

Imaging Study of Fine Pixel Scintillator Block using Reflector on the Side of Light Guide

Seung-Jae Lee^{1,2,*}, Byungdu Jo^{1,2}

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: September 08, 2023. Revised: October 20, 2023. Accepted: October 31, 2023.

ABSTRACT

When a scintillator block is constructed using fine scintillator pixels, the scintillator block located at the edge of the scintillator block results in overlapping images. To solve this problem, a light guide was inserted between the scintillator block and the photosensor, and images of all scintillation pixels were separated and acquired. However, loss of light may occur through the light guide, which eventually affects the quality of the image due to a decrease in energy resolution. Therefore, in this study, a detector was designed that can separate scintillation pixels better by using a reflector on the side of the light guide and can secure excellent energy resolution by minimizing light loss. For comparative evaluation with previous studies, flood images were obtained through DETECT2000 capable of light simulation, and the degree of separation and light collection rate were evaluated. When a reflector was used on the side of the light guide, all materials showed excellent separation regardless of the material of the light guide, which showed better separation results than previous studies. In addition, the light collection rate was more than five times better when the reflector was applied than when it was not. If this detector is applied to a small animal positron emission tomography, it will be possible to secure excellent image quality through excellent spatial resolution and energy resolution.

Keywords: Fine scintillation pixel, Light guide, Spatial resolution, Energy resolution

I. INTRODUCTION

소동물용 양전자방출단층촬영기기(Positron Emission Tomography; PET)에 사용하는 검출기의 섬광 픽셀들의 크기는 매우 작다. 이는 작은 촬영 대상을 영상화하기 위해서는 우수한 공간분해능이 필요하기 때문이다. 이처럼 우수한 공간분해능 확보를 위해 많은 연구에서 매우 작은 섬광 픽셀을 사용한 검출기를 개발하였다^[1-5]. 그러나 광센서의 크기에 비해 상대적으로 작은 섬광 픽셀을 사용하여 검출기를 구성할 경우 광센서 외곽에 위치한 섬광 픽셀들의 위치가 평면 영상에서 중첩되는 현상이 발생한다. 모든 영역의 섬광 픽셀들을 영상화하기 위해서 광

가이드를 사용하는 검출기들이 개발되었다^[4-6]. 지난 연구에서는 광가이드의 물질을 일반적으로 사용되는 유리가 아닌 검출기의 섬광 픽셀과 동일한 섬광체를 사용하였을 경우, 평면 영상에서 외곽에 위치한 섬광 픽셀들의 분리가 더 우수한 것을 확인하였다^[7]. 그러나 섬광 픽셀에서 발생한 빛이 광가이드를 통해 광센서로 이동할 경우 광가이드에서 빛이 손실된다면, 전체적인 에너지 분해능의 감소가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 광가이드 옆면에 반사체를 적용하여, 검출기 외곽에 위치한 섬광 픽셀들의 영상화가 이전에 설계한 검출기에 비해 분리가 더욱 명확하고, 또한 반사체를 사용함으로써 빛의 손실을 최소화하고 에너지 분해능의 감소를 방지할 수 있는 검출기를 설계하였다. 설계

* Corresponding Author: Seung-Jae Lee

E-mail: sjlee@gdsu.dongseo.ac.kr

Tel: +82-51-320-2719

Address: Jurye-ro 47, Sasang-gu, Busan, Republic of Korea

한 검출기의 에너지 손실에 대한 평가와 평면 영상에서 가장자리 섬광 픽셀들의 분리 정도를 광가이드에 반사체 유무에 따른 평가를 수행하였다. 이를 위해 빛의 거동을 모사할 수 있는 DETECT2000^[8,9] 시뮬레이션 툴을 사용하여 평면 영상을 획득하였다. 획득한 평면 영상에서 가장자리 영역의 섬광 픽셀들의 영상 분리 정도 및 에너지 분해능과 연관된 빛의 수집율을 광가이드 유무에 따른 결과를 비교·평가하였다.

