

Characteristics Analysis of SiPM for Detection of High Sensitivity of Portable Detectors

Byung-Wuk Kang¹, Sun-Kook Yoo^{2,*}

¹Graduate School of Biomedical Engineering, Yonsei University

²Department of Medical Engineering, Yonsei University College of Medicine

Received: November 15, 2023. Revised: November 28, 2023. Accepted: November 30, 2023.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to analyze the characteristics of Silicon Photomultiplier (SiPM) for the realization of high-sensitivity radiation detection in portable detectors. Portable X-ray detectors offer the advantage of quickly accessing the patient's location and obtaining real-time images, allowing physicians to perform rapid diagnoses. However, this mobility comes with challenges in achieving accurate radiation detection. In existing detectors, SiPM is used for a simple purpose of detecting X-ray triggers. To verify the feasibility of high-sensitivity X-ray detection through SiPM, seven types of SiPM sensors were compared and selected, and their characteristics were analyzed. The SiPM used in the final test demonstrated the ability to distinguish signals at the ultra-low radiation level of 10 nGy, and it was observed that the slope of the signal rise curve varies with the X-ray tube voltage. Utilizing the characteristics of SiPM, which exhibits changes in signal level and duration with X-ray dose, it appears possible to achieve high-sensitivity measurements for X-ray detection.

Keyword: X-ray, SiPM, Portable Detector, High-sensitivity Radiation Detection

I. INTRODUCTION

휴대용 X-ray 검출기는 이동성 및 신속한 의료 영상을 제공하여 현대 의료 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 검출기에서 실시간 선량 감지는 진단의 정확성 및 환자 안전에 관련된 핵심적인 요소 중 하나이다.

휴대용 X-ray 검출기는 응급 상황이나 이동 중의 환자 진료에서 특히 중요하다. 환자의 위치에 빠르게 접근하여 실시간 이미지를 획득함으로써 환자의 상태를 파악하고 신속한 진단을 수행할 수 있게 하여 환자의 위험 요소를 제거하고 응급 처치가 가능하게 할 수 있다^[1]. 그러나 이동성은 선량 감지의 어려움을 동반한다. 일반적인 X-ray System에서는 최적화된 선량으로 질 높은 영상을 획득하기 위해

X-ray의 노출 제어를 위한 automatic exposure control(AEC) 장치를 사용하고 있다. AEC는 ion chamber를 이용하는 방법으로, 피사체를 투과한 방사선을 측정해 설정된 방사선량에 도달하면 노출을 중단시키는 장치이다^[2]. 하지만 AEC 장치는 휴대에 대한 문제점과 이에 사용되는 ion chamber는 크기로 인하여 휴대용 검출기에 내장이 어려운 한계가 있다. 그래서 대부분의 휴대용 검출기에서는 X-ray 조사 상태 검출을 위해 소형 크기인 Silicon Photomultiplier(SiPM) Sensor를 내장해 Automatic Exposure Detection(AED)이라는 기능을 구현해 사용 중이다^[3]. 이에 사용되는 SiPM은 실리콘 광증배소자로 단일 광자를 검출할 정도의 매우 높은 민감도와 고에너지 해상도를 제공하지만, 휴대용 검출기에서는 SiPM을 통해 X-ray Trigger를 판별하는 단순한 용도로 사용되고 있는 상황이다. 본 논문은

* Corresponding Author: Sun-Kook Yoo

E-mail: sunkyoo@yuhs.ac

Tel: +82-02-2228-1919

휴대용 X-ray 검출기에 내장이 가능한 소형 SiPM 센서를 이용한 고감도 선량 측정의 가능 여부에 초점을 맞춰 특성을 분석하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

휴대용 검출기의 내부 구조를 분석하여 시판되는 다수의 SiPM Sensor를 응답시간, 민감도, 외부 잡음 저항성을 비교 시험하여 SiPM의 특성을 분석해 SiPM을 통한 고감도 선량 검출 구현이 가능한지를 분석하고자 한다.

