

# 저비용 고고도 뮤온 검출기를 위한 시스템 개발 및 지상 성능 평가

윤인규                      유호균                      이동현                      조운찬  
세종대학교 물리천문학과      ???                      세종대학교 물리천문학과      세종대학교 물리천문학과  
Email: mylego02@sju.ac.kr      Email: @sju.ac.kr      Email: 22010526@sju.ac.kr      Email: 24010734@sju.ac.kr

초록—프로젝트의 목적과 주요 결과를 간략히 요약합니다.

## I 서론

뮤온(muon)은 전자와 같은 렙톤 계열의 기본입자로, 전자보다 약 200배 큰 질량을 가진 불안정한 입자이다. 주로 우주선(Cosmic Ray)이 지구 대기권이 진입할 때 대기 중 원자핵과 충돌하며 생성되는 2차 입자로, 자체 수명은 길지 않으나 광속에 근접한 속도로 운동하기 때문에 특수 상대성 이론의 시간 지연 효과가 적용되어 지상에서도 관측된다. 이러한 특성 덕분에 뮤온은 지상에서의 평균적인 검출률이  $1\text{cm}^2$  당 약 1분에(ref) 수준으로 매우 낮음에도 불구하고 입자물리학과 우주선 연구에서 핵심적인 연구 대상이 되어 왔다. 최근에는 전통적인 입자물리 분야를 넘어 피라미드 내부 구조 탐사, 화산 내부 구조 관측, 대기 물리학 연구 등 다양한 비전통적 분야에서도 활용되고 있으며, 이로 인해 뮤온 검출 기술의 수요가 점차 증가하고 있다.

그러나 기존 뮤온 검출장치는 일반적으로 고가의 장비와 복잡한 설치 과정을 필요로 하며, 장비의 무게와 유지보수에 따른 추가 비용 역시 상당하다. 이러한 요인들은 특히 신진 연구자거나 소규모 연구 그룹에게는 큰 부담으로 작용하며, 데이터 수집의 효율성을 저해하는 주요 원인이 된다. 더 나아가 우주선 관측을 위해 고고도 환경에서 뮤온 관측을 위해 고고도 환경에서 뮤온을 관측하고자 할 때 무겁고, 복잡한 기존 장치는 저비용의 소형 플랫폼에 탑재하기 어렵다는 구조적 한계를 가지며 비행기 등의 고비용 요소를 실험자에게 강요한다. 정리하자면, 기존 뮤온 검출기 시스템은 현재로서 연구 접근성과 실험 확장성 면에서 한계를 드러내고 있으며, 특히 소규모 연구 또는 교육용 실험 환경 등 큰 자본을 투입하기 어려운 곳이나 고고도 환경과 같은 극한 환경에서 이 한계가 더 두드러지게 나타난다.

본 연구는 고고도에서 우주선 관측을 수행하고자 하는 프로젝트의 연장선상에서 수행된 파생 연구로, 성층권 고도에서 뮤온 관측을 목표로 한다. 물론 기존에도 항공기 기반의 고고도 뮤온 검출 실험 사례는 다수 존재하지만, 항공기 실험의 경우 높은 비용과 더불어 풍선에 비하면 떨어지는 즉발성, 높은 비용이라는 한계가 존재한다. 또, 항공기는 그 태생상의 한계로 풍선에 비하면 상대적 저고도(10km) 정도 영역에서만 관측이 가능하다는 단점 역시 존재한다. 반면에 라디오존데와

같이 무동력 부유물(; 풍선)의 형태로 관측을 진행할 경우 기술적·법적 준비 과정을 단축하여 비교적 신속한 관측을 진행할 수 있으며 항공기에 비해 저렴한 가격으로 더 많은 관측 횟수를 확보할 수 있다. 또, 30km라는 항공기 대비 고고도에서 관측을 수행하기에 더 신뢰 가능한 데이터를 수집 가능하는 등 무동력에서 오는 한계에도 불구하고 분명한 장점을 제공한다.

실제 기상 관측 영역을 참고해 보면 항공기를 통해 대기 수평 분포 데이터와 실시간 자료를, 라디오존데를 통해 대기 연직 분포 데이터와 상층 대기의 고정밀 데이터를 받는 등 서로 다른 두 관측방식에 따른 비교우위를 적절히 이용해 고품질의 데이터를 얻고 있음을 알 수 있다. 이러한 시스템을 참조하여 우주 기상 관측에서도 현재 주로 사용되고 있는 항공기 기반 관측과 더불어 라디오존데 기반 관측을 상보적으로 활용한다면 기존보다 더 진보된 시스템을 구축할 수 있을 것이다. 이처럼 라디오존데 기반의 뮤온 관측 시스템은 우주선 관측에 있어 새로운 길이 될 수 있으며, 이는 오로라나 태양 플레어 등 미래시대의 우주 기상 관측의 새로운 방향성을 제시할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구팀은 상기할 목표를 실현하기 위해 다음 조건을 충족하는 뮤온 검출기의 개발 필요성을 제기하였다.

