

유역특성을 반영한 공간격자기반의 분포형모형 개선

Modification of Spatial Grid Based Distributed Model Considering River Basin Characteristics

박진혁* · 허영택**

Park, Jin Hyeog · Hur, Young Teck

Abstract

Recently, the rapid development of GIS technology has made it possible to handle a various data associated with spatially hydrological parameters with their attribute information. Therefore, there has been a shift in focus from lumped runoff models to distributed runoff models, as the latter can consider temporal and spatial variations of discharge. In this research, a distributed rainfall-runoff model based on physical kinematic wave for analysis of surface and river flow was used to simulate temporal and spatial distribution of long-term discharge. The snowfall and melting process model based on Hydro-BEAM was developed, and various hydrological parameters for input data of the model was extracted from basic GIS data such as DEM, land cover and soil map. The developed model was applied for the Shonai River basin(532) in Japan, which has sufficient meteorological and hydrological data, and displayed precise runoff results to be compared to the hydrograph.

Keywords : distributed model, discharge, GIS, DEM, spatial gri

요 지

최근, GIS기술의 급속한 발전에 따라 다양한 공간 수문 자료들이 속성정보와 결합되어 다루는 것이 가능해졌고, 집중형 유출모형보다 유역 유출량의 시·공간적인 변동을 고려할 수 있는 분포형유출 모형의 구축이 활발하게 연구되고 있다. 본 연구에서는 장기 유출량의 시공간적 분포를 파악할 수 있도록 지표 및 하도흐름해석에 물리적인 운동파(kinematic wave)이론에 근거한 분포형 강우-유출모형을 이용하였다. Hydro-BEAM모형을 근간으로 용설·적설과정 모듈을 추가로 개발하였고, 각종 수문매개변수를 DEM, 토지피복도, 토양도 등의 기본 GIS자료들로부터 추출, 본 모형의 입력 자료로 사용하였다. 본 모형의 적용성 검증을 위해서 비교적 신뢰할만한 기상자료와 장기간의 수문자료를 보유하고 있는 일본의 쇼나이강 유역(532)을 대상으로 구축하였고, 수문곡선 비교 결과 비교적 재현성 높은 유출 결과를 모의할 수 있었다.

핵심용어 : 분포형모형, 유출량, 지리정보시스템, DEM, 공간격자

1. 연구배경 및 목적

최근 전 세계적으로 GIS 및 인공위성 영상기법의 발달로 유역에 대한 정확하고 상세한 각종 수문자료의 수집이 가능하게 되었다. 따라서 수자원 강우-유출 모형부분에서 유역을 부분유역으로 분할한 기존의 집중형 수문모형 보다 유역내 토지이용의 변화 및 공간적인 유량변동을 보다 상세하게 고려할 수 있는 격자기반의 분포형 수문모형의 활용도가 높아지고 있다. 분포형 수문모형은 유역을 수문학적으로 균일한 소유역 또는 격자망으로 구분하여 적용하는 것으로, 도시화 등 토지이용의 변화나 기타 유역내의 물리적인 특성의 변화가 수문기작에 미치는 영향을 잘 모의할 수 있다. 또한, 모형의 매개변수를 유역의 물리적 특성이나 실측된 자료로부터 구하기 때문에 미계측 유역에도 적용할 수 있다. 이러한

분포형 수문모형에 의해 유역의 임의의 지점에서 유량, 오탁 부하량 등을 추정할 수 있고, 그 프로세스를 물리적으로 추적하고 있기 때문에 유역내의 인간 활동이나 자연조건 변화 등의 공간적인 분포특성을 계산에 반영시킬 수 있다는 장점이 있다.

GIS기술의 급속한 발전에 따라 다양한 공간 자료들이 위치좌표와 결합되어 통일적으로 다루는 것이 가능해졌고 수량과 수질의 공간적인 분포특성을 충실히 반영할 수 있는 분포형유출 모형의 구축이 최근에 비교적 활발하게 연구되고 있다.

본 연구의 목적은 시계열 및 공간적인 유역특성을 반영하여 GIS수문자료와 연계한 격자 기반의 장기 분포형 유출모형을 개선하여 모형의 적용성을 검토해 보는 것이다.

