

Design of Two Layer Depth-encoding Detector Module with SiPM for PET

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

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: April 26, 2019. Revised: June 21, 2019. Accepted: June 30, 2019

ABSTRACT

A depth-encoding detector module with silicon photomultipliers(SiPMs) using two layers of scintillation crystal array was designed, and the position measurement capability was verified using DETECT2000. The depth of interaction of the crystal pixels with the gamma rays was tracked through the image acquired with the combination of surface treatment of the crystal pixels and reflectors. The bottom layer was treated as a reflector except for the optically coupled surfaces, and the crystals of top layer were optically coupled each other except for the outer surfaces so that the light sharing was made easier than the bottom layer. Flood images were obtained through the combination of specular reflectors and random reflectors, grounded and polished surfaces of crystal pixels, and the positions at which layer images were generated were measured and analyzed. The images were reconstructed using the Anger algorithm, whose the SiPM signals were reduced as the 16-channels to 4-channels. In the combination of the grounded surface and all reflectors, the depth positions were discriminated into two layers, whereas it was impossible to separate the two layers in the all polished surface combinations. Therefore, using the combination of grounded surface crystal pixels and reflectors could improve the spatial resolution at the outside of the field of view by measuring the depth position in preclinical positron emission tomography.

Keywords: SiPM, depth of interaction, reflector, DETECT2000

I. INTRODUCTION

전임상용 양전자방출단층촬영기기(Positron Emission Tomography; PET)는 공간분해능과 민감도를 향상하기 위해 가늘고 긴 섬광체를 사용하여 소형의 갠트리틀을 통해 구성한다.^[1] 소형 갠트리틀 적용함으로써 촬영 시야(Field of view; FOV)의 중심부에서부터 외곽으로 이동함에 따라 공간분해능이 점점 저하된다. 중심영역에서 발생한 방사선은 섬광체에 수직으로 입사하여 하나의 섬광체에서만 검출이 되지만, 방사선원이 외곽에서 발생하면 섬광체에 사선으로 입사하여 여러 섬광체에 걸쳐 검출

될 수 있으므로 공간분해능에 영향을 미치게 된다.^[2] 이러한 영향은 공간분해능의 저하현상으로 나타나며, 이를 해결하기 위해서 방사선과 섬광체가 상호작용한 깊이를 측정하는 방법이 개발되었으며, 이러한 위치 측정은 여러 층의 섬광체를 사용하고, 다수의 센서를 활용하며, 섬광체와 방사선이 상호작용하여 발생한 빛의 분포를 분석하는 방법 등이다.^[3-6] 여러 층의 섬광체를 사용하는 방법은 각 섬광체의 감쇠 시간을 측정하여 상호작용한 위치를 추적하는 방법이나, 섬광체의 감쇠시간을 정확히 측정하지 못하는 문제점이 있다. 다수의 센서를 활용하는 방법은 센서의 수가 많아질수록 제작하는 비용이 증가하고, 신호처리를 해야 하는 부분

* Corresponding Author: Seung-Jae Lee

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

Tel: +82-320-2719

이 복잡해지는 문제점이 있다.^[7]

본 연구에서는 이러한 여러 문제점을 해결하기 위해서 실리콘광전증배관 (Silicon Photomultiplier, SiPM)과 두 층의 섬광체를 사용한 새로운 반응 깊이를 측정하는 검출기 모듈을 설계하였다. 검출기는 두 층의 섬광체로 구성되어있고, 방사선과 상호작용하여 발생된 빛을 검출하기 위해서 실리콘광전증배관과 결합되어 있다. 아래층과 위층의 빛 분포가 다른 특징을 통해 검출되는 영역이 다르도록 설계함으로써 방사선이 섬광체와 반응한 층의 깊이를 추적하도록 설계하였다. 아래층의 섬광체는 옆면이 모두 반사체로 구성되며, 위층은 가장자리의 섬광체만 반사체로 구성되고, 나머지 부분은 모두 광학적으로 연결된 상태로 구성됨으로써, 센서에서 획득되는 빛의 분포를 다르도록 설계하였다. 이러한 반응 깊이를 측정하는 검출기를 DETECT2000^[8] 시뮬레이션을 통해 검증하였다. DETECT2000은 섬광체 내에 빛을 발생시키고, 발생된 빛은 다양하게 처리된 섬광체 면과 상호작용하여, 반사·굴절 및 흡수 등의 과정을 거쳐 센서로 입사하는 과정을 시뮬레이션할 수 있다.

