



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

감마선 영상장비를 활용한 원자력
안전규제 적용 연구

채민기

제주대학교 대학원
에너지화학공학과

2024년 2월

감마선 영상장비를 활용한 원자력 안전규제 적용 연구

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

채민기

제주대학교 대학원

에너지화학공학과

지도교수 정만희

채민기의 공학 석사 학위논문을 인준함

2023년 6월

심사위원장	최수석	
위원	강재혁	
위원	정만희	

A Study on the Application of Nuclear Safety Regulations Using Gamma-ray Imager

A Thesis submitted to the graduate school of Jeju National University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering under the supervision of Manhee Jeong

The thesis for the degree of Master of Engineering by Minki Chae has been approved by the dissertation committee

2023. 6.

Chair _____ Sooseok Choi 

Member _____ Jeahyuk Kang 

Member _____ Manhee Jeong 

목 차

표 목차	i
그림 목차	ii
요약	iv
I. 서론	1
1. 배경 및 필요성	1
2. 국내외 연구 현황	2
3. Epsilon-G 구조 및 성능	4
3.1 마스크 디자인	4
3.2 영상재구성 방법	6
3.3 Epsilon-G 성능	8
4. 연구 범위	9
II. 안전규제 적용방안	10
1. 단일 감마선 영상장비	11
1.1 방사능 방재 환경탐사	11
1.2 원전 내부 핵종 분석 포인트 선정 작업	13
1.3 비파괴검사용 선원 안정성 테스트	14
1.4 재활용 고철 슬러그 내 방사성오염 탐지	14
1.5 방사성 핵종 깊이 측정	15
1.5.1 삼각측량법	15
1.5.2 실험 환경 구축	19
2. 파노라마 감마선 영상장비	21
2.1 현장 신속 탐사	21
2.1.1 장비 설계	21

2.1.2 장비의 신호처리	23
2.1.2.1 영상품질 개선을 위한 방법	24
2.1.2.2 신호처리 보드	25
2.1.3 실험 조건	30
Ⅲ. 결과 및 논의	31
1. 단일 감마선 영상장비 결과	31
1.1 방사능 방재 환경탐사 결과	31
1.2 원전 내부 핵종 분석 포인트 선정 작업 결과	33
1.3 비파괴검사용 선원 안정성 테스트 결과	35
1.4 재활용 고철 슬러그 내 방사성 오염탐지 결과	37
1.5 방사성 핵종 깊이 측정 결과	38
1.5.1 시간별 깊이 정확도 측정 결과	38
1.5.2 핵종별 깊이 정확도 측정 결과	40
1.5.3 체적 선원 측정 결과	43
2. 파노라마 감마선 영상장비 결과	45
2.1 성능평가 결과	45
Ⅳ. 결론	50
참고 문헌	51
부록 01. 국외 감마선 영상장비 성능 비교	58
ABSTRACT	61

표 목차

표 1. 대표적인 감마선 영상장비의 특징	3
표 2. Epsilon-G의 세부 성능	8
표 3. 국가환경방사선자동감시망 경보설정 기준	12
표 4. 삼각측량법을 이용한 이격거리 이론값	18
표 5. 30초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과	39
표 6. 120초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과	39
표 7. ¹⁵² Eu 선원을 이용하여 150초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과	41
표 8. ¹³⁷ Cs 선원을 이용하여 150초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과	41
표 9. ⁶⁰ Co 선원을 이용하여 150초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과	42
표 10. 세 가지 선원을 이용한 체적 선원의 깊이 분포 측정 결과	44
표 11. 각 검출 시스템에서 획득된 계수율 및 선량값	46
표 12. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 시야각 비교	58
표 13. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 각분해능 비교	59
표 14. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 방사능 측정 감도 비교	59
표 15. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 에너지 분해능 비교	60
표 16. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 특수 핵물질 영상획득 가능 여부 비교	60

그림 목차

그림 1. 대표적인 감마선 영상장비의 영상재구성 방식	3
그림 2. Anti mask의 영상획득	5
그림 3. Mosaic pattern 11 × 11 array 및 21 × 21 array	5
그림 4. 선원의 영상을 재구성하기 위해 사용된 MLEM 방법 개략도	7
그림 5. 초지에서의 공간감마선량률 측정	12
그림 6. 원전 내부 시설의 핫스팟 이미지 획득 예시	13
그림 7. 깊이 추정 절차 개략도	16
그림 8. 삼각측량법 수식 개략도	16
그림 9. 43 × 43 × 50 cm ³ 크기의 아크릴 상자(a), 선원 수납공간(b) 및 측정 시스템 개략도(c)	19
그림 10. 감마선 영상장비를 활용한 삼각측량법의 경향성 파악	20
그림 11. 8개의 마스크를 사용한 링 배치 구조	22
그림 12. 파노라마 감마선 영상장비의 개략도(a) 및 단면도(b)	22
그림 13. 감마선 영상장비의 신호처리 회로 구성도	23
그림 14. 센서의 감마선 파형	24
그림 15. 2-D flood map 내에서 임계값 설정을 통한 compton 산란 신호 제거 방법	25
그림 16. 파노라마 감마선 영상장비의 신호처리 보드	26
그림 17. 파노라마 감마선 영상장비의 FEE 보드 회로도	26
그림 18. 파노라마 감마선 영상장비의 아날로그 회로도	27
그림 19. 아날로그 회로 내에서 발생하는 신호 파형 변화	27
그림 20. 파노라마 감마선 영상장비의 ADC 회로도	28
그림 21. 신호처리 과정 개략도	29
그림 22. 파노라마 영상장비 실험을 위한 선원 배치도	30
그림 23. 배경 방사선 준위에서 방사선 특이지점 평가 결과	32

그림 24. 감마선 영상장비 활용 중저준위 폐기물 측정 실험 조건	33
그림 25. 감마선 영상장비 활용 중저준위 폐기물 측정 결과	34
그림 26. 비파괴검사 장비 사용 전 작업자와 선원 이미지	35
그림 27. 비파괴검사 장비 사용 시 선량 환경(24.48 $\mu\text{Sv/h}$) 및 선원 위치	36
그림 28. 비파괴검사 장비 사용 시 선량 환경(0.28 $\mu\text{Sv/h}$) 및 선원 위치	36
그림 29. 3.4 $\mu\text{Sv/h}$ 의 표면선량률을 가지는 화물차 측정 결과	37
그림 30. 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과	38
그림 31. 선원의 깊이 별 위치 추정 정확도 결과	41
그림 32. 세 가지 선원을 활용한 체적 선원 표현	43
그림 33. 완성된 파노라마 감마선 영상장비(a) 및 내부 마스크 지지층(b)	46
그림 34. FOV 내 선원이 존재하는 검출기에서 재구성된 영상 이미지	46
그림 35. 각 검출기에서 재구성된 영상 이미지	48
그림 36. FOV 내 선원이 존재하는 검출기에서 재구성된 영상 이미지	48
그림 37. FOV 내 선원이 존재하지 않는 검출기에서 재구성된 영상 이미지	49
그림 38. 8개의 영상을 결합하여 재구성한 파노라마 이미지	49

감마선 영상장비를 활용한 원자력 안전규제 적용 연구

채 민 기

제주대학교 대학원 에너지화학공학과

요 약

국제 방사선 방어위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서는 1997년에 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)를 권고하였으나, 방사선 사고는 예기치 못하게 발생하며 방사성 물질 누출을 동반해 작업자에게 주요 위험 요소로 작용한다. 따라서 방사선 사고에 신속하고 효과적으로 대응하기 위한 기술과 관리 시스템이 필요하다.

감마선 영상장비는 방사선 사고 대응 수단으로 사용되기 적합하다. 감마선 영상장비가 제공하는 핫스팟은 방사성 핵종의 위치를 판별할 수 있어 관심 구역의 오염도 해석, 핵종 탐지에 유용하다.

본 연구에서는 감마선 영상장비를 원자력 안전규제 기반 방사선 사고 방지 및 비상대응에 효과적으로 활용하는 것을 목표로 한다. 장비의 유효성을 판단하기 위해 원전 해체를 위한 핵종 분석 포인트 선정, 비파괴감사 장비의 안정성 테스트, 오염된 재활용 고철 슬러그 분리 등 다양한 현장 적용성 평가를 진행하였다.

평가 결과, 원전 해체, 폐기물 선별 작업 등 여러 환경에서 방사성 핵종의 위

치를 정확히 탐지해 작업에서 소요되는 시간적, 금전적인 문제를 극복하였고, 방사선 사고 예방 및 사고 발생 시 즉각적인 대응이 가능함을 증명하였다.

검증 과정에서 감마선 영상장비의 구조적인 한계로 인해 방사성 핵종의 깊이 정보와 전방위의 방사성 핵종을 탐지하지 못하는 문제가 발생하였지만, 삼각법/파노라마 감마선 영상장비를 적용하여 감마선 영상장비의 한계점을 극복하였다.

삼각측량법은 감마선 영상장비의 위치에 따라 변화하는 핫스팟의 위치를 수식화하여 깊이 정보를 추정하는 방법이다. 측정 결과 방사성 핵종의 깊이 추정 정확도는 15% 이내의 상대 오차값을 가지지만, 영상재구성을 위한 측정시간을 증가시킨다면 깊이 추정 정확도가 더욱 향상됨을 실험으로 검증하였다.

파노라마 감마선 영상장비는 신속한 공간 평가를 위해 8개의 검출 시스템을 하나의 장비로 제작하였으며, 8개의 시야 내에서 방사성 핵종을 감시할 수 있다. 8개의 검출 시스템을 사용하기 때문에 공간 측정에 소모되는 시간을 약 8배 정도로 단축할 수 있어 신속한 공간 측정에 효과적이다. 또한, 하나의 검출기 시스템의 정보를 독립적으로 분리할 수 있어 정밀한 탐사/분석이 가능하다.

I. 서론

1. 배경 및 필요성

국제 방사선 방어 위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서는 1997년에 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)를 권고하였으나, 예기치 못한 방사선 사고 발생은 방사성 물질을 동반해 작업자에게 주요 위험 요소로 작용한다. 국내에서 최근 4년 동안(2018-2022) 16건의 방사선 사고가 발생하였고, 방사선 사고는 방사선 관리구역 화재, 방사선 투과 검사 선원의 고착 및 이탈 사고, 방사성 폐기물 누출, 방사선 발생 장치 사용자의 피폭 등 의료 사고, 산업체 사고, 원자력 발전소 사고와 같은 다양한 유형에서 발생하고 있다. 작업자의 안전과 방사선 방호의 최적화를 달성하기 위해서는 방사선 사고에 신속하고 효과적인 대응을 위한 방사선 모니터링 기술과 관리 시스템이 필요하다.

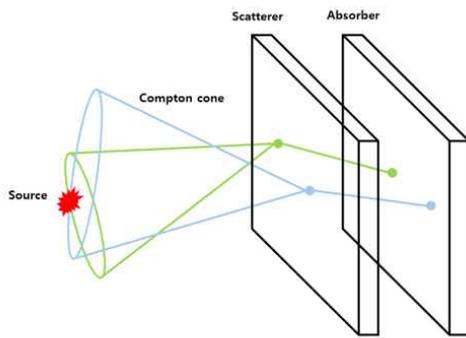
현재 국내에서는 방사능 감시기술로 GM 계수기 기반의 선량계[1] 혹은 HPGe[2-3]와 NaI(Tl) [4-6] 섬광체 기반의 방사성 핵종 분석 장비가 이용되고 있다. 위 장비들은 현장 선량을 측정하기 위해 환경방사선 선량계 또는 휴대용 핵종 분석 장비로 이용되며, 현장 방사선/능 측정을 통해 현장 오염도 조사가 가능하다. 그러나 무색, 무취의 특성인 방사선을 직관적으로 평가하는 데 한계가 있어 주민 보호조치 의사결정에 기반이 되는 정보의 품질을 보장하지 못한다.

앞선 문제점을 해결하기 위해 국제적으로 방사선을 영상화할 수 있는 장비에 대해 많은 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 감마선 영상장비는 감마선 계수 시스템에 감마선 이미징 기술을 결합하여 실시간으로 선량과 방사선의 위치를 제공한다. 감마선의 영상화는 감마선 영상장비가 제공하는 핫스팟(hot spot)을 통해 오염 및 방사성 핵종의 위치를 직관적으로 판단하여 관심 구역의 방사성 특이점 확인이 가능하다. 특히, 원전 해제 과정에서 발생한 폐기물의 효율적인 분류 작업을 통한 시간, 비용 절감과 미지 또는 분실 방사선원을 추적하는 데 효과적이다.

2. 국내외 연구 현황

감마선 영상장비의 방사선 영상화 작업은 복합적인 기술이 결합되어 있으며, 종류는 그림 1과 같이 크게 Compton camera, coded-aperture 기반 imager 두 종류로 분류된다. 두 방식은 감마선 이미징을 하기 위한 목적은 동일하지만, 영상장비의 구성 및 영상재구성을 위한 알고리즘이 다르게 구성된다[7-8]. 현재 감마선 영상장비는 위에서 언급한 두 방식을 기반으로 많은 연구개발이 진행되고 있다. 특히, 미국의 H-Polaris (H3D), 프랑스의 iPIX™ (Mirion Tech.)는 상용화된 대표적인 감마선 영상장비이며, 제주대학교에서는 해외의 의존도를 낮추고자 Epsilon-G를 자체적으로 개발하였다. 감마선 영상장비는 평상시 원전안전검사(방사성 물질 유출 탐지, 배관 및 펌프 검사 등), 방사성 폐기물(드럼) screen 검사 및 이동 시 건전성 평가 등 작업종사자의 안전확보 목적을 위한 이용과 비상시 in-situ 감마선 영상 측정을 통한 오염지역 모니터링 및 안전부지 확보 등 원자력 안전규제를 위해 다양하게 활용할 수 있다. 감마선 영상장비는 인공위성에서 제공하는 위성 지도와 GPS, 실제 현장 선량률을 결합하여 2D 형상의 선량 분포지도를 획득하거나, 사물의 특성을 감지하는 LiDAR를 결합하여 방사성오염 분포를 실제 건물구조에 투영하는 3D 맵핑 기술을 적용할 수 있다. 또한, 무인 지상 차량, 무인 항공 시스템 등 다양한 플랫폼에 배치하여 원격으로 방사성 물질 추적 및 탐사를 하는 등 감마선 영상장비의 기술은 빠르게 발전하고 있다[9-17].

Compton Camera Imaging



Coded Aperture Imaging

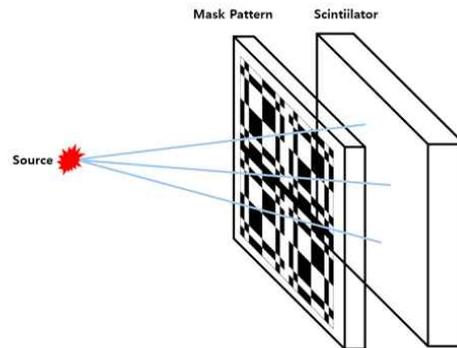


그림 1. 대표적인 감마선 영상장비의 영상재구성 방식

표 1. 대표적인 감마선 영상장비의 특징

	Compton Camera	Coded-aperture
Field of View	Up to 360°	45° ~ 50°
Angular Resolution	10° ~ 30°	2.5° ~ 6°
Energy Range	250 keV ~ 1.5 MeV	30 keV ~ 1.5 MeV
Dose Linearity	N/A	2 μSv/h ~ 10 Sv/h
Energy Resolution	High (~ 1%)	Very Limited

3. Epsilon-G 구조 및 성능

3.1 마스크 디자인

Epsilon-G는 coded-aperture 기반으로, 입사되는 방사선과 마스크 구조적 차폐로 인해 투과되는 방사선의 변조 패턴을 통해 방사선원의 위치 정보를 판별하고 평면 영상으로 재구성한다. Coded-aperture의 경우, 구경을 통해 많은 광자가 들어오더라도 포획시간이 짧아 비교적 빠른 영상획득이 가능하며, 배경 방사선 제거 방법을 적용하여 방사선원의 위치 정보를 더욱 정확하게 파악한다.

Coded-aperture 기반 감마선 영상장비는 기하학적 구조로 인해 시야각에 제한이 있다. 방사선 입사 패턴을 획득하기 위해 적용된 마스크 차폐구조는 크기가 증가함에 따라 넓은 공간의 영상재구성 정보를 담을 수 있지만, 이는 감마선 영상장비의 중량 증가로 인해 현장 이동평가 장비로 사용이 부적합하다. 따라서 감마선 영상장비는 중량의 최소화와 더불어 최적의 FCFV(Fully-Coded Field-of-View)를 달성해야 한다[18]. 위 조건을 만족하기 위해 일반적으로 anti mask 방식과 mosaic mask 방식을 사용한다. Anti mask 방식은 그림 2와 같이 기존 마스크를 이용한 영상 정보와 90°로 회전된 마스크의 영상 정보를 결합하여 배경 노이즈를 제거하고 영상 품질을 향상시킨다. Anti mask의 방식을 사용하여 재구성된 이미지는 기존 단일 마스크를 사용하여 획득된 영상보다 영상의 성능이 개선되었다는 사실은 앞선 많은 연구에서 입증 되었다[19-21].

