



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 구경기반
감마선 영상장비 개발

제주대학교대학원

에너지화학공학전공

박서령

2022년 02월



부호화 구경기반 감마선 영상장비 개발

지도교수 정 만 희

박 서 령

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2022년 02월

박서령의 공학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장

최 수 석

위 원

정 만 희

위 원

우 승 민

제주대학교 대학원

2022년 02월

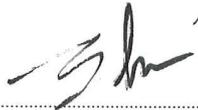
Development of coded-aperture based
gamma-ray imaging system

Seoryeong Park
(Supervised by professor Manhee Jeong)

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

2022. 02.

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 Energy and chemical Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

표 목차	.....
그림 목차	.....
ABSTRACT	.....
I. 서론	.....	1
제 1 절 연구배경 및 필요성	.....	1
1. 연구배경 및 필요성	.....	1
2. 국내외 연구 동향	.....	2
제 2 절 연구 범위	.....	3
II. 재료 및 방법	.....	5
제 1 절 MCNPX-Polimi 전산모사	.....	5
1. 부호화 구경 패턴 설계	.....	5
2. 복조 패턴 설계	.....	7
3. 재구성 영상 획득방법	.....	8
4. 전산모사 조건	.....	11
제 2 절 하드웨어 구성	.....	12
1. 섬광체 및 센서	.....	12
2. 신호처리 회로 구성	.....	15
제 3 절 영상 화질 평가 방법	.....	20
III. 결과 및 논의	.....	23

제 1 절 전산모사 결과	23
1. 부호화 구경 두께 최적화	23
2. 최소 검출 선량 도출	26
제 2 절 시스템 보정	29
1. gain 보정	29
2. 호모그래피	30
제 3 절 스펙트럼 특성 및 공간분해능 평가	32
1. 스펙트럼 특성	32
2. 공간 분해능 평가	34
제 4 절 영상장비 성능평가	35
1. 시야각 평가	35
2. 각 분해능 평가	37
3. 방사선 총 민감도 평가	38
4. 방사선 영상 민감도 평가	39
5. 핵종 판별 가능 여부 평가	40
6. 방사선 영상 화질 평가	41
IV. 결론	43
제 1 절 연구의 요약	43
제 2 절 향후 연구 계획	45
참고문헌	47

표 목차

표 1. 개발 완료된 감마선 영상장비의 명칭과 해당 장비 원천기술 보유 국가 ……	3
표 2. MCNPX-Polimi 전산모사 조건 ……………	11
표 3. 섬광체 별 특성 비교 ……………	14

그림 목차

그림 1. 감마선 영상장비에서 획득한 영상 예시	4
그림 2. 검출기와 선원 간의 거리가 무한일 때, (a) 단일 패턴 마스크와 (b) mosaic 패턴 마스크를 사용했을 때의 FCFV 차이를 비교한 그림. 여기에서 PCFV는 partially-coded field of view를 의미한다.	6
그림 3. (a) 단일 MURA 패턴과 (b) centered mosaic MURA 패턴.....	6
그림 4. (a) 획득된 복호화 패턴과 (b) 부호화 구경 패턴과 복호화 패턴의 상관관계를 통해 획득된 델타 함수	8
그림 5. 상관 관계법을 이용하여 선원의 영상을 재구성하는 과정 예시	9
그림 6. MLEM 기법을 이용하여 선원의 영상을 재구성하는 과정 예시	10
그림 7. (a) 상관 관계법을 이용하여 재구성한 감마 선원 영상과 (b) MLEM 기법을 이용하여 재구성한 감마 선원 영상. 이때, 감마 선원과 검출기 간의 거리는 100cm로 설정하였다.	10
그림 8. 채택되어 실험에 사용된 GAGG(Ce). 섬광체의 각 픽셀 사이에는 반사체로써 0.2mm 두께의 BaSO ₄ 가 위치하며, 가장자리와 바닥 부분에는 0.3 mm 두께로 위치한다. 양옆과 바닥 면은 알루미늄 포일로 감싸져 있다.	13
그림 9. 실험에 사용된 SiPM 어레이의 외관. 전체 면적은 50.2 mm × 50.2 mm이다.	14
그림 10. 연구에 사용된 전자회로 구성. (a) 아날로그 보드, (b) ADC+ 디지털 보드, (c) 전원 보드.....	17
그림 11. 감마선 영상장비의 아날로그 회로도	17
그림 12. 감마선 영상장비의 디지털 보드 회로 블록도	18
그림 13. 부호화 구경기반 감마선 영상장비의 구성도	19

그림 14. 부호화 구경 두께, 입사 감마선의 에너지, 영상재구성 기법에 따른 (a) PSNR, (b) NMSE, (c) SSIM의 값을 나타낸 그래프	25
그림 15. 실제 시스템에서 부호화 구경 두께, 입사 감마선의 에너지에 따른 (a) PSNR, (b) NMSE, (c) SSIM의 값을 나타낸 그래프	25
그림 16. 3D 프린터로 출력한 출력물에 텅스텐 조각을 끼워 완성한 부호화 구경의 (a) 전면부와 텅스텐 차폐체로 둘러싼 (b) 후면부	26
그림 17. 입사 감마선의 수의 증가에 따른 (a) PSNR, (b) NMSE, (c) SSIM 그래프	28
그림 18 입사 광자의 수에 따른 전산모사 결과와 실제 실험 결과의 (a) PSNR, (b) NMSE, (c) SSIM 비교 그래프	28
그림 19. (a) gain 보상 전 스펙트럼, (b) 개별 셀에 대한 스펙트럼, (c) 보상 후 스펙트럼 결과. 선원은 ^{137}Cs 점 선원을 사용하였다.	30
그림 20. 호모그래피 적용 전 GUI 영상. 점선은 광학 영상에 촬영한 선원의 위치이고, 가운데 흰색으로 표시된 것이 감마선 영상에서 획득한 선원의 위치이다.	31
그림 21. 호모그래피 적용 후 GUI 이미지. 점선은 광학 영상에 촬영한 선원의 위치이고, 가운데 흰색으로 표시된 것이 감마선 영상에서 획득한 선원의 위치이다.	32
그림 22. 에너지 스펙트럼 획득을 위한 실험 구성 모식도	33
그림 23. ^{137}Cs 점 선원에 대하여 1,000,000 count를 계수하였을 때 획득한 감마선 에너지 스펙트럼	33
그림 24. 50.8 mm × 50.8 mm × 20 mm 두께의 GAGG(Ce) 섬광체와 12 × 12 SiPM 어레이를 광학 결합하여 획득한 2-D flood map	34
그림 25. 50.8 mm × 50.8 mm × 20 mm 두께의 GAGG(Ce) 섬광체와 12 × 12 SiPM 어레이를 광학 결합하여 획득한 1-D sum profile	34
그림 26. 시야각 평가실험 모식도.....	36
그림 27. 가로축과 세로축의 최대 시야각 평가실험 결과	36

그림 28. 각 분해능 평가실험 모식도	37
그림 29. 두 선원의 각도에 따른 각 분해능 평가실험 결과	37
그림 30. 방사선 총 민감도 평가실험 모식도	39
그림 31. 방사선 영상 민감도 평가실험 결과 획득한 GUI 화면 캡처 영상. 이때, ^{137}Cs 선원의 세기는 10.1195 μCi 이며, 검출기와 선원 간의 거리는 1.075 m이었다.	40
그림 32. 제작된 시작품에서 에너지 스펙트럼을 획득하고 핵종 정보를 제공하는 기능의 예시	41
그림 33. 에너지 윈도우를 적용하여 각 선원에 대한 위치 정보를 획득한 예시	41
그림 34. 방사선 영상의 화질 평가를 위해 획득한 데이터로 재구성한 영상	42
그림 35. Epsilon-G의 외관(왼쪽)과 GUI화면(오른쪽)	45

ABSTRACT

In this study, we analyze radiographic imaging technology and imaging equipment capable of visualizing radioactive materials. First, the pattern of the encoding diameter was determined as the 'centered mosaic' MURA pattern, and the corresponding decoding pattern was designed. The optimal thickness of coded aperture was derived by inputting the pattern of the adopted size, material, rank of coded aperture, energy of incident gamma rays (100 keV, 662 keV, 1330 keV), detector size, and scintillation size as parameters. The images of radiation sources obtained as a result of MCNP simulation were reconstructed through the cross-correlation method and the MLEM method. And reconstructed image was evaluated with peak signal to noise ratio (PSNR), normalized mean square error (NMSE), and structure simulation (SSIM). As a result of the evaluation, the image quality of the reconstructed image was 2 ~ 5cm when the MLEM technique was used. In addition, the minimum detection activity at the corresponding thickness was derived, and when the thickness of the encoding diameter was 2cm, the minimum detection activity was 2000counts.

Based on the MCNP simulation results, a real system was constructed, and GAGG (Ce) was adopted as the scintillator in consideration of physical characteristics, and SiPM was used as the sensor. The coded aperture adopted a method of inserting tungsten pieces into the results output through a 3D printer, and the radiation signal processing board consisted of an analog board, an ADC+digital board, and a power board. In the real system, the gain of each pixel of the SiPM array was calibrated for a different value, and homography was applied to prevent distortion between the radiation image and the optical image.

After constructing the real system, the image quality was evaluated by obtaining an image by increasing the thickness of the coded aperture to 0.5 ~

4.5cm for verify the MCNP simulation result. Image quality was evaluated at the derived minimum detection activity. Both experimental results confirmed that they had a similar to the MCNP simulation results. In addition, an experiment was conducted to evaluate spectrum characteristics, equipment performance characteristics, and image quality characteristics required by gamma-ray imaging equipment. The spectral characteristics were evaluated with energy resolution, peak-to-valley ratio (PVR), and peak-to-Compton ratio (PCR), and the equipment performance characteristics were evaluated with angular resolution, field of view (FOV), total sensitivity, and image sensitivity. And the image quality characteristics were evaluated by PSNR, NMSE, and SSIM. As a result of evaluating the energy spectrum characteristics in the real system, energy resolution was 8.3%, PVR was 9.494, PCR was 5.06, and angular resolution was determined to be $6 \sim 7^\circ$ and FOV was 45° . Total sensitivity was calculated as 17.827cpm/nSv/h for ^{137}Cs , 110.267cpm/nSv/h for ^{241}Am , and 7.07cpm/nSv/h for ^{60}Co . And image sensitivity within 10 seconds in a 662keV 0.3 μ Sv/h irradiation environment. The image quality of the reconstructed image was 45.886dB, 2.0568×10 , 0.9917 for each indicator of PSNR, NMSE, and SSIM.

I. 서론

제 1 절 연구배경 및 필요성

1. 연구배경 및 필요성

국제 원자력 기구 (International Atomic Energy Agency; IAEA)에 의하면, 2020년 12월 기준 운영 중인 원전은 총 442기이며, 그중 약 66.97%에 해당하는 296기가 30년 이상 운영되고 있다 [1]. 이러한 노후원전은 꾸준히 증가할 전망이며, 노후원전의 영구정지 이후 원전 해체 및 해체부지의 제염에 관한 관심이 전 세계적으로 증가하는 추세이다. 국내에서도 2017년 6월 18일 고리 1호기가 영구정지됨에 따라 고리 1호기의 관리는 어떻게 이루어지고 있는지, 해체는 어떻게 진행될 것인지가 주요 관심사이다 [2]. 제염 및 원전 해체에 있어 오염 지역 식별, 핵종 판별 기술을 통한 방사성 오염 준위 지도 획득은 효율적인 해체 작업계획을 수립하고, 방사선 작업 종사자의 피폭 저감에 도움이 되며, 해체 폐기물의 효율적인 분류 작업을 통해 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다 [3]. 또, 원전 해체 이후에도 원전 부지에 대한 지속적인 방사선 모니터링이 요구될 것으로 예상함에 따라 환경 모니터링 분야에서도 적용 가능할 것으로 기대된다 [4].

사회적으로 2011년 후쿠시마 원전사고와 2018년 라돈 침대 파문 이후 국내에서 방사선에 관한 관심이 고조되었다 [5, 6]. 특히, 방사선은 인간의 오감으로는 느낄 수 없는 특성을 가지므로 이에 대한 불안감 해소를 위하여 방사성 물질로

오염된 지역 및 물체의 방사선 및 방사능을 정확하게 측정하고 분석할 수 있는 시스템 개발에 대한 요구가 비약적으로 증가하고 있다. 또한, 방사선 응용기술의 발전과 함께 방사선사용에 대한 수요가 지속해서 증가하고 있으며, 이와 관련하여 방사선의 안전한 사용에 대한 요구도 증대되고 있다. 특히, 방사선이 상시적으로 이용되는 장소에서 미지 혹은 분실 방사선원을 찾는 방법이 꾸준히 개발되어왔으나, 이러한 노력에도 불구하고 여전히 미지의 방사선원을 찾는 것은 많은 시간과 노력이 필요한 실정이다.

2. 국내외 연구 동향

앞서 언급한 다양한 요구에 부응하여, 국내·외의 많은 연구진에서 감마선을 시각화할 수 있는 감마선 영상기술 개발을 위한 연구를 진행하였다. 이러한 감마선 영상기술을 바탕으로 만들어진 영상장비는 표 1과 같으며, 미국, 영국, 프랑스에 의해 상용화되었다. 해당 장비들은 영상 획득방식에 따라 컴프턴 방식 및 부호화 구경방식으로 나뉜다. 컴프턴 방식은 컴프턴 산란에 기초하여 방사선원의 위치에 대한 정보를 획득하여 영상을 획득하는 방식이고, 부호화 구경방식은 특수한 패턴을 가지는 부호화 구경에 방사선이 투과하면서 맺히는 상을 통해 영상을 획득하는 방식이다. 개발된 장비들은 원자력 발전소 내부와 외부의 방사선 계측, 방사선 작업 종사자 방호, 원전 해체 등의 원자력 사업과 국토안보, 의료 산업 등에 응용되고 있다 [7].

국내에서도 컴프턴 영상 획득방식과 부호화 구경기반의 영상 획득방식을 통한 감마선 영상기술의 개발이 시도되었으며, 컴프턴 영상 획득방식은 주로 산란 검출기와 흡수 검출기가 별도로 운용되는 방식의 대형 장비가 개발되었다 [9]. 이는 위치 민감형 검출기는 실리콘 기반의 double-sided strip detector가 주로 사용되었으며, 원자번호가 낮은 계측기 물질의 특성상 상대적으로 검출 효율이 낮아 오랜 시간 동안의 계측이 이루어져야만 감마 선원에 대한 위치 정보를 획득할 수 있다. 부호화 구경기반 영상 획득방식에 대해서는 전산모사 중심으로 연

구가 이루어졌으며, 실제 시스템 구성 및 활용까지 이어진 연구결과는 검색되지 않는다 [10].

