

고감도 보급형 방사선 측정센서 모듈 개발

Development of High-Sensitivity and Entry-Level Radiation Measuring Sensor Module

오 승 진*, 이 주 현**, 이 승 호*★

Seung-Jin Oh*, Joo-Hyun Lee**, Seung-Ho Lee*★

Abstract

In this paper, we propose the development of high-sensitivity low-end radiation measuring sensor module. The proposed measurement sensor module is a scintillator + photomultiplier(SiPM) sensor optimization structure design, amplification and filter and control circuit design for sensor driver, control circuit design including short-distance communication, sensor mechanism design and manufacturing, and GUI development applied to prototypes consists of, etc. The scintillator + photomultiplier(SiPM) sensor optimization structure design is designed by checking the characteristics of the scintillator and the photomultiplier (SiPM) for the sensor structure design. Amplification, filter and control circuit design for sensor driver is designed to process fine scintillation signal generated by radiation with a scintillator using SiPM. Control circuit design including short-distance communication is designed to enable data transmission through MCU design to support short-range wireless communication function and wired communication support. The sensor mechanism design and manufacture is designed so that the glare generated by wrapping a reflective paper (mirroring) on the outside of the plastic scintillator is reflected to increase the efficiency in order to transmit the fine scintillation signal generated from the plastic scintillator to the photomultiplier(SiPM). The GUI development applied to the prototype expresses the date and time at the top according to each screen and allows the measurement unit and time, seconds, alarm level, communication status, battery capacity, etc. to be expressed. In order to evaluate the performance of the proposed system, the results of experiments conducted by an authorized testing institute showed that the radiation dose measurement range was $30 \mu\text{Sv/h} \sim 10 \text{mSv/h}$, so the results are the same as the highest level among products sold commercially at domestic and foreign. In addition, it was confirmed that the measurement uncertainty of $\pm 7.4\%$ was measured, and normal operation was performed under the international standard $\pm 15\%$.

요 약

본 논문에서는 고감도 보급형 방사선 측정센서 모듈 개발을 제안한다. 제안하는 측정센서 모듈은 섬광체+광증배소자(SiPM) 센서 최적화 구조 설계, 센서 드라이버용 증폭과 필터 및 제어회로 설계, 근거리 통신을 포함한 제어회로 설계, 센서 기구설계 및 제작, 시제품에 적용되는 GUI 개발 등으로 구성된다. 섬광체+광증배소자(SiPM) 센서 최적화 구조 설계는 센서 구조 설계를 위한 섬광체와 광증배소자(SiPM)의 특성을 확인하여 설계한다. 센서 드라이버용 증폭과 필터 및 제어회로 설계는 SiPM을 이용하여 섬광체로 방사선에 의해 발생하는 미세 섬광신호를 처리하도록 설계한다. 근거리 통신을 포함한 제어회로 설계는 근거리 무선통신 기능을 지원하기 위한 MCU 설계 및 유선 통신 지원을 통해 데이터 전송이 가능하도록 설계를 수행한다. 센서 기구설계 및 제작은 플라스틱 섬광체에서 발생한 미세 섬광 신호를 광증배소자(SiPM)에 전달하기 위해 플라스틱 섬광체 외부에 반사지(미러링)를 감싸 발생한 섬광이 반사되어 효율을 높이도록 설계한다. 시제품에 적용되는 GUI 개발은 각 화면에 따라 상단에 날짜와 시간을 표현하며, 측정단위 및 시간, 초, 알람 레벨, 통신상태, 배터리 용량 등이 표현되도록 한다. 제안된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 공인시험기관에서 실험한 결과는 방사선량 측정 범위가 $30\mu\text{Sv/h} \sim 10\text{mSv/h}$ 로 측정되어서, 현재 국내외에서 상용으로 판매되는 제품들 중에서 최고 수준 범위와 같은 결과가 산출되었다. 또한, $\pm 7.4\%$ 의 측정 불확도가 측정되어서 국제 표준인 $\pm 15\%$ 이하에서 정상동작 됨이 확인되었다.