- 1) 경량: 라디오존데를 이용한 관측을 실현하기 위한 경량화
- 2) 저비용: 라디오존데와 같이 지속적인 발사를 실현하기 위한 가격 안정화
- 3) 고고도 특화: 저온 / 저기압의 극한 상황인 고고도에서의 원활한 작동 보장

(TBA)

실제 해외에서도 유사한 연구가 진행된 바 있으나, 미국에서 제안된 프로젝트의 특성상 국내 연구 여건에 그대로 적용하기엔 기술적·환경적 제약이 존재하였다. 이에 본 연구팀은 해당 프로젝트를 참고하여 부품 구성과 제작 공정을 국내 실정에 맞게 최적화함으로써 국내 환경에서 구현 가능한 고고도 기반 뮤온 검출 시스템을 개발할 수 있었다.

검출기는 성층권 환경에서의 신뢰성 있는 데이터 수집을 위해 모듈화된 하드웨어 구조와 효율적인 신호 전달계를 기반으로 설계되었다. 또, 고고도에서의 전자회로 및 데이터 처리 과정에서 발생할 수 있는 신호 손실과 잡음을 최소화하기 위해 회로 안정 및 신호 전송 효

율을 중심으로 데이터 파이프라인을 구성하였다. 이를 통해 시스템 전체의 신뢰도를 향상시키고 데이터 수집 및 후처리 과정의 효율을 극대화하였다.

결론적으로 본 연구는 기존 고비용·고중량·대형 뮤온 검출기의 대안으로서 국내에서 활용 가능한 비용·경량·소형 고고도 특화 뮤온 검출기를 제작할 수 있었다. 우리의 검출기는 단순히 우주풍선을 이용한 성층권 뮤온 관측에 이용 가능할 뿐 아니라 저비용, 경량형이라는 특성에서 학생이나 소규모 연구자도 장비 비용이나 설치 복잡성에 대한 부담 없이 뮤온 검출 실험을 수행할 수 있는 대안으로도 이용됨으로서 뮤온 검출 연구의 접근성과 확장성을 동시에 확보할 수 있음을 기대한다.

## II 뮤온 검출기 구성요소

뮤온을 포함한 이온화 우주선을 검출하기 위한 목적으로 설계한 경량화된 휴대용 장치이다. 모듈화된 장비 하나로 신호 처리, 온보드 데이터 저장, 환경 센서 및 USB를 통한 데이터 연결을 위한 맞춤형 설계를 지향한다.

간단히 서술하자면, 플라스틱 섬광검출기를 이용하여 뮤온을 검출한다. 섬광검출기는 섬광체 (Scintillator)와 실리콘 광전자 증배관 (Silicon PhotoMultiplier; SiPM)으로 구성된다. 뮤온이 섬광체를 통과할 때 발생하는 섬광 (빛)을 SiPM이 증폭 후 읽어들이며 뮤온의 존재여부와 뮤온이 플럭스의 총 에너지를 검출한다. 이 에너지를 보정한 후 이를 해당 고도에서 뮤온의 평균 에너지량으로 나눔으로서 단위면적당 뮤온 입사량이 얼마인지를 얻어내는 구조이다. 이하는 우리의 뮤온 검출기의 구성 요소에 대한 상세한 기술이다.

시스템 구축에 있어 총 20 만원 정도가 포함되었다.

### A. 섬광체 신호 획득

#### 1) 플라스틱 섬광체 작동 원리

뮤온 검출기에서 뮤온과 관련된 데이터가 아날로그 데이터에서 디지털 데이터로 변환됨에 있어 핵심이 되는 부분으로, 플라스틱 섬광체 (Scintillator)의 섬광 효과 (Scintillate effect)를 이용하여 뮤온의 유무와, 뮤온 플럭스의 에너지량을 측정한다.