*정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 대우 (E-mail : park5103@kwater.or.kr)
**정회원 · 교신저자 · 한국수자원공사 물관리센터 공동연구원 (E-mail : korcivil@hanmail.net)

2. 모형의 구성

2.1 모형의 개요

본 모형의 근간이 되는 모형은 1998년부터 일본 교토대학 방재연구소 코지리 연구실에서 개발 중인 Hydro-BEAM (Hydrological Basin Environmental Assessment Model)으로서 유역 물순환의 건전성을 평가하기 위하여 장기간의 유역 내 유량, 수질을 시계열 및 공간적으로 파악하여 장래 토지이용의 변화나 인공적인 변화에 의한 유역의 영향평가를 하기 위해 개발된 물리적 기반의 격자구조를 가진 분포형 장기유출 모형이다.

유역내 수량산정 모듈로서 평면 분포형으로 격자형을, 연직분포형으로 다층모형을 이용해서 격자기반다층유출모형을 적용한다. 연직구조는 A~C층의 수평유출량은 하천으로 유입하고, D층은 하천유출에 영향을 미치지 않는 지하수층으로 가정하였다(Fig. 1). 또한, 도시로부터의 배수는 분류식 하수도를 상정하였고 오수를 하수도 보급률에 따라서 하수처리장으로, 하수처리장에서 처리되지 않은 오수는 각각 정화조를 거쳐서 강수와 함께 하천흐름방향을 따라서 하수도로 유출시켰다. 토지피복은 지표면 조도 및 불투수층의 분포를 좌우하며 이에 따른 유역의 수문응답 반응시간과 유출용적의 변화에 직접적인 영향을 미치게 된다. 본 모형에서는 동일한 유출특성 및 부하발생특성을 가지는 토지피복을 하나로 묶어서 산림지역, 논지역, 밭지역, 도시지역, 수역으로 5종류로 재분류하여 격자마다 모자이크법을 적용하여 토지피복의 영향을 상세하게 파악할 수 있도록 고려하였다(박진혁, 2003). 그 외에 본 모형에서 입력인자로 사용되는 수문매개변수들은 DEM, 흐름방향도, 하천격자, 유역경사, 하상경사, 하도폭, 조도계수 등이 있다. 강우입력에 관해서는 우량관측소 및 기상관측소 등의 지배영역을 GIS상에서 티센분할로 구하고 10분간격의 티센강우를 입력하고 있다.

본 연구에서는 Hydro-BEAM의 기본 모형에서 용설·적설량 산정 모듈을 추가로 개발하였으며, GIS를 이용하여 모형의 입력인자로 사용되는 각종 수문 매개변수들을 추출함으로써 기존모형을 개선하였다. 당초 초기버전의 모형에서는 입력자료 등을 GIS 등으로 추출하지 않고 종이지도에 정사각형의 격자를 그어 해당격자의 수치정보를 일본 국토지리원으로부터 입수하여 입력값으로 활용하였다. 결과적으로 지

형에 대한 좌표투영에 오차가 생겨 실제 그 해당격자에 맞는 수치정보가 입력되지 않는 경우도 발생하였으나, GIS분석기법을 이용하여 지형인자 및 격자흐름방향 등의 개선으로 모형의 입력인자에 대한 신뢰성을 개선하였다.

2.2 적설·용설량 산정모형

본 연구에서는 강우부터 용설까지를 연속적으로 다룰 수 있는 열수지법(近藤純正, 1994)을 이용하여 격자마다의 강우·적설·용설·보수·침투 등 일련의 과정을 고려한 적설·용설량 산정모형을 구축하였다. 적설·용설량 산정 흐름도는 Fig. 2와 같다.

