

고감도 보급형 핵종 분석 모듈 개발

Development of High-Sensitivity and Entry-Level Nuclide Analysis 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 a high-sensitivity entry-level nuclide analysis module. The proposed measurement sensor module consists of an electronic driving circuit for nuclide analysis resolution, prototype production with nuclide analysis function, and GUI development applied to prototypes. The electronic part driving circuit for nuclide analysis resolution is divided into nuclide analysis resolution process by the electronic part driving circuit block diagram, MCU circuit design used for radiation measurement, and PC program design for Spectrum acquisition. Prototyping with nuclide analysis function is made by adding a 128×128 pixel OLED display, three buttons for operation, a Li-ion battery, and a USB-C type port for charging the battery. The GUI development department applied to the prototype develops the screen composition such as the current time, elapsed measurement time, total count, and nuclide Spectrum. To evaluate the performance of the proposed measurement sensor module, an expert witness test was conducted. As a result of the test, it was confirmed that the calculated result by applying the resolution formula to the Spectrum (FWHM@662keV) obtained using the Cs-137 standard source in the nuclide analysis device had a resolution of 17.77%. Therefore, it was confirmed that the nuclide analysis resolution method proposed in this paper produces improved performance while being cheaper than the existing commercial nuclide analysis module.

요 약

본 논문에서는 고감도 보급형 핵종 분석 모듈 개발을 제안한다. 제안하는 측정센서 모듈은 핵종 분석 분해능을 위한 전자부 구동 회로, 핵종 분석 기능이 적용된 시제품 제작, 시제품에 적용되는 GUI 개발 등으로 구성된다. 핵종 분석 분해능을 위한 전자부 구동 회로는 전자부 구동 회로 블록도에 의한 핵종 분석 분해능 과정, 방사선 측정에 사용되는 MCU 회로 설계, Spectrum 취득용 PC 프로그램 설계 등으로 나뉘어진다. 핵종 분석 기능이 적용된 시제품 제작은 128x128 픽셀의 OLED display, 조작을 위한 3개의 버튼, Li-ion 배터리, 배터리 충전을 위한 USB-C Type 포트의 구성을 추가하여 제작한다. 시제품에 적용되는 GUI 개발부는 현재 시간, 측정 경과 시간, 토탈 카운트, 핵종 Spectrum 등의 화면구성으로 개발한다. 제안된 측정센서 모듈의 성능을 평가하기 위하여 공인기관 전문가 입회시험을 시행한 결과, 핵종 분석 장치에 Cs-137 표준선원을 이용하여 취득한 Spectrum(FWHM@662keV)으로 분해능 공식을 적용하여 계산한 결과가 17.77%의 분해능을 가짐이 확인되었다. 따라서, 제안된 본 논문에서 제안한 핵종 분석 분해능 방법이 기존의 상용의 핵종 분석 모듈보다 저렴하면서도 향상된 성능이 산출됨이 확인되었다.

Key words : Resolution of Nuclide Analysis, Gamma-Ray, Energy Spectrum, MCU Circuit 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. 19, 2022, accepted Sep. 20, 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

방사능 물질은 무색무취로 파괴적인 에너지를 갖고 있으며, 통상적인 위험 관리 방식으로는 예측과 통제가 매우 어려운 현실이다. 이에 따라, 환경방사능 감시대상으로써 알파, 베타 방출 핵종을 신속, 정확히 분석하려는 연구는 수십 년에 걸쳐서 계속되어 왔다. 현재 생활권에서 사용되기 위해 개발된 측정 장치들은 소형화를 위해 상대적으로 감도가 좋지 않은 GM Tube(Geiger-Müller tube) 센서를 적용하여 보급하고 있다. GM Tube는 가이거 계수기의 검출기로서, 이온 방사에서 나오는 원소를 검출하지만 밀봉된 센서에 가스를 충전하는 방식으로 가격이 높으며, 핵종에 관한 정보를 확인하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 저렴한 섬광체와 SiPM(Silicon Photomultiplier)의 결합으로 구성된 핵종 분석 측정센서 모듈의 개발을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 핵종 분석 측정센서 모듈은 수명이 길어 짧은 주기로 교체해야 하는 GM Tube[1] 핵종 분석 측정센서 모듈을 대체할 수 있다. 또한, 저렴한 가격으로 생산이 가능하기 때문에 고가의 핵종 분석 장비인 MCA(Multi Channel Analyzer) Module을 수입 대체할 수 있다.

