

지하수 수위 및 수온의 장기 측정자료 분석

구 민 호 (공주대학교 지질환경과학과 조교수)

김 형 수 (한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원)

안 경 환 (한국수자원공사 수자원연구소 연구원)

1. 서 론

최근 인구 증가 및 산업 발달에 따른 용수 수요의 증가로 국내 수자원의 부족 현상이 심화되면서 지하수에 대한 의존도가 높아지고 있다. 하지만 1990년대 이 후 지하수자원의 무분별한 개발로 인해 지하수 고갈, 지반 침하, 지하수 오염 등의 문제들이 발생하여 국내 지하수자원의 효율적인 이용과 관리의 필요성이 높아지고 있다. 이에 건설교통부는 지하수법에 근거하여 1995년에 국가 지하수 관측망 설치계획을 수립하고(건설교통부, 1995), 사업을 수행하여 현재 총 155개소의 지하수 관측망이 운영되고 있다.

본 연구는 지하수 관측망에서 자동 계측되는 수위 측정자료와 기상관측소의 강우량 자료를 분석하여 강우량과 수위 변동과의 상관관계를 파악하고, 지하수 함양량과 관계되는 수리지질학적인 인자를 추정하는 것을 목적으로 한다. 소유역별 함양량의 평가는 국내 지하수자원을 효율적으로 이용하는데 매우 중요하며 본 연구의 결과는 이러한 평가를 수행하는데 필요한 자료로 활용될 수 있으리라 예상된다.

본 연구에서는 또한 지하수 관측망에서 측정되는 수온 변동 자료를 분석하여 대수층 또는 암반의 열확산계수(thermal diffusivity)를 추정하였다. 일반적으로 심도가 크지 않은 충적층 대수층에서의 수온은 기온의 영향을 받아 연주기의 변화 특성을 보이며, 주로 주변 토양 및 암반의 열확산계수에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서는 1차원 열전도 모델을 적용하여 주기적 변동 특성을 나타내는 충적층 지하수의 수온 측정자료로부터 열확산계수를 추정하는 방법을 제시하였다.

2. 연구 내용

2.1 지하수 수위 변동 분석

강우량 P 에 대한 단위 면적당 지하수 함양량(R)은 다음 식과 같다.

$$R = \alpha(P - P_0) \quad (1)$$

여기서 α 는 함양율(recharge ratio), P_0 는 지하수 침투가 시작되는 임계 강우량(threshold precipitation)을 나타낸다. 자유면 대수층의 경우 지하수 함양량 R 은 수위 상승량(Δh)과 비산출률(S_y)의 곱과 같으므로 강우량과 지하수위 변동과의 관계는 다음 식과 같다.

$$\Delta h = \frac{\alpha(P - P_0)}{S_y} \quad (2)$$

피압 대수층의 경우 비산출률(S_y) 대신 저유계수(S)를 사용한 동일한 식이 적용된다. 함양율(α)이 강우량에 관계없이 일정하다고 가정하면 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d(\Delta h)}{dP} = \frac{\alpha}{S_y} \quad (3)$$

식 (3)의 좌변은 강우량에 대한 수위상승의 변화율을 나타내는 무차원의 물리량으로 대수층의 수리 특성을 반영한다.

본 연구에서는 지하수 수위의 장기 관측자료 및 강우량 자료를 이용하여 식 (3)의 강우량에 대한 수위상승의 변화율을 구하였다. 지하수 수위의 장기 관측값으로는 건설교통부에서 설치, 운영중인 155개 국가 지하수 관측소의 1997, 1998년도 측정자료를 이용하였으며, 강우량은 지하수 관측소 인근의 기상관측소 및 AWS(자동기상관측소)의 관측자료를 이용하였다.

그림 1은 충북 보은 관측소에서 측정된 지하수의 수위와 일강우량의 변화를 나타낸다. 도시된 측정 자료로부터 강우에 따른 지하수 수위상승이 뚜렷하게 나타나는 점들을 선별하여, 그림 2와 같이 강우량(P)과 수위상승량(Δh)을 구하였다. 이러한 방법으로 구한 여러 점의 P 와 Δh 를 이용하여 그림 3과 같이 두 값 사이의 선형의 관계식으로부터 강우량에 대한 수위상승의 변화율을 산정하였다.

