

격자기반 운동파 강우유출모형 KIMSTORM의 개선(I) - 이론 및 모형 -

A Modified grid-based KIneMatic wave STOrM Runoff Model (ModKIMSTORM) (I) - Theory and Model -

정인균* · 이미선** · 박종윤*** · 김성준****

Jung, In Kyun · Lee, Mi Seon · Park, Jong Yoon · Kim, Seong Joon

Abstract

The grid-based KIneMatic wave STOrM Runoff Model (KIMSTORM) by Kim (1998) predicts the temporal variation and spatial distribution of overland flow, subsurface flow and stream flow in a watershed. The model programmed with C++ language on Unix operating system adopts single flowpath algorithm for water balance simulation of flow at each grid element. In this study, we attempted to improve the model by converting the code into FORTRAN 90 on MS Windows operating system and named as ModKIMSTORM. The improved functions are the addition of GAML (Green-Ampt & Mein-Larson) infiltration model, control of paddy runoff rate by flow depth and Manning's roughness coefficient, addition of baseflow layer, treatment of both spatial and point rainfall data, development of the pre- and post-processor, and development of automatic model evaluation function using five evaluation criteria (Pearson's coefficient of determination, Nash and Sutcliffe model efficiency, the deviation of runoff volume, relative error of the peak runoff rate, and absolute error of the time to peak runoff). The modified model adopts Shell Sort algorithm to enhance the computational performance. Input data formats are accepted as raster and MS Excel, and model outputs viz. soil moisture, discharge, flow depth and velocity are generated as BSQ, ASCII grid, binary grid and raster formats.

Keywords : kinematic wave, distributed rainfall-runoff model, grid-based water balance, GIS

요 지

격자기반 운동파 강우유출모형 KIMSTORM(grid-based KIneMatic wave STOrM Runoff Model)은 유역의 지표흐름, 지표 하흐름 및 하천흐름의 시간적 변화와 공간적 분포를 모의할 수 있다. 본 모형은 유닉스 운영체제의 C++언어로 개발되었으며, 각 셀에서의 흐름을 모의하기 위하여 단방향흐름 알고리즘과 격자기반 수문학적 물수지요소를 채택하고 있으나 운영에 몇몇 제약사항이 있다. 본 연구에서는 기존모형을 개선하고자 하였으며, MS Windows 운영체제에서 실행 가능하도록 FORTRAN 90 언어를 이용하여 ModKIMSTORM을 개발하였다. 기존모형에 비해 개선된 주요사항으로, 물리적 기반의 침투기법인 GAML(Green-Ampt & Mein-Larson) 침투모형 추가, 격자 유출심과 Manning 조도계수에 의한 눈에서의 지표유출 제어, 지표격자의 기저유출 요소 추가, 공간강우와 지점강우의 처리, 전·후 처리부분 개발, 5개 평가항목(피어슨의 결정계수 R^2 , Nash & Sutcliffe 모형효율 E , 유출용적 편차 D , 침투유출의 상대오차 EQ_p , 침투시간의 절대오차 ET_p)을 이용한 모의결과의 자동 평가 기능을 개발하였다. 추가적으로, 모형의 계산효율을 향상시키고 지표격자의 기저유출을 하천격자로 이송하기 위하여 셀정렬 알고리즘을 채택하였다. 모형의 입력자료는 ESRI ArcInfo W/S 또는 ArcView와 같은 GIS 소프트웨어 및 MS Excel을 이용하여 간단히 구축할 수 있으며, 모의결과의 공간적 분포를 확인할 수 있는 토양수분, 지표유출, 유출심 및 유속분포도는 BSQ, ESRI ASCII Grid, ESRI Binary Grid 및 IDRISI Raster 형식으로 출력할 수 있도록 개선하였다.

핵심용어 : 운동파, 분포형 강우유출모형, 격자물수지, 지리정보시스템

1. 서 론

수문모형은 수자원 계획 및 평가 등 다양한 목적을 해결하는 방법으로 이용되고 있으며 최근 HEC-GeoHMS,

WMS 등과 같은 대부분의 수문모형에서 GIS(Geographic Information System)와 RS(Remote Sensing) 기법의 적용은 기본적인 요소가 되어 온지 오래다. 수문해석에 GIS/RS를 더욱 적극적으로 활용할 수 있게 된 것은 그동안 많은 연구

*정희원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사수료 (E-mail : nemoik@konkuk.ac.kr)

**정희원 · 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과 박사수료 (E-mail : misun03@konkuk.ac.kr)

***정희원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사과정 (E-mail : bellyon@konkuk.ac.kr)

****정희원 · 교신저자 · 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수 (E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr)

자에 의한 수자원 분야의 GIS/RS활용 방안에 대한 연구뿐만 아니라 국가차원의 양질의 GIS 데이터와 RS 분석자료 서비스를 제공함으로써 GIS/RS에 대한 접근이 더욱 쉬워진 것도 원인이 될 수 있다. 이와 함께 무어의 법칙을 적용하듯 향상되고 있는 컴퓨터의 성능은 더욱 큰 용량의 데이터 분석을 가능하게 하였으며 보다 가시적이고 물리적인 분석의 요구를 해결해주고 있다.

최근, 이와 같이 분포형 모형의 적용환경이 우수해짐에 따라 분포형 모형에 대한 관심과 활용은 더욱 증가하고 있으며, 1969년 Freeze와 Harlan이 처음으로 물리적 기반의 분포형 모형을 소개한 이후 Beven과 O'Connell(1982), Abbott 등(1986a), Bathurst 와 O'Connell(1992) 등에 의하여 제안된 공간적인 예측에 대한 공감대의 형성과 지속적 개발 노력에 따라 등장한 Systeme Hydrologique Europeen (SHE, Abbott 등, 1986a, 1986b; Bathurst 등, 1986a, 1986b)과 Institute of Hydrology Distributed Model (IHDM, Beven, 1985; Beven 등, 1987; Calver, 1988; Beven과 Binley, 1992; Calver와 Wood, 1995) 등과 같은 분포형 모형(Beven, 1996) 외에도 여러 수문학자들에 의하여 새로운 모형의 개발과 적용이 지속적으로 시도 되고 있다. 대표적인 분포형 모형을 국가별로 살펴보면, 미국에서 개발된 AGNPS(Young 등, 1989), ANSWERS(Beasley 등, 1980), DBSIM(Cabral 등, 1990), KINEROS(Woolhiser 등, 1990), CASC2D(Julien 등, 1995), GSSHA(Downer 등, 2002), *Vflo*TM(Vieux 등, 2002) 등이 있고, 영국에서 개발된 TOPMODEL (Beven 등, 1979), IHDM, 영국, 프랑스, 덴마크가 공동으로 개발한 SHE, MIKE SHE(Refsgaard와 Storm, 1995), 호주에서 개발된 THALES(Grayson 등, 1992a, 1992b), TOPOG(O'Loughlin, 1986, 1990), 일본에서 개발된 WEP(Jia 등, 2001), Hydro-BEAM(Kojiri 등, 1998, 2006) 모형 등이 있다. 최근에는 Jain 등(2004)이 Philip 침투모형과 St. Venant 확산과 근사식을 적용한 분포형 강우유출모형을, Jinkang 등(2007)은 습윤산림유역에 적용을 위한 분포형 강우유출모형을 개발하였으며, Bell 등(2007)은 RCM(Regional Climate Model)자료를 이용한 고해상도 격자기반 분포형 모형을 개발한 바 있다.

국내에서는 1990년대 중반부터 GIS를 이용한 수문모형의 적용 및 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 김대식 등(1995)이 격자 물수지를 이용한 강우유출모형을 개발하여 반월유역에 적용하였고, 최진용(1996)은 GIS를 이용한 장기 유출모형을 개발하여 동일유역에 적용한 바 있다. 김진택(1995)은 농업 비점오염 유출모형인 AGNPS와 GRASS (Geographic Resources Analysis Support System, U.S. Army CERL)와의 호환모형을 개발하여 반월유역에 적용하였고, 김상현 등(1996), 김상현(1997, 1998), 조홍제 등(1997, 1998), 김상현 등(1999), 정선희 등(1999), 배덕효 등(2000)이 TOPMODEL의 적용성 검토와 알고리즘 개선과 관련된 연구를 수행한 바 있다(김성준, 2001). 유동훈(1999)은 SIRG를 개발하여 양양남대천유역의 강우유출모의에 적용한 바 있다. 최근에는 신철균 등(2004)이 저류함수기법을 이용한 격자기반의 강우유출모형을 개발하여 집중형 저류함수 모형과 비교하였고, 홍준범 등(2006)은 *Vflo*TM를 증량천유역

의 유출모의에 적용하여 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성을 평가하였고, 박진혁 등(2006)은 댐유역의 홍수예측을 위하여 집중형모형인 KOWACO와 분포형모형 *Vflo*TM를 용담댐유역의 유출해석에 적용하여 비교하였으며, 이창희 등(2006)은 비정형격자기반 도시침수해석모형을 개발하였다. 최근의 분포형 강우유출모형 적용에 대한 연구에서 *Vflo*TM가 많은 활용도를 나타내고 있으며 엔지니어링 실무 적용에 대한 시도도 활발하다.

