

물리적기반의 분포형모형을 활용한 임진강유역 홍수유출모의 Flood Runoff Simulation Using Physical Based Distributed Model for Imjin-River Basin

박진혁* / 허영택**
Park, Jin Hyeog / Hur, Young Teck

Abstract

2/3 of the Imjin River Basin area is located in North Korea, so it was hard to acquire reliable rainfall and hydrological information. This point is one of the factors that has added to flood damage. In this study, flood runoff for the river basin was simulated using hydrological radar, which is installed in an effort to reduce flood damage in the Imjin River Basin, which habitually suffers from flood damage. The feasibility of the distributed flood model was reviewed for the river basin, which is lacking in hydrological data such as rainfall and recent soil data. Based on the hydrograph, observed value was not consistent partially because of insufficient data, but peak discharge and the overall pattern showed relatively precise runoff results which can be applied in actual work.

keywords : Distributed Rainfall-Runoff Model, Imjin River Basin, Flood Discharge, GIS

요 지

임진강유역은 유역의 2/3가 북한에 위치하고 있어 신뢰성 있는 강우 및 수문정보를 획득할 수 없었다는 점이 지금까지 홍수 피해를 가중시킨 요인 중의 하나로 지적되어 왔다. 본 연구에서는 상습적으로 홍수피해를 겪고 있는 임진강유역의 홍수피해를 경감하기 위한 노력의 일환으로서 임진강유역에 설치된 수문레이더를 활용하여 임진강 수계 전체에 대한 홍수유출을 모의하고자 하였다. 강우 및 최근 토양자료 등의 수문자료 확보가 곤란한 유역에 대하여 자체 개발한 분포형모형의 적용 가능성을 검토하였다. 수문곡선 결과 가용자료의 부족으로 인해 부분적으로 관측값과 불일치하는 경우도 있었지만, 첨두유량 및 전체적인 패턴은 비교적 양호한 결과를 보여줌으로써 실무적용가능성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 분포형 강우유출모형, 임진강유역, 홍수유출, 지리정보시스템

1. 서 론

임진강유역의 상류부는 급경사의 좁은 하도로 되어 있어 유출시간이 빠르고, 하류부는 하상경사가 낮은 평

야지대이기 때문에 조위의 영향을 받으므로 하류 지역으로 갈수록 홍수피해의 가능성이 큰 특징을 가지고 있다. 이 지역은 대부분 군사보호지역으로 지정되어 있고, 유역의 2/3가 북한에 위치하고 있어 홍수 예·경보

* 정희원 · 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원대우
Principal Researcher, KIWE, K-Water, Daejeon 306-711, Korea

** 교신저자, 정희원 · 한국수자원공사 물관리센터 공동연구원
Corresponding Author, Co-researcher, Water Resources Operations Center, K-Water, Daejeon 306-711, Korea
(e-mail: korcivil@hanmail.net)

를 위한 정확하고 충분한 수문정보를 제대로 확보할 수 없어 홍수 피해를 가중시키는 요인 중의 하나로 지적되어 왔다(신용노 등, 1999). 1996년을 비롯하여 1998년, 1999년에 연이어 대규모 홍수가 발생하였던 임진강 유역의 홍수대책의 일환으로 도입된 임진강 강우레이더는 면관측 또는 공간관측 자료를 제공함으로써, 기존의 우량계 관측망이 제공하지 못하는 강우의 공간분포와 이동발달상황 등을 우수한 해상도로 제공하고 있으며 관측이 불가능한 북한지역의 강수량 정보를 실시간으로 추정해 냄으로서 이를 활용한다면 보다 신뢰성있는 홍수예보 시스템의 구축이 가능하다(김병식 등, 2008).

현재, 국내 다목적댐을 운영하고 있는 수자원공사 물관리센터에서는 종관일기예보를 바탕으로 유역별 강수총량예측과 저류함수법을 기반으로 한 Kwater-홍수분석모형을 이용하여 저수지 홍수유입량을 추정하고 있는데, 태풍이나 국지성 집중호우의 경우 강수의 발달과 소멸이 매우 짧은 시간에 이루어지고, 공간적인 분포의 변화가 매우 심하기 때문에, 종관일기예보에서 이러한 변화에 대한 충분한 정보를 제공하기란 쉽지 않다. 과거 수자원관리를 위해서는 지상강우관측소에서의 관측자료가 주류를 이루었고, 지금까지도 이러한 자료는 실제 지상에 떨어진 강수자료로서 활용가치가 매우 높다. 그러나 악기상시의 태풍이나 대류형의 집중호우가 발생하였을 때, 강수 클러스터의 이동경로나 강도 등을 예측하기 위해서는 강수대의 공간분포를 정확히 파악해야 하는데, 이 경우 레이더 등의 원격탐사자료가 유용하게 활용될 수 있다(박진혁 등, 2007). 또한, 북한지역이 포함된 임진강유역의 강수자료를 입수하기 위해서는 유역 전체의 실시간 강수량 관측이 가능한 수문레이더를 활용하여 강우의 시공간분포를 관측하여 지상강우관측망의 강수량 및 누적강수량의 측정으로 레이더 정보를 보정하여 격자기반의 정량적 강수량을 산정하여 분포형 강우-유출모형에 적용함으로써 홍수량 산정 및 홍수에·경보업무에 활용하는 것이 필요하다.

