Journal of Radiation Industry 15(2) : 99~106(2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.2.99

국제표준 기반의 공간선량계(서베이미터)의 방사선 성능시험 및 평가 기술 연구

노성진[1] · 박태진[1] · 임영기[2,*]

[1]한국방사선진흥협회 방사선기기표준화연구센터, [2]가천대학교 메디컬 캠퍼스

A Study on the Radiation Performance Testing and Evaluation Technology for Survey Meter Based on International Standards

Sung Jin Noh[1], Tai Jin Park[1] and Young-Khi Lim[2,*]

[1]*Radiation Technology and Standardization Center, Korean Association for Radiation Application, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea*

[2]*Medical Campus, Gachon University, Incheon 21936, Republic of Korea*

Abstract - The goal of this study is to secure the technology to carry out international standards based measurements, testing, and verification of survey meters and radiation safety management equipment for safe management of radiation. Based on IEC 60846-1, the international standard for evaluating the performance of radiation devices, we derived radiation performance requirements and test methods for dose dependability, energy dependance, direction dependency, linearity, accuracy, overload, reaction time, and alarm. Performance evaluation was conducted using the test methods that were derived by using gamma and x-ray reference survey devices based on international standards. Based on this, we first secured the technology level and performance criterion for the commercialized domestic survey meter, then we verified whether the survey meter conforms to the standard requirement by evaluating it with the test method and performance standard stipulated in the international standard. We were able to verify that the performance condition proposed by the manufacturer was more narrowly specified compared to the IEC performance condition. In general, an empirical evaluation of the technical specifications recommended by the manufacturer and the test items specified by IEC confirmed that they were satisfied within the reference conditions. It is expected that the result of this research on the introduction of a radiation equipment evaluation system suitable for these international standards will secure the technology to carry out international standards based measurements, testing, and verification of radiation protection measurement equipment for radiation safety management.

Key words : Radiation survey meters, International standard, Performance evaluation, Verification

서 론

방사선 기기(방사선 검출기 등)와 관련하여 국내에서는 특

* Corresponding author: Young-Khi Lim, Tel. +82-32-820-4365, E-mail. yklim@gachon.ac.kr

정 시험원에서 수요자가 요구할 경우 일반 환경하에서 수행하고 있으며, 방사선 기기가 아닌 산업용 계측기로 성능 평가를 수행하고 있다. 또한 한국표준과학연구원에서 일부 환경조건에서 방사선 기기의 성능 시험 및 평가를 수행하고 있으나 그 외 타 기관에서는 방사선 기기는 물론 방사선 방호장비에 관련하여 시험이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

방사선 안전정보의 신뢰성은 소급성 확보와 불확도의 엄밀한 평가에 있으므로 방사선안전관리장비 성능 적합성 평가와 방사선 기기의 설계기준 만족 여부를 평가하기 위해서는 국가표준체계에 기초한 측정품질시스템을 구비해야 하며 국제기준에 따른 평가기술과 표준절차 개발이 필요하다. 산업 분야는 물론 기기제작 분야에서는 ISO 및 IEC로 대표되는 국제표준의 국내 도입에 대한 필요성에 대해서는 공감하고 있으나 방사선 분야에서는 이러한 국제표준에 대해 영세 중소기업체의 경우 인력 및 예산 등의 기타 문제로 국제공인인증 취득에 많은 어려움이 내포되어 있고 입찰 제한 등 업무적으로 불이익을 받고 있는 실정이다.

방사선 기기의 성능 평가를 위한 국제규격은 ISO/IEC 4037 (2019), 6980 (2006), 8529 (2001), ANSI N13.11 (2009), IEC 60846 (2009), 61526 (2010) 등이 있으며 각 규격들은 지속적인 제/개정을 통하여 방사선 방호 분야의 기술/동향을 반영하고 있다(ISO 4037-4:2019; ISO 6980-1:2006; ISO 8529-1:2001; ANSI/HPS N13.11:2009; IEC 60846-1:2009; IEC 61526:2010; ISO/IEC 17025:2017). 따라서 책임 있는 국제사회의 일원으로 국내 방사선 이용시설에서 방사선안전관리장비로 획득되는 방사선 측정데이터에 기초한 방사선안전정보는 국제 기준에 대한 충족이 필요하다.

