

# Nash 모형의 구조를 이용한 관측유역의 저류상수 및 집중시간 결정

## Decision of Storage Coefficient and Concentration Time of Observed Basin Using Nash Model's Structure

유철상\* / 신정우\*\*

Yoo, Chulsang / Shin, Jungwoo

### Abstract

This study proposes an empirical method for estimating the concentration time and storage coefficient of a basin using the Nash unit hydrograph. This method is based on the analytically derived concentration time and storage coefficient of the Nash model. More fundamentally, this method recursively searches convergent number of linear reservoirs and storage coefficient of linear reservoir representing the basin given. This method is to overcome the problem of HEC-HMS to use an optimization technique to estimate the basin concentration time and storage coefficient. The proposed method was applied to the Bangrim station of the Pyungchang river basin, also found to estimate physically reasonable values.

**Keywords** : storage coefficient, concentration time, Nash model

### 요 지

본 연구에서는 단위도 이론인 Nash 순간단위도의 구조를 이용하여 유역의 저류상수 및 집중시간을 추정하는 경험적인 방법을 제시하였다. 이 방법은 Nash 모형을 이론적으로 해석하여 구한 집중시간 및 저류상수에 기초하고 있다. 보다 근본적으로는 반복적인 계산을 통해 유역을 대표하는 선형저수지의 개수 및 저류상수의 수렴된 값을 찾아내는 형태로 되어 있다. 이는 HEC-HMS 등에서 채택하고 있는 최적화기법 적용의 문제점을 극복하고자 하는 것이다. 제안된 방법론은 평창강 유역의 방림지점에 적용하였으며, 또한 물리적으로 타당한 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 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 표현된

다. 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.

Clark 단위도 매개변수 결정상의 또 다른 문제는 이들

\* 교신저자, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수 · 공학박사 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

Prof. School of Civil, Environment and Architectural Engineering, College of Engineerign, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

\*\* 고려대학교 건축사회환경공학과 · 석사과정 (e-mail: ventus@korea.ac.kr)

School of Civil, Environment and Architectural Engineering, College of Engineerign, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

두 매개변수가 서로 관련되어 있다는 점이다(윤석영과 홍일표, 1995; 유철상, 2009; Pilgrim and Johnston, 1976; Boyd, 1978; Sabol, 1988). 따라서 정밀하게 관측된 강우-유출 기록이 가용하다 하더라도 이들 두 매개변수를 유일하게 결정하기는 어렵다. 미계측 유역에서 이들 두 매개변수를 추정하는 경우에도 둘 사이의 관련성이 적절히 고려되어야 함은 당연하다. 그러나 그 관련성이 정확히 어떤 것인지는 아직 이론적으로 규명된 바 없다. 단지 몇몇 경험식에서 이들 둘 사이의 관계가 지형인자를 이용하여 정량화 되어 있는 정도이다.

주어진 호우사상의 강우 및 유출 자료를 이용하여 유역의 저류상수 및 집중시간을 결정하는 과정에서는 또 다른 문제가 발생한다. 근본적으로 저류상수 및 집중시간 사이에 큰 상관성이 존재하므로 주어진 호우사상에 대해 유일한 매개변수를 결정하는 것은 어려운 일이다. 특히, 유출 수문곡선의 형상만을 비교하는 최적화 기법을 이용하는 경우 이러한 문제가 더욱 크게 부각될 수밖에 없다. 즉, 물리적으로 비상식적인 매개변수가 추정될 가능성이 매우 크다(안상진 등, 2001; 김형수, 2004; 한국수자원공사, 2008)

이러한 근본적인 문제점에도 불구하고, 여전히 유역의 저류상수 및 집중시간을 결정하는 것은 매우 중요한 일이며, 따라서 가능한 한 합리적인 수준의 추정치를 얻으려는 노력이 경주되어 왔다. 상대적으로 많은 연구가 집중시간과 관련이 있으며(윤석영과 홍일표, 1995; 성기원, 2003; Pilgrim and Johnston, 1976; Singh, 1976; Agiralioglu, 1988; Wong, 1995), 이는 집중시간이 지표면 또는 하도 내에서의 유속과 관련이 있고 따라서 물리적으로 해석이 가능하기 때문이다. 이에 반해 저류상수는 상대적으로 개념적이어서 물리적으로 규명하기 어렵고 따라서 관련 연구도 빈약한 편이다. 저류상수와 관련된 연구로는 윤태훈과 박진원(2002), 윤태훈 등(2005), 안태진과 최광훈(2007), Clark(1945), Boyd(1978), Russel et al.(1979), Linsley et al.(1982), Sabol(1988) 등이 있다. 공교롭게도 이들 연구의 대부분은 상대적으로 매끈한 단위도 형태의 수문곡선을 분석하여 유역의 저류상수 및 집중시간을 유도하고자 하는 경우들이다.

그러나 위의 연구들에서 제시한 방법들은 일반적인 강우 및 유출 관측기록에 적용하기 힘들다. 먼저 복합호우사상은 아니더라도 강우기록이 일반적으로 매끄럽지 못하며, 따라서 유출기록도 매끄럽지 못하다. 또한 유효강우의 시점과 종점을 명확히 한정하기 힘들며, 무엇보다도 감수부의 변곡점을 정확히 찾아서 그 기울기를 결정하기가 어렵다. 이런 이유로 관측 강우 및 유출 기록으로부터 유역의 저류상수 및 집중시간을 구하는 경우 관측수문곡

선과 모의수문곡선을 비교하는 일종의 최적화 기법에 의존하게 된다. 그러나 앞서 언급한 것처럼, 이러한 최적화 기법의 적용은 전혀 물리적이지 못한 비상식적인 추정치를 주는 경우가 많다.

