Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 1, pp. 15-21, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.1.15

Original article

Visual Sample Plan을 활용한 미신고 시설 핵활동 분석 시료 채취 계획

박수희[1] · 한지영[1] · 박제완[1] · 김용민[1,*]
[1]대구가톨릭대학교 방사선학과

Soil sampling plan for Analysis of Nuclear Facility Activities utilizing Visual Sample Plan

Su-Hui Park[1], Ji-Young Han[1], Je-Wan Park[1], and Yong-Min Kim[1,*]
[1]Department of Radiological Science, Daegu Catholic University, 13-13, Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

ABSTRACT The Non-Proliferation Treaty (NPT) is the basis of global efforts to prevent the spread of nuclear weapons. In Republic of Korea, safety measures are integrated with NPT approval through agreements with the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the Safeguards Agreement. In contrast, Democratic People's Republic of Korea (DPRK), initially an NPT member, withdrew, refusing IAEA nuclear inspections. This inhibits the precise management of DPRK's nuclear facilities and limits access to related information. The Korean Peninsula, politically divided, sees DPRK in control of nuclear weapons. Although the IAEA periodically evaluates DPRK's nuclear facilities, there's a research gap in contamination and site management with nuclear activities. Recognizing the presence or absence of such activities is crucial for peaceful nuclear endeavors. This proposal suggests the number and locations for environmental sample collection using the Visual Sample Plan (VSP) software for nuclear activity analysis. VSP software is sample collection locations and quantities through statistical tests on collected data, ensuring reliability for decision-making. The proposal identifies sites and facilities for nuclear activity analysis based on IAEA safety reports, utilizing the software's embedded methods. Suggested sampling locations for undisclosed nuclear activities employ VSP's embedded techniques, including 'Show that at least some high % of the sampling area is acceptable' to confirm contamination and 'Estimate the Mean' to evaluate the average contamination level.

Key words: Analysis, Sampling, Nuclear Activities, Visual Sample Plan

1. 서 론

핵무기의 확산을 방지하기 위하여 1968년 7월 1일에 체결되고 1970년 3월 5일부터 효력이 발생된 핵비확산조약(Non-Proliferation Treaty, NPT)은 국제 핵 비확산 체제의 근간이 되고 있다[1]. 한국에서는 1975년 핵비확산조약 발효에 따라 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)와 안전조치협정(Safeguards Agreement)을 체결하여 안전조치를 받아오고 있다. 이러한 핵비확산조약에 북한은 1985년 12월에 가입하였고, 그로부터 약 6년 이후인 1992년에 국제원자력기구와 안전조치협정을 체결하여 핵 비확산 의무 이행 의사를 밝혔다. 안전조치협정 체결 후 1992년부터 1993년까지 북한 내의 핵시설에 대해서 6회의 사찰을 시행하였는데, 그중 제3차 사찰이 실시되었던 1992년에 국제원자력기구는 북한 내의 미신고 지점인 영변 2곳에 대한 사찰을 요구하였다[1]. 1993년 초에 들어서면서 북한의 영변에서 핵개발 의혹이 있다는 정보를 입수하여 국제원자력기구는 2곳에 대한 특별사찰을 요구하는 계기가 되었고, 이에 대하여 북한은 사찰을 거부하였다. 국제원자력기구는 북한으로부터 특별사찰을 수용하라는 결의를 통과시켰지만, 북한은 2003년에 핵비확산조약 탈퇴를 선언한 후 현재까지 국제원자력기구의 비핵화 사찰을 거부하고 있다[1]. 이로 인하여 북한에서는 핵관련 부지 및 시설에 대한 관리 유무가 정확하지 않고 관련 정보를 열람하기에 어려움이 존재한다. 현재 한반도는 정치적으로 분리된 분단국가인 동시에 북한은 핵무장국으로 국제원자력기구에서는 미신고 핵활동 시설 현황을 주기적으로 분석하여 보고서로 발간하고 있다. 발간된 보고서에 따르면 미신고 핵활동

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/
Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author: Yong-Min Kim
Tel: +82-53-850-2522, Fax: +82-53-359-6762, E-mail: ymkim17@cu.ac.kr
Received 13 February 2024 Revised 29 February 2024 Accepted 5 March 2024

단지 내 새로운 시설 건설 및 변경과 관련한 내용이 서술되어 있다[2]. 이에 따라 한반도 내 북한에 존재하는 미신고 핵활동 시설 분석이 필요한 실정이다.

