

Monte-carlo Simulation for X-ray Photon Counting using MPPC Arrays

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: October 05, 2018. Revised: December 06, 2018. Accepted: December 31, 2018

ABSTRACT

Studies for counting and detecting X-rays for the improvement of image quality and material analysis are active. In this work, the detector for X-ray photon counting was designed using Multi-pixel photon counter (MPPC) array and the detector characteristics were evaluated through simulation. Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) was used to obtain the position where the X-ray and the scintillation interacted, and this position was used as the light generation position of DETECT2000. 0.5 mm and 1 mm thick Gadolinium Aluminium Gallium Garnet (GAGG) scintillators were used and the light generated through a 4 x 4 array of MPPCs was acquired. The spatial resolution of the designed detector was evaluated by reconstructed image using the light signal acquired for each channel. We obtained images of more than 2 lp/mm in both 0.5 mm and 1 mm thick GAGG scintillation. When this detector is used in a X-ray system, a low-cost system capable of photon counting can be made.

Keywords: Photon counting, Monte-carlo simulation, MPPC

I. INTRODUCTION

엑스선 검출 방식은 일정 시간 동안 검출기에 입사된 엑스선의 신호를 적분하여 영상화하는 방식이 주로 사용되고 있으며, 최근 영상의 화질 및 물성의 구분을 향상하기 위해 광자계수형 방식의 검출기가 연구 개발되고 있다. 광자계수형 방식은 신호 적분 방식에 비교해 넓은 동작 범위와 물질 분별 능력을 지니며, 에너지 가중치 부여에 따른 신호대잡음비를 향상할 수 있다. 최근 많은 연구그룹에서 광자계수형 방식으로 엑스선을 검출하기 위하여 Cadmium zinc telluride (CZT), Silicon photomultiplier (Si-PM) 등의 센서를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1-4] 반도체 검출기인 CZT와 Si-PM으로 엑스선을 직접 검출하기 위해서는 X선의 에너지가 높아짐에 따라 두꺼운 센서가 필요하다. 이런 고에너지 엑스선 검출을 위해 두꺼운 센서를 만들기 위한 기술력은 미

흡하여 실제 제품으로 상용화하는데 어려움이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 섬광체와 Si-PM을 사용한 광자계수형 방식의 검출기가 연구 및 개발되고 있다.^[5-7] 이런 광자계수를 위한 검출기는 얇은 두께의 섬광체와 Si-PM 센서를 사용하여 구성되며, 선형 스캔 방식을 통해 영상을 재구성하게 된다. 선형 스캔 방식을 통한 영상 획득은 많은 시간이 소요되며, Si-PM 센서의 크기로 인한 분해능의 한계가 존재한다.^[8] 이에 본 연구에서는 고에너지 엑스선을 검출할 수 있으며, 다채널의 Si-PM을 사용한 고분해능의 광자계수형 방식의 검출기를 설계하고, Geant4 기반의 몬테칼로 시뮬레이션 툴인 Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE)와^[9] 섬광체 내의 빛의 이동을 모사하는 DETECT2000을^[10] 이용하여 특성을 평가하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

* Corresponding Author: Cheol-Ha, Baek

E-mail: baekch@kangwon.ac.kr

Tel: +82-33-540-3384

1. GATE 시뮬레이션

엑스선이 섬광체와 상호작용한 위치를 측정하기 위해 몬테칼로 시뮬레이션 툴인 GATE를 사용하여 모사하였다. 검출기는 9 mm × 9 mm의 크기를 갖고, 두께는 0.5 mm와 1 mm인 GAGG 섬광체로 구성하였다. GAGG는 밀도가 6.63 g/cm³로 높고 감쇄시간이 87 ns로 빠르고 빛 발생량이 많아 에너지 분해능이 우수하다.^[11]

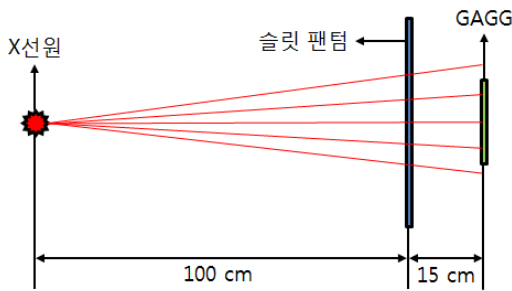


Fig. 1. Geometry of GATE simulation.

