

비핵화 검증 역량 향상을 위한 KINAC의 연구개발 활동

정승호, 김명수, 김남경
한국원자력통제기술원



정승호
한국원자력통제기술원 책임연구원

- 前 삼성 SDS 책임컨설턴트
- 前 한국원자력통제기술원 선임연구원



김명수
한국원자력통제기술원 선임연구원

- 한국과학기술원 원자력공학 박사



김남경
한국원자력통제기술원 연구원

- 한양대학교 원자력공학 석사

비핵화 및 정부 규제사무와 관련된 R&D의 지향점

우리나라는 후쿠시마 사고를 계기로 2011년 원자력안전위원회(원안위)를 설립하였고, 산하에 한국원자력통제기술원(KINAC, Korea Institute of Nonproliferation And Control)

을 두고 핵비확산 이행과 관련된 전문적인 심사와 검사(심·검사)를 위탁하고 있다. 비핵화 이슈는 정치, 외교, 군사, 원자력 등이 복잡하게 얽혀 있어 우리 정부에서도 범부처적인 성격을 가지는데, 원안위와 KINAC은 비핵화 단계 중에서도 검증과 관련된 기술적인 부분을 맡게 된다.

비핵화 검증이란 비핵화 대상국이 의도적으로 숨겨둔 핵시설이나 핵물질이 없고 핵개발 역량을 완전히 폐기하였음을 기술적으로 판정하는 것으로 요약할 수 있는데, 이는 본질적으로 KINAC이 평시에 수행하는 핵비확산과 핵안보의 심·검사 활동과 일맥상통한다. 따라서 정부의 규제사무 시 발생하는 의사결정에 기술자문 조직의 전문성이 큰 영향을 미치는 사례들이 비핵화 검증에서도 발생할 수 있다. 규제 사무에서 발생하는 가장 빈번한 문제점 중 하나가 바로 담당 전문가가 바뀌면서 기존의 유사한 유형과 다른 결과가 나오는 경우이다. 여러 나라의 정치, 외교, 군사 분야가 얽혀 있는 비핵화에 있어 전문성의 편차로 인해 의사결정의 일관성이 무너지거나 다른 나라에 비해 비효율적인 업무 처리가 발생한다면, 이는 국가 신인도에 직결되는 사안이 된다.

따라서 자연적으로 핵비확산·핵안보 분야의 R&D 역시 최근에는 이와 같은 기초를 따르고 있는데, 이는 인력을 크게 늘리지 않고도 유사한 업무 효율을 보여야 한다는 점, 담당자가 바뀌어도 심사와 검사의 결과가 일관성을 유지하도록 한다는 점에서 민간 조직의 경영혁신 활동(효율성과 품질)과 상당 부분 닮았다.

KINAC은 우리나라가 비핵화 검증에 참여하는 경우를 가정하여, IAEA 또는 미국과 유사한 의사결정을 내릴 수 있는 기반기술을 크게 3가

지 분야 (탐지·감시, 채취·분석, 해석·평가)에서 도출하였다. 각 분야별로 위성영상 분석, 시료 채취·운반, 해석도구(Physical Model) 구축의 3가지가 선정되었는데, 이들은 한편으로 IAEA가 보유하고 있는 사찰역량을 우리나라 버전으로 기획한 것으로도 볼 수 있다.

조금 더 자세한 내용을 다음에서 각 기술개발 과제별로 살펴보겠다.

【위성영상】 미신고(또는 은닉) 핵활동 탐지·감시를 위한 영상분석 기술

IAEA 및 미국 안보 싱크탱크(think tanks)¹⁾에서는 미신고 핵활동을 탐지·감시하기 위해 관심 영역의 위성영상을 육안으로 판독하고 있다. 그림 1의 38 North 기고문 예시에서 볼 수 있듯이, 영상 판독가들은 자신만의 경험을 바탕으로 핵활동 여부를 판단할 수 있는 기술적이고 논리적인 근거들을 영상 내 주석(황색)으로 제시하고 있다.²⁾ 하지만 육안판독은 판독가 개인의 역량에 의존하기 때문에, 판독 경험이 부족한 다른 분야의 전문가나 비숙련 전문가가 영상을 분석해 핵활동을 추론하기란 쉽지 않다.