본 연구에서 방사선 방호 계측기로 사용되는 국내 공간선량계(서베이미터)에 대해서 기술사양을 분석하고 국제규격인 IEC 60846-1를 바탕으로 선량 의존성, 에너지 의존성, 방향 의존성, 선형성, 정확성, 과부하, 반응시간, 경보 등에 대한 방사선 성능 요건 및 시험방법을 도출하였으며 한국방사선진흥협회 방사선기기표준화연구센터에 구축된 국제표준 기반의 감마선 및 엑스선 기준조사장치를 이용하여 그에 따른 성능 평가를 실시하였다. 이러한 국제규격에 적합한 방사선 기기 평가체계 도입 연구결과를 통해 방사선안전관리를 위한 방사선 방호 계측기기 등에 대한 국제표준 기반 측정, 시험, 검증을 할 수 있는 기술 확보가 마련될 것으로 판단된다.

재료 및 방법

1. 시험항목 및 범위 분석, 선정 (IEC 60846-1)

IEC 60846-1 표준 규격은 ICRU Report 47의 권고에 따라 외부 베타, X 및 감마 방사선에 의한 주변 선량당량(률) 또는 방향선량당량(률) 측정용 선량당량(률)계 또는 감지기에 적용되며 작업 공간 및 환경에 사용하려는 휴대용 측정기 및 감지기에 적용된다. 따라서 이 표준규격을 바탕으로 서베이미터의 방사선 성능 요건에 대한 시험항목들을 분석하고 평가를 실시하였다.

1.1. 선량률 의존성(선량 측정의 선량률 의존성으로 인한 응답 변화)

최소 정격 범위는 5 μSv·h^{-1}에서 1 Sv·h^{-1}로 하되 이 요건이 1 Sv·h^{-1}까지 만족할 수 없으면, 적어도 선량률의 측정 범위의 최대값까지 만족해야 하고 사용 정격 범위의 최대값은 선량계에 표시되어야 한다. 10초보다 적은 시간 또는 10시간을 초과하는 시간과 노출은 제외하며 선량률당 약 100초에 한 번 시험으로 충분하다. 또한 선량률 의존성으로 인한 상대응답의 변화는 사용 정격 범위의 모든 선량률에 대해 −13%에서 +18%의 범위 이내면 요건이 충족된 것으로 간주하고 있다. 이를 바탕으로 기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 10 μSv·h^{-1}, 50 μSv·h^{-1}, 100 μSv·h^{-1}, 500 μSv·h^{-1}, 1 mSv·h^{-1}, 10 mSv·h^{-1}, 20 mSv·h^{-1})으로 선량률 의존성 평가를 실시하였다.

1.2. 에너지 의존성(광자 방사선 에너지에 의한 응답 변화)

사용 정격 범위 이내에서 광자 방사선의 에너지에 대한 상대적인 응답은 −29%에서 +67% 범위 이내에 있어야 하고 사용 최소 정격 범위는 80 keV에서 1.5 MeV 사이 또는 20 keV에서 150 keV 사이의 에너지를 사용하며 정격 범위의 모든 방사선 에너지에 대한 상대적인 응답은 제작사가 명시해야 한다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 Table 1과 같이 ISO narrow beam X-ray 4개 선질과 ^{137}Cs 등 총 5개 에너지에 대하여 공간선량당량을 기준으로 평가하였으며 제작사가 제시한 에너지 측정 영역 내에서 유효에너지 65.2 keV, 83.3 keV, 100 keV 및 188 keV 인 X-ray와 ^{137}Cs의 662 keV를 사용하였다.

1.3. 방향 의존성(광자 방사선 입사각에 의한 응답 변화)

ISO에 명시된 좁은 스펙트럼 시리즈 및 ^{60}Co, ^{137}Cs 및 ^{241}Am 감마선원의 광자 방사선질을 사용하며 상대적인 응답값은 α=0°, α=±30°, α=±45°, α=±60°, α=±75°, α=

Table 1. X-ray and gamma reference radiation

Radiation quality	Energy	Air kerma rate
ISO X-ray NS 80	65.2 keV	5.510 mSv·h^{-1}
ISO X-ray NS 100	83.3 keV	5.147 mSv·h^{-1}
ISO X-ray NS 120	100 keV	5.542 mSv·h^{-1}
ISO X-ray NS 150	118 keV	8.884 mSv·h^{-1}
ISO ^{137}Cs S-Cs	662 keV	10 mSv·h^{-1}

