

중랑천 유역에서의 Vflo™ 모형의 매개변수 민감도 분석

Parameter Sensitivity Analysis of Vflo™ Model In Jungnang basin

김병식* · 김보경** · 김형수***

Kim, Byung Sik · Kim, Bo Kyung · Kim, Hung Soo

Abstract

Watershed models, which are a tool for water cycle mechanism, are classified as the distributed model and the lumped model. Currently, the distributed models have been more widely used than lumped model for many researches and applications. The lumped model estimates the parameters in the conceptual and empirical sense, on the other hand, in the case of distributed model the first-guess value is estimated from the grid-based watershed characteristics and rainfall data. Therefore, the distributed model needs more detailed parameter adjustment in its calibration and also one should precisely understand the model parameters' characteristics and sensitivity. This study uses Jungnang basin as a study area and Vflo™ model, which is a physics-based distributed hydrologic model, is used to analyze its parameters' sensitivity. To begin with, 100 years frequency-design rainfall is derived from Huff's method for rainfall duration of 6 hours, then the discharge is simulated using the calibrated parameters of Vflo™ model. As a result, hydraulic conductivity and overland's roughness have an effect on runoff depth and peak discharge, respectively, while channel's roughness have influence on travel time and peak discharge.

Keywords : distributed model, Vflo™ Model, sensitivity analysis

요 지

물 순환과정을 평가하기 위한 도구로 사용되는 수문모형은 크게 분포형 모형과 집중형 모형으로 구분할 수 있다. 지형 특성 자료의 제공과 활용을 위한 시스템이 등장하고 컴퓨터 계산 능력이 발달하면서 과거 집중형 모형에서 분포형 모형을 이용한 연구와 적용이 진행되고 있다. 개념적, 경험적 의미가 큰 집중형 모형과는 달리 분포형 모형의 경우, 격자 기반의 유역 특성 및 강우 자료로부터 초기 매개변수 값(first-guess value)을 추정하기 때문에 모형 보정 시 미세한 매개변수 조정이 요구된다. 따라서 모형 내 구성된 매개변수별 특성과 민감도를 정확하게 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 물리적 기반의 분포형 모형인 Vflo™ 모형의 매개변수별 민감도를 분석하기 위하여 중랑천 유역을 대상유역으로 선정하고 적용하였다. 이를 위하여 중랑천 수계 하천정비기본계획(경기도, 1996)을 참고하여 재현기간 100년에 지속시간 6시간 설계강우를 작성하고, 이로부터 각 매개변수 변화에 따른 유출량 변화를 모의하였다. 그 결과, 수리전도도는 유역 전체의 유출고에 영향을 주는 것으로 나타났고 지표면 조도계수는 침투 발생시간의 변화없이 침투유량값 즉, 수문곡선의 형태에 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 하도 구간의 조도계수는 비슷한 유출고에 대하여 침투유량값과 도달시간에 매우 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 분포형 모형, Vflo™ 모형, 민감도 분석

1. 서 론

유역 전반의 물 순환과정의 해석과 예측을 목적으로 이용되는 수문모형은 최근 컴퓨터의 성능 향상과 지형 특성 자료의 제공과 활용이 가능해지면서 집중형 모형에서 분포형 모형으로 발전하고 있는 추세이다(국토해양부, 2009). 물 순환과정은 시공간적으로 그 분포가 변동하는데 분포형 모형은 수치지형자료를 이용함으로써 토지이용변화 외에도 물리적 특성 변화에 따른 영향을 모의할 수 있다(홍준병 등,

2006). 대표적인 분포형 모형으로는 AGNPS(Young 등, 1989), ANSWERS(Beasley 등, 1980), MIKE SHE(DHI, 1998), GSSHA(Downer 등, 2002), Vflo™(Vieux, 2004)과 KIMSTORM(김성준, 1998) 등이 있다. 과학기술부(2004)와 건설교통부(2007)는 이들 격자기반의 물리적 분포형 모형을 비교하여 유출 해석 과정 중 가장 큰 차이점이 강우 입력 자료에 있음을 확인하였다. 대부분의 분포형 모형은 강우의 시공간적 분포를 표현하기 위하여 지점 우량을 입력 자료로 사용하고 있으나 Vflo™ 모형은 지점 우량 외에도 격자형 레

*정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : hydrokbs@kict.re.kr)

**정회원 · 교신저자 : 노아솔루션(주) 기술연구소 · 공학석사 (E-mail : winnerbk@naver.com)

***정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : sookim@inha.ac.kr)

이더 자료를 입력할 수 있다. 지점 우량은 우량계 위치에 상관없이 시간적으로는 연속적이거나 공간적으로는 불연속적인 반면, 강우 레이더의 관측 자료는 측정할 수 있는 범위가 연속적이므로 특정 지역에 활용이 가능하여 최근에는 지점 우량과 강우 레이더 자료를 보정하여 물 순환과정 해석에 적용되고 있다. 김병식 등(2007)은 조건부 합성방법을 이용하여 레이더 강우와 지상 강우 자료를 보정하였고 이후 Kim 등(2008)은 임진강 레이더 강우 자료 보정시 조건부 합성방법을 적용하고 이를 Vflo™모형의 강우 입력 자료로 이용하여 안성천 유역에 대한 유출을 모의하였다. 박진형 등(2008)은 Vflo™모형에 레이더 강우를 적용하여 국내 적용 가능성을 검증하였으며 분포형 강우 생성을 위하여 미국 Oklahoma 대학과 수자원연구원에서 공동개발한 K-RainVieux프로그램(한국수자원공사, 2006)을 이용하였다. 이외에도 미계측 유역의 홍수 유출 모의(김병식 등, 2008) 또는 홍수예보에 적용(도시홍수재해관리기술연구사업단, 2005; 건설교통부, 2007)되는 등 최근까지 많은 연구에 이용되고 있다. 국외에서는 Vieux(2002)가 Vflo™모형의 구성과 특징을 설명하였으며 이후, 이들은 이 모형을 이용하여 타이완의 홍수예보시스템을 구축하였다. Hunter 등(2003)은 레이더 강우를 입력 자료로 하여 GSSHA모형과의 결과를 비교하였고 Vieux와 Bedient(2004)는 도시지역 수문 예측의 정확성을 평가에 Vflo™모형을 적용하는 등 점차 모형의 적용 범위를 넓혀가고 있다. 본 연구에서는 격자형 레이더 자료를 활용하여 강우의 시공간 분포를 반영하고 미계측 유역의 유출 모의, 홍수예보와 도시지역의 수문을 예측하는 등 그 활용범위가 확대되고 있는 Vflo™모형을 분석에 적용하였다.