또한 위성영상 기술의 발전을 계기로 ‘위성영상 분석(판독)’이 미신고(은닉) 핵활동을 지속적으로 탐지·감시할 수 있는 기술로서 부상했지만, 그림 2와 같이 위성영상의 공간해상도(화질)

1) 38 North, CSIS(Center for Strategic and International Studies) Beyond Parallel, Jane's 등.

2) 38 North 기고문 예시에서는 북한 실험용경수로(ELWR)의 활동을 추론할 수 있는 기술적·논리적 근거로 실험용경수로 부근 건축부지 개간, 보조건물 제거, 크레인 및 차량 이동 등을 제시했다.



[그림 2] 위성영상 공간해상도(화질) 및 시간해상도(촬영주기)의 향상



[그림 1] 위성영상 분석을 활용한 핵활동 판독 기고문 예시(38 North) : 이전 시기의 위성영상(좌측), 이후 시기의 위성영상(우측), 그리고 핵활동 여부 판단의 기술적 근거(영상 내 주석, 황색)

와 시간해상도(촬영주기)가 향상되어 위성정보의 양이 너무나 방대해진 탓에 육안판독에 소요되는 전문인력과 시간(비용)은 역설적으로 증가하게 되었다. 예를 들어 [그림 3] 상단과 같이, 동일한 지역에 대한 서로 다른 시기의 고해상도 위성영상 한 쌍(스테레오)을 육안으로 비교하여 ‘틀린 그림(변화)’를 찾아내는 것은 뛰어난 전문가조차 정말 까다로운 작업일 것이다.

하지만 만약에 [그림 3] 하단처럼 실제 변화를 포함하고 있는 ‘변화 후보영역’을 영상 판독가에게 사전에 제공할 수 있다면, 위성영상을 활용해

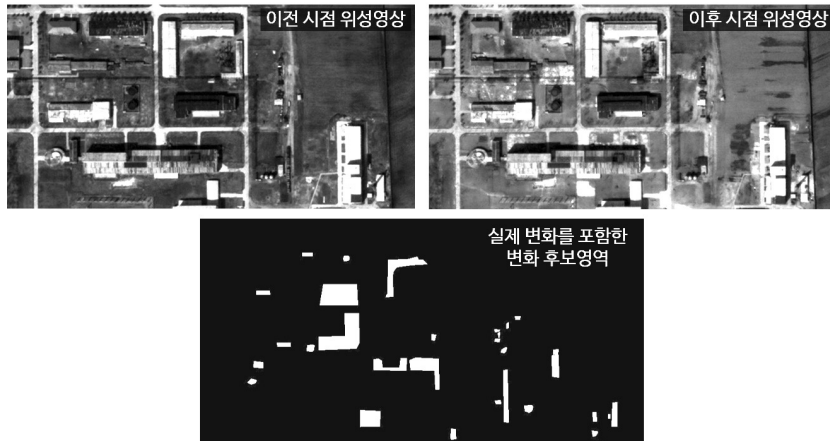
핵활동을 판독하는 데 소요되는 시간과 비용을 절약할 뿐만 아니라, 전문가의 역량 편차에 따라 해석이 달라지는 일도 줄어들 것이다.

이에 따라 위성영상 R&D 과제는, 위성영상 기반 핵활동 변화탐지 알고리즘을 개발하고 ‘변화 후보영역’을 영상 판독가에게 제공하여 육안 판독을 지원하고 효율화하는 것을 목표로 한다. 변화 후보영역을 도출하는 기술로 화소-객체 기반 융합 변화탐지 알고리즘을 개발하였다. 화소 기반 변화탐지 알고리즘의 대표적인 단점인 ‘흠뻑러진 화소 현상(미세한 변화 영역이 여기저기 퍼져있는 현상)’을 보완하고자 주변의 유사한 화소를 병합하는 객체화 기법을 추가로 적용하는 연구를 완료하였으며, 미탐지와 오탐지³⁾를 줄이는 연구가 추가로 진행 중이다.

