

지하수 함양량 추정 방법

박창근 · 김남원 · 김성탁* · 김남중**

한국건설기술연구원, *건설교통부 수자원연구소,

**한국수자원공사 지질지하수부

1. 서론

지하수법 제2조에 의하면 지하수란 '지하의 지층이나 암석사이의 빈틈을 채우고 있는 물'로 정의하고 있는데, 이것은 토양 및 암석 속의 포화 및 비포화 상태에 있는 물을 모두 의미하는 포괄적 개념이다. 수문학적 또는 공학적 측면에서 '지하수는 지하의 투수성이 높은 지층에 포함된 사용가능한 물'로 정의되기도 하고(선우중호, 1983), 또한 '토양과 지층에서 자유수면 아래에서 발생하는 포화된 지표하의 물'이라고도 정의한다(Freeze와 Cherry, 1979).

지하수법 제6조에 '지하수 부존량' 및 '개발가능량'이란 용어가 명시되어 있다. '지하수 부존량'이란 지하수법에서 정의된 지하수의 양을 의미하는 것이라 판단되며, 국내에 분포된 각종 토양 및 암석의 분포면적, 부존심도와 공극율을 이용하여 지하수 부존량을 추정하고 있다. 우리나라 지하수 부존량은 13,240억톤(농진공, 1992)에서 15,448억톤(한정상, 1995)까지 추정하고 있으나, 이러한 수치는 단지 상징적인 것에 지나지 않는다. 그것은 수자원 계획 또는 지하수 계획을 수립하는데 있어 어떠한 지표도 제공하지 못한다.

'지하수 개발가능량'이란 '양수된 물의 수량과 수질이 시간에 따라 변하지 않는 평형 상태에서 대수층으로부터의 연간 지하수 양수량'이라 정의하고자 한다. 이것은 국가차원의 수자원 종합계획에서 지하수 적정개발 및 이용의 목표를 설정하는데 있어서 하나의 중요한 지표가 될 수 있다. 그러나 지하수는 대량개발이 어렵다는 특성으로 인하여 용수수요지 인근에서 개발이 이루어져야만 경제성이 확보되기 때문에, 용수수급 계획의 수립에 있어 지하수 개발가능량은 하나의 지표로서 가치가 있고 아무런 여과장치 없이 그대로 수자원 계획에 반영될 성질의 것이 아니다.

지하수 개발가능량이라는 손에 잘 잡히지 않는 개념적 물리량을 추정하여야 할 경우 기존에 개발된 많은 모형들을 이용할 수 있다. 그러나 대상구역은 공간적으로 비균질한 특성을 가지고 있으므로 어느 한 구역에 적합하다고 판단되는 방법이 다른 구역에

적합하다고는 할 수 없다. 더구나 개념적인 물리량인 지하수 개발가능량 추정시 적합하다고 판단한 모형에 의한 결과를 검증(verification)할 방법이 현재로서는 없다. 따라서 실용적인 면에서 볼 때 보다 복잡한 모형을 사용하더라도 현실의 상태를 결코 더 잘 설명할 수 없는 경우에는 단순한 모형을 사용하는 것이 바람직할 것이다. 단순한 모형의 물리적 의미가 현실의 상태를 비교적 적절히 설명할 수 있다면, 그것을 모든 유역에 일관성 있게 적용할 수가 있다. 본 고에서는 지하수 개발가능량을 추정하는 모형을 제시함에 있어 물리적 의미를 가지고 있으면서 가능한 단순한 기법의 사용에 초점을 맞추고자 한다.

2. 기추정된 지하수 함양량

지하수 개발가능량과 같은 의미인 지하수 함양량을 산정하는 방법으로는 물수지 방법, 지하수 관리분석 방법, 해석적 방법, 기저유출 분석 방법 등이 있다. 각 방법의 장단점을 요약하면 표1과 같다.

