

섬진강 쌍치유역의 기저유출 감수곡선식 개발에 관한 연구

A Study on the Base Flow Recession Curve Development in the Ssangchi Basin of the Sumjin River

김경수(Gyung-Soo Kim)* · 조기태(Ki-Tai Jo)**

요약: 본 연구는 하천유량의 인위적 교란이 비교적 적은 쌍치유역에서 감수곡선식을 개발하기 위함이다. 이를 위하여 대상유역에서 관측 수문곡선을 토대로 총 34개의 감수구간을 선정하였으며, 이것을 이용하여 감수계수(0.86)와 감수곡선의 초기유량(0.40 m³/sec)를 산정하였다. 그리고 이들의 결과를 토대로 선형 및 비선형 감수곡선식의 매개변수를 결정하여 대상유역에서 감수곡선식을 산정하였다. 대상유역에서 산정한 선형 및 비선형 감수곡선식의 적합성을 판단하기 위하여 관측유량에 대한 상대오차 및 평균오차를 산정하여 이를 비교하였다. 그 결과 비선형 감수곡선식이 선형 감수곡선식에 비해 오차의 정도가 양호하게 나타났다.

Abstract: The purpose of this study is establish a recession curve for low flow discharge in the Ssangchi basin. For this study, we selected 34 recession segments and calculated recession constants and initial discharges. The average initial discharge is 0.40 m³/sec and the recession constant is 0.86. With using the initial discharge and the recession constant, We got the non-linear recession curve equation. This non-linear equation is more reasonable fit than the linear equation of the recession curve for low flow.

서론

지속적인 가뭄으로 인한 생·공용수 및 농업용수 등의 각종 용수 부족현상은 심각한 문제가 아닐 수 없다. 따라서 가뭄시에 용수부족을 해결할 수 있는 저수지 및 댐 건설과 같은 수자원의 개발계획과 이수계획을 위한 합리적인 대책이 매우 중요하다. 그런데 집중호우로 인한 홍수추정과 방재대책에 관한 연구는 국내·외적으로 많은 경험공식과 추계학적 방법 및 단위도법 등의 다양한 연구들이 수행되었으나 이수계획의 기본이 되는 갈수량에 관한 연구는 매우 미진하다.

지금까지 감수 곡선식을 개발하기 위한 많은 연구들이 수행되었다. Klaassen (1975)은 감수곡선 계수를 지질학적 인자와 지형학적 인자로부터 추정하였으며, Singh (1968)은 지수 함수식을 이용하여 감수 곡선식을 유도하였고, 주효준 (1987)은 최소자승법에 의하여 감수곡선 계수를 산정 한 바 있다. 또한 감수부 해석은 Dupuit가 지하수 흐름을 연구한 후, Boussinesq가 비피압 대수층에서 하천으로 유출되는 유출량에 대한 지배방정식을 소개하였고, Barnes (1939)는 반대수지상에서 지하수 감수곡선이 직선적으로 추정이 가능하다고 논한 이후 많은 수문 학자들에 의하여 연구가 수행되었다. Singh (1968)은 Boussinesq가 제시한 방정식으로부터 지하수 유출량을 산정 할 수 있는 방정식을 제안하였고, 이 방정식의 매개변수들의 값들

을 결정함으로써 기저유출의 분리가 가능함을 제시하였다. 기저유출로 나타나는 유출의 한 성분인 갈수량은 유역내 대수층에서 자연적으로 배수되어 나오는 흐름으로 정의된다. 자연하천에서 지표층을 통하여 흐르는 유출량의 유하시간은 대수층에서 유하하는 기저 유출량의 유하시간에 비하여 매우 짧다. 이것은 해당 하천유역에서 발생하는 갈수량의 특성이 해당유역내의 지형학적 특성에 매우 의존하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 갈수량을 산정하는데 가장 중요한 요소 중의 하나는 유역내의 인위적인 조장이 없는 자연상태에서 배수되는 유출이라는 점이다.

기저유출의 기본이론

Barnes (1939)는 강우가 끝나면 유역에서 강우에 의한 유출은 점차 감소하고, 시간이 흐른 후 강우에 의한 지표유출은 중단되고, 침투된 물이거나 지하에 저장된 저류수가 유출의 주성분임을 밝혔다. 그는 이러한 유출을 식(1)과 같은 선형 식으로 제안하였다.

$$Q = Q_0 k^t \tag{1}$$

여기서, Q_0 는 초기 유출량, Q 는 t 시간 후의 유출량, k 는 Q_0 에서 한시간 후의 Q 의 비율 혹은 변곡상수로서 이것은 항상 1보다 작은 값, t 는 시간이다. 수리학적 시스템(Hydraulics systems)에서 기저 유출량은 식(2)과 같은 운동량 방정식(Kinematic equations)에 의하여 개념적으로 표현할 수 있다. 즉,

$$Q = KS^n \tag{2}$$

* 군산대학교(Kunsan National University, San 68, Miroung-Dong, Kusan 573-360)

** 전북대학교(Chonbuk National University, 664-14, Dukjin-Dong, Dukjin-Gu, Chonju 561-756, Korea)

여기서, Q 는 유역으로부터 유출량이며, S 는 저류량 그리고 K 와 n 은 상수이다.

