Digital Position Measurement with MLPE of PET detector using a Small Number of Photosensors

Seunghun Kang[1], Seung-Jae Lee[1,2,3,*]

[1]Department of Convergence Radiological Science, Dongseo University
[2]Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University
[3]Department of Radiological Science, Dongseo University

Received: March 08, 2022. Revised: April 15, 2022. Accepted: April 30, 2022.

ABSTRACT

A detector using a small number of photosensors was designed, and the position of a scintillation pixel that interacted with gamma rays through a maximum likelihood position estimation(MLPE) was measured as a digital position. For this purpose, simulation was performed using DETECT2000, which can simulate the movement of light within the scintillator, and the accuracy of position measurement was evaluated. A detector was configured using a 6 × 6 scintillation pixel array and 4 photosensors, and a gamma ray event was generated at the center of each scintillation pixel to create a look-up table through the ratio of acquired light. The gamma-ray event generated at the new position was applied as the input value of the MLPE, and the positiion of the scintillation pixel was converted into a digital positiion after comparison with the look-up table. All scintillation pixels were evaluated, and as a result, a high accuracy of 99.1% was obtained. When this method is applied to the currently usesd system, it is concidered that the process of determining the position of the scintillation pixel will be simplified.

Keywords: Digital position, MLPE, photosensor, DETECT2000

I. INTRODUCTION

인체 내의 생체 영상을 획득하기 위해 양전자방출단층촬영기기(positron emission tomography, PET)를 사용한다[1]. 현재 개발되어 사용되는 PET은 다수의 섬광체와 광전자증배관(photomultiflier tube, PMT)의 조합을 통해 검출기를 구성하여 전체 시스템이 구성된다.

자기공명영상장치(magnetic resonance imaging, MRI)와의 융합된 시스템인 PET-MRI에서는 기존에 사용하는 PMT를 사용할 경우 높은 자기장에 의해 영상의 왜곡이 발생한다[2]. 이를 해결하기 위해 자기장의 영향을 받지 않는 광센서인 실리콘광전증배기(silicon photomultiplier, SiPM)[3]를 사용하여 검출기를 구성하였다[4-8]. SIPM은 3 mm × 3 mm 정도의 픽셀들이 4 × 4 또는 8 × 8 배열로 구성된 광센서들과 다수의 섬광 픽셀들의 배열과 조합하여 하나의 검출기를 구성한다. 광센서로 PMT를 사용할 경우 다수의 섬광체와 4개의 PMT 조합으로 검출기를 구성할 수 있었으나, SiPM을 사용할 경우 수 십개의 광센서가 필요하게 되었다. 이로 인해 전체 시스템의 구성하는 비용의 상승이 발생하였다. 비용의 상승을 억제하고 고효율을 유지할 수 있는 검출기를 개발에 대한 연구를 지난 연구에서 수행하였다[9]. 이는 동일한 섬광 픽셀 배열을 사용하고, 적은 수의 광센서를 사용하는 검출기 개발에 관한 것이다. 광센서는 PET을 제작할 때 많은 비용이 투입되는 구성요소 중 하나이다. 이를 적게 사용함으로써 비용을 낮추나, 그 효율은 비슷한 수준

* Corresponding Author: Seung-Jae Lee E-mail: sjlee@gdsu.dongseo.ac.kr Tel: +82-52-320-2719
Address: 47 Jurye-ro, Sasang-gu, Busan, 47011, Republic of Korea

을 유지할 수 있는 검출기를 개발하였다. 개발한 검출기의 각 섬광 픽셀의 위치는 디지털 위치로 변경해야 영상을 재구성할 수 있다. 이러한 디지털 위치로 변환하는 방법을 시뮬레이션 데이터와 최대우도함수(Maximum Likelihood Position Estimation, MLPE)를 사용하여 측정할 수 있는 방법을 이전 연구에서 개발하였다[10]. 사용하는 광센서의 수를 줄일 경우 각 섬광 픽셀에서 발생된 빛은 각 광센서에서 나뉘어 수집되는데 광센서와 거리가 먼 섬광 픽셀에서 발생된 빛이 측정되는 분포는 광센서와 인접한 섬광 픽셀에서 발생된 빛에 비해 넓게 나타난다. 이로 인해 광센서와 먼 거리의 섬광 픽셀의 영상은 넓은 범위에 걸쳐 나타난다.