한편, 김성준 등(1998)은 GRISTORM(Grid-based variable source area STOrM Runoff Model)을 개발하여 New York의 Crowe Road유역(1.7 km²) 및 연천댐유역(1,875 km²)에 적용하였다. GRISTORM은 GIS를 이용한 물리적기반의 분포형 강우유출모형으로 GRASS를 공간자료 전후처리에 이용하고 있으며, ASCII 형식의 격자자료를 공간매개변수로 입력하여, 계산결과를 시공간적으로 파악할 수 있는 분포도로 출력하도록 구성되어 있다. 지표 및 지표하 유출을 운동파방정식(kinematic wave equation)으로, 침투는 Holtan 공식(1961)에 의하여 모의하며, 각 격자에서의 수치해를 구하기 위하여 4점 음해기법(four-point implicit method)에 의한 유한차분해석을 사용하는 모형으로 유역면적 2,000 km² 이내의 계산능력을 가지고 있다. 이후 김성준(1998)은 GRISTORM의 흐름추적에 적용된 음해기법을 격자물수지(cell-based water balance) 기법으로 대체하여 KIMSTORM (Grid-based KInematic Wave STOrM Runoff Model) 분포형 강우유출모형을 개발하였다. KIMSTORM은 지표 및 지표하 유출모의를 위하여 GRISTORM과 동일하게 운동파(kinematic wave) 이론을 적용하고 있으며, 침투는 Huggins & Monke (Beasley 등, 1980)식을 적용하여 모의한다. KIMSTORM은 격자물수지법을 이용함으로써 음해기법에 비해 모형의 구조 및 계산이 간단한 것이 특징이며, 연천댐유역(1,875 km²), 용담댐유역(930 km²), 홍보간척지유역(218 km²), 화옹간척지유역(162 km²), 이평교유역(76 km²) 등의 강우유출모의에 적용된바 있고 최근에는 도시지역의 홍수유출을 모의하기 위하여 평택시(12 km²)를 대상으로 적용가능성을 평가한바 있다.

그러나 여러 유역에 적용된 바 있는 KIMSTORM은 모형은 적용이론과 모형구동과 관련한 기능적 측면에 대하여 개선이 필요하다. 이론적 측면에서 경험적 침투식인 Huggins & Monke의 적용 보다는 물리적 기반의 침투모의가 가능하도록 Green-Ampt의 적용, 지표유출과정에서 논의 유출을 반영할 수 있도록 개선, 격자기반 분포형 강우유출모형에서 수문곡선의 감수부를 반영할 수 있는 기법 적용이 필요하다. 기능적 측면에서 UNIX 운영체제를 기반으로 하고 있는 KIMSTORM은 모형의 입출력자료 처리를 위한 구조가 정형화 되어 있지 않아 공간입력자료, 강우자료 및 매개변수 설정을 위하여 소스코드 수정이 불가피하고 모의결과의 평가 및 가시화에 다소 불편함이 있으며, 최근 분포형 강우유출모형에 많이 적용하고자 하는 공간강우의 입력처리가 매우 어려운 실정으로서 모형 사용자가 보다 쉽게 모형을 구동할 수 있도록 개선이 필요하다. 특히 분포형 모형은 유역을 세분화하여 계산하게 되므로 모의에 소요되는 시간을 단축할 수 있는 기법의 적용도 필요한 사항이다.

따라서 본 연구에서는 격자기반 운동과 강우유출모형 KIMSTORM의 적용이론과 구조 및 성능을 개선하고 모형구동 환경을 MS Windows 운영체제로 전환하여 ModKIMSTORM을 개발하고자 한다. 모형의 개발언어는 FORTRAN 90를 채택하여 구조화된 형태로 개발함으로써 소스코드의 해석이 편리하도록 구성하고자 하였다.

2. 모형의 개요 및 개선사항

본 연구를 통하여 개발된 ModKIMSTORM(Modified grid-based KIneMatic wave STOrn Runoff Model)은 정방향 격자망으로 분할된 대상유역의 격자마다 지형, 지표, 토양관련 공간매개변수를 입력하고 단방향흐름경로 알고리즘(single flowpath algorithm)을 이용하여 격자간 물수지를 계산함으로써 유역의 전반적인 시공간적 수문량을 파악할 수 있는 분포형 강우유출모형이다. 기존모형과 본 연구에서 개선된 모형을 비교하면 Table 1과 같이 요약할 수 있다.

3. 모형의 이론

3.1 격자물수지 계산을 위한 흐름방향정의 및 유입유출 방향 결정

분포형 강우유출모형에서 격자흐름방향은 강우에 의하여 발생된 유출이 다른 격자로 유출되거나 다른 격자로부터 유

입되는 양을 결정하기 위하여 반드시 정의되어야 한다. 격자 흐름방향은 유역의 수치지도 또는 위성영상으로부터 구축한 DEM(digital elevation model)을 GIS 소프트웨어의 흐름방향 함수를 적용함으로써 쉽게 결정할 수 있다. 흐름방향을 정의하는 방법으로는 3×3 윈도우를 DEM에 적용하여 가장 낮은 고도값으로 흐르는 단방향 흐름경로(single flowpath) 알고리즘인 8방향법과 하나 이상의 격자로 배분되어 흐르는 다방향 흐름경로(multiple flowpath) 알고리즘으로 구분된다. 지형경사가 비교적 급한 유역이 많은 우리나라의 지형적 특성을 고려하여 본 모형에서는 단방향 흐름경로 알고리즘에 의해 정의된 격자흐름방향을 이용하여 격자별 유입-유출 물수지를 모의할 수 있도록 설계하였다.

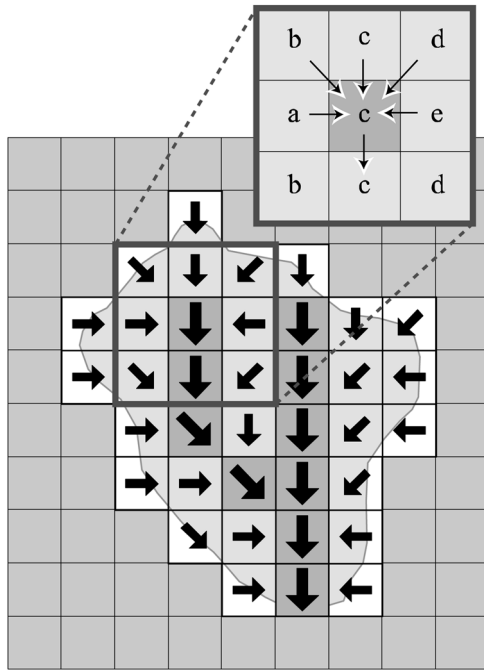
Fig. 1은 유역의 단방향 격자흐름방향을 이용하여 유입-유출 경로를 결정하는 과정을 나타낸 것이다. 이 방법은 중심 격자의 단방향 유출경로를 결정하기 위하여 중심격자가 가질 수 있는 8방향 값을 주변격자에 표시한 Fig. 1(b)의 3×3 윈도우를 이용한다. 한편 중심격자의 유출방향은 단방향이지만 중심격자로 유입될 수 있는 주변격자의 개수는 하나 이상이 될 수 있으므로 Fig. 1(c)와 같이 Fig. 1(b)의 3×3 윈도우를 180° 회전시킨 3×3 반전윈도우를 적용하여 유입 방향을 결정하게 된다(김대식, 1995; 김성준, 1998). Fig. 1에서 흐름방향 코드 a, b, c, d, e, f, g, h는 8 방향을 의미하는 것으로 3×3 윈도우의 경우 동, 남동, 남, 남서, 서, 북서, 북, 북동 방향으로의 유출방향을 의미 하고 3×3 반전

Table 1. Comparison between KIMSTORM and ModKIMSTORM

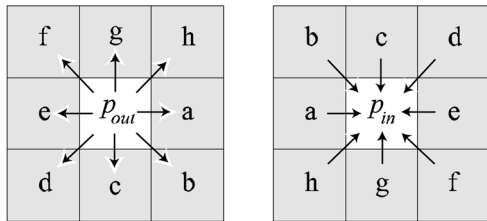
Features		KIMSTORM	ModKIMSTORM
Functional	Program Language	C++ (gcc)	FORTRAN 90 (G95)
	Operating Environment	SUN UNIX or SGI IRIX	MS Windows XP DOS
	GIS Processing	GRASS	ESRI Arcinfo W/S, ArcView, IDRISI
	Input Data Type	GRASS ASCII Grid Text format	GRASS or ESRI ASCII Grid CSV, Text format
	Output Data Type	GRASS ASCII Grid Text format	ESRI ASCII or Binary Grid, BSQ IDRISI Raster A.1, Text and CSV format
	Cell Domain Limit	40,000 cells (200×200)	600,000 cells within watershed boundary
	Calculation time interval	1 min	1 sec ~ 5 min
	Rainfall type	Thiessen	Spatial (Radar) or Thiessen
	Cell Inflow	None	This function is connect the outflow from the upper watershed or dam
	Parameter Adjustment	Change and rebuild code	By using scale factor
	Model Evaluation*	None	R^2 , E, D_v , EQ_p , ET_p
Theoretical	Surface flow	Kinematic wave	Kinematic wave
	Surface flow of paddy	always saturated	always saturated, controlled by roughness
	Subsurface flow	Kinematic assumption	Kinematic assumption
	Infiltration	Huggins and Monke	Huggins and Monke or GAML
	Percolation	Constant rates	Constant rates or Huggins and Monke
	Base flow	None	A potion of the accumulative volume of percolation water is assumed to contribute to stream as a baseflow
	Initial Soil Moisture**	$PO_e \geq SW_{ini} \geq FC$	$PO_e \geq SW_{ini} \geq WP$

* R^2 , Pearson's coefficient of determination; E, Nash and Sutcliffe model efficiency; D_v , Diviation of runoff volumes (%); EQ_p , Relative error of the peak runoff rate; ET_p , Absolute error of time to peak runoff (hr).