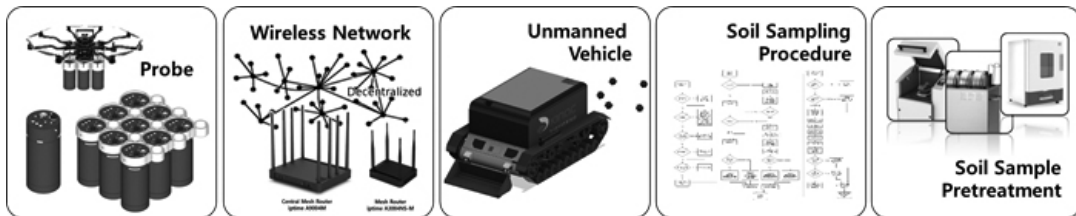
[시료 채취·운반] 미신고지역에서의 환경시료 채취

채취 시료의 분석을 통한 비핵화 검증은 신고서 검증과정의 핵심적 요소이다. 시료의 정확한

3) 실제 변화객체를 탐지하지 못한 오차인 ‘미탐지’와 실제 변화하지 않은 객체를 변화객체로 잘못 탐지한 오차인 ‘오탐지’로 구성된 혼동행렬(confusion matrix)을 활용하여, 변화탐지 알고리즘의 성능(정확도)을 평가할 수 있다.



[그림 3] 핵활동 육안판독의 대상 위성영상(상단)과 변화 후보영역(하단) 예시



[그림 4] KINAC에서 개발 중인 시료채취 관련 기술

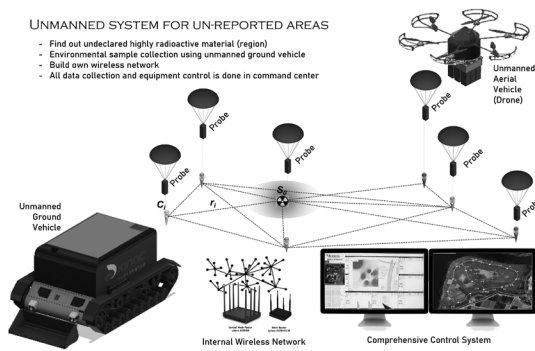
분석을 위해서는 필연적으로 올바른 절차에 따른 합리적인 시료채취 및 운반 기술이 동반되어야 한다. 신고지역에서의 공정시료 및 환경시료 채취는 IAEA가 오랜 시간 관련 기술을 개발하여 보유 중이고 이를 토대로 국내 원자력 시설 검증에도 활용하고 있다. 따라서 통제기술원은 미신고지역에서 시료를 채취하고 운반하기 위한 필요기술 위주로 연구개발을 진행 중이다.

비핵화 검증 시 시료를 채취하고 운반하는 기술로서 [그림 4]와 같은 무인 지역 방사선량 측정장치, 자체 무선망, 지상이동형 무인체, 채취 및 이송 절차, 보안 시료 전처리시설 등 기술개발을 진행 중이다.