본 연구에서는 적은 수의 SiPM을 사용하여 구성된 검출기의 섬광 픽셀의 위치를 디지털 위치로 변환하기 위해 최대우도함수를 적용하였다. 적은 수의 SiPM을 사용하므로 각 섬광 픽셀에서 발생된 빛이 각 SiPM에서 검출되는 양상은 달라져 평면 영상에서 넓은 분포로 나타난다. 이러한 분포를 최대우도함수로 디지털 위치로 변환하고, 그 변환된 정확도를 평가하였다. 위치 측정의 정확도를 평가하기 위해 섬광체와 광센서로 이루어진 검출기 내에서 감마선과 상호작용에 의해 발생된 빛의 시뮬레이션이 가능한 DETECT2000[11,12]을 사용하였다.

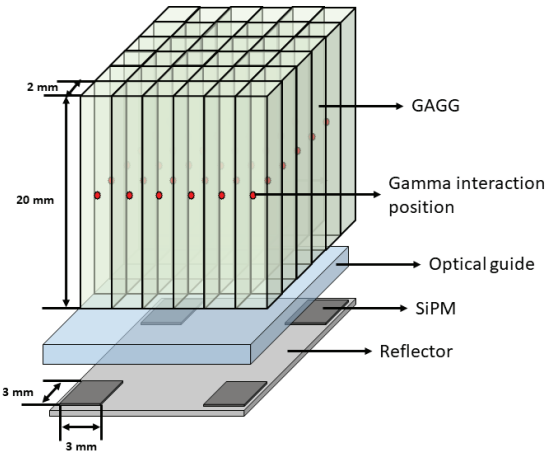

Fig. 1. Schematic of a detector block composed with a 6 × 6 array of GAGG scintillator pixels coupled to 4 SiPM pixels[7].

II. MATERIAL AND METHODS

1. 적은 수의 SiPM을 사용한 검출기 설계

DETECT2000을 통해 Fig. 1과 같이 4개의 SiPM 픽셀을 사용한 검출기를 설계하였다. 각 SiPM의 크기는 3 mm × 3 mm로 검출기의 4개의 모서리에 위치하여 섬광 픽셀과 감마선이 상호작용하여 발생된 빛을 수집하도록 구성하였다. 섬광체로는 2 mm × 2 mm × 20 mm 크기의 Gadolinium Aluminium Gallium Garnet(GAGG)[13] 섬광 픽셀을 사용하여 6 × 6 배열로 구성하였다. 각 섬광 픽셀은 감마선과 상호작용하여 발생된 빛을 최대한 SiPM으로 전달하기 위해 SiPM과 연결된 면을 제외하고 모든 면을 거울 반사체로 처리하였으며, 반사율은 98%를 적용하였다. 거울 반사체는 3M 사의 Enhanced Specular Reflector(ESR)[14]을 모사하였다. 반사체 두께를 고려하여 섬광 픽셀간의 간격은 0.1 mm로 설정하여, 전체 검출기의 크기는 12.5 mm × 12.5 mm 이다. 적은 수의 SiPM을 사용하였으므로, SiPM과 직접 연결되지 않은 다수의 섬광 픽셀들이 존재한다. 이러한 GAGG 픽셀에서 발생된 빛을 SiPM으로 전달하기 위해 섬광 픽셀과 SiPM 사이에 광가이드를[15] 삽입하였다. 광가이드 또한 모든 빛을 광센서로 전달하기 위해 반사체 처리를 하였다. 옆면과 광센서와 맞닿는 면을 제외하고는 모든 면을 거울반사체로 처리하였으며, 반사율은 98%로 설정하였다.

2. 순람표 작성

최대우도함수를 이용하여 감마선과 상호작용한 섬광 픽셀의 위치를 디지털 위치로 변환하기 위해 순람표를 작성하였다. 순람표는 각 섬광 픽셀의 위치에서 발생된 빛을 각 SiPM에서 획득한 신호의 비율로 작성하였다. 이를 위해 각 섬광 픽셀의 중심에서 소멸방사선과 GAGG가 상호작용하여 생성된 빛을 발생시켰으며, 이를 1,000회 반복하여 평균값과 표준편차 값을 획득하였다. 모든 섬광 픽셀에서 동일하게 시뮬레이션을 실시하여 총 36개의 섬광 픽셀에 대한 평균 및 표준편차 값을 통해 순람표를 작성하였다.

