

Nash 모형을 이용한 유역 저류상수 및 집중시간의 이론적 검토

A Theoretical Review of Basin Storage Coefficient and Concentration Time Using the Nash Model

유철상*

Yoo, Chulsang

Abstract

This study theoretically reviews the basin storage coefficient and concentration time using the Nash model, a simple unit hydrograph theory. First, the storage coefficient and concentration time of Nash instantaneous unit hydrograph (IUH) are derived based on their definitions, whose characteristics as well as their relationship are also reviewed. Additionally, several empirical equations of storage coefficient and concentration time commonly used in Korea are evaluated by comparing them with those for the Nash IUH. Major results of this study are summarized as follows. (1) The concentration time of Nash IUH is approximately linearly proportional to the number of linear reservoirs, but the storage coefficient non-linearly to the square root. That is, if increasing the number of linear reservoirs by four times, the concentration time becomes also increased by about four times, but the storage coefficient only about two times. This result has a special meaning to understand the effect of basin subdivision on the concentration time and storage coefficient. (2) The storage coefficient and concentration time of Nash IUH are not independent each other, so their independent estimation does not make any physical sense. As the concentration time among the two is more sensitive to the number of linear reservoirs, which should be estimated first, then the storage coefficient considering the concentration time estimated. (3) Empirical equations of concentration time can be divided into two groups, one following the linear channel theory and the other not, whose equation forms are also found to be very similar. This result indicates that the characteristic factors dominating the concentration time are very similar, indicating the possibility of its regionalization over a basin with consistent equation forms. (4) Those for storage coefficient like the Russell formulae are found to consider the physical characteristics of a basin, so their unreasonable applications could sufficiently be excluded.

keywords : unit hydrograph, storage coefficient, concentration time, Nash model

요 지

본 연구에서는 간단한 단위도 이론인 Nash 모형을 이용하여 유역 저류상수 및 집중시간의 문제를 이론적으로 고찰해 보았다. 먼저, Nash 순간단위도의 저류상수 및 집중시간을 그 정의에 따라 유도하고, 각각의 특성은 물론 둘 사이의 관계를 검토하였다. 추가로, 국내에서 많이 사용되고 있는 저류상수 및 집중시간의 경험공식들을 유도된 Nash 모형의 저류상수 및 집중시간 특성과 비교·검토하였다. 이 과정을 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다. (1) Nash 순

* 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수

Corresponding Author, Prof., Dept. of Architectural, Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: envchul@korea.ac.kr)

간단위도의 집중시간은 선형저수지의 개수에 거의 선형적으로 비례하는 형태를 가지나 저류상수는 비선형적으로 제곱근에 비례하는 형태를 가진다. 즉, 선형저수지의 수를 4배로 증가시키면 집중시간은 약 4배 증가하게 되나 저류상수는 약 2배 증가하는데 그치게 된다. 이러한 결과는 특히 유역분할에 따른 집중시간과 저류상수의 변화를 이해하는데 중요하다. (2) Nash 순간단위도의 집중시간과 저류상수의 관계는 서로 독립적이지 아니며, 따라서 두 매개변수가 서로 독립적으로 결정되는 것은 물리적으로 타당하지 않다. 두 매개변수 중 집중시간이 선형저수지의 개수에 보다 민감하므로 이를 먼저 결정하고 저류상수의 경우는 기 결정된 집중시간을 반영하여 결정하는 것이 보다 바람직한 방법으로 이해할 수 있다. (3) 유역의 집중시간과 관련한 경험공식은 크게 선형하천의 개념에 충실한 경우와 그렇지 않은 것으로 나눌 수 있었으며, 각각의 경우에 포함된 식의 형태는 매우 유사한 것으로 나타났다. 이는 집중시간을 결정하는 유역의 특성인자가 대체로 유사함을 의미하며, 또한 유역 전반에 걸쳐 일관된 식의 형태를 적용하는 지역화가 가능함을 의미한다. (4) 유역의 저류상수와 관련해서 검토한 Russell 공식 등의 경우 그 적용범위 설정에 유역의 물리적인 특성을 충분히 고려할 수 있어, 비합리적인 적용은 충분히 배제될 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 단위도, 저류상수, 집중시간, Nash 모형

1. 서 론

국내에서 강우-유출 해석의 가장 대표적인 방법은 Clark 단위도(Clark, 1945)를 이용하는 것이다. Clark 단위도는 선형저수지 및 선형하천 이론에 근거한 간단한 방법으로, 크게 유역의 집중시간(concentration time)과 저류상수(storage coefficient) 두 개의 매개변수로 표현된다. 그러나 단위도 이론 자체가 선형시스템 이론에 근거하므로, 비록 두개뿐이지만 이 매개변수를 결정하는데 큰 어려움이 있다. 즉, 모든 강우-유출 사상에 대해 유일하게 적용되는 매개변수의 추정은 현실적으로 불가능하다. 이는 유역에서의 강우-유출 과정이 근본적으로 비선형이기 때문이다(Dooge, 1967; Amorocho and Brandstetter, 1971).

Clark 단위도 매개변수 결정상의 또 다른 문제는 이들 두 매개변수가 서로 관련되어 있다는 점이다(윤석영과 홍일표, 1995; Boyd, 1978; Pilgrim, 1976; Sabol, 1988). 따라서 정밀하게 관측된 강우-유출 기록이 가용하다 하더라도 이들 두 매개변수를 유일하게 결정하기 어려운 것이 현실이다. 또한 이들 두 매개변수를 추정하는 경우에도 이들 두 매개변수의 관련성이 적절히 고려되어야 함은 당연하다. 그러나 그 관련성이 정확히 어떤 것인지는 아직 이론적으로 규명된 바 없다. 단지 몇몇 경험식에서 이들 둘 사이의 관계가 지형인자를 통해 정량화 되어 있는 정도이다(성기원, 1999; Russell *et al.*, 1979; Sabol, 1988).

Clark 단위도와 관련된 연구는 크게 단위도 이론에 근거한 매개변수 추정 및 미계측 유역에의 적용을 위한 경험식의 개발로 나눌 수 있다. Sabol(1988)의 연구가 단위도 이론에 근거한 매개변수 추정의 대표적인 연구

이며, 이 외에도 Linsley *et al.*(1982), Bruen and Dooge(1984) 등이 여기에 속한다. 국내에도 전민우(1991), 윤석영과 홍일표(1995), 윤태훈 등(2005), 안태진과 최광훈(2007) 등의 연구를 살펴볼 수 있다. 경험공식의 개발과 관련해서는 앞서 언급된 논문들에서도 경험식을 제시한 것들이 있으며, 추가로 Kirpich(1940), Kerby(1959) 및 국내의 유동훈 등(1998), 윤태훈과 박진원(2002), 정종호 등(2003), 전민우(2005) 등을 살펴볼 수 있다.

그러나 이와 같은 연구들에도 불구하고, 유역의 저류상수와 집중시간에 대한 이해는 매우 부족한 것이 현실이다. 개개 매개변수의 거동뿐만 아니라 둘 사이의 관계에 대한 이해도 부족하다. 앞서 언급한 것과 같이 이들 매개변수 사이의 관련성은 이들 매개변수 결정과정에 가장 큰 장애로 작용하고 있다. 아울러 유역분할에 따라 또는 유역규모의 변화에 따라 이들 매개변수가 어떻게 거동하게 되는지를 예측한다는 것도 현 상태에서는 매우 어려운 문제이다.

