

폭 함수를 기반으로 한 Clark 모형의 매개변수 추정 Parameters Estimation of Clark Model based on Width Function

박 상 현* / 김 주 철** / 정 관 수***

Park, Sang Hyun / Kim, Joo-Cheol / Jung, Kwansue

Abstract

This paper presents the methodology for construction of time-area curve via the width function and thereby rational estimation of time of concentration and storage coefficient of Clark model within the framework of method of moments. To this end time-area curve is built by rescaling the grid-based width function under the assumption of pure translation and then the analytical expressions for two parameters of Clark model are proposed in terms of method of moments. The methodology in this study based on the analytical expressions mentioned before is compared with both (1) the traditional optimization method of Clark model provided by HEC-1 in which the symmetric time-area curve is used and the difference between observed and simulated hydrographs is minimized (2) and the same optimization method but replacing time-area curve with rescaled width function in respect of peak discharge and time to peak of simulated direct runoff hydrographs and their efficiency coefficient relative to the observed ones. The following points are worth of emphasizing: (1) The optimization method by HEC-1 with rescaled width function among others results in the parameters well reflecting the observed runoff hydrograph with respect to peak discharge coordinates and coefficient of efficiency; (2) For the better application of Clark model it is recommended to use the time-area curve capable of accounting for irregular drainage structure of a river basin such as rescaled width function instead of symmetric time-area curve by HEC-1; (3) Moment-based methodology with rescaled width function developed in this study also gives rise to satisfactory simulation results in terms of peak discharge coordinates and coefficient of efficiency. Especially the mean velocities estimated from this method, characterizing the translation effect of time-area curve, are well consistent with the field surveying results for the points of interest in this study; (4) It is confirmed that the moment-based methodology could be an effective tool for quantitative assessment of translation and storage effects of natural river basin; (5) The runoff hydrographs simulated by the moment-based methodology tend to be more right skewed relative to the observed ones and have lower peaks. It is inferred that this is due to consideration of only one mean velocity in the parameter estimation. Further research is required to combine the hydrodynamic heterogeneity between hillslope and channel network into the construction of time-area curve.

Keywords : time-area curve, width function, method of moment, time of concentration, storage coefficient

요 지

본 연구에서는 Clark 모형의 시간-면적곡선의 구성 방법과 적용성을 검토하고 모멘트 원리에 의한 도달시간, 저류상

* 금강유역환경청 측정분석과 환경연구소 (e-mail: pbaby75@korea.kr)

Researcher, Measurement and Analysis Division, Geum River Basin Environmental Office, Daejeon 305-706, Korea

** 교신저자, 충남대학교 국제수자원연구소 수석연구원 (e-mail: kjc@cnu.ac.kr, Tel: +82-42-821-8958)

Corresponding Author, Chief Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University, Daejeon 305-761, Korea

*** 충남대학교 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National University, Daejeon 305-761, Korea

수를 합리적으로 산정하기 위한 방법론을 고찰해 보았다. 격자 기반으로 폭 함수를 구성하고 운동과정을 순수 이류현상으로 가정하여 시간-면적곡선으로 사용하였다. 또한 도달시간과 저류상수는 모멘트 법의 원리에 따라 Clark 모형 구조에 적용하여 해석적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 적용성 검토를 위해 (1) HEC-1에서 기본적으로 제공하는 좌우 대칭형상인 무차원 시간-면적곡선을 적용하고 매개변수 산정은 관측유출수문곡선과 계산된 유출수문곡선의 오차를 최소화하는 HEC-1의 최적화 기법 사용, (2) HEC-1에 폭 함수 기반의 시간-면적곡선을 적용하고 매개변수 산정은 HEC-1의 최적화 기법 사용, (3) 폭 함수 기반의 시간-면적곡선을 이용하여 모멘트 원리에 따라 매개변수를 직접 산정하는 방법을 적용하였다. 방법별로 산정된 Clark 모형의 매개변수들을 HEC-1을 이용하여 직접유출량을 산정하고 관측 직접유출량과 비교하여 얻은 결과는 다음과 같다. (1) 정량적으로 비교하기 위해 산정한 침투유량과 침투발생 시간의 상대오차 및 효율계수 E(Efficiency Coefficient)를 비교한 결과, 시간-면적곡선을 폭 함수로 대체하여 HEC-1으로부터 추정된 매개변수가 관측값을 잘 반영하였다. (2) Clark 모형의 올바른 적용을 위해서는 HEC-1에서 기본적으로 제공하는 좌우 대칭형상인 무차원 시간-면적곡선보다는 적용 대상구역의 배수구조가 적절하게 반영된 시간-면적곡선의 사용이 합리적일 것으로 판단된다. (3) 본 연구 방법은 침투유량과 침투시간의 상대오차 범위와 재현정도를 나타내는 효율계수를 비교하여 볼 때 대체로 양호하게 모의되었고, 대상구역별 유량측정성과인 하천평균유속과 비교했을 때 본 연구 방법이 다소 실제 유속에 접근하고 있음을 확인하였다. (4) 본 연구에서 모멘트 원리를 기반으로 제안한 매개변수 추정을 위한 방법은 유역의 이류현상과 저류현상을 정량적으로 계량할 수 있는 효율적인 관계식으로 사용할 수 있음을 확인하였다. (5) 본 방법에 의해 계산된 수문곡선이 대부분 관측수문곡선의 우측으로 왜곡되고 침투유량은 과소평가 되는 것을 보이고 있다. 이것은 평균과 분산만을 고려하여 유역을 하나의 평균이송속도로 모의한 본 연구의 한계점으로 판단된다. 만약 모멘트의 왜곡도를 고려하고 유역을 지표면과 하천으로 나누어 평균이송속도를 모의한다면 물리적인 특성을 충분히 반영하여 매개변수를 추정 할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 시간-면적곡선, 폭 함수, 모멘트법, 도달시간, 저류상수

1. 서 론

자연유역의 유출응답특성은 주로 이류효과(translation effect)와 저류효과(storage effect)로 구분되어진다. 유역의 도달시간(time of concentration)이나 저류상수(storage coefficient)와 같은 시간응답특성으로 대표되는 이들 두 성분은 합리식(rational method)을 필두로 한 대부분의 수문학적 강우-유출모형들의 이론적 토대를 이룬다(Dooge, 1973). 이와 관련하여 주목할 만한 연구 성과로서 Clark (1945)은 시간-면적곡선(time-area curve)과 선형저수지(linear reservoir)에 대한 개념을 결합하여 순간단위도(instantaneous unit hydrograph)의 개념을 수립한 바 있다. 이후 이를 기반으로 하여 선형수로(linear channel)와 선형저수지의 개념을 기반으로 한 각종 순간단위도 모형들이 여러 학자들에 의하여 제안되어 왔다(Edson, 1951; O'Kelly, 1955; Nash, 1957; Dooge, 1959; Singh, 1962; Diskin, 1964).

Kim (2005)은 강우에 대한 유역의 유출 현상을 나타내기 위해서 개념적 모형이 사용된다면 개념적 모형의 선택과 함께 이 모형을 위한 매개변수의 값들을 선택하는 것이 필요하고, 모형이 무작위하게 선택되고 유출의 적합도

에 근거하여 시행착오적으로 매개변수가 산정된다면 접근 방법은 고전적 단위도보다 훨씬 주관적이 될 수 있음을 밝힌바 있다. 또한 모형에 의한 출력의 짜맞추기는 단위도가 실제의 단위도와 아주 근사하게 닮았다는 어떤 보증도 하지 못하고, 만약 신뢰할 수 있는 방법론을 개발하고자 한다면 그 과정의 모든 단계는 가능한 객관적이어야 함을 제안하였다. 모멘트는 개념적 모형의 매개변수의 적절한 값의 결정과 모형들의 비교를 위한 근거로 사용될 수 있고(Kim, 2005), Nash (1960)는 직접유출과 이에 해당되는 유효우량의 모멘트로부터 IUH의 통계학적 모멘트가 결정될 수 있음을 밝힌바 있다. Clark 모형은 선형이론을 근간으로 하여 제안된 개념적 모형이고, 앞에서 밝힌 바와 같이 모멘트 법은 선형이론에서 응답함수의 특성을 설명할 수 있는 수단으로 적용이 가능하다.

