

Study of Signal Pattern Recognition and Predictive Maintenance in Liquid Scintillators and Photomultiplier Tube

Sang Yong KIM · Hyun-Gi LEE* · Kyung Kwang JOO† · Ji Young CHOI‡

Center for Precision Neutrino Research (CPNR), Department of Physics,
Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

(Received 30 May 2024 : revised 20 August 2024 : accepted 20 August 2024)

In high-energy experiments, photo detectors using photomultiplier tubes require detection materials that absorb the energy of incident particles and convert it into an optical signal. These materials must exhibit high geometric efficiency, scintillation efficiency, and light output. The most common detection materials that satisfy these characteristics are utilized in the form of liquid scintillators where certain organic scintillation solutes are dissolved in a solvent. In order to achieve a high signal-to-noise ratio, this paper is focusing efforts on the development of next-generation liquid scintillators as detection materials and the saturation response of photomultiplier tubes to high-energy gamma rays as photo detector response characteristics. As a preliminary step towards achieving a high signal-to-noise ratio, to date, basic several research that has not been reported was performed on the recognition of detector output signal patterns and predictive maintenance of triggered detectors through signal preprocessing studies.

Keywords: Liquid scintillaor, Photomultiplier tube, Waveform, Convolution, Pattern recognition, Slow control and monitoring system, Predictive maintenance, Pulse discrimination

액체섬광검출용액 및 광전 증배관에 대한 신호 패턴 인식과 예지 보전 연구

김상용 · 이현기* · 주경광† · 최지영‡

전남대학교 물리학과, 중성미자 정밀 연구센터, 광주 61186, 대한민국

(2024년 5월 30일 받음, 2024년 8월 20일 수정본 받음, 2024년 8월 20일 게재 확정)

고에너지 실험에서 광전 증배관을 사용하는 광검출기의 경우, 입사 입자의 에너지를 흡수하여 광신호로 변환하는 검출 물질은 높은 기하학적 가공성, 섬광 효율, 광출력을 가져야 한다. 이러한 특성을 만족하는 대표적인 검출 물질로 유기 섬광 용질이 유기용매에 용해된 검출용액 형태를 활용할 수 있다. 본 연구는 높은 신호 대비 잡음 비를 달성하기 위해, 차세대 액체섬광검출용액에 대한 다양한 검출 물질을 집중 연구 및 개발 중이다. 특히, 광검출기 응답 특성 연구로 고에너지 감마선에 대한 광전 증배관의 포화 응답 연구를 진행하고 있는데, 이를 위한 사전 단계로 이제까지 보고되지 않은 검출기 출력 신호 패턴의 인식과 신호 처리 연구로 유발된 검출기의 예지 보전에 대한 기초 연구를 수행하였다.

Keywords: 액체섬광검출용액, 광전 증배관, 파형, 합성곱, 패턴 인식, 저속 제어 감시, 예지 보전, 펄스 파형 판별

I. 서론 및 동기

고에너지 입자는 검출 물질 내로 입사하여 다양한 상호작용을 겪으며 전파한다. 그 결과, 검출 매질의 에너지 흡수는 고에너지 입자가 에너지를 잃어버리면서 발생된 여기, 이온화, 그리고 2차 입자 생성 과정을 통해 이뤄진다. 입자 반입자의 쌍생성 및 쌍소멸, 그리고 광전 흡수 및 중성자 포획 같은 입자 흡수 상호작용을 제외하고, 비탄성 산란으로 입사 입자의 모든 에너지를 매질로 전달하는 과정은 확률적으로 매우 희귀하다. 고에너지 물리 실험에서 높은 섬광, 가공성에 따른 높은 기하학적 검출 효율, 특정 반응 탐지에 맞는 미량 원소 주입 (doping), 그리고 대규모 생산 경제성을 충족하는 검출 물질은 유기 액체섬광검출용액 (organic liquid scintillator, LS)이고, 보다 상세한 내용은 다음 문현을 참고한다 [1–5].

검출 물질 선택은 물질 내의 상호작용에서 발생한 정보 전달자들¹을 최종적으로 확률적 요동이나 열 소산으로 잃어버리는 차폐과정보다는 신호로 추출하는 과정이 많은 물질이 유리하다. LS는 사용 목적에 따라 그 구성이 다르지만, 기본적으로 유기 용매²와 용질³로 구성된다. LS 내에 원하는 물리 상호작용의 결과는 광신호로, 그 외 결과들은 잡음으로 구분할 수 있다.

그래서, Fig. 1과 같은 LS 체적이 1 톤 이상 검출기에 있는 광검출 면적이 넓고, 양자 효율⁴ 및 광감도가 높은 광전 증배관 (photomultiplier tube, PMT) 사용이 선호된다. PMT는 광신호를 전압 신호로 변환하는 장치이고, 진공관 내 증폭 전극 (dynode)⁵이 내장된 PMT를 사용하는 경우 1–2 kV 고전압 공급이 요구된다 [6]. 고전압 공급에 따른 전압 요동 (ripple)과 전자기 간섭 효과를 줄이기 위해, 전체 증폭 전극 양단에서 증폭률 (gain)은 10⁶ 이상 권장된다 [7]. PMT 구조마다 양자 효율, 증폭률, 그리고 전기적 파형 신호는 고유한 특징을 가지며, 자세한 사항은 다음 문현을 참고할 수 있다 [6,7]. PMT 연속파형 신호는 아날로그 디지털 변환 회로 (analog-to-digital converter, ADC)를 통해 이산 표본화된다. 상용 전압 변화율 시각화 장치 (오실로스코프, oscilloscope) 및 고속 ADC (Flash ADC, FADC)의

시간 분해능⁶은 나노 초 (nano second, ns) 범위에 있다. LS 복사 전이 (형광)⁷가 일어나는 시간 범위는 ns이다. FADC를 이용한 데이터 획득의 기본적 구조는 실시간 연산 중에 신호 처리가 안되는 것을 피하기 위해, 간단한 펄스 신호 획득 논리 제어 (trigger) 알고리즘을 적용하고 1차 중간 저장하는 구조이다. 실시간 1차 저장된 데이터에 복잡한 알고리즘을 적용하여 데이터 분석한다. 본 연구에서 전압 파형 신호의 이산 표본화율 (sampling rate)은 500 MHz로 안정적인 실험을 위해 충분하다.

장기간 계측에서 안정적인 실험을 위해 예측 유지 보수 (예지 보전, predictive maintenance)는 필수적으로 고려되어야 한다. LS 검출기에서 예지 보전 고려 대상은 LS 광투과율, 형광 스펙트럼, 발광 강도, 섬광 효율, 미세 전자회로에서 단락과 합선, 미세 전자회로 잡음 유형과 그 비율, 그리고 집적 회로에서 각 전기적 수동 소자 (저항, 코일, 축전기) 등이다. LS에서 예지 보전 목적은 검출기 특성에 관련하여 물리화학적, 전기적, 기계적 열화를 감지 및 방지하는 기준을 세워, 각 기준에 해당하는 작업을 수행하여 측정 정밀도를 유지 관리하는 것이다. 고에너지 실험의 각 상황별 예지 보전 구축과 활용은 본 보고 범위를 벗어나므로, 본 연구에서는 기초적 응용만 언급한다.

II. 액체섬광검출용액 준비와 파형 신호 측정 결과

상용 LS 및 합성된 LS 샘플 각각 1개씩 준비하고, 샘플들의 스펙트럼들은 Fig. 2 같은 구조를 갖는 형광 분광광도계 (fluorescence spectrometer)을 통해서 여기 (excitation)와 방출 (emission) 스펙트럼들을 조사하였다. LS 샘플의 광신호는 Fig. 3 같은 단계로 PMT로 전압 신호로 증폭 변환 후 FADC를 통해 측정용 컴퓨터에 데이터화하여 저장하였다.

