

다방향 흐름 분배와 실시간 보정 알고리즘을 이용한 분포형 강우-유출 모형 개발(I) - 이론 -

Development of Distributed Rainfall-Runoff Model Using Multi-Directional Flow Allocation and Real-Time Updating Algorithm (I) - Theory -

김극수* / 한건연** / 김광섭***

Kim, Keuk Soo / Han, Kun Yeun / Kim, Gwangseob

Abstract

In this study, a distributed rainfall-runoff model is developed using a multi-directional flow allocation algorithm and the real-time runoff updating algorithm. The developed model consists of relatively simple governing equations of hydrologic processes in order to apply developed algorithms and to enhance the efficiency of computational time which is drawback of distributed model application. The variability of topographic characteristics and flow direction according to various spatial resolution were analyzed using DEM(Digital Elevation Model) data. As a preliminary process using fine resolution DEM data, a multi-directional flow allocation algorithm was developed to maintain detail flow information in distributed rainfall-runoff simulation which has strong advantage in computation efficiency and accuracy. Also, a real-time updating algorithm was developed to update current watershed condition. The developed model is able to hold the information of actual behavior of runoff process in low resolution simulation. Therefore it is expected the improvement of forecasting accuracy and computational efficiency.

keywords : distributed rainfall-runoff model, multi-directional flow allocation algorithm, real-time updating algorithm

요 지

본 연구에서는 다방향 흐름 분배 알고리즘과 실시간 보정 알고리즘을 개발하여 분포형 강우-유출 모형에 적용하였다. 개발된 알고리즘의 적용과 분포형 모형 적용상의 약점인 계산시간 개선을 위해 비교적 간단한 수문과정 지배 방정식들을 이용하여 분포형 강우-유출 모형을 작성하였다. DEM(Digital Elevation Model)를 이용하여 공간해상도 변화에 따른 지형정보와 흐름정보의 변동성을 파악하였다. 모의수행 전처리 과정으로 가용한 고해상도 DEM 자료를 사용하여 공간해상도 변화에 따른 흐름정보의 손실을 최소화하고 상세흐름정보를 저해상도 흐름정보에 반영시키는 다방향 흐름분배 알고리즘을 개발하였다. 또한 실시간으로 유역상태량을 보정하는 실시간 보정 알고리즘을 개발하였

* 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해양항만연구실 박사후연구원
Corresponding Author, Post-doctor, River, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Construction Technology,
Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea
(e-mail: keuksookim@gmail.com)
** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
*** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea

다. 개발된 모형은 저해상도 모의에서 유출 과정의 실제적 거동 정보를 유지할 수 있다. 그러므로 예측 정확도 향상 및 계산시간의 개선이 기대된다.

핵심용어 : 분포형 강우-유출 모형, 다방향 흐름 분배 알고리즘, 실시간 보정 알고리즘

1. 서 론

최근 전지구적으로 발생되고 있는 기후변화의 영향으로 사상 유례 없던 홍수들이 빈발하고 있으며 이에 따른 피해 규모 또한 막대하다. 또한 홍수의 대처능력과 피해 규모에 대한 차이는 있을 수 있으나 홍수 방어 대책들이 잘 정립된 국가 및 그렇지 않은 국가를 막론하고 이러한 홍수 발생으로부터 완전하게 안전한 지역은 있을 수 없다. 그리고 국민들의 홍수에 관한 의식 또한 과거 완전한 홍수 방어 대책에서 홍수에 대한 위협의 인식과 유연한 대응이라는 측면으로의 전환이 이루어지고 있다. 그러나 정책 결정권자들은 현재까지 한번도 발생하지 않았던 홍수에 대한 위협을 인지해야 하며, 그에 상응하는 대책의 수립 또한 고려하여야만 한다. 이러한 치수대책 수립의 기본은 정확한 수문량의 예측에 있으며 수문량의 정확한 예측을 위해서는 진보된 수문 모형의 개발이 수반되어야만 한다. 이에 따라 최근 정책입안 및 정책결정 당국 그리고 모형수행자들로부터 수문 모형의 적용성과 예측 정확성에 대한 요구가 점점 복잡해지고 있으며 증가되고 있다.

GIS를 이용한 흐름 추적 알고리즘은 낮은 인접 지점 또는 지역으로 흐름(물, 유사, 유기물)을 전달하는 것이다(Desmet and Govers, 1996). 그러므로 강우-유출 반응의 모형화에 있어 흐름추적 알고리즘의 선택은 중요하며 유역면적 계산, 비유역면적, 흐름 전달 등의 지형 속성에 영향을 미친다. 현재까지 개발된 흐름 추적 알고리즘은 하나 이상의 GIS 내부에서 실행되며 특정한 환경에서의 흐름을 모의하는데 사용되며 모두 DEM (Digital Elevation Model, 수치 표고 모형) GRID에 기반을 두고 셀에서 인접 셀로의 흐름추적을 시도하고 있다. O'Callaghan and Mark(1984)는 D8 알고리즘을 개발한 바 있으며, 이 알고리즘은 Jenson and Domingue (1988)에 의해 ESRI 사의 ARC/INFO GRID 시스템으로 통합되었으며 현재까지 집중형 강우-유출 모의를 위한 유역 추출에 이용되어 오고 있다. Fairfield and Leymarie(1991)는 D8 알고리즘의 확률 버전인 Rho8 알고리즘을 개발하였다. Quinn *et al.*(1991)은 흐름 방향을 결정하고자하는 셀에서 인접 셀들과의 경사 및 직교방향과 대각방향의 흐름 폭에 따른 가중치를 부여하여

낮은 표고의 인접 셀들로 흐름을 유도하는 FD8 다방향 흐름추적 알고리즘을 개발하였다. Holmgren(1994)은 인접 하류사면 셀로의 흐름 분배율을 추정하기 위해서 경사구배에 기초한 경험적인 함수를 이용하는 방법을 제안한 바 있다. Costa-Cabral and Burges(1994)는 또 다른 흐름추적 알고리즘인 DEMON 알고리즘을 고안하였으며, Tarboton(1997)은 선정된 셀들에 대한 다방향 흐름을 부여하기 위해 DEMON 알고리즘에서 이용된 몇 가지 아이디어들을 통합한 D ∞ 알고리즘을 개발하였다. 현재까지 개발된 DEM 기반 흐름추적 알고리즘들은 대상 셀에서 이동 가능한 흐름방향의 수에 따라 일방향 흐름추적 알고리즘과 다방향 흐름추적 알고리즘으로 구분할 수 있으며, 다방향 흐름추적 알고리즘의 경우, 각각의 기법별로 제시된 흐름분배 규칙에 따라 인접 셀들의 흐름양이 결정된다. 이러한 기법들은 일반적으로 유역의 분할과 하도망의 표현이라는 주제에 초점을 두고 있으며 DEM의 해상도에 따라 많은 변동성들을 가지고 있다.

