

# A Study for Analysis of Image Quality Based on the CZT and NaI Detector according to Physical Change in Monte Carlo Simulation

Hye-Rim Ko, Yu-Ri Yoo, Chan-Rok Park\*

Department of Radiological Science, Jeonju University

Received: August 27, 2021. Revised: October 20, 2021. Accepted: October 31, 2021.

## ABSTRACT

In this study, we evaluated image quality by changing collimator length and detector thickness using the Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) simulation tool. The gamma camera based on the Cadimium Zinc Telluride (CZT) and NaI detectors is modeled. In addition the images were acquired by setting 1, 2, 3, 4, 5, and 6 cm collimator length and 1, 3, 5, and 7 mm detector thickness using point source and phantom, which is designed by each diameter (4.45, 3.80, 3.15, 2.55 mm) with 447, 382, 317, and 256 Bq. The sensitivity (cps/MBq) for point source, and signal to noise ratio (SNR) and profile for phantom at the 4.45 mm by drwan the region of interests were used for quantitative analysis. Based on the results, the sensitivity according to collimator length is 2.3 ~ 48.6 cps/MBq for CZT detector, and 1.8 ~ 43.9 cps/MBq for NaI detector. The SNR using phantom is 3.6~9.8 for CZT detector, and 2.9~9.5 for NaI detector. As the collimator length is increased, the image resolution is also improved according to profile results based on the CZT and NaI detector. In addition, the senistivity for detector thickness is 0.04 ~ 0.12 cps/MBq for CZT detector, and 0.03 ~ 0.11 cps/MBq. The SNR using phnatom is 7.3~9.8 count for CZT detector, and 5.9~9.5 for NaI detector. As the detector thickness is increased, the image resolution is decreased according to profile results based on the CZT and NaI detector due to scatter ray. In conclusion, we need to set the geometric material such as detector and collimator to acuquire suitable image quality in nuclear medicine.

Keywords: Monte Carlo, GATE Simulation, Nuclear Medicine, Sensitivity, Detector Material

## I. INTRODUCTION

감마카메라를 이용해 핵의학 진단 영상을 획득하는 원리는 첫째, 타겟 장기에 집적되는 방사성 동위원소를 인체에 주입한다<sup>[1-3]</sup>. 둘째, 주입된 방사성 동위원소는 감마선을 방출하게 되는데, 방출된 감마선은 산란선 제거의 기능을 하는 조준기를 통과한 후, 검출기를 이용해 감마선을 계측하여 영상을 재구성한다<sup>[4]</sup>. 방출되는 감마선을 계측하는 핵의학 영상은 투과되는 X선 검출 원리의 기반을 둔 영상의학 영상과 비교했을 때 상대적으로 검출 광자의 개수가 적기 때문에 조준기와 검출기의 기하

학적 구조 및 물질의 선택이 매우 중요하게 작용하고 있다<sup>[5,6]</sup>. 현재 핵의학 임상에서 대중적으로 평행다공형 형태의 조준기가 장착되어 사용되고 있다<sup>[7]</sup>. 평행다공형 조준기는 영상의 확대·축소 없이 사물 크기와 동일하게 영상획득이 가능하므로 영상의 외곽 부분에 대한 공간분해능 저하가 발생하지 않는 장점이 있다<sup>[8]</sup>. 평행다공형 조준기는 대표적으로 조준기의 격벽의 크기 및 길이의 변화에 따라 364 keV의 에너지를 검출하는 고에너지용 조준기와 140 keV 이하의 에너지를 검출하는 저에너지용 조준기로 분류 할 수 있다<sup>[9]</sup>. 임상에서는 최적의 영상의 질 획득을 위하여 검출하고자 하는 에너지 영

\* Corresponding Author: Chan-Rok Park

E-mail: tigeaglepcr@jj.ac.kr

Tel: +82-63-220-2220

역에 적합한 조준기를 감마카메라에 장착하여 사용하고 있다.

검출기는 TI을 도포한 NaI 섬광체를 일반적으로 적용하고 있다. 조해성의 단점이 있지만, 유효 원자 변화와 밀도가 높아 감마선의 검출효율이 우수하고, 검출기의 크기를 크게 제작할 수 있는 장점이 있기 때문에 주로 적용하고 있다<sup>[10]</sup>. 최근에는 Cadimium Zinc Telluride (CZT) 기반의 반도체 소자를 적용한 감마카메라의 상용화가 진행되고 있다. CZT는 고감도와 높은 안정성으로 검출기 물질로 선호되고 있지만, 큰 크기의 검출기 제작이 어렵고 고가인 단점이 있다. 이와 같은 장·단점을 바탕으로 현재 임상에서는 심장전용 장비로 D-SPECT (Spectrum Dynamics, Israel)가 개발되어 이용되고 있다<sup>[11]</sup>. 검출기 물질이 검출 효율의 성능을 결정하는 주요 인자이고, 그 외에도 검출기의 크기, 구조 등이 있다. 특히, 검출기의 두께에 따라 입사되는 감마선이 반응할 수 있는 면의 두께가 증가하기 때문에 검출기 성능 평가에 있어 중요한 역할을 하고 있다.