이에 본 연구에서는 물리적인 타당성을 확보할 수 있는 유역의 집중시간 및 저류상수의 추정방법을 제시하고자 한다. 제안된 방법은 단위도 이론인 Nash 모형(1957)에 근거한 것으로, Nash 모형을 이론적으로 해석하여 구한 집중시간 및 저류상수의 특성에 기초하고 있다. 보다 근본적으로는 반복적인 계산을 통해 유역을 대표하는 선형저수지의 개수 및 저류상수의 수렴된 값을 찾아내는 형태로 되어 있다. 이는 물론 HEC-HMS 등에서 채택하고 있는 최적화기법 적용의 문제점을 극복하고자 하는 것이다. 제안된 방법은 평창강 유역의 방림지점에 적용하여 평가하였다.

## 2. Nash의 순간단위도

### 2.1 선형저수지 이론 및 Nash의 순간단위도

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 함수이다.

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

$$Q_1(t) = \frac{1}{K} e^{-t/K} \quad (4)$$

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 충격응답함수 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.

$$K \frac{dQ_2(t)}{dt} + Q_2(t) = Q_1(t) \quad (5)$$

아울러 두 번째 저수지로 부터의 응답함수는 다음과 같다.

$$Q_2(t) = \frac{t}{K^2} e^{-t/K} \quad (6)$$

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

$$Q_n(t) = \frac{1}{K} \left( \frac{t}{K} \right)^{n-1} \frac{e^{-t/K}}{\Gamma(n)} \quad (7)$$

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 선형 저수지에 상류 또는 하류의 개념을 적용하는 것은 불가능하다. 이 모형의 매개변수는 선형저수지의 개수  $n$ 과 저류상수  $K$  두 개이며, 이 매개변수는 관측수문곡선의 모멘트와 이 모형의 모멘트를 일치시킴으로서 추정하는 것이 일반적이다.

## 2.2 Nash 순간단위도의 저류상수 및 집중시간

Nash 순간단위도는 선형저수지의 저류상수  $K$ 와 개수  $n$ 만으로도 잘 정의되지만, 수문곡선의 일반적인 정의에 따라 저류상수  $K^*$  (선형저수지의 저류상수와 구분하기

위하여 \*를 붙였음) 및 집중시간  $T_c$ 을 추가로 유도할 수 있다. 다음 내용은 유철상 (2009)을 참고하여 관련 내용을 정리한 것이다.

수문곡선으로 부터 저류상수와 집중시간을 추정하는 방법은 그리 복잡하지 않다. 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). 이와 같은 정의를 적용하여 유도한 집중시간 및 저류상수는 다음과 같다.

$$T_c = K(n-1) + \sqrt{n-1} \quad (8)$$

$$K^* = K(\sqrt{n-1} + 1) \quad (9)$$

위 식에서 보면  $n=1$ 인 경우 집중시간은 0이 되고, 이후  $n$ 이 증가함에 따라 집중시간  $T_c$ 도 비선형적으로 더욱 크게 증가하게 된다. 즉, 유역의 집중시간은 선형저수지의 개수에 매우 민감하다. 반면에 저류상수의 경우는 선형저수지의 개수  $n$ 의 증가에 상대적으로 둔감한 편이다. 유역의 저류상수나 집중시간 모두 선형저수지의 저류상수에 선형적인 비례관계가 있는 것도 특이한 점이다. 이런 관계 때문에 유역의 집중시간과 저류상수의 비는 단순히 선형저수지의 개수  $n$ 만의 함수가 되나, 개수의 제곱근에 비례하는 형태이므로 둔감하게 반응하게 된다. 즉,

$$T_c/K^* = \sqrt{n-1} \quad (10)$$

기본적으로 Nash 순간단위도의 저류상수는 선형저수지의 저류상수  $K$ 와는 다르다. 전체적으로 보면 선형저수지의 개수에 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.

Fig. 1는 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 매

우 작게 나타난다. 이러한 결과는 Eq. (9)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. (8)에서 확인할 수 있다.

Fig. 1에서 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 사용

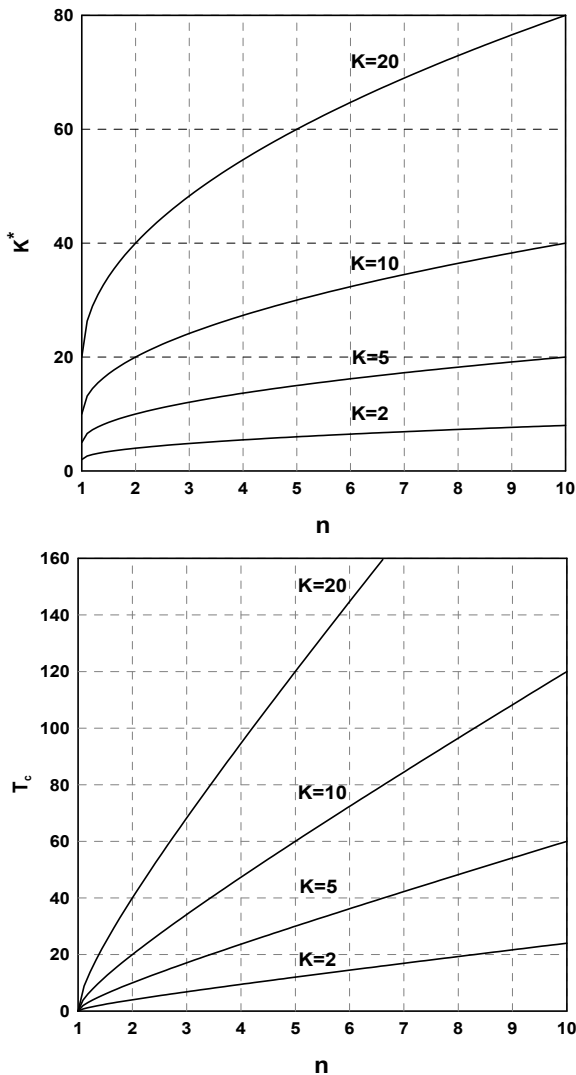


Fig. 1. Change of Storage Coefficient and Concentration Time of Nash IUH Depending on the Storage Coefficient of Linear Reservoir and the Number of Linear Reservoirs

될 수 있다.