** PO_e , Effective porosity (m^3/m^3); SW_{ini} , Initial soil moisture contents (m^3/m^3); FC, Field capacity (m^3/m^3); WP, Permanent wilting point (m^3/m^3).



(a) flow direction map of the watershed and define the flow path



(b) 3x3 window for outflow path (c) 3x3 mirror win. for inflow path

CODE	a	b	c	d	e	f	g	h
ESRI	1	2	4	8	16	32	64	128
GRASS	8	7	6	5	4	3	2	1

(d) flow direction code with value

Fig. 1 Define the flow path using 3x3 window and 3x3 mirror window

윈도우의 경우 서, 북서, 북, 북동, 동, 남동, 남, 남서 방향으로부터의 유입방향을 의미한다. 흐름방향 코드는 데이터 형식에 따라 Fig. 1(d)와 같이 GRASS Raster 형식의 경우 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, ESRI ArcGrid 형식의 경우 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128의 흐름방향 값이 정의되어 있다. Fig. 1(a)의 선택영역은 본 모형에서 중심격자에 대한 유출·유입경로 결정하는 예를 도시한 것이다. 중심격자의 흐름방향 값이 c 이므로 유출방향은 남쪽으로 이루어지고, 중심격자 주변 8개 격자의 흐름방향 값을 Fig. 1(b)의 3x3 반전 윈도우와 비교하면 a, b, c, d, e가 일치하므로 서, 북서, 북, 북동, 동쪽으로부터 유입되는 것이다.

3.2 격자의 경사, 폭 및 길이

분포형 모형에서 격자의 경사, 길이, 폭은 유량 모의와 관련하여 중요한 요소이며 격자별 흐름방향과 고도값으로부터 결정한다. Fig. 2는 격자의 흐름방향에 따라 경사, 길이, 폭

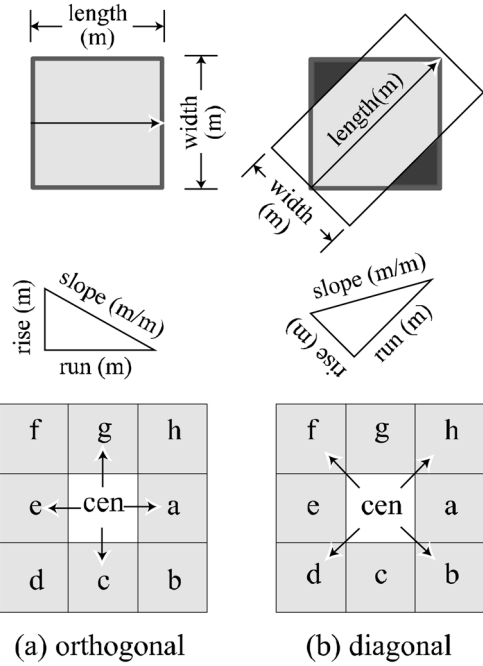


Fig. 2 Cell slope, width and length of the center cell

을 결정하는 방법을 도시한 것이며, 격자의 형태는 사각형으로 가정하였다.

중심격자의 경사는 Eq. (1)과 같이 중심격자와 흐름방향에 위치하는 격자의 표고차를 흐름방향의 거리로 나눔으로서 결정한다. 여기서 흐름방향의 거리는 흐름방향에 따른 중심격자의 길이와 동일한 값을 의미하게 된다. 이때 격자의 폭과 길이는 흐름방향에 따라 달라지는데 격자의 면적이 방향에 상관없이 동일하다고 가정하면 직교 및 대각선 방향의 폭과 길이는 Eq. (2)와 같이 결정할 수 있다.

$$S_{cen} = \frac{rise}{run} = \frac{EL_{cen} - EL_{odir}}{L_{cen}} \quad (1)$$

$$L_{cen} = CS \quad W_{cen} = CS, \text{ orthogonal: } a(E), c(S), e(W), g(N) \quad (2)$$

$$L_{cen} = CS\sqrt{2} \quad W_{cen} = CS/\sqrt{2}, \text{ diagonal: } b(SE), d(SW), f(NW), h(NE)$$

여기서 S_{cen} 은 중심격자의 지면경사(m/m), EL_{cen} 은 중심격자의 표고(EL.m), EL_{odir} 은 흐름방향격자의 표고(EL.m), L_{cen} 은 중심격자의 길이(m), W_{cen} 은 중심격자의 폭(m), CS 는 정방형격자의 크기(m)이다.

하상경사의 경우 유역내 모든 하도구간에 대하여 실제 측량된 자료를 적용하여 구축하는 것은 실제적으로 어렵기 때문에 유역내 하천정비기본계획 및 소하천정비종합계획의 중 단자료를 확보할 수 있는 구간에 대하여 흐름누적면적과 경사간의 관계를 파악하여 Eq. (3)과 같이 평형하상경사공식 (Shulits, 1941)을 응용한 공식으로부터 하상경사를 결정할 수 있도록 하였다.

$$S_{str,i} = S_{max} \text{EXP}(-aA_i) \quad (3)$$

여기서 $S_{str,i}$ 는 i 에서의 하상경사(m/m), S_{max} 는 유로원점에서의 최대하상경사(m/m), A_i 는 하천격자 i 에서의 흐름누적면적(km²), a 는 상류로부터의 하상경사 변화정도를 결정하는 경사감소계수이다. 본 모형의 흐름특성상 역경사를 방지하기 위

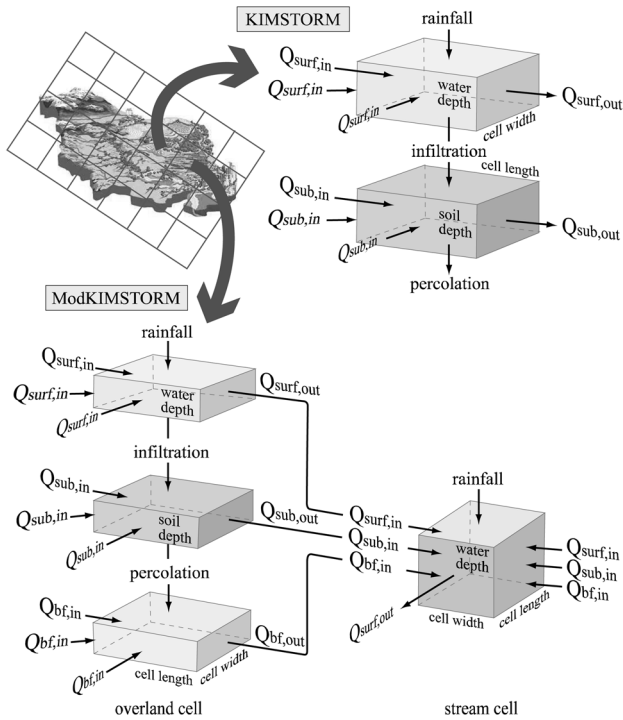


Fig. 3 Comparison of conceptual diagram of grid-based water balance components in the grid element

하여 사용자가 최소경사를 설정할 수 있도록 하였다.

3.3 격자 물수지 인자

격자물수지법은 유역을 일정한 정방향 격자로 분할한 상태에서 각 격자에서의 유입·유출에 대한 물수지를 계산함으로써 주어진 시간간격별로 유역전체에 대한 물수지를 파악할 수 있는 방법이다(김성준, 1998). Fig. 3은 기존모형과 개선된 모형의 격자물수지 요소를 도시한 것이다.