Clark 모형은 국내에서도 많은 적용과 연구가 수행되고 있으나 매개변수를 산정하는 과정이 명확히 확립되지 않은 상태이다(Yoon et al., 2005). Yoon and Hong (1995)는 시간-면적곡선을 평균유속을 이용하여 간단히 구성할 수 있도록 Clark-KICT 방법을 개발 하였고, Lee (1994)는 Clark 모형을 포함한 다수의 개념적 모형에 대한 매개변수의 지형학적 연관성과 효율적인 매개변수 산정에 대한

방법론을 제시하였다. Seong (1999)은 시간-면적곡선을 해석적인 방법으로 유도하였으며 도달시간은 지형학적 자기상사성, 저류상수는 유역의 시간특성의 상사성 공식을 이용하여 추정하였다. 또한 Seong (2003)은 순간단위도를 Gamma함수로 가정하여 매개변수를 추정한 후 이를 Clark 모형의 매개변수로 변환하는 간접 추정방법을 제안하였다. Jeong and Bae (2003)는 시간-면적곡선을 GIS 기법을 이용하여 산정할 수 있는 방법을 제안하였고 유출해석에 미치는 영향을 검토한 바 있다. Yoo and Shin (2010)은 Nash 순간단위도의 구조를 이용하여 유역의 저류상수 및 도달시간을 추정하는 경험적인 방법을 제시하였다.

상기한 모형에 대한 연구 성과들 중에서 주목할 만한 사항을 Clark 모형(1945)과 Nash 모형(1957)의 구조로부터 찾아볼 수 있다. Nash (1957)는 동일한 규모의 선형저수지들이 직렬로 연결된 형태의 배수구조를 제안하였다. Zoch (1934, 1936, 1937)에 의하여 제시된 선형저수지 개념은 유역의 저류효과를 대표하는 선형 수문시스템(linear hydrologic system)의 기본성분으로서 유역의 이류효과(혹은 선형수로)에 대한 고려를 포함하지 않는다. 따라서 선형저수지들의 계열로 구성된 Nash 모형의 경우 이류효과에 대한 표현을 명시적으로 제공하지 않는다. 이와 관련하여 Yoo (2009)은 해당모형에 대한 이론적 검토를 기반으로 유역의 도달시간과 저류상수의 관계에 대한 세심한 접근을 수행한 바 있다. 이러한 시도는 Nash 모형의 유연한 수리구조(mathematical structure)에 바탕을 둔 것으로 실제로 이모형은 모멘트법(method of moments)에 의한 매개변수의 해석적인 동정(identification) 절차와 함께 간단한 수리연산을 통하여 순간단위도의 주요한 특성매개변수에 대한 관계식을 제공하고 있다. 이에 따라 Yoo (2009)은 유역의 도달시간과 저류상수를 Nash 모형의 두 매개변수에 대한 함수의 형태로 유도하고 이를 기반으로 두 특성 응답시간에 대한 기존 경험공식들의 적용범위 및 양자 사이의 상관성에 대한 추론을 수행하였다.

시간-면적곡선은 도달시간 및 저류상수와 함께 Clark 모형을 구성하는 주요한 매개변수 중의 하나이지만 하천기본계획 등과 같은 실무적용사례에 있어 그 형상에 대한 고려를 찾아보기 힘들고 대부분 HEC-1 (혹은 HEC-HMS)에서 기본적으로 제공하는 좌우 대칭형상이 적용되고 있다. O'Kelly (1955)는 시간-면적곡선을 이등변 삼각형으로 가정하여 순간단위도를 유도하고 이를 유역에 적용할 수 있음을 밝힌바 있다. Jeong and Bae (2003)는 Clark 방법을 이용하여 유역 유출량을 산정할 경우 시간-면적곡선 산정보다는 도달시간 및 저류상수 산정에 특히 주의가 필요

함을 제안하였다. 그러나 Kim et al. (2012)은 도달시간과 저류상수를 동일한 조건으로 가정하여 시간-면적곡선의 형상에 따라 수문학적 응답함수의 거동에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 이에 Clark 모형의 올바른 적용을 위해서는 도달시간과 저류상수의 신뢰성 있는 추정뿐만 아니라 적용 대상유역의 배수구조가 적절하게 반영된 시간-면적곡선의 선택이 필요함을 제안하였다.

따라서 본 연구에서는 시간-면적곡선의 구성 방법과 적용성을 검토하고 도달시간, 저류상수를 합리적으로 산정하기 위한 방법론을 제시하고자 한다. 유역 내에서 이류현상을 나타내는 시간-면적곡선은 Meas and Mifflin (1986)이 제안한 폭 함수를 기반으로 구성한다. 만약 물 입자의 운동특성에 따라 폭 함수의 유효거리 축을 시간 축으로 재조정할 경우 대상 유역에 대한 수문학적 응답함수 혹은 재조정된 폭 함수로의 변환이 가능해진다(Rinaldo et al., 1995). Di Lazzaro (2009)는 격자 기반의 폭 함수를 이용하여 지표면과 하천의 특성유속을 모멘트 법의 원리에 의해 산정한 바 있다. 또한 도달시간과 저류상수는 모멘트 법의 원리에 따라 Clark 모형 구조에 적용하여 해석적인 방법으로 추정하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 Clark 모형

Clark (1945)은 선형저수지 모형의 입력으로 시간-면적곡선을 적용하여 순간단위도의 개념을 수립한 바 있다. 이를 연속방정식을 이용하여 표현해 보면 다음과 같다.

$$w(t) - h(t) = R \frac{dh(t)}{dt} \quad (1)$$

여기서, $w(t)$ ($0 < t < T_c$, T_c 는 유역의 도달시간; time of concentration)는 무차원화 한 시간-면적곡선, $h(t)$ 는 순간단위도 그리고 R 은 유역의 저류상수(storage coefficient)를 나타낸다. Eq. (1)의 해, 즉 Clark 모형에 의한 순간단위도의 일반식은 다음과 같이 convolution 연산의 형태로 유도될 수 있다.

$$h(t) = \int_0^t w(\tau)k(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

여기서, $k(t) = \frac{1}{R}e^{-\frac{t}{R}}$ ($0 < t < \infty$)는 선형저수지의 응답 함수이다. Eq. (2)를 구성하는 $w(t)$ 와 $k(t)$ 는 선형수문계의 개념적 성분들로서 유역의 수문학적 응답과정을 각각 이류(translation)현상 및 저류(storage)현상의 범주로 구

분하여 모의한다. 이에 따라 Clark 모형의 두 매개변수 T_c 와 R 은 각각 선형수로계열 $w(t)$ 의 기저시간과 선형저수지의 평균저류시간으로 정의되어진다.

2.2 순간단위도의 통계모멘트

만약 호우사상에 대한 관측 자료가 주어질 경우 순간단위도의 평균과 분산은 다음과 같이 추정될 수 있다 (Dooge, 1973; Di Lazzaro, 2009).

$$\bar{t} = Q_1 - P_1 \quad (3)$$

$$\sigma_t^2 = Q_2^* - I_2^* \quad (4)$$

여기서 \bar{t} , σ_t^2 는 각각 순간단위도의 평균과 분산, Q_1 , P_1 은 직접유출 수문곡선과 유효우량주상도의 원점에 대한 1차 모멘트 그리고 Q_2^* , P_2^* 는 직접유출 수문곡선과 유효우량주상도의 면적중심에 대한 2차 모멘트이다.

모멘트법의 원리에 따라 Eqs. (3) and (4)의 \bar{t} , σ_t^2 는 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$\bar{t} = \int_0^\infty tw(t)dt + R \quad (5)$$

$$\sigma_t^2 = \int_0^\infty (t - \bar{t})^2 w(t)dt + R^2 \quad (6)$$

만약 $w(t)$ 의 형상이 주어진다면 Clark 모형의 두 매개변수는 Eqs. (5)~(6)로부터 모멘트 법을 기반으로 해석적으로 추정할 수 있게 됨을 확인할 수 있다.

