

GIS기반 다방향 흐름 분배 모형의 적용성 검토*

최승용¹ · 이원하² · 한건연¹ · 김극수^{3*}

Evaluation for Applicability of GIS Based Multi-Directional Flow Allocation Model*

Seung-Yong CHOI¹ · Won-Ha LEE² · Kun-Yeun HAN¹ · Keuk-Soo KIM^{3*}

요 약

본 연구의 목적은 GIS 기반 다방향 흐름 분배 모형의 적용성을 평가하는데 있다. 개발된 모형의 적용성을 평가하기 위해서 평창강, 소양강 유역을 포함한 실제 유역에 대해 적용하고 모의 결과를 실측치와 비교하였다. 모의 결과를 실측치와 비교한 결과 실측치와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 또한 다방향 흐름분배의 적용을 통해 정확도의 향상과 계산 소요시간의 단축을 확인할 수 있었다. 향후 유역 유출 산정에 있어 본 연구에서 개발된 다방향 흐름 분배 알고리즘을 적용하면 조금 더 정확한 유출량을 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : GIS, 다방향 흐름분배 모형, 계산소요시간

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the applicability of GIS based multi-directional flow allocation model. In order to evaluate the suggested model in this study, it was applied to real watersheds, Pyeongchang and Soyang river basin. The simulation results were compared with observed values, and showed good agreements. The improvement of accuracy and reduction of simulation time were carried out by applying multi-directional flow allocation. Accordingly, the applied methodologies presented in this study will be used to predict accurate runoff, which plays a major role in integrated flood management. If this model is combined with the techniques of

2010년 7월 22일 접수 Received on July 22, 2010 / 2010년 10월 19일 수정 Revised on October 19, 2010 / 2010년 11월 9일 심사완료 Accepted on November 9, 2010

* 본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

1 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ.

2 롯데건설 Lotte Engineering & Construction

3 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 River, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Construction Technology

※ 연락처 E-mail : keuksookim@gmail.com

rainfall forecasting, it will contribute to the real-time flood forecasting and warning in the future.

KEYWORDS : GIS, Multi-Directional Flow Allocation Model, Simulation Time

서 론

최근 지구 온난화와 이상기후 등의 전 지구적인 기후변화의 영향으로 인해서 세계 각지에서 피해가 나타나고 있다. 이러한 가운데 홍수에 대한 피해 규모는 커지고 피해발생빈도도 증가하고 있다. 우리나라도 예외는 아니어서 강우량의 계절적인 집중현상으로 인해서 상습적인 홍수피해가 발생하고 있고 피해규모 또한 과거와 비교할 수 없을 만큼 커지고 있다. 홍수에 대한 피해를 줄이기 위해서는 그에 상응하는 홍수 방어 대책들이 수립되어야 할 것이고 하천정비와 댐 축조 같은 구조적 대책뿐만 아니라 치수 대책 수립의 기본인 정확한 수문량의 예측과 같은 비구조적 대책이 함께 논의되어야 할 것이다. 이에 정확한 수문량 예측을 위해서 발전된 수문 모형의 개발이 수반되어야 함은 의심할 여지가 없는 사실이다.

수문모형에는 유역의 유출현상을 단순히 유역전체의 공간적 특성을 일정한 것으로 가정하여 단순한 거동으로 해석하는 집중형(lumped)모형과 이와 달리 유역 내에서 수문현상이 유사하다고 판단되는 소유역들로 구분해서 각 유역의 특성을 반영하는 분포형(distributed)모형으로 구분할 수 있다. 과거에는 가용자료의 제한성과 이론의 부족으로 인하여 집중형 모형에 관한 연구가 비교적 많이 이루어졌지만 최근에는 GIS 기술의 발전, 레이더 강우자료의 증대, 컴퓨터 계산 용량 및 속도의 급속한 발전으로 분포형 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

분포형 수문 모형은 유역 시스템의 시간적 변동성과 공간적 변동성을 동시에 고려하여 물리적으로 유역 상태를 표현할 수 있다는 점

에서 물리적 수문 모형화에 관한 요구를 어느 정도 충족시킬 수 있다. 또한 수자원 분야에서 GIS(Geographic Information System, 지리정보시스템) 도구의 활용도 증가, 분포형 레이더 강우 정보의 활용, 상세한 지형 및 지리 정보 데이터베이스 구축 및 혁명적인 컴퓨터 기술의 발전으로 과거에는 처리할 수 없었던 많은 양의 정보들을 일시에 처리할 수 있게 되었다. 그 결과 분포형 모형의 활용도는 지속적으로 증가되고 있다. 그러나 분포형 모형의 활용도 증가에 반해, 실제 적용에 있어서는 많은 문제점들이 존재하고 있다. 특히, 모형화를 위한 적정 해상도의 선정, 적정 분포형 매개변수의 적용, 계산 소요 시간, 강우 입력자료와 지형 입력자료 간 공간해상도의 불일치, 강우의 공간적 분포 형태에 따른 매개변수 보정 등이 분포형 수문 모형의 적용에 대한 과제로 남아 있다. 이러한 난제들에 대한 연구들은 현재까지 지속적으로 수행되어 오고 있으며 앞으로도 계속될 것이다.

분포형 모형에 관한 연구로는 Abbott *et al.*(1986)은 2차원 지표류 흐름추적, 지하수 유출을 포함하는 강우-유출 전 과정을 포함하는 물리기반 분포형 매개변수를 이용하는 연속 모형인 MIKE-SHE 모형을 개발하였다. Julien and Saghafian(1991)은 2차원 유역 강우-유출 모형인 CASC2D 모형을 개발하였고 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 Rajas(2002)에 의해 유사(sediment) 부분이 추가되어 CASC2D-SED

모형으로 수정되었다. Vieux and Vieux(2002)에 의해 개발된 Vflo™ 모형은 분포형 매개변수를 이용하는 단기 유출 모형으로 공간적으로는 유한요소법, 시간적으로는 유한차분법을 이용하고 있다.

다방향 흐름분배 알고리즘에 관한 연구로는 Fairfield and Leymarie(1991)는 D8 알고리즘의 확률 버전인 Rho8 알고리즘을 개발하였으며 무작위수를 추출하여 흐름 방향을 결정하고 있다. Quinn *et al.*(1991)은 흐름 방향을 결정하고자 하는 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 고안하였다. 이 알고리즘은 Onstad and Brakensiek(1968), O'Loughlin(1986), Moore and Grayson(1991), Lea(1992)의 연구에서 논의된 바 있는 흐름관 개념을 일부 이용하고 있다.

국내의 경우 분포형 강우-유출 모형의 개발에 관한 몇몇 연구들이 1990년대부터 본격적으로 수행되어 왔으며 개발 및 적용을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 국내 분포형 강우-유출 모형에 관한 연구들은 고덕구(1989), 김대식 등(1995), 김성준(1998), 김성준 등(1998), 신철균 등(2004), 최현상과 한건연(2004a; 2004b), 홍준범 등(2006), 박진혁 등(2006), 박진혁 등(2007), 김문모 등(2007), 정인균 등(2008a; 2008b)에 의해 수행된 바 있다.

고덕구는(1989)는 산지 소유역에서 장기 유출 예측을 위해 확정론적 분포형 유역수문 모형인 SNUA2 모형을 개발하여 실제유역에 대한 적용성을 입증한 바 있다. 김대식 등(1995)은 격자 물수지를 이용한 강우유출모

형을 개발하여 반월유역에 적용하였다. 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)을 이용하여 흐름방향도를 추출하여 흐름추적에 활용하였다. 또한 김성준 등(1998)은 개발된 모형을 연천댐 유역에 대해 적용하여 그 적용성을 평가한 바 있다. 최현상과 한건연(2004a; 2004b)은 불확실도 해석기법인 Monte Carlo 기법과 연계한 분포형 강우-유출 해석모형을 개발하여 설마천 유역과 동곡 유역에 관해 적용성을 평가한 바 있다. 신철균 등(2004)은 저류함수를 이용한 격자기반 분포형 강우-유출 모형을 개발하여 횡성 다목적댐 유역과 합천댐 유역에 대해 적용성을 검토한 바 있다. 홍준범 등(2006)은 Vflo를 이용하여 중랑천 유역의 유출모의에 적용하여 적용성을 평가하였고, 박진혁 등(2006)은 용담댐 유역의 유출해석에 집중형모형인 KOWACO와 분포형모형 Vflo™를 적용하여 비교 평가하였고 박진혁 등(2007)은 레이더강우와 Vflo모형을 이용한 남강댐 홍수 유출해석을 실시하였다. 김문모 등(2007)은 도시유역의 지표면 유출 모의를 위해서 격자기반 지표면 유출모형을 개발하여 가상유역과 군자 배수구역에 대해 모형을 적용한 바 있다. 정인균 등(2008a; 2008b)은 격자기반 운동과 강우유출모형인 KIMSTORM의 개선에 대한 연구를 수행하고 그 적용성을 검토하였다.

본 연구에서는 앞서 언급한 분포형 강우-유출 모형의 실제 적용에서 안고 있는 몇 가지 문제점들을 개선하기 위해 개발된 GIS기반 다방향 흐름분배 모형을 실제 유역에 대해 적용하여 관측된 유출 자료와의 비교를 통해 모형의 적용성을 검토함으로써 유출 예측 정확도에 대한 검토를 수행하였다.