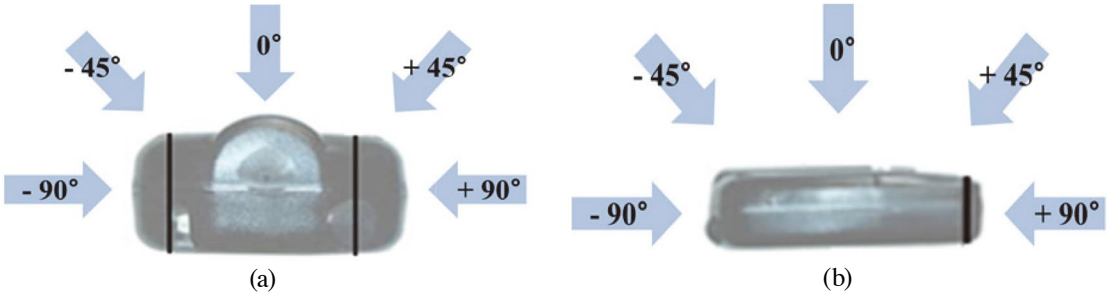


Fig. 1. Variation of the response due to angle of incidence: (a) horizontal plane, (b) vertical plane.

±90°의 입사각에 대해 측정이 되며 측정은 선량계의 기준점을 지나는 기준 방향을 포함하는 두 수직 평면 내에서 수행되어야 한다. 광자 방사선의 에너지 및 입사각에 기인한 정격 사용 범위의 모든 상대적인 응답값들은 −29%에서 +67%까지 범위 이내면 요건이 충족된 것으로 간주하고 있으며 Fig. 1과 같은 방법으로 평가를 실시하였다((a) 서베이미터의 좌우방향으로 회전: 선원을 바라보고 시계방향(+), 반시계방향(−) (기준선량: ^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 300 μSv·h^{-1}), (b) 서베이미터의 상하방향으로 회전: 위쪽(지시창 쪽) 방향(+), 아래쪽 방향(−) (기준선량: ^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 300 μSv·h^{-1})).

1.4. 선형성(선형성 및 통계적 요동)

주변 선량당량(률)은 ^{137}Cs 또는 ^{60}Co를 사용하여 시험하고, 방향선량당량(률)은 광자 방사선으로서 ^{80}N 또는 S-Am, 베타 방사선으로서 ^{90}Sr/^{90}Y를 사용하여 시험한다. 서베이미터의 최대 눈금 범위의 약 20%, 40%, 80%의 선량값을 조사하며 w 선량(률)값에 대해 지시된 n 값들의 평균값 및 분산계수를 결정한다. 이때 반응도 평가는 기준선량의 전체 유효 측정 범위에 걸쳐 −15%에서 +22% 범위 이내면 요건이 충족된 것으로 간주하며, 기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 100 μSv·h^{-1}, 2 mSv·h^{-1}, 4 mSv·h^{-1}, 8 mSv·h^{-1}, 10 mSv·h^{-1})으로 선형성 평가를 실시하였다.

1.5. 정확성(반복성)

기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 100 μSv·h^{-1})으로 10회 반복조사 후 반응도의 통계적 표준편차로 특성평가를 실시하였으며 기준선량의 전체 유효 측정 범위에 걸쳐 −15%에서 +22% 범위 이내면 요건이 충족된 것으로 간주한다.

1.6. 과부하

선량당량률계는 측정 가능한 최대 선량당량을 고려(0.1 Sv·h^{-1} 이하 범위 최대의 100배, 5 Sv·h^{-1}에서 0.1 Sv·h^{-1}를 넘는 범위 최대에 대하여 범위 최대 10배 또는 10 Sv·h^{-1} 중 큰 값, 5 Sv·h^{-1}를 넘는 선량률에 대하여 범위 최대 2배)하여 기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 100 μSv·h^{-1})으로 시험기간 동안 과부화 상태를 확인하였으며, 시험이 완료된 뒤에 5분 이내에 요건에 맞는 기능 여부에 대해서도 평가를 실시하였다. 이때 선량 지시가 재설정되거나 기기의 전원이 꺼질 때까지 과부화 상태가 남아있는지 여부에 대해서도 확인하였으며, 선량 지시가 일정하게 증가하거나 선량률 과부하에 기인한 선량 판독의 오류 표시가 나타나는지도 확인하였다.