엑스선 에너지는 120 kVp 관전압의 평균 에너지에 해당하는 40 keV로 설정하였고, 선원의 크기는 0.5 mm로 구성하였다. 본 시스템의 분해능을 측정하기 위해 1 lp/mm ~ 4 lp/mm의 슬릿 팬텀을 사용하였다. 팬텀은 납 재질로 5개의 슬릿으로 설정하였으며 두께는 2 mm로 구성하였고 슬릿 이외에 투과되는 광자가 없도록 하였다. Fig. 1과 같이 선원과 슬릿 팬텀 사이의 거리는 100 cm, 팬텀과 GAGG와의 거리는 15 cm로 설정하였다.

2. DETECT2000 시뮬레이션

엑스선이 섬광체와 반응하여 발생한 빛의 이동을 모사하기 위해 DETECT2000 시뮬레이션을 하였다. 센서의 크기 및 섬광체와 센서들이 맞닿아 있는 위치에 따라 영상이 달라질 수 있으므로, 정확한 시뮬레이션을 위해 GATE 시뮬레이션을 통해 획득한 엑스선과 섬광체와의 상호작용 위치를 DETECT2000 시뮬레이션의 빛 발생 위치로 사용하였다. 굴절률을 1.9로 설정하여 GAGG 섬광체를 모사하였으며, 크기는 2.0 mm × 2.0 mm의 두께 0.5 mm, 1 mm로 설정하였다. 엑스선이 입사하는 면과 옆면은 난반사체를 적용하였고, 센서와 맞닿는 면은 매끈한 면으로 설정하여 빛이 센서로 이동하여 측정되도록 설정하였다. 센서는

Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) arrays인 Hamamatsu사의 S13361-2050 series를 모사하였다.^[12] 본 센서는 2 mm × 2 mm 크기의 MPPC가 4 × 4 배열로, 2.2 mm의 간격으로 설계하였다. MPPC의 물질은 Epoxy resin으로 굴절률 1.55로 설정하였다. 광검출 효율은 GAGG의 최대 발광 파장인 520 nm에서 약 35%의 효율을 지닌다.

발생한 빛의 수는 Eq. (1)과 같이 엑스선의 에너지에 따른 GAGG의 빛 발생 수와 MPPC의 광 검출 효율로 계산하였다.

$$\text{빛 발생 수} = \text{GAGG의 빛 발생 수} \times \text{MPPC 검출 효율} \quad (1)$$

시뮬레이션의 구성은 Fig. 2와 같다. 엑스선 하나가 GAGG와 상호작용하여 발생된 빛은 MPPC에서 나뉘어져 측정되며, 나뉘어진 비율을 통해 영상을 획득할 수 있다. 영상은 일반적인 감마카메라의 영상 재구성에 사용되는 Eq. (2)의 Anger 방정식을 사용하여 재구성하였다.

$$X_{\text{position}} = \frac{(X_+ - X_-)}{(X_+ + X_-)} \quad (2)$$

$$Y_{\text{position}} = \frac{(Y_+ - Y_-)}{(Y_+ + Y_-)}$$

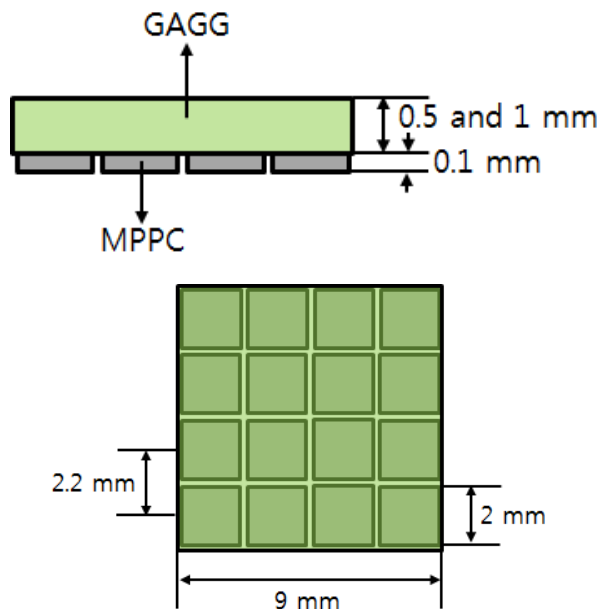


Fig. 2. Geometry of DETECT2000 simulation.

