Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 1, pp. 79-87, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.1.79

Technical article

극한 온도환경에서의 안전조치 검증장비 사용을 위한 리트로핏 제작 및 현장 평가

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

Retrofit Production and Field Evaluation for Use of Safeguards Equipment in Extreme Temperature Environments

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 In a previous study, the suitability for use of inspection equipment was evaluated at temperatures outside the quality assurance range. The quality assurance operating temperature of the safeguards equipment is 0~ +40°C, and previous studies have confirmed the performance of the safeguards equipment for temperatures ranging from –40~ +70°C. The scintillator-based verification equipment showed a shift in the centroid channel and a change in the count rate in all temperature ranges, and the semiconductor-based safeguards equipment generated Leakage Current and equipment failure. In this study, a retrofit was performed applying a vacuum housing to the safeguards equipment (Inspector-2000-based inspection equipment), and performance evaluation was performed at a low temperature and snowy site, and it was confirmed that the same performance was observed as the measurement results at room temperature.

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

1. 서 론

북한은 주기적인 핵실험을 통해 핵물질 사용의 고도화를 이루었으며 핵탄두의 핵심물질(고농축 우라늄, 플루토늄 등)의 연간 생산 및 재고량, 미사일 수 등의 핵 관련 데이터를 최고 기밀로 분류하고 있다[1]. 추후 북한과의 관계 개선, 나아가 통일을 바라보았을 때 북한의 핵물질 관리 방안을 수립할 필요가 있으며 핵 재고량 평가를 위해서는 사찰을 통한 안전조치 수행이 필요하다. 그러나 북한은 다른 국가에 비해 교통의 발전이 늦고 고산지대에 건설된 핵시설은 우리나라보다 접근이 어렵고 환경의 제약이 많이 발생한다.

선행 연구에서는 안전조치 검증 장비의 극 저온, 극 고온에 대한 성능평가를 수행하였으며, 대상 장비는 다음과 같다[2].

· 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)
· HM-5 (identiFINDER2)

평가에 사용한 검증 장비는 품질 보증 온도 범위(0~ +40°C)를 벗어나는 환경인 –40~ +70°C의 온도에서의 정상 작동 여부 및 성능 변화에 대해 분석하였다. 모든 검증 장비에서 –30°C 미만, +50°C 이상에서 정상적인 기능을 하지 못하였으며, 고분해능 검출기 기반인 IMCG와 휴대형 검증 장비인 HM-5는 장비의 고장이 발생하였다.

IMCN, HM-5와 같은 섬광체 기반의 검증 장비는 모든 온도 범위에서 중심채널과 계수율이 변화하고, 반도체 기반의 검증 장비는 고온에서의 노이즈 발생, 장비의 고장과 같은 문제가 발생하였다. 또한, 현장에서 사용하는 목적으로 리튬이온 배터리를 사용하는 Inspector-2000의 경우 온도에 따른 배터리의 지속시간을 평가하였으나, –30°C 미만에서는 8시간 미만의 동작 시간을 확인하였다.

이에 따라 본 연구에서는 Inspector-2000 기반 검증 장비와 함께 사용하는 NaI(Tl), CZT, HPGe 검출기의 온도 보완 리트로핏 방안을 도출하고 리트로핏 제작을 통해 실제 장비의 품질 보증

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

온도를 벗어나는 현장에서 사용 적합성을 평가하였다.

2. Selection of Retrofit Method

2.1. Temperature supplementation using insulation materials

단열재는 주로 건축에서 사용하고 있으며 외부의 열을 차단하여 실내의 온도를 보존하는 방법이다. 종류와 두께에 따라 단열성능에 차이가 크기 때문에 열전도율이 낮은 물질일수록 절연에 주로 사용되어 열의 전도를 차단하고 대류를 방지하여 외부로부터의 열/냉기의 순환을 최소화할 수 있다.

'국토교통부고시 제 2022호, 건출물의 에너지절약설계기준'에 따르면 열전도율에 따라 단열재의 등급을 분류하며 Table 1은 대표적으로 사용하는 단열재의 종류 및 성능이다[3].

폴리우레탄 발포체(Polyurethane foam)은 우수한 단열 성능을 가지고 있는 대표적인 단열재 중 하나이며 가엽고 높은 강도를 가지고 있어 다양한 분야에서 사용되고 있다. 본 절에서는 낮은 열전도율을 가지고 수급이 용이한 폴리우레탄 발포체를 이용하여 하우징을 하였을 때 하우징 내부의 온도 변화를 모니터링하여 온도 보완 성능을 평가하였다.

단열재를 이용한 온도보완 성능평가 조건은 다음과 같다.

- 5 mm의 아세탈 하우징 내 폴리우레탄 발포체의 두께별 온도 변화 모니터링
- –40~ +100°C 성능의 항온항습 테스트 챔버 사용
- 폴리우레탄 두께 : 0, 5, 10, 15 mm
- 온도 : +20°C에서 한 시간 지속(내부 온도 적응) 후 테스트 챔버의 최대 성능인 –40°C로 온도를 변경

Fig. 1은 단열재의 두께에 따른 하우징 내부의 온도변화 그래프이다.

