

# Optimization of Light Guide Thickness for Optimal Flood Image Acquisition of a $14 \times 14$ Scintillation Pixel Array

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: July 13, 2022. Revised: August 17, 2022. Accepted: August 31, 2022.

## ABSTRACT

In order to obtain excellent spatial resolution in the PET detector, when the detector module is designed using very small scintillation pixels, overlap occurs at the edges and corners of the scintillation pixel array in the flood image. By using a light guide, the occurrence of overlap can be reduced. In this study, after using a scintillator of  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  to form a  $14 \times 14$  array,  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  SiPM pixels are combined with  $4 \times 4$  photosensor to reduce the occurrence of overlap. The optimal thickness of the light guide used for this purpose was derived. Quantitative evaluation was performed based on scintillation pixel images of edges and corners where overlap occurs mainly in the acquired flood image. Quantitative evaluation was calculated through the interval and full width at half maximum between scintillation pixel images, and when a light guide with a thickness of 2 mm was used, the best image was obtained with a k value of 2.60. In addition, as a result of measuring the energy resolution through the energy spectrum, the light guide with a thickness of 2 mm showed the best result at 28.5%. If a 2 mm light guide is used, it is considered that the best flood image and energy resolution with minimal overlap can be obtained.

Keywords: Positron emission tomography, Scintillation pixel array, Light guide, Optimization

## I. INTRODUCTION

양전자방출단층촬영기기(Positron Emission Tomography, PET)는 생체내의 양전자를 방출하는 방사성의약품을 주입한 후 양전자 소멸현상에 의해 발생하는 한 쌍의 감마선을 동시에 검출하는 시스템이다<sup>[1]</sup>. 새로운 질병의 진단 및 의약품, 치료법의 개발을 위해 인체를 대상으로 시험을 진행하기 전 동물 모델을 통해 평가한다<sup>[2,3]</sup>. 이러한 동물 모델을 사용하여 검사 및 평가를 수행하기 위해 동물 전용의 PET이 개발되어 사용되고 있다. 동물 모델은 인체에 비해 매우 작은 크기를 지니므로 인체용 PET에 비해 매우 우수한 공간분해능을 지녀야 한다. 많은 연구기관 및 기업에서는 높은 공간분해능을 달성하기 위

해 섬광 픽셀의 크기를 작게 만들어 검출기를 개발해왔다<sup>[4-11]</sup>. 섬광 픽셀의 크기를 작게 만들어 검출기를 구성하더라도, 빛을 측정하여 전기적 신호로 변환해주는 광센서의 크기가 제한된다면, 아무리 작은 섬광 픽셀로 구성하더라도 영상을 획득하기엔 어려움이 따른다. 이에 지난 연구에서 섬광 픽셀과 광센서의 조합을 통해 검출기를 구성할 경우, 광센서의 크기는 고정된 상태에서 섬광 픽셀 배열의 증가에 따라 모든 섬광 픽셀들이 영상화되는 최대의 배열을 획득하는 연구를 수행하였다<sup>[12,13]</sup>. 여러 섬광 픽셀 배열들과 광센서의 조합을 통해 최대의 배열을 획득하였으며, 광가이드를 추가하여 사용하였을 경우에 최대의 영상화가 가능한 섬광 픽셀 배열을 획득하였다.

\* 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

본 연구에서는  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 의 섬광 픽셀을 사용하여  $14 \times 14$  배열로 검출기를 구성한 후 광가이드의 두께에 따라 최적의 영상을 획득하는 실험을 수행하였다. 실험을 통해 획득한 평면 영상을 통해 광가이드의 두께에 따라 가장자리에서 발생하는 영상의 겹침과 그 외 지점에서의 영상간의 거리를 통해 광가이드의 두께를 최적화하고자 한다. 본 연구를 위해 Epic crystal사의 GAGG 섬광체<sup>[14]</sup>와 SensL사의 광센서<sup>[15]</sup>를 사용하여, 평면 영상을 획득하였으며, 이를 통해 최적의 광가이드 두께를 산출하였고, 획득된 데이터를 통해 설계한 검출기의 에너지 분해능을 평가하였다.