한반도 내에 존재하는 미신고 핵활동 시설 중 대부분은 북한에 있으며 대표적인 장소로는 영변, 평산, 강선, 풍계리로 이 부지들을 중심으로 핵활동 분석을 시행하는 것이 필요하다. 미신고 핵활동 시설이 존재하는 부지에 대한 오염 여부 분석을 위한 시료 채취 시, 시설 접근 및 제한된 시간 내 채취 수행은 한계가 존재한다. 또한 현 북한과의 상황을 고려하였을 때 핵활동 분석을 위한 공정시료의 이용은 어려울 것으로 예상된다. 그러므로 환경시료 채취를 통하여 오염 분석을 수행하기 위해 북한의 미신고 핵활동 부지 및 시설 선정과 장소 제안이 필요하다. 오염 분석을 위한 장소 제안으로 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)에서 개발한 Visual Sample Plan (VSP) 소프트웨어를 활용하였다[4]. VSP는 샘플링 계획을 통해 수집된 데이터에 대한 결과가 의사 결정에 필요한 신뢰도를 갖도록 환경 샘플 채취를 시행하는 부지 내 채취 개수와 위치를 선택하기 위한 소프트웨어이다[3]. 핵활동으로 기인한 부지 및 시설의 오염 정도를 알 수 없고 폐쇄적인 성향을 고려하여 시료 채취를 수행하는 것이 필요하므로 VSP 소프트웨어를 이용하여 핵활동 분석을 위한 시료 채취 지점 장소를 제안하는 방법을 수립하고자 한다.

2. 재료 및 방법

환경시료를 채취하기 위한 VSP 소프트웨어를 활용하기 위해서는 소프트웨어를 구동할 부지 및 시설을 선정하는 것이 우선이다. 부지 선정은 국제원자력기구에서 발간된 안전조치보고서의 최근 활동을 토대로 결정하였다. 미신고 핵활동 시설과 관련된 활동이 존재하는 대표적인 부지는 영변, 평산, 강선, 풍계리이며 최근 활동은 다음과 같다[2].

2.1. 영변

5 MW(e) 원자로와 원심분리기 농축시설의 가동과 일치하는 징후 및 냉각수 배출과 같은 활동이 포착되었다. 또한 원심분리 농축시설에 새로운 별관을 건설하여 면적을 늘렸으며 우라늄 농축과 관련 활동에 대한 징후가 발견되었다. 폐연료봉 재처리 시설인 방사화학실험실 가동 정황이 포착되었으며 이 시설의 가동 기간은 방사화학실험실의 폐기물 처리 또는 유지보수 활동과 일치한다. 남쪽으로는 냉각수 배출을 위한 새로운 수로가 굴착되고 경수로 냉각장치 시험 징후가 관찰되는 등의 경수로 주변 활동도 포착되었다. 하지만 경수로 가동 징후는 발견하지 못하였으며 현재까지의 정보로 원자로가 언제 가동될 수 있는지 추정 불가하다. 이외로 우라늄농축시설에서 증기가 배출되었으며 이곳에서 철거된 장비 중 일부가 UF_4 (사불화우라늄) 생산 건물인 화학처리의혹시설로 이전된 징후가 포착됨에 따라 2022년 7월에 폐기된 화학처리의혹시설을 대대적으로 개조하는 작업이 시작돼 일 년 동안 지속된 것을 확인할 수 있었다.

2.2. 평산

2014년 우라늄 정련 시설의 개조 작업이 확인되었으며 일 년 뒤인 2015년에 우라늄 광산과 정련 시설에서 채광 및 제분과 관련된 것으로 보이는 건물 개조, 차량 이동 활동이 위성 이미지를 통해 관찰되었다. 이후 현재까지 꾸준하게 우라늄 광산과 정련 시설에서 채광, 제분, 농축 활동이 진행 중인 정황을 포착할 수 있었다.

2.3. 강선

평양 인근에 있는 부지로 영변 핵단지 시설 건설 이전부터 존재하였으며 강선은 영변 핵단지 시설과 동일한 인프라로 이루어져 있다. 강선에 존재하는 우라늄농축의혹시설에서 지속적인 활동이 관찰되었으며 또한 현재까지 채굴과 같은 활동도 포착되었다.

