

분포형 모형을 이용한 홍수범람해석



박민규 ▶▶▶
 충남대학교 방재안전과학과 교수
 mkhojin@gmail.com

1. 서론

분포형 강우-유출 모형에 관한 연구는 1990년대에 들어 인공위성자료나 레이더 자료의 활용성이 높아지면서 활발해지기 시작하였으며, 최근에는 컴퓨터 성능의 급격한 발달과 수치해석 기법의 발달로 많은 발전을 보이고 있다. 기존의 강우-유출과정은 물순환 과정을 몇 개의 매개변수로 개념화하여 표현하는 집중형 모형을 이용하였다. 이에 비해 분포형 모형은 유역의 시공간적인 특성을 반영하기 위하여 격자기반의 지형구조를 형성하여 좀 더 정교한 해석이 가능하도록 개선한 것이다. 이때, 분포형 모형은 격자간의 유출을 추적하거나 수학적 상사면에서 방정식을 간략화하는 물리적 기반 계산 구조를 포함하고 있다. 물리적 기반 모형(Physical based model)이란 수문학적 과정(hydrologic process)을 표현하기 위하여 질량(mass), 운동량(momentation), 에너지 보존방정식(Energy Conservation Equation)을 이용하며 이들은 본 연구에서 선정한 Vflo™ 모형(Vieux, 1998; Vieux et al., 1990)에 지표유출 계산에 적용하였다.

분포형 모형의 홍수범람해석 및 홍수예정보 측면에서의 활용사례는 다음과 같다. 일본에서는 강우레이더 자료와 자체적으로 개발한 다양한 분포형 강우-유출 모형, 홍수범람모형을 이용하여 일본내에서의 홍수 유출해석 및 범람해석을 수행하고, 이를 바탕으로 홍수대응 전략을 수립하고, 다양한 정보에 대하여 대국민 서비스를 시행하고 있다. 미국의 경우 미국내 전역에 대해 레이더 강우 관측자료 및 예측자료와 자체적으로 개발된 분포형 모형을 함께 활용하여, 실시간 홍수 유출해석 뿐만 아니라, 홍수예측에까지 활용하고 있다. 한편, 우리나라도 국토해양부에서 저류함수법과 통계적 모형을 이용하여 중소하천의 홍수예보를 시행하고 있으며, 최근 들어 레이더 강우자료와 분포형 강우-유출 모형을 이용한 돌발홍수예보시스템 구축을 위한 연구가 진행되고 있다. 특히, 소방방재청에서는 재해상황분석판단시스템에서 레이더 관측 및 예측 자료와 분포형 모형을 이용해서 홍수예경보시스템을 구축 및 운영하고 있다.

여기서는 기존에 널리 소개된 분포형 모형들의 특성을 살펴보고 홍수예경보 측면에서 낙동강의 함양유역을 대상으로 적용한 사례와 분포형 모형을 예경보 측면에서 사용할 경우의 유용성과 시사점을 소개하고자 한다.

2. 분포형 모형의 특성 비교

분포형 모형은 유역을 수문학적으로 균일한 격자

망 또는 소유역으로 구분하여 적용하므로 토지이용 변화 외에도 유역내의 물리적인 특성 변화에 따른 영향을 모의할 수 있다. 또한, 유역의 물리적 특성이나 실측 자료로부터 모형의 매개변수를 구하므로 미세측 유역에 적용이 가능하다. 국내에 소개된 대표적인 분포형 유출모형으로는 AGNPS, ANSWERS, WEP, MIKE SHE, GSSHA와 Vflo™ 모형 등이 있으며 Vflo™ 모형의 개요와 다른 분포형 모형들과의 수문 해석 측면에서의 효율을 검토한 결과를 정리하여 제시하면 아래와 같다.

1) Vflo™ 모형

Vflo™ 모형은 미국 Oklahoma 대학에서 개발한 물리적 기반의 분포형 수문모형이다. 이 모형은 수치해를 구하기 위하여 공간적으로는 유한요소법을, 시간적으로는 유한차분 음해법을 사용하고 지표유출 산정을 위하여 운동파방정식(Kinematic Wave Equation, KWA)을 사용하고 있다. 한편, 하도망은 지형정보로부터 유도한 유하방향도로부터 형성되며 하도망의 지형학적 특성은 유역과 수문곡선의 형태와 반응특성을 결정한다. 지표, 하도, 저수지, 천수격자의 수리특성이 강우와 함께 수문모형의 입력을 구성한다. 환경사의 하도와 하천 외 저류는 Modified Plus 및 Jones 방정식을 이용하고 지표격자로부터 발생하는 유출은 하도추적과 연결된다. 이때, 하도추적은 실제단면, 사다리꼴단면, 수위-유량곡선 등을 이용하여 수행된다(Vieux, 2001, 2002, 2003, 2004).