현재 국가 관측망 가운데 11개의 관측소에 대하여 위와 같은 분석이 완료되었는데, 그림 3의 보은 관측소의 경우와 같이 P 와 Δh 는 일반적으로 선형의 관계를 잘 보여준다. 11개 관측소의 강우량에 대한 수위상승의 변화율은 2.6 - 38.7 m/m 사이의 값을 나타낸다. 이러한 값의 변화는 식 (3)에서와 같이 대수층의 저유계수와 함양율의 차이에 기인한다. 따라서 관측지에서 현장 양수시험을 통하여 대수층의 저유계수를 산정하면 함양율 추정이 가능하

며, 역으로 지하수위 강하곡선을 이용하여 함양율을 산정하면(최병수, 안중기, 1998) 대수층의 저유계수를 추정할 수 있다.

국가 지하수 관측망의 모든 관측소에 대하여 분석이 완료되면 관측소의 지형 및 지질 요인들과 분석값의 상관성 여부를 파악할 예정이다.

2.2 지하수 수온 변동 분석

155개 지하수 관측망에서 수위와 함께 측정되는 수온의 장기 측정자료를 이용하여 토양 또는 암반의 열확산계수를 추정하였다.

그림 4는 경기도 가평 관측소의 수온 측정 기록으로 지하수의 전형적인 수온 변동 특성을 보여준다. 심부에 위치하는 암반 지하수의 경우 연중 거의 일정한 온도를 유지하며, 천부의 충적층 지하수의 경우 지표면 온도 변화의 영향을 받아 연중의 변동 특성을 나타낸다. 그림 4와 같이 충적층 지하수의 수온은 지표면의 온도 변화와 비교할 때 진폭은 감소하면서 상이동(phase shift)이 발생하는 변동을 나타낸다. 이러한 변동 특성은 지표면 온도가 주기적으로 변할 때 지하의 온도 변화를 설명하는 1차원 열전도 모델에 잘 부합된다.

즉 지표면의 온도 변화를 아래와 같이 주기 함수로 나타내면,

$$T_s(t) = T_0 + \Delta T_s \sin(\omega t) \quad (4)$$

임의의 깊이 z 에서의 지온 변화는 다음과 같은 1차원 열전도 방정식의 해로 표현된다 (Turcotte and Schubert, 1982).

$$T(z, t) = T_0 + \Delta T_s e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2k}}} \sin\left(\omega t - z\sqrt{\frac{\omega}{2k}}\right) \quad (5)$$

여기서 ω 는 지표면 온도변화의 각속도를 나타내며 연중 변동의 경우 $1.99 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$ 의 값을 갖는다. k 는 열전도가 발생하는 토양 또는 암석의 열확산계수(thermal diffusivity)를 나타낸다.

본 연구에서는 관측망 지하수의 수온 측정자료를 이용하여 다음과 같은 방법으로 토양 또는 암석의 열확산계수를 추정하였다.

- (1) 관측소 인근에 위치하는 기상관측소의 기온 측정자료에 최소제곱법(Least Square Method)을 적용하여 식 (4)의 주기함수를 구하였다.

(2) 같은 방법으로 지하수 수온 측정자료에 잘 부합하는 주기함수를 구하여 진폭(T_g)과 상이동(t_0)을 구하였다.

(3) 충적층 관측공에 설치된 온도측정 센서의 깊이를 z 값으로 사용하고, 위에서 구한 T_g 와 t_0 를 이용하여 아래 식으로부터 열확산계수를 계산하였다.

$$k = \frac{\omega z^2}{2(\ln \Delta T_0 - \ln \Delta T_g)^2} \quad (6)$$

$$k = \frac{z^2}{2\omega t_0^2} \quad (7)$$

(4) 식 (6)과 (7)에 의해 계산된 k 값이 잘 일치하지 않는 경우, 두 값의 범위 내에서 수치적으로 반복 계산하여 지하수 수온 측정자료에 잘 부합하는(best-fitting) k 값을 구하였다.