1. SiPM 구조 분석

SiPM은 Fig. 1과 같이 작은 크기인 다수의 포토다이오드로 이루어진 배열을 가지고 있으며, 이 포토다이오드는 각각 미세한 광자를 감지하는 역할을 한다. 모든 마이크로 셀이 병렬로 판독되기 때문에, 평방 밀리미터 면적의 장치에서 단일 광자에서 수천 광자까지의 동적 범위 내에서 신호를 생성할 수 있다^[4]. SiPM은 일반적으로 $10 \times 10 \text{ mm}$ 이하 크기로 작은 편이지만 섬광체를 결합할 수 있고 자기장에 둔감한 특성을 갖고 있다^[5].

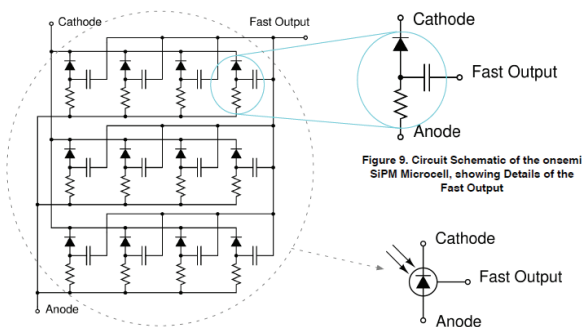


Fig. 1. Structure of SiPM Sensor.

2. FPD 내부 구조 분석

Flat Panel Detector(FPD)는 휴대용 검출기를 포함해 일반적인 내부 구조는 Fig. 2와 같다. 상단에 X-ray를 가시광선으로 변환시키는 섬광체, 빛을 전기 신호로 받아들이기 위한 TFT Panel로 구성된다^[6]. Panel 하단에는 Panel을 안정적으로 고정하기 위한 판재가 사용되는데 일반적으로 마그네슘, 알루미늄

등의 재질을 사용한다.

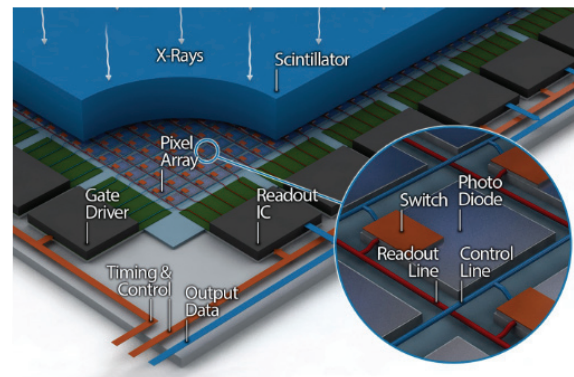


Fig. 2. Structure of FPD.

3. 실험 방법

3.1. SiPM 선정 시험

SiPM을 포함한 구조를 간단히 표현하면 Fig. 3-(a)와 같은 형태이다. 조사된 X-ray는 외부의 높은 X-ray 투과도와 강도를 가지고 있는 Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP)와 내부의 섬광체, TFT Panel, Middle Block을 통과하면서 선량이 감쇠한다^[7]. 즉, 내부의 Middle Block의 재질 혹은 형태에 따라서도 SiPM Sensor가 받는 선량 자체에도 차이가 발생한다. 이에 따라 Fig. 3-(b)와 같이 SiPM 상단 부분의 Middle Block 일부를 삭제한 시험도 병행했다. 또한 휴대용 검출기는 외부 충격이나 주변 기기에서 발생하는 자기장에 영향을 많이 받을 수 있는 환경임으로 충격 및 모터 구동을 통한 자기장 시험을 진행했다. 5개 제조사 7종의 센서를 선정해 Test를 진행했으며, 응답시간, 선량 감지 특성을 시험 비교하였다.

실험환경은 Fig. 4와 같다. 시험에 사용된 X-ray System은 SU-3000 모델로 Toshiba사의 E7252X Tube를 사용하고 있다. X-ray 선량 조건은 고감도 선량 검출 여부를 확인하기 위해 해당 System의 최소 조사 조건 및 Source to Detector Distance(SDD)를 150 cm로 설정하고 Al 21 mm filter를 추가하여 10 nGy 선량의 극저선량 환경에 대한 감지 여부와 출력되는 peak 전압을 확인하였다.