Vflo™ 모형은 환경사에서의 부정류 흐름을 고려하기 위해 하도요소에서 고리형 수위-유량관계 곡선식을 사용하는데 특히, 유속의 상승과 하강은 수문곡선에서의 상승부 또는 하강부에 의해 유도되므로 Jones 공식이 고려된다. 환경사에서의 수리적 조건, 고리형 수위-유량 곡선은 최대 유출이 최대 수위에서 발생할 때 매우 중요한 영향을 미치는 요인이 된다.

2) 모형별 기능 비교

앞서 기술한 WEP, MIKE SHE, GSSHA와 Vflo™ 모형들은 물리적 기반의 분포형 수문모형이며 공통 입력 자료로 요구되는 토양도와 토지이용도로부터 유출변화를 모의하게 된다. 식생의 증발산 산정을 위하여 Penman-Monteith식을 공통으로 사용하며, 식의 적용방법에는 차이가 있으나 각각 식생의 계절변화를 고려할 수 있다. 침투는 공통적으로 Richard 방정식의 해석을 통해 모의하고 있다. 다만, 계산의 효율성을 높이기 위하여 Green-Ampt 모형이나 여러 형태로 확장된 Green-Ampt 모형을 사용한다. 지표면이나 하도 추적의 경우, GSSHA 모형은 확산파 방정식(Diffusive wave equation)을, MIKE SHE 모형은 Saint Venant 식을 적용하고 있으며, WEP 모형과 Vflo™ 모형은 공통적으로 운동파방정식(Kinematic wave equation)을 사용하여 모의하고 있다. 제시한 분포형 모형들은 구조나 모의값을 산정하는데 적용되는 방법이 대부분 비슷한 것으로 비교되었다.

기존에 소개된 분포형 모형들을 비교해 보면 계산 구조 측면에서 유출모의 상에서 큰 차이를 유발하거나 더 우수하다고 판단할 수 있는 모형이 무엇이라고 이야기하기 어렵다. 기존에 분포형 모형의 효율을 비교한 여러 연구결과들이 공통적으로 지적하고 있는 사항을 소개하면 입력자료로 사용되는 격자구조의 자료가 어떻게 작성되었고 어느 정도로 개별 격자지형을 대표할 수 있는냐가 모형의 구조보다 모의결과의 정확성을 결정하는 주요 요소로 제시되어 있다(Vieux, 2002).

3. 분포형 모형의 적용성 검토

홍수예측 정확도 및 신뢰성을 향상시키기 위해서는 GIS를 이용한 분포형 모형의 적용이 필요하다. 따라서 분포형 모형의 홍수범람 해석을 위한 GIS 자료

