

## 4D RT에서 PET/CT Image를 이용한 Metabolic Target Volume 적용의 유용성 평가

\*가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, †서울성모병원 방사선종양학과,

†Department of Radiation Oncology, Stanford University

김창욱\*<sup>†</sup> · 천금성<sup>†</sup> · 허경훈<sup>†</sup> · 김연실<sup>†</sup> · 장홍석<sup>†</sup> · 정원균\* · Lei Xing<sup>†</sup> · 서태석\*

본 연구는 호흡 정보를 갖고 있는 PET 영상의 표준섭취계수(SUV: standard uptake value)를 이용하여 보다 정확하고 편리한 호흡동조 방사선치료의 metabolic target volume (MTV) 적용에 대한 유용성을 평가하고자 하였다. 평가를 위해 4D 팬텀에 임의의 인공산물을 만들어 PET 영상을 획득하였으며, 최대 SUV를 기준으로 임의로 설정한 50%, 30%, 그리고 5%의 SUV에서의 VOIs (Volumes Of Interest)와 호흡동조 방사선치료를 위한 4D-CT를 통해 획득한 호흡위상백분율에서 설정한 GTV (Gross Target Volume)을 비교하였다. 4D-CT를 통해 얻은 총합 GTV와 PET 영상의 30% SUV로 얻은 VOI와의 비교는 50%의 SUV로 얻은 VOI의 비교 결과보다 종(Longitudinal) 방향에서의 오차가 상당히 감소되었으며 4D 총합 CT와 가장 일치하는 PET 영상은 5% SUV로 얻은 VOI로 관찰되었다. 4D PET/CT에서 전체 호흡의 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상의 30% SUV로 얻은 VOI는 IGRT (Image-guided radiation therapy)에 적용되는 4D-CT의 동일한 호흡위상백분율 영상에서 설정한 GTV와 비교한 결과, 최대 0.5 cm 이하로 잘 일치하였으며 4D PET의 5% SUV로 얻은 VOI의 경우 모든 방향에서 잘 일치하였다. 따라서 IGRT의 MTV 적용에 있어서 일반 PET 영상의 이용보다 4D PET 영상의 적용이 더 유용함을 보였다. 본 연구결과 현재 핵의학과에서 인체종양의 VOI를 30% SUV로 권고하고 있지만 30% 이하의 주변 SUV와 구분되는 최소 SUV를 선택해 적용한다면, 더욱 유용한 MTV 적용이 될 것으로 판단된다.

**중심단어:** PET, 4D PET/CT, Standard uptake value (SUV), 4D-CT, Metabolic target volume (MTV)

### 서 론

최근 방사선치료는 일반적인 방사선치료에서 3차원적 방사선치료를 거쳐 종양의 형태와 위치에 따라 방사선의 강도를 조절하는 세기조절방사선치료(IMRT: intensity modulation radiation therapy)와 호흡이나 내부 장기의 움직임에 따른 종양의 움직임을 고려한 영상기반 방사선치료(IGRT: image-guided radiation therapy)로 발전해가고 있다.<sup>1)</sup>

이러한 정밀하고 복잡한 방사선치료기술의 발달은 움직임을 갖고 있는 종양과 주변 입계장기의 크기와 형태 및 용적을 보다 정확히 결정하는 것을 요구하게 되었으며, 특히 종양의 크기가 작으면서 움직임이 큰 종양을 치료대상

으로 할수록 이런 요구의 중요성은 더욱 커지게 되었다. 만일 이러한 종양의 범위를 정확히 결정하지 못하거나 잘못 결정되었을 경우 종양에 처방한 방사선선량을 전달하지 못함은 물론 주위 정상 장기들에 불필요한 방사선 조사를 유발시켜 방사선치료의 실패 또는 방사선에 의한 부작용이 증가되는 원인으로 작용된다. 따라서 호흡이나 장기의 움직임에 따른 종양의 범위를 정확히 정의하기 위해 4차원적 단층 촬영(이하 4D-CT)을 이용하고 있다.<sup>2-8)</sup>

4D-CT 영상을 획득하기 위해서는 기존 CT와 달리 4D 영상을 획득할 수 있는 Software (CINE Mode, HELICAL Mode)의 구비와 호흡주기를 얻는 장치(Spirometer, Thermal Sensor/Belt Transducer, X-ray Fluoroscopy) 및 호흡별 종양의 정보를 얻기 위한 영상선별 프로그램(Image Sort Program), 그리고 일반 CT 영상 수보다 훨씬 많은 영상들을 저장, 처리하기 위한 서버를 구비하여야 한다. 또한 4차원 방사선 치료(4D RT)에 있어서 종양의 범위를 정확히 결정하기 위하여 여러 가지 영상 장치(초음파, 자기공명영상, PET/CT, 등)에서 얻어진 영상들 이용해 방사선치료의 GTV (Gross

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. K20901000001-09E0100-00110).  
이 논문은 2010년 3월 15일 접수하여 2010년 4월 26일 채택되었음.  
책임저자 : 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포동 505번지  
가톨릭대학교 의과대학 의공학교실  
Tel: 02)2258-7232, Fax: 02)2258-7506  
E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

Target Volume)를 설정하고 있으며, 이에 따른 영상 융합(Fusion) 작업의 정확성과 호환성이 요구된다.

획득한 4D-CT 영상은 방사선 치료계획 장치(RTP)로 보내져 각 호흡위상별 영상에서 각기 종양에 대한 GTV를 그린 후 IGRT의 호흡위상 전체에 대한 GTV를 얻는 작업이 필요하며 이는 많은 노력과 시간이 소요된다.

PET 영상은 종양의 진단, 병기 결정, 재발 판정 및 크기가 작은 종양의 전이에 대한 평가에 있어 그 유용함은 이미 인정되고 있으며, 특히 PET과 단층 촬영을 기계적으로 일치시킨 PET/CT의 경우 그간 PET의 단점인 저해상도 문제를 단층 촬영의 해부학적 영상으로 보완함으로써 그 유용성이 한층 증가되고 있다.