식(2)에서 저류량 S 와 유출량 Q 는 시간 t 에 따라 변화하는 양이므로 $dS/dt=I-Q$ 과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, I 는 유입량이며, 이 값은 강우가 그친다면 0이 된다. 식(2)과 같은 형태는 n 의 값에 따라 선형과 비선형 방정식으로 나눌 수 있다. 만약 $n=1$ 경우에는 유출량 Q 와 저류량 S 의 관계가 직선과 같은 형태가 되기 때문에 선형이며, $n \neq 1$ 경우 유출량 Q 와 저류량 S 는 직선이 아니기 때문에 비선형이 된다. 선형방정식의 경우, 즉, $n=1$ 인 경우 식(2)을 적분하여 정리하면 식(3)과 같은 기저유출 방정식을 얻을 수 있다.

$$Q = Q_0 e^{-kt} \quad (3)$$

여기서, k 는 저류지체상수, t 는 지체시간이다.

위 식은 지금까지 가장 폭넓게 사용되는 기저유출 선형 감수곡선으로 Boussinesq에 의하여 제안되었다. 한편, Barnes (1939)는 식(3)을 식(4)과 같은 형태로 표현하였다.

$$Q = Q_0 K_b \quad (4)$$

여기서, K_b 는 감수상수이다.

Hall(1968)은 기저유출의 일반적인 비선형 방정식을 식(5)과 같이 제안하였으며, Tallaksen(1996)은 저수지나 호수 등과 같은 저류시설에 영향을 받고있는 유역에서 기저유출 감수곡선은 비선형 감수곡선이 적합하며 이를 식(6)과 같이 제안하였다.

$$Q = Q_0(1 + at)^{n/(1-n)} \quad (5)$$

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

여기서, a 와 n 은 상수이다.

선형 대수층의 경우, 선형 감수곡선에 포함된 상수 K 는 전체적으로 시간(t)에 독립이기 때문에 선형 감수곡선에 의하여 갈수량 자료를 비교적 정확하게 해석할 수 있다. 반면, 비선형 대수층의 경우 수문곡선 $Q=Q(t)$ 에서 시작시간 $t=0$ 을 정하거나 선택하는데 매우 신중을 기해야 한다. 관측된 하천유량 수문곡선이 간헐적인 갈수기간이나 강우기간을 포함하고 있을 경우 각 감수계열의 시작시간 $t=0$ 을 적절히 선택할 수 없다. 이러한 어려움을 해결하기 위하여 Brutsaert & Nieber(1977)는 미분방정식 형태로 수문곡선을 해석하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{dQ}{dt} = f(Q) \quad (7)$$

여기서, f 는 대상유역의 특성을 나타내는 함수이다.

어떤 유역에서 지하수 유출량의 감수율은 지표 유출량이나 중간 유출량과 같은 다른 유출성분의 감수율에 비해 매우 적다 이것은 단지 지하수 저류량에 기인하는 유출량은 주어진 유량 Q 에서 가장 적은 $|dQ/dt|$ 과 같다고 할 수 있다. 그러므로 식(7)의 함수 f 는 도해적으로 또는 하천유량 자료로부터 구한 $(Q_i+Q_{i-1})/2$ 와 $(Q_i-Q_{i-1})/t_i$ 의 포락선의 최소 자승 상관성에 의하여 간단하게 결정할 수 있다. 한편 Brutsaert & Nieber(1977)는 식(7)을 식(8)과 같은 형태로 가정하였다.

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ^b \quad (8)$$

여기서, a, b 는 상수이다.

식(8)과 비선형 감수곡선을 비교하면 상수 a, b 는 식(9)과 같다.

$$a = n(n-1)^{-1} c_2 Q_0^{(1-n)/n} \quad (9a)$$

$$b = (2n-1)/n \quad (9b)$$

한편, Troch(1993)는 시간 t 가 클 경우, 식(8)의 변수 a, b 는 식(10)과 같으며, 시간 t 가 작을 경우 식(11)과 같다고 제안하였다.

$$a = \frac{4.804k^{1/2}L}{fA^{3/2}}, b = 1.5 \quad (10)$$

$$a = \frac{1.133}{kfD^3L^2}, b = 3.0 \quad (11)$$

여기서, f 는 공극율, L 은 수로의 총길이, A 는 유역면적, D 는 대수층의 두께이다.

식(10)과 (11)는 대수지상에 기올기가 1.5와 3인 두 개의 직선을 도시함으로써 결정된다. 이들 두 직선의 절편 값은 유역의 수리학적 특성과 지질학적 특성에만 좌우된다. 그리고 이들 두 직선의 교차점은 기저유출의 초기함수를 의미한다.

감수계수

수문곡선상에서 감수부의 유출특성은 감수계수로 설명될 수 있으며, 감수계수는 직접유출과 중간유출이 끝난 부분의 유출 수문곡선인 감수곡선의 기올기로 정의된다. 하천유량에서 감수는 기본적으로 강우에 의한 지표유출의 유입량이 끝나는 시간부터 고려되며, 유역에 저류된 저류량이 서서히 고갈되어 가는 과정이므로 강우와는 무관하며, 유역의 유역특성, 지질특성, 지형학적 특성 등에 따라 달라지는 특성을 가진다. 감수계수에 관한 연구는 그 동안 많은 학자들에 의하여 연구되어 왔다. 그 중 Martin (1973)은 감수계수는 항상 1보다 작은 값을 가지며, 통상 0.80~0.99 범위 내에서 변화한다고 제안하였다. 한편, Klassen & Pilgrim (1975) 등은 감수계수는 0.93~0.99까지 변화한다고 하였으며, Tallaksen (1995)은 감수계수는 일반적으로 0.7이상의 값을 가진다고 하였다. 이들의 연구를 종합하여 비교하면 감수계수의 일반적인 범위는 0.75~0.95 범위의 값을 갖는다고 할 수 있다.

