



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

부호화 구경 기반의 휴대용 이중입자
영상장비 개발

제주대학교대학원

에너지응용시스템 학부

부 지 환

2022년 02월

부호화구경 기반의 휴대용 이중입자 영상장비 개발

지도교수 정 만 희

부 지 환

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2022 년 02 월

부지환의 공학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 최 수 석

위 원 우 승 민

위 원 정 만 희



제주대학교 대학원

2022 년 02월



Development of a Coded Aperture Based Hand-held Dual
Particle Imager

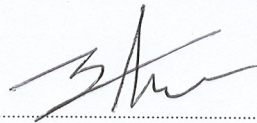
Jihwan Boo

(Supervised by professor Manhee Jeong)

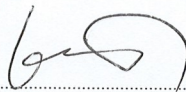
A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Science

February 2022

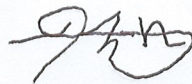
This thesis has been examined and approved.



.....
Thesis director, Manhee Jeong. Prof. of Nuclear and Energy Engineering



.....
Sooseok Choi. Prof. of Nuclear and Energy Engineering



.....
Seung Min Woo. Prof. of Nuclear and Energy Engineering

Date Feb. 2022.

Department of Nuclear and Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

표 목차	I
그림 목차	II
ABSTRACT	VI
1. 서 론	1
1.1 배경 및 필요성	1
1.2 연구범위	2
2. 휴대용 이중입자 영상장비 구축	3
2.1 개념과 시스템 개요	3
2.2 이중입자 영상장비(DPI)의 검출 원리	4
2.2.1 감마선 검출	4
2.2.2 중성자 검출	6
2.2.3 신호 파형 구별법(PSD)	8
2.3 시스템 구조와 구성	11
2.3.1 픽셀화 된 스틸벤과 플라스틱 유기섬광체 어레이	11
2.3.2 광센서 어레이	13
2.3.3 신호 처리 하드웨어 구축	15
2.4 부호화 구경 제작 및 영상 재구성 기법	19
2.4.1 부호화 구경 제작 방법	19
2.4.2 방사선 영상 재구성 방법	20
3. 이중입자 영상장비 실험 결과 및 해석	21
3.1 스틸벤과 플라스틱 섬광체의 성능 비교	21
3.1.1 인가된 전압에 따른 플라스틱-SiPM 어레이와 스틸벤-SiPM 어레이 모듈의 반응 위치 분해능 비교	21

3.1.2	인가전압과 R_f 의 변화에 따른 플라스틱-SiPM 어레이와 스틸벤-SiPM 어레이 모듈의 PSD 성능 비교	23
3.1.3	최적화된 조건에서의 중성자 영상과 감마선 영상의 획득에 필요한 시간 측정	28
3.1.4	개선점 논의	32
3.2	SiPM 어레이의 광 흡수 면적에 따른 픽셀화된 스틸벤 어레이의 성능 비교	33
3.2.1	에너지 교정 및 SiPM 어레이의 광흡수 면적에 따른 반응 위치 분해능 비교	33
3.2.2	SiPM 어레이의 광흡수 면적에 따른 PSD 성능 비교	36
3.2.3	SiPM 어레이의 광흡수 면적에 따른 중성자와 감마선의 영상 획득에 필요한 시간 비교	39
3.2.4	개선점 논의	42
4.	결론 및 시사점	43
	참고문헌	44

표 목차

표 I. 스틸벤 섬광체 어레이와 플라스틱 섬광체 어레이 주요 특징 비교	12
표 II 사용된 SiPM 어레이의 특징 비교	14
표 III. 그림 17에 나타난 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이의 1D sum profile에 대한 전압 별 피크의 반치폭(FWHM) 비교	22
표 IV. 측정 시간 또는 이벤트의 수를 증가시킬 때 PSNR, NMSE, SSIM을 이용한 중성자 영상의 화질 평가	29
표 V. 측정 시간 또는 이벤트의 수를 증가시킬 때 PSNR, NMSE, SSIM을 이용한 감마선 영상의 화질 평가	30

그림 목차

그림 1. 이중입자 영상장비 시스템 개요.	3
그림 2. 물질의 원자번호와 입사 감마선의 에너지에 따른 감마선과 물질과의 반응.	5
그림 3. 감마선의 콤프턴 산란.	5
그림 4. 스틸벤 섬광체 내 중성자 및 광자 에너지 침적에 따른 광 출력 변환 7	7
그림 5. π -전자 구조로 인한 유기분자의 에너지 준위.	9
그림 6. 스틸벤에서의 감마선과 중성자의 반응에 생성된 신호의 차이(a), 감마선(빨간색 선)과 중성자 분포(파란색 선)에 대한 분리 정도를 나타내는 지표인 FOM을 평가하는 실례(b).	10
그림 7. 스틸벤 섬광체 어레이(a), 플라스틱 섬광체(EJ-276) 어레이(b).	11
그림 8. C-series의 SiPM 어레이(a), 그리고 J-series의 SiPM 어레이(b).	14
그림 9. 144개의 픽셀에서 신호를 획득하고 처리하기 위한 신호 처리 회로의 구성도.	15
그림 10. 휴대용 DPI의 아날로그 회로도.	16
그림 11. 휴대용 DPI의 디지털 보드 회로 블록도.	17
그림 12. 배터리 충전회로도.	18
그림 13. (a) 아날로그 보드 (b) ADC+디지털 보드 (c) 전원 보드.	18
그림 14. 완성된 DPI 시스템 (a), 그리고 실제 DPI의 삼각대 거치를 통해 SNM을 계측하는 사례 (b).	18
그림 15. 3D 프린터를 이용한 부호화 구경 구조물 제작 후 텅스텐을 레고 형식으로 삽입하여 완성한 부호화 구경(a), 부호화 구경이 탑재된 하드웨어 조립 형태 (b).	19
그림 16. (a) 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이 모듈을 이용하여 ^{137}Cs 감마선원 계측을 통해 획득한 반응 위치 2-D 분포 히스토그램. 두 어레이 모듈에 인가된 전압은 28 V로 동일하다.	22

그림 17. (a) 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이 모듈에 인가된 전압을 26 V에서 30 V 까지 1 V 단위로 증가시킬 때, ^{137}Cs 감마선원 계측 시 행에 대한 검출 위치 분포를 합하고 이를 1차원 적으로 나타낸 검출 위치 분포 윤곽(1D row-sum profile). 22

그림 18. (a) 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이 모듈에 인가된 전압을 28 V로 고정시키고, 신호 처리 회로 단의 트랜스 임피던스의 피드백 저항을 50 Ω , 100 Ω , 그리고 200 Ω 으로 증가시킬 때, ^{22}Na 감마선원 계측 시 획득된 에너지 스펙트럼. 이때, SiPM은 28°C의 온도에서 동작한다. 23

그림 19. (a) 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이 모듈에 인가된 전압을 28 V로, 처리 회로 단의 트랜스 임피던스의 피드백 저항을 50 Ω 로 고정시킬 때, 획득된 ^{137}Cs 과 ^{22}Na 의 컴프턴 단애의 에너지와 그에 해당하는 채널 번호 간의 관계. 24

그림 20. (a, c) 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈과 스틸벤-SiPM 모듈이 100 cm 거리에서 3.5×10^5 n/s ^{252}Cf 의 자발적 핵분열 선원을 측정할 때, 50 keVee의 문턱값에서 획득된 1,000,000개의 신호에 대한 144개의 전체적인 검출기의 PSD 분포 (b, d) 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈과 스틸벤-SiPM 모듈에서 각각 획득한 다양한 에너지 (300 ± 100 keVee, 500 ± 100 keVee, 700 ± 100 keVee)에서의 PSD 분포의 윤곽(profile)과 그때의 FOM 값. 26

그림 21. 인가 전압과 R_f 의 값 변화 시 (a) 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈에서 관찰된 500 ± 100 keVee의 에너지 범위에서의 FOM 값과, (b) 스틸벤-SiPM 모듈에서 관찰된 300 ± 100 keVee의 에너지 범위에서의 FOM 값. 26

그림 22. 그림 20에 제시된 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈과 스틸벤-SiPM 모듈에서 추출한 단일 픽셀이 갖는 PSD 분포(a, c) 그리고 다양한 에너지 (300 ± 100 keVee, 500 ± 100 keVee, 700 ± 100 keVee)에서의 PSD 분포의 윤곽과 그때의 FOM 값. 27

그림 23. 계측 시간 또는 기록된 이벤트 수에 따른 검출기 map 변화와 각 검출기 map을 이용하여 재구성된 중성자(왼쪽)와 감마선 영상(오른쪽). 29

그림 24. (a) 시스템의 최대 FOV 테스트를 위해 시스템으로부터 1m 거리에서 6.4 $\mu\text{R/h}$ 를 생성하는 ^{137}Cs 선원이 $\pm 22.5^\circ$ 의 각도에 각각 위치할 때 재구성된

영상. (b) 각도 분해능 시험을 위해 시스템으로부터 75 cm 거리에서 초당 3.5×10^5 개의 중성자를 방출하는 ^{252}Cf 선원과 30 cm에서 2.7 $\mu\text{R/h}$ 를 생성하는 ^{137}Cs 선원이 6.8° 각도로 분리되었을 때의 재구성된 감마선 및 중성자 영상.....	30
그림 25. 앞서 언급한 그림 24(b) 제시된 방사선 재구성 영상과 결합한 광학 카메라 영상.....	31
그림 26. (a) C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈과 (b) J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈을 이용하여 ^{137}Cs 감마선원 계측을 통해 획득한 반응 위치 2-D 분포 히스토그램. 두 어레이 모듈에 인가된 전압은 28 V로 동일 함.....	34
그림 27. 그림 26에 제시된 행에 대한 검출 위치 분포를 합하고 이를 1차원 적으로 나타낸 검출 위치 분포 윤곽(1D row-sum profile).	34
그림 28. (a) C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈과 (b) J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈로 감마선원(^{60}Co , ^{137}Cs , ^{22}Na , 그리고 ^{57}Co)을 측정하여 획득된 에너지 스펙트럼.....	35
그림 29. (a) C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈과 (b) J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈에서 획득된 컴프턴 단애의 에너지와 그에 해당하는 채널 번호 간의 관계, 그리고 채널-에너지 교정(calibration)을 위한 선형 식과 2차 함수의 비교. 컴프턴 단애는 각 감마선 선원에 대해 컴프턴 단애의 피크의 80% 되는 지점에서의 채널 번호로 계산되며, SiPM은 28 V의 인가전압과 25°C의 온도에서 작동됨.....	35
그림 30. (a) C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈과 (b) J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈이 100 cm 거리에서 3.5×10^5 n/s ^{252}Cf 의 자발적 핵분열 선원을 측정할 때, 10 keVee의 문턱값에서 획득된 1,500,000개의 신호에 대한 전체적인 검출기의 PSD 분포.....	37
그림 31. 그림 30에 주어진 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈과 스틸벤-SiPM 모듈에서 각각 획득한 PSD 분포에서 다양한 에너지(0-50 keVee, 50-100 keVee, ..., 1500-1550 keVee)마다 획득된 FOM 값.....	37

그림 32. 그림 30에 제시된 C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈 (a)과 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(b)이 획득한 PSD 분포 중 단일 픽셀이 갖는 PSD 분포.	38
그림 33. 그림 32에 주어진 C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(윗행)과 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(아래행)에서 각각 획득한 PSD 분포에서 저에너지(50-100 keVee, 100-150 keVee, 그리고 150-200 keVee) 구간에서 획득된 FOM 값.	38
그림 34. C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(a)과 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(b)로부터 100 cm 거리에 위치한 2.8×10^5 n/s의 ^{252}Cf 선원을 계측할 때 측정 시간에 따른 검출 확률 분포.	40
그림 35. C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(a)과 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(b)이 0.1 $\mu\text{Gy/h}$ 의 선량을 나타내는 ^{137}Cs 선원을 계측할 때 측정 시간에 따른 검출 확률 분포.	40
그림 36. 휴대용 DPI를 이용하여 5.37×10^6 n/s ^{252}Cf 선원 계측할 때 GUI에 나타난 감마선 영상(좌측)과 중성자 영상(우측).	41

ABSTRACT

Dual particle imaging, in which both neutrons and gamma-rays in the environment can be individually characterized, is particularly attractive for monitoring mixed radiation emitters such as special nuclear materials (SNM). An effective SNM localization and detection benefits from high instrument sensitivity so that real-time imaging or imaging with a limited number of acquired events is enabled. For portable applications, one also desires a dual particle imager (DPI) that is readily deployable. We have developed a hand-held type DPI equipped with a pixelated stilbene-silicon photomultiplier (SiPM) array module and low sampling-rate analog-to-digital converters (ADCs) processed via a multiplexed readout. The stilbene-SiPM array (12×12 pixels) is capable of effectively performing pulse shape discrimination (PSD) between gamma-ray and neutron events and neutron/gamma-ray source localization on the imaging plane, as demonstrated with ^{252}Cf neutron/gamma and ^{137}Cs gamma-ray sources. The low sampling rate ADCs connected to the stilbene-SiPM array module result in a compact instrument with high sensitivity that provides a gamma-ray image of a ^{137}Cs source, producing $6.4 \mu\text{R/h}$ at 1 m, in less than 69 seconds. A neutron image for a $3.5 \times 10^5 \text{ n/s}$ ^{252}Cf source can also be obtained in less than 6 minutes at 1 m from the center of the system. The instrument images successfully with field of view of 50° and provides angular resolution of 6.8° .

This study also illustrates a positive effect of a large light-absorption area in a photodetector, such as a SiPM array, on the PSD performance despite the use of ADCs that have a low bit resolution (12 bit) and a low sampling rate (50 MHz). To the best of our knowledge, there have been few studies on how to improve a degraded capability of discrimination between the gamma-ray and neutron pulses in DPI systems that mount a pixelated scintillator array. With improved PSD performance in the pixelated array sensor module of the DPI system, gamma-ray and neutron events can be used as much as possible for the reconstruction of gamma-ray and neutron images, respectively, enabling rapid image acquisition.

1. 서론

1.1 배경 및 필요성

플루토늄과 고농축 우라늄(highly enriched uranium, HEU)과 같은 특수핵물질(special nuclear material, SNM)은 핵무기로써 오용될 수 있으며 [1], SNM은 중성자와 감마선을 함께 방출하는 특징을 가진다 [2]. 핵물질 및 기타 방사성물질과 관련된 시설 또는 관련 활동으로부터 위협을 방지하기 위해, 핵물질 검출, 위치 파악 및 동위원소 함량을 정량화할 수 있는 장비가 요구된다.

이중입자 영상장비(dual particle imager, DPI)는 감마선과 중성자를 모두 계측하고, 획득한 데이터를 기반으로 방사선원의 분포 맵(map)을 제공하는 장비이다. 부호화 구경(coded aperture) 기반의 DPI는 수동적 탐지 방법을 통해 감마선과 중성자를 동시에 방출하는 $^{241}\text{AmBe}$ 선원과 ^{252}Cf 선원의 위치를 모두 성공적으로 나타낸 사례가 있다 [3]. 더불어, 산란 반응 기반의 DPI는 중성자를 핵물질에 조사(interrogation)하는 능동적 조사 방법을 이용하여 중성자 차폐체로 둘러싸인 핵무기 등급(weapon-grade)의 HEU의 위치를 파악하고, 핵물질로 오해받을 수 있는 일반 금속 물체(예를 들어, 텅스텐)를 신호의 특성을 통해 구별할 수 있다 [4].

그럼에도 불구하고, DPI 시스템은 아직 휴대성과 현장 배치 용이성이 미흡한 상태이다. 앞서 언급한 산란 반응 기반의 DPI는 EJ-309 및 NaI 섬광체 검출기 여러 개를 배열로 만들고, 그 뒤에 부피가 큰 광전자 증배관(photomultiplier tube, PMT)이 결합한 형태이다. 부호화 구경 기반의 DPI 또한 부피가 큰 검출기와 PMT들을 배열하여 사용하며, 영상을 얻기 위해 부호화 구경을 원위치에 두고 측정하는 것과 부호화 구경을 90°로 회전시켜 측정하는 두 과정(마스크와 안티 마스크를 이용한 계측 방법)을 모두 요구하며, 이 과정은 각각 1시간의 측정 시간이 소요된다. 한편, 미국의 미시간 대학교에서 개발하고 있는 휴대용 이중입자 영상장비는 [5] 부피가 큰 PMT를 실리콘 광 증배소자(silicon photomultipliers, SiPM)으로 대체하여 소형화에 성공하였으며, 더불어 SiPM의 사용은 PMT에 비해 낮은 전압을 요구하는 장점이 있다. 사용된 스틸벤(stilbene) 섬광체 또한 타 섬광체에 비해 높은 광 출력과 중성자/감마선 신호 분리(pulse shape discrimination, PSD) 능력이 높은 특징을 가진다. 하지만, 획득된 신호 처리를 위해 CAEN V1720과 같이 부피가 큰 신호 처리 장비

여러 대를 요구하기 때문에, 아직 휴대용으로 사용하기에는 어려움이 있다.

1.2 연구 범위

본 연구는 12×12 개의 픽셀로 구성된 SiPM 어레이(array)와 유기 섬광체 어레이가 결합된 센서 모듈(sensor module)을 이용하여 DPI 시스템을 소형화하고자 하였으며, 신호 파형 구별을 이용한 중성자/감마선 동시 검출 가능성을 확인하고자 한다. 또한, centered mosaic의 MURA(modified uniformly redundant array) 패턴의 부호화 구경을 탑재하였을 때 반복적 영상 재구성법(maximum likelihood expectation maximization, MLEM)을 이용하여 중성자 및 감마선의 위치 영상을 신속하고 동시에 제공하고자 한다.

