

자연하천 형상을 이용한 최적 흐름분배 알고리즘의 개발

Development of Optimized Flow Apportioning Algorithm Using Natural Stream Morphology

김 상 현* / 이 학 수** / 강 창 용*** / 김 남 원****

Kim, Sang Hyun / Lee, Hak Su / Kang, Chang Yong / Kim, Nam Won

Abstract

The flow apportioning algorithms with digital elevation models have been developed to reflect reasonable flow divergence properties but they showed several defects related to the connectivity of channel cells, various divergence features along to local topography and channel cells' size etc. Topographic data used by existing flow apportioning algorithms are flow accumulation area and local slope. However, the size and location of channel cells which play the dominant role in the flow pathway were not properly considered. Therefore, a new flow apportioning algorithm considering various flow divergence characteristics in the complicate terrain is proposed. The GA optimization scheme is used to represent the location and scale of the channel pixel. Improved result can be obtained by using both a new flow apportioning algorithm and optimization.

keywords : Digital Elevation Model, Flow Apportioning Algorithm, Optimization

요 지

수치고도모형을 이용한 흐름분배 알고리즘들은 지형을 따른 흐름의 분산특성을 잘 기술해 주는 방향으로 발달되어 왔지만, 수로격자의 연결성, 지형기복을 따른 다양한 분산특성, 수로격자크기 등과 관련한 한계성을 가지고 있다. 기존 흐름 알고리즘들이 흐름분배 결정에 사용한 지형 데이터들은 수치고도모형에서 산출가능한 흐름누적면적과 경사도로써 유역내 지배적인 흐름경로인 수로격자의 위치와 크기에 대한 고려를 하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 기존 알고리즘들의 단점인 수로의 연결성과 복잡한 지형을 따른 다양한 흐름분산 특성을 기술할 수 있는 흐름분배 알고리즘을 제안하고, 유전자 알고리즘을 이용하여 수로격자의 위치와 크기를 가장 잘 표현할 수 있도록 최적화하였으며, 기존의 방법에 비해 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 수치고도모형, 흐름분배 알고리즘, 최적화

* 정희원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수
Assistant Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735, Korea
(E-mail : kimsangh@pnu.edu)

** 부산대학교 청정공학 협동과정 연구조원
Research Assistant, IETI Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea

*** 부산대학교 환경공학과 석사과정
Research Assistant, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea

**** 한국건설기술연구원 수석연구원
Research Fellow, KICT, Kyungido, 411-712, Korea

1. 서 론

컴퓨터의 발달에 따라 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM)을 이용한 수문모형의 발달이 가속화 되었으며, DEM은 TOPMODEL, THALES, AGNPS, DHSVM, TOPOG 등의 수문모형이 흐름 방향과 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 다양한 알고리즘의 형태로 발전되어 왔다. 제일 처음 개발된 알고리즘은 주위 8격자 중 가장 급한 경사로 흐름을 분배하는 단방향 흐름(Single Flow Direction, *sfd*) 알고리즘(O'Callaghan과 Mark, 1984; Jenson과 Dominique, 1988)으로서, 1차원 경로를 따라 흐름이 형성되므로 흐름면적의 분배가 없고 흐름면적의 누적만이 발생하는데 이는 구형지형의 흐름의 발산과 수렴을 표현하지 못한다. 또한 직각인 흐름방향에 대해서는 기여면적의 계산이 올바르지만 대각선 방향의 흐름은 기여면적의 과소추정을 유발하며, 다중 경로를 따른 흐름의 임의 거동을 표현하지 못할 뿐 아니라 1차원 경로를 따른 흐름면적의 누적은 수로 격자에 기여면적의 과다추정을 야기한다. *Rho8*(Fairfield와 Leymarie, 1991)은 *sfd*에 확률성분을 추가시켜 흐름분산 문제를 해결하기 위해 시도된 방법으로서, 전체격자를 따른 흐름 경로의 기대값이 계산된 흐름 방향각과 일치하도록 확률을 주위격자에 배분하는 방식이다. *Rho8*은 확률에 의해 흐름 경로가 계산되므로, 재계산시 동일한 흐름 경로를 산출하지 못할 뿐 아니라, 평행한 흐름과 인접한 흐름의 표현이 어려우며 하류로 진행될수록 확률변수로 도입되는 오차가 커져서 기여면적의 과다추정과 과소추정을 유발한다. 다방향 흐름(Multiple Flow Direction, *mfd*) 알고리즘(Quinn 등, 1991)은 *sfd*의 1차원적 흐름 경로 표현의 한계를 없애기 위해 제시된 방법으로서 낮은 고도의 모든 주위격자에 흐름을 분배하는 방법이다. *mfd*는 수로격자 폭의 비정상적 크기를 유발하며 흐름경로가 흐름방향과 일치하지 않고 8방향으로 제한되는 한계성을 가지고 있다. *FRho8*(Mendicino와 Sole, 1997)은 *mfd*와 *Rho8*의 혼합형태로서 2차원적 흐름분배를 행할수 있지만 수로망을 정의하는데 문제점을 가지고 있다. DEMON(Digital Elevation Model Network) 알고리즘(Costa-Cabral과 Burges, 1994)은 *sfd*의 1차원적 흐름경로 문제와

*mfd*의 8방향 흐름경로 제한을 해결해 주는 방법으로서 지형기복을 따른 가상 흐름 튜브망을 따라서 기여면적을 산출해 준다. Holmgren(1994)은 지형경사를 따른 흐름분배를 먹급수 *h*로서 조절할 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.

여러 작업과정을 거쳐 구축된 DEM은 흐름분산을 저해하는 국소 요면(local concave) 지형과 흐름분배를 정의하기 어려운 평탄 지형, 실제 하천의 형상과 두께를 동질화된 격자 단위로 표현해야만 하는 점 등의 문제점들을 가지고 있다. 이런 문제점들을 가지는 DEM으로 수문모의 수행시 적정 격자 크기 결정에 대한 고찰은 필수적이다. Zhang과 Montgomery(1994)는 수문모형의 해석인자로서 널리 사용되는 지형지수($\alpha/\tan\beta$)의 빈도를 구하는 적정 격자크기를 10[m]로 제한한 바 있다. 강우시 유역수문과정의 결정인자는 연속성(continuity), 연결성(connectivity), 수렴성(convergence)(Western 등, 1999)을 만족하는 포화면적의 크기로서, 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. 지형상 흐름분배에 대한 국내연구로는 김상현과 이지영(1999), 이지영과 김상현(2000), 김상현 등(2001)이 있다. 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. 방법론

2.1 제안된 흐름분배 알고리즘(Spatially Distributed Flow Apportioning Algorithm, SDFAA)

제안된 흐름분배 알고리즘은 Quinn 등(1995)의 CIT와 Holmgren(1994)의 흐름 분배인자를 이용하여 이 두 개념의 단점을 보완하는 방향으로 개발되었다. CIT는 영구 수로 시발면적으로 정의되나 산지유역의 가변적인 수로망은 CIT로서 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 ECIT는 상부기여면적과 비교되어 해당 격자의 흐름분배인자를 결정하게 되며, ECIT가 클수록 *sfd* 특성을 가지도록 한다. 만약, ECIT가 CIT와 동일하면 해당격자를 수로격자로서 인식하게 한다. 제안된 식은 식 (1)과 같으며, 계수 *c*는 경계조건으로 구할 수 있고, 지수 *n*은 해당 유역에서 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 격자 좌표를 의미한다. 확장수로 형성면적(A_{ECIT})은 최고 고도 격자로부터 하경사 격자로 계산되며 식 (2)로서 표현되는 흐름분배량과 일치한다.

