한국습지학회지 제13권 제3호, 2011년 12월 (385 - 394)

확산-유추 지형학적 순간단위도 모형의 최적매개변수 추정

김 주 철* / 최 용 준**+

Optimal Parameters Estimation of Diffusion-Analogy Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Model

Joocheol Kim* / Yongjoon Choi**+

요약 : 본 연구에서는 유역의 배수구조를 지표면과 하천으로 구분하여 확산-유추 지형학적 순간단위도의 최적매개변수를 산정하였다. 모형의 매개변수는 지표면과 하천 각각의 유속(u_c, u_h) 및 확산계수(D_c, D_h)로 구성하였다. 대상유역은 보청천 유역의 탄부 소유역을 선정하였으며, 대상유역의 하천망은 Strahler 차수법칙에 의해 4차 하천으로 분류되었다. 최적화 기법은 SCE-UA을 적용하였으며, 추정된 최적 매개변수는 다음과 같다; u_c : 0.589 m/s, u_h : 0.021 m/s, D_c : 34.469 m^2/s, D_h : 0.1333 m^2/s. 추정된 매개변수의 검증결과 평균 첨두유량 오차는 약 11 %, 첨두시간 오차는 0.3 hr로 양호하게 나타났다. 또한 매개변수들의 변동성을 살펴본 결과 하천확산계수(D_c)는 수문응답함수에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었으며, 향후에는 이러한 결과들을 고려함으로서 모형을 좀 더 간편화 할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 동수역학적 분산, 지형학적 분산, 지형학적 순간단위도, Strahler 차수법칙

Abstract : In this study, optimal parameters of diffusion-analogy GIUH were calculated by separating channel and hillslope from drainage structures in the basin. Parameters of the model were composed of channel and hillslope, each velocity(u_c, u_h) and diffusion coefficient(D_c, D_h). Tanbu subwatershed in Bocheong river basin as a target basin was classified as 4th rivers by Strahler's ordering scheme. The optimization technique was applied to the SCE-UA, the estimated optimal parameters are as follows. u_c : 0.589 m/s, u_h : 0.021 m/s, D_c : 34.469 m^2/s, D_h : 0.1333 m^2/s. As a verification for the estimated parameters, the error of average peak flow was about 11 % and the error of peaktime was 0.3 hr. By examining the variability of parameters, the channel diffusion coefficient didn't have significant effect on hydrological response function. by considering these results, the model is expected to be simplified in the future.

Keywords : *Hydrodynamic dispersion, Geomorphologic dispersion, GIUH, Strahler's ordering scheme*

1. 서 론

지형학적 순간단위도(GIUH, Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph)이론은 임의 유역에서 강우로 인해 발생되는 유역출구점에서의 유량의 시간적 변화를 해석할 수 있는 유용한 방법으로, 그 기원은 Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)와 Gupta et al.(1980)로 부터 찾을 수 있다. GIUH 모형은 기존의 개념적 모형과는 달리 유역 내 떨어진 강우입자들의 유역 출구점까지의 유하시간에 대한 확률밀도함수를 기반으로 한 모형으로, 이러한 통계학적 접근방법과 자연 유역의

+ Corresponding Author : ace_choi@kwater.or.kr
* 비회원 · 한국수자원공사 K-water 연구원 · 연구원 · E-mail : kjoocheol@hanmail.net
** 정회원 · 한국수자원공사 K-water 연구원 · 연구원 · E-mail : ace_choi@kwater.or.kr

형태적 특성을 결합하였다는 점에 주목된다. GIUH 이론은 이후 여러학자들에 의해 획기적인 발전을 이루었는데, 그 중 하나가 Rinaldo et al.(1991)에 의해 제시된 확산유추의 개념을 기반으로 한 GIUH 모형이다. 이러한 확산-유추 GIUH는 수문학적 응답함수의 형상(특히 분산)에 대한 체계적인 접근을 가능하게 하는 유용한 수단으로 평가할 수 있다. 즉 이들은 수문응답함수의 퍼짐 현상이 물입자 사이의 동수역학적 특성과 배수구조의 기하학적 특성에 의해 결정됨을 규명하였다. 이들은 이와 같은 현상을 각각 동수역학적 분산(hydrodynamic dispersion)과 지형학적 분산(geomorphological dispersion)으로 구분하였다. 이후 Saco and Kumar(2002)는 Strahler 차수법칙(Strahler, 1957)에 의해 구분된 하천망의 차수별 유속차에 의해 발생되는 퍼짐 현상을 밝혀내고 이를 운동학적 분산(kinematic dispersion)으로 정의하였다.