2. 휴대용 이중입자 영상장비 구축

2.1 개념과 시스템 개요

DPI는 광자와 고속 중성자를 영상화할 수 있는 방사선 검출 시스템이다. DPI는 두 입자 유형에 대한 국소화 및 에너지 분광학(spectroscopy)을 위해 설계되었다. 이러한 기능을 통해 DPI는 SNM의 탐지, 지역화 및 특성화가 필요한 애플리케이션을 위한 강력한 측정 도구가 된다. DPI의 주요 특징은 그림 1과 같이 유기 섬광체(orgainc scintillator)와 부호화 구경으로 구성되며, 유기 섬광체는 12×12 배열의 픽셀화 된 어레이 형태이다. 유기 섬광체는 중성자와 감마선에 모두 민감하며, 방사선과의 상호작용으로 흡수한 방사선 에너지의 일부를 가시광선으로 변환하여 내보낸다. 방출된 가시광선은 광센서를 통해 전류 신호로 측정될 수 있으므로 섬광체는 방사선 검출기로써 사용된다. DPI에서의 감마선과 중성자를 검출 원리를 제 2.2절에 제시하였으며, 또한, 사용된 유기 섬광체의 종류와, 광 센서, 그리고 발생된 신호를 처리하기 위한 하드웨어 구성은 제 2.3절에 기술하였다. 부호화 구경은 전면에서 입사되는 감마선에 대하여 그 부호화 구경이 가지는 마스크 패턴을 유기섬광체에 투영(projection)한다. 투영된 마스크 패턴을 이용하여 방사선원의 위치를 추정할 수 있으며, 제 2.4절에서 마스크 패턴을 이용한 방사선 영상 재구성 방법을 설명한다.

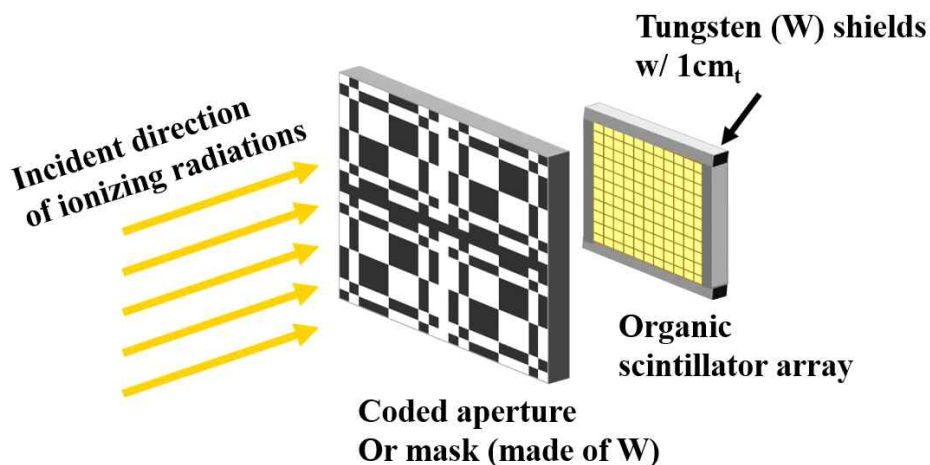


그림 1. 이중입자 영상장비 시스템 개요.

2.2 이중입자 영상장비(DPI)의 방사선 검출 원리

2.2.1 감마선 검출

DPI에서의 감마선 검출은 주로 콤프턴 산란(Compton scattering)에 의존한다. 에너지가 100 keV 이상 10 MeV 이하인 감마선은 원자번호가 낮고 밀도가 작은 유기물질, 예를 들어 스틸벤이나 플라스틱 섬광체, 에 대해서 그림 2와 같이 주로 콤프턴 산란을 통해 전자와 상호작용할 확률이 높다. 콤프턴 산란의 상호작용 과정은, 그림 3과 같이, 입사 감마선이 원자의 궤도전자와 충돌하여 전자에 에너지 일부를 주어 전자를 튕기고 동시에 광자 자신의 에너지는 그 몫만큼 낮아져서 다른 방향으로 산란하는 현상이다. 이때 튀어나온 전자를 되튐 전자(recoil electron)라 하며, 산란한 전자기 방사선을 산란 감마선이라 부른다. 에너지 E_0 인 감마선이 한 원자와 작용하여 되튐 전자가 갖는 에너지 E_c 는 다음과 같다.

$$E_c = E_0 - \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

여기서 $\alpha = \frac{E_0}{m_0 c^2}$ 이며, $m_0 c^2$ 은 전자의 정지질량 에너지(0.511 MeV)이다. 산란 각 θ 에 따라서 되튐 전자는 최소 ($\theta=0$)으로부터 최대 ($\theta=\pi$)까지 걸쳐 에너지 분포를 가진다. 반도 전자 에너지 스펙트럼의 최대치 $E_{c,max}$ 를 콤프턴 단애(edge)라고 부르며, 최대 에너지는 식 (1)과 같다.

$$E_{c,max} = \frac{2\alpha E_0}{1 + 2\alpha}$$

따라서 에너지 E_0 의 입사 감마선은 검출기 내에서 에너지 0과 $E_{c,max}$ 사이의 반도 전자를 방출시킨다. 나머지 산란 감마선은 후속으로 광전효과를 통해서 섬광체 내에 완전히 정지된다는 지, 혹은 후속 콤프턴 산란을 다시 일으키든지, 혹은 검출되지 않고 섬광체를 이탈한다. 본 연구에서 사용한 스틸벤 섬광체는 대부분 수소와 탄소로 구성되어 있으므로, 광전효과가 일어날

확률은 콤프턴 산란보다 극히 적다. 따라서, 본 실험에서 사용한 선원에서의 에너지 스펙트럼은 대부분이 콤프턴 연속부 만으로 구성된다.

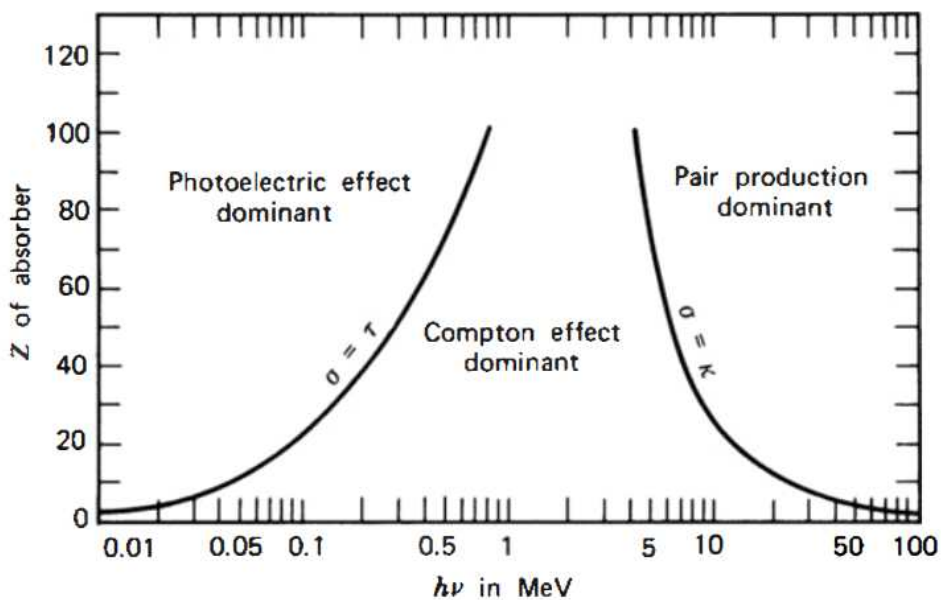


그림 2. 물질의 원자번호와 입사 감마선의 에너지에 따른 감마선과 물질과의 반응 [6].

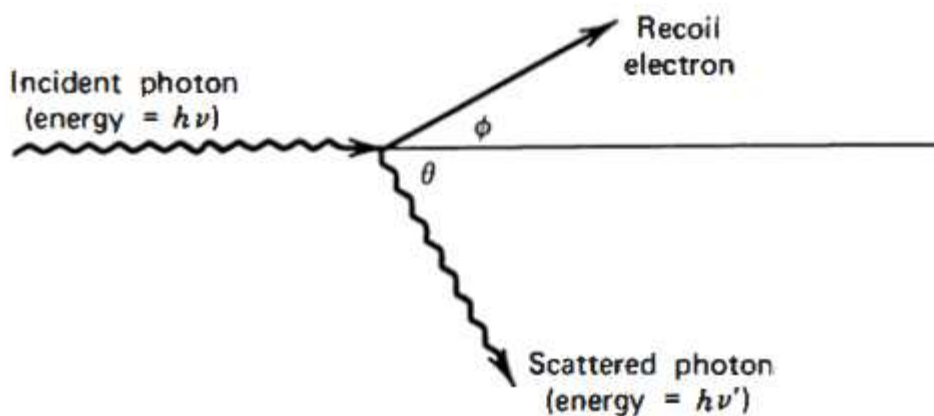


그림 3. 감마선의 콤프턴 산란 [6].

2.2.2 중성자 검출

DPI에서의 중성자 거물은 주로 중성자의 탄성 산란(elastic scattering) 반응에 의존한다. 탄성 산란 반응은 0.5 eV 에너지 이상인 속중성자(fast neutron)에 대해 발생하며, 중성자가 원자핵과 충돌하여 중성자 에너지의 일부를 되튐 원자핵(recoil nucleus)에 전달한다. 탄성 산란에서 운동에너지와 운동량은 산란 전후에 있어서 일정하므로 중성자와 원자핵은 서로 운동에너지와 운동량을 주고받는데 지나지 않는다. 산란 전후에서 중성자의 운동에너지를 E_0 , E , 그리고 되튐 원자핵의 에너지를 E_r 이라 하면, 에너지 보존법칙과 운동량 보존법칙에 따라 다음 식을 얻을 수 있다.

$$E = E_0 + E_r \quad (4.40)$$

$$E_r = \frac{4A}{(A+1)^2} E_0 \cos^2\theta \quad (4.41)$$

여기서 A 는 되튐 원자핵의 질량수를, θ 는 그 되튐 각을 나타낸다. 식 (4.41)에서 E_r 은 $\theta = 0^\circ$ 일 때 최대치 $E_{r(\max)}$ 에 도달함을 수 있다. $E_{r(\max)}$ 는 수소원자핵($A=1$)일 때 가장 크고, 입사중성자의 에너지 E_0 와 같아진다. 다시 말하면 입사중성자는 수소원자핵과 완전히 속도를 교환하여 멈춘다. 속중성자 계측 시 중성자의 에너지를 가장 잘 전달할 수 있는 수소 원자가 많이 활용되며, 중성자와 충돌하여 산란한 수소 원자를 반도 양성자(recoil proton)로 지칭한다.

섬광체(scintillator)는 이러한 흡수된 방사선 에너지의 일부를 가시광선으로 변환하여 내보내며, 방출된 가시광선은 광전자 증배관을 통해 전류 신호로 측정될 수 있다. 그림 4에 제시한 주어진 방사선 에너지에 따른 스틸벤 섬광체의 광 출력을 보면, 광자 에너지 침적(deposition)에 의한 반도 전자의 에너지와 광 생성 사이의 관계는 선형성을 갖지만, 중성자 에너지 침적에 의한 반도 양성자나 탄소의 에너지와 광 생성 사이의 관계는 비선형적이다. 이 비선형적 효과는 중성자 산란에서 발생하는 되튐 양성자나 탄소가 광자보다 더 높은 밀도로 분자를 들뜨게 한다는 사실에 기인하며, 특히 낮은 에너지에서 더욱 두드러진다. 위 사실은 소광(quenching) 확률을 높인다는 것이며, 소광은 되튐 양성자나 탄소

때문에 들뜬 분자들이 가시광선을 방출하지 않고 재결합하고 천이(de-excitation)하는 것을 말한다. 탄소 핵은 양성자보다 훨씬 무거우므로, 수소 산란을 통해 축적되는 것보다 탄소 산란을 통해 축적되는 에너지가 더 적고, 결과적으로 들뜬 분자들은 소광 될 가능성이 심히 크다. 이러한 영향은 탄소에 대한 중성자 산란으로 인해 발생한 빛의 양을 무시할 수 있는 수준으로 만든다.

입자의 유형에 대한 유기 섬광체의 광 수율(light yield) 의존성 때문에, 절대 광 수율을 설명하기 위해 때때로 특별한 명명법이 사용된다. MeV 전자 동가물(MeV electron equivalent, MeVee)이라는 용어는 광 수율을 절대적인 기준으로 설명하기 위해 도입되었다 [6]. 그 정의는 1 MeVee에 해당하는 빛의 양을 생성하는 데 필요한 입자 에너지는 전자의 경우 1 MeV이지만 중 하전(heavy particle) 입자의 경우 단위 에너지당 광 수율이 감소하기 때문에 몇 MeV에 해당한다.

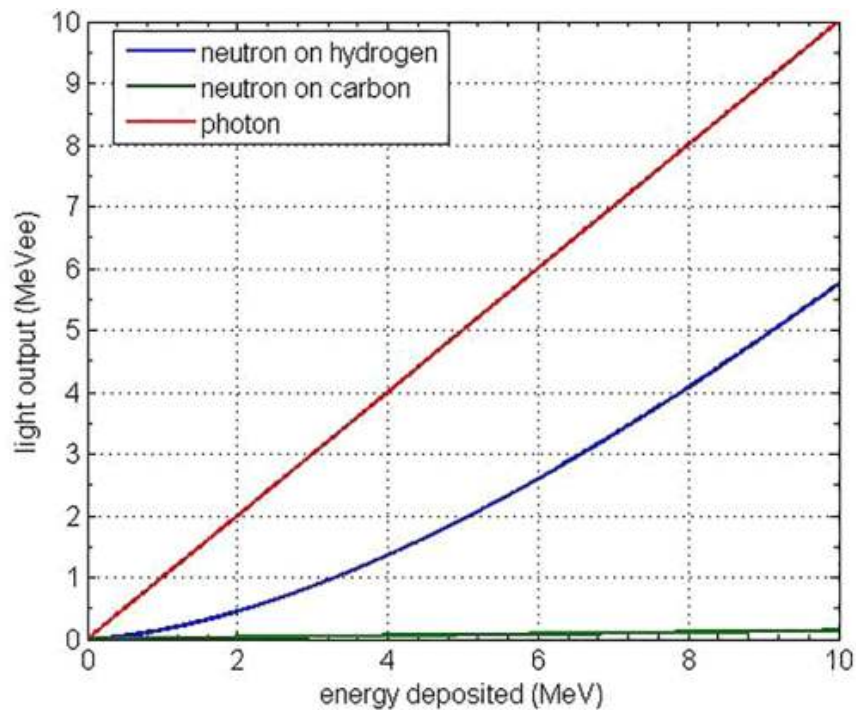


그림 4. 스틸벤 섬광체 내 중성자 및 광자 에너지 침적에 따른 광 출력 변환 [7].

2.2.3 신호 파형 구별법(PSD)

감마선 또는 중성자는 유기 섬광체 내에서 상호작용의 결과로 섬광(luminescence)을 발생시키며, 신호 파형 구별법(pulse shape discrimination, PSD)은 발생한 섬광의 종류에 따른 특징을 이용하여 감마선과 중성자의 신호를 판별하는 방법이다. 유기분자에서 발생할 수 있는 섬광에는 즉발 형광(fluorescence), 인광(phosphorescence), 지연 형광(delayed fluorescence)이 있다. 그림 5과 같이 π -구조 이론에 의한 유기분자의 에너지 준위를 보면, 즉발 형광의 원리는 에너지 준위가 가장 낮은 단일 일중항 상태(singlet states) (S_0)에 있는 분자가 방사선에 의하여 여기되어 더 높은 단일 일중항 상태(S_1)로 들뜨고 S_0 상태로 다시 천이할 때 빛을 내는 것이다. 즉발 형광은 1 ns와 10 ns 사이의 짧은 시간 안에 섬광이 발생하는 특징을 가진다. 인광(phosphorescence)은 계간 전이(intersystem crossing)를 거친 후 발생하는 섬광을 지칭하며, 여기서 계간 전이는 일중항 상태로 여기된 상태에서 삼중항 상태(triplet states) (T_1)로의 천이를 말한다. 이러한 방출 유형은 수 백 ns에서 1 ms 사이의 지연되고 느린 섬광을 발생시키는 특징이 있다. 지연 형광은 몇몇 T_1 상태의 분자가 열적으로(thermally) S_1 상태로 다시 여기되고 형광이 발생한 경우를 말한다.

유기 섬광검출기 내 중성자 반응으로 인한 반도 양성자는 짧은 거리를 이동하며 높은 비율의 삼중항 상태를 야기시켜 인광으로 섬광을 발생시킨다. 반대로, 유기 섬광검출기 내 감마선 반응에 의한 반도 전자는 동일한 에너지의 양성자보다 상대적으로 긴 거리를 이동하여 낮은 비율의 삼중항 상태를 만들며 오히려 많은 일중항 상태를 야기시켜 즉발 형광으로 섬광을 발생시킨다. 따라서, 중성자에 의한 섬광 신호가 감마선에 의한 것과 비교하면 더 긴 붕괴 시간을 가지며, 이러한 방사선별 즉발 및 인광의 비율 차이를 이용한 PSD는 감마선 환경에서 속중성자 계측을 가능하게 한다.

그림 6(a)에서 알 수 있듯이 중성자와 감마선과 스틸벤 섬광체 간 반응을 통해 발생한 신호는 시간에 따른 감쇠 구간에서 확연한 차이를 보인다. 중성자와 감마선의 신호 차이가 크게 발생하는 꼬리(tail) 구간을 설정하고 그 구간에 대한 전하 값을 적분하여 S_{tail} 이라고 할 때, 신호의 크기(S_{peak})에 대한 비를 PSD 값으로 정의하면 중성자와 감마선의 신호를 구분할 수 있음. PSD 값은 다음과 같은 방정식으로 주어진다.

$$PSD = \frac{Q_{tail}}{Q_{peak}} = \frac{\int_{tail_{start}}^{tail_{end}} Q dt}{Q_{peak}}$$

그림 6(b)는 PSD 값에 대한 분포를 보여주며, 가우시안 분포 형태의 중심 값이 작은 피크(peak)는 감마선의 신호에 대한 분포(빨간색 선), 큰 값을 가지는 것은 중성자의 신호에 대한 분포(파란색 선)로 간주할 수 있다. 이때, 중성자와 감마선의 신호에 대한 분포를 얼마나 잘 구분하는지 정량적으로 나타내는 성능 지표는 FOM(figure of merit)이라 불린다. FOM은 감마선 이벤트와 중성자 이벤트에 해당하는 두 개의 피크를 존재할 때, 두 피크의 절반에 해당하는 지점의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)의 합에 대한 피크 중심의 차이로 정의되며, 그 값이 1.27 이상일 경우 중성자와 감마선의 신호에 대한 분포를 잘 구분할 수 있다고 알려져 있다 [8].