기존모형의 경우 각 격자를 지표와 지표하의 2개 층으로 구분하여 물수지를 계산하는 방식이나, 개선된 모형에서는 지표격자를 지표, 비포화 및 포화 지표하층의 3개 층으로 구별하였으며, 하천격자는 단일층으로 구성하여 상류의 하천 격자 및 지표격자로 부터의 물수지를 계산하도록 하였다. 비포화층에서는 유효공극률, 포장용수량, 영구위조점 및 유효 토심과 같은 매개변수에 의해 배수 가능한 토양수분량이 결정되며 포화투수계수에 의하여 측방흐름이 일어난다. 이때 비포화층의 중력수 일부는 가장 아래의 포화층으로 침투된다. 이때 유출곡선의 감수부를 고려하기 위하여 마지막 포화층에 저류된 침투수는 지표에서 하천방향으로 합산되고 최종적으로는 일정비율에 의해 하천격자에 전달되는 것으로 가정하여 단순화 하였다.

강우기간 동안의 증발산은 미소량으로 무시하였으며, 지표 격자에서 하천격자로의 흐름은 측방흐름이 이루어지는 것으로 가정하였다(김성준과 Steenhuis, 2001).

3.3.1 지표흐름

지표흐름은 운동파(kinematic wave)이론을 적용하였다. 지표면 흐름(overland flow)과 하도흐름(channel flow)은 Eq. (4)의 연속방정식(continuity equation), Eq. (5)의 운동과근사(kinematic approximation) 운동량방정식(momentum equation),

Eq. (6)의 Manning 공식으로 주로 나타내며, 이들 기본공식을 다른 다양한 형식으로 나타내고 있다(Grayson과 Blöschl, 2000).

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

$$S_0 = S_f \quad (5)$$

$$Q = S_f^{1/2} \cdot n^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot A \quad (6)$$

여기서 Q 는 유량(m^3/sec), A 는 흐름단면적(m^2), s 는 유하거리(m), t 는 시간(sec), q 는 단위길이당 측방유입율(lateral inflow rate) 또는 유출율(outflow rate), S_0 는 지면경사(surface slope, m/m), S_f 는 마찰경사(friction slope, m/m), n 은 Manning 조도계수, R 은 동수반경(m)이다.

본 모형에서의 포화상태 지표면흐름과 하천흐름은 Eq. (7)의 운동과방정식(Grayson 등, 1995)을 적용하고 있다.

$$Q = \alpha R^{m_1} A^{m_2} \quad (7)$$

여기서 α , m_1 , m_2 는 지표면, 면상류 또는 하천류의 기하구조, 경사, 조도 및 유체점성과 흐름종류에 따른 상수항이다(Grayson 등, 1995). 지표면 흐름을 얕은면 흐름(shallow sheet flow)으로 가정하면 구형수로의 경우와 같게 되어 동수반경은 흐름깊이와 같게 되므로 Eq. (8)같다.

$$\alpha = n^{-1} w^{-2/3} S_o^{1/2}, R = h = A/w, m_1 = 0, m_2 = 5/3 \quad (8)$$

여기서 h 는 흐름깊이(m), w 는 흐름방향으로의 격자폭(m)이다.

논은 경작기인 5월초~9월말 사이의 기간 동안 담수심을 유지하므로 항상 포화된 상태가 되며, 논둑과 여유고를 가지면서 담수되어 있다. 만일 강우가 발생하여 담수위가 논둑을 초과하면, 지표유출과 같이 논에 담수된 물은 넘쳐흐르게 된다. 연속형 수문모델링의 경우, 담수심은 일일유출량에 영향을 주기 때문에 논에서의 일물수지를 모형화하는데 중요한 사항이 될 수 있는데, 사상형 수문모델링의 경우, 논이 여유고는 강우이전 논이 저류량에 상응하는 의미가 있으며 Manning 조도계수와 같은 매개변수로 처리할 수 있다(김성준 등, 2003). 본 모형에서는 강우시 논 격자의 유출심이 증가함에 따라 논에서의 Manning 조도계수가 감소하여 논둑을 초과하여 발생하는 유량이 서서히 증가할 수 있도록 Eq. (9)와 같은 식을 적용하였다.

$$n_p = n \text{Exp}[(h_p - h)/h_p]^b \quad (9)$$

여기서 n_p 는 논격자의 Manning 조도계수, h_p 는 논둑과 담수심사이의 기준 여유고(m), b 는 조도계수 감소와 관련된 무차원상수이다.

하천흐름 모의를 위하여 유역전체 하천격자의 횡단면을 측정하여 입력하는 것은 매우 어렵기 때문에 수로의 형상과 특성을 알 수 없거나 매우 일정하지 않는 경우의 동수반경 R 은 Eq. (10)과 같이 흐름단면적 A 의 함수로 간략히 할 수 있다(Foster 등, 1984; Moore와 Burch, 1986).

$$R = CA^{1/2} \quad (10)$$

여기서 C 는 수로형상에 따른 상수로서 대부분의 수리학적으 로 유효한 단면에 대해 사각형수로에서는 0.354, 사다리꼴

수로에서는 0.352, 포물선 수로에서는 0.364의 값을 가진다 (Moore와 Burch, 1986; Moore와 Foster, 1990). 따라서 Eq. (7)의 α , R , m_1 , m_2 는 Eq. (11)과 같이 정리할 수 있다.

$$\alpha = n^{-1} S_o^{1/2}, R = 0.354A^{1/2}, m_1 = 0, m_2 = 4/3 \quad (11)$$

3.3.2 지표하 흐름

일반적으로 유역규모의 거의 모든 공간수문학적 모형은 비포화상태의 측방흐름을 무시하고 포화상태에서 지표하 흐름이 일어난다고 가정하고 있으며, Eq. (4)의 연속방정식과 Darcy의 법칙을 결합한 형태로 지표하 흐름을 모형화 한다. 따라서 본 모형에서 지표하 흐름은 포화상태에서 운동과 가정에 의하여 Eq. (12)를 적용하였다(Beven, 1982; Sloan과 Moore, 1984). 단, 지표하 흐름은 토양층의 수분함량이 포장용수량을 초과할 경우에 대하여 발생하도록 하였다.

$$\begin{aligned} Q_{sub} &= K_{sar} A_{sub} S_o, & FC < SW_c < PO_e \\ Q_{sub} &= 0, & SW_c \leq FC \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 Q_{sub} 는 지표하 유량(m^3/sec), A_{sub} 는 지표하 흐름 단면적(m^2), S_o 는 지표하층의 경사(m/m)로 지표면경사와 같다고 가정하였다. K_{sar} 는 포화투수계수(m/sec), SW_c 는 토양수분함량(m^3/m^3), FC 는 포장용수량(m^3/m^3), PO_e 는 유효공극률(m^3/m^3)이다.

3.3.3 침투

개선된 모형에서는 기존모형에서 채택하고 있는 경험적 침투방법인 Huggins & Monke(1966) 침투식 뿐만 아니라 보다 물리적인 침투과정을 모의할 수 있도록 GAML(Green-Ampt & Mein-Larson, 1973) 침투모형을 추가 적용하였다. 또한 격자의 침투량 계산에서 토지피복항목에 대하여 지정된 불투수율에 따라 침투량이 조절될 수 있도록 하였다.

1) Huggins & Monke infiltration

Huggins와 Monke(1966)는 Holtan(1961)식과 Overton(1964)식을 수정하여 차원적으로 균질한 형식의 침투식을 제시하였으며 Eq. (13)과 같다(Beasley 등, 1980). 이 방법은 공식이 간단하고 비포화 토양층의 잉여저류능에 따라 침투량을 결정하므로 매개변수의 조정이 간편하고 계산이 빠른 장점이 있다.

$$f = f_c + f_i \left(\frac{SW_r}{PO_e} \right)^P \quad (13)$$

여기서 f 는 침투율(m/hr), f_c 는 최종 침투율(m/hr), f_i 는 초기 침투율(m/hr), SW_r 은 잉여저류능(m^3/m^3), P 는 토양수분 증가에 따른 침투율 감소와 관련된 무차원 계수이다. Eq. (13)을 적용함에 있어 토양이 포화되지 않은 상태에서 강우강도가 침투율보다 작은 경우의 침투율은 강우강도와 같다고 가정하였다.