표 1 지하수 함양량 산정 방법의 장단점

방 법	장 점	단 점	연구자(들)
물수지 방법	사용된 이론이 명확함	증발량 계산이 어려움	Lesack(1993)
지하수관리 분석 방법	적용이 간편함	많은 관측정에 대한 장기간의 관측자료가 필요함	Liu와 Zhang(1993)
해석적 방법	개념이 명확함	자연상태를 정확히 모의하지 못함	Su(1994)
기저유출 분석 방법	자연상태를 잘 설명	기저유출 분리에 임의성 내재	이동률(1995)

표2에 수록된 바와 같이 많은 연구자 또는 기관이 우리나라 연간 지하수 개발가능량 또는 지하수 함양량을 추정하였는데, 주로 물수지 방법을 이용하였다. 이동률(1995)은 지하수 감수곡선을 이용하여 5대강 유역을 대상으로 하여 지하수 함양량을 추정한 바 있다.

3. 기저유출 분리 기법

기저유출의 정의에 대하여 이견이 있을 수 있으나, 본 고에서는 기저유출은 지하수 유출을 의미한다. 따라서 수문곡선으로부터 기저유출의 분리를 갈수기간과 함양기간의

로 나누어 고려할 수 있다. 여기서 우리나라의 경우 4월~6월, 9월~다음해 2월이 갈수 기간에 해당하고(이동률, 1995), 함양기간은 강우에 의한 2월~4월, 6월~9월을 의미한다.

표2 연간 지하수 함양량 추정값

연구자 또는 기관	용어	추정량 (억톤/년)	연평균 강우량에 대한 비율	추정방법
선우중호 (1992)	적정개발가능량	100~150	7.9~11.8%	Cheremisinoff(1988)의 기준, 물수지
한정상(1995) 이천복(1994)	지하수 함양량	228	18 %	물수지(건설부 통계편람)
최병수 (1992)	지하수 함양량	205	16 %	물수지(건설부 통계편람, 1991)
	경제적 지하수 이용가능량	143	11.3 %	함양량의 70%
수자원공사 (1993)	적정개발가능량	134.3	10.6%	지하수자원 기본조사 보고서(1993) 물수지, 유역별 적정개발가능량 분석 대상지역 : 5대강 유역
수자원공사 (1994)	기저유출량	193.9	15.3%	지하수자원 기본조사 보고서(1994) 다목적댐유입량(갈수시 3개월) → 기저유출량 산정
	적정개발가능량	131.6	10.7%	안정율 70% 이용
수자원공사 (1995)	기저유출량	186.3	14.7%	지하수자원 기본조사 보고서(1995) 1994년 자료 이용 Ridge regression 기법 이용
	적정개발가능량	132.7	10.3%	안정율 70% 이용
이동률 (1995)	지하수 함양량	64.8	7.8 %	지하수감수곡선 이용, 5대강 유역 갈수기의 지하수 유출량 고려

3.1 갈수기간의 기저유출

흐름방정식(flow equation)을 이용하는 기법은 물리적 특성이 단순화된 대수층에 흐름방정식을 적용하여 해석적으로 기저유출 곡선을 산출하는 방법이다. 이 방법에 의한 대표적 결과로는 시간 t에서 기저유출 $Q_b(t)$ 가 다음과 같이 표시된다.

$$Q_b(t) = Q_0 \cdot 10^{-t/K_1} \quad (1)$$

여기서 Q_0 는 감수초기의 유량이고, K_1 은 감수계수(recession coefficient)이다. 다른 형

태로는 다음 식들이 있다(Singh, 1992).

$$Q_b(t) = Q_0 \cdot k^t \quad (2)$$

$$Q_b(t) = Q_0 / (1 + \sigma t)^2 \quad (3)$$

여기서 k 와 σ 는 감수계수이다. 또한 식(1)을 series 형태로 표시한 식도 있다 (Nutbrown, 1975).

