JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical paper

16(4) : 519-528 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.519

기준 방사선장 구축을 위한 방사선 조사장치의 특성 및 선질 평가에 대한 연구

권다영[1], 한기택[1], 민제호[1], 노성진[1,*]

[1]한국방사선진흥협회 방사선기기표준화연구센터

A Study on the Characterization and Quality Evaluation of Radiation Irradiation System for Construction of Reference Radiation Field

Da Yeong Gwon[1], Ki Taek Han[1], Jeho Min[1] and Sung Jin Noh[1,*]

[1]Radiation Instrument Standardization Research Center, Korean Association for Radiation Application, Jeongeup-si 56212, Republic of Korea

Abstract The institution using radiation must have radiation protection equipment under the law, but they must calibrate the equipment in a foreign country. Also, a company related to equipment development carries out performance evaluations in a foreign country because equipment performance evaluations and certification systems are inadequate in the Republic of Korea. Therefore, this study aims to review the international standard for reference radiation field and assess the suitability of the radiation irradiation system constructed in KARA (Korean Association for Radiation Application). Firstly, we deducted the technical criteria by analyzing international standard documents (ISO 4037-1, IEC 61267). Secondly, we checked whether the radiation irradiation system is suitable for international standard criteria by characterization assessment. Based on these results, we judged that the radiation irradiation system could be used to establish a reference radiation field. Finally, using the radiation irradiation system, we built the reference radiation (gamma-ray and X-ray) through the half-value layer test, homogeneity coefficient assessment, and so on. It is expected that reference radiation fields constructed through this study will be used in performance evaluation for radiation protection equipment and contribute to creating the radiation irradiation infrastructure by building additional reference radiation fields. Also, we expect that it will be possible to secure the technology to calibrate and test for radiation instruments based on the international standard through further research using the radiation irradiation system.

Key words: Reference radiation, Radiation irradiation system, International standard, Performance evaluation, Characterization assessment

1. 서 론

다양한 분야(의료, 산업, 교육·연구, 군사 분야 등)에서 방사선을 이용함에 따라 Tables 1,2에 제시된 바와 같이 방사선이용기관 수 및 방사선작업종사자의 수가 증가하고 있으며, 후쿠시마 원전사고 등으로 인해 방사선 방호에 대한 사회적 관심이 증가하고 있다[1]. 따라서, 방사선이용기관에서는 국내 관련법에 따라 방사선 방호 등을 위한 방사

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. Sung Jin Noh
Tel. +82-63-538-8192 E-mail. nsj@ri.or.kr
Received 24 October 2022 Revised 22 November 2022 Accepted 2 December 2022

Table 1. Number of institution according to the radiation field

Radiation field	2016	2017	2018	2019	2020	CAGR
Industrial field	5,470	5,862	6,372	6,696	6,898	6.0
Medical field	35,319	36,258	37,038	38,061	38,920	2.5
Veterinary medicine field	2,657	2,623	2,948	2,782	3,037	3.4
Educational and research field	1,461	1,526	1,548	1,618	1,651	3.1
Others	354	365	394	405	429	4.9
Total	45,261	46,634	48,300	49,562	50,935	3.1

Table 2. Number of radiation workers according to the radiation field

Radiation field	2016	2017	2018	2019	2020	CAGR
Industrial field	34,645	28,998	30,333	31,202	28,340	−4.9
Medical field	80,115	89,996	94,935	100,627	104,250	6.8
Veterinary medicine field	3,446	3,677	4,554	5,733	6,037	15.0
Educational and research field	7,896	8,746	8,896	8,633	8,163	0.8
Total	126,102	131,417	138,718	146,195	146,790	3.9

선기기 (방사선 측정기, 방사선 방호장비 등)를 구비하고 있으나, 기관에서 사용하는 방사선기기의 대부분 해외에서 수입하고 있는 실정이다.

또한, 방사선 측정기 교정, 반응도 시험 등을 수행 시 교정기관 또는 표준기관에 설치된 국제규격 기반의 정량화된 기준 방사선을 사용해야 한다. 하지만, 2022년 11월 기준 국내 방사선, 방사능, 중성자 분야의 KOLAS 교정기관 (총 13개 기관)은 엑스/감마 서베이미터, 개인피폭선량계, 표면오염감시기, 전리함 등에 대한 교정을 수행하고 있으며, KOLAS 시험기관(총 26개 기관)은 대부분 환경 방사능이나 실내 공기질 측정 등 방사능 측정 관련 시험규격에 대한 KOLAS 공인 시험을 수행하고 있다. 따라서, 국내에서는 방사선기기 성능 평가를 위한 국제규격 기준 시험 체계 및 인증 시스템이 미비하여 국내 방사선기기 개발 산업체는 국외에서 제품 성능 평가를 수행하고 있는 실정이다.

의료분야의 경우,「진단용 방사선 발생장치의 안전관리에 관한 규칙」에 의해 진단용 방사선 발생장치는 3년마다 정기검사를 받아야 하며,「진단용 방사선 안전관리 규정」에 따라 정기검사 시 필요한 측정 장비를 주기적으로 교정하도록 규정되어 있다. 하지만, 국내에서는 정기검사 시 사용하는 측정 장비 교정을 위한 공인교정기관이 부재하여 국외 제조사 등을 통해 교정을 수행하고 있다.

