

Evaluation of the Measurement Efficiency of GM Tube and NaI(Tl)-Based Radiation Detectors in High Magnetic Fields

Hyun-Jun Joo^{1,2}, Youngmin Choi^{1,2}, Sangrok Kim², In-Ok Ko², and Man-Seok Han^{1,3*}

¹Department of Medical Health Science, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea

²Korea Institute of Radiological and Medical Sciences (KIRAMS), Seoul 01812, Korea

³Department of Radiological Science, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea

(Received 17 September 2025, Received in final form 5 November 2025, Accepted 5 November 2025)

The present study evaluated the performance changes of detectors that may occur when measuring radiation in a high magnetic field environment using a GM tube-based radiation detector and a NaI(Tl) scintillation detector owned by the Radiation Safety Management Team of the Korea Institute of Radiological and Medical Sciences. The experiment was conducted in a high-magnetic field environment in the small animal imaging room at the Radiation Medicine Research Institute of the Korea Institute of Radiological and Medical Sciences. The experiment utilised a 333 kBq ¹³⁷Cs as the radiation source. Subsequently, the source was positioned at a distance of 100 cm from the center of the MRI bore, with the distance between the source and the measuring instrument fixed at 20 cm. The performance of each detector was compared by moving the desk towards the door at intervals of 0 cm, 30 cm, and 75 cm, for a total of 80 measurements. The statistical significance of these results was verified using non-parametric testing. The GM tube-based detector exhibited an approximate 25% reduction in radiation dose when compared to 0.85 μ Sv/h measured in a non-magnetic environment. In a measuring device utilising a NaI(Tl) detector, the counts decreased by approximately 80% compared to 15,215 counts measured in a non-magnetic environment, and it was confirmed that measurement was impossible at the center position. This study is considered to provide fundamental data for evaluating the practicality of radiation measurement instruments in the event of radioactive contamination under high magnetic field conditions.

Keywords : Geiger-Müller (GM) tube, NaI(Tl) scintillation detector, high magnetic field environment, radiation measurements, statistical hypothesis test

고자기장 환경에서 GM 튜브와 NaI(Tl) 기반 방사선 계측 장비 효율 평가

주현준^{1,2} · 최영민^{1,2} · 김상록² · 고인옥² · 한만석^{1,3*}

¹강원대학교 일반대학원 보건의료과학과, 강원 삼척시 황조길 346, 25949

²한국원자력의학원, 서울특별시 노원구 노원로 75, 01812

³강원대학교 방사선학과, 강원 삼척시 황조길 346, 25949

(2025년 9월 17일 받음, 2025년 11월 5일 최종수정본 받음, 2025년 11월 5일 게재확정)

본 연구는 한국원자력의학원 방사선안전관리팀에서 보유하고 있는 GM 튜브 기반 방사선 계측기와 NaI(Tl) 섬광검출기를 활용하여 고자기장 환경에서 방사선 측정 시 발생할 수 있는 검출기의 성능 변화를 평가하였다. 실험은 한국원자력의학원의 방사선 의학연구소에 위치한 소동물영상실에서 고자기장 환경을 구축하였으며 방사선원은 333 kBq의 ¹³⁷Cs를 사용하였다. 이후 MRI 보어(Bore) 가운데 에서 100 cm 거리에 있는 책상에 선원을 위치하였고 선원과 계측기의 거리는 20 cm로 고정하였다. 계측기에 따른 성능 비교는 0 cm, 30 cm, 75 cm 간격으로 책상을 출입문 방향으로 이동하며 총 80회 측정하였다. 측정값은 비모수 검정 기법을 통해 통계적 유의성을 검증하였다. GM 튜브 기반 계측기는 자기장이 없는 환경에서 측정한 0.85 μ Sv/h와 비교하였을 때 약 25% 수준의 감소를 보였다. NaI(Tl) 검출기를 활용한 계측기에서는 자기장이 없는 환경에서 측정한 15,215 Counts와 비교하였을 때 약 80% 이상 감소하였으며 기준(center) 위치에서는 계측이 불가능한 것을 확인하였다. 본 연구가 고자기장 환경에서 방사능오염 상황 발생 시 계측기의 실용성을 판단할 수 있는 기초 자료가 될 것으로 사료된다.