수문곡선 분리를 일관성 있게 하기 위하여 이론적 기반을 가진 가능한 단순한 기저 유출 곡선을 선정하고자 한다. 따라서 기저유출이 반대수지상에 직선으로 나타나는 식 (1)을 갈수기간의 지하수유출 곡선으로 선택한다.

3.2 홍수기간의 기저유출 분리

함양기간에서 수문곡선으로부터 감수곡선을 외삽하여 분리하고자 할 경우, 다음 그림1에서와 같이 몇가지 방법이 제안되고 있다.

함양기간중 기저유출은 분석자의 주관에 따라 곡선 ①과 곡선 ②사이의 임의의 곡선을 따라 발생할 것으로 예견된다. 일반적으로 수문곡선에서 기저유출 분리시 어떠한 방법을 사용하더라도 사용된 방법이 일관성만 유지될 수 있다면 전체적인 관점에서 볼 때 그 오차는 무시할 수 있다고 알려져 있다(선우중호; 1983, 이원환; 1989).

따라서 본 연구에서는 일관성을 유지하기에 가장 편리한 방법으로 그림1에서 곡선 ③과 같이 두 갈수기간 사이의 기저유출 곡선에서 종점(점A)과 시점(점B)을 직선으로 외삽한 곡선을 함양기간의 지하수유출 곡선으로 선택하고자 한다. 여기서 그림1에 도시된 수문곡선에서 y 축, 즉 유량은 상용대수값이다.

4. 지하수 함양량 산정

갈수기간에서 기저유출은 식(1)과 같이 표시될 수 있으므로, 식(1)을 이용하여 갈수기간중 기저유출량을 계산하는 절차는 다음과 같다(Meyboom; 1961, 이동률; 1995). 그림 2에서와 같이 (i) 감수곡선에 대하여 감수시점 $t_0^{(i)}$ 에서 시작되는 기저유출은 강우에 의한 지하수 함양이 없다면 무한히 계속될 것이며, 상기 기간동안의 기저유출량을 잠재 지하수 유출량($V_t^{(i)}$, total potential groundwater discharge)이라 하고 이것은 다음과 같이 계산된다. 이때 계산의 편의상 $t_0^{(i)}=0$ 이다.

$$V_t^{(i)} = \int_{t_0^{(i)}}^{\infty} Q_b^{(i)} dt = \frac{Q_0^{(i)} K_1}{2.3} \quad (4)$$

감수시점 $t_0^{(i)}$ 에서 감수종점 $t_1^{(i)}$ 까지 실제로 대수층으로부터 유출되는 지하수 유출량을 실제지하수 유출량 ($V_a^{(i)}$, actual groundwater discharge)이라 한다.

$$V_a^{(i)} = \int_{t_0^{(i)}}^{t_1^{(i)}} Q_b^{(i)} dt = \frac{Q_0^{(i)} K_1}{2.3} - \frac{Q_0^{(i)} K_1 / 2.3}{10^{t_1^{(i)}/K_1}} \quad (5)$$

잠재지하수 유출량 ($V_t^{(i)}$)과 실제지하수 유출량 ($V_a^{(i)}$)과의 차를 잔여지하수 유출량 ($V_r^{(i)}$, remaining potential groundwater discharge)이라 하며, 이것은 감수종점에서 대수층이 보유하고 있는 지하수 저류량을 의미한다.

$$V_r^{(i)} = V_t^{(i)} - V_a^{(i)} = \frac{V_t^{(i)}}{10^{t_1^{(i)}/K_1}} \quad (6)$$

함양기간 동안 함양된 지하수량중 함양기간 동안 유출된 지하수량을 제외한 양을 $R_1^{(i)}$ 라 하고, 그림 2를 참조하면 다음 식으로 계산된다.

