

북한 우라늄 농축시설로 인한 한반도에서의 공기중 우라늄 입자 농도 예측

곽성우, 강한별, 신중기, 이정현
한국원자력통제기술원

2014년 6월 13일 접수 / 2014년 7월 30일 1차 수정 / 2014년 7월 30일 채택

북한 우라늄 농축 시설은 국내외적으로 심각한 위협중 하나이다. 특히 우리나라 입장에서는 국가 안보에 관련된 사안 이므로 항상 주시하고 대비를 하여야 한다. 북한 미신고 우라늄 농축시설 탐지 가능성을 평가하기 위해 시설로부터 장·단거리에 따른 공기중 우라늄 농도를 예측하였다. 북한 농축시설에 대해 국제 사회에 알려진 정보와 다른 국가의 농축 시설 운영 데이터를 근거로 북한 시설로부터 공기중으로 누출되는 UF₆ 선원향(source terms)을 계산하였다. 계산된 선원향과 영변 주변 기상 자료를 바탕으로 장·단거리 대기 확산 모델 - Gaussian Plume and HYSPLIT Models - 을 이용하여 북한 농축시설 주변과 멀리 떨어진 남한 지역에서의 공기중 우라늄 농도를 결정하였다. 최대 공기중 우라늄 농도와 위치는 기상 조건과 방출 높이에 따라 시설 바로 근처와 0.4 km 이내 이고, 농도 약 1.0×10^{-7} g·m⁻³로 나타났다. 본 논문의 가정을 적용하였을 때, 수 십 μ g 정도의 우라늄 샘플을 채취할 수 있을 것으로 나타났다. 이 수십 μ g 우라늄 양은 현대 측정 장비로 어려움 없이 측정 가능한 양이다. 반면에 영변 농축시설로부터 수 백 km 이상 떨어진 남한 지역의 농도는 $1.0 \times 10^{-13} \sim 1.0 \times 10^{-15}$ g·m⁻³이하로 자연 방사성 우라늄 농도보다 낮은 값이다. 따라서 본 논문에 의하면 북한 영변 농축시설 주변에서 공기포집에 의한 신고 및 미신고 핵활동 탐지는 가능하지만 장거리에서는 불가능할 것으로 예측된다.

중심어 : 우라늄 농축 시설, 핵물질, 원심분리법, 안전조치 검사, 미신고 핵활동, 육불화 우라늄

1. 서론

북핵은 국가 안보에 관련된 사항이므로 일어날 수 있는 다양한 가능성에 대해 항상 대비를 하여야 한다. 현재 북한은 확인된 영변 농축 시설외에도 다른 시설을 운영하고 있는 것으로 의심을 받고 있다. 2010년 11월 미국 헤커 박사에 의해 북한 우라늄 농축시설 실체가 처음으로 알려졌다[1]. 가스 원심분리를 이용한 우라늄 농축시설은 시설이 작고 독특한 특징이 없기 때문에 위성 영상으로 일반 시설과 구별하기가 어렵다[2]. 또한 대기압 이하에서 운전되기 때문에 우라늄 가스 누출도 매우 적은 것으로 알려져 있다. 그래서 수 백 km 떨어진 지점에서 가스 원심분리 농축시설을 탐지할 수 있는 검증된 기술은 현재까지 개발되지 않고 있다. UF₆ 변환 시설(conversion facility)은 우라늄 농축을 위한 필수 시설이기 때문에 농축 시설을 운영하고 있다는 것은 반드시 어딘가에 UF₆ 변환 시설도 구비하고 있음을 의미한다[2]. 가스 원심분리 농축시설에 비해 UF₆ 변환시설은 대기압에서 운전되기 때문에 누출되는 UF₆ 가스가 상대적으로 많은 것으로 알

려져 있다. David Albright와 Lauren Barbour 그리고 IAEA는 농축 프로그램에 따른 최적 UF₆ 누출 가정치(25 kg·yr⁻¹의 고농축우라늄을 생산하는 시설이라고 가정)를, 가스 원심분리법은 1 kg·yr⁻¹, 가스 확산법은 4 kg·yr⁻¹, 그리고 UF₆ 변환 시설은 5 kg·yr⁻¹로 제시하였다[3,4]. 따라서 누출이 적은 농축시설을 직접 탐지하기 보다는 부대 시설인 UF₆ 변환 시설을 탐지하는 것이 효과적이다. 본 논문의 목적은 북한 미신고 핵활동을 탐지하기 위해 공기중 우라늄 농도와 선원향을 예측하는 것이다. 그리고 장·단거리에 따라 누출 우라늄 탐지 가능성도 분석하였다. 북한 영변 우라늄 농축 시설 주변에 UF₆ 변환 시설이 운영되고 있다는 가정하에(실제로는 서로 다른 지역에 위치할 수 있음) 주변으로부터 단거리와 장거리에 따라 한반도에서의 공기중 우라늄 입자(UO₂F₂) 농도를 계산하였다.

