

## Development of Artificial Pulmonary Nodule for Evaluation of Motion on Diagnostic Imaging and Radiotherapy

Sang Keun Woo\*, Noh Won Park<sup>†</sup>, Seung Woo Park<sup>†</sup>, Jung Woo Yu\*, Su Chul Han<sup>†</sup>,  
Seung Jun Lee<sup>†</sup>, Kyeong Min Kim\*, Joo Hyun Kang\*, Young Hoon Ji<sup>†</sup>, Ki Dong Eom<sup>†</sup>

\*Molecular Imaging Research Center, <sup>†</sup>Division of Radiation Cancer Research, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, <sup>†</sup>Department of Veterinary Radiology and Diagnostic Imaging, College of Veterinary Medicine, Konkuk University, Seoul, Korea

Previous studies about effect of respiratory motion on diagnostic imaging and radiation therapy have been performed by monitoring external motions but these can not reflect internal organ motion well. The aim of this study was to develop the artificial pulmonary nodule able to perform non-invasive implantation to dogs in the thorax and to evaluate applicability of the model to respiratory motion studies on PET image acquisition and radiation delivery by phantom studies. Artificial pulmonary nodule was developed on the basis of 8 Fr disposable gastric feeding tube. Four anesthetized dogs underwent implantation of the models via trachea and implanted locations of the models were confirmed by fluoroscopic images. Artificial pulmonary nodule models for PET injected <sup>18</sup>F-FDG and mounted on the respiratory motion phantom. PET images of those acquired under static, 10-rpm- and 15-rpm-longitudinal round motion status. Artificial pulmonary nodule models for radiation delivery inserted glass dosimeter and mounted on the respiratory motion phantom. Radiation delivery was performed at 1 Gy under static, 10-rpm- and 15-rpm-longitudinal round motion status. Fluoroscopic images showed that all models implanted in the proximal caudal bronchiole and location of models changed as respiratory cycle. Artificial pulmonary nodule model showed motion artifact as respiratory motion on PET images. SNR of respiratory gated images was 7.21. which was decreased when compared with that of reference images 10.15. However, counts of respiratory images on profiles showed similar pattern with those of reference images when compared with those of static images, and it is assured that reconstruction of images using by respiratory gating improved image quality. Delivery dose to glass dosimeter inserted in the models were same under static and 10-rpm-longitudinal motion status with 0.91 Gy, but dose delivered under 15-rpm-longitudinal motion status was decreased with 0.90 Gy. Mild decrease of delivered radiation dose confirmed by electrometer. The model implanted in the proximal caudal bronchiole with high feasibility and reflected pulmonary internal motion on fluoroscopic images. Motion artifact could show on PET images and respiratory motion resulted in mild blurring during radiation delivery. So, the artificial pulmonary nodule model will be useful tools for study about evaluation of motion on diagnostic imaging and radiation therapy using laboratory animals.

**Key Words:** Motion, Artificial pulmonary nodule model, PET, Radiation delivery

### 서 론

방사선치료는 수술이 제한되는 종양에 대해 적용 가능한

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2012-0002831)과 원자력기술개발사업(No. 2013-029685)의 지원으로 수행되었음.

이 논문은 2013년 2월 26일 접수하여 2013년 3월 7일 채택되었음.  
책임저자 : 엄기동, (143-701) 서울시 광진구 화양동 1

건국대학교 수의과대학 수의방사선 및 영상진단의학교실  
Tel: 02)450-4165, Fax: 02)444-4396  
E-mail: eomkd@konkuk.ac.kr

치료법으로 인체에 최소 침습적이고 치료 중에도 일상생활이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 방사선 치료의 목적은 종양 부위가 치료에 효과적인 방사선에 최대한 조사되게 함과 동시에 정상조직은 최소한으로 포함시키는 것이다. 이를 위한 노력 중 하나가 방사선치료계획 수립 시 양전자방출단층촬영(PET: positron emission tomography)을 이용한 종양의 확인이다. PET은 종양의 생리학적인 특성을 이용하는 기법으로 형태적 영상 진단법인 전산화단층촬영기(CT: computed tomography)나 자기공명영상(MRI: magnetic resonance imaging)에 비해 높은 민감도와 특이도를 가지며 다중영상기법을 조

합한 PET-CT나 PET-MRI의 경우 종양의 생리학적인 정보와 해부학적 정보를 동시에 제공하여 진단과 치료에 많은 정보를 제공한다. 특히 흉부종양에 있어서 PET-CT는 종양과 무기폐 및 흉수를 감별하는 데 많은 정보를 제공한다.<sup>1)</sup>

호흡에 의한 장기의 움직임은 종양의 진단 및 치료에 있어서 부정적인 영향을 미친다. 간, 췌장, 폐 등은 최대 35 mm까지 움직이며 이러한 움직임은 진단 및 치료에서 왜곡된 정보 및 불명확성을 제공한다.<sup>2-4)</sup> PET은 영상획득 소요 시간이 길기 때문에 CT나 MRI에 비해 움직임에 의한 영향을 많이 받으며 이로 인해 종양의 대비도를 저평가하고 용적의 과측정을 일으킨다.<sup>5)</sup> Chun 등은 PET/MRI 영상획득시 발생할 수 있는 호흡과 심장의 움직임을 평가하기 위하여 토끼의 간에 인공결절을 삽입함으로써 영상획득기법에 따른 신호대잡음비의 평가를 실제 간의 움직임을 반영하여 개선된 영상을 획득할 수 있는 방법을 소개하였다.<sup>6)</sup> Osman 등<sup>7)</sup>은 50 명의 폐종양환자들을 대상으로 PET-CT를 실시하여 전체 환자 중 86%에서 양쪽 하부 폐엽과 심근에 영향을 받는 좌측 폐엽에서 곡선냉결절(curvilinear cold defect)가 발생함을 관찰하였다. 방사선치료의 경우 병변의 움직임은 치료에서 불명확성을 제공하기 때문에 이를 극복하기 위해 임상표적용적(CTV: clinical target volume)에 생리적 움직임을 고려한 내부표적용적(ITV: internal target volume)이 추가되어 정상 세포의 방사선 피폭에 의한 피해를 증가시킨다.