1. 실험 준비

본 연구에서 검출 물질은 이수화학에서 제공하는 선형 알킬 벤젠 (linear alkyl benzene; LAB, C₆H₅–C_nH_{2n+1}, n = 10–13) [8]을 용매로 사용하고, 용질로는 Sigma-Aldrich에서 제조된 2,5-Diphenyloxazole (약칭 PPO) [9]와 1,4-Bis

*Correspondence to: physilhg@chonnam.ac.kr

†Correspondence to: kkjoo@chonnam.ac.kr

‡Correspondence to: opercjy@gmail.com

¹ LS에서 주로 380 nm ~ 680 nm 대역 광자, 전자, 정공, 이온

² 단일 벤젠 고리로 구성된 페닐기 화합물로 입사 입자의 에너지를 흡수하여 자외선 영역대 광자를 방출

³ 용매에서 방출된 에너지를 전자 교환과 공명 에너지 전달 매커니즘으로 흡수하여 수광소자 양자효율이 최대 파장대역에 맞춰 광자 방출. 후보군으로 이중 벤젠 고리를 가지는 페닐기 화합물, 무기 결정, 나노 입자

⁴ 광음극에 (특정 파장의) 입사 광자 수 대비 광음극에서 생성된 광전자 비율

⁵ 광음극에서 광전효과로 방출된 광전자 개수를 설계된 비율로 증폭

⁶ 6 GHz 급 무선 통신이 보편화된 미세 전자회로 분야에서 논리 소자가 작동 (on-off) 할 수 있는 시간 간격

⁷ 원자 혹은 분자들의 전이 행렬 요소에 선택 규칙이 제약 조건으로 적용된 결과

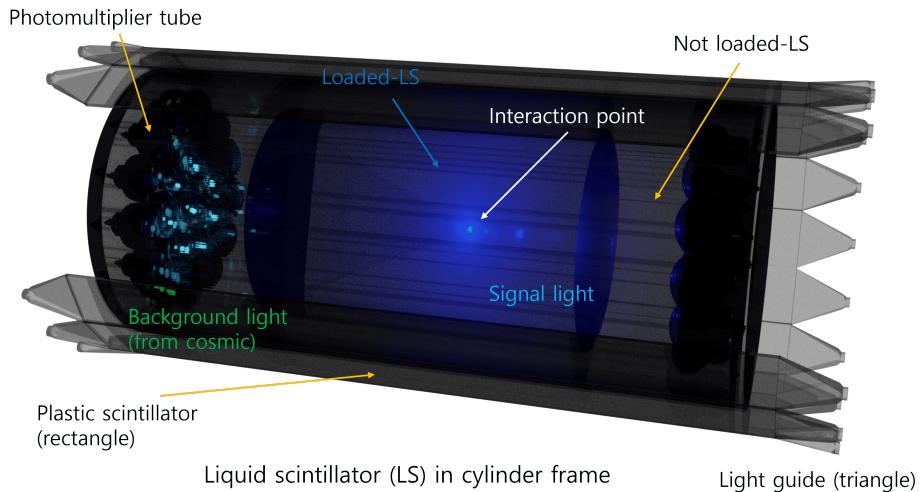


Fig. 1. (Color online) This illustration shows a cylindrical detector filled with a liquid scintillator (LS) with a volume of about one ton. To measure the optical signal generated by the LS, photomultiplier tubes are mounted close by to boost the detection efficiency. Some of the plastic scintillators and light guides used to veto cosmic ray events are missing from this figure. In addition, the LS can be doped (or loaded) with materials that have high neutron capture or photoelectric absorption cross sections, allowing for the observation of the desired physical interactions.

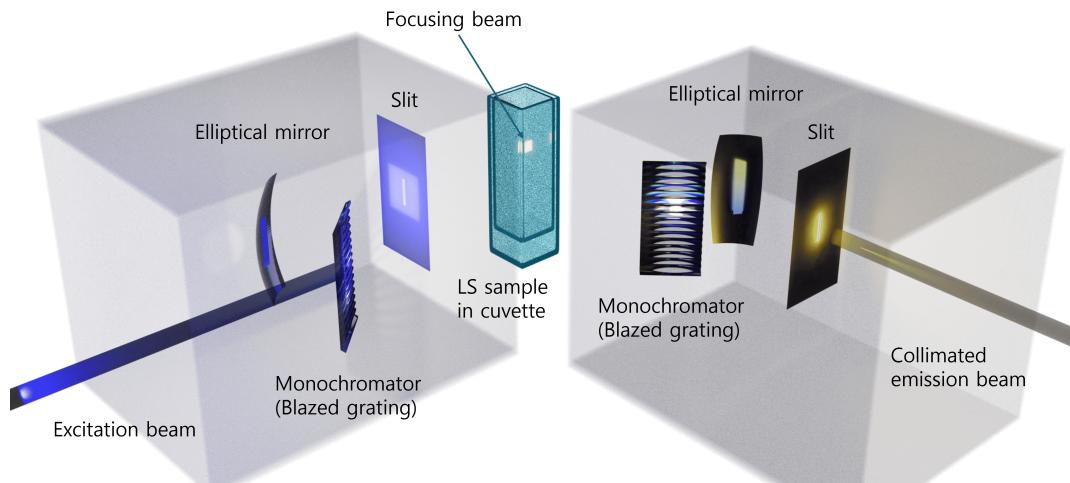


Fig. 2. (Color online) This illustration provides an overview of the structure and operation of a standard fluorescence spectrometer from an optical perspective.

(2-methylstyryl) benzene (약칭 bis-MSB) [10]을 선택하여 합성 LS 샘플 (샘플 A)로 합성하였다⁸. 감마선과 고속 중성자 사건으로부터 발생된 광신호 구분 방법론인 펄스 형태 판별 (pulse shape discrimination, PSD)에서 우수한 성능을 보이는 EJ-309 [12]를 상용 LS 샘플 (샘플 B)로 선택하였다. 본 연구에서 PMT 통합 모듈로는 Hamamatsu의 2 인치 H7195 [13]를, FADC 모듈로는 Notice korea의 KFADC 500 MHz USB 모델 [14]를, 고전압 전원으로는 Ortek의 556 모델 [15]을, 고전압 및 통신용 연결 단자와

⁸ 국내 중성미자 실험 [11] 이후 LAB에 PPO는 3 g/l, bis-MSB는 30 mg/l 농도로 용해 시킨 것이 국내 기준 포화 농도로 선호되고 있다

전선은 국제 전기기술 위원회 (International Electrotechnical Commission, IEC) 기술기준 [16,17]을 만족하는 것을 사용하였고, 이러한 장비들을 통해 신호 획득과 데이터를 수집하였다. 교정용 방사성동위원소 및 광원 있는 (혹은 없는 배경 잡음) 상황에서 H7195의 공급 전압 대비 증폭율 탐색을 수행하여 최적 공급 전압은 1600–1900 V으로 추론하였다. 본 연구에 사용된 파형 데이터 획득 장비의 신호 처리 알고리즘에 대해 상세 언급은 이 보고 지면과 수준을 넘어서지만, 핵심적인 내용은 다음과 같다. 신호 획득을 알리는 논리 (동기화) 펄스 발생 (trigger timing)은 입력 채널의 전압 수준이 임계값 (trigger threshold)을 넘어가는 경우 (첨단 판별, leading edge discrimination)이다. 동기화

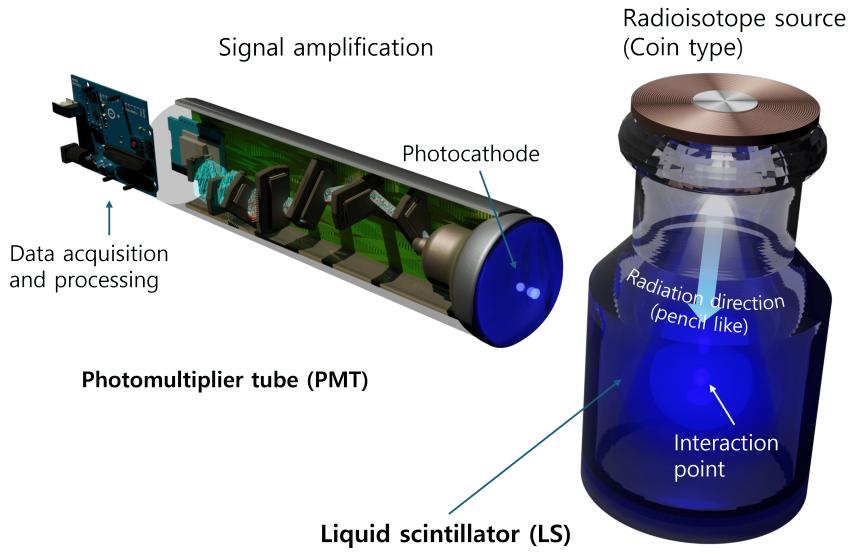


Fig. 3. (Color online) This figure provides an overview of the acquisition of the waveform signals utilized in this study. The actual data acquisition and processing equipment is depicted in miniature for illustrative purposes. The radioisotope was mounted on top of the liquid scintillator vessel, rather than immersed in the liquid scintillator within the vessel.