이상의 두 연구는 수문학적 응답특성의 구조를 밝히는데 큰 역할을 하였으나, 이들 연구는 유역의 하천망에 집중하였다는 점에 한계성을 가지고 있다. 이와는 별개로 van der Tak and Bras(1990)은 지표면에서의 물의 유동에 대해 관심을 기울였다. 이들은 자연 유역에서 물의 유동특성은 지표면과 하천의 상호작용에 의해 결정됨을 착안하였으며, 이를 통해 지표면과 하천에 대해 각각의 개별적인 동수역학적 특성을 고려한 GIUH를 제안하였다. 이러한 원인에 의해 발생되는 수문응답함수의 퍼짐현상은 일종의 지표면과 하천의 운동학적 분산으로 볼 수 있다. 이들의 연구에서 특히 주목할 점은 순간단위도의 형상은 하천의 특성속도 보다 지표면의 특성속도에 대해 더 민감하게 반응할 수 있음을 언급하였다는 것이다. 이는 지표면 유동거리가 짧더라도 지표면과 하천망의 특성유속이 크게 차이가 남으로서 유하시간에 대한 지표면의 영향을 간과할 수 없음을 나타낸다.

이상의 수문응답함수의 구조에 대한 이론들을 모두 적용한다면 지표면유동과 하천유동 사이의 구분 및 하천차수에 따른 유속의 변동특성이 명시적으로 포함하게 되는 것으로 하천지형법칙(예를 들면 하천차수법칙)의 맥락에 따라 유역의 수문학적 응답특성이 갖는 공간변동성에 대한 해석이 가능해진다. 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(Saco and Kumar, 2002; Paik and Kumar, 2004). 하지만 신뢰성 있는 수리기하 관계식의 수립은 이론적 혹은 실무적 측면에서 아직 해결되지 않은 많은 과제를 보유한 어려운 문제 중의 하나이다.

따라서 본 연구에서는 하천과 지표면을 구분하여 각각의 동수역학적 특성과 기하학적 특성을 고려한 최적 매개변수를 산정하고자 하였다. 즉, 유역에 총 4개의 동적 매개변수를 적용하고자 하였다. 이러한 최적 매개변수 추정을 위해서 수문분야 모형의 최적 매개변수 산정을 위한 다양한 연구들에 적용되어 온 자동최적화 기법(automatic optimization method)을 적용하였다. 특히 자동최적화 기법 중 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona)기법을 적용하였다(Duan et al., 1992). 이 기법은 전역탐색기법과 지역탐색기법 장점들과 콤플렉스 분할(complex partition) 및 혼합(shuffling)이라는 새로운 개념을 결합한 기법으로서 국내외적으로 다양한 수리/수문모형에 적용되어 왔으며, 다른 전역탐색기법들과의 비교평가를 통해 계산의 효율성 및 매개변수 산정의 정확도면에서 그 우수성이 증명된 바 있다(Eckardt and Arnold, 2001; 이도훈, 2006).

본 연구에서는 이상의 이론적 배경에 따라 보청천 유역의 탄부 소유역을 대상으로 지리정보체계(GIS, Geographic Information System)를 이용하여 지형학적 인자들을 추출하였으며, 이를 바탕으로 SCE-UA 방법을 이용하여 대상유역의 확산-유추 지형학적 순간단위도 모형을 적용하기 위한 최적 매개변수를 산정하고자 하였다.