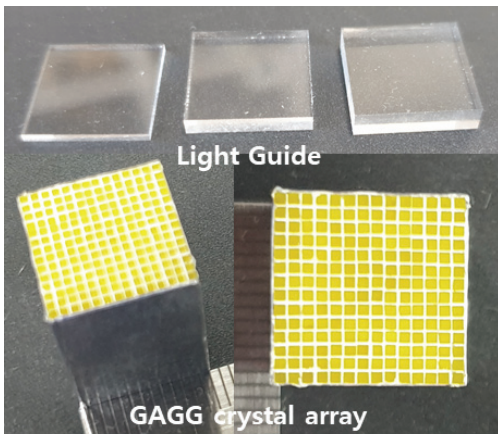


Fig. 1. Light guides and GAGG crystal array used for flood images acquisition and energy resolution measurement.

## II. MATERIAL AND METHODS

PET 검출기의 평면 영상 획득과 에너지 분해능 측정을 위해 Epic crystal사의  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  크기의 GAGG 섬광 픽셀  $14 \times 14$  배열과, SensL사의 광센서를 사용하여 검출기를 구성하였다. 광센서는  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  크기를 지닌 SiPM이  $4 \times 4$  배열이  $3 \times 3$ 으로 구성된 형태이며, 본 연구에서는 이 중 가운데 하나의 배열을 사용하였다. 모든 섬광 픽셀이 평면 영상에서 나타날 수 있도록 광가이드를 사용하였으며, 여러 두께를 사용하여 각각의 평면 영상을 획득하여 최적의 평면 영상을 구했다.

Fig. 1은 사용한 광가이드 및 섬광 픽셀 배열을 나타낸다. 광가이드는 Epic crystal사의 K-9 glass이

며,  $12.6 \text{ mm} \times 12.6 \text{ mm}$ 의 크기를 지닌, 두께 1 mm, 2 mm, 3 mm를 사용하였다<sup>[16]</sup>. 섬광체는 0.1 mm 간격을 지니며, 해당 간격에는 섬광체와 감마선이 상호작용하여 발생된 빛을 광센서로 이동시키기 위해 반사체( $\text{BaSO}_4$ )가 삽입되었다. 전체 크기는  $12.5 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 를 지닌다. 광센서는 각 픽셀간의 0.2 mm 간격을 지니 전체 12.6 mm의 크기를 지닌다.

Fig. 2와 같이 섬광 픽셀 배열과 광가이드를 연결하고, 이를 광센서와 연결하여 데이터를 수집하였다. 광가이드와 광센서 사이에는 급격한 굴절률의 차이로 인해 발생하는 빛의 손실을 최소화하기 위해 광학윤활제(굴절률: 1.465)를 사용하였다. 511 keV의 감마선을 발생시키는 Na-22 방사선원을 사용하여 감마선과 섬광체의 상호작용에 의해 발생된 빛을 광센서를 통해 수집하였다. 수집된 데이터를 평면 영상으로 구성하였으며, 에너지 스펙트럼을 획득하였다.

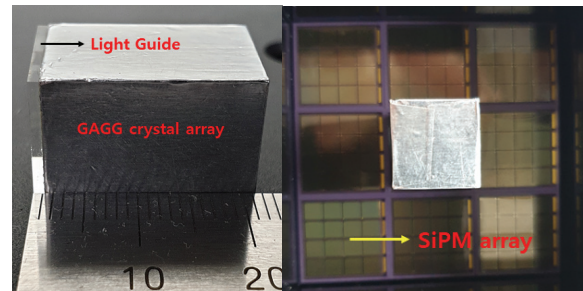


Fig. 2. Experimental setup using a scintillator array coupled with a light guide and a SiPM array.

광가이드 두께에 따라 획득된 평면 영상은 정량적으로 비교 평가하기 위해 인접한 섬광 픽셀 영상들을 분석하였다. 영상 분석은 여러 섬광 픽셀 영상에서 기준이 되는 위치에서 분리된 비율로 측정하였다. Fig. 3은 섬광 픽셀 영상의 분석을 위한 인접한 위치를 나타내며, Eq. (1)을 통해 정량적으로 평가하였다<sup>[17]</sup>.

