Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 1, pp. 71-78, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.1.71

Technical article

안전조치 검증장비의 극한 온도환경 적용성 평가

백희균[1] · 이진원[1] · 신중기[1,*]
[1]㈜네오시스코리아

Evaluation of Usability in Extreme Temperature Environments of Safeguards Equipment

Heekyun Baek[1], Jinwon Lee[1], and Jung-Ki Shin[1,*]
[1]Neosiskorea Co., Ltd., 10-11, Expo-ro 339beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Repiblic of Korea

ABSTRACT For most commercial radiation measurement equipment, manufacturers specify an operating temperature in the range of 0 to +40°C. However, in environments that exceed the quality assurance performance of the safeguards equipment, such as the winter environment in North Korea, the performance of the equipment deteriorates or normal use is impossible. In this study, safeguards equipment measurements were performed by creating an extreme temperature environment using a constant temperature and humidity test chamber. The safeguards equipment used in the evaluation was MIRION's Inspector-2000-based equipment, which evaluated the usability in extreme temperature environments using three types of detection units: NaI(Tl), CZT, and HPGe.

Key words: Nuclear material, Safeguards, Extreme environment, Safeguards techniques, Retrofit

1. 서 론

북한의 핵확산방지조약(Non-Proliferation Treaty) 탈퇴 이후 공식적인 핵물질 관리에 대한 자료는 전무하며, 여섯 차례의 핵실험으로 인해 국제적인 불안감을 조성하고 있다. 장기간 단절된 북한의 핵물질 정보를 파악하기 위해서는 오랜 기간에 거쳐 관리할 수 있는 관리 체계를 구축해야 하며, 효율적인 검증을 위해 북한의 지리, 기후, 교통 등의 환경요소를 고려한 안전조치 체계 구축이 필요하다.

핵물질의 관리는 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 안전조치 협정 때문에 수행되며 장부의 검증, 설계정보검증, 핵물질 계량, 정보 확인, 환경 시료 측정, 격납 및 감시의 사찰 활동으로 안전조치를 이행한다. 안전조치 사찰은 우라늄 광산과 같은 실외 핵시설이나 현장에서의 핵물질 검증 등 외부에 노출된 환경에서 수행될 수 있기에 정량적인 검증을 위해서는 환경요소를 파악할 필요가 있다.

북한은 대한민국보다 고위도 지역이며 산간지형으로 인해 계절에 따른 온도의 차이가 크다. 핵실험장이 위치한 풍계리의 경우 해발고도가 2200 m 정도로 고산지에 위치하고 역대 최저 기온이 –20°C 이하로 떨어지는 기온으로 검증장비의 제조사에서 제공하는 품질 보증 성능을 벗어나는 환경조건을 가지고 있다(출처: 북한지역정보넷(http://cybernk.net/infoText/InfoAdminstList.aspx?ac=A0811&mc=AD0102)). 이는 방사선 측정에 있어서 검출기의 성능이 저하되거나 작동 불량으로 인해 핵물질의 정량적인 계량이 불가능한 상황이 발생할 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 안전조치 검증 장비의 극 저온, 극 고온에 대한 성능 평가를 수행하여 검출 성능을 확인한다. 평가를 위해 사용한 검증 장비는 MIRION사의 Inspector-2000 MCA (Multi Channel Analyzer) 기반 검증 장비 및 휴대형 검증 장비인 HM-5이다. Inspector-2000 검증 장비는 연결되는 검출부 종류에 따라 명칭을 달리한다.

- Inspector-2000 Multi-Channel Analyzer (IMCA)
- Inspector-2000 Multi-Channel Analyzer, NaI (IMCN)
- Inspector-2000 Multi-Channel Analyzer, CZT (IMCC)
- Inspector-2000 Multi-Channel Analyzer, Ge (IMCG)

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Jung-Ki Shin
Tel: +82-42-489-6541, Fax: +82-42-489-6534, E-mail: jkshin@neosiskorea.com
Received 1 February 2024 **Revised** 24 March 2024 **Accepted** 26 March 2024

Inspector-2000 MCA 기반 검증장비는 MCA와 함께 검증 장비로써 활용되는 세 종류의 검출기(NaI(Tl), CZT, HPGe)에 대해 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Temperature evaluation specification of equipment

국제원자력기구에서는 안전조치 검증 장비의 정상 작동 여부를 평가하는 권장 테스트 지침을 제공하고 있으며 열 및 습도 테스트, 전자파 적합성 테스트, 전기안전시험, 조사시험과 같은 환경 테스트 조건을 제시하고 있다[1]. 다음의 Table 1, 2, 3은 국제원자력기구에서 제시하는 온도 환경 테스트 조건이며 작동, 비작동 등의 상황별 조건을 제시하였다.