따라서, ISO/IEC 11934 (1997), 60532 (2010), 60846-1 (2019), 61267 (2005), 61331-1 (2014), 61526 (2012) 등 방사선기기 성능 평가 목적의 국제규격 등에 대한 시험을 수행하기 위해서는 ISO 4037 및 IEC 61267에 적합한 기준 방사선장을 구축할 필요성이 있다[2-11] (Table 3 참조). 이에 본 연구에서는 기준 방사선 관련 국제규격인 ISO 4037-1 및 IEC 61267 내 기준 방사선장별 성능요건을 분석하고, 방사선기기 시험 인프라 구축 및 국내 방사선기기 산업체 지원을 위해 한국방사선진흥협회 방사선기기표준화연구센터에 구축된 저준위 감마선 조사장치와 엑스선 조사장치에 대한 성능평가를 수행하여 국제규격 기준의 적합성 여부를 검토하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 국제규격 기반의 기준 방사선 항목 및 범위 (ISO 4037-1, IEC 61267)

ISO 4037-1 국제규격은 일정 범위의 공기커마율(10 μGy h^{-1}~10 Gy h^{-1})에 대한 선량(률)계 교정 및 광자에너지에 따른 응답 측정 시 사용되는 엑스선 및 감마선에 대한 기준 방사선 특성 및 발생 방법에 대해 명시되어 있다. 하지

Table 3. List of international standard

Standard number	Standard name	(Reference) radiation
ISO 4037-1 (2019)	Radiological protection - 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 4037-2 (2019)	Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV	–
ISO 4037-3 (2019)	Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence	–
ISO 4037-4 (2019)	Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 4: Calibration of area and personal dosemeters in low energy X reference radiation fields	–
IEC 61267 (2005)	Medical diagnostic X-ray equipment - Radiation conditions for use in the determination of characteristics	–
ISO 11934 (1997)	X and gamma radiation - Indirect or direct reading capacitor-type pocket dosemeters	Gamma-ray: ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{60}Co X-ray: N-series (8EA)
IEC 60532 (2010)	Radiation protection instrumentation - Installed dose rate meters, warning assemblies and monitors - X and gamma radiation of energy between 50 keV and 7 MeV	Gamma-ray: ^{137}Cs, ^{60}Co Beta-ray: ^{90}Sr/^{90}Y Neutron: ^{252}Cf, ^{241}Am/Be
IEC 60846-1 (2009)	Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors	Gamma-ray: ^{137}Cs X-ray: N-series (2EA) Beta-ray: ^{90}Sr/^{90}Y
IEC 61331-1 (2014)	Protective devices against diagnostic medical X-radiation - Part 1: Determination of attenuation properties of materials	Gamma-ray: ^{137}Cs, ^{60}Co X-ray
IEC 61526 (2010)	Radiation protection instrumentation - Measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for X, gamma, neutron and beta radiations - Direct reading personal dose equivalent meters	Gamma-ray: ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{60}Co X-ray: N-series (1EA) Beta-ray: ^{90}Sr/^{90}Y Neutron: ^{252}Cf, ^{241}Am/Be

만, 해당 규격이 2019년 개정되면서 저에너지 영역 X선의 범위 및 종류가 변경되었으며, 기준 감마선 발생 동위원소 중 ^{241}Am이 제외되어 ISO 4037-1: 2019에 제시된 기준 방사선은 다음과 같다; 1) Continuous filtered X radiation (8~330 keV), 2) Gamma radiation emitted by radionuclides (600 keV~1.3 MeV), 3) Photon radiation produced by accelerators (4~9 MeV). IEC 61267 국제규격은 의료분야 진단용 X선 장치에 대한 시스템 및 구성요소의 특성 평가 시 적용되는 규격으로서 진단용 X선 장치 용도별 기준 방사선장에 대한 특성(X선 튜브 전압, 1차 반가층, 균질계수)이 명시되어 있다. 방사선 방호용 및 진단용 등에 대한 국제규격에서 명시된 기준 감마선장 및 기준 엑스선장에 대한 기술기준은 Table 4에 제시되어 있다.

2.1.1. ISO 4037-1 규격에서의 기준 방사선 특성

ISO 4037-1에 명시된 기준 엑스선을 결정하는 요소에는 평균에너지, 분해능, 반가층, 균질계수가 포함되며, 기준 엑스선장은 크게 High air kerma rate series (H-series),

Table 4. Main quality and technical standard of reference radiation

Reference radiation	Details	
	Type of quality	Criteria
X-ray	Tube voltage	Within 5%
	Ripple	Within 10%
	Target	Tungsten (W)
	Incidence angle	Over 7°
	Windows of X-ray tube	1~4 mmBe
	Purity of filter	Over 99.98%
	Thickness variation of filter	Within 10%
	Irradiation distance	Over 500 mm
	Beam size and type	Circle, Diameter 450 mm (in 2,500 mm)
	Beam homogeneity	Over 95%
	Contribution of scattered radiation	Less than 5%
Gamma-ray	Radiation source	^{60}Co or ^{137}Cs, over 37 MBq
	Range of air kerma rate	1 μGy h^{-1}~100 Gy h^{-1} (Uncertainty: within 10%)
	Beam homogeneity	Over 95% of maximum value
	Reproducibility	Within 1% (Number of irradiation: 10)
	Contribution of scattered radiation	Less than 5%
	Open close time of shutter	Within 0.2% of total irradiation time