2) GAML (Green-Ampt & Mein-Larson) infiltration

Green-Ampt(1911) 식은 토양의 물리적인 특성을 반영하고 실제의 침투와 유사하게 모의하는 침투방법으로 알려져 있으며, 최근 다수의 분포형 강우유출모형에서 침투 모의 방법으로 채택하고 있다. 이 침투모의 방법은 매 시간간격마다

격자의 침투량을 Newton-Raphson법에 의해 시산하여 해를 결정해야 하므로 계산시간이 Huggins & Monke 침투식에 비해 조금더 소요되는 단점이 있다. GAML의 침투율은 Eq. (14)와 같다.

$$f_t = K_e \left(1 + \frac{\psi_{wf} SW_r}{F_t} \right) \quad (14)$$

여기서 f_t 는 시간 t 에서의 침투율(m/hr), K_e 는 유효투수계수(m/hr), ψ_{wf} 는 습윤전선에서의 흡인수두(m), F_t 는 시간 t 에서의 누가 침투량(m)이다. Eq. (14)로 정의된 침투율은 침투량의 함수이며, 이것은 전 시간단계에서 침투율의 함수가 된다. Eq. (14)의 f 는 dF/dt 로 대체하여 Eq. (15)와 같이 정리하고 시간단계의 끝에서의 누가 침투량 F_t 을 시산법에 의하여 산정한다(King 등, 1999). 본 모형에서는 Newton-Raphson 법을 이용하여 누가 침투량 F_t 를 산정하며, 해당 시간간격동안의 침투량은 Eq. (16)과 같다. 단, 강우강도가 침투율보다 작을 경우 모든 강우는 전 기간 동안 침투될 것이고, 이 시간동안의 누가 침투량은 Eq. (17)과 같다.

$$F_t = F_{t-1} + K_e \Delta t + \psi_{wf} SW_r \times \ln \left[\frac{F_t + \psi_{wf} SW_r}{F_{t-1} + \psi_{wf} SW_r} \right] \quad (15)$$

$$F_{\Delta t} = F_t - F_{t-1} \quad (16)$$

$$F_t = F_{t-1} + R_{\Delta t}, \quad R_{\Delta t} < f_t \quad (17)$$

여기서 F_t 는 주어진 시간단계에서의 누가 침투량(m), F_{t-1} 은 전 시간단계($t-1$)에서의 누가 침투량(m), Δt 는 시간간격(hr), $R_{\Delta t}$ 는 시간간격 Δt 동안 내린 강우의 총량(m)이다.

3.3.4 침투 및 기저유출

포화층으로의 침투(percolation)는 불포화층의 토양수분함량이 포장용수량 이상인 경우에 대하여 Eq. (18)과 같이 Huggins와 Monke(1968)식을 적용하였다.

$$DR = f_c \left(1 - \frac{SW_r}{SW_{gwc}} \right)^N, \quad FC < SW_c < PO_e \quad (18)$$

여기서 DR 은 침투율(m/hr), SW_{gwc} 는 토양층의 증력수최대함량(m^3/m^3) 즉 ($PO_e - FC$)이며, N 은 침투의 증감을 조절하는 무차원계수이다. 침투수는 지하수에 충전 되고 최종적으로 하천으로 유입되거나 유역전체에 대한 침투수의 이동경로를 확인하는 것은 어렵다. 따라서 침투수는 매시간간격마다 하천방향으로 누적되고, 누적된 침투수의 용적 중 일부분이 기저유출처럼 하천유량에 기여한다고 가정하였다(Marchant 등 2006).

$$Q_{bf} = r \sum_i DR_i CS^2 \quad (19)$$

여기서 Q_{bf} 는 기저유량(m^3/sec), CS 는 격자크기(m), r 은 지표에서 하천방향으로 누적된 침투수의 하천유입비율, DR_i 는 지표에서 하천으로의 격자에서의 침투율(m/sec)이다.

3.3.5 토양수분조건 (soil moisture conditions)

본 모형에서 지표격자의 토양수분은 Fig. 4와 같이 유효공극률, 포장용수량, 영구위조점 및 토양깊이에 따라 결정된다.

초기토양수분은 초기유출을 결정하는 중요한 요소로서, 토양의 물리적인 특성인 유효공극률, 포장용수량, 영구위조점 및 토양깊이에 따라 Eq. (20)과 같이 수심의 함수로 표현할 수 있다.

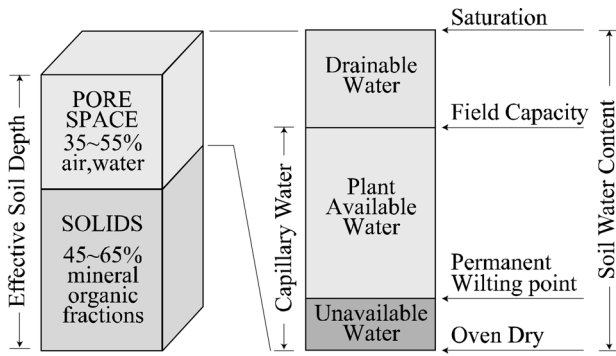


Fig. 4 Soil bulk volume and soil moisture content

$$\begin{aligned}
 H_{ini} &= D_c \cdot PO_e, & PO_e \leq SW_{ini} \\
 D_c \cdot SW_{ini} &> WP < SW_{ini} < PO_e \\
 D_c \cdot WP, & & SW_{ini} \leq WP
 \end{aligned}
 \quad (20)$$

여기서 SW_{ini} 는 초기토양수분함량(m^3/m^3), H_i 는 초기토양수분(m), D_c 는 유효토심(m), WP 는 영구위조점(m^3/m^3)이다. 잉여저류능은 비포화층으로의 침투와 포화층으로의 침투량을 결정하는 조건으로 Eq. (21)과 같고, 배수가능 토양수분은 지표하 흐름과 침투가 발생하는 조건으로 Eq. (22)와 같다.

$$SW_r = PO_e - SW_c, \quad 0 \leq SW_c \leq PO_e \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 SW_{dr} &= D_c(PO_e - FC), & PO_e \leq SW_c \\
 &= D_c(SW_c - FC), & FC < SW_c < PO_e \\
 &= 0, & SW_c \leq FC
 \end{aligned}
 \quad (22)$$

3.4 격자 물수지 (Grid-based water balance)

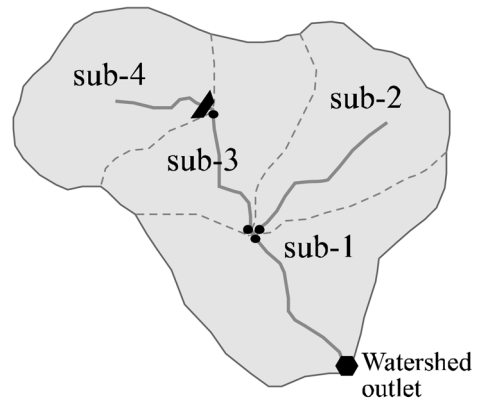
격자 물수지는 Fig. 3과 같이 격자물수지 인자를 이용하여 각 격자별로 계산되며, 임의 시간에 계산된 격자별 물수지 결과는 입력자료 및 모형의 매개변수와 함께 다음 시간으로 전달되어 각 격자의 물수지 변화를 추적하게 된다(김성준, 1998; 김성준 등 2003). 지표격자에 대한 물수지는 지표면 흐름과 하천흐름으로 구분하여 물수지를 계산하며 Eq. (23)과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_i}{dt} &= P(t)_i - F(t)_i + \sum Q_{surf.in.i} - Q_{surf.out.i} \\
 &\text{for overland flow} \\
 &= P(t)_i + \sum Q_{surf.in.i} + \sum Q_{sub.in.i} + Q_{bf.in.i} - Q_{surf.out.i} \\
 &\text{for stream flow}
 \end{aligned}
 \quad (23)$$

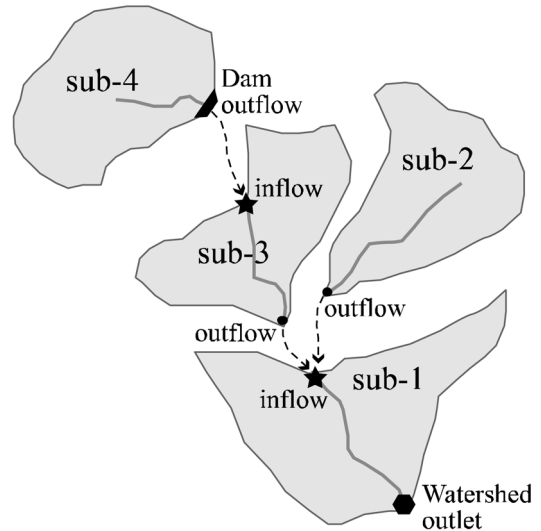
여기서 i 는 격자주소, S_i 는 격자 저류량(m^3), $P(t)_i$ 는 강우량(m^3), $F(t)_i$ 는 침투량(m^3), $Q_{surf.in.i}$ 는 주변격자로부터의 유입량(m^3/sec), $Q_{surf.out.i}$ 는 중심격자에서 주변격자로의 유출량(m^3/sec), $Q_{sub.in.i}$ 는 불포화 지표하층으로부터의 유입량(m^3/sec), $Q_{bf.in.i}$ 는 포화 지표하층으로부터의 유입량(m^3/sec), t 는 시간간격(sec)이다.

분포형 모형은 유역을 세분화하여 모의하는 특성으로 인해 유역면적에 비하여 격자의 크기를 조밀하게 구성하는 경우 계산부하가 발생하게 되며, 전체유역에 대하여 동일한 매개변수를 적용하게 되므로 소유역별 특성을 고려한 모의가 어렵다. 따라서 개선된 모형에서는 Fig. 5와 같이 전체유역에 대한 모의뿐만 아니라 분할된 소유역간의 유량전달이 가능하도록 하였다.