주제어 : 가이거-뮐러 계수관, NaI(Tl) 섬광검출기, 고자기장 환경, 방사선 측정, 통계적 가설 검정

I. 서 론

현대 산업 및 의료 환경에서는 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI)실, 사이클로트론 실험실, 산업용 비파괴 검사(Nondestructive Testing, NDT) 시설 등과 같이 강한 전자기 간섭(Electromagnetic Interference, EMI)이 발생하는 환경이 다수 존재한다. 병원에서는 양전자 방출 단층 촬영(Positron Emission Tomography, PET)과 MRI 기술이 융합된 PET-MRI 시스템이 도입되면서 종양학, 신경학, 심혈관 영상 등 다양한 분야에서 인체 내 기능적 대사 정보와 고해상도 영상을 동시에 획득하는 것이 가능해졌다[1].

한국원자력의학원을 비롯한 국내의 연구기관에서는 소동물(mouse, rat) 등을 활용하여 방사성동위원소를 체내에 투여한 후 생체 내 대사 경로와 약물 동태를 파악하는 전임상 연구를 수행할 때 고자기장 영상 장비를 함께 사용하는 추세이다[2]. 하지만 이런 환경에서 예기치 못한 방사능오염이나 누출 사고가 발생할 경우 외부 자기장이 방사선 검출기에 미치는 영향을 고려하지 않으면 대응을 위한 측정의 정확도와 신뢰도가 크게 저하될 수 있다. 특히 고자기장(high magnetic field) 환경에서는 방사선 검출기의 응답 변화, 계수를 감소, 검출 효율 저하 등이 보고되어 있으며 이는 실제 사고 대처 시 계측기의 신뢰성을 저해할 수 있는 요인으로 평가된다[3].

본 연구는 고자기장 환경에서 발생할 수 있는 방사능오염 상황을 가정하여 방사선 계측기에 따른 자기장 영향을 비교하였다. 사용된 방사선 계측기는 가이거-뮐러 계수관(Geiger-Müller tube, GM tube) 기반의 방사선 계측기와 무기결정 섬광체(scintillator)인 NaI(Tl)을 활용한 방사선 계측기로, 비모수 검정 기법을 통해 자기장 영향에 따른 계측값의 차이를 정량적으로 분석하여 계측기의 실용성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 재료

연구에서 사용한 GM 튜브 기반 방사선 계측기는 RadEye B20-ER(Fig. 1A)과 Radiation Alert Ranger(Fig. 1B)이며 NaI(Tl) 검출기를 활용한 계측기는 Gammaspectacular 사의 GS-1515-N(Fig. 1C)이다. RadEye B20-ER과 Radiation Alert Ranger는 662 keV의 ^{137}Cs 감마선으로 공장 교정이 되어 있고 GS-1515-N은 ^{137}Cs 선원에서 약 60% 수준의 검출 효율을 나타낸다[4-7].

실험에 활용된 고자기장 환경은 소동물용 MRI 영상장비인 Agilent technologies사의 MRBR 9.4 Tesla/310 mm(MRBR 9.4/310)가 위치한 한국원자력의학원 RI응용부 제 2연구동 건

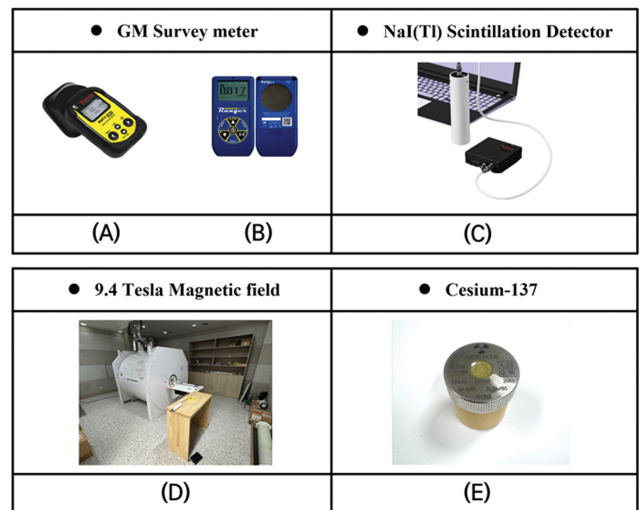


Fig. 1. (Color online) Equipments used in the study. (A) RadEye B20-ER from Thermo Scientific, (B) Radiation Alert from S.E. International, (C) GS-1515-N from Gammaspectacular., (D) MRBR 9.4T/310 mm from Agilent Technologies, (E) 333 kBq of ^{137}Cs .