본 논문은 크게 5 부분으로 구성되어 있다. 1절은 서론, 2절은 북한 우라늄 농축 시설에 대해 간략히 설명한다. 3절에서는 북한 농축 시설에 대한 알려진 정보와 국외 우라늄 농축시설의 과거 운영 데이터를 이용해서 UF₆ 변환 시설의 공기중 누출량, 즉 선원향을 계산하였다.

교신저자 : 곽성우, swkwak@kinac.re.kr
대전시 유성구 유성대로 1534(화암동 58-3번지)



Fig. 1. Nuclear facilities of North Korea located at Yongbyon[5].

4절에서는 장·단거리 확산 모델(Gaussian Plume 과 HYSPLIT 모델)을 이용하여 농축시설 근처와 남한 지역에서의 공기중 UO_2F_2 농도를 계산하였다. 5절에서는 단거리와 장거리에 따라 탐지 가능성에 대해 논한다.

2. 북한 우라늄 농축 시설

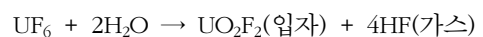
북한은 1959년 구 소련과 『원자력의 평화적 사용에 관한 협정』을 체결하였고, 이 협정하에 얻은 기술 지원과 자체 연구를 통해 핵 프로그램을 진행시켜 왔다. 우라늄 광산과 정련 시설을 제외한 중요 핵심 시설은 평안북도 영변의 원자력연구센터내에 위치해 있다. Fig. 1은 영변에 위치한 북한의 주요 원자력 시설을 보여 준다[5]. 북한이 비밀리에 우라늄 농축 프로그램을 추진하고 있다는 의혹이 1990년대 후반부터 꾸준히 제기되어 왔으나 북한은 이를 일관되게 부정해 왔다. 그러던 중, 2009년 4월에 북한은 처음으로 공식적으로 농축 프로그램 추진 가능성을 시사했고, 2010년 11월 지그프리트 헤커 박사가 포함된 전문가단에게 영변의 농축시설을 공개했다(북한은 헤커 박사 일행의 방문 수 일전에 운전을 시작했다고 언급함)[6]. 북한의 주장과 관련 전문가들의 의견에 의하면, 북한 농축시설은 약 2,000개의 P-2 형 원심분리기가 6개의 캐스케이드(cascade)를 이루며 2개의 구역으로 나누어져 있다. 시설 용량은 $8,000 \text{ kg-SWU}\cdot\text{yr}^{-1}$, 생산품(product)과 잔류물(tail)의 농축도는 평균 3.5 % (2.2 ~ 4 %)와 0.27%이고, 실험용 경수로 핵연료 제조를 위한 저농축 우라늄 생산이 목적이라고 북한은 밝혔다[6].

북한의 원심분리 농축시설은 우라늄 정광(yellow

cake, U_3O_8)이 변환 시설(conversion facility)에 의해 변환된 육불화우라늄(UF_6)을 원심분리기를 이용해 ^{235}U 비율을 증가시킨다. 따라서 영변 농축시설은 우라늄 농축활동을 위해서는 U_3O_8 로 존재하는 우라늄을 UF_6 로 변환하는 시설이 반드시 필요하다. 북한은 2010년 헤커 박사에게 우라늄 농축을 위한 UF_6 를 자체적으로 생산하고 있다고 밝혔다. 그러나, 북한의 육불화우라늄 생산시설, 즉, 변환시설의 소재 및 규모는 아직까지 알려진 바 없다. 북한은 북한의 플루토늄 생산로인 5 MWe 흑연로에서 사용되는 핵연료봉을 생산하기 위해 이산화우라늄(UO_2)을 사불화우라늄(UF_4)으로 변환하는 공정을 영변 핵연료가공공장에 이미 보유하고 있는데, UF_4 를 UF_6 로 변환하는 불소화공정 하나를 추가하면 UF_6 생산이 가능하며, 이는 기술적으로 어렵지 않다고 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 북한 농축시설 주변에 UF_6 변환시설이 위치하고 있다는 가정하에 연구를 수행하였다.

3. 선원항 (Source Terms)

UF_6 변환 시설은 농축 시설과 달리 대기압에서 운전된다. 그래서 UF_6 는 시설의 유지 및 보수, 정상 운전중 시설 파이프 혹은 이음새, 잔류물 기화등과 같은 방식에 의해 누출되고, 누출 시나리오에 따라 기체, 액체, 혹은 고체 형태이다. 액체나 고체는 상온에서 곧 바로 기화된다.



