

방사성폐기물 물리화학적 특성 값의 확률통계 추정 방법

조현준, 이윤희*, 강기두

한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1

*충남대학교 정보통계학과, 대전광역시 유성구 궁동 220

chohvuni@khnp.co.kr

1. 서론

한국수력원자력(주)은 2009년 7월 울진 1,000드림의 처분 인도를 시작으로 향후 5년 동안 약 34,000여 드림의 중·저준위 방사성폐기물을 처분할 계획에 있으며, 그 준비의 일환으로 과거발생 방사성폐기물에 대한 물리화학적 특성평가를 수행하고 있다. 과거(2006년 12월 이전)에 발생된 방사성폐기물의 물리화학적 특성을 검증하는 작업은 드림을 파괴 분석해야 하기 때문에 많은 시간과 비용이 소요된다. 인수기준 만족여부를 확인하기 위하여 전체 드림을 검사하는 것이 가장 확실한 방법이겠지만, 현실적으로 불가능하다.

본 논문의 목적은 과거발생 방사성폐기물의 모집단을 대표할 수 있는 과학적인 표본 추출과 확률통계 방법으로 모집단의 특성분포를 추정함으로써, 전체 모집단의 특성을 통계적으로 검증하기 위한 효율적인 대안을 제시하는 것이다.

2. 표본 추출

조사대상인 모집단 전부를 조사할 수 없을 때에 모집단의 일부를 추출하여 조사할 수 있다. 이때에 모집단으로부터 그 일부를 일정한 신뢰도와 오차의 한계 내에서 추출하는 것을 표본추출이라 한다. 따라서 표본추출은 관찰대상을 선정하는 과정이라고 할 수 있다. 표본집단의 통계 값을 이용하여 모집단의 특성을 추정하는데 있어서 신뢰성을 높이기 위해서는 모집단으로부터 표본을 추출하는 방법이 중요하다. 보다 과학적인 방법으로 표본을 선택하여 표본통계량(X, S^2)이 모집단의 모수(μ, σ^2)에 근접하게 되면, 즉 모집단의 특성을 충분히 대표할 수 있는 표본을 선정하면 표본 집단의 특성 값을 이용하여 모집단의 특성을 추정할 수 있다.

과거발생 방사성폐기물의 물리화학적 특성시험을 위한 대표드림 선정은 폐기물의 유형을 분류하고 전문가의 판단에 따라 가장 보수적인 표본을 선정하는 층화랜덤샘플링 방법을 이용하였다. 인수기준상의 물리화학적 특성은 압축강도(압축강도, 침출, 침수, 방사선조사, 열순환), 유리수, 킬레이트제 등 3가지 특성으로 대표된다. 잡고체폐기물의 경우 유리수 및 킬레이트 특성이 주요 평가항목이며, 고화체폐기물의 경우는 유리수, 킬레이트 및 압축강도가 주요 평가항목이다.^[1] 잡고체폐기물의 주요 검증항목인 킬레이트농도의 경우에 킬레이트 유입경로를 분석하여 가장 보수적인 종이류폐기물을 대상으로 시료를 채취함으로써 통계검증의 보수성을 확보할 수 있다.

표본집단 선정은 대상 모집단을 경상정비와 예방정비로 발생시기를 기준으로 폐기물을 분류하고, 폐기물 생성시점으로부터 4년 단위로 폐기물 유형을 분리한 후 각 폐기물 유형의 시료채취군으로부터 임의로 1개의 대표드림을 선정했다. 현재까지 4개 원전본부에서 잡고체 41개, 고화체 5개 등 총 46개의 표본이 선정되어 분석 중에 있다.^[2]

3. 확률통계 검증 방법

통계적 추정 방법을 사용하면, 표본집단 특성 값으로부터 모집단 특성 값의 확률분포에 대해 추정할 수 있다. 이러한 모집단의 통계 추정은 모수의 구간추정을 이용하여 모집단 확률분포를 추정하는 방법 또는 모수의 점추정과 허용한계를 이용하여 모집단 확률분포를 추정하는 방법으로 할 수 있다.

가. 모수의 구간추정을 이용한 모집단 확률분포 추정

정규분포의 모수인 모평균과 모분산을 각각 μ 와 σ^2 이라고 하고 미지의 값이라고 할 때, 이 모집단에서 추출한 크기가 n 인 표본을 x_1, \dots, x_n 이라고 하면 표본평균과 표본표준편차는 각각 \bar{x} , s 이다.

이를 표 1과 같이 킬레이트 분석이 완료된 하나의 원전본부 잡고체폐기물 표본에 적용하면, 표본평균 및 표본표준편차는 $\bar{x}=0.073$, $s=0.089$ 이다.

