

## Image-based Absorbed Dosimetry of Radioisotope

Yong Sung Park\*, Yong Jin Lee\*, Wook Kim\*, Young Hoon Ji<sup>†</sup>,  
Kum Bae Kim<sup>†</sup>, Joo Hyun Kang\*, Sang Moo Lim\*, Sang-Keun Woo\*

\*Division of RI-Convergence Research, <sup>†</sup>Department of Radiation Oncology,  
Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, Seoul, Korea

An absorbed dose calculation method using a digital phantom is implemented in normal organs. This method cannot be employed for calculating the absorbed dose of tumor. In this study, we measure the S-value for calculating the absorbed dose of each organ and tumor. We inject a radioisotope into a torso phantom and perform Monte Carlo simulation based on the CT data. The torso phantom has lung, liver, spinal, cylinder, and tumor simulated using a spherical phantom. The radioactivity of the actual absorbed dose is measured using the injected dose of the radioisotope, which is Cu-64 73.85 MBq, and detected using a glass dosimeter in the torso phantom. To perform the Monte Carlo simulation, the information on each organ and tumor acquired using the PET/CT and CT data provides anatomical information. The anatomical information is offered above mean value and manually segmented for each organ and tumor. The residence time of the radioisotope in each organ and tumor is calculated using the time activity curve of Cu-64 radioactivity. The S-values of each organ and tumor are calculated based on the Monte Carlo simulation data using the spatial coordinate, voxel size, and density information. The absorbed dose is evaluated using that obtained through the Monte Carlo simulation and the S-value and the residence time in each organ and tumor. The absorbed dose in liver, tumor1, and tumor2 is  $4.52\text{E-}02$ ,  $4.61\text{E-}02$ , and  $5.98\text{E-}02$  mGy/MBq, respectively. The difference in the absorbed dose measured using the glass dosimeter and that obtained through the Monte Carlo simulation data is within 12.3%. The result of this study is that the absorbed dose obtained using an image can evaluate each difference region and size of a region of interest.

**Key Words:** Torso phantom, Glass dosimeter, Absorbed dosimetry, PET/CT, Cu-64

## 서 론

방사성의약품은 평균수명의 연장과 함께 암 및 난치성 질환의 증가로 양전자방출단층촬영(Positron Emission Tomography)과 같은 진단 목적과 특정 종양 조직을 파괴하여 치

료 목적으로 사용이 증가하고 있다.<sup>1,2)</sup> 방사성물질에서 발생된 방사선은 종양영역 뿐만 아니라 정상세포에도 영향을 미치기 때문에<sup>3)</sup> 방사성의약품을 한 번에 많은 양을 사용할 수 없으며 환자에게 안전하고 효율적인 진단 및 치료를 위해서 방사선의 흡수 선량평가가 필요하다.<sup>4)</sup>

방사선 흡수 선량평가의 한 방법인 몬테카를로 시뮬레이션은 무작위 통계적 표본추출 방법으로 폭 넓게 사용되는 시뮬레이션 중 하나로 의학 분야에서는 방사선과 같은 고에너지의 입자의 물리현상을 예측할 수 있어 영상화<sup>5)</sup> 및 선량평가<sup>6)</sup>에 이용되고 있다. Berger<sup>7)</sup>는 몬테카를로 시뮬레이션에 방사선 전달 방정식을 적용하여 방사선을 해석하는데 사용하였으며, Snyder<sup>8)</sup>는 성인 남자의 MIRD S-value를 계산하였다. 1996년 Stabin<sup>9)</sup>은 방사선의 선량평가를 위하여 MIRDose 소프트웨어를 개발하였다. Caon<sup>10)</sup>은 디지털 팬텀을 몬테카를로 시뮬레이션에 적용하여 실제 환자에 가까운 방사선 선량 평가를 수행하였다.

Stabin의 선량평가 프로그램은 windows 환경에서 visual-

This research was supported by Civil-Military Technology Cooperation Program, Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. NRF-2011-0012830) and Radiation Technology R&D program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2012M2A2A7013480).