누출된 UF_6 는 공기중에서 위와 같이 수분(water

vapor)와 반응해서 uranyl fluoride(UO₂F₂)와 불화수소(HF)를 생성한다. HF 가스도 대기중 수분과 반응해서 HF·H₂O를 형성한다. HF 가스는 불안정하고, 일반 산업 시설에서도 많이 누출되기 때문에 농축시설 탐지를 위한 표지(indicator) 물질로 사용될 수 없다. 반면에 UO₂F₂는 안정한 물질이고, 일반시설에서는 누출되지 않기 때문에 농축시설 탐지를 위한 표지 물질로 사용된다[8]. 대기중 UF₆는 UF₆ plume을 형성해서 이동하면서 UO₂F₂로 변환된다. UO₂F₂는 상당히 안정적이기 때문에 상온상압 하에서 에어졸(aerosol) 형태로 존재한다. UF₆ plume의 특징은 대기중의 화학반응율, 승화율, plume내에 존재하는 UO₂F₂와 HF의 양, 주변의 대기 변수(풍속, 지형)등의 상호 작용에 의해 결정되며, 그 농도는 확산(diffusion)에 의해 점차 감소한다.

원심분리 농축시설 혹은 변환 시설의 탐지를 위해서는 정확한 선원항(source terms)을 알아야 한다. 비록 대기압 이하에서 운전되지만 소량의 UF₆가 농축시설에서도 누출되는 것으로 알려져 있다. 그러나 그 양이 너무 작아서 시설 탐지에는 활용되지 못하고 대신에 농축 공장의 필수 시설인 UF₆ 변환 시설에서 누출되는 UF₆가 이용된다. 시설 주변 주민들의 방사선량 평가를 위해 측정된 값으로부터 역으로 계산된 UF₆ 누출량을 R. Scott Kemp는 정리하였다[2,9]. Table 1은 생산된 UF₆ 1 kg 당 누출량을 보여준다. 미국 Oak Ridge에 위치한 K-25 부지의 K-1131 빌딩으로부터 UF₆ 누출량은 다른 시설에 비해 상당히 많은 것으로 알려져 있다. 반면에 Cameco사 Port Hope 그리고 AREVA사 Comurhex Pierrelatte 시설은 누출을 관리를 잘하는 시설로 인정받고 있다. Table 1에서 알 수 있듯이 시설에 따라 누출량은 큰 차이를 보인다. K-25 부지 누출량이 일반적 변환 시설의 누출량을 대표한다고 할 수 없으나 기술이 낙후된 북한과 같은 시설은 대표할 수 있다고 판단된다. 그래서 북한 시설 주변에서의 우라늄 입자 농도 계산에 필요한 누출율은 미국 K-25 사이트 값을 사용하였다. 즉 북한 UF₆ 변환 시설에서 생산된 UF₆ kg 당 0.24 g의 UF₆가 방출된다고 가정하였다.

Table 1. Release Rate of Commercial UF₆ Conversion Plants[1,7].

시설명	누출율(g · kg ⁻¹ ·UF ₆)
U.S. K-25 site (Building K-1131)	0.24
U.S. Honeywell Metropolis	0.01645
Cameco's Port Hope	0.00365
AREVA's Comurhex Pierrelatte	0.00011

UF₆ 변환 시설을 운영함에 따라 대기 중으로 누출되는 UF₆ 양을 결정하기 위해서는 시설의 UF₆ 생산량을 알아야 한다. 북한에서 운영하고 있는 UF₆ 변환 시설에 의해 생산된 양은 북한의 주장과 2010년 헤커 박사 일행에 의해 알려진 정보를 이용하여 계산하였다. 이와 같이 주어진 정보에 의하면 3.5% 농축도를 가진 우라늄은 매년 1,736 kg를 생산할 수 있음을 알 수 있다. 3.5% 우라늄