GIS 기반 다방향 흐름 모형의 구축

1. 다방향 흐름분배 알고리즘

현재 지형정보들은 국가나 기관에 의해 운영되는 지형정보 데이터베이스를 통해 서비스되고 있으며, 통상 30m 해상도를 갖는 지형정보들이 제공되고 있다. 우량계 점 관측망을 통한 강우량의 관측은 대규모 자본의 투입과 관측의 중요성에 대한 인식을 통해 과거에 비해 매우 높은 해상도로 강우 관측이 실시되고 있다. 그러나 분포형 모형의 입력 자료로 되기 위한 점 관측 강우량 자료는 가용한 지형 자료의 해상도에 비해 상대적으로 매우 낮은 해상도를 가지고 있다. 현재 가용한 가장 높은 해상도의 강우량 자료는 레이더 관측 장비를 통해 얻어진 강수관측 자료이다. 분포형 모형의 여러 장점 중의 하나가 바로 이러한 레이더 분포형 강우자료를 바로 받아서 강우-유출 모의가 가능하다는 점이다. 그러나 이러한 강우정보와 지형정보 간에 해상도의 불일치로 인해 강우-유출 수문현상의 물리과정을 표현이 가능한 분포형 모형이 또 다른 추가적인 불확실성을 가지게 된다.

현재 기상실무에서 운영되고 있는 레이더 강수관측은 일반적으로 1km 해상도에서 수행되고 있다. 그 외에 일부 연구목적으로 실시되는 강수관측은 그보다 더 높은 해상도에서 운영이 이루어진다. 그러나 연구를 목적으로 하던 실무운영을 목적으로 하던지 간에 레이더 강수 관측 자료 역시 우량계 자료와 마찬가지로 가용한 지형 자료에 비해 상대적으로 낮은 해상도를 가지고 있다. 이러한 경우, 강우 자료를 분포형 모형의 지형 입력자료의 해상도에 적합시키거나 역으로 모형의 지형 입력 자료들을 강우 입력 자료에 적합시킬 필요가 있다. 이런 적합과정에는 오차들이 내포되어 있으며 이러한 오차들을 최소화시키기 위한 노력이 수반되어야 한다.

현재까지 개발된 흐름분배 알고리즘들은 모두 고정된 DEM 해상도에서 얼마나 정확하게

수체의 흐름을 파악할 수 있는가에 주안점이 있다. 그러나 DEM 해상도가 낮아질수록 이러한 흐름분배 알고리즘의 적용은 무의미해질 수 있으며, 심지어 지면으로 유입된 수체의 흐름 경로의 물리성의 붕괴될 수도 있다. 반면 수체의 흐름 경로를 잘 반영해 주기위해서 매우 높은 해상도의 DEM을 이용할 경우에는 엄청난 계산량과 계산시간을 필요로 한다. 그러므로 Beven(1989)이 강조한 바 있듯이 물리기반 모형화에서 상세한 축적을 갖는 정보의 반영이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 이용한 다방향 흐름분배 알고리즘은 고해상도 지형정보로부터 도출된 흐름정보를 상대적으로 저해상도 지형정보에 전달하여, 저해상도 지형정보의 이용을 통해 발생할 수 있는 흐름정보의 평활화(smoothing)로 인한 흐름정보의 손실을 최소화하는 것이다. 이는 저해상도 DEM의 이용에서 얻을 수 있는 계산 효율성의 증가, 그리고 상세한 지형정보를 이용하여 획득될 수 있는 흐름 양상표출의 정확도 향상이라는 2가지 강점을 모두 취하여 좀 더 물리적인 분포형 강우-유출 모형화를 가능하게 할 것이다.

1) 수치 표고 자료

지형학적 속성은 위성영상, 지형도의 등고선의 디지털라이징 또는 지표조사를 수행을 통해 얻어질 수 있는 수치표고자료에 관계된다. 수치표고자료는 일반적으로 그림 1과 같은 3개의 자료 구조 중 하나로 저장, 컴파일 되어 있다: (1) 수치화된 등고선 자료, (2) 규칙적 GRID에서의 표고점 자료, (3) 불규칙 삼각망에서의 표고점 자료.

첫 번째 수치표고자료 형태는 인접한 등고선과 등고선에 직교하는 유선들로 경계되어진 작고 불규칙한 형태의 다각형들로 구성된 등고선 기반의 망이다. 이러한 구조 형태는 실행되기는 어려우나 그림에도 불구하고 복잡한 지형을 가진 지역에서 3차원흐름 방정식을 연립 1차 방정식으로 감소시킬 수 있으므로 수문학적으로 널리 적용되고 있다(Moore and

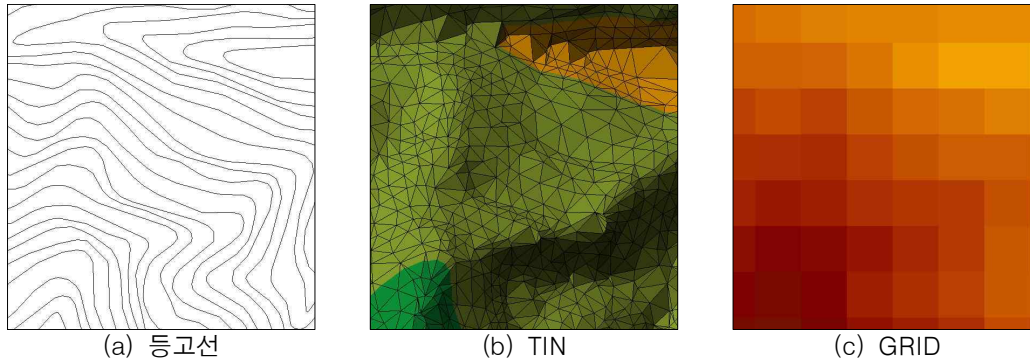


FIGURE 1. 수치표고자료 구조

Foster, 1990).

수치화된 표고 자료의 저장에 사용되는 두 번째 구조는 불규칙 삼각망이다(TIN). 이러한 망은 삼각요소 또는 표본 지점에서의 꼭짓점을 가지는 면을 기반으로 한다(Moore *et al.*, 1991). 평면에서 인접한 3개의 점은 삼각형 요소를 형성하기 위해 연결되어 있다. TIN은 산등성이, 산봉우리와 같은 뾰족한 특징을 쉽게 모형화하고 불연속성을 통합할 수 있다. 표본점과 삼각형의 수는 표면 조도를 표현하기 위해 변화될 수 있다는 점에서 TIN은 더욱 효율적이다. 규칙적인 GRID에 비해 TIN의 이용은 컴퓨터 저장 공간을 절약할 수 있다. 지형적 속성을 계산하는 것은 TIN 구조의 불규칙성으로 인해 사각 GRID를 갖는 것보다 때때로 더 어렵다. 예를 들면 면의 연결된 상류부 사면을 추적하는데 난점이 있으며 경관에서 다른 점들에서 상류 유출 기여 면적을 추정하는 것에도 무리가 따른다(Moore and Grayson, 1991).

DEM 정사각형 GRID는 시각적 단순성과 컴퓨터 실행의 용이성으로 인해 가장 널리 이용되고 있는 표고 자료 형태이다(Moore *et al.*, 1991; Wise, 1998). 이러한 정사각형 GRID는 행과 열로 배열되어 있고 각각의 GRID의 중심점은 그 지점의 표고를 나타낸다. 정사각형 GRID는 그 평면상에 불필요한 데이터를 포함하고 그것들은 표고에서의 급격

한 변화를 처리할 수 없기 때문에 비판을 받고 있다. 그러나 대축척 GRID의 이용은 시각적 단순성을 감소시키며 컴퓨터 수행 용이성을 감소시키는 문제를 가지고 있다. 또한 적절치 않은 정사각형 GRID 사용의 결과는 계산된 상류 사면의 흐름경로에서 실제적인 경로가 아닌 지그재그 형태의 흐름 경로를 나타내게 될 것이다. 그러나 정사각형 GRID의 규칙적인 자료 배열은 자료 취급의 용이성으로 인해 대부분의 지형자료 데이터베이스에서 제공되고 있는 자료형식이며, 또한 대부분의 분포형 강우-유출 모형들이 채택하고 있는 자료형식이다. 본 연구에서도 기존의 분포형 강우-유출 모형들이 채택하고 있는 자료형식인 GRID 자료에 기반하여 자료 처리 및 방법론의 전개가 이루어진다.

2) GIS 기반 다방향 흐름분배

본 연구에서는 저해상도 흐름정보에 고해상도 흐름정보를 전달하기 위해 개발된 다방향 흐름분배 알고리즘을 이용하였다. 흐름분배 알고리즘의 개발을 위해 ESRI사의 ArcGIS 소프트웨어에서 채택하고 있는 D8 알고리즘을 통한 흐름정보 추출과정을 이용하였으며, 관심 셀에서 상세 흐름 정보를 추출하여 인접 셀들로 흐름을 분배시키는 개념을 적용하였다.