3. 방법론

3.1 폭 함수를 이용한 시간-면적곡선의 구성

폭 함수 $W(x)$ 는 유역의 출구를 기준으로 동일한 유하거리 x 에 위치한 link의 개수를 총 link의 개수로 나누어 정규화한 무차원함수이다. 하천망을 구성하는 기본 성분인 link는 단일 유역의 경우 유사한 직접배수면적을 갖는 것으로 알려져 있다(Smart, 1972). 이는 $W(x)$ 가 배수면적의 1차원 공간분포와 합동임을 의미하는 것으로 Kim and Yoon (1993)은 이를 하천망의 형태학적 특성에 따라 조직되는 초기유량분포함수로서 해석한 바 있다. 따라서 만약 물 입자의 운동특성에 따라 $W(x)$ 의 유하거리 축을 시간 축으로 재조정할 경우 대상 유역에 대한 수문학적 응답함수 혹은 재조정된 폭 함수로의 변환이 가능해진다 (Mesa and Mifflin, 1986; Rinaldo et al., 1995). 이러한 개념을 $w(t)$ 에 적용하기 위하여 물 입자의 운동과정을 순

수 이류(혹은 이송, advection)현상으로 가정할 경우 유역 내 물 입자의 운동궤적은 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있게 된다(Rodríguez-Iturbe and Rinaldo, 2003).

$$X(t;x,0) = x - \int_0^t u(X(\tau;x,0),\tau)d\tau \sim x - \bar{u}t \quad (7)$$

여기서, $u(X,t)$, \bar{u} 는 각각 물 입자의 지점별 속도벡터 및 평균이송속도이다. Eq. (7) 좌변의 $X(t;x,0)$ 는 초기시점에서 x 지점에 떨어진 물 입자가 t 시점에 도착하는 지점을 나타내는 Lagrangian 좌표이다. 유출현상에 대한 통계물리학적 접근법(Lienhard, 1964; Rodríguez-Iturbe and Valdes, 1979)에 따라 Eq. (7)과 같이 정의되는 운동궤적에 대한 수문학적 응답함수는 다음과 같이 해당 경로를 통한 물 입자의 유하시간에 대한 확률밀도함수 $f_x(t)$ 로서 나타낼 수 있다.

$$f_x(t) = \delta(x - \bar{u}t) \quad (8)$$

여기서, $\delta(\cdot)$ 는 Dirac의 delta함수이다. 결국 Eq. (8)을 해당 지점에 대한 $W(x)$ 을 가중치로 하여 유역의 흐름방향 축을 따라 적분할 경우 순수 이류현상에 따른 유역의 재조정된 폭 함수(혹은 시간면적 곡선) $w(t)$ 를 다음과 같이 유도할 수 있게 된다.

$$w(t) = \int_0^\infty dx W(x)\delta(x - \bar{u}t) = W(\bar{u}t) \quad (9)$$

3.2 모멘트 법

Eqs. (5) and (6)의 우변에 Eq. (9)를 대입할 경우 Clark 모형의 두 통계모멘트(Eqs. (5) and (6))는 다음과 같이 변환되어 진다.

$$\bar{t} = \frac{\bar{L}}{\bar{u}} + R \quad (10)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma_L^2}{\bar{u}^2} + R^2 \quad (11)$$

여기서, $\bar{L}(= \int_0^\infty x W(x)dx)$, $\sigma_L^2(= \int_0^\infty (x - \bar{L})^2 W(x)dx)$ 는 각각 Eq. (7)로 정의되는 운동궤적의 평균과 분산이다. 이에 따라 \bar{u} , R 은 Eqs. (10) and (11)을 연립하여 다음과 같이 유도할 수 있게 된다.

$$\bar{u}_{1,2} = \frac{\sigma_L^2 + \bar{L}^2}{\bar{t}\bar{L} \pm \sqrt{(\sigma_L^2 + \bar{L}^2)\sigma_t^2 - \sigma_L^2 R^2}} \quad (12)$$

$$R_{1,2} = \bar{t} - \frac{\bar{L}}{u_{1,2}} = \bar{t} - \frac{\bar{t}\bar{L} \pm \sqrt{(\sigma_L^2 + \bar{L}^2)\sigma_t^2 - \sigma_L^2 \bar{t}^2}}{\sigma_L^2 + \bar{L}^2} \bar{L} \quad (13)$$

유역의 도달시간에 대한 정의에 따라 $w(t)$ 의 기저시간 T_c 역시 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$T_{c1,2} = \frac{L_{\max}}{u_{1,2}} = \frac{\bar{t}\bar{L} \pm \sqrt{(\sigma_L^2 + \bar{L}^2)\sigma_t^2 - \sigma_L^2 \bar{t}^2}}{\sigma_L^2 + \bar{L}^2} L_{\max} \quad (14)$$

여기서, L_{\max} 는 물 입자의 운동궤적의 최대치이다. Eqs. (12)~(14)는 $W(x)$ 를 기반으로 정의되는 $w(t)$ 에 따라 유역의 이류현상과 저류현상을 정량적으로 계량할 수 있는 효율적인 관계식으로 판단된다.

4. 시간-면적곡선 및 저류상수와 도달시간의 산정

대상유역의 저류상수와 도달시간을 산정하기 위해서는 우선 시간-면적곡선을 결정해야 한다. Clark 모형은 유역 출구까지 도달하는데 걸리는 시간이 동일한 점들을 연결하는 등시간선을 기반으로 시간-면적곡선을 작성하고 저수지 추적을 수행하여 유출을 모의하는 방법이다. 따라서 시간-면적곡선은 유역의 길이나 형상 등의 유역특성이 반영되어 있고 유역별로 상이한 형상을 나타낸다. HEC-1에서는 사용자가 시간-면적곡선을 작성하여 모형에 적용할 수 있고 작성이 어려운 경우에는 기본적으로 제공하는 좌우 대칭형상인 무차원 시간-면적곡선을 사용할 수 있다. 또한 강우-유출의 실측자료가 주어지면 적용된 시간-면적곡선에 따라 관측유출수문곡선과 계산된 유출수문곡선의 오차를 최소화하는 최적화 기법에 의해 저류상수와 도달시간을 산정해주는 방법이 제공되고 있다. 이를 이용하면 수문사상 자료로부터 시간-면적곡선의 형태에 따른 저류상수와 도달시간이 결정되고 계산된 유출수문곡선이 산정된다. 또한 모멘트 원리에 따라 저류상수와 도달시간을 직접 산정하고 이 값을 HEC-1에 입력한다면 또한 유출수문곡선의 계산이 가능하다. 따라서 적용성 검토를 위해 (1) HEC-1에서 기본적으로 제공하는 좌우 대칭형상인 무차원 시간-면적곡선을 적용하고 매개변수 산정은 관측 유출수문곡선과 계산된 유출수문곡선의 오차를 최소화하는 HEC-1의 최적화 기법 사용, (2) HEC-1에 폭 함수 기반의 시간-면적곡선을 적용하고 매개변수 산정은 HEC-1의 최적화 기법 사용, (3) 폭 함수 기반의 시간-면적곡선을 이용하여 모멘트 원리에 따라 매개변수를 직접 산정하는 방법을 적용한다.

본 연구에서는 이상과 같은 방법을 토대로 다음과 같은 절차에 따라 시간-면적곡선의 구성 방법과 적용성을 검토하고 저류상수와 도달시간에 대한 결정방법을 제시하고자 한다.

- 1) 관측 수문자료로부터 유효우량과 직접유출수문곡선을 결정한다.
- 2) 결정된 수문자료로부터 지체시간(T_{LAG} , \bar{t})과 분산(Var_{OBS} , σ_t^2)을 모멘트 원리에 따라 산정한다.
- 3) GIS를 이용하여 격자별 흐름경로길이를 산정하여 흐름경로길이의 평균(\bar{L}), 분산(σ_L^2)과 최대치(L_{\max})를 결정한다.
- 4) 격자별 흐름경로길이를 이용하여 유역의 출구를 기준으로 동일한 유하거리 x 만큼 떨어진 거리 내의 격자수를 산정하고 이를 폭 함수 $W(x)$ 로 사용한다.
- 5) 단계 2와 4에서 산정된 결과를 이용하여 본 연구에서 제시한 방법에 따라 매개변수(저류상수, 도달시간)를 결정한다.
- 6) 적용성 검토를 위해 (1) HEC-1에서 기본적으로 제공하는 시간-면적곡선을 이용하여 매개변수 산정 (2) 대상유역별 산정된 폭 함수 $W(x)$ 를 시간-면적곡선으로 하여 HEC-1에 직접 입력하고 매개변수를 산정한다.
- 7) 단계 4와 5에서 결정된 시간-면적곡선, 저류상수와 도달시간을 HEC-1에 입력하여 유출수문곡선을 계산하고 6단계의 결과를 이용하여 적용성을 검토한다.

