

Gamma 분포형 함수 적합을 이용한 Clark 모형의 매개변수 간접추정

An Indirect Approach Determining Parameters of Clark's Model Based on Model Fitting to the Gamma Distribution Function

성기원*

Seong, Kee-Won

Abstract

An indirect or supplementary approach is proposed for determining the parameters of the Clark's model in order to improve existing defect in estimating the parameters. The gamma-distribution type function is employed to represent the Clark's model, which takes the same form as the Nash's model, so that parameter estimation is not difficult since it can be performed with a simple optimization process. Analytic forms of Clark's models parameters are introduced using parameters of the proposed methodology to give traditional form of Clark's. An application to a watershed has shown that the proposed approach can preserve the properties of observed data. Based the application, the new approach is recommended as an alternative to the existing parameter estimating methodology.

Keywords : Clark's model, Nash model, basin similarity

요 지

Clark 모형의 매개변수 추정방법을 개선하기 위하여, 순간단위도를 gamma 분포형 함수로 가정하여 매개변수를 추정한 후 이를 Clark 모형의 매개변수로 전환하는 간접 추정방법을 제안하였다. 이 방법은 전통적인 Clark 모형의 매개변수 추정방법의 개연적인 부정확성을 개선하는 특징과 더불어 Nash 모형과의 상관성을 파악할 수 있는 장점을 갖고 있다. 제안된 매개변수 추정방법을 위천 유역에 적용한 결과 만족할 수 있는 수준의 추정값을 얻을 수 있었으며 또한 유역의 도달시간-유하면적 관계를 나타내는 합성함수를 구축할 수 있었다. 또한 제안된 매개변수 추정방법은 미계측 유역에 대한 추정에 있어서도 높은 적용성을 보였다. 따라서 제안된 방법론은 기존의 매개변수 추정방법을 보조할 수 있는 충분한 대안으로 판단된다.

핵심용어 : Clark 모형, Nash 모형, 유역 상사성

* 건국대학교 공과대학 토목공학과 조교수

Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ., Seoul 143-701, Korea
(E-mail : kwseong@konkuk.ac.kr)

1. 서론

Clark 모형은 우리나라의 중소규모 유역의 수문응답(hydrologic response)을 재현하는데 이용되는 대표적인 방법 가운데 한 가지이다. 이 모형의 매개변수는 도달시간-유하면적 관계식(time-area relation, 이하 TA)과 이 관계의 기저시간인 도달시간(time of concentration, 이하 T_c) 그리고 유역의 저류상수(storage coefficient, 이하 R)로 구성되는데 이들에 대한 적절한 추정을 위해 다양한 연구가 이루어져 왔다. 이들 매개변수를 추정하는 전통적 방법에 의하면 TA 의 경우 지도를 통하여 도달거리-유하면적 관계를 작성하고, 우량주상도와 직접유출곡선의 시간특성 관계를 주관적으로 해석하거나 또는 적절히 가정된 수리학적 관계식을 이용하여 T_c 를 계산한 후 이를 통하여 TA 를 수립한다. 그리고 유역의 R 은 유출수문곡선의 변곡점에서의 기울기와 유량간의 비를 통하여 산정하는 것이 일반적이다. 그러나 이와 같은 매개변수 추정방법은 실용적으로 적용하기 어려운 문제에 접하거나 또는 분석자마다 일치되지 않는 해석 등에 의하여 높은 불확실성을 내포하고 있는 것이 사실이다. 이에 따라 이러한 불확실성을 최소화하는 효과적인 방법론을 제시하는 연구는 Clark 모형에 대한 연구의 중요한 부분으로 인식되어 다양한 방법을 통하여 진행되어왔다. Jain 등(2000)은 Clark 모형을 GIS를 이용한 GIUH 모형으로 확장한 바 있으며, Kull과 Feldman(1998)은 강우에 대한 정보와 지역회귀분석을 이용한 매개변수 추정방법을 제시한 바 있다. Wilson과 Brown(1992)는 γ 함수로 표현된 TA 를 이용한 무차원 Clark 모형을 제안하여 해석적인 모형으로서의 타당성을 입증한 바 있고, Khan과 Ormsbee(1989)는 급경사 산지 유역에 대한 Clark 모형의 적용성을 평가하였으며, Bhaskar(1988)은 도시화에 따른 매개변수의 영향을 검토하였다. 또한 Sabol(1988)은 유역의 저류상수를 유출곡선의 감소계수를 통하여 산정하는 방법을 제시하는 등 유역의 환경과 조건에 따라서 적절하게 매개변수를 추정하는 방법과 GIS 등 수치지도를 이용하여 TA 를 효율적으로 구축하는 연구들이 꾸준히 진행되고 있다. 국내의 경우 유철상 등(2002)은 수정Clark 방법으로 면적평균강우의 추정오차가 유출에 미치는 영향을 검토하였으며, 백경록 등(2000)은 소양강 댐 유역의 17년간 단위도 변화를 Clark 모형을 적용하여 분석한 바 있다. 그리고 성기원(1999)은 유역의 매개변수들의 지형학적 그리고 시

간특성적 상사성을 미계측 유역에 적용하여 매개변수를 추정하는 방법론을 제시하였으며, 윤여진(1998)은 Clark 모형을 이용하여 빈도별 임계지속기간과 침투유량을 산정하는데 있어서 매개변수의 변동성을 연구하기도 하였다. 윤석영과 홍일표(1995)는 유역의 수리지형학적 분석을 통하여 매개변수를 산정하는 방법을 제시하였으며, 윤광원 등(1994)은 홍수량 산정에 있어서 Clark 모형 매개변수들의 영향을 연구하였다. 또한 윤석영과 홍일표(1994) 및 이정식(1994)는 위천유역에 대한 집중적인 연구를 통하여 Clark 모형 등 주요 강우-유출 모형의 매개변수의 지형학적 연관성과 효율적인 매개변수 산정에 대한 방법론을 보고서를 통하여 제시한 바 있다. 제시된 연구사례에서 보여주듯이 비록 Clark 모형의 매개변수의 효과적인 추정에 관련한 연구는 계속 진행되고 있으나 그 정도를 평가할 수 있는 합리적인 방법의 적용, 다른 관련 모형과의 재현성 비교 그리고 매개변수간의 상관성 검토 등에 대한 연구는 꾸준히 이루어져야 하는 부분으로 남아있다.

본 연구는 Clark 모형의 매개변수 추정에 있어서 기존의 전형적인 방법대신 γ 분포로 순간단위도를 적합시키고 이를 통하여 Clark 모형의 매개변수를 간접적으로 추정하는 방법을 제시하고 이 방법의 적용성을 평가하는데 그 주목적이 있다. 또한 제안된 방법을 이용하여 미계측 유역에 대한 단위도를 추정할 경우 기존의 방법에 비하여 어느 정도의 신뢰성을 갖고있는지 분석하고자 한다. 본 연구가 제안하는 매개변수 추정 방법은 γ 분포형 Clark 모형을 통해 모형의 매개변수를 간접적으로 추정하는 것이다. 그런데 γ 분포형 모형은 잘 알려져 있는 Nash 모형의 순간단위도이기 때문에 본 연구는 Clark 모형과 Nash 모형과의 상관성을 평가하는 의미도 동시에 갖고 있다.