섬광체는 폴리스티렌 (polystyrene) 기반의 소자를 정육면체 형태 (5 cm x 5 cm x 5 cm)로 가공한 형태를 사용하였다. 고에너지 입자 (e.g. 전자, 양성자, 뮤온 등)이 섬광체에 입사될 때 섬광체 분자들은 불안정한 들뜬 상태로 전이된다. 따라서 입자의 궤적을 따라 섬광체 분자는 들뜬 상태로 전이된다. 이들이 다시 복귀하여 바닥 상태가 될 때 빛을 방출하므로, 결과적으로 뮤온 입자와 같은 위상의 섬광을 방출하게 되며, 이 빛은  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  실리콘 광증배관 (SiPM)에 수집된다. 이 때, SiPM과 섬광체를 광학적으로 결합시켜 외부의 빛이 들어오지 못하면서도 섬광체의 거의 모든 빛은 SiPM으로 부드럽게 전달되어 SiPM이 효과적으로 이를 처리할 수 있도록 해 준다. SiPM은 반도체 기반의 광증폭 / 광검출기로, 높은 감도와 빠른 응답 신호를 제공한다. 검출기에서 SiPM은 섬광체에서 발생한 미약한 빛의 각 광자를 전기 펄스로 변환시키는데, 이때의 펄스

의 진폭은 섬광된 빛의 강도에 비례한다. 이후 SiPM 신호는 증폭되어 비교기와 피크 검출기 회로로 전송된다.

#### 2) SiPM 신호 획득 회로 구조

SiPM 신호는 증폭되어 비교기 (Comparator)와 피크 검출기 회로 (Peak detector circuit)로 전송된다. 비교기는 타임스탬프를 제공하여 데이터 수집을 트리거하며, 피크 검출기는 펄스 피크의 일정한 비율 (Constant fraction)을 유지하여 Raspberry Pi Pico (RPi) 기반 마이크로컨트롤러 (MCU)가 진폭을 정확하게 측정할 수 있도록 한다. 결과적으로 입사되는 입자 수에 비례하는 ADC (Analog to Digital Converter) 값을 얻을 수 있게 되며, 이 값을 분석하면 시간당 입사되는 뮤온의 양을 계산할 수 있게 된다. 이때 SiPM 신호는 나노초 단위로 제공되므로, 외부 판독이 가능하도록 위해 BNC 커넥터를 이용해 충분한 분해능을 얻도록 한다. 데이터 분석 기법에 대한 자세한 내용은 II-C에서 후술한다.

### B. 메인 PCB 설계

메인 PCB는 검출기에 전원 및 바이어스 전압을 공급하고, 아날로그 펄스 성형 회로를 호스팅하며, 디지털 주변 장치 및 RPi MCU의 백본 역할을 한다. 보드 상단에 온도 및 압력 센서, microSD 카드 소켓을 제외한 대부분의 디지털 부품이 배치되어 있으며, 보드 하단에는 전원 시스템과 아날로그 전자 장치가 포함되어 있다. PCB 회로도 및 실제 이미지는 여기서 확인 가능하다.

#### 1) 전원 공급 시스템

온보드 부품의 전원은 모두 RPi MCU의 5V USB를 통해 공급된다. 다이오드를 통과후 4.5V로 강화된 전원은 SiPM용 DC-DC 부스터 (승압기)를 거친 뒤 SiPM의 듀얼 신호 증폭기에 전원을 공급한다. 이때 RJ45 동시 검출 커넥터를 통해 전원이 분배되므로 단일 USB 소스로도 다중 검출기에 전원을 공급할 수 있게 된다.

원래 SiPM은  $24.5 \pm 0.5$  이상의 낮은 리플 (: Ripple, 직류 공급 장치에서 장치의 한계로 나오는 약한 교류 전원)과 안정적인 바이어스 전압을 필요로 하나, 본 연구에서는 과전압을 공급하여 SiPM의 수득률과 광자 검출 효율을 향상시켰다. V3X 검출기는 MAX5026 DC-DC 부스터 (승압기)를 사용하여 시스템 전압을 30.0V로 승압한다 (5.5V 과전압에 해당). 이때 승압된 전원은 SiPM 6핀 헤더의 RC 필터와 로컬 디커플링 커패시터를 통과한다. 이를 통해 HV 선의 고주파수 노이즈를 제거할 수 있게 된다. 결과적으로 최적화된 회로 설계를 통해 출력되는 DC-DC 부스터 리플은  $\leq 10 \text{ mV}$ 로 출력됨을 확인했다.

이외의 MCU 레귤레이터에서 공급되는 정전압 3.3V 라인은 주변 장치에 전원을 공급하며, ADC의 기준으로 사용되는 2.5 기준 전압을 공급하고, 신호 증폭기에 bias를 입력한다.