움직임이 진단 및 치료 시 미치는 영향을 최소화하려는 연구는 이전부터 진행되어왔으며, Catana 등<sup>8)</sup>은 통합 PET-MRI 스캐너를 개발하여 고해상도의 MR 영상을 기반으로 PET 영상에서 움직임에 의한 인공산물을 교정하여 더 나은 해상도의 PET-MRI 영상을 획득할 수 있으며, Echo-planar images (EPI) 움직임 보정 방법을 이용하면 MRI와 PET를 동시에 얻을 수 있음을 보고하였다. Zhang 등<sup>9)</sup>은 호흡 동기화된 CT 영상에 변형 정합(deformable registration)과 주성분분석(principal component analysis)를 통해 실제 불규칙적인 호흡패턴에 대한 종양의 움직임을 효과적으로 예측하였다. Caldwell 등<sup>10)</sup>은 움직이는 종양 모사체에 대한 ITV에서 기존 3차원 CT를 통한 ITV가 실제 모사체의 용적을 기반으로 한 ITV보다 1.8~3배 정도 크지만, PET 영상을 이용할 경우 실제 ITV와 거의 유사하므로 방사선 치료계획 수립 시 PET 기반 ITV 설정이 더 유용하다고 발표하였다. Low 등<sup>11)</sup>은 폐종양에 대한 치료계획 수립 시 3차원 CT에 호흡용적과 호흡속도를 게이트 동조화하는 5차원 CT를 이용하였을 때 폐종양의 움직임을 보다 실제에 가깝게 표현할 수 있음을 보고하였다.

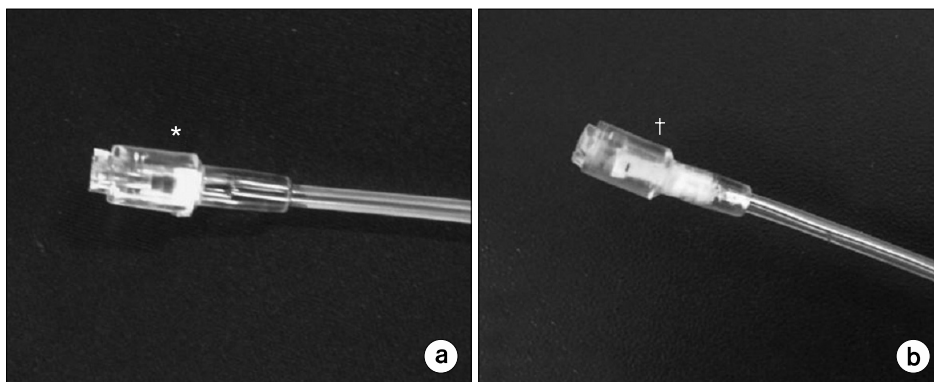
그러나 움직임이 진단 및 치료 시 미치는 영향에 관한 기존의 연구들은 흉곽과 복부의 외부움직임을 기반으로 관찰함에 따라 내부 장기의 실제 움직임을 제대로 반영할 수 없다. Yu 등<sup>12)</sup>은 마취된 쥐의 폐 내부에 부착한 분자체의 움직임 데이터 분석을 통해 내부 움직임이 외부 움직임보다 많은 변화량을 나타냄을 확인하였다. Ionascu 등<sup>13)</sup>은 10 명의 폐암환자들을 대상으로 호흡기움직임추적시스템(respiratory motion tracking system)으로 관찰한 흉강의 움직임과 종양 주변에 이식한 표지점을 방사선 투시장치로 관찰한 내부 움직임 간에 시간차가 존재함을 보고하였다. 호흡 운동에 따른 폐의 실제 운동을 반영할 수 있도록 선량계나 PET에서 종양과 유사한 계수율을 가지는 인공결절을 실험 동물에 비침습적으로 삽입할 수 있는 방법이 개발된다면 호흡에 의한 인공산물이 영상진단과 방사선 치료에 미치는 영향을 연구하는데 중요한 기반을 차지하게 될 것이다. 본 연구는 방사선 표지 물질이나 선량계를 장착할 수 있고 개의 흉부 내 비침습적 이식이 가능한 인공폐결절을 제작하여 동물실험에 대한 적용가능성을 확인하고, 인공폐결절을 이용한 모사실험을 통하여 PET 영상 획득 및 방사선 조사 시 움직임의 영향을 평가하고자 한다.