2. 기본이론

2.1 확산-유추 지형학적 순간단위도

Strahler의 차수분류법을 기반으로 한 지형학적 순간단위도 모형의 일반식은 식 (1)과 같다.

$$f(t)=\sum_{\gamma\in\Gamma}P(\gamma)\left[f_{\omega}(t)*\cdots*f_{\Omega}(t)\right]_{\gamma} \tag{1}$$

여기서 Γ는 물 입자의 배수경로인 γ의 모집단, $P(\gamma)$는 임의 추출한 물 입자가 γ를 통하여 배수될 확률 그리고 *는 convolution 연산자이다. $f_{\omega}(t)$는 ω차 상태의 유하시간에 대한 확률밀도함수로서 식 (1) 우변의 $[\cdot]_{\gamma}$는 γ를 통하여 배수되는 물 입자의 총 유하시간에 대한 확률밀도함수를 의미한다. Gupta et al.(1980)은 $P(\gamma)$를 식 (2)와 같이 정의한 바 있다.

$$P(\gamma)=\theta_i(0)\times p_{ij}\times\cdots\times p_{k\Omega} \tag{2}$$

여기서 $\theta_i(0)$는 초기상태확률이고 p_{ij}는 i차 하천에서 j차 하천으로 천이될 상태천이확률이다. 이러한 초기상태확률과 상태천이확률은 다음 식 (3)에 의해 계산 된다(Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979).

$$\theta_i(0)=\frac{A_i^*}{A};\ p_{ij}=\frac{N_{ij}}{N_i} \tag{3}$$

여기서 A_i^*는 i차 하천으로 직접 배수되는 유역면적, A는 총 유역면적, N_{ij}는 j차 하천과 합류하는 i차 하천의 개수 그리고 N_i는 i차 하천의 총 개수이다. 이로부터 식 (1)은 유하시간에 대한 확률밀도함수 $f(t)$를 Strahler의 차수분류법을 기반으로 각 배수경로별 확률밀도함수의 가중평균으로서 모의하고 있음을 확인할 수 있다.

이 후 Rinaldo et al.(1991)은 확산방정식의 해석해를 차수별 평균대기시간의 확률밀도함수로 하여, 동수역학적 관점에서 지형학적 순간단위도를 유도하였고 하천망의 수문학적 응답은, 개별적인 하천구간내의 동수역학적 분산효과와 하천망의 형태로 인한 지형학적 분산효과로 구성됨을 제시하였다. 특히 지형학적 확산계수는 동수역학적 분산과 지형학적 분산의 결합으로 인한 유하시간 분포형, 즉 지형학적 순간단위도의 분산에 대한 추정으로부터 추론됨을 다음과 같이 증명하였다. 수로를 통한 유출의 수송과정은 확산유추를 통하여 식 (4)와 같이 근사(approximation)할 수 있다 (Henderson, 1966)

$$\frac{\partial h_{\omega}}{\partial t}+u_{\omega}\frac{\partial h_{\omega}}{\partial x}=D_{L_{\omega}}\frac{\partial^2 h_{\omega}}{\partial x^2} \tag{4}$$

여기에서 h_{ω}, $D_{L_{\omega}}$는 흐름 수심과 동수역학적 확산 계수(m^2/s) 이고 u_{ω}는 운동학적 파속(m/s)이다. Rinaldo et al.(1991)은 상태 ω에서 운동학적 파속 u_{ω}와 동수역학적 확산계수 $D_{L\omega}$이 공간적으로 불변할 경우 해석해를 다음과 같이 증명하였다.

$$f(t)=\frac{1}{\sqrt{4\pi D_L t^3}}\sum_{\gamma\in\Gamma}P(\gamma)\overline{L_{\gamma}}exp\left\{-\frac{(\overline{L_{\gamma}}-ut)^2}{4D_L t}\right\} \tag{5}$$

여기에서 $\overline{L_{\gamma}}$는 경로 γ의 평균 길이로 정의된다.