2.4. 풍계리

풍계리 핵실험장 3번 갱도의 굴착 작업이 2022년 5월 완료된 이후에 추가 활동이 관찰되었으며 4번 갱도 입구로 진입할 수 있는 도로가 복원되었다. 이외의 활동으로는 풍계리 핵실험장 지역에 목적을 알 수 없는 여러 건물이 추가로 건설되었다.

국제원자력기구에서 발간되는 안전조치보고서의 주요 미신고 핵활동 시설 최근 활동을 분석한 내용을 정리한 Table 1과 같다.

미신고 핵활동 시설의 최근 활동과 동시에 우라늄 농축 및 정련 시설이 존재하는 평산을 대상으로 샘플링을 시행하기로 결정하였다. 평산은 광산에서 채광한 우라늄을 정련시설에서 농축하는 과정을 수행하고 있다. 농축하는 과정을 통하여 생성된 우라늄 정광은 핵연료 생산에 이용되고 높은 농도의 우라늄을 추출하는 과정을 통해 핵무기의 원료로 사용될 가능성이 존재한다. 우라늄을 농축하는 과정 중 방출되는 높은 농도의 우라늄으로 기인한 오염 분석이 가능할 것으로 예상되기 때문에 평산 우라늄 농축 및 정련시설을 대상으로 VSP 소프트웨어를 이용하여 샘플링 하기로 결정하였다.

VSP 소프트웨어는 PNNL에서 개발되었으며 이는 소프트웨어에 내장된 샘플링 방법으로 환경 샘플의 적절한 수와 위치를 선택한 결과가 의사결정에 필요한 신뢰를 제공하는 소프트웨어 도구이다. 프로그램 내에는 여러 종류의 환경문제에 적합하고 특정 통계검정에 필요한 샘플 디자인 및 샘플 크기에 맞는 방정식을 제공한다[3]. 소프트웨어 결과를 통하여 환경 시료 채취를 수행하는 부지의 올바른 수와 위치 선택이 가능하므로 시설의 활동으로 기인한 오염을 파악하기 위한 환경 시료 채취 장소 제안 방법을 구축하고자 하였다. VSP 소프트웨어는 Data Quality Objective (DQO) process를 이용하도록 권장한다[3]. 이 프로세

Table 1. The Recent activities of nuclear facilities

Sites	Facilities	The Operation status
Yongbyon	5 MW(e) Reactor	Detection of operational status
	Radiochemical Raboratory	Detection of operational status
	Uranium Enrichment Facility	Detection of operational status
	Chemical Processing Facility	Detection of facility renovation work
	Light Water Reaction (LWR)	Undetection of operational status and Detection of building renovation
	Reactor Cooling Facility	Detection of cooling system testing
Pyongsan	Mining/Milling Facility	Detection of operational status
Kangson	Uranium Enrichment Facility	Detection of operational status
Punggye-ri	Nuclear Test Site Tunnel	Restoration of tunnel entrance access road

스는 US Environmental Protection Agency (EPA)에서 데이터 품질을 관리하고 개선하기 위한 과정으로 데이터가 정확하고 신뢰할 수 있는지를 나타내기 위해 수립되었다[4]. VSP 소프트웨어에 내장된 샘플링 방법을 사용하기 전 DQO process를 통한 의사결정이 필요하다. 이는 오염 물질의 평균 농도 수준 확인 및 추정과 같은 활동을 시행할 경우의 권장사항이므로 DQO process를 통하여 VSP 소프트웨어 구동 전 조사계획을 수립하였다[3]. DQO process는 데이터를 이용하여 의사결정을 내릴 때 데이터의 품질을 평가 및 개선을 위한 다양한 단계와 활동으로 구성된다. 이 과정에서 사용자는 데이터 관리와 품질을 지속해서 개선하기 위한 중요한 도구로 사용할 수 있으며 정확하고 신뢰할 수 있는 데이터를 활용하여 더 나은 의사결정을 내리는 것이 가능하다[4]. 미신고 시설의 핵활동 분석을 위한 토양시료 채취 시 북한이라는 지역에서 예상하지 못한 상황 발생 가능성이 크다. 그러므로 DQO process 수립 후 VSP 소프트웨어를 구동을 통해 토양 시료 채취 장소를 시뮬레이션하여 시료 채취 시 발생할 수 있는 변수를 대비하고자 하였다. 시설의 핵활동을 분석하기 위한 VSP 소프트웨어 활용 시 DQO process의 수립이 필요하므로 지침에 따른 수행 과정은 다음과 같다[4,5].

