

대도시 복합유역의 지표 및 지표하 유출해석기법 개발 (I) - 이론 및 모듈의 개발 -

A Development of Method for Surface and Subsurface Runoff Analysis in Urban Composite Watershed (I)

- Theory and Development of Module -

곽 창 재* / 이 재 준**

Kwak, Chang Jae / Lee, Jae Joon

Abstract

Surface-subsurface interactions are an intrinsic component of the hydrologic response within a watershed. In general, these interactions are considered to be one of the most difficult areas of the discipline, particularly for the modeler who intends simulate the dynamic relations between these two major domains of the hydrological cycle. In essence, one major complexity is the spatial and temporal variations in the dynamically interacting system behavior. The proper simulation of these variations requires the need for providing an appropriate coupling mechanism between the surface and subsurface components of the system. In this study, an approach for modelling surface-subsurface flow and transport in a fully intergrated way is presented. The model uses the 2-dimensional diffusion wave equation for sheet surface water flow, and the Boussinesq equation with the Darcy's law and Dupuit-Forchheimer's assumption for variably saturated subsurface water flow. The coupled system of equations governing surface and subsurface flows is discretized using the finite volume method with central differencing in space and the Crank-Nicolson method in time. The interactions between surface and subsurface flows are considered mass balance based on the continuity conditions of pressure head and exchange flux. The major module consists of four sub-module (SUBFA, SFA, IA and NS module) is developed.

Keywords : surface flow, subsurface flow, interaction, coupling, rainfall-runoff analysis module

요 지

유역내에서 발생하는 유출은 지표 유출과 지표하 유출이 있으며, 서로 상호작용 상태를 유지하게 된다. 일반적으로 지표와 지표하 둘 중 한 가지 알고리즘으로 해석이 힘든 유역에 대해 지표와 지표하 사이의 동적인 관계를 상세하게 모의해야 하는 경우 상호작용에 관한 요소를 고려하여야 한다. 동적인 상호작용 시스템의 구동에서는 시·공간적인 매개변수가 중요하며, 적절한 모의를 위해 시·공간적인 매개변수는 시스템 상에서 지표와 지표하 항에 대한 복합적인 메카니즘으로 구성되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 지표 및 지표하 유출의 상호작용에 관한 알고리즘을 위해 2차원 확산파 방정식을 이용하여 지표 유출을 해석하고, Darcy의 법칙과 Dupuit-Forchheimer의 가정을 이용한 Boussinesq 방정식을 적용하여 포화상태의 지표하 유출의 알고리즘을 구성하였다. 커플링 방정식으로 공간에 대해서는 유한체적법을 사용하고, 시간에

* 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (e-mail: water@kumoh.ac.kr)

ABD / School. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Daehak-ro 61, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea

** 교신저자, 금오공과대학교 토목환경공학부 교수, 공학박사 (e-mail: jhb365@kumoh.ac.kr)

Corresponding Author, Professor / Ph.D., School. of Civil and Environmental Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Daehak-ro 61, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea

대해서는 Crank-Nicolson 방법을 이용하였으며, 지표와 지표하 흐름의 상호작용에 대해서는 질량보존의 법칙에 기반하여 구성하였다. 이상의 과정을 통하여 지표 유출해석, 지표하 유출해석, 상호작용, 수치해석 부분의 4가지 주요 모듈을 만들었으며, 4가지 주요 모듈을 통합하여 복합구역의 지표 및 지표하 유출해석 모듈을 개발하였다.

핵심용어 : 지표 유출, 지표하 유출, 상호작용, 커플링, 강우-유출해석 모듈

1. 서론

우리나라는 근대화 이후 꾸준한 토지 이용의 확대로 점점 도시화 및 산업화가 되어 왔다. 대규모 택지 및 단지 개발사업으로 인해 도시구역은 점차적으로 불투수층이 많아졌으며, 홍수에 대한 방어가 취약하게 되었다. 갑작스러운 폭우에 대한 내수침수 피해를 방지하기 위하여 도시를 관류하거나 도시변의 하천으로 방류될 수 있는 배수시설을 설치하고 우수지를 시설하여 배제하는 방식의 대안을 제시해 왔다. 최근들어 유역내 우수유출저감시설의 설치 등과 같은 유역전반의 홍수방어체제를 구축하고자 하는 노력들이 이루어지고 있다. 우리나라는 외곽부의 산지와 중심부의 도시가 혼합된 유역의 형태가 일반적이며, 이러한 유역을 투수유역과 불투수유역이 혼재된 복합유역이라 정의할 수 있다. 복합유역에서 발생하는 유출현상은 불투수층 또는 완전 포화된 토양층의 상부에서 발생하거나 강우강도에 따라 포화되기 전의 토양에서 발생하는 지표 유출과 투수층 토양층 내부의 침투현상에 의해 발생하는 지표하 유출, 침투와 지하수에 의해 발생하는 기저 유출로 나눌 수 있으며, 유역의 유출량은 이러한 형태의 유출해석을 모두 실시함으로써 산정되어야 한다.

현재, 국내에서 강우-유출해석을 위해 사용하고 있는 해석모형은 국외에서 개발된 모형이 대부분이며, 이러한 유출모형은 유역에서 유출현상을 물리적으로 표현하는 수학적 모형으로서 매개변수의 공간적인 변화의 고려 유무에 따라 집중형 모형 (lumped model)과 분포형 모형 (distributed model)으로 구분된다. 집중형 모형은 유역내의 흐름분포를 표현하지 않고 직접 강우를 유출로 변환시키기 때문에 집중형 모형이라고도 하며, 유역을 동질의 배수역으로 보아 매개변수의 공간적 변화가 없는 것으로 가정함으로써 사용이 간편하여 홍수 유출해석 등에 널리 이용되고 있다. 대표적인 것으로 단위도법이 있다. 그러나 유역의 수문 특성이 비교적 단기간에 있어서 크게 변화하고 공간적인 분포를 무시할 수 없는 경우에는 유역의 수문특성을 평균적으로 취급하는 방법으로는 유출현상의 표현이 곤란하게 된다. 반면에 분포형 모형은 집중형 모

형에 비하여 시·공간적인 변화를 효과적으로 고려할 수 있어 비교적 정확한 홍수유출해석을 할 수 있을 것으로 기대되나, 입력자료 구성의 어려움과 계산시간이 과다하게 소요되는 단점이 있다. 최근 GIS 기술의 획기적인 발전, 레이더 강우자료의 활용성 증대, 컴퓨터 계산 용량 및 속도의 급속한 발전과 더불어 분포형 강우-유출모형의 적용성은 지속적으로 증대되고 있다.

집중형 모형에 비해 잘 알려지지 않은 분포형 유출모형에 대한 연구동향을 국내외로 살펴보면, Abbott et al. (1986a; 1986b)은 강우, 차단, 증발산, 침투를 고려하고 있으며 2차원 지표의 흐름추적, 지하수 유출을 포함하는 강우-유출 전 과정을 포함하는 모형인 MIKE-SHE 모형을 개발하였다. 이 모형은 물리기반 분포형 매개변수를 이용하는 연속모형이며 현재 DHI (Danish Hydraulic Institute)에서 지속적으로 수정·보완하고 있는 모형이다. Julien and Saghaffian (1991)은 2차원 유역 강우-유출 모형인 CASC2D 모형을 개발하였다. CASC2D 모형은 2차원 분포형 매개변수 모형으로 강수, 침투, 지표면 흐름, 하천 흐름을 고려하는 단기 유출 모형이다. 지표면 흐름은 인접 셀과 수면경사로 결정되며 직교 방향 4개 셀과의 유량교환을 고려하고 있으므로 4방향 흐름을 고려하고 있다. 이 모형은 Ogden (1997)에 의해 WMS (Watershed Modeling System) 모형의 지표면 흐름 해석 모듈로 개발된 바 있다. 그 후 Downer and Ogden (2002)에 의해 GSSHA (Gridded Surface-Subsurface Hydrologic Analysis) 모형으로 수정 보완되었으며, 같은 해 Rojas (2002)에 의해 유사 (sediment) 부분이 추가되어 CASC2D-SED 모형으로 수정되었다. Downer and Ogden (2002)에 의해 개발된 GSSHA 모형은 강우, 응설, 차단, 침투, 증발산, 지표면 저류, 지표면 흐름, 하천 흐름, 지하수 흐름을 포함하여 확산과 방정식을 이용하여 유출을 모의하도록 구성되어 있다. 지표면 흐름의 고려는 CASC2D 모형과 동일하게 수행되고 있다. Vieux (2002)에 의해 개발된 VfloTM 모형은 분포형 매개변수를 이용하는 단기 유출 모형으로 공간적으로는 유한요소법, 시간적으로는 유한차분법을 이용하고 있다. 특히 이 모형은 미리 결정된 흐름방향 분포도에 의해

1차원 흐름 추적을 실시하는 점에서 앞서 언급한 모형들과 차별성을 가진다. 따라서 지표면 흐름은 최급구배 1방향으로 전파되는 알고리즘을 택하고 있으며, 최근 국내에서도 VfloTM 모형을 적용한 다수의 연구들이 수행된 바 있다.

