

호흡에 의해 내부 움직임을 갖는 장기에 전달되는 선량에서 Time Gating Threshold (TGT)의 효과

*가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, †서울보건대학 방사선과, ‡건국대학교 의과대학 방사선종양학교실

김연래*† · 정진범* · 정원균† · 홍세미† · 서태석*

본 연구는 호흡에 따라 내부 장기가 움직일 때, 내부 장기가 가장 안정적인 구간의 문턱 값(threshold)을 시간으로 설정한 후 선량분포에 대한 연구를 수행하였다. 일반적으로 정상적인 호흡주기 중에서 시간대비 내부 장기 움직임이 호기 상태에서 적게 나타난다. 그러므로 시간동기 문턱 값(time gating threshold, TGT)은 내부 장기 움직임이 가장 적은 호기 시 1초 동안 움직일 때의 선량분포를 평가하였다. TGT를 설정했을 때 선량분포를 비교하기 위해 다음 조건으로 방사선을 조사하였다. 내부 장기가 1) 고정된 상태, 2) 문턱 값 범위 내에서 움직일 때, 3) 문턱 값 범위 밖에서 움직일 때, 각각의 내부 장기 움직임 조건을 구동팬텀시스템으로 모사하였다. 그리고 필름 선량 측정법(film dosimetry)을 이용하여 비교 평가하였다. TGT를 1초로 설정하고 내부적 움직임을 고려하여 선량분포를 획득했을 때 치료시간은 증가하였다. 그러나 TGT를 1초로 설정한 것은 내부적 움직임을 고려하지 않은 선량분포 즉, 치료 조사면 내에 장기의 움직임이 없을 때와 비슷한 선량분포를 얻을 수 있었다. 그리고 문턱 값없이 내부 장기가 움직일 때와 비교해서 반응영역에 불필요한 선량을 줄일 수 있었다. 또한 치료시간을 줄이기 위해서 문턱 값을 1.4초로 설정했을 때가 1초로 설정했을 때보다 시간 비에 따른 선량분포에 대해 효과적인 결과를 얻지 못했다. 즉, 시간은 줄었지만 치료영역 밖에 많은 선량이 분포하였다. 임상적으로 TGT를 설정해서 방사선 치료를 하기 위해서는 수학적인 계산 방법에 의한 내부 장기의 움직임을 표현하는 것이 아니라 실측에 의해서 모든 환자의 외부 움직임과 내부 움직임을 측정해야 한다. 또한 내부와 외부 움직임의 상관관계를 분석해서 환자의 호흡주기에 따른 내부 장기의 움직임 중에 이상적인 위치에서 문턱 값을 설정 후 방사선치료를 시행하면 정상조직은 낮은 선량이 분포하면서 치료성적이 향상될 것이라 예상된다.

중심단어: 내부 장기 움직임, Time gating threshold (TGT), 호흡

서 론

방사선치료의 목적은 정상 조직에는 선량을 최소화하면서 종양에 가능한 많은 선량을 조사하는 데 있다. 그런데 폐, 유방, 간, 신장 같은 장기는 호흡에 따른 종양의 움직임이 있기 때문에 방사선 치료 시 종양에 선량 분포가 좋지 않고 정상조직에 불필요한 선량이 분포하게 된다. 이와 같이 움직이는 장기에 대해 방사선치료를 시행할 때 여러 가지 방법이 있는데, 첫 번째는 일반적으로 사용하는 방법으로 planning target volume (PTV) 설정 시에 clinical target vo-

lume (CTV)의 경계영역을 증가시키는 방법¹⁾, 두 번째는 세 기조절방사선치료(IMRT) 시에 동적 다엽 콜리메이터(dynamic multileaf collimator; DMLC)의 움직임을 이용하여 치료하는 방법,²⁾ 세 번째는 호흡 주기에 따라 방사선을 조사하는 호흡동기방사선치료(respiration gated radiotherapy)와 호흡 조절 방법(breath-hold technique)이 있다.³⁾ IMRT시에 내부 장기의 움직임을 DMLC와 동시적으로 움직이는 방법은 DMLC의 움직임과 움직이는 장기의 움직임이 일치하지 않아서 문제(motion artifact)가 발생할 수 있다. 그리고 치료계획에 분포된 선량분포와 실제로 조사된 선량분포에 많은 차이가 나타난다. 그러므로 이 방법은 많은 연구는 이루어지고 있으나 임상적으로 한계가 있다. 본 연구는 세 번째 치료 방법으로 호흡주기를 이용한 것이다. 호흡주기에서 문턱 값을 이용한 동기 방법은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 진폭동기(amplitude gating) 방법과 위상동기(phase gating) 방법이 있는데,^{4,5)} 본 연구는 적절한 시간에 따른 문턱 값을 설정하여 선량분포를 평가하기 위한 실험으로 진폭과 위상

본 연구는 원자력중장기 사업 과제(과제번호:M2050507-05A0907-00210) 연구비 보조로 수행되었음.

이 논문은 2005년 2월 22일 접수하여 2005년 6월 16일 채택되었음.

