

GIS를 이용한 공간분포형 수문단위도

- Spatially distributed unit hydrograph by using GIS -

김성준 (건국대학교 농공학과 조교수)

1. 서론

전문가의 입장에서 GIS의 출현을 수문분야에 접목시킨다는 것은 기존의 수문모형을 GIS와 연계시켜 본다거나, 보다 나은 GIS기반의 수문모형들을 개발하는 등으로 "GIS를 어떻게 하면 유용하게 쓸 수 있을까?"를 결정하는 것이다. 수문단위도는 지난 수십년간 강우-유출계산의 기본적인 방법으로 간주되어 왔다. 이 방법은 유역내의 흐름분포를 표현하지 않고 직접 강우를 유출로 변환시키기 때문에 집중형 모형이다. 따라서 GIS를 이용한다면 유역내의 공간적 흐름분포를 잘 반영할 수 있는 수문단위도를 구성하는 방법은 없는지에 대한 문제제기를 할만한 가치가 있다고 본다.

수문단위도의 수학적 표현은 수문에 있어 긴 역사를 가지고 있다. Clark(1945)은 유역의 시간-면적도형과 출구에서의 선형저수지를 결합시켜 수문단위도 모형을 구성하였다. Nash(1957)는 연속적인 선형저수지 모형을 제안하였고, Dooge(1959)는 선형수로와 선형저수지를 결합한 이론을 제안하였다. 부분면적흐름(partial area flow)은 Betson(1964)에 의하여 구명되었으며, 이 개념은 강우가 유역을 통과하면서 시간에 따라 팽창하고 수축하는(부분면적 시간-면적도형)유출기여지역 개념을 포함한다.

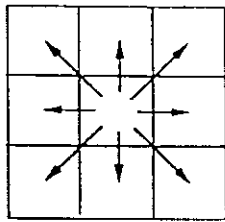
선형적인 요소들의 조합으로 구성시킨 다양한 수문단위도 모형들이 제안되었는데, 이 중에서도 특히 Rodriguez-Iturbe and Valdes(1979)는 지형학적 순간단위도를 제시하였다. 이 방법은 유달시간의 확률밀도함수로 수문단위도를 발생시키는 평균지체시

간으로 특성화시키므로서 전 유역에 대한 하천 연계의 지연효과를 통합시킬 수 있도록 하는 Horton의 하천법칙을 사용하였다. 이 방법은 전 유역에 걸쳐 유출이 Horton의 지표흐름으로 발생된다고 가정한다.

본 논문에서 제시하는 공간 분포형 수문단위도는 GIS를 이용하여 유역 흐름망에서 링크간의 연결성을 표현한 것을 제외하고는 지형학적 순간단위도의 개념과 유사하다(하천망 연계를 통하여 물의 흐름을 결합시키므로서 확률변수의 사용을 제거시킴). 또한 GIS 기반의 접근방법은 유역내의 등시간 지역으로 초과강우량의 공간적 양상을 파악할 수 있도록 해주기 때문에, 이는 전 유역에 걸쳐 균일한 초과강우량이 발생하는 단점을 보완할 수 있다.

2. 격자기반의 흐름패턴

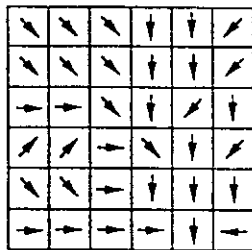
Arc/Info 격자시스템과 GRASS 시스템을 포함한 현재의 버전들은 흐름점 모형을 이용하여 지표면에서의 흐름방향을 결정하는 루틴을 포함하고 있다. 그림 1a. 에서 보는 바와 같이 중심격자 셀에서의 물은 8개 주위격자 중의 한 격자로 흐른다. 중심격자에서 주변 셀 각각에 대한 경사를 계산할 수 있는 표고격자(그림 1b)를 이용하면, 8개의 격자셀 중에서 경사가 가장 급한 방향을 나타내는 각 셀에 대한 흐름방향 격자를 생성할 수 있다. 이 격자는 그림 1c.와 같이 화살표로 표현할 수 있지만, 실제로 GIS에서는 각 흐름방향에 유일한 번호를 가지는 격자번호로 저장된다. 여기서 사용된 격자 예는 ESRI(1992)에서 인용하였다.



