

분포형 강우-유출 모형에 의한 유출 해석 Runoff Analysis Using a Distributed Rainfall-Runoff Model

신 사 철*
Shin, Sha Chul

Abstract

The main goal of this study is a rainfall-runoff analysis using a topographically-based distributed model. It consists of two parts: one is a direct runoff submodel and the other is a baseflow submodel. The direct runoff submodel is a distributed model which routed through the drainage networks with a kinematic wave model. The baseflow submodel is considered as a lumped system. This model makes it possible to take the effect of areal and temporal distribution of storm into account.

요 지

본 연구의 목적은 분포형 강우-유출 모형에 의한 유출량을 해석하는 것이다. 본 모형은 두개의 부모형으로 구성되어 있다. 하나는 수계망(drainage network)을 통하여 운동파 모형(kinematic wave model)을 이용하여 분포적으로 추적되는 직접 유출 부모형이며, 다른 하나는 기저유출 부모형으로서 집중형으로 취급되어 유역 출구에서만 계산하도록 하였다. 본 연구에서 개발된 모형에 의하여 청미천 유역에 대한 유출량의 시간적, 공간적인 분포를 고려할 수 있었다.

1. 서 론

단기간의 호우에 의한 홍수 시에 있어서 임의 유역에서의 물순환기구의 정량적인 공간분포의 해석은 이수와 치수 및 방재공학적 측면에서 볼 때 대단히 중요한 문제이다. 최근, 유역의 개발, 토지이용 상태의 변화에 따른 물수지 구성요소의 특성 변

화 등의 추정은 중요한 과제이지만, 이들을 정확히 추정한다는 것은 대단히 어려운 문제이다.

유출현상의 해석에 있어서 입력인 강우량의 시간적, 공간적 분포와 변환계인 유역 사면의 수문 특성의 공간 분포는 대단히 중요한 인자이다. 유역 사면의 수문특성이 비교적 단기간에 있어서 크게 변화하는 등 공간적인 분포를 무시할 수 없을 경우에 있어서, 종래의 강우와 유역사면을 평균적으로

* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

취급하는 방법으로는 유출현상의 표현이 곤란하게 된다. 최근 인공위성 자료와 지리정보시스템(GIS)의 발달에 따라 입력인 강우량과 변환계에 있어서 각 수문요소가 분포정보로서 얻어지는 것이 가능하도록 되어 가고 있다. 여기서 분포형 강우-유출 모형의 필요성이 높아지고 있다.

물의 운동을 기술하는 방정식에 근거한 분포형 모형으로 SHE(System Hydrologique European)모형이 제안되어 물리모형으로 불리어지고 있다(Abbott 등, 1986a, b). 그러나 수학적 엄밀도가 증가함에 따라 필요로 하는 자료가 크게 증가되어 실 유역에의 적용에는 과제를 남겨놓고 있다.

본 연구에서는 표고자료를 이용하여 유사하도망을 작성하여, 운동파(kinematic) 이론에 근거한 분포형 수문정보에 대응하는 유출모형을 개발하고 그 적용성을 검토하고자 한다.

2. 대상유역과 대상기간

본 연구의 대상 유역은 그림 1과 같은 남한강의 지류인 청미천 유역으로서 저자가 지도에 의하여 얻은 유역면적은 $561.8km^2$ 이다. 또한, 1990년 9월 9일부터 12일까지의 4일간에 약 500mm 정도의 폭우로 인하여 인명피해와 농경지의 침수 등의 재산과 인명피해가 있었다. 이 호우기간에 있어서 본 유역에는 건설교통부 관할의 설성, 생극, 삼죽

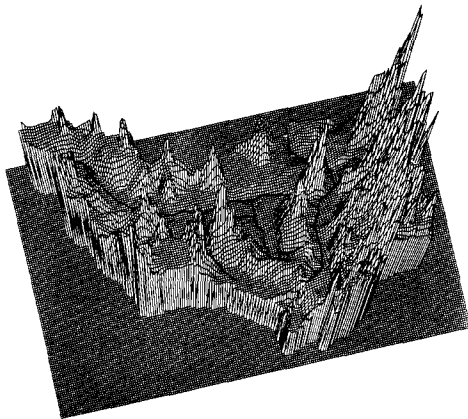


그림 1. 청미천 유역의 표고도

의 3개의 우량관측소와 유역부근의 부른, 오류, 양성, 용인관측소로부터의 시간강우량이 이용가능하며, 비교적 정확도 높게 관측이 이루어진다고 생각되는 청미수위관측소가 있다.