#### 2) 아날로그 펄스 성형

원시 SiPM 펄스 분석을 위해선 나노초 레벨의 분해능을 가진 고빈도 신호 판독이 필요하므로 후면 패널 BNC 커넥터로 전송된다. 이와 동시에 이 신호는 AC로 결합된 TPH2502 연산 증폭기의 입력으로 전송된다.

이 증폭기는 비반전 모드로 구성되며, 226.dB의 이득 (13.5V 위 전압 이득)과 약 10MHz의 대역폭을 제공한다.

2.5V 기준 전압에 연결된 전압 분배기에서 파생된 25mV DC 오프셋은 AC 결합 신호를 연산 증폭기의 음극에서 멀리 이동시킨다. 이때, 고주파수 통과 필터 (3kHz 차단)는 저주파 노이즈를 제거한다, 증폭된 신호는 25mV로 재편향된 뒤 피크 검출기와 비교기 회로로 동시에 전송된다. 증폭된 회로는 오실로스코프를 테스트 포인트 1 (TP1)에서 확인할 수 있는데, 무운 신호가 검출될 시 ref와 같이 나타난다.

피크 검출기 회로는 쇼트키 다이오드를 이용해 각 입력 펄스 동안 소량 캐퍼시터를 충전한다. 이 전압은 2차 연산 증폭기에 의해 버퍼링된 후 저항 전압 분배기를 통해 2.5V ADC 입력 범위로 조정된다. 피크 검출기 출력은 고임피던스 오실로스코프를 이용해 테스트 포인트 2 (TP2)에서 모니터링 가능하며, 무운이 검출되었을 때 ref와 같이 나타난다. 이때, 반사를 최소화하기 위한 짧은 동축 케이블이 권장된다. ADC는 이 전압을 샘플링하여 원본 SiPM 펄스의 진폭을 추정한다.

디지털 신호로 변환된 후 RPi MCT로 제어되는 MOSFET이 캐퍼시터를 방전시켜 다음 이벤트 (무운의 입사) 기록을 위해 피크 검출기를 초기화한다. 비교기는 또 다른 TPH2502 증폭기를 이용해 신호를 RPi MCU에서 RC 필터링된 펄스폭 변조 (PWM) 출력으로 설정된 임계 전압과 비교하여 조정 가능한 DC 기준 전압을 제공한다. 펄스가 임계값을 초과하면 비교기는 증폭된 신호의 임계값을 초과 시간과 일치하는 4.5V 논리 펄스를 출력한다. 이 펄스는 RPi MCU와의 화합성을 위해 전압 분배기를 통해 3.3V로 스케일링된다. 이때, 트리거 임계값은 microSD 카드에 있는 configure.txt 파일에서 조정할 수 있다.

정리하면, 펄스 형성 및 트리거링 시스템을 통해 검출기는 고빈도로 들어오는 SiPM 신호의 펄스 진폭과 이벤트의 발생 시각을 고정밀·저노이즈로 검출할 수 있게 된다.

### 3) 디지털 전자 장치

검출기 디지털 시스템의 핵심은 133MHz 클럭의 듀얼 코어 RPi MCU이다. 코어 한개는 ADC 읽기, 타임스탬프 기록, 데드 타임 측정, 피크 검출기 리셋, 이벤트 데이터를 시리얼 포트로 출력 등 시간에 민감한 데이터 수집 작업을 처리한다. 다른 코어는 OLED 디스플레이, microSD 카드 읽기/쓰기, 환경 센서 처리 등 주변 장치와의 통신을 관리한다. 이러한 멀티프로세싱은 데드 타임을 크게 줄일 수 있고 초당 수백번의 고빈도 이벤트 발생 환경에서도 신속한 작동을 보장한다. RPi MCU에는 I2C 및 SPI 버스를 통해 아래와 같은 여러 디지털 주변장치와 상호작용한다:

- Bosch BMP280(센서): 온도 및 기압 모니터링
- microSD 카드 (ROM): 데이터 로깅 및 구성
- OLED 디스플레이 (디스플레이): 측정값 및 시스템 상태를 실시간 모니터링 (일반적인 경우 개인 PC 모니터 이용)
- 버저: 청각적 피드백을

- 6축 관성 측정 장치(IMU): 방향과 움직임 추적 모니터링 (가속도계 및 자이로스코프 이용)

이 모든 시스템은 USB serial 통신을 이용하여 실시간 모니터링 및 펌웨어 업데이트 통신을 한다 (115,200bps 비트레이트). import\_data.py 코드를 이용하여 PC의 직렬 포트를 통해 데이터를 읽어들이며, 이때 호스팅 컴퓨터의 시간 기준으로 타임스탬프를 기록한다. 이 타임스탬프는 NTP와 동기화되어 있으므로 수백 마이크로초 ~ 수 밀리초 내의 정확성을 보장한다. RJ45(8P8C) 커넥터로 구현된 동시 검출 포트는 두 검출기가 서로 통신할 수 있도록 해 준다. 두 검출기는 CAT 통신 규격을 통해 연결된 후 재부팅하면 자동으로 동시 검출 모드로 진입하며, 인디케이터 LED 두 개가 동시에 점멸하는 것으로 확인 가능하다.