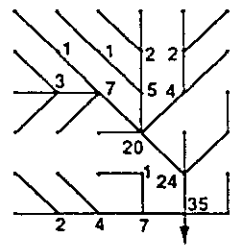
(a)

78	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

(b)



(c)



(d)

그림 1. 격자 GIS방법에 의한 유역지형분석: (a) 8방향 흐름모형; (b) 표고격자; (c) 흐름방향격자; (d) 흐름누적량

처음에 물의 흐름을 단지 8개의 가능한 방향 중의 하나로 할당하는 것은 실제로 물이 흐를 수 있는 방향들을 무시하는 불필요한 제약조건으로 생각할 수도 있지만, 그림 1d.에서 보는 바와 같이 셀의 중심들을 연결시키는 대등한 흐름망을 생성하기 때문에, 이 방법을 이용하면 단순화된 매우 중요한 흐름망을 얻어낼 수 있다. 따라서 격자와 동등 흐름망간에는 양면성이 있으며, 이 망을 “혼합격자망”이라 부르기도 한다. 강우, 침투와 같이 공간적으로 분포되는 2차원 과정은 격자를 이용하면 모델링이 가능하며, 이들로 부터의 유출은 1차원적 흐름망을 통하여 유역 출구까지 추적할 수 있다. Vieux & Westerfelt (1992)는 이상과 같은 방법으로 격자망에서의 흐름 추적을 수행하도록 GRASS 격자셀 시스템에서 운영되는 격자 대 격자 운동파모형을 구축하였다.

서로 다른 조건을 이용하여 구축할 수 있는 격자망들도 있다. 예를 들어 Sekulin et al.(1992)은 기존의 하천도를 격자구조로 바꾼 후, 모든 지표면 셀에

가장 가까운 하천 셀을 할당하므로서 유역경계를 추출하였다. 또한 여기서 제시된 공간 분포형 수문단위도 기법에 대해서는 지표면이 격자 셀들로 구분될 필요가 없다; 대신에 다각형 또는 불규칙 삼각망으로 구분되면 된다. 수문공간분석에서의 첫번째 단계는 전체 지형공간을 세부지역으로 분할하고, 이들이 1차원적 흐름망에 의하여 유역출구로 연결하는 것이다.

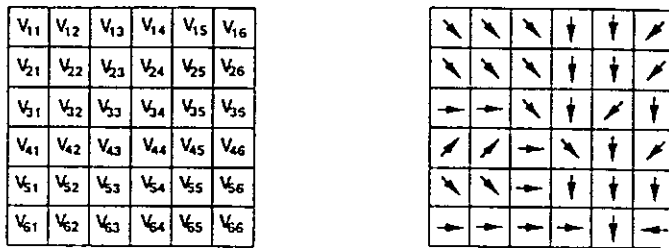
GIS 격자시스템에서 유역과 하천 추출은 동등망(그림 1d)에서 유출시 각 하류하천 격자를 통과하는 상류 셀들의 개수를 합산하는 흐름누적(flow accumulation)을 수행하면 된다; 유역분할은 이들을 통과하여 흐르는 셀이 없는 셀들의 선으로 형성되며, 하천은 상류 셀들의 한계치 이상으로 흐르는 셀들의 선으로 형성된다. 이와 같은 방법으로 Lozar (1992)는 지구표면의 5분 간격(~10km) 수치고도 모델을 이용하여 전 지구의 배수경로와 유역경계를 추출하였다.