국내의 경우 분포형 강우-유출 모형의 개발에 관한 몇몇 연구들이 1990년대부터 본격적으로 수행되어 왔으며 개발 및 적용을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 고덕구 (1989)는 산지 소유역에서 장기 유출 예측을 위해 확정론적 분포형 유역수문모형인 SNUA2 모형을 개발하여 실제유역에 대한 적용성을 입증한 바 있다. 김성준 (1998)은 격자기반 물수지 기법을 이용하여 강우에 의한 지표면 흐름과 지표하 흐름의 시간적 변화와 공간적 분포를 모의할 수 있는 분포형 강우-유출 모형인 KIMSTORM 모형을 개발하였으며 UNIX 환경에서 구동되는 무료 GIS 소프트웨어인 GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)를 이용하여 흐름방향도를 추출하여 흐름추적에 활용하였다. 또한 김성준 등 (1998)은 개발된 모형을 연천댐 유역에 대해 적용하여 그 적용성을 평가한 바 있다. 유동훈과 오윤창 (2000)은 지표면 유출과정에서 침투를 고려하여 홍수시 하천유출을 모의하는 연계모형을 개발하였고, 지표수와 지하수를 동적으로 연계하는 통합모형을 구축하여 양양 남대천 유역, 안성천 유역 등에 적용하였다. 최현상과 한건연 (2004a; 2004b)은 불확실도 해석기법인 Monte Carlo 기법과 연계한 분포형 강우-유출 해석모형을 개발하여 설마천 유역과 동곡 유역에 대해 적용성을 평가한 바 있다. 신철균 등 (2004)은 저류함수를 이용한 격자기반 분포형 강우-유출 모형을 개발하여 횡성다목적댐 유역과 합천댐 유역에 대해 적용성을 검토한 바 있다. 김문모 등 (2007)은 도시유역의 지표면 유출 모의를 위해서 격자기반 지표면 유출모형을 개발하여 가상 유역과 군자 배수구역에 대해 모형을 적용한 바 있다.

국내·외 여러 연구자들에 의한 유출해석과 관련한 연구가 이루어지고 있으나, 대부분의 연구가 단일유역을 대상으로 하여 유출해석기법과 해석방식에 관한 것이며, SWAT과 MODFLOW를 완전연동형 방식으로 결합하여 지표수와 지하수 연계해석이 가능하도록 개발된 SWAT-MODFLOW (김남원 등, 2004a)와 같은 장기유출해석 모형과 달리 도시유역과 같이 단기간의 호우사상에 대한 지표 및 지표하 유출의 상호작용을 고려할 수 있고 불투수 지역과 투수지역이 혼재된 복합유역에 대한 유출해석기법에 관한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 포화상태에서 지표유출이 발생한다는 가정 하에 기저

유출을 제외한 지표 유출과 지표하 유출 개개의 알고리즘을 구성하고 두 가지 해석과정을 수치해석적으로 커플링하여 복합유역의 유출해석이 이루어 질 수 있는 해석모형을 개발하였다.

2. 개발 배경

먼저, 본 연구에서는 기존에 잘 알려져 있으나, 유효강우 분리에 의한 침투해석과 지표하 흐름에 대한 모의가 고려되지 않는 HEC-HMS, ILLUDAS, SWMM 등과 같은 집중형 모형은 해석방식의 비교에서 제외하고 분포형 강우-유출해석에 이용되는 모형 11종에 대해 지표 흐름 해석부분과 침투 및 지표하 흐름 해석부분에 대한 자료조사를 실시하여 상호 비교해 보았다. Table 1은 국내에 소개되었거나 사용 중인 분포형 유출해석 모형 11종의 지표 흐름해석과 침투 및 지표하 흐름해석에 관한 사항을 요약하여 정리한 것이다 (정인균, 2010).

Table 1에서 보는 바와 같이 지표 흐름해석과 침투 및 지표하 흐름에 대한 해석방식은 기존에 알려진 모형별로 다양하였고, 대부분의 모형에서 경험식이나 이론식을 그대로 사용하거나 수정을 통하여 보완하는 형태를 취하고 있으며, 지표하 흐름은 모의하지 않는 경우도 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 도시유역과 같이 투수유역과 불투수유역이 복합적으로 구성된 유역의 유출해석을 목적으로 하는 모듈개발을 실시하고자 하였으므로, 기존의 모형에서 시행하고 있는 방식이 아닌 지표 및 지표하 유출해석의 결합방식인 커플링 모델에 대한 내용이 필요하게 되므로 이에 대해서도 조사하였다. Table 2는 커플링 모델을 이용하고 있는 분야별로 모형 또는 알고리즘의 연구결과를 정리한 것이며, 지표 유출의 해석과 지표하 유출해석, 결합방식에 대해 다양한 방식이 사용되고 있음을 알 수 있다.

3. 복합유역 유출해석 모듈 개발

3.1 지표 및 지표하 유출해석 알고리즘의 기본 가정 및 개념

본 연구에서는 투수 및 불투수지역의 유출해석을 위한 지표 및 지표하 통합유출해석 기법의 고안을 위해 Tables 1 and 2의 조사결과를 바탕으로 적정한 유출해석 방식을 결정하였으며, 커플링에 대한 스킴을 작성하고 컴퓨터 프로그래밍을 통한 모듈을 개발하였다. 다음의 두 가지 사항은 본 연구의 개발 모듈인 커플링의 기본 개념이다.

Table 1. Comparison with Surface, Subsurface and Infiltration Analysis of Distribute Models in Domestic and Foreign

Flow Analysis Models	Surface Runoff	Infiltration and Subsurface Runoff
AGNPS	<ul style="list-style-type: none"> • Analysis of SCS-CN • Analysis of Peak Flow Using Empirical Equation or TR-55 	<ul style="list-style-type: none"> • SCS-CN • Don't simulation for horizontal subsurface flow
ANSWERS	<ul style="list-style-type: none"> • Manning and Continuous's Explicit Method 	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltration Analysis according to Modify Holtan-Overton
DWSM	<ul style="list-style-type: none"> • Kinematic Wave 	<ul style="list-style-type: none"> • Simple Runoff CN • Smith-Parlange Infiltration Procedure • Kinematic Storage
GSFLOW	<ul style="list-style-type: none"> • Runoff Contribution Area (Contribution Ratio) 	<ul style="list-style-type: none"> • Linear and Non-linear Formular Relation to HRU
GSSHA	<ul style="list-style-type: none"> • 2D Diffusive Wave (Finite Difference-Explicit Method) 	<ul style="list-style-type: none"> • Green-Ampt • Multi-layered Green-Ampt • Green-Ampt with Redistribution • 1D Vertical Richards equation
Hydro-BEAM	<ul style="list-style-type: none"> • Kinematic Wave 	<ul style="list-style-type: none"> • Kinematic Wave • Linear Storage Method
Hydrosphere	<ul style="list-style-type: none"> • Approcimation Diffusion Wave Equation of Saint-Venant • Equation of Mass Balance and Conservation of Momentum 	<ul style="list-style-type: none"> • Saint-Venant Equation
HyGIS-GRM	<ul style="list-style-type: none"> • Kinematic Wave 	<ul style="list-style-type: none"> • Green-Ampt • Beven eq. (1981) • Simple Storage-Discharge Model
KINEROS2	<ul style="list-style-type: none"> • Kinematic Wave 	<ul style="list-style-type: none"> • Smith-Parlange Infiltration Procedure • Don't simulation for horizontal subsurface flow
MIKE-SHE	<ul style="list-style-type: none"> • 2D Diffusive Wave (Finite Differential Method) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1D Finite Difference (Gravity Flow, Richard's q) • 2-Layer Hydrologic Balance • Net Recharge
Vflo TM	<ul style="list-style-type: none"> • 1D KWA (Kinematic Wave Analogy) 	<ul style="list-style-type: none"> • Green-Ampt • Don't simulation for horizontal subsurface flow

