

# 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어 설계에 관한 연구

## A Study On Hardware Design for High Speed High Precision Neutron Measurement

장 경 욱\*, 이 주 현\*\*, 이 승 호\*\*\*

Kyeong-Uk Jang\*, Joo-Hyun Lee\*\*, Seung-Ho Lee\*\*\*

### Abstract

In this paper, a hardware design method is proposed for high speed high precision neutron radiation measurements. Our system is fabricated to use a high performance A/D Converter for digital data conversion of high precision and high speed analog signals.

Using a neutron sensor, incident neutron radiation particles are detected; a precision microcurrent measurement module is also included: this module allows for more precise and rapid neutron radiation measurement design. The high speed high precision neutron measurement hardware system is composed of the neutron sensor, variable high voltage generator, microcurrent precision measurement component, embedded system, and display screen.

The neutron sensor detects neutron radiation using high density polyethylene. The variable high voltage generator functions as a 0 ~ 2KV variable high voltage generator that is robust against heat and noise; this generator allows the neutron sensor to perform normally. The microcurrent precision measurement component employs a high performance A/D Converter to precisely and swiftly measure the high precision high speed microcurrent signal from the neutron sensor and to convert this analog signal into a digital one. The embedded system component performs multiple functions including neutron radiation measurement for high speed high precision neutron measurements, variable high voltage generator control, wired and wireless communications control, and data recording. Experiments using the proposed high speed high precision neutron measurement hardware shows that the hardware exhibits superior performance compared to that of conventional equipment with regard to measurement uncertainty, neutron measurement rate, accuracy, and neutron measurement range.

### 요 약

본 논문에서는 중성자 방사선 측정을 위한 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어 설계방법을 제안한다. 제안된 고속 고정밀 중성자 측정 장치의 하드웨어 설계는 고성능 A/D 변환기를 사용하여 고정밀 고속의 아날로그 신호를 디지털 데이터로 변환할 수 있도록 구성된다.

중성자 센서를 사용하여 입사된 중성자 방사선 입자를 검출하고, 극저전류 정밀 측정 모듈을 통해 검출된 중성자 방사선을 보다 정밀하고 빠르게 측정하는 모듈을 설계한다. 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어 시스템은 중성자 센서부, 가변 고전압 발생부, 극저전류 정밀 측정부, 임베디드 시스템부, 디스플레이부 등으로 구성 된다.

중성자 센서부는 고밀도 폴리에틸렌을 통해 중성자 방사선을 검출하는 기능을 수행한다. 가변 고전압 발생부는 중성자 센서가 정상적으로 운영되기 위하여 발열 및 잡음 특성에 강인한 0 ~ 2KV 가변 고전압 발생장치의 기능을 수행한다. 극저전류 정밀 측정부는 중성자 센서에서 출력되는 고정밀 고속의 극저전류 신호를 고성능 A/D 변환기를 사용하여 정밀하고 빠르게 측정하고 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 기능을 수행한다. 임베디드 시스템부는 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 중성자 방사선 측정 기능, 가변 고전압 발생장치 제어 기능, 유무선 통신 제어 기능, 저장 기능 등을 수행한다. 제안된 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어를 실험한 결과, 불확도, 중성자 측정 속도, 정확도, 중성자 측정 범위 등에서 기존의 장치보다 우수한 성능이 나타남을 확인할 수가 있다.

*Keywords : Neutron sensor, Radiation, Embedded system, High-density polyethylene, Variable high voltage generator*

## I. 서론

1897년 방사선을 발견한 이후로 방사선을 다양한 분야에서 사용되고 있다. 일반적인 방사선의 경우에, 기초과학에서는 방사선의 강도 및 에너지 등을 측정하여 핵 및 소립자의 성질을 규명하는데 사용되고 있다. 한편, 의료용으로는 감마카메라, CT, PET 등의 장비에서 X-선 및 감마선을 사용하여 진단용으로 사용되고 있으며, 산업용으로는 디지털 방사선 비파괴 검사, 액면측정, 두께 및 밀도 측정, 성분측정에도 사용되고 있다.[1],[2] 전기적 성질을 띠지 않는 소립자로 불리는 중성자는 투과성이 강하며, 접촉한 물질의 특성에 따라 일정한 각도로 분산되는 산란성을 가지고 있어 물질 깊숙이 들어가 내부 구조와 성분을 확인할 수 있는 특징이 있다. 따라서 중성자는 항공엔진의 결함, 거대한 선박 등 대형 구조물의 내부 이상 여부 확인에 사용되고 있으며, 그 사용이 급격하게 증가하는 추세에 있다. 이에 따라 방사선을 사용하는 다양한 분야의 종사자들은 방사선 측정을 통해 방사선 피폭의 피해를 최소화하는 예방 및 안전이 중요하게 대두되고 있다. 본 논문에서 다루는 중성자선의 경우에는 일반적으로 방사선을 차폐할 수 있는 납, 철판 등을 관통할 수 있는 에너지를 갖고 있기 때문에 보다 정밀한 계측기를 통해 중성자수를 측정해야 한다. 중성자 방사선 측정 장치는 방사선 폐기물 처리, 방사선