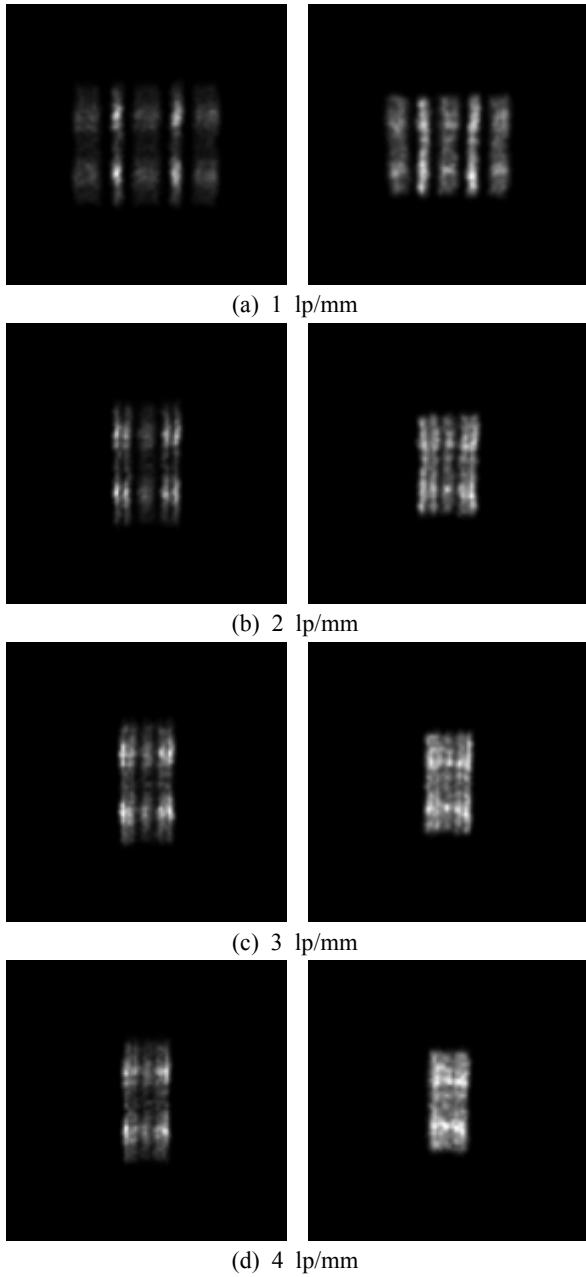


Fig. 3. Reconstruction images for several slit phantoms in 0.5 and 1 mm GAGG.

III. RESULT

DETECT2000 시뮬레이션을 통해 각 센서에서 수집된 빛의 수를 사용하여 Anger 계산을 통해 슬릿 팬텀을 영상화하였다. Fig. 3과 4에 두께 0.5, 1 mm의 GAGG에서 획득한 1 lp/mm ~ 4 lp/mm의 슬릿 팬텀 영상 및 각각의 Profile을 나타내었다. 5개의 슬릿으로 팬텀을 구성하여 5줄의 영상으로 나타났으며, GAGG 두께