Key words : Radiation Measure, Scintillator, SiPM, Control Circuit Design, Sensor Mechanism Design, GUI

* Dept. Electronic Engineering, Hanbat National University

** M1 INTERNATIONAL INC.

★ Corresponding author

E-mail : shlee@cad.hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1137

Manuscript received Sep. 1, 2022, revised Sep. 16, 2022, accepted Sep. 19, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

현재 한반도 주변에 가동 중이거나 건설 중인 원자력 발전소로 인해 많은 국민들이 먹거리 및 생활환경에 대한 방사능 오염[1]을 우려하고 있다. 그러나 방사능 계측은 대부분 원자력 관련 전문기관에서만 수행되고 있는 실정이다. 국민들을 방사선(방사능 오염 포함)으로부터 안전을 확보하기 위해서는 생활권역에서 사용할 수 있는 고민감도의 휴대용 방사선 측정기가 필요하다. 국내에서 유통되는 대부분의 방사선 측정기는 해외에서 수입되는 고가의 제품이라 사회 전반에 보편적으로 적용되는데 제약이 있다. 따라서, 본 과제에서는 저렴한 가격과 더불어 높은 민감도의 기능을 갖는 고감도 보급형 방사선 측정 센서 모듈 개발을 제안한다. 본 논문에서 개발된 고감도 보급형 방사선 측정 센서 모듈은 해외의 고가 수입품에 의존하고 있는 방사선 측정센서를 플라스틱 섬광체와 SiPM을 이용한 국산화를 통하여 기술 확보를 할 수 있다. 플라스틱 섬광체는 주로 대면적의 방사선 검출기에 주로 활용되어 왔으나, 형태 가공 기술 확보를 통해 소형의 방사선 측정센서로 활용할 수 있는 원천기술을 확보할 수 있게 된다. 또한, 발전소 및 연구소 등의 원자력, 방사선 관련 작업자의 방사선 피폭관리[2]에 활용할 수 있게 된다.

II. 본론

1. 섬광체+광증배소자(SiPM) 센서 최적화 구조 설계

1.1 센서 구조 설계를 위한 섬광체 설계

그림 1의 섬광체는 유기물인 PVT 섬광체를 사용하여 방사선이 투과되면 섬광체 내에 미세하게 발생한 섬광을 측정하는 방식으로 가공 및 폴리싱을 수행하여 제작한다. 또한, 플라스틱 섬광체는 방사선과 반응하여 미세한 빛을 내고 이를 확인하는 방식으로 섬광체 내에 빛이 들

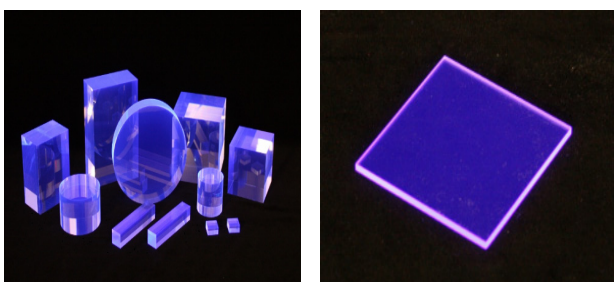


Fig. 1. Scintillator for the Design of Sensor Structure. 그림 1. 센서 구조 설계를 위한 섬광체

어가게 되면 방사선과 반응한 빛과 구분할 수 없어 검정색 에폭시를 사용하여 차광 및 차폐설계를 한다.

1.2 센서 구조 설계를 위한 광증배소자(SiPM) 설계

그림 2의 SiPM은 마이크로셀이라는 작은 사이즈의 소자들이 병렬의 매트릭스로 구성되어 역방향의 항복전압을 넘어 동작하는 가이거 모드 아발란치 다이오드와 비슷한 원리로 동작하는 소자이다. 광소자 하나당 100만배 정도의 전자들로 신호가 증폭되며, 가로세로 1mm의 크기에 1,600개의 작고 독립적인 다이오드가 구성되어 반응신호가 합쳐져 출력된다.