Epsilon-G는 FCFV 확보를 위해 mosaic 방식을 채택하였다. Mosaic 방식은 그림 3과 같이 부호화 구경 패턴을 2×2 배열로 복제 및 확장하여 사용하는 방식으로 한 번의 측정으로도 성능이 개선된 영상을 재구성할 수 있고, 이러한 사실은 선행연구를 통해 검증을 완료하였다[22]. 위와 같은 특징은 anti mask의 영상재구성 과정에서 발생하는 시간적 제약과 물리적으로 마스크를 회전시켜야 하는 기술적 한계점을 극복한다.

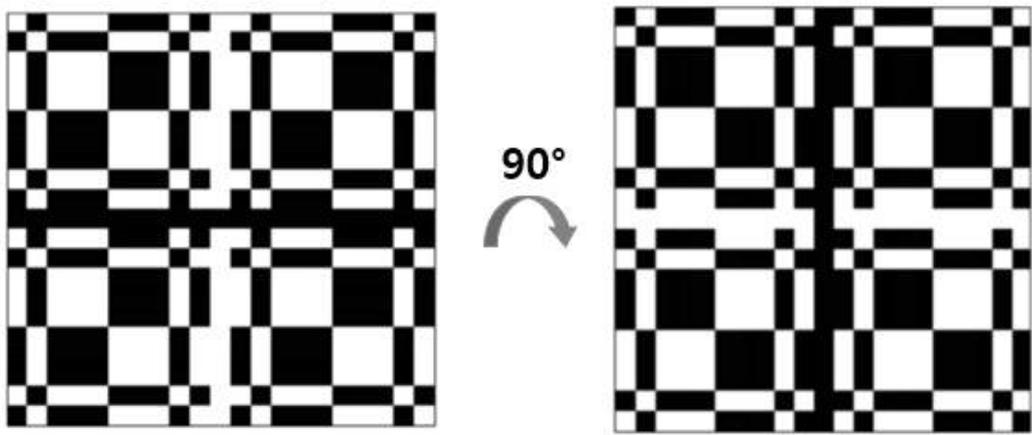


그림 2. Anti mask의 영상획득

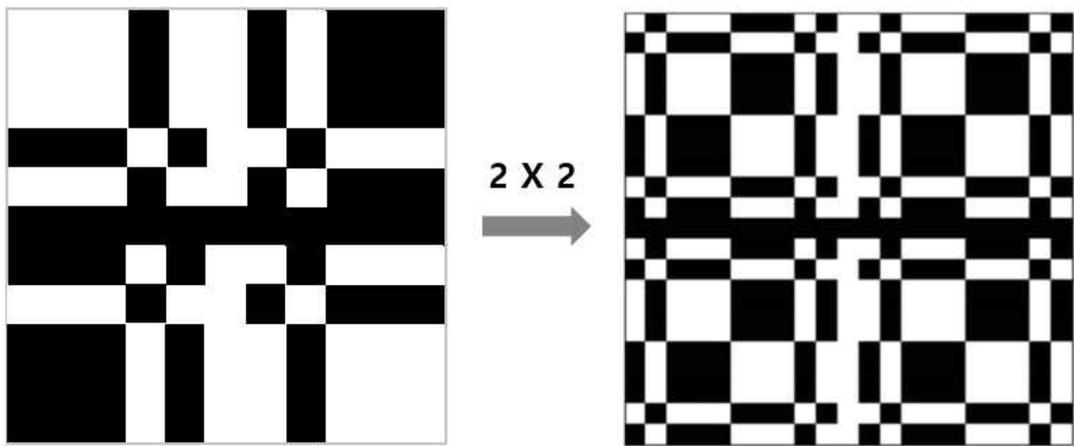


그림 3. Mosaic pattern 11 × 11 array 및 21 × 21 array

3.2 영상재구성 방법

획득된 이미지는 다양한 요인으로 인해 정확한 이미지를 재구성할 수 없거나 부적합한 결과를 도출할 수 있다. 이러한 제한 사항을 극복하기 위해서는 측정 노이즈를 제거하고 공간 해상도 및 최적의 이미지 재구성 결과를 도출하는 방법을 적용한다. 반복 이미지 재구성 알고리즘은 위에서 언급한 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 수단이 된다[23-28]. 반복 이미지 재구성 알고리즘은 수식을 통해 반복적으로 영상을 재구성하여 이미지 품질 저하 문제를 효과적으로 극복한다. 대표적인 기법으로는 MLEM (Maximum Likelihood Expectation Maximization)이 존재한다.

Cross-correlation 기법은 정형화된 수식을 통해 두 개 이상의 영상 사이의 유사도를 측정한다. 사용된 데이터 사이의 반복되는 패턴 혹은 유사 패턴을 분석하여 영상의 성능을 개선한다. Anti 마스크 기반 감마선 영상장비에서 획득된 두 개의 이미지는 cross-correlation을 통해 영상의 유사 패턴을 추출하며, 주위 필요 없는 배경 노이즈를 제거하여 영상의 품질을 개선하는 방향으로 활용할 수 있다.

MLEM은 expectation-maximization (EM) 알고리즘을 기반으로 하며, 그림 4와 같이 이미지의 확률분포함수를 이용하여 영상을 재구성한다. 초기 획득된 영상에서 얻은 데이터는 수학적 수식을 활용해 확률분포함수를 계산할 수 있고, 계산된 확률분포함수를 이용하여 이미지를 업데이트한다. 위 업데이트 과정을 반복적으로 수행하여 획득된 영상은 확률분포함수를 최대화하며, 최종적으로 영상재구성의 정확도가 높고 노이즈가 제거된 영상을 획득할 수 있다. MLEM의 반복적인 영상 업데이트는 계산량이 많아 속도가 느리지만, 전산모사를 통해 얻은 시야각 내 선원 위치에 따른 패턴 영상 정보를 활용한다면 적은 데이터의 양으로도 검출기의 패턴을 생성할 수 있어 빠르게 선원의 위치 판별이 가능하다.

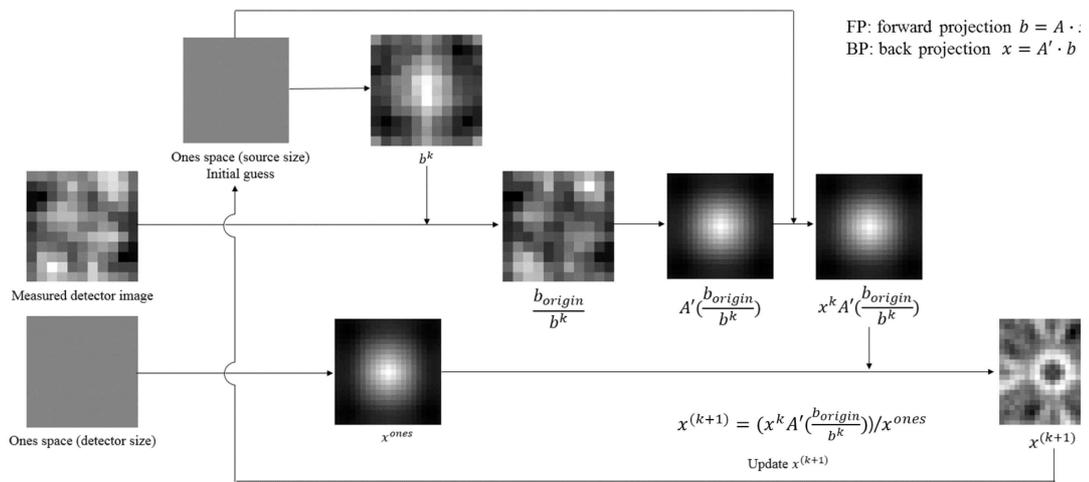


그림 4. 선원의 영상을 재구성하기 위해 사용된 MLEM 방법 개략도[29].

3.3 Epsilon-G 성능

제주대학교에서 개발된 Epsilon-G는 MCNPX-Polimi 전산모사를 통해 구조의 최적화를 달성하였고, 부록 01에서 기존에 개발되었던 해외 장비와의 성능 비교를 통해 장비의 성능을 검증하였다. 사전 연구를 통해 도출된 Epsilon-G의 세부 성능은 다음 표 2와 같다. Epsilon-G의 큰 특징은 영상 민감도가 매우 뛰어나 방사성 물질의 감시 및 탐지 목적에서 효과적인 성능을 기대할 수 있다.

표 2. Epsilon-G의 세부 성능

구분	Epsilon-G
영상획득 타입	Coded-aperture
시야각	45°
각분해능	6~7°
에너지 분해능	7.9%
SNM Detection & Imaging	○
선량률 측정 가능 여부	○ (BKG~100 μGy/h)
측정 가능 에너지	30~3000 keV
¹³⁷ Cs(0.6 μSv/h)의 영상 민감도	1초 미만
무게	5 kg
크기	104 × 144 × 197 mm ³

4. 연구 범위

본 연구에서는 제주대학교에서 개발한 Epsilon-G를 활용하여 원자력 안전규제 기반 방사선 사고 방지 및 비상대응에 효과적으로 활용하는 것을 목표로 한다. 장비의 유효성을 판단하기 위해 안전규제에 적용 가능한 방안을 설정하고 정량적인 데이터를 확보하였다. 단일 감마선 영상장비를 활용하여 재활용 고철 슬러그 내 방사성 오염탐지, 원전 내부 핵종 분석 포인트 선정 작업, 비파괴검사용 선원 안정성 테스트, 방사능 방재 환경탐사, 방사성 핵종 깊이 측정을 수행하였으며, 360° 시야각을 가지는 파노라마 감마선 영상장비 개발을 통해 신속한 현장 측정이 가능하도록 하였다.

II. 안전규제 적용방안

감마선 영상장비의 휴대성과 방사선의 시각화라는 이점은 원자력안전위원회 고시를 기반으로 환경방사선/능 감시, 원자력시설의 해체, 공항 및 항만의 감시기 운영 등 다양한 범주에서 적용할 수 있고, 현장 평가/안전조치에서 추가적인 근거자료를 제공함으로써 작업자의 안전 및 즉각적인 판단, 대응을 가능하게 한다. 다만 방사선 사고 발생 시 높아진 배경 방사선 준위는 방사성 핵종의 영상재구성 정확도에 문제가 발생할 수 있으며, 그 외에도 예상치 못한 다양한 물리적/환경적 제약 사항을 동반할 수 있다. 이러한 문제들로 인해 감마선 영상장비의 현장 적용성 평가는 필수적이며, 본 연구에서는 위의 문제를 해결하기 위해 감마선 영상장비를 활용하여 안전규제에 적용방안을 제시하여 장비의 유효성을 검증하였다. 실험은 크게 단일 감마선 영상장비와 파노라마 감마선 영상장비로 세분화하여 장비의 성능을 검증하였다.

1. 단일 감마선 영상장비

1.1 방사능 방재 환경탐사

원자력안전법 제105조(전국 환경방사능 감시) 및 원자력안전법 시행령 제147조(전국 환경방사능 감시)에 따라 전국토 환경방사능 감시와 해양 방사능 감시, 전국토 환경방사능 자동감시망이 운영 중이다. 전국토 환경방사능 감시는 평상시의 환경방사능 농도를 측정하며, 표 3과 같이 방사능 농도의 변화에 따라 적절한 비상대응 단계를 수립한다. 현재 공간감마선량률을 측정하기 위해 한국원자력안전기술원에서는 NaI(Tl) 섬광 검출기와 가압전리함(High Pressure Ion Chamber)을 사용 중이다. 그러나 위 장비들은 에너지 교정 및 측정 완료까지 약 30분에서 1시간이 소요되어 비상상황 발생 시 신속하게 대응하기에는 시간적인 문제가 발생한다.

Epsilon-G는 위의 한계점을 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 온도/에너지 보정을 완료한 Epsilon-G는 추가적인 교정 작업이 필요하지 않으며, 실시간 공간감마선량률 측정 및 방사성 물질 시각화를 통해 매립 선원 및 오염지역 탐지에 활용할 수 있다. 본 실험에서는 장비의 방사성 핵종 탐지 유효성을 검증하기 위해 임의의 초지 내에 매립된 방사성 핵종을 탐지하는 실험을 진행하였다. 탐지를 위해 그림 5와 같이 감마선 영상장비를 1 m 높이에서 300초 측정된 평균값을 기준값으로 설정하였으며, 사용된 선원인 ^{137}Cs (6.02 μCi , 1.92 μCi)은 약 2 cm 깊이에 매립되었다.

표 3. 국가환경방사선자동감시망 경보설정 기준

준위	기준	비고
정상준위	평균값 + 0.0973 $\mu\text{Sv/h}$ (10 $\mu\text{R/h}$) 미만	자연현상 등에 기인한 평상시 변동범위
주의준위	평균값 + 0.0973 $\mu\text{Sv/h}$ (10 $\mu\text{R/h}$) 이상	방사선 이상 조기발견 목적, 원인 규명
경고준위	0.973 $\mu\text{Sv/h}$ (100 $\mu\text{R/h}$) 미만	식품섭취 제한 권고
비상준위	0.973 $\mu\text{Sv/h}$ (100 $\mu\text{R/h}$) 이상	소개 또는 대피



그림 5. 초지에서의 공간감마선량률 측정

1.2 원전 내부 핵종 분석 포인트 선정 작업

노후화된 원전은 원전 해체를 위해 영구 정지 준비와 해체 주요 전략 및 계획을 수립한다. 원자력안전위원회 고시 제2021-10호에 따르면 원자력 이용 시설의 해체를 위해서는 부지 및 환경 현황 파악이 필수적이며, 이를 위해 방사선학적 특성평가가 이루어진다. 그러나 현장 측정방법, 시료 채취 지점 선정에 어려움을 겪는다. 시료의 대표성을 입증하기 위해서는 많은 시료를 채취/분석해야 하지만 이 과정에서 많은 시간과 비용이 드는 문제점이 발생한다. 특히, 원자력 발전소의 다양한 계통과 계통 내 존재하는 수많은 구조물의 시료를 채취하기에는 비효율적이다.

본 연구에서는 감마선 영상장비를 활용한 시료 채취 지점 선정 방법을 제안한다. 현장에서의 감마선 영상장비는 표면 오염도가 가장 높은 곳에 핫스팟을 제공하며 동시에 실시간 선량률을 제공하여 시료 채취를 위한 위치 선정에 효과적이다. 따라서 감마선 영상장비의 적합성을 평가하기 위하여 중저준위 폐기물 측정과 동시에 고리 1호기의 1차 계통 비파괴적 방사선 특성 분석을 위한 현장 측정을 진행하였다.



그림 6. 원전 내부 시설의 핫스팟 이미지 획득 예시

1.3 비파괴검사용 선원 안정성 테스트

비파괴검사는 재료나 제품을 원형과 기능에 변화를 주지 않고 대상물에 존재하는 불완전성을 조사하고 판단하는 기술을 의미한다. 비파괴검사는 여러 종류가 존재하며, 방사성 동위원소를 이용한 방사선 비파괴검사도 존재한다. 방사선 비파괴검사는 선량 한도 이상의 방사선 피폭을 야기하거나, 사용 선원의 분실, 선원 파손으로 인한 오염확산 등의 방사선 사고를 동반하며, 많은 양의 방사선에 노출될 수 있어 안전관리는 필수적이다.

감마선 영상장비는 실시간 선량률을 제공하여 작업 시 작업자가 받는 피복량을 실시간으로 감시할 수 있으며, 방사성 핵종의 이동 경로를 파악하여 방사선 사고를 예방하고 사고 시 즉각적인 대응을 할 수 있는 자료를 제공할 수 있다. 따라서 실제 비파괴검사 작업 절차에 감마선 영상장비를 활용하여 방사성 핵종의 이동 경로를 파악하여 장비의 유효성을 검증하였다.

1.4 재활용 고철 슬러그 내 방사성오염 탐지

생활주변방사선 안전관리법 제20조(재활용고철취급자의 감시기 설치)에 따라 단위 용량 30톤 이상의 전기 용융시설이나 단위 용량 100톤 이상의 전로를 이용하는 시설은 감시기를 설치/운영해 방사성 핵종을 감시한다. 기준 방사능 농도를 초과하거나 초과로 의심되는 물질이 감시기를 지날 시 경보가 발생하며 작업자의 방사능 농도 초과 물질의 선별 작업이 진행된다. 그러나 질량/부피가 큰 폐기물의 경우, 폐기물 처리 시설로의 이동 문제가 발생하며, 부분적으로 오염된 폐기물은 오염 부위를 파악하기 위해 모든 범위를 일일이 측정해야 하는 시간적 문제가 발생한다.