## 재료 및 방법

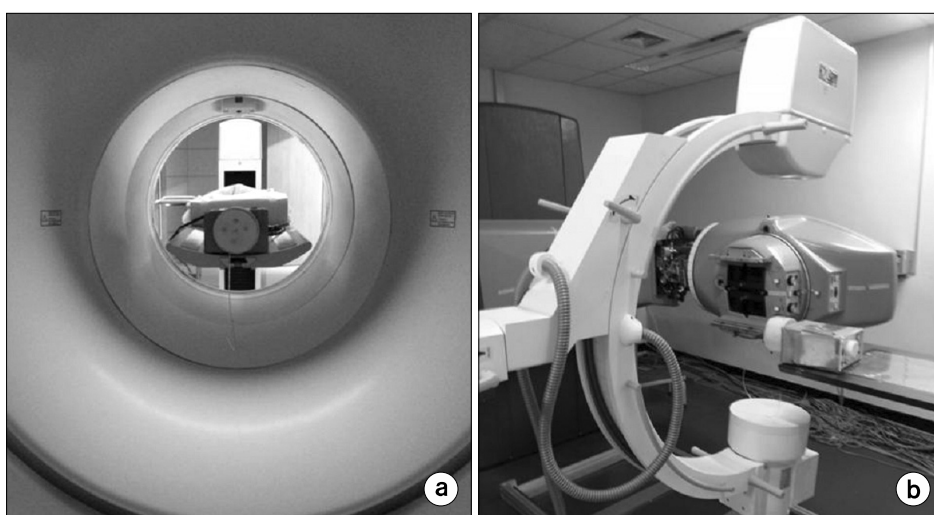
### 1. 인공폐결절 제작

인공폐결절은  $^{18}\text{F}$ -FDG (2-deoxy-2-[ $^{18}\text{F}$ ]fluoro-D-glucose) 주입용과 유리선량계(GD-320M, Asahi Techno glass Co., Japan) 삽입용 두 가지로 제작하였으며, 길이 500 mm 직경 8 Fr 일회용 위장용 영양공급 튜브(Hankook Medical Supply Co., Seoul, Korea)를 이용하여 제작하였다.  $^{18}\text{F}$ -FDG 주입용 인공폐결절은 용액 주입 시 관으로의 이탈 없이 주입구에 유지될 수 있도록 커넥터 부분 튜브 입구를 젤 형태 접착제로 봉한 뒤 탈지면으로 내강을 채웠다(Fig. 1a). 유리선량계 삽입용 인공폐결절은 유리선량계가 원통 안에 충분히 삽입될 수 있도록 직경 3 mm의 전동드릴로 내강을 절삭하고 충분한 내부공간 확보를 위해 캡의 막음새 부분을 절단한 뒤 유리선량계를 삽입하였다(Fig. 1b). 배출구 튜브 끝은 유도 와이어의 출입이 용이하도록 절단하였으며 튜브는 삽입 시 불필요한 소요 단면적을 최소화하기 위해 캡과 튜브의 연결부를 제거하였다.

제작된 인공폐결절의 폐내 삽입은 총 4마리의 건강한 암컷 비글견을 이용하여 마취상태에서 진행되었으며, 평균 체중 7.5 kg (범위, 7.0~8.0 kg), 평균 월령 36개월령을 이용하



**Fig. 1.** Artificial pulmonary nodule models for (a): PET and (b): radiation delivery; (a), the nodule part of the model for PET phantom study in which cotton (\*) was inserted; (b), the nodule part of the model for radiation delivery phantom study in which glass dose-meter (†) was inserted.



**Fig. 2.** The set up for respiratory motion studies and represented fluoroscopic images. (a) the setup for respiratory motion study on the PET with the model mounted on the respiratory phantom; (b) the setup for respiratory motion study on the radiation delivery with the model mounted on the respiratory phantom.

었다. 마취유도 20분 전 진정제로 medetomidine (Domitor<sup>®</sup>, Pfizer Korea, Korea) 0.02 mg/kg을 정맥주사하였으며 이후 propofol (Anepol<sup>®</sup>, Hana Phamar Co., Korea) 5 mg/kg을 정맥 주사하여 마취유도를 실시하였다. 기관 내 튜브 삽관 뒤 2% 농도의 isoflurane (Foran<sup>®</sup>, Choongwae Pharma Co., Korea)으로 마취상태를 유지하였으며 양와위 상태에서 기관튜브의 커프 내 공기를 제거한 뒤 확보된 기관 내 공간으로 기관튜브 옆에서 유도 와이어를 장착한 인공폐결절을 별도의 외부감시장치의 도움 없이 삽입하였다. 결절삽입이 더 이상 진행되지 않는 것을 확인한 후 방사선투시장치 (SM-20HF, Listem, Korea)를 이용하여 인공폐결절 삽입 위치 및 호흡에 따른 위치 변화를 확인하였다.

## 2. 움직임 모사체를 이용한 PET 영상화

PET 영상은 임상용 Biograph Truepoint PET 스캐너(Siemens Preclinical Solutions, Knoxville, TN, USA)를 이용하여

획득하였다. 호흡 움직임 영상은 0.44 MBq의 <sup>18</sup>F-FDG를 인공폐결절에 흡착시킨 후 모사체에 탑재하여 획득하였다. 인공폐결절이 탑재된 호흡 모사체의 PET 리스트모드 데이터는 정지 상태와 15 rpm의 종축 왕복운동상태에서 획득하였다(Fig. 2a). PET 영상의 크기는 168×168×74이며 복셀 크기는 4.07×4.07×3.00 mm<sup>3</sup>이다. 정적 PET 영상은 2 mm 가우시안 필터와 산란 및 감쇠 보정을 거쳐 16부분 집합의 6번 반복하는 Ordered Subset Expectation Maximization (OSEM) 알고리즘을 이용하여 재구성하였다. 호흡 동조 게이트 영상은 압력 센서를 이용하여 영상획득 시간동안 호흡신호를 획득하고 AZ-733-V (Anzai Medical Co., LTD, Japan)에 의해 PET 스캐너에 전달된 트리거 신호를 기반으로 리스트 데이터를 히스토그램밍하여 획득하였다.

