

## 분포형 모형의 다지점 보정 모듈 개발 \*

– GRM 모형을 중심으로 –

최윤석<sup>1\*</sup> · 최천규<sup>1</sup> · 김경탁<sup>1</sup>

## Development of a Multi-Site Calibration Module of Distributed Model \*

– The Case of GRM –

Yun-Seok CHOI<sup>1\*</sup> · Cheon-Kyu CHOI<sup>1</sup> · Kyung-Tak KIM<sup>1</sup>

### 요 약

분포형 모형은 유역내에서 공간 분포된 임의 지점의 유출해석 결과를 손쉽게 얻을 수 있다. 이때 다양한 특성을 가지는 소유역으로 구성된 유역의 경우, 소유역에 대해 신뢰성 있는 유출량을 얻기 위해서는 소유역별로 보정된 모형을 적용해야 한다. 본 연구에서는 관측 유량자료가 있는 소유역별로 모형을 보정할 수 있는 다지점 보정 기술을 개발하였다. 이를 위해서 다지점 보정 대상 매개변수의 선정 및 적용 방법과 소유역 네트워크 정보를 설정하는 방법을 제시하였다. 또한 다지점 보정 모듈을 구현하기 위한 클래스를 설계하고 GUI를 개발하였으며, 소유역별로 설정된 매개변수를 이용한 유출해석 절차를 정립하였다. 다지점 보정 모듈을 낙동강 수계 선산 유역(977km<sup>2</sup>)에 적용하였다. 적용결과 다지점 보정 모듈은 유역내 소유역에 대한 모형의 보정에 효과적으로 적용할 수 있었으며, 다지점 보정에 의해서 소유역의 유출해석 결과를 향상시킬 수 있었다.

주요어 : 다지점 보정, 분포형 모형, 소유역 매개변수, 강우-유출

### ABSTRACT

A distributed model can easily obtain discharge at any grids spatially distributed in a watershed. But if there are subwatersheds which have various characteristics in a watershed, it is needed to apply a model calibrated at each subwatershed to obtain reliable simulation results for each subwatershed. In this study, a multi-site calibration

2012년 6월 28일 접수 Received on June 28, 2012 / 2012년 8월 16일 수정 Revised on August 16, 2012 / 2012년 8월 28일 심사완료 Accepted on August 28, 2012

\* 본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발 사업인 '중·소하천 홍수 예·경보 체계 구축' 과제[NEMA-Nature-2011-45]와 기초기술연구회의 일반사업인 위성자료 활용지원 운영사업(과제명-위성영상을 이용한 하천정보 생산 및 활용에 관한 연구)의 연구비지원에 의해 수행되었음.

1 한국건설기술연구원 수자원연구실 Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

※ Corresponding Author E-mail : yschoi51@kict.re.kr

module that can calibrate a distributed model at each subwatershed using observed flow data was developed. Methods to select multi-site calibration parameters, to apply subwatershed parameters, and to set subwatershed network information are suggested. Classes to implement multi-site calibration technique are designed and a GUI was developed, and procedures for runoff modelling using subwatershed parameters were established. Multi-site calibration module was applied to Sunsan watershed(977km<sup>2</sup>) of Nakdong river basin. Application results showed that the multi-site calibration technique could be applied effectively to model the calibration for each subwatershed, and the simulation results of subwatershed were improved by the application of multi-site calibration.

**KEYWORDS :** *Multi-Site Calibration, Distributed Model, Subwatershed Parameters, Rainfall-Runoff*

## 서론

분포형 모형은 입력자료의 공간분포를 반영하여 모형을 구축하며, 소유역 및 유역내 임의 지점의 유출량을 손쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다(Ajami *et al.*, 2004). 물리적 분포형 모형에서 지배방정식이 유역의 실제 수문 현상을 정확히 해석할 수 있고, 매개변수가 유역의 물리적 및 수문학적 상황을 정확히 반영할 수 있다면 모형의 보정 없이도 유역내 임의 지점의 유출량을 잘 해석할 수 있을 것이다. 그러나 지배방정식은 실제 현상을 개념화하고 있으며, 매개변수 또한 스케일 문제 및 관측오차 등으로 인해서 불확실성을 내포하고 있으므로 물리적 분포형 모형의 적용을 위해서는 모형의 보정이 필요하다(Abbott *et al.*, 1986; Beven and Binley, 1992; Refsgaard and Storm, 1996; Sahoo *et al.*, 2006).

분포형 모형을 이용한 기존의 강우-유출 해석(박진혁과 허영택, 2008; 정인균 등, 2008; Shafii and Smedt, 2009; 최윤석 등, 2010)에서는 대상 유역에 대해서 동일한 격자 크기를 가지도록 입력자료를 구축하고, 유역 최하류에서 관측된 수문곡선을 이용하여 보정된 하나의 매개변수군을 이용하여 유출해석을 수행하였다. 그러나 유역내에는 다양한

지형적, 수문학적 특성을 가짐으로써 유출특성이 상이한 소유역이 포함될 수 있다. 이와 같이 상이한 유출특성을 가지는 소유역을 포함한 유역에 대해서 단일 매개변수군을 이용하여 유출해석을 수행할 경우 소유역별 유출 해석 결과는 관측 수문곡선을 잘 재현하지 못할 수 있다. 그러므로 분포형 모형을 이용한 유출해석에서도 소유역의 유출해석 결과를 향상시키기 위해서는 소유역별로 각각의 특성이 반영된 모형 보정이 필요하다.

물리적 분포형 모형의 보정에 대한 필요성은 기존의 연구(Refsgaard, 1997; 김성준, 2002; 정인균 등, 2008)에서 제시된바 있으며, 소유역별로 모형을 보정했을 때의 효과에 대한 정량적 분석은 Andersen *et al.*(2001)에 의해서 이루어 졌다. Andersen *et al.*(2001)은 MIKE SHE 모형을 이용하여 유역 출구에 대해서만 모형을 보정하는 것보다는 내부에 있는 관측소에 대해서 추가적으로 모형을 보정하는 것이 유역내에서의 유출해석 결과를 향상시킬 수 있음을 입증하였으며, 이러한 사실은 Ajami *et al.*(2004)에 의해서 확인 되었다. 그러므로 분포형 강우-유출 모형에서 유역 내부의 유출해석 결과를 향상시키기 위해서는 소유역별로 모형을 보정할 수 있는 효과적인 방법의 개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 분포형 강우-유출 모형

에서 관측유량이 있는 다수의 소유역에 대해서 모형을 손쉽게 보정할 수 있는 다지점 보정 모듈을 개발하는 것이다. 본 논문의 구성은 우선 유출해석을 위한 분포형 강우-유출 모형을 소개하고, 다지점 보정 모듈을 개발하기 위한 시스템 설계 및 구현 방법을 기술하였다. 또한 다지점 보정 모듈이 적용된 분포형 강우-유출 모형을 유출해석에 적용함으로써 다지점 보정 모듈의 적용성 및 효과를 평가하였다.