그러므로 본 논문에서는 Monte Carlo 시뮬레이션 기반 Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) 툴을 활용해 CZT 와 NaI 검출기 기반 감마카메라를 모사하고, 조준기와 검출기의 물리적 변화를 통하여 획득된 영상의 특징을 분석하고자 한다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. GATE 시뮬레이션 기반 감마카메라 및 팬텀 모델링

감마카메라 모사를 위하여 GATE 시뮬레이션 툴을 사용하였다. 조준기와 검출기 크기는  $51.2 \times 51.2 \text{ mm}^2$  로 각각 동일하게 설정하였고, 길이는 1, 2, 3, 4, 5, 6 cm 로 설정하여 납 물질 조준기를 모사하였고, 검출기 두께는 3 mm로 고정하였다. 또한, 검출기 두께는 1, 3, 5, 7 mm 로 설정하여 CZT 와 NaI 물질 검출기를 모사하였고, 조준기의 길이는 2 cm 로 고정하였다. 영상 획득을 위해 1 MBq 점선원과 지름 크기가 각각 다른 4개의 구를 모사한 팬텀을 모사하여 600초 동안 <sup>99m</sup>Tc (에너지= 140

keV, 에너지 대역폭=  $\pm 10\%$ ) 방사성 동위원소를 이용하여 NaI 와 CZT 검출기에 따른 조준기 길이와 검출기 두께 변화에 따른 영상을 획득하였다. 모든 영상은  $0.8 \times 0.8 \text{ mm}^2$  의 픽셀 크기와  $64 \times 64$  의 매트릭스 크기로 획득하였다. Fig. 1은 팬텀의 모식도를 나타내었다. 팬텀의 구조는 지름의 크기가 40 mm인 실린더형 팬텀에 각각 다른 지름 (4.45, 3.80, 3.15, 2.55 mm)을 가지는 4쌍의 홀을 모사하고, 각 홀의 거리는 1.32, 1.97, 2.62, 3.22 mm 의 간격을 유지하였다. 그리고 각 홀에 대하여 447, 382, 317, and 256 Bq으로 설정하였다.

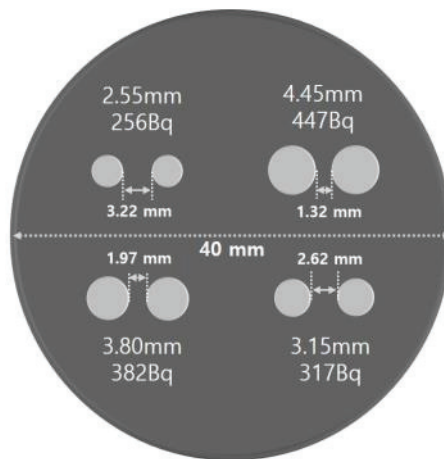


Fig. 1. The Phantom Photo according to Four Diameters (4.45, 3.8, 3.15, 2.55 mm) with 447, 382, 317, and 256 Bq.

### 2. 영상 획득 및 정량적 분석

모든 영상은 NaI 와 CZT 검출기 별로 획득하였다. 1, 2, 3, 4, 5, 6 cm 의 납 물질 조준기의 길이 변화에 따른 점선원과 팬텀영상을 획득 하였다. 획득한 영상을 정량적으로 분석하기 위하여 점선원은 민감도를 이용해 평가하였다. 팬텀 영상은 가장 큰 지름 4.45 mm 구에 관심영역을 설정하고 아래의 식과 같이 signal to noise ratio (SNR)과 프로파일을 이용하여 분석하였다. 또한, 1, 3, 5, 7 mm 검출기 두께에 따른 점선원과 팬텀 영상을 획득하고, 조준기 영상 분석 방법과 동일하게 정량적 분석 인자 값을 적용하여 영상을 비교 분석하였다.

$$SNR = \frac{S_A}{\sigma_A} \quad (1)$$

Eq. (1)에서,  $S_A$ 와  $\sigma_A$  는 설정한 관심영역의 평균값과 표준 편차 값을 의미한다.