단열재가 없을 때 하우징 내부의 온도는 +20°C로부터 –40°C까지 약 58분의 시간이 소요되었으며, 5 mm 두께의 단열재는 약 78분, 10 mm 두께는 약 87분, 15 mm 두께에서는 약 96분의 시간이 소요되었다. 단열재의 두께가 증가함에 따라 점차 하우징 내부의 온도는 감소하였지만, 두께 증가량에 비해 지속시간의 증가량이 미비하였다. 이는 최소한의 측정시간을 고려하더라도 측정할 수 있는 핵물질의 양이 한정되며 단열재의 두께를 증가시킬 경우 핵물질과의 거리로 인한 측정시간 증가, 장비의 부피 증가 등의 단점이 발생한다.

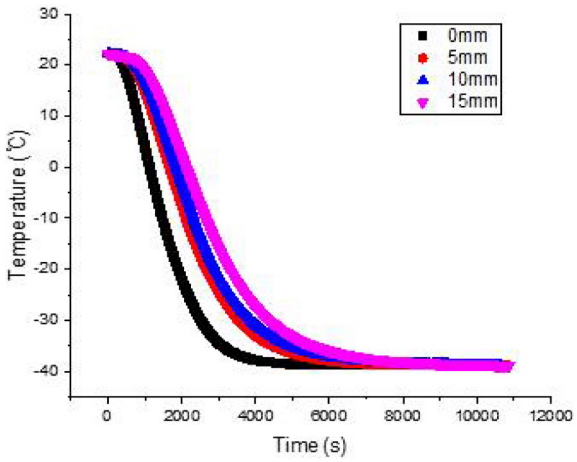

Fig. 1. Graph of internal temperature change of housing by thickness of polyurethane foam

2.2. Temperature supplementation using vacuum

일반적으로 열이 전달되는 과정은 열역학 법칙에 따라 대류, 전도, 복사로 구분한다.

- 대류: 유체 내의 분자들이 확산, 또는 이동을 통해 열이 전달되는 현상
- 전도: 두 물체가 접촉하여 위치의 변화 없이 온도 차에 의해서 열이 전달되는 현상
- 복사: 매개물질 없이 열원에서 내보내는 전자파를 흡수하여 열을 전달하는 현상

공기, 물의 경우 열전도에 의해 열이 이동하는 경우는 드물지만, 대류로 인해 열전달이 많이 발생한다. 이는 가열된 공기, 물이 열팽창이 되어 차가운 공기, 물보다 밀도가 작아지기 때문에 상승 기류로 인해서 발생되는 현상이며, 열원이 존재하는 경우에는 열복사에 의한 열전달이 가장 많은 비중을 차지하지만 환경에서의 열전달은 대류로 인해 가장 많이 발생한다.

본 연구에서는 열의 대류, 전도를 최소화할 수 있도록 진공 챔버를 제작하여 진공도에 따른 챔버 내부의 온도를 모니터링하여 온도 보완 성능을 확인하였다. Fig. 2는 진공 내 온도 변화 평가를 위해 제작한 진공 테스트베드이다.

온도 변화 모니터링을 위해 온/습도 모니터링 모듈을 진공 챔버 내/외부에 설치하여 온도의 변화량을 비교하였다. 평가 조건은 단열재를 이용한 온도 변화 평가와 동일하게 수행하였으며, 진공도는 대기압인 760 Torr부터 10^{-1} Torr, 10^{-2} Torr, 10^{-4} Torr

Table 1. Properties of insulation materials

	Polyurethane foam	Expended polystyrene	Glass wool	Cellulose insulation
Thermal conductivity (W/mK)	22-35	29-41	30-50	37-42
Density (g/cm^3)	30-160	18-50	10-100	30-80
Specific heat capacity (J/kgK)	1.3-1.45	1.25	0.8-1	1.3-1.6

Fig. 2. Vacuum testbed (top) and test setup (bottom)

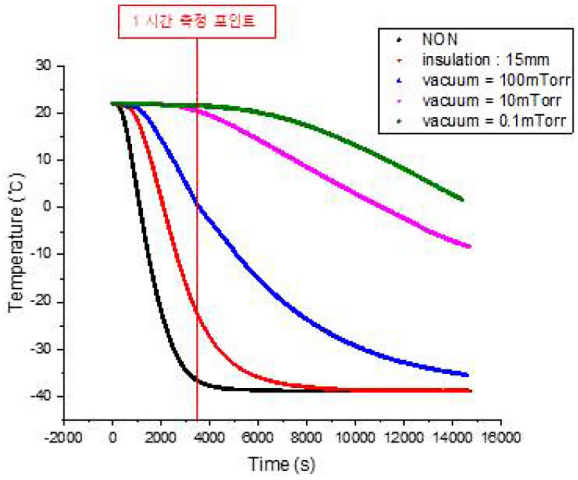

Fig. 3. Graph of internal temperature change of vacuum level

의 네 포인트를 측정하였다. Fig. 3은 진공도에 따른 챔버 내부의 온도 변화를 나타낸다.

단열방안 없이 항온항습기의 온도가 –40°C까지 감소하는데 걸린 시간은 58분으로 한 시간이 채 되지 않았으며 15 mm의 단열 패드를 사용하여도 96분으로 세 시간 만에 온도가 감소되는 경향을 보였으나. 10^{-1} Torr 진공도에서의 진공 챔버 내부 온도는 최대 4시간을 소요했을 때 –35°C에 도달하였다. 또한, 10^{-2} Torr 이상의 진공 환경에서는 온도 변화가 급격히 감소하는 경향을 보였으며 항온항습기의 온도가 –40°C까지 도달하는 한 시간 동안 내부 온도를 유지하는 것을 확인하였다.