2.2.1 적설 매개변수의 산정

시간 내에 내린 강수가 눈인지 비인지를 각 격자에 있어서의 기온과 수증기압에 의해 다음과 같은 식에서 판별한다.

$$T_c = 11.01 - 1.5e_a + 273.15 \quad (1)$$

$$T_a > T_c : \text{비} \quad T_a \leq T_c : \text{눈} \quad (2)$$

눈의 물리적인 특성에는 함수량과 물을 포함하지 않는 눈이 가진 상당수량이 고려될 수 있다. 새롭게 내린 눈의 함수량, 즉 상당수량은 다음과 같은 식에서 산정된다.

$$W_{CN} = RS \times 0.05 \quad T_a \geq 273.15 \quad (3)$$

$$W_{CN} = 0 \quad T_a < 273.15 \quad (4)$$

$$W_{EQN} = RS - W_{CN} \quad (5)$$

여기에서 W_{CN} : 신설의 함수량(mm), W_{EQN} : 신설의 상당수량(mm), RS : 강수량(mm) 이다.

2.2.2 용설량의 산정

용설열량 Q_M 이 적설층 내에 흡수되었을 때 용설열량이나 눈의 온도 $T_s(K)$, 함수량 W_c 에 의해 다음과 같이 4개의 과정이 생긴다.

- | | |
|--------------------|---------------------|
| $Q_M > 0$ 일 경우 | $Q_M \leq 0$ 일 경우 |
| ① $T_s < 0$: 승온과정 | ③ $W_c > 0$: 재동결과정 |
| ② $T_s = 0$: 용설과정 | ④ $W_c = 0$: 냉각과정 |

용설량 H_T 는 다음 식에서 구해진다.