안전 관리 분야 등에서 중성자 검출에 대한 중요성이 증가하고 함에 따라 신뢰성 및 빠른 인식 속도가 중요한 점이 되고 있다.[3],[4],[5] 따라서 본 논문에서는 원자력 기술과 IT 기술의 융합으로 중성자 센서에서 입사된 중성자 방사선 입자를 보다 정밀하고 빠르게 측정하는 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어 설계방법을 제안한다.

## II. 중성자 방사선 측정 기술에 관련된 연구

본 장에서는 중성자 방사선 측정 기술과 관련된 선행기술에 대하여 논한다.

1936년에 비례 계수관을 이용한 가스형 중성자 검출 방법이 발표되었다.[6],[7],[8] 이 방법은 포획 반응, 핵분열반응, 탄성 산란 등 다양한 반응을 이용하여 감마선과의 구분이 용이하다. 따라서 수명이 길고 방사선 손상이 다른 검출기에 비해 적기 때문에 핵발전소의 감지기로 사용되고 있으나, 불감 시간이 길어 고속 중성자 측정하는 장비를 구성하는데 어려움이 있다.

1960년대에 무기 및 유기 섬광체를 이용한 섬광체형 중성자 검출 방법이 발표되었다.[9] 이 방법은 섬광 물질을 이용하여 빠른 시간 분해능과 높은 반응효율, 효과적인 감마선 배경계수 구분이 가능하여, 높은 에너지의 중성자 검출에 사용되고 있다. 그러나 에너지 분해능이 낮고 안정성에 문제가 있어, 고정밀 중성자 측정하는 장비를 구성하는데 어려움이 있는 단점이 있다.

1966년에 반도체의 공핍층을 이용한 반도체형 중성자 검출 방법이 발표되었다. 이 방법은 방사선이 공핍층에 입사되면 순간 전류가 흐르고 이 전류를 수집하여 측정한다. 이 방법은 에너지 분해능이 좋고 고에너지 측정에 적합하며 자계의 영향이 없는 장점이 있으나, 방사선 손상의 큰 문제가 있어 신뢰성 높은 중성자 측정하는 장비를 구성하는데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 새로운 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어 설계 방법을 제안한다. 제안된 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어 설계는 중성자 센서를 이용하여 극저전류 신호를 고성능 A/D 변환기를 사용하여 정밀하고 빠르게 측정할 수 있도록 하였다.

\* Department of Electronic Engineering, Hanbat National University, [jku10171010@gmail.com](mailto:jku10171010@gmail.com), 042-821-1423

\*\* Department of Electronic Engineering, Hanbat National University, [jimlee314@gmail.com](mailto:jimlee314@gmail.com), 042-821-1423

\*\*\* Department of Electronics&Control Engineering, Hanbat National University, [shlee@cad.hanbat.ac.kr](mailto:shlee@cad.hanbat.ac.kr), 042-821-1137 (Corresponding author)

### \* Acknowledgment

This research was financially supported by the Ministry of Education (MOE) and National Research Foundation of Korea(NRF) through the Human Resource Training Project for Regional Innovation (No.2015035818)

Manuscript received Feb 15, 2016; revised Feb 28, 2016 ; accepted Mar 1, 2016

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.

### III. 제안하는 방법

#### 3.1 전체 하드웨어 구성 블록도

본 논문에서 제안하는 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어의 전체 하드웨어 구성 블록도는 그림 1과 같이 중성자 센서부, 가변 고전압 발생부, 극저전류 정밀 측정부, 임베디드 시스템부, 디스플레이부 등으로 구성되어 있다.