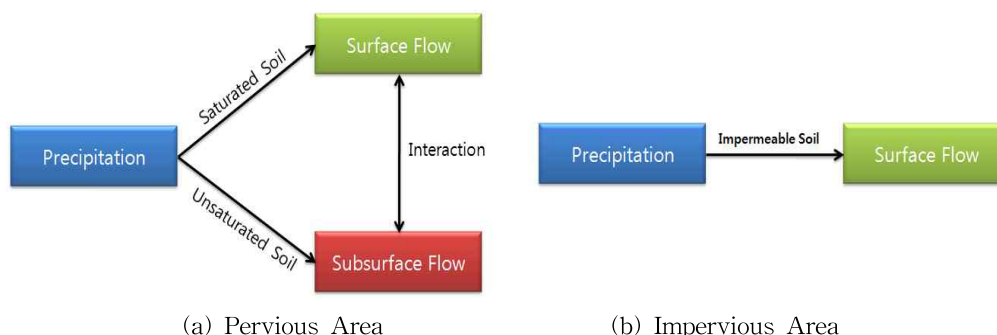


Fig. 1. Runoff Processing in Pervious and Impervious Area

Table 2. Comparison with Coupling Models of Practicable Surface and Subsurface Runoff Analysis

Field	Developer or Researcher	Model Name	Surfae ⁽¹⁾	Subsurface ⁽²⁾	Interaction ⁽³⁾
Irrigation	Strelkoff et al. (1998); U.S.Arid-Land Agricultural Research Center (2006)	SRFR/ WinSRFR	1D ZI	EA	DU
	Utah State University (1999, 2003)	SIRMOD	1D KW/ZI/HD	EA	DU
	Katopodes and Strelkoff (1977)		1D HD	EA	DU
	Singh and Bhallamudi (1996, 1997)		1D HD	EA	DU
	Akanbi and Katopodes (1988)		2D HD	EA	DU
	Zerihun et al. (2003)		1D ZI	EA	DU
	Zerihun et al. (2005 a,b,c)		1D ZI	1D R	IC
	Schwankl et al. (2000)		1D ZI	EA	DU
	Abbasi et al. (2003 a,b)	ZIMOD	1D ZI	EA	DU
Whling et al. (2004, 2006)		1D ZI	2D R	IC	
Watershed	U.S.Army corps of Engineers (2000)	HEC-HMS	1D KW/TL/UH	EA	DU
	VanderKwaak (1999)	InHM	2D	3D R	FC
	Panday and Huyakorn (2004)	MODHMS	1D+2D HD	3D R	FC/IC
	Refsgaard and Storm (1995)	MIKE-SHE	1D+2D ZI	1D R/EA	UC/DU
	Bixio et al. (2002)		1D ZI	3D R	UC
Subsurface	Fiedler and Ramirez (2000)		2D HD	EA	DU
	Gandolfi and Savi (2000)		2D HD	1D R	UC
	Singh and Bhallamudi (1998)	1DS1DSS/ 1DS2DSS	1D HD	1D/2D R	UC
	Smith and Woolhiser (1971)		1D KW	1D R	UC
	Govindaraju and Kavvas (1991)		1D ZI	2D R	IC
	Liang et al. (2007)		2D HD	GW	FC
	Gunduz and Aral (2005)		1D HD	GW	FC
	McDonald and Harbaugh (1988)	MODFLOW	VB	GW	DU
	Cheng and Anderson (1993)	MODFLOW	VB	GW	DU
Council (1999)	MODFLOW	VB	GW	DU	
Other	Kouznestov et al. (2007)		1D HD	3D R	IC

⁽¹⁾ Surface - 1D : one-dimensional, 2D : two-dimensional, ZI : zero inertia, KW : kinematic wave,
 HD : dynamic wave (hydrodynamic full inertia), TL : time lag, UH : unit hydrograph,
 VB : mass volume balance
⁽²⁾ Subsurface - EA : empiric or algebraic, R : Richards' equation, 3D : three-dimensional, GW : groundwater
⁽³⁾ Interaction Method - DU : degenerated uncoupled, IC : iterative coupling, FC : full coupling, UC : uncoupled

1) 투수 유역에 강우가 발생하면 토양층의 포화정도에 따라 지표유출 또는 지표하 유출이 발생하며, 투수 지역에 대한 강우와 지표유출 및 지표하 유출에 대

한 상호작용이 일어난다 (Fig. 1(a)).
 2) 불투수 유역의 경우 지표하 유출이 발생하지 않고 지표유출만 발생한다 (Fig. 1(b)).

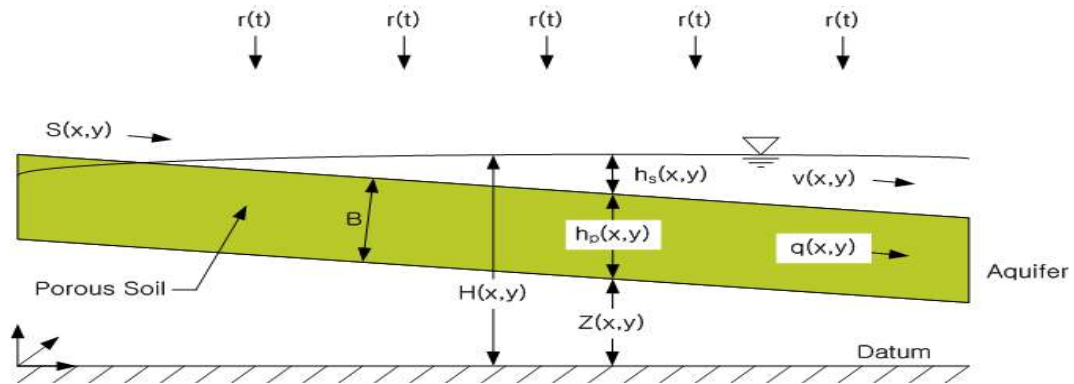


Fig. 2. Numerical Concept Diagram of Surface and Subsurface Flow

Table 3. Composition of Module

Compositon of Module		Descriptions
Module Feature	Module Name	
Subsurface Flow Analysis	SUBFA	Boussinesq Equation Using Darcy's law and Dupuit-Forchheimer Assumptions
Surface Flow Analysis	SFA	2-Dimensional Diffusion Wave Model
Interaction	IA	Interaction Method of Surface and Subsurface Using Mass Balance
Numerical Solution	NS	Numerical Solution uses the finite volume method with central differencing in space and the Crank-Nicolson method in time

이상의 2가지 기본개념을 이용하여 지표 유출 및 지표 하 유출에 대한 수치모델링 개념도를 다음과 같이 세분화 하였다 (Fig. 2).

