

## 호흡에 의한 내부 움직임의 영향이 있는 간에서의 실험적 선량 측정

\*가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, †서울보건대학 방사선과

정진범\* · 김연래\* · 정원균<sup>†</sup> · 서태석\*

우리의 연구는 호흡에 의해 움직임의 영향을 받는 장기 및 종양에 대해서 조사된 선량분포를 측정하는 것이다. 이 연구를 수행하기 위해, 사전연구로 이전에 발표된 논문을 토대로 호흡에 의해 장기 및 종양의 움직임 변위를 조사하였다. 그리고 조사된 데이터를 활용하여 호흡에 따른 움직임을 구동 시스템을 적용하여 구현하였다. 내부 움직임에 의한 선량분포의 변화를 측정하기 위해서 이 구동 팬텀 시스템을 사용하였다. 이 결과로부터 호흡에 환자의 조사되는 선량분포의 부정확 정도를 평가할 수 있었다.

중심단어: 호흡, 내부 장기 움직임, 구동 팬텀 시스템

## 서 론

3 차원 입체조형 방사선 치료(3D-CRT)와 세기변조방사선치료(IMRT) 기술은 종양의 정확한 위치를 필요로 한다. 하지만 호흡에 의한 내부 장기 움직임과 치료 시 발생하는 환자의 움직임 때문에 발생하는 setup 오차에 의해 정확한 방사선치료가 수행되기는 힘든 실정이다. 하지만, 이러한 환자의 setup 오차 경우는 portal 영상과 alignment 툴을 이용하여 정확한 환자의 치료위치 결정하고 또한 고정 body frame을 사용하여 환자의 움직임을 최소화함으로써 감소 할 수 있다. 그러나 환자의 흉부와 복부부위에서는, 호흡에 의한 내부 장기 움직임(intra-treatment organ motion)이 발생하여 정확한 방사선치료가 어렵다. 일반적으로 이러한 호흡에 의한 환자의 내부적 움직임 변위는 fluoroscopy, CT, 초음파를 이용한 연구를 통해 획득한 영상 데이터로 측정한다. 이러한 연구 수행에 의해, 정상적인 호흡 시 내부적 움직임은 보통 10-30 mm 정도 나타난다고 보고 되고 있다. 또한 이러한 내부적 장기 움직임 변위를 구체화하기 위해서, 현재에도 많은 연구가 진행 중에 있다.<sup>1,3</sup> 특히, 호흡에 의해 움직임 영향을 많이 받는 간에 대한 연구가 많이 수행 되었다. 이러한 예로, Davies<sup>4</sup> 등은 간의 움직임이 횡격막의 움직임과 밀접한 관련이 있다는 것을 보고 했으며 Balter<sup>2</sup> 등은 fluoroscopy로 호흡에 의한 횡격막의 움직임은 시간에 따라 정확한 대칭 형태는 아니지만 일반적인 주기를 갖고 대칭에 비슷한 형태를 나타내고 있다는 것을 증명하였다. 그리고 환자 내부의 횡격막 움직임과 간에서의 종양 움직임은 서로 상관성에 있게 움직인다는 결과를 보고하였다. 더나가 Lujan<sup>1</sup> 등은 호흡에 의해 내부적 움직임을 갖는 장기에서 3차원적 선량을 계산하기 위해 내부 장기의 움직임에 관한 수학적 모델 방법을 개발하였다. 이 모델을 이용하여, 환자의 한 호흡주기에서 호흡시간 변위에 따라 장기 존재하는 위치를 계산하고 그 위치가 한 호흡주기에서 존재할 확률을 계산하였다. 그리고 이 위치의 확률과 장기가 그 위치에서 받게 되는 선량의 가중치를 곱하여 각 장기 위치에 대해 조사되는 선량 값을 계산하였다.

본 연구에서는 이전 연구에서 Lujan 등에 의해 수행된 선량계산의 절차 보다 간소화 하여 환자의 간 부위에 조사되는 선량을 평가하기 위해서, 시간 변위에 따라 내부 장기 움직임의 위치를 나타내는 수학적 모델 방법과 시간에 따른 exhale/inhale의 호흡 위치에서 횡격막의 위치를 나타낸 fluoroscopy 데이터를 분석하였다. 여기서 획득한 시간변화 따른 장기의 위치를 x, y, z축과 회전 구동이 가능한 구동 팬텀 시스템의 입력값(input)으로 적용하여 환자의 간 내부 움직임과 동일하게 움직이도록 구현하였다. 그러므로 호흡에 따른 내부적 움직임을 고려한 간부위에서의 선량측정 실험을 수행하여 장기의 내부적 움직임을 고려한 상태와 어떠한 움직임도 고려되지 않은 상태에서 팬텀에 조사되는 선량을 비교 평가함으로써 호흡에 의한 내부적 움직임이 장기에 조사되는 선량에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다.<sup>1,2,6</sup>

