

저수지 홍수유입량 산정을 위한 확산-유추 지형학적
순간단위도 모형의 최적매개변수 추정
Optimal Parameters Estimation of Diffusion Analogy-GIUH Model for
Estimation of Reservoir Flood Inflow

최용준*, 김주철**, 이기하***, 정관수****
Yong Joon Choi, Joo Cheol Kim, Gi Ha Lee, Kwan Sue Jeong

요 지

확산-유추 지형학적 순간단위도는 통계물리적인 모형으로 이론적·물리적으로 뛰어난 모형임에도 불구하고 유역의 동적 매개변수인 특성유속과 확산계수의 산정이 어려워 실제적인 사용이 제한되어 왔다. 이러한 난제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 금강수계의 보청천 산성유역을 대상으로 전역최적화 기법인 SCE-UA를 이용하여 확산-유추 지형학적 순간단위도 모형의 동적 매개변수 산정하였으며, 모형의 재현성을 3개의 수문사상을 이용하여 검토하였다. 매개변수의 최적화 결과 차수 단계별 특성유속 및 확산계수의 증감은 변동을 보이지만, 전체적인 경향성은 특성유속의 경우 하천차수가 커질수록, 즉 하류방향에 대해 증가 경향을 나타내며, 반대로 확산계수는 감소되는 경향을 나타냈다. 본 연구에서 적용한 최적화 방법에 향후 지체시간, 분산 및 왜곡도 등의 통계적인 제약조건과 동적 매개변수의 공간적 변화 등의 물리적인 의미를 갖는 제약조건 등이 결합된다면 좀 더 발전된 모형으로 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 확산-유추, 지형학적 순간단위도, 전역최적화 기법, SCE-UA

1. 서론

확산유추의 개념을 기반으로 한 지형학적 순간단위도 모형(Rinaldo et al., 1991)은 수문학적 응답함수의 형상에 대한 체계적인 접근을 가능하게 하는 유용한 수단으로서 평가할 수 있다. 특히 Saco and Kumar(2002)에 의하여 일반화된 해석적 형태의 모형 구조 속에는 지표면유동과 하천유동 사이의 구분 및 하천차수에 따른 유속의 변동특성이 명시적으로 포함되어 있어 통상적인 하천 지형법칙(예를 들면 하천차수법칙)의 맥락에 따라 유역의 수문학적 응답특성이 갖는 공간변동성에 대한 해석을 가능하게 한다. 하지만 해당 모형의 실제 적용을 위해서는 각 차수별로 총 4개의 동적 매개변수(즉 지표면과 하천의 유속 및 확산매개변수)가 필요하기 때문에 유역 규모의 성장에 따라 추정되어야 할 매개변수의 개수는 상당수 증가하게 된다. 기존 연구에서는 주로 대상유역에 대한 기지의 수리기하(hydraulic geometry) 관계식에 의존한 동적 매개변수의 추정과정이 보고되어 왔다. 하지만 신뢰성 있는 수리기하 관계식의 수립은 이론적 혹은 실무적 측면에서 아직 해결되지 않은 많은 과제를 보유한 어려운 문제 중의 하나이다.

* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : ace_choi@hanmail.net
** 정회원 · 한국수자원연구원 연구원 · E-mail : kjoocheol@hanmail.net
*** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 건설방재연구소 post-doc 연구원 · E-mail : leegiha@gmail.com
**** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수 · E-mail : ksjung@cnu.ac.kr

