Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 3, pp. 347-352, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.3.347

Technical article

국제표준규격의 ^{137}Cs 감마선장에서 전리함선량계 종류에 따른 공기커마율 측정 및 평가 결과의 유효성 검증

목성윤[1,2] · 계용욱[1] · 김효진[1] · 이지은[1] · 장희진[1] · 이창근[1] · 조월순[1] · 백정화[1] · 안 현[2] · 강영록[1,*]

[1]동남권원자력의학원 연구센터, [2]동의대학교 방사선학과

Method Validation of the Measurement and Assessment Results of Air Kerma Rate by Type of Ionizing Chamber in ^{137}Cs Gamma Field of International Standard

Seoung Yun Mok[1,2], Yong Uk Kye[1], Hyo Jin Kim[1], Ji Eun Lee[1], Hee Jin Jang[1], Chang Geun Lee[1], Wol Soon Jo[1], Jeong Hwa Baek[1], Hyun An[2], and Yeong-Rok Kang[1,*]

[1]Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences, Research Center, Jwadong-gil 40, Jangan-eup, Gijang-gun, Busan 46033, Republic of Korea
[2]Dong-eui University, Department of Radiological Science, Eomgwangno 176, Busanjin-gu, Busan 47340, Republic of Korea

ABSTRACT In this study, air kerma was measured in field of the ^{137}Cs gamma-ray irradiator using both farmer type and spherical type ionization chambers and was compared the results to determine whether they provide similar values under identical conditions. The gamma-ray field was established with an irradiator containing ^{137}Cs isotope of 370 GBq radioactivity and the customized conical collimator according to ISO 4037:2019. The air kerma rate at a reference distance of 1 m from the source was measured using farmer type and spherical type ionization chambers, which maintain traceability through accredited calibration with identical environment condition. The assessed air kerma rate by the farmer type was 20.07 mGy h^{-1}, with 3.1% uncertainty (confidence level : approx. 95%, $k = 2$) and the spherical type was 20.11 mGy h^{-1}, with 2.4% (confidence level: approx. 95%, $k = 2$), respectively. The result of both air kerma measurement shows good agreement. To verify the validation of dose measurement results through KOLAS measurement audit was demonstrated that assessment of own dosimetry method conforms to international standards. The measurement audit was conducted E_n-*value* evaluation through comparison of calibration factor including measurement uncertainty by using a spherical type of portable standard ionization chamber. The calibration of measurement audit was performed at a reference air kerma rate of 3 mGy h^{-1}. The results of our laboratory was 3.731×10^4 Gy C^{-1}, with 2.7% (confidence level: approx. 95%, $k = 2$) and the testing laboratory was 3.722×10^4 Gy C^{-1}, with 1.7% (confidence level : approx. 95%, $k = 2$), respectively. The E_n-*value* evaluation result was 0.08, which is significantly smaller than the threshold value. It was shown that the objective precision and reliability of the dosimetry evaluation results have been verified. Overall, the own dose assessment method conform to international standards and contribute to the advancement of radiation measurement techniques.

Key words: Ionization chamber, ^{137}Cs gamma irradiator, Air kerma, Measurement uncertainty, E_n-value, Measurement Quality

1. 서 론

공기커마(air kerma)는 방사선의 에너지가 공기 중에 전달되어 물질에 흡수되는 에너지의 양을 나타내는 중요한 물리량으로, 이를 정확하게 측정하는 것은 방사선에 대한 기본 측정 표준의 기초가 되며 국제 표준에 따라 측정 및 교정 방법을 제시하고 있다[1-3]. 방사선 측정을 위해 다양한 종류의 방사선 검출기가 사용되며, 그 중 전리함선량계(ionization chamber dosimeter)는 대표적인 선량계로 널리 활용된다[4,5]. 전리함선량계는 방사선의 흡수 및 전리 작용을 기반으로 하는 기기로, 내부의 기체가 방사선

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/
Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author: Yeong-Rok Kang
Tel: +82-51-720-5828, Fax: +82-51-720-5826, E-mail: yeongrok@dirams.re.kr
Received 4 July 2025 Revised 11 July 2025 Accepted 15 July 2025