재료 및 방법

1. 간 움직임 구현에 대한 수학적 모델 적용

환자의 호흡에 따라 폐, 간 같은 내부의 장기들은 움직임이 있다. 그러므로 이러한 움직임에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구에서, 우리는 Balter 등에 의한 시간에 따른 exhale와 inhale의 위치를 나타낸 fluoroscopy data(Fig. 1)와 Lujan 등에 보고된 내부 장기 움직임을 나타낸 수학적 모델 방법을 적용하여 내부 장기에 조사되는 선량을 측정한다. 먼저 수학적인 모델 방정식에서 간에 대한 내부적 움직임의 위치를 시간에 따라 결정한다.

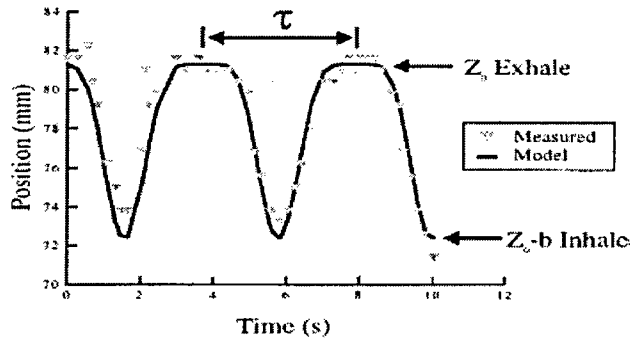


Fig. 1. Position of diaphragm due to breathing seen in fluoroscopic studies(triangles) and mathematical model of data(solid line).

이 수학적 모델 방법의 방정식은 다음과 같다. 이 수학적인 모델은 전체적인 환자의 호흡 주기에서 동일한 주기와 호흡의 크기라고 가정하였다.

$$z(t) = z_0 - b \cos^{2n}(\pi t / \tau - \phi) \tag{1}$$

여기서  $z_0$ 는 exhale에서 장기의 위치,  $b$ 는 한 호흡주기에서 변하는 장기 총 위치변위,  $z_0 - b$ 는 inhale에서 장기의 위치이다.  $\tau$ 는 한 호흡주기 동안 소요되는 시간,  $n$ 은 수학적 모델의 일반적인 모양(steeptness and flatness)을 결정하는 변수들이다. 실험을 수행 위해서, 우리는 한 호흡주기 시간( $\tau$ ) 4 s, 호흡에 따른 변위( $b$ ) 15 mm,  $n$ 의 값은 3으로 설정하여 사용했다. 여기서 설정된 값은 Lujan 등의 연구에서 보고된 연구결과를 바탕으로 설정된 것이다.

2. 구동 팬텀 시스템을 이용한 간 움직임 구현과정

흔히, 간의 움직임은 보통 superior-inferior 방향으로 움직임을 보인다고 S. C. Davies 등과 H. W. Korin 등에 보고 되었다.<sup>4,5</sup> 그리고 이러한 개념을 가지고 호흡에 의한 장기 움직임에 대한 수학적 모델 방정식을 Lujan 등에 개발되었다. 우리는 이 수학적 모델 방정식(1)을 이용하여 일정한 시간 간격에 따라 간의 움직임 위치를 나타내는  $z(t)$  값을 계산한다. 이  $z(t)$  값을 시간함수와 함께 구동 팬텀 시스템에서 구동 컨트롤 시스템의 입력문으로 하여 일정한 호흡에 따른 환자 내부에서의 간 움직임과 동일하게 구현하도록 한다.

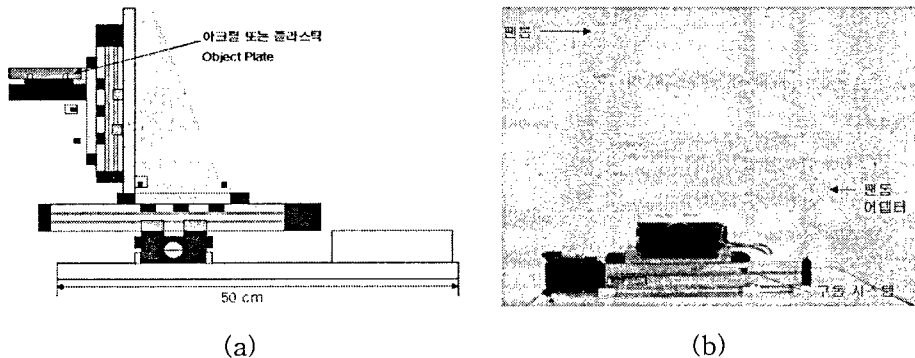


Fig. 2. Moving phantom system (a) Primarily phantom, (b) The modified moving phantom for dosimetry

