

## Development of New 4D Phantom Model in Respiratory Gated Volumetric Modulated Arc Therapy for Lung SBRT

KyoungJun Yoon\*, JungWon Kwak\*, ByungChul Cho\*, SiYeol Song\*,  
SangWook Lee\*, SeungDo Ahn\*, SangHee Nam<sup>†</sup>

\*Department of Radiation Oncology, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine,

<sup>†</sup>Department of Biomedical Engineering, Inje University, Kyongnam, Korea

In stereotactic body radiotherapy (SBRT), the accurate location of treatment sites should be guaranteed from the respiratory motions of patients. Lots of studies on this topic have been conducted. In this letter, a new verification method simulating the real respiratory motion of heterogenous treatment regions was proposed to investigate the accuracy of lung SBRT for Volumetric Modulated Arc Therapy. Based on the CT images of lung cancer patients, lung phantoms were fabricated to equip in QUASAR<sup>TM</sup> respiratory moving phantom using 3D printer. The phantom was bisected in order to measure 2D dose distributions by the insertion of EBT3 film. To ensure the dose calculation accuracy in heterogeneous condition, The homogeneous plastic phantom were also utilized. Two dose algorithms; Analytical Anisotropic Algorithm (AAA) and AcurosXB (AXB) were applied in plan dose calculation processes. In order to evaluate the accuracy of treatments under respiratory motion, we analyzed the gamma index between the plan dose and film dose measured under various moving conditions; static and moving target with or without gating. The CT number of GTV region was 78 HU for real patient and 92 HU for the homemade lung phantom. The gamma pass rates with 3%/3 mm criteria between the plan dose calculated by AAA algorithm and the film doses measured in heterogeneous lung phantom under gated and no gated beam delivery with respiratory motion were 88% and 78%. In static case, 95% of gamma pass rate was presented. In the all cases of homogeneous phantom, the gamma pass rates were more than 99%. Applied AcurosXB algorithm, for heterogeneous phantom, more than 98% and for homogeneous phantom, more than 99% of gamma pass rates were achieved. Since the respiratory amplitude was relatively small and the breath pattern had the longer exhale phase than inhale, the gamma pass rates in 3%/3 mm criteria didn't make any significant difference for various motion conditions. In this study, the new phantom model of 4D dose distribution verification using patient-specific lung phantoms moving in real breathing patterns was successfully implemented. It was also evaluated that the model provides the capability to verify dose distributions delivered in the more realistic condition and also the accuracy of dose calculation.

**Key Words:** 4D phantom, 3D print, Lung SBRT, Respiratory Gated VMAT

### 서 론

한번에 10 Gy 이상의 방사선량을 전달하며 5회 이하의

This study was supported by a Development of Technology for Radiation Safety in the National Research Foundation of KOREA (NRF) and MSIP research program (2013M2A2A7043506).

Received 25 April 2014, Revised 23 May 2014, Accepted 29 June 2014

**Correspondence:** JungWon Kwak (jwkwak0301@gmail.com)

Tel: 82-2-3010-5731, Fax: 82-2-3010-6950

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분할치료를 하는 폐암 정위신체 방사선치료에서 호흡에 따른 종양의 움직임이 큰 경우에 치료체적이 커지게 되어 정상조직에 불필요하게 많은 방사선량이 전달되게 되는데 이를 해결하기 위하여 보편적으로 환자의 호흡을 연동한 호흡동조 치료법이 사용되고 있다.<sup>1-4)</sup> 최근에는 세기조절 방사선치료(IMRT)와 함께 부피적조절회전 방사선치료(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)에서도 호흡동조를 이용하여 폐암 정위신체 방사선치료에 적용되기 시작하고 있다.<sup>5)</sup>

폐암 환자에 대한 호흡동조 정위신체방사선치료에서는 다음의 두 가지 요소에 대한 선량적 영향이 치료의 정확성

에 크게 작용하는 것으로 알려져 있다. 첫 번째 요소는 작은 조사야와 폐암 환자의 비균질적인 치료 부위에 의하여 발생하는 전자불균형 상태에서의 선량계산 알고리즘의 정확성이다. 근래에는 Superposition convolution 기반의 Analytical Anisotropic Algorithm (AAA)<sup>6)</sup>과 같은 빔 모델링에 의한 알고리즘이 많이 사용되고 있으며 최근 적용되기 시작하고 있는 Linear Boltzmann transport equation (LBTE) 기반의 분석적 해법에 의한 AcurosXB (AXB)<sup>7,8)</sup>나 통계적인 방법의 Monte Carlo 알고리즘은 보다 나은 선량계산의 정확도를 가지고 있는 것으로 평가되고 있다. 두 번째 요소는 호흡동조 치료방식에 의한 선량전달의 정확성에 대한 영향이다. 현재 환자호흡을 모니터링하면서 일정 호흡 주기에 빔을 조사하는 Gating 방식을 가장 많이 사용되고 있지만 환자의 호흡이 안정된 일정한 주기성을 갖지 못하거나, 내부 장기의 움직임과 호흡이 동조를 이루지 못할 경우 심각한 선량오차가 발생될 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>9,10)</sup>

이에 VMAT를 이용한 호흡동조방식의 SBRT에서 환자에게 조사되는 치료의 정확성을 확인하기 위하여 보다 사실적인 선량분포에 대한 검증이 요구되고 있다. 하지만 대부분의 경우 균질한 매질에서 움직임이 없거나 정형화된 호흡패턴의 조건에서 환자치료에 대한 정확성 검증이 시행되고 있는 실정이다.

따라서 폐암 환자의 비균질 종양부위에 대하여 호흡연동 방사선치료를 수행하기에 앞서 환자 호흡에 의한 치료부위의 움직임과 치료부위의 비균질성이 치료에 미치는 영향에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다. 본 논문에서는 3D 프린터를 이용하여 보다 사실적인 폐암 환자의 종양부위를 모사한 팬텀을 제작하고 환자 호흡에 따른 움직임을 고려한 새로운 4D 팬텀 모델을 개발하여 그 효용성을 평가하고

자 하였다.

## 대상 및 방법

### 1. 4D 팬텀 디자인 및 제작

새로운 4D 팬텀 모델에서는 실제 폐암 환자의 치료과정을 모사하기 위하여 3D 프린터를 이용하여 제작된 폐 팬텀과 환자 호흡에 따른 움직임이 가능한 QUASAR<sup>TM</sup> 호흡동조구조동팬텀이 사용되었다.