Fig. 2는 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. 2와 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 0.5에서 2 정도를 살펴보면  $n$ 은 1.3에서 5 정도가 된다. 좀 더 엄격하게 0.8에서 1.2 정도를 고려하면  $n$ 은 1.7에서 2.5 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 저류상수  $K^*$ 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. 2 참고). 이러한 경우는 상대적으로 원형인 아울러 하천망이 잘 발달된 유역에서나 발생할 수 있다. 대체로 유역이 중·소규모일 가능성이 크다. 그 반대의 경우도 예외적인 경우에 해당한다. 즉, 유역의 저류상수  $K^*$ 가 집중시간  $T_c$ 보다 월등히 크기 위해

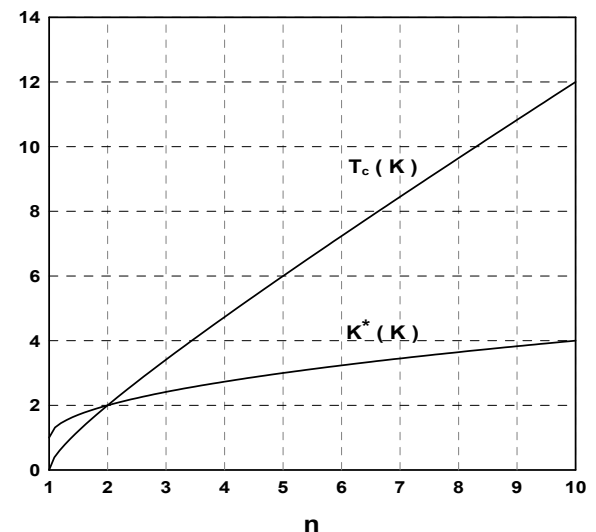


Fig. 2. Change of Concentration Time  $T_c$  and Storage Coefficient  $K^*$  Depending on the Number of Linear Reservoirs  $n$  (both concentration time and storage coefficient are normalized as functions of  $K$ , the storage coefficient of linear reservoir)

서는 선형저수지의 개수  $n$ 이 1에 가까워야만 한다 (Fig. 2 참고). 이렇게 되면 유역에서의 침투유량 발생이 거의 순간적이어서 하므로 긴 막대모양의 대규모 유역에서나 가능한 경우가 된다. 그러나 우리나라 하천 유역의 규모는, 이러한 기준에서 보면, 중규모 이하에 해당하므로 집중시간  $T_c$ 와 저류상수  $K^*$ 가 매우 크게 차이는 것은 이론적으로 타당하지 않다.

### 3. 강우-유출 기록에 나타난 집중시간 및 저류상수의 결정

주어진 유역에 대해  $T_c$ 와  $K$ 는 유일하게 결정되어야 한다. 이는 Eq. (10)에서 제시한 것과 같이 선형저수지의 개수  $n$ 이 주어진 유역에 대해 유일하여야 하기 때문이다. 그러나 이 같은 가정은 강우-유출 과정이 선형시스템이라는 것을 전제로 함으로 실제에서는 다를 수밖에 없다. 즉, 강우의 특성, 지표면 조건 등에 따라 다른 형태의 유출 응답이 가능하므로 특히 관측 강우-유출 기록을 분석하여  $T_c$ 와  $K$ 를 유일하게 결정하기는 어렵다. 이 점이  $T_c$  및  $K$ 와 관련된 아주 중요한 문제의 하나이다.

또 다른 문제는 어떤 지점에 하나의 강우-유출 기록이 주어지는 경우 이 사상을 대표하는  $T_c$ 와  $K$ 를 결정하는 문제이다. 본 연구에서는 일단 이 문제만을 다루기로 한다. Eqs. (8) and (9)는 각각  $T_c$ 와  $K$ 를 선형저수지의 저류상수 및 개수의 함수로 표현하고 있다. 이 식을 살펴보면 특히  $T_c$ 의 경우가 선형저수지의 개수에 더욱 민감하다는 것을 알 수 있다. 앞에서 간단히 설명했던 것처럼 강우-유출 과정의 비선형성에 더욱 민감한 매개변수가  $T_c$ 가 되는 것이다. 반면에  $K$ 는 상대적으로 변화가 적은 값이 된다. 그러나 비록 변하는 정도의 차이는 있어도 두 값이 함께 변하게 되므로 이를 일관되게 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 참고로, 경험공식을 이용하여 위 매개변수 중 하나를 먼저 결정하고 나머지를 일종의 최적화 기법을 이용하여 결정하는 방법은  $T_c$ 와  $K$ 의 특성을 이해하지 못한 부적절한 방법이다.

본 연구에서는 이상과 같은 이론적 검토를 토대로 다음과 같은  $T_c$ 와  $K$ 의 결정방법을 제시하고자 한다. 그 구체적인 절차는 다음과 같다.