이에 본 연구에서는 간단한 단위도 이론인 Nash 모형(Nash, 1957)을 이용하여 이들 문제를 이론적으로 고찰해 보고자 한다. 물론 다양한 유역의 형상 및 기타 특성을 고려하여 매개변수의 거동을 살펴보는 연구는 아니다. 다만 저류상수 및 집중시간의 일반적 거동특성, 아울러 저류상수와 집중시간간의 관련성을 Nash 순간단위도의 구조 안에서 살펴보는 정도가 될 것이다. 그러나 이러한 연구결과는 단지 Nash 모형에만 한정되는 것은 아니다. 실제 유역에서 이들 매개변수의 거동 및 두 매개변수 사이의 관계를 추측할 수 있는 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 추가로 이러한 연구를 통해 얻어지는 결과는 기존 경험식을 이론적으로 평가

하는데 적용해 볼 것이며, 이를 통해 향후 관련 경험식의 개발에 필요한 일종의 지침 등도 제공할 수 있을 것이다.

2. Nash 순간단위도

2.1 선형저수지 이론 및 Nash 모형

선형저수지 이론은 저류량과 유출량간에 선형의 관계가 만족된다는 가정에 근거한다. 즉, 선형저수지 이론은 다음과 같은 저류방정식을 기초로 한다.

$$S(t) = KQ(t) \quad (1)$$

위 식에서 $S(t)$ 는 시간 t 에서의 저류량, $Q(t)$ 는 유출량을 나타내고, K 는 비례상수로서 저류상수라 부른다. 위 식을 연속방정식에 대입하면 다음과 같이 유출량 $Q(t)$ 에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$I(t) - Q(t) = \frac{dS(t)}{dt} = K \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2)$$

위 식에서 $I(t)$ 는 유입량을 나타낸다. 만일 단위 (unit) 크기의 유입량이 순간적으로 저수지에 들어온다면, 위 미분방정식은 다음과 같이 변형시킬 수 있다. 즉,

$$K \frac{dQ_1(t)}{dt} + Q_1(t) = \delta(t) \quad (3)$$

위 식에서 유출량에 추가한 아래 첨자 1은 첫 번째 저수지를 표시하기 위해 도입된 것이고, $\delta(t)$ 는 Dirac delta 함수로서 다음 관계를 만족한다.

$$\int \delta(t) dt = 1 \quad (4)$$

$$\int f(t) \delta(s) ds = f(s) \quad (5)$$

위 Eq. (3)의 해는 여러 가지 방법으로 구할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$Q_1(t) = \frac{1}{K} e^{-t/K} \quad (6)$$

위 결과식은 선형저수지에서의 순간유입량에 대한 유출량을 나타내며, 선형시스템에서의 충격응답함수 (impulse response function)와 동일하다. 만일 어떤 유역을 선형저수지로 모의한다면 그 유역의 순간단위도 (instantaneous unit hydrograph: IUH)와도 같다. 위 충

격응답함수 또는 순간단위도는 시간 $t=0$ 에서 최대값을 가지고 이후 지수적으로 감소하는 형태를 띠게 된다. 이 선형저수지 이론은 비록 자연유역의 유출형태를 반영하지는 못하지만 해석상의 장점으로 인해 많이 거론되는 모형이다.

그러나 이 선형저수지를 여러 개 연결하게 되면 그 충격응답함수의 모양이 많이 바뀌게 된다. Nash(1957)는 이에 착안하여 동일한 저류상수를 갖는 선형저수지를 여러 개 묶어 그 응답함수를 유도하였다. 먼저, 선형저수지가 두개인 경우 두 번째 선형저수지의 입력은 첫 번째 선형저수지의 출력으로 정의되고, 따라서 두 번째 선형저수지의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K \frac{dQ_2(t)}{dt} + Q_2(t) = Q_1(t) \quad (7)$$

아울러 두 번째 저수지로 부터의 응답함수는 다음과 같다.

$$Q_2(t) = \frac{t}{K^2} e^{-t/K} \quad (8)$$

이와 같은 방식으로 n 개의 선형저수지를 연결하면 마지막 선형저수지에서의 충격응답함수는 다음과 같이 유도된다. 즉,

$$Q_n(t) = \frac{1}{K} \left(\frac{t}{K} \right)^{n-1} \frac{e^{-t/K}}{\Gamma(n)} \quad (9)$$

위 결과식이 소위 Nash 모형 또는 Nash 순간단위도라고 부르는 것이다. 이 모형은 유역에서의 강우-유출 과정을 여러 개의 선형저수지의 조합으로 나타내고 있기는 하나, 소유역의 분할과는 다른 개념이라는 것에 유의할 필요가 있다. 오로지 첫 번째 저수지에만 강우의 유입이 허용되는 형태를 갖는다. 따라서 각 선형저수지에 상류 또는 하류의 개념을 적용하는 것은 불가능하다. 이 모형의 매개변수는 선형저수지의 개수 n 과 저류상수 K 두개이며, 관측수문곡선의 모멘트와 이 모형의 모멘트를 일치시킴으로서 추정하는 것이 일반적이다.

Fig. 1은 Nash 순간단위도의 일반적인 특성을 나타낸 것이다. 먼저, 위 두개의 그림은 저류상수가 일정하게 주어지는 경우 선형저수지의 개수에 따른 순간단위도의 변화를 나타낸 것이며, 아래 두 개의 그림은 선형저수지의 개수가 주어지는 경우, 저류상수에 따른 순간단위도의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 보면, 선형

