

분포형 모형에 의한 소유역에서의 강우-유출 해석

Rainfall-Runoff Analysis for Small Watershed by Using Distributed Model

최현상* · 한건연** · 정귀한***

1. 서론

최근 들어 전세계적으로 극심한 기후변화와 그에 따른 기상이변으로 집중호우에 의한 피해가 급증하고 있으며, 기상재해에 따른 강우-유출 현상에 관한 정교한 해석이 필요하게 되었다. 국내의 경우에도 1990년 중반부터 매년 국지적 집중호우나 이상호우로 인한 피해가 반복되고 있고, 이러한 문제점을 해결하기 위해 물리적 거동에 기초한 새로운 강우-유출 모형의 도입이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 또한, 과거에는 거의 불가능했던 실제 지형정보들이 인공위성 기술, 컴퓨터 기술과 GIS 관련 기술의 급속한 발전, 영상정보 해석기술의 발전 등에 힘입어 그 적용가능성을 확대시키고 있다. 국내의 경우에도 1990년대 중반부터 국가적으로 추진된 국가수치기본도 사업을 필두로 위성의 발사 등으로 국내의 지형정보들이 지속적으로 확충되고 있는 실정이나 이를 적극적으로 활용하기 위한 연구들은 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 그동안 국내에서 이루어져 왔던 집중형 강우-유출모형이나 단순화된 분포형 모형이 아닌 2차원 분포형 강우-유출 모형을 제시하고, 실제유역에 대한 적용을 통해 2차원 분포형 모형의 적용성을 검증하였다. 이를 위해 우선 강우의 시간적, 공간적 변화를 모의할 수 있는 기법을 도입하고, 지리적으로 다르게 분포되어 있는 토양특성에 대해 지표면으로의 침투과정을 모의하고 초과 강우량을 산정하기 위해 Green-Ampt 공식을 도입하였다. 초과강우량의 지표류 유출을 모의하기 위해 지표면 유출에 대한 2차원 확산과 방정식을 도입하여 해석하고, 하도에 대한 1차원 확산과 방정식을 도입하였다. 또한, 지표류 유출모의에 있어서 흐름방향의 다양성을 고려하기 위하여 1방향, 4방향, 8방향 흐름에 대한 흐름추적이 가능하도록 구성하여 흐름방향에 따른 차이에 대해서도 비교·검토하였다.

2. 2차원 분포형 모형의 개발

지표면 흐름과 하도 흐름의 기구를 기술하기 위해서 Saint-Venant의 연속방정식과 운동량방정식을 사용하여 모형을 수식화 하였다. 일반적으로 지표면 흐름은 경사, 지표의 조도, 초과강우와 그 외의 매개변수에 대한 공간적 변화에 의해 지배받는 2차원적 과정으로 나타낼 수 있다. 확산과 근사는 Saint-Venant 운동량방정식의 단순한 형태로 사용된다. 확산과 방법은 작은 경사와 큰 조도를 나타내는 지역에 대해서 적용할 수 있다는 것과 저류된 물을 표현할 수 있다는 이유로 사용되었다. 연속방정식과 운동량방정식은 유역내의 각 격자에 대해서 동시에 적용된다. 수치해는 각 격자의 폭에 대해서 산정된다. 강우강도와 토양특성, 유역특성 등은 각 격자내에서는 동일한 상수로 가정하였으나 격자와 격자간에는 변화할 수 있다.

* 경북대학교 토목공학과 강사(공학박사)

** 경북대학교 토목공학과 교수

*** 우대기술단

그림 1은 본 모형에서 사용된 전형적인 유한차분 격자망을 묘사하고 있고, 격자의 한번의 길이가 W 인 정사각형을 이루고 있다.