1.7. 반응시간(응답시간)

서베이미터가 선량당량률의 증가 또는 감소하지 않을 때, 지시값은 최종 선량당량률을 받은 후 10초 미만에 아래와 같은 값이 되어야 한다.

$$\dot{G}_i + \frac{90}{100(\dot{G}_f + \dot{G}_i)}$$

$\dot{G}_i$: 초기 지시
$\dot{G}_f$: 최종 지시
$\dot{G}_f < 10$ mSv·h^{-1}: 변화의 90%를 지시하기 위해 10초 이내

기준선량이 1 mSv·h^{-1}보다 크고 10 mSv·h^{-1}보다 작은 값에 적용되며 이보다 큰 값의 시간은 2초 이내면 요건이 충족된 것으로 간주한다. 이를 바탕으로 기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 5 mSv·h^{-1})으로 초기 지시에서 최종 지시 변화의 90%를 지시하기까지 시간에 대해 평가하였다.

1.8. 경보

서베이미터의 최대 유효 범위에 가까운 $\dot{H}_a$(경보가 설정된 지시를 만들어내는 선량당량값)에서 수행하고, 시험은 두 번째 최하위 자릿수의 최대값에 가까운 $\dot{H}_a$에서 적어도 2회 시험을 수행한다. 기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 5 mSv·h^{-1})으로 표준시험 조건에서 서베이미터가 10분 동안 0.8 $\dot{H}_a$의 선량당량률을 받을 때 시험기간의 10% 이상 동안 경보 동작 여부와, 10분 동안 1.2 $\dot{H}_a$의 선량당량률을 받을 때 시험기간의 90% 동안 경보가 동작 여부에 대해서 평가를 실시하였다.

(a) (b)

Fig. 2. Gamma-ray irradiation system: (a) ^{137}Cs irradiation system, (b) ^{60}Co irradiation system.

2. 방사선 기준조사 시스템

2.1. 감마선 조사 시스템

2.1.1. ^{137}Cs 조사 시스템

혈액조사기, 서베이미터 등 관련분야 정도관리를 위해 구축된 ^{137}Cs 감마 방사선 조사장비는 3.7 GBq (0.1 Ci), 185 GBq (5 Ci), 11,100 GBq (300 Ci) ^{137}Cs 선원을 장착된 감마 방사선 조사 시스템으로 최대 500 Ci의 차폐능력을 가진 시스템이다(Fig. 2(a)). 또한 7 m 이상 레일을 활용하여 한국인정기구에 의해 유효성이 검증된 "감마선 조사장치의 표준교정절차서(KASTO 02-26-1040-102)"에서 권고하는 공기커마 조사 범위(10 μGy·h^{-1}~100 mGy·h^{-1})를 만족하는 동시에 선원으로부터 1 m 이하 지점에서 관련분야 연구를 위한 고선량(>1 Gy·h^{-1})을 발생시킬 수 있는 2차 표준 ^{137}Cs 기준조사장치이다. ^{137}Cs 기준조사장치 및 7 m 레일 시스템에 장착된 3.7 GBq과 185 GBq 2개의 ^{137}Cs 선원은 핵의학 분야에서 사용되는 서베이미터 등 관련 장비 교정사업에 활용이 가능하고, 111,000 GBq ^{137}Cs 선원은 사고 시 선량 평가, 방사선을 활용한 융합연구 등에 활용이 가능하도록 설계되어있다. 조사야(radiation field) 크기는 선원과의 거리 100 cm에서 collimator를 활용하여 최소 4.0×4.0 cm^{2}에서 최대 42×42 cm^{2}의 조사야 크기를 가지고 있으며 기준 조사야 조건 10×10 cm^2 (SSD)에 부합하는 기준조사장치로 설계되었다. 레일 시스템의 길이는 7 m로 최소분해능 0.1 mm를 가지며, 이동거리는 0.5~7.0 m 이다.