5. 적용사례

5.1 수문사상 분석 및 지형특성인자 산정

본 연구의 대상유역은 보청천에 위치한 탄부, 기대와 산계수위국을 출구점으로 하는 유역을 선정하였다. Fig. 1과 같이 기대와 산계유역은 보청천의 본류이며, 탄부유역은 지류에 해당된다. 수문사상은 International Hydrologic Programme (IHP) Research Paper (2001-2005)와 Water Management Information System(<http://www.wamis.go.kr>)에서 제공하는 수위자료를 Annual Hydrological Report on Korea (2007, 2009, 2010)와 2011년 Hydrological Survey Report (2012)의 수위-유량곡선식에 적용하여 선정하였다. 본 연구의 적용을 위해 면적평균 강우량은 티센법을 적용하였고, 기저유출분리는 수평직선분리법을 사용하였으며 수평직선분리법의 적용이 어려운 경우에는 수문곡선의 감수부를 반대수지에 도시하여 감수부 경사가 급변하는 점을 중점으로 하는 경사급변점

법을 적용하였다. 유효우량 분리방법은 수문곡선의 상승 시점 이전까지의 강우량은 초기손실로 취하고, 그 후의 손실량은 일정 손실율로 가정하는 초기손실-일정손실법을 적용하였다. 또한 도달시간과 저류상수를 추정하기 위

한 지체시간(T_{LAG} , \bar{t})과 분산(Var_{OBS} , σ_t^2)은 각각 Eqs. (3) and (4)에 따라 산정되었다. 이상의 과정을 통하여 선정된 소유역별 수문사상들과 분석 결과는 Table 1과 같다. 본 연구에서 사용된 DEM은 1/25,000 수치지도로부터

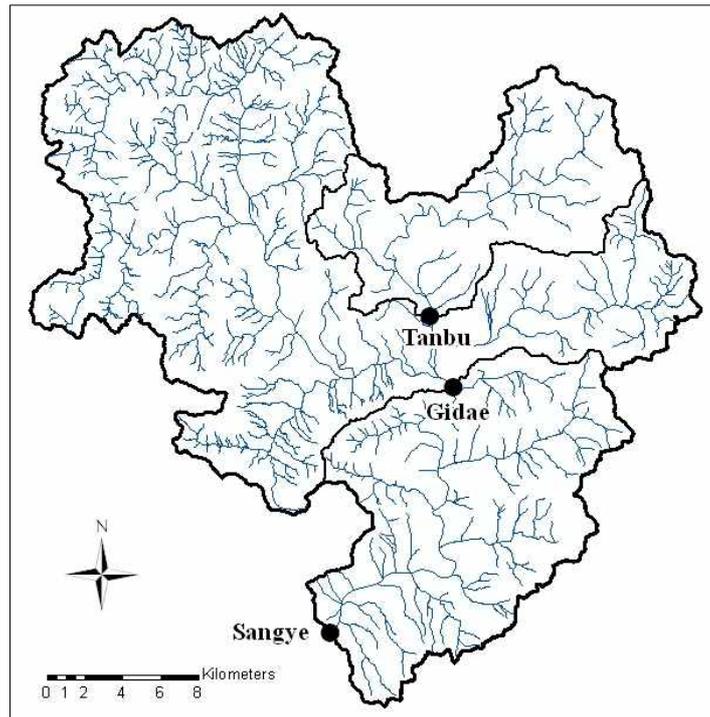


Fig. 1. Target Basin

Table 1. The Outline of Storm Events and Estimation of Storm Events Parameters

Watershed	Event	Runoff rate	$Q_p(m^3/s)$	$t_p(hr)$	T_{LAG}	Var_{OBS}
Tanbu	(1) 2000-07-23	0.32	87.2	15	10.99	50.09
	(2) 2003-07-25	0.70	36.6	5	7.24	29.13
	(3) 2004-07-16	0.28	92.0	6	5.01	11.57
	(4) 2009-07-21	0.75	116.7	7	9.28	30.99
Gidae	(5) 2000-07-30	0.24	67.1	15	20.00	181.03
	(6) 2001-06-24	0.25	43.7	7	14.29	111.45
	(7) 2007-06-24	0.29	45.4	10	14.94	139.23
	(8) 2007-07-01	0.51	209.7	5	7.92	32.05
	(9) 2009-07-12	0.35	160.6	7	12.85	106.76
	(10) 2011-07-25	0.47	251.5	5	10.50	82.76
	(11) 2011-08-03	0.39	86.2	6	14.50	133.39
Sangye	(12) 2000-06-26	0.24	284.5	9	12.11	61.62
	(13) 2001-06-30	0.23	75.3	11	12.30	37.20
	(14) 2004-08-18	0.20	139.0	12	20.40	271.21
	(15) 2007-07-10	0.55	226.7	14	19.75	196.69
	(16) 2007-07-19	0.37	49.8	9	17.90	114.70
	(17) 2008-07-23	0.50	219.4	8	17.35	148.73

상용 S/W인 Arc Info를 이용하여 20×20m의 격자망으로 구성하였다. 전처리된 DEM을 이용하여 흐름방향도를 생성하고 Arc/Info의 flowlength 함수를 사용하여 각 격자별 흐름경로길이를 계산한다. 이를 토대로 도달시간과 저류상수를 모멘트 법의 원리에 따라 Clark 모형 구조에 적용하기 위한 지형특성인자들은 Table 2와 같이 산정되었다.

5.2 폭 함수를 이용한 시간-면적곡선의 구성

앞서 언급한 바와 같이 Kim et al.(2012)은 동일한 도달시간과 저류상수를 가정하여 서로 다른 왜곡도를 갖는 삼각형 시간-면적곡선을 Clark 모형에 적용하여 그에 따른 순간단위도의 변화 양상을 분석하였다. 시간-면적곡선의 형상에 따라 침투시간, 침투유출량과 폭의 형태가 다른 특성을 갖는 순간단위도가 나타나게 됨을 확인하였다. 이에 Clark 모형의 올바른 적용을 위해서는 적용 대상유역의 배수구조가 적절하게 반영된 시간-면적곡선의 선택이 필요함을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 유역의 배수구조를 나타내는 폭 함수를 이용하여 시간-면적곡선을 구성하고자 한다. 대상유역의 폭 함수 $W(x)$ 는 유역 각 격자 중심에서 유역출구점까지의 유하거리를 의미하는 흐름경

로길이를 이용하여 구성한다. 앞에서 언급한 가정에 의해 유역의 출구를 기준으로 동일한 유하거리 x 만큼 떨어진 거리 내의 격자수로 폭 함수를 대체 할 수 있다. Figs. 2~4는 유역출구점으로부터 20m 간격의 대상유역별 폭 함수를 나타낸 것이다.

5.3 저류상수와 도달시간 산정

본 연구에서 제시한 방법에 의해 Clark 모형의 매개변수인 저류상수와 도달시간은 우선 Eq. 12에 Table 1 and Table 2의 수문자료의 통계 모멘트와 유하거리 통계값들을 대입하여 유역 내 평균이송속도 \bar{u}_1 과 \bar{u}_2 를 산정한다. 산정된 각각의 평균이송속도를 Eq. (13) and Eq. (14)에 대입하여 동일한 사상에 대해 두 쌍의 저류상수와 도달시간을 계산한다. 구해진 해들 중 한 쌍은 저류상수가 음수일 경우 물리적으로 발생할 수 없는 경우이므로 제외하였다. 또한 적용성 검토를 위해 앞에서 제시한 단계 6에 따라 저류상수와 도달시간을 산정하였고 그 결과는 Table 3과 같다. 단계 6에서 산정된 매개변수에 대한 평균이송속도는 흐름경로길이의 최대치(L_{max})를 각각의 도달시간으로 나누어 계산한 값을 나타낸다.