자동최적화 기법(automatic optimization method)은 컴퓨터 기술의 발달로 수문분야 모형의 최적 매개변수 산정을 위한 다양한 연구들에 적용되어 왔다. Axis-Rotating법, Pattern Search법, Simplex법 등과 같은 지역탐색기법(local search method)를 이용한 수문모형 매개변수 산정을 위한 연구가 1960년대 중반부터 수행되어 왔으며, 최근에는 다중수렴구간(multiple regions of attraction), 국부최적해(local optima), 매개변수의 상호의존성(parameter interdependency)등과 같은 지역탐색기법의 한계성을 극복하기 위해 전역탐색기법(global search method)을 이용한 수문모형 매개변수 산정에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. Duan 등(1992)은 전역탐색기법과 지역탐색기법 장점들과 콤플렉스 분할(complex partition) 및 혼합(shuffling)이라는 새로운 개념을 결합한 Shuffled Complex Evolution(SCE-UA)기법을 개발하였으며, SCE-UA는 국내외적으로 다양한 수리/수문모형에 적용되고 다른 전역탐색기법들과의 비교평가를 통해 계산의 효율성 및 매개변수 산정의 정확도면에서 그 우수성이 증명된 바 있다(Eckardt and Arnold, 2001; 이도훈, 2006). 본 연구에서는 보청천 산성 소유역을 대상으로 GIS를 이용하여 지형학적 인자들을 자동추출하고 SCE-UA를 이용하여 확산유추 지형학적 순간단위도 모형의 동적매개변수 산정하고, 유역 차수별 매개변수 변동성을 비교분석하였다.

2. 기본이론

2.1 전역최적화기법

SCE-UA는 1) 확정론적 및 확률론적 접근법의 결합; 2) 전역해로의 수렴을 위한 매개변수 공간에서의 콤플렉스 규칙적인 진화; 3) 경쟁적 진화과정; 4) 콤플렉스 혼합이라는 네가지 개념을 기반으로 구성된 단일목적 최적화기법 (single-objective optimization algorithm)으로써 기존의 GA법 및 Simplex법에서 적용된 1) ~ 3) 까지의 특성과 새로운 콤플렉스 혼합이라는 4)의 특성을 접목한 전역 최적해 탐색기법이다. 이 기법은 각 모형의 매개변수에 따라 주어진 가능해 공간(feasible parameter space)에서 무작위 표본추출에 의해 최초 모집단을 형성한 후 목적함수 값의 오름차순으로 표본 점들을 서열화한 뒤 $2n+1$ (n :매개변수의 수)개의 점으로 구성된 몇 개의 콤플렉스로 분할한다. 그 후 확장, 축소, 반사, 수축에 의한 규칙적인 콤플렉스 진화과정에 의해 각 콤플렉스의 최소값 주변으로 축소된 새로운 콤플렉스를 반복적으로 생성한다. 또한 탐색과정에서의 새로운 정보를 공유하기 위해 각각의 콤플렉스를 주기적으로 혼합하며 새로운 콤플렉스를 생성한 뒤 다시 진화과정을 수행하며, 수렴한계조건을 만족할 때까지 반복된다. 진술한 SCE-UA에 의한 최적매개변수로의 수렴과정은 Fig. 1과 같다.

2.2 확산-유추 지형학적 순간단위도

Rinaldo et al.(1991)은 수로의 유출 수송과정을 Eq. (1)의 이송-확산 방정식을 이용하여 유추하였다.

$$\frac{\partial h_{\omega}}{\partial t} + u_{\omega} \frac{\partial h_{\omega}}{\partial x} = D_{L_{\omega}} \frac{\partial^2 h_{\omega}}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기에서 h_{ω} , $D_{L_{\omega}}$ 는 흐름 수심과 동수역학적 확산 계수(m^2/s) 이고 u_{ω} 는 운동학적 파속(m/s)이다. 또한 Strahler 차수법clr의 상태 ω 에서 운동학적 파속 u_{ω} 와 동수역학적 확산계수 $D_{L_{\omega}}$ 이 공간적으로 불변할 경우 해석해를 다음과 같이 증명하였다.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_{L_{\omega}} t^3}} \sum_{\gamma \in \Gamma} P(\gamma) \bar{L}_{\gamma} \exp \left\{ -\frac{(\bar{L}_{\gamma} - ut)^2}{4D_{L_{\omega}} t} \right\} \quad (2)$$