책임저자: 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포동 505

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

Tel: 02)590-2414, Fax: 02)532-1779

E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

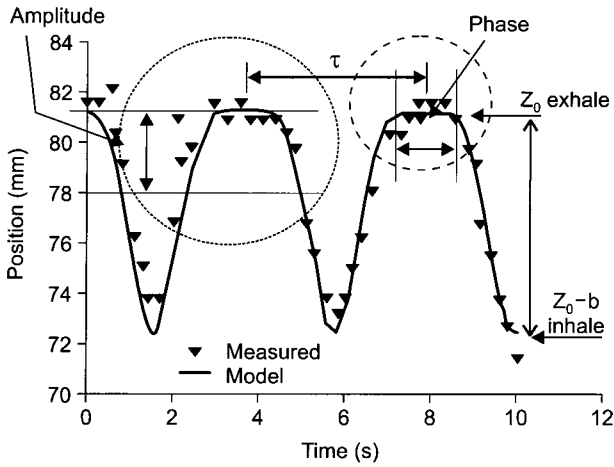


Fig. 1. Two gating (amplitude gating (red arrow), phase gating (blue arrow) method in breathing cycle & the parameter of the organ position for an equation (1). The positions of organ due to breathing are seen in fluoroscopic studies (triangle) and mathematical model of data (solid line).

동기 방법을 혼합시킨 방법이다. 일반적으로 호흡에 의한 환자의 내부적 움직임 변위는 기준표지(fiducial markers)를 환자의 내부 장기에 삽입 한 후 투시촬영 장치를 이용해서 측정하고,^{2,6,7)} 외부적 움직임은 strain gauge, spirometer, 실시간 위치 모니터(real-time position monitor, RPM) 같은 센서 시스템에 의해 측정하는데,^{8,9)} 본 연구에서는 내부 장기 움직임을 Lujan 등⁴⁾에 의해 보고된 수학적 모델 방법에 근거하여 일정한 시간간격에서 장기의 위치를 계산하였다. 이 식은 미국 미시건 대학에서 호흡할 때, 복부 computed tomography (CT) 촬영으로 간의 위치¹⁰⁾를 식으로 나타낸 것이다. 대부분 복부에 위치한 장기가 호흡에 의해 움직일 때, 주로 상하 방향으로 움직인다는 것이 복부 CT에 의해서 증명되었다.¹¹⁾ 그러므로 본 연구는 2, 3차원적인 선량분포를 하기 위해서 1차원적인 내부 장기의 움직임을 수학적으로 나타낸 Lujan의 식을 적용하여 실험하였다. 그래서 이 식을 바탕으로 계산해 본 결과 처음 호기 시 최대 장기 위치에서 흡기까지의 2초 호흡주기 동안 15 mm 움직임이 있고 그 기간 중 호기에서 1초까지의 장기 움직임은 2 mm 이내의 범위에 위치하는 것을 알게 되었다.

본 연구의 목적은 호흡주기에 따른 장기의 움직임에서 1초의 TGT를 설정했을 때 선량분포와 치료시간을 줄이기 위해 TGT 범위를 연장했을 때(1.4초), TGT 범위 밖에서 장기가 움직일 때, 그리고 고정된 장기에서의 선량분포를 비교, 평가하여 TGT를 설정해서 방사선을 조사했을 때 치료

Table 1. The calculated values of organ position as a function of time.

Time (s)	Position (mm)	Time (s)	Position (mm)
0.2	14.999	1.2	10.800
0.4	14.998	1.4	7.500
0.6	14.860	1.6	3.904
0.8	14.310	1.8	1.080
1.0	13.140	2.0	0

영역과 반응영역에 미치는 선량분포에 관하여 연구를 수행하였다.

대상 및 방법

1. 시간에 의한 문턱 값 설정

환자 호흡 시 장기의 움직임을 수학적 모델 방정식을 계산하여 일정 시간간격에 따라 장기가 위치하는 지점을 나타내었다. 이 수학적 모델 방법의 방정식은 다음 식 (1)과 같고, 전체적인 환자의 호흡 주기에서 동일한 주기와 호흡의 크기라고 가정하였다.

$$Z(t): \text{호흡시간에 따른 장기의 위치} \quad (1)$$

Z_0 : 처음 장기의 위치(호기 시에 장기의 위치)

b : 움직이는 장기의 변위

$Z_0 - b$: 흡기 시에 장기의 위치

τ : 호흡주기

t : 한 호흡주기 동안 소요되는 시간

ψ : 호흡주기에서 시작위치

n : 수학적 모델의 일반적인 모양(steeptness and flatness)을 결정하는 변수

본 실험을 수행하기 위해서, 한 호흡주기 시간(t) 4초, 호흡에 따른 변위(b) 15 mm, n 의 값은 3으로 설정하여 사용하였다. 여기서 적용된 변수들은 앞서 발표된 연구결과를 바탕으로 설정한 것으로 미시건 대학에서 시행한 CT결과에 의한 호흡에 따른 변수이다.¹⁰⁾ 위 식을 계산하여 시간에 따른 장기 위치를 나타내는 결과는 Table 1과 Fig. 2와 같다.