Table 1은 안전조치 검증 장비의 온도에 대한 환경 테스트 조건으로 미작동 상태에서 포장된 장비의 환경조건이다. 온도는 최저 –40°C와 최고 70°C 환경에서 검증 장비의 안정성이 확인되어야 하며 이송 시간을 고려하여 최대 16시간의 내환경성을 가져야 한다.

Table 2는 미작동 상태의 검증 장비가 노출되었을 때의 환경조건이다. 노출된 상태에서는 –10°C의 최저 기온을 만족하고 85% 습도 환경에서 최대 +85°C의 온도에서 검증 장비의 이상이 발생하지 않아야 한다.

또한, Table 3과 같이 정상 작동 중에는 –10°C부터 55°C까지 온도에서 작동할 수 있어야 하며 총 96시간의 작동 가능하도록 조건을 제시한다. 이는 최저 기온이 –30°C 이하로 내려가는 북한 환경을 고려하였을 때 국제원자력기구에서 제시하는 환경조건에 맞추어 수행해야 하며 유사시에 장비 적용성을 위한 개조가 필요할 것으로 보인다.

2.2. Temperature evaluation method

극 저온, 극 고온에서의 검출기 성능 변화를 확인하기 위해 항온항습 테스트 챔버를 이용하여 성능을 평가하였다. Table 4는

Table 1. Tests in non-operation condition in transport packaging

Test type	Applicable standard	Recommended test conditions	Duration, hours	Remarks
Cold 1	IEC 60068-2-1	-40°C ± 3°C	16	Temperature ramp duration ≤1 hour
Cold 2	IEC 60068-2-1	-25°C ± 3°C	96	Temperature ramp duration ≤2 hour
Dry Heat	IEC 60068-2-2	+75°C ± 3°C	16	Temperature ramp duration ≤1 hour
Change of temperature	IEC 60068-2-14	-40°C ± 3°C +75°C ± 3°C The thermal cycling to be repeated five times	3 3	Temperature ramp duration ≤0.5 hour

Table 2. Tests in non-operation condition, unpacked

Test type	Applicable standard	Recommended test conditions	Duration, hours	Remarks
Cold	IEC 60068-2-1	-10°C ± 3°C (or minimal specified temperature)	16	Temperature ramp duration ≤1 hour
High temperature and humidity	IEC 60068-2-2	+70~ +85°C ± 3°C/85% RH	96	Temperature ramp rate ≤1°C / minute RH ramp duration ≤1 hour
Damp heat, steady state	IEC 60068-2-56	+30°C ± 3°C/93% RH	16	Temperature ramp duration ≤1 hour RH ramp duration ≤1 hour
Degrees of protection provided by enclosure	IEC 60529	According to the specified IP code	3 3	Only applicable if an IP code is specified

Table 3. Tests in normal operation condition

Test type	Applicable standard	Recommended test conditions	Duration, hours	Remarks
Cold	IEC 60068-2-1	-10°C ± 3°C (or minimal specified temperature)	16	Temperature ramp duration ≤1 hour
Dry Heat	IEC 60068-2-2	+55°C ± 3°C (or minimal specified temperature)	96	Temperature ramp duration ≤1 hour
Damp heat, steady state	IEC 60068-2-56	+40°C ± 3°C / 93% RH	16	Temperature ramp duration ≤1 hour RH ramp duration ≤1 hour

Table 4. Safeguards equipment specifications

Detector	NaI(Tl)	CZT	HPGe (GC2018)
Crystal size	76.2 × 76.2Φ mm	10 × 10 × 5 mm	76.2 × 76.2Φ mm
Operating Temperature	0~ +50℃	0~ +50℃	+5~ +40℃
Energy resolution	≤7.5% (662 keV)	≤2.5% (662 keV)	0.86 keV (^{57}Co) 1.8 keV (^{60}Co)
Manufacturing company	MIRION	RITEC	MIRION
Relatuve efficiency	-	-	20%

극한온도 환경 평가를 위해 사용된 검출기의 상세 성능이다.

온도 특성 평가를 위해 사용한 항온항습 테스트 챔버는 –40~ +100℃의 온도 조건을 조성할 수 있는 장비를 사용하였다. 최저 기온은 항온항습 테스트 챔버의 최저 기온인 –40℃로부터 국제전기기술위원회에서 고시하는 IEC 60068-2 표준의 최고 온도인 +70℃까지 10℃ 간격으로 측정하였다. 테스트 챔버 내의 온도 및 검증 장비의 온도가 안정되는 시간을 확보한 후 한 시간의 측정을 통해 스펙트럼을 통해 결과를 확인하였다.