현재까지 개발된 분포형 강우-유출 모형의 흐름전달 과정은 일방향 흐름정보를 이용한 흐름추적(김성준, 1998; Vieux and Vieux, 2002; 신철균 등, 2004; 최윤석 등, 2008)과 2차원 흐름 방정식을 적용하여 4방향 또는 8방향으로의 흐름추적(Julien and Saghafian, 1991; Downer and Ogden, 2002; Rojas, 2002; 최현상과 한건연, 2004)으로 생각할 수 있으며, 인접셀과의 표고차 또는 수위차로부터 흐름을 전달하고 있다. 이러한 모형들을 대규모 유역에 대해 적용할 경우에는 계산소요시간 및 계산기 연산장치의 한계로 인해 지형정보의 평활화가 수반되고 있으며 가용한 상세 지형정보의 고려는 이루어지지 않고 있다. Beven(1989)은 모형 개발자들의 당면 과제가 물리기반 모형화에서 하부 GRID 축척의 과정에서 집중화 이론의 고려, 이론적 과정과 현장에서의 과정 사이에 긴밀한 연계의 필요, 모형 예측에서 불확실도의 엄밀한 산정에 관한 필요성을 강조하였다.

인류에 대해 점점 높아져만 가는 피해와 비용은 위험도 관리에 대한 새롭고 좀 더 효과적인 전략을 요구하고 있다(WMO, 2004). 홍수 예측은 조기 경보를 통한 새로운 접근 방법들로부터 특히 중요한 역할을 담당한다. 이들 새로운 접근방법들은 시민 보호 당국들이 좀

더 효과적인 경감과 안전 계획의 좀 더 효율적인 조직을 가능케 한다. 현재 수문 예측 모형의 불확실도에 대한 연구들이 수행되고 있다. 실시간 기반 정확한 홍수 예측은 오랫동안 많은 수문학자들의 주된 목표였으며, 다수의 강우-유출 모형들이 개발되어 예측의 문제에 적용되어왔다. 운영 수문실무에서 실시간 예측은 강우-유출 모형의 향상을 비롯하여 이전의 예측으로부터, 관측된 오차에 기초한 예측의 연속적인 조정 기법이 요구된다(Nash and Sutcliffe, 1970). 실시간 관측과 갱신을 통한 이러한 연속적인 보정은 강우-유출 모형의 예측 수행성을 향상시키기 위한 가장 가치 있는 기법들 중 하나이다. 지난 수십 년에 걸쳐 많은 연구들에 의해 이러한 연속적인 보정을 적용함에 있어 Filtering 기법들의 유효성이 밝혀져 왔다. Hino(1970)는 처음으로 실시간 하천 유출 예측의 문제에 반복 추정 접근법을 적용하여 수문 시스템에서 이용하기 위해 Filtering 이론을 채택하였다. 그리고 Todini and Wallis(1978)는 년수문모형에 대해 Kalman Filter의 적용을 수행하였다. Wood and Szöllösi-Nagy(1978), Puente and Bras(1987), Rajaram and Geogakakos(1989), Lee and Singh(1999) 등에 의한 다수의 연구들이 개념적 수문 시스템들에 대한 반복 실시간 매개변수 추정을 논의해 왔다. 최근 DEM과 레이더 강우 관측과 같은 자료 이용가능성의 진전과 더불어 컴퓨터 자료 저장과 처리 속도의 기하급수적 발달은 수문학자들로 하여금 매우 작은 규모에서 일어나는 유역 거동에 관한 연구와 물리 기반 과정 방정식의 이용을 가능케 하였다(Smith et al., 2004). 그러나 운영 수문실무에서 이용되고 있는 모형들이 여전히 확정론적 시스템에 기초하고 있기 때문에 수문실무로의 적용에 있어 반복 관측 갱신 기법의 유용성은 낮은 편이다. 반면 최근 홍수 예측은 확정론적 예측에서 확률론적 예측으로 바뀌어가고 있는 추세이다. 확정론적 예측은 하천 수위/유량과 같은 예측 값들의 점 추정량을 제공한다. 그러므로 사용자의 과도한 확신에 의해 유발되는 그릇된 결정으로 막대한 재산과 생명의 손실을 유발할 수도 있다(Krzysztofowicz, 2001). 가장 최근의 분포형 모형을 이용한 실시간 강우-유출 예측은 Rabuffetti(2006)와 Kim et al.(2007)의 연구에서 찾아볼 수 있다. Rabuffetti(2006)는 Kalman Filter를 비선형 시스템으로 확장시킨 자료 동화기법을 SCS-CN 기법에 기초한 분포형 강우-유출 모형에 적용하였다. 이를 실시간 운영을 목적으로 이탈리아 알프스 산악 지역의 Toce 강 유역의 수문시스템에 적용한 바 있다. Kim et al.(2007)은 일본 경도대학 방재연구소의 CDRMV3 (Cell-based Distributed Runoff Model Version 3) 모형

에 Monte Carlo 기법과 몇 가지 다른 기법을 이용한 Kalman Filter를 적용하여 향상된 유출 반응의 결과를 도출한 바 있다.

본 연구의 목적은 유역에서의 홍수량 해석을 위해서 다방향 흐름분배 알고리즘과 실시간 보정 알고리즘을 개발하여 분포형 강우-유출 모형에 적용하여 수문반응 제한의 향상을 도모하는 것이다. 고해상도 지형정보로부터 취득할 수 있는 상세흐름정보를 상대적으로 저해상도 지형에서 발생하는 흐름에 전파시키는 다방향 흐름분배 알고리즘을 개발하여 분포형 모형의 해상도에 관련한 문제와 유출 보정 알고리즘의 개발을 통해 매개변수 보정에 관련한 문제를 개선하고자 한다.

2. 분포형 강우-유출 모형화

본 연구에서 다방향 흐름 분배 알고리즘과 실시간 유출 보정 알고리즘의 적용을 위해 단기 분포형 강우-유출 모형을 작성하였으며 비교적 간단한 이론들을 적용하여 모형화에 적용하였다. 모형화를 위해서 침투, 지표면흐름, 하도흐름, 기저유출의 4가지 수문과정이 고려되었다.

