

추적자시험(Tracer Test)의 현장적용 연구

정형재 · 김은진 · 이강근* · 배광욱*

농어촌진흥공사 농공기술연구소, *서울대학교 지질학과

추적자시험(Tracer Test)은 지중을 흐르는 지하수의 유동속도와 유동방향을 개략적으로 파악하기 위하여, 누수되는 제당 등에서 염료, 소금 등을 이용하여 시행되어 왔다. 그러나 근래에는 지하수의 유동속도, 방향은 물론이고, 지하수 연령, 지하수의 지질학적 및 지구화학적 기원, 대수층 내 물의 양, 수리전도도 등 대수층에 관한 물리적, 화학적 특성과 오염물질의 분산(dispersion), 이송(advection), 확산(diffusion), 흡착(sorption) 등을 파악하기 위하여, 또 수질모델링의 자료 취득수단으로 시행된다.

일반적으로 현장 추적자시험에는 4가지 유형이 있다. 첫째는, 단일 우물에서의 순간 주입후 회수시험법으로, 우물에 추적자를 주입 후 변화하는 농도를 측정하고, 일정시간이 경과한 다음 양수하며 농도를 측정하는 방법으로서 우물 주변의 분산도는 농도 데이터로 산출된다. 둘째는 자연구배 시험법으로서, 지하수가 자연상태에서 수두구배를 갖는 경우 지하수 흐름의 교란없이 대수층 내에 추적자를 주입하고 하나 혹은 그 이상의 지점에서 관측한다. 셋째, 재순환 시험법으로서, 하나의 우물에서 추적자가 흐름 내로 주입되고 다른 우물에서 양수가 이루어지며, 주입-양수 시스템을 통해 순환이 이루어진다. 수위강하가 발생하는 우물에서의 시간에 따른 농도 변화는 분석적 모델이나 수치 모델을 이용한 분산도 산출에 이용된다. 넷째, 두개 이상의 우물을 이용한 단공주입-다공관측 시험법으로서, 수위변화가 발생하는 주입 또는 양수 영향권 내의 다른 한개 우물에 추적자가 주입되며, 영향권 내의 다른 우물에서 관측한 농도변화를 이용하여 분산도를 계산한다.

본 추적자시험은 강원도 원주시 축산부지 내에 설치한 관측망을 이용하였다. 관측망 지역의 지질은 선캠브리아기 혹은 시대 미상으로 분류되는 변성암류와 이를 후기에 관입한 화강암류로 대별된다. 변성암류는 부분적으로 엽상구조를 보이는 흑운모편마암으로서 compositional layer 등으로 미루어 퇴적기원으로 추정되며, 본 지역 분포지질의 기저를 이룬다. 화강암류는 중생대 유라기로 추정되는 소위 대보화강암으로서, 조립 내지 중립질의 흑운모화강암과 백운모를 소량 함유하는 복운모화강암이 상호 점이적으로

분포하며, 편마암류와는 관입접촉하고 있다. 축산단지는 1,500수 규모의 양돈장으로서, 오폐수 정화시설과 돈분, 왕겨 혼합장으로부터 점오염 형태로 오염물질이 흘러 내리고, 하부에는 소하천이 흐르는 5.5° 경사진 지역으로 오염원 추적에 적당하다고 판단되었으므로 이 지역에 관측망을 설치하였다. 관측공은 배경수질 분석을 위한 측사 상류부 1공, 오염원 하류에는 2공 1조로, 1공은 미고결층까지 다른 1공은 미고결층을 제외한 암반까지 3조로 하였고, 관측망 중간 부위에는 양수정(관측겸용)과 그 좌우에 미고결층까지 2개의 관측공을 배치, 총 10공을 설치하였다.

현장에서 시행한 추적자시험은 두개의 우물을 이용한 재순환 시험법으로서, 이는 선형 순간수위시험 결과 대수층의 수리전도도가 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/sec 정도로, 관정간격과 파쇄 매질에서의 불확실한 지하수 유동경로를 고려할 때 주입에서 검출까지 많은 시간이 소요될 것으로 추정되었으므로, 하부공에서 양수하여 도달시간을 단축할 수 있도록 하기 위해서였다. 주입공과 양수·검출공은 암맥이나 파쇄구간 등의 분포 심도, 지하수 위, 양수기 설치가능 여부, 지형경사 등을 고려하여, 추적자 주입공으로는 B-6 호공(상류 관측공)을, 양수·검출공은 W-1호공(양수 겸용 관측공)을 선정하였다(표 참조). 이는 주상도 상의 B-6호공 17.0m-18.0m와 W-1호공 11.5m-13.0m 심도에 존재하는 풍화 받은 암맥이 지하수 유로 역할을 할 것으로 판단되었으며, 양수기 설치가 W-1호공에서 가능하였기 때문이다. 주입 추적자 전량이 대상 대수층으로 유입되고 공내 수직 분산이 최소화 되도록 주입공의 16m 깊이에 단일packer를 설치하였으며, 추적자 용액의 주입량과 검출정의 양수량이 동일하게 유지될 수 있도록 조절하기 위하여 추적자시험 전 적정 양수량과 안정수위 산출을 위한 예비양수를 실시하였다. 그 결과 적정양수량은 12.6톤/일, 안정수위는 지표로부터 4.4m이었다.

