

Design of DOI Detector Module for PET through the Light Spread Distribution

Seung-Jae Lee,^{1,2} Cheol-Ha Baek^{3,*}

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

³Department of Radiological Science, Kangwon National University

Received: September 05 2018. Revised: October 25, 2018. Accepted: October 31, 2018

ABSTRACT

A depth of interaction(DOI) detector module using a block scintillator and a pixellated scintillator was designed, and layer discrimination ability was calculated using DETECT2000. The block scintillator was used to improve the sensitivity and the spatial resolution was improved by measuring the DOI. The DOI was measured by analyzing the signal characteristics of each channel of the changed distribution of light. The detector module was composed to the block scintillator in the top layer and the pixellated scintillator in the bottom layer, which changes the distribution of light generated from a scintillator interacting with a gamma ray. In the flood image, the top layer was able to acquire the image at the position similar to the position of the bottom layer because the bottom layer consist of the pixellated scintillator. By using the Anger algorithm, the 16 channel signal was reduced to 4 channels to facilitate the analysis of the signal characteristics. The layer discrimination was measured using a simple algorithm and the accuracy was about 84% for each layer. When this detector module is used in preclinical PET, the spatial resolution at the outside of the field of view can be improved by measuring the DOI.

Keywords: Depth of interaction, Block scintillator, Anger algorithm, DETECT2000

I. INTRODUCTION

소동물용 양전자방출단층촬영기기(Positron Emission Tomography; PET)는 민감도를 향상하기 위해 작은 갱트리를 적용하고, 공간분해능을 향상하기 위해서 가늘고 긴 섬광체를 사용한다.^[1] 작은 갱트리 적용으로 인해 촬영 시야(Field of view; FOV)의 외곽 부분에서 공간분해능이 저하되는 현상이 발생한다. 이는 중심에서 발생한 방사선원은 하나의 섬광체에 수직으로 입사하지만, 외곽에서 발생한 방사선원은 섬광체에 사선으로 입사하여, 여러 섬광체에 걸쳐 검출되기 때문이다.^[2-4] 이러한 공간분해능의 저하 현상을 패럴랙스 에러(parallax error)라 한다.

공간분해능의 저하 현상은 섬광체 내에서 방사선원이 상호작용한 깊이를 측정함으로써 해결할 수 있다. 상호작용한 위치를 측정하는 방법은 다양하며, 많은 연구기관에서 개발 및 연구되었다. 여러 섬광체를 사용하여 각 섬광체의 감쇠 시간의 차이를 이용한 방법^[5], 섬광체 양단에 센서를 부착하여 각 센서에서 획득되는 신호의 비를 통해 깊이를 측정하는 방법^[6,7], 여러 층의 섬광체를 사용하고 층마다 센서를 사용하여 직접 측정하는 방법^[8,9], 섬광체 층 사이마다 파장변이섬유를 사용하여 측정하는 방법^[10] 등이 있다. 각 방법에는 여러 문제점이 존재한다. 여러 섬광체를 사용하고 감쇠 시간을 측정하는 방법은, 섬광체의 감쇠시간을 정확히 측정하지 못하는 문제점이 있다. 섬광체 양단에 센서를

* Corresponding Author: Cheol-Ha Baek

E-mail: baekch@kangwon.ac.kr

Tel: +82-33-540-3384

부착하는 방법은 방사선원이 입사하는 위치의 센서 및 기타 전자 부품에서 발생하는 방사선원의 감쇠 및 산란으로 인해 신호대 잡음비 영향을 미치게 된다.^[11] 섬광체 층마다 센서를 사용하여 직접 측정하는 방법은 정확하게 위치를 측정할 수 있지만, 검출기를 만드는데 큰 비용이 소요되는 단점이 있다.

본 연구에서는 여러 문제점을 해결하기 위해서 새로운 반응 깊이를 측정하는 검출기 모듈을 설계하였다. 검출기의 특징은 섬광체가 감마선과 상호작용하여 발생한 빛의 분포를 분석하여 반응한 깊이를 추적하는 방법이다. Fig. 1과 같이 윗면은 블록형 섬광체를 사용하고, 아랫면은 픽셀형 섬광체를 사용할 경우, 윗면에서 발생한 빛은 아랫면에서 발생된 빛에 비해 더 넓은 분포로 퍼지며, 센서에서 획득된다. 아랫면은 픽셀형 섬광체를 사용하고, 각 섬광체는 반사체가 도포되어 있기 때문에 빛의 퍼짐 정도는 윗면보다 한정적이다. 센서에서 획득되는 빛의 분포를 분석하면 감마선이 섬광체와 상호작용한 위치를 추적할 수 있다. 또한 윗면의 섬광체를 블록형으로 구성하였기 때문에 민감도 측면에서도 전체를 픽셀형 섬광체로 구성한 검출기에 비해 높은 민감도를 지닐 수 있다.

