

자연하천 형상을 이용한 최적 흐름분배 알고리즘의 개발

○이 학 수*, 김 남 원**, 김 원**, 김 상 현***

1. 서 론

컴퓨터의 발달에 따라 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM)을 이용한 수문모형의 발달이 가속화 되었으며, DEM은 수문모형이 흐름방향과 흐름분배 결정에 이용할 수 있는 지형 데이터로서 인식되어 왔다. DEM에서 계산될 수 있는 흐름방향과 흐름누가면적, 지형경사를 이용한 흐름분배방법은 실제 지형기복을 따른 흐름분산 특성을 반영하기 위해 단방향 흐름(Single Flow Direction, *sfd*) 알고리즘(O'Callaghan과 Mark, 1984; Jenson과 Dominique, 1988), *Rho8*(Fairfield와 Leymarie, 1991) 알고리즘, 다방향 흐름(Multiple Flow Direction, *mfd*) 알고리즘(Quinn 등, 1991), *FRho8*(Mendicino와 Sole, 1997) 알고리즘, DEMON(Digital Elevation MOdel Network) 알고리즘(Costa-Cabral과 Burges, 1994)등의 다양한 알고리즘의 형태로 발전되어 왔다. Holmgren(1994)은 지형경사를 따른 흐름분배를 먹급수 h 로서 조정할 수 있게 하였는데, h 값이 커질수록 가파른 경사로 흐름을 더욱 많이 배분하는 *mfd* 알고리즘을 제안하였다. 그러나, 선택된 h 값을 전체 유역에 적용하는 것은 수로와 사면지역의 흐름특성을 달리 표현하지 못하며, 흐름경로 폭에 대한 고려를 하지 않는 단점을 가지고 있다. Quinn 등(1991)은 수로형성면적(Channel Initiation Threshold, *CIT*)의 개념을 이용하여 정확한 수로지역의 형성과 모형내 영향력에 대해 강조하였고, Western 등(2001)은 연결함수(connectivity function)를 이용하여 계절적으로 변화하는 포화면적의 정량화를 시도하였다. 기존의 흐름분배 알고리즘들은 자연하천의 실제형상에 대한 고려를 하지 않으며, 단지 좌표와 고도를 이용하여 수로지역을 계산한다. 이상의 관련연구들은 유역에서의 강우-유출시 발생하는 흐름을 고려해 주기 위해 발전되어 왔으나, 평지지형과 산지지형이 복합적으로 존재하고 수로가 형성되어 있는 국내 유역상황을 적절히 기술하는데 한계점을 보여주었다.

따라서, 본 연구에서는 수로형성면적, 지형기복을 따른 흐름분배를 고려해 줄 수 있는 국내유역에 적합한 흐름분배 알고리즘을 제안하고, 제안된 알고리즘에 최적화 방법을 적용하여 자연하천 형상을 최대한 반영해 줄 수 있도록 함을 목표로 한다.

2. 하천지형을 고려한 흐름분배 알고리즘(Spatially Distributed Flow Apportioning Algorithm, SDFAA)

* 부산대학교 공과대학 청정공학협동과정 석사
** 한국건설기술연구원 선임연구원
*** 정회원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수

제안된 흐름분배 알고리즘은 Quinn 등(1995)의 CIT 와 Holmgren(1994)의 흐름 분배인자를 이용하여 이 두 개념의 단점을 보완하는 방향으로 개발되었다. CIT 는 영구 수로 시발면적으로 정의되나 산지구역의 가변적인 수로망은 CIT 로서 정의될 수 없으므로, 단위 격자 크기에서 CIT 격자 크기까지 수로가 형성될 수 있다고 가정하는 확장수로 형성면적(Expanded Channel Initiation Threshold, $ECIT$)의 개념을 제안한다. Holmgren(1994)의 흐름 분배인자는 단일 값으로서 sfd 와 mfd 의 중간적인 표현을 가능하게 하지만, 봉우리(mfd 경향)에서 수로(sfd 경향)로 형성되는 가변적인 흐름분배를 행할 수 없다. 이러한 두 가지의 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 다음의 방법을 사용한다. 제안된 $ECIT$ 는 상부기여면적과 비교되어 해당 격자의 흐름분배인자를 결정하게 되며, $ECIT$ 가 클수록 sfd 특성을 가지도록 한다. 만약, $ECIT$ 가 CIT 와 동일하면 해당격자를 수로격자로서 인식하게 한다. 제안된 식은 식 (1)과 같으며, 계수 c 는 경계조건으로 구할 수 있고, 지수 n 은 해당 구역에서 최적화 되어야 하는 매개변수이다.

