

&lt;원저&gt;

## 몬테카를로 시뮬레이션 기반 밀도에 따른 다양한 검출기 물질을 적용한 획득 영상 평가

이나눔·최다솜·이지수·박찬록

전주대학교 방사선학과

### Evaluation of Image Quality by Using Various Detector Materials according to Density : Monte Carlo Simulation Study

Na-Num LEE·Da-Som Choi·Ji-Su Lee·Chan-Rok Park

Department of Radiological Science, Jeonju University

**Abstract** The detector performance is important role in acquiring the gamma rays from patients. Among parameters of detector performances, there is density, which relates to respond to gamma rays. Therefore, we confirm the detection efficiency according to various detector materials based on the density parameter using GATE (geant4 application for emission tomography) simulation tool. The NaI (density:  $3.67 \text{ g/cm}^3$ ), CZT (Cadmium Zinc Telluride) (density:  $5.80 \text{ g/cm}^3$ ), CdTe (Cadmium Telluride) ( $5.85 \text{ g/cm}^3$ ), and GAGG (Gadolinium Aluminum Gallium Garnet) (density  $\text{g/cm}^3$ ) were used as detector materials. In addition, the point source and quadrant bar phantom, which is modeled for 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 mm thicknesses, were modeled to confirm the quatitative analysis using sensitivity (cps/MBq) and the full width at half maximum (FWHM, mm) at the 2.0 mm bar thickness containing visual evaluation. Based on the results, the sensitivity for NaI, CZT, CdTe, and GAGG detector materials were 0.12, 0.15, 0.16, and 0.18 cps/MBq. In addition, the FWHM for quadrant bar phantom in the 2.0 mm bar thickness is 3.72, 3.69, 3.70, and 3.73 mm for NaI, CZT, CdTe, and GAGG materials, respectively. Compared with performance of detector materials according to density, the high density can improve detection efficiency in terms of sensitivity and mean count. Among these detector materials, the GAGG material is efficient for detection of gamma rays.

**Key Words:** Pointsource, Quadrant bar phantom, Sensitivity, Density, Nuclear Medicine

**중심 단어:** 점선원, 사분할 바 팬텀, 민감도, 밀도, 핵의학

## 1. 서론

핵의학 영상은 인체에 목적으로 하는 표적 장기로 향하는 방사성동위원소를 주입하고, 인체로부터 방출되는 감마선을 핵의학 장치를 이용하여 검출하고, 이를 영상화하는 원리를 적용한다[1-3]. 핵의학검사는 다른 검사에 비하여 질병으로 인한 해부학적인 이상이 생기기 이전에 나타나는 기능적인

이상을 찾아내기 때문에 질병을 조기진단을 할 수 있는 장점이 있다[4]. 방출 감마선은 조준기 통과 후, 검출기에 도달하고 있으며, 검출기는 계수효율, 해상력 등 영상의 질을 결정하는 매우 중요한 역할을 하고 있다[5]. 일반적으로 감마카메라에서의 범용적인 검출기 물질 종류는 주로 140 keV의 에너지 영역대를 계측하는 탈륨을 도포한 NaI(밀도=  $3.67 \text{ g/cm}^3$ )가 주로 사용되고 있으며, 511 keV의 에너지를 검출하는 PET

This work was supported by the Korea Foundation for the Advancement of Science & Creativity (KOFAC), and funded by the Korean Government(MOE).

