

Gamma Camera Design to Improve Spatial Resolution and Sensitivity

Seung-Hun Kang^{1,2}, Seung-Jae Lee^{1,2,3,*}

¹Department of Multidisciplinary Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

³Department of Radiological Science, Dongseo University

Received: March 13, 2023. Revised: April 11, 2023. Accepted: April 30, 2023.

ABSTRACT

In order to improve the spatial resolution of the gamma camera, the size of the hole in the collimator must be reduced, so the sensitivity is reduced. In order to improve the sensitivity, the size of the hole must be increased, and thus the spatial resolution is reduced. In other words, spatial resolution and sensitivity show opposite characteristics. In this study, a gamma camera was designed to improve both spatial resolution and sensitivity. In order to obtain higher sensitivity in gamma cameras with the same spatial resolution, the structure of the scintillator was designed differently from the existing system. A scintillation pixel was used, and a partition wall was placed between the scintillation pixels to prevent incident gamma rays from being transmitted to other scintillation pixels to interact. Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) simulation was performed to evaluate the performance of the designed gamma camera. When the same sensitivity as the block-type scintillator was obtained, the spatial resolution increased by 16.5%, and when the same spatial resolution was obtained, the sensitivity increased by 61.5%. It is considered that the use of the gamma camera designed in this study can improve the sensitivity compared to the existing system while securing excellent spatial resolution.

Keywords: Gamma Camera, Scintillator, Sensitivity, Spatial Resolution, GATE

I. INTRODUCTION

감마카메라는 체내에 방사성의약품을 주입하여 방사성의약품에 포함된 방사성동위원소의 붕괴로 인해 방출되는 감마선을 검출한 뒤, 방사성의약품의 분포를 영상으로 표현해주는 장비이다^[1,2]. 감마카메라의 영상 시스템은 크게 콜리메이터와 검출기로 나뉘어진다. 콜리메이터는 방사성동위원소로부터 방출되는 감마선 중에서 원하지 않는 방향으로 입사되는 1차선 및 산란선을 차단해주며, 섬광체에 수직 및 특정 방향으로 입사하는 감마선을 통과시켜 방사성의약품의 분포를 섬광체에 전달하는 역할을 수행한다^[3]. 형태와 기능에 따라 확산형, 집속형, 바늘구멍, 평행다공형 등이 있으며 구멍의 형

태도 원형, 육각형, 사각형 등 다양한 형태로 사용된다^[4]. 감마카메라의 감도와 공간분해능은 콜리메이터 구멍의 크기, 길이에 따라 정해진다. 콜리메이터 구멍의 크기가 크거나 길이가 짧고 격벽의 두께가 얇을수록 검출기에 도달하는 정보전달자의 양이 증가하여 민감도가 높아지지만, 영상의 공간분해능은 저하한다. 즉 민감도와 공간분해능은 상반되는 특성이 있다. 높은 질의 영상을 얻기 위해서는 높은 공간분해능과 민감도를 가진 감마카메라 시스템이 필요하다^[5].

본 연구에서는 기존의 감마카메라와 비슷한 민감도를 획득할 경우, 보다 높은 공간분해능 획득이 가능한 감마카메라를 설계하였다. Fig. 1은 본 연구에서 설계한 감마카메라의 구조를 나타낸다. 섬광픽셀 사이의 격벽 구조는 기존의 감마카메라에서

* Corresponding Author: Seung-Jae Lee E-mail: sjlee@gdsu.dongseo.ac.kr
Address: Jurye-ro 47, Sasang-gu, Busan, Republic of Korea

Tel: +82-51-320-2719

발생할 수 있는 사선으로 입사한 감마선이 콜리메이터 통과 및 투과 후, 여러 깊이에서 상호작용하여 발생하는 공간분해능의 저하^[6,7] 및 섬광체 내 빛 퍼짐 현상에 의한 공간분해능의 저하^[8]를 막아주는 역할을 수행한다. 설계한 감마카메라의 성능을 평가하고 섬광체와 방사선의 상호작용 위치를 측정하기 위해 Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE)^[9,10] 시뮬레이션을 수행하였다. GATE를 사용하여 섬광체와 감마선이 상호작용한 위치를 측정하고, 영상으로 재구성하여 민감도와 공간분해능을 평가하였다.

