

# PET System Design using a Scintillator with a Size of 0.8 mm to Improve Spatial Resolution

Seung-Jae Lee<sup>1,2,\*</sup>

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

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

Received: September 04, 2022. Revised: October 14, 2022. Accepted: October 31, 2022.

## ABSTRACT

Positron emission tomography (PET) uses a very small scintillator to achieve excellent spatial resolution. Therefore, in this study, a PET system using a scintillator to 0.8 mm size was designed and the performance was evaluated. Anihilation radiation was generated from the center of the field of view (FOV) to the outskirts at intervals of 10 mm, and counted simultaneously. The image was reconstructed using the coincidence data, and the spatial resolution was calculated by acquiring the full width at half maximum through the profile. The spatial resolution at the center of the FOV was 1.02 mm, showing a very good result, and the spatial resolution decreased as it was located at the outer edge. To evaluate the phantom image, the Derenzo phantom was constructed to acquire the image, and the degree of classification between radiation sources was evaluated through profile analysis. The result showed that the distance between the radiation sources was larger than the spatial resolution of the radiation sources at each location, and it was confirmed that the radiation sources were distinguished through this. When the PET system designed in this study is applied to PET for small animals, it is considered that excellent performance can be secured through the characteristic of very good spatial resolution.

Keywords: positron emission tomography, small size scintillator, spatial resolution, GATE

## I. INTRODUCTION

양전자방출단층촬영기기(Positron Emission Tomography, PET) 시스템의 공간분해능은 섬광체 크기에 의존하므로, 우수한 공간분해능을 달성하기 위해서는 작은 섬광체를 사용해야 한다<sup>[1,2]</sup>. 섬광체의 크기에 따른 이론적인 공간분해능의 값은 Eq. 1을 통해 계산할 수 있다<sup>[3,4]</sup>.

$$FWHM = 1.25 \sqrt{\left(\frac{D_{crystal}}{2}\right)^2 + (0.0022D_{system})^2 + p^2 + b^2} \quad (1)$$

$D_{crystal}$ 은 섬광체의 크기를 나타낸다. 그러므로 섬광체의 크기가 작을수록 우수한 공간분해능을 확

보할 수 있다. PET 시스템을 통해 영상을 재구성하기 위해서는 동시계수된 섬광체를 서로 연결(line of response, LOR)해야 한다. 검출기 모듈의 섬광체 배열의 평면 영상을 획득하여, 각 섬광 픽셀들의 위치를 분리하고 동시에 측정된 섬광체끼리 서로 연결함으로써 영상을 재구성할 수 있다. 그러나 우수한 공간분해능을 달성하기 위해서 매우 작은 섬광 픽셀을 사용하더라도 광센서의 크기가 한정된다면, 평면 영상에서 섬광 픽셀들의 위치가 분리되지 않는다. 이에 지난 연구에서 3 mm × 3 mm 크기의 광센서를 사용할 경우 평면 영상에서 모든 섬광 픽셀들이 분리 가능한 최소한의 섬광체의 크기를 도출하는 연구를 수행하였다<sup>[5,6]</sup>. 0.8 mm 크기의 섬광체를 14 × 14 배열로 구성하고, 3 mm × 3 mm

\* 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

광센서 픽셀이 4 × 4 배열로 검출기 모듈을 구성하였을 경우, 모든 섬광 픽셀들이 분리된 평면 영상을 획득할 수 있었다. 이에 본 연구에서는 해당하는 검출기 모듈을 사용하여 PET 시스템을 구성하여 공간분해능의 특성을 분석하고, 시스템의 성능을 비교 평가하였다. 비교 평가를 위해 기존에 개발되어 사용되는 소동물용 PET 시스템의 사양을 바탕으로 갠트리의 크기를 설정하였으며, 관심시야 중심에서부터 외곽에 이르는 위치에서 공간분해능을 획득하였다<sup>[7-9]</sup>. 설계한 시스템의 성능은 핵의학 영상기기의 시뮬레이션이 가능한 Geant4 Application for Tomographic Emission(GATE)를 사용하여 평가하였다<sup>[10,11]</sup>.

