강변여과 대수층의 매개변수 추정을 위한 역해석

Back Analysis for Parameter Estimation in Riverbank Filtration

박서화*, 이상일**

Seo Hwa Park, Sang Il Lee

요 지

본 연구에서는 매개변수를 추정하는 방법 중 하나인 역해석을 이용하여 강변여과 지역의 투수량계수를 추정하였다. 최적화 기법으로 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)를, 정해석 프로그램으로 지하수위와 오염물 거동을 2차원적으로 모의할 수 있는 MOC(Method of Characteristics)을 이용하여 포트란으로 구성된 새로운 프로그램을 개발하였으며 프로그램의 적용성을 검증하기 위해 실제 강변여과를 하고 있는 경남 창원시 대산면의 8개월간 관측 지하수위를 이용하여 그 지역의 투수량계수를 추정하였다.

핵심용어 : 역해석, 강변여과, 투수량계수, MOC, BFGS

1. 서 론

지금까지 우리나라의 수자원 개발은 주로 지표수에 의존해 왔으나 계절적 유량 변동이 크고 수질오염의 위험에 노출되어 있어 상수원으로 사용하는데 많은 어려움이 있다. 더욱이 신규댐 건설을 통한 용수확보는 해당지역 주민과 환경단체의 반발로 개발 여건이 불리해지고 있어 댐에 의존하지 않으면서 지속적으로 증가하는 용수 수요에 대처하고 음용수의 수질 안정을 도모 하기위한 다양한 수원확보 방안이 필요하다. 그러한 방법 중 하나인 강변여과는 수질 등급이 낮은 하천수를 하천변에 분포된 토양으로 여과시켜서 대수층의 자체 정화 능력을 이용하여 수자원을 안정적으로 공급하는 방법으로서 충분한 수량과 양질의 상수공급 목표를 동시에 달성할 수 있는 대안이라 할 수 있다. 강변여과는 현재 영산강, 낙동강 중•하류 지역 등 하천수의 오염이 심각하여 직접 취수하여 사용하기 어렵고 댐 건설조건이 나빠 용수공급이 불안정한 지역에서 많은 관심을 받고 있으며 일부 사업은 이미 추진 중에 있다(윤성용 외, 2002).

강변여과의 효율적 관리와 운영을 위해서는 우선 지하수 대수층의 특성을 정확히 파악하고 지하수자원의 정량화를 정확하게 해야 하며 그에 따른 적절한 운영 계획을 수립해야 한다.

본 연구에서는 역해석을 이용하여 포트란 코드의 프로그램을 개발하고 이를 이용하여 대수층의 대표적 수리상수인 투수량계수를 추정하고자 하였다. 또한 프로그램을 실제 강변여과가 시행되고 있는 창원시 대산면 지역에 적용하여 프로그램의 적용성을 살펴보았다.

2. 역해석 기법

공학 분야에서는 변위, 수두, 응력 등 공학적으로 관심대상이 되는 물리량을 예측하기 위해 많은 정해석 프로그램을 개발하고 사용한다. 여기에는 수많은 입력변수들이 존재하며 민감도가 큰 입력변수들은 그 수치가 조금만 달라도 정해석 결과값에 큰 차이를 보이기 때문에 그것들의 정확도에 따라 예측값이 얼마큼 신뢰

* 정회원·동국대학교 토목환경공학과 석사과정·공학사·E-mail : bluejamiro@hanmail.net

** 정회원·동국대학교 토목환경공학과 부교수·공학박사·E-mail : islee@dongguk.edu

할 수 있는지 결정된다고 볼 수 있다. 정확한 매개변수 추정을 위해 정해석 결과값과 현장 계측값의 차를 목적함수로 두고 그 값이 최소가 되도록 하는 입력변수를 역으로 결정할 수 있는데 이를 역해석(back analysis)이라 부른다.

