

입자상 기체유출물 환경배출 방사능 평가결과에 대한 불확도 해석

정재학

한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

radwaste@kins.re.kr

환경으로 배출되는 방사능을 평가하는 목적은 관련 규제제한치 만족여부와 안전 여유도 (Margin)를 확인하는데 있으며, 따라서 시설 운영자는 가능한 한 방사성물질의 환경배출량을 정확하게 평가할 필요가 있다. 방사성물질 환경배출량에 대한 정확한 평가를 위해서는 평가결과의 불확도(Uncertainty)에 대한 정량적인 평가를 통해 상대 불확도가 상대적으로 큰 부분을 개선하기 위한 노력이 필요하다.

미국 규제지침 Reg. Guide 1.21(1974), Reg. Guide 4.16(1985) 등에서는 원자력시설로부터 환경으로 배출된 방사성물질 수량을 보고할 때 계수 통계값(계수 오차의 표준편차)을 측정기록에 포함하고 총오차 또는 최대오차에 시료채취 및 측정작업 전반에 걸쳐 유발된 누적오차를 포함하도록 하고 있다. 한편 ANSI/HPS-N13.1(1999)에서는 기체유출물 시료채취 및 계측에 수반되는 계통오차 평가지침을 제시하고 있다.

이들 미국 규제지침과 산업기술기준에 제시된 관련 요건은 시료채취, 제조, 방사능 계측 등 환경배출 방사능 평가과정에 수반되는 전반적인 오차의 유발요인을 고려하여 평가결과에 내포된 총오차를 평가해야 한다는 것으로 정리할 수 있다. 그러나 실제 방사성물질의 환경배출량에 대한 참값을 알 수 없으므로 정확한 의미에서 “오차”를 평가하는 것은 불가능하며, 따라서 상기 문서에 제시된 요건은 평가결과에 대한 통계적인 “불확도”의 범위를 산출하라는 의미로 해석하는 것이 타당하다. 이에 따라 본 연구에서는 입자상 기체유출물 방사능 평가결과의 불확도를 평가하기 위한 일반화된 모델을 개발하여 가상적인 배출조건에 적용함으로써 단일 값으로 보고되고 있는 기체유출물 배출량의 불확도를 분석하고, 또한 개별 변수의 확률분포를 토대로 최종 배출방사능의 종합적인 확률분포를 시산하고자 한다. 이를 위하여 1995년 국제표준화기구(ISO: International Organization for Standardization)가 발간한 “측정에 수반되는 불확도 평가지침”에 따라 기체 방사성유출물에 함유된 입자상 핵종 방사능 평가결과의 불확도를 평가하였다.

국내 발전용원자로에서는 연속적으로 배출되는 기체폐기물에 대하여 입자시료를 연속적으로 채취하며, 1회/1주 주기로 포집매질을 수거하여 시료의 방사능을 분석하고 있다. 연속배출되는 기체폐기물에 함유된 입자상 핵종 방사능은 다음 수식을 통해 계산할 수 있다:

$$A_M = C_S \cdot V_M = A_S \cdot \frac{V_M}{V_S} ,$$

여기서, A_M = 환경으로 배출된 입자상 핵종의 방사능[Bq], C_S = 시료의 방사능 농도[Bq/m³], A_S = 시료의 방사능[Bq], V_S = 포집재를 통과한 시료의 체적[m³], V_M = 기체유출물의 배출체적[m³].

Table 1. 가상적인 기체유출물 배출조건

| 조건 | 변수 | 값(범위) | 비고 |
|-----------------|-------|---|------|
| 시료의 총방사능 측정결과 | A_S | $(1.0 \times 10^6) \pm (1.0 \times 10^7)$ Bq ($\pm 2\sigma$) | 측정기록 |
| 시료채취장치 유량률 | f_S | $(9.44 \times 10^{-4}) \pm (9.44 \times 10^{-5})$ m ³ /s | 설계값 |
| 배기팬 유량률 | F_M | $(1.84 \times 10^{+1}) \pm (1.84 \times 10^{+0})$ m ³ /s | 설계값 |
| 기체폐기물 시료채취 기간 | T_S | $(604,800) \pm (3,600)$ s | " |
| 기체폐기물 배기 기간 | T_M | " | " |
| 시료채취장치 유량률의 불확도 | - | $\pm 10\%$ (신뢰수준 : 95%) | 교정기록 |
| 배기팬 유량률의 불확도 | - | $\pm 10\%$ | 설계기준 |

위에서 언급한 불확도 평가방법론과 국내 발전용원자로의 일반적인 운영조건에 근거하여 Table 1과 같이 재구성한 가상적인 기체유출물 연속배출 조건을 기준으로 표준불확도와 합성표준불확도

를 평가하였다. Table 2는 수식 (2)에 포함된 개별 독립변수의 값, 불확도 및 상대표준불확도 평가결과를 보여주고 있으며, 이를 통해 가상의 조건에서 전체 평가결과에 미치는 불확도 유발인자의 상대적인 영향은 모집된 기체시료 체적, 배출기체 체적, 시료 총방사능 순서임을 알 수 있다.