1. 관측 강우 및 유출 자료로부터 유효우량 및 직접유출수문곡선을 결정한다.
2. 유효우량 및 직접유출수문곡선의 도심 사이의 시간 차이를 단위도의 집중시간  $T_c$ 로 가정한다.
3. Eq. (8)을 이용하여 가능한 선형저수지의 개수  $n$ 과 선형저수지의 저류상수  $K$ 의 조합을 결정한다.

4. Eq. (9)를 이용하여 위 단계 (3)의 모든 경우의  $n$ 과  $K$ 에 대한 단위도의 저류상수  $K^*$ 를 각각 결정한다.
5. 관측수문곡선과 모의수문곡선의 비교를 통해 최적의  $n$ 과  $K$  및  $K^*$ 를 결정한다.
6. 전 단계에서 최적으로 결정된  $K^*$  및 Eq. (9)를 이용하여 가능한 선형저수지의 개수  $n$  및 선형저수지의 저류상수  $K$ 의 조합을 결정한다.
7. Eq. (8)을 이용하여 전 단계 (6)의 모든 경우의  $n$ 과  $K$ 에 대한 단위도의 저류상수  $T_c$ 를 각각 결정한다.
8. 관측수문곡선과 모의수문곡선의 비교를 통해 최적의  $n$ 과  $K$  및  $T_c$ 를 결정한다.
9. 단계 (8)에서 결정한  $T_c$ 와 단계 (2)에서의  $T_c$ 를 비교한다. 두 값이 유사하면  $T_c$  및  $K^*$ 가 결정된다.
10. 만일 두 값이 다르면 단계 (2)에서의  $T_c$ 를 단계 (8)에서의  $T_c$ 로 바꾸어 단계 (3)에서 (9)를 반복한다.

위 절차를 적용할 경우 문제가 될 수 있는 것이 선형저수지의 개수이다. 개념적으로 선형저수지의 개수는 정수이다. 그러나 선형저수지의 개수를 정수로 고집하는 경우 Clark 모형의 매개변수가 최적으로 구해지지 않는 경우가 있을 수 있음을 확인하였다. 특히 유역의 집중시간이 작은 경우에는 선형저수지의 개수가 2개 이내가 되어야 하는데 이 경우 고려될 수 있는 선형저수지의 수는 하나밖에 없어 적절한 모의결과를 만들어 주지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 목적이 유역의 저류상수 및 집중시간을 결정하는 것이므로 선형저수지의 개수를 정수로 한정할 필요는 없다고 판단하였다. 물론 이 경우 잘 수렴되는 아울러 물리적으로도 타당한 결과를 확인할 수 있었다. 결론적으로 선형저수지의 개수로 1.1에서 10까지 0.1의 간격으로 총 90가지 정도를 고려하면 충분한 것으로 확인되었다. 물론 보다 정밀한 결정을 위해서는 더 좁은 간격을 사용하는 것도 가능하다. 아울러 단계 (2)의 초기값은 다른 값으로 가정할 수도 있으나 수렴의 속도를 고려할 때 무난한 것으로 파악되었다.

마지막으로 위와 같은 저류상수 및 집중시간의 결정은 유효우량 및 직접유출의 분리 또는 유도 결과에 영향을 받을 수밖에 없다는 점을 강조하고 싶다. 본 연구에서는 직접유출 수문곡선을 결정하기 위해 주로 N-day법을 이용하여 기저유출을 분리하였다. 이 방법은 특히 수평직선분리법을 이용할 경우 직접유출의 지속시간이 과도하게 길게 되는 경우를 방지해 주는 장점이 있다. 유효강우의 결정에 있어 단순한 호우사상의 경우에는  $\phi$ -Index 방법의 적용도 가능하나, 호우사상의 형상이 복잡한 경우 SCS 방법이 보다 현실적인 것으로 보인다.

## 4. 평창강 유역에의 적용

### 4.1 유역특성 및 강우-유출 자료

본 연구의 적용대상 지역으로 국제수문개발계획 (IHP)의 시범유역인 평창강 유역을 선정하였다. 평창강은 유역의 최고봉인 계방산 (EL. 1577.4m)에서 발원하여 남한강으로 유입되는 남한강 상류에 위치한 한강의 제 1지류이다. 북으로는 홍천강, 동으로는 오대천, 서로는 남한강 수계의 섬강과 인접하는 산지성 고지대라 할 수 있다. 유역 최하류에 위치한 방림수위관측소 상류의 유역면적은 약 527.83 km<sup>2</sup>, 본류연장은 51.85 km, 하천의 지류와 본류를 합한 총연장은 712.77 km이다.

강우자료로는 방림수위관측소 상류에 위치한 방림 등 11개 우량관측소의 자료를 Thissen 가중치를 적용하여 결정한 가중평균강우량을 사용하였다. 선행강우의 영향이 없다고 판단되고 단일호우 사상의 형태를 보이는 강우-유출 자료를 추출하여 본 연구에 적용하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 5개의 호우사상을 정리한 것이다.

### 4.2 매개변수의 추정 결과

관측된 강우 및 유출기록으로 부터 유역의 저류상수 및 집중시간을 결정하기 위해 전 장에서 제시한 방법을 적용하였다. 직접유출수문곡선의 결정을 위해 N-day법을 사용하였고, 유효우량은 간단한  $\phi$ -Index 법을 사용하였다. 매개변수 추정 알고리즘의 적용을 위한 초기값으로는 유효강우의 무게중심과 직접유출의 무게중심의 시간차이를 적용하였다.