시간 제어는 시간 분해능 (resolving time) 또는 불감 시간 (deadtime) 보다 짧은 시간 내에 펄스 입력으로 발생된 펄스 중첩 (pulse pile up)⁹을 배제하는 알고리즘 (pulse pile up rejection)을 적용하고 제조사 권장 설정 범위 안에서 최적화하였다.

2. 측정 및 결과 분석

샘플 A와 B를 표준 대기압, 실온, 상대 습도 55% 상태에서 각각 표준 10 ml 수정 큐벳 (quartz cuvette)에 담아 Varian의 Cary Eclipse 형광 분광광도계¹⁰의 고정 장치 (standard single cell holder)에 놓고 Fig. 2와 같이 각 샘플의 여기, 방출 스펙트럼을 200 nm – 600 (800) nm 범위를 설정하고 형광 분광광도계에 설정된 회절 격자와

⁹ 전치 증폭기 (preamplifier)와 펄스 파고 (pulse height) 분석 시스템에서 인접 2개 펄스를 1개 펄스로 처리될 때 발생되는 현상이다. 시스템 설계에서 펄스 발생은 특정한 확률 과정 (예로, 푸아송 확률 과정)을 따른다고 가정한다. 파형 신호가 펄스 획득 조건에 일치하면 정해진 동기화 시간 (gating time) 동안 단일 펄스 획득하도록 (혹은 특정한 시간 동안 푸아송 확률 과정을 따르는 사건이 1번 관찰하도록) 전기적 수동 소자 (저항, 코일, 그리고 축전 소자)들이 조정되어 설계 된다. 변화율 측정에서 동역학적의 과도 응답 (transient response)이 중요하다. 동기화 시간 동안 단일 펄스보다 다중 펄스 비중이 높아지면, 측정 동역학 시스템 상태의 반응은 정상 상태 (steady state) 반응이 지배적으로 된다. 상세한 분석은 다음 문헌을 참고한다 [18–21].

¹⁰ 정격 출력 2 W 제논 (Xe) 램프의 섭광 시간 분해능은 2×10^{-6} 초, 순간 최대 출력은 2 kW, 파장 재현성 오차는 0.2 nm 이다. 형광 동역학 관찰은 시간 분해능이 ns 단위인 시분해 분광 장비 (time-resolved spectroscopy)를 사용한다

슬릿 제어는 5 nm 씩 변화 시켰고, 분광광도계의 PMT 전압은 400 V으로 설정하여 탐색 하였다. 앞서 언급한 환경에서 샘플 A와 B를 각각 100 ml 용기에 담고, 감마선을 방출하는 ¹³⁷Cs과 고속 중성자를 방출하는 ²⁵²Cf 방사성 동위원소 (radioisotope, RI) 선원들을 Fig. 3과 같이 샘플 용기 상단에 부착하고 광신호를 수집하였다. 이 때 PMT 인가 전압은 -1750 V이다. FADC 제조사 [14]가 제공하는 알고리즘과 설정들은 각각 다음과 같다. 첨단 판별에서 동기화 시작 임계 전압 (trigger threshold in leading edge discrimination)¹¹은 20 mV, 펄스 폭 임계값 (pulse width threshold)¹²은 20 ns, 펄스 임계 개수와 간격 (pulse count threshold and pulse count interval)¹³은 1개와 200 ns, 파형 기록 시간 (recorded length)은 256 ns, 파형 기록 시작 후 동기화된 신호의 지연 시간 (trigger time delay)은 50 ns, 그리고 동시 계수 폭 (coincidence width)과 전압 기준선 보정 (zero suppression) 설정은 단일 PMT 사용인 경우로 해당되지 않아 임의 설정, 그리고 불감 시간은 동기화 시작 임계 전압을 20 mV 설정하여 동기화 신호 발생 빈도가 100 Hz 이하로 판단되어 0 으로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 교정용 RI 선원의 출고시 봉괴율과 반감기,

¹¹ 해당 FADC에서는 입력 전압 파형을 10 배 증폭

¹² 동기화 시작 임계 전압을 초과하는 배경 잡음 펄스를 배제하기 위해, 추가로 펄스 파형 정보를 이용

¹³ 연속 다중 펄스와 단일 펄스를 구분하기 위한 시간 간격과 펄스 수. 주어진 시간 간격 동안 해당 펄스 수가 탐지되면 동기화 신호 발생과 동시에 신호 획득 논리 제어는 다시 초기화된다. 신호 순차적인 행태를 알고 있거나 외부 동기화 (external trigger) 신호를 이용하는 경우에 적용

붕괴 사슬, LS 샘플과 RI 선원 간의 기하학적 검출 효율, 동기화 시작 임계값 그리고 신호 획득 효율을 고려하여 동기화 신호 발생 빈도 (trigger rate)를 100 – 10 Hz 수준으로 판단하였고, 실측치는 평균 24 Hz 이였다. 최종적으로 사건 획득 수는 10^6 으로 설정하였다.

1) 액체섬광검출용액 스펙트럼

사용된 형광 분광광도계의 시간 분해능은 마이크로 초이고, 여기 파장 당 방출 스펙트럼 탐색 시간은 약 12 초로 샘플 형광 전이 시간 규모가 나노초라는 것을 고려하면, 형광 동역학 형태는 정상상태라 볼 수 있다. Figure 4은 탐색된 샘플 A와 B의 여기 방출 행렬 (excitation emission matrix, EEM)이다. Figure 4(a)는 샘플 A의 EEM이고 320 nm – 390 nm 파장 대역, 최빈값 360 nm 잘 흡수하고 380 nm – 420 nm 파장 대역 에너지, 최빈값 400 nm 잘 방출하고 있다. Figure 4(b)는 샘플 B의 EEM이고 395 nm – 405 nm 좁은 파장 대역 에너지를 잘 흡수하고 400 nm – 500 nm 넓은 파장 대역 에너지, 최빈값 420 nm를 방출하고 있다.

2) 파형 신호

Figure 5는 Fig. 3 언급된 측정 구조와 2.2절에서 언급한 PMT, FADC 조건으로 설정하여 실험을 하여 얻어진 데이터들이고, 샘플 A와 B에서 발생된 전압 펄스 파형 (waveform)들을 적분한 전하 분포이다. Figure 5(a)의 전하 축 기준 1100 지점에서 LS의 에너지 분해능에 의한 분포의 펜션으로 컴프턴 단애 (Compton edge)라고 추정하는 것은 주의해야 한다. Figure 5(b)는 신호에 대한 검출기 반응을 합성곱을 하여 모델링 한 것이다. 합성곱 (convolution) 핵 (kernel)은 확률론에서 중요한 정리인 중심극한정리 (central limit theorem)에 의해 정규 분포를 따르는 확률 밀도 함수로 선택하였고, 응용 관점에서 간단한 어림은 다음 문헌을 참고할 수 있다 [22]. 현실적인 어림은 선형 규모의 총 전하 분포 시각화에서 겉보기 컴프턴 단애로 추정되는 무릅 능선에 해당하는 높이의 절반에 해당하는 수평선을 그어 그 수평선과 교차하는 전하 분포의 x 축 값을 컴프턴 단애로 추정하는 것이다. Figure 5(b) 가장 나쁜 에너지 분해능을 가지는 경우에 겉보기 컴프턴 단애는 ~ 1000 ADC이고 신호 왜곡을 고려한 컴프턴 단애 추정은 ~ 3200 ADC이다.

