

# Optimization of the Coupling and the Reflector Material in the DOI PET Detector Module using the WLS Fiber

Seung-Jae Lee\*

Department of Radiological Science, Dongseo University  
Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: December 18, 2018. Revised: December 26, 2018. Accepted: February 28, 2019

## ABSTRACT

We developed a novel depth-of-interaction positron emission tomography (PET) detector using wavelength shifting (WLS) fibers and optimized it. The optimization module was designed by using two scintillators and three WLS fibers and attaching a sensor to the end of the WLS fiber. Optimum combinations were obtained through the light collection efficiency and the light collection ratio between sensors depending on coupling materials and reflectors of scintillators, WLS fibers and sensors. The highest light collection efficiency and the light collection ratio between sensors were obtained in the combination of the epoxy (coupling materials)-diffuse reflector (scintillators)-specular reflector (WLS fibers).

Keywords: Positron Emission Tomography, Spatial Resolution, Wavelength Shifting Fiber, Coupling Material, Reflector

## I. INTRODUCTION

전임상용 양전자방출 단층촬영기기(PET)는 공간 분해능과 민감도를 향상시키기 위해서 가늘고 긴 섬광체를 사용한다.<sup>[1]</sup> 작은 촬영 시야(FOV)로 인해 중심에 비해 외곽에서 검출되는 방사선원에 대한 공간분해능이 저하되는 현상이 발생된다. 이는 외곽에서 발생된 방사선원이 섬광체에 사선으로 입사하여, 여러 섬광체에 걸쳐 검출되기 때문이다.<sup>[2-4]</sup> 이러한 공간분해능의 저하 현상은 섬광체와 방사선원의 상호작용한 위치를 측정함으로써 해결할 수 있다. 상호작용한 위치를 측정하는 방법은 다양하며, 섬광체 양측 끝에 센서를 부착하여 측정하는 방법이 많은 연구기관에서 개발 및 연구되었다.<sup>[5,6]</sup> 그러나 방사선원이 입사하는 위치의 센서 및 기타 전자 부품에서 발생하는 방사선원의 감쇄와 산란은 신호대 잡음비에 영향을 미치게 된다.<sup>[7]</sup> 또한 이러한 방법은 정확한 위치를 추적하기 위한 보정작

업이 필수이며, 모든 섬광픽셀에 적용하여야 한다.<sup>[8]</sup>

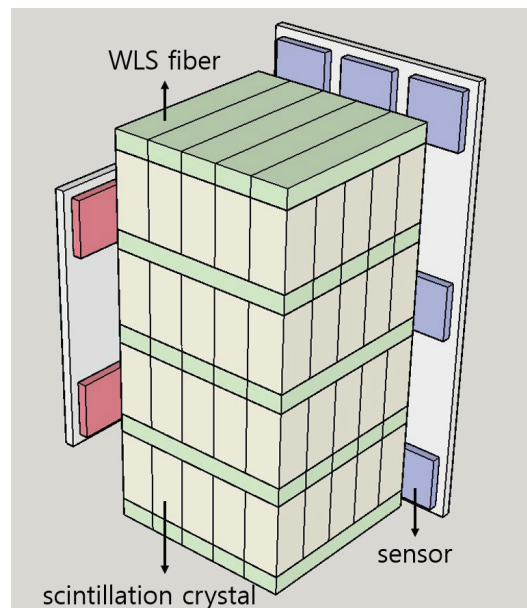


Fig. 1. DOI PET detector module using WLS fiber.