$$R_1^{(i)} = V_t^{(i)} - V_r^{(i-1)} \quad (7)$$

두 감수곡선의 종점을 기준으로 하여 지하수 물수지 분석을 실시하면, 다음과 같이 대수층에서 지하수 변화량 $\Delta S^{(i)}$ 는 각 잔여지하수 유출량의 차로 표시된다.

$$\Delta S^{(i)} = V_r^{(i)} - V_r^{(i-1)} \quad (8)$$

그림 2를 엄밀히 살펴보면 감수기간의 기저유출량 $V_a^{(i)}$ 와 식(7)의 $R_1^{(i)}$ 는 일치하지 않는다. 그러나 식(8)에서 수년간의 지하수 변화량 $\Delta S^{(i)}$ 를 평균하면 $\Delta S^{(i)} \approx 0$ 가 된다(이동률, 1995). 따라서 식(8)에서 근사적으로 $V_r^{(i-1)} = V_r^{(i)}$ 로 표시할 수 있으므로, $R_1^{(i)}$ 를 감수기간의 기저유출량이라 가정하여도 큰 오차는 없을 것이다.

그림 2에서와 같이 함양기간 ($t_1^{(i-1)} \sim t_0^{(i)}$)동안 지하수 유출곡선이 두 감수곡선 사이에서 지하수유출량의 상용대수값과 시간이 선형으로 나타난다는 가정에 의하여 홍수기간 동안 지하수유출 곡선 $Q_g^{(i)}(t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_g^{(i)}(t) = Q_e^{(i-1)} \cdot 10^{Kt} \quad ; \quad Q_g^{(i)} = Q_0^{(i)} \quad \text{at } t = t_0^{(i)} \quad (9)$$

여기서 K는 상수이고, $Q_e^{(i-1)}$ 는 $t_1^{(i-1)}$ 에서의 유량 즉 (i-1) 감수곡선 종점에서의 유량이고, $Q_0^{(i)}$ 는 $t_0^{(i)}$ 에서의 유량 즉 (i) 감수곡선 시점에서의 유량이다. 여기서 계산의 편의상 $t_1^{(i-1)} = 0$ 로 가정하였다. 상기 식을 정리하면 다음과 같다.

$$Q_g^{(i)}(t) = Q_e^{(i-1)} \cdot 10^{\frac{t}{t_0^{(i)}} \log(Q_0^{(i)}/Q_e^{(i-1)})} \quad (10)$$

함양기간동안, 즉 $(i-1)$ 과 (i) 감수곡선 사이에서 지하수 유출량 $V_g^{(i)}$ 는 식(10)을 이용하면 다음과 같이 계산된다.

$$V_g^{(i)} = \int_{t_1^{(i-1)}}^{t_0^{(i)}} Q_g^{(i)} dt = \frac{Q_e^{(i-1)}}{2.3K} (10^{Kt_0^{(i)}} - 1) = \frac{t_0^{(i)} (Q_0^{(i)} - Q_e^{(i-1)})}{2.3 \log(Q_0^{(i)}/Q_e^{(i-1)})} \quad (11)$$

따라서 결론적으로 함양기간($t_1^{(i-1)} \sim t_0^{(i)}$)동안 강우에 대한 지하수 함양량 $R^{(i)}$ 는 함양기간의 기저유출량과 갈수기간의 기저유출량의 합으로 표시될 수 있다.

$$R^{(i)} = V_g^{(i)} + R_1^{(i)} \quad (12)$$

여기서 우변의 첫째항 $V_g^{(i)}$ 는 홍수기간동안 지하수 유출량을 의미하고, 둘째항은 갈수기간동안 지하수 유출량을 의미한다. 따라서 식(12)를 이용하여 주어진 수문곡선을 분리하여 지하수 함양량 즉 지하수 개발가능량을 추정할 수 있다. 여기서 사용되는 수문곡선은 댐 등과 같은 하천구조물에 의해 조절되지 않은 자료(unregulated data)이어야 한다.