No.	장비명	개발국가
1	Polaris-H	미국
2	HEMI	미국
3	iPIX	프랑스
4	HiSpect	프랑스
5	RadSearch	영국
6	GeGI	미국
7	ORNL HPGe Gamma-ray Imager	미국

표 1. 개발 완료된 감마선 영상장비의 명칭과 해당 장비 원천기술 보유 국가

제 2 절 연구 범위

1. 연구 범위

본 연구에서는 그림 1과 같이 광학 영상장치와 방사성 물질에서 나오는 감마선 이미지를 합성하여 방사성 물질의 위치를 시각화하는 기술을 개발하여 이를 적용한 휴대용 소형 감마선 영상장비 개발을 목표로 하였다. 우선 Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX)-Polimi 전산모사를 통해 부호화 구경의 패턴을 설계하고, 시스템 매트릭스를 획득하여 부호화 구경의 재질과 두께를 선정하였다. 또한, 섬광체의 물리적 특성을 고려하여 섬광체를 선정하였으며 전산모사 결과를 바탕으로 설계된 부호화 구경, 채택된 섬광체와 실리콘 광전자 증배기 (silicon photo-multiplier; SiPM)을 광학 결합한 형태의 검출기 모듈, 검출기 모

들과 센서 모듈에서 발생하는 신호를 처리하기 위한 고속 신호처리 회로로 실제 시스템을 구성하였다. 최종적으로, 실제 시스템의 스펙트럼 특성과 감마선 영상 장비의 성능, 영상 화질을 평가하였다.

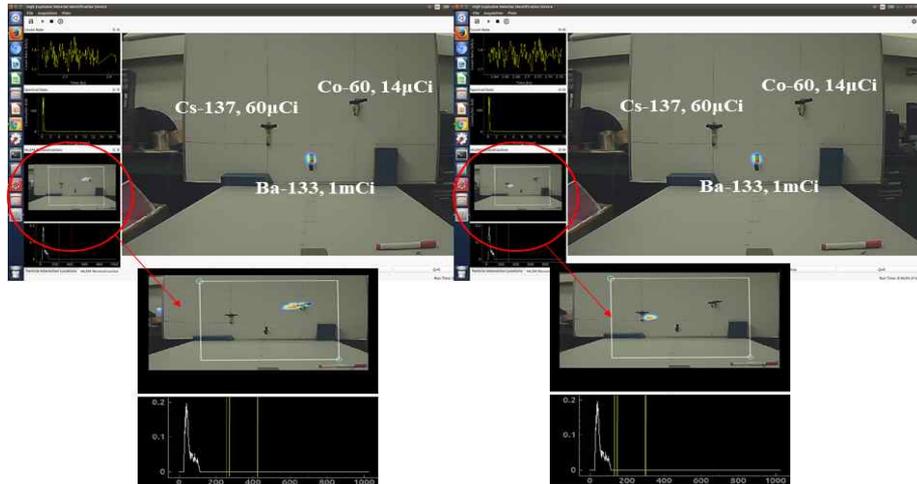


그림 1. 감마선 영상장비에서 획득한 영상 예시

II. 재료 및 방법

제 1 절 MCNPX-Polimi 전산모사

1. 부호화 구경 패턴 설계

부호화 구경은 원래 엑스선 천문학을 관찰하기 위해 개발되었다 [11]. 부호화 구경은 작은 편홀의 분해능을 달성하면서 높은 신호처리량을 유지할 수 있어 편홀 또는 콜리메이터를 사용한 엑스선 영상에서의 열악한 신호 대 잡음 비를 극복하고자 고안되었다. 부호화 구경은 1961년 Mertz and Young에 의해 Fresnel Zone Plate로 처음 제안되었다 [11]. 그 이후 이를 응용하여 random array, Non Redundant Array (NRAs), Uniformly Redundant Arras (URAs), Modified Uniformly Redundant Arrays(MURAs) 순으로 제안되었다 [11-14].

부호화 구경기반 영상 획득방식은 컴프턴 영상 획득방식과 달리 그림 2에서 볼 수 있듯, 기하학적 구조에 기인하여 시야각에 제한이 있다 [15]. 시야각은 주어진 공간에서 방사선을 탐지하는데 걸리는 시간과 연관되므로 부호화 구경기반 감마선 영상장비에서 FCFV (Fully-Coded Field of View)를 확보하는 것이 중요하다. FCFV를 확보하는 방법으로는 다음과 같이 크게 세 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 큰 검출기를 사용하는 것인데, 이는 물리적 측면에서 한계가 있다. 두 번째 방법은 영상을 한번 획득한 뒤 부호화 구경을 90° 회전하여 영상을 획득하여 두 영상을 합성하는 방법이다. 이 방법은 부호화 구경을 회전시켜야 한다는 점에서 기술적인 단점이 있으며, 두 번에 걸쳐 영상을 획득해야 하므로 시간적 단점이 있다. 세 번째 방법은 부호화 구경 패턴을 2 × 2 배열로 복제 및 확장

하여 사용하는 ‘mosaic’ 방법이다 [15]. 따라서, 본 연구에서는 그림 3과 같이 MURA 패턴을 2×2 로 복제 및 확장하여 사용하였다.

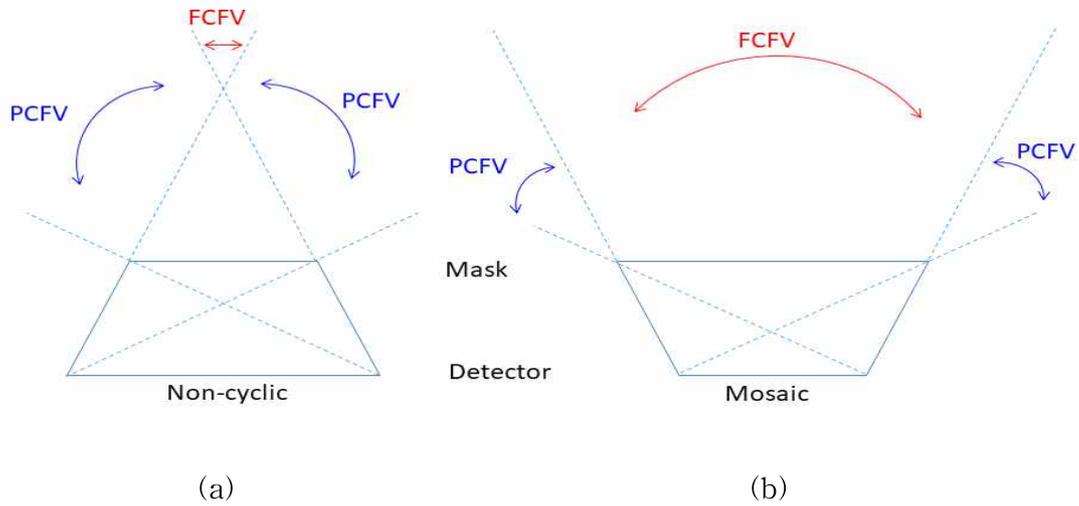


그림 2. 검출기와 선원 간의 거리가 무한일 때, (a) 단일 패턴 마스크와 (b) mosaic 패턴 마스크를 사용했을 때의 FCFV 차이를 비교한 그림. 여기에서 PCFV는 partially-coded field of view를 의미한다.

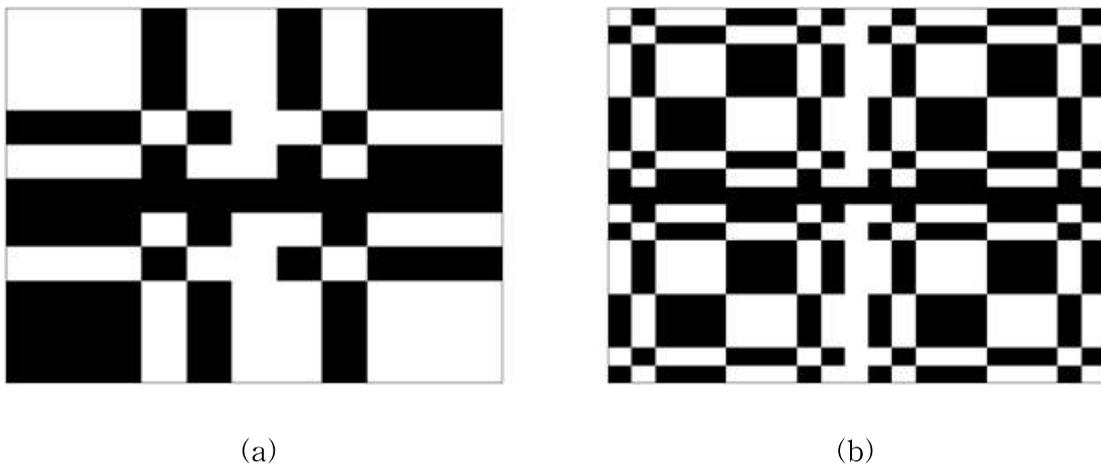


그림 3. (a) 단일 MURA 패턴과 (b) centered mosaic MURA 패턴

2. 복조 패턴 설계

부호화 구경방식은 특수한 형태로 설계된 집속기에 의한 입사 방사선의 기계적 차폐에 기반하여, 투과된 방사선의 변조 패턴을 획득하고 이를 복원하는 과정을 통해 선원의 영상을 획득하는 방식이다. 따라서, 고안된 부호화 구경 패턴에 따라 검출기에서 생성되는 영상 패턴 데이터를 획득하고, 획득된 검출기 데이터와 디자인된 복호화 패턴 (decoding pattern)의 상관관계를 이용하면 선원의 영상을 재구성할 수 있다. 복호화 패턴은 아래 식 2.1를 통해 획득할 수 있다. 검출기에 맺히는 상은 식 2.2와 같은 관계를 갖는다. 결과적으로 획득된 복호화 패턴과 검출기에서 생성되는 영상 패턴은 식 2.3과 같은 관계를 가지므로, 선원의 영상을 재구성할 수 있다 [16].

$$MURA\ pattern * Decoding\ pattern = \delta\ function \quad \text{식 2.1}$$

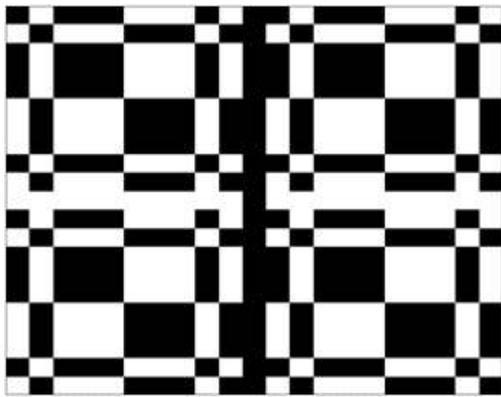
여기에서, *는 convolution을 의미한다.

$$Source * MURA\ pattern = I_{detector} \quad \text{식 2.2}$$

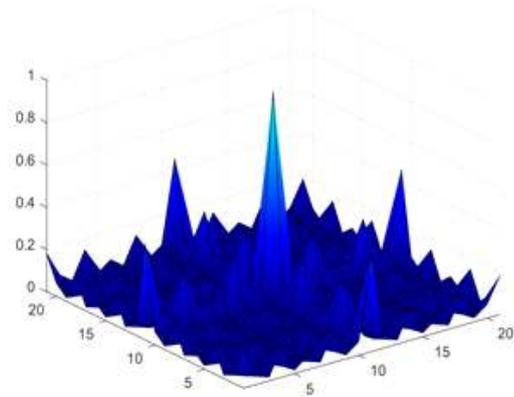
여기에서, $I_{detector}$ 는 검출기에서 획득된 영상이다. 따라서, 고안된 시스템에서 재구성된 방사선원의 영상은 복호화 패턴과 아래 식 2.3과 같은 상관관계를 통해 획득할 수 있다.

$$I_{detector} * Decoding\ pattern = I_{recon} \quad \text{식 2.3}$$

여기에서 I_{recon} 은 재구성된 방사선원 영상을 의미한다. 결과적으로 획득된 복호화 패턴은 그림 4와 같다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 획득된 복호화 패턴과 (b) 부호화 구경 패턴과 복호화 패턴의 상관관계를 통해 획득된 델타 함수

3. 재구성 영상 획득방법

영상재구성 방법으로는 크게 상관 관계법 (cross-correlation)과 반복적 영상 재구성 기법으로 나뉜다. 상관 관계법은 그림 5와 같이 앞서 언급한 복호화 패턴을 통해 재구성된 영상을 획득하는 방법이다. 방사선원의 위치에 따라 검출기에 맺히는 상이 달라지는데 이때 검출기에 맺힌 상을 복호화 패턴과 수학적으로 계산하여 선원의 영상을 획득한다. 반면, 반복적 영상재구성 기법의 하나인 Maximum Likelihood Expectation Maximization (MLEM)은 푸아송 유사 확률 함수의 로그 최대화에 기초한다. 이는 그림 6과 같이 원래 영상과 새로 추정하여 얻어진 영상 간의 비로 표현되는 승인자(approver)를 사용하여 반복 횟수에 따라

영상을 업데이트하여 획득하는 방법이다.

상관 관계법을 이용하기 위해서는 검출기에서의 방사선원에 대한 패턴 정보가 정확해야 하므로 영상재구성을 위해 충분한 데이터가 필요하므로 약한 세기의 선원일 경우 긴 데이터 획득시간이 필요하다. 반면, MLEM과 같은 반복적 영상재구성 기법은 전산 모사를 이용하여 유효영상 범위의 선원 위치들에 대한 검출기 패턴 영상을 이용하게 되므로 적은 데이터량으로도 검출기 패턴을 만들 수 있어 선원의 세기가 약한 환경에서 상관 관계법보다 빠르게 방사선 영상을 획득할 수 있다. 또한, 동시에 핵종 판별 및 선량 계측이 이루어질 수 있다는 장점이 있다. 그러나 반복 횟수에 따라 재구성 영상 잡음이 증가할 수 있으므로 최적의 반복 횟수를 설정해야 한다.

그림 7은 상관 관계법과 MLEM 방법을 각각 이용하여 재구성된 감마선 영상이다. (a)는 부호화 구경 자체의 기하학적 구조로 주변에 잡음이 생기는 것을 확인할 수 있다. 반면, MLEM 기법을 이용하면 (b)에서 볼 수 있듯 영상 잡음 정도가 현저히 줄어들었음을 확인할 수 있다.