### 분포형 강우-유출 모형

본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 개발한 GRM(Grid based Rainfall-runoff Model) 모형을 이용하여 유출해석을 수행하였다. GRM 모형은 격자 기반의 물리적 분포형 강우-유출 모형으로 GIS 기반의 모델링 시스템인 HyGIS-GRM을 제공한다. GRM에서는 지표면 흐름과 하도 흐름의 홍수추적을 위해서 1차원 운동과 방정식을 이용하고 있으며, 각각에 대한 연속방정식은 식 (1) 및 식 (2)와 같다. 운동량방정식은 식 (3)을 적용하고 있으며, 식 (4)의 Manning의 식을 통해서 유속을 계산한다(한국건설기술연구원, 2011a; 한국건설기술연구원, 2011b).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f + \frac{q_r}{\Delta y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = r \Delta y + q_{ol} + q_{ss} + q_b \quad (2)$$

$$S_0 = S_f \quad (3)$$

$$u = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n} \quad (4)$$

여기서  $q$  : 단위 폭당 유량( $q = uh$ ),  $u$  :  $x$  방향 유속,  $r$  : 강우강도,  $f$  : 침투율,  $A$  : 하도 단면적,  $q_r$  : 복귀류,  $A$  :  $x$  방향에 직각인 단면적,  $Q$  : 유량,  $h$  : 수심,  $q_{ol}$  : 지표면 흐

름에 의한 측방유입,  $q_{ss}$  : 하도로 유입되는 지표하 유출,  $q_b$  : 기저유출,  $t$  : 시간,  $n$  : 조도계수,  $R$  : 동수반경,  $\Delta y$  : 검사체적의  $y$  방향 크기

### 다지점 보정 모듈

#### 1. 다지점 보정 대상 매개변수

물리적 분포형 모형의 매개변수는 유역의 수문지형학적 특성에 의해서 설정되는 것과 추정에 의해서 설정할 수 있는 것으로 분류된다. 지형, 토지피복, 토양 특성 등에 관한 매개변수는 DEM, 토지피복도, 토양도 등에 의해서 얻어지고 격자별로 설정된다. 이와 같이 격자별로 할당된 매개변수를 일괄 보정하고자 할 때는 일반적으로 기존에 설정되어 있는 값에 대한 비율을 나타내는 보정계수를 이용한다(Vieux, 2004). 추정 대상 매개변수는 토양의 초기포화도와 하도 조도계수 등과 같이 시간에 따라서 가변적이거나, 지점에 대해서 관측된 자료의 유역내 공간분포 형태를 알 수 없는 매개변수를 포함하며(Refsgaard and Storm, 1996), 일반적으로 유역에 대해서 추정된 하나의 값을 전체 격자에 적용한다(Sahoo *et al.*, 2006).

그러므로 물리적 분포형 모형의 적용을 위해서는 수문지형학적 특성에 대한 매개변수의 값을 일괄 보정하기 위한 매개변수 보정계수와 추정에 의해서 설정되는 매개변수가 중요한 보정 대상이며, 다지점 보정시에도 이러한 매개변수가 보정 대상이 된다. 표 1에서는 GRM 모형의 입력자료와 각 입력자료로부터 얻어지는 매개변수 및 다지점 보정 대상 매개변수를 나타낸 것이다. 표 1에서 보정 대상 매개변수는 시행착오법으로 보정되며, 매개변수 보정계수는 입력자료에 의해서 자동으로 설정된 토지피복 및 토양도 관련 매개변수 값을 특정 비율로 증가 혹은 감소시키기 위한 비율을 나타내는 것이다.

GRM 모형은 1차원 운동과 모형을 이용해

TABLE 1. GRM 모형의 다지점 보정 대상 매개변수

모형 입력 자료 (그리드 레이어)	자동설정 매개변수	다지점 보정 대상 매개변수
유역 흐름방향, 흐름누적수	검사체적 번호, 격자크기, 유출해석 영역 상하류 검사체적, 흐름 관계, 계산 순서	
경사	경사, 지표면 최소경사, 하도 최소경사	지표면 최소경사 하도 최소경사
하천망	최소하폭, 하천 검사체적, 하천차수, 건천차수, 하도 조도계수	최소하폭 하도 조도계수 건천차수
토지피복도	지표면 조도계수, 불투수율	
토양도	Green-Ampt 매개변수, 유효 토심	매개변수 보정계수
강우	강우, 초기포화도(선형강우)	초기포화도
유량(지점자료)	초기유량	초기유량

서 지표면 유출 및 하도 유출을 해석한다. 운동과 모형에서는 흐름의 동수경사가 지표면 경사와 같다는 가정을 내포하고 있으므로, 운동과 모형을 이용한 유출해석에서는 적용되는 경사의 적절성을 평가해야 한다(Henderson, 1966; Woolhiser and Liggett, 1967; Ponce *et al.*, 1978; ASCE, 1996; 우효섭, 2001). DEM(Digital Elevation Model)을 이용해서 계산되는 격자별 경사는 매우 작은 값을 가질 수 있으며(Garbrecht and Martz, 1996; 김경탁과 최윤석, 2005), GRM에서는 이와 같이 매우 작은 경사를 보정하기 위해서 표 1의 매개변수 중 ‘지표면 최소경사’와 ‘하도 최소경사’를 이용하고 있다(한국건설기술연구원, 2011b).

2. 다지점 보정 매개변수의 적용 방법

다지점 보정 모듈은 소유역으로 구분된 유역자료를 이용하여 소유역별로 매개변수를 설정하고, 소유역별로 모형을 보정하는 기술이다. 이때 분할된 소유역 중 일부의 소유역에 대해서 매개변수를 설정하는 경우에도 유역 전체의 격자에 대해서 매개변수를 할당할 수 있어야 한다. 다지점 보정 모듈에서는 임의 유역에 대해서 설정된 매개변수를 상류 전체 유역에 적용하는 것을 기본 정책으로 하며, 상류에 있는 소유역에서 매개변수 설정이 없을 경우 단일 매개변수군을 적용한다. 이를 위해서는 소유역간의 상·하류 관계 정보인 소유역 흐름 네트워크 정보를 이용하여 임의 유역에 대해서 설정된 매개변수를 상류의 어느 유역까지 적용할지를 결정할 수 있어야 한다.

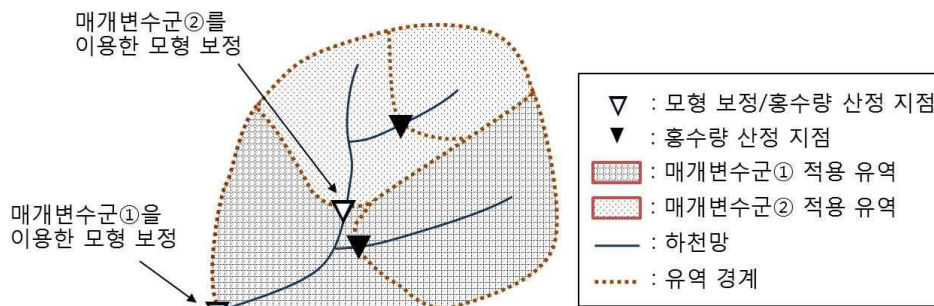


FIGURE 1. 다지점 보정 매개변수 적용 방법

소유역의 흐름 네트워크 정보는 GRM 모형에서 격자별 흐름 네트워크 정보를 설정하는 과정에서 소유역 구분자인 소유역 번호를 이용하여 자동으로 설정된다. 소유역 네트워크 정보는 현재 소유역과 인접한 상하류 소유역 번호와 모든 상·하류 소유역 번호에 대한 정보를 포함하고 있으며, 이를 이용하여 현재 소유역에 설정된 매개변수를 할당할 영역을 결정한다.