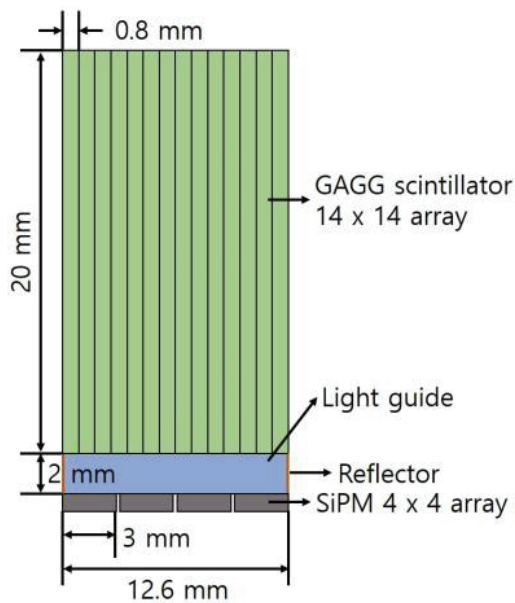


Fig. 1. Detector composed of fine scintillation pixels and light guides whose sides are treated with reflectors.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 검출기 설계

광가이드를 적용하여 구성한 검출기는 Fig. 1과 같다. 감마선이 입사하는 면적이 0.8 mm × 0.8 mm 크기의 미세한 섬광 픽셀을 14 × 14 배열로 구성하고, 가장자리 섬광 픽셀들을 모두 영상화하기 위해 광가이드를 적용하였다. 광가이드는 섬광 픽셀에서 이동한 빛의 손실을 최소화 및 모든 섬광 픽셀의 영상화를 위해 옆면을 반사체로 처리하였다. 광센서는 실리콘광증배기(silicon photomultiplier; SiPM)을 사용하였으며, 4 × 4 배열로 구성하였다.

검출기 구성에 사용한 섬광체는 Gadolinium Aluminum

Gallium Garnet (GAGG)^[10]이며, 20 mm 높이를 사용하였다. 섬광 픽셀 간 0.1 mm의 간격을 두고 배열하였으며, 그 사이에는 반사체를 삽입하여 발생된 빛을 광센서로 전달하도록 설계하였다. 섬광 픽셀 사이는 난 반사체를 사용하였으며, 광가이드 옆면은 난 반사체와 금속 반사체 두 종류를 사용하여, 반사체 종류에 따른 평면 영상을 획득하였다. 광가이드는 유리 및 섬광체 물질로 구성하였다. 광센서의 크기는 3 mm × 3 mm이며, 0.2 mm 간격으로 구성하였다.

2. 신호 획득

광가이드에 반사체를 적용한 검출기의 신호를 획득하기 위해, 소멸방사선과 GAGG 섬광체가 상호작용하여 생성되는 빛을 발생시켰다. 모든 섬광 픽셀의 중심에서 감마선 상호작용을 일으켰으며, 광센서에서 이를 획득하였다. 16개의 SiPM에서 획득한 빛의 신호는 4개의 신호로 감소시켜 평면 영상으로 재구성하였다. X+, X-, Y+, Y- 신호로 각 SiPM 픽셀의 위치에 따른 가중치를 부여하여 감소시켰으며, Eq 1.을 통해 감마선 상호작용의 위치를 산출하였다.

$$X = \frac{X^+ - X^-}{X^+ + X^-}, Y = \frac{Y^+ - Y^-}{Y^+ + Y^-} \quad (1)$$

모든 섬광 픽셀에서 1,000번의 감마선 상호작용을 일으켜, 각 섬광 픽셀의 평면 영상을 획득하였으며, 검출기 전체에서 총 196,000번의 시뮬레이션을 실시하였다.

3. 평면 영상 평가

광가이드 옆면에 반사체를 적용한 검출기를 통해 획득한 평면 영상을 정략적으로 평가하기 위해 획득한 평면 영상의 가장자리 섬광 픽셀들의 공간 분해능과 분리 정도를 평가하였다. Fig. 2와 같이 평면 영상에서 왼쪽의 가장자리 두 픽셀 영상들에 대한 각각의 공간분해능 및 두 픽셀 간의 거리를 통해 Eq. 2로 영상을 평가하였다. 빨간색 네모 안의 총 14줄의 인접한 섬광 픽셀들을 각각 평가하였으며, 왼쪽에서 첫 번째가 0번째 섬광 픽셀, 두 번째가 1번째 섬광 픽셀 영상을 나타낸다.

$$k_i = \frac{\sqrt{D_{01}}}{(w_0 + w_1)/2}$$

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

여기서, k_i 는 인접한 두 섬광 픽셀 간의 분리된 정도를 나타내고, w_i 는 i 번째 픽셀의 공간분해능을, D_{01} 은 두 섬광 픽셀 영상의 분리된 거리를 나타낸다. k 는 모든 두 섬광 픽셀 간의 분리 정도의 평균을 나타내고, k_{std} 는 표준편차를 나타낸다. k 값이 크고, k_{std} 값이 작을수록 우수한 분리 정도로 평가할 수 있다.