Fig. 1a는 실제 환자치료 과정에서 획득된 4차원 컴퓨터 단층촬영영상(Lightspeed RT16, GE healthcare, USA)를 기반으로 치료계획 시스템(Eclipse Ver. 10.0, Varian, USA)프로그램을 사용하여 폐 팬텀을 디자인 하는 것을 보여준다. 환자 CT 영상은 full-exhale 상태에서의 60 phase 영상을 사용하였다.

환자 CT 영상의 window level을 조절하여 GTV 내에 종양이 일치되도록 한 후 그 보이는 영역을 팬텀 구조로 설정하였다. Fig. 1b에서 처럼 QUASAR 호흡동조 구조동팬텀에 장착될 수 있도록 직경 8 cm, 길이 15 cm, 표면 두께 0.2 cm의 원통형 구조로 디자인하였다. 팬텀 중심에 PTV가 위치하도록 하여 종양부위가 중심이 되도록 하였으며 폐 팬텀을 2등분 되도록 하여 그 사이에 EBT3 필름을 삽입함으로 팬텀 단면에서의 이차원 선량분포를 측정할 수 있도록 하였다(Fig. 1c). 이와 같이 디자인된 팬텀의 DICOM파일은 3D-slicer 프로그램을 이용하여 Standard Tessellation Language (STL) 파일로 변환하였고,<sup>11)</sup> Fused Deposition Modeling (FDM) 방식의 3D 프린터(EDISON, Lokit, Seoul, Korea) 장비를 이용하여 폐 팬텀을 제작하였다. 제작에 사용된 소재는 밀도가 1.25 g/cm<sup>3</sup>인 플라스틱 계열의 Polylactic acidide

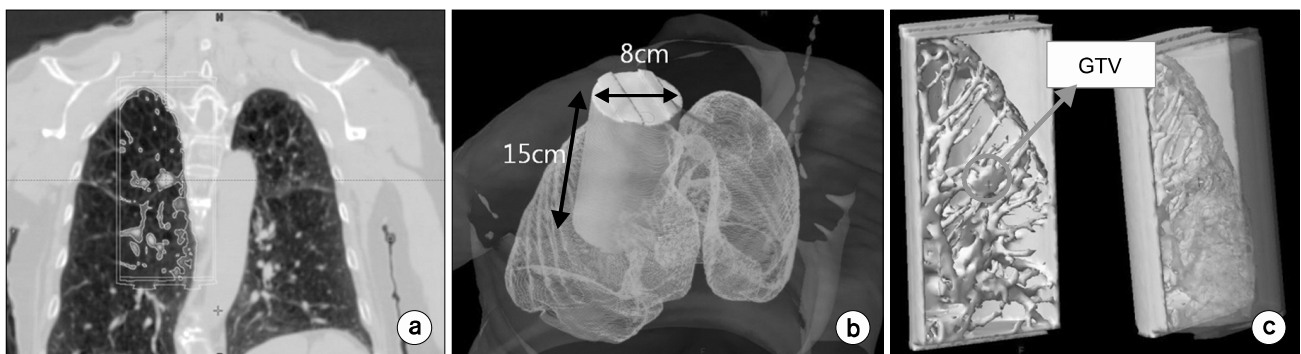


Fig. 1. CT image based 3D Phantom design using the Eclipse RTP system. (a) Frontal image for a lung cancer patient. (b) Rendering image of a lung phantom contour. (c) Dividing into the two equal parts of the phantom.

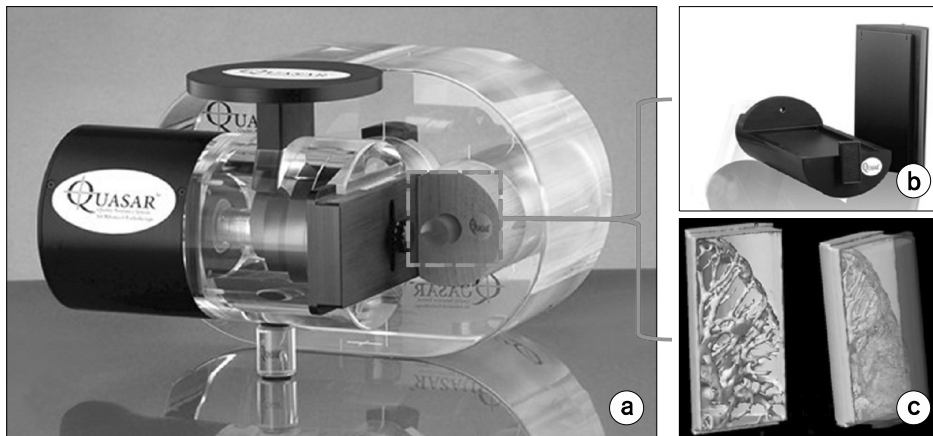
(PLA)를 사용하였다. 폐 팬텀에서 종양부위를 제외한 폐 조직 부분은 단순한 공기가 아닌 2 mm 간격의 격자형태의 구조물로 채워 넣어서 폐와 유사한 밀도가 구현되도록 하였다.

Fig. 2a는 제작된 폐 팬텀이 Quasar 호흡동조동팬텀에 장착되어 4D 팬텀을 구성한 것을 나타내는 모식도 이다. 기존의 균질한 플라스틱 재질의 팬텀(Fig. 2b)과 본 연구에서 제작된 폐 팬텀(Fig. 2c)에 대하여 호흡에 따른 움직임 유무와 게이팅 치료 여부에 따른 여러 빔 조사 조건에서 EBT3 필름을 이용하여 전달된 선량분포를 측정하였다.