지금까지 많은 연구자들은 도해적 방법을 이용하여 감수계수를 산정 하였다. 그러나 이러한 도해적 방법은 감수계수를 산정 하는데 많은 시간과 노력을 필요로 하며, 또한 이러한 도해적 방법은 완전한 수문곡선을 획득하는데 인위적 요소가 포함될 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Bako & Hunt (1988)는 하천유량의 수문곡선에서 감수계열을 선정한 후, 각각의 감수계열에서 감수계수를 통계적인 방법으로 산정하는 식(12)을 제안하였으며, Vogel & Kroll (1992)은 장기 하천 수문자료를 이용하여 감수계수를 산정 할 수 있는 방법을 식(13)과 같이 제안하였다.

$$K_b = \sum_{i=1}^k \left[\sum_{v=1}^{n_i} v y_{iv} - \frac{1}{2} n_i (n_i + 1) y_i \right] / \sum_{i=1}^k \frac{1}{12} (n_i^3 - n_i) \quad (12)$$

$$K_b = \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\ln(Q_{i-1} - Q_i) - \ln \left[\frac{1}{2} (Q_i + Q_{i+1}) \right] \right) \right] \right\} \quad (13)$$

여기서 n_i 는 관측자료의 수, y_{iv} 는 관측유량 중 v 번째 유량 측정값, y_i 는 관측유량, k 는 감수계열의 수, m 은 일 하천유량 Q_{i-1} 과 Q_i 쌍의 개수이다. 본 연구에서 Bako & Hunt (1988)가 제시한 방법을 이용하여 감수계수를 산정 하였다

감수곡선 초기유량

Zecharias & Brutsaert (1988)는 유로-대수층 모형에서 단위 하천연장으로 유출되는 감수부의 초기유량 Q_0 는 강수량에만 의존된다고 하였다. 이들이 제안한 관계식은 식(14)과 같이 표현 할 수 있다. Brutsaert & Nieber (1977)와 Vogell & Kroll (1992)은 감수부의 초기 유량을 대수층의 수리학적 특성치인 유역면적, 유역경사, 투수계수, 전 유역에 대한 유출에 기여하는 유역의 면적비 등의 관계함수로 식(15)과 같이 제안하였다. Ambrose (1996)은 감수부의 초기유량은 식(16)과 같이 유역면적, 평균유역경사, 전달계수 등의 함수의 형태로 제안하였다.

$$Q_0 = f(L, R) \quad (14)$$

$$Q_0 = 2akAS^2 \quad (15)$$

$$Q_0 = Af(S, T) \quad (16)$$

여기서, L 은 하천의 총 연장, R 은 강수량, f 는 유역특성을 반영하는 함수, a 는 전 유역에 대한 유출에 기여하는 유역의 면적비, k 는 투수계수, A 는 유역면적, S 는 평균 유역경사, T 는 전달계수이다. 지금까지 많은 수문학자들이 제안한 감수부 초기 유량을 종합하면, 감수부의 초기유량은 평균 유역경사에 관한 함수와 대수층의 수리특성에 관한 함수로 분리할 수 있다. 또한 지하수 유출은 전 대수층의 포화된 상태에서 저류량이 서서히 고갈되는 상태로 진행되는 과정에서 발생하는 유출이므로 감수부의 초기유량은 대수층의 규모, 저류수준 그리고 대수층의 수리특성 등에 지배된다고 할 수 있다. 한편, 최소자승법을 이용하여 감수부의 초기유량은 다음 식과 같이 산정 할 수 있다.

$$Q_0 = \left\{ \sum_{i=1}^n \log Q_u + a \sum_{i=1}^n t_i \right\} / n \quad (17)$$

여기서, n 은 감수계열의 수, t_i 는 시간 그리고 a 는 감수곡선의 변곡상수이다. 그러나 이 방법은 선형 감수식에 대해서만 적용 하였으며, 비선형 감수식에 대해서는 적용하지 않았다. 한편, Troch (1993) 등은 전대수지상의 횡축에 감수계열의 유량 Q 를 취하고 종축에 dQ/dt 를 취하여 이들에 대한 포락선 도시하여 감수부의 초기유량을 결정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은

dQ/dt 값이 오차를 포함하고 있을 경우 포락선의 정확한 위치를 결정하기 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, Troch (1993) 등은 경사가 1.5와 3인 포락선을 감수계열의 5%를 제외한 곳에 도시하여 두 개의 포락선이 만나는 교차점의 유량값을 감수부의 초기유량으로 결정하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 Troch (1993)등이 제시한 방법을 이용하여 감수부의 초기유량을 결정하였다.

