

수리학적 추적 방법을 이용한 자연하천의 강우유출 해석

An Analysis of the Rainfall-Runoff of Natural Watershed Using the Hydraulic Routing Method

권 현 한* / 문 영 일**

Kwon, Hyun-Han / Moon, Young-Il

Abstract

In this study, a simple rainfall-runoff model was proposed by using the hydraulic routing model that requires relatively few parameters. The parameters of this model were estimated by the watershed characteristics data, and were applied to the Soyang watershed and Ui stream watershed by using the kinematic wave for overland flow and dynamic wave routing for channel routing. In order to demonstrate validity, the proposed approach was compared to the HEC-1 model for the Soyang watershed. As the results of modeling have shown, the hydraulic model shows reasonable results similar to that of the HEC-1 model. This model also represents good results for the Ui stream watershed. Hence, even if this model is a simple rainfall-runoff model using general methodology, it is competitive to the natural watershed. However, it is still difficult to estimate the roughness coefficient and the catchment width, and therefore this model is in need of such supplements.

keywords : kinematic wave, dynamic wave, rainfall-runoff modeling, ungauged watershed

요 지

본 논문에서는 매개변수의 의존도가 상대적으로 적은 수리학적 모형으로 강우-유출 모형을 구성하였다. 미계측 유역에 대해서 지형도나 유역 특성 자료로부터 매개변수를 추정하고 지표류는 운동파 방법을 하도추적은 Dynamic Wave 추적기법을 적용하여 대표적인 자연하천 유역인 소양강 유역과 위천 유역에 대해서 적용성을 검토해 보았다. 모형의 효율성을 평가하기 위해서 소양강댐 유역을 대상으로 HEC-1 모형과 본 연구에서 제시한 모형을 비교한 결과 HEC-1 모형에 부합되는 유출해석이 가능하였으며 모형의 효율성 및 타당성을 확인할 수 있었다. 낙동강 위천 유역에서도 도시적 해석 및 통계적 지표에서 모두 실측치와 근접한 해석이 가능하였다. 따라서 기존에 많이 사용되는 일반적인 방법론을 이용한 간단한 모형이지만 자연하천에 적용이 가능하리라 사료된다. 그러나 여전히 조도계수의 추정 및 유역폭의 산정 등에 있어서 어려움이 있으며 이에 대한 보완이 필요하다 하겠다.

핵심용어 : 운동파, dynamic wave, 강우-유출모형, 미계측유역

1. 서 론

유역의 토지이용 상태가 자연하천 유역으로 간주되

면서 중규모 유역의 경우에는 단위유량도법 또는 합성 단위유량도법 및 유역홍수추적법(watershed routing 또는 area routing), 유출함수법 등의 선형 유출계산법이

* 정희원 · Columbia University, Postdoctoral Research Associate, NY, USA
(e-mail: hk2273@columbia.edu)

** 정희원 · 교신저자, 서울시립대학교 토목공학과 부교수(Columbia University, Visiting Professor)
(e-mail: ymoon@uos.ac.kr)

많이 사용되며, 일본에서는 저류함수법, 탱크모형(tank model) 등의 비선형 유출계산법도 많이 사용되고 있다. 자연하천 유역의 유출 계산을 위해 개발된 범용 컴퓨터 모형에는 여러 가지가 있으며 자연하천 유역의 홍수사상을 계산하기 위한 사상모의모형(event simulation model)으로 대표적인 것은 HEC-1 (U.S. Hydrologic Engineering Center, Flood Hydrograph Package), SFM (Storage Function Method, Japan), TR-20 (U.S. SCS) 등이 있고, 연속모의 모형(continuous simulation model)으로는 NWS-PC 및 SSARR, TWM, USDAHL 등 수 많은 모형들이 있다.

국내 하천유역의 경우는 아직까지 신뢰도 높은 수문 자료의 획득이 어려워 이들 모형의 적용에는 한계가 있으므로 적용시 주의를 요하며, 홍수유출 계산 방법을 선정할 때에는 유효수량의 산정 방법, 대상유역의 대소, 유역 형태, 지질 및 식생피복, 주요 유출성분의 구성, 대상홍수의 규모 등을 고려해야 한다. 국내의 경우 대부분의 자연하천 유역은 미계측(ungaged) 유역이기 때문에 강우-유출 모형에서 실측 유출자료를 바탕으로 요 구되는 보정(calibration)을 실시하기가 쉽지 않다.

최근에 활발한 모형 개발과 물리적 특성에 기반을 둔 강우-유출 모형의 적용은 크게 2가지 목적으로 분류할 수 있다. 첫째, 실측자료를 통하여 강우-유출 관계의 과정 및 유출의 예측 특성을 개선하고자 하는 노력과 둘째, 수공학적인 문제점을 해결하기 위한 적용으로 크게 대별할 수 있다. 물리적인 특성에 기반을 둔 강우-유출 모형은 Freeze와 Harlan (1969), Abbott 등(1986a, b), Refsgaard와 Storm (1995), 그리고 Ping과 Xiaofang (1999) 등에 의해서 연구가 진행되었다. 이들 연구들은 유출과정을 모의하고 유역의 유출량을 추정하였다. 그러나 이들 연구에서 사용된 모형들은 상대적으로 큰 자연 하천유역에 적용될 때 복잡한 모형으로 인해 많은 시간 뿐만 아니라 자료의 준비 및 구성에 있어서 많은 시간을 필요로 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 유역의 물리적인 특성을 고려하고 기존 수리학적 추적 방법을 고려하여 특별한 부가적인 복잡성을 배제하고 유출모의가 가능한 모형을 구성하는데 목적을 두고 있다.

