

중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정 및 통합 제어 시스템 개발

Development of Neutron, Gamma ray, X-ray Radiation Measurement and Integrated Control System

고 태 영*, 이 주 현**, 이 승 호**

Tae-Young Ko*, Joo-Hyun Lee**, Seung-Ho Lee**

Abstract

In this paper, we propose an integrated control system that measures neutrons, gamma ray, and x-ray. The proposed system is able to monitor and control the data measured and analyzed on the remote or network, and can monitor and control the status of each part of the system remotely without remote control. The proposed system consists of a gamma ray/x-ray sensor part, a neutron sensor part, a main control embedded system part, a dedicated display device and GUI part, and a remote UI part. The gamma ray/x-ray sensor part measures gamma ray and x-ray of low level by using NaI(Tl) scintillation detector. The neutron sensor part measures neutrons using Proportional Counter Detector(low-level neutron) and Ion Chamber Type Detector(high-level neutron). The main control embedded system part detects radiation, samples it in seconds, and converts it into radiation dose for accumulated pulse and current values. The dedicated display device and the GUI part output the radiation measurement result and the converted radiation amount and radiation amount measurement value and provide the user with the control condition setting and the calibration function for the detection part. The remote UI unit collects and stores the measured values and transmits them to the remote monitoring system. In order to evaluate the performance of the proposed system, the measurement uncertainty of the neutron detector was measured to less than $\pm 8.2\%$ and the gamma ray and x-ray detector had the uncertainty of less than 7.5% . It was confirmed that the normal operation was not less than $\pm 15\%$ percent of the international standard.

요 약

본 논문에서는 중성자, 감마선, 엑스선 등의 방사선을 측정하는 통합 제어 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 원격 또는 네트워크상으로 측정 및 분석한 데이터를 디스플레이를 통해 모니터링 및 제어할 수 있는 장비로서, 현장에 가지 않고도 시스템 각 구성 부분의 상태를 보고 변경하여 원격으로 감시 및 관리할 수 있다. 제안하는 시스템은 감마선/엑스선 센서부, 중성자 센서부, 주제어 임베디드 시스템부, 전용 디스플레이 장치 및 GUI부, 원격 UI부 등으로 구성된다. 감마선/엑스선 센서부는 NaI(Tl) Scintillation Detector를 사용하여 저준위의 감마선 및 엑스선을 측정한다. 중성자 센서부는 Proportional Counter Detector(저준위 중성자)와 Ion Chamber Type Detector(고준위 중성자)를 사용하여 중성자를 측정한다. 주제어 임베디드 시스템부는 방사선을 검출하여 초단위로 샘플링하고 누적된 펄스 및 전류값에 대한 방사선량으로 변환한다. 전용 디스플레이 장치 및 GUI부는 방사선 측정 결과와 변환된 방사선량 및 방사능량 측정 수치를 출력하고, 사용자에게 제어 조건 설정 및 검출부에 대한 캘리브레이션 기능을 제공한다. 원격 UI부는 측정된 값들을 취합, 저장하여 원격 감시 시스템에 전달한다. 제안된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 공인시험기관에서 실험한 결과는 중성자 검출부는 $\pm 8.2\%$ 이하의 측정 불확도가 측정되었고, 감마선, 엑스선 검출부는 7.5% 이하의 불확도가 측정되어 국제 표준인 $\pm 15\%$ 이하에서 정상동작 됨이 확인되었다.

Key words : Neutron, Gamma ray, X-ray, Main Control Embedded System, Display Unit, Remote UI

* Dept. Electronics&Control Engineering, Hanbat National University

** Dept. Electronic Engineering, Hanbat National University

★ Corresponding author

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

※ Acknowledgment

This work was supported by the Human Resource Training Program for Regional Innovation and Creativity through the Ministry of Education and National Research Foundation of Korea(NRF-2015H1C1A1035818)

Manuscript received, Dec,6, 2017; revised, Dec, 27, 2017; accepted, Dec, 28, 2017

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 사용되고 있는 원자력 발전소, 양성자 가속기 및 중이온 가속기 등의 연구 시설 등의 기존 시설에서 운영되고 있는 다수의 방사선 측정 장비들이 노후화 되어서 새로운 방사선 측정 장치의 수요가 발생하고 있는 실정이다[1][2]. 그러나 대다수의 측정 장비들이 고가의 수입 장비들이어서 측정 장비 기술의 국산화 필요성이 크게 대두되고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서 제안하는 중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정 및 통합 제어 시스템은 해외에서 대다수 수입에 의존하고 있는 중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정 장치의 국산화를 통한 기술 확보를 할 수 있다. 또한, 다양한 방식의 방사선 측정 센서에 대한 측정, 모니터링 솔루션 확보할 수가 있게 된다.