Corresponding author: Chan-Rok Park, Department of Radiological Science, Jeonju University, 303, Cheonjam-ro, Wansan-gu, Jeonju-si, Chollabuk-do, 55069, Republic of Korea / Tel: +82-63-220-2220 / E-mail: tigeaglepcr@jj.ac.kr

Received 10 August 2021; Revised 25 August 2021; Accepted 8 September 2021

Copyright ©2021 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

(positron emission tomography)은 LSO (lutetium oxy-orthosilicate; 밀도= 7.4 g/cm<sup>3</sup>)를 적용하고 있다. 우수한 검출기는 입사한 감마선의 비례하는 섬광 및 전자가 생성되는 것이고, 검출기 물질의 유효 원자번호, 밀도, 출력 파장, 감쇠 시간, 빛 변환 효율, 경제성 등 물리·화학적 특성에 따라 결정된다[6]. 특히, 높은 유효원자번호에 따른 고밀도 검출기 물질은 화학적 내성이 높고, 입사 감마선에 대한 반응 효율이 우수한 특징이 있다. 최근에는 검출기 물질 NaI의 대체물질로 CZT (Cadmium Zinc Telluride; 밀도: 5.8 g/cm<sup>3</sup>) 기반의 D-SPECT(Spectrum Dynamics, Israel)가 심장 전용 핵의학 장치로 개발되어 환자 검사에 이용하고 있다[7]. 새로운 검출기 개발 및 임상 적용은 영상의 질을 향상시킬 수 있는 기반이 되므로, 개발된 검출기 물질 외에도 영상의 질을 향상시키기 위하여 다양한 변수들을 고려한 새로운 검출기 물질의 개발에 대한 연구가 더욱 필요한 시점이다.

현재 임상에서 적용되는 검출기 물질 외에도 새로운 검출기의 특성을 평가하기 위하여 Monte Carlo 기반 GATE (Geant4 application for tomographic emission) 시뮬레이션 툴을 사용하고 있다. 검출기의 기하학적 모양과 크기, 물질의 종류 등 다양한 환경 구연 가능하며, GATE 툴의 유용성은 여러 연구 결과를 통해 입증되었다[8-10]. 또한, 수치의 확률적 분포를 실험의 통계로부터 구하는 방법 기반으로, 실제 장치와 같은 구조를 다양한 코드를 통해 설계가 가능하고, 팬텀이나 방사성 선원 등의 특성 및 형태의 모사가 가능하므로 시뮬레이션을 통해 핵의학 장치 및 영상의 성능 평가가 가능하기 때문에 다양한 연구에 적용하고 있다[11].

그러므로 이번 연구의 목적은 GATE 시뮬레이션 기반 새

로운 검출기 물질 개발을 위하여 밀도에 따른 영상을 획득 및 평가를 통해 검출기의 특성을 평가해보고자 한다.

## II. 대상 및 방법

### 1. GATE 시뮬레이션 기반 감마카메라 모사

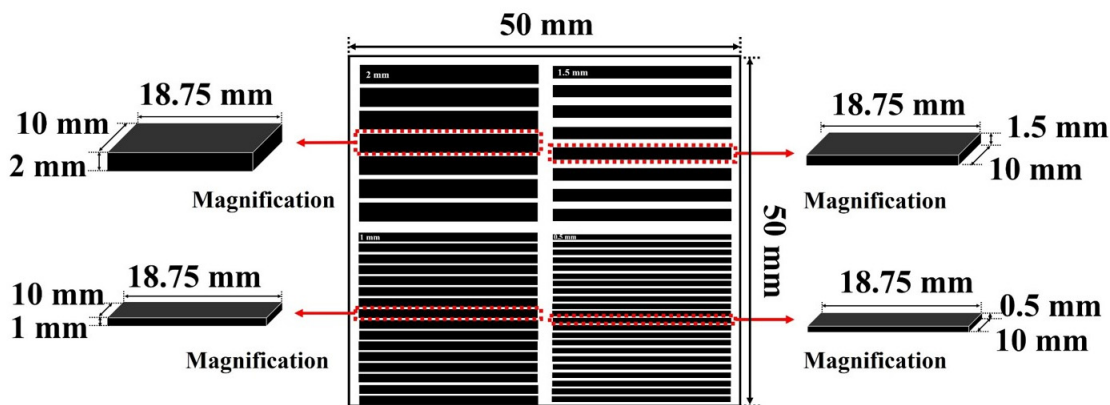
감마카메라 모사를 위하여 GATE 시뮬레이션 툴을 사용하였다. 검출기 모사를 위하여 51.2 × 51.2 mm<sup>2</sup>의 크기와 홀의 길이는 2 cm의 텅스텐 물질의 조건기를 모사하였다. 이번 연구에서 적용된 밀도 기반 검출기 물질은 Table 1과 같다. NaI, CZT, CdTe (Cadmium Telluride; 밀도= 5.85 g/cm<sup>3</sup>), GAGG (Gadolinium Aluminum Gallium Garnet; 밀도 = 6.63 g/cm<sup>3</sup>)다. 검출기 크기는 51.2 × 51.2 × 3 mm<sup>3</sup>로 모사하였다. 영상획득을 위하여 1 MBq 점선원과 사분할 바 팬텀을 모사하고 600초 동안 140 keV의 <sup>99m</sup>Tc 방사성동위원소를 이용하여 ±10%의 에너지 대역폭을 설정하고 검출기 물질에 따라 각각 영상을 획득하였다. 또한, 0.4 × 0.4 mm<sup>2</sup>의 픽셀크기로 128 × 128의 매트릭스 크기의 영상을 획득했다.