Step 1: 문제 정의

연구에서 해결하고자 하는 문제를 정의한다. 특히 환경문제(연구에서 진행하고 있는 미신고 시설 핵활동 오염을 분석하기 위한 토양시료 채취 장소 제안과 같은 상황)는 기술적, 경제적, 사회적 등 문제가 복잡하게 결합한 경우가 많기 때문에 문제를 정확하게 정의해야 한다. 또한 실제 연구에 참여하는 자들을 결정하는 것이 필요하다.

- 시료수집 목적: 평산 우라늄 농축 및 정련시설 핵활동 오염 여부를 파악하는데 필요한 시료수집 위치를 제안하였다.
- 연구 참여자는 언어적, 지리적 한계를 고려한 국내 연구진으로 결정하였다.

Step 2: 연구 목표 파악

두 번째 단계에서는 연구의 주요 문제를 식별하는 작업을 수행하고 이러한 문제를 해결하기 위한 방안을 모색해야 한다.

- 조사 방법론: VSP 소프트웨어를 이용하므로 확률론적 분석(probability-based)에 기반한 부지 조사를 시행하였다.

Step 3: 연구에 필요한 정보 파악

앞서 설정한 결정문을 해결하거나 원하는 추정치를 생성하는데 필요한 정보의 유형과 출처를 결정해야 한다. 이때 새로운 데이터 수집 필요 여부와 연구 참여진의 적절한 분석 접근법, 성과 또는 수용 기준을 확립하는데 필요한 정보 기반이 필요하다. 또한 환경 특성을 고려하여 문제를 해결하기 위한 샘플링 및 분석 방법 여부와 측정해야 할 항목을 결정한 후 측정 기준을 구체화하는 것이 필요하다.

- 평산 우라늄 채광 및 정련 시설에 대한 오염 데이터가 존재하지 않으므로 새로운 데이터 측정 및 방법론 수립이 필요하다.
- 환경 특성을 고려한 샘플링 분석 방법 결정: VSP 소프트웨어에 내장되어 있는 Show that at least some high % of the sampling area is acceptable과 Estimate the Mean 이용하였다.

Step 4: 연구 경계 정의

관심 대상 모집단을 식별하고 의사결정이나 추정에 적합한 공간적, 시간적 특징을 지정해야 한다. 샘플링을 방해할 수 있는 실질적인 제약 조건을 식별하는 과정으로 이때의 제약은 토양시료 수집 시 방해할 수 있는 장애물과 제약으로 인해 연구 모집단에 포함될 공간적/시간적 경계 또는 지역을 의미한다.

- 실제 북한 내 평산 부지로 접근 시 공간적인 한계가 더 크다고 판단하였다. 이를 고려하여 시설 내로 접근이 가능할 경우와 불가능할 경우를 고려하여 샘플링을 시행하였다.

Fig. 1. Setting up sampling areas for the Pyongsan Uranium Enrichment and Refinement Facility (if access is possible from within the facility).

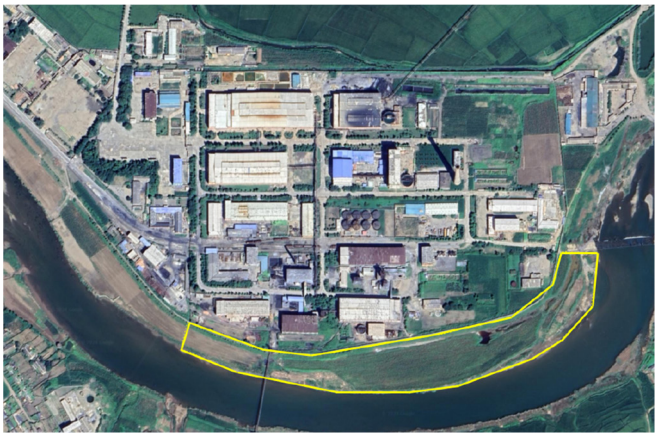

Fig. 2. Setting up sampling areas for the Pyongsan Uranium Enrichment and Refinement Facility (if access is not possible from within the facility).