진공에서의 가능성을 위해 제작된 간이 테스트베드 특성상 케이블 홀이 없는 문제로 온도 모니터링 모듈의 지속시간이 길지 않아서 측정을 길게 수행하지 못하였지만, 항온항습기에서 최저 온도까지 도달하는 동안 진공 챔버 내부의 온도를 유지하는 것으로 보았을 때 본 연구에서 제안하는 온도 보완 방안에서 가장 최고의 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

이에 따라 검증 장비 규격에 맞는 10^{-2} Torr 성능의 진공 하우징을 설계하였으며, 실제 제작된 리트로핏 하우징을 이용하여 저온, 적설 환경에서의 사용 적합성 평가를 수행하였다.

3. Retrofit Design And

3.1. IMCN and IMCC Retrofit design

진공 챔버를 제작하기 위해서는 압력을 견디기 위한 고강도의 물질을 사용해야 하지만 소재의 강도가 높아질수록 밀도가 높아지기 때문에 감마선에 대한 감쇄율이 높아지고 이는 계수율 저하로 이어진다. 이에 따라 진공을 견딜 수 있는 강도의 감마선 투과율이 좋은 소재를 선정할 필요가 있으며 소재의 질량감쇠계수(Mass Attenuation Coefficient)와 강도를 고려할 필요가 있다.

일반적인 방사선 계측기의 하우징은 강도를 고려하여 알루미늄을 사용하지만, 아크릴 및 플라스틱 계열 하우징에 비해 높은 밀도(2.7 $g \cdot cm^{-3}$)를 가져 계수율의 감소가 발생한다. 본 연구에서는 질량감쇠계수를 최소화할 수 있도록 하우징 재질 중 가장 밀도가 낮은 아크릴(density: 1.18 $g \cdot cm^{-3}$)을 사용하여 하우징을 제작하였다.

진공의 경우 전도, 대류에 의한 열전달이 매우 희박하기 때문에 보온병과 같이 얇은 두께로도 열 손실을 최소화할 수 있지만, 장기적으로 열 이동을 방지하기 위해서는 적절한 두께를 적용할 필요가 있다. 진공 대상 장비는 MIRION사의 3" × 3"Φ 규격 NaI(Tl) 검출기와 RITEC사의 10 × 10 × 5 mm 규격 CZT로 두 검출기가 호환되어 한 개의 진공 하우징에 사용할 수 있도록 구성하였다.

진공 하우징은 보온병과 같은 원리로 외벽과 내벽 사이를 진공으로 만들어 단열시키도록 구성하였으며, 하우징의 내벽과 외벽의 두께는 외부의 충격, 진공으로 인한 파손을 방지하기 위해 10 mm로 설계하였으며 진공 층의 두께를 30 mm로 구성하여 열전도, 대류뿐만이 아닌 복사에 대해서도 최소화할 수 있도록 설계하였다. CZT 검출기는 작은 사이즈이기 때문에 NaI(Tl) 검출기 홀더에 맞출 수 있는 추가 브라켓을 구성하였다. 모든 검출기는 하우징의 최외각과의 거리를 150 mm로 설계하였다. Fig.

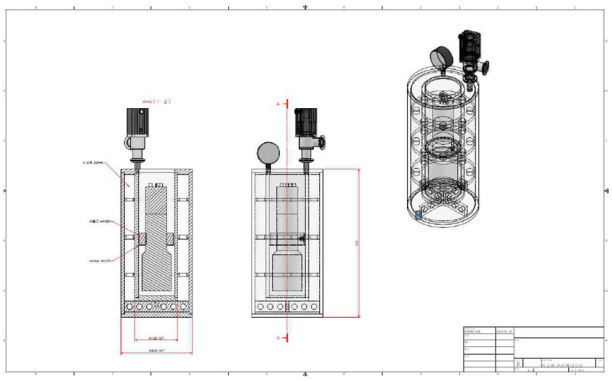

Fig. 4. Vacuum chamber drawing of NaI(Tl) detector

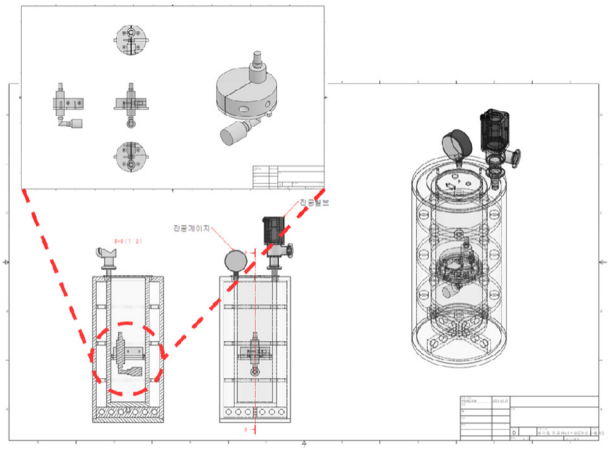

Fig. 5. Vacuum chamber drawing of CZT detector

4, 5는 각 검출기의 진공 하우징 설계 도면이다.

3.2. IMCG Retrofit design

HPGe 검출기는 MIRION사의 BE3830 모델을 사용하였다. 설계 기준은 IMCN, IMCC와 동일하게 아크릴을 사용하고 내/외벽의 두께를 10 mm, 진공 층을 30 mm로 구성하여 10-2 Torr의 진공도에 맞추어 설계하였다.