동시 검출 모드에선 각 검출기의 트리거 신호가 교환되어 2.3μs 이내에 발생한 이벤트는 양측 검출기 모두에 동시 발생으로 표시되어 측정값 보정이나, 각방향성 보정 등을 수행 가능하다.

동시 검출 포트는 확장을 위한 I2C 및 SPI 인터페이스가 설치되어 있다. 이를 통해 GPS 모듈, 자력계, 실시간 시계 및 기타 센서 같은 주변 장치와의 통신이 가능하므로, 추후 탐지기 제어, 효율적 데이터 수집, 추가 모듈 개발 및 통합에 있어 적합한 플랫폼으로 기능할 수 있다.

### C. 소프트웨어 구성

검출기에서 사용되는 소프트웨어는 크게 두가지 부분으로 나눌 수 있다. 검출기 RPi MCU에서 검출기 시스템 작동을 위한 펌웨어와, 검출기에서 나온 신호를 윈도우에서 읽어들이 해석하기 위한 프로그램으로 구성된다. RPi MCU는 C++로, 윈도우 프로그램은 Python으로 작성하였다.

#### 1) RPi MCU 펌웨어

기본적으로 RPi MCU는 Cortex M0+ 듀얼 ARM로 구성되며, 이곳에 C++ 기반의 펌웨어를 작성하여 실행한다. 코드 베이스는 모듈식 구성으로 작성하였으며, 각 모듈이 검출기의 특정 하위시스템을 관리한다. 주 하위시스템은 마이크로 SD 카드, OLED 디스플레이, 환경 센서 (BMP280 및 MPU-6050)이며, 각 하위시스템들은 핵심 유틸리티 기능과 상호작용한다. 펌웨어는 시작 시 모든 하위시스템을 초기화한 뒤, 우선 두번째 검출기의 존재 감지 목적으로 동시 검출 핀을 통해 핸드셰이킹을 수행한다. 만약 두번째 검출기의 존재가 감지된다면 동시 검출 모드가 자동으로 활성화되며, 사용자에게 LED 점멸을 통해 활성화를 알린다.

하위시스템의 초기화가 완료되면 시스템은 연속 작동 모드로 전환된다. 펌웨어는 RPi MCU의 듀얼 코어 아키텍처를 적극적으로 활용한다. 코어 0은 실시간 무운 데이터 수집을 전담하고, 코어 1은 디스플레이 업데이트 및 microSD 카드 데이터 로깅과 같은 시간에 민감하지 않은 보조 작업을 수행한다.

코어 0에서는 고속 디지털 폴링 루프가 비교기의 출력을 지속적으로 모니터링한다. 신틸레이터 내 입자가 상호작용을 할 때 SiPM 내에서 전압 상승 펄스를 펌웨어

어가 감지한다. 상호작용을 감지하면 펌웨어는  $2.3\mu s$  동시 발생 이벤트 체크를 시작한다. 이 기간 내에 동시 발생 핀을 감지하면 핀을 32회 폴링한다. 이 폴링 중 어느 시점에서든 높은 전압 (HIGH) 신호가 관측되면 해당 이벤트는 동시 발생으로 표시된다. 이후 펌웨어는 파형에서 피크 ADC 값을 샘플링하고 타임스탬프를 기록하며, 온보드 LED를 통해 검출에 대한 시각적 피드백을 제공한다; 검출되면 LED 1개, 동시 검출시 LED 2개가 발광한다. 이벤트 검출이 완료되면 펌웨어는 그 즉시 타임스탬프, 피크 신호 측정값, 사용 가능한 모든 환경센서의 값을 포함하는 데이터 패킷을 작성한다. 작성된 패킷은 USB 직렬포트를 통해 전송되며, 동시에 4096개의 이벤트를 저장할 수 있는 중 링 버퍼에 추가된다. 이벤트 발생률이 높을 시 버퍼 오버플로우를 막기 위해 버퍼 용량의 80% 이상일 시 개입하여 데드타임이 도입된다.

