서 정상적으로 호기와 흡기가 이루어지도록 환자에게 권고한다.

그리고 투시영상(fluoroscopy)에 나타난 횡격막의 움직임을 포착하여, 디지털 카메라 동영상 모드로 약 15초간 두 번 촬영한다.

Table 1. The patient's information; consist of tumor site, sex, age, height, weigh.

Patient	Tumor site	Sex	Age	Height (cm)	Weight (kg)
A	Mediastinum	male	49	168	62
B	Pancreas	male	60	165	54
C	Pancreas	male	61	169	64
D	Chest Wall	female	42	158	70
E	Pancreas	male	64	167	60
F	Chest Wall	female	52	158	54
G	Lung	male	53	176	62

3. 움직임 감소 장치 장착 시 횡격막 측정

움직임 감소 장치를 환자에게 장착하고, 횡격막의 움직임을 관찰하였다.

양와위(supine) 상태로 치료침대 위에 위치시킨 환자에게 움직임 감소 장치를 장착하고, 편안한 상태를 유지하도록 한다(Fig. 4).

2와 동일한 방법으로 투시영상(fluoroscopy)에 나타난 횡격막의 움직임을 디지털 카메라 동영상 모드로 약 15초간 두 번 촬영하였다.

4. 횡격막의 위치변환 분석

2, 3를 통하여 디지털 카메라에 저장된 파일을 컴퓨터에 연결한 후, 포토샵 6.0 프로그램을 통하여 각 환자별 횡격막의 움직임을 비교 분석하였다(Fig. 5, 6).

여기에서 투시영상(fluoroscopy)에 나타난 레벨자를 기준으로 횡격막의 가장 높은 지점이 움직이는 최대점과 최소

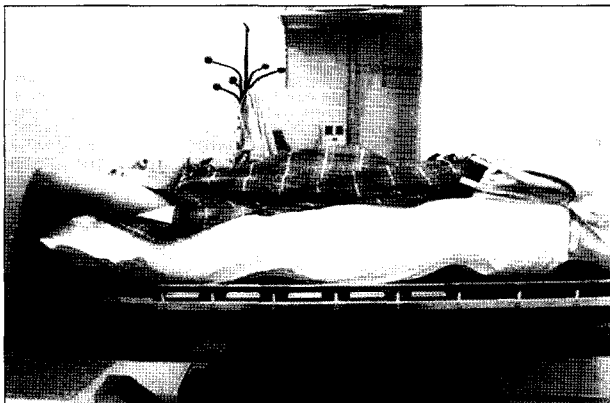


Fig. 3. The patient's situation without the decreasing device of position conversion.

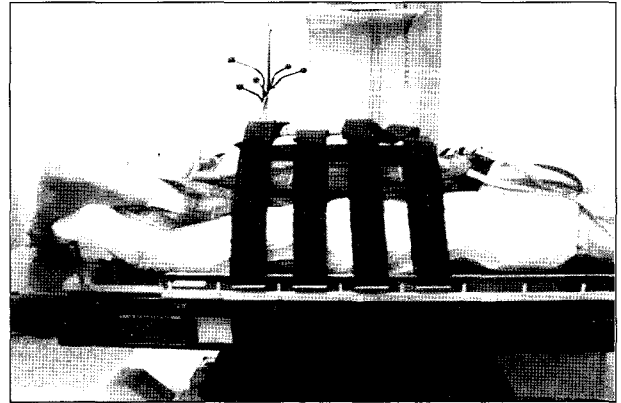


Fig. 4. The patient's situation with the decreasing device of position conversion.

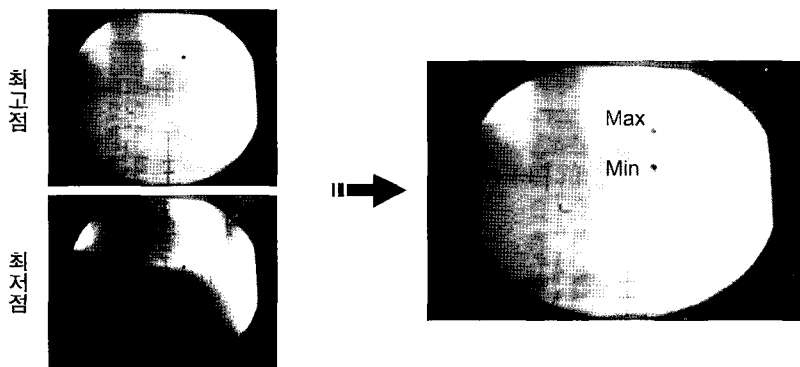


Fig. 5. The range of diaphragm motion without the decreasing device of position conversion.