3. 시간-면적 모형

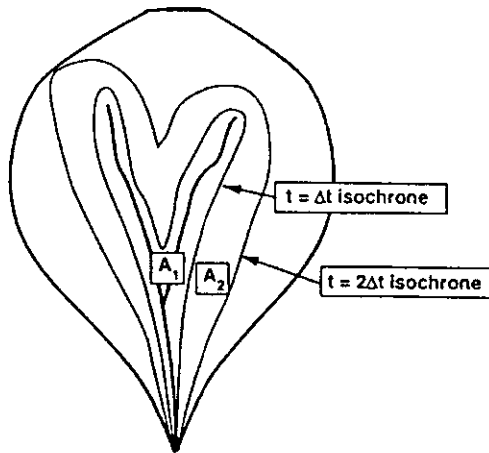
속도는 크기와 방향을 가진 벡터량이다. 그림 1c.와 같이 흐름방향 격자는 속도장의 반에 해당된다; 이는 방향만 가지고 있다. 속도크기를 가진 격자가 지표파복과 경사도에 의하여 생성되었다고 가정하자. Sircar et al.(1991)은 이를 $V = aS^b$ (여기서 S는 지표면경사, a와 b는 USDA의 SCS의 과정을 근거로 한 McCuen(1982)연구결과의 토지이용과 관련된 계수) 형태의 속도함수를 이용하면 가능하다는 것을 보여주었다. 이제 각 셀에 대하여 흐름방향과 속도를 알고(그림 2a) 각 셀로부터 유역출구까지의

흐름경로가 파악되었기 때문에, 각 셀의 값이 그 셀에서의 물이 유역출구로 흐르는 시간 값인 흐름유달시간 격자를 생성시킬 수 있다.

셀들은 이제 $i=1,2,\dots$ 의 영역으로 구분할 수 있다. 이 영역의 유달시간 t 는 시간간격 Δt 즉, 1 영역은 $0 \leq t < \Delta t$ 의 유달시간, 2 영역은 $\Delta t \leq t < 2\Delta t$ 의 유달시간 등으로 된다. 영역 i 에서 셀들의 바깥경계선은 유역출구로 $t=i\Delta t$ 유달시간에 대한 등시간선이다. 영역 i 에서 셀들의 총면적은 A_i 이다. 이러한 방법으로 유역의 등시간도가 생성된다(그림 2b). 출구로의 최대 흐름시간을 가지는 등시간선은 유역의 도달시간 t_c 이다.



(a)



(b)

그림 2. 유역에서의 시간-면적관계: (a) 유속의 크기와 방향을 나타내는 속도장; (b) 유역출구로의 흐름시간 격자로 구분한 유역 등시간선도

시간-면적 도형은 주어진 유달시간 내에 출구로 흐르는 누가배수면적을 나타내는 그래프이다. 이는 그림 3.과 같이 증가면적 A_k 를 합하면 된다. 따라서 $t=0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, i\Delta t, \dots$ 시각에 $A(i\Delta t)$ 출구로 배수되는 누가면적은 다음과 같다:

$$A(i\Delta t) = \sum_{k=1}^i A_k \quad (1)$$

또한 증가면적은 다음과 같다.

$$A_i = A(i\Delta t) - A[(i-1)\Delta t] \quad (2)$$

누가 시간-면적도형 (그림 3b)은 이들의 값이 식 (1)에 의하여 규칙적인 시각에 주어지는 연속 시간함수인 반면에, 증가 시간-면적 도형은 각 시간간격 Δt 에 대하여 하나의 값을 가지는 이산 시간함수라는 중요한 의미를 갖는다. 따라서 서로 다른 시간 ($\Delta t'$)으로 분리된 등시간선으로 흐름격자시간을 분류한다면, 증가 시간-면적 막대그래프는 그 모양이 변형될 것이지만, 누가 시간-면적도형은 단순히 서로 다른 시간간격으로 구성된 동일한 연속곡선이 될 것이다.