따라서 지표면과 하천을 개별적인 지형요소로 구분할 경우 유역의 수문응답, 지표면과 하천에 대한 수문응답은 각각 다음과 같이 정의된다 (D'odorico and Rigon, 2003).

$$f(t)=\sum_{\gamma\in\Gamma}P(\gamma)[f_h(t_h)*f_c(t_c)] \tag{6}$$

$$f_h(t_h)=\frac{\overline{L_h}}{\sqrt{4\pi D_h t_h^3}}exp\left\{-\frac{(\overline{L_h}-u_h t_h)^2}{4D_h t_h}\right\} \tag{7}$$

$$f_c(t_c) = \frac{\overline{L_c}}{\sqrt{4\pi D_c t_c^3}} exp\left\{ - \frac{(\overline{L_c} - u_c t_c)^2}{4 D_c t_c} \right\} \quad (8)$$

여기서 아래첨자 h와 c는 각각 지표면과 하천을 나타낸다. 또한 지표면과 하천이 길이가 서로 독립적일 경우 유하시간분포의 평균 및 분산은 다음과 같이 유도된다(D'odorico and Rigon, 2003).

$$E[t] = \frac{1}{u_c} E[L_c] + \frac{1}{u_h} E[L_h] \quad (9)$$

$$Var[t] = \frac{2D_c}{u_c^3} E[L_c] + \frac{2D_h}{u_h^3} E[L_h] + \frac{1}{u_h^2} Var[L_h] + \frac{1}{u_c^2} Var[L_c] \quad (10)$$

여기에서 $E[\cdot]$, $Var[\cdot]$는 각각 기대치 및 분산 연산자이다. 식 (9)는 순간단위도의 평균을 식 (9)는 분산을 나타내며, 식 (9)의 첫 두 항은 동수역학적 분산을, 마지막 두 항은 지형학적 분산을 나타낸다. 전자의 동수역학적 분산은 지형학적 순간단위도의 분산의 일부를 수로의 동수역학적 특성인 확산계수를 기반으로 정량화 하고 있다. 하지만 후자의 지형학적 분산은 확산계수에 독립적인 형태로서 하천망의 기하학적 특성(혹은 배수경로의 이질성)이 순간단위도의 분산(혹은 형상)에 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있다. 만약 대상유역의 배수경로가 오직 한 개이거나 혹은 출구를 중심으로 동일한 길이를 갖는 방사형의 경로들로 구성된다면 두 번째 항은 소거될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 식 (9)와 (10)의 연립해는 해석해가 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 최적화 기법을 적용하였다.

2.2 전역 탐색기법

전역 탐색기법은 초기조건에 관계없이 효율적으로 전역해를 탐색하는 방법으로 확정론적 방법, 추계학적 방법 및 이상의 두 방법을 조합한 방법으로 구분된다. 확정론적 방법은 목적함수가 연속적이고 미분식이 필요하며, 추계학적 방법과 조합법은 가능한 공간에서 무작위로 추출한 점들의 목적함수를 평가하여 최적해를 탐색한다. 이러한 전역최적화기법 중 SCE-UA법은 다른 방법보다 효율적이고 지속적인 결과를 나타낸다고 알려져 있으며, Simplex법, 무작위 탐색법, 경쟁적 진화 및 집합체의 혼합등과 같은 개념을 탐색기법으로 정보의 공유와 생물학적인 진화개념에 바탕을 두고 있다(Duan et al., 1992; 강민구와 박승우, 2005). 본 연구에서는 이상에서 설명된 SCE-UA 방법에 의해 확산-유추 GIUH 모형의 최적 매개변수를 산정하고자 하였다.

3. 적용 결과

3.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 국제수문개발계획(IHP, International Hydrological Project) 대표유역인 금강수계의 보청천 유역 중 탄부 수위표 지점을 선정하였다(Fig. 1). 탄부 유역은 보청천 유역 중 유일한 지류유역으로 독립적인 유역이다. 지형분석을 위한 하천망은 하천망 생성기법에 따른 불확실성을 줄이고자 수치지형도상의 실제하천망(blue line)을 이용하였다. 이 때 수치지형도의 축척은 1:25,000을 이용하였으며, 격자 해상도는 20 m를 적용하였다.