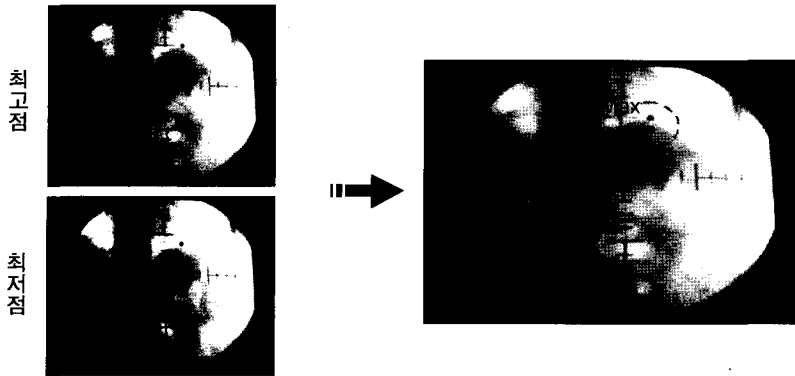


Fig. 6. The range of diaphragm motion with the decreasing device of position conversion.

점의 좌표를 관찰하여 횡격막의 상하 운동 범위를 측정하였다.

시간당 나타나는 횡격막의 가장 높은 지점의 위치를 통하여 횡격막의 amplitude, 호흡 주기 및 움직임 감소 장치를 사용한 결과에 대한 횡격막 움직임의 감소율을 분석할 수 있었다.

결 과

1. 움직임 감소 장치의 사용 유무에 따른 횡격막 움직임 분석

움직임 감소 장치의 사용유무에 따른 각 환자별 횡격막의 움직임을 시간에 따른 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다.

각 환자별로 일정한 주기성을 가지고 횡격막이 움직이고 있음을 확인해 볼 수 있다. 그리고 내부 장기의 움직임 감소 장치를 사용한 결과 각 환자별 횡격막 움직임의 범위에 차이가 있지만, 공통적으로 그 움직임의 범위가 현저히 줄어드는 것을 살펴볼 수 있다(Fig. 7).

세부적으로 각 환자별 횡격막의 amplitude, 주기 및 감소율 등에 관하여 알아보자.

환자별 amplitude의 범위는 위치변환 감소 장치를 사용하지 않을 때는 횡격막 움직임의 범위가 1.14~3.14 cm로 나타났으며, 그 평균값은 2.14 cm였고, 표준편차는 0.64였다.

이 결과는 KM Langen,¹²⁾ Balter JM,¹³⁾ Kubo HD¹⁴⁾가 제시한 횡격막 움직임의 평균값과 거의 근사한 값이다. 그러나 움직임 감소 장치를 사용한 결과 횡격막의 움직임의 범위와 평균값이 0.72~1.95 cm, 1.16 cm로 줄어들었다(Fig. 8). 그리고 표준편차는 0.48로 나타났다.

각 환자별 주기의 범위는 움직임 감소 장치를 사용하지 않았을 경우, 3~6초로 그 평균값은 4.4초였고 표준편차는 0.98이었다. 그러나 움직임 감소 장치를 사용한 결과 주기의 범위는 1.5~4 초로 그 평균값은 3.07초로 줄어들었다.

그리고 표준편차는 0.84로 나타났다. 즉 amplitude의 범위가 줄어든 반면, 호흡은 호기와 흡기가 더 빠르게 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 9).

내부 장기의 움직임 감소 장치를 사용한 결과, 횡격막 운동의 움직임의 범위는 현저히 줄어드는 것을 확인하였다. 각 환자별 횡격막 운동의 감소율은 Fig. 10에서 알 수 있듯이, 20~68.4% 범위 내에서 감소가 이루어졌으며, 그 평균값은 44.9%였고, 표준편차는 17.98로 나타났다. 즉, 움직임 감소 장치를 사용한 결과 횡격막의 움직임이 약 절반으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

위의 결과를 토대로 Antolak와 Rosen 그리고 Vedam이 제시한 식 (1)과 식 (2)의 CTV-PTV 마진을 계산해 보았다. 물론 본 논문에서는 CTV 설정에 초점을 두기보다는 CTV가 동일하다는 조건 하에, 횡격막의 움직임이 CTV-PTV 마진을 어느 정도 감소시키는가에 주안점을 두었다. 즉, 내부 장기 중 횡격막의 움직임의 감소가 CTV-PTV 마진에 영향을 미치는 기여도를 Antolak와 Rosen 그리고 Vedam이 제시한 식 (1)과 식 (2)를 통하여 도출해 보고자 한 것이다.