### 3. 다지점 보정을 위한 클래스 구성

다지점 보정을 위한 클래스는 표 2와 같다. 다지점 보정에 적용되는 클래스는 ‘유역 클래스’ 및 다지점 보정 대상 매개변수를 저장하기 위한 ‘매개변수 클래스’와 소유역의 흐름

네트워크 정보를 포함하고 있는 ‘소유역 네트워크 클래스’로 구성되며, 각 클래스의 관계는 그림 2와 같다.

매개변수 클래스(cSetSubWatershedParameter)는 유역 번호와 매개변수가 연계된 리스트 형식으로 데이터 구조를 설계하였다. 유역 클래스(cSetWatershed)는 입력된 공간정보 레이어로부터 다양한 유역 정보를 추출하여 저장하고 있으며, 소유역의 번호를 포함하고 있다. 그러므로 매개변수 클래스와 유역 클래스는 소유역 번호를 매개로 연결된다. GRM 모형은 사용자에게 의해서 입력된 흐름방향 레이어를 이용해서 유역내 격자별 흐름정보를 설정한다. 소유역 네트워크 클래스(cWatershedNetwork)는 그림 3과 같이 격

TABLE 2. 다지점 보정에 적용되는 클래스

클래스명	내용	적용방법
유역 클래스 (cSetWatershed)	소유역 번호 정보 포함	소유역 번호를 매개로 매개변수 클래스와 연계
매개변수 클래스 (cSetSubWatershedParameter)	소유역별 매개변수 정보 포함	소유역별 매개변수 저장
소유역 네트워크 클래스 (cWatershedNetwork)	소유역별 상하류 관계 정보 포함	소유역 상하류 관계 정보를 이용해서 매개변수를 적용할 대상 유역을 결정

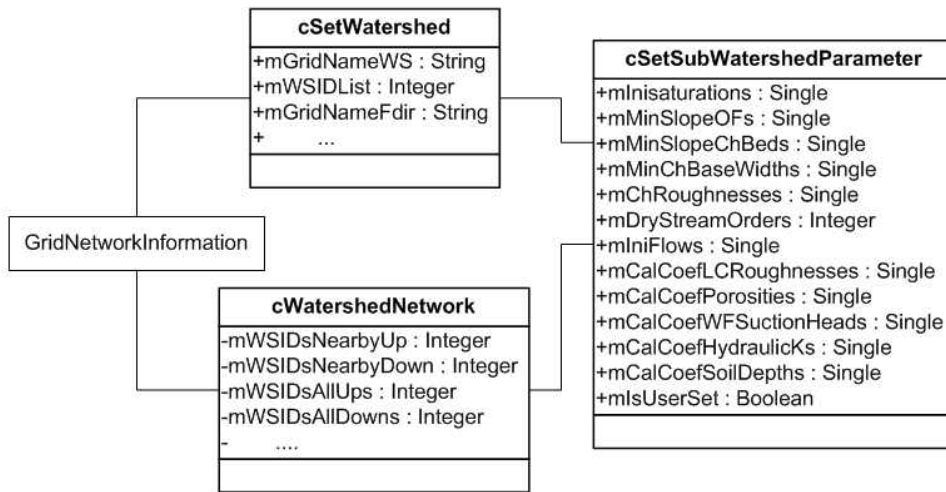


FIGURE 2. 다지점 보정 매개변수 클래스 관계

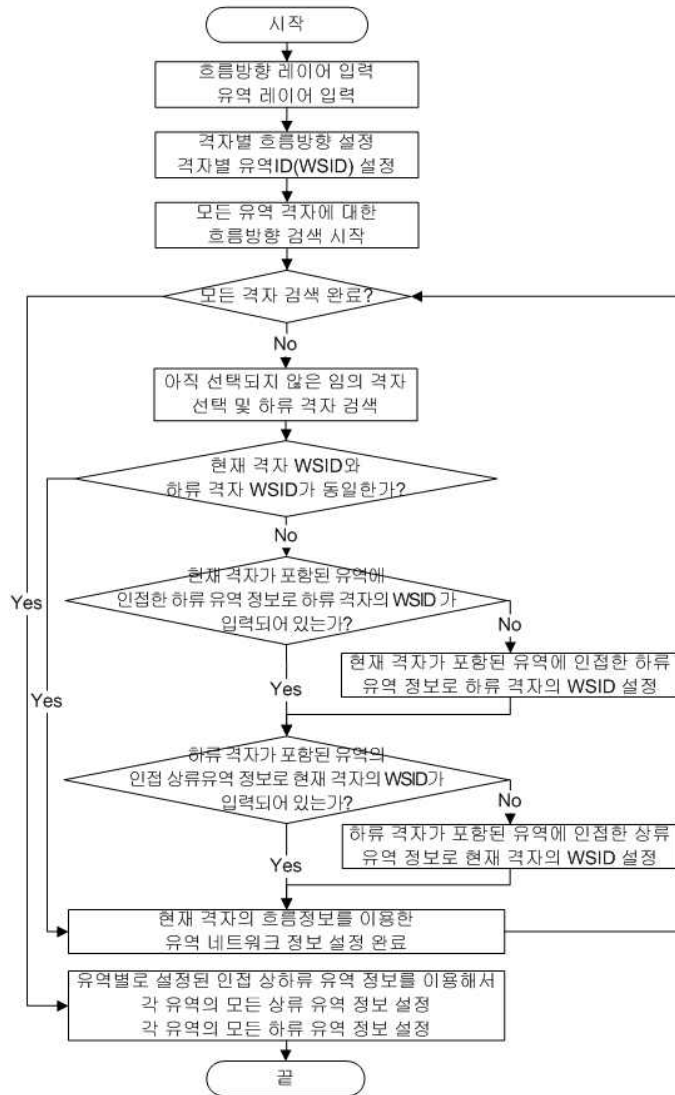


FIGURE 3. 격자별 흐름정보를 이용한 유역 네트워크 설정

자별 흐름정보와 유역 번호를 추적하여 설정된 소유역별 상·하류 관계 정보를 포함하고 있다. 그러므로 소유역별로 설정된 매개변수는 소유역 네트워크 정보를 이용해서 매개변수를 적용할 대상 유역을 결정할 수 있다.