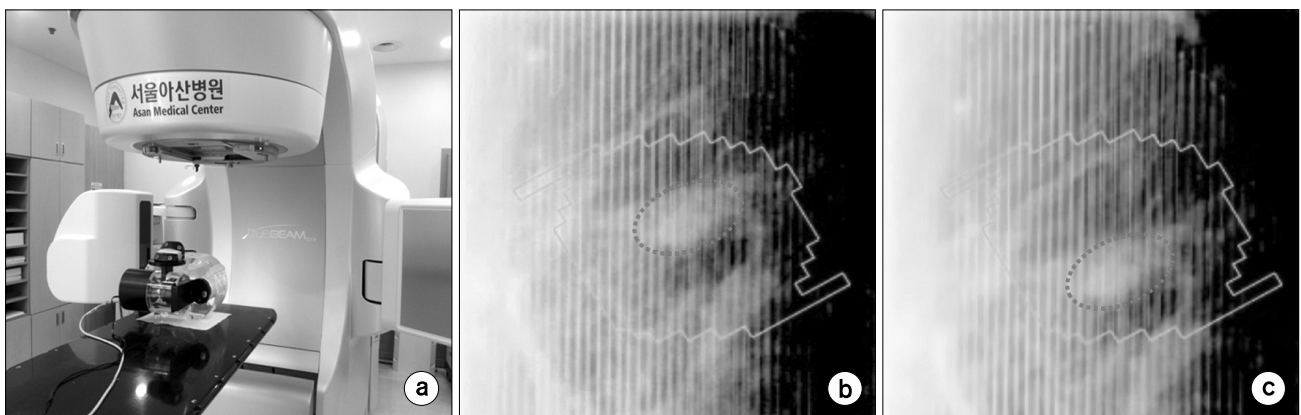
환자 호흡에 따른 종양의 움직임은 3차원으로 움직일 수 있지만, 본 연구에서는 서로게이트의 1차원 움직임만으로 이를 충분히 대변하는 것으로 간주하였다.<sup>12)</sup>

## 2. 치료 계획

1) 폐 팬텀의 선량계산: 호흡 주기에 따른 종양의 위치변화를 확인하기 위해 제작된 4D 팬텀과 환자 호흡을 연동하여 4D CT영상을 획득하였다. 호흡 신호와 연동하기 위해 RPM (Real-time Position Management, Varian, Palo Alto, CA, USA) 시스템을 사용하였고 4DCT 영상은 영상처리용 컴퓨터(Advanced Workstation, GE)에서 10개의 호흡 위상으로 분리하여 각각의 CT 영상으로 재구성하였다. Internal Tumor Volume (ITV)은 호흡 위상 주기 30~70%로 정해진 게이팅 구간의 CT영상들로 재구성된 Maximum Intensity Projection (MIP) 영상을 이용하여 설정 정하였고, 여기에 5 mm 마진을 두어 Planning Target Volume (PTV)을 설정하였다. 방사선 치료기기는 TrueBeamSTX (Varian Medical Systems Inc. Palo Alto, CA, USA)를 사용하였으며 빔 에너지는 6 MV 광



**Fig. 2.** (a) 3D printed lung phantom based new 4D lung phantom with quasar respiratory motion phantom. The insert was selected (b) 3D printed lung phantom or (c) homogeneous phantom.

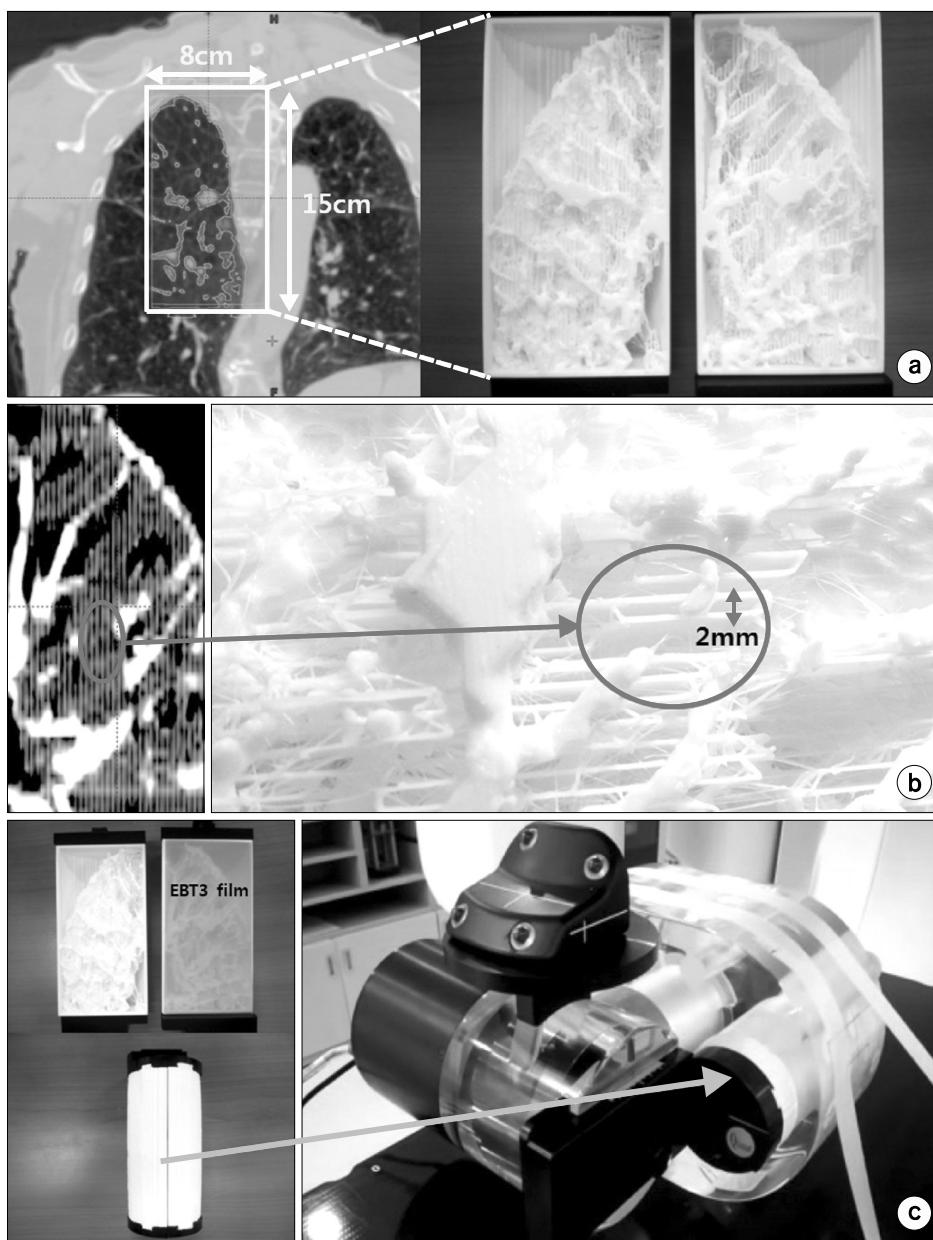


**Fig. 3.** (a) System setup of the 4D lung phantom to simulate the respiratory motion of target in gated VMAT treatment. The fluoroscopy images of the lung phantom captured in (b) exhale and (c) inhale phases.