HPGe 검출기는 검출부의 냉각을 위한 Cryostat 장치가 일체형으로 붙어 NaI(Tl)과 CZT 검출기에 비해 크기 때문에 전체 시스템에 대한 하우징을 제작하기에는 어려움이 있다. 또한, 검출부만 진공으로 유지하기 위해서는 검출부 냉각봉(deep stick) 통해 전달되는 열을 최소화하도록 구성해야 하며 냉각을 위한 진공으로 인해 충격에 약하고 mV 단위의 펄스를 분석하는 예민한 시스템이기 때문에 하우징으로 인해 검출 성능의 저하를 고려한 설계가 필요하다.

HPGe 검출기 리트로핏 장비는 Big MAC 타입의 질소냉각 고정 브라켓을 검출부 쪽으로 연장하여 진공 챔버를 거치할 수 있도록 구성하였으며, 검출부 냉각봉을 통해 전달되는 열을 최소화하기 위하여 중간의 가드 벽을 배치하고 내부의 폴리우레탄

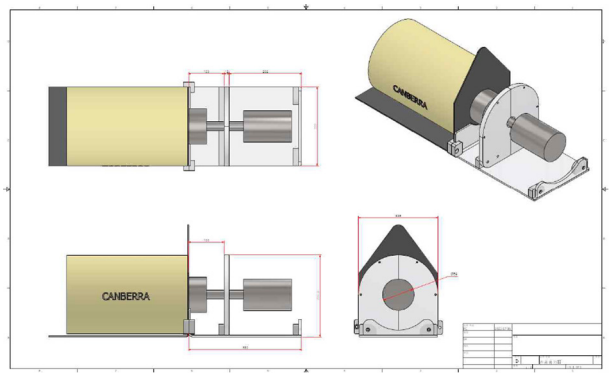

Fig. 6. Vacuum chamber drawing of HPGe detector

재질의 단열재를 적용하였다. 진공 챔버에는 공기를 배출시킬 수 있는 진공 밸브를 적용하고 내부의 진공을 확인할 수 있도록 진공 게이지를 전면에 배치하였다.

4. Field Evaluation

4.1. Measurement location selection and method

리트로핏 장비의 현장 평가를 위하여 본 연구에서는 고위도 지방을 선정하여 진공 하우징의 건전성을 평가하였다. 측정 장소는 일본 북해도의 오타루 시이며 일본의 최북단이자 해안과 맞닿아 있고 접근이 원활한 지역으로 본 장소를 선정하였다.

사전 답사를 통해 북한의 극한 환경과 유사한 장소를 선정하기 위하여 바다와 가장 인근에 위치한 텐구산 정상에서 측정을 진행하고자 하였으나, 기상의 문제로 산 중단부터 제설이 불가한 상황이 발생하였다. 이에 따라 현장의 협조로 인적이 가장 드문 최종 제설 구역을 측정 장소로 선정하였고 텐구산의 최대 해발고도(532 m)의 중간인 200 m 위치(43°10'27.4"N 140°58'55.9"E)에서 측정을 수행하였다.

텐구산의 테스트 환경은 −5~ −15°C의 온도조건으로 일교차로 인한 온도 변동이 있었으며 진공 챔버를 이용한 리트로핏 장비(NaI(Tl), CZT, HPGe)를 설치하여 각 조건당 1800초 측정을 수행하였다. 선원은 MIRION 일본지사의 협조를 통해 ^{137}Cs (7400 Bq)과 ^{60}Co (7400 Bq)를 측정하여 배경방사선과 함께 비교하였으며, 진공 챔버의 측정 포인트로부터 10 cm 거리에서 리트로핏 전/후의 성능평가를 수행하였다. 도출된 스펙트럼을 기준으로 각 검출기의 계수율, 에너지 분해능 및 채널 이동(shift) 여부로 리트로핏 성능 유효성을 평가하였다.

4.2. IMCN field applicability evaluation

IMCN 측정은 정오부터 측정을 수행하여 −5~ −8°C의 온도 환경이였으며 리트로핏 없이 측정을 수행할 때에는 극한환경을 조성하기 위하여 설면에 보호구 없이 장비를 올려놓고 측정을 수행하였다.

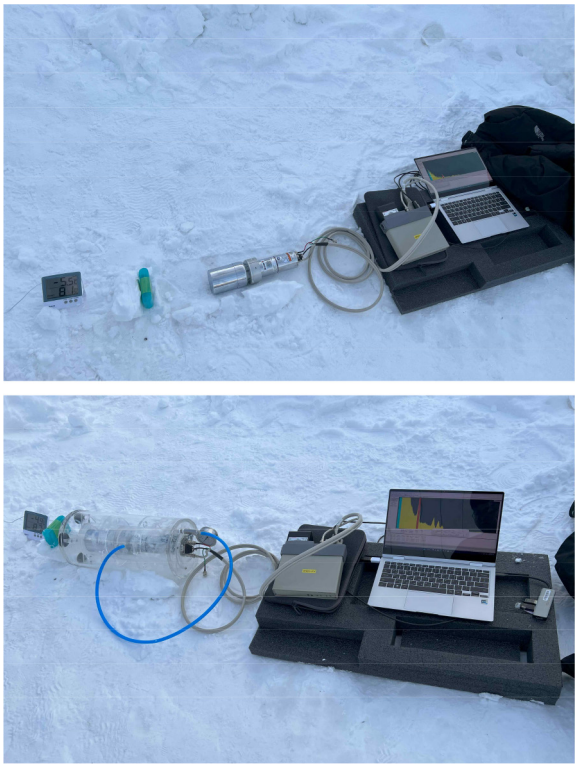

Fig. 7. IMCN measurement environment at low temperature and snow sites (top : non-retrofit, bottom : retrofit)