먼저, 호우 case #1에 대해 각 단계별 매개변수 추정과정은 Table 2와 같다. 이 강우사상의 경우 먼저 유효우량의 무게중심과 직접유출의 무게중심의 차이인 24.10 hr가 집중시간의 초기값으로 가정되었다. 다음으로 집중시간 24.10 hr를 주는 선형저수지의 개수와 선형저수지의 저류상수를 계산하였다. 본 연구에서는 선형저수지의 개수로서 1.1에서 10까지 총 90가지를 고려하였고 각각의 경우에 해당하는 선형저수지의 저류상수는 Eq. (8)을 이용하여 결정하였다. 이 90 가지의 경우에 대해 다시 단위도의

Table 1. Storm Events Considered in This Study

Storm event	Start	End	Total rainfall depth (mm)	Average rainfall intensity (mm/hr)
Case #1	1991/05/25/13	1991/05/26/02	114.58	8.81
Case #2	1983/07/14/08	1983/07/15/03	42.28	2.23
Case #3	2003/09/18/07	2003/09/19/06	98.18	4.27
Case #4	1992/09/02/06	1992/09/03/02	115.17	5.76
Case #5	1992/08/26/18	1992/08/27/20	116.42	4.48

Table 2. Decision of Basin Concentration Time and Storage Coefficient at Each Calculation Step (case #1)

Step	Assumed values		Optimal values	
	$T_c$	$K^*$	$T_c$	$K^*$
0	24.10	-	24.10	9.31
1	-	9.31	19.97	9.31
2	19.97	-	19.97	12.63
3	-	12.63	16.94	12.63
4	16.94	-	16.94	16.32
5	-	16.32	15.68	16.32
6	15.68	-	15.68	14.95
7	-	14.95	15.68	14.95
8	15.68	-	15.68	14.95
9	-	14.95	15.68	14.95
10	15.68	-	15.68	14.95

저류상수를 Eq. (9)를 이용하여 결정하였다. 이렇게 하여 총 90개의 저류상수 및 집중시간의 조합이 마련되었다.

마련된 90개의 저류상수 및 집중시간의 조합을 각각 Clark 단위도의 매개변수로 하여 유출해석을 수행하고, 관측 유출수문곡선과의 평균제곱근오차 (RMSE)를 최소로 하는 매개변수의 조합을 선택하였다. 이렇게 선택된 최적의 저류상수 및 집중시간 조합은 각각 9.31 hr 및 24.10 hr로 나타났다. 다음 단계에서는 전 단계에서 추정된 저류상수 9.31 hr을 만족하는 선형저수지의 개수 및 선

형저수지 저류상수의 가능한 조합을 Eq. (9)를 이용하여 구하게 된다. 이 단계에서도 선형저수지의 개수로는 1.1에서 10까지 0.1의 간격으로 총 90가지의 경우를 고려하였다. 각 선형저수지의 개수 및 선형저수지의 저류상수를 가지고 다시 단위도의 집중시간을 Eq. (8)을 이용하여 결정할 수 있다. 다음은 전 단계와 동일하게, 마련된 90개의 저류상수 및 집중시간의 조합을 각각 Clark 단위도의 매개변수로 하여 유출해석을 수행하고 RMSE를 최소로 하는 조합을 선택하였다. 선택된 최적의 저류상수 및 집중

