

## 발전용원자로에서 뱃치방식으로 배출되는 액체상 방사성물질의 방사능 평가결과에 대한 불확도 해석

### Uncertainty Analysis of the Calculated Radioactivity in Liquid Effluent Released as Batch Mode from a Nuclear Power Plant

정재학, 박원재  
한국원자력안전기술원

#### 요 약

발전용원자로에서 뱃치방식으로 환경으로 배출된 액체유출물 내에 함유된 방사능 평가 결과에 오차를 유발하는 시료채취, 제조, 방사능 계측, 유출물 배출체적 측정 등 다양한 인자를 분석하였다. 환경배출 방사능 평가에 포함된 많은 인자들은 단일 측정에 의해 얻어지고 환경배출 방사능의 참값을 알 수 없음에 따라, 평가결과의 오차를 예측하는 것은 원칙적으로 불가능하다. 이에 따라 1993년 ISO가 권고한 측정의 불확도 표현지침에 근거하여 액체폐기물 배출방사능에 대한 불확도 평가모델을 수립하고 가상적인 조건에 대한 액체유출물 환경배출 방사능 평가결과의 불확도를 평가하였다. 그 결과, 액체유출물을 통한 환경배출 방사능 평가결과에 불확도를 유발하는 인자의 상대적인 기여도는 배출폐액의 체적, 시료의 체적, 총방사능 계측값의 순서를 갖는 것으로 나타났다. 또한 개별 변수의 확률분포와 특성값을 토대로 몬테칼로 모사법을 적용하여 최종 환경배출 방사능 평가결과의 확률분포를 해석함으로써, 지금까지 단일 값을 평가 및 보고되었던 발전용원자로의 액체상 방사성물질 환경배출량이 실제로는 일정한 확률분포를 갖고 있음을 확인하였다.

#### Abstract

A series of factors such as sampling, pretreatment, measurement, volume estimation which induces uncertainty of the calculated radioactivity in liquid effluent released from a nuclear power plant were analyzed. It is innately impossible to estimate exact error of the calculated radioactivity, since most of the input parameters are determined by a single measurement and true value of the released radioactivity cannot be known. In this paper, a systematic model to calculate uncertainty of the released liquid radioactivity was developed based upon the guidance report published by the ISO in 1993, and the model was applied to a set of hypothetical batch release conditions. As a result, the priority of each input parameter was turned out to be (1) wastewater volume, (2) sample volume, and (3) measured radioactivity of the sample. In addition, probability distribution of the released radioactivity was simulated by Monte Carlo method combining the probability distribution of each input parameter. It was shown that the radioactivity released to the environment, which has been reported as a single value, has a certain form of probability distribution.

## 1. 서 론

국내 원자력이용시설의 유출물관리에 관한 법적 제한치는 방사능 농도를 기준으로 한 배출관리기준과 소외 주민선량을 기준으로 한 설계목표치로 규정되어 있으며, 이러한 제한치 만족여부를 입증하기 위해 발전용원자로에서는 방사성유출물에 대한 연속감시 이외에도 유출물 시료에 대한 시료채취 및 방사능 분석을 수행하고 있다[1-3]. 환경으로 배출되는 방사능을 평가하는 목적이 규제제한치 만족여부와 안전 여유도(Margin)를 확인하는데 있음을 고려할 때 가능한 한 방사성물질의 환경배출량을 정확하게 평가할 필요가 있으며, 방사성물질의 환경배출량에 대한 정확한 평가를 위해서는 평가결과의 불확도(Uncertainty)에 대한 정량적인 평가를 통해 상대 불확도가 상대적으로 큰 부분을 개선하기 위한 노력이 필요하다. 그러나 지금까지 국내 원전에서는 방사성물질 환경배출량을 단일 값으로 보고하고 있으며 단일 값에 내재된 불확도에 대한 분석이 수행된 바 없다[4].