여기서  $D_{0ix}$ 와  $D_{0iy}$ 는 0번째 픽셀 영상에서  $i$ 번째 픽셀 영상까지의  $x$ 축 및  $y$ 축의 중심간 거리를 나타내고,  $w_{ix}$ 와  $w_{iy}$ 는 각 축의  $i$ 번째 픽셀의 반치폭을 나타낸다.  $k_i$ 는 내부, 가장자리 및 코너 부분에 위

치한 섬광 픽셀 영상의 반치폭에 대한 평균적인 분리된 비율을 나타낸다.  $k$ 는 내부, 가장자리 및 모서리 부분에서 계산된  $k_i$ 값의 평균값을 나타내고,  $k_{std}$ 는 표준편차를 나타낸다.  $k$ 의 값이 크고  $k_{std}$  값이 작을수록 더 나은 평면 영상을 나타낸다.

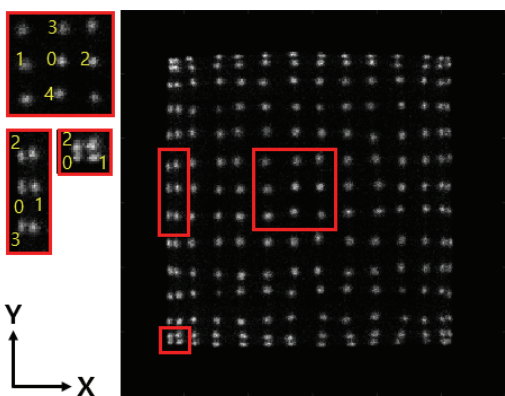


Fig. 3. Picture illustrates an inner, edge, and corner crystal and its adjacency crystals used to calculate flood image quality.

$$k_i = \begin{cases} \frac{\sqrt[4]{D_{01x}D_{02x}D_{03y}D_{04y}}}{(w_{0x} + w_{0y} + w_{1x} + w_{2x} + w_{3y} + w_{4y})/6} & \text{Inner} \\ \frac{\sqrt[3]{D_{01x}D_{02y}D_{03y}}}{(w_{0x} + w_{0y} + w_{1x} + w_{2y} + w_{3y})/5} & \text{Edge} \\ \frac{\sqrt[2]{D_{01x}D_{02y}}}{(w_{0x} + w_{0y} + w_{1x} + w_{2y})/4} & \text{Corner} \end{cases}$$

$$k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad k_{std} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (k_i - k)^2} \quad (1)$$

### III. RESULT

14 × 14 배열의 섬광 픽셀과 여러 두께의 광가이드 조합을 통해 최적의 평면 영상을 획득하는 실험을 수행하였다. 광가이드의 두께는 광가이드를 사용하지 않았을 때와, 1 mm, 2 mm, 3 mm를 사용하여 평면 영상과 에너지스펙트럼을 획득하였다.

Fig. 4는 광가이드 두께에 따라 획득한 평면 영상과 평면 영상의 프로파일을 나타낸다. 프로파일은 가로축과 세로축 순서로 나타내었다. 광가이드를 사용하지 않았을 경우의 평면 영상을 보면, 가운데 부분의 위치는 모두 겹침이 발생하지 않고 구분이

가능하지만, 가장자리 및 모서리 부분에서는 서로 겹침이 발생하여 구분이 어려운 것을 확인할 수 있다. 프로파일에서도 겹침이 발생하여 모든 피크가 나타나지 않은 것을 확인할 수 있다.