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

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 유역의 경계조건에서 구해지는 계수이다. 식 (1)로서 공간적으로 변화하는 흐름 분배인자가 결정되면, 식 (5)로서 상부기여 면적의 하격자로의 분배를 행하고 식 (6)으로 유역 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 흐름 방향의 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.

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

2.2 최적화 적용대상과 방법

DEM을 이용한 최적의 지형지수지도를 산출하기 위해서 다음의 사항들을 최적화의 적용대상으로 한다. 첫째, 산지에서는 강우시와 건조시의 수로크기가 변하므로 영구수로의 개념은 불합리하다. 그러므로, ECIT와 실제 하천 좌표를 이용하여 자연형상에 가장 일치하는 수로 형상을 도출한다. 둘째, 식 (1)의 지수 n 은 상부기여 면적과 공간적으로 변화하는 흐름분배인수의 크기를 관련지워주는 매개변수로서 해당유역의 지형을 따른 흐름 분배를 잘 표현해주는 적정 n 의 결정이 요구된다. 셋째, $H(I, J)$ 의 범위는 흐름이 *mfd*에서 *sfd*로 변화할 수 있는 가능성의 범위를 제시해 주는 것으로서 $H(I, J)$ 의 최대, H_{max} 값이 클수록 사면지역에서는 *mfd*에서 *sfd*로의 변화가 두드러지고, 수로에서는 단방향 흐름이 지배적이게 되어 수로의 폭과 연결성에 영향을 미친다. 넷째, 계산된 수로격자의 위치는 실제 지형도상의 수로 위치와 일치되지 않는다. 그러므로, 실제 지형도상의 수로와 위치 오차가 제일 적은 지형지수 지도의 계산이 필요하다.

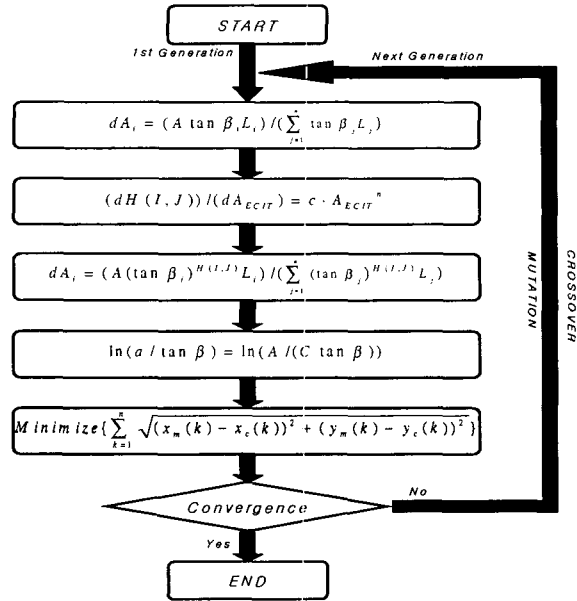


그림 1. 유전자 알고리즘을 이용한 흐름분배 방법의 최적화 알고리즘

본 연구에서 선택한 최적화 알고리즘은 유전자 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 자연진화와 도태를 통한 적자생존의 원리를 응용한 것으로서 다양한 분야에 걸쳐 적용성과 적합성이 널리 검증된 알고리즘이므로 본 연구 수행에 적합하다고 판단한다(Goldberg, 1989). 유전자 알고리즘을 바탕으로 수행되는 흐름분배 알고리즘의 최적화 수행 순서도는 그림 1과 같다.

계산이 시작되면 CIT와 n 그리고 H_{max} 을 적절히 가정한 후 전체적인 분배면적 dA 를 계산한다. 그리고 식 (1), (3) 및 (4)에 의한 $H(I, J)$ 의 공간적 분포를 계산한 다음 dA 를 재계산하여 수로형상을 도출하고 목적함수식인 식 (9)에 의해 적합도 계산을 수행한다. 이 과정을 유전자 알고리즘(Goldberg, 1989)으로 반복하여 흐름분배 알고리즘의 매개변수를 최적화한다.

2.3 최적화 대상 매개변수의 특성분석

최적화는 실제하천의 형상을 반영하기 위해 계산된 수로격자를 디지털이징된 하천과 비교하여 폭, 위치, 길이오차를 최소화하여 수행된다. 이와 관련한 매개변수는 H_{max} , $ECIT$, n 이며, 이 세 매개변수의 공간적인 흐름특성과 수로격자 형상에 대한 영향력은 다음과 같다.

H_{max} 는 식 (1)로 결정되는 공간적으로 변화하는 흐름분배인자의 변화상한을 결정짓는 매개변수로 작은 값을 가질 경우, 유역전체흐름의 특성을 mfd 화하려는 경향이 있어 수로격자의 유출구로의 계산진행에 따라 수로격자폭을 파다산출한다. 그림 2는 $n=-1, 0, 1, 5, H_{max}=10, 30, 50, A_{ECIT, max}=200,000\sim 2,000,000m^2$ 인 경우의 $H(I, J)=f(n, ECIT)$ 의 형상을 표현하고 있다. 그림 2에서 $n, A_{ECIT, max}$ 의 증가는 식 (2)로 결정되는 흐름누적면적값이 큰 수로격자부근에 큰 $H(I, J)$ 의 값을 할당시켜, 사면에서 mfd 흐름특성과 수로에서 sfd 의 흐름특성이 보다 두드러져 좁은폭의 수로격자가 기대된다. 그러나, 식(3), (4)로 결정되는 $H(I, J)$ 는 항상 증가함수(식 (1))의 형태를 취하며, $mfd(H(I, J)=1)$ 에서 $sfd(H(I, J)=\infty)$ 로의 흐름특성의 변화를 결정해 주는 매개변수이므로 H_{max} 가 수로격자폭의 결정에 지배적인 영향력을 가짐을 알 수 있다.