Received 30 May 2016, Revised 18 June 2016, Accepted 21 June 2016

**Correspondence:** Sang-Keun Woo (skwoo@kirams.re.kr)

Tel: 82-2-970-1659, Fax: 82-2-970-1341

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

basic 언어를 사용하여 개발하였으며 이후 Java언어로 재작성하여 OLINDA (Organ Level Internal Dose Assessment)로 개명되었고 1차, 2차 함수를 이용하여 누적된 데이터의 잔류시간을 계산할 수 있는 기능(EXM: EXponential Modeling)을 추가하였다. OLINDA/EXM 버전 1.1은 알파 테스트와 베타 테스트를 완료하였고, 2004년 미국 식품의약국(Food and Drug Administration)의 허가를 받아 전 세계에 배포 사용하였다.<sup>11)</sup>

기존에 수행된 방사선 흡수 선량평가는 일반적인 디지털 팬텀과 미리 정의되어 있는 S-value를 사용하여 일반화된 장기에 대해서만 선량 평가가 가능하였다.<sup>12)</sup> 본 연구에서는 방사성동위원소의 선량평가를 위해 몸통 팬텀에 방사성동위원소를 주입하고 실제 측정된 CT 영상을 기반으로 장기와 종양에서의 방사선 흡수선량을 몬테카를로 시뮬레이션(Geant 4, geant4-09-06-patch-03)을 이용하여 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. Cu-64 몸통 팬텀 PET/CT 영상화

방사성동위원소의 선량평가는 평균 성인에 대한 해부학적 구조를 제공하는 몸통 팬텀(torso phantom)에서 투여된 방사성동위원소의 영향을 평가하였다. 몸통 팬텀은 폐와 간 그리고 삽입 가능한 척추로 실린더 모양의 물과 아크릴로 구성 되어있으며, 종양을 모사하기 위하여 구 팬텀을 추가로 삽입하여 종양을 가지는 몸통 팬텀을 구현하였다. 몸통 팬텀의 전체 크기는 외경이 26×38 cm<sup>2</sup>이고 내경이 24×36 cm<sup>2</sup>이며 벽의 두께는 9.5 mm이다. 각 영역의 부피는 폐 2,000 cc, 간 1,200 cc, 종양1 10 cc, 그리고 종양2 5 cc이다.

몸통 팬텀의 방사성동위원소를 평가하기 위해 Cu-64를 간에 48.1 MBq, 폐에 15.28 MBq, 종양1에 0.74 MBq, 종양2에 0.74 MBq, 배경에 9.99 MBq 주입 하고 유리선량계(glass dosimeter, GD-302M, AGC Techno Glass Co.Ltd, Japan)를 삽입하여 측정하였다(Fig. 1(a)). 몸통 팬텀의 영상화는 SIEMENS 사의 Biograph TruePoint PET/CT 스캐너를 이용하여 6.18초 단위로 5.0 mm 두께의 CT 영상을 획득하였으며, 3분 동안 PET 영상을 획득하였다(Fig. 1(b)).

### 2. 장기별 영역 분할 및 잔류시간 평가

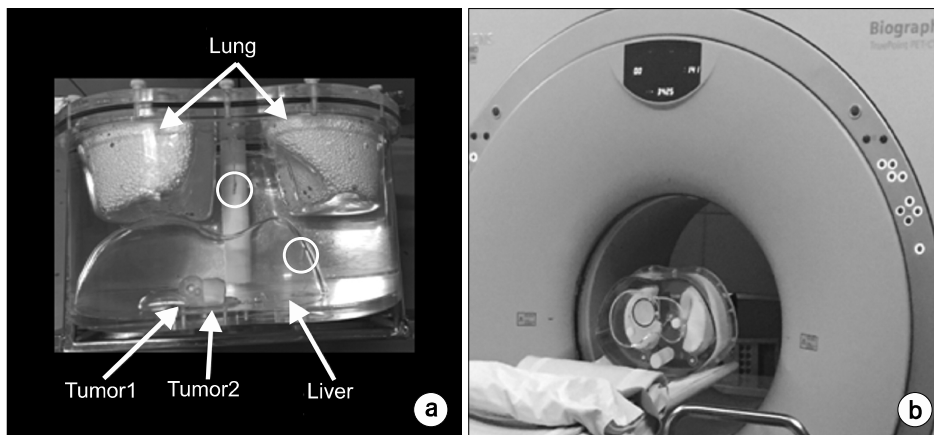
각 영역의 분할은 CT 영상을 이용하여 평균값과 메뉴얼 방법을 이용하여 정의하였으며, 각 영역별 위치와 방사성동위원소의 방사능량은 CT영상을 통해 얻은 해부학적 정보와 시간 변화에 따른 PET 영상을 이용하여 획득하였다.<sup>13)</sup> 각 영역별 누적된 방사능량은 시간 변화에 따라 측정된 방사능량을 다음 식을 이용하여 계산하였다.<sup>14)</sup>