2.1.2. ^{60}Co 조사 시스템

치료방사선 정도관리의 목적으로 구축한 감마 방사선 조사장비(GBX-200)는 최대 434 TBq (11,725 Ci)의 장착이 가능한 장비로 2차용 표준 방사선량 측정, 의료 연구목적을 위한 방사선 선량조사를 위해 구축된 장비이며, 본 연구에서는 서베이미터의 에너지 의존성 평가를 위해 사용하였다(Fig. 2(b)). GBX-200 시스템은 연구 수행에 적합하며 치료방사선에 사용되는 조건에 부합하는 5,200 Ci의 ^{60}Co 방사선원을 내장하고, 조사부의 head 부분은 납으로 채워진 납 외피로 구성되어 우라늄과 텅스텐을 통하여 차폐함으로써 주변 선량은 1 m 거리에서 0.5 μSv·h^{-1} (0.05 mR·h^{-1})의 선량률을 나타낸다. 조사기의 조사야 크기는 선원과의 거리 100 cm에서 최소 4.0×4.0 cm^{2}에서 최대 42.0×42.0 cm^{2}의 조사야 크기를 가지고 있으며 조사야 조건 10×10 cm^{2}에 부합하는 기준조사장치로 설계되었다. 레일 시스템의 길이는 5 m로 최소분해능 0.1 mm, 이동거리는 0.5 m~4.5 m이며, 측정스테이지의 미세조정 장치 및 Laser alignment system은 ±0.1 mm의 오차율을 가진다.

Fig. 3. X-ray irradiation system.

2.2. 엑스선 조사 시스템

본 연구에서 사용된 엑스선 조사 시스템은 ISO 4037-1 및 ISO/IEC 17025에서 제시하는 국제규격에 따라 차폐시설, 환경조건(온도, 습도, 조도 등)에 적합한 실험실에 구축되어 있다(ISO/IEC 17025:2017). 엑스선 튜브는 COMET사의 MXR-320/26 모델로 최대 전압 320 kVp (±160 kV 출력을 가지는 제너레이터 2개로 구성) 성능을 가지고 있으며 국제표준규격에 적합한 기준방사선장 7종(N60, N120, N300, M30,

Table 2. Response of dose rate dependence

Radiation	Actual	Reading	Response	Normalized response
^{137}Cs	10 μSv·h^{-1}	(9.17±0.13) μSv·h^{-1}	0.917	0.963
	50 μSv·h^{-1}	(45.27±0.71) μSv·h^{-1}	0.905	0.951
	100 μSv·h^{-1}	(95.24±0.78) μSv·h^{-1}	0.952	1.000
	500 μSv·h^{-1}	(480.48±1.66) μSv·h^{-1}	0.961	1.009
	2 mSv·h^{-1}	(1.89±0.01) mSv·h^{-1}	0.943	0.990
	10 mSv·h^{-1}	(9.81±0.02) mSv·h^{-1}	0.981	1.030
	20 mSv·h^{-1}	(18.90±0.01) mSv·h^{-1}	0.945	0.992

M60, M100, M150)을 구축하여 유효성을 평가하였다. 고유 필터 제작을 위해 99.9% 이상의 고순도 순물질(Al, Cu, Sn, Pb, Mo)을 사용하여 국제기준빔 3종(ISO, NIST) 이상 구축하였고, CdTe 반도체 검출기 및 전리함을 이용해 스펙트럼 및 반가층 측정을 통해 기준빔에 대한 특성 평가를 실시하였다(Fig. 3).

3. 공간선량계(서베이미터)

본 연구에서 사용된 서베이미터는 국내에서 개발된 상용화된 제품으로서 Gamma, X-ray를 최대 ~20 mSv·h^{-1}까지 측정할 수 있는 기기이다. 제조사에서 제시하고 있는 방사선 성능 요건으로 정확성(±10%, ^{137}Cs), 에너지 의존성(±20%, 60 keV~1.2 MeV), 방향 의존성(±20%, 전방 ±20°)에 대해서 확인할 수 있었으며 본 연구에서는 국제규격인 IEC 60846-1를 바탕으로 선량 의존성, 에너지 의존성, 방향 의존성, 선형성, 정확성, 과부하, 반응시간, 경보 등에 대한 방사선 성능 평가를 실시하였고 앞서 설명한 제조사가 제시하고 있는 성능 요건과 비교하였다.

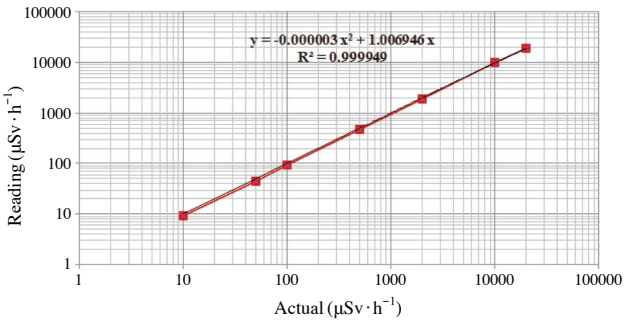


Fig. 4. Dose rate dependence curve.