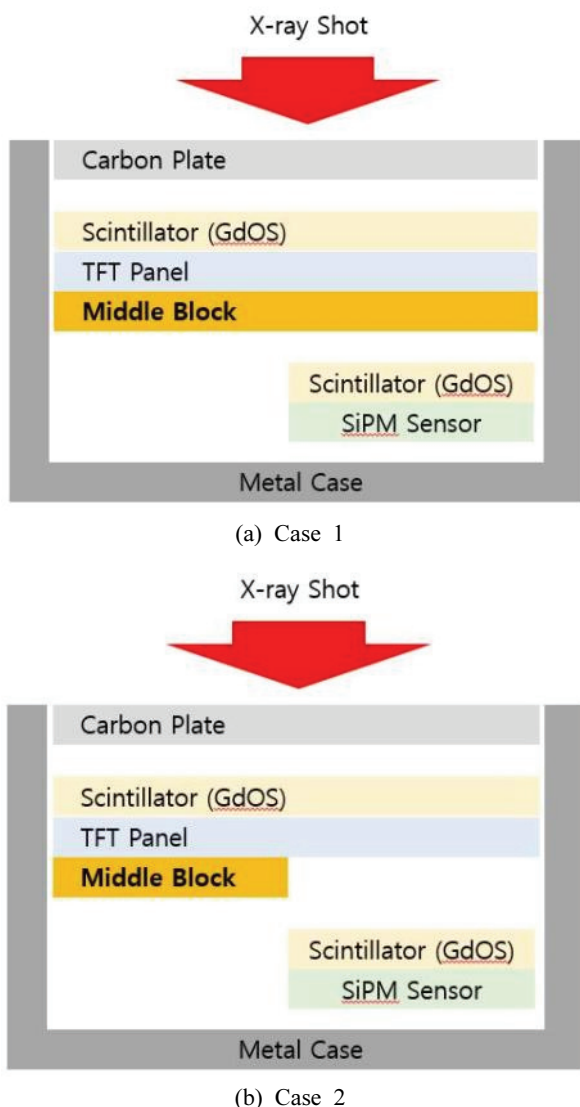


Fig. 3. Radiation Dosimetry Conditions for SiPM.

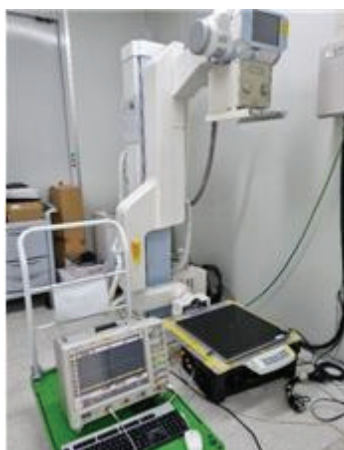


Fig. 4. Radiation Test Environment

III. RESULT AND DISCUSSION

Table 1은 각 Sensor의 특성을 시험한 것으로 모든 Sensor가 자기장과 외부 충격에는 SiPM 자체의 특성으로 인하여 반응하지 않아 주변 환경에 대한 높은 강건성을 보였다. 민감도 측정 부분에서는 Fig. 3-(a) 조건으로는 Middle Block에 의한 감쇠로 인해 모든 Sensor가 반응하지 않았다. SiPM 상단의 Middle Block을 삭제한 Fig. 3-(b)의 조건에서는 3 ~ 7번 Sensor가 반응을 보였고 응답시간은 모두 10 ns 이하로 측정되었다. 응답 시간은 X-ray 조사 후 Sensor의 반응 시간으로 해당 시간이 길어지는 만큼 TFT Panel로 받아들이는 선량의 손실이 발생함으로 빠를수록 좋다. 감광체는 X-ray를 가시광선으로 바꿔주기 때문에 성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 가시광선을 감지하는 1 ~ 5번과 X-ray 감지 전용으로 제작되어 감광체가 내장된 6 ~ 7번 Sensor와의 비교가 필요했다. 극저선량인 10 nGy 반응을 통해 실험에 사용된 Gadolinium Oxide (GaOS) 감광체와 6 ~ 7번 Sensor의 감광체는 유사한 성능으로 판단된다. 해당 시험 결과를 종합했을 때 10 nGy 선량에 대한 출력 Level 및 10 ns 이하의 빠른 반응속도를 보이는 C사의 4번 Sensor가 사용하고자 하는 성능에 가장 부합되는 것으로 확인되었다.