Table 2. Geomorphologic Factors

Watershed	A (km ²)	L _{max} (m)	Travel Length	
			Mean(\bar{L}) (m)	Variance(σ_L^2) (m ²)
Tanbu	77.51	21,854	11,946	38,196,165
Gidae	354.14	37,362	17,477	62,258,725
Sangye	485.21	56,436	30,420	158,711,391

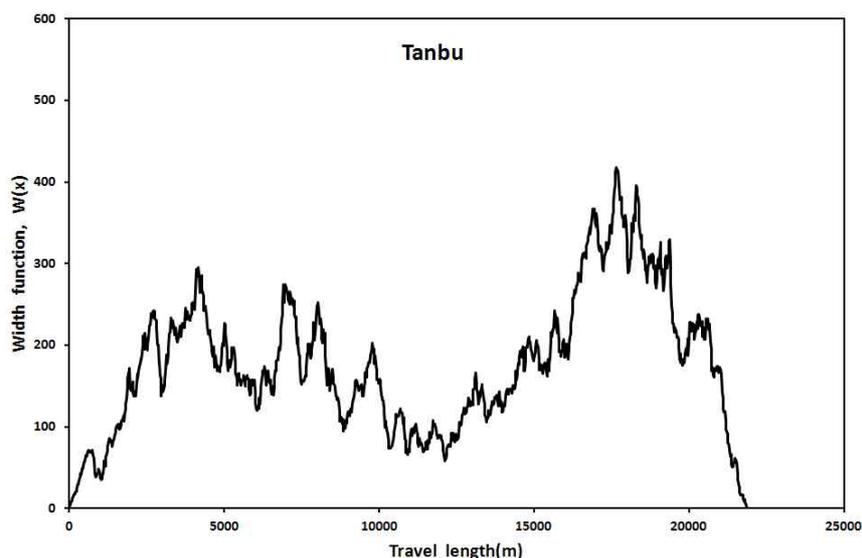


Fig. 2. Width Function of Tanbu Watershed ($\Delta x = 20$ m)

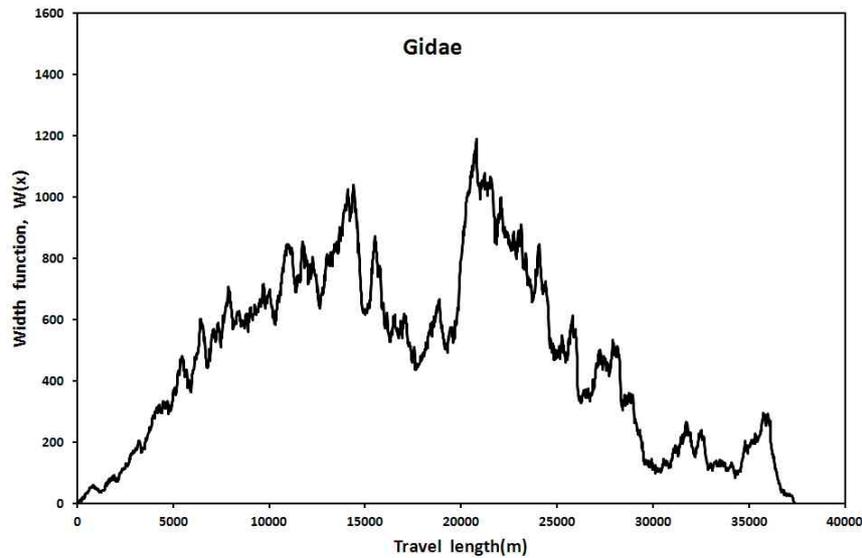


Fig. 3. Width Function of Gidae Watershed ($\Delta x = 20$ m)

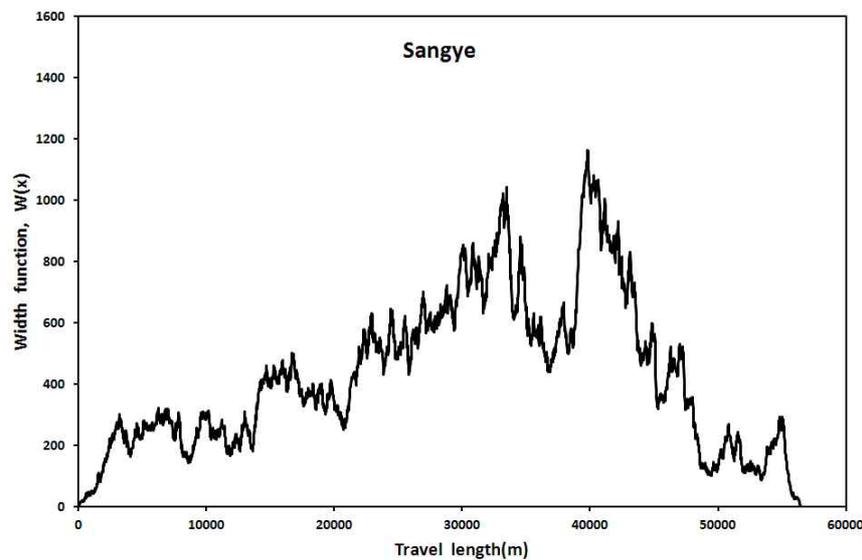


Fig. 4. Width Function of Sangye Watershed ($\Delta x = 20$ m)

5.4 적용성 검토

이상의 과정을 통해 대상유역별 분석결과를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 5와 같이 HEC-1으로 부터 시간-면적곡선 형상에 따라 산정된 저류상수는 서로 유사한 결과를 나타냈으나 본 연구 방법에 의해 산정된 저류상수는 일부 큰 편차 보이고 있다. 또한 HEC-1으로부터 산정된 저류상수들은 유사하지만 Fig. 6과 같이 도달시간들은 일부 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 시간-면적곡선 형상에 따라 도달시간이 더 민감함을 보이고, 그 형상이 수문학적 거동에 영향을 미치고 있음을 유추할 수 있다. 평균이

송속도는 Fig. 7과 같이 본 연구 방법의 결과가 작게 산정되는 경향을 보이고 있다.

본 연구 방법의 적용성을 평가하기 위하여, 방법별로 산정된 Clark 모형의 매개변수들을 HEC-1의 입력값으로 하여 직접유출량을 산정하였고 관측 직접유출량과 비교를 위해 Figs. 8~10과 같이 도시하였다. 또한 각각의 침투유량과 침투시간을 Table 4와 같이 정리하였다. 정량적인 비교를 위하여 관측된 침투유량에 대한 상대오차와 침투발생 시간에 대한 상대오차, 평균제곱근오차(Root Mean Square Error; RMSE) 및 효율계수 E (Efficiency Coefficient)를 Table 5와 같이 산정하였다. 여기에서 효율계수

Table 3. Estimation of Clark Method Parameters and Dynamic Parameter

Water shed	Event	Parameter								
		HEC-1 optimization			Width function optimization			This study		
		R (hr)	T_c (hr)	\bar{u} (m/s)	R (hr)	T_c (hr)	\bar{u} (m/s)	R (hr)	T_c (hr)	\bar{u} (m/s)
Tanbu	2000-07-23	2.39	15.88	0.38	2.69	13.77	0.44	6.73	7.79	0.78
	2003-07-25	4.66	4.04	1.50	4.65	3.54	1.71	5.30	3.55	1.71
	2004-07-16	3.26	3.59	1.69	3.15	3.33	1.82	3.28	3.16	1.92
	2009-07-21	4.19	8.42	0.72	4.59	6.86	0.88	5.14	7.58	0.80
Gidae	2000-07-30	13.57	12.15	0.85	13.64	13.18	0.79	13.09	14.78	0.70
	2001-06-24	11.93	6.32	1.64	11.96	6.89	1.51	10.41	8.28	1.25
	2007-06-24	12.37	6.18	1.68	12.40	6.75	1.54	11.71	6.91	1.50
	2007-07-01	5.55	3.95	2.63	5.56	4.31	2.41	5.56	5.04	2.06
	2009-07-12	9.59	3.99	2.60	9.65	4.21	2.47	10.27	5.52	1.88
	2011-07-25	8.11	2.46	4.22	8.08	2.79	3.72	9.07	3.04	3.41
	2011-08-03	10.51	4.42	2.35	10.49	5.01	2.07	11.47	6.48	1.60
Sangye	2000-06-26	8.38	6.63	2.36	8.51	6.31	2.48	7.63	8.31	1.89
	2001-06-30	5.56	11.37	1.38	5.88	10.64	1.47	5.38	12.83	1.22
	2004-08-18	13.05	7.34	2.14	13.23	7.00	2.24	16.38	7.45	2.10
	2007-07-10	11.14	11.64	1.35	11.56	10.90	1.44	13.81	11.02	1.42
	2007-07-19	10.68	13.66	1.15	11.60	12.35	1.27	10.23	14.24	1.10
	2008-07-23	11.96	8.08	1.94	12.15	7.79	2.01	11.99	9.95	1.58