1,736 kg·yr⁻¹를 생산하기 위해서는 천연 농축도(0.72%) UF₆ 18,800 kg·yr⁻¹이 필요하다. 따라서 만약 북한 시설이 미국의 노후화된 시설 K-25 수준의 누출율을 가진다고 가정하면 매년 약 4,512 kg(또는 12.36 g·day⁻¹) 정도의 UF₆가 대기중으로 누출될 것으로 예상된다. 누출된 UF₆는 다시 공기중 수분과 반응해서 UO₂F₂ 에어졸로 존재한다. UO₂F₂를 포집해서 그 농축도를 측정함으로써 현재 운영되고 있는 시설이 국제 사회에 신고한 내용에 따라 우라늄 농축을 수행하고 있는지 혹은 신고하지 않은 시설에서 비밀리에 우라늄 농축 프로그램을 가동하고 있는지를 판단할 수 있다. 서론에서 언급한 바와 같이, David Albright등은 선원항 계산을 위한 UF₆ 변환 시설의 최적 누출 가정치로써 최대 10 kg·yr⁻¹, 최소 0.2 kg·yr⁻¹, 평균 5.0 kg·yr⁻¹를 제시했다. David Albright등의 논문은 고농축도 우라늄 25 kg·yr⁻¹ 생산 시설을 기준으로 하고 있지만, 북한 시설과 같은 농축도(3.5%)를 가진 우라늄을 생산한다면, 논문에서 제시한 생성량과 비슷할 것으로 예상된다. 기존 문헌에서 제시한 5.0 kg·yr⁻¹과 본 논문의 4.5 kg·yr⁻¹는 유사하므로 본 논문에서 의해 예측된 값은 타당하다고 본다.

4. 장 · 단거리 확산 모델을 이용한 공기중 우라늄 농도 예측

4.1 근거리에서의 공기중 우라늄 농도

우라늄 농축 시설 주변에서의 공기중 UO₂F₂ 농도 계산은 HotSpot 3.0 코드를 이용하였다. HotSpot 3.0 코드는 방사성물질과 관련된 사고 발생 초기에 신속한 사고 영향 평가를 수행하기 위해 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서 개발된 보건물리(health physics) 코드이고, 계산 모델로써 explosion, fire, resuspension, 그리고 plume을 제공한다[10]. HotSpot 3.0 코드는 간단한 Gaussian Plume Model을 채택하며 단거리(10 km 이내)와 단시간(몇 시간 이내) 방출 거동 해석에 적합하다. 본 연구의 목적은 농축 시설 근거리 주변에서 우라늄 농축도를 포집하고 분석하기 위한 연구이므로 HotSpot의 목적과 부합한다. 방출 선원, 방출 시나리오, 그리고 기상 데이터가 정확하지 않은 상황에서 복잡하고 방대한 정보를 필요로 하는 수치 모델은 간단한 Gaussian 모델 보다 더 큰 오차를 유발하는 것으로 알려져 있다[10].

누출된 우라늄 입자에 대한 거동을 결정하는 가장 중요한 인자는 기상 데이터 이다. 북한 영변 농축시설 주변에서의 바람의 방향성을 알아보기 위해 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 영변 농축 시설을 중심으로 2013년 1년 동안의 기상데이터(GDAS 0.5-deg 3H)를 분석하였다. Fig. 2는 농축시설 주변에서의 1년 동안 풍향 비율을 보여 준다. Fig. 2를 보면 풍향비율이 SSE, S, SSW, SW만 약간 낮을 뿐 대체적으로 비슷한 분포를 보여주고 있다. 그래서 농도 측정 위치는 어떤 특정한 한 방향을 설정할

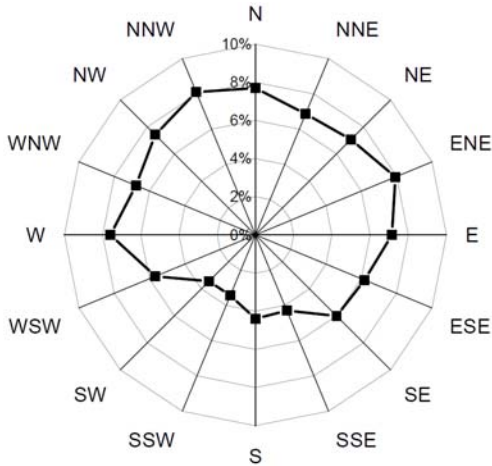


Fig. 2. Distribution of wind direction at Yongbyon uranium enrichment facility of North Korea.

필요는 없고 16 방향중 어느 방향이라도 가능함을 확인할 수 있었다.

북한 농축시설의 가스 배출 시설에 대한 정보는 알려져 있지 않기 때문에 환경영향 평가 시 일반적으로 사용하고 있는 배출 높이는 10 m로 가정하였다. 즉, UF_6 가스가 10m 높이에서 $6,410 \text{ Bq}\cdot\text{hr}^{-1} (=12.36\text{g}\cdot\text{day}^{-1})$ 방출되고, 측정 지점은 지상으로부터 1.5 m라고 가정하였다. 사람의 호흡은 평균적으로 1.5 m 높이에서 이루어지기 때문에 방사성 위험도 평가에 관한 국내의 보고서는 대부분 1.5 m 높이에서 측정이 이루어진다고 가정하고 있다. 따라서 본 논문에서도 측정 위치를 1.5m로 하였다. 또한 측정 지점을 1.0 m와 1.5 m로 비교하였을 때도 그 결과 (Fig. 3)는 거의 같았다. 침적속도(deposition velocity)는 공기중 UO_2F_2 입자 사이즈가 미세하기 때문에 R. Scott Kemp 논문에서와 같은 $0.1 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 을 사용하였다[2]. 정확한 데이터 부재 때문에 침적속도에 따른 영향을 알아보기 위해 민감도 테스트 수행하였는데, 침적속도가 $0.0 \sim 1.0 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 에서도 결과 값에는 변화가 없었고 다만 10