### III. RESULT

#### 1. 기하학적 변화에 따른 획득 영상

Fig. 2는 CZT 검출기 기반 조준기 길이 변화에 따른 팬텀 영상이다. Fig. 3은 NaI 검출기 기반 조준기 길이 변화에 따른 팬텀 영상이다. 조준기 변화에 따른 영상의 질은 CZT와 NaI 검출기 기반 획득 영상 모두 조준기의 길이가 길어질수록 구 주변의 산란선이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 조준기 2 cm 이상의 영상에서 더욱 확인 할 수 있으며, CZT 기반 영상의 질이 정성적 평가에서는 NaI 기반 영상의 질 보다 우수함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 CZT 검출기 기반 검출기 두께 변화에 따른 팬텀 영상이다. Fig. 5는 NaI 검출기 기반 검출기 두께 변화에 따른 팬텀 영상을 나타냈다. 1 mm의 검출기 두께 기반 획득 영상 보다 3, 5, 7 mm의 검출기 두께 기반 획득 영상에서 더 선명한 구의 형태를 확인할 수 있었다.

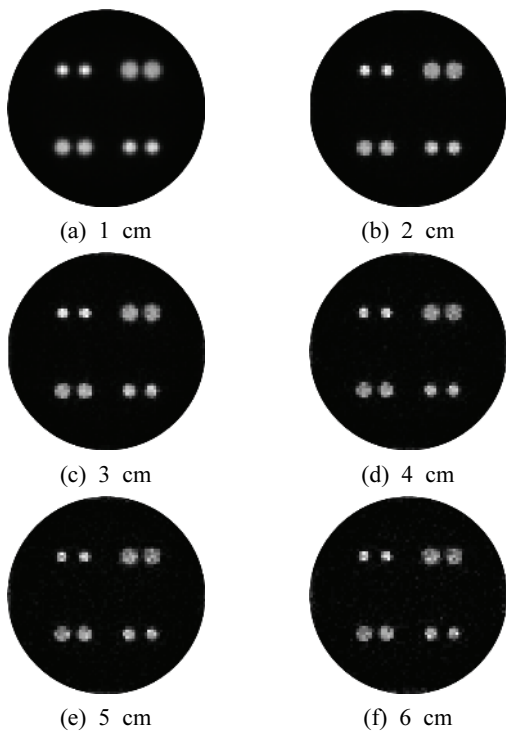


Fig. 2. Phantom Image by Collimator Length based on CZT Detector Material.

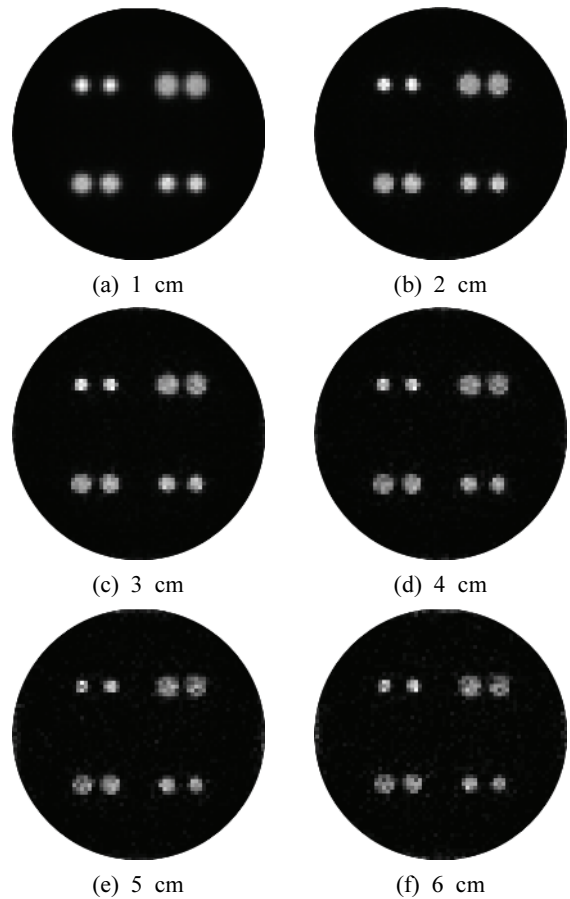


Fig. 3. Phantom Image by Collimator Length based on NaI Detector material.