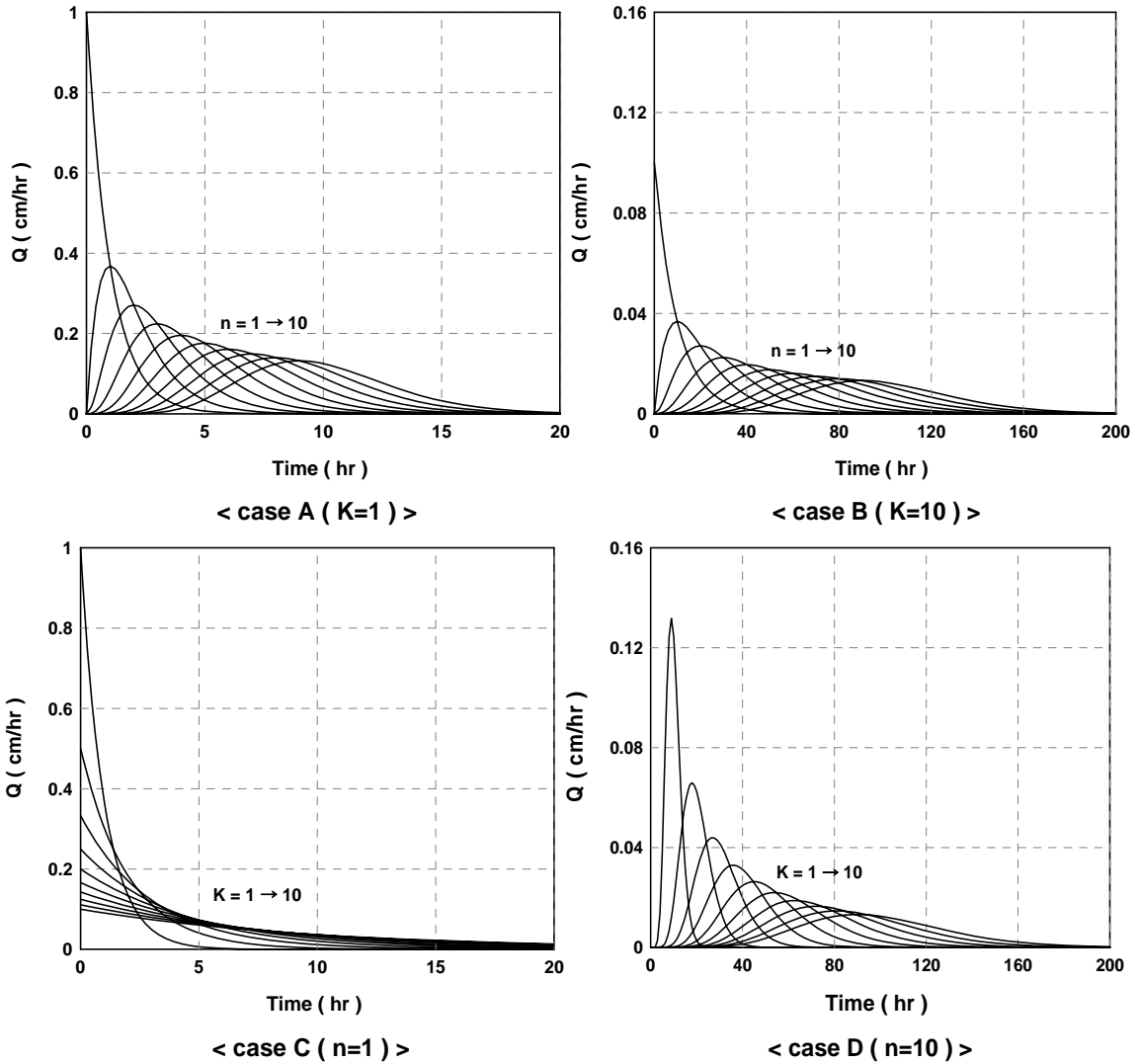


Fig. 1. Characteristics of Nash IUH (from the top, cases with $K=1, 10$ and cases with $n=1, 10$)

저수지의 개수가 많을수록 또한 저류상수가 클수록 순간단위도의 첨두유량은 감소하고 반대로 집중시간은 늘어나게 되는 경향을 보인다.

2.2 Nash 순간단위도의 저류상수 및 집중시간

Nash 순간단위도는 선형저수지의 저류상수 K 와 개수 n 만으로도 잘 정의되지만, 수문곡선의 일반적인 정의에 따라 저류상수(K^*) 및 집중시간(T_c)을 추가로 유도할 수 있다. 본 연구에서는 선형저수지의 저류상수 K 와 개수 n 에 따른 Nash 순간단위도의 저류상수 K^* 및 집중시간 T_c 의 변화를 집중적으로 살펴보고자 한다. 이를 통해 저류상수와 집중시간간의 관계를 보다 구체적으로 정량화 할 수 있을 것으로 기대한다.

수문곡선으로부터 저류상수와 집중시간을 추정하는 방법은 간단하다. 먼저 집중시간은 유효강우가 끝나는 시점으로부터 유출수문곡선의 하강부 첫 번째 변곡점

(inflection point)까지의 시간으로 정의된다. 따라서 수문곡선의 변곡점을 찾아내는 경우 정확한 집중시간의 결정이 가능하다. 저류상수는 변곡점에서의 평균유량을 변곡점의 기울기로 나눈 값으로 정의된다(Sabol, 1988). 즉, 저류상수는 실측 수문곡선의 변곡점에서의 직접 유출량을 그 점에서 수문곡선에 그은 접선경사로 나누어 줌으로써 구할 수 있다. 따라서,

$$K^* = \frac{-Q_i}{(dQ/dt)_i} \quad (10)$$

Eq. (9)로 나타난 Nash 순간단위도는 미분의 개념을 적용하여 그 특성을 자세히 살펴볼 수 있다. 먼저, 1차 미분을 이용하면 첨두치의 크기 Q_p 및 발생시간 t_p 를 유도할 수 있다. 즉,

$$t_p = (n-1)K \quad (11)$$

$$Q_p = \frac{(n-1)^{n-1}}{K \cdot \Gamma(n)} e^{-(n-1)} \quad (12)$$

또한 Eq. (9)에 대한 2차 미분을 이용하여 Nash 순간단위도의 변곡점 t_i 의 위치를 찾아낼 수 있다.

$$t_i = K(n-1) \pm \sqrt{n-1} \quad (13)$$

위 두 변곡점은 각각 첨두치 전후로 존재한다. 또한, 위 식에 나타난 변곡점의 위치는 선형저수지의 개수 n 이 증가할수록 상대적으로 첨두치에 접근하게 된다. 즉, 변곡점의 위치가 첨두치에 가깝게 위치하므로 순간단위도의 모양이 완만하게 상승하고 하강하는 형태를 띠게 된다.

본 연구에서 관심을 갖는 변곡점의 위치는 유역의 집중시간을 결정하기 위한 것이므로 첨두치 이후에 발생하는 것이 된다. 또한 강우의 유입이 순간적이므로 집중시간은 간단히 변곡점의 위치로 정의되게 된다. 따라서,

$$T_c = K(n-1) + \sqrt{n-1} \quad (14)$$

위 식에서 보면 $n=1$ 인 경우 집중시간은 0이 되고, 이후 n 이 증가함에 따라 집중시간 T_c 도 비선형적으로 증가하게 된다.

Nash 순간단위도에 나타난 저류상수 K^* 는 Eq. (10)을 이용하여 간단히 유도할 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$K^* = K(\sqrt{n-1} + 1) \quad (15)$$

기본적으로 Nash 순간단위도의 저류상수는 선형저수지의 저류상수 K 와는 다르다. 전체적으로 보면 선형저수지 수의 증가에 따라 비선형적으로 증가하는 형태를 보인다. 그러나 선형저수지 1개를 고려하는 경우, 즉, $n=1$ 인 경우 두 경우의 저류상수는 같게 된다. 공교롭게도 이 경우에는 순간단위도에 변곡점이 존재하지 않는다.

참고로 Eq. (15)로 나타난 결과는 여러 측면에서 매우 중요한 의미를 내포하고 있다. 즉, 저류상수가 K 인 선형저수지를 직렬로 연결하는 경우 그 개수 n 의 증가에 따라 저류상수가 어떻게 달라지는지를 명확하게 나타내주는 결과이다. 그 변화는 선형저수지의 개수 n 에 대해 비선형적 증가의 형태이다. 참고로 저류상수를 2배로 하기 위해서는 약 4배의 동일한 선형저수지가 필요하다라는 결과가 된다. 이러한 결과는 유역분할 시 전

체유역이 저류상수와 소유역의 저류상수 간에 어떠한 결과가 만족되어야 하는지를 유추할 수 있게 해준다. 이러한 관계를 만족시켜주지 못하는 유역분할 및 저류상수의 결정은 유역 전체의 저류상수를 크게 왜곡하는 결과로 나타날 수 있다.