\* Corresponding Author: Seung-Jae Lee

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

Tel: +82-51-320-2719

Address: Dongseo University, Jurye-ro 47, Sasang-gu, Busan, Rep.of Korea 47011

섬광체 양측 끝에 센서를 부착하여 섬광체와 방사선원이 상호작용한 위치를 측정하는 방법의 단점을 보완하기 위해 새로운 방법의 PET 검출기 모듈을 개발하였으며,<sup>[9]</sup> 이에 대한 최적화 작업을 수행하였다. Fig. 1처럼, 새로운 PET 검출기 모듈은 섬광체와 방사선원의 상호작용 위치를 측정하기 위해 섬광픽셀과 과장면이 섬유(WLS)를 사용하여 구성하였으며, WLS 끝에 센서를 부착하여 섬광체에서 발생된 빛의 신호를 측정한다. 신호가 측정된 센서의 위치를 통해 상호작용한 위치를 측정한다. 이러한 검출기 모듈에서 섬광체에서 발생된 빛이 센서에 최대한 도달하기 위해 섬광체와 WLS 사이의 연결물질 및 WLS와 센서 사이의 연결물질과 섬광체와 WLS의 반사체 물질에 따른 빛의 이동을 최적화 하였다.

## II. MATERIAL AND METHODS

섬광체와 WLS 사이의 빛의 이동을 모사하기 위해, 빛의 이동을 모사할 수 있는 DETECT2000<sup>[10]</sup> 시뮬레이션 툴을 사용하였다. DETECT2000은 굴절율을 통해 물질을 모사할 수 있으며, 반사체 특성을 모사할 수 있다. Fig. 2와 같이 최적화 특성을 평가하기 위해 섬광체와 WLS, 센서를 모사하였다. 섬광체는 LSO로 구성하였고, WLS는 Saint-Gobain사의 BCF-91A를 모사하였다.<sup>[11]</sup> BCF-91A는 LSO의 발광과장에 적합한 특성을 보인다. WLS의 끝에는 Hamamatsu사의 MPPC인 S13360<sup>[12]</sup>을 연결하였다. 섬광체와 WLS 사이, WLS와 센서 사이에 연결물질을 삽입하였으며, 섬광체와 WLS는 반사체 물질로 감쌌다.

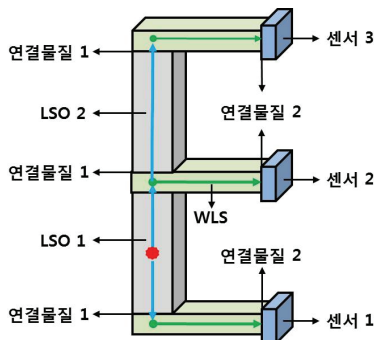


Fig. 2. Condition of the simulation for the optimization.

섬광체는 2 mm x 2 mm x 10 mm의 크기이며, WLS는 2 mm x 2 mm x 10 mm의 크기로 구성하였다. 섬광체와 WLS, WLS와 센서를 연결하는 연결물질은 공기(굴절율: 1.0), 광학 그리즈(굴절율: 1.465), 에폭시(굴절율: 1.602)를 사용하였으며, 반사체물질은 난반사체와 거울반사체를 사용하였다. Fig. 2에서 빨간색 점은 섬광체와 방사선이 상호작용한 위치를 나타내며, 파란색 화살표는 섬광체에서 발생된 빛을, 녹색선은 과장면이 섬유에서 섬광체의 빛을 흡수한 후 재 방출한 빛을 나타낸다. 섬광체에서 발생된 빛은 주로 인접한 센서로 이동하여 측정되며, 나머지 센서에서는 적은 양의 빛이 검출된다.

반사체와 연결물질들의 조합으로 시뮬레이션을 실시하였다. LSO와 방사선이 상호작용하여 발생된 빛을 시뮬레이션의 인풋으로 사용하였으며, 이때 빛의 양은 방사선원의 에너지에 비례한 양으로 설정하였다. LSO 1의 중심에서 1,000번의 빛 발생을 수행하여 센서들에서 측정된 값의 합계의 평균값을 통해 빛의 수집율을 측정하였으며, 각 센서에서 수집된 빛의 양의 비율을 통해 어느 LSO와 방사선이 상호작용을 하였는지 확인하였다. 즉, 센서 1과 센서 2에서 서로 비슷한 양의 빛이 검출되며, 이는 LSO 1에서 방사선이 검출된 것으로 간주한다. 그리고 LSO 2에서 발생된 빛은 센서 2와 센서 3에서 공유되어 측정된다. 이러한 측정 방법은 방사선을 측정하는 LSO의 위치를 어떠한 변환 없이 직접 디지털 신호로 측정할 수 있다.