US NRC는 Reg. Guide 1.21(1974)에서 방사성물질 환경배출량 평가결과에 대한 총오차(Total Error)를 평가하도록 규정하였으며 이에 따라 대부분의 미국 원전에서는 총오차를 평가하여 그 결과를 매년 규제기관에 보고하고 있다[5,6]. Reg. Guide 1.21 Table 2A에서는 액체유출물 배출실적 보고와 관련하여 총오차 추정치를 보고하는 기본형식을 제공하고 있으며, 이에 따르면 보고대상 기간 동안 환경으로 배출된 방사능(핵분열 및 방사화 생성물, 삼중수소, 용존기체, 전알파), 배출폐액의 체적 및 희석수의 체적에 대한 총오차 추정값을 각각 보고하도록 권고하고 있다. 또한 동 지침 C.11.a(Errors in Measurements)에서는 계수 통계값(예; 계수 오차의 표준편차)을 측정기록에 포함하고 총오차 또는 최대오차에 시료채취 및 측정작업 전반에 걸쳐 유발된 누적 오차를 포함하도록 권고하고 있다. 그러나 Reg. Guide 1.21은 오차에 대한 상세한 통계적인 평가는 권고하지 않고 있으며, 그 이유는 최종 측정결과에 영향을 미치는 각각의 파라미터에 대하여 오차항을 지정하는 것은 매우 어렵기 때문이라고 밝히고 있다. 한편 Reg. Guide 4.16(1985)의 C.5.2(Errors Estimates)에서도 핵연료주기시설에서 환경으로 배출된 방사성물질의 수량에 대한 보고와 관련하여, 보고값에 오차에 대한 추정치를 포함하고 개별 측정결과에 계측의 우연오차를 나타내는 표준편차를 보고해야 하며, 계통오차에 대한 추정치는 별도로 보고하도록 요구하고 있다[7].

비교적 최근(1999년)에 발간된 ANSI/HPS-N13.1의 Annex E(Evaluating Effluent Sampling Errors and Uncertainty)에서는 기체유출물의 시료채취 및 분석에 수반되는 불확도 평가지침을 제시하고 있다[8]. 동 기술기준에서는 유출물 환경배출량평가에 수반되는 계통오차 평가식을 다음과 같이 제시하고 있다:

$$B_L = \sqrt{\sum_i B_{CAL}^2 + \sum_i B_{PAR}^2 + \sum_i B_{TST}^2}, \quad (1)$$

여기서,  $B_L$  = 95% 신뢰수준에서 총계통오차한계,  $B_{CAL}$  = 교정오차,  $B_{PAR}$  = 파라미터 오차,  $B_{TST}$  = 설계 및 시험오차.

미국의 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 엄밀한 의미에서 『오차』를 평가하는 것은 불가능하며, 따라서 동 규제지침에서 요구하는 총오차는 『오차』라기 보다 평가결과에 대한 통계적인 『불확도』의 범위를 산출하라는 의미로 해석되어야 한다[9]. 이에 따라 본 연구에서는 국내 발전용원자로의 액체유출물 배출에 의한 환경배출 방사능 평가결과의

불확도를 평가하기 위한 일반화된 모델을 개발하여 개상적인 배출조건에 적용함으로써 지금까지 단일 값으로 보고되고 있는 액체유출물 배출량의 불확도를 평가하고, 또한 환경 배출량 평가모델에 반영된 개별 변수의 확률분포를 토대로 최종 배출방사능의 종합적인 확률분포를 분석하고자 한다.

## 2. 측정 불확도 평가방법론 및 모델설정

1995년 국제표준화기구(ISO: International Organization for Standardization)는 측정에 수반되는 불확도 평가지침을 확정하였으며, 1999년 한국표준과학연구원은 이를 토대로 측정불확도 표현지침을 발간하였다[9,10]. 본 논문에서는 ISO의 불확도 평가지침을 기준으로 액체 방사성유출물에 함유된 방사능 평가결과의 불확도를 평가하기 위한 기본 방법론을 다음과 같이 도출하였다.

### 2.1 불확도 평가절차

1995년 발간된 측정불확도 평가지침을 통해 ISO가 제시한 불확도 평가방법은 다음과 같은 5단계 표준절차로 분류할 수 있으며, 단계별 평가절차는 다음과 같이 요약할 수 있다 [10,11].

우선 제1단계는 평가모델 수립단계이며, 직접 측정되지 않는 측정량(R)의 추정값(r)은 N개의 독립변수( $X_i$ )에 대한 추정값( $x_i$ )의 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$r=f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (2)$$