방사선원은 9,250 Bq 세기의 ^{137}Cs과 인증표준물질(Certified reference material)을 사용하였다.

NaI(Tl)과 CZT 검출기, HM-5는 ^{137}Cs 체크 선원을 25 cm 간격을 두고 사용하였으며 고분해능 성능을 가진 HPGe 검출기는 인증표준물질을 사용하여 온도에 따른 검출시스템의 에너지 분해능, 중심채널 변화를 확인하였다. Table 5는 IMCG 검출기 성능평가에 사용한 인증표준물질의 핵종 정보이다.

Inspector-2000 검증 장비의 경우 리튬이온 배터리를 통해 전력을 공급하는 장비로 온도에 따른 배터리의 성능 변화를 함께 확인하였다. 측정 온도 조건은 검증장비 평가와 동일하게 –40~ +70℃로 해당 온도에서 최대로 데이터를 수집하는 시간을 확인하였다.

Table 5. CRM radionuclide information

Isotope	Gamma energy (keV)	Emission probability (%)	Activity (Bq)	$T_{1/2}$ (d)
^{241}Am	59.541	35.92	1,233	158004
^{109}Cd	88.034	3.66	6,613	461.9
^{57}Co	122.061 136.474	85.49 10.71	395	271.81
^{139}Ce	165.858	79.90	388	137.641
^{51}Cr	320.084	9.89	40,292	27.704
^{133}Sn	391.698	64.97	1,049	115.09
^{85}Sr	514.005	98.5	1,306	64.850
^{137}Cs	661.657	84.99	591	10976
^{60}Co	1173.228 1332.492	99.85 99.9826	818	1925.23
^{88}Y	898.036 1836.052	93.7 99.346	1,937	106.63

3. 결 과

3.1. Inspector-2000 MultiChannel Analyzer, NaI

일반적으로 섬광체는 온도 변화에 따라 발광 효율이 변하기 때문에 Gain 조절, 광 펄스 확인 등의 온도 보정 기술 개발이 활발히 진행되고 있다.

NaI(Tl) 섬광체는 0~+20℃의 온도에서 가장 높은 발광 효율을 가지고 있으며 섬광체와 함께 사용되는 광 센서인 광전자증배관(Photomultiplier Tube, PMT)는 +20℃의 온도에서 최적의 전압이득 성능을 보인다[2,3].

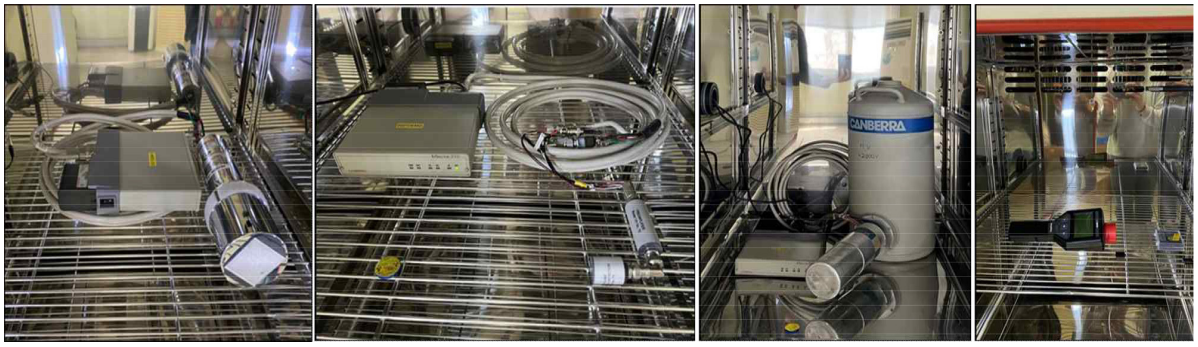

Fig. 1. Used safeguards equipments (IMCN, IMCC, IMCG, HM-5)