4. 다지점 보정을 위한 GUI

다지점 보정을 위한 GUI는 소유역 선택 부

분과 매개변수 입력 부분 및 매개변수 적용 버튼으로 구성되며, 그림 4와 같다. 소유역 선택을 위한 기능으로는 입력된 유역 레이어를 이용해서 지도창에 소유역 정보를 가시화 하고, 선택된 소유역에 대해서 상류 소유역과 하류 소유역 목록을 제시한다. 모형을 보정할 소유역의 번호를 선택하면, 기존에 설정된 매개변수가 제시되며, 이를 수정함으로써 소유

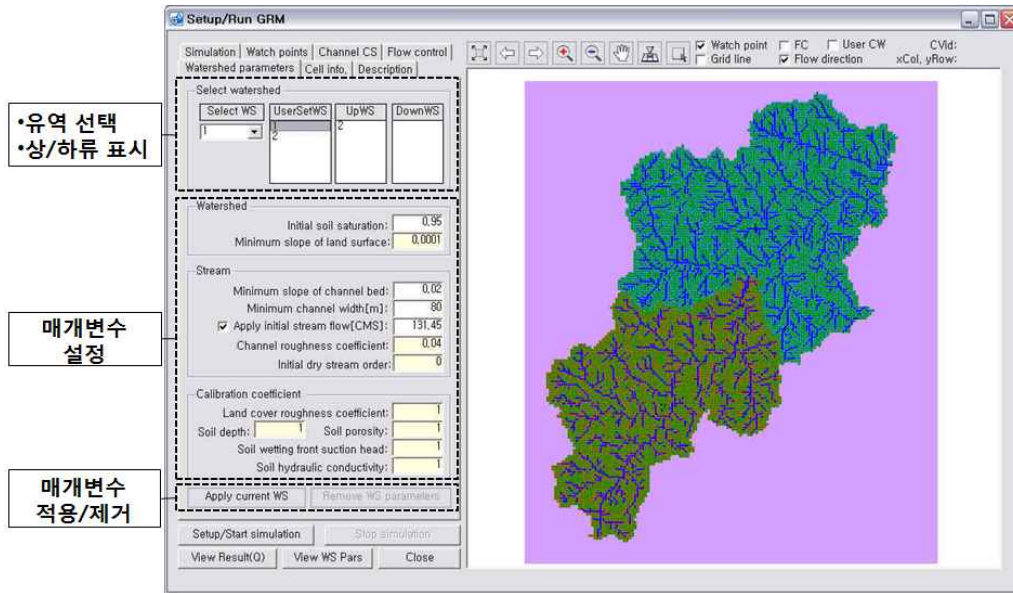


FIGURE 4. 다지점 보정을 위한 매개변수 설정 GUI

역별 모형 보정을 위한 매개변수를 설정할 수 있다.

### 5. 다지점 보정을 이용한 유출해석 절차

사용자에 의해서 설정된 소유역 매개변수를 유출해석에 적용하기 위해서는 시스템에서 자동으로 설정된 격자별 매개변수의 초기값을 사용자에게 의해서 설정된 소유역 매개변수를 이용해서 업데이트해야 하며, 그림 5와 같은 절차를 통해서 이루어진다. 격자별 매개변수 업데이트를 위해서는 ‘매개변수 클래스(cSetSubWatershedParameter)’로부터 유역 번호를 키 값으로 소유역 매개변수를 반환 받고, 해당 소유역에 포함된 모든 격자의 지표면, 하천, 토지피복, 토양에 대한 보정대상 매개변수를 업데이트 한다.

다지점 보정을 이용한 유출해석 절차는 그림 6과 같다. 유출해석을 수행하기 위해서는 우선 입력된 유역의 개수를 판단해야 한다. 유역 그리드 레이어에서 유출해석 대상 격자는 ‘0’ 보다 큰 값을 가지며, 유역의 개수는 입력된 유역 그리드 레이어에서 ‘0’ 보다 큰

값을 가지는 소유역 영역의 개수로 판단할 수 있다.

단일 유역인 경우는 기존에 다지점 보정 모듈을 적용하지 않은 유출해석 절차와 동일한 과정이 수행된다. 그러나 소유역으로 분할된 유역의 경우에는 유역간의 네트워크 정보가 자동으로 설정되며, 사용자는 그림 4의 GUI를 이용하여 모든 소유역 혹은 임의의 소유역의 매개변수를 입력한다. 본 연구에서 개발된 다지점 보정 모듈에서는 입력된 소유역 매개변수와 유역 네트워크 정보를 이용하여 모든 소유역별 매개변수를 자동으로 설정하며, 이를 이용하여 격자별 매개변수를 업데이트 하고 유출해석을 수행한다.

## 다지점 보정 모듈의 적용성 평가

### 1. 대상 유역 및 적용성 평가 방법

다지점 보정을 위해서는 모형의 보정에 사용되는 관측유량을 계산할 수 있는 수위관측소가 유역에 두 개 이상 있어야 한다. 본 연구에서는 유량 산정이 가능한 선산 및 김천

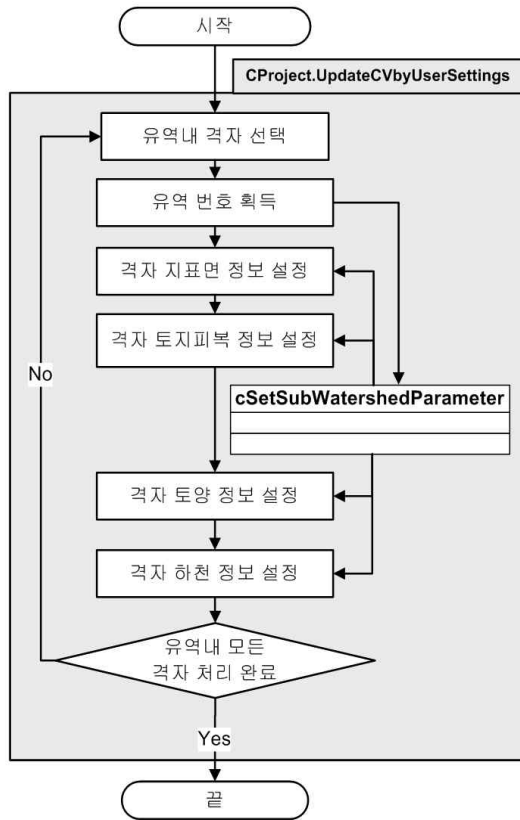


FIGURE 5. 소유역 정보를 이용한 격자 정보 설정

수위관측소를 포함하고 있는 낙동강 감천의 선산 유역을 대상으로 다지점 보정 모듈을 적용하였다. 그림 7은 선산 유역의 개황도를 나타낸 것이다. 선산 유역의 면적은 약 977km<sup>2</sup>이며 낙동강 본류와의 합류점으로부터 상류 약 28km에 위치해 있다. 또한 김천 소유역의 면적은 약 455km<sup>2</sup>이며, 선산 수위관측소 상류 약 26km에 있다.