대상유역

본 연구의 대상유역은 섬진강 다목적 댐 상류에 설치 운영되고 있는 쌍치 수위관측소 지점을 유역의 출구로 한 쌍치유역이다. 본 유역은 우리나라 5대강 중 하나인 섬진강 유역의 최상류에 위치하고있으며 경도 127° 50'~127° 05', 위도 35° 22'~35° 35'에 위치하고 있으며, 유역면적 126.3 km², 유로연장 36 km의 준용하천이다. 쌍치 유역의 유수로 형상은 대체로 나뭇가지 모양이고, 불규칙하게 소계곡에서 발달한 하천은 그 연장이 2~10 km로 대체로 짧은 거리를 남하 및 북동류한다. 지형은 산지 면적이 넓고, 산간부의 기반암은 화강암과 응회암질 사암 및 역암으로 되어있다. 계곡과 계곡사이는 충적토, 산악지는 암층토가 주 분포를 이루고 있다 산악지의 암쇄토는 배수가 양호한 식양질 또는 사양질토가 암층을 피복하고 있다. 본 유역은 한반도의 중남부에 위치한 관계로 한반도 전체의 기후와 별 차이 없이 겨울에는 중국 몽고 방면의 대륙성 기후의 영향으로 한랭 건조하고 여름에는 해양성 기후의 영향을 받아 고온 다습하다. 또한 다른 유역과는 달리 평 · 갈수시의 유출이 적고, 홍수시의 지체시간이 짧은 특징이 있다.

한편, 본 유역은 북측에 노령산맥이 동측에 태백산맥이 놓여 있어 산악형 강수현상이 발생되며 겨울철에는 계절풍의 영향으로 한랭건조하고 여름철에는 남동 계절풍의 영향으로 고온 다습한 해양성 기후를 나타내고 있다. 년평균 강수량은 1283 mm로 우리 나라 연평균 강수량 1274 mm보다 다소 많은 편이며 연평균 기온은 12.6°C, 최고기온 36.5°C, 최저기온 -20°C, 연평균 증발량은 992.3 mm, 년 강우일수는 약 110일이다. 그리고 전체유역의 약 74%인 88.56 km²가 임야이며, 경작지는 논이 약 10%인 12.04 km², 밭이 약 9%인 10.61 km²를 차지하고 있다. 그밖에 대지 및 기타의 합계는 약 7%이며, 유로연장은 약 26 km이며, 평균 폭은 4.5 km, 형상계수는 0.18, 유역평균경사는 0.910, 표면경사는 39.0%, 하상구배는 1/320이다. 본 연구의 대상유역인 쌍치유역은 유역도는 Figure 1에 도시하였다.

감수부 선정

하천의 유출량은 일반적으로 지표유출, 중간유출, 기저유출 등 3개 성분으로 구성되며, 이를 다시 빠르게 유출하는 성분과 완만하고 지속적으로 발생하는 유출성분으로 구성된다. 감수구간은 강우가 발생하여 유출이 발생하지 않는다면 감수구간은 계속되며, 감수구간의 시작의 기준은 초기유량이며, 감수구간의 끝의 기준은 강우의 발생으로 인하여 유출이 발생하는 시점이다. 이러한 감수구간의 선정은 지금까지 많은 연구자들에 의하여 연구되었다. Vogel & Kroll (1991)은 최소 감수길

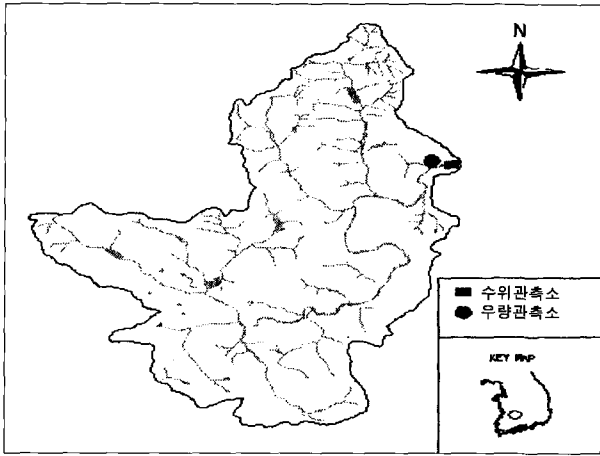


Figure 1. Study basin.

이를 4~10일을 확보 할 수 있는 구간을 선정하였으며, 3일 이동평균법을 이용하여 감수계열을 선정하였다. 이동물(1995)은 이동평균법에 의하여 변환된 유출량 자료에서 무강우 기간이 13일 이상 지속되는 구간 중 유출량이 감소하는 구간을 감수구간으로 선정하였다. 감수구간을 선정하는 방법 중 Vogel & Kroll (1991)의 3일 이동평균법은 3일간의 연속적인 유출량 자료를 평균하여 감수계열을 취득하는 방법이다. 이러한 방법은 유출량 자료가 부족하여 많은 감수계열을 확보할 수 없을 경우 더 많은 감수계열을 획득하기 위하여 사용하는 방법이다. 3일 이동평균법에서 감수구간은 3일 이동평균이 감소하는 시점을 시작점으로 하고, 3일 이동평균값이 증가하는 시점을 감수구간의 종점으로 결정한다.