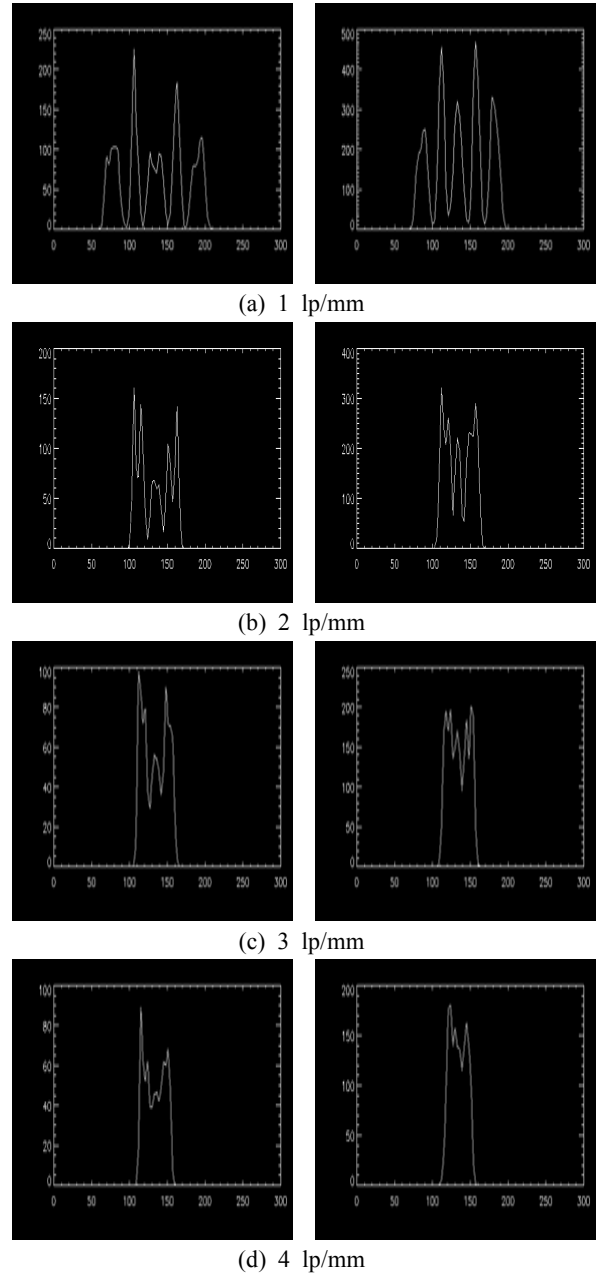


Fig. 4. Profiles for several reconstruction images in 0.5 and 1 mm GAGG.

0.5 mm 및 1 mm에서 2 lp/mm까지 구분이 잘되는 것을 확인할 수 있었다. 3 lp/mm 이상에서는 두 개의 두께에서 모두 구분이 확실하게 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있었다. GAGG 0.5 mm 두께에서 영상화된 각 슬릿의 두께가 일정하지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 4 × 3 배열의 MPPC 센서 사이의 0.2 mm의 간격으로 인해 발생한 결과이다. 간격이

존재하는 부분에서 발생한 빛은 양 측의 센서에서 획득되며, 항상 같은 양의 빛이 획득되지 않으므로 좀 더 넓은 분포로 영상화가 이루어진다.

GAGG 두께가 1 mm에서 0.5 mm 두께의 영상보다 일정한 슬릿의 두께로 나타났으며, 이는 섬광체의 두께에 기인한 것이다. 섬광체가 두꺼우면 빛이 더 넓게 퍼지게 되므로 각 센서에서 획득하는 빛의 양이 비율이 0.5 mm 두께의 섬광체에 비해서 고르게 분포하므로 일정한 영상으로 나타났다. 하나의 슬릿 영상에서 밝은 부분과 어두운 부분이 번갈아가며 나타나는데, 이 부분 또한 센서 간격 및 섬광체의 두께에 기인하여 나타난 현상이다. 하나의 센서 중심 부분의 섬광체에서 발생한 빛은 주로 맞닿아 있는 센서에서 측정되므로, 영상화의 범위가 작아 좀 더 밝게 나타난다.

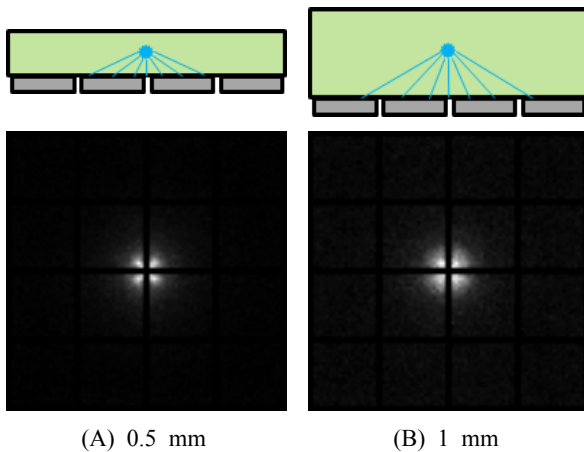


Fig. 5. Light distribution in 0.5 and 1 mm GAGG.