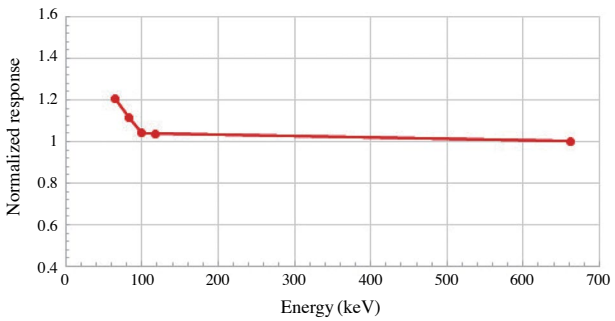


Fig. 5. Energy response curve.

결과 및 고찰

1. 선량률 의존성 평가(선량 측정의 선량률 의존성으로 인한 응답 변화)

선량률 의존성은 ^{137}Cs 에너지를 이용하여 선량률 범위 10 μSv·h^{-1}~20 mSv·h^{-1} (선량률의 측정범위의 최대값)에서 평가하였고 측정범위 내에서 상대응답은 Table 2, Fig. 4와 같이 0.951에서 1.030 (−4.94%~+2.96%)의 변화를 보이고 있으며 이는 IEC의 조건인 −13%에서 +18%의 범위를 만족하고 있음을 확인하였다.

2. 에너지 의존성 평가

에너지 의존성 평가는 ISO narrow beam X-ray 4개 선질과 ^{137}Cs 등 총 5개 에너지에 대하여 공간선량당량을 기준으로 평가하였으며 제작사가 본 시험대상 장비의 에너지 측정 영역을 60 keV~1.2 MeV에서 ±20%로 제시하였으므로 유효에너지 65.2 keV, 83.3 keV, 100 keV 및 188 keV인 X-ray와 ^{137}Cs의 662 keV를 사용하여 측정한 결과 662 keV를 기준으로 에너지에 따라 그 상대반응도가 1.000에서 1.205의 변화를 보이고 있으며 이는 IEC의 조건인 −29%에서 +67% 범위를 만족하고 있음을 확인하였다. 하지만 제작사에서 제시한 ±20%의 조건에는 오차 범위 내에서 초과하는 것을 확인하였다(Table 3, Fig. 5).

3. 방향 의존성 평가

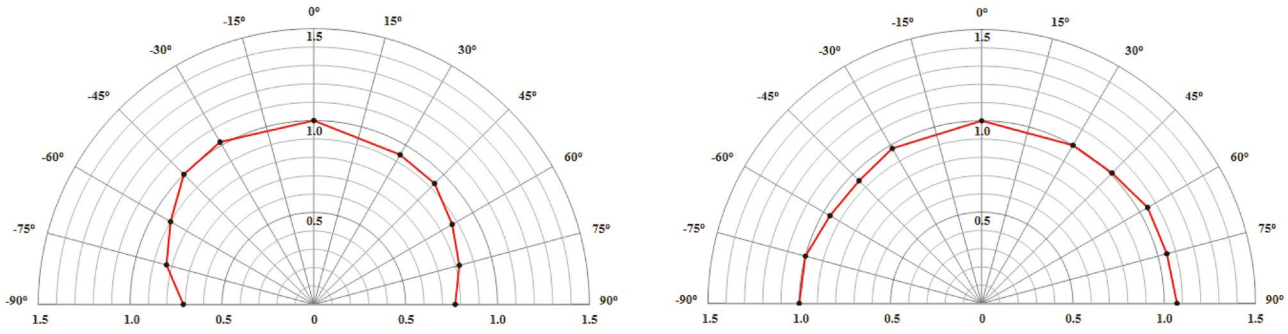
측정기준점을 중심으로 수평, 수직방향에 대하여 각각

Table 3. Energy dependence

Radiation quality	Energy (keV)	Actual ($mSv \cdot h^{-1}$)	Reading ($mSv \cdot h^{-1}$)	Response	Normalized response
ISO X-ray NS 80	65.2	5.510	6.496	1.179	1.205
ISO X-ray NS 100	83.3	5.147	5.609	1.090	1.114
ISO X-ray NS 120	100	5.542	5.644	1.018	1.041
ISO X-ray NS 150	118	8.884	9.022	1.016	1.038
ISO ^{137}Cs S-Cs	662	10	9.781	0.978	1.000