이와 같은 연구를 위해 이용되는 자료의 객관성을 확보하고 기존 연구와의 공정한 비교를 위하여 위천유역에 대한 기존연구를 활용하기로 하였다. 그런데 본 연구의 타당성 있는 평가를 위해서는 제안된 모형의 특성상 Clark 모형과 Nash 모형을 동일 홍수사상에 독립적으로 적용한 자료가 요구되지만 이러한 자료는 흔하지 않다. 또한 이러한 사상들의 분석을 통해 얻어진 단위도를 수문학적으로 상사성이 있는 미계측유역에 적용하는 연구도 드물다. 본 연구에서는 이러한 자료의 제약조건을 대부분 만족시키는 윤석영과 홍일표(1994)의 연구와 윤석영과 홍일표(1995), 성기원(1997) 그리고 성기원(1999)의 분석내용을 이용하여 연구를 수행하

였다.

2. Gamma 분포형 Clark 모형 유도 및 특성

Clark 모형의 매개변수를 추정하고자 할 경우 자원 소모적이면서 주관성을 배제하기 어려운 전통적 매개변수 추정 절차를 적용하는 대신 비록 간접적인 방법이라 할지라도 보다 효율적이고 객관성이 향상된 매개변수 추정방안이 있다면 이를 대안으로 적용하고 그 결과를 보정하는 것이 바람직할 경우가 있다. 이러한 절차를 위하여 본 연구에서는 Clark 순간단위도를 해석적으로 다루기 용이한 gamma 분포함수에 적합시키는 방법을 고안하였다. 즉, Clark 순간단위도의 형태가 만일 gamma 분포함수에 일치하거나 근사적으로 동일하다면 Clark 순간단위도는 해석적으로 식 (1)을 통하여 나타낼 수 있을 것이다.

$$h(t) = \frac{\left(\frac{t}{K}\right)^{(n-1)} \exp\left(-\frac{t}{K}\right)}{\Gamma(n) K} \quad (1)$$

여기서 $h(t)$ 는 gamma 분포형 Clark 순간단위도이며, n 과 K 는 이 순간단위도의 매개변수이다. 그런데 이 n 과 K 는 Nash 모형의 매개변수 개념과 일치하지만 동시에 Clark 모형의 매개변수인 TA , Tc 그리고 R 을 두 개의 매개변수 n 과 K 로 변환시킨 개념으로 설명할 수 있다. 이러한 변환된 개념을 이용하는 주된 이유는 홍수사상으로부터 TA , Tc 그리고 R 을 추정하는 것은 작업이 번거롭고 분석자의 주관적 판단이 개입되는 반면, n 과 K 를 도출하는 하는 것은 단순한 최적화프로그램을 통해 용이하게 수행할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

식 (1)이 Clark 순간단위도라 가정하였으므로 R 은 식 (1)의 변곡점에서의 유량과 기울기의 비로 얻어낼 수 있다. 식 (1)의 변곡점은 식의 2차도함수가 0을 만족하는 지점으로서 첨두부 이후의 변곡점의 시간좌표는 식 (2)와 같다.

$$t_f = (n-1 + \sqrt{n-1}) K \quad (2)$$

그리고 계산된 변곡점에서의 유량과 기울기는 식 (3)과 식 (4)로 계산된다.

$$h_{t=t_f} = \frac{(n-1 + \sqrt{n-1})^{(n-1)} \exp(-n+1-\sqrt{n-1})}{\Gamma(n) K} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \left. \frac{dh(t)}{dt} \right|_{t=t_f} \\ &= \frac{(n-1 + \sqrt{n-1})^{(n-2)} \sqrt{n-1} \exp(-n+1-\sqrt{n-1})}{\Gamma(n) K^2} \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 저류상수 R 은 식 (3)과 (4)를 이용하여 식 (5)와 같이 계산된다.

$$R = - \left. \frac{h(t)}{dh/dt} \right|_{t=t_f} = \frac{K(n-1 + \sqrt{n-1})}{\sqrt{n-1}} \quad (5)$$

또한 식 (1)을 이용하여 TA 를 추정하기 위해 식 (6)과 같은 선형저수지 관계식을 이용한다.

$$\frac{dA^*}{dt} - h(t) = R \frac{dh(t)}{dt} \quad (6)$$

여기서 식 (6)의 좌변 $\frac{dA^*}{dt}$ 는 시간의 변화에 따른 정규화된 유하면적(유역의 전체면적으로 나누어진 유하면적)의 변화량 즉 단위합성 TA (unit synthetic time-area relation, 이하 $USTA$)를 나타내는 식을 의미한다. 그러나 이 $USTA$ 는 유역의 도달거리-유하면적 관계를 함수로 변환한 것이기 때문에 일종의 가상적으로 합성된 TA 로써 이해될 수 있다. 식 (6)을 이용하여 $USTA$ 를 도출하기 위해서는 식 (1)의 일차도함수를 포함한 계산을 수행하여야 한다. 이에 따라 식 (1)과 식 (5)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (7)과 같은 $USTA$ 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} USTA &= \frac{dA^*}{dt} \\ &= \frac{\left(\frac{t}{K}\right)^{(n-1)} \sqrt{n-1} [K(-n+1-\sqrt{n-1}) + t] \exp\left(-\frac{t}{K}\right)}{\Gamma(n) K t} \end{aligned} \quad (7)$$

이상과 같은 식들을 정리하여 설명하면, 단위면적을 갖는 유역에 단위충격(unit impulse) 강우가 발생하였을 때 gamma 분포형 함수를 적용하여 응답함수를 구할 경우 n 과 K 라는 매개변수값을 얻을 수 있었다면 이를 Clark 모형으로 대체할 경우 R 은 식 (5)를 그리고 $USTA$ 는 식 (7)을 통하여 추정할 수 있다는 것이다. 이로써 Clark 모형의 세 개의 매개변수 가운데 Tc 를 제외한 나머지 매개변수의 값들을 n 및 K 의 값으로부터 간접적으로 산출할 수 있게된다.

추정되지 않은 매개변수 Tc 는 식 (7)을 Tc 까지 적

분할 때 단위면적이 되는 일종의 적분방정식을 해결하면 얻을 수 있으나 이를 해석적으로 나타내지 않았다. 이는 식 (7)로 나타낸 *USTA*의 시간에 대한 변화가 유출곡선의 변곡점 도달시간 t_f 이후 음의 값을 보여주다가 0으로 수렴하는 wiggle 현상이 발생하기 때문에 이 현상에 대한 물리적인 고찰이 우선 필요하기 때문이다.