Fig. 2는 선형저수지의 저류상수 및 개수에 따른 Nash 순간단위도의 저류상수 및 집중시간을 나타낸 것이다. 선형저수지의 저류상수가 작을수록, 또한 선형저수지의 개수가 작을수록 Nash 순간단위도의 저류상수 및 집중시간은 작게 나타난다. 그러나 이 두 인자가 Nash 순간단위도의 저류상수와 집중시간에 미치는 영향은 다르다, 먼저, 저류상수의 경우, 두 인자 중 선형저수지의 저류상수가 Nash 순간단위도의 저류상수에 미치는 영향이 더 큰 것으로 파악된다. 그 관계는 거의 선형적인 비례로 나타난다. 그러나 선형저수지의 개수에 대한 영향은 선형저수지의 개수가 작은 경우에는 어느 정도 크지만 이후에는 매우 작게 나타난다. 이러한 결과는 Eq. (15)와 같이 유도된 결과에서도 쉽게 판단할 수 있다. 집중시간의 경우는 이와 반대이다. 두 인자 중 선형저수지의 개수가 미치는 영향이 더 큰 것으로 파악된다. 이러한 결과는 물론 Eq. (14)에서 확인할 수 있는 것과 같다.

Fig. 2에서 추가로 살펴볼 수 있는 내용은 Nash 순간단위도의 저류상수 또는 집중시간을 결정하는 인자가 선형저수지의 저류상수 및 개수라는 점이다. 이 당연한 내용은 동일한 Nash 순간단위도의 저류상수나 집중시간을 각각 독립적으로 추정할 경우 이를 만족하는 선형저수지의 저류상수 및 개수의 조합이 여러 개 있을 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 이 둘을 동시에 결정하게 된다면 선형저수지의 저류상수 및 개수는 유일하게 결정될 수 있다. 따라서 이 두 특성치는 유역을 특성화하는 인자로도 사용될 수 있다.

2.3 저류상수와 집중시간의 관계

Nash 순간단위도에 나타난 저류상수와 집중시간의 관계 또한 매우 중요한 의미를 갖는다. 이 관계는 기존 경험식 및 관측된 수문곡선을 분석해서 얻은 집중시간 및 저류상수의 관계를 분석할 경우 일종의 기준으로 사용될 수 있기 때문이다.

먼저, Eqs. (14) and (15)에 주목할 필요가 있다. 이 두식을 통해 두 특성치의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$T_c/K^* = \sqrt{n-1} \quad (16)$$

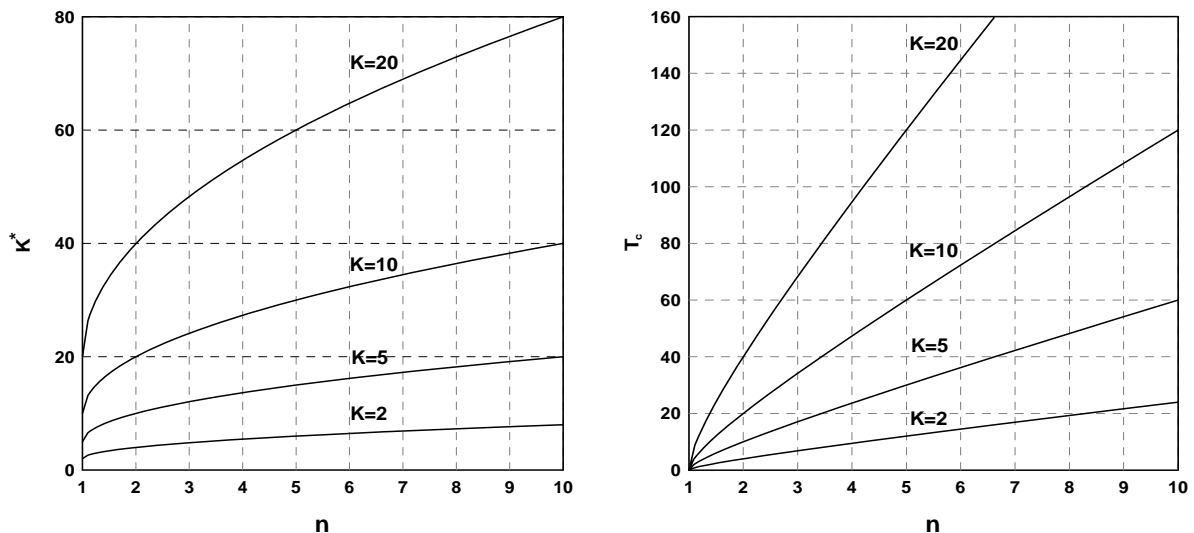


Fig. 2. Change of Storage Coefficient and Concentration Time of Nash IUH Depending on the Storage Coefficient of Linear Reservoir and the Number of Linear Reservoirs

위와 같은 간단한 관계는 상수가 아닌 선형저수지의 개수 n 의 함수로 나타난다. 만일 n 이 주어진 유역에 대해 상류 또는 하류 어느 지점에서나 일정하다면, 유역의 집중시간과 저류상수의 비는 유역의 어느 지점에서나 동일하게 된다. 이러한 가능성은 SCS(1985) 및 성기원(1999)에서 확인할 수 있다. 이들의 연구에서는 유사성(similarity) 있는 유역간에는 $K^*/(T_c + K^*)$ 관계가 일정하게 유지된다고 설명하고 있다. 이러한 관계가 만족된다는 것은 물론 유역 전반에 대해 선형저수지의 개수 n 이 일정하다는 것을 의미하며, 이는 반대로 선형저수지의 저류상수가 달라진다는 것을 의미하기도 한다. 예를 들어 상류 소유역을 대변하는 선형저수지의 크기는 전체유역을 대변하는 선형저수지의 크기와 크게 다를 수 있다. 그러나 만일 n 이 지점마다 다르다면 집중시간과 저류상수의 관계도 지점마다 다르게 되고, 따라서 유역 전체의 특성을 하나의 상수로 표현하는 것은 어려워진다. 유역의 형상이 유역면적에 따라 달라진다는 self-affinity 특성을 고려하면(Rigon *et al.*, 1996), 특히 대유역 전반에 걸쳐 선형저수지의 개수 n 이 일정하게 유지되는 것을 기대하기는 어렵다. 이 이러한 경우에는 집중시간 및 저류상수의 관계가 주로 유역이나 하천의 특성인자로 정량화 된다(Sabol, 1988).

집중시간 및 저류상수와 관련하여 현실적으로 중요한 또 하나의 문제는 주어진 강우-유출 기록을 대표하는 값을 어떻게 결정하느냐 하는 것이다. 먼저, Eqs. (14) and (15)에 나타난 두 매개변수 T_c 와 K^* 를 다시 한 번 살펴보면, 이들은 모두 선형저수지의 저류상수 및 개수의 함수로 표현되어 있으나, 이 중 특히 T_c 의

경우가 선형저수지의 개수에 더욱 민감하다는 것을 알 수 있다. 즉, 앞에서 간단히 설명했던 것처럼 강우-유출 과정의 비선형성에 더욱 민감한 매개변수가 T_c 가 되는 것이다. 반면에 K^* 는 상대적으로 변화가 적은 값이 된다. 즉, 강우-유출 사상에 따라 T_c 의 변화는 매우 클 수 있으나, 상대적으로 K^* 의 변화는 그리 크지 않은 것이다, 따라서 강우사상별로 T_c 를 먼저 결정하고 이를 토대로 K^* 를 결정하는 것이 형태가 바람직하다. 그러나 비록 변하는 정도의 차이는 있어도 두 값이 함께 변하게 되므로 이를 일관되게 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 아울러, 이들 매개변수를 추정하는 경험공식의 경우에도 이러한 특성이 반영되어 있어야 하며, 따라서 T_c 와 K^* 가 모두 독립적으로 추정되는 형태는 이론적으로 타당하지 않다.