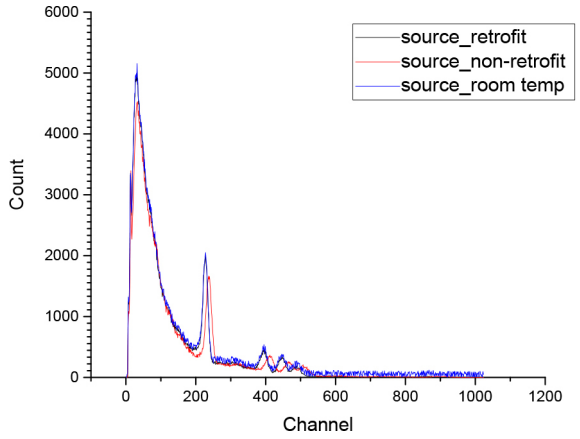

Fig. 8. ^{137}Cs, ^{60}Co measurement spectrum before and after IMCN retrofit

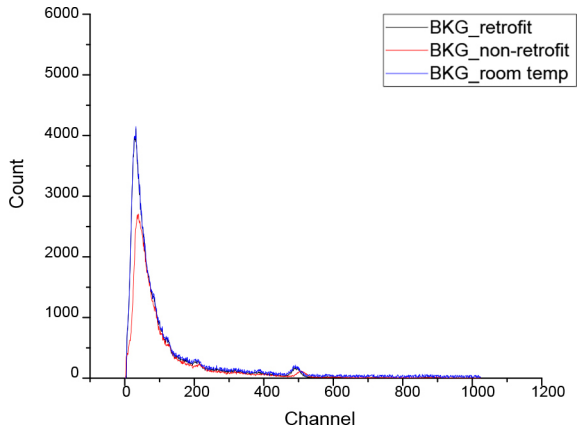

Fig. 9. Background measurement spectrum before and after IMCN retrofit

측정 과정에서 강설로 인해 Inspector-2000 MCA와 노트북은 천을 이용하여 덮어두고 리트로핏 전/후의 검증장비만 강설 환경에 노출하여 측정을 수행하였다. Fig. 7은 IMCN 측정 현장의 사진이며, 측정 결과는 Fig. 8, 9의 스펙트럼과 Table 2와 같다.

데이터 상의 Room temp는 상온(20°C)에서 측정한 데이터, retrofit은 현장 내에서 진공 챔버를 이용한 측정 데이터, non-retrofit은 현장 내에서 장비만을 이용하여 측정한 데이터이다.

^{137}Cs 측정에서는 상온 기준으로 리트로핏 장비를 적용하였을 때, 온도 변화는 –25~ –30°C의 차이를 가지고 있음에도 불구하고 중심채널의 변화가 없었고 에너지 분해능 또한 큰 차이가 나타나지 않는 것을 확인하였다. 반면에 상온과 비교하면 리트로핏 장비 없이 측정한 결과는 계수율이 약 6.84% 감소하였으며 Cs-137 선원을 기준으로 중심 채널 또한 10 ch 이동하여 에너지 분해능 성능에도 영향을 미치는 것을 확인하였다[4].

배경방사선의 경우 측정하는 건물 등으로 인한 환경의 차이가 발생하여 계수율이 약 22.59%가 감소하였으며 K-40 배경방사선을 기준으로 중심채널이 약 18 ch 이동하는 것을 확인하였다.

4.3. IMCC field applicability evaluation

IMCC의 측정은 IMCN과 같으며 측정 환경의 사진은 Fig. 10, 측정 결과는 Fig. 11, 12의 스펙트럼과 Table 3과 같다.

Table 2. Performance comparison before and after IMCN retrofit

Source	Performance	Room temperature	Retrofit	Non-retrofit
^{137}Cs, ^{60}Co	Count	481,592	474,188	448,666
	Channel	227	227	237
	Resolution (662 keV)	6.87%	6.89%	7.76%
Background (^{40}K)	Count	283,299	281,503	219,309
	Channel	491	491	509

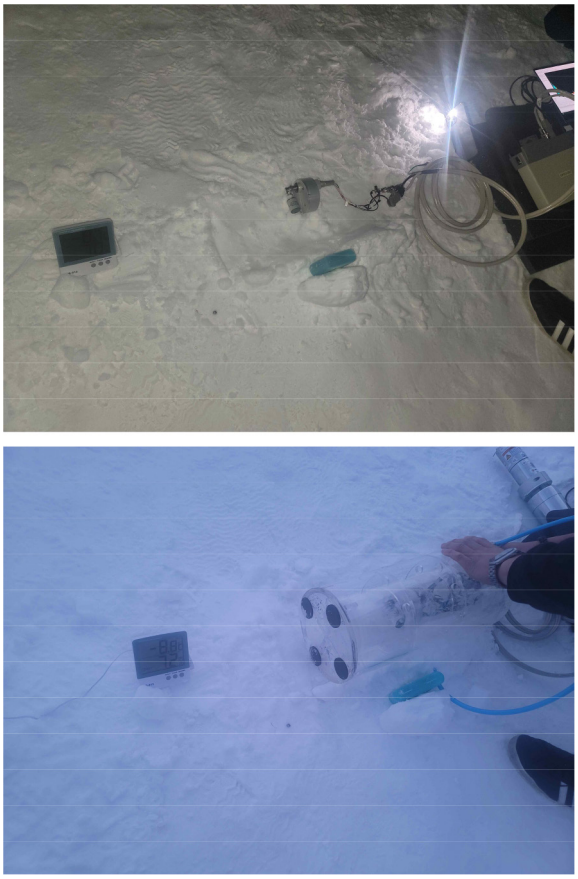

Fig. 10. IMCC measurement environment at low temperature and snow sites (top: non-retrofit, bottom: retrofit)