이 결과를 통해, 호기 시 위에 위치하는 지점에서 흡기 시 바닥에 위치하는 지점까지 호흡하는 2초 시간 중 호기의 초기지점부터 1초까지 호흡하는 동안 장기의 움직임은 2 mm 이하의 변위로 나타났다. 이것은 호흡에 의한 장기의 총 움직임 변위(15 mm)에 비해 아주 작은 변위라고 할 수 있다. 호기 시부터 흡기 시까지 호흡하는 시간이 2초인 것을 고려

하면 호기 초기의 지점에서 1초 동안의 지점은 호흡주기 중에서 50%의 호흡을 할 수 있는 기간(2초에서 1초 동안 치료를 할 수 있는 기간)이다. 그러므로 치료시간의 많은 증가 없이 방사선치료에 정확성을 높일 수 있기 때문에, 호기 초기지점에서부터 1초 동안의 장기위치 범위를 TGT 값으로 설정하였다. 여기서 TGT는 일정한 시간을 설정하여 정해진 시간 범위 내에서 방사선을 조사하는 것으로 한다.

$$Z(t) = Z_0 - b \cos^{2n}(\pi t / \tau - \psi)$$

2. 팬텀에 전달된 선량의 측정

수학적 모델 식을 이용해서 계산된 시간에 따른 장기의 위치는 구동 팬텀시스템에 적용하였다. 그리고 이 구동 팬텀의 움직임에 따라서 선량측정을 수행하였다. 실험은 세

가지 상태 내부 장기가 1) 고정된 상태, 2) 문턱 값 범위 내 (1초)에서 움직일 때, 3) 문턱 값 범위 밖(1.4, 2초)에서 움직임 일 때, 구동 팬텀시스템에 필름을 장착하여 측정하였다.

1)과 2) 실험은 TGT가 설정되었을 때, 고정된 상태와 비교해서 반응영과 조사야 내의 정확성을 검토하기 위해서 수행하였다. 2)와 3) 실험에서, 1초의 문턱 값과 1.4초의 문턱 값 범위 밖의 선량분포 비교는 실제 치료 시에 치료시간의 길어짐에 따라서 환자 자세가 약간 변하는 것을 감안해서 치료시간을 줄이기 위한 것으로 TGT를 늘렸을 때 시간과 선량분포를 측정하였고, 2초 동안 움직임을 갖는 장기에서의 선량분포와 설정된 TGT의 선량분포를 통해, 방사선조사의 정확성에 어떠한 영향이 있는가를 평가하였다.

본 연구에서 사용된 구동 팬텀 시스템은 X, Y, Z 축에 구

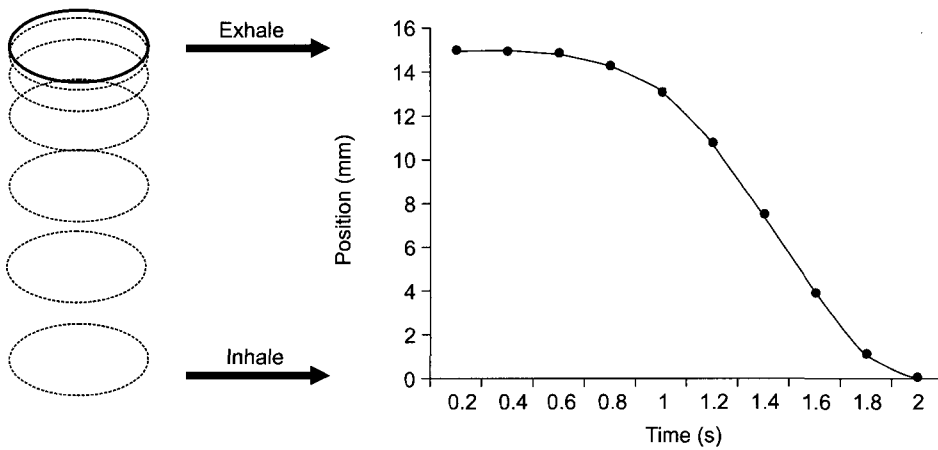


Fig. 2. Moving organ positions as a function of time during respiration initial organ movement is small during 2 sec.