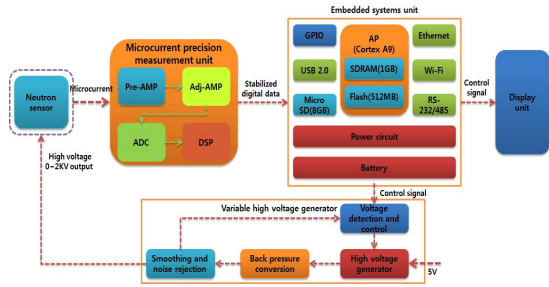


Fig. 1. The Block Diagram of Overall Hardware  
그림 1. 전체 하드웨어 구성 블록도

중성자 센서부는 10B 코팅된 판에 Ar 가스를 이용한 Boron coated neutron detect(BN50) 적용 센서를 사용하였다.

가변 고전압 발생부에서는 센서의 특성에 따라 0V ~ 2KV 사이의 출력 전압을 Coarse Switching Regulator에서 증폭하고, Precision Linear Regulator에서 출력 전압을 제어하여, 발열 및 잡음에 대해 개선을 통해 정밀도를 유지할 수 있도록 하였다.

극저전류 정밀 측정부에서는 Pre-AMP, Adj(adjustable)-AMP, ADC, DSP로 구성되어 있으며, 미세 전류 증폭, 입력신호 변환, 노이즈 간섭을 최소화 할 수 있도록 하였다.

임베디드 시스템부는 ARM Cortex-A9 계열의 삼성 Exynos 4210 코어 S5PC210 프로세서로 구성되어 있다. 임베디드 시스템부는 가변 고전압 발생부 제어 기능, 극저전류 정밀 측정부에 대한 입력 데이터 분석 수치화 알고리즘, 측정 데이터에 대한 유·무선통신 제어 기능, 디스플레이부를 통한 GUI 기능 등이 있다. 내장된 플래시 메모리와 SDRAM 메모리를 사용하여 부트로더, 커널, 안드로이드 OS(아이스크림 샌드위치), 윈도우 8을 포팅 하였다. 외장형 T플래시 메모리에는 실시간 사용자 설정 및 측정 데이터를 수집 저장하도록 구성된다.

디스플레이부는 5인치, 8인치 터치형 디스플레이 장치를 이용하여, 안드로이드 전용 GUI와 윈도우 8 전용 GUI를 설계하여 측정된 중성자 방사선 측정수를 CPS, uSv/h 등의 단위로 표시될 수 있도록 하였다.

#### 3.2 가변 고전압 발생부

가변 고전압 발생부는 중성자 센서에 사용되는 고전압 발생 장치로서 센서의 저전류 데이터에 대한 고압전원의 립플이 결과 전류에 큰 잡음으로 작용한다. 따라서 전체 회로 동작 중에 전압, 전류의 변화를 통하여 방사되는 잡음이 매우 작아야 함으로, 사용되는 가변 고전압 발생부는 저잡음 구조로 설계되었다. 가변 고전압 발생부는 저압으로부터 고압을 얻고, 출력 전압에서 잡음을 제거하기 위해 1차 풀 브리지 방식을 이용하고 2차 전압을 배압 정류하여 고압을 얻는 구조로 전압 검출 및 제어부, 고전압 발생부, 배전압 정류부, 평활 및 노이즈 제거부 등으로 설계되었다.