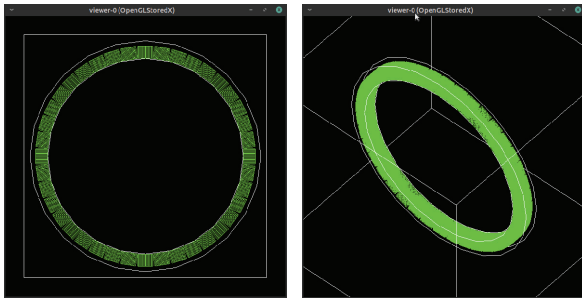


Fig. 1. PET system designed through GATE. A system was configured by arranging 40 detector modules in a 14 × 14 crystal array in a circle.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. PET 시스템

GATE 시뮬레이션 툴을 통해 0.8 mm의 입사 면적을 지닌 섬광체를 사용하여 PET 시스템을 설계하였다. Fig. 1은 설계한 시스템의 모습을 나타낸다. 이는 지름 161 mm의 갠트리를 지니고 있으며, 0.8 mm × 0.8 mm × 10 mm 크기를 지닌 Gadolinium aluminium Gallium Garnet(GAGG) 섬광 픽셀을 14 × 14 배열로 구성한 검출기 모듈을 40개 사용하여 원형으로 배열하였다. Table 1<sup>[7-9]</sup>에 설계한 PET 시스템과 비교 대상의 시스템의 사양을 나타내었다. 총 7,840개의 섬광 픽셀을 사용하였으며, 14개의 검출기 링으로 구성하였다.

Table 1. Comparison of specifications of PET systems

	Our system	Inveon	R4	Focus 120
Crystal material	GAGG	LSO	LSO	LSO
Size (mm <sup>3</sup> )	0.8×0.8×10	1.5×1.5×10	2.1×2.1×10	1.5×1.5×10
Pitch (mm)	0.9	1.59	2.45	1.59
Array	14×14	20×20	8×8	12×12
No. of detector blocks	40	64	92	96
Total No. of crystals	7,840	25,600	6,144	13,824
No. of rings	40	80	36	48
Ring diameter (mm)	161	161	150	150

### 2. 공간분해능

공간분해능을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 설계한 시스템 관심 시야(field of view, FOV) 중심에서부터 10 mm 간격으로 0 mm에서부터 50 mm까지 점선원을 위치시켜 데이터를 획득하였다. 데이터 획득을 위한 에너지의 상한과 하한은 350 keV ~ 650 keV로 설정하였으며, 시스템의 에너지 분해능은 26%로 설정하였다. 획득한 데이터를 사용하여 여과후역투사방법(filtered back projection, FBP)을 통해 재구성 영상을 획득하였으며, 획득된 영상의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)을 통해 공간분해능을 도출하였다.

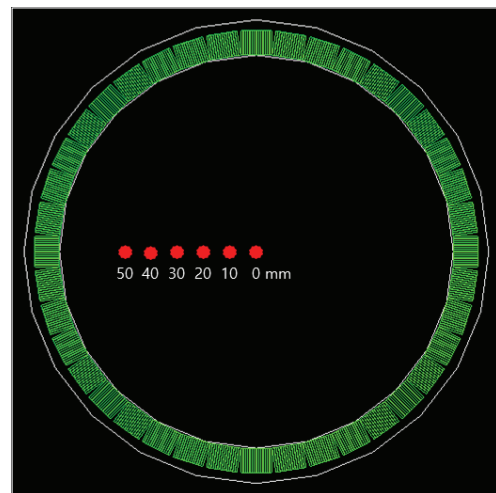


Fig. 2. A position of the radiation point source to evaluate the spatial resolution of the designed system. Measurements were made by locating the radiation source at intervals of 10 mm from the center to the outside.