이에 본 연구에서는 종양에 집적된 FDG를 일정 시간(1 BED당 10~15분) 동안 Scan하여 표준섭취계수(SUV: standard uptake value)의 정보를 얻는, 즉 호흡에 대한 정보를 함유한 PET/CT 영상을 이용하여<sup>9-11)</sup> SUV를 바탕으로 4D RT에서 보다 간단하고 정확한 metabolic target volume (MTV) 설정의 유용성을 평가하고자 한다.

### 재료 및 방법

실험을 위해 팬텀 내부에 원형 모양의 막대기둥이 회전 중심축을 기준으로 회전, 전진 그리고 후진 운동을 할 수 있는 4차원적 팬텀(Dynamic Phantom; CIRS, USA)을 이용하였다.<sup>12)</sup> 또한 종양의 움직임을 표현하기 위해 막대기둥의 회전 중심축에서 10 mm 떨어진 지점에 구형 모양의 인공산물(지름 4 cm, 부피 약 33.5 cc)을 위치시켰다(Fig. 1).

팬텀의 움직임은 15 RPM으로 4초당 좌, 우 45도씩 왕복 회전하면서 최대 3 cm까지 종 방향으로 작동되도록 설정하였다. 인공산물에는 CT 영상과 PET 영상을 얻기 위해 각각 조영제(Gastrografin)와 증류수를 1 : 3 비율로 혼합한 혼합액체(33 cc)와 FDG (100 μCi, 33 cc)를 동일한 위치, 동일한 크기 및 형태로 주입하였다. 또한 PET과 CT 장치의 환자테이블이 다른 점을 보완하기 위해 평탄한 판(Carbon plate)을 이용하여 그 위에 팬텀을 위치시켰으며, 팬텀 표면에 표시된 기준점 3부분을 Laser에 일치시키고, 그 테이블의 위치를 0으로 설정하였다. FOV (Field Of View)는 두 영상 장치에서 각각 500 mm로 설정하고 스캔 두께(Slice Thickness)는 3 mm로 각각의 영상을 얻었다. 또한 호흡주기를 얻는 호흡(운동)추적 장치는 Respiratory Gating System AZ-733V (Anzai Medical)를 이용하였다.<sup>12)</sup>

4D-CT 영상 획득은 4차원 CT 촬영장치(sensation open,

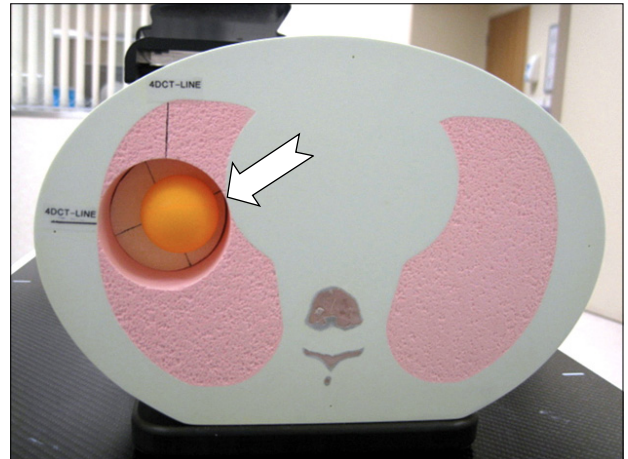


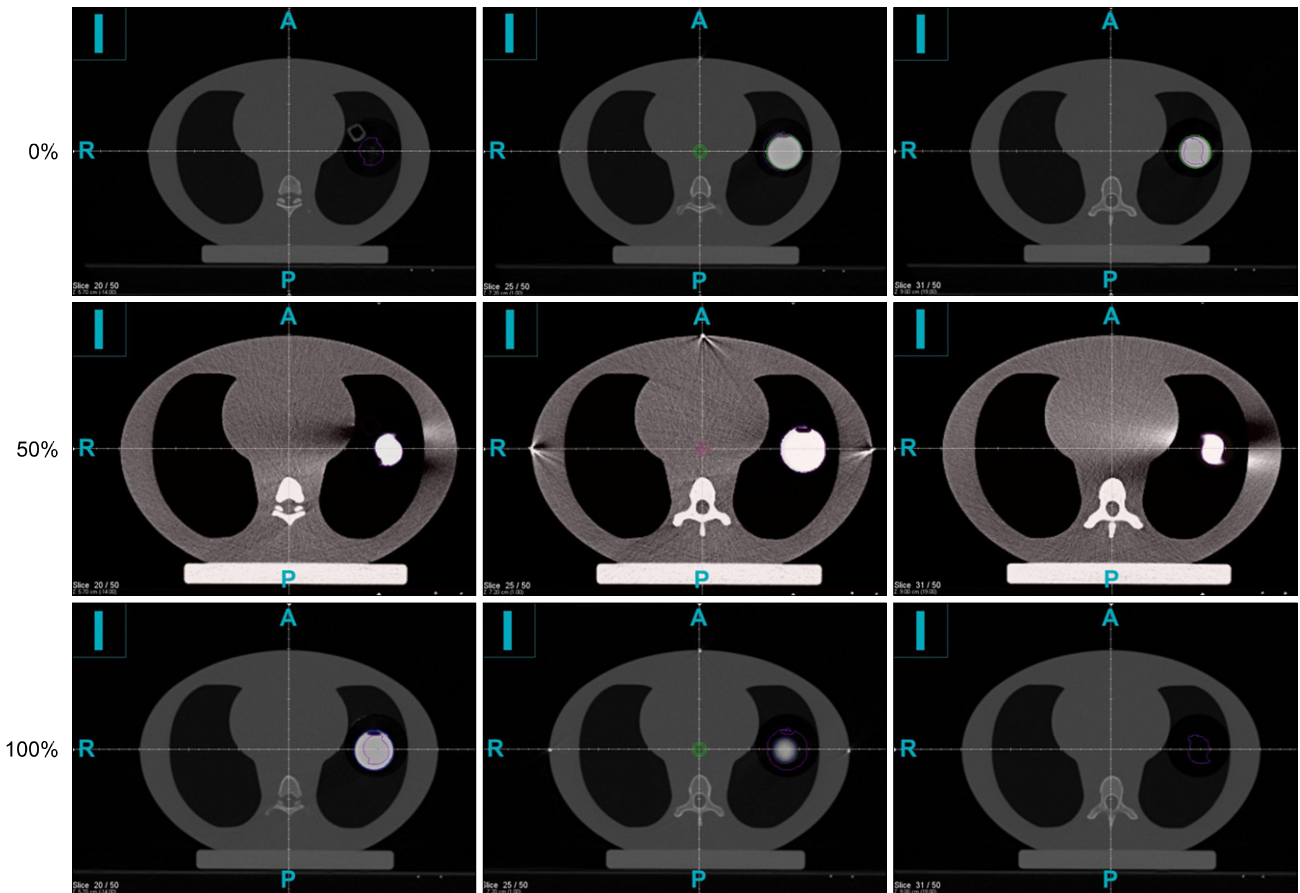
Fig. 1. Picture of 4D Phantom (Dynamic Phantom; CIRS, USA) with an insertion of artificial target pointed by arrow.