Table. 1. Analysis of SiPM Characteristics According to Sensor

구분	1	2	3	4	5	6	7
제조사	A	B	C	D	E		
Sensing Source	Light	Light	Light	Light	Light	X-ray	X-ray
Response Time	> 100 ms	> 100 ms	< 10 ns	< 10 ns	< 10 ns	< 10 ns	< 10 ns
Sensitivity V-p (조건1)	X	X	X	X	X	X	X
Sensitivity V-p (조건2)	X	X	40 mV	40 mV	150 mV	30 mV	30 mV
Mechanical Shock Resistor	O	O	O	O	O	O	O
Magnetic Field Resistor	O	O	O	O	O	O	O

7종의 센서 중 Table 1의 시험 결과를 바탕으로 고감도 선량 검출을 위한 1종을 선정해 X-ray 선량에 따른 Signal 특성을 측정하였다.

Fig. 5는 저선량 구간에서 출력되는 Signal로 확인 결과 (a) 10 nGy에서 약 410 mV, (b) 20 nGy에서 590 mV가 측정되어 전압 Level을 통한 구분 가능성이 확인하였다.

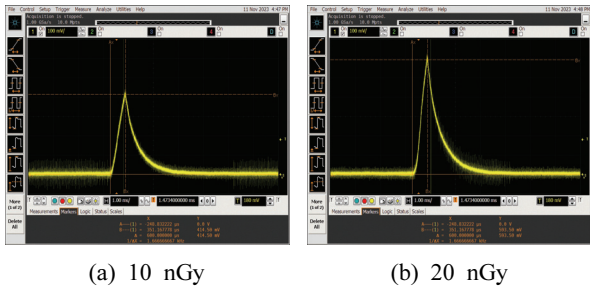


Fig. 5. Ultra-Low-Dose Detection Discrimination.

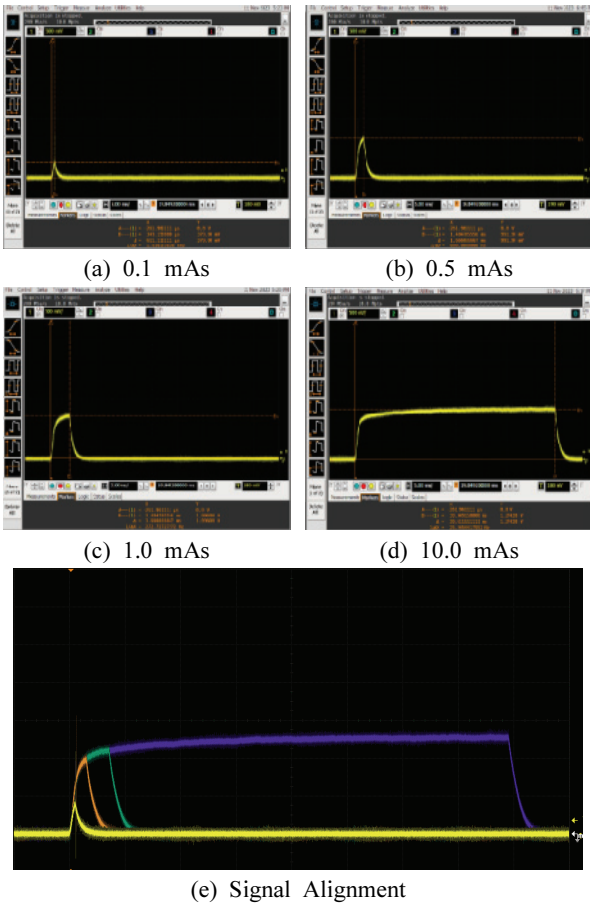


Fig. 6. Signal Changes with mAs.