## 3. 움직임 모사체를 이용한 방사선 조사

유리선량계는 직경 1.5 mm에 12 mm 길이로 소자 자체

에 식별번호가 있으며, 유효원자 번호는 12.04이며 밀도는  $2.61 \text{ g/m}^3$ 이다. 판독시스템은 FGD-100 판독기로(Asahi Techno Glass Co., Japan) 판독 시 사용하는 매거진에 따라 저 선량 모드 및 고 선량 모드가 있다.<sup>14)</sup> 유리선량계의 교정은 60-Co 조사장치(Theratron 780, AECL, Canada)를 이용하여 선원-표면 거리(SSD: source to surface distance) 80 cm에서 시행하였으며, 유리선량계에 조사 되는 기준 선량은 국내 2차 표준기관인 식품의약품안전청에서 교정 받은 이온 전리함(TN30006, PTW Freiburg, Germany)과 전기계(UNIDOS T10005, PTW Freiburg, Germany)를 사용하여 결정하였다. 유리선량계를 이식한 인공폐결절은 호흡운동 모사체에 장착한 뒤 방사선 조사를 실시하였다. 60-Co 조사장치를 선원으로 사용하였으며 방사선량율은  $75.19 \text{ cGy/min}$ , SSD는 80 cm이었다. 감마선 1 Gy 선량을 인공폐결절이 삽입된 모사체에  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 에 1분 30초간 조사하였다. 모사체는 종축방향으로 10 rpm, 15 rpm 각각 왕복운동하였다(Fig. 2b). 유리선량계로 측정된 조사선량은 검증을 위해 전기계를 모사체에 장착 후 동일 조사조건에서 반복 계측하여 비교하였다.

#### 4. 정량적 분석

인공폐결절의 움직임에 따른 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 신호대잡음비(signal to noise ratio)와 프로파일을 생성하여 비교하였다. 신호대잡음비는 움직임에 따른 민감도의 차이를 평가하기 위하여 결절모델의 영역을 신호영역으로 설정하고 배경 영역을 잡음으로 설정하여 백분율(%)로 계산하였다. 실제 기준영상과 정적영상, 게이트영상에서의 차이를 확인하기 위하여 수직 방향에 대하여 프로파일을 설정하고 각 화소 위치에서의 계수값을 획득하여 움직임 정도를 분석하였다. 영상 분석은 AMIDE (Amide's a Medical Image Data Examiner) 상용 소프트웨어를 이용하여 수행하였다.

### 결 과

#### 1. 실험동물 내 인공폐결절 검증

인공폐결절의 위치는 마취된 실험동물 개 4마리에 삽입 후 방사선투시장치를 이용하여 삽입위치를 확인하였다. Fig. 3과 같이 4마리에 대하여 방사선투시장치를 이용한 영상에서 모든 결절이 후엽 기관지 근위부에 위치함에 따라 삽입 위치에 대한 재현성이 있음을 확인하였다. 방사선투시장치의 후엽 기관지 근위부에 위치한 인공폐결절은 Fig. 3a의 흡기시 폐 결절 위치가 Fig. 3b의 호기시 위치보다 후방내

측으로 변위됨이 관찰되어 체내에 삽입된 인공폐결절이 호흡에 의한 움직임을 반영함을 확인할 수 있었다.

#### 2. PET 영상에서의 움직임 영향

PET 영상 내 인공폐결절은 Fig. 4a에서와 같이 잘 구분

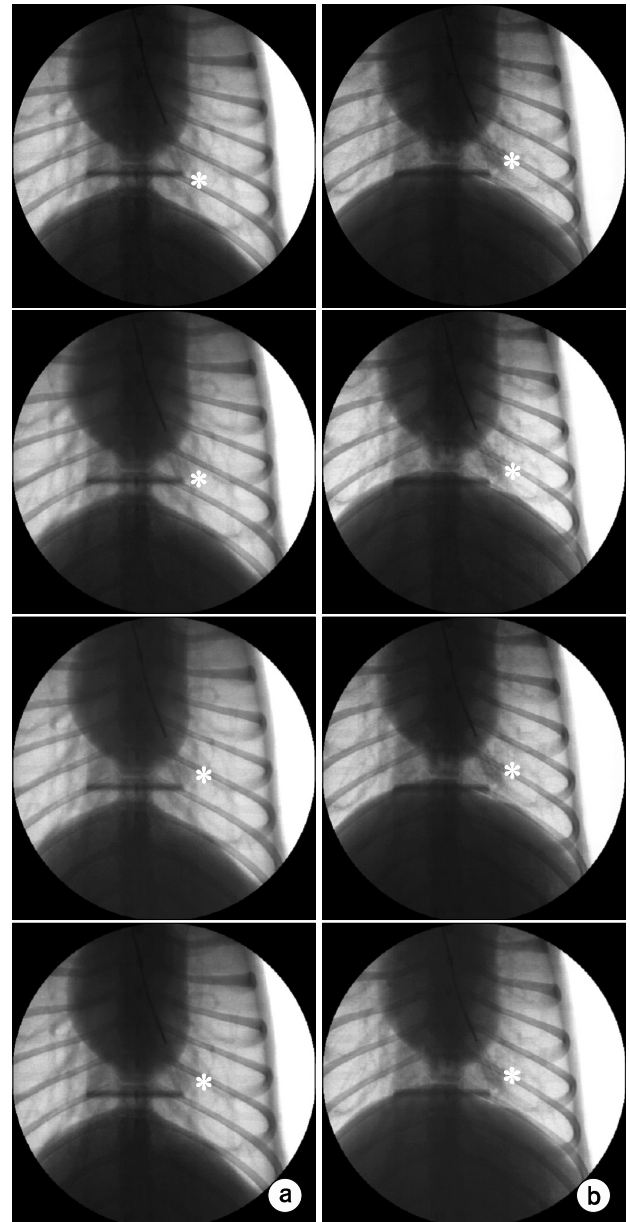
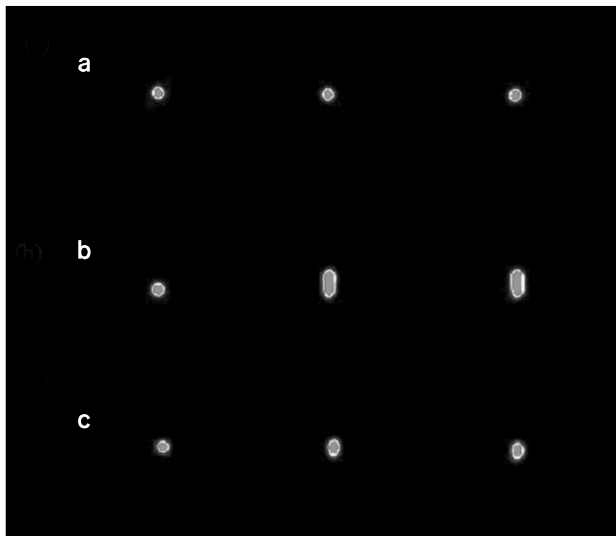


