지하수 오염물질 함량의 거시적 분포형태 추정

강성권

조선대학교 수학과

지하수 오염 현장에서 축출된 샘플을 이용하여 오염 물질의 공간적 분포를 추정하는 방법의 하나로 크리깅(Kriging)이라 불리는 지리통계학적 방법이 널리 쓰이고 있다. 이 크리깅 방법은 주어진 샘플을 이용하여 측정하지 못한 지점에서의 변수(예를 들어, 지하수 오염물질의 함량)의 값을 추정하는 방법으로서, 주어진 샘플의 위치와 추정 지점의 위치를 비교하여, 측정된 데이타 각각이 추정지점에 미치는 영향력(weight)을 거리관계에 따라 산출한다. 실제 현장에서 많이 쓰이는 방법으로는 거리의 제곱에 반비례하여 영향력을 계산하는데, 크리깅에서는 거리에 따른 변화량의 상관관계를 구한 다음, 그 관계식에 따라 영향력을 계산하는 최적치 기법을 사용한다. 이러한 크리깅 기법은 지리 통계학의 본질적 가정(Geostatistical intrinsic hypothesis) 하에서 개발된 기법인데, 이 가정은 변수값 또는 측정된 값의 기대치(expected value)는 샘플 각각의 위치에 관계없이 일정하다는 것을 의미한다. 예를 들어, 측정된 샘플이 어떤 광물질의 함량을 나타낼 때, 어느 지점에서 측정을 해도 기본적으로 기대값은 일정함을 의미한다. 이러한 가정은 광물질이 오랫동안 지하에 묻혀 있어, 시간에 따른 변화나 어떤 역학적 활동에 의해 변화하지 않고, 임으로 분포(randomly distributed)되어 있다는 것을 의미한다. 그러나, 실제로는 샘플의 위치가 다르면 광물질의 함량이 다른 것을 알 수 있고, 이러한 이유로 크리깅에서는 또 하나의 가정을 두고 있다. 이는 변수 값의 기대치는 각각의 위치에는 관계없지만 측정 지점 사이의 거리(distance)에만 관계한다는 가정이다. 각 지점에 따라 변화하는 량을 지리통계학에서는 경향(trend 또는 drift)이라 하고, 이 경향은 지역에 따라 조금씩 연속적으로 변화한다고 가정한다. 이제 측정된 샘플이 지하수 오염물질의 함량이라 할 때, 위에서 설명된 지리통계학과 크리깅에서의 가정을 어느 정도 만족하는가를 생각하여 보자. 일반적으로 지하수 오염물질은 지하수의 흐름방향(flow direction), 속도와 지질구조, 그리고 지하 미생물과의 반응정도 등에 따라 영향을 크게 받는다. 예를 들어, 지하수 흐름방향으로 오염물질이 주로 이동되고 그 수직방향(transversal direction)으로는 적게 퍼지는 현상을 쉽게 발견할 수 있고, 지층의 수직방향보다는 수평방향으로 훨씬 넓고 길게 이동되는 것을 알 수 있다. 그리고, 오염물질 함량은 오염물질의 근원지 부근에서는 농도가 높게 나타나고, 근원지에서 멀리 갈수록

농도가 낮아진다. 이러한 관찰은 지리통계학의 본질적 가정에 크게 위배되는 것으로, 크리깅 기법을 측정된 데이타에 직접 적용하면, 잘못된 가정 하에서 출발했기 때문에 그 결과는 현장상황과는 동떨어진 현상을 산출하게 된다. 그래서, 이러한 위치에 따른 변화량의 폭을 줄이기 위해 로그변환(log transformation)을 데이타에 적용시킨 후, 높은 농도의 값과 낮은 농도의 값의 차이의 폭을 좁힌후 크리깅기법을 적용하는 방법이 보편적으로 이용되어오고 있다. 그런데, 이 로그변환에의해 변별력이 강조되는 부분은 농도가 낮은 부분의 데이타들이 되고, 높은 농도의 데이타들은 측정오류로 처리하는 결과를 야기하게 된다. 그러나, 실제로 관심대상이 되는 부분은 오염함량 농도가 높은 부분으로서 우리가 마시는 음료수, 공업용수, 생태계 등에 결정적인 악영향을 주게 된다. 따라서, 오염물질 함량분포를 추정하기 위해 크리깅방법을 적용하기 전에, 함량분포가 나타내는 거시적 분포형태 또는 분포경향(macroscopic plume behavior)을 미리 추정한 다음, 원래 함량에서 이 추정치를 뺀 나머지(residuals)가 어느 정도 지리통계학의 가정(임의의 분포형태)을 만족하게 할 수 있다. 여기서, 거시적 분포경향 이라 함은 지리통계학에서의 경향(trend 또는 drift)와 본질적으로 비슷한 의미를 갖지만, 경향은 각 샘플 지점(point)과 지점에 따라 조금씩 변하는 것에 비해, 거시적 경향은 지역(region)에 따라 다른 특성을 갖는 분포형태를 의미한다. 즉, 거시적 분포경향은 경향(미시적 경향)의 개념을 공간적으로 확장한 것이다. 거시적 경향의 개념을 도입하는 이유중의 하나는, 지하수 오염물질의 연속적 확산과정을 추적하기 위해 수치 시뮬레이션이 필수적인데, 이러한 시뮬레이션에는 정확한 지리물리적 변수 값들이 요구되기 때문에, 주어진 한정된 데이타를 바탕으로 좀더 정확한 정보를 추론하는데 있다.