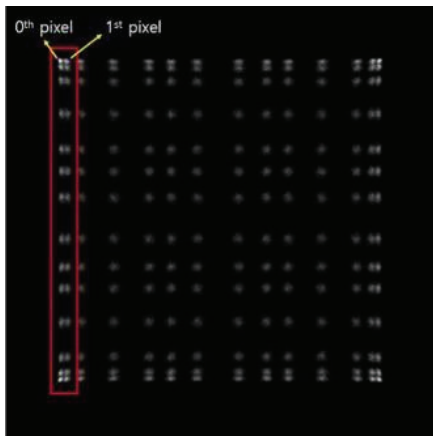


Fig. 2. Evaluate the degree of separation of two edge pixels in a flood image. In the red square, the left is the 0th pixel and the right is the 1st pixel.

III. RESULT

1. 광가이드 옆면 반사체에 따른 평면 영상 비교

Fig. 3은 광가이드 옆면에 반사체를 사용하여 획득한 평면 영상을 나타낸다. 반사체의 종류 및 광가이드 물질에 따라 다른 형태의 평면 영상이 나타난 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 (a)와 (c)는 각각 유리 광가이드와 금속 반사체 조합 및 섬광체 광가이드와 금속 반사체 조합에서 획득한 평면 영상을 나타낸다. 금속 반사체를 사용하였을 경우, 광가이드 물질에 상관없이 모든 섬광 픽셀들이 영상화된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 (e)는 광가이드 옆면을 금속반사체 처리하여 획득한 평면 영상과 반사체 처리를 하지 않았을 때 획득한 평면 영상에서 모서리 부분을 확대한 결과이다. 반사체 처리를 했

을 경우, 반사체를 사용하지 않았을 때의 평면 영상보다도 더욱 잘 구분되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 3-(b)의 유리 광가이드 난 반사체 처리와, (d)의 섬광체 광가이드 난 반사체 처리와 같이 난 반사체를 사용하였을 경우에는 모든 종류의 광가이드에서 가장자리 픽셀들이 중첩된 것을 확인할 수 있다.

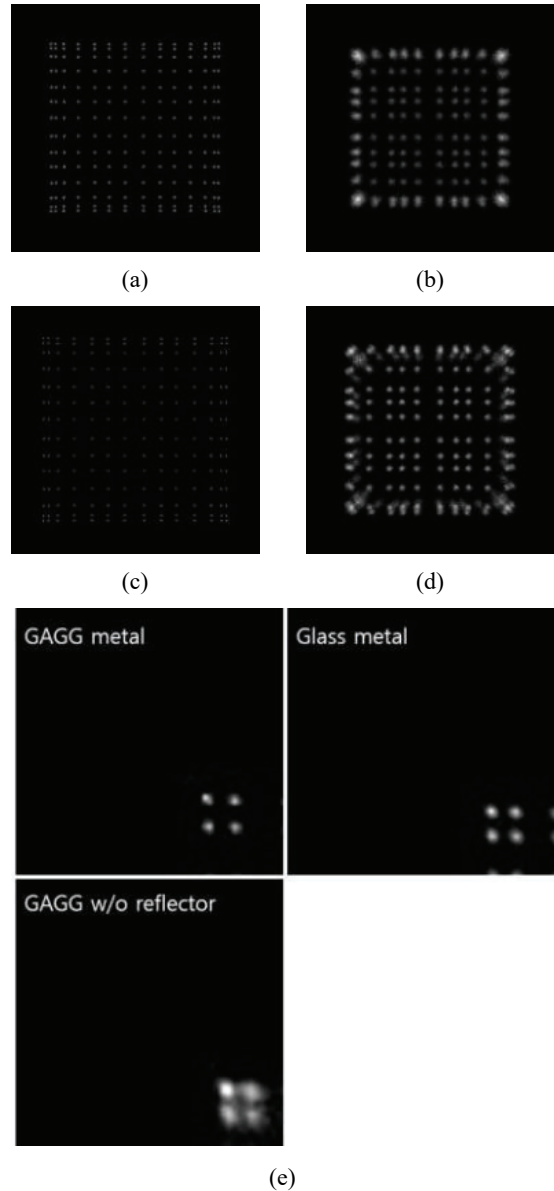


Fig. 3. Comparison of flood image according to the type of light guide and reflector, and comparison with flood image when no reflector is applied. (a) Glass guide with metal reflector, (b) Glass guide with diffuse reflector, (c) Scintillator guide with metal reflector, (d) Scintillator guide with diffuse reflector, (e) Comparison without reflector