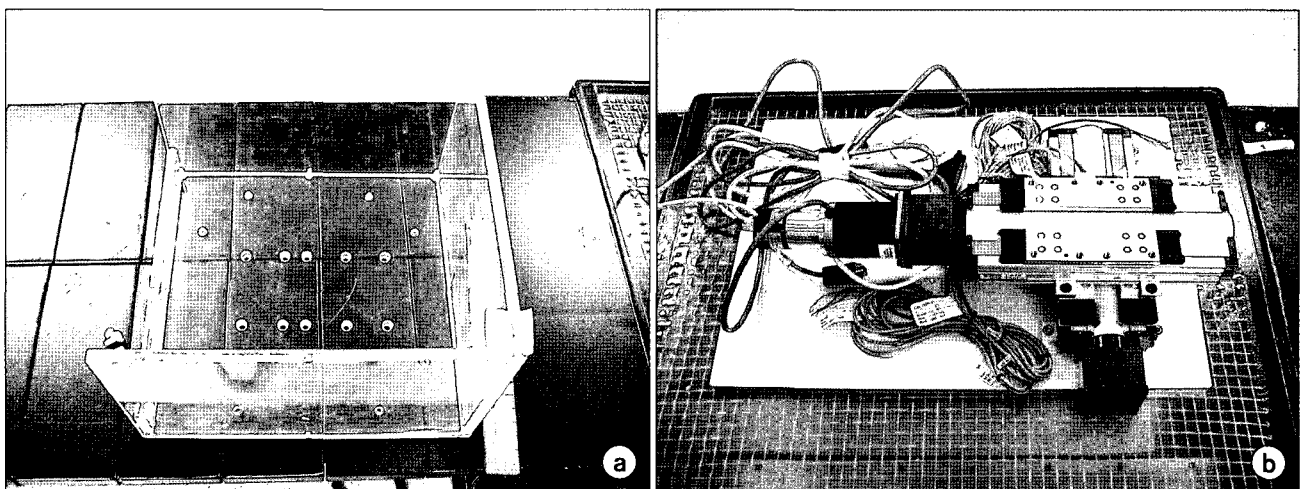


Fig. 3. Moving phantom system (a) Moving devices, (b) Adaptor plate. The adaptor plate fixed on the moving device. The solid water phantom is inserted into the adaptor plate.

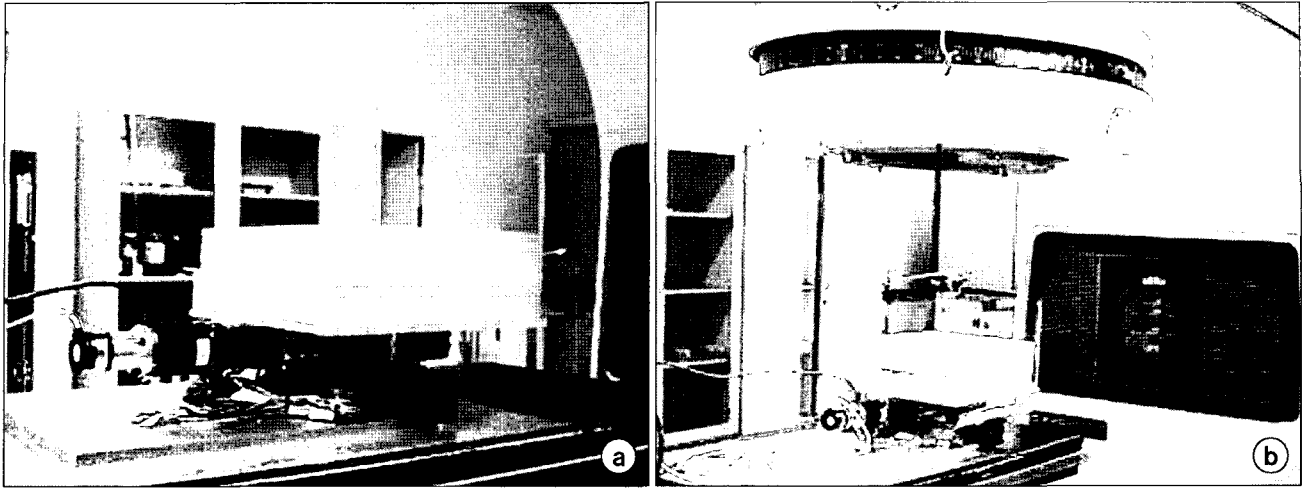


Fig. 4. (a) The film in the water equivalent white solid phantom is on the moving phantom, (b) The moving phantom is set up on the couch of the accelerator.

Table 2. The measurement of the relative film dose when the moving phantom is moving and static states.

Phantom Moving	Field size										
	5 cm	4 cm	3 cm	2 cm	1 cm	0	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
0 mm	61.5	99	100.1	100.1	100.6	100	100.4	100.2	100.2	98.8	63.6
0.2 mm	61.4	98.7	100	100.2	100.1	100	100.4	100.6	100.4	99.2	62.1
7.5 mm	61.1	98.5	100	100.3	100	100	100	100.1	100.1	99	61.3
15 mm	60.8	96.3	99.7	100.3	99.7	100	100.1	100.5	100.3	93.5	60.8

동모터에 적용하여 3차원적으로 구동할 수 있는 팬텀이다. 그러나 이 실험에서는 1차원적인 선량분포를 얻기 위한 것이므로 1차원적으로 팬텀을 구동하였고, 이 팬텀시스템의 구동은 미국 Parker사에서 구동모터의 구동 시에 사용된 프로그램으로 일반컴퓨터에 이 프로그램을 적용하여 내부 장치의 움직임을 동일하게 모사할 수 있다. 선량 측정을 위해 사용된 장비는 선형가속기 2,100C/D (Varian, U.S.A)를 사용하였고, 에너지는 10 MV 광자선, 조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$, SAD 100 cm에서 방사선을 조사하였다. 그리고 Fig. 3에서 보는 것처럼 구동팬텀 위에 물 등과 고체팬텀(water equivalent white solid phantom, SP34, Wellhofer, Germany)을 장착할 수 있는 삽입 판(adaptor plate)을 올려서 구동시키고, 필름(Kodak X-omat V film, Kodak, U.S.A)을 이용하여 선량 측정 실험을 수행하였다. 필름 분석은 필름 방사선량분석 시스템(Wellhofer, Germany)을 이용하였다. Fig. 4는 선형가속기에 구동팬텀과 물 등과 고체팬텀이 설치된 사진으로 세 가지 실험 조건에서 50 MU를 조사하였다.