이상일 때부터 장거리에서 조금씩 영향을 미치기 시작했다. HotSpot 의 sampling time은 $1 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 속도를 가진 plume이 근처를 충분히 통과할 수 있도록 1 시간으로 설정하였다. HotSpot에서 제공한 모델중 “General Plume”을 사용했다. Fig. 3은 3 가지 다른 대기 안정도 조건하 (Very Unstable(매우 불안정:A), Neutral(중립:D), Moderately Stable(매우 안정:F)에서 방출 거리에 따른 공기중 우라늄 입자 농도를 보여준다. Fig. 3으로부터 기상 조건에 따라 최대 농도 지점이 다르고, 농도는 $1.0 \times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 정도 됨을 알 수 있다. 즉, 만약 대기안정도가 Very Unstable(A) 조건이면, 시설 바로 옆, Neutral(D) 조건이면 농축 시설로 부터 0.1 km 지점, 그리고 Moderately Stable(F) 인 경우는 0.4 km 지점에서 가장 효과적으로 우라늄 입자 포집 혹은 측정을 수행할 수 있음을 알 수 있다. 최대 농도 지점은 기상 조건 뿐만 아니라 방출 높이에도 영향을 받는다. 0.1 km와 0.4 km 위치는 방출 위치가 10 m 일 때의 경우이고, 만약 다른 높이에서 UO_2F_2 가 방출되면 최대 농도와 위치도 변화할 것이다. UO_2F_2 plume이 0.1 km 까지 도달하는 데는 1 분, 0.4 km는 6 분이 소요되는 것으로 나타났다. 수 km 까지 plume이 도달하는데 짧은 시간이 소요되기 때문에 샘플 채취는 언제든지 간단히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 장거리에서의 공기중 우라늄 농도

장거리에 따른 우라늄 농도 계산은 HYSPLIT 4(HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다. HYSPLIT는 미국 NOAA와 호주 기상청이 공동으로 개발한 장거리 대기확산모델이다[11]. 이류와 확산은 라그랑지안(Lagrangian) 방법, 농도는 고정 격자에서 puff나 입자의 이동과 확산을 계산하는 오일러리안(Eulerian) 방법을 채택하고 있다. 기상 데이터는 미국 NOAA에서 제공하는 0.5 도 분해능(50 km 간격)을 가진 GDAS 0.5-deg 3H를 이용하였다.

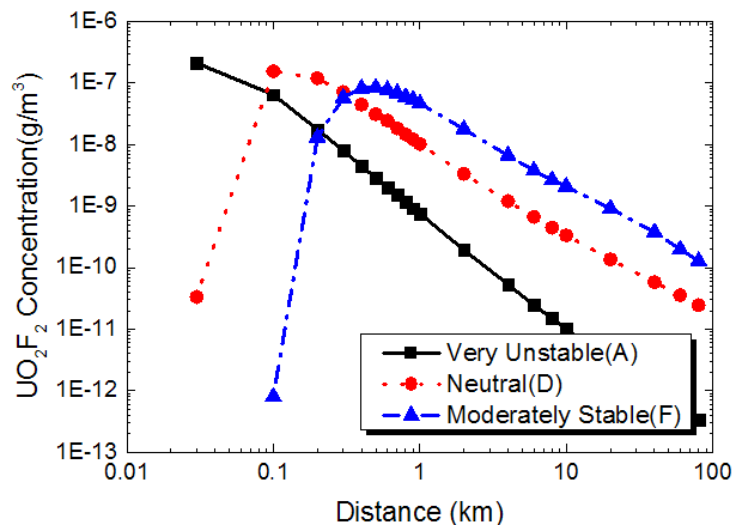


Fig. 3. UO_2F_2 concentration($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) according to a distance from a release point under different atmospheric stability conditions.