II. 본론

1. 중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정 및 통합 제어 시스템 구조

본 논문에서 제안하는 중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정 및 통합 제어 시스템의 전체적인 시스템의 구조는 그림 1과 같이 감마선/엑스선 센서부, 중성자 센서부, 주제어 임베디드 시스템부, 전용 디스플레이 장치 및 GUI부, 원격 UI부 등으로 구성된다.

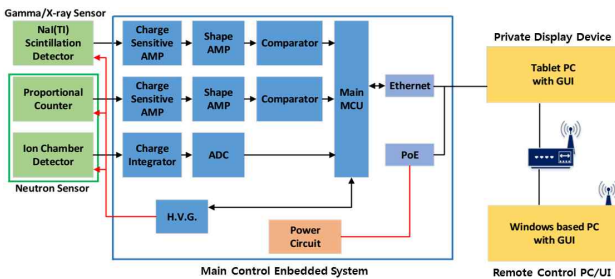


Fig. 1. Overall Configuration of Neutron, Gamma ray, X-ray Radiation Measurement and Integrated Control System

그림 1. 중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정 및 통합 제어 시스템의 전체 구성도

2. 감마선/엑스선 센서부

감마선/엑스선 센서부는 NaI(Tl) Scintillation Detector를 사용하여 감마선 및 엑스선을 측정할 수 있는 제어 회로이다[3]. 감마선/엑스선 센서부는 그림 2와 같이 방사선 측정부와 주제어 임베디드 시스템부로 구성된다.

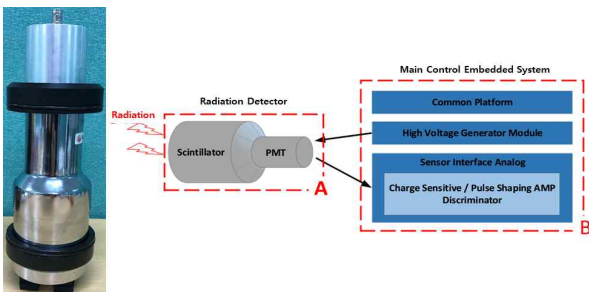


Fig. 2. Overall Configuration of Gamma ray/X-ray Sensor
그림 2. 감마선/엑스선 센서부의 전체 구성도

가. 방사선 측정부(A)

NaI(Tl) Scintillation Detector에 고전압(500V ~ 1,600V)을 인가하면 감마선/엑스선에 반응하는 약한 섬광을 발생시키면, PMT(Photo Multiplier Tube)에서 광전 효과를 통해 전하들로 변환하고, 이를 고전계하에서 다단으로 가속시켜 약 10^4 배 정도 증폭한 신호를 출력한다.

나. 주제어 임베디드시스템 내의 Sensor Interface Analog부(B)

그림 3의 Sensor Interface Analog부는 측정된 방사선에 의한 출력 신호를 증폭, 가우시안 펄스로의 변형, 노이즈를 제거한 펄스 신호를 Common Platform부로 전송한다. Charge Sensitive AMP는 센서로부터 출력된 미세 펄스 신호를 증폭하며, Pulse Shaping AMP는 펄스 신호를 Gaussian 모양으로 정형화 하고, Discriminator는 정형화된 펄스를 Comparator를 사용하여 사용 가능한 펄스 신호를 선택한다.



Fig. 3. PCB of Charge Sensitive Amp, Pulse Shaping Amp, Discriminator

그림 3. Charge Sensitive Amp, Pulse Shaping Amp, Discriminator의 PCB

다. 주제어 임베디드시스템 내의 High Voltage Generator부(B)

PMT용 바이어스 전압으로는 500V ~ 1600V 정도가 주로 사용되므로, 그림 4와 같이 0V ~ 3000V 고전압을 인가할 수 있도록 하는 가변 고전압 발생장치 모듈을 제작한다[4].