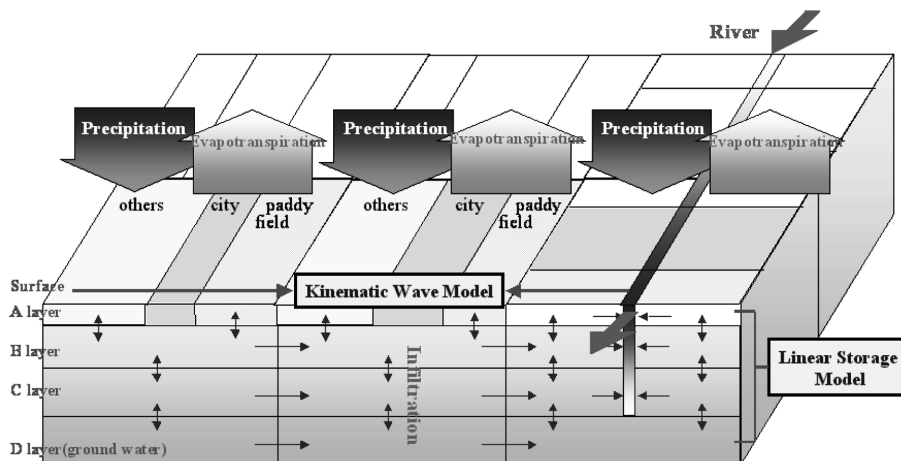


Fig. 1. Structure of the model

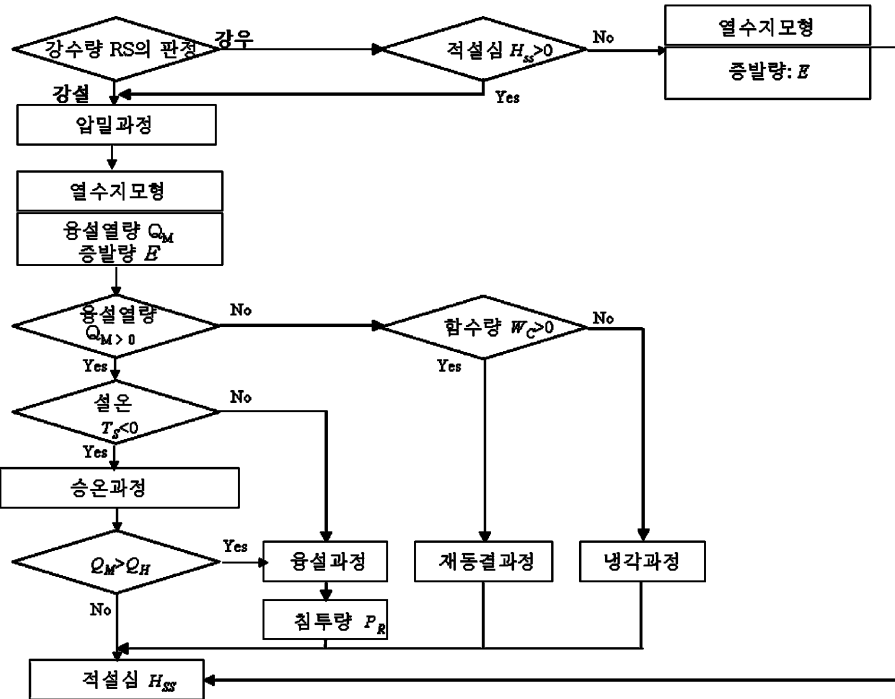


Fig. 2. Flowchart of snow fall and melting process model

$$H_T = \frac{Q_M}{IF} \quad (6)$$

여기에서 IF : 얼음의 용해잠열
 용설열량 Q_M 은 적설표면에 관여하는 열에너지수지 식으로부터 다음 식에서 구해진다.

$$Q_M = R\downarrow - \sigma T_s^4 - H - \iota E \quad (7)$$

여기에서 σ : 스테판볼츠만정수($5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), T_s : 적설층온도(K), H : 현열운송량(Wm^{-2}), ιE : 잠열운송량(Wm^{-2}), $R\downarrow$: 입력방사량(Wm^{-2})

$$R\downarrow = (1 - \text{ref})S\downarrow + L\downarrow \quad (8)$$

여기에서 ref : 알베도, $S\downarrow$: 전천일사량(Wm^{-2}), $L\downarrow$: 장파방사량(Wm^{-2})

2.3 표면류, 토양내 침투, 하천유하과정

도시부 표면에 내린 강우는 도시표면흐름으로서 운동과 해석법(kinematic wave)을 이용하여 추적하고, 가정배수와 함께 하수도로 유입, 운동과 해석법으로 추적된 하수도흐름으로서 하천에 유입시킨다. 또한 논에서부터 유출된 물도 마찬가지로 운동과 해석법으로 추적된 용수도류로서 하천까지 이동된다. 그 외의 토지이용부분에서는 지표면흐름을 kinematic wave법으로, A~D층은 선형저류법으로 수량을 추적해서 각 층의 저류수량이 포화상태가 되면 상층으로 복귀류로서 유입한다. 하천류는 하수도 및 용수도와 마찬가지로 운동과 해석법을 이용한다. 수리학적 흐름해석에는 대표적으로 동역학과 해석, 확산과 해석, 운동과 해석으로 구분되어 지며, 이들 방법들은 흐름의 단순화 정도에 따라 차이가 발생한다. 본 모형은 단순화된 조건하에서 사용하기 적합한 해석해가 존재하여 검증이 용이하고 넓은 범위의 조건하에서 적용성이 우수하며 강우-유출로 인한 지표류를 추적하기 위하여 보

편적으로 적용하고 있는 운동과 해석법을 이용하였고 기본식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x, t) \quad (9)$$

$$q = \alpha h^m \quad (10)$$

여기에서 x : 상류단으로부터의 거리(m), h : 수심(m), q : 단위폭당 유량(m^2/s), r : 단위폭당 횡유입량(m/s), t : 시간(sec), α, m : 정수로서 흐름이 manning의 저항법칙에 따르는 경우, $m=5/3$, $\alpha = \sqrt{\sin\theta}/n$ (n : Manning조도계수, θ : 사면경사각)

A~D층의 유출량은 각각 다음과 같은 선형저류식에서 계산된다.