Wide-spectrum series (W-series), Narrow-spectrum series (N-series), Low air kerma rate series (L-series)로 분류되며, 교정에 가장 많이 활용되는 기준 엑스선장은 W-series와 N-series이다. 실제 방사선장의 품질은 관전압, 총 필터(Total filtration) 두께 및 특성, 타겟 특성(양극 물질, X-선관 각도 등), 초점과 시험점 간의 공기층 두께(평균 에너지 25 keV 미만 시)에 따라 다르므로, 다음의 기술 조건 등을 준수하여 엑스선 조사장치를 설치하여야 한다; 1) 엑스선은 거의 일정한 potential을 발생시키는 장치에 의해 생성, 2) 리플이 가능한 한 낮은 엑스선 장치 사용, 3) 엑스선관 표적 재질로 텅스텐(반사형)을 사용하고 각도는 7° 이상(7°~20°인 경우 anode heel effect 고려), 4) 엑스선관과 모니터 챔버 간 셔터는 최고 에너지 기준 방사선에 대한 공기커마율을 최소 0.1%로 감소시킬 수 있을 정도로 충분히 두꺼워야 함. 본 연구에서 특성 평가를 수행한 기준 엑스선장이 포함된 N-series의 에너지별 기준 엑스선장 특성은 Table 5에 제시되어 있다.

ISO 4037-1에서는 방사성동위원소에서 방출되는 감마선을 활용한 선량(률)계 교정 시 사용 가능한 방사성핵종은 ^{60}Co과 ^{137}Cs이며, 선원이 내장된 캡슐은 베타선을 흡수하기에 충분히 두꺼워야 한다; ^{60}Co의 경우 0.2 g cm^{-2}, ^{137}Cs의 경우 0.5 g cm^{-2}. Collimator는 1차 광자선의 모양과 크기를 결정하기 위해 활용되어야 하며, 다양한 거리에서 Collimated beam 외부의 공기 커마율은 Collimated beam 내부 공기 커마율의 5%를 초과하지 않아야 한다. ISO 4037-1에 명시된 기준 감마선장의 특성은 Table 6에 제시되어 있다.

2.1.2. IEC 61267 규격에서의 기준 방사선 특성

IEC 61267에서는 의료 진단용 X선 장비의 특성 결정을 위해 실험실이나 제조시설에서의 시험 조건하에서 사용할 수 있는 방사선 조건을 가진 방사선장을 형성하는 방법에 대해 제시되어 있다. 해당 규격에서는 RQR (Patient supports 특성 결정 등에 사용), RQT (CT 특성 결정 등에 사용), RQR-M (유방촬영 장치 특성 결정 등에 사용) 등이 기준 방사선장으로 명시되어 있다. 기준 방사선장은 Target 물질, 엑스선 관전압, 총 여과(Total filtration), 1차 반가층, 균질 계수, 적용 거리에 따라 결정되며, 엑스선 튜브 전압의 리플은 10% 미만이어야 한다. 기준 방사선장을 시험할 때 필요한 장비는 엑스선 관전압 측정장치, Auxiliary filter,

Table 5. List of X and gamma reference radiation

Reference radiation (X-ray, ISO 4037-1: 2019)											
Name	Mean energy [keV]	Resolution [%]	Tube potential [kV]	Recommended inherent filtration	Additional filtration thickness				1st HVL at distance from the focal spot of		2nd HVL at distance from the focal spot of	
					mm Pb	mm Sn	mm Cu	mm Al	1.0 m [mm]	2.5 m [mm]	1.0 m [mm]	2.5 m [mm]
N-25	20.3	33	25	1 mmBe				2.0	0.662 Al	0.677 Al	0.746 Al	0.760 Al
N-30	24.6	32	30	1 mmBe				4.0	1.16 Al	1.17 Al	1.28 Al	1.29 Al
N-40	33.3	30	40	4 mmAl			0.21		2.63 Al	2.65 Al	2.83 Al	2.84 Al
N-60	47.9	36	60	4 mmAl			0.6		0.234 Cu	0.235 Cu	0.263 Cu	0.264 Cu
N-80	65.2	32	80	4 mmAl			2.0		0.578 Cu	0.580 Cu	0.622 Cu	0.623 Cu
N-100	83.3	28	100	4 mmAl			5.0		1.09 Cu	1.09 Cu	1.15 Cu	1.15 Cu
N-120	100	27	120	4 mmAl		1.0	5.0		1.67 Cu	1.67 Cu	1.73 Cu	1.74 Cu
N-150	118	37	150	4 mmAl		2.5			2.30 Cu	2.30 Cu	2.41 Cu	2.41 Cu
N-200	165	30	200	4 mmAl	1.0	3.0	2.0		3.92 Cu	3.91 Cu	3.99 Cu	3.99 Cu
N-250	207	28	250	4 mmAl	3.0	2.0			5.10 Cu	5.08 Cu	5.14 Cu	5.14 Cu
N-300	248	27	300	4 mmAl	5.0	3.0			5.96 Cu	5.94 Cu	6.00 Cu	5.99 Cu
N-350	288	29	350	4 mmAl	7.0	4.5			–	6.69 Cu	–	6.74 Cu
N-400	328	27	400	4 mmAl	10.0	6.0			–	7.31 Cu	–	7.34 Cu

