

## 광자 궤적 검출기 모듈의 광수율 향상을 위한 실험적 연구

이경호<sup>1</sup> · 임계엽<sup>2</sup> · 김은주<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 사범대학 과학교육학부, 전주 54896

<sup>2</sup>고에너지가속기연구기구, 츠쿠바 300-3256, 일본

## Study to improve the Light Yield of Photon Tracking Detector Module

KyeongHo Lee<sup>1</sup>, GeiYoub Lim<sup>2</sup>, and Eun-Joo Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Science Education, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

<sup>2</sup>High Energy Accelerator Research Organization(KEK), Tsukuba 300-3256, Japan

**초 록:** 일본 양성자가속기연구센터 (J-PARC)에서 진행 중인 KOTO 실험은 중성케이온의 희귀 붕괴  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 의 관측을 통해 표준모형 너머의 새로운 물리 현상을 탐색하는 실험이다. 표준모형에서는 이 붕괴의 갈래비를  $3 \times 10^{-11}$ 이라는 매우 작은 값으로 예측하고 있으며, 계산에 수반되는 이론적 불확정성이 작아 새로운 물리 현상의 관측에 적합한 현상으로 받아들여지고 있다. 그러나, 현재 KOTO 실험의 해당 붕괴에 대한 실험 감도는 표준모형의 예측값에 아직 도달하지 못하였으며, 통계적으로 유의미한 관측을 위해서는 실험 감도를 100배 이상 향상할 차세대 실험인 KOTO-II가 필요하다. 실험 감도 향상에 따라 배경사건의 제거 능력 또한 강화되어야 하며, 이를 위해 지금까지 측정하지 못했던 광자의 입사각을 측정할 수 있는 새로운 광자 궤적 검출기의 개발이 진행 중이다. PAScal (Photon Angle Sampling calorimeter)로 명명된 이 광자 궤적 검출기는 광자가 만드는 전자기 샤워의 공간 분포로부터 광자의 입사각을 재구성하는 것을 목표로 한다. 텅스텐 (W)과 섬광 섬유 (scintillating fiber)를 번갈아 배치한 가늘고 긴 모듈을 수평 및 수직 방향으로 배열하여, 전자기 샤워 분포를 삼차원으로 측정한다. 본 연구에서는 열량계의 기본 성능 지표 중 하나인 광수율 (light yield)을 측정하였다. 광자가 검출기에 입사하여 생성하는 전자기 샤워 입자는 섬광 섬유에서 섬광 (scintillation light)을 발생시키며, 이 섬광은 섬광 섬유를 따라 진행하여 단면에서 방출되어 광학적으로 결합되어 있는 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)에서 전기 신호로 변환된다. 이때 MPPC 표면에 도달한 광자의 수는 섬광 섬유의 단면 상태에 의존한다. 본 연구에서는 PAScal 모듈의 단면 상태에 따른 광수율의 변화를 정량적으로 측정하였다. 섬광 섬유 단면을 사포를 이용하여 단계적으로 연마하였으며, 연마 입도 (grit)를 #120에서 #4700으로 증가시키면서 광수율을 측정하였다. 사포의 연마 입도가 증가함에 따라 표면 조도 (surface roughness)가 감소하고, 이에 따라 최대 약 46%의 광수율 향상을 관측할 수 있었다. 또한, 섬광 섬유 단면과 MPPC 사이의 광학적 결합 (optical junction)을 개선함으로써, 추가적인 광수율 향상이 가능함을 확인하였다.

**중심어:** 광자검출기, 광수율

**Abstract:** The KOTO experiment at J-PARC aims to search for physics beyond the Standard Model through the observation of the rare neutral kaon decay  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ . Within the Standard Model, its branching ratio is predicted

\*Corresponding Author: Eun-Joo Kim

Phone: +82-(0)63-270-2776

E-mail: ejkim@jbnu.ac.kr



All the content in Journal of Science & Science Education(JSSE) is Open Access, meaning it is accessible online to everyone, without fee and authors' permission. All JSSE content is published and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Under this license, the authors retain full ownership of their work, while permitting anyone to use, distribute, and reproduce the content in any medium, as long as the original authors and source are cited. For any reuse, redistribution, or reproduction of a work, users must clarify the license terms under which the work was produced.

to be extremely small, approximately  $3 \times 10^{-11}$ , while benefiting from an exceptionally low theoretical uncertainty. Since this decay originates from short-distance interactions, it is highly sensitive to contributions from new physics. However, the current experimental sensitivity of KOTO has not yet reached the Standard Model prediction. To achieve a statistically significant observation, a next-generation experiment, KOTO-II, which requires more than two orders of magnitude improvement in sensitivity, is necessary. As experimental sensitivity improves, enhanced background rejection capability is also required. Accordingly, the development of a new detector capable of measuring previously inaccessible photon incident angles is underway. The detector, named PAScal (Photon Angle Sampling calorimeter), aims to reconstruct the photon incident angle by measuring the spatial distribution of electromagnetic showers. The detector consists of narrow and elongated modules composed of alternating layers of tungsten (W) and scintillating fibers, arranged in both horizontal and vertical directions to achieve three-dimensional sampling of electromagnetic showers. In this study, we investigated the light yield, one of the fundamental performance parameters of the calorimeter, to improve the performance of the PAScal module. Scintillation light produced in the scintillating fibers by shower particles is transmitted through the fiber bundle cross section fixed with optical cement and converted into electrical signals by a photon sensor, an MPPC (Multi-Pixel Photon Counter). The number of photons reaching the MPPC depends on the surface condition of the fiber bundle cross section. We quantitatively investigated the dependence of the light yield on the surface condition of the PAScal module. The fiber bundle cross section was polished step by step using sandpapers with grit numbers ranging from #120 to #4700, and the light yield was measured at each polishing stage. As the grit number increased, the surface roughness decreased, which led to an improvement of the light yield by up to approximately 46%. Furthermore, we confirmed that additional improvement in light yield can be achieved by optimizing the optical coupling between the fiber bundle cross section and the MPPC.