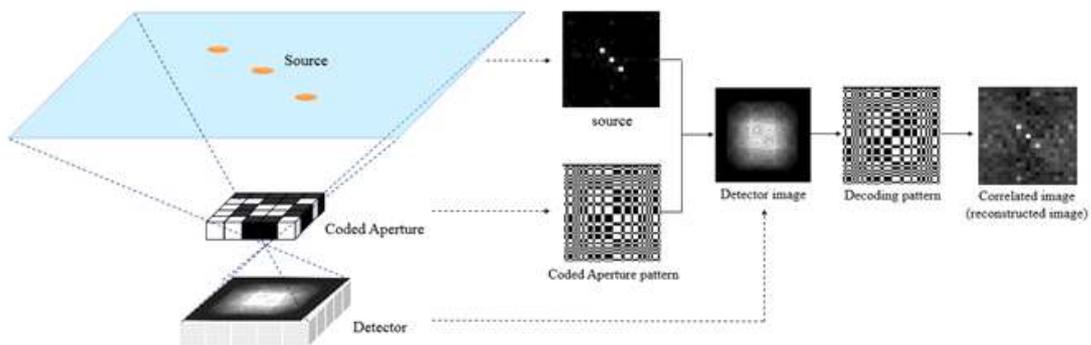


그림 5. 상관 관계법을 이용하여 선원의 영상을 재구성하는 과정 예시

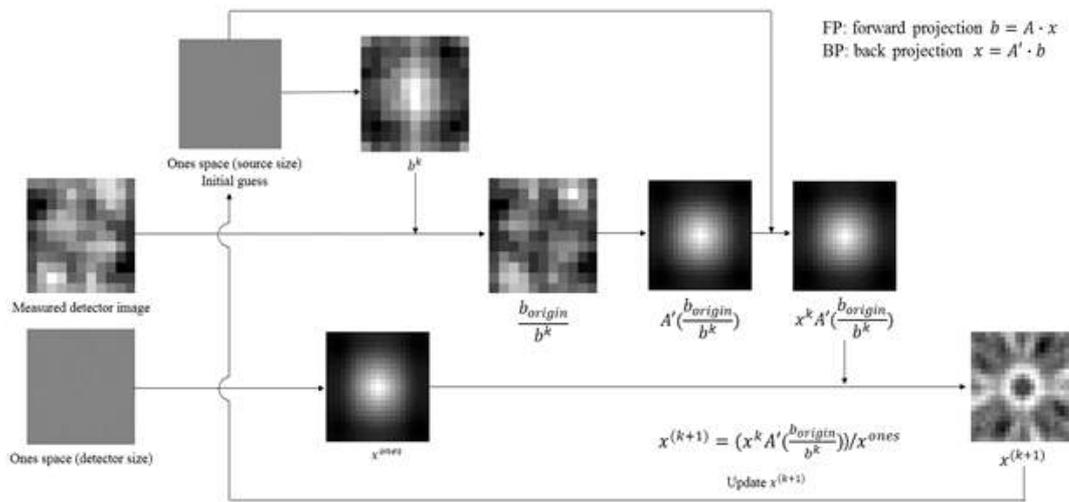
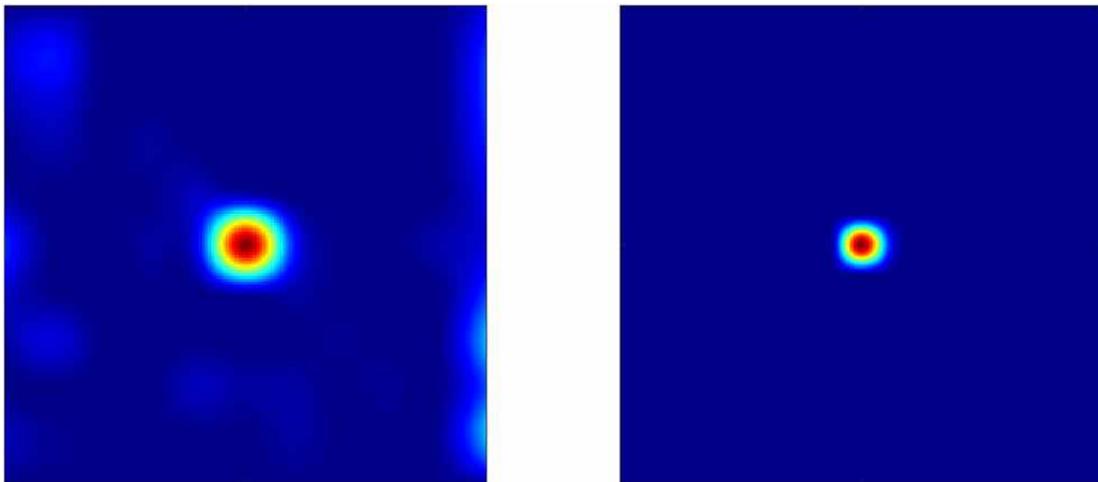


그림 6. MLEM 기법을 이용하여 선원의 영상을 재구성하는 과정 예시 [16]



(a)

(b)

그림 7. (a) 상관 관계법을 이용하여 재구성한 감마 선원 영상과 (b) MLEM 기법을 이용하여 재구성한 감마 선원 영상. 이때, 감마 선원과 검출기 간의 거리는 100cm로 설정하였다.

4. 전산모사 조건

전산모사는 Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX)-Polimi를 사용하여 결과를 도출하였다. MCNPX-Polimi는 선원의 위치, 크기, 에너지 및 기타 관련 매개 변수가 지정되어 있을 때, 검출기에서 반응이 측정되는 상황을 설명할 때 사용되며, coded aperture imaging(CAI) system은 부호화 구경 영상시스템에서 방사선과 디자인된 시스템 사이의 물리적 현상을 계산하기 위해 만들어진 방법이다 [16]. MCNP 기반 시스템 매트릭스는 부호화 구경 영상시스템의 시스템 응답 함수로 시스템의 기하학적 구조를 재질이나 물체 또는 각 셀에 대해 자세하게 기록되어 있다. 이는 Matlab 스크립트로 작성되었으며, 이 스크립트는 MCNP에 대한 입력 파일을 작성하고 반복적 영상재구성에 대한 시스템 응답 함수를 생성하기 위해 사용된다. 생성된 시스템 응답 함수를 바탕으로 매개 변수와 항목별 해당하는 변수들을 이용하여 부호화 구경의 디자인과 최소 검출 선량을 도출하였다. 전산모사 조건은 표 2와 같다.

선원	점 선원, ^{137}Cs
선원과 검출기 간 거리	100cm
부호화 구경 픽셀 크기	4.105mm
부호화 구경 요소 수	11
부호화 구경 패턴	centered mosaic MURA
부호화 구경 재질	텅스텐 (19.3 g/cm^3)
검출기 크기	5.02cm × 5.02cm

표 2. MCNPX-Polimi 전산모사 조건

제 2 절 하드웨어 구성

1. 섬광체 및 센서 선정

본 연구에서는 방사선원의 위치를 판별할 수 있도록 픽셀화된 섬광체와 위치 민감형 센서를 결합하여 검출부를 구성하고자 하였다. 감마선 영상장비에 사용되는 섬광체는 광 출력이 우수하여야 하며, 픽셀화에 용이하도록 흡습성이 없어야 한다. 또한, 에너지 분해능과 같은 스펙트럼 특성이 우수해야 하며, 방사선원의 신속하고 정확한 위치판별을 위해 민감도와 공간 분해능이 우수하여야 한다. 에너지 분해능과 공간 분해능은 사용되는 섬광체의 밀도, 유효 원자번호, 광 수집 효율, 광 생성 효율 등의 영향을 받는다. 따라서 CsI(Tl), LYSO(Ce), LaCl₃(Ce), GAGG(Ce), NaI(Tl), BGO 섬광체의 특성을 표 3과 같이 비교하여 실제 시스템에 적용할 섬광체를 선정하였다. 표의 데이터와 참고문헌 17을 참고하여, 실제 시스템에는 GAGG(Ce)를 채택하여 적용하였다. GAGG(Ce)은 높은 광 수율을 가지며 붕괴시간이 빠르고, 방사선 저항성이 우수해 고선량에서도 사용할 수 있다는 장점을 가진다 [18]. 채택된 GAGG(Ce)은 그림 8과 같이 4mm × 4mm × 20mm 크기의 총 144개 픽셀을 갖는 12 × 12 어레이 형태이다.

SiPM은 기존의 광 증배 관 (photo-multiplier; PMT)에 비해 소형이며 자기장에 민감하지 않고 높은 광 검출 효율을 갖는다. 또한, 광센서에서 빛을 쬐지 않았음에도 발생하는 암전류(dark current)의 발생 비율이 낮은 특성이 있다. 특히, SiPM은 상대적으로 낮은 전압에서 운용되지만 $10^5 - 10^6$ 수준의 높은 gain을 갖는다. 이러한 장점으로 많은 연구진에서 SiPM 어레이를 활용하여 검출 효율을 증가시켜 의료 영상 및 감마선 영상 분야에 적용하여 연구하고 있다.

이 연구에 사용된 SiPM 어레이는 SensL Techonogy 사의

C-series(ArrayC-30035-144P)로 Hamamatsu Photonics 사의 SiPM보다 2배 이상 낮은 전압에서 운용 가능하다는 장점이 있다. 이 SiPM의 각 픽셀 피치는 4.2 mm, 활성 영역은 3mm × 3mm이며, 각 마이크로 셀의 크기는 35 μ m이다. C-series는 온도 안정성과 높은 출력 균일성, 그리고 자외선에서부터 가시광까지의 파장에서 단일 광 민감성이 우수하고 420nm의 파장에 최적화되어있다 [19]. SiPM의 외관은 다음 그림 9와 같다.

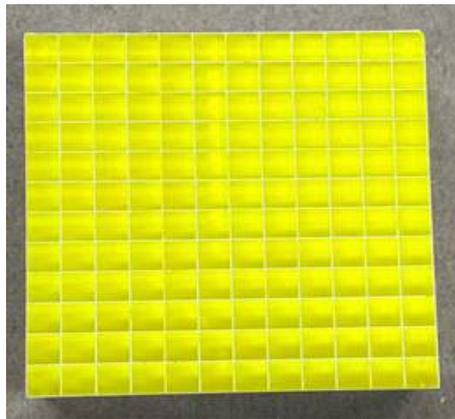


그림 8. 채택되어 실험에 사용된 GAGG(Ce). 섬광체의 각 픽셀 사이에는 반사체로써 0.2mm 두께의 BaSO₄가 위치하며, 가장자리와 바닥 부분에는 0.3mm 두께로 위치한다. 양옆과 바닥 면은 알루미늄 포일로 감싸져 있다.

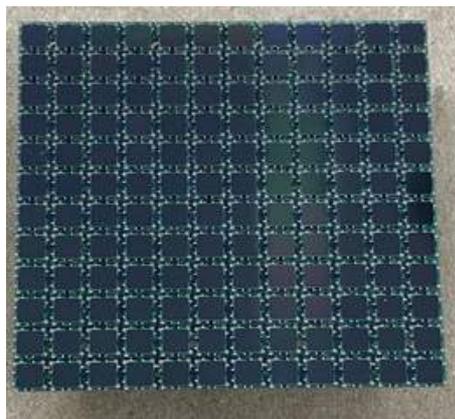


그림 9. 실험에 사용된 SiPM 어레이의 외관. 전체 면적은 50.2mm × 50.2mm이다.

	Unit	CsI(Tl)	LYSO(Ce)	LaCl ₃ (Ce)	GAGG(Ce)	NaI(Tl)	BGO
density	g/cm^3	4.51	7.2	3.85	6.63	3.67	7.13
Effective atomic number (Z_{eff})	N/A	54	65	59.5	54.4	50	73
Wavelength of emission peak	nm	550	420	350	520	415	480
Primary decay time	ns	1,050	40	28	87 (90 %)/ 255(10 %)	230	317
Light output	Photons/M eV	54,000	29,000	49,000	50,000	45,000	8,500
Hygroscopic	Yes/No	Slightly	No	Yes	No	Yes	No
Hardness	Mho	2	5.8	3	8	2	5

표 3. 섬광체 별 특성 비교 [18]

2. 신호처리 회로 구성

섬광체 어레이와 부호화 구경을 사용한 감마선 영상신호를 획득하기 위한 전자회로 장치를 구성하였다. 이 장치는 가능한 작은 부피를 가지도록 설계되었다. 그림 10과 같이 전치 증폭기를 포함한 아날로그 보드, A/D 변환기 (analog to digital converter; ADC)를 포함하는 ADC+ 디지털 보드, 전원 보드로 구성하였다. 획득된 원시 자료 (raw data)는 실시간으로 외부 영상처리 장비(노트북 또는 데스크톱)로 전송하고 외부 영상처리 장비에서 소프트웨어를 사용하여 감마선 영상 재구성하도록 구성하였다.

부호화 구경을 통과한 감마선은 가로, 세로가 12×12 로 총 144개의 픽셀화된 섬광체에서 검출된다. 아날로그 보드에서 섬광체에서 감마선과 반영하여 출력되는 빛은 같은 면적과 같은 개수의 센서를 갖는 SiPM 어레이에서 전류 신호로 바뀌게 되며, 아날로그 보드의 회로도도 그림 11과 같다. 이때 전류 신호의 크기는 섬광체에서 검출된 감마선의 에너지와 비례하여 SiPM에 제공되는 바이어스 전압에 따라 광전변환 gain을 갖는다.

디지털 보드에서는 SiPM의 전류 신호를 처리하여 감마선의 에너지와 검출 위치를 디지털 값으로 만들기 위해 그림 12와 같이 X축과 Y축 방향으로 12개씩 합성하여 신호의 개수를 X, Y 각각 12 개로 만든다. 이때, 서로 합성되어있는 채널의 신호들은 모두 더해지게 된다. 이렇게 합성된 신호들은 24개의 트랜스 임피던스 전치 증폭기 (transimpedance preamplifier)로 증폭한다. 제작된 하드웨어는 100 Ω 의 트랜스 임피던스 gain을 가지도록 설계하였다. Anger logic은 X, Y 축의 각각 12개 번호 (1 - 12까지)를 순서대로 증폭하여 모두 더하는 회로이다. + 신호의 경우 크기대로 증폭하고, - 신호의 경우 (13 - (해당 번호))의 크기로 증폭하여 더한다. X, Y에서 감마선이 검출될 경우 전치 증폭기 신호의 크기가 A라고 가정하면 $Ex+$, $Ex-$, $Ey+$ 와 $Ey-$ 는 다음과 같다.

$$E_{x+} = A * X, E_{x-} = A * (13 - X) \quad \text{식 2.4}$$

$$E_{y+} = A * Y, E_{y-} = A * (13 - Y) \quad \text{식 2.5}$$

여기에서 E_x 는 x축에서의 감마선 에너지이고, E_y 는 y축에서의 감마선 에너지이다. 따라서 감마선의 에너지는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$E = E_{x+} + E_{x-} = E_{y+} + E_{y-} = A * 13 \quad \text{식 2.6}$$

감마선의 검출 위치는 다음과 같다.

$$P_x = (E_{x+} - E_{x-}) / E = (2 * X - 13) / 13 \quad \text{식 2.7}$$

$$P_y = (E_{y+} - E_{y-}) / E = (2 * Y - 13) / 13 \quad \text{식 2.8}$$

여기에서, P_x 는 x축에서의 감마선 검출 위치이고, P_y 는 y축에서의 감마선 검출 위치이다.

디지털 신호 처리 회로에서는 입력된 파형으로부터 검출기 신호의 크기와 검출된 위치를 추출한다. 측정된 데이터는 Field Programmable Gate Array (FPGA) 내부의 메모리를 사용하여 데이터를 저장한 후 바로 TCP/IP 인터페이스로 전송하도록 하였다. 또한, 디지털 신호 처리 회로에서는 SiPM 동작에 필요한 바이어스 전압을 조정하고, 온도에 따른 SiPM의 gain을 보정하기 위해 온도 센서의 값을 읽어 들일 수 있게 하였다. 전체 시스템의 하드웨어 구성은 그림 13과 같다.