$$\frac{dH(I, J)}{dA_{ECIT}} = c \cdot A_{ECIT}^n \quad (1)$$

여기서, $H(I, J)$ 는 공간적으로 변화하는 흐름 분배인자, A_{ECIT} 는 확장수로 형성면적이며, I, J 는 격좌 좌표를 의미한다. 확장수로 형성면적(A_{ECIT})은 최고 고도 격자로부터 하경사 격자로 계산되며 식 (2)로서 표현되는 흐름분배량과 일치한다.

$$dA_i = \frac{A \tan \beta_i L_i}{\sum_{i=1}^m \tan \beta_i L_i} \quad (2)$$

여기서 dA_i 는 i 방향 격자로의 흐름분배량이며 m 은 흐름 방향의 전체 수, 그리고 L_i 는 i 번째 방향의 등고선 길이, $\tan \beta_i$ 는 고도값들 사이의 거리에 대한 고도차의 비로서 계산되는 경사도이다. 식 (1)은 n 의 값에 따라 식 (3)과 식 (4)로 구분된다.

$$H(I, J) = c_1 A_{ECIT}^{n+1} + c_2 \quad (n \neq -1) \quad (3)$$

$$H(I, J) = c_3 \ln\{A_{ECIT}\} + c_4 \quad (n = -1) \quad (4)$$

여기서, c_1, c_2, c_3, c_4 는 구역의 경계조건에서 구해지는 계수이다. 식 (1)로서 공간적으로 변화하는 흐름 분배인자가 결정되면, 식 (5)로서 상부기여 면적의 하격자로의 분배를 행하고 식 (6)으로 구역 내 모든 격자지점의 지형지수를 구한다.

$$dA_i = \frac{A (\tan \beta_i)^{H(I, J)} L_i}{\sum_{j=1}^m (\tan \beta_j)^{H(I, J)} L_j} \quad (5)$$

$$\ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right) = \ln\left(\frac{A}{C \tan \beta}\right) \quad (6)$$

여기서, dA_i 는 i 방향 격자로의 흐름분배량, m 은 흐름방향의 전체 수, L_i 는 i 번째 방향의 등고선 길이, A 는 상경사 누적면적, C 는 하경사 방향의 등고선 길이의 합이다. $\tan \beta$ 는 국부 경사도로서 식 (7)로 기술된다.

$$\tan \beta = \frac{\sum_{i=1}^m (\tan \beta_i L_i)}{\sum_{i=1}^m L_i} \quad (7)$$

