

Design of Small-sized Scintillation Pixel Detector with a Light Guide made of the Same Material as the Scintillation Pixel

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

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: August 09, 2023. Revised: August 25, 2023. Accepted: August 31, 2023.

ABSTRACT

In order to achieve excellent spatial resolution, very small scintillation pixels are used in detectors of positron emission tomography for small animals. However, by using these very small scintillation pixels, scintillation pixels at the edge of the array may overlap in a flood image. To solve this problem, a light guide capable of changing the distribution of light was used. Depending on the material of the light guide, the light spreading tendency is different, and accordingly, the presence or absence of overlapping is different depending on the material of the light guide used. In this study, instead of the conventional glass light guide, a detector using the same material as the scintillation pixel was designed. A scintillator light guide has a higher refractive index than a glass light guide, so the light spread is different. Flood images were acquired to evaluate the degree of separation of the scintillation pixels at the edge of the detector using the two light guides. The degree of separation was evaluated by calculating the distance between the center and the spatial resolution of the image of two scintillation pixels at the edge of the obtained flood image. As a result, when the scintillator light guide was used, better spatial resolution was shown, and the distance between centers of scintillation pixels was wider. When a detector is constructed using a scintillator light guide instead of a conventional glass light guide, it is possible to use a smaller scintillation pixel, thereby securing better spatial resolution.

Keywords: Small Animal, Positron Emission Tomography, Light Guide, Spatial Resolution

I. INTRODUCTION

전임상용 양전자방출단층촬영기기(Positron Emission Tomography; PET)의 검출기는 매우 작은 크기의 동물을 영상화하기 위해 우수한 공간분해능이 필요하다. 이를 위해 전임상용 PET의 검출기는 우수한 공간분해능을 위해 매우 작은 섬광 픽셀을 사용한다. 초기 개발된 전임상용 전용의 PET에는 수 mm 크기의 섬광 픽셀을 사용하였다¹⁻⁵. 이러한 섬광 픽셀을 사용하여 2 mm 내외의 공간분해능을 획득하였다. 이후에 개발된 전임상용 PET은 1 mm 이하의 섬광 픽셀을 사용하여, 이전의 PET에 비해 더욱 우

수한 공간분해능을 얻었다⁶⁻¹⁰. 1 mm 이하의 우수한 공간분해능을 통해 우수한 질의 영상을 획득하였다. 이러한 1 mm 이하의 섬광 픽셀을 사용하여 검출기의 평면 영상을 획득할 때, 광센서 가장 외곽에 위치한 섬광 픽셀들은 하나의 광센서 픽셀과 연결되어 위치가 서로 중첩되는 결과가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 가장 외곽에 위치한 광센서 픽셀의 반 정도까지만 섬광 픽셀을 위치시키거나, 광가이드를 사용하여 모든 섬광 픽셀들의 영상을 획득하였다^{9,11}.

광가이드를 사용하더라도 광센서 픽셀과 섬광 픽셀의 크기에 따라 영상화 가능한 수준은 달라진

다. 이에 본 연구에서는 기존 시스템에서 사용하는 광가이드의 물질 대신에 섬광 픽셀과 동일한 물질을 광가이드로써 사용하여 가장자리 영역의 섬광 픽셀들의 중첩 현상을 해결하였다. 일반적인 광가이드의 물질은 유리로 구성되어 섬광 픽셀과는 굴절률의 차이가 발생하여 영상화되는 위치가 서로 인접하게 나타났다. 그러나 섬광 픽셀과 동일한 물질을 사용하여 광가이드 역할을 수행할 경우 굴절률의 변화가 없어 가장자리 섬광 픽셀들의 중첩이 완화되는 결과를 나타낼 수 있다. 광가이드 물질에 따른 섬광 픽셀 검출기의 가장자리 영역의 중첩 정도를 평가하기 위해 DETECT2000^[12,13] 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 각 광가이드 물질에 따른 평면 영상을 획득 후 가장자리 부분의 섬광 픽셀 영상의 분리 정도를 평가하였다.