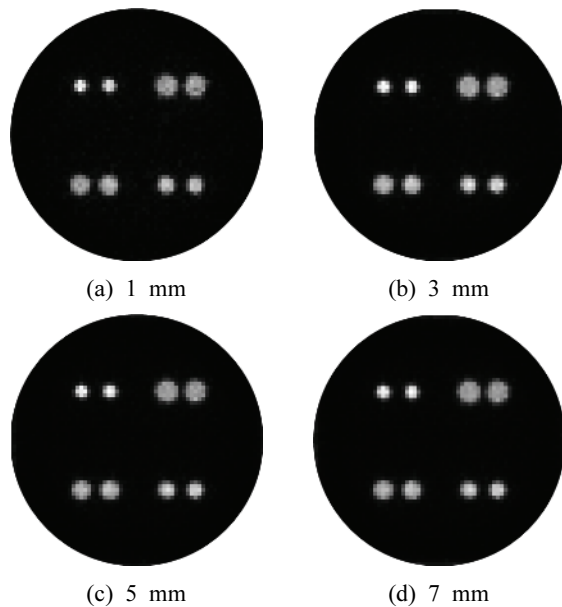


Fig. 4. The Phantom Images according to Detector Thickness based on the CZT Detector Material.

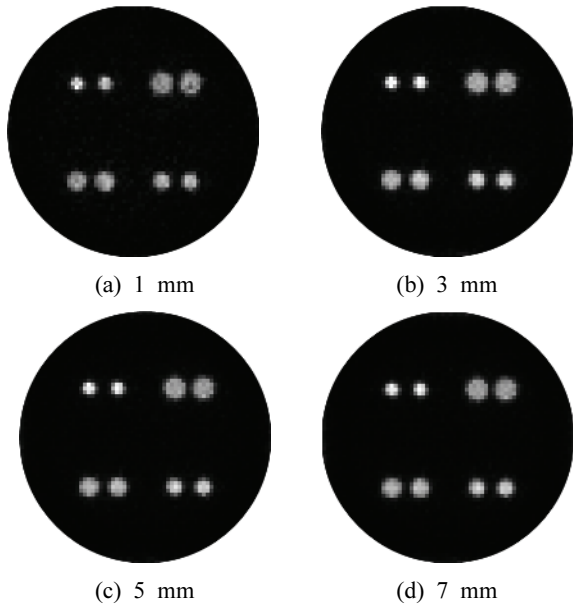


Fig. 5. The Phantom Images according to Detector Thickness based on the NaI Detector Material.

## 2. 민감도, SNR, 프로파일 분석

Fig. 6는 조준기의 길이와 검출기 물질에 따른 점선원 영상에 대한 민감도 결과이다. 조준기 길이 (1, 2, 3, 4, 5, 6 cm) 에 따른 CZT 물질 기반의 민감도 값은 48.6, 22.9, 9.7, 5.3, 3.4, 2.3 cps/MBq 결과 값을 보였고, 같은 물리적 조건에서 NaI 물질 기반의 민감도 값은 43.9, 17.6, 7.4, 4.1, 2.6, 1.8 cps/MBq 결과 값을 보였다. Fig. 7은 조준기의 길이와 검출기 물질 기반 팬텀을 적용하여 획득한 영상에 대한 SNR 결과이다. 조준기 길이 (1, 2, 3, 4, 5, 6 cm) 에 따른 CZT 물질 기반의 SNR은 9.7, 8.5, 6.2, 6.1, 4.2, 3.6이고, 같은 물리적 조건에서 NaI 물질 기반의 SNR은 9.5, 8.3, 5.8, 5.7, 3.6, 2.9의 결과 값을 보였다. Fig. 8과 9는 조준기 길이 변화에 따른 CZT 와 NaI 기반 팬텀 영상에서 4.45 mm 구의 프로파일 결과를 각각 나타냈다. 두 검출기 기반 획득 영상 모두 조준기의 길이가 증가 할수록 픽셀 간 간격이 감소함을 확인 하였다. Fig. 10은 검출기 두께 변화에 따른 CZT, NaI 검출기 물질 기반 점선원 영상에 대한 민감도 결과이다. 검출기 두께에 따른 CZT 물질 기반의 민감도 값은 0.04, 0.09, 0.11, 0.12 cps/MBq 결과 값을 보였고, 같은 물리적 조건에

서 NaI 물질 기반의 민감도 값은 0.03, 0.07, 0.09, 0.11 cps/MBq 결과 값을 보였다. Fig. 11는 검출기 두께와 물질 기반 팬텀을 적용하여 획득한 영상에 대한 SNR 결과이다. 검출기 두께에 따른 CZT 물질 기반의 SNR은 7.3, 8.9, 9.1, 9.9 이고, 같은 물리적 조건에서 NaI 물질 기반의 SNR은 5.9, 8.7, 9.1, 9.5의 결과 값을 보였다. Fig. 12와 13은 검출기 두께 변화에 따른 CZT와 NaI 기반 팬텀 영상에서 4.45 mm 구의 프로파일 결과를 각각 나타냈다. 검출기의 두께가 증가할수록 획득되는 광자의 개수는 증가하지만, 픽셀 간 간격이 증가하는 것을 확인하였다.

