

측정불확도를 응용한 오염토양부지 조사의 최적화 방안

이종천¹⁾

1. 서론

중금속으로 오염된 폐광산 주변부나 유류누출로 인한 토양오염 등과 같은 오염부지에 대한 환경조사는 그 결과를 토대로 환경계획이나 정책이 수립되므로 의사결정의 기초가 된다. 이때, 의사결정의 타당성은 오염부지 조사결과 오염도가 얼마나 정확하게 측정되었느냐에 따라 달리 평가되어 진다. 그러므로 이와 같은 환경조사는 측정결과의 불확실성이 감소되도록 정밀한 시료채취방법이나 분석방법을 고안하여 적용해야 한다. 이를 위해서는 야외시료 및 분석시료의 수와 양을 늘리거나 최신의 분석장비를 이용하는 등의 노력이 필수적이다. 그러나 이에 소요되는 비용은 기하급수적으로 증가하게 되므로 조사목적이나 조사후 부지 사용에 따른 경제성과 같은 경제적 제한요소를 고려해 정밀도 수준을 결정하여 조사계획에 반영하게 된다.

이러한 경제적 측면을 고려한 오염조사방안에서 흔히 간과되는 부분은 측정값에 근거한 의사결정이 잘못될 경우 야기되는 경제적 손실이다. 이는 측정된 값의 불확실도(measurement uncertainty)에 의해 오염기준에 따른 구분에 오류가 생김으로써 발생할 수 있는 비용이다. 따라서 환경조사방법을 환경조사에 소요되는 직접적인비용 뿐만 아니라 조사결과를 바탕으로 내려진 의사결정의 오류에 의한 손실까지도 고려함으로써 최종 조사비용을 최소화 할 수 있는 조사방법의 정밀도 수준을 도출할 필요가 있다. 이러한 과정은 측정값에 대한 측정불확도수준을 확률적 손실계산식(probabilistic loss function)을 통해 최적값을 산출하고 이를 조사방법에 적용시킴으로써 완성할 수 있다.

2. 측정불확도(measurement uncertainty)란?

환경측정은 현장에서의 시료채취와 이에 대한 분석으로 그 과정을 크게 구분할 수 있다. 이 과정을 통해 구해진 측정값은 참값일 수 없으며 항상 불확실성을 내포하게 된다. 이를 ISO는 측정불확도(measurement uncertainty)라 하여 다음과 같이 정의하고 있다(ISO, 1993).

Measurement Uncertainty

A parameter associated with the result of a measurement, that characterises the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand Refer to Glossary of Terms.

측정불확도는 크게 두가지 원인에서 비롯된다. 첫째는 환경시료의 불균질성인데, 특히 토양오염의 특성상 문제시 되는 시료채취지점의 분균일한 오염물질 분포(small-scale heterogeneity)와 두번째로는 이런 불균질성을 제어하지 못하는 채취방법상의 오류와 분석에서의 오류다(Ramsey, 1998). 즉 오염부지 조사는 이러한 이유로 인해 측정불확도가 필연적

으로 개입될 수밖에 없으며 부지별 특성(site-specific)에 따라 개별적으로 계획되어야 한다. 일차적 야외시료채취와 실험실내 분석과정에서 기인하는 측정불확실도를 알아내는 기존의 방법으로는, 다중 샘플링에 대한 다중 분석값을 토대로 각 단계에서의 정밀도(precision)를 추정해 볼 수 있는 통계분석기법인 robust ANOVA를 이용하거나(Ramsey, 1997), 시료 농도변화에 따른 측정불확도를 선형정밀도모형을 통해 보다 정확히 산출할 수도 있다(Lee and Ramsey, 2001).

$$U_{meas} = 2S_{meas} = 2\sqrt{(s_{samp}^2 + s_{anal}^2)}$$

U_{meas} : measurement uncertainty, S_{meas} : measurement precision, s_{samp}^2 : variance of sampling method, s_{anal}^2 : variance of analytical method