2. 빛 수집을 평가

광가이드 옆면의 반사체 처리 여부에 따른 빛 수집을 평가를 위해 196,000번의 시뮬레이션에서 획득한 빛의 수로 에너지 스펙트럼을 구성하여 중심값을 획득하였다. Fig. 3은 섬광체 광가이드 옆면을 반사체로 처리하지 않았을 때와 처리했을 때의 수집된 빛의 빈도를 나타낸 에너지 스펙트럼이다. 반사체를 처리했을 경우 수집된 빛의 중심값은 1787.1로 반사체 처리를 하지 않았을 때인 318.79보다 우수한 빛 수집율을 보였다. 5배 이상의 빛 수집율로 반사체를 사용하여 광가이드를 구성한 경우 더욱 우수한 에너지 분해능을 확보할 수 있다.

3. 분리 정도의 정량적 평가

광가이드 옆면의 반사체를 사용하여 광가이드 물질에 따라 평면 영상을 획득 후 분리 정도의 정량적 평가를 수행하였다. Table 1은 각 재구성된 평면 영상에서 왼쪽의 가장자리 두 섬광 픽셀 영상들의 공간분해능과 거리 및 이를 통해 산출한 분리 정도를 나타낸 결과이다. 유리 광가이드에 비해 섬광체 광가이드에서 섬광 픽셀들의 공간분해능이 더 우수한 것을 확인할 수 있으며, 분리 정도 또한

더 우수한 것을 확인할 수 있다. 유리 광가이드의 k 값은 1.11 ± 0.03 으로 산출되었으며, 섬광체 광가이드의 k 값은 1.49 ± 0.06 으로 산출되어, 전체적인 분리 정도가 섬광체 광가이드를 사용하였을 경우 더 우수한 것으로 나타났다. 광가이드 옆면에 반사체를 사용하지 않았을 경우, 섬광체 광가이드의 k 값은 0.64 ± 0.03 이었다. 반사체를 사용하였을 때 광가이드 물질의 종류에 관계없이 반사체를 사용하였을 때보다 더 우수한 분리 정도를 나타내었다.

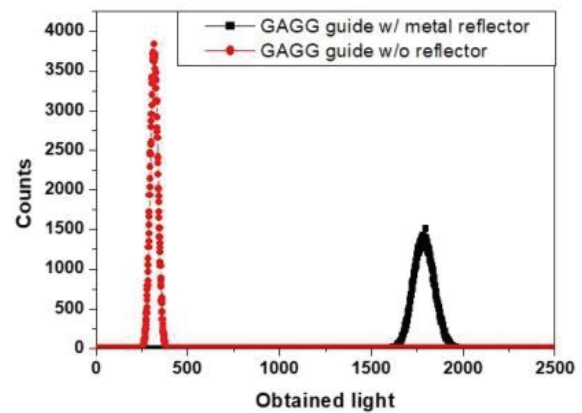


Fig. 4. Comparison of light collection rate depending on whether the side surface is treated with a reflector using a GAGG scintillator light guide.

Table 1. Evaluation results of the degree of separation between the two edge pixel images in the flood image according to each light guide material, when a reflector is used on the side of the light guide. (unit: image pixel)