빛 수집율은 총 발생시킨 빛의 수와 센서에서 수집된 빛의 수의 총 합을 비율을 통해 계산하였으며, Eq. (1)에 나타내었다.

$$LCE = \frac{S1 + S2 + S3}{GL} \times 100 \quad (1)$$

여기서, LCE는 Light collection efficiency로 빛 수집율이며, S1, S2, S3는 각 센서에서 수집된 빛의 양이다. 그리고 GL은 Generated Lights로 발생시킨 빛의 수를 나타낸다.

센서 사이의 빛 수집의 비는 가장 많은 빛을 수집한 센서의 값 대비 다른 센서의 비로 나타내었으

며, Eq. (2)는 다음과 같다.

Table 1. Average light collection efficiency according to several combinations (unit: %)

반사체		난반사체-난반사체			난반사체-거울반사체			거울반사체-난반사체			거울반사체-거울반사체		
연결물질1		Air	Epoxy	Grease	Air	Epoxy	Grease	Air	Epoxy	Grease	Air	Epoxy	Grease
연결 물질	Air	4.78	5.35	5.41	3.81	6.46	5.39	2.14	4.77	4.24	1.28	3.50	2.93
	Epoxy	6.08	6.85	6.92	10.16	<b>14.51</b>	13.58	2.68	6.06	5.34	3.47	9.45	7.77
2	Grease	6.17	6.94	7.02	9.21	13.83	12.71	2.72	6.15	5.41	3.12	8.53	7.02

Table 2. Average relative ratio of light collection between sensor1 and sensor 2 (unit: %)

반사체		난반사체-난반사체			난반사체-거울반사체			거울반사체-난반사체			거울반사체-거울반사체		
연결물질1		Air	Epoxy	Grease	Air	Epoxy	Grease	Air	Epoxy	Grease	Air	Epoxy	Grease
연결 물질	Air	88.6	79.1	80.1	91.8	90.3	93.1	87.8	84.7	86.3	86.7	90.9	90.9
	Epoxy	89.3	79.5	80.5	95.0	93.9	92.3	88.6	84.8	86.4	91.8	83.4	86.3
2	Grease	89.3	79.4	80.5	94.6	94.4	92.7	88.8	85.0	86.3	91.0	84.3	87.1

$$Ratio = \frac{S1 \text{ or } S2}{Max} \times 100 \quad (2)$$

여기서, S1과 S2는 센서1과 센서 2를 나타내며, Max는 센서 1 또는 센서 2에서 측정된 값 중 가장 큰 값을 나타낸다.

### III. RESULT

#### 1. 빛 수집율

Table 1에서 LSO와 WLS의 반사체 물질과 연결 물질의 모든 조합에 대한 결과를 나타내었다. 반사체 조합에서 앞의 반사체는 LSO의 반사체를 나타내며, 뒤의 반사체는 WLS의 반사체를 나타낸다. 예를 들어, 난반사체-거울반사체에서 LSO는 난반사체를 WLS는 거울반사체를 사용하였을 때의 결과이다. Table 1과 Fig. 3에서 보면 난반사체-거울반사체를 적용하였을 때, 연결물질 1, 2는 모두 에폭시를 사용할 경우 가장 좋은 빛 수집율을 보였으며, 그 값은 14.51%로 측정되었다. 거울반사체-거울반사체의 조합에서 연결물질이 모두 공기일 때 가장 낮은 빛 수집율을 보였다.