에 의해 전리되면서 생성된 이온쌍을 전기적으로 수집하여 선량을 측정하는 방식으로 동작한다[6]. 이러한 전리함선량계는 구조적 특성에 따라 여러 유형으로 나뉘며, farmer type, micro type, parallel plate type, spherical type, well type 등의 유형이 있다. 대표적으로 farmer type 전리함선량계는 선형적 구조를 가지며 높은 정확도와 재현성으로 인해 주로 의료 방사선 측정에 사용되며, spherical type 전리함선량계는 구형 구조를 가지고 있어 공간적 선량 분포를 평가하는데 유리하다[7,8]. 전리함선량계는 종류와 용도에 따라 서로 다른 방사선 응답 특성을 보일 수 있으므로 동일한 방사선장에서 두 장비를 사용하여 측정한 결과를 비교하는 것은 선량계의 특성을 이해하는데 중요하다.

동남권원자력의학원(Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences, DIRAMS)는 측정에 대한 품질을 보증하는 한국인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)로부터 국제공인 교정기관(KOLAS 인정번호: KC14-297)으로 2014년도에 최초 인정을 받았고, 2020년도에는 국제공인 시험기관(KOLAS 인정번호 : KT887)으로 인정받았다. 또한, 국가표준기본법 및 공인기관 인정제도 운영요령 등에 의거하여 국제 표준(ISO/IEC 17025) 및 국내 부합화 표준(KS Q ISO/IEC 17025)에 따라 적합한 품질 시스템을 유지하고 있다[9,10].

본 기관은 18.5, 37, 185, 370 GBq의 방사능을 가진 ^{137}Cs 선원이 장착된 감마선 조사장치 2대를 보유하고 있으며 방사선 측정, 기준 방사선 및 국제적 표준화를 위한 기준이 되는 국제 표준인 ISO 4037에 만족하도록 감마선장을 구축하여 운용중이다. ^{137}Cs 동위원소는 방사성붕괴를 통해 0.662 MeV의 감마선을 방출하는 방사선원으로 약 30년의 장기간의 반감기로 인해 감마선 조사의 안정된 환경을 제공한다[11]. 이러한 특성으로 인해 ^{137}Cs 감마선 조사장치는 공기커마 측정 및 방사선 교정 연구에서 널리 활용되고 있으며, 국제 계측 표준에서도 중요한 기준 선원으로 널리 사용하고 있다[11,12].

본 연구에서는 farmer type 및 spherical type 두 형태의 전리함선량계에 대한 ^{137}Cs 감마선 조사장치의 방사선장 공기커마율을 측정하여 동일한 선장 및 환경에서 두 종류의 전리함선량계의 특성을 분석하였고 측정심사를 통해 방사선량 측정의 품질에 대한 신뢰성을 확보하였다[13].

2. 재료 및 방법

2.1. 전리함선량계를 활용한 ^{137}Cs 조사장치 감마선장의 선량 평가 방법

본 실험에서는 370 GBq의 ^{137}Cs 선원이 내장된 감마선 조사장치(TH-I93991, Chiyoda Technol Corp.)를 활용하였다. ^{137}Cs 감마선 조사실의 크기는 약 7 m (가로) × 9 m (세로) × 3 m (높이)이며, 0.6 m 두께의 철근콘크리트 차폐벽으로 구축되어 있다. 또한 국제표준규격에 부합하는 감마선의 방출각이 중심축으로부터 10°인 콘 형태의 집속기를 자체 제작하여 ISO 4037:2019 기준 감마 방사선장을 구축하였다. 집속기를 거쳐 기준거리인 1 m에서 감마선장의 유효빔면적 반지름은 0.155 m이다[12]. ^{137}Cs 방사선장에서의 전리함선량계 형태별 공기커마 비교를 위해 공인교정으로 소급성이 유지되는 측정장비를 활용하였으며 사용한 전리함선량계는 farmer type (TM30011-1, PTW)과 spherical type (EXRADIN A6, Standard Imaging)을 사용하였다. Farmer type의 TM30011-1의 경우 ^{60}Co 방사선장; 감마에너지 약 1.17, 1.33 MeV의 방사선장에서 전하량-공기커마에 대해 국제공인교정되었으며 전하 수집체적은 0.6 cm^{3}이다. Spherical type의 EXRADIN A6의 경우 ^{137}Cs 방사선장; 감마에너지 약 0.662 MeV의 방사선장에서 전리함선량계-공기커마에 대하여 국제공인교정되었으며 전하 수집체적은 800 cm^{3}이다. 방사선량률 측정 부대 장비로는 공인교정된 전리전류계(6517B, KEITHLEY), 기압계(C300, LUFFT), 온습도계(CENTER-313, CENTER Technol. Corp.)를 사용하여 전리함선량계에 수집된 전하량을 온도, 기압에 대해 보정을 실시하였다. ^{137}Cs 선원으로부터 기준거리인 1 m에 Fig. 1과 같이 전리함선량계를 설치한 후 전하량을 측정하였으며 식 (1)을 활용하여 공기커마율로 환산하였다[14].