이론적으로 Clark 모형에서는 유출곡선의 변곡점 도달시간 t_f 이후부터 *USTA*는 0이 되고 t_f 까지 *USTA*를 적분하면 단위면적이 되어야 한다. 그렇지만 식 (7)의 함수특성상 $t=\infty$ 까지 함수는 확장되어야 하고 t_f 에서 함수값은 0을 만족해야 하는 제약조건으로 수문학적 개념으로는 설명할 수 없는 wiggle 현상이

발생하는 것이다. 이는 Nash 모형을 Clark 모형에 비교하여 물리적 의미에 대한 일치성을 평가할 경우 필연적으로 발생하는 Nash 모형이 갖고있는 물리적 재현성의 한계로 판단된다. 따라서 t_f 는 비록 변곡점의 시간 좌표라 하더라도 γ 분포함수 적합 과정에서만 들어지는 *USTA*에서 t_f 는 함수 특성상 T_c 라 규정할 수 없다. 이에 본 연구에서는 Clark 모형의 매개변수에 대하여 다음과 같이 재 정의하였다. γ 분포함수를 Clark 모형의 단위도로 가정할 경우, ① 식 (5)를 통하여 추정되는 저류상수 R 은 식 (2)로 계산되는 변곡점에서의 유량과 유량의 시간적 변화율의 비를, ② 식 (7)로 계산되는 해석적인 도달시간-유하면적 관계 *USTA*는 유역의 도달시간-유출변화특성을, ③ 도달시

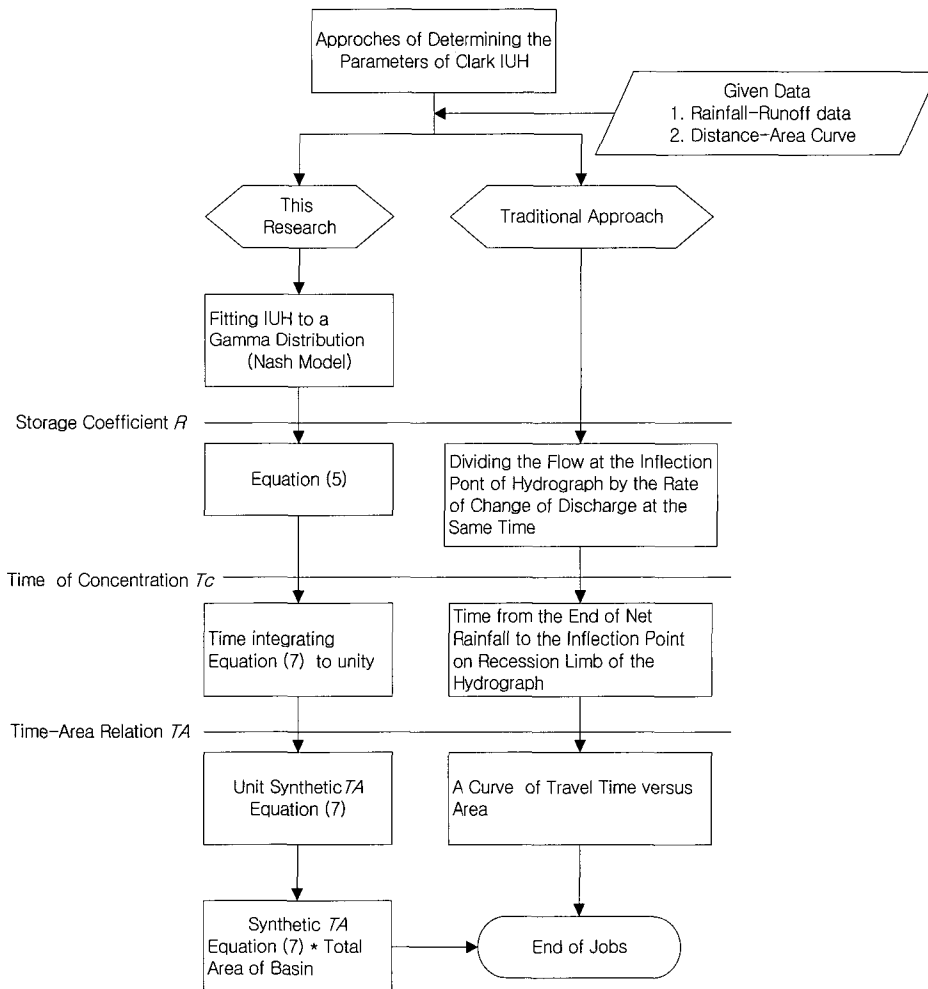


그림 1. Clark 모형 매개변수 추정을 위한 제안절차와 전통적 방법과의 비교

표 1. 위천 유역의 소유역별 개황

소유역 명	유역면적 (km ²)	주하천유로연장 (km)	유역최원거리 (km)
동 곡	33.8	8.0	8.3
고 노	109.8	18.9	19.1
미 성	171.7	30.9	30.7
병 천	300.3	40.7	40.4

간 T_c 는 USTA의 면적이 단위 값으로 도달하는 최초의 시간 t_f' 부터 t_f 까지 구간 범위로 정의한다. 따라서 전통적인 Clark 모형의 매개변수를 용이하게 추정할 수 있는 공식을 제공하며 특히 구축하기가 까다로운 TA를 USTA라는 유역의 시간-유출변화특성을 나타내는 해석적 관계식으로 제공함으로써 유역간의 시간적 유출변화의 상사성까지도 비교할 수 있다. 뿐만 아니라 상사성을 바탕으로 하는 유역 대표 매개변수를 제공함으로써 유역내 미계측 유역에 대한 추정단위도를 제시할 수도 있다. 그렇지만 무엇보다도 제안방법은 전통적인 매개변수 산정과정에서 비롯되는 소모적이고 주관적인 작업을 효율적인 방법으로 개선할 수 있다는 점에 주된 장점이 있다고 할 수 있다. 이상과 같은 과정을 기존의 전통적인 방법과 비교하여 도식화하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

3. Gamma 분포형 Clark 모형의 적용결과

3.1 분석자료

본 연구에서 제안된 gamma 분포형 Clark 모형의 타당성을 입증하는 정당한 방법 가운데 한 가지는 동일한 홍수사상에 대하여 각각 독립적으로 도출된 Clark 모형의 매개변수와 gamma 분포형 모형(혹은 형태상으로 Nash 모형)의 매개변수와의 비교를 수행하는 것이다. 이를 위하여 윤석영과 홍일표(1994)의 보고서에 수록된 자료들이 높은 신뢰성을 갖고 있다고 판단하고 아울러 연구의 객관성을 도모하는 측면에서 이를 연구에 활용하기로 하였다. 이에 따라 본 연구에서 이용된 기본자료는 윤석영과 홍일표(1994)가 제시한 위천 유역의 강우-유출자료와 유역의 지형자료 그리고 추정된 Clark 및 Nash 모형의 매개변수 값들이다. 분석대상 유역인 위천유역에 대한 개황을 표 1에 수록하였다.