**Keywords:** Photon Detector, Light Yield

## 1. 서 론

일본 양성자가속기연구센터 (J-PARC)에서 진행 중인 KOTO 실험은 중성 케이온의 희귀 붕괴 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ )의 관측을 통해 표준모형 너머의 새로운 물리 현상을 탐색하는 실험이다[1,2]. 이 붕괴는 표준모형에서 CP 대칭성을 붕괴하는 맛깔변환중성류(Flavor Changing Neutral Current)로 기술하고 있으며, 이 과정의 이론적인 계산은 불확정성이 매우 적은 특징을 지닌다. 따라서, 이론적인 예측에서 벗어나는 실험 결과는 새로운 물리 현상의 발견으로 바로 연결된다. 또한, 쿼크 간의 변환이 연속적으로 일어나야만 하는 특성을 지니므로, 매우 짧은 거리 척도에서의 상호작용에 의해 갈래비가 결정된다. 따라서 지금까지 발견하지 못한 새로운 물리 현상의 발견 가능성이 높다[3].

표준모형에서 예측하는  $3 \times 10^{-11}$ 의 작은 갈래비는 [4] 이 붕괴 현상의 관측이 가지는 어려움을 말하고 있다. KOTO 실험의 결과는 90% 신뢰수준 상한값이  $2.2 \times 10^{-9}$ 이며[1], 이는 현재까지의 해당 붕괴에

가장 근접한 결과이다.  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  붕괴의 관측을 위해서는, 열량계에서 관측하는 두 개의 광자가  $\pi^0$ 로부터 발생하였으며, 다른 어떤 입자도 동시에 생성되지 않았다는 사실을 사용한다. 중성미자의 검출을 위해서는 거대한 검출기를 사용해야 하므로, 관측되지 않는 입자로 취급하는 것이 현실적인 접근 방법이다.

새로운 물리 현상의 존재로  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  붕괴의 갈래비가 표준모형의 예측보다 큰 값을 가질 가능성은 존재하지만, 통계적으로 유의미한 결론에 도달하기 위해서는 현재의 실험 감도가 100배 이상 향상되어야 하며, 이를 위해서 차세대 실험인 KOTO-II가 준비 중이다. 실험 감도 향상에 따라 배경사건의 제거 능력 또한 강화되어야 하며, 이를 위해 광자의 입사각을 측정할 수 있는 새로운 광자 궤적 검출기의 연구 개발이 진행 중이다.

KOTO 실험에서는 전자기 열량계로 측정된 두 광자의 에너지와 입사 위치를 이용하여, 이들이 빔 중심축에서 붕괴한  $\pi^0$ 로부터 생성되었다는 가정에 사건을 재구성한다. KOTO-II에서는 광자의 입사각

정보를 활용한 재구성 방법을 새롭게 도입하여, 기존 방법과의 교차 검증을 통해 배경사건 제거 능력을 강화하고자 한다. 이를 위하여 광자의 에너지 및 입사 위치뿐만 아니라, 입사각까지 측정할 수 있는 광자 레직 검출기를 개발 중이다. PAScal로 명명된 이 광자 레직 검출기는 광자가 만드는 전자기 샤워의 공간 분포로부터 광자의 입사각을 재구성하는 것을 목표로 한다. PAScal은 텅스텐과 섬광 섬유가 교차로 적층된 가늘고 긴 모듈이 수평 및 수직 방향으로 배열된 구조를 가지며, 전자기 샤워의 공간 분포를 삼차원으로 측정한다. 섬광 섬유 내부에서 발생하는 섬광은 텅스텐에서 생성된 전자기 샤워 입자들에 의해 생성된다. 또한 섬광의 양은 섬광 섬유를 통과하는 입자 수에 비례하게 되므로, 샤워 생성의 공간적 분포를 보여 준다. 이 분포를 삼차원으로 읽어 냄으로써, 샤워를 생성하는 광자의 입사각을 결정할 수 있다. 두께 0.15 mm의 얇은 텅스텐과  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  단면을 갖는 섬광 섬유를 적층함으로써, 생성된 샤워 입자가 섬광 섬유에 입사하기 전에 사라지는 현상을 최소화하여 표본형 열량계의 단점인 에너지 분해능의 한계를 극복하고자 하였다[5].

PAScal 모듈 내부에서 발생한 광자는 MPPC 센서에 집광되어 전기 신호로 변환된다. 이때, 광자가 방출되는 표면적  $14 \times 6 \text{ mm}^2$ 의 모듈 단면에서 유효 면적이  $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 인 MPPC로 향해 진행하는 광자를 효율적으로 집광하는 빔길잡이 (light guide)가 필요

하다. 측정원리의 검증을 위하여 제작한 PAScal 시제품에서는 ABS 수지의 내부에 만들어진 사다리꼴 홈을 통하여 광자를 집광한다. 이 빔길잡이 영역은 전자기 샤워를 발생시키지 못하는 영역이 된다. 빔길잡이는 효율적인 광자의 검출을 위해서 최소한의 크기만을 가져야 하며, 길이 5 mm의 공기층이 존재하는 구조로 되어 있다. 섬광 섬유 내부에서 발생한 섬광이 MPPC에 전달되는 과정에서, PAScal의 핵심 성능 지표인 광수율은 모듈 단면 및 빔길잡이의 섬광 전달 능력에 의해 결정된다.

본 연구에서는 모듈 단면 상태와 광수율의 관계를 조사하기 위해, 사포를 이용한 연마 과정에서 연마 입도를 #120에서 #4700으로 증가시키면서 광수율을 측정하였다. 또한 빔길잡이 내부 표면의 반사 능력 향상을 위한 시도와 함께, 새로운 형태의 빔길잡이의 성능 평가를 수행하였다.