Light guide		Pixel line Number													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Glass	pixel 1 resolution	1.98	1.93	2.04	2.10	2.02	1.97	2.11	2.00	1.99	2.09	2.15	2.00	2.02	1.92
	pixel 2 resolution	2.17	2.22	2.19	2.25	2.24	2.21	2.31	2.31	2.33	2.38	2.27	2.25	2.17	2.27
	distance	5.58	5.61	5.61	5.63	5.57	5.60	5.65	5.56	5.55	5.57	5.65	5.64	5.57	5.59
	ki	1.14	1.14	1.12	1.09	1.11	1.13	1.08	1.09	1.09	1.06	1.08	1.12	1.13	1.13
Scintillator	pixel 1 resolution	1.27	1.35	1.42	1.45	1.42	1.41	1.40	1.43	1.42	1.38	1.42	1.44	1.41	1.31
	pixel 2 resolution	1.63	1.65	1.84	1.82	1.80	1.75	1.79	1.80	1.77	1.81	1.71	1.82	1.69	1.64
	distance	5.57	5.48	5.61	5.58	5.51	5.46	5.58	5.62	5.46	5.47	5.62	5.63	5.54	5.56
	ki	1.63	1.56	1.45	1.45	1.46	1.48	1.48	1.47	1.46	1.47	1.52	1.46	1.52	1.60

IV. DISCUSSION

미세 섬광 픽셀을 사용하여 구성된 검출기의 평면 영상에서 모든 섬광 픽셀들을 분리하여 영상화하기 위해 광가이드를 사용하였다. 광가이드의 옆면에는 반사체를 사용하여 분리 정도가 더욱 명확하도록 하였고, 광센서에서 수집되는 빛의 수를 증가시켜 에너지 분해능을 향상시켰다. 이전 연구에서 수행한 광가이드를 사용하고, 옆면의 반사체를 사용하지 않은 결과에 비해 분리 정도는 더욱 우수하고, 빛 수집율은 더욱 높아 더 우수한 에너지 분해능을 나타낼 수 있었다. 광가이드 물질의 종류에 따라서는 옆면을 반사체를 사용하였을 경우에도, 유리 물질에 비해 섬광체 물질일 때 더욱 분리 정도가 우수한 결과를 보였다. Table 1의 결과에서 유리 광가이드의 픽셀 간 거리는 5.60이었으며, 섬광체 광가이드는 5.55로 유리 광가이드의 픽셀 간 거리가 더 멀게 측정되었다. 그러나 분리 정도 평가는 섬광체 광가이드가 더 우수한 결과를 보였는데, 이는 섬광체 광가이드의 픽셀에서 더 우수한 공간 분해능으로 측정되어 나타난 결과이다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 미세 섬광 픽셀을 사용하여 구성된 섬광체 블록과 광가이드 및 광센서를 조합한 검출기를 설계하였다. 이때 광가이드 옆면에 반사체를 적용하여 광가이드 물질에 따른 평면 영상을 평가하였다. 반사체는 난 반사체 및 금속 반사체를 사용하였고, 광가이드 물질은 유리 및 섬광체를 사용하였다. 금속 반사체를 사용하였을 경우, 광가이드 물질에 상관없이 모두 가장자리 섬광 픽셀들의 분리가 명확한 것을 확인할 수 있었다. 이전 연구에서 광가이드 옆면에 반사체를 적용하지 않았을 때의 결과보다 더욱 우수한 분리 정도를 보였으며, 빛 수집율을 비교 평가한 결과 반사체를 적용하였을 때 5배 이상의 매우 우수한 빛 수집율의 결과를 획득하였다. 이러한 결과는 우수한 에너지 분해능을 달성할 수 있어 영상의 질 개선에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 광가이드에 반사체를 사용하여 설계한 검출기를 PET 시스템에 적용할 경우 모든

섬광 픽셀들을 분리하여 측정할 수 있고, 우수한 에너지 분해능을 확보할 수 있어, 공간분해능 및 영상의 질을 향상시킬 수 있을 것이다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 동서대학교 "Dongseo Cluster Project" 지원에 의하여 이루어진 것임 (DSU-20230003).