II. 본론

1. 핵종 분석

1.1 핵종 분석의 정의

방사성 물질은 핵종[2]마다 고유의 에너지를 내며 이를 이용하여 입사되는 방사선의 에너지를 측정, Spectrum을 취득하여 방사성 물질의 종류를 판단할 수 있다. 대표적인 핵종별 에너지 Spectrum은 그림 1과 같다.

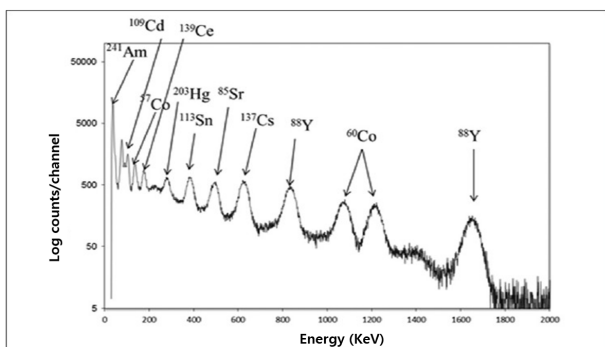


Fig. 1. Energy Spectrum for each representative nuclide.
그림 1. 대표적인 핵종별 에너지 Spectrum

1.2. 감마선 에너지 Spectrum의 측정 방법

감마선 에너지 Spectrum[3] 측정은 주로 NaI(Tl) 섬광 검출기[4] 및 HPGe 반도체 검출기를 이용하여 Spectrum을 측정하고 핵종 분석을 진행한다. 감마선의 에너지 측정에는 파고 분석법이 주로 사용된다. 파고 분석법을 사용할 경우에 감마선의 에너지는 선 Spectrum을 가지고 있다. 그러나, 단일 에너지의 하전입자와는 달리 검출기에 입사한 감마선의 에너지는 광전효과, 콤프턴 효과, 전자쌍생성 중의 어느 한 과정에 의하여 전자의 운동에너지로 변환되고 그 전자에 의해서 검출기가 반응하게 되어 그림 2와 같이 에너지 Spectrum을 나타낸다.

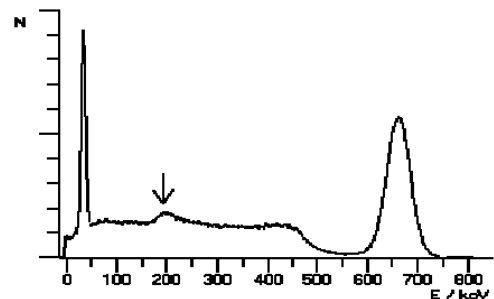


Fig. 2. Cs-137 Energy Spectrum.
그림 2. Cs-137 에너지 Spectrum

1.3. 핵종 분석 평가를 위한 에너지 분해능

에너지 분해능은 해당 시스템의 충격이 본래 방사선 에너지를 얼마나 정확히 표현하는가를 나타내는 척도이며, 감응 함수가 표현하는 출력 Spectrum $N(S)$ 피크의 폭이 얼마나 좁은가를 의미한다. 또한, 분해능의 수치가 낮을수록 좋은 에너지 분해능을 가지기 때문에 핵종 분석 능력이 향상된다. 핵종 분석의 성능평가를 위하여 Spectrum을 취득한 후에, 반치폭(FWHM)과 핵종 에너지(E_0)를 계산하여 분해능을 확인할 수 있다. 식 1은 분해능을 계산하는 식이며, 그림 3과 같이 Cs-137 Spectrum을 이용한 분해능을 확인할 수 있다.

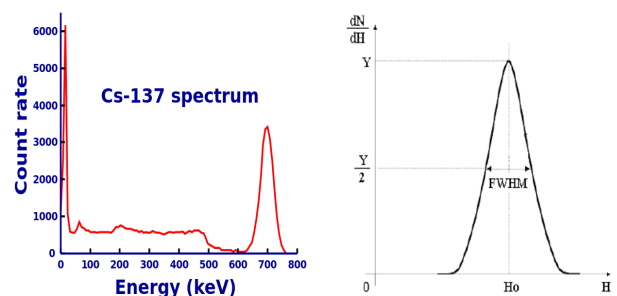


Fig. 3. Resolution Confirmation Using Cs-137 Spectrum.
그림 3. Cs-137 Spectrum을 이용한 분해능 확인

$$R = \frac{FWHM}{E_0} \times 100\% = \text{분해능}(\%) \quad (1)$$

2. 핵종 분석 분해능을 위한 전자부 구동회로

2.1 전자부 구동 회로 블록도

그림 4의 전자부 구동 회로 블록도에 의한 핵종 분석 분해능 과정은 다음과 같다.