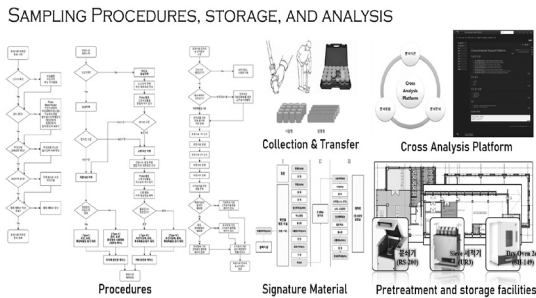
미신고지역에서의 성공적인 시료채취를 위해서 국내 환경과 다른 다양한 요소가 고려되어야 한다. 미신고지역은 일반적으로 해당 지역의 시료채취가 민감할 가능성이 높다. 따라서 협의 시 채취기간이 넉넉하게 확보될 가능성이 낮다. 또한 대상지역은 사회기반시설(전기, 수도, 통신, 도로 등)이 갖추어지지 않을 가능성이 있기 때문에 자체적인 전력, 통신을 공급하기 위한 방안을 마련해야 한다. 이에 더불어 작업자의 작업환경 측면에서 미신고지역은 방사선 관리가 되지 않는다고 판단할 수 있으며 작업자가 들어가서 작업할 수 없을 만큼 지역방사선량이 높을 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 사찰지역 내

방사선량을 빠르게 측정 및 확보하여 필요시 무인장비를 활용할 수 있는 방안을 마련해야 한다. 이는 작업자의 보호와 함께 인적 자원의 한계를 극복할 수 있는 방안이 될 수 있다(그림 5).

마지막으로 샘플의 이송 및 보관 과정에서 의도적인 시료의 오염 및 훼손될 가능성이 있으므로 이를 대비할 수 있는 방법을 연구 중이며, 작업자 간 편차를 줄이기 위한 절차서 연구도 진행 중이다. 이에 더불어 분석 정확성 확보를 위한 교차분석 지원 프로그램과 시료전처리 및 보관 전용 시설도 필요하다(그림6).



[그림 5] 현장 검증을 위한 무인 측정 시스템



[그림 6] 채취 절차, 운반체 및 분석 체계

[Physical Model] IAEA의 Physical Model과 KINAC Physical Model

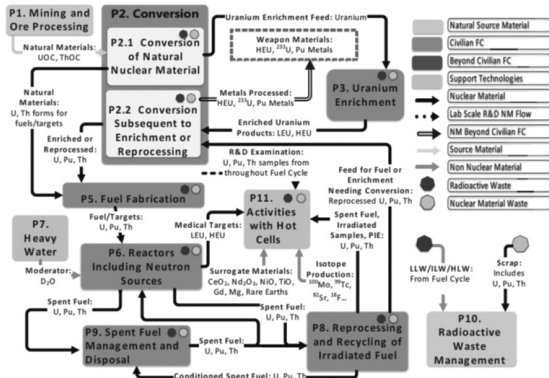
B. D. Boyer 등은 그들의 논문에서 IAEA의 Physical Model을 “a living encyclopedia”로 소개하고 있다⁴⁾. 실제로 IAEA Physical Model은 여러 권의 책인데 [그림 5]에 소개된 것과 같이 핵주기의 흐름을 따르도록 구성되어 있고 사찰관들이 회원국의 핵물질 악용 가능성(무기로의 전용 등)을 평가할 수 있도록 시설에 대한 다양한 지식들을 담고 있다.

IT system을 이용한 업무의 상향 평준화는 IAEA의 경우에도 마찬가지로, 그들은 이제 국가 내 핵물질의 흐름을 Sankey Diagram으로 만드는 기능을 갖춘 SW system도 Physical Model로 통칭하고 있다. 앞서 소개한 B. D. Boyer 등이 굳이 “living”이라는 표현을 쓴 것도 이 이유라고 짐작된다. 즉 IAEA의 Physical Model은 모델링 과정에 사용되는 실물 모형도 아니고 단순 책자도 아니며 이 모든 기능을 담은 ‘살아있는 백과사전’인 셈이다.