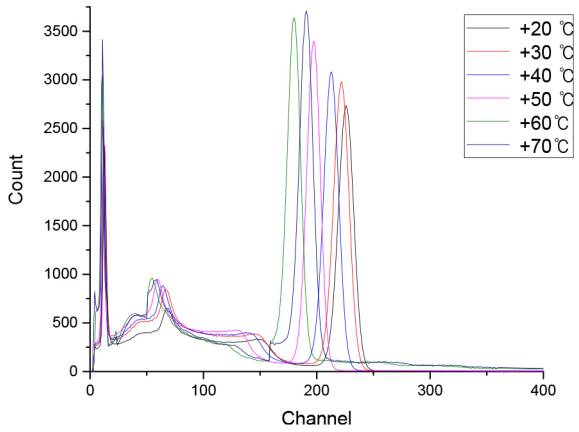

Fig. 2. ^{137}Cs spectrum from IMCN (+20~ +70°C)

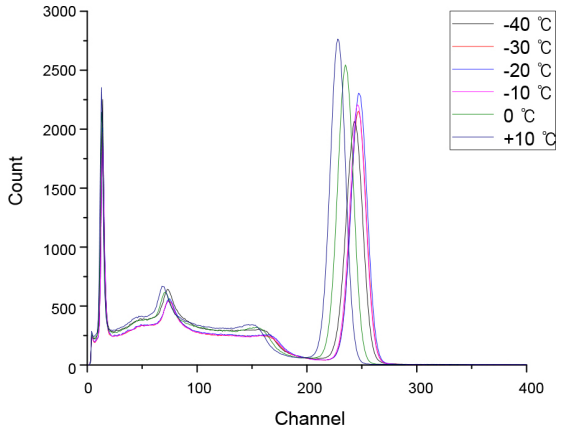

Fig. 3. ^{137}Cs spectrum from IMCN (-40 ~ +10°C)

Table 6. Comparison of ^{137}Cs properties of IMCN according to temperature (+20~ +70°C)

	+20°C	+30°C	+40°C	+50°C	+60°C	+70°C
Centroid channel	225.96	221.60	212.66	197.11	179.93	170.58
Energy resolution	6.96 %	7.15 %	7.25 %	7.07 %	7.79 %	7.22 %
Count per second	31.75	36.47	36.52	36.39	40.71	43.06

Table 7. Comparison of ^{137}Cs properties of IMCN according to temperature (-40~ +10°C)

	-40°C	-30°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
Centroid channel	243.20	246.72	247.49	246.14	235.10	228.15
Energy resolution	7.20 %	6.80 %	6.86 %	6.88 %	7.14 %	7.09 %
Count per second	30.27	27.77	29.16	28.21	31.61	33.12

Fig. 2, 3은 IMCN 검증 장비로 측정한 ^{137}Cs 선원의 스펙트럼이며 Table 6, 7은 측정 결과 중 중심 채널, 에너지 분해능, 계수율이다.

중심채널의 변화는 +20°C에서 226채널을 기준으로 하였을 때, +70°C를 제외한 온도 범위에서 온도가 증가할수록 중심채널이 감소하고 온도가 낮아질수록 중심채널이 증가하는 경향을 보였다(226 ch = 662 keV * 1024 ch / 3000 keV).

에너지 분해능은 온도의 증가. 감소와 무관하게 7% (±0.2%) 내외의 성능을 보였다. 일반적으로 판매되는 NaI(Tl) 검출기의 성능이 7.5% 이내 임을 고려하면 분해능 성능을 변화가 없음을 확인하였다.

마지막으로 계수율의 경우 –30~ +70°C의 범위에서는 온도가 감소할수록 낮아지는 경향을 보였으나, –40°C에서는 저에너지 영역에서의 배경잡음으로 인하여 증가하는 경향을 보였다.

전체적인 성능을 비교하였을 때, 극한의 온도 환경에서는 중심채널과 계수율의 큰 변화가 나타났으며 –30~ +60°C의 내부 범위에서는 섬광체 및 광전자증배관이 가지는 온도 특성과 동일한 경향을 보이는 것을 확인하였다[4].

3.2. Inspector-2000 MultiChannel Analyzer, CZT

IMCC 또한, IMCN과 동일한 기분으로 평가를 수행하였으며 Fig. 4, 5는 ^{137}Cs의 측정 스펙트럼, Fig. 6은 온도별 총 계수, Table 8, 9는 측정 결과이다.

온도 변화에 따른 중심채널 변화는 1,808채널에서 ±3%로 NaI(Tl)에 비하여 큰 차이를 보이지 않았으며(1808 ch = 662 keV * 8192 ch / 3000 keV) 에너지 분해능 성능 또한 –40~ +50°C까지 범위에서는 2.5% (±0.45%)로 큰 차이가 발생하지 않았다. 그러나 +60°C 이상의 극고온 환경에서는 4% 이상으로 두 배 이상 증가하는 경향을 보였다[5].