Table 6. Properties of radionuclide used for the production of gamma radiation

Name	Radionuclide	Radiation energy [keV]	Half-life [year]	Air kerma rate constant $\left[\frac{\mu Gy\ m^2}{MBq\ hr}\right]$
S-Cs	^{137}Cs	661.7	30.05 ± 0.08	0.079
S-Co	^{60}Co	1,173.3/1,332.5	5.2711 ± 0.0008	0.31

Attenuation layer, Diaphragm, 방사선 검출기, 반가층 시험 장치이며, Auxiliary filter와 Attenuation layer의 재료는 순도 99.9% 이상의 알루미늄으로 구성되어야 한다. 본 연구에서 특성 평가를 수행한 RQR은 기기의 감쇠 특성 결정 시 활용 가능하며, RQR 기준 방사선장별 세부 사양은 Table 7에 제시되어 있다.

2.2. 방사선 조사 시스템

2.2.1. 감마선 조사 시스템

방사선기기 교정, 성능 평가 등의 목적으로 구축된 감마선 조사 시스템에는 한국산업표준(KS A ISO 4037-1)에 명시된 기준 감마선장 구축을 위해 ^{60}Co (3.7 GBq), ^{137}Cs (0.37 GBq, 3.7 GBq), ^{241}Am (3.7 GBq) 선원이 장착되어 있다[Fig. 1(a)]. 조사실 바닥으로부터 1,200 mm 높이에 위치한 선원으로부터 조사 방향 1,000 mm 지점에서 직경 200 mm의 원형 감마선장이 형성되며, 콜리메이터는 ISO 4037-1에 따라 지그재그 형태의 텅스텐 재질로 구성되어 있다. 또한, 방사성동위원소 종류 및 방사능에 의해 상이해지는 조사점을 고려하여 선원표면이 일치하도록 선원 홀더를 구성하였으며, 레이저 수평계 3개를 이용하여 선원 조사점으로부터 빔 수평 방향으로 1,000 mm 지점을 시각적으로 확인할 수 있는 기준점 설정장치를 설계하고, 중간점검용 물리적 기준바를 제작하였다.

2.2.2. 엑스선 조사 시스템

방사선기기 특성 평가 시험 기준값 설정 등의 목적으로 구축된 엑스선 조사 시스템은 기준거리 1,000 mm에서 직

Table 7. Characterization of standard radiation qualities (RQR 2 to RQR 10)

Standard radiation quality	X-ray tube voltage [kV]	First half-value layer [in mm of Al]	Homogeneity coefficient
RQR 2	40	1.42	0.81
RQR 3	50	1.78	0.76
RQR 4	60	2.19	0.74
RQR 5	70	2.58	0.71
RQR 6	80	3.01	0.69
RQR 7	90	3.48	0.68
RQR 8	100	3.97	0.68
RQR 9	120	5.00	0.68
RQR 10	150	6.57	0.72

(a) (b)

Fig. 1. Radiation irradiation system: (a) Low-level gamma-ray, (b) X-ray.

경 200 mm 원형의 다양한 기준 엑스선장을 형성할 수 있으며, 엑스선 발생장치는 엑스선관, 고전압 발생장치, 냉각장치, 콜리메이터, 셔터, 필터 홀더 등으로 구성되어 있다[Fig. 1(b)]. 빔 조사 방향으로 최대 2,500 mm (위치제어 수 μm)까지 이동이 가능하며, 레이저수평계 3개를 이용하여 엑스선관 타겟 포커스에서 빔 조사 방향으로 1,000 mm 지점을 시각적으로 확인할 수 있는 기준점 설정장치를 설계하고, 중간점검용 물리적 기준바를 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

국내외 표준규격 기반의 방사선기기 및 방사선 센서 특성 평가, 방사선 차폐체 차폐성능 평가 등 연구개발과 방사선기기 국내 납품 및 해외 수출 등의 지원 목적으로 구축된 방사선 조사장치 2종에 대해 KIRSS에서 교정한 전리함 선량계를 사용하여 방사선장 균질도, 재현성, 1차 빔의 산란선 기여도 등을 평가하였다. 이후, 기준 방사선장을 형성하여 국제규격(ISO 4037-1, IEC 61267) 적합 여부를 검토하였다.

3.1. 감마선 조사 시스템 특성 평가

전리함(Standing Imaging, Exradin A5, A6), 전위계(Keithley 6517B), 온도계(CTR 5000), 압력계(CPG 2500)를 사용하여 감마선 조사 시스템 선원으로부터 1,000 mm 지점(기준점)에서 형성되는 방사선장에서 감마선 조사 시스템의 특성 평가를 실시하였으며, 특성 평가 항목에는 방사선장 균질도, 재현성, 산란성, 셔터 개폐시간이 포함된다. 첫 번째로, 기준점에서 Horizontal 방향으로 전리함을 일정 간격으로 이동시키면서 선량률을 측정하여 Beam profile 측정 결과 직경 160 mm 원형에서 98% 이상으로 평가되어 방사선장 균질도는 감마선 조사장치의 최소 성능(유효 빔