가평 관측소(그림 4)의 경우 식 (6)과 (7)에 의해 계산된 k 는 각각 $4.0 \text{ mm}^2/\text{sec}$, $4.1 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 로 유사한 값을 나타내며, 1차원 열전도 모델에 의하여 충적층 지하수의 수온 변화를 잘 설명할 수 있음을 보여준다. 그림 5는 가평 관측소의 수온 변화 분석 결과를 도시한 것으로 측정된 수온 변화와 열전도 모델에 의하여 계산된 값이 잘 일치함을 볼 수 있다.

위와 같은 방법으로 분석이 완료된 10개소의 k 값은 $3.0 - 13.5 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 사이의 값을 나타낸다. 암석의 열확산계수는 지열학(geothermics)의 연구에서 가장 중요한 물리량으로 본 연구의 결과는 우리 나라의 지열 연구에 기초 자료로 사용될 수 있으리라 예상된다. 앞으로 국가 지하수 관측망의 모든 충적층 관측소에 대하여 열확산계수를 산정하고, 투수계수 및 저유계수와 같은 대수층의 수리 특성과 열확산계수와의 상관성에 대하여도 후속 연구로 수행할 예정이다.

3. 참 고 문 헌

- 건설교통부, 한국수자원공사, 1995, 지하수 관리조사 보고서: 지하수자원 기본조사(3차), IPD-95-5a.
- 최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양을 산정방법 연구, 지하수환경, 5(2), p. 57-65.
- Turcotte, D.L. and G. Schubert, 1982, Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems, John Wiley & Sons, pp 450.

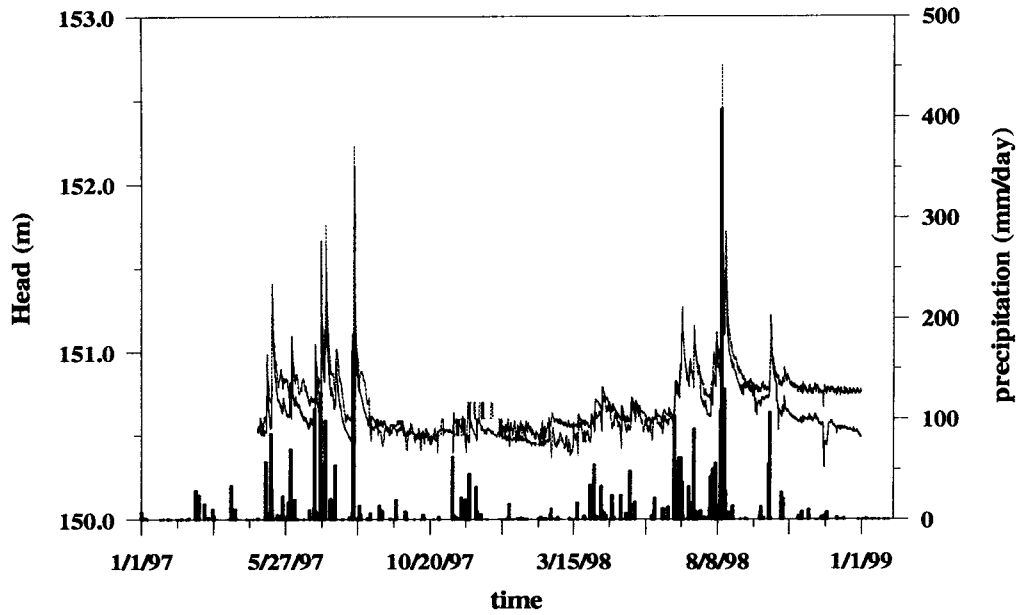


그림 1. 충북 보은 관측소의 지하수 수위 변동 곡선
(굵은 실선: 암반지하수, 가는 실선: 충적층지하수).