또한, +40°C 이상의 고온 환경에서는 저에너지 영역에서의 노이즈가 발생하는 것을 확인하였다(Fig. 4). 이는 반도체 검출기가 가지는 특성으로 높은 온도에서 발생하는 누설전류로 인해 발생하는 노이즈로 특성으로 사료된다[6].

Fig. 6은 ^{137}Cs의 Net count를 비교한 그래프이며, –40~ +50°C의 범위의 계수는 비슷하였지만 +60°C 이상은 검출기의 성능 저하로 인해 Peak 영역의 계수가 감소하였다.

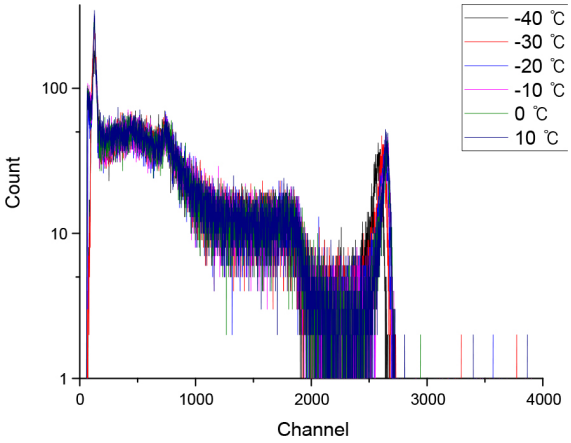

Fig. 4. ^{137}Cs spectrum from IMCC (-40~ +10°C)

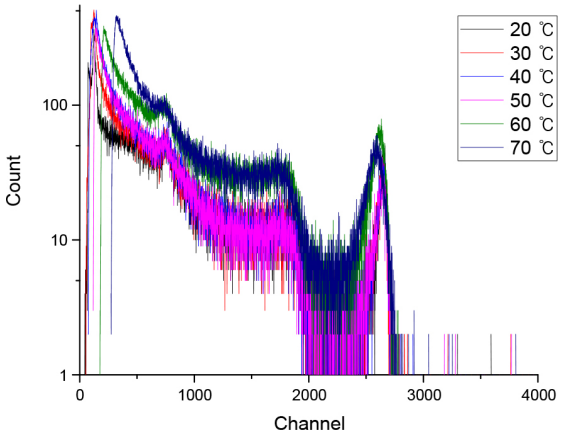

Fig. 5. ^{137}Cs spectrum from IMCC (+20~ +70°C)

Table 8. Comparison of ^{137}Cs properties of IMCC according to temperature (+20~ +70°C)

	+20°C	+30°C	+40°C	+50°C	+60°C	+70°C
Centroid channel	1808.00	1807.44	1803.6	1798.96	1782.80	1759.36
Energy resolution	2.38%	2.29%	2.50%	2.82%	4.21%	5.84%
Count per second	20.23	25.95	30.20	25.1	38.11	40.01

Table 9. Comparison of ^{137}Cs properties of IMCC according to temperature (-40~ +10°C)

	-40°C	-30°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
Centroid channel	1758.56	1784.88	1797.68	1805.28	1806.88	1807.76
Energy resolution	2.95%	2.51%	2.44%	2.47%	2.29%	2.22%
Count per second	16.55	16.75	16.66	16.89	17.10	17.62.

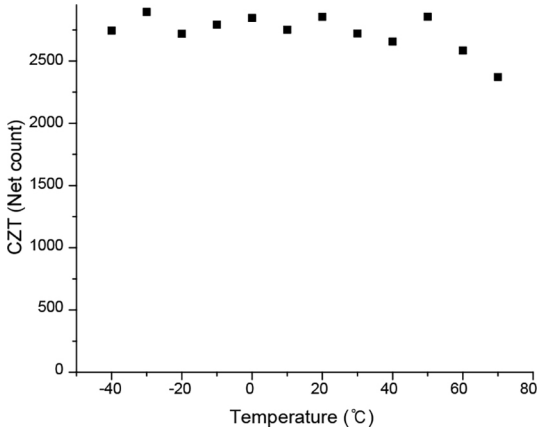

Fig. 6. IMCC Net count by temperature (^{137}Cs)

3.3. Inspector-2000 MultiChannel Analyzer, Ge

IMCG의 경우 동일한 온도조건에서 평가를 수행하고자 하였으나, 상온(+20°C)부터 온도 감소 평가 진행 중에 장비의 고장으로 인하여 온도 상승에 대한 평가를 진행하지 못하였다. 장비의 고장은 –40°C 온도 측정 전으로 –30°C까지의 측정에서는 정상적인 결과를 확인하였다.