기존 운동파(kinematic wave) 방법은 인위적인 배수 계통을 갖는 도시하천의 지표류(overland flow) 산정과 분포형 강우-유출 모형(distributed rainfall-runoff model)에 유출량 산정에 이용되었으며 Dynamic Wave 방법은 수리학적 하도추적 방법으로서 주로 이용되었다. 최계원 등(1992)은 유역내 공간적 및 시간적 분포특성을 가진 이동강우를 해석하기 위하여 분포형 모형을 개발하였으며 이 유역모델은 지표면 흐름에서 운동파

방법으로 유출을 추정하였다. 신사철(1996)은 분포형 강우-유출 모형에 의한 유출량을 해석시에 운동파 방법을 이용하여 분포적으로 추적되는 직접 유출을 추정하였다. 김성준(1998a,b)은 GIS 자료를 기반으로 하는 격자형 운동파 모형을 통해 지표흐름을 추적하였으며 김한준 등(2001)은 HEC-1 모형의 운동파 방법을 사용하여 유출을 모의한 사례가 있다. Brian 등(2003)은 기상레이더와 지형정보시스템을 이용한 격자기반 강우-유출모형에서 운동파 방법으로 유출량을 추정하였다.

수리학적 모형에 기반을 둔 유출해석 및 하도추적은 많은 연구자들에 의해서 모형의 효율성 및 적용성은 이미 입증된 바 있으며 적용사례도 많이 있다. 하지만 대부분 운동파 방법은 강우-유출모형의 지표류 산정을 위해서 단일 목적으로 사용되고 있는 경우가 많으며 Dynamic Wave 방법 또한 하도추적(channel routing)을 위해서 주로 이용되고 있다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 새로운 유출해석 모형의 개발보다는 이들 방법론을 하나의 모형으로 구성하여 이에 대한 적용성과 효율성을 평가해 보고자 하는데 목적이 있다. 국내에서 많은 유역에서 미계측 유역으로 존재하는 자연하천을 대상으로 매개변수의 의존도가 상대적으로 적은 수리학적 모형으로 강우-유출 모형을 구성하였다. 지형도나 유역 특성 자료로부터 매개변수를 추정하고 지표류에 대해서는 운동파 방법을 이용하여 각 소유역별로 유출량을 산정하였다. 이들 수문곡선을 Dynamic Wave 방법으로 최종 유출구에서 수문곡선의 유도가 가능하도록 유출모형을 구성하여 대표적인 자연하천 유역인 소양강 유역과 IHP 대표유역인 낙동강 위천 유역에 대해서 적용성을 검토해 보았다. 그림 1은 전체적인 유출 모의 과정을 나타낸다.

2. 수리학적 홍수추적

본 연구에서 사용한 운동파 모형과 Dynamic Wave 모형은 여러 문헌에서 언급하고 있으므로 본 장에서는 이를 간단히 정리하여 나타내었으며 홍수량 추정을 위해서 본 연구에서는 운동파 모형으로 각 소유역에 유출량을 산정한 후 Dynamic Wave 모형으로 하도추적을 실시하여 최종적으로 유출구에서의 수문곡선을 유도하였다.

2.1 운동파를 이용한 지표류(overland flow) 산정

운동파 방법은 중력과 마찰력이 중요하고 가속항의 관성력과 압력은 중요하지 않은 흐름이다. 중력과 마찰력이 서로 평형을 이루어 흐름은 등류가 된다. 운동파 추적은 연속방정식과 등류의 운동량 방정식을 계산하는

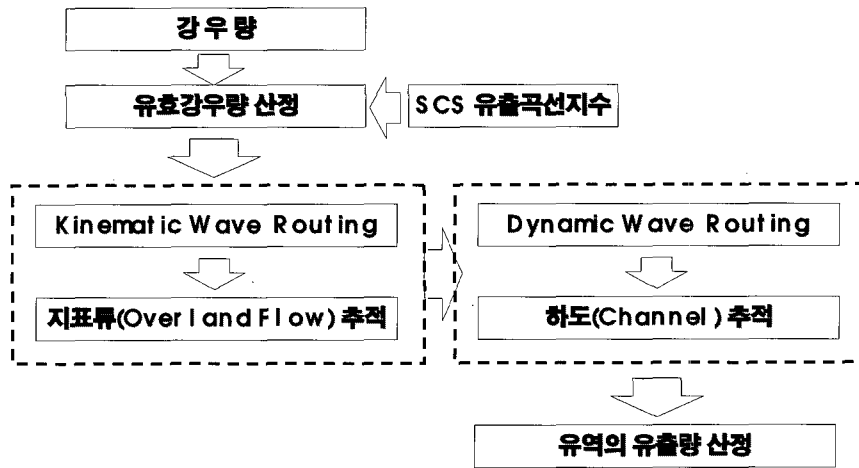


그림 1. 수리학적 홍수유출 모의 과정

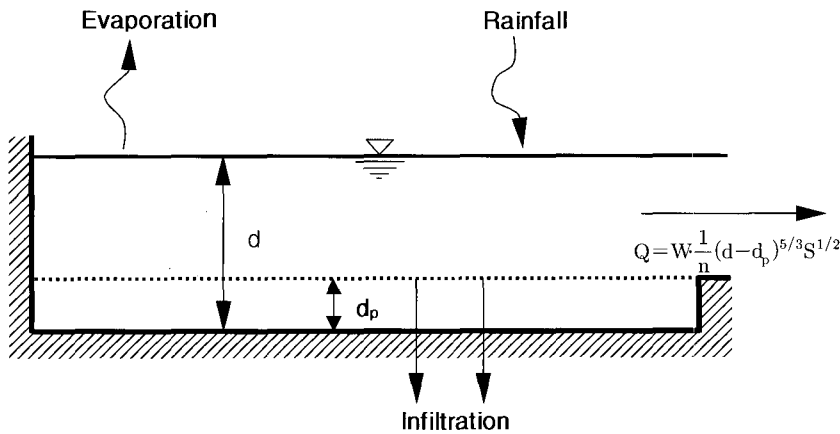


그림 2. 지표흐름 추적 개념도(Huber and Dickinson, 1988)

것이다. 마찰경사와 하천경사가 같다고 가정하는 운동과 근사적인 비선형저류방정식을 이용하여 지표류를 계산하였다. 그림 2는 지표흐름의 추적 개념도를 나타낸다.