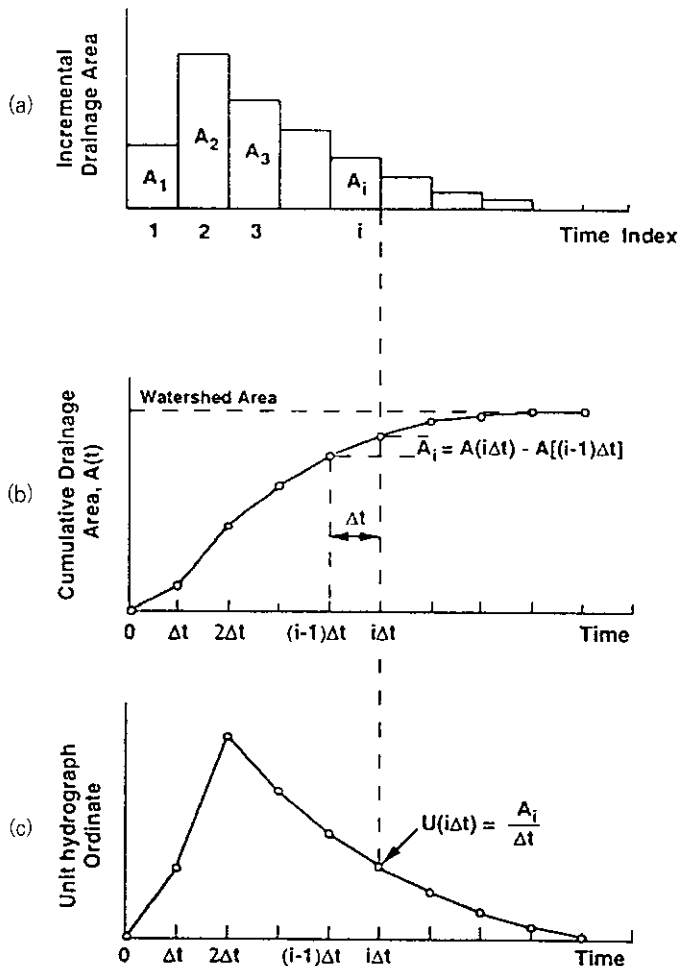


그림 3. 시간-면적도와 수문단위도: (a) 배수 증가면적; (b) 시간-면적 누가곡선; (c) 시간-면적도의 경사로 구한 수문단위도

4. 수문단위도의 유도

전 유역에 걸쳐서 초과강우가 I의 비율로 발생한 다면, 출구에서의 유출은 $Q(t) = I \cdot A(t)$ (IA의 평형 유출에 도달하는 S-수문곡선)로 주어진다. 강우강도 I와 지속기간 Δt 의 강우량에 대한 유출반응은 $Q(t) = I \cdot A(t) - IA(t - \Delta t)$ 인 수문단위도의 선형성 원칙으로 주어진다. 이는 S-수문곡선의 값과 이 값을 Δt 만큼 지연시킨 값의 차에 해당된다($A(t) = 0$ for $t < 0$). 이 강우사상에서의 초과강우량은 $P = I\Delta t$ mm 이므로, 단위강우량($P = 1\text{mm}$)에 대한 반응 $U(t)$ 는 $Q(t)/I\Delta t$ 에 의하여 주어진다:

$$U(t) = \frac{A(t) - A(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (3)$$

시간-면적 도형값은 $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, i\Delta t, \dots$ 의 시각에만 알기 때문에, 해당 시각에서의 수문곡선 종거는 다음과 같다:

$$U(i\Delta t) = \frac{A(i\Delta t) - A((i-1)\Delta t)\Delta t}{\Delta t} \quad (4)$$

또는 식(2)로부터,

$$U_i = U(i\Delta t) = \frac{A_i}{\Delta t} \quad (5)$$

식 (5)는 Δt 시간간격에서 유역출구로의 유달시간 등시간선을 정의하면 i 번째 시간이 끝나는 시각의 수문단위 종거는 증가면적 A_i (해당 시간간격동안 출구로 처음 도달하는 배수면적을 시간간격 Δt 로 나눈 값)와 같게 된다. 그림 3.에서 보는 바와 같이, 이는 $i\Delta t$ 시각에서의 수문단위 종거는 $[(i-1)\Delta t, i\Delta t]$ 기간에 대한 시간-면적도형의 기울기에 해당된다. Δt 가 0으로 접근하게 되면, 이 기울기는 순간 수문단위도가 시간-면적 도형의 기울기와 같아지기 때문에 t 시각에서의 시간-면적 도형의 기울기가 된다.

