

# Design of Gamma Camera with Diverging Collimator for Spatial Resolution Improvement

Seung-Jae Lee,<sup>1,2</sup> Yeongill Jang,<sup>3</sup> Cheol-Ha Baek<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiological Science, Dongseo University

<sup>2</sup>Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

<sup>3</sup>Department of Radiology, Gwangyang Health College

<sup>4</sup>Department of Radiological Science, Kangwon National University

Received: May 30, 2019. Revised: August 08, 2019. Accepted: August 31, 2019

## ABSTRACT

Diverging collimators is used to obtain reduced images of an object, or to detect a wide filed-of-view (FOV) using a small gamma camera. In the gamma camera using the diverging collimators, the block scintillator, and the pixel scintillator array, gamma rays are obliquely incident on the scintillator surface when the source is located the periphery of the FOV. Therefore, the spatial resolution is reduced because it is obliquely detected in depth direction. In this study, we designed a novel system to improve the spatial resolution in the periphery of the FOV. Using a tapered crystal array to configure the scintillation pixels to coincide with the angle of the collimator's hole allows imaging to one scintillation pixel location, even if events occur to different depths. That is, even if is detected at various points in the diagonal direction, the gamma rays interact with one crystal pixel, so resolution does not degrade. The resolution of the block scintillator and the tapered crystal array was compared and evaluated through Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) simulation. The spatial resolution of the obtained image was 4.05 mm in the block scintillator and 2.97 mm in the tapered crystal array. There was a 26.67% spatial resolution improvement in the tapered crystal array compared to the block scintillation.

Keywords: Gamma camera, Diverging collimator, Tapered crystal array, GATE

## I. INTRODUCTION

감마카메라를 사용하여 대상을 촬영하기 위해서는 콜리메이터의 사용이 필수적이다. 사용되는 콜리메이터의 종류는 평행다공형, 바늘구멍형, 초점형, 확산형 콜리메이터 등이 있다. 각 콜리메이터의 특징은 평행다공형 콜리메이터는 촬영 대상과 동일한 크기의 영상을 획득할 수 있으며, 일반적으로 가장 널리 사용되고 있다. 바늘구멍형 콜리메이터는 대상의 확대 또는 축소를 위해 사용하고 있으며, 초점형 콜리메이터는 대상의 확대를 위해 사용되며, 특징은 관심영역 내의 대상만 촬영할 수 있다. 확산형 콜리메이터는 촬영대상을 축소하여 촬

영하거나 넓은 범위를 작은 감마카메라로 촬영하기 위해 사용한다.<sup>[1-5]</sup> 이러한 콜리메이터를 사용하는 감마카메라에서 평행다공형 콜리메이터를 제외한 나머지 콜리메이터에서는 관심영역 외곽 부분에서 입사한 감마선에 의해 공간분해능 저하가 발생한다. 외곽 부분에서 발생한 감마선은 섬광체에 입사하여 여러 깊이에서 상호작용을 하게 되며, 대각선 방향으로 입사하게 되므로 영상을 재구성할 경우 여러 지점에서 측정된 것으로 나타난다.<sup>[6]</sup> 이러한 현상은 콜리메이터가 이루는 각도가 커질수록 외곽지점에서의 공간분해능 저하가 크게 발생한다.

본 연구에서는 관심영역 외곽에서 발생하는 공

\* Corresponding Author: Cheol-Ha Baek

E-mail: baekch@kangwon.ac.kr

Tel: +82-33-540-3384

간분해능의 저하를 감소시키기 위한 감마카메라를 설계하였으며, 콜리메이터는 넓은 범위를 작은 감마카메라로 촬영하기 위해 사용할 수 있는 확산형 콜리메이터를 적용하였다. 작은 감마카메라를 사용하여 넓은 범위의 공간을 촬영하고자 하는 환경 모니터링 시스템이나, 원자력발전소 등의 감시 시스템에 활용이 가능하다. Fig. 1은 확산형 콜리메이터를 사용하여 외곽에서 발생한 감마선을 검출하였을 경우 섬광체에서 반응하는 위치를 나타낸다. 감마선이 대각선으로 입사하여 여러 지점에서 반응한 모습을 확인할 수 있다. 깊이 방향뿐만 아니라 가로축 방향으로도 여러 지점에서 반응하게 되므로 공간분해능이 저하될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 공간분해능 저하를 해결하기 위해 섬광체를 일반적인 블록형 섬광체가 아닌 사다리꼴 형태의 픽셀을 이루는 섬광체를 사용하여 감마카메라를 설계하였고, 이에 대한 평가를 Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE)<sup>[7]</sup> 시뮬레이션을 통해 수행하였다.