Figure 6은 샘플 A와 B로부터 발생된 전압 펄스 파형 데이터 들이다. 본 실험에 사용한 표준 RI 선원의 방사능

크기는 ^{252}Cf 의 경우 7.4 kBq이고 ^{137}Cs 은 37 kBq이다. 표준 RI 선원들의 반감기, 자체 흡수를 고려하면 전체적으로 고속 중성자 선원을 사용했을 때, 펄스 파형에서 전압 강하와 펄스 중첩이 더 많이 발생함을 관찰할 수 있다. FADC의 동적 입력 전압 범위는 -2 V – 2 V 임에 따라, 전압 강하 폭이 동적 범위를 초과해서 발생하는 데이터 획득 (data acquisition, DAQ) 포화/한계¹⁴가 Fig. 6(a)–(d)에서 보인다. Figure 6(e)–6(h)은 Fig. 6(a)–6(d)의 파형을 Sobel 핵의 수평방향 성분으로 합성곱 (convolution)한 파형이다 [23]. Sobel 핵은 픽셀값 변화가 큰 부분인 객체의 경계 탐지 성능이 우수하여 객체 인식, 이미지 분할, 특징 추출 분야에서 기본 필터로 많이 사용되고 있다. 일반적으로 3×3 행렬로 구성되며 수평, 수직 방향의 1차원 미분 사상으로 분해할 수 있다. 본 연구에서 Sobel 핵의 수평 성분으로 합성 곱을 한 파형을 1차 미분 파형이라고 지칭한다. 기존 PSD 연구의 방법론에서 중성자/감마선 사건 분리하는데 필요한 PSD 매개변수가 존재한다¹⁵. Figure 6 같이 파형 적분 시, 파형 꼬리와 머리 지역의 정의역 경계가 PSD 매개변수의 중요 인자이며, 이 경계 값은 경험적으로 결정된다. 적분 경계값은 섬광 물질의 섬광 감쇠 시간에 따라 다르지만, LS에서는 파형의 최대 전압 강하 지점을 기준으로 20–60 ns 지난 시점을 정의역 경계 값으로 잡고 있다. 물질과 고속 중성자 (고속 중성자 사건이라 지칭) 및 감마선 상호작용 (감마선 사건이라 지칭)에서 유래된 파형 머리 폭과 꼬리 길이를 보면 고속 중성자에서 유래된 파형이 더 같다. 전압 강하 후 회복 시간을 고려하면 꼬리 시작 부분은 1차 미분 파형의 최소 지점에 해당함을 관찰하였다. 또한 1차 미분 파형에서 샘플 B의 최소 값 (-1000) 이 샘플 A 보다 더 낮음을 관찰 할 수 있으며, 현 보고에서 평균적으로 고속 중성자 사건에 대한 1차 미분 파형 반응이 감마선 사건에 대한 반응보다 크다고 단정 짓는 것은 무리이며, 현 검출기 크기에 대한 선원 보정과 불확정도에 따른 정밀 분석은 차후 보고 한다.

¹⁴ 신호 응답 특성 논의는 검출 모듈과 데이터 획득 시스템 측면을 구분해야 한다.

¹⁵ 고속 중성자는 핵자들과 주로 탄성 산란 혹은 중성자 포획으로 에너지를 손실한다. 중성자는 강한 상호작용 (strong interaction)과 그 잔류 형태로부터 핵자 간 (또는 핵) 산란으로 목표 물질의 이온화, 여기 외에 목표 물질 핵의 자발적 핵붕괴와 분열을 일으킨다. 감마선은 광전 흡수, 컴프턴 산란, 양전자 전자 쌍생성, 광핵 반응을 통해서 에너지를 손실한다. 중성자의 탄성 산란으로 열화되어 최종적으로 열 중성자 포획되는 것처럼, 물질 내에서 감마선의 에너지 손실 매커니즘은 목표 물질의 원자 번호에 따라 다르지만 0.5 MeV 이상 감마선 대부분은 컴프턴 산란 형태이다. 감마선 에너지가 전자 양전자 쌍생성이 가능한 경우, 쌍생성 후 양전자 전자 쌍소멸로 인한 0.5 MeV 이상 광자가 발생한다. 컴프턴 산란으로 감마선 에너지의 일정 비율이 튀어 나간 전자에 전달된다. 산란 된 감마선은 다시 지속적인 비탄성 산란으로 에너지가 손실되며 최종적으로 광전 흡수를 거친다. 일반적으로 양성자 같은 무거운 하전 입자 발생 빈도는 감마선보다는 중성자가 더 높다. 또한 무거운 (하전) 입자는 관심 영역에서 전자보다 제공 시간이 높다는 것을 관찰할 수 있다. LS의 정보 전달자 생성 에너지가 낮아질수록 더 높은 PSD 능력을 가진다.

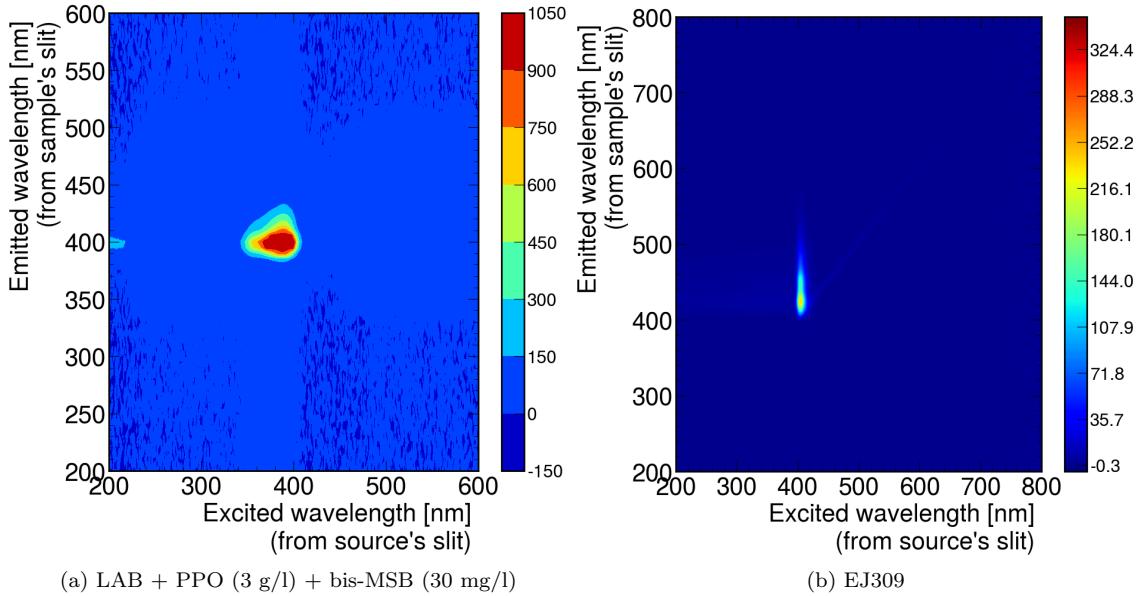


Fig. 4. (Color online) The excitation-emission matrices (EEM) with a fluorometer (Varian Cary Eclipse) to samples A and B in 10 ml cuvettes are presented in figure (a) and (b), respectively. (a) Sample A (Ref. LAB) is a laboratory-synthesized LS sample comprising LAB, PPO, and bis-MSB, with a ratio of 1 l for LAB, 30 mg/l for bis-MSB, and a total of 3 g/l for PPO. (b) Sample B (EJ309) is a commercial LS sample, EJ309 from the EJ technology company.

