

지형학적 인자에 관한 갈수량 매개변수 산정

박상현*, 정관수**, 김재한***

1. 서론

자연하천에서 갈수량(drought flow)은 지하 대수층으로부터 배출되는 유량으로 정의할 수 있다. 이러한 갈수량은 강우가 없거나 저류를 위한 수공구조물이 없을 때 하천의 유량을 유지할 수 있는 공급원이라는 사실에서 예측의 중요성이 대두된다.

Brutsaert와 Nieber(1977)는 Boussinesq 방정식으로 유도될 수 있는 대수층으로부터의 유출량에 관한 이론식을 소개하였다. 지하수 흐름해석에 요구되는 Darcy 투수계수의 불확실성(예를 들면, 층류에서 적용범위 및 이질도의 변화성)과 지하 흙의 공극률 및 포화도 등을 고려한다면, 지하 비피압대수층의 갈수량을 정확하게 추정하기란 거의 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는, Brutsaert를 중심으로 연구한 내용들(예를 들면, 1977, 1985, 1986, 1993, 1994, 1998)을 참고로 하여, 우리나라 하천에 그 적용성과 모형의 매개변수값들의 변화성을 검토분석코자 한다. 우리나라의 경우, 이와 관련된 연구가 최근호(1983), 김재한(1988), 이동률(1995), 조기태(1999) 등에 의하여 시도된 바 있으나, 본 저자들이 알기로는 현재까지 연구활동이 저조한 상태에 있는 실정이다.

우리나라와 같이 기복이 심하지 않은 발달된 산지 평야에서는, 복잡한 지질학적 요소들을 특성화할 수 있는 것으로 알려져 있다. 하천과 접하고 있는 대수층들의 흐름 유속도는 하천내의 흐름 유속도와 상당한 차이를 나타내기 때문에, 평갈수기의 하천내 유량을 알기 위해서는 하천의 한 지점에서부터 상류까지의 지하수 흐름을 추정해 주지 않으면 안된다. 여기서, 증발산량을 배제시키면, 갈수량의 특성은 주로 지질학적인 성질에 의존되어 진다는 것으로 잘 알려져 있다. 그러나, 지하수 흐름 자체를 순수히 토양도에 의해서만 구하기란 극히 어려움으로, 본 연구에서는 Brutsaert와 Nieber(1977)가 시도한바 있는 하천유량 수문곡선을 함수화하여 갈수량을 측정코자 한다. 본 연구를 수행하기 위해서 지하수 흐름에 대한 비선형 방정식 이론이 대두된다. 얻어진 결과들은 기존의 지하수 감수곡선식과 연결시킴으로써 유역의 특성인자들, 즉 투수계수 및 공극률을 추정할 수 있으며, 또한 미계측 유역에서의 갈수량 예측에 기여할 수 있으리라 판단된다.

2. 기본이론

2.1 Boussinesq 방정식

Boussinesq 방정식을 풀기 위한 기본과정은 다음과 같은 가정에 유도되었다. <그림 1>과 같은 대수층 내에서, 유속의 분포는 Dupuit 가정을 따르고, 대기압을 받는 지하수위상의 모세관 효과는 무시하였다.

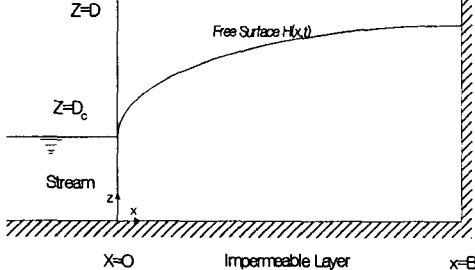


그림 1. 대수층 모형

대수층 흐름을 지배하는 Boussinesq 비선형 편미방정식은 다음과 같다.(1977 Singh, 1968 ; McWhorter and Sunanda, 1977)

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{k}{f} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{k}{f} \left[H \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, H : 수평분투수층에서부터 지하수위까지의 높이

k : Darcy법칙의 투수계수

f : 대수층의 유효공극도

x : 지하수 분수계에서 하천방향의 거리

2.2 비선형 Boussinesq 방정식의 해

자유수면을 가진 지하수 흐름에 대한 Boussinesq 비선형 방정식의 해는 다음과 같다. 수로바닥에서부터 수면까지의 수심

D_c 는 영(zero)이고, 대수층이 완전히 포화된 상태가 아닌 상당한 시간(t)이 지난 후 자유수면이 역 불완전 베타 함수(inverse incomplete beta function)의 곡선 형태라 가정할 때, 수로 단위길이당 지하수 유출량은 다음과 같다.