3. 수계망의 추출

3.1 유로망의 작성

청미천 유역에 있어서 9"간격(약 $220 \times 277m$)의 표고자료로부터 8,917개의 격자를 형성하여, 가장 급경사 방향의 유로망을 작성한다. 각 격자에 있어서 가상 유로의 방향은 경사가 가장 급한 방향으로 물이 전부 흐른다고 가정하여 그림 2와 같은 3×3 격자의 중심점의 물의 흐름방향을 주위 8점과 경사가 가장 급한 점을 지정하는 것이다. 그러나, 주위 8방향의 경사가 전부(-)인 점(이하 와지라 한다)들이 존재하게 되며, 이들에 대해서는 유로 방향의 결정이 불가능하게 된다. 또한, 평탄지에서 급경사가 0인 점들이 많이 존재하게 된다. 여기서, 조건을 급경사가 0인 점까지를 (+)경사로서 간주하여 탐색을 수행하게 되며, 이들의 점에 있어서 방향을 결정할 수 없는 점들이 많이 존재하게 된다. 이것은 두개의 격자에서 무한히 반복되는 점과 유역출구까지 도달하기 전에 그대로 폐곡선이 되는 점이 되기 때문이다. 이와 같이, 와지와 무한히 반복되는 점의 존재가 유로망의 작성에 어려움을 주게 된다.

이러한 와지에 대한 유로의 방향을 결정하기 위하여 몇 가지의 방법이 제안되고 있으나, 가장 간단한 방법으로서 와지의 표고를 주위 8점의 최소 표고값까지 상승시키는 것이다(Morris와 Heerdegen, 1988; Jenson과 Domingue, 1988). 그러나, 이 경우 와지주변에서 평탄지가 형성되어 새로운 와지가 생기는 결과를 초래한다. 따라서,

P ₄	P ₃	P ₂
P ₅	P ₀	P ₁
P ₆	P ₇	P ₈

그림 2. 3×3 격자망

본 연구에서는 주위 8점의 평균 표고를 부여하는 것으로 하였다. 이 경우에도 다른 점에서 와지가 발생될 수 있으므로 같은 방법을 반복 시행하여 와지의 처리를 수행하였다. 그러나, 이 처리에 의하여 어느 정도의 와지는 감소되지만, 여전히 남아있는 와지가 존재한다. 여기서, 이와 같이 방향이 결정되어지지 않는 점의 대부분은 표고가 상대적으로 낮은 하도에 집중되어 있으므로 실제 하도망을 작성하여 다음과 같은 처리를 수행하도록 하였다.

우선, 1/25,000 지형도를 참고로 하여 개략적인 실제 하도망을 작성한다. 이것은 반드시 복잡한 하도망일 필요는 없으며, 방향이 결정되어지지 않는 점이 많이 존재하는 본류만의 하도망이라도 그다지 문제는 되지 않는다. 다음은 방향이 결정되지 않은 점에 있어서 생각할 수 있는 경로에 대하여 가장 짧은 거리로 하도에 도달할 수 있는 방향을 부여한다. 이때, 평탄지에서 무한 반복되는 점이 되지 않도록 하기 위하여 유로망에서 1회 통과한 점은 하도에 도달하기 전에는 반복하여 탐색을 하지 않도록 한다. 단, 이와 같은 처리에 의해서도 방향이 결정되지 않는 점에 대해서는 표고자료와 지형도를 참고로 하여 수동으로 입력하도록 하였다. 이상의 처리로써 모든 점의 유하방향을 결정할 수 있으며, 모든 점이 유역출구까지 도달하는가, 또한, 교차하는 점은 없는가를 검토함으로써 그림 3과 같은 완전한 유로망을 작성할 수 있다.