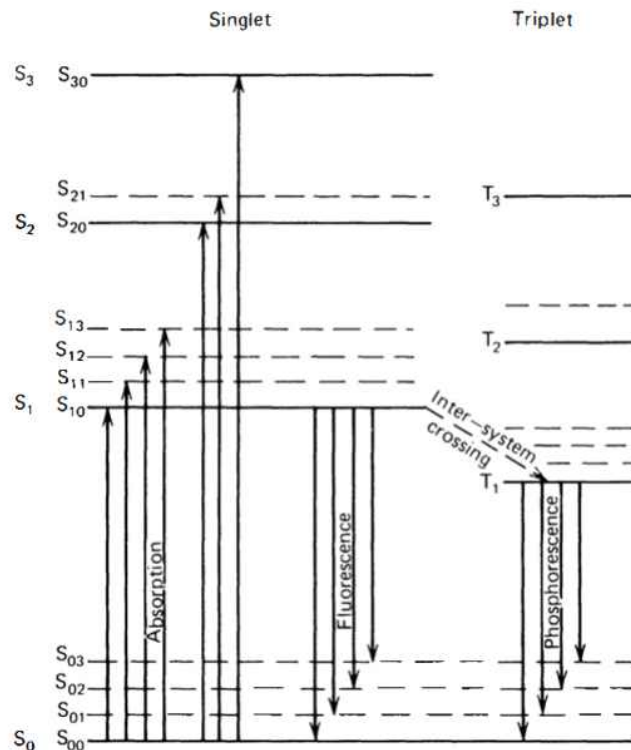


그림 5. π -전자 구조로 인한 유기분자의 에너지 준위 [6].

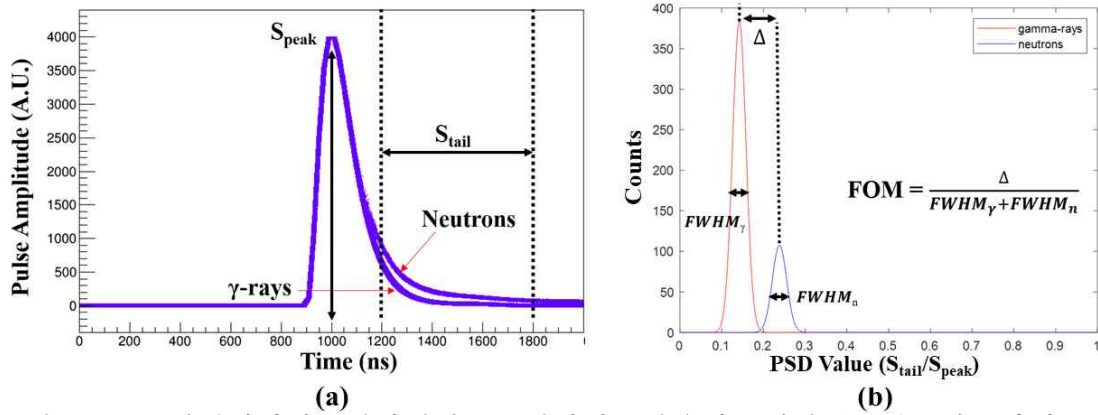


그림 6. 스틸벤에서의 감마선과 중성자의 반응에 생성된 신호의 차이(a), 감마선(빨간색 선)과 중성자 분포(파란색 선)에 대한 분리 정도를 나타내는 지표인 FOM을 평가하는 실험(b).

2.3 시스템 구조와 구성

2.3.1 픽셀화 된 스틸벤과 플라스틱 유기섬광체 어레이

사용된 스틸벤 섬광체 어레이(Inrad Optics 제작)는 그림 7(a)와 같이 $4 \times 4 \times 20 \text{ mm}^3$ 의 체적을 가지는 직육면체 형태의 픽셀 144개로 구성되어 있으며 4.2 mm의 픽셀 간격을 위해 200 μm 두께의 BaSO_4 물질로 반사체를 형성한다. 그림 7(b)의 플라스틱 섬광체 (EJ-276) 어레이(EIjen Technology 제작)는 스틸벤 어레이와 동일한 크기와 픽셀 수를 가지며, 반사체의 물질은 PTFE(polytetrafluoroethylene)로 구성된다. 스틸벤과 플라 섬광체의 특징 비교는 표 I에 나타나며, 광 수율이 두드러지게 차이 남. 스틸벤의 PSD 능력이 플라스틱 섬광체의 것보다 우수하다고 알려져 있으나, 스틸벤 섬광체보다 가격이 저렴한 특징을 가진다. 따라서, DPI 시스템에 스틸벤 어레이 또는 플라스틱 어레이를 탑재하였을 때 어느 것이 가격 대비 우수한 성능을 보여주는지 확인하기 위해, 시험은 두 어레이를 모두 사용하여 수행하였다.

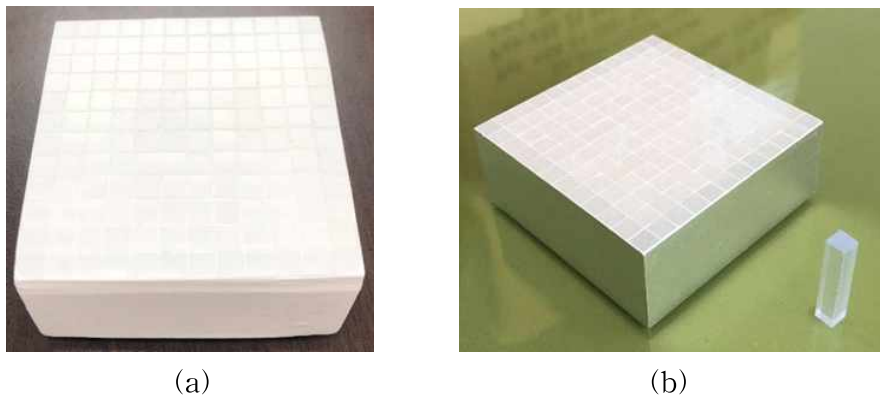


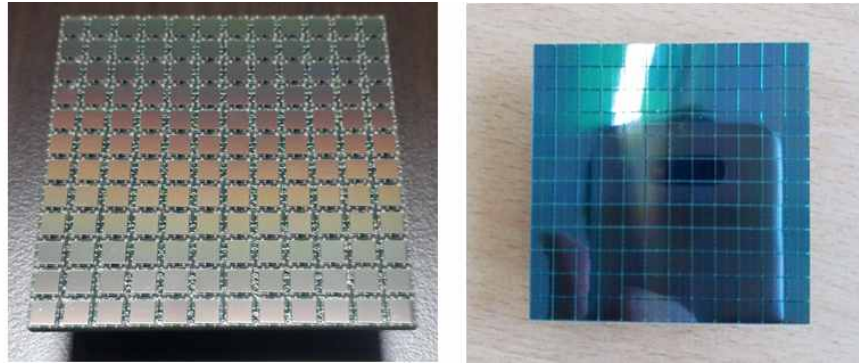
그림 7. 스틸벤 섬광체 어레이(a), 플라스틱 섬광체(EJ-276) 어레이(b).

표 I. 스틸벤 섬광체 어레이와 플라스틱 섬광체 어레이 주요 특징 비교.

	Stilbene	Plastic scintillator (EJ-276)
Density (g/cm ³)	1.15	1.096
Peak Emission (nm)	390	425
Decay Time (ns)	3.5 ~ 4.5	γ (13, 35, 270) n (13, 59, 460)
Light Yield (photons/MeV)	γ (14,000) n (10,700)	8,600
No. of H atoms / No. of C atoms	0.858	0.927
Gap material (reflector)	BaSO ₄	PTFE

2.3.2 광센서 어레이

광센서 어레이는 스틸벤 섬광체 어레이의 픽셀 수와 픽셀 면적을 고려하여 그림8과 같이 C-series의 SiPM (ArrayC-30035-144P, On Semiconductor) 어레이와 실험실 자체 내에서 조립한 J-series의 SiPM (MICROFJ-40035-TSV-TR1, On Semiconductor) 어레이를 사용하였다. On Semiconductor는 3 mm 픽셀 크기를 갖는 12×12 의 픽셀화 된 어레이 형식의 C-series의 SiPM 어레이를 판매하지만, 4 mm 픽셀 크기를 갖는 12×12 의 픽셀화 된 어레이를 따로 판매하지 않는다. 따라서, 4 mm 픽셀 크기를 갖는 J-series의 SiPM 픽셀을 144 개 만큼 구매하여 어레이 형식으로 자체적으로 제작하였다. 두 SiPM 어레이는 스틸벤 섬광체 어레이와 동일한 픽셀 수와 픽셀 간격을 가지며, 스틸벤 어레이와 물리적으로 결합하여 검출기 모듈로 사용한다. 표 II는 ArrayC-30035-144P 제품의 SiPM 어레이와 MICROFJ-40035-TSV-TR1 제품의 SiPM 픽셀의 특징을 보여주며, V_{ov} 는 두 SiPM의 작동전압인 24.5 V보다 얼마나 높은 전압을 인가했는지 나타내는 과전압(over-voltage)을 의미한다. 이때, 사용된 SiPM의 인가전압은 28 V이다. 주목할 점은 J-series의 SiPM의 픽셀 크기(4×4 mm)가 C-series의 SiPM 어레이의 픽셀 크기(3×3 mm)보다 2 배가량 크므로 광 흡수 면적이 비례해서 커지며, 스틸벤 섬광체의 픽셀 크기(4×4 mm)와 동일한 특징을 가진다. 더욱이, 광 계측 효율(photo detection efficiency, PDE)이 J-series의 경우 75%로 상대적으로 우수하다. 한편, 잡음의 관점에서 J-series의 경우 서로 다른 픽셀 간의 간섭을 일으키는 신호(crosstalk)의 확률이 8%로 C-series의 것(7%)보다 다소 높고, 광에 노출되지 않았음에도 불구하고 발생한 암전류(dark count rate)가 350 nA로 C-series의 것보다 2 배가량 많으며, 본래의 펄스 후에 후속 펄스가 발생하는 현상 (afterpulsing)의 비율이 0.75%로 C-series의 것보다 3 배가량 많다는 단점이 있다.



(a) (b)
 그림 8. C-series의 SiPM 어레이(a), 그리고 J-series의 SiPM 어레이(b).

표 II. 사용된 SiPM 센서의 특징 비교

Properties	SensL C-series (+2.5 V _{ov})	SensL J-series (+2.5 V _{ov})
Pixel size	3 mm × 3 mm	4 mm × 4 mm
Micro cell size (μm)	35	35
Microcell fill factor (%)	64	75
PDE (%)	31	38
Peak PDE wavelength (nm)	420	420
Gain	3×10^6	2.9×10^6
Afterpulsing (%)	0.2	0.75
Crosstalk probability (%)	7	8
Dark current (nA)	154	350

2.3.3 신호 처리 하드웨어 구축

DPI의 하드웨어 시스템은 144개 픽셀을 가지는 유기섬광체 어레이와 SiPM 어레이를 결합한 검출기 모듈을 제어하여 모든 픽셀에서 발생하는 신호를 처리하기 위해 제작되었다. 그림 9는 각 행과 열의 24개 신호를 바로 ADC(analog to digital converter)에 연결하여 처리하는 저항 기반의 행/열 판독 회로를 보여준다. 판독 회로는 개별 섬광 이벤트의 상호작용 위치가 결정되는 각 직교 X 및 Y 방향에 대해 표준 출력을 144개에서 각각 12개로 감소시킨다. X 및 Y 라인으로부터 출력되는 신호 전류는 각각 49.9 Ω 의 피드백 저항(R_f)을 가진 24개의 트랜스-임피던스 전치 증폭기(trans-impedance preamplifier, TIA)를 이용해 전압 신호로 바꾼 뒤, 그다음에 개별 성형 증폭기(shaping amplifier)에서 신호를 성형한다. 피드백 저항은 전치 증폭기에서 충분히 낮은 잡음 수준(큰 저항은 더 높은 잡음을 발생시킴)을 생성하는 동시에 저항이 감소함에 따라 나타나는 펄스 형상 왜곡을 최소화하도록 선택되었다.

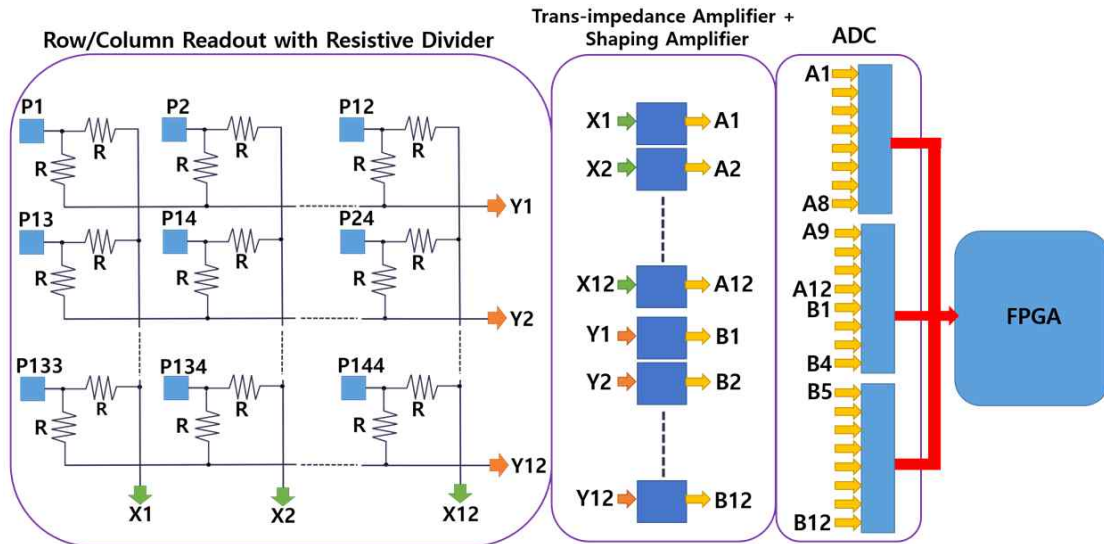


그림 9. 144개의 픽셀에서 신호를 획득하고 처리하기 위한 신호 처리 회로의 구성도.

이로 인해, 기존의 Anger 로직(logic) 처리 시 행과 열의 위치에 따른 배수와 모든 행 또는 열의 신호를 더 할 때 증폭되는 잡음을 줄일 수 있다. 각각의 행과 열의 신호를 따로 처리하기 때문에 다중 픽셀 산란 반응 사건(multi-pixel scattering events)에 대한 처리가 가능하다 [9]. 검출기 내 반응 위치는 가장 큰 신호를 발생시킨 행과 열의 픽셀로 지정할 때, 계산된

검출 위치 중 픽셀과 픽셀 중간에 분포하는 사건들은 산란이 발생한 것들이다. 산란이 인접한 셀들이 아닌 떨어진 셀들 사이에서 발생하여 잘못된 위치 정보로 인식되고 영상품질의 저하로 이어질 수 있다. 따라서, 디지털회로 상에서 신호의 피크 검출 위치와 평균 검출 위치가 일정 수준 이상 차이가 나면 영상 재구성에서 제외하도록 하였다.

국외 타 연구진의 DPI 시스템은 성능을 최대한 끌어내기 위해 고 사양의 ADC(샘플링률이 500 MHz 이상 그리고 해상도는 14 bit 이상)를 사용하지만, 전력 공급 문제, 발열 문제 및 신호 처리를 위한 추가적인 장비의 크기 문제가 발생하므로 개발하고자 하는 휴대용 DPI 시스템은 위의 문제들을 해결하기 위해 다음과 같이 하드웨어를 구성하였다. 아날로그 단에서의 전력 소모를 최소화하기 위해 모든 부품을 기능이 되는 한도에서 가장 전력이 작게 소모되는 부품으로 디자인하였으며, 그림 10은 휴대용 DPI에 사용된 아날로그단 회로도(FEE 보드, front-end electronics board)를 보여준다. 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위해, 그림 6과 같이, 디지털단(DAQ 보드, data acquisition board)의 회로도를 그림 11과 같이 제작하였다. 사용된 ADC는 50 MHz의 샘플링률과 12 bit의 해상도를 가지며, 스틸벤에서 관찰되는 빠른 감쇠 시간(decay time)을 갖는 신호를 주어진 샘플링률 내에서 유효하게 획득하기 위해 shaping 회로의 필터 시간을 최적화하였다. 디지털회로에서는 FPGA(field programmable gate array)내부의 메모리를 사용하여 데이터를 저장한 후 바로 TCP/IP(transmission control protocol/Internet protocol) 인터페이스로 전송하도록 하였다. 이미지 센서와 렌즈만 장착한 후 센서 신호를 FPGA에서 바로 읽도록 하여 소모 전력을 줄였고, USB2 인터페이스가 아닌 전력 소모가 적은 TCP/IP 인터페이스를 사용해 외부 PC와 연결하여 사용하도록 하였다.

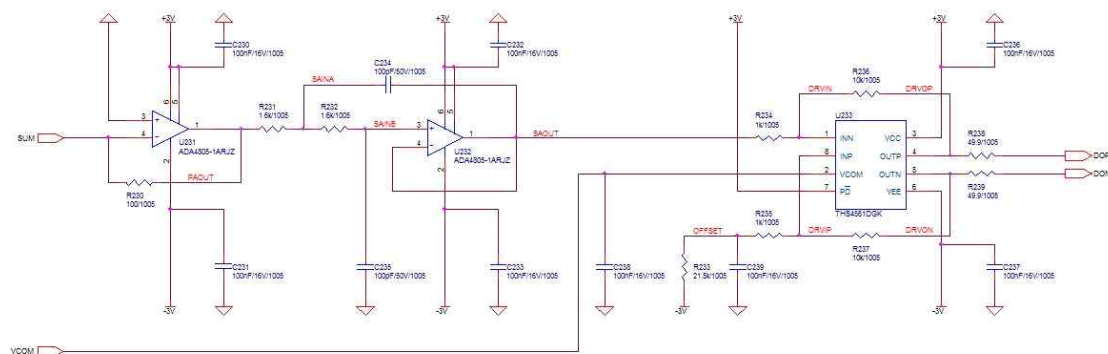


그림 10. 휴대용 DPI의 아날로그 회로도.