$$q = 0.862kD^2B^{-1} [1 + (1.115kD/fB^2)t]^{-2} \quad (2)$$

여기서, q : 수로 단위길이당 지하수 유출량, D : $x=B$ 에서 대수층의 깊이, B : 대수층의 폭

또, 수로바닥에서부터 수면까지의 수심 D_c 는 영(zero)이고 초기에 대수층은 무한히 넓다($B=\infty$)라는 가정하에 짧은 시간(t)에 대한 수로 단위길이당 지하수 유출량은 다음과 같다.(Polubarinova-Kochina, 1962)

* 충남대학교 토목공학과 박사과정

** 충남대학교 토목공학과 조교수

*** 충남대학교 토목공학과 교수

$$q = \frac{1}{2} \{0.6642(kf)^{1/2} D^{3/2}\} t^{-1/2} \quad (3)$$

2.3 저류량-유출량의 관계

저류량-유출량 관계를 나타내는 식은 다음과 같다.(윤용남, 1998 ; Chow, 1988)

$$Q = KS^n \quad (4)$$

$$I - Q = dS/dt \quad (5)$$

여기서, Q : 유출량(m³/s), S : 저류량(m³), K : 저류상수, n : 상수, I : 유입량(m³/s)

유입량이 없는 동안 즉, $I=0$ 일 때 $n \neq 1$ 대해 감수곡선식을 유도하면 다음과 같다.(Dooge, 1973)

$$Q = Q_0(1 + c_2 t)^{n/(1-n)} \quad (6)$$

여기서, Q_0 : 초기유량, c_2 : 상수

2.4 멱함수 관계식 정의

관찰된 수문곡선을 통하여 유역에 대한 Boussinesq 비선형 해의 적용성을 판단하고, Boussinesq 비선형 방정식의 해와 저류량-유출량 관계를 상관시킴으로써 개념적 모형에 물리적 의미를 부여하기 위해 다음과 같이 멱함수 관계식을 정의하였다.

$$dQ/dt = -aQ^b \quad (7)$$

여기서, a , b : 상수

식(7)에 따라 Boussinesq 비선형 해와 저류량-유출량 관계의 감수곡선식을 정리할 수 있다. 수로 단위길이당 지하수 유출량 q 와 대수층의 폭 B 를 정의하고, Boussinesq 비선형 해를 멱함수 관계식에 따라 정리하면 다음과 같다.

우선, q 를 등가의 측방 유입량(equivalent lateral inflow)으로 정의하면 다음과 같다.

$$q = Q/(2L) \quad (8)$$

여기서, L : 유량이 Q 인 관측소에서부터 상류의 모든 지류와 본류의 총 길이(m)

또, 등가의 폭(equivalent breadth) B 를 다음과 같이 정의하였다.

$$B = aA/(2L) \quad (9)$$

여기서, A : 배수면적(km²), L/A : 배수밀도(drainage density)

α : 지하수가 하천수에 기여하는 대수층 하의 면적을 전 유역면적과의 비로서 나타낸 분수(fraction)

식(8), (9)를 Boussinesq 비선형 해에 대입하여 멱함수 관계식에 따라 정리하면, 식(2)에 대한 a , b 는 다음과 같다.

$$a = \frac{4.8038k^{1/2}L}{f(aA)^{3/2}} \quad (10a)$$

$$b = 3/2 \quad (10b)$$

또, 식(3)에 대한 a , b 는 다음과 같다.

$$a = \frac{1.1334}{kfD^3L^2} \quad (11a)$$

$$b = 3 \quad (11b)$$

저류량-유출량 관계의 감수곡선식을 멱함수 관계식에 따라 정리하면, 식(6)에 대한 a , b 는 다음과 같다.

$$a = n(n-1)^{-1}c_2Q_0^{(1-n)/n} \quad (12)$$

$$b = (2n-1)/n \quad (13)$$

유역에 대한 갈수량 매개변수들은 유역의 특성들(유역면적, 지류 및 본류의 총연장)과 관련됨을 알 수 있고, 개념적 모형에 물리적 의미를 부여할 수 있음을 보이고 있다.