운동과 근사적인 비선형저류방정식을 사용한 지표류 계산에 개념적인 도입은 Huber와 Dickinson (1988), Bedient와 Huber (1992)에 이루어졌으며 도시유출모형으로 많이 이용되는 SWMM(Storm Water Management Model)의 근간을 이루고 있다. 계산을 수행하는 데는 상류부 경계조건만이 필요하고, 각 수로요소는 다른 요소에 대해 독립적인 계단형 수로로 가정한다. 각 연산구간 dt 에서 두개의 미지수 유량 Q 와 수심 d 가 존재하며 이를 위한 두개의 방정식이 구성된다. 소유역에서의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai - Q \quad (1)$$

식(1)에서 V 는 물의 체적, d 는 수심(m), t 는 시간

(sec), A 는 수표면 면적(m^2), i 는 초과 강우량(m/sec), Q 는 유출량(m^3/sec)이다. 지표면유출은 유역면적을 광폭으로 보아 수리반경이 수심과 같다는 가정아래 Manning방정식을 사용하여 계산한다.

$$Q = W \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2)$$

식 (2)에서, W 는 유역의 폭(m), n 은 Manning의 조도계수, d_p 는 지면저류 깊이(m), S 는 소유역 경사(m/m)이다. 미지값 d 를 계산하기 위해 식(2)를 식 (1)에 대입하여 정리한 비선형 저류방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} = i - \frac{W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} = i + R \cdot (d - d_p)^{5/3}$$

$$R = - \frac{W S^{1/2}}{A_s \cdot n} \quad (3)$$

R 은 유역폭, 경사, 조도계수 등을 하나로 표현한 변수로서 유역의 특성에 따라 변화하는 유역특성 인자이다. 식 (3)은 각 연산 시간구간에서 유한차분법을 사용하여 풀이될 수 있다. 차분법을 적용함에 있어서, 방정식의 오른쪽 항에서 유입량과 유출량은 시간에 대한 평균값이다. 여기서 d_n 는 t 시간에서의 수심, d_{n+1} 는 $t+\Delta t$ 에서의 수심이다. 초과강우량 i 는 각 연산 시간구간에서 입력자료로 주어지며, 평균유출량은 계산 초기와 종기의 수심을 평균한 값으로 계산된다. 식 (3)은 다음의 차분식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{(d_{n+1} - d_n)}{\Delta t} = i + R \left(d_n + \frac{(d_{n+1} - d_n)}{2} - d_p \right)^{5/3} \quad (4)$$

식 (4)는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 풀이되며, 미지수심 d_2 가 계산되면 각 연산구간에서 순간 유출을 계산하게 된다.

2.2 Dynamic wave를 이용한 하도 추적

Dynamic Wave를 이용한 하도추적에서 흐름에 대한 기본방정식은 연속방정식과 개수로에서의 일차원 점변 부정류 방정식으로서 다음의 St. Venant 식을 사용한다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (6)$$

수심이 얇은 흐름에 있어서 이송항($\partial(Q^2/A)/\partial x$)은 운동량방정식 계산시 생략하게 되는데, 이 항이 운동량방정식의 여러 항들 중에서 가장 작은 값을 갖는 동시에 결과치에 불안정한 요인을 제공하기 때문이다 (Yen, 1981).

따라서, 간편하고, 안정된 해를 구하기 위해 식 (7), (8)로 부터 식(5)를 변형시켜 하도 추적에 사용되는 식 (9)와 같은 기본방정식이 유도될 수 있으며 이를 해석하기 위한 방법으로 차분형태의 식을 사용하게 된다. 기본방정식으로 1차원 부정류 점변류방정식(St. Venant 방정식)인 Dynamic 방정식을 사용하며, 수치해석적으로 시간에 대해 전진법인 양해법(Explicit Method)을 사용한다. 차분방정식의 해를 구하기 위해서는 2개의 경계조건이 필요하며 상류부의 경계조건은 소유역으로부터의 지표면유출량이 되며, 하류부의 경계조건은 수심을 이용하였다.

$$\frac{Q^2}{A} = V^2 A \quad (7)$$

$$\frac{\partial(V^2 A)}{\partial x} = 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

3. 대상 유역

강우-유출 모형의 적합성을 평가하기 위해서는 모형의 검증에 위한 최소한의 사상별 강우-유출 자료가 필요하다. 이번 연구에서는 유출 자료가 비교적 잘 갖추어져 있고 자연하천인 소양강댐 유역과 건설교통부에서 운영하고 있는 대표시험유역인 위천 유역에 대해서 적용성을 검토해 보았다.