(a) (b) (c)

그림 10. 연구에 사용된 전자회로 구성. (a) 아날로그 보드, (b) ADC+ 디지털 보드, (c) 전원 보드

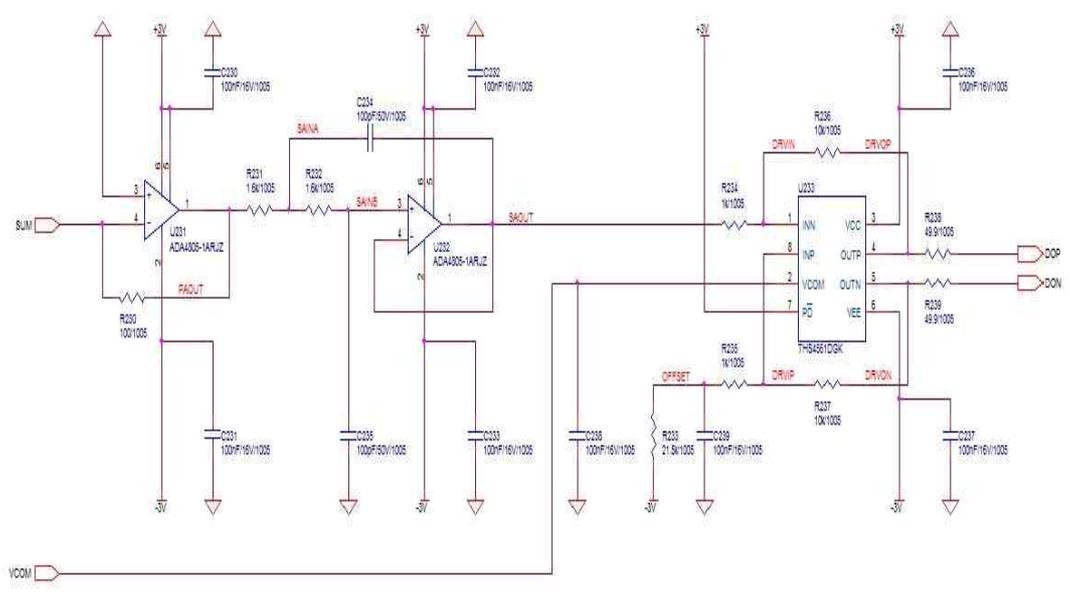


그림 11. 감마선 영상장비의 아날로그 회로도

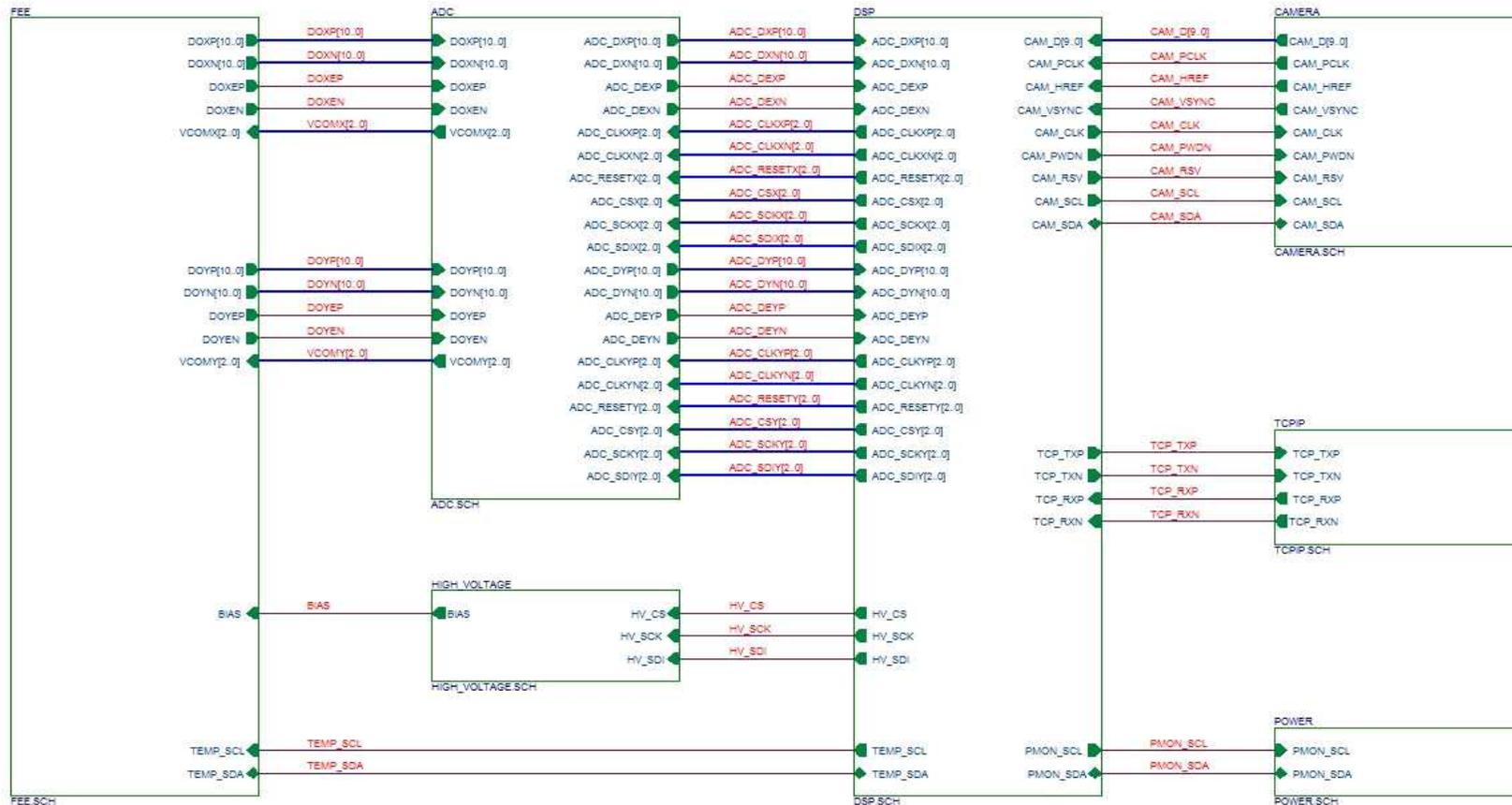


그림 12. 감마선 영상장비의 디지털 보드 회로 블록도

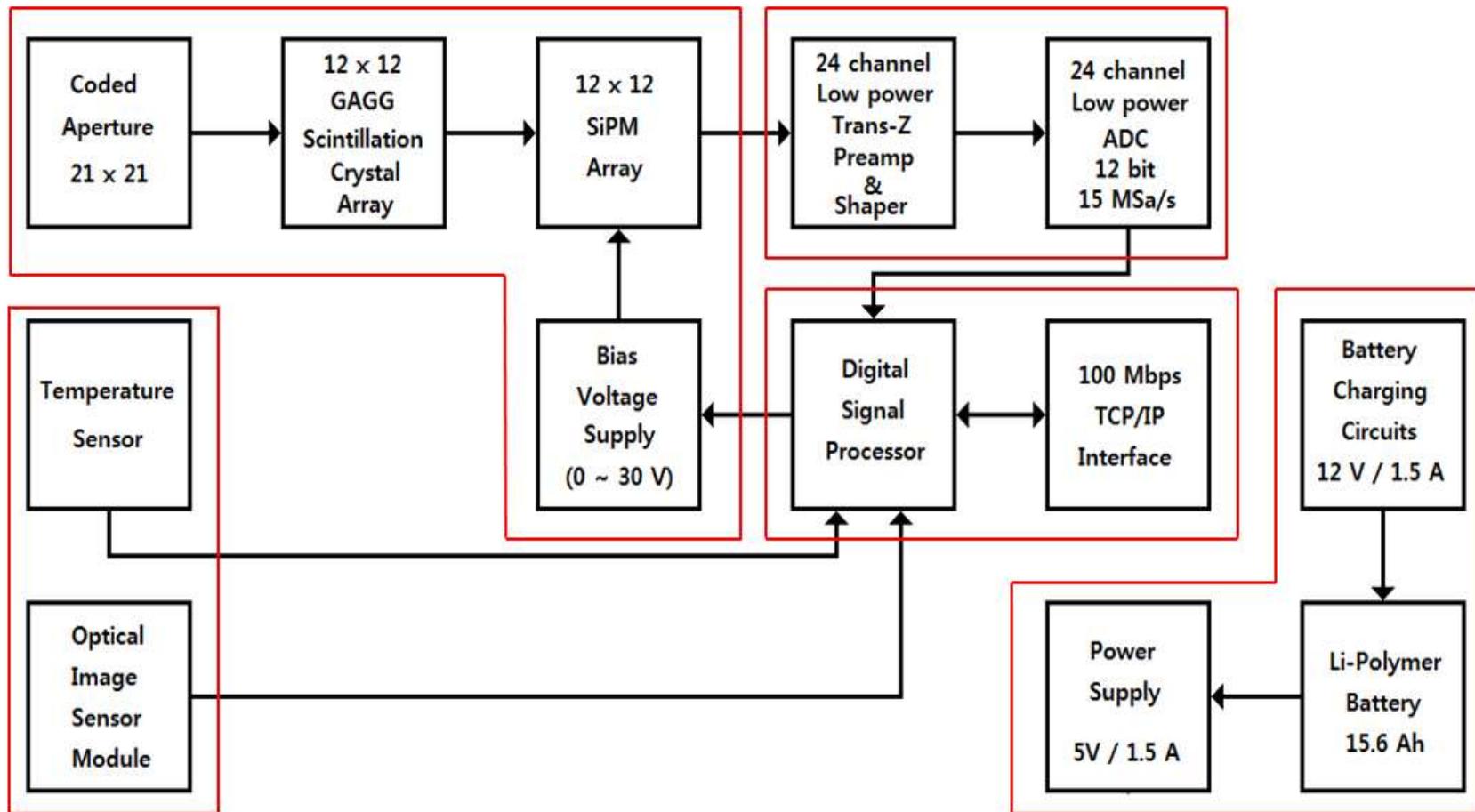


그림 13. 부호화 구경기반 감마선 영상장비의 구성도

제 3절 영상 화질 평가 방법

영상 화질 평가 지표로는 peak signal-to-noise ratio (PSNR)과 normalized mean-square error (NMSE), structure similarity (SSIM), full width at half maximum (FWHM)을 사용하였다. PSNR과 NMSE, SSIM, FWHM은 방사선 영상뿐 아니라 다양한 영상의 화질 평가에 사용되는 요소로, 영상 화질 저하와 영상 잡음 생성의 평가 지표로 활용된다 [20]. PSNR은 다음 식으로 계산되며, 일반적으로 PSNR이 30dB 이상이면 재구성된 영상의 화질이 우수하다고 판단한다 [21].

$$PSNR(f,g) = 10 \log \left(\frac{\max(f)^2}{\sqrt{MSE(f,g)}} \right) \quad \text{식 2.9}$$

여기에서 f 가 기준 영상이고 g 가 재구성된 영상이며 두 영상 모두 8 비트 영상 일 때, MSE는 평균 제곱 오차이다. 영상의 크기가 $M \times N$ 일 때 MSE는 아래 식으로 계산할 수 있다 [22].

$$MSE(f,g) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{ij} - g_{ij})^2 \quad \text{식 2.10}$$

두 영상 간 차이가 없다면 NMSE는 0이 되며, 두 영상의 차이가 적을수록 그 값은 0에 가까워진다. NMSE는 다음 식을 통해 계산된다 [23].

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} (f_{ij} - g_{ij})^2}{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} (f_{ij})^2} \quad \text{식 2.11}$$

SSIM은 기준 영상과 재구성된 영상 간의 구조적 유사도를 판단하는 지표이다. 두 영상이 구조적으로 유사할수록 1에 가까운 값을 가지며, 완전히 구조적으로 동일할 경우 1에 수렴한다. SSIM은 다음 식을 통해 계산된다 [24, 25].

$$SSIM(f, g) = \frac{(2\mu_f\mu_g + C_1)(2\sigma_{fg} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_g^2 + C_1)(\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + C_2)} \quad \text{식 2.12}$$

여기에서 $\mu_f, \mu_g, \sigma_f, \sigma_g, \sigma_{fg}, C_1, C_2$ 는 아래 식으로 계산할 수 있다.

$$\mu_f = \sum_{i=1}^N w_i f_i \quad \text{식 2.13}$$

$$\mu_g = \sum_{i=1}^N w_i g_i \quad \text{식 2.14}$$

$$\sigma_f = \left(\sum_{i=1}^N w_i (f_i - \mu_f)^2 \right)^{1/2} \quad \text{식 2.15}$$

$$\sigma_g = \left(\sum_{i=1}^N w_i (g_i - \mu_g)^2 \right)^{1/2} \quad \text{식 2.16}$$

$$\sigma_{fg} = \sum_{i=1}^N w_i (f_i - \mu_f)(g_i - \mu_g) \quad \text{식 2.17}$$

$$C_1 = (k_1 L)^2 \quad \text{식 2.18}$$

$$C_2 = (k_2 L)^2 \quad \text{식 2.19}$$

여기에서, μ_f, μ_g 는 평균 밝기를 나타내며, $\sigma_f, \delta_g, \delta_{fg}$ 는 기준 영상과 재구성된 영상에 대한 이산 형식의 편향되지 않은 추정치이다. C_1, C_2 는 분모가 0에 수렴되지 않게 하도록 사용된 값으로, k_1, k_2 는 각각 0.01, 0.03의 값을 가지며, L 은 픽셀값의 동적 영역 (dynamic range)을 의미한다.

Ⅲ. 결과 및 논의

제 1절 전산모사 결과

1. 부호화 구경 두께 최적화

MCNPX-Polimi 전산모사를 통해 최적의 부호화 구경 두께를 도출하였다. 부호화 구경의 두께가 너무 얇으면 백그라운드를 차폐하지 못해 영상에 잡음이 생기며, 두께가 너무 두꺼울 경우 부호화 구경 내에서의 산란이 일어나 영상에 잡음이 발생한다. 따라서, 각 에너지에 따라 부호화 구경의 두께를 0.1 ~ 30cm 까지 늘려가며 재구성 영상의 화질을 평가하였다. PSNR, NMSE, SSIM 지표별 평가결과는 그림 14와 같다. (a)는 PSNR 평가결과로 100keV의 저에너지 광자는 영상재구성 기법과 관계없이 2 ~ 5cm 일 때, 최댓값을 갖는 것으로 확인된다. 662keV 와 1332keV의 고에너지 광자의 경우에는 12 ~ 16cm 일 때, 가장 우수한 PSNR을 갖는 것으로 확인된다. 그러나 상관관계법은 선원의 에너지에 따라 최대값이 23 ~ 25dB 수준으로 MLEM 기법의 최댓값인 75 ~ 230dB에 비하면 낮은 수준이다. 앞서 언급했듯이 재구성된 영상 화질이 우수하다고 판단하는 30dB 수준에 미치지 못하는 수준이며, MLEM의 경우 부호화 구경의 두께가 2cm 이상이면 PSNR 측면에서 우수한 화질을 갖는 영상의 획득이 가능하다고 판단된다.

(b)는 NMSE 평가결과로 선원의 에너지에 따라 상관 관계법은 부호화 구경의 두께가 0 ~ 2.5cm 일 때 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6}$ 의 최솟값을 갖는다. MLEM 기법은 동일한 두께에서 $1 \times 10^{-24} \sim 1 \times 10^{-14}$ 의 최솟값을 갖는다. 상관 관계

법을 통해 영상을 재구성하였을 때, 부호화 구경의 두께가 증가함에 따라 NMSE가 증가하는 양상을 보였다. MLEM 기법을 통해 영상을 재구성하였을 때에는 저에너지 광자의 경우 2cm 부근에서 최솟값을 가졌으며, 662keV와 1332keV의 고에너지 광자의 경우 12 ~ 16cm 부근에서 최솟값을 갖는 것으로 확인되었다.