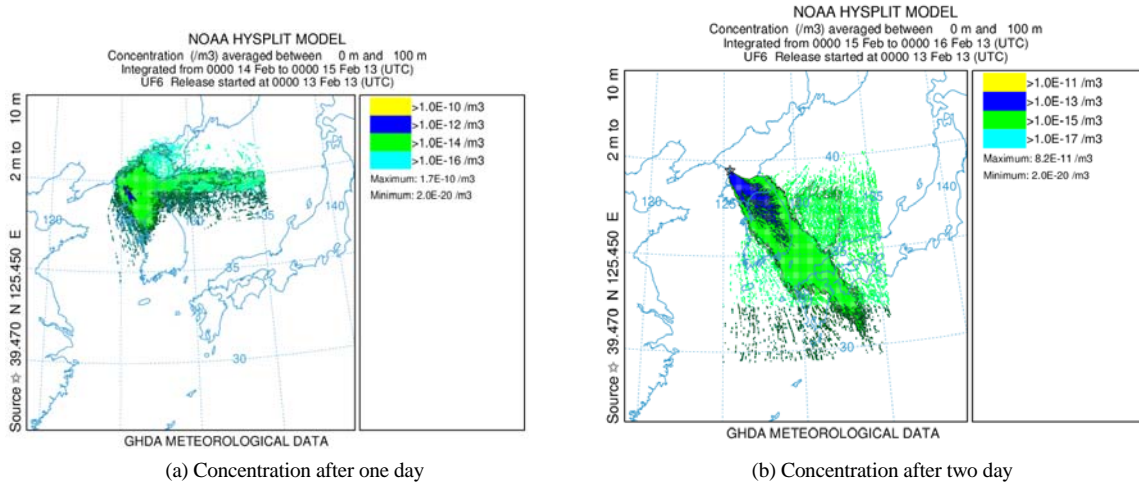


Fig. 4. UO_2F_2 concentration($g\cdot m^{-3}$) at one and two days after UF_6 release.

2013년 1년 중에서 주풍하방향인 남쪽인 2월 13일 - 2월 15일 기간 동안 $0.5151\text{ g}\cdot\text{hr}^{-1}$ ($=12.36\text{ g}\cdot\text{day}^{-1}$)로 UF_6 가 방출된다는 가정 하에 계산하였다. UF_6 방출은 지상에서부터 10 m 사이에서 일정하게 방출되고, 침적속도는 단거리 모델에서와 같은 $0.1\text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 로 가정하였다. 누출 방식은 2월 13일 00:00시부터 2월 15일 24:00까지 지속적으로 누출된다. 2월 13일 이후에 누출된 우라늄 입자가 남한 영역에 충분히 도달할 수 있도록 측정 시작은 하루가 경과한 2월 14일과 2월 15일로 설정하였다. Fig. 4는 2013. 2.14일과 15일 각각 하루 동안(24 시간) 공기중 농도를 평균한 값이다. Fig. 4는 plume 중심이 누출 후 1일 지나서는 누출 지점으로부터 약 50 km, 2일 후에는 100 ~ 200 km까지 도달함을 보여준다.

Fig. 4에 의하면 누출 후 2일이 경과한 후, 북한과 경계(휴전선)를 이루고 있는 지점에서는 공기중 농도가 $1.0 \times 10^{-13} \sim 1.0 \times 10^{-15}\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이고 다른 지역은 $1.0 \times 10^{-15}\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이하이다. 이 값은 주변 방사능(background) 수준, 수 $10^{-11} \sim$ 수 $10^{-10}\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 보다 낮은 값이다[12]. 따라서 정상적으로 운전되는 북한 UF_6 변환 시설에서 누출되는 UF_6 양을 남한 지역에서는 포집해서 미신고 핵활동을 탐지하기는 어려울 것으로 예상된다.

5. 탐지 가능성 논의

측정 장치에 대한 최소 측정가능 방사능(minimum detectable activity, MDA)은 공기 포집 장치의 유량(flow rate), 포집 효율, 화학분리 회수율, 샘플 핵종의 양, 주변 방사능, 측정 시간에 의해 결정된다. 포집 장치 유량은 간단한 휴대형인 경우, 수 십 LPM(litter per minute)에서부터 대용량 고정형의 수 천 LPM까지 다양하다. 포집 시간에 따라 공기 필터에는 먼지(dust) 입자등과 같은 이물질이 흡착되어서 포집 유량은 서서히 감소하지만 본 논문에서는 일정하다고 가정한다. 참고로 한국원자력통제기술원에서 자체 개발된 공기포집장치를 시설 옥상에서 포집