### 2. 사분할 바 (quadrant bar) 팬텀 모델링

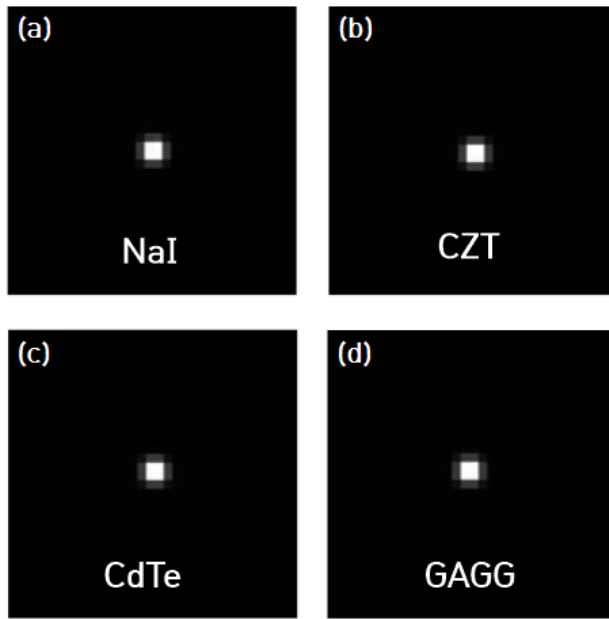
Fig. 1은 사분할 바 팬텀의 모식도를 나타내었다. Monte Carlo 시뮬레이션 기반 감마카메라와 사분할 바 팬텀은 Park 등의 제안한 모델링을 참고하였다[12]. 핵의학 영상

**Table 1.** Density according to detector materials

Material	NaI	CZT	CdTe	GAGG
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.67	5.80	5.85	6.63



**Fig. 1.** Diagram of quadrant bar phantom according to four thicknesses (0.5, 1, 1.5, and 2 mm).



**Fig. 2.** Point source images according to (a) NaI, (b) CZT, (c) CdTe, and (d) GAGG detector materials, respectively.

정도관리의 대표적으로 사용되는 사분할 바 팬텀은 4개의 각각 두께가 다른 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm) 바가  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 의 크기로, 각 바의 영상획득 후 평가가 가능하도록 모사하였다.