## II. 실험 방법 및 분석 과정

### 2.1. 광수율 측정을 위한 모듈 제작

PAScal의 기존 모듈은  $0.15 \times 14 \times 250 \text{ mm}^3$  (두께  $\times$  폭  $\times$  길이)의 길고 얇은 텅스텐과 14개의 섬광 섬유를 한 시트로 하고, 시트 5층을 묶어서 하나의 모듈을 제작하였다. 이때,  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 의 단면을 가지고, 같은 길이를 지닌 섬광 섬유를 텅스텐의 폭인 14 mm가 되도록 배열하였다. 16개의 모듈을 배열하여 하나의 검출

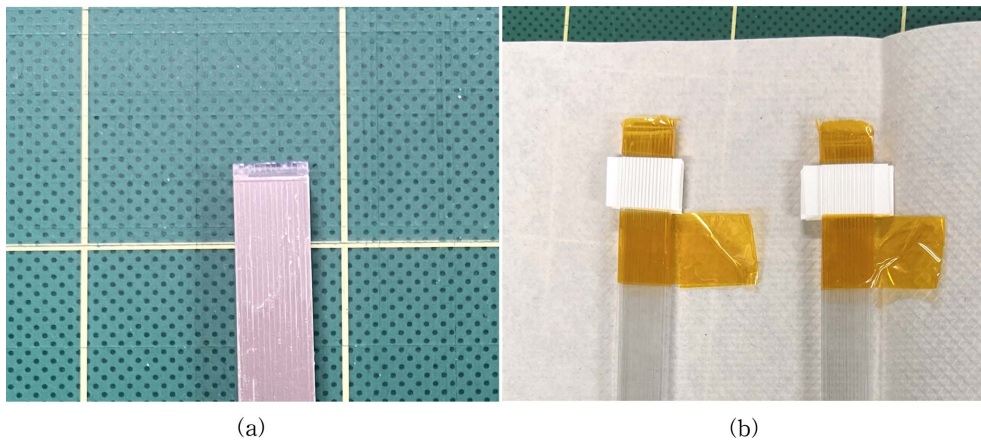
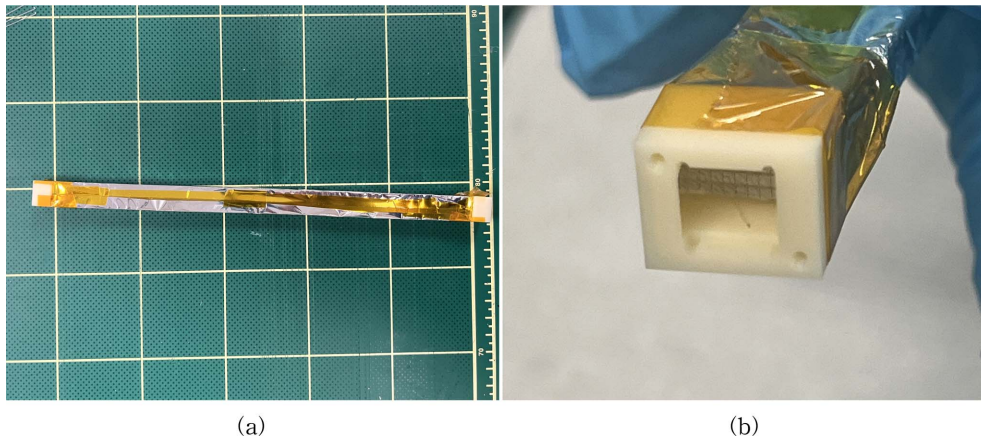
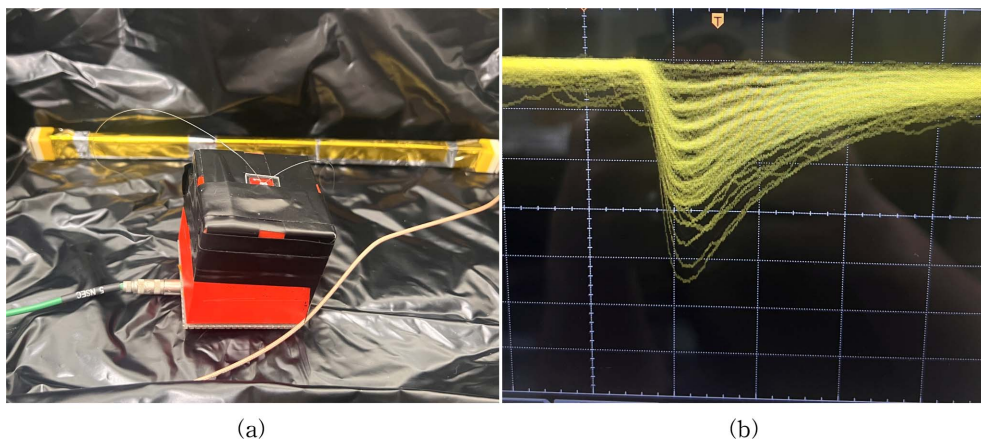


그림 1. (a) 섬광 섬유 시트 사이에 텅스텐을 넣은 기존의 모듈과 (b) 텅스텐 대신에 종이를 넣은 광수율 측정용 모듈.



**그림 2.** (a) 5층의 섬광 섬유를 양 끝에서 고정 한 후 반사재를 둘러싸고 빛길잡이를 부착한 모습. (b) 빛길잡이 내부의 모습. 사각형으로 보이는 부분에 MPPC를 부착하며, 단일 광자 측정을 위한 광섬유가 설치되어 있다.



**그림 3.** 단일 광자 측정 모습. (a) 제작한 모듈에 LED 빛을 광섬유를 통해서 넣어준다. 이때, 붉은 상자 안에서 LED가 광섬유에 광자를 공급한다. (b) 오실로스코프로 LED가 공급한 빛에 대한 MPPC 신호를 관측하면, 입사 광자 수에 따라서 분리된 신호들을 볼 수 있다.

기 면을 만들고, 24개의 검출기 면을 수평 및 수직 방향으로 교대로 적층하여 표본형 열량계를 제작하였다.