하류유역에서 상류유역으로 부터의 유출량이 유입되는 경



(a) simulation for single watershed



(b) simulation for sub-watershed by using cell-inflow function

Fig. 5 Conceptual diagram of the cell inflow function

우 Eq. (24)와 같이 해당시간간격의 하천격자 저류량을 갱신함으로써 전달할 수 있다.

$$\frac{dS_i}{dt} = S(t)_i + Q_{ci.in.i} \quad (24)$$

여기서 $Q_{ci.in.i}$ 는 셀으로의 유입량(m^3/sec)이다. 한편, 비포화층의 토양수분은 Eq. (25)와 같이 계산한다.

$$\frac{dSW_i}{dt} = F(t)_i + \sum Q_{sub.in.i} - Q_{sub.out.i} - DR(t)_i \quad (25)$$

여기서 SW_i 는 비포화층의 격자토양수분 (m^3), $F(t)_i$ 는 침투량(m^3), $Q_{sub.out.i}$ 는 지표하 유출량(m^3/sec), $DR(t)_i$ 는 침투량(m^3)이다.

3.5 격자물수지 계산방식의 개선

기존모형에서는 Fig. 6(a)에 도시된 바와 같이 전체격자를 대상으로 좌상단으로부터 우하단까지 순차적으로 물수지를 계산하는 방식을 채택하고 있다. 유역의 형상에 따라 차이가 있지만 입력되는 격자판 내에 위치하고 있는 Nodata의 비율이 절반 이상 될 수 있으며 공간해상도가 높아질수록 Nodata 처리는 계산시간을 증가시키는 원인중의 하나가 된다. 또한 유역의 흐름능특성을 고려하지 않는 격자물수지 계산은 유량 전달에 오류를 발생시킬 가능성이 있다. 개선된

■ Nodata ■ Stream □ Watershed

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81
82	83	84	85	86	87	88	89	90

(a) KIMSTORM

			15					
		20	23	11	4			
	1	22	31	8	25	3	6	
	2	27	32	17	28	29	10	
		19	34	13	30	26	16	
		7	24	35	33	18		
			9	12	36	14		
				21	37	5		

(b) ModKIMSTORM

Fig. 6 Comparison of cell processing with KIMSTORM and ModKIMSTORM

모형에서는 이와 같은 문제점을 해결하고 지표격자의 기저 유출을 하천격자로 이송하기 위하여 Fig. 6(b)와 같이 유역의 흐름누적값을 오름차순 정렬함으로써 유역의 원점에서 출구방향으로 격자물수지 계산이 이루어질 수 있도록 계산순서를 미리 결정하여 계산하는 방식을 적용하였다. 흐름누적값을 정렬하기 위한 알고리즘으로는 버블정렬(Bubble sort), 선택정렬(Select sort), 삽입정렬(Insert sort) 등 여러 가지 방법이 있으나 본 모형에서는 셸정렬 알고리즘을 적용하였다. 셸정렬은 Shell(1959)이 개발한 정렬 알고리즘으로 비교적 오래된 방법중에 하나이나 입력배열을 부분배열로 나누어 정렬하고 순서에 맞지 않는 키드를 빠르게 이동시키도록 고안된 방법으로서 상기 정렬방법에 비해 계산효율이 좋고 알고리즘의 적용과 실행이 간단한 방법이다.

3.6 모의결과의 평가

기존모형에서는 모의결과를 평가하기 위하여 사용자가 직접 실측유량과 비교하는 방식을 취함으로써 매개변수 보정 시 모의결과의 적절성을 판단하는데 번거로움이 있어왔다. 따라서 개선된 모형에서는 실측유량을 입력하는 경우에 대하여 각 지점의 모의결과와 비교하여 자동으로 평가하고 보고서를 출력하도록 설계하였다. 강우유출모형의 모의결과를 평가하는 방법에는 여러 가지가 있지만 본 모형에서는 Eq.

(26)~Eq. (30)과 같이 피어슨의 결정계수(Pearson's coefficient of determination) R^2 , Nash & Sutcliffe(1970) 모형효율계수(model efficiency coefficient) E , 유출용적편차(deviation of runoff volume) D_v (ASCE Task Committee, 1993), 침투유량의 상대오차(relative error) EQ_p , 침투시간의 절대오차(absolute error) ET_p 의 5가지 평가항목을 적용하였다.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right\}^2 \quad (26)$$

$$E = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (27)$$

$$D_v(\%) = [(O_v - P_v)/O_v] \times 100 \quad (28)$$

$$EQ_p = [O_p - P_p]/Q_p \quad (29)$$

$$EP_p = [Q_{\max} - P_{\max}] \quad (30)$$

여기서 Q_i 는 시간에서의 관측유량, P_i 는 시간에서의 모의유량, \bar{O} 는 전체모의시간의 관측유량평균, \bar{P} 는 전체모의시간의 모의유량평균, n 은 시간 간격개수, O_v 는 전체모의시간의 관측유량용적, P_v 는 전체모의시간의 모의유량용적, O_p 는 관측유량의 침투유량, P_p 는 모의유량의 침투유량, O_{\max} 는 관측유량의 침투유량 발생시간(hr), P_{\max} 는 모의유량의 침투유량 발생시간(hr)이다. R^2 과, E 는 모의유량과 관측유량의 차이를 평가하는 것으로 1.0에 가까울수록 모의유량이 관측유량과 같아짐을 의미하며, D_v 는 0%에 가까울수록 모의유량과 관측유량과의 용적편차가 작음을 의미하며, 초기토양수분함량을 결정하는 기준이 된다. 분포형 강우유출모형의 적용에서 초기 토양수분함량은 지표유출의 발생시점과 크기를 결정하는 중요한 요소가 되지만 강우발생 이전의 전체유역에 대한 토양수분함량 파악은 어려우므로 관측유량과 모의유량과의 용적편차가 최소가 되는 값을 초기토양수분함량으로 결정한다 (Julien 등, 1995; Wang과 Hjelmfelt, 1998; Jain 등, 2004). 또한 관측유량의 부족으로 인하여 유역 출구점에 대해서만 모의결과를 평가하는 경우 전체적인 발생유량의 적절성을 평가하는 기준으로 적용될 수 있다.

4. ModKIMSTORM의 구성

본 연구에서 개선된 모형의 구성은 Fig. 7과 같이 자료준비, 전처리, 모형실행, 후처리로 요약할 수 있다. 모형은 프로젝트파일(ModKIMSTORM project file; *.kpr)과 설정파일(configuration file; *.cfg)에 의해 모의조건 및 자료입출력에 대한 사항을 제어할 수 있다. 모형에는 강우 및 관측유량, 관측소위치정보, 모형 매개변수, GIS자료가 입력된다. 입력 GIS자료는 유역경계, DEM, 흐름방향도, 흐름누적도, 산정지점도, 격자유입지점도, 토지피복도, 토심도 및 토양종류도, 티센망도 또는 공간강우를 입력하게 된다. 이들 GIS자료는 ESRI ArcInfo W/S 또는 ArcView를 사용하여 ESRI ASCII Grid 형식으로 구축하게 되는데, 기존모형의 입력자료 형식인 GRASS ASCII Grid 형식을 입력하는 것도 가능하다. 그리고 토지피복 및 토양과 관련한 주요매개변

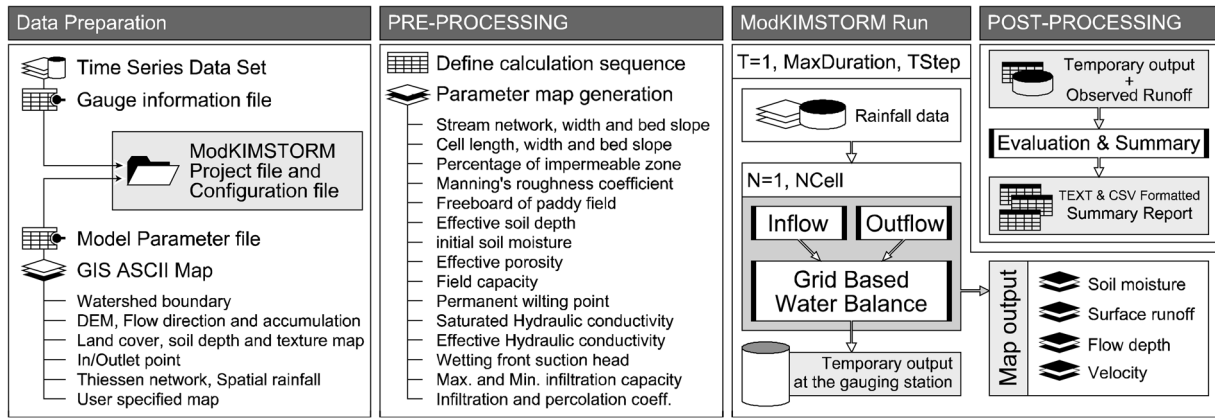


Fig. 7 Schematic diagram of the ModKIMSTORM

수는 사용자가 직접 작성한 데이터를 선택적으로 입력할 수 있다.