3.2 수계망의 작성

어느 격자점의 집수면적은 그 점을 흐르는 격자수에 의해 결정될 수 있다. 당연히 흘러오는 격자수에 각각의 격자면적을 곱하여 집수면적으로 환산될 수 있으나, 여기서 모든 격자의 크기가 일정하므로 단순히 흘러오는 격자 수만을 집수면적으로 정의한다. 집수면적은 모든 점으로부터 유역출구까지 추적을 수행하여, 급경사방향의 유로망격자 통과 횟수를 계산하면 각 점의 집수면적의 계산이 가능하다. 얻어진 유로망의 방향 자료와 집수면적의 자료를 이용하여 어느 집수면적 이상의 격자 점으로부터 형성되는 수계망을 작성한다.

집수면적의 어느 한계치(threshold)를 여러 값으로 변화시킴으로써 다양한 수계망이 얻어진다. 당연히, 한계치를 작게 하면 수계망은 복잡하게 된다. 본 연구에서는 지형도와 비교하여 한계치를 50으로 정하여 그림 4와 같은 수계망을 작성하였다.

또한, 격자 점을 연결하는 가상 유로 경사의 계산은 유로망의 방향 자료와 표고자료를 이용하여 계산이 가능하다. 경사가 (-)인 점에 대해서는 평균경사가 (+)가 될 때까지 하류 추적을 실시하고 그 평균경사를 그 점의 경사로 하기로 하였다.