본 연구에서는 Vogel & Kroll (1991)의 3일 이동평균법과 이동물(1995)의 무강우 기간을 중심으로 한 감수계열 선정방법에 의하여 본 연구의 대상유역인 쌍치유역에서 감수계열을 선정하였다. 감수계열 선정 대상기간은 1993년부터 1998년까지의 일 하천유량자료이며, 감수계열 추출결과 1993년의 경우 1개, 1994년의 경우 7개, 1995년의 경우 6개, 1996년의 경우 7개, 1997년의 경우 4개 그리고 1998년의 경우 9개의 감수계열을 추출하였다. 앞에서 선정한 감수기간 중 감수부의 초기에는 강우로 인한 지표유출이 포함하고 있기 때문에 이 부분을 제외한 감수기간을 선택하여야 한다. Vogel & Kroll(1991)은 지표유출에 해당하는 직접유출을 제거하기 위하여 λ 를 이용하였다. λ 는 3일 이동 평균법에 의하여 선정된 감수계열에서 강우에 의한 직접유출을 포함하는 부분을 제거하고 기저유출 부분을 추출하여 감수계열을 획득하기 위하여 이용되는 값이다. 통상 λ 값의 범위는 $0 \leq \lambda \leq 0.8$ 사이의 값을 가진다. λ 를 결정하기 위해서는 선정된 각 감수계열로부터 λ 를 조정하여 얻어진 b 값과 그때의 λ 값을 비교하여야 한다. 그러나 이러한 방법은 선정한 모든 감수계열에 대하여 각각의 λ 값에 대한 b 값을 결정해야 하기 때문에 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 전 절에서 선정한 각각의 감수계열에서 초기유량을 산정 한 후 초기유량보다 큰 유출성분을 제거하여 감수계열을 재 선정하였다. 그 결과 3일 이동평균법이나 무강우 사상에 의하여 선정한 감수계열의 경우

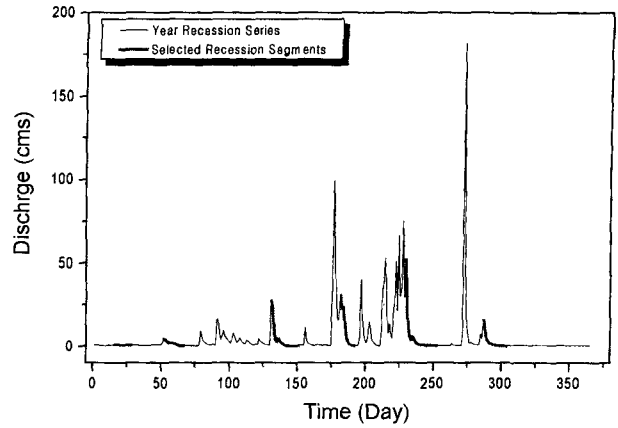


Figure 2. The selected recession segments.

감수기간은 20~10일, 감수범위는 $129.44 \sim 0.02 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이었으나, 감수계열의 초기 유출성분을 제거한 후 감수계열을 재선정한 결과 감수기간은 17~4일, 감수범위는 $3.45 \sim 0.02 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 나타났다.

감수계수 산정

본 연구의 대상유역인 쌍치유역의 하천 유출량 자료(Figure 2)를 이용하여 3일 이동평균법 및 무강우 사상에 의한 감수계열 선정방법에 의하여 1993년부터 1998년까지 감수계열을 선정하였다. 그리고 기존 수문학자들에 의하여 제시된 감수계산 산정법, 즉, 가중 최소자승법, 비가중 최소 자승법, Vogel & Kroll법, Bako & Hunt법 등을 이용하여 선정된 각 감수계열에서 감수계수를 산정 하였다. 그리고 각 감수계열에서 감수계수를 산정하기 위하여 초기시간이 다른 감수계열을 재배열하였다. 그 결과 가중 최소자승법에 의하여 산정된 감수계열은 0.580~0.960의 범위를 나타내고 있으며, 비가중 최소 자승법에 의하여 산정된 감수계수는 0.573~0.957의 범위를 나타내고 있다. 그리고 Vogel & Kroll법에 의하여 산정된 감수계수는 0.415~0.948의 범위를 나타내고 있으며, Bako & Hunt법에 의하여 산정된 감수계수는 0.860이다. 또한 감수계수 산정 결과를 비교하면 감수계열이 3~9월의 경우 감수계수가 비교적 적게 나타났다으며, 10~2월의 경우 감수계수가 비교적 높게 나타났다.

감수계수 산정결과를 비교하면 감수계수의 일반적인 범위가 0.75~0.95인 것을 고려하였을 때, 감수계수 산정 방법들 중 가장 정확하게 감수계수를 산정 할 수 있는 방법은 Bako & Hunt법임을 알 수 있다. 또한, 최소 자승법을 이용하여 감수계수를 산정할 경우 감수계열의 감수길이가 최소한 8일 이상 확보되어야 한다는 한계는 가지고 있다. 그러나 우리 나라의 경우 8일 이상 감수길이를 확보할 수 있는 감수계열을 선정하기 용이하지 않기 때문에 이 방법을 이용하여 감수계수를 산정 하는데는 부적합하다. 그리고 Vogel & Kroll법은 산정된 감수계수의 값들이 일반적인 감수계수의 범위보다 적게 산정되어 신뢰성을 다소 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 감수 길이에 비교적 영향을 덜 받고, 계산이 간단하며, 산정결과의 정도가 비교적 높은 Bako & Hunt법을 이용하여 산정된 감수계수를 이용하였다. 각 감수계수 산정방법에 의하여 산정된 감