3. 판정오류의 계산과 이를 이용한 경제적 손실 계산식

조사대상부지에 대한 잘못된 결정(즉, 실제오염도가 오염기준 이상이지만 오염기준치 미달로 판단하는 경우와 그 반대인 경우)에 의해 발생 가능한 예상 손실은 조사방법의 측정불확실도 수준(혹은 측정방법의 정밀도 수준)이 변화함에 따라 달라지는데(그림 1) 이를 이용하여 손실계산식을 이끌어 낼 수 있다(Ramsey *et al.*, 2002). 먼저 측정값이 오염판정기준치에 미달하고 측정값에 대한 불확도수준 또한 판정오류를 일으킬 수준이 아니라면(그림 1-a) 총 비용은 순수하게 시료채취와 분석에 따른 비용으로 계산되어지나, 측정값이 기준치에 근접하고 측정불확도 수준 또한 증가하면 이에 따라 판정오류를 일으킬 확률도 같이 증가하게 된다.

이를 바탕으로 적용된 조사방법의 측정불확실도 수준(혹은 측정방법의 정밀도 수준)이 변화함에 따라 환경조사결과 발생할 수 있는 예상경제적 손실을 계산할 수 있는 확률적 손실계산식(probabilistic loss function)이 마련되었다(그림 2)(Lee, 2002).

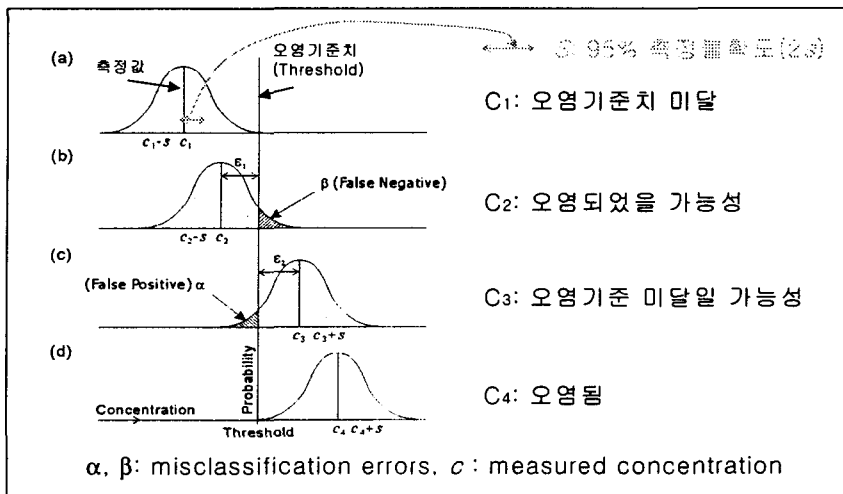


그림 1. 측정불확도 수준에 따른 판정오류의 종류 및 그 확률분포.

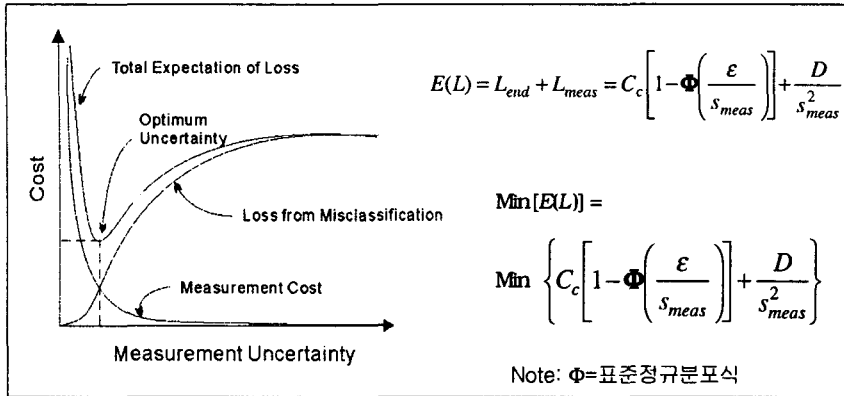


그림 2. 측정불확도수준에 따른 측정비용과 판정오류에 의한 손실계산식.