Fig. 7은 IMCG 검증 장비를 이용한 온도에 따른 인증표준물질 측정 스펙트럼이며, Fig. 8은 온도에 따른 인증표준물질 내 모든 핵종의 중심채널 변화 그래프, Fig. 9는 온도에 따른 IMCG 검증 장비의 측정 계수율 그래프이다.

+20°C로부터 –30°C까지의 결과에서는 에너지 스펙트럼 모두 정상적으로 측정하였으며, 인증표준물질 내의 모든 핵종에 대하여 채널 이동이 발생하지 않았다. 또한, 한 시간의 측정 데이터에서 초당 계수의 변화도 보이지 않아 –30°C까지 성능 변화가 발생하지 않음을 확인하였다.

그러나, –40°C 측정에서는 한 시간의 측정에도 계수가 되지 않는 것을 확인하였다. 온도와의 역학관계를 추정하기는 어렵지만, 장비 고장 발생 사이의 시간은 온도 안정화를 위해 대기한 한 시간뿐이므로 장비에 물리적, 전기적 충격은 발생하지 않은 상태에서 문제가 발생하였다. 증상은 질소 냉각을 위해 온도를 유지용 진공이 깨지면서 측정 불가능 상태가 된 것으로 보인다.

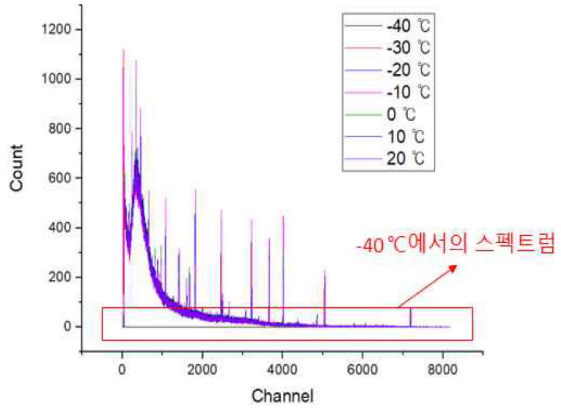

Fig. 7. CRM spectrum from IMCG (-40 ~ +20°C)

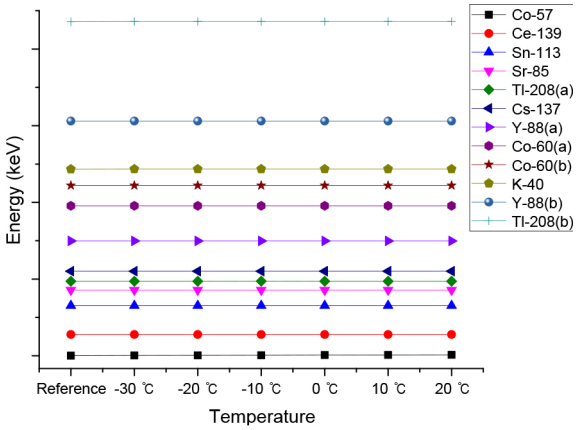

Fig. 8. Channel for each radionuclide according to temperature

Table 10. Comparison of ^{137}Cs properties of IMCC according to temperature (-40~ +10°C)

	-40°C	-30°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C	+20°C
Centroid channel	-	3637.24	3637.26	3637.25	3637.24	3637.25	3637.25
Energy resolution	-	2.35	2.26	2.10	2.22	2.13	2.07
Count per second	-	140.12	140.80	142.95	145.98	143.35	137.9