3. 디지털 위치 변환 정확도 평가

설계한 검출기의 각 섬광 픽셀에 대한 디지털 위치를 최대우도함수를 통해 변환하였고, 실제 빛을 발생시킨 섬광 픽셀의 위치와, 변환된 위치와의 정확도를 평가하였다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 각 섬광 픽셀에서 감마선과 상호작용한 위치를 깊이 방향으로 0.1 mm ~ 19.9 mm까지 0.2 mm 간격으로 지정하여 동일한 섬광 픽셀에서 총 100개의 서로 다른 위치에서 빛을 발생시킨 후 각 SiPM에서 신호를 획득하였다. 획득된 신호는 비율로 변환하였고, 이를 최대우도함수에 입력하여 디지털 위치로 변환하였다. 모든 섬광 픽셀에서 동일한 과정을 통해 디지털 위치 변환의 정확도를 평가하였다.

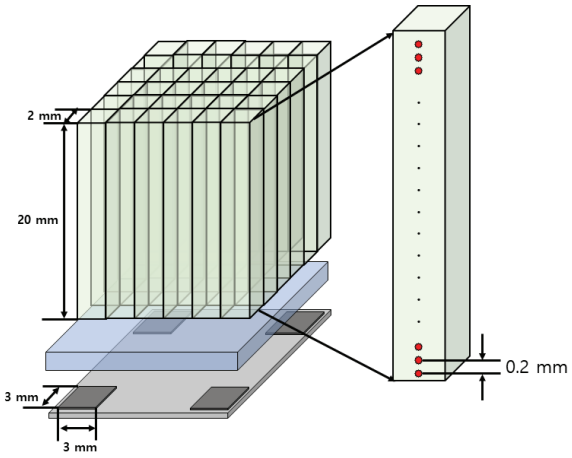

Fig. 2. Schematic diagram of position interacting with gamma rays for evaluation of digital position conversion accuracy. Gamma-ray events were generated at intervals of 0.2 mm from 0.1 mm to 19.9 mm.

III. RESULT

적은 수의 SiPM을 사용하여 구성한 검출기에서 최대우도함수를 통한 섬광 픽셀의 위치를 디지털 위치로 변환하였다. 디지털 위치로 변환하기 위해 순람표를 작성하였으며, 순람표 작성을 위해서 모든 섬광 픽셀의 중심에서 1,000회의 감마선 이벤트를 발생시켜 각 SiPM에서 빛을 수집하였다. Fig. 3은 순람표를 작성하기 위해 획득한 빛을 통해 평면 영상으로 재구성한 것이다. SiPM과 직접 맞닿아 있는 위치의 섬광 픽셀의 영상은 그렇지 않은 위치에서의 섬광 픽셀 영상에 비해 보다 뚜렷하고 그 분포가 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 섬광 픽셀에서 발생된 빛이 주로 인접한 SiPM에 수집되고, 멀리 떨어진 SiPM에는 그 양이 적게 수집되어 나타난 결과이다. 또한 SiPM과 직접 연결되지 않은 위치의 섬광 픽셀 영상은 보다 흐릿하고 넓게 분포된 것을 확인할 수 있다. 이는 각 SiPM에서 수집되는 양의 분포가 넓어, 수집되는 양에 기반하여 결정되는 위치 또한 그 분포가 넓어지기 때문이다. 그러므로 순람표 또한 영상의 분포가 작은 위치의 섬광 픽셀들의 표준편차는 평균 값에 비교해 작게 획득되었으며, 영상의 분포가 큰 위치의 섬광 픽셀들의 표준편차는 상대적으로 큰 값이 획득되었다.

디지털 위치 변환의 정확도 평가를 위해서 각 섬광 픽셀의 깊이 방향에서 0.2 mm 간격으로 총 100개의 서로 다른 위치에서 감마선 이벤트를 발생시켰다. 각 위치에서 획득한 빛의 신호에 대한 비율을 최대우도함수의 입력값으로 사용하여 섬광 픽셀의 위치를 디지털 위치로 변환하였다. 실제 빛을 발생시킨 섬광 픽셀의 위치와 최대우도함수를 통한 디지털 위치와의 비교 평가 결과 99.1 ± 1.4%의 정확도를 보였다. Fig. 4에 각 섬광 픽셀별 정확도 결과를 나타내었다.