그림 2에서 나타난 바와 같이 D8 흐름추적 알고리즘은 최급구배 인접 셀 방향으로 현재

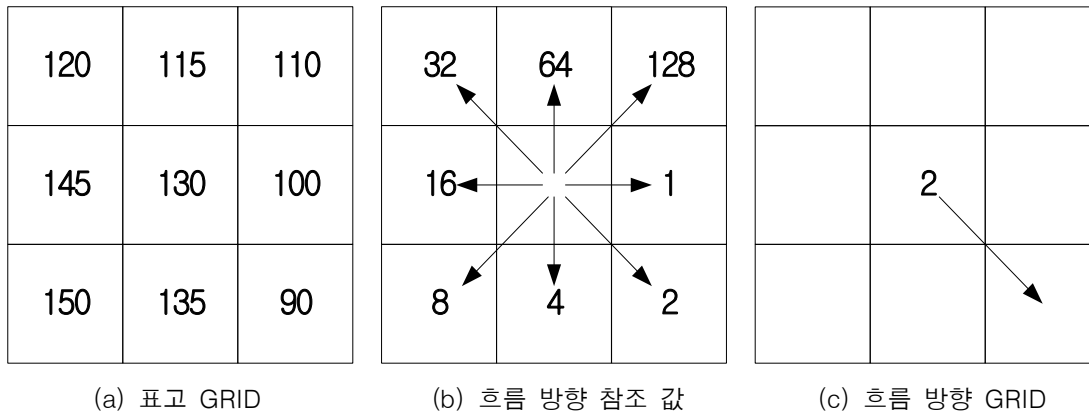


FIGURE 2. D8 알고리즘

셀의 흐름 방향이 결정된다. D8 알고리즘은 중심 셀에서 흐름 정보가 하나의 인접 셀로 전달된다. DEM 해상도가 적절하게 선정된다면 이 알고리즘을 통한 흐름추적은 물리적으로 의미 있는 예측을 할 수 있게 된다. 그러나 DEM 해상도의 선정에 따라 흐름양상은 분명히 다른 양상을 보이게 될 것이며 실제의 흐름과의 물리적 합치가 이루어지지 않을 수도 있다. 이는 Grayson *et al.*(1992a)이 경고한 바 있는 물리적이 아닌 수문 모형을 통한 수문 과정 적합도 도출이라는 문제를 유발할 수 있다. 그 결과 자칫 오류가 포함된 수문 모형 예측 결과의 신뢰라는 매우 위험한 결과가 도출될 수도 있다. 그러므로 이러한 상황을 보완하기 위해서는 가용한 지형정보를 활용하여 흐름의 물리성을 확보해 주는 것이 필요하며, 이에 따라 본 연구에서는 낮은 해상도의 지형 정보로 높은 해상도의 지형 정보를 반영해 주는 형식으로 수문과정의 모형화에 좀 더 물리적인 흐름양상을 반영하도록 모형을 개발하였다. 본 연구에서 이용한 다방향 흐름분배 알고리즘의 방법론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 저해상도 DEM과 고해상도 DEM으로부터 D8 알고리즘을 활용한 흐름방향 도출
- (2) 저해상도 DEM을 기준으로 8개 방향

(EE, SE, SS, SW, WW, NW, NN, NE)의 인접 셀으로 유입되는 고해상도 DEM으로부터 도출된 흐름방향의 근집화

- (3) 근집화된 상세 흐름정보에 대한 저해상도 DEM 기준 흐름방향별 흐름 분배율 계산
- (4) 저해상도 흐름정보를 이용하여 실시된 흐름추적에 의한 일방향 전달유량에 (3)에서 계산된 흐름 분배율을 적용하여 상세 근집화 흐름방향으로의 전달 유량 계산

위의 과정을 통해 지표면 흐름추적에 의해 도출된 일방향 흐름전달 정보가 다방향의 흐름정보로 전환되며 상세 흐름정보의 반영으로 좀 더 물리적인 흐름양상의 구현이 가능해질 것으로 판단된다.

3) 모형의 구성

본 연구에서 이용한 모형은 크게 2개의 과정으로 나누어 질 수 있다. 첫 번째 과정은 수문과정의 모형화이고 두 번째 과정은 다방향 흐름분배 알고리즘의 개발이다. 우선 본 연구에서 이용한 수문모형의 모형화 과정을 개략적으로 나타내면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

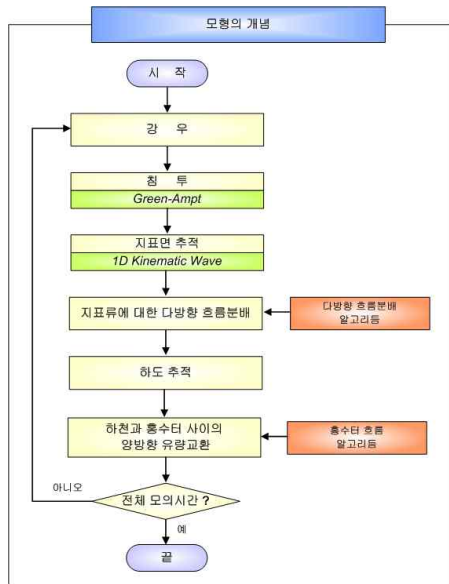


FIGURE 3. 다방향 흐름분배 알고리즘을 이용한 모형화

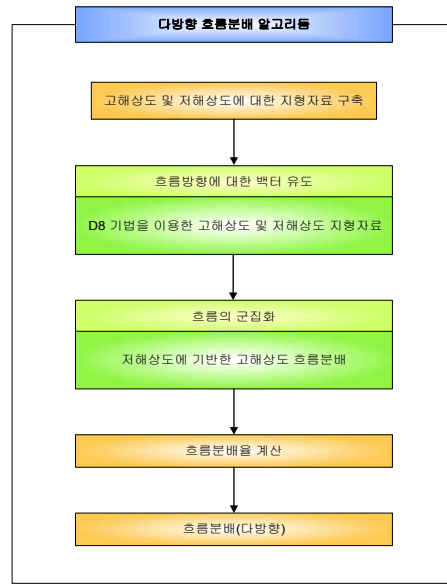


FIGURE 4. 다방향 흐름분배 알고리즘 모식도

그림 4는 전술한 모형 흐름도에서 다방향 흐름 분배 알고리즘의 과정을 간략하게 나타낸 모식도이다. 그림에 제시된 흐름방향, 흐름 균집화, 흐름분배율을 이용하여 흐름도에 제시되고 있는 계산된 지표면 일방향 흐름이 다방향 흐름으로 전이된다.

대부분의 분포형 강우-유출 모형화에 관한 연구들은 적절한 수문 과정의 물리적 표현을 위해 적정 모형화 해상도의 선정에 초점이 맞추어 지고 있으며 적정해상도의 선정에 있어 상세한 지형정보의 반영이라는 측면은 배제되어 있다. 반면 지형정보학적 측면에서는 매우 고해상도의 지형 자료의 구축을 위한 기법 (LiDAR 측량, 항공사진측량, 위성사진측량 등)에 대한 연구가 수행되고 있다. 컴퓨터 기술의 혁명적인 발전이라는 측면은 이러한 상세 지형정보를 이용한 수문 모형화의 연구를 촉진하고 있지만 현재까지도 데스크탑 컴퓨터에서 가용한 연산처리장치와 연산기억장치에는 한계가 있으며 그 결과 가용한 상세 지형정보의 직접적인 이용을 통한 분포형 강우-

유출 모형화는 많은 계산비용의 문제를 안고 있다.

따라서, 본 연구에서는 분포형 강우-유출 모형화에서 저해상도 흐름정보에 상세 세부흐름정보를 반영하는 집중화 과정을 고려하여 개발된 다방향 흐름분배 알고리즘을 이용한 분포형 강우-유출 모형을 이용하였다. 본 연구에 사용된 모형은 저해상도 지형을 이용하여 계산 효율성이 증가되고 상세한 흐름정보의 반영을 통해 계산 정확도의 향상이 이루어 질 것으로 판단된다.

실제 유역에 대한 적용

GIS 기반 다방향 흐름분배 모형의 적용성을 검토하기 위해서 실제 유역에 대해 적용해 보았다. 대상유역은 평창강 유역과 소양강 유역이며, 기왕의 강우 사상에 대하여 모형을 적용하였다. 평창강 유역과 소양강 유역 모두 지점 강우량 자료를 활용하여 모의를 수행하였다.

1. 평창강 유역에 대한 적용

평창강 유역은 최고봉인 계방산(EL. 1577.4m)에서 발원하여 남한강으로 유입되는 남한강 상류에 위치한 한강의 제 1지류이며 북으로는 홍천강, 동으로는 오대천, 서로는 남한강 수계의 섬강과 인접한 산지성 고지대의 유역을 형성하고 있다. 영월1관측소에서 유역분할을 실시할 경우 유역면적은 1,774km²의 유역면적을 가지고 유역의 평균표고는 EL. 591.53m, 유역평균 경사는 39.91%를 갖는다.

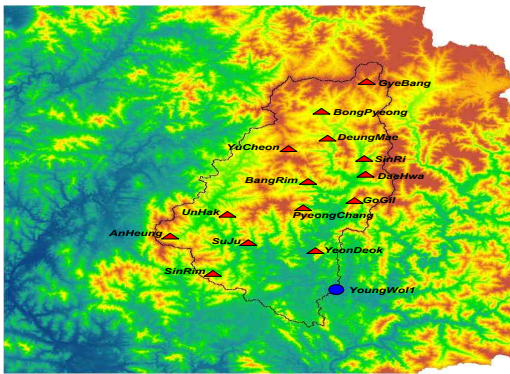


FIGURE 5. 평창강 유역 지형, 관측소 및 유역 경계

1) 모형 입력자료 구축

모형의 입력자료 구성에 있어 대상유역 DEM을 도출하기 위해서 1:25,000 수치지형도가 이용되었으며 이 수치지형도를 GIS 도구를 이용하여 등고선을 추출한 후 TIN으로의 변환과정을 거치고 나서, 얻어진 TIN 자료로부터 10m 해상도의 DEM을 도출하였다.