제2단계에서는 수식 (2)에서 개별 독립변수의 불확도를 유발시키는 요소를 평가해야 한다. 개별 독립변수 추정값의 불확실성(즉, 편차의 폭)은 실험값, 기기공급자 인증서 등 다양한 정보원을 활용하여 추정할 수 있으며 일반적으로 다음과 같은 수식으로 표시된다:

$$x_i - \phi_i \leq x_i \leq x_i + \phi_i. \quad (3)$$

제3단계는 표준불확도(Standard Uncertainty)를 평가하는 과정으로 개별 독립변수의 표준불확도는 불확실성을 유발하는 요인에 따라 A형 불확도평가 또는 B형 불확도평가를 통해 산출된다. A형 평가는 다수 측정결과에 대한 통계분석을 통해 불확도를 계산하는 방법이며, B형 평가는 비통계적 방법으로 불확실성을 표현할 수 밖에 없는 경우에 적용된다. N회의 독립된 측정을 통해 획득된 측정값( $X_{i,k}$ )으로부터 결정된 독립변수( $X_i$ )에 대한 추정값  $x_i$ 가 독립변수의 평균값과 같은 경우 A형 표준불확도  $U(x_i)$ 는 다음과 같다 [10]:

$$U(x_i)=s(\bar{X}_i)=\left[\frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{k=1}^N (X_{i,k} - \bar{X}_i)^2\right]^{1/2}. \quad (4)$$

한편, B형 불확도 평가에서는 활용 가능한 최대한의 정보와 평가자의 주관적 판단에 의해 독립변수  $X_i$ 의 추정값  $x_i$ 에 대한 표준불확도를 평가하게 되며, 따라서 B형 평가는 측정에 의해 획득할 수 없는 독립변수에 국한하여 적용되어야 한다. 독립변수에 대한 추정값이 수식 (3)과 같은 범위에 존재할 것으로 추정될 경우 B형 표준불확도는 추정값에 대한 가상적인 확률분포에 따라 다음과 같이 계산된다:

$$U(x_i) = \frac{\varphi_i}{(3 \cdot f)^g}, \quad (5)$$

여기서, 변수  $f$ 와  $g$ 는  $x_i$ 의 추정 확률분포에 따라 직사각형 분포( $f = 1, g = 1/2$ ), 삼각형 분포( $f = 2, g = 1/2$ ), 정규분포( $f = 1, g = 1$ )로 주어진다[11].

제4단계에서는 종속변수  $R$ 에 대한 추정 표준편차로 해석할 수 있는 합성표준불확도(Combined Standard Uncertainty),  $U_c(R)$ 을 평가한다. 독립변수들 사이에 상관관계가 미미하거나 또는 개별 독립변수  $x_i$ 의 표준불확도가  $R$ 값에 비해 상대적으로 작을 경우, 합성 표준불확도는 다음 수식과 같이 합성분산의 양의 제곱근으로 정의된다[9-11]:

$$U_c^2(R) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2 \cdot U^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i \cdot U^2(x_i)] = \sum_{i=1}^N U_i^2(R), \quad (6)$$

여기서,  $U_c^2(R)$  = 합성분산,  $U(x_i)$  =  $x_i$ 의 표준불확도,  $c_i \equiv \partial R / \partial x_i$  = 감도계수,  $U_i(R) = |c_i| \cdot U(x_i)$ .

한편 독립변수가 상호 종속적인 경우에는 각  $x_i$ 의 공분산항을 포함해 수식 (6)을 확장시켜야 하며, 개별 독립변수의 표준불확도가  $R$ 값에 비해 상대적으로 클 경우에는 Taylor Series 전개를 통해 고차항을 포함하는 불확도 전파법칙을 적용해야 한다. 이에 대한 세부 평가지침은 ASME PTC appendix C 등에 자세하게 소개되어 있다[12-15].

제5단계에서는 제4단계에서 도출된 합성표준불확도에 포함인자(Coverage Factor,  $k$ )를 곱해 확장불확도(Expanded Uncertainty)를 다음과 같이 평가한다[10]:

$$U_E(R) = k \cdot u_c. \quad (7)$$

확장불확도는 주로 규제목적이나 또는 보건 및 안전관 관계된 경우에 적용하기 위한 목적으로 도입된 개념이며,  $R$ 에 대한 최종 평가결과의 자유도가 커서 정규분포로 가정할 수 있는 경우에는 약95%의 신뢰수준( $k = 2$ ) 또는 약99% 신뢰수준( $k = 3$ )을 적용할 수 있다[11]. 참고로 1999년 한국표준과학연구원은 확장불확도 평가시 포함인자를 2로 적용할 것을 권고한 바 있다[10].