이러한 연구배경을 바탕으로 본 연구에서는 상습적으로 홍수피해를 겪고 있는 임진강유역의 홍수피해를 경감하기 위한 노력의 일환으로서 임진강유역에 설치된 수문레이더를 활용하여 관측이 불가능한 북한 지역의 강수량 정보를 한강홍수통제소에서 제공받아 자체개발한 물리적기반의 분포형 홍수유출모형인 H-DRUM (Hydrologic & Hydraulic Distributed flood RUoff Model)을 이용하여 임진강 수계 전체를 대상으로 2006년 7월 사상에 대하여 홍수유출모의를 실시하였으며 관측 수문곡선과 비교함으로써 실무에서의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 모형의 개요 및 이론

2.1 모형의 개요

본 모형개발에 있어 이론적 배경이 된 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(박진혁 등, 2003). 본 연구에서는 모형의 각종 수문매개변수들을 GIS와 연계하여 직접 입력할 수 있도록 하였으며, 물리적기반의 침투과정을 모의할 수 있도록 Green-Ampt모형을 추가하였고, 향후 레이더 강우 및 수치예보강우의 홍수유출예측을 염두에 두고 격자강우량을 활용할 수 있도록 하였으며 모형의 구동 시간을 최대한 단축하는 등 실시간 홍수유출해석을 위한 분포형 강우-유출모형으로 개발하였다(박진혁 등, 2008).

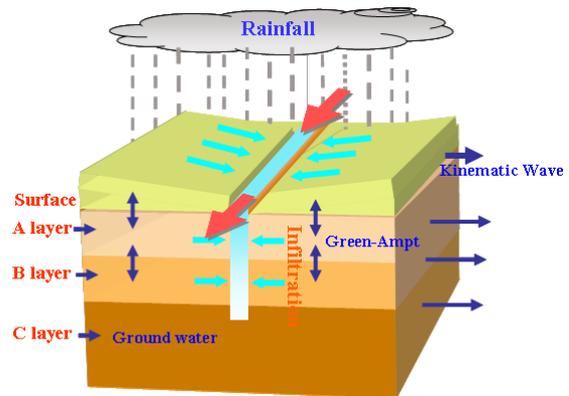


Fig. 1. Basic Structure of the Model

2.2 모형의 구성 및 이론

유역내 수평 유출량산정 모듈로서 평면 분포형의 격자형, 연직분포형으로 다층모형을 이용해서 격자기반 다층유출모형을 적용한다. 연직구조는 A~B층의 수평 유출량은 하천으로 유입하고, C층은 하천유량에 영향을 미치지 않는 지하수층으로 가정하였다(Fig. 1). 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. 본 모형은 단순화된 조건하에서 사용하기 적합한 해석해가 존재하여 검증이 용이하고 넓은 범위의 조건

하에서 적용성이 우수하며 강우-유출로 인한 지표흐름을 추적하기 위하여 보편적으로 적용하고 있는 운동과 해석법(kinematic wave)을 이용하였다(박진혁 등, 2008).

지표 흐름 및 A층(얇은면 흐름)은 중간유출을 고려한 운동과법을 적용하였고, B층(지표하 흐름)과 C층(지하수 흐름)은 선형저류법을 적용하였다. 각층에서의 유출해석을 위한 지배방정식과 각각의 변수에 대한 내용은 다음과 같다(Beven, 1979).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r, \quad r = R + U_B - f \quad (1)$$

$$q = \left(\frac{\alpha(h - d_A)^m + \beta h}{\alpha h} \right), \quad (2)$$

$$\text{when } \begin{cases} h \geq d_A \\ h < d_A \end{cases}, \quad d_A = \lambda_A D_A, \quad m = \frac{5}{3}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sin\theta}}{n} \text{ (Manning type)}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{k_A \sin\theta}{\lambda_A} \text{ (Darcy type)}$$

$$U_B = \begin{pmatrix} S_B - d_B \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \text{when } \begin{cases} S_B - d_B \geq 0 \\ S_B - d_B < 0 \end{cases}, \quad d_B = \lambda_B D_B \quad (4)$$

$$\frac{dS_B}{dt} = I_B - O_B, \quad I_B = f_A + U_C, \quad (5)$$

$$O_B = O_{h_B} + O_{v_B}, \quad O_{h_B} = k_{h_B} S_B, \quad O_{v_B} = k_{v_B} S_B$$

$$U_C = \begin{pmatrix} S_C - d_C \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \text{when } \begin{cases} S_C - d_C \geq 0 \\ S_C - d_C < 0 \end{cases}, \quad d_C = \lambda_C D_C \quad (6)$$

$$\frac{dS_C}{dt} = I_C - O_C, \quad I_C = O_{v_B} + O_{C_{VP}}, \quad (7)$$

$$O_C = O_{h_C}, \quad O_{h_C} = k_{h_C} S_C$$

여기서, h : 수심(m), q : 단위폭당 유량(m^2/sec), R : 강우강도(m/sec), f : Green-Ampt식으로 산출한 침투강도(m/sec), θ : 사면경사각, n : Manning의 조도계수, k_A : A층의 투수계수(m/sec), $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$: A, B, C층의 공극율, D_A, D_B, D_C : A, B, C층의 유효토심(m), d_A, d_B, d_C : A, B, C층의 포화저류가능량(m), U_B : B층에서 A층으로 복귀하는 유량강도(m/sec), U_C : C층에서 B층으로 복귀하는 유량강도(m/sec), S_B, S_C : B, C층의 저류

량(m), I_B, I_C : B, C층의 유입강도(m/sec), O_B, O_C : B, C층의 유출강도(m/sec), O_{h_B}, O_{h_C} : B, C층에서의 횡방향 유출강도(m/sec), O_{v_B} : B층에서의 종방향 유출강도(m/sec), k_{h_B}, k_{h_C} : B, C층에서의 횡방향 투수계수(m/sec), k_{v_B} : B층에서의 종방향 투수계수(m/sec), $O_{C_{VP}}$: C층의 상류경계로 유입하는 유입유량강도(m/sec)