$$\dot{K}_{air} = M_{net} \cdot k_{tp} \cdot k_{Q,Q_0} \cdot N_{K,air} \quad (1)$$

식 (1)의 $\dot{K}_{air}$는 측정위치에서 평가된 공기커마율, M_{net}는 측정시간동안 획득한 선량측정 시스템의 순전하량, k_{tp}는 온도 및 기압에 의한 환경보정인자, k_{Q,Q_0}는 전리함선량계의 교정시 기준 방사선과 실제로 측정한 방사선의 선질에 따른 전리함선량계의 반응도 차이를 보정하기 위한 선질보정인자, $N_{K,air}$는 측정 표준기의 전하량-공기커마 교정계수이다[15]. 동일 조건 하에서 전리함선량계의 종류를 변경하여 farmer 및 spherical type의 차이에 따른 ^{137}Cs 감마선장에서의 공기커마율을 비교하였다.

2.2. ^{137}Cs 조사장치 감마선장 측정선량의 유효성 검증 방법

소급성이 유지되는 측정기를 활용한 선량평가에서 측정의 결과값 유효성을 검증하는 단계는 필수적이다. 본 논문에서는 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)에서 이동형 표준기를 사용하는 측정심사를 통하여 보유하고 있는 선량평가 시스템 측정 결과의 유효성을 검증하였다. 이동형 표준기는 spherical type의 전리함선량계(EXRADIN A6, Standard Imaging)를 사용하였고 심사기관의 선교정, 신청기관 교정, 심사기관의 후교정 방식으로 진행하였다. 측정 범위는 ^{137}Cs 광자에너지 약 0.662 MeV의 감마선장의 기준 공기커마율 3 mGy h^{-1}로 선정하였다. 먼저, 1 m에서 5 m까지 제어가 가능한 교정대를 활용하여 감마선 조사장치의 거리별 공기커마율을 공인 교정하였고 측정일 기준으로 방사성붕괴를 보정하여 선원으로부터 2.568 m의 거리를 기준 공기커마율 3 mGy h^{-1}의 조사지