Fig. 3은 선형저수지의 개수 n 에 따른 저류상수 및 집중시간을 선형저수지의 저류상수 K 의 비(ratio)로 표현한 것이다. 즉, 어떤 유역의 특성치로서 선형저수지의 저류상수 K 가 주어지는 경우 그 유역의 저류상수 및 집중시간은 Fig. 3과 같이 거동하게 된다. 이 그림을 통해 살펴볼 수 있는 내용은 먼저, 저류상수 및 집중시간이 같게 되는 조건이다. 오직 선형저수지의 개수 n 이 2인 경우에만 두 매개변수가 같다. 대부분의 경험공식에서 제시하는 두 매개변수의 비를 포괄하도록 최대 범위 0.5 - 2 정도를 살펴보면 n 은 1.5에서 5 정도가 된다. 좀 더 엄격하게 0.8에서 1.2 정도를 고려하면 n 은 1.8에서 3 정도로 나타난다. 그러나 선형저수지의 개수 n 을 정수로 한정하면 실제 가능한 선형저수지의 개수는 2 또는 3이 될 수밖에 없다. 이 경우 집중시간 T_c 는 저류

상수 K^* 보다 작을 수 없다. 아울러 집중시간 T_c 가 저류상수 K^* 보다 아주 크지 않은 경우라면 선형저수지의 개수 n 은 2 또는 3 이하가 될 가능성이 크다.

추가로 저류상수 및 집중시간에 큰 차이가 나는 예외적인 경우를 살펴보기로 한다. 먼저, 집중시간 T_c 가 저류상수 K^* 보다 월등히 큰 경우는 선형저수지의 개수 n 이 매우 크다는 것을 의미한다(Fig. 3 참조). 이러한 경우는 유역 내 하천망이 매우 잘 발달하여 큰 저류효과 없이 배수가 신속하게 이루어진다는 의미이다. 도시 유역의 배수 시스템이나 잘 발달된 하천망을 갖는 급경사의 원형에 가까운 자연유역이 여기에 속할 수 있을 것이다. 그 반대의 경우도 예외적인 경우에 해당한다. 즉, 유역의 저류상수 K^* 가 집중시간 T_c 보다 월등히 크기 위해서는 선형저수지의 개수 n 이 1에 가까워야만 한다. 이렇게 되려면 유역에서의 침투유량 발생이 거의 순간적이어야 하므로, 하천의 사행이 적은 상대적으로 긴 막대형의 유역에서나 가능한 경우가 된다. 이런 하천은 Hack's law에 의하면 유역면적이 크다.

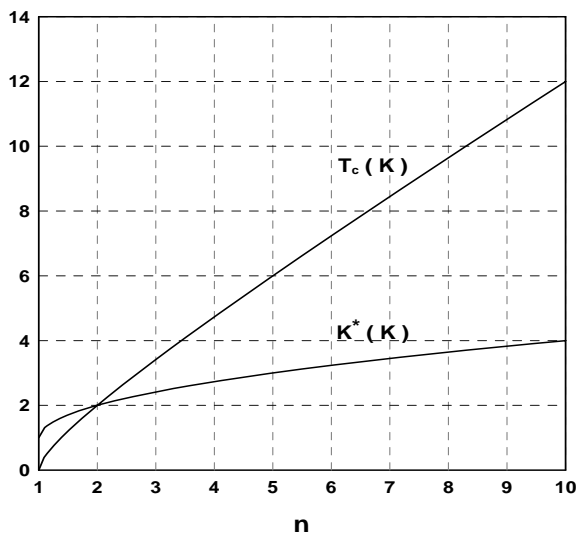


Fig. 3. Change of Concentration Time T_c and Storage Coefficient K^* Depending on the Number of Linear Reservoirs n (both concentration time and storage coefficient are normalized as functions of K , the storage coefficient of linear reservoir)

3. 집중시간 및 저류상수에 관한 경험공식의 분석

3.1 집중시간에 대한 경험공식들

국내에서 사용되고 있는 미계측 유역의 집중시간과 저류상수를 위한 경험공식은 매우 다양하다(정중호와

윤용남, 2007). 그러나 경험공식별로 계산된 집중시간과 저류상수는 매우 큰 편차를 보이는 경우가 많아 그 사용에 주의가 필요하다. 특히 경험공식의 개발 목적, 개발에 사용된 자료, 자료가 수집된 유역의 지형, 토양, 토지이용 등 제반 사항에 대해 충분한 이해가 중요하다. 이를 바탕으로 이들 경험공식의 선별적 적용이 가능하기 때문이다. 국내에서 사용되고 있는 대표적인 집중시간의 경험공식은 Table 1과 같다. 여기서, T_c 는 집중시간(hour), L 은 유로연장(km), S 는 유역경사(공식에 따라 하도경사를 사용하기도 함), N 은 지체계수(또는 피복조도계수), V 는 유역의 평균유속(m/sec)를 나타낸다.

기존 도달시간 공식을 실제 유역에 적용하여 보면 대부분 그 결과의 차이가 매우 크게 나타나고 있으나 마땅한 채택 기준은 제시되지 않고 있다. 이에 따라 Table 1에 제시된 것과 같이 기존 경험식을 기본적인 산정공식의 개발배경 및 목적을 고려하여 채택하거나, 산정된 도달시간으로 유속을 계산하여 홍수 시 가능한 유속인 2.0 - 3.5 m/sec의 범위에 포함되는지 여부를 등을 검토하여 유사한 결과를 나타내는 경험공식을 채택하고 있는 실정이다.

그러나 위에 제시된 식들은 유역경사(또는 하도경사)를 고도차 및 유로연장의 비로 간략화 하는 경우 또 다른 특성을 살펴볼 수 있다. 먼저, Rziha 공식 및 Kraven(I) 공식의 경우 유로연장에 대한 멱수가 대략 1.5 - 1.6, 고도차에 대한 멱수는 0.5 - 0.6으로 유사하게 나타난다. 이 두식의 경우 각각 자연하천 상류부 및 하류부를 그 적용 대상지역으로 하므로 근본적으로 다른 형태가 되어야 하나, 오히려 식의 형태는 매우 유사하고 오로지 비례상수 값만 약 2배의 차이를 나타내는 식의 형태를 가지고 있다.

