

하천유역의 GIS해석 기법



한건연 | 경북대학교 토목공학과 교수



최현상 | 한국건설기술연구원 GIS/LBS 연구센터 선임연구원

1. 서언

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 국내의 지형정보들이 지속적으로 확충되고 있으나 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 제시하였다. 이를 위해 우선 강우의 시간적, 공간적 변화를 모의할 수

있는 기법을 도입하고, 공간적으로 상이하게 나타나는 토양특성에 대한 침투과정을 모의하고 초과 강우량을 산정하기 위해 Green-Ampt 공식을 도입하였다. 초과강우량의 지표류 유출을 모의하기 위해 지표면 유출에 대한 2차원 방정식을 도입하여 해석하고, 하도에 대한 1차원 방정식을 도입하였다. 지표류 유출모의에 있어서 흐름방향의 다양성을 고려하기 위하여 1방향, 4방향, 8방향 흐름에 대한 흐름추적이 가능하도록 구성하여 흐름방향에 따른 차이에 대해서도 비교·검토하였다. 또한, GIS와의 연계를 통해 모의수행에 필요한 수치자료의 처리 및 결과의 출력을 위해 ArcView와 연계하였다.

대상 모형을 8km²의 유역면적을 가지는 설마천 유역에 적용하였고, 모의된 결과는 관측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 모형은 향후 실시간 강우-유출해석 및 예보에 적극 사용될 수 있으며 유역단위 홍수조절에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단되었다.

2. GIS 적용 이론

본 모형에서는 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 사용하였다. 확산과 방법은 작은 경사와 큰 조도를 나타내는 지역에 대해서 적용할 수 있다는 것과 저류된 물을 표현할 수 있다는 이유로 사용되었다. 이는 산지 유역을 포함한 유역전체의 지형 형상에서 나타나는 부분적 지면 저하로 인한 일시적 배수 현상을 확산과 근사가 해결할 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다. 연속방정식과 운동량방정식은 유역내의 각 격자에 대해 동시에 적용된다. 강우강도와 토양특성, 유역특성 등은 각 격자내에서는 동일한 상수로 가정하였으나 격자와 격자간에는 변화할 수 있다. 모의수행 과정에서 각 격자별 유출량은 격자의 크기에 대하여 산정된다.

가. 강우 및 침투해석

(1) 강우해석

강우 조건 및 해석을 위해서 여러 지점의 우량관측 자료나 유역평균 강우량을 적용할 수 있도록 개발하였다. 매 시간간격마다 유역내의 모든 격자요소들에 대한 강우강도가 평가되며, 만약 다수의 강우관측소 자료가 사용될 경우, 역거리자승법으로 공간적 변동성을 근사화 한다. 그러나, 관측소의 개수가 한정되어 있는 경우나 유역 내에 가용한 관측소가 없는 경우에는 우량 보간에 있어 과소추정되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 유역 평균강우량이나 티센망에 의한 평균 강우량 산정도 가능하도록 개발하였다.

(2) 침투해석

Green-Ampt 모형은 Darcy법칙을 이용한 근사모

형으로 최초의 모형은 일정한 초기 함수량을 가진 깊은 균질토에 대한 저류침투를 위해 개발되었다. 토양에 침투된 물은 습윤과 비습윤 영역을 구분하는 습윤전선에 도달한다고 가정한다. 표면에서의 담수를 무시하면 Green-Ampt 식은 식 (1)과 같이 기술된다.

$$f = K \left[1 + \frac{(\Phi - \theta_i)S_f}{F} \right] \tag{1}$$

여기서 K = 유효투수계수, S_f = 습윤전선에서의 모관 흡인수두, Φ = 토양공극율, θ_i = 초기함수량, F = 누가침투량, f = 침투율을 나타낸다.

침투량을 산정하기 위한 방법에는 이외에도 SCS 방법이나 Horton의 침투능 곡선식, Philip 모형 등 여러 방법들이 있으나 본 연구에서는 토양의 물리적인 현상을 상세히 묘사하고 있는 Green-Ampt 모형을 적용하였다.

침투량은 매 계산시간마다 지표면 유출을 추적하기 이전에 계산되어지게 된다. 즉, 계산시간 간격동안 격자내에 내린 강우량과 계산되어진 침투량을 비교하여 강우량이 침투량을 초과할 때 지표면 유출이 시작된다. 일반적으로 지표류 유출량 산정 모형에서 침투량이 순수한 손실량으로 취급되어지나 지표류 유출량 산정과 더불어 강우-유출 과정의 전반을 모의하기 위해 본 모형에서는 침투량 중 일부를 다시 지표하 유출로 고려함으로써 강우-유출에 관한 수문학적 접근방법을 완성하는데 사용되었다.