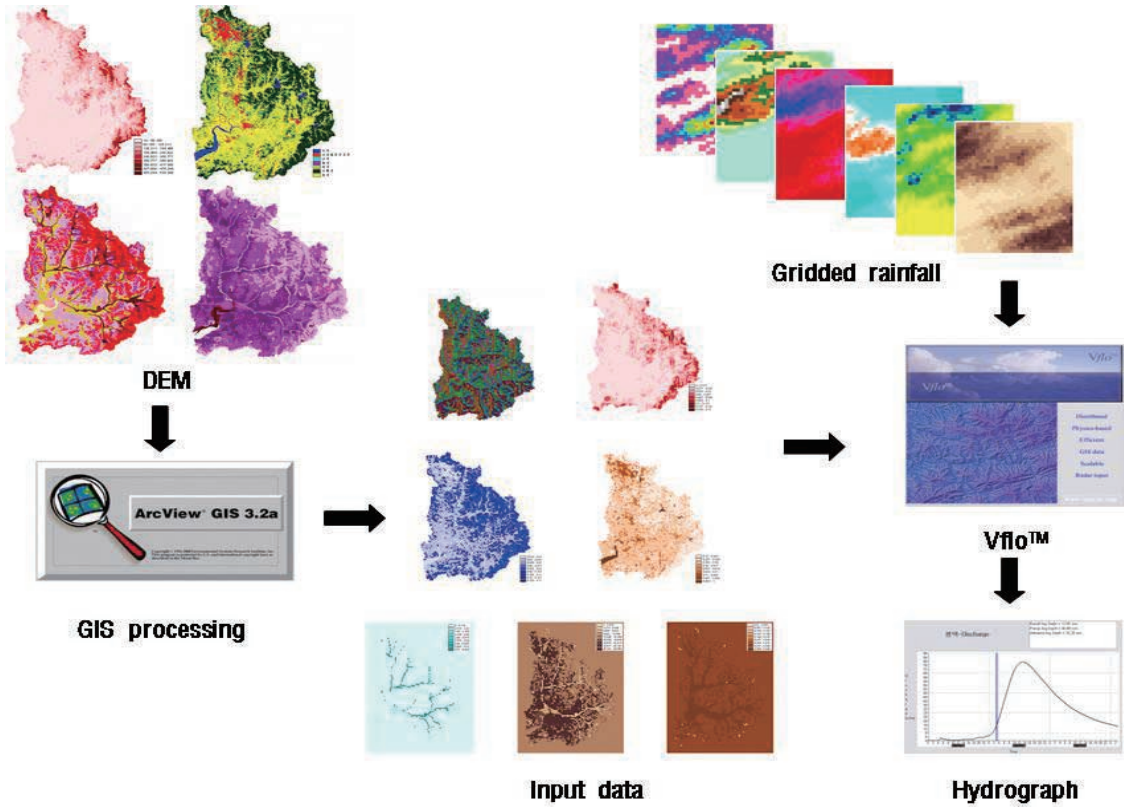


그림 1. Vflo™ 모형의 매개변수 구축 과정

의 전처리 과정이 체계적으로 수립되어야 한다. 특히, 지역특성에 반영한 홍수 예측이 체계적으로 이루어지기 위해서는 적정 해상도에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서 적용한 Vflo™ 모형은 입력 자료로 흐름방향(Flow Direction), 경사도(Slope), 조도계수(Roughness), 수리전도도(hydraulic conduction)를 포함한 침투 요소의 자료가 요구되며, 이들 자료를 입력 자료로 활용하기 위하여 GIS 프로그램을 사용하여 나타내면 그림 1과 같다.

본 연구에서는 남강댐 유역의 상류지점인 함양을 대상유역으로 선정하였다. 유역의 크기는 약 124 km²이며, 하도경사는 0.0149이다. 함양유역의 DEM, 개략토양도, 토지피복도(또는 토지이용도), 그리고 토양유효토심은 아래 그림과 같다. 아래 그림을 살펴보면, 함양유역의 표고는 145~1,253 m로 분포되어 있

으며, 산림이 70% 이상인 대표적인 산림유역에 해당한다. 반면에 토양의 유효토심은 대체적으로 얇거나 암석으로 인한 불투수지역이 유역의 대부분을 차지한다.

그림 2는 대상유역에 적용된 Vflo™ 모형의 검보정 결과를 보여주고 있다. 관측유량과(기호 'O') 모의유량(실선)을 함께 도식화하였으며, 관측유량과 모의유량간의 정량적인 오차는 침투유출량 및 침투발생시간 측면에서는 1% 미만으로 유출체적의 모의 측면에서는 10% 미만을 보이고 있다. 이를 통해 대상유역에 적절한 분포형 강우유출 모의 시스템이 구축되었다고 판단할 수 있다.