실제 PAScal 모듈에서는 사위 생성을 위하여 텅스텐이 필요하지만, 본 연구에서는 방사성 교정 선원을 이용한 광수율 측정이 목적이기 때문에 섬광 섬유만으로 모듈을 제작하였다. 섬광 섬유 층의 사이에는 0.1 mm 두께의 종이를 이용하여, 단면의 공간적 구조를 PAScal 모듈과 동일하게 하였다. 모듈 양 끝의 텅스텐과 섬광 섬유는 광학 시멘트(Eljen Technology 사의 EJ-500)를 사용해 고정하여, 빛길잡이와 결합한다. 그림 1의 (a)는 텅스텐을 사용한 PAScal 모듈에서

섬광 섬유를 고정한 모습이고 (b)는 본 연구에서 사용한 모듈의 제작 모습이다.

광학 시멘트가 완전히 경화되어 섬광 섬유들이 고정되고 나면, 사포를 이용하여 섬광 섬유 단면에 부착된 시멘트를 제거한 후, 그림 2와 같이 빛길잡이를 연결한다. 이 과정에서 MPPC의 광증폭률 (gain)의 변화를 모니터링하기 위한 LED 빛의 제공을 위해  $\phi = 25 \mu\text{m}$ 의 광섬유를 함께 설치하였다.

## 2.2. 단일 광자 측정

단일 광자 측정은 하전 입자가 통과하면서 생성하는

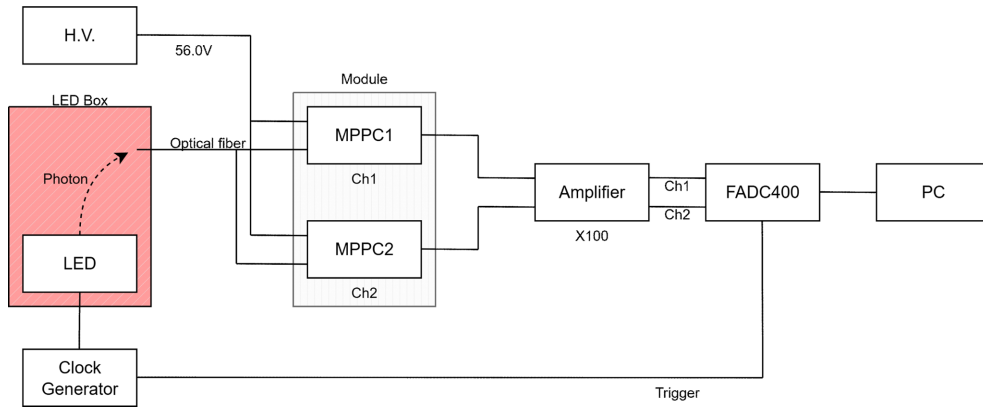


그림 4. 광증폭률 모니터링을 위한 모듈 신호 취득의 전자 장비 개략도.

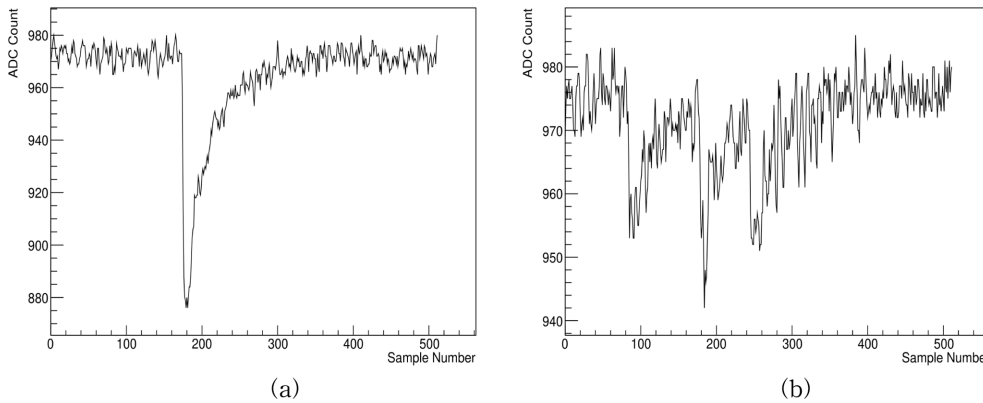


그림 5. (a) 수 개의 광자가 만드는 신호는 잡음의 영향을 크게 받지 않지만, (b) 단일 광자의 경우에는 잡음의 효과를 최소화하는 분석 방법이 필요하다.

신호의 크기로부터 발생한 광전자 수 (number of photoelectron)를 얻기 위해 수행한다. 그림 3의 (a)에서 보는 바와 같이, 미약한 전류에 의해 생성되는 LED 빛을 광섬유를 통해서 MPPC에 제공하면 도달한 광자의 수에 따라 서로 다른 크기의 신호가 선명히 분리됨을 볼 수 있다(그림 3의 (b)).

그림 4는 광증폭률 모니터링을 위한 모듈 신호 취득의 전자 장비 개략도이다. 신호 발생기(clock generator)에서 생성된 신호는 둘로 나뉘어, 하나는 LED에서 광자를 생성하며, 다른 신호는 데이터 취득을 위한 트리거 신호의 역할을 한다. 모듈 양 끝에 설치되어 있는 MPPC의 신호는 NIM 규격의 증폭기에서 100배 증폭되어 FADC (12-bit 400 MHz FlashADC)에 기록된다. 본 연구에서는 512샘플 (1.28  $\mu$ s)을 하나의 신호로 저장하였다. 그림 5는 FADC에 기록된 파형

의 모습이다.