Reference

- [1] Y. C. Tai, A. F. Chatziioannou, Y. Yang, R. W. Wilverman, K. Meadors, S. Siegel, D. F. Newport, J. R. Stickel and S. R. Cherry, "MicroPETII: 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. <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/48/11/303>
- [2] J. R. Stickel, S. R. Cherry, "High-resolution PET detector design: modelling components of intrinsic spatial resolution", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 50, No. 2, pp. 179-195, 2005. <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/50/2/001>
- [3] Y. Yang, J. Bec, J. Zhou, M. Zhang, M. S. Judenhofer, X. Bai, K. Di, Y. Wu, M. Rodriguez, P. Dokhale, K. S. Shah, R. Farrell, J. Qi, S. R. Cherry, "A Prototype High-Resolution Small-Animal PET Scanner Dedicated to Mouse Brain Imaging", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 57, No. 7, pp. 1130-1135, 2016. <https://dx.doi.org/10.2967/jnumed.115.165886>
- [4] S. Yamamoto, H. Watabe, T. Watabe, H. Ikeda, Y. Kanai, Y. Ogata, K. Kato, J. Hatazawa, "Development of ultrahigh resolution Si-PM-based PET system using 0.32 mm pixel scintillators", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 836, pp. 7-12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.08.045>
- [5] F. Godinez, K. Gong, J. Zhou, M. S. Judenhofer, A. J. Chaudhari, R. D. Badawi, "Development of an Ultra High Resolution PET Scanner for Imaging Rodent Paws: PawPET", *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, Vol. 2, No. 1, pp. 7-16, 2018.

<https://doi.org/10.1109/TRPMS.2017.2765486>

- [6] Z. Liu, M. Niu, Z. Kuang, N. Ren, S. Wu, L. Cong, X. Wang, Z. Sang, C. Williams, Y. Yang, "High resolution detectors for whole-body PET scanners by using dual-ended readout", *EJNMMI Physics*, Vol. 9, article No. 29, 2022.
<https://doi.org/10.1186/s40658-022-00460-4>
- [7] S. J. Lee, B. D. Jo, "Design of Small-sized Scintillation Pixel Detector with a Light Guide made of the Same Material as the Scintillation Pixel", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 17, No. 4, pp. 523-529, 2023.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2023.17.4.523>
- [8] F. Cayouette, D. Laurendeau, C. Moisan, "DETECT2000: an improved Monte-Carlo simulator for the computer aided design of photon sensing devices", *Proceedings of SPIE, Quebec*, Vol. 4833, pp. 69-76, 2003. <https://doi.org/10.1117/12.474315>
- [9] F. Cayouette, C. Moisan, N. Zhang, C. J. Thompson, "Monte Carlo Modeling of Scintillator Crystal Performance for Stratified PET Detectors With DETECT2000", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 49, No. 3, pp. 624-628, 2002.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2002.1039539>
- [10] GAGG(Ce) Crystal. Epic-Crystal, from URL:
<https://www.epic-crystal.com/oxide-scintillators/gagg-ce-scintillator.html>

광가이드 측면 반사체 사용을 통한 미세 픽셀 섬광체 블록의 영상화 연구

이승재^{1,2,*}, 조병두^{1,2}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구센터

요 약

미세 섬광 픽셀을 사용하여 섬광체 블록을 구성할 경우 섬광체 블록 가장 자리에 위치한 섬광 픽셀들에서 중첩되어 영상화되는 결과가 나타난다. 이를 해결하기 위해서 섬광체 블록과 광센서 사이에 광가이드를 삽입하여 모든 섬광 픽셀들의 영상을 분리하여 획득하였다. 그러나 광가이드를 통해 빛의 손실이 발생할 수 있으며, 이는 에너지 분해능의 감소로 결국 영상의 질에 영향을 미치게 된다. 이에 본 연구에서는 광가이드의 옆면에 반사체를 사용하여 더욱 우수한 섬광 픽셀의 분리가 가능하며, 빛 손실을 최소화해 우수한 에너지 분해능을 확보할 수 있는 검출기를 설계하였다. 이전 연구와 비교 평가를 위해 빛 시뮬레이션이 가능한 DETECT2000을 통해 평면 영상을 획득하여, 분리 정도 및 빛 수집율을 평가하였다. 광가이드의 옆면에 반사체를 사용할 경우, 광가이드의 물질에 상관없이 모든 물질에서 매우 우수한 분리 정도를 나타내었으며, 이는 이전 연구에 비해 더욱 우수한 분리 결과를 나타내었다. 또한 빛 수집율은 반사체 적용하였을 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 5배 이상 우수한 수집율을 보였다. 본 검출기를 소동물용 양정자방출단층촬영기에 적용할 경우 우수한 공간분해능 및 에너지 분해능을 통해 우수한 영상의 질을 확보할 수 있을 것이다.

중심단어: 미세 섬광 픽셀, 광가이드, 공간분해능, 에너지 분해능

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자) (교신저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	교수
(공동저자)	조병두	동서대학교 방사선학과	교수