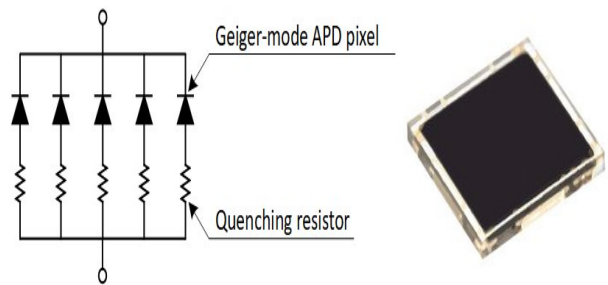


Fig. 2. SiPM for the Design of Sensor Structure.

그림 2. 센서 구조 설계를 위한 광증배소자

1.3 섬광체 + SiPM의 블록도 및 구조도 설계

본 논문에서 제안하는 섬광체+광증배소자(SiPM)[3] 센서 구조는 섬광체와 광증배소자의 결합을 통해 초소형

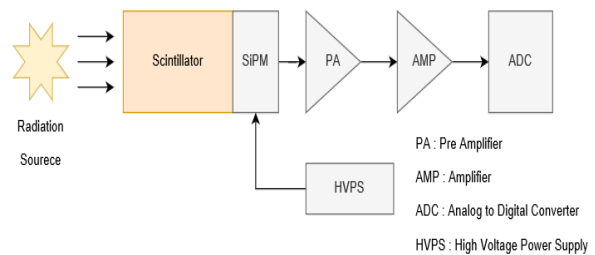


Fig. 3. Block Diagram of Scintillator + SiPM.

그림 3. 섬광체 + SiPM의 블록도

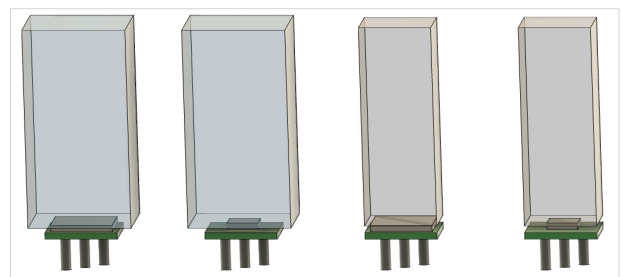


Fig. 4. Structural Diagram of Scintillator + SiPM.

그림 4. 섬광체 + SiPM 구조도

모듈의 구성이 가능하도록 인가전압의 전원 노이즈 필터 회로를 포함한 SiPM 모듈을 구성한다. SiPM은 생산 단가 및 소형화를 위해 1×1mm, 3×3mm의 활성 영역을 갖는 모듈 사용이 가능하도록 설계한다. 섬광체+SiPM의 블록도는 그림 3, 섬광체+SiPM의 구조도는 그림 4와 같다.

2. 센서 드라이버용 증폭과 필터 및 제어회로 설계

SiPM에 사용되는 고전압은 배터리로부터 스위칭을 이용한 승압회로를 통해 만들어지기 때문에 높은 주파수의 잡음을 많이 포함하고 있어, 이러한 잡음 성분을 SiPM에 전달되기 이전에 제어하는 필터 회로 구성이 필요하다. 그림 5의 센서 드라이버용 증폭[4] 회로와 그림 6의 필터 및 제어회로는 SiPM을 이용하여 섬광체로 방사선에 의해 발생하는 미세 섬광신호를 처리하도록 설계한다.

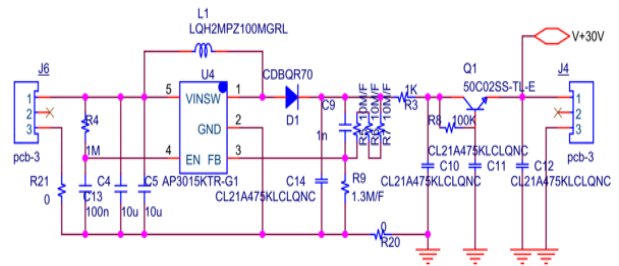


Fig. 5. Photomultiplier (SiPM) Driver Circuit Design.
그림 5. 광증배소자(SiPM) 드라이버 회로 설계