3.2 제안 절차의 적용 예시

앞서 2장에서 제시한 Clark 모형의 매개변수 추정방

안에 대한 예를 임의로 추출된 사상인 동곡 소유역의 DT905 자료(호우발생일시: 1990.09.23.16-09.27.09)를 통하여 제시하도록 한다. 윤석영과 홍일표(1994)에 의하면 DT905 사상에 대한 매개변수 값은 n 과 K 가 각각 2.44와 2.88로 추정되었으며 그리고 T_c 와 R 은 각각 5hr와 6hr로 관측되었다. 이에 대하여 먼저 R 을 검증할 때 본 연구에서 제안한 식 (5)에 대입하면 R 은 6.34hr로 계산된다. 그런데 이 값은 직접 관측한 값인 6hr에 비교할 때 거의 일치된 값을 보여준다. 그런데 윤석영과 홍일표(1994)와 윤석영과 홍일표(1995)의 연구에서 지체시간의 상사성을 바탕으로 Nash 모형의 1차모멘트 값과 Clark 모형의 R 은 일치한다는 다음과 같은 식을 제안한 바 있다.

$$R = n K \tag{8}$$

식 (8)을 이용하여 R 을 계산하면 7.03hr가 되며 따라서 제안된 식 (5)는 관측값 및 경험식을 만족 시키고 있다. 그런데 R 값을 추정하는데 이용된 제안식인 식 (5)와 식 (8)은 비교적 비슷한 결과를 보여주었지만 n 값의 변화에 따라 그 결과는 달라질 수 있다. 만일 K 가 일정하다는 가정 하에 식 (5)와 식 (8)을 비교 도시하면 그림 2와 같은 현상을 발견할 수 있다.

그림 2를 살펴보면 K 가 일정하다고 가정할 때 식 (5)와 식 (8)의 적용에 따른 R 값은 $n=2$ 인 경우 일치하지만 이 값에서 멀어질수록 그 차이는 증가하는 것을 볼 수 있다. 그런데 위천 유역의 경우 n 값은 대체로 2를 상회하고 있는데 이에 따라 식 (5)는 식 (8)에 비하여 다소 낮은 값을 제공하게 된다. 그리고 유역의 도달시간 T_c 와 USTA의 특성을 살펴보기 위하여 그림 3을 살펴보기로 한다.

본 연구에서 유도되는 TA는 USTA임을 식 (7)을 통해 밝힌 바 있으며 따라서 유역면적을 단위TA에 곱함으로써 실제 유역의 합성된 TA를 추정할 수 있다. 그런데 소유역간의 응답함수를 비교하는 측면에서는

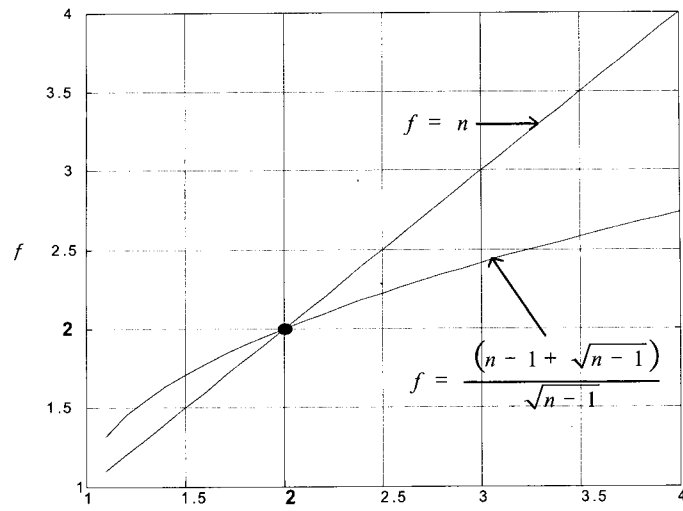


그림 2. 매개변수 n 에 대한 추정식 비교

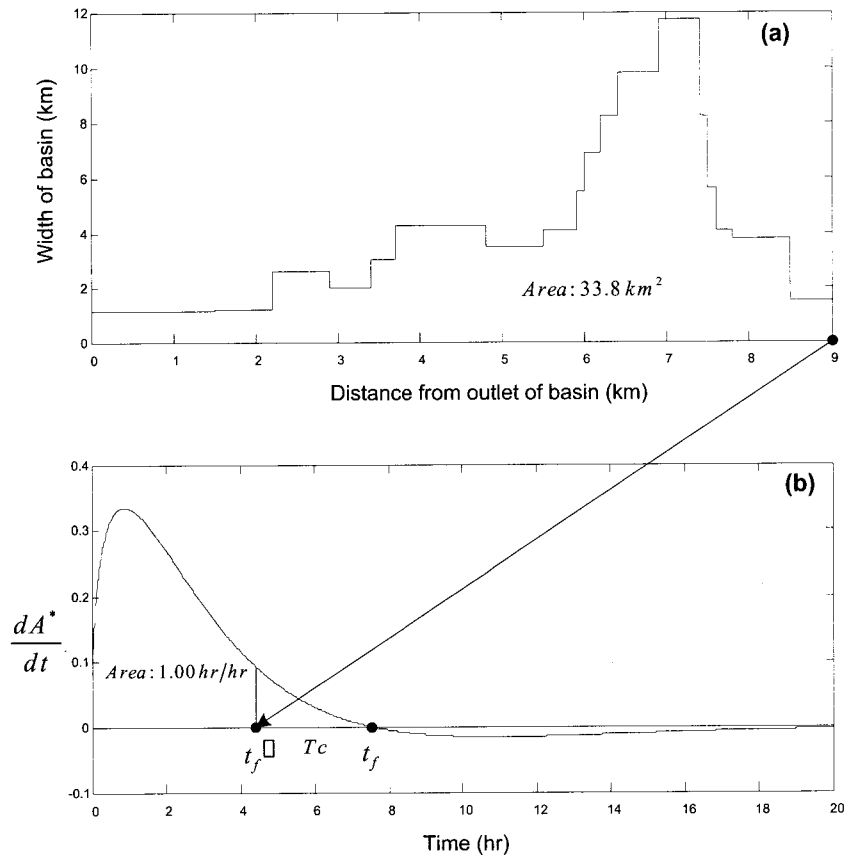


그림 3. 동곡유역의 USTA와 TA간 비교 및 제안 모형의 T_c 범위

USTA가 무차원 개념이기 때문에 유리하므로 본 연구에서는 USTA를 통하여 앞서 이용한 DT905사상을 분석한다. 그림 3(a)는 동곡소유역의 실측 도달거리-유하면적 관계로서 유역의 무게중심이 상당히 후반에 위치한 형태의 유역형상을 보여주고 있다. 그러나 gamma 분포형 Clark 모형을 통해 역으로 추정된 유역의 USTA는 그림 3(b)에 도시한 바와 같이 유역의 형상과 거의 대칭 되는 구조를 보여주고 있다. 따라서 이 유역의 실측 유하거리-유하면적 관계로부터 USTA를 설명하기는 어렵다. 그런데 실측 유하거리-유하면적 관계에 대한 유용성은 많은 연구에서 의심받고 있다. 이는 유출의 시간적 변화에 관계하는 다양한 수문학적 인자를 유하면적으로 대표하기 어렵다는 평가 때문이다. 이에 따라 HEC-1은 대칭 비선형 곡선형태의 TA 곡선식을 제공하고 있으며 또한 Wilson과 Brown(1992)은 TA를 중앙값을 도달시간의 25%에 위치하게 한 gamma 분포를 가장 이상적인 형태의 TA로 평가한 바 있다. 그런데 이러한 가상적인 TA의 적용에 대하여 이미 O'Kelly(1955)는 삼각형 형상의 합성곡선(synthetic curve)은 실측 도달거리-유하면적 관계 대신 이용하여도 정밀도에서 큰 차이를 보여주지 않는다고 한 바 있다.