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (11)$$

$$O = kS \quad (12)$$

여기에서 S : 저류량고(mm), I : 유입강도(mm/h), O : 유출강도(mm/h), k : 침투계수(h^{-1})

단, 침투계수는 다음 식에서 구해진다.

$$I = P_{in} + Q_{in} \quad (13)$$

$$O = P_{out} + Q_{out} \quad (14)$$

$$k = k_1 + k_2 \quad (15)$$

여기에서 P_{in} : 상층으로부터의 침투강도(m/s), P_{out} : 하층으로의 침투강도(m/s), Q_{in} : 상류격자로부터의 유입강도(m/s), Q_{out} : 하류격자에의 유출강도(m/s)

또한, k_1, k_2 는 다음 식으로부터 계산된다.

$$k_1 = \frac{k_H \sin\theta}{B\epsilon} \quad (16)$$

$$k_2 = \frac{k_V}{\varepsilon} \quad (17)$$

여기에서 k_H : 수평침투계수(m/h), k_V : 연직침투계수(1/h), θ : 사면경사각, B : 격자폭(m), ε : 유효공극율

3. 대상유역 선정 및 GIS 수문 매개변수 구축

본 연구에서는 비교적 정확한 기상자료와 장기간의 수문자료를 갖고 있는 일본의 쇼나이강 유역을 연구대상지로 선정하였다. 쇼나이강 유역은 행정구역상으로는 기후현(岐阜縣)에 위치하고 있는 1급 하천으로, 중부지방을 대표하는 도시하천이다. 본 연구대상지는 Fig. 3과 같이 유역면적은 532이고, 유로연장은 약 80이며 현재 나고야 시를 중심으로 최근 급격하게 도시화가 진행되고 있다(박진혁, 2004).

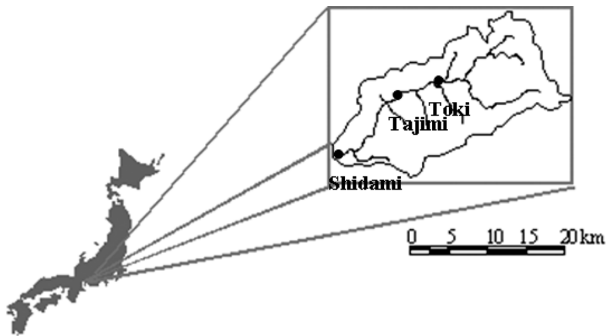


Fig. 3. Study area

본 연구에 필요한 지형 및 토지피복자료는 일본 국토지리원(국토지리원, 1995)에서 발간하는 수치정보를 이용하였다. DEM 자료는 격자 해상도가 50m, 250m, 1km의 3종류가 있으며, 토지피복도는 Landsat에서 15종류로 분류한 토지피

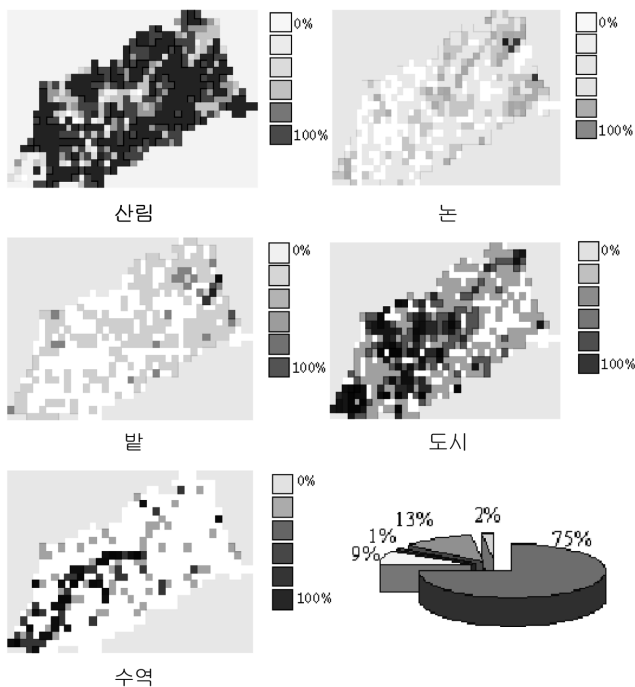


Fig. 4. Land cover distributions of the Shonai river basin (resolution:1km)

복자료가 100m 해상도로 구축되어 있다. 본 연구에서는 15 종류의 토지이용분류를 유사한 유출특성 및 부하발생특성을 가진 항목을 하나의 항목으로 묶어서 산림, 논, 밭, 도시, 수역으로 5종류로 재분류하였다(Fig. 4).