## 2.2 뱃치배출 액체유출물 환경배출 방사능 평가모델

국내 발전용원자로의 운영기술지침서 또는 방사성배출물 관리계획서에서는 액체유출물의 배출방식을 뱃치(Batch)와 연속으로 구분하고, 배출방식 및 분석대상 핵종에 따라 상이한 시료채취 및 분석요건을 적용하고 있다. 본 논문에서는 실제로 가장 적용 빈도가 높은 뱃치배출 액체유출물에 대한 그랩시료(Grab Sample) 채취를 통한 총방사능 측정시 수반되는 불확도를 평가하기 위한 모델을 수립하였다. 뱃치배출은 주로 액체폐기물을 탱크에 수집한 후 배출하되 배출기간 동안에는 탱크로 추가 폐액의 유입이 배제된 조건으로 정의되며, 이 경우 배출 전에 그랩시료를 채취하여 방사능을 분석해야 한다. 뱃치배출 탱크에서 환경으로 배출된 액체유출물에 함유된 방사능은 다음과 같은 수식을 통해 계산할 수 있다:

$$A_{BG} = C_{SG} \cdot V_D = \left( \frac{A_{SG}}{V_{SG}} \right) \cdot V_D, \quad (8)$$

여기서,  $A_{BG}$  = 뱃치배출 그래프시료 채취시 액체유출물의 총방사능[Bq],  $C_{SG}$  = 시료의 방사능 농도[Bq/m<sup>3</sup>],  $A_{SG}$  = 시료의 방사능[Bq],  $V_{SG}$  = 시료의 체적[m<sup>3</sup>],  $V_D$  = 액체유출물의 체적[m<sup>3</sup>],

### 3. 가상적인 뱃치배출 조건에 대한 불확도 평가

지금까지 도출된 불확도 평가방법론과 국내 발전용원자로의 운영조건에 근거하여 설정된 전형적인 액체유출물 뱃치배출 조건(표 1 참조)을 기준으로 표준불확도와 합성표준불확도를 평가하였다.

표 1. 불확도 평가를 위한 가상적인 조건(사전 평가를 목적으로 재구성된 조건으로 특정 원전의 배출조건과 일치하는 것은 아님.)

변수	값(범위)	비고
시료의 총방사능 측정결과	$(3.7 \times 10^1) \pm (3.7 \times 10^0)$ Bq (신뢰수준 : 95%)	측정기록
마리넬리 비이커의 규격	$(1.0 \times 10^{-3}) \pm (1.0 \times 10^{-4})$ m <sup>3</sup> (신뢰수준 : 불명)	공급자 사양
마리넬리 비이커 체적 보정온도	25℃	공급자 사양
시료채취 및 분석장소의 온도	25±5℃ (신뢰수준 : 95%)	운전조건
액체유출물 배출전 탱크 수위	80%	측정기록
액체유출물 배출후 탱크 수위	20%	측정기록
탱크 수위계의 불확도	전구간의 ±5% (신뢰수준 : 95%)	교정기록
탱크 수위-체적 관계식	2m <sup>3</sup> /(수위, %)	공급자 사양
탱크 용량곡선의 불확도	전구간의 ±5% (신뢰수준 : 불명)	공급자 사양

#### 3.1 불확도 평가

##### 가. 총방사능 측정결과의 불확도

표 1에 도시한 바와 같이 총방사능 측정결과는 95% 신뢰수준에서  $\pm(3.7 \times 10^0)$  Bq의 불확도를 갖는 것으로 가정하였으며 시료 총방사능 측정결과의 표준불확도는 다음과 같다:

$$U(A_{SG}) = \frac{(3.7 \text{ Bq})}{1.96} = 1.89 \text{ Bq} \quad (9)$$

##### 나. 시료체적의 불확도

일반적으로 액체유출물 시료는 1,000mL 용량의 마리넬리 비이커에 수집되며, 채취된 시료체적에 불확도를 유발하는 요인은 비이커의 체적, 온도에 따른 액체체적의 변화 등이다. 본 논문에서 가정한 사례에서는 공급자 인증서에서 비이커의 규격을  $(1.0 \times 10^{-3}) \pm (1.0 \times 10^{-4})$  m<sup>3</sup>로 제시하고 있으나 신뢰수준이 별도로 주어지지 않았으므로, 비이커의 체적이 직사각형 확률분포를 갖는 것으로 가정하는 것이 타당하다. 수식 (5)를 적용하여 비이커 체적의 표준불확도는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\frac{(1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3)}{\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (10)$$

한편 시료채취장소 또는 계측장소의 온도가 25℃(비이커의 교정온도)±5℃ 이내로 유지되고 폐액의 부피팽창계수가 물과 동일하게  $2.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 이라고 가정하면, 마리넬리 비이커에 채취된 시료체적의 표준불확도는 95% 신뢰수준에서 다음과 같다:

$$\frac{(1.0 \times 10^{-4} m^3) \cdot (\pm 5K) \cdot (2.1 \times 10^{-4} K^{-1})}{1.96} = 5.36 \times 10^{-8} m^3. \quad (11)$$