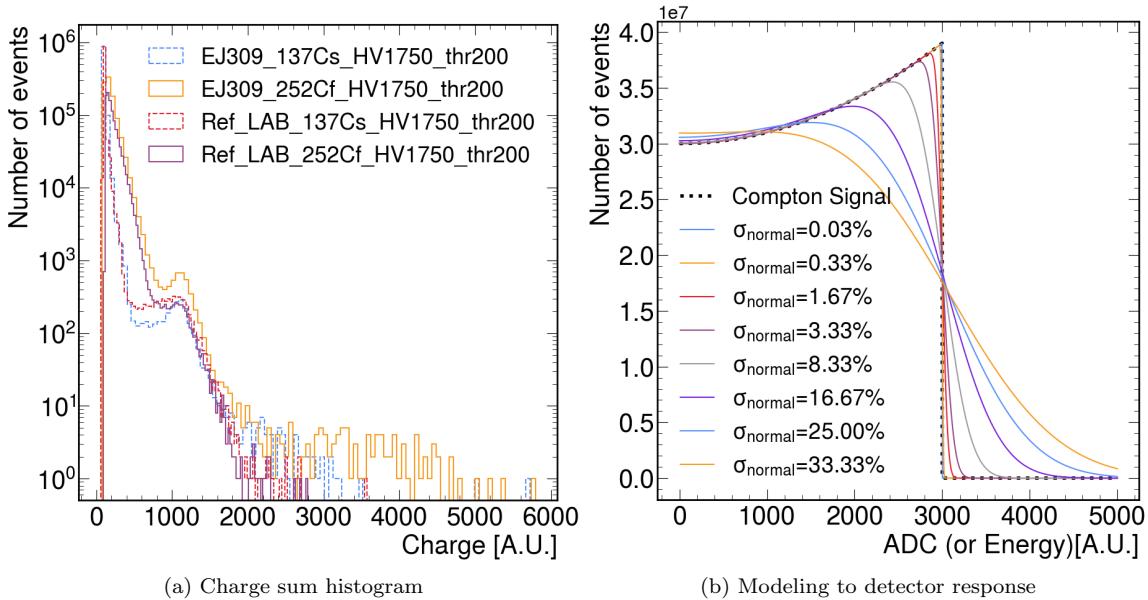


Fig. 5. (Color online) (a) The charge histogram was generated using a KFADC 500 MHz USB module with a 2-inch PMT H7194 and standard 370 kBq ^{137}Cs and ^{252}Cf radioisotope (RI) sources. The mounting of the radioisotope was constructed in such a way that it was attached to the top of a 100 ml container containing Sample A (Ref. LAB) and Sample B (EJ309), as illustrated in Fig. 3. The supply voltage of the PMT was set at 1750 V, and the data acquisition (DAQ) settings were configured to align with the recommended settings for liquid scintillators. Given that the voltage gain ratio of the DAQ system is 10, the leading edge discrimination trigger threshold (thr) of the DAQ is, in fact, 20 mV. (b) The following plot illustrates the dependence of the detector response on the kernel of detector resolution. The detector response is modelled as a convolution between the charge distribution signal and the kernel of detector resolution, which is assumed to be normally distributed with a standard deviation of σ_{normal} .

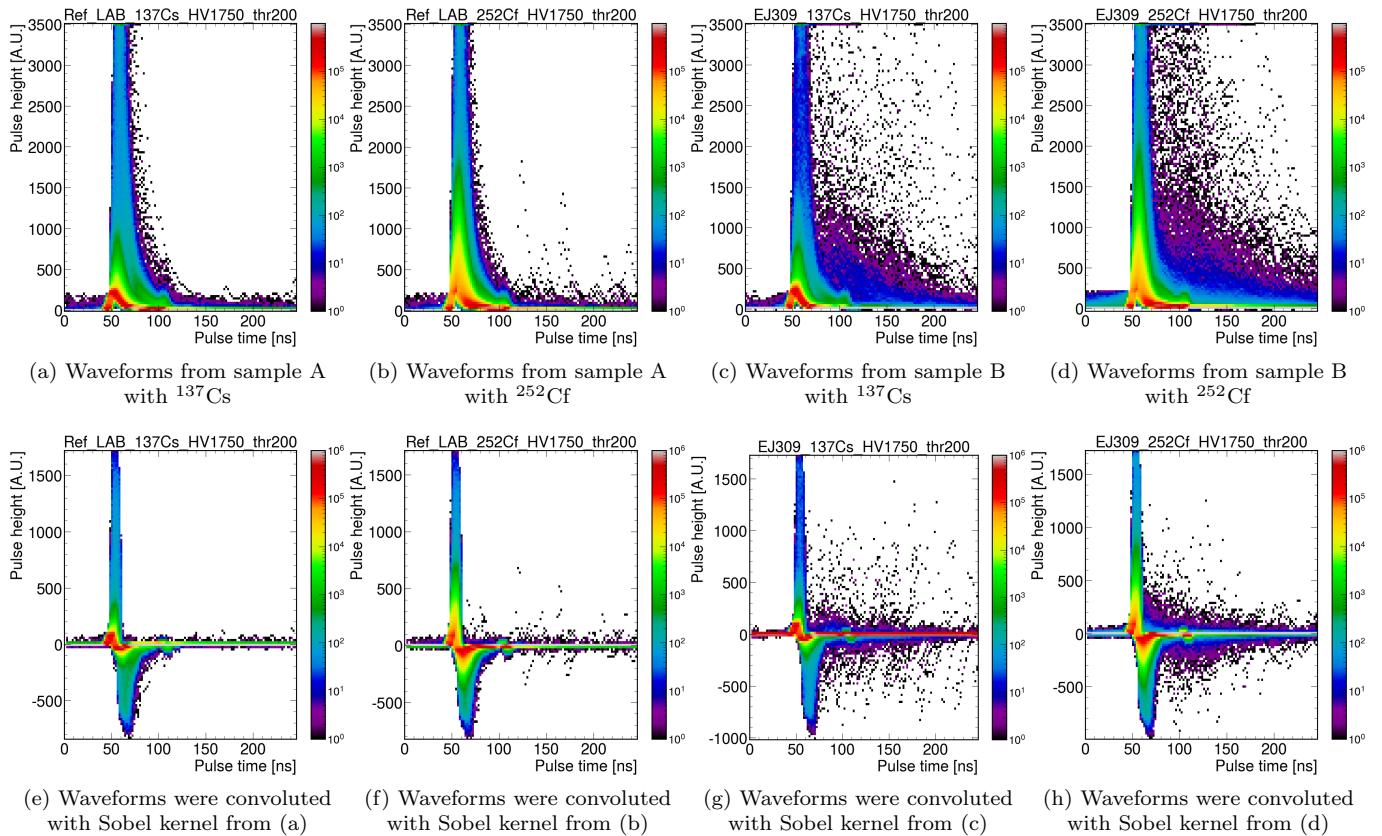


Fig. 6. (Color online) These (a)–(d) waveforms were generated using a KFADC 500 MHz USB module with a 2-inch PMT H7194 and standard 370 kBq ^{137}Cs and ^{252}Cf radioisotope (RI) sources. These (e)–(f) waveforms represent the first derivatives (or convolutions with a Sobel kernel) of the waveforms illustrated in figure (a)–(d). The mounting of the radioisotope was constructed in such a way that it was attached to the top of a 100 ml container containing Sample A (Ref. LAB) and Sample B (EJ309), as illustrated in Fig. 3. The supply voltage of the PMT was set at 1750 V, and the data acquisition (DAQ) settings were configured to align with the recommended settings for liquid scintillators. Given that the voltage gain ratio of DAQ system is 10, the leading edge discrimination trigger threshold (thr) of the DAQ is, in fact, 20 mV.

3) 논의

^{252}Cf 는 대부분 알파 붕괴로, 나머지는 자발적 핵분열을 통해, 다양한 방사선을 방출한다 [24]. 관측된 데이터와 붕괴 사슬을 고려하면 ^{137}Cs 보다 ^{252}Cf 이 더 많은 정보 전달자들을 생성한다는 것을 추론할 수 있다. 비하전 입자 (감마선, 중성자)와 물질 간의 상호작용 형태를 보기 위해, 감마선 사건과 중성자 사건을 구분하는 PSD 적용하는 것 외에 광전, 컴프턴, 쌍생성, 광핵 반응 단면적에 비롯된 에너지 전달과 흡수 효율을 고려해야 한다. LS 용기와 PMT 간의 굴절률 정합하고 측정하였다. Figure 5(a)에 RI 별로 동일한 무릎 능선이 보이는 것은 배경 우주선 배제 (veto)하지 않아 생긴 효과이다. 배경 우주선 (cosmic-ray background)과 검출 물질 간의 상호작용에서 발생하는 2차 입자 발생 빈도와 그 자유 행로 길이보다 작은 LS 체적, 계수 능력이 특화된 검출기 구성으로 배경 우주선 배제를