격자기반의 분포형 모형을 구축하기 위한 격자의 해상도는 계산시간, 컴퓨터의 기억용량 및 유역면적 등을 고려하여 아래의 식을 개발하여 격자크기를 결정하였다.

$$\sqrt{AREA/25} = MESH(km) \quad (18)$$

여기에서 $AREA$: 유역면적(km²), $MESH$: 정수를 가진 유역 격자크기(km) 이다.

위의 식에서 25라는 값은 과거의 사례연구를 통하여 유역면적이 500km²의 유역의 경우엔 격자해상도가 1km, 1000 km²의 유역의 경우엔 격자해상도가 2km 정도에도 비교적 신뢰할 만한 유출량이 계산되었다는 근거에서 설정한 경험값으로, 개략적인 해상도 크기를 표현한 것으로 향후 컴퓨터 성능의 향상 등에 따라 조정될 수도 있다.

본 연구대상 유역인 쇼나이강 유역(532km²)의 격자 해상도는 단기유출량 (홍수시)해석의 측면에서 보면 컴퓨터의 계산시간 및 용량에 제한을 받을 정도가 아니나, 대유역적용을 위하여 장기유출량 해석(이수)의 측면에서 보면 하나의 격자에 수많은 입력 자료가 필요하며 장기간의 시뮬레이션 계산도 필요하므로 계산당시의 컴퓨터 성능을 고려하여 1km로 결정하였다.

하도망은 대표적인 상용 GIS소프트웨어인 ARC/VIEW에서 채택하고 있는 Jensen의 알고리즘을 기본으로 함몰부(sink)의 처리 - 흐름방향(Flow Direction)의 해석 - 흐름누적(Flow Accumulation) 과정을 통하여 흐름누적값에 대한 경계값을 부여함으로써, 일정 갯수 이상의 격자가 추출되어야만 하도를 형성할 수 있다는 개념으로 추출하였다(Fig. 5).

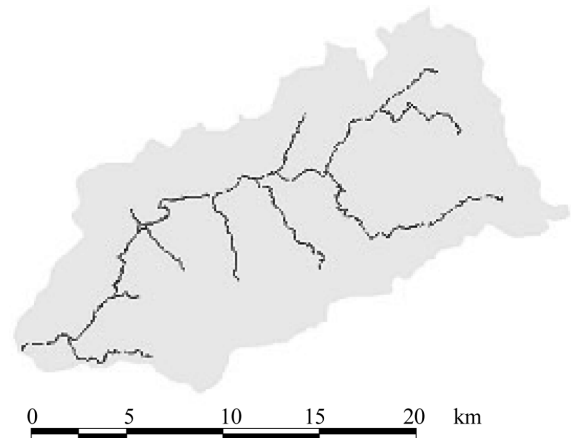


Fig. 5. Stream network and flow routing map in shonai River Basin

4. 모형 적용 및 결과

입력인자로 사용되는 각종 수문매개변수 및 강우자료들은 GIS기법을 이용하여 추출하였다. 중발산과정, 적설·융설과정에서의 해석결과를 입력값으로 해서 표면유출, 토양내 침

투, 하천유하 등의 각 유출과정을 해석하였고, 계산기간은 1994~1996년까지의 3년간의 장기유출량을 모의하였다. 상당수의 매개변수들은 GIS 등을 이용하여 추정치를 입력하거나 기존에 추정치가 나와 있기 때문에 매개변수는 주로 A~D층의 연직, 수평 침투계수를 중심으로 시행착오법으로 보정하였다. 순서로서는,

1. 체적오차의 백분율(VER)이 기준값 이하가 되도록 총 유출량을 합한다.
2. 침투유량의 오차백분율(QER)이 기준값 이하로 되도록 피크유량을 맞춘다.
3. 모형의 적합성 평가를 통하여 VER 및 QER이 15% 이하에 해당하면 보정을 종료한다.

아랫방향의 침투계수를 크게 하면 변동의 진폭은 변화하지 않지만, 전체적으로 총량은 작아지게 된다. 횡방향의 침투계수를 크게 하면 전체적으로 총량이 크게 된다. 또한, 침투유량은 침투계수, 특히 B층 이하의 침투계수에 의한 영향이 크다.