본 논문의 목적은 거시적 경향을 샘플로부터 추정하는 방법을 소개함에 있다. 전통적으로 미시적 경향(trend 또는 drift)을 추정하기 위해서 다항식(polynomial)을 이용한다. 특히, 3차원인 경우는 1차, 2차, 또는 3차다항식을 보편적으로 사용한다. 그러나, 오염물질의 함량분포는 물질이동 방정식(solute transport equation)을 해(solution)에 상응하는 분포형태를 취하기 때문에, 간단한 물질이동 방정식의 해가 적합한 기저함수(basis function)로서의 대상이 될 수 있음을 알 수 있다. 지하수 오염물질 함량분포에 대한 거시적 경향을 추정하기 위한 기저함수의 선택에는 다음과 같은 몇 가지 기준을 만족해야한다. 첫째는, 기저함수가 간단하면서 계산하기 쉬워야하고, 둘째는, 기저함수의 본질적 특성(characteristics)이 오염함량분포에서 나타나는 거시적 형태(global profile)를 가지고 있어야 하며, 셋째는, 여러 제약조건(경제적, 기술적 등)으로 인해 실제 오염물질이 퍼져 나가는 것을 감지하지 못하고, 실제보다 샘플링 네트워크(sampling network)를 작게 잡는 경우가 종종 있으므로, 선택된 기저함수에의해 추정된 거시적 형

태는 샘플링 네트워크 밖에서도 추정이 가능해야 하며, 넷째는, 지질구조와 지리물리학적 활동의 복잡성으로 인한 오염함량분포의 다변성에 지나치게 예민하지 않는(robustness) 기저함수를 선택해야 한다. 위에서 열거한 네 가지 특성 외에 여러 가지 조건이 첨가될 수 있다. 이러한 특성들을 만족하는 기저함수로서 특수한 형태의 지수함수(exponential function)를 택할 수 있다. 이 지수함수는 간단한 물질이동 방정식의 해로부터 유추된 것으로, 대개의 경우 3~4개 기저함수의 일차결합으로 거시적 경향을 추정한다. 이에 반하여, 전통적으로 사용되는 다항식에 의한 접근 방법은 위에서 열거한 조건 중 두번째부터 네번째까지를 만족하지 못하게되므로, 거시적 경향 추정에 실패를 하게 된다. 그럼에도 불구하고, 다항식의 접근방법을 많이 사용하는 이유중의 하나는, 경향(trend)이 거시적 경향에 비해 상대적으로 좁은지역에서의 변화량을 나타내는 것이므로, 어느정도의 연속된 변화량은 추정할 수 있기 때문이다. 그러나, 이러한 좁은 의미에서의 개념을 거시적 경향 추정에 사용하므로써, 논리 뿐만 아니라 실제 추정결과에서 오류가 발생하는 것이다. 기저함수로서 지수함수 선택의 우월성과 효능성은 현장 데이타에 적용했을 때 더욱 확연히 나타나게 된다.

사 사

본 연구는 과학재단의 지원 (과제 951-0104-024-2)에 의하여 수행되었으며, 연구비를 지원해준 과학재단에 감사한다.

참고문헌

ASCE Task Committee on Geostatistical Techniques in Geohydrology of the ASCE Hydraulics Division, Review of geostatistics in geohydrololy, I. Basic Concepts; II. Applications, J. Hydraulic Engineering, 116(a), 612-632; 633-658, 1990.

Cooper, R. M. and J. D. Istok, Geostatistics applied to groundwater contamination, I. Methodology; II. Application; III. Global estimates, J. Environmental Engineering, 114(2), 270-286; 287-299; 114(4), 915-928, 1988.

Kang, S., T. B. Stauffer, K. Hatfield, and V. S. Manoranjan, A method for detrending three-dimensional groundwater contaminant distributions, preprint, 1995.