Fig. 3. Fluoroscopic images of artificial pulmonary nodule models implantation in 4 dogs (from top to bottom). (a) fluoroscopic images of inserted artificial pulmonary nodule models (white star) in dogs at inspiration. (b) fluoroscopic images of inserted artificial pulmonary nodule models (white star) in dogs at expiration.

되어 영상화되었으며 모사된 호흡 움직임에서는 위치가 변함에 따라 움직임에 의한 흐림으로 운동허상이 발생함을 Fig. 4b와 같이 확인할 수 있었다. 호흡 게이트 영상에서는 호흡 움직임이 최소화됨에 따라 인공폐결절의 흐림 현상이 정적 영상보다 국소화됨을 Fig. 4c에서 확인하였다.

기준영상으로 획득된 정지상태의 인공폐결절 신호대잡



**Fig. 4.** Acquired images of artificial pulmonary nodule model by PET. (a), reference images; (b), static images; (c), respiratory gated images; left, transaxial images; middle, coronal images; right, sagittal images.

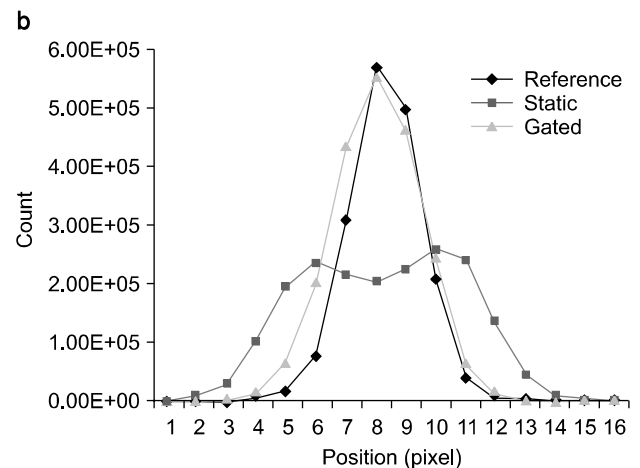
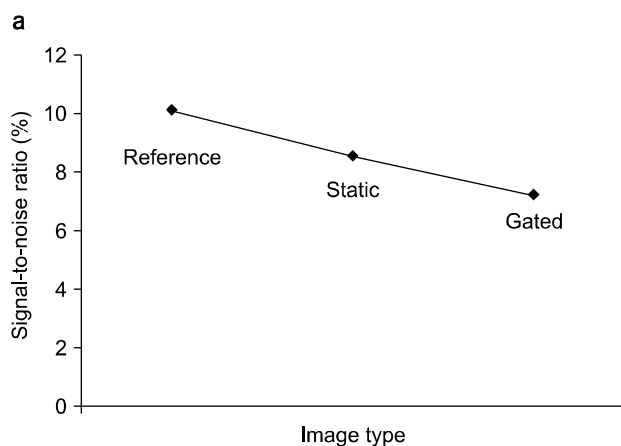
음비는 Fig. 5a에서와 같이 10.15로 가장 높았으며, 정적영상에서는 8.57, 게이트된 영상에서는 7.21로 가장 낮게 평가되었으나, Fig. 5b와 같이 위치정확성을 평가하였을 때 정적영상에서 나타난 흐림 현상이 게이트된 영상에서 움직임이 보정되어 기준영상에 근접하게 향상됨을 확인하였다.