첫 번째로, 섬광체+광증배소자(SiPM)에서 발생한 섬광을 입력받아 MCU 내의 A/D를 통하여 디지털 데이터로 변환된다. 두 번째로, 변환된 데이터는 신호강도에 따라 MCU의 펌웨어에서 0에서 255까지 분류하여 Spectrum으로 저장한다. 세 번째로, MCU에서 분류된 Spectrum은 유선(UART)으로 Spectrum 취득용 PC 프로그램으로 전달되어 GUI로 표현된다. 네 번째로, Spectrum 취득 화면에서 분해능 채널, 반치폭 등을 계산하여 확인하고 식 1을 사용하여 핵종 분석 분해능을 계산하게 된다.

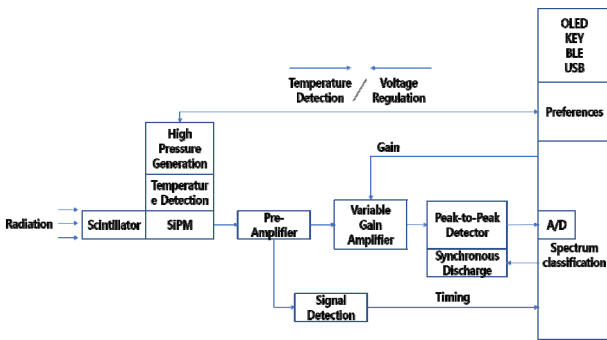


Fig. 4. Block Diagram of Electronic Driving Circuit for Nuclide Analysis Resolution.

그림 4. 핵종 분석 분해능을 위한 전자부 구동회로의 블록도

2.2. 방사선 측정에 사용되는 MCU 회로 설계

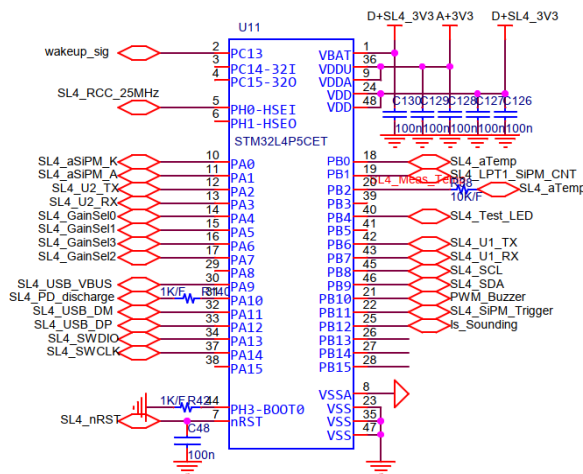


Fig. 5. MCU Circuit Design Used for Radiation Measurement.

그림 5. 방사선 측정에 사용되는 MCU 회로 설계

MCU 회로[5]는 Cortex-M4 코어를 사용하여 신호 검출부의 출력 시점으로부터 침두치 검출기가 동작할 시간 후에 8bit A/D 변환을 진행한다. A/D 변환된 데이터는 Spectrum으로 저장되며, 통신부의 요구가 있을 때 취합한 데이터를 전송하도록 그림 5와 같이 설계한다.

2.3. Spectrum 취득용 PC 프로그램 설계

본 논문에서 개발하는 휴대용 핵종 분석 장치는 휴대용의 크기로 설계되어 Spectrum을 취득하는 화면이 128x128 픽셀이 적용되어 있다. 그러나 핵종 분석을 위한 Spectrum 취득 시 128채널로는 핵종 분석의 한계가 있게 된다. 방사성 물질이 방출하는 고유한 에너지가 두 개 이상 발생할 때 피크의 간격이 짧은 경우 128 채널에서는 구분이 어려움이 발생하게 된다. 따라서, 그림 6과 같이 PC 소프트웨어를 통해 1,024 채널 확장으로 두 개 이상의 에너지를 방출하는 핵종의 분석이 가능하도록 설계를 진행한다.