### 3. 팬텀 평가

GATE 시뮬레이션 툴에서 제공되는 Derenzo 팬텀을 사용하여 시스템의 공간분해능을 평가하였다. Fig. 3과 같은 다양한 크기 및 위치에 점선원이 위치한 팬텀을 사용하여 설계한 시스템의 공간분해능을 평가하였다. 팬텀의 지름은 34 mm이며, 각 위치에 따라 서로 다른 크기의 점선원이 위치한다. 각 점선원의 크기는 2.5, 2, 1.5, 1.25, 1 mm이다. 에너지분해능과 문턱값의 설정은 공간분해능 평가와 동일하게 설정 후 소멸방사선을 발생시켜 데이터를 획득하였다. 획득한 데이터를 바탕으로 FBP 방법을 통해 영상을 재구성한 후 각 크기별 및 위치별 점선원의 영상화 정도와 점선원의 반치폭과 피크 간의 간격을 통해 인접한 점선원간의 구분 정도를 평가하였다.

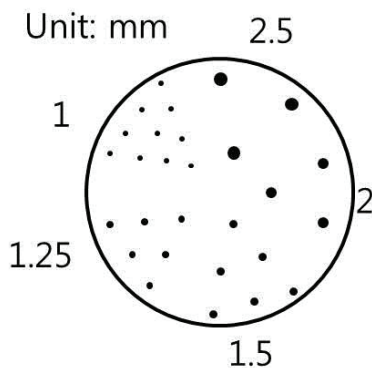


Fig. 3. Derenzo phantom for phantom evaluation. The diameter of the phantom is 34 mm, and it consists of radiation sources with sizes of 2.5, 2, 1.5, 1.25, and 1 mm.

## III. RESULT

### 1. 공간분해능

공간분해능 평가를 위해 FOV 중심부터 외곽으로 10 mm 간격으로 소멸방사선을 발생시키는 점선원을 위치시켜 동시계수하였다. 동시계수한 데이터를 통해 여현곡선과 점선원의 위치에 대한 영상을 재구성하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다. 재구성된 영상의 각 위치별 점선원의 프로파일을 통해 반치폭을 측정하여 공간분해능을 계산하였으며, 중심

에서 1.02 mm로 가장 작은 공간분해능 값을 보였으며, 외곽으로 갈수록 공간분해능이 저하되는 특징을 보였다. Fig. 5에 각 위치별 공간분해능 값을 나타내었다.

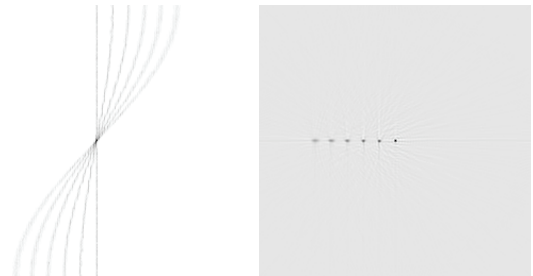


Fig. 4. Sinogram and reconstructed images of a radiation point source located 10 mm apart from the center of FOV.

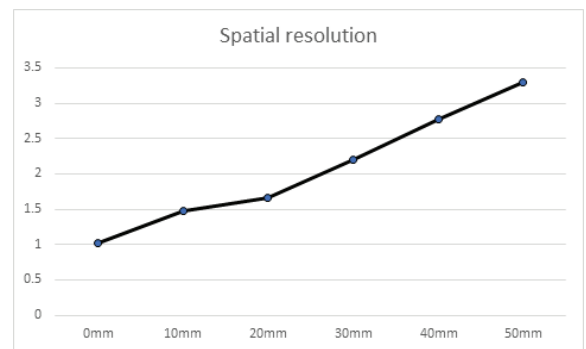


Fig. 5. Spatial resolution of the radiation point sources located 10 mm apart from the center of the FOV.

### 2. 팬텀 평가

다양한 크기의 선원을 사용하여 구성된 팬텀의 여현곡선과 재구성한 영상을 Fig. 6에 나타내었다. 선원의 크기는 1 mm에서부터 2.5 mm로 다양하며, 중심에서부터 외곽까지 위치해 있다. 모든 크기 및 위치에서 선원이 구분가능하였다. 가장 작은 선원인 1 mm 선원의 영상에서 Fig. 7의 파란색 선에 해당하는 프로파일을 분석하여 구분 가능 정도를 평가하였다. FOV 외곽 위치의 선원을 peak1으로 나타내었으며, 중심 위치를 peak4로 나타내었다. 측정된 공간분해능과 선원간의 간격은 Table 2에 나타내었으며, 각 선원의 공간분해능에 비해 선원간의 간격이 더 크므로 모든 선원들의 구분이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

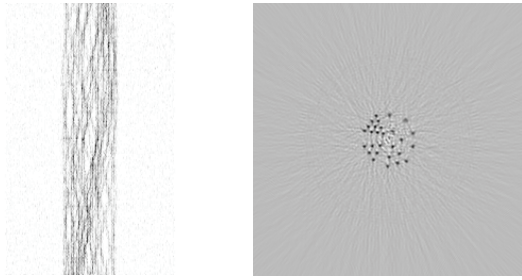


Fig. 6. Sinogram and reconstruction images of the Derenzo phantom.