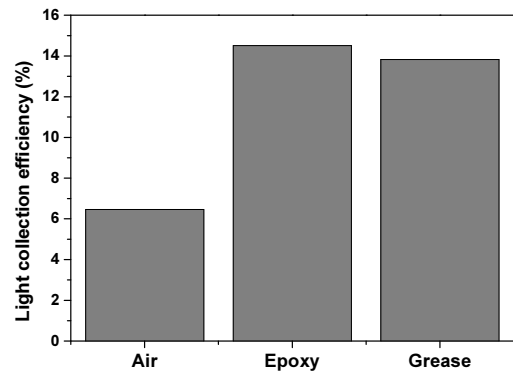


Fig. 3. Light collection efficiency for the combination of epoxy-epoxy in the diffuse-specular reflector combination.

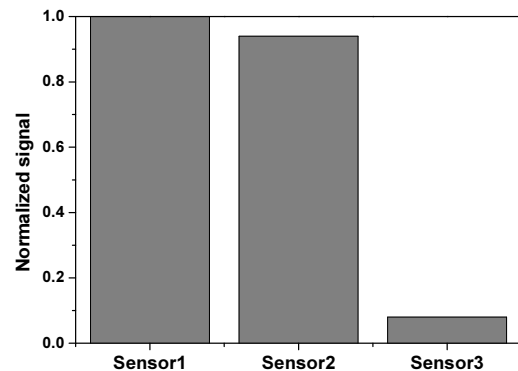


Fig. 4. Normalized signal for the sensor1.

## 2. 센서간 빛 수집 비

Table 2에 모든 조합에 대한 센서간 빛 수집 비를 나타내었으며, 전체적으로 센서 1과 2에서 빛 수집이 비슷한 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 LSO1에서 발생된 빛이 센서 1과 2로 대부분 이동하여 수집되었음을 나타내며, 이를 통해 방사선과 상호작용한 섬광체가 LSO1임을 추적할 수 있다. 가장 많은 빛 수집율을 보인 난반사체-거울반사체 및 에폭시-에폭시 조합에서 센서간 빛 수집 비는 93.9%를 보였다. 두 센서간 빛 수집의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. Fig. 4는 각 센서별 빛 수집 비를 나타내며, 상대적인 비로 나타내었다. LSO1에서 발생된 빛을 수집한 것으로 센서 1과 2에서 대부분의 빛을 수집하고 센서 3에는 적은 빛이 수집됨을 확인할 수 있다.

## IV. DISCUSSION

섬광체와 WLS에 사용한 반사체의 조합에서 섬광체는 난반사체를 WLS는 거울반사체를 사용하였을 경우에 각 연결물질들 간의 조합에서 대부분 가장 좋은 수집율을 보였다. 이는 섬광체는 난반사체를 사용해야하며, WLS는 거울반사체를 사용해야함을 의미한다. 연결물질간의 조합을 보면 공기와 공기의 조합일 때 모든 반사체 조합에서 가장 낮은 빛 수집율을 보였다. 연결물질1이 공기이고, 연결물질2가 에폭시나 광학 그리즈일 경우의 조합은 비슷한 수집율을 보였다. 즉, 섬광체와 WLS의 연결 및 WLS와 센서와의 연결 시 공기의 틈이 발생하지 않도록 에폭시나 광학 그리즈의 적절한 사용이 필요하다.

센서간 빛의 수집 비는 평균적으로 난반사체-난반사체 조합에서 가장 낮은 값을 보였으며, 난반사체-거울반사체 조합에서 가장 높은 값을 보였다. 연결물질의 조합에서는 모든 조합에서 비슷한 값을 보였다.