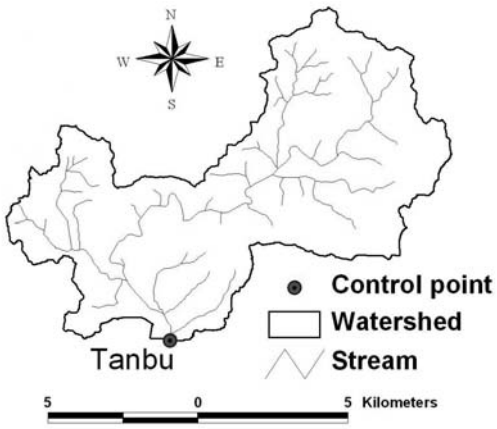


Fig. 1 Target Basin

3.2 지형분석 및 수문자료

대상유역의 지형분석결과는 다음 Table 1과 같다. 대상유역은 Strahler의 차수법칙에 따른 위상구조에 의해 4차 하천으로 분류되며, 1차 하천은 80개, 2차 하천은 23개, 3차와 4차 하천은 각각 4개와 1개로 나타났다. Table 1의 (3)~(5)란은 식 (3)에서의 상태천이 하천수(상태천이 확률)를 나타내며, 마지막란은 초기상태확률이다. 또한 대상유역의 하천 평균길이($E[L_c]$) 분산($Var[L_c]$)은 각각 17.161 ㎞, 5.591 ㎢이며, 지표면에 대한 $E[L_h]$ 및 $Var[L_h]$는 각각 0.388 ㎞, 0.006 ㎢으로 나타났다. 또한 모형의 검·보정을 위해 조사된 수문자료는 Table 2와 같다. 각 수문사상에 대해 면적 평균 강우량은 티센가중법을, 기저유출분리에는 경사급변점법을 사용하였다. 또한 유효우량 분리방법은 다음 식 (11)의 NRCS(Natural Resources Conservation Service) 법을 사용하였다.

$$Q_e = \frac{(P_t - I_a)^2}{(P_t - I_a) + S_p} \tag{11}$$

여기에서 Q_e는 유효우량, P_t는 총 우량, I_a는 초기손실우량을 S_p는 초기손실우량을 포함한 토양의 최대 잠재보유수량을 나타낸다.

Table 1 Results of Geomorphologic Analysis

Stream Order (ω)	Number	Transition number (Probability)			Initial Probability
		1-2	1-3	1-4	
		2-3	2-4	-	
		3-4	-	-	
1	80	64 (0.800)	10 (0.125)	6 (0.075)	0.553
2	23	16 (0.696)	7 (0.304)	-	0.171
3	4	4 (1.000)	-	-	0.153
4	1	-	-	-	0.123

Table 2 Storm Events

No.	Year	Month -Date	Observation		Calculation		Error	
			Peak Discharge $Q_{p,OBS}$ (㎥/s)	Peak Time $t_{p,OBS}$ (hr)	Peak Discharge $Q_{p,CAL}$ (㎥/s)	Peak Time $t_{p,CAL}$ (hr)	$Abs.\left[\frac{Q_{p,OBS}-Q_{p,CAL}}{Q_{p,OBS}}\right]$ (%)	$Abs.[t_{p,OBS}-t_{p,CAL}]$ (hr)
S1	1983	06-20	38.82	8	36.99	8	4.7	0
S2	1992	07-13	12.72	8	12.29	7	3.4	1
S3	1997	07-16	44.19	8	36.49	8	17.4	0
S4	1999	09-10	44.62	12	37.98	12	14.9	0
Mean (Verification Events)							11.9	0.3