자선을 이용하여 2 ARC VMAT치료로 처방선량 10 Gy를 조사하였다.

치료계획시스템으로는 Eclipse 프로그램을 사용하였으며, 광자선에 대한 선량계산 알고리즘은 AAA와 AXB를 사용하였다. 이를 통해 기존의 균질한 재질로 구성된 팬텀과 폐암 환자 종양부위의 비균질성을 보다 사실적으로 표현한 폐 팬텀에 대하여 각각에 대한 선량계산 알고리즘을 적용하였을 때 균질성 차이에 따른 선량계산의 정확성에 대하여 확인하고자 하였다.

**2) 호흡동조 VMAT치료:** 두 팬텀 각각에 대해서 호흡유무에 따른 호흡동조 방사선치료와 관련하여 3가지 빔 조사조건에 대한 부피적조절회전 방사선치료계획을 적용하였다. 조사조건으로는 팬텀에 모션없이 exhale 상태를 모사한 경우를 “Static”으로 표기하였고, 호흡모션이 있는 상태에서 호흡동조 방사선치료를 적용한 “Gating with motion” 치료와 호흡동조를 적용하지 않은 “No-gating with motion” 치료로 구분하였다. Fig. 3a에서는 환자의 호흡신호와 연동하여 움직임을 구현하는 4D 팬텀의 셋업을 보여주며 기존 환자



**Fig. 4.** (a) The picture of the homemade 3D printed Lung phantom. (b) 4D lung phantom consists of the Quasar respiratory motion phantom and 3D printed lung phantom. The EBT3 film located inside the lung phantom.

와 동일한 영상유도 치료과정을 수행하였다. Fluoroscopy를 통해서 환자호흡 위상에 따라 60% (Fig. 3b)와 0% (Fig. 3c)에서 PTV 내에 종양의 위치를 확인하였다.

### 3. 분석 및 평가

1) **폐 팬텀의 재현성**: MIM 프로그램(MIMVista Corp, Cleveland, Ohio)을 이용하여 환자 CT와 폐 팬텀 CT의 영상을 정합한 후 폐 팬텀이 잘 구현되었는지 확인하였다. 실제 환자와 제작된 폐 팬텀의 밀도 차이를 상대적으로 비교하기 위해 두 영상에서 각각의 종양부위에 대한 HU 값을 비교하였다. 그리고 팬텀 내에 폐 조직 부분을 구성하는 격자형태의 구조물이 폐 조직의 밀도에 대해서 유사하게 구현되었는지 확인하기 위하여 Area profile에 대한 HU 평균값을 확인하였으며, 폐 팬텀 내 격자형태가 차지하는 영역을 키투어링 한 후 폐 조직(Eclipse default, -721 HU)과 공기(-1000 HU)로 각각 적용하여 선량계산을 수행하여 기존 격자형태 구조물에 대한 선량분포와 비교 분석하였다. 선량 비교는 OmniPro I'mRT (IBA Dosimetry, Germany) 프로그램을 사용하였으며 감마 합격률(3%/3 mm)을 비교 평가 하였다.

2) **선량 분포**: 균질한 팬텀과 폐 팬텀에 삽입된 EBT3 필름을 사용하여 세가지 조사조건에 따른 선량을 측정하였다. 치료계획 시스템에서 계산된 선량은 팬텀 4DCT 영상의 60 phase 영상을 이용하였으며 필름에서 측정된 선량과 비교 분석하였다. 치료계획 선량과 측정된 선량은 Film QA Pro 2012 (Ashland Inc, Bridgewater, NJ) 프로그램을 이용하여 감마합격률을 확인하였으며 감마지표(Gamma Index)는 3%/3 mm와 3%/1 mm를 적용하였다.

## 결 과

### 1. 4D 팬텀 제작

Fig. 4은 최종 제작된 4D 팬텀을 나타내고 있다. Fig. 4a는 폐암 환자의 종양부위를 모사하여 3D 프린터로 제작한 폐 팬텀이며, Fig. 4b는 팬텀 내 폐 조직을 구현하기 위하여 적용된 격자형태의 구조물을 나타낸다. Fig. 4c는 선량측정을 위해 폐 팬텀사이에 EBT3 필름을 삽입한 후 이를 다시 환자의 호흡과 연동하여 움직일 수 있도록 QUASAR™ 호흡 동조 구동 팬텀에 장착한 것을 나타낸다.

### 2. 팬텀의 4D CT 영상 획득 및 평가

Fig. 5은 4D 팬텀 모델에 대하여 환자호흡을 연동하여 획득한 4D CT영상을 나타낸다. 환자의 호흡패턴과 동일하게 호흡을 가장 내쉬었을 때는 60% 영상(Top phase)으로 나타났고, 전체 호흡 구간에서 7.2 mm, Gating motion 구간(30%~70% phase)에서는 2.6 mm의 움직임을 나타내었다.

Fig. 6에서는 환자의 CT 영상과 팬텀의 CT 영상을 비교한 것으로 Fig. 6a는 두 영상을 병합하여 팬텀과 환자의 종양부위를 중심으로 내부 구조를 비교한 것이다. 폐 안의 공기부분과 종양의 위치 및 크기 등이 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6b는 두 영상의 종양부위에 대하여 HU 값을 비교한 것으로 오차값 14 HU (환자 78 HU, 팬텀 92 HU)를 나타내었다. 이는 Tomas (1999)<sup>13)</sup>와 Kilby (2002)<sup>14)</sup> 등의 연구에서 동일한 전자밀도 내에 8% 오차범위는 1% 이하의 선량오차를 나타내는 것으로 보고되고 있기에, 이를 기반으로 팬텀 내 종양부위에서의 밀도에 의한 차이가 작은 것으로 확인할 수 있었다.