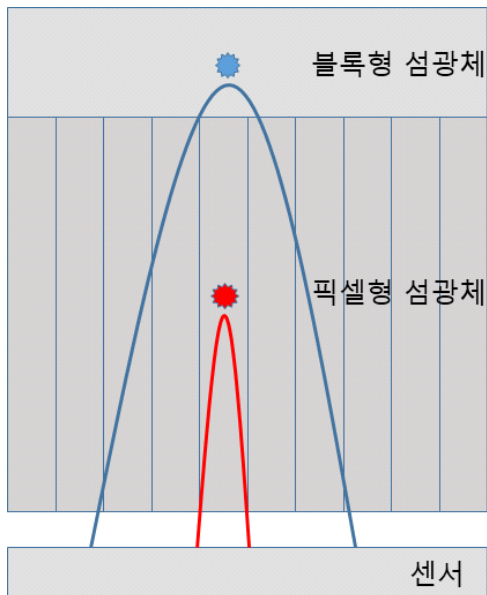


Fig. 1. Light distribution in block and pixel crystals.

II. MATERIAL AND METHODS

새로운 반응 깊이 검출기를 모듈을 설계하고 DETECT2000^[12] 시뮬레이션을 통해 검증하였다. DETECT2000 시뮬레이션 툴은 섬광체 내의 빛의 이동을 모사할 수 있으며, 섬광체의 굴절률을 통해 물질을 모사할 수 있다. 검출기 모듈은 Fig. 2와 같다. 두 층 구조로 이루어져 있으며, 위층은 블록형 섬광체로 아래층은 픽셀형 섬광체로 구성하였다. 위층의 섬광체 크기는 12 mm × 12 mm × 5 mm 이며, 아래층은 2 mm × 2 mm × 15 mm의 섬광체를 6 × 6으로 배열하였다. 섬광체는 511 keV의 감마선 검출율이 높으며, 빛 발생량이 많은 LSO를 사용하였으며, 굴절률은 1.82이다. 섬광체에서 발생한 빛을 검출하기 위한 광센서는 Hamamatsu사의 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) arrays인 S13361-3050^[13] 모델을 사용하여 모사하였다. S13361-3050은 유효면적이 3 mm × 3 mm의 MPPC가 4 × 4 배열로 구성되어 있다. 입사 창은 에폭시 레진(굴절률 1.55)으로 구성되어 있다. 섬광체 층 사이와 섬광체와 MPPC 사이의 굴절률의 차이에 의한 빛의 반사와 손실을 막기 위해 Saint-gobain사의 BC-630^[14] optical grease(굴절률 1.465)를 사용하여 빛의 손실을 최소화 하였다.

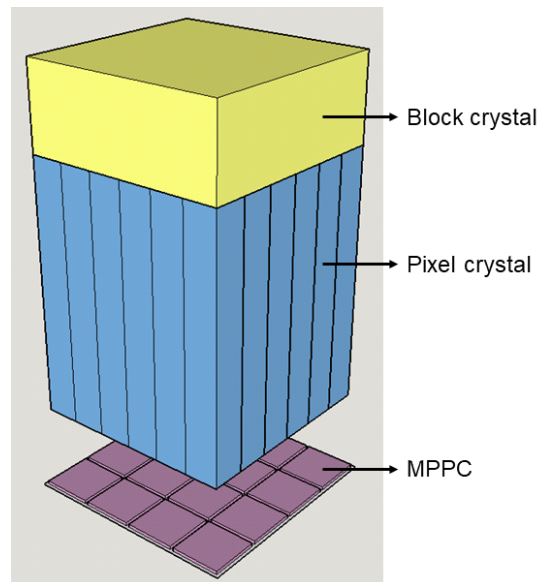


Fig. 2. Schematic of the detector module.