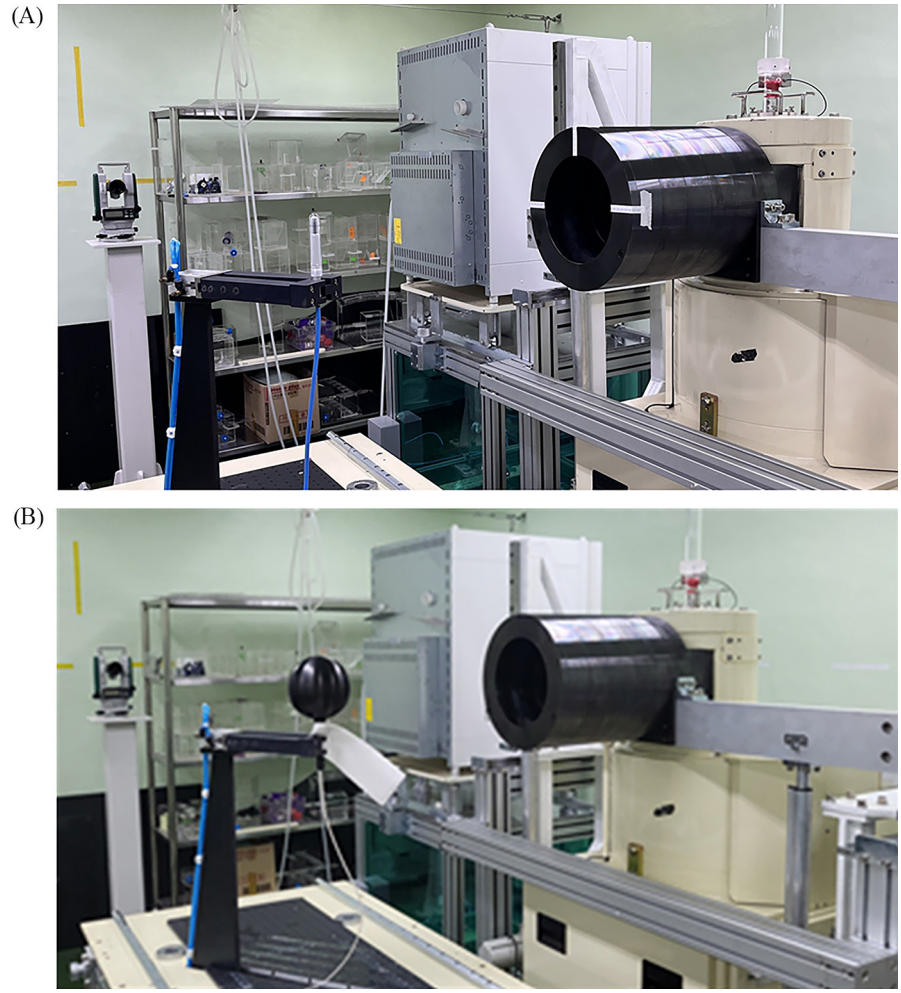

Fig. 1. Air kerma rate measurement at the reference distance using (A) farmer type and (B) spherical type ionization chambers in a ^{137}Cs gamma radiation field according to international standards.

점으로 선정하였다[16]. 측정심사에 사용된 측정량은 이동형 표준기인 구형 전리함선량계의 전하량-공기커마 교정계수값($N_{k,air}$)이며 유효성 검증을 위해 식 (2)의 E_n-value로 평가하였다[17].

$$E_n = \left| \frac{N_{K,air}^{Lab} - N_{K,air}^{Ref}}{\sqrt{U_{Lab}^2 - U_{Ref}^2}} \right| \quad (2)$$

식 (2)에서 $N_{K,air}^{Lab}$은 본 측정량의 결과값, $N_{K,air}^{Ref}$는 심사기관 측정량의 결과값이며, U_{Lab}은 본 측정의 측정불확도(신뢰수준 약 95%, $k = 2$)값, U_{Ref}는 심사기관의 측정불확도(신뢰수준 약 95%, $k = 2$) 값이며 측정심사에 사용된 이동형 표준기의 교정계수($N_{K,air}^{Lab}$)를 구하기 위하여 식 (3)을 사용하였고 측정의 불확도를 평가하기 위하여 참고문헌을 통해 본 실험에 최적화된 불확도 평가법을 적용하였다[13].

$$N_{K,air}^{Lab} = \frac{N_{K,air}^{ws} \cdot M_{net}^{ws} \cdot k_E^{ws} \cdot k_{tp}^{ws} \cdot k_{re}^{ws} \cdot k_d^{ws} \cdot k_s^{ws}}{M_{net}^{r} \cdot k_E^{r} \cdot k_{tp}^{r} \cdot k_n^{r} \cdot k_{dre}^{r} \cdot k_d^{r}} \quad (3)$$

$N_{K,air}^{ws}$는 교정용 전리함선량계의 전하량-공기커마 교정계수, M_{net}^{ws}는 교정용 전리함선량계로 측정된 순전하량, k_E^{ws}는 교정용 전리전류계의 교정인자, k_{tp}^{ws}는 교정용 전리함선량계 측정시 환경보정인자, k_{re}^{ws}는 교정용 전리함선량계의 이온재결합 보정인자, k_d^{ws}는 교정용 전리함선량계의 위치재현성, k_s^{ws}는 교정용 전리함선량계의 안정도, M_{net}^{r}는 교정대상기기로 측정된 순전하량, k_E^{r}는 교정대상기기 측정에 사용된 전리전류계 보정인자, k_{tp}^{r}는 교정대상기기 측정시 환경보정인자, k_n^{r}는 빔의 비균질도 보정인자, k_{re}^{r}는 교정대상기기의 이온재결합 보정인자, k_d^{r}는 교정대상기기의 위치재현성 보정인자이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전리함선량계를 활용한 ^{137}Cs 조사장치 감마선장의 선량 평가 결과