나. 지표면 및 지표하 유출해석

(1) 지표면 유출해석

지표면 유하흐름을 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 2차원 Saint-Venant의 연속방정식과 운동량방정식이 사용되어졌다. 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_b 를 결정하여 이 가운데 가장 경사가 급한 하나의 격자로만 흐름이 계산되는 1방향 계산방법과 두 번째로 지표류의 흐름이 직교방향으로만 이루어진다는 가정하에서 하나의 격자를 중심으로 4방향으로 계산하는 방법, 세 번째로 대각선 방향으로의 흐름도 가능하다고 가정한 8방향 흐름 계산 방법으로 나누어 적용하였다.

그림 1은 하나의 격자에 대한 계산 순서를 보여준다. 8방향 모의의 경우, 실제 진행과정에서는 하나의 격자에 대해 일차적으로 직교방향 격자에 대해 계산을 수행한 후, 대각선 방향의 격자에 대해 계산을 수행한다. 대각선 방향으로 계산을 수행할 때에는 S_b 와 S_f 를 계산할 때 격자의 폭 W 대신, $\sqrt{2} \times W$ 를 사용한다.

(2) 지표하 유출해석

대부분의 수문학적 모형은 지표류만을 유출로써

고려하였고 지표류를 계산하기 위해 많은 방법들을 제시하였다. 그러나 지표류 개념은 산림이 우거진 산악 유역에서는 적용이 쉽지 않다.

Loukas와 Quick(1991)은 캐나다의 British Columbia지역의 산림이 우거진 산악 유역에서 우세한 표면 흐름은 지표류가 아니라 표토층을 통한 조기 지표하 흐름이라고 밝힌 바 있다. 또한, 강우의 대부분이 표토층으로 빠르게 침투하여 관수로 흐름과 같이 아래쪽으로 흐르므로 산림이 우거진 산악 유역에서는 지표류와 더불어 지표하 유출도 고려되어야만 한다고 연구한 바 있다.

유역에서 강우 사상의 결과로 발생한 물은 토양 형태에 따라 지표류 혹은 지표하 흐름을 발생하게 될 것이고, 만약 유역의 토양이 높은 투수계수를 나타낸다면 대부분의 물은 지표하로 침투될 것이다. 물이 지표하로 들어가게 된다면, 물은 측면으로 이동하여 하도를 만나게 되어 하도 흐름으로 추적되고 결국은 유역 밖으로 빠져나가게 된다. 본 연구에서는 지표면 흐름해석 뿐만 아니라 지표하 흐름추적에 대한 추적과정도 추가하였다.

지표하 흐름을 표현하기 위해 Saint-Venant 방

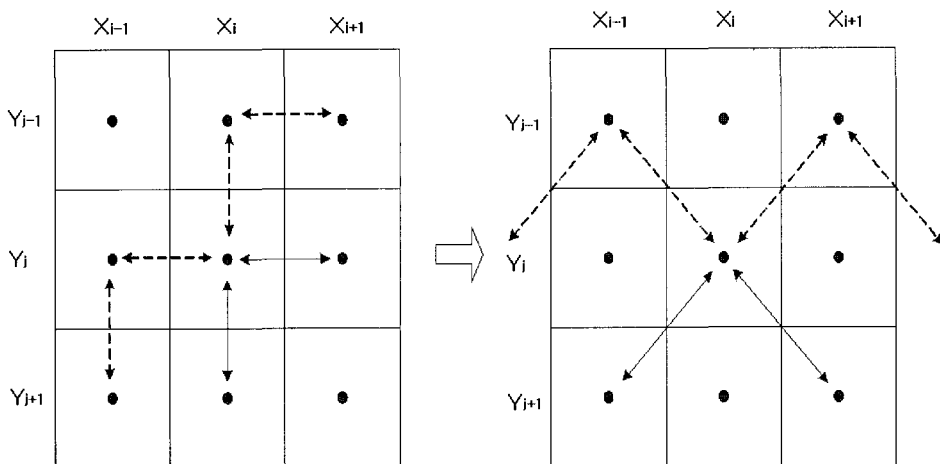


그림 1 흐름방향에 따른 지표류 계산절차

정식을 사용하였다. 편미분 형태의 2차원 연속 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\Phi}{\partial t} \frac{\partial h_{sub}}{\partial x} + \frac{\partial q_{(sub)}}{\partial x} + \frac{\partial q_{(sub)}}{\partial y} = f \quad (2)$$

여기서 h_{sub} 는 지표하 흐름 수심, $q_{(sub)}$ 는 x방향 지표하 단위폭당 유량, $q_{(sub)}$ 는 y방향 지표하 단위폭당 유량, f 는 투수율, Φ 는공극율, t 는 시간을 나타낸다.

