

Research on the Operation of Safeguards Equipment in Extreme Environmental Conditions

Jiyoung Han, Suhui Park, Jewan Park, Yongmin Kim*

Department of Radiological Science, Daegu Catholic University

Received: December 18, 2023. Revised: December 28, 2023. Accepted: December 31, 2023.

ABSTRACT

In scenarios involving inspections and verifications of nuclear facilities, ensuring the proper functioning of on-site safeguards equipment is crucial. There have been precedents in Kazakhstan where equipment failed to operate properly due to extremely cold temperatures, and the year-round minimum temperature at North Korea's Punggye-ri nuclear test site is approximately minus 30 degrees Celsius. To ensure the proper functioning of equipment in extreme environments for on-site verification of nuclear activities on the Korean Peninsula, relevant research is necessary. This includes confirming the functionality of equipment used in inspections and verifications, as well as analyzing factors that may disrupt their normal operation. This study aims to conduct a risk analysis for the normal operation of equipment in extreme environments and develop criteria and procedures for environmental-based performance testing. To achieve this, we conducted a risk analysis based on IAEA safeguards, analyzed the utilization of equipment, and performed a risk analysis associated with transportation for on-site verification considering the environmental characteristics of the Korean Peninsula. Furthermore, we provided performance testing criteria and procedures. The research results can be utilized as reference material in the verification and monitoring processes of nuclear activities.

Keywords: Nuclear Activity, Denuclearization Verification, Safeguards Equipments, Performance Test

I. INTRODUCTION

대한민국은 1975년 NPT 핵확산금지조약(Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, NPT) 발효 및 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)와 전면안전조치협정(Comprehensive Safeguards Agreement, CSA)을 체결하고 IAEA의 안전조치를 받고 있으나^[1], 북한은 현재 모든 핵사찰을 거부하고 있다. 하지만, 북한 핵사찰 및 비핵화 가능성은 여전히 존재한다. IAEA는 매년 ‘Application of Safeguards in the Democratic People’s Republic of Korea’ 보고서를 발간하고 있으며^[2], 이를 통해 핵활동 모니터링을 보고하고 있다. 38 NORTH도 북한 원자력시설 관련 기고문을 꾸준히

발간하고 있으며 최근 발간된 문헌인 ‘Possible Refueling at Yongbyon’s 5 MWe Reactor’는 5 MWe 원자로의 폐쇄 가능성과 함께 사용후핵연료의 핵분열 물질 비축 가능성에 대해 보고하였다^[3]. 또한 ‘Yongbyon Nuclear Scientific Research Center: Expansion Work Continues’에서는 영변핵단지외의 꾸준한 확장 작업을 보고하였다^[4].

대한민국은 지리적 인접함, 언어적 이점, 기술 역량 등 북한 사찰 및 검증 참여 가능성이 높은 다양한 이유를 갖추고 있다. 또한, 위성 영상 기반 탐지 분석 기술 개발, 핵사찰용 시료 채취·운반 기술 및 절차 개발 등 핵활동 검증을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다^[1]. 하지만, 현장에서 활용될 장비에 대하여 북한 환경을 고려한 사용에 대한 연구는 미

* Corresponding Author: Yong-Min Kim

E-mail: ymkim17@cu.ac.kr

Tel: +82-53-850-2522

비한 실정이며, 개발 장비 성능 목표나 유지 조건이 없어 이에 관한 연구가 필요하다.

II. MATERIAL AND METHODS

북한 풍계리 핵실험장의 연중 최저 기온은 영하 30 °C이다. 극저온이 장비에 미칠 수 있는 영향에 대한 사전 분석이 요구되며 대비책 수립이 필요하다. 본 연구에서는 극한 환경 내 장비의 정상 작동 담보를 위한 장비의 성능 시험 기준 및 절차 제시를 목적으로 한다.

선행 연구를 통해 성능 시험 기준, 북한 지리, 기후 특성 등과 같은 기초 자료 구축 및 분석이 수행되었고 이를 종합하여 성능시험 기준을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 사찰 및 검증에 활용되는 장비를 확인하고 위험성 분석을 수행하고자 한다. 또한 구축된 성능 시험 기준의 타당성을 확인을 통한 기준 수정과 함께 시험 수행 절차를 수립하여 보다 활용도 높은 시험 기준 및 절차를 제시하고자 한다.