### 3. 움직임에 의한 방사선 조사 영향

정지 상태에서 인공폐결절에 삽입된 유리선량계의 방사선량은 0.91 Gy이었다. 각각 10 rpm과 15 rpm의 종축 왕복 운동 시 1 Gy를 조사하였을 때, 10 rpm 종축운동간 인공폐결절내 유리선량계에 검출된 방사선량은 0.91 Gy로 정지 상태와 같았으나, 15 rpm 종축운동간 인공폐결절 내 유리선량계에 검출된 방사선량은 0.90 Gy로 정지 상태 및 10 rpm 종축운동시 보다 1.1% 가량 감소하였다. 15 rpm 종축운동간 검출된 방사선량 감소에 대한 검증을 위해 이온 전리함을 움직임 모사체에 장착한 뒤 동일 속도의 종축운동

**Table 1.** Delivered radiation dose to artificial pulmonary nodule models mounted respiratory phantom with static, 10- and 15-rpm-longitudinal round motion.

	Glass dosimeter		Ion chamber	
	Dose (Gy)	Difference (%)	Dose (nC)	Difference (%)
Reference	0.91	-	13.91	-
10 rpm	0.91	0	13.91	0
15 rpm	0.90	1.10	13.87	0.28

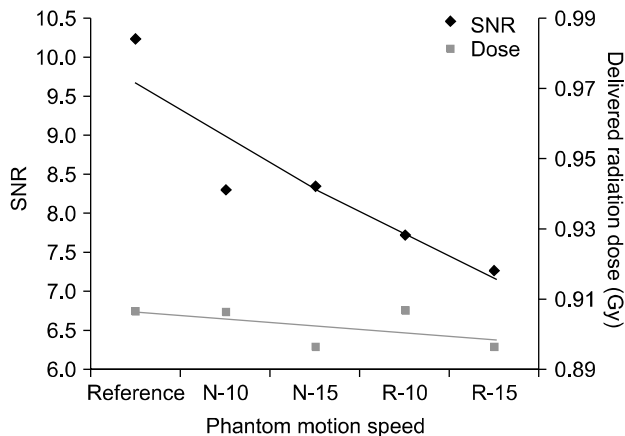


**Fig. 5.** Quantitative analysis of motion in PET images. (a), estimated SNR to reference, static, gated images of artificial pulmonary nodule models at 15-rpm-longitudinal motion; (b), the count of vertical line profile drawn at the artificial pulmonary nodule model during motion at 15 rpm. The diamond line, the square line and the triangle line represent as data of reference, static image and gated image, respectively.

간 방사선 조사량을 검출하여 Table 1과 같이 비교하였다. 정지 상태와 10 rpm 종축운동간 이온 전리함에 검출된 방사선량은 13.91 nC로 동일하나, 15 rpm 종축운동간 검출된 방사선량은 13.87 nC로 0.28% 감소하여 물체가 분당 15회 움직일 경우 조사된 방사선량이 근소하게 감소하였다.

#### 4. 움직임 기반 진단 및 치료 평가

모사체의 운동속도에 따른 호흡동조게이트영상의 신호대잡음비와 유리선량계에서 검출된 조사선량으로 움직임 기반 진단 및 치료 평가를 실시하여 Fig. 6과 같이 획득하였다. 기준 영상에 대한 호흡동조게이트영상의 신호대잡음비는 10.14이며 10 rpm과 15 rpm 종축왕복운동에 대한 신호대잡음비는 각각 7.68과 7.21로 감소하였다. 유리선량계에 검출된 방사선량은 정지상태 및 10 rpm 종축왕복운동시 0.91 Gy이며 15 rpm 종축왕복운동시 0.90 Gy로 감소하여 호흡동조게이트영상의 신호대잡음비와 유사한 추세를 보였다. 상기 결과들로 신호대잡음비와 조사선량 모두 운동속도가 빠를수록 감소하는 경향을 나타내며, 조사선량에 비해 신호대잡음비의 감소경향이 큰 것을 확인하였다.



**Fig. 6.** Relationship of SNR of respiratory gated PET images and delivered radiation dose as motion rate changes of phantom. The diamond and square represent as SNR and delivered radiation dose, respectively. The blue and red lines represent as drift curves of SNR and delivered radiation dose, respectively. Reference, motion status under rest; N-10, sine wave motion at 10 rpm; N-15, sine wave motion at 15 rpm; R-10, respiratory motion at 10 rpm; R-15, respiratory motion at 15 rpm.

## 고 찰

본 연구에서는 일회용 위장용 영양공급 튜브를 이용하여 PET영상 획득 시 종양과 유사한 결절 병소를 보이며 방사선치료 모사연구간 표적으로 작용할 수 있는 인공폐결절을 제작하였다. 인공폐결절의 삽입위치는 폐의 후엽 기관지 내로 결정하였다. 이는 폐 후엽이 호흡간 횡격막의 움직임에 의해 전체 폐 중 가장 큰 움직임을 보이며, 기관 분지부에서 급격한 각도 변화로 주행하는 전, 중엽 기관지와 달리 후엽 기관지의 경우 상대적으로 큰 각도 변화 없이 배측방향으로 폐엽을 향해 주행하므로 양와위에서 기관을 통해 삽입할 경우 별도의 조작 없이 재현성 있게 위치한다.<sup>15)</sup> 인공폐결절은 추가적인 모니터링 장치 없이 삽입하여 장착하였음에도 4마리에서 모두 폐 후엽의 근위부 세기관지에 장착되었다. 이는 상기 기술한 기관 및 기관지가 가지는 특성에 의한 것으로 판단된다. 기관은 후두 덮개를 지나서 일정한 내강을 유지하며, 기관 분지부에서 각 폐 엽으로 주행하는 기관지들은 주기관지, 세기관지 등으로 폐 변연부로 주행할수록 직경이 점점 작아져 변연부에서는 폐포와 연결된다. 같은 종의 실험동물군이 같은 체적을 가진 경우 기관 및 기관지의 직경은 동일하며, 따라서 인공폐결절 삽입 시, 외부 모니터링 없이도 항상 유사한 위치에 장착될 수 있다. 이는 장착의 재현성을 더욱 증대시키는 요인으로도 작용하였다.