지표하 흐름에 대한 저항 법칙은 속도와 유량을 깊이에 연관시키고 깊이-유량 관계로 공식화 된다. 포화 다공성 토양을 통과하는 흐름은 Darcy 법칙으로 수식화할 수 있다.

$$q_{(sub)} = -Kh_{(sub)} \frac{\partial h_{sub}}{\partial i} = -Kh_{(sub)} S_{(sub)}(i = x, y) \quad (3)$$

여기서, K 는 투수 계수, $\frac{\partial h_{sub}}{\partial i}$ 는 지표하 흐름에 대한 마찰경사는, $S_{(sub)}(i = x, y)$, $h_{(sub)}$ 는 지표하 수심을 나타낸다. 지표하 유출을 모의하기 위해 2차원 양해법을 사용하였다.

질량 보존의 법칙에 의해 임의의 시간간격동안 하나의 요소에 들어간 총 질량은 같은 시간 단계에서

같은 요소 내의 질량 변화에 비례한다. 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 단위 폭당 유출량은 마찰 경사 S_i 의 부호에 의한 흐름 방향에 기초하여 계산된다.

그림 2는 지표하 유출량이 하도 유출량에 기여하게 되는 과정에 대한 개념도이다.

(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 식 (4)와 같은 연속방정식이 적용된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \quad (4)$$

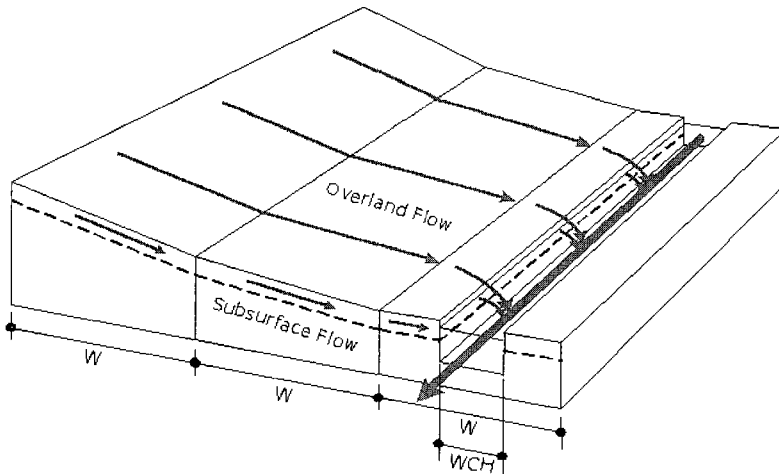


그림 2. 지표하 흐름추적에 대한 개념도

여기서 A = 흐름의 단면적, Q = 유량, q_i = 단위길이 당 측방유출입량을 나타낸다.

하도내의 난류 흐름조건을 가정하여, Manning의 경험식을 적용할 수 있는데, 하도의 유량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

운동량 방정식의 확산과 근사해에 기초하여 지표

면 격자에 대한 마찰경사를 결정하는데 사용된 식은 하도망 내에서 하상표고로 계산된 하상경사와 함께 하도 격자에 대해 그대로 사용되어진다. 하도추적은 유역에서 최상류단에서부터 시작하여 유역의 출구쪽으로 진행되며, 모의결과로 제시될 수문 곡선은 사용자가 지정한 하도상의 관심지점에 대해 작성되어진다. 그림 3은 모형에서 적용되는 하도형상과 하도 추적에 대한 개념도이고, 다음의 그림 4는 모의수행과정을 개괄적으로 보여주고 있다.