1. 안전조치 방법 및 장비

안전조치 검증 기술에는 격납 및 감시, 파괴분석, 비파괴 분석이 존재한다. 격납 및 감시는 정보의 연속성 및 건전성 유지를 목적으로 한다.

파괴분석은 정교한 핵물질 측정을 목적으로 하며 가장 정확한 방법이며 시료 채취, 분석이 포함된다.

비파괴 분석은 현장 핵물질 측정을 목적으로 한다. 비파괴 분석 기반 안전조치 검증 방법에는 감마선 분광, 사용후핵연료 분석, 중성자 계수가 존재한다. 중성자 계수, 사용후핵연료 분석 방법을 활용한 장비는 현장 검증에 활용될 가능성이 낮으며 감마선 분광을 이용한 검증 장비가 핵활동 현장 검증에 주로 활용된다. 감마선 분광을 활용한 장비로는 IMCA (InSpector 2000 MultiChannel Analyser), MMCA (Miniature MultiChannel Analyser), HM-5 (Hand Held Assay Probe), MMCN(MMCA paired with a NaI detector), ISOCS(In Situ Object Counting System) 등이 있다.

2. IAEA 사찰


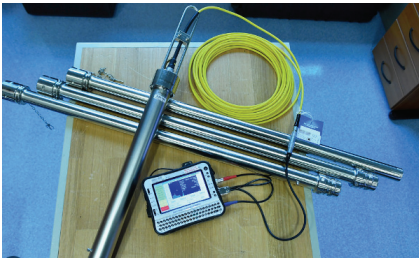
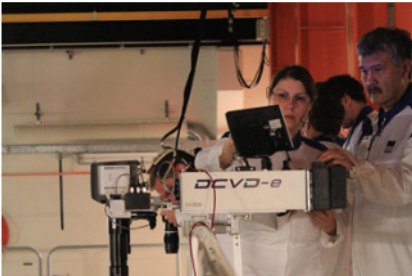

IAEA 사찰의 목적은 안전조치 수행에 있어 가장 중요한 국가 및 시설에서 핵물질 전용 여부 탐지이며, 사찰은 크게 일반, 수시, 특별 사찰로 구성된다. IAEA 사찰에서는 핵물질의 현장 이동 확인, 안전조치와 관련된 시설 설계 검증, UF₆ Cylinder 검증, 핵연료집합체 측정, 연료봉 검증 등이 수행된다. 실제 IAEA 사찰에서 항목별 사용된 장비 및 도구는 Table 1과 같다.

Table 1. Equipment and tools for each verification item.

검증 항목	장비 및 도구
UF ₆ Cylinder 검증	- HPGeDetector - ECGS - Thickness Gage, Standard weight
사용후 핵연료집합체 검증	- 체렌코프 검출기 - SFAT(Spent Fuel Attribute Tester)
분말(PD)검증	- IMCG & HM-5 - Standard weight
핵연료집합체(FF) 측정	- HE-UNCL, HM-5
연료봉(FR) 검증	- IMCL & HM-5 - IAEA 표준 연료봉
Pool의 사용후핵연료봉 검증	- SFAT(Spent Fuel Attribute Tester) - SFRV(Spent Fuel Rod Verifier)
펠렛(PL)검증	- IMCG & HM-5 - Standard weight
중수로 Bundle 검증	- HM-5 - Standard weight
DA Sampling	- Empty bottle - Standard weight
신핵연료봉 검증	- 휴대형감마측정시스템(PMCN) - HM-5, MMCN

사찰 시 주로 사용되는 장비인 HM-5, SFAT (Spent Fuel Attribute Tester), Digital Cerenkov Viewing Device, Complementary Access Kit에 대한 상세 설명은 Table 2와 같다^[5].