소양강은 총 유로연장 166km로서 한강수계를 형성하는 북한강의 최대지류이며, 유역의 대부분이 산악 지역으로 둘러 쌓여있다. 유역의 평균경사는 댐 지점으로부터 인제까지 약 1/800 ~ 1/1,000 이고 상류방향으로 1/400 ~ 1/800 이다. 소양강댐 유역은 인북천 유역, 내린천 유역 및 소양호 유역 등 세 개로 이루어져 있다.

위천 유역은 낙동강 중류 좌안에 위치하고 있으며 유역의 경계부가 산악으로 둘러싸여 있고 본류를 중심으로 상류는 깊은 계곡을 이루고 있으나 하류부는 비교적 평탄한 구릉을 형성하면서 소규모 평야지대를 이루고 있다. 고도의 중앙치는 221El.m로 유역면적의 90%가 600El.m 이하에 위치하고 있으며 하천경사는 상류가 급하고 하류가 완만한 일반적인 하천형태를 가지고 있다. 그림 3과 4는 소양강 유역과 위천 유역을 나타낸다.

소양강댐 유역과 위천 유역에 소유역 및 하도에 특성자료는 각각 표 1과 표 2에 제시하였다. 강우의 공간적 분포를 위한 세 개의 소유역에 대한 각 관측소의 티센(Thissen) 가중치를 유역평균 강우량을 산정하였다. 유역폭에 결정에 있어서 실제의 자연유역은 사각형과 같은 대칭적이고 균등한 특성을 갖는 형태로 표현이 어려우므로 자연 상태에 있는 유역의 폭을 결정하는 일반적인 방법이 필요하며 본 논문에서는 유역면적을 유역길이로 나누어 추정하거나 유역길이와 유역의 왜곡 정도를 고려하여 결정하였다. 운동파를 이용한 지표류 계산에 적용되는 조도계수는 일반적으로 하천과는 다르게 큰 값을 가지며 표 3을 고려하여 추정하였다(Engman, 1986).

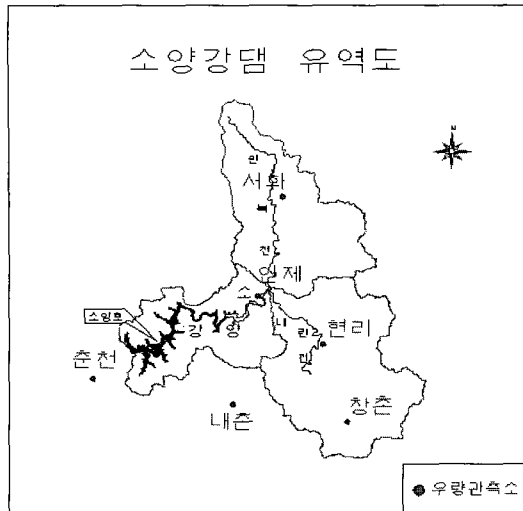


그림 4. 소양강댐 유역도

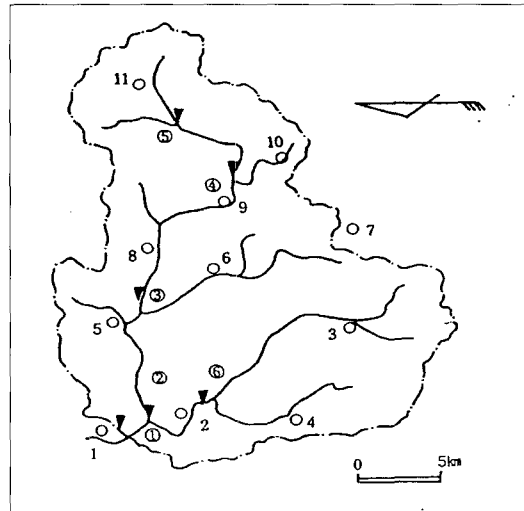


그림 5. 낙동강 위천 유역

표 1. 소양강 댐 유역 특성 및 매개변수

구분 (소유역)	Area (km ²)	유역경사 (m/m)	유역폭 (m)	운동과 조도계수
인북천	923.8	0.01268	148,600	0.13
내린천	1069.3	0.01168	178,400	0.13
소양호	709.9	0.03529	111,600	0.13
하도 지점	하도연장 (m)	평균 하도폭 (m)	하도 경사 (m/m)	하도 조도계수
소양호	55800	300	0.00155	0.044

표 2. 위천 유역 특성 및 매개변수

구분 (소유역)	Area (km ²)	유역경사 (m/m)	유역폭 (m)	운동과 조도계수
무성	472.53	0.00353	95,660	0.13
병천	302.13	0.00369	81,300	0.13
효령	151.03	0.01163	43,600	0.13
미성	171.25	0.00417	61,800	0.13
하도 지점	하도연장 (m)	평균 하도폭 (m)	하도 경사 (m/m)	하도 조도계수
무성	23,686	50	0.01078	0.04
병천	10,287	50	0.01099	0.04
효령	12,466	50	0.03109	0.04
미성	15,140	50	0.01398	0.04

표 3. 운동과 모형의 지표류 추정을 위한 조도계수

피복상태	n
concrete and asphalt	0.011
bare sand	0.01
graveled surface	0.02
range(natural)	0.13
bluegrass sod	0.45
short grass prairie	0.15