2.1 목적함수

정해석을 통한 수치해석 결과값과 계측값 사이의 차의 제곱이 목적함수가 되며 이 값이 가장 작아지도록 하는 최적의 매개변수를 찾는다.

$$\text{Min} \quad f(P) = \sum_{i=1}^{n} (u_i^* - U_i)^2 \tag{1}$$

$f(P)$: 목적함수, P : 매개변수들의 vector set, n : 계측점의 수

u_i^* : i번째 지점에서 설계변수 P를 가지고 해석한 결과

U_i : i번째 지점에서 계측결과

2.2 최적화 기법

최적화 방법에는 여러 가지가 있으나 다음 4단계는 최적값을 탐색해 가는 기본 흐름이다.

Step 1. 시작점 $P_{k=0}$ 점을 가정한다.

Step 2. 탐색방향 d_k 을 결정한다.

Step 3. 스칼라 값인 탐색거리 α_k를 찾고 $P_{k+1} = P_k + \alpha_k d_k$ 를 이용하여 새로운 P값을 찾는다.

Step 4. 갱신된 P가 목적함수를 충분히 최적값에 수렴시키는지 여부를 판단한다. 만족하지 못한다면 step2로 돌아가 충분히 수렴할 때까지 같은 과정을 반복한다.

본 연구에서 사용한 BFGS 방법은 목적함수의 2차 도함수로 구성된 Hessian의 역행렬을 근사적으로 구하는 Quasi-Newton Method의 방법 중 하나로 탐색 방향을 찾기 위해 가장 널리 쓰이는 방법 중 하나이다.

탐색방향은 식 (2)와 같고, 각 단계의 근사 Hessian 역행렬(G)은 식 (3)로 구한다.

$$d_{k+1} = -G \nabla f(P_{k+1}) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} G_{k+1} = G_k &+ \frac{(P_{k+1} - P_k) \otimes (P_{k+1} - P_k)}{(P_{k+1} - P_k) \cdot (\nabla f_{k+1} - \nabla f_k)} \\ &- \frac{[H_k \cdot (\nabla f_{k+1} - \nabla f_k)] \otimes [H_k \cdot (\nabla f_{k+1} - \nabla f_k)]}{(\nabla f_{k+1} - \nabla f_k) \cdot H_k \cdot (\nabla f_{k+1} - \nabla f_k)} \\ &+ [(\nabla f_{k+1} - \nabla f_k) \cdot H_k \cdot (\nabla f_{k+1} - \nabla f_k)] \upsilon \otimes \upsilon \end{aligned} \tag{3}$$

이때,

$$\upsilon \equiv \frac{(P_{k+1} - P_k)}{(P_{k+1} - P_k) \cdot (\nabla f_{k+1} - \nabla f_k)} - \frac{H_k \cdot (\nabla f_{k+1} - \nabla f_k)}{(\nabla f_{k+1} - \nabla f_k) \cdot H_k \cdot (\nabla f_{k+1} - \nabla f_k)}$$

역해석 과정을 나타낸 흐름도는 그림 1과 같다.