감마선 영상장비는 위의 문제를 쉽게 해결할 수 있다. 감마선 영상장비의 영상재구성 기능을 통해 표면 오염도가 가장 높은 폐기물을 1차 선별할 수 있으며, 부분적으로 오염된 폐기물도 오염 부위를 가시적으로 파악할 수 있어 효과적인 폐기물 선별이 가능하다. 따라서 감마선 영상장비를 통한 폐기물의 모의 선별 실험을 진행하여 장비 사용의 건전성을 검증한다.

1.5 방사성 핵종 깊이 측정

1.5.1 삼각측량법

감마선 영상장비는 영상재구성 과정을 통해 방사성 물질의 위치를 적시적으로 보여주어 직관적인 판단이 가능하지만, 2차원 평면에서 방사성 물질의 위치를 표현하는 영상장비의 특성상, 지면 혹은 매립된 방사성 핵종의 경우 정확한 위치를 추정하기 어렵다. 하지만 동일한 대상을 목표로 영상획득 시, 두 영상재구성의 차이점을 이용하여 방사성 핵종의 깊이 정보를 획득할 수 있다.

그림 7과 같이, 영상장비와 선원이 수직인 조건일 때 선원의 위치와 핫스팟의 위치는 동일하다. 이후 다른 위치에서 감마선 영상장비를 생성된 핫스팟 방향으로 영상을 재구성할 시 핫스팟은 이전과 다른 위치에 생성된다. 즉, 영상장비의 위치에 따라 핫스팟의 위치가 달라지며, 두 포인트 사이에 이격거리가 발생한다. 또한, 이격거리는 선원의 깊이에 따라 다르게 분포된다. 본 실험에서는 위 특징을 이용하여 선원의 깊이 정보를 역으로 추정하였다. 모든 실험은 수직 조건과 45°일 때의 조건을 이용하여 진행했다.

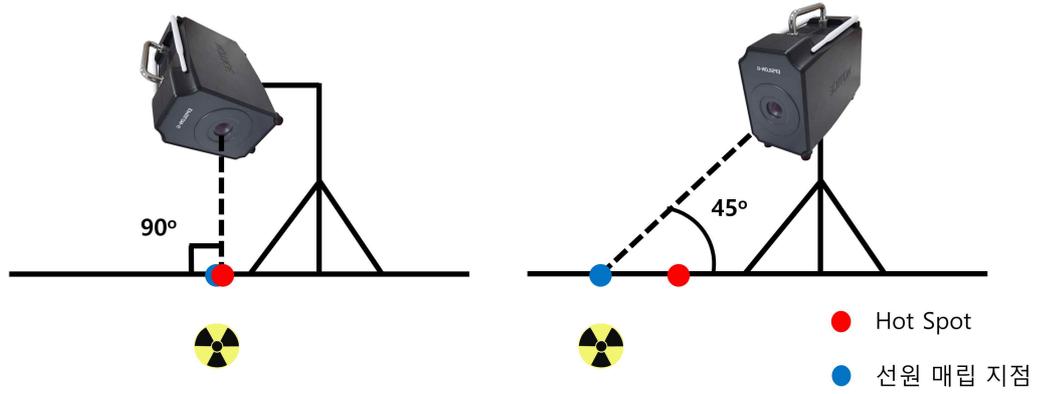


그림 7. 깊이 추정 절차 개략도

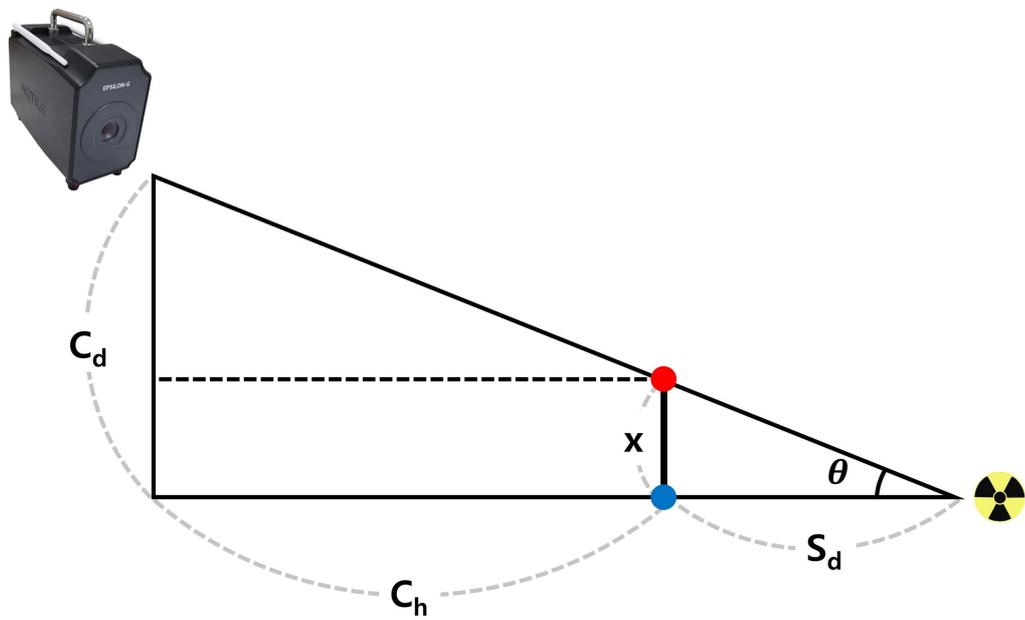


그림 8. 삼각측량법 수식 개략도

그림 8에서는 선원의 깊이에 따라 핫스팟의 이격거리가 변화하는 메커니즘을 나타낸다. x 는 두 번의 측정을 통해 획득한 핫스팟 이격거리이며 S_d 는 선원의 매립 깊이, C_d 와 C_h 는 영상장비의 위치 좌표를 의미한다. C_d 와 C_h 의 값에 따라 x , S_d 값이 변화하기 때문에, C_d 와 C_h 의 변수값을 고정하여 x 와 S_d 를 역추적할 수 있는 작업을 수행하였다. 본 실험에서는 45° 조건을 달성하기 위해 C_d 와 C_h 의 값을 50 cm로 고정하였다. 해당 메커니즘은 삼각함수로 표현할 수 있으며, 선원의 깊이 분포에 따라 x 값 변화를 파악하기 위해 수식 (1)로 표현하였다.

$$\tan \theta = \frac{C_d}{C_h + S_d} = \frac{x}{S_d} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 이격거리 x 를 추정할 수 있으며, x 에 관하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$x = \frac{C_d \cdot S_d}{C_h + S_d} \quad (2)$$

식 (2)는 선원의 깊이에 따라 이격거리 변화를 나타낸다. 다시 말해, 식 (2)를 통해 선원의 깊이와 핫스팟의 이격거리 사이의 상관관계를 정의할 수 있다. 이는 새로운 환경에서 x 값을 측정한다면 역으로 선원의 깊이 정보를 추정할 수 있음을 의미한다. 깊이 추정 식은 식 (2)를 S_d 에 관하여 정리하면 얻을 수 있다. 선원의 깊이 정보 추정 식은 다음과 같이 표현된다.

$$S_d = \frac{x \cdot C_d}{C_h - x} \quad (3)$$

C_d 와 C_h 가 50 cm일 경우, 카메라의 화각이 $34 \times 34 \text{ cm}^2$ 임을 고려하면 식 (3)에 의해 이론상 깊이 추정이 106.25 cm까지 가능하다. 그러나 선원의 세기, 물질의 차폐 정도에 따라 검출기에 도달하는 방사선의 양이 제한되기 때문에 모든 깊이를 추정하기에는 한계가 있다. 실험은 10, 20, 30, 40, 50 cm 간격으로 진행되었으며, 식 (2)를 사용하여 이론값 x 를 도출한다. x 값은 표 4에 작성되어 있으며, 실제 실험을 통해 이론값과 실험값의 정확도를 검증하였다. x 값을 측정할 수 있다면 식 (3)에 의해 선원 매립 깊이를 추정할 수 있으므로 본 연구에서 제시하는 방법론을 검증하였다.

표 4. 삼각측량법을 이용한 이격거리 이론값

S_d (cm)	C_d (cm)	C_h (cm)	x (cm)
10	50	50	8.33
20	50	50	14.29
30	50	50	18.75
40	50	50	22.22
50	50	50	25.00

1.5.2 실험 환경 구축

삼각측량법을 검증하기 위해서는 정밀한 작업이 요구된다. 야외에서의 실험은 기상 문제, 온도 변화, 매립 선원의 부정확한 깊이 등 다양한 변수들에 의해 부정확한 결과를 가져온다. 즉, 실험의 신뢰성을 확보하기 어렵다. 본 실험에서는 정확성을 위해 아크릴판을 이용한 선원 수납공간을 제작하였다. 그림 9과 같이 $43 \times 43 \times 50 \text{ cm}^3$ 크기의 아크릴 상자를 2개 제작하였으며, 내부에는 흙을 채워 넣어 지면과 유사한 환경을 조성하였다. 아크릴 상자에는 선원 수납공간을 만들어 10 cm 간격으로 선원의 깊이 정보를 파악할 수 있으며, 최대 50 cm까지 깊이 별로 선원을 이동하여 측정할 수 있다. 사용 선원은 ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co 선원을 사용하였으며, 방사능 값은 각각 $68.6 \mu\text{Ci}$, $68.36 \mu\text{Ci}$, $63.28 \mu\text{Ci}$ 이다. 해당 방법론의 경향성을 파악하기 위해 영상재구성 작업을 진행하였고, 영상재구성 결과는 그림 10과 같다.

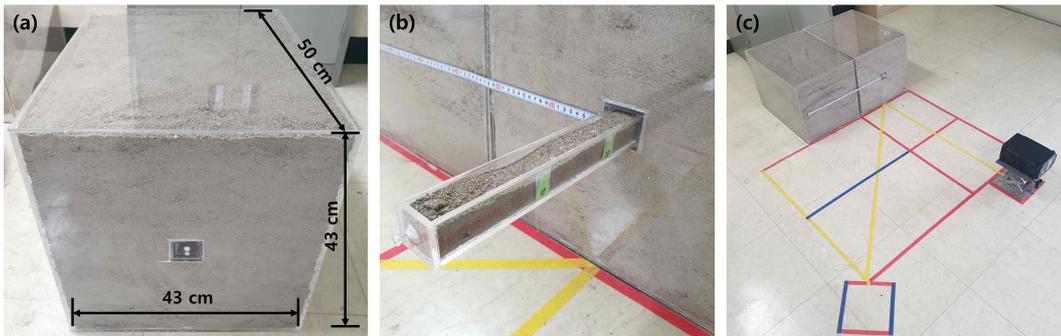
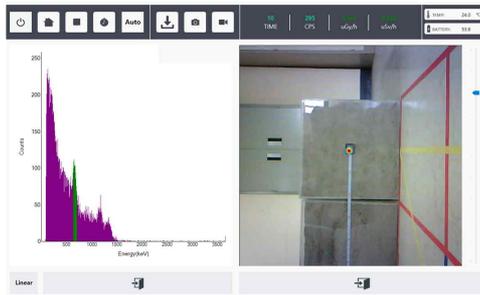
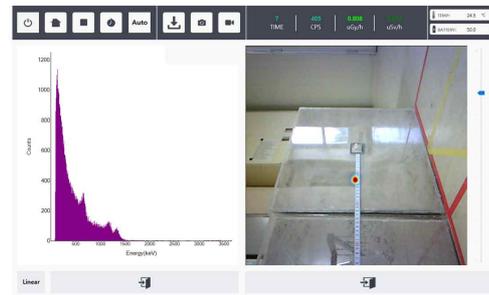


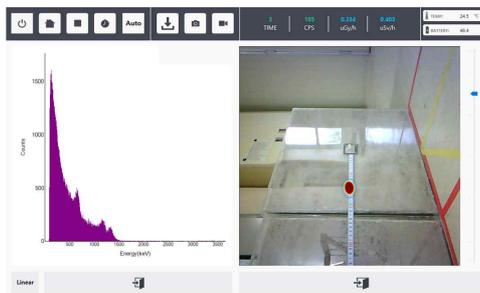
그림 9. $43 \times 43 \times 50 \text{ cm}^3$ 크기의 아크릴 상자(a), 선원 수납공간(b) 및 측정 시스템 개략도(c)



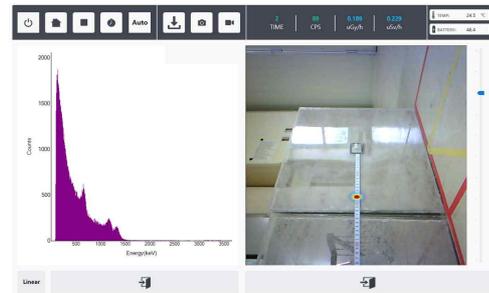
<정면>



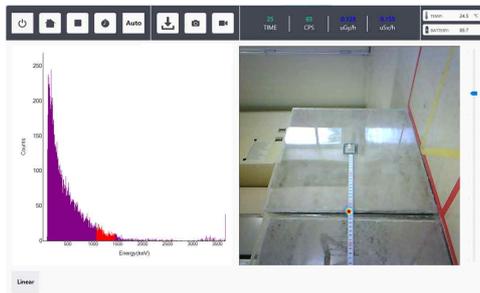
<45°, 10 cm >



<45°, 20 cm >



<45°, 30 cm >



<45°, 40 cm >



<45°, 50 cm >

그림 10. 감마선 영상장비를 활용한 삼각측량법의 경향성 파악

2. 파노라마 감마선 영상장비

2.1 현장 신속 탐사

감마선 영상장비는 마스크의 변조 패턴과 복합 수학적 알고리즘을 통해 영상을 재구성하며, MCNP 전산모사를 통해 결정된 마스크-섬광체 구조에 따라 장비의 시야각을 결정한다. 본 실험에서 사용된 감마선 영상장비 Epsilon-G는 45°의 시야각을 가지며, 재구성된 이미지는 FOV(Field-of-View) 내에서 부분적인 영상재구성 결과를 제공한다. 하지만 위와 같이 제한된 시야각 내에서의 영상재구성은 비상상황 발생 시, 공간의 오염분포를 신속하게 평가하기에는 한계가 존재한다. 측정시간의 증가는 넓은 현장에서 선원의 유무를 판별하기에 적합하지 않으며, 밀폐된 공간에서의 장비 사용자는 더 많은 피폭 선량값을 받는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 FOV를 확장한 감마선 영상장비를 제안한다.

2.1.1 장비 설계

제한된 시야각을 극복하기 위해 8개의 마스크를 결합하였다. 45°의 시야각을 가지는 마스크를 그림 11과 같이 8개 사용하여 링 배치한다면 시야각 360°를 달성할 수 있어 실시간으로 전 방향의 공간을 측정할 수 있다. 단일 감마선 영상장비의 경우, 특정 공간 내에 존재하는 방사성 핵종을 탐지하기 위해 여러 번의 측정 과정이 필요하지만, 팔각형의 파노라마 감마선 영상장비는 단 한 번의 측정으로 공간의 핵종 분포 탐지 작업을 수행하기 수월하다.

장비를 제작하기 위해 자체적으로 그림 12와 같이 설계를 진행하였다. 전체 크기는 $421.87 \times 421.87 \times 311.01 \text{ mm}^3$ 이다. 신호처리 보드를 고정하기 위해 장비는 총 3층으로 구성되었고, 3층은 마스크와 검출 시스템을 배치하였다. 마스크의 배치는 인접하는 마스크의 시야각과 간섭이 발생하지 않아 독립적으로 영상을 분리할 수 있으며, 개별적으로 분리된 영상은 현장 정밀 측정이 가능하도록 설계하였다. 2층은 DAQ, 1층은 Motherboard가 위치하며 해당 보드에 대한 상세 설명은 2.2에 기술하도록 한다.