Table 4. Response of angle of incidence

Horizontal direction											
Angle	−90°	−75°	−60°	−45°	−30°	0	30°	45°	60°	75°	90°
Response (μSv)	203.1 ±0.84	235.5 ±0.96	258.2 ±1.00	285.1 ±1.55	291.8 ±0.68	286.1 ±1.26	268.2 ±1.38	265.7 ±0.75	250.5 ±0.69	234.6 ±1.24	221.2 ±1.04
Normalized	0.709	0.832	0.901	0.995	1.018	1.000	0.936	0.928	0.874	0.819	0.772
Vertical direction											
Angle	−90°	−75°	−60°	−45°	−30°	0°	30°	45°	60°	75°	90°
Response (μSv)	296.43 ±1.61	294.74 ±1.07	283.21 ±0.91	281.70 ±1.09	288.86 ±1.99	295.16 ±0.95	295.78 ±1.19	297.91 ±1.46	309.37 ±1.01	310.53 ±2.05	315.90 ±1.17
Normalized	1.004	0.998	0.959	0.954	0.979	1.000	1.002	1.009	1.048	1.052	1.070



(a) (b)

Fig. 6. Angular dependence: (a) Horizontal direction, (b) Vertical direction.

0°, ±30°, ±45°, ±60°, ±75° 및 ±90°에 대한 반응도 변화 측정 결과 Table 4와 같이 0° 방향을 기준으로 입사각에 따라 그 상대반응도가 수평방향에서 0.709~1.018 (−29.12%~+1.85%), 수직방향에서 0.954~1.070 (−4.57%~+7.01%)까지 변화를 확인하였다. 대부분의 방향에서 IEC의 조건인 −29%에서 +67% 범위 이내에 만족하였으나, 수평방향 −90°에서 29.12%의 차이를 보였다. 하지만 제작사에서 명시하고 있는 방향성에 대한 측정영역인 0°~±80°에서 상대반응도 ±20% 조건에 만족하였다(Fig. 6).

4. 선형성 평가(선형성 및 통계적 요동)

^{137}Cs 에너지에 대한 선량률 범위 100 $\mu Sv \cdot h^{-1}$~16 $mSv \cdot h^{-1}$까지 선량률 증가에 대한 선형성을 확인한 결과 측정 범위 내에서 각각의 기준선량률에 대한 서베이미터의 반응도는 Table 5와 같이 −6.35%에서 −1.73%의 범위로 나타났으며, 이는 IEC의 조건인 −15%에서 +22% 범위 이내에 만족하다는 것을 확인하였다. 또한 선형성은 Fig. 7과 같이 R^2=0.999890의 상관계수를 확인하였다.

Table 5. Response of dose rate linearity

Actual	Reading	Response
100 μSv·h^{-1}	(93.65±0.82) μSv·h^{-1}	0.936
2 mSv·h^{-1}	(1.88±0.00) mSv·h^{-1}	0.941
4 mSv·h^{-1}	(3.84±0.01) mSv·h^{-1}	0.961
8 mSv·h^{-1}	(7.86±0.01) mSv·h^{-1}	0.983
16 mSv·h^{-1}	(15.43±0.01) mSv·h^{-1}	0.964

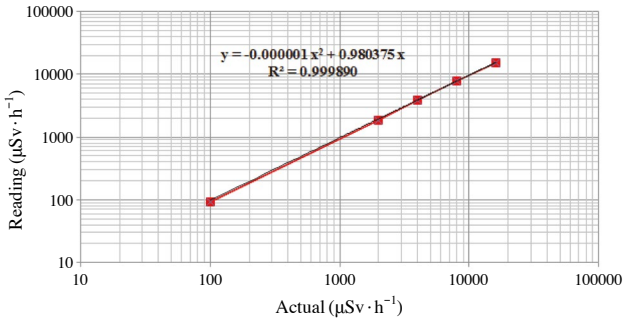


Fig. 7. Dose rate linearity curve.

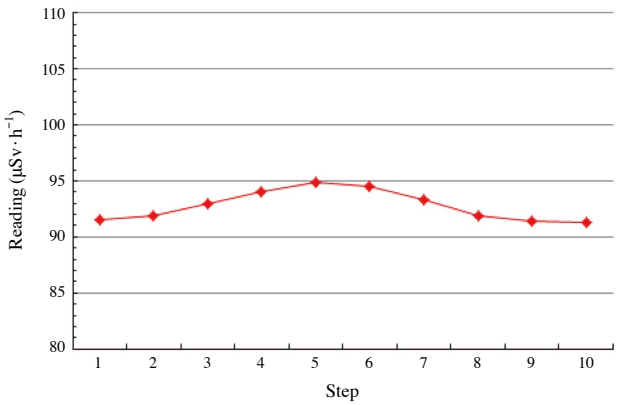


Fig. 8. Evaluation of the Accuracy curve.