한편 측정량과 독립변수가 수식 (12)의 관계를 갖는 경우 수식 (6)을 수식 (13)과 같이 변형하여 합성표준불확도를 계산할 수 있는 것으로 알려져 있다[9-11].

$$R = a \cdot X_1^{p_1} \cdot X_2^{p_2} \cdot \dots \cdot X_N^{p_N}. \quad (12)$$

$$\left[ \frac{U_c(R)}{R} \right]^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{p_i \cdot U(x_i)}{x_i} \right)^2. \quad (13)$$

따라서 시료체적의 합성표준불확도는 수식 (10), (11) 및 (13)을 적용하여 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$U_c(V_{SG}) = \sqrt{(5.77 \times 10^{-5} m^3)^2 + (5.36 \times 10^{-8} m^3)^2} = 5.77 \times 10^{-5} m^3. \quad (14)$$

#### 다. 배출폐액 체적의 불확도

환경으로 배출된 액체폐기물의 순수한 체적( $V_D$ )은 배출전 탱크에 저장된 폐액의 체적( $V_{h1}$ )과 배출후 탱크에 잔류된 폐액의 체적( $V_{h2}$ )의 차로부터 다음과 같이 구할 수 있다:

$$V_D = V_{h1} - V_{h2}. \quad (15)$$

가상적인 사례에서 운전원이 액체폐기물을 배출하기 전에 작성한 점검기록에 따르면 탱크의 수위는 80%이며, 탱크 수위계기계열 지시치의 불확도는 95% 신뢰수준에서 전구간(Full Span, 탱크 유효수위 100%)의  $\pm 5\%$ 이다. 이를 정규분포로 가정하면 수위지시계 기록값의 표준불확도는 다음과 같다:

$$\frac{(Water\ Level,\ 5\%)}{1.96} = 2.55 \times 10^{+0}\% (Water\ Level). \quad (16)$$

한편 탱크 수위-체적 관계식에 따르면 탱크 수위 1%에 해당하는 체적은  $2m^3$ 이고, 이러한 관계식의 불확도는 신뢰구간이 정해지지 않은 상태에서  $\pm 5\%$ 이다. 이를 직사각형분포로 가정하면 탱크 용량곡선 적용에 따른 표준불확도는 다음과 같다:

$$\frac{(0.1m^3/\%)}{\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-2} m^3/\% (Water\ Level). \quad (17)$$

배출전 탱크에 저장된 액체폐기물 체적은 수위 지시계 기록값(%)과 수위계의 단위 %당 체적( $m^3/\%$ )의 곱으로 표현할 수 있으므로, 배출전 액체폐기물 체적의 합성표준불확도는 수식 (16)과 (17)로부터 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$\left[ \frac{U_c(V_{h1})}{V_{h1}} \right]^2 = \left( \frac{(1) \cdot (2.55 \times 10^{+0}\%)}{(80\%)} \right)^2 + \left( \frac{(1) \cdot (5.77 \times 10^{-2} m^3/\%)}{(2m^3/\%)} \right)^2, \quad (18)$$

$$V_{h1} = (80\%) \times (2m^3/\%) = 1.60 \times 10^{+2} m^3, \quad (19)$$

$$U_C(V_{h1}) = (1.60 \times 10^{+2} m^3) \cdot \sqrt{\left(\frac{(2.55 \times 10^{+0}\%)^2}{(80\%)^2}\right) + \left(\frac{(5.77 \times 10^{-2} m^3/\%)^2}{(2m^3/\%)^2}\right)} = 6.88 \times 10^{+0} m^3. \quad (20)$$

이와 유사한 방법을 통해 배출후 탱크에 잔류된 액체폐기물의 체적에 대한 합성표준불확도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_C(V_{h2}) = (4.00 \times 10^{+1} m^3) \cdot \sqrt{\left(\frac{(2.55 \times 10^{+0}\%)^2}{(20\%)^2}\right) + \left(\frac{(5.77 \times 10^{-2} m^3/\%)^2}{(2m^3/\%)^2}\right)} = 5.23 \times 10^{+0} m^3. \quad (21)$$

한편 R과 입력변수  $x_i$  사이에 수식 (22)와 같은 선형관계가 성립할 경우 합성표준불확도는 수식 (23)을 통해 계산할 수 있다[10].