6. 요약 및 결론

본 고에서는 지하수법에 명시는 되어있지만 정의되지 않은 용어를 수문학적 기반에 기초하여 실무적으로 쉽게 사용할 수 있도록 다음과 같이 정의하였다. 지하수법 제6조에 명시된 지하수 부존량은 지하수법에서 정의된 지하수의 양을 의미하며, 그것은 수자원계획에 있어 어떠한 지표도 제공하지 못하고 단지 상징적인 용어에 지나지 않는다. 지하수 개발가능량은 양수된 물의 수량과 수질이 시간에 따라 변하지 않는 평형상태에서 대수층으로부터의 연간 지하수 양수량이라 정의하였고, 그것은 수문학적으로 지하수 유출량과 동일하며 개념적으로 지하수 함양량과도 동일하다. 따라서 그것은 수자원 또는 지하수와 관련된 제반 계획에서 중요한 지표로 사용될 수 있다.

따라서 본 고에서 제시된 지하수 함양량 즉 지하수 개발가능량 추정 방법은 갈수기간뿐만 아니라 함양기간의 지하수유출을 고려한 것이다. 수문곡선으로부터 지하수유출 곡선을 분리하기 위해 제안된 방법은 물리적 의미를 가지면서 단순한 기법을 이용한 것으로, 모든 유역 또는 수문곡선에 일관성 있게 적용할 수 있는 방법이다. 즉 갈수기간의 지하수유출은 반대수지상에 직선으로 나타나는 감수곡선으로 표시되고, 함양기간의 지하수유출은 두 감수곡선 사이에서 지하수유출량의 상용대수값과 시간이 선형으로 표시된다고 가정하였다. 이와 같이 갈수기간 및 함양기간에서 지하수유출 곡선을 단순화 시킴으로서 쉽고 일관성 있게 수문곡선으로부터 지하수유출 곡선을 분리하여 지하수 함

양량을 계산할 수 있을 것이다.

참고문헌

- Cheremisinoff, Paul et al. edited (1988). Civil Engineering Practice, Chapt. 5: Water Use and Public Policy, Technomic Publishing Co.
- Dewalle, D. R., Swistock, B. R. and William, E. S. (1988). "Three-Component Tracer Model for Storm Flow on a Small Appalachian Forested Catchment," Jr. of Hydrology, 104, pp.301-310.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979). Groundwater, Prentice Hall, pp.2-3.
- Lesack, F. W. (1993). "Water Balance and Hydrologic Characteristics of a Rain Forest Catchment in the Central Amazon Basin," W. R. R., 29(3), pp.759-773.
- Liu, Y. and Zhang, C. (1993). "A Comparative Study of Calculation Methods for Recharge of Rain Fall Seepage to Ground Water in Plain Area," Ground Water, 31(1), pp.12-18.
- Meyboom, P. (1961). "Estimating Ground-water Recharge from Stream Hydrology," Jr. of Geophysical Research, 66(4), pp.1203-1214.
- Mink, J. F. (1992). "Groundwater Occurrence, Development and Sustainable Yields: Cheju Island, Korea," '92 Annual Joint Symposium on Water Resources and Water Quality Management, and Development and Conservation of Groundwater Resources in Che-Ju Do, Center for Water Resources and Quality Management, Choong-Buk Nat'l Univ., pp.69-73.
- Nutbrown, D. A. (1975). "Normal Mode Analysis of the Linear Equation of Groundwater Flow," W. R. R., 11(6), pp.979-987
- Singh, V. P. (1992). Elementary Hydrology, Prentice Hall, pp.308-323
- Su, N. (1994). "A Formula for Computation of Time-Varing Recharge of Groundwater," Jr. of Hydrology, 160, pp.123-135.
- Tallaksen, L. M. (1995). "A Review of Baseflow Recession Analysis," Jr. of Hydrology, 165, pp.349-370.
- 선우중호 (1983). 수문학, 동명사, pp.169-174
- 선우중호 (1992). "우리나라 지하수 개발의 필요성," 물 관련 정책토론회, 건설부·한국수자원공사, pp.99-119.