Siemens Medical System)의 나선형 Mode를 통해 얻었으며, PET/CT (Biograph; Siemens Medical Systems) 영상은 우선 일반 영상 획득방식으로 1 BED로 10분 동안 획득하고, 다음 4D PET/CT 영상은 List Mode를 이용하여 얻었다. 영상 선별(Images sort)은 4D-CT의 경우 Breathing Phase Study로 호흡위상 백분위별(0%, 50% 그리고 100%) 영상(Fig. 2)으로 획득하였고, IGRT를 위해 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상(Fig. 3)을 선별하였으며, 4D PET/CT의 경우 List mode를 이용하여 흡기와 호기의 25% 호흡위상영상에서 50%, 30% 그리고 5%의 SUV에 대한 VOIs를 설정하였다.

PET 영상은 육안에 의해 정적으로 분석할 뿐만 아니라 종양 내 방사성 핵종 집적 정도를 측정하여 정량 분석하는 것이 가능한데, 실제 임상에서는 반 정량적인 방법인 SUV로 종양 내 방사성의약품 집적 정도를 평가하며, SUV는 아래 식에 의해 구해진다.<sup>13)</sup>

$$SUV = \frac{\text{tissue activity } (\mu\text{Ci/ml})}{\text{injected activity (mCi)/weight(kg)}}$$

SUV 수치는 임상에서 육안적인 평가와 함께 유용하게 사용되고 있다. 보통 SUV 1은 주사한 FDG가 전신에 고루 퍼진 상태를 알리는 정도이고, 대부분의 악성 종양의 경우 2.5~3 이상으로 SUV가 증가된다. 즉, 고루 퍼진 농도보다 2.5~3배 암 병소에 FDG가 높게 집적된다는 의미이다. 그러나 SUV 수치에는 여러 가지 인자들이 영향을 미치는데, 환자 측 인자로는 환자의 체형과 지방조직의 양, 혈중 포도당 농도, 종양의 크기, 운동에 의한 정상 조직의 섭취 증가



**Fig. 2.** CT images at 0% (first row), 50% (second row) and 100% (third row) respiratory phase acquired by a respiratory gating system (AZ-733; Anzai Medical Inc., Japan). Longitudinal position of each image, Z, is 5.7 cm.

등이 작용하며,<sup>14)</sup> 촬영 기기 인자로는 투과영상 방법 및 방사능 검출 회수율 등과 촬영 기법 인자로는 방사성 핵종의 누출, FDG 주사량, FDG 주사와 촬영 간격 등이 영향을 미친다. 또한 암 조직이 정상조직과 중복되어 나타나는 부분 체적 효과(partial volume effect)가 있어<sup>15)</sup> 2 cm 이하인 종양에서는 평균 SUV가 아닌 최대 SUV가 많이 사용되며 부분 체적 효과는 작고 주변부가 불규칙으로 생긴 종양에서 더 영향이 크다. 따라서 본 실험에서는 SUV 수치에 영향을 줄 수 있는 환자 측 인자를 없애기 위해 모형을 대상으로 하였으며, 부분체적 효과를 고려하여 종양의 크기도 지름 4 cm의 구형 인공산물을 만들어 적용했다.

4D-CT의 GTVs는 각 호흡위상백분율 영상들을 방사선 치료계획장치의 프로그램(CoreFusion)을 이용해 CT-CT 영상정합을 수행하였다. 영상정합의 상호 일치성을 평가한 후, CorePLAN (RTP, SC&J)을 이용해 동일한 window, level 조건(W: 401, L: 800, W+L: 1201)으로 인공산물에 대한 각

호흡위상백분율의 GTV들을 얻은 후 전 호흡위상백분율에 따른 GTVs를 얻었으며, PET/CT 영상과 4D PET/CT의 각 SUV는 레오나르도 True-D (Siemens Medical Systems)를 이용하여 인공산물에 주입한 FDG (100  $\mu$ Ci, 33 cc)에 대한 최대(100%) SUV를 기준으로 50%, 30% 그리고 5% SUV로 설정하였다.

PET 영상과 4D-CT 영상을 CoreFusion을 이용해 PET-CT 영상정합을 하여 상호 일치성을 비교한 후 CorePLAN상에서 동일 중심점(Isocenter)을 설정하고 횡단면(Axial) 영상에서 좌(Left), 우(Right), 시상면(Sagittal) 영상에서 전(Anterior), 후(Posterior), 상(Superior), 하(Inferior) 방향으로 MTV 크기 차이와 부피를 각각 비교하였다.