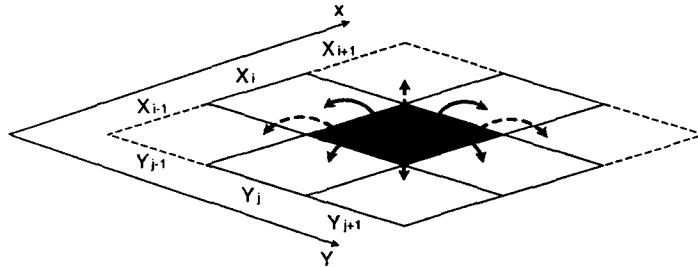


그림 1. 모형에서 사용한 격자망의 개념도

2.1 강우 및 침투해석

강우 조건 및 해석을 위해서 여러 지점의 우량관측 자료나 유역평균 강우량을 적용할 수 있도록 구성하였다. 만약 다수개의 강우관측소 자료가 사용될 경우, 역산거리자승법으로 유역전체에 대해 관측된 측정자료에 기초하여 강우의 공간적인 변동성을 근사화 하여야 한다. 그러나, 관측소의 개수가 한정되어 있는 경우나 유역내에 가용한 관측소가 없는 경우에는 우량 보간에 있어 과소추정하게 되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 유역전체에 대한 평균강우량이나 티센 망에 의한 강우량 산정기법을 도입하였다.

침투량을 산정하기 위한 방법에는 SCS 방법이나 Horton의 침투능 곡선식 등 여러 방법들이 있으나 본 연구에서는 토양의 물리적인 현상을 상세히 묘사하고 있는 Green-Ampt 모형을 적용하였다. 침투량은 지표면 유출을 추적하기 이전에 계산되어지게 된다. 즉, 계산시간 간격동안 격자내에 내린 강우량과 계산되어진 침투량을 비교하여 강우량이 침투량을 초과할 때 지표면 유출이 시작된다. 기본적인 지표류 유출량 산정 모형에서는 순수한 손실량으로 취급되어지나 본 모형에서 침투량 중 일부를 다시 지표하 유출로 고려하였다.

2.2 지표면 및 지표하 유출해석

지표면 유출흐름을 지배하는 유역특성치의 공간적 변화는 격자구조내에서 정의된다. 특성치들은 하나의 격자안에서는 균질하다고 가정한다. 각 격자의 중심점에 할당된 고도값에 기초하여 흐름이 지표면상에서 유출·추적된다.

지표면 흐름의 과정을 나타내기 위해 Saint-Venant의 연속방정식과 운동량방정식이 사용되어졌다. 2차원 연속방정식과 운동량방정식의 편미분 형태는 다음의 식 (1)~(3)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i - f \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{H} \right) + gH \left(S_{fx} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{H} \right) + gH \left(S_{fy} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

여기서, $S_{fx}, S_{fy} = x, y$ 방향에 대한 마찰경사, $H =$ 수심, $h =$ 수위, $g =$ 중력가속도, $q_x, q_y = x, y$ 에 대한 단위폭당 유량, $i =$ 강우강도, $f =$ 침투율을 각각 나타내고 있다.

Manning의 식에 의한 마찰경사를 가정하면 x 와 y 방향에 대한 식 (4)~(8)을 얻게 된다.

$$a_i = \frac{1}{n} H^{\frac{5}{3}} S_{fi}^{\frac{1}{2}} \quad (i = x, y) \quad (4)$$

$$q_i = -F_i \left[\frac{\partial h_i}{\partial i} + M_i \right] \quad (i = x, y) \quad (5)$$

$$\text{여기서, } F = \frac{1}{n} H^{\frac{5}{3}} \left[\frac{\partial h_i}{\partial i} + M_i \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (i = x, y) \quad (6)$$

$$M_x = \frac{1}{gH} \left[\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{H} \right) \right] \quad (7)$$

$$M_y = \frac{1}{gH} \left[\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{H} \right) \right] \quad (8)$$

확산형 방정식의 경우 $M_i = 0$ 이므로 식 (9)와 같이 기술된다.

$$q_i = -F_i \frac{\partial h}{\partial i} \quad (i = x, y) \quad (9)$$

식 (9)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 2차원 확산형 모형의 일반식은 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} F_x \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} F_y \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} + (i-f) \quad (10)$$