Kirpich 공식과 California DoT 공식의 경우는 근본적으로는 동일한 식이나 적용 대상지역을 달리하고 있을 뿐이다. 이 두 공식의 경우도 유역경사(또는 하도경사)를 고도차 및 유로연장의 비로 치환하면 유로연장에 대한 멱수는 대략 1.0 정도로 나타나고 또한 고도차에 대한 멱수는 0.4 정도가 된다. 적용 대상유역은 다르지만 두 경험식 모두 경사가 급한 유역을 대상으로 하고 있다는 점에서 같은 경우로 분류할 수 있을 것이다. 이외에 Kraven(II) 공식은 유로연장과 유속의 비로 집중시간을 정의한 것이므로 대상 유역의 유속을 어떻게 결정하느냐가 가장 중요한 부분이 된다. Kerby 공식의 경우는 다른 식들에 비해 유로연장과 하도경사에 대해 덜 민감한 형태의 식이다. 따라서 추가로 고려하는 인자인 지체계수에 더욱 의존적인 형태로 판단할 수 있으며,

Table 1. Empirical Formulae for Concentration Time

Name	Formula	Application	Area	Channel length	Slope
Kirpich	$T_c = 0.0663 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	small agricultural	~ 0.8 km ²	-	1/30 ~ 1/10
Rziha	$T_c = 0.0139 \cdot \frac{L}{S^{0.6}}$	upstream natural	-	-	1/200 ~
Kraven(I)	$T_c = 0.0074 \cdot \frac{L}{S^{0.515}}$	downstream natural	-	-	~ 1/200
Kraven(II)	$T_c = 0.2778 \cdot \frac{L}{V}$	-	-	-	-
California DoT	$T_c = 0.0663 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$	small forest	-	-	-
Kerby	$T_c = 0.6059 \cdot \left(\frac{L \cdot N}{\sqrt{S}}\right)^{1/2.14}$	-	-	~ 0.36 km	~ 1/10

Table 2. Empirical Formulae for Storage Coefficient

Name	Formula	Characteristics
Clark	$K^* = C \cdot \frac{L}{\sqrt{S}}$	Applicable to natural basins with their areas 647~4298 km ²
Linsley	$K^* = \frac{b \cdot L \cdot \sqrt{A}}{\sqrt{S}}$	This formula was proposed as a modified version of Clark to consider the basin area
Russell	$K^* = \alpha \cdot T_c$	The range of α is 0.8~1.2 in general, which, however, could be 1.1~2.1 for urban area, 1.5~2.8 for natural basin, and 8~12 for forest area
Sabol	$K^* = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867 \cdot L^2/A}$	-

이런 측면에서 Kraven(II) 공식에 보다 유사한 형태로 이해될 수 있다.

Rziha 공식이나 Kraven(I) 공식, 또는 Kirpich 공식과 California DoT 공식은 사용된 자료가 다르기는 하나 모두 비선형 다중회귀분석에 의거하여 유도된 경험식들이다. 그러나 Rziha 공식과 Kraven(I) 공식은 선형 하천의 개념을 유지하기 위해 의도적으로 하도길이에 대한 멱수를 1.0으로 고정한 것으로 판단된다. 즉, 유역 경사가 일정하게 유지된다면 집중시간은 하도의 길이에 선형적으로 비례하게 만들려 하는 것이다. 이에 반해 Kirpich 공식과 California DoT 공식의 경우는 선형 하천의 개념을 고려하지 않고 관측된 자료에 근거한 회귀식을 유도한 것으로 보인다. 따라서 이들 공식에서 집중시간은 하도길이에 직접 비례하지는 않는다. 따라서 유역에서의 집중시간이 갖는 일종의 비선형성이 이 두 식에는 반영되어 있다고 판단할 수 있다.

Rziha 공식이나 Kraven(I) 공식, 또는 Kirpich 공식과 California DoT 공식의 형태가 유사하게 나오는 것은 여전히 중요한 의미를 갖는다. 즉, 유역 집중시간의 결정에 관여하는 인자의 특성이 유역의 규모, 하도의

길이, 유역경사 등 다양한 차이에도 불구하고 유사할 수 있다는 가능성을 의미하기 때문이다. 산지하천, 자연 하천, 또는 농경지의 하천, 경우에 따라서는 대하천 및 중소하천에서의 집중시간 특성이 간단하면서도 유사한 형태로 정규화 되고 단지 그 비례상수만이 지점마다 다르게 표현될 수도 있는 것이다. 이는 앞서 살펴본 Nash 순간단위도의 집중시간이 선형저수지의 저류상수와 선형저수지의 개수의 곱으로 표현되는 구조와도 비교될 여지가 있다. 그러나 아직 이와 관련한 어떤 확정적인 증거가 있는 것은 아니며, 추가의 연구가 필요한 부분이다.

3.2 저류상수에 대한 경험공식들

저류상수 산정공식의 경우, 가장 많이 사용되는 공식으로 Clark, Linsley, Russell, 및 Sabol 공식 등을 들 수 있다. 각 공식의 형태 및 특성은 Table 2와 같다. 여기서, K^* 는 저류상수(hour), C 는 유출계수, L 은 유로연장(km), A 는 유역면적(km²), S 는 하도경사, b 및 α 는 보정계수를 나타낸다. 참고로 A/L^2 은 형상계수(shape factor)로서 유역의 형태를 정량화할 경우 자주

사용된다.

위 식은 크게 두 부류로 나눌 수 있는데, 하나는 집중시간과 무관하게 저류상수를 추정하는 식이며, 또 하나는 집중시간을 추정 후 이를 독립변수로 하여 저류상수를 추정하는 식이다. 본 연구에서 살펴본 Nash 모형의 예를 살펴보면 유역의 집중시간과 저류상수에는 뚜렷한 관계가 있으며, 따라서 두 변수 사이의 관계를 고려한 식들이 그 구조상 더욱 정교한 형태임을 이해할 수 있다.

개개 공식의 검토에 앞서 본 연구의 결과를 다시 한번 상기할 필요가 있다. 즉, 집중시간과 저류상수의 비는 선형저수지의 수의 제곱근에 비례하는 형태가 된다. 유역이 작고 형상이 단순하면 적은 수의 선형저수지로 설명가능하고, 유역이 커지고 그 형상이 복잡하면 많은 수의 선형저수지가 필요하다. 특히, Nash 순간단위도의 집중시간 역시 선형저수지의 수에 비례하는 형태를 갖는다는 것을 상기하면 둘 사이의 관계를 적절히 파악할 수 있다.

(1) Russell 공식

Russell 공식은 단순하다. 즉, 집중시간과 저류상수의 관계는 다음과 같은 비례상수로 설명한다.

$$\frac{T_c}{K^*} = \frac{1}{\alpha} = \alpha' \quad (17)$$

위 식에서 적용하는 Russel 계수 α 의 일반적인 범위가 0.8 - 1.2이므로 α' 의 범위도 유사하게 된다. 이 모형을 Nash 순간단위도를 이용하여 유도한 결과에 대응시키면 필요한 선형저수지의 개수는 대략 2 - 3개 정도가 된다. 즉, 유역을 Nash 모형으로 설명할 때 필요한 선형저수지의 개수는 그리 많지 않다. 따라서 유역이 큰 경우에는 선형저수지 개수의 증가보다는 저류상수가 큰 선형저수지가 고려될 가능성이 크고, 반대로 유역이 작을 경우에는 상대적으로 작은 저류상수를 갖는 선형저수지가 고려되게 된다.