4. 적용결과

본 연구에서 제시한 방법론과 기존모형과 비교하기 위해서 일반적으로 자연하천 유역에서 주로 사용되는 HEC-1 단일사상 강우-유출모형과 해석결과를 비교하였다. HEC-1 모형에서 사용된 방법은 SCS 유출곡선지수방법과 Clark 합성단위도법을 이용하였으며 매개변수 보정은 1984년, 1990년, 1998년 등 대상댐 유역의 주요 홍수사상을 중심으로 Clark 합성단위도법의 도달시간과 저류상수 값을 대상으로 실시하였다. 도달시간과 저류상수의 초기값은 유역의 지형학적 인자 및 소양강다목적댐 치수능력증대계획 타당성조사제검토 보고서(1997)와 소양강다목적댐 정밀안전진단 보고서(1999)를 인용하여 산정 하였으며 다음 식 (10)과 같은 목적함수(objective function)를 적용하여 실시하였다. 식 (10)은 침투유량 백분율 오차를 나타내며, 여기서 $q_s(t)$ 는 계산유량을 $q_0(t)$ 는 실측유량을 나타낸다.

$$Z = 100 \left| \frac{q_s(\text{peak}) - q_0(\text{peak})}{q_0(\text{peak})} \right| \quad (10)$$

매개변수 보정 결과 각 홍수사상별로 모두 다른 값을 나타내고 있으며 표 4에 정리하였다. 이러한 현상은 유역의 초기함수조건, 강우발생형태, 유역특성, 모형의 불확실성, 수문자료의 불확실성 등으로 인해 발생한 결과라 사료되며 본 연구에서는 이들 값을 평균하여 사용하였다. 그림 5-7은 매개변수의 보정 결과를 나타낸다.

이들 보정 결과를 바탕으로 1995년 강우사상에 대해서 HEC-1 모형으로 유출량을 추정하였으며 본 연구에서 제시한 방법론과 비교하여 나타내었다. 1995년 강우-유출 사상은 3번의 큰 침투 유출량을 나타내는 특성을 갖고 있다. 각 방법에 대해서 침투시간 및 침투유량을 중심으로 비교해 보았다. 실측치의 1번째 침투유량 경

우는 $5,498m^3/sec$ 수리학적 모형은 $5,426m^3/sec$ 로 거의 같게 발생하였으나 HEC-1 모형은 $6,002m^3/sec$ 로 실측치에 비해 6.2% 큰 값으로 모의가 이루어 졌으며 침투유량 발생시간은 2가지 모형 모두 실측치와 동일한 결과를 나타내었다. 그러나 2번째, 3번째 침투유량은 수리학적 홍수추적 모형은 실측유량에 비해 12%, 21% 적게 모의가 이루어졌으며 HEC-1 모형은 2번째 모형은 실측치와 거의 동일한 침투유량을 가리키고 있으며 3번째 침투유량은 34%가 큰 차이를 갖는 값으로 모의가 이루어졌다. 침투시간을 비교해보면 수리학적 홍수추적 모형은 2번째 침투에서는 1시간 빠른 값을 나타내었으며 3번째 침투는 실측치와 동일한 값으로 추정이 가능하였다. 반면 HEC-1 모형은 2번째 침투에서 실측치보다 1시간 지체되어 침투유량이 발생하고 있으며 3번째 유량의 경우도 2시간 지체된 유출특성을 나타내었다. 그림 8은 수리학적 홍수추적모형과 HEC-1의 Clark 모형을 통한 유출모의 결과를 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 수리학적 모형과 HEC-1 모두 실측유출사상과 시간에 따라 차이는 있지만 거의 같은 거동을 보여주고 있다. 또한 매개변수 보정을 통한 해석결과인 HEC-1모형이 유출 전반부의 경우에는 실측치에 보다 근접한 결과를 제시해주고 있으나 후반부에는 수리학적 홍수모형이 실측자료보다 유사한 거동을 보이고 있다.

전체적으로 수리학적 추적모형을 이용하여 매개변수의 보정의 과정을 생략하고 유출량을 추정한 결과 매개변수 보정을 실시한 HEC-1모형에 부합되는 값으로 모의가 가능하였으며 자연하천유역에 적용성을 확인할 수 있었다. 소양강 유역의 해석결과를 바탕으로 위천 유역의 4개의 소유역에 대해서 모의를 실시하여 실측유출사상의 거동과 비교하였다. 모의결과 4개 유역 모두 침투시간에 대해서는 실측치에 거의 같게 나타났으며, 침투유량은 무성, 효령 유역은 실측치와 같은 거동을 보여주고 있으나, 병천, 미성유역은 실측치보다 작은 침투값을 나타내었다.

표 4. 대상댐 유역 매개변수 보정 결과(단위 : 시간)

년 도	유역명	매개변수 보정		매개변수 초기치	
		도달시간	저류상수	도달시간	저류상수
1984	인북천	1.34	1.80	2.15	2.70
	내린천	1.82	2.76	2.20	2.76
	소양강댐	1.52	1.83	1.53	1.83
1990	인북천	4.77	9.68	2.15	2.70
	내린천	3.30	2.81	2.20	2.76
	소양강댐	0.99	3.16	1.53	1.83
1998	인북천	4.84	7.56	2.15	2.70
	내린천	3.30	2.80	2.20	2.76
	소양강댐	1.50	1.30	1.53	1.83