재료 및 방법에서 언급한 바와 같이 전리함선량계의 형태별 교

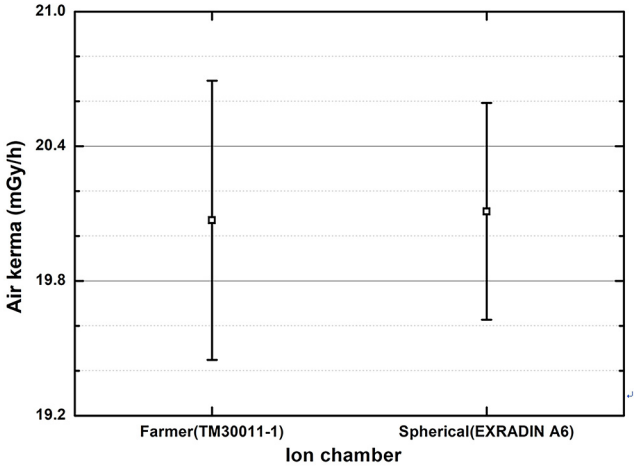

Fig. 2. Results of air kerma rate measurement using a farmer type and spherical type ionization chambers in a gamma radiation field.

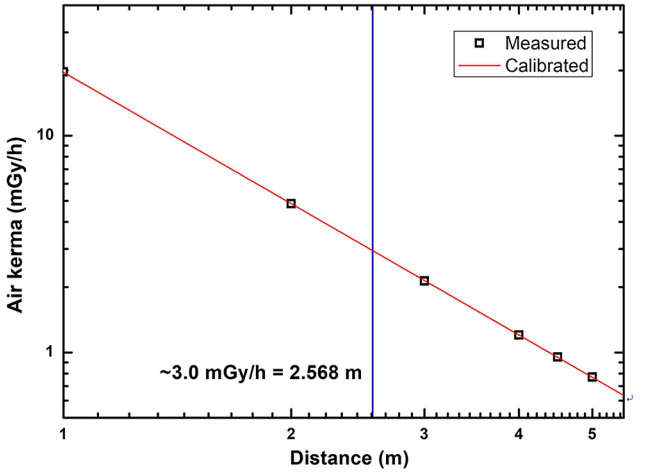

Fig. 3. Internationally accredited calibration results of air kerma rate in ^{137}Cs gamma radiation field and determination of the reference distance for measurement audit.

정의 조건은 farmer type의 경우 ^{60}Co 방사선장에서, spherical type 의 경우 ^{137}Cs 방사선장에서 공인교정 되었다. 전리함선량계의 형태를 변경하고 부대장비와 측정의 조건을 동일하게 한 후 선원으로부터 기준 거리 1 m 위치에서 측정한 ^{137}Cs 감마 조사장치의 공기커마율에 대한 선량평가 결과는 farmer type 전리함선량계의 경우 20.07 mGy h^{-1} 및 3.1%의 측정불확도(신뢰수준 약 95%, k = 2)로 평가되었고 spherical type 전리함선량계의 경우 동일한 기준거리에서 20.11 mGy h^{-1} 및 2.4%의 측정불확도(신뢰수준 약 95%, k = 2)로 평가되었다. 두 형태의 전리함선량계 중 farmer type의 전리함선량계는 유효 체적이 0.6 cm^{3}이고 spherical type의 전리함선량계는 800 cm^{3}로 매우 다른 유효 체적을 가짐에도 불구하고 기준 거리 1 m에서 국제표준규격의 ^{137}Cs 방사선장 내에서 평가된 공기커마율은 Fig. 2와 같이 산출되었고 0.22% 차이를 나타내며 높은 수준의 일치성을 보였다.