대상유역의 하천, 흐름방향 자료들을 그림 6(a)와 그림 6(b)에 제시하였다. 또한 국가수자원관리 종합정보시스템으로부터 취득할 수 있는 연구지역에 대한 토지피복도와 토양도를 그림 6(c)와 그림 6(d)에 제시하였다. 토양과 토지피복 정보를 이용하여 침투매개변수와 조도계수들을 산정하였으며 산정된 값들을 표 1과 표 2에 제시하였다. 침투매개변수들의 경우는 Rawls *et al.*(1983)의 연구에서 제시된 결과의 매개변수들을 직접 이용하거나 평균하여 침투매개변수들을 추출하였고, 지표면 조도계수는 Vieux(2004)의 문헌에서 제시된 조도계수 분류를 이용하였다.

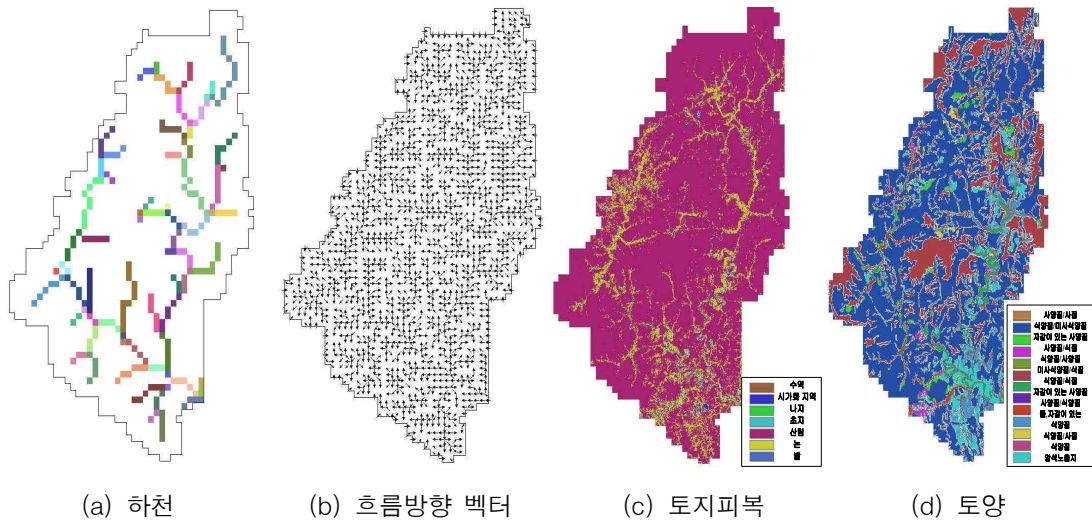


FIGURE 6. 입력자료

TABLE 1. Green-Ampt 침투매개변수

Value	토양형태	투수계수 (mm/hr)	토양흡인수두 (mm)	유효공극률
1	사양질/사질	64.350	79.800	0.415
2	식양질/미사식양질	1.000	240.900	0.371
3	자갈이 있는 사양질	10.900	110.100	0.412
4	사양질/식질	5.600	213.200	0.399
5	식양질/사양질	5.950	159.450	0.361
6	미사식양질/식질	0.650	294.650	0.409
7	식양질/식질	0.650	262.550	0.347
8	자갈이 있는 사양질	10.900	110.100	0.412
9	미사식양질/식질	0.650	294.650	0.409
10	사질	117.800	49.500	0.417
11	사양질/미사사양질	8.700	138.450	0.449
12	미사사양질/식질	3.400	241.550	0.436
13	미사사양질/미사식양질	3.500	229.500	0.455
14	사양질/식양질	5.950	159.450	0.361
15	돌, 자갈이 있는 식양질	1.000	208.800	0.309
16	식양질/사질	3.750	187.800	0.393
17	식양질	1.000	208.800	0.309
49	암석노출지	0.000	0.000	0.000

TABLE 2. Manning 조도계수(Vieux, 2004)

Value	피복 분류	조도계수	Value	피복 분류	조도계수
1	수역	0.030	5	초지	0.013
2	시가화지역	0.015	6	산림	0.100
3	나지	0.035	7	논	0.050
4	습지	0.050	8	밭	0.035

그림 7은 각각 평창강 유역에 관해 구축된 투수계수, 습윤전선 흡인수두, 유효공극률, 지표면 조도계수를 나타내는 그림이다.

2) 2007년 7월 호우사상에 대한 적용

구축된 모형 입력 자료들을 기반으로 2007년 7월 17일 01시에서 2007년 7월 20일 23시 사이에 발생한 강우사상에 대하여 강우-유출 모의를 수행하였다.

모의 결과의 보정을 위해 영월1 수위관측소에서의 호우사상동안 수위 자료를 2007년도

한국수문조사연보에 제시되어 있는 영월1관측소 수위-유량관계곡선식을 적용하여 유량으로 환산하였다.

그림 8에 영월1관측소의 수위-유량관계곡선과 관측된 수위자료와 환산된 유량 자료를 각각 제시하였다. 그림 9는 2007년 7월 강우사상을 이용하여 모의된 평창강 유역 유출수문곡선과 관측 수문곡선을 비교한 것이다.

그림 9에서 제시된 바와 같이 본 연구에서 개발된 모형에서 도출된 결과가 전체적인 관측수문곡선의 양상을 잘 표현하고 있음을 알

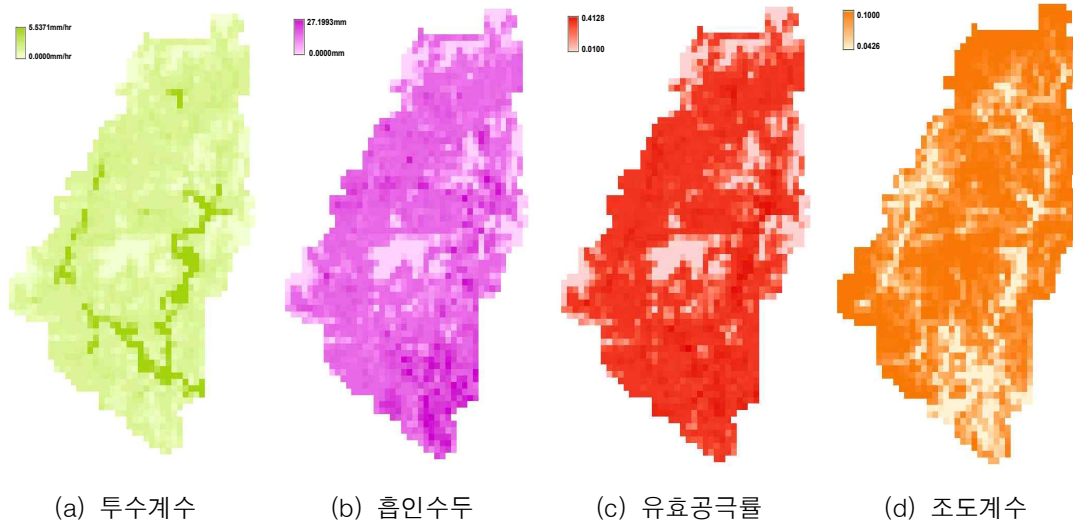


FIGURE 7. 매개변수

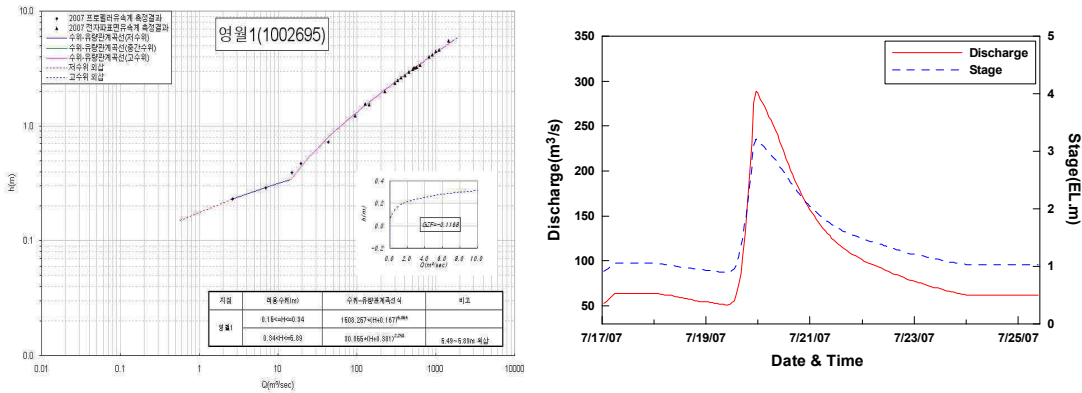


FIGURE 8. 영월1수위관측소 수위-유량관계곡선과 관측 수위 및 환산 유량(2007년 7월 호우)

수 있었다. 계산 침투유출량은 $291\text{m}^3/\text{s}$ 로 관측 침투유출량은 $289\text{m}^3/\text{s}$ 에 비해 $2\text{m}^3/\text{s}$ 정도 높게 나타났으며 침투 발생시각은 관측과 계산의 경우 모두 70hr(2007년 7월 19일 23시)으로 동일하였다.

