

Development of PET Detector Module Measuring DOI using Multiple Reflectors

Neung Gyun Kim,^{1,3} Gu Kim,^{1,3} Jong Hyeok Kwak,^{1,3} Seung-Jae Lee^{1,2,*}

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

³Department of Radiology, Pusan National University Yangsan Hospital

Received: September 27, 2019. Revised: November 10, 2019. Accepted: November 30, 2019

ABSTRACT

A detector module measuring a depth of interaction was developed using silicon photomultiplier (SiPM) and two layers of scintillation crystal array treated with multiple reflectors. When reconstructing an image based on a signal obtained by using different types of reflector of each layer, the interaction positions of scintillation pixels and gamma rays could be tracked by utilizing the feature that all scintillation pixels were recorded at different positions. The bottom layer uses a specular reflector, and the top layer uses a diffuse reflector to differently process the size of the signal obtained from the SiPM. The optical grease was used to reduce the sharp refractive index change between the layers of scintillator and the SiPM. The signals obtained from the 16 SiPMs were reduced to four signals using the Anger equations, and the images were reconstructed using them. All the scintillation pixels composed of the two layers appeared in the reconstructed image, which distinguished the layer where the scintillation pixels and gamma rays interacted. If the detectors, which measure the interaction depth of two layers using different reflectors, will be applied to preclinical positron emission tomography, the degradation of spatial resolution appearing outside the field of interest could be solved.

Keywords: specular reflector, diffuse reflector, SiPM, depth of interaction

I. INTRODUCTION

소동물용 양전자방출단층촬영기기(Positron Emission Tomography; PET)는 인체의 유전자와 비슷한 소동물을 사용하여 의약품 개발, 생체 내 질환의 규명을 위해 사용하는 핵의학 영상 기기이다. PET은 여러 링으로 이루어져 있으며, 하나의 링에는 섬광체와 광센서로 이루어진 다수의 검출기로 구성된다. 인체에 비해 크기가 매우 작은 소동물을 대상으로 영상 촬영이 이루어져야 하므로 PET은 소형의 갠트리를 사용하고, 공간분해능과 민감도를 향상시키기 위해 가늘고 긴 섬광체를 적용한 검출기를 사용한다.^[1,2] 이러한 소형 갠트리 사용으로 인해 관심시야 외곽부분에서 발생한 선원은 섬광체에 사선으로 입사하게 되므로 여러 섬광 픽셀과 상호 작용

하여 공간분해능이 저하된다.^[3] 이를 패럴랙스 오차라하며, 공간분해능 저하 현상을 해결하기 위해 섬광체와 감마선이 반응한 층을 측정하기 위한 많은 연구가 이루어졌다. 반응 깊이를 측정하는 방법에는 여러 종류의 섬광체 층으로 이루어진 검출기에서 각 섬광체의 특성을 통해 층을 구분하는 방법, 하나의 층으로 이루어진 섬광체의 양 끝에 위치한 광센서에서 획득되는 신호의 비율을 통해 측정하는 방법, 동일한 섬광체를 여러 층으로 구성하고 각 층마다 광센서를 위치시켜 직접 3차원 위치를 측정하는 방법이 있다.^[4-6] 그러나 이러한 방법들에는 여러 문제점이 존재한다. 섬광체의 특성을 정확하게 측정하지 못할 경우 감마선이 반응한 층을 정확하게 측정하지 못하며, 감마선이 입사하는 방향에 광센서가 위치할 경우 감마선의 산

* Corresponding Author: Seung-Jae Lee

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

Tel: +82-51-320-2719

란으로 인한 영향과, 광센서의 수명 문제가 발생할 수 있다. 또한 각 층마다 광센서를 사용할 경우 복잡한 회로 구성과 비용 상승의 문제점이 발생한다.^[7]

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 두 층의 섬광체를 사용하고 각 섬광체는 서로 다른 반사체를 사용하여 광센서에서 획득되는 신호의 분포를 다르게 하여 반응 깊이 층을 측정함으로써 공간분해능을 향상시킨 검출기를 개발하였다.

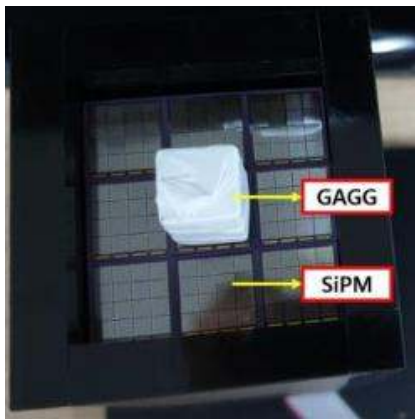


Fig. 1. Detector module using GAGG scintillators and SiPMs as photosensor.