강우발생시 토양내부로의 침투강도를 계산하기 위하여 Mein 과 Larson(1971)이 제안한 Green-Ampt식을 이용하였고 수식은 다음과 같다.

$$F_t = k_s \Delta t + \psi(\theta_s - \theta_0) \ln \left(1.0 + \frac{F_t}{\psi(\theta_s - \theta_0)} \right), \quad (8)$$

$$f_t = k_s \left(1.0 + \frac{\psi(\theta_s - \theta_0)}{F_t} \right)$$

여기서, F_t : t 시간에서의 누가침투량(m), k_s : 유효투수계수(m/sec), Δt : 계산시간 간격(sec), ψ : 습윤선 흡입수두(m), θ_s : 포화 함수비, θ_0 : 초기 함수비, f_t : t 시간에서의 침투강도(m/sec)

t 시간에서의 누가침투량은 비선형식이기 때문에 Newton-Raphson법을 이용하였고 초기조건으로 전 시간단계에서의 누가침투량을 이용하였다.

하도에서의 유출을 계산하기 위한 지배방정식과 각각의 변수에 대한 내용은 다음과 같다(Beven, 1979).

$$\frac{\partial A_r}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial x} = q_r, \quad Q_r = \alpha_r A_r^{m_r}, \quad (9)$$

$$\alpha_r = \left(\frac{\sqrt{I}}{n} \right) \left(\frac{m}{(2\sqrt{1+m^3})^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad m_r = \frac{4}{3}$$

여기서, A_r : 하도의 유하단면적(m^2), Q_r : 유량(m^3/sec), q_r : 횡유입량(m^2/sec), I : 하도경사, n : 하도의 조도계수, m : 하도의 법면경사

각각의 격자에 적용한 초기조건 및 상류단 경계조건은 다음과 같다.

$$A(0, x) = A_0(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (10)$$

$$A(t, 0) = A_B(t), \quad 0 \leq t$$

여기서, A : 유하단면적(m^2), L : 하도 및 사면의 길이(m), A_0 : 시간 $t=0$ 에서의 유하단면적(m^2), A_B : 격자의 상류단 유하단면적(m^2)

지표흐름 및 하도흐름에 대한 지배방정식에 초기조

건 및 경계조건을 이용하여 수치해를 얻기 위하여 본 모형에서 사용한 유한차분 근사기법은 각종 수치기법 중에서 비교적 안정적으로 계산이 수행되는 Beven (1979)의 차분스킴을 적용하였다. Eq. (1)과 Eq. (9)와 같은 형태의 편미분 방정식을 시간과 공간 평면상에서 적절한 차분간격에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{q_i^{t+1} - q_i^t}{\Delta t} + \gamma c_{i-1/2}^{t+1/2} \left(\frac{q_{i+1}^{t+1} - q_i^{t+1}}{\Delta x} - r \right) \\ & + (1 - \gamma) c_{i+1/2}^t \left(\frac{q_{i+1}^t - q_i^t}{\Delta x} - r \right) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$c_{i-1/2} = 0.5(c_i + c_{i-1}), \quad c = \frac{dq}{dA}$$

여기서, Δx : 공간차분간격(m), Δt : 시간차분간격(sec), q_i^t : 위치 i 와 시간 t 에서의 유량(m^3/sec), γ : 시간가중계수, c : 운동과 속도(m/sec)

위 식은 미지의 값 q_{i+1}^{t+1} 에 대하여 비선형식이기 때문에 Newton-Raphson법을 이용하여 반복 수렴계산을 하여 q_{i+1}^{t+1} 을 구한다(박진혁 등, 2008).

3. 대상유역 및 GIS tool을 이용한 수문매개변수 구축

3.1 대상유역

임진강유역은 한반도의 중앙부를 가로지르는 38도선에서 북쪽으로 길게 위치하고 있다. 이 유역의 주하천인 임진강은 함경남도 덕원군에 위치한 마식령 산맥에서 발원하여 강원도와 황해도를 거쳐 경기도로 들어와 유역의 제1지류인 한탄강과 합류한 후 서해의 강화만으로 유입한다(우효섭 등, 1996).

임진강유역의 전체 유역면적은 8,117 km^2 , 총 유로연장은 254.6 km로 상류부는 급경사의 좁은 하도이어서 유출시간이 빠르고, 하류부는 하상경사가 낮은 평야지대이어서 조위의 영향을 받으므로 하류 지역으로 갈수록 홍수피해의 가능성이 큰 특징을 가지고 있다. 이 지역은 대부분 군사보호지역으로 지정되어 있고, 유역의 2/3(63.3%)가 북한에 위치하고 있어 홍수 예·경보를 위한 정확하고 충분한 수문정보를 얻을 수 없었다는 점이 홍수피해를 가중시킨 요인 중의 하나로 지적되어 왔다(통일부 등, 2006). 임진강유역의 강우관측은 해방 전 8개의 우량관측소가 설치·운영되었으나 1944년까지 기록이 있고 그 후 1968년 철원에서 우량관측을 재개하기까지 20년 이상이나 우량자료의 공백이 계속되었다.

그 후에도 수문관측은 제대로 수행되지 못했고 1990년대 들어 본격적인 우량관측이 수행되어 현재 총 19개소의 우량관측소가 설치·운영되고 있다(엄경택 등, 2000).

임진강유역의 지형지세 및 하도, 수위관측소 등 기본 현황은 DEM자료 등을 ArcGIS에서 처리하여 Fig. 2에 나타내었다.