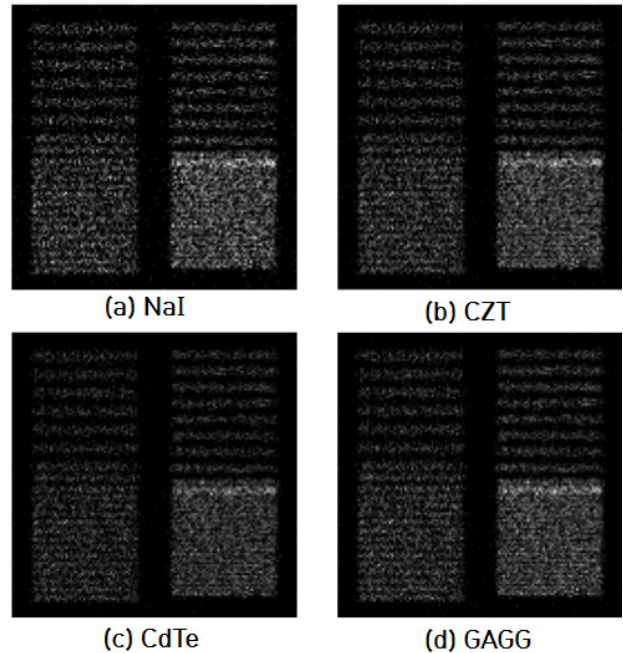
### 3. 영상평가

본 연구에서는 정량적 평가와 정성적 평가를 하였다. 검출기 물질에 따른 각각 획득한 점선원 영상을 정량적으로 분석하기 위하여 검출기 물질에 따른 민감도 (cps/MBq) 평가 인자를 사용하였다. 사분할 바 팬텀의 2.0 mm에서의 반치폭을 구하여 비교 평가하였다. 또한, 정성적 분석으로 획득한 사분할 바 팬텀을 연구원 10명을 기준으로 육안평가를 시행하였다.

## III. 결과

### 1. 검출기 물질에 따른 획득 영상

Fig. 2은 NaI, CZT, CdTe, GAGG 검출기 물질 기반 점선원 영상을 나타냈다. Fig. 3은 사분할 바 팬텀을 적용하여 획득한 영상을 나타냈다. 육안평가로는 1.5 mm와 2.0 mm의 바는 구분이 가능하였으며, 1.0 mm 이하의 바는 육안으



**Fig. 3.** Quadrant bar phantom images according to (a) NaI, (b) CZT, (c) CdTe, and (d) GAGG detector materials, respectively.

로 구분이 불가능하였다.

### 2. 검출기 물질에 따른 민감도와 반치폭 분석

Fig. 4는 검출기 물질에 따른 점 선원에 대한 민감도 결과다. NaI, CZT, CdTe, GAGG 검출기 물질 순서로 우수한 검출 효율을 나타냈으며, 0.12, 0.15, 0.16, 0.18 cps/MBq의 민감도 결과값을 보였다. 각각 검출기 밀도 값에 따른 3.67, 5.80, 5.85, 6.63  $\text{g/cm}^3$ 와 비교했을 때 CZT와 CdTe의 비슷한 밀도 값과 민감도 측면에서 비슷한 결과값으로 나타났다.

Fig. 5는 검출기 물질에 대한 반치폭 결과값이다. 2.0 mm의 바 두께를 기준으로 NaI, CZT, CdTe, GAGG 검출기 물질 순서로 3.72, 3.69, 3.70, 3.73 mm의 반치폭 결과값이 나타났다.

## IV. 고찰

핵의학 영상의 질은 감마선을 검출하는 검출기의 역할이 매우 중요하다. 전 세계적으로 경제적인 면과 큰 크기의 검출기 제작이 가능한  $\text{Tl}$ 을 도포한 NaI 섬광체 기반 검출기를 사용하고 있다[13]. 하지만, NaI 검출기는 조해성과 낮은 분해능의 단점으로 반도체 기반의 검출기 시스템이 새롭게 개발되어 적용되고