II. MATERIAL AND METHODS

검출기는 두 층의 섬광체와 광센서로는 실리콘 광증배관 (Silicon Photomultiplier, SiPM)으로 구성하였다. 반사체는 난반사체와 거울반사체를 사용하여 각 층별 광센서에서 획득되는 신호의 분포가 달라지도록 처리하였다. 검출기는 Fig. 1과 같이 여러 개의 SiPM 모듈 중에 중심의 SiPM 모듈을 사용하여 구성하였다. 섬광체는 Epic Crystal사의 Gadolinium Aluminum Gallium Garnet (GAGG)^[8]를 사용하였고, Fig. 2와 같이 서로 다른 반사체로 두 층으로 제작하였다. GAGG는 6.63 g/cm³의 밀도와 50,000 photons/MeV로 다수의 빛을 발생시켜 우수한 에너지 분해능을 가지며, 섬광체 자체에서 방사선을 발생시키지 않아 측정하고자 하는 방사선 신호에 영향을 미치지 않는 우수한 특성을 지니고 있다. 각 섬광 픽셀의 크기는 3 mm × 3 mm × 10 mm이며, 4 × 4 배열로 두 층으로 구성하였다. 섬광체 층 사이와 광센서와 연결되는 부분은 급격한 굴절

률의 변화로 인한 빛 전달 감소를 방지하기 위해 광학 그리드를 사용하였다. 아래 층의 섬광 픽셀들은 감마선과 섬광체가 상호작용하여 발생된 빛을 반사할 때 입사각과 반사각이 동일한 거울반사체를 사용하였고, 위층은 무작위 각도로 반사되는 난반사체를 사용하였다. 거울반사체는 98%의 반사율을 지닌 3M사의 Enhanced Specular Reflector (ESR)을 사용하였으며,^[9] 난반사체는 95% 이상의 반사율을 지닌 Saint-gobain사의 BC-620과 테플론을 사용하였다.^[10] 섬광체에서 발생된 빛을 검출하기 위해 SensL사의 MatrixSM-9-30035^[11]를 사용하였으며, 센서 픽셀하나의 크기는 3 mm × 3 mm이며, 간격은 3.2 mm로 4 × 4 배열로 구성된 형태를 지니고 있다.

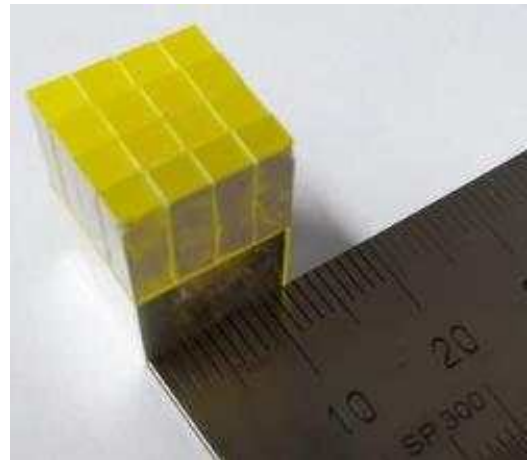


Fig. 2. Configuration of GAGG scintillator with specular and diffuse reflectors.

양전자를 방출하여 511 keV의 감마선을 발생시키는 Na-22 선원을 사용하여 평면 영상과 에너지 스펙트럼을 획득하였다. 평면 영상에서 각 섬광 픽셀의 위치를 모두 동일한 밝기로 나타내기 위해서 섬광체의 각 면에 선원을 위치시켜 데이터를 획득 후 모든 데이터를 사용하였으며, 16채널의 데이터는 앵거 방정식 Eq. (1)을 사용하여 4채널로 감소시켜 영상을 재구성하였다.

$$\begin{aligned} X_{position} &= \frac{X^+ - X^-}{X^+ + X^-} \\ Y_{position} &= \frac{Y^+ - Y^-}{Y^+ + Y^-} \end{aligned} \quad (1)$$