2.5 지형학적 인자에 관한 매개변수와 수문곡선의 산정

1) 대수층의 깊이(D)

식(10)과 식(11)의 교점이 초기유량(Q_0)의 상한값이라 가정하면, 대수층 깊이(D)에 관해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = 0.618 \left(\frac{aA}{k}\right)^{1/2} L^{-1} Q_0^{1/2} \quad (14)$$

2) 초기유량(Q_0)

초기유량의 상한값을 지형학적 인자에 관하여 나타내기 위해 식(14)를 Q_0 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$Q_0 = 2.619 \left(\frac{k}{a}\right) D^2 L^2 A^{-1} \quad (15)$$

3) 매개변수 n 과 c_2

식(10b)와 식(13)에 의해 $n=2$ 값을 가지고, 식(12)를 c_2 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$c_2 = a \frac{n-1}{n} Q_0^{n-1} \quad (16)$$

여기서, a : 식(10a)에 의해 산정된 값

4) 수문곡선의 산정

산정된 매개변수를 식(6)에 대입하면 지형학적 인자에 관한 갈수량 수문곡선을 구할 수 있다.

3. 적용 방법 및 사례

3.1 대상유역 선정

본 연구의 대상유역은 국제수문개발계획(IHP) 시험 유역 중의 하나인 보청천 유역이다. 그리고, 자료는 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서(1996~1999)에서 표금 등 12개의 자기 기록 관측소의 강우량과 산계지점의 유량 자료를 사용하였다. 적용 대상유역의 지형학적 인자를 정리하면 다음 표와 같다.

표 1. 산계 수위표 지점의 지형학적 인자

유역면적(km ²)	지류 및 본류의 총연장(km)
475.68	735.25

3.2 자료의 분석

분석에 있어 다음과 같은 식을 제안한다.

$$dQ/dt = f(Q) \quad (17)$$

식(17)에 대한 자료 분석은 다음과 같은 차분식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{Q_i - Q_{i-1}}{\Delta t} = f\left(\frac{Q_i + Q_{i-1}}{2}\right) \quad (18)$$

여기서, Q_i : 임의의 시간 t 에서의 유량

Q_{i-1} : $t - \Delta t$ 에서의 유량

유역에서 지하수 유량의 감소 비율은 다른 유출량 요소(지표면 유출, 중간유출 또는 수로 저류량)보다 적게 나타나는 것으로 알려져 있다. 그러므로, 지하수 유량은 주어진 Q 에서 가장 작은 $|dQ/dt|$ 와 일치한다고 가정 할 수 있고, 비선형 Boussinesq 방정식 해의 적용성은 $(Q_i + Q_{i-1})/2$ 점에서의 $(Q_i - Q_{i-1})/\Delta t$ 값에 대한 하부포락선(lower envelope)을 이용하여 검토하였다.

자료의 분석에 있어 고려할 하천유량 자료는 지하수 유출량을 분리하기 위한 방법인 N -day 법과 주지하수감수곡선법을 이용하여 결정하였다.(윤용남, 1998 ; Chow, 1988)

1) N -day 법

N 은 수문곡선의 첨두 시간으로부터 직접 유출이 끝나는 시간을 일(day)로 표시한 것으로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$N = 0.827 A^{0.2} \quad (19)$$

여기서, N 은 일(day), A 는 km² 단위로 표시되는 유역면적을 뜻한다. <표 1>에서 제시된 유역면적을 식(19)에 적용을 시키면 2.84 일로 나타났다.

2) 주지하수감수곡선법

유출수문곡선에서 감수곡선들을 선정하여 유량 Q 의 대수값(log Q)을 시간축에 따라 각 곡선을 비켜 놓아 작은 유량부분이 일치하도록 하고 최저유량을 연결하여 얻는 주지하수감수곡선(master groundwater depletion curve)을 이용하면, 첨두유량이 발생한 시간으로부터 약 1.5~2일 사이에 직접유출이 끝나는 것으로 나타났다.