(c)는 SSIM 평가결과로 상관 관계법과 MLEM 기법 모두 입사 광자의 에너지와 관계없이 부호화 구경의 두께에 따라 증가하다가 일정한 두께 이상이 되면 SSIM 값이 저하되는 것을 확인할 수 있었다. MLEM 기법의 경우 입사 광자의 에너지와 무관하게 부호화 구경의 두께가 2 ~ 18cm 인 부근에서 1에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 상관 관계법의 경우 1에 수렴하지는 못했으며 광자의 에너지에 따라 0 ~ 12cm에서 최댓값을 갖는 것으로 확인되었다.

따라서 PSNR, NMSE, SSIM의 세 가지 영상 화질 평가 지표를 바탕으로 판단 결과, 부호화 구경의 재질이 텅스텐이고 패턴이 centered mosaic MURA일 때의 최적 두께는 2cm로 판단된다. 이를 바탕으로 실제 시스템에 적용해 영상을 획득하여 부호화 구경의 두께를 0.5cm씩 증가시켜가며 두께가 0.5 ~ 4.5cm일 때의 감마선 영상을 획득하여 화질을 평가하였다. PSNR, NMSE, SSIM에 대한 화질 평가결과는 그림 15와 같다. 실제 시스템에 적용 결과 2.5cm에서 가장 최고의 성능을 내는 것으로 확인되었다. 이는 실제 실험 환경에서는 백그라운드 존재하기 때문에 이러한 결과가 도출된 것으로 판단된다. 그러나, PSNR, NMSE, SSIM 세 가지 평가 지표 모두 부호화 구경의 두께가 2 ~ 3cm일 때 우수한 결과를 보이고, 텅스텐의 밀도가 높아 물리적인 측면을 고려하였을 때 2cm 두께가 여러 측면에서 최적의 두께로 판단하여 실제 시스템에 적용하였다. 부호화 구경은 그림 16과 같이 3D 프린터로 출력한 출력물에 텅스텐 조각을 끼워 사용하는 방식을 채택하였으며, 후면부에는 섬광체를 감쌀 수 있도록 차폐용 텅스텐을 끼워 사용한다.

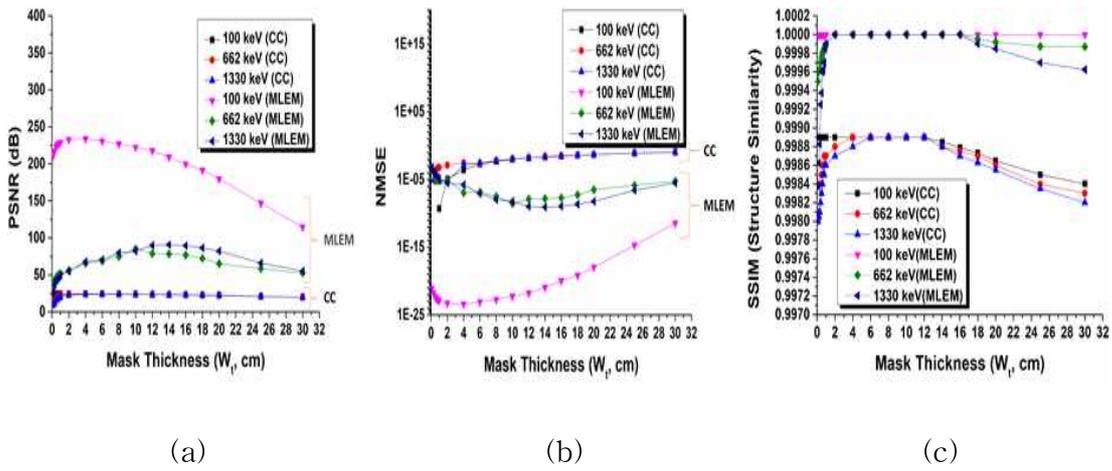


그림 14. 부호화 구경 두께, 입사 감마선의 에너지, 영상재구성 기법에 따른 (a) PSNR , (b) NMSE, (c) SSIM의 값을 나타낸 그래프 [26]

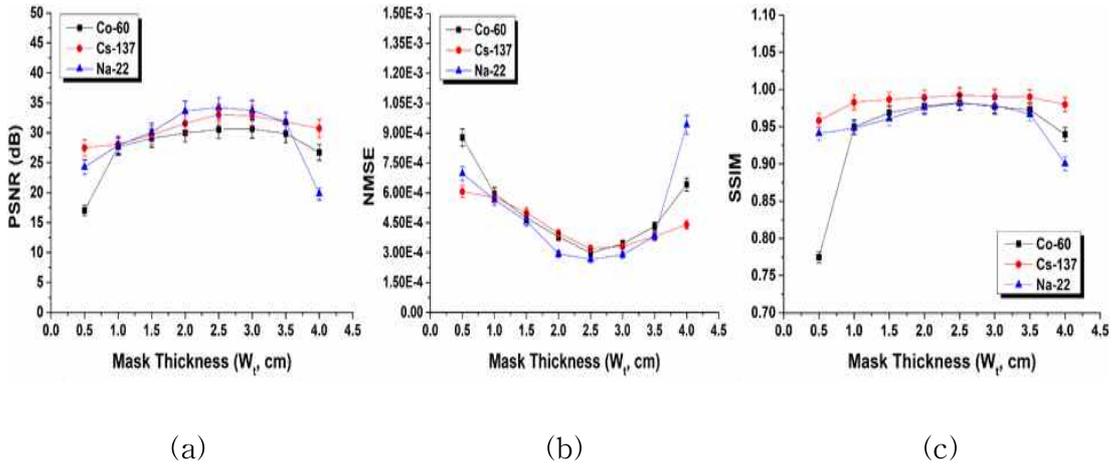


그림 15. 실제 시스템에서 부호화 구경 두께, 입사 감마선의 에너지에 따른 (a) PSNR , (b) NMSE, (c) SSIM의 값을 나타낸 그래프 [26]



(a)



(b)

그림 16. 3D 프린터로 출력한 출력물에 텅스텐 조각을 끼워 완성한 부호화 구경의 (a) 전면부와 (b) 텅스텐 차폐체로 둘러싼 후면부

2. 최소 검출 선량 도출

방사선 반응을 전산 모사할 때 photon-flux 패턴은 검출기 픽셀에 저장된 카운트 수에 영향을 준다. 실시간 재구성 영상을 획득하기 위해 계수되는 광자 수는 해당 동위원소의 반감기보다 훨씬 짧은 시간에 걸쳐 이루어진다. 원래 영상과 유사한 수준의 영상을 제공할 수 있는 최소 입사 감마 플럭스가 있는 경우 아래의 식을 통해 이론적으로 최소 검출 플럭스 (Minimum detectable flux; MDF)를 정의할 수 있다. 그리고 선원의 위치, 크기, MDF를 비롯한 다른 매개 변수를 알면 다음 식을 통해 최소 검출 선량 (Minimum detectable activity; MDA)을 계산할 수 있다.

$$MDA = N(E) \frac{4\pi}{\Omega p(E) f T} \quad \text{식 3.1}$$

$$N(E) \geq L_c, L_c = 2.326N_B \quad \text{식 3.2}$$

여기에서, E는 선원에서 방출되는 광자의 에너지이고, N(E)는 검출기에 입사되는 방사선의 수이다. Ω 은 입체 각 (solid angle)이고, p(E)는 감마선 방출 확률, f는 부호화 구경에서 열려있는 부분의 비이고, N_B 는 백그라운드 카운트 수이다. critical level이라고 부르는 L_c 는 가양성 확률 (false-positive probability)이 5% 이하임을 보장한다 [27]. 검출기와 선원과의 거리가 d 일 때, 치수가 a × b인 사각형 검출기에서의 입체각은 다음 식을 따른다.

$$\Omega(a,b,d) = 4\arccos\sqrt{\frac{1+\alpha^2+\beta^2}{(1+\alpha^2)(1+\beta^2)}} \quad \text{식 3.3}$$

여기에서 $\alpha \equiv a/(2d)$ 이고 $\beta \equiv b/(2d)$ 이다. 검출기와 선원 간의 거리가 1.08 m 일 때 GAGG(Ce)에서의 입체 각은 0.00216으로 계산되었다.

이를 기반으로 MCNPX-Polimi를 이용하여 입사 광자의 에너지가 662 keV이고, 부호화 구경의 패턴이 centered mosaic MURA, 재질이 텅스텐, 두께가 2 cm 인 조건에서 영상 화질 평가를 통해 최소 검출 선량을 도출하였다. 전산모사 결과는 그림 17과 같으며, 입사 광자의 수가 증가할수록 영상의 화질이 개선되는 것을 확인할 수 있다. MLEM 기법을 사용하였을 때 PSNR과 NMSE, SSIM 측면에서 종합하여 보았을 때, 입사 광자의 수가 2000개 이상일 때 우수한 화질의 방사선원 영상을 획득할 수 있음을 확인하였다.

전산모사 결과를 바탕으로 실제 662keV의 ^{137}Cs 선원을 가지고 입사 감마선 수에 따른 PSNR, NMSE, SSIM 결과를 도출하였다. 실험 결과와 전산모사 결과를 비교한 그래프는 그림 18과 같으며, 실제 실험 결과가 전산모사 결과보다 좋지 못한 결과를 가지는 것을 확인하였다. 이는 앞서 언급했던 이유와 마찬가지로

실제 실험 환경에서는 백그라운드가 존재하기 때문에 전산모사 결과보다 영상의 화질이 저하되었다.

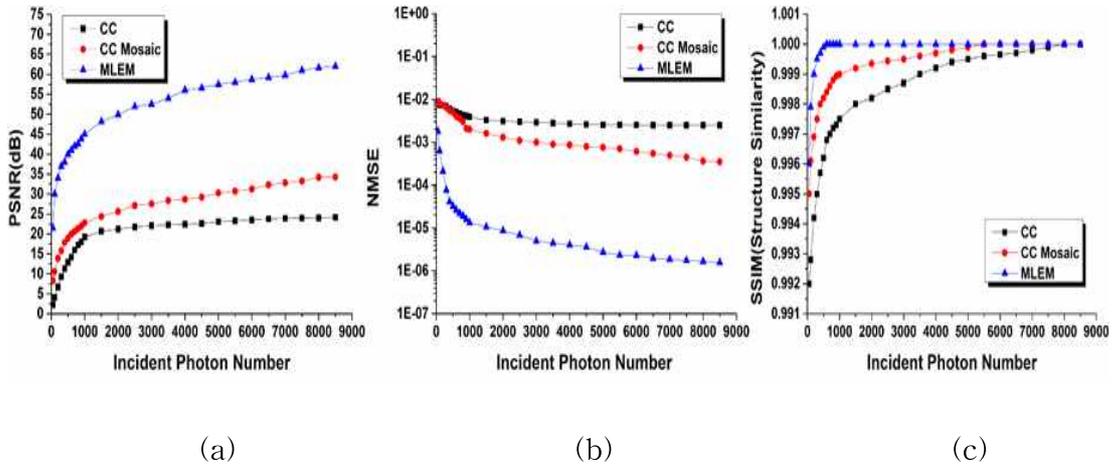


그림 17. 입사 감마선의 수의 증가에 따른 (a) PSNR, (b) NMSE, (c) SSIM 그래프 [26]

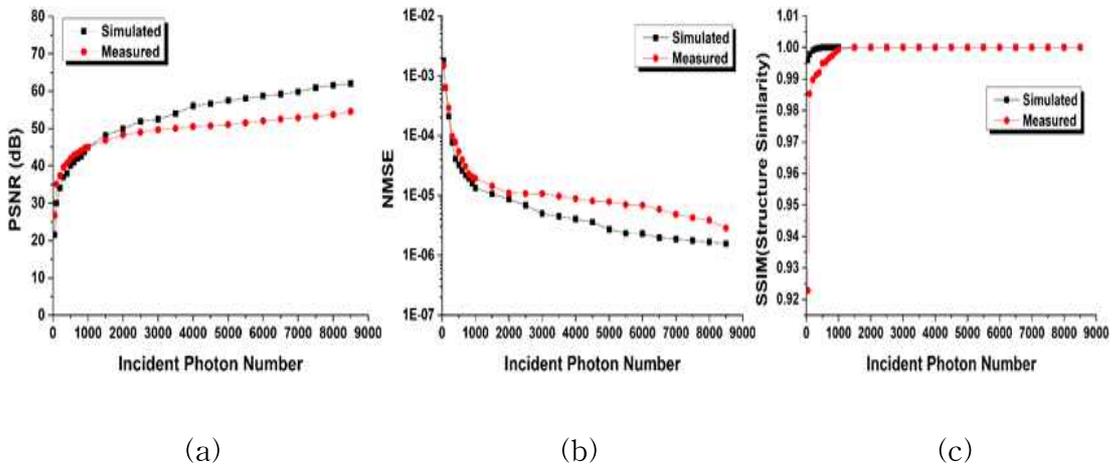


그림 18 입사 광자의 수에 따른 전산모사 결과와 실제 실험 결과의 (a) PSNR, (b) NMSE, (c) SSIM 비교 그래프 [26]

제 2절 시스템 보정

1. gain 보정

SiPM 어레이의 개별 셀은 각각 다른 gain을 가진다. 이렇게 각 셀이 다른 gain을 가지게 되면, 셀 별 피크 에너지에 대한 채널 수가 다르므로 에너지 분해능과 위치 분해능이 저하된다. 따라서 우수한 에너지 분해능과 위치 분해능에 도달하기 위해서는 각기 다른 SiPM 어레이 개별 셀의 gain을 보정해주어야한다. gain 보정을 위해 부호화 구경 마스크를 제거하고 ^{137}Cs 선원과 검출기 간의 거리를 25cm 떨어뜨려 놓고 에너지 스펙트럼을 획득하였다. 이때, 인가전압은 28V로 설정하였다. gain 보정 전과 후의 ^{137}Cs 의 에너지 스펙트럼을 비교한 결과는 그림 19와 같다. (a)는 gain 보정 전 스펙트럼, (b)는 개별 셀에 대한 스펙트럼, (c)는 보정 후 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯 실험값이 각각 48.43, 28.21, 32.51로 gain 보정을 해준 값이 개별 셀의 실험값에 근접해짐을 알 수 있다. 또한, 보정 전과 후의 피크 대 밸리 비는 각각 6.1과 15.49였으며, 피크 대 컴프턴 비는 4.94, 6.32로 보정 후 에너지 분해능을 포함한 스펙트럼 특성이 향상된 것을 확인하였다.

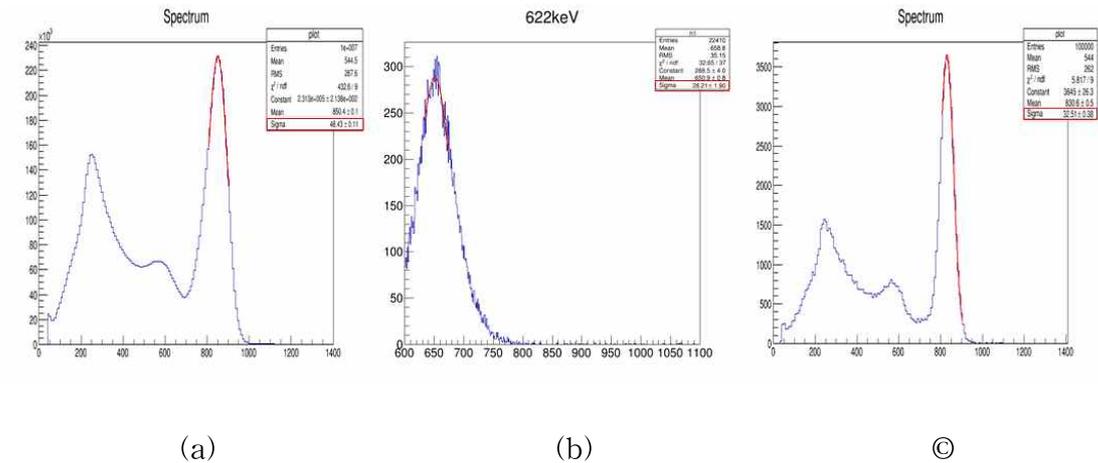


그림 19. (a) gain 보상 전 스펙트럼, (b) 개별 셀에 대한 스펙트럼, (c) 보상 후 스펙트럼 결과. 선원은 ^{137}Cs 점 선원을 사용하였다.