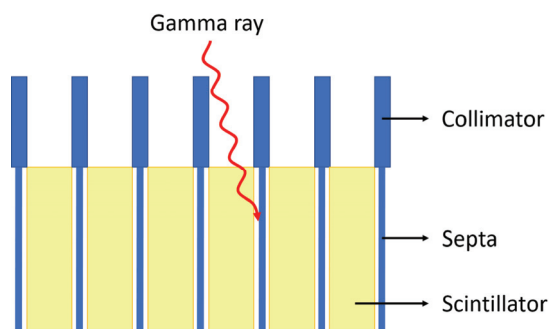


Fig. 1. Prevent septa from interacting with other scintillators.

II. MATERIAL AND METHODS

GATE 시뮬레이션 툴은 다양한 방사선 검출기 및 기기를 구성할 수 있으며 방사선과 물질의 상호작용을 시뮬레이션할 수 있다. 이러한 GATE를 사용하여 섬광 픽셀 사이에 격벽이 위치한 감마카메라를 설계하였다.

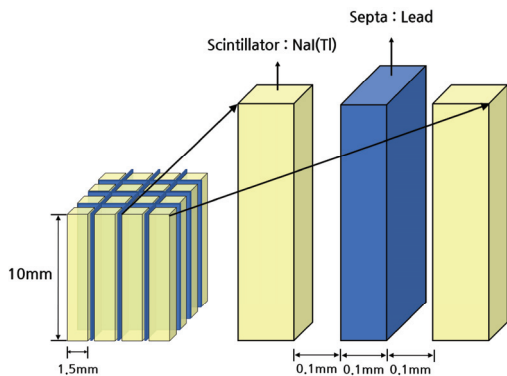


Fig. 2. Detector of septa between crystal array implemented in GATE.

Fig. 2는 설계한 감마카메라의 모식도를 나타낸다. 감마카메라에 사용한 콜리메이터의 물질은 납이며, 200 mm × 200 mm × 40 mm의 크기로 구성하였다. 콜리메이터의 구멍은 1.5 mm × 1.5 mm × 40 mm로, 격벽의 두께는 0.3 mm로 구성하였다. 콜리메이터의 구멍마다 각 섬광 픽셀 하나가 위치할 수 있도록 설계하기 위해 각 섬광 픽셀을 콜리메이터의 구멍 비율에 맞게 구성하였다. 섬광체의 종류는 NaI(Tl)^[11]을 사용하였으며, 각 섬광 픽셀의 크기는 1.5 mm × 1.5 mm × 10 mm로 픽셀 간격은 0.3 mm로 구성하였다. 섬광 픽셀 사이마다 0.1 mm 두께의 납으로 된 격벽을 위치시켜 섬광 픽셀 사이에서 빛의 퍼짐 현상 및 사선으로 입사한 감마선에 의한 공간분해능의 저하를 방지하였다. 격벽과 섬광 픽셀 사이에는 섬광체에서 발생한 섬광의 검출효율을 높여 줄 수 있는 0.1 mm의 반사체를 사용하는 것을 가정하여 감마카메라를 구성하였다.

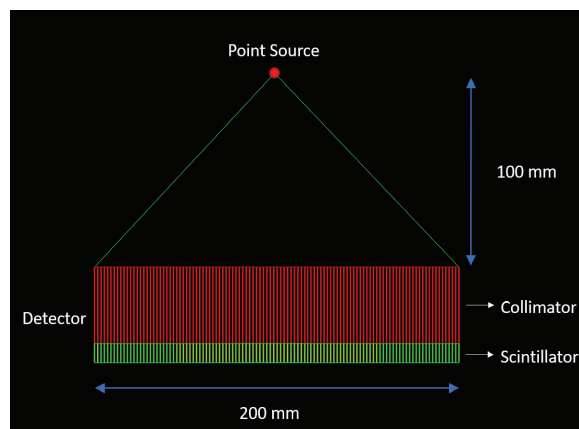


Fig. 3. GATE simulation of designed gamma camera detector.

섬광 픽셀과 감마선의 상호작용 위치의 신호 획득 과정은 다음과 같다. GATE 시뮬레이션을 통해 Fig. 3과 같이 섬광 픽셀을 콜리메이터의 구멍 비율에 맞게 111 × 111 배열로 구성하여 감마카메라를 설계하였다. 검출기의 중앙에서 100 mm 떨어진 위치에 10 mCi의 Tc-99m 선원을 조사하여 데이터를 획득하였다. 설계한 검출기의 성능을 비교하기 위해, 기존의 감마카메라 시스템에서 콜리메이터 구멍의 크기를 0.1 mm 씩 증가시켜 공간분해능과 민감도를 산출하여 비교하였다.