측정불확도의 평가는 전리함선량계의 교정계수 불확도, 측정전하량의 반복측정 불확도, 전리전류계의 교정인자 불확도, 환경보정인자 불확도, 선질보정인자 불확도, 전리함선량계의 이온재결합 불확도, 전리함선량계의 선원으로부터 기준거리까지의 위치재현성 불확도, 전리함선량계의 안정도 불확도, 붕괴보정계수의 불확도를 합성하여 상대불확도로 평가하였다.

3.2. ^{137}Cs 조사장치 감마선장 측정선량의 유효성 검증 결과

기준 공기커마율 3 mGy h^{-1}에서의 선원과의 측정거리 선정은 공인교정된 조사장치의 1 m에서 5 m까지 1 m 간격으로 측정한 공기커마율 교정 결과의 회귀방정식 파라미터를 사용하여 Fig. 3과 같이 2.568 m의 기준거리 결과를 얻었다. 이 때, 해당 위치에서 spherical type 전리함선량계로 공기커마율을 측정하였을 때 3.028 mGy h^{-1}로 평가되었다. 조사장치 공인교정 결과로 추론한 측정범위 3.0 mGy h^{-1}와 측정값의 차이를 보이는 이유는 소급성

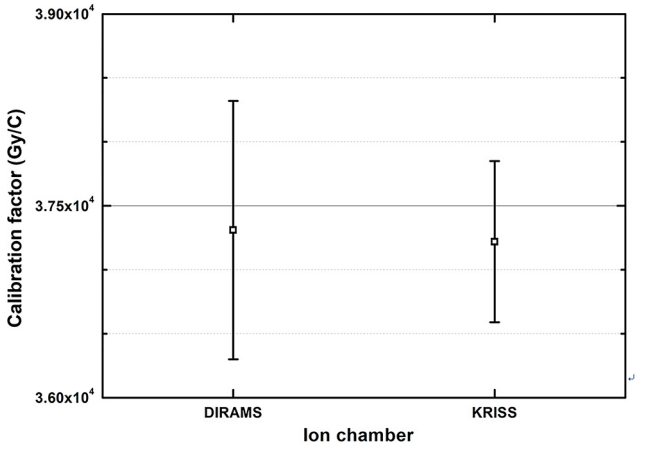

Fig. 4. Comparison of calibration factor results for the portable standard ionization chamber measured by DIRAMS and KRISS for the measurement audit.

은 동일하게 유지되지만 측정시스템의 상이함 뿐만아니라 기준 공기커마율 위치인 2.568 m는 공인교정 결과의 내삽함수에서 측정거리 2.0 m와 3.0 m 사이에 있으며 이 때 측정값과 내삽함수를 사용한 계산값의 차이는 최대 0.48% 정도 내삽함수 계산값이 높게 산출되었으므로 해당 영향이 반영되었다고 볼 수 있다.

평가된 기준 공기커마율 3 mGy h^{-1}의 기준거리인 2.568 m에서 이동형 표준기의 전하량-공기커마에 대한 교정계수를 산출하였다. ^{137}Cs 감마선 약 0.662 MeV 에너지에 대한 이동형 표준기에 대한 측정량의 결과값으로 신청기관은 3.731 × 10^4 Gy C^{-1}, 심사기관의 결과값은 3.722 × 10^4 Gy C^{-1}이며, 측정불확도값으로 신청기관은 2.7% (신뢰수준 약 95%, k = 2), 심사기관은 1.7% (신뢰수준 약 95%, k = 2)의 값이 Fig. 4와 같이 평가 되었고 신청기관에서 평가한 측정불확도 요소를 Table 1에 표기하였다. 측정심사에

Table 1. Uncertainty budget for the portable standard ionization chamber measured by Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences (DIRAMS) for measurement audit