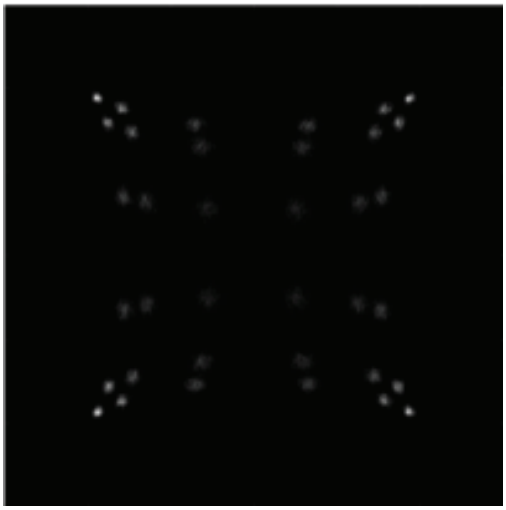

Fig. 3. Flood image acquired through light collected from SiPM generated by each GAGG pixel for look-up table creation.

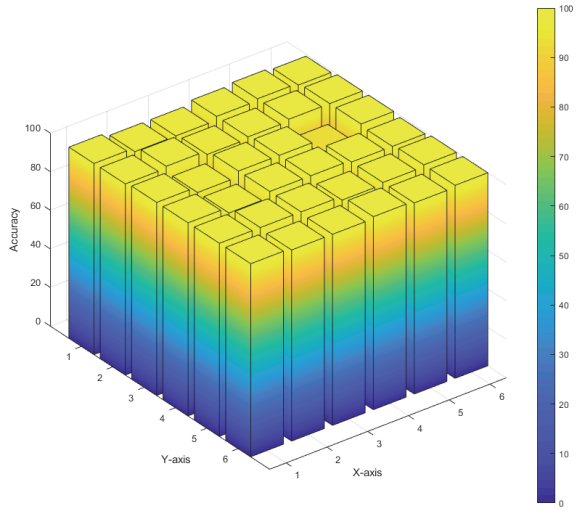

Fig. 4. Digital position conversion accuracy of each GAGG pixel.

IV. DISCUSSION

디지털 위치 변환의 정확도 결과 (5, 3)위치(X, Y axis)에서 다른 곳에 비해 낮은 결과를 보였다. 이 부분은 다른 위치의 결과가 매우 높아 상대적으로 낮게 보이지만, 실제로는 93%로 높은 결과를 보인 부분이다. 다른 위치에 비해 상대적으로 낮은 결과를 보인 이유는 100개 지점에서 획득한 신호를 바탕으로 디지털 위치로 변환하였기에, 위치 변환의 모수가 작아 한, 두 개의 차이에 의해서도 상대적인 결과가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

적은 수의 SiPM과 최대우도함수를 사용하여 섬광 픽셀의 위치를 디지털 위치로 측정고 정확도를 평가하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 6 × 6 배열의 GAGG 섬광 픽셀과 SiPM 픽셀 4개를 사용하여검출기를 구성하였으며, 섬광 픽셀 중심에서 감마선 이벤트를 발생시켜 SiPM에서 빛을 수집하였다. 수집된 빛의 비율로 순람표를 작성하였으며, 새로운 위치에서 발생된 빛의 비율을 최대우도함수의 입력값으로 사용하여 순람표와 비교를 통해 감마선 이벤트가 발생된 섬광 픽셀의 디지털 위치를 측정하였다. 측정의 정확도는 모든 섬광 픽셀에서 매우 높게 나타났으며, 정확도 범위는 최소 93%에서 최대 100%의 결과를 보였다. 시뮬레이션을 통해 수행한 결과로 모든 사항들에 대해 완벽한 조건을 갖추었으므로 매우 높은 정확도 결과를 보였다.

V. CONCLUSION

시뮬레이션을 통해 작성된 순람표는 각 SiPM 픽셀에서 획득한 빛의 신호를 바탕으로 비율로 작성되었으므로, 실험에 적용하여 사용할 수 있다. 향후 실험을 통해 획득한 신호를 시뮬레이션으로 작성한 순람표에 적용하는 연구를 수행하고자 한다. 본 연구 결과를 바탕으로 현재 사용되는 시스템에 적용할 경우 섬광 픽셀의 위치를 판별하는 과정의 간소화를 이룰 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 논문(저서)는 부산광역시 및 (재)부산인재평생교육진흥원의 BB21플러스 사업으로 지원된 연구임

Reference

[1] D. L. Bailey, D. W. Townsend, P. E. Valk, M. N. Maisy, *Positron Emission Tomography: Basic Science*, 1st Ed., Springer-Verlag London Ltd., London, pp. 1-8, 2005.