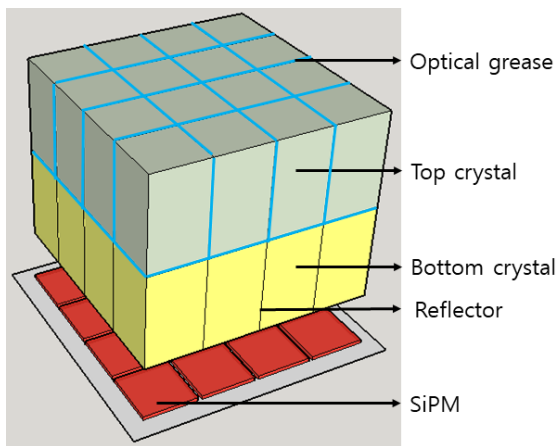


Fig. 1. Schematic of the detector module.

II. MATERIAL AND METHODS

설계한 검출기는 두 층의 섬광체와 SiPM으로 구성되며, Fig. 1과 같다. 섬광체는 Furukawa사의 Gadolinium Aluminum Gallium Garnet (GAGG)^[9]를 모사하였고,

각 섬광 픽셀의 크기는 3 mm × 3 mm × 5 mm이며, 4 × 4 배열로 두 층으로 구성하였다. 섬광체의 밀도는 6.63 g/cm³이고 굴절률은 1.9이다. 각 층별 섬광 픽셀의 면을 다르게 처리하여 SiPM으로 입사하는 빛의 분포가 서로 다르도록 구성하였다. 아래층의 섬광 픽셀은 위층과 SiPM과 연결되는 부분을 제외하고 모든 면이 반사체로 처리되었으며, 위층은 윗면과 외곽에 위치한 섬광 픽셀의 가장자리 면은 반사체로, 그 외의 면은 모두 광학적으로 연결되도록 처리하였다. 아래층의 섬광 픽셀 내에서 발생한 빛은 반사체로 둘러싸인 면들로 인해 서로 공유되기가 제한적이지만, 위층의 섬광 픽셀 내에서 발생한 빛은 옆면이 광학적으로 연결되어 있으므로, 서로 공유가 아래층에 비해 상대적으로 자유롭다.

섬광체에서 발생된 빛을 검출하기 위해 사용한 센서는 SensL사의 MatrixSM-9-30035^[10]를 사용하였다. MatrixSM-9-30035는 Fig. 2와 같이 3 mm × 3 mm 크기의 SiPM이 4 × 4로 구성된 배열이 3 × 3 배열로 구성된 형태를 지니고 있으며, 본 연구에서는 이중 4 × 4 배열 1개를 사용하여 모사하였다.

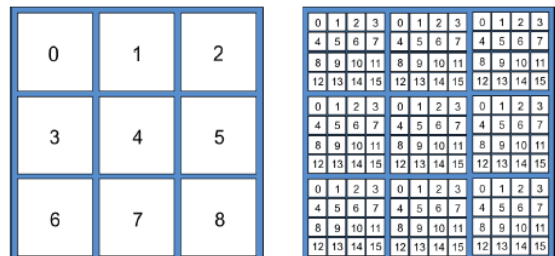


Fig. 2. MatrixSM-9-30035 configuration of SensL Ltd.