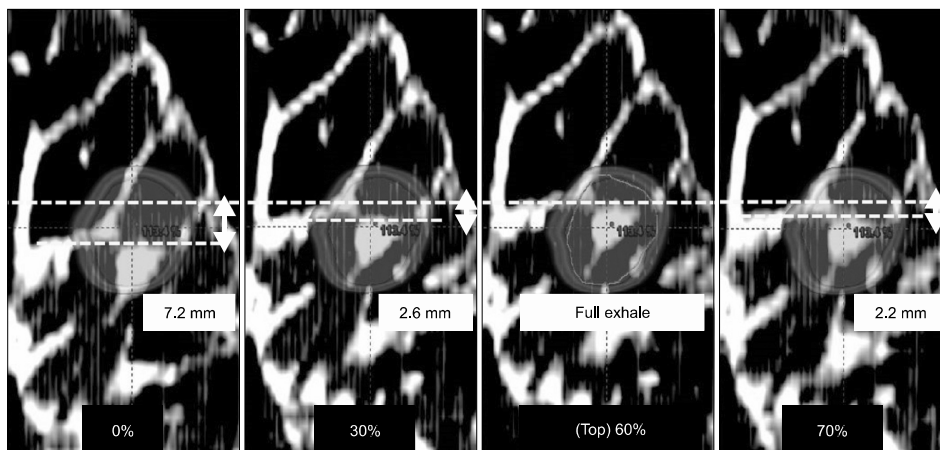
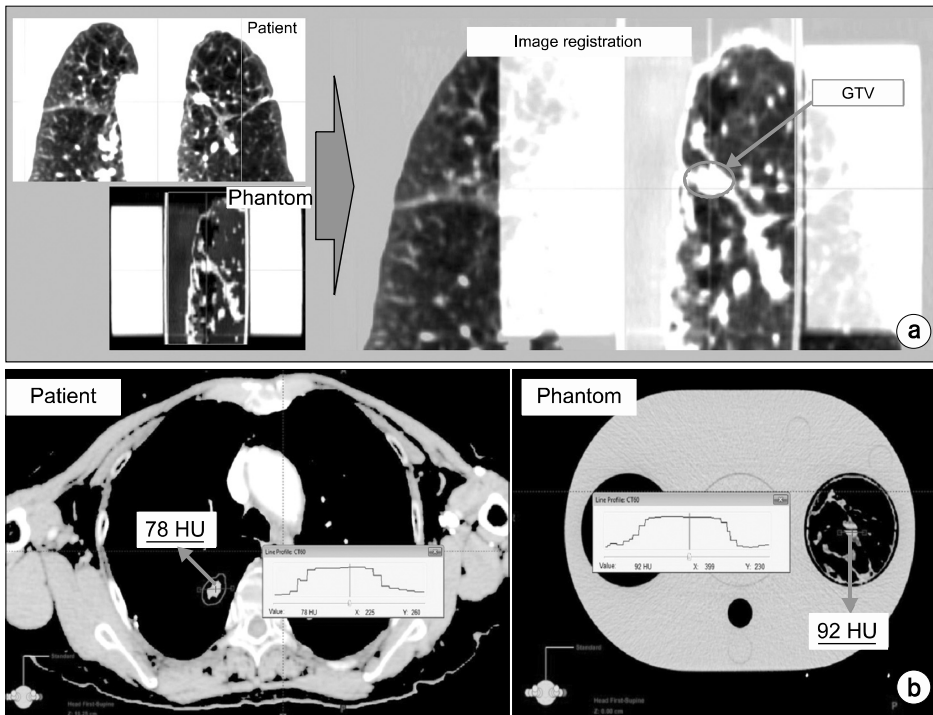
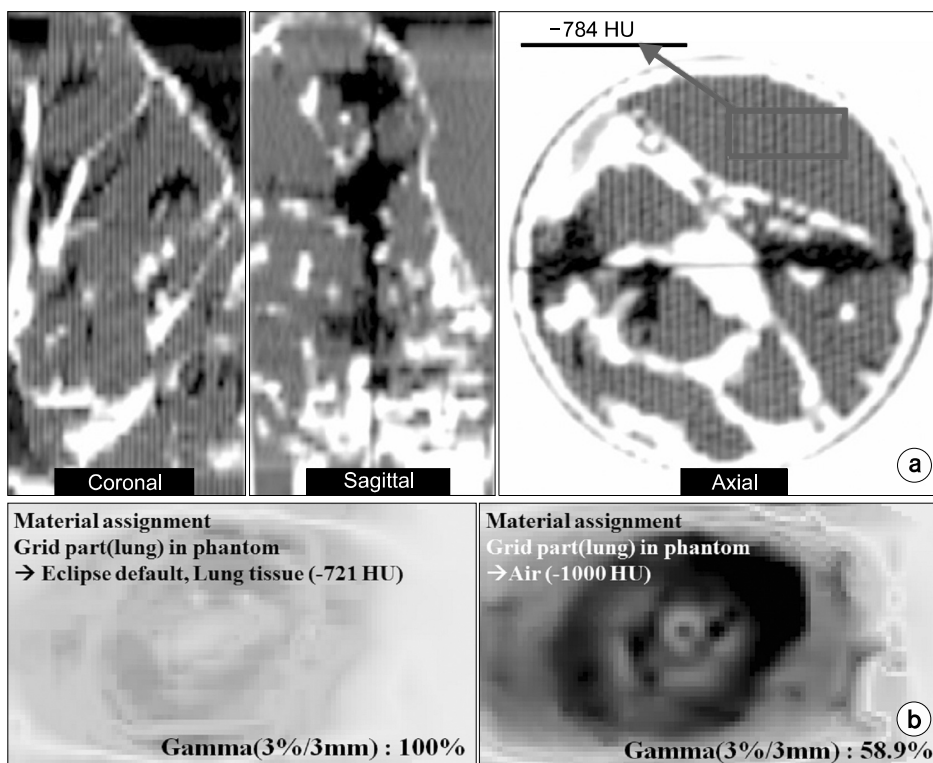


Fig. 5. 4D CT images of the lung phantom reconstructed using phase based sorting. From left to right in row: end inhalation (0%), middle exhalation (30%), end exhalation (60%), and middle inhalation (70%). Full motion was 7.2 mm and Gated motion (30%~70% phase) was 2.6 mm.



**Fig. 6.** (a) Image fusion between patient CT and lung phantom CT. Red Arrows indicate the GTV contour. (b) The CT number of patient and phantom were respectively 78 HU and 92 HU in tumor regions.