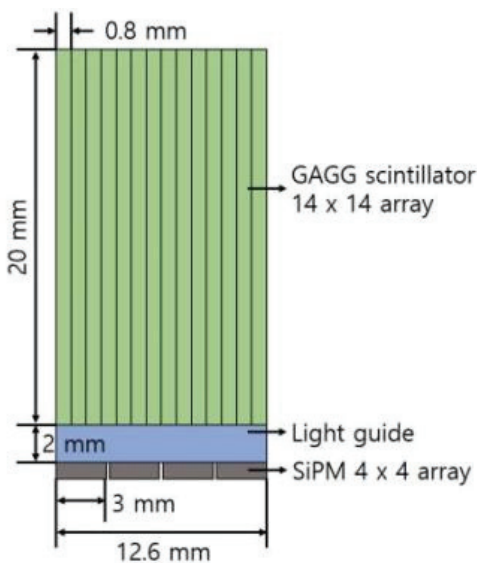


Fig. 1. Detector consisting of a 14×14 array of 0.8 mm scintillation pixels. A light guide was inserted between the scintillation pixels and the photosensor.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 검출기 구성

광가이드의 물질 종류에 따른 평면 영상에서 가장자리 섬광 픽셀들의 분리 정도를 평가하기 위해 Fig. 1과 같이 검출기를 설계하였다. 매우 우수한 공간분해능 달성을 목적으로 섬광 픽셀의 크기는 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 로 구성하였으며, 광가

이드는 $12.6 \text{ mm} \times 12.6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 로 구성하였다. 섬광 픽셀의 종류는 감마선의 에너지에 따른 다수의 빛이 발생하는 Gadolinium Aluminium Gallium Garnet (GAGG) 섬광체를 사용하였다^[14]. GAGG 섬광체는 섬광체 자체에서 발생하는 방사선이 없으며, 많은 양의 빛을 발생시켜 우수한 에너지 분해능을 지닌다. 광가이드로는 기존에 사용되는 유리 재질의 광가이드와 섬광체 물질과 동일한 GAGG를 사용하여 광가이드로써 사용하였다. 섬광 픽셀에서 발생한 빛을 전기적 신호로 변환시키기 위한 광센서로써는 SensL사의 MatrixSM-9 시스템을 사용하였다^[15]. MatrixSM-9 시스템은 4×4 픽셀의 SiPM이 3×3 으로 구성되며, 이중 가운데 부분의 4×4 배열을 사용하였다.

2. 감마선 이벤트 발생 및 평면 영상 획득

각 광가이드에 따른 평면 영상을 획득하기 위해 구성된 검출기에서 감마선 이벤트를 발생시켰다. 모든 섬광 픽셀의 중심위치에서 GAGG 섬광체와 소멸방사선이 상호작용하여 생성된 빛의 양과 광센서의 양자효율을 고려한 빛의 수를 발생시켰다. 모든 섬광 픽셀마다 1,000번의 감마선 이벤트를 발생시켜, 총 14×14 배열에서 196,000번의 감마선 이벤트를 실행시켰다. 각 위치에서 발생한 빛은 섬광 픽셀 내에서 이동과 산란, 흡수, 반사 등의 과정을 거쳐 최종적으로 광센서에 도달하여 신호가 기록된다.

모든 위치에서 획득된 빛의 신호는 광센서 픽셀의 위치에 따른 가중치를 부여하여 X+, X-, Y+, Y- 신호로 합산되어 좌표 값으로 산출된다. 이렇게 산출된 좌표 값을 사용하여 평면 영상으로 재구성하였다.

3. 정량적 평가

유리 광가이드와 섬광체 광가이드를 사용하여 재구성한 평면 영상에서 가장자리 섬광 픽셀들의 영상의 분리 정도를 정량적으로 평가하기 위해 가장자리 섬광 픽셀 영상의 분리 정도를 공간분해능과 섬광 픽셀 영상들의 중심 간의 거리를 통해 평가하였다. 공간분해능은 작을수록 중심 간의 거리를 클수록 분리된 정도는 우수한 것으로 평가하였다.

III. RESULT

1. 평면 영상 비교

각 광가이드에 따른 평면 영상을 획득하여 두 평면 영상에서 나타나는 가장자리 부분의 섬광 픽셀 영상들을 비교하였다. Fig. 2는 유리 가이드를 사용하였을 때와 섬광체 가이드를 사용하였을 때의 평면 영상을 나타낸다. 가장자리 부분과 모서리 부분에서의 확대된 영상을 보면, 유리 광가이드의 평면 영상에서는 외곽 두 섬광 픽셀들이 서로 중첩되어 영상에 나타난 것을 확인할 수 있다. 반면 섬광체 광가이드의 평면 영상에서는 분리되어 나타난 것을 확인할 수 있다.