그림 11. 8개의 마스크를 사용한 링 배치 구조

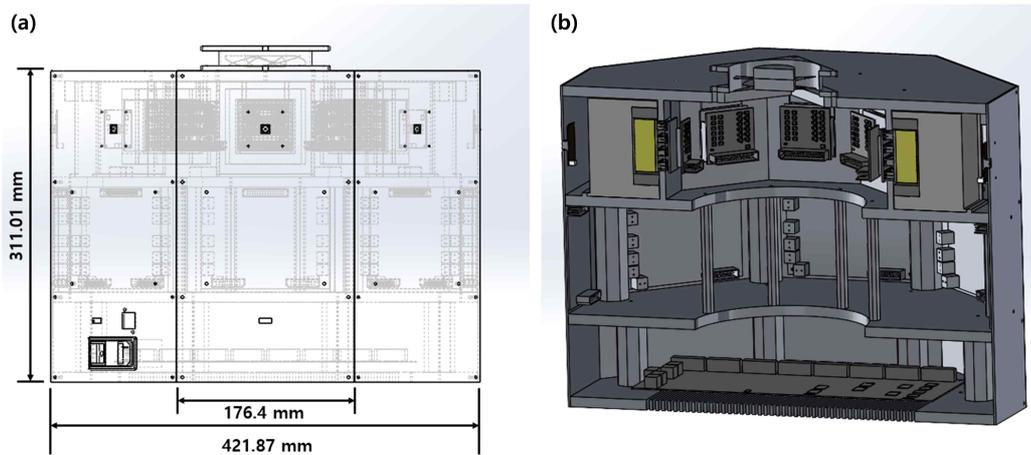


그림 12. 파노라마 감마선 영상장비의 개략도(a) 및 단면도(b)

2.1.2 장비의 신호처리

장비의 전체적인 신호처리 과정은 그림 13과 같다. 12×12 array로 구성된 섬광체와 SiPM은 하나의 검출기 모듈로 구성되어 있으며, 방사선과 상호작용을 통해 144개의 픽셀에서 전류 신호가 발생한다.

발생한 144개의 신호는 144개의 픽셀에서 반응한 위치 정보를 추출하기 위해 24개의 판독 회로(행 12개 + 열 12개)로 구성되어 있고, 판독 회로를 거쳐 반응 위치가 결정된 신호들은 TIA (Trans-Impedance Amplifier)를 통해 전류 신호를 전압 신호로 변경한다. 이후 개별 성형 증폭기에서 신호를 성형하여 그림 14와 같은 파형을 획득할 수 있다.

사용된 TIA는 전치 증폭기에서 발생하는 노이즈와 저항이 감소함에 따라 나타나는 펄스 형상 왜곡을 최소화하기 위해 49.9 Ω 의 피드백 저항값이 선택되었다.

정규화된 아날로그 신호는 ADC (Analog to Digital Converter)에 의해 디지털 신호로 전환되고 FPGA (Field Programmable Gate Array)에서 발생 신호를 처리하여 신호가 획득된다.

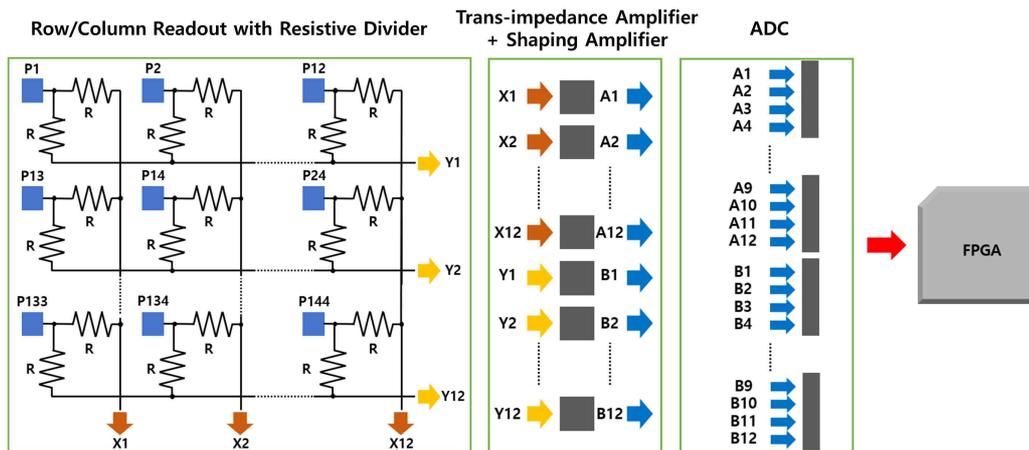


그림 13. 감마선 영상장비의 신호처리 회로 구성도

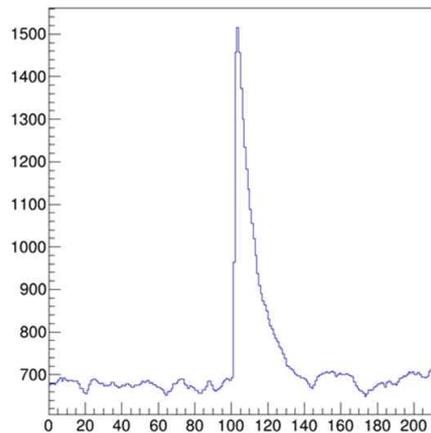


그림 14. 센서의 감마선 파형

2.1.2.1 영상품질 개선을 위한 방법

본 실험에서 설계된 장비는 그림 14와 같은 파형을 144개의 채널에 대해 획득한다. 검출된 신호의 면적은 입사된 감마선의 에너지에 비례하고, 가장 큰 신호가 검출된 센서에서 신호를 누적하여 섬광 이벤트의 상호작용 위치를 결정한다. 하지만 다수의 입사 방사선은 Compton 산란 이벤트를 발생시켜 영상의 품질을 저하하는 문제가 발생한다. 따라서 Compton 산란 이벤트를 제거하는 방법을 고려해야 한다.

2-D flood map은 144개의 픽셀로 구성된 검출기 모듈에서 발생한 신호의 반응 위치를 2차원 평면으로 보여준다. 2-D flood map에서 검출된 신호들은 검출기 내 발생한 가장 큰 신호를 행과 열의 픽셀로 지정한 값이고, 가장 큰 신호가 검출된 센서의 위치에서 신호가 누적된다. 이때 계산된 검출기 위치 중, 산란 신호는 픽셀과 픽셀 사이에 무분별하게 위치한다. 이는 표적물질의 영상 품질을 저하하는 문제점을 일으킨다. 따라서 그림 15와 같이 픽셀의 중심값을 기준으로 특정한 임계값을 부여하고, 이 값을 넘어서는 신호는 검출기 내부에서 산란된 사건으로 판별하여 영상 획득 사건에서 제외하였다. 또한, 이 장비의 신호처리는 각각의 행과 열의 신호를 따로 처리하기 때문에 다중 픽셀 산란반응 사건(multi-pixel scattering events)도 처리할 수 있다[30].

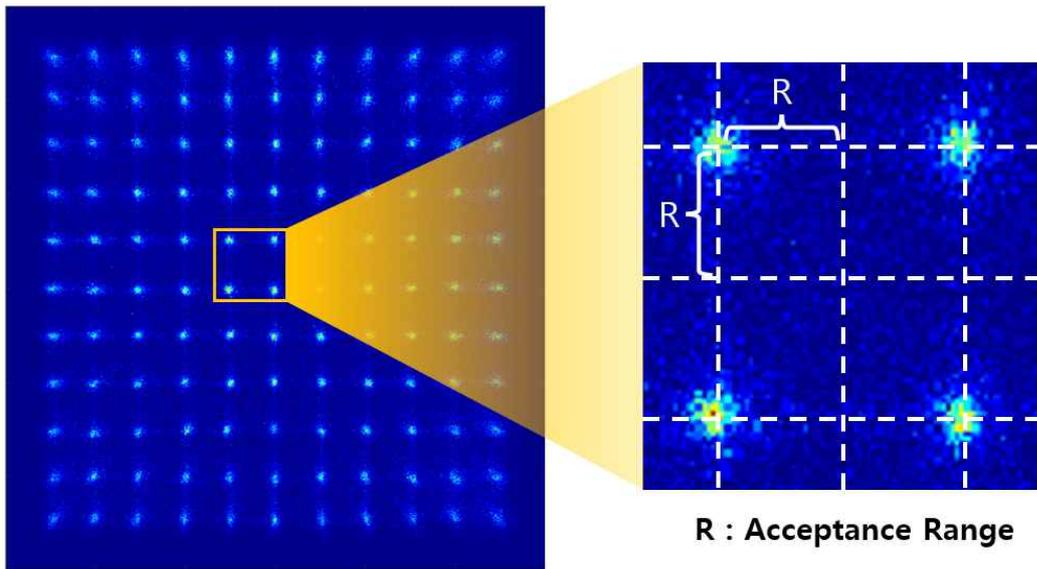
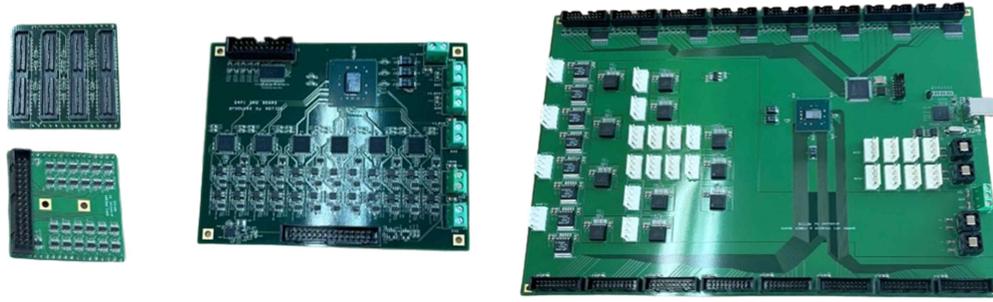


그림 15. 2-D flood map 내에서 임계값 설정을 통한 compton 산란 신호 제거 방법

2.1.2.2 신호처리 보드

장비의 신호처리 보드는 그림 16과 같이 FEE (Front-End Electronics) 보드, DAQ (Data Acquisition) 보드, Mother 보드(FPGA + 전원 보드)로 구성된다. 파노라마 감마선 영상장비는 8개의 검출기 모듈로 구성되기 때문에, 8개의 FEE 보드와 8개의 DAQ가 설계되었고, 8개의 검출기에서 획득된 데이터 처리와 장비의 전원 공급을 위해 1개의 Mother 보드로 설계되었다.



<FEE board>

<DAQ board>

<Motherboard>

그림 16. 파노라마 감마선 영상장비의 신호처리 보드

FEE 보드는 그림 17과 같이 24개의 판독 회로를 포함하고 있다. 24개의 판독 회로는 방사선에 의해 발생한 신호의 위치를 결정하는 역할을 한다.

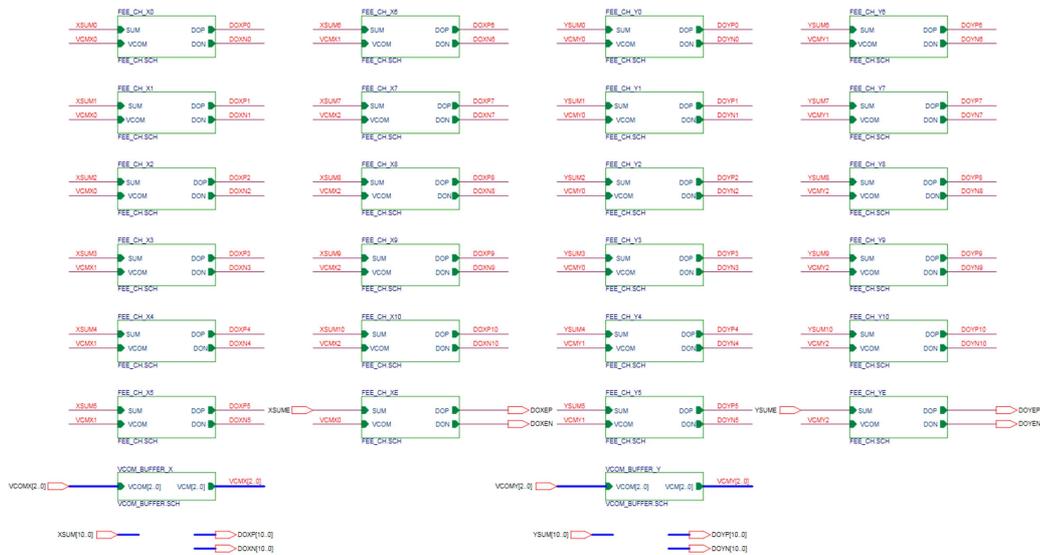


그림 17. 파노라마 감마선 영상장비의 FEE 보드 회로도

그림 18은 하나의 판독 회로를 확대한 아날로그 회로도를 보여준다. 이 아날로그 회로는 pre-amplifier와 shaping-amplifier가 연속으로 결합되어 있다. 검출기와 상호작용한 입사 방사선은 그림 19와 같이 전류 펄스로 변환되어 에너지를 축적하지만 총 전하는 일반적으로 너무 작아 pre-amplifier를 사용해 출력 신호를 증폭하고, shaping amplifier를 사용해 출력 신호를 측정에 적합한 형태로 변환하여 신호를 누적하는 과정을 거친다.

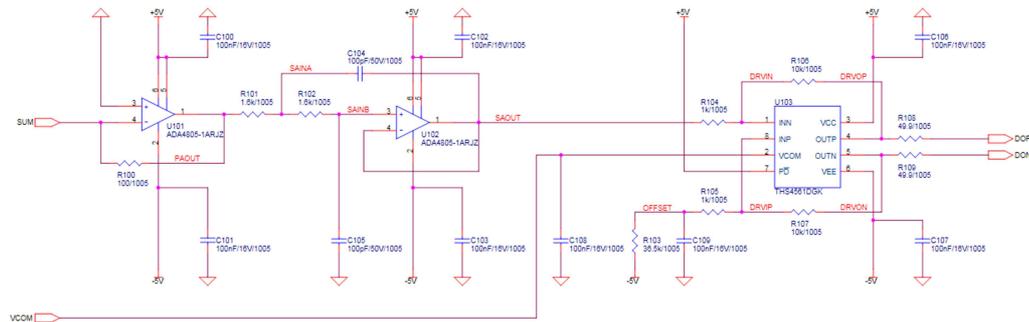


그림 18. 파노라마 감마선 영상장비의 아날로그 회로도

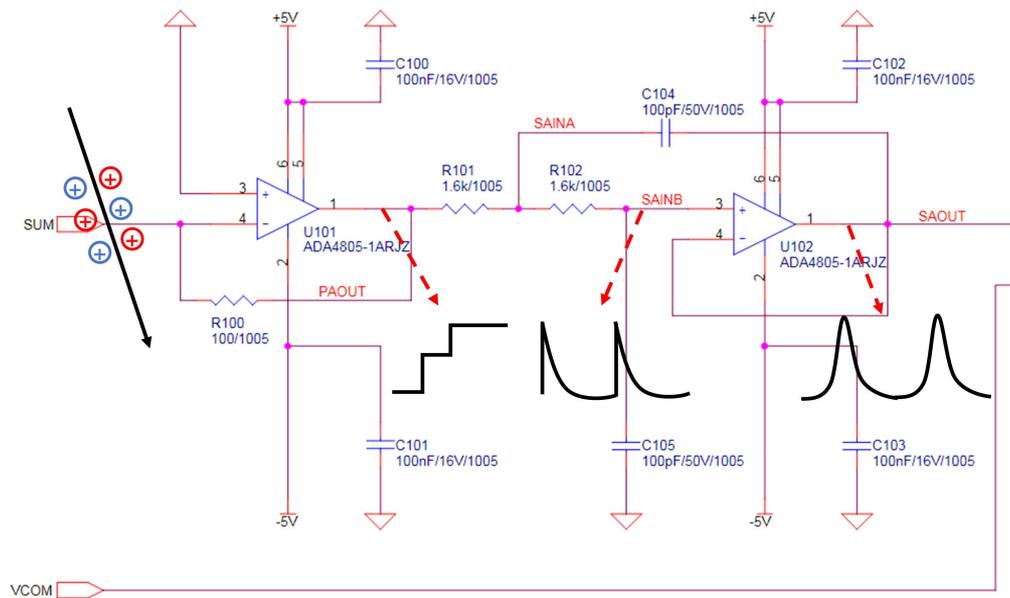


그림 19. 아날로그 회로 내에서 발생하는 신호 파형 변화

DAQ 보드는 ADC와 디지털 회로를 포함하고, FEE에서 정규화된 신호를 받아들인다. 이 장비의 ADC는 15 MHz의 샘플링률과 12 bit의 해상도를 가진다. 장비의 모든 기능이 작동됨과 동시에 전력을 최소화하기 위한 목적에서 최적화되었다. ADC의 최적화된 성능은 전력 공급, 발열 문제를 해결하고, GAGG(Ce)에서 관찰되는 감쇠 시간을 갖는 신호를 유효하게 획득할 수 있다. 그림 20은 ADC의 회로도를 보여준다.



그림 20. 파노라마 감마선 영상장비의 ADC 회로도

FPGA는 발생 신호를 처리하기 위해 설계되었으며, 프로세서 내부 회로를 병렬적으로 실행시킴으로써 CPU보다 압도적인 계산속도를 낼 수 있다. 검출기 모듈이 1개에서 8개로 증가함에 따라 신호처리량은 8배 증가하였지만, FPGA는 모든 신호를 효과적으로 처리한다. 추가로, 인터페이스를 이전 방식인 이더넷 통신에서 USB 3.0 통신으로 변경함으로써 PC와의 데이터 처리 속도를 향상해 신호처리의 지연 문제를 극복하였다.