호흡 움직임 모사체를 이용한 PET 영상획득실험에서 기준영상은 Fig. 4a와 같이 획득하여 <sup>18</sup>F-FDG를 주입한 인공폐결절이 종양을 모사하고 있음을 확인하였으며 Fig. 4b와 같이 정적 영상에서 호흡움직임에 의한 흐림 현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 게이트 영상은 Fig. 4c와 같이 획득되었으며 호흡에 의한 흐림 현상이 개선되었고 수직 프로파일에서도 Fig. 5b와 같이 정적 영상은 기준영상과 비교하여 최대 계수 및 위치당 계수가 많은 차이를 보였으나, 게이트된 영상은 기준 영상과 유사한 패턴을 보였다. 이는 제작된 인공폐결절이 중동물에 삽입될 때 PET 영상에서 호흡에 의한 인공산물을 충분히 관찰할 수 있으며 동물실험으로 움직임 보정효과를 통한 PET 영상 개선 연구가 가능함을 알 수 있다. Fig. 5a에서와 같이 게이트된 영상은 신호대잡음비는 감소하지만 Fig. 5b에서와 같이 정지상태의 프로파일과 유사한 패턴으로 향상됨을 알 수 있다. 이는 PET 영상 재구성시 획득한 계수를 호흡의 신호에 맞추어 위상별로 나누어 게이트된 영상으로 재구성한다. 재구성시 갑자

기 발생하는 신호는 정확한 위상의 데이터가 아니므로 제거하고 정확한 위상의 데이터만을 수집하여 재구성함으로써 신호는 감소하나 위치는 정확하게 평가되었다.

호흡 움직임 모사체를 이용한 방사선 조사연구에서 Table 1과 같이 15 rpm 종축 운동시 검출된 방사선량이 정지 상태 및 10 rpm 종축운동에 비해 오차범위 내의 감소경향을 나타내어 방사선 치료시 표적의 움직임이 분당 15회 이상일 경우 치료에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단되며 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다. 이는 유리선량계가 종축운동간 조사범위의 중심을 벗어나면서 발생한 조사 방사선량의 흐림에 의한 것으로 관찰되었다. 조사선량 분포의 흐림은 조사선량이 누적될수록 분명하게 관찰되며 조사 관심영역의 가장자리내 반그림자(penumbra)를 증가시키고 조사 분포 경사를 완만하게 한다고 보고된 바 있다.<sup>16)</sup> 움직임 기반 진단 및 치료 평가 시 Fig. 6과 같이 검출된 방사선량과 호흡동조게이트영상의 신호대잡음비는 모사체의 운동속도가 빨라짐에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 감소추세는 방사선량보다 호흡동조게이트영상의 신호대잡음비가 더 크게 관찰되었다. 이는 표적의 운동속도가 진단 및 치료분야에 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다. 그러나, 치료분야에서는 충분한 조사야 내에서 운동속도에 영향을 크게 받지 않으며, 진단분야에서는 운동속도에 따라 영상 내 신호대잡음비가 감소함을 확인할 수 있었다.

## 결 론

본 연구에서는 진단 및 방사선조사 시 비침습적으로 움직임을 영향을 평가할 수 있는 인공폐결절을 제작하여 동물실험 적용가능성을 확인하였으며 움직임 모사체를 이용하여 진단 및 치료시 움직임에 의해 발생할 수 있는 영향을 평가하였다. 진단 및 치료시 이용 가능한 인공폐결절은 방사선투시장치 영상에서 실험동물의 후엽 근위부 세기관지에 재현성 있게 삽입되어 기존의 실제 사례를 이용한 방법과 비교하여 병소의 위치 재현성을 높일 수 있으므로 동물실험시 비침습적으로 동일한 실험조건 구성이 가능할 것이다. 모사체를 이용한 진단 및 치료시 움직임 영향 평가에서 PET 영상 내에서는 움직임에 의한 계수의 감소와 인공산물이 관찰되었고, 방사선 조사연구에서는 호흡운동이 미약한 영상 흐림을 일으킴으로 움직임 기반 진단 및 치료 평가 연구에 유용한 도구로 사용될 것으로 기대된다. 본 연구의 기반기술은 실제 동물실험에 적용하여 비침습적으로 보다 직접적이고 임상적 결과에 근접한 연구 성과를 기대