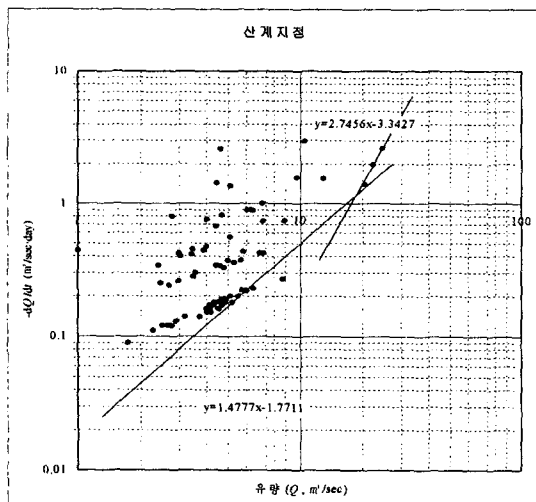


그림 2. 보청천 유역의 산계지점에 대한 하부포락선

3) 분석 결과

두가지 방법으로 분석한 결과, N -day 법이 첨두 시간에서부터 직접유출이 끝나는 시간이 더 크게 나타났다. 지하수 유량이 아닌 다른 유출량 요소를 가능한 많이 제거하기 위해 N -day 법에서 산정된 값을 사용하는 것을 제안한다. 그래서, 대상유역인 보청천 유역은 강우사상이 끝난 후 적어도 3일이 지난 하천유량 자료를 이용하였다.

4) 비선형 Boussinesq 방정식 해의 적용성 판단

식(18)에 의해 제시된 자료를 이용하여 log-log 상에 도시하면 <그림 2>와 같은 결과를 보인다. 직선의 기울기 b 값이 어느 중간범위 이하에서는 1.5에 근접하는 것을 보이고, 이상에서는 3에 근접함을 보이고 있다. 이것은 앞에서 제시한 방법으로 갈수량 수문곡선을 산정할 수 있음을 나타낸다.

3.3 지형학적 인자에 관한 갈수량 수문곡선 산정

지형학적 인자에 관한 갈수량 매개변수를 산정하기 위해서 투수계수 및 대수층의 유효공극도는 김재한(1988)이 토양도 분석을 통해 산정한 값을 사용하였다. 그리고, 지하수가 하천수에 기여하는 대수층 하의 면적 비인 α 는 Brutsaert와 Nieber의 연구에 적용한 경험적

수치인 $\alpha=0.1$ 을 인용하였다. 이에 대해서는 앞으로 보다 신빙성 있는 자료들로부터 규명되어야 할 것으로 판단된다. 이상으로 적용 조건을 요약하면 다음과 같다.

표 2. 보청천 유역 매개변수값

대상 유역	대수층의 유효공극도(f)	투수계수 (k , m/s)	α
보청천	0.16	3.47×10^{-4}	0.1

<그림 2>의 두 구간 포락선 교점으로 $Q_0=17.36m^3/s$ 로 산정되었다. 제시된 방법에 따라 수문곡선을 산정하면 $Q_0 \leq 0.0153L^2A^{-1}$ 에 대해 다음과 같다.

$$Q = 0.0153L^2A^{-1}(1 + 3938L^2A^{-2}t)^{-2} \quad (20)$$

여기서, L^2 과 A : m^2 , t : 시간(hr)

3.4 결과의 비교 및 분석

3.3절에서 산정된 갈수량 수문곡선을 관측사상과 비교하면 <그림 3-1>~<그림 3-3>과 같이 나타난다.