코어 1은 UI와 데이터 로깅을 처리하는 독립적인 루프를 실행한다. 이 루프는 OLED 디스플레이를 주기적으로 업데이트하고 기압, 온도, 가속도를 포함한 주변 환경 데이터를 수집한다. 각 사이클 동안 코어 1은 주 버퍼의 새 이벤트를 확인하고, 이를 250여 개의 이벤트를 저장할 수 있는 보조 32kB 버퍼로 전송한다. 이 중단 버퍼는 사전 정의된 임계값 (디폴트는 20개 이벤트)을 초과하거나, 10초 간격이 지난 후 배치 모드로 microSD 카드에 쓰여진다.

코어 0과 1로 구성된 이중 버처 구조는 읽기 쓰기 지연을 최소화하고, 시리얼 포트와 microSD 카드 모두에 최소 700Hz의 지속적 이벤트 로깅을 가능하게 하며, 쓰기 작업 빈도를 줄여 microSD 카드의 수명을 연장시킨다, 더 높은 처리량이 필요한 모듈을 활용하는 경우 config.txt 파일을 수정하여 시리얼 통신을 비활성화하면 microSD 카드의 로깅 속도를 7,000Hz까지 높일 수 있다.

펌웨어에 추가 보호 및 디버깅 모듈이 있다. 실행될 시 ADC 채널 1, 2를 통해 SiPM 바이어스 전압과 트리거 임계값을 측정하여 허용 오차 범위 내에 있는지 확인한다. 진단 및 이벤트 기록을 포함한 모든 시스템 파라미터는 USB 시리얼 인터페이스를 통해 실시간으로 스트리밍 된다. 시스템은 데이터 손실에 강하며, microSD 카드 유무에 관계없이 작동하며, microSD 카드가 없을 시 기본적으로 시리얼 출력만을 수행한다. SD 카드에 기록된 컬럼은 Table 1.을 참고하면 된다.

## 2) PC 모니터링 소프트웨어

크게 3가지 방법으로 PC로 데이터를 실시간 스트리밍 가능하며, 기본적으로는 USB 포트에서 115,200bps로 데이터를 캡처한다.

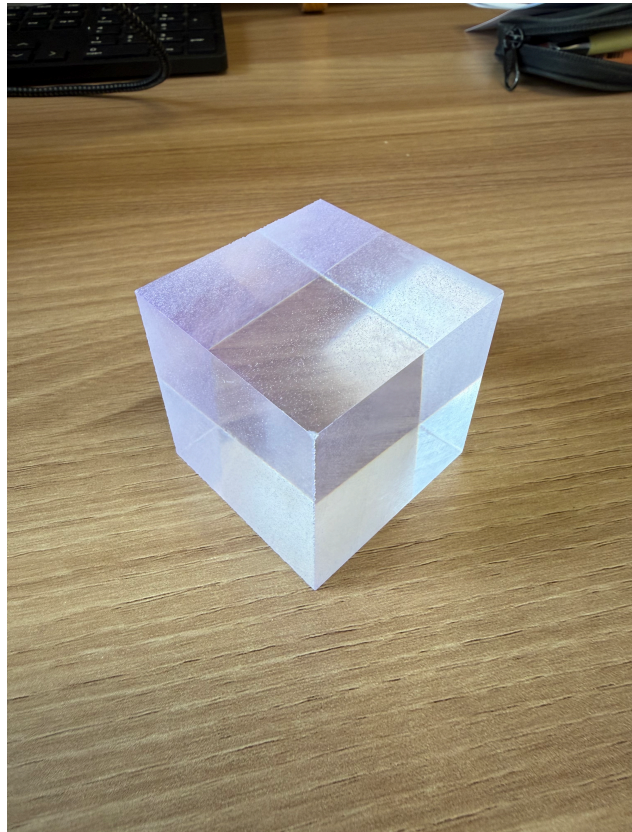


Fig. 1: 섬광검출기 (Scintillator)

D.

## III 뮤온 디텍터 분석 시스템

A. 데이터 읽기 및 플롯

B.

## IV 검출기 사용 시험 예시

A. 콘크리트 건물에서 층별 뮤온 감쇄율

일반적으로 특정 고도에서의 뮤온 에너지량을 찾으면, 특정 에너지에 해당하는 뮤온 입자의 통계적 수에 대한 그래프를 얻을 수 있다. 이를 에너지별로 적분하여, 특정 에너지를 가진 입자의 통계적 양을 얻을 수 있으므로, 이것을 분석하여 신틸레이터에 입사되는 입자의 개수 (혹은 상대적 개수)를 얻을 수 있다. 문제는 우주선의 입사량이 위치와 시간에 따라 달라지므로 우주선에 의해 생성되어 입사되는 고에너지 입자의 수가 극적으로 달라지므로 정확한 측정을 목표로한다면 정확히 실험을 측정할 위치와 시간에서의 그래프가 필요하나, 이를 얻는 것이 일단은 불가능하였다. 하지만 보정하지 않더라도 전체 에너지의 상대량까지는 얻을 수 있기 때문에, 해당 고도에서 신틸레이터를 통과하는 입자 에너지 플럭스의 변화에 대한 상대량을 측정할 수는 있으므로, 우선은 이를 얻고자 하였다.