물, 1102호 소동물 영상실에서 진행하였다(Fig. 1D).

Fig. 2는 MRBR 9.4/310의 자기장 분포를 시각적으로 묘사하기 위한 주변 자기장(Magnetic fringe field) 이미지로써, 기하학과 대수학 기반의 그래프 제작 프로그램인 GeoGebra를 이용하였다[8]. 일반적으로 자기장 강도 5 Gauss는 의료기기 및 자기장에 민감한 장비들의 접근을 제한하는 임계값으로 평가받으며 MRBR 9.4/310의 주변 자기장은 x축 방향으로 약 4.9 m, y축 방향으로 약 2.7 m에 해당한다[9](Fig. 2). 그러나 본 실험에서는 오염상황이 일어났을 경우를 가정하고 정확한 계측기의 검출 효율을 평가하기 위해 보어 가운데에서 100 cm 떨어진 거리를 오염 구역으로 설정하였다.

Fig. 1D는 측정에 사용된 방사선원으로써 방사선안전관리팀에서 보유하고 있는 333 kBq의 ^{137}Cs 선원을 사용하였다. 핵종의 특성상 약 30년의 반감기를 가지고 있어 시간에 따른 감쇠 변화는 고려하지 않았다.

2. 실험 방법

Fig. 3은 실험 과정을 도식화한 이미지로써 자기장이 높은 보어 근처에서 방사능오염 상황이 발생하였다는 가정하에 보어 가운데에서 축방향(Axial)으로 100 cm 거리에 ^{137}Cs 선원을 위치시켰다. 방사선 계측기와 선원은 가로 40 cm, 세로 90 cm 규격의 책상 위에 위치시켰고 간격은 20 cm로 고정하였다.

Fig. 3에서 나타난 기준점 0 cm는 중심 보어에서 축방향으로 100 cm 떨어진 ^{137}Cs 선원을 의미한다. 거리 설정은 오염 확산 상황을 가정하여 거리 간극의 차이를 30, 60과 같이