수행하지 않았다. 현재 실험 조건 구성에 대한 배경 우주선 배제 효과에 대해서 정밀 전산 모사, 샘플 크기, 검출기, 동시 회로 구성, 필터 구성, 신호 동기화 알고리즘 변경 등은 현재 추가 실험 중이다. 샘플의 EEM은 샘플들의 전자 구조를 유추 할 수 있는 정보를 주며, 이 연구에서 전자 구조 내 에너지 전달은 형광 분광광도계의 시간 분해능에 의해 제한되었다. 샘플 B가 샘플 A 보다 방출 최빈값이 더 긴 파장에 있고 그 방출 대역이 넓다. 또한 샘플 B가 샘플 A 보다 더 긴 여기 파장 대역을 가지고 있어, 정보 전달자 생성하는 필요한 에너지가 더 작다는 것을 알 수 있으며, 또한 평행 데이터에서 펄스 중첩이 더 많이 일어나는 것을 볼 수 있다. 중성자 사건과 감마선 사건을 구분하는 전통적인 방법론은 PSD이다. LS 기반 검출기 주된 목적은 광자를 검출하기 위한 높은 감도 및 신호 대 잡음비를 달성하는 것이며, 이 목적 구현에 따른 기회비용으로 에너지 분해능은 반도체 검출기에 비해 상대적으로 낮고, 총 전하 (에너지)

분포의 퍼짐이 발생할 수 있다. 기존 PSD 연구는 노동 집약적이고 검출 (혹은 신호 획득) 모듈의 응답 왜곡 및 포화가 발생하면 기존 PSD 알고리즘은 강건성 (robust)이 떨어져 중성자/감마선 사건 분리 효율이 떨어진다. 중성자 사건과 감마선 사건의 파형 꼬리 시작 부분이 1차 미분 파형 최소 지점에 대응되는 관찰은 PSD 알고리즘 개발에서 강건성이 높은 패턴 인식을 구현할 수 있다는 의미이다.

III. 핵 입자 물리의 예측 유지 보수 응용

산업 현장에서의 예측 유지 보수 (예지 보전, predictive maintenance)는 모듈 단위의 프로그래밍 가능 논리 제어기 (programmable logic controllers, PLC)와 인간과 기계 간의 통신부 (human machine interface, HMI)를 결합하여 수행되거나, 그 상위 계층으로 PLC, HMI 그리고 네트워크 통신이 통합된 지역 단위의 감시 제어 및 데이터 획득 (supervisory control and data acquisition, SCADA) 형태로 수행된다. 중소형 과학 프로젝트에서는 SCADA 형태가 선호된다¹⁶. 감시 제어 프로그래밍은 유한 상태 기계 (finite-state machine) 패턴으로 작성하며, 그 추상적 표현은 블록 다이어그램 (block diagram)으로 표현한다. 이러한 감시 제어는 전산 운영 체제에서 운영 되며, 산업계에서 마이크로소프트 (microsoft) 사의 윈도우즈 (windows)는 사용자 관리 및 지원 용이성 측면에서 선호되는 운영체제이다. 과학 분야에는 안정성이 입증된 리눅스 (linux) 계열이 선호된다¹⁷. 중앙처리유닛 (central processing unit, CPU) 또는 고급 축약된 명령어 집합 컴퓨터 (advanced reduced instruction set computer machine, ARM)가 내장된 내장형 시스템 (embedded system)과 초소형 제어 시스템에는 직류 3.3 V, 5 V 전원이 선호된다. 산업용 감시 및 제어 시스템에는 직류 12 V, 24 V가 표준 전원으로 사용되고 있다¹⁸. SCADA은 핵 입자 물리 실험의 저속 제어 감시 시스템 (slow control and monitoring system, SCM)에 대응된다.

¹⁶ 거대과학 시설에서 표준 분산 제어형 실험 물리 및 산업 제어 시스템 (experimental physics and industrial control system, EPICS)이 선호되고 있다. 사물 인터넷 발달로 SCADA 시스템과 분산 제어 시스템 (distributed control system, DCS) 유의미한 차이는 없으며, 단지 원격 제어의 접근 차이만 있다

¹⁷ 현재 핵 입자 물리 연구에서 Red Hat Enterprise Linux (RHEL), Rocky Linux, Alma Linux를 채택하고 있다

¹⁸ SCADA에서 신호 규모는 직류 전압 1 V – 5 V 및 전류 1 mA – 20 mA 이내이다. 내장형 시스템의 공급 전압은 발열과 저전력 설계 요구에 따라 1.7 V, 산업용은 전기 잡음 영향과 접촉 전압 안전 기준을 고려하여 상대 습도가 높은 환경에서는 12 V 이내로 엄격해진다

1) 기본 설정

이전 연구 [25]에서 언급한 Xilinx의 프로그래밍 가능 집적회로 (field programmable gate array, FPGA) 모듈이 내장된 National Instrument (NI)의 compact DAQ (cDAQ) 시스템, 내장형 시스템인 Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Pico, Arduino Mega 모델을 현재 수행 중인 비활성 중성 미자 탐색의 예지 보전을 수행할 시스템으로 고려 하였다. 그에 따라 최상위 감시 제어 플랫폼은 SCADA 형식 체계를 지원하는 소위 “랩뷰”라고 불리는 실험실 가상장치 공학 작업대 (laboratory virtual instrument engineering workbench, LabVIEW)를 선택하였다.

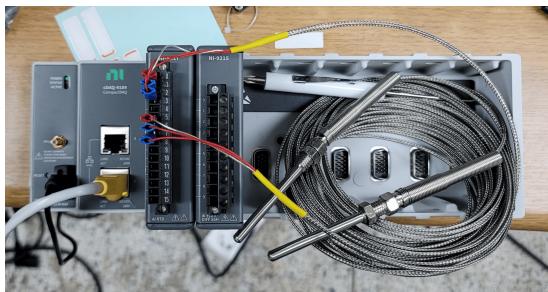
cDAQ 시스템을 이용한 LabVIEW 프로그래밍은 윈도우즈에 최적화되어 있어 리눅스에는 직접 그 기능을 구현하고 설정해야 한다. 구체적인 보고는 지면 목적에 맞지 않으며, 학문 후속 세대가 시행착오 할 가능성성이 높은 중요한 부분만 보고한다. LabVIEW 및 Linux Device Drivers의 원격 저장소는 리눅스 소프트웨어 관리자 도구 (Red-Hat package manager, rpm)를 통해 등록된다. 등록된 NI 원격 저장소에 리눅스 소프트웨어 관리자 명령어 (Dandified Yum, dnf)를 통해 리눅스에 데이터 획득 및 자동화 탐색 (data acquisition measurement and automation explorer, DAQmx)과 가상 장치 소프트웨어 설계도 (virtual instrument software architecture, VISA), NI 장치 관리자, 그리고 LabVIEW 프로그램을 빌드한다¹⁹.

장치 (hardware)를 기계어 수준으로 관리하는 리눅스 커널의 통신 부분에 사용자 권한을 할당하고 범용 직렬 포트 (general serial port) 상태를 확인한다. SCADA 형식 체계에서 데이터베이스는 필수 요소이기 때문에, 본 연구에서는 관계형 데이터베이스로 MariaDB (or MySQL)를 선택하여 직접 LabVIEW 프로그래밍에 연동 및 구현하였다.