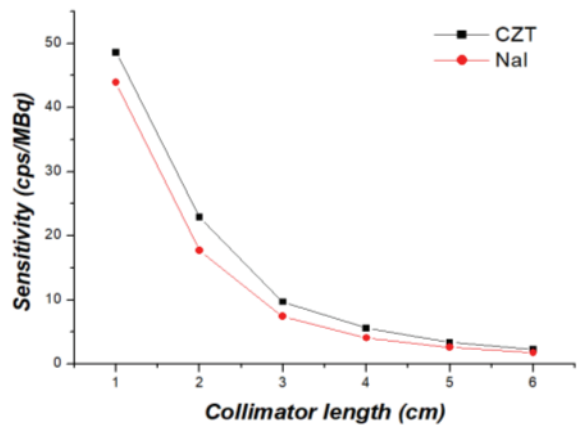


Fig. 6. Result of Sensitivity according to Collimator Length and NaI, CZT Detector Materials using Point Source with <sup>99m</sup>Tc Radioisotope.

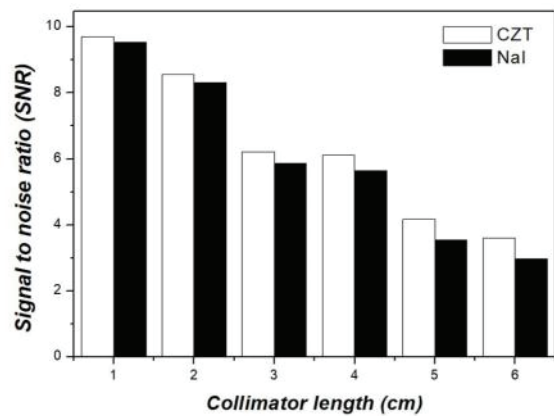


Fig. 7. Result of SNR according to Collimator Length and NaI, CZT Detector Materials using the Phantom with <sup>99m</sup>Tc Radioisotope.

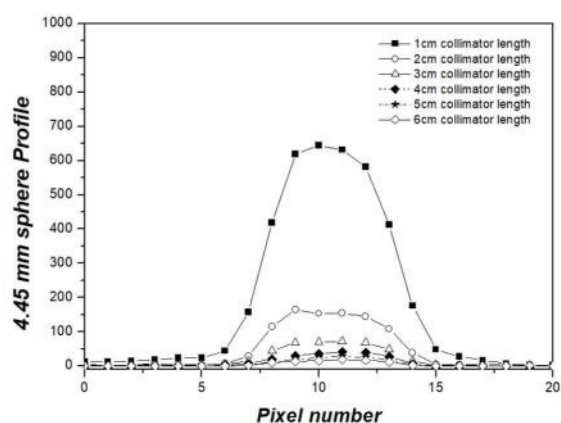


Fig. 8. Profile Result according to Collimator Length with CZT Detector Materials using the Phantom by Setting Line at 4.45 mm Sphere.

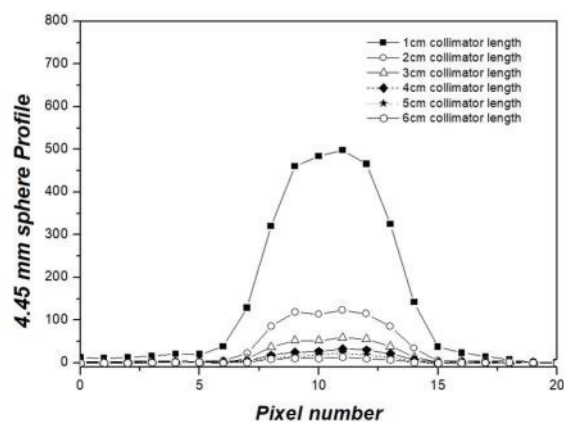


Fig. 9. Profile Result according to Collimator Length with NaI Detector Materials using the Phantom by Setting Line at 4.45 mm Sphere.