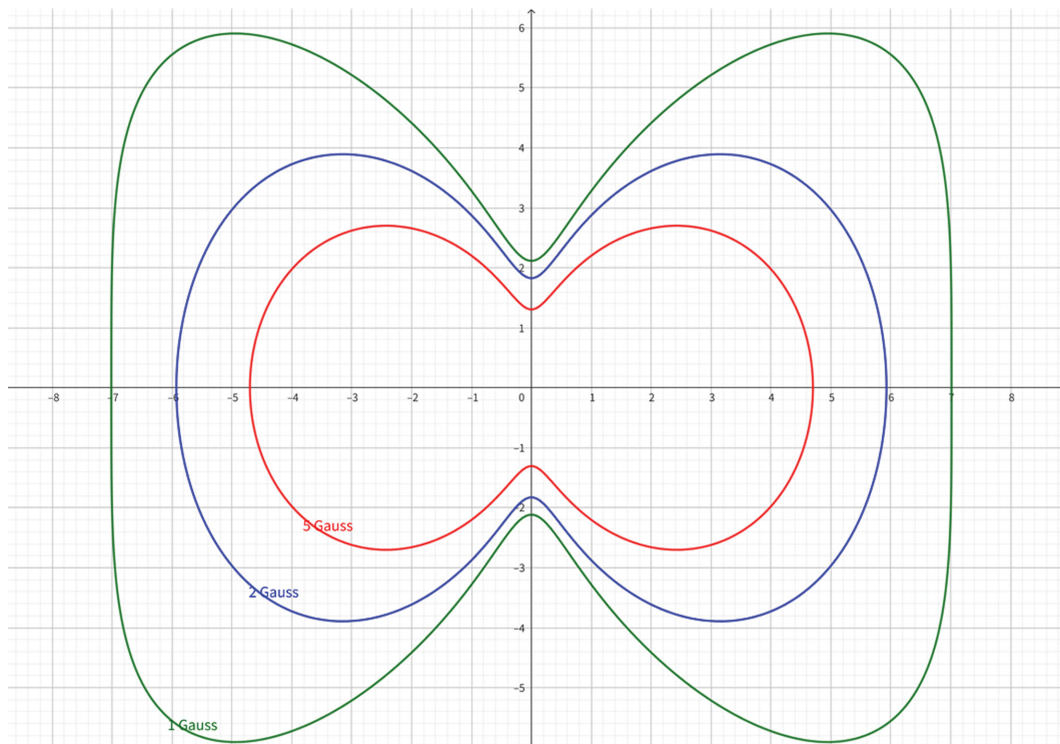


Fig. 2. (Color online) Magnetic fringe field distribution of the MRBR 9.4T/310 mm magnet system.

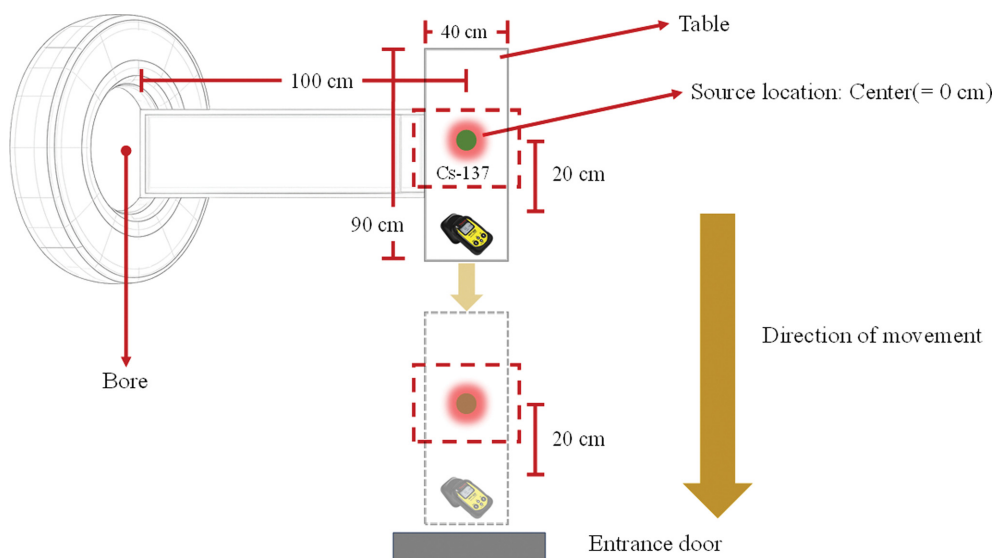


Fig. 3. (Color online) Schematic diagram for conducting research.

2배가 아닌 2.5배로 확대한 0 cm, 30 cm, 75 cm로 설정하였다. 이후 선원, 계측기 및 책상을 동일한 방향(출입문 방향)으로 동시에 이동시키며 자기장 변화에 따른 방사선 측정값을 기록하였다. GM 튜브 기반 방사선 계측기는 오염상황에 대한 보수적인 지표로서 장비 2대 중 더 높은 값을 기재하였다[10]. 선원이 없는 환경에서 배경 방사선을 측정된 결과, RadEye B20-ER은 0.12 $\mu\text{Sv/h}$, Radiation Alert Ranger는

0.1 $\mu\text{Sv/h}$, GS-1515-N은 2,302 Counts로 측정되었다. 배경 방사선은 동일한 환경에서 반복 수행되었으며 향후 통계적 유의성에 영향을 줄 정도로 크지 않다고 판단하여 별도의 보정 없이 실험 측정값의 일부로 포함하였다.

측정 시간은 자기장이 없는 환경과 고자기장 환경 모두 1회 측정 시 1분간 측정하였으며 계측기와 선원의 거리는 20 cm로 동일하다. 측정 횟수는 계측기의 종류를 자기장 유무

및 거리 조건에 따라 구분하여 총 80회 측정하였다.