$$\bar{A}_h = \int_0^{\infty} A(t) dt \quad (1)$$

식 (1)에서  $\bar{A}_h$ 는 누적된 방사능량이며, A(t)는 시간 t에서 측정된 방사능량이다. 잔류시간(residence time)은 대상 영역에 주입된 방사능량과 누적된 방사능량의 비율로 다음 식을 이용하여 계산하였다.<sup>15)</sup>

$$\tau_h = \frac{\bar{A}_h}{A_0}, \quad (2)$$

식 (2)에서  $\bar{A}_h$ 는 누적된 방사능량을 나타내며, A<sub>0</sub>는 주입된 초기 방사능량을 의미한다.



**Fig. 1.** Acquired PET data using torso phantom. (a) The shape of torso phantom. Torso phantom made of a cylinder and mimic the human organ which is lung, liver, spine insert. The glass dosimeter (circle line) was located in lung, liver, background, tumor1, and tumor2. (b) Positioning of torso phantom when acquired PET data.

### 3. 몬테카를로 시뮬레이션

각 영역의 S-value는 Fig. 2와 같이 MCNP 코드를 사용한 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 계산하였다.<sup>16)</sup> 몬테카를로 시뮬레이션은 선원, 표적, 검출기를 모델링하였고, 측정된 영상의 영역별 별로 정의된 공간상의 좌표, 복셀 크기 (voxel size), 밀도정보, 잔류시간을 입력 데이터로 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. S-value는 선원영역의 방사성동위원소가 붕괴될 때 표적영역의 흡수선량으로 다음 식을 이용하여 계산하였다.<sup>17)</sup>

$$S(r_{target} \leftarrow r_{source}) = \frac{k \sum_i y_i E_i \Phi_i(r_{target} \leftarrow r_{source})}{m_{target}} \quad (3)$$

여기서 k는 비례상수이고  $y_i$ 는 방사선 개수를 나타내고  $E_i$ 는 i번째 방사선당 에너지를 나타내며  $\Phi$ 는 에너지방출 변화를 m은 표적영역의 질량을 나타낸다.

### 4. Cu-64 흡수선량 평가

흡수선량은 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 계산된 S-value와 누적된 방사능의 곱으로 다음 식을 이용하여 계산하였다.<sup>18)</sup>

$$D = \tilde{A} \cdot S = A_0 \cdot \tau \cdot S \quad (4)$$

여기서  $A_0$ 는 초기에 주입된 양이며  $\tau$ 는 누적된 방사선의 양 그리고 S는 S-value이다. 흡수선량은 각 영역에 대한 S-value, 잔류시간, 방사성동위원소의 정보를 종합하여 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 복셀 단위로 계산하였다. 팬텀내 선량은 FGD-1000 판독기(ASAHI Glass Cor., Japan)를 이용하여 팬텀내 삽입한 유리선량계의 선량을 측정하였다. 유리선량계 교정은 공기 및 팬텀 내에서 2 Gy에 대하여 표준 유리선량계(GDS-301-AH)의 기준선량을 획득하여 보정해주었다.

## 결 과

### 1. Cu-64 몸통 팬텀의 PET/CT 영상화

Cu-64 73.85 MBq이 주입된 몸통 팬텀은 PET/CT를 이용하여 Fig. 3과 같이 영상화하였다. 장기 및 관심영역의 경계는 CT 영상의 해부학적 정보를 이용하여 설정하였고, 방사성물질의 방사능 정보는 PET 영상을 이용하여 시간 변화에 따른 방사성물질의 방사능량으로 계산하였다.