식 (4)와 (5)에서의 $U(t)$ 단위는 $[L^2T^{-1}]$ 이다. 이들은 단위 초과강우량당 단위유출량에 해당된다. 이 단위는 유출단위만으로 표기되더라도 수문단위도에

적용되어야 한다. 식 (1)과 (5)를 조합하면, 시간-면적 도형은 다음과 같이 수문단위도로 계산될 수 있다:

$$A(i\Delta t) = \sum_{k=1}^i U(k\Delta t)\Delta t \quad (6)$$

5. 직접유출 수문곡선

직접유출을 발생시키는 강우의 일부를 초과강우량이라고 부른다. 이 값들은 $P_1, P_2, \dots, P_j, \dots$ (여기서 P는 초과강우량(mm)의 기호를 사용하며, 이와 대응되는 직접유출값은 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \dots$ (여기서, Q는 유역출구에서의 유출율(m^3s^{-1})으로 주어진다. 유역에서의 초과강우 주상도가 주어지면, 처음 시간간격에 대한 직접유출곡선은 다음과 같이 계산된다:

$$Q_1 = P_1 U_1 \quad (7)$$

식 (5)를 대입하면 다음과 같다:

$$Q_1 = \frac{P_1 A_1}{\Delta t} \quad (8)$$

따라서 강도 $P_1/\Delta t$ 의 초과강우가 시각 0에서 유역에 떨어지기 시작하면, Δt 시간 후에 면적 A_1 은 그 시간에 $(P_1/\Delta t)A_1$ 인 직접 유출율을 가지고 출구로 흐르게 된다. $t=2\Delta t$ 시간 후에는 P_1 과 P_2 의 두 강우로부터 직접유출은 다음과 같이 계산된다:

$$\begin{aligned} Q_2 &= P_2 U_1 + P_1 U_2 \\ &= \frac{1}{\Delta t} [P_2 A_1 + P_1 A_2] \end{aligned} \quad (9)$$

이는 면적 A_1 에 흐르는 P_2 출구에서의 직접적인 영향과 A_2 에 흐르는 P_1 의 지연효과를 포함한다. 정상적인 수문단위도를 계산함에 있어, 초과강우량은 어떠한 특정 강우증가분 P_j 가 모든 면적 A_1, A_2, \dots 등을 대상으로 시간간격 $[(j-1)\Delta t, j\Delta t]$ 에서의 평균 강우량을 말하기 때문에 유역 전체에 걸쳐 균등하게

분포되는 것으로 가정한다.

GIS의 격자기능을 이용하여 강우분포도를 작성하면, 이러한 균등 공간강우분포 가정은 강우를 P_{ij} 로 취급하기 때문에 더 이상 필요하지 않다. 여기서 P_{ij} 는 시간간격 j 동안 등시간영역 i 내의 모든 셀들에 대한 평균 초과강우량이다. $t=n\Delta t$ 시각에서의 직접 유출은 시간적으로 적절하게 지연된 적용가능한 등 시간 영역으로부터의 기여유출들을 합하면 된다:

$$Q_n = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ij}A_i}{\Delta t} \quad \text{where } j = n - i + 1 \quad (10)$$

이와 유사한 개념은 Tierstrep & Stall(1974)에 의하여 제안되었는데, 이는 Illudas 모형의 도시배수를 위하여 포장 또는 잔디로 피복된 지역으로부터의 유출 공급율(supply rates)을 시간지연과 면적가중의 합으로 유출수문곡선을 계산한다.

6. 수문단위도의 해석

이산시간에서의 수문단위도 이론은 Chow et al. (1988)가 제시한 선형시스템의 선형적분으로 유도할 수 있다. 여기서 제시하는 유도방법은 상기의 유도방법과 동일하나, 보다 이해하기가 쉽다. 일단 시간-면적 도형이 알려지면, 수문단위도는 바로 구해진다. 시간-면적 도형이 있다는 것은 유역에서의 속도장이 존재한다는 것을 의미하기 때문에, 이 속도장을 알면 수문단위도는 도달시간에 대한 어떠한 임의의 수학적 함수나 경험적인 공식없이도 완벽하게 얻어낼 수 있다. 역으로 만약 수문단위도를 안다면, 시간-면적 도형은 식 (6)으로부터 얻을 수 있다.