Table 1. Sensitivity and spatial resolution obtained through GATE simulation

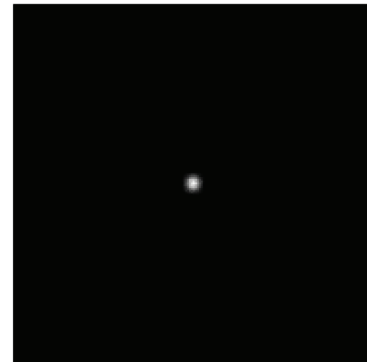
	Scintillator structure					
	Pixellated crystal with septa			Block		
Collimator hole length (mm)	40	40	40	40	40	40
Collimator hole size (mm)	1.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Collimator septa thickness (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Sensitivity (%)	0.042	0.026	0.033	0.040	0.048	0.056
Spatial Resolution (mm)	4.742	4.540	5.164	5.475	5.914	6.623

III. RESULT

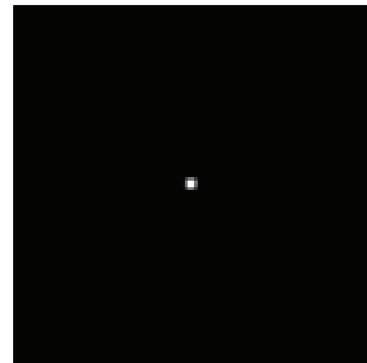
GATE를 사용하여 획득한 감마선과 섬광체의 상호작용 위치를 영상으로 재구성하였다. 블록형 섬광체를 사용한 기존의 감마카메라와 설계한 감마카메라의 공간 분해능 및 민감도를 비교 평가하기 위해 두 영상의 공간분해능을 mm 단위로, 민감도를 % 단위로 산출하였다.

각 검출기의 에너지 분해능을 10%로 설정 후 계수하여, 전체 발생된 방사선원에 대한 검출된 계수를 통해 민감도를 산출하였다. 블록형 섬광체를 사용한 기존의 감마카메라 시스템에서 콜리메이터 구멍의 크기를 0.1 mm 씩 증가시켜 획득한 공간분해능 및 민감도와 설계한 감마카메라에서 획득한 공간분해능 및 민감도를 Table 1에 나타내었다. 설계한 감마카메라에서 획득한 민감도는 0.042%이었으며, 공간분해능은 4.742 mm였다. 블록형 섬광체를 사용한 감마카메라와 설계한 감마카메라가 비슷한 공간분해능을 가질 경우 민감도는 0.026%를 획득하였으며, 비슷한 민감도를 가질 경우 공간분해능은 5.475mm를 획득하였다.

Fig. 4는 동일한 콜리메이터 구멍 크기를 사용하여 재구성한 영상을 나타낸다. Fig. 4-(a)는 블록형 섬광체, (b)는 설계한 감마카메라에서 획득한 영상이다. 블록형 섬광체에서 획득한 영상에서는 감마선이 주로 입사한 위치뿐만 아니라 주위에서도 상호작용하여 넓게 퍼진 영상을 확인할 수 있다. 이러한 넓게 퍼진 형태로 나타나는 영상은 공간분해능의 저하로 나타난다.



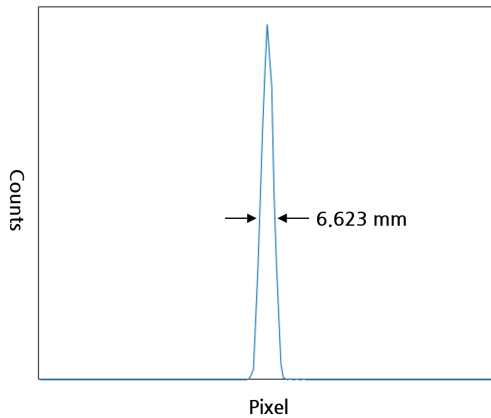
(a) Top: block crystal



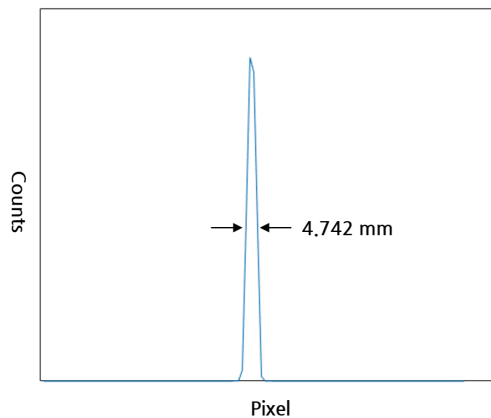
(b) Bottom: pixellated crystal array

Fig. 4. Reconstruction Images.