현재까지 경험적으로 분석한 강우-유출 기록을 살펴 보더라도, 유역의 규모가 커지면 집중시간이 증가하고 또한 이에 비례하여 저류상수도 증가하게 된다. 둘 사이에 확연한 차이를 보이는 경우는 흔하지 않다. 이러한 특성을 Nash 순간단위도의 특성에 비추어 보면, 유역의 크기 변화에 따라 선형저수지의 개수가 크게 변하는 것이 아니라 선형저수지의 저류상수가 크게 변한다는 것을 의미한다.

그러나 유역의 특성이 다른 경우에 둘 사이의 비율은 크게 다를 수 있다. 예를 들어 Russell et al.(1979)에

의하면 산림지역의 경우에 Russel 계수 α 값은 최대 10 이상의 값을 가질 수 있는 것으로 되어 있다. 그러나 이 값을 적용하면 α' 의 값은 약 0.1로서 일반적인 값의 범위를 크게 벗어난다. Nash 순간단위도를 통해 살펴볼 경우 이 값은 선형저수지의 개수 n 이 1보다 약간 큰 경우에 해당하는 값이다. 이런 경우라면 강우에 따른 유출응답이 거의 순간적일 수 있는 조건을 갖추어야 한다. 즉 하천은 사행이 적어야 하고, 하천망은 잘 발달되어 있지 않으며, 유역의 형태는 긴 막대기 형이어야 한다. 이런 유역에서의 유출응답은, 좀 더 극단적으로 비유하면, 마치 긴 저수지를 순간적으로 채운 후 수문을 전부 개방했을 경우와 같아지게 된다. 따라서 선형저수지의 개수가 1인 Nash 모형과 유사하게 되는 것이다.

도시유역에서의 Russel 계수 α 는 1.1 - 2.1, 자연유역에서의 Russel 계수 α 는 1.5 - 2.8로 제시되어 있다. 이 두 경우를 Eq. (17)에 적용하여 보면 선형저수지의 개수가 모두 2보다 작다. 배수효율이 상대적으로 좋을 것으로 판단되는 도시유역에서 선형저수지의 개수가 좀 더 많고, 자연유역의 경우는 산림유역에 좀 더 근접한 형태이다. 그러나 이 두 경우 모두 일반적인 경우라고 하는 Russel 계수 0.8 - 1.2의 범위를 벗어난다는 점은 현실적으로 쉽게 설명하기 어렵다.

Russel 공식의 적용과 관련하여 그 특성을 다시 한번 정리하면, 먼저, 도시유역에서처럼 배수관망 등이 잘 갖춰져 배수효율이 높은 경우에는 Russel 계수 α 값이 매우 작아 1에 근접한다. 이 경우에 유역의 저류상수와 집중시간은 유사한 값이 된다. 그러나 자연유역에서처럼 배수효율이 떨어지면 Russel 계수 α 값은 좀 더 커지게 되고, 따라서 저류상수가 집중시간보다 좀 더 큰 값을 갖게 된다. 극단적으로 산림유역에서는 저류상수가 집중시간의 10배까지 나타나게 된다. 그러나 이미 앞서 설명한 것처럼 Russel 공식이 적용에 인용되는 산림지역은 우리나라의 산림지역과 다르다는 점에 주의하여야 한다. 미국 서부 Colorado 강과 같은 형태의 하천 유역을 산림지역으로 표현한 것으로 보이며, 따라서 우리나라의 주요 대하천은 자연유역의 범주를 크게 벗어나지 않을 것이다.

(2) Sabol 공식

Sabol 공식은 다음과 같다(Sabol, 1988).

$$\frac{T_c}{K^*} = 1.46 - 0.0867 \frac{L^2}{A} \quad (18)$$

위 식의 주요인자는 유로연장(L)과 유역면적(A)이다. 그러나 유로연장의 제곱은 대체로 유역면적보다 크

고 이는 유역이 클수록 더욱 그렇다. 예를 들어 Hack's law (Hack, 1957)에 의하면 유로연장은 다음과 같이 유역면적의 멱함수형태로 나타난다.

$$L = \alpha A^\beta \quad (19)$$

위 식에서 α 와 β 는 유역마다 다르게 결정되는 상수이다. 특히 β 의 값은 0.5 이상의 값을 갖는데 이것이 Hack's law의 핵심적인 부분이다. 즉, 유역의 self-affinity 특성을 나타내는 증거로서 유역이 커지면 그 모양이 점차로 막대 모양으로 길어지게 되고 반대로 유역이 작아지면 원형에 가까워지게 된다(Rigon *et al.*, 1996).

이 관계를 Sabol 공식에 대입하면 집중시간과 저류상수의 관계를 보다 정량적으로 살펴볼 수 있다. 즉, Hack's law에 의하면 L^2/A 는 유역면적에 비례하는 함수가 되어, 유역면적이 커질수록 L^2/A 값이 커지게 된다. 따라서 유역면적이 아주 작은 경우에 집중시간과 저류상수의 비는 1.46에 수렴하게 되고, 이 경우에 대한 Nash 모형의 선형저수지의 개수는 3개 정도가 된다. 유역면적이 조금 더 커져서 집중시간과 저류상수의 비가 1 정도가 되면 선형저수지의 개수는 2개로 줄게 된다. 유역면적이 더욱 커지게 되면 집중시간과 저류상수의 비가 더욱 작아져서 1.0보다 훨씬 작은 값이 된다. 이 경우 선형저수지의 개수는 1 보다 약간 큰 정도가 될 수밖에 없다. 이런 경우라면 전 절에서 살펴본 것처럼 Russel 계수가 10 정도인 산림지역일 가능성이 크다. 즉, 집중시간이 매우 작고 저류상수는 매우 큰 유역이어야 한다.

이에 대한 Sabol(1988)의 설명도 동일하다. 그는 긴 막대형의 유역에서는 저류상수가 집중시간보다 크고, 반대로 원형에 가까운 유역에서는 집중시간이 저류상수보다 크므로 제안된 식이 타당하다고 설명하고 있다.

Sabol의 공식을 요약하면 Nash 모형을 이용하여 유역을 모형화 하는 경우에 선형저수지의 개수는 최대 3개까지로 제한된다. 상대적으로 배수효율이 좋은 도시 유역이나 원형의 소유역의 경우에 그 수가 많고 반대로 배수효율이 작은 대유역의 경우에 그 수가 작아지게 된다. 이러한 결과는 Russel의 공식과도 유사한 것이다.

(3) Clark 및 Linsley 공식

위 두 공식은 모두 유역의 지형특성 인자를 이용하여 저류상수를 추정한다. 사실 Linsley 공식은 Clark 공식의 제안에 대한 수정제안의 형태로 제시된 공식이다(Linsley *et al.*, 1982). 그러나 그 형태는 많이 다르다.

먼저 Clark 공식은 유로연장 및 유역경사를 이용하도록 되어 있다. 유로연장이 길수록, 유역경사가 완만할수록 저류상수의 값은 커진다. Linsley 공식에서는 유로연장 이외에 유역면적의 제곱근이 추가로 고려되는데, 이 값은 간단히 보면 유로연장과 같은 차원이 된다. 따라서 Linsley 공식은 유로연장에 더욱 민감하게 된다. 결국 두 식의 상대적인 비교는 한 유역에서의 저류상수가 유로연장에 얼마나 민감한가 하는 것이 된다.