[2] B. Pichler, H. F. Wehrl, A. Kolb, and M. S. Judenhofer, "PET/MRI: THE NEXT GENERATION OF MULTI-MODALITY IMAGING?", Seminars in Nuclear Medicine, Vol. 38, No. 3, pp. 199-208, 2008. https://dx.doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2008.02.001

[3] N. Otte, B. Dolgoshein, J. Hose, S. Klemin, E. Lorenz, R. Mirzoyan, E. Popova, M. Teshima, "The SiPM-A new Photon Detector for PET," Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) Vol. 150, pp. 417-420, 2006. https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2004.08.048

[4] D. Perez-Benito, R. Chil, J. M. Udias, M. Desco, J. J. Vaquero, "SiPM-based PET detector module for a 4π span scanner," Nuclear Instrumnets and Methods in Physics Research A, Vol. 936, pp. 18-21, 2019. https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.179

[5] I. Sonni, L. Baratto, S. Park, N. Hatami, S. Srinivas, G. Davidzon, S. S. Gambhir, and A. Iagaru, "Initial experience with a SiPM-based PET/CT scanner: influence of acquisition time on image quality," EJNMMI Physics, Vol. 5, No. 9, pp. 1-12, 2018.

https://doi.org/10.1186/s40658-018-0207-x

[6] N. G. Kim, G. Kim, J. H. Kwak, S-J. Lee, "Development of PET Detector Module Measuring DOI using Multiple Reflectors," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 13, No. 6, pp. 825-830, 2019. https://doi.org/10.7742/jksr.2019.13.6.825

[7] P. Lecoq, S. Gundacker, "SiPM applications in positron emission tomography: toward ultimate PET time-of-flight resolution," The European Physical Journal Plus, Vol. 136, No. 292, pp. 1-16, 2021. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01183-8

[8] Z. Deng, Y. Deng and G. Chen, "Design and Evaluation of LYSO/SiPM LIGHTENING PET Detector with DTI Sampling Method," Sensors, Vol. 20, No. 20, pp. 1-18, 2020. https://doi.org/10.3390/s20205820

[9] S-J. Lee, C-H. Baek, "PET Detector Design with a Small Number of Photo Sensors," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 15, No. 4, pp. 525-531, 2021. https://doi.org/10.7742/jksr.2021.15.4.525

[10] S. J. Lee, C. H. Baek, "Digital Position Acquisition Method of PET Detector Module using Maximum Likelihood Position Estimation," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 15, No. 1, pp. 1-7, 2021. https://doi.org/10.7742/jksr.2021.15.1.1

[11] 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

[12] F. ayouette, 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

[13] https://www.epic-crystal.com/oxide-scintillators/gagg-ce-scintillator.html

[14] https://multimedia.3m.com/mws/media/1389248O/application-guide-for-esr.pdf

[15] https://www.epic-crystal.com/others/light-guide.html

적은 수의 광센서를 사용한 PET 검출기의 최대우도함수를 적용한 디지털 위치 측정

강승훈[1], 이승재[1,2,3,*]

[1]동서대학교 융합방사선학과
[2]동서대학교 방사선보건환경연구센터
[3]동서대학교 방사선학과

요 약

적은 수의 광센서를 사용하는 검출기를 설계하고, 최대우도함수를 통해 감마선과 상호작용한 섬광 픽셀의 위치를 디지털 위치로 측정하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 섬광체 내에서 빛의 이동을 모사할 수 있는 DETECT2000을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 위치 측정의 정확도를 평가하였다. 6 × 6의 섬광 픽셀 배열과 4개의 광센서를 사용하여 검출기를 구성하였으며, 각 섬광 픽셀 중심에서 감마선 이벤트를 발생시켜 수집된 빛의 비율을 통해 순람표를 작성하였다. 새로운 위치에서 발생된 감마선 이벤트를 최대우도함수의 입력값으로 적용하여 순람표와 비교후 섬광 픽셀의 위치를 디지털 위치로 변환하였다. 모든 섬광 픽셀들에서 평가하였으며, 그 결과 99.1%의 높은 정확도를 획득하였다. 이러한 방법을 현재 사용되는 시스템에 적용할 경우 섬광 픽셀의 위치를 판별하는 과정의 간소화를 이룰 것으로 판단된다.

중심단어: 디지털 위치, 최대우도함수, 광센서, DETECT2000

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	강승훈	동서대학교 융합방사선학과	대학원생(석사)
(교신저자)	이승재	동서대학교 융합방사선학과	교수