그림 2에서 $A_{ECIT, max}$ 의 증가(n 일정, H_{max} 일정)는 낮은 흐름누적면적값(식 (2))을 가지는 사면지역에 낮은 $H(I, J)$ 를 유도하여 전체유역의 흐름특성을 mfd 화 하려는 경향이 있다. 그림 3은 식 (2)로 전체격자에 할당된 흐름누적면적의 누적분포함수(cdf)를 나타내며, 변곡점은 사면에서 수로로의 변화에 따른 흐름특성이 달라짐을 표현하고 있으며, 변곡점 이후의 구간이 수로가 발달가능한, 즉 CIT 값의 범위로 설정할 수 있는

그림 2에서 $A_{ECIT, max}$ 의 증가(n 일정, H_{max} 일정)는 낮은 흐름누적면적값(식 (2))을 가지는 사면지역에 낮은 $H(I, J)$ 를 유도하여 전체유역의 흐름특성을 mfd 화 하려는 경향이 있다. 그림 3은 식 (2)로 전체격자에 할당된 흐름누적면적의 누적분포함수(cdf)를 나타내며, 변곡점은 사면에서 수로로의 변화에 따른 흐름특성이 달라짐을 표현하고 있으며, 변곡점 이후의 구간이 수로가 발달가능한, 즉 CIT 값의 범위로 설정할 수 있는

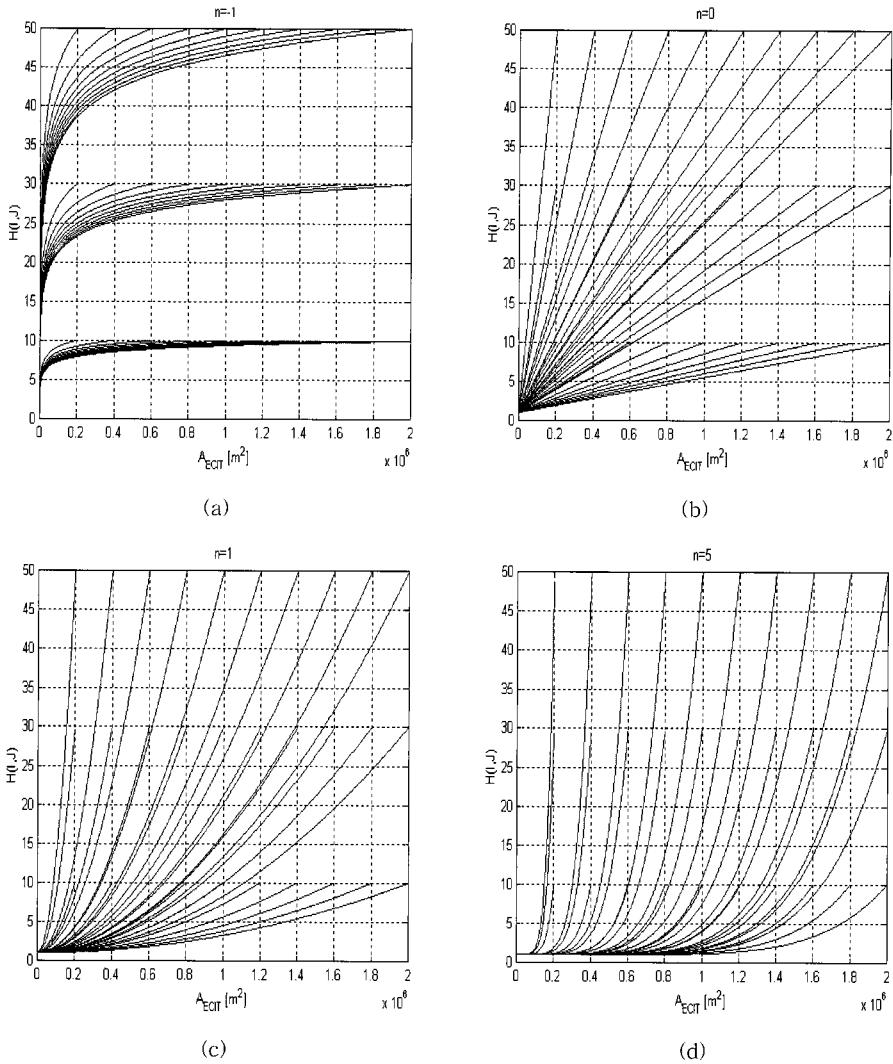


그림 2. $H_{\max}=10, 30, 50$; A_{ECIT} : 200,000~2,000,000[m²]인 경우의 $H(I, J)$
 : (a) $n=-1$, (b) $n=0$, (c) $n=1$, (d) $n=5$

구간이 된다. 그림 3은 설마천 유역에 대한 경우이며, 변곡점에서의 흐름누적면적값은 84537.477[m²]이며 2.6% 정도의 누가면적에 해당된다. 이는 $A_{ECIT, \max} = 84535.477$ [m²]로 설정할 경우 n 에 따른 $H(I, J)$ 의 전체영역이 사면지역에 표현되어 mfd 에서 sfd 로의 점진적인 변화경향을 관측할 수 있게 해준다. 작은 CIT 는 $ECIT$ 와 비교되어 긴 수로격자를 생성시키며, 큰 CIT 는 짧은 수로격자를 생성시킨다. 이때 $ECIT$ 의 전체영역이 작아지면 사면에 큰 $H(I, J)$ 를 할당하여 sfd 거동을 유도하여 사면격자가 수로격자로 전환될 가능성을

증대시킨다.

n 의 변화는 각 격자에 할당가능한 $H(I, J)$ 의 변화를 유도하며 음수일 경우 높은 $H(I, J)$ 를 할당하여 사면격자의 수로격자로의 전환가능성을 증대시킨다. n 이 일정할 경우, 사면격자의 수로격자로의 전환가능성은 H_{\max} 의 증가에 비례하며, $A_{ECIT, \max}$ 의 증가에 반비례하며 n 이 작은 값일수록 이러한 효과는 분명해진다. 이것은 그림 3에서 알 수 있듯이 수로격자로 전환가능한 격자가 전체격자의 2.6%이내로 매우 적기 때문이다. 그림 4(a)는 H_{\max} , CIT , n 에 따른 흐름특성의 변화를