Table 2. Equipment and tools

장비	활용
HM-5	U-235 존재 유무 확인이 가능함. 핵물질 관련 모든 기관에서 사용 중에 있음. 연료 집합체 및 연료봉의 실제 길이 결정에 활용 가능함
	
SFAT	감마선 에너지 스펙트럼 분석으로 사용후핵연료봉 검증시스템에 사용됨
	
Digital Cerenkov Viewing Device	사용후핵연료 검증에 사용되는 장비. 사용후핵연료 집합체에서 방출되는 자외선을 포착함. 사용후핵연료 수조를 검증하는 데 사용되며, 사용후핵연료가 비연료 집합체로 대체되지 않도록 함
	
Complementary Access Kit	카메라, 레이저 거리 측정기, GPS 도구, 음성 녹음기, 손전등, HM-5와 같은 범용 방사선 측정 시스템 및 환경 샘플링 키트가 포함됨
	

3. 위험 요인 분석

검증 및 사찰에 활용되는 장비의 정상작동 담보는 필수적 요소이며, 장비에 영향을 미칠 수 있는 요인을 사전 분석하고 대비할 필요가 있다. 장비가 고온, 저온 환경에 노출된 채 보관될 가능성, 운반 과정에서 충격이 가해질 가능성 등 다양한 위험 요인이 존재할 수 있다. 이에 위험 요인의 확인 및 해당 요인이 장비에 미칠 수 있는 영향에 대한 분석이 필요하다. 일련의 예로 감마선 분광 시 온도 변화에 따라 채널 이동, 분해능 변화가 발생하며, NaI 검출기는 온도 및 고전압에 따라 파고의 변화가 발생한다⁶⁾. 또한, 높은 온도에서 작동할 경우 선광수율 및 분해능 저하로 인한 정밀도, 정확도 문제를 야기시킨다. 북한 환경 특성에 따라 장비에 영향을 미칠 수 있는 환경 요인, 운반 및 검증 과정에서 장비에 영향을 미칠 수 있는 요인에 대한 분석을 수행하였다.

3.1. 환경 특성에 따른 위험 요인

고온 환경에서 장비 부품의 전기적 특성 변화 가능성이 존재하며 과열로 인한 부품 손상이 발생할 수 있으며 내장 배터리의 수명이 감소할 수 있다. 이와 관련하여 다양한 온도 영향성 분석 연구가 수행되고 있으며, 최근 연구를 통해 일반 작동 온도 대비 20~30°C만 상승해도 추가적 상변화로 인한 배터리 성능 저하가 발생한다고 밝혀졌다⁷⁾.

저온에서 기기 충전 시 손상, 과충전의 가능성이 높아지며 성능 저하의 원인이 된다⁸⁾. 습도가 높은 환경은 기기 내 부식, 손상의 위험을 높이며, 성능 저하 및 오작동 발생 가능성도 높아진다. 낮은 습도 환경은 정전기 발생을 야기하고 이는 정확도에 영향을 미친다. 또한, 진동은 장비 결속을 느슨하게 하며 접촉 불량, 재료 마모 등을 유발한다.

3.2. 운반 및 검증 과정별 위험 요인

차량 운반 중 장비에 영향을 미칠 수 있는 요인에는 하중, 비포장 도로 이동으로 인한 차량 진동, 물에 빠트리게 되어 생길 수 있는 침수 등이 존재한다. 검증 과정에서 발생 가능한 위험 요인은 작업자가 손에서 놓치거나 떨어트려 가해지는 충격,

배터리 소모, 온도 변화 등이 존재한다.

4. 환경 실험

저온 환경이 기기에 미치는 영향 평가를 위한 극한 환경 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 기기는 NaI(Tl) 검출기, CZT 검출기, HPGe(BEGe) 검출기이다. NaI는 저비용, 쉬운 보수 관리의 장점이 있고, CZT는 질소 냉각이 필요없고 상온작동하며 내장 배터리 사용으로 인한 최소 전력 사용, 높은 에너지 분해능 등의 장점이 존재한다. 또한, CZT는 상대적으로 높은 방사선 측정 민감도를 가지고 있다. 실험은 영하 10 °C 환경에서 계수율, 분해능, 채널 이동 항목에 대한 성능 저하 여부를 확인하고자 하였다. 각 기기별 측정 시간은 30분이며, 측정 전 백그라운드 측정 시간도 동일하게 30분으로 진행되었다. 실험 결과 NaI(Tl) 검출기의 계수율 및 분해능에서 미비한 감소 및 저하를 확인하였고, 채널 이동에서 성능저하를 확인하였다. CZT 검출기는 계수율에서 성능 저하를 확인할 수 있었으며 분해능은 미비한 저하가 있었고 채널 이동은 없었다. HPGe 검출기는 계수율, 분해능, 채널 이동 모든 항목에서 성능 저하를 확인하였다. 검출기별 계수율, 채널 이동, 분해능 변화 정도는 Table. 3에 일부 나타내었다.