데이터 처리 과정은 그림 21과 같으며, 최종적으로 획득된 데이터는 8개의 검출 시스템에서 받아들이는 총 에너지 스펙트럼과 공간감마선량률, 전방위를 동시에 탐사할 수 있는 파노라마 이미지를 생성한다.

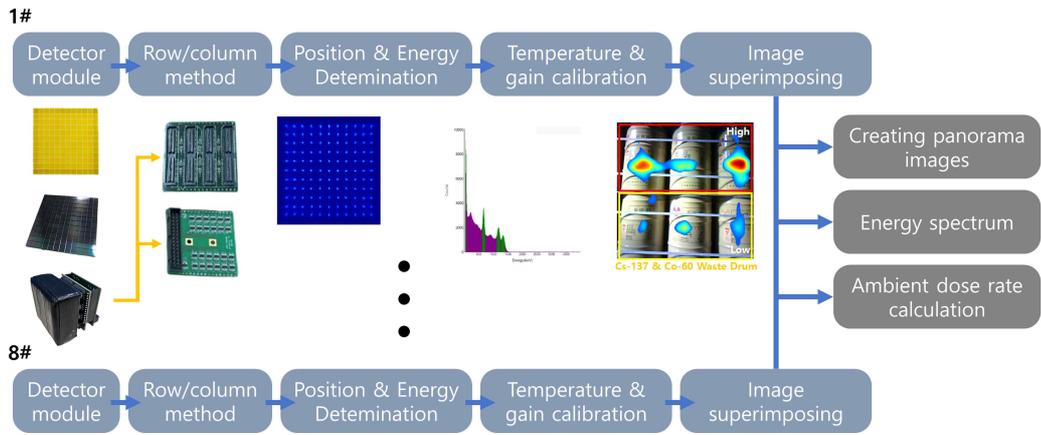


그림 21. 신호처리 과정 개략도

2.3 실험 조건

8개 검출 시스템의 영상재구성에 대한 유효성을 검증하기 위해 그림 22와 같이 선원을 배치하였다. 다양한 방사성 핵종이 존재할 시, 산란 방사선은 인접하는 검출기에 영향을 주어 영상재구성의 품질을 저하시키는 원인이 된다. 특히, 높은 배경방사선량을 가지는 환경에서는 이러한 한계점이 더욱 명확할 것으로 판단되어 해당 장비의 영상재구성 경향성을 파악할 필요가 있다.

사용된 선원은 ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu 이며, 영상장비에 도달하는 방사선의 선량률이 유사하도록 선원을 배치하였다. 영상재구성을 위한 데이터 확보를 위해 8개의 검출 시스템은 300초 동안 동시 측정되었으며, 측정되는 시간 동안 장비는 고정 상태로 유지하였다.

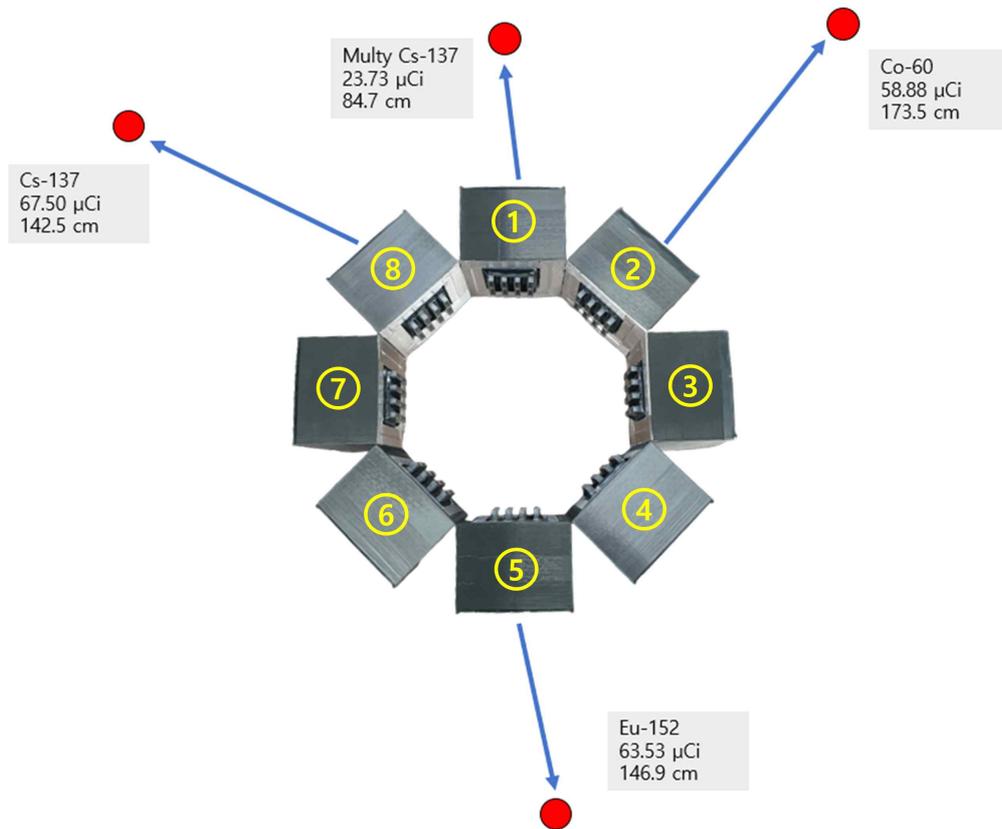


그림 22. 파노라마 영상장비 실험을 위한 선원 배치도

Ⅲ. 결과 및 논의

1. 단일 감마선 영상장비 결과

1.1 방사능 방재 환경탐사 결과

현장의 방사능 특이 지점을 판단하기 위해 오염되지 않은 배경 방사선 준위를 측정하여 이상치를 판단할 수 있는 기준값을 설정하였다. 300초 측정 결과, 23~35 cps, 0.072 $\mu\text{Gy/h}$, 0.085 $\mu\text{Sv/h}$ 의 값을 도출하였으며, 해당 기준값을 바탕으로 방사성 특이점을 추적하였다. 인공 핵종의 유무를 판단하기 위해 감마선 영상장비를 지면 방향으로 기울인 상태로 현장을 탐색하였다. 탐사 과정에서 핵종의 광피크 관측, 계수율(cps) 및 배경 방사선 준위의 기준값을 초과하는 포인트를 탐지하였으며, 탐지된 포인트 방향으로 영상을 재구성하여 핵종의 위치를 판별하였다. 방사능 값에 따라 영상을 획득하는데 필요한 시간이 결정되지만, 사용된 선원들의 경우 대략 2 cm 정도의 깊이에 매립되어 있어 토양의 차폐 효과로 인해 선원의 방사능 값은 더욱 감소되어 정밀한 측정이 필요하였다. 6.02 μCi 의 ^{137}Cs 선원의 경우, 평균 46 cps를 보였으며 공간감마선량률 기준치보다 약 18 cps의 높은 방사선 준위를 가져 5분의 계측시간으로 영상을 획득하였다. 1.97 μCi 의 ^{137}Cs 선원의 경우, 평균 37 cps를 보였으며, 공간감마선량률 기준치보다 약 9 cps의 높은 방사선 준위를 가져 10분의 계측시간으로 영상을 획득하였다. 재구성된 영상은 아래 그림 23과 같으며, 성공적으로 선원의 위치에 영상을 재구성한 것을 확인하였다. 이는 낮은 선량값을 가지는 방사선 특이 지점도 탐지할 수 있음을 확인하여 감마선 영상장비의 가능성을 검증하였다.

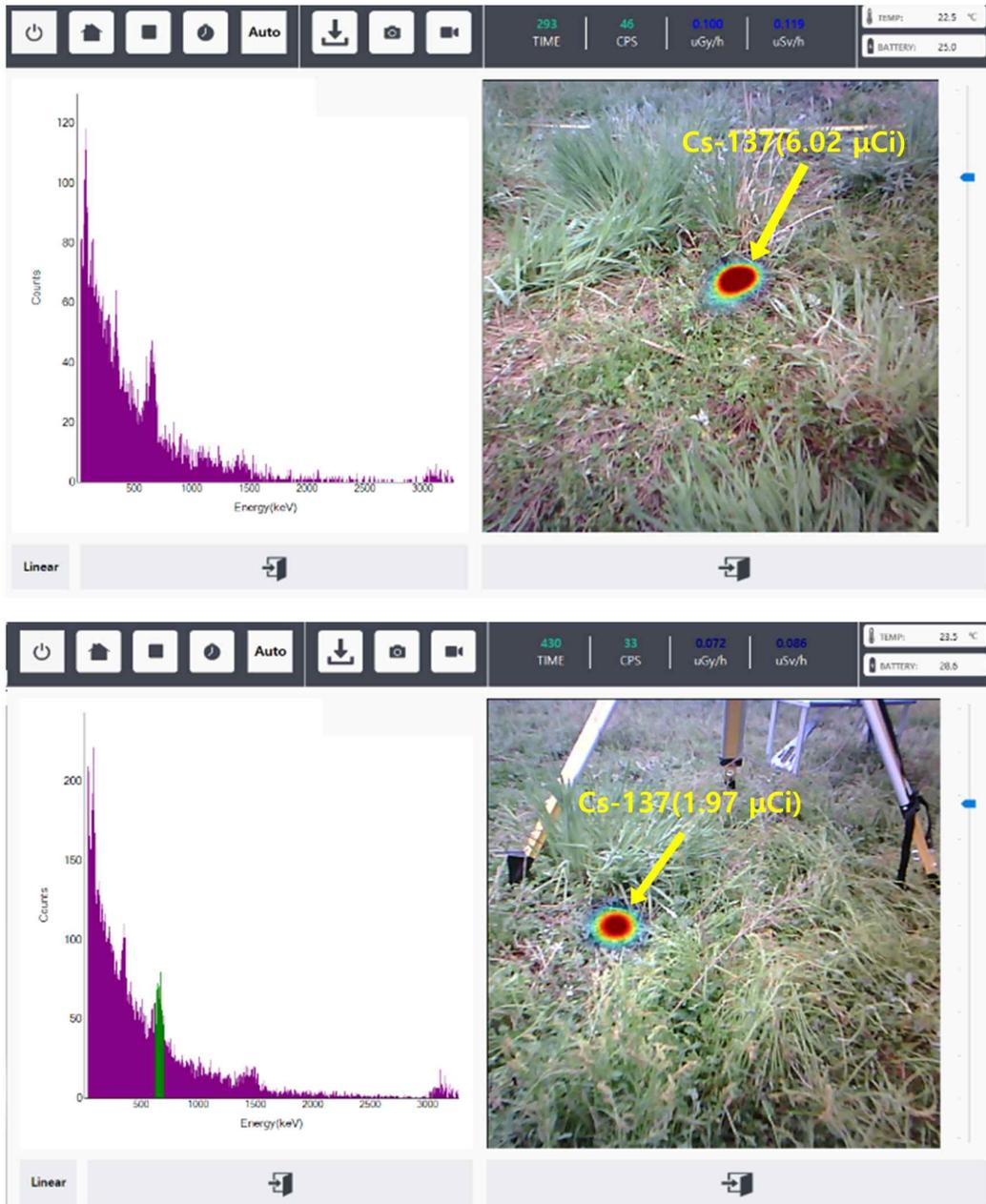


그림 23. 배경 방사선 준위에서 방사선 특이지점 평가 결과

1.2 원전 내부 핵종 분석 포인트 선정 작업

감마선 영상장비를 활용한 시료 채취 지점 선정의 신뢰성을 확보하기 위해 한국 원자력연구원, 한국원자력환경공단과 협력하여 중저준위 폐기물 드럼을 측정하였다. 해당 작업은 기 상용화된 프랑스 제품 iPIX™과 제주대에서 개발한 Epsilon-G를 이용하여 중저준위 폐기물의 시료 채취 지점 선정을 평가하였다. 측정은 그림 24와 같이 영상장비와 중저준위 폐기물의 거리를 일정하게 두었으며, 300초간 측정하였다. 본 테스트 결과, 드럼과 감마선 영상장비의 거리가 0.9 m일 때 측정 당시 계수율은 위치별로 600~1100 cps를 나타냈으며, 공간감마선량률은 1.728~2.7 $\mu\text{Sv/h}$ 의 값을 도출하였다. 화면상에서는 드럼 좌측에 핫스팟이 존재함을 확인하였으며, 핫스팟이 영상장비와 수직일 때 가장 높은 계수율과 공간감마선량률을 나타내어 관심 대상의 시료 채취 지점을 효과적으로 선정할 수 있었다.

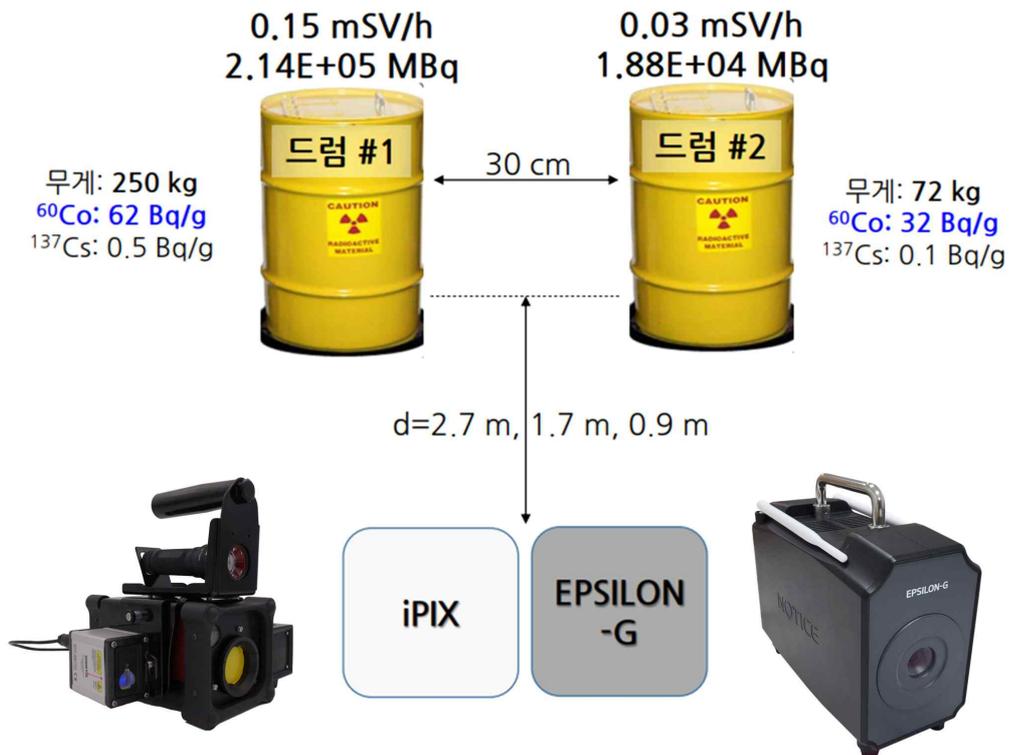


그림 24. 감마선 영상장비 활용 중저준위 폐기물 측정 실험 조건[31]

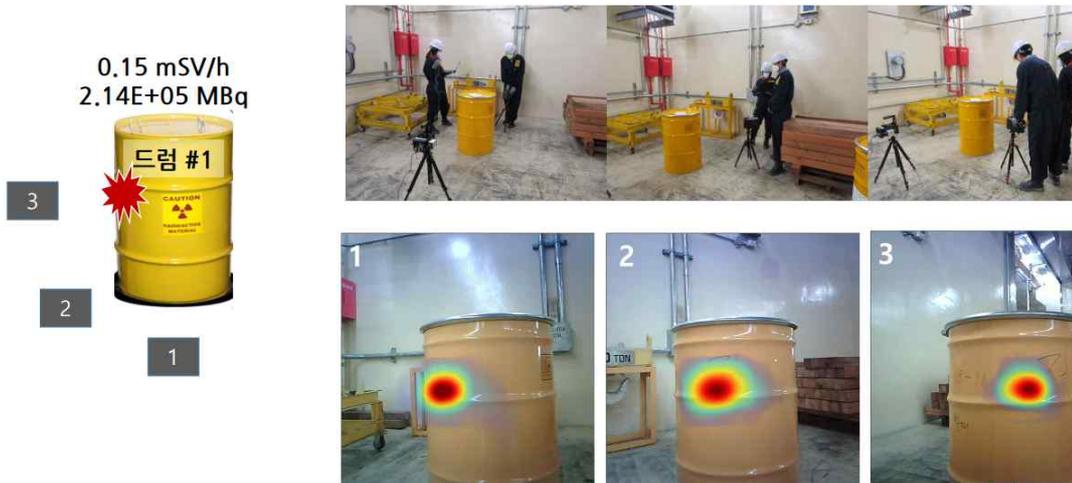


그림 25. 감마선 영상장비 활용 중저준위 폐기물 측정 결과[31]

위 결과를 기반으로 해체 작업을 앞둔 고리 1호기의 1차 계통 내(방사선 작업구역)에서 감마선 영상장비의 적용성을 평가하였다. 해당 작업도 마찬가지로 iPIX™와 Epsilon-G 두 장비를 사용하였으며, 방사성 핫스팟 위치의 동일 여부를 확인하였다. 측정 지역은 계통별 연결 배관 및 밸브, 그리고 펌프 등에 대한 측정이 이루어졌으며, 크게 RCS (Reactor Coolant System)의 hot leg와 cold leg, crossover, 가압기 상부, 관통부 등의 방사성오염 지역을 측정하고 주요 핵종을 판별하였다.