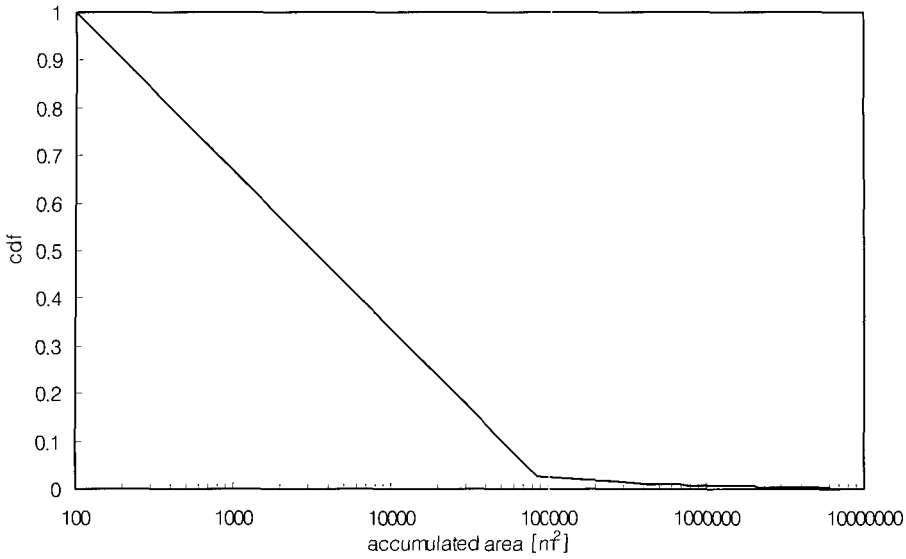


그림 3. 설마천 유역의 확장수로형성면적(A_{ECFI})의 누적분포함수(cdf)

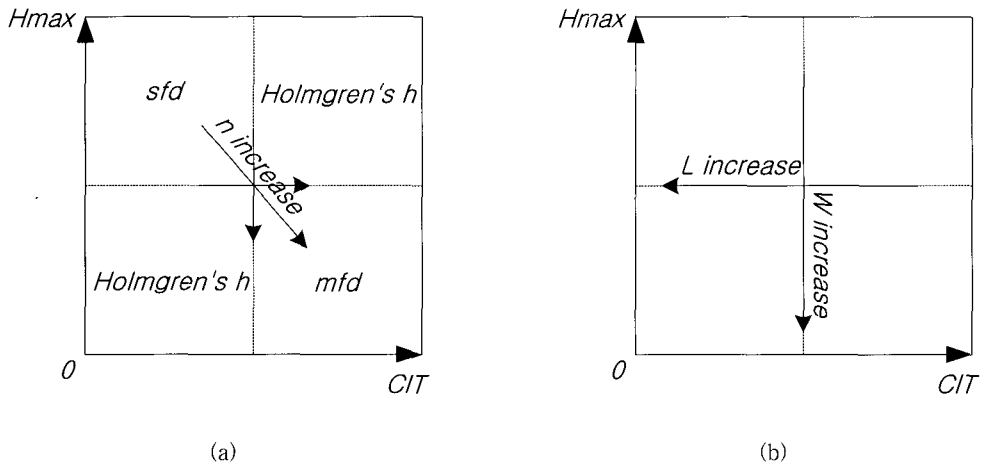


그림 4. 흐름분배인자($H(I, J)$)의 최대값과 CIT 에 따른 흐름특성변화성(a)과 수로폭(W)과 길이(L)의 변화성(b)

나타낸다. n 과 CIT 의 증가, H_{max} 의 감소는 mfd 적 흐름경향을 유도하며, 반대의 경우는 sfd 적 흐름경향을 유도한다. H_{max} , CIT 가 둘다 작거나 클 경우는 Holmgren의 방법과 유사한 흐름분배를 행하게 된다. 그림 4(b)는 H_{max} , CIT 에 따라 수로격자의 폭(W)과 길이(L)의 변화경향을 나타낸다. H_{max} 의 감소는 수로폭의 증가를, CIT 의 감소는 수로길이의 증가를 유도

한다.

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°

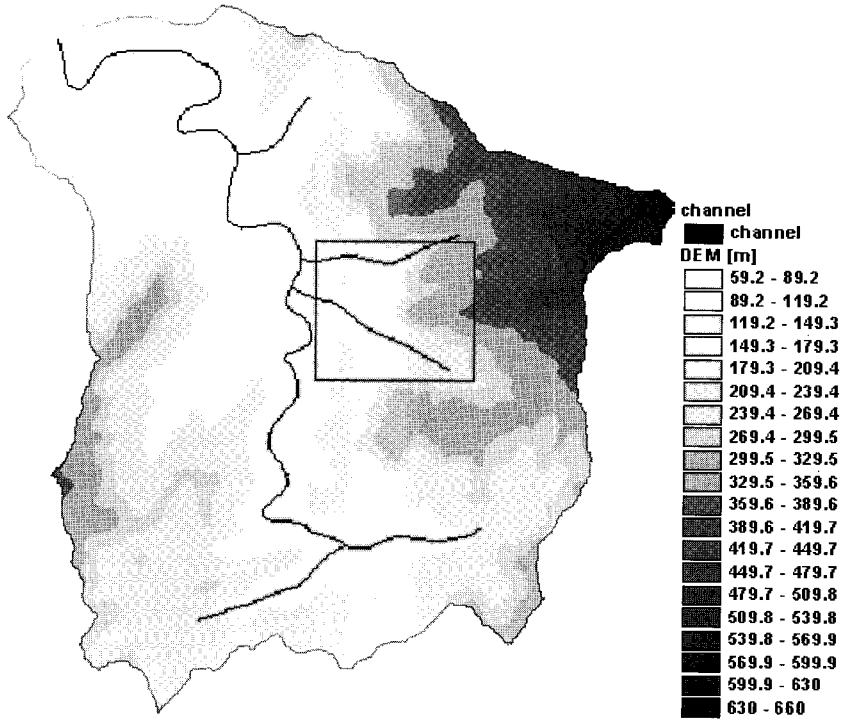


그림 5. 설마천 유역의 수치고도모형과 수로형상

55°54'~126°54'57'' 북위 37°54'57''~37°56'23'' 이고, 유역면적 8.5km², 유로연장 5.8km, 연평균 강수량은 1,600mm, 고도는 최저 59m에서 최고 675m, 유로경사 2%인 전형적인 급경사 산지 사행하천 지형이며 전형적인 곡류하천이다. 지질은 경기편마암 복합체로 구성되고 단층과 열리가 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 10마다 강우와 수위가 관측되고 있다(한국건설기술연구원, 1998). 그림 5는 1:50,000 지형도를 이용하여 10m 해상도로 구축한 대상유역의 수치고도모형과 수로형상을 나타내고 있다.