- 수자원공사 (1993). 지하수자원 기본조사 보고서
- 수자원공사 (1994). 지하수자원 기본조사(2차) : 지하수 이용관리법안 수립 및 대체용수
원 개발지역 산정조사 보고서
- 수자원공사 (1995). 지하수자원 기본조사(3차) : 지하수 관리조사 보고서
- 이동률 (1995). 지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기갈수량 예측, 고려
대학교 박사학위논문
- 이원환 (1989). 수문학, 문운당, pp.78-85
- 이천복 (1994). "한국의 지하수자원과 개발방향," 지하수개발과 농어촌용수, 농어촌진흥
공사, pp.133-164.
- 최병수 (1992). "지하수 개발의 현황과 문제점," 물관련 정책토론회, 건설부·한국수자원
공사, pp.157-170.
- 한정상 (1995). "지하수개발과 관리대책, 수자원 개발과 보존대책," 한국수자원공사,
pp.39-103

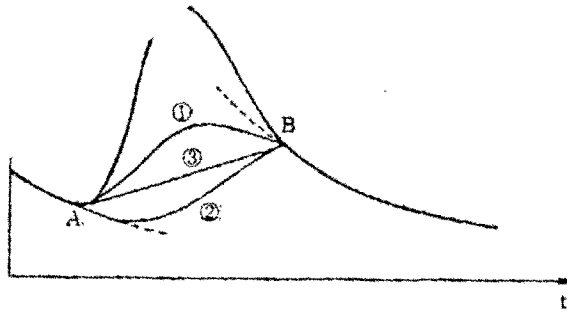


그림 1 지하수유출 곡선 분리

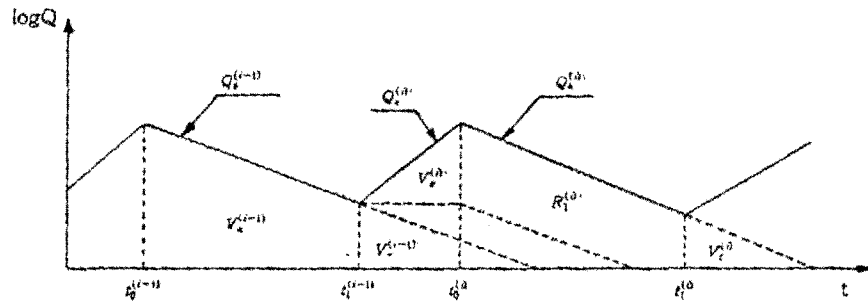


그림 2 수문곡선 분리에 의한 지하수 유출량 추정 모식도

- $Q_b^{(i)}$: 갈수기간에서 (i) 감수곡선
- $Q_g^{(i)}$: 합양기간에서 (i) 지하수유출 곡선
- $t_1^{(i-1)}$: (i-1)감수곡선 종점 또는 (i) 지하수유출 곡선 시점
- $t_0^{(i)}$: (i)지하수유출 곡선 종점 또는 (i)감수곡선 시점
- $V_a^{(i-1)}$: 갈수기간($t_0^{(i-1)} - t_1^{(i-1)}$)에서 실제 지하수유출량
- $V_g^{(i)}$: 합양기간($t_1^{(i-1)} - t_0^{(i-1)}$)에서 지하수유출량
- $V_r^{(i-1)}$: (i-1) 감수곡선 종점에서 잔여 지하수유출량
- $R_1^{(i)}$: $V_t^{(i)} - V_r^{(i-1)}$
- $V_t^{(i)}$: 잠재지하수 유출량, $t_0^{(i)}$ 에서 $Q_b^{(i)} = 0$ 인 시간까지의