개선된 모형에서는 매개변수 조정을 간단히 하기 위해 입력된 기본매개변수 중 주요매개변수에 대하여 축척계수(scale factor)를 적용하고 있으며, 강우 및 관측유량과 같은 시계열 자료는 MS Excel과 같은 스프레드시트를 이용하여 CSV (Comma Separated Variables) 형식으로 작성함으로써 입력 자료 구축에 편의를 고려하였다. 기존모형에서 공간강우를 적용하기 위해서는 프로그램을 수정해야 하는 번거로움이 있었지만 개선된 모형에서는 강우파일목록과 경로지정만으로 공간강우를 적용할 수 있도록 개선되었다.

모형 전처리 부분에서는 첫 번째로 흐름누적도로부터 격자 계산순서를 셀정렬 알고리즘을 적용하여 결정하고, 두 번째로 DEM, 흐름방향도를 이용하여 격자의 폭, 길이, 경사를 결정한다. 세 번째 과정으로는 흐름누적도로부터 하천망을 결정하고 평형하상경사공식에 의하여 하상경사를 결정한다. 마지막으로 토지피복도, 토심도, 토양종류도의 속성값에 기본매개변수를 축척계수를 적용하여 할당함으로써 조도계수, 논격자의 여유고, 불투수율, 유효토심, 초기토양수분, 유효공극률, 포장용수량, 영구위조점, 포화투수계수, 유효투수계수, 습윤선흡인수두, 초기 및 중기침투능, 침투 및 침투조절계수 분포도를 자동으로 생성한다.

모형 실행 부분에서는 유역내 격자에 대하여 강우를 분포시켜 각 격자층의 물수지를 계산하고 계산시간간격마다 산정지점의 셀에 대한 모의결과를 임시파일형태로 기록하며, 설정된 시간간격에 따라 토양수분, 지표유출, 유출심, 유속분포도를 작성한다. 이들 공간분포도는 강우유출시 토양수분의 변화 및 유출발생과정을 가시화하는 것으로 IDRIS, ESRI ArcInfo Workstation 및 ArcView 와 같은 GIS 소프트웨어를 활용할 수 있도록 설정된 출력형식에 따라 BSQ, ESRI ASCII Grid, ESRI Binary Grid 및 IDRISI Raster 형식으로 출력된다. 마지막으로 후처리과정에서는 임시로 저장된 결과를 산정지점별로 정리하고 모형자동평가 기능에 의해 관측유량과 비교하여 5가지 항목을 자동으로 평가하며, 텍스트 형식과 CSV형식의 결과파일을 생성한다.

5. 결 론

본 연구에서는 KIMSTORM의 적용이론, 프로그램 구조,

성능 및 구동환경을 개선하여 ModKIMSTORM을 개발하였다. 개선된 모형은 MS Window 운영체제에서 구동할 수 있도록 FORTRAN 90언어를 이용하여 개발되었으며, 기존 모형과 비교하여 개선된 주요사항은 다음과 같이 요약할 수 있다. 물리적 침투모의를 위하여 GAML 침투모형 적용, 논격자의 유출심 증가에 따라 Manning 조도계수가 감소하는 방식으로 논에서의 유출을 제어하는 기법적용, 격자 물수지를 지표격자와 하천격자로 구분하고 수문곡선의 감수곡선을 고려할 수 있도록 기저유출 적용, 소유역간 연계모의가 가능하도록 격자유입기능 적용, 공간강우 입력처리 개발, 5개 항목에 의한 모의결과의 자동평가기능 개발, 계산효율 향상 및 기저유출이 하천격자로 이송될 수 있도록 셀정렬 알고리즘 적용, 모형의 자료구축 및 구동을 편리하게 하기 위한 전·후 처리부분을 개발하였으며, 처리능력이 4만 셀에서 60만 셀로 확장되었다. 모형 입력 자료는 ESRI ArcInfo W/S 또는 ArcView와 같은 GIS 소프트웨어와 MS Excel을 이용하여 구축할 수 있고, 모의결과는 설정된 산정지점에 대하여 텍스트 및 CSV 형식으로 저장되며, 시간의 변화에 따른 공간적 분포를 파악할 수 있도록 토양수분, 지표유출, 유출심 및 유속분포도를 출력할 수 있다.

개선된 모형은 다수의 강우사상을 이용한 검보정과 민감도 분석을 통해 모형의 기능과 이론에 대한 적용성이 검토되어야 할 것이다. 그 중에서도 공간입력자료의 격자 크기 및 개수를 결정하는 것이 중요하다. 유역면적에 비해 격자의 개수가 작으면 계산효율은 높아질 수 있으나 공간정보가 상쇄되어 총괄형 모형에 가까워진다. 반대로 분포형 모형에 입력하는 다수의 주요 매개변수들이 우리나라에서 실측된 값보다는 국외의 문헌을 참고하여 적용되고, 유역전체에 대하여 동일한 값을 적용하는 매개변수가 있으므로 유역면적에 비해 격자개수가 많아지면 불확실한 매개변수가 증가하여 모형의 결과에 영향을 미치게 되며, 계산에 필요한 시간이 증가하게 됨으로써 단시간 내에 효율적인 홍수유출해석을 수행할 수 없게 된다. 본 연구에서 개선된 모형은 지표격자를 3개의 층으로 구분하였고, 추가로 적용된 계산식에 의해 입력해야 하는 매개변수가 기존 모형에 비해 증가하였으며, 처리능력 또한 최대 60만 셀로 증가하였지만, 분포형 모형을 적용시 불확실성을 최소화하고 효율적인 계산이 될 수 있도록 위와 같은 사항을 고려하지 않을 수 없다. 따라서 본 연구(II)에서 개선된 모형의 적용성 평가는 다음과 같은 절차로 진행 될 것이다. 첫째, 지형 및 하천 등

공간정보가 어느 정도 유지되면서 단시간에 효율적인 계산을 수행할 수 있는 적정 공간해상도를 결정하는 과정을 우선적으로 수행할 것이다. 둘째, 모형의 민감도 분석을 통하여 유출변화에 큰 영향을 미치는 매개변수들을 파악한 후 설정한 모형 평가함수의 기준에 따라 매개변수를 보정함으로써 모형 적용을 위한 매개변수 보정절차를 제시하고, 보정된 매개변수들의 평균값을 다른 강우사상에 적용하여 모형의 검정을 수행할 것이다. 셋째, 분석결과를 바탕으로 추가 적용된 GAML 침투모형과 기존 모형의 경험적 침투방법인 Huggins & Monke 식에 의한 모의결과 및 논 격자를 고려한 모의결과를 검토하고, 수문곡선의 감수곡선을 반영하기 위해 가정된 방법에 대한 적용성을 검토할 것이다.