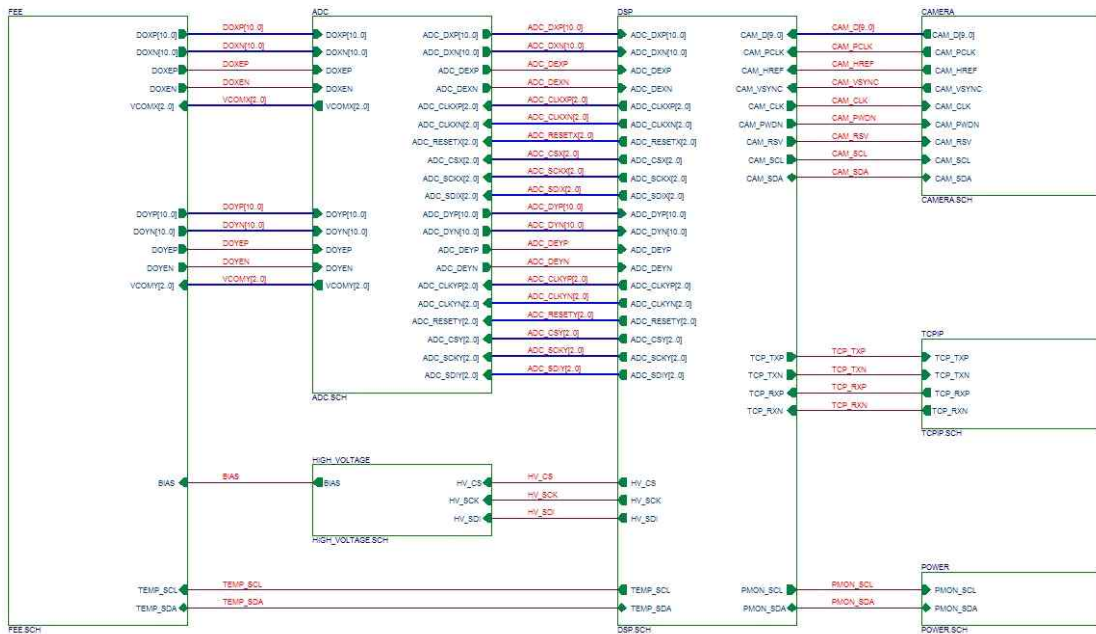


그림 11. 휴대용 DPI의 디지털 보드 회로 블록도.

휴대용 DPI는 리튬-폴리머 배터리 전압(4 V)기준으로 3 A의 전류를 소모하며, 이는 상대적으로 낮은 전력을 소모하는 것이다. 낮은 소비 전력으로 인해 발열 현상이 억제되어 작은 용량의 냉각팬으로도 실내온도 20 도에서 동작시 장비의 내부 온도가 35 도 이상 올라가지 않게 제어할 수 있다. 이는 온도에 민감한 SiPM의 안정성에 유리하여 장비 작동의 안정성을 향상시킨다. 장비에 사용한 배터리는 15.4 Ah의 용량을 가지는 리튬-폴리머 배터리로 완충 후 6 시간 가량 장비를 구동시킬 수 있다. 그림 12는 장비의 배터리 충전회로도이며 12 V 외 부전원을 사용하여 최대 3 A의 전류로 배터리를 충전시킬 수 있다. 이는 완전히 방전된 배터리를 3.5 시간 이내에 완충할 수 있다. 휴대용 DPI의 전자회로는 그림 13과 같이 아날로그 보드, ADC가 존재하는 디지털 보드, 그리고 전원 보드로 구성되며, 최종 조립된 휴대용 DPI의 외형은 그림 14와 같다.

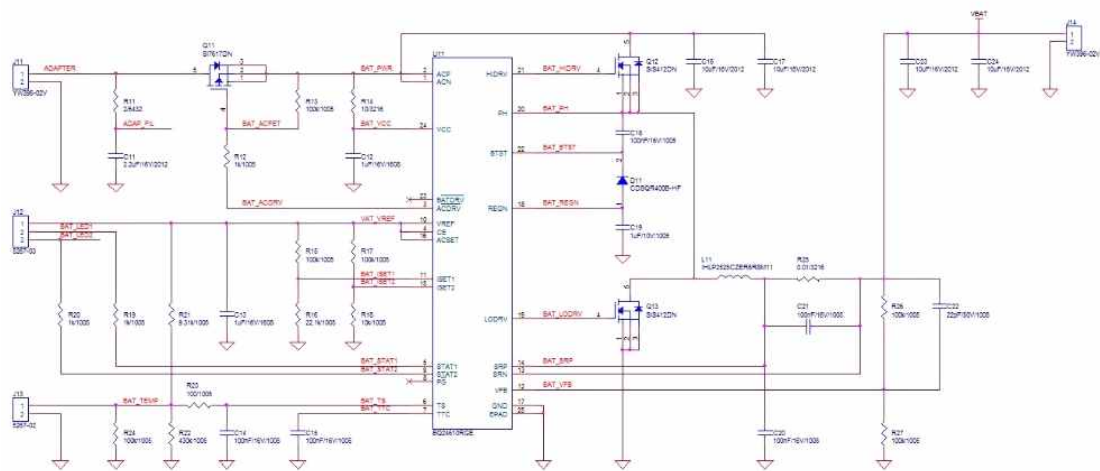


그림 12. 배터리 충전회로도.

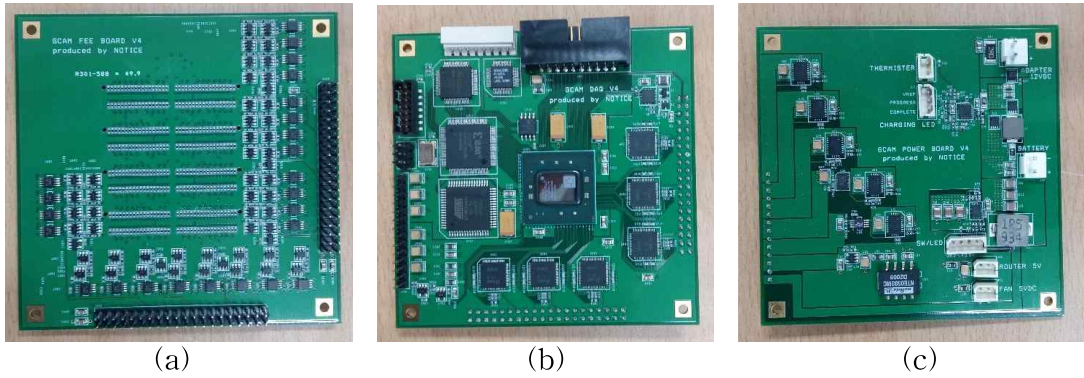


그림 13. (a) 아날로그 보드 (b) ADC+디지털 보드 (c) 전원 보드.



그림 14. 완성된 DPI 시스템 (a), 그리고 실제 DPI의 삼각대 거치를 통해 SNM을 계측하는 사례 (b).

2.4 부호화 구경 제작 및 영상 재구성 기법

2.4.1 부호화 구경 제작 방법

DPI 시스템에 사용되는 부호화 구경은, 그림 15(a)와 같이, 3D 프린터로 구조물을 만들고 레고 형식으로 텅스텐 조각을 삽입하는 형태의 부호화 구경을 제작하였다. 텅스텐 기반 마스크는 감마선을 차단할 뿐만 아니라 고속 중성자를 산란시키기 위해 선택되었다 [10]. 부호화 구경이 가지는 21×21 의 centered-mosaic MURA 패턴은 본 연구실에 의해 개발되었으며, 관련 특허가 이미 출원되었다 [11]. 마스크는 SiPM의 11×11 픽셀 구간과 일치하도록 소수 (prime number, p)가 11인 크기 21×21 ($2p-1$)의 비대칭 2차 잔류물 배열(anti-symmetric quadratic residue array)을 선택하였다. 이전 연구[12]에서 이 MURA 마스크는 측정 시간을 절반으로 단축하고 기존의 안티 마스크 방법을 사용하지 않고도 영상 잡음을 성공적으로 완화한다는 것을 확인하였다. 그림 15(b)는 MURA 마스크가 장착된 프로토타입 하드웨어 구성을 보여준다. 부호화 구경의 무게는 약 2.85 kg에 달하며, 스틸벤-SiPM 어레이를 둘러싸는 텅스텐 차폐체(1cm 두께)와 MURA 마스크를 포함한 하드웨어의 총 중량은 약 5 kg 내이다.

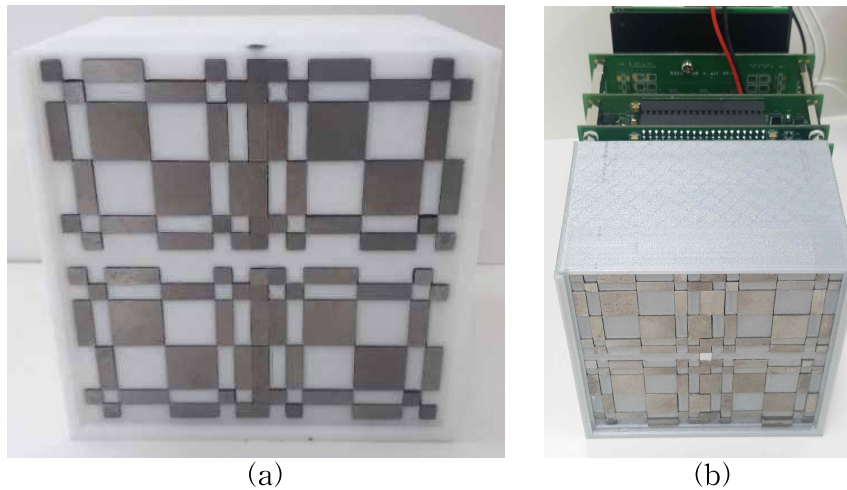


그림 15. 3D 프린터를 이용한 부호화 구경 구조물 제작 후 텅스텐을 레고 형식으로 삽입하여 완성한 부호화 구경(a), 부호화 구경이 탑재된 하드웨어 조립 형태 (b).

2.4.2 방사선 영상 재구성 방법

부호화 구경을 이용한 방사선 영상 재구성 방법은 반복 영상 재구성 기법인 MLEM 알고리즘을 사용하며, 알고리즘은 다음 식(1)과 같다 [13].

$$\lambda_j^{\neq w} = \frac{\lambda_j^{old} \sum_i A_{ij} y_i}{\sum_i A_{ij} \sum_k A_{ik} \lambda_k + b} \quad (1)$$

여기서 y 는 검출기에서 측정된 부호화 구경 패턴의 투영을 의미하며, 여기서 y_i 는 검출기의 i 번째 픽셀에서 기록된 신호의 수이다. 즉, 한 선원에서 방출된 방사선이 부호화 구경을 통과하면서 부호화 구경이 가진 패턴의 투영을 만들고 이것이 검출기에 기록된다. A 는 다양한 위치에 있는 선원이 만들어내는 부호화 구경 투영 정보를 가진 시스템 매트릭스로, 여기서 A_{ij} 는 한 평면 위에 존재하는 픽셀 j 에 선원이 위치할 때 검출기 픽셀 i 에 대한 예측 응답이다. 측정된 투영과 추정된 투영(λ_k , 두 투영 간의 비율) 사이에 불일치가 있는 경우, 추정을 개선하기 위해 수정을 반복하고, k 번째까지 반복을 수행하면 최대 반복 횟수에 도달하게 된다. 이 과정은 선원이 평면의 어떠한 픽셀 j 에 있을 최대 확률(λ_j)로 이어진다. b 라는 계수는 배경 방사선으로부터 획득된 계수율을 보정하는 항이다. 요약하자면, 이 과정은 부호화 구경 패턴의 투영을 형성하기에 충분한 수의 입사 방사선을 획득한다면, 방사선원의 위치를 빠르게 추정할 수 있다.

3. 이중입자 영상장비 실험 결과 및 해석

3.1. 플라스틱과 스틸벤 섬광체의 성능 비교

3.1.1 인가된 전압에 따른 플라스틱-SiPM 어레이와 스틸벤-SiPM 어레이 모듈의 반응 위치 분해능 비교

픽셀화 된 어레이 형태의 검출기에 SiPM 어레이를 결합하여 PSD의 성능을 제시한 연구가 거의 없으므로, 최적의 반응 위치 분해능과 PSD의 성능을 가지는 시스템 파라미터를 찾고자 하였다. 예를 들어, 인가전압의 변화와 트랜스임피던스의 R_t 의 변화를 통해 내부 신호 증폭도와 신호 처리부에서 외부 신호 증폭도를 각각 변화시켜 충분한 신호의 증폭과 동시에 전류 잡음을 가능한 한 낮게 하여 반응 위치 분해능과 PSD 능력을 최대화시키고자 하였다. 그림 16(a)와 그림 16(b)는 각각 플라스틱-SiPM 어레이와 스틸벤-SiPM 어레이 모듈에 28 V의 전압을 인가하고 10 cm 떨어진 곳에 위치한 ^{137}Cs 감마선원(0.312MBq의 방사능을 가짐)을 한 시간 동안 계측할 때 현 회로에 의해 획득된 행과 열의 검출 위치 분포를 보여준다.

그림 16에서 나타난 검출기 어레이의 행에 대한 검출 위치 분포를 합하고, 이를 1차원적인 분포 윤곽(1D row-sum profile)으로 나타낸 것이 그림 17이며, 인가전압을 26 V부터 30 V까지 1 V 단위로 변화시켰을 때 획득된 1D row-sum profile을 함께 보여준다. 1D row-sum profile에는 픽셀 중심이 국부화되는 불확실성을 나타내는 피크(peak)의 폭이 포함되어 있으며, 반치폭(FWHM, full width at half maximum)으로 정량화된다. 표 III에서, SiPM 어레이에서 인가전압이 26 V에서 28 V까지 증가함에 따라 SiPM 어레이의 광 검출 효율(~31%에서 ~41%)과 이득(3×10^6 에서 4×10^6)이 커지므로 플라스틱 및 스틸벤 어레이 모듈에서 관찰된 반치폭이 1468.2 μm 와 803.8 μm 로 각각 줄어들며, 이는 반응 위치 분해능이 향상됨을 의미한다. 반면, 30 V와 같이 과도한 인가전압은 암 전류 또는 인근 픽셀 간 상호간섭(crosstalk)에 의한 부정적 영향을 증가시키므로, 어레이 전체에 걸쳐 저하된 반응 위치 분해능을 가져온다.

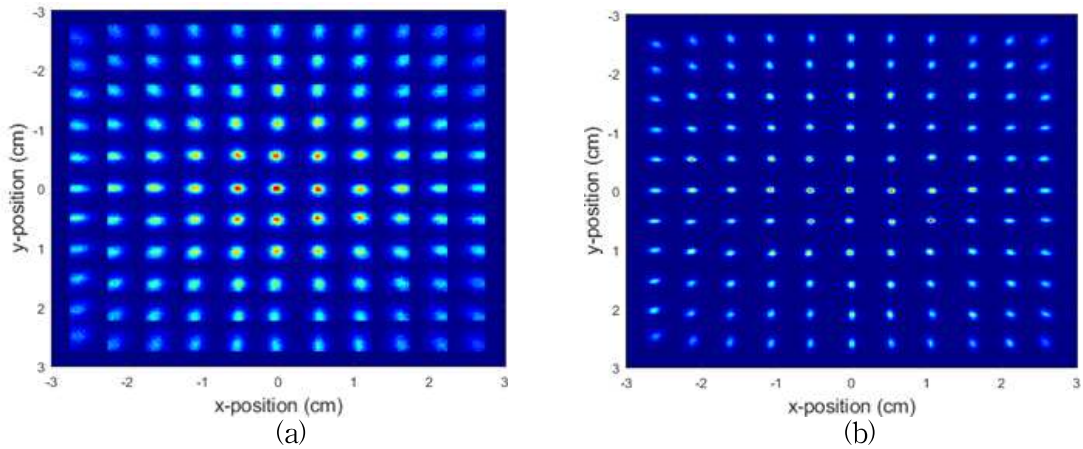


그림 16. (a) 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이 모듈을 이용하여 ^{137}Cs 감마선원 계측을 통해 획득한 반응 위치 2-D 분포 히스토그램. 두 어레이 모듈에 인가된 전압은 28 V로 동일하다.

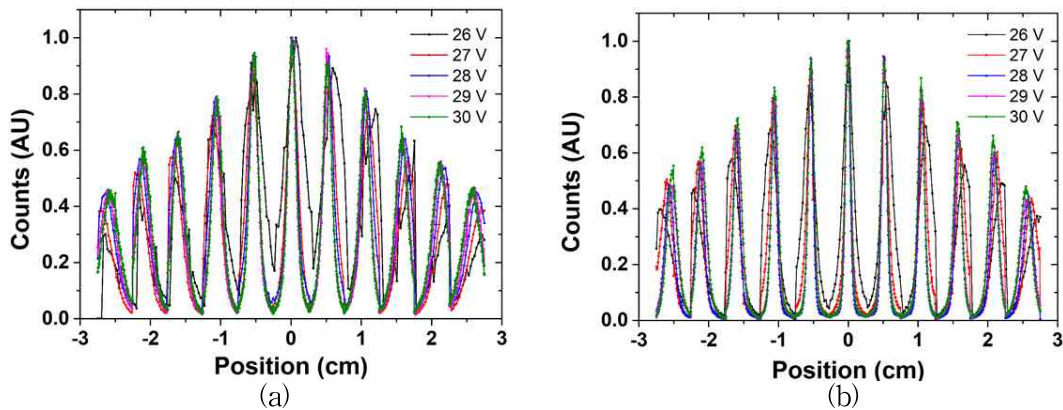


그림 17. (a) 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이 모듈에 인가된 전압을 26 V에서 30 V 까지 1 V 단위로 증가시킬 때, ^{137}Cs 감마선원 계측 시 행에 대한 검출 위치 분포를 합하고 이를 1차원 적으로 나타낸 검출 위치 분포 윤곽(1D row-sum profile).

표 III. 그림 17에 나타난 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이의 1D sum profile에 대한 전압 별 피크의 반치폭(FWHM) 비교.