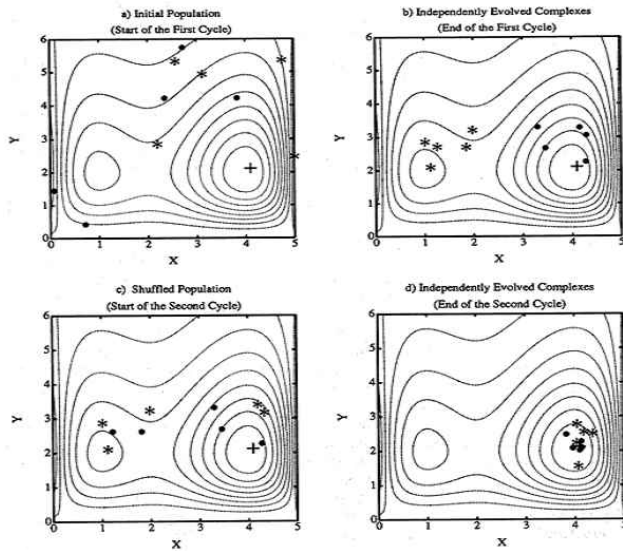


Fig. 1 Schematic SCE-UA processes

항은 운동학적 분산(D_K)을 나타낸다. 본 연구에서는 Saco and Kumar(2002)가 하천에 대해 제안한 Eqs. (3) 과 (4)에 지표면 유동을 결합하여 모형을 구성하였다.

3. 대상 유역 및 적용

대상유역은 국제수문개발계획(IHP) 대표유역인 금강수계의 보청천 유역 중 산성 수위표 지점을 선정하였다. 한국지리원에서 제공하는 수치지도 하천망(blue line)을 그대로 사용하여 차수분석 결과 대상유역은 Fig. 2와 같이 4차 유역으로 확산유추 지형학적 순간단위도 모형의 경우 각 차수별 하천/지표면 유속, 하천/지표면 확산계수 총 16개의 매개변수가 필요하다. 본 연구에서는 대상 유역의 3개 수문자료 및 GIS를 이용하여 추출된 지형학적 인자들을 이용하여 모형의 매개변수 추

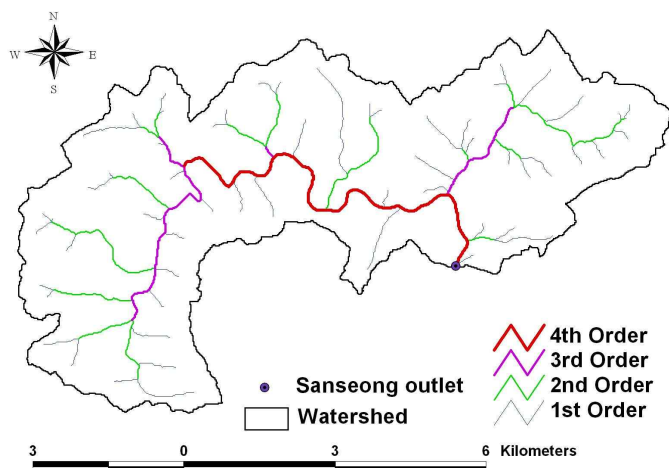


Fig. 2 Target Basin Map

여기에서 $P(\gamma)$ 는 경로확률, \bar{L}_γ 는 경로 γ 의 평균 길이로 정의된다. 하천의 상태 ω 별 특성유속이 상이할 경우 유하시간분포의 평균 및 분산은 각각 다음 Eq. (3) and (4)와 같다 (Saco and Kumar, 2002).

$$E[T_n] = \sum_{\gamma \in \Gamma} P(\gamma) \frac{\bar{L}_\gamma}{u_\gamma} \quad (3)$$

$$Var[T_n] = \frac{2E_\gamma(\bar{L}_\gamma)}{u_n^3} (D_D + D_G + D_K) \quad (4)$$

여기서 u_γ 는 등가경로 유속, $E_\gamma(\bar{L}_\gamma)$ 은 평균경로 길이를 나타낸다. Eq. (3)은 순간단위도의 평균을 Eq. (4)는 분산을 나타내며, Eq. (4)의 첫 항은 동수역학적 분산(D_D)을, 두 번째 항은 지형학적 분산(D_G), 마지막