Fig. 5는 데이터를 획득하여 재구성한 영상의 프로파일을 보여주고 있으며, 반치폭(full width at half maximum, FWHM)을 측정한 결과를 나타낸다^[2]. 영상에서 뿐만 아니라 프로파일 상에서도 블록형 섬광체가 넓게 퍼진 모습을 확인할 수 있다. 블록형 섬광체를 사용한 감마카메라에서 공간분해능은 6.623 mm로 측정되었고, 설계한 감마카메라에서는 4.742 mm로 측정되었다.



(a) Top: block crystal



(b) Bottom: pixellated crystal array

Fig. 5. Profiles.

IV. DISCUSSION

기존의 감마카메라 시스템에서 사용하는 블록형 섬광체를 사용할 경우 보다 넓은 빛의 퍼짐 현상으로 인한 공간분해능의 저하가 발생할 수 있으며, 콜리메이터를 통과하여 사선으로 입사한 감마선이 섬광체를 투과하여 서로 다른 깊이에서 상호작용할 때 공간분해능의 저하가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 픽셀 형태의 섬광체 사이에 격벽을 위치시킨 검출기를 설계하여 블록형 섬광체를 사용하는 기존의 감마카메라 시스템보다 영상의 품질을 향상시키고자 하였다. 섬광체를 픽셀 형태로 배열하고 섬광 픽셀 사이에 격벽을 위치시키게 되면 격벽으로 인해 감마선이 다른 섬광 픽셀로 투과되어 상호작용하는 것을 방지해 주는 역할을 수행하여 공간분해능의 향상으로 이어진다.

본 연구에서는 픽셀 기반 영상 구성을 위해 콜리메이터의 구멍의 형태와 섬광 픽셀의 형태를 사각형으로 수행하였다. 그러나 현재 임상에서는 육각형의 구멍 형태를 가진 콜리메이터를 주로 사용한다. 실측 연구 진행 시 블록형 섬광체를 사용한 감마카메라에서 구멍의 형태에 따른 감마카메라 성능 차이가 생길 수 있으나, 섬광 픽셀 사이 격벽 구조를 적용하면 구멍의 형태에 상관없이 감마카메라의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 섬광 픽셀 사이 격벽 구조를 사용하여 공간분해능을 향상시킬 수 있는 검출기를 설계하였다. 섬광 픽셀 사이에 0.1 mm 두께의 납으로 된 격벽을 위치시켜 섬광 픽셀 사이에서 빛의 퍼짐 현상 및 사선으로 입사한 감마선에 의한 공간분해능의 저하를 방지하였다. 블록형 섬광체를 사용한 기존의 감마카메라 시스템에서 콜리메이터 구멍의 크기를 0.1 mm 씩 증가시켜 획득한 결과들과 본 연구에서 설계한 감마카메라 검출기에서 획득한 결과들을 비교하였을 때, 설계한 감마카메라가 기존의 감마카메라 시스템과 비슷한 민감도를 가질 때 13.53% 향상된 공간분해능을 얻을 수 있었고, 비슷한 공간분해능을 가질 경우 기존의 시스템에서 획득한 영상보다 민감도가 61.54% 향상을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 설계한 감마카메라를 사용할 경우 영상의 민감도를 향상시켜 환자의 촬영 시간 감소뿐만 아니라 피폭선량의 감소가 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 논문(저서)는 부산광역시 및 (재)부산인재평생교육진흥원의 BB21플러스 사업으로 지원된 연구임.

Reference

- [1] H. O. Anger, "Scintillation Camera", Review of Scientific Instruments, Vol. 29, No. 1, pp. 27-33, 1958. <https://doi.org/10.1063/1.1715998>
- [2] Y. Choi, J. H. Kim, J. Y. Kim, K. C. Im, S. E.