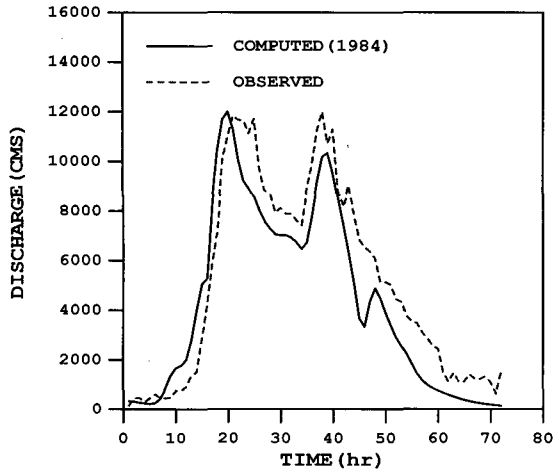


그림 5. 1984년 호우사상 매개변수 보정결과

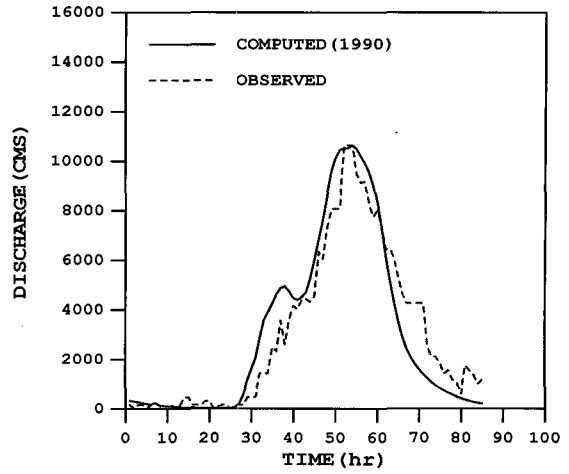


그림 6. 1990년 호우사상 매개변수 보정결과

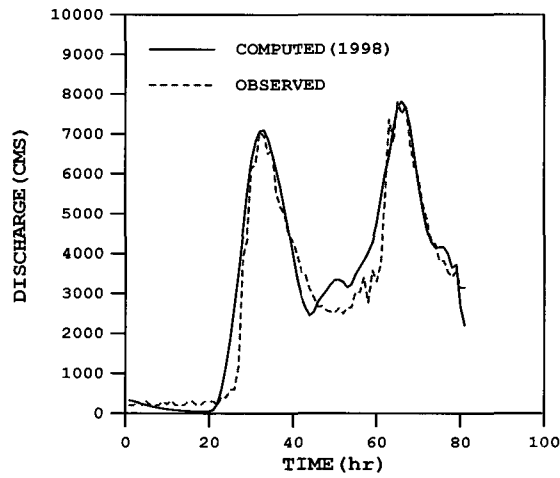


그림 7. 1998년 호우사상 매개변수 보정결과

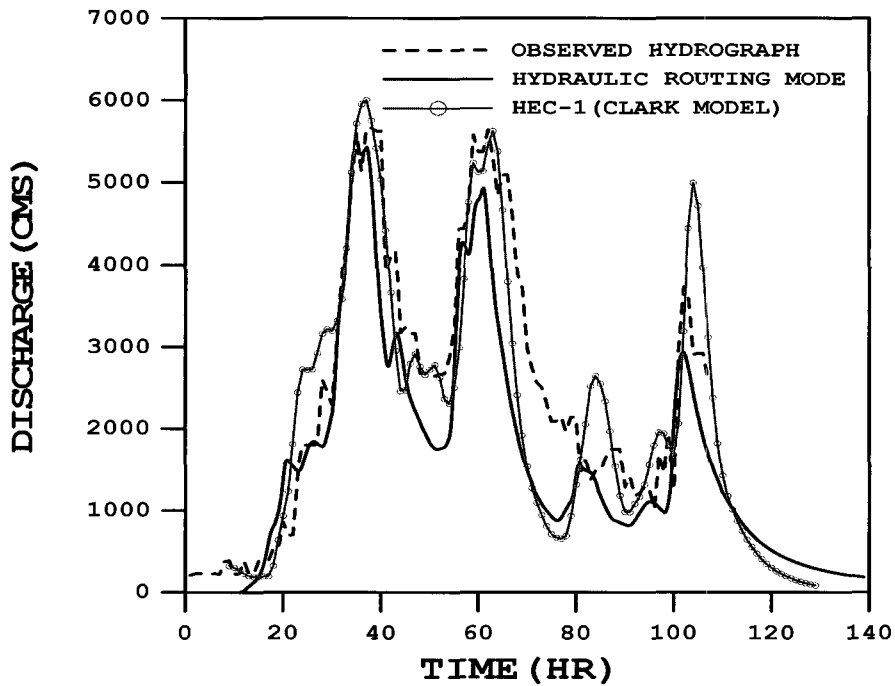


그림 8. 수리학적 홍수추적모형과 Clark 합성단위도 모형과의 비교

일반적으로 강우-유출 모형의 정확성을 평가하기 위한 많은 통계적 적합도 기준이 제안되었으나, 적합도 기준보다는 모의 발생된 값과 측정된 값 사이의 불일치에 더 중점을 두고 있다. 즉 관측치와 예측치 사이의 차이인 잔차의 분석이 계통적으로 과소 또는 과대 추정되는 것을 파악하여 모형 수행능력을 평가하는데 사용되고 있다. 본 논문에서는 통계적 평가 수단으로 평균제곱오차(root mean square error, RMSE), 모형효율성계수(model efficiency, ME), 상관계수(correlation coefficient, CC), 첨두유량의 퍼센트 오차(percent error in peak, PEP)를 사용하여 모형의 적합성을 평가하였다. 모형효율성계수는 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 통계적 기준으로 편의를 줄일 수 있는 무차원계수이다. 모의된 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치할수록 1에 가까워지는 성질이 있다. 이 기준은 무차원양으로서 자료의 개수에 관계없이 절대적 평가기준이 될 수 있다.

$$ME = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \quad (11)$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^n [q_0(t) - q_s(t)]_i^2 \quad (12)$$

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^n [q_0(t) - \bar{q}]_i^2 \quad (13)$$

여기서, q_0 는 실측유량을 q_s 는 모의 유량을 나타낸다.