수문곡선 상승부의 경우, 모의 시작 후 0hr에서 60hr사이에서 다소 차이를 보이고 그 후에는 관측과 비슷한 양상을 보이고 있다. 수문곡선의 하강부의 경우는 관측과 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 관측

된 지점 우량자료를 분포 우량자료로 변환 시 발생할 수 있는 불확실성을 원인으로 생각할 수 있으며 우량계 자료의 밀도가 좀 더 향상되거나 잘 정의된 레이더 분포형 강우 자료를 활용할 경우 좀 더 향상된 예측이 가능할 것으로 판단된다.

3) 2005년 6월 호우사상에 대한 적용

보정된 매개변수들을 이용하여 동일한 유역에 대해 새로운 강우 사상을 선정하여 모형을

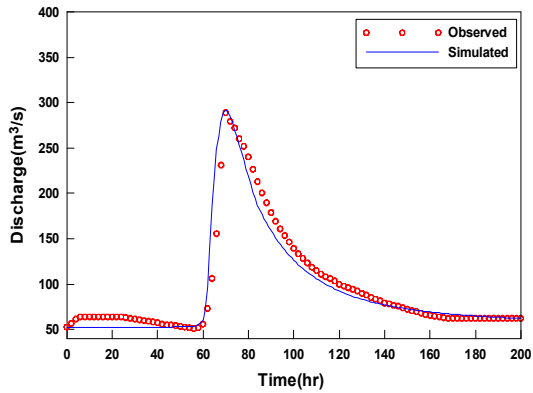


FIGURE 9. 평창강 유역 유출수문곡선 (2007년 7월 호우)

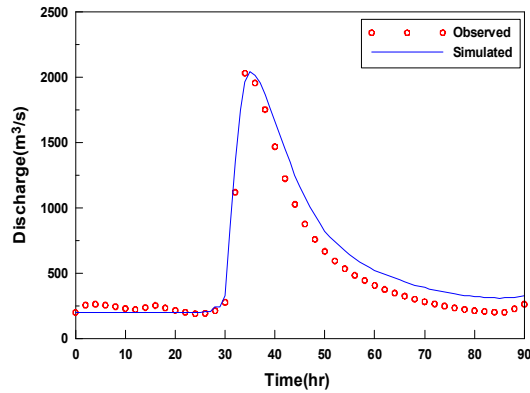


FIGURE 11. 평창강 유역 유출수문곡선 (2005년 6월 호우)

적용해 보았다. 적용에 이용된 강우사상은 2005년 6월 30일에서 2005년 7월 30일 사이에 발생한 호우 사상이다. 유출구에서 실측 수문곡선과 모의 수문곡선의 비교를 위해서 영월1관측소에서의 수위-유량 관계곡선이 이용되었다. 영월1 수위관측소에서의 호우 사상 동안 관측 수위 자료를 2005년도 한국수문조사연보에 제시되어 있는 영월1관측소 수위-유량관계곡선식을 적용하여 유량으로 환산하였다. 그림 10에 영월1관측소의 수위-유량관계곡선과 관측된 수위자료와 환산된 유량 자료를 각각 제시하였다.

수행된 결과의 검증을 위해 영월1관측소에서 관측된 유량 수문곡선을 계산된 유량 수문곡선과 비교하였으며 그림 11에 제시하였다.

그림 11에서 제시된 바와 같이 2005년 6월 30일에서 2005년 7월 3일 사이의 호우 사상에 대해서 적용한 결과, 전체적인 관측수문곡선의 양상과 침두가 매우 정확하게 모의되었음을 알 수 있다. 계산 침두유출량은 $2,042\text{m}^3/\text{s}$ 로 관측 침두유출량 $2,031\text{m}^3/\text{s}$ 에 비해 $11\text{m}^3/\text{s}$ 높게 나타났으며, 침두 발생시각은 관측과 계산의 경우 모두 35hr(2005년 7월 1일 13시)으로 동일하게 나타났다. 계산된 유량수문곡선의 상승이 시작되는 시간은 30hr이후부터였고 관측된 결과에 비해 약 1hr 정도 빠르게 상승이 시작되었다. 유역 반응 초기부분과 후기의 수문곡선 하강부에서 육안으로 확인되는 유량 차이를 보이고 있으나 전체적인 수문곡선의 양상은 관측과 유사한 것으로 나타났다.

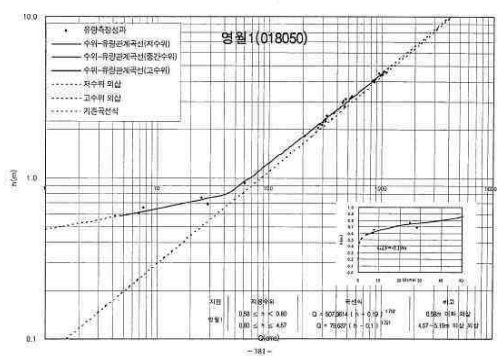
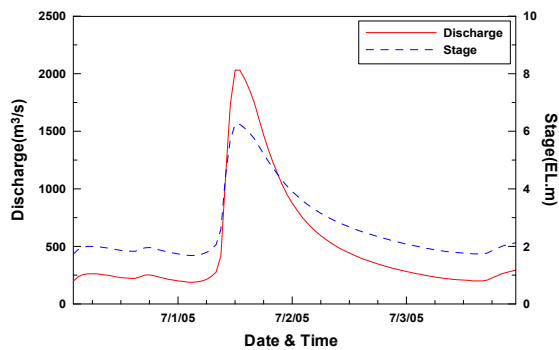


FIGURE 10. 영월1관측소 수위-유량 관계곡선과 관측 수위 및 환산 유량(2005년 6월 호우)



2. 소양강 유역에 대한 적용

소양강 유역은 2,703km²의 유역면적을 갖고 있으며 소양강은 총 유로연장 156.46km이고 하천 총 길이는 2,843km로써 한강수계를 형성하는 북한강의 최대지류이며 강원도 인제군의 서화면 무산에서 발원하여 중부지역을 남서류하여 춘천 북쪽에서 북한강에 합류한다. 소양강 댐 상류에 위치한 양구관측소에서 유역분할을 실시할 경우 유역면적은 1,891km²의 유역면적을 가지고 유역의 표고는 EL. 608.46m이고 유역평균경사는 45.66%를 가진다. 모형의 지형 입력자료는 평창강의 경우와 같은 방법으로 구축하였다.

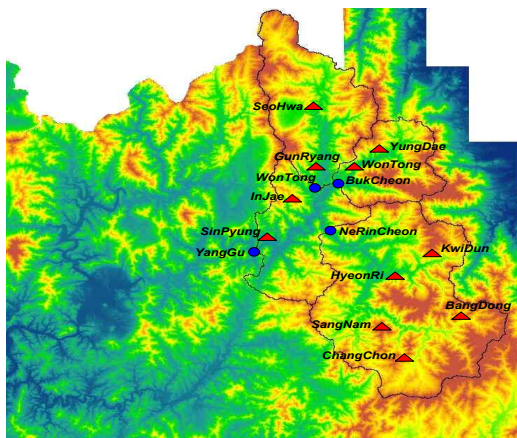


FIGURE 12. 소양강 유역 지형, 관측소 및 유역 경계

1) 2007년 8월 호우사상에 대한 적용

소양강 유역에 대해 모형을 적용해 보았다. 강우자료는 지점 강우 자료들을 이용하였으며, 선정 호우 사상은 2007년 8월 8일 01:00시에서 2007년 8월 11일 07:00사이에 발생한 호우 사상이다. 한국수자원공사에서 관리하는 서화, 용대, 원통, 인제, 군량, 귀둔, 현리, 신평, 상남, 방동, 창촌의 총 11개소의 우량관측소 자료들이 이용 되었다.

모의 결과의 보정을 위해 내린천, 북천, 원통 수위관측소의 호우 사상동안 수위 자료를

2007년도 한국수문조사연보 제시되어 있는 수위-유량 관계곡선식을 적용하여 유량으로 환산하였다. 그림 13~그림 15는 내린천, 북천, 원통 수위관측소의 수위자료와 환산된 유량자료들을 나타내고 있다.

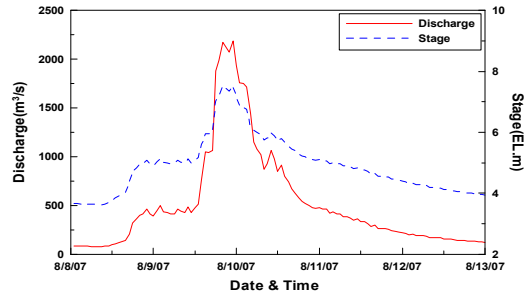


FIGURE 13. 관측수위 및 환산 유량 (내린천 관측소, 2007년 8월 호우)

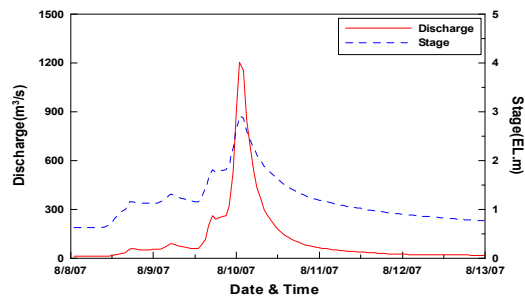


FIGURE 14. 관측수위 및 환산 유량 (북천 관측소, 2007년 8월 호우)

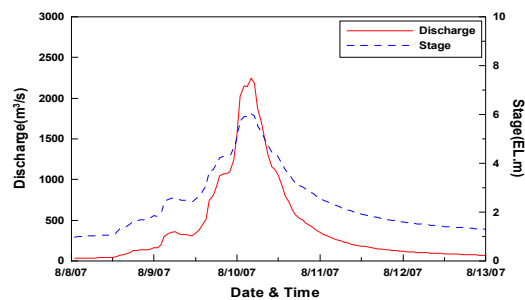


FIGURE 15. 관측수위 및 환산 유량 (원통 관측소, 2007년 8월 호우)

그림 16~그림 18은 2007년 8월 8일에서 2007년 8월 13일 사이의 호우 사상에 대하여 내린천유역, 북천유역, 원통유역에 대해서 모형의 적용성 검토를 위해서 모의한 결과와 관측 수문곡선을 비교한 것이다.