- ① 일정 면적을 가진 지역에 균일한 강우 $r(t)$ 가 발생
- ② datum에서 암반층 (또는 대수층)까지의 연직거리 $Z(x,y)$
- ③ 투수성 토양층의 두께 B 에 대한 포화심 $h_p(x,y)$
- ④ 투수성 토양층의 두께 B 와 포화심 $h_p(x,y)$ 이 같아 지는 시점부터 발생하는 지표 유출심 $h_s(x,y)$
- ⑤ 단위폭 당 발생 유출량 $q(x,y)$, 지표경사 $S(x,y)$, 평균유속 $v(x,y)$, datum으로부터의 총수두 $H(x,y)$

본 연구에서는 지표 유출해석의 경우 지표면의 경사에 따른 흐름해석과 횡방향 유입에 대한 원활한 해석을 위해 2차원 해석을 기반으로 설정하고, 지표하 유출해석에서는 투수성 토양의 물성치를 비교적 효과적으로 반영할 수 있는 Boussinesq 방정식을 사용하였으며, 지표 및 지표하의 흐름에 대한 결합방식은 반복기법 (Iterative method)으로 결정하고 각각의 필수 알고리즘을 다음과 같은 세부모듈로 구성하였다. Table 3은 지표하 유출해석, 지표 유출해석, 상호작용, 수치해석 부분에서 구성한 각 세부모듈에

대한 설명을 요약하여 나타낸 것이다.

3.2 세부모듈의 구성

3.2.1 지표하 유출해석 (SUBFA 모듈)

지표하 유출은 연속방정식과 운동량방정식을 기본 방정식으로 선정하고, Darcy의 법칙과 Dupuit-Forchheimer 가정을 이용한 Boussinesq 방정식으로 구성하였으며, 구성과정은 다음과 같다.

$$\text{연속방정식} : \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Eq. (1)을 투수층의 포화심 h_p 에 대해 적분하면

$$\int_0^{h_p} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dz = \frac{\partial}{\partial x} (q_x h_p) + \frac{\partial}{\partial y} (q_y h_p) + q_{h_p} - q_0 \quad (2)$$

여기서, q_{h_p} : 자유표면의 이동량, q_0 : 강우량

Eq. (2)에서 연직방향으로 흐름에 대한 저항이 없다고 가정하면 자유표면 (free surface)의 이동과 강우량의 영향은 각각 q_{h_p} 와 q_0 로 분리될 수 있으며, 시간에 대한 투수층

내 자유표면의 이동은 $q_{h_p} = n_e \frac{\partial h_p}{\partial t}$ 로 주어지고 강우량은 $q_0 = r(t)$ 로 표현할 수 있다.

$$n_e \frac{\partial h_p}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(q_x h_p) - \frac{\partial}{\partial y}(q_y h_p) + r(t) \quad (3)$$

여기서, n_e : 유효공극률, $r(t)$: 시간간격별 강우량

비관성 흐름에 대한 수평 등방성을 가정하고 Darcy의 법칙에 따라 Eq. (3)을 정리하면 Eq. (4)와 같이 일정한 유량에 대한 비피압 투수층에서 2차원 부등류 흐름을 나타내는 Boussinesq 방정식 (Singh, 1968)이 된다.

$$n_e \frac{\partial h_p}{\partial t} = K \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} h_p \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} h_p \right) \right] + r(t) \quad (4)$$

여기서, K : 투수계수, H : 총수두

3.2.2 지표 유출해석 (SFA 모듈)

지표 유출의 동역학적인 흐름은 연속방정식과 운동량 방정식으로 구성된 Saint-Venant 방정식을 Diffusion Wave 근사해법으로 간략화 한 2차원 확산파 모델 (Hromadka and Yen, 1986)로 다음과 같이 구성하였다.

$$\text{연속방정식 : } \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial (v_x h_s)}{\partial x} + \frac{\partial (v_y h_s)}{\partial y} = r(t) \quad (5)$$

운동량방정식 :

$$\frac{\partial (v_x h_s)}{\partial t} + \frac{\partial (v_x^2 h_s)}{\partial x} + \frac{\partial (v_x v_y h_s)}{\partial y} + g h_s \left(S_{f_x} + \frac{\partial H}{\partial x} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial (v_y h_s)}{\partial t} + \frac{\partial (v_y^2 h_s)}{\partial y} + \frac{\partial (v_x v_y h_s)}{\partial x} + g h_s \left(S_{f_y} + \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (7)$$

Diffusion Wave의 근사해법을 이용하여 운동량방정식을 간략화 하면 Eq. (8)과 같이 마찰경사항을 정의할 수 있다.

$$S_{f_x} = -\frac{\partial H}{\partial x}, S_{f_y} = -\frac{\partial H}{\partial y} \quad (8)$$

Manning 공식을 이용하여 동수반경을 수심으로 가정하고, 유속항을 마찰경사항으로 표현하면 Eq. (9)와 같다.

$$(v_x^2 + v_y^2)^{1/2} = \frac{1}{n} \frac{h_s^{2/3}}{\sqrt{S_f}} (S_{f_x}^2 + S_{f_y}^2) \quad (9)$$

마찰경사항을 수리학적경사항으로 바꾸면 방향에 따라 Eqs. (10) and (11)이 된다.

$$v_x = \frac{1}{n} \frac{h_s^{2/3}}{\sqrt{S_f}} S_f = -\frac{1}{n} \frac{h_s^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (10)$$

$$v_y = \frac{1}{n} \frac{h_s^{2/3}}{\sqrt{S_f}} S_f = -\frac{1}{n} \frac{h_s^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \frac{\partial H}{\partial y} \quad (11)$$

Eqs. (10) and (11)의 사항을 고려하여 연속방정식을 정리하면 지표 흐름의 기본적인 1차 편미분 방정식이 된다.

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{1}{n} \frac{h_s^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \frac{\partial H}{\partial x} h_s \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{1}{n} \frac{h_s^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \frac{\partial H}{\partial y} h_s \right) = r(t) \quad (12)$$

지표 흐름이 발생할 때 $\frac{dz}{dt}$ 와 $\frac{\partial}{\partial t} h_p$ 는 0이 되고, 포화심은 투수층 토양의 두께와 동일하게 된다.

2-dimensional diffusion wave model :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D(h_s) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-D(h_s) \frac{\partial H}{\partial y} \right) = r(t) \quad (13)$$

여기서, $D(h_s) = \frac{1}{n} \frac{h_s^{5/3}}{\sqrt{S_f}}$

3.2.3 상호작용 (Interaction, IA 모듈)

강우, 지표하 흐름, 지표 흐름에 대한 상호작용은 격자

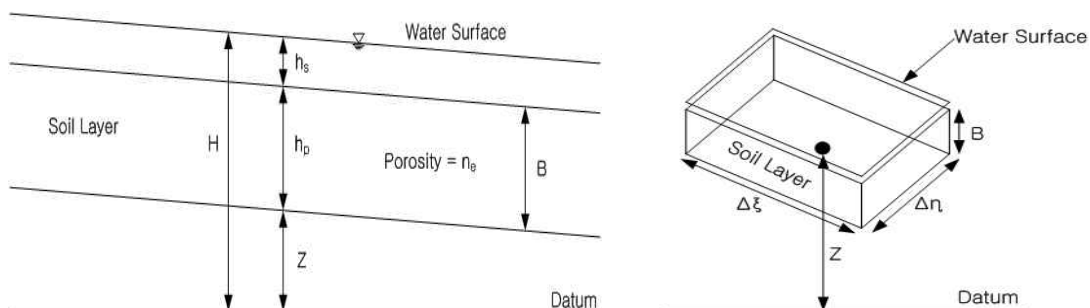


Fig. 3. Mass Balance of Rainfall, Subsurface Flow and Surface Flow

셀의 질량보존을 유지하도록 설정하였다. 격자 셀의 질량보존을 유지하기 위해 셀 중심에서 총 수두(H)와 체적(V)을 Eqs. (14) and (15)와 같이 정하였다 (Fig. 3).

$$H = z + h_p + h_s \quad (14)$$

$$V = Area \times Depth = \Delta A(H - z) = \Delta A(h_p + h_s) \quad (15)$$

여기서, ΔA : 셀의 면적

토양층의 투수성을 고려하여 Eq. (15)를 변경하면 Eq. (16)과 같다.

$$V_{H_2O} = \Delta A h_p n_e + \Delta A h_s \quad (16)$$

Eq. (16)의 좌변을 시간과 투수층의 두께에 따라 편도 함수로 표현하면 Eq. (17)과 같이 된다.

$$\frac{\partial V_{H_2O}}{\partial t} = \begin{cases} \Delta A n_e \frac{\partial h_p}{\partial t} & h_p < B \\ \Delta A \frac{\partial h_s}{\partial t} & h_p \geq B \end{cases} \quad (17)$$

Eq. (17)의 좌변을 시간에 따른 유량으로 나타내면 Eq. (18)과 같다.

$$\frac{\partial V_{H_2O}}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (18)$$

여기서, Eq. (18)과 격자 셀 내부의 유량은 강우, 지표하 흐름, 지표 흐름에 따라 변하는 질량보존의 관계를 유지하게 된다.