## V. CONCLUSION

전임상용 PET에서 공간분해능을 향상시키기 위해서 방사선과 섬광체가 반응한 위치를 찾는 검출기 모듈의 최적화 작업을 실시하였다. 섬광체와

WLS를 감싸는 반사체의 조합 및 각각을 연결하는 연결물질의 조합을 통해 최적의 조합을 도출하였다. 섬광체는 난반사체를 WLS는 거울반사체를 사용하고, 연결물질1과 2는 모두 에폭시를 사용하였을 경우에 가장 높은 빛 수집율을 보였으며, 각 센서간 빛 수집 비도 비슷한 수준으로 측정되어, 최적의 조합으로 사용할 수 있다. 본 연구에서 설계한 파장변이섬유를 사용한 반응 위치를 추적하는 검출기는 여러 층의 섬광체와 파장변이섬유를 사용한 독특한 구조의 검출기로 유일하며 디지털로 3차원 위치를 알 수 있는 시스템이다. 여러 종류의 반사체와 연결물질의 조합을 통해 최상의 결과를 도출할 수 있는 조합을 도출하여 향후 실험을 진행할 때 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 2018년도 동서대학교 학술연구조성비 지원과제의 지원에 의해 수행되었다.

## 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] S. E. Derenzo, W. W. Moses, H. G. Jackson, B. T. Turko, J. L. Cahoon, A. B. Geyer, T. Vuletich, "Initial Characterization of a Position-Sensitive Photodiode/BGO Detector for PET," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 1084-1089, 1989.
- [4] W. W. Moses, S. E. Derenzo, C. L. Melcher, R. A. Manente, "A Room Temperature LSO/PIN Photodiode PET Detector Module That Measures Depth of Interaction," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 42, No. 4, pp. 1085-1089, 1995.
- [5] K. C. Burr, A. Ivan, D. E. Castleberry, J. W. LeBlanc, K. S. Shah, R. Farrell, "Evaluation of a Prototype Small-Animal PET Detector With

- Depth-of-Interaction Encoding," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 51, No. 4, pp. 1791-1798, 2004.
- [6] Y. Shao, X. Sun, K. A. Lan, C. Bircher, K. Lou, Z. Deng, "Development of a prototype PET scanner with depth-of-interaction measurement using solid-state photomultiplier arrays and parallel readout electronics," Physics in Medicine and Biology, Vol. 59, No. 5, pp. 1223-1238, 2014.
- [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, pp. 70-81, 2011.
- [8] Y. Yang, J. Qi, Y. Wu, S. S. James, R. Farrell, P. A. Dokhale, K. S. Shah, S. R. Cherry, "Depth of interaction calibration for PET detectors with dual-ended readout by PSAPDs," Physics in Medicine and Biology, Vol. 54, No. 2, pp. 433-445, 2009.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] [https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystal.com/files/documents/sgc-organics-plastic-scintillators\\_0.pdf](https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystal.com/files/documents/sgc-organics-plastic-scintillators_0.pdf)
- [12] [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360\\_series\\_kapd1052e.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf)

# 과장변이섬유를 사용하는 반응 위치 측정 양전자방출 단층촬영기기 검출기 모듈의 연결물질과 반사체 물질의 최적화

이승재

동서대학교 방사선학과  
동서대학교 방사선보건환경센터

## 요 약

과장변이섬유를 사용한 새로운 반응 위치 측정 양전자방출 단층촬영기기 검출기를 개발하였으며, 이에 대한 최적화 작업을 수행하였다. 섬광체 2개와 과장변이섬유 3개를 사용하고, 과장변이섬유 끝에 센서를 부착하여 최적화 모듈을 설계하였다. 섬광체와 과장변이섬유 및 센서를 연결시키는 연결물질과 섬광체와 과장변이섬유의 반사체 물질에 따른 센서에서의 빛 수집율 및 센서별 빛 수집 비를 통해 최적의 조합을 도출하였다. 연결물질은 에폭시를 사용하고 반사체 물질은 섬광체와 과장변이섬유에서 각각 난반사체 및 거울반사체를 사용한 조합에서, 가장 높은 빛 수집율과 센서별 빛 수집 비를 보였다.

중심단어: 양전자방출 단층촬영기기, 공간분해능, 과장변이섬유, 연결물질, 반사체 물질

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	교수