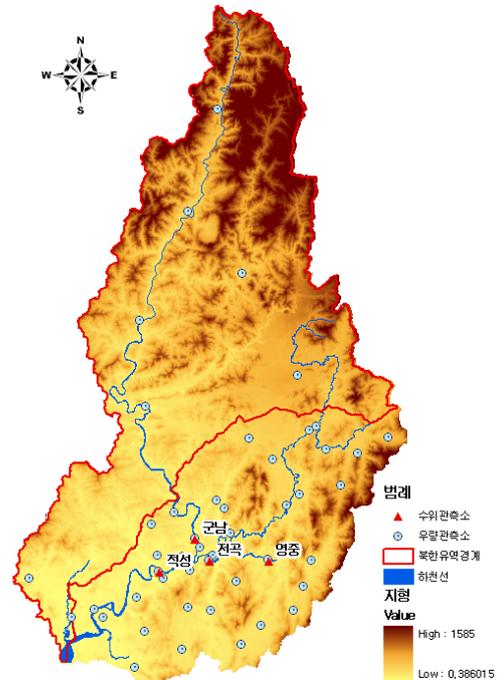


Fig. 2. Status Map of Imjin River Basin

3.2 GIS tool을 이용한 수문매개변수 추출

유역의 수문학적인 특성은 지형, 토지피복, 토양 등에 의해 크게 좌우된다. 본 연구에서는 한국수자원공사 조사기획처로부터 30 m 해상도의 DEM, 토지피복도(2004년) 및 토양도(남한지역)를 제공받아 HEC-GeoHMS를 ArcView에 탑재하여 아래와 같이 H-DRUM모형의 입력인자로서 ASCII포맷의 공간분포형 수문매개변수들을 추출하였다.

3.2.1 지형매개변수

임진강유역 30 m DEM을 ArcView에서 GIS 각 주제도의 투영과 해상도가 동일한 해상도를 갖도록 조정 한 후 1 km로 리샘플(Resample) 하였다. 흐름방향도는 ArcView에서 HEC-GeoHMS extension을 사용하여 유도하였다. 유역의 가로흐름을 막고 수계망을 향하여 유하방향도를 작성하기 위하여 Charleux-Demarge과 Peuch(2000)가 제안한 방법을 이용하여 30 m DEM과 전체 유역도로부터 유도된 수계망을 1km DEM에 중첩

Table 1. Main Hydrological Parameters

Original data	Hydrological parameters	Remark
DEM	Basin slope	ArcView (Spatial Analysis)
	Riverbed slope	ArcView (Spatial Analysis)
	Flow direction	HEC-GeoHMS
Land Cover	Roughness coefficient of land covers	Reclassify as 5 types
Soil Map	Efficient soil depth	Green-Ampt infiltration process
	Saturated conductivity	
	Wetting front suction	
	Effective porosity	
Grid resolution		1000 m (1km)

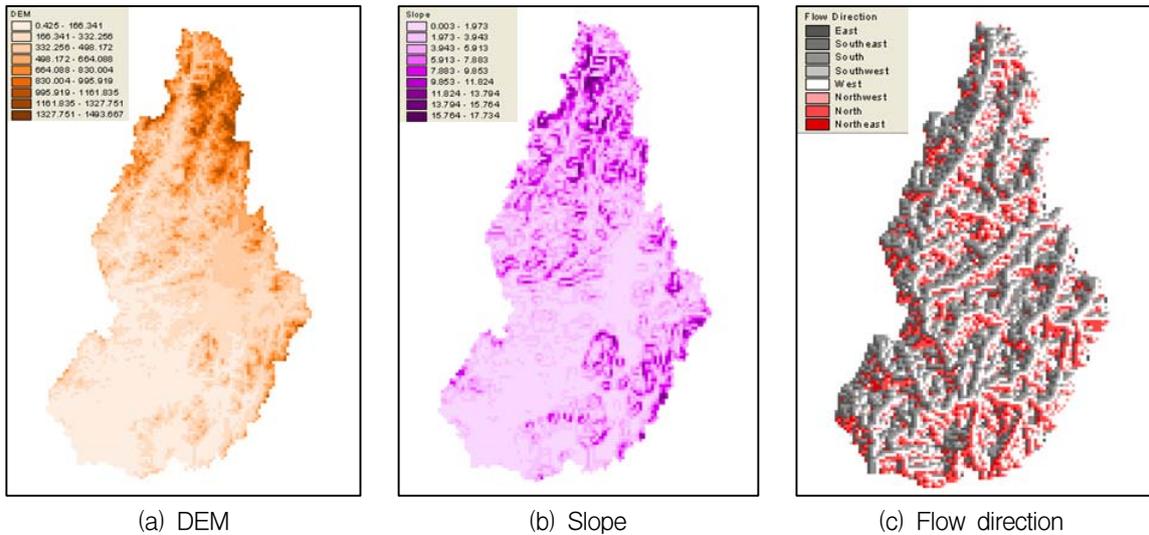


Fig. 3. Topographic Characteristics of Imjin River Basin

시켰다. 30 m DEM에서 유도된 수계망은 1 km H-DRUM모형 격자내에서 배수방향을 결정하는데 사용되었다. Fig. 3에 임진강 유역의 DEM과 이로부터 획득한 경사도 및 흐름방향도를 나타내었다.