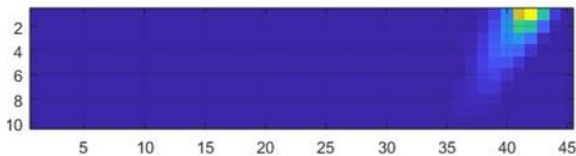


Fig. 1. The gamma ray interaction positions with the scintillator when using the diverging collimator in the periphery of the FOV.

## II. MATERIAL AND METHODS

설계한 사다리꼴 픽셀형 섬광체와 확산형 콜리메이터는 3차원 설계 프로그램을 사용하여 설계하였고, 이를 GATE 시뮬레이션에 적용하였다. GATE는 다양한 방사선 기기를 구성하고 여기에서 발생하는 방사선과 물질과의 상호작용에 대한 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 섬광체의 종류는 NaI(Tl)를 사용하였으며, 각 픽셀의 크기는 작은 면이 1 mm × 1 mm, 넓은 면이 1.4 mm × 1.4 mm로 높이는 10 mm 이다. 45 × 45 배열로 구성하였으며, 전체 크기는 작은 면이 49.4 mm × 49.4 mm이고, 넓은 면이 69.4 mm × 69.4 mm로 확산하는 각을 90도로 설계

하였다.

콜리메이터 각 홀마다 섬광체 픽셀 하나가 위치하도록 설계하기 위해, 콜리메이터의 홀의 작은 면의 크기는 섬광체 픽셀의 넓은 면과 동일하게 설계하였으며, 섬광체와 동일한 각을 지니도록 설계하였다. 물질은 납으로 구성하였으며, 홀의 크기는 작은 면이 1.4 mm × 1.4 mm 이고, 넓은 면은 2.2 mm × 2.2 mm로 높이는 20 mm 이다. 전체 크기는 작은 면이 69.4 mm × 69.4 mm 이고, 넓은 면이 109.4 mm × 109.4 mm 이다. 격벽의 두께는 좁은 면에서 0.14 mm, 넓은 면에서 0.22 mm로 설계하였으며, 두께가 점점 증가하는 형태로 구성하였다.

Fig. 2는 3차원 설계 프로그램을 사용하여 설계한 확산형 콜리메이터와 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 나타낸다. 3차원으로 설계한 콜리메이터와 섬광체는 GATE 시뮬레이션의 인풋으로 사용하였다. 이는 보다 정확한 설계를 할 수 있으며, 설계의 자율성을 확보하는 방법이다. 복잡한 구조로 GATE 상에서 구현하기 힘든 부분을 자유롭게 설계할 수 있다.

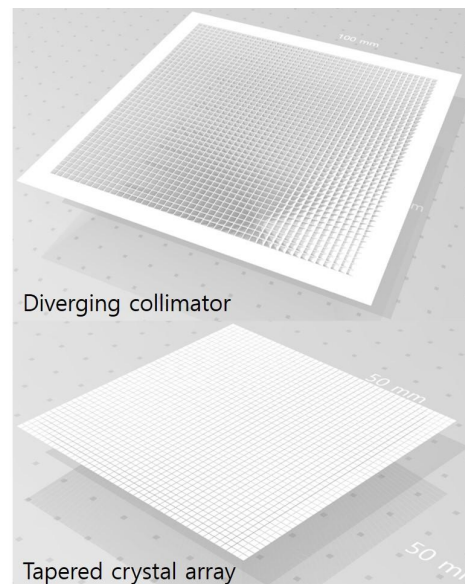


Fig. 2. Schematics of the diverging collimator and tapered crystal array.

Fig. 3은 설계한 콜리메이터와 섬광체를 GATE의 인풋으로 사용하여 시뮬레이션 상에 나타낸 모습이다. 파란색이 콜리메이터이고, 노란색이 섬광체

를 나타내며, 두 구조의 크기가 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 사다리꼴 픽셀형 섬광체와의 비교 평가를 위해  $69.4 \text{ mm} \times 69.4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 의 크기를 지닌 NaI(Tl) 블록형 섬광체를 사용하였다.

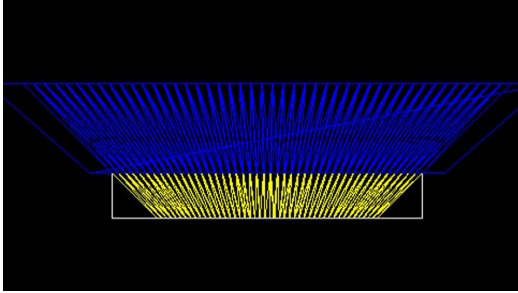


Fig. 3. Diverging collimator and tapered crystal array implemented in GATE.