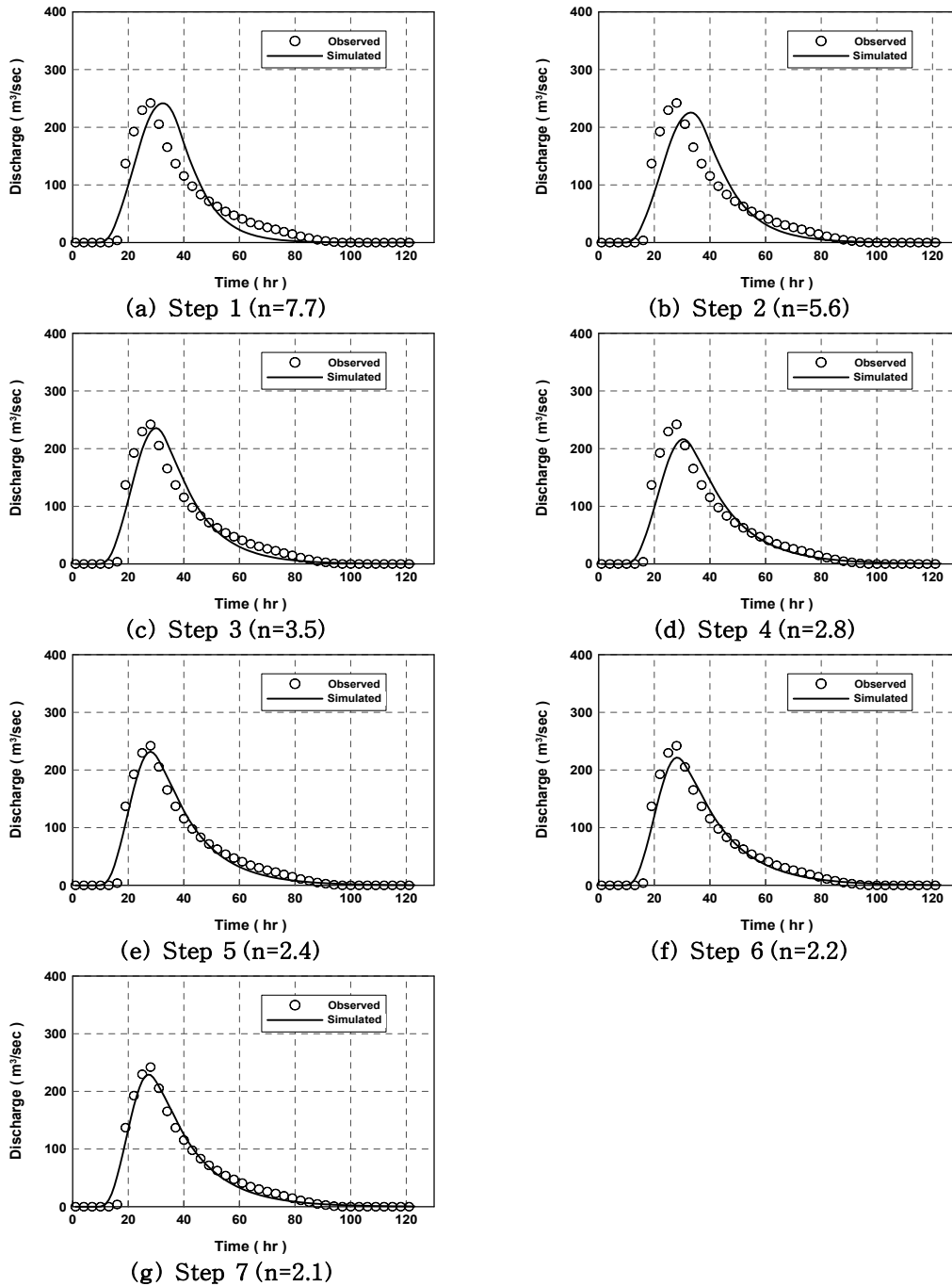


Fig. 3. Comparison of Observed and Simulated Runoff Hydrographs at Each Calculation Steps (case #1)

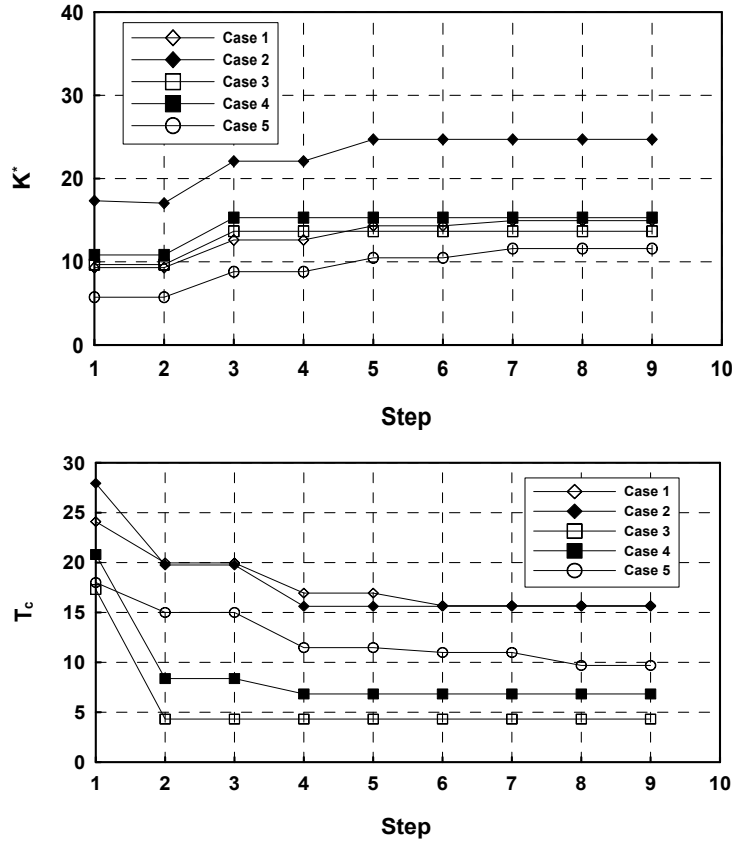


Fig. 4. Convergence of Parameters of Storm Events Considered

Table 3. Basin Characteristics (storage coefficients and concentration times) and the Linear Reservoir Characteristics (numbers and storage coefficients) Decided for Storm Events Considered

	Basin		Linear reservoir	
	$T_c$	$K^*$	$n$	$K$
Case #1	15.68	14.95	2.1	7.30
Case #2	15.62	24.70	1.4	15.13
Case #3	4.32	13.67	1.1	10.39
Case #4	6.84	15.30	1.2	10.57
Case #5	9.69	11.59	1.7	6.31

시간 조합은 각각 12.63 hr 및 19.67 hr로 나타났다. 이 단계에서 드디어 처음 가정한 집중시간과 새로 결정된 집중시간을 비교할 수 있다. 처음 가정한 집중시간 24.10 hr과 이 단계에서 새로 추정된 집중시간 19.97 hr은 차이가 크므로 다음단계로 넘어가게 된다. 다음 단계에서는 물론 첫 번째 단계와 같은 방법으로 집중시간 19.97 hr를 초기 값으로 가정하고 최적의 저류상수를 결정하게 된다.

이상과 같이 집중시간 및 저류상수를 교대로 고정한 후 나머지 매개변수를 결정하는 방식으로 주어진 관측 호우사상에 대한 유역의 저류상수 및 집중시간을 결정하였다.

이 호우사상의 경우에는 5회의 반복 후 일정한 값에 수렴하는 것으로 확인되었다. 각 단계에서 최적으로 판단된 경우의 수문곡선과 관측 수문곡선을 단계별로 비교하면 Fig. 3과 같다. 이 그림에서도 모의된 수문곡선이 관측된 수문곡선에 점차 수렴해 가는 모습을 확인할 수 있다. 물론, 호우사상별로 그 수렴의 정도는 다르며, 이를 비교하면 Fig. 4와 같다.