3.3 최적 매개변수 산정 및 검증

Table 2에서 첫 번째 수문사상은 모형의 최적 매개변수 산정에 적용하였으며, 나머지 세 수문사상은 산정된 최적 매개변수의 검증에 이용하였다. 최적 매개변수 산정을 위한 목적함수로는 식 (12)와 같이 RMSE(Root Mean Square Error)가 최소가 되도록 설정하였으며, 특성유속의 제약조건은 D'odorico and Rigon(2003)이 제시한 값을 적용하였다. 즉 하천 유속(u_c)은 0.5~4.0 m/s의 범위를, 지표면 유속(u_h)은 0.001~0.1 m/s의 범위를 적용하였다. 또한 확산계수는 Fischer et al.(1979)에 의해 조사된 범위 중 자연하천에서의 확산계수 범위인 0.76~670 m^2/s을 적용하였다.

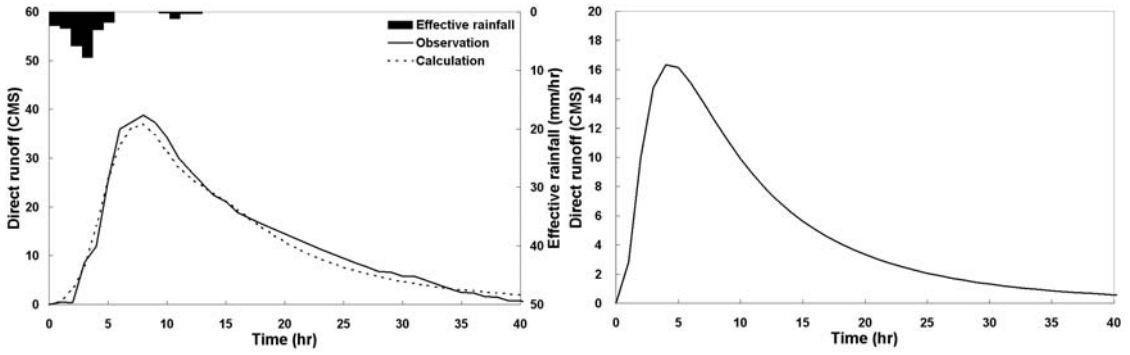
$$OF(\eta) = \frac{1}{m}\sqrt{\sum_{k=1}^{m}(Q-\hat{Q}(\eta))^2} \qquad (12)$$

여기서 m은 사상별 자료의 개수, Q는 실측유량 $\hat{Q}(\eta)$는 매개변수 η의 경우 계산유량을 의미한다.

보정용 수문사상(S1)에 대해 추정된 최적매개변수는 다음 Table 3과 같다. Fig. 2는 보정된 수문사상을 나타내며 Table 2에서 보여 지듯이 관측값에 대한 최적화된 모의값의 첨두유량 오차는 -4.7 %, 첨두시간 오차는 0시간으로 나타났다. 따라서 Table 3의 최적화된 값들은 대상유역의 매개변수로 대표 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 Fig, 3의 (b)는 최적화된 매개변수를 적용해 산정한 유효우량 1 cm에 대한 대상유역의 1시간 단위도이다.