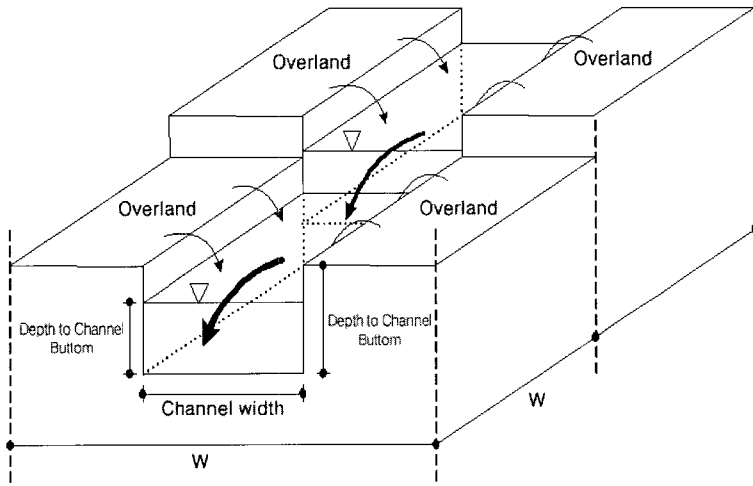


그림 3. 하도추적에 대한 개념도

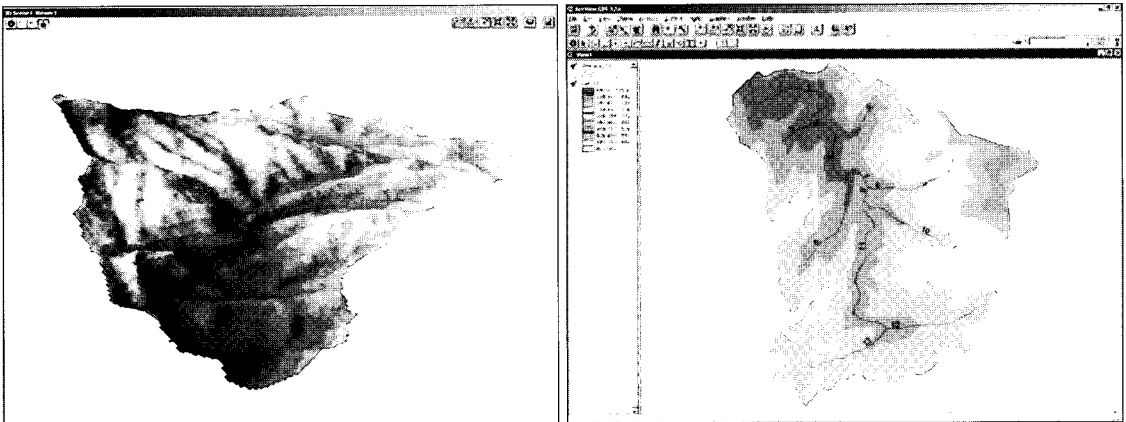


그림 4. 설마천 유역 지형형상과 하도망

3. 적용 예

소규모 실제 유역에 대한 적용을 위하여 임진강 상류의 설마천 유역을 선정하였다. 설마천 유역은 1995년부터 한국건설기술원에 의해 운영되는 시험유역으로서 임진강 상류 46km에 위치한 전형적인 산지유역으로서, 전체 유역면적 18.5km², 유로연장 11.3km인데, 이 중에서 영국군 전적비를 출구점으로 하는 소유역을 연구대상유역으로 선정하였다. 연구대상유역은 면적 8.5km², 유로연장 5.8km로 절리와 엮리가 잘 발달하고 경사가 급하여 강우시 사면유출모의에 적합한 지형으로 판단된다. 우량관측소 5개, 수위관측소 2개가 설치되어 있으며, 10분 단위로 실시간 관측이 이루어지고 있다(한국건설기술연구원, 1998).

설마천 유역에 대한 지형자료의 구축은 1/25,000 지형도를 사용하여 고도자료를 구축하였고, 강우자료는 2001년 7월 29일부터 2001년 8월 1일까지의 강우사상을 사용하였다. 그림 4는 설마천 소유역에 대한 3차원 지형형상과 하도망을 나타내고 있다. 설마천 시험유역에는 우량관측소 5개소, 수위관측소 2개소가 설치되어 있으며, 관측 시간단위는 10분으로 운

영되고 있다(한국건설기술연구원, 2000).

설마천의 유역 면적은 18.5km², 유로연장은 11.25km로서 임진강 유역의 약 0.23%를 차지하고 있고, 수계형상은 대체로 수지상의 모양으로 이루어져 있다. 이 가운데 전적비교를 유출구로 하는 8.5km²를 대상유역으로 선정하였다(한국건설기술연구원, 1995).