결 과

호기부터 흡기까지 2초에서 처음 1초 TGT를 설정하고 내부적 움직임을 고려하여 획득한 선량 값을 각각의 다른 조건 1) 움직임을 고려하지 않았을 경우, 2) 2초 동안 계속 움직인 경우, 3) 1.4초 TGT를 설정했을 때와 선량분포를 비교하였다. 선량분포의 비교는 dose profile과 isodose curve에 의해서 치료영역 밖의 반응영역에 대한 평가와 치료 영역 안에서의 선량분포를 평가하였다. Table 2에서 나타난 것처럼 조사면 내에서의 선량분포는 15 mm 움직일 때만 중심축(central axis)에서 벗어날수록 선량분포가 적게 분포하였고 다른 조건에서는 균등한 치료 조사면 내에서는 균등한 선량이 분포하는 것을 알 수 있었다. 1초 TGT 값을 설정하여 획득한 선량분포와 1)의 실험에서 획득한 결과와 비교하면 Fig. 5의 선량분포곡선에서 나타난 것과 같이 선량분포에 거의 변화가 없음을 나타내고 있다. 그러나 내부

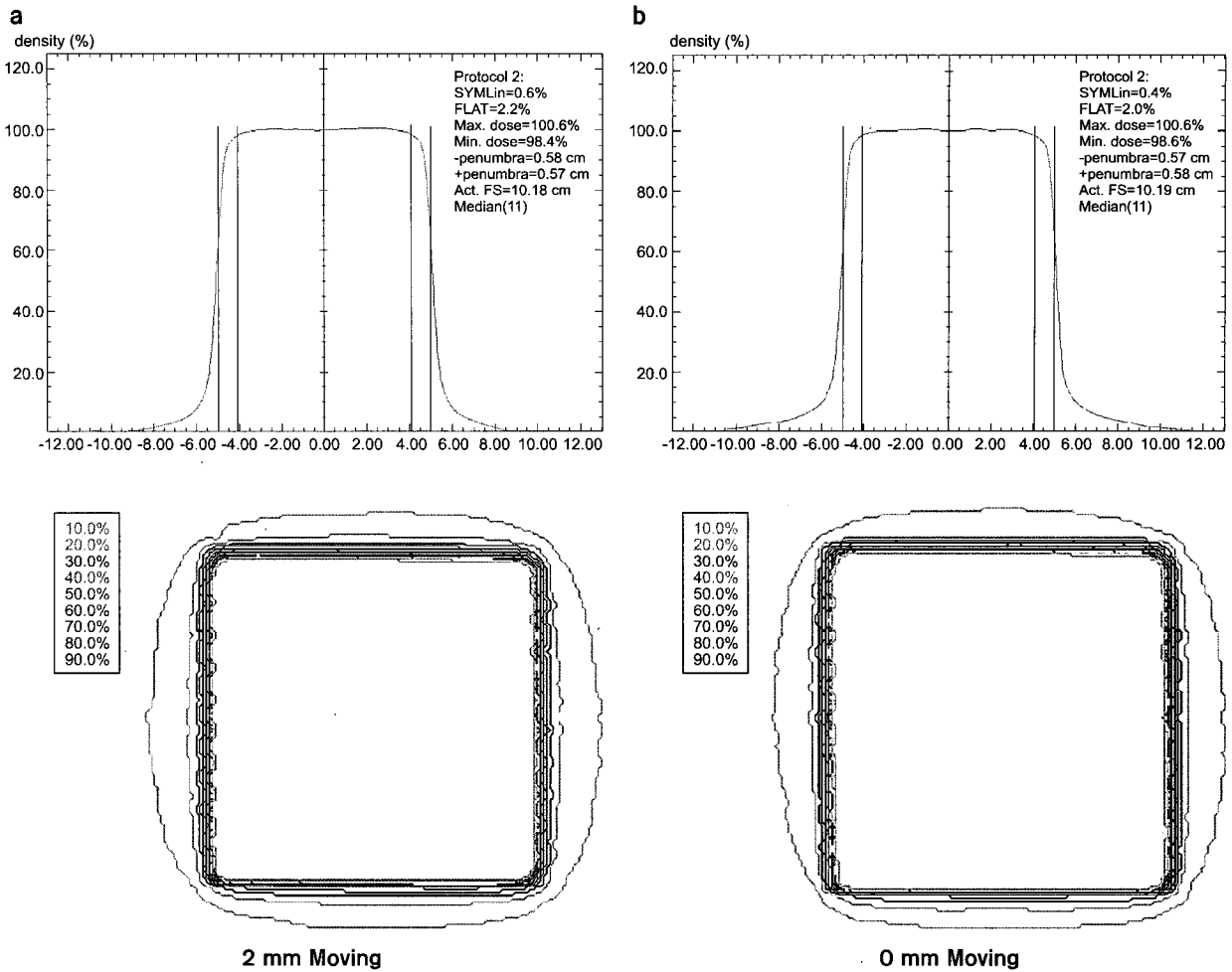


Fig. 5. The comparison of TGT 1 sec (2 mm) (a) and non-moving (b). The dose profiles and isodose curves of the 2 mm moving and non-moving display symmetry, flatness and penumbra etc. The dose profile display the penumbra and field that are inner line and outer line.