$$R = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_N x_N, \quad (22)$$

$$U_C(R) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i). \quad (23)$$

환경으로 배출된 액체폐기물의 순수한 체적은 수식 (15)와 같은 선형관계식으로 표현되므로  $V_D$ 의 합성표준불확도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$U_C(V_D) = \sqrt{(6.88 \times 10^{+0} m^3)^2 + (5.23 \times 10^{+0} m^3)^2} = 8.64 \times 10^{+0} m^3. \quad (24)$$

#### 라. 액체유출물 환경배출량의 합성표준불확도

배치배출 액체유출물에 대한 그래프시료 채취 및 분석에 따라 수반되는 합성표준불확도는 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$\left[\frac{U_C(A_{BG})}{A_{BG}}\right]^2 = \left(\frac{(1) \cdot U_C(A_{SG})}{A_{SG}}\right)^2 + \left(\frac{(1) \cdot U_C(V_D)}{V_D}\right)^2 + \left(\frac{(-1) \cdot U_C(V_{SG})}{V_{SG}}\right)^2. \quad (25)$$

표 1과 수식(8)로부터 액체유출물 배출에 따른 총배출방사능( $A_{BG}$ )는 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$A_{BG} = \left(\frac{3.7 \times 10^{+1} Bq}{1.0 \times 10^{-3} m^3}\right) \times (1.2 \times 10^{+2} m^3) = 4.44 \times 10^{+6} Bq. \quad (26)$$

표 2는 수식 (8)에 포함된 개별 독립변수의 값, 불확도 및 상대표준불확도 평가결과를 보여주고 있으며, 이를 통해 가상적인 조건에서 전체 평가결과에 미치는 불확도 유발인자는 배출폐액의 체적, 시료의 체적, 시료의 총방사능 순서임을 알 수 있다.

표 2. 배치배출 그래프시료 채취 및 분석시 배출방사능 평가인자별 불확도 요소

변수	기호	값	불확도, $U(x_i)$	상대 표준불확도, $U(x_i)/x_i$
시료의 총방사능	$A_{SG}$	$3.7 \times 10^{+1} \text{ Bq}$	$1.89 \times 10^{+0} \text{ Bq}$	$5.10 \times 10^{-2}$
시료의 체적	$V_{SG}$	$1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	$5.77 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	$5.77 \times 10^{-2}$
배출 폐액의 체적	$V_D$	$1.2 \times 10^{+2} \text{ m}^3$	$8.64 \times 10^{+0} \text{ m}^3$	$7.20 \times 10^{-2}$

표 2와 수식 (25) 및 (26)으로부터,  $A_{BG}$ 의 합성표준불확도는 다음과 같이 산출할 수 있다:

$$U_C(A_{BG}) = (4.44 \times 10^{+6} \text{ Bq}) \cdot \sqrt{(5.10 \times 10^{-2})^2 + (5.77 \times 10^{-2})^2 + (7.20 \times 10^{-2})^2} = 4.68 \times 10^{+5} \text{ Bq}. \quad (27)$$

마. 액체유출물 환경배출량의 확장불확도

수식(7)과 (27)로부터 액체유출물 환경배출량의 확장불확도는 다음과 같이 평가되었다:

$$U_E(A_{BG}) = (2) \cdot (4.68 \times 10^{+5} \text{ Bq}) = 9.36 \times 10^{+5} \text{ Bq}. \quad (28)$$

3.2 액체유출물 배출방사능 평가결과의 확률분포

최근 미국에서는 원자력이용시설 부지의 재활용이나 극저준위폐기물의 규제해제(Clearance)에 따른 방사선학적인 영향평가 등 요구되는 입력변수가 방대하고 불확실성이 큰 경우, 불확도 및 민감도 분석 측면에서 개별 입력변수의 확률분포를 조합함으로써 최종적인 단일 결과값(예: 피폭방사선량) 이외에 그 확률분포까지 추정하기 위한 시도가 활발하게 이루어지고 있다[16,17].