먼저 강우에 의한 지표면으로의 수량 공급 중 지표면 유출에 기여하는 수량의 분리를 위해서 이용된 침투 과정 식은 Green-Ampt(1911) 식이며 지배방정식은 다음과 같다.

$$f = K \left[\frac{\psi \Delta \theta + F}{F} \right] \quad (1)$$

여기서, f 는 침투율(LT^{-1}), K 는 투수계수(LT^{-1}), ψ 는 습윤전선 흡인수두(L), F 는 누가침투량(L)이다.

다음으로 지표면 흐름 추적을 위해서 운동과 추적에 대한 개념을 적용하였다. 운동과는 중력과 마찰력이 중요하고 가속도항의 관성력과 압력은 중요하지 않다고 가정하는 흐름이다. 중력과 마찰력이 서로 평형을 이루어 흐름은 등류 상태가 되며 홍수파에는 운동과와 동역학과가 모두 존재하나 많은 경우 경사가 급할 경우 중력과 마찰력이 지배적이어서 대부분의 홍수파는 운동과로 이동한다. 지표면 흐름추적을 위해 적용한 지배방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = q_R \quad (2)$$

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

$$q = \frac{1}{n} h^{5/3} S_o^{1/2} \quad (4)$$

여기서, q 는 단위폭당 유량($L^2 T^{-1}$), h 는 수심(L), q_R 은 초과강우량($L T^{-1}$), S_o 는 하상경사, S_f 는 마찰경사, n 은 Manning 조도계수이다.

그리고 하도흐름 추적을 위해서는 확산과 흐름의 개념을 적용하였다. 운동과 방법은 지표류나 급경사 흐름에 대한 추적에 적용이 되어 왔다. 그러나 대부분의 자연 하천의 부정류는 확산이 존재하며 운동과 방법의 경우는 수문곡선의 확산에 관한 계산이 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 확산과 개념을 이용하여 이러한 수문곡선의 확산에 관한 계산이 가능하도록 하도흐름 추적에 확산과 모형을 적용하였다. 하도흐름 추적을 위해 적용한 지배방정식은 1차원 확산과에 대해서 질량보존에 관한 연속방정식과 운동과 모형에서와는 달리 국부 가속도항과 이송가속도항만을 무시한 운동량 방정식이 적용되었고 관련된 식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = S_o - S_f \quad (6)$$

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (7)$$

여기서, Q 는 유량($L^3 T^{-1}$), A 는 흐름단면적(L^2), q_L 은 횡유입($L^2 T^{-1}$)을 나타낸다.

지금까지 제시한 지배방정식의 수치해석기법은 유한차분양해법이 사용되었으며 Chow *et al.*(1988)과 Julien and Saghafian(1991)의 연구를 참고하였다.

마지막으로 기저유출의 고려를 위해 수평직선분리법의 개념이 적용되었다. 수평직선분리법은 적용과정이 타기법들(주지하수 감수곡선법, N-day 법, 수정 N-day 법 등)에 비해 매우 간단하며, 홍수시의 유출을 고려함에 있어서 기저유량은 홍수 유출량에 비해 상대적으로 작기 때문에 어떠한 방법을 이용하더라도 홍수유출량 예측에는 큰 영향을 미치지 않기 때문에 본 연구에서는 수평직선 분리법을 선정하여 모형화에 적용하였다.

3. 다방향 흐름 분배 알고리즘

3.1 분포형 강우-유출 모형의 입력자료 구축

수문 모형화에 있어서 지형정보와 강수정보는 중요

한 역할을 수행한다. 국내의 경우 대표적으로 국토해양부, 한강홍수통제소, 국가 수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)을 통해서 수자원 관련 지형 정보들이 제공되고 있으며 래스터 형식의 자료들은 30m로 제공되고 있다. 또한 수치지형도를 이용할 경우 더 높은 해상도의 DEM(Digital Elevation Model, 수치표고모형)의 구축이 가능하다. 반면, 강수정보의 경우는 우량계 또는 레이더 관측에 취득되며 우량계는 $144\text{km}^2/\text{관측소}$ ($99,461\text{km}^2/689\text{개소}$; 건설교통부, 2006)의 관측밀도를 가지고 있으며 레이더 관측에 의한 강우정보는 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 의 해상도(분해능)를 가지고 있다. 이와 같이 지형정보의 공간해상도는 매우 높은 편이며 그에 비해 강우정보의 공간해상도는 매우 낮은 편이다. 그러므로 이러한 가용 지형정보와 강수정보의 해상도 차이로 인해 분포형 강우-유출 모형의 입력자료 구축을 위해서는 대표적으로 다음과 같은 상호 적합과정이 필요하게 된다.

- ① 지형정보의 해상도(예, $30\text{m} \times 30\text{m}$)를 강수정보의 해상도(예, $1\text{km} \times 1\text{km}$)로 적합
- ② 강수정보의 해상도(예, $1\text{km} \times 1\text{km}$)를 지형정보의 해상도(예, $30\text{m} \times 30\text{m}$)로 적합
- ③ 지형정보와 강수정보의 해상도를 특정해상도(예, $500\text{m} \times 500\text{m}$)로 적합

먼저 ①의 과정은 가용 지형정보의 평활화(smoothing)가 유발되어 상세 지형정보로부터 취득될 수 있는 흐름 정보의 손실(계산 정확성의 측면)이 크게 발생하는 반면 계산비용(계산시간, 계산기 연산 처리·저장 장치 등)은 상대적으로 적은 장점을 가진다(계산 효율성의 측면). ②의 경우는 높은 해상도의 지형정보를 직접 이용함으로써 흐름정보의 손실을 최소화할 수 있으나 매우 높은 계산비용이 소요되며 강우정보의 downscaling으로 인한 오차 최소화 기법이 요구된다. ③의 경우는 ①과 ②의 중간으로 생각할 수 있다. 일반적으로 분포형 강우-유출 모형의 입력자료 구축을 위해서는 ③의 과정이 주로 이용되며 계산정확성과 계산효율성의 타협으로 생각할 수 있다. 이러한 분포형 강우-유출 모형화 해상도에 따른 계산 정확성과 계산 효율성의 문제는 서로 반(反)의 관계에 있기 때문에 적정 모형화 해상도의 선정의 문제에 대한 논의가 이루어져 왔다(Gupta *et al.*, 1986; Kalma and Sivapalan, 1995).

본 연구에서는 모형화 해상도를 기상 실무에서 제공하고 있는 분포형 레이더 강우의 해상도에 적합시키고 지형정보의 평활화로 인해 손실될 수 있는 흐름정보를 반영할 수 있는 방법론을 제시하였다.