Voltage	FWHM (μm)	
	(플라스틱-SiPM 어레이 모듈)	(스틸벤-SiPM 어레이 모듈)
26	3079.3	1833.2
27	1914	1094.4
28	1570.4	803.8
29	1468.2	952.9
30	1522.1	971.3

3.1.2 인가전압과 R_f 의 변화에 따른 플라스틱-SiPM 어레이와 스틸벤-SiPM 어레이 모듈의 PSD 성능 비교

그림 18은 R_f 의 값을 50 Ω , 100 Ω , 200 Ω 으로 변화 시켰을 때, 스틸벤과 플라스틱 섬광체 어레이 모듈로 10 cm 거리에 위치한 ^{22}Na (0.039 MBq의 방사능을 가짐)의 감마선원을 측정하여 얻은 에너지 스펙트럼이다. 사용된 R_f 의 값이 클수록 같은 에너지의 감마선에 대한 신호의 크기가 커져 높은 채널 번호에 위치하며, 이에 따라 동적 범위(dynamic range)가 좁아진다. 특히 그림 18(b)는 높은 R_f 는 스틸벤 어레이 모듈 사용 시 포화된 감마선 스펙트럼을 가져오나, 동일한 R_f 를 가진 플라스틱 어레이에서는 포화가 관찰되지 않았으며, 이는 플라스틱 섬광체의 광 수율이 스틸벤의 것보다 작기 때문이다. 한편, 스틸벤과 플라스틱 섬광체는 원자번호와 밀도가 낮으므로 전 에너지 흡수 피크가 아닌 340.67 keV와 1061.71 keV의 컴프턴 단애만이 관찰된다. 그림 19는 플라스틱-SiPM 어레이와 스틸벤-SiPM 어레이 모듈에서 관찰된 ^{137}Cs 과 ^{22}Na 의 컴프턴 단애와 그에 해당하는 채널 번호 간의 관계를 보여준다. 컴프턴 단애에 해당하는 채널은 컴프턴 단애 피크의 80% 되는 지점에서의 채널로 계산된다. 그림은 스틸벤-SiPM 어레이와 플라스틱-SiPM 어레이 모듈 모두 에너지 선형성을 가짐을 보여주며, 인가전압과 R_f 의 조합으로 나올 수 있는 모든 경우에 대하여 컴프턴 단애와 그에 해당하는 채널 번호 간의 관계를 이용하여 에너지 교정(calibration)을 수행하였다.

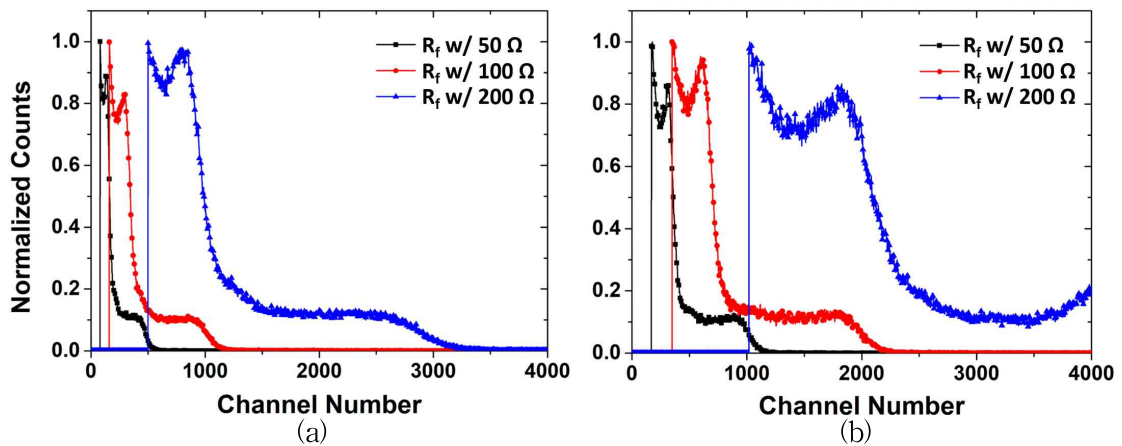


그림 18. (a) 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이 모듈에 인가된 전압을 28 V로 고정시키고, 신호 처리 회로 단의 트랜스 임피던스의 피드백 저항을 50 Ω , 100 Ω , 그리고 200 Ω 으로 증가시킬 때, ^{22}Na 감마선원 계측 시 획득된 에너지 스펙트럼. 이때, SiPM은 28°C의 온도에서 동작한다.

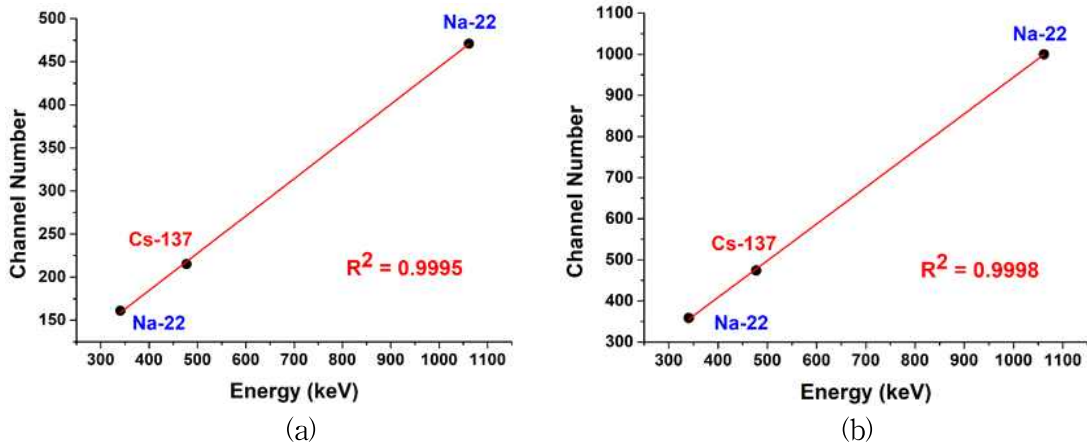


그림 19. (a) 플라스틱-SiPM 어레이와 (b) 스틸벤-SiPM 어레이 모듈에 인가된 전압을 28 V로, 처리 회로 단의 트랜스 임피던스의 피드백 저항을 50 Ω 로 고정시킬 때, 획득된 ^{137}Cs 과 ^{22}Na 의 컴프턴 단애의 에너지와 그에 해당하는 채널 번호 간의 관계.

스틸벤-SiPM 어레이와 플라스틱-SiPM 어레이 모듈의 인가전압이 28 V이고, R_f 가 100 Ω 일 때 초당 3.5×10^5 개의 중성자와 7.8×10^5 개의 감마선을 동시에 방출하는 ^{252}Cf 의 자발적 핵분열 선원을 계측하였으며, 이때 획득한 중성자와 감마선 이벤트 분포를 보여주는 PSD 분포와 각 에너지 영역(300 \pm 100 keVee, 500 \pm 100 keVee, 700 \pm 100 keVee)에서의 PSD 분포의 윤곽(profile)을 그림 20에 제시하였다. 그림 20(a-b)에서 플라스틱(EJ-276) 어레이 모듈은 상대적으로 낮은 PSD 성능을 보이며, 500 keVee 이상의 에너지 범위에서 감마선과 중성자 이벤트가 어느 정도 분리되나, FOM 값은 1.27에 미치지 못한다. 한편, 그림 20(c-d)와 같이, 스틸벤-SiPM 어레이 모듈은 300 \pm 100 keVee의 에너지 범위에서 FOM의 값이 1.33으로 1.27보다 큰 값을 가진다. 즉, 동일한 SiPM 어레이를 사용하였음에도 불구하고 스틸벤이 플라스틱 섬광체보다 저에너지에서부터 감마선/중성자 이벤트 분리가 가능한 것으로 판단되며, 이는 광수율이 높고 인광에 의한 신호의 감쇠 부분의 큰 차이 때문이라고 판단된다. 예를 들어, 섬광체 내 트랩(trap) 역할을 하는 구조적 결함이 PSD 성능의 저하를 가져올 수 있으며, 삼중항 상태의 유기분자가 트랩에 의해 손실되면 지연된 섬광이 크게 줄어들 수 있다. 이에 본 연구에 사용된 스틸벤은 위 문제를 해결하기 위해 용융상 성장법(melt-growth techniques) 대신 용액 성장법(solution-growth method)으로 만들어졌기 때문에 [14], 스틸벤의 PSD 성능이 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

그림 21은 스틸벤과 플라스틱 섬광체 어레이 모듈에서 인가전압과 R_f 의 변화에 따라 나타난 FOM 값을 각각 보여주며, FOM의 측정 에너지 범위는 스틸벤 어레이의 경우 300 \pm 100

keVee로 그리고 플라스틱 어레이의 경우 500 ± 100 keVee로 설정하였다. 에너지 구간 설정은 플라스틱의 경우 500 ± 100 keVee에서 감마/중성자 이벤트가 어느 정도 분리된다고 판단하여 지정되었고, 스틸벤의 경우 300 ± 100 keVee에서 분리된다고 판단하여 결정되었다. 그 결과 스틸벤 어레이와 플라스틱 어레이 모두 100 Ω 의 R_f 를 가질 때 그리고 전압은 각각 27 V와 28 V에서 가장 높은 PSD 값(1.385와 0.876)을 보인다. 스틸벤 어레이를 사용하였을 때 가장 우수한 PSD 능력은 100 Ω 의 R_f 와 27 V에서 을 보였으나, 앞서 언급한 반응 위치 분해능을 고려하면 28 V의 인가전압의 경우가 27 V의 경우보다 우수하며 PSD 값(1.332)도 두 번째로 우수하다. 따라서, 휴대용 DPI를 위한 시스템은 스틸벤-SiPM 어레이와 28 V의 인가전압 그리고 100 Ω 의 R_f 를 채택하였으며, 이후에서는 위 조건을 최적화된 조건이라 하겠다.

PSD 분포를 각 픽셀별로 추출하면 중성자와 감마선 이벤트에 대한 구분이 더 낮은 에너지에서도 가능하다. 그림 22는 스틸벤 어레이와 플라스틱 어레이에 대해 144개의 픽셀 중 하나의 픽셀이 갖는 PSD 분포를 각각 보여주며, 앞에서 언급한 각 에너지 영역에서의 PSD 분포의 윤곽과 FOM 값을 나타낸다. 플라스틱 섬광체의 경우 전체 픽셀의 PSD 분포보다 향상된 FOM 값을 가지나, 1.27의 FOM 기준에 못 미치는 수준을 가진다. 반면, 스틸벤 섬광체 어레이의 픽셀이 갖는 PSD 분포는 1.54 이상의 우수한 FOM 값을 가지며, 100 keVee 에너지 구간에서도 감마선/중성자 분리가 어느 정도 가능한 것으로 관찰된다. 픽셀별 광 수율 및 광 수집 효율의 차이가 각 픽셀의 PSD 분포 차이를 만들기 때문에, 모든 픽셀의 PSD 분포가 이러한 차이를 가지고 합쳐지면 PSD 성능이 저하된 것처럼 보이게 된 것이다.

주목할 점은 타 연구[15]에서 단일 스틸벤 섬광체 PMT에 결합하고 고사양의 ADC(500MHz의 샘플링 주파수와 14비트 해상도)를 사용할 때 중성자/감마 분리 성능이 현 연구보다 더 우수한 FOM 값을 갖는 것이다. 위 연구는 앞서 언급한 에너지 영역에서 FOM 값이 1.71-2.53으로 현 연구에서 제시한 값 FOM 값(1.54-2.06)보다 크다. 그 이유는 현 연구에 사용된 스틸벤 섬광체 픽셀이 타 연구에 사용된 것보다 작을 뿐만 아니라, 사용된 SiPM 픽셀의 활성 면적이 스틸벤 섬광체의 픽셀 면적보다 작기 때문이다. 즉, 광 손실은 인광에 의한 신호 감쇠 정보를 손실시키고 낮은 FOM 값을 유발할 수 있다고 판단된다. 그럼에도 불구하고 스틸벤-SiPM 모듈은 유효한 중성자/감마선 분리 능력을 보이기 때문에 낮은 사양의 ADC를 이용하더라도 만족스러운 PSD를 수행할 수 있었다.

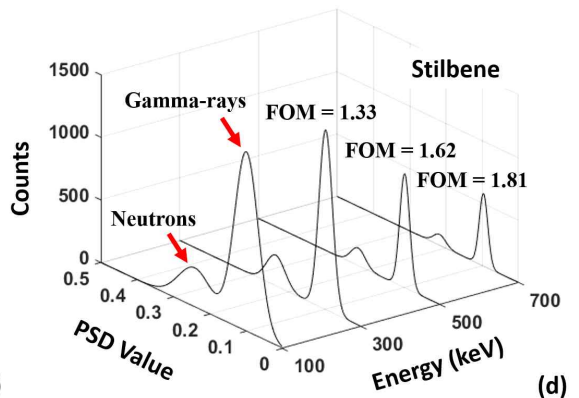
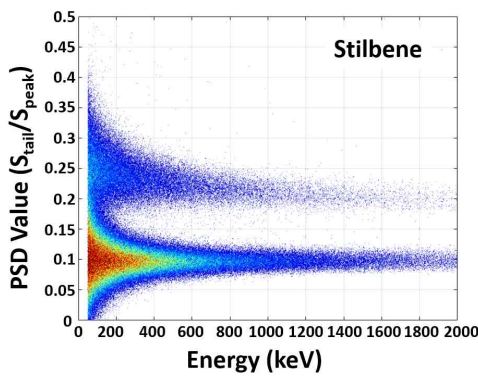
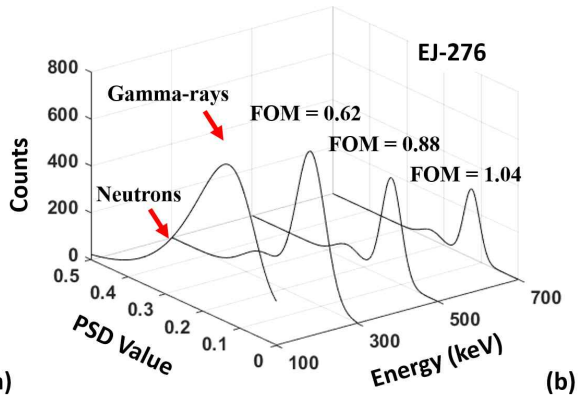
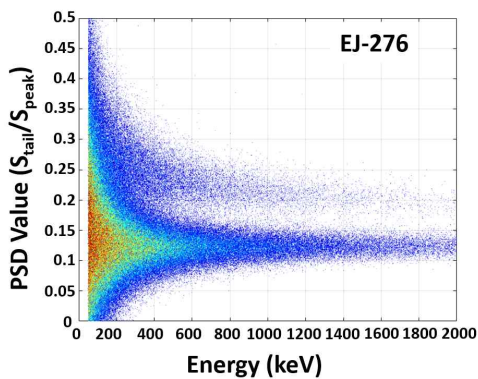


그림 20. (a, c) 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈과 스틸벤-SiPM 모듈이 100 cm 거리에서 3.5×10^5 n/s ^{252}Cf 의 자발적 핵분열 선원을 측정할 때, 50 keVee의 문턱값에서 획득된 1,000,000개의 신호에 대한 144개의 전체적인 검출기의 PSD 분포 (b, d) 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈과 스틸벤-SiPM 모듈에서 각각 획득한 다양한 에너지 (300 ± 100 keVee, 500 ± 100 keVee, 700 ± 100 keVee)에서의 PSD 분포의 윤곽(profile)과 그때의 FOM 값.

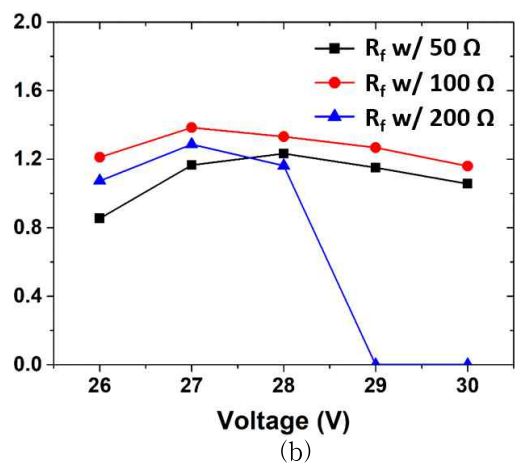
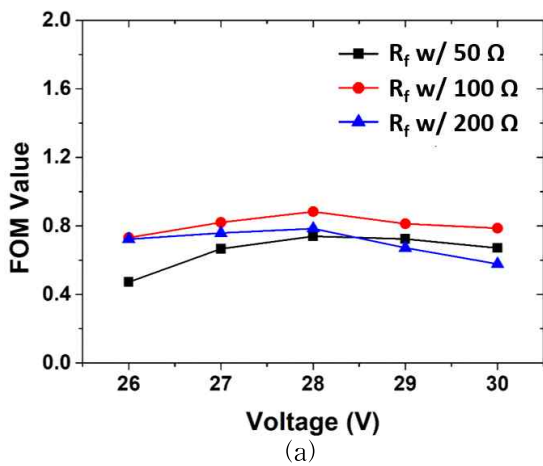
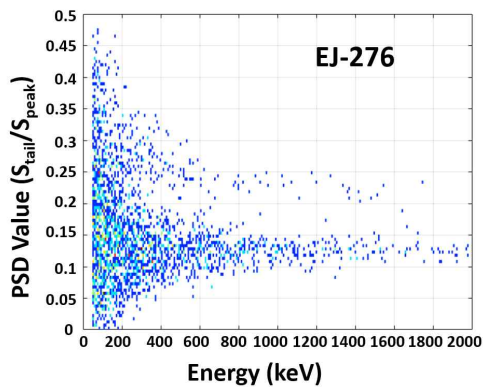
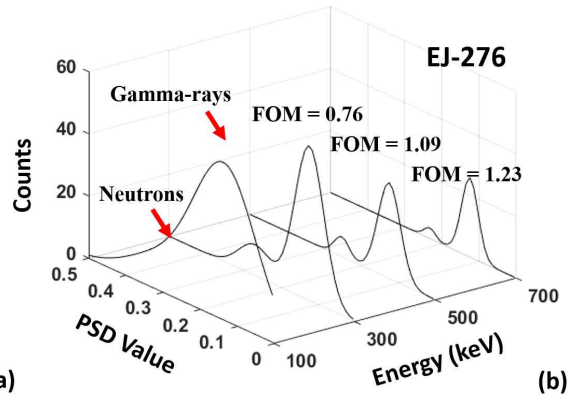


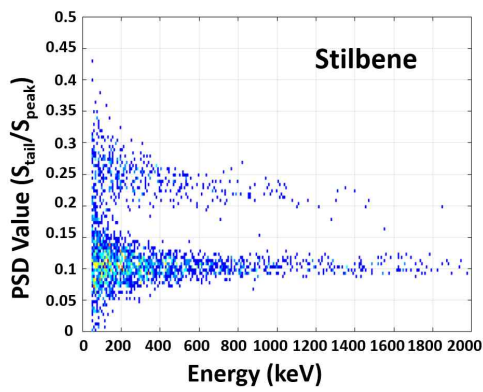
그림 21. 인가 전압과 R_f 의 값 변화 시 (a) 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈에서 관찰된 500 ± 100 keVee의 에너지 범위에서의 FOM 값과, (b) 스틸벤-SiPM 모듈에서 관찰된 300 ± 100 keVee의 에너지 범위에서의 FOM 값.