	Uncertainty factor	Type	Measured	Relative measurement uncertainty	Probability distribution	Sensitivity factor	Uncertainty contribution	ν
Gamma radiation filed	Calibration factor for standard chamber, $u(N_K^{ws})$	B	0.000 037 Gy nC^{-1}	1.000 0%	normal	1.0	1.000 0%	∞
	Measurement repeatability of charge, $u(M_{net}^{ws})$	A	1.352 533 nC	0.009 1%	t	1.0	0.009 1%	9
	Calibration factor for electrometer, $u(k_E^{ws})$	B	0.998 600	0.100 0%	normal	1.0	0.100 0%	∞
	Correction factor for environmental, $u(k_{tp}^{ws})$	B	1.003	0.121 0%	normal	1.0	0.121 0%	∞
	Correction factor for ion recombination, $u(k_{re}^{ws})$	B	1.000	0.577 4%	rec.	1.0	0.577 4%	∞
	Correction factor for location reproducibility, $u(k_d^{ws})$	B	1.000	0.115 5%	rec.	1.0	0.115 5%	∞
	Correction factor for stability of ion chamber, $u(k_s^{ws})$	B	1.000	0.100 0%	normal	1.0	0.100 0%	∞
Measuring instrument for calibration	Measurement repeatability of charge, $u(M_{net}^{r})$	A	1.350 076 nC	0.013 9%	t	-1.0	0.013 9%	9
	Calibration factor for electrometer, $u(k_E^{r})$	B	0.998 600	0.100 0%	normal	-1.0	0.100 0%	∞
	Correction factor for environmental, $u(k_{tp}^{r})$	B	1.004	0.121 0%	normal	-1.0	0.121 0%	∞
	Correction factor for beam homogeneity, $u(k_n^{r})$	B	1.000	0.290 0%	rec.	-1.0	0.290 0%	∞
	Correction factor for ion recombination, $u(k_{re}^{r})$	B	1.000	0.577 4%	rec.	-1.0	0.577 4%	∞
	Correction factor for location reproducibility, $u(k_d^{r})$	B	1.000	0.115 5%	rec.	-1.0	0.115 5%	∞
Relative combined standard measurement uncertainty			1.355%		Effective DOF, ν_{eff}		6.866×10^8	
Relative extended uncertainty			2.7% (confidence level about 95%, $k = 2$)					

대한 결과는 심사기관과 신청기관의 전하량-공기커마 교정계수에 대하여 E_n-value로 평가 되었다. E_n-value는 측정결과와 기준값 사이의 차이가 각 결과의 불확실성을 고려했을 때 통계적으로 허용 가능한 범위 내에 있는지 평가하기 위한 정규화된 지표이며 측정의 신뢰성과 정확도를 객관적으로 평가하는 중요한 요소이다. E_n-value의 평가기준은 값이 1보다 작거나 같을 경우에는 측정결과와 기준값의 차이가 불확실성 범위 내에 있으므로 측정결과가 기준값과 통계적으로 일치한다고 판단하며, 1보다 클 경우에는 측정결과와 기준값의 차이가 불확실성보다 커서 측정결과가 유의미하게 다르다고 해석한다. 본 측정심사의 E_n-value 결과는 0.08로 1보다 매우 작은 값을 나타냈으며 이것은 측정의 불확도를 포함한 선량평가의 결과값에 대하여 신뢰할 수 있고 고도의 측정기술을 확보하였다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 ^{137}Cs (370 GBq) 방사성 동위원소 및 자체 구축한 ISO 4037:2019의 국제표준규격에 부합하는 조사 시스템을 활용하여 구조적 특성이 다른 farmer type과 spherical type의 두 형태의 전리함선량계로 동일한 기준거리에서 공기커마 측정을 수행하여 전리함선량계 별 선량평가 특성을 비교분석 하였으며, 본 기관에서 수행된 측정에 대한 품질의 유효성을 검증하기 위해 측정심사를 수행하였다. 본 연구의 결과는 상이한 구조적 특성을 지닌 farmer type과 spherical type 전리함선량계 간의 ^{137}Cs 감마선장에서 선량측정 결과 비교를 통해 구조적 특성이 다른 전리함선량계에 대한 특성비교분석을 할 수 있는 측정기술 기반 자료로 활용이 가능하다. 두 가지 형태의 전리함선량계는 현저히 다른 유효체적(farmer type: 0.6 cm^3, spherical type: 800 cm^3)을 가지고 있으나 기준거리 1 m 및 동일한 측정조건에서 평가한 공기커마율은 각각 20.07 mGy h^{-1} 및 20.11 mGy h^{-1}로 farmer type에 대비하여 spherical type 전리함선량계의 공기커마율의 차이는 0.22%로 높은 일치율을 보였다. 측정 품질의 유효성을 검증하기 위해 이동형 표준기의 교정계수에 대한 E_n-value 평가 방법의 측정심사를 통해 실험에서 도출된 측정값과 기준값 간의 차이가 불확도를 포함하여 통계적으로 허용 가능한 범위 내에 있음을 확인하여 선량의 정밀측정의 기술력을 확보하였다. 이와 같은 결과는 동남권원자력의학원의 측정 체계가 표준규격에 따른 평가 절차에 따라 관리되고 있으며, 국제 표준화 기구에서 제시하는 측정 품질 관리