뮤온의 단위 밀도당 에너지 감쇄율을 얻으려면:

TABLE I: RPi Pico 기반 SiPM 검출기의 이벤트 데이터 구조

이벤트	타임스탬프 [s]	플래그	ADC[12b]	SiPM[mV]	Deadtime[s]	Temp[C]	Press[Pa]	Accel(X:Y:Z)[g]	Gyro(X:Y:Z)[deg/sec]
-----	-----------	-----	----------	----------	-------------	---------	-----------	-----------------	----------------------

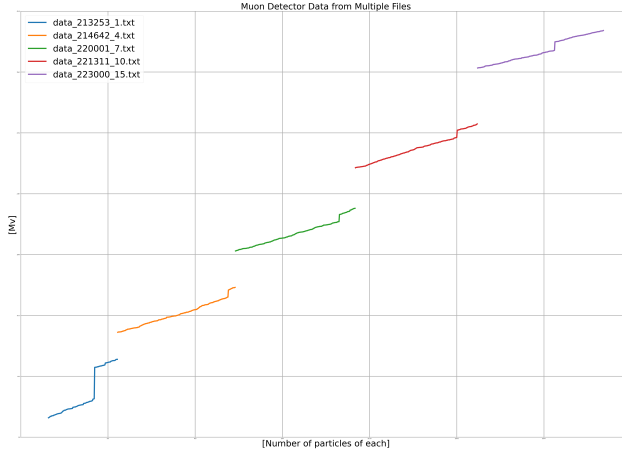


Fig. 2: 건물 층별 뮤온 플럭스 에너지값

$$\frac{dE}{dx} = 2\text{MeV}/g/cm^2 \text{ 라고 가정}$$

콘크리트 밀도를  $2.3g/cm^3$  이라고 가정

위의 가정을 통해 뮤온은 콘크리트 1cm 통과할때 마다 대략  $4.5\text{MeV}$  의 에너지를 잃는다고 가정할 수 있다.

철근콘크리트 바닥판 두께 30-40cm 라고 가정하였을 때  $135\text{MeV}$  ~  $180\text{MeV}$  가 층별 뮤온 에너지 감쇄율이라고 말할 수 있게 된다. 이때, 뮤온 에너지가 대충  $4\text{GeV}$  정도라고 가정하면 콘크리트 3층 차이당 뮤온 에너지는 15% 정도 감쇄된다는 것을 알 수 있게 된다. 이 결과를 본 연구에서 제작한 뮤온 측정기의 측정값과 비교하여, 실제 측정값이 15% 이내로 에너지가 감쇄된다는 것을 확인할 수 있다면 우리의 측정기가 제대로 작동한다는 것을 확인할 수 있다.

실제 실험은 광개토관에서 진행하였는데, 1층부터 3층 간격으로 한 층에서 10분당 측정함으로써 값을 얻었다. 결과 그래프는 fig.2. 를 통해 확인할 수 있다.

실제로 점점 건물 아래층으로 갈수록 뮤온이 갖는 에너지가 낮아짐을 알 수 있으며, 실제로 그 간격이 20%로 이론치와 유사하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 따라서, 우리가 제작한 뮤온 검출기는 어느정도 정확한 관측을 할 수 있음을 알 수 있다.

## B. MIP 계산

신틸레이터를 이용한 뮤온 검출 실험에서 MIP (Minimum Ionizing Particle) 커브를 작성하는 것은 검출기의 성능을 정량적으로 평가하고 보정하기 위한 필수적인 과정이다. MIP는 물질을 통과할 때 단위 길이당 에너지 손실이 최소가 되는 입자를 의미하며, 일반적으로 지상에서 관측되는 고에너지 뮤온은 이러한 MIP의 특성을 갖는다. 따라서 MIP 커브는 신틸레이터 검출기의 기준 응답 (reference response) 을 정의하는 데 사용된다.