수문단위도는 기저시간 또는 직접유출의 기간이 특정기간의 초과강우량에 대해서 일정하고, 보통 기저시간의 직접유출곡선 증거는 수문곡선들로 표현된 직접유출의 총량에 직접적으로 비례한다는 가정을 하고 있다(Chow et al., 1988). 이러한 가정들이 공간적 속도장의 관점에서 검증된다면, 이들은 초과강우량이 얼마나 발생되든지 간에 유출은 항상 동일한 속도로 동일한 경로를 따른다는 것으로 귀착된다. 이

는 수문단위도의 일정 기저시간과 상대적 모양이 발생하는 직접유출의 양과는 관계없이 유지될 수 있는 유일한 방법이다. 따라서 유역에서의 수문단위도의 존재는 공간적으로 변화하지만 유량의 시간과 크기에 대해서는 변화가 없는 유출에 대한 속도장이 존재한다는 것을 의미한다.

공간적 속도장으로부터 유도된 시간-면적 도형은 지표면을 가로질러 이동하는 물의 전달시간은 고려하지만, 유역내에서 물이 저장됨으로 해서 지연되는 시간은 고려하지 못한다. 여러 모델에서 선형저수지를 도입하거나 수문단위도를 확률적 기반으로 해석하는 것처럼 토지특성으로부터 결정되는 순수한 전달시간으로 또는 저류시스템을 통하여 이동하는 물의 평균저류시간으로, 셀을 통하여 유하하는 시간이 적절하게 해석되었는지는 불분명하다.

7. 적용 예

그림 1.에서 주어진 격자를 함수의 분석 예로 활용하였다. 시간-면적 도형의 예비단계는 출구의 주어진 흐름거리 내에서 유역출구로 배수되는 면적인 거리-면적 도형이다. 그림 1.의 셀들이 1의 크기(단위 크기)를 갖는다면, 대각선방향 셀중심 간의 흐름은 $\sqrt{2}=1.414$ 단위의 거리를 갖는 반면, 수평 또는 수직방향의 두 인접한 셀중심 간의 흐름은 1단위의 거리를 가진다. 그림 1d.의 유역출구에 근접한 셀에서 시작하여, 출구로의 흐름거리인 셀별 저장값을 가지고 흐름망을 따라 상류방향으로 계산이 진행된다. 셀 흐름거리에 대한 막대그래프는 그림 4a.와 같으며, 누가 거리-면적도형은 그림 4b.와 같다.

이 도형들은 흥미로운 모양을 보이고 있다: 거리-면적 막대그래프는 가장 크게 집중되는 셀들이 유역의 출구에 가깝게 있기 보다는 멀리 떨어져 있는 음(-)의 왜곡형태를 보이고 있다. 이는 수문단위도가 일반적으로 양(+)의 왜곡형태를 보이기 때문에 모순인 것처럼 보이지만, 배모양의 유역이 유역출구로 갈수록 좁아지는 유역을 생각하면 이치에 맞는다고 할 수 있다. 그림 4b.에서 보는 바와 같이 대응되는 거