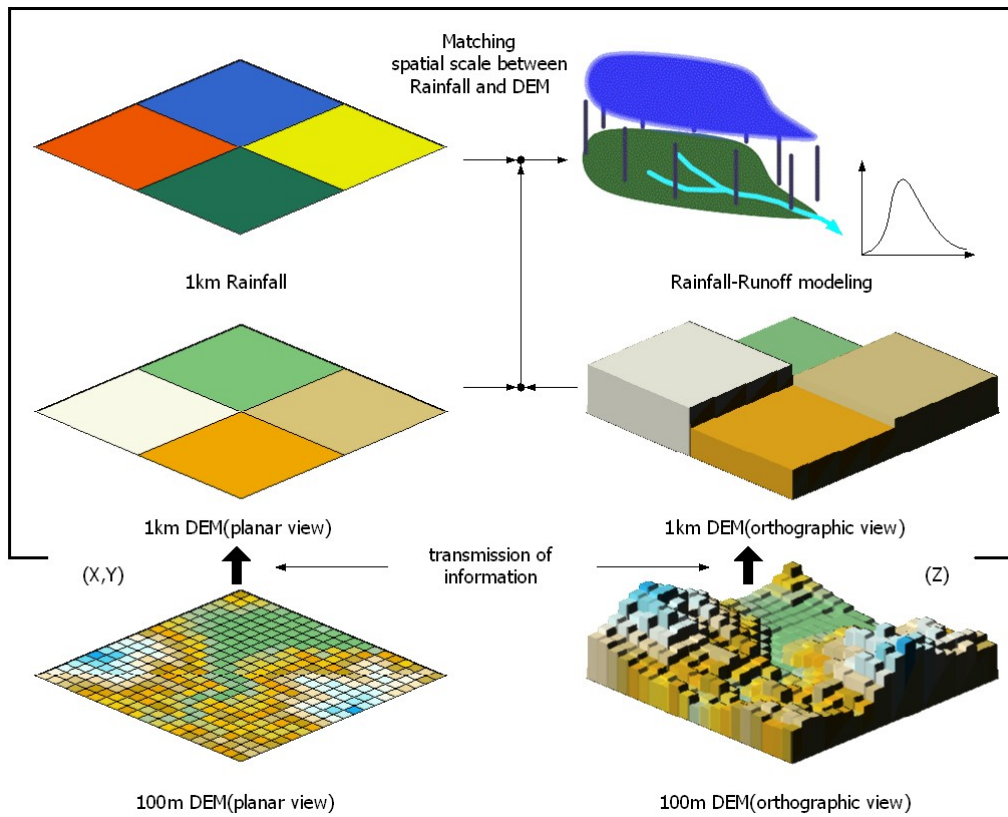


Fig. 1. Propagation of Detailed Topographic Information to Low Resolution Data

3.2 DEM 해상도에 따른 지형정보의 변동양상

본 연구에서 개발하고자 하는 다방향 흐름 분배 알고리즘의 언급에 앞서 DEM 해상도에 따른 지형정보의 변동을 살펴 볼 필요가 있다. Fig. 2와 3은 각각

2km×2km(가로×세로) 표본지역에 대해서 DEM 해상도에 따른 지형의 변동양상을 평면적·입체적으로 표현한 그림이다. Fig. 2에서 표고는 흑색에서 백색에 가까워질 수록 증가함을 나타낸다.

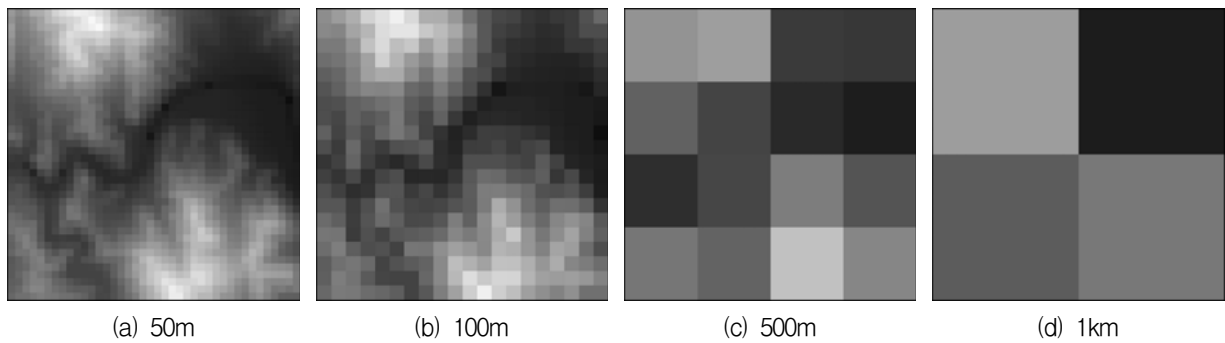


Fig. 2. Variation of DEM(2D)

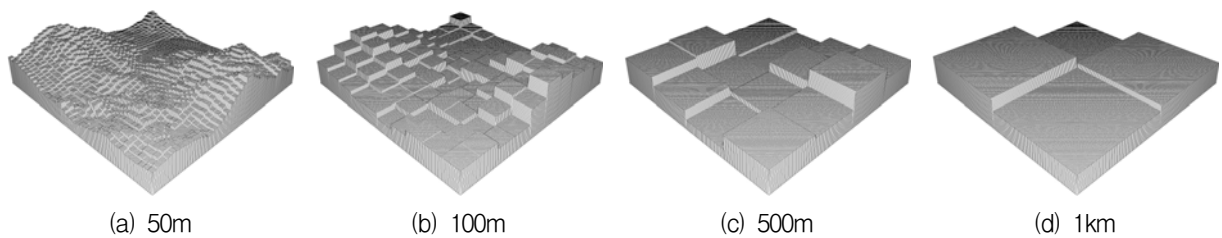


Fig. 3. Variation of DEM(3D)

Table 1. Statistics of DEM

Statistics	50m DEM	100m DEM	500m DEM	1km DEM
Total Number of Cells	40×40	20×20	4×4	2×2
Min.	170.00	170.00	190.00	188.20
Max.	460.00	450.00	387.48	339.27
Mean	281.14	280.87	277.76	282.99
Standard Deviation	66.66	66.70	60.75	62.57