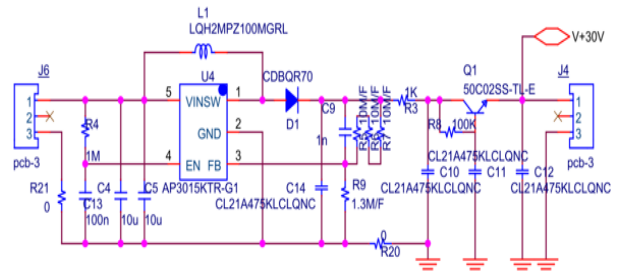


Fig. 6. Filter Circuit Design for Boosting and Noise removal.
그림 6. 승압 및 잡음 제거용 필터회로 설계

3. 근거리 통신을 포함한 제어회로 설계

근거리 무선통신 기능이 가능하도록 설계하고 임피던스 매칭 회로와 안테나를 추가하여 그림 7과 같이 MCU 회로를 설계한다.

4. 센서 기구설계 및 제작

4.1. 센서 기구설계

플라스틱 섬광체는 방사선이 섬광체를 투과하면서 발생하는 미세 섬광신호를 통해 방사선을 측정하는 방식으

로, 플라스틱 섬광체를 방사선 센서로 구성하기 위해 두 가지 조건을 반영하여 설계한다. 첫 번째, 플라스틱 섬광체에서 발생한 섬광 신호를 SiPM 외부에 반사지(미러링)를 감싸서 발생한 섬광이 반사되어 효율을 높이는 설계가 필요하다. 두 번째, 발생하는 미세 섬광신호를 SiPM 까지 전달되도록 구성되어야 한다. 따라서 그림 8과 같이 센서기구를 설계한다.

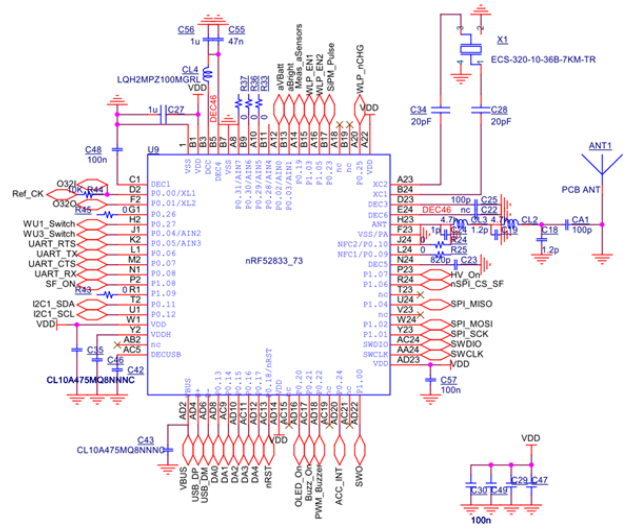


Fig. 7. MCU Circuit Design.
그림 7. MCU 회로 설계

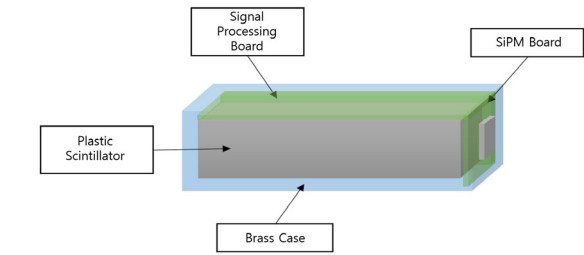


Fig. 8. A Schematic of Sensor Mechanism Design.
그림 8. 센서 기구 설계

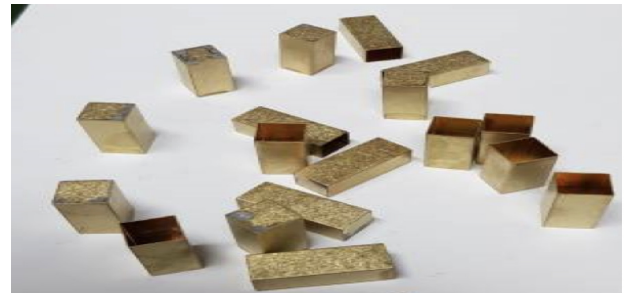


Fig. 9. Brass Case used as Outer Shape of Sensor Mechanism.
그림 9. 센서 기구의 외형으로 사용된 황동 케이스

또한, 입사되는 방사선의 차폐율[5] 및 외부 노이즈, 내부 섬광체의 압박 등을 고려하여, 센서 기구 외형을 그림 9와 같이 캔 형태의 황동 재질로 구성한다.