4. 결과 및 고찰

SDFAA은 식 (2)로 계산되는 확장수로 형성면적을 이용하여 주어진 n , H_{max} 로 결정되는 식 (1)의 합수로 흐름분배인자를 각 격자에 할당한다. 설마천 유역의 확

장수로 형성면적은 그림 3으로 표시되며, 그림 3의 변곡점은 흐름특성의 변화점으로서 사면과 수로가 위치가 가능한 지역의 경계를 나타낸다. 변곡점의 확장수로 형성면적(A_{ECIT})은 84537.477[m²]로서 이보다 큰 A_{ECIT} 에서 수로가 발달가능하며, $CIT=84537.477$ [m²]로 설정시 사면흐름거동의 공간적 분포형태가 명확히 모의될 수 있다.

그림 6은 $CIT=84537.477$ [m²]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°57'0.288''~126°57'35.243''(850[m]) 위도 37°55'49.486''~37°56'13.499''(740[m])인 지역을 선정하였으며 그림 5에 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 표

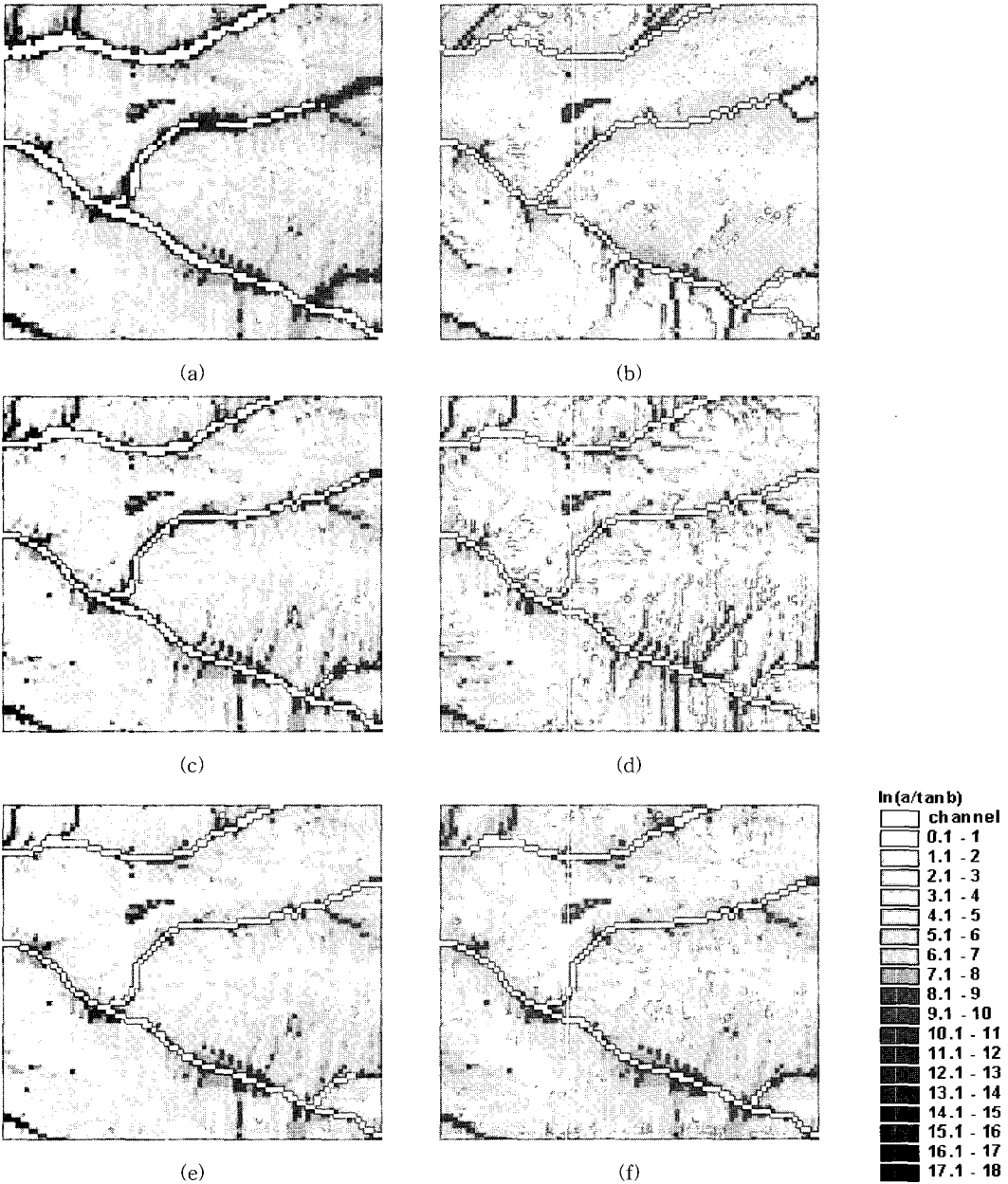


그림 6. $CIT = 84537.477[m^2]$; $H_{max} = 40$ 일때 각 흐름분배 알고리즘으로 계산한 지형지수지도
 : (a) *mfd* (b) *sfd* (c) $h=5$ (d) $n=-2$ (e) $n=0$ (f) $n=2$

현을 나타내지만 유역전체에 동일한 흐름분산특성을 가
 정하는 단점을 가지고 있다. (d)는 *SDFAA*의 $n=-2$
 함수에 의한 흐름특성의 표현으로서 봉우리에서 *mfd*
 특성을 지나며 흐름의 진행에 따른 *sfd*로의 빠른 변화
 를 표현하며, (f)는 느린 변화, (e)는 (d)와 (f)의 절충

된 표현으로서 사면의 흐름특성을 *SDFAA*가 다른 알
 고리즘에 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. 그림 7은 그림 6의 각각의

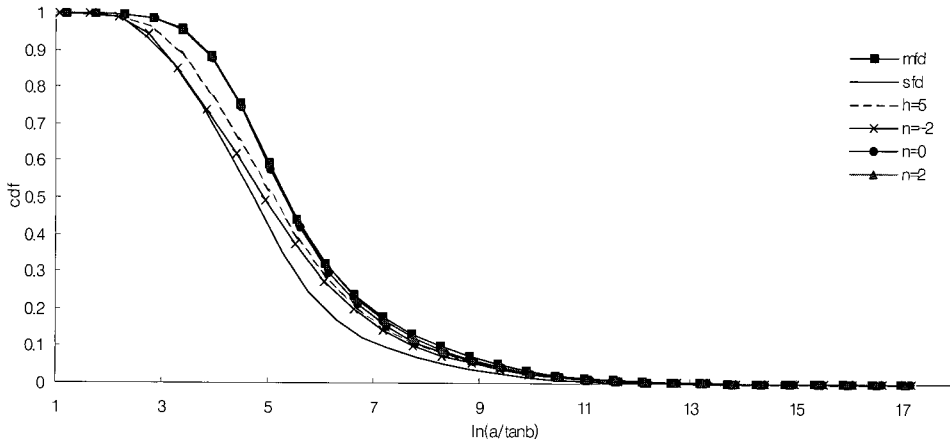


그림 7. $CIT = 84537.477[m^2]$; $H_{max} = 40$ 일 때 각 흐름분배 알고리즘으로 계산한 지형지수 ($\ln(a/\tan\beta)$)의 누적분포함수 (cdf)