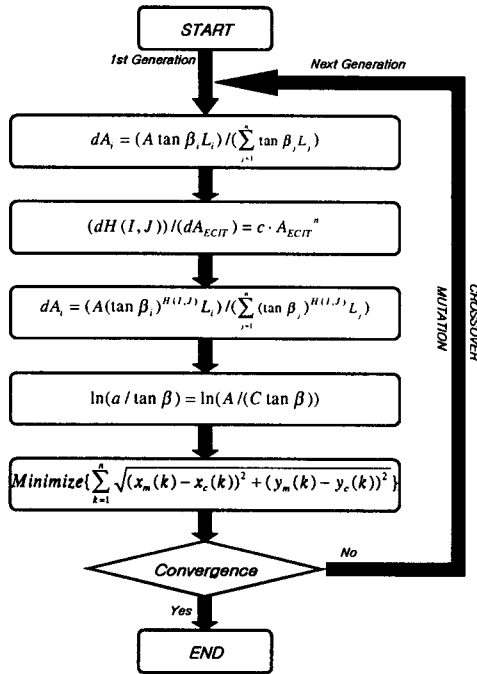


그림 1. 유전자 알고리즘을 이용한 흐름분배 방법의 최적화 알고리즘

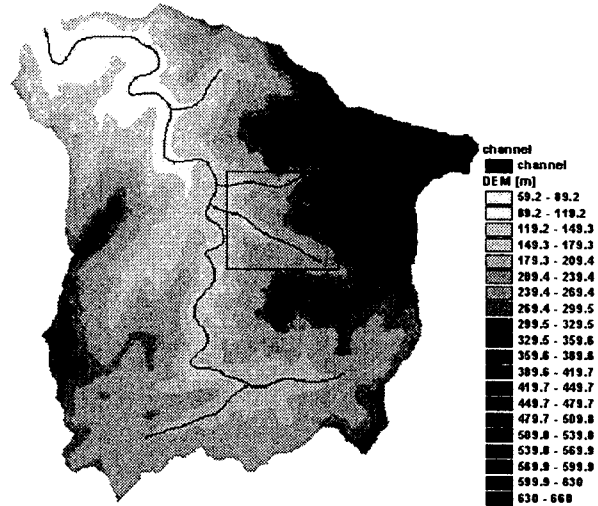


그림 2. 설마천 유역의 수치고도모형과 수로형상

3. 대상유역

본 연구의 대상유역으로써 95년부터 한국건설기술연구원에서 시험유역으로 운영하고 있는 임진강 하구에서 약 46km 상류의 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리의 설마천 유역을 선정했다. 위치는 동경 126°55'54" ~ 126°54'57" 북위 37°54'57" ~ 37°56'23"이고, 유역면적 8.5km², 유로연장 5.8km, 연평균 강수량은 1,600 mm, 고도는 최저 59 m에서 최고 675 m, 유로경사 2%인 전형적인 급경사 산지 사행하천 지형이며 전형적인 곡류하천이다. 지질은 경기편마암 복합체로 구성되고 단층과 엽리가 잘 발달되어 있다. 또한 삼림과 토양은 90% 이상이 주로 20~30년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되고 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮고 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우시 토석류를 유발한다. 관측소는 우량관측소 5개(유역밀도 1.7km²/개소, 전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 감악산)와 수위관측소 2개(전적비교, 사방댐)와 기상관측소 1개(비룡포대)이며 10분마다 강우와 수위가 관측되고 있다(한국건설기술연구원, 1998). 그림 2는 대상유역의 수치고도모형과 수로형상을 나타내고 있다.

4. 결과 및 고찰

그림 3은 $CIT=84537.477 [m^2]$ 일때, $mfd(a)$, $sfd(b)$, $h=5(c)$, $n=-2(d)$, $n=0(e)$, $n=2$

(f)로 표현한 지형지수지도이며, 분석영역은 수로와 사면의 흐름특성의 분석이 용이한 지역으로서 경도 $126^{\circ} 57'0.288'' \sim 126^{\circ} 57'35.243''$ (850 [m]), 위도 $37^{\circ} 55'49.486'' \sim 37^{\circ} 56'13.499''$ (740 [m])인 지역을 선정하였으며 그림 2에 사각형으로 표시된 지역이다. *mfd*의 경우 수로를 따른 흐름의 분산에 의해 수로폭이 과다모의되며 하격자로 분배된 흐름누적면적이 *CIT*보다 작아져 수로로서 인식되지 못하는 단점을 가지고 있다. *sfd*는 수로의 연결성(connectivity)과 수로폭의 표현이 *mfd*보다 개선된 표현을 나타내지만 완곡한 수로의 형상표현이 부족하며, 사면에서의 분산흐름특성을 표현하지 못하고 있다. Holmgren's $h=5(c)$ 는 *mfd*와 *sfd*의 절충된 표현을 나타내지만 유역전체에 동일한 흐름분산특성을 가정하는 단점을 가지고 있다. (d)는 *SDFAA*의 $n=-2$ 함수에 의한 흐름특성의 표현으로서 봉우리에서 *mfd* 특성을 지니며 흐름의 진행에 따른 *sfd*로의 빠른 변화를 표현하며, (f)는 느린 변화, (e)는 (d)와 (f)의 절충된 표현으로서 사면의 흐름특성을 *SDFAA*가 다른 알고리즘에 비해 보다 잘 묘사할 수 있으며 매개변수 n 의 선정으로 해당유역의 흐름분산특성을 적절히 묘사해낼 수 있음을 알 수 있다. 또한 H_{\max} 의 선정으로 수로의 연결성도 획득할 수 있다. 대상 매개변수의 보정범위는 표 2에 기술하였으며 목적함수는 식 (8)와 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{k=1}^n \sqrt{(x_m(k) - x_c(k))^2 + (y_m(k) - y_c(k))^2} \quad (8)$$