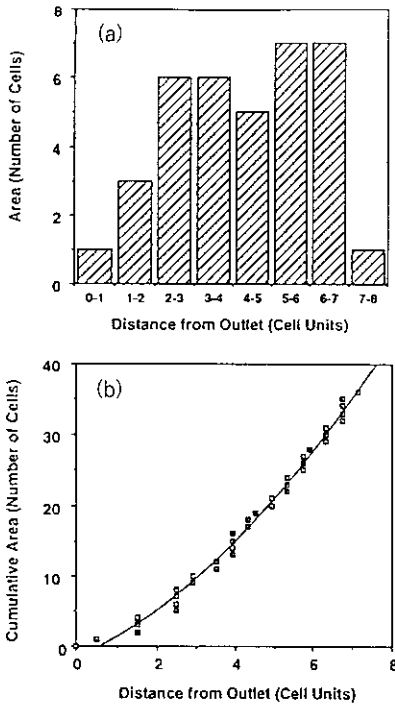


그림 4. 그림 1의 격자에 대한 거리-면적 분석:
(a) 거리-면적 막대그래프;
(b) 유역출구까지의 흐름거리에 대한 누가 거리-면적도

리-면적도형은 S곡선모양의 일반적인 시간-면적곡선이 아니라, 거리가 증가하면서 오목한 형태를 보인다. 유역내의 각 셀에 동일한 속도를 할당하는 속도장을 결정하는 가장 간단한 방법은 그림 4와 같은 모양의 시간-면적 도형을 발생시키는 것이며, 적어도 이 예에서는 그림 3c.에서 기대되었던 수문단위도 모양으로는 되지 않을 것이다.

그림 1d.의 흐름 누적값은 그림 5a.의 빈도 막대 그래프로 표현된다. 격자 예의 36개 셀들 중에서, 19개 셀은 이들을 통하여 흐르는 상류 셀이 없으며, 나머지 17개 셀은 1~35의 상류셀을 가진다. 19개 셀에서 단위시간당 0.1의 속도를 가지고, 나머지 셀들은 0.4의 속도를 가진다면 시간-면적 도형은 그림 5b.와 같이 될 것이다. 이는 실질적으로 직선인데, 이로부터 유도된 수문단위도는 유출기간동안 균등하게 분포될 것이라는 것을 의미한다. 속도를 여러 가

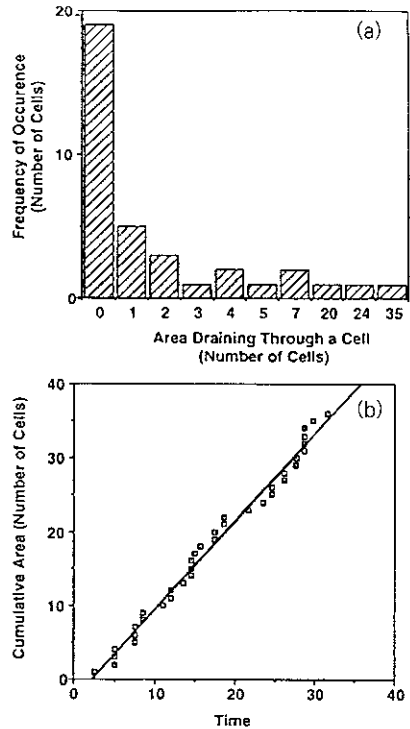


그림 5. (a) 그림 1d의 흐름누적도에 대한 빈도 막대그래프; (b) 그림 1d의 흐름누적값이 0인 셀 및 1이상인 셀들의 단위시간당 격자속도가 각각 0.1, 0.4인 경우의 시간-면적도

지로 시도하였지만, 이들 모두 시간-면적도형에서 기대했던 것처럼 S 수문곡선으로 되지는 않았다.

이 적용 예의 결과는 다소 부족한 점이 있다. 적용 격자가 너무 작아서 현실적인 결과를 얻을 수 없었다고 말할 수 있다. Sircar et al.(1991)이 연구한 보다 현실적인 규모의 유역격자로는 S자 형태의 시간-면적 도형을 얻어낸 바 있다.

8. 결론


유역에서의 수치고도모델이 주어지면, 흐름방향격자는 각 셀로부터 주위의 8격자 중에서 가장 경사가 큰 하류방향으로 정의된다. 이로부터 흐름거리 격자는 유역에 대하여 가장 낮은 격자로부터 모든 격자를 추적하여 각 격자에 출구까지의 흐름거리를 저장하므로써 얻을 수 있다. 각 격자에 흐름속도를 할당하

모로서 출구로의 흐름시간 격자는 Δt 시간간격에서 흐름 등시간선을 배치하면 유사하게 계산할 수 있다. 등시간선간의 셀들의 증가면적 $A_i, i=1,2,\dots$. 이 결정될 수 있으며, 유역출구로부터 상류로 이 면적들을 누가시키면 유역의 시간-면적 도형이 결정된다.