(1) 인접한 격자 셀의 지표하 유량 추정

주어진 셀의 크기가 일정하다고 가정하면 각 셀은 가

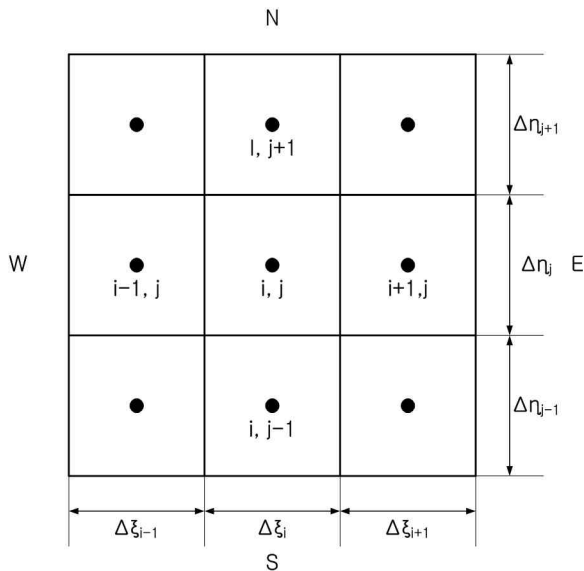


Fig. 4. Computational Grid

로, 세로방향은 각각 일정한 간격인 $\Delta\eta$ 와 $\Delta\xi$ 를 가지도록 하고, 해당 셀과 인접 셀의 방향관계를 고려하기 위해 동서방향은 i , 남북방향은 j 점자로 표기하였다 (Fig. 4).

해당 셀 i, j 에서 균등한 강우에 의한 유량은 Eq. (19)와 같이 강우강도와 셀 면적의 곱이 된다.

$$Q_{rain} = r(t) \times \Delta A \quad (19)$$

여기서, 지표하에서 발생하는 유량은 Darcy의 법칙에 따라 $Q = KLA$ 이며, 수리경사의 방향성을 고려할 때 서쪽방향으로 흐름이 발생한다면 Eq. (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial \xi} \Big|_w = \frac{H_{i-1,j} - H_{i,j}}{1/2(\Delta\xi_{i-1} + \Delta\xi_i)} \quad (20)$$

Eq. (20)의 $\Delta\xi$ 를 길이 l 로 표기하고 서쪽을 비롯한 모든 방향의 유량을 나타내면 Eqs. (21)~(24)로 정의할 수 있다.

$$\text{서쪽: } Q_{p,w} = K \frac{H_{i-1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i-1,j} + l_{i,j})} h_{p,w} l_{i,j} \quad (21)$$

$$\text{동쪽: } Q_{p,e} = K \frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i+1,j} + l_{i,j})} h_{p,e} l_{i,j} \quad (22)$$

$$\text{남쪽: } Q_{p,s} = K \frac{H_{i,j-1} - H_{i,j}}{1/2(l_{i,j-1} + l_{i,j})} h_{p,s} l_{i,j} \quad (23)$$

$$\text{북쪽: } Q_{p,n} = K \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{1/2(l_{i,j+1} + l_{i,j})} h_{p,n} l_{i,j} \quad (24)$$

(2) 인접한 격자 셀의 지표 유량 추정

한편, 지표 유량을 Diffusion Wave의 간략식으로 표시하면 Eq. (25)와 같다.

$$Q = V \times A = \frac{1}{n} \frac{h_s^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \frac{\partial H}{\partial x} \times h_s \Delta y \quad (25)$$

각 방향에 대한 유량 관련 식에서 수리경사를 격자 셀의 방향점자 i, j 로 나타내면 Eqs. (26)~(29)로 나타낼 수 있다.

$$\text{서쪽: } Q_{s,w} = \frac{1}{n} \frac{h_{s,w}^{2/3}}{\sqrt{S_{f,w}}} \left(\frac{H_{i-1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i-1,j} + l_{i,j})} \right) \times h_{s,w} l_{i,j} \quad (26)$$

$$\text{동쪽: } Q_{s,e} = \frac{1}{n} \frac{h_{s,e}^{2/3}}{\sqrt{S_{f,e}}} \left(\frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i+1,j} + l_{i,j})} \right) \times h_{s,e} l_{i,j} \quad (27)$$

$$\text{남쪽: } Q_{s,s} = \frac{1}{n} \frac{h_{s,s}^{2/3}}{\sqrt{S_{f,s}}} \left(\frac{H_{i,j-1} - H_{i,j}}{1/2(l_{i,j-1} + l_{i,j})} \right) \times h_{s,s} l_{i,j} \quad (28)$$

$$\text{북쪽: } Q_{s,n} = \frac{1}{n} \frac{h_{s,n}^{2/3}}{\sqrt{S_{f,n}}} \left(\frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{1/2(l_{i,j+1} + l_{i,j})} \right) \times h_{s,n} l_{i,j} \quad (29)$$

(3) 인접한 격자 셀의 유량 추정

이상의 사항을 종합하면 2차원 격자에서 발생할 수 있는 질량보존은 9가지 유량의 향으로 Eq. (30)과 같이 표현 가능하게 된다.

$$\frac{\partial V_{H_2O}}{\partial t} = Q_{p,w} + Q_{s,w} + Q_{p,e} + Q_{s,e} + Q_{p,s} + Q_{s,s} + Q_{p,n} + Q_{s,n} + Q_{rain} \quad (30)$$

3.2.4 수치해석 (NS 모듈)

질량보존에 의한 각각의 유량을 계산하기 위해서는 총수두 H 를 산정해야 한다. 포화된 토양층의 포화심 (h_p)과 지표 유출심 (h_s)의 합을 h 로 나타내면 총수두는 $H = Z + h$ 가 되며, 경계면과 셀의 중심에 대한 총 수두 H 는 h_s, h_p, S_f 로 나타낼 수 있다.

(1) 투수층의 포화심 (h_p)과 지표 유출심 (h_s)

인접 셀간의 양단면 평균법을 사용하면 투수층의 포화심에 의한 수두 h_p 와 지표 흐름이 발생할 때 수심에 의한 수두 h_s 는 투수층의 포화심에 따라 Eqs. (31)~(34)와 같이 4방향의 8가지 식으로 표현할 수 있으며, 투수층의 포화심 (h_p)과 투수층 토양의 두께 (B)에 따라 $0 \leq h_p < B$ 이 되는 경우 $h_s = 0$ 가 되는 조건을 가지게 된다.

$$\begin{aligned} \text{서쪽: } h_{p,w} &= \frac{H_{i,j} l_{i-1,j} + H_{i-1,j} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i-1,j}} - z_w \\ h_{s,w} &= \frac{H_{i,j} l_{i-1,j} + H_{i-1,j} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i-1,j}} - z_w - B \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{동쪽: } h_{p,e} &= \frac{H_{i,j} l_{i+1,j} + H_{i+1,j} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i+1,j}} - z_e \\ h_{s,e} &= \frac{H_{i,j} l_{i+1,j} + H_{i+1,j} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i+1,j}} - z_e - B \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \text{남쪽: } h_{p,s} &= \frac{H_{i,j} l_{i,j-1} + H_{i,j-1} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i,j-1}} - z_s \\ h_{s,s} &= \frac{H_{i,j} l_{i,j-1} + H_{i,j-1} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i,j-1}} - z_s - B \end{aligned} \quad (33)$$

$$\text{북쪽: } h_{p,n} = \frac{H_{i,j} l_{i,j+1} + H_{i,j+1} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i,j+1}} - z_n$$

$$h_{s,n} = \frac{H_{i,j} l_{i,j+1} + H_{i,j+1} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i,j+1}} - z_n - B \quad (34)$$