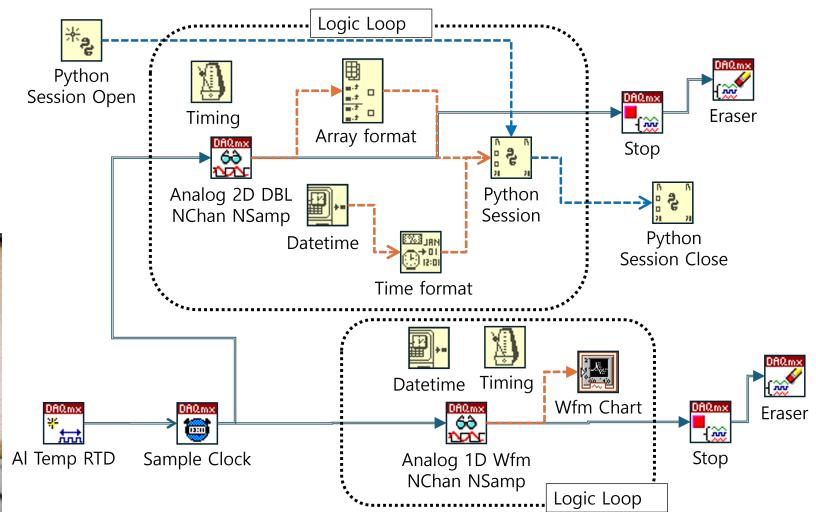
2) 온도 감시 구현

이 보고에서는 온도 의존적인 금속의 팽창에 따라 저항이 변한다는 원리를 이용한 저항 온도 검출기 (resistance thermometer detector, RTD) 방식을 채택하였다. RTD 결선 방식은 4선식 혹은 3선식이 많이 사용되며, 온도 검출 물질로는 백금, 공칭 저항은 100–1000 Ω 대역이 선호된다. 사용된 장비로는 NI 9217 RTD 수신 모듈과 Pt 100

¹⁹ sudo dnf install ni-labview-2024-community ni-daqmx ni-visa ni-hwcfg-utility ni-daqmx-labview-support ni-visa-labview-support
sudo dkms autoinstall
sudo reboot



(a) The picture for cDAQ equipped with an NI 9217 RTD slot, with an RTD probe connected.



(b) The following diagram illustrates a rough block diagram for a cDAQ equipped with an NI 9217 RTD slot, with an RTD probe connected.

Fig. 7. (Color online) (a) The photograph depicts an NI 9217 RTD slot connected to RTD probes and an NI 9215 voltage module with no probe connected, mounted and operational within the cDAQ. (b) The main block diagram comprises a DAQmx channel node (analogue input), which directly controls the NI 9217 RTD receive module; a DAQmx timing node (sample clock), which generates a synchronous signal; a DAQmx stop node, which aborts signal acquisition; and a DAQmx eraser node, which clears the buffer. The sub-logic blocks located below the main block diagram comprise a node for visualising the waveform, a node for displaying the current time, and a loop period node. The sub-logic block located above the main block consists of the following components: a DAQmx read node to read the temperature value, an array node to process the waveform, a loop period node, and a Python node that manipulates ‘onepush_python.py’ for the purpose of pushing each piece of information to the database. To ensure the operational correctness of the block diagram, the start and end of each DAQmx and Python session sequence were constructed outside of the sub-logic loop.

RTD (3 wire) 탐촉 모듈을 선택하였다²⁰. NI-DAQmx와 LabVIEW를 이용한 온도 감시 제어 장비와 블록 다이어그램은 Fig. 7(a), 7(b)이다. Python 코드 명세는 Appendix 의 코드 목록 1과 같다.

3) 내장형 시스템

높은 경제성을 달성하고 장비 소형화에 맞는 감시 체계 구현이 필요하다면, 상용화된 내장형 시스템이 좋은 대안이다. 내장형 시스템으로 Raspberry Pi Pico (pico) 선택하였고, 센서 모듈로는 온습도계 (DHT22)와 초음파 (HCSR04+) 모듈을, 화면 표시에는 LCD 모듈을 고려했다. Pico의 범용 입출력 (general-purpose input and output, GPIO), 각 모듈에 대한 아날로그 디지털 변환회로 (analog-to-digital converter, ADC) 및 범용 비동기 송수신 (universal asynchronous receiver/transmitter, UART)

및 내부 집적회로 (inter-integrated circuit, I2C) 통신, 그리고 전원은 Fig. 8(a)을 바탕으로 연결하였고, pico 제어는 micro python 프로그래밍 언어를 사용하였다. 실제 구현된 시스템은 Fig. 8(b)와 같다. 컴퓨터와 통신은 UART 방식을 선택하였다. 리눅스 상 LabVIEW 프로그램과 내장형 시스템 통신에 대한 시험용 명세는 Fig. 9(a)와 같고, 프론트 패널 결과는 Fig. 9(b)와 같다.

IV. 요 약

광전 증배관을 사용하는 경우, 고에너지 입자로부터 축적된 에너지는 섬광체를 통해 광전 증배관에 민감한 파장대의 빛으로 변환되어 방출되어야 한다. 액체섬광검출용액은 높은 기하학적 가공성, 원하는 사건 탐지를 위한 미량 원소 주입 후 안정성, 섬광 효율, 광출력, 높은 생산 경제성 등 다양한 조건을 충족시킨다. 이러한 액체섬광검출용액 기반 검출기에서 고려될 수 있는 신호 패턴에 영향을 주는 요소들을 살펴보았다. 액체섬광검출용액 샘플들의 전자 구조 탐색, 감마선과 고속 중성자 사건에 대한 광전 증배관을 통한 액체섬광검출용액의 반응, 검출기 분해능에 따른

²⁰ RTD 탐촉자의 공칭 저항은 100 Ω, 온도 탐지 물질은 백금 그리고 신호선은 3선식. NI 9217 모듈 전원 공급 '+' 터미널에 RTD 탐촉자의 전압선(hot line)을 결선.

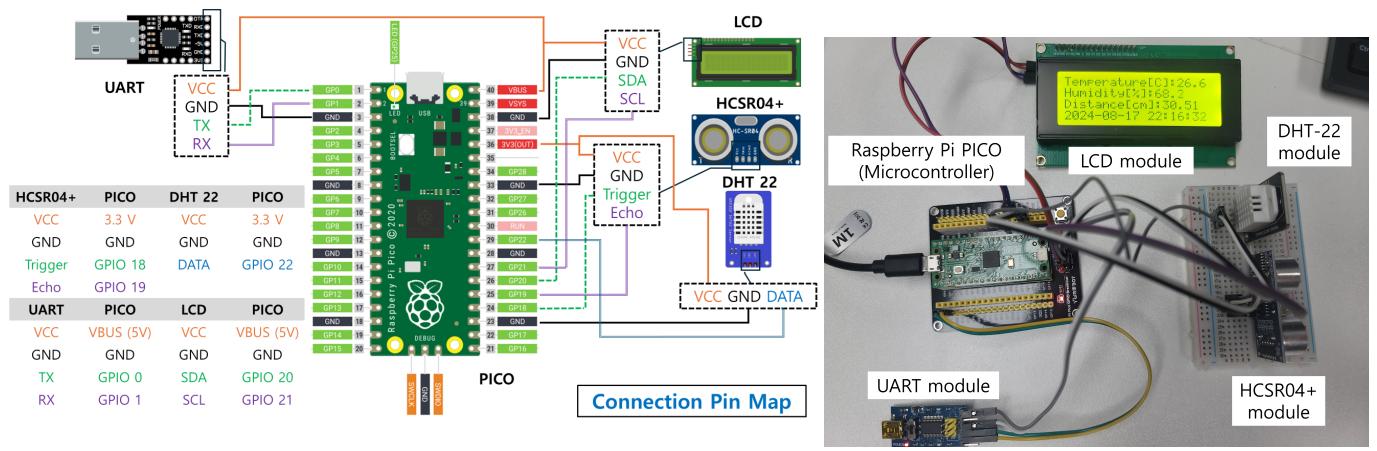


Fig. 8. (Color online) (a) The Raspberry Pi Pico has a limited number of ADC, UART (TX, RX) and I2C (SDA, SCL) channels that it can support. For further details on the assigned communication channels, please refer to the official Pico documentation. (b) The sensors and displays were connected to the Raspberry Pi Pico, an embedded system, and monitored and controlled using micro-python. In this figure, the micro-USB connection was used for testing the 5V voltage supply, not for communication. The communication with a desktop computer was conducted through the GPIO port using UART protocol and voltage supply.