### 2. 장기별 영역 분할 및 잔류시간 평가

장기와 종양 영역은 CT영상의 해부학적 정보를 이용하여 영역의 평균값과 매뉴얼 정보로 그림 Fig. 4(a)와 같이 분할하였다. Cu-64 방사성동위원소의 몸통 팬텀내 영역은 간, 폐, 종양1, 종양2, 그리고 배경 값들을 정의하기 위한 영역으로 나누었다. 잔류시간은 분할된 영역의 Cu-64 방사능량을 시

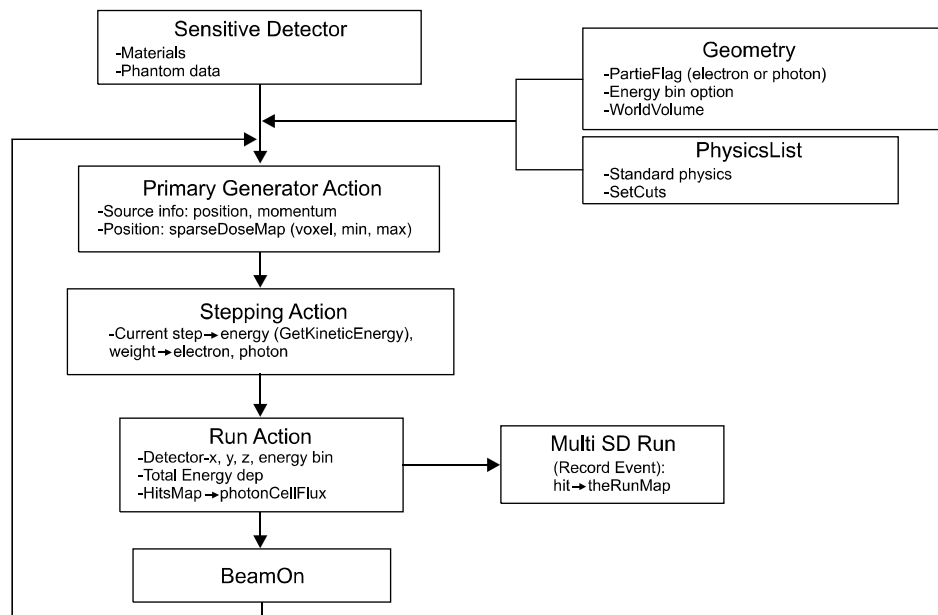
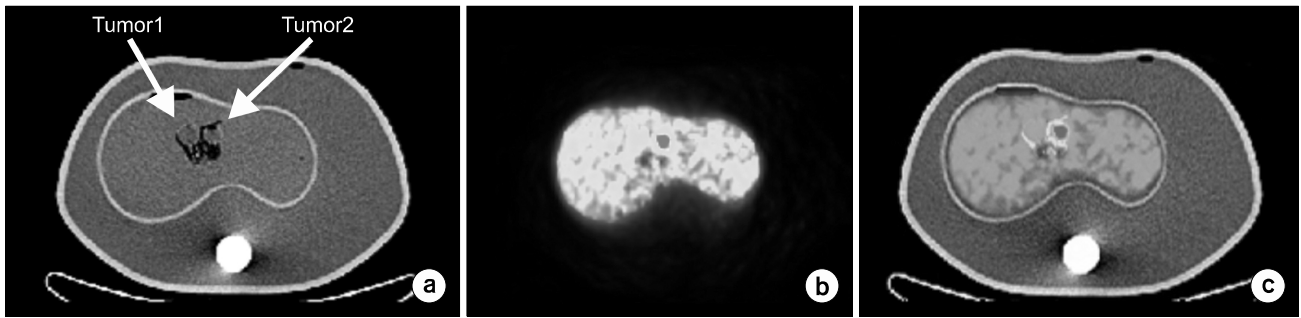
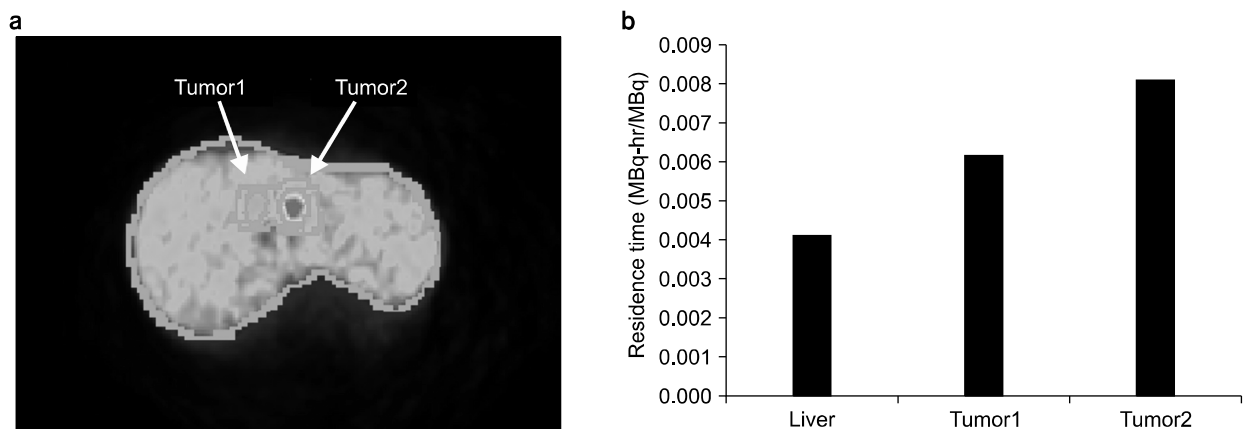