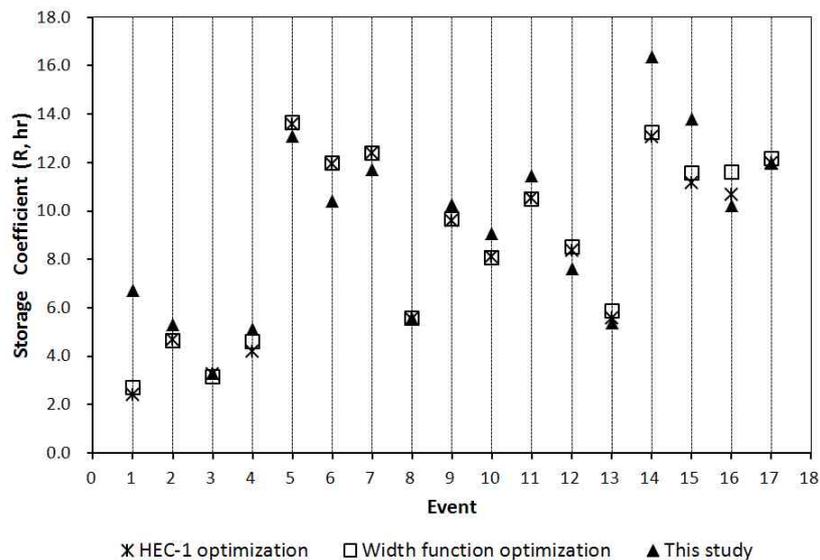


Fig. 5. Comparison of Storage Coefficients Estimated

란 모의된 직접유출 수문곡선의 재현정도를 평가하기 위하여 Nash and Sutcliffe (1970)에 의하여 Eq. (15)와 같이 제안된 결정계수와 유사한 형태의 지표로서 1에 가까울수록 우수한 재현정도를 의미한다.

$$E = 1 - \frac{\sum_i (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_i (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (15)$$

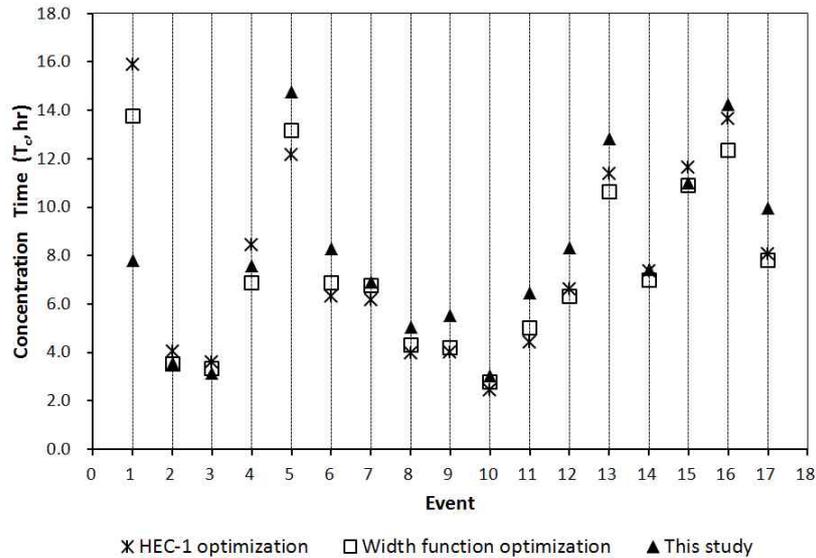


Fig. 6. Comparison of Concentration Times Estimated

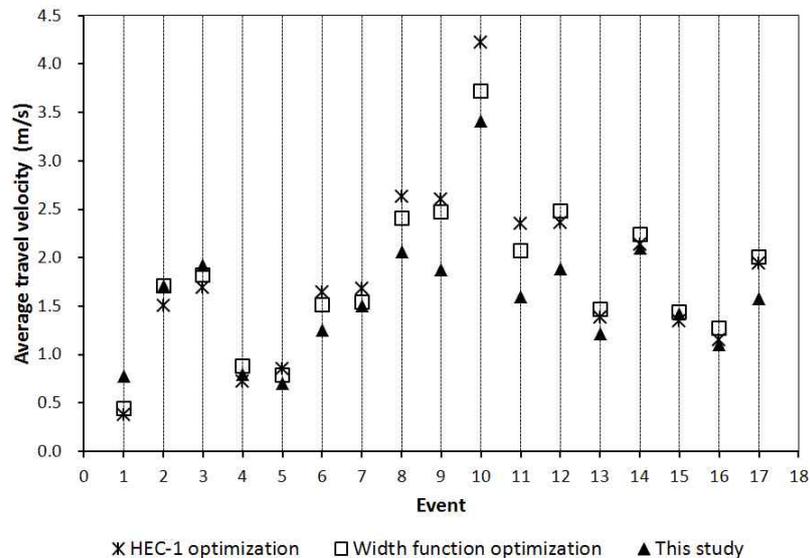


Fig. 7. Comparison of Average Travel Velocities Estimated

여기서 Q_i 는 관측된 직접유출량, \hat{Q}_i 는 계산된 직접유출량, \bar{Q}_i 는 관측된 직접유출량의 평균을 의미한다. 침투유출량에 대한 상대오차는 방법 (1)에 대하여 탄부 1.1~7.5%, 기대 0.6~9.5%, 산계 0.4~16.3%, 방법 (2)는 탄부 1.6~4.0%, 기대 0.1~10.7%, 산계 2.5~8.8%, 본 연구 방법 (3)은 탄부 1.1~14.3%, 기대 3.7~20.0%, 산계 4.7~19.4%의 범위를 나타내었다. 또한 침투시간에 대한 상대오차는 방법 (1)에 대하여 탄부 0.0~14.3%, 기대 0.0~20.0%, 산계 0.0~33.3%, 방법 (2)는 탄부 0.0~14.3%, 기대 0.0~20.0%, 산계 0.0~22.2%, 본 연구 방법 (3)은 탄부 0.0~33.3%, 기대 0.0~20.0%, 산계 0.0~33.3%의 범위를 나타내었다. 평

균제곱근오차는 방법 (1)에 대하여 탄부 1.4~6.8, 기대 0.8~10.3, 산계 3.3~16.2, 방법 (2)는 탄부 1.4~7.8, 기대 0.8~10.1, 산계 3.1~13.5, 본 연구 방법 (3)은 탄부 1.5~9.1, 기대 1.8~10.8, 산계 3.7~21.7의 범위를 나타내었다. 효율 계수는 본 연구 방법에 의해 산정된 산계지점 2001년 6월 30일 사상을 제외하고는 0.90 이상의 수치를 보이고 있다. 이상의 결과에서 주목할 점은 전체적으로 시간-면적곡선을 폭 함수로 대체하여 HEC-1로부터 추정된 매개변수가 관측값을 잘 반영하고 있다는 것이다. 이에 Clark 모형의 올바른 적용을 위해서는 HEC-1에서 기본적으로 제공하는 좌우 대칭형상인 무차원 시간-면적곡선보다는 적용

Table 4. Comparison between and Observed Data and Calculated Results

Water-shed	Event	Q_p (m^3/s)				T_p (hr)			
		Obs.	(1)	(2)	(3)	Obs.	(1)	(2)	(3)
Tanbu	2000-07-23	87.2	82.0	90.0	77.0	15	14	15	10
	2003-07-25	36.6	36.0	36.0	33.0	5	5	5	5
	2004-07-16	92.0	91.0	94.0	93.0	6	6	6	6
	2009-07-21	116.7	108.0	112.0	100.0	7	8	8	9
Gidae	2000-07-30	67.1	63.0	63.0	63.0	15	14	14	15
	2001-06-24	43.7	46.0	46.0	49.0	7	7	8	8
	2007-06-24	45.4	46.0	46.0	48.0	10	9	9	9
	2007-07-01	209.7	211.0	210.0	202.0	5	5	5	6
	2009-07-12	160.6	154.0	154.0	141.0	7	7	7	8
	2011-07-25	251.5	245.0	246.0	225.0	5	4	4	5
Sangye	2011-08-03	86.2	78.0	77.0	69.0	6	6	6	7
	2000-06-26	284.5	262.0	270.0	271.0	9	9	9	10
	2001-06-30	75.3	63.0	69.0	66.0	11	11	11	13
	2004-08-18	139.0	131.0	133.0	112.0	12	12	12	12
	2007-07-10	226.7	214.0	221.0	196.0	14	15	15	15
	2007-07-19	49.8	50.0	53.0	55.0	9	12	11	12
2008-07-23	219.4	195.0	200.0	192.0	8	9	9	10	