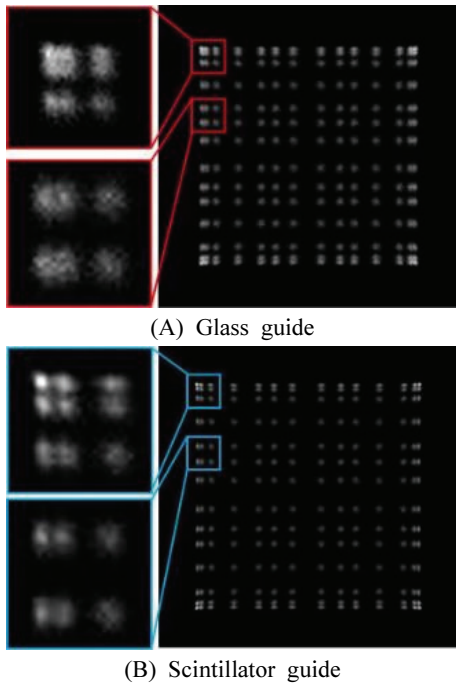


Fig. 2. Flood images acquired using a glass guide and a scintillator guide.

2. 분리 정도의 정량적 평가

외곽 두 섬광 픽셀 영상들의 분리된 정도를 정량적으로 평가하기 위해 평면 영상에서 왼쪽에서부터 첫 번째와 두 번째 섬광 픽셀 영상에 대한 프로파일을 획득하고, 이에 대한 공간분해능과 피크 중심 간의 거리를 산출하였다. Fig. 3은 유리 광가이드 및 섬광체 광가이드에 대한 가장자리 두 섬광 픽셀 영상의 위에서 네 번째 프로파일을 나타낸다. 유리 광가이드 평면 영상에 비해 섬광체 광가이드 평

면 영상의 섬광 픽셀들이 서로 더 잘 분리되어 나타난 것을 확인할 수 있다. Fig. 3에서 검은색 선은 프로파일을 나타내고, 녹색 선은 첫 번째 및 두 번째 섬광 픽셀의 공간분해능을 획득하기 위해 피팅한 가우시안 곡선을 나타낸다. 그리고 빨간색 선은 두 가우시안 곡선의 합으로 이루어진 선을 나타내며, 프로파일과 일치하는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 가우시안 피팅이 매우 잘 이루어졌으며, 공간분해능의 계산도 정확히 이루어진 것을 알 수 있다.

Table 1은 14개 쌍의 섬광 픽셀 영상들의 공간분해능과 두 픽셀 간의 거리를 산출한 결과이다. 모든 광가이드에서 첫 번째 섬광 픽셀 영상의 공간분해능이 두 번째 섬광 픽셀 영상의 공간분해능에 비해 우수한 것을 확인할 수 있다.

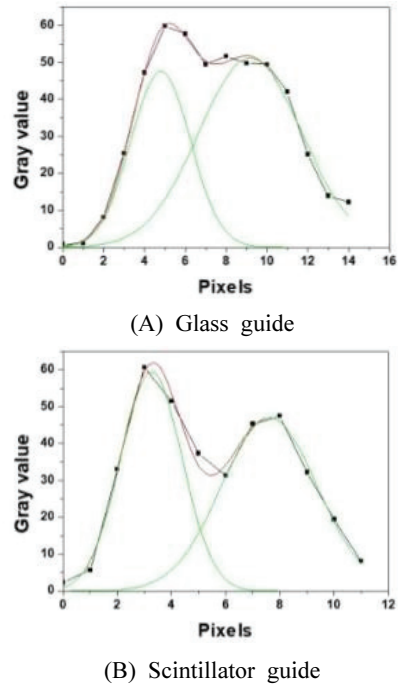


Fig. 3. The fourth profile from the top of the edge two scintillation pixel image for the glass light guide and scintillator light guide.

IV. DISCUSSION

굴절률이 서로 다른 물질 내에서 빛의 이동은 Eq. (1)과 같이 스넬의 법칙을 따른다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

Table 1. The result of calculating the spatial resolution of 14 pairs of scintillation pixel images and the distance between two pixels. (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	3.01	3.83	3.10	3.43	3.67	3.38	3.49	3.89	3.69	3.42	3.70	4.11	4.27	3.18
	pixel 2 resolution	5.41	5.53	5.52	5.93	5.63	6.04	6.04	5.21	5.47	5.97	5.72	6.05	4.89	5.79
	distance	4.36	4.44	4.34	4.39	4.40	4.16	4.23	4.61	4.34	4.15	4.42	4.38	4.59	4.08
Scintillator	pixel 1 resolution	2.24	2.50	2.44	2.66	2.50	2.55	2.73	2.82	2.57	2.72	2.60	2.57	2.31	2.43
	pixel 2 resolution	3.64	3.66	4.38	4.14	4.13	4.26	3.76	3.71	3.84	3.50	4.10	3.90	4.05	3.60
	distance	4.22	4.20	4.23	4.35	4.26	4.23	4.42	4.40	4.22	4.28	4.37	4.34	4.33	4.24

여기서, n_1 및 n_2 는 물질의 굴절률을 나타내고, θ_1 및 θ_2 는 입사각과 굴절각을 나타낸다.