다지점 보정 모듈을 이용한 유출해석 및 적용성 평가 절차는 그림 8과 같다. 선산 유역에 대해 구축된 입력자료와 김천 수위관측소에 대해서 소유역 분할된 유역 레이어를 이용하여 모형을 구축한다. 우선 선산 수위관측소 지점에 대해서만 보정된 모형을 이용하여 계산된 선산 및 김천 수위관측소 지점의 유출량을 분

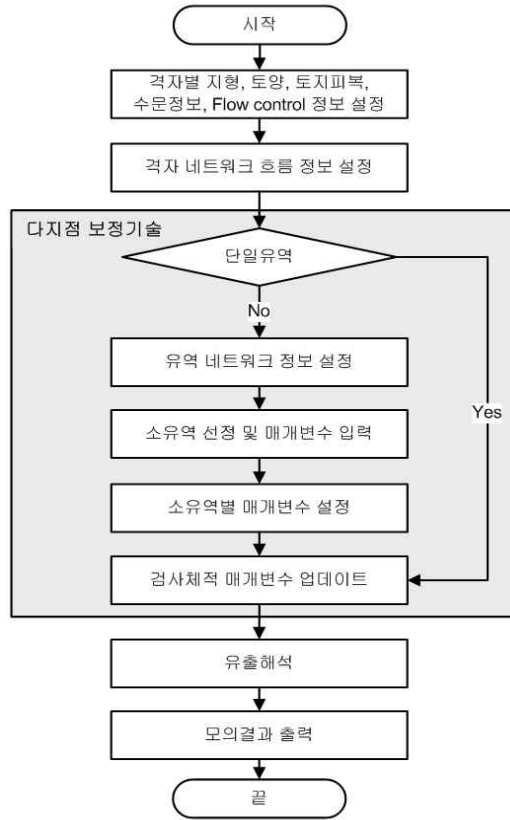


FIGURE 6. 다지점 보정 유출해석 절차

석하고, 다음으로는 선산 및 김천 수위관측소 지점에 대해 보정된 모형을 이용하여 계산된 각 지점의 유출량을 분석하였다. 이를 통해서 다지점 보정이 선산 및 김천 수위관측소의 유출량 산정에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 입력자료 구축

GRM은 격자 기반의 분포형 모형이며, 래스터 형식의 레이어를 입력자료로 사용한다. 대상 유역의 지형자료 구축을 위해서 낙동강 유역조사사업(건설교통부, 2004)으로부터 구축된 30m×30m 격자 크기의 DEM을 300m×300m 격자 크기로 리샘플링하여 적용하였다. 이 때 유출해석 대상 격자의 개수



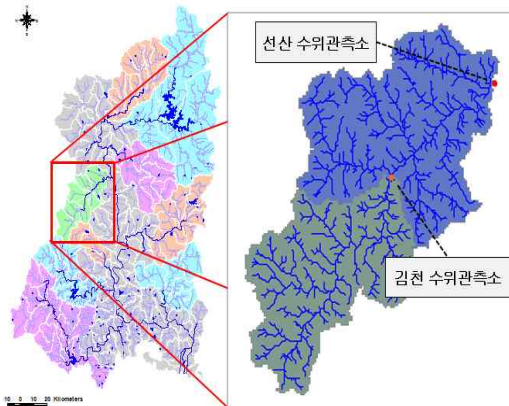


FIGURE 7. 선산 유역 개황도

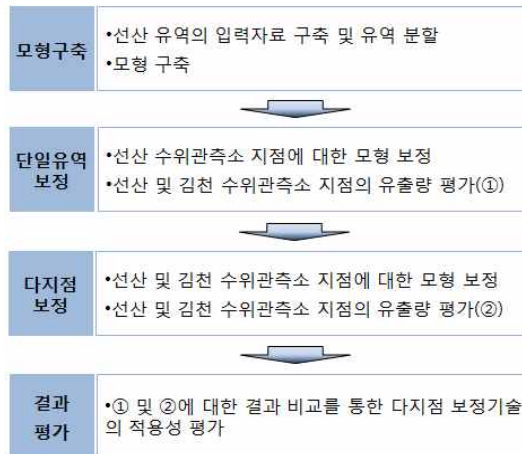


FIGURE 8. 다지점 보정 모듈의 적용성 평가 흐름도

는 11,501개 이다. 토지피복도는 환경부 대분류 토지피복도를 적용하였으며, 토양자료는 농업과학기술원에서 제공하고 있는 정밀토양도(농업기술연구소, 1992)를 이용하여 생성한 토성도 및 토양심도를 적용하였다. 그림 9는 선산 유역의 지형기복도와 하천망을 나타낸 것이며, 그림 10 ~ 그림 12는 토지피복도

와 토성도 및 토양심도를 나타낸 것이다. 이때 토지피복도와 토성도 및 토양심도의 속성별 매개변수 값은 최윤석 등(2010)에서 제시된 값을 적용하였다.

그림 13은 선산 유역의 수문관측소 현황을 나타낸 것이다. 선산 유역에 영향을 미치는 강우관측소는 총 14곳(낙동, 일선교, 부항2,

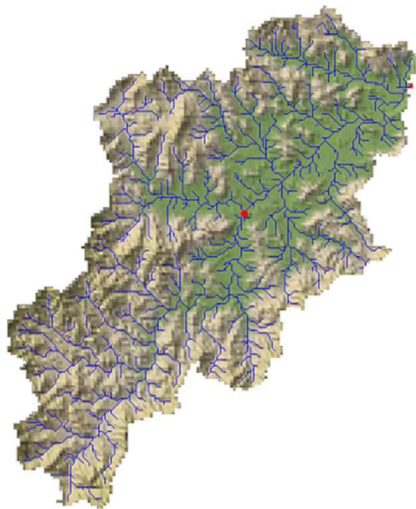


FIGURE 9. 선산 유역의 지형기복도와 하천망



FIGURE 10. 선산 유역의 토지피복도

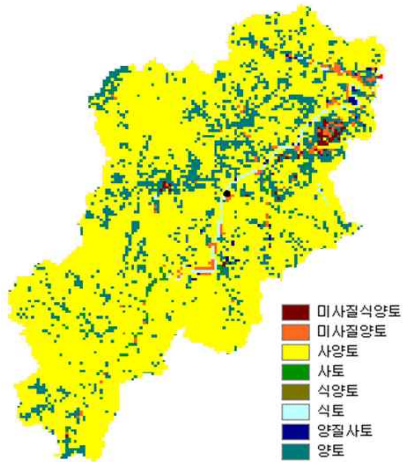


FIGURE 11. 선산 유역의 토성도

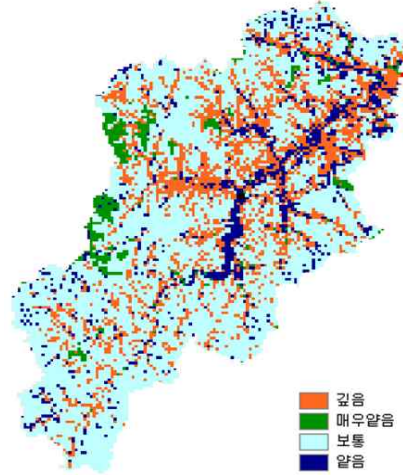


FIGURE 12. 선산 유역의 토양심도



FIGURE 13. 선산 유역의 수문관측소 현황

김천, 선산, 대가, 부항1, 지례, 웅북, 웅양, 무룡, 상촌, 구미, 황간)이며, 유량을 산정할 수 있는 김천 및 선산 수위관측소가 있다. 수문자료는 낙동강홍수통제소(<http://www.nakdongriver.go.kr>)에서 10분 간격 수문자료를 이용하여, 2010년 6월부터 2011년 7월까지 발생한 수문사상 중 5개의 강우-유출 사상을 선정하였

TABLE 3. 수문사상

수문 사상	강우 기간	총강우량 [mm]	적용
사상1	2010/08/11/00:00	68.47	보정
	2010/08/12/20:00		
사상2	2010/08/15/23:00	33.52	검정
	2010/08/16/19:00		
사상3	2010/08/16/17:50	53.40	검정
	2010/08/17/23:50		
사상4	2010/09/01/20:20	43.44	검정
	2010/09/03/12:20		
사상5	2011/07/09/11:40	153.48	검정
	2011/07/12/20:40		

으며, 표 3과 같다.