최소와 최대치의 개념을 이용하여 셀의 서쪽방향 경계 층에 해당하는 두께에 관해 정리하면, Eqs. (35) and (36)과 같이 된다.

$$h_{p,w} = \min \left(B; \frac{H_{i,j} l_{i-1,j} + H_{i-1,j} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i-1,j}} - z_w \right) \quad (35)$$

$$h_{s,w} = \max \left(0; \frac{H_{i,j} l_{i-1,j} + H_{i-1,j} l_{i,j}}{l_{i,j} + l_{i-1,j}} - z_w - B \right) \quad (36)$$

이러한 사항은 서쪽방향 뿐만 아니라 동쪽, 남쪽, 북쪽 방향에서도 동일하게 적용된다.

(2) 마찰경사 (S_f)

Dupuit-Forchheimer의 가정에 의해 마찰경사를 수리경사와 같게 두면, ξ -성분에서 서쪽과 동쪽방향 중심의 마찰경사와 η -성분의 남쪽과 북쪽방향 마찰경사는 인접 셀과의 산술평균으로 산정가능하게 된다.

$$\xi\text{-성분 서쪽: } S_{f\xi,w} = \frac{H_{i-1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i-1,j} + l_{i,j})} \quad (37)$$

$$\xi\text{-성분 동쪽: } S_{f\xi,e} = \frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i+1,j} + l_{i,j})} \quad (38)$$

$$\eta\text{-성분 남쪽: } S_{f\eta,s} = \frac{H_{i,j-1} - H_{i,j}}{1/2(w_{i,j-1} + w_{i,j})} \quad (39)$$

$$\eta\text{-성분 북쪽: } S_{f\eta,n} = \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{1/2(w_{i,j+1} + w_{i,j})} \quad (40)$$

η -성분에서 서쪽과 동쪽방향의 마찰경사와 ξ -성분의 남쪽과 북쪽방향의 마찰경사는 인접 4면의 가중평균을 이용하여 구할 수 있다.

$$\xi\text{-성분 남쪽: } S_{f\xi,s} = \frac{(S_{f\xi,e} + S_{f\xi,w})w_{i,j-1} + (S_{f\xi,e} + S_{f\xi,w})_{j-1}w_{i,j}}{2(w_{i,j} + w_{i,j-1})} \quad (41)$$

$$\xi\text{-성분 북쪽: } S_{f\xi,n} = \frac{(S_{f\xi,e} + S_{f\xi,w})w_{i,j+1} + (S_{f\xi,e} + S_{f\xi,w})_{j+1}w_{i,j}}{2(w_{i,j} + w_{i,j+1})} \quad (42)$$

$$\eta\text{-성분 서쪽: } S_{f\eta,w} = \frac{(S_{f\eta,n} + S_{f\eta,s})l_{i-1,j} + (S_{f\eta,n} + S_{f\eta,s})_{i-1}l_{i,j}}{2(l_{i,j} + l_{i-1,j})} \quad (43)$$

η -성분 동쪽 :

$$S_{f\eta,e} = \frac{(S_{f\eta,n} + S_{f\eta,s})l_{i+1,j} + (S_{f\eta,n} + S_{f\eta,s})_{i+1}l_{i,j}}{2(l_{i,j} + l_{i+1,j})} \quad (44)$$

격자의 폭 w 와 길이 l 에 대한 영향을 배제하면 Eq. (45) 와 같이 정리된다.

$$S_{f,w} = \sqrt{S_{f\zeta,w}^2 + S_{f\eta,w}^2} \quad (45)$$

(3) 통수능 계수

Eq. (30)을 V_{H_2O} , H , h_p , h_s 와 같은 4개의 독립변수를 포함한 식으로 바꾸면 Eq. (46)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{H_2O}}{\partial t} = & K \frac{H_{i-1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i-1,j} + l_{i,j})} h_{p,w} w_{i,j} + \frac{1}{n} \frac{h_{s,w}^{2/3}}{\sqrt{S_{f,w}}} \left(\frac{H_{i-1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i-1,j} + l_{i,j})} \right) \times h_{s,w} w_{i,j} \\ & + K \frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i+1,j} + l_{i,j})} h_{p,e} w_{i,j} + \frac{1}{n} \frac{h_{s,e}^{2/3}}{\sqrt{S_{f,e}}} \left(\frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{1/2(l_{i+1,j} + l_{i,j})} \right) \times h_{s,e} w_{i,j} \\ & + K \frac{H_{i,j-1} - H_{i,j}}{1/2(w_{i,j-1} + w_{i,j})} h_{p,s} l_{i,j,s} + \frac{1}{n} \frac{h_{s,s}^{2/3}}{\sqrt{S_{f,s}}} \left(\frac{H_{i,j-1} - H_{i,j}}{1/2(w_{i,j-1} + w_{i,j})} \right) \times h_{s,s} l_{i,j,s} \\ & + K \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{1/2(w_{i,j+1} + w_{i,j})} h_{p,n} l_{i,j,n} + \frac{1}{n} \frac{h_{s,n}^{2/3}}{\sqrt{S_{f,n}}} \left(\frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{1/2(w_{i,j+1} + w_{i,j})} \right) \times h_{s,n} l_{i,j,n} \\ & + r(t) \times \Delta A \end{aligned} \quad (46)$$

Eq. (46)을 정리하여 통수능 계수로 나타내면 Eq. (47) 이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta A} \frac{\partial V_{H_2O}}{\partial t} = & \left[\left(K \times h_{p,w} + \frac{1}{n} \frac{h_{s,w}^{5/3}}{\sqrt{S_{f,w}}} \right) \left(\frac{2w_{i,j}}{l_{i-1,j} + l_{i,j}} \right) \left(\frac{1}{\Delta A} \right) \right] \times (H_{i-1,j} - H_{i,j}) \quad (47) \\ & + \left[\left(K \times h_{p,w} + \frac{1}{n} \frac{h_{s,e}^{5/3}}{\sqrt{S_{f,e}}} \right) \left(\frac{2w_{i,j}}{l_{i+1,j} + l_{i,j}} \right) \left(\frac{1}{\Delta A} \right) \right] \times (H_{i+1,j} - H_{i,j}) \\ & + \left[\left(K \times h_{p,s} + \frac{1}{n} \frac{h_{s,s}^{5/3}}{\sqrt{S_{f,s}}} \right) \left(\frac{2l_{i,j}}{w_{i,j-1} + w_{i,j}} \right) \left(\frac{1}{\Delta A} \right) \right] \times (H_{i,j-1} - H_{i,j}) \\ & + \left[\left(K \times h_{p,n} + \frac{1}{n} \frac{h_{s,n}^{5/3}}{\sqrt{S_{f,n}}} \right) \left(\frac{2l_{i,j}}{w_{i,j+1} + w_{i,j}} \right) \left(\frac{1}{\Delta A} \right) \right] \times (H_{i,j+1} - H_{i,j}) \end{aligned}$$

셀의 경계층에 대한 통수능 계수를 Eqs. (35) and (36) 을 이용하여 나타내면 Eq. (48)과 같다.

$$C_w = \left(\begin{array}{l} K \times \min \left(b; \frac{H_{i,j-1,j} + H_{i-1,j} - z_w}{l_{i,j} + l_{i-1,j}} \right) \\ \max \left(0; \frac{H_{i,j-1,j} + H_{i-1,j} - z_w - b}{l_{i,j} + l_{i-1,j}} \right)^{5/3} \\ + \frac{1}{n} \frac{h_{s,w}^{5/3}}{\sqrt{S_{f,w}}} \end{array} \right) \left(\frac{2w_{i,j}}{l_{i-1,j} + l_{i,j}} \right) \left(\frac{1}{\Delta A} \right) \quad (48)$$