참고문헌

- 김대식, 정하우, 김성준, 최진용(1995) 소유역 지표유출의 공간적 해석을 위한 지리정보시스템 응용모형(II) 격자 물수지모형을 위한 GIS 응용모형 개발-, **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제37권, 제5호, pp. 35-42.
- 김상현, 손광익, 한건연(1996) Tile Drain의 영향과 GIS를 연계한 농경지 유역에 대한 수문학적 모의, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제6호, pp. 203-216.
- 김상현(1997) 인공배수유역에서의 TOPMODEL의 적용, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 539-548.
- 김상현(1998) 확장 TOPMODEL의 영역화 민감도 분석, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 741-756.
- 김상현, 이지영(1999) 개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp. 489-500.
- 김성준(1998) 격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I) -이론 및 모형-, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 303-308.
- 김성준(1998) 격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(II) -적용 예(연천댐유역을 대상으로)-, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 309-316.
- 김성준(2001) 분포형 수문·수질 모델링의 최근 동향과 활용방안, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 33-45.
- 김진택(1995) 농업비점원 오염모형을 위한 지리정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 박사학위논문, 서울대학교.
- 박진혁, 강부식(2006) 댐유역 홍수예측을 위한 GIS기반의 분포형모형과 집중형모형의 유출해석 비교, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제9권, 제3호, pp. 171-182.
- 배덕효, 김진훈, 권원태(2000) TOPMODEL의 단일유역 홍수에 보능에 관한 연구, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 87-98.
- 신철균, 조효섭, 정관수, 김재한(2004) 저류함수기법을 이용한 격자기반의 강우-유출 모형 개발, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 969-978.
- 이창희, 한건연, 김지성(2006) 비정형격자기반 도시침수해석모형 개발, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 511-517.
- 정선희, 김상현(1999) TOPMODEL 투수량계수 감소함수 일반화 과정의 적용에 관한 연구, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 637-648.
- 조홍제, 조인률, 김정식(1997) TOPMODEL을 이용한 강우-유출 해석에 관한 연구, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 515-526.
- 조홍제, 조인률(1998) 분포형 유출모형을 이용한 홍수유출해석, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제2호, pp. 199-208.
- 최진용(1996) **지리정보시스템을 이용한 장기유출모형에 관한 연구**, 박사학위논문, 서울대학교.
- 홍준범, 김병식, 윤석영(2006) VfloTM 모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제6B호, pp. 613-622.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986a) 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*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986b) An introduction to the european hydrological system - systeme hydrologique europeen, 'she', 2: structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 61-77.
- ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models (1993) Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation and Drain Engineering*, Vol. 119, No. 3, pp. 429-441.
- Bathurst, J.C. and O'Connell, P.E. (1992) The future of distributed modelling: The Systeme Hydrologique Europeen. *Hydrological Processes*, Vol. 6, pp. 265-277.
- Bathurst, J.C. (1986a) Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique Europeen. *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 79-102.
- Bathurst, J.C. (1986b) Sensitivity analysis of the Systeme Hydrologique Europeen for an upland catchment. *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 103-121.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., and Monke, E.J. (1980) ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, Vol. 23, No. 4, pp. 938-944.
- Bell, V.A., Kay, A.L., Jones, R.G., and Moore, R.J. (2007) Development of a high resolution grid-based river flow model for use with regional climate model output. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 532-549.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Beven, K.J. (1982) On subsurface stormflow: Predictions with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 1627-1633.
- Beven, K.J. and O'Connell, P.E. (1982) *On the role of physically-based distributed models in hydrology*. Report No. 81, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Beven, K.J. (1985) Distributed models, *Hydrological forecasting*. M.G. Anderson and T.P. Burt, eds. Wiley, Chichester, pp. 405-435.
- Beven, K.J., Calver, A., and Morris, E.M. (1987) *The Institute of Hydrology Distributed Model*. Report No. 98, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Beven, K.J. and Binley, A.M. (1992) The future role of distributed models: Model calibration and predictive uncertainty. *Hydrological Processes*, Vol. 6, pp. 279-298.
- Beven, K.J. (1996) A discussion of distributed modelling: Chapter 13A, *Distributed Hydrological Modelling*. J.C. Refsgaard and M.B. Abbott, eds., Kluwer, Dordrecht, pp. 255-278.
- Cabral, M.C., Bras, R.L., Tarboton, D., and Entekhabi, D. (1990) *A distributed physically-based rainfall-runoff model incorporating topography for real-time flood forecasting*. The Ralph M. Parsons Laboratory technical Report No. 332, MIT. Department of Civil Engineering, Cambridge, MA.
- Calver, A. (1988) Calibration, sensitivity and validation of a physically based rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, Vol. 103, pp. 103-115.
- Calver, A. and Wood, W.L. (1995) The Institute of Hydrology Distributed Model. *Computer Models of Watershed Hydrology*, V.

- P. Singh, ed., Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, pp. 595-626.
- Downer, C.W. and Ogden, F.L. (2002) *GSSHA-User's Manual, Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis. Version 1.43 for WMS 6.1*. ERDC Technical Report, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi.
- Foster, G.R., Huggins, L.F., and Meyer, L.D. (1984) A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships. *Transactions of the ASAE* Vol. 27, No. 3, pp. 790-796.
- Freeze, R.A. and Harlan, R.L. (1969) Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, Vol. 9, pp. 237-258.
- Grayson, R.B., Moore, I.D., and McMahon, T.A. (1992a) Physically based hydrological modeling. 1. A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 10, pp. 2639-2658.
- Grayson, R.B., Moore, I.D., and McMahon, T.A. (1992b) Physically based hydrological modeling. 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 10, pp. 2659-2666.
- Grayson, R.B., Blöschl, G., and Moore, I.D. (1995) Distributed parameter hydrologic modeling using vector elevation data: THALES and TAPES-C. *Computer Models of Watershed Hydrology*, V.P. Singh, ed., Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, pp. 669-696.
- Grayson, R.B. and Blöschl, G. (2000) *Spatial Patterns in Catchment Hydrology*. Cambridge University Press, New York, NY.
- Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911) Studies in Soil Physics, I: The Flow of Air and Water Through Soils. *Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 4, pp. 1-24.
- Holtan, H.N. (1961) *A concept for infiltration estimates in watershed engineering*. ARS 41-51, US Department of Agriculture, Washington, DC.
- Huggins, L.F. and Monke, E.J. (1966) *The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds*, Technical report, Water Resources Research Center, No. 1, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Huggins, L.F. and Monke, E.J. (1968) A mathematical model for simulating the hydrologic response of a watershed. *Water Resources Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 529-539.
- Jain, M.K., Kothiyari, U.C., and Ranga Raju, K.G. (2004) A GIS based distributed rainfall-Runoff model. *Journal of Hydrology*, Vol. 299, pp. 107-135.
- Jia, Y., Ni, G., Kawahara, Y., and Suetsugi, T. (2001) Development of WEP model and its application to an urban watershed. *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 2175-2194.
- Jinkang, D., Shunping X., Youpeng, X., Chong-yu, X., and Singh, V.P. (2007) Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*, Vol. 336, pp. 334-346.
- Julien, P.Y., Saghafian, B., and Ogden, F.L. (1995) Raster based hydrological modeling of spatially-varied surface runoff. *Water Resources Bulletin*, Vol. 31, No. 3, pp. 523-536.
- Kim, S.J. and Steenhuis, T.S. (1998) Grid-Based Variable Source Area Storm Runoff Model, *Hydroinformatics 98*. V. Babovic and L.C. Larson, eds., Danish Hydraulic Institute, Netherlands, pp. 1383-1390.
- Kim, S.J. and Steenhuis, T.S. (2001) GRISTORM: Grid-based variable source area storm runoff model. *Transactions of the ASAE*, Vol. 44, No. 4, pp. 863-875.
- Kim, S.J., Kwon, H.J., Jung, I.K., and Park, G.A. (2003) A comparative study on grid-based storm runoff prediction using Thiessen and spatially distributed rainfall. *PWEE*, Vol. 1, No. 3, pp. 149-155.
- King, K.W., Arnold, J.G., and Bingner, R.L. (1999) Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin creek watershed using SWAT. *Transactions of the ASAE*, Vol. 42, No. 4, pp. 919-925.
- Kojiri, T., Tokai, A., and Kinai, Y. (1998) Assessment of river basin environment though simulation with water quality and quantity. *Annals of Disaster Prevention*, Research Institute, Kyoto University, Vol. 41, No. B-2, pp. 119-134.
- Kojiri, T. (2006) Hydrological River Basin Environment Assessment Model (Hydro-BEAM). *Watershed Models*, V.P. Singh and D.K. Frevert eds., CRC Press, Taylor & Francis Books, Inc., New York, pp. 613-626.
- Marchant, P.G., Hively, W.D., and Steenhuis, T.S. (2006) Distributed hydrological modelling of total dissolved phosphorus transport in an agricultural landscape, part I: distributed runoff generation. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 245-261.
- Mein, R.G. and Larson, C.L. (1973) Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 384-394.
- Moore, I.D. and Burch, G.J. (1986) Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 8, pp. 1350-1360.
- Moore, I.D. and Foster, G.R. (1990) Hydraulics and overland flow. *Process Studies in Hillslope Hydrology*, M.G. Anderson and T.P. Burt, eds., John Wiley, New York, N.Y., pp. 215-254.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 283-290.
- O'Loughlin, E.M. (1986) Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 794-804.
- O'Loughlin, E.M. (1990) Modelling soil water status in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 50, pp. 23-38.
- Overton, D.E. (1964) *Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering*. ARS 41-49, US Department of Agricultural Services, Washington, DC.
- Refsgaard, J.C. and Storm, B. (1995) MIKE SHE. *Computer Models of Watershed Hydrology*, V. P. Singh, ed., Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, pp. 809-846.
- Shell, D.L. (1959) A high-speed sorting procedure. *Communication of the ACM*, Vol. 2, No. 7, pp. 30-32.
- Shulits, S. (1941) Rational equation of river-bed profile, *Transactions AGU*, Vol. 22, pp. 622-631.
- Sloan, P.G. and Moore, I.D. (1984) Modelling subsurface storm-flow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 15, pp. 1815-1822.
- Yoo, D.H. (2002) Numerical model of surface runoff, infiltration, river discharge and groundwater flow - SIRG, *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*, V.P. Singh and D.K. Frevert, eds., Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, pp. 167-182.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., and Anderson, W.P. (1989) AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 44, No. 2, pp. 168-173.
- Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2002) VfloTM: a real-time distributed hydrologic model. *Proceedings of the Second Federal Inter-agency Hydrologic Modeling Conference 2002*, Las Vegas, NV.
- Wang, M. and Hjelmfelt, A.T. (1998) DEM based overland flow routing model. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-8.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., and Goodrich, D.C. (1990) *KIN-EROS, A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual*. Report No. ARS-77, US Department of Agriculture, Agricultural Research Services.

(접수일: 2008.7.28/심사일: 2008.9.8/심사완료일: 2008.9.8)