적 움직임만 즉, 2초 동안 움직임을 고려한 것(15 mm)과 비교해보면 실제 방사선 조사 부위에 정확한 선량을 얻을 수 있었고, Fig. 6에서 반응영역의 비교를 보면 2 mm 움직일 때는 평균 5.75 mm이고 15 mm 움직일 때는 약 13 mm로 반응영역에 선량분포가 확실히 줄어드는 것을 발견할 수 있었다. 그러나 TGT를 설정함으로써 치료시간은 2배 이상 증가되었고, 긴 치료시간으로 인해 환자의 자세가 불안정해지는 것을 예상할 수 있었다. 그래서 치료시간을 줄이기 위해서 TGT를 1.4초(7.5 mm)로 설정하였다. TGT를 1초(2 mm)로 설정하여 획득한 선량 분포를 1.4초(7.5 mm)로 설정한 것과 비교해본 결과, 처음 호흡에서 1초 사이의 내부 장기 움직임이 1초에서 1.4초 사이의 움직임보다 Table 1과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 적게 움직인다. 그리고 Fig. 7에서의 반응

영을 보면 TGT 1초일 때 평균 5.75 mm이 나타나는 반면 TGT가 1.4초일 때는 8.75 mm이 나타난다. 그러므로 시간 비에 따른 선량분포가 TGT를 1초로 설정했을 때 효과적인 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 환자를 치료할 때 환자의 호흡주기 중에 움직임이 가장 적은 영역을 선택해서 문턱값을 설정해야 불필요한 치료영역 밖의 선량분포를 줄일 수 있다.

고찰 및 결론

Lujan등⁴⁾에 의해 보고된 수학식에 의해 측정된 호흡주기 중에서 처음 호흡부터 1초 동안 장기의 움직임이 가장 적기 때문에 이때 TGT를 설정해서 획득한 선량분포가 내