3. 데이터 분석

측정 데이터는 jamovi version 2.6에서 Shapiro-Wilk test

를 통한 정규성 검정을 진행하였고 표본 수, 귀무가설에 따른 조건을 고려하여 비모수 검정을 진행하였다. 이후 집단 간 차이를 세부적으로 확인하기 위해 Dwass-Steel-Critchlow-Fligner(DSCF) 사후검정을 진행하였다.

Table I. Radiation measurements Magnetic field-free environment and varying distances from the source in a 9.4 T magnetic field.

Magnetic field-free environment	GM tube-based radiation measuring instrument ($\mu\text{Sv/h}$)	NaI(Tl)-based scintillation detection system (Counts)
	0.85 (Maximum)	15,215 (Maximum)
	0.69 (Minimum)	14,348 (Minimum)
	0.82	15,176
	0.78	15,097
	0.73	14,633
	0.84	15,014
	0.75	14,868
	0.79	15,048
	0.81	15,069
	0.77	14,942
9.4 Tesla Magnetic field	GM tube-based radiation measuring instrument ($\mu\text{Sv/h}$)	NaI(Tl)-based scintillation detection system (Count)
	0.63 (Maximum)	0
	0.59 (Minimum)	0
	0.61	0
	0.62	0
move Distance: 0 cm	0.60	0
	0.62	0
	0.58	0
	0.59	0
	0.62	0
	0.61	0
9.4 Tesla Magnetic field	GM tube-based radiation measuring instrument ($\mu\text{Sv/h}$)	NaI(Tl)-based scintillation detection system (Counts)
	0.67 (Maximum)	1,490 (Maximum)
	0.62 (Minimum)	1,280 (Minimum)
	0.64	1,355
	0.65	1,363
move Distance: 30 cm	0.63	1,310
	0.66	1,421
	0.65	1,377
	0.63	1,324
	0.66	1,398
	0.65	1,383
9.4 Tesla Magnetic field	GM tube-based radiation measuring instrument ($\mu\text{Sv/h}$)	NaI(Tl)-based scintillation detection system (Count)
	0.62 (Maximum)	8,400 (Maximum)
	0.57 (Minimum)	8,027 (Minimum)
	0.58	8,083
	0.60	8,207
move Distance: 75 cm	0.61	8,325
	0.56	8,180
	0.61	8,301
	0.60	8,230
	0.59	8,173
	0.61	8,276

III. 결 과

Table I은 자기장이 없는 환경과 9.4 T 고자기장 환경에서 이동거리에 따른 총 80회의 측정값이다. Fig. 4는 자기장의 유무와 각 거리 조건에서 도출한 최댓값, 중간값, 최소값을 그래프로 나타낸 이미지이다. 그래프에 명시된 수치는 거리 조건에 따른 최댓값이다. 자기장이 없는 환경에서 측정한 GM 튜브 기반 계측기의 최대값은 0.8 $\mu\text{Sv/h}$ 이며 고자기장 환경에서 측정한 거리에 따른 최댓값은 0 cm에서 0.63 $\mu\text{Sv/h}$, 30 cm에서 0.67 $\mu\text{Sv/h}$, 75 cm에서 0.62 $\mu\text{Sv/h}$ 이다(Fig. 4A).

NaI(Tl) 검출기를 활용한 계측기는 자기장이 없는 환경에서 15,215 Counts를 측정하였고 고자기장 환경에서는 0 cm에서 0 Count, 30 cm에서 1,490 Counts, 75 cm에서 8,400 Count를 측정하였다(Fig. 4B).

Table II에서 GM 튜브 기반 방사선 계측기와 NaI(Tl) 검출기를 활용한 계측기의 검정 통계량(χ^2)은 33과 37, 자유도(df)는 3이며 유의확률(p) 값은 모두 0.001 미만으로 나타났다[11-16].

Kruskal-Wallis 검정 이후 집단 간 차이를 세부적으로 확인하기 위한 Dwass-Steel-Critchlow-Fligner(DSCF) 사후검정에 대한 결과는 Table III과 같다.