강우-유출해석의 결과로부터 모형의 적합성 평가조건은, 체적오차의 백분율(VER) 및 침투유량의 오차백분율(QER)을 산정해서 VER 값이 15%이하, QER값이 15%이하로 판정되었을 때 매개변수의 보정을 종료하였다. 각각의 계산식은 다음과 같다.

$$VER = \left| \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})}{\sum Q_{obs}} \right| \times 100 < 15 \quad (19)$$

$$QER = \left| \frac{Q_{pobs} - Q_{pcal}}{Q_{pobs}} \right| \times 100 < 15 \quad (20)$$

여기에서 Q_{obs} : 관측유량, Q_{cal} : 계산유량, Q_{pobs} : 관측피크유량, Q_{pcal} : 계산피크유량

Fig. 6은 1995년 장기유출량 해석결과를 관측치와 비교한 수문곡선을 나타내었고, Fig. 7은 홍수시 침투유량 때의 유출해석 결과를 분포형모형의 특성을 살려 GIS상에서 공간분포로 표현하였다.

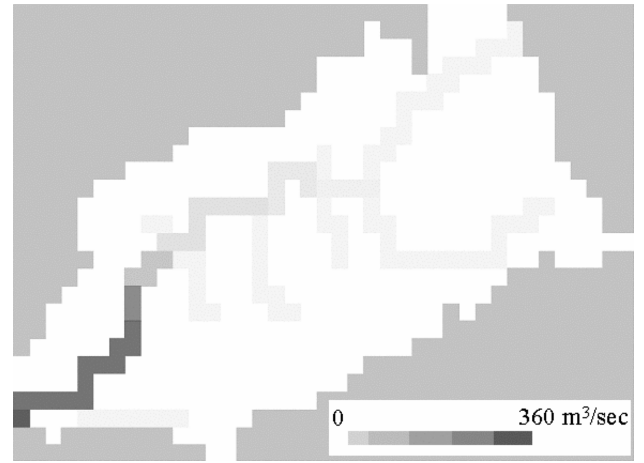


Fig. 7. Distribution of discharge during the flood in the Shonai River Basin (1995)

강우-유출해석 결과로부터 모형의 적합도를 평가한 결과 3년간의 하천유량(일관측)의 관측값과 계산값의 평균 상관계수는 Fig. 8과 같이 0.848로 나타났고, 체적오차의 백분율

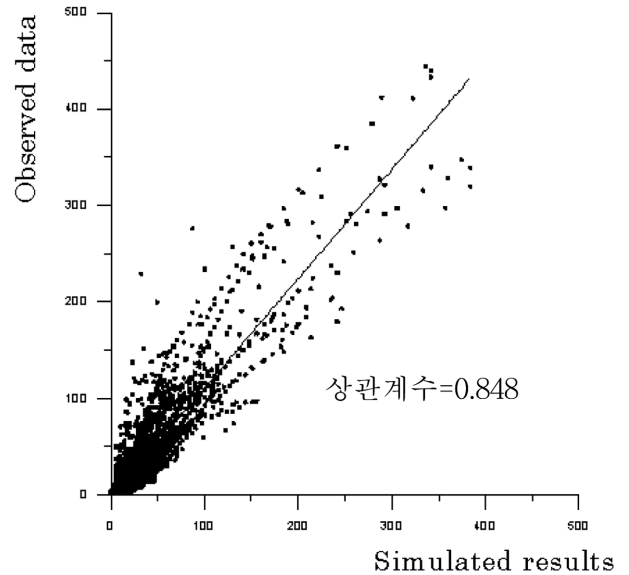


Fig. 8. Correlation between simulated results and observed data at Shidami (1995)