내부 장기의 움직임 감소 장치를 사용한 결과, CTV-PTV의 마진은 19.0~64.4%의 범위 내에서 평균 42.3% 감소함을 확인해 볼 수 있었다.

결 론

위의 결과를 통하여 움직임 감소 장치를 사용한 결과 내부 장기 중 횡격막의 움직임이 20~68.4%의 범위 내에서 평균 44.9% 감소함을 확인하였다. 또한 Antolak와 Rosen 그리고 Vedam이 제시한 식 (1)과 식 (2)의 CTV-PTV 마진 감소율은 환자마다 다소 차이가 있었으나, 19.0~64.4%의 범위 내에서 평균 42.3% 감소하였다.

이는 흉부 또는 복부에 종양을 가진 암 환자 치료 시,

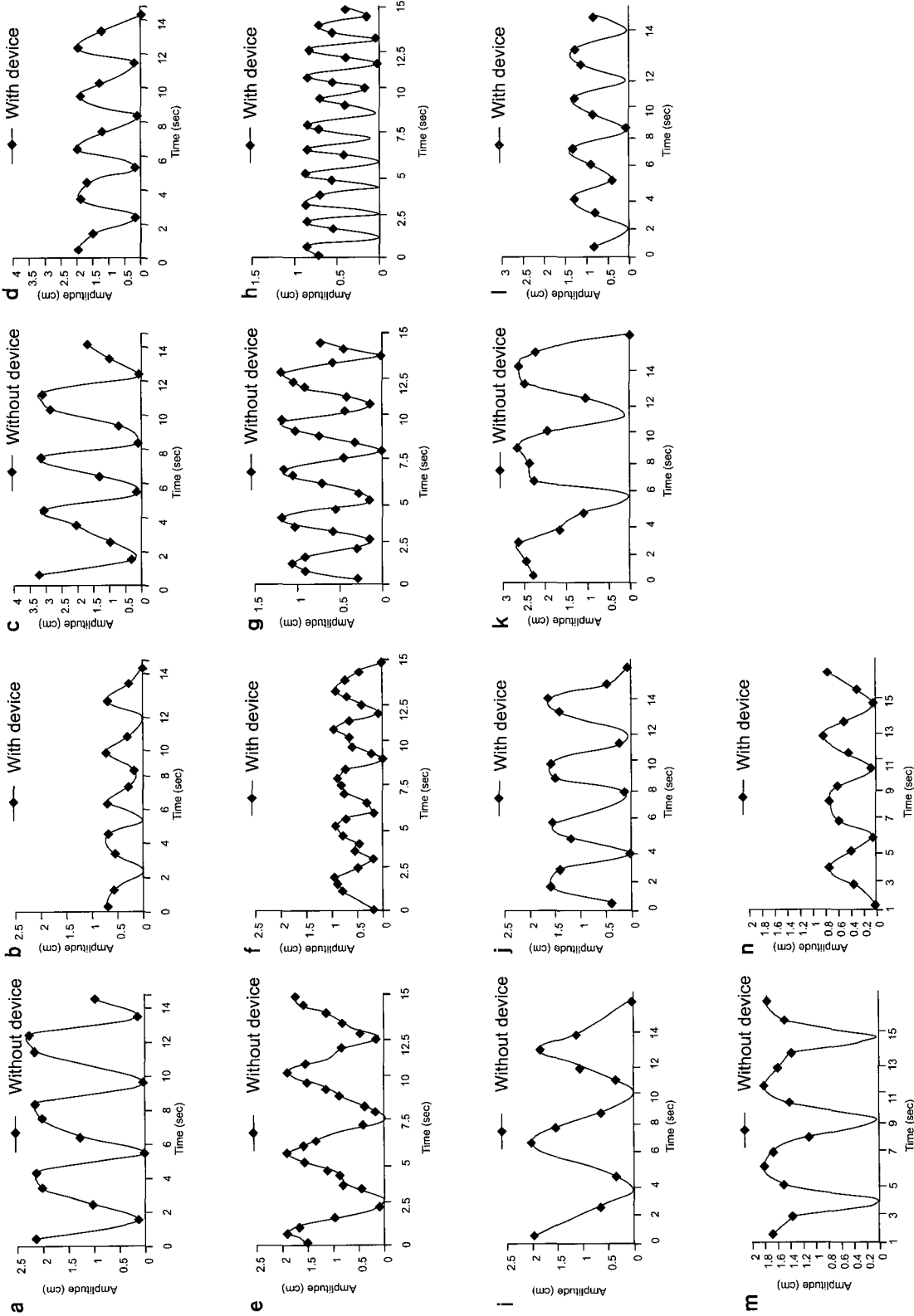


Fig. 7. The diaphragm position plotted against time for (a) without the decreasing device of position conversion; patient A, (b) with the decreasing device of position conversion; patient B, (c) without the decreasing device of position conversion; patient C, (d) with the decreasing device of position conversion; patient D, (e) without the decreasing device of position conversion; patient E, (f) with the decreasing device of position conversion; patient F, (g) without the decreasing device of position conversion; patient G, (h) with the decreasing device of position conversion; patient H, (i) without the decreasing device of position conversion; patient I, (j) with the decreasing device of position