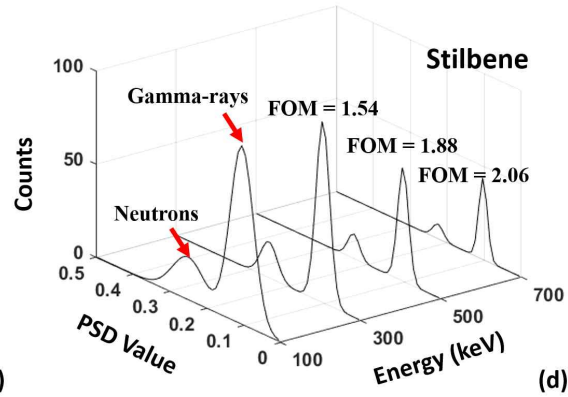
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 22. 그림 20에 제시된 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈과 스틸벤-SiPM 모듈에서 추출한 단일 픽셀이 갖는 PSD 분포(a, c) 그리고 다양한 에너지 (300 ± 100 keV, 500 ± 100 keV, 700 ± 100 keV)에서의 PSD 분포의 윤곽과 그때의 FOM 값.

3.1.3 최적화된 조건에서의 중성자 영상과 감마선 영상의 획득에 필요한 시간 측정

이중입자 영상장비 이용 시 중성자 영상과 감마선 영상의 획득에 필요한 시간을 측정하고 자 ^{252}Cf 선원과 ^{137}Cs 선원을 최적화된 조건속에서 각각 측정하였다. 두 선원은 각각 100 cm 거리에 위치하였으며, ^{252}Cf 선원은 초당 3.5×10^5 중성자를 방출하고 ^{137}Cs 선원은 0.74 MBq 방사능을 가지며 6.4 $\mu\text{R/h}$ 의 선량을 나타낸다. 이때, 50 keVee 에너지 구간 이상의 데이터만 사용하였다. 영상에 대한 정량적 및 정성적 평가를 위해, 재구성된 영상을 참 영상(즉, 영상 중심에서 1을 제외한 0으로 채워진 공간 분포)을 기준으로 최대 신호 대 잡음비(peak signal-to-noise ratio, PSNR) [16], 정규화된 평균 제곱 오차(normalized mean-square error, NMSE) [17] 및 구조적 유사성(structural similarity, SSIM) [18]을 이용하여 영상의 화질을 평가하였다. PSNR 값이 33 dB를 초과하거나 NMSE 값이 0에 가깝거나 SSIM 값이 1에 가까우면 재구성된 영상을 참 영상과 구별하기 어려운 것으로 판단한다.

그림 23(a-c)는 각각 330, 1,000 및 2,000개의 중성자 이벤트로 구성된 검출기 맵을 보여 주며, PSD 값이 0.16보다 높은 이벤트로 구성된다. 해당 MLEM 영상은 그림 23(d-f)에 표시된 바와 같이 이러한 검출기 맵을 사용하여 재구성되었다. 이 3개의 이미지는 각각 1분, 3분, 6분(반복실험을 통해 확인된 수치이다)의 측정에 해당한다. 표 IV은 위에서 언급한 세 가지 영상 측정 기준(PSNR, NMSE, SSIM)을 사용한 중성자 영상 평가 결과를 나타낸다. 중성자 상호작용의 수가 1,000에서 2,000으로 증가함에 따라 PSNR 지표는 33 dB를 초과하였고, 실제로 39.29 dB로 증가하였으며, NMSE는 10^{-4} 로 몇 배 이상 감소하였으며 SSIM은 1에 근접하여 유효한 위치 국부화를 달성되었으며 영상 잡음은 최소가 되었다. 이는 미시간에서 개발된 H2DPI 시스템의 성능과 비교할 수 있다. H2DPI는 중심에서 58.4cm 떨어진 곳에서 초당 1.2×10^7 개의 중성자를 방출하는 ^{252}Cf 선원에 대한 중성자 영상 획득에 30분의 시간이 소요된다 [5]. 위 실험은 부호화 구경 기반 DPI가 제한된 수의 이벤트를 이용하여 유효한 중성자 영상을 제공할 수 있음을 보여준다.

중성자 이미지 평가와 마찬가지로 휴대용 DPI에서 100cm에서 6.4 $\mu\text{R/h}$ 를 생성하는 ^{137}Cs 를 측정하여 감마선 영상의 화질을 추정하였다. 그림 23(g-i)는 PSD 값 0.16보다 낮은 300, 600 및 1,000 감마선 이벤트로 구성된 각 검출기 맵을 제시하며 이러한 검출기 맵을 사용하여 MLEM 영상을 각각 얻었다. 그림 23(j-l)의 세 영상들은 각각 20초, 40초 및 69초의 측정 시간에 해당하며 반복 측정을 통해 확인된 대표 영상에 해당한다. 세 영상에 대한 감마선 영상

평가 결과는 표 V에 제시하였다. 감마선 이벤트 수가 1,000개 일때 높은 PSNR(50.65dB), 낮은 NMSE($\sim 10^{-5}$) 및 거의 1에 가까운 SSIM을 가지며, 이는 영상의 왜곡을 최소화하면서 감마선원의 위치를 보장하였다. 본 실험실의 이전 연구에서 이 결과를 뒷받침할 수 있는데, 부호화 구경 기반의 휴대용 감마 카메라는 픽셀화된 12×12 무기섬광체-SiPM 어레이를 이용할 때 약 1,000개의 카운트 수는 실시간 영상을 제공하기 때문이다 [12].

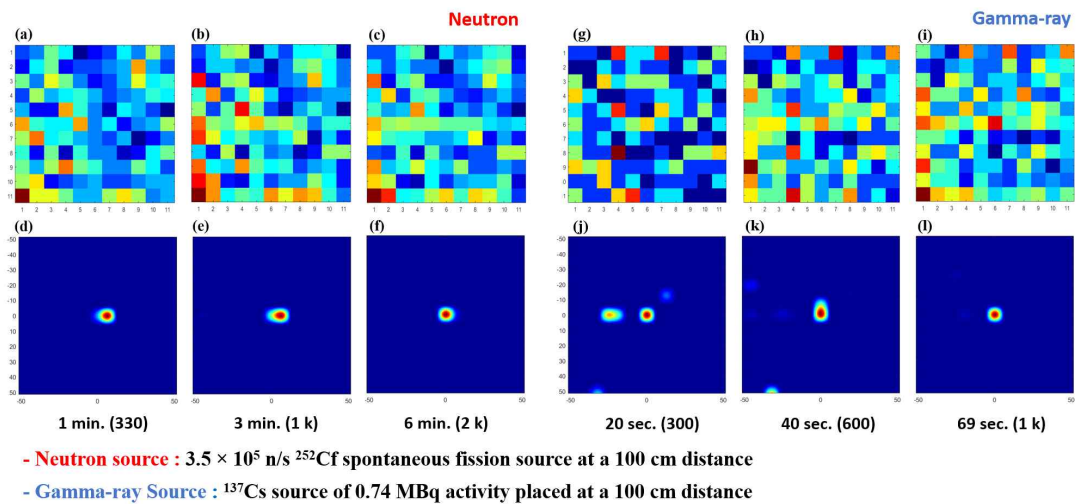


그림 23. 계측 시간 또는 기록된 이벤트 수에 따른 검출기 map 변화와 각 검출기 map을 이용하여 재구성된 중성자(왼쪽)와 감마선 영상(오른쪽).

표 IV. 측정 시간 또는 이벤트의 수를 증가시킬 때 PSNR, NMSE, SSIM을 이용한 중성자 영상의 화질 평가.

중성자 이벤트 수(계측시간)	PSNR	NMSE	SSIM
330 (1 min)	22.90	4.7×10^{-3}	0.81
1,000 (3 min)	23.74	3.3×10^{-3}	0.85
2,000 (6 min)	39.29	1.1×10^{-4}	0.99

그림 24(a)는 100 cm 거리에서 $6.4 \mu\text{R/h}$ 를 생성하는 ^{137}Cs 감마선 선원이 -22.5° 와 $+22.5^\circ$ 의 각도에 걸쳐 위치했을 때 시스템의 최대 시야(field of view, FOV)를 평가하는 실험 결과이며, 선원의 위치가 시야각의 최대 범위에 놓여있을 때 선원이 영상에서 나타남을 확인하였다. 선원이 $+22.5^\circ$ 의 각도에 위치한 감마선 영상은, 선원이 -22.5° 의 각도에 위치한

영상과 비교하였을 때, 선원의 위치가 다소 늘어난 모양을 보인다. 이는 시스템의 중심에서 벗어난 위치에 존재하는 방사선원이 큰 입사 각도를 갖고 부호화 구경에 입사되기 때문에, 마스크에 의해 산란된 입사 감마선이 기존 입사 방향을 잃고 검출기에 기록되어 잘못된 위치 정보를 가져왔다고 고려된다. 이러한 영상 화질 열화 메커니즘은 ^{137}Cs 선원의 컴프턴 단애에 해당하는 이벤트만 선별하는 에너지 윈도우(energy windowing) 기법을 사용하여 완화할 수 있다 [19].

표 V. 측정 시간 또는 이벤트의 수를 증가시킬 때 PSNR, NMSE, SSIM을 이용한 감마선 영상의 화질 평가.

감마선 이벤트 수(계측시간)	PSNR	NMSE	SSIM
300 (20 s)	25.17	1.6×10^{-3}	0.73
600 (40 s)	26.82	1.3×10^{-3}	0.82
1,000 (69 s)	50.65	8.6×10^{-6}	0.99

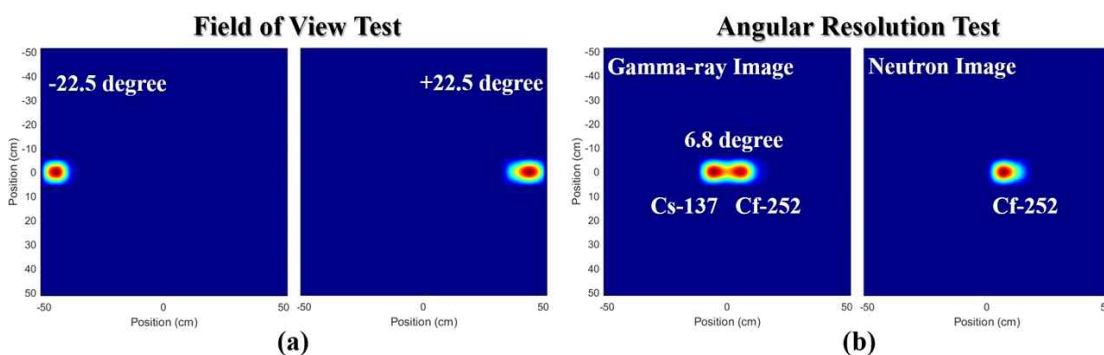


그림 24. (a) 시스템의 최대 FOV 테스트를 위해 시스템으로부터 1m 거리에서 $6.4 \mu\text{R/h}$ 를 생성하는 ^{137}Cs 선원이 $\pm 22.5^\circ$ 의 각도에 각각 위치할 때 재구성된 영상. (b) 각도 분해능 시험을 위해 시스템으로부터 75 cm 거리에서 초당 3.5×10^5 개의 중성자를 방출하는 ^{252}Cf 선원과 30 cm에서 $30.16 \mu\text{R/h}$ 를 생성하는 ^{137}Cs 선원이 6.8° 각도로 분리되었을 때의 재구성된 감마선 및 중성자 영상.

그림 24(b)는 각도 분해능을 시험하기 위해, 두 ^{252}Cf 그리고 ^{137}Cs 선원이 각각 시스템으로부터 75 cm와 30 cm 떨어진 곳에 6.8° 각도만큼 분리하여 위치시켰을 때 재구성된 중성자 및 감마선 영상을 보여준다. 감마선 영상은 6.8° 각도에서 두 선원을 분리할 수 있음을 보여주며, 중성자 영상은 ^{252}Cf 의 정확한 위치를 가리키며 ^{137}Cs 선원의 위치에는

방사선 영상이 나타나지 않음을 확인하였다. 이때, 두 영상을 얻는 데 필요한 계측 시간은 약 10분이 소요되었으며, 6.8° 각도는 앞서 언급한 현 연구실에서 개발한 휴대용 감마 카메라의 각도 분해능 성능[12]을 기준으로 지정하였다.

그림 25는 CMOS 영상 센서(SONY, IMX214)에 의해 생성된 광학 영상과 그림 14(b) 제시된 방사선 영상을 결합한 결과를 보여준다. Prospective transformation 기법 중 하나인 Homography [20]를 영상시스템에 적용하여 광학카메라로부터 획득한 실영상과 재구성된 방사선영상을 융합하는 데 사용하였다. 이는 광학 영상과 방사선 영상 간의 9개의 좌표 정보를 서로 매칭시켰으며, Homography 매트릭스(matrix)는 RANSAC 알고리즘을 이용하여 계산하였다 [21]. 계산된 Homography 매트릭스를 사용하여 각 광학 영상과 방사선 영상 정합(superimposition)을 시켰고, 이로 인해 감마선과 중성자 선원의 존재와 위치를 확인할 수 있다.

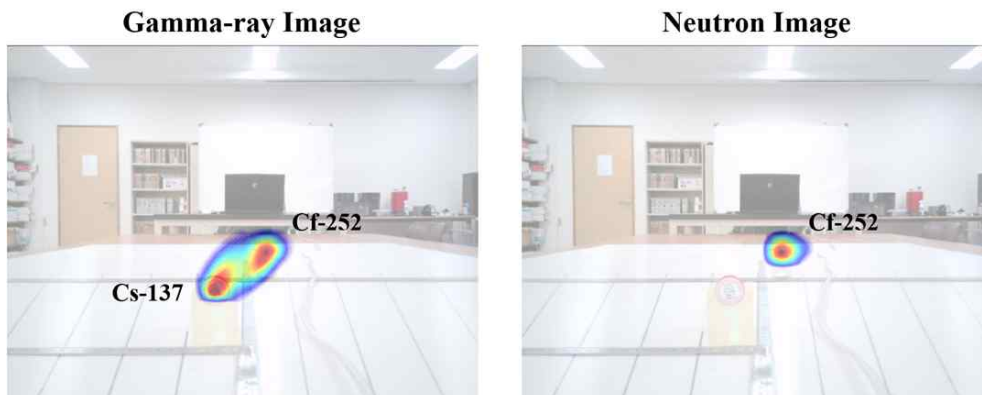


그림 25. 앞서 언급한 그림 24(b) 제시된 방사선 재구성 영상과 결합한 광학 카메라 영상.

3.1.4 개선점 논의

많은 수의 ADC(50 MS/s sampling rate)와 고속 동작하는 디지털회로로 인해 장비의 발열 문제가 있다. 센서로 사용하는 SiPM의 저잡음과 안정된 증폭률을 위해서는 동작 온도를 적정 수준에서 유지할 필요가 있다. 장비의 케이스를 제거하고 냉각팬을 구동하면 장비의 동작 온도를 30도 중반에서 유지할 수 있다. 반면, 케이스에 모든 부품을 장착할 경우는 냉각팬을 구동해도 40도 정도로 동작 온도가 상승한다. 이 온도에서 잡음 및 증폭률 안정성에는 별다른 문제가 없는 것으로 확인되었으나, 케이스 내부 구조를 개선하고 좀 더 큰 냉각팬을 장착할 수 있도록 디자인을 개선할 필요가 있다. 추가적으로, 낮은 에너지 대역(100 keVee 이하)에서 감마선과 중성자 동시 검출로 만족하지 않고 중성자의 신호와 감마선의 신호를 더욱더 효과적으로 분리할 방법을 찾기 위해 PSD 방법과 신호 처리 회로의 개선을 하고자 한다. 특히 기존에 사용했던 ADC의 성능을 개선한 하드웨어를 수정 및 적용하여 PSD의 향상이 얼마나 이루어지는지 확인할 예정이다. 이를 통해 300초 이내에 중성자 및 감마선원에 대해 동시에 영상 획득하는 기술을 확보하고자 한다.

3.2 SiPM 어레이의 광 흡수 면적에 따른 픽셀화된 스틸벤 어레이의 성능 비교

3.2.1 에너지 교정 및 SiPM 어레이의 광흡수 면적에 따른 반응 위치 분해능 비교

그림 26(a)와 그림 26(b)는 각각 스틸벤이 C-series와 J-series의 SiPM에 각각 결합하였을 때 10 cm 떨어진 곳에 위치한 ^{137}Cs 감마선원(0.312MBq의 방사능을 가짐)을 한 시간 동안 계측할 때 현 회로에 의해 획득된 행과 열의 검출 위치 분포를 보여준다. 그림 26에서 나타난 검출기 어레이의 행에 대한 검출 위치 분포를 합하고, 이를 1차원적인 분포 윤곽으로 나타낸 것이 그림 27이다. 그림은 1차원적인 분포 윤곽에서 픽셀 중심이 국부화되는 불확실성을 나타내는 반치폭을 함께 제시하였다. SiPM 어레이에서 C-series에서 J-series로 바뀔 때 따라 SiPM 어레이의 광 검출 면적(9 mm²에서 16 mm²로)과 광 검출 효율(31%에서 38%로)이 증가하므로, 1차원적인 분포 윤곽의 반치폭이 822 μm 와 718 μm 까지 줄어들며, 이는 반응 위치 분해능이 향상됨을 의미한다.