본 연구에서는 PET/CT 영상에서 임의로 설정한 인공산물에 나타난 50%, 30% 그리고 5%의 SUV로 얻은 VOIs (Volume Of Interest)와 4D-CT 영상에서 얻은 총합 GTV를 비교, 평가하고, IGRT를 4D-CT 위한 영상에서 해당 호흡위

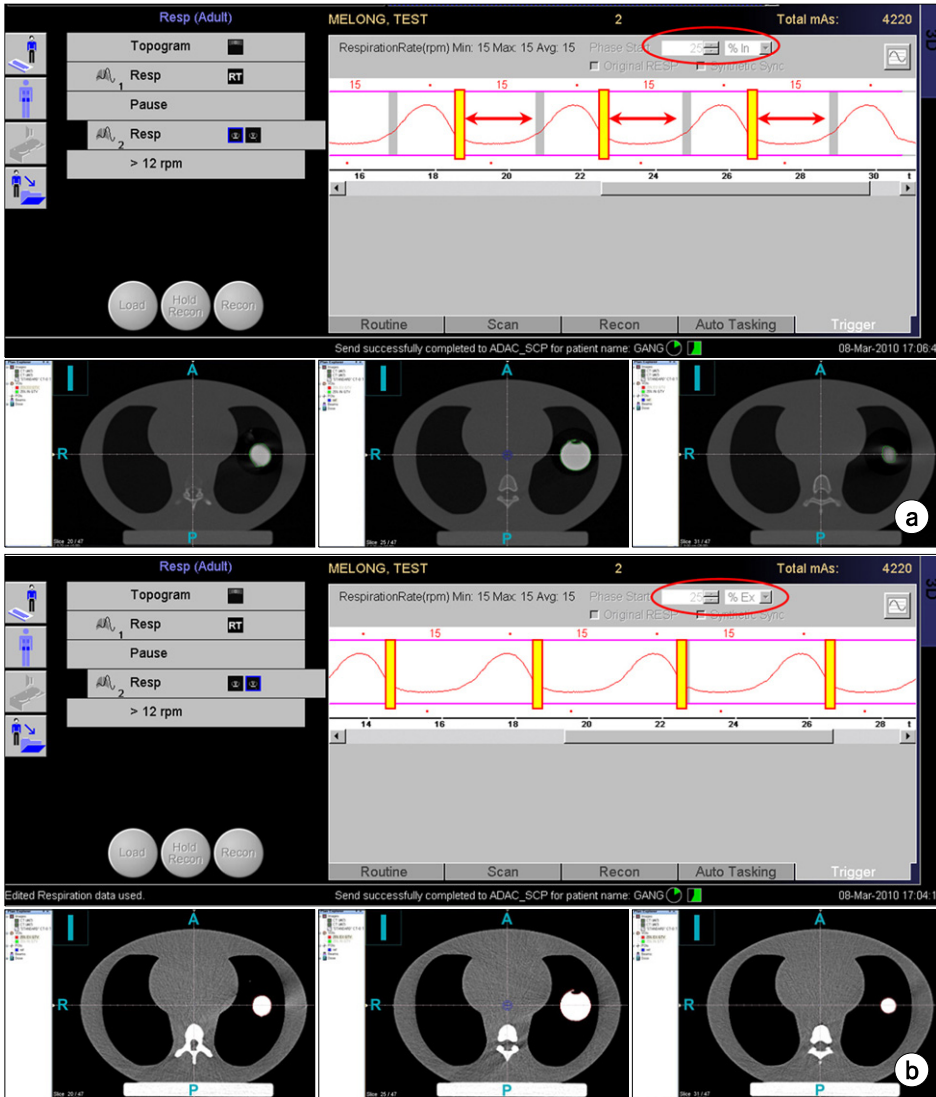


Fig. 3. Pictures of respiratory signal and corresponding CT images acquired at (a) 25% inspiration phase (shown as gray bar) and (b) 25% expiration phase (shown as yellow bar). Beam is on for therapy at time interval between yellow bar and gray bar in (a).

상범위에서의 GTV와 4D PET/CT영상에서 동일한 호흡위 상범위의 SUV로 얻은 VOIs를 비교, 평가하기 위하여 다음과 같은 순서로 실험을 진행하였다.

1) PET/CT에서 PET 영상의 5% SUV로 얻은 VOI와 PET/CT의 CT 영상에서 설정한 GTV를 분리하여 RTP (CorePLAN)을 이용하여 상호 일치성을 비교하였고,<sup>8)</sup> PET 영상과 4D-CT 영상에서 전체 호흡의 중간 정보를 갖는 50% 호흡위상백분율 영상과 영상정합을 하여 내부 장기인 폐와 척추의 상호 일치성을 비교하고, 두 영상에서 얻은 각각의 GTV를 비교하였다.<sup>9,10)</sup>

2) 4D-CT의 전 호흡위상에 따른 총합 GTV를 설정하고 PET 영상에서 나타난 50%, 30% 그리고 5%의 SUV로 얻은 VOIs와의 비교를 통해 MTV의 적용 가능한 SUV를 찾기

위해 비교, 분석하였다.

3) 4D PET을 통해 얻은 전체 호흡의 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상에서의 50%, 30% 그리고 5% SUV로 얻은 VOI와 현재 4D-CT 중 IGRT에서 주로 이용하는 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상을 선택하여 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상에서의 GTV와의 비교를 통해 MTV 적용의 유용성을 평가해 보았다.

## 결 과

1. PET/CT의 CT영상으로 얻은 GTV를 기준으로 5% SUV PET의 VOI와 50% 호흡위상 4D-CT의 GTV 비교 결과

는 5% SUV PET의 VOI 오차가 횡단면 영상에서 우 방향을 제외한 모든 방향에서 50% 호흡위상 4D-CT의 GTV보다

**Table 1.** Comparison of VOI obtained from 5% SUV PET in order to get GTV from PET/CT image with GTV in 50% respiratory phase of 4D-CT image (Unit in each parameter is cm and SD represent 1 standard deviation).