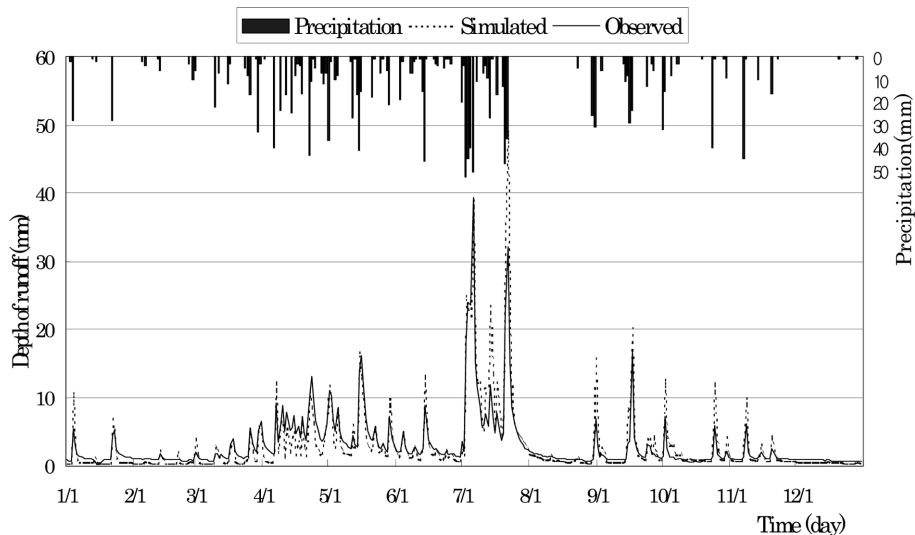


Fig. 6. Discharge sequences at Shidami, the Shonai River (1995)

(VER) 및 침투유량의 오차백분율(QER) 지표는 각각 0.24와 13.7로 나타나 비교적 재현성 높은 결과를 보여주었다.

하여야 하며, 국내유역에서의 적용도 검토하여 본 모형의 범용성을 검증할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 장기 유출량 측면에서 시계열 및 공간적인 유역특성을 반영하여 보다 상세한 유출모의가 가능하도록 공간격자 기반의 분포형 유출모형을 개선하였다. 수량이류과정에서 용설·적설과정 모듈을 추가로 개발하였고, GIS를 이용하여 유역의 공간적인 특성을 반영한 보다 정확하고 신뢰성 있는 수문매개변수들을 추출함으로써 기존모형을 개선하였다. 본 모형의 적용성 검증을 위해서 비교적 신뢰할만한 기상자료와 장기간의 수문자료를 보유하고 있는 일본의 쇼나이강 유역(532)을 대상으로 과거 3개년간의 장기 유출량을 시·공간적으로 파악할 수 있도록 구축하였고, 수문곡선 비교 결과 비교적 재현성 높은 유출 결과를 모의할 수 있었다. 본 모형에서는 강우자료를 티센분할에 의한 티센강우량을 입력하였으나, 향후 정량적 강우에 의한 격자기반의 강우를 적용시켜 보다 공간적인 강우량의 변동을 모의할 수 있도록

참고문헌

배덕효(2005) 도시유역에서의 레이더 강수 추정, **자연과 문명의 조화**, 대한토목학회, 제53권 제9호, pp. 38-42.

일본국토지리원(1995) DEM, **토지피복도**.

박진혁(2003) GIS기반의 분포형유출모형을 이용한 비교수문학의 제안, **교토대학, 공학박사학위논문**, pp. 39-60.

박진혁, 황의호, 이근상, 채효석(2004) 분포중발산량 산정결과와 격자형 GIS표현, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제7권 제4호, pp. 88-97.

최지혜, 배덕효, 남재철, 김정운, 안병철(2003) 레이더강우량을 활용한 왕숙천 유역의 유출해석, **한국기상학회 학술발표지**, 한국기상학회, 제13권 제1호, pp. 570-573.

Brian E. Skahill, 최우희, 김민환, 김성균, Lynn E. Johnson (2003) 기상레이더와 지형정보시스템을 이용한 분포형 강우-유출유역모형의 개발과 검증, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권 제2호, pp. 285-300.

近藤純正(1994) 水環境の氣象學, 朝倉出版, pp. 333.

(접수일: 2008.1.16/심사일: 2008.3.6/심사완료일: 2008.4.4)