만일 유역의 경사가 일정하다면, Clark 공식은 상대적으로 긴 형태의 유역에 적절한 식이 된다. 이렇게 되어야만 유로연장에 비례하는 정도로만 유역이 커지게 되고 따라서 저류상수가 유로연장에 상대적으로 덜 민감해 지기 때문이다. 이에 반해 Linsley 공식은 상대적으로 둥근 유역에 적절한 공식이 된다. 즉, 유로연장의 변화보다 유역의 규모변화가 더 커서 저류상수의 변화에 크게 영향을 미칠 수 있어야 하기 때문이다. 이러한 관점에서 보면 Clark 공식의 적용 범위는 현실적으로 Linsley 공식에 비해 상대적으로 작은 유역으로 제한될 수밖에 없다.

5. 결 론

본 연구에서는 간단한 단위도 이론인 Nash 모형을 이용하여 유역 저류상수 및 집중시간의 문제를 이론적으로 고찰해 보았다. Nash 모형은 간단한 선형저수지 이론에 근거하고 있어 그 구조를 이론적으로 살펴보기 유리한 모형이다. 본 연구에서는 먼저 유역의 저류상수 및 집중시간을 그 정의에 따라 유도하고, 그 각각의 특성은 물론 둘 사이의 관계를 검토하였다. 추가로, 국내에서 많이 사용되고 있는 저류상수 및 집중시간의 경험 공식들을 유도된 Nash 순간단위도의 저류상수 및 집중시간 특성과 비교·검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 선형저수지의 저류상수가 작을수록, 또한 선형저수지의 개수가 작을수록 Nash 순간단위도의 저류상수 및 집중시간은 작게 나타난다. 그러나 Nash 순간단위도의 저류상수에는 선형저수지의 저류상수가 집중시간에는 선형저수지의 개수가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타난다.
- 2) Nash 순간단위도의 집중시간은 선형저수지의 개수에 거의 선형적으로 비례하는 형태를 가지나 저류상수는 비선형적으로 제곱근에 비례하는 형태를 가진다. 즉, 선형저수지의 수를 4배로 증가시키면 집중시간은 약 4배 증가하게 되나 저류상수는 약 2배 증가하는데 그치게 된다. 이러한 결

과는 특히 유역분할에 따라 각 소유역의 집중시간과 저류상수를 결정하는 과정에서 중요하게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

- 3) Nash 순간단위도의 집중시간과 저류상수의 관계는 선형저수지의 개수의 함수로 나타난다. 즉, 둘 사이의 관계는 서로 독립적이지 아니며, 따라서 두 매개변수가 서로 독립적으로 결정되는 것은 물리적으로 타당하지 않다. 두 매개변수 중 집중시간이 선형저수지의 개수에 보다 민감하므로 이를 먼저 결정하고 저류상수의 경우는 기 결정된 집중시간을 반영하여 결정하는 것이 보다 바람직한 방법으로 이해할 수 있다.
- 4) 유역의 집중시간과 관련한 경험공식은 크게 선형하천의 개념에 충실한 경우와 그렇지 않은 것으로 나눌 수 있었으며, 각각의 경우에 포함된 식의 형태는 매우 유사한 것으로 나타났다. 이는 집중시간을 결정하는 유역의 특성인자가 대체로 유사함을 의미하며, 또한 유역 전반에 걸쳐 일관된 식의 형태를 적용하는 지역화가 가능함을 의미한다.
- 5) 유역의 저류상수와 관련해서 검토한 Russell 공식 등에 대해 그 적용의 한계를 Nash 순간단위도의 특성과 연결하여 살펴보았다. 특히 이들 경험공식의 적용범위 설정에 유역의 물리적인 특성을 충분히 고려할 수 있어, 비합리적인 적용은 충분히 배제될 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 한국수자원공사의 연구지원으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 성기원 (1999). "유역의 상사성을 이용한 Clark 모형의 매개변수 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp. 427-435.
- 안태진, 최강훈 (2007). "강우-유출 자료에 의한 Clark 모형의 저류상수 결정." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1454-1458.
- 유동훈, 전우용, 엄호식 (1998). "도달시간 산정식." **한국수자원학회 학술대회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 44-49.
- 윤석영, 홍일표 (1995). "Clark 모형의 매개변수 산정방법 개선." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제5호, pp. 1287-1300.
- 윤태훈, 박진원 (2002). "Clark 단위도의 저류상수 산정방법의 개선." **한국수자원학회 학술대회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1334-1339.
- 윤태훈, 김성탁, 박진원 (2005). "한국 중소하천의 Clark 모형 도달시간 및 저류상수의 재정의." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제3호, pp. 181-187.
- 전민우 (1991). "단일 저수지모형에 의한 유역의 저류상수 추정." **건설기술논문집**, 충북대학교 건설기술연구소, 제9권, 제2호, pp. 3-10.
- 전민우 (2005). "지형학적 인자에 의한 유역 저류상수의 결정." **건설기술논문집**, 충북대학교 건설기술연구소, 제24권, 제1호, pp. 149-160.
- 정중호, 금중호, 윤용남 (2003). "도달시간 산정 방법의 개발." **한국수자원학회 학술대회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 137-140.
- 정중호, 윤용남 (2007). **수문학**, 청문각.
- Amorcho, J. and Brandstetter, A. (1971). "Determination of nonlinear functional response functions in rainfall runoff processes." *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 5, pp. 1087-1101.
- Boyd, M.J. (1978). "A storage-routing model relating drainage basin hydrology and geomorphology." *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 5, pp. 921-928.
- Bruen, M. and Dooge, J.C.I. (1984). "An efficient and robust method for estimating unit hydrograph ordinate." *Journal of Hydrology*, Vol. 70, pp. 1-24.
- Clark, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Dooge, J.C.I. (1967). "The hydrologic cycle as a closed system." *Proceedings of International Hydrology Symposium*, pp. 58-68.
- Hack, J.T. (1957). "Studies of longitudinal profiles in virginia and maryland." *USGS Professional Paper* 294-B.
- Kerby, W.S. (1959). "Time of concentration for overland flow." *Civil Engineering*, Vol. 29, No. 3, p. 60.
- Kirpich, P.Z. (1940). "Time of concentration of small agricultural watersheds." *Civil Engineering*, Vol. 10, No. 6, p. 362.
- Linsley, R.K, Kohler, M.A., and Paulhus, I.L. (1982). *Hydrology for engineers*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.

- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 45, No. 3, pp. 114-121.
- Pilgrim, D.H. (1976). "Travel times and nonlinearity of flood runoff from tracer measurements on a small watershed." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 587-595.
- Rigon, R., Rodriguez-Iturbe, I., Maritan, A., Giacometti, A., Tarboton, D.G., and Rinaldo, A. (1996). "On Hack's law." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 11, pp. 3367-3374.
- Russel, S.O., Kenning, B.F.I., and Sunnell, G.J. (1979). "Estimating design flows for urban drainage." *Journal of the Hydraulics division*, Vol. 105, NO. 1, pp. 43-52.
- Sabol, G.V. (1988). "Clark unit hydrograph and R-parameter estimation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.
- Soil Conservation Service (SCS) (1985). *National Engineering Handbook*, U.S. Department of Agriculture.

(논문번호:08-100/접수:2008.10.09/심사완료:2008.10.09)