아래층 섬광체의 반사체는 거울반사체와 난반사체를 사용하였고, 광학적으로 연결된 부분은 거친 면과 매끈한 면으로 설정하였다. 위층의 섬광체에서 반사체 종류는 아래층과 동일하게 거울반사체와 난반사체를 사용하였고, 광학적으로 연결된 섬광체의 면은 거친면과 매끈한 면으로 설정하여 조합을 다양하게 구성하였다. 광학적으로 연결된 부분은 빛의 전달과 흡수 및 산란을 최소화하기 위해 광학 그리드를 사용하였으며, 센서와 섬광체 사이의 부분 또한 광학 그리드를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

위층과 아래층에서 발생한 감마선 반응을 확인하기 위해 각 섬광 픽셀 중심에서 섬광체와 감마선 반응에 생성된 빛을 발생시켰다. 전체 32개 픽셀에서 빛을 발생시켰으며, 각 지점마다 총 1,000번의 감마선 반응을 발생시켜 데이터를 획득하였다. 16채널의 데이터는 앵거 방정식을 사용하여 4채널로 감소시켰으며, 이를 사용하여 영상을 재구성하였다.

III. RESULT

위층과 아래층에서 각 섬광 픽셀의 중심 위치에서 발생시킨 빛을 앵거 방정식을 사용하여 4×4 의 섬광 픽셀을 4개 채널로 신호를 획득한 후 평면 영상으로 재구성하였다. 재구성한 영상은 2×2 만큼에 해당하는 영상이 대칭으로 구성되어 나타났으며, 이에 대한 프로파일을 획득하였다. Fig. 3에 재구성한 영상과 획득한 프로파일을 나타내었다. Fig. 3(a)는 거울반사체를 사용하였고, 광학적으로 연결된 부분을 거친 면으로 설정하였을 때 획득한 영상을 보여준다. 4개의 부분에서 대칭된 모습을 확인할 수 있으며, 이중 한 영역을 확대하여 나타내었다. 노란색 영역의 프로파일을 획득하였으며, 이를 아랫부분에 나타내었다. 프로파일의 왼쪽부터 첫 번째 피크는 아래층 섬광 픽셀을 나타내고, 두 번째는 위층의 섬광 픽셀, 세 번째는 아래층, 네 번째는 위층의 섬광 픽셀을 각각 나타낸다. 아래층과 위층의 섬광 픽셀이 모두 잘 구분되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 거울반사체를 사용하고, 광학적으로 연결된 부분은 매끈한 면으로 설정하였을 때 획득한 영상과 프로파일을 나타낸다. 영상뿐만

아니라 프로파일에서도 아래층과 위층이 구분 안 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)는 난반사체를 사용하고, 거친 면으로 설정하였을 때 획득한 영상과 프로파일이다. 이 설정에서는 Fig. 3(a)와 마찬가지로 아래층과 위층의 구분이 잘 되는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 Fig. 3(d)는 난반사체를 사용하고, 매끈한 면으로 설정하였을 때 획득한 영상과 프로파일이다. 프로파일에서 3개의 피크만 나타난 것을 볼 수 있으며, 이는 하나의 피크가 아래층과 위층이 겹쳐서 나타났기 때문이다. 프로파일의 2번째 피크가 아래층과 위층의 섬광 픽셀 영역이 겹쳐서 나타난 부분이며, 피크의 높이가 다른 두 피크에 비해 상당히 높게 나타난 것을 확인할 수 있으며, 영상에서도 보다 더 밝게 나타난 것을 확인할 수 있다. 모든 섬광 픽셀이 구분되는 Fig. 3(a)와 (c)의 프로파일에서 가장 가까운 두 개의 피크와 피크의 거리는 모두 동일하게 15 픽셀로 측정되었다.