Fig. 2. The scheme of Monte Carlo simulation. This process was used a MCNP code and CT density information and acquired radioactivity using PET data.



**Fig. 3.** Acquired image data using the PET/CT scanner. (a) Acquired CT image using torso phantom. (b) Acquired Cu-64 radioisotope and PET data using torso phantom. (c) PET/CT fusion data.



**Fig. 4.** Measured residence time. (a) Segmentation method using a mean-based region growing method and performer manually. (b) Residence time in Liver, tumor1, and tumor2. Residence time (MBq-hr/MBq) was calculated by area under the curve of time-activity curves expressed as percentage of injected radioactivity (data not shown).

간에 따라 측정하고 Fig. 4(b)와 같이 시간 변화에 따른 그래프 면적을 평가하여 간에서  $4.13\text{E-}03$  MBq-hr/MBq, 종양1에서  $6.15\text{E-}03$  MBq-hr/MBq, 종양2에서  $8.06\text{E-}03$  MBq-hr/MBq로 평가하였다.

### 3. 몬테카를로 시뮬레이션

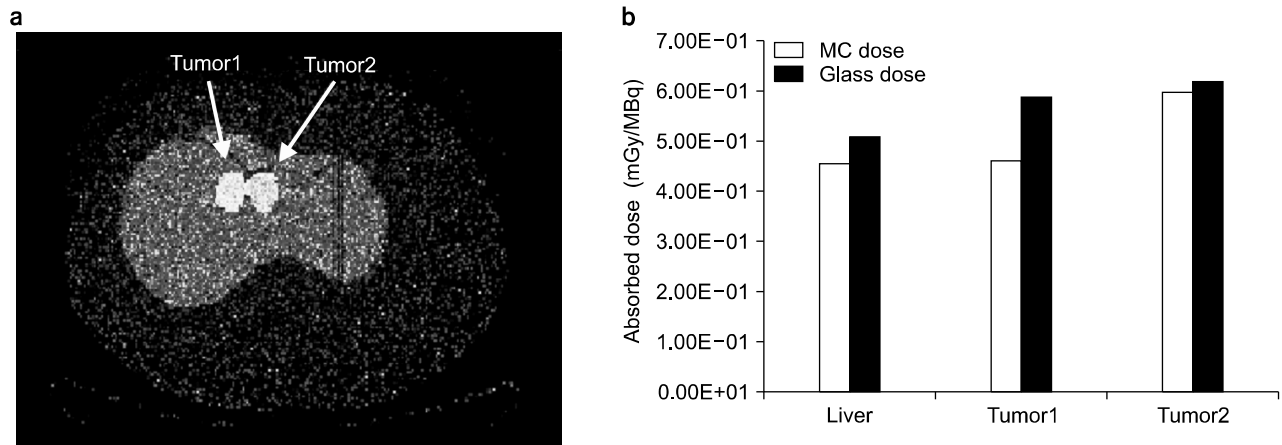
각 영역의 에너지 분포(Energy map)는 획득된 영상의 정의된 공간상의 좌표, 복셀 크기, 밀도정보를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행함으로써 Fig. 5(a)와 같이 획득되었다. 에너지 맵을 이용하여 각 영역 내와 영역간의 영향요소 즉 S-value를 계산하여 Table 1에 나타내었다. 간에서의 S-value는  $7.79\text{E+}01$  mGy/MBq, 간이 폐에 미치는 영향 S-value는  $6.84\text{E-}01$  mGy/MBq, 간이 종양1에 미치는 영향 S-value는  $9.24$  mGy/MBq, 간이 종양2에 미치는 영향 S-value는  $9.08$  mGy/MBq이었다.