항은 운동학적 분산(D_K)을 나타낸다. Duan 등(1994)은 SCE-UA의 계산 효율성과 정확성은 알고리즘 매개변수의 적절한 선택에 의해 결정되고 특히, 모형의 매개변수의 수에 따라 콤플렉스 수의 조정이 필요하다고 지적하였다. 본 연구에서는 2개의 콤플렉스와 단위콤플렉스당 13개의 점을 이용하여 1000의 반복과정을 통해 최적매개변수를 산정하였고, 목적함수로(OF)는 식(5)의 RMSE, 매개변수 산정을 위한 제약조건은 특성유속의 경우 D'odorico and Rigon(2003)이 제시한 값, 확산계수의 경우 Fischer et al.(1979)에 의해 조사된 범위내에서 추정하였다.

$$OF(\theta) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q - \hat{Q}(\theta))^2} \quad (5)$$

여기서 n은 사상별 자료의 개수, Q는 실측유량 $\hat{Q}(\theta)$ 는 매개변수 θ 의 경우 계산유량을 의미한다. Table 1은 각 매개변수, 초기범위 및 전역최적화기법으로 산정된 각 사상별 차수별 최적매개변수값을 보여주고 있다.

Table 1. Optimal Solution of Parameters

Parameter	Event (Year-Month-Day)	Order			
		1	2	3	4
u_c (m/s)	1986-07-09	0.540	0.514	0.683	0.579
	1992-07-12	0.510	0.503	0.621	0.609
	1993-08-08	0.510	0.514	0.532	0.503
	Mean	0.520	0.510	0.612	0.564
u_h (m/s)	1986-07-09	0.033	0.098	0.079	0.099
	1992-07-12	0.006	0.093	0.079	0.059
	1993-08-08	0.013	0.025	0.079	0.094
	Mean	0.017	0.072	0.079	0.084
D_c (m ² /s)	1986-07-09	0.291	23.816	185.192	657.185
	1992-07-12	0.135	1001.892	1129.872	846.690
	1993-08-08	0.150	274.779	391.243	465.297
	Mean	0.192	433.496	568.769	656.391
D_h (m ² /s)	1986-07-09	1179.615	7.591	15.548	6.737
	1992-07-12	873.639	730.580	859.195	15.668
	1993-08-08	1195.745	0.943	602.302	133.535
	Mean	1082.999	246.371	492.349	51.980

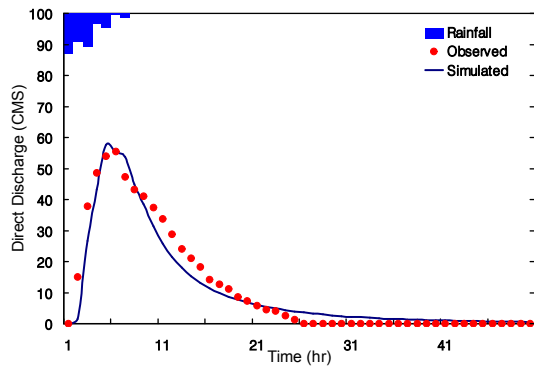
매개변수의 최적화 결과 차수 단계별 특성유속 및 확산계수의 증감은 변동을 보이지만, 전체적인 경향성은 특성유속의 경우 하천 차수가 커질수록, 즉 하류방향에 대해 증가 경향을 나타내며, 반대로 확산계수는 감소되는 경향을 나타냈다. Fig. 3은 최적화된 매개변수에 의해 계산된 단위도로부터 작성된 수문곡선과 관측된 수문곡선을 비교한 것으로, 침투유량의 경우 (a), (b), (c) 사상 각각 3.8%, 7.2%, 26.6%의 오차를 나타냈으며, 침투시간은 각각 1시간, 0시간, 2시간의 오차를 나타내었다.