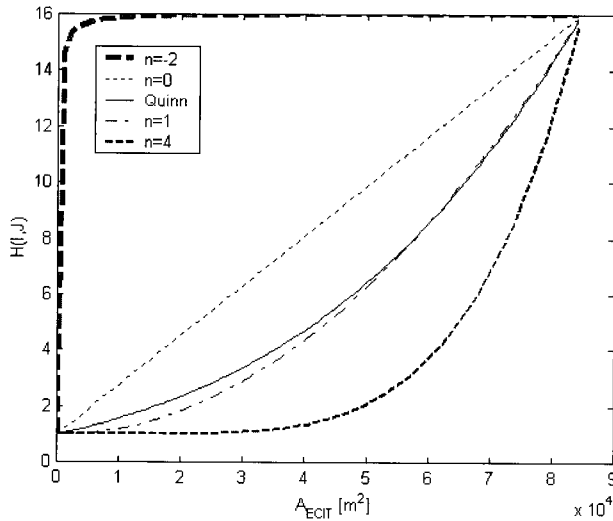


그림 8. $CIT = 84537.477[m^2]$; $H_{max} = 16$; $n = -2, 0, 1, 4$ 일 때 제안된 알고리즘과 Quinn의 방법에 의해 표현되는 함수공간

경우에 대한 지형지수의 누적분포함수(cdf)이다. 그림 6에서 고찰한 대로 $h = 5$ 는 mfd 와 sfd 의 중간적 거동을 보이며 $n = -2$ 는 $n = 0.2$ 에 비해 sfd 에 보다 가까운 흐름 표현을 기술하고 있다.

CIT 와 흐름분배인자에 대한 연구가 Quinn(1995)에 의해 행해진 바 있다. 식 (8)은 Quinn에 의해 고안된 식이며 흐름누적면적은 단위격자면적에서 CIT 까지 증대되며 $H_{max} = 2^f$ 으로 표현된다. 식 (8)에서 A 는 흐름

누적면적, f 는 흐름지수이다.

$$H(I, J) = (A/CIT + 1)^f \quad (8)$$

H_{max} 는 f 에 의해 결정되며 주어진 H_{max} 와 CIT 에 대해 식 (8)은 단일함수로서 표현되지만, $SDFAA$ 는 n 의 선정으로 다양한 흐름분배를 행할 수 있다. 그림 8은 $CIT = 84537.477[m^2]$, $H_{max} = 16$, $n = -2, 0, 1, 4$ 에 대한 Quinn의 방법과 $SDFAA$ 의 함수공간을 나타내

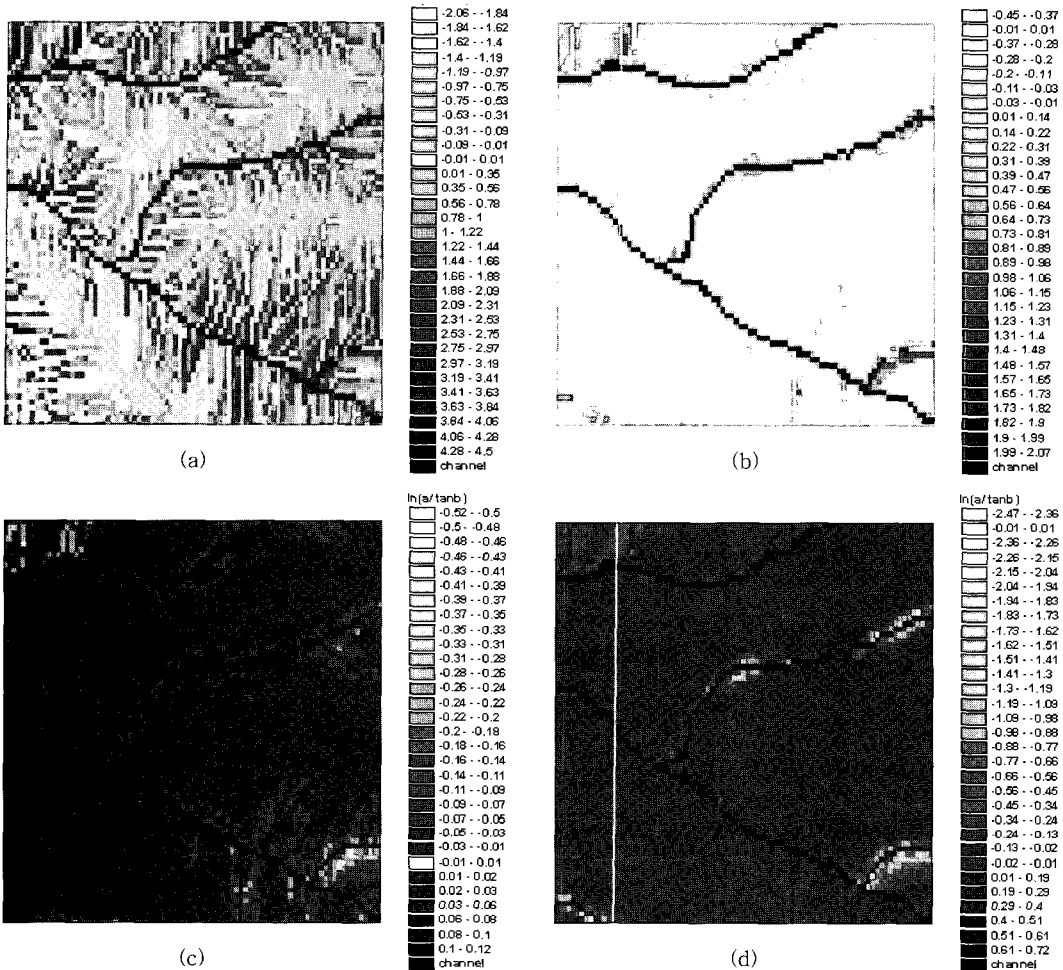


그림 9. Quinn의 방법과 제한된 흐름분배 알고리즘으로 계산한 지형지수의 차이지도
 : (a)Quinn's method) - (n=-2) (b)Quinn's method) - (n=0)
 (c)Quinn's method) - (n=1) (d)Quinn's method) - (n=4)