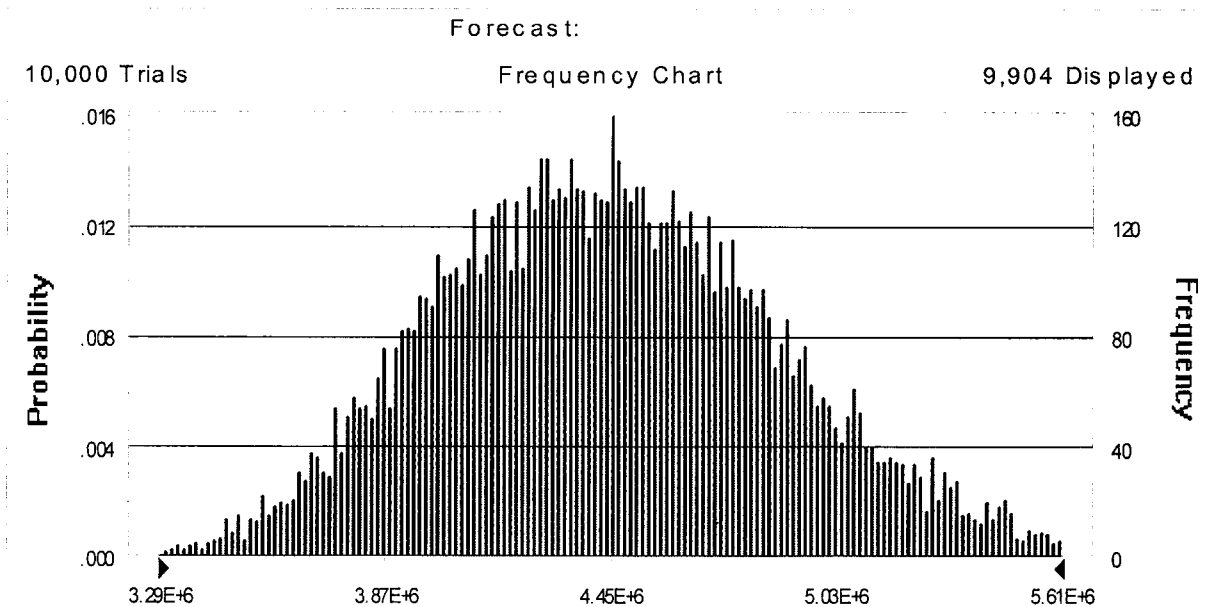


그림 1. 배치배출 액체유출물에 함유된 총방사능 평가결과의 확률분포(Crystal Ball®의 Monte Carlo법을 적용한 10,000회 모사결과)

최종 평가결과의 확률분포는 궁극적으로 전체 평가과정에 수반된 불확도에 대한 종합적인 정보를 제공할 뿐 아니라 제한치 대비 안전 여유도 및 제한치를 만족하는 사례(Case)의 누적 확률분포에 대한 정보를 제공함으로써 불확실성이 큰 안전성 평가결과에 대한



규제판단에 도움을 줄 수 있다. 본 논문에서 지금까지 평가된 결과는 액체유출물 배출 방사능 및 구성인자들에 대한 불확도에 대한 충분한 정보를 제공하고 있으나, 최종적인 배출방사능의 통계적인 분포를 규명하기 위해서는 추가적인 평가가 요구된다.

뱃치방식으로 환경으로 배출된 액체유출물 방사능은 정규분포를 갖는 각종 변수들(시료 방사능 계측값, 탱크의 배출전후 수위, 온도편차)과 직사각형분포를 갖는 변수들(비이커의 규격, 탱크 수위곡선)의 조합으로 구성되어 있다. 따라서 최종적인 배출방사능의 확률분포는 수식 (6)을 기준으로 하여 변수별 확률분포와 표 1에 제시된 변수별 범위를 이용하여 규명할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 확률분포를 고려한 분석방법으로 Monte Carlo모사법을 적용하였고 상용 평가도구인 Crystal Ball<sup>®</sup>을 이용한 평가결과를 그림 1에 도시하였다. 그 결과 배출방사능의 확률분포는 왜도(Skewness)가 0.26로서 다소 왼쪽으로 편향된 정규분포를 보여주고 있으며, 첨도(Kurtosis)는 +3.0으로 정규분포 보다 다소 첨용성(Leptokurtic)을 나타내고 있다. 한편 가상적인 조건에서 확률분포의 범위는  $2.92E+06 \sim 6.37E+06$  Bq, 평균값  $4.45E+06$  Bq, 표준편차  $4.45E+06$  Bq 등으로 평가되었다. 한편 확률분포상 50퍼센타일 및 95퍼센타일에 해당하는 방사능은 각각  $4.43E+06$  Bq 및  $5.23E+06$  Bq으로 평가되었다.