4. 결과

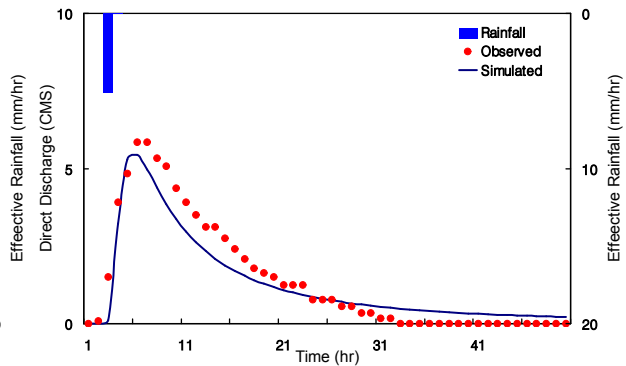
확산-유추 지형학적 순간단위도는 통계물리적인 모형으로 이론적·물리적으로 뛰어난 모형임에도 불구하고 유역의 동적 매개변수인 특성유속과 확산계수의 산정이 어려워 실제적인 사용이 제한되어 왔다. 이러한 난제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 확산-유추 지형학적 순간단위도 모형의 동적 매개변수 산정을 위해 전역최적화 기법을 적용을 시도하였다는 점에 의미를 둘 수 있다. 다만 (c) 사상의 경우 침투유량이 큰 오차를 보였는데, 이는 향후 전역최적화 기법에 지체시간, 분산 및 왜곡도 등의 통계적인 제약조건과 동적 매개변수의 공간적 변화 등의 물리적인 의미의 제약조건 등의 결합을 통해 보완해 나아가야 할 것으로 판단된다.

감 사 의 글

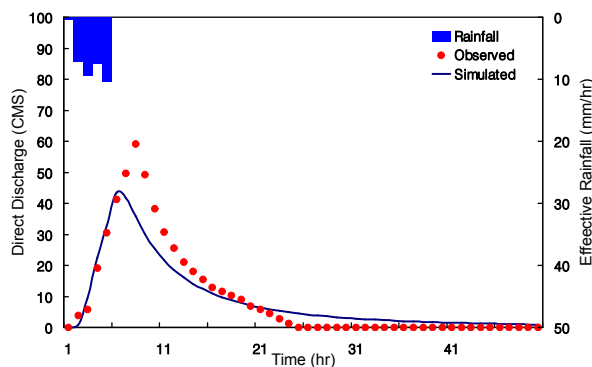
이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-09-NH-05] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.



(a) 1986-07-09



(b) 1992-07-12



(c) 1993-08-08

Fig. 3 Comparison between Observed and Simulated hydrographs

Table 2 Comparison between Observation and Simulation

Event	Q_p (CMS)		t_p (hr)	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
(a)	55.42	57.53	6	5
(b)	5.86	5.44	6	6
(c)	59.15	43.40	8	6

참 고 문 헌

1. 이도훈 (2006). "LH-OAT 민감도 분석과 SCE-UA 최적화 방법을 이용한 SWAT 모형의 자동보정", 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 39(8), 677-690.
2. D'odorico, P., and Rigon, R. (2003). "Hillslope and channel contributions to the hydrologic response". *Water Resour. Res.*, Vol. 39, NO. 5, 1113. doi:10.1029/2002WR001708.
3. Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. K. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models", *Water Resour. Res.*, Vol. 28, 1015 - 1031.
4. Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. K. (1994). "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models", *J. Hydrol.*, Vol. 158, 265 - 284.
5. Eckhardt K, Arnold J. (2001). "Automatic calibration of a distributed catchment model", *Journal of Hydrology*, Vol. 251, pp. 103-109.
6. Fischer, H. B., List E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*, A Division of Harcourt Brace and Company, California, USA.
7. Rinaldo, A., and Rodriguez-Iturbe, I. (1996). "The geomorphological theory of the hydrologic response", *Hydrological Processes*, Vol. 10, No. 6, pp. 803-844.
8. Saco, P.M. and Kumar, P. (2002). "Kinematic dispersion in stream networks -1. Coupling hydraulics and network geometry", *Water Resour. Res.*, Vol. 38, No. 11, pp. 26~1-26~14.