Eq. 1.을 토대로 굴절률이 큰 물질로 빛이 입사하면 더 작은 각도로 빛이 굴절된다. 서로 다른 두 물질의 광가이드를 사용하였을 경우, 빛이 30도 각도로 입사한다고 가정하였을 때, Fig. 4와 같이 빛의 각도가 변경되어 이동한다. 섬광 픽셀 배열과 광가이드 사이에는 공기층에 의한 빛의 전반사 및 손실을 최소화하기 위해 광학윤활제를 사용하였다. 즉, 굴절률이 큰 광가이드에서 빛의 퍼짐이 보다 적은 것을 확인할 수 있다. 이는 평면 영상에서 섬광체 광가이드를 사용하였을 경우 공간분해능이 더 우수한 결과로 나타났다. 빛 퍼짐 분포가 더 작게 나타나므로 평면 영상에서 더 작은 분포로 영상으로 나타난 것이다.

유리 광가이드를 적용하여 획득한 평면 영상은 두 섬광 픽셀 중심 간의 거리에 비해 두 번째 섬광 픽셀 영상의 공간분해능이 더 큰 결과를 보였으며, 이는 두 영상의 분리가 되지 않는다는 것을 보여준다. 반면에 섬광체 광가이드를 적용하여 획득한 평면 영상에서는 두 번째 섬광 픽셀 영상의 공간분해능이 두 섬광 픽셀의 중심 간 거리에 비해 더 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 두 섬광 픽셀들의 영상이 서로 잘 분리됨을 나타낸다.

본 연구는 시뮬레이션을 바탕으로 완벽한 조건에서 이루어진 이론적 검증을 진행한 부분으로 실제 실험과는 차이가 발생할 수 있으므로, 향후 연

구에서 실험을 통해 증명하고자 한다.

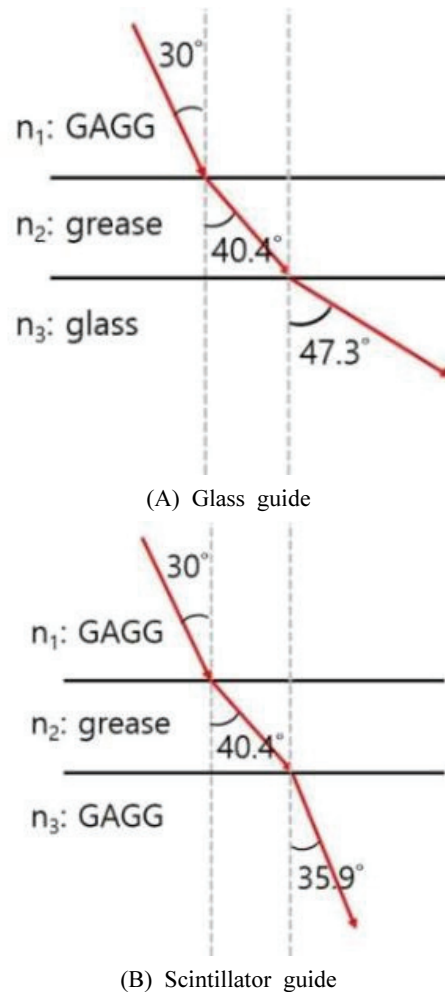


Fig. 4. Refraction of light according to the use of glass and scintillator light guides.