IV. DISCUSSION

반사체의 종류와 섬광 픽셀의 면처리의 조합에 따라 각 섬광 픽셀의 영상이 생성되는 곳이 달라졌다. 섬광 픽셀의 면이 거친 면일 때와 매끈한 면일 때 발생된 빛의 퍼짐 정도가 다르므로 영상에서 생성되는 곳이 달라지며, 섬광 픽셀의 면이 거친 면일 경우 모든 반사체에서 두 층의 구분이 잘 되는 것을 확인할 수 있지만, 매끈한 면일 경우 모든 반사체에서 명확히 두 층이 구분이 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 매끈한 면일 경우 거울반사체에 비해 난반사체와의 조합일 경우가 더 구분이 잘 되는 것을 확인할 수 있지만, 모든 섬광 픽셀이 구분이 되지는 않았다.

섬광 픽셀이 거친 면일 경우, 거울반사체와의 조합에 비해 난반사체와의 조합에서 영상의 피크가 더 높은 회색조 값을 보였다.

이는 난반사체와의 조합에서 거울반사체와의 조합에 비해 빛의 퍼짐이 감마선 반응시마다 보다 일정하게 나타난 것을 의미한다.

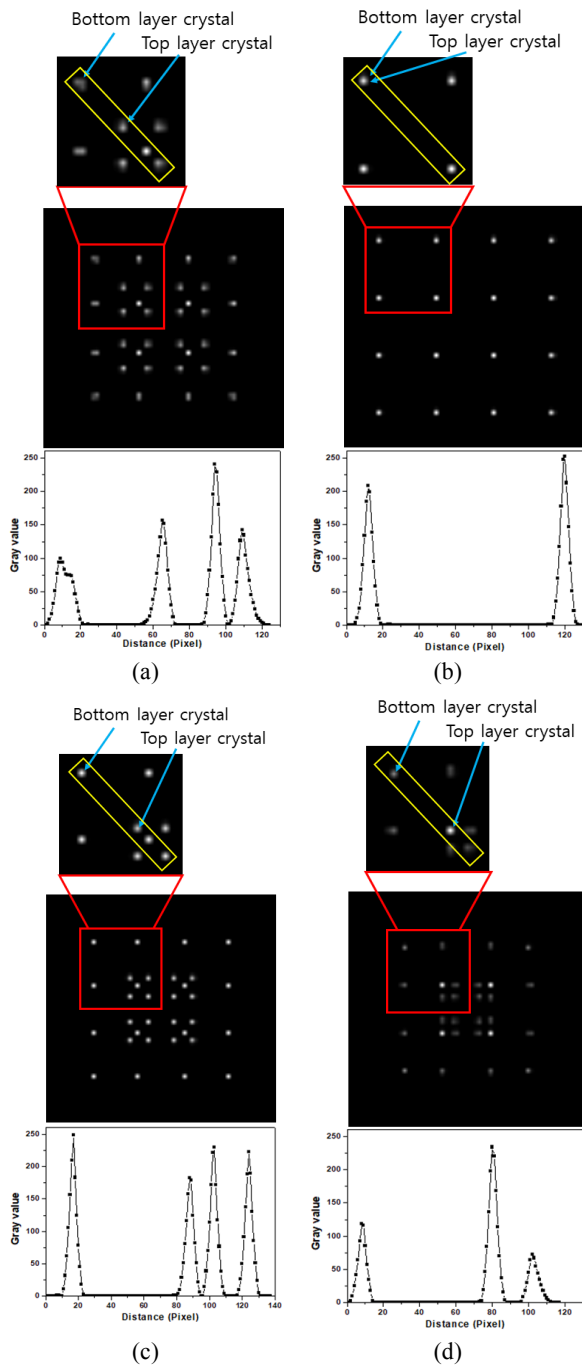


Fig. 3. Flood histogram and row profiles simulated for two layer DOI detector module. Combination of (a) specular reflectors and grounded surfaces, (b) specular reflectors and polished surfaces, (c) white reflectors and grounded surfaces, (d) white reflectors and polished surfaces.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 두 층의 섬광 픽셀 배열을 사용하