IMCC의 측정은 15시부터 수행하여 약 –8~ –15°C의 온도 환경에서 수행되었다. CZT 검출기의 경우 10×10×5 mm의 작은 결정 사이즈로 인하여 ^{60}Co와 ^{40}K (배경방사선)의 측정이 불가능하여 ^{137}Cs의 스펙트럼과 배경방사선의 계수만으로 비교하여 기술하였다.

IMCC 측정은 NaI(Tl) 검증장비에 비하여 더 높은 온도 변화(–30~ –35°C)의 차이를 가지고 있지만, 진공으로 인해 검출 계수와 분해능, 중심채널 이동 등의 변화가 크지 않은 것을 확인하였다[5].

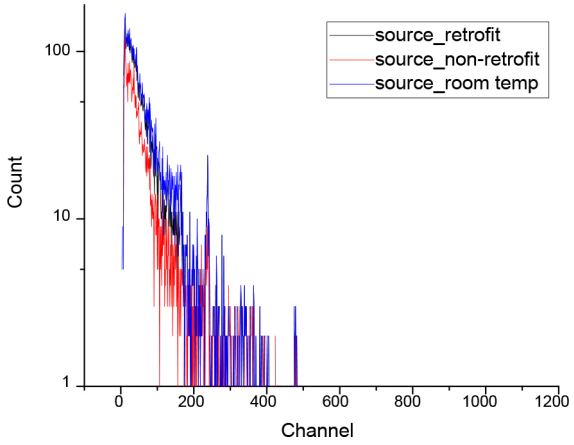

Fig. 11. ^{137}Cs, ^{60}Co measurement spectrum before and after IMCC retrofit

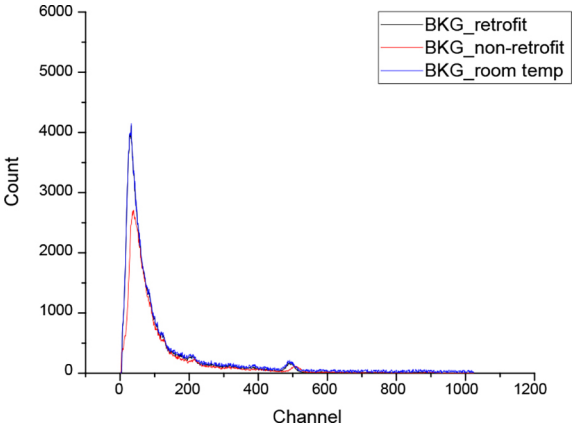

Fig. 12. Background measurement spectrum before and after IMCC retrofit

리트로핏 장비 없이 측정한 결과 또한 중심채널은 동일하게 측정되었으나, 계수율이 약 31.74% 대폭 감소하였으며 에너지 분해능도 0.24% 성능 저하가 발생하였다.

배경방사선 측정도 동일하게 리트로핏 장비를 적용하였을 때에는 계수율이 약 4.18% 정도 감소한 것에 비하여 Non-retrofit 상태에서는 계수율이 31.74% 정도 큰 폭으로 감소하는 것을 확인하였다.

Table 3. Performance comparison before and after IMCC retrofit

Source	Performance	Room temperature	Retrofit	Non-retrofit
^{137}Cs, ^{60}Co	Count	7,683	7,530	4,607
	Channel	237	237	237
	Resolution (662 keV)	2.88%	2.90%	3.12%
Background (^{40}K)	Count	6,078	5,824	4,149
	Channel	-	-	-

Fig. 13. IMCG measurement environment at low temperature and snow sites (top: non-retrofit, bottom: retrofit)