표 2. 최적화에 적용된 매개변수들

매개변수	의미	보정범위
<i>CIT</i> [m ²]	수로형성면적정의	84,537 ~ 8,547,900 [m ²]
n	상부기여면적과 흐름분배인수의 연결매개변수	-2 ~ 10
H_{\max}	공간적인 흐름특성의 변화범위	10 ~ 50

표 3. 연결성과 실제수로 형상에 대한 최적화 결과

매개변수	최적값
<i>CIT</i>	200,542.0087 [m ²]
n	1.4364
H_{\max}	102
수로위치오차의 합	12109.4431 [m]
수로위치오차의 평균	14.33 [m]

$x_m(k)$, $y_m(k)$ 는 실제수로의 x , y 좌표이며, $x_c(k)$, $y_c(k)$ 는 *SDFAA*로 계산된 수로격자의 x , y 좌표이다. n 은 실제수로격자의 전체수이며 k 는 실제수로격자 각각을 구분짓는 수이다. 실제 수로의 형상과 더불어 수로의 연결성(connectivity) 획득이 필수적이다. 연결성은 H_{\max} 의 상향조정으로 획득가능하며 연결성과 실제수로 형상에 대한 최적화 결과는 표 3과 같다. 그림 4는 수로의 연결성과 실제형상에 최적화시킨 *SDFAA*의 지형지수지도이다. 빗금친 영역은 군사지역으로서 수로에 대한 정보를 확보할 수 없었다. 수로는 유역내 지배적인 흐름경로를 제공하므로 강우-유출 모의시 수로의 형상과 연결성에 대한 분석은 필수적이다. 또한, 복잡한 산지사면 지역의 흐

름분산에 대한 적절한 묘사는 유역유출모형의 개선된 입력자료로서 활용될 수 있다.