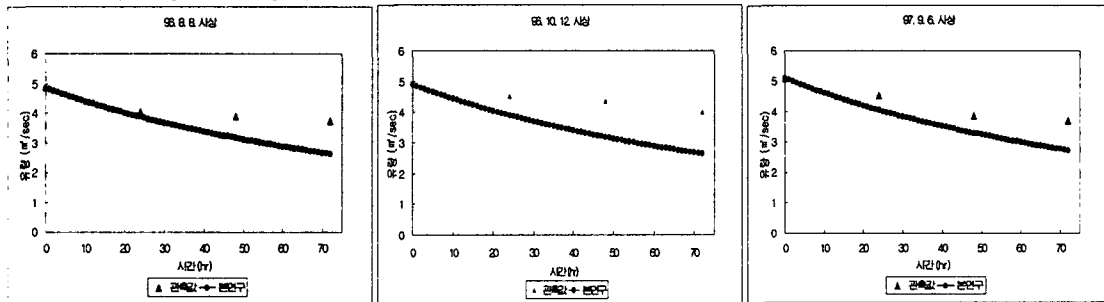


그림 3-1. 관측값과 본연구와의 비교

그림 3-2. 관측값과 본연구와의 비교

그림 3-3. 관측값과 본연구와의 비교

본 연구를 적용한 결과는 관측값에 비해 과소 산정되는 경향을 나타내고 있으나, 추세선은 관측값에 상당히 근접하고 있음을 알 수 있다. 이는 갈수량 매개변수를 산정하는데 요구되는 투수계수 및 대수층의 유효공극도의 값이 앞으로 좀더 정확하게 추정되어 진다면, 좋은 결과가 얻어 질 수 있으리라 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 Brutsaert와 Nieber(1977)가 제시한 방법을 통해 유역의 특성들 즉, 유역면적(drainage area), 총 수로연장(total stream length)과 관련시켜 지형학적 인자에 관한 갈수량 매개변수를 산정하고자 한다. 토양도로부터 추정된 투수계수 및 대수층의 유효공극도의 값을 본 연구 방법에 적용시켜 갈수량을 산정할 수 있었다. 결과치들은 실측치에 비해 다소 낮은 값을 나타내고 있으나, 경향은 상당히 근접하고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 연구 결과 분석으로부터 본 연구는 보다 정확한 지형정보가 요구되어지며, 이와 같은 지형정보가 획득된다면 미세측 유역에서의 갈수량 산정을 할 수 있는 중요한 모형이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 1989~2002년 "국계수문개발계획(IHP) 연구보고서"
2. 김재한, "Saint-Venant 공식에 의한 개수로의 지하수분포 추적", 대한토목학회지, Vol. 8, No. 4, pp. 23-32, 1988
3. 윤용남, 공업수문학, 청문각, 1998
4. 이동률, "지하수 갈수량곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 갈수량 예측", 고려대학교 대학원, 박사학위논문, 1995
5. 조기태, "미계측 산지하천 유역의 설계 갈수량 추정식 개발", 전북대학교 대학원, 박사학위논문, 1999
6. 최근호, "소하천유역에서의 강우로 인한 기저유량 증가량 산정에 관한 연구", 연세대학교 대학원, 석사학위논문, 1983
7. Brutsaert, W., and J. L. Nieber, "Regionalized Drought Flow Hydrographs from a Mature Glaciated Plateau", Water Resour. Res., 13(3), pp. 637-643, 1977
8. Brutsaert, W., and A. I. El-Kadi, "Interpretation of an unconfined groundwater flow experiment", Water Resour. Res., 22, pp. 419-422, 1986
9. Brutsaert, W., "The unit response of groundwater outflow from a hillslope", Water Resour. Res., 30, pp. 2759-2763, 1994
10. Brutsaert, W., and J. P. Lopez, "Basin-scale geohydrologic drought flow features of riparian aquifers in the southern Great Plains", Water Resour. Res., 34, pp. 233-240, 1998
11. Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W.(1988), Applied Hydrology
12. David B. McWhorter and Daniel K. Sunada, Groundwater Hydrology and Hydraulics, Water Resources Publication, Fort Collins, Colo.1977
13. Dooge, J. C. I., "Linear theory of hydrologic systems", U.S. Dep. Agr. Tech. Bull., 1468, 1973
14. Polubarinova-Kochina, P. Ya., Theory of Groundwater Movement, translated from Russian by R. J. M. DeWiest, 613 pp., Princeton University Press, Princeton, N. J., 1962
15. Singh, K. P., "Some Factors Affecting Baseflow", Water Resour. Res., 4(5), pp. 985-999, 1968
16. Troch, P. A., F. P. De Troch, and W. Brutsaert, "Effective water table depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions, Water Resour. Res., 29, pp. 427-434, 1993
17. Zecharias, Y. B., and W. Brutsaert, "Ground-surface slope as a basin scale parameter", Water Resour. Res., 21, pp. 1895-1902, 1985