본 연구에서 고려한 5개의 호우사상에 대한 매개변수 추정결과는 Table 3과 같다. 기본적으로 이 5가지 호우사상은 모두 같은 지점에서 관측된 호우사상이므로 최종적



으로 결정된 유역의 저류상수 및 집중시간은 같아야 한다. 그러나 Table 3에서 살펴볼 수 있는 것처럼 모든 호우 사상에 대해 각기 다른 값들이 추정되었다. 이는 물론 유역 강우-유출 과정의 비선형성을 가장 큰 원인으로 설명할 수 있겠으나, 기저유량 분리나 유효우량 분리 과정상의 불확실성도 어느 정도 영향을 미쳤을 것이라 판단된다. 추정된 결과를 보다 구체적으로 살펴보면 다음과 같다 (Fig. 5 참조).

먼저, 선형저수지의 특성으로 그 개수는 대략 1.1에서 2.1로 나타난다. 평균적으로는 1.5 정도의 값으로, 중·소 규모의 상대적으로 잘 발달되지 못한 하천망을 가진 유역에 해당하는 값으로 나타난다. 또한 선형저수지의 저류상수는 6에서 15 사이에서 크게 변동하고 있으며, 평균적으로는 10 정도가 된다. 유역의 특성도 유사한 변동특성을 보인다. 먼저, 집중시간은 작게는 4 정도에서 크게는 15까지 나타나고, 평균은 약 10 정도이다. 저류상수는 작게는

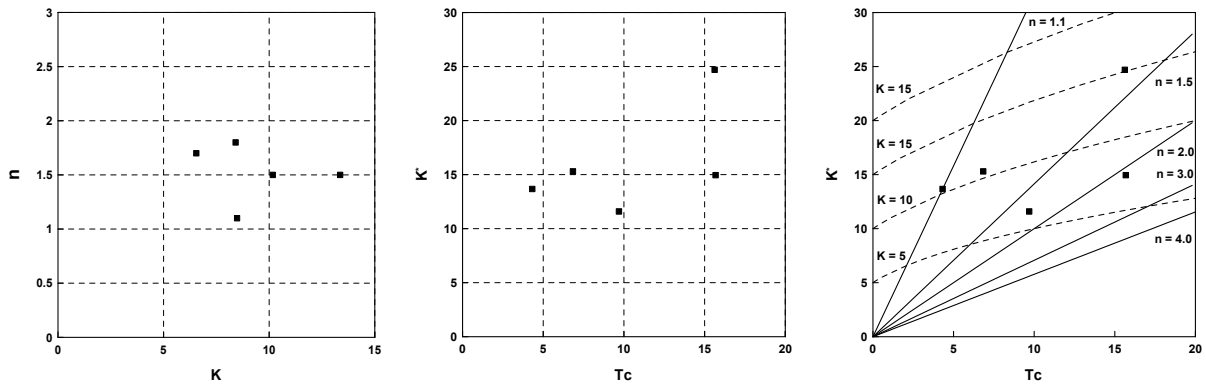


Fig. 5. Relations between Number of Linear Reservoirs and Storage Coefficients (Left), Between Basin Concentration Times and Storage Coefficients (Middle), and Comparison of Basin Characteristics to Linear Reservoir Characteristics (Right)

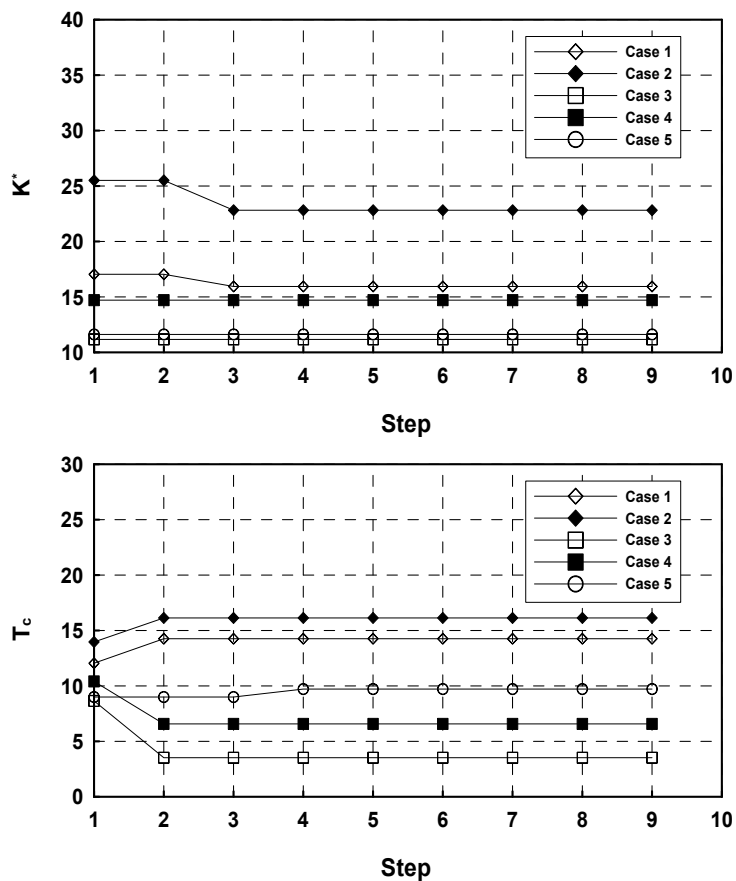


Fig. 6. Same as Fig. 4, but with the One Half of Initial Values Adopted in Fig. 4

11에서 크게는 24까지 나타나고, 평균은 약 15 정도가 된다. 자료의 수가 적어 단정하기는 어려우나, 대체로 집중시간과 저류상수는 비례적인 특성을 보여, 집중시간이 작을수록 저류상수도 작아지고, 반대로 집중시간이 크면 저류상수도 크게 나타난다. 그러나 선형저수지의 개수와 저류상수에서는 그러한 관계는 보이지 않으며 서로 큰 관련이 없는 것으로 보인다. 참고로 경험공식 중 본 연구의 대상유역에 적용 가능한 Rziha 공식을 이용하여 추정된 집중시간은 12.17 hr, Sabol 공식을 이용한 저류상수는 11.95 hr로 나타났다. 적은 수의 호우사상 분석결과를 가지고 이들 경험공식을 판단하는 것은 무리이나, 이 두 경험식의 추정치는 본 연구 결과의 범주에 어느 정도 포함한다고 볼 수 있기는 하다. 그러나 작은 차이기는 하나 집중시간이 저류상수보다 크다는 측면에서는 약간 다른 특성을 보이고 있기도 하다.