내부로 접근하지 못 할 경우 시설 주변에 존재하는 예성강 하류 인근으로 시료 채취 구역을 설정하였다. 예성강 하류에는 저수지 댐 및 시설 외부에 시설의 활동으로 발생하는 슬러지를 옮기기 위한 파이프라인이 존재하므로 이를 포함한 구역을 설정하였다.

Step 5: 연구 접근 방법 개발

분석적 접근 방식을 개발하는 단계로 연구 결과를 분석하고 데이터로부터 결론을 도출하는 과정이 필요하다. 연구 결과에서 알고자 하는 것이 무엇인지 명확히 하기 위해 접근 방식을 개발하여 도출된 데이터를 통해 결정을 내려야 한다. 그러므로 결정 또는 추정을 위해 적절한 모집단 매개변수를 지정하고 실행할 수 있는 작업 수준을 선택하여 이를 포함하는 "if...then...else" 결정 규칙을 생성하는 것이 필요하다.

Fig. 3. The Confidence level is 90%.

Fig. 4. The Confidence level is 99%.

- 시료 중 오염원에서 가까운 지점에 수집한 시료를 우선 분석 대상으로 지정하며, 그렇지 않으면 우라늄과 플루토늄을 많이 포함한 시료의 분석 결과를 활용하여 판단한다.
- 채취한 시료의 분석 결과가 자연 상태의 비율을 기준으로 하여 유의한 수준으로 비율이 달라졌을 경우 시설의 활동으로 인한 오염이 있었다고 판단하고, 그렇지 않으면 교차분석을 통해 분석기관과 결과를 비교하여 오염 여부를 판단한다.

Step 6: 시행된 연구 승인 기준 지정

DQO process 지침에서는 데이터에 대해 샘플 수집 및 측정 방법 등의 다양한 요인으로 인하여 오류 발생이 가능하다고 명시되어 있다. 결과적으로 수집된 데이터로부터 사용자가 내리는 추정이나 결론은 실제 상황과 다를 수 있으므로 추정치의 불확실성을 허용 가능한 수준 내로 유지하기 위해 한계를 지정하는 것이 필요하다. 데이터 결정 시 위 단계를 통하여 수립한 의사결정 오류 가능성에 대한 허용 가능한 한계를 설정해야 한다. 기준 조건이 거짓임을 나타내는 데이터의 증거가 충분하지 않을 경우 수립한 기준 조건이 참이라고 결론을 내리거나 거짓이라는 명확한 값이 데이터 내에 포함되어 있고 대체 조건이 참일 경우 기준

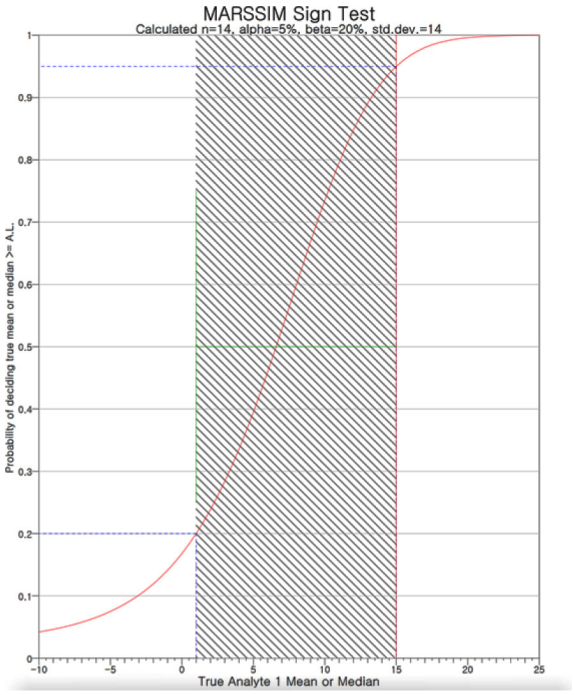

Fig. 5. Set up the gray region.

조건이 거짓이라는 결론을 내린다. 이를 통하여 관심 매개변수의 가능한 참값 범위를 지정해야 하며 승인 결정 오류를 범할 가능성이 높은 회색 영역 지정이 필요하다.