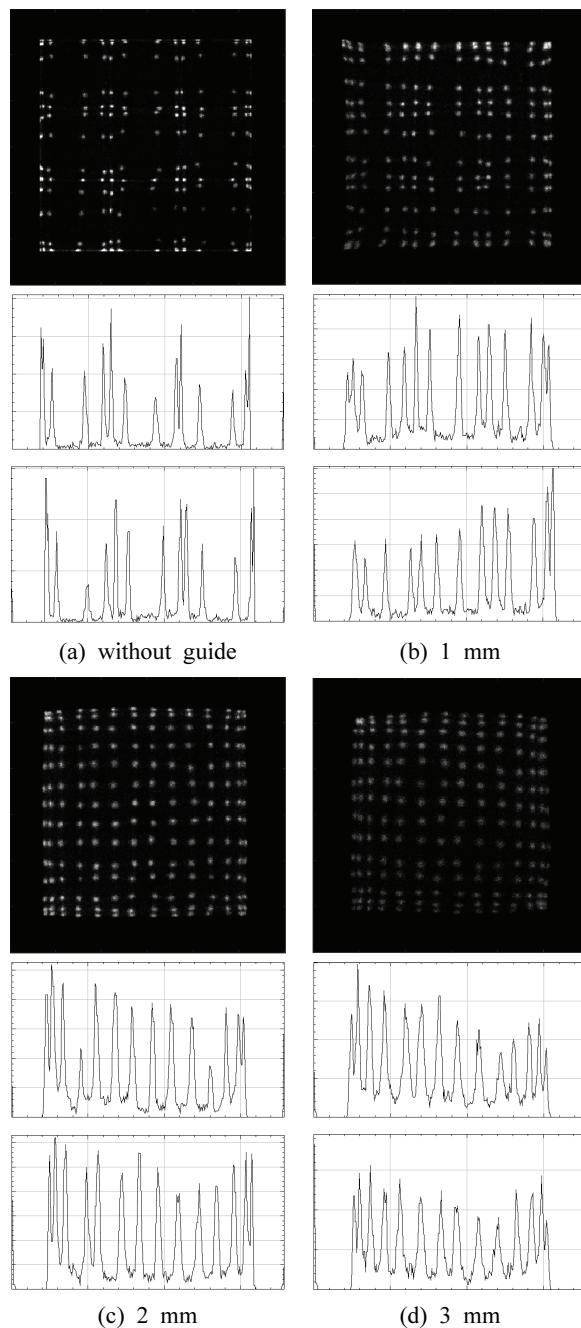


Fig. 4. Flood images, and horizontal and vertical profiles for each thickness of light guides obtained through experiments.

1 mm의 광가이드를 적용하였을 때 획득한 평면

영상에서 가운데 부분의 위치는 모두 겹침이 발생하지 않았으며, 가장자리 및 모서리 부분에서는 어느 정도 구분이 가능하나 겹침의 정도가 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 영상의 프로파일에서도 확인 가능하다. 2 mm와 3 mm의 광가이드를 사용하여 획득한 평면 영상을 보면, 모든 위치에서 구분 가능한 것을 확인할 수 있다. 가운데 위치에서는 모든 픽셀이 완벽히 분리되어 나타났으며, 가장자리 및 모서리 부분에서도 어느 정도 분리가 되어 나타난 것을 확인할 수 있다. 프로파일에서도 14개의 모든 피크가 나타난 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 광가이드를 사용하지 않았을 경우와, 각 두께별 광가이드를 사용하였을 때의 에너지스펙트럼을 나타낸다. 511 keV에 대한 에너지 분해능은 각각 37.23%, 35.41%, 28.51%, 34.17%로, 2 mm 두께의 광가이드를 적용하였을 경우 가장 우수한 에너지 분해능을 보였다.

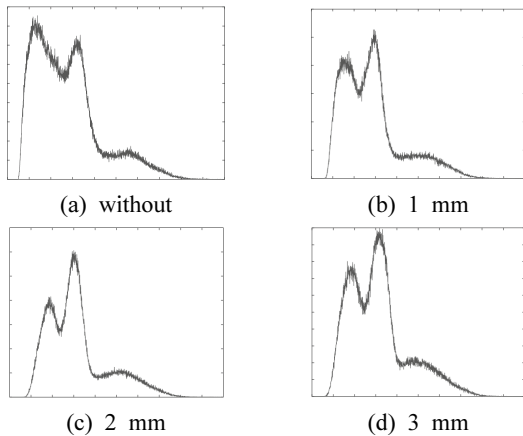


Fig. 5. Energy spectra without and with light guide. The thickness of the light guides were 1 mm, 2 mm, and 3 mm.

광가이드를 사용하지 않았을 경우와 1 mm 두께를 사용한 경우에는 가장자리 및 모서리 부분에서 겹침이 발생하여 구분이 어려워, Eq. 1을 사용한 정량적 평가는 2 mm 및 3 mm의 평면 영상에서 수행하였다. 내부와 가장자리 및 모서리 부분에서 정량적 평가를 수행하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 2 mm의 광가이드를 사용하였을 경우 k값이 2.60으로 더 우수한 평면 영상을 획득한 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Quantitative evaluation results of flood images through Eq. (1)

Guide thickness		$k_i$	k	$k_{std}$
2 mm	Inner	3.66	2.60	0.98
	Edge	2.40		
	Corner	1.74		
3 mm	Inner	3.07	2.31	0.77
	Edge	2.33		
	Corner	1.53		