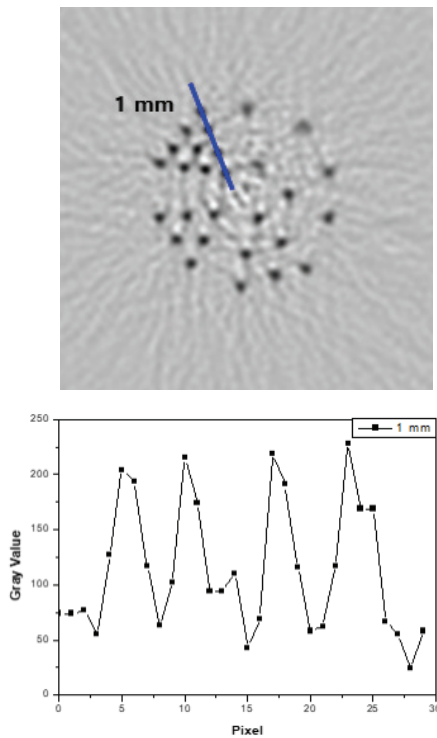


Fig. 7. Profiles of 1 mm sized radiation sources on the Derenzo phantom.

Table 2. Spatial resolution and peak-to-peak gap of 1 mm sized radiation sources in the Derenzo phantom

	Peak1	Peak2	Peak3	Peak4
Spatial resolution	2.16	1.82	1.88	2.74
peak-to-peak gap	3.02	4.57	3.74	

#### IV. DISCUSSION

공간분해능 평가 결과에서 FOV 중심에 비해 외

곽에 위치한 점선원에서 저하된 결과가 나타났다.

PET 검출기에서 섬광 픽셀은 높은 에너지의 감마선을 검출하고, 우수한 공간분해능을 획득하기 위해 매우 작고, 가느다란 형태로 가공된다. FOV 외곽에서 발생한 선원은 섬광 픽셀에 사선으로 입사하여 여러 섬광 픽셀에 걸쳐 획득된다. 이에 여러 섬광 픽셀에서 검출되므로 FOV 외곽에서는 공간분해능이 저하되는 결과를 발생한다. 많은 연구에서 이러한 공간분해능 저하현상을 해결하기 위해 반응 깊이를 측정하는 검출기를 개발하였다. 향후 본 연구에서 설계한 시스템에도 반응 깊이를 측정하는 방식을 도입할 경우 공간분해능의 향상을 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

#### V. CONCLUSION

GATE 시뮬레이션을 통해 0.8 mm 크기의 섬광체를 사용한 PET 시스템을 설계하고 성능을 평가하였다. FOV 중심에서부터 외곽에 이르는 위치에서 소멸방사선을 발생시켜 동시계수 후, 영상을 재구성하였으며, 영상의 각 위치의 프로파일을 통해 공간분해능을 계산하였다. 중심에서 공간분해능이 1.02 mm로, 비교한 다른 시스템에 비해 매우 우수한 결과를 획득하였다. Inveon은 중심에서 공간분해능이 1.54 mm, R4는 1.65 mm, Focus 120은 1.18 mm였다. Derenzo 팬텀을 사용한 팬텀 평가에서도 모든 크기의 선원을 구분가능하였으며, 특히 가장 작은 선원인 1 mm 크기의 선원의 프로파일을 분석한 결과 선원간의 간격에 비해 공간분해능의 크기가 더 작아 모든 선원들이 구분이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 설계한 PET 시스템을 사용하여 영상을 획득할 경우 매우 작은 병변의 위치를 구분할 수 있으므로, 특히 소동물용 PET에 적용할 경우 우수한 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2022년도 동서대학교 “Dongseo Cluster Project” 지원에 의하여 이루어진 것임 (DSU-20220004).