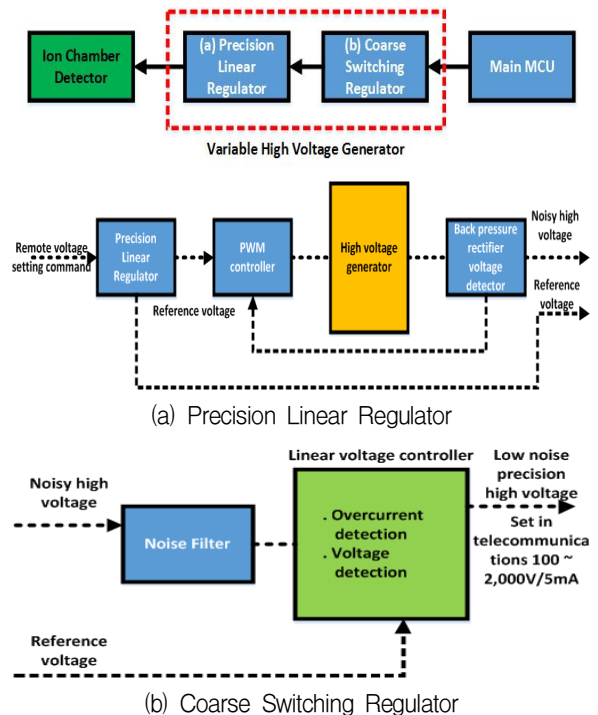


Fig. 2. Block diagram of variable high voltage generator unit  
그림 2. 가변 고전압 발생부 블록도

전압 검출 및 제어부는 출력 전압을 감시하여 고압 발생기의 동작 여부를 결정하도록 하였다. 고전압 발생부는 스위칭 IC에서 트랜스를 통해

고전압을 생성하도록 하였다. 배전압 정류부는 트랜스의 AC 전압을 최대 6배 전압으로 정류하도록 하였다. 평활 및 노이즈 제거부는 출력 DC 전압으로부터 AC 성분(노이즈)을 제거하는 기능을 한다. 이 기능을 위해서 저주파 평활용 7.5uF(47uF 6직렬)를 사용하였고 높은 주파수 성분의 제거를 위해 RC 필터(10KΩ-1uF 4단)를 사용 하였다. 모듈로 제작된 가변 고전압 발생부는 전원 입력, 스위칭 부분, 필터부 등에서 생기는 잡음을 줄이기 위해 차폐되도록 설계되었다. 가변 고전압 발생부의 블록도는 그림 2와 같다.

3.3 극저전류 정밀 측정부

극저전류 정밀 측정부는 중성자 센서에서 출력되는 고정밀 고속의 극저전류 신호를 고성능 A/D 변환기를 사용하여 정밀하고 빠르게 측정하고 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 기능을 수행한다. 극저전류 정밀 측정부는 센서 출력신호인 극저전류를 정밀하게 측정하기 위해 Pre-AMP, Adj-AMP, ADC, DSP 등으로 설계되었다. Pre-AMP는 센서로부터 입력되는 매우 작은 미세 전류를 1차적으로 증폭시키도록 하였다. Adj(adjustable)-AMP는 저잡음, 저입력 바이어스 전류의 전처리 앰프와 이득 가변형 후단 앰프/감쇄기의 두 부분으로 구성되며, 아날로그 신호를 디지털로 변환에 용이하도록 하였다. ADC는 고성능 A/D 변환기를 사용하여 입력된 극저전류의 아날로그 신호를 디지털 데이터로 변환하도록 하였다. DSP는 노이즈 및 연속되는 신호에 대한 간섭을 최소화하기 위한 연산을 수행하도록 하였다. 극저전류 정밀 측정부의 블록도는 그림 3과 같다.

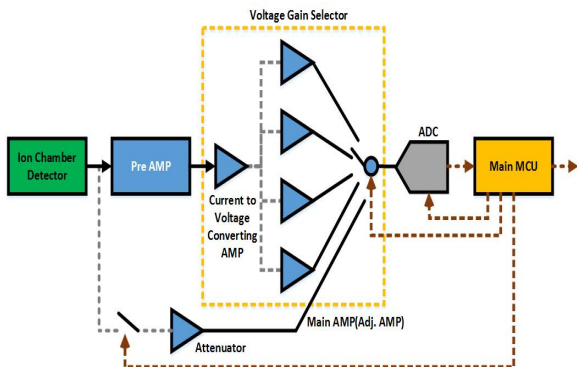


Fig. 3. Block diagram of microcurrent precision measurement unit  
그림 3. 극저전류 정밀 측정부 블록도