4.2. 센서 기구 제작

센서 기구는 충전형 리튬이온 배터리를 적용하여 케이스의 설계, 휴대용 방사선 측정장치의 기구 내구성, 사용 기간 등에 편리하도록 그림 10과 같이 제작하였다. 또한, 충전 포트는 USB-C Type을 적용하여 제작한다.

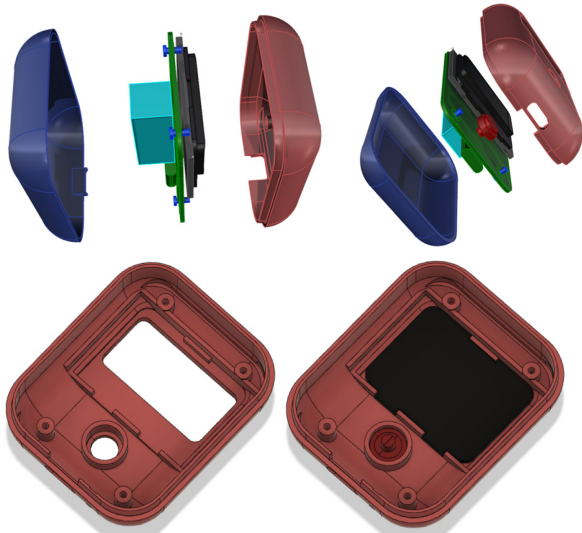


Fig. 10. Assembly Diagram of Manufactured Sensor Mechanism.

그림 10. 제작된 센서 기구의 조립도

5. 시제품에 적용되는 GUI 개발

시제품에 적용되는 GUI는 공간선량, 누적선량, 시계 등의 화면구성으로 개발한다. 화면의 구성은 각 화면에 따라 상단에 날짜와 시간을 표현하며, 측정단위 및 시간, 초, 알람 레벨, 통신상태, 배터리 용량 등이 표현되도록 그림 11과 같이 구성한다. 또한, USB-C Type 충전 포트를 이용한 리튬이온 배터리 충전 진행 시 GUI 화면 상단의 배터리 표시 아이콘의 충전용량 변경으로 충전여부를 확인하도록 설계한다. 그림 12는 시제품에 적용된 GUI를 나타낸다.

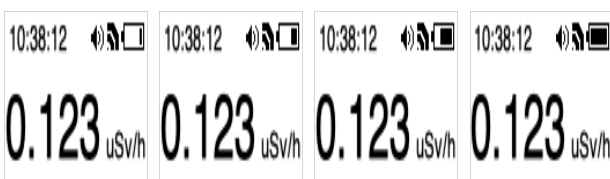


Fig. 11. GUI Configuration Screen.

그림 11. GUI 구성 화면



Fig. 12. GUI Applied to the Prototype.

그림 12. 시제품에 적용된 GUI

6. 성능 실험

6.1. 실험 방법

본 논문에서 제안한 고감도 보급형 방사선 측정센서 모듈의 성능을 평가하기 위하여, KOLAS 인증기관의 방사선측정 성능평가 절차(감마 서베이미터)에 따라 3 range (~100 μ Sv/h, ~1mSv/h, ~10mSv/h) 기준으로 측정범위 및 측정 불확도 테스트를 수행하였다. 각 range 마다 3개의 평균 구간을 10회 반복 측정하여 정확도를 평가하였으며, 각 측정 구간마다 방사선 측정이 안정될 수 있도록 약 5분 가량의 측정시간을 두어 반복 측정하였다.