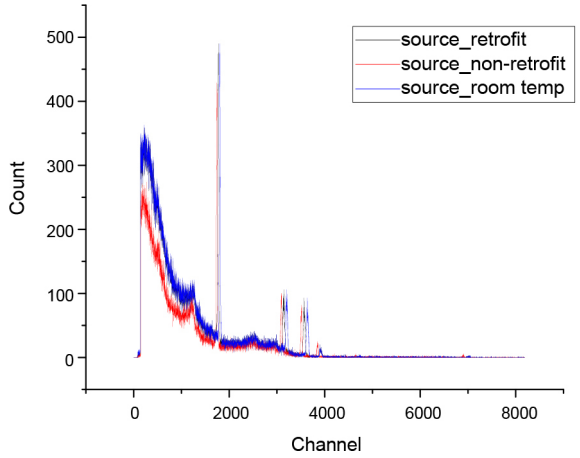

Fig. 14. ^{137}Cs, ^{60}Co measurement spectrum before and after IMCG retrofit

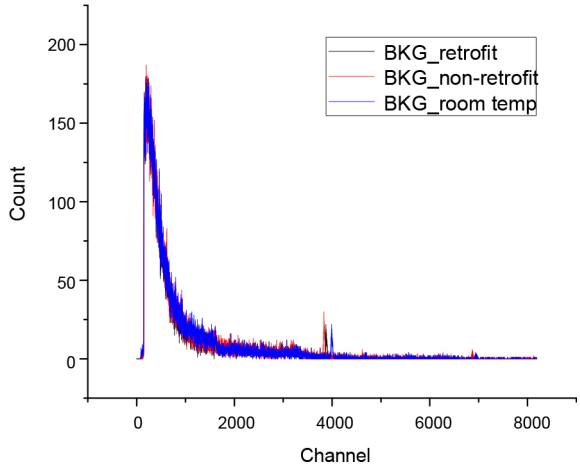

Fig. 15. Background measurement spectrum before and after IMCG retrofit

4.4. IMCG field applicability evaluation

IMCG의 측정은 09시부터 수행하여 약 −10~ −5°C의 온도 환경에서 수행되었다. IMCG 측정 환경의 사진은 Fig. 13, 측정 결과는 Fig. 14, 15의 스펙트럼과 Table 4과 같다.

상온에서 측정했던 결과와 비교하였을 때, 본 테스트의 리트로핏 전/후 결과는 모두 에너지 분해능이 감소하는 경향을 나타내고, 전체적인 계수와 채널 이동 등 모든 면에서 성능이 감소하는 것을 확인하였다. 계수율의 경우 상온에서 측정한 데이터는 건물 내부에서 측정하였기 때문에 배경 방사선의 차이가 큰 영향을 미치는 요소로 볼 수 있지만, 에너지 분해능과 채널 이동은 해당 검출기의 성능이 저하되는 것으로 사료된다.

4.5. Identifying problems with IMCG

IMCG의 성능 저하는 고분해능 분광분석 장비의 치명적인 단점이 될 수 있으며 원인을 분석하여 보완할 필요가 있다. Table

Table 4. Performance comparison before and after IMCG retrofit

Source	Performance	Room temperature	Retrofit	Non-retrofit
^{137}Cs, ^{60}Co	Count	288,438	283,624	199,683
	Channel	3,637	3,570	3,512
	Resolution (662 keV)	1.87 keV	11 keV	13 keV
	Resolution (1332 keV)	2.0 keV	10 keV	15 keV
Background (^{40}K)	Count	84,885	80,276	83,869
	Channel	3,990	3,839	3,880

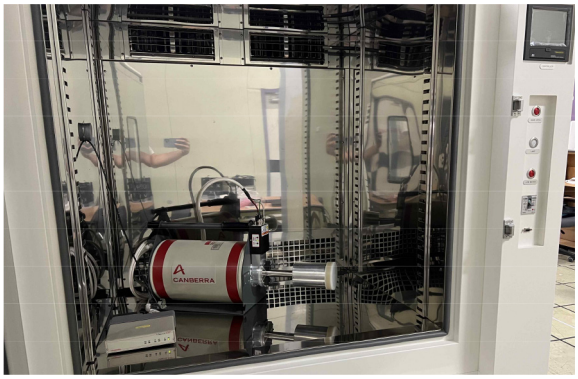

Fig. 16. IMCG Humidity test conditions

5는 IMCG 장비의 상온 대비 리트로핏 전/후의 현장 평가 성능 변화표이다.

현장 테스트 전/후로 실내에서 측정한 데이터의 경우 Co-60에 대한 분해능이 모두 2.0 keV로 정상 성능을 보이는 것을 확인했지만, 현장에서의 성능 저하 발생은 환경, 리트로핏 장비 등 문제가 발생했을 가능성이 있으며 예상 요인은 아래와 같다.

- 리트로핏 장비의 진공 풀림 현상
  · 현장에서는 전력공급의 문제로 진공 게이지를 통해 10^{-2} Torr 압력을 확인할 수는 없었으나, 실내 복귀 후 확인하였을 때 이상 없음을 확인
- Inspector-2000 MCA의 노출로 인한 성능 저하
  · 측정 당시의 현장은 강설로 인하여 노트북과 MCA가 눈에 노출되어 있었으며, 달라붙은 눈이 녹으면서 생긴 물로 인하여 노이즈가 발생했을 것으로 추정
  · Inspector-2000은 채널당 28 bits의 데이터 샘플링이 가능한 고성능의 MCA로 8k 채널의 고분해능 조건을 측정하는 HPGe 검출기의 경우 Amp in (full scale: ±10 V) 값의 약 75 nV의 차이로도 한 개의 채널이 이동하기 때문에 분해능 저하를 초래할 수 있음

4.6. Evaluation of humidity characteristics by IMCA

Inspector-2000 MCA의 노이즈 발생 원인을 파악하기 위해 항온항습 테스트 챔버를 이용하여 습도에 따른 HPGe 검출기의 성능을 평가하였다. 성능평가는 Fig. 16과 같이 테스트 챔버 내에 HPGe 검출기와 Inspector-2000 MCA를 모두 적용하였다.

테스트 조건은 습도 설정을 위한 최소 조건의 온도가 영상 25°C로 저온에 대한 습도 평가를 수행할 수 없으므로, 온도조건을 영상 25°C에서의 습도 범위에 대한 기능 평가를 수행하였다. 습도는 0%부터 90%까지 20% 단계로 설정하였으며, 제조사에서 제공하는 HPGe 검출기 분해능 성능을 만족하는지 판단하기 위하여 ^{60}Co (3.7×104 Bq) 선원을 사용하여 30분 측정을 수행하였다. Table 5는 IMCG의 습도별 성능 비교표이다.