3.4 임베디드 시스템부

임베디드 시스템부는 개발 시스템의 전체적인 제어 및 관리, 가변 고전압 발생부 제어, 극저전류 정밀 측정부 제어, 다중의 통신프로토콜 제어, 디스플레이부 제어 등을 수행한다. 이를 위해 AP 블록, Ethernet 블록, WiFi 블록, USB 2.0 블록, Micro SD 블록, GPIO블록, Power Circuit 블록, Battery 블록 등으로 설계되었다. AP 블록은 ARM Cortex-A9 계열의 삼성 Exynos 4210 코어 S5PC210 프로세서를 사용하여 시스템 제어를 수행한다. 내장된 512MB 플래시 메모리와 1GB SDRAM 메모리를 사용하여 부트로더, 커널, 안드로이드 OS(아이스크림 샌드위치), 윈도우 8을 포팅 하였다. Ethernet 블록은 유선 통신을 위한 통신 및 제어 기능을 수행하도록 적용하였다. WiFi 블록은 외부 PC 및 무선 통신기기와 무선으로 데이터를 송수신하도록 하였다. USB 2.0 블록은 PC와 유선으로 연결하여 장치의 설정 및 실시간 데이터 수신으로 모니터링 및 시스템의 데이터 등을 백업하기위한 포트 USB 인터페이스를 통하여 전원공급이 되도록 구성된다.

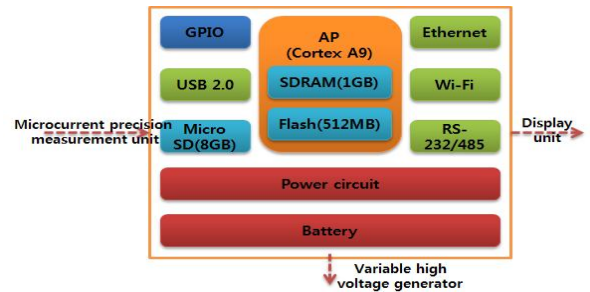


Fig. 4. Block diagram of embedded system  
그림 4. 임베디드 시스템부 블록도

Micro SD 블록은 실시간 또는 사용자의 설정에 의해 측정된 데이터를 수집 저장하도록 구성되었으며 USB, WiFi 등을 경유하지 않고 물리적으로 메모리를 착탈하여 외부 PC등의 시스템에서 데이터를 백업 저장할 수 있게 하였다. GPIO 블록은 고전압 발생부 및 AMP, ADC 블록과 연결되어 제어 명령 및 수집된 데이터 등을 수신할 목적으로 구성되었다. 파워회로 블록은 프로세서 및 고전압 발생부, AMP 및 ADC 등 시스템 전반에 필요시 되는 전원을 공급하는 회로이며, 내장된 배터리를 충전하여 휴대용으로 사용될 수 있도록 하기위한 전원회로 구성되었다. 배터리 블록은

3.7V, 5.2A 리튬이온 배터리를 적용하며, 필요에 따라 최대 2개까지 연결하여 장시간 테스트가 가능하도록 구성할 수 있게 설계되었다. 임베디드 시스템부의 블록도는 그림 4와 같다.

#### IV 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 실험 환경

본 실험을 진행한 환경은 그림 5과 같이 중성자 검출부의 불확도, 중성자 측정 속도, 정밀도, 정확도에 대해서 조사 및 테스트가 가능한 공인 시험기관의 장비를 사용하여, 실험 및 공인 성적을 발급받는 방식으로 실험하였다. 한편, 중성자 검출부의 중성자 측정 범위, 가변 고전압 측정 범위에 대해서는 객관적 테스트 데이터를 사용하여 자체 평가를 진행하였다. 모든 실험에 대해 누설 전류 및 주위환경의 영향을 최소화하기 위해 케이블 길이는 최대한 짧게 연결하고, 실험에 사용되는 모든 케이블은 완전 차폐된 것을 사용하였다.



Fig. 5. Accredited testing laboratory equipment capable of Irradiation and test

그림 5. 중성자 방사선 조사 및 테스트가 가능한 공인 시험기관의 장비

##### 4.2 실험 결과 고찰

1) 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 중성자 검출 장치의 거리별 선량검출 범위 및 불확도에 대한 실험 결과 및 고찰

고속 고정밀 중성자 측정을 위한 중성자 검출 장치의 거리별 선량검출 범위에 대한 실험결과 표 1과 같고, 거리별 기준선량에 대한 전류값의 비례 정도, 선형성을 평가하여 불확도에 대한 결과는 표 2와 같다. 중성자 선원을 기준으로 5cm, 10cm, 20cm, 30cm의 거리를 띄워 각거리에서 기준선량 값에 대한 측정 장치의 배경전류, 구간별 측정 전