여 깊이 방향의 위치를 추적하는 검출기 모듈을 설계하였다. 아래층은 모든 섬광 픽셀이 위층과 센서가 연결되는 부분을 제외하고 반사체로 처리되었으며, 가장 외곽부분과 윗부분을 제외하고 모두 광학적으로 연결되도록 구성하여, 위층이 아래층에 비해 빛의 공유가 더 잘되도록 설계하였다. 각 반사체와 섬광 픽셀의 면의 조합에 따른 영상의 생성이 변화되는 것을 확인하였고, 거친 면으로 처리된 섬광 픽셀은 모든 반사체의 조합에서 깊이 방향의 층이 잘 구분되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 매끈한 면으로 처리된 섬광 픽셀에서는 모든 반사체에서 구분이 되지 않는 것을 확인하여, 섬광 픽셀의 면 처리는 거친 면으로 처리하여 검출기 모듈을 구성해야 함을 검증하였다. 이렇게 구성된 검출기 모듈을 사용하여 전임상용 PET에 적용할 경우 감마선과 섬광체가 반응한 깊이 방향의 위치를 측정할 수 있으므로 검출 시야 외곽에서의 공간분해능 향상을 이룰 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2019년도 동서대학교 "Dongseo Cluster Project" 지원에 의하여 이루어진 것임 (DSU-20190004).

Reference

- [1] H. Peng, C. S. Levin, "Recent Developments in PET Instrumentation," *Current Pharmaceutical Biotechnology*, Vol. 11, No. 6, pp. 555-571, 2010.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, pp. 2131-2142, 2006.
- [6] S-J. Lee, C-H. Baek, "Three-dimensional cross point readout detector design for including depth information", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 887, pp. 13-17, 2018. doi: 10.1016/j.nima.2017.12.069
- [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] F. Cayouette, D. Laurendeau, C. Moisan, "DETECT 2000: an improved Monte-Carlo simulator for the computer aided design of photon sensing devices," Proceedings of SPIE, Quebec, Vol. 4833, pp. 69-76, 2003.
- [9] <http://www.furukawa-denshi.co.jp/cgi-bin/pdfdata/20140428162950.pdf>
- [10] <http://www.sensl.com/downloads/ds/PB-MatrixB.pdf>

SiPM을 사용한 두 층의 반응 깊이를 측정하는 양전자방출단층촬영기기의 검출기 모듈 설계

이승재^{1,2,*}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구센터

요 약

실리콘광전증배관(Silicon Photomultiplier, SiPM)과 두 층의 섬광 픽셀 배열을 이용한 반응 깊이 측정 검출기를 설계하였으며, 위치 측정 능력을 DETECT2000을 사용하여 검증하였다. 섬광 픽셀의 면 처리와 반사체 조합을 통해 섬광 픽셀과 감마선이 반응한 위치를 추적하였다. 아래층은 광학적으로 연결된 부분을 제외하고 반사체로 처리하였으며, 위층은 가장 외곽부분을 제외하고 모두 광학적으로 연결되도록 처리하여 빛의 공유가 아래층에 비해 자유롭도록 구성하였다. 거울반사체와 난반사체, 섬광 픽셀의 거친 면과 매끈한 면의 조합을 통해 평면 영상을 획득하였으며, 층별 영상이 생성되는 위치를 측정하여 분석하였다. 앵거 알고리즘을 사용하여 SiPM의 16채널 신호를 4개의 채널로 감소시켜 영상을 재구성하였다. 섬광 픽셀의 거친 면과 모든 반사체 조합에서 두 층으로 구분되는 것을 확인할 수 있었으며, 매끈한 면일 경우에는 모두 층 구분이 불가능한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 거친 면의 섬광 픽셀과 반사체 조합을 사용한 검출기를 사용할 경우 전임상용 PET에서 반응 깊이 측정을 통해 검출 시야 외곽에서의 공간분해능을 향상시킬 수 있을 것이다.

중심단어: 실리콘광전증배관, 반응 깊이 측정, 반사체, DETECT2000

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	교수