고 있다. n 의 적절한 선택에 의해 *SDFAA*로서 Quinn의 방법을 표현할 수 있으며, 복잡한 지형에서의 다양한 흐름분산특성을 기술하기 위해서는 단일함수로 흐름분산을 표현하는 Quinn 방법보다 *SDFAA*방법이 적합하다고 판단한다. 그림 8의 4개의 *SDFAA* 함수와 Quinn 방법에 의해 계산된 지형지수의 격자별 차이를 그림 9에 표현하였다. 그림 8에서 $n=-2.0$ 는 Quinn 방법에 비해 *sfd*적 흐름표현이 강하며, $n=4$ 는 *mfd*적 표현이 강하며 $n=1$ 이 Quinn 방법과 유사한 흐름분배를 행함을 기술하고 있다. 그림 9(a)는 $n=-2$ 의 *sfd*적 표현에 대해 단일방향을 따른 지형지수의 차이가 분명하지만 그림 9(b), (c), (d)는 수로격자 부근의 일부영역

에서만 차이가 나타나고 있다.

그림 9의 각각의 경우에 대한 유역전체지역의 비교를 표 1로 정리하였다. 흐름특성의 차이가 분명한 $n=-2$ 와 Quinn 방법의 경우 지형지수 차이의 최소값과 최대값이 다른 경우에 비해 크며 사면지역의 98%가 다른 값을 보이고 있다. 수로격자에 대한 표현도 5%의 차이를 보이고 있다. 이에 비해 $n=1$ 의 경우는 차이의 범위와 평균, 분산, 표준편차가 작고 수로격자의 위치(99.8% 일치)와 사면격자의 지형지수 값(52% 일치)을 다른 경우에 비해 매우 유사하게 모의함을 알 수 있다. $n=0.4$ 의 경우는 $n=-2$, 1의 경우에 비해 지형지수의 차이가 중간적 표현을 취하고 있음을 알 수 있다.

표 1. Quinn의 방법과 제안된 알고리즘의 비교

	(Quinn's method) - (n=-2)	(Quinn's method) - (n=0)	(Quinn's method) - (n=1)	(Quinn's method) - (n=4)
최소값	-2.060	-0.440	-0.510	-2.460
최대값	4.500	2.070	0.120	0.710
절대차이의 합	57081.609	3669.986	1242.149	3433.197
절대차이의 평균	0.682	0.044	0.015	0.041
절대차이의 분산	2.188	0.020	0.002	0.033
절대차이 표준편차	1.479	0.140	0.050	0.181
절대차이 분산계수	2.169	3.196	3.365	4.406
사면지역 비교격자수	83714	83750	83795	83793
사면내 값다른 셀수	81889 (98%)	55890 (67%)	43559 (52%)	44926 (54%)
사면내 값같은 셀수	1825 (2%)	27860 (33%)	40236 (48%)	38867 (46%)
수로격자 동일셀수	1678 (95.0%)	1682 (97.2%)	1681 (99.8%)	1625 (96.3%)
수로격자 다른셀수	88 (5.0%)	48 (2.8%)	4 (0.2%)	62 (3.7%)
파일전체 값다른셀수	81977	55938	43563	44988

표 2. 최적화에 적용된 매개변수들

매개변수	의미	보정범위
$CIT[m^2]$	수로형성면적정의	84,537~8,537,900[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
CIT	200,542.0087[m ²]
n	1.4364
H_{max}	102
수로위치오차의 합	12109.4431[m]
수로위치오차의 평균	14.33[m]

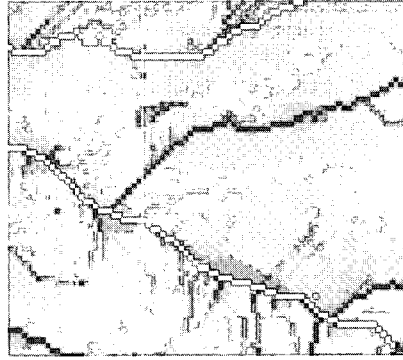
Quinn의 방법은 흐름지수 f 에 의해 $H_{max} = 2^f$ 로 결정되며, H_{max} 를 임의값으로 표현할 수 없다. H_{max} 는 수로격자폭의 표현에 결정적인 영향력을 가지므로 Quinn의 방법으로는 실제 수로의 형상표현에 최적화시킬 수 없는 단점을 가진다. 실제 수로의 형상과 일치시키기 위해 유전자 알고리즘을 사용하여 $SDFAA$ 를 최적화하였다. 대상 매개변수의 보정범위는 표 2에 기술하였으며 목적함수는 식 (9)와 같다.

$$Minimize \sum_{k=1}^n \sqrt{(x_m(k) - x_c(k))^2 + (y_m(k) - y_c(k))^2} \quad (9)$$

$x_m(k)$, $y_m(k)$ 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. 실제수로의 형상과 더불어 수로의 연결성(connectivity) 획득이 필수적이다. 연결성은 H_{max} 의 상향조정으로 획득가능하며 연결성과 실제수로 형상에 대한 최적화 결과는 표 3과 같다. 그림 10은 $mfd(a)$, $sfd(b)$, $h=5(c)$, $h=10(d)$, Quinn의 방법(e), 연결성과 실제수로형상에 최적화시킨 $SDFAA(f)$ 를 나타내고 있다.



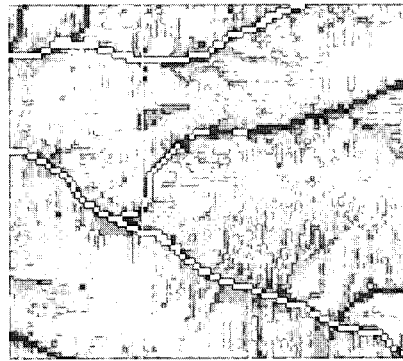
(a)



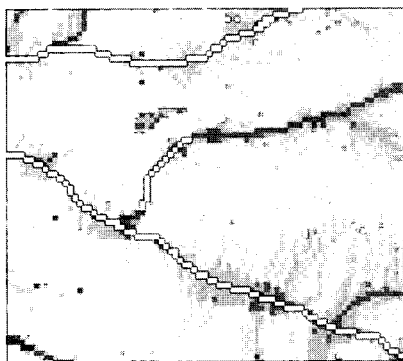
(b)



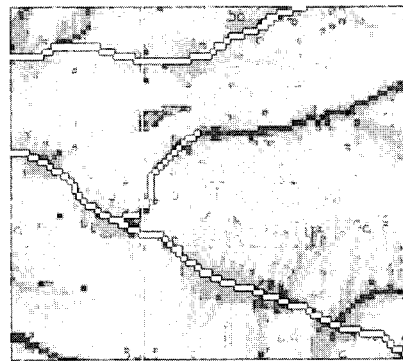
(c)