W 값은 Wilcoxon 순위합 통계량이며 p 값은 유의확률(p -value)이다. p 는 0.05보다 작을 때 두 집단 간 차이가 유의미하다고 판단한다.

GM 튜브 기반 계측기에서는 자기장이 없는 환경과 고자기장 환경에서 측정한 0 cm, 30 cm, 75 cm의 계측값을 개별적으로 비교하였을 때 유의미한 차이가 있었지만 0 cm와 75 cm의 계측값을 비교하였을 때는 통계적으로 차이가 없었다. NaI(Tl) 검출기를 활용한 계측기는 모든 비교에서 $p < 0.001$ 로 나타났다. 이는 자기장이 없는 환경에서의 계측값과 0 cm, 30 cm, 75 cm를 개별적으로 비교하였을 때 통계적으로 유의미한 차이가 있으며 0 cm와 30 cm, 0 cm와 75 cm, 30 cm와 75 cm의 비교에서도 검출 효율의 변화가 있다는 것을 의미한다[17-19].

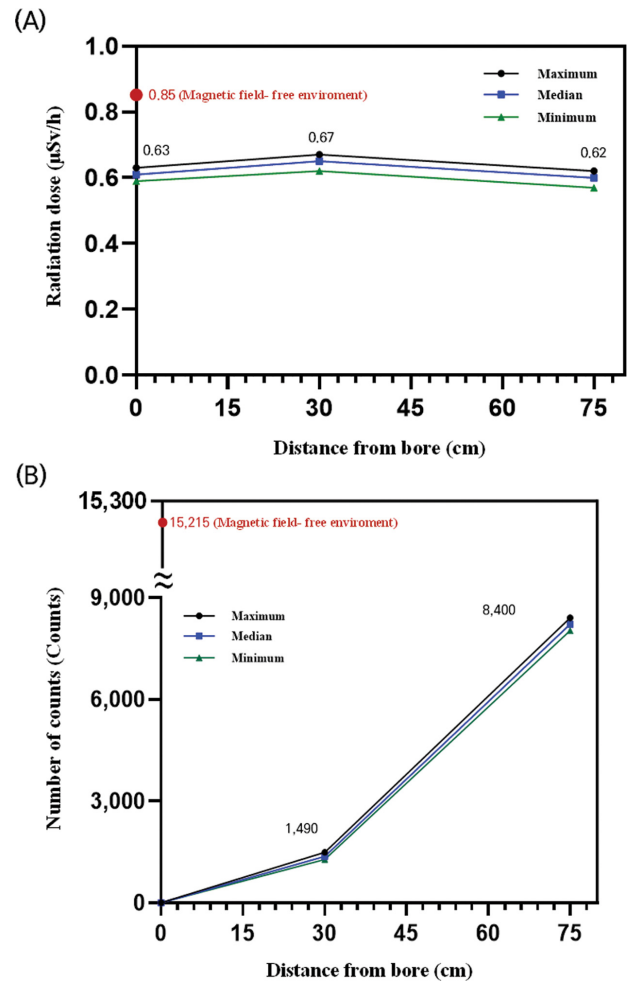


Fig. 4. (Color online) Detection efficiency of radiation detectors as a function of distance. (A) GM tube-based radiation measuring instrument, (B) NaI(Tl) based scintillation detector.

Table II. Results of the Kruskal-Wallis test, a nonparametric test method. χ^2 : Chi-squared statistic, df : Degrees of Freedom, p : probability value.

	χ^2	df	p
GM tube	33	3	< 0.001
NaI(Tl) detector	37	3	< 0.001

Table III. Results of the Post-hoc: Dwass-Steel-Critchlow-Fligner pairwise comparisons. W : Statistics for pairwise comparisons, p : probability value, (1): Magnetic field-free environment, (2): 0 cm, (3): 30 cm, (4): 75 cm.