**Fig. 7.** (a) The image of the lung phantom was shown the coronal, sagittal and axial. The lung tissue in the phantom was implemented using the form of a lattice structure. The mean value in red area was  $-784$  HU. (b) The material of lung tissue in the phantom was replaced to lung tissue (Eclipse default,  $-725$  HU) and air ( $-1000$  HU). then gamma passing rates (3%/3 mm) were compared between the lung phantom with lattice structure and the phantom with replacement materials. Treatment planning dose applied AXB dose calculation algorithm.

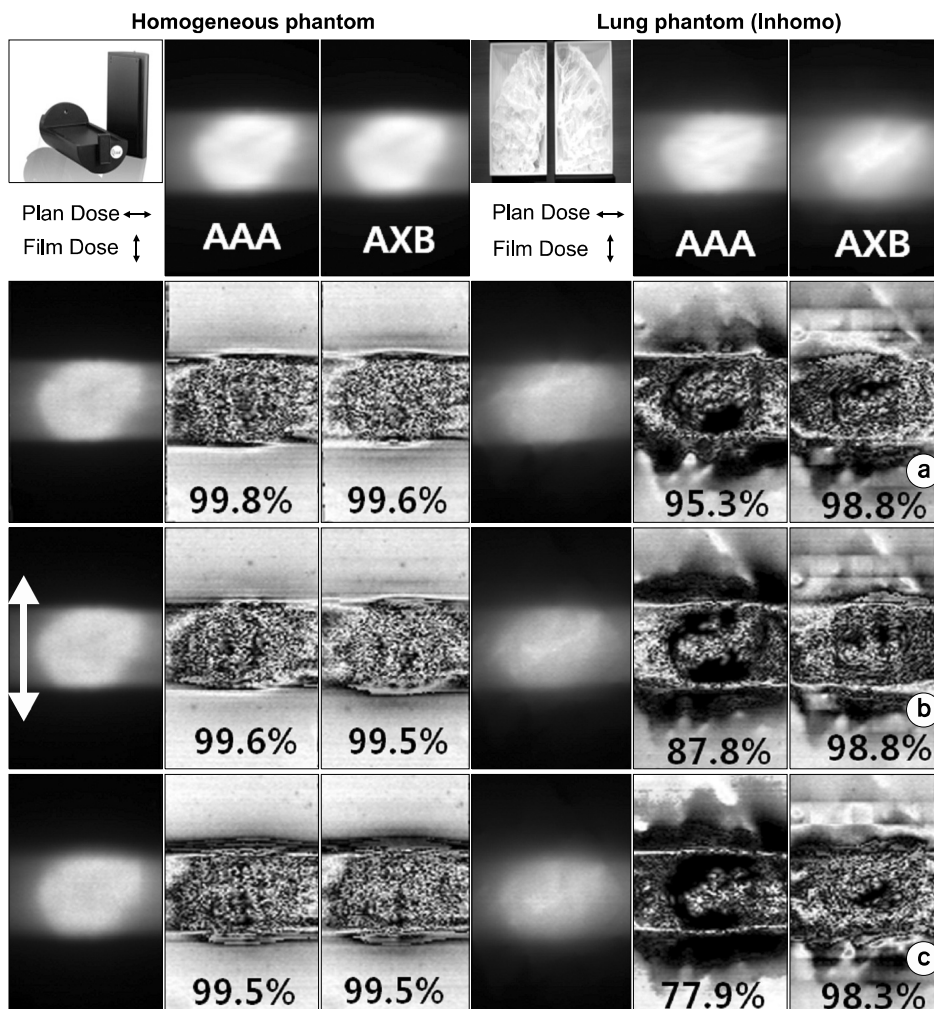
Fig. 7a는 팬텀의 CT 영상에서 폐 팬텀에서의 종양부위를 제외한 폐 부분의 재현성을 확인한 것으로, 격자구조를 이용하여 구성된 폐 조직부분의 Area profile에 대한 HU 평균값은 -784를 나타내었다.

Fig. 7b는 폐 팬텀의 계산된 선량과 팬텀 내 격자형태 영역을 폐 조직(Eclipse default)인 경우와 공기인 경우로 각각 적용하여 감마합격률(3%/3 mm)을 비교하였을 때 100%, 58.9% 값을 나타내었다. 따라서 격자 구조로 적층된 폐 팬텀의 폐 조직부분이 실제 폐 조직과 유사하게 잘 구현되었음을 확인할 수 있었다.

### 3. 감마지표를 이용한 선량계산 및 평가

Fig. 8에서는 균질한 팬텀과 비균질성이 구현된 폐 팬텀에서 AAA와 AXB 두가지 알고리즘에 의하여 계산된 2차원 선량분포 맵과 3가지 치료조건에 따른 Film dosimetry

결과에 대한 선량 분포 맵을 보여주고 있으며, 3%/3 mm에서의 감마합격률을 각각 보여주고 있다. 균질한 팬텀의 경우 두가지 알고리즘 모두에서 모든 치료모드에 대해 99% 이상의 감마합격률을 나타내었다. 이는 환자 호흡에 따른 Full-motion이 8 mm 정도의 작은 호흡이었고 호흡패턴이 inhale보다는 exhale에서 위상 점유가 많았기 때문에 결과적으로 3%/3 mm 감마 기준에서는 치료부위의 움직임이나 Gating 여부에 의한 차이가 나타나지 않았으며, 적용된 두 알고리즘 사이에서도 큰 차이를 나타나지 않았다. 하지만 환자 폐를 기반으로 제작한 폐 팬텀에서는 적용된 알고리즘에 따라서 감마합격률의 분명한 차이가 발생하였으며, 특히 AAA 알고리즘을 적용할 경우 치료모드에 따른 감마합격률이 각각 95.3%, 87.8%, 77.9%로 균질한 팬텀의 경우와 비교하여 큰 차이를 나타내었다. 이는 폐 팬텀의 비균질 조건에서 AAA 알고리즘에 의한 선량계산의 정확성이



**Fig. 8.** The phantom study were performed using the homogeneous phantom and 3D printed lung phantom. Gamma index map for 3%/3 mm criteria in the coronal plane, it was compared between the plan dose and film measurement under the three experimental conditions of (a) Static, (b) Gating with motion and (c) Not gating with motion. Treatment planning dose applied AAA and AXB dose calculation algorithm. Gating window included 30%~70% phase. Arrows indicate the movement direction.