Table 3 Estimated Optimal Parameters

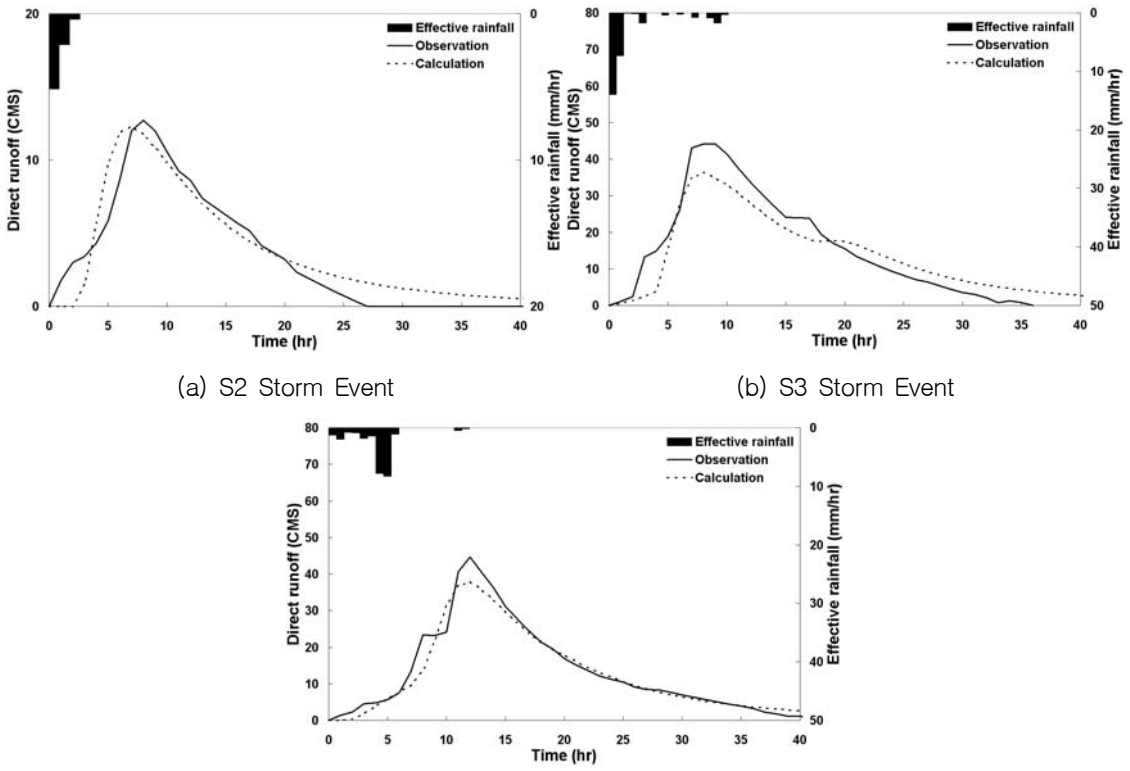
Parameter	u_c (m/s)	u_h (m/s)	D_c (m^2/s)	D_h (m^2/s)
Optimal Value	0.589	0.021	34.469	0.1333



(a) Storm Event (S1) (b) Estimated 1-Hr Unit Hydrograph

Fig. 2 Model Calibration

모형의 검증을 위해 Table 2의 S2~S4 사상에 대해 Table 3의 최적화된 매개변수를 적용하였다. 적용결과 S2 사상은 첨두유량의 관측값과 모의값이 각각 12.72 ㎥/s와 12.29 ㎥/s로 약 3.4 %의 오차를 나타내며 우수하게 모의 되었으며, 첨두유량의 경우 관측값보다 1시간 빠르게 모의되었다. S3 사상은 첨두유량의 경우 약 17.4 %의 오차를 나타냈으며, 첨두시간의 경우 관측값과 모의값이 일치하게 산정되었다. 마지막으로 S4 사상은 첨두유량의 경우 14.9 %의 오차를, 첨두시간은 0시간의 오차를 나타냈다. 따라서 검증을 위해 사용된 세 사상 평균 첨두유량은 약 11.9 %의 오차를 첨두시간의 경우에는 0.3 시간의 오차를 보이며 비교적 관측수문 사상을 잘 모의 하는 것으로 나타났다.