기록된 파형으로부터 Pulse Height (신호의 크기)와 intADC (전하량)를 얻을 수 있다. 파형의 생성시간을 ADC 값이 가장 낮은 샘플의 위치로 정의하며, 이 위치로부터 50샘플 전에서부터 시작하여 10샘플의 ADC 값의 평균을 Pedestal (기준값)로 정의하여, ADC의 기준값으로 사용하였다. Pulse Height는 최솟값의 ADC 값으로 정의하며, intADC는 최솟값으로부터 30샘플 전에서부터 100샘플 후까지의 총 130샘플의 ADC 값의 합으로 정의하였다. 잡음의 영향을 최소화 하기 위하여, Pedestal의 분산 값이 큰 사건은 배제하였다.

그림 6은 intADC와 Pulse Height의 상관관계를 나타내는 2차원 그림이다. Pulse Height는 intADC에 비해 선명하게 광자 수의 구분이 가능하지만, 최솟값을 선택하는 데에서 오는 분석적 편향이 존재한다.

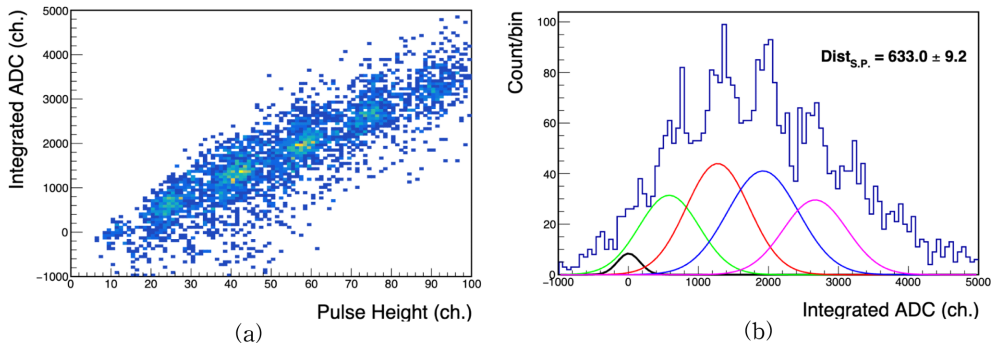


그림 6. (a) intADC와 Pulse Height의 상관관계를 나타내는 2차원 그림 및 (b) intADC의 분포 및 Pulse Height를 사용해서 분리한 성분을 수식 (1)로 피팅한 결과. 각각의 실선이 광자 수에 따른 intADC의 분포이다.

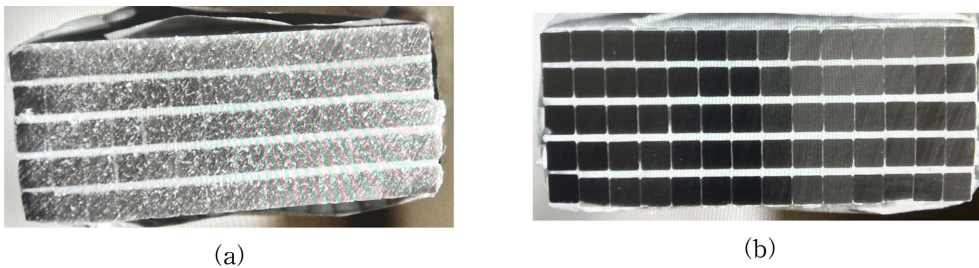


그림 7. (a) #120과 (b) #4700으로 연마한 모듈 끝단 표면의 사진.

따라서, 단일 광자 신호의 크기를 대표하는 변수로는 intADC를 사용하는 것이 타당하다. 이에, Pulse Height에 따른 각 광자 수에 대한 intADC의 분포를 구한 다음, 이 분포를 가우시안 함수로 피팅 (fitting)을 하였다. 피팅에 사용된 가우시안 함수는 수식 (1)과 같다.

$$f(x) = p_0 \exp \left[ -0.5 \cdot \left( \frac{x - p_1}{p_2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Pulse Height에 따라 분리한 각각의 광자 수에 따른 intADC 분포들의 중심값 ( $p_1$ )은 정수배만큼 떨어져 있다. 단일 광자의 크기 ( $\text{Dist}_{s.p.}$ )는 수식 (2)를 사용하여 구한다. 여기에서  $\mu_i$ 는 광자 수에 따른 intADC 분포의 중심값을 해당 광자 수로 나눈 값이며,  $\epsilon_i$ 는 피팅에서 얻은  $\mu_i$ 의 오차이다. 단일 광자 크기의 오차는 수식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\text{Dist}_{s.p.} = \frac{\sum_i \omega_i \mu_i}{\sum_i \omega_i}, \quad \left( \omega_i = \frac{1}{\epsilon_i^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{Dist}_{s.p.}} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \omega_i}} \quad (3)$$

### 2.3. 연마 수준에 따른 광수율 측정

연마 수준에 따른 광수율 측정의 목표는 PAScal 광자 검출기 모듈 끝단 표면 상태가 실제 광자 검출 효율에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 데 있다. 다양한 입도의 사포 (#120, #600, #1000, #3000, #4700)를 사용해 연마 수준을 변화시키면서 각 조건에서의 광수율을 측정하였다. 이 과정에서 동일한 베타선원 (Sr-90)을 사용하였다.

그림 7은 사용한 사포의 입도에 따른, 모듈 끝단의 모습을 보여 준다. 광학 시멘트를 제거하여, 모듈을 빔길잡이와 결합하기 위한 최소한의 연마 (#120)와 비교하면, 정밀한 연마 (#4700)의 경우에 모듈 끝단의 표면 상태가 매우 균일하다.