Table 1. Analysis of the gamma passing rate (3%/3 mm and 3%/1 mm) for the two phantoms with three different respiratory gated VMAT mode. Plan doses were calculated with two dose calculation algorithms: AAA and AcurosXB.

Dose calculation Algorithm	3%/3 mm				3%/1 mm			
	AAA		AcurosXB		AAA		AcurosXB	
Treatment mode	Homo	Inhomo	Homo	Inhomo	Homo	Inhomo	Homo	Inhomo
Static	99.8	95.3	99.6	98.8	90.0	57.5	94.5	82.8
Gating with motion	99.6	87.8	99.5	98.8	90.9	46.8	94.4	78.1
No-gating with motion	99.5	77.9	99.5	98.3	78.8	38.4	82.2	72.2

충분하지 않은 것으로 이해할 수 있었으며, 비균질한 환경에서 보다 정확한 선량계산을 하는 것으로 알려진 AXB 알고리즘을 적용하여 감마값을 비교하였을 경우 모든 치료모드에서 기존 균질한 팬텀의 감마합격률과 근접한 98% 값을 나타냄을 확인 할 수 있었다.

Table 1은 알고리즘에 따른 계산된 선량과 Film dosimetry로 측정된 선량에 대해서 3%/3 mm와 3%/1 mm 기준의 감마합격률을 비교한 결과를 보여주고 있다. Fig. 8와 더불어 3%/3 mm 뿐만 아니라 3%/1 mm에서도 AAA 알고리즘을 적용하였을 때 보다 AXB 알고리즘에 의한 선량분포의 감마 합격률이 균질과 비균질 환경에서의 그 차이가 적게 나타남을 확인 할 수 있었다.

### 고찰 및 결론

호흡동조를 이용한 VMAT 치료에 있어서 기존 Rapid arc에 대한 정도관리의 경우, 정지된 균질 팬텀에서 환자 별 정도관리를 실시하여왔다. 그러나 본 연구에서는 폐암 환자의 경우 환자 호흡에 따른 움직임과 치료부위의 비균질성을 반영하여 종양부위를 보다 사실적으로 구현한 폐 팬텀을 적용함으로 새로운 정도관리를 위한 모델을 제시하였다. 이를 위하여 실제 치료에서 획득된 환자의 CT 영상을 이용하여 3D 프린트 기법으로 환자의 종양부위를 모사한 폐 팬텀을 제작하였으며, 환자 호흡에 따라 움직임을 구현할 수 있도록 Quasar 호흡 동조 팬텀과 연동하여 구동하였다. 현재 폐암 환자의 방사선치료에서 3D 프린터를 이용하여 종양 부위를 보다 사실적으로 모사한 팬텀을 제작한 후 이를 호흡과 연동하여 2차원 선량분포를 분석한 연구 사례는 보고된 바가 없으며, 본 연구를 통하여 제작된 폐 팬텀과 기존의 정도관리를 위한 균질한 팬텀에 의한 전달선량을 비교하여 선량계산 알고리즘에 따른 선량 정확성을 평가할 수가 있었다.

환자 호흡에 따른 2차원 선량분포 결과를 보면, 균질한 팬텀을 사용하였을 때 호흡동조 치료의 유무와 상관없이 감마합격률이 모두 99% 이상으로 나타나는 것을 Fig. 8에서 확인하였다.

이는 선택한 환자의 호흡패턴에 따른 움직임이 Gating-motion 3 mm, Full-motion 8 mm 정도로 작고 호흡패턴 자체가 Exhale부분에 점유하는 위상구간이 많았기 때문에 호흡에 의한 3%/3 mm에서의 합격률에 영향이 없었던 것으로 사료되었다. 결과적으로 다양하고 불규칙적인 호흡 패턴이나 큰 움직임을 보이는 환자의 호흡일 경우 게이팅 유무에 따른 결과 값의 차이가 크게 나타날 것으로 예상이 되며, 본 연구에서 제시된 환자의 경우 움직임에 대한 선량의 차이가 없다는 점이 이 환자의 특이사항으로 확인 되었다.

알고리즘에 따른 선량계산에 있어서도 기존의 균질한 팬텀에서는 모든 움직임 조건에서 AAA와 AXB 모두 감마합격률(3%/3 mm) 99% 이상으로 큰 차이가 없었다. 이를 기준으로 비균질성이 구현된 폐 팬텀을 이용하여 선량계산을 하였을 때 호흡에 의한 영향이 거의 없는 이 환자의 특이사항을 고려한다면, 치료모드에 따라서 균질한 팬텀과 유사한 감마합격률 결과를 예상할 수 있으나 결과적으로 두 알고리즘 사이에 결과가 다르게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 선택된 폐암 환자의 치료계획에 따른 선량계산에서 AAA보다는 AXB 알고리즘을 적용할 때에 균질한 팬텀을 사용한 결과와 유사한 합격률을 확인할 수 있었다. 따라서 이 환자에서의 폐 팬텀이 가지는 비균질성의 경우 알고리즘에 따라 선량계산에 미치는 영향이 크음을 확인 할 수 있었으며 AXB 알고리즘을 적용하였을 때 SBRT 치료에서의 감마합격률이 98% 이상임을 확인 할 수 있었다. 균질한 팬텀에 대한 두가지 알고리즘을 적용한 선량계산 결과 및 비균질 팬텀의 AXB 알고리즘을 적용한 선량계산 결과와는 달리, 비균질 팬텀에 AAA 알고리즘을 적용할 때에는 3가지 치료모드(static, gating with move, nogating with move)



에 대하여 각각 95.3%, 87.8%, 77.9%의 합격률 차이를 나타내었다. 이는 환자 호흡 특성과 함께 선량계산 알고리즘에 따른 영향으로 예상할 수 있으나 이를 정확히 확인하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

이러한 결과를 기반으로 다양한 호흡유형을 가지는 환자의 폐 팬텀 수를 더욱 늘리고 호흡에 따른 종양 및 주변 장기의 움직임 등을 보다 사실적으로 구현할 수 있는 추가적인 연구를 진행한다면 호흡동조 폐암 방사선 치료에서 보다 임상적 상황이 반영된 치료 정확성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