Eq. (48)의 통수능 계수를 질량보존에 의해 간략화 하면 Eq. (49)와 같다.

$$\frac{1}{\Delta A} \frac{\partial V_{H_2O}}{\partial t} = C_w \times (H_{i-1,j} - H_{i,j}) + C_e \times (H_{i+1,j} - H_{i,j}) + C_s \times (H_{i,j-1} - H_{i,j}) + C_n \times (H_{i,j+1} - H_{i,j}) + r(t) \quad (49)$$

(4) 공극률 유량 계수

Eq. (17)의 면적항을 왼쪽으로 이항하여 나타내면 Eq. (50)이 된다.

$$\frac{1}{\Delta A} \frac{\partial V_{H_2O}}{\partial t} = \begin{cases} n_e \frac{\partial h_p}{\partial t} & h_p < B \\ \frac{\partial h_s}{\partial t} & h_p \geq B \end{cases} \quad (50)$$

Eq. (50)의 조건에서 총수두 H 는 시간에 따라 다음의 두 가지 경우를 만족하게 된다.

Case 1: 투수층 내에서 모든 유출이 일어날 경우

Case 2: 지표 유출과 지표하 유출이 혼합되어 나타날 경우

두 경우에 대한 총수두가 의미하는 값은 Case 1의 경우 해당 투수율에 대한 수두값이 되고 Case 2의 경우는 투수율이 적용되지 않은 수두가 된다.

Case 1에 해당하는 경우 수두값의 계산에 하기 위해 공극률 함수를 이용하면 Eq. (51)과 같다.

$$pf(H, z, B, n_e) = \begin{cases} 1 & \text{for } H - z \geq B \\ 1/n_e & \text{for } H - z < B \end{cases} \quad (51)$$

(5) 총수두의 계산

시간에 따른 총수두의 변화를 계수값을 이용하여 행렬화시키면 Eq. (52)가 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} = pf \times [& C_w H_{i-1,j} + C_s H_{i,j-1} - (C_w + C_s + C_n + C_e) H_{i,j} \\ & + C_n H_{i,j+1} + C_e H_{i+1,j} + r(t)] \end{aligned} \quad (52)$$

투수층의 두께와 포화심의 관계에 따라 Eq. (52)의 각 항들은 소거되거나 의미를 가지게 되며, 이러한 과정은 시스템 내에서 유동적으로 변하게 된다. 총수두 H 를 $h + Z$ 의 항으로 바꾸고 시간변화에 대한 해를 구하기 위해 전방 및 후방 차분에 비해 높은 정확도를 나타내는 중앙차분방식의 Crank-Nicolson 방법을 사용하였다.

3.2.5 복합유역 유출해석 모듈

본 연구에서는 지표하 유출해석 모듈 (SUBFA)와 지표 유출해석 모듈 (SFA), 상호작용 모듈 (IA), 수치해석 모듈

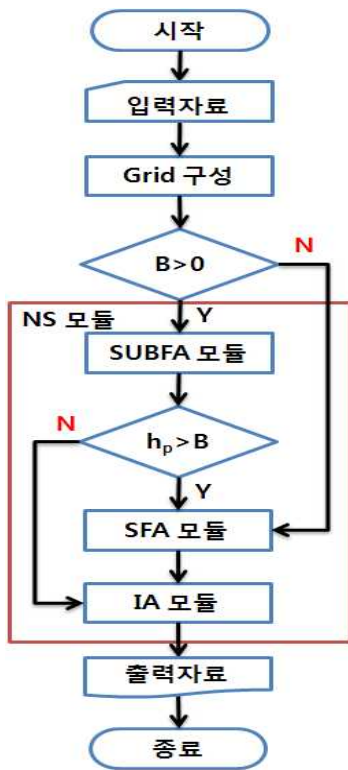


Fig. 5. Flow Chart of Composite Basin Runoff Analysis Module

(NS)의 4가지 세부모듈을 결합하여 복합유역 유출해석 모듈을 구성하였으며, Fig. 5와 같은 계산 흐름도에 따라 모듈이 시뮬레이션 되도록 하였다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 도시유역의 전형적인 유역구성 형태인 투수지역과 불투수지역이 혼재하는 복합유역을 대상으로 하는 강우-유출해석에 적용 가능한 지표 및 지표하 유출해석 커플링 모듈을 개발하였다. 지표하 유출해석에서는 Darcy의 법칙과 Dupuit-Forchheimer 가정을 이용한 Boussinesq 방정식을 이용하였으며, 지표 유출의 동역학적인 흐름은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된 Saint-Venant 방정식을 Diffusion Wave 근사해법으로 간략화 한 2차원 확산파 모델로 구성하였다. 지표하와 지표 유출의 상호작용은 질량보존에 의한 해석을 이용하고, 공간에 대해서는 유한체적법을 시간에 대해서는 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 수치모의를 시행하도록 하였다. 각각의 과정을 모듈로 구성하고 4가지 주요 모듈을 결합하여 복합유역 유출해석 모듈을 완성하였다. 본 논문을 통해 개발한 모듈의 적용 및 분석은 “대도시 복합

유역의 지표 및 지표하 유출해석기법 개발 II”에서 다루었으며, 관거 및 하도 흐름이송해석 모듈 및 유출저감용 시설물에 대한 부수적인 모듈을 추가하여 도시유역의 강우-유출해석을 위한 통합모형 구축을 향후 연구로 계획하고 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2008년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구성과입니다.

참고문헌

- 고덕구 (1989). 소유역의 장기유출 예측을 위한 모의발생 수문모형의 개발. 박사학위논문, 서울대학교.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-507.
- 김문모, 이정우, 이재웅 (2007). “격자기반의 도시유역 지표면 유출모형의 개발 및 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제1호, pp. 25-38.
- 김성준 (1998). “격자기반의 운동과 강우유출모형 개발 (I) -이론 및 모형-.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 303-308.
- 김성준, 채효석, 신사철 (1998). “격자기반의 운동과 강우 유출모형 개발 (II)-적용예-.” **한국수자원학회 논문집**, 제31권, 제3호, pp. 309-315.
- 신철균, 조효섭, 정관수, 김제한 (2004). “저류함수기법을 이용한 격자기반의 강우-유출 모형의 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 969-978.
- 유동훈, 오윤창 (2000). “지표면-지하수의 연계 수치모형.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 359-364.
- 정인균 (2010). 분포형 강우-유출모형의 토양수분 및 격자 흐름추적 알고리즘 개발 및 적용. 박사학위논문, 건국대학교, pp. 8-13.
- 최현상, 한건연 (2004a). “GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (I)-이론 및 모형의 개발-.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 329-339.
- 최현상, 한건연 (2004b). “GIS와 불확실도 해석기법을 이용