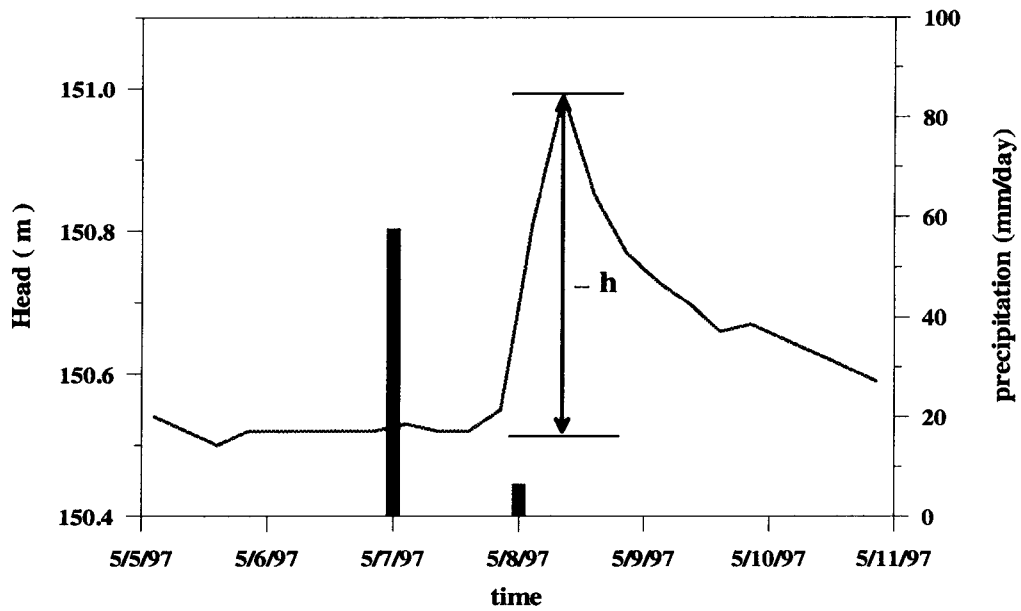


그림 2. 지하수 수위 변동 분석의 예.

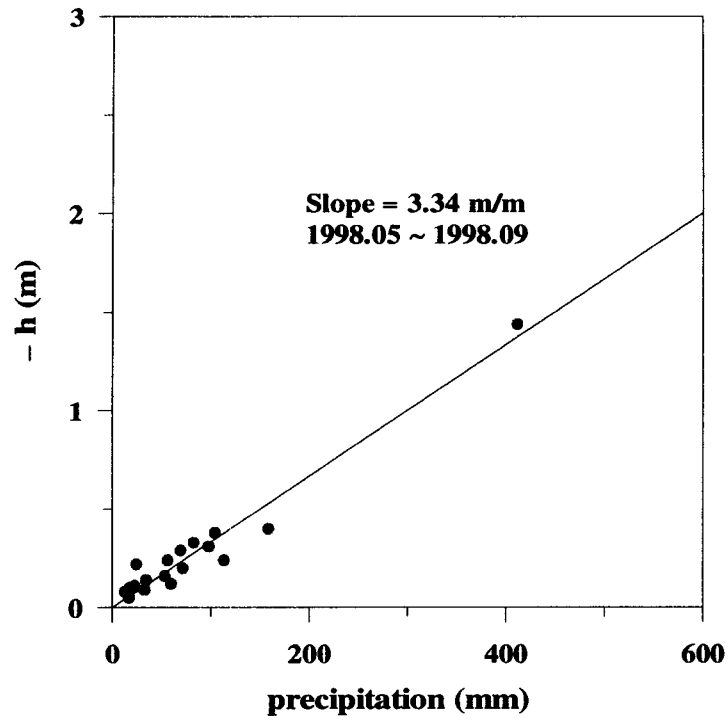


그림 3. 충북 보은 관측소에서 강우량에 대한 수위 상승의 변화율 분석.