할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Phelps ME: Positron emission tomography provides molecular imaging of biological processes. *Proc Natl Acad Sci* 97(16):9226-9233 (2000)
2. Bryan PJ, Custar S, Haaga JR, Balsara V: Respiratory movement of the pancreas: an ultrasonic study. *J Ultrasound Med* 3(7):317-320 (1984)
3. Ross CS, Hussey DH, Penington EC, et al: Analysis of movement of intrathoracic neoplasms using ultrafast computed tomography. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 18(3):671-677 (1990)
4. Davies SC, Hill AL, Holmes RB, Halliwell M, Jackson PC: Ultrasound quantitation of respiratory organ motion in the upper abdomen. *Br J Radiol* 67(803):1096-1102 (1994)
5. Nehmeh SA, Erdi YE: Respiratory motion in positron emission tomography/computed tomography: Review. *Semin Nucl Med* 38:167-176 (2008)
6. Chun SY, Reese TG, Ouyang JS, et al: MRI-Based non-rigid motion correction in simultaneous PET/MRI. *J Nucl Med* 53(8):1284-1291 (2012)
7. Osman MM, Cohade C, Nakamoto Y, Wahl RL: Respiratory motion artifacts on PET emission images obtained using CT attenuation correction on PET-CT. *Eur J Med Mol Imaging* 30(4):603-606 (2003)
8. Catana C, Benner T, van der Kouwe A, et al: MRI-assisted PET motion correction for neurologic studies in an integrated MR-PET scanner. *J Nucl Med* 52(1):154-161 (2011)
9. Zhang Q, Pevsner A, Hertanto A, et al: A patient-specific respiratory model of anatomical motion for radiation treatment planning. *Med Phys* 34(12):4772-4781 (2007)
10. Caldwell CB, Mah K, Skinner M, Danjoux CE: Can PET provide the 3D extent of tumor motion for individualized internal target volumes? A phantom study of the limitations of CT and the promise of PET. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 55(5):1381-1393 (2003)
11. Low DA, Parikh PJ, Lu W, et al: Novel breathing motion model for radiotherapy. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 63(3):921-929 (2005)
12. Yu JW, Woo SK, Lee YJ, et al: Estimation of internal motion for quantitative improvement of lung tumor in small animal. *Korean J Med Phys* 22(3):140-147 (2011)
13. Ionascu D, Jiang SB, Nishioka S, Hiroki S, Berbeco RI: Internal-external correlation investigations of respiratory induced motion of lungs. *Med Phys* 34(10):3893-3903 (2007)
14. ASAHI Glass Cor. 2004. Explanation Material of RPL Glass Dosimeter: Small Element System. Tokyo, Japan
15. Eom K, Seoung Y, Park H, Choe N, Park J, Jang K: Radiologic and computed tomographic evaluation experimentally induced lung aspiration sites in dogs. *J Vet Sci* 7(4): 397-399 (2006)
16. Bortfeld T, Jiang SB, Rietzel E: Effects of motion on the total dose distribution. *Semin Radiat Oncol* 14(1):41-51 (2004)

## 움직임 기반 진단 및 치료 평가를 위한 인공폐결절 개발

한국원자력의학원 방사선의학연구소 \*분자영상연구부, †방사선암연구부,  
‡건국대학교 수의과대학 수의방사선 및 영상진단의학교실

우상근\* · 박노운‡ · 박승우† · 유정우\* · 한수철† · 이승준‡ · 김경민\* · 강주현\* · 지영훈† · 엄기동‡

진단 및 치료분야에서 호흡 움직임이 미치는 영향에 대한 연구는 외부 움직임을 관찰하여 실시되었으나, 이러한 외부 움직임은 내부 장기의 실제 움직임을 반영하지 못한다. 이에 본 연구에서는 개의 흉부 내 비침습적 이식이 가능한 인공 폐결절을 제작하여 동물실험에 대한 적용가능성을 확인하고 PET 영상 획득 및 방사선조사 시 움직임의 영향을 평가하고자하였다. 인공폐결절은 8 Fr 일회용 위장용 영양공급튜브를 개조하여 제작하였다. 제작된 결절모델은 마취된 개 4마리에 기관을 경유하여 기관지에 삽입한 뒤 방사선투시장치를 이용하여 위치를 확인하였다. PET 촬영용 인공폐결절은 내강에  $^{18}\text{F}$ -FDG를 주입한 뒤 호흡운동 모사체에 장착하여 정지 상태, 10 rpm과 15 rpm의 종축 왕복운동간 PET 촬영을 실시하였다. 방사선조사용 인공폐결절은 유리선량계를 이식한 뒤 PET 촬영 시와 동일한 호흡운동 모사체에 장착하여 정지 상태, 10 rpm과 15 rpm의 종축 왕복운동간 1 Gy 선량을 조사하였다. 인공폐결절은 방사선투시장치 영상에서 실험동물의 후엽 근위부 세기관지에 이식되며 호흡에 따라 결절의 위치가 변화함을 확인하였다. PET 영상에서의 인공폐결절은 모사된 호흡 움직임에 따라 움직임에 의한 인공산물을 나타내었으며, 호흡동조게이트 시 SNR은 7.21로 기준영상의 SNR 10.15에 비해 감소하였으나 프로파일상 게이트영상의 영상계수는 정적영상에 비해 기준영상과 유사하여 PET 영상의 질을 개선함을 확인하였다. 방사선조사 실험간 인공폐결절 내 삽입된 유리선량계에 조사된 조사선량은 정지 상태와 10 rpm의 종축 왕복운동에서 0.91 Gy로 차이를 보이지 않았으나, 15 rpm의 종축 왕복운동에서 0.90 Gy로 오차범위 내 감소를 나타내었으며, 이온 전리함을 통한 조사선량 검출에서도 근소한 감소를 나타내었다. 본 실험에서 제작된 인공폐결절은 실험동물의 후엽 근위부 세기관지에 높은 재현성을 보이며 방사선투시 영상에서 폐의 내부 움직임을 반영하였다. PET 영상 내 움직임에 의한 인공산물이 관찰되며, 방사선 조사연구에서는 호흡운동이 미약한 영상 흐림을 일으킴을 확인하였다. 따라서 본 인공폐결절은 진단 및 치료분야에서 실험동물을 이용한 움직임 기반 진단 및 치료 평가에 유용한 도구로 사용될 것으로 기대된다.

---

**중심단어:** 움직임, 인공폐결절, PET, 방사선 조사