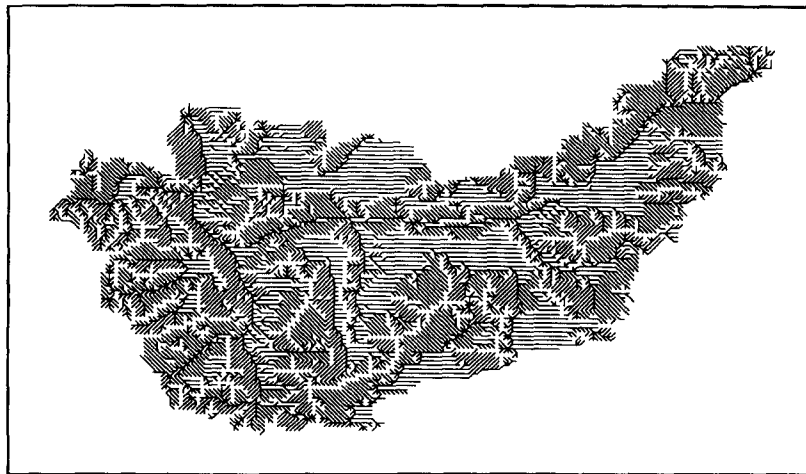


그림 3. 청미천 유역의 유로망

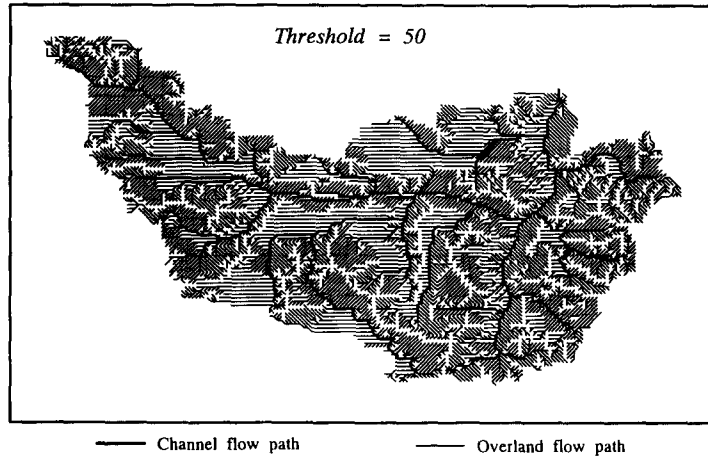


그림 4. 청미천 유역의 수계망

4. 유출량의 계산

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

4.1 직접유출량의 계산

직접유출량의 계산은 사면상의 흐름과 같이 하류 조건에 구속되지 않는 운동파 모형(kinematic wave model)과 하류조건을 고려하는 동력학과 모형(dynamic wave model)으로 분류된다. 폭이 넓고 수심이 상대적으로 얇은 자연하천에서의 홍수파의 이동현상이나 댐파괴에 의한 하류에의 홍수전파 등의 계산을 위해서는 동력학과 이론을 적용하게 된다. 그러나, 흐름의 Froude 수 $F \geq 2$ 가 되면, 운동파가 동력학과보다 지배적이 되며, 평균 유속이 중력파의 전파속도보다 크게 되어 중력파가 상류방향으로 전파되지 않는 경우에는 운동파로 간주할 수 있다. 따라서, 지표류의 흐름이나 소하천 유역의 하도 흐름의 경우, 실질적인 면에서 운동파 이론에 의하여 충분한 정확도의 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 각 격자에 있어서 직접유출성분을 既 작성된 수계망을 통하여 광폭구형단면으로 가정하여 운동파 이론에 의하여 유역 출구까지 추적 계산한다. 저항에 대하여 Manning 공식을 이용하면, 가상유로에서의 전파에 대하여 다음 식이 성립한다.

$$Q = \frac{1}{N} W h^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 A 는 하도의 유수단면적(m^2), Q 는 유량(m^3/s), W 는 하도의 폭(m), h 는 수심(m), I 는 하상 경사, t 는 시간(sec), N 은 조도계수, x 는 거리(m)이다.

이식을 특성곡선법으로 풀면 다음의 두 식이 얻어진다.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{5}{3} \frac{Q^{0.4}}{W^{0.4}} \frac{I^{0.3}}{N^{0.6}} \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \quad (4)$$

결국, 식 (3)을 이용하여 격자 점간의 전달시간은 상류단의 유량을 이용하여 계산이 가능하며, 따라서 하류단에의 도달시간도 구할 수 있다.

그러나 후속유량이 대단히 큰 경우, 또는 경사가 작은 흐름에 있어서 다음의 격자에 도달하기 전에 선행하는 유량을 추월하는 경우가 발생할 수 있다. 즉, 특성곡선의 교차문제이다. 여기서, 특성곡선을

직선으로 가정하고 두 특성곡선의 교차점을 구하여, 두 특성곡선상의 유량을 합산한 후 하나의 특성곡선으로 계산하여 처리하도록 하였다(角屋, 1980).

4.2 기저유출량의 계산

지하수유출의 감수식으로서 다음 식이 이론적으로 유도된다(高木, 1966).

$$Q = Q_0 \exp(-at) \quad (5)$$

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + b\sqrt{Q_0 t})^2} \quad (6)$$

여기서 Q 는 지하수 유출량이고, Q_0 는 초기지하수 유출량, t 는 시간, a, b 는 상수이다.

식 (5)는 피압지하수 대수층으로부터의 지하수유출의 감수식이며, 식 (6)은 비피압지하수 대수층으로부터의 지하수유출의 감수식이다.

한편, 지하수 저류량(S_g)과 유출량과의 대응관계, 즉 저류함수로서는 다음과 같은 식이 제시되고 있다.

$$Q = aS_g \quad (7)$$

$$Q = b^2 S_g^2 \quad (8)$$

高橋 등(1983)은 지수함수 감수식과 분수함수 감수식을 유출해석에 적용하여 비교한 결과, 산지 하천의 감수식으로서 지수함수 감수식보다 분수함수 감수식에 의한 결과가 적합성이 우수하다고 보고하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 식 (6)으로 표시되는 분수함수 감수식에 해당되는 식 (8)의 저류함수를 이용하기로 한다. 즉, 다음 식에 의해 기저유출량이 계산된다.

$$\frac{dS_g}{dt} = \alpha(1 - \alpha_d) \times P - Q \quad (9)$$

$$Q = b^2 S_g^2 \quad (10)$$

여기서 P 는 유역평균강수량이며, α_d 는 총유출율, α 는 직접유출율이다.

5. 실제 유역에의 적용

5.1 강우량 분포의 추정

유역내의 설성, 생극, 삼죽의 3개의 우량관측소와 주위의 부론, 용인, 양성, 오류관측자료로부터 각 격자의 강우량을 보간하여 구한다. 본 연구에서는 거리가중법을 이용하여 각 격자로부터 관측소까지의 거리에 따라 관측치를 가중 평균한 값을 그 격자에서의 강우량으로 한다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N W_i R_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (11)$$

$$W_i = \frac{1}{L_i^2} \quad (12)$$

여기서 r 은 격자 점에서의 강우량, N 은 대상관측소수, W_i 는 관측소 i 의 거리에 의한 가중계수, R_i 는 관측소 i 의 관측 강우량, L_i 는 산정할 점으로부터 관측소까지의 거리이다.