위층과 아래층에서 발생한 빛의 분포를 확인하기 위해 x, y축 방향으로 1 mm부터 11 mm 까지 2 mm 간격으로 섬광체와 감마선 반응에 생성된 빛을 발생시켰다. z축 방향으로는 대부분 위치에서 감마선이 반응한 것을 모사하기 위해 아래층은 1 mm부터 12 mm까지 3 mm 간격으로, 위층은 15 mm부터 19 mm까지 1 mm 간격으로 발생시켰다. 총 36개 픽셀에서 빛을 발생시켰으며, 지점마다 총 2,500 번의 감마선 반응을 발생시켜 데이터를 획득하였다. 16 채널의 데이터는 앵거 방정식을 사용하여 4채널로 감소시켰으며, 이를 사용하여 영상을 재구성하였다. 앵거방정식을 사용하여 4채널로 데이터 획득 채널을 감소시켰으므로 데이터 처리 회로의 간소화와 비용의 감소를 이룰 수 있다.

층의 구분은 4채 채널에서 획득한 신호의 크기 비율을 사용하여 위층과 아래층을 구분하였다. 층별 픽셀 영역에 대한 4채널 신호의 평균값을 각각 측정하여 저장하였다. 새로 입사한 감마선과 섬광체가 반응하여 생성한 빛의 4채널에 대한 신호의 분포를 미리 측정된 4채널 신호의 평균값과 비교하였다. 평균값과의 비교는 Eq. (1)에 나타내었다.

$$\text{비교값} = \sum_{i=1}^4 |\text{새로운 신호}_i - \text{저장된 신호}_i| \quad (1)$$

비교값은 새로운 신호 i번째 채널의 값에서 저장된 신호 i번째 값을 뺀 값의 절댓값을 취하고, 4개 채널의 합을 통해 산출하였다. 산출된 값이 최소가 되는 층을 구하였으며, 그 층이 섬광체와 감마선이 반응한 층이 된다.

III. RESULT

1. 평면 영상

위층과 아래층에서 각 픽셀형 섬광체의 중심 위치에서 발생시킨 빛을 앵거 방정식을 사용하여 6 × 6의 섬광픽셀을 4개 채널로 신호를 획득한 후 평면 영상으로 재구성하였다.

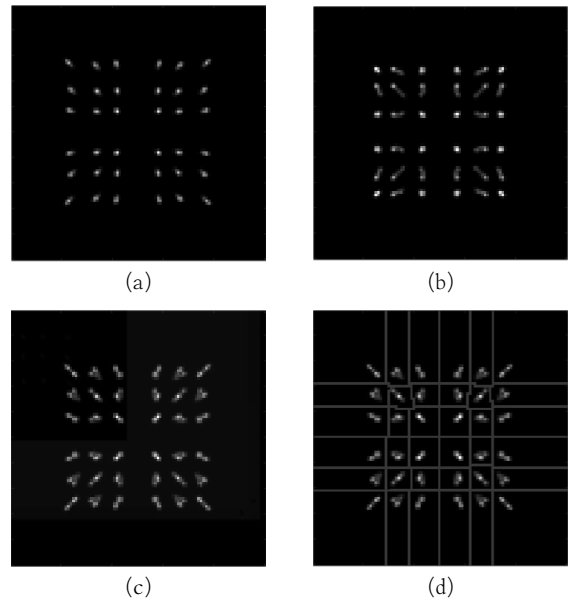


Fig. 3. Flood images. (a) bottom image, (b) top image, (c) summation of bottom and top, (d) pixel segmentation image

Fig. 3에 각 층의 평면영상을 나타내었다. Fig. 3(a), (b)는 아래층과 위층의 평면 영상이며, (c)는 아래층과 위층을 합한 영상으로, 이 영상을 사용하여 (d)와 같이 픽셀 구획화를 수행하였다. 모든 픽셀이 정확하게 구획화되어 나타난 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3(a)의 영상을 보면 가운데 가로 및 세로 부분을 경계로 4개의 구역으로 나뉘는 모습을 보인다. 각 구역은 3 × 3의 섬광 픽셀이 영상화되어 있는데, 이는 섬광픽셀과 MPPC array의 배열 위치에 기인하여 발생한 현상이다. 4 × 4 MPPC array에서 2 × 2 영역에 섬광픽셀이 3 × 3으로 위치하여 그 결과로 영상에서 4분할 영역으로 분리된 것처럼 나타났다.