설마천 시험유역에 대한 1/25,000 정밀 토양도를 확인한 결과 하천 주위를 따라 약간의 부분에 대해서만 조사되어 있을 뿐 전체적인 토양구분은 나와 있지 않았다. 그러나, 1995년 설마천 시험유역보고서에 따르면 총 11개 측정점에 대한 자세한 토양조사가 이루어진 결과가 제시되어 있다(한국건설기술연구원, 1995). 침투와 관련한 계수는 11개 측정점을 기준으로 티센망을 구성하여 그 영역내에는 같은 토양으로 구성되어 있다는 가정을 통해 산정하였다. 투수계수, 모관흡인수두, 토양미흡량 매개변수 등의 계수값은 Rawls 등(1983)의 연구에 의해 제시된 값을 사용하였다.

그림 5는 2001년 7월 29일 호우사상 강우사상에 대해서 본 연구모형을 적용한 격자 간격 100에서의 확정론적 모의수행 결과이다. 전체 직사각형 대상유역의 크기는 37×35로 총 1,295개의 격자로 구성되

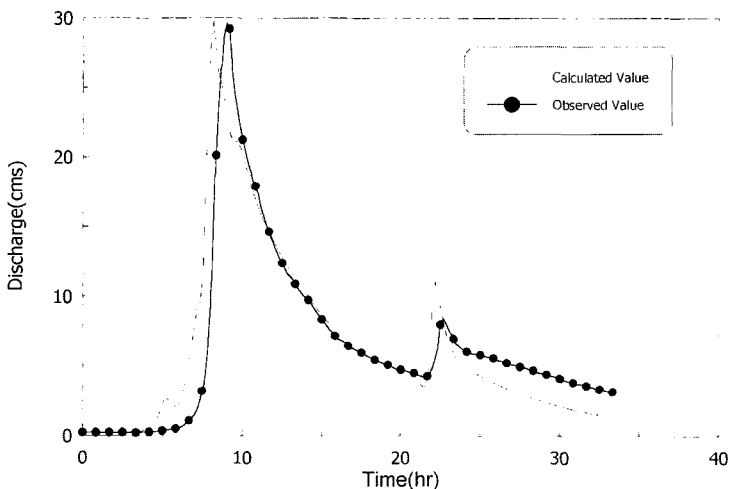


그림 5. 모형의 보정결과

었고, 계산수행 유효격자 수는 857개로 나타났고, 계산 시간간격은 2초, 총 모의시간은 2,000분(33.3시간)을 적용하였다. 그림 6은 1999년 7월 11일 호우사상(Case II)에 대한 유역평균 우량주상도와 격자간격 30로 모의수행한 결과로 4방향 흐름해석에 의한 결과이다. 전체 직사각형 대상영역은 122×130로 총 15,860개의 격자로 구성되어졌으나 유역경계

바깥쪽에 있는 격자를 제외한 직접적인 계산수행 유효격자의 개수는 9,473개로 나타났고 계산 시간간격은 2초, 총 모의시간은 1,667분(27.8시간)을 적용하였다.

다음으로 1방향, 4방향, 8방향 흐름에 대한 적용결과를 비교·검토하였다. 그림 7은 Case II의 호우사상에 대한 각 흐름방향별 모의에 대한 결과를 비교한