2. 호모그래피

한 평면과 다른 평면의 배율(scale factor)이 같을 때, 한 평면을 다른 평면에 투영시키면 투영된 대응점들 사이에 변환 관계가 성립한다. 이를 수학적으로 나타내면 아래 식으로 표현할 수 있다 [28].

$$s \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{식 3.4}$$

여기에서 s 는 scale factor, x' , y' 은 한 평면상에서의 좌표이고, x , y 는 투영된 상에서의 좌표이다. 여기에서 행렬 H 는 유일하다. 따라서, 임의의 네 쌍 이상의 좌표를 이용하여 구한 H 를 다른 모든 좌표에서도 동일하게 적용 가능하다.

그림 20에서 볼 수 있듯, 방사선 영상을 광학 영상에 매핑하였을 때, 방사선 영상에서 획득한 선원의 위치와 광학 영상에 나타나는 방사선원의 위치가 차이

가 나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 시스템과 선원과의 거리를 2 m로 두고 9개의 좌표를 획득해 광학 영상과 감마선 영상의 매핑에 필요한 행렬 H 를 도출하였다. 도출한 행렬 H 를 적용하여 영상을 획득하였을 때, 아래 그림 21에서 볼 수 있듯 감마선 영상과 광학 영상의 매핑이 정확한 위치에 되는 것을 확인하였다.



그림 20. 호모그래피 적용 전 GUI 영상. 점선은 광학 영상에 촬영한 선원의 위치이고, 가운데 흰색으로 표시된 것이 감마선 영상에서 획득한 선원의 위치이다.

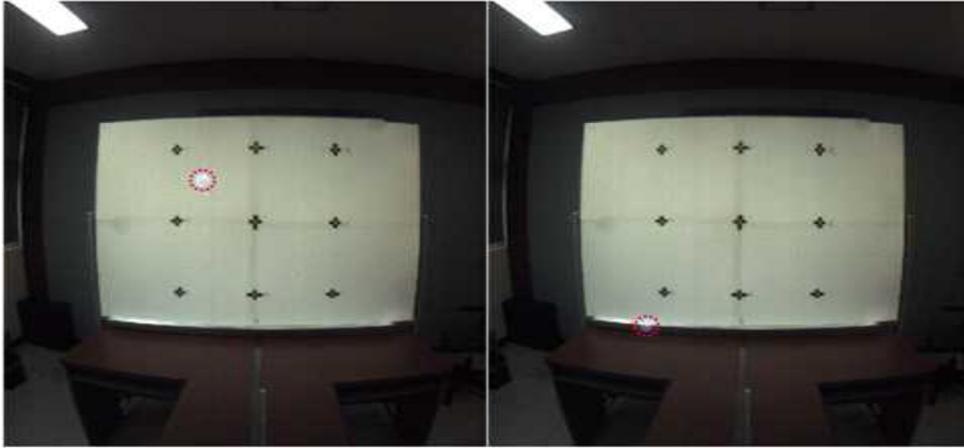


그림 21. 호모그래피 적용 후 GUI 이미지. 점선은 광학 영상에 촬영한 선원의 위치이고, 가운데 흰색으로 표시된 것이 감마선 영상에서 획득한 선원의 위치이다.

제 3절 스펙트럼 특성 평가

1. 스펙트럼 특성

선행연구를 통해 SiPM의 바이어스 전압이 28V일 때 우수한 스펙트럼 특성을 나타내는 것을 확인하여, 마찬가지로 본 실험에서도 SiPM의 동작 전압이 28V인 조건에서 결과를 도출하였다. 에너지 스펙트럼 측정 실험에서는 부호화 구경을 끼우지 않은 상태에서 진행하였다. 이때, 선원은 ^{137}Cs (779.6307kBq의 점 선원)을 사용하였다. 선원의 위치는 그림 22와 같이 detector의 중앙에 위치하였으며 선원과 검출기 간 거리는 25cm로 설정하였다. 또한, SiPM 어레이는 픽셀 별 gain이 다르기때문에 gain 보정을 진행한 후 에너지 스펙트럼을 획득하여 에너지 분해능, 피크 대 밸리 비 (peak-to-valley ratio; PVR), 피크 대 콤프턴 비 (peak-to-Compton ratio; PCR)를 평가하였다.

획득한 에너지 스펙트럼은 그림 23과 같은 결과가 나타났다. 스펙트럼 분석 결과 에너지 분해능은 8.3%로 나타났다. 이때의 PVR은 9.494, PCR은 5.06의 결과가 나타났다. 또한, 이때의 전체 대비 최대치 비 (peak-to-total ratio)은 약

30.5로 나타났다.

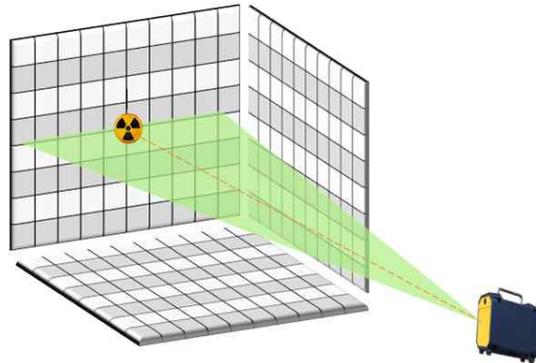


그림 22. 에너지 스펙트럼 획득을 위한 실험 구성 모식도

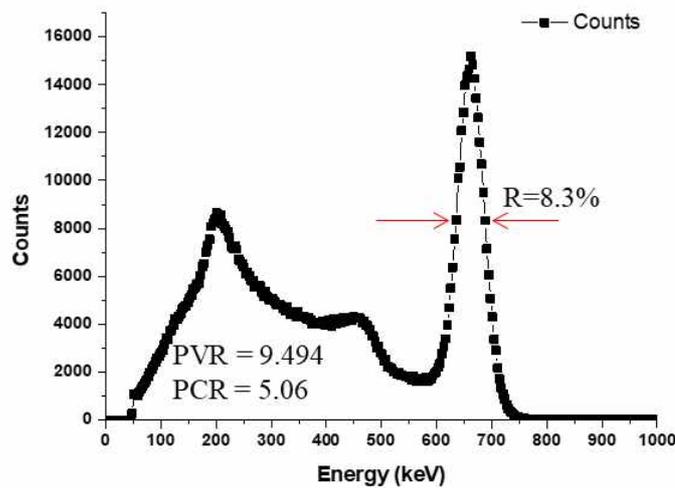


그림 23. ^{137}Cs 점 선원에 대하여 1,000,000 counts를 계수하였을 때 획득한 감마선 에너지 스펙트럼

2. 2-D flood map

그림 24는 GAGG(Ce)과 SiPM을 광학 결합하여 획득한 2-D flood map으로, 각 픽셀에서 샘플링되는 강도를 나타낸다. 이는 각 픽셀이 12×12 개로 모두 식

별되며 해당 식별의 불확실성이 밀리미터 이하의 공간 분해능을 갖는다는 것을 보여준다. 아래 그림 25는 1-D sum profile로 각 행 또는 열의 합을 나타낸 것이다. 피크의 높이는 정 가운데 열과 행에서 가장 우수하게 나타났으며, 이때의 FWHM은 0.5096mm로 나타났다.

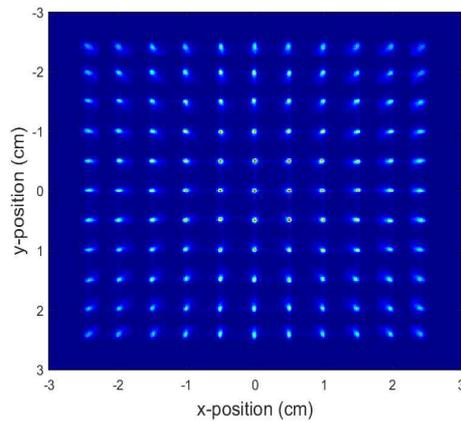


그림 24. 50.8 mm × 50.8 mm × 20 mm 두께의 GAGG(Ce) 섬광체와 12 × 12 SiPM 어레이를 광학 결합하여 획득한 2-D flood map

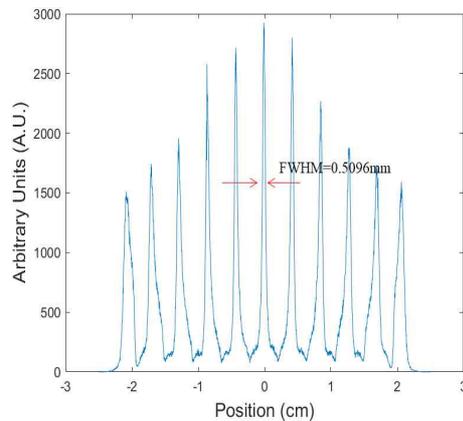


그림 25. 50.8 mm × 50.8 mm × 20 mm 두께의 GAGG(Ce) 섬광체와 12 × 12 SiPM 어레이를 광학 결합하여 획득한 1-D sum profile

제 4 절 영상장비 성능평가

1. 시야각 평가

감마선 영상장비의 시야각에 따라 방사선 조사영역에 대하여 방사선원을 검색하는데 필요한 측정 횟수가 달라지고, 이는 전체 방사선 조사영역에 대한 방사성 오염 분포 파악에 필요한 시간으로 이어진다. 따라서, 감마선 영상장비에서 시야각이 제시되어야 한다. 본 연구에서 개발한 장비의 시야각 평가를 위해서 그림 26과 같이 662 keV의 단일 에너지 광자를 방출하는 ^{137}Cs 선원을 영상장비의 시야각 중앙에 위치시키고, 순 선량률이 백그라운드 선량률의 4배 이상이 되도록 선원과 감마선 영상장비 간 거리를 설정하였다. 영상장비와 방사선원 간의 각도를 -25° 에서 $+25^\circ$ 까지 2.5° 씩 넓혀가며 각각의 위치에서 회당 30초 동안 측정하며, 각 위치에서 10회 반복하여 방사선 영상을 획득하였다.

시야각은 그림 27과 같은 결과를 나타내었다. 측정 결과 $-22.5^\circ \sim +22.5^\circ$ 사이에서는 안정적인 방사선 영상이 얻어짐을 확인하였다. 또한, 부호화 구경 특성상 시야각을 벗어나면 선원의 위치 반대편에 영상 잡음이 생기는데 $-25^\circ \sim +25^\circ$ 에서는 종종 이러한 현상이 수반되며 방사선원의 위치가 불안정하게 얻어짐이 확인되었다. 따라서, Epsilon-G의 시야각은 가로축과 세로축에 대하여 45° 로 판단하였다.

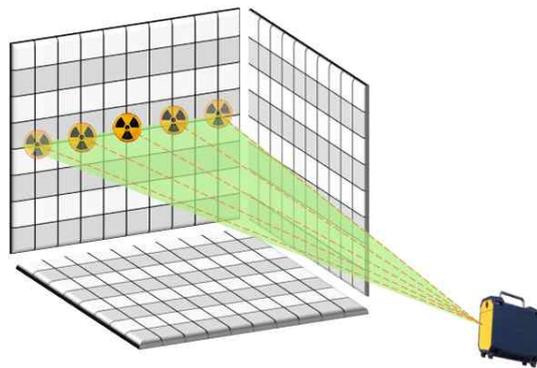


그림 26. 시야각 평가실험 모식도

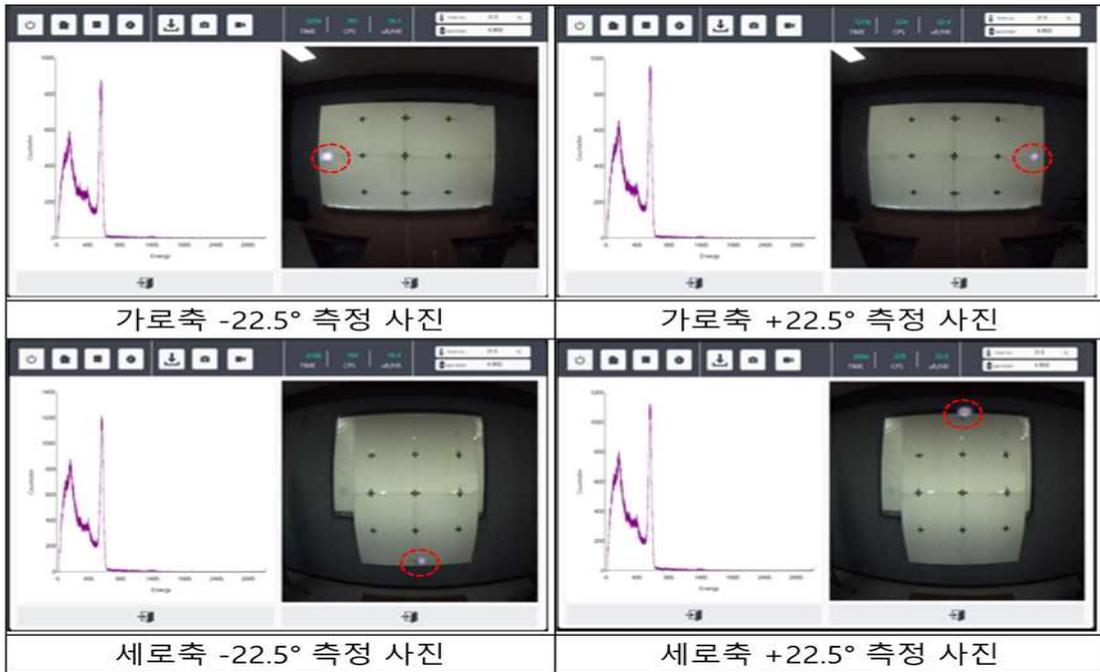


그림 27. 가로축과 세로축의 최대 시야각 평가실험 결과

2. 각 분해능 평가

감마선 영상장비는 여러 선원 또는 확장 선원에 의해 생성되는 방사선 조사영역에서도 방사선원의 위치를 제대로 판별할 수 있도록 우수한 각 분해능을 가져야 한다 [29, 30]. 각 분해능을 측정하기 위해서는 감마 방출 분율을 고려한 세기가 같거나 비슷한 두 개의 선원 (^{137}Cs 과 ^{60}Co)을 사용하였다. 선원에 의해 측정되는 순 선량률이 백그라운드 선량률의 5배 이상이 되도록 선원과 감마선 영상장비 간의 거리를 설정하였다. 영상 획득을 위해 부호화 구경을 썩은 채로 측정하였다. 그림 28과 같이 두 개의 방사선원이 영상장비의 시야각 중앙을 중심으로 이루는 각도가 1° 가 되도록 위치시키고 회당 30초 동안 측정하며, 각 위치에서 10회 반복하여 방사선 영상을 획득하였으며, 두 선원이 분리되어 보일 때까지 각도를 1° 씩 넓히며 측정을 반복하여 진행하였다.