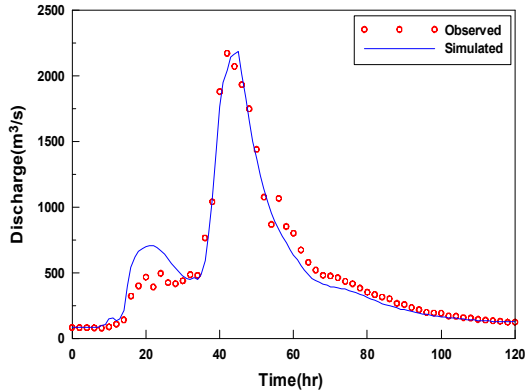


FIGURE 16. 내린천유역 유출수문곡선(2007년 8월 호우)

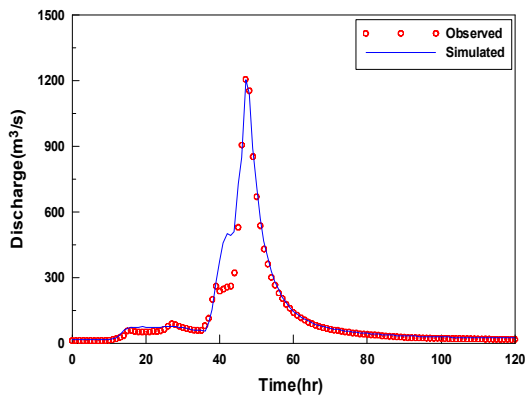


FIGURE 17. 북천유역 유출수문곡선(2007년 8월 호우)

그림 16에서 보는바와 같이 내린천유역에서 관측된 결과, 계산 침투유출량은 2,189m³/s로 관측 침투유량 2,172m³/s에 비해 17m³/s정도 높게 나타났으며 침투 발생시각은 1hr정도 차이가 나는 것으로 나타났다. 계산된 유량수문곡선의 모의 초기 20hr에서 40hr 사이에는

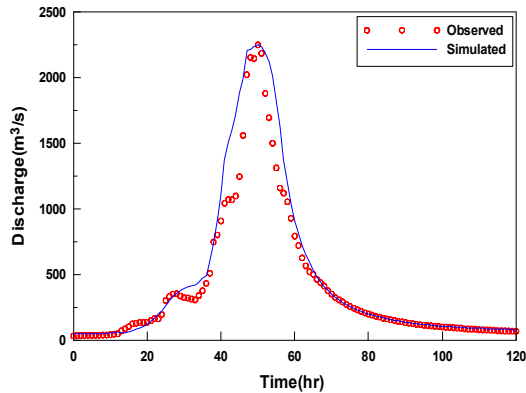


FIGURE 18. 원통유역 유출수문곡선(2007년 8월 호우)

관측과의 유량에서 다소 차이를 보이고 침투 부분에서 관측값과 상이한 결과를 보이나 하강부의 경우에는 관측 자료와 일치하는 것으로 보이며 전체적인 양상은 거의 일치하는 것으로 판단된다. 북천 유역의 경우, 계산 침투 유출량은 1,206m³/s로 관측 침투유출량은 1,205m³/s에 비해 1m³/s높게 나타났으며 침투 발생시각은 관측과 계산의 경우 모두 47hr(2007년 8월 10일 1시)으로 동일하였다. 계산된 유량수문곡선의 상승이 시작되는 시간은 38hr이후이고 침투부분과 후기의 수문곡선 하강부는 관측과 일치하는 것으로 나타났다.그리고 전체적인 수문곡선의 양상은 관측과 유사한 것으로 나타났다. 원통 유역의 경우, 계산 침투유출량은 2,253m³/s, 관측 침투유출량은 2,249m³/s로 4m³/s의 유량 차를 보였다. 침투 발생시각은 계산과 관측 모두 50hr(2007년 8월 10일 3시)으로 동일하였다. 원통 유역에 대한 관측 유량수문곡선의 경우 수문곡선의 초기 상승부와 후기 하강부는 관측과 거의 일치하는 것으로 나타났으나 40hr에서 60hr사이에서 다소 상이한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

2) 2003년 7월 호우사상에 대한 적용

적용에 이용된 강우자료는 지점 강우 자료

들로서 2003년 7월 21일 18:00시에서 2003년 7월 23일 10:00사이에 발생한 호우 사상이다. 결과의 보정을 위해 내린천, 원통 수위 관측소의 호우 사상동안 수위 자료를 2003년도 한국수문조사연보 제시되어 있는 수위-유량 관계곡선식을 적용하여 유량으로 환산하였고 북한 수위관측소는 한국수문조사연보에서 2003년도 자료를 제공하지 않아 2004년도 수위-유량 관계곡선식을 적용하였다.

그림 19~그림 21은 2003년 7월 호우사상을 이용하여 내린천유역, 북한유역, 원통유역에 대해 모형의 적용성을 검토하기 수행한 모의결과와 관측 수문곡선을 비교한 것이다.

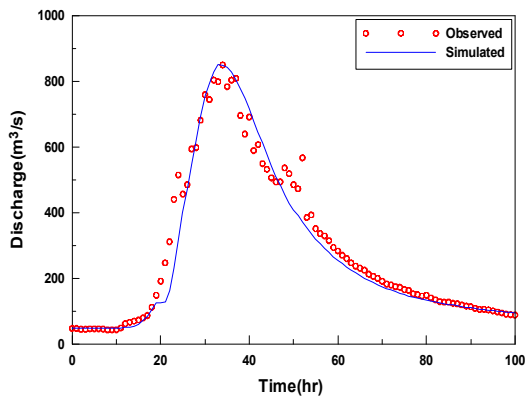


FIGURE 19. 내린천유역
유출수문곡선(2003년 7월 호우)

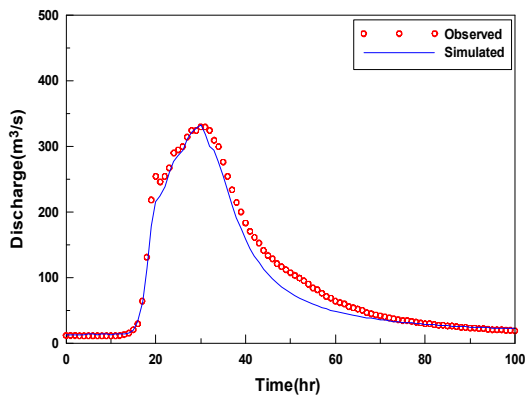


FIGURE 20. 북한유역
유출수문곡선(2003년 7월 호우)

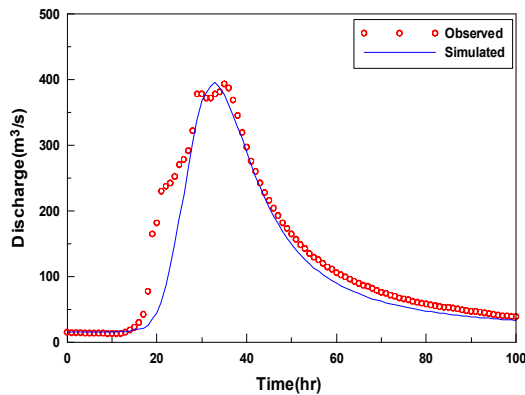


FIGURE 21. 원통유역
유출수문곡선(2003년 7월 호우)

그림 19에 제시된 바와 같이 내린천 유역의 경우, 계산 첨두유출량은 $850\text{m}^3/\text{s}$ 로 관측 첨두유출량 $850\text{m}^3/\text{s}$ 와 동일하게 나타났으며 첨두 발생시각은 1hr 정도의 차이를 보인다. 계산된 유량수문곡선의 초기 상승부와 후기의 하강부는 관측과 유사한 것으로 나타났으나 20hr에서 60hr 사이는 관측과 다소 상이한 결과를 나타내었다. 북한 유역의 경우, 계산 첨두유출량은 $333\text{m}^3/\text{s}$ 로 관측 첨두유출량 $329\text{m}^3/\text{s}$ 와 $4\text{m}^3/\text{s}$ 의 유량 차를 보였다. 첨두 발생시각은 계산과 관측 모두 30hr(2003년 7월 24일 00시)으로 동일하였다. 계산된 유량수문곡선의 초기 상승부와 후기의 하강부는 관측과 유사한 것으로 나타났으나 20hr에서 70hr 사이는 관측과 다소 상이한 결과를 나타내었고 첨두는 관측과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 원통 유역의 경우, 계산 첨두유출량은 $395\text{m}^3/\text{s}$ 로 관측 첨두유출량 $393\text{m}^3/\text{s}$ 과 $2\text{m}^3/\text{s}$ 의 유량 차를 보였다. 첨두 발생시각은 계산과 관측 모두 2hr 정도의 차이를 보였다. 계산된 유량수문곡선의 초기 상승부는 관측과 유사한 것으로 나타났으나 20hr에서 첨두까지는 관측과 다소 상이한 결과를 나타내었고 전체적인 수문곡선의 양상은 관측과 유사한 것으로 나타났다.