### 3. 모형 보정

본 연구에서는 모형보정시 침투유량의 적합을 우선적으로 고려하였으며, 보정결과의 평가는 총유출량, 침투유량, 침투시간에 대해서 평가하였다. 모형 보정을 위하여 '사상1'을 이

용하였으며, 보정 방법은 시행착오법을 적용하였다. 모형 보정 결과의 평가는 총유출량과 침투유량은 % 단위를 가지는 상대오차로 계산하고, 침투시간은 시간 단위를 가지는 절대오차로 평가하였으며, 식 (5)~식 (7)과 같다.

$$VE = \frac{|V_o - V_s|}{V_o} \times 100 \quad (5)$$

$$PE = \frac{|P_o - P_s|}{P_o} \times 100 \quad (6)$$

$$TE = |T_{pO} - T_{pS}| \quad (7)$$

여기서,  $VE$  : 총유출량 오차[%],  $V_o$  : 관측 총유출량 [ $m^3$ ],  $V_s$  : 계산 총유출량 [ $m^3$ ],  $PE$  : 침투유량 오차[%],  $P_o$  : 관측 침투유량 [ $m^3/s$ ],  $P_s$  : 계산 침투유량 [ $m^3/s$ ],  $TE$  : 침투시간 오차[hr],  $T_{pO}$  : 관측 침투시간 [hr],  $T_{pS}$  : 계산 침투시간 [hr]

본 연구의 대상 유역은 두 개의 소유역으로 분할되며, 단일 유역에 대한 유출해석시에는 선산 유역 전체에 대해서 유출해석을 수행하였다. 다지점 보정을 적용한 유출해석에서는 선산 수위관측소의 상류에 있는 김천 유역에 대해 우선적으로 모형을 보정하고, 김천 유역의 유출해석 결과가 반영된 상태에서 선산 소유역에 대해 모형을 보정하였다.

단일 유역 및 다지점 보정에 사용된 매개변수는 표 4와 같다. 표 4에서 다지점 보정시에는 단일 유역 보정과 비교하였을 때 하도 최소경사, 최소하폭, 하도 조도계수 매개변수만을 다르게 입력하여 보정이 이루어 졌다. 이때 최소하폭은 대상 유역에서의 하폭의 최소 값 조건으로서, 대체적으로 하천 지류의 상류 부분에 위치한 격자에서의 하폭에 영향을 미친다. 김천 유역은 선산 소유역의 상류에 위치하고 있으므로, 단일 유역에서의 최소하폭보다 작은 값으로 보정되었으며, 선산 소유역은 김천 유역에서의 하류 영역에 위치하고 있

으므로, 단일 유역에서의 최소하폭보다 큰 값으로 보정이 된 것으로 판단된다.

그림 14~그림 15 및 표 5는 모형 보정 결과를 나타낸 것이다. 선산 유역에 대해서만 보정된 모형을 이용한 유출해석 결과인 그림 14에서는 선산 수위관측소 지점의 수문곡선은 관측수문곡선을 잘 재현하고 있으나, 김천 수위관측소 지점에 대해서는 침투유량이 관측수문곡선 보다 매우 크게 계산된 것으로 나타났다. 그러나 다지점 보정에 의한 선산 및 김천 수위관측소의 유출해석 결과를 나타내는 그림 15에서는 선산 및 김천 수위관측소 모두에 대해서 관측수문곡선을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 또한 표 5에서는 다지점 보정에 의해서 김천 수위관측소 지점에서의 침투유량의 상대오차가 크게 향상된 것으로 나타났다. 그러나 김천 수위관측소 지점에 대한 총유출량오차는 오히려 커지는 것으로 나타났으며, 이는 홍수유출해석에서 중요한 침투유량의 적합과정에서 모의 수문곡선이 관측 수문곡선에 비해서 낮게 계산됨으로써 총유출량 오차가 커지게 된 것으로 판단된다. 모형 보정결과 단일 유역 및 다지점 보정을 위한 선산 유역과 선산 및 김천 소유역의 매개변수는 관측수문곡선을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 그러므로 표 4에서의 매개변수를 이용해서 ‘사상2’ ~ ‘사상5’ 에 대해 모형을 검증하고, 다지점 보정 모듈의 적용성을 평가하였다.

TABLE 4. 모형 보정을 위한 매개변수

매개변수	단일 유역 보정	다지점 보정	
		선산 소유역	김천 소유역
하도 최소경사	0.013	0.014	0.018
최소하폭	15	45	2
하도 조도계수	0.045	0.045	0.04
지표면 조도계수	1	1	1
공극률	1	1	1
습윤전선 흡인수두	1	1	1
토양 수리전도도	1	1	1
토양심	1	1	1

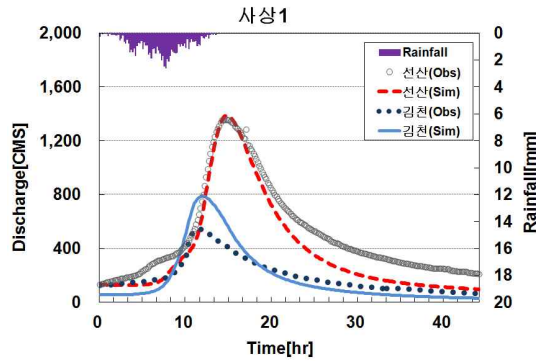


FIGURE 14. 선산 및 김천 지점의 수문곡선(단일 유역 보정 결과)

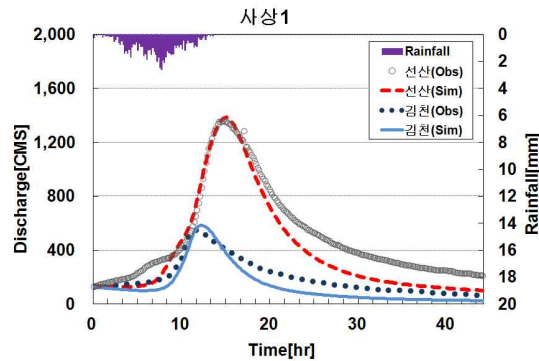


FIGURE 15. 선산 및 김천 지점의 수문곡선(다지점 보정 결과)

TABLE 5. 모형 보정 결과(사상1)

구분	관측값	단일 유역 보정		다지점 보정		
		모의값	오차	모의값	오차	
선산	총유출량[1000×m <sup>3</sup> ]	80,444	61,919	23.03%	64,511	19.81%
	침투유량[m <sup>3</sup> /s]	1,361	1,389	2.01%	1,385	1.77%
	침투시간[hr]	14.67	14.83	0.17hr	15.00	0.33hr
김천	총유출량[1000×m <sup>3</sup> ]	31,372	30,145	3.91%	22,149	29.4%
	침투유량[m <sup>3</sup> /s]	549	788	43.65%	586	6.73%
	침투시간[hr]	11.50	11.83	0.33hr	12.17	0.67hr

4. 다지점 보정 모듈의 적용성 평가

본 연구에서 개발된 다지점 보정 모듈은 소유역 분할된 유역 시스템에서 손쉽게 소유역 별로 모형을 보정하고, 소유역을 포함한 전체 유역에 대해 일괄적으로 유출해석을 수행할 수 있는 기술을 제공하고 있다. 또한 본 논문의 다지점 보정 모듈의 적용에서는 다지점 보정 모듈을 이용하여 소유역의 유출해석 결과를 향상 시킬 수 있는 지를 평가하고자 한다. 적용성 평가의 주요 항목으로는 모형 보정에서와 동일하게 침투유량의 적합을 우선적으로 평가 하였다.