Table 1. The results of recession constant

Section	Vogel & Kroll	Least square method		Bako & Hunt
		Weight	Nonweight	
94.	3.10~ 3.22	0.948	0.949	0.860
	4.17~ 4.29	0.916	0.907	0.895
	5.18~ 5.24	0.733	0.781	0.762
	8.19~ 8.25	0.647	0.715	0.703
95	1.24~ 2.11	0.786	0.801	0.797
	3.16~ 4.3	0.846	0.851	0.848
	5.21~ 6.1	0.721	0.788	0.756
	9.7 ~ 9.21	0.715	0.763	0.763
96	2.16~ 3.4	0.847	0.922	0.917
	3.31~ 4.15	0.902	0.898	0.886
	7.24~ 8.1	0.833	0.845	0.863
	8.29~ 9.8	0.912	0.839	0.806
97	4.9 ~ 4.23	0.799	0.814	0.789
	12.22~ 1.7	0.852	0.901	0.903
	1.16~ 1.28	0.906	0.955	0.956
	7.6 ~ 7.11	0.415	0.580	0.573
98	8.25~ 9.10	0.830	0.862	0.848
	8.27~ 9.3	0.498	0.677	0.670
93	5.26~ 6.2	0.618	0.623	0.550
	10.22~11.3	0.768	0.813	0.799
94	4.26~ 5.8	0.714	0.724	0.724
	9.10~ 9.18	0.868	0.901	0.892
95	10.8~10.16	0.825	0.912	0.901
	12.23~12.31	0.927	0.960	0.957
96	3.20~ 3.25	0.881	0.868	0.862
	2.27~ 3.7	0.723	0.703	0.703
97	5.18~ 5.26	0.727	0.775	0.746
	10.15~10.29	0.812	0.863	0.812
Average	0.769	0.811	0.799	

0.860

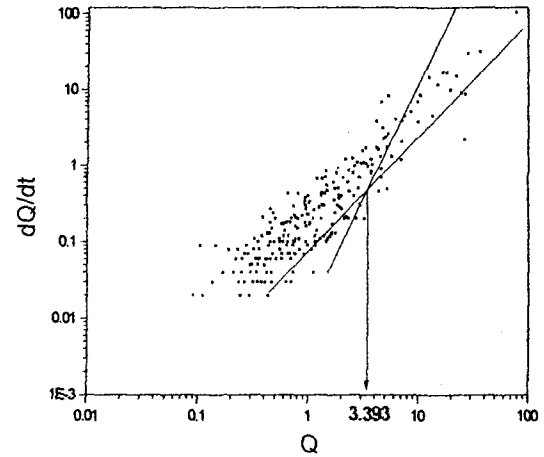


Figure 3. The initial discharge.

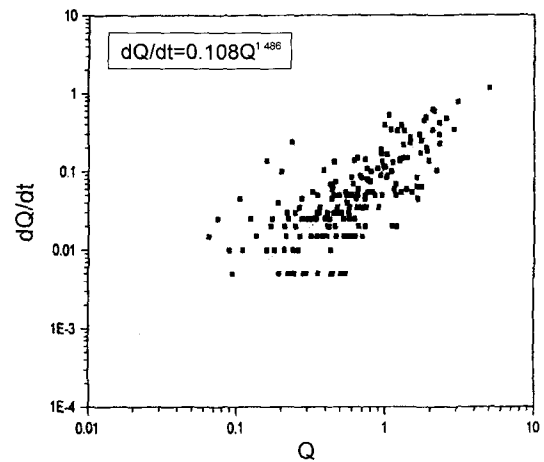


Figure 4. The estimation of parameters.

수계수는 Table 1에 게재하였다. 산정된 감수계수 값의 표준오차는 Bako & Hunt(1988)가 이용한 식(18)을 이용하였다. 즉,

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^k \left[\sum_{v=1}^{n_i} y_{iv}^2 - \frac{1}{n_i} \left(\sum_{v=1}^{n_i} y_{iv} \right)^2 \right]}{(n-k-1)} - \left\{ \sum_{i=1}^k \left[\sum_{v=1}^{n_i} v y_{iv} - \frac{1}{2} (n_i + 1) n_i y_i \right] \right\}^2 \quad (18)$$

여기서, k는 감수계열의 총 수이며, n은 각 감수계열의 감수일수, y_v는 각 감수계열의 일유량이다.

초기유량 및 매개변수산정

감수 곡선식을 개발하기 위해서는 하천 유량 수문곡선상의 감수부 초기 유량값을 산정하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 Peter & Troch (1993)가 제시한 방법을 이용하여 감수부의 초기유량 값을 산정하였다(Figure 3). 이를 위하여 X축에 하천유량 Q를 취하고 Y축에 dQ/dt를 취하여 포락선을 도시한다. 이때 dQ/dt는 오차를 포함하고 있기 때문에 포락선의 정확한 위치를 결정하기 어렵다. 이러한 점을 고려하여 1.5와 3.0

의 경사를 갖는 포락선을 감수계열 자료의 5%를 제외한 곳에 도시한다. 이렇게 해서 도시된 포락선이 만나는 교점의 유량값을 초기유량으로 결정한다. 그 결과 본 연구에서 산정한 초기 유량값은 3.40 m³/sec이다.