측정 결과 모든 계통은 공통으로 유량이 변하는 밸브 및 드레인 쪽이나 곡 관 부분에서 핫스팟이 생성되었으며, 이 지점에서 crude가 쌓여 있는 것으로 예측되었다. 특이사항으로는 각 측정지점에서 정비를 위해 사용한 센서들이 결합할 수 있는 연결부에서 방사성오염이 두드러짐을 확인하였고, 고방사선 지역 배관의 경우 주로 ^{60}Co 에 의한 오염이 주원인이며, 저방사선 지역의 밸브나 펌프의 경우, ^{60}Co 과 ^{137}Cs 핵종이 주된 방사성오염 원인이었음을 확인하였다.

1.3 비파괴검사용 선원 안정성 테스트 결과

방사성 동위원소는 ^{192}Ir 이 사용되었으며, 장비 사용자의 안정성 평가 및 장비 운용 전/중/후로 선량 변화, 선원 이동 경로를 파악하였다. 측정 결과, 작업자가 장비 사용 전에도 $0.28 \mu\text{Sv/h}$ 의 환경에서 방사선 피폭에 노출될 수 있음을 보이며, 실제 비파괴검사를 위한 동위원소 운용 시 작업자는 $16.65 \mu\text{Sv/h}$ 환경에 노출되어 체내에 많은 방사선이 조사됨을 확인하였다. 또한, 감마선 영상장비는 실시간 영상을 제공함으로써 비파괴검사용 선원의 작동 전/중/후의 이동 경로를 쉽게 파악할 수 있었으며, 작업 종료 이후에도 선원의 위치를 파악하여 이탈 및 선원의 차폐 여부, 분실사고 예방 목적에서 효과적으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 따라서 감마선 영상장비의 활용은 효과적인 방사선 사고 예방/대응 및 작업자의 위험성 판단, 즉각적인 대처로 작업자의 방사선 피폭을 저감하는 효과를 기대하였다.

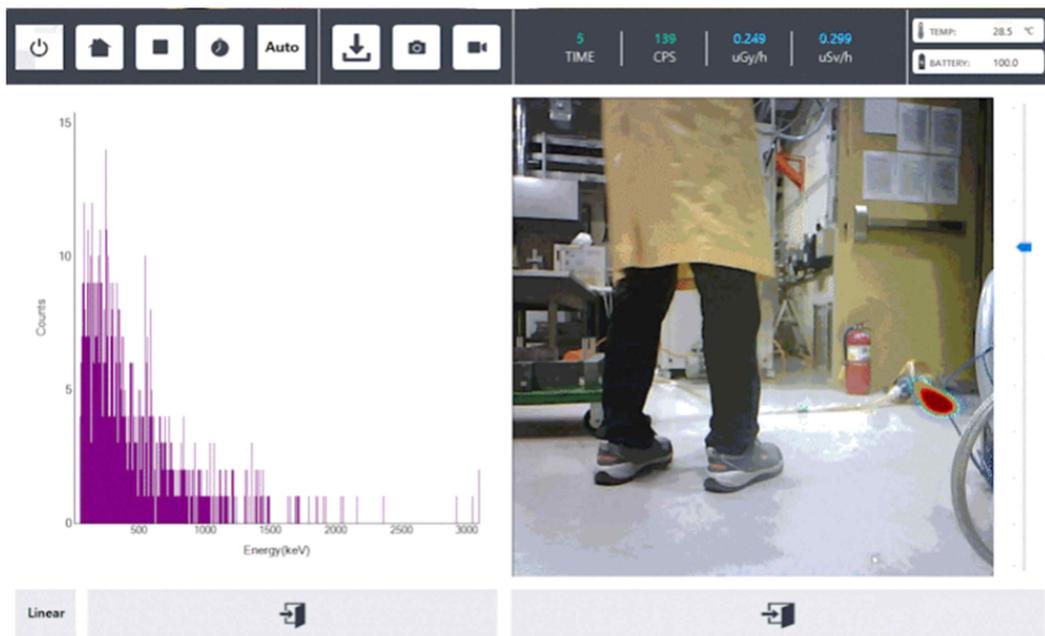


그림 26. 비파괴검사 장비 사용 전 작업자와 선원 이미지

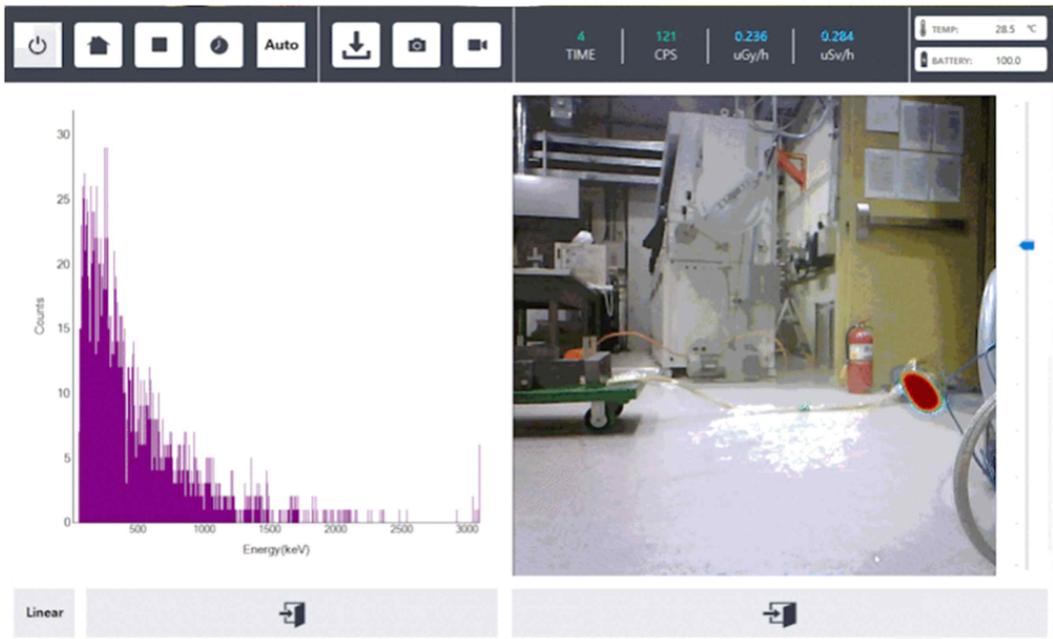


그림 27. 비파괴검사 장비 사용 시 선량 환경(24.48 $\mu\text{Sv/h}$) 및 선원 위치

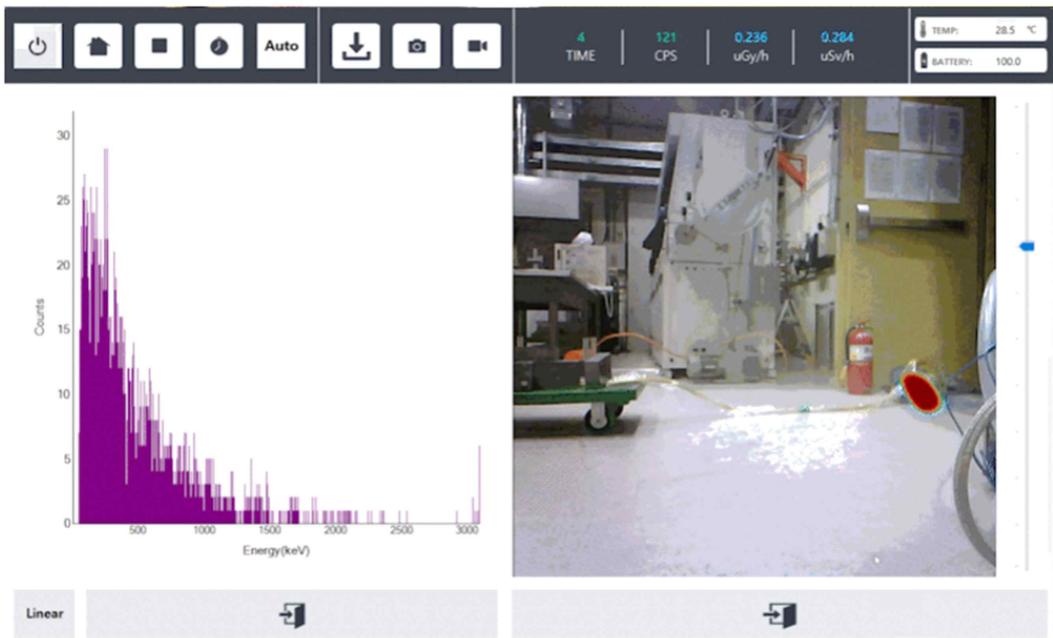


그림 28. 비파괴검사 장비 사용 후 선량 환경(0.28 $\mu\text{Sv/h}$) 및 선원 위치

1.4 재활용 고철 슬러그 내 방사성오염 탐지

감마선 영상장비의 성능을 검증하기 위해 현대제철과 협력하여 감시기의 경보가 발생하는 선량 환경을 구축하였다. 선량 환경 구축을 위해 12 μCi 의 ^{137}Cs 선원을 트럭 외벽에 부착하였고, 이때 트럭의 외벽은 3.4 $\mu\text{Sv/h}$ 의 표면선량률을 가진다. 위 선량 조건에서 움직이는 화물차에 대한 검사는 불가능하였으나, 감시기의 경보가 울렸을 때 정지된 차량에서는 그림 29와 같이 영상이 획득되었다. 획득된 영상의 핫스팟은 표면선량률이 가장 높은 곳을 효과적으로 보여주었다. 화물차와 감마선 영상장비의 거리가 3 m임을 고려할 때, 감마선 영상장비는 질량/부피가 큰 물질을 1차 선별할 수 있으며, 부분적으로 오염된 물질의 위치를 추적하기에도 효과적이다. 특히, 선별 작업과정에서 작업자는 먼 거리에서 오염물질을 판별하고 작업 시간을 줄일 수 있어 합리적으로 피폭선량을 낮게 유지할 수 있을 것으로 기대하였다.

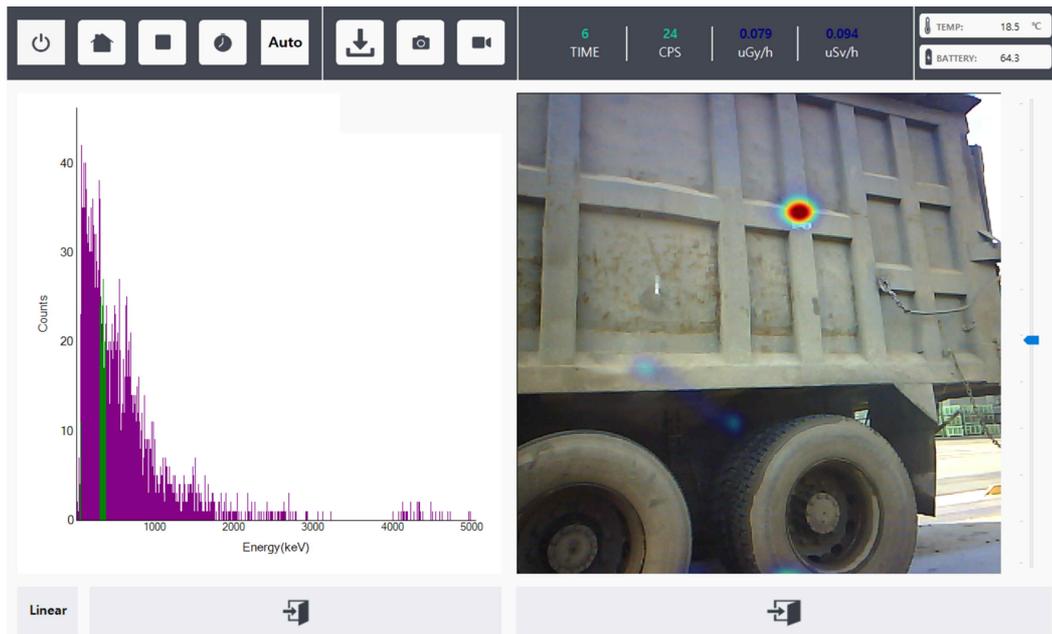


그림 29. 3.4 $\mu\text{Sv/h}$ 의 표면선량률을 가지는 화물차 측정 결과

1.5 방사성 핵종 깊이 측정

1.5.1 시간별 깊이 정확도 측정 결과

^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co 의 세 가지 선원을 동시에 넣어서 측정시간에 따른 결과를 비교하였다. 다중 선원의 방사능은 각각의 방사능 수치를 합산한 결과이므로 상대적으로 적은 시간으로 영상획득이 가능하다. 30초 반복 측정 결과, 영상재구성의 위치가 유사하였으며, 매립 깊이 10, 20, 30 cm에서는 편차가 거의 없음을 확인하였다. 다만 일정 깊이 이상에서는 편차가 발생하며, 깊이가 깊어질수록 아래 그림 30과 같이 오차가 증가함을 확인할 수 있다. 해당 문제는 깊어질수록 방사선의 차폐영향이 증가하여 영상획득의 정확도가 낮아짐으로 해석할 수 있다. 위 문제점은 계측시간을 증가시키는 것으로 쉽게 해결할 수 있다. 측정시간이 증가할수록 누적 데이터 수도 증가하여 방사선원의 위치 추적 정확도가 향상한다. 그림 30의 좌측 이미지는 30초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과이며, 우측 그림은 120초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과이다.

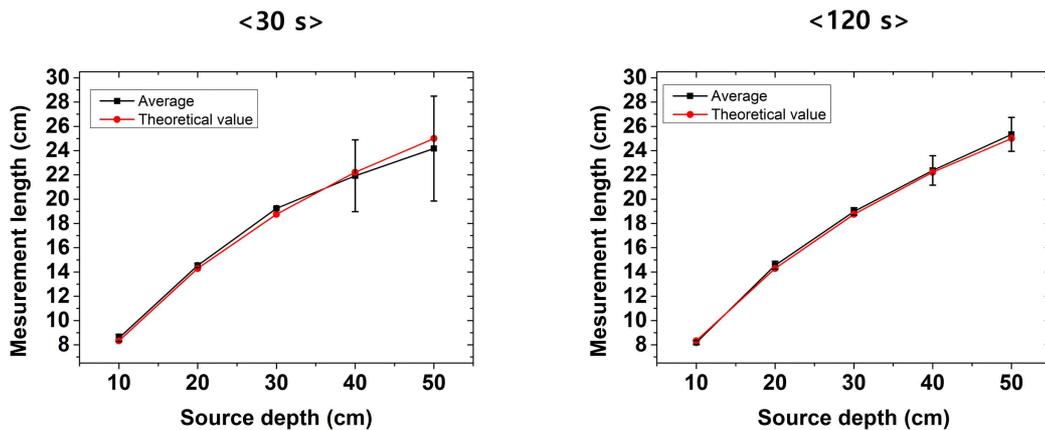


그림 30. 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과

두 그래프 비교 결과, 계측시간을 증가시키는 것만으로도 깊이 추정 정확도가 향상됨을 확인하였다. 얇은 깊이에서의 정확도는 변함이 없지만, 정확도가 다소 낮았

던 40, 50 cm의 깊이에서 정확도가 개선되었음을 확인할 수 있다. 수치상으로도 아래 표 5, 6 결과의 50 cm 깊이에서 표준편차는 4.32에서 1.39로 향상되었다. 표 5, 6은 계측시간에 따른 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과다.

표 5. 30초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과

S_d (cm)	x (cm)	측정 평균값 (cm)	추정 S_d (cm)	표준편차	상대 오차율
10	8.30	8.57	10.34	0.30	3.31
20	14.30	14.54	20.50	0.16	2.45
30	18.75	17.25	31.30	0.06	4.16
40	22.22	21.93	39.06	2.95	2.40
50	25	24.17	46.79	4.32	6.87

표 6. 120초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과

S_d (cm)	x (cm)	측정 평균값 (cm)	추정 S_d (cm)	표준편차	상대 오차율
10	8.3	8.19	9.79	0.16	2.10
20	14.3	14.55	20.52	0.34	2.54
30	18.75	18.99	30.62	0.30	2.02
40	22.22	22.37	40.48	1.22	1.19
50	25	25.34	51.38	1.39	2.68

1.5.2. 핵종 별 깊이 정확도 측정 결과

방사성 핵종에 따라 방출 에너지, 방사선의 종류가 다르며, 물질을 투과하는 능력이 달라 동일한 차폐 물질이 구성되더라도 검출기에 도달하는 방사선의 수는 다르다. 특히 측정 환경에 따라 발견되는 핵종이 다르게 분포되기 때문에 최적의 측정 시간을 결정하기 위해 핵종 분석 및 핵종의 특성을 반영한 측정시간을 고려해야 한다. 그림 31은 좌측부터 ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co 의 그래프를 나타낸다. 각각의 선원은 세 가지 선원을 합쳤을 때보다 낮은 방사능 값을 지니기 때문에 측정시간을 증가시켜야 한다. 핵종의 특성을 파악하기 위해 유사한 방사능 값의 선원을 사용하였으며, 계측시간 150초로 동일한 조건에서 실험을 진행하였다.