3.2.2 토지피복 매개변수

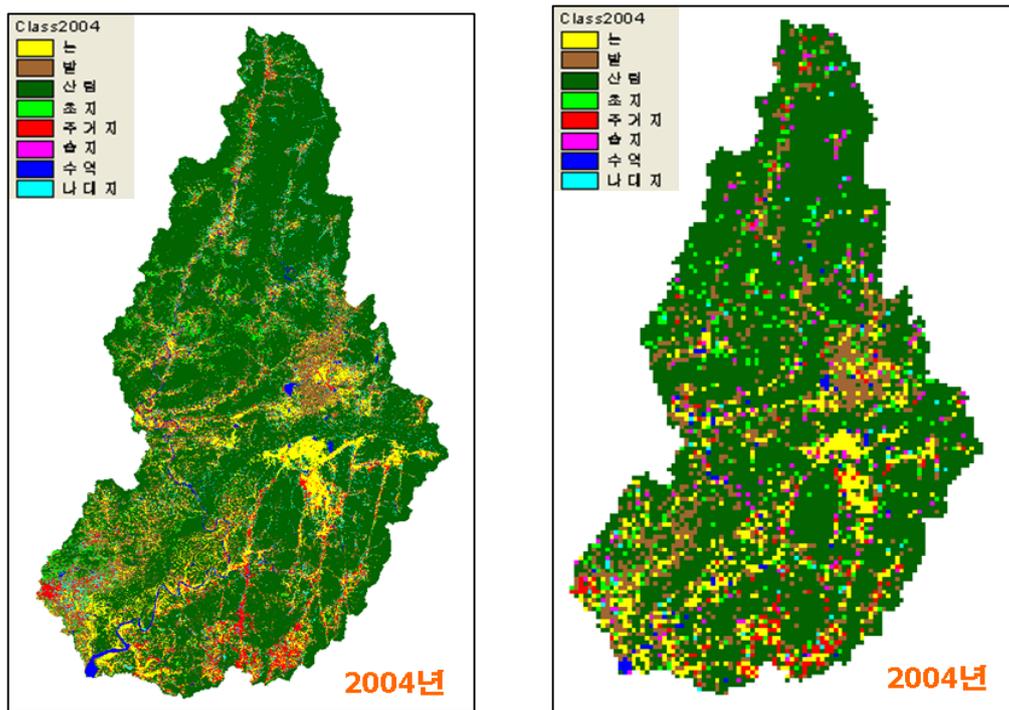
토지피복은 지표면 조도 및 불투수층의 분포를 좌우하며 이에 따른 유역의 수문응답 반응시간과 유출용적의 변화에 직접적인 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 30 m 해상도의 토지피복도를 이용하여 동일한 유출 부하 특성을 보이는 항목을 묶어서 8가지로 재분류하여 격자마다 조도계수를 계산하였다. 각각의 토지피복분류에 대한 전형적인 조도계수 값은 문헌에서 제시한 값 (Vieux, 2004)을 참고로 하였다(박진혁 등, 2006). Fig. 4는 2004년도 임진강유역의 토지피복도 현황을 30 m원 시자료와 분포형모형의 격자해상도에 맞게 1000 m로 리샘플링한 토지피복도 현황을 나타내고 있다. 각각의 토지피복분류에 대한 전형적인 조도계수 값은 Vieux가 제시한 값(Vieux, 2004)을 참고로 하였다. Table 2에 각

토지항목별 조도계수값을 표시하였다.

3.2.3 토양 매개변수

토양은 초기 함유수분, 토심, 입도분포 등에 따라 강우의 침투능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 토양도와 토양깊이, 점토와 모래비율 등의 정보가 포함된 남한지역의 GIS 토양주제도는 수자원공사 조사기획처로부터 제공받아 ArcView를 이용하여 토심 및 토양수분의 시간변화량 추정을 위한 Green-Ampt 침투 매개변수를 구하였다.

Green-Ampt식은 토양 수분에 따른 시간변화 영향을 물리적으로 설명하기 위해 Darcy법칙의 이론적인 근거에서 유도되어 흙의 성질로부터 계산될 수 있는 물리적인 의미를 갖고 다양한 토양조건에서 좋은 결과를 보여 주었다. 임진강 유역 30 m해상도의 토양자료를 모형의 격자해상도(1 km)에 맞게 리샘플링한 후 문헌에서 제시한 값(Vieux, 2004)을 참고로 토심 및 Green-Ampt 매개변수인 습윤전선(wetting front suction), 포화 투수 계수 그리고 유효공극율과 같은 침투 매개변수(Table 3)



(a) Land Cover(30m)

(b) Land Cover(1000m)

Fig. 4. Land Cover of Imjin River Basin

Table 2. Classification of Roughness Coefficient (Vieux, 2004)

Class	Land Cover	Roughness Coefficient
1	Water Area	0.03
2	Urbanization	0.015
3	Eroded Land	0.035
4	Marsh	0.05
5	Grassland	0.13
6	Forest	0.1
7	Paddy Field	0.05
8	Cropland	0.035

Table 3. Green-Ampt Infiltration parameters (Vieux, 2004)

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

를 산정하여 모형의 입력포맷인 ASCII파일로 변환하여 출력하였다. 북한지역에 대해서는 현실적으로 토양자료를 입수하기가 불가능하여 남한지역의 토양자료를 토대로 분포비율이 가장 높은 토양특성을 반영하여 분포시켰다.

4. 적용 및 결과

4.1 격자 강우자료 처리

본 연구에서는 유역에서의 분포형 강우유출모형을 적용함에 있어 모형의 중요 입력 자료인 강우는 한강홍수통제소 하천정보센터에서 지점강우와 합성한 임진강 레이더자료를 소유역별로 가공한 자료를 이용하였다. 임진강 강우레이더는 북쪽의 임진강 유역을 관측대상으로 하지만, 북한강 일부 및 한강 유역의 일부 지점에 대한 관측도 가능하다. Fig. 5는 한강홍수통제소로부터 제공받은 16개소로 분할한 소유역을 나타내고 있다.