관전압과 관전류, 시간의 변화를 SiPM을 통해 확인할 수 있으면 이를 통해 고감도 선량 측정이 가능하다. 즉, 선량의 주요 조건의 변화에 대한 따른

SiPM 출력 Signal에 대한 시험이 필요하다. 따라서 관전압과 관전류 각각에 대한 고정 시험을 통해 SiPM의 특성을 확인하였다.

Fig. 6의 (a) ~ (d)는 관전압을 40 kVp로 고정하고 관전류와 조사 시간을 0.1, 0.5, 1.0, 10.0 mAs로 변경하여 SiPM Signal을 측정된 결과이다. Fig. 6-(e)는 상기 4가지 파형을 정렬해 놓은 것으로 관전압이 같으면 상승하는 기울기가 동일하고 관전류와 X-ray 조사 시간 증가로 SiPM의 지속 출력되는 시간이 변한다는 것을 확인하였다.

동일 관전압에서는 SiPM 출력의 상승 기울기가 동일함이 확인되었기에 관전압 변화에 따른 Signal의 차이를 확인하기 위한 시험을 진행하였다.

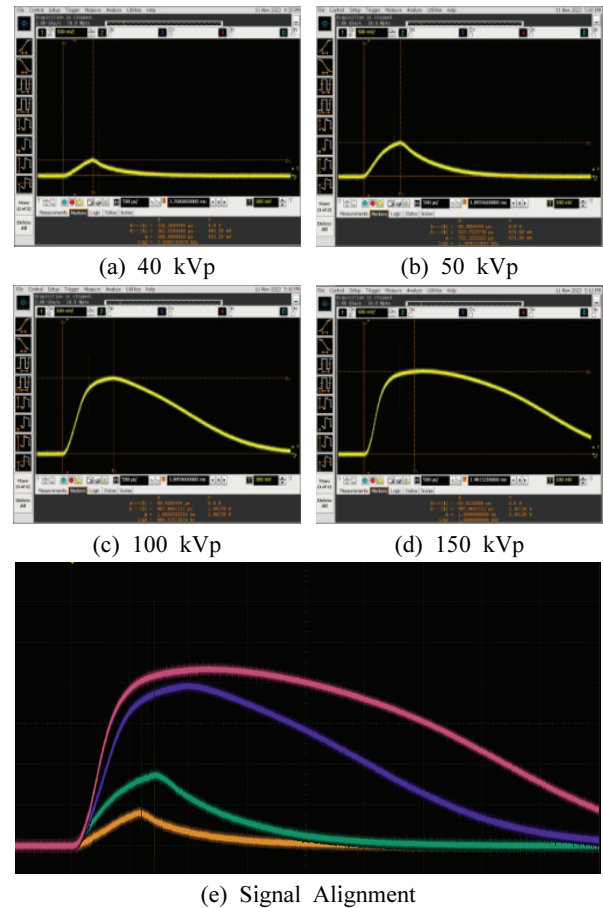


Fig. 7. Signal Changes with X-ray tube voltage.

Fig. 7의 (a) ~ (d)는 관전류와 X-ray 조사 시간을 0.1 mAs로 고정하고 관전류를 40, 50, 100, 150 kVp로 변경하여 SiPM Signal을 측정된 결과이다. Fig.

7-(E)은 상기 4가지 파형을 정렬해 놓은 것으로 관전압 변화에 따라 상승 기울기에 변화가 있음을 확인하였다. 0.1 mAs의 동일 관전압과 조사 시간을 설정했음에도 Signal 출력 시간의 차이가 발생하는 것은 감광체의 X-ray 반응에 따른 발광 강도 차이로 인해 의한 빛의 감쇠 지속시간에 의한 것이다.

IV. CONCLUSION

본 논문에서는 휴대용 X-ray 검출기에서 고감도 선량 측정의 가능 여부를 확인하기 위해 7종의 SiPM Sensor를 비교 선정하고 특성 분석을 진행하였다. 최종 시험에 사용한 SiPM은 10 nS 미만의 빠른 응답 속도를 보이며 초저선량인 10 ~ 20 nGy에서의 Signal 구분이 가능한 수준의 전압 차가 보임을 확인하였다. 다만 Panel과 SiPM 사이에 Middle Block과 같은 금속 물체로 인해 선량 감쇠가 생기는 경우 초저선량은 감지가 되지 않음으로 이를 주의해야 해야 한다. 동일 관전압에서는 상승하는 기울기가 동일하고 관전류와 X-ray 조사 시간 증가에 따라 SiPM의 지속 출력되는 시간이 변한다는 것을 확인하였다. 또한 관전압 변화에 따른 SiPM 출력을 확인한결과 관전압 변화에 따라 상승곡선의 기울기가 변하는 것이 확인되었기에 향후 과제로 SiPM의 Signal level과 지속시간에 따른 선량 산출하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