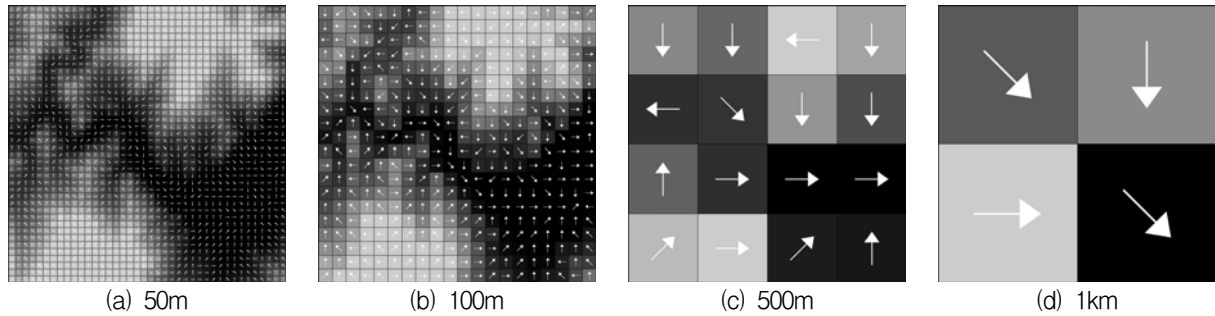


Fig. 4. Variation of Flow Direction

위의 두 그림에서 제시된 바와 같이 고해상도에서 저해상도로 갈수록 DEM은 평활화의 정도가 증가하여 지형의 표현의 간략화가 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 1은 그림에서 제시된 해상도 변화에 따른 표고의 변화를 셀 수, 최소, 최대, 평균, 표준편차로 제시한 것이다. DEM 해상도의 감소에 따라 DEM 구성 셀 수의 감소로 인해 지형정보의 손실이 발생하고 있으며 특히 표고의 극값에 관한 손실이 상대적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 DEM 해상도의 감소로 인한 흐름정보의 손실을 의미하며, DEM 구성 셀 수의 감소로 인해 계산효율성은 구성 셀 수의 비로 증가하게 될 것이다.

해상도 감소로 인한 흐름정보의 손실의 정도를 파악해 보기 위해서 GIS를 이용하여 흐름방향도를 도출하였으며 Fig. 4에 제시하였다. 제시된 바와 같이 DEM 해상도에 따라 도출되는 흐름방향의 수는 Table 1에 제시된 DEM 구성 셀 수와 같으며 고해상도 DEM에서 획득할 수 있는 많은 수의 흐름정보들이 저해상도로 갈수록 크게 손실되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 흐름추적과정에서 손실되는 상세흐름정보의 활용이 필요할 것이다. 그러나 이러한 상세흐름정보를 직접 이용하는 것은 계산 효율성을 저하시키게 될 것이며 특히 대규모 유역에 대한 적용에는 한계가 있을 것이다. 그러므로 상세 지형정보로부터 도출될 수 있는 흐름정보의 간접적인 이용이 효과적일 것으로 판단된다.

3.3 다방향 흐름분배 알고리즘

전 절에서 언급한 바와 같이 공간해상도의 변화에

따라 지형정보의 손실이 크게 발생되기 때문에 이러한 지형정보의 손실을 최소화하면서 효율적인 흐름추적을 실시하기 위하여 다음과 같은 다방향 흐름 분배 알고리즘을 개발하였다.

- ① 저해상도 DEM과 고해상도 DEM으로부터 D8 알고리즘을 활용한 흐름방향 도출
- ② 저해상도 DEM을 기준으로 8개 방향(EE(동), SE(남동), SS(남), SW(남서), WW(서), NW(북서), NN(북), NE(북동))의 인접 셀로 유입되는 고해상도 DEM으로부터 도출된 흐름방향 군집화(Fig. 5)
- ③ 군집화된 상세흐름정보에 대한 저해상도 DEM 기준 흐름방향별 흐름분배율 계산
- ④ 저해상도 흐름정보를 이용하여 실시된 흐름추적에 의한 일방향 전달유량에 ③에서 계산된 흐름분배율을 적용하여 인접 8개 방향으로의 전달유량 계산

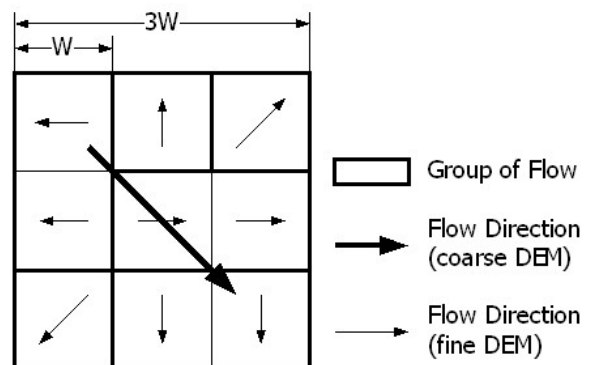


Fig. 5. Concept of Flow Grouping

위에서 제시된 과정을 통해 지표면 흐름추적에 의해 도출된 일방향 흐름전달 정보가 다방향으로의 흐름정보로 전환되며 상세 흐름정보의 반영으로 좀 더 물리적인 흐름양상의 구현이 가능해질 것으로 판단된다. Fig. 6은 1km 해상도 DEM으로부터 추출된 흐름정보에 대한 500m, 100m, 50m 해상도의 상세흐름 정보를 고려한 군집화 수행의 결과를 나타내고 있다.

상세흐름정보의 군집화후 저해상도 DEM 흐름정보 기준, 다음의 식을 이용한 방향별 흐름분배율들의 계산이 수행된다.

$$f_i = \frac{n_i}{N} \quad (8)$$

여기서, i :는 EE(동), SE(남동), SS(남), SW(남서), WW(서), NW(북서), NN(북), NE(북동) 방향을 나타내

는 첨자, f_i :는 i 방향으로의 흐름 분배율, n_i :는 i 방향 흐름에 관여하는 흐름군을 구성하는 고해상도 DEM 셀 수, N :은 저해상도 DEM 셀을 구성하는 고해상도 DEM 셀의 총 수를 나타낸다.

Table 2는 Fig. 6에서 제시된 DEM 해상도별 흐름 군집화의 결과로부터 도출된 각각의 흐름분배율들을 나타내고 있다. 표에서 제시된 좌표쌍은 1km 해상도 DEM을 2×2 행렬로 고려한 것이다. 좌표쌍은 (행번호, 열번호)로 생각할 수 있다. 그리고 음영으로 표현된 칸들은 기준 DEM(1km)으로부터 도출된 흐름방향을 나타낸다. DEM 해상도의 증가에 따라 여러 방향으로의 흐름 전달이 이루어짐을 알 수 있고, 특히 기준 DEM(1km)으로부터 도출된 흐름방향으로의 흐름 전달이 일어나지 않는 경우가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이는 지형정보의 평활화가 흐름방향에 크게 영향을 미치고 있다는 사실을 보여주는 단적인 예이다.