conversion; patient J, (k) without the decreasing device of position conversion; patient K, (l) with the decreasing device of position conversion; patient L, (m) without the decreasing device of position conversion; patient M, (n) with the decreasing device of position conversion; patient N.

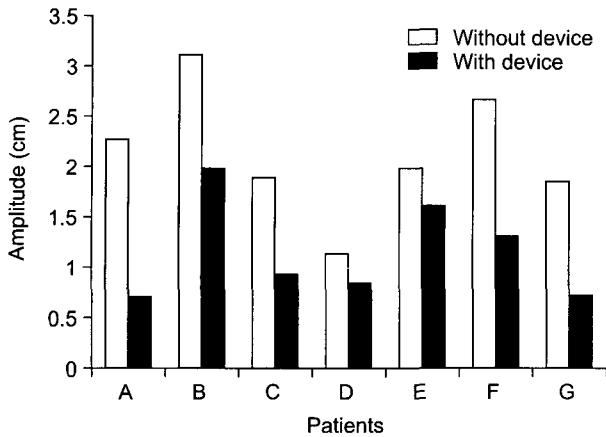


Fig. 8. The diaphragm amplitude; without the decreasing device of position conversion and with he decreasing device of position conversion for patients A-G.

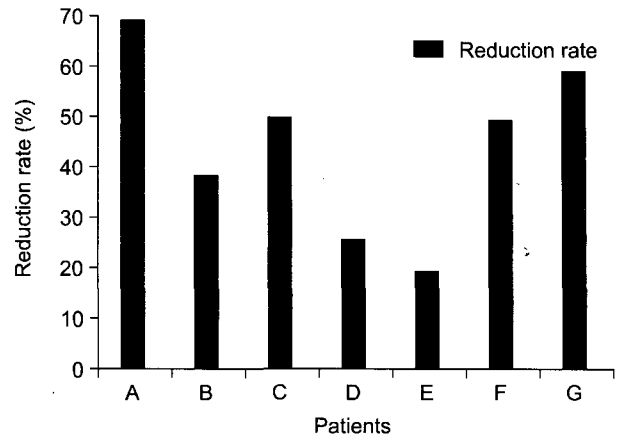


Fig. 10. The diaphragm reduction rate; without the decreasing device of position conversion and with he decreasing device of position conversion for patients A-G.

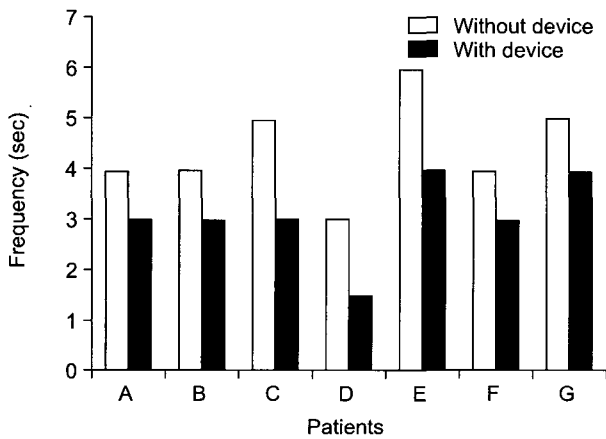


Fig. 9. without the decreasing device of position conversion and with he decreasing device of position conversion for patients A-G.

tumor 마진을 줄여 환자에게 보다 질 높은 치료가 이루어 질 것이라 생각된다. 그리고 이와 같은 임상 실험이 더 많이 이루어진다면, 움직임 감소 장치의 사용에 따른 치료 부위별 종양의 CTV-PTV 마진 감소율도 비교해 볼 수 있을 것이라 판단된다. 앞으로 내부 장기 중 횡격막 뿐만이 아닌 호흡에 영향을 받는 다양한 장기들 또한 모델링하여 이를 환자 치료에 반영코자 한다.