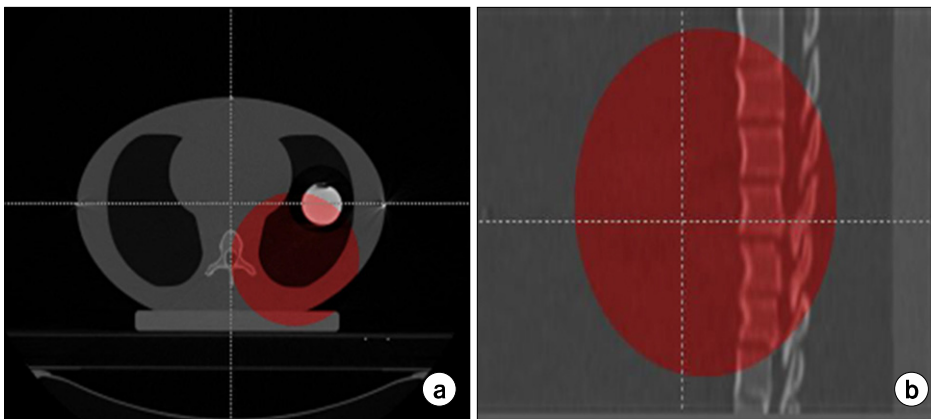
		CT (PET CT)	PET 5% SUV VOI (SD)	4D CT 50% RESP. GTV (SD)
Volume (cc)		35.0	67.6	35.7
Axial	Rt.	1.59	2.05 (0.46)	2.15 (0.56)
	Lt.	1.54	2.26 (0.72)	1.82 (0.28)
Sagittal	Ant.	1.50	1.68 (0.18)	1.66 (0.16)
	Pos.	1.49	2.10 (0.61)	2.04 (0.55)
	Suf.	1.85	3.01 (1.16)	2.24 (0.39)
	Inf.	0.79	3.92 (3.13)	1.97 (1.18)

크게 나타났으며, 최대 오차는 하 방향에서 3.13 cm로 나타났으며, 부피에서도 32.6 cc의 오차를 나타냈다(Table 1).

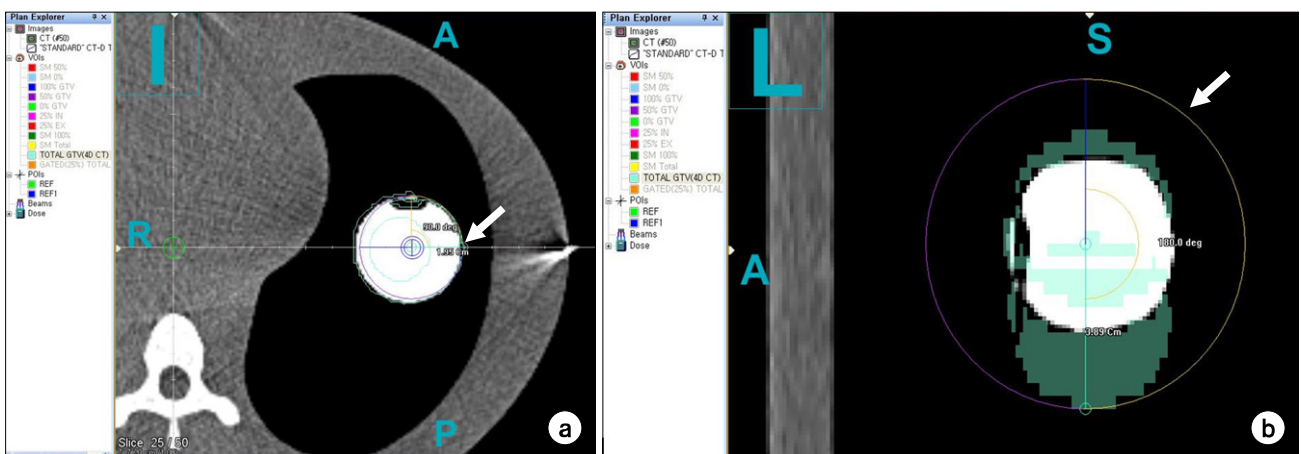
이와 같은 오차의 원인은 PET/CT가 기계적으로 일치된 하나의 장치일지라도 일정시간 호흡정보를 충분히 갖고 있는 PET 영상과 일정 시간에서 정적으로 얻는 CT 영상의 차이 때문이며,<sup>8)</sup> 하 방향으로 최대 오차 결과를 나타낸 이유는 4차원적 팬텀의 움직임이 종 방향에서 가장 크게 구현되었기 때문이다.

PET/CT의 CT 영상과 4D-CT 50% 호흡위상 영상의 정합에 따른 일치성 결과는 내부 장기인 폐와 척추, 체표윤곽 등의 비교를 통해 매우 정확한 일치를 나타냈다(Fig. 4).

이는 PET/CT와 4D-CT는 서로 다른 장치이지만 CT 양식 자체는 동일하기 때문으로 생각된다. 이런 영상정합의 정확성을 바탕으로 PET/CT의 CT 영상에서 얻은 GTV와



**Fig. 4.** (a) Axial image and (b) sagittal image of lung and spine inside the phantom from the fusion image of the artificial target using PET/CT (gray color) and 4D-CT (red color) at 50% respiratory phase.



**Fig. 5.** Pictures of (a) axial image and (b) sagittal image of the total GTV obtained from integration of all percentage respiratory phases in 4D-CT image using ruler function of CorePLAN. Region in light blue color in axial image and in dark green color in sagittal image represents total GTV.

4D-CT의 50% 호흡위상 영상의 GTV를 비교한 결과는 PET/CT의 CT 영상과 5% SUV PET의 VOI의 오차보다 횡단면 영상에서 우 방향을 제외한 모든 방향에서 줄어들었으며, 4차원적 팬텀에서 큰 움직임을 갖는 종 방향인 시상면 영상에서 상 방향으로 0.39 cm, 하 방향으로 1.18 cm로 오차가 현격히 줄어들었으며, 부피에서도 0.7 cc의 근소한 차이를 나타냈다(Table 1).