6.2 실험 결과

실험 결과는 표 1과 같이 방사선량 측정 범위가 30 μ Sv/h~10mSv/h로 측정되어서, 현재 국내외에서 상용으

Table 1. Experimental Results on Radiation Dose Measurement Range And Measurement Uncertainty Rate

표 1. 방사선량 측정범위 및 측정 불확도에 대한 실험 결과

Source	Measuring range	Reference dose rate (μ Sv/h)	Measured Value (μ Sv/h)	Measurement uncertainty rate(%)	
Cs-137	~100 μ Sv/h	30	30.4	7.4	
		50	51.1		
		70	71.6		
	Measuring range	Reference dose rate (μ Sv/h)	Measured Value (μ Sv/h)	Measurement uncertainty rate(%)	
		~1,000 μ Sv/h	300	307.5	7.4
			500	511.5	
	700		716.4		
	Measuring range	Reference dose rate (mSv/h)	Measured Value (mSv/h)	Measurement uncertainty rate(%)	
		~10 mSv/h	3	3.1	5.8
			5	5.1	
	7		7.2		

로 판매되는 제품들 중에서 최고 수준 범위와 같은 결과가 산출되었다. 또한, $\pm 7.4\%$ 의 측정 불확도가 측정되어서 국제 표준인 $\pm 15\%$ 이하에서 정상동작 됨이 확인되었다.

III. 결론

본 논문에서는 고감도 보급형 방사선 측정센서 모듈 개발을 제안하였다. 제안하는 측정센서 모듈은 섬광체+광증배소자(SiPM) 센서 최적화 구조 설계, 센서 드라이버용 증폭과 필터 및 제어회로 설계, 근거리 통신을 포함한 제어회로 설계, 센서 기구설계 및 제작, 시제품에 적용되는 GUI 개발 등으로 구성되었다. 실험 결과, 방사선량 측정 범위가 $30\mu\text{Sv/h} \sim 10\text{mSv/h}$ 로 측정되고, $\pm 7.4\%$ 의 측정 불확도가 측정되어서 국제 표준인 $\pm 15\%$ 이하에서 정상동작 됨이 확인되었다. 따라서 기존 센서에 비해 낮은 가격으로 상용 판매 제품 중 최고 수준과 같은 성능을 나타낸다. 제안된 측정센서 모듈은 저렴한 가격과 더불어 높은 민감도를 가진 방사능 측정 센서 기술 및 모니터링할 수 있는 장비로서, 개인 및 국가 차원의 방사선 안전확보를 위해 기여할 수 있다. 향후 연구과제로는 방사선량의 측정범위를 더욱 늘림과 동시에 측정 불확도를 더욱 낮추는 방법에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] Hee Geun Kim, Taeyoung Gong, "A Study on the Verification and Improvement to Locate and Determine the Radioactive Contamination Using a Whole Body Counter," *Journal of Radiation Protection and Research*, vol.34, no.1, pp.37-42, 2009.
- [2] Schaart, D. R., van Dam, H. T., Seifert, S., Vinke, R., Dendooven, P., Löhner, H., & Beekman, F. J. A novel, "SiPM-array-based, monolithic scintillator detector for PET," *Physics in Medicine & Biology*, Vol.54, No.11, pp.3501, 2009.
DOI: 10.1088/0031-9155/54/11/015
- [3] Di Francesco, A., Bugalho, R., Oliveira, L., Pacher, L., Rivetti, A., Rolo, M., ... & Varela, J. "TOFPET2: a high-performance ASIC for time and amplitude measurements of SiPM signals in time-of-flight applications," *Journal of Instrumentation*,

Vol.11, No.03, pp.C03042, 2016.

DOI: 10.1088/1748-0221/11/03/C03042

[4] Thibeault, S. A., Kang, J. H., Sauti, G., Park, C., Fay, C. C., & King, G. C ".Nanomaterials for radiation shielding," *MRS Bulletin*, Vol.40, No.10, 836-841, 2015. DOI: 10.1557/mrs.2015.225

[5] Ko, T. Y., Lee, J. H., & Lee, S. H. "Development of Neutron, Gamma ray, X-ray Radiation Measurement and Integrated Control System," *Journal of IKEEE*, 21(4), 408-411, 2017.

DOI: 10.7471/ikeee.2017.21.4.408