이는 섬광체의 두께가 작을수록 빛의 퍼짐이 적으므로 더 잘 나타나게 된다. Fig. 5에 0.5와 1 mm 두께의 GAGG 중심에서 발생한 빛이 센서에서 획득되는 위치의 분포도를 영상화하였다. 0.5 mm 두께에 비해 1 mm에서 더 넓은 분포로 빛을 획득하는 것을 확인할 수 있었다.

IV. DISCUSSION

GAGG 0.5 mm의 슬릿 영상에서 더 좋은 분해능을 보였다. 이는 빛이 1 mm에서 보다 퍼짐이 적어 영상 재구성 시에 위치의 분포가 더욱 좁았기 때문이다. 그러나 센서 간격의 영향이 더 크게 나타나,

1 mm의 영상에 비교해 균일하지 못한 영상으로 나타났다. 또한 각 슬릿이 서로 다른 크기를 보였다. 섬광체 두께에 따른 장단점이 존재하며, 좋은 분해능과 균일도 사이의 적합한 변수를 찾는 것이 중요하다. 그리고 검출기의 직선성과 균일도 보정을 수행함으로써 영상의 위치 정확도를 향상할 수 있을 것이다.

센서 간격 부분에 반사체를 위치시킴에 따라 영상의 왜곡을 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 빛 수집 효율을 향상해 에너지 분해능 및 영상의 질을 향상할 수 있을 것이다.

GATE 시뮬레이션을 통해 엑스선과 섬광체가 반응한 위치 정보를 획득할 수 있었고, 이 정보를 활용하여 DETECT2000 시뮬레이션의 인풋으로 사용하였다. 섬광체와 광학적으로 연결된 센서의 위치 및 크기, 특성에 따라 영상이 달라진다. GATE와 DETECT 2000 시뮬레이션의 조합을 통해 실험과 일치하는 시뮬레이션을 실시하여 정확하고 신뢰할 수 있는 데이터를 획득할 수 있었다.

V. CONCLUSION

다채널의 MPPC를 사용하여 포톤 카운팅이 가능한 검출기를 설계하였고, 특성을 평가하였다. 2 mm × 2 mm 크기의 센서를 사용하고, Anger 계산 방식을 적용하여 2 lp/mm 이상의 공간 분해능을 달성하였다. 이러한 영상 획득 방식을 적용함으로써, 센서의 크기 대비 높은 공간 분해능을 획득할 수 있었다. 일반촬영 영상에서 공간 분해능은 10 lp/mm로, 이에 비교해 낮은 공간 분해능을 보였으나, 더 작은 센서를 사용할 경우 근접한 공간 분해능을 획득할 수 있을 것이다. 본 검출기를 CT에 적용할 경우 적은 비용으로 기존 방식과 비슷한 공간 분해능을 보이면서 포톤 카운팅이 가능한 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 2018년도 강원대학교 대학회계 학술 연구조성비로 연구하였음