실험을 하였을 때, 12시간 운전하면 공기 유량은 약 30% 감소하였다[1]. 포집 효율은 공기 포집 필터의 특성과 우라늄 입자의 사이즈에 따라 다르다. UO_2F_2 입자 사이즈는 누출 시나리오에 따라 $0.001 \sim 2.5\ \mu\text{m}$ 사이의 분포를 가진다[2]. UF_6 잔여물과 시설 밸브등에 침적되어 있는 UO_2F_2 는 서서히 기화되기 때문에 미세한 크기인 반면 사고시에는 급격히 기화되기 때문에 입자의 사이즈가 큰 것으로 알려져 있다. 연구자에 따라 따라 약간의 차이는 있지만 약 $1\ \mu\text{m}$ 를 UO_2F_2 평균 크기로 보고 있다[2]. 화학분리 회수율은 분리/추출 방법과 분석자의 숙련도에 따라 다르다. 본 논문은 Riekkinen I 등이 Kazakhstan 발전소 주변에서 수행한 현장 실험 결과 값, 78%의 회수율을 사용하였다[13]. 북한 UF_6 변환 시설 주변에서의 채취 가능한 샘플 양을 결정하기 위해 Table 2에 기술된 공기 포집 유량 및 포집 시간, 공기포집 효율, 그리고 화학분리 회수율을 값을 사용하였다.

Table 2. Parameters Used to Calculate an Amount of a Uranium Sample.

변수	값
공기포집장치 유량	1,000 LPM
공기 포집 시간	12 hr
UO_2F_2 입자 크기	1 μm
공기 필터 포집 효율	90%
화학분리 회수율	78%

HotSpot으로 계산한 농축시설 주변의 공기중 농도는 $1.0 \times 10^{-7}\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이다. 한전원자력연료(주)의 보고서에 의하면 핵연료 가공시설 주변의 ^{238}U 의 공기중 농도는 $1.17 \times 10^{-11} \sim 3.31 \times 10^{-10}\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이다[12]. 이 값은 자연 방사성 우라늄과 시설에서 누출된 우라늄을 포함하고 있지만 시설에서 누출된 양이 미미하기 때문에 자연 방사성 우라

1) 1 μm 입자에 대한 95% 포집 효율을 가진 필터를 이용하여 한국원자력통제기술원에서 자체적으로 수행한 실험 결과

높 준위라고 가정해도 무리는 없을 것으로 사료된다. 지역을 구성하는 지질 계통에 따라 어떤 지역은 한전원자력 연료(주) 보고서 값보다 더 클 수도 있다고 생각한다. 따라서 북한 우라늄 시설 주변의 농도는 자연 방사성 우라늄과 충분히 구별 가능한 높은 수준이다.

MDA는 또한 샘플 양에 따라 다르다. 특정 시간 동안 공기를 포집 하였을 때, 탐지 가능성을 평가하기 위해 채취 가능한 샘플의 양을 계산하였다. HotSpot으로 계산한 농도(Fig. 3)와 Table 2 값을 이용하면 약 65 μg 의 우라늄(U) 샘플 양을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 65 μg 우라늄은 정밀한 질량 분석기가 아니더라도 일반적인 알파선 계측장치로도 측정 가능한 양이다. 본 논문에서는 누출량이 많은 Oak Ridge K-site 값을 사용하였지만, K-25 시설 보다 1/100이하로 누출량을 잘 관리하는 Cameco's Port Hope의 값을 사용하더라도 샘플 양은 0.65 μg 로 이 값 또한 충분히 측정가능한 양이다. 따라서 UF₆ 시설 주변에서 공기를 포집하고 이를 이용한 미신고 핵활동 탐지는 가능할 것으로 판단된다.

HYSPLIT으로 계산한 남북한 경계 부분에서의 농도는 $1.0 \times 10^{-13} \sim 10^{-15} \text{ gm}^{-3}$ 이다. 이 값은 앞에서 언급한 바와 같이 주변방사능 공기중 농도, $1.17 \times 10^{-11} \sim 3.31 \times 10^{-10} \text{ gm}^{-3}$ 보다 훨씬 낮은 값이다. 누출된 우라늄 입자의 거동과 농도에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 바람의 방향이다. 본 논문에서는 보수적 계산을 위해 바람의 방향이 남쪽으로만 향하는 날을 선택했다. 그러나 실제적으로는 본 연구의 사례 처럼 바람장이 한쪽 방향으로만 계속적으로 형성되는 경우는 극히 드물고 수시로 변하기 때문에 남한 지역에서의 실제 공기중 우라늄 농도는 본 연구에서 계산된 값($1.0 \times 10^{-13} \text{ gm}^{-3}$) 보다 훨씬 낮은 것으로 예상된다. 따라서 농축시설로부터 수 백 km 떨어진 장거리에서 공기중 우라늄 입자를 포집해서 북한의 미신고 핵활동을 탐지하기는 어려울 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문은 북한 영변 우라늄 농축시설을 예로써 공기중 우라늄 입자를 포집해서 미신고 핵활동 여부를 결정할 수 있는지 여부를 분석하였다. 본 논문의 연구 결과에 의하면, 은밀히 숨겨진 의심 시설 주변에서 우라늄 입자를 포집하면 불법적 핵 활동 여부를 파악할 수 있지만, 수 백 km 떨어진 장거리에서는 불가능한 것으로 보인다. 1993년 북한의 출입 거부로 의심시설에 대한 특별 사찰이 이루어지지 못한 이후로 IAEA를 비롯한 국제 사회는 시설 접근 없이 해당 시설을 검증할 수 있는 기술을 개발 중이다. 이러한 상황 하에서 본 논문은 우라늄 농축 행위가 의심되는 의심시설을 출입하지 않고도 확인할 수 있는 하나의 방법을 제시했다.