그림 8은 광수율 측정 장치의 사진이다. 연마가 끝난 모듈에 빔길잡이와 MPPC를 연결한다. 베타선원

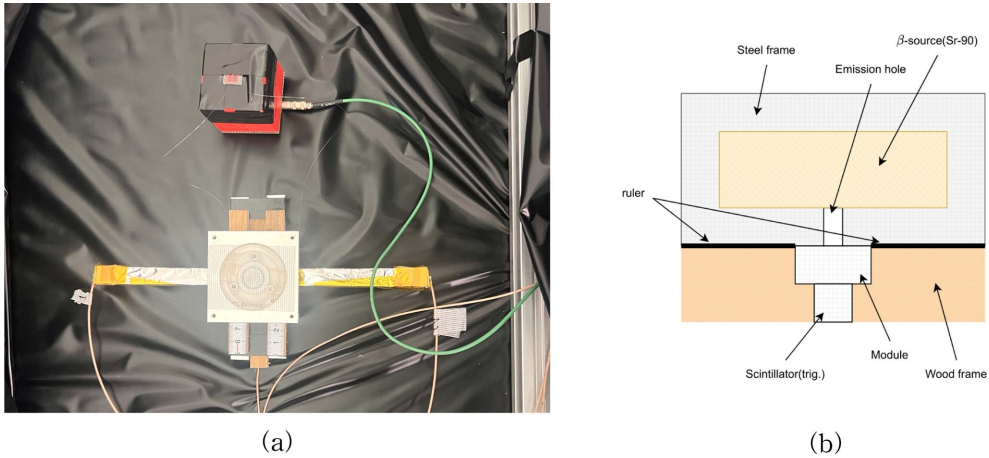


그림 8. (a) 광수율 측정 장치의 사진 및 (b) 베타선원과 모듈, 트리거용 섬광기의 위치 관계.

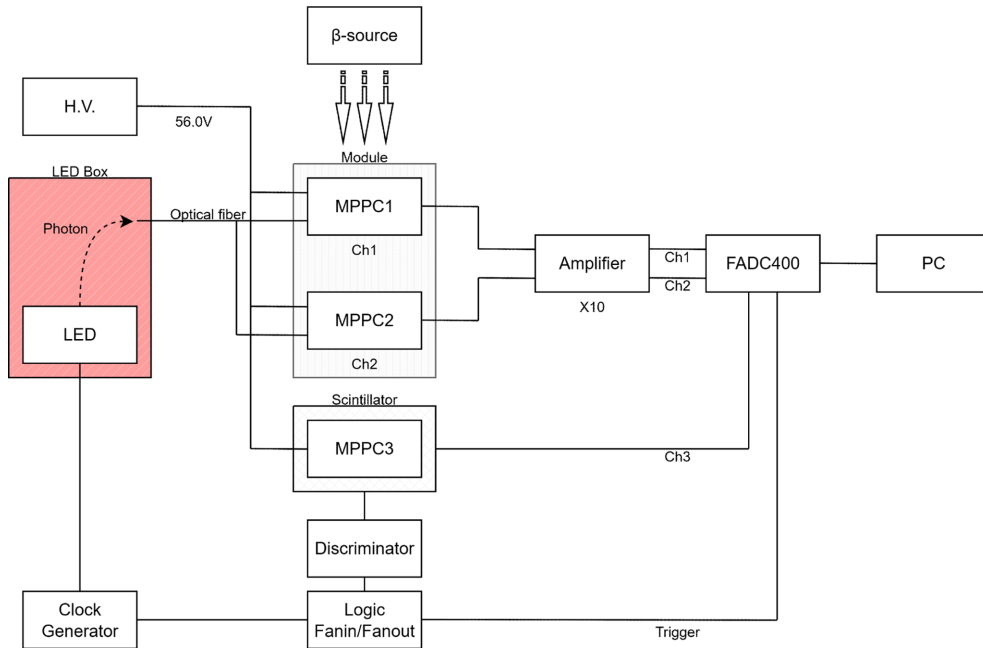


그림 9. 광수율 측정의 개략도. 섬광기의 신호 (MPPC3)를 트리거로 사용하고, 모듈의 신호 (MPPC1, MPPC2)를 FADC400에서 디지털 신호로 변환하여 PC에 저장한다.

을 모듈 위에 설치하여, 베타선이 모듈을 통과하도록 한다. 베타선의 통과 위치를 정확히 결정하기 위하여, 베타선원은 지름 1 mm의 구멍을 지닌 알루미늄 블록으로 이루어진 시준기 (collimator) 위에 위치한다. 모듈의 아래에는 두께 10 mm의 플라스틱 섬광기 (scintillator)를 설치하고 베타선이 통과함을 확인하여 데이터 취득의 트리거 신호로 사용한다. 각각의 연마

조건하에서 모듈 폭 방향에 따른 광수율의 변화를 측정하기 위하여, 베타선원의 위치를 모듈 중심에서 폭 방향으로 각각 -6, -3, 0, +3, +6 mm 떨어진 지점으로 옮겨가며 데이터를 취득하였다.

그림 9는 광수율 데이터 취득의 개략도이다. 트리거용 섬광기의 신호 (MPPC3)를 두 개로 나누어, 한 개는 Discriminator에서 논리 신호로 변환하여

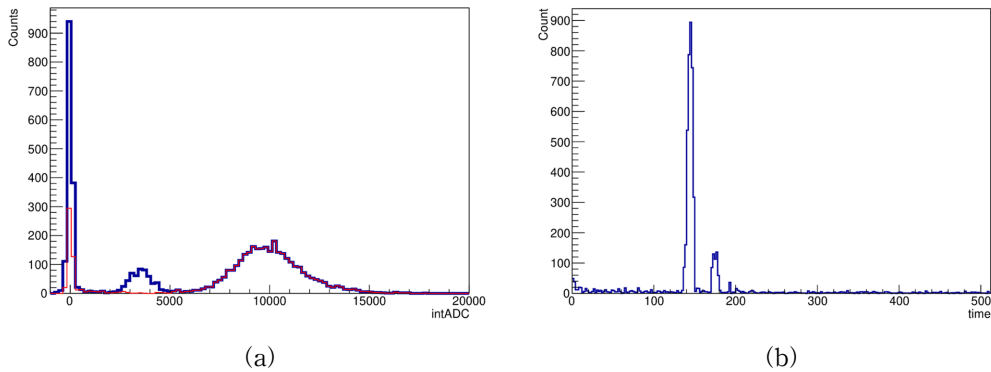


그림 10. 입도 #4700인 사포로 단면 연마를 한 모듈이 통과한 베타선에 대해 생성하는 신호의 (a) intADC 분포와 (b) 시간 분포. 베타선 신호와 LED 신호는 서로 다른 시간에 기록되며, 이를 이용하면 베타선이 만드는 신호만을 선별할 수 있다.