III. RESULT

섬광체의 모든 방향에서 획득한 Na-22 선원의 데이터로 앵거 방정식을 사용하여 평면 영상을 재구성하였다. 섬광체 구성은 4×4 배열의 섬광체가 두 층으로 구성된 형태이며, 평면 영상으로 나타낼 경우 4×4 배열로 나타나야 하지만, 층마다 다른 반사체를 사용하여 Fig. 3(a)와 같이 $4 \times 4 \times 2$ 배열의 형태로 나타났다. 즉, 하나의 픽셀에 두 개의 픽셀 영상으로 재구성되었다. 반사체의 종류를 다르게 구성함으로써, 센서에서 획득되는 빛의 양이 다르고, 층이 구분되어 빛이 제한적으로 공유되어 영상이 두 개의 반응 깊이 층으로 측정되었다. Fig. 3(b)는 재구성된 영상을 각 섬광 픽셀별로 구획화한 그림이다. 모든 층의 섬광 픽셀이 16개로 정확히 구분되는 것을 확인할 수 있다.

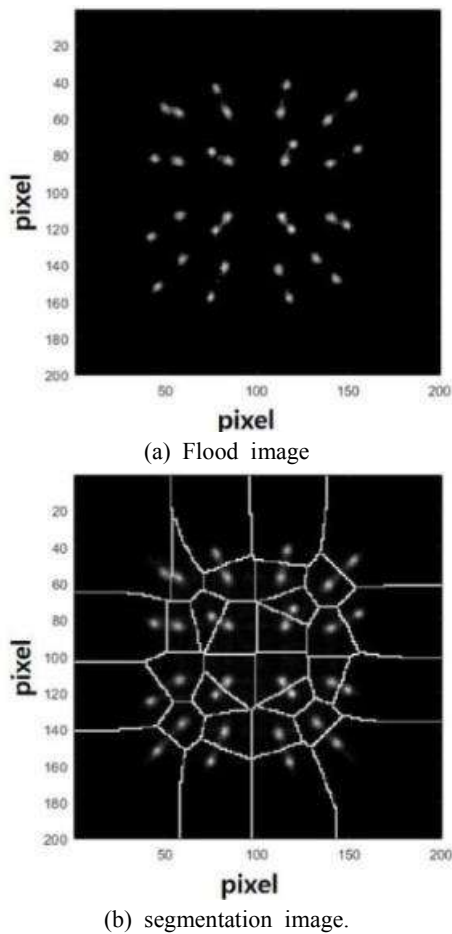


Fig. 3. Flood image and segmentation image obtained detector module with GAGG scintillators using multiple reflector.

획득한 데이터를 사용하여 에너지 스펙트럼을 측정하였다.

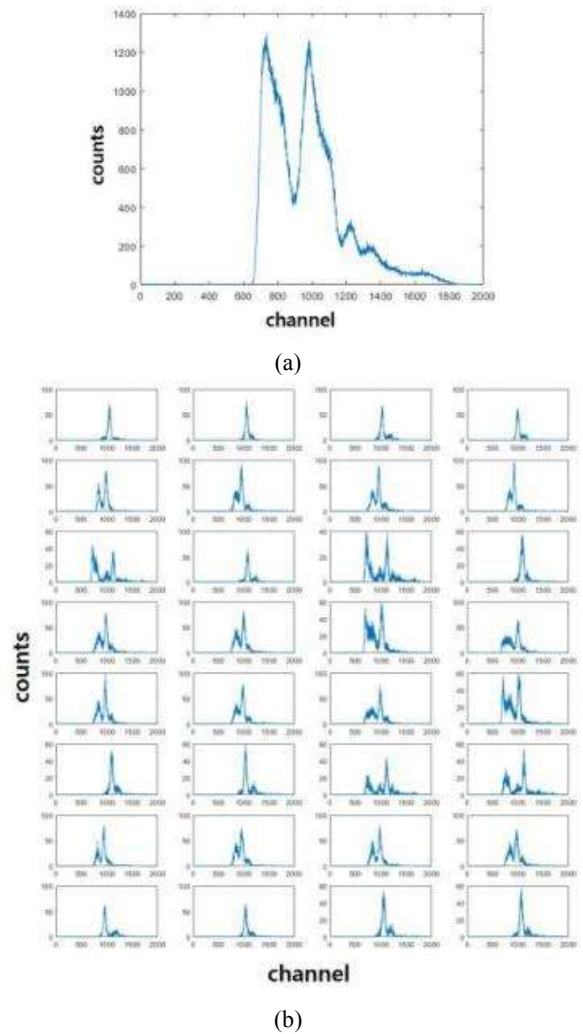


Fig. 4. Global energy spectrum (a) and individual energy spectrum of scintillators (b) of DOI detector module using GAGG scintillator applied multiple reflector.