평균제곱오차는 비선형 유출모형의 수행능력을 평가하기 위해 Party와 Marino(1983)는 수문곡선 비교의 기준으로 평균제곱오차를 채택하였다. 모형 수행결과 평균적으로 어느 정도의 유량만큼 오차가 발생하는지를 나타내는 지표로 일종의 평균치라고 할 수 있다.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_0(t) - q_s(t))_i^2 \right)^{0.5} \quad (14)$$

첨두유량의 백분율오차는 첨두유량이 중요한 사상형 강우-유출 모형에 주로 이용되며 이 값이 음수이면 모의된 첨두유량이 더 작음을 의미하며, 첨두시간이 고려되지 않는 단점이 있다.

$$PEP = \frac{q_{ps} - q_{p0}}{q_{p0}} \times 100 \quad (15)$$

여기서, q_{p0} 는 실측유입량의 첨두유량을 나타내며 q_{ps} 는 모의치의 첨두유량을 나타낸다.

상관계수는 모형의 효율성을 나타내는 무차원 기준으로 1에 근접할수록 모형의 모의능력이 우수함을 뜻한다.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (q_o(t) - \bar{q}_o)(q_s(t) - \bar{q}_s)}{(n-1)} \quad (16)$$

강우-유출 모의의 적합성을 평가하기 위해서 그림 9에서~그림 12에 실측치와 모의 결과를 도시적으로 나타내어 평가하였다. 그림에서 보듯이 전체적으로 유역에 따른 정도에 차이는 나타나지만, 실측치에 근접한 모의가 이루어졌다. 표 5에 통계적 지표에 나타냈듯이 무성, 효령, 미성유역은 모형효율성계수가 거의 1에 가깝게 산정되었으며, 소양강댐과 병천 유역도 80%에 가까운 효율성계수를 나타내었다. 첨두유량 퍼센트 오차는 소양강댐, 무성, 효성 유역에서 -5% 내외로 실측치와 비슷한 값을 나타내어 좋은 모의 결과를 나타내었다. 상관계수는 모든 유역에 92% 이상의 값을 나타내어 실측치와 모의치의 경향성이 일치하는 결과를 나타내었다. 전체적으로 모의결과가 실측치와 근접한 결과를 나타내었다.

표 5. 강우-유출 관계의 통계적 지표

유역구분	ME (-)	CC (-)	PEP (%)	RMSE
소양강댐	0.75	0.92	-4.2	874.66
무성	0.99	0.99	-2.6	19.78
미성	0.87	0.98	23.91	21.89
병천	0.77	0.92	15.98	87.42
효령	0.95	0.98	-2.1	14.78