Table 2. 배출방사능 평가인자별 불확도 요소

| 변수 | 기호 | 값 | 불확도, U(x _i) | 상대 표준불확도, U(x _i)/x _i |
|-------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 시료의 총방사능 | A _S | 1.0×10 ¹⁶ Bq | 5.1×10 ¹⁴ Bq | 5.10×10 ⁻² |
| 모집된 기체시료 체적 | V _S | 5.71×10 ¹² m ³ | 3.52×10 ¹⁰ m ³ | 6.17×10 ⁻² |
| 배출기체 체적 | V _M | 1.11×10 ¹⁷ m ³ | 6.45×10 ¹⁵ m ³ | 5.81×10 ⁻² |

가상적인 배출조건에서 입자상 핵종의 총배출방사능(A_M)은 다음과 같다:

$$A_M = (1.0 \times 10^{16} \text{ Bq}) \cdot \left(\frac{1.11 \times 10^{17} \text{ m}^3}{5.71 \times 10^{12} \text{ m}^3} \right) = 1.94 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

한편 Table 1에 제시된 가상적인 조건 하에서, 1주일 동안 연속배출된 기체유출물 시료채취 및 계측에 수반되는 합성표준불확도(Combined Standard Uncertainty)는 다음 수식으로 나타낼 수 있다:

$$\left(\frac{U_C(A_M)}{A_M} \right)^2 = \left(\frac{(1) \cdot U_C(A_S)}{A_S} \right)^2 + \left(\frac{(1) \cdot U_C(V_M)}{V_M} \right)^2 + \left(\frac{(-1) \cdot U_C(V_S)}{V_S} \right)^2$$

여기서, U_C(R) = 변수 R의 합성표준불확도.

따라서, 입자상 기체유출물 환경배출량의 합성표준불확도와 확장불확도는 각각 다음과 같다:

$$U_C(A_M) = (1.94 \times 10^{10} \text{ Bq}) \cdot \sqrt{(5.1 \times 10^{-2})^2 + (6.17 \times 10^{-2})^2 + (5.81 \times 10^{-2})^2} = 1.92 \times 10^9 \text{ Bq}$$

$$U_E(A_M) = (2) \cdot (1.92 \times 10^9 \text{ Bq}) = 3.84 \times 10^9 \text{ Bq}$$

본 연구에서는 기체상 입자핵종 환경배출량 평가결과의 확률분포를 해석하기 위하여 상용 평가 도구 Crystal Ball™에 포함된 Monte Carlo 모사법을 적용하였다. Fig. 1은 동 확률분포 평가결과를 보여주고 있다.

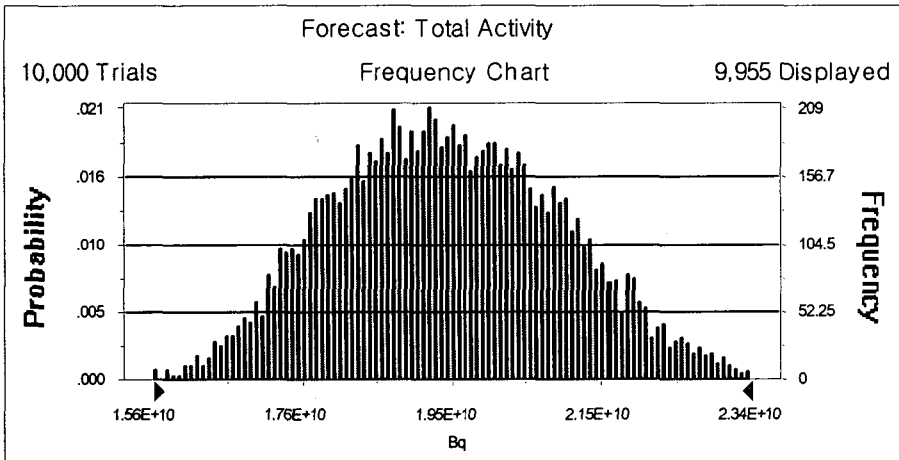


Fig. 1. 가상적인 조건에서 연속배출 기체유출물에 함유된 입자 방사능 평가결과의 확률분포

상기 평가결과는 환경배출 방사능을 단일 값으로만 고려해왔던 기존 관행에 개선의 필요성이 있음을 암시하고 있다. 또한 환경배출 방사능의 오차와 불확도에 대한 분석결과는 방사성유출물 관리의 품질제고 및 개별 원자력이용시설 환경배출 방사능의 제한치 대비 안전여유도에 대한 확률론적 평가 등 규제검증 목적으로도 활용될 수 있을 것이다.