Table 3. Changes in the detector

	NaI(Tl)	CZT
계수율	5.4% 감소	39% 감소
채널 이동	10 ch 이동 (약 30 KeV)	없음
분해능	0.87% 저하	0.22% 저하

실험 결과를 통해 저온 환경에서 일부 안전조치 장비의 성능 저하를 확인할 수 있었으며, 이는 안전조치 장비 사용에 있어 극한 운습도 환경에 대비한 장비의 정상 작동 담보가 요구됨을 의미한다.

III. RESULT

선행 연구를 통해 도출된 성능 시험 기준은 다양한 기준과 절차 분석, 북한 기후 환경, 위험 요인 분석 등을 통해 수립되었다. 하지만 환경 실험, 위

험 요인 상세 분석을 통해 기준의 실제 적용에 어려움이 있는 것을 확인하였고 고온 시험 시간을 기존 기준인 96시간에서 16시간으로 수정하였다. 수정된 기준은 북한 환경에 적합하고 보다 활용성 높을 것으로 판단된다. 수정된 성능 시험 기준은 Table 4와 같다.

Table 4. Test criteria and procedures

시험	기준
고온	70 °C, 16시간
저온	-40 °C, 16시간
습도	상대습도 93%, 40 °C, 96시간(고온의 경우 85 °C)
충격	1 m 높이에서 콘크리트 바닥으로 2번 낙하
진동	표본을 진동 테이블에 고정된 뒤 10-200 Hz의 진동으로 30분 시험

본 연구에서는 장비의 북한 내 정상 작동을 담보할 수 있는 성능 시험 기준과 절차를 함께 제시한다. 선행 연구를 통해 성능 시험 기준을 제시하였고 해당 기준의 타당성 수립 및 적용 가능성을 확인을 위해 사찰 장비 분석, 위험 요인 분석, 환경 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 시험 과정에서의 통일성 수립을 위해 보다 상세한 시험 절차를 함께 제시하고자 하였다. 이를 위해 절차서를 작성하였으며, 절차서는 시험 전 확인 사항, 시험 기준 및 절차, 시험 장비 및 사양, 시험 결과, 시험 유의사항을 포함한다. 본 연구에서 제시하는 고온, 저온, 습도, 충격, 진동 시험의 절차는 아래 Table 5와 같이 절차서의 일부 내용을 Fig 1에 나타냈다.

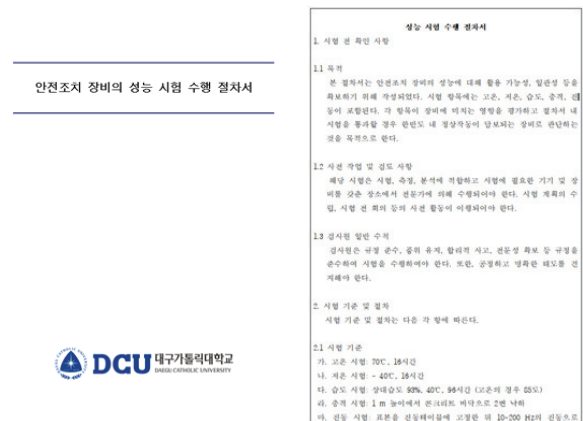


Fig. 1. Test procedure.