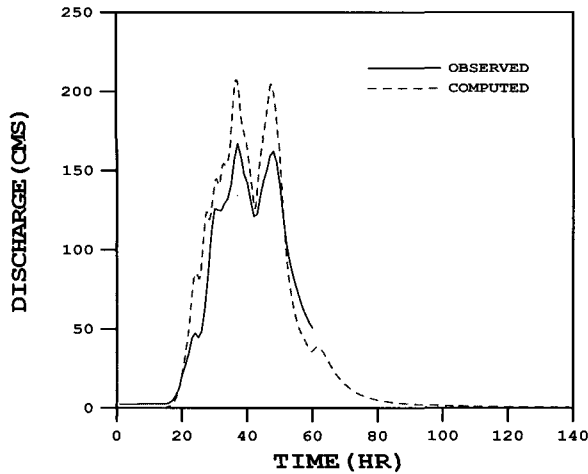


그림 9. 미성구역의 실측치와 모의결과

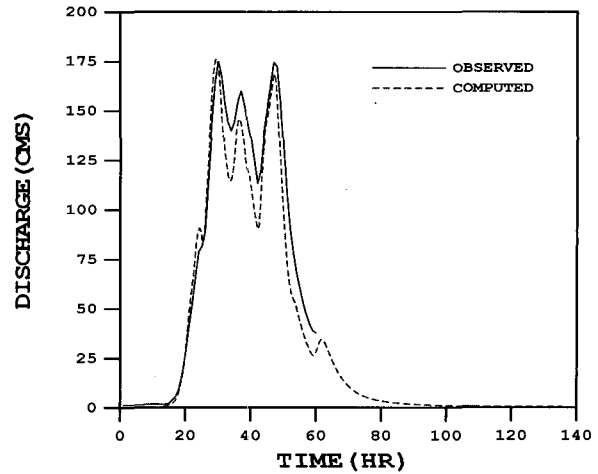


그림 10. 효령구역의 실측치와 모의결과

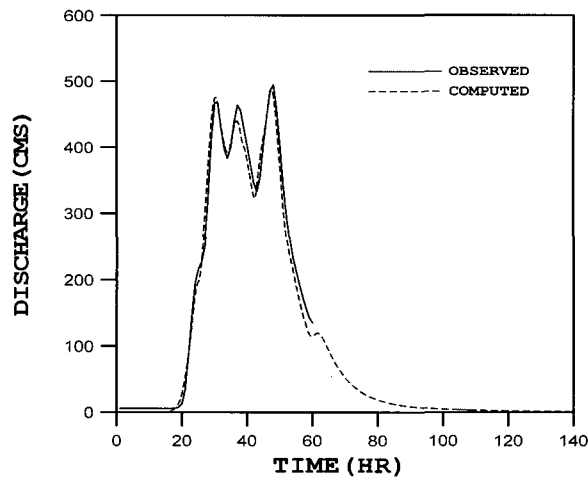


그림 11. 무성구역의 실측치와 모의결과

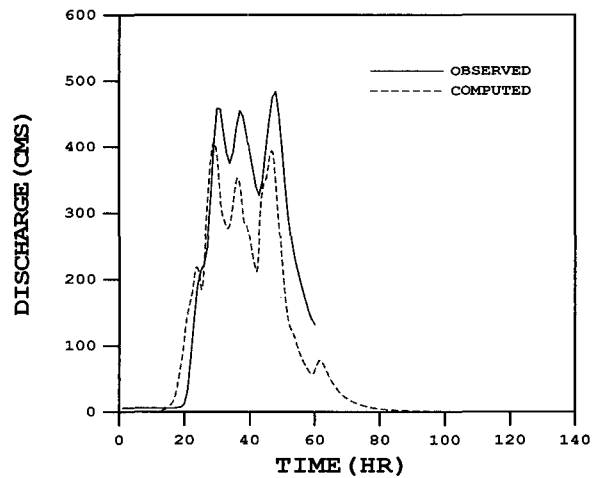


그림 12. 병천구역의 실측치와 모의결과

5. 결 론

국내에 경우 신뢰성 있는 강우-유출 자료의 획득이 어려운 실정이며, 자연하천의 경우 국가하천을 제외하고 대부분이 미세측유역의 특성을 갖고 있다. 하천기본계획 및 기존의 수공구조물의 설계시 설계홍수량을 산정하기 위해서는 합성단위유량도 및 경험적인 공식을 사용하여 유출량을 산정하였다.

그러나 대부분의 자연하천 유역은 미세측유역으로 매개변수의 보정을 통한 신뢰성 있는 해석이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 자연하천에 대해서 매개변수의 의존도가 상대적으로 적은 수리학적 강우-유출 모형을 구성하고 미세측 유역에 대해서 지형도나 유역 특성 자료로부터 매개변수를 추정하였고 지표류는 운동과 방법을 하도추적은 Dynamic Wave 추적기법을 적용하여 대표적인 자연하천 유역인 소양강 유역과 위천 유역에 대해서 적용성을 검토해 보았으며 본 논문을 통

해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 모형의 효율성을 평가하기 위해서 소양강댐 유역을 대상으로 매개변수 보정을 통해 추정된 HEC-1 모형과 본 연구에서 제시한 모형을 비교한 결과 두 가지 모형 모두에서 실측유출수문곡선의 특성을 반영한 모의가 가능하였으며 모형의 효율성 및 타당성을 확인할 수 있었다.
- 2) 이들 결과를 바탕으로 위천 유역에 적용하였으며 도시적 해석 및 통계적 지표에서 모두 실측치와 근접한 해석이 이루어졌으며, 유출 형태도 실측치와 유사한 결과를 나타내었다.
- 3) 따라서 기존에 많이 사용되는 두 가지 방법론을 이용한 간단한 모형이지만 자연하천에 적용이 가능하리라 사료된다. 그러나 여전히 조도계수의 추정 및 유역폭의 산정 등에 있어서 어려움이 있으며 이에 대한 보완이 필요하다 하겠다.

참 고 문 헌

- 한국수자원공사 (1997). **소양강다목적댐 치수능력증대 계획타당성조사제검토보고서**.
- 한국수자원공사 (1999). **소양강다목적댐 정밀안전진단 보고서**.
- Brian E., 최우희, 김민환, 김성균 (2003). “기상레이더와 지형정보시스템을 이용한 분포형 강우-유출 유역모형의 개발과 검증”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회 Vol. 36, No. 2, pp. 285-300.
- 김성준 (1998a). “격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I)”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 31, No. 3, pp. 303-308.
- 김성준 (1998b). “격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(II)”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 31, No. 3, pp. 309-315.
- 김한준, 김병익, 전경수 (2001). “운동과 모형에 의한 확률홍수량 산정”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집(1)**, 한국수자원학회, pp. 236-241.
- 신사철 (1996). “분포형 강우-유출 모형에 의한 유출 해석”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 29, No. 6, pp. 131-139.
- 최계원, 이희성, 안상진 (1992). “분포형 모형을 이용한 유역내 이동강우(MOVING STORM)의 유출해석 (1) -모델의 개발-”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 25, No. 1, pp. 101-110.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O Connel, P.E., Rasmussen, J., (1986a). “An introduction to the European hydrological system-systeme hydrologique SHE. 1. History and philosophy of physically based distributed modellingsystems”, *J. Hydrol.*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O Connel, P.E., Rasmussen, J., (1986b). “An introduction to the European hydrological system-systeme hydrologique SHE. 2. History and philosophy of physically based distributed modeling systems”, *J. Hydrol.*, Vol. 87, pp. 61-77.
- Bedient, P.B., and Huber, W.C. (1992). *Hydrology and Floodplain Analysis*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA, Second Edition.
- Engman, E.T. (1986). “Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 112, No. 1, pp. 39-53.
- Freeze, R.A., Harlan, R.L., (1969). “Blue print for a physically based digitally simulated hydrologic response model”, *J. Hydrol.*, Vol. 9, pp. 237-258.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). *Storm Water Management Model User's Manual. Version 4*, EPA, GA.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). “River Flow Forecasting Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles”, *J. Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Ping, F., Xiaofang, R., (1999). “Method of flood routing for multibranch rivers”. *J. Hydrol. Engng*, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp. 271-276.
- Refsgaard, J.C., Storm, B., (1995). *MIKE SHE. In: Singh, V.P., (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, pp. 809-846.
- Yen, B.C. (1981). *Urban Stormwater Hydraulics and Hydrology*, WRP, pp. 547.

(논문번호:04-81/접수:2004.8.16/심사완료:2005.06.14)