Fig. 4(a)는 에너지 스펙트럼을 나타내며, 511 keV의 광전 피크가 뚜렷이 나타난 것을 확인할 수 있다. 광전 피크의 모습은 일반적인 가우시안 분포를 보이지 않고, 아래 부분에서 오른쪽이 볼록한 형태를 보인다. 이는 위층과 아래층 섬광 픽셀에서 서로 다른 반사체를 사용하여 센서에서 획득된 신호의 크기가 서로 달라 발생한 부분이다. 에너지 분해능은 광전 피크에 해당하는 부분의 반치폭에 해당하는 채널의 크기를 구하고 이를 피크 채널로 나누어 계산하였다. 그 결과 511 keV에 해당하는

에너지 분해능은 18.8%였다. Fig. 4(b)를 구획화된 각 섬광 픽셀들의 개별적인 에너지 스펙트럼을 나타낸다. 모든 섬광 픽셀에서 에너지 스펙트럼을 획득할 수 있으며, 이는 개별적인 에너지 윈도우 설정을 통해 영상의 보정이 가능하다.

IV. DISCUSSION

서로 다른 반사체를 각 층에 사용함으로써 섬광 픽셀의 영상이 생성되는 곳이 층마다 달라졌다. 어떠한 반사체를 사용하느냐에 따라 최종적으로 SiPM에 전달되는 빛의 수가 달라지며, 이는 신호의 크기로 이어졌다. 또한 각 층 사이의 빛의 전달을 최대한으로 하기 위해 광학 그리드를 사용하였으며, 이 사이에서의 빛이 다른 섬광 픽셀로 이동하여 SiPM에서 측정된 결과도 각 층의 섬광 픽셀의 영상이 서로 다른 위치에 생성된 결과를 나타내었다.

에너지 스펙트럼에서 600 채널 이상에서부터 감마선의 신호가 분포하였는데, 이는 SiPM의 특성으로 dark count에 기인한 결과이다. 센서에서 신호가 측정되지 않았지만, dark count로 인해 신호가 측정된 것으로 나타나, 16개의 SiPM 픽셀의 합으로 나타난 에너지 스펙트럼에서 600 채널 이상부터 신호가 획득된 것으로 측정되었다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 서로 다른 반사체를 사용한 두 층의 섬광 픽셀 배열을 사용하여 반응 깊이를 측정하는 검출기 모듈을 개발하였다. 아래층은 거울반사체를 사용하고, 위층은 난반사체를 사용하여 광센서에서 획득되는 빛 신호의 크기를 다르게 하였다. 감마선과 섬광체가 상호작용하여 발생된 빛을 광센서로 최대한 전달하기 위해 섬광체 층 사이와 아래층과 광센서 사이를 광학 그리드를 사용하여 굴절률의 변화를 감소시켰다. 각 층별 획득되는 빛 신호의 크기와 층 사이를 광학적으로 연결시키기 위해 사용한 광학 그리드를 통한 빛의 이동 등을 통해 각 섬광 픽셀이 영상으로 나타나는 위치가 서로 상이하였다. 서로 다른 위치에 나타난 영상을 통해 섬광체와 감마선이 반응한 위치를 측정할 수

있으며 이는 층별 구분이 가능함을 나타낸다. 이렇게 구성된 검출 모듈을 사용하여 소동물용 PET에 적용할 경우 감마선과 섬광체가 반응한 깊이 방향의 위치 측정이 가능하여 관심 시야 외곽에서 발생하는 패럴랙스 오차로 인한 공간분해능 저하 현상을 해결할 수 있을 것으로 판단된다

검출기 모듈의 전체 에너지 분해능은 18.8%로 측정되었다. 사용화된 소동물용 PET 시스템에서 영상을 획득할 때 일반적으로 에너지 범위는 $\pm 30\%$ 정도에서 측정한다. 본 검출기 모듈의 에너지 분해능은 이와 비교하여 상당히 우수한 성능을 보였으며, 16개 섬광 픽셀의 서로 다른 위치에 생성된 광전 피크를 합하여 측정된 결과로 PET 시스템을 구성하여 영상을 획득할 때 각 섬광 픽셀의 개별 에너지 분해능을 분석하여 영상에 반영하면 영상의 질이 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2019년도 BB21+사업에 의하여 지원되었음.