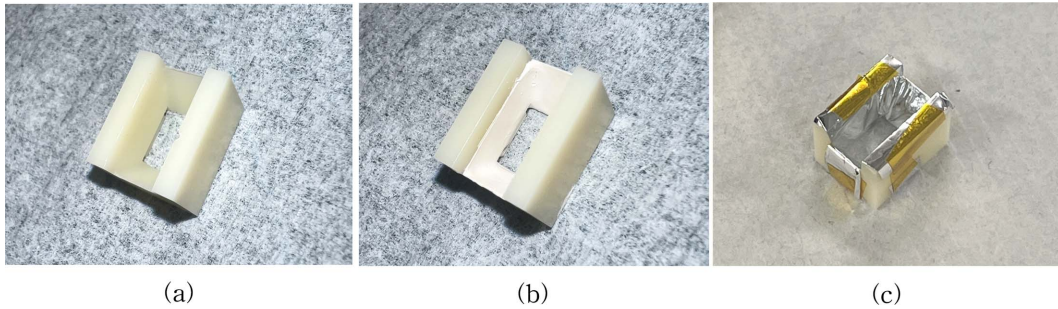


그림 11. ABS 수지로 만든 빛길잡이 (a)와 반사재를 도장한 경우 (b)와 Aluminized Mylar를 부착한 경우(c)의 사진.

트리거 신호로 사용하며, 나머지 한 개는 FADC에서 디지털 신호로 변환되어 PC에 기록하였다. 양쪽 (MPPC1, MPPC2)에서 검출하는 모듈 신호는 10배의 증폭기를 통하여 FADC로 들어간다. 베타선원의 신호는 많은 광자들에 의한 것이므로, 단일 광자 신호와 달리 10배의 증폭률을 사용하였다.

단일 광자 측정과 같은 방법으로 intADC의 분포를 그림 10(a)과 같이 얻을 수 있다. 베타선원과 LED, 두 종류의 데이터를 취득하였기 때문에 서로 다른 두 개의 분포를 보여 주고 있다. 각각의 트리거는 서로 다른 시간에 생성되므로, 신호의 시간 분포 (b)를 사용하여 베타선원에 의한 신호만을 선별할 수 있다. 선별된 베타선원 신호는 그림 10(a)에서 붉은 실선으로 표시하고 있으며, 수식 (1)으로 피팅하여 평균값을 구하였다. 광수율은 베타선이 모듈을 통과할 때 얻을 수 있는 광전자 수로 정의하며, 피팅으로 얻은 평균값을 수식 (2)에서 얻은 단일 광자 크기로 나눈

값으로 정의한다.

#### 2.4. 다양한 빛길잡이에 따른 광수율 측정

빛길잡이는 검출기 모듈에서 생성된 광자가 효율적으로 MPPC에 도달할 수 있도록 하는 역할을 담당한다. 빛길잡이는 6 mm × 14 mm의 단면을 갖는 모듈과 6 mm × 6 mm인 MPPC 단면 사이에서 광자를 효율적으로 MPPC에 전달하여야 한다. PAScal의 시제품에서는 ABS 수지의 내부에 사다리꼴의 구멍을 제작하여 광자의 통로로 사용하였다. 이러한 구조에서 구멍의 가장자리에 위치한 섬광 섬유에서 나오는 빛은 빛길잡이의 내부 벽면에서 반사되어 MPPC에 도달하게 되기 때문에, 일정한 손실이 예상된다.

그림 11은 빛길잡이의 사진이다. 기존의 ABS 수지 빛길잡이 (a)에 입사하는 광자의 반사를 돕기 위한 반사재 (reflective paint; Eljen Technology 사의 EJ-510)를 도장하는 경우 (b)와 알루미늄 증착 반사재

(Aluminized Mylar)를 접착하는 경우 (c)의 광수율 변화를 측정하였다. 또한, 모듈과 MPPC를 PMMA (Poly(methyl methacrylate),  $(C_5O_2H_8)_n$ ,  $1.18 \text{ g/cm}^3$ )로 제작한 빛길잡이로 직접 연결하여, 광수율의 변화를 확인하였다. 모듈과 PMMA 빛길잡이는 광학 그리스

(optical grease; Saint Gobain 사의 BC-630)를 이용하여 공기층이 없도록 밀착하였다. 그림 12는 모듈에 PMMA 빛길잡이를 부착한 상태의 사진이다. PMMA 빛길잡이의 경우에 내부에서의 광손실과 빛 전달의 균일성 변화를 살펴보기 위하여, 세 가지의 서로 다른 길이 5 mm, 8 mm, 10 mm의 빛길잡이에 대하여 데이터를 취득하였다.



그림 12. 광학 그리스를 이용하여 PMMA 빛길잡이를 모듈에 부착한 사진.