한편, Vflo™모형과 같은 물리적 기반의 분포형 모형은 격자별로 구성된 지형특성 및 강우 자료로부터 초기 매개변수 값을 추정하여 유출을 모의하기 때문에 개념적, 경험적 의미가 큰 집중형 모형에 비하여 실측치에 더 근접한 결과 값을 얻을 수 있다. 일부 수자원연구자들은 분포형 모형이 물리적 모형이기 때문에 매개변수 최적화 과정을 생략하고 초기 매개변수를 그대로 사용하여야 한다고 주장하기도 한다. 그러나 일반적인 분포형 모형 또한 매개변수 최적화 과정인 모형 보정(calibration) 과정이 요구되며(Eckhardt와 Arnold, 2001; Zhiyu와 Ezio, 2002; Vieux, 2004) 이는 분포형 모형을 구성할 때 대상 유역을 일정한 크기의 격자로 분할하거나 지형자료를 구축하는 과정과 GIS 지형자료들의 초기값이 내포하고 있는 불확실성을 줄이기 위한 필요조건으로 설명할 수 있다. 따라서 각 매개변수에 대한 모형의 민감도 분석은 매개변수 최적화 과정인 모형 보정에 매우 중요한 과정으로 볼 수 있다. 다만, 매개변수 최적화 과정에서 집중형 모형은 매개변수들의 물리적 범위를 고려하지 않고 실측 수문곡선에 최대한 적합한 매개변수를 산정하나 분포형 모형에서는 각 매개변수가 적정한 범위 내에서 물리적 의미를 잃지 않도록 신중을 기해야 한다. 분포형 모형의 보정은 모의하고자 하는 각 유역 출구지점에서 체적과 침투유량이 관측치를 잘 재현할 수 있도록 격자단위별로 적용하며 이에 대하여 Vieux(2001), Vieux와 Moreda(2003)는 OPPA(Ordered Physics-based Parameter Adjustment) 방법을 들어 설명하였다. 이 방법은 매개변수별 상호 작용과 단계별로

최적화를 진행하여 매개변수의 범위가 큰 개념적 모형이 아니라 물리적이고 실질적인 매개변수의 적정 범위 내에서 적용하였을 때 타당한 방법으로(Vieux, 1998; White 등, 2002, 2003) 이 방법은 Vflo™모형에 이용되고 있다.

모형 보정의 목적은 대상유역에 대한 계절, 기간별 여러 강우 사상에 대한 일관성을 유지할 수 있는 매개변수 범위를 확보하는 데 있다. 따라서 모형을 구성하는 매개변수의 민감도 분석을 통해 각 매개변수들이 유출 모의에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

본 연구에서 선정한 Vflo™모형은 지표면 유출(Overland Flow)과 하도(Channel)에 대하여 각 매개변수들을 입력받아 유출과 홍수 추적을 실시한다. 이 모형은 ① 각각의 격자에 대하여 매개변수를 입력하고 ② 매개변수의 보정이 필요할 경우 각각의 격자 또는 해당 지점 상류의 격자를 선택한 후, ③ 선택된 격자의 해당 매개변수에 일정비율(0.01~5.0)까지의 보정계수 값을 곱하여 매개변수를 보정하게 된다. 본 연구에서는 각 지표면 유출 및 하도 추적에서 각각의 주요 매개변수가 결과에 어느 정도의 영향을 미치고 민감한지를 파악하기 위하여 모형의 유출량 산정과 하도 추적에 영향을 주는 매개변수에 대하여 보정계수에 따른 수문곡선의 형태, 유출량과 침투시간 등을 비교하여 민감도 분석을 실시하였다. 그러나 실제 강우 사상을 이용하는 경우, 하나의 침투값을 갖는 기본적인 형태의 수문곡선보다 훨씬 복잡한 형태의 수문곡선이 예상되어 각 매개변수의 정확한 민감도를 분석하는 데 지장을 초래할 것으로 판단하여 설계강우를 작성, 분석에 이용하였다. 설계강우는 중앙천 수계 하천정비기본계획(경기도, 1996)을 참고하여 재현기간 100년, 지속시간 6시간에 대하여 작성하였으며 이로부터 매개변수 변화에 따른 유출량 변화를 모의하였다. 그리고 민감도 분석 결과를 중앙천 유역의 실제 강우 사상에 적용하여 모형에 대한 보정과 검증을 실시하였다.

2. Vflo™ 분포형 수문모형

2.1 개념

미국 Oklahoma 대학에서 개발된 Vflo™모형은 물리적 기반의 분포형 수문모형으로 지표유출해석에는 운동파방정식(Kinematic Wave Equation)을 이용하고, 수치해를 구하기 위하여 공간적으로는 유한요소법(Vieux, 2001, 2002, 2004)을, 시간적으로는 유한차분 음해법을 사용한다. 하도망은 지형정보에서 유도된 유하방향도로부터 형성되며 하도망의 지형학적 특성은 유역과 수문곡선의 형태와 반응 특성을 결정한다. 지표, 하도, 저수지와 천수격자의 수리특성은 강우와 함께 수문모형의 입력 자료로 구성된다. 환경사의 하도와 하천 외 저류는 Modified Puls 및 Jones방정식을 이용하고 지표격자로부터 발생하는 유출은 하도추적과 연결되며 이 때, 하도추적은 실제 단면, 사다리꼴단면과 수위-유량곡선 등이 이용된다.

한편, Vflo™모형은 환경사에서의 부정류 흐름을 고려하기 위하여 하도요소에서 고리형 수위-유량관계곡선식을 이용하며 특히, 유속의 상승과 하강은 수문곡선에서 상승부나 하강부에서 유도되기 때문에 Jones 공식이 적용된다(Henderson,

1996). 환경사에서의 수리적 조건, 고리형 수위-유량 곡선은 최대 유출이 최대 수위에서 발생할 때 매우 중요한 영향을 미치는 요인이 된다(홍준범 등, 2006).

2.2 Vflo™ 모형의 지배방정식

Vflo™ 모형은 수학적 상사성을 지배 방정식으로 표현하기 위하여 운동과 상사(Kinematic Wave Analogy, KWA)를 이용한다. 단순화된 운동량방정식과 연속방정식으로 구성된 KWA는 매우 평평한 지역을 제외한 대부분의 유역과 배수(backwater)가 중요하지 않거나 영향이 적은 유역에서 주로 사용된다. 초과우량에 의해 발생하는 지표유출은 식 (1)과 같이 1차원 연속방정식의 형태로 표현한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = R - I \quad (1)$$

여기서 R : 강우강도(rainfall rate)

I : 침투율(infiltration rate)

h : 수리심(flow depth)

u : 직접유출속도(overland flow velocity)

KWA는 마찰경사를 이용하여 하상경사를 계산하는데 개수로 수리학에서는 이를 등류로 가정하여 산정한다. 식 (2)와 같이 Manning 공식을 이용하여 유속 u 와 수심 h 사이 관계를 표현하며 이 때, 유속과 수심은 지표면 경사와 조도계수의 영향을 받는다.

$$u = \frac{S_o^{1/2}}{n} h^{2/3} \quad (2)$$

여기서 S_o : 하상경사 또는 지표면 경사

n : 조도계수

시간에 대한 수심의 변화와 거리에 따른 유출률의 변화는 식 (1)과 (2)를 이용하여 식 (3)으로 나타낼 수 있고 하도구간 흐름에서 식 (1)은 수심 h 를 단면 A 로 치환하여 식 (4)와 같이 표현한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{S_o^{1/2}}{n} \frac{\partial h^{5/3}}{\partial x} = R - I \quad (3)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

여기서 Q : 하도에서의 유출률 또는 유량

q : 하도의 단이 길이당 측방유입율(lateral inflow per unit)

직접유출은 유출 흐름이 등류라는 가정 하에 식 (3)과 (4)로부터 계산되며 수치지도 형태로 구성된 격자기반의 토양도, 토지이용도, 지형도와 강우강도를 입력 자료로 하여 Vieux(1998), Vieux 등(1990)가 제안한 유한요소법(Finite element Method)으로부터 하천망(network)을 산정하게 된다.