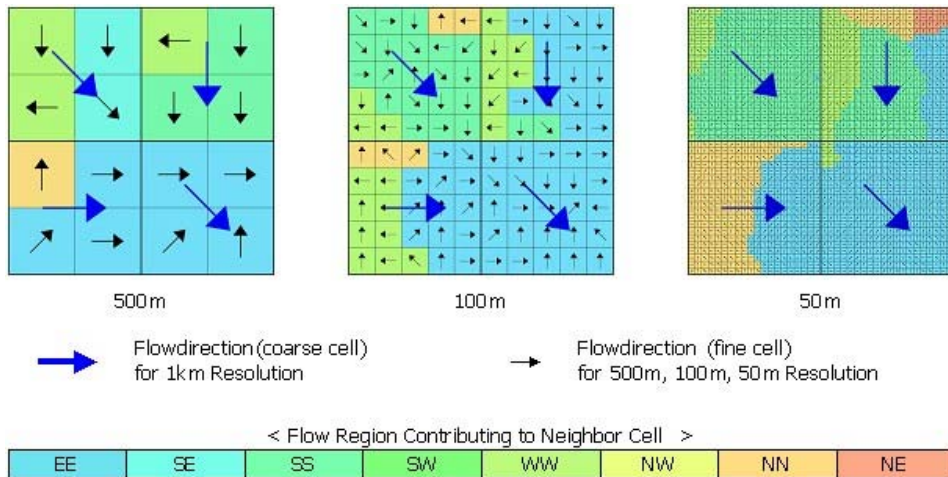


Fig. 6. Result of Flow Grouping

Table 2. Calculated Ratio of Flow Allocation in Sample Area

DEM Resol'n	1km (row,col)	Ratio of Flow Allocation								Sum
		EE	SE	SS	SW	WW	NW	NN	NE	
500m	(1,1)	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.0000	0.0000	1.0
	(1,2)	0.0000	0.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.0000	0.0000	1.0
	(2,1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.0000	1.0
	(2,2)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0
100m	(1,1)	0.0000	0.0000	0.8900	0.0000	0.0000	0.0700	0.0400	0.0000	1.0
	(1,2)	0.2400	0.0000	0.3800	0.0000	0.0000	0.2400	0.0900	0.0500	1.0
	(2,1)	0.4700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5300	0.0000	1.0
	(2,2)	0.9900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0100	0.0000	0.0000	1.0
50m	(1,1)	0.0025	0.0000	0.9000	0.0000	0.0000	0.0975	0.0000	0.0000	1.0
	(1,2)	0.2050	0.0000	0.4200	0.0000	0.0000	0.2325	0.0875	0.0550	1.0
	(2,1)	0.4550	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5450	0.0000	1.0
	(2,2)	0.9775	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0225	0.0000	0.0000	1.0

다음은 위에서 계산된 흐름 분배율들을 이용하여, 지표면 흐름추적에서 계산된 일방향 전달유량을 다방향으로 전파시키는 과정으로 다음의 식이 이용된다.

$$q_i = q_{CC} \times f_i \quad (9)$$

여기서, q_i 는 방향으로의 단위 폭 당 유량, q_{CC} 는 저해상도 DEM 기준으로 계산된, 중심 셀에서 1개의 인접 셀로 전달되는 단위 폭 당 유량을 의미한다.

기존 흐름 전달 알고리즘은 대규모 유역에 대한 분포형 강우-유출 모형화 과정에서 계산소요시간과 계산기의 연산처리/기억장치 용량 문제로 인해 가용 지형정보의 평활화 과정의 수행이 필수적이며, 이를 통해 상세 지형정보 및 흐름정보의 손실을 발생시킴으로써 지표면 흐름과정의 간략화를 유발하게 되며 가용한 상세한 지형정보의 보유에도 불구하고 이러한 정보를 이용하지 못하는 한계가 있다. 반면 본 연구에서 개발한 흐름분배 알고리즘은 가용한 상세 지형정보로부터 도출된 흐름정보를 유출과정에 전달함으로써 가용 흐름정보의 손실을 최소화하여 물리적으로 향상된 지표면 흐름과정의 재현이 가능할 것으로 판단된다.

4. 실시간 보정 알고리즘

유역에서 강우-유출 반응에 대한 평가의 수행에 있어 강우, 하천유량, 침투 등에 대한 관측량들은 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 수문과정에 있어 이러한 관측의 중요성이 인식되기 시작하면서 관측밀도와 관측 정확도는 현재까지 지속적으로 향상되어 오고 있으며 앞으로도 이러한 노력들은 지속될 것이다. 실시간 분포형 강우-유출 모의를 위한 가장 이상적인 관측은 유역을 구성하는 개개의 분포 셀마다 강우, 침투, 수위 등의 상태들이 실시간으로 관측되는 것이다. 이러한 측면에서 현재의 수문학 분야는 관측의 질적·양적 엄청난 진보에도 불구하고 유역내 모든 지점에서의 수위와 토양 수분과 같은 유역의 분포 특성의 관측에 관한 문제를 안고 있다. 그러나 높은 해상도의 분포형 강우-유출 모의에 있어서 각 셀별 관측의 실시는 경제적 비용뿐만 아니라 시간적 비용의 측면에서 현실적으로 불가능하다. 현재까지는 특정 시험유역을 제외하면 실시간적으로 유역 상태를 추정하는데 이용될 수 있는 관측자료들은 우량자료와 유역 출구부 수위자료이다. 분포형 강우-유출모형의 적용에 있어 유역 상태의 갱신을 위해 이용할 수 있는 자료가 유출구 지점의 수위-유량 관계곡선을 적용한 수위자료로부터 변환된 유량자료라는 사실

은 대상 유역의 분포형 매개변수 추정에 있어 너무 큰 불확실성을 내포하게 되는 원인이 된다. 이러한 유출구 수위자료로부터 변환된 유량자료를 이용하여 유역내 분포형 상태량들을 갱신하기 위해서는 유역의 상태와 유출구 관측 사이에 관계식이 필요하다.