갈수량의 해석방법으로서 선형 대수층의 경우, 지하수 유출량 산정식의 매개변수가 시간에 따라 변화하지 않기 때문에 갈수량 해석은 비교적 간단하다. 즉, 이와 같은 경우 시간 t와 유출량 Q를 반대수지상에 도시하면 기저유량 감소부분은 직선으로 나타난다. 이 직선의 기울기는 초기유량 Q₀와 시간 t의 크기와 관계없이 일정하다. 그러나 비선형 대수층의 경우 수문곡선상의 t=0인 시작점을 임의로 취할 수 없기 때문에 비선형 지하수 유출량 산정식은 식(19)과 같이 표현해야 한다. 즉,

$$Q = Q_0(1 + c_2 t)^{(1-n)/n} \quad (19)$$

위 식은 Q=Q(t)인 관측 수문곡선의 분석으로부터 얻을 수 있는 각 매개변수 Q₀, c₂, n값들이 감수곡선의 시작점 즉, t=0의 선택에 영향을 받기 때문이다. 이러한 시간선택의 영향으로 포함되는 불확실성은 자료의 해석에서 시간변수 t를 제거하는

방법과 시간변수 대신 미분항 dt 를 취하는 방법 등이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 수문곡선을 $Q=Q(t)$ 로 정의하지 않고, 식(7)과 같은 기울기의 함수로 가정한다. 그리고 식(9a-9b)과 같은 매개변수를 결정하기 위하여 선정된 감수계열의 유량자료를 y 축에 dQ/dt 를 취하고, x 축에 유량 Q 를 취하여 전대수지상에 이를 도시한다(Figure 4). 이렇게 도시된 각각의 유량을 회귀분석하여 상수 a , b 를 산정 하였으며, 그 결과 $a=0.108$, $b=0.486$ 으로 나타났다. 한편, 비선형 감수곡선식과 식(7)과 (8)를 비교하면 식(9a-9b)과 같은 매개변수를 산정할 수 있다. 식(8)을 통하여 산정된 매개변수 a , b 의 값을 각각 식(9a-9b)에 대입한 결과 $n=1.95$, $c_2=0.272$ 로 각각 산정되었다.

적용 및 고찰

전절에서 산정한 각 매개변수들과 감수계수 및 감수부 초기 유량 등을 선형 감수곡선식과 비선형 감수곡선식에 대입하여 본 연구의 대상유역인 쌍치유역에서 감수곡선식을 다음과 같이 개발하였다.

$$\text{선형 지하수 감수곡선식: } Q=3.40 \times 0.86^t$$

$$\text{비선형 지하수 감수곡선식: } Q=3.40(1+0.27t)^{-2.05}$$

위와 같이 대상유역인 쌍치 유역에 대해 개발한 감수곡선식 중 어떠한 식이 대상유역의 지하수 감수 곡선식으로 적합한지를 판단하기 위하여 1993년부터 1998년까지 쌍치 유역의 수위 관측소에서 관측한 하천 유량값과 본 연구에서 개발한 선형 및 비선형 지하수 감수 곡선식에 의하여 산정된 계산유량을 다음 식에 대입하여 각각의 상대오차와 평균오차를 계산하여 그 결과를 비교하였다. 즉,

$$T = \left\{ \sum_{t=1}^N Q(t) - \sum_{t=1}^N Q_c(t) \right\} / \sum_{t=1}^N Q(t) \quad (20)$$

$$R = \left\{ \sum_{t=1}^N \frac{|Q(t) - Q_c(t)|}{Q(t)} / N \right\} \quad (21)$$

여기서, T 는 총 하천유량에 대한 상대오차, R 은 일 하천유량에

대한 평균오차, $Q(t)$ 는 관측유량, $Q_c(t)$ 는 계산유량, t 는 일단위 시간, N 은 자료의 총수이다. 식(20)과 식(21)을 이용하여 산정한 상대오차 및 평균오차는 Table 2와 같다.

쌍치유역에서 개발한 선형 및 비선형 감수곡선식을 비교하기 위하여 각 곡선식에 대하여 상대오차와 평균오차를 산정하여 이를 비교하였다. 그 결과 선형 지하수 감수곡선식의 경우 상대오차 범위는 $-1.882 \sim -0.008$, 평균 -0.957 로 나타났으며, 평균오차의 범위는 $0.184 \sim 4.477$, 평균 3.606 으로 나타났다. 그리고 비선형 지하수 곡선식의 경우 상대오차의 범위는 $-0.703 \sim 0.021$, 평균 -0.036 으로 나타났으며, 평균오차의 범위는 $0.113 \sim 1.237$, 평균 0.595 등으로 나타났다. 이들 상대오차와 평균오차를 비교한 결과 1997년 12월 22일~98년 1월 7일의 감수계열을 제외하고는 대부분 비선형 지하수 감수곡선식의 상대오차와 평균오차가 선형 지하수 지하수 감수곡선식보다 양호하게 나타났다. 이의 결과를 토대로 대상유역인 쌍치유역의 감수곡선식은 선형 감수곡선식보다 비선형 감수곡선식이 더 적합한 것을 알 수 있다.