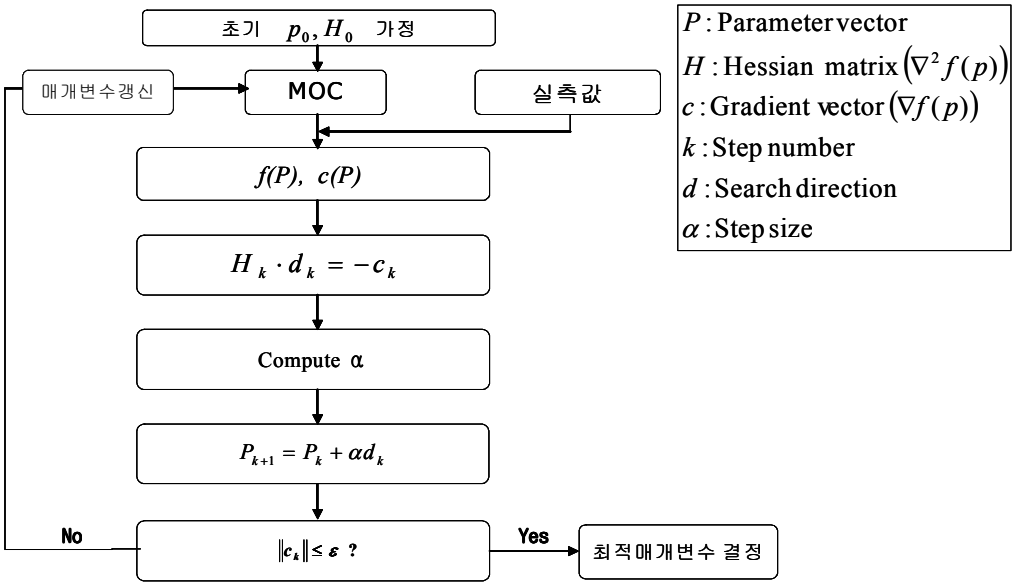

그림 1. 역해석 흐름도

3. 적 용

3.1 적용 지역

대상 지역은 경남 창원시 대산면 일대로 이곳은 낙동강 물을 정화하여 상수로 이용하고 있으나 수질 오염이 심각하여 현재 강변여과수 취수 방법을 병행 하고 있다.

대상지역은 그림 2에서 보는바와 같이 가로 400m, 세로 500m이며 북쪽으로 낙동강이 있고 흐름은 강변여과 지역에서 강쪽으로 일어난다. 관측정(DS1~DS8)은 8개, 취수정(PW1~PW7)은 7개가 있으며 관측정 주변의 지질은 지표로부터 차례로 세립질 모래층, 중립질 모래층, 세립질 모래층, 모래자갈층으로 구성되어 있다. 취수정 지역의 지질은 상부에서부터 하부로 모래층, 모래자갈층 그리고 안산암질 응회암의 풍화대로 구성되어 있으며, 지하 약 48.5~54.0m 이하에서 기반암이 나타난다(부산대, 2004). 본 연구에서는 취수를 하기 전 자연적인 평형상태의 수두를 재현하고자 정상류상태일 때를 모의하였으며 관측공 자료는 8개 중 4개만 선택하여 사용하였다. 표 1은 연구지역에 대한 지하수 모델링에 사용한 조건을 나타낸다.

초기 투수량계수는 0.02 m^2/sec로 하였는데 이는 부산대(2004)에서 관층공 주변의 지반에 대해 실시한 입도 분석 결과를 근거로 가정한 것이다. 초기 매개변수값은 문헌이나 실내실험을 통해 어느 정도 상식적인 범주 내에서 가정해야 하는데 이는 실제와 너무 동떨어진 초기값으로 역해석을 수행하면 지나친 반복횟수를 거치거나 목적함수 값이 발산하기 때문이다.

표 1. 모델링 조건

흐름상태	정상류(steady state)
노드수	가로: 20개, 세로: 25개
펌핑기간	8개월
관정당 펌핑율	2000 m^3/day
포화대 평균 두께	38.5 m