3. 적 용

3.1 대상 유역

본 연구에서는 Vflo™ 모형의 매개변수 민감도를 분석하기 위하여 중랑천 유역을 대상유역으로 선정하였다. 중랑천은 동경 127° 03'~127° 08', 북위 37° 40'~37° 48' 사이에 위치하며(그림 1) 경기도, 의정부시와 서울시의 행정 구역을 다수 포함하고 있다. 중랑천 유역의 유역면적은 299.60 km²이며 유역연장은 34.80 km, 유역 평균폭과 평균고도는 각각 8.1 km, EL. 107.2 m이다. 서울특별시와 의정부시가 3/4 이상을 점하고 있는 고밀도 도시지역으로 농경지는 상류부의 제 1,2 지류 연변에 다소 분포하고 있으며, 하상 재료는 대부분 가는 모래와 굵은 모래로 구성되어 있다. 하폭은 하구부에서 330 m, 서울시계 부근에서 110 m 정도이고 하상의 평균 경사는 1/1,150이다(건설교통부, 2005).

3.2 Vflo™ 모형의 입력자료 구성

3.2.1 설계강우량 산정

본 연구에서는 중랑천 유역의 설계강우량을 산정하기 위하여 중랑천 유역에서 가까운 서울 지점을 선정하고 이에 대하여 “지역적 설계강우의 시간적 분포(건설교통부, 2000)” 분석 결과를 적용하여 설계강우량을 산정하였다. 이 때, 설



그림 1. 중랑천 위치

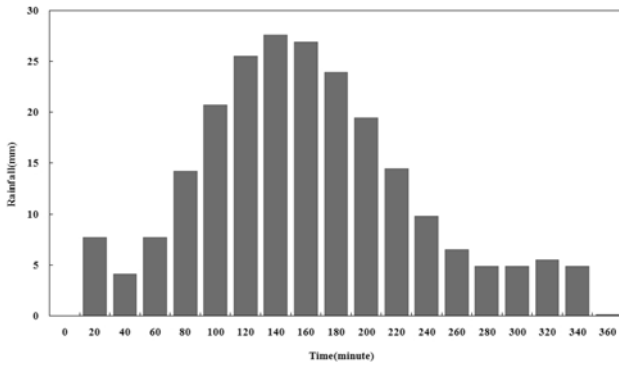


그림 2. 중랑천 유역의 설계강우(6시간)

계강우량의 시간적 분포를 위하여 Huff 4분위법을 사용하였으며 시간 간격은 6시간으로 산정된 설계강우 주상도는 그림 2와 같다.

3.2.2 지형자료의 입력

본 연구에서는 Vflo™모형을 구축하기 위하여 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 지형 자료를 이용하였다. 모형 구축시 사용된 지형 자료는 수치고도자료, 토지이용도, 토양종류별 토양도, 토양 배수분포별 토양도이다.

1) 흐름방향 (Flow direction) 및 경사도

Vflo™ 모형의 가장 기본적인 지형 입력 자료는 흐름방향 (Flow Direction)이다. 일반적으로 입력되는 격자의 크기가 지나치게 작을 경우 컴퓨터의 계산 용량 초과 및 계산 시간의 효율성을 떨어뜨리는 것으로 알려져 있다(홍준범 등, 2006). 이에 본 연구에서는 중랑천 유역면적을 고려하여 30 m DEM을 격자크기 300 m DEM으로 재구성한 후 이로부터 흐름 방향과 유역 내 각 격자의 경사를 산정하였다. 그림 3은 300 m로 재구성된 중랑천 유역의 DEM과 이로부터 획득한 흐름방향과 경사도를 나타낸 것이며 그림 4는 Vflo™ 모형에 입력된 흐름방향을 나타낸 것이다. 그림 4에서 녹색의 화살표 선은 격자의 흐름 방향을 나타내며 파란색 화살표 선은 유역의 하천망을 의미한다.

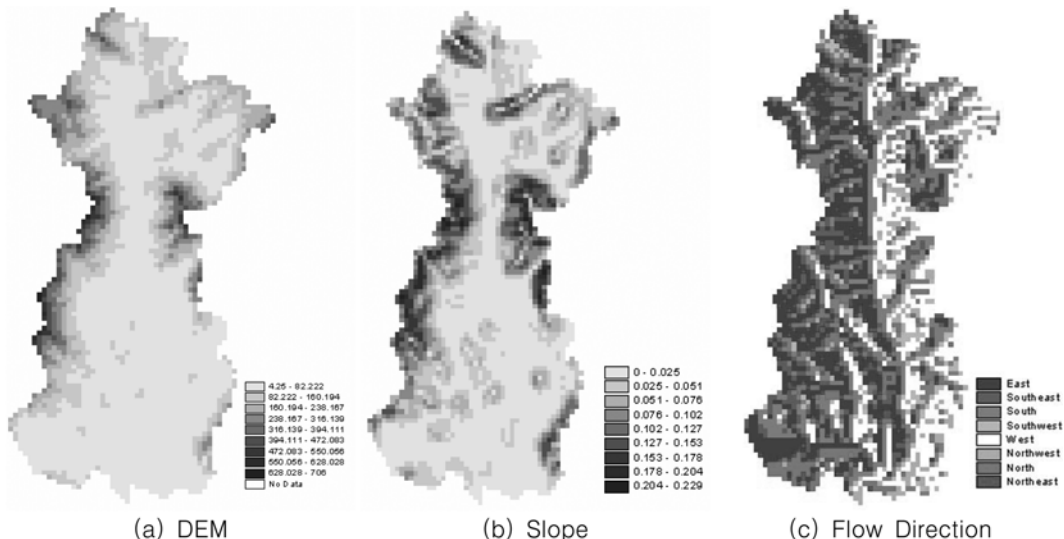


그림 3. 중랑천 유역의 지형 특성

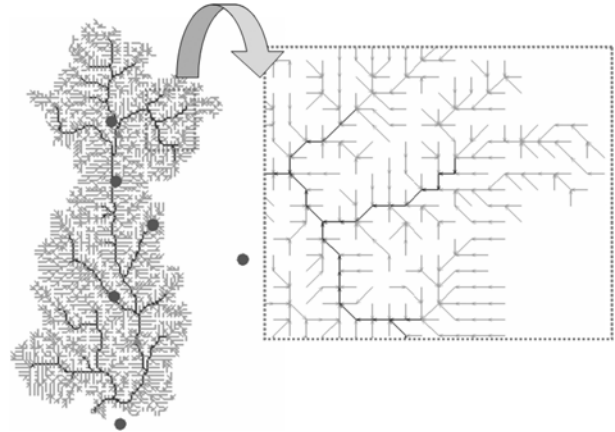


그림 4. Vflo™ 모형에 입력된 중랑천의 흐름방향

표 1. 토지이용에 따른 조도계수와 불투수율

Value	Description	Roughness coefficient ¹⁾	Impervious ²⁾
1	Water Area	0.030	1.000
2	Urbanization	0.015	0.742
3	Eroded Area	0.035	0.442
4	Wetland	0.050	0.241
5	Grassland	0.150	0.440
6	Forest	0.100	0.130
7	Farmland	0.035	0.391

1) Distributed Hydrologic Modeling Using GIS(Vieux, 2004)

2) IKONOS 위성영상을 이용한 토양포장현황 분석(사공호상 외)

2) 조도계수

조도계수는 토지이용 또는 식생의 상태에 따라 그 값이 달라지며 일반적으로 토지이용도나 위성측정 자료로부터 획득할 수 있다. 본 연구에서는 대상유역인 중랑천 유역의 30 m 토지이용도(2000년 기준)로부터 조도계수를 산정하였으며, 이를 흐름 방향과 같은 격자크기인 300 m로 재구성하였다. 그리고 각 토지이용에 대한 조도계수와 불투수율을 고려하기 위하여 표 1에 나타난 토지이용별 조도계수¹⁾를 Vflo™ 모형에 입력하였다. 그림 5는 중랑천 유역의 토지이용도와 이를 근거로 산정된 조도계수이다.