### 4. Cu-64 흡수선량 평가

유리선량계를 이용하여 획득된 몸통 팬텀의 Cu-64 방사성동위원소 실제 선량은 간에서  $5.09\text{E-}01$  mGy/MBq, 종양1에서  $5.92\text{E-}01$  mGy/MBq, 종양2에서  $6.22\text{E-}01$  mGy/MBq로 평가되었다. 흡수선량은 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 획득한 S-value와 PET 영상을 이용하여 획득한 잔류시간을 이용하여 Fig. 5(b)와 같이 계산하였다. 간에서의 흡수선량은  $4.52\text{E-}02$  mGy/MBq, 종양1에서의 흡수선량은  $4.61\text{E-}02$  mGy/MBq, 종양2에서의 흡수선량은  $5.98\text{E-}02$  mGy/MBq으로 평가되었다.

### 고 찰

본 연구에서는 방사성동위원소의 흡수선량 평가를 위하여 몸통 팬텀의 PET/CT 영상을 획득하고 영상을 기반으로



**Fig. 5.** Calculated absorbed dose in torso phantom. (a) Indicate absorbed dose map of voxel unit was obtained density information using Monte Carlo simulation. (b) Compared the absorbed dose of MC dose and Glass dosimeter dose in liver, tumor1, and tumor2.

**Table 1.** Monte Carlo simulated S-value of organs and tumors in torso phantom.

S-value (mGy/MBq)	Liver	Lung	Tumor1	Tumor2
Liver	7.79E+01	6.84E-01	9.25E+00	9.09E+00
Lung	7.16E-01	7.48E+01	6.98E-01	5.90E-01
Tumor1	8.40E-02	6.51E-03	7.43E+01	4.56E-01
Tumor2	6.49E-02	5.05E-03	3.75E-01	7.39E+01

방사성동위원소의 선량을 평가하는 방법에 대하여 제시하였다. 분할된 관심영역 정보를 이용하여 수행된 몬테카를로 시뮬레이션은 각 영역별 에너지 분포를 계산하였으며 이를 이용하여 각 영역별 영향요소 S-value를 계산할 수 있었다. 몸통 팬텀은 폐, 간, 척추로 구성되어 있으며, 구 모형을 삽입함으로써 종양을 모사할 수 있어 각 영역과 구 영역 즉 종양모형에 Cu-64 방사성동위원소를 주입하여 실제 환자와 유사한 환경을 구축하였다.

각 영역의 방사성동위원소 잔류시간은 CT영상의 해부학적 정보를 이용함으로써 보다 정확하게 영역을 분할 할 수 있었으며 CT영상에서 정의된 영역을 바탕으로 PET 영상내 영역을 정확히 정의할 수 있었다. 정의된 관심영역을 이용하여 PET 영상내 영역별 방사능량을 측정할 수 있었으며, 이를 이용하여 잔류시간을 평가하였다. 5 cc에 Cu-64 0.74 MBq이 주입된 종양2 영역에서의 잔류시간이 8.06E-03 MBq-hr/MBq로 평가되었으며 1200 cc에 48.1 MBq 주입된 간에서의 잔류시간이 4.13E-03 MBq-hr/MBq로 평가되어 종양2에 비해 약 2 배 낮게 평가되었다.

방사성동위원소의 흡수선량 평가를 위해 사용된 MCNP 코드는 입력된 방사성동위원소 데이터에 대하여 각 영역별 에너지 축적 영상을 획득하는데 이용할 수 있었다. 획득된 에너지 영상을 기반으로 계산된 S-value는 각 영역별 영향요소인 S-value를 측정할 수 있었으며 이를 이용하여 방사성동위원소의 복셀 단위의 흡수선량을 평가할 수 있었다. 자기 조사(self irradiation)와 교차 조사(cross irradiation)에 의한 영향 값의 평가는 크기와 위치에 따른 정확한 S-value를 계산할 수 있음을 확인하였다.