Fig. 5. Sub-basins of Imjin River Basin

입력된 강우자료는 각각의 소유역에 포함되어 있는 격자에 해당 소유역의 시계열 강우자료가 적용되게 된

다. 또한 시단위의 강우자료는 모형의 계산시간 단위에 따라서 자동 선형보간되어 모형의 실행시에 입력자료로 사용되게 된다.

4.2 유출계산 결과

본 연구에 사용한 강우사상은 2006년 7월 11일부터 21일까지 태풍 “에위니아”를 포함하여 12일간의 강우사상에 대하여 적용하였다. 임진강 유역내 대표적인 4개 수위관측소(군남, 영중, 전곡, 적성)로부터 수위-유량 관계곡선에 의해 유량자료로 환산한 관측값과 비교해 본 수문곡선 결과를 Figs. 6 ~ 9에 나타내었다.

군남지점의 계산값은 관측값과 비교하여 전체적으로 비슷한 양상을 나타내고 있으나 7월 16일 전후에 발생한 초기침투시간은 약 2시간 빠르게 나타나고 있으며, 이후의 두번째 침투는 시간상으로는 비슷하게 나타나고 있지만 크기는 다소 작게 나타나고 있다. 이러한 침투 시간과 침투량의 차이는 군남지점의 상류유역이 북한에 위치해 있어 다른 지점들과는 달리 유출에 필요한 각종 매개변수의 정확도가 비교적 낮기 때문으로 판단된다.

영중지점의 경우 7월 12일에 발생한 침투유량과 침투시간은 다소 불일치하고 있고, 특히 7월 15일의 경우 침투유량의 크기가 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 영중지점은 대부분의 유역이 남한에 위치하여 있으며 비교적 기타 지점보다 수문매개변수의 정확도가 높다고 가정할 경우 이러한 오차발생의 원인은 레이더를 이용한 강우관측의 부정확성에 따른 것으로 판단된다.

전곡지점의 경우는 군남지점의 경우와 마찬가지로 대부분의 유역이 북한에 위치하고 있으며, 영중지점의 유입이 합류되는 지점이다. 7월 12일의 침투시간은 약 1시간 늦게 발생하고 있으며, 7월 15일의 경우 침투유량은 관측값과 비교하여 매우 크게 나타나고 있다. 전체적으로 유출 경향은 영중지점과 비슷하게 나타나고 있으며, 오차발생의 원인은 과다 추정된 강우자료에 의한 것으로 판단된다.