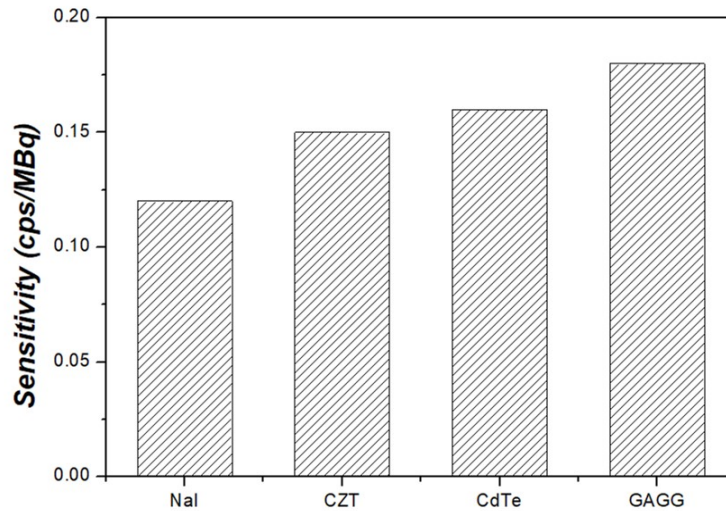


Fig. 4. Result of sensitivity according to NaI, CZT, CdTe, and GAGG detector materials using point source with  $^{99m}\text{Tc}$  radioisotope.

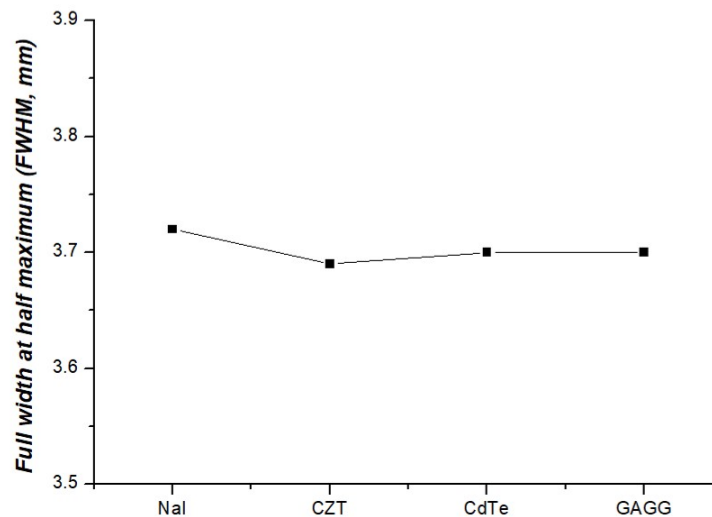


Fig. 5. Result of full width at half maximum (FWHM, mm) according to NaI, CZT, CdTe, and GAGG detector materials using quadrant bar phantom in the 2 mm bar thickness.

있는 시점이다. 또한, 이런 반도체 기반 검출기의 임상 적용을 위하여 사전의 다양한 기하학적, 물리적 변화를 모사하여 특성을 평가할 수 있는 Monte Carlo 시뮬레이션이 대중적으로 사용되고 있다[14, 15]. GATE 시뮬레이션 툴은 검출기의 특성과 물리적 현상을 모델링 함으로써 임상 적용 가능성 유무를 평가할 수 있는 유용한 툴이며, 이와 같은 시뮬레이션 툴의 성능은 많은 연구에서 입증되었다[16]. 따라서 본 연구는 Monte Carlo 기반 GATE 시뮬레이션 툴을 활용해 밀도에 따른 기존의 사용하는 검출기 물질과 새로운 검출기 물질의 검출효율을 점선원과 사분할 바 팬텀 모델링을 통해 확인해

보고자 한다. 결과를 바탕으로, NaI 물질과 CZT, CdTe, GAGG 물질에 대하여 민감도는 약 20.1%, 25.0%, 33.3% 증가함을 확인할 수 있었다. 그러므로 NaI 보다 상대적으로 높은 유효 원자번호로 구성되어 있는 새로운 검출기 물질은 입사되는 감마선의 계측 효율을 높일 수 있는 장점이 있음을 이번 연구를 통하여 확인할 수 있었다. 또한, 정량적 평가로써 사분할 바 팬텀 영상을 기반으로 2 mm 두께의 반치폭은 모든 검출기에서의 크게 차이가 없음을 확인할 수 있었고, 정성적 평가에서도 사분할 바 팬텀의 바 두께를 구분할 수 없었다. 영상의 공간 분해능의 성능을 평가하는 반치폭의 결과를 기반으로 밀도에