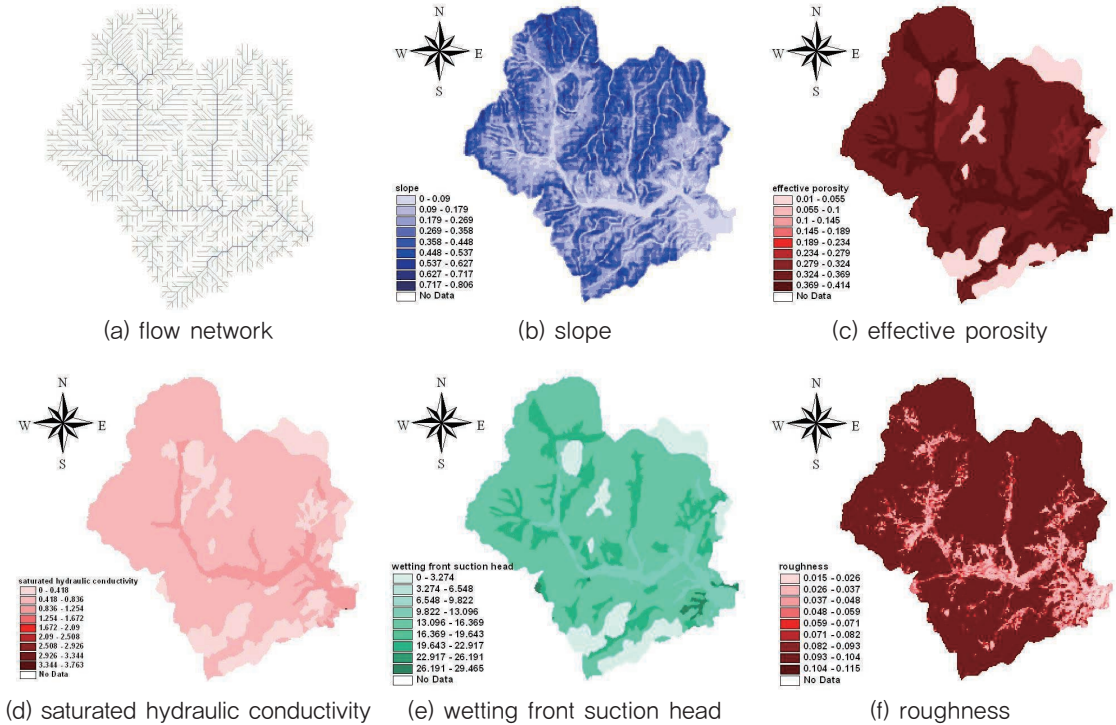


그림 2. Vflo™ 모형의 지형입력자료

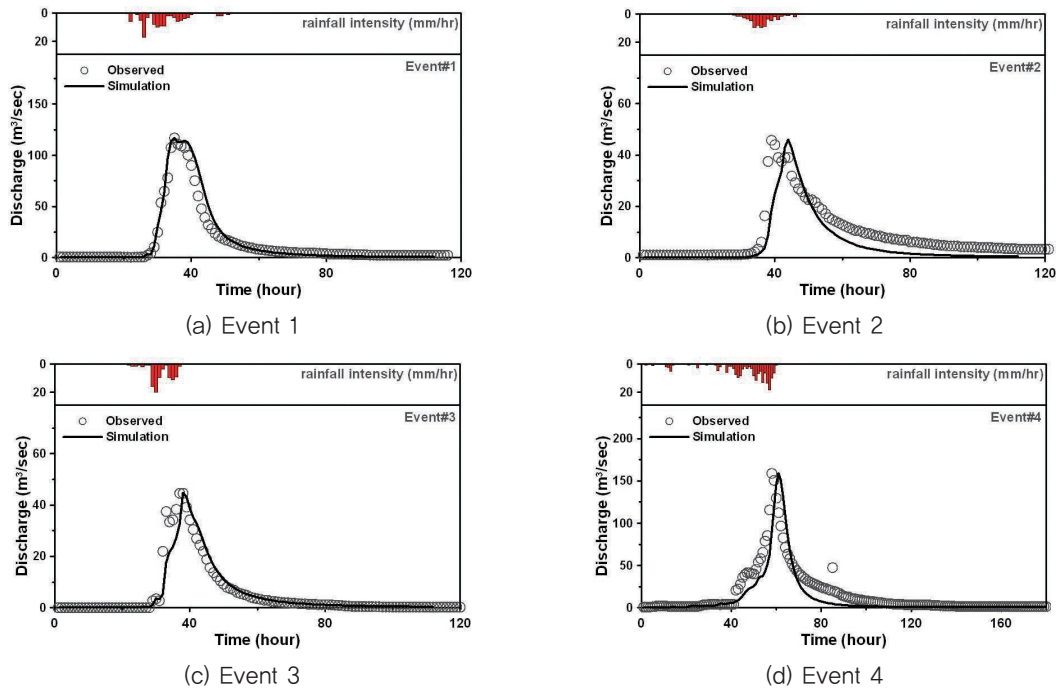


그림 3. Vflo™ 모형의 검증결과

4. 결론 : 홍수예경보 측면에서 분포형 모형의 활용성

중소하천 유역에서의 홍수예경보는 기본적으로 입력강우의 정확성과 정밀성에 의존하게 된다. 오차를 포함하고 있는 강우측정량 또는 강우예보량이 강우-유출모형에 미치는 영향을 고려할 수 있어야 홍수예경보에서 사용하기 위한 강우량의 정확도나 강우-유출모형 설계와 관련하여 이들의 오차유발특성을 명확히 할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 정교한 레이다 강우측정을 통한 강우 공간분포 자료의 정확도 평가가 관심을 받고 있다.