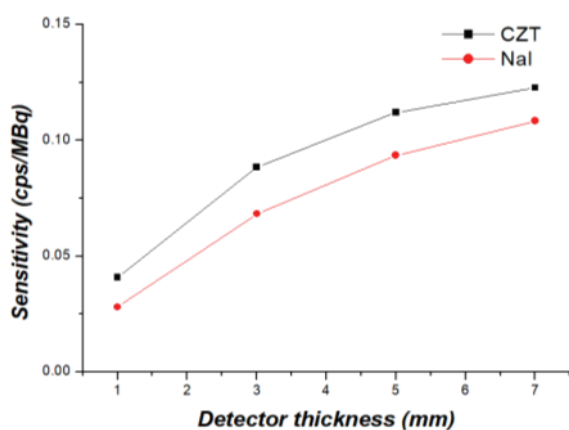


Fig. 10. Result of Sensitivity according to Detector Thickness and NaI, CZT Detector Materials using Point Source with <sup>99m</sup>Tc Radioisotope.

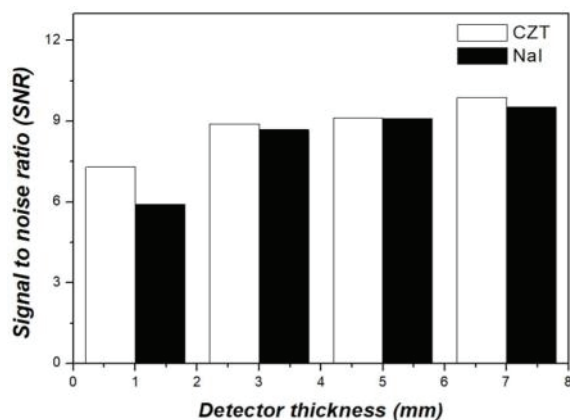


Fig. 11. Result of SNR according to Detector Thickness and NaI, CZT Detector Materials using the Phantom with <sup>99m</sup>Tc Radioisotope.

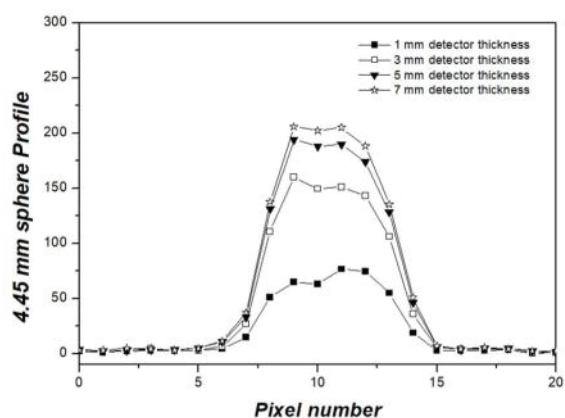


Fig. 12. Profile Result according to Detector Thickness with CZT Detector Materials using the Phantom by Setting Line at 4.45 mm Sphere.

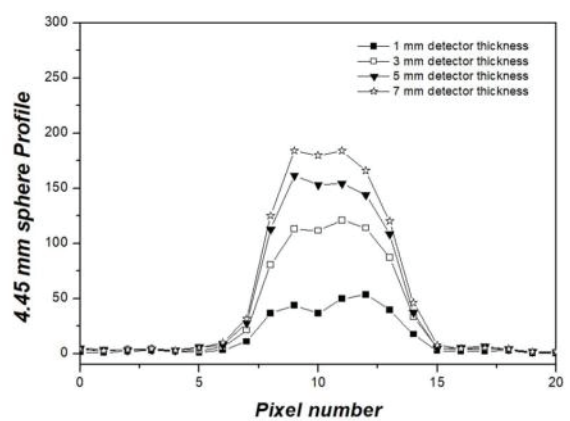


Fig. 13. Profile Result according to Detector Thickness with NaI Detector Materials using the Phantom by Setting Line at 4.45 mm Sphere.

#### IV. DISCUSSION

GATE 시뮬레이션 툴을 사용하여 CZT와 NaI 검출기 물질 기반 감마카메라를 모사 후, 조준기와 검출기 두께 변화에 따른 점선원과 팬텀의 영상 획득하고 민감도와 SNR, 프로파일을 활용해 영상을 분석하였다. 이전 연구와의 차이점은, 물리적 변화와 함께 검출기 물질에 따른 영상의 질을 평가하기 위하여 조준기 길이와 검출기 두께에 따른 CZT와 NaI 물질 기반 검출기를 모사하여 점선원영상과 팬텀을 적용한 영상을 획득한 후 비교평가하였다는 점이다.