기준을 충실히 반영되어 국제공인 교정 및 시험기관의 인정 요건 하에 체계적인 관리와 지속적인 품질 보증 시스템을 구축하였고 적법하게 운영되고 있는 기관임을 알 수 있다.

이는 향후 전리함선량계 및 ^{137}Cs 감마선 조사장치를 이용한 연구에서의 본 기관이 보유한 측정 기술은 국제 기준에 부합하는 정밀한 선량 평가 능력을 보유하고 있음을 입증하였고 이를 통한 응용 측정 실험에서 신뢰성을 높이는 양질의 실험 결과를 얻을 수 있는 기반기술, 품질 보증 체계 강화, 방사선 측정 기술 고도화 등으로 적용가능하다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 동남권원자력의학원의 지원을 받아 수행된 연구(No. 50491-2025)입니다. 본 연구는 동남권원자력의학원의 자체연구개발지원사업의 지원을 받아 수행된 연구(No. 51001-2024)입니다.

참고문헌

1. International Atomic Energy Agency. 1997. Absorbed dose determination in photon and electron beams: An international code of practice, 2nd ed.. Technical Report Series No. 277.
2. International Atomic Energy Agency. 2000. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Technical Reports Series No. 398.
3. Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, Hanson WF, Huq MS, Nath R and Rogers DW. 1999. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Medical physics* **26**(9):1847-1870. https://doi.org/10.1118/1.598691.
4. International Commission on Radiation Units & Measurements. 2014. Key data for ionizing-radiation dosimetry: Measurement standards and applications. ICRU Report 90.
5. International Commission on Radiation Units & Measurements. 2006. Measurement quality assurance for ionizing radiation dosimetry. ICRU Report 76.
6. Khan FM and Gibbons JP. 2014. Khan's the physics of radiation therapy. Lippincott Williams & Wilkins. Philadelphia, USA.
7. Seco J, Clasie B and Partridge M. 2014. Review on the characteristics of radiation detectors for dosimetry and imaging. *Physics in medicine and biology* **59**(20):303-347. https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/20/r303.
8. Boutillon M. 1998. Volume recombination parameter in ionization chambers. *Physics in medicine and biology* **43**(8):2061-2072. https://doi.org/10.1088/0031-9155/43/8/005.
9. International Organization for Standardization. 2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO/IEC 17025.
10. Korean Standards Association. 2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. KS Q ISO/IEC 17025.
11. Be MM, Chiste V, Dulieu C, Browne E, Baglin C, Chechev V, Kuzmenko N, Helmer R, Kondev F, MacMahon TD and Lee KB. 2006. Table of radionuclides (Vol. 3-A=3 to 244). Editions Bureau International des Poids et Mesures.
12. International Organization for Standardization. 2019. X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1 Radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1.
13. Korea Association of Standards and Testing Organizations. 2020. Standard calibration procedure of ionization chamber dose meter. KASTO 20-80105-042.
14. Korea Association of Standards and Testing Organizations. 2016. Standard calibration procedure of gamma irradiation systems. KASTO 16-80107-102.
15. Kang SK, Rhee DJ, Kang YR, Kim JK and Jeong DH. 2014. Determination of TRS-398 Quality Factors for Cs-137 Gamma Rays in Reference Dosimetry. *Progress in Medical Physics* **25**(3):123-127. https://doi.org/10.14316/pmp.2014.25.3.123.
16. Korea Laboratory Accreditation Scheme. 2022. KOLAS Proficiency Test Operation Guidelines. KOLAS-R-007.
17. Korean Standards Association. 2015. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. KS Q ISO/IEC 13528.