- Kim, Y. S. Choe, K. H. Lee, B. T. Kim, "Investigation of the Signal Characteristics of a Small Gamma Camera System Using NaI(Tl)-position Sensitive Photomultiplier Tube", *Korean Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 34, No. 1, pp. 82-93, 2000.
- [3] S. C. Moore, K. Kouris and L. Cullum, "Collimator design for single photon emission tomography", *European Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 19, pp. 138-150, 1992. <https://doi.org/10.1007/BF00184130>
- [4] G. S. Cho, "Gamma-ray Detectors for Nuclear Medical Imaging Instruments", *Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, Vol. 42, No. 2, pp. 88-97, 2008
- [5] W. White, "Resolution, Sensitivity, and Contrast in Gamma-Camera Design: A Critical Review", *Radiology*, Vol. 132, No. 1, pp. 179-187, 1979. <https://doi.org/10.1148/132.1.179>
- [6] R. V. Holen, S. Staelens, S. Vandenberghe, "SPECT imaging of high energy isotopes and isotopes with high energy contaminants with rotating slat collimators", *The International Journal of Medical Physics Research and Practice*, Vol. 36, No. 9, pp. 4257-4267, 2009. <https://doi.org/10.1118/1.3177312>
- [7] S. J. Lee, D. H. Kim, C. H. Baek, "Spatial Resolution Improvement of a Gamma Camera with a Diverging Collimator Using a Tapered Crystal Array", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 77, No. 7, pp. 561-564, 2020. <http://dx.doi.org/10.3938/NPSM.69.1033>
- [8] S. R. Cherry, J. A. Sorenson, M. E. Phelps, "chapter 14 - The Gamma Camera: Performance Characteristics", *Physics in Nuclear Medicine (Fourth Edition)*, pp. 209-231, 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4160-5198-5.00014-9>
- [9] G. Santin, D. Strul, D. Lazaro, L. Simon, M. Krieguer, M. V. Martins, V. Breton and C. Morel, "GATE: a Geant4-based simulation platform for PET and SPECT integrating movement and time management", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 50, No. 5, pp. 1516-1521, 2003. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2003.817974>
- [10] S. Jan, G. Santin, D. Strul, S. Staelens, et al., "GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 49, No. 19, pp. 4543-4561, 2004. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/49/19/007>
- [11] J. D. Valentine, B. D. Rooney, P. Dorenbos, "More on the scintillation response of NaI(Tl)", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 45, No. 3, 2003. <https://doi.org/10.1109/23.685299>
- [12] P. Velo, A. Zakaria, "Determining Spatial Resolution of Gamma Cameras Using MATLAB", *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, Vol. 48, No. 1, pp. 39-42, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2016.10.010>

공간분해능 및 민감도 향상을 위한 새로운 감마카메라 설계

강승훈^{1,2}, 이승재^{1,2,3,*}

¹동서대학교 융합방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구센터

³동서대학교 방사선학과

요약

감마카메라의 공간분해능을 향상시키기 위해서는 콜리메이터의 구멍 크기를 작게 만들어야 하므로 민감도는 저하된다. 민감도를 향상시키기 위해서는 구멍 크기를 크게 해야 하므로 공간분해능은 저하된다. 즉, 공간분해능과 민감도는 서로 상반된 특성을 보인다. 본 연구에서는 공간분해능과 민감도를 모두 향상시키는 감마카메라를 설계하였다. 동일한 공간분해능을 보이는 감마카메라에서 보다 높은 민감도를 획득하기 위해 섬광체의 구조를 기존시스템과 다르게 설계하였다. 섬광 픽셀을 사용하고, 섬광 픽셀 사이에는 격벽을 위치시켜 입사한 감마선이 다른 섬광 픽셀로 투과되어 상호작용하는 것을 방지하였다. 설계한 감마카메라의 성능을 평가하기 위해 Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) 시뮬레이션을 수행하였다. 동일한 공간분해능을 획득하는 조건의 콜리메이터를 각각 사용하여 기존 감마카메라와 설계한 감마카메라의 민감도를 획득한 결과 각각 0.0026%, 0.0042%로 설계한 감마카메라의 민감도가 61.54% 향상된 결과를 나타내었다. 본 연구에서 설계한 감마카메라를 사용하면 우수한 공간분해능을 확보하면서 민감도를 기존 시스템보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 감마카메라, 섬광체, 공간분해능, 민감도, GATE

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	강승훈	동서대학교 융합방사선학과	대학원생(석사과정)
(교신저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	교수