### III. 실험 결과 및 분석

#### 3.1. 연마 수준에 따른 광수율 측정

그림 13은 베타선원의 폭 방향의 위치에 따라 양단의 MPPC에서 얻은 광전자 수를 보여 준다. 동일한 입도의 결과를 선으로 연결하였으며, 중심 위치에서 가장자리로 이동함에 따라 광전자 수가 감소함을 알 수 있다. 모듈 중심에서는 연마 수준이 높아질수록, 즉 표면이 매끄러울수록 광전자의 개수가 증가하는 뚜렷한 경향이 관찰되었다. 그러나 가장자리의 광전자 수는

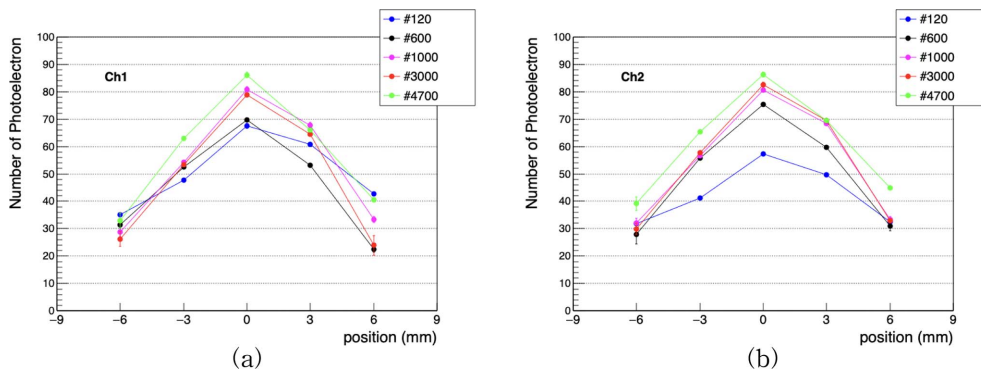


그림 13. 연마 수준에 따른 (a) Ch1과 (b) Ch2의 광수율 변화.

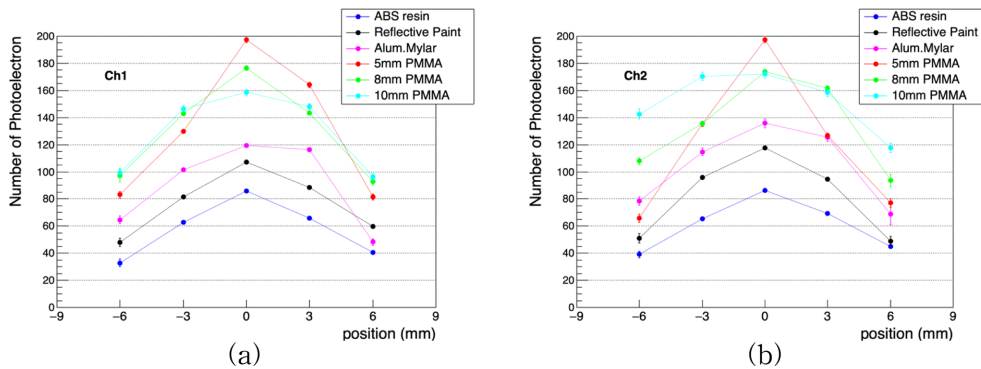


그림 14. 빛길잡이의 종류에 따른 (a) Ch1과 (b) Ch2의 광수율 변화.

연마 수준에 따른 일관된 변화가 관측되지 않았다.

### 3.2. 다양한 빛길잡이에 따른 광수율 측정 결과

ABS 수지로 제작한 빛길잡이의 내부 표면 조건을 변화한 세 가지와 PMMA로 제작한 서로 다른 길이의 빛길잡이에 대한 데이터를 취득하였다. 이 경우에 입도 #4700으로 연마된 모듈을 이용하였다.

그림 14에서 보는 바와 같이, 모듈 중심에서의 광수율은 반사재 도장으로 30%, Aluminized Mylar의 부착으로는 48% 향상됨을 알 수 있다. 이러한 증가율은 가장자리에서도 볼 수 있는데, Ch1 Aluminized Mylar의 +6 mm 위치에서의 감소는 빛길잡이와 모듈 사이의 미세한 위치 어긋남(misalignment)으로 인한 결합 손실로 추정한다. PMMA 빛길잡이를 사용한 경우에 더 큰 광수율의 향상을 얻을 수 있었다. 모듈 중심에서는 광수율이 길이가 짧을수록, 가장자리에서는 길이가 길수록 증가폭이 커짐을 알 수 있다.

## IV. 결 론

섬광 섬유 단면의 조도를 매우 작게 하는 표면 연마는 검출기의 광수율 향상에 기여함을 확인할 수 있었다. 섬광 섬유로 구성된 검출기의 특성상, 모듈에서 생성된 섬광은 폭 방향의 위치는 검출기의 단면까지 그대로 유지된다. 따라서, 내부 벽면에서 광손실이 크게 일어나는 빛길잡이를 사용하는 경우에는, 섬광의 생성 위치에 따른 검출기 응답 특성이

크게 변화하는 문제가 발생한다.

빛길잡이 내부 표면에 반사재를 도장하거나 Aluminized Mylar를 부착하여 반사 능력을 향상시키는 시도는 광수율의 향상에는 효과가 있으나, 위치의존성의 개선에는 제한적이다. PMMA로 제작한 빛길잡이를 사용하는 경우, 모듈 중심에서는 길이가 짧을수록, 가장자리에서는 길이가 길어질수록 광수율이 증가한다. 이 결과를 바탕으로 하는 광학 시뮬레이션을 통하여, 검출기 응답 특성의 위치의존성을 완화할 수 있는 빛길잡이 설계를 수행할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] J. K. Ahn et al. (KOTO Collaboration), Search for the  $K_L \rightarrow \pi_0 \nu \bar{\nu}$  Decay at the J-PARC KOTO Experiment, Phys. Rev. Lett., **134**, 081802 (2025).
- [2] J. K. Ahn et al. (KOTO Collaboration), Study of the  $K_L \rightarrow \pi_0 \nu \bar{\nu}$  Decay at the J-PARC KOTO Experiment, Phys. Rev. Lett., **126**, 121801 (2021).
- [3] B. Beckford, New results on the search for rare kaon events with the KOTO detector, arXiv:1910.07148 [hep-ex] (2019).
- [4] A. J. Buras, D. Buttazzo, J. Girrbach-Noe, and R. Knegjens,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  and  $K_L \rightarrow \pi_0 \nu \bar{\nu}$  in the Standard Model: Status and Perspectives, J. High Energy Phys., **11**, 033 (2015).
- [5] G. Y. Lim et al., Sampling calorimeter to measure the photon's incident angle, EPJ Web Conf. 320, 00063 (2025).