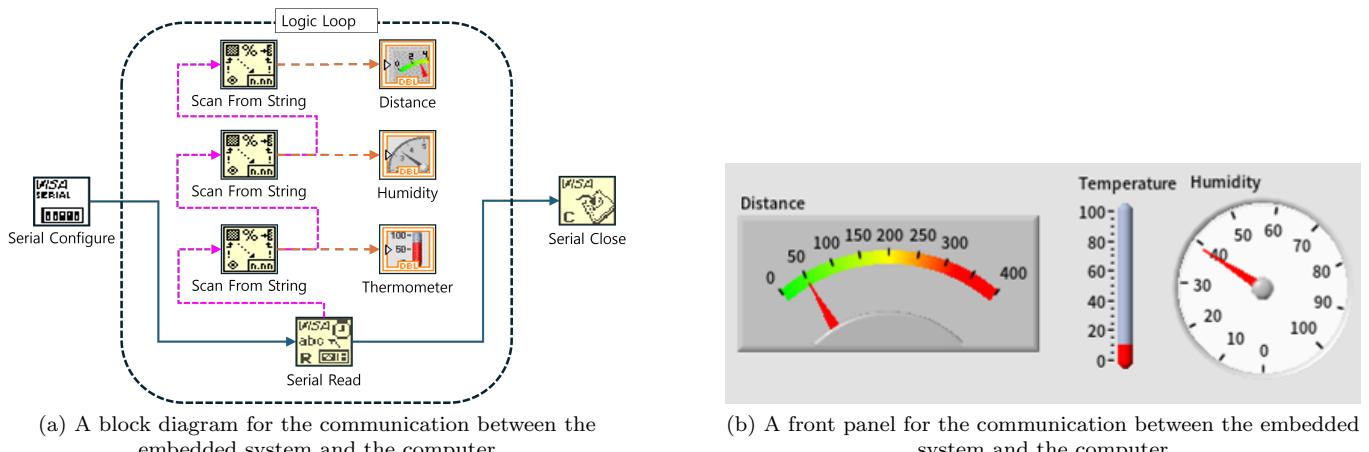


Fig. 9. (Color online) The block diagram and front panel of the LabVIEW prototype that implements the communication between the embedded system and the computer shown in Fig. 8.

총 전하 분포의 왜곡, 신호 획득 시스템에서 고려될 수 있는 펄스 중첩 등을 언급하였다. 차세대 액체섬광검출용액 연구 개발에서는 용매, 용질의 전자 구조와 에너지 전달 매커니즘에 대한 이해가 필수적입니다.

노동 집약적인 PSD 연구 체계를 개선하기 위해, 고속 증성자와 감마선 사건에서 비롯된 파형에 수학적 불변량을 찾고자 합성곱 연산을 수행하였으며, 이를 통해 PSD 패턴 인식 알고리즘 개발을 위한 단서를 발견하였다. 또한, PSD 능력이 높은 액체섬광검출용액을 이해하기 위해 측정된 여기방출 행렬과 이전 연구에서 수행된 밀도 범함수 이론 계산 결과를 비교하였다.

펄스 중첩 외에도 광전증배관과 신호 획득 시스템에서 신호 왜곡을 유발할 수 있는 요인들을 탐색하였다. 이러한 탐색 결과는 검출기 연구 개발에서 귀중한 데이터베이스 자료로 활용될 수 있으며, 검출기 신호 전산 모사의 입력값으로도 활용될 수 있다.

이를 위해서는 측정의 정밀도를 유지하기 위한 일련의 과정이 필요하다. 산업 현장에서는 SCADA 형식 체계로 예측 유지 보수 시스템을 구축하고 있으며, 이는 핵 입자 물리의 저속 제어 감시 시스템에 대응된다. 저속 제어 감시 시스템의 성능과 안정성을 높이기 위해, 산업 현장과

달리 과학용 전산 운영체제에서 저속 제어 감시 시스템을 구현하였다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부 (교육부)와 2022, 2023년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 (2022R1I1A1A01064311, RS-2023-00211807), 중견연구사업 (2022R1A2C1006069), 선도연구센터 (2022R1A5A1030700) 및 전남대학교 연구자역량 고도화 사업 지원을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- [1] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4ed. (Wiley, 2010).
- [2] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*, 2ed. (Springer, 1994).
- [3] K. Kleinknecht, *Detector for Particle Radiation*, 2ed. (Cambridge University Press, 1999).
- [4] C. Grupen and Boris Shwartz, *Particle Detectors*, 2ed. (Cambridge University Press, 2023).
- [5] J. B. Birks, *The Theory of Practice of Scintillation Counting* (Pergamon, 1964).
- [6] Hamamatsu, *Photomultiplier Tubes, Basic and Applications*, 4ed. (Hamamatsu Photonics, 2012).
- [7] A. G. Wright, *The Photomultiplier Handbook* (Oxford University Press, 2017).
- [8] ISU Chemical, Petrochemical Products : LAB, (CAS number: 67774-74-7), <https://www.isuchemical.com/eng/business/getBiz1001Html.do>.
- [9] Sigma-Aldrich, 2,5-Diphenyloxazole, (CAS number: 92-71-7), <https://www.sigmaaldrich.com/KR/ko/product/sigma/d4630>.
- [10] Sigma-Aldrich, 1,4-Bis(2-methylstyryl)benzene, (CAS number: 13280-61-0), <https://www.sigmaaldrich.com/KR/ko/product/sigma/15090>.
- [11] J. K. Ahn *et al.* [RENO], RENO: An Experiment for Neutrino Oscillation Parameter θ_{13} Using Reactor Neutrinos at Yonggwang, [arXiv:1003.1391 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1003.1391).
- [12] ELJEN-Technology, EJ309, <https://eljentechnology.com/products/liquid-scintillators/ej-301-ej-309>.
- [13] Hamamatsu, Photomultiplier tube assembly: H7195, <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/pmt/pmt-assembly/head-on-type/H7195.html>.
- [14] NOTICE KOREA, KFADC 500 MHZ USB, <http://www.noticekorea.co.kr/>.
- [15] AMETEK ORTEC, 556 and 556H High Voltage Power Supply, <https://www.ortec-online.com/products/electronic-instruments/nim-power-supplies-and-bins/556-and-556h>.
- [16] Technical Committee 45 Nuclear Instrumentation, *High-voltage coaxial connectors used in nuclear instrumentation*, IEC 60798:1975, International Electrotechnical Commission.
- [17] Technical Committee 45 Nuclear Instrumentation, *Coaxial connectors used in nuclear laboratory instrumentation*, IEC 60313:2002, International Electrotechnical Commission.
- [18] P. C. Johns and M. J. Yaffe, Correction of pulse-height spectra for peak pileup effects using periodic and random pulse generators, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **255**, 559 (1987).
- [19] J. W. Müller, Generalized dead times, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **301**, 543 (1991).
- [20] S. Pommé, Cascades of pile-up and dead time, *Appl. Radiat. Isot.* **66**, 941 (2008).
- [21] S. Usman and A. Patil, Radiation detector deadtime and pile up: A review of the status of science, *Nucl. Eng. Technol.* **50**, 1006 (2018).
- [22] M. J. Safari, F. Abbasi Davani, H. Afarideh, Differentiation method for localization of Compton edge in organic scintillation detectors, [arXiv:1610.09185 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1610.09185).
- [23] I. Sobel and G. M. Feldman, *An Isotropic 3×3 image gradient operator*, In Presentation at Stanford Artificial Project, 271-272 (1968).
- [24] Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Data center, <https://atom.kaeri.re.kr/>.
- [25] J. W. Choi, J. Y. Choi, H. I. Jang and K. K. Joo, Feasibility Study of Convolutional Neural Networks for a Slow Control System and Fluor Discrimination in Emission Spectrum of Liquid Scintillator, *New Phys.: Sae Mulli* **72**, 582 (2022).

APPENDIX

Code Listing 1. onepush_python.py (MariaDB version).

```
import mariadb
import sys

def add_aaccount(date, time, RTD_value1, RTD_value2):
    conn = mariadb.connect(
        host="localhost", port=3306,
        user="SCM_TEST", database ="SCM_TEST_DB",
        password="XXXX")
    cur = conn.cursor() # Instantiate Cursor
    """This command verifies the existence of the table in the specified account database, creates it if necessary, and populates the table with the specified value"""
    cur.execute("CREATE TABLE if not exists SCM_test_table(date DATE, time TIME, RTD_value1 NUMERIC(4, 2), RTD_value2 NUMERIC(4,2), PRIMARY KEY(date, time));")
    cur.execute("INSERT INTO SCM_test(date, time, RTD_value1, RTD_value2) VALUES (?, ?, ?, ?)", (date, time, RTD_value1, RTD_value2))
    conn.commit() # Push the values to DB
    conn.close() # Close Connection
    #print(date, time, RTD_value1, RTD_value2)
    return date, time, RTD_value1, RTD_value2
```