그림 28은 스틸벤이 C-series와 J-series의 SiPM에 각각 결합하였을 때 10 cm 떨어진 곳에 위치한 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{22}Na , 그리고 ^{57}Co 선원(0.312 MBq의 방사능을 가짐)을 각각 1 시간 동안 측정된 에너지 스펙트럼을 각각 보여준다. 그림 28(a)에서 각 에너지의 컴프턴 단애가 위치한 채널 번호가 그림 28(b)에서 관찰한 채널 번호와 거의 유사한데, 두 센서 모듈의 최대 측정 범위(dynamic range)를 2 MeV로 동일하게 설정하였기 때문이다. 만약 선형 증폭기의 증폭율이 두 SiPM 어레이의 신호 처리에 똑같이 적용된다면, J-series의 SiPM 어레이의 신호 크기가 포화되는(saturated) 문제가 발생할 것이다. 예를 들어, 특정 에너지의 입사 감마선에 대한 신호 크기는 광 흡수 면적에 비례하여 결정되므로 2 MeV보다 작은 에너지에 해당하는 신호 크기가 포화되어 나타난다. 그림 29는 앞서 관찰된 컴프턴 단애와 그에 해당하는 채널 번호 간의 관계를 보여주며, 선형 식과 2차 함수를 이용한 채널-에너지 교정(calibration) 함수를 함께 보여준다. 이때, 컴프턴 단애는 각 감마선 선원에 대해 컴프턴 단애가 가진 피크의 80% 되는 지점에서의 채널 번호로 계산하였다. 채널-에너지 교정 시, 100 keV 이하의 에너지 구간은 2차 함수를 이용한 교정함수가 선형함수를 이용한 것보다 실험 결과와 더 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 에너지 교정은 2차 함수를 이용한 교정함수를 이용하였다.

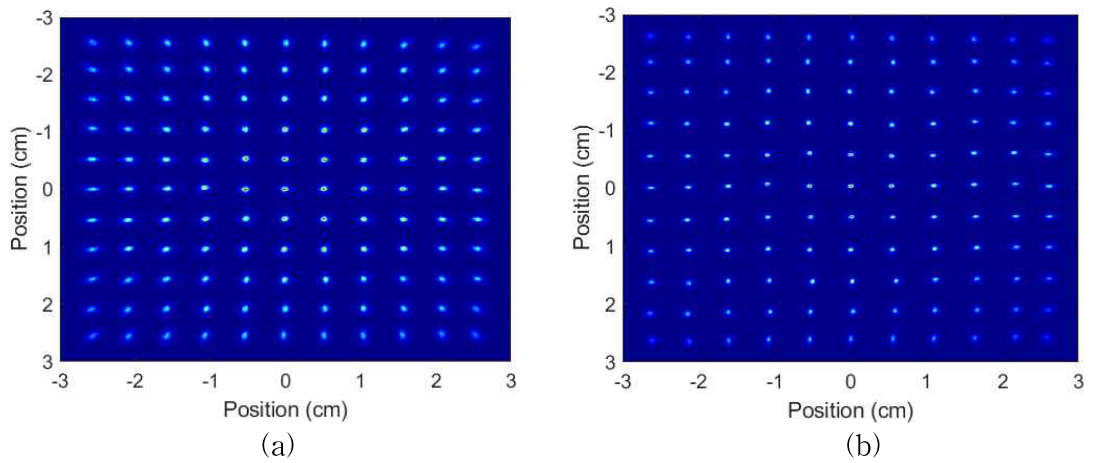


그림 26. (a) C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈과 (b) J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈을 이용하여 ^{137}Cs 감마선원 계측을 통해 획득한 반응 위치 2-D 분포 히스토그램. 두 어레이 모듈에 인가된 전압은 28 V로 동일 함.

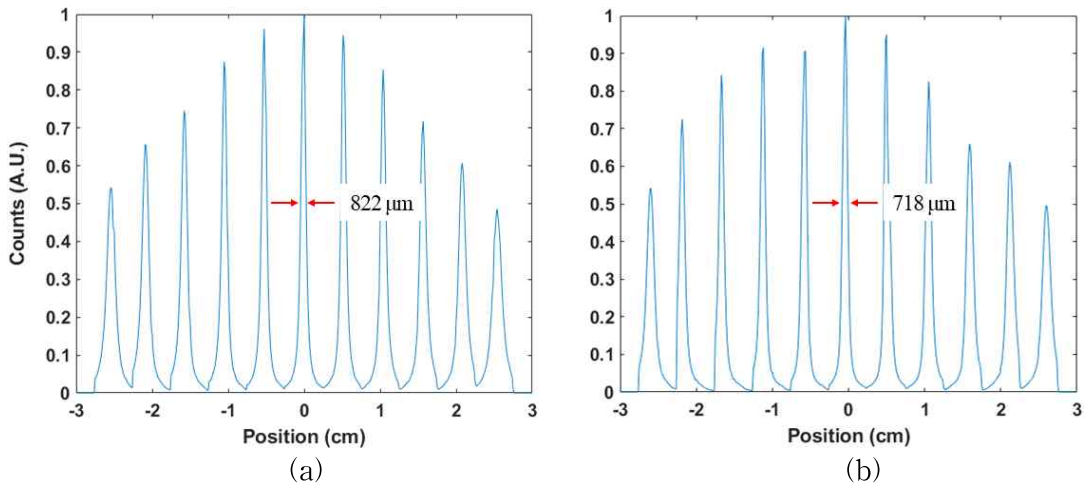


그림 27. 그림 26에 제시된 행에 대한 검출 위치 분포를 합하고 이를 1차원 적으로 나타낸 검출 위치 분포 윤곽(1D row-sum profile).

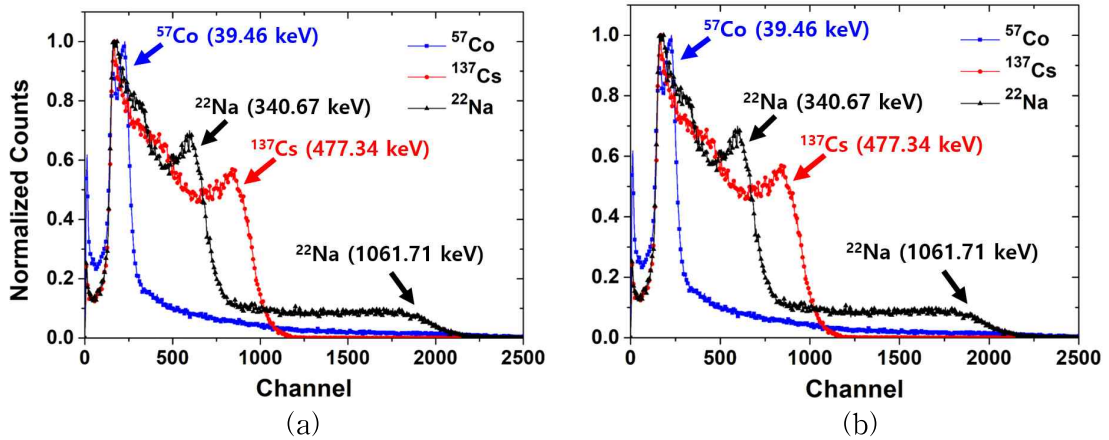


그림 28. (a) C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈과 (b) J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈로 감마선원(^{60}Co , ^{137}Cs , ^{22}Na , 그리고 ^{57}Co)을 측정하여 획득된 에너지 스펙트럼.

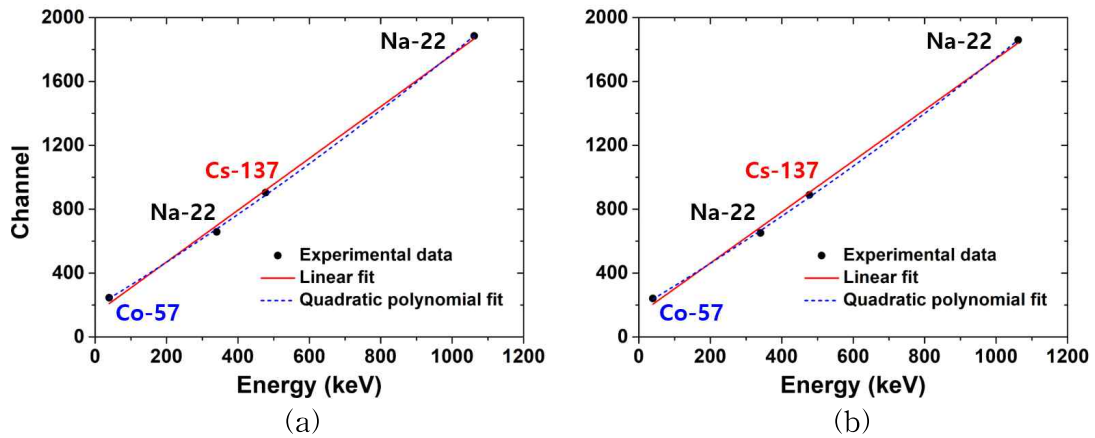


그림 29. (a) C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈과 (b) J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈에서 획득된 컴프턴 단애의 에너지와 그에 해당하는 채널 번호 간의 관계, 그리고 채널-에너지 교정(calibration)을 위한 선형 식과 2차 함수의 비교. 컴프턴 단애는 각 감마선 선원에 대해 컴프턴 단애의 피크의 80% 되는 지점에서의 채널 번호로 계산되며, SiPM은 28 V의 인가전압과 25°C의 온도에서 작동됨.

3.2.2 SiPM 어레이의 광흡수 면적에 따른 PSD 성능 비교

그림 30은 중성자와 감마선 이벤트 분포를 보여주는 픽셀 전반에 대한 PSD 분포를 보여주며, 그림 31은 PSD 분포의 각 에너지 영역(0-50 keVee, 50-100 keVee, ... 1500-1550 keVee)에서의 PSD 분포의 윤곽과 그때의 FOM 값을 제시하였다. J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈은 100-150 keVee의 에너지 범위에서 중성자 및 감마선 사건에 대한 FOM의 값이 1.28로 1.27에 가까운 값을 가지며, 이는 100 keVee 이상에서 중성자와 감마선 신호가 잘 분리됨을 의미한다. 타 연구에서 높은 사양의 ADC(14 bit, 500MHz)와 C-series SiPM-스틸벤 센서 모듈을 이용하여 얻은 FOM 값은 100-200 keVee 에너지 범위 내에서 2.13 [22]이며, 현재 연구에서 제시된 FOM 값(1.28-1.48)은 이보다 열등하나 1.27의 FOM 기준을 넘으므로 양호하다고 말할 수 있다. 한편, C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈은 상대적으로 낮은 PSD 성능을 보이며, 200-250 keVee 이상의 에너지 구간에서만 1.27 이상의 FOM 값을 보인다.

PSD 분포를 각 픽셀별로 추출하면 중성자와 감마선 이벤트에 대한 구분이 더 낮은 에너지에서도 가능하다. 그림 32는 두 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈에 대해 144개의 픽셀 중 하나의 픽셀이 갖는 PSD 분포를 각각 보여주며, 저에너지 영역에서의 PSD 분포의 윤곽과 그때의 FOM 값은 그림 33에 나타난다. C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈은 150-200 keVee의 에너지 범위에서 FOM 값이 1.29로 1.27에 근사하며, 감마선/중성자 분리 능력이 향상됨을 알 수 있다. 주목할 점은 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈이 50-100 keVee의 에너지 범위에서도 FOM 값이 1.26으로 우수하게 나타나는 것이다. 따라서 측정 결과는 저에너지 영역에서도 감마/중성자 구별이 픽셀 별로 달성 가능함을 보여준다. 즉, 광 흡수 면적을 증가시키는 것은 광 손실을 방지하여 인광에 의한 신호 감쇠 정보를 최대한 보존하여 스틸벤의 고유한 중성자/감마선 분리 능력을 유지할 수 있다. 따라서, J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈을 탑재한 DPI는 픽셀화된 스틸벤 섬광체를 이용하더라도 우수한 중성자/감마선 분리 능력을 갖춘다.

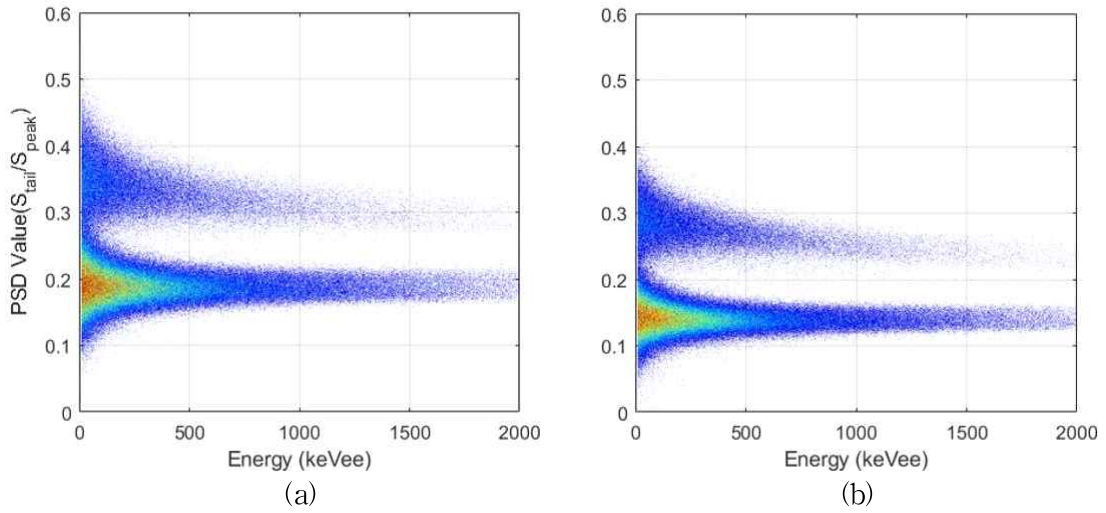


그림 30. (a) C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈과 (b) J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈이 100 cm 거리에서 3.5×10^5 n/s ^{252}Cf 의 자발적 핵분열 선원을 측정할 때, 10 keVee의 문턱값에서 획득된 1,500,000개의 신호에 대한 전체적인 검출기의 PSD 분포.

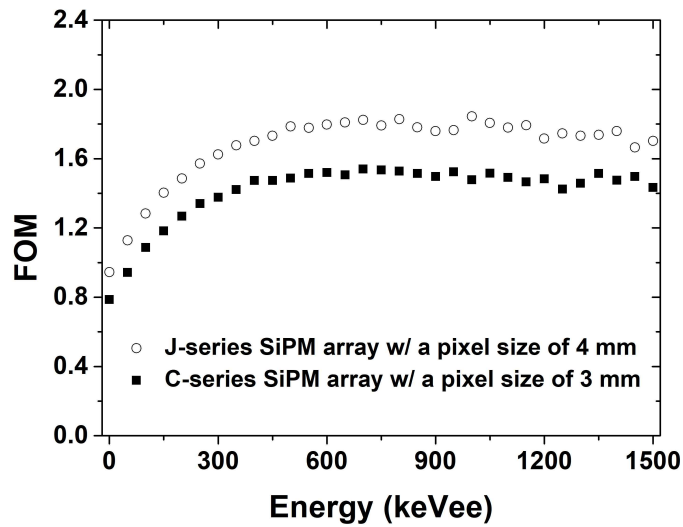


그림 31. 그림 30에 주어진 플라스틱(EJ-276)-SiPM 모듈과 스틸벤-SiPM 모듈에서 각각 획득한 PSD 분포에서 다양한 에너지(0-50 keVee, 50-100 keVee, ..., 1500-1550 keVee)마다 획득된 FOM 값.

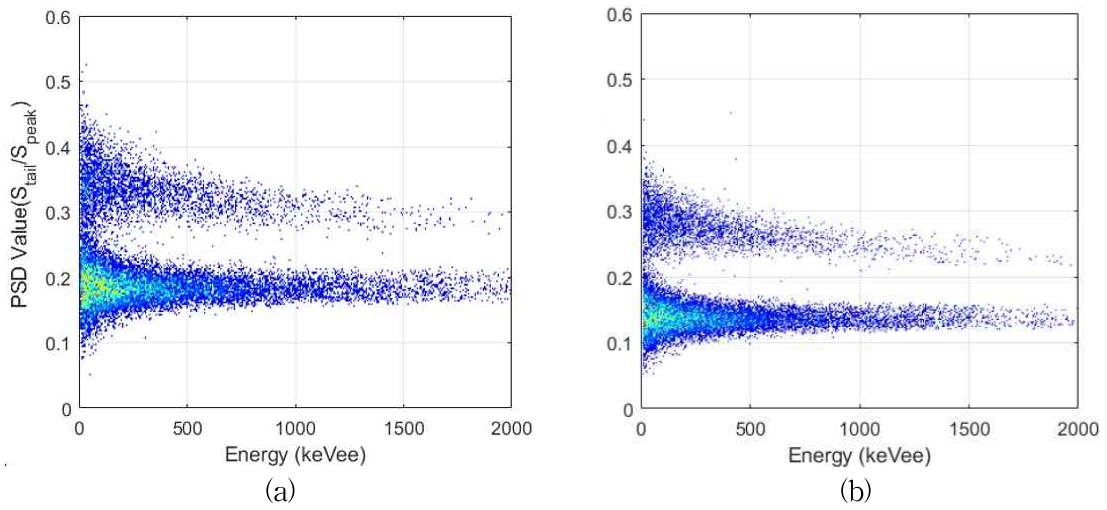


그림 32. 그림 30에 제시된 C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈 (a)과 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(b)이 획득한 PSD 분포 중 단일 픽셀이 갖는 PSD 분포.

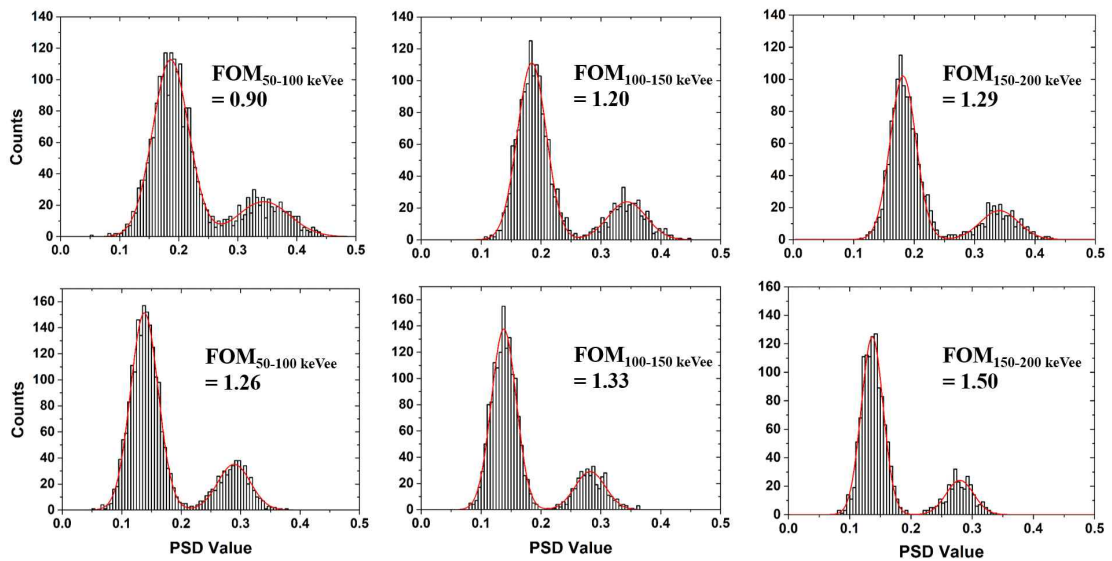


그림 33. 그림 32에 주어진 C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(윗행)과 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(아래행)에서 각각 획득한 PSD 분포에서 저에너지(50-100 keVee, 100-150 keVee, 그리고 150-200 keVee) 구간에서 획득된 FOM 값.