각 분해능 평가 시험결과는 아래 그림 29와 같다. 측정 결과 선원의 위치가 각각 $\pm 2.5^\circ$ 일 때는 두 선원이 한 개의 선원처럼 영상이 획득되었으며, 두 선원의 위치가 각각 $\pm 3^\circ$ 일 때부터는 두 선원으로 구분이 되기는 하나 확실하게 구분되어 보

이지는 않았다. 두 선원 간의 거리를 더 넓혀 $\pm 3.5^\circ$ 일 때는 두 선원이 확실하게 구분되어 보이는 것을 확인하였다. 따라서, 해당 감마선 영상장비의 각 분해능은 $6 \sim 7^\circ$ 로 판단된다

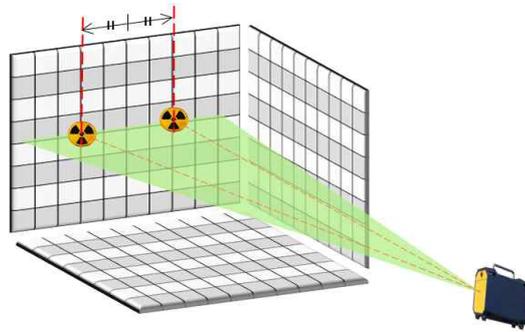


그림 28. 각 분해능 평가실험 모식도



그림 29. 두 선원의 각도에 따른 각 분해능 평가실험 결과

3. 방사선 총 민감도 평가

감마선 영상장비는 세기가 약한 감마 선원에 대해서도 핵종 정보를 획득할 수 있도록 민감도를 가져야 하며, 특히 특수 핵 물질의 판별을 위해 이러한 영상장비는 미량의 핵 물질에 대해서도 핵종 판별이 가능하여야 한다 [31, 32]. 그림 30과 같이 시야각의 중앙에 ^{137}Cs 선원을 위치시키고, 이 때의 순 선량률이 175nSv/h 가 되도록 감마선 영상장비와 선원과의 거리를 설정하였다. ^{241}Am 과 ^{60}Co 에 대해서

는 각각의 순 선량률리 315nSv/h, 805nSv/h가 되도록 거리를 설정하였다. 우선 선원을 두지 않은 상태에서 백그라운드 계수율 (cpm)을 측정하고, 각 선원과 감마선 영상장비 간의 거리를 조절하여 선원별 앞서 언급한 선량 조건을 맞춰준다. 이때, 검·교정 된 GM 서베이미터를 감마선 영상장비의 검출부와 동일한 위치에 두고 선량률을 측정하여 영상장비에서 측정된 값과 일치 여부를 확인한다. 두 계측값이 일치하면 각 선원에 대하여 10분 계수하고 에너지 스펙트럼과 계수율을 획득한다.

방사선 측정 감도 평가실험에서 총 민감도는 아래의 식4.1로 계산된다.

$$TS = ((\text{total count rate}) - (\text{back ground count rate})) / (\text{dose rate}) \quad \text{식 4.1}$$

계산 결과 ^{137}Cs 에 대한 총 민감도는 17.827cpm/nSv/h, ^{241}Am 에 대해서는 110.267cpm/nSv/h, ^{60}Co 에 대해서는 7.07cpm/nSv/h로 나타났다. 입사하는 감마선의 에너지에 따라 검출기에 대한 투과율이 다르기때문에 에너지가 증가할수록 투과율이 증가하여 총 민감도가 감소하는 양상을 보였다.

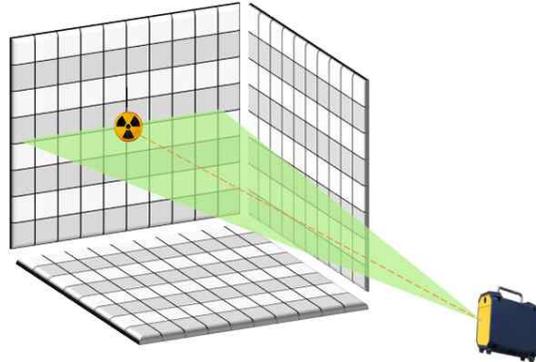


그림 30. 방사선 총 민감도 평가실험 모식도

4. 방사선 영상 민감도 측정

감마선 영상장비는 세기가 약한 감마 선원에 대해서도 영상을 획득할 수 있도록 민감성을 가져야 하며, 특히 특수 핵 물질의 이동 감시를 위해 이러한 영상장비는 미량의 핵 물질에 대해서도 영상 획득이 가능하여야 한다. 시야각의 중앙에

^{137}Cs 선원을 위치시키고, 이때의 선량률이 $0.3\mu\text{Sv/h}$ 가 되도록 방사선원과 감마선 영상장비 간의 거리를 설정하였다. 마찬가지로 영상 획득을 위해 부호화 구경 마스크를 씌운 채로 측정하였다. 해당 거리에서 감마선 영상장비가 방사선원의 위치를 80% 이상의 정확성을 가지며 판별할 수 있을 때까지 영상재구성 시간을 1초씩 증가시켜가며 측정하였다. 방사선 영상 민감도 측정은 앞의 그림 30과 마찬가지로 구성되며, 실험 결과는 아래 그림 31과 같이, 662keV ^{137}Cs 에 대해 $0.3\mu\text{Sv/h}$ 선량 조건에서 10초 이내에 선원의 위치를 판별할 수 있는 것으로 나타났다.

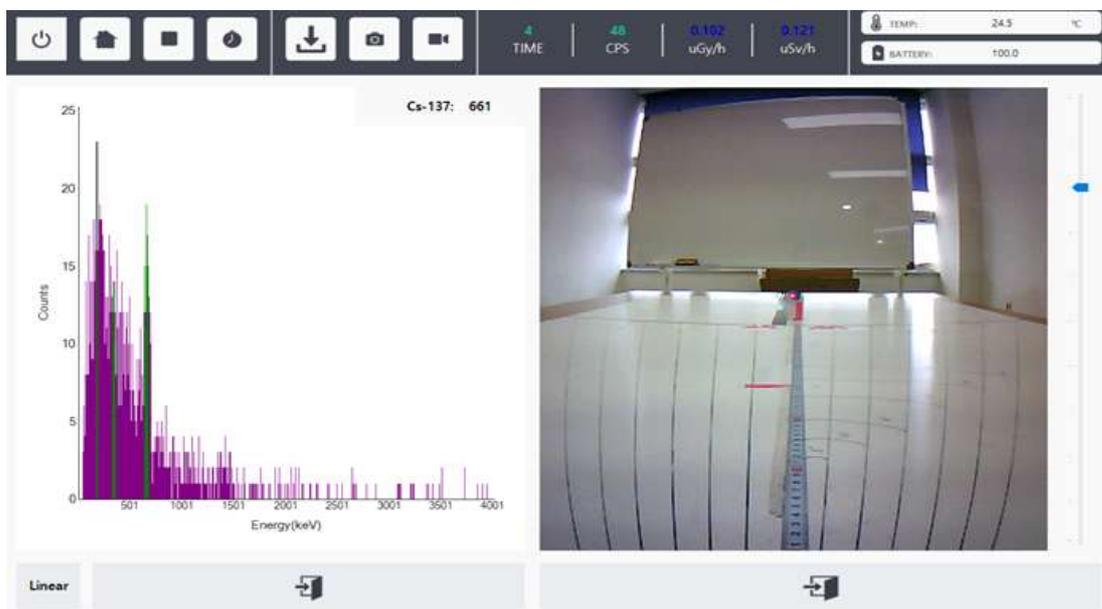


그림 31. 방사선 영상 민감도 평가실험 결과 획득한 GUI 화면 캡처 영상. 이때, ^{137}Cs 선원의 세기는 $10.1195\mu\text{Ci}$ 이며, 검출기와 선원 간의 거리는 1.075m 이었다.

5. 핵종 판별 가능 여부 평가

해당 영상장비에서는 획득된 에너지 스펙트럼에서의 피크 분석을 통해 핵종 판별이 가능하다. 그림 32와 같이 획득된 에너지 스펙트럼에서 특정 핵종에 대한 피크로 인식되면 GUI상에서 초록색으로 표시된다. 이때, 해당 피크에 마우스 커서를 가져다 대면 핵종 정보를 확인할 수 있다. 또한, MLEM 영상재구성 기법의 특성으로 재구성 영상 획득 시 가장 세기가 강한 선원에 대해서만 재구성 영상을 획득

할 수 있다. 이를 보완하기 위해 MLEM 영상재구성 시 샘플링 강도를 설정할 수 있도록 하였으며, 스펙트럼 상에서 에너지 윈도우(energy window)를 적용하여 원하는 핵종에 대한 영상을 확인할 수 있도록 구성하였다.

핵종 판별 가능 여부를 평가하기 위해 ^{137}Cs 과 ^{22}Na 를 감마선 영상장비의 시야각 내에 위치시켰다. 두 선원의 세기와 입사각을 고려하여 위치를 선정하였으며, 실험 결과 그림 33과 같이 GUI 영상을 획득하였다. 영상 확인 결과와 같이 왼쪽에 ^{137}Cs 선원을 위치시켰으며 오른쪽에는 ^{22}Na 를 위치시켰다. 에너지 윈도우를 적용하였을 때는 각 에너지 윈도우 범위에 해당하는 선원에 대한 위치 정보를 나타내고, sum을 선택하면 모든 선원의 위치를 합쳐서 나타낼 수 있도록 하였다.

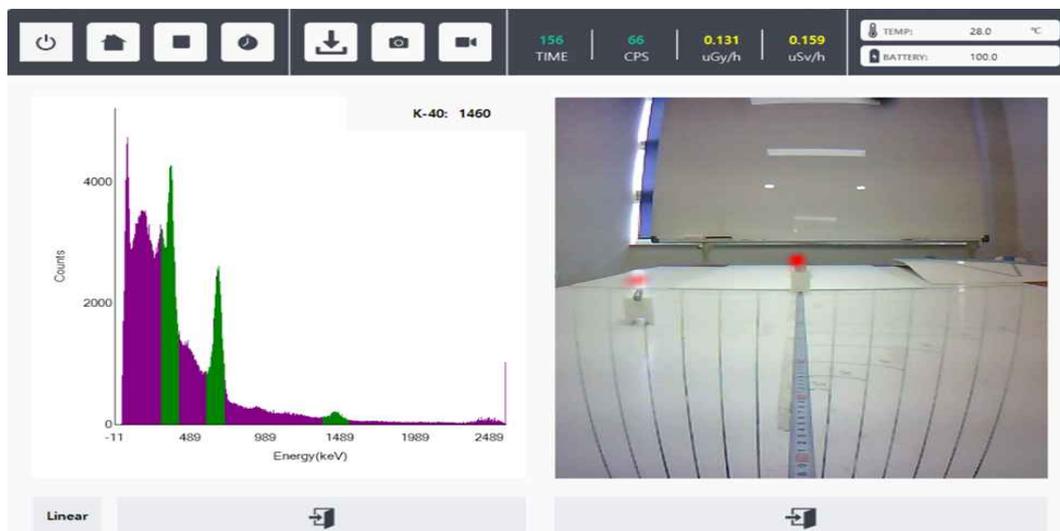


그림 32. 제작된 시작품에서 에너지 스펙트럼을 획득하고 핵종 정보를 제공하는 기능의 예시

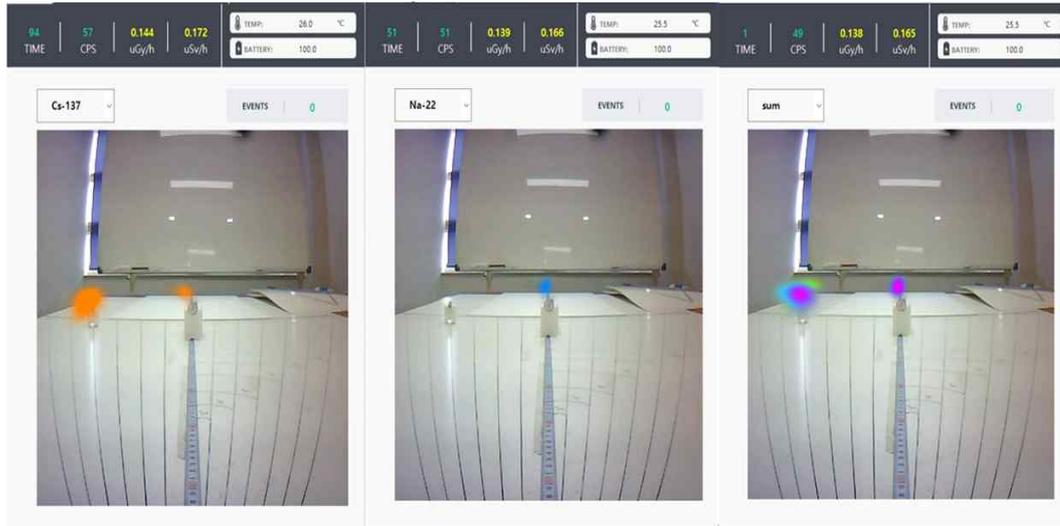


그림 33. 에너지 윈도우를 적용하여 각 선원에 대한 위치 정보를 획득한 예시

6. 방사선 영상 화질 평가

앞서 언급했듯 PSNR, NMSE, SSIM은 방사선 영상의 평가에 사용되는 주요 지표로 영상재구성 시 영상 화질 저하 및 재구성 영상에서 잡음의 발생 정도를 정량화하여 나타낸다. 방사선 영상 화질 평가를 위해 604.746 kBq의 세기의 ^{137}Cs 점선원을 시야각의 중심에 위치시키고, 방사선원과 검출기 간의 거리가 1m가 되도록 위치시켰다. 영상 획득을 위해 총 30,000counts를 획득하였다. 획득된 원시 데이터(raw data)는 root 프로그램을 통해 Matlab에서 읽을 수 있는 텍스트 파일 형태로 변환하고, 이 텍스트 파일은 Matlab 스크립트에서 획득된 영상과 기준 영상을 비교하여 PSNR, NMSE, SSIM 값을 계산하였다.

실험 결과 획득한 영상은 아래 그림 34와 같으며, PSNR은 45.8886dB, NMSE는 2.0568×10^{-5} , SSIM은 0.9917로 나타났다. 3장 1절에 기술하였던 것을 토대로, PSNR이 30dB 이상이고 NMSE가 거의 0에 가까우며, SSIM도 1에 근사한 값을 갖는다는 점을 미루어보아 재구성된 영상의 화질이 우수하다고 판단할 수 있다.