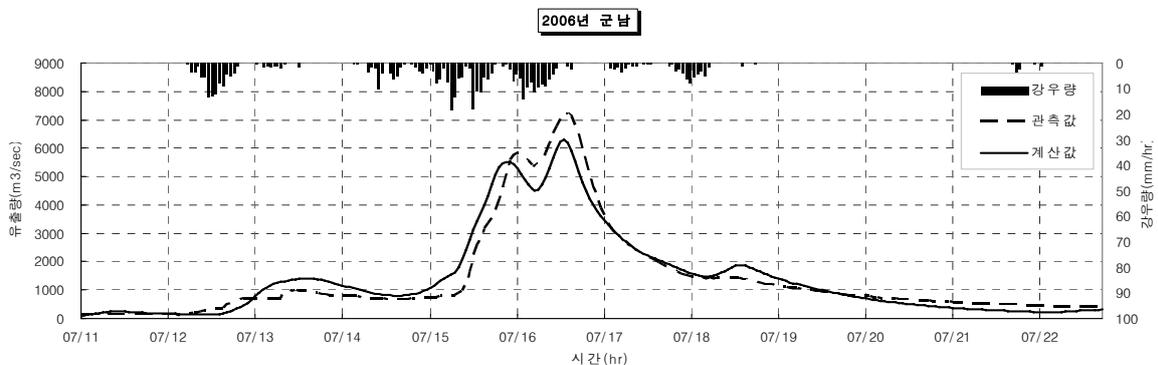


Fig. 6. Runoff Analysis Result at Gunnam Point

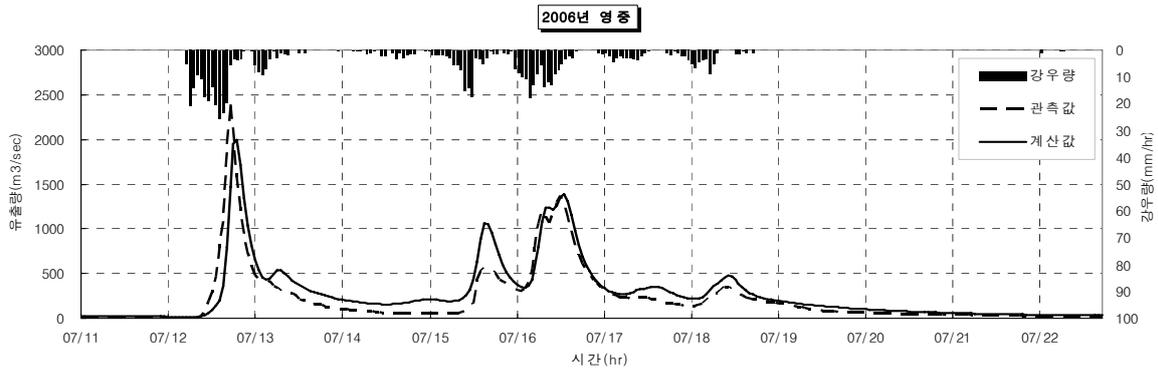


Fig. 7. Runoff Analysis Result at Youngjung Point

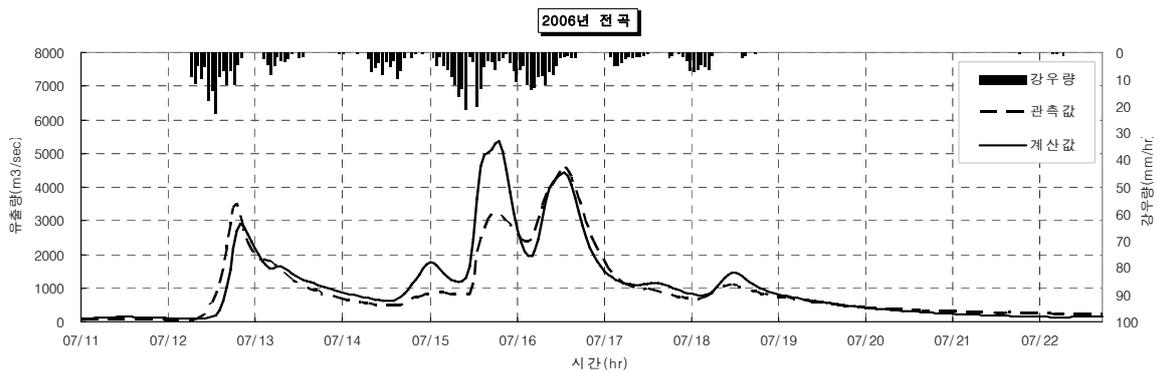


Fig. 8. Runoff Analysis Result at Jeungok Point

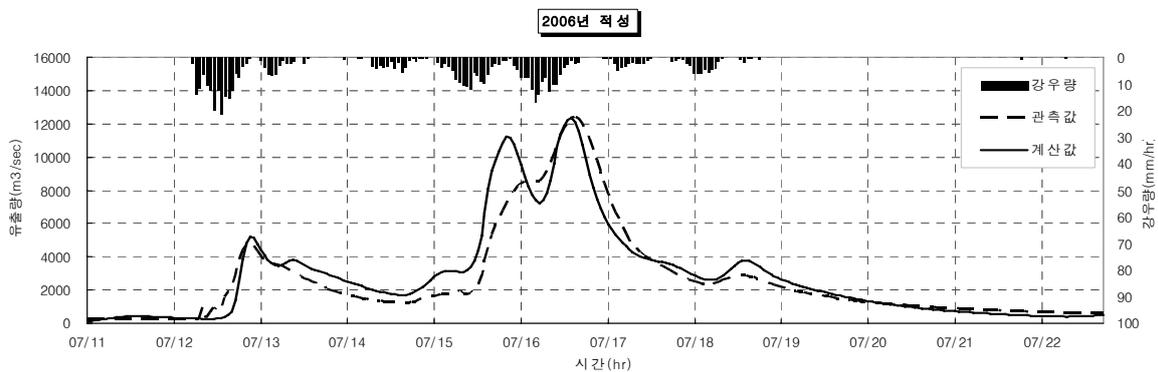


Fig. 9. Runoff Analysis Result at Juksung Point

적성지점은 군남, 영중, 전곡지점에서 관측된 유입량이 최종적으로 합류되는 곳으로서 상류 관측지점에서 발생된 오차의 특성이 그대로 나타나고 있다. 전체적으로 볼 때 7월 15~16일 사의의 유출은 관측값과 비교하여 다소 부정확하게 나타나고 있으나 전·후의 유출곡선은 비교적 비슷하게 나타나고 있다. 7월 16일에서 17일 사이에 발생한 첨두유량은 관측값과 매우 비슷하게 나타나고 있으나, 첨두시간은 관측값 보다 약 1시간 빠르게 나타나고 있다.

모형의 적합성을 평가하기 위하여 강우유출해석결과 중에서 체적오차 백분율(VER)과 첨두유량 오차 백분율(QER)을 산정하였다. 각각의 계산식은 다음과 같다.

$$VER = \left| \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})}{\sum Q_{obs}} \right| \times 100, \quad (12)$$

$$QER = \left| \frac{Q_{pobs} - Q_{pcal}}{Q_{pobs}} \right| \times 100$$

여기서, Q_{obs} : 관측유량(CMS), Q_{cal} : 계산유량(CMS), Q_{pobs} : 관측첨두유량, Q_{pcal} : 계산첨두유량 이다.

Table 4에 임진강유역의 4개 관측지점에 대하여 VER, QER, 추가로 계산유량의 합계와 관측유량의 합계를 나눈 총유출량오차를 비교하여 나타내었다. 적합성 평가 결과 4개의 지점에 대하여 QER은 군남지점에서 20.49%로 비교적 크게 나타나고 있고, 이외의 지점

Table 4. Reliability Assessment of the Distributed Model

Point	VER(%)	QER(%)	Total Error(%)
Gunnam	20.49	12.83	1.44
Youngjung	41.49	1.72	24.99
Jeungok	24.65	4.89	9.62
Juksung	22.40	0.65	7.83

에서는 4.89% 이하로 첨두유량의 크기를 정확하게 재현하였다. VER은 영중지점에서 41.49%로 다소 크게 나타나고 있고, 이외의 지점에서는 24.65% 이하로 나타나고 있다. 총유출량오차는 영중지점에서 24.99%로 다소 크게 나타나고 있고, 이외의 지점에서는 9.62% 미만으로 나타나고 있다. 결과적으로 임진강 유역에 대한 토양 기초자료의 미확보와 강우자료의 낮은 신뢰도에도 불구하고 본 모형을 이용한 유출해석결과는 군남과 영중지점에서 정확도가 낮게 나타나고 있으나, 전곡 및 적성지점에서는 정확도가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 첨두유량시 하천유출량을 분포형모형의 주된 장점중 하나인 전유역에 대하여 유역 내 임의의 지점에 대한 유출량을 파악하기 위하여 분포형 유출모형의 계산 결과값을 이용하여 시·공간적 분포를 나타내고 있다.