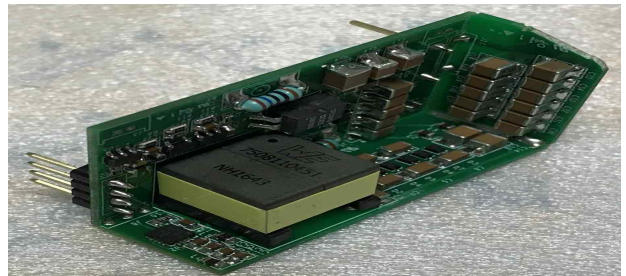


Fig. 4. PCB of High Voltage Generator
그림 4 High Voltage Generator의 PCB

3. 중성자 센서 부

3.1. Proportional Counter Detector

HDPE(High Density Poly Ethylene)를 통하여 감속된 저준위 중성자가 He-3 Proportional Counter Detector에서 검출되어 출력되는 전하를 처리한다.

그림 5는 Proportional Counter Detector부의 전체 구성도를 나타낸다[5].

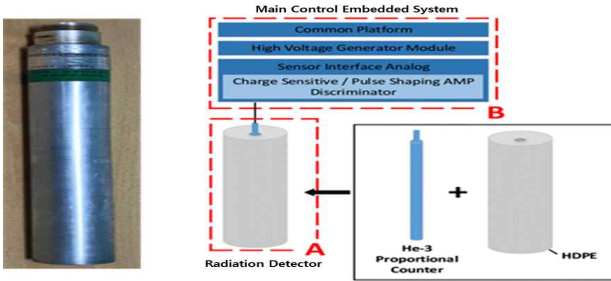


Fig. 5. Overall Configuration of Proportional Counter Detector Control Unit

그림 5. Proportional Counter Detector부의 전체 구성도

가. 방사선 검출부(A)

Proportional Counter는 He-3을 이용하여 저속 중성자에 대하여 미세 전하가 방전되도록 구성된 검출기로 약 2500V ~ 3000V의 바이어스 전압이 필요하다. HDPE는 수소원자를 많이 함유하고 있는 물질로 반응성이 낮은 고속 중성자의 속도를 늦추어 반응성이 높은 저속 중성자로 변환하여 검출 효율을 높인다.

3.2. Ion Chamber Detector

그림 6의 Ion Chamber Detector는 고준위 중성자에 의해 전리된 전하를 처리한다[6].

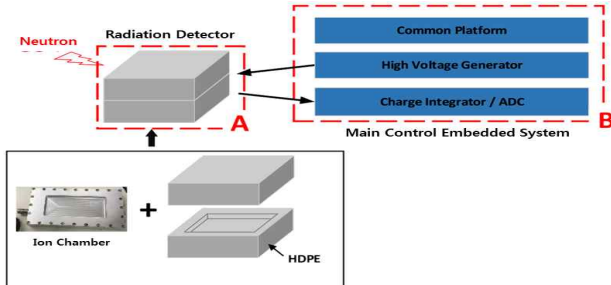


Fig. 6. Overall Configuration of Ion Chamber Detector Control Unit

그림 6. Ion Chamber Detector부의 전체 구성도

가. 방사선 검출부(A)

Ion Chamber는 외부의 HDPE에 의해 감속된 중성자를 검출하며 Proportional Counter에 비해 매우 낮은 바이어스 전압인 300V ~ 1000V로 동작하므로 펄스 형태의 신호를 얻을 수는 없고, pA 급의 미세 출력 전류의 신호를 검출한다.

나. 주제어 임베디드 시스템 내의 적분기와 ADC부(B)

적분기와 ADC를 사용하여 Ion Chamber에서 발생한 전하를 누적한다. 이때 전류가 pA급이기 때문에 아주 작은 누설 전류와 온도변화가 큰 오차 유발 요인이 되므로, 정밀한 적분기의 구성을 위해 전하를 누적하는 정밀한 커패시터를 사용한다. 전류 적분 회로는 2 channel의 전류 적분기와 ADC를 내장한 IC를 이용하며, channel별로 2개의 적분기를 사용하여 하나의 적분기가 적분할 동안 다른 적분기의 출력을 AD 변환 및 초기화하는 동작을 수행하게 한다.

2개의 적분기를 교대로 동작시키면 입력 전하를 놓치지 않고 적분할 수 있게 된다.

그림 7은 적분기와 ADC의 회로를 나타낸다.