본 연구에서는 임의의 유역 내부와 그 근처에 설치된 몇 개의 우량자료를 사용하여 강우레이더 자료와 같이 정밀하게 분포된 우량자료의 효과를 검토하였다. 이때 적용된 모의과정과 결과는 상당한 분량이므로 여기서는 홍수예경보 목적에서 시사성을 가지고 있는 몇몇 적용 사례와 결론만을 소개하기로 한다.


가상의 호우를 유역을 가로질러 이동시키며 홍수 수문곡선을 모의하였다. 이때, 우량관측소의 수를 변화시키면서 강우량의 변화를 조사하였는데 그 결과 수문곡선의 첨두의 시간과 크기는 2배 이상의 큰 차이가 나타날 수 있는 것으로 모의되었다. 즉, 태풍과 같은 호우사상의 경우 호우의 공간이동이 유출량 발생결과에 미치는 효과가 상당히 크고 예경보 측면에서는 매우 중요하다고 발견되었다. 그리고 이러한 결과는 특히 유역면적이 작은 중규모와 소규모 유역의 경우 태풍이 아닌 집중호우에 의해 더욱 크게 나타날 수 있음을 보여주었다. 동일한 유역평균강우량을 가지지만 유역 전체가 아니라 유역의 일부지역에만 내

리는 강우량은 그 위치에 따라 유역 전체에 균등하게 내리는 동일 유역평균강우량에 의해 유발되는 첨두유출량보다 3배 가까이 큰 값을 보일 수 있는 것으로 모의되었기 때문이다.

즉, 한정된 결과이기는 하지만 홍수예경보 측면에서 볼 때 유역내 평균우량을 결정하는데 기여하는 우량관측망 집단은 그것이 유역 평균 강우량을 얼마나 잘 추정하는가 하는 의미에서만 사용할 경우 예경보 측면의 활용에서는 큰 오류를 범할 우려가 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 오류의 가능성은 유역내 강우의 발생특성이 보다 극심한 호우사상 즉 강우강도가 증가할수록 보다 증가하는 것으로 나타났다. 이는 극심한 호우사상이 시간적 측면 뿐만 아니라 공간적 측면에서도 간헐성이 보다 증가하고 그로 인한 강우의 공간분포가 이질적이고 편차가 증가하면서 유출오차를 더욱 큰 영향을 미쳤기 때문으로 볼 수 있다.

이러한 모의결과를 살펴볼 때 홍수예경보 측면에서 분포형 강우유출 모형을 도입하는 것은 강우의 공간분포가 균일하지 않거나 태풍의 이동과 같은 호우사상이 발생할 경우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-자연-2011-45] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 

참고문헌

1. Vieux, B.E. (1988) Finite Element Analysis of Hydrologic Response Areas Using Geographic Information Systems. A dissertation submitted in partial fulfillment for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Agricultural Engineering, Michigan State University, July, pp. 199.
2. Vieux, B.E. (2001) Distributed Hydrologic Modeling Using GIS, ISBN 0-7923-7002-3, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, Wat. Sci. Tech. Series, Vol. 38. pp. 293.
3. Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2002). "Vflo™: A real time distributed hydrologic model." Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada.
4. Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2003). "Operational deployment of physics-based distributed rainfall-runoff model for flood forecasting in Taiwan." Proceedings of International Symposium on Information from Weather Radar and Distributed Hydrologic Modeling, IAHS, Sapporo, Japan.
5. Vieux, B.E.(2004). Distributed hydrologic modeling using GIS. Kluwer Academic Publishers, ISBN : 1-4020-2459-2, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
6. Vieux, B.E., Bralts, V.F., Segerling, L.J., and Wallace, R.B. (1990). "Finite element watershed Modeling: one-dimensional elements." Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 116, No. 6, pp. 803-819.