대상관측소수 N 과 가중계수 W_i 에 대해서는 몇 가지의 방법을 생각할 수 있으나, 福岡 등(1993)에 의하면, $N=4$ 로 하고, 식 (12)의 거리제곱의 역수를 가중계수로 할 경우, 등우선법과 가장 가까운 값을 얻을 수 있다고 보고하고 있다.

5.2 수문곡선의 분리

유출수문곡선은 직접유출과 기저유출의 각 성분으로부터 구성되어지는 것으로 볼 수 있으나, 이들의 구성비율에 대해서는 유출기구가 규명되지 않는 한 명확하게 분리할 수 있는 방법은 없다. 직접유출과 기저유출을 정확하게 분리하기 위해서는 유역의 정확한 범위, 지하대수층의 지질, 침투능, 통수능력 등 유역의 지질 수문학적특성을 파악할 필

요가 있으나, 이들의 특성을 해석적으로 규명할 수 있는 방법은 현재까지 정립되어 있지 않기 때문에, 이들의 특성을 가능한 한 고려할 수 있는 몇 가지의 간략법이 사용되어지고 있는 것이 현재의 실정이다. 그러나, 홍수 시에 있어서는 기저유출량에 비하여 직접유출량이 상당히 크게 되어, 수문곡선의 분리에서 생기는 오차는 유출해석에 있어서 그다지 크지 않다고 생각되며, 본 연구에서는 간단한 방법을 이용하여 분리하는 것으로 한다.

수문곡선분리의 하나의 방법인 지하수감수곡선을 이용하여 감수부의 유량에 대수를 취하여 나타내면 통상 3개의 직선으로 표시된다. 이때, 제1변곡점은 표면유출이 끝나는 점으로 생각할 수 있으며, 제2변곡점은 중간유출이 끝나는 점으로 기저유출이 시작되는 점에 대응한다. 이와 같은 방법으로 본 기간동안의 호우에 대하여 수문곡선을 분리한 결과, 총유출율 α_t 는 0.92, 직접유출율 α_d 는 0.82가 산출되어, 직접유출량이 상당히 큰 홍수임을 알 수 있다. 결국, 각 격자에 있어서 시간별 강우에 직접유출율을 곱하여 그 격자에 대한 직접 유출량을 구하게 된다.

5.3 계산 결과

작성된 수계망에서 집수면적의 한계치(threshold)가 50 이하의 유로는 실제의 현상에서는 존재하지 않는다. 즉, 이 사면류에 대한 유로폭 W 는 미지수이며, 유역면적의 함수로 계산하는 연구도 보고되고 있으나, 현재까지 정확한 근거는 없다. 따라서, 이 사면류에 대하여 물이 전사면에 걸쳐 하류로 전파된다고 가정하여 그림 5와 같이 하도폭을 계산하는 것으로 하였다(Jirayoot 등, 1992). 집수면적의 한계치 50이상의 하도에 대해서는 하도 폭을 30m로 일정한 값을 주었다.

또한, 식 (10)에 대한 분수감수상수 b 를 구하기 위하여, 식 (6)을 다음과 같이 변형한다.