2. Fig. 5는 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 GTV를 나타낸 것이며, Fig. 6는 PET 영상에서 나타난 50%, 30% 그리고 5%의 SUV로 얻은 VOIs를 각각 나타낸 것이다. 비교 결과는 다음과 같으며, Table 2에서 정리하였다.

첫째, 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 총합 GTV와 PET 영상에서 나타난 50%의 SUV로 얻은 VOI의 비교 결과는 종 방향인 시상면 영상에서 상 방향으로 2.08 cm, 하 방향으로 2.68 cm로 나타났으며, 부피에서도 60.1 cc의 큰 차이를 나타냈다.

둘째, 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 GTV와 PET 영상에서 나타난 30%의 SUV로 얻은 VOI의 비교 결과는 50%의 SUV로 얻은 VOI의 비교 결과보다는 종 방향에서의 오차

가 시상면 영상에서 상 방향으로 0.91 cm, 하 방향으로 1.76 cm로 줄어들었으며, 부피에서도 42.2 cc의 차이로 상당히 줄어들었다.

셋째, 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 GTV와 PET 영상에서 나타난 5%의 SUV로 얻은 VOI와의 비교결과는 거의 모든 방향으로 일치함을 알 수 있었으며, 부피에 있어서도 0.7 cc의 오차로 상당히 근접한 값을 가졌다. 또한 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 GTV를 기준으로 PET 영상에서 나타난 50%와 30%의 SUV로 얻은 VOI 비교와 달리 5%의 SUV로 얻은 VOI가 횡단면 영상의 좌, 우 방향과 시상면 영상의 상, 하 방향으로 더 크게(- 부호로 표시) 나타났다. 위 실험 단계에 대한 결과에서, 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 GTV와 가장 일치하는 PET 영상의 VOI는 5%의 SUV로 얻은 VOI로 나타났다.

이는 호흡에 따른 움직임을 표현하고 있는 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 GTV가 같은 정보를 담고 있는 5%의 SUV로 얻은 VOI와 잘 일치되는 것으로 평가되었다.

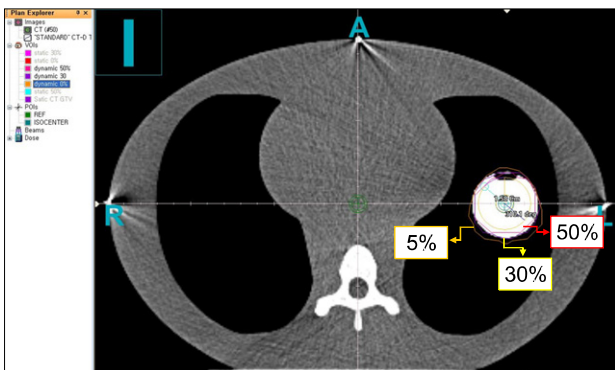


Fig. 6. Axial PET images of VOIs acquired from 50%, 30% and 5% SUV.

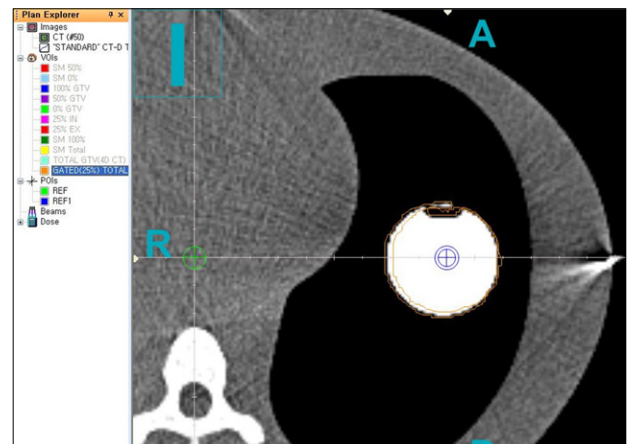


Fig. 7. Axial 4D-CT image of the GTV acquired during 25% expiration phase and 25% inspiration phase.

Table 2. Comparison of total GTV from 4D-CT image with VOI obtained from 50%, 30% and 5% SUV in PET Image (Unit in each parameter is cm and SD represents 1 standard deviation).

		4D CT TOTAL GTV (SD)	PET 50% SUV VOI (SD)	PET 30% SUV VOI (SD)	PET 5% SUV VOI (SD)
Volume (cc)		66.9	6.8	24.7	67.6
Axial	Rt.	2.01	1.18 (0.83)	1.67 (0.34)	2.05 (-0.04)
	Lt.	1.95	1.09 (0.86)	1.46 (0.49)	2.26 (-0.31)
Sagittal	Ant.	2.02	1.15 (0.87)	1.54 (0.48)	1.68 (0.34)
	Pos.	2.09	1.22 (0.87)	1.60 (0.49)	2.10 (0.08)
	Suf.	2.72	0.64 (2.08)	1.81 (0.91)	3.01 (-0.29)
	Inf.	3.89	1.21 (2.68)	2.13 (1.76)	3.92 (-0.03)

Table 3. Comparison of VOI obtained from 50%, 30% and 5% SUV in 4D PET image with GTV from 4D-CT image (Both regions were obtained from the image of percentage respiratory phase from 25% expiration to 25% inspiration.) (Unit in each parameter is cm and SD represents 1 standard deviation).