- 관심 매개변수의 참값 범위 결정: 시료 수집 개수를 통한 적절한 입력값을 신뢰도를 변화하여 결정하였다.
- 환경데이터의 경우 90번째, 95번째 및 99번째 백분위를 중요하게 평가하고 있으므로 신뢰도 값을 변화하여 최적의 채취 위치를 선정할 수 있는 백분위 값을 결정하였다[6]. 신뢰도 90%일 경우 시료 채취 개수는 11개, 신뢰도 99%일 경우 시료 채취 개수는 21개이다. 신뢰도 99%일 경우 시료 채취 시 북한의 시간적인 한계를 고려하였을 때 적절하지 않다고 판단하였으며, 신뢰도 90%일 경우 시료 채취 지점이 비슷한 지점에 분포해 있어 시료 채취 시 유의미한 결괏값 도출에 적절하지 않다고 판단하였다. 그러므로 입력값 변화에 따라 신뢰도 값 95%로 샘플링을 시행하였다.
- 회색영역 설정: 95%의 신뢰도 값을 이용하여 설정한 구역 내에서 부지가 오염되었다고 판단할 확률은 95%, 부지가 오염되지 않았다는 사실을 잘못 받아들일 확률은 20%를 넘지 않을 것이라 설정하였다. 두 값에 대해 설정한 회색영역은 다음과 같다.

Step 7: 연구 데이터 확보 계획 개발

이전 단계를 통하여 수집된 데이터가 달성해야 하는 일련의 성능 또는 승인 기준을 생성하게 된다. 마지막 단계에서는 환경 시료를 수집 및 측정하거나 문제를 해결하는 데 필요한 기타 정보를 통하여 자원 효율적인 데이터 수집 또는 고정된 예산 내에서 합성 및 분석에 사용할 수 있는 정보의 양을 최대화하는 데이터 수집 프로세스를 생성한다. 또한 이 단계는 성능 또는 승인 기준을 달성하는 데이터로 이어지는 역할을 해야 한다.

- 최적화된 시료 수집 크기(개수, 규모 등)를 선택: 95%의 신뢰도를 활용하여 소프트웨어를 구동할 경우, 시료 채취 개수에 대한 민감도를 계산하였다. 민감도 분석 결과는 Table 2와 같다.
- 민감도 분석을 통하여 신뢰구간을 변경하였을 때, P=80, CL=95%인 경우 부지의 오염 여부를 확인하기 위해 수집해야 하는 시료 수는 14개이다. 14개의 시료 분석값의 최대값이 조치수준(Action level)보다 작으면 모집단의 최소 5%가 조치수준보다 작다는 결론을 80% 확신할 수 있으므로 95% 신뢰도로 소프트웨어를 구동하여 시료채취장소를 제안하였다.

수립한 DQO process를 바탕으로 VSP 소프트웨어를 구동하기 위해서는 소프트웨어에 내장되어 있는 방법론을 선택하여 결과를 도출해야한다. 내장되어 있는 소프트웨어 방법 중 현재 샘플링하고자 하는 우라늄 농축 및 정련시설에 대한 오염 여부 추정 및 정도의 확인이 불가한 점을 고려하여 부지 내 시설의 토양 시료 채취 개수에 대한 결괏값이 필요하므로 Show that at least some high % of the sampling area is acceptable과 Estimate the Mean 방법을 이용하기로 결정하였다. Show that at least some high % of the sampling area is acceptable 방법은 정규분포를 적용하지 않아도 샘플링이 가능하며 정확한 오염 정도를 파악할 수 없는 상황에서도 오염 여부를 확인하기 위한 시료 채취 개수를 도출할 수 있다[3]. Estimate the Mean 방법은 오염을 알고자 하는 구역의 평균값을 추정하기 위한 표본 값을 계산하고 지도에 배치하는 방법이다[3]. 오염 정도를 파악하기 위해 적절한 시료 채취 개수를 추정하여 오염 평균 도출이 가능하므로 두 방법을 이용하여 소프트웨어를 구동하였다. Show that at least some high % of the sampling area is acceptable을 이용한 소프트웨어 구동 결괏값을 Estimate the Mean에 적용할 경우 중복되는 채취 장소 선정이 가능하므로 시료 채취 결과에 대한 오류를 줄일 수

Table 2. Results of sensitivity analysis with a confidence level of 95%

	Number of Samples				
	CL=99	CL=97	CL=95	CL=93	CL=91
P=75	17	13	11	10	9
P=80	21	16	14	12	11
P=85	29	22	19	17	15

P: Required Percent of the Population to be Less Than Action level
CL: Confidence Level (1-α), %