Δt 기간의 초과강우에 대한 수문단위도 증가 U_i 는 $A_i/\Delta t$ 로 주어진다. 이는 각 등시간 영역으로부터 임의의 시각에서의 유출이 출구로 흐르면서 시간적으로 지연된 유출 기여량을 합하면 직접유출이 개념적으로 계산되는 간단한 방법이 된다. 각 등시간 영역은 초소유역으로 수행되며, 타 등시간영역과는 다른 초과강우율을 가질 수 있다.

속도장, 시간-면적 도형, 여기서 유도된 수문단위도 간의 관계는 일반 수문단위도의 일정 기저장, 유출반응의 선형성 가정이 강우량에 관계없이 유출은 항상 동일한 평균유속으로 동일한 경로를 따른다고 제시하였다. 따라서 유역 수문단위도의 존재는 공간적으로는 변화하지만, 시간과 유량면에서는 불변인 속도장의 존재를 내포한다. 작은 격자 예로부터의 결

과는 거리-면적 막대그래프가 음의 왜곡형태를 보였는데, 만약 속도장의 공간적 변화를 부여한다면 양으로 왜곡된 수문단위도를 생성시킬 수도 있다. 하류지역의 셀들은 큰 속도를, 상류지역의 셀들은 하류지역보다는 작게 속도를 부여하여 속도장을 간단하게 만들어 주면 작은 격자 예에서 거의 직선인 시간-면적 도형을 만들 수 있다.

공간적으로 분포된 수문단위도를 유도하는 이와 같은 방법에 대한 분명한 결론을 도출하려면 보다 현실적인 경우들에 대한 연구가 요구된다. 각 셀에 대하여 속도를 단순히 할당하는 것은 유출에서 저류의 지연효과를 무시하는 것이다. 사실 유역에서의 모든 셀들이 유역출구로 흐르게 되는지에 대하여 의문을 가질 수 있다. 시간-면적 도형을 수문단위도로부터 찾을 수 있다는 역관계는 강우사상동안 유역출구로 실질적으로 기여한 유역면적을 찾아내는 유출기여지역(variable source area) 연구와 결합할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있다. 

〈참고 문헌〉

- Betson, R.P. (1964). "What is watershed runoff?" *J. Geophys. Res.* Vol. 69, No. 8, pp. 1541-1522.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 201-236.
- Clark, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Dooge, J.C.I. (1959). "A general theory of the unit hydrograph." *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, No. 1, pp. 241-256.
- ESRI (1992). *Cell-based modelling with Grid 6.1: supplement — hydrologic and distance modelling tools*. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, April.
- Lozear, R.C. (1992). *Global climatic management by watershed basin units*. Construction Engineering Research Laboratory, US Army Corps of Engineers, Champaign, IL.
- McCuen, R.H. (1982). *A guide to hydrologic analysis using SCS methods*. Prentice Hall, Englewood-Cliffs, NJ.
- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *IAHS Publication No. 45*, 3-4, pp. 114-121.
- Rodriguez-Iturbe, I. and Valdes, J.B. (1979). "The geomorphological structure of hydrologic response." *Wat. Resour. Res.*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.
- Sekulin, A.E. Bullock, A., and Gustard, A. (1992). "Rapid calculation of catchment boundaries using an automated river network technique." *Wat. Resour. Res.*, Vol. 28, No. 8, pp. 2101-2109.
- Sircar, J.K. Ragan, R.M. Engman, E.T., and Fink, R.A. (1991). "A GIS based geomorphic approach for the digital computation of time-area curves."

Proc. ASCE Symposium on Remote Sensing Applications in Water Resources Engineering, May.

Tierstrep, M.L. and Stall, J.B. (1974). *The Illinois urban drainage area simulator*. ILLUDAS Bulletin 58. Illinois State Water Survey, Urbana, IL.

Vieux, B.E. and Westervelt, J. (1992). "Finite element modelling of storm water runoff using GRASS GIS." *Proc. 8th ASCE Conference on*

Computing in Civil Engineering, held in Dallas TX, Am. Soc. Civ. Eng. New York, pp. 712-718.

본 논문은 Maidment D.R. (1993)의 "Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS" In: *HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources*, IAHS Publ. No. 211, pp. 181-192를 정리한 것임.