		4D CT 25% RESP. GTV (SD)	4D PET 50% SUV VOI (SD)	4D PET 30% SUV VOI (SD)	4D PET 5% SUV VOI (SD)
Volume (cc)		44.9	25.3	32.5	47.3
Axial	Rt.	2.00	1.77 (0.23)	1.79 (0.21)	2.06 (-0.06)
	Lt.	1.98	1.85 (0.13)	1.88 (0.1)	2.06 (-0.08)
Sagittal	Ant.	2.02	1.71 (0.31)	1.71 (0.31)	2.11 (-0.09)
	Pos.	2.21	1.71 (0.5)	2.09 (0.12)	2.50 (-0.29)
	Suf.	2.4	1.8 (0.6)	1.81 (0.59)	2.41 (-0.01)
	Inf.	2.1	2.09 (0.01)	2.09 (0.01)	2.41 (-0.31)

3. IGRT 상황에서 4D PET/CT을 통해 얻은 전체 호흡의 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상에서의 50%, 30% 그리고 5% SUV로 얻은 총합 VOI와 4D-CT 호흡 위상인 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상에서의 GTV와의 비교결과는 다음과 같고, Fig. 7과 Table 3에 정리하였다.

4D PET/CT (전체 호흡의 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상)에서의 50% SUV로 얻은 총합 VOI와 4D-CT의 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상에서의 GTV와의 비교는 최대 오차가 상 방향으로 0.6 cm, 후 방향으로 0.5 cm으로 나타났으며, 부피의 차이는 19.6 cc로 나타났다.

이는 앞서 실험된 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 GTV와 PET 영상에서 나타난 50%의 SUV로 얻은 VOI의 비교 결과와 비교 시 적은 오차를 보여주고 있으며, 실험에 적용된 SUV 중 가장 적은 부피를 갖는 50% SUV로 얻은 VOI에서도 종 방향에서의 오차가 현격히 줄어든 것으로 평가되었다.

4D PET/CT에서의 30% SUV로 얻은 VOI와 4D-CT의 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상에서의 GTV는 50%의 SUV로 얻은 VOI의 결과와 유사한 오차로 평가되었으나, 부피의 경우 12.4 cc로 오차가 줄어드는 결과를 나타냈다.

4D PET/CT에서의 5% SUV로 얻은 VOI와 4D-CT의 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상에서의 GTV과의 비교는 최대 오차가 하 방향으로 -0.31 cm로 나타났고, 그 외 모든 방향에서는 거의 일치(4D-CT의 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상에서의 GTV를 기준하여 4D PET/CT에서의 5% SUV로 얻은 VOI가 더 크게 나타나 - 부호로 표기하였음) 하였으며, 부피의 경우 2.4 cc

의 오차로 현격히 줄어들음을 알 수 있었다.

특이할 사항은 하 방향에서 4D PET/CT에서의 5% SUV로 얻은 VOI가 더 큰 값으로 나타났다.

### 고찰 및 결론

최근 방사선치료는 호흡이나 내부 장기의 움직임에 따른 종양의 움직임을 고려한 4D RT 즉 IGRT로 발전해가고 있다.<sup>1)</sup>

이러한 정밀하고 복잡한 4D RT는 치료성적을 높이고, 정상장기의 장해를 줄이기 위해 움직임을 갖고 있는 종양의 범위를 보다 정확히 결정하는 것을 요구하고 있다. 특히 크기가 작고 움직임이 큰 종양의 범위를 일반적 CT 영상만을 이용해 정확히 표현하기에는 한계성이 있으므로 4D-CT 영상은 물론 여러 영상 장치(MRI, PET/CT 등)들의 영상을 융합하여 종양의 범위를 정확하게 결정하는 노력을 하고 있다.<sup>2-8)</sup>

또한 호흡으로 인한 종양의 움직임을 고려한 4D-CT의 이용은 호흡에 따른 위상별로 여러 영상들을 획득하여 영상 선별하고 그 영상들을 모두 융합하는 작업과 융합한 영상들에 종양 윤곽(Contour)을 그리는 시간 및 장비구입에 대한 경제적 부담이 많이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 종양에 집적된 FDG를 일정 시간 (1 BED당 10~15분)동안 Scan하여 SUV 정보를 얻는, 즉 호흡에 대한 정보를 함유한 PET/CT 영상을 이용해 보다 쉽고 정확하게 IGRT의 MTV 설정에 대한 유용성을 평가하기 위한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

기존 사용하는 PET/CT 영상은 호흡정보를 담고 있는 PET 영상과 호흡이 고려되지 않은 CT 영상의 결합으로 인

해 종양의 크기가 작고 움직임이 클수록 왜곡 영상이 증가함을 알 수 있었다.<sup>9)</sup> 이는 움직임이 많은 부위에 대한 IGRT의 MTV에 PET/CT 영상을 융합하여 적용함에 있어서는 PET/CT 영상 정보를 그대로 이용하는 것보다 PET 영상과 호흡정보를 담고 있는 4D-CT 영상과의 융합을 통한 정보가 매우 정확함을 알 수 있었다.

또한 4D-CT의 전체 호흡위상에서의 GTV와 PET 영상에서 나타난 5%의 SUV로 얻은 VOIs가 일치하는 것은 4D-CT의 GTV가 호흡에 따른 종양의 움직임을 고려한 체적을 나타내고 있으며, PET 영상에서 5%의 SUV로 표현되는 VOI가 종양의 움직임을 포함하여 표현되기 때문으로 볼 수 있다.

이런 결과는 실험자체가 인체가 아닌 팬텀을 대상으로 임의의 종양을 설정하고 인공산물 외의 부분에는 FDG를 부여하지 않은 결과로 보인다.

끝으로 현재 IGRT에서 주로 이용하는 25% 흡기에서 25% 호기까지 호흡위상백분율 영상을 바탕으로 실험한 결과에서와 같이 4D PET의 30% SUV로 얻은 VOI와 일반 PET 영상에서의 30% SUV로 얻은 VOI를 비교해보면 종방향에서의 오차가 크게 감소하였다.

이는 4D PET 영상을 얻는 과정이 25% 흡기, 최대 호기, 25% 호기의 호흡위상에서 영상을 획득하고 선별하여 VOI를 얻었기 때문에 전체 호흡정보를 갖는 일반 PET 영상보다 그 오차가 적게 발생한 것으로 생각된다. 따라서 IGRT의 MTV 적용에 있어서는 일반 PET 영상의 이용보다 4D PET 영상의 적용이 더 유용할 것으로 사료된다.