## Reference

- [1] W. W. Moses, "Fundamental Limits of Spatial Resolution in PET", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 648, Supplement 1, pp. S236-S240, 2011. <https://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.11.092>
- [2] S. Surti, R. Scheuermann, M. E. Werner, J. S. Karp, "Improved spatial resolution in PET scanners using sampling techniques", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 56, No. 3, pp. 596-601, 2009. <https://dx.doi.org/10.1109/TNS.2009.2013389>
- [3] A. R. Yu, J. S. Kim, K. M. Kim, Y. S. Lee, J. G. Kim, S. K. Woo, J. A. Park, H. J. Kim, G. J. Cheon, "Performance Measurement of Siemens Inveon PET Scanner for Small Animal Imaging", *Progress in Medical Physics*, Vol. 21, No. 2, 2010.
- [4] S. J. Lee, "A Study on the Maximization of Scintillation Pixel Array According to the Size of the Photosensor", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 16, No. 2, pp. 157-162, 2022. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2022.16.2.157>
- [5] S. J. Lee, "Image Acquisition Study of Maximal Scintillation Pixel Array Using Light Guide", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 16, No. 3, pp. 249-255, 2022. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2022.16.3.249>
- [6] S. J. Lee, "Optimization of Light Guide Thickness for Optimal Flood Image Acquisition of a  $14 \times 14$  Scintillation Pixel Array", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 16, No. 4, pp. 365-371, 2022. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2022.16.4.365>
- [7] C. C. Constantinescu, J. Mukherjee, "Performance evaluation of an Inveon PET preclinical scanner", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 54, No. 9, pp. 2885-2899, 2009. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/54/9/020>
- [8] C. Knoess, S. Siegel, A. Smith, D. Newport, N. Richerzhagen, A. Winkeler, A. Jacobs, R. N. Goble, K. Wienhard, W-D. Heiss, "Performance evaluation of the microPET R4 PET scanner for rodents", *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, Vol. 30, pp. 737-747, 2003. <http://dx.doi.org/0.1007/s00259-002-1052-6>
- [9] R. Laforest, D. Longford, S. Siegel, D. F. Newport, J. Yap, "Performance Evaluation of the microPET@-FOCUS-F120", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 54, No. 1, pp. 42-49, 2007. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2006.889312>
- [10] 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 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>
- [11] 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>

# 공간분해능 향상을 위한 0.8 mm 크기의 섬광체를 사용한 PET 시스템 설계

이승재<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>동서대학교 방사선학과

<sup>2</sup>동서대학교 방사선보건환경연구센터

## 요 약

양전자방출단층촬영기기(positron emission tomography, PET)는 우수한 공간분해능을 달성하기 위해 매우 작은 섬광체를 사용한다. 이에 본 연구에서는 0.8 mm 크기의 섬광체를 사용한 PET 시스템을 설계하여 성능을 평가하였다. 관심 시야(field of view, FOV) 중심에서부터 10 mm 간격으로 외곽에 이르는 위치에서 소멸방사선을 발생시켜 동시계수하였다. 획득한 데이터를 사용하여 영상을 재구성하였으며, 프로파일을 통해 반치폭을 획득하여 공간분해능을 계산하였다. FOV 중심에서 공간분해능은 1.02 mm로 매우 우수한 결과를 보였으며, 외곽에 위치할수록 공간분해능은 저하되는 특징을 보였다. 팬텀 영상을 평가하기 위해 Derenzo 팬텀을 구성하여 영상을 획득하였으며, 프로파일 분석을 통해 선원간 구분 정도를 평가하였다. 각 위치별 선원의 공간분해능에 비해 선원간의 간격이 더 큰 결과를 보였으며, 이를 통해 모든 위치의 선원들이 구분되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 설계한 PET 시스템을 소동물용 PET에 적용할 경우 매우 우수한 공간분해능을 특성을 통해 우수한 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 양전자방출단층촬영기기, 작은 섬광 픽셀, 공간분해능, GATE

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	교수