<추적자시험 대상우물의 특성>

특 성 \ 공 번	B-6 호공 (상류 관측공)	W-1 호공 (양수 겸용 관측공)
위 치	상류 (추적자 주입공)	하류(추적자 검출공)
우물 구경 및 심도	6", 4m 4", 32m	8", 4.7m 6", 51.3m
케이싱 구경 및 심도	5", 4m	6", 4.7m
지하수 유로	풍화받은 암맥 17.0 ~ 18.0m	풍화받은 암맥 11.5 ~ 13.0m

추적자시험을 실시하는 목적이 오염물질의 분산도 측정일 경우에는, 모든 오염물질의 회석률이 오염 평가에 매우 중요하므로 추적자를 특성에 맞게 선택하는 것이 중요하다. 추적자의 종류로는 염료류, 무기염류(NaCl, KCl, NaI, KBr 등), 방사성동위원소, 환경동위원소 등이 있으나 이들은 최저 검출농도가 다르고 각각 장단점이 있으므로, 대수층 특성과 지하수 배경수질에 대한 검토를 선행하여, 극히 낮은 농도에서도 추적자가 검출될 수 있고, 지하수나 지층 구성물질과 물리, 화학적으로 반응하지 않도록 설계하여야 한다.

본 연구에서는 배경수질과 검출농도의 명확성 등을 감안하여 비반응물질로 분류되는 염화브롬(KBr)을 추적자로 선택하였고, 주입이 종료될 즈음 검출이 이루어지도록 총 주입량을 3,000 l로 하였다. 주입을 연속적으로 시행하기 위하여, 탱크(용량 550 l) 2개를 주입공 내에 설치한 packer에 연결하여 회당 500 l 씩 연속 6회 주입하였다. 주입농도는 휴대용 이온미터와 전기전도도미터로 검출 가능토록 2,000ppm으로 결정하고 이를 위하여 염화브롬 9kg(회당 1.5kg)을 사용하였으나, 3회 주입 부터는 농도가 높아진 지하수를 양수하여 주입용액 제조에 사용케 되어 그 농도가 점차 상승하였으므로 분석대상에서는 제외하였다. 주입속도는 밸브를 조정하여 1.435×10^{-4} m³/s로 일정하게 유지하였다. 현장 측정항목은 시간 경과에 따른 전기전도도 및 수온으로서, 시간 간격은 초기 5분, 전기전도도 증가가 관측된 이후에는 2분으로 하였으며, 매 측정 시 지하수 시료를 채취하여 브로마이드 이온농도를 실내 분석하였다.

추적자 주입 당시의 배경수질 전기전도도는 $333 \mu\text{s}/\text{cm}$ 이었으나, 주입 약 15분 경과 후 검출공의 전기전도도가 $368 \mu\text{s}/\text{cm}$ 로 증가하며 추적자의 plume이 검출되기 시작하였다. 이는 packer 위치 하부인 반화강암(암맥) 주변 파쇄대를 따라 지하수가 빠른 속도로 흐르고 있기 때문으로 분석되었다. 현장 측정치인 전기전도도와 실내 분석한 브로마이드 이온의 검출농도는, 절대치는 다르나 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 전기전도도 $1 \mu\text{s}/\text{cm}$ 증가에 브로마이드 이온의 검출농도는 0.7mg/l 씩 증가하였다. 이때의 상관계수는 0.9047로 양자 간에 정(+)의 상관관계가 매우 높게 나타났다. 수리분산계수는, uniform flow에서 일정량을 연속 주입 후 분산도를 산출할 수 있는 IGWMC의 CATTI(computer aided tracer test interpretation) 프로그램을 이용하여 2차원으로 해석하였는데, 입력자료는 시험구간(6m), 주입량(1.435×10^{-4} m³/s), 주입농도(3kg/m³), 양수량(1.435×10^{-4} m³/s), Darcy velocity (6.667×10^{-5} m/s), 대수층 두께(4.5m) 등이며, 이로 부터 대수층의 유효공극율(0.1)과 중분산도(3.750×10^{-1} m), 횡분산도(1.600×10^{-6} m)를 산출하였다.

추적자시험 결과, 본 지역의 지하수는 다수의 소규모 균열부를 따라 작은 속도로 흐를 것이라는 당초 예상과는 달리 B-6호공의 심도17.0~18.0m와 W-1호공의 11.5~13.0m를 연결하는 반화강암 암맥 주위의 파쇄대를 빠른 속도로 흐르고 있음이 확인되었는 바, 정확한 대수층 수리상수 산출, 시추 과정에서의 logging과 공내검층에 의한 지질단면도 작성 등으로 최적의 시험방법 선택이 중요하며, 추적자의 검출농도와 정의 상관관계를 갖는 전기전도도의 현장측정을 늘리고 브로마이드 이온농도의 실내 분석을 줄여 원활한 시험이 가능토록 계획하여야 할 것이다.

본 연구는 수문·수질모델링을 시행하여 오염물질의 확산범위, 농도 변화, 자연감쇄 등을 예측하는 것이 목적이므로, 차후 추적자시험에서는 지하수 유동속도를 감안 인위적인 수위저하 없이 상류공에 추적자를 투입하고 하류공에서 검출하는 자연구배 시험법으로 분석하여 금회 시행한 결과와 대비할 계획이다.