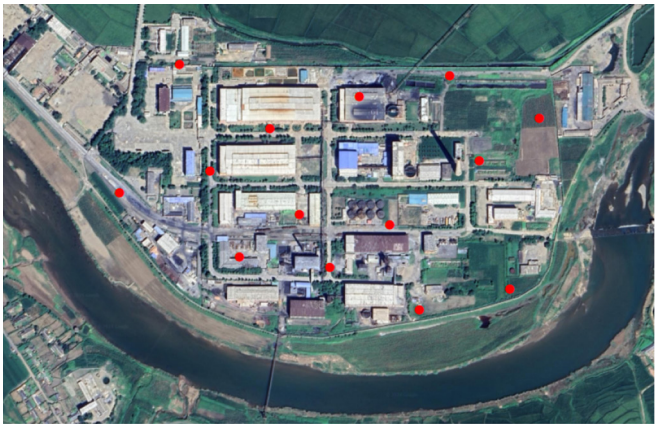

Fig. 6. Show that at least some high % of the sampling area is acceptable (If access is possible from within the facility).

Fig. 8. Estimate the Mean (If access is possible from within the facility).

Fig. 7. Show that at least some high % of the sampling area is acceptable (If access is not possible from within the facility).

Fig. 9. Estimate the Mean (If access is not possible from within the facility).

있다. 중복되는 채취 장소를 선정하기 위하여 두 샘플링 방법의 공통적인 입력값인 비용을 이용하였다. Show that at least some high % of the sampling area is acceptable의 소프트웨어 구동 결괏값으로 도출된 비용을 Estimate the Mean에 적용하여 시설의 활동으로 기인한 오염을 분석 방법을 제안하였다.

3. 결 과

수립한 DQO process와 선택한 샘플링 방법을 이용하여 VSP 소프트웨어를 구동하였다. 이를 위해서는 핵활동 분석을 위한 시료 채취 부지 내 시설을 결정한 후 샘플링 구역을 설정하는 것이 필요하다. 수립한 DQO process를 토대로 Step 4에 따라 평산우라늄 농축 및 정련시설의 샘플링 구역 설정은 시설 내부로 접근하지 못할 경우를 고려하여 내부뿐만이 아닌 외부에 존재하는 파이프라인을 포함하여 댐이 있는 예성강 하류까지 설정하였다.

Show that at least some high % of the sampling area is acceptable 방법에 존재하는 하위 항목 중 샘플링 대상 부지의 정확한 오염 여부와 정도를 알 수 없으므로 Using presence/absence를 이용하였다. 샘플링 대상 시설의 범위를 결정한 후 95%의 1-α 값과 80%의 1-P 값으로 시설의 샘플링을 시행하였다. 샘플링 결괏값은 총 14개의 수집 개수와 장소가 선정되었으며 Fig. 6, 7과 같다.

평산 우라늄 농축 및 정련 시설 내부에는 정확한 목적을 알 수 없는 건물들이 있으므로 오염 분포 정도는 불균일할 것으로 판단된다. 외부 또한 환경적 요소로 인하여 불균일할 것으로 예상된다. Estimate the Mean의 데이터 불균질 하위 항목 중 Stratified sampling 방법의 Minimize Variance of Sample Mean for Fixed Cost를 이용하였다. 오염 평균을 추정하기 위한 시료 총수를 계산할 경우, 시료 수집 및 측정 시 미리 지정된 고정 총비용에 대해 추정된 모집단 평균 정밀도를 최대화하여 계산할 수 있다[3]. Show that at least some high % of the sampling area is acceptable의 결괏값인 시료의 총수와 고정된 총비용 값을 이용

하여 소프트웨어를 구동하였다. 소프트웨어를 구동하기 위한 입력값은 Show that at least some high % of the sampling area is acceptable의 결괏값에서 도출된 14개의 시료 개수에 대한 고정비용 $8000이다. 이로 인하여 도출된 Estimate the Mean의 결괏값은 시료 하나를 수집하는 데 드는 비용 $100, 분석 비용 $400으로 총 13개의 시료에 대한 값은 $6500이다. 결과적으로 총 고정비용보다 낮은 비용으로 시료 수집이 가능하다. 실제 비용은 큰 중요 인자는 아닐 것으로 예상되나 공간 및 시간적 제약 등을 고려하여 비용을 적용하여 평가하였다.