Table 5. The Relative Err., RMSE and the Efficiency Coefficient

Water-shed	Event	Q_p (%)			T_p (%)			RMSE			Efficiency Coefficient		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Tanbu	2000-07-23	6.0	3.2	11.7	6.7	0.0	33.3	5.3	5.5	8.1	0.96	0.96	0.91
	2003-07-25	1.6	1.6	9.8	0.0	0.0	0.0	1.4	1.4	1.5	0.98	0.98	0.97
	2004-07-16	1.1	2.2	1.1	0.0	0.0	0.0	3.4	3.6	3.8	0.99	0.98	0.98
	2009-07-21	7.5	4.0	14.3	14.3	14.3	28.6	6.8	7.8	9.1	0.96	0.95	0.93
Gidae	2000-07-30	6.1	6.1	6.1	6.7	6.7	0.0	2.0	2.0	2.7	0.99	0.99	0.98
	2001-06-24	5.3	5.3	12.1	0.0	14.3	14.3	0.8	0.8	1.9	1.00	1.00	0.98
	2007-06-24	1.3	1.3	5.7	10.0	10.0	10.0	1.7	1.7	1.8	0.98	0.98	0.98
	2007-07-01	0.6	0.1	3.7	0.0	0.0	20.0	5.8	5.4	8.2	0.99	0.99	0.98
	2009-07-12	4.1	4.1	12.2	0.0	0.0	14.3	7.8	7.7	10.5	0.96	0.96	0.94
	2011-07-25	2.6	2.2	10.5	20.0	20.0	0.0	10.3	10.1	10.8	0.98	0.98	0.97
Sangye	2011-08-03	9.5	10.7	20.0	0.0	0.0	16.7	4.5	4.5	6.0	0.95	0.95	0.91
	2000-06-26	7.9	5.1	4.7	0.0	0.0	11.1	16.2	13.5	21.7	0.96	0.97	0.93
	2001-06-30	16.3	8.4	12.4	0.0	0.0	18.2	7.0	5.1	7.1	0.90	0.94	0.89
	2004-08-18	5.8	4.3	19.4	0.0	0.0	0.0	6.4	6.0	7.8	0.97	0.97	0.95
	2007-07-10	5.6	2.5	13.5	7.1	7.1	7.1	10.6	8.3	10.1	0.97	0.98	0.97
	2007-07-19	0.4	6.4	10.4	33.3	22.2	33.3	3.3	3.1	3.7	0.95	0.96	0.94
2008-07-23	11.1	8.8	12.5	12.5	12.5	25.0	11.1	7.8	15.1	0.96	0.98	0.93	

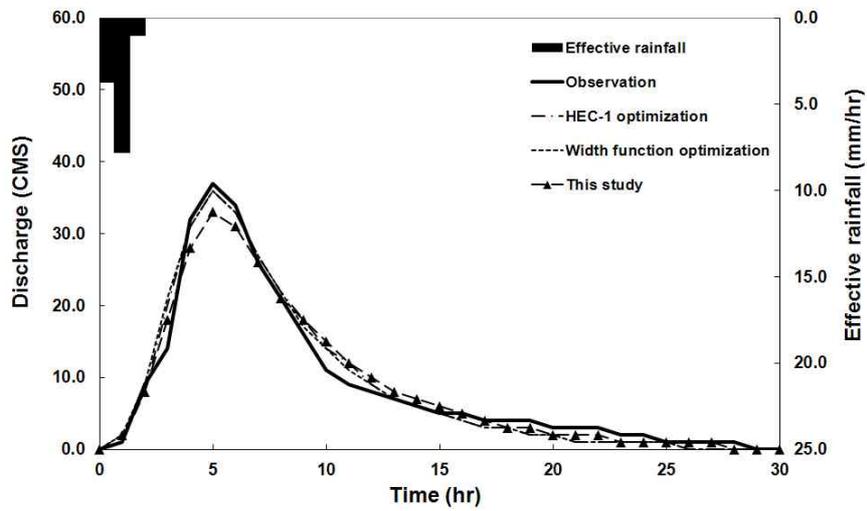


Fig. 8. Comparison of Observed and Simulated Runoff Hydrographs in the Tanbu Watershed ('03.07.25)

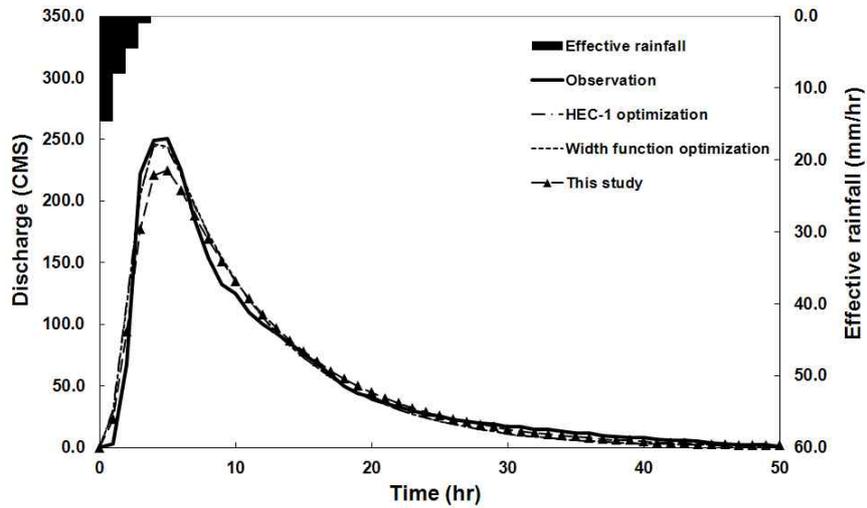


Fig. 9. Comparison of Observed and Simulated Runoff Hydrographs in the Gidae Watershed ('11.07.25)

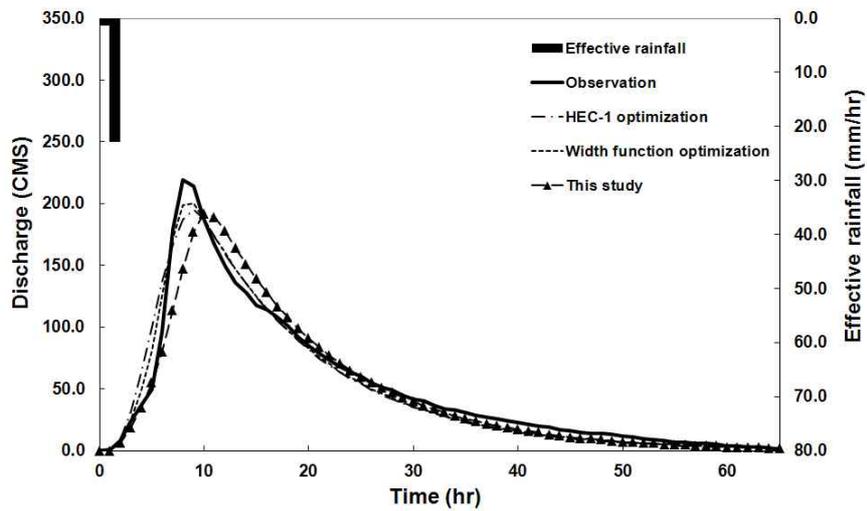


Fig. 10. Comparison of Observed and Simulated Runoff Hydrographs in the Sangye Watershed ('08.07.23)

대상구역의 배수구조가 적절하게 반영된 폭 함수의 사용이 합리적일 것으로 판단된다. 본 연구 방법 또한 침투유량과 침투시간의 상대오차 범위, 평균제곱근오차 및 재현 정도를 나타내는 효율계수를 비교하여 볼 때 대체로 양호하게 모의되는 것으로 판단된다. Annual Hydrological Report on Korea (2007, 2009, 2010)와 2011년 Hydrological Survey Report (2012)에 수록된 유량측정성과 중 탄부교는 유량 27.34~137.3 m/s에 대해 하천평균유속 0.650~1.249 m/s, 기대교는 175.18~289.98 m/s에 대해 하천평균유속 1.040~1.460 m/s, 산계교는 134.9~316.6 m/s에 대해 하천평균유속 0.808~0.949 m/s의 범위를 나타내었다. 임의 시점의 총유출량에 대한 하천평균유속과 직접유출량으로부터 산정된 Table 3의 유역 평균이송속도와 직접 비교는 어렵겠지만 직관적으로 판단할 때 전체적으로 과대평가된 것으로 판단된다. 하지만 본 연구 방법이 다소 실제 유속에 접근하고 있음을 보여주고 있다. Figs. 8~10을 살펴보면 본 방법에 의해 계산된 수문곡선이 대부분 관측수문곡선의 우측으로 왜곡되고 침투유량은 과소평가되는 것을 보이고 있다. 이것은 평균과 분산만을 고려하여 유역을 하나의 평균이송속도로 모의한 본 연구의 한계점으로 판단된다. 만약 모멘트의 왜곡도를 고려하고 유역을 지표면과 하천으로 나누어 평균이송속도를 모의한다면 물리적인 특성을 충분히 반영하여 매개변수를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 Clark 모형의 시간-면적곡선의 구성 방법과 적용성을 검토하고 모멘트 원리에 의한 도달시간, 저류상수를 합리적으로 산정하기 위한 방법론을 고찰해 보았다. GIS를 이용하여 격자별 흐름경로길이를 계산하고 이것으로부터 산정된 격자 기반의 폭 함수를 시간-면적곡선으로 사용하였다. 또한 도달시간과 저류상수는 모멘트 법의 원리에 따라 Clark 모형 구조에 적용하여 해석적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 적용성 검토를 위해 HEC-1에서 기본적으로 제공하는 시간-면적곡선을 이용하여 매개변수 산정하고 대상구역별 산정된 폭 함수를 시간-면적곡선으로 하여 HEC-1에 직접 입력하여 매개변수를 추정하였다. 방법별로 산정된 Clark 모형의 매개변수들을 HEC-1의 입력값으로 하여 직접유출량을 산정하고 관측 직접유출량과 비교하여 적용성을 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 방법별로 산정된 Clark 모형의 매개변수들로부터 정