5. 정확성 평가

기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 100 μSv·h^{-1})으로 10회 반복조사 시 그에 따른 응답에 따른 반응도를 측정한 결과 Fig. 8과 같이 −8.66%~−5.11%의 범위 이내로 나타났으며 IEC의 조건인 −15%에서 +22% 범위 이내에 만족함을 확인하였다.

6. 과부하 평가

측정 가능한 최대 선량당량률 20 mSv·h^{-1}를 참고하여 기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H* (10) 100 μSv·h^{-1})으로 5분간 조사 시 5분 동안 과부하 표시를 확인하였으며, 시험 완료 후 기존 조건과 동일하게 정상작동하였으며, 이는 IEC의 조건에 만족함을 확인하였다.

7. 반응시간 평가

기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 5 mSv·h^{-1})을 조사하여 초기 지시에서 최종 지시 변화의 90%를 지시하기까지 1.90초~2.78초 이내로 도달하였으며 IEC의 조건인 10 mSv·h^{-1}보다 작은 기준선량 값에 대한 반응이 변화의 90%를 지시하기 위해 10초 이내 도달하는 범위 내에 만족하였음을 확인하였다.

8. 경보 평가

설정된 경보 지시값에 대해서 기준선량(^{137}Cs 감마선 공간선량당량률 H*(10) 10 mSv·h^{-1})을 조사 시 서베이미터가 10분 동안 0.8 $\dot{H}_a$ (경보가 설정된 지시를 만들어내는 선량당량 값)의 선량당량률을 받을 때 시험기간 동안 경보가 동작하지 않았으며, 10분 동안 1.2 $\dot{H}_a$의 선량당량률을 받을 때 시험기간의 99.57% 동안 경보가 동작하였다. 이는 IEC 조건인 10분 동안 0.8 $\dot{H}_a$의 선량당량률을 받을 때 시험기간의 10% 이상 동안 경보가 동작하지 않아야 한다는 조건과 10분 동안 1.2 $\dot{H}_a$의 선량당량률을 받을 때 시험기간의 90% 동안 경보가 동작해야 된다는 조건을 모두 만족하였다.

결 론

본 연구에서는 국제 표준 기반의 서베이미터에 대한 방사선 성능 평가를 위해 IEC 국제표준 규격에서 시험항목들을 도출하고 이에 따른 평가를 실시하였으며, 이를 바탕으로 상용화된 국내 서베이미터의 기술수준 및 성능기준을 확보하고 국제표준규격에 명시되어 있는 시험방법 및 성능기준으로 평가하여 기준요건에 부합하는지를 확인하였다. 제작사에서 제시한 성능조건의 경우 IEC 성능조건보다 좁게 명시한 것을 확인할 수 있었으며, 대체적으로 제작사에서 권고한 기술사양과 IEC에서 명시한 시험항목에 대한 실증 평가 결과, 기준 조건 범위 내로 만족하는 것을 확인하였다. 이러한 연구수행은 방사선안전관리 장비의 성능 검증이 국제규격 및 국가측정표준체계에 따르는 지속적인 기술개발이 필요하다는 것을 제시하고자 하며, 국가표준 소급성 및 동급성을 확보한 객관적인 데이터를 기반으로 방사선안전규제기술 선진화를 위한 초석이 될 것으로 판단된다. 더불어 국내방사선조사시설의 조화성을 확보하고 각 시설별(기계적 성능 요건, 환경 특성 성능 요건, 전자기 성능 요건) 고유의 특성기법을 확보하여 방사선방호계측기기의 산업표준 모든 조건을 만족시키는 연계시스템 구축 연구도 필요하다고 판단된다.

사 사

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

참 고 문 헌

ANSI/HPS N13.11:2009, Personnel Dosimetry Performance - Criteria for Testing.

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.

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.

ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

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 1: Radiation characteristics and production methods.

ISO 6980-1:2006, Nuclear energy - Reference beta-particle radiation - Part 1: Methods of production.

ISO 8529-1:2001, Reference neutron radiations - Part 1: Characteristics and methods of production.

Received: 27 April 2021
Revised: 11 May 2021
Revision accepted: 21 May 2021