김연래 외 4인 : 호흡에 의해 내부 움직임을 갖는 장기에 전달되는 선량에서 Time Gating Threshold (TGT)의 효과

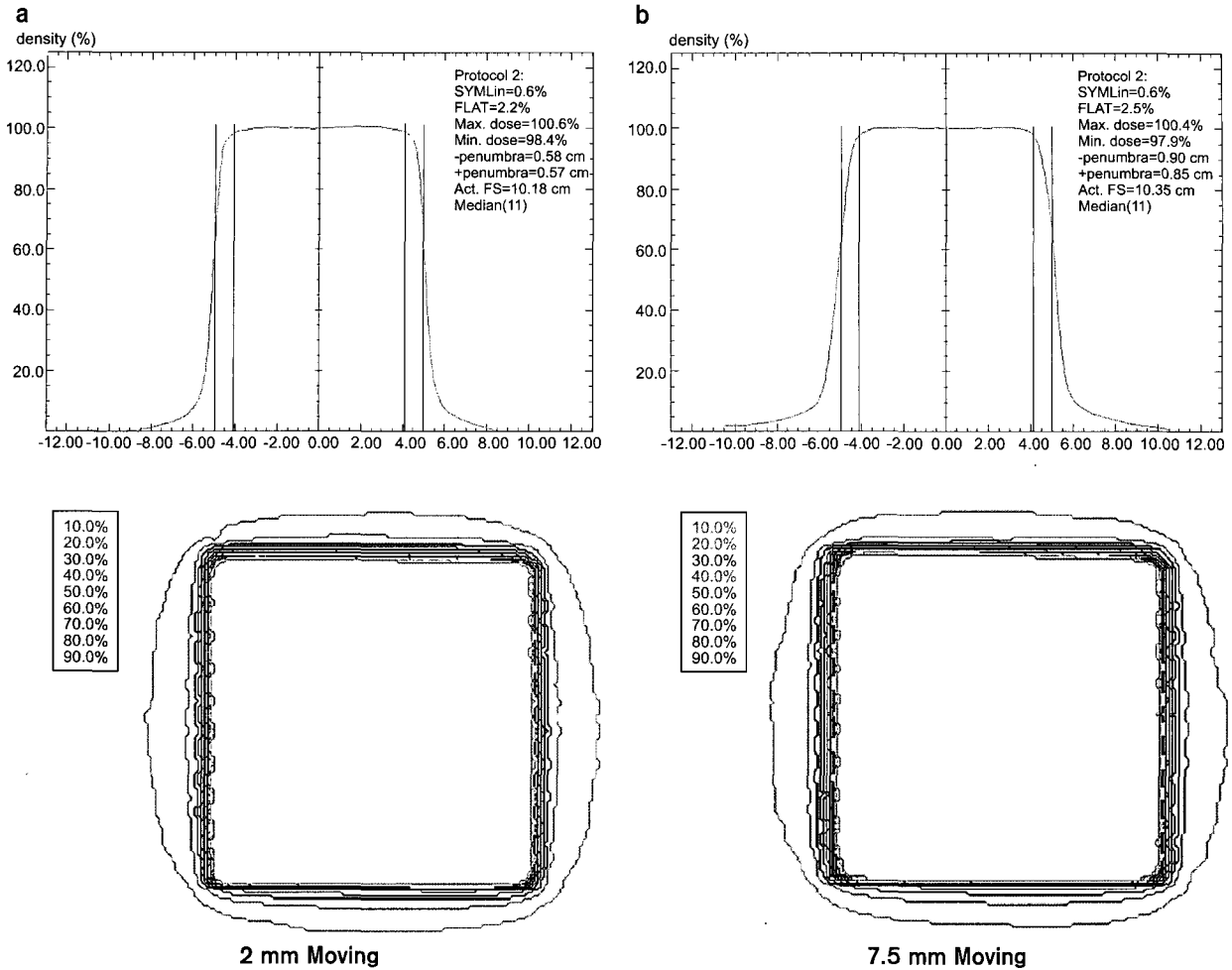


Fig. 6. The comparison of TGT 1sec (2 mm) (a) and TGT 2 sec (15 mm) (b). The dose profiles and isodose curves of the 2 mm and 15 mm moving display symmetry, flatness and penumbra etc. The dose profile display the penumbra and field that are inner line and outer line. The penumbra region (20~90%) are broad.

부적 움직임만을 고려한 것보다 치료영역이 아닌 반응영역 즉, 정상조직 부분에서의 선량분포가 적게 분포하는 것을 알 수 있었다. 비록 TGT를 설정해서 내부의 움직임을 고려해서 방사선을 조사했을 때, 많은 시간이 걸리고 실제 TGT를 설정해서 방사선 치료를 할 경우에 긴 치료시간으로 인한 환자의 자세의 정확도가 떨어지는 단점이 나타날 수 있다. 그러나 조금 더 빠른 치료를 위해서 1) 선량률의 증가, 2) 환자가 안정된 자세, 3) 각 환자의 정확한 내부, 외부 움직임을 획득, 프로그램화해서 치료 장비에 적용한 후 사용하면 좀 더 빠른 치료를 할 수 있으리라 생각된다.

본 연구는 장기의 움직임을 수학적 모델 방법을 적용해서, 환자 호흡에 의한 간의 움직임을 시간의 변위에 따라

간의 위치를 계산하였고, 이 값을 구동팬텀 시스템에 입력해서 움직임에 따른 선량분포를 비교하였다. 그런데 이 실험에서 구동팬텀의 움직임은 수학적 근거를 둔 1차원적인 움직임을 표현되었다. 실제 인체의 움직이는 장기는 3차원적으로 움직이고 환자에 따라 호흡주기가 다르므로, 임상적용 시에는 환자의 내부 움직임을 알기 위해 기준표지를 장기에 삽입 후 움직이는 위치를 파악하는 투시촬영과 외부 움직임을 획득하는 RPM, strain gauge 그리고 spirometer 같은 센서 시스템을 이용하여, 내·외부 움직임을 서로 비교 분석해서 각각 환자의 두 움직임을 분석해야 한다. 그리고 각 환자의 데이터를 방사선 치료 시에 적용시켜 좀 더 정확한 치료를 수행해야 하며, 3차원적으로 움직이는 내부 장기의 정확한 선량검증을 위해 3차원 구동 팬텀 시