분포형 강우-유출 모형화에 실시간 갱신 기법을 적용한 연구들은 Rabuffetti(2006)는 침투에 의한 손실을 SCS-CN 방법을 통해 처리하고 있으며, SCS-CN 방법의 저류상수, S 를 상태변수로 고려하고 유출계수(누가홍수체적과 총강수량의 비)와 연계함으로써 Kalman Filter를 적용하고 있다. 상태변수를 S 로 처리함으로써 SCS-CN 방법에서 모든 시간 단계에서 일정하게 유지되는 S 가 갱신 시간 단계별로 변화하도록 하였다. 그러나 유출율의 계산에서 소개된 전체 강수가 유출이 되기까지 걸리는 지체시간을 고려해야 하는 점과 SCS-CN 방법의 기본 개념인 저류상수가 전체 강수기간동안 일정한 값을 가진다는 가정이 위배되는 문제점을 안고 있다. Kim *et al.*(2007)의 연구에서는 관측자료를 유출구 유량으로 상태변수를 유역 내 총 저류량으로 고려하였으며 관측유량과 유역의 상태량인 총 저류량을 연관시키기 위해서 모형으로부터 계산된 유량-저류량 관계곡선을 이용하였다. 또한 계산된 저류량과 관측된 저류량의 비를 곱하여 유역 셀들의 공간적으로 분포된 수심을 갱신하였다. 이 연구에서는 Tachikawa *et al.*(2004)이 개발한 지표면 흐름과 지표하 흐름을 통합한 유역내 셀에서의 수위-유량 관계식을 이용하는 CDRMV3 모형이 실시간 강우-유출 모의에 적용되었다. 그러나 이 기법을 적용하기 위해서는 유역의 유출량과 저류량의 관계를 나타내는 곡선이 추가적으로 필요하며 유역 유출량과 저류량은 거의 선형관계를 나타내어야 한다. 그러나 강우-유출 반응은 비선형 관계이며, 특히 유역 면적이 넓고 강우의 강도와 공간적 변동성이 커지게 되면 유역의 수문반응의 비선형성은 더욱 커지게 되어 유출량과 저류량의 관계는 고리형을 띠게 되어 유출량과 저류량 사이에 상관관계가 파괴되는 문제점을 안고 있다. 또한 오차 공분산의 전파를 위해 Monte Carlo 모의기법을 채택함으로써 확률량의 포착을 위해 수행되는 모의의 반복회수에 따라 장기간의 계산시간이 소요되는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 유출량의 실시간 보정 기법의 개발을 위해 Kim *et al.*(2007)의 연구에서 제안한 유출구에서의 유량비를 이용하는 유역 상태량 갱신 방법을 채택하였으며 반복법에 의해 최적 유역 상태량을 추정하는 방법을 제안하였다. Fig. 7은 본 연구에서 개발한 실시간 보정 알고리즘의 절차를 나타내는 모식도이다. 관측

량이 참 값이라는 가정의 보완을 위해서, 허용 유량비와 허용 유량차를 적용하여 신뢰구간을 설정하였다. 신뢰구간의 폭이 커질수록 관측의 신뢰도가 낮고 역의 경우는 관측의 신뢰도가 높은 의미를 갖는다. 본 연구에서 개발된 실시간 보정 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 모형을 통한 예측(사전 상태량 추정)
- ② 관측량의 획득을 통해 사전 추정 유량과 관측된 유량 사이의 비를 계산한다. 허용기준을 만족하면 다음 시간 단계로 진행하여 단계 ①의 과정을 수행하고 아닐 경우 단계 ③으로 진행한다.
- ③ 계산된 유량비를 전체 유역의 수심에 곱하여 유역의 수심 분포를 갱신한다.
- ④ 갱신된 수심을 이용하여 관측이 획득되기 이전의 시간 단계로 회귀하여 모의를 수행하여 유출 유량을 계산한다.
- ⑤ 계산유량과 이미 획득된 관측유량의 비를 재계산하여 허용오차 내에 들거나 허용 유량 차 이내일 경우 보정과정을 종료하고 예측 단계로 진행하고, 만족되지 않을 경우는 단계 ③으로 진행하여 최적 수심 분포를 얻을 때까지 과정을 반복한다.

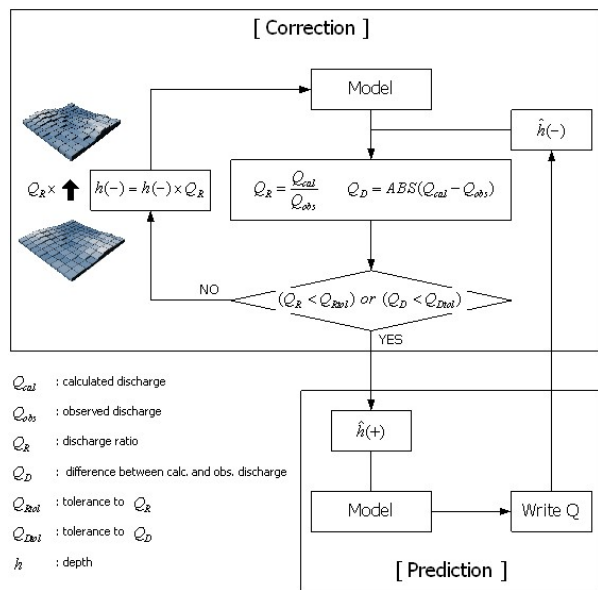


Fig. 7. Procedure of Developed Real-Time Updating Algorithm

분포형 강우-유출 모형에서 유역 전체의 상태를 갱신하기 위해서는 앞서 언급한 바 있듯이 유역을 구성하고 있는 개개의 셀에 대한 관측 정보가 필요하다. 그러나 이러한 관측정보를 얻는 것은 불가능하며 향후에도 이러한 측정이 가능해질 수 있을지는 미지수이다. 유역