실험 결과, 두 가지의 큰 특징을 확인할 수 있다. 첫째는 방사능 값이 낮아질수록 방사선의 차폐영향으로 깊이 정보 추정이 어렵다는 점이다. 1.5.1의 결과에서는 50 cm에서 영상획득이 가능했지만, 핵종 하나를 사용했을 때는 일정 깊이 이후로는 영상획득이 불가능함을 확인하였다. 즉, 방사능의 값에 따라 깊이 정보를 추정할 수 있는 제한치가 존재한다.

두 번째로는 핵종에 따라 추정 가능한 깊이가 달라진다는 점이다. ^{152}Eu , ^{137}Cs 의 경우, 30 cm까지 영상획득이 가능하였지만, ^{60}Co 은 40 cm에서 영상획득이 가능함을 보여준다. 이는 선원이 지니는 특성으로 인한 결과이다. ^{152}Eu , ^{137}Cs 과는 달리 ^{60}Co 은 고에너지를 동시에 두 개 방출하여 상대적으로 물질에 의한 차폐영향을 덜 받는다. 즉, 깊이 정보를 추정하기 위해서는 관심 핵종의 특성을 파악하고 영상 획득 시간을 조정할 필요가 있다. 모든 측정 결과는 표 7, 8, 9와 같으며 15% 이내의 상대 오차값을 도출하였다.

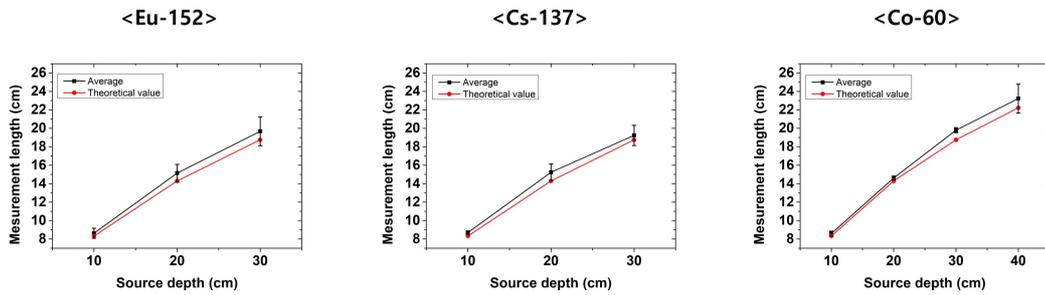


그림 31. 선원의 깊이 별 위치 추정 정확도 결과

표 7. ^{152}Eu 선원을 이용하여 150초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과

S_d (cm)	x (cm)	측정 평균값 (cm)	추정 S_d (cm)	표준편차	상대 오차율
10	8.3	8.63	10.43	0.54	4.13
20	14.3	15.15	21.74	0.94	7.99
30	18.75	19.67	32.43	1.56	7.48

표 8. ^{137}Cs 선원을 이용하여 150초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과

S_d (cm)	x (cm)	측정 평균값 (cm)	추정 S_d (cm)	표준편차	상대 오차율
10	8.3	8.7	10.53	0.19	5.06
20	14.3	15.24	21.92	0.89	7.88
30	18.75	19.23	31.28	1.67	14.72

표 9. ^{60}Co 선원을 이용하여 150초 계측 시 깊이 별 선원 위치 추정 정확도 결과

S_d (cm)	x (cm)	측정 평균값 (cm)	추정 S_d (cm)	표준편차	상대 오차율
10	8.3	8.6	10.39	0.26	3.72
20	14.3	14.62	20.66	0.21	3.20
30	18.75	19.8	32.78	0.28	8.48
40	22.22	23.22	43.35	1.57	7.73

1.5.3 체적 선원

체적 선원의 깊이 정보를 추정하는 것은 은닉된 핵물질 탐지 목적에서 활용할 수 있으며, 핵물질의 형태와 매립 깊이를 비파괴적으로 분석이 가능해진다. 본 실험에서는 위에서 사용한 세 가지 선원을 사용하여 체적 선원을 표현했다. 감마선 영상 장비의 성능평가 항목 중 하나인 각분해능은 선원과 선원 사이를 분간할 수 있는 능력을 뜻하며, 실험에서 사용된 장비인 Epsilon-G의 경우 각분해능이 6.8° 이다. 즉, 6.8° 이내의 거리에서는 독립적인 선원이 하나의 선원으로 표현이 되며, 위 특성을 이용하여 독립적인 선원을 체적 선원으로 표현하였다. 체적 선원을 표현하기 위해 ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co 선원을 각각 20, 25, 30 cm 깊이에 매립하였다. 체적 선원의 영상처리 결과는 그림 32와 같으며 체적 선원의 깊이는 표 7과 같이 상대적으로 6% 이내의 정확도로 매립 선원의 깊이 정보를 추정하였다. 실제 선원 매립 깊이와 추정 깊이는 모두 유사한 값을 나타내며, 삼각측량법의 정확성을 검증하였다.

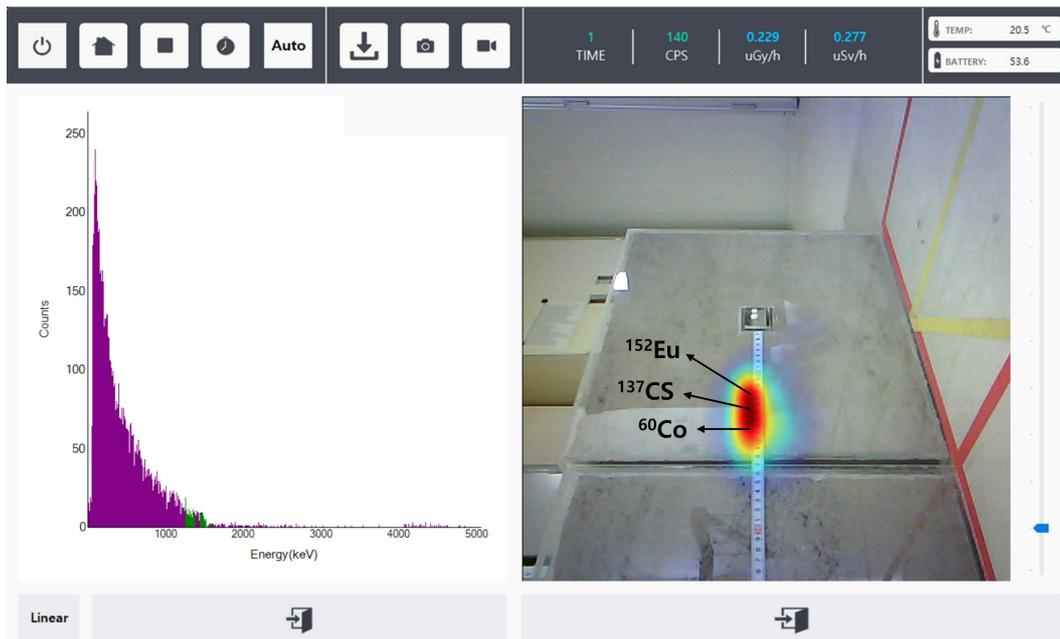


그림 32. 세 가지 선원을 활용한 체적 선원 표현

표 10. 세 가지 선원을 이용한 체적 선원의 깊이 분포 측정 결과

S_d (cm)	x (cm)	측정값 (cm)	추정 S_d (cm)	상대 오차율
20	14.29	13.6	18.86	6.04
25	16.67	16.3	24.18	3.39
30	18.75	18.5	29.37	2.15

2. 파노라마 감마선 영상장비

2.1 성능평가 결과

파노라마 감마선 영상장비는 경량화를 위해 그림 33과 같이 알루미늄으로 제작되었으며, 이 장비를 바탕으로 실험을 진행하였다. 파노라마 감마선 영상장비는 8개의 검출 시스템이 존재하며, 구동 방식에 따라 8개의 데이터를 취합하여 정보를 획득하거나 하나의 데이터만을 사용하여 선택적인 정보 획득이 가능하다.

표 11은 각 검출기에서 획득된 데이터를 보여준다. 계수율, 선량률은 8개의 신호 처리 보드로 인해 모두 독립적으로 계산되며, 영상재구성 결과 또한 하나의 검출기가 가지는 시야각에 의해 독립적인 영상을 제공한다. 이는 현장 탐사 과정에서 관심 지역을 집중적으로 탐사 및 정밀 평가를 가능하게 한다.

Motherboard는 독립적으로 처리된 신호들을 취합하여 GUI 상에서 하나의 정보로 표현할 수 있다. 8개의 검출 시스템 정보를 취합하여 계수율, 에너지 스펙트럼, 선량률을 획득할 수 있으며, 그림 34와 같이 GUI 상에서 실시간으로 그 값을 확인할 수 있다.

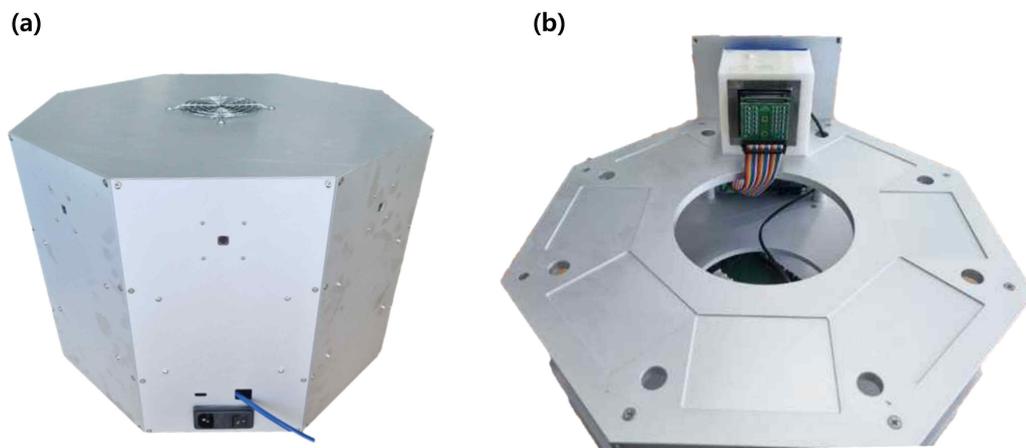


그림 33. 완성된 파노라마 감마선 영상장비(a) 및 내부 마스크 지지층(b)

표 11. 각 검출 시스템에서 획득된 계수율 및 선량값

point	cps	$\mu\text{Gy/h}$	$\mu\text{Sv/h}$
1	193	0.556	0.659
2	212	0.491	0.582
3	130	0.421	0.500
4	178	0.449	0.535
5	217	0.535	0.635
6	186	0.481	0.570
7	150	0.405	0.481
8	169	0.432	0.513

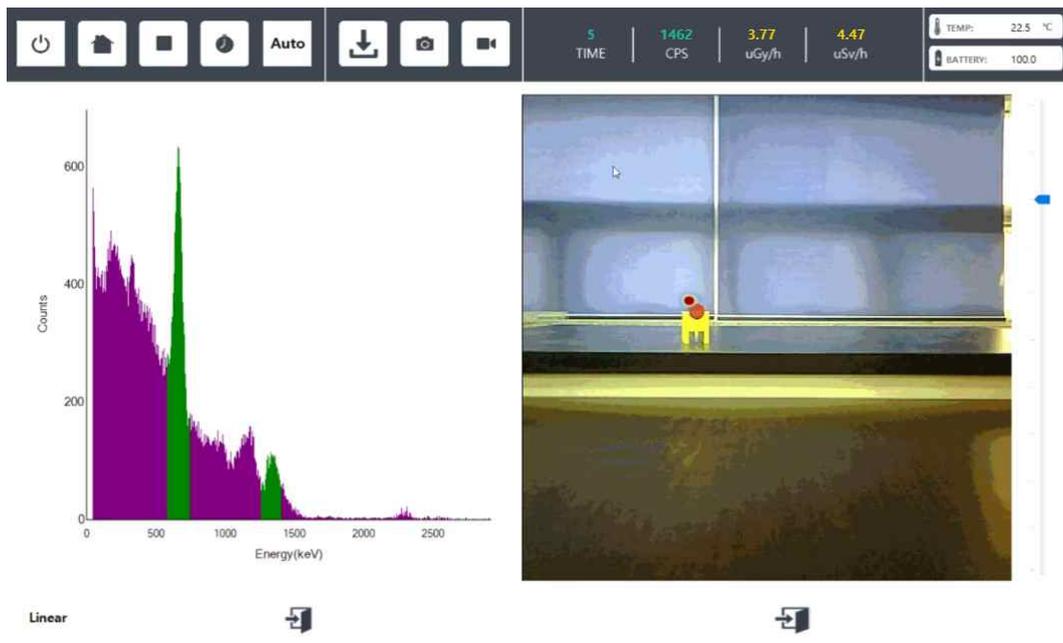


그림 34. FOV 내 선원이 존재하는 검출기에서 재구성된 영상 이미지

방사성 핵종을 사용한 이미지 성능 테스트 결과, 그림 35와 같이 8개의 검출기에서 독립적인 영상의 핫스팟을 획득하였다. 총 8개의 검출기 중 시야각 내에 선원이 존재하는 검출기는 (a), (b), (e), (h)이며, 선원의 위치에 정확하게 핫스팟이 형성된 것을 확인하였다. 특히 (a), (b), (h)의 경우, 각 선원의 위치가 인접해 있지만, 주위의 선원 영향 없이 시야각 내에서 영상을 정확하게 재구성하였다. 300초의 측정시간 동안 핫스팟의 위치가 한 곳으로 수렴하였으며, 그 위치가 변화하지 않음을 확인하였다.

반면, FOV 내에 선원이 존재하지 않은 검출기인 (c), (d), (f), (g)는 주변 선원의 영향으로 인해 산란되어 들어오는 배경 노이즈를 선원으로 인식하는 경우가 발생하였다. 위 4개의 검출기에서는 영상의 핫스팟이 한 곳으로 수렴되는 것이 아니라 그림 37과 같이 무분별하게 위치가 변화하여 영상의 신뢰성을 확보할 수 없었다. 위 문제는 추후 실험 및 MCNP 전산모사를 통해 극복할 수 있다. MLEM의 구성 중 background 제거 매개변수는 입사 방사선에 의해 재구성되는 핫스팟 중 수렴되지 않는 값들을 효과적으로 제거한다. 즉, 최적의 매개변수를 도출하여 배경 및 산란 방사선의 영향을 줄이고 영상의 품질을 개선할 예정이다.

Motherboard는 계수율, 선량률 뿐만 아니라 8개의 획득된 이미지를 결합하여 그림 38과 같은 파노라마 이미지를 생성할 수 있다. 파노라마 이미지는 실시간으로 전방위의 핫스팟을 획득할 수 있으며, 8개의 영상을 동시에 측정함으로써 측정시간을 약 8배 이상 줄일 수 있다. 따라서 신속한 현장 판단을 가능하게 하여 현장의 핵종 분포도를 신속하고 효과적으로 분석할 수 있다.