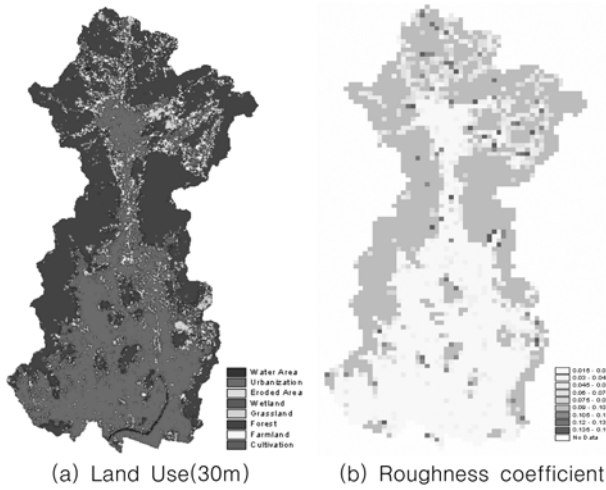


그림 5. 중랑천 유역의 토양 특성

3) 침투 요소

침투율은 유역의 총 유출체적에 영향을 주는 요소로 Vflo™ 모형은 침투율을 산정하기 위하여 일정비율법(constant rate method)과 Green-Ampt 방법을 지원하고 있다. 본 연구에서는 Green-Ampt 방법을 이용하여 중랑천 유역의 침투율 산정하고자 하였으며 이에 따라 중랑천 유역의 토양도(그림 6 (b))와 토양별 토양 깊이(표 2)와 침투계수(표 3)를 적용하여 수리전도도(hydraulic conductivity), 습윤전선(wetting front suction), 유효공극률(effective porosity)과 토

양심도(soil depth)를 산정하였다(그림 6 (d), (e)와 (f)). 토지이용에 따른 불투수율은 표 1의 불투수율 계수²⁾를 이용하여 그림 6 (a)와 같이 산정하였으며 초기 포화도(initial saturation)는 “0”으로 가정하였다.

4. 민감도 분석

Vflo™ 모형은 지표면 유출(Overland Flow)과 하도(Channel)에서 각 매개변수들을 입력받아 유출과 홍수 추적을 실시한다. 주요 매개변수로는 유역 내 침투와 관련한 수리전도도, 토양 특성과 하도 및 지표면에서 유출량 추적에 필요한 조도계수를 언급할 수 있다. 본 연구에서는 각 지표면 유출과 하도 추적에서 주요 매개변수가 결과값에 미치는 영향을 분석하여 매개변수별 민감도를 평가하였다. 여기서, 매개변수 보정 비율 1.0은 초기 입력값을 그대로 사용(모형 보정 전)한 것이며, 1.0을 기준으로 작거나 큰 비율은 선택한 격자에 이들 비율만큼을 곱함으로써 작거나 크게 보정된 매개변수(모형 보정 후)가 입력되었음을 의미한다. 단, 토양 깊이와 습윤전선(wetting front suction)은 침투유량에 대하여 어느 정도 차이를 나타내었으나 수리전도도에 비하여 민감도가 적은 것으로 나타나 그 결과를 생략하였다.

4.1 수리전도도에 대한 민감도 분석

수리전도도는 많은 경우-유출 모형에서 토양내 침투량을

표 2. 토양도에 따른 토양 깊이 (Vieux와 Koehler, 2005)

Value	Description	Soil Depth (cm)	Value	Description	Soil Depth (cm)
0	No data	50	6	Shallow/Moderate	75
1	Very Deep	200	7	Shallow	20
2	Very Deep/Deep	175	8	Very Shallow	25
3	Deep	150	49	Rocky land	10
4	Moderate/Deep	125	No data		50
5	Moderate	100			

표 3. 토양도에 따른 침투계수 (Vieux와 Koehler, 2005)

Value	Description	Effective Porosity	Wetting Front (cm)	Saturated Hydraulic Conductivity (cm)
0	No data	0.361	15.945	0.595
1	Sandy Loam/Sands	0.415	7.980	6.435
2	Clay Loam/Silty Clay Loam	0.371	24.090	0.100
3	Sandy Loam (with gravels)	0.412	11.010	1.090
4	Sandy Loam/Clay	0.399	21.320	0.560
6	Silty Clay Loam/Clay	0.409	29.465	0.065
7	Clay Loam/Clay	0.347	26.255	0.065
8	Sandy Loam (with gravels)	0.412	11.010	1.090
14	Sandy Loam/Clay Loam	0.361	15.945	0.595
15	Clay Loam (with gravels)	0.309	20.880	0.100
16	Clay Loam/Silt	0.393	18.780	0.375
17	Clay Loam	0.309	20.880	0.100
49	Rocky Land	0.010	0.000	0.000
No data		0.361	15.945	0.595