표 1. 표본 분석 결과 (단위 wt%)

시료 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
킬레이트 값	0.025	0.02	0.064	0.045	0.152	0.034	0.3	0.02	0.023	0.047

표본의 특성 값을 이용하여 모평균과 모분산의 100(1- α)% 신뢰구간은 다음과 같이 구할 수 있다.^[3]

$$\bar{x} - t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad \frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{\alpha/2}(n-1)} < \sigma^2 < \frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)}$$

통계표를 이용하여 모평균과 모분산의 95% 신뢰구간을 추정하면,

$$0 < \mu < 0.1089, \quad 0.0037 < \sigma^2 < 0.0264 \text{ 이다.}$$

모집단의 확률분포를 보수적으로 추정하기 위하여 모평균과 모분산 신뢰구간의 최대값인 0.1089와 0.0264을 사용하여 정규분포 모집단의 확률분포를 계산하면, $\mu + 4\sigma$ (킬레이트 0.7589 wt%) 이상인 드럼의 존재 확률은 0.00316% 이다. 즉, 전체 모집단(4100 드럼) 중 킬레이트 농도가 0.7589 wt% 이상인 드럼은 0.13 드럼(4100드럼×0.00316%)으로 1 드럼이 되지 않는다.

나. 모수의 점추정과 허용한계를 이용한 모집단 확률분포 추정

허용한계를 구하여 모집단의 분포를 추정할 때, 모평균과 모표준편차(μ, σ)의 불편추정량인 표본평균과 표본표준편차를 이용하여 추정량 $\hat{\mu}$ 와 $\hat{\sigma}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.^[3]

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \hat{\sigma}^2 = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

즉 표본평균과 표본표준편차가 정규분포 모집단의 모평균과 모표준편차의 점추정값이 된다. 이를 킬레이트 분석이 완료된 하나의 원전본부 잡고체폐기물에 적용하면, 정규분포 모집단의 모평균 및 모표준편차를 $\bar{x} = 0.073, s = 0.089$ 으로 점추정 할 수 있다.

이렇게 점추정한 모평균과 모표준편차를 이용하여 정규모집단의 하위 100(1- α)%를 포함하는 허용한계를 추정하면 된다. 여기서 허용한계의 상한값에 대한 추정문제이므로 100%의 신뢰도 개념이 필요하다. 울진 잡고체폐기물 모집단 특성분포에 대한 허용한계 상한값의 추정은 $\bar{x} + k_{\alpha/\gamma, n} s$ 으로 구할 수 있고, 자연공차 계수 $k_{\alpha/\gamma, n}$ 는 통계표를 이용한다. 표본 10개로 모집단의 99% 이상을 포함할 신뢰도가 95%인 허용한계 상한치는 $\bar{x} + 3.981s$ 이다. 또한 모집단의 99.99% 이상을 포함할 신뢰도가 95%인 허용한계 상한치는 $\bar{x} + 7.286s$ 이다. 그러므로 신뢰도 95%에서 전체 드럼 중 킬레이트 농도가 0.721wt% 이상인 드럼은 존재 확률이 0.01% 이고, 전체 모집단(4100 드럼) 중 0.4 드럼(4100드럼×0.01%)으로 1 드럼이 되지 않는다.

4. 결론

방사성폐기물의 물리화학적 특성시험은 드럼을 파괴 분석해야 하기 때문에 전수검사를 한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로 표본검사와 확률통계 검증을 통하여 이러한 어려움을 과학적으로 극복할 수 있는 방법을 적용할 필요가 있다. 과거발생 방사성폐기물의 물리화학적 특성시험을 위한 대표 드럼 선정은 폐기물의 유형을 분류하고 전문가의 판단에 따라 가장 보수적인 표본을 선정하는 층화랜덤 샘플링 방법을 이용하였다. 본 논문에서는 표본집단 특성 값을 이용하여 모수의 구간추정을 하고 모집단 확률분포를 추정하는 방법 또는 모수의 점추정과 허용한계 상한값을 구하여 모집단 분포를 추정하는 방법으로 모집단의 확률분포를 추정할 수 있었다. 이러한 두 가지 확률통계 추정 방법을 이용하여 한 원전본부의 과거발생 잡고체폐기물에 적용한 결과, 전체 모집단 중 킬레이트 1wt%(잡고체폐기물 인수 기준 제한치)를 초과하는 드럼은 확률적으로 0 으로 추정할 수 있는 동일한 결과를 얻었다.

참고문헌

- [1] 교육과학기술부 고시, 2008-65 중저준위 방사성 폐기물 인도규정 (2008. 4)
- [2] 한국수력원자력, 처분시설 인도폐기물의 관리기술 개발(I) 1,2차년도 중간보고서 (2007, 2008)
- [3] 청문각, 통계학 이론과 응용 (2004. 7)