Reference

- [1] P. M. Shikhaliev, S. G. Fritz, J. W. Chapman, "Photon counting multienergy x-ray imaging: Effect of the characteristic x-rays on detector performance," *Medical Physics*, Vol. 36, No. 11, pp. 5107-5119, 2009.
- [2] H. Ding, M. J. Klopfer, J. L. Ducote, F. Masaki, S. Molloy, "Breast Tissue Characterization with Photon-counting Spectral CT Imaging: A Postmortem Breast Study," *Radiology*, Vol. 272, No. 3, pp. 731-738, 2014.
- [3] O. Hagiwara, M. Watanabe, E. Sato, H. Matsukiyo, A. Osawa, T. Enomoto, J. Nagao, S. Sato, A. Ogawa, J. Onagawa, "Energy-discrimination X-ray computed tomography system utilizing a silicon-PIN detector and its application to 2.0-keV-width k-edge imaging," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 638, No. 1, pp. 156-170, 2011.
- [4] Y. Arakawa, E. Sato, H. Kogita, T. Hamaya, S. Nihei, W. Numahata, S. Kami, Y. Oda, O. Hagiwara, H. Matsukiyo, A. Osawa, T. Enomoto, M. Watanabe, S. Kusachi, S. Sato, A. Ogawa, "Investigation of X-ray photon-counting using ceramic-substrate silicon diode and its application to gadolinium imaging," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 53, No. 7, pp. 72201, 2014.
- [5] E. A. Babichev, S. E. Baru, D. N. Grigoriev, V. P. Oleynikov, V. V. Porosev, G. A. Savinov, S. Callier, "SiPM based photon counting detector for scanning digital radiography," *Journal of Instrumentation*, Vol. 10, No. C03002, pp. 1-8, 2015.
- [6] M. Akiba, K. Inagaki, K. Tsujino, "Photon number resolving SiPM detector with 1 GHz count rate," *Optics Express*, Vol. 20, No. 3, pp. 2779-2788, 2012.
- [7] Y. Oda, E. Sato, A. Abudurexiti, O. Hagiwara, A. Osawa, H. Matsukiyo, T. Enomoto, M. Watanabe, S. Kusachi, S. Sugimura, H. Endo, S. Sato, A. Ogawa, J. Onagawa, "McpS-range photon counting X-ray computed tomography system utilizing an oscillating linear-YAP(Ce) photon detector," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 643, No. 1, pp. 69-74, 2011.
- [8] H. Sabet, G. Prekas, M. Breen, H. B. Bhandari, P. Nickerson, G. Dergerian, F. Robertson, H. Kudrolli, S. Cool, V. V. Nagarkar, "High-Performance and Cost-Effective Detector Using Microcolumnar CsI:Tl and SiPM," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 59, No. 5, pp. 1841-1849, 2012.
- [9] S. Jan, D. Benoit, E. Becheva, T. Carlier, F. Cassol, P. Descourt, T. Frisson, L. Grevillot, L. Guigues, L. Maigne, C. Morel, Y. Perrot, N. Rehfeld, D. Sarrut, D. R. Schaart, S. Stute, U. Pietrzyk, D. Visvikis, N. Zahra, I. Buvat, "GATE V6: a major enhancement of the GATE simulation platform enabling modelling of CT and Radiotherapy," *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 56, No. 4, pp. 881-901, 2011.
- [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] http://www.epic-crystal.com/shop_reviews/gagge-scintillator
- [12] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13361-2050_series_kapd1053e.pdf

배열형 실리콘광증배소자를 이용한 포톤 카운팅 검출기 설계를 위한 몬테칼로 시뮬레이션 연구

이승재,^{1,2} 백철하^{3,*}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구센터

³강원대학교 보건과학대학 방사선학과

요약

영상의 질 향상과 물질 분석 등을 위해 엑스선을 카운팅하여 검출하기 위한 연구가 활발하다. 본 연구에서는 MPPC 어레이를 사용하여 엑스선 포톤 카운팅을 위한 검출기를 설계하였고, 시뮬레이션을 통해 검출기 특성을 평가하였다. GATE를 사용하여 엑스선과 섬광체와 반응한 위치 정보를 획득하였고, 이 정보를 D ETECT2000의 빛 발생 위치로 사용하였다. 0.5 mm와 1 mm 두께의 GAGG 섬광체를 사용하였으며, 4 × 4 어레이의 MPPC를 통해 발생된 빛을 획득하였다. 각 채널별로 획득한 빛의 신호를 통해 영상을 재구성하여 설계한 검출기의 분해능을 확인하였다. 0.5 mm와 1 mm 두께의 GAGG 섬광체에서 모두 2 lp/mm 이상의 영상을 획득하였다. 본 검출기를 엑스선 시스템에 사용할 경우 포톤 카운팅이 가능한 저비용의 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

중심단어: 포톤 카운팅, 몬테 칼로 시뮬레이션, MPPC

연구자 정보 이력

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