이와 같은 배경에서 볼 때 제안된 gamma 분포형 Clark 모형의 장점 가운데 한 가지는 TA합성곡선에 대한 함수적인 정보를 USTA를 통하여 제공한다는 것이다. 즉 DT905사상에 대하여 동곡소유역의 TA합성곡선 즉 가상적인 TA는 본 연구에서 제시한 USTA대신 다른 해석적인 함수로 대체할 경우 t_f 의 약 15% 정도에 위치하는 gamma 분포가 적당할 것으로 판단되며 이 결과는 성기원(1999)의 연구에서도 비슷한 수치로 검증된 바 있다. 비록 그림 3(b)에 나타난 가상적 USTA가 TA의 합성에 관련된 유용한 정보를 제공하지만 이 유도된 USTA 자체는 미미한 물리적 문제가 있다. 이는 고차함수의 wiggle 현상으로 인하여 t_f 이후에는 음의 값을 보여주기 때문이다. 따라서 t_f 까지 적분할 때 단위값을 초과하는 현상이 발생하는 데 이용된 DT905사상의 경우 적분값이 1.13으로 단위값을 13% 초과한다. 이는 함수적으로는 Nash 모형이 Clark 모형을 재현하는데 있어서 별 무리가 없지만 물리적으로는 명백하게 설명할 수 없는 부분이 존재한다는 것을 의미한다. 이를 개선하기 위해서 Tc의 범위를 USTA의 면적이 단위값에 도달하는 최초의 시간인 t_f' 부터 t_f 까지의 구간으로 정의하고 이에 의하여 최소값

t_f' 를 계산하면 4.27hr를 얻을 수 있다. 따라서 이 값은 최대값 t_f 인 7.60hr보다 약 3시간 빠른 값이다. 그런데 이 사상의 실제 관측된 Tc는 5hr로서 제시한 추정구간에 포함되며 특히 본 연구의 Tc의 최소값 t_f' 와 거의 일치한다. 따라서 DT905사상에 대한 분석을 통하여 살펴볼 때, Clark 모형의 매개변수를 추정하는데 있어서 제안된 gamma 분포형 Clark 모형은 적은 작업량으로도 신뢰성 있는 R과 Tc에 대한 합리적인 추정치 그리고 합성곡선으로의 TA에 대한 정보를 제공한다고 판단된다.

3.3 위천유역에 대한 적용 및 결과해석

위천유역내 소유역인 동곡, 고노, 미성 그리고 병천에 발생한 19개 사상에 대한 매개변수 추정을 실시하였으며 그 결과를 표 2에 수록하였다.

표 2를 살펴보면 앞서 언급한 동곡의 DT905사상에서 발견된 현상들이 나머지 사상에서도 거의 유사하게 나타나고 있다. 저류상수 R을 추정하는 제안식 식 (5)는 관측값 R을 거의 정확하게 모의하고 있으며 식 (8)보다 약간 좋은 결과를 보이나 유의성이 있다고 볼 수는 없다.

그런데 그림 2에서 제시하였듯이 식 (5)와 식 (8)의 결과는 $n=2$ 를 전후로 그 값의 크기가 역전된다. 그렇지만 표 2에서 대부분의 사상이 $n>2$ 을 보여주고 있으므로 식 (5)의 결과가 식 (8)보다 작은 경향을 보여주고 있으며 각 사상별로 비교할 때와 마찬가지로 소유역별 평균값을 이용한 식 (5)의 결과는 대단히 만족스럽다. 그렇지만 상대적으로 표본의 수가 적은 미성과 병천의 경우는 추정치가 약간 관측값을 벗어나고 있으나 만족스러운 결과이다. 도달시간 Tc의 경우 관측값은 추정된 구간 최소값 t_f' 와 거의 일치하는 경향을 보이고 있다. 그리고 t_f' 와 추정구간의 크기는 유역의 면적(표 1)이 증가함에 따라 일관성 있게 증가하고 있으나 선형적인 관계는 아니다. 분석자료를 살펴볼 때 윤석영과 홍일표(1994)의 매개변수 실측자료는 매우 일관성이 있는 방법으로 수집된 것으로 보이며, 이 결과 본 연구에서 제시한 추정구간 내에서 일정부분에 분포하고 있는 것으로 판단된다.

그런데 고노 소유역의 DT904 사상과 병천 소유역의 DT922 사상의 실측치 Tc는 구간 내부에 포함되지만 다른 자료들과 비교할 경우 t_f' 에 비하여 비교적 크다. 그런데 이 사상들은 모두 매개변수 n 의 값이 2보다 작고 K는 평균보다 크게 평가된 사상으로 상승부는 급

표 2. 위천 유역의 사상별 매개변수 추정결과 비교

유역	사상	관측된 Clark 매개변수		이용된 Nash 매개변수		저류상수 R		도달시간 Tc	
		Tc	R	n	K	본연구 식(5)	비교식 식(8)	최소값 t_f	최대값 t_f
동곡	DT861	4	5	2.73	2.13	4.94	5.82	3.83	6.48
	DT891-1	5	8	3.12	2.13	5.22	6.64	4.73	7.61
	DT892	5	7	2.74	2.71	6.27	7.41	4.89	8.27
	DT903	4	7	2.58	2.89	6.52	7.46	4.72	8.20
	DT905	5	6	2.44	2.88	6.34	7.03	4.27	7.60
	DT921-1	4	5	2.50	2.61	5.81	6.53	4.04	7.11
	DT924	3	6	1.93	3.31	6.50	6.39	3.06	6.27
	평균	4.29	6.29	2.58	2.67	평균 n, K에 의한 계산결과			
						6.01	6.87	4.35	7.55
고노	DT891-1	5	9	2.77	2.95	6.87	8.17	5.43	9.15
	DT892	5	8	3.10	2.67	6.54	8.28	5.56	9.48
	DT903	4	8	2.15	3.74	7.75	8.04	4.36	8.31
	DT904	6	5	1.87	3.47	6.71	6.49	3.02	6.26
	DT905	5	6	2.23	3.42	7.21	7.63	4.29	8.00
		평균	5.00	7.20	2.42	3.25	평균 n, K에 의한 계산결과		
						7.13	7.88	4.75	8.51
미성	DT891-1	6	6	3.04	2.86	6.94	8.69	6.10	9.92
	DT892	8	8	3.46	2.55	6.55	8.82	6.61	10.27
	DT904	4	5	1.88	3.65	7.07	6.86	3.17	6.64
	DT905	5	6	2.21	3.57	7.50	7.89	4.40	8.25
		평균	5.75	6.25	2.65	3.16	평균 n, K에 의한 계산결과		
						7.21	8.36	5.41	9.25
병천	DT892	8	7	3.47	3.00	7.71	10.41	7.80	12.12
	DT905	6	8	2.34	3.75	8.09	8.78	5.15	9.37
	DT922	4	7	1.58	4.23	7.45	6.68	2.33	5.67
		평균	6.00	7.33	2.46	3.66	평균 n, K에 의한 계산결과		
						8.09	9.02	5.51	9.78