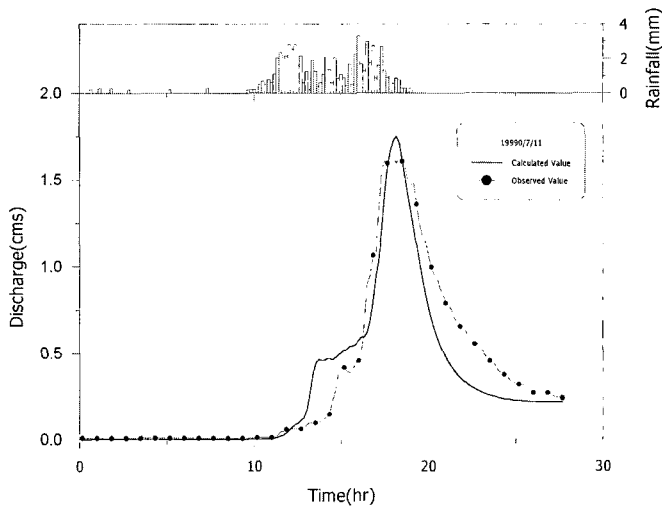


그림 6. 모형의 검증결과

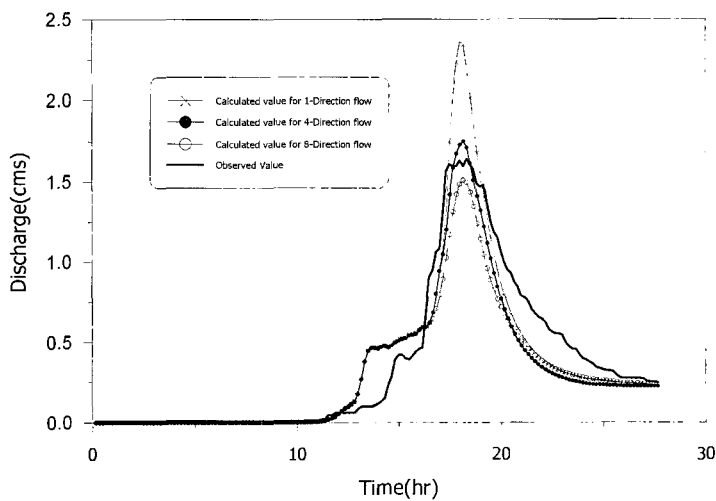


그림 7. 흐름방향별 유출해석 결과의 비교

것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 계수값들을 사용하였음에도 흐름방향별 결과가 상이하게 나타나는 이유는 격자로부터의 흐름방향을 1, 4, 8방향으로 증가시킬수록 유출량이 분산되어 전체적인 유출경로가 길어지기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 차이는 격자 크기가 작아질수록 현저하게 나타난다.

4. 결론

하천유역에서의 GIS 기법에 의해서 유역내의 지표류 및 지표하 유출에 대한 2차원 흐름추적과 하도에 대한 1차원 흐름추적이 가능한 분포형 강우-유출 모형을 개발하였다. 특히 지표류 및 지표하 흐름의 모의에 있어서 1, 4, 8방향 흐름추적이 가능하도록 구현하여 각 흐름방향별 비교가 가능하게 하였다. 본 연구를 통해 유역 강우-유출과정의 물리적 거동에

기초한 모형을 개발하므로써 기존의 연구에 비해 정교한 모의를 실시할 수 있었다. 본 모형의 입력자료와 출력자료는 Arc/Info와 ArcView상에서 구축, 도시되었다. 이러한 방법을 통해 향후 인공위성자료나 국가수치지형도 사업의 성과로 확충될 수치자료의 활용성을 제고하였고, 모의결과에 대한 직접적인 도시가 가능하도록 구성하였다. 특히, 기존 모형들과 차별화하여 유역의 표고, 토양, 하도망 등과 관련된 입력자료를 구성함에 있어 유역의 공간적 변동성을 고려하기 위해 GIS를 통한 입력자료 구축 및 활용이 가능하도록 구성하여 ArcView 상에서 강우-유출모형의 모의수행이 가능하도록 구현하였다.

분포형 모형은 실시간 강우-유출해석 및 예보에 사용될 수 있으며, 유역단위 홍수조절에도 기여할 수 있을 것으로 사료되며, 향후 비점원 오염물의 이송·확산이나 산지유역 유사량 산정에 관한 연구 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원 (1995~2001). 시험유역의 운영 및 조사·연구
2. Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). "An introduction to the European hydrological system - Système Hydrologique Européen(SHE), 2 : Structure of a physically based, distributed modeling system." *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 45-59.
3. ESRI (1994). *Advanced Arc/Info*. ESRI
4. ESRI (1998). *Advanced ArcView GIS*. ESRI
5. ESRI (1998). *Programming with Avenue*. ESRI
6. ESRI (1998). *Working with the ArcView Spatial Analyst*. ESRI
7. Loukas, A. and Quick, M.C. (1993). "Hydrologic behaviour of a mountainous watershed." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, pp. 1-8.
8. Maidment, D.R. (1993). "GIS and hydrologic modeling." *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*, Edited by Goodchild, M.F., Parks, B.O, and Steyaert, L.T., Oxford University Press, Oxford, pp. 147-167.
9. Mein, R.G. and Larson, C.L. (1973). "Modeling Infiltration During a Steady Rain." *Water Resources Reserch*, Vol. 9, pp. 384-394.
10. Rawls, W.J. (1983). "Estimating Soil Bulk Density from Particle Size Analysis and Organic Matter Content." *Soil Science*, Vol. 135, No. 2, pp. 123-125.
11. Saghafian, B. and Julien, P.Y. (1995). "Time to equilibrium for spatially variable watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 172, pp. 231-245.