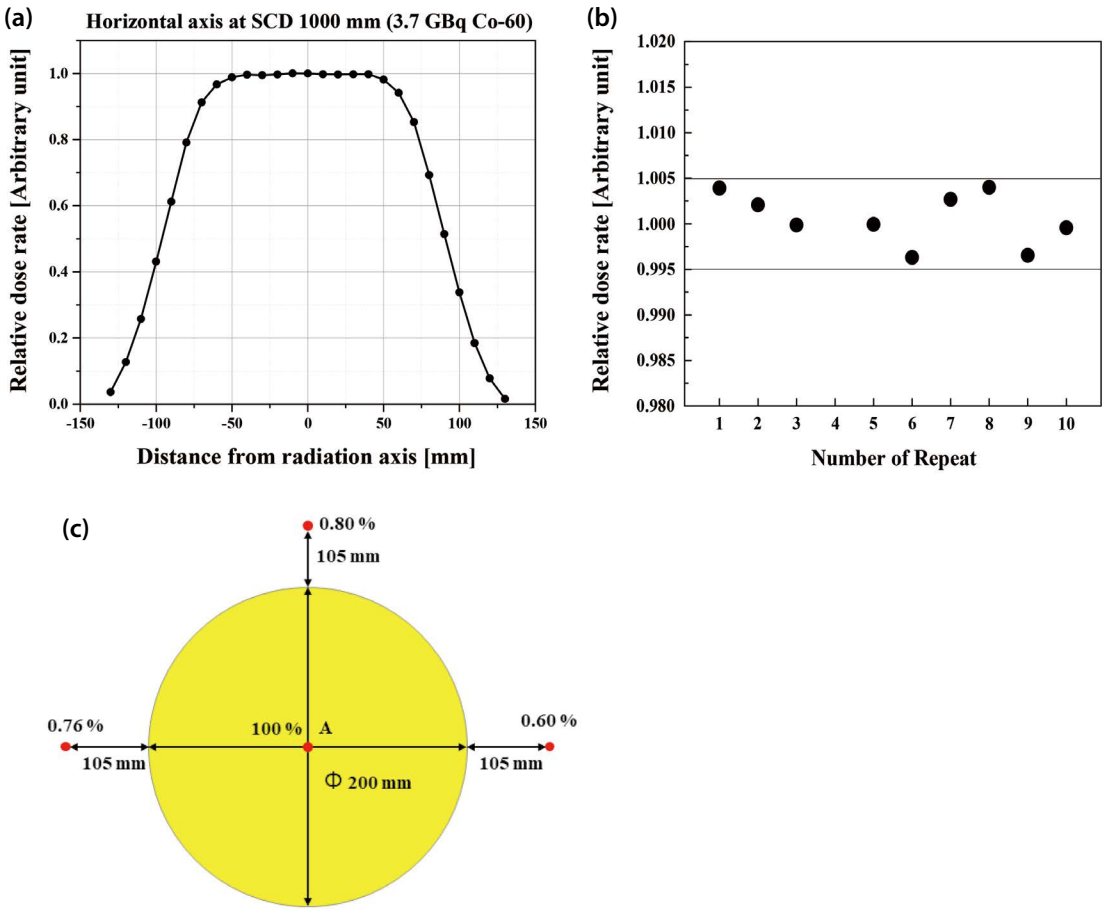

Fig. 2. Characteristic evaluation of low-level gamma-ray irradiation system: (a) Homogeneity, (b) Reproducibility, and (c) Scattered radiation.

크기 범위에서 최대값의 95% 이상)을 만족함을 확인하였다. 두 번째로, 선원 이동 및 선원 조사 과정을 10회 반복하여 기준점에서의 선량률 측정값을 평가한 결과 상대표준편차가 ±0.33 % 이내로서 방사선장 재현성은 감마선 조사장치의 최소성능(10회 반복 조사 시 1% 이하)을 만족함을 확인하였다. 세 번째로 기준점에서 콜리메이터 내외부 선량률 측정 결과 방사선장 중심에서 105 mm 떨어진 지점에서의 선량률은 1% 이하로 평가되어 1차 빔의 산란성 기여도는 감마선 조사장치의 최소 성능(1차 빔의 5% 이하)을 만족함을 확인하였다. 마지막으로 50초 10회와 500초 1회 조사 시 누적된 선량측정값을 바탕으로 계산된 선원이동시간이 1초 이내이므로 감마선 조사장치의 최소성능(총 조사시간의 0.2% 이하)을 만족함을 확인하였다. 방사선장 균질도, 방사선장 재현성, 1차 빔의 산란선 기여도의 측정 결과는 Fig. 2에 제시되어 있으며, 측정 결과에 따라 해당 감마선 조사 시스템은 기준 조사장치로 활용 가능함을 확인하였다.