1. McNair HA, et al: Active Breathing Control (ABC) in Radical Radiotherapy of Non-small Cell Lung Cancer (NSCLC). Clin Oncol (R Coll Radiol) 19:S39 (2007)
2. Ko YE, et al: Effectiveness of breath hold with a ABC for SRS of lung cancer. J Lung Cancer 4:42-47 (2005)
3. D'Souza WD, et al: The use of gated and 4D CT imaging in planning for stereotactic body radiation therapy. Med Dosim 32:92-101 (2007)
4. Wurm RE, et al: Image guided respiratory gated hypofractionated stereotactic body radiation therapy (H-SBRT) for liver and lung tumors: initial experience. Acta Oncol 45:881-889 (2006)
5. Otto K, et al: Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. Med Phys 35(1):310-317 (2008)
6. Ulmer W, et al: A 3D photon superposition/convolution algorithm and its foundation on results of Monte Carlo calculations. Phys Med Biol 50(8):1767-1790 (2005)
7. Gifford KA, et al: Comparison of a finite-element multigroup discrete-ordinates code with Monte Carlo for radiotherapy calculations. Phys Med Biol 51(9):2253 (2006)
8. Vassiliev ON, et al: Validation of a new grid-based Boltzmann equation solver for dose calculation in radiotherapy with photon beams. Phys Med Biol 55(3):581-598 (2010)
9. Keall P, et al: The management of respiratory motion in radiation oncology report of AAPM Task Group 76. Med Phys 33:3874-3900 (2006)
10. Li XA, et al: Point/counterpoint. Respiratory gating for radiation therapy is not ready for prime time. Med Phys 34:867-870 (2007)
11. Andriy Fedorov, et al: 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. Magnetic Resonance Imaging 30:1323-1341 (2012)
12. A. Sam Beddar, et al: Correlation between internal fiducial tumor motion and external marker motion for liver tumors imaged with 4D-CT. International Journal of Radiation Oncology and Biology and Physics 67:630-638 (2008)
13. Thomas SJ, et al: Relative electron density calibration of CT scanners for radiotherapy treatment planning. Br J Radiol 72:781-786 (1999)
14. Kilby W, Sage J, Rabett V, et al: Tolerance levels for quality assurance of electron density values generated from CT in radiotherapy treatment planning. Phys Med Biol 47:1485-1492 (2002)

## 폐암 SBRT에서 호흡동조 VMAT의 정확성 분석을 위한 새로운 4D 팬텀 모델 개발

\*울산대학교 의과대학 서울아산병원 방사선종양학교실, <sup>†</sup>인제대학교 의생명공학대학 의공학과의

윤경준\* · 박정원\* · 조병철\* · 송시열\* · 이상욱\* · 안승도\* · 남상희<sup>†</sup>

정위신체방사선치료(SBRT)에서 환자의 호흡에 대한 정확한 치료위치의 확보는 필수적으로 고려되어야 하며 그 정확성에 관련하여 많은 연구들이 진행되어왔다. 본 연구에서는 실제 호흡에 의한 움직임과 실제 환자 폐의 형태를 고려한 팬텀실험으로 실제 치료에서 일어나는 임상적 상황을 모사함으로 호흡 동조 부피적조절회전 방사선치료(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 기법을 이용한 폐부 SBRT의 정확성을 분석하는 방법을 제시하고자 하였다. SBRT를 받은 폐암 환자의 CT 영상을 기반으로 3D 프린터를 이용하여 치료부위와 유사하게 폐 팬텀을 제작하였고 환자 호흡과 동일하게 움직임을 재현할 수 있도록 QUASAR™ 호흡 동조 구동 팬텀(Modus Medical Devices, London, Canada)에 장착하여 호흡동조 VMAT에서의 2차원 선량 분포를 평가할 수 있는 시스템을 구축하였다. 폐 팬텀은 종양부위를 중심으로 2등분하여 EBT3 필름을 삽입하고 선량분포를 측정할 수 있도록 제작되었다. 비균질 조건에서의 선량계산의 정확성을 확인하기 위하여 균질한 플라스틱 팬텀과 제작된 비균질 폐 팬텀에서 Analytical Anisotropic Algorithm (AAA)와 AcurosXB (AXB) 두가지 알고리즘으로 선량계산을 하여 비교, 분석하였다. 움직임에 대한 치료의 정확성을 평가하기 위하여 호흡동조와 비 호흡동조의 경우, 그리고 움직임이 없는 조건에서 선량분포를 취득하여 치료계획 선량에 대한 감마지표를 분석하였다. 치료부위 GTV에서의 CT number는 실제 환자의 경우 78 HU를 나타내었고 모사된 폐 팬텀의 경우 92 HU를 나타내었다. 팬텀 내 폐 조직부분은 3D프린터로 적층하는 과정에서 격자구조의 형태를 이용하여 구현하였다. 측정된 필름 선량은 AAA 알고리즘을 이용한 치료계획 선량에 대하여 움직이는 팬텀에서 호흡동조의 유무에 따라 3%/3 mm 감마지표 조건하에서 각각 88%와 78%의 감마합격률을 나타내었으며, 움직임이 없는 경우 95% 이상의 감마합격률을 보였다. AXB 알고리즘을 적용하였을 경우에는 모든 경우에서 98% 이상의 합격률을 나타내었다. 균질한 플라스틱 팬텀에 대하여 측정하였을 때 두가지 선량계산 알고리즘을 포함한 모든 조건에서 99% 이상의 감마합격률을 나타내었다. 선택된 환자의 호흡 진폭이 비교적 작고 inhale보다는 exhale에 더 오래 머무르는 호흡패턴 때문에 3%/3 mm 감마 기준에서는 호흡에 따른 차이가 거의 나타나지 않은 것으로 이해되었다. 선량계산의 정확성에서는 AAA 알고리즘을 적용하였을 때보다 AXB 알고리즘을 적용하였을 때가 균질과 비균질 환경에서의 선량 분포에 따른 감마 합격률의 차이가 적게 나타남을 확인 할 수 있었다. 본 논문에서는 환자와 유사하게 제작된 폐 팬텀에 실제 환자 호흡 패턴을 연동함으로 새로운 4D 치료선량 분포 검증 방법을 제시하였고 보다 사실적인 선량분포를 반영한 개별 환자 치료의 정확성 검증이 가능할 것으로 평가되었다.

**중심단어:** 4D phantom, 3D 프린트, 폐암 정위신체방사선치료, 호흡동조치료