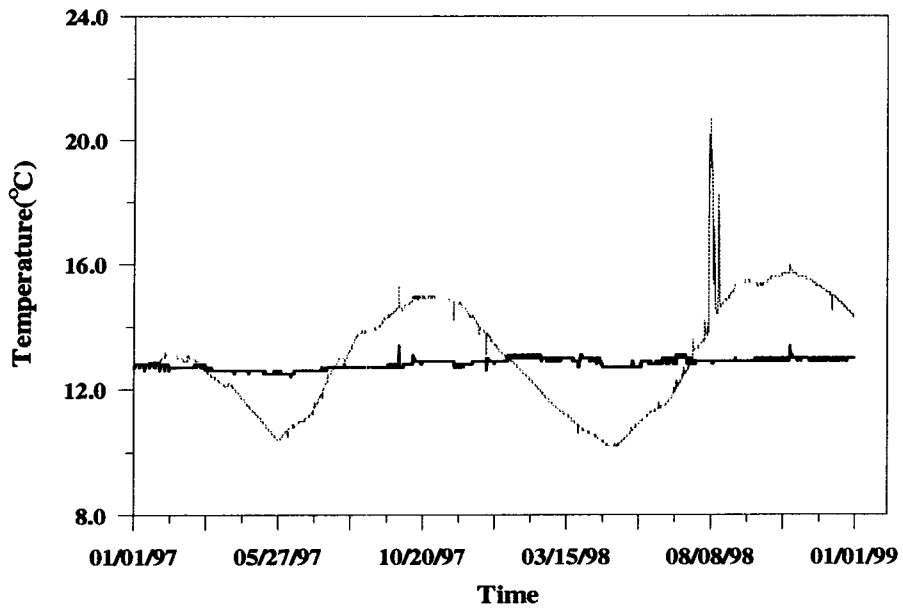


그림 4. 경기도 가평 관측소의 지하수 수온 변동 곡선
(굵은 실선: 암반지하수, 가는 실선: 충적층지하수).

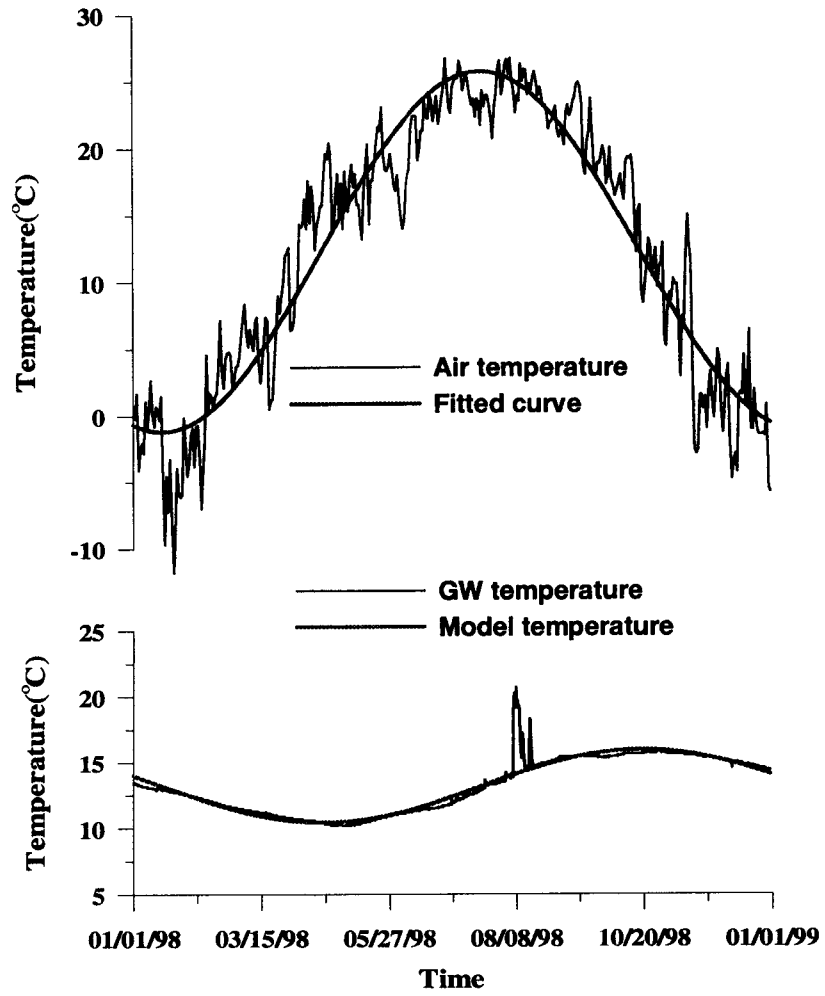


그림 5. 경기도 가평 관측소에서 지하수 수온 분석.