Reference

- [1] A. Zhu, D. M. Marcus, H. K. G. Shu, H. Shim, "Application of metabolic PET imaging in radiation oncology," *Radiation Research*, Vol. 177, No. 4, pp. 436-448, 2012.
- [2] H. Peng, C. S. Levin, "Recent Developments in PET Instrumentation," *Current Pharmaceutical Biotechnology*, Vol. 11, No. 6, pp. 555-571, 2010.
- [3] R. S. Miyaoka, T. K. Lewellen, H. Yu, D. L. McDaniel, "Design of a Depth of Interaction (DOI) PET Detector Module," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 45, No. 3, pp. 1069-1073, 1998.
- [4] M. Streun, G. Brandenburg, H. Larue, H. Saleh, E. Zimmermann, K. Ziemons, and H. Halling, "Pulse Shape Discrimination of LSO and LuYAP Scintillators for Depth of Interaction Detection in PET," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 50, No. 3, pp. 344-347, 2003.
- [5] Y. Shao, R. W. Silverman, R. Farrell, L. Cirignano,

- R. Grazioso, K. S. Shah, G. Visser, M. Clajus, T. O. Tumer, S. R. Cherry, "Design Studies of A High Resolution PET Detector Using APD Arrays," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 47, No. 3, pp. 1051-1057, 2000.
- [6] Y. Yang, P. A. Dokhale, R. W. Silverman, K. S. Shah, M. A. McClish, R. Farrell, G. Entine and S. R. Cherry, "Depth of interaction resolution measurements for a high resolution PET detector using position sensitive avalanche photodiodes," Physics in Medicine and Biology, Vol. 51, No. 9, pp. 2131-2142, 2006.
- [7] M. Ito, S. J. Hong, J. S. Lee, "Positron Emission Tomography (PET) Detectors with Depth-of-Interaction (DOI) Capability," Biomedical Engineering Letters, Vol. 1, No. 2, pp. 70-81, 2011.
- [8] <http://www.epic-crystal.com/oxide-scintillators/gagg-ce-scintillator.html>
- [9] <http://multimedia.3m.com/mws/media/13892480/application-guide-for-esr.pdf>
- [10] http://static6.arrow.com/aropdfconversion/5f21e5069a452c0b4d6a95c9954f098ba0ad6261/113423053200175sgc-bc620-data-sheet_.pdf
- [11] <http://www.sensl.com/downloads.ds/PB-MatrixB.pdf>

여러 반사체를 사용한 양전자방출단층촬영기기의 반응 깊이 측정 검출기 모듈 개발

김능균,^{1,3} 김구,^{1,3} 곽종혁,^{1,3} 이승재^{1,2,*}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구센터

³양산부산대학교 병원

요 약

두 층의 섬광체와 각 층별 서로 다른 반사체의 사용과 섬광체와 감마선의 상호작용으로 발생한 빛 신호를 측정하기 위한 광센서로써 실리콘광전증배관(Silicon Photomultiplier, SiPM)을 사용하여 반응 깊이를 측정하는 검출기를 개발하였다. 층별 섬광 픽셀의 반사체의 종류를 다르게 사용함으로써 획득한 신호를 바탕으로 영상을 재구성할 경우 모든 섬광 픽셀이 서로 다른 위치에 기록되는 특징을 활용하여 섬광 픽셀과 감마선이 반응한 위치를 추적하였다. 아래층은 거울반사체를 사용하였으며, 위층은 난반사체를 사용하여 SiPM에서 획득되는 신호의 크기를 다르게 처리하였다. 섬광체 사이와 SiPM과 연결되는 부분은 광학적으로 연결되도록 광학 그리즈를 사용하여 급격한 굴절률 변화를 감소시켰다. 16개의 SiPM에서 획득한 신호는 앵거 방정식을 사용하여 4개의 신호로 감소시켰으며, 이를 사용하여 영상을 재구성하였다. 두 층으로 구성된 모든 섬광 픽셀이 재구성된 영상에 나타났으며, 이를 통해 섬광 픽셀과 감마선이 반응한 층을 구분할 수 있었다. 서로 다른 반사체를 사용하여 두 층의 반응 깊이를 측정하는 검출기를 전 임상용 양전자방출단층촬영기기에 적용할 경우 관심 시야 외곽에서 나타나는 공간분해능의 저하 현상을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 거울반사체, 난반사체, 실리콘광전증배관, 반응 깊이 측정

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김능균	동서대학교 방사선학과	대학원생
(공동저자)	김 구	동서대학교 방사선학과	대학원생
	곽종혁	동서대학교 방사선학과	교수
(교신저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	교수