결 론

본 연구는 쌍치유역을 대상유역으로 선정하여 보다 정확하고 신뢰성 있는 감수곡선식을 개발하기 위하여, 대상유역의 수위관측소에서 관측한 하천유량자료를 토대로 감수계열을 선정하고, 각 감수계열에 대하여 감수계수와 감수부의 초기유량, 그리고 지하수 감수곡선식 개발을 위한 매개변수들을 산정 하였다. 이러한 연구 결과를 토대로 대상유역인 쌍치유역에서 지하수 감수곡선식을 개발하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 대상유역에서 선정된 감수계열에서 보다 신뢰성 있는 감수계수를 산정하기 위하여 Vogel & Kroll법, 최소자승법, Bako & Hunt법 등을 비교하였으며, 그 결과 Bako & Hunt법에 의한 결과가 가장 적합한 것으로 판단되었다. 그리고 산정된 감수계수는 0.860으로 나타났다.
- 2) 본 연구에서 선정된 감수계열의 하천유량 자료를 분석하여 감수부의 초기유량은 $3.40 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 산정되었으며, 감수곡선식의 매개변수인 $n=1.95$, $c_2=0.272$ 등으로 산정되었다.
- 3) 대상유역에서 개발한 선형 및 비선형 감수곡선식의 적합

Table 2. Teh results of relative error and average error

Recession Series	Linear recession curve		NonLinear recession curve		Remark
	Relative Error	Ave. Error	Relative Error	Ave. Error	
94. 5.26~ 6. 2	-1.882	4.477	-0.703	1.237	
95. 1.24~ 2.11	-0.876	1.526	0.021	0.132	
95. 3.16~ 4. 3	-1.092	1.290	-0.099	0.245	
95. 4.25~ 5. 9	-0.990	4.331	-0.045	0.771	
95. 5.21~ 6. 1	-1.688	4.383	-0.479	0.961	
95. 9. 7~ 9.21	-1.091	2.652	-0.098	0.259	
97. 4. 9~ 4.23	-0.532	0.601	0.184	0.344	
97.12.22~98.1.7	-0.008	0.184	0.468	0.613	
98. 5.18~ 5.31	-1.071	1.778	-0.189	0.113	
98.10.18~10.31	-0.957	3.606	-0.036	0.595	
Average	-1.0187	2.4828	-0.0976	0.527	

성을 판단하기 위하여 일 하천유량에 대한 상대오차와 평균오차를 산정하여 이를 비교하였다. 그 결과 비선형 감수곡선식이 오차의 정도가 양호하게 나타나 본 연구의 대상유역은 비선형 감수곡선식이 더 적합한 것으로 판단된다.

참고문헌

- Ambrose, B. and Beven K. and Freer J., 1996, Toward generalization of the topmodel concepts; Topographic indices hydrological similarity, *Water Resource Research*, 32(7), p. 2135-2145.
- Bako, M. D. and Hunt, D. N., 1988, Derivation of baseflow recession constant using computer and numerical analysis, *Journal of Hydrological Sciences*, 33(4), p. 357-367.
- Bares, B. S., 1939, The structure of discharge recession curve, *Eos Trans. AGU*, 20, p. 721-725.
- Brownlee, K. A., 1965, *Statistical theory and methodology in science and engineering*, John Wiley.
- Brusaert, W. and Nieber, J. L., 1977, Regionalized drought flow hydrographs from a nature glaciated plateau, *Water Resources Research*, 13(3), p. 637-643.
- Hall, F. R., 1968, Base flow recession -A review, *Water Resource Research*, 4(5), p. 973-983
- Hino Sugiyama, 1996, Analysis and extraction of low flow recession characteristics, *Water Resources Bulletin*, 32(3), p. 491-497.
- Klaasen, B. and Pilgrim D. H., 1975, Hydrograph recession constants for New South Wales stream, *Civil Eng. Trans. Inst. Eng.*, p. 43-49.
- Martin G. N., 1973, Characterization of simple exponential baseflow recession, *Journal of Hydrology*, p. 57-62.
- Singh, K. P., 1968, Some factors affecting base flow, *Water Resource Research*, 4, p. 985-999.
- Talaksen, L. M., 1995, A review of baseflow recession analysis, *Journal of Hydrology*, 165, p. 349-370
- Troch, P. A. and Troch, F. P. DE., 1993, Effective water table depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions, *Water Resources Research*, 29(2), p. 427-434.
- Vogel, R. M. and Kroll, C. N., 1992, Regional geohydrologic-geomorphic for the estimation of low-flow statics, *Water Resources Research*, 28(9), p. 2451-2458.
- Zecharias, B. & Brutsaert, W., 1988, Recession characteristics of groundwater outflow and base flow from mountainous watersheds, *Water Resource Research*, 24(10), p. 1651-1658.
- 이동철, 1995, 지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기 갈수량 예측, 고려대학교 대학원, 석사학위논문.
- 이명섭, 1993, 유역특성을 이용한 갈수량 추정에 관한 연구, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문.
- 전라북도, 1990, 주령천 하천정비 기본계획.
- 주효준, 1987, 최소자승법에 의한 감수상수의 계산과 기저유출의 합성, 고려대학교대학원, 석사학위논문.
- 한국수자원공사, 1993-1998, 수문자료집.