감사의 글

본 연구는 한국방사선안전재단의 원자력안전연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Hecker SS. A return trip to North Korea's Yongbyon Nuclear Complex. CISAC, 2010.
2. Kemp RS. Initial analysis of the detectability of UO₂F₂ aerosols produced by UF₆ released from uranium conversion plants. Science & Global Security, 2008;16:115-125.
3. David A, Lauren B. Source terms for uranium enrichment plants. IAEA, 1997.
4. Wogman N. History of STR 321-IAEA use of wide area environmental sampling in the detection of undeclared nuclear activities. STR-321. IAEA, 2010.
5. UNSC. Report of the panel of experts established pursuant to resolution 1874. S/2014/147. UNSC, 2014.
6. 이정현, 박일진, 안진수. 북한의 핵 프로그램 검증. KINAC/TR-008/2011. 한국원자력통제기술원, 2011.
7. 이정현. 북핵 현안 분석. KINAC/TR-008/2012. 한국원자력통제기술원, 2012.
8. Bosenberg J, Kalinowski MB. Detecting atmospheric UF₆ and HF as indicators for uranium enrichment. International Network of Engineers and Scientists Against Proliferations(INESAP).
9. Kemp RS. Research note - source terms for routine UF₆ emission. Science & Global Security, 2010;18:119-125.
10. Homann SG, Fernando A. HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's guide. LLNL-SM-636474. Lawrence Livermore National Laboratory, 2013.
11. Roland D, Barbara S, Glenn R, et. al. HYSPLIT4 user's guide. NOAA, 2013.
12. 이익환. 원자력연료 가공시설 가동중 환경감시 보고서. KAERI/CR-330/2008. 한전원자력연료(주), 2008.
13. Riekkinen I, Jaakkola T, Pulli S, et. al. Analytical methods for wide area environmental sampling(WAES) for air filters. STUK-YTO-TR 184. STUK, 2001.

Estimation of Uranium Particle Concentration in the Korean Peninsula Caused by North Korea's Uranium Enrichment Facility

Sung-Woo Kwak, Han-Byeol Kang, Jung-Ki Shin, and Junghyun Lee
Korea Institute of Nuclear Nonproliferation And Control

Abstract - North Korea's uranium enrichment facility is a matter of international concern. It is of particular alarming to South Korea with regard to the security and safety of the country. This situation requires continuous monitoring of the DPRK and emergency preparedness on the part of the ROK. To assess the detectability of an undeclared uranium enrichment plant in North Korea, uranium concentrations in the air at both a short and a long distance from the enrichment facility were estimated. UF_6 source terms were determined by using existing information on North Korean facility and data from the operation experience of enrichment plants from other countries. Using the calculated source terms, two atmospheric dispersion models (Gaussian Plume Model and HYSPLIT models) and meteorological data were used to estimate the uranium particle concentrations from the Yongbyon enrichment facility. A maximum uranium concentration and its location are dependent upon the meteorological conditions and the height of the UF_6 release point. This study showed that the maximum uranium concentration around the enrichment facility was about $1.0 \times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. The location of the maximum concentration was within about 0.4 km of the facility. It has been assumed that the uranium sample of about a few micrograms (μg) could be obtained; and that few micrograms of uranium can be easily measured with current measurement instruments. On the contrary, a uranium concentration at a distance of more than 100 kilometers from the enrichment facility was estimated to be about $1.0 \times 10^{-13} \sim 1.0 \times 10^{-15} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, which is less than back-ground level. Therefore, based on the results of our paper, an air sample taken within the vicinity of the Yongbyon enrichment facility could be used to determine as to whether or not North Korea is carrying out an undeclared nuclear program. However, the air samples taken at a longer distance of a few hundred kilometers would prove difficult in detecting a clandestine nuclear activities.

Keywords : Uranium enrichment facility, Nuclear material, Centrifuge method, Safeguard inspection, Undeclared nuclear activity, Uranium hexa-fluoride(UF_6)