참 고 문 헌

1. Vedam SS, Kini VR and Keall PJ, et al: Quantifying the predictability of diaphragm motion during respiration with a

noninvasive external marker. *Med Phys* 30: 505-513 (2003)

2. Brahme A: Optimization of stationary and moving beam radiation therapy techniques. *Radiother Oncol* 12:129-140 (1988)

3. Chang SD, Adler JR: Robotics and Radiosurgery - The Cyberknife. *Stereotact. Funct Neurosurg* 76:204-208 (2001)

4. Hanley J, Debois MM, Mah D, et al: Deep inspiration breath-hold technique for lung tumors: The potential value of target immobilization reduced lung density in dose escalation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 45:603-611 (1999)

5. Rosenzweig 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* 48: 81-87 (2000)

6. Balter JM, Lam KL, McGinn CJ, et al: Improvement of CT-based treatment-planning models of abdominal targets using static exhale imaging. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 41:939-943 (1998)

7. 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* 44:911-919 (1999)

8. Stromberg JS, Sharpe MB, Kim LH, et al: Active breathing control (ABC) for Hodgkin's disease: reduction in normal tissue irradiation with deep inspiration and implications for treatment [in process citation]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 48(3):797-806 (2000)

9. Hanley J, Debois MM, Mah D, et al: Deep inspiration breath-hold technique for lung tumors: The potential value of target immobilization reduced lung density in dose escalation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 45:603-611 (1999)

10. Antolak JA, Rosen II: Planning target volumes for radiotherapy: How much margin is needed? *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 44(5):1165-1170 (1999)

11. Ekberg L, Holmberg O, Wittgren L, Bjelkengren G, Landberg T: What margins should be added to the clinical target volume in radiotherapy treatment planning for lung

- cancer? Radiother Oncol 48:71-77 (1998)
12. **Langen KM, Jones DT**: Organ motion and its management. Int J Radiat Oncol Biol Phys 50(1):265-278 (2001)
13. **Balter JM, Kwok LL, Cornealus, et al**: Improvement of CT-based treatment-planning models of abdominal targets using static exhale imaging. Int J Radiat Oncol Biol Phys 41: 939-943 (1998)
14. **Kubo HD, Len PM, Minohara S, et al**: Breathing-synchronized radiotherapy program at the university of california davis cancer center. Med Phys 27:346-353 (2000)

A Study on the Reduction of Organ Motion from Respiration

Jae-Gyoun Kim*, Dong-Han Lee*[†], Dong-Hoon Lee*[†], Mi-Sook Kim*[†], Chul-Koo Cho*[†],
Seong-Yul Yoo[‡], Kwang-Mo Yang[†], Won-Yong Oh[‡], and Young-Hoon Ji*[†]

*Radiological & Medical Sciences Research Center, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences,

[†]Department of Radiation Oncology, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences,

[‡]Department of Radiation Oncology, National Medical Center

To deal with tumor motion from respiration is one of the important issues for the advanced treatment techniques, such as the intensity modulated radiation therapy (IMRT), the image guided radiation therapy (IGRT), the three dimensional conformal therapy (3D-CRT) and the Cyber Knife. Studies including the active breath control (ABC) and the gated radiation therapy have been reported. Authors have developed the device for reducing the respiration effects and the diaphragm motions with this device were observed to determined the effectiveness of the device. The device consists of four belts to immobilize diaphragm motion and the vacuum cushion. Diaphragm motions without and with device were monitored fluoroscopically. Diaphragm motion ranges were found to be 1.14~3.14 cm (average 2.14 cm) without the device and 0.72~1.95 cm (average 1.16 cm) with the device. The motion ranges were decreased 20~68.4% (average 44.9%). However, the respiration cycle was increased from 4.4 seconds to 3.7 seconds.

The CTV-PTV margin could be decreased significantly with the device developed in this study, which may be applied to the treatments of the tumor sited diaphragm region.

Key Words: Diaphragm motion, Decreasing device, Diaphragm frequency, CTV-PTV