V. CONCLUSION

매우 작은 섬광 픽셀과 광가이드의 조합으로 이루어진 검출기를 설계하였다. 섬광 픽셀의 크기가 작을수록 검출기 및 PET 시스템의 공간분해능은 향상된다. 소동물 촬영을 위해서는 우수한 공간분해능이 필요하며, 이를 위해 검출기에 사용하는 섬광의 크기는 매우 작아야 한다. 광센서 픽셀의 크기에 따라 모든 섬광 픽셀들의 영상화가 가능한 섬광 픽셀의 크기는 제한된다. 이보다 더 작은 섬광 픽셀을 사용하여 검출기를 구성할 경우 가장자리에 위치한 섬광 픽셀들은 서로 중첩되어 나타난다. 그러나 광가이드를 사용함으로써 이러한 가장자리 부분의 겹침 현상을 해결할 수 있으며, 광가이드 물질에 따라 가장자리 섬광 픽셀의 영상화 되는 위치가 달라진다. 유리 광가이드를 사용하였을 경우에 비해 섬광 픽셀과 동일한 섬광체를 사용하여 광가이드를 구성하였을 경우, 가장자리 섬광 픽셀들의 영상이 더욱 잘 나타났다. 유리 광가이드에서는 서로 중첩되어 나타났으나, 섬광체 광가이드에서는 서로 분리되어 나타났다. 공간분해능 향상을 위해 매우 작은 섬광 픽셀을 사용하여 검출기를 구성할 경우, 광가이드 선택에 있어서 섬광 픽셀의 물질과 동일한 물질을 광가이드로써 사용할 경우 모든 위치의 섬광 픽셀들의 영상화가 가능하여, 우수한 공간분해능 달성으로 전체 시스템의 영상의 질을 향상시킬 수 있을 것이다.

Acknowledgement

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

Reference

[1] R. Lecomte, J. Cadorette, P. Richard, S. Rodrigue, D. Rouleau, "Design and engineering aspects of a high resolution positron tomograph for small animal imaging", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 41, No. 4, pp. 1446-1452, 1994. <https://dx.doi.org/10.1109/23.322930>

[2] P. M. Bloomfield, S. Rajeswaran, T. J. Spinks, S. P. Hume, R. Myers, S. Ashworth, K. M. Clifford, W. F. Jones, L. G. Byars, J. Young, "The design and physical characteristics of a small animal positron emission tomograph", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 40, No. 6, pp. 1105-1126, 1995. <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/40/6/010>

[3] 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, pp. 1161-1166, 1997. <https://dx.doi.org/10.1109/23.596981>

[4] 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. <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/46/7/308>

[5] 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. <https://dx.doi.org/10.1007/s00259-002-1052-6>

[6] Y. C. Tai, A. F. Chatziioannou, Y. Yang, R. W. Wilverman, K. Meadors, S. Siegel, D. F. Newport, J. R. Stickel, 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>

[7] 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>

[8] 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>
- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] GAGG(Ce) Crystal, Epic-Crystal, from URL; <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. <https://doi.org/10.1118/1.4905088>

섬광 픽셀과 동일한 물질로 광가이드를 적용한 매우 작은 섬광 픽셀 검출기 설계

이승재^{1,2,*}, 조병두^{1,2}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구소

요 약

우수한 공간분해능을 달성하기 위해 소동물용 양전자방출단층촬영기기의 검출기에는 매우 작은 섬광 픽셀을 사용한다. 그러나 이러한 매우 작은 섬광 픽셀을 사용함으로써 배열의 가장자리 부분의 섬광 픽셀들이 평면 영상에서 중첩되는 현상이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 빛의 분포를 변화시킬 수 있는 광가이드를 사용하였다. 광가이드의 물질에 따라 빛이 퍼지는 경향이 달라지며, 이에 따라 어떠한 물질의 광가이드를 사용하느냐에 따라 겹침의 발생 유무가 달라진다. 본 연구에서는 기존의 유리 광가이드를 대신하여 섬광 픽셀과 동일한 물질의 광가이드를 적용한 검출기를 설계하였다. 섬광체 광가이드는 유리 광가이드에 비해 더 높은 굴절률을 지녀, 빛의 퍼지는 정도가 달라진다. 두 광가이드를 사용한 검출기의 가장자리 부분의 섬광 픽셀들의 분리 정도를 평가하기 위해 평면 영상을 획득하였다. 획득한 평면 영상의 가장자리 두 섬광 픽셀 영상의 공간분해능과 중심 간의 거리를 산출하여, 분리 정도를 평가하였다. 그 결과 섬광체 광가이드를 사용하였을 경우, 더 우수한 공간분해능을 보였으며, 섬광 픽셀들의 중심 간의 거리가 더 넓게 나타났다. 기존에 사용하는 유리 광가이드 대신에 섬광체 광가이드를 사용하여 검출기를 구성할 경우 더 작은 섬광 픽셀을 사용할 수 있으므로, 더 우수한 공간분해능을 확보할 수 있을 것이다.

중심단어: 소동물용, 양전자방출단층촬영기기, 광가이드, 공간분해능

연구자 정보 이력

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