관심영역 외곽에서 입사한 감마선에 대한 공간 분해능을 확인하기 위해 콜리메이터 면으로부터 100 mm, 중심에서부터 외곽으로 140 mm 떨어진 위치에서 140 keV의 감마선을 발생시켰으며, 섬광체와 반응한 위치에 대한 데이터를 획득하였다. 획득한 데이터는  $45 \times 45$  배열의 영상으로 재구성하여, 두 섬광체를 비교 평가하였다.

### III. RESULT

GATE 시뮬레이션을 통해 획득한 감마선과 섬광체의 반응 위치를 사용하여 영상을 재구성하였다. 블록형 섬광체와 사다리꼴 픽셀형 섬광체의 공간 분해능을 비교 평가하기 위해 두 섬광체의 재구성 배열 크기를 동일하게 설정하였다. 블록형 섬광체는 전체 섬광체 크기를  $45 \times 45$  배열로 나누어 획득한 데이터를 영상화하였으며, 사다리꼴 픽셀형 섬광체는 각 섬광픽셀의 모양대로 데이터를 분류하여 영상화를 수행하였다.

Fig. 4는 시뮬레이션을 통해 획득한 데이터를 사용하여 재구성한 영상이다. Fig. 4의 위 영상은 블록형 섬광체, 아래 영상은 사다리꼴 픽셀형 섬광체에서 획득한 영상이다. 블록형 섬광체에서 획득한 영상에서는 주로 감마선이 입사한 위치뿐만 아니라 가로축 상에 왼쪽으로 넓게 퍼진 영상이 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 감마선이 대각선으로 입사하여 발생한 것으로 대각선 방향으로 여러 겹

이에서 섬광체와 반응한 결과 가로축 상으로 여러 지점에서 영상으로 나타났다. 사다리꼴 픽셀형 섬광체는 감마선이 입사한 방향으로 섬광 픽셀이 구성되어 있으므로 블록형 섬광체처럼 넓게 퍼진 영상은 나타나지 않았다. 이러한 넓게 퍼진 형태의 영상은 공간분해능의 저하로 나타난다.

Fig. 5는 획득한 영상의 프로파일을 보여주고 있으며, 반치폭을 측정한 공간분해능 결과이다. 영상에서 뿐만 아니라 프로파일 상에서도 블록형 섬광체에서 가로축 방향으로 넓게 퍼진 것을 확인할 수 있다. 블록형 섬광체에서 분해능은 4.05 mm로 측정되었고, 사다리꼴 픽셀형 섬광체에서는 2.97 mm로 측정되었다.

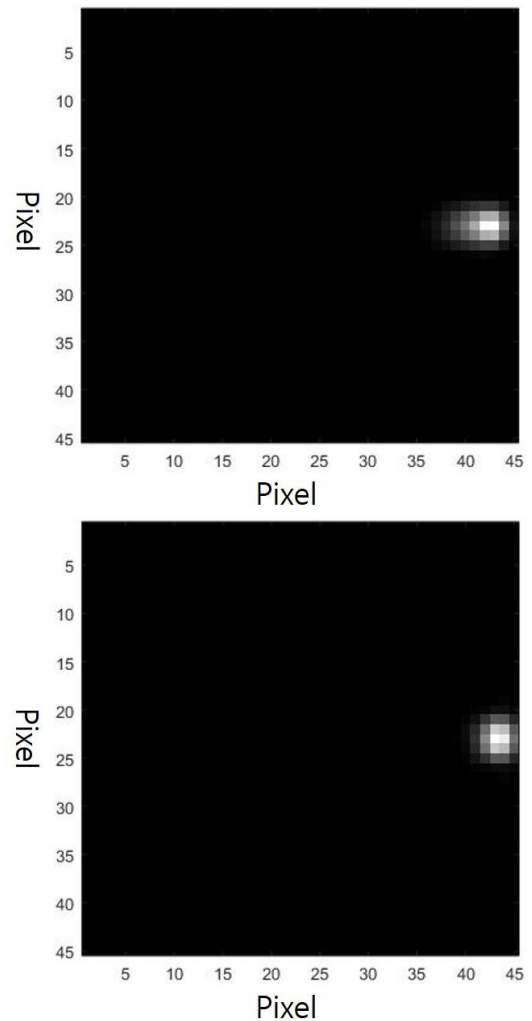


Fig. 4. Reconstruction images. Top: block crystal, Bottom: tapered crystal array.