3.2. 엑스선 조사 시스템 특성 평가

제조사 매뉴얼 및 Certificate 자료 검토를 통해 엑스선 발생장치의 엑스선관 및 고전압 발생장치의 사양(관전압, 관전류, 고유필터, 타겟, 리플, 정확도 등)을 확인한 결과 기준 엑스선장을 발생시키기에 충분한 사양임을 확인하였다. 또한, 기준 엑스선장 형성을 위해 사용한 고유여과 및 부가여과용 필터에 대한 물질, 순도 등에 대한 특성을 확인한 결과 관련 표준문서(ISO 4037-1, KS C IEC 61267: 2005 등)에 제시된 조건(순도 99.98% 이상 Al, Cu, Sn, Pb 등)을 충족함을 확인하였다. 이후 전리함(Standard Imaging, Exradin A3), 전위계, 온도계, 압력계를 사용하여 엑스선 조사 시스템의 빔 안정도, 빔 균질도, 산란선 기여도, 셔터 개폐시간에 대한 특성 평가를 수행하였다. 첫 번째로 기준거리 1,000 mm에서 여과 없이 형성된 직경 200 mm 원형 엑스선장 중심에서 전리함선량계 측정값을 검토한 결과 빔 출력 반복성 및 안정도는 0.5% 이하로서 관련 표준문서 조건(5% 이하)을 만족함을 확인하였다. 두 번째로 기준거리 1,000 mm에서

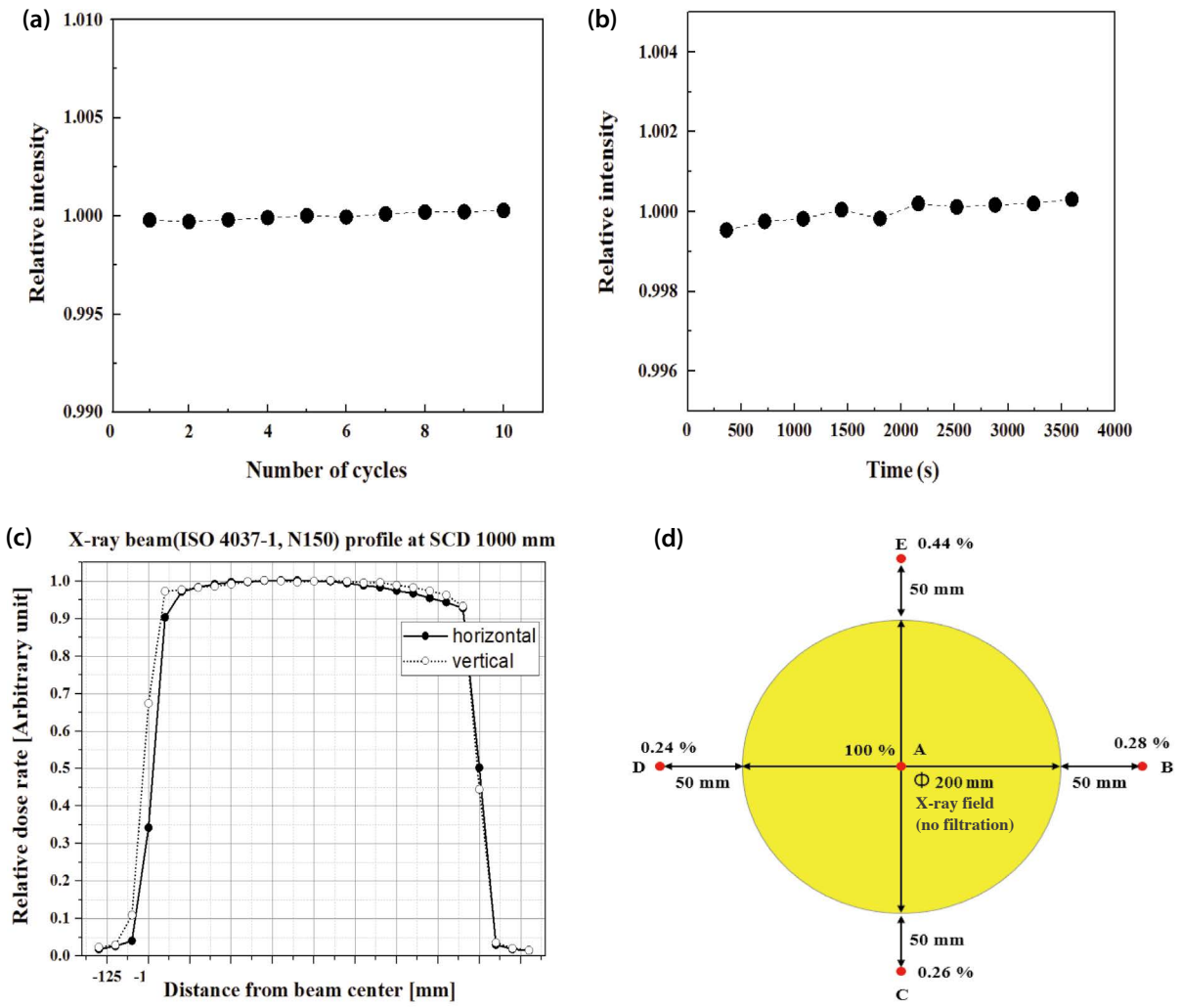

Fig. 3. Characteristic evaluation of X-ray irradiation system: (a) Beam reproducibility, (b) Beam stability , (c) Homogeneity, and (d) Scattered radiation.