량적으로 비교하기 위해 산정한 침투유량과 침투발생 시간의 상대오차, 평균제곱근오차 및 효율계수 E (Efficiency Coefficient)를 비교한 결과, 시간-면적곡선을 폭 함수로 대체하여 HEC-1으로부터 추정된 매개변수가 관측값을 잘 반영하였다.

- 2) Clark 모형의 올바른 적용을 위해서는 HEC-1에서 기본적으로 제공하는 좌우 대칭형상인 무차원 시간-면적곡선보다는 적용 대상구역의 배수구조가 적절하게 반영된 시간-면적곡선의 사용이 합리적일 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구 방법은 침투유량과 침투시간의 상대오차 범위와 재현 정도를 나타내는 효율계수를 비교하여 볼 때 대체로 양호하게 모의되었고, 대상구역별 유량측정성과인 하천평균유속과 비교했을 때 본 연구 방법이 다소 실제 유속에 접근하고 있음을 확인하였다.
- 4) Clark 모형의 매개변수를 추정할 때 폭 함수 $W(x)$ 를 기반으로 정의되는 재조정된 폭 함수 $w(t)$ 에 따라 유역의 이류현상과 저류현상을 정량적으로 계량할 수 있는 효율적인 관계식으로 사용할 수 있음을 확인하였다.
- 5) 본 방법에 의해 계산된 수문곡선이 대부분 관측수문곡선의 우측으로 왜곡되고 침투유량은 과소평가 되는 것을 보이고 있다. 이것은 평균과 분산만을 고려하여 유역을 하나의 평균이송속도로 모의한 본 연구의 한계점으로 판단된다.
- 6) 본 연구에서는 유출의 적합도에 근거하여 시행착오적으로 매개변수를 산정한 것이 아닌 Clark 모형의 적용에 있어 객관성을 높이기 위해 폭 함수와 모멘트 법을 처음으로 적용하였다. 제안된 모멘트 법을 왜곡도를 고려하여 유역을 지표면과 하천으로 나누어 평균이송속도를 모의한다면 유역 전체를 하나의 평균이송속도로 모의하는 것 보다는 좀 더 자연 현상에 가까운 유출특성을 파악하는데 유용한 이론적 근간으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 실제 유출 모의에 있어 더 물리적인 특성을 충분히 반영하여 산정된 매개변수는 객관성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Clark, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1416.
- Di Lazzaro, M. (2009). "Regional analysis of storm hydrographs in the rescaled width function framework." *Journal of Hydrology*, Vol. 373, pp. 352-365.
- Diskin, M.H. (1964). *A basic study of the linearity of the rainfall-runoff process in watersheds*. Ph.D. thesis, University of Illinois, Urbana, Ill.
- Dooge, J.C.I. (1959). "A general theory of the unit hydrograph." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, pp. 241-256.
- Dooge, J.C.I. (1973). *Linear theory of hydrologic systems*. Technical Bulletin 1468, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Edson, C.G. (1951). "Parameters for relating unit hydrographs to watershed characteristics." *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 32, No. 4, pp. 591-596.
- Jeong, D.M., and Bae, D.H. (2003). "Analysis of Time-Area Curve Effects on Watershed Runoff." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 2, pp. 211-221.
- Kim, J.C., Kang, J.W., Son, M.W., and Jung, K.S. (2012). *Response Analysis of Clark Model in accordance with Shape of Time-Area Curve*. KSCE Conference and Civil Expo 2012, Korean Society of Civil Engineers.
- Kim, J.H. (2005). *Mathematical Models for Hydrologic Systems based on the Linear Theory*. Saeron, pp. 32-33.
- Kim, J.H., and Yoon, S.Y. (1993). "Derivation of the Basin Instantaneous Unit Hydrograph Considering the Network Geometry and Hillslope of Small Basin." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 13, No. 2, pp. 161-171.
- Lee, J.S. (1994). *A Comparative Study of Conceptual Models for Rainfall-Runoff Relationship*. International Hydrologic Programme (IHP) Research Paper, Ministry of Construction and Transportation, pp. 6.1-6.86.
- Lienhard, J.H. (1964). "A statistical mechanical prediction of the dimensionless unit hydrograph." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 69, No. 24, pp. 5231-5238.
- Mesa, O.J., and Mifflin, E.R. (1986). *On the relative role of hillslope and network geometry in hydrologic response*. Scale Problems in Hydrology, Dordrecht, Holland, pp. 181-190.
- Minister of Land, Transport and Maritime Affairs (2007, 2009, 2010). Annual Hydrological Report on Korea.
- Minister of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). Hydrological Survey Report.
- Ministry of Construction and Transportation (2001-2005). International Hydrologic Programme (IHP) Research Paper.
- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *Proceedings IASH Assemblée Générale de Toronto*, Vol. 3, pp. 114-121.
- Nash, J.E. (1960). "A unit hydrograph study, with particular reference to British catchments." *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, Vol. 17, pp. 249-282.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part I - A Discussion on principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- O'Kelly, J.J. (1955). "The employment of unit hydrographs to determine the flows of Irish arterial drainage channels." *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, Vol. 4, No. 3, pp. 365-412.
- Rinaldo, A., Vogel, G.K., Rigon, R., and Rodríguez-Iturbe, I. (1995). "Can one gauge the shape of basin." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 1119-1127.
- Rodríguez-Iturbe, I., and Valdes, J.B. (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.
- Rodríguez-Iturbe, I., and Rinaldo, A. (2003). *Fractal river basins, Chance and self-organization*. Cambridge.
- Seong, K.W. (1999). "Analysis of the Clark Model Using the Similarity Characteristics of the Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 32, No. 4, pp. 427-435.
- Seong, K.W. (2003). "An Indirect Approach Determining Parameters of Clark's Model Based on Model Fitting to the Gamma Distribution Function." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 2,

- pp. 223-235.
- Singh, K.P. (1962). *A non-linear approach to the instantaneous unit hydrograph*. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Ill.
- Smart, J.S. (1972). "Channel networks." *Advanced in Hydroscience*, Vol. 8, pp. 305-346.
- Water Management Information System (<http://www.wamis.go.kr>).
- Yoo, C.S. (2009). "A Theoretical Review of Basin Storage Coefficient and Concentration Time Using the Nash Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 3, pp. 235-246.
- Yoo, C.S., and Shin, J.W. (2010). "Decision of Storage Coefficient and Concentration Time of Observed Basin Using Nash Model's Structure." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 6, pp. 559-569.
- Yoon, S.Y., and Hong, I.P. (1995). "Improvement of the Parameter Estimation Method for the Clark Model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 15, No. 5, pp. 1287-1300.
- Yoon, T.H., Kim, S.T., and Park, J.W. (2005). "On Redefining of Parameters of Clark Model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 3B, pp. 181-187.
- Zoch, R.T. (1934, 1936, 1937). "On the relation between rainfall and stream flow." *Monthly Weather Review, Part I* (62), 315-322, 1934, *Part II* (64), 105-121, 1936 and *Part III* (65), 135-147, 1937.

논문번호: 13-003	접수: 2013.01.09
수정일자: 2013.03.04/03.18	심사완료: 2013.03.18