분석 결과에 따르면, 점선원을 활용한 1, 2, 3, 4, 5, 6 cm 조준기 길이에 따른 민감도는 CZT 검출기가 약 9.6%, 22.8%, 23.2%, 23.4%, 22.0%, 22.5% 로 우수했으며, 조준기의 길이가 증가할수록 민감도가 저하됨을 확인하였고, CZT 기반 검출기의 민감도는 1cm 와 2, 3, 4, 5, 6 cm 과 비교했을 때, 52.8%, 80.0%, 88.9%, 93.0%, 95.2% 감소하였고, NaI 기반 검출기의 민감도는 59.6%, 83.1%, 90.7%, 93.9%, 95.9% 감소하였다. 또한, 4.45 mm 구의 SNR 분석 비교는 CZT 검출기의 결과값 NaI 검출기 기반 획득영상과 비교했을 때 약 2.3%, 2.7%, 5.6%, 7.4%, 14.7%, 17.5% 우수함을 보였다. CZT 검출기 기반 1 cm 과 2, 3, 4, 5, 6 cm의 조준기 길이 변화에 따른 SNR 분석은 12.4%, 36.3%, 37.5%, 57.3%, 63.1% 로 조준기의 길이가 짧을수록 계속되는 광자 개수가 많음을 확인하였다. 동일하게 NaI 검출기 기반 영상의 SNR 분석은 12.8%, 38.5%, 40.8%, 62.8%, 68.8% 로 조준기의 길이가 짧을수록 동일하게 계속되는 광자수가 증가함을 확인하였다. 또한 프로파일 결과는 CZT 와 NaI 기반 영상 모두 조준기의 길이가 증가함에 따라 영상의 픽셀 간 간격이 좁아짐으로써 공간 분해능은 증가함을 확인할 수 있다.

1, 3, 5, 7 mm 검출기 두께 변화에 따른 영상 분석은 CZT 검출기 기반 민감도 결과 값은 NaI 검출기 기반 결과 값 보다 31.5%, 22.8%, 16.5% 11.7% 로 우수함을 확인하였고, 두께가 증가할수록 민감도가 증가함을 확인하였고, 7mm 와 1, 3, 5mm 의 검출기 두께에 따른 CZT 검출기 기반 획득 영상의

민감도는 66.6%, 27.8%, 8.7%의 차이가 발생했고, NaI 검출기 기반 획득 영상의 민감도는 74.1%, 36.9%, 13.6%의 차이가 발생했다. 4.45 mm 구의 SNR 분석 결과값은 1, 3, 5, 7 mm 의 두께를 가진 CZT 검출기 획득 영상이 19.1%, 2.4%, 0.4%, 3.7% 로 NaI 검출기 기반 획득 영상 보다 우수하게 분석되었다. 또한, 7 mm 와 1, 3, 5 mm 의 CZT 검출기 두께에 따른 SNR 값은 12.1%, 9.8%, 7.4% 차이가 발생했으며, NaI 검출기 두께에 따른 SNR 값은 37.9%, 8.7%, 4.3% 의 차이가 발생했다. 검출기 두께 변화에 따른 4.45 mm 구의 프로파일 결과는 두께가 증가할수록 획득되는 광자수가 증가하지만, 산란선의 영향으로 픽셀 간 간격이 증가함으로써 영상의 공간 분해능은 저하됨을 확인할 수 있다.

#### V. CONCLUSION

본 연구는 핵의학 임상에서 대중적으로 적용하고 있는 NaI 기반 검출기와 성능이 우수한 CZT 기반 검출기를 대상으로 GATE 시뮬레이션 툴을 활용해 감마카메라를 모사하고, 핵의학 영상의 질의 영향을 줄 수 있는 조준기의 길이와 검출기의 두께의 변화에 따른 영상의 질을 비교 평가하였다. 결과적으로 검출기의 두께가 두꺼울수록, 조준기의 길이가 짧을수록 계속되는 감마선 광자수는 증가하지만, 산란선 및 빛 퍼짐 현상으로 영상의 공간 분해능이 저하된다. 그러므로 획득영상의 목적에 따라 검출기와 조준기의 적절한 조합이 필요하다고 사료된다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국과학창의재단(2021년도 학부생 연구프로그램)의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### Reference

- [1] B. F. Hutton, K. Erlandsson, K. Thielemans, "Advances in clinical molecular imaging instrumentation", *Clinical and Translational Imaging*, Vol. 6, No. 1, pp. 31-35, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/s40336-018-0264-0>