단지 영상만으로는 위층과 아래층의 픽셀 위치를 구분하지 못하지만 4채널의 신호를 분석하여 층을 구분할 수 있으며, 이를 위해 채널별 신호를 분석하였다.

2. 층 구분 정확도

블록 섬광체의 위층과 픽셀 섬광체의 아래층에 대한 4채널 신호의 크기를 수집하여 평균값을 각

섬광 픽셀마다 측정하였다. 미리 측정한 각 픽셀의 4채널의 평균값과 새로 측정된 4채널의 값과 비교하여 감마선과 섬광체가 반응한 층을 결정하였다. 층 정확도 산출식은 Eq. (2)에 나타내었다.

$$\text{정확도} = \frac{\text{빛의 신호를 발생시킨 층으로 찾은 횟수}}{\text{빛의 신호를 발생시킨 총 횟수}} \quad (2)$$

Table 1과 2에 아래층과 위층에 대한 층 결정 정확도를 나타내었다. 각 층의 층 결정 정확도를 보면, 아래층은 70% ~ 94% 범위에 평균 84.03%를 보였으며, 위층은 65% ~ 99% 범위에 평균 84.28%를 보였다. Fig. 4와 5에 Table 1과 2에 나타낸 결과를 그래프로 나타내었다. Fig. 4에서는 아래층의 정확도 결과이며, MPPC array에서 외곽에 위치한 픽셀의 정확도가 높은 반면, 안쪽과 MPPC 픽셀 사이에 위치한 섬광체에서 정확도가 조금 낮은 모습을 보였다. Fig. 5에서는 위층의 정확도 결과를 나타내었고, 아래층과 마찬가지로 외곽의 픽셀에서 높은 정확도를 보인 반면 안쪽 부분과 MPPC 픽셀 사이에 위치한 섬광체에서 정확도의 낮음을 관찰할 수 있다.

Table 1. Accuracy of the bottom layer discrimination. (unit: %)

Pixel No.	X1	X2	X3	X4	X5	X6
Y1	93.6	82.72	89.52	89.52	81.04	92.96
Y2	81.52	72.28	83.52	85.04	71.52	80.88
Y3	89.92	85.00	83.72	85.56	82.96	88.36
Y4	88.24	81.68	83.24	84.04	82.28	89.48
Y5	81.80	72.00	81.24	84.44	70.44	81.40
Y6	92.76	80.64	88.08	90.04	80.44	93.24

Table 2. Accuracy of the top layer discrimination. (unit: %)

Pixel No.	X1	X2	X3	X4	X5	X6
Y1	98.72	86.64	94.32	94.72	85	98.52
Y2	84	64.88	72.96	75.36	65.24	85.44
Y3	94.36	75.88	85.84	86.04	75.28	94.2
Y4	93.96	72.84	85.36	85.84	73.8	94.08
Y5	87.08	65.72	74.28	75.88	65.2	84.8
Y6	98.28	86.16	94.96	94.32	85.16	98.8

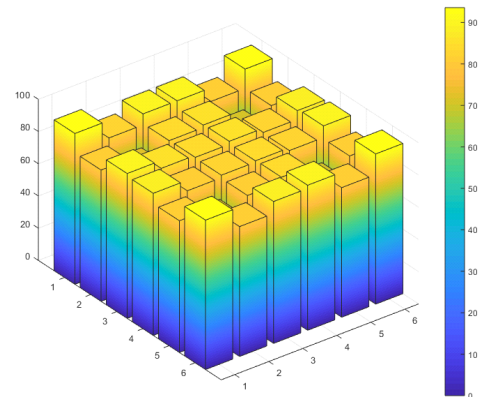


Fig. 4. DOI accuracy of the bottom layer in all position.

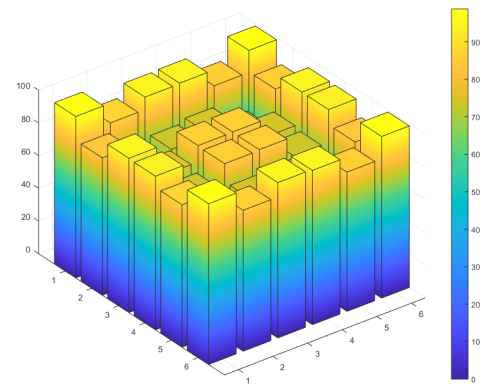


Fig. 5. DOI accuracy of the top layer in all position.