#### IV. DISCUSSION

각 광가이드 두께별 평면 영상을 보면 가운데 부분은 모든 두께에서 구분이 잘되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 가장자리 및 모서리 부분에서는 두께에 따라 겹침의 정도가 다르다. 이는 가장자리 및 모서리 부분에 위치한 섬광 픽셀에서 발생된 빛은 모든 방향으로 확산되나 이를 검출하는 광센서는 모든 방향에 위치하지 않기에 어느 한쪽 방향에서만 검출이 이루어져 각 섬광 픽셀들의 구분이 어려워지며 겹침이 발생하였다. 특히 광가이드를 사용하지 않거나 두께가 작을 경우에는 특정 방향으로의 확산 또한 제한적으로 이루어져 겹침의 정도가 더 높게 나타났다. 겹침의 발생을 줄이기 위해 광가이드의 두께를 증가시키기에 따라 겹쳐지는 정도는 2 mm에서 최소가 되고 3 mm 부터는 픽셀 영상의 반치폭의 증가로 인해 오히려 겹침의 정도가 더 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 에너지 분해능은 광가이드를 사용하지 않은 경우에서 광가이드의 두께가 증가함에 따라 점점 우수한 결과를 보이다, 3 mm 광가이드 두께에서 다시 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이는 광가이드를 사용하지 않거나, 그 두께가 작을 경우에는 빛의 확산이 제한적으로 이루어져 광센서간의 존재하는 빛 수집이 이루어지지 않는 곳에 의해 빛의 손실로 나타난 결과로 판단되며, 3 mm에서 다시 에너지 분해능이 저하되는 것은 광가이드 측면으로 빛이 빠져나갈 수 있으므로 두께가 증가할수록 이러한 경향은 크게 되어 나타난 결과로 판단된다.

## V. CONCLUSION

0.8 mm × 0.8 mm × 20 mm 크기의 섬광체를 14 × 14 배열로 구성한 후, 3 mm × 3 mm 크기의 SiPM 이 4 × 4 배열로 구성된 광센서와 조합 후, 모든 섬광 픽셀이 영상화되는 최적의 광가이드 두께를 도출하였다. 광가이드를 사용하지 않을 경우와, 1 mm, 2 mm, 3 mm 두께의 광가이드를 사용하였을 경우의 평면 영상을 획득하여 영상을 정량적으로 평가하였다. 광가이드를 사용하지 않은 경우와 1 mm 두께의 광가이드를 사용한 경우에는 가장자리 및 모서리 부분에서의 결침이 발생하여 정량적 평가의 어려움이 존재해, 2 mm와 3 mm 두께의 광가이드 적용 평면 영상에 대해 정량적 평가를 수행하였다. 2 mm에서는 k 값이 2.60, 3 mm에서는 2.31을 보여 2 mm 두께의 광가이드를 적용하여 획득한 평면 영상에서 더 우수한 결과를 확인하였다.

본 연구는 향후 PET 검출기를 설계할 때 우수한 공간분해능을 획득하기 위해 매우 작은 섬광 픽셀을 사용할 경우 광가이드를 적용 시, 모든 섬광 픽셀 영상에서 결침을 최소화할 수 있는 검출기 설계의 기초 자료로 사용될 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