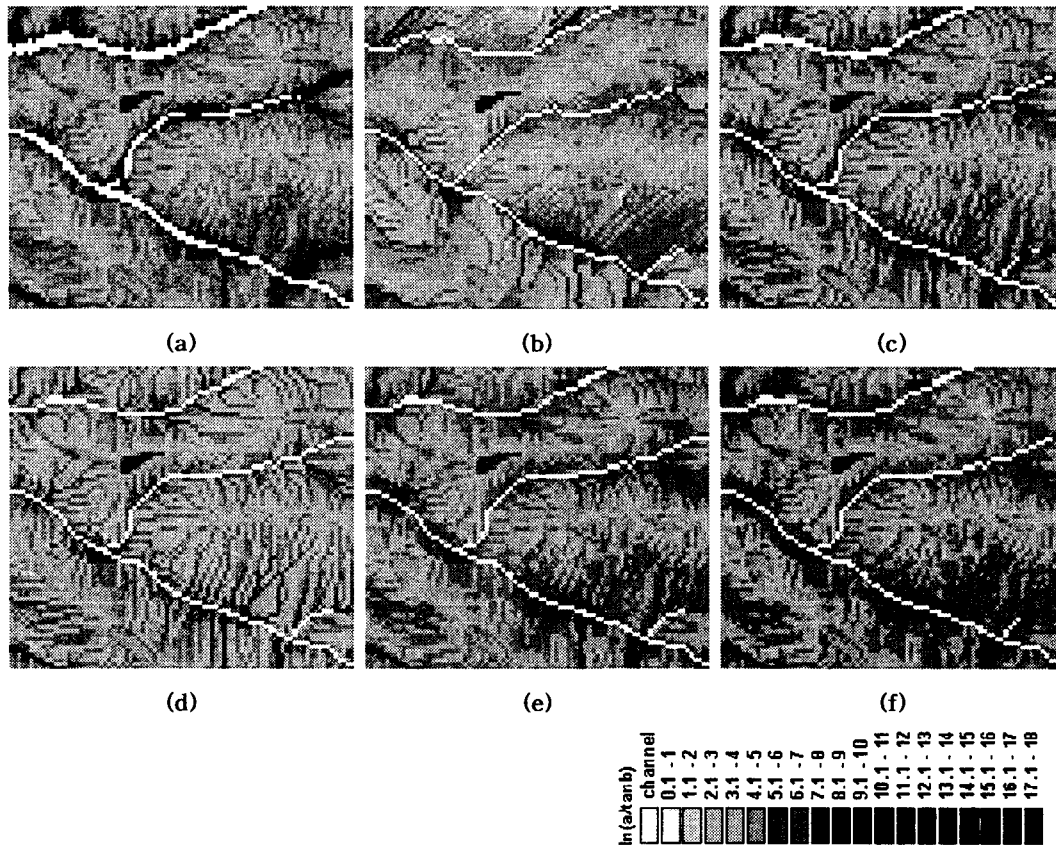


그림 3. $CIT=84537.477 [m^2]$; $H_{max}=40$ 일때 각 흐름분배 알고리즘으로 계산한 지형지수지도
: (a) *mfd* (b) *sfd* (c) $h=5$ (d) $n=-2$ (e) $n=0$ (f) $n=2$

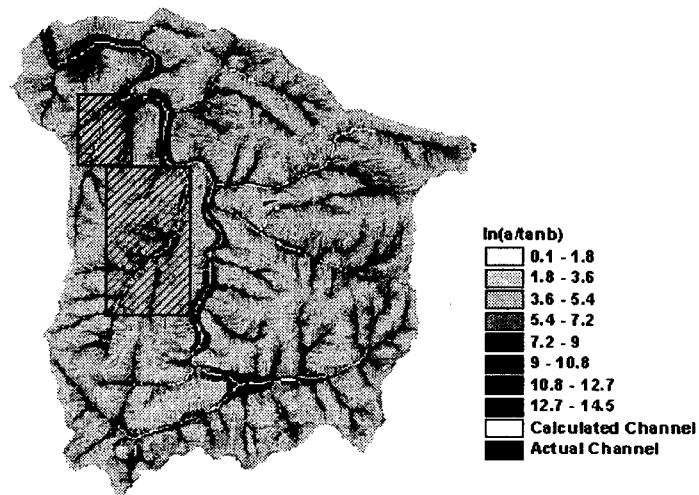


그림 4. 최적화($CIT=200,542.0087 [m^2]$; $H_{max}=102$; $n=1.4364$)시킨 계산수로격자와 실제수로격자의 형상(빗금친 영역: 군사지역)

5. 결 론

본 연구에서는 기존알고리즘들의 단점을 보완하고 사면지역의 흐름분산특성을 기술할 수 있는 알고리즘인 *SDFAA*를 제시하며, 실제수로의 정보를 반영하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, *SDFAA*는 기존 알고리즘의 단점인 복잡한 산지사면지형의 흐름분배, 수로격자의 연결성, 수로폭의 과다산출문제를 해결할 수 있다.

둘째, *SDFAA*와 유전자 알고리즘을 이용한 최적화는 실제수로형상에 대한 최적해를 도출할 수 있다.

본 연구에서 제시된 *SDFAA*는 실측된 토양수분의 공간분포 자료를 이용한 관련성 획득에 의해 매개변수의 설정과 알고리즘의 보완이 가능하며 이는 필수적인 향후과제로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원 (과제번호 2-1-1, 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

6. 참고문헌

1. Costa-Cabral, M., and S. J. Burges (1994). "Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslope for computation of contributing and dispersal areas." *Water Resour. Res.*, vol. 30, pp. 1681-1692.
2. Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991). "Drainage networks from grid digital elevation medels." *Water Resour. Res.*, vol. 27, pp. 709-717.
3. Holmgren, P. (1994). "Multiple flow direction algorithms for runoff modeling in grid based elevation models and empirical elevation." *Hydrol. Process.*, vol. 8, pp. 327-334.
4. Jenson, S. K., and J. O. Domingue (1988). "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis." *Phonogram. Eng. Remote Sens.* vol. 54, pp. 1593-1600.
5. Mendicino, G., and A. Sole (1997). "The information content theory for the estimation of the topographic index distribution used in TOPMODEL." *Hydrol. Process.*, vol. II, pp. 1099-1114.
6. O'Callaghan, J. F., and D. M. Mark (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Comput. Vision Graphes Image Process.*, vol. 28, pp. 323-344.
7. Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier, and O. Planchon (1991). "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models." *Hydrol. Process.*, vol. 5, pp. 59-79.
8. Western, A. W., Blóschl, G., and Grayson, R. B. (2001). "Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns." *Water Resour. Res.*, Vol. 37, No 1, pp. 83-97.