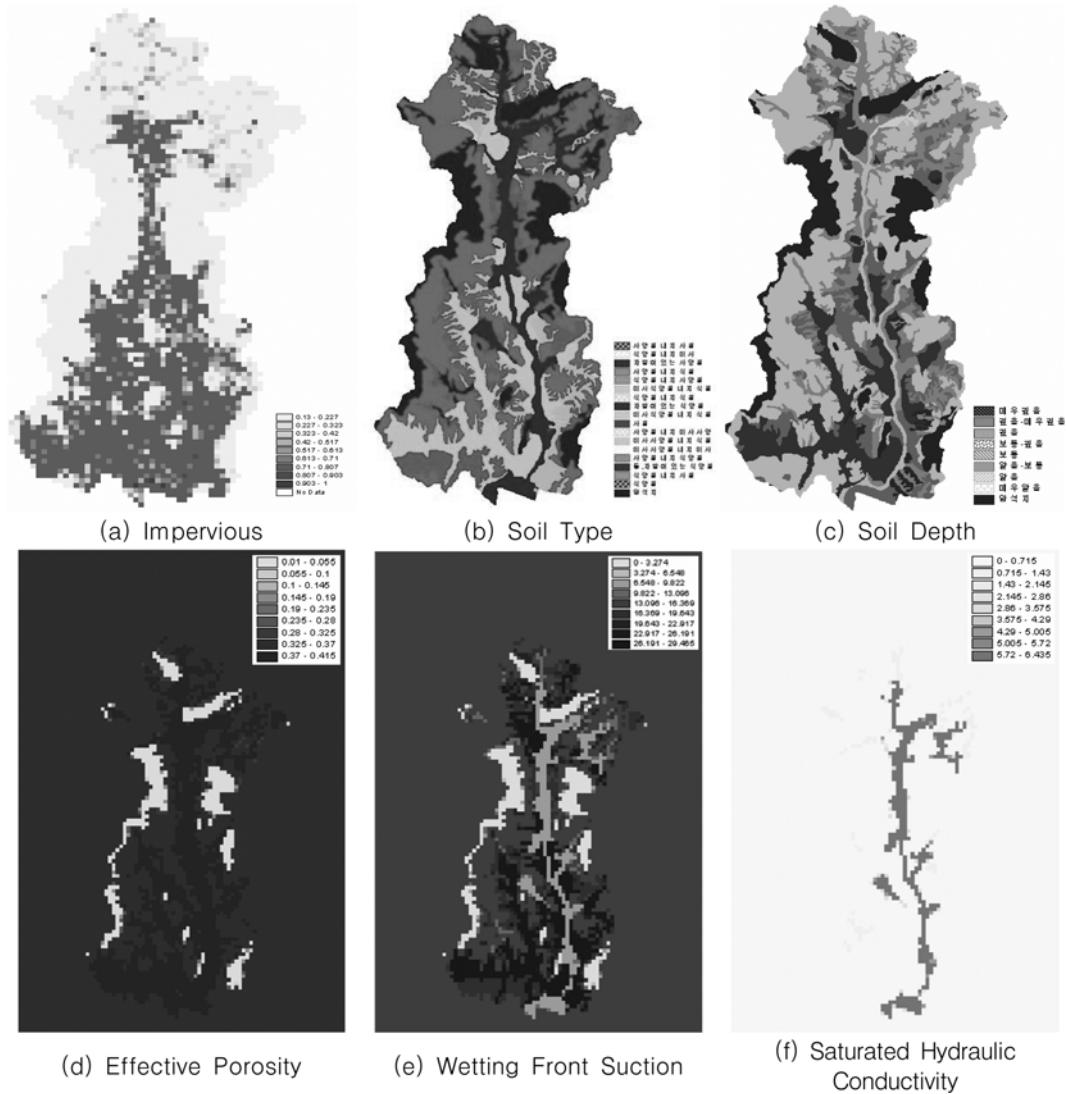


그림 6. 중량천 유역의 침투요소

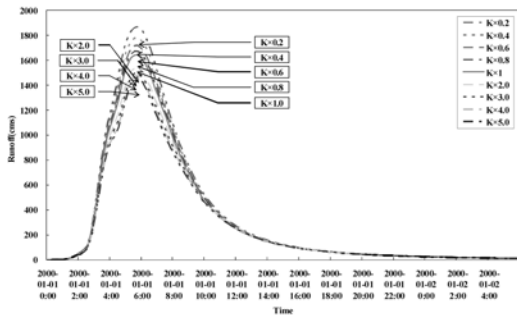
결정하여 수문곡선에서 전체 유출량에 관여하는 매개변수로 대상유역에서 발생하는 홍수의 총 체적을 정확하게 결정하기 위해서는 초기 입력자료는 물론, 이 매개변수의 최적화 또한 중요하다고 볼 수 있다.

vflo™모형은 대상유역 내 각 격자가 가지는 토양 종류별 수리전도도를 사용자가 직접 입력하여 초기값을 설정할 수 있으며, 모형 내 입력되는 토양 종류별 수리전도도와 기타 토양의 수리학적 특성은 표 3에 제시하였다. 앞서 설명한 것과 같이 매개변수 보정 시 비율 1.0은 모형 보정 전으로 초기 입력값을 그대로 사용함을 의미한다. 매개변수 최적화를 위하여는 1.0을 기준으로 작거나 큰 값을 설정할 수 있는데 1.0보다 작은 값으로 설정하는 경우 초기 매개변수에 해당 값을 곱함으로써 초기 매개변수보다 작게, 1.0보다 큰 값으로 설정하는 경우에는 초기 매개변수보다 크게 변경되는 것이다. 예를 들어 사용자가 1.0보다 작은 0.9로 설정하였다면, 모형 내 입력된 초기 매개변수에 0.9를 곱하여 더 작은 값이 입력되는 것이다.

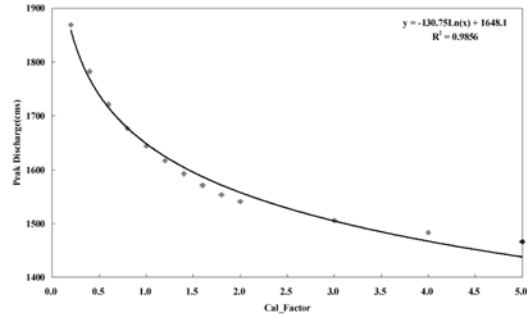
보다 정확한 민감도 분석을 수행하기 위해서는 각 보정계수에 대한 유출량을 모의하여야 하나, 분포형 모형의 특성상 모의에 소요되는 시간이 상당하므로 민감도 분석에는 부적합할 것으로 판단되어 0~2.0범위에서는 0.2 단위로, 2이상

의 범위에서는 1.0 단위로 보정계수를 변화시키며 입력된 설계강우에 대한 유출량 모의를 실시하였다. 한편, 수리전도도는 모형 내에서 강우로부터 침투에 미치는 영향이 큰 항목으로 하도 격자보다는 지표면(overland)에서의 영향력이 더 클 것으로 판단하여 지표 격자에서의 민감도 분석을 실시하였다. 각 보정계수에 대한 유출수문곡선을 정리한 결과는 그림 7과 같다.

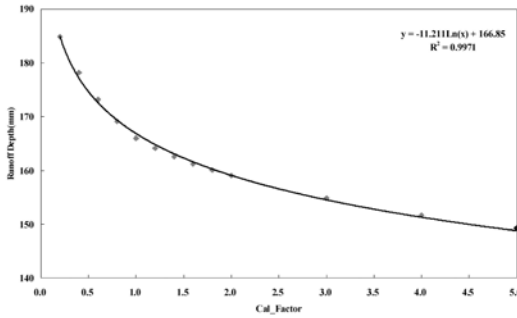
그림 7 (a)는 수리전도도(K)값에 보정계수를 적용한 결과를 나타낸 것으로 보정계수가 초기값보다 작을 경우에는 침투유량이 증가하였고 초기값보다 클 경우에는 침투유량이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 수문곡선의 상승부나 하강부의 꼬리부분에서 전체 수문곡선이 거의 일치하는 결과를 보였다. 이로부터 수리전도도가 유출량 생성 과정에서 수문곡선 형태보다는 침투유량의 변화를 통한 전체 유출량을 조절하는 역할을 하고 있음을 확인할 수 있었다. 수리전도도의 각 보정계수별 침투유량과 유출고의 변화를 분석한 결과, 그림 7 (b)와 (c)에 나타난 것처럼 보정계수가 커짐에 따라 침투유량과 유출고가 각각 최대 400 cms, 300 mm 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 이는 수리전도도가 토양 내에서 물입자의 이동을 조절함으로써, 그 값이 작을수록 토양 내 수분 이동이 어려워져 지표면으로 유하되는 유출량이 증가