$$\frac{1}{\sqrt{Q}} = \frac{1}{\sqrt{Q_0}} + b, \quad (13)$$

그림 6과 같이 횡축에 시간 t 를, 종축에 $1/\sqrt{Q}$

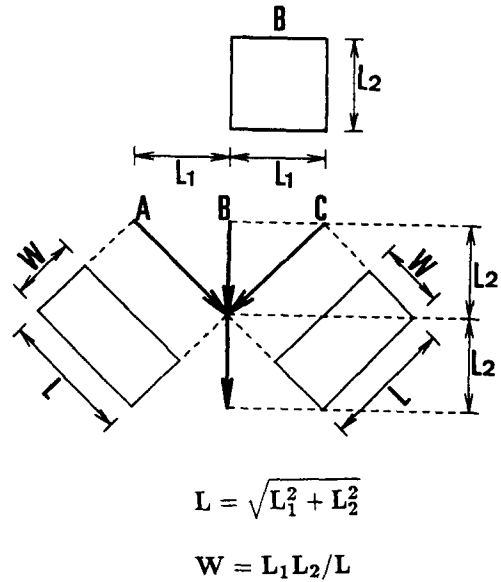


그림 5. 사면에 대한 하도폭의 계산

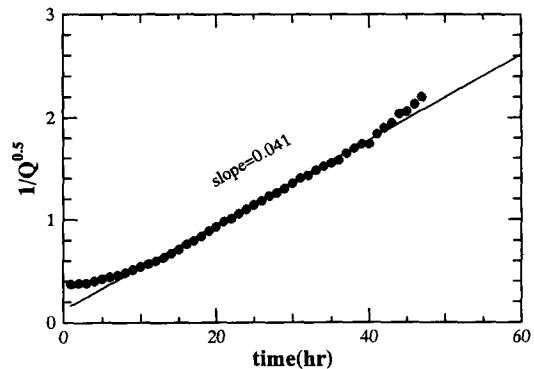


그림 6. 분수감수상수 b 의 계산

을 취하여 강우가 끝난 기간의 유량자료를 이용하여 직선으로 근사시키면, 그에 따른 경사가 분수감수상수 b 에 해당된다. 여기서, $b=0.041$ 을 얻었다.

직접유출성분에 대하여 $\Delta t=15$ 분으로 하여, 유사하도망을 통하여 추적계산을 수행하였다. 단, 15분간의 강우량은 관측되는 시간강우량을 4로 나누어 입력하였다. 등가조도를 변화시킬 경우, 등가조

도가 클수록 침투유량이 증가하게 되며, 그 출현시간도 빨라지게 된다. 이 경우, 총 유출량은 변화하지 않기 때문에 침투유량이 클수록 유출의 지속시간은 짧아진다. 따라서, 등가조도를 시행착오를 통하여 변화시켜 실측의 수문곡선에 가까워지도록 최적의 등가조도를 구한다. 여기서 오차의 평가기준으로서 다음 식을 고려한다.

$$E_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(Q_{oi} - Q_{ci})^2}{Q_{oi}^2} \quad (14)$$

$$E_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{(Q_{oj} - Q_{cj})^2}{Q_{oj}^2} \quad (15)$$

$$CRE = \frac{E_1 + E_2}{2} \quad (16)$$

여기서 CRE는 오차의 평가치, Q_o 는 관측유량, Q_c 는 계산유량이며, N은 총자료수이다. 또한, i 는 시간순, 즉, 1시간간격의 유량의 변호를 표시하며, j 는 관측유량, 계산유량을 각각 큰값에서 작은 값으로 배열했을 때의 변호를 나타낸다. 이때 침투유량이 여러번 반복되는 수문사상에 대해서는 평가오차 E_2 에 대한 세심한 고려를 하여야 한다.

유사하도망에서 집수면적의 한계치가 50이상인 하도에 대해서는 조도계수를 0.05로 고정하고, 사면의 등가조도의 범위로서 0.05~0.65로 정하여 유출계산을 실시하였다. 이들의 계산에 대한 오차의 평가치는 그림 7과 같으며, 등가조도가 0.34의 경우에 최적의 재현성이 얻어졌다. 이때의 유역 출구에 대한 유출량을 그림 8에 표시하였다.

유출계산 결과, 제1침투부에 대해서는 유량과 출현시간이 대단히 잘 일치하고 있다. 그러나, 제2침투부에서는 약간의 유량의 차가 생기고 있다. 이것은, 유출을 시간적으로 일정한 값으로 적용한 것과 실제의 유역에 있어서는 도로와 같은 포장지역이 포함되어 있음에도 불구하고 모형의 구성상 등가조도를 채택함으로써 생기는 오차에 기인한다고 생각할 수 있다. 실제로, 토양의 침투능력은 강우초기에는 크고, 후기에 일정하게 된다. 이 때문에 유출율은 강우초기에는 작으나, 후기가 되면 크