‘사상1’ 을 제외한 4개의 수문사상에 대해서 다지점 보정 기술의 적용 여부에 따른 선산 및 김천 수위관측소의 유출해석 결과는 표 6과 같다. ‘사상2’ ~ ‘사상5’ 의 유출해석에서는 ‘사상1’ 을 이용해서 단일 유역(선산 유역) 및 다지점(선산 및 김천 수위관측소

유역)에 대해서 보정된 모형을 이용하였다. 표 6은 ‘사상2’ ~ ‘사상5’ 4개의 수문사상에 대한 유출해석 결과의 오차를 나타낸 것이며, 평균값은 단일 유역 보정에 비해서 다지점 보정이 선산 및 김천 수위관측소에서의 유출해석 결과에 미치는 영향을 평균적으로 평가한 것이다.

표 6에서는 선산 수위관측소 지점의 유출해석 결과는 단일 유역(선산 수위관측소 유역) 보정 및 다지점(선산 수위관측소 소유역 및 김천 수위관측소 소유역) 보정의 경우에 대해서 평균적으로 침투유량 오차는 6.23% 및 7.4%, 총유출량 오차는 10.04% 및 12.92%, 침투시간 오차는 0.96시간으로 관측 수문곡선을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 김천 수위관측소 지점의 유출해석 결과(표 6에서 음영 표시된 부분)는 단일 유역 보정시 침투유량 오차는 평균 55.78%, 총유출량 오차는

12.35%, 침투시간 오차는 1.08 시간으로 침투유량 오차가 매우 크게 나타났다. 본 연구에서는 모형 보정시 침투유량의 적합을 우선적으로 고려하였으므로, 이를 기준으로 김천 유역과 선산 유역을 함께 보정한 모형을 적용한 결과(표 6에서 (2)번 항목) 김천 수위관측소 지점의 침투유량 오차는 평균 5.98%, 총유출량 오차는 29.36%, 침투시간 오차는 0.96 시간을 나타내었으며, 다지점 보정에 의해서 침투유량의 계산 결과가 크게 향상되었다.

선산 수위관측소의 유출해석 결과는 다지점 보정에 의해서 다소 나빠지는 것으로 나타났다. 선산 수위관측소의 유출해석 결과는 다지점 보정에 의해서 상류에 위치한 김천 수위관측소 유역의 총유출량 오차가 증가함으로써, 하류에 위치한 선산 수위관측소에서의 오차 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 다수의 소유역에 대한 모형의 보정 및 각 소유역간에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 소유역별 관측 수문곡선의 품질 평가와 보정된 매개변수의 적합도 평가 및 소유역 분할에 따라 변경되는 유역특성에 적합한 스케일 평가 등 다양한 측면에서의 검토가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 다지점 보정 기술의 구현을 위한 다지점 보정 모듈의 설계 및 적용 방법과 적용효과를 제시하는 것을 주제로 하고 있으므로, 모형 보정 결과의 심도 있는 평가를 위한 다양한 분석 및 검토는 추가 연구가 필요하다.

또한 다지점 보정에 의해서 김천 수위관측소의 총유출량 오차는 오히려 증가하였다. 이는 모형 보정시 침투유량의 적합을 우선적으

로 고려한 것이 가장 중요한 요인인 것으로 판단된다. 그러나 모형 보정에 의해서 침투유량 오차 보다 총유출량 오차가 크게 나타나는 것은 선산 및 김천 수위관측소에서 동일하게 나타나는 현상으로, 이는 관측 수문곡선에서 침투유량 발생 후에 수문곡선이 천천히 하강하는 경향을 보이고 있지만 이를 모형에서 적절히 반영하지 못하고 있기 때문이다. 그러므로 이러한 현상을 나타내는 원인을 규명하기 위해서는 선산 유역의 특성과 이를 해석하기 위한 GRM 모형의 적용성을 추가로 연구할 필요가 있을 것이다.

다지점 보정 기술의 적용결과 대상 유역의 보정 지점에서의 유출해석 결과는 관측수문곡선을 잘 재현할 수 있었으며, 특히 유역 내부의 보정 지점에서의 유출해석 결과 중 침투유량 오차가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 이는 단일 유역 보정에 사용된 매개변수군이 김천 수위관측소 소유역의 특성을 적절히 반영하지 못하고 있기 때문이며, 이러한 경우에 김천 수위관측소 지점에서의 유출해석 결과를 향상시키기 위해서는 김천 수위관측소 소유역에 적합한 매개변수군을 이용하여 보정된 모형을 적용해야 함을 나타내고 있다. 그러므로 다양한 물리적, 수문학적 특성을 가지는 소유역으로 구성된 유역에서 각 소유역에 대한 신뢰성 있는 유출해석 결과를 얻기 위해서는 각 소유역별로 보정된 모형을 적용해야 하며, 이와 같은 다지점 보정을 위해서 본 연구에서 개발된 다지점 보정 모듈은 효과적으로 적용될 수 있었다.

TABLE 6. 다지점 보정 적용 결과(사상2~사상5)

구분	사상2		사상3		사상4		사상5		평균		
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
선산	총유출량[%]	8.57	13.96	0.21	4.14	16.63	15.34	14.75	18.22	10.04	12.92
	침투유량[%]	10.17	10.60	3.54	11.88	5.86	1.87	5.34	5.26	6.23	7.4
	침투시간[hr]	0.83	1.50	1.00	1.50	1.17	0.50	0.83	0.33	0.96	0.96
김천	총유출량[%]	18.67	23.25	23.50	31.88	1.43	37.40	5.82	24.92	12.35	29.36
	침투유량[%]	79.36	7.69	65.05	6.90	73.86	2.74	4.85	6.57	55.78	5.98
	침투시간[hr]	0.67	1.00	1.17	1.17	1.17	1.00	1.33	0.67	1.08	0.96

\* (1):단일 유역 보정, (2):다지점 보정

## 결론

본 연구에서는 물리적 분포형 강우-유출 모형에서 유역내 다수의 지점에 대해서 모형을 보정할 수 있는 다지점 보정 모듈을 개발하고, 유출해석에 적용하였다. 다지점 보정 모듈의 설계 및 구현 방법을 기술하였으며, 유출해석에 대한 적용성을 평가하였다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 다지점 보정을 위한 클래스를 설계하고, 소유역별로 설정된 매개변수의 적용 방법을 제시하였다. 다지점 보정을 위한 각 정보는 '유역 클래스', '매개변수 클래스', '소유역 네트워크 클래스'에 분할되어 저장되며, 각 클래스는 소유역 번호를 매개로 하여 상호 참조된다. 소유역간의 네트워크 정보는 소유역이 구분된 유역레이어와 흐름방향 레이어의 격자별 흐름방향 정보를 이용해서 설정되며, 이를 이용하여 소유역별로 입력된 매개변수를 적용할 대상 소유역을 결정한다. 사용자가 보정 대상 유역으로 선정한 소유역에 설정된 매개변수를 적용할 대상 소유역의 범위는 사용자가 선정한 소유역의 상류방향으로 검색되며, 검색과정에서 사용자에게 의해서 선정된 다른 보정 소유역이 존재할 경우 그 하류까지를 적용 범위로 한다.