IV. DISCUSSION

평면 영상은 위층과 아래층에서 모두 6 × 6 픽셀로 정확하게 나타났으며, 두 영상을 합한 영상에서도 모두 정확하게 나타났다. 이를 통해 정확한 구획화를 진행할 수 있었다. 섬광체와 MPPC array의 배열로 인해 발생한 4분할 영역으로 나뉜듯한 모습은 MPPC array와 섬광체 사이에 빛이 더 퍼질 수 있도록 광전도체를 위치시킴으로써 이러한 영상에서 나타나는 결과는 감소시킬 수 있다.

층의 구분은 위층과 아래층을 구분하는데 각각 평균 84%의 정확도를 보였다. 이러한 정확도는 20 mm 길이의 단일층의 시스템과 5 mm, 15 mm의 길

이를 적용한 두 층으로 구성된 시스템에서의 공간 분해능 시뮬레이션 결과에서 평균적으로 약 30% 정도의 공간분해능 향상을 보였으며, 84%의 정확도를 적용할 경우 약 20%의 공간분해능 향상을 가져올 수 있다. 외곽에 위치한 픽셀에서 90% 이상의 높은 정확도를 보였으며, MPPC 픽셀 사이에 위치한 섬광 픽셀에서 상대적으로 낮은 정확도를 보였다. 그중 MPPC 픽셀 4개와 연결된 섬광 픽셀에서 가장 낮은 정확도를 보였다. 이는 위층과 아래층 모두에서 동일하게 낮은 정확도를 나타내었으며, 빛의 분포가 위층과 아래층에서 비슷하게 여러 MPPC 픽셀로 나뉘어 획득된 결과이다. 위층의 섬광체에서는 모든 위치에서 여러 MPPC 픽셀로 빛을 획득하지만, 아래층의 섬광체에서는 적은 수의 MPPC 픽셀에서 빛을 획득한다. 즉, 빛의 분포가 아래층에 보다 위층이 넓게 된다. 그러나 이러한 아래층의 빛의 분포가 상대적으로 넓게 분포하게 되면 위층과의 구분이 잘 안 되게 된다. Fig. 6에서 MPPC array와 섬광 픽셀의 배열 분포를 나타내었다. 분홍색 선이 MPPC 픽셀을 나타내고, 검은색 선이 섬광 픽셀을 나타낸다. Fig. 6과 Fig. 4 및 5와 비교를 해보면, 하나의 섬광 픽셀이 4개의 MPPC와 연결되는 부분에서 가장 낮은 정확도를 보인 것을 확인할 수 있으며, 그 다음의 낮은 정확도를 보인 부분은 하나의 섬광 픽셀이 2개의 MPPC 픽셀과 연결된 부분이다. Fig. 5에서 가운데 4개의 부분의 정확도는 높은 것을 볼 수 있는데, 이는 가운데 4개의 섬광 픽셀은 모두 하나의 MPPC와 연결된 부분으로 아래층은 주로 연결된 MPPC에서 빛의 신호를 획득했지만 위층은 여러 MPPC에서 신호를 획득하여 신호의 분포가 넓게 되어 층 구분의 정확도가 높은 것으로 나타났다. MPPC 픽셀 사이의 공간으로 인해 빛 손실 및 분포의 변화로 발생한 결과이며, 틈새 부분을 최소화함으로써 층 구분 정확도는 높아질 것으로 판단된다.

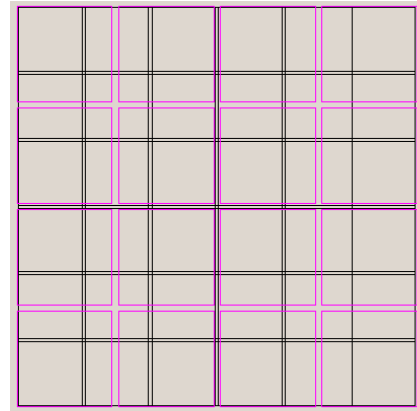


Fig. 6. Position of the MPPC array and the pixellated crystals. (Pink: MPPC array, Black: pixellated crystals)