Pairwise comparisons - GM				Pairwise comparisons - NaI(Tl)		
Comparison group		W	P	Comparison group	W	P
(1)	(2)	-5.36	< 0.001	(1)	(2)	< 0.001
(1)	(3)	-5.36	< 0.001	(1)	(3)	< 0.001
(1)	(4)	-5.36	< 0.001	(1)	(4)	< 0.001
(2)	(3)	5.01	0.002	(2)	(3)	< 0.001
(2)	(4)	-1.95	0.512	(2)	(4)	< 0.001
(3)	(4)	-5.32	< 0.001	(3)	(4)	< 0.001

IV. 고 찰

GM 튜브 기반의 계측기와는 달리 NaI(Tl) 검출기를 활용한 계측기에서는 0 cm에서 계측이 불가능하였고 중심 보어에서 30 cm, 75 cm 씩 거리를 이동할수록 Count가 회복되는 모습을 통해 자기장에 따른 효율 민감도가 크다는 것을 알 수 있었다.

데이터 분석 결과는 두 장비 모두 Kruskal-Wallis 검정을 통해 조건 간 차이가 있음을 확인하였고 DSCF 사후검정 결과 NaI(Tl) 검출기는 모든 조건에서 효율이 변화한 것을 알 수 있었다. 이러한 차이는 광전자증배관(Photo Multiplier Tube, PMT)을 사용하는 NaI(Tl)의 특성상 강한 자기장으로 인한 전자 편향으로 인해 다이노드(dynode)를 통한 전자증폭 현상이 감소되어 검출효율의 저하를 유발한 것으로 확인된다[20]. 반면 GM 튜브는 기체 이온화와 고전압을 통한 전자사태를 이용하므로 상대적으로 영향이 적은 것을 알 수 있다[21]. 현재 자성 민감 장비에 대한 선행연구에서는 효율 저하를 방지하기 위해 μ -metal 기반의 국부 차폐를 진행하거나 장비 선택 단계에서 자기장의 영향을 감소시키는 방안을 모색하고 있다[22,23].

본 연구의 제한점으로는 첫째, 계측 데이터 수의 부족이다. 표본 수가 적을 경우 시행될 수 있는 비모수 검정을 통해 측정값에 따른 유의미한 차이는 도출했지만 향후 추가적인 실험을 통해 자료의 신뢰성을 보완하고자 한다[24]. 둘째는 연구 배경의 제한성으로 고자기장 환경에서의 방사능오염 사고 발생 가능성은 일반적인 동위원소 생산시설이나 가속기 연구실, 원자력발전소와 같은 방사선관리구역보다 낮다고 알려져 있다. 그러나 고자기장 환경에서 오염 상황이 발생할 경우를 대비하여 자기장 환경에서의 계측 정확도 향상 및 사전 데이터는 필요하다고 사료된다[25-27].

V. 결 론

본 연구는 고자기장 환경에서 방사능오염 상황 발생 시 자기장이 GM 튜브 기반의 계측기와 NaI(Tl) 검출기를 활용한 계측기에 미치는 영향에 대해 비모수 검정을 사용하여 장비의 실용성을 평가하였다. GM 튜브 기반의 계측기는 고자기장 조건에서 약 25%의 효율이 저하되었지만 NaI(Tl) 검출기를 활용한 계측기는 약 80% 이상 검출효율이 저하되었다. 따라서 해당 연구와 유사한 고자기장 환경에서 방사선 계측을 진행한다면 GM 튜브 기반의 계측기는 중심 보어에서 직선 방향으로 1 m 이상, 거리를 두고 사용해야 한다. NaI(Tl) 검출기는 1 m에서 사용할 경우 추가적인 자기장 차폐를 고려하거나 직선 방향으로 2.7 m 이상 거리를 두고 측정할 것을

권고한다. 본 연구가 고자기장 환경에서 방사능오염 상황 발생 시 계측기의 실용성을 판단할 수 있는 기초 자료가 될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술정보통신부 한국원자력의학원 연구운영비 지원사업의 지원을 받아 수행하였음(No. 50422-2025).