영상기반 몬테카를로 시뮬레이션의 검증을 위하여 측정된 유리선량계 값은 Cu-64가 주입된 팬텀 내에서 감마선의 선량을 평가할 수 있었으며, 10 MBq이 주입된 종양2에서 6.22E-01 mGy/MBq로 가장 높은 선량이 평가되었다. 유리선량계에서 측정된 선량 값과 시뮬레이션을 통해 획득된 선량 값을 비교해보면 Fig. 5(b)에서와 같이 영역별로 차이가 있으나 평균 12.3%의 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 영상기반의 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 흡수선량 평가 방법은 기존에 평가하지 못하였던 관심영역에 대하여 선량평가가 가능하였으며 진단용 방사성동위원소를 이용하여 치료용 방사성동위원소의 치료반응을 예측할 수 있음을 확인하였다.

## 결론

본 연구에서는 방사성동위원소의 선량평가를 위하여 몸통 팬텀에 Cu-64 방사성동위원소를 주입하고 획득된 영상을 기반으로 장기와 종양에서의 흡수선량을 몬테카를로 시

물레이션을 이용하여 평가하였다. PET/CT 영상은 몸통 팬텀에 방사성동위원소와 유리선량계를 주입하여 획득하였으며 CT 영상의 해부학적 정보를 이용하여 각 영역을 분할하고 PET 영상과 융합하여 시간에 따른 방사능량을 측정함으로써 각 영역별 방사성동위원소의 잔류시간을 계산하였다. 각 영역에서 발생된 방사선이 흡수된 에너지 지도를 바탕으로 계산된 S-value는 몬테카를로 시물레이션을 이용하여 계산된 에너지 분포에서 각 영역별 거리정보를 이용하여 계산하였다. 흡수선량은 복셀 단위의 방사능량과 시물레이션된 S-value를 이용하여 각 영역에 대하여 계산하였으며 12.3%의 차이를 보였다. 본 연구는 영상기반의 몬테카를로 시물레이션 방법을 이용한 방사성동위원소의 선량평가 방법을 제시하였고 적용 가능성을 확인하였다. 개발된 방사성동위원소의 선량평가 방법은 개인차를 반영한 방사성동위원소의 선량 평가와 위치 및 크기가 다양한 종양의 선량평가가 가능할 것으로 기대된다.

## References

1. Bar-Shalom R, Yefremov N, Guralnik L, et al: Clinical performance of PET/CT in evaluation of cancer: additional value for diagnostic imaging and patient management. *J Nucl Med* 44(8): 1200-1209 (2003)
2. Antoch G, Saoudi N, Kuehl H, et al: Accuracy of whole-body dual-modality fluorine-18-2-fluoro-2-deoxy-D-glucose positron emission tomography and computed tomography (FDG-PET/CT) for tumor staging in solid tumors: comparison with CT and PET. *J Clin Oncol* 22(21): 4357-4368 (2004)
3. Mack A, Scheib SG, Major J, et al: Precision dosimetry for narrow photon beams used in radiosurgery Determination of Gamma Knife output factors. *Med Phys* 29:2080-2089 (2002)
4. Huang SY, Bolch WE, Lee C, et al: Patient-specific dosimetry using pretherapy [ $^{124}\text{I}$ ]m-iodobenzylguanidine ([ $^{124}\text{I}$ ]mIBG) dynamic PET/CT imaging before [ $^{131}\text{I}$ ]mIBG targeted radionuclide therapy for neuroblastoma. *Mol Imaging Biol* 17(2):284-294 (2015)
5. Neto VL, Vieira JW, Lima FR: Application for internal dosimetry using biokinetic distribution of photons based on nuclear medicine images. *Radiol Bras. Set* 47:275-282 (2014)
6. Miller G, Martz HF, Little TT, et al: Bayesian internal dosimetry calculations using Markov Chain Monte Carlo. *Radiation Protection Dosimetry* 98:191-198 (2002)
7. Berger MJ: MIRD Pamphlet No. 7: distribution of absorbed doses around point sources of electrons and beta particles in water and other media. *J Nucl Med* 12:5-23 (1971)
8. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, et al: MIRD Pamphlet No. 11: 'S', Absorbed dose per unit cumulated activity for selected radionuclides and organs, The Society of Nuclear Medicine, New York (1975)
9. Stabin MG: MIRDose: personal computer software for internal dose assessment in nuclear medicine. *J Nucl Med* 37:538-546 (1996)
10. Caon M: Voxel-based computational models of real human anatomy: a review. *Radiat Environ Biophys* 42:229-235 (2004)
11. Stabin MG, Richard B, Sparks, Eric Crowe: OLINDA/EXM: The Second-Generation Personal Computer Software for Internal Dose Assessment in Nuclear Medicine. *THE JOURNAL OF NUCLEAR MEDICINE* 46:1023-1027 (2005)
12. Thomas SR, Stabin MG, Chen CT, et al: MIRD Pamphlet No. 14: A Dynamic Urinary Bladder Model for Radiation Dose Calculations. *The Journal of Nuclear Medicine* 33:783-802 (1992)
13. Koepfli P, Hany TF, Wyss CA, et al: CT attenuation correction for myocardial perfusion quantification using a PET/CT hybrid scanner. *J Nucl Med* 45(4):537-542 (2004)
14. Stabin MG, Flux GD: Internal dosimetry as a tool for radiation protection of the patient in nuclear medicine. *Biomed Imaging Interv J* 3(2)e28:1-11 (2007)
15. Treyer V, Streffer J, Ametamey SM, et al: Radiation dosimetry and biodistribution of  $^{11}\text{C}$ -ABP688 measured in healthy volunteers. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 35:766-770 (2008)
16. Stabin MG, Yoriyaz H: Photon specific absorbed fractions calculated in the trunk of an adult male voxel-based phantom. *Health Phys* 82:21-44 (2002)
17. Stabin MG: Nuclear medicine dosimetry. *Phys Med Biol* 51:R187-R202 (2006)
18. Loevinger R, Budinger T, Watson E: MIRD Primer for Absorbed Dose Calculations, Society of Nuclear Medicine, New York (1988)