추가로, 초기값으로 가정된 값의 민감도를 살펴보기 위해, 앞의 경우에서 초기값으로 가정한 유역의 집중시간을 절반으로 하여 적용한 경우에도 매우 유사한 유역의 저류상수 및 집중시간을 구할 수 있었다 (Fig. 6). 특히 수렴의 속도는 앞의 경우보다 더욱 빠르게 나타났다. 따라서 아직 충분히 검증되지는 못하였으나 본 연구의 방법을 적용하는 경우 관측된 강우 및 유출자료를 대표하는 유역의 저류상수 및 집중시간의 결정은 가능한 것으로 판단된다.

그러나 여전히 이들 결과로부터 어떻게 유역을 대표하는 저류상수 및 집중시간을 결정할 것인가의 문제는 남는다. 이는 근본적으로 보다 많은 호우사상의 분석 결과를 토대로 수행될 수밖에 없을 것이다 (유철상 등, 2007). 집중시간과 저류상수의 관계나 보다 근본적인 선형저수지의 개수와 저류상수의 관계도 보다 많은 호우사상의 분석을 통해 가능할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 단위도 이론인 Nash 모형을 이용하여 유역의 저류상수 및 집중시간을 추정하는 경험적인 방법을 제시하였다. 이 방법은 Nash 모형을 이론적으로 해석하여 구한 집중시간 및 저류상수의 특성에 기초하고 있다. 보다 근본적으로는 반복적인 계산을 통해 유역을 대표하는 선형저수지의 개수 및 저류상수의 수렴된 값을 찾아내는 형태로 되어 있다. 이는 HEC-HMS 등에서 채택하고 있는 최적화기법 적용의 문제점을 극복하고자 하는 것이다.

제안된 방법론은 평창강 유역의 방림지점에 적용하였으며, 전체적으로 물리적으로 타당한 값을 얻을 수 있었다. 그러나 추정된 유역의 저류상수 및 집중시간은 많은

변동성을 보이고 있음을 확인할 수 있었으며, 따라서 유역을 대표하는 값을 결정하기 위해서는 보다 많은 호우사상에의 적용이 필요함을 판단한 것으로 판단되었다. 특히, 분석에 필요한 양호한 단일 호우사상의 수가 매우 제한되어 있다는 한계에 따라, 복합호우사상에 적용될 수 있는 방안의 도출이 매우 시급한 것으로 확인되었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원 (KRF-2008-313-D01083)과 한국수자원공사의 물산업 핵심분야 연구개발비 지원사업 (No. KIWE2008-0003)의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김형수 (2004). "HEC-HMS의 이론과 실무적용." **한국수자원학회 2004년도 제13회 수공학 육삼 교재**, 한국수자원학회, pp. 1-124.
- 성기원 (2003). "Gamma분포형 함수 적합을 이용한 Clark 모형의 매개변수 간접추정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제2호, pp. 223-235.
- 안상진, 김진극, 윤석환, 광현구 (2001). "유출모의를 위한 HEC-HMS 모형의 매개변수 추정." **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 365-370.
- 안태진, 최강훈 (2007). "강우-유출 자료에 의한 Clark 모형의 저류상수 결정." **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1454-1458.
- 유철상, 김기욱, 이지호 (2007). "유역 및 기상상태를 고려한 Clark 단위도의 매개변수 평가: 1. 대표 호우사상의 선정 및 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제2호, pp. 159-170.
- 유철상 (2009). "Nash 모형 이용한 유역 저류상수 및 집중시간의 이론적 검토." **한국수자원학회**, 제42권, 제3호, pp. 235-246.
- 윤석영, 홍일표 (1995). "Clark 모형의 매개변수 산정방법 개선." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제5호, pp. 1287-1300.
- 윤태훈, 박진원 (2002). "Clark 단위도의 저류상수 산정방법의 개선." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1334-1339.
- 윤태훈, 김성탁, 박진원 (2005). "한국 중소하천의 Clark 모형 도달시간 및 저류상수의 재정의." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제3호, pp. 181-187.
- 한국수자원공사 (2008). PMP 및 PMF 산정절차 지침 수립.

- Agiralioglu, N. (1988). "Estimation of the time of concentration for diverging surfaces." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 33, No. 2, pp. 173-179.
- Boyd, M.J. (1978). "A storage-routing model relating drainage basin hydrology and geomorphology." *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 5, pp. 921-928.
- Clark, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- 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., and Johnston, P.R. (1976). "Travel times and nonlinearity of fold runoff from tracer measurements on a small watershed." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 587-595.
- 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.
- Singh, V.P. (1976). "Derivation of time of concentration." *Journal of Hydrology*, Vol. 30, pp. 147-165.
- Wong, T.S.W. (1995). "Time of concentration formulae for planes with upstream inflow." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 40, No. 5, pp. 663-666.

논문번호: 10-008	접수: 2010.01.19
수정일자: 2010.04.14/04.28	심사완료: 2010.04.28