격한 수문곡선의 변화가 발생하고 하강부는 상대적으로 매우 완만한 특징이 있다. 이러한 경우 eye-fitting에 의한 변곡점의 위치선정은 대단히 어렵기 때문에 다른 결과와는 구분되는 것으로 추측된다. 이상과 같은 R과 Tc의 비교분석을 수행한 결과 본 연구에서 제시한 방법론은 매우 적절하게 관측값을 모의하는 것으로 판단된다.

앞서 언급한 바 있듯이, 본 연구의 TA는 도달시간-유하면적 관계가 아닌 도달시간-유출변화특성을 나타내는 일종의 합성TA이며, 이를 단위면적으로 환산한

USTA로 정의한 바 있다. 각 소유역별로 이러한 도달시간-유출변화특성을 파악하기 위하여 각 소유역에 대한 실측 도달거리-유하면적 관계 및 평균 관측치를 통하여 계산된 USTA를 그림 4에 도시하였다.

그림 4에서 4개 소유역의 도달거리-유하면적 관계를 살펴보면 유역간의 형태적 유사성에 대한 평가는 주관적 판단에 의존할 수밖에 없다. 그렇지만 제안된 gamma 분포형 Clark 모형을 통해 유도된 USTA는 시간의 변화에 따른 유출관여 인자들의 변화가 소유역 간에 거의 일치함을 보여준다. 제시된 가상적 USTA의

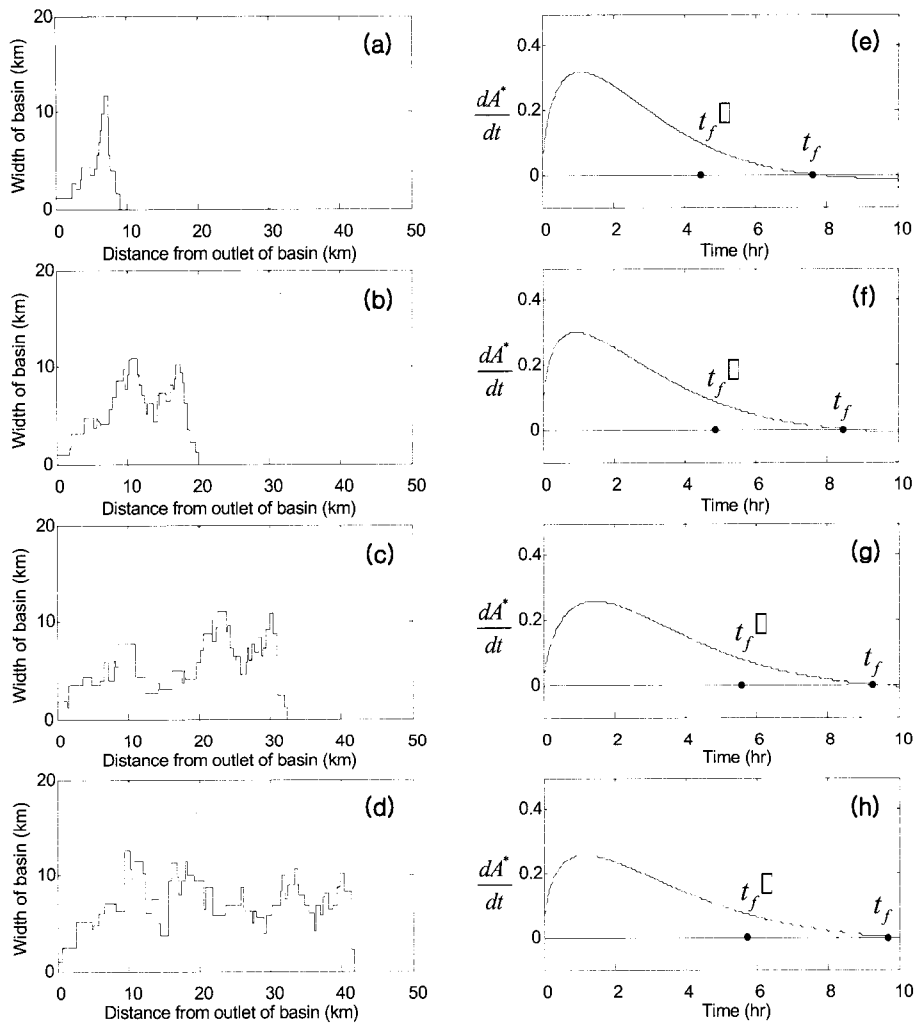


그림 4. 소유역별 TA와 USTA의 비교

표 3. 유도된 USTA의 소유역별 비교

유역	t_f (hr)	시점부터 t_f 까지 적분면적 (hr/hr)	t_f 에 대한 침투부 상대위치 (%)
동곡	7.55	1.13	14.5
고노	8.51	1.13	11.2
미성	9.25	1.13	15.8
병천	9.78	1.13	12.1

소유역별 특성을 표 3에 수록하였다.

표 3을 살펴보면 유역의 면적이 증가하면서 t_f 는 상응하여 증가하는 결과를 보여주지만 USTA의 침투발생 시간은 t_f 의 11 내지 16% 사이로 변화의 폭이 대단히 좁고 곡선의 형태나 시점부터 t_f 까지 곡선적분값도 일치하는 경향을 보여준다. 따라서 위천 유역의 소유역간에는 대단히 양호한 유출특성의 상사성을 가정할 수 있는데 이러한 판단의 근거는 제안된 gamma 분포형 Clark 모형이 제공하는 유용한 기능 가운데 한 가지이다.

4. 미계측 유역에 대한 적용성 평가

위천 유역에 대하여 제안된 gamma 분포형 Clark 모형을 검증하는 과정에서 USTA 분석을 통해 소유역간에는 유출특성의 상사성이 있는 것으로 추정된 바 있다. 따라서 적절한 상사성 관계를 수립하고 이를 이용할 경우 미계측 유역에 대한 Clark 모형의 매개변수와 이에 상응하는 순간단위도를 추정할 수 있을 것이다. 이를 검증하기 위하여 동곡 소유역을 미계측 유역으로 가정하고 나머지 유역들의 자료만으로 동곡 소유역의 매개변수를 추정하였으며 순간단위도 비교를 통해 방법의 적절성을 평가하였다.