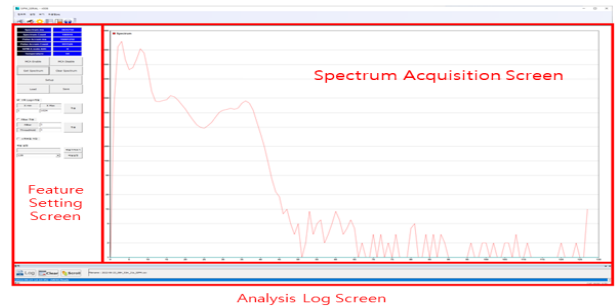


Fig. 6. PC Program for Spectrum Acquisition.

그림 6. Spectrum 취득용 PC 프로그램

2.4. 핵종 분석 기능이 적용된 시제품 제작



Fig. 7. Assembly Diagram of Manufactured Nuclide Analysis Module

그림 7. 제작된 핵종 분석 모듈의 조립도

128×128 픽셀의 OLED display를 적용하고 제품의 상단 면에 검출기가 구성될 수 있도록 설계를 진행한다. 또한, 조작을 위한 버튼은 3개로 구성하여 전원 ON/OFF, 메뉴 설정, 취소 등의 기능을 수행할 수 있다. Li-ion 배터리는 장치의 후면 내부에 배치될 수 있는 구조이고, 배터리 충전을 위한 USB-C Type 포트의 구성을 추가하여 제품의 하단 면에 그림 7과 같이 제작한다.

3. 시제품에 적용되는 GUI 개발

시제품에 적용되는 GUI는 그림 8과 같이 현재시간, 측정 경과 시간, 토탈 카운트, 핵종 Spectrum 등의 화면구성으로 개발한다. 현재시간은 현재시간을 표시한다. 측정 경과 시간은 핵종 분석 화면으로 전환되어 Spectrum을 누적하여 측정하는 시간을 초 단위로 표기한다. 토탈 카운트는 Spectrum을 취득하면서 각 채널(128 채널)에 입사되는 방사선의 카운트의 총합을 표시한다. 핵종 Spectrum의 총 채널은 128 채널로 구성되어 1 채널 당 14.71keV의 에너지 카운트를 표현하고, 입사되는 방사성 물질의 핵종에 따라 Spectrum을 형성하여 핵종 분석이 가능하도록 표시한다. 그림 9는 시제품에 적용된 GUI를 나타낸다.

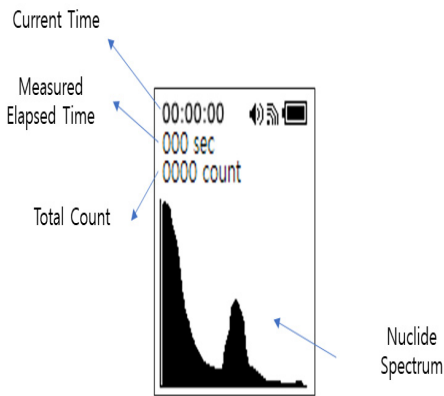


Fig. 8. GUI Configuration Screen.
그림 8. GUI 구성 화면



Fig. 9. GUI Applied to the Prototype.
그림 9. 시제품에 적용된 GUI

4. 성능 실험

4.1. 실험 방법

본 논문에서 제안한 고감도 보급형 핵종 분석 모듈의 성능을 평가하기 위하여 공인기관 전문가 입회시험을 시행하였다. 핵종 분석 장치에 Cs-137 표준선원을 이용하여 Spectrum (FWHM@662keV)을 취득하여 취득된 Spectrum으로 분해능 공식을 적용하여 성능을 평가하였다.

4.2. 실험 결과

662keV의 단일 Spectrum을 1시간 측정하여 피크를 획득하고, 피크의 반치폭(FWHM)을 그림 10과 같이 확인하였다. Cs-137의 핵종 에너지가 662keV이므로 측정된 피크 값의 채널이 45일 때, 채널 당 14.71keV의 에너지를 갖게 된다. 또한, 측정된 반치폭의 채널이 8채널이므로, 채널당 14.71keV일 때 117.68로 확인되었으며, 이를 적용 및 식 1에 대입하여 표 1 및 식 2와 같은 17.77%의 분해능을 확인하였다. 따라서, 제안된 본 논문