3.2.3 SiPM 어레이의 광흡수 면적에 따른 중성자와 감마선의 영상 획득에 필요한 시간 비교

두 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈에 의한 중성자와 감마선 영상 획득 시간을 비교하기 위해, ^{252}Cf 선원과 ^{137}Cs 선원을 각각 계측하였다. ^{252}Cf 선원은 초당 2.8×10^5 중성자 방출하고 시스템으로부터 100 cm 거리에 위치하였으며, 0.74 MBq 방사능을 갖는 ^{137}Cs 선원은 75 cm 거리에서 0.1 $\mu\text{Gy/h}$ 의 선량을 나타낸다. 이때, C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈은 감마선과 중성자 분포의 분리가 잘 된다고 판단되는 150 keVee 에너지 구간 이상의 데이터만 사용하였으며, J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈은 50 keVee 에너지 구간 이상의 데이터를 모두 사용하였다. 그림 34와 35는 각각 ^{252}Cf 선원과 ^{137}Cs 선원에 대하여 주어진 측정 시간에서의 검출 확률 분포를 보여주며, 정확한 선원의 위치를 가리키는 영상을 얻는데 필요한 시간을 암시한다. 즉, 그림에 주어진 각도 편차의 범위(Angular deviation)는 방사선 영상이 방사선원의 실제 위치로부터 얼마나 벗어나는지를 나타냄. 그 결과, 중성자 영상 획득 시험의 경우, J-series와 C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈을 사용하는 이중입자 영상장비는 검출 확률이 80% 이상인 유효한 중성자 영상을 각각 4분 및 5분 만에 획득할 수 있었다. 이때, J-series와 C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈에서 측정된 중성자 계수율(counts per second, CPS)은 각각 3.7과 2.3으로, 약 1000개의 이벤트 획득 시 중성자 영상 획득이 가능하다. 감마선 영상 획득 시험의 경우, J-series와 C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈을 사용하는 이중입자 영상장비는 검출 확률이 80% 이상인 유효한 감마선 영상을 얻기 위해 각각 8초 및 10초 만에 획득하였다. 이때, J-series와 C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈에서 측정된 감마선 계수율은 각각 18과 10.3으로, 약 150개의 이벤트 획득 시 감마선 영상 획득이 가능하다. 감마선보다 중성자 영상 획득 시간이 훨씬 긴 이유는 텅스텐으로 이루어진 부호화 구경이 입사중성자에 대하여 차폐를 제대로 하지 못하여 검출기 내 패턴을 잘 형성하지 못한다고 사료 된다.

그림 36은 5.37×10^6 개의 중성자를 방출하는 ^{252}Cf 선원을 미시간 대학교에서 계측하여 재구성한 중성자와 감마선 영상을 사용자 인터페이스(graphical user interface, GUI)를 통해 동시에 보여준다. GUI의 왼쪽은 감마선 영상, 그리고 오른쪽은 중성자 영상으로 모두 ^{252}Cf 선원의 위치를 가리키며, GUI의 우측 상단에는 관측된 계수율을 실시간으로 나타낸다. 왼쪽부터 흰색-빨간색-파란색으로 된 원은 선원의 위치를 가리키는 포인터이다. 감마선 영상의 경

우 1초 간격으로 정확한 선원의 위치를 가리키나, 중성자 영상의 경우 23초의 계측 시간이 필요하다. 이는 미시간에서 개발된 H2DPI 시스템의 성능과 비교할 수 있다. H2DPI는 중심에서 58.4cm 떨어진 곳에서 초당 1.2×10^7 개의 중성자를 방출하는 ^{252}Cf 선원에 대한 중성자 영상 획득에 30분의 시간이 소요되었다 [5]. 그러므로, 본 연구에서 개발한 부호화구경 기반 DPI는 중성자 및 감마선의 위치 영상을 신속하고 동시에 제공할 수 있다고 말할 수 있다.

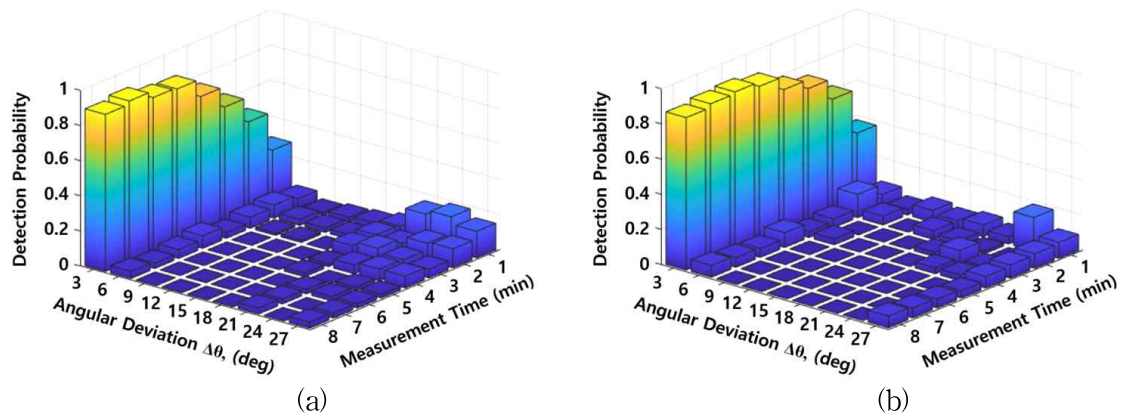


그림 34. C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(a)과 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(b)로부터 100 cm 거리에 위치한 2.8×10^5 n/s의 ^{252}Cf 선원을 계측할 때 측정 시간에 따른 검출 확률 분포.

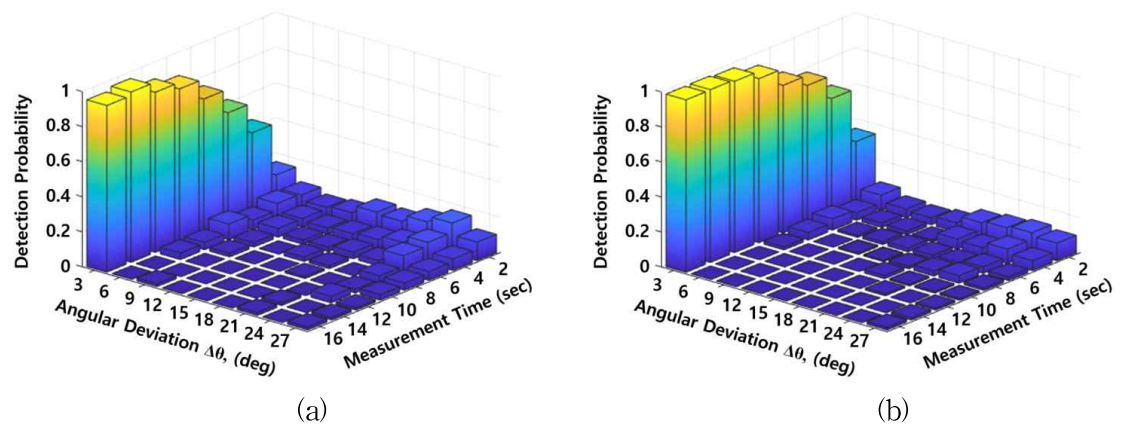


그림 35. C-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(a)과 J-series의 SiPM-스틸벤 어레이 센서 모듈(b)이 0.1 μGyh 의 선량을 나타내는 ^{137}Cs 선원을 계측할 때 측정 시간에 따른 검출 확률 분포.

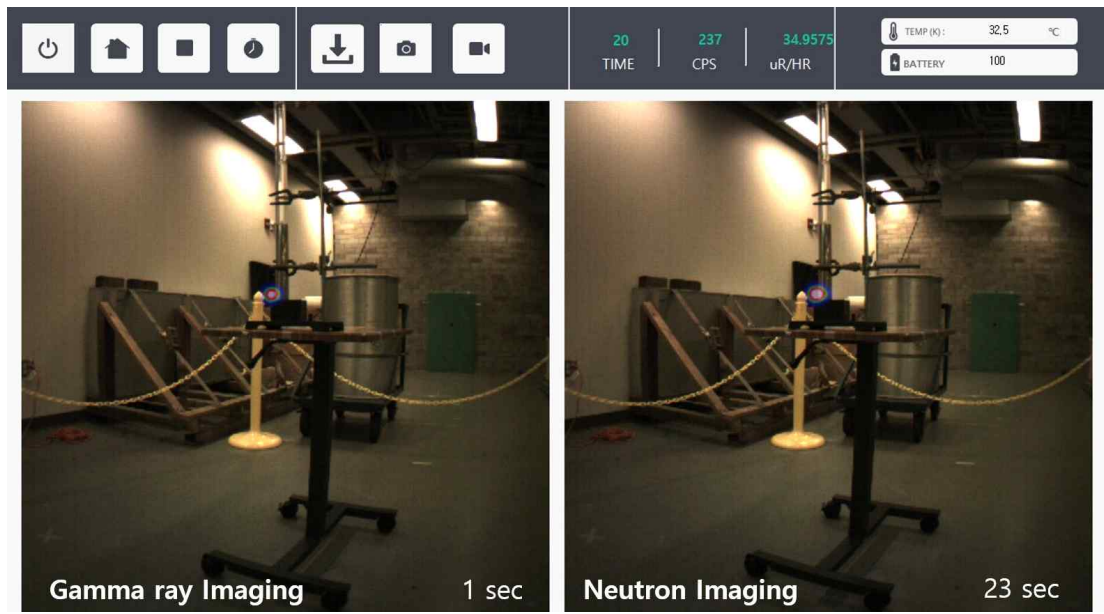


그림 36. 휴대용 DPI를 이용하여 5.37×10^6 n/s ^{252}Cf 선원 계측할 때 GUI에 나타난 감마선 영상(좌측)과 중성자 영상(우측).

3.2.4 개선점 논의

많은 수의 ADC(50 MS/s sampling rate)와 고속 동작하는 디지털회로로 인해 장비의 발열 문제가 있다. 센서로 사용하는 SiPM은 온도에 따른 광 수집 효율이 변화하므로, 변화하는 온도에 대한 신호 크기의 보정이 필요하다. 이는 온도 변화에 따른 신호 크기의 변화를 룩업 테이블(lookup table)로 만들면 해결 가능할 것으로 보인다. 추후에 온도 챔버(chamber)에서 실내온도부터 50°의 고온까지 온도를 변화시킬 때 그 신호 크기를 관찰하여 룩업 테이블을 만들고, 시스템의 온도에 따른 신호 크기를 보상할 계획이다. 추가적으로, 감마선과 중성자 영상 획득 시간 간의 간격 차이를 좁히도록 설계하고자 한다. 예를 들어, 고속 중성자에 대한 차폐율이 낮은 텅스텐을 보완하기 위해 폴리에틸렌(polyethylene)과 텅스텐이 조합된 부호화 구경을 구현하고자 한다. 폴리에틸렌은 텅스텐보다 고속 중성자에 대해 탄성 산란 반응 단면적이 높으므로 중성자 차폐율이 우수하다. 이러한 복합형 부호화 구경은 입사중성자에 대한 유효한 검출기 패턴을 제공할 수 있을 것이며, 중성자 영상 획득에 필요한 계측 시간을 단축할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론 및 시사점

본 연구에서 개발한 부호화구경 기반 이중입자 영상장치는 단일 마스크를 사용하고 PSD 기능을 가진 유기 섬광체인 스틸벤 어레이와 SiPM 어레이를 결합한 검출기 모듈을 사용하여 소형(compact) 구조로 만들 수 있어 휴대화가 가능한 크기로 제작이 용이하며 감마선과 중성자 영상을 동시에 획득하여 실영상과 융합한 영상을 구현할 수 있는 장비이다. 현재 부호화구경 기반의 기술을 적용한 이중입자 영상장치를 구현한 사례가 세계 어느 곳에도 없으며, 본 연구에서 개발된 장비가 세계 최초이며 성능 또한 가장 우수함을 확인하였다. 비핵화 및 핵군축을 원하는 지역(미국, 러시아)이나 핵물질의 도난 및 사고가 발생하는 지역(탄자니아, 조지아 등 아프리카 및 동유럽 국가)에서 큰 관심을 가지는 기술이다. 향후 계획은 반복되는 실험과 현장 시험 등을 통해 요구되는 보완 사항을 개선하고 최종적으로 중성자 선원과 감마선원이 함께 존재하는 복합환경 내에서의 실험을 통해 장비의 성능을 평가하고자 한다.

참고문헌

- [1] U.S. NRC, Special Nuclear Material. US Nuclear Regulatory Commission, USA, Retrieved from: <http://www.nrc.gov/materials/sp-nucmaterials.html>.
- [2] G. W. Philips, D. J. Nagel, and T. Coffey, A primer on the detection of nuclear and radiological weapons, Center for Technology and National Security Policy, National Defense University, Washington, DC, USA, *Tech. Rep.*, OMB-0704-0188, May. (2005) Retrieved from <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/keller1/docs/phillips.pdf>
- [3] C. Whitney, *et al.*, Gamma - neutron imaging system utilizing pulse shape discrimination with CLYC *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, 784 (2015) 346-351. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.09.022>
- [4] M. C. Hamel, *et al.*, Active neutron and gamma-ray imaging of highly enriched uranium for treaty verification. *Sci. Rep.*, 7 (2017) 1 - 10. <https://doi:10.1038/s41598-018-32882-5>
- [5] W. M. Steinberger, *et al.*, Imaging special nuclear material using a handheld dual particle imager. *Sci. Rep.*, 10 (2020) 1 - 11. <https://doi:10.1038/s41598-020-58857-z>
- [6] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement (Wiley, New York, 2010).
- [7] C. A. Miller, A. D. Fulvio, S. D. Clarke, and S. A. Pozzi, Dual-Particle Dosimeter Based on Organic Scintillator. *Radiat. Prot. Dosim.*, 191 (2020) 319-327. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa151>
- [8] N. Zaitseva, B. L. Rupert, I. Pawełczak, A. Glenn, H. P. Martinez, L. Carman, ... and S. Payne, Plastic scintillators with efficient neutron/gamma pulse shape discrimination. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.*, 668 (2012) 88-93. <https://doi:10.1016/j.nima.2011.11.071>

- [9] J. Boo, M. D. Hammig, and M. Jeong, Row - Column Readout Method to Mitigate Radiographic-Image Blurring From Multipixel Events in a Coded-Aperture Imaging System. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 68 (2021) 1175-1183. <https://doi:10.1109/TNS.2021.3066414>.
- [10] D. Lister, A. B. Smith, and C. Dunford, Fast-neutron scattering from the 182, 184, and 186 isotopes of tungsten. *Phys. Rev.*, 162 (1967) 1077. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.162.1077>.
- [11] M. Jeong and G. Kim, SYSTEM FOR PROCESSING 3-DIMENSIONAL VISUALIZATION OF RADIATION SOURCE DISTRIBUTION USING CODED-APERTURES, *KOREA Patent* 10-2020-0061885 (2020).
- [12] S. Park, J. Boo, M. Hammig, and M. Jeong, Impact of aperture-thickness on the real-time imaging characteristics of coded-aperture gamma cameras. *Nucl. Eng. Technol.*, 53 (2020) 1266-1276. <https://doi:10.1016/j.net.2020.09.012>
- [13] M. Jeong and M. D. Hammig, Comparison of gamma ray localization using system matrixes obtained by either MCNP simulations or ray-driven calculations for a coded-aperture imaging system. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 954 (2020) 161353. <https://doi:10.1016/j.nima.2018.10.031>
- [14] N. Zaitseva, A. Glenn, L. Carman, H. P. Martinez, R. Hatarik, H. Klapper, S. Payne, Scintillation properties of solution-grown trans-stilbene single crystals. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 789 (2015) 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.03.090>
- [15] C. Kim, J. Y. Yeom, and G. Kim, Digital n- γ pulse shape discrimination in organic scintillators with a high-speed digitizer. *J. Radiat. Prot. Res.*, 44 (2019) 53-63. <https://doi.org/10.14407/jrpr.2019.44.2.53>
- [16] Y. Yan, W. Cao, and S. Li, Block-based adaptive image watermarking scheme using just noticeable difference, In *IEEE I. W. Imag. Syst. Techni.*, (2009) 377-380. <https://doi.org/10.1109/WICT.2011.6141267>

- [17] R. Chaves, *et al.*, SVM-based computer-aided diagnosis of the Alzheimer's disease using t-test NMSE feature selection with feature correlation weighting. *Neurosci. Lett.*, 461 (2009) 293-297.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.06.052>
- [18] A. Hore, and D. Ziou, Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM. In *2010 20th international conference on pattern recognition.*, (2010)
<https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579>
- [19] Q. Liu, *et al.* Image reconstruction using multi-energy system matrices with a scintillator-based gamma camera for nuclear security applications. *Appl. Radiat. Isot.* 163, (2020) 109217. doi:10.1016/j.apradiso.2020.109217
- [20] E. Dubrofsky, Homography estimation. Master's thesis, Carleton University. (2009).
- [21] J. Lee and G. Kim, Robust estimation of camera homography using fuzzy RANSAC. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (2007) 992 - 1002 Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi:10.1007/978-3-540-74472-6_81.
- [22] M. L. Ruch, M. Flaska, and S. A. Pozzi, Pulse shape discrimination performance of stilbene coupled to low-noise silicon photomultipliers. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.*, 793 (2015) 1-5.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.04.053>