위천유역의 소유역간에는 다양한 상사성이 존재하기 때문에 이를 통한 유역내 미계측 유역에 대한 적용을 수행한 연구는 다수 존재한다. 이러한 상사성은 유역내 지형인자를 이용하는 단순한 회귀분석을 통하여 분석되기도 하지만 매개변수들의 시간적 특성을 이용한 지역 분석을 통해 평가되기도 한다. 특히 미계측 유역에 적용할 수 있는 Clark 모형의 매개변수 산정을 위하여 HEC-1에서는 T_c 와 R 사이의 독립성을 가정하고 이를 이용하는데 $T_c + R$ 또는 $R / (T_c + R)$ 과 같은 매개변수들간의 함수적 결합이 수문학적으로 상사성이 있는 유역내에서 일정한 값을 보여주는 특성을 이용하여

최적화과정을 통해 지역회귀분석을 수행한다(Hogan, 1997). 예를 들면 상사성이 존재하는 유역에서 T_c 와 R 사이는 식 (9)를 만족한다고 알려져 있다.

$$\frac{R}{T_c + R} = C \quad (9)$$

여기서 C 는 상수이다.

그런데 본 연구에서 T_c 는 t_f' 부터 t_f 사이의 범위로 정의하였기 때문에 상사성을 만족할 경우 식 (10) 및 (11)을 동시에 만족하여야 한다.

$$\frac{R}{t_f' + R} = C_1 \quad (10)$$

$$\frac{R}{t_f + R} = C_2 \quad (11)$$

여기서 C_1 및 C_2 는 상수이다. 따라서 T_c 를 구하는 적절한 경험공식이 있을 경우 이를 이용하여 T_c 를 우선 추정하고 그리고 주변 계측유역에 대한 상사성 관계를 분석하여 C_1 및 C_2 를 구한 후 식 (10) 및 (11)에 대입하여 미계측 유역에 대한 R 과 t_f 를 계산한다.

그리고 이 결과를 이용하여 식 (2)와 (5)의 연립방정식을 풀면 Clark 모형의 매개변수인 T_c , R 그리고 USTA 및 gamma 분포함수의 매개변수인 n 과 K 를 모두 추정할 수 있는 것이다. 그런데 본 연구에서 미계측 유역의 도달시간 T_c 를 구하는 공식으로 이정식 (1994)의 성과를 적용하였는데 이는 식 (12)와 같다.

$$T_c = 2.17 A^{0.17} \quad (12)$$

이에 따라 위천내 소유역에 대한 식(12)의 적용성을 평가하기 위하여 4개 유역에 대한 도달시간을 실측치와 비교하였으며 또한 C_1 및 C_2 를 계산하기 위하여 동곡을 제외한 3개 유역에 식 (10) 및 식 (11)를 적용하고

표 4. 도달시간 T_c 추정 및 상사성관계

유역	동곡	고노	미성	병천	평균
T_c 식(12)	3.95	4.82	5.20	5.72	
$\frac{R}{t_f' + R}$ 식(10)	미계측 가정	0.60	0.57	0.59	0.59
$\frac{R}{t_f + R}$ 식(11)		0.46	0.45	0.47	0.46

그 결과를 표 4에 수록하였다.

표 4에 나타난 결과와 표 2의 T_c 관측치를 비교할 때, 식 (12)는 모든 유역에서 관측값을 약간 밑돌지만 유역간의 도달시간의 일관성을 만족시키고 있다고 판단된다. 따라서 미계측 유역으로 가정한 동곡의 경우 T_c 는 식 (12)의 결과인 3.95hr를 채택한다. 산정된 T_c 는 t_f' 부터 t_f 사이의 범위에 포함되어야 하는데, 표 4와 표 2를 비교하면 나머지 3개 계측 유역의 경우 T_c 는 t_f' 와 거의 일치한다. 따라서 식 (10)을 적용하여 R 을 추정할 수 있는데, 이때 C_1 은 표 4에 나타난 것처럼 계측유역의 평균값인 0.59를 적용한다. 이 결과 동곡 유역의 R 은 5.68hr로 추정되었으며 이를 표 4의 계측 유역의 평균값 $C_2 = 0.46$ 을 적용한 식 (11)에 대입함으로써 t_f 는 6.67hr로 계산된다. t_f 와 R 이 계산되었으므로 이들을 각각 식 (2)와 (5)에 대입하고 두 식을 연립하여 풀면 n 과 K 를 구할 수 있으며 이 결과를 식 (7)에 대입함으로써 $USTA$ 도 얻을 수 있다. 이러한 일련의 계산결과를 동곡유역의 관측치와 비교하기 위하여

표 5를 준비하였다.

표 5를 살펴보면 제안공식과 상사성관계를 이용할 경우 만족스러운 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 특히 가상적으로 추정 T_c 를 관측치와 일치시킬 경우 나머지 매개변수들도 거의 정확하게 일치하는 것을 발견할 수 있었다. 따라서 본 제안 모형의 미계측 적용에 관한 정확도 문제는 유일한 입력변수인 T_c 의 산정에 깊이 의존하는 것으로 판단된다.

제안 모형은 n 과 K 를 매개변수로 이용하고 있으므로 실측과 관측에 의한 순간단위도는 n 과 K 를 통하여 비교하는 것이 적절하다. 이에 따라 순간단위도와 상응하는 $USTA$ 를 그림 5에 나타내어 비교하였다.

그림을 살펴보면 추정된 순간단위도가 관측값에 의한 단위도에 비하여 응답이 약간 빨리 재현되고 있다. 이것은 당연히 추정된 n 값이 관측치에 비하여 작기 때문에 발생하는 현상이지만 전반적으로 순간단위도는 일치한다. 특히 추정된 n 과 K 는 동곡의 관측치 평균과 표준오차를 살펴볼 때 상당히 신뢰성이 높은 값이다.