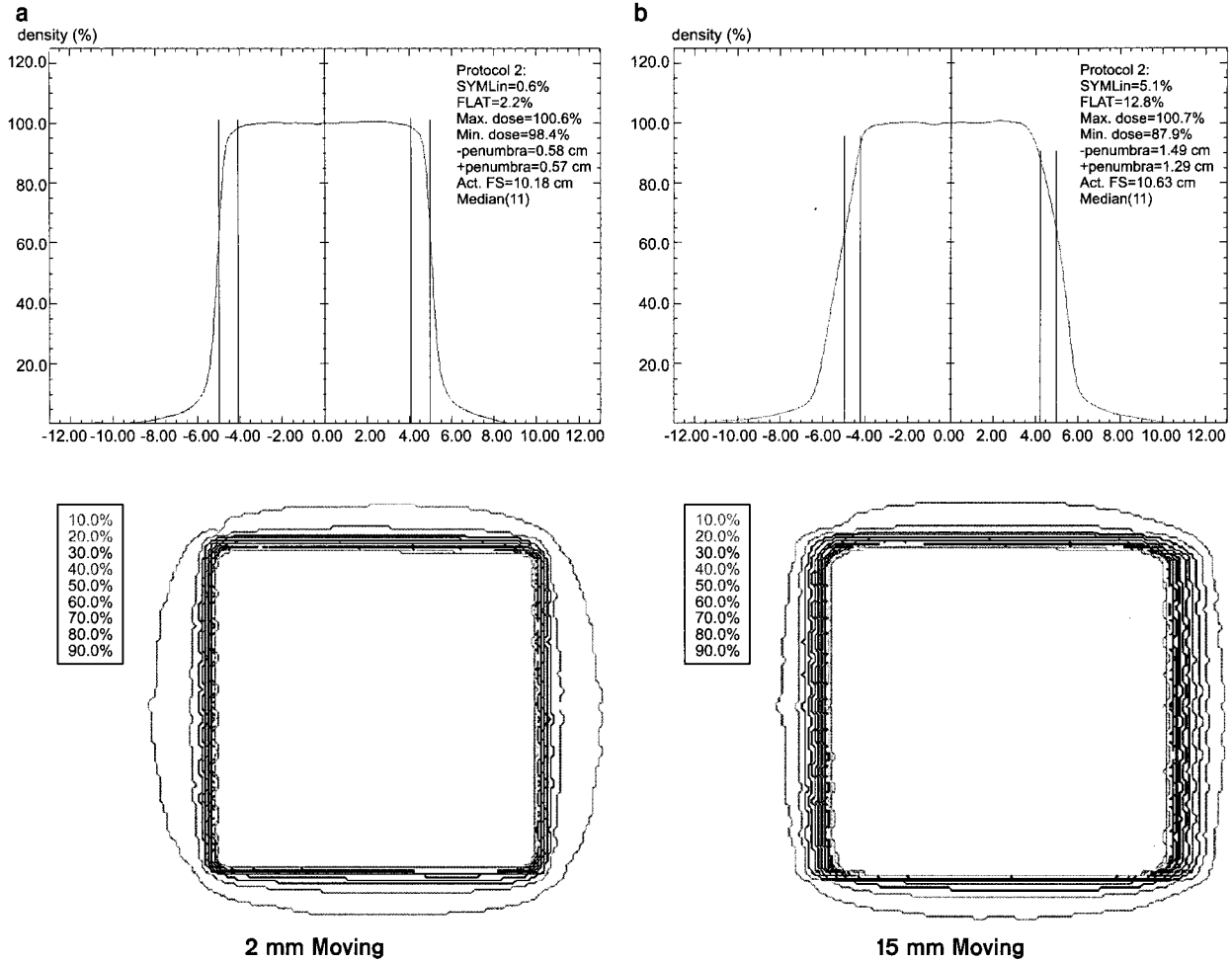


Fig. 7. The comparison of TGT 1sec (2 mm) (a) and TGT1. 4 sec (7.5 mm) (b). The dose profiles and isodose curves of the 2 mm and 7.5 mm moving display symmetry, flatness and penumbra etc. The dose profile display the penumbra and field that are inner line and outer line.

스텝과 같은 장비를 적용하여 정확한 정도관리를 실행하여야 한다.

참 고 문 헌

1. ICRU Report 62: Radiological protection in biomedical research. International Commission in Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD (1999)
2. Gierra DP, Chen TY, Kung JH, et al: Quantification of respiration-induced abdominal tumor motion and its impact on imrt dose distributions. Int J Radiat Oncol Biol Phys 58:1584-1595 (2004)
3. 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)
4. Lujan AE, Larsen EW, Balter JM, et al: A method for incorporating organ motion due to breathing into 3D dose calculations. Med Phys 26:715-720 (1999)
5. Vedam SS, Keall PJ, Kini VR, et al: Determining parameters for respiration-gated radiotherapy. Med Phys 28:2139-2146 (2001)
6. Mageras GS, Yorke E, Rosenzweig K, et al: Fluoroscopic evaluation of diaphragmatic motion reduction with a respiratory gated radiotherapy system. Journal of applied clinical medical physics 2:191-200 (2001)
7. Kubo HD, Hill BC: Respiration gated radiotherapy treatment: a technical study. Phys Med Biol 41:83-91 (1996)
8. Jeremy DP, Katharina E, Tirona R, Patrick CF, Pegnol J: Correlation of lung tumor motion with external surrogate indicators of respiration. Int J Radiat Oncol Biol Phys 60:1298-1306 (2004)
9. Kearvell R, Ebert MA: External respiratory motion for abdominal radiotherapy patients: implications for patient alignment. Medical Dosimetry 28:217-222 (2003)
10. 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)

11. Balter JM, Ten Haken RK, Lawrence TS, et al: Uncer-

tainties in CT-based radiation therapy treatment planning associated with patient breathing. Int J Radiat Oncol Biol Phys 36:167-174 (1996)

An Effect of Time Gating Threshold (TGT) on the Delivered Dose at Internal Organ with Movement due to Respiration

Yon Lae Kim*[†], Jin Bum Chung*, Won Kyun Chung[†], Semie Hong[†], Tae Suk Suh*

*Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, The Catholic University of Korea,

[†]Department of Radiation Sciences, Seoul Health College, [‡]Department of Radiation Oncology, Konkuk University College of Medicine

In this study, we investigated the effect of time gating threshold on the delivered dose at a organ with internal motion by respiration. Generally, the internal organs have minimum motion at exhalation during normal breathing. Therefore to compare the dose distribution time gating threshold, in this paper, was determined as the moving region of target during 1 sec at the initial position of exhalation. The irradiated fields were then delivered under three conditions; 1) non-moving target 2) existence of the moving target in the region of threshold (1sec), 3) existence of the moving target region out of threshold (1.4 sec, 2 sec). And each of conditions was described by the moving phantom system. It was compared with the dose distributions of three conditions using film dosimetry. Although the treatment time increased when the dose distributions was obtained by the internal motion to consider the TGT, it could be obtained more exact dose distribution than in the treatment field that didn't consider the internal motion. And it could be reduced the unnecessary dose at the penumbra region. When we set up 1.4 sec of threshold, to reduce the treatment time, it could not be obtained less effective dose distribution than 1 sec of threshold. Namely, although the treatment time reduce, the much dose was distributed out of the treatment region. Actually when it is treated the moving organ, it would rather measure internal motion and external motion of the moving organ than mathematical method. If it could be analyzed the correlation of the internal and external motion, the treatment scores would be improved.

Key Words : Internal organ motion, Time gating threshold (TGT), Respiration