(a) 수리전도도 변화에 따른 유출 수문곡선

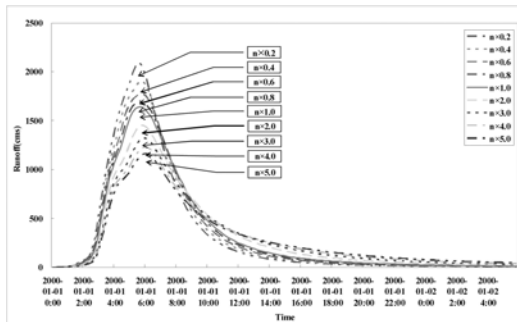


(b) 수리전도도 변화에 따른 침투유량 변화

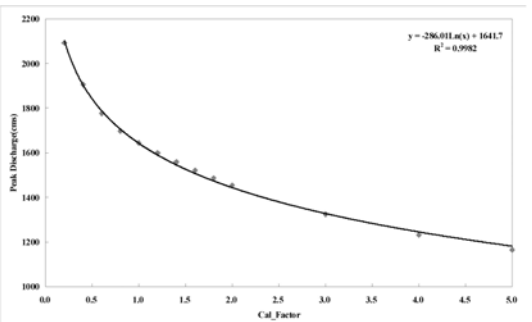


(c) 수리전도도 변화에 따른 유출고 변화

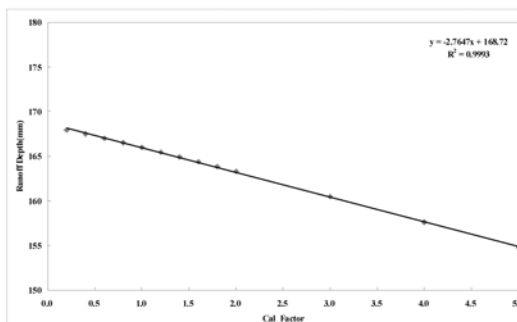
그림 7. 수리전도도의 민감도 분석



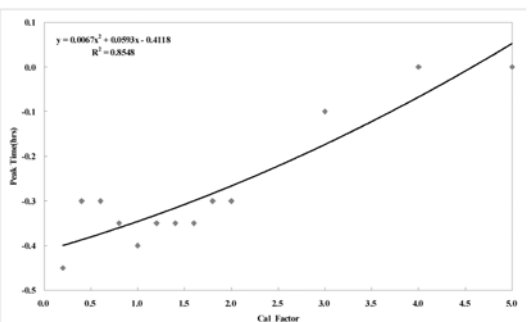
(a) 지표면 조도계수 변화에 따른 유출 수문곡선



(b) 지표면 조도계수 변화에 따른 침투유량 변화



(c) 지표면 조도계수 변화에 따른 유출고 변화



(c) 지표면 조도계수 변화에 따른 도달시간 변화

그림 8. 지표면 조도계수의 민감도 분석

되기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 조도계수에 대한 민감도 분석

조도계수는 지표면과 하천에서 유출되는 물의 흐름을 결정하는 요소들 중 하나로 지표면 조도계수와 하천 구간 조도계수가 수문곡선에 서로 다른 영향을 미칠 것으로 판단되어 본 연구에서는 지표면과 하천 구간 조도계수 변화에 따른 민감도 분석을 실시하였다.

4.2.1 지표면 조도계수의 민감도 분석

침투유량과 지체시간 등 수문곡선의 모양에 관여하는 조도계수는 유출된 물의 이동과 관련이 깊은 매개변수로 각 보정계수에 대한 유출수문곡선, 침투유량과 유출고 외에도 도달시간의 변화를 추가로 분석하여 그림 8에 나타내었다.

그림 8 (a)는 지표면 조도계수의 변화에 따른 수문곡선을 나타낸 것으로 조도계수 값이 작아질수록 침투유량 값이 커지는 것으로 나타나 수리전도도 변화와 비슷한 형태를 보였다. 그러나 수문곡선 형태에서 차이를 보였는데 수리전도도에서는 침투유량 변화만 나타났으나, 조도계수 변화에서는 조도계수가 커질수록 수문곡선 상승부 유량은 감소하고 하

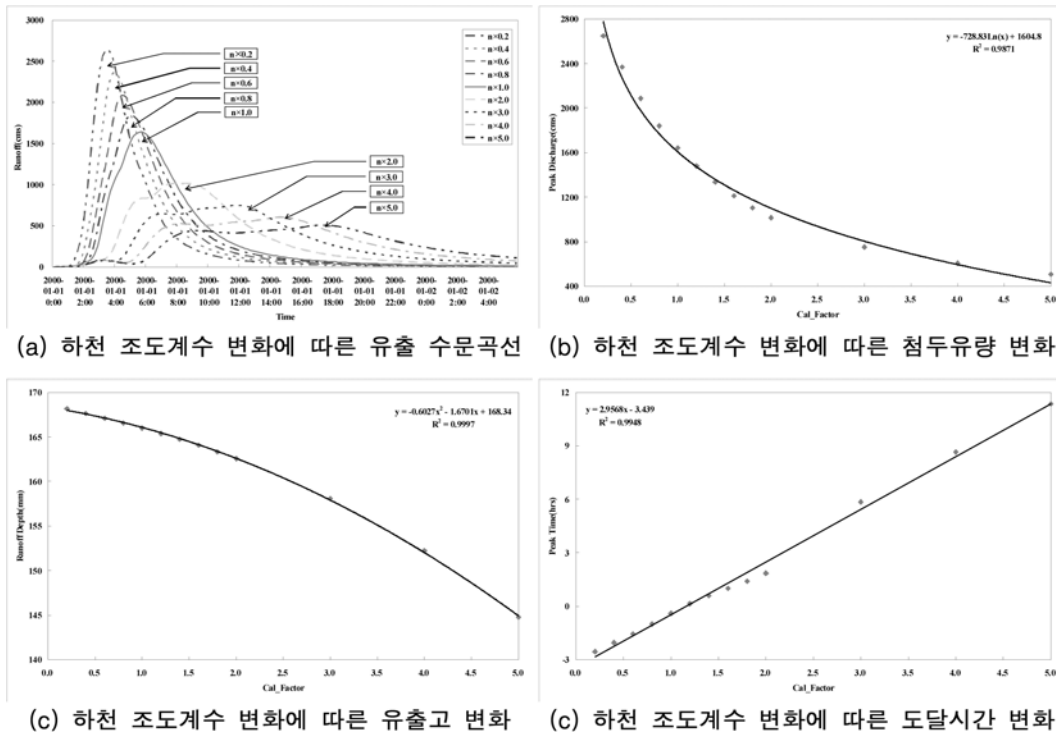


그림 9. 하천 조도계수의 민감도 분석

상부에서는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 조도계수 변화에 따른 수문곡선 변화를 더 자세히 평가하기 위하여 침투유량, 유출고와 도달시간 변화를 분석하여 각각 그림 8 (b), (c)와 (d)에 제시하였다. 이들 분석 결과에 따르면 조도계수가 변함에 따라 침투유량은 최대 1000 cms에 달하는 큰 차이를 보였으나 전체 유출고는 약 10 mm 가량의 차이를 나타내었다. 앞서 분석한 수리전도도 변화에 따른 수문곡선 변화 결과와 비교하면, 침투유량에서는 수리전도도보다 큰 차이를 보였으나 유출고에서의 차이는 크지 않았다. 이와 같은 결과로부터 지표면의 흐름에 영향을 주는 조도계수는 전체적인 유출체적보다는 수문곡선 형태에 더 민감한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 조도계수의 변화에 따른 도달시간의 경우 0.5시간(30분)가량 늦어지는 것으로 확인되었다. 위 결과를 종합하여 볼 때, 지표면 조도계수의 경우 전체 유출량보다는 수문곡선의 형태, 특히 침투유량 값에 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

4.2.2 하천 조도계수의 민감도 분석

앞서 분석한 지표면 흐름에서의 조도계수 변화에 따른 수문곡선 변화 분석과 같이 유역 내 하도 구간에서의 조도계수 변화에 따른 수문곡선의 민감도 분석을 실시한 결과, 이 매개변수는 보정계수에 따른 수문곡선의 변화가 가장 두드러지는 것으로 확인되었다.