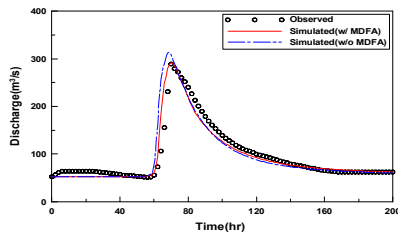
비교 검토

1. 흐름분배 알고리즘의 적용성 검토

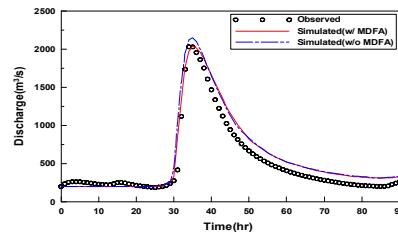
본 연구에서 개발한 GIS기반 다방향 흐름분배 알고리즘의 적용성 검토를 위해 평창강 유역과 소양강 유역에 대하여 지점 강수량 자료를 이용하여 모의를 수행하였다. 모형 수행의 정확도의 검토를 위해 다방향 흐름분배를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교해 보았다. 비교된 사상은 평창강 유역 2007년 7월, 2005년 6월 호우사상과 소양강 유역의 2003년 7월 사상이다. 알고리즘 적용 미적용

경우를 모의된 수문곡선으로 표현하여 그림 22~그림 23에 제시하였다. 제시된 그림의 범례에서 약어로 표현한 『w/ MDFA』는 다방향 흐름분배를 이용하였을 경우를 의미하며 『w/o MDFA』는 흐름분배를 적용하지 않은 경우를 의미한다.

흐름분배의 적용성 검토를 위해서, 유역의 매개변수들은 동일하게 처리하였으며 단지 상세흐름 정보의 이용 여부에 따라서 모의를 수행하는 방법론을 채택하였다. 그림에서 보는 바와 같이 흐름분배 알고리즘을 적용한 경우가 적용하지 않은 경우보다, 유역 유출반응을 좀 더 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

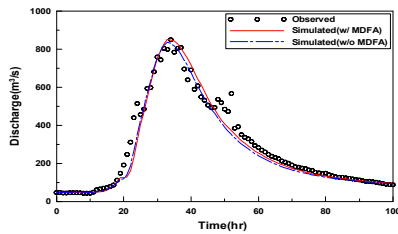


(a) 2007년 7월

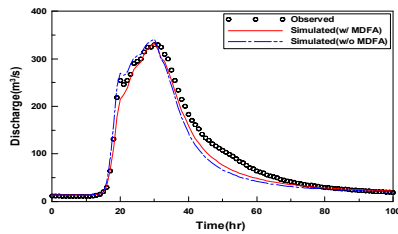


(b) 2005년 6월

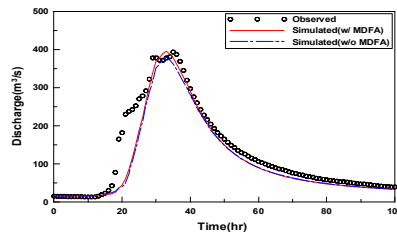
FIGURE 22. 흐름분배 적용과 미적용에 대한 결과 비교(평창강유역)



(a) 내린천유역



(b) 북천유역



(c) 원통유역

FIGURE 23. 흐름분배 적용과 미적용에 대한 결과 비교(2003년 7월)

모의 결과의 정량적 평가를 위하여 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE), 제곱근 평균 제곱 오차(Root Mean Square Error, RMSE), 상관계수(Correlation Coefficient, CC), Nash-Sutcliffe 효율계수(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSEC)를 산정하여 표 3에 나타내었다.

표에서 보는 바와 같이 일방향 흐름해석에 의한 경우보다 다방향 흐름분배 알고리즘을 적용한 경우가 제곱근 평균 제곱 오차가 감소하고 있음을 알 수 있으며, 상관계수 및 Nash-Sutcliffe 효율계수는 증가하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 개발된 모형은 관측과 모의간 상관계수는 약 0.97이상으로 매우 높은 값을 보이고 있으며, Nash-Sutcliffe 효율계수는 최소 0.99이상으로 1에 근접한 값을 보이고 있다. 이를 통해 모형의 결과가 관측에 매우 높은 상관도를 보이고 있음을 알 수 있으며 매우 정확한 예측의 수행이 이루어진 것으로 판단된다.

흐름분배를 적용하지 않은 경우도 수문곡선의 형태상 좀 더 향상된 관측의 묘사가 가능할 것으로 보이나 합리적이지 못한 매개변수의 무리한 조정이 요구될 수도 있으며, 매개변수의 조정으로 인해 수문곡선의 패턴의 변화가 발생할 수 있을 것이다. 흐름분배 미적

용의 경우, 관측결과에 대한 추가적인 매개변수 보정작업을 통해서 모형 수행의 적합도에서는 어느 정도 향상이 이루어질 수 있으나 침투유량, 침투발생시각 등의 수문곡선 패턴의 변화가 발생할 것이기 때문에 침투의 포착 측면에서는 손실이 발생할 것이며 매개변수 보정 시 무리한 매개변수의 조정으로 합리적이지 않은 매개변수를 이용한 경우-유출 모의의 적합도 도출이라는 문제점이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 계산시간에 대한 검토

흐름분배를 이용할 경우 계산 소요시간 단축을 검토하기 위해서 상세지형정보를 직접 이용하여 모의할 경우와 계산 소요시간을 비교하였다. 계산기의 연산처리 및 기억장치의 제한으로 고해상도 지형정보를 직접 이용하여 경우-유출 모의를 수행할 수 없었기 때문에 계산 소요시간 검토를 위한 방법론은 저해상도 지형정보를 이용하여 모의할 경우 소요시간에 대해 고해상도 지형정보를 이용할 경우 추가적인 계산회수를 반영하여 계산 소요시간을 도출하는 방식을 채택하였다. 경우-유출 모의에서 계산 소요시간은 모의반복 회수와 관련이 있으며 모의반복 회수는 전체모의기간을 계산시간간격으로 나눈 값으로 생각할 수

TABLE 3. 모형의 정량적 평가

대상유역	대상호우	MAE	RMSE	CC	NSEC
일방향 지표면 흐름해석에 의한 경우-유출 모의					
평창강	2007년 7월	12.18	25.34	0.9210	0.9927
	2005년 6월	109.50	139.07	0.9837	0.9994
내린천		30.62	50.94	0.9796	0.9990
북천	2003년 7월	15.44	21.33	0.9829	0.9979
원통		21.82	40.47	0.9550	0.9969
다방향 흐름분배 알고리즘을 이용한 경우-유출 모의					
평창강	2007년 7월	9.07	15.79	0.9658	0.9955
	2005년 6월	98.88	121.19	0.9852	0.9995
내린천		29.61	48.68	0.9829	0.9992
북천	2003년 7월	11.09	15.82	0.9936	0.9985
원통		20.03	37.45	0.9595	0.9972

있다. 특히 분포형 강우-유출 모형의 경우에는 계산시간간격 내에서 계산이 수행될 격자의 수와 계산에 참여하는 수문과정의 수에도 많은 영향을 받게 된다.

본 연구에서 흐름분배 알고리즘의 적용을 위해 이용된 입력 자료의 해상도는 저해상도의 경우 1km, 고해상도의 경우 50m가 사용되었다. 단적으로 1km 해상도의 자료를 이용할 경우와 50m 해상도 자료를 이용할 경우 동일한 시간 간격 내에서 계산수행 회수는 50m 지형정보를 이용할 경우가 해상도의 측면에서만 볼 경우 400배(20×20)정도가 요구된다. 평창강 유역의 적용에서는 계산시간 간격을 30초로 설정하였으며 전체모의기간은 200hr이었다. 그러므로 전체모의를 위해서 계산시간만의 반복회수로 볼 때 6,000회의 반복이 이루어졌으며 매 회 계산되어야 할 계산 격자수가 3,080개였으므로 총 모의반복 회수는 $6,000 \times 3,080 = 18,480,000$ 이다. 이 경우 계산 소요시간은 24초가 소요되었다. 고해상도 지형정보를 그대로 이용할 경우 400배의 반복회수가 더 요구되기 때문에 계산 소요시간도 400배 정도가 더 소요될 것이며 단순 수치연산에 의해 $400 \times 24 = 9,600$ 초, 약 2.67시간 정도의 계산시간이 걸릴 것으로 판단된다. 위에서 언급된 과정을 통해 50m 입력자료 이용 시 계산 소요시간과 흐름분배를 적용하였을 경우에 관해서 본 연구에서 적용한 유역에 대해 표 4에 제시하였다.