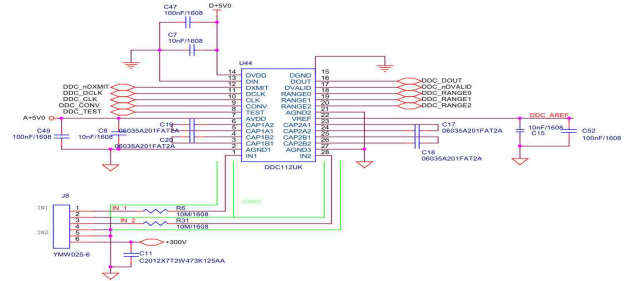


Fig. 7. Circuit of Charge Integrator and ADC

그림 7. 적분기와 ADC의 회로도

4. 주제어 임베디드 시스템

그림 8의 주제어 임베디드 시스템은 검출된 감마선, 엑스선, 중성자 등에 해당하는 펄스 및 전류 등의 값을 보정하여 방사선량 및 방사능량 변환 알고리즘을 적용할 수 있게 한다. Ethernet 및 RS-485의 유선통신 기능, PoE 지원 기능 등을 지원하는 Common Platform 모듈과 Detector Bias/AFE 모듈로 구성된다.

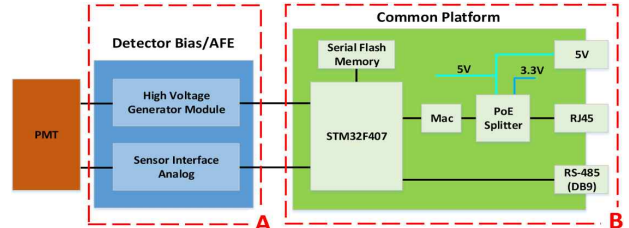


Fig. 8. Overall Configuration of Main Control Embedded System

그림 8. 주제어 임베디드 시스템의 전체 구성도

가. Detector Bias/AFE부(A)

High Voltage Generator 모듈과 Analog Sensor Interface 모듈로 구성되며, 대부분의 방사선 검출 장치를 지원하기 때문에 모듈만 교체하여 사용할 수 있다.

나. Common Platform부(B)

NaI(Tl) Scintillation/Proportional Counter 검출기의 Sensor Interface Analog 모듈로부터 고속 디지털 펄스와 Ion Chamber 검출기의 전류 신호를 SPI 버스를 통해 입력받는다. 검출기의 소신호 펄스는 디지털로 변환되어 MCU의 펄스 계수 전용 핀을 통하여 입력받아 매초 숫자를 계수한다. 이때 약 25ns 간격의 펄스까지 계수 가능하다. 한편, Ion Chamber의 전하를 매초 누적하고 AD 변환된 결과를 SPI(I2C도 지원)를 통하여 입력 받아서 등가 전류값을 계산한다.

5. 전용 디스플레이 장치 및 GUI부

전용 디스플레이 장치는 디스플레이 및 화면 조작을 담당하는 디스플레이 보드(Windows-CE with 8인치 LCD)와 통신, 전원제어, 알람제어, 온도제어를 담당하는 통신/제어보드로 구성된다. 외부 전원은 220VAC -> DC 57V인 SMPS가 담당하고, 57V는 센서 포트에 연결되는 4채널의 센서 모듈에 PoE 공급

전원으로 사용된다. 주요 기능으로는 방사선 측정 결과와 변환된 방사선량 및 방사능량 측정 수치를 출력하고, 사용자에게 제어 조건 설정 및 검출 부에 대한 캘리브레이션 기능을 제공한다.

그림 9는 전용 디스플레이 장치의 GUI를 나타낸다.

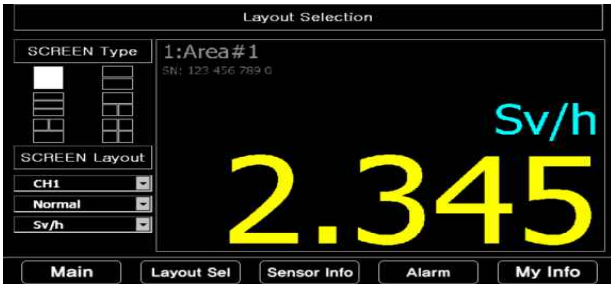


Fig. 9. GUI of Private Display Device
그림 9. 전용 디스플레이 장치의 GUI

6. 원격 UI

현장에 가지 않고도 시스템 각 구성 부분의 상태를 보고 변경하여 원격으로 감시/관리할 수 있도록 하여서, 위험 상황이 발생했을 때 원격지에서 즉각 상황을 파악할 수 있도록 한다.