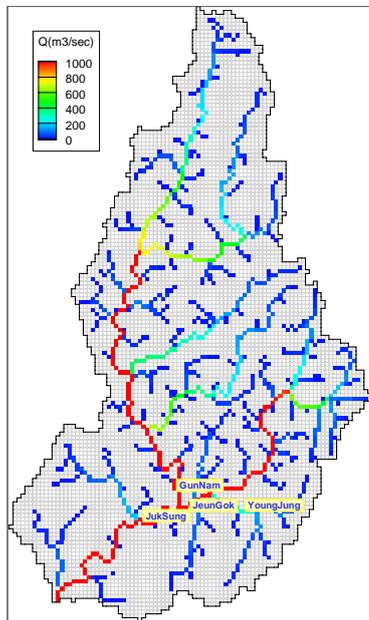


Fig. 10. Distribution Map of the River Discharge

5. 결론

본 연구에서는 유역면적의 약 2/3가 미계측 지역인 임진강유역의 지리적 특성으로 기존의 우량계 관측망이

제공하지 못하는 한계를 극복하기 위하여 임진강 레이더강우를 사용하였으며 임진강 유역조사 성과를 토대로 제공받은 GIS자료를 이용하여 임진강유역내의 공간수문매개변수들을 구축하였다. 또한 이를 입력 자료로 자체개발한 격자기반의 분포형 홍수유출모형인 H-DRUM을 적용하여 2006년 7월 사상에 대하여 홍수 유출모의를 실시하였다. 유출모의 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 4개의 관측지점에 대한 유출계산 결과 북한지역 토양도 자료의 미입수 그리고 북한지역에 대한 레이더강우자료의 결측 및 오류로 인하여 강우자료의 신뢰성이 낮음에도 불구하고, 토지피복, 지형자료 등 가용 가능한 기타 매개변수들의 추출과 물리적인 운동과 추적법에 의한 계산으로 관측값에 대해 비교적 양호한 재현성을 나타내었다.
- 2) 지점별 특성은 군남지점의 경우 강우자료에 의한 오차 발생보다 수문매개변수에 의한 오차발생이 지배적으로 나타났고, 영중과 전곡지점의 경우에는 강우자료의 부정확성에 따른 과다유출이 발생하였다. 적성지점은 상류지점의 특성을 그대로 나타내는 경향을 보였다.
- 3) 초기 유출계산결과 본 연구에 사용된 H-DRUM모형은 기본 매개변수(침투계수, 조도계수, 강우보정계수)의 별다른 보정 없이도 비교적 양호한 결과를 나타내었고, 강우사상(약 12일)에 대한 모형의 총 계산시간이 약 2~3분정도로서 실무에서 사용하기에도 충분하다고 판단된다.

결과적으로 본 모형은 토양의 물리적 특성이 계측되어 있지 않은 지역이나 계측이 불가능한 지역 또는 유역내 부분적인 계측자료의 미비 시 주관적이고 인위적인 수문매개변수의 수정이 없이도 비교적 양호한 홍수 유출계산을 가능하게 하며, 향후 다양한 유역에 대하여 적용가능성이 높다고 판단된다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 있어 임진강유역의 DEM, 토지피복도 등의 GIS수문자료는 한국수자원공사 조사가

획처로 제공받았으며, 레이더강우자료는 한강홍수통제소 하천정보센터로부터 제공받았습니다. 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

김병식, 배영혜, 박정술, 김정탁 (2008). “레이더강우와 분포형모형을 이용한 임진강유역의 홍수유출모의.” **한국수자원학회 08학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 738-743.

박진혁, 강부식 (2006). “댐유역 홍수예측을 위한 GIS 기반의 분포형모형과 집중형모형의 유출해석 비교.” **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제9권, 제3호, pp. 171-182.

박진혁, 강부식, 이근상, 이을래 (2007). “레이더와 Vflo를 이용한 남강댐유역 해석.” **한국지리정보학회 논문집**, 한국지리정보학회, 제10권, 제3호, pp. 13-21.

박진혁, 허영택 (2008). “홍수유출해석을 위한 운동과기반의 분포형모형 개발 및 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 455-462.

박진혁, 코지리, 토모스기 (2003). “유역환경평가를 위한 GIS기반 분포형유출모형의 구축(일본어).” **일본수문·수자원학회 논문집**, 일본 수문·수자원학회, 제16권, 제5호, pp. 541-555.

신용노, 박상근, 윤재홍, 박노혁, 채효석, 우형민 (1999). “임진강유역의 강우-유출모형 개발.” **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 47-50.

우효섭, 김양수, 이동률 (1996). “1996년 7월 임진강 유역 대홍수시 강우 및 홍수 특성.” **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 223-226.

염경택, 김주환, 신용노, 박명기, 박상근 (2000). “레이더를 이용한 임진강 유역의 홍수예경보 시스템 구축.” **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 245-248.

통일부, 건설교통부 (2006). 임진강유역조사 보고서.

Beven, K..(1979). “On the generalized kinematic routing method.” *Water Resources Research*, Vol. 15, pp. 1238-1242.

Mein, R. G. and Larson, C. L., (1971). “Modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process.” *Water Resources Research Center, Univ. of Minn., Minneapolis, Bull.* 43, pp. 21-29.

Charleux-Demargne, J. and Puech, C. (2000). “Quality assessment for drainage networks and watershed boundaries extraction from a Digital Elevation Model(DEM).” *Eighth ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems in Washington D.C.*, November 10-11, pp. 89-94.

Vieux, B.E. (2004). *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS. Second Edition*, ISBN: 1-4020-2459-2, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

(논문번호:08-98/접수:2008.09.17/심사완료:2008.12.08)