확산형 방정식을 해석하기 위하여 본 연구에서는 양해법의 중앙차분법을 변형한 격자망 계산방법을 사용하였다. 적용대상지역을 정사각형 격자로 분할 구분하였고, 각 격자에 대한 표고, 조도계수, 위치 등을 분포시켰고 유량을 계산하기 위하여 흐름의 수심치를 해석하여 격자 시스템 내에서 추적하였다. 본 모형의 경우, 하나의 격자를 기준으로 세 가지 방법으로 계산을 진행할 수 있도록 구성하였다. 첫 번째 방법은 중앙의 격자를 기준으로 주변의 8개의 격자와 마찰경사 S_f 를 결정하여 이 가운데 가장 경사가 급한 하나의 격자로만 흐름이 계산되는 1방향 계산방법과 두 번째로 지표류의 흐름이 직교 방향으로만 이루어진다는 가정하에서 하나의 격자를 중심으로 4방향으로 계산하는 방법, 세 번째로 대각선 방향으로의 흐름도 가능하다고 가정한 8방향 흐름계산 방법으로 나누어 적용하였다. 일차적으로는 4방향으로의 흐름으로 지표류를 계산하는 방법에 대해 가상유역에 적용하였고, 실제 유역에 대한 적용시 1방향 흐름과 4방향 흐름, 8방향 흐름을 비교하였다. 그림 2의 (a), (b), (c)는 각각 본 모형에 적용된 1방향, 4방향 및 8방향 지표류 흐름해석에 대한 개념도이다.

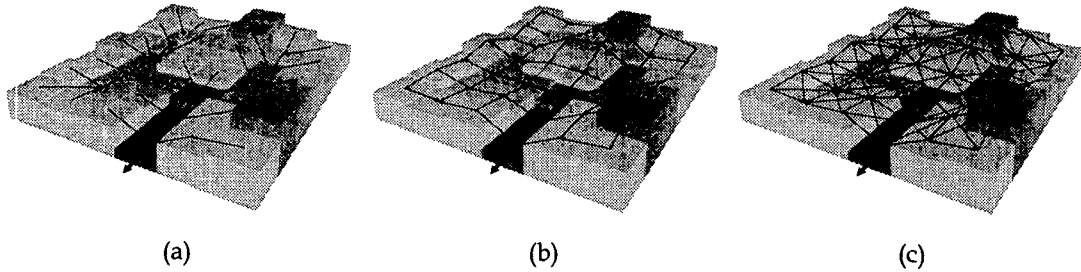


그림 2. 지표류 흐름해석에 대한 개념도

지표하 흐름에 대한 저항 법칙은 속도와 유량을 깊이에 연관시키고 깊이-유량 관계로 공식화 된다. 포화 다공성 토양을 통과하는 흐름추적을 위해 Darcy 법칙을 적용하였다. 지표하 유출 알고리즘을 추가한 목적은 주어진 시간 단계의 끝에서 지표하 흐름의 깊이와 수로로 이동하는 지표하 유량을 계산하기 위함이다. 모형은 침투량 계산과정을 통해 침투 깊이를 얻을 수 있고, 지표하 흐름의 단위폭당 유출량은 마찰 경사 S_f 의 부호에 의한 흐름 방향에 기초하여 계산된다.

2.3 하도흐름 해석

하도망은 여러 개의 수로절점들에 의해 나뉘어진 일련의 연결된 하도들로 정의할 수 있다. 하나의 수로절점은 하나의 격자에 해당한다. 각각의 수로절점에 대해서 하도의 폭, 수심, Manning의 조도계수 및 하상표고를 포함한 하도 특성치들로서 정의된다. 지표면 유출이 하도격자에 도달하게 되면, 하도내의 흐름을 추적하기 위해 1차원 확산과 방정식을 적용하였다.

운동량 방정식의 확산과 근사해에 기초하여 지표면 격자에 대한 마찰경사를 결정하는데 사용된 식은 하도망 내에서 하상표고로 계산된 하상경사와 함께 하도 격자에 대해 그대로 사용되어진다. 하도추적은 유역에서 최상류단에서부터 시작하여 유역의 출구쪽으로 진행되어 진다.