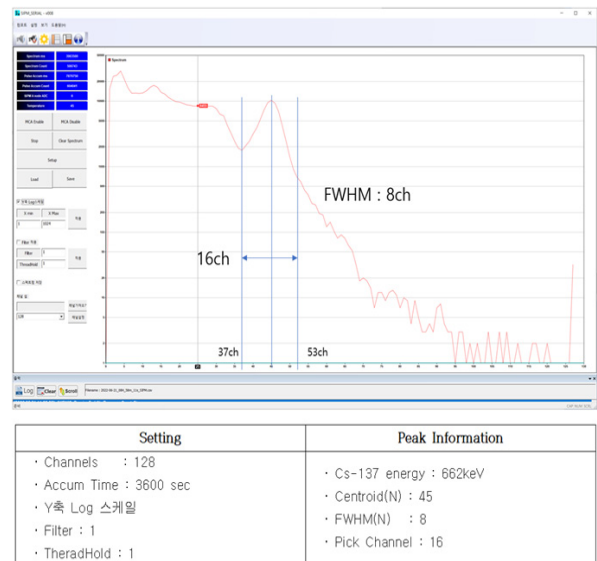


Fig. 10. FWHM Measured for a 662keV Single Spectrum.
그림 10. 662keV 단일 Spectrum에 대하여 측정된 FWHM

Table 1. Experimental Results on Resolution of Nuclide Analysis for Cs-137.

표 1. Cs-137에 대한 핵종 분석의 분해능 실험 결과

	Resolution of nuclide analysis for Cs-137
The highest level of commercial products	20% or less FWHM @ 662keV (FLIR/US)
The proposed method	17.77% FWHM @ 662keV

에서 제안한 핵종 분석 분해능 방법이 기존의 상용 핵종 분석 모듈보다 저렴하면서도 향상된 성능이 산출됨이 확인되었다.

$$R = \frac{FWHM}{E_0} \times 100\% = \frac{117.68}{662keV} \times 100 = 17.77\% \quad (2)$$

III. 결론

본 논문에서는 고감도 보급형 핵종 분석 모듈 개발을 제안하였다. 제안하는 측정센서 모듈은 핵종 분석 분해능을 위한 전자부 구동회로, 핵종 분석 기능이 적용된 시제품 제작, 시제품에 적용되는 GUI 개발 등으로 구성되었다. 제안된 측정센서 모듈의 성능을 평가하기 위하여 공인기관 전문가 입회시험을 시행한 결과는 핵종 분석 장치에 Cs-137 표준선원을 이용하여 취득한 Spectrum (FWHM@662keV)으로 분해능 공식을 적용하여 계산한 결과 17.77%의 분해능을 가짐이 확인되었다. 따라서, 제안된 본 논문에서 제안한 핵종 분석 분해능 방법이 기존의 상용 핵종 분석 모듈보다 저렴하면서도 향상된 성능이 산출됨이 확인되었다. 향후 연구과제로는 구분 가능한 핵종의 개수를 늘림과 동시에 정확도를 더욱 높이는 방법에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] Seung-Tak Ra, Joo-Hyun Lee, & Seung-Ho Lee. "Design of Wide-Range radiation measurement system using GM Tube and NaI(Tl) Detector," *IKEEE*, Vol.21, No.2, pp.146-149, 2017.
DOI: 10.7471/ikeee.2017.21.2.146
- [2] Santala, M. I. K., Zepf, M., Beg, F. N., Clark, E. L., Dangor, A. E., Krushelnick, K., ... & Norreys, P. A. "Production of radioactive nuclides by energetic protons generated from intense laser-plasma interactions. Applied Physics Letters," Vol.78, No.1, pp.19-21, 2001.
DOI: 10.1063/1.1335849
- [3] Kelner, S. R., Aharonian, F. A., & Bugayov, V. V. "Energy spectra of gamma rays, electrons, and neutrinos produced at proton-proton interactions in the very high energy regime," *Physical Review D*, Vol.74, No.3, pp.034018. 2006.

DOI: 10.1103/PhysRevD.79.039901

- [4] Kwak, D. H., Ko, T. Y., & Lee, S. H. "Development of 3D Radiation Position Identification System of Multiple Radiation Sources using Plastic Scintillator and NaI (TI) Detector," *Journal of IKEEE*, Vol.22, No.3, pp.638-644, 2018.

DOI: 10.7471/ikeee.2018.22.3.638

- [5] Lueders, M., Eversmann, B., Gerber, J., Huber, K., Kuhn, R., Zwerg, M., ... & Brederlow, R. "Architectural and circuit design techniques for power management of ultra-low-power MCU systems," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Vol.22, No.11, pp.2287-2296, 2013.

DOI: 10.1109/TVLSI.2013.2290083