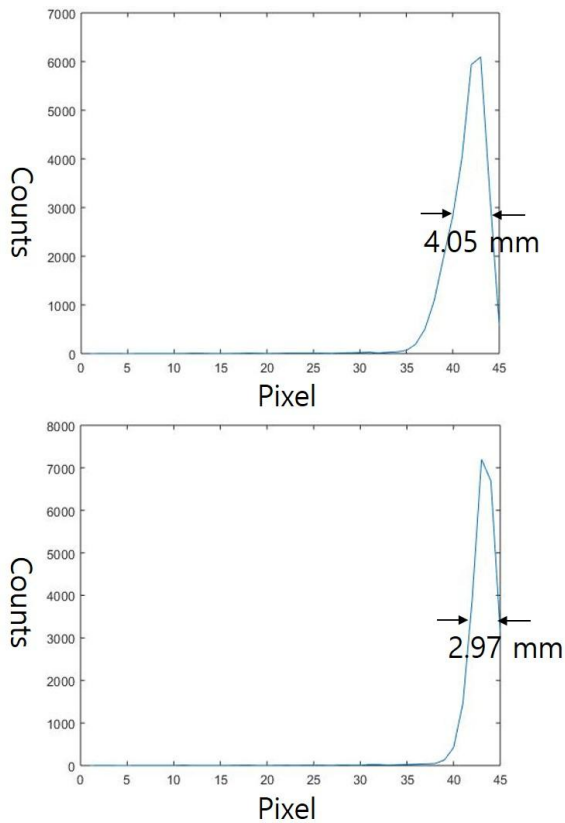


Fig. 5. Profiles. Top: block crystal, Bottom: tapered crystal array.

#### IV. DISCUSSION

섬광체의 모양 및 픽셀 형태에 따라 영상을 재구성할 경우에 공간분해능의 차이가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 확산형 콜리메이터를 사용할 경우 관심영역 외곽에서 발생한 선원은 섬광체에 비스듬히 입사하므로 섬광체 내에서도 비스듬하게 검출되기 때문이다. Fig. 6은 블록형 섬광체와 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 사용하여 영상을 픽셀단위로 구성할 경우 각 픽셀에서 재구성되는 감마선의 반응 위치를 나타낸 예이다. 블록형 섬광체는 비스듬히 입사한 감마선에 의해 다수의 픽셀에서 영상화가 되지만 사다리꼴 픽셀형 섬광체는 감마선과 반응한 방향대로 픽셀이 위치하여 블록형 섬광체에 비해 적은 수의 픽셀에서 영상화가 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 관심영역을 증가하고자 확산형 콜리메이터의 각을 더 크게 하면 섬광체의 동일한

깊이에서 감마선이 검출될 경우 더욱더 넓은 영역에 걸쳐 영상화가 이루어진다. 또한 고에너지의 감마선을 검출할 경우에도 더욱 깊은 영역에 걸쳐 검출되므로 영상의 공간분해능 저하는 더 발생하게 된다.

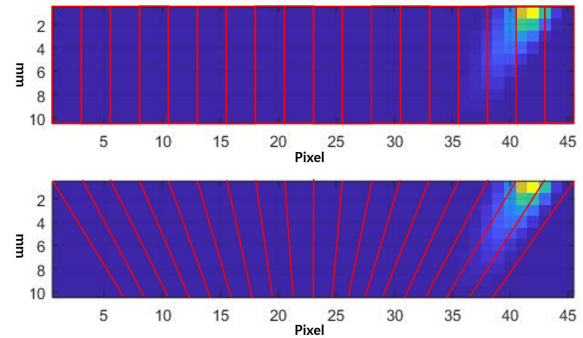


Fig. 6. DOI accuracy of the bottom layer in all position.

#### V. CONCLUSION

본 연구에서는 확산형 콜리메이터와 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 사용하여 관심영역 외곽에서의 공간분해능을 향상한 감마카메라를 설계하였다. 확산형 콜리메이터의 홀의 위치와 각도에 맞는 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 사용하여 관심영역 외곽에서 비스듬히 입사하는 감마선을 검출하고 공간분해능의 저하가 없도록 설계하였다. 여러 깊이에서 감마선과 섬광체가 반응하더라도 모두 같은 섬광 픽셀에서 검출되도록 구성함으로써 공간분해능의 저하를 막을 수 있었다.