V. CONCLUSION

본 연구에서는 두 층의 섬광체 층을 사용하여 깊이 방향의 위치를 추적하는 검출기 모듈을 설계하였다. 위층은 블록형을 아래층은 픽셀형 섬광체를 사용하여 빛의 분포를 서로 다르게 하였으며, 이를 통해 층을 구분하는 방법을 사용하였다. 블록형 섬광체를 사용함으로써 빛의 분포를 픽셀형 섬광체에 비해 더 넓게 만들었으며, 아래층은 픽셀형 섬광체를 사용하여 좁은 빛의 분포 및 픽셀형을 사용함으로써 X, Y 축의 위치를 정확하게 표현하였다. 평면 영상을 획득하여 모든 픽셀의 구분이 정확히 되는 것을 확인할 수 있었으며, 층을 구분하는 정확도는 위층과 아래층 모두에서 약 84%의 결과를 나타내었다. 본 검출기를 사용함으로써 반응 깊이 층을 두 층으로 구분할 수 있으며, 공간분해능을 향상할 수 있다. 또한 위층에 블록형 섬광체를 사용함으로써 민감도를 향상할 수 있다. 본 검출기를 전임상용 PET에서 사용할 경우 반응 깊이를 측정함으로써 검출 시야 외곽에서의 공간분해능을 향상할 수 있을 것이다.

MPPC array의 틈새로 인한 빛의 손실 및 분포 변화로 이 부분에 위치한 섬광 픽셀에서 층 결정 정확도가 낮아진 모습을 보였으며, 향후 틈새 부분의 반사체 사용과 빛 분포를 변화시킬 수 있는 광전도체를 사용하여 정확도를 향상시킬 수 있는 연구가 필요할 것으로 생각한다.

Acknowledgement

이 논문은 2018년도 BB21+사업에 의하여 지원되었음.

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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] C. S. Levin, "Design of a High-Resolution and High-Sensitivity Scintillation Crystal Array for PET With Nearly Complete Light Collection," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 49, No. 5, pp. 2236-2243, 2002.
- [9] D. P. McElroy, M. Hoose, W. Pimpl, V. Spanoudaki, T. Schuler, and S. I. Ziegler, "A true singles list-mode data acquisition system for a small animal PET scanner with independent crystal readout," *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 50, No. 14, pp. 3323-3335, 2005.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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.
- [13] <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/S13361-3050AE-04/index.html>
- [14] <https://www.crystals.saint-gobain.com/document/bc630-silicone-grease-sdspdf>

빛 분포를 통한 양전자방출단층촬영기기의 반응 깊이 측정 검출기 모듈 개발

이승재,^{1,2} 백철하^{3,*}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구센터

³강원대학교 보건과학대학 방사선학과

요 약

블록형 섬광체와 픽셀형 섬광체를 이용한 반응 깊이 측정 검출기를 설계하였으며, 층 구분 능력을 DETECT2000을 사용하여 측정하였다. 블록형 섬광체를 사용하여 민감도를 향상했으며, 반응 깊이를 측정함으로써 공간분해능을 향상했다. 위층은 블록형으로 아래층은 픽셀형 섬광체를 위치시켜 감마선과 반응한 섬광체에서 발생한 빛의 분포를 변화시켰으며, 변화된 빛의 분포의 채널별 신호 특성 분석을 통해 반응 깊이를 측정하였다. 아래층을 픽셀형 섬광체로 구성하여 평면 영상 획득 시 위층의 블록형 섬광체에서도 픽셀형 섬광체의 위치와 비슷한 곳에서 영상을 획득할 수 있었다. 앵거 알고리즘을 사용하여 16채널의 신호를 4개의 채널로 감소시켜, 신호 특성 분석을 용이하게 하였으며, 층 구분은 간단한 알고리즘을 사용하여 측정하였고 층별 약 84%의 측정 정확도를 보였다. 본 검출기를 전임상용 PET에서 사용할 경우 반응 깊이 측정을 통해 검출 시야 외곽에서의 공간분해능을 향상할 수 있을 것이다.

중심단어: 반응 깊이 측정, 블록형 섬광체, 앵거 알고리즘, DETECT2000

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	이승재	동서대학교 방사선학과	조교수
(교신)	백철하	강원대학교 방사선학과	조교수