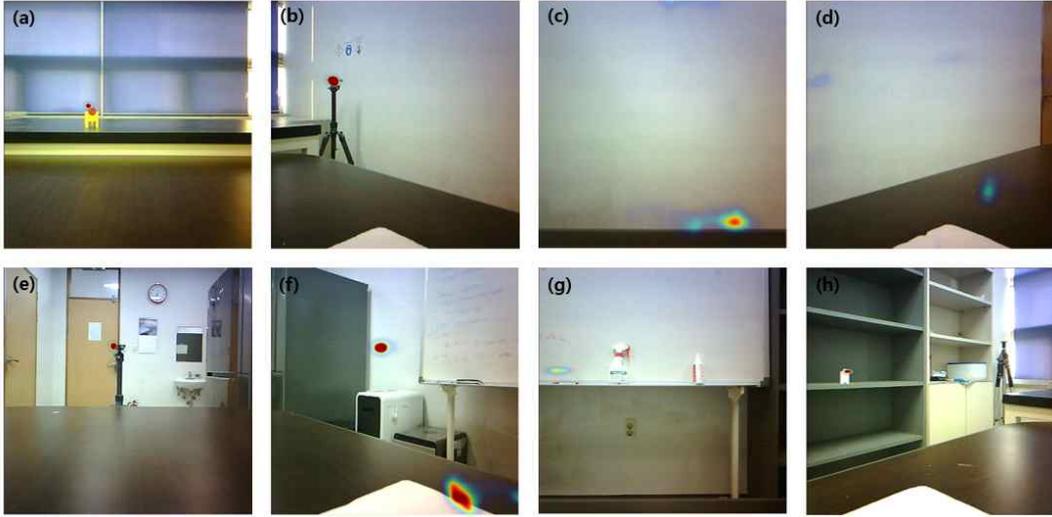


그림 35. 각 검출기에서 재구성된 영상 이미지

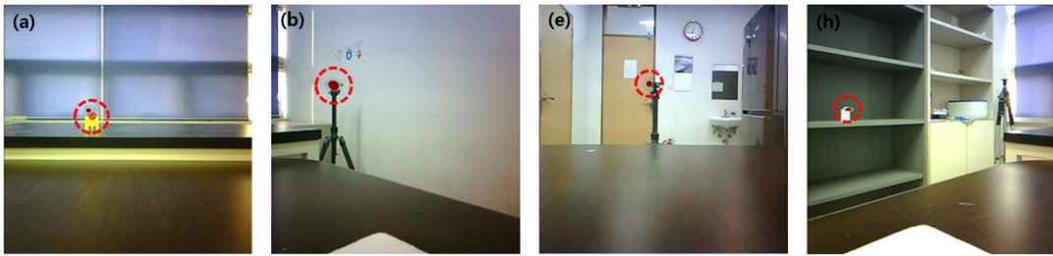


그림 36. FOV 내 선원이 존재하는 검출기에서 재구성된 영상 이미지

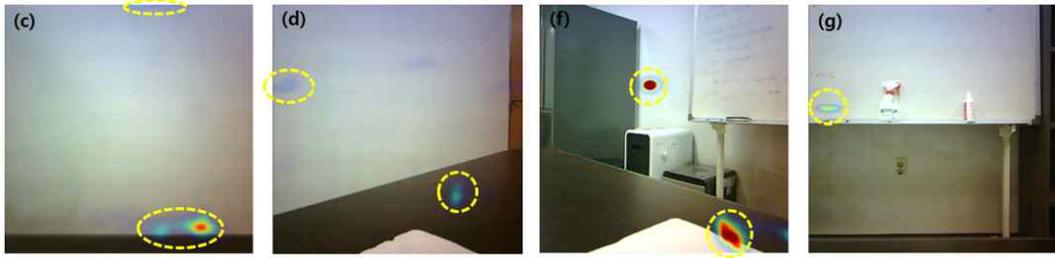


그림 37. FOV 내 선원이 존재하지 않는 검출기에서 재구성된 영상 이미지



그림 38. 8개의 영상을 결합하여 재구성한 파노라마 이미지

IV. 결론

본 연구에서는 원자력 안전규제에 감마선 영상장비를 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 장비 유효성 판단을 위한 실험 결과, 원전 해체를 위한 핵종 분석 포인트 선정, 비파괴검사 장비의 안정성 테스트, 오염된 재활용 고철 슬러그 1차 선별 등 다양한 분야에서 핫스팟의 위치를 정확히 재구성하였다. 또한, 삼각측량법을 적용하여 지면에 매립된 방사성 핵종의 깊이 정보를 추정하였다. 감마선 영상장비의 위치에 따라 변화하는 핫스팟의 위치를 수식화하여 깊이 정보를 추정하였으며, 이 방법은 15% 이내의 상대 오차값을 가진다. 다만, 영상재구성을 위한 측정시간을 증가시킨다면 깊이 추정 정확도가 더욱 향상됨을 실험으로 검증하였다. 즉, 감마선 영상장비의 실시간 핫스팟 측정과 선량률 제공은 작업자의 안전 및 즉각적인 판단, 대응을 가능하게 하며, 한 번의 측정으로 넓은 범위의 오염분포를 판단할 수 있어 많은 시간적, 금전적인 문제를 극복할 수 있음을 확인하였다.

그러나, 실험에서 사용된 Epsilon-G는 우수한 영상 민감도를 가져 신속한 탐사가 가능하였지만, 넓은 공간에서는 제한적이다. 따라서 8개의 검출 시스템을 결합한 수평 방향으로 360°의 시야각을 가지는 파노라마 감마선 영상장비를 개발하였다. 파노라마 감마선 영상장비는 8개의 검출기에서 획득된 영상을 결합하여 파노라마 이미지를 제공하여 기존 단일 감마선 영상장비의 측정시간보다 약 8배 이상 단축할 수 있어 신속한 공간 측정 목적에서 효과적이다. 파노라마 감마선 영상장비는 무한궤도/로봇에 탑재하여 무인 탐사 장비로 활용할 수 있으며, 추후 마스크 소형화를 통한 파노라마 감마선 영상장비의 크기를 줄여 장비의 소형화를 진행할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Habrman, P., Directional Geiger-Müller detector with improved response to gamma radiation. *Journal of Instrumentation* 14.09 (2019): P09018.
- [2] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (Wiley, New York, 2010).
- [3] Alexiev, Dimitri, et al. Review of Ge detectors for gamma spectroscopy. *Australasian physical & engineering sciences in medicine* 25.3 (2002): 102-109.
- [4] Mouhti, I., et al. Validation of a NaI (Tl) and LaBr₃ (Ce) detector's models via measurements and Monte Carlo simulations. *Journal of radiation research and applied sciences* 11.4 (2018): 335-339.
- [5] Akkurt, I., K. A. D. İ. R. Gunoglu, and S. S. Arda. "Detection efficiency of NaI (Tl) detector in 511-1332 keV energy range." *Science and Technology of Nuclear Installations* 2014 (2014).
- [6] Nakayama, K., and T. Nakamura. *X-Ray Fluorescence Spectroscopy for Geochemistry. Treatise on Geochemistry: Second Edition.* Elsevier Inc., 2013. 181-194.
- [7] Cieślak, Michał J., Kelum AA Gamage, and Robert Glover. Coded-aperture imaging systems: Past, present and future development-A review. *Radiation Measurements* 92 (2016): 59-71.

- [8] Yang, Y. F., et al. A Compton camera for multitracer imaging. IEEE Transactions on Nuclear Science 48.3 (2001): 656-661.
- [9] Mihailescu, L., Vetter, K., Chivers, D. 3-D Gamma-Ray Imaging. IEEE Transactions on Nuclear Science 56 (2019): 479-486.
- [10] Barnowski, Ross, et al. Scene data fusion: Real-time standoff volumetric gamma-ray imaging. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 800 (2015): 65-69.
- [11] Vetter, Kai. Multi-sensor radiation detection, imaging, and fusion. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 805 (2016): 127-134.
- [12] Haefner, Andrew, et al. Handheld real-time volumetric 3-D gamma-ray imaging. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 857 (2017): 42-49.
- [13] Vetter, Kai, et al. 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 878 (2018): 159-168.
- [14] Pavlovsky, Ryan, et al. 3-D radiation mapping in real-time with the localization and mapping platform LAMP from unmanned aerial

systems and man-portable configurations. arXiv preprint arXiv:1901.05038 (2018).

- [15] Hellfeld, Daniel, et al. "Real-time free-moving active coded mask 3D gamma-ray imaging." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 66.10 (2019): 2252-2260.
- [16] Vetter, Kai, et al. Advances in nuclear radiation sensing: Enabling 3-D gamma-ray vision. *Sensors* 19.11 (2019): 2541.
- [17] Ohno, Kazunori, et al. Robotic control vehicle for measuring radiation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. IEEE, 2011.
- [18] Accorsi, Roberto. Design of a near-field coded aperture cameras for high-resolution medical and industrial gamma-ray imaging. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [19] Braga, Joao, et al. A new mask-antimask coded-aperture telescope for hard X-ray astronomy. *Experimental astronomy* 2 (1991): 101-113.
- [20] Accorsi, Roberto, Francesca Gasparini, and Richard C. Lanza. Optimal coded aperture patterns for improved SNR in nuclear medicine imaging. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 474.3 (2001): 273-284.

- [21] Lee, Taewoong, Sung-Woo Kwak, and Wonho Lee. "Investigation of nuclear material using a compact modified uniformly redundant array gamma camera." *Nuclear Engineering and Technology* 50.6 (2018): 923-928.
- [22] Fessler, Jeffrey A. Penalized weighted least-squares image reconstruction for positron emission tomography. *IEEE transactions on medical imaging* 13.2 (1994): 290-300.
- [23] Anastasio, Mark A., et al. Half-time image reconstruction in thermoacoustic tomography. *IEEE transactions on medical imaging* 24.2 (2005): 199-210.
- [24] Wernick, Miles N., and John N. Aarsvold. *Emission tomography: the fundamentals of PET and SPECT*. Elsevier, 2004.
- [25] Pan, Xiaochuan, Emil Y. Sidky, and Michael Vannier. Why do commercial CT scanners still employ traditional, filtered back-projection for image reconstruction?. *Inverse problems* 25.12 (2009): 123009.
- [26] Mehta, D., et al. Iterative model reconstruction: simultaneously lowered computed tomography radiation dose and improved image quality. *Med Phys Int J* 2.1 (2013): 147-55.
- [27] Puchner, Stefan B., et al. Iterative image reconstruction algorithms in coronary CT angiography improve the detection of lipid-core plaque—a comparison with histology. *European radiology* 25 (2015): 15-23.

- [28] Park, Seoryeong, et al. Impact of aperture-thickness on the real-time imaging characteristics of coded-aperture gamma cameras. *Nuclear Engineering and Technology* 53.4 (2021): 1266-1276.
- [29] Jeong, Manhee, and 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* 954 (2020): 161353.
- [30] Boo, Jihwan, Mark D. Hammig, and Manhee Jeong. Row-Column readout method to mitigate radiographic-image blurring from multipixel events in a coded-aperture imaging system. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 68.5 (2021): 1175-1183.
- [31] 김현철, 장미, 김창종, 이민선, 박지영, 차혜미, 임종명, 홍상범. Lessons learned from implementing the radiological characterization of Kori 1: In-situ measurement and Lab analysis. 2022년 춘계 방사성폐기물 학회
- [32] Mihailescu, L., et al. SPEIR: a Ge Compton camera. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 570.1 (2007): 89-100.
- [33] Luke, P. N., et al. Amorphous Ge bipolar blocking contacts on Ge

- detectors. IEEE transactions on nuclear science 39.4 (1992): 590-594.
- [34] Amgarou, K., et al. A comprehensive experimental characterization of the iPIX gamma imager. Journal of Instrumentation 11.08 (2016): P08012.
- [35] Joshi, Sonal. Coded Aperture Imaging Applied to Pixelated CdZnTe Detectors. Diss. 2014.
- [36] Willy Kaye. olaris and Orion 3D CdZnTe Gamma-Neutron Imaging Spectrometers. Presentation at IAEA October 2015.
- [37] G. Montemont. CEA Portable Gamma-Ray Imagers. Presentation, IAEA October 2015.
- [38] Lemaire, Hermine, et al. Implementation of an imaging spectrometer for localization and identification of radioactive sources. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 763 (2014): 97-103.
- [39] Gmar, M., et al. GAMPIX: A new generation of gamma camera. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 652.1 (2011): 638-640.
- [40] Amman, Mark, et al. Detector module development for the high efficiency multimode imager. 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC). IEEE, 2009.

- [41] Haefner, Andrew, et al. Handheld real-time volumetric 3-D gamma-ray imaging. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 857 (2017): 42-49.
- [42] Galloway, Michelle Lee. Characterization and applications of a CdZnTe-based gamma-ray imager. Ph. D. Thesis (2014).
- [43] Dubos, S., et al. ORIGAMIX, a CdTe-based spectro-imager development for nuclear applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 787 (2015): 302-307.

부록 01. 국외 감마선 영상장비 성능 비교

감마선 영상장비를 안전규제에 적용하기 위해서는 감마선 영상화 기술분석을 통해 현재의 기술 수준을 파악할 필요성이 있다. 감마선 영상장비 개발이 활발하게 진행된 실정과는 달리, 감마선 영상장비의 성능을 평가할 항목과 절차 표준이 마련되어 있지 않다. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에서 2015년 10월 23~28일 ‘2016 Technology Demonstration Workshop(이하 TDW) on Gamma Imaging-External’을 진행하였다. 해당 워크숍에는 2015년 당시 연구개발이 완료된 감마선 영상장치 8대(GeGi, HEMI, HiSpect, iPIX, N-Visage, ORNL HPGe Imager, Polaris-H, RadSearch)가 참가하였다. TDW에 참가한 장비들과 Epsilon-G의 상세 스펙들을 비교하여 현재 기술 수준을 파악하였다.

표 12. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 시야각 비교[32-43]

No.	장비	시야각
1	Epsilon-G	45°
2	Polaris-H	4π
3	HEMI	4π
4	iPIX	41.4~48.8°
5	HiSpext	35°
6	N-Visage	4π
7	RadSearch	4π
8	GeGI	4π (compton), 60° (pinhole)
9	ORNL HPGe Gamma-ray Imager	12~110°

표 13. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 각분해능 비교[32-43]

No.	장비	시야각
1	Epsilon-G	45°
2	Polaris-H	45°
3	HEMI	45°
4	iPIX	45°
5	HiSpext	45°
6	N-Visage	No data
7	RadSearch	45°
8	GeGI	45°
9	ORNL HPGe Gamma-ray Imager	No data

표 14. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 방사능 측정 감도 비교[32-43]

No.	장비	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am241	⁶⁰ Co
1	Epsilon-G	17.827	110.267	7.07
2	Polaris-H	0.1	2.3	0.01
3	HEMI	No data	No data	No data
4	iPIX	0.5	2.7	No data
5	HiSpext	0.03	1.5	0.007
6	N-Visage	0.002	0.37	0.0004
7	RadSearch	0.5	9.6	0.05
8	GeGI	No data	No data	No data
9	ORNL HPGe Gamma-ray Imager	No data	No data	No data

표 15. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 에너지 분해능 비교[32-43]

No.	장비	에너지 분해능(662 keV, FWHM)
1	Epsilon-G	7.9%
2	Polaris-H	1%
3	HEMI	3.7%
4	iPIX	No data
5	HiSpext	2%
6	N-Visage	No data
7	RadSearch	3%
8	GeGI	0.28%
9	ORNL HPGe Gamma-ray Imager	0.28%

표 16. TDW 참가 장비와 Epsilon-G의 특수 핵물질 영상획득 가능 여부 비교 [32-43]

No.	장비	O / X
1	Epsilon-G	O
2	Polaris-H	X
3	HEMI	X
4	iPIX	O
5	HiSpext	O
6	N-Visage	X
7	RadSearch	O
8	GeGI	O
9	ORNL HPGe Gamma-ray Imager	O

A Study on the Application of Nuclear Safety Regulations Using Gamma-ray Imager

Minki Chae

Department of Energy and Chemical Engineering
The Graduate School
Jeju National University

Abstract

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) recommended ALARA (As Low As Reasonably Achievable) in 1997, but leakage of radioactive materials due to unexpected radiation accidents is a major factor exceeding the dose limit of workers. Therefore, technology and management systems are needed to respond quickly and effectively to radiation accidents.

Gamma-ray imaging equipment is suitable for use as a means of responding to radiation accidents. The hot spot provided by gamma-ray imaging equipment can determine the location of radionuclides, which is useful for analyzing the pollution level of the

area of interest and detecting nuclides.

This study aims to effectively utilize gamma ray imaging equipment for radiation accident prevention and emergency response based on radiation safety regulations. In order to determine the effectiveness of the equipment, various field applicability evaluations were conducted, such as selection of nuclide analysis points for nuclear power plant dismantling, stability testing of non-destructive audit equipment, and separation of contaminated recycled scrap metal slugs.

As a result of the evaluation, it was proved that the location of radionuclides in various environments, such as nuclear dismantling and waste screening, was accurately detected to overcome the time and financial problems of the work, and to prevent radiation accidents and immediately respond to accidents.

During the verification process, the structural limitations of the gamma-ray imager caused a problem of not detecting depth information of radionuclides and omnidirectional radionuclides, but the limitations of the gamma-ray imager were overcome by applying trigonometric/panorama gamma-ray imager.

Triangulation is a method of estimating depth information by formulating the location of a hotspot that changes according to the location of a gamma ray imaging device. As a result of the measurement, the depth estimation accuracy of radionuclides has a relative error value of less than 15%, but it was verified through experiments that the depth estimation accuracy is further improved if the measurement time for image reconstruction is increased.

For rapid spatial evaluation, the panoramic gamma-ray imager has built eight detection systems into one equipment, and can monitor radionuclides within eight field of view. Since eight detection systems are used, the time spent on spatial measurement can be reduced by

about eight times, which is effective for rapid spatial measurement. In addition, the information of one detector system can be independently separated, enabling precise exploration/analysis.