3. 대상유역의 선정

모형의 적용을 위해 한국건설기술연구원에서 시험유역으로 관리하고 있는 설마천 소유역을 선정하였고, 설마천 유역에 대한 지형자료의 구축은 1/25,000 지형도를 사용하여 고도자료를 구축하였다. 설마천 시험유역에는 우량관측소 5개소, 수위관측소 2개소가 설치되어 있으며, 관측 시간단위는 10분으로 운영되고 있다(한국건설기술연구원, 2000). 설마천 유역의 면적은 18.5km², 유로연장은 11.25km로서 수계형상은 대체로 수지상의 모양으로 이루어져 있다. 이 가운데 전적비교를 유출구로 하는 8.5km²를 대상유역으로 선정하였고, 그림 3은 대상유역에 대한 3차원 지형형상을 보여주고 있다. 설마천 시험유역에 대한 1/25,000 정밀 토양도를 확인한 결과 하천 주위를 따라 약간의 부분에 대해서만 조사되어 있을 뿐 전체적인 토양구분은 나와 있지 않아 1995년 설마천 시험유역 보고서에 제시된 총 11개 축점에 대한 토양조사 결과를 이용하였다(한국건설기술연구원, 1995). 그림 4는 11개 조사축점과 우량관측소에 대한 위치를 보여주고 있다.

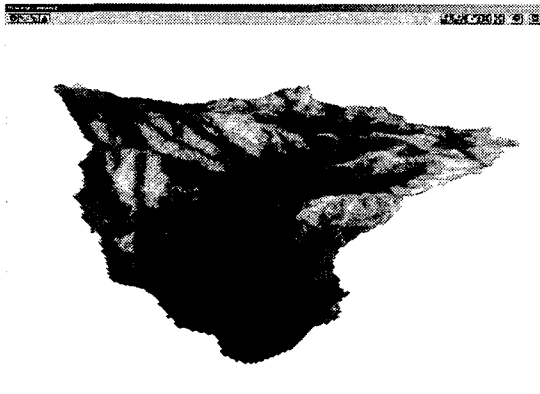


그림 3. 설마천 유역 3차원 지형형상



그림 4. 우량관측소와 토양조사 측정점의 위치

4. 모형의 적용

설마천 유역의 2001년 7월 29일 강우사상에 대해 본 모형을 적용하였다. 그림 5는 대상강우에 대한 우량주상도로 우량계번호와 지명은 관측소 1~5번까지 각각 전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 그리고 감악산 우량관측소에서 측정된 10분 간격 우량이다. 전체 직사각형 대상유역의 크기는 37×35로 총 1,295개의 격자로 구성되었고, 계산수행 유효격자의 수는 857개로 나타났다. 그림 6은 주어진 강우사상에 대해서 본 연구모형을 적용하여 확정론적 모의수행한 결과로 격자 간격은 100m이다.

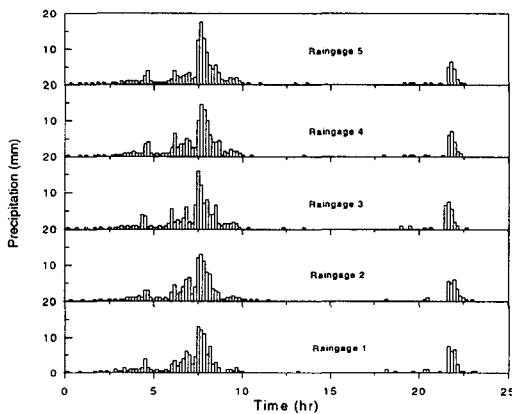


그림 5. 우량주상도(2001년 7월 29일)

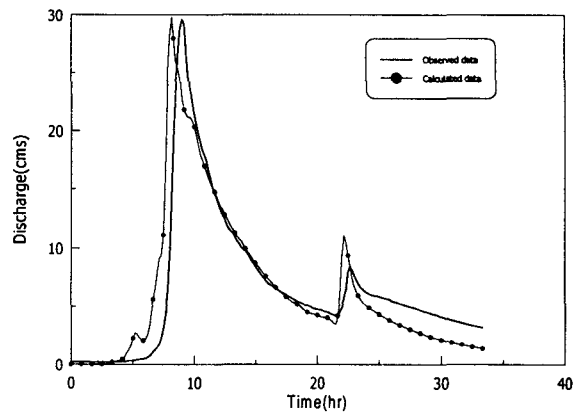


그림 6. 모의수행결과(100m)

흐름 방향에 따른 모의수행 결과를 비교하기 위해 1999년 7월 11일 강우사상에 대해 모의수행 하였다. 우선 격자간격은 30m로 4방향 흐름을 적용하였고, 전체 직사각형 대상영역은 122×130로 총 15,860개의 격자로 구성되나 직접적인 계산수행 유효격자의 개수는 9,473개로 나타났다. 그림 7은 대상강우에 대한 우량주상도와 4방향 흐름을 적용한 모의수행결과를 보여주고 있다.