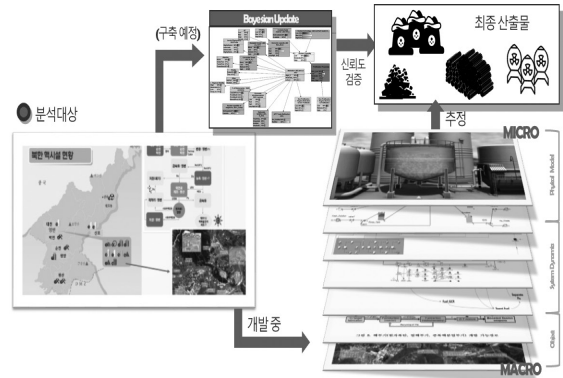
KINAC의 Physical Model 역시 비핵화 검증에서 현장 사찰 결과나 사전 추정치를 계산할 수 있는 도구로 기획 중인데 현재 시점에서 다음과 같이 IAEA의 Physical Model과 차이점을 가진다(그림 8).

먼저, 분석 대상이 다르다. IAEA는 전 세계의

4) B.D. Boyer et al., “The IAEA’s Physical Model : Fine Tuning Nuclear Fuel Cycle Understanding for Robust State-Level Safeguards”, JNMM 2018 Vol. XLVI, No.3.



[그림 7] IAEA Physical Model의 각 볼륨별 흐름도



[그림 8] KINAC Physical Model의 개념도

맺음말

회원국을 대상으로 해야 하지만 KINAC은 비핵화 대상국을 지정한 상태에서 설계가 진행되었다. 핵주기 시설을 중점적으로 모델링하는 핵주기 물질흐름 계산 기능을 가진다는 점에서는 공통점을 가지지만 KINAC Physical Model은 일반 제조 공정의 Discrete Event Modeling⁵⁾을 결합시키는 점에서 차별화된다. 또한 원자로의 노심 연소를 모델링할 수 있는 기능을 포함시키고자 계획 중이며, 계산된 핵주기 물질 흐름에 대한 신뢰도를 제공하기 위해 베이지안 네트워크⁶⁾를 결합시킬 계획이다.

물질 흐름을 종합적으로 볼 수 있는 조감도를 만든다는 점에서 IAEA의 Physical Model과 같은 지향점을 가지고 있지만, KINAC은 micro-level에서 macro-level에 이르기까지 계산 도구로서의 기능을 더욱 높은 우선순위에 두고 개발을 진행하고 있다.

이상으로 3가지 기술분야별로 비핵화 검증과 관련된 KINAC의 연구개발 과제를 간략히 살펴 보았다. 전술한 바와 같이 각 기술들은 일정한 전문성을 담보하여 담당 전문가가 바뀌더라도 유사한 수준의 업무 품질과 업무 효율성을 갖추는 것이 궁극적인 목표이다.

미국 바이든 행정부의 출범 이후, 과거 트럼프 행정부에서와 같은 비핵화의 진전은 보이지 않고 있다. 그러나 서두에서 설명하였듯이 비핵화의 정치외교적인 상황과는 별개로 기술적 현안들은 핵비확산의 본질적인 문제들과 크게 다를 것이 없으며, 따라서 환경 변화에 따라 변동되지 않는다. 향후에라도 우리나라가 비핵화 상황에서 한 몫을 하고자 한다면, 앞서 설명한 기반기술들은 협상을 유리하게 끌고 갈 카드가 될 것이다. **KAIF**

5) DEM으로 줄여 쓰기도 한다. 우리말로 이산사건 모델링 또는 연속사건 모델링 등으로 부를 수 있다. 불연속적으로 발생하는 일련의 이벤트를 기준으로 모델링하는 것으로 조립공정 또는 라인공정 등 연속 공정 이외의 제조 공정을 묘사하는 데에 널리 쓰이고 있다.

6) Bayesian Network, 베이지안 확률론을 이용한 방법론으로 보통 데이터가 부족한 현상에 대해 원인을 추정하기 위해 적용하는 사례가 많다. KINAC Physical Model에서는 현상 상황이 바뀔 경우 신뢰도 계산을 빠르게 업데이트할 수 있는 목적으로 활용할 예정이지만, 다양한 추가 연구를 모색하고 있다.