그림 9 (a)는 조도계수에 대한 보정계수의 변화에 따른 수문곡선의 변화를 정리한 것으로 조도계수가 큰 값을 가질수록 침투시간은 길어지나 침투유량은 매우 작게 나타났고 그 변화양상이 뚜렷하여 앞서 분석한 수리전도도나 지표면 조도계수보다 더 큰 민감도를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

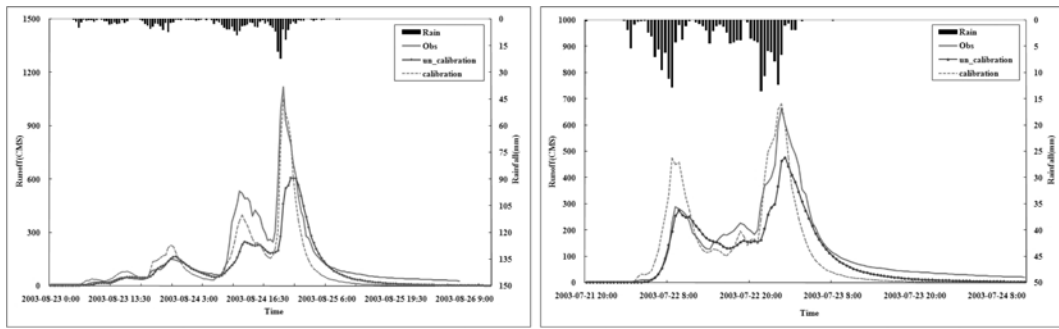
하천조도계수에 대한 침투유량, 유출고와 도달시간에 대한 결과를 분석한 결과, 그림 9 (b)침투유량의 경우, 조도계수

보정에 따라 침투유량은 최대 2000 cms 차이를 보여 민감도 분석을 실시한 매개변수 중 최고 민감도를 나타내었다. 그러나 그림 9 (c) 유출고 즉, 유출 총량의 보정계수에 따른 차이는 최대 20 mm가량에 불과하였고 그림 9 (d) 도달시간은 조도계수에 따라 최대 15시간 가까이 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 이들 결과로부터 하천 구간에서 조도계수가 전체 유출량에는 큰 영향을 미치지 않으나 침투유량과 도달시간에 대하여는 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 즉, 하도 구간의 조도계수는 전체 유출량 보다는 유출곡선의 형태에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수로 볼 수 있다.

5. Vflo™모형의 보정 및 검증

본 절에서는 중랑천 유역에 실제 강우 자료를 적용하여 앞서 분석한 Vflo™모형의 주요 매개변수별 민감도를 고려하여 매개변수 최적화를 실시하였다. 이를 위하여 중랑천 유역에 위치한 상계, 송정, 우이, 장암과 의정부 관측소(그림 1)의 30분 강우 자료를 이용하고 강우의 격자 분포를 위하여 크리깅 기법을 적용하였다. 강우 공간분포에는 지형 자료와 같은 크기인 300 m격자로 구성하였으며 모형 보정기간은 2003년 8월 23일~8월 26일로 하였으며 검증 기간은 2003년 7월 21일~7월 24일이다. 모의 지점은 중랑교 지점으로 앞서 실시한 민감도 분석 결과에 따라 가장 영향력이 큰 것으로 분석된 수리전도도와 조도계수를 이용하여 전체적인 홍수유출량과 수문곡선의 모양을 보정하였다. 그림 10에는 실제 강우 사상을 적용한 Vflo™모형의 보정 및 검증 결과를 나타내었으며 표 4에는 모형 보정 결과(2003년 8월 23일~8월 26일)를 정리하였다.

한편, 민감도 분석 결과에 따른 모형 보정 전과 후의 결과를 보다 정량적으로 비교하기 위하여, 각 모형의 모의 결



(a) 모형의 보정 (2003년 8월 23일 ~ 8월 26일) (b) 모형의 검증 (2003년 7월 21일 ~ 7월 24일)

그림 10. 실제 강우 사사를 적용한 Vflo™ 모형의 보정 및 검증 결과

표 4. 중랑천 유역의 Vflo™ 모형의 보정 및 검증 결과

구분	최소		평균		최대	
	보정전	보정후	보정전	보정후	보정전	보정후
조도계수	0.015	0.005	0.07	0.038	0.15	0.083
수리전도도(cm/hr)	0.0	0.0	1.25	0.9	6.43	6.43
경사(%)	0.001		5.498		22.933	
Wetting Front Suction (cm/hr)	0.0		15.13		29.46	
Effective Porosity	0.01		0.33		0.415	
Soil Depth	10.0		80.0		200.0	
Impervious	0.13		0.346		0.742	

표 5. Vflo™ 모형 보정 전·후의 오차계산 결과

구분	MRE		FSE	
	보정전	보정후	보정전	보정후
호우사상				
2003/07/21(검증)	-0.24	-0.17	0.04	0.05
2003/08/23(보정)	-0.29	-0.22	0.07	0.04

과에 대하여 MRE(Mean Relative Error)와 FSE(Fractional Standard Error)를 산정하였다. 오차에 사용된 계산식은 다음 식 (5)와 (6)과 같다.

$$MRE = \frac{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} (S_i - O_i)}{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} O_i} \quad (5)$$

$$FSE = \frac{\frac{1}{N_i} \left[\sum_{i=1}^{N_i} (S_i - O_i)^2 \right]}{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} O_i} \quad (6)$$

여기서, S_i 는 모의치이며, O_i 는 관측치이다.

MRE 통계치를 보면 보정과 검증에 사용된 두 사상에 대하여 음의 값을 나타내어 실제 수문곡선보다 다소 적게 모의되고 있는 것으로 나타났으나 침투홍수량과 도달시간은 개선되었고 전반적으로 보정 전보다 보정 후의 오차가 대체적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 중랑천 유역에 Vflo™모형을 적용하여 주요 매개변수의 민감도 분석을 실시하였다. 이 때, 재현기간 100년, 지속시간 6시간을 갖는 Huff 4분위법을 이용하여 설계강우를 작성하고 이를 모형에 적용하여 침투값을 하나만 갖는 이상적인 수문곡선으로부터 유출 변화를 모의하였다. 분포형 모형을 구성하는 매개변수는 수리전도도, 조도계수를 포함하여 토양층 깊이(soil depth)와 습윤전선(wetting front suction), 강수량 등이다. 그러나 강수량의 경우 지점 관측값을 공간분포한 후 사용하였고 토양층 깊이와 습윤전선 매개변수는 침투유량에서 어느 정도 차이를 보였으나 변화폭이 크지 않은 것으로 나타나 그 결과를 생략하였다.