Table 5. Test criteria and procedures

시험	절차
고온	1. 챔버 내에 장비를 위치 시킨다.
	2. 0 °C에서 시작하여 최소 10분 간격으로 10 °C씩 올리며 10, 20, 30, 40, 50, 60 °C에서 장비의 정상작동(분해능, Channel Peak, 계수율 변화 등)을 확인, 기록한다.
	3. 70 °C에서 16시간 온도를 지속한다.
	4. 장비의 정상작동을 최종 확인, 기록한다.
저온	1. 챔버 내에 장비를 위치 시킨다.
	2. 0 °C에서 시작하여 최소 10분 간격으로 10 °C씩 내리며 -10, -20, -30 °C에서 장비의 정상작동(분해능, Channel Peak, 계수율 변화 등)을 확인, 기록한다.
	3. -40 °C에서 16시간 온도를 지속한다.
	4. 장비의 정상작동을 최종 확인, 기록한다.
습도	1. 챔버 내에 장비를 위치 시킨다.
	2. 온도 40 °C, 상대습도 93%로 조정하고 96시간 동안 유지한다.
	3. 장비의 정상작동을 최종 확인, 기록한다.
충격	1. 장비를 1 m 높이에서 콘크리트 바닥으로 떨어트린다.
	2. 장비의 정상작동(분해능, Channel Peak, 계수율 변화 등)을 확인, 기록한다.
	3. 장비를 1 m 높이에서 콘크리트 바닥으로 떨어트린다.
	4. 장비의 정상작동을 최종 확인, 기록한다.
*일련의 방법을 통해 장비를 떨어트려 충격이 가해질 상황을 방지하고 기기에 가해질 충격이 크지 않을 경우에는 충격 시험을 통과한 것으로 간주하고 자 함. 여기에는 케이스 보관, 완충재 포장, 손목 길이 클립 부착이 있음	
진동	1. 장비를 진동테이블 위에 고정한다.
	2. 10-200 Hz, Table Motion-랜덤으로 30분 동안 시험한다.
	3. 장비의 정상작동을 최종 확인, 기록한다.

IV. DISCUSSION

원자력 시설, 교통, 환경 등 모든 항목에 대한 정보가 정확하지 않은 북한의 원자력 활동 사찰 및 검증에 대비하여 기초 자료를 구축하고 이를 기반으로 북한 환경에 적합한 장비 성능 시험 기준 및 절차를 제시하였다. 북한 환경에 적합하다 함은 북한 기후, 지형, 교통 등을 고려하여 제시된 기준이므로 해당 기준에 적합한 장비라면 북한 환경 내에서 정상작동을 담보할 수 있을 것으로 예상됨을 의미한다. 본 연구에서 제시한 기준은 다양한 기준

및 북한 환경 분석 등을 통해 도출되었으나 IAEA의 ‘Qualification Test of IAEA Safeguards Equipment’ 보고서에서 제시하고 있는 성능 시험 기준을 크게 벗어나지 않으며 전문가 검토를 통해 해당 기준의 타당성을 확인하였다. ‘Qualification Test of IAEA Safeguards Equipment’는 보편화된 성능 시험 기준으로 본 연구에서 제시하는 시험 기준의 북한 현장 검증과 관련하여 활용 가능성이 충분하다고 판단된다.

V. CONCLUSION

북한 원자력 시설에 대한 사찰 및 검증 가능성은 여전히 존재하며 이를 대비할 필요성이 있다. 북한 사찰 및 검증을 가정하였을 때 시간, 공간 모두 제한적일 것으로 예상되며 짧은 시간 내에 다량의 정보 도출이 요구된다. 본 연구에서는 원자력활동 현장 검증 수행에 대비하여 실제 사찰 및 검증에 사용되는 장비를 확인하고 해당 장비의 정상 작동 담보를 위한 위험성 분석을 수행하였다. 또한, 실제 IAEA 사찰에 활용되는 장비 및 방법 분석, 국제 표준 성능 시험 기준 분석 등을 통해 북한 환경 기반 성능 시험 기준 및 절차를 도출하였다. 연구를 통해 도출된 결과는 실제 북한 원자력활동 현장 검증 및 사찰에서 장비의 정상 작동을 담보할 수 있는 기준이 될 수 있으며, 참고자료로 활용될 수 있다.

연구를 통해 분석 및 구축된 북한 환경에 기반한 성능 시험 기준은 실제 북한 비핵화 검증에서 사용될 검증 장비의 정상 작동을 담보할 수 있는 명확한 기준이 될 수 있다. 이를 통해 시행착오를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 연구를 통해 구축된 자료는 향후 북한 비핵화 검증 준비 단계에서 참고 자료로 활용될 수 있다.