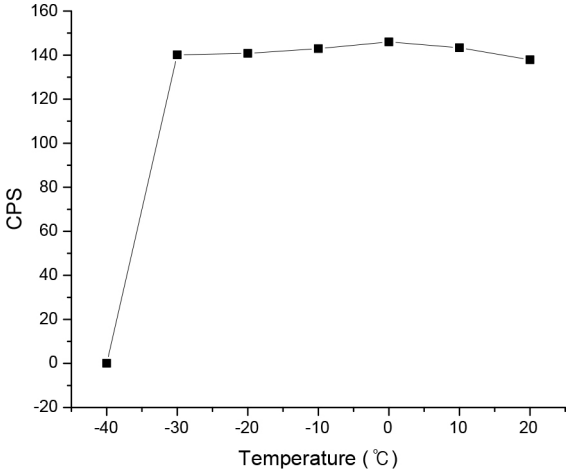

Fig. 9. IMCG counts per second by temperature

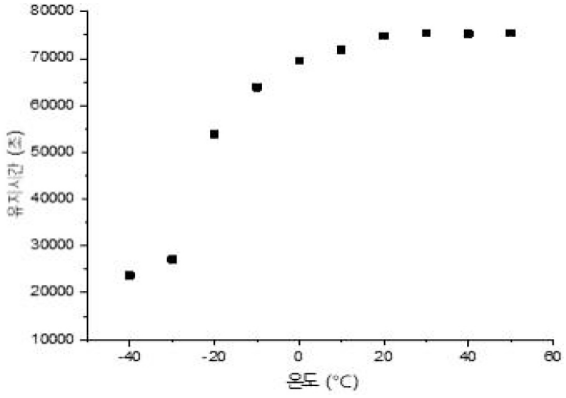

Fig. 10. Lithium-ion battery maximum operating time

3.4. Inspector-2000 Lithium-ion battery

Inspector-2000 기반 장비는 모두 배터리를 사용하여 사찰 현장에서 사용되기 때문에, 극한의 온도 환경에서 배터리가 정상적으로 작동하여야 한다. Inspector-2000 MCA는 WATONTM 사의 B-4206 리튬이온 배터리를 사용하며 해당 모델은 –10°C 이하, +40°C 이상에서는 안전장치가 작동하여 출력을 차단한다. 이는 극한환경에서의 사용이 제한되는 상황이기 때문에 본 연구에서는 배터리에 대한 온도 평가를 수행하였다.

배터리 지속시간 평가는 NaI(Tl) 검출기를 연결한 Inspector-2000의 측정을 70시간으로 설정한 후 온도 환경에 따른 최대 측정 시간을 측정하였다. 배터리가 모두 소진될 경우 Genie-2000 소프트웨어가 중지되며 기록되는 최대 측정 시간을 통해 온도에 따른 배터리 유지 시간을 확인하였다. Fig. 10과 Table 10은 온도에 따른 리튬이온 배터리의 유지시간을 보여준다.

배터리의 성능은 상온(+20°C)에서 온도가 상승해도 최대 측정시간의 변화가 없었지만, 온도가 감소할수록 최대 측정시간 또한 감소하는 것을 확인하였다. 특히 0°C부터 급격히 감소하는 경향을 보였으며, –40°C에서는 최대 14시간 이상 감소하여 그 성능이 약 30% 정도로 저하하는 것을 확인하였다. 이는 겨울철 사찰 과정에서 상시전원을 공급하지 않았을 경우 7시간 이상의 작업이 불가능하며 여분의 배터리를 동반하더라도 측정 도중 배터리를 교체하는 등 번거로움이 발생하고 배터리의 잔량이 표시되지 않기 때문에 측정 도중 장비가 멈춰 설정값을 다시 조정하는 문제가 발생할 수 있다.

Table 11. Lithium-ion battery maximum operating time

Temperature (°C)	Maximum operating time (second)
-40	23727.96 (6 h 35 m)
-30	27199.13 (7 h 33 m)
-20	53848.3 (14 h 57 m)
-10	63815.82 (17 h 44 m)
0	69452.74 (19 h 18 m)
10	71811.41 (19 h 57 m)
20	74740.51 (20 h 46 m)
30	75420.68 (20 h 57m)
40	75290.22 (20 h 55 m)
50	75493.13 (20 h 58 m)

3.5. HM-5

Hand-held 타입의 HM-5 검증장비는 원격으로 조작이 불가능하며 현장에서 장비의 디스플레이로 도출되는 결과를 확인하는 장비이기 때문에 항온항습기 내에서 디스플레이에 표출되는 선량 변화를 확인하였다. Fig. 11은 HM-5의 온도에 따른 선량률 변화 그래프이다.

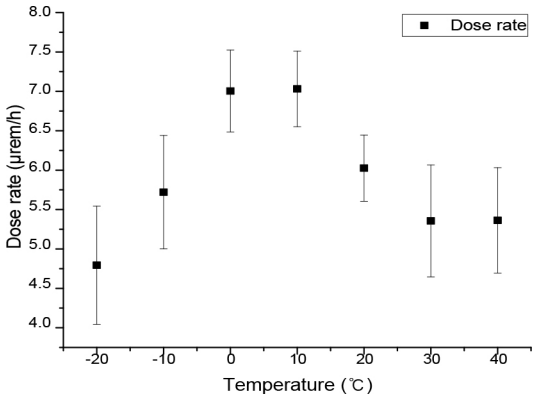

Fig. 11. ^{137}Cs dose rate from HM-5 by temperature

HM-5 검증 장비의 측정에서 –30°C 미만, +50°C 이상에서 작동이 되지 않는 증상을 확인하였다. 또한, 상온보다 높은 온도에서 사용하였을 시 선량률이 20%정도 감소하는 경향을 보였다. HM-5 제조사에서 권고하는 동작 온도는 –20~ +55°C로 해당 결과와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였으며, 장비 내부를 확인하였을 때 단열을 위한 부속품이 없기에 극저온 환경에서 사용하기 위해서는 보조 물품 등을 통해 온도 보완이 필요하다.