다른 검출기 물질 종류와 공간 분해능은 크게 관계가 없음을 확인하였다. 또한, Park 등이 연구한 결과에 따르면 반치폭은 방사성동위원소와 검출 기간 거리와 관계가 있으며, 거리가 증가할수록 반치폭이 증가함으로써 영상의 질을 저하시킴을 증명하였다[12]. M. Ashoor 등은 511 keV의 에너지를 측정하는 PET에서 사용되는 BGO (bismuth germanate), LSO (lutetium oxyortho silicate), LSO (lutetium oxyortho silicate), GSO (gadolinium silicate), LYSO (lutetium yttrium oxyortho)의 검출기 물질 측정 효율을 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용해 비교 분석하였다. 특히, 7.13 g/cm<sup>3</sup>의 BGO와 6.71 g/cm<sup>3</sup>의 GSO 물질의 비교를 통하여 검출효율을 비교 평가하였고, 밀도가 증가할수록 저지능이 증가함으로써 입사되는 감마선의 측정 효율이 증가함으로써 비례관계가 있음을 증명하였다[17]. 또한, CZT와 NaI 검출기 물질을 실제 임상에서 사용되고 있는 핵의학 장치를 활용하여 140 keV의 <sup>99m</sup>Tc 방사성동위원소를 brain 팬텀에 주입하여 민감도와 공간분해능을 J. W. Douglas 등이 평가하였다. 결과에 따르면, CZT 검출기 적용의 획득 영상 민감도는 NaI 검출기 적용 획득 영상 민감도보다 약 71% 우수함을 확인하였다[18]. 위의 두 유사연구 결과를 참고하여 PET 검출기 물질이 아닌 감마카메라의 검출기 물질의 평가와 유용성이 입증된 핵의학 검출기 모사 및 영상 획득이 가능한 시뮬레이션을 통하여 새로운 검출기에 따른 영상의 질 평가에 대한 연구를 진행하였고, 검출기 물질에 따라 NaI, CZT, CdTe, GAGG 순으로 물질의 밀도가 상승함에 따라 민감도가 향상됨을 연구를 통해 확인하였다. 본 연구는 한계점으로는 입사되는 감마선을 측정하는데 필요한 다양한 인자 중 밀도에만 중점을 두었다. 추후 연구에서는 한계점을 보완하여 밀도뿐만 아니라 감쇠 시간, 빛 변환 효율 등 검출기 물질의 다양한 특성을 반영하여 영상의 질을 분석하고자 한다.

## V. 결론

핵의학 검출기의 결정 요소로서 다양한 물리적 성질 중 밀도가 중요한 역할을 한다. 고밀도의 물질은 유효원자 번호가 높고, 저지능이 상대적으로 낮은 유효원자 번호와 비교했을 때 우수하기 하기 때문에 입사 감마선에 대하여 비례하는 시그널을 생성할 수 있는 확률이 높으므로 성능이 좋은 검출기의 조건이 될 수 있다. 기존의 적용되는 검출기인 NaI를 기반으로 CZT, CdTe, GAGG 물질에 대한 밀도를 기준으로 획득된 영상의 질을 평가하였다. 결과를 기반으로, NaI, CZT, CdTe, GAGG 순으로 검출효율이 우수함을 확인하였고, 각 물질의 밀도값에 비례하는 결과값을 나타냈

다. 본 연구의 시뮬레이션 결과를 기반으로 새로운 검출기 물질 개발에 있어 기초자료의 활용으로 가능할 것으로 사료된다.