둘째, 다지점 보정 모듈과 소유역별 매개변수 설정을 위한 GUI를 개발하고, 다지점 보정을 이용한 유출해석 절차를 정립하였다. GUI에서는 소유역간의 상하류 네트워크 정보를 이용해서 소유역의 상하류 관계를 직관적으로 판단할 수 있는 기능과 소유역별 매개변수를 설정할 수 있는 기능을 포함하고 있다. 다수 소유역에 대해서 설정된 각각의 매개변수군을 이용한 유출해석을 위해서는 유역내 격자 검사체적에 할당된 매개변수 중 수정된 매개변수를 업데이트하는 과정이 필요하다. 이를 위해서 소유역별 매개변수와 격자 검사체적이 소유역 번호를 매개로 연결되며, 최종적으로 업데이트된 검사체적의 매개변수가 유출해석에 적용된다.

셋째, 다지점 보정 모듈의 유출해석에 대한 적용성을 평가하였다. 본 연구의 대상 유역은 두 개의 소유역으로 분할되며, 모형의 보정은 시행착오법으로 수행하였다. 단일 유역에 대한 유출해석시에는 선산 유역 전체에 대해서 유출해석을 수행하였고, 다지점 보정을 적용한 유출해석에서는 먼저 상류에 있는 김천 유역에 대해 유출해석을 수행하고, 김천 유역의 유출해석 결과를 반영하여 선산 소유역에 대한 유출을 해석하였다. 대상 유역에 대한 유출해석 결과 다지점 보정에 의해서 김천 수위 관측소 지점의 유출해석 결과는 모형 보정시 우선적으로 고려한 침투유량에 대해서는 크게 향상되었으나, 총유출량 오차는 오히려 증가하였다. 이러한 연구결과를 통해서 다지점 보정은 임의 소유역의 유출해석 결과를 향상시킬 수는 있으나, 변경되는 유역 구조 및 면적과 소유역별 물리적, 수문학적 특성의 평가와 이에 따른 해상도 평가 등 다양한 부분에 대한 추가 분석이 필요하다는 것을 알 수 있다.

넷째, 다양한 특성을 가지는 소유역을 포괄하고 있는 유역에 대해서 다지점 보정은 유역내 계측지점의 유출해석 결과를 향상시킬 뿐만 아니라, 유역내 임의의 미계측 지점에 대한 모형의 지역화 및 유량 추정에도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 대상 소유역 내에 위치한 임의의 소유역에 대한 모형의 보정이 다른 소유역 및 전체 유역의 모형 보정 및 유출해석 결과에 미치는 영향에 대한 평가를 위한 추가 연구가 필요하다.

**KAGIS**

## 참고문헌

- 건설교통부. 2004. 낙동강 유역조사 보고서.
- 김경탁, 최윤석. 2005. DEM에서의 sink와 flat area 처리 알고리즘에 대한 비교 검토. 한국지리정보학회지 8(4):91-101.
- 김성준. 2002. 분포형 수문모델의 구축, 보정 및 검증. 한국수자원학회지 35(4):55-65.

- 농업기술연구소. 1992. 증보 한국토양총설, 토양조사자료 13. 농촌진흥청. 283-290쪽.
- 박진혁, 허영택. 2008. 홍수유출해석을 위한 운동과기반의 분포형모형 개발 및 적용. 한국수자원학회논문집 41(5):455-462.
- 우효섭. 2001. 하천수리학. 청문각. 239-296쪽.
- 정인균, 신형진, 박진혁, 김성준. 2008. 격자기반 운동과 강우유출모형 KIMSTORM의 개선(II)-적용 및 분석-. 대한토목학회논문집 28(6B):709-721.
- 최윤석, 김경탁, 심명필. 2010. 분포형 강우-유출 모형을 이용한 미계측 증소구역의 유량 추정. 한국수자원학회논문집 43(4):353-365.
- 한국건설기술연구원. 2011a. HyGIS 개발 및 적용. 교육과학기술부.
- 한국건설기술연구원. 2011b. HyGIS-GRM User's manual.
- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen. 1986. An introduction to the European hydrological system-systeme hydrologique europeen, "SHE", 1:history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. Journal of Hydrology 87:45-59.
- Ajami, N.K., H. Gupta, T. Wagener and S. Sorooshian. 2004. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. Journal of Hydrology 298:112-135.
- Andersen, J., J.C. Refsgaard and H.J. Jensen. 2001. Distributed hydrological modeling of the Senegal river basin-model construction and validation. Journal of Hydrology 247:200-214.
- ASCE. 1996. River hydraulics. Technical engineering and design guides as adapted form the US Army Corps of Engineers, no. 18, ASCE Press, New York, USA. 58-61pp.
- Beven, K. 1981. Kinematic subsurface stormflow. Water Resources Research 17(5):1419-1424.
- Beven, K. and A. Binley. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes 6:279-298.
- Chow, V.T., David R. Maidment and Larry W. Mays. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill.
- Garbrecht, J. and L.W. Martz. 1996. Digital landscape parameterization for hydrological applications. HydroGIS 96:Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. Proceedings of the Vienna Conference, April 1996. IAHS Publ., No. 235, pp.169-173.
- Henderson, F.M. 1966. Open channel flow. Macmillan Publishing Co., Inc., New York, USA. 355-383pp.
- Ponce, V.C., R.M. Li, and D.B. Simons. 1978. Applicability of kinematic and diffusion models. Journal of the Hydraulics Division ASCE 104(HY3): 353-360.
- Refsgaard, J.C. 1997. Parameterisation, calibration and validation of disributed hydrological model. Journal of Hydrology 198:69-97.
- Refsgaard, J.C. and B. Storm. 1996.

- Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott, M.B., Refsgaard, J.C(Eds), Distributed hydrological modeling. Kluwer Academic, pp.41-54.
- Sahoo, G.B., C. Ray and E.H. De Carlo. 2006. Calibration and validation of a physically distributed hydrological model, MIKE She, to predict streamflow at high frequency in a flashy mountainous Hawaii stream. *Journal of Hydrology* 327:94-109.
- Shafii, M. and F.D. Smedt. 2009. Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (Wetspa) using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences* 13:2137-2149.
- Vieux, B.E. 2004. *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Kluwer Academic Publishers.
- Woolhiser, D.A and J.A. Liggett. 1967. Unsteady, one-dimensional flow over a plane - the rising hydrograph. *Water Resources Research* 3(3):753-771.

KAGIS