7. 성능 실험

가. 실험 방법

본 논문에서 제안한 중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정 및 통합 제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여 중성자 검출부와 감마선, 엑스선 검출부에 대해 공인시험기관의 장비를 사용하여 방사선 값을 측정하였다. 중성자 검출부는 0.1 μ Sv/h ~ 100mSv/h 범위에 대해 측정 불확도를 측정 하였고, 감마선, 엑스선 검출부는 0.01 μ Sv/h ~ 500 μ Sv/h 범위에 대해 측정 불확도를 측정하였다.

나. 실험 결과

실험 결과 표 1과 같이 중성자 검출부에 대해 $\pm 8.2\%$ 의 불확도가 측정되었고, 감마선, 엑스선 검출부에 대해 $\pm 7.5\%$ 의 불확도가 측정되었다. 국제 표준인 $\pm 15\%$ 이하에서 정상동작 됨이 확인되었다.

Table 1. Experimental Results on the Measurement Uncertainty Rate

표 1. 측정 불확도에 대한 실험 결과

Source	Reference dose rate	Calibrator measured value	Measurement uncertainty
Neutron	0.1 μ Sv/h~100mSv/h	42.8 μ Sv/h	$\pm 8.2\%$
Gamma ray/ X-ray	0.01 μ Sv/h~500 μ Sv/h	25.0 μ Sv/h	$\pm 7.5\%$
		100.3 μ Sv/h	$\pm 7.5\%$
		501.6 μ Sv/h	$\pm 7.5\%$

III. 결론

본 논문에서는 중성자, 감마선, 엑스선 등의 방사선을 측정하는 통합 제어 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 원격 또는 네트워크상으로 측정 및 분석한 데이터를 디스플레이를 통해 모니터링 및

제어할 수 있는 장비로서, 현장에 가지 않고도 시스템 각 구성 부분의 상태를 보고 변경하여 원격으로 감시 및 관리할 수 있다. 제안된 중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정 및 통합 제어 시스템은 해외에서 대다수 수입에 의존하고 있는 중성자, 감마선, 엑스선 방사선 측정장치의 국산화를 통한 기술 확보를 할 수 있으며, 다양한 방식의 방사선 측정센서에 대한 측정, 모니터링 솔루션 확보할 수가 있으리라 기대된다. 제안된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 공인시험기관에서 실험한 결과, 중성자 검출부는 $\pm 8.2\%$ 이하의 측정 불확도가 측정되었고, 감마선, 엑스선 검출부는 7.5% 이하의 불확도가 측정되어 국제 표준인 $\pm 15\%$ 이하에서 정상동작 됨이 확인되었다. 향후 연구과제로는 센서부 측정 회로의 안정화 및 측정 불확도를 더욱 낮추는 방법에 대한 연구가 필요하다.

References

[1] Chang-Gyu.Kim, "Measurement dose of dental panoramagraphy using a radiophotolumine scent glass rod detector," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol.12, no.6, pp.2624-2628, 2011.
DOI : 10.5762/KAIS.2011.12.6.2624

[2] Campbell et al, "Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at atmospheric radiation measurement program sites: Instruments and data processing," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.19, no.4, pp.431-442, 2002.
DOI:10.1175/1520-0426(2002)019<0431:FTESCA>2.0.CO;2

[3] Häusser et al, "The prompt response of bismuth germanate and NaI (TI) scintillation detectors to fast neutrons," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol.213, no.2-3, pp.301-309, 1983.

[4] Kyeong-Uk Jang et al, "A Study On Hardware Design for High Speed High Precision Neutron Measurement," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, vol.20, no.1, pp. 61-67, 2016.
DOI:10.1016/0167-5087(83)90423-4

[5] Howard et al, "The use of an imaging proportional counter in macromolecular crystallography," *Journal of applied crystallography*, vol.20, no.5, pp.383-387, 1987.
DOI:10.1107/S0021889887086436

[6] Lytle et al, "Measurement of soft X-ray absorption spectra with a fluorescent ion chamber detector," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol.226, no.2-3, pp.542-548, 1984
DOI:10.1016/0168-9002(84)90077-9