

폐기물 표본조사 정량화 기법 연구

김주열

(주)미래와도전, 서울시 관악구 산4-2 서울대학교연구공원 본관516호

gracemi@fnctech.com

2006년 1월 방사성 폐기물 처분사업의 본격화로 저장중인 폐기물의 처분준비가 시작되었다. 폐기물 드럼의 내용물 전체에 대한 특성분석(전수조사)은 현실적으로 불가능하며, 비용 및 효율의 측면에서 바람직하지 않으므로, 폐기물의 인도 및 인수에 앞서 시료의 대표성(representative sampling) 확보를 위한 표본조사 절차 수립 및 신뢰도 입증이 선결되어야 한다. 폐기물의 특성분석을 위해 추정의 편의(bias)를 줄이면서 모집단을 대표할 수 있는 대표시료 채취방법을 논리정연하게 정량화하고 체계화하는 방법론들이 미국 환경보호국(EPA), 원자력규제위원회(NRC) 및 영국 환경부 지침서 등에서 개발되었다. 상기 방법론들은 특정 신뢰도를 확보하기 위하여 요구되는 시료의 개수, 신뢰구간, 분산 및 변이계수 등 추정의 정밀도를 계산한다. 기본적인 대표시료 채취방법들을 요약하면 다음과 같다.

- 단순랜덤추출(simple random sampling): 각각의 시료는 동일 확률로 선정, 모집단이 불균일할 경우 큰 오차 발생
 - 층화랜덤추출(stratified random sampling): 선행 정보를 활용하여 모집단을 여러 개의 균일 집단으로 분할하고 시료채취함. 모집단에 대한 선행 정보가 필요함.
 - 계통추출(systematic sampling): 시료채취의 구간을 일정하게 선정
 - 사전판단추출(judgemental sampling): 전문가의 판단에 따름, 대표성 및 정확도를 정량화할 수 없음.
 - 기타 복합추출(composite sampling) 및 현장적용추출(adaptive sampling) 등
- 실제로는 상기 방법들을 혼합하여 적용하고 비용, 시간 및 효율성 등을 고려하여 시료채취의 방법과 시료의 개수를 결정한 다음 시험조사를 통하여 시료채취법을 검증하고 보완한다. 예를 들어, 사전판단추출법과 층화랜덤추출법을 혼합하여 95% 신뢰구간 내에서 신뢰성 있는 대표시료를 얻기 위한 과정은 그림 1과 같으며, 추가드럼 선정의 여부 및 개수를 결정하기 위한 층화랜덤추출법은 그림 2와 같다.

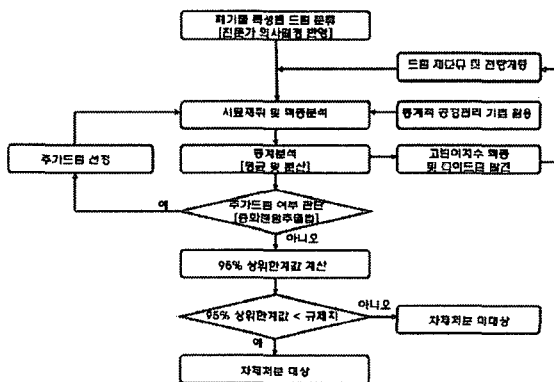


그림 1. 폐기물 표본조사 흐름도

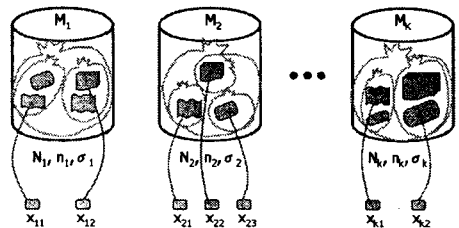


그림 2. 폐기물 표본조사 모형도

그림 2에서 k는 드럼의 수, M_i 는 i 번째 드럼내 폐기물 양, $N_i = M_i / M_{total}$ 는 i 번째 드럼의 상대적 크기, M_{total} 는 i 번째 드럼에서 채취한 시료의 양, n_i 는 i 번째 드럼에서 채취한 시료의 수, x_{ij} 는 i 번째 드럼에서 채취한 j 번째 시료의 분석결과, $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, n_i$ 이다.