류, 순전류 테스트를 수행하였다. 또한, 거리별 전류대비 선량값을 환산하여 선형성을 갖는 그래프를 유추하고 산출하였다. 표 1에서 나타난 바와 같이 거리 20cm를 기준으로 1.9pA 순전류에서 기준 선량값이 3.912uSv/h 이므로 100nA에서는 대략 205.9mSv/h의 값을 가짐으로, 따라서 기존의 중성자 검출 장치의 중성자 측정 범위인 0 ~ 100mSv/h 보다 높은 0 ~ 200mSv/h 이상의 방사선량을 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 중성자 검출장치의 반응도 시험 및 선량범위 측정 결과는 상대 측정 불확도가 기기보정인자 k = 2 일 때, 표 2에서 나타난 바와 같이 기존의 중성자 검출 장치의 불확도 보다 성능이 좋은 ±5%를 나타남을 확인하였다.

Table1. Distance detection range of neutron detector for high speed high precision neutron measurement

표 1. 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 중성자 검출 장치의 거리별 선량검출 범위

	5cm	10cm	20cm	30cm
Reference dose (uSv/h)	62.596	15.649	3.912	1.739
Current background (pA)	2.3	1.9	1.5	1.4
Current (pA)	11.2	6.5	3.4	2.5
Forward current (pA)	8.9	4.6	1.9	1.2

Table2. Uncertainty of neutron detector for high speed high precision measuring neutrons

표 2. 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 중성자 검출 장치의 불확도

	Suggested device	Thermo FTH 762 device	Etc
Uncertainty (%)	±5	±10	Instrument correction factor k=2

2) 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 극저전류 측정 장치의 측정 속도, 전류의 정밀도, 정확도에 대한 실험 결과 및 고찰

고속 고정밀 중성자 측정을 위한 극저전류 측정 장치의 측정 속도, 전류의 정밀도, 정확도에 대한 실험 결과는 표 3과 같다. 측정 속도에 대한 테스트를 위해 신호발생기(analog)를 조정하여 100Hz Ramp,  $V_{min} = 0V$ ,  $V_{max} = 0.1V$ 를 설정하고 DUT로 전류를 측정하였다. 전류의 정밀도에 대한 테스트를 위해 기준 전류계와 DUT 전류계에 2M 가변저항을 조정하여 스위치를 on/off 했을 때 전류 변화량 측정하였다. 정확도에 대한 테스트를 위해 전류 소스를 100nA로 설정하여 기준 전류계의 전류값과 DUT 전류계의 전류값을 측정하여, 각각 측정된 결과값의 평균값을 이용하여 정확도를 측정하였다. 표 3에 나타난 바와 같이 기존의 극저전류 측정장치에 비하여 속도, 정확도 등에 대해서 보다 높은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 한편, 정밀도의 경우에는 기존의 극저전류 측정장치에 비하여 낮은 유효 자릿수인 4 자리를 나타내었다. 그러나 유효 자릿수 4자리 변화정도라도 충분히 표현이 가능한 것으로 확인할 수 있었다. 모든 실험에서 총 10회의 데이터 측정 테스트를 수행하였다.

Table3. Microcurrent precision measurement device experimental results analysis of measuring speed, precision of the current, accuracy for high speed high precision measuring neutrons

표 3. 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 극저전류 측정 장치의 측정 속도, 전류의 정밀도, 정확도에 대한 실험 결과 분석

	Suggested device	Keithley device
Speed (Hz)Existing	100K	1K
Precision (Significant digit)	4	5
Accuracy (bit)	15	12

3) 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 고압생성부에 대한 출력전압 범위 실험 결과 및 고찰

고속 고정밀 중성자 측정을 위한 고압생성부에 대한 출력전압 범위에 대한 실험 결과는 표 4와 같다. 출력전압 범위에 대한 테스트를 위해 5V 전원과 가변저항(10K $\Omega$ )을 연결하여, 오실로스코

프용 프로브(전압변환비율 1:100)를 고압 출력단자에 연결하여 가변저항을 조정하여 출력 전압 범위를 측정하였다. 표 4에 나타난 바와 같이 출력전압범위는 목표로 설정한 0 ~ 2KV를 나타남을 확인하였다.