4. 고 찰

북한 미신고 핵활동 시설이 존재하는 부지를 고려하였을 때 평산뿐만이 아닌 영변, 강선, 풍계리에서 시설의 활동이 포착되고 있으며 이는 국제원자력기구의 안전조치보고서와 38 North의 위성사진 상으로 확인할 수 있었다. 그러므로 평산 우라늄 농축 및 정련시설뿐만이 아닌 미신고 핵활동 시설이 존재하는 타 부지의 핵활동으로 기인한 오염 분석이 필요할 것으로 예상된다. 이를 위한 시료 채취 장소의 제안은 최근 활동이 존재하는 영변, 강선 등과 같은 부지 또한 정확한 오염 여부 및 정도를 알 수 없다는 점을 토대로 평산 우라늄 농축 및 정련시설에 적용한 VSP 소프트웨어 구동 방법을 이용할 수 있을 것이다.

5. 결 론

평화적 핵활동 담보를 위해서는 핵활동이 존재하는 부지 및 시설에 대한 정기적인 조사를 통한 관리 필요하다. 한국과 비교하였을 때, 북한의 핵활동 부지 및 시설의 관리 여부와 정보가 불분명하다. 그러므로 시간적, 공간적 한계가 있는 북한 지역에서 핵활동 시설의 운영으로 기인한 오염 정보가 필요하다. 공정시료를 채취하여 오염 정도를 분석하는 것이 정확하지만 한국과 북한과의 상황을 고려하여 환경시료를 채취하는 방법을 제안하였다. 환경 시료 채취를 위한 장소 및 개수 제안 방법으로 VSP 소프트웨어를 이용하였다. 소프트웨어를 구동하기 전 핵활동을 확인하기 위한 부지 및 시설을 선정하는 과정이 필요하다. 이를 위해 국제원자력기구의 안전조치보고서를 분석하여 최근 활동을 토대로 평산 우라늄 농축 및 정련시설로 결정하였다. 대상 시설에 대한 채취 장소 및 개수 제안은 북한이라는 특수한 지역에서 예측할 수 없는 상황 발생 가능성이 존재하기 때문에 DQO process를 수립하였으며 이를 토대로 VSP 소프트웨어를 구동하기 위한 방법론을 제안하였다. 북한에만 국한된 것이 아닌 정확한 오염의 정도를 파악할 수 없고 시간적, 공간적 한계가 있는 지역 내에서 핵활동 분석을 확인하기 위한 목적으로 환경시료 채취를 수행해야 하는 경우 VSP 소프트웨어를 활용하여 시료 채취 장소 및 개수 제안이 가능할 것으로 예상된다. 본 연구에서 개발된 방법론은 핵활동으로 기인한 오염 확인뿐만이 아닌 비핵화 사찰 연구에 대한 초석이 될 것이다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업에 의해 수행되었습니다(No. 2004025).

References

1. Lee YH. 2006. “The view and legal estimation over North Korea’s withdrawal from the NPT”, *SungKyunKwan Law Review* **18**(1):499-520, https://G704-001437.2006.18.2.010.
2. International Atomic Energy Agency (IAEA). 2023. “Application of Safeguards in the Democratic People’s Republic of Korea”, https://GOV2023/41-GC(67)/20.
3. Matzke BD, Wilson JE, Newburn LL, Dowson ST, Hathaway JE, Sego LH, Bramer LM, Pulsipher BA. 2014. “*Visual Sample Plan Version 7.0 User’s Guide*”, No. PNNL-23211, Pacific Northwst National Laboratory (PNNL) Publishing Co., Richland, pp. 26-129.
4. US Environmental Protection Agency (EPA). 2006. “*Gudiance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process*”, EPA QA/G-4., United States Environmental Protection Agency Publishing Co., Washington DC, pp. 1-78.
5. Jeon YR, Kim YM. 2022. “Soil sampling plan design of key facilities for denuclearization based on data quality objective process”, *Nuclear Engineering and Technology* **54**(10):3788-3794. https://doi.org/10.1016/j.net.2022.05.012.
6. US Environmental Protection Agenct (EPA). 2000. “*Guidance for Data Quality Assessment Practical Methods for Data Analysis*”, EPA QA/G-9., Unitied Stated Environmental Protection Agency Publishing Co., Washington DC, pp. 35-40.