## 영상기반 방사성동위원소 흡수선량 평가

한국원자력의학원 \*RI융합부, <sup>†</sup>방사선종양학과

박용성\* · 이용진\* · 김 욱\* · 지영훈<sup>†</sup> · 김근배<sup>†</sup> · 강주현\* · 임상무\* · 우상근\*

디지털 팬텀을 사용한 선량평가 방법은 일반화된 장기에 대해서만 평가가 가능하여 종양에 대한 선량평가가 불가능하다. 이에 본 연구에서는 몸통 팬텀에 방사성동위원소를 주입하고 실제 측정된 CT 영상을 기반으로 장기와 종양에 대하여 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 S-value를 계산함으로써 장기와 종양에 대한 흡수선량을 평가하고자 하였다. 몸통 팬텀은 폐, 간, 척추, 실린더로 구성되어 있으며 구 모형 팬텀을 이용하여 종양을 모사하였다. 방사성동위원소의 실제 선량 측정은 방사성동위원소 Cu-64 73.85 MBq 주입된 몸통 팬텀에 유리선량계(glass dosimeter)를 삽입하여 방사성동위원소의 선량을 측정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을 위한 몸통 팬텀의 각 영역 정보는 Cu-64가 주입된 몸통 팬텀을 이용하여 PET/CT 영상을 획득하고 CT영상의 해부학적 정보를 우선으로 평균값과 매뉴얼로 각 장기 및 종양을 영역별로 분할하여 제공하였다. 방사성동위원소의 영역별 잔류시간은 PET 영상에서 분할된 영역을 기반으로 시간변화에 따라 Cu-64 방사능량을 측정하여 계산하였다. 각 영역의 S-value는 몬테카를로 시뮬레이션에 입력된 공간상의 좌표, 복셀 크기, 밀도정보를 사용하여 계산하였다. 흡수선량 평가는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 선량분포를 계산하였으며 각 영역별로 미치는 S-value와 잔류시간을 이용하여 계산하였다. 각 영역에서의 흡수선량은 간에서  $4.52 \times 10^{-2}$  mGy/MBq, 종양1에서  $4.61 \times 10^{-2}$  mGy/MBq, 그리고 종양2에서  $5.98 \times 10^{-2}$  mGy/MBq으로 평가되었다. 유리선량계로 측정된 선량 값과 시뮬레이션을 통해 계산된 선량 값의 차이는 평균 12.3% 이내의 차이를 보였다. 본 연구결과는 다양한 크기와 위치에 대하여 영상기반 선량평가의 적용가능성을 제시하였다.

---

중심단어: 몸통 팬텀, 유리선량계, 흡수선량, PET/CT, Cu-64