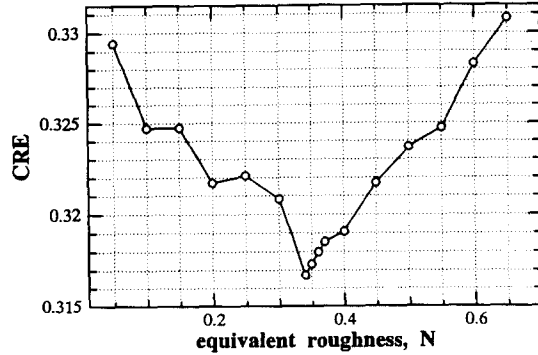
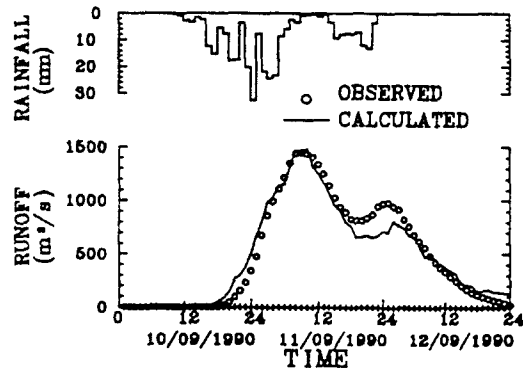
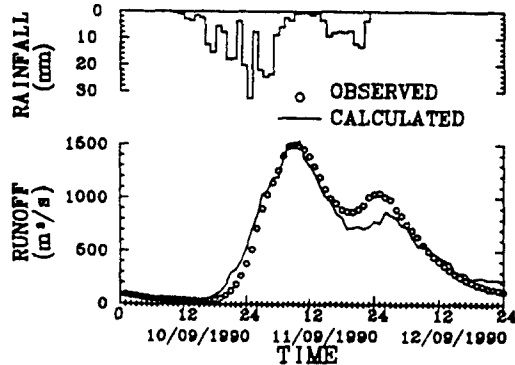


그림 7. 최적등가조도의 산출



(a) Direct runoff



(b) Total runoff

그림 8. 유역출구에서의 수문곡선

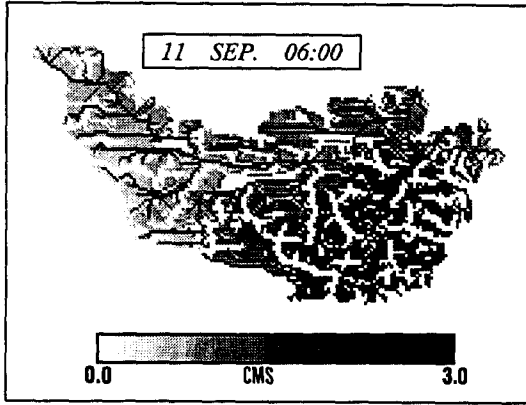


그림 9. 호우직후의 직접유출량의 분포

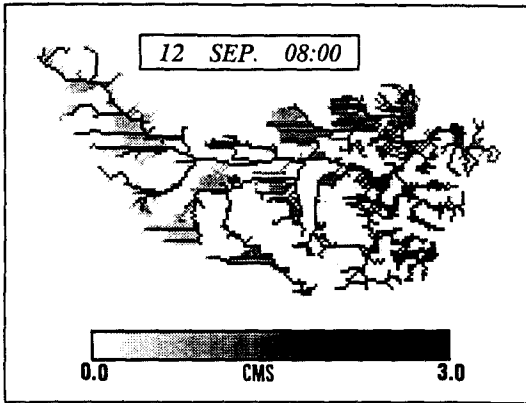


그림 10. 강우후기의 직접유출량의 분포

게 된다. 이와 같은 실태에도 불구하고 유출율의 시간적인 배분은 상당히 어려운 문제이며, 강우전후, 즉 유출계산의 전기간에 걸쳐 일정한 값으로 가정하고 있다.

지금까지의 보고에 의하면, 유역출구에서의 유량의 재현성만을 생각한다면, 기존의 집중형 모형의 경우가 보다 재현성이 우수한 것으로 보고되고 있다. 이것은 집중형모형의 경우 유역고유의 특성, 즉 유역의 지표면 피복상황 또는 토지이용의 상태, 지형 등을 고려하지 않고 유량의 재현성을 중시한

반면, 분포형 모형에서는 이들의 물리적 특성을 가능한 한 고려하기 위하여 유역 특성을 간략화함으로써 생기는 오차에 기인한다고 생각할 수 있다. 그러나, 분포형 모형을 이용함으로써 지형특성을 고려한 유출량의 공간적인 분포상황이 파악 가능한 장점이 있다.