4. 고 찰

극한 온도 환경에서 검증 장비의 적용 가능성을 평가하기 위해 항온항습 테스트 챔버를 이용하여 선정된 검증 장비의 성능 평가를 수행하였다. 섬광검출기는 온도 변화에 따라 중심채널의 변화와 계수율 변화가 모두 나타나며 반도체 검출기의 경우 고온에서의 노이즈 발생, 장비의 고장과 같은 문제가 발생하였다. 북한에서의 사용을 위해 열악한 전력환경을 대체할 리튬이온 배터리의 경우에도 고온에서는 폭발 위험이 발생할 수 있으며 저온에서는 급격히 사용 시간이 감소하였다. 검증 장비를 극 저온, 극 고온 환경에서 사용할 경우 정량적인 측정을 요구하는 사찰의 변수로 작용할 수 있으며 북한과 같은 환경, 시설의 요소를 고려하였을 때 대체할 수 있는 수단을 마련할 필요가 있다. 이를 통해 열악한 온도 환경에서 검증 장비를 사용할 수 있도록 후속 연구를 통해 장비의 부품 등을 변경하지 않고 개선할 수 있는 리트로핏(retrofit)을 수행하고자 한다.

5. 결 론

북한의 핵물질 관리를 위해 사용하는 검증 장비는 제조사에서 제공하는 품질보증 지표가 있으며, 규격을 벗어나는 환경에서는 장비의 정상 동작 여부를 확인해야 한다. 북한은 고위도, 고산지형의 환경으로 계절에 따른 온도차이가 크기 때문에 검증 장비의 정상적인 활용 가능성을 평가하였다. 대상 검증장비는 Inspector-2000 MCA 기반의 검증 장비 세 종류와 HM-5로 총 네 가지의 검증 장비를 사용하였으며, 극 저온(–40°C), 극 고온(+70°C)의 온도에서 검증 장비가 정상 작동하는지를 확인하였다.

모든 검증 장비는 평가 온도의 최저, 최고 기온에서 정상적인 기능을 하지 못하였으며, 고분해능의 HPGe 검출기는 장비의 고장이 발생하여 추가 실험을 진행하지 못하였다. 또한, 검증 장비를 작동시키기 위해 사용하는 리튬이온 배터리의 최대 작동 시간을 확인하였을 때, –30°C 이하의 온도 환경에서는 업무 시간인 8시간 미만의 동작 시간을 확인하였다.

연구를 통해 도출한 결과를 기반으로 극한의 온도조건에서 검증 장비를 활용할 수 있도록 온도 보완 기술을 적용한 검증 장비 개발이 있어야 할 것으로 판단되며 국내, 혹은 해외에서의 사찰 중 본 연구 결과를 참고하여 극한환경에서의 검증 장비 사용에 대한 대비를 사전에 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgment

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation Of Nuclear Safety (KoFONS) using the financial resource granted by the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) of the Republic of Korea (No. 2103090).

References

1. IAEA. Qualification Test of IAEA Safeguards Equipment, SG-PR-12145
2. NaI(Tl) and Polvscin® NaI(Tl) Sodium Iodide Scintillation Material, SAINT-GOBAIN
3. Rohde R Erling. 1965. “Gain vs temperature effects in NaI(Tl) photomultiplier scintillation detectors using 10 and 14 stage tubes.” *Nuclear Instruments and Methods* **34**:109-115. https://doi.org/10.1016/0029-554X(65)90268-5
4. Ianakiev KD *et al*. 2009. “Temperature behavior of NaI(Tl) scintillation detectors.” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 607.2:432-438. https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.02.019
5. Maehlum Gunnar *et al*. 2007. “Study of cadmium zinc telluride (CZT) radiation detector modules under moderate and long-term variations of temperature and humidity.” 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Vol. 2. IEEE, https://10.1109/NSSMIC.2007.4437315
6. Park SH *et al*. 2010. “Effect of temperature on the performance of a CZT radiation detector.” *Journal of the Korean Physical Society* **56**(4):1079-1082. https://doi.org/10.3938/jkps.56.1079