뮤온이 신틸레이터를 통과할 때 방출된 광자는 광센서 (SiPM 또는 PMT) 에 의해 전기 신호로 변환되고, 그 펄스 크기 (또는 적분 전하) 는 ADC 단위로 기록된다. 이러한 펄스 크기의 분포를 히스토그램 형태로 나타내면, 통상적으로 Landau 분포 형태의 스펙트럼이 얻어진다. 이 분포의 최빈값 (MPV, Most Probable Value) 은 한 개의 MIP가 검출기 내에서 남기는 평균적인 에너지 손실에 해당하며, 이를 1 MIP 단위로 정의한다.

MIP 커브를 작성하는 주요 목적은 다음과 같다. 첫째, 검출기의 게인 (Gain) 보정이다. 신틸레이터 및 광검출기의 이득은 온도, 전원 전압, 노화 등의 요인에 따라 변동할 수 있다. MIP 피크 위치를 정기적으로 측정함으로써 이러한 변화를 보정하고, 실험 간 일관된 감도를 유지할 수 있다.

둘째, MIP 커브는 검출기의 에너지 스케일 (Energy scale) 을 설정하는 기준이 된다. MIP 피크를 기준 단위로 삼으면, 이후 측정된 신호를 MIP 단위로 환산하여 서로 다른 실험 환경이나 검출 모듈 간의 비교가 가능하다.

셋째, MIP 커브는 신호와 노이즈의 구분에도 활용된다. 펄스 높이 분포에서 저전압 영역은 전자적 노이즈나 열 노이즈에 해당하며, MIP 피크 부근은 실제 입자 신호를 나타낸다. 따라서 MIP 피크를 기준으로 적절한 임계값 (threshold) 을 설정하면, 불필요한 노이즈 트리거를 효과적으로 제거할 수 있다.

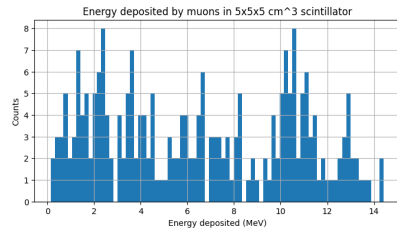
넷째, 다채널 검출기 시스템의 경우 각 채널의 MIP 피크 위치를 비교함으로써 채널 간 감도 균일성 (uniformity) 을 평가할 수 있다. 이 과정은 대면적 검출기 어레이에서 신뢰성 있는 데이터 해석을 위해 필수적이다.

결과적으로, MIP 커브는 단순한 데이터 분포가 아니라, 검출기 시스템의 감도 보정, 에너지 단위 환산, 노이즈 구분, 효율 평가를 위한 핵심 기준선으로 기능한다. 따라서 신틸레이터 기반 뮤온 검출 실험에서 MIP 커브의 구축은 정확한 물리량 측정과 장기적 안정성 확보를 위한 필수 절차라 할 수 있다.

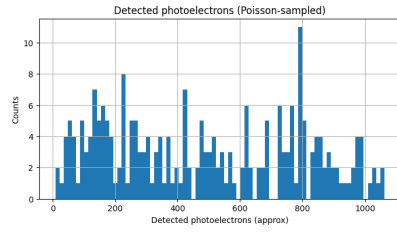
본 실험의 경우, 아래의 가정에 기반한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해, 검출기에 검출될 뮤온 입자의 MIP 커브를 시뮬레이션했다. 추후 조금 더 정밀한 시뮬레이션을 실행한 후, 이를 통해 장치를 캘리브레이션 하여 전자볼트 단위의 측정량을 실제 MeV 형태의 에너지 플럭스를 구할 예정이다.

- Scintillator length = 5 cm
- MIP energy loss  $\frac{dE}{dx} = 2.0\text{MeV}/cm$
- isotropic muon directions (assume  $4\pi$ )
- muon starting points sampled uniformly in a bounding box  $[-L, L]^3$  (L adjustable)
- scintillation yield = 10000 photons / MeV
- light collection efficiency = 0.03 (3%)
- SiPM PDE = 0.25 (25%)

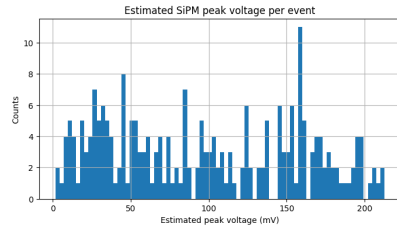
- SiPM gain =  $5 \times 10^5$  electrons per avalanche
- readout load  $R = 50\Omega$ , pulse duration  $t_{pulse} = 20ns$  (used to estimate peak voltage)



(a) MIP 데이터 히스토그램



(b) 푸아송 피팅 결과



(c) SiPM 예상 peak

Fig. 3: 몬테카를로 기법을 이용한 MIP 커브 피팅