Horizontal, Vertical 방향으로 전리함을 일정 간격으로 이동시키면서 선량률을 측정하여 Beam profile을 측정한 결과 직경 200 mm 원형 기준 엑스선장에 대해 95% 이상의 빔 균질도가 확보된 빔은 빔 중심점에서 직경 140 mm로 확인되었으며, 관련 표준문서 조건(95% 이상)을 만족함을 확인하였다. 그러나 빔 수평방향에서 기울기가 발생하였으며 이는 타겟에 의한 Heel effect로 인해 발생한 것으로 예상된다. 세 번째로 기준거리 1,000 mm에서 여과 없이 형성된 직경 200 mm 원형 엑스선장 빔 중심과 빔 외측부에서의 산란선 기여도를 확인한 결과 0.5% 이하로서, 관련 표준문서 조건(5% 이하)을 만족함을 확인하였다. 마지막으로 기준거리 1,000 mm에서 여과 없이 형성된 직경 200 mm 원형 엑스선장 빔 중심의 셔터 여부에 따른 전류값을 전리함선량계로 측정한 결과 셔터 차폐율은 0.001% 이하로서 관련 표준문서 조건(0.1% 이하)을 만족함을 확인하였다. 빔 출력 반복성 및 빔 안정도, 빔 균질도, 산란선 기여도에 대한 측정 결과는 Fig. 3에 제시되어 있다. 기준 엑스선장은 빔 시리즈 및 빔 코드에 따라 특성 차이가 발생할 가능성이 있으나, 본 연구에서 구축된 엑스선 조사장치는 관련 표준문서 조건을 충분히 만족함을 확인하여 N-150과 RQR-5 기준 방사선장을 형성하여 선질 평가를 수행하였다.

3.3. 기준 엑스선장 선질 평가(N-150)

본 연구에서는 방사선기기 교정 목적으로 많이 활용되는 방사선방호용 기준 엑스선장 시리즈 중 N-150에 대한 기준 엑스선장 구축 및 선질 평가를 수행하였다. 첫 단계로

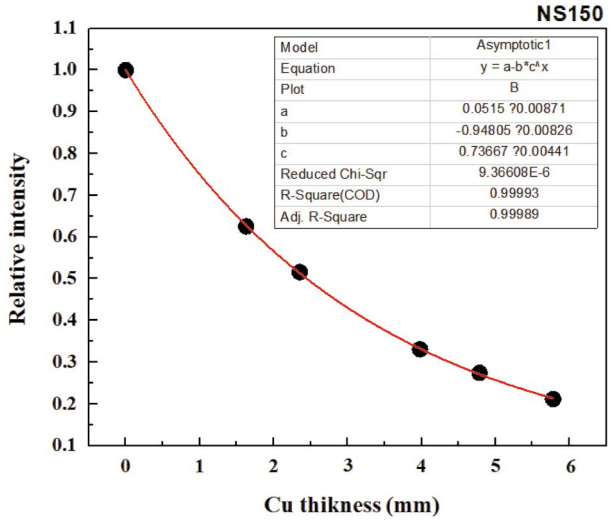

Fig. 4. Measurement of half-value layer (HVL) (N-150).

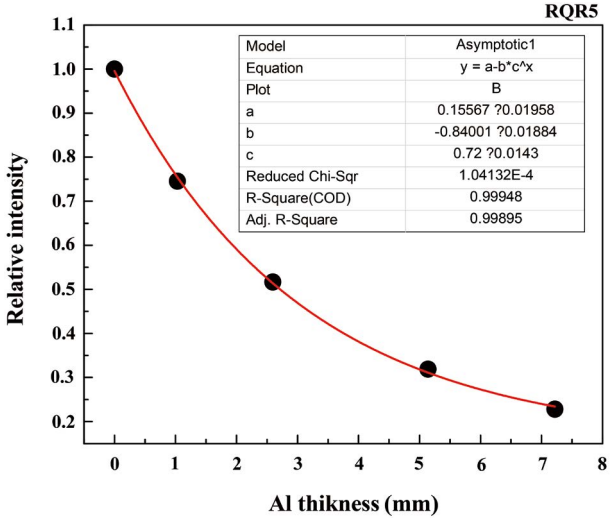

Fig. 5. Measurement of half-value layer (HVL) (RQR-5).

Table 8. Evaluation result of half-value layer (N-150)

Category	KS A ISO 4037-1: 1996	Measurement	X-ray quality	Criteria	Pass/Fail
1 HVL	2.36 mmCu	2.46 mmCu	1.042	0.95~1.05	Pass
2 HVL	2.47 mmCu	2.59 mmCu	1.049	0.95~1.05	Pass

Table 9. Evaluation result of half-value layer and homogeneity coefficient (RQR-5)

Category	IEC 61267: 2005	Measurement	X-ray quality	Criteria	Pass/Fail
1 HVL	2.58 mmAl	2.71 mmAl	–	–	–
2 HVL	–	3.945 mmAl	–	–	–
Homogeneity coefficient	0.71	0.687	0.023	Within ±0.03	Pass

4.0005 mmAl 필터, 0.7656 mmSn 필터, 1.846 mmSn 필터를 사용하여 N-150 엑스선질을 형성하였다. 이후 기준 방사선장으로서의 적합성 여부를 확인하기 위해 Cu 필터를 이용하여 KS A ISO 4037-1: 1996에 명시된 1차(2.36 mmCu) 및 2차 반가층(2.47 mmCu) 두께와 유사한 두께를 포함한 다양한 Cu 필터 두께(1.63 mmCu, 2.35 mmCu, 3.98 mmCu, 4.79 mmCu, 5.78 mmCu)를 사용하여 1, 2차 반가층 평가를 수행한 결과 1차 반가층은 2.46 mmCu, 2차 반가층은 2.59 mmCu로 측정되어 표준문서의 1, 2차 반가층의 차이는 5% 이하로 적합한 것으로 확인되었다. N-150에 대한 반가층 측정 그래프 및 반가층 평가 결과는 각각 Fig. 4, Table 8에 제시되어 있다.