본 연구의 시간 및 공간 규모를 생각해 볼 때, 본 유역에서의 유출량의 재현성은 대단히 양호하다고 생각할 수 있다. 호우직후의 9월 11일 6시와 호우가 완전히 종료한 후인 12일 8시의 직접유출량의 분포를 각각 그림 9와 10에 표시하였다. 강우에 대하여 유출량의 분포가 잘 대응하고 있으며, 임의의 격자에서의 유출량을 구할 수 있어, 호우직후 또는 호우중의 유출량의 분포가 용이하게 구해질 수 있다.

6. 결 론

청미천 유역을 대상으로 하도 특성을 고려한 홍수 유출 해석으로서, 직접 유출 성분에 대하여 유역을 격자로 분할하고, 수계망을 통하여 유역 출구까지 운동과이론에 의해 추적 계산하는 분포형 유출 모형에 대한 개발을 시도하였다. 또한, 기저유출성분에 대해서는 집중형인 저류함수이론에 의하여 유출고로 환산되어 두 유출성분의 합계가 유역 출구에서의 총 유출량이 된다. 그 결과, 양호한 재현성이 얻어졌으며, 직접유출성분의 분포정보가 얻어졌다.

최근, 유역의 개발과 도시화에 의한 토지이용상태의 변화에 따른 유출특성이 변화하고 있으며, 이에 따른 평가가 하나의 문제로 대두되어 지고 있다. 이 또한, 본 모형을 효과적으로 이용함으로써 정량적인 평가가 가능하리라 생각된다. 이를 위해서는 사전에 토지이용상태에 대한 정보를 파악 할 필요가 있으며, 각각의 토지 이용에 따른 등가조도를 산출할 필요가 있을 것이다.

본 연구에서는, 모형의 개발과 적합도의 검증을 위한 초기 단계로서 단일호우에 대한 결과에 대하여 논하고 있으나, 단일호우에 대한 유출계산 결과로부터 적용성의 여부를 논하기에는 부족함이 많으며, 보다 다양한 강우 사상 혹은 또 다른 유역에

대한 유출량의 재현성 및 유출율, 조도계수 등의 검증이 이루어져야 할 것이다. 따라서, 이에 수반되는 문제점에 대해서는 추후 보완 및 수정을 실시하여, 본 연구의 최종 성과로서 강우에 대하여 지형조건을 고려한 유출성분의 시간적, 공간적인 분포를 제공하고자 하는 것이다.

참 고 문 헌

- 角屋 睦 (1980). “流出解析手法(その6).” 日本 農業土木學會誌, 第48卷, pp. 419-425.
- 高木不折 (1966). “低水流出の低減特性に関する研究.” 日本 土木學會論文集, 第228卷, pp. 1-11.
- 高橋 裕, 安藤義久, 伊藤 孝, 伊藤和央 (1983). “山地河川の低水流出の減水特性に関する研究.” 日本 土木學會論文報告集, 第337卷, pp. 75-82.
- 福岡 捷二, 谷岡 康, 高本正彦 (1993). “都市中小河川流域における雨量觀測所の密度が面積雨量精度に與える影響.” 日本 土木學會水工學論文集, 第37卷, pp. 27-32.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986a). “An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique European, 'SHE', 1: history and philosophy of a physically-based distributed modelling system.” *J. Hydrol.*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986b). “An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique European, 'SHE', 2: structure of a physically-based distributed modelling system.” *J. Hydrol.*, Vol. 87, pp. 61-77.
- Jenson, S.K., and Domingue, J.O. (1988). “Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis.” *Photogram. Eng. Remote. Sens.*, Vol. 54, No. 11, pp. 1593-1600.
- Jirayoot, K., Sawamoto, M., and Kazama, S. (1992). “Quasi-physically-based distributed rainfall runoff model incorporating GIS data: model structure development.” *Proc. of the 36th Japan Conference on Hydraulics*, pp. 659-664.
- Morris, D.G., and Heerdegen, R.G. (1988). “Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological applications.” *Geomorphology*, Vol. 1, pp. 131-141.

〈접수: 1995년 6월 13일〉