0~60%의 습도까지는 에너지 분해능과 중심채널의 변화가 두드러지게 나타나지 않았지만 80%의 습도에서는 에너지 분해능이 약 5 keV (약 3.4배 증가), 중심 채널이 12.98 keV 이동하는 것을 확인하였다. 모든 습도에서는 ^{60}Co 피크로 분류되는 1,173 keV와 1,332 keV를 제외한 배경방사선이 유사한 경향을 보였으나, photon peak의 계수가 확연히 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 현장 평가에서 도출한 HPGe 검출기의 10 keV의 에너지 분해능보다는 낮은 성능 저하지만, 현장 평가에서는 적설의 환경으로 인한 물방울 맺힘 현상 등을 고려하였을 때 습기로 인해 HPGe 검출기의 성능 저하가 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 5. IMCG perfoemance by humidity

Humidity	Count per second	Resolition (1332 keV)	Centroid energy
0%	530.33	2.12 keV	1332.74 keV
20%	532.43	2.24 keV	1331.96 keV
40%	533.67	2.25 keV	1331.95 keV
60%	524.55	2.26 keV	1332.00 keV
80%	501.94	7.26 keV	1319.76 keV
90%	500.90	11.07 keV	1329.78 keV

5. 고 찰

본 연구에서는 극한온도 환경에서의 검증 장비 활용을 위해 리트로핏 방안을 도출하고 제작하여 실제 현장에서의 적용 가능성을 평가하였다. IMCN과 IMCC의 경우, 상온에서의 측정 결과와 영하, 적설 현장에서 리트로핏 적용 후 측정한 결과가 비슷하게 나타나는 것을 확인하였으나, IMCG의 경우 에너지 분해능 성능 저하 및 중심 채널의 이동이 발생하는 것을 확인하였다.

이에 따라 노이즈 발생 원인을 분석하고자 항온항습 테스트 챔버를 이용하여 Inspector-2000 MCA의 습도에 대한 성능평가를 수행하였을 때 80% 이상의 습도 환경에서는 검출 성능이 저하되는 것을 확인하였다. 고분해능 검출기 및 MCA는 수 nV의 Amp Input 차이로도 채널 이동과 같은 성능 저하가 발생하기 때문에 후속 연구로 MCA에 대한 리트로핏 방안을 수립하여 평가를 수행하고자 한다.

6. 결 론

핵물질 안전조치를 위해 사용되는 사찰 장비는 북한과 같은 고위도, 고산지형에서 발생하는 일교차 등으로 인해 검출 성능의 문제가 발생할 수도 있으며 이는 정량적인 계량을 통한 핵물질 관리의 차질이 발생하게 된다. 성광 검출기의 경우 온도의 변화만으로도 섬광체 및 광전자증배관 특성으로 인해 계수율과 중심채널의 변화와 같이 성능 변화가 발생하며, 반도체 검출기도

고온의 경우 누설 전류로 인해 노이즈가 발생하여 측정의 변수로 작용할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 검증 장비의 극한 온도 환경 사용을 위해 리트로핏 방안을 도출하여 현장에서의 성능평가를 수행하였다.

온도 보완을 위한 리트로핏은 단열재를 이용한 방법과 진공을 이용한 방법 두 가지를 비교하였으며, 단열재는 단위부피 대비 큰 효율을 얻지 못하였고 진공 챔버는 10^{-2} Torr의 진공도만으로 충분한 단열 효과가 나타나는 것을 확인하였다.

도출한 리트로핏 방안을 기반으로 본 연구에서는 Inspector-2000 기반의 검증 장비의 사용을 위해 NaI(Tl), CZT, HPGe 세 가지의 검출기의 진공 하우징을 제작하였다. 진공 하우징은 계측 효율 감소를 최소화하기 위해 밀도가 낮은 아크릴을 사용하였으며 30 mm의 진공도를 확보하여 리트로핏 하우징을 제작하였다.

리트로핏 하우징을 이용한 성능평가를 위해 겨울철 일본의 북해도 내 해안가에 위치한 텐구산에서 검증 장비의 성능 평가를 수행하였다. 현장의 온도는 −15~ −5°C의 저온 환경에 적설 및 강설의 현장이였으며, 각 검증 장비의 성능을 리트로핏 전/후와 상온에서의 측정 결과를 함께 비교하였다.

IMCN과 IMCC의 경우 리트로핏 하우징을 적용하였을 때 상온과 유사한 결과를 보여 리트로핏 하우징의 유효성을 확인하였지만, IMCG의 경우 리트로핏 하우징 적용에도 성능 저하가 발생하였다. 이는 MCA의 외부 노출로 인해 발생된 것으로 추정하여 항온항습 테스트 챔버를 이용하여 IMCG의 습도에 대한 영향을 평가하였다. 챔버의 습도가 80% 이상일 때 IMCG의 측정 결과는 현장에서의 리트로핏 성능평가 결과와 유사한 결과를 보였으며 성능 저하에 대한 원인을 확인할 수 있었다.

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. Lee BC *et al*. 2023. Implications of changes in North Korea's nuclear strategy for South Korea." Kyungnam University Institute for Far Eastern Studies North Korea Studies Series 63
2. Baek HK *et al*. 2023. Evaluation of usability in extreme temperature environments of safeguards equipment. *Journal of Radiation Industry*. In publication
3. Kumar Dileep *et al.* 2020. "Comparative analysis of building insulation material properties and performance." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **131**:110038. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038
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. 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