Reference

[1] D. H. Cho, "An Implementation of Portable X-ray Unit Suitable for Remote Emergency Medical System", Hoseo Graduate School of Venture, doctor of Medical and Biological Engineering, 2008.

[2] M. Y. Lee, S. B. Chun, D. Y. Park, B. J. Hwang Y. C. Joo, M. S. Ahn, "Evaluation of dose and image given air gap in chest X-ray using automatic exposure control", KCR 2017 (Korean Congress of Radiology), Vol. 14, No. 8, pp. 109-115, 2017.

[3] K. S. Karim, S. T. Ii, "Portable Single-Exposure Dual-Energy X-ray Detector for Improved Point-of-Care Diagnostic Imaging", Military Medicine, Vol. 188, No. 8, pp. 84-91, 2023.
<https://doi.org/10.1093/milmed/usad034>

[4] R. G. Fardipour, M. J. gol, M. Sahraei, M. Khakzad, "SiPM and PMT Driving, Signals Count and Peak Detection Circuits, suitable for Particle Detection", Journal of Instrumentation, Vol. 17, No. 23, pp. 9011, 2022.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/09/t09011>

[5] D. Grzonka, P. Bergmann, T. Hahnraaths von der Gracht, P. Kulesa, W. Parol, T. Sefzick, J. Ritman, M. Zielinski, "A large area efficient trigger scintillator with SiPM read out", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 1041, No. 6, pp. 16741, 2022.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2022.167410>

[6] Everything You Need to Know about Flat Panel Detector, Wellman S-ray Solution, From URL;
<https://wellmanxray.com/blog/everything-you-need-to-know-about-flat-panel-detector/>

[7] J. H. Moon, B. Y. Koo, "Usefulness of Carbon Fiber Reinforced Plastics as a Material of Auxiliary Tool for X-ray Imaging", Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 46, No. 9, pp. 197-205, 2023.
<https://doi.org/10.17946/JRST.2023.46.3.197>

휴대용 검출기의 방사선 고감도 검출을 위한 SiPM 특성 분석

강병욱¹, 유선국^{2,*}

¹연세대학교 대학원 생체공학협동과정

²연세대학교 의학공학교실

요 약

본 논문에서는 휴대용 X-ray 검출기의 방사선 고감도 검출에 대한 실현 가능 여부를 확인하기 위한 SiPM의 특성 분석을 목적으로 한다. 휴대용 X-ray 검출기는 환자의 위치에 빠르게 접근하여 실시간 이미지를 획득함으로써 의사들은 신속하게 진단을 수행할 수 있는 장점이 있지만 이러한 이동성은 선량 감지의 어려움을 동반한다. 기존 검출기에서는 SiPM을 X-ray Trigger를 판별하는 단순한 용도로 사용하고 있다. SiPM을 통한 X-ray의 고감도 검출 가능 여부를 확인하기 위해 7종의 SiPM Sensor를 비교 선정하고 특성 분석을 진행하였다. 최종 시험에 사용한 SiPM은 10 nGy 수준의 극저선량 조사 조건에서 Signal 구분이 가능하며, 관전압에 따라 Signal 상승곡선의 기울기가 변하는 것이 확인되었다. X-ray 선량에 따라 SiPM의 signal level 및 지속시간이 변화되는 특성을 이용한 고감도 측정이 가능할 것으로 보인다.

중심단어: X-ray 방사선, 실리콘 광증배소자, 휴대용 X-ray 검출기, 방사선 고감도 검출

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	강병욱	연세대학교 대학원 생체공학협동과정	대학원생
(교신저자)	유선국	연세대학교 의학공학교실	교수