또한 4D PET의 5% SUV로 얻은 VOI의 경우 모든 방향에서 일치함으로 핵의학에서 30% SUV로 표현되는 범위를 종양의 범위로 권고하고 있는 것을 감안하고, 폐암의 경우 해부학적으로 폐 외의 다른 장기들이 인접하지 않은 특성을 고려하여 30% SUV보다 낮지만 주변 SUV와 구분되는 최소 SUV를 선택해 적용한다면, 더욱 정확한 IGRT의 MTV를 설정할 것으로 생각된다.

현재 PET영상의 경우 FDG 집적의 효율성으로 인해 모든 종류의 종양에 대해 종양의 범위를 설정하는 것은 부적절하지만, 움직임을 가지고 있고 주로 구형을 갖는 폐암의 경우에 FDG 집적의 효율성이 높으므로 IGRT의 MTV를 설정하는데 4D PET 영상을 이용하는 것이 더 유용할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Kara Bucci M, Alison Bevan, Mack R: Advances in Radiation Therapy : Conventional to 3D, to IMRT, to 4D, and Beyond. CA Cancer J Clin 55:117-134 (2005)
2. Dawson LA, Brock KK, Kazanjian Sahira: The reproducibility of organ position using active breathing control (ABC) during liver radiotherapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys 51:1410-1421 (2001)
3. Hideo DK, Bruce CH: Respiration gated radiotherapy treatment: a technical study. Phys Med Biol 41:83-91 (1996)
4. Mageras GS, Yorke E, Rosenzweig K, et al: Fluoroscopic evaluation of diaphragmatic motion reduction with a respiratory gated radiotherapy system. J Appl Clin Med Phys 2:191-200 (2001)
5. Ford EC, Mageras GS, Yorke E, et al: Evaluation of respiratory movement during gated radiotherapy using film and electronic portal imaging. Int J Radiat Oncol Biol Phys 52:522-531 (2002)
6. Wagman R, Yorke E, Ford EC, et al: Reproducibility of organ position with respiratory gating for liver tumors: use in dose-escalation. Int J Radiat Oncol Biol Phys 55:659-668 (2003)
7. Song SY, Park SH, Yoon SM, et al: Assessment of respiratory tumor movement using 4D computed tomography for stereotactic radiosurgery in lung tumor. J Lung Cancer 6:24-28 (2007)
8. Oldham M, Guo P, Adamovics J, et al: Towards four dimensional (4D) dosimetry for radiation-therapy. J Phys Conf Ser 56:225-227 (2006)
9. Cho BC, Park SH, Park HC, et al: Analysis of respiratory motion artifacts in PET imaging using respiratory gated PET combined with 4D-CT. Nucl Med Mol Imaging 39 (2005)
10. Nehmeh SA, Erdi YE, Pan T, et al: Four-dimensional (4D) PET/CT imaging of the thorax. Med Phys 31:3179-3186 (2004)
11. Townsend DW, Beyer T, Blodgett T: PET/CT scanners: a hardware approach to image fusion. Seminars in Nuclear Medicine 33:193-204 (2003)
12. Antonia Dimitrakopoulou Strauss, Ludwig Strauss: Quantitative studies using positron emission tomography for the diagnosis and therapy planning of oncological patients. Hell J Nucl Med 9:10-21 (2006)
13. Choi CW: Quantitative Analysis of PET Measurements in Tumors. Nucl Med Mol Imaging 60-66 (2001)
14. Seo YS, Kwon SY, Jeong SY, et al: Correlation of pre-treatment FDG uptake to therapeutic response and relapse in patients with small cell lung cancer. Nucl Med Mol Imaging 41:538-545 (2007)
15. Olivier G. Roussel, Yilong Ma, et al: Evans. Correction for partial volume effects in PET: principle and validation. J Nucl Med 39:904-911 (1998)
16. Hwang HS, Bae HS: The role of positron emission tomography (PET) in radiation treatment planning. Hanyang Medical Reviews 27:76-85 (2007)



## Evaluation of the Feasibility of Applying Metabolic Target Volume in 4D RT Using PET/CT Image

Changuk Kim\*<sup>†</sup>, Keum Sung Chun<sup>†</sup>, Kyung Hoon Huh<sup>†</sup>, Yeon Shil Kim<sup>†</sup>,  
Hong Seok Jang<sup>†</sup>, Won-Gyun Jung\*, Lei Xing<sup>‡</sup>, Tae-Suk Suh\*

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

<sup>†</sup>Department of Radiation Oncology, Seoul St Mary's Hospital, Seoul, Korea,

<sup>‡</sup>Department of Radiation Oncology, Stanford University, California, USA

In this study, we evaluated feasibility of applying MTV (Metabolic Target Volume) to respiratory gated radiotherapy for more accurate treatment using various SUV (Standard Uptake Value) from PET images. We compared VOI (Volume of Interest) images from 50%, 30% and 5% SUV (standard uptake volume) from PET scan of an artificial target with GTV (Gross Tumor Volume) images defined by percentage of respiratory phase from 4D-CT scan for respiratory gated radiotherapy. It is found that the difference of VOI of 30% SUV is reduced noticeably comparing with that of 50% SUV in longitudinal direction with respect to total GTV of 4D-CT image. Difference of VOI of 30% SUV from 4D-PET image defined by respiratory phase from 25% inhalation to 25% exhalation, and GTV from 4D-CT with the same phase is shown below 0.6 cm in maximum. Thus, it is better to use 4D-PET images than conventional PET images for applying MTV to gated RT. From the result that VOI of 5% SUV from 4D-PET agrees well with reference image of 4D-CT in all direction, and the recommendation from department of nuclear medicine that 30% SUV be advised for defining tumor range, it is found that using less than 30% SUV will be more accurate and practical to apply MTV for respiratory gated radiotherapy.

**Key Words:** PET, 4D PET/CT, Standard uptake value (SUV), 4D-CT, Metabolic target volume (MTV)