Table4. Output voltage range results analyzed for variable high voltage generator unit for high speed high precision measuring neutrons

표 4. 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 고압생성부에 대한 출력전압 범위 실험 결과 분석

	Suggested device	Keithley device
Output voltage range (V)	0 ~ 2K	0 ~ 2K

## V 결론

본 논문에서는 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어 설계방법을 제안하였다. 제안된 고속 고정밀 중성자 측정 장치 모듈은 중성자 센서부, 가변 고전압 발생부, 극저전류 정밀 측정부, 임베디드 시스템부, 디스플레이부 등으로 구성된다. 한편, 극저전류 정밀 측정부는 중성자 센서에서 출력되는 고정밀 고속의 극저전류 신호를 고성능 A/D 변환기를 사용하여 정밀하고 빠르게 측정하고 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 기능을 수행하였다. 본 논문에서 제안된 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어를 실험한 결과, 불확도, 중성자 측정 속도, 정확도, 중성자 측정 범위 등에서 기존의 장치보다 우수한 성능이 나타남을 확인할 수가 있다. 따라서 제안된 고속 고정밀 중성자 측정을 위한 하드웨어 설계방법으로 고속 고정밀 중성자 측정 장치를 국산화 할 수 있으며, 휴대용 중성자 방사선 측정 장치를 통해 빠르고 정밀하며 안정적인 중성자 방사선 측정 및 실시간 모니터링 환경을 구축할 수가 있으리라 기대된다. 향후 고속 고정밀 중성자 측정 장치의 크기를 보다 소형화하고, 소비전력을 감소시켜 휴대용 중성자 방사선 측정 장치에 용이하게 적용할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

## References

- [1] Nuclear Training Center, "Status of radiation detector and neutron monitor technology", Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Training Center, 2002.
- [2] G. F. Knoll, "Radiation Detection and measurement", Nuclear Instruments and Methods, Vol. 171 No. 1 199p ~ 199p, 1999.
- [3] A. J. Peurrung, "Recent developments in neutron detection", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A Vol. 443 No. 2 400p ~ 415p, 1999.
- [4] F. D. Brooks, H. Klein, "Neutron spectrometry historical review and present status", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A Vol. 476 No. 1 1p ~ 11p, 2002.
- [5] Ghal-Eh. N, Koochi-Fayegh. R, Hamidi. S, "Low-energy neutron flux measurement using a resonance absorption filter surrounding a lithium glass scintillator", Radiation Physics and Chemistry. Vol. 76 No. 6 917p ~ 920p. 2007.
- [6] Paulsen A, Widera R, Berlin A, Trapani A, "Neutron Flux Measurement By Counting the Associated  $3\text{He}$  Particles From The  $T(p, n)$  Reaction corresponding to 500 keV Neutron Energy", Nuclear Instruments and Methods, Vol. 91 No. 4 589p ~ 593p, 1971.
- [7] B. Meftah, T. Zidi, A. Bousbia-Salah, "Neutron flux optimization in irradiation channels at NUR research reactor", Annals of Nuclear Energy, Vol. 33 No. 14 1164p ~ 1175p, 2006.
- [8] Takafumi Aoyama, Takashi Sekine, Shiro Tabuchi, "Characterization of neutron field in the experimental fast reactor JOYO for fuel and structural material irradiation test", Nuclear Engineering and Design, Vol. 228 No. 1 21p ~ 34p, 2004.
- [9] Sergey V. Budakovsky, Nikolai Z. Galunov, Natalya L. Karavaeva, Jong Kyung Kim, Yong kyun Kim, Oleg A. Tarasenko, and Eugenia V. Martynenko, "New effective organic scintillators for fast neutron and short-range radiation detection", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54 Issue. 6 2734p ~ 2740p, 2007.

## BIOGRAPHY

### Kyeong-Uk Jang (Student Member)



2015 : BS degree in Electronic Engineering, Hanbat National University  
2015 ~ current : MS degree course of Electronic Engineering, Hanbat National University

### Joo-Hyun Lee (Student Member)



1997 : BS degree in Electronic Engineering, Hanbat National University  
2000 : MS degree in Electronic Engineering, Hanbat National University  
2013 ~ current : Ph. D course of Electronic Engineering, Hanbat National University

### Seung-Ho Lee (Life Member)



1986 : BS degree in Electronic Engineering, Hanyang University  
1989 : MS degree in Electronic Engineering, Hanyang University  
1994 : Ph. D degree Electronic Engineering, Hanyang University  
1994 ~ current : Professor, Department of Electronics&Control Engineering, Hanbat National University