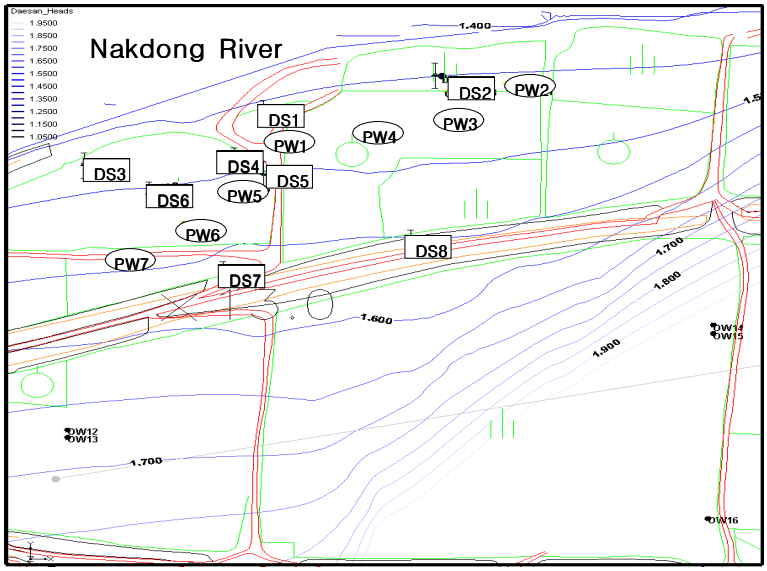

그림 2. 창원시 대산면

3.2 역해석 결과

역해석 수행 결과 투수량계수는 초기값 0.02 m^2/sec 에서 0.0036 m^2/sec 으로 수렴되었다. 정상류 상태이므로 결과는 관측공마다 시간에 대해 평균한 지하수위 값을 사용하여 나타내었다. 표 2는 역해석 수행전과 수행 후, 오차를 비교한 것이며 그림 3은 투수량계수가 최적값으로 수렴되는 과정을 나타낸 것이다.

표 2. 역해석 수행전과 수행후 지하수위 비교 (단위:m)

관측공	관측값	역해석전		역해석후	
		계산값	오차(%)	계산값	오차(%)
D1	1.987	1.527	23.1	1.895	4.6
D2	2.038	1.511	25.9	1.781	12.6
D3	2.23	1.583	28.7	1.663	25.4
D4	2.313	1.616	30.1	2.016	12.8

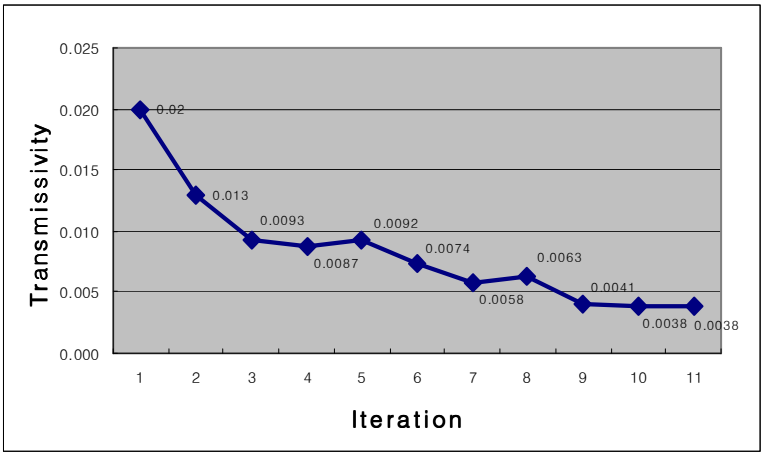

그림 3. 투수량계수 변화

4. 결 론

본 연구에서는 역해석을 이용하여 강변여과 지역 대수층의 투수량계수를 추정하였다. 이를 위해 역해석의 개념을 알아보고 2차원 지하수 흐름해석 프로그램인 MOC을 이용하여 역해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 실제 강변여과 지역인 창원시 대산면 지역에 적용하여 정상류 상태일 때 투수량계수를 추정하였다. 초기 투수량계수는 입도분석을 통해 어느 정도 최적값과 유사한 범위 값을 사용하였다. 역해석 수행 후 보정된 투수량계수로 계산한 지하수위 값이 실측값과 상당히 유사해 짐을 확인할 수 있었다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-4-2)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 동국대학교(2005), 인공함양을 활용한 한강 및 낙동강 유역 수도공급 방안 연구 1차년도 요약 보고서.
2. 부산대학교(2004), 낙동강 중하류 강변여과수 개발지역 수리지질 특성평가.
3. 윤성용, 김상준, 박재현(2002), 강변 여과과정에서 박테리아의 발생 및 이동에 관한 모형개발, 환경기술연구개발사업 보고서, 인천지역환경기술개발센터.
4. Mahar, P. S., and Dataa, B.(2001), "Optimal Identification of Ground-Water Pollution Sources and Parameter Estimation", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.127, No. 1, pp. 20-29.
5. Press, Teukolsky, Vetterling, Fannery(1992), Numerical Recipes, 2nd ed., Cambridge.
6. Sakurai, S., and Takeuchi, K. (1983), "Back Analysis of Measured Displacement of Tunnels", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.16, pp. 173-180.