Acknowledgement

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)

Reference

- [1] Nuclear Safety and Security Commission, Nuclear Safety Research and Development Project Plan for the year 2022, 2023.
- [2] IAEA, "Application of Safeguards in the Democratic People's Republic of Korea", Board of Governors General Conference, 2023.
- [3] O. Heinonen, P. Makowsky, J. Liu, "Possible Refueling at Yongbyon's 5 MWe Reactor", 38 NORTH, 2023. From URL;
<https://www.38north.org/2023/04/possible-refueling-at-yongbyons-5-mwe-reactor/>
- [4] P. Makowsky, J. Liu, "Yongbyon Nuclear Scientific Research Center: Expansion Work Continues", 38 NORTH, 2023. From URL;
<https://www.38north.org/2023/04/yongbyon-nuclear-scientific-research-center-expansion-work-continues/>
- [5] IAEA Office of Public Information and Communication, "Safeguards Equipment: What's in an Inspector's Luggage?", IAEA, 2016. From URL;
<https://www.iaea.org/newscenter/news/safeguards-equipment-whats-in-an-inspectors-luggage>
- [6] M. S. Lee, "Automatic Determination of the Energy Pulse-height Relationship in NaI(Tl) Spectra", Journal of radiation protection and research, Vol. 22, No. 3, pp. 143-151, 1997.
- [7] M. S. Kim, B. H. Lee, J. H. Park, H. S. Lee, W. H. Antink, E. Jung, J. Kim, T. Y. Yoo, C. W. Lee, C. Y. Ahn, Seok M. Kang, J. Bok, W. Ko, X. Wang, S. P. Cho, S. H. Yu, T. Hyeon, Y. E. Sung, "Operando Identification of the Chemical and Structural Origin of Li-Ion Battery Aging at Near-Ambient Temperature", Journal of the American Chemical Society, Vol. 142, No. 31, pp. 13406-13414, 2020.
<https://doi.org/10.1021/jacs.0c02203>
- [8] A. Gupta, A. Manthiram, "Designing Advanced Lithium-based Batteries for Low-temperature Conditions", Advanced Energy Materials, Vol. 10, No. 38, pp. 2001972, 2020.
<https://doi.org/10.1002/aenm.202001972>

극한 환경 내 안전조치 장비 운영에 관한 연구

한지영, 박수희, 박제완, 김용민*

대구가톨릭대학교 방사선학과

요 약

원자력 시설 사찰, 검증 등의 상황을 가정하였을 때, 현장 내 안전조치 장비의 정상 작동 담보는 필수적 요소이다. 카자흐스탄의 핵실험금지조약 현장 사찰 대비 훈련에서 극저온으로 인해 장비가 정상 운영되지 못한 선례가 있으며 북한 풍계리 핵실험장의 연중 최저 기온은 영하 30도 내외이다. 한반도 원자력 활동 현장 검증을 위해서는 극한 환경 내 장비의 정상 작동 담보를 위한 관련 연구가 필요하며, 여기에는 사찰 및 검증에 활용되는 장비 확인, 정상 작동을 방해하는 위험요인 분석 등이 포함된다. 본 연구는 극한 환경 내 장비의 정상 운영을 위한 위험성 분석, 환경 기반 성능 시험 기준 및 절차 개발을 목적으로 한다. 이를 위해 IAEA 안전조치 방법, 활용 장비 분석, 한반도 환경 특성과 현장 검증을 위한 운반에 따른 위험성 분석을 수행하고 성능 시험 기준 및 절차를 제시하였다. 연구 결과는 핵활동 검증 및 감시 과정에서 참고 자료로 활용될 수 있으며, 한반도 비핵화 참여에 대비한 정책 및 전략 수립에 기여할 것으로 판단된다.

중심단어: 원자력 활동, 비핵화 검증, 안전조치 장비, 성능 시험

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	한지영	대구가톨릭대학교 방사선학과	연구원
(공동저자)	박수희	대구가톨릭대학교 방사선학과	연구원
	박제완	대구가톨릭대학교 방사선학과	연구원
(교신저자)	김용민	대구가톨릭대학교 방사선학과	교수