그림 8은 각 흐름방향에 대한 결과를 비교한 것으로, 동일한 계수값들을 사용하였음에도 흐름방향을 1방향, 4방향, 8방향으로 증가시킬수록 유출경로가 분산되어 상이한 결과를 나타내었다.

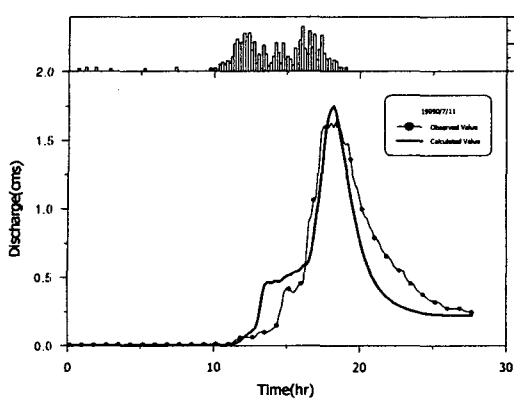


그림 7. 모의수행 결과 (30m)

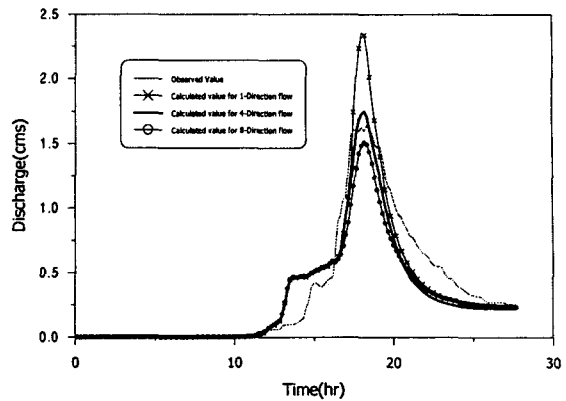


그림 8. 흐름방향별 유출해석 결과의 비교

5. 결론

본 연구에서는 확산과 방정식을 이용한 2차원 유한차분모형을 개발하여 유역내의 지표류 및 조 기지표하 유출에 대한 2차원 흐름추적과 하도에 대한 1차원 흐름추적이 가능한 유역 강우-유출 모형을 개발하였다. 실제유역에 대한 적용성을 검토하기 위하여 유역면적이 8km²인 설마천 유역에 대하여 적용하였고, 모의결과와 실제 유출수문곡선을 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 1방향, 4방향, 8방향으로의 흐름방향을 적용하여 흐름방향별 결과의 차이를 제시하였다. 본 모형의 입력자료와 출력자료는 GIS 소프트웨어인 Arc/Info와 ArcView상에서 구축, 도시할 수 있도록 구성하여 수치자료의 활용성을 제고하였고, 모의결과에 대한 직접적인 도시가 가능하도록 구성하였다. 특히, 기존의 모형들과는 달리 유역의 고도, 토양, 하도망 등에 관련된 입력자료를 유역의 물리적인 형상을 고려하여 GIS를 통해 직접 입력자료로 활용할 수 있도록 구성하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부 수자원의 지속적 확보기술개발사업의 시·공간자료 활용기술개발 과제(1-2-1)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

6. 참고문헌

- 한국건설기술연구원 (1995~2001). **시험유역의 운영 및 조사·연구**
- ESRI (1998). *Programming with Avenue*. ESRI
- Ogden, F.L., Sharif, H.O., Senarath, S., Smith, J.A., Baech, M.L., and Richardson, J.R. (2000). "Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997." *Journal of Hydrology*, Vol. 228, pp. 82-100.
- Philip, J.R. (1957) "The Theory of Infiltration:1. The Infiltration Equation and Its Solution." *Soil Science*, Vol. 83, pp. 345-357.
- Saghafian, B. and Julien, P.Y. (1995). "Time to equilibrium for spatially variable watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 172, pp. 231-245.