#### 4. 결 론

지금까지 단일 값으로 보고되고 있는 국내 발전용원자로의 액체폐기물 환경배출 방사능 평가결과에 포함된 불확도를 ISO의 평가지침에 근거하여 정량적으로 분석할 수 있는 원칙과 방법론을 도출하였다. 특히 국내 원전에서 가장 적용범위가 넓은 액체유출물 뱃치 배출방식을 기준으로 총방사능 평가결과의 불확도 평가모델을 개발하고, 특정한 조건하에서 주요 변수들의 불확도, 합성표준불확도 및 최종 결과의 확장불확도를 정량적으로 평가하였다. 본 논문에서 가정한 액체유출물 배출조건에서 환경배출 방사능 평가결과에 영향을 주는 인자들의 상대적 중요도는 배출폐액의 체적, 시료의 체적, 시료의 총방사능 계측값 등의 순서인 것으로 분석되었다. 이를 통해 현재 국내 원전에서 방사성유출물관리 관련 요건에 따라 수행되고 있는 방사능계측기, 유량계기계열 또는 수위계기계열에 대한 주기적인 교정 및 점검은 환경배출 방사능 평가결과의 계통오차를 감소시키고 최종적인 평가결과의 불확도를 저감시키는데 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 평가된 개별 인자의 상대적 우선순위는 절대적인 결과로 해석되지 않아야 하며 인자별 우선순위는 평가에 적용된 가정 및 조건에 따라 가변적임에 유의해야 한다. 따라서 특정 원전에서 일정 기간동안 배출된 액체방사성유출물의 방사능에 대한 불확도를 평가하기 위해서는 실제 현장의 액체유출물 감시조건을 반영한 평가가 수행되어야 한다. 또한 본 논문에서는 Monte Carlo모사법을 이용하여 개별 변수의 확률분포를 조합함으로써 뱃치방식으로 배출되는 액체유출물에 함유된 방사능의 확률분포를 유도하였으며, 그 결과 최종 배출방사능의 확률분포는 다소 편향성과 첨형성이 있는 정규분포를 갖는 것으로 나타났다.

본 논문의 평가결과는 환경배출 방사능 평가결과를 단일 값으로 간주해온 지금까지 관행에 개선의 필요성이 있음을 암시하고 있다. 또한 현장에서 방사성유출물 환경배출량 평가결과의 오차와 불확도를 자체적으로 평가하여 방사성유출물관리의 품질을 제고하기 위한 목적으로 활용될 수 있으며, 향후 개별 원자력이용시설 환경배출 방사능의 제한치 대비 안전여유도에 대한 확률론적 평가 등 규제검증 목적으로도 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해 향후 연속배출 및 복합시료에 대한 불확도 평가방법과 기체유출물에 대한 불확도 평가방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국원자력안전기술원의 기본연구과제인 『원자력 이용시설의 방사성유출물에 대한 규제관리 개선방안 연구』의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 과학기술부고시 제2002-23호, 방사선방호 등에 관한 기준, 2002.
2. 정재학, 방사선방호 및 폐기물 전문과정 - 방사성유출물관리, 한국원자력안전기술원, 2001.
3. 한국수력원자력(주), 영광5,6호기 배출물관리계획서, 2001.
4. 한국수력원자력(주), 원자력발전소 방사선관리연보, 2001.
5. US NRC, Measuring and Reporting Radioactivity in Solid Wastes and Releases of Radioactive Materials in Liquid and Gaseous Effluents from Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants, Reg. Guide 1.21, 1974.
6. North Anna Power Station, Annual Radioactive Effluent Release Report for 2002, 2003.
7. US NRC, Monitoring and Reporting Radioactivity in Releases of Radioactive Materials in Liquid and Gaseous Effluents from Nuclear Fuel Processing and Fabrication Plants and Uranium Hexafluoride Production Plants, Reg. Guide 4.16, Rev.1, 1985.
8. American National Standard, Sampling and Monitoring Releases of Airborne Radioactive Substances from the Stacks and Ducts of Nuclear Facilities, ANS/HPS N13.1-1999.
9. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, 1995.
10. 한국표준과학연구원, 측정불확도 표현 지침, KRISS-99-070-SP, 1999.
11. 최종오 등, 국제규격에 따른 측정결과의 표현, 화학세계, Vol.40(4), pp.52-58 (2000).
12. American Society of Mechanical Engineers, Test uncertainty, ASME PTC 19.1-1998, 1998.
13. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST Technical Note 1297, 1994.
14. ANSI N42.23, American National Standard Measurement and Associated Instrumentation Quality Assurance of Radioassay Laboratories, IEEE, 1997.
15. L.A. Bruckner, " Propagation of Variance Uncertainty Calculation for an Autopsy Tissue Analysis," Health Physics, 67(1): 24-33, 1994.
16. US NRC, Radiological Assessments for Clearance of Equipment and Materials From Nuclear Facilities, NUREG-1640, Draft (1999).
17. US NRC, Probabilistic Dose Analysis Using Parameter Distributions Developed for RESRAD and RESRAD-BUILD Codes, NUREG/CR-6676 (2000).