출구부에 위치한 1개소의 관측소에서 관측된 수위자료를 이용하여 분포된 유역 셀들의 상태들을 갱신하고자 하는 것은 유역을 구성하고 있는 모든 셀들에 대한 수문반응을 묘사할 수 있는 거대한 시스템 방정식을 구성하여 유출구 유량이라는 답이 도출되도록 분포형 매개변수들을 찾아가는 과정으로 생각할 수 있다. 그러나 이러한 방정식은 많은 수의 해를 갖는 방정식이 될 것이며, 매우 잘 정의된 방정식이라 할지라도 엄청난 계산 비용과 시간 비용이 소요될 것이다. 그러므로 현재 상태에서 분포형 강우-유출 과정의 보정을 위해서는 집중화된 관계의 적용이 필수적이다. 그러므로 본 연구에서는 유출구에서 계산된 유량비를 이용하여 적정 수심 분포를 반복법에 의해 도출함으로써 좀 더 향상된 강우-유출 반응을 묘사할 수 있도록 하는 실시간 유출 보정 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘을 매개변수 보정이 실시된 유역에 대해 적용함으로써 좀 더 향상된 유출 반응의 표현이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 향상된 강우-유출 반응의 재현을 위해 다방향 흐름 분배 알고리즘과 실시간 보정 알고리즘을 개발하여 모형화에 적용할 수 있도록 분포형 강우-유출 모형을 구성하였다. 본 연구의 주요 내용을 요약해 보면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 개발한 알고리즘들을 적용하기 위해서 단기 유출을 모의할 수 있도록 분포형 강우-유출 모형을 작성하였다. 모형화에 고려한 수문과정들은 침투, 지표면흐름, 하도흐름, 기저유량을 고려하였으며, 각각 Green-Ampt 방법, 운동과 기법, 확산과 기법, 수평직선분리법을 적용하였다.
- 2) 공간 해상도 변화에 따른 지형정보의 변동양상과 흐름정보의 변동양상을 제시함으로써 지형정보의 해상도가 낮아질수록 다량의 흐름정보 손실을 확인하였으며, 지표면 흐름추적에서 상세흐름정보의 반영의 필요성을 제시하였다.
- 3) 본 연구에서는 일방향 방향성을 갖는 저해상도 흐름정보에 상세 흐름정보를 반영하여 다방향 흐름으로 유도하는 다방향 흐름 분배 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘을 분포형 강우-유출 모형화에 적용함으로써 저해상도 지형정보를 이용하여 취득할 수 있는 계산 효율성의 향상과 상세 흐름정보의 반영을 통해 좀 더 물리적인 흐름양상의 표출이 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 유출구 유량비를 이용하여 반복법에 의해 최적

유량비를 찾아내는 실시간 보정 알고리즘을 개발함으로써 분포형 강우-유출 모형의 예측의 정확성 향상이 기대되며, 강우 예측 기술과의 결합을 통해 진보된 유역홍수관리가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명:내배수 침수재해 저감기술개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 건설교통부 (2006). **한국수문조사연보**.
- 김성준 (1998). “격자기반의 운동과 강우유출모형 개발 (I) - 이론 및 모형 -.” **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제3호, pp. 303-308.
- 신철균, 조효섭, 정관수, 김재한 (2004). “저류함수기법을 이용한 격자기반의 강우-유출 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제11호, pp. 969-978.
- 최윤석, 김경탁, 이진희 (2008). “유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 제41권, 제9호, pp. 895-905.
- 최현상, 한건연 (2004). “GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (I) - 이론 및 모형의 개발 -.” **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제4호, pp. 329-339.
- Beven, K. (1989). “Changing ideas in hydrology - the case of physically based models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 105, pp. 157-172.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Costa-Cabral, M.C. and Burges, S.J. (1994). “Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas.” *Water Resources Research*, Vol. 30, pp. 1681-1692.
- Desmet, P. and Govers, G. (1996). “Comparison of routing algorithms for Digital Elevation Models and their implications for predicting ephemeral gullies.” *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 51, pp. 427-433.
- Downer, C.W. and Ogden, F.L. (2002). *GSSHA ser'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.
- Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991). “Drainage networks from grid Digital Elevation Models.” *Water Resources Research*, Vol. 27, pp. 709-717.
- Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911). “Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils.” *J. Agric. Sci.*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-24.
- Gupta, V.K., Rodriguez-Iturbe, I., and Wood, E.F. (1986). *Scale problems in hydrology*, Springer.
- Hino, M. (1970). “Runoff forecast by linear predictive filter.” *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 96, pp. 618-707.
- Holmgren, P. (1994). “Multiple flow direction algorithms for runoff modeling in grid based elevation models: An empirical evaluation.” *Hydrological Processes*, Vol. 8, pp. 327-334.
- Jenson, S.K. and Domingue, J.O. (1988). “Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis.” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 11, pp. 1593-1600.
- 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).
- Kalma, J.D. and Sivapalan, M. (1995). *Scale issues in hydrological modelling*, Wiley, New York, NY.
- Kim, S.M., Tachikawa, Y., and Takara, K. (2007). “Applying a recursive update algorithm to a distributed hydrologic model.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 12, pp. 336-344.
- Krzysztofowicz, R. (2001). “The case of probabilistic forecasting in hydrology.” *Journal of Hydrology*, Vol. 249, pp. 2-9.
- Lee, Y.H. and Singh, V.P. (1999). “Tank model using Kalman filter.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, pp. 344-349.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models. Part 1 - A discussion of principles.” *Journal of Hydrology*,

- Vol. 10, pp. 282-290.
- O'Callaghan, J.F. and Mark D.M. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 28, pp. 328-344.
- Puente, C.E. and Bras, R.L. (1987). "Application of nonlinear filtering in the real time forecasting of river flows." *Water Resources Research*, Vol. 23, pp. 675-682.
- Quinn, P.F., Beven, K.J., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991). "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models." *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 59-79.
- Rabuffetti, D. (2006). "Discharge assimilation in a distributed flood forecasting model." *Advances in Geosciences*, Vol. 7, pp. 355-360.
- Rajaram, H. and Georgakakos, K.P. (1989). "Recursive parameter estimation of hydrologic models." *Water Resources Research*, Vol. 25, pp. 281-294.
- 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.
- Smith, M.B., Georgakakos, K.P., and Liang, X. (2004). "Preface, The distributed model intercomparison project (DMIP)." *Journal of Hydrology*. Vol. 298, pp. 1-3.
- Tachikawa, Y., Nagatani, G., and Takara, K. (2004). "Development of stage-discharge relationship equation incorporating saturated-unsaturated flow mechanism." *Annual J. Hydraulic Engineering*, JSCE, 48, pp. 4-12(in Japanese with English abstract).
- Tarboton, D.G. (1997). "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid Digital Elevation Models." *Water Resources Research*, Vol. 33, pp. 309-319.
- Todini, E. and Wallis, J.R. (1978). "A real time rainfall run-off model for an on-line flood warning system." in *Application of Kalman filter to hydrology, hydraulics and water resources*, edited by Chaolin, C., pp. 355-368.
- Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2002). "VfloTM: a real-time distributed hydrologic model." *Proceedings of 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*(Paper on CD-ROM).
- WMO (2004). *Associated Program on Flood Management*.
- Wood, E.F. and Szöllösi-Nagy, A. (1978). "An adaptive algorithm for analyzing short-term structural and parameter changes in hydrologic prediction models." *Water Resources Research*, Vol. 14, pp. 577-581.

(논문번호:08-91/접수:2008.08.22/심사완료:2009.03.02)