- 한 분포형 강우-유출 모형의 개발(II)-적용 및 분석-”
한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 341-352.
- Abbasi, F., Feyen, J., Roth, R.L., Sheedy, M. and van Genuchten, M.Th. (2003a). “Water flow and solute transport in furrow-irrigated fields.” *Irrig. Sci.*, Vol. 22, pp. 57-65.
- Abbasi, F., Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., Feyen, J., Adamsen, F.J., Hunsaker, D.J., Strelkoff, T.S. and Shouse, P. (2003b). “Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis.” *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 129, pp. 71-81.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O’Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986a). “An Introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen SHE. 1: History and Philosophy of a Physically Based Distributed Modelling System.” *J. Hydrol.*, 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-Système Hydrologique Européen SHE. 2: Structure of a Physically Based Distributed Modelling System.” *J. Hydrol.*, 87, pp. 61-77.
- Akanbi, A.A., and Katopodes, N.D. (1988). “A Model for Flood Propagation on Initially Dry Land.” *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 114, pp. 689-706.
- Bixio, A.C., Gambolati, G., Paniconi, C., Putti, M., Sheshtopalov, V.M., Bublías, V.N., Bohuslavsky, A.S., Kasteltseva, N.B., and Rudenko, Y.F. (2002). “Modeling Groundwater-Surface Water Interactions Including Effects of Morphogenetic Depressions in the Chernobyl Exclusion Zone.” *Environ. Geol.*, Vol. 42, pp. 162-177.
- Cheng, X., and Anderson, M.P. (1993). “Numerical Simulation of Ground-Water Interaction with Lakes allowing for Fluctuating Lake Levels.” *Ground Water*, Vol. 31, pp. 929-933.
- Council, G.W. (1999). A Lake Package for MODFLOW (LAK2) : Documentation and User’s Manual. Version 2.2. HSI GeoTrans, Roswell, GA.
- Downer, C.W., and Ogden, F.L. (2002). GSSHA User’s Manual, Gridded Surface-Subsurface Hydrologic Analysis. Version 1.43 for WMS 6.1, EDRL Technical Report, Engineering Research and Development Center, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg.
- Fiedler, F.R., and Ramirez, J.A. (2000). “A Numerical Method for Simulating Discontinuous Shallow Flow over an Infiltrating Surface.” *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 32, pp. 219-240.
- Gandolfi, C., and Savi, F. (2000). “A Mathematical Model for the Coupled Simulation of Surface Runoff and Infiltration.” *J. Agric. Eng. Res.*, Vol. 75, pp. 49-55.
- Govindaraju, R.S., and Kavvas, L.M. (1991). “Dynamics of moving boundary overland flows over infiltrating surfaces at hillslopes.” *Water Resour. Res.*, Vol. 27, pp. 1885-1898.
- Gunduz, O., and Aral, M.M. (2005). “River Networks and Groundwater Flow: A Simultaneous Solution of a Coupled System.” *J. Hydrol.*, Vol. 301, pp. 216-234.
- Hromadka, T.V., and Yen, C. (1986), “A Diffusion Hydrodynamic Model.” U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report, 87-4137.
- Julien, P.Y., and Saghafian, B. (1991). CASC2D User’s Manual, A Two-Dimensional Watershed Rainfall-Runoff Model. Center for Geosciences-Hydrologic Modeling Group, Colorado State University (CER90-91PYJ-BS-12).
- Katopodes, N.D., and Strelkoff, T.S. (1977). “Dimensionless Solution of Border Irrigation Advance.” *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 103, pp. 401-407.
- Kouznetsov, M.Y., Roodsari, R., Pachepsky, Y.A., Shelton, D.R., Sadeghi, A.M., Shirmohammadi, A., and Starr, J.L. (2007). “Modeling Manure-Borne Bromide and Fecal Coliform Transport with Runoff and Infiltration at a Hillslope.” *J. Environ. Manage.*, Vol. 84, pp. 336-346.
- Liang, D., Falconer, R.A. and Lin, B. (2007). “Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model.” *J. Hydrol.*, Vol. 337, pp. 147-158.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model.” *Tech. of Water-Resour. Invest.* 06-A1. USGS, Reston, VA.
- Ogden, F.L. (1997). Premier : Using WMS for CASC2D

- Data Development. Brigham Young University, Provo, UT.
- Panday, S., and Huyakorn, P.S. (2004). "A Fully Coupled Physically-Based Spatially Distributed Model for Evaluating Surface/Subsurface Flow." *Adv. Water Resour.*, Vol. 27, pp. 361-382.
- Refsgaard, J.C., and Storm, B. (1995). "MIKE-SHE." In V.P. Singh (ed.) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resour. Publ., Highlands Ranch, CO., pp. 809-846
- Rojas, R. (2002). GIS-Based Upland Erosion Modeling, Geovisualization and Grid Size Effects on Erosion Simulations with CASC2D-SED. PhD thesis, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Schwankl, L.J., Raghuvanshi, N.S. and Wallender, W.W. (2000). "Furrow irrigation performance under spatially varying conditions." *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 126, pp. 355-361.
- Singh, K.P. (1968), "Some factor affecting baseflow." *Water Resources Research*, Vol. 4, No. 5, pp. 985-999
- Singh, V., and Bhallamudi, S.M. (1996). "Complete Hydrodynamic Border-Strip Irrigation Model." *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 122, pp. 189-197.
- Singh, V., and Bhallamudi, S.M. (1997). "Hydrodynamic Modeling of Basin Irrigation." *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 123, pp. 407-414.
- Singh, V., and Bhallamudi, S.M. (1998). "Conjunctive Surface-Subsurface Modeling of Overland Flow." *Adv. Water Resour.*, Vol. 21, pp. 567-579.
- Smith, R.E., and Woolhiser, D.A. (1971). "Overland Flow on an Infiltrating Surface." *Water Resour. Res.*, Vol. 7, pp. 899-913.
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., and Schmidt, B.V. (1998). "Computer Program for Simulating Flow in Surface Irrigation : Furrows-. Basins-. Borders." U.S. Water Conserv. Lab., Phoenix, AZ. SRFR v.3.31.
- U.S. Arid-Land Agricultural Research Center. (2006). WinSRFR 1.0 user manual(draft). Available at policy.nrcs.usda.gov/media/pdf/UG_210_7_10_a.pdf(verified 29 Mar. 2008). USALARC, Maricopa, AZ.
- U.S. Army Corps of Engineers (2000). HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual. Hydrol. Eng. Ctr., U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Utah State University (1999). SIRMOD II : Surface Irrigation Simulation, Evaluation, and Design: User's Guide and Technical Note. Utah State Univ., Logan.
- Utah State University (2003). SIRMOD III: Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design: User's Guide and Technical Note. Utah State Univ., Logan.
- VanderKwaak, J.E. (1999). Numerical Simulation of Flow and Chemical Transport in Integrated Surface-Subsurface Hydrologic System. Ph.D. thesis., Univ. of Waterloo, Waterloo, ON, Canada.
- Vieux, B.E. (2002). "Predictability of Flash Floods Using Distributed Parameter Physics-Based Models, Appendix B in: Report of a Workshop on Predictability and Limits to prediction in Hydrologic Systems." Committee on Hydrologic Science, National Research Council, National Academy Press, ISBN 0-309-08347-8. pp. 77-82.
- Wohling, Th., Singh, R., and Schmitz, G.H. (2004). "Physically Based Modeling of Interacting Surface-Subsurface Flow during Furrow Irrigation Advance." *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 130, pp. 349-356.
- Wohling, Th., Frohner, A., Schmitz, G.H., and Liedl, R. (2006). "Efficient Solution of the Coupled One-Dimensional Surface-Two-Dimensional Subsurface Flow during Furrow Irrigation Advance." *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 132, pp. 380-388.
- Zerihun, D., Furman, A., Sanchez, C.A., and Warrick, A.W. (2003). "Calculation of Recession in Basins and Closed-End Furrows: Problems and Simplified Solutions." In Proc. Int. Conf. on Irrig., and Drain., 2nd, Phoenix, AZ. 12-5 May 2003. U.S. Committee on Irrigation and Drainage, Denver, CO. pp. 767-784.
- Zerihun, D., Furman, A., Warrick, A.W., and Sanchez, C.A. (2005a). "A Coupled Surface-Subsurface Flow Model for Improved Basin Irrigation Management." *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 131, pp. 111-128.
- Zerihun, D., Furman, A., Warrick, A.W., and Sanchez, C.A. (2005b). "A Coupled Surface-Subsurface Solute Transport Model for Irrigation Borders and Basins:

I. Model Development.” *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 131, pp. 396-406.

Zerihun, D., Sanchez, C.A., Furman, A., and Warrick, A.W. (2005c). “A Coupled Surface-Subsurface Solute Transport Model for Irrigation Borders and Basins:

II. Model Evaluation.” *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 131, pp. 407-419.

논문번호: 11-085	접수: 2011.07.27
수정일자: 2011.10.12/11.16	심사완료: 2011.11.16