- [2] H. H. O. Anger, "Scintillation Camera with Multichannel Collimators", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 5, pp. 515-531, 1964.
- [3] J. H. Jung, Y. Choi, K. J. Hong, B. J. Min, W. Hu, J. H. Kang, "Recent Advances in Nuclear Medicine Imaging Instrumentation", *Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, Vol. 42, No. 2, pp. 98-111, 2008.
- [4] M. W. Groch, W. D. Erwin, "SPECT in the year 2000: basic principles", *Journal of Nuclear Medicine Technology*, Vol. 28, pp. 233-244, 2000.
- [5] Y. J. Lee, H. J. Ryu, S. W. Lee, S. J. Park, H. J. Kim, "Comparison of ultra-high-resolution parallel-hole collimator materials based on the CdTe pixelated semiconductor SPECT system", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 713, pp. 33-39, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.03.014>
- [6] V. Bom, M. Goorden, F. Beekman, "Comparison of pinhole collimator materials based on sensitivity equivalence", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 56, No. 11, pp. 3199, 2011.  
<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/56/11/003>
- [7] H. I. Kim, C. H. Baek, S. J. An, S. W. Kwak, Y. H. Chung, "Gamma camera with a two-layer diverging-slat collimator for radioisotope monitoring", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 698, pp. 90-93, 2012.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.09.049>
- [8] S. J. Lee, Y. Jang, C. H. Baek, "Design of Gamma Camera with Diverging Collimator for Spatial Resolution Improvement", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 13, pp. 661-666, 2019.  
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.4.661>
- [9] J. G. Park, S. H. Jung, J. B. Kim, J. Moon, Y. S. Yeom, C. H. Kim, "Performance evaluation of advanced industrial SPECT system with diverging collimator", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 94, pp. 125-130, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.07.020>
- [10] L. Chen, Y. X. Wei, "Monte Carlo simulations of the SNM spectra for CZT and NaI spectrometers", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 66, pp. 1146-1150, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.01.008>
- [11] K. Erlandsson, K. Kacperski, D. V. Gramberg, B. F. Hutton, "Performance evaluation of D-SPECT: a novel SPECT system for nuclear cardiology", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 54, No. 9, pp. 2635, 2009.  
<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/54/9/003>

## CZT와 NaI 검출기 물질 기반 물리적 변화에 따른 영상의 질 분석에 관한 연구: 몬테카를로 시뮬레이션

고혜림, 유유리, 박찬록\*

전주대학교 방사선학과

### 요약

본 연구의 목적은, 몬테 카를로 시뮬레이션 기반 조준기 길이와 검출기 두께 변화에 따른 Cadmium Zinc Telluride (CZT) 와 NaI 검출기 물질을 변화하면서 영상의 질을 비교 평가 해보고자 한다. CZT 와 NaI 검출기 물질 기반 감마카메라를 각각 모사하였고, 조준기 길이는 1, 2, 3, 4, 5, 6 cm, 검출기 두께는 1, 3, 5, 7 mm 로 설정하였다. 1 MBq의 점선원을 이용해 민감도, 4.45, 3.80, 3.15, 2.55 mm 의 지름을 가진 자체 제작한 팬텀을 모사하고, 가장 큰 지름인 4.45 mm 영상에 관심영역을 설정하여 signal to noise ratio (SNR)과 프로파일을 이용하여 각각 획득영상을 분석하였다. 조준기 길이에 따른 CZT 검출기 기반 민감도는 2.3 ~ 48.6 cps/MBq, NaI 검출기 기반 민감도는 1.8 ~ 43.9 cps/MBq 이고, CZT 검출기 기반 팬텀을 활용한 SNR은 3.6 ~ 9.8, NaI 검출기 기반 팬텀 SNR은 2.9~9.5다. 조준기 길이 변화에 따른 프로파일은 조준기의 길이가 증가할수록 영상의 공간 분해능이 향상함을 확인하였다. 또한, 검출기 두께에 따른 CZT 검출기 기반 민감도는 0.04 ~ 0.12 cps/MBq 이고, NaI 검출기 기반 민감도는 0.03 ~ 0.11 cps/MBq 다. CZT 검출기 기반 팬텀 SNR은 7.3~9.8 이며, NaI 검출기 기반 팬텀 SNR은 5.9~9.5다. 또한, 검출기 두께 변화에 따른 프로파일은 검출기 두께가 증가할수록 산란선이 증가함으로써 영상의 공간 분해능이 감소함을 확인하였다. 이 연구 데이터를 기반으로 영상 획득 목적에 따라 검출기의 종류와 두께, 조준기의 길이를 선택하여 최고의 영상의 질을 획득할 수 있어야 한다.

중심단어: 몬테카를로, GATE 시뮬레이션, 핵의학, 민감도, 검출기 물질

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	고혜림	전주대학교 방사선학과	학부생
(공동저자)	유유리	전주대학교 방사선학과	학부생
(교신저자)	박찬록	전주대학교 방사선학과	조교수