사다리꼴 픽셀형 섬광체와 블록형 섬광체의 공간분해능은 각각 2.97 mm, 4.05 mm를 보여 블록형 섬광체를 사용한 것에 비해 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 사용한 시스템에서 26.67%의 공간분해능 향상을 보였다. 이처럼 확산형 콜리메이터를 사용하는 감마카메라에서 블록형 섬광체가 아닌 콜리메이터의 홀의 각도와 크기에 맞는 사다리꼴 섬광체를 사용할 경우 관심영역 외곽에서의 공간분해능 향상을 이룰 수 있으며, 이는 전체 영상의 질을 향상할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF - 2018R1C1B5085189) (2019).

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.

## Reference

- [1] Cheol-Ha Baek, Hyun-Il Kim, Ji Yeon Hwang, Su Jung An, Kwang Hyun Kim, Sung-Woo Kwak, Yong Hyun Chung, "Large-angle pinhole gamma camera with depth-of-interaction detector for contamination monitoring," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 648, pp. 111-115, 2011.
- [2] Hyun-Il Kim, Cheol-Ha Baek, Su Jung An, Sung-Woo Kwak, Yong Hyun Chung, "Gamma camera with a two-layer diverging-slat collimator for radioisotope monitoring," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 698, pp. 90-93, 2013.
- [3] Jarno van Roosmalen and Marlies C Goorden, "Non-diverging analytical expression for the sensitivity of converging SPECT collimators," Physics in Medicine and Biology, Vol. 62, No. 10, pp. N228-N243, 2017.
- [4] 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.
- [5] J. G. Park, S. H. Jung, J. B. Kim, J. Moon, M. C. Han, C. H. Kim, "Development of advanced industrial SPECT system with 12-gonal diverging-collimator," Applied Radiation and Isotopes, Vol. 89, pp. 159-166, 2014.
- [6] C. H. Baek, S. J. An, H-I. Kim, Y. Choi and Y. H. Chung, "Development of a large-angle pinhole gamma camera with depth-of-interaction capability for small animal imaging," Journal of Instrumentation, Vol. 7, No. 1, pp. 1011, 2012. DOI:10.1088/1748-0221/7/01/C01011
- [7] G. Santin, D. Strul, D. Lazaro, L. Simon, M. Krieguer, M. Vieira Martins, V. Breton, and C.

# 공간분해능 향상을 위한 확산형 콜리메이터 기반의 감마카메라 설계

이승재,<sup>1,2</sup> 장영일,<sup>3</sup> 백철하<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>동서대학교 방사선학과

<sup>2</sup>동서대학교 방사선보건환경연구센터

<sup>3</sup>광양보건대학교 방사선과

<sup>4</sup>강원대학교 보건과학대학 방사선학과

## 요 약

확산형 콜리메이터는 촬영 대상을 축소 촬영하거나 넓은 관심영역을 작은 감마카메라를 사용하여 검출하기 위해서 사용한다. 확산형 콜리메이터와 블록형 섬광체 및 픽셀형 섬광체 배열을 사용하는 감마카메라에서 방사선원이 관심영역 주변에 위치할 때 섬광체 표면에 감마선이 대각선으로 입사하게 되면, 섬광체 깊이 방향으로 대각선으로 검출되기 때문에 공간 분해능이 저하된다. 본 연구에서는 이러한 관심영역 외곽에서의 공간 분해능을 향상하기 위한 새로운 시스템을 설계하였다. 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 사용하여 각 섬광 픽셀을 콜리메이터 구멍의 각도와 크기에 맞게 일치하도록 구성하면, 감마선이 섬광체의 여러 깊이에서 반응하더라도, 하나의 섬광 픽셀 위치로 영상화 할 수 있다. 즉, 대각선 방향의 여러 지점에서 검출되더라도, 감마선은 하나의 섬광 픽셀과 상호 작용하기 때문에 공간 분해능의 저하가 발생하지 않는다. Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) 시뮬레이션을 통해 블록형 섬광체를 사용한 감마카메라와 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 사용한 감마카메라를 설계하여 공간 분해능을 비교 평가하였다. 관심영역 외곽에서 발생한 감마선을 통해 획득한 영상에서 공간 분해능은 블록형 섬광체를 사용한 감마카메라에서는 4.05 mm였고, 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 사용한 감마카메라에서는 2.97 mm의 공간 분해능을 보였다. 사다리꼴 픽셀형 섬광체를 사용한 시스템에서 26.67% 공간 분해능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

중심단어: 감마카메라, 확산형 콜리메이터, 사다리꼴 픽셀형 섬광체, GATE

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	교수
(공동저자)	장영일	광양보건대학교 방사선과	교수
(교신저자)	백철하	강원대학교 보건과학대학 방사선학과	교수