## REFERENCES

- [1] Zai P, Hayteri MR, Salei A, Salavati A, Houshmand S, Alavi A. Role of optimal quantification of FDG PET imaging in the clinical practice of radiology. *RadioGraphics*. 2016;36:481-96.
- [2] Tsubakimoto M, Yamashiro T, Tamashiro Y, Murayama S. Quantitative CT density histogram values and standardized uptake values of FDG-PET/CT with respiratory gating can distinguish solid adenocarcinomas from squamous cell carcinomas of the lung. *Radiology*. 2018;100:108-15.
- [3] Anger HO. Scintillation camera with multichannel collimatgors. *Journal of Nuclear Medicine*. 1964;5: 515-31.
- [4] Townsed DW. Multimodality imaging of structure and function. *Physics in Medicine & Biology*. 2008;53: 1-39.
- [5] Madsen MT. Recent advances in SPECT imaging. *Journal of Nuclear Medicine*. 2007;48:661-73.
- [6] Kim J, Park CR. Usefulness of new GAGG scintillation detector for gamma camera: A Monte Carlo simulation study. *Journal of Korean Society Radiology*. 2020;14:511-5.
- [7] Erlandsson K, Kacperski K, Gramberg DV, Hutton BF. Performance evaluation of D-SPECT: A novel SPECT system for nuclear cardiology. *Physics in Medicine & Biology*. 2009;54:2635.
- [8] Lamare F, Turzo A, Bizais Y, Rest CCL, Viscikis D. Validation of a Monte Carlo simulation of the Philips Allegro/GEMINI PET systems using GATE. *Physics in Medicine & Biology*. 2006;51:943.
- [9] Chen CL, Wang Y, Lee JJS, Tsui BMW. Integration of SimSET photon history generator in GATE for efficient Monte Carlo simulations of pinhole SPECT. *Medical Physics*. 2008;35:3278-84.
- [10] Takahashi A, Miwa K, Sasaki M, Baba S. A Monte Carlo study on <sup>223</sup>Ra imaging for unsealed radio-

nuclide therapy. *Medical Physics*. 2016;43:2965-74.

[11] Mok GSP, Du Y, Wang Y, Frey EC, Tsui BMW. Development and validation of a Monte Carlo simulation tool for multi-pinhole SPECT. *Molecular Imaging and Biology*. 2010;12:295-304.

[12] Park CR, Kang S, Lee Y. Similarity analysis of pixelated CdTe semiconductor gamma camera image using a quadrant bar phantom for nuclear medicine: Monte Carlo simulation study. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021;53:1947-54.

[13] Starck S, B ath M, Carlsson S. The use of detective quantum efficiency (DQE) in evaluating the performance of gamma camera systems. *Physics in Medicine & Biology*. 2005;50:1601.

[14] Bae S, Kim J. A study on the radioactive products of components in proton accelerator on short term usage using computed simulation. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2020;43(5): 389-95.

[15] Jang E, Gim Y, Lee S. Marinelli beaker measurement and self absorption correction and application for various environmental samples in Monte Carlo simulation. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2017;40(4):605-11.

[16] Staelens S, Strul D, Santin G, Vandenberghe S, Koole M, D'Asseler Y, Lemahieu I, Walle RV. Monte Carlo simulations of a scintillation camera using GATE: Validation and application modelling. *Physics in Medicine and Biology*. 2003;48:3021.

[17] Ashoor M, Khorshidi A. Evaluation of crystals' morphology on detection efficiency using modern classification criterion and Monte Carlo method in nuclear medicine. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2019;89: 579-85.

[18] Wagennar DJ, Chowdhury S, Engdahl JC, Burchardt DD. Planar image quality comparison between a CdZnTe prototype and a standard NaI(Tl) gamma camera. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2003;505:586-9.

구분	성명	소속	직위
제1저자	이나눔	전주대학교 방사선학과	학부생
공동저자	최다솜	전주대학교 방사선학과	학부생
공동저자	이지수	전주대학교 방사선학과	학부생
교신저자	박찬록	전주대학교 방사선학과	조교수