표에서 제시된 결과는 평창강 유역의 경우는 계산시간 간격을 30초로 설정하여 200시

간 모의한 결과이고, 내린천·북천·원통 유역은 계산시간 간격을 30초로 설정하여 120시간 모의한 결과이다. 계산격자수를 1km DEM과 50m DEM 순서로 각 유역별로 정리해 보면 평창강유역은 3,080개와 1,232,000개, 내린천유역은 1,768개와 714,400개, 북천유역은 506개와 202,400개, 원통유역은 638개와 255,200개이다. 표에서 보는바와 같이 흐름분배를 이용한 경우가 고해상도 지형정보를 이용할 경우에 비해 최소 200배에서 최대 250배 정도의 계산 소요시간 향상이 이루어짐을 알 수 있었다.

결론

본 연구에서는 GIS 기반 다방향 흐름분배 모형의 실제유역에 대한 적용성을 검토해 보았다. 본 연구의 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 GIS 기반 다방향 흐름분배 모형의 적용성을 검토하기 위해 실제 유역인 평창강 유역과 소양강 유역에 대해 적용하였다. 평창강 유역의 경우, 2007년 7월 모의 시 계산 침투유출량은 관측 침투유출량보다 $2\text{m}^3/\text{s}$ 정도 높게 나타났으며, 침투 발생시각은 70hr로 동일하게 나타났다. 2005년 6월 모의 시 계산 침투유출량은 관측 침투유출량보다 $11\text{m}^3/\text{s}$ 정도 높게 나타났으며, 침투 발생시각은 35hr로 동일하게 나타났다. 침투 유출량에서 다소 차이가 있으나 전체적으

TABLE 4. 계산 소요시간 비교

구 분	흐름분배 적용	50m 해상도 모의
평창강 유역	43초	9,600초
소양강유역	내린천	19초
	북천	6초
	원통	7초
		4,800초
		1,200초
		1,600초

로 수문곡선의 양상이 관측값과 거의 일치하는 결과를 나타내었다.

- (2) 소양강 유역의 경우, 2007년 8월 모의 시 내린천 유역의 계산 침투유출량은 관측 침투유출량보다 $17\text{m}^3/\text{s}$, 북천유역은 $1\text{m}^3/\text{s}$, 원통유역 $4\text{m}^3/\text{s}$ 정도 높게 나타났으며, 침투 발생시각은 내린천 유역의 경우 1hr정도 차이가 나는 것으로 나타났고, 북천유역과 원통유역은 각각 47hr, 50hr로 동일하게 나타났다. 2003년 7월 모의 시 내린천 유역의 계산 침투유출량은 관측 침투유출량과 동일하게 나타났으며, 북천유역은 $4\text{m}^3/\text{s}$, 원통유역 $2\text{m}^3/\text{s}$ 정도 높게 나타났고, 침투 발생시각은 내린천 유역과 원통유역의 경우 각각 1hr, 2hr정도 차이가 나는 것으로 나타났고 북천유역은 동일하게 나타났다. 모의 결과 침투 유출량과 침투 발생시간에서 다소 상이한 결과를 나타내는 부분도 있었지만 전체적인 수문곡선의 양상은 관측값과 거의 일치하는 결과를 나타내었다.
- (3) 다방향 흐름분배 모형의 적용과 미적용 결과(일방향 흐름분배)의 고찰을 통해 다방향 흐름분배 모형의 정확도의 향상을 확인할 수 있었고 계산 소요시간의 경우 다방향 흐름분배를 적용했을 경우가 고해상도 지형정보를 이용할 경우에 비해 최소 200배에서 최대 250배 정도의 계산 소요시간 향상이 이루어짐을 알 수 있었다.
- (4) 본 연구 모형을 이용하여, 향후 유역 홍수통합관리에서 중요한 정확한 유출량 산정이 가능할 것으로 판단되며 특히 강우 예측 기술과의 통합으로 유역 홍수 예경보에 크게 기여할 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 해상도 변화에 따른 결과 비교를 통해서 적정 해상도에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. **KAGIS**

참고문헌

- 건설교통부. 2003. 한국수문조사연보.
- 건설교통부. 2004. 한국수문조사연보.
- 건설교통부. 2005. 한국수문조사연보.
- 건설교통부. 2007. 한국수문조사연보.
- 고덕구. 1989. 소유역의 장기유출예측을 위한 모의 발생수문모형의 개발. 박사학위논문. 서울대학교.
- 김대식, 정하우, 김성준, 최진용. 1995. 소유역 지표유출의 공간적 해석을 위한 지리정보시스템 응용모형(II) -격자 물수지모형을 위한 GIS 응용모형 개발-. 한국농공학회지 37(5):35-42.
- 김문모, 이정우, 이재웅. 2007. 격자기반의 도시유역 지표면 유출모형의 개발 및 적용. 한국수자원학회논문집. 40(1):25-38.
- 김성준. 1998. 격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I) -이론 및 모형-. 한국수자원학회논문집. 31(3):303-308.
- 김성준, 채효석, 신사철. 1998. 격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(II) -적용 예(연천댐유역을 대상으로)-. 한국수자원학회논문집. 31(3):309-316.
- 박진혁, 강부식. 2006. 댐 유역 홍수예측을 위한 GIS기반의 분포형 모형과 집중형 모형의 유출해석 비교. 한국지리정보학회지 9(3):171-182.
- 박진혁, 강부식, 이근상, 이을래. 2007. 레이더 강우와 Vflo모형을 이용한 남강댐 홍수유출 해석. 한국지리정보학회지 10(3):13-21.
- 신철균, 조효섭, 정관수, 김재한. 2004. 저류함수기법을 이용한 격자기반의 강우-유출 모형의 개발. 한국수자원학회논문집. 37(11):969-978.
- 정인균, 이미선, 박종윤, 김성준. 2008a. 격자

- 기반 운동과 강우유출모형 KIMSTORM의 개선(I) - 이론 및 모형 -. 대한토목학회 논문집. 28(6b):697-707.
- 정인균, 신형진, 박진혁, 김성준. 2008b. 격자 기반 운동과 강우유출모형 KIMSTORM의 개선(I) - 적용 및 분석 -. 대한토목학회 논문집. 28(6b):709-721.
- 최현상, 한건연. 2004a. GIS와 불확실도 해석 기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (I) - 이론 및 모형의 개발 -. 한국수자원학회논문집. 37(4):329-339.
- 최현상, 한건연. 2004b. GIS와 불확실도 해석 기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (II) - 적용 및 분석 -. 한국수자원학회 논문집. 37(4):341-352.
- 홍준범, 김병식, 윤석영. 2006. Vflo™ 모형을 이용한 물리기반 분포형 수문모형의 정확성 평가. 대한토목학회논문집. 26(6):613-622.
- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunhem, P.E. O'Connell and J. Rasmussen. 1986. An Introduction to European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, (SHE): Structure of a Physically-Based Distributed Modeling System. *Journal of Hydrology*. 87: 61-77.
- Beven, K. 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically based models. *Journal of Hydrology*. 105:157-172.
- Costa-Cabral, M.C. and S.J. Burges. 1994. Digital elevation model networks(DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*. 30:1681-1692.
- Downer, C.W. and F.L. Ogden. 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.
- Fairfield, J. and P. Leymarie. 1991. Drainage networks from grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*. 27:709-717.
- Grayson, R.B., I.D. Moore and T.A. McMahon. 1992a. Physically-based hydrologic modeling, 1. A terrain-based model for investigative purpose. *Water Resources Research*. 28: 2639-2658.
- Grayson, R.B., I.D. Moore and T.A. McMahon. 1992b. Physically-based hydrologic modeling: 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*. 26:2659-2666.
- Holmgren, P. 1994. Multiple flow direction algorithms for runoff modeling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Processes*. 8:327-334.
- Julien, P.Y. and B. Saghafian. 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).
- Lea, N.L. 1992. An aspect driven kinematic routing algorithm. *Hydraulics and Erosion Mechanics*. London. University College London Press. pp.393-407.
- Moore, I.D. and G.R. Foster. 1990. *Hydraulics and overland flow. Process Studies in Hillslope Hydrology*. Wiley. New York. pp.215-252.
- Moor, I.D. and J.C. Gallant. 1991. Overview of Hydrological and water

- quality modeling the Fate of Chemicals in the Environment. Center for Resource and Environmental Studies. Australian University. Canberra. pp. 1-8.
- Moor, I.D. and R.B. Grayson. 1991. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*. 27:1177-1191.
- Moor, I.D., R.B. Grayson and A.R. Ladson. 1991. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Process*. 5:3-30.
- Ogden, F.L. 1997. Premier: Using WMS for CASC2D Data Development. Brigham Young University. Provo. UT.
- O'Loughlin, E.M. 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*. 22:794-804.
- Onstad, C.A. and D.L. Brakensiek. 1968. Watershed simulation by stream path analogy. *Water Resources Research*. 4:965-971.
- Quinn, P.F., K.J. Beven, P. Chevallier and O. Planchon. 1991. The Prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes*. 5:59-79.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek and N. Miller. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soil data. *Journal of Hydraulic Division* 109(1):62-70.
- Rojas, R. 2002. GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASD2D-SED. PhD thesis Department of Civil Engineering. Colorado State University. Fort Collins. Colorado.
- Vieux, B.E. 2004. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Vieux, B.E. and J.E. Vieux. 2002. Vflo™: A Real-Time Distributed Hydrologic Model. Proceedings of 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference (Paper on CD-ROM).
- Wise, S.M. 1998. The effect of GIS interpolation errors on the use of digital elevation models in geomorphology. In Lane, S.N., Richard, K.S., and Chandler, J.H. (eds.) *Landform Monitoring, Modeling and Analysis*, Wiley and Sons, New York, pp. 139-164. 