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

## Reference

- [1] D. L. Bailey, D. W. Townsend, P. E. Valk, M. N. Maysy, *Positron Emission Tomography: Basic Science*, 1st Ed., Springer-Verlag London Ltd., London, pp. 41-62, 2005.
- [2] B. H. Peng, C. S. Levin, "Recent developments in PET instrumentation", *Current Pharmaceutical Biotechnology*, Vol. 11, No. 6, pp. 555-571, 2010. <https://doi.org/10.2174/138920110792246555>
- [3] J. J. Vaquero, P. Kinahan, "Positron Emission Tomography: Current Challenges and Opportunities for Technological Advances in Clinical and Preclinical Imaging Systems", *Annual Review of Biomedical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 385-414, 2015. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071114-040723>
- [4] S. R. Cherry, Y. Shao, R. W. Silverman, K. Meadors, S. Siegel, A. Chatziioannou, J. W. Young, W. Jones, J. C. Moyers, D. Newport, A. Boutefnouchet, T. H. Farquhar, M. Andreaco, M. J. Paulus, D. M. Binkley, R. Nutt, M. E. Phelps, "MicroPET: a high resolution PET scanner for imaging small animals", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 44, No. 3, 1997. <http://dx.doi.org/10.1109/23.596981>
- [5] Y. C. Tai, A. Chatziioannou, S. Siegel, J. Young, D. Newport, R. N. Goble, R. E. Nutt, S. R. Cherry, "Performance evaluation of the microPET P4: a PET system dedicated to animal imaging", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 46, No. 7, pp. 1845-1862, 2001. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/46/7/308>
- [6] 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, No. 5, pp. 737-747, 2003. <http://dx.doi.org/10.1007/s00259-002-1052-6>
- [7] Y. C. Tai, A. F. Chatziioannou, Y. Yang, R. W. Silverman, K. Meadors, S. Siegel, D. F. Newport, J. R. Stickel, S. R. Cherry, "MicroPET II: design, development and initial performance of an improved microPET scanner for small-animal imaging", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 48, No. 11, pp. 1519-1537, 2003. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/48/11/303>
- [8] Y. C. Tai, A. Ruangma, D. Rowland, S. Siegel, D. F. Newport, P. L. Chow, R. Laforest, "Performance evaluation of the microPET focus: a third-generation microPET scanner dedicated to animal imaging", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 46, No. 3, pp. 455-463, 2005.
- [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] 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>

- [11] K. Nagy, M. Toth, P. Major, G. Patay, G. Egri, J. Haggkvist, A. Varrone, L. Farde, C. Halldin, B. Gulyas, "Performance evaluation of the small-animal nanoScan PET/MRI system", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 54, No. 10, pp. 1825-1832, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.2967/jnumed.112.119065>
- [12] 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.  
<https://doi.org/10.7742/jksr.2022.16.2.157>
- [13] 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>
- [14] <https://www.epic-crystal.com/oxide-scintillators/gagg-ce-scintillator.html>
- [15] J. Du, J. P. Schmall, Y. Yang, K. Di, E. Roncali, G. S. Mitchell, S. Buckley, C. Jackson, S. R. Cherry, "Evaluation of Matrix9 silicon photomultiplier array for small-animal PET", *Medical Physics*, Vol. 42, No. 2, pp. 585-599, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1118/1.4905088>
- [16] <https://www.epic-crystal.com/others/light-guide.html>
- [17] J. Du, Y. Yang, X. Bai, M. S. Judenhofer, E. Berg, K. Di, S. Buckley, C. Jackson, S. R. Cherry, "Characterization of Large-Area SiPM Array for PET Applications", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 63, No. 1, pp. 8-16, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2015.2499726>

# 14 × 14 섬광 픽셀 배열의 최적의 평면 영상 획득을 위한 광가이드 두께 최적화

이승재<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>동서대학교 방사선학과

<sup>2</sup>동서대학교 방사선보건환경연구소

## 요 약

PET 검출기에서 매우 우수한 공간분해능을 획득하기 위해, 매우 작은 섬광 픽셀을 사용하여 검출기 모듈을 설계할 경우, 평면 영상에서 섬광 픽셀 배열 가장자리 및 모서리 부분에서의 겹침이 발생한다. 광가이드를 사용함으로써 겹침의 발생을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 0.8 mm × 0.8 mm × 20 mm의 섬광체를 사용하여 14 × 14 배열로 구성한 후, 3 mm × 3 mm의 SiPM 픽셀이 4 × 4 배열로 구성된 광센서와 조합하고, 겹침의 발생을 감소시키기 위해 사용한 광가이드의 최적의 두께를 도출하였다. 획득한 평면 영상에서 겹침이 주로 발생하는 가장자리 및 모서리 위치의 섬광 픽셀 영상을 바탕으로 정량적 평가를 수행하였다. 정량적 평가는 섬광 픽셀 영상간의 간격과 반치폭을 통해 계산되었으며, 2 mm 두께의 광가이드를 사용하였을 경우 k값이 2.60으로 가장 우수한 영상을 획득한 결과를 보였다. 또한 에너지 스펙트럼을 통해 에너지 분해능을 측정된 결과 2 mm 두께의 광가이드에서 28.5%로 가장 우수한 결과를 나타내었다. 2 mm의 광가이드를 사용할 경우 겹침이 최소화된 가장 우수한 평면 영상과 에너지 분해능을 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 양전자방출단층촬영기기, 섬광 픽셀 배열, 광가이드, 최적화

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	교수