본 실험을 위해서, 구동 팬텀 시스템(Paker deal Inc. USA)을 사용 하였다. 이 시스템은 구동 시스템, 구동 컨트롤 시스템, 장기를 묘사를 하고 선량을 측정할 수 있는 팬텀 시스템과 그리고 팬텀을 지지대에 고정시켜줄 어댑터 시스템, 네 가지로 구성되어 각각의 4개 스텝 모터를 이용하여 각각 모터의 회전에 따라 x, y, z축에서 각각 다른 변위로 움직일 수 있게 제작된 것이지만 본 연구를 위해서는 x, y축 구동만 가능하게 변형시켜 사용하였다(Fig. 2). 또한 이 시스템은 팬텀을 올려놓는 지지대를 회전할 수 있으므로 어떠한 움직임 변위도 정교하게 구현이 가능한 구동 시스템이다. 구동 컨트롤 시스템은 컴퓨터와 소프트웨어로 구성되므로 본 연구진이 구현한 자체 프로그램으로 컴퓨터로 통해 움직임 컨트롤이 가능하다.

## 결 과

수학적 모델 방정식(1)을 이용하여 시간에 따라 간의 움직임 위치를 나타내는  $z(t)$  값을 계산하였다. 0.2초의 시간 변위 간격으로 간의 움직임 위치를 계산하여 표 1에 나타내었고 위치에 대한 그래프를 Fig. 3에 나타내었다.

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

Time(s)	Organ position(mm)	Time(s)	Organ 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

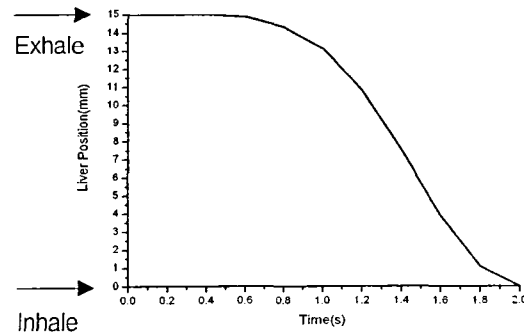


Fig. 3. Organ position as a function of time

표 1의 장기의 위치를 바탕으로, 구동 컨트롤 프로그램을 구현하여 시간에 따른 간의 움직임을 환자 내부에서의 움직임과 동일하게 구동 팬텀 시스템으로 구현할 수 있었다. 그리고 10×10 조사면 10 MV X-ray Linac 2100C/D로 구동 팬텀 시스템에 수직으로 조사하여 얻은 선량분포는 내부의 움직임을 고려하지 않고 측정하였을 때보다 15% 이상의 차이를 보였다.

## 고찰 및 결론

환자의 호흡 때문에 발생하는 내부 장기의 움직임에 의해서 중앙부위뿐만 아니라 정상조직에도 불필요하게 방사선이 조사되는 경우가 발생한다. 그러므로 환자 내부의 장기 움직임은 방사선치료에 있어 아주 중요하게 고려해야 할 사항이다. 일반적으로, 이러한 움직임은 폐, 간, 신장 같은 장기에서 10-30cm 정도 나타난다고 발표된 바가 있다.

본 연구에서, 우리는 이전 연구에서 발표된 내부 장기 움직임을 나타내는 수학적 모델을 계산하여 호흡에 때문에 발생하는 환자 내부의 간 움직임을 시간의 변위에 따라 간의 위치로 계산하였다. 이 계산 값을 구동 팬텀 시스템의 입력 문하여, 호흡에 의한 내부 움직임의 고려 여부에 따라 각각 간에 조사되는 선량에 대해 비교 평가하였고 Lujan 등의 선량계산 결과 값과 비교하였다. 이 결과로 내부의 움직임에 의해 장기에 조사되는 선량의 부정확도와 움직임이 고려되지 않았을 때와 고려되었을 때 조사되는 선량차이의 정도를 평가하고 분석하였다. 또한 우리는 구동 팬텀 시스템 적용으로, 우리의 선량측정 절차 방법이 Lujan 등의 연구에서 사용한 선량계산 절차보다 복잡하지 않고 편리하며 빠르고 더 정확한 선량을 평가되었다고 사료된다. 하지만 우리의 방법은 정확한 내부 장기의 움직임을 모사할 수 있는 프로그램 구현의 노하우를 필요로 한다. 그래서 우리는 CT, fluoroscopy, 초음파, MR 등 영상진단 장치를 사용하여 내부 장기 움