(d)



(e)



(f)

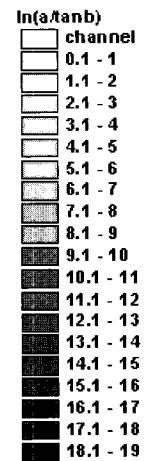


그림 10. CIT=200,542.0087[m²] 일때 각 흐름분배 알고리즘으로 계산한 지형지수지도 :
 (a) mfd, (b) sfd, (c) h=5, (d) h=10, (e) Quinn's method($H_{max} = 64$),
 (f) 연결성($H_{max}=102$)과 실제수로형상에 최적화
 (CIT=200,542.0087[m²]; $n=1.4364$) 시킨 지형지수지도

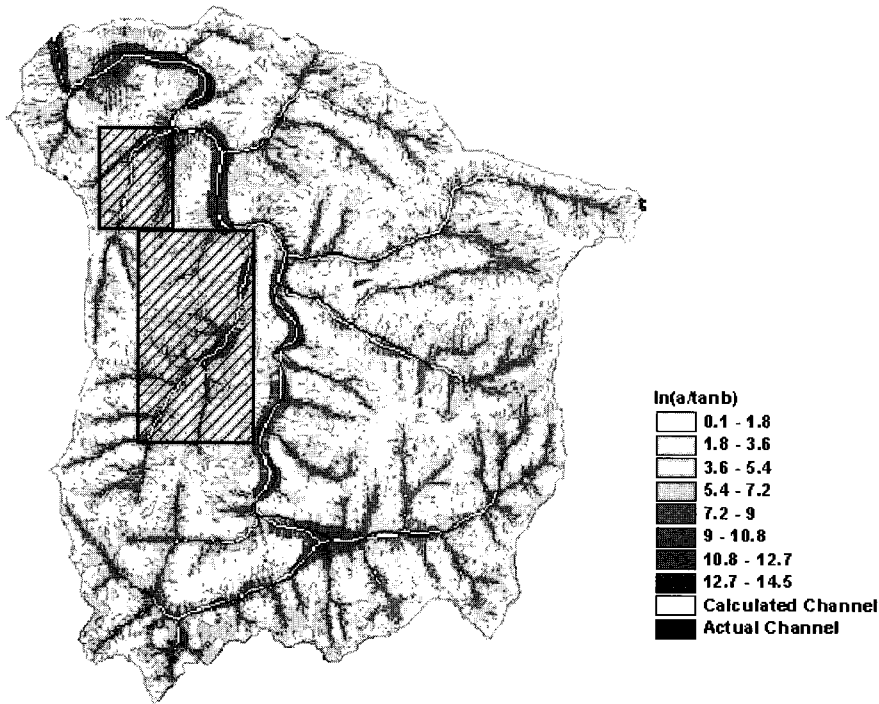


그림 11. 최적화($CIT = 200,542.0087[m^2]$; $H_{max} = 102$; $n=1.4364$)시킨 계산수로격자와 실제수로격자의 형상(빗금친 영역: 군사지역)

그림 10은 그림 6에 비해 큰 CIT 가 적용되어 수로 격자가 적게 산출됨을 관측할 수 있으나 $mfd(a)$ 알고리즘의 단점인 수로폭의 과다산출과 수로격자의 연결성 부족, $sfd(b)$ 알고리즘의 사면지형 흐름분배의 일차원적인 표현의 한계를 동일하게 지니고 있다. Holmgren's $h=5(c)$ 는 mfd 에 근접한 표현을 보이고 $h=10(d)$ 는 sfd 적 흐름표현을 보이며, (c), (d)는 h 의 선정에 따라 mfd 와 sfd 의 절충된 표현을 기술할 수 있음을 보여주지만 수로격자의 연결성이 부족하며 수로와 사면지역의 흐름분배율을 동일하게 고려하는 것은 복잡한 지형형상을 따른 흐름특성을 반영하지 못함을 의미한다. Quinn(e)의 흐름분배 방법은 사면에서 수로로의 변화하는 흐름특성을 반영하고 있지만 식 (8)에서 알 수 있듯이 수로의 연결성과 관련한 H_{max} 의 흐름지수 (f) 의존성에 의해 수로의 연결성을 획득할 수 없었다. 반면에 $SDFAA(f)$ 는 H_{max} 의 선정으로 수로의 연결성을 획득하였으며 유전자 알고리즘과의 결합으로 실제 수로와의 위치오차를 최소화하면서 사면에서 수로로의 점진적인 흐름특성 변화를 표현하고 있다.

그림 11은 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 흐름분산에 대한 적절한 묘사는 유역유출모형의 개선된 입력자료로서 활용될 수 있다.

5. 결 론

강우-유출 모형에서 흐름분배는 기초작업이며 필수과정이다. 복잡한 산지사면의 흐름거동과 지배적인 유출경로를 제공하는 수로에 대한 정확한 표현은 물리적인 의미를 가지는 유역유출모형의 발전된 형태를 유도할 수 있다. 따라서, 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 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김상현, 김경현, 정선희 (2001) "수치 고도 분석 : 분포형 흐름 분배 알고리즘." 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제3호, pp. 241-251.

김상현, 이지영 (1999). "개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구." 한국수자원학회 논문집, 제32권, 제4호, pp. 489-499.

이지영, 김상현 (2000) "지형적 특성을 고려한 지형지수 산정 알고리즘에 관한 연구." 한국수자원학회 논문집, 제33권, 제3호, pp. 179-188.

한국건설기술연구원, (1998) "시험유역의 운영 및 수문 특성 조사·연구", 연구보고서, 건기연 98-077.

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.

Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991). "Drainage networks from grid digital elevation medels." *Water Resour. Res.*, vol. 27, pp. 709-717.

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, Mass p. 412

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.

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.

Mendicino, G., and A. Sole (1997). "The information content theory for the estimation of the topographic index distribution used in TOP-MODEL." *Hydrol. Process.*, vol. II, pp. 1099-1114.

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.

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.

Western, A. W., Blöschl, G., and Grayson, R. B. (2001). "Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns." *Water Resour. Res.*, Vol. 37, No 1, pp. 83-97.

Western, A. W., R. B. Graysen, B. G nter, G. R. Willgoose and T. A. McMahon (1999). "Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices." *Water Resour. Res.*, vol. 35, pp. 797-810.

Zhang, W. and D. R. Montgomery (1994). "Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations." *Water Resour. Res.*, vol. 30, pp. 1019-1028.

(논문번호:02-028/접수:2002.5.10/심사완료:2002.06.4)