○ 각 드럼에 가중치 적용(폐기물의 유형 및 관리이력에 따라) $W_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^k M_i}$

○ 각 드럼내 핵종의 평균치 $\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}}{n_i}$,

각 드럼내 핵종의 분산 $\sigma_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$

○ 시료의 개수 결정

$$n = \frac{[t_{1-\alpha, df} + t_{1-\beta, df}]^2}{\Delta^2} \sum_{i=1}^k W_i \sigma_i^2$$

△: 최소검출차이(MDD, minimum detectable difference)

α: Type I 오차율 (false rejection), β: Type II 오차율 (false acceptance)

df: 자유도, $df = \frac{\left(\sum_{i=1}^k W_i \sigma_i^2\right)^2}{\sum_{i=1}^k \frac{W_i^2 \sigma_i^4}{n W_i - 1}}$, $t_{1-\alpha, df}$ 및 $t_{1-\beta, df}$: Student's t분포

상기 자유도 df는 시료의 수 n에 의존하므로 최종 시료의 개수는 반복적으로 계산되어야 한다.

예를 들어, 가연성 종이류와 가연성 플라스틱류 폐기물 드럼이 혼재할 경우, 전체 드럼 중 종이류를 포함하는 드럼은 60%(W1=0.6), 플라스틱류를 포함하는 드럼은 40%(W2=0.4)라고 가정한다. 종이류 드럼에서 6개의 시료를 무작위로 채취하고 그 농도를 측정하고(각각 0.03, 0.01, 0.01, 0.04, 0.08, 0.06 Bq/g), 플라스틱류 드럼에서 6개의 시료를 채취하고 그 농도를 측정한다.(각각 0.05, 0.05, 0.07, 0.04, 0.10, 0.12 Bq/g) 95% 신뢰구간 내에서 대표성 있는 시료를 얻기 위한 최종 시료의 개수는 다음과 같이 계산된다.

$$n = 12, \sigma_1 = 0.0279, \sigma_2 = 0.0319, \alpha = 0.05, \beta = 0.25, \Delta = 0.01 \text{ Bq/g}$$

$$df_1 = \frac{[(0.6 \times 0.0279^2) + (0.4 \times 0.0319^2)]^2}{\left[\frac{(0.6 \times 0.0279^2)^2}{12 \times 0.6 - 1} + \frac{(0.4 \times 0.0319^2)^2}{12 \times 0.4 - 1}\right]} \approx 10$$

$$n_1 = \frac{(1.812 + 0.700)^2}{0.01^2} \times [(0.6 \times 0.0279^2) + (0.4 \times 0.0319^2)] \approx 55$$

$$df_2 \approx 52, n_2 \approx 48$$

$$df_3 \approx 45, n_3 \approx 49 \dots \dots (\text{수렴})$$

총 49개의 시료 중 가연성 종이류 시료는 $49 \times 0.6 = 29.4 \rightarrow 30$ (올림), 가연성 플라스틱류 시료는 $49 \times 0.4 = 19.6 \rightarrow 20$ 개인데, 이미 각각 6개씩의 시료를 채취하였으므로, 추가적인 시료의 개수는 각각 24개(종이류), 14개(플라스틱류)으로 계산된다. 그림 3은 최종적으로 구해진 시료의 평균값 및 최대값의 신뢰상한(UCL)을 이용하여 규제치에 대한 초과여부를 판정하는 예시이다.

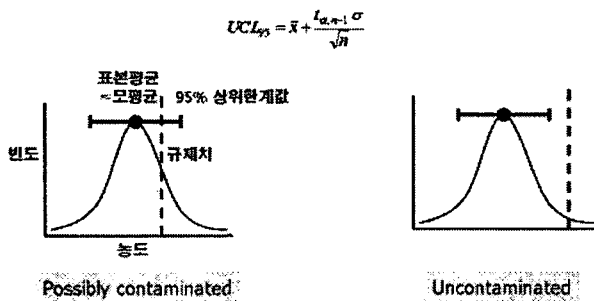


그림 3. 규제치 초과여부 판정 예시