분포형 모형인 Vflo™모형의 민감도 분석결과에 따르면 수리전도도는 유역전체 유출고에 관여하였고, 지표면 조도계수는 수문곡선 형태를 조절하여 침투시간의 변화없이 침투유량 값에만 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 유역 유출과 흐름에 영향을 주는 각 매개변수가 특성상, 수리전도도는 침투에 영향을 미치고 하도 구간 조도계수는 어떠한 규모의 유출량 흐름에 영향을 주기 때문인 것으로 해석할 수 있다. Vflo™ 모형을 이용하여 강우-유출 모의 시 정확한 결과에 도달하기 위하여 앞서 언급한 세 매개변수의 조합에 많은 주의를 기울일 필요가 있다.

한편, 중랑천 유역에 실제 호우사상을 적용하여 민감도 분석 결과에 따라 모형에 대한 보정과 검증을 실시한 결과, 매개변수 보정 전보다 보정 후 오차가 감소하였으며 수문곡선의 침투값과 도달 시간을 정확히 모의하는 것을 확인할 수

수 있었다.

Vflo™ 모형을 이용하여 유출모의를 할 경우, 본 연구의 결과를 토대로 매개변수 보정 시 우선적으로 ① 유역 내 수리전도도를 보정하여 유역 내 전체 유출량을 산정한 후 ② 지표면 조도계수로부터 유출곡선의 첨두유량과 ③ 하도 구간 조도계수로부터 첨두시간에 대한 매개변수 최적화 과정 순에 따른다면 Vflo™ 모형을 이용하여 보다 쉽게, 정확한 유출분석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

건설교통부(2000) 지역적 설계강우의 시간적 분포.
 건설교통부(2005) 강우레이더에 의한 돌발홍수에보시스템 개발(1차년도).
 건설교통부(2006) 강우레이더에 의한 돌발홍수에보시스템 개발(2차년도).
 건설교통부(2007) 강우레이더에 의한 돌발홍수에보시스템 개발(3차년도).
 경기도(1996) 중랑천수계 하천정비기본계획.
 과학기술부(2004) 21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발사업-지표수 수문성분 해석기술 개발.
 국토해양부(2009) 기후변화 대비 국가 물 안보 확보방안(2차년도).
 김병식, 배영혜, 박정술, 김경탁(2008) 레이더 강우와 분포형 수문모형을 이용한 미계측 유역의 홍수 유출모의. 임진강 유역, 한국지리정보학회지, 한국지리정보학회, 제11권, 제3호, pp. 52-67.
 김병식, 홍준범, 김형수, 최규현(2007) 조건부 합성방법을 이용한 레이더 강우와 지상 강우 자료의 조합, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 255-265.
 김성준(1998) 격자기반의 운동과 강우유출모형개발(1) 이론 및 모형-, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 303-308.
 도시홍수재해관리기술연구사업단(2005) Geostatistical 기법을 이용한 레이더 강우산정과 유출연계해석.
 박진혁, 강부식, 이근상, 이을래(2008) 레이더 강우와 Vflo모형을 이용한 남강댐유역 홍수유출해석, 한국지리정보학회지, 한국지리정보학회, 제19권, 제3호, pp. 13-21.
 사공호상, 정한용, 황승미(2003) IKONOS 위성영상을 이용한 토양포장현황 분석, 춘계 워크숍 및 학술대회 논문집, 한국지리정보학회.
 한국수자원공사(2006) 레이더 강수를 이용한 단기강수 및 유출 예측시스템 개발(3차년도).
 홍준범, 김병식, 윤석영(2006) Vflo™모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제26권, 제6B호, pp. 613-622.
 Beasley, D.B. and Huggins, L.F. (1980) ANSWERS: Users Manual, EPA 905/982-011, U.S. Environmental Protection Agency, Chicago, IL.
 Danish Hydraulic Institute (1998) MIKE SHE Water Movement - User Guide and Technical Reference Manual, Edition 1.1., Danish Hydraulic Institute(DHI).
 Downer, C.W. and Ogden, F.L. (2002) GSSHA user's manual, Grid-

ded Surface subsurface hydrologic analysis version 1.43 for WMS 6.1. ERDC Technical Report, Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS.
 Eckhardt, K. and Arnold, J.G. (2001) Automatic calibration of a distributed catchment model, *Journal of Hydrology*, Vol. 251, No. 1, pp. 103-109.
 Henderson, F.M. (1996) *Open Channel Flow*, MacMillan & Co., New York, USA.
 Hunter, S., Vieux, B., Ogden, F., Niedzialek, J., Downer, C., Addiego, J., and Daraio, J. (2003) A test of two distributed hydrologic models with WSR-88D Radar precipitation data input in Arizona, *31st Intl. Conf. on Radar Meteorology*, 6-12 Aug., Seattle, Washington.
 Kim, B.S., Kim, B.K., and Kim, H.S. (2008) Flood simulation using the gauge-adjusted radar rainfall and physics-based distributed hydrologic model, *Hydrologic Processes*, Vol. 22, pp. 4400-4414.
 Vieux, B.E. and Moreda, F.G. (2003) Ordered physics-based parameter adjustment of a distributed model, *Water Science and Application Series*, Vol. 6, *American Geophysical Union*, pp. 267-281, ISBN 0-87590-355-X.
 Vieux, B.E. (1998) *Finite Element Analysis of Hydrologic Response Areas Using Geographic Information Systems*, A dissertation submitted in partial fulfillment for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Agricultural Engineering, Michigan State University, pp. 199.
 Vieux, B.E. (2004) *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*, Kluwer Academic Publishers.
 Vieux, B.E. and Koehler, E. (2005) *Vflo™ Model Advanced Training*.
 Vieux, B.E. (2001) *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*, ISBN 0-7923-7002-3, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, *Wat. Sci. Tech. Series*, Vol. 38. pp. 293.
 Vieux, B.E. (2004) *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS, Second Edition*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
 Vieux, B.E. and Bedient, P.B. (2004) Assessing urban hydrologic prediction accuracy through event reconstruction, *Journal of Hydrology*, Vol. 299, pp. 217-236.
 Vieux, B.E., Bralts, V.F., Segerlind, L.J., and Wallace, R.B. (1990) Finite element watershed modeling: one-dimensional elements, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 6, pp. 803-819.
 Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2002) Vflo™: A real-time distributed hydrologic model, *Proceedings of the Second Federal Inter-agency Hydrologic Modeling Conference*, July 28-August 1.
 White, L.W., Vieux, B.E., and Armand, D. (2002) Surface flow model: inverse problemes and predictions, *Advance in Water Resources*, Vol. 25, No. 3, pp. 317-324.
 White, L.W., Vieux, B.E., and Armand, D. (2003) Estimation fo optimal parameters for a surface hydrology model, *Advance in Water Resources*, Vol. 26, pp. 337-348.
 Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D., and Anderson, W.P. (1989) AGNPS: A nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watesheds, *Journal Soil Water Conservation*, Vol. 50, pp. 484-489.
 Zhiyu, L. and Todini, E. (2001) Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6, No. 5, pp. 859-881.

(접수일: 2009.3.27/심사일: 2009.6.4/심사완료일: 2009.7.27)