4. 손실계산식을 적용한 오염부지 조사방법

이러한 손실계산식을 실제 오염부지 조사에 적용하여 손실이 최소화 되는 불확도 수준을 찾아본 결과를 그림 3에 나타냈다. 이를 기준으로 경제적인 최적의 환경조사방법을 설계할 수 있다. 즉, 산출된 최적 측정불확실도보다 더 낮은 수준으로 조사가 이루어지면 측정비용이 상승하게 된다. 반대로 최적 측정불확실도보다 더 큰 불확실도 수준에서는 확인되지 못한 오염상황에 대해 불필요한 토양복원비용 또는 반대로 오염의 존재를 확인하지 못해 청구될 수 있는 소송의 결과에 따른 보상 위험성이 높아지므로 전체 조사비용을 상승시키는 요인이 된다.

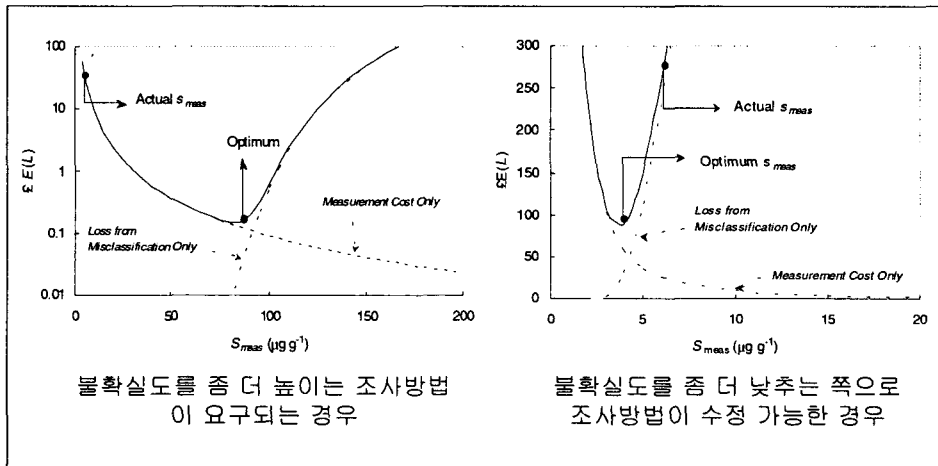


그림 3. 확률적 손실계산식을 이용한 불확도 수준에 따른 손실과 최적 불확도 수준 결정.

이러한 환경조사방법 최적화방안을 이용하면 환경측정계획이 조사목적에 부합하는지를 타진해 보는 데 유용한 도구가 될 것이다.

5. 참고문헌

- ISO (1993 a). *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 1st ed. International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland.
- Lee, J. (2002). *Measurement uncertainty in contaminated land investigations related to analyte concentration and cost*. PhD Thesis. Department of Environmental Science and Technology, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- Lee, J. C. and Ramsey, M. H. (2001). Modelling measurement uncertainty as a function of concentration: an example from a contaminated land investigation. *Analyst* **126**: 1784-1791.
- Ramsey, M. H. (1997). Measurement uncertainty arising from sampling: Implications for the objectives of geoanalysis. *Analyst* **122**(11): 1255-1260.
- Ramsey, M. H. (1998). Sampling as a source of measurement uncertainty: techniques for quantification and comparison with analytical sources. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **13**(2): 97-104.
- Ramsey, M. H., Taylor, P. D. and Lee, J. C. (2002). Optimized contaminated land investigation at minimum overall cost to achieve fitness-for-purpose. *Journal of Environmental Monitoring* **4**(5): 809-814

주요어 : 측정불확도(measurement uncertainty), 환경조사(environment investigation), 경제적손실계산식(economic loss function)

1) 국립환경연구원 영산강물환경연구소