3.4. 기준 엑스선장 선질 평가(RQR-5)

본 연구에서는 진단용 방사선 발생장치 검사장비 검·교정 등을 위해 IEC 61267에 명시된 진단용 기준 엑스선 중 RQR-5 구축 및 선질 평가를 수행하였다. 첫 단계로 2.0698 mmAl 필터, 0.5359 mmAl 필터, 0.1939 mmAl 필터를 사용하여 RQR-5 엑스선질을 형성하였다. 이후 기준 방사선장으로서의 적합성 여부를 확인하기 위해 Al 필터를 이용하여 IEC 61267에 명시된 1차(2.58 mmAl) 두께와 유사한 두께를 포함한 다양한 Al 필터 두께(1.03 mmAl, 2.60 mmAl, 5.14 mmAl, 6.31 mmAl, 7.22 mmAl)를 사용하여 1, 2차 반가층을 측정한 결과 1차 반가층은 2.71 mmAl, 2차 반가층은 3.945 mmAl로 측정되었다. 최종적으로 방사선 품질 적

합성을 확인하기 위해 균질계수(1차 반가층/2차 반가층)를 확인한 결과, 표준문서에 명시된 균질계수와의 차이가 ±0.03 이내로서 적합한 것으로 확인되었다. RQR-5에 대한 반가층 측정 그래프와 반가층 및 균질계수 평가 결과는 각각 Fig. 5, Table 9에 제시되어 있다.

4. 결 론

현재 방사선기기, 소재 등에 대한 성능 평가와 진단용 방사선 측정장비 검·교정 등의 서비스를 제공할 수 있는 국내 기관이 부재하여 대부분의 방사선 산업체는 국외 기관을 통해 교정 및 시험을 진행하고 있다. 또한, 국외에서는 자국 산업 보호를 위해 표준 기반 기술 규제 및 시험인증 제도를 강화하여 무역기술장벽으로 활용하고 있어 국내에서도 방사선기기 성능 평가 및 인증 표준체계 구축이 필요하다. 이에 본 연구에서는 방사선기기에 대한 교정 및 시험 등을 수행하기 위해 필요한 기준 방사선장을 형성할 수 있는 감마선 및 엑스선 조사장치를 구축하여 특성 평가를 수행하였다. 이후, 구축된 조사장치와 필터 등을 사용하여 형성된 국제표준 규격 기반의 기준 방사선장별 선질 평가 및 기준 방사선장으로서의 적합성 여부 검토를 수행함으로써 기준 감마선장과 기준 엑스선장 2종(N-150, RQR-5)을 구축하였다. 향후 본 연구에서 구축된 방사선 조사장치 2종을 활용하여 국내 방사선 산업에서 필요한 기준 방사선장(RQR-3, RQR-4, RQR-9 등)을 추가적으로 구축함으로써 국내 방사선 산업 활성화를 위한 인프라 체계를 구축하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 국내의 방사선기기에 대한 원천 기술력 보호 및 글로벌 산업 경쟁력 강화를 위해 국내에 구축된 방사선 조사장치를 활용하여 국제규격에 적합한 방사선기기 교정 및 시험기술 확보를 위한 추가 연구도 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20203210100190).

참고문헌

1. Koran Association for Radiation Application. 2022. Survey on the status of Radiation/RI Utilization in 2020, pp. 13.
2. International Organization for Standardization. 2019. Radiological protection - 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), 2nd Edition.
3. International Organization for Standardization. 2019. Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV (ISO 4037-2), 2nd Edition.
4. International Organization for Standardization. 2019. Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence (ISO 4037-3), 2nd Edition.
5. International Organization for Standardization. 2019. Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 4: Calibration of area and personal dosemeters in low energy X reference radiation fields (ISO 4037-4), 2nd Edition.
6. Korean Agency for Technology and Standard. 2020. X and gamma radiation - Indirect - or direct - reading Capacitor-type pocket dosemeters (KS A ISO 11934).
7. International Electrotechnical Commission. 2010. Radiation protection instrumentation - Installed dose rate meters, warning assemblies and monitors - X and gamma radiation of energy between 50 keV and 7 MeV (IEC 60532), 3rd Edition.
8. International Electrotechnical Commission. 2009. Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors (IEC 60846-1), 1st Edition.
9. International Electrotechnical Commission. 2005. Medical diagnostic X-ray equipment - Radiation conditions for use in the determination of characteristics (IEC 61267), 2nd Edition.
10. International Electrotechnical Commission. 2014. Protective devices against diagnostic medical X-radiation - Part 1: Determination of attenuation properties of materials (IEC 61331-1), 2nd Edition.
11. International Electrotechnical Commission. 2010· Radiation protection instrumentation - Measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for X, gamma, neutron and beta radiations - Direct reading personal dose equivalent meters (IEC 61526), 3rd Edition.