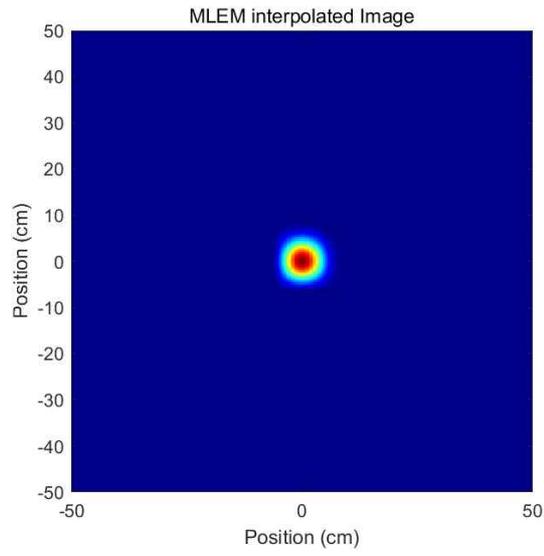


그림 34. 방사선 영상의 화질 평가를 위해 획득한 데이터로 재구성한 영상

IV. 결론

제 1절 연구의 요약

본 연구에서는 부호화 구경기반 감마선 영상기술의 개발을 위해 전산모사를 수행하고, 전산모사 결과 도출한 매개 변수값을 적용하여 실제 시스템을 구성하였다. 우선, FCFV를 확보하기 위하여 부호화 구경의 패턴을 centered mosaic MURA로 확정하고, 영상 획득을 위해 부호화 구경에 대한 복호화 패턴을 도출하였다. 이를 바탕으로 MCNPX-Polimi 전산모사를 통해 부호화 구경의 재질이 텅스텐일 때, 부호화 구경의 두께를 0.1 ~ 30cm 까지 늘려가며 영상 화질을 평가한 결과 2cm 이상일 때 우수한 결과를 보였다. 이때, 상관 관계법과 반복적 영상 재구성 기법의 하나인 MLEM 기법을 사용하여 영상을 재구성하였을 때 영상 화질 평가 지표 결과 MLEM 기법을 사용하여 재구성한 영상의 화질이 월등히 우수한 결과를 보였다. 이 결과를 바탕으로 실제 시스템에 적용하여 부호화 구경의 두께를 0.5 ~ 4.5cm 두께에서 영상 화질을 평가하였다. 그 결과 2.5cm에서 재구성된 영상의 화질이 가장 우수한 것으로 나타났으나, 물리적 특성을 고려하여 부호화 구경의 두께를 2cm로 채택하였다.

부호화 구경 내에 입사하는 광자의 수가 적을 경우, 영상에 잡음이 많이 생기며 방사선원의 위치를 제대로 식별하지 못한다. 따라서, 전산모사를 통해 영상에 잡음이 적으며 방사선원의 위치를 식별할 수 있는 최소 검출 선량을 도출하였다. 전산모사 결과 부호화 구경의 두께가 2cm일 때, 최소 검출 선량은 2000counts로 나타났으며 실제 시스템에서 실험 결과도 동일한 값으로 나타났다.

2장에서 언급했던 것처럼 GAGG(Ce) 섬광체와 SiPM을 결합한 형태로 검출부를 구성하였으며, 부호화 구경은 3D 프린터로 출력한 출력물에 텅스텐 조각을

끼워 사용하는 방식을 채택하여 사용하였다. 실제 시스템의 회로는 아날로그 보드, ADC+디지털 보드, 전원 보드 세 개로 구성되며, 전원공급은 리튬-폴리머 배터리를 통해 공급하도록 설계하였다.

또한, SiPM 어레이의 gain이 픽셀별로 다르기 때문에 gain 보정을 해주었으며, gain 보정결과 전체 픽셀에 대한 신폭값과 개별 픽셀의 신폭값의 차이가 감소한 것을 확인하였으며, 결과적으로 에너지 분해능이 향상되는 결과를 얻었다. 광학 영상에 방사선 영상을 매핑하는 과정에서 광학 영상에서 획득되는 방사선원의 위치와 방사선 영상에서 획득한 방사선원의 위치에 서로 차이가 있었다. 이를 보정하기 위해, 광학 영상에 방사선 영상을 투영시켰을 때 각 대응점 간의 변환 관계를 정의하여 호모그래피를 적용하였다. 호모그래피를 적용함으로써, 광학 영상과 방사선 영상에서 방사선원의 위치가 일치하게 매핑할 수 있었다.

결과적으로, 본 연구를 통해 부호화 구경기반의 감마선 영상장비 *Energetic Particle Sensor for the Identification and Localization of Originating Nuclei-Gamma (Epsilon-G)*를 개발하였다. 완성된 Epsilon-G의 외관은 그림 35와 같으며, Epsilon-G의 에너지 스펙트럼 특성 평가결과 에너지 분해능이 8.3%, 피크 대 벨리 비가 9.494, 피크 대 컴프턴 비가 5.06으로 평가되었다. 2-D flood map과 1-D sum profile을 통해 0.5096mm의 FWHM을 갖는 것으로 나타났다. 이는 해당 시스템의 공간 분해능과 위치 분해능이 밀리미터 이하로 우수하다는 것을 의미한다. 또한, 각 분해능, 시야각, 방사선 총 민감도, 방사선 영상 민감도, 재구성된 영상의 화질에 대해 평가하였으며, 각 분해능은 6 ~ 7°로 나타났으며, 시야각은 45°로 판단된다. 방사선 총 민감도는 핵종에 따라 ^{137}Cs 은 17.827cpm/nSv/h, ^{241}Am 은 110.267cpm/nSv/h, ^{60}Co 은 7.07cpm/nSv/h로 나타났다. 방사선 영상 민감도는 662keV 0.3 μ Sv/h 조사 환경에서 10초 이내에 영상 획득이 가능한 것으로 나타났다. 재구성된 영상의 화질은 PSNR, NMSE, SSIM 각 지표에 대하여 45.8886dB, 2.0568×10^{-5} , 0.9917로 나타났다. Epsilon-G는 방사선원의 위치뿐 아니라 해당 방사성 핵종의 판별이 가능하며, 선량률을 제공한다. 또한, 에너지 윈도우를 적용하여 각 핵종에 따른 영상만을 획득할 수 있도록 기능을 추

가하였으며, Epsilon-G의 GUI에서 영상재구성 시간, 계수율, 선량률에 대한 정보를 제공할 수 있도록 하였다.

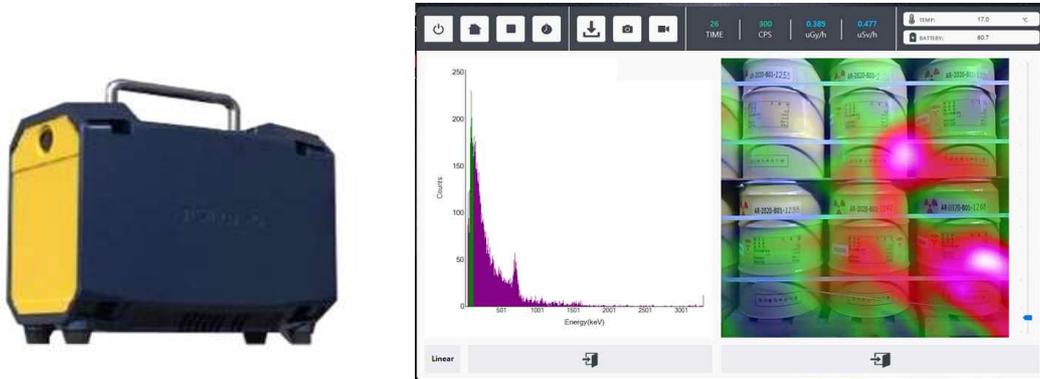


그림 35. Epsilon-G의 외관(왼쪽)과 GUI화면(오른쪽)

제 2절 향후 연구 계획

본 연구에서 개발된 감마선 영상장비는 온도에 따라 gain의 변화 폭이 크다. 이는 채널-에너지 교정 후 각 채널을 에너지로 변환하여 핵종 판별을 하는 현 시스템에서 큰 취약점이다. 채널-에너지 교정 시와 다른 온도에서 선원에 대한 스펙트럼을 획득하면 피크 에너지의 영역이 달라지고, 이로 인해 해당 선원의 핵종을 판별하지 못하게 된다. 따라서, 앞으로 진행될 연구에서는 검출부의 온도를 일정하게 유지할 수 있는 방법이나 각 온도에 따라 SiPM의 gain을 보정하는 함수를 적용하여 보완하는 연구가 진행될 것이다.

요소 수에 따라 방사선원의 형태를 구현할 수 있는 범위가 달라진다. 현재 시스템의 경우 요소 수가 11이기 때문에 부호화 구경의 요소 수가 21이다. 이는 점 선원의 영상을 재구성하기에는 충분하지만, 선 선원이나 면 선원과 같은 확장 선원의 영상을 재구성하기에는 적합하지 않다. 따라서, 섬광체의 픽셀 수와 부호화 구경의 요소 수를 늘려 점 선원뿐만 아니라 선 선원, 면 선원 등 다양한 선원의

형태를 구현할 수 있도록 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] IAEA, Nuclear Power Reactors in the World 2021 Edition, 2021.
- [2] 최영기, 원전 해체 종합 검토 - 고리 1호기 해체 사업 추진 계획, Korea Atomic Industry Forum, vol. 37, pp. 40-49, 2017.
- [3] Al. Mladenov, D. Stankov, Tz. Nonova, K.Krezhov, Radiation protection, radioactive waste management and site monitoring at the nuclear scientific experimental and educational centre IRT-Sofia at INRNE-BAS, Radiation Protection Dosimetry, vol 162, pp. 176-181, 2014.
- [4] Ziock K.P., Collins J.W., Fabris L., Gallagher S., Horn B.K.P., Lanza R.C., Madden N.W. Source-search sensitivity of a large-area, coded-aperture, gamma-ray imager, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53 (3), pp. 1614-1621, 2016.
- [5] 왕채선 , 김서용, 후쿠시마 원전사고 이후 원자력 수용성 및 인식구조 변화에 대한 탐색적 분석, 한국행정학보, 47권 2호, pp. 395-424, 2013.
- [6] 김수근, 라돈침대의 문제 및 대책, 산업보건, 362권, pp. 6-19, 2018.
- [7] Michał J.Cieślak, Kelum A.A.Gamage, Robert Glover, Coded-aperture imaging systems: Past, present and future development - A review, Radiation Measurements, vol. 92, pp. 59-71, 2016.
- [8] Kai Vetter, Ross Barnowski, Andrew Haefner, Tenzing H.Y. Joshi, Ryan Pavlosky, Brian J. Quiter, Gamma-Ray imaging for nuclear security and safety: Towards 3-D gamma-ray vision, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 878, pp. 159-168, 2018.
- [9] Lee H.S, Kim J.H., Lee J., Kim C.JH., Development and performance evaluation of large-area hybrid gamma imager (LAHGI), Nuclear Engineering

and Technology, vol. 53, pp. 2640–2645, 2021.

[10] Hosang Jeon, Hyunduk Kim, Bo Kyung Cha, Jong Yul Kim, Gyuseong Cho*, Yong Hyun Chung and Jong-Il Yun, Performance evaluation for pinhole collimators of small gamma camera by MTF and NNPS analysis: Monte Carlo simulation study, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, vol. 604, p.93–96, 2009.

[11] Mertz, L. & Young, N. O. Fresnel transformation of images. In Proc. ICO Conference on Optical instruments and Techniques (ed. K. J. Habbell) 305 - 310 (Chapman and Hall, London, 1962).

[12] R. H. Dicke, SCATTER-HOLE CAMERAS FOR X-RAYS AND GAMMA RAYS, The Astrophysical Journal, vol. 153, 1968.

[13] M.J.E. Golay, Point arrays having compact, non-redundant autocorrelations, Journal of the Optical Society of America, vol. 61, pp. 272–273, 1971.

[14] Stephen R. Gottesman and E. E. Fenimore, New family of binary arrays for coded aperture imaging, Applied Optics, vol. 28, pp. 4344–4352, 1989.

[15] R. Accorsi, Design of near-field coded aperture camera for high resolution medical and industrial gamma-ray imaging, Ph.D. thesis Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Nuclear Engineering, 2001.

[16] Manhee Jeong, Mark 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, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 954, pp. 161353, 2020.

[17] Manhee Jeong, Benjamin Van, Byron T. Wells, Lawrence J. D’Aries, Mark D. Hammig, Comparison between Pixelated Scintillators: CsI(Tl), LaCl₃(Ce) and

LYSO(Ce) when coupled to a Silicon Photomultipliers Array, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 893, pp. 75-83, 2018.

[18] Epic crystal Co. Ltd.

Available from: https://www.epic-crystal.com/download-center/index_2.html.

[19] SensL Technologies Ltd. Silicon Photomultiplier Sensors, C-Series (SiPM). Data sheet.

Available from:

<https://www.onsemi.com/products/sensors/photodetectors-sipm-spad/silicon-photomultipliers-sipm>.

[20] Y.A. Syahbana, Herman, A.A. Rahman, K.A. Baker, Aligned-PSNR(APS NR) for objective video quality measurement(VQM) in video stream over wireless and mobile network, World Congress on Information and Communication Technologies(WCIT), pp. 330-335, 2011.

[21] Y. Yan, W. Cao, S. Li, Block-adaptive image watermarking scheme using just noticeable difference, IEEE International Workshop on Imaging Systems and Technique, pp. 377-380, 2009.

[22] R. Chaves, J.Ramírez, J.M.Górriz, M.López, D.Salas-Gonzalez, I.Álvarez, F.Segovia, SVM-based computer-aided diagnosis of the Alzheimer's disease using t-test NMSE feature selection with feature correlation weighting, Neuroscience Letters, 461, pp. 293-297, 2009.

[23] A. Hore, D. Ziou, Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM, Proc. ICPR, 34, pp. 2366-2367, 2010.

[24] P. Ndajah, H. Kikuchi, M. Yukawa, H. Watanabe, S. Muramatsu, SSIM image quality metric for denoised images, Proceedings of the 3rd WSEAS

international conference on Visualization, imaging and simulation (VIS '10), World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Stevens Point, Wisconsin, pp. 53 - 57, 2010.

[25] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli, Image quality assessment: From error measurement to structural similarity, *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 13, pp. 600-612, 2004.

[26] Seoryeong Park, Jihwan Boo, Mark Hammig, Manhee Jeong, Impact of aperture-thickness on the real-time imaging characteristics of coded-aperture gamma cameras, *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 53, pp. 1266-1276, 2021.

[27] A. Khadjavi, Calculation of Solid Angle Subtended by Rectangular Apertures, *Journal of the Optical Society of America*, vol. 58(10), pp. 1417-1418, 1968.

[28] Elan Dubrofsky, Homography Estimation, Master thesis Carleton University, 2007.

[29] IAEA, 2016 Technology Demonstration Workshop (TDW) on Gamma Imaging-External, 2017.

[30] John A. Mason, M. Looman, Adam J. Poundall, DEVELOPMENT AND TESTING OF A NOVEL GAMMA RAY CAMERA FOR RADIATION SURVEYING, CONTAMINATION MEASUREMENT AND RADIATION DETECTION, INMM annual meeting, 2012.

[31] Hamrashdi, H.A, Monk, S.D. and Cheneler. D., Passive Gamma-Ray and Neutron Imaging Systems for National Security and Nuclear Non-Proliferation in Controlled and Uncontrolled Detection Areas: Review of Past and Current Status. *Sensors*, vol. 19(11), pp. 2638, 2019.

[32] John A. Mason et al. (2013). Testing and Performance Validation of a

Sensitive Gamma Ray Camera Designed for Radiation Detection and Decommissioning Measurements in Nuclear Facilities. *WM2013 Conference*, February 24 - 28, 2013, Phoenix, Arizona, USA, 2013.