표 5. 매개변수 추정값과 실측값과의 비교

매개변수	Clark 모형		Gamma 분포 함수 (Nash 모형)		USTA	
	T_c (hr)	R (hr)	n	K	t_f' (hr)	t_f (hr)
관측치	4.29	6.29	2.58	2.67	4.35	7.55
계산치 (미계측가정)	3.95	5.68	2.38	2.61	3.95	6.67

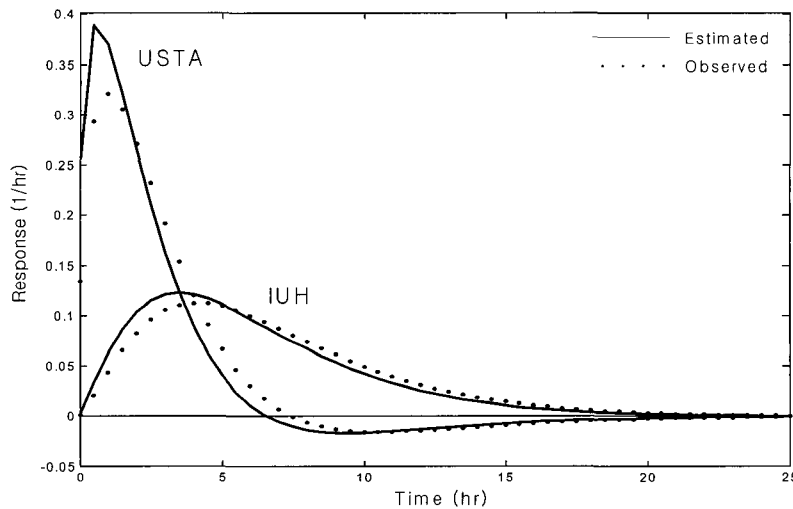


그림 5. 미계측유역(동곡)의 USTA와 순간단위도

이상과 같은 연구 결과를 종합할 때 제안된 gamma 분포 함수형 Clark 모형과 이에 상응하는 매개변수 추정절차는 전통적 Clark 모형의 매개변수를 간접적으로 추정함에 있어서 대단히 효과적인 대안으로 판단되며 미계측 유역에 대한 적용성도 우수한 것으로 사료된다. 그렇지만 본 연구는 매개변수의 간접 추정이라는 새로운 접근 방법에 연구의 범위를 국한하였기 때문에 대안으로 추정된 매개변수를 이용한 별도의 유출해석을 시행하지는 않았다. 물론 제시된 결과를 볼 때 제시된 방법론의 문제점은 대상 유역에 한정할 경우 발견할 수 없었다. 그러나 제안된 방법론이 실제 유출해석에 있어서 구조적인 문제점이 있는지의 여부는 향후 논의될 필요가 있다. 따라서 보다 광범위한 유역에 대해서 보다 충분한 자료를 통한 분석이 요구된다.

5. 결 론

Clark 단위도를 유도하기 위해서는 일반적으로 시간 매개변수 추정을 위한 주관적인 판단과 도달시간-유하면적 관계를 도출하기 위한 자원 소모적인 지도작업이 요구된다. 더욱이 도달시간-유하면적 관계를 합성곡선으로 대체하려 할 경우 이 곡선의 형태나 특성에 대하여 미리 판단할 수 있는 근거가 부족하다.

본 연구에서는 이러한 단점이나 한계를 보완하기 위하여 Nash 모형과 형태가 같은 gamma 분포 함수형 Clark 모형을 제시하고 이 모형의 매개변수를 추정함으로써, 전통적인 Clark 모형의 매개변수를 간접적으로 추정하는 기법을 제시하였다. 따라서 본 연구는 Clark 모형의 매개변수에 대한 간접적 추정이라는 주목적과 더불어 Clark 모형과 Nash 모형과의 상관성을 파악하는 목적도 지니고 있다.

위천 유역에 대하여 본 연구에서 제안한 모형을 적용한 결과 전통적 형태의 Clark 모형의 매개변수를 매우 적절하게 추정할 수 있음을 확인하였으며, 도달시간-유하면적 관계 대신 USTA를 분석함으로써 소유역간의 유출특성의 시간적 변화가 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 HEC-1에서 사용되는 Clark 매개변수를 이용한 유역간 상사성 관계식을 해석적으로 유도하였으며 또한 이를 USTA와 연관함으로써 Nash 모형 매개변수의 상사성 관계식을 도출하였다. 또한 상사성 관계식과 gamma 분포 함수형 Clark 모형을 미계측유역에 적용한 결과 적절한 매개변수 추정이 가능함을 확인하였다. 따라서 향후 Clark 모형을 적용할 경우 gamma 분포 함수형 Clark 모형을 우선 적용하여 매개변수들

을 간접적으로 추정한 후 이를 실제현상에 보다 적합하도록 보완하면 기존의 전통적인 절차에 비하여 상대적으로 객관적이고 효율적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구과제의 수행을 위한 건국대학교 산업기술연구원원의 지원이 있었으며 이에 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- 백경록, 최중남, 유철상, 김중훈 (2000). "강우-유출관계의 변동성에 관한 고찰." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권, 제3-B호, pp. 377-386.
- 성기원 (1999). "유역의 상사성을 이용한 Clark 모형의 매개변수 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp. 427-435.
- 성기원 (1997). "수문지형특성 및 시간응답특성의 상사성을 이용한 Nash 모형의 해석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제2호, pp. 97-106.
- 유철상, 김상단, 윤용남 (2002). "면적평균강우의 추정 오차와 유출계산에 미치는 영향." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제3호, pp. 307-319.
- 윤광원, 원석연, 윤용남 (1994). "Clark 유역추적법에 의한 계획홍수량 산정에 미치는 매개변수의 민감도 분석." **한국수문학회논문집**, 한국수문학회, 제27권, 제4호, pp. 85-94.
- 윤석영, 홍일표 (1995). "Clark 모형의 매개변수 산정방법 개선." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제5호, pp. 1287-1300.
- 윤석영, 홍일표 (1994). **홍수유출예측을 위한 수리수문학적 인자의 결정 : Clark 및 Nash 모형을 중심으로**. 연구보고서, 건기연 94-WR-113, 한국건설기술연구원.
- 윤여진 (1998). "실계홍수량에 영향을 미치는 매개변수의 민감도 분석: 자연유역을 중심으로." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 695-708.
- 이정식 (1994). 기존 강우-유출관계의 개념적 모형 비교연구. **국제수문개발계획(IHP)연구보고서**, 건설교통부, pp. 6.1-6.86.
- Bhaskar, N.R. (1988). "Projection of urbanization

- effects on runoff using Clark instantaneous unit hydrograph parameters." *Water Resources Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 113-124.
- Hogan, D.H. (1997). *Computer assisted floodplain hydrology and hydraulics*, 2nd edition. McGraw-Hill, New York, pp. 53-59.
- Jain, S.K., Singh, R.D., and Seth, S.M. (2000). "Design flood estimation using GIS supported GIUH approach." *Water Resources Management*, Vol. 14, No. 5, pp. 369-376.
- Khan, A.Q., and Ormsbee, L.E. (1989). "Comparison of two hydrologic models for steeply forested watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 109, No. 3/4, pp. 325-349.
- Kull, D.W., and Feldman, A.D. (1998). "Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-11.
- O'Kelly, J.J. (1955). "The employment of unit hydrograph to determine the flows of Irish arterial drainage channel." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 4, No. 3, pp. 365-412.
- Sabol, G.V. (1988). "Clark unit hydrograph and R-parameter estimation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.
- Wilson, B.N., and Brown, J.W. (1992). "Development and evaluation of a dimensionless unit hydrograph." *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, No. 2, pp. 397-408.

(논문번호:02-95/접수:2002.12.23/심사완료:2003.03.11)