직임에 대한 정확한 정보를 얻는데 노력할 것이며 또한, 정교한 프로그램 구현을 위해서, 여러 번 반복수행하여 최적화된 프로그램을 구현할 것이다. 이러한 과정을 거치면 내부 장기의 움직임에 대해 정확하게 묘사가 가능할 것이고 정확한 선량 측정 및 평가가 가능할 것이다. 그러므로 이 결과는 폐, 신장 같은 내부적 움직임의 영향을 받는 다른 장기에 대한 선량 측정 평가에 적절하게 사용될 수 있을 것이다.

향후, 우리는 strain gauge, spirometer, thermistor 같은 센서 시스템을 이용하여, 호흡에 의한 환자의 복부나 흉부의 외부적 움직임도 측정하여 호흡에 따라 두 움직임(internal motion와 external motion)의 상관관계를 검토하는 연구를 수행할 것이다. 더나가 적절한 호흡조절 치료기술을 접목시켜 호흡에 따라 많은 움직임 영향을 받는 간, 폐 같은 장기에 대해 선량 검증 연구를 수행할 것이다. 이러한 연구가 진행되면, 이 결과는 여러 가지 호흡조절 방사선치료기술 시스템의 선량 QA(quality assurance)로도 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. A. E. Lujan, E. W. Larsen, J. M. Balter, and R. K. Ten Hen "A method for incorporating organ motion due to breathing into 3D dose calculations," *Med. Phys* Vol. 26(5) 715-720 (1999)
2. J. M. Balter, K. L. Lam, C. J. McGinn, T. S. Lawrence, and R. K. Ten Haken, "Improvement of CT-based treatment planning models of abdominal target using static exhale imaging," *Int. J. Radiat. Oncol., Biol., Phys.* 41, 939-943 (1998)
3. J. M. Balter, R. K. Ten Haken, T. S. Lawrence, L. Lam, and J. M. Robertson, "Uncertainties in CT-based radiation therapy treatment planning associated with patient breathing," *Int. J. Radiat. Oncol., Biol., Phys.* 36, 167-174 (1996)
4. S. C. Davies, A. L. Hill, R. B. Holmes, M. Halliwell, and P. C. Jackson, "Ultrasound quantitation of respiratory organ motion in the upper abdomen," *Br. J. Radiol.* 67, 1096-1102 (1994)
5. H. W. Korin, R. L. Ehman, S. J. Riederer, J. P. Felmlee, and R. C. Grimm, "Respiratory Kinematics of the upper abdominal organs" A quantitative study," *Magn. Reson. Med.* 23, 172-178 (1992)
6. S. B. Jiang, C. Pope, K. M. A. Jarrah, J. H. Kung, T. Bortfeld, and G. T. Y. Chen, "An experimental investigation on intra-fractional organ motion effects in lung IMRT treatment" *Phys. Med. Biol.* 48, 1773-1784 (2003)
7. G. S. Mageras, E. Yorke, K. Rosenzweig, L. Braban, E. Keatley, E. Ford, S. A. Leibel, and C. C. Ling, "Fluoroscopic evaluation of diaphragmatic motion reduction with a respiratory gated radiotherapy system" *Journal of applied clinical medical physics*, 2(4) 191-200 (2001)

## Dose perturbation measurements during the liver treatment with internal organ motion: Mathematical modeling and Experimental simulation

Jin Bum Chung\*, Yon Lae Kim\*, Won Kyun Chung<sup>†</sup>, Tae Suk Suh\*

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

<sup>†</sup>Department of Radiation Sciences, Seoul Heathy College, Sunnam, Korea

Respiratory motion in the thorax and abdomen is an important limiting factor in high-precision radiation therapy. The lung tumor and tumor(pancreas, stomach) in abdomen therefore are internal motion due to breathing. We will perform to measurement of dose distributions for these moving tumors. In preliminary study, we investigated displacement of moving tumor such as liver, lung tumor in abdomen with previously reported papers. With reference data, internal movements of tumor are displayed with phantom and moving control device(MCD), which appear three dimension (3-D) motion such as x, y and z axis. These devices are used to access dose delivered in tumor with and without internal motion. The MCD and phantom were used to evaluate a delivered dose under similar condition, although there are not same internal tumor motion. In future, we will obtain the exact evaluation of dose if improved in programed software of moving control device and measure precise internal motion using image modality such as fluoroscopy, simulator in based on this study.

Key Words: Respiration, Internal Organ Motion, Moving Control Device(MCD)