References

- [1] W. P. Fendler, J. Czernin, K. Herrmann, and T. Beyer, J. Nucl. Med. **57**, 2016 (2016).
- [2] S. Y. Kim, H. Soh, J. H. Jung, E. H. Cho, H. Kim, J. M. Ju, J. H. Sheen, S. J. Lee, S. J. Oh, S. J. Lee, J. Chung, and J. S. Ryu, Radiology **310**, e231406 (2024).
- [3] A. Patel and H. Mazumdar, J. Radiat. Nucl. Appl. **8**, 93 (2023).
- [4] Thermo Fisher Scientific, RadEye Selection Guide, (2022). [online]. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/brochures/D16620~.pdf>
- [5] S. E. International Inc, OPERATION MANUA, (2024). [online]. https://seintl.com/media/product_document/Ranger%20Operation%20Manual%202012-4-2024_241204065023.pdf
- [6] Laurus Systems, Inc., (n.d.), Multi-Purpose Survey Meter, [online]. https://www.laurussystems.com/wp-content/uploads/LS_thermo_radeye_B20.pdf
- [7] Gammaspectacular, (n.d.), GS-1515-NAI (Kit), [online]. <https://www.gammaspectacular.com/blue/gamma-spectroscopy/scintillation-detectors/gs-1515-nai>
- [8] GeoGebra. (n.d.), GeoGebra, [online]. Available: <https://www.geogebra.org/>
- [9] Agilent Technologies, (n.d.), SPECIFICATION FOR AN MRBR 9.4 TESLA/310MM/AS CRYO-COOLED MAGNET SYSTEM, [online]. https://www.agilent.com/Library/specifications/Public/ts1330h_9-4t_310_asz.pdf
- [10] Washington State Department of Health, Office of Radiation Protection, Radiation Emergency Guide, (2014). [online]. <https://doh.wa.gov/sites/default/files/legacy/Documents/Pubs/320-103-RadiationEmergencyHandbook.pdf>
- [11] B. W. Yap and C. H. Sim, J. Stat. Comput. Simul. **81**, 2141 (2011).
- [12] D. G. Altman and J. M. Bland, BMJ. **310**, 298 (1995).
- [13] F. Habibzadeh, J. Korean Med. Sci. **39**, e35 (2024).
- [14] A. J. Bishara, J. Li, and C. Conley, Psychon. Bull. Rev. **28**, 1164 (2021).
- [15] A. Ghasemi and S. Zahediasl, Int. J. Endocrinol. Metab. **10**, 486 (2012).
- [16] J. E. Kolassa, An Introduction to Nonparametric Statistics, Chapman and Hall/CRC, New York (2020) pp. 96~110.
- [17] M. Hollander, D. A. Wolfe, and E. Chicken, Nonparametric Statistical Methods, John Wiley & Sons, Hoboken (2013)

- pp. 256~285.
- [18] M. Tosun and H. Uslu, *Ultrasonography*, **41**, 394 (2022).
 - [19] S. Rani, G. K. Gupta, R. Chakraborty, T. Kumar, M. K. Kumar, A. K. Das, and S. Shekhar, *Ann. Afr. Med.* **23**, 459 (2024).
 - [20] Z. Fu, F. Gao, W. Wang, and J. Xia, *Front. Phys.* **11**, 1160388 (2023).
 - [21] D. Barclay, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **33**, 613 (1986).
 - [22] J. Lu, D. Ma, K. Yang, W. Quan, J. Zhao, B. Xing, and M. Ding, *IEEE Access*, **8**, 40918 (2020).
 - [23] J. Wehner, B. Weissler, P. Dueppenbecker, P. Gebhardt, D. Schug, W. Ruetten, F. Kiessling, and V. Schulz, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* **734**, 116 (2014).
 - [24] H. Arahmane, J. Dumazert, E. Barat, T. Dautremer, F. Carrel, N. Dufour, and M. Michel, *J. Environ. Radioact.* **272**, 107358 (2024).
 - [25] J. Lehmann, T. Beveridge, C. Oliver, T. E. Bailey, J. E. Lye, J. Livingstone, A. W. Stevenson, and D. J. Butler, *Med. Phys.* **46**, 3298 (2019).
 - [26] H. Fuchs, F. Padilla-Cabal, L. Zimmermann, H. Palmans, and D. Georg, *Med. Phys.* **48**, 2572 (2021).
 - [27] F. Ferrulli and M. Silari, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* **1042**, 167430 (2022).