(a) S2 Storm Event

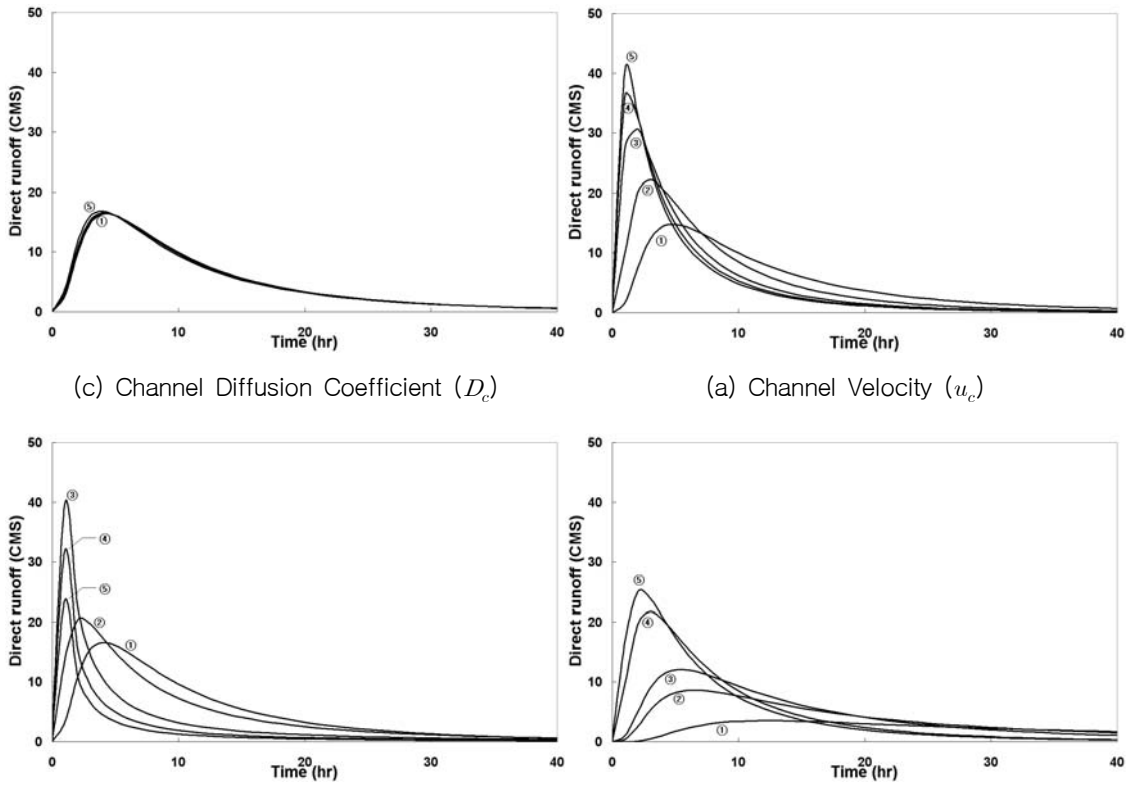
(b) S3 Storm Event

(c) S4 Storm Event

Fig. 3 Model Verification

3.4 매개변수에 따른 수문응답함수의 변동성

각각의 매개변수가 수문응답함수에 미치는 영향을 알아보기 위해 Table 3의 최적화된 매개변수를 기반으로 u_c는 0.5, 1, 2, 3, 4 m/s, u_h는 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1 m/s, D_c 및 D_h는 각각 0.76, 10, 100, 300, 670 m^2/s로 변화시켜 가면서 1시간 단위도의 변화양상을 살펴보았다. 각각의 경우에 대한 변화 양상은 Fig. 4의 (a)~(d)와 같다. (a)와 (b)를 통해 하천유속은 첨두유량에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 반면 지표면 유속은 감수부의 형상에 큰 영향을 미침을 알 수 있었으며, 하천유속에 비해 단위도 형상의 퍼짐(variance)에 많은 영향을 줌을 알 수 있었다. 이러한 결과는 최용준 등(2010)의 격자 형태의 지형학적 순간단위도의 결과에서도 쉽게 찾아 볼 수 있다. 본 연구에서는 이와 별개로 동수역학적 확산계수들의 영향을 추가적으로 살펴보았다. 하천에서의 동수역학적 확산의 영향은 Fig. 4(c)와 Table 4에서 볼 수 있듯이 수문응답에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Botter and Rinaldo(2003)의 연구결과에서도 언급된 바 있다. 마지막으로 지표면에서의 동수역학적 분산의 영향은 Fig. 4의 (d)와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 지표면 확산계수가 커짐에 따라 첨두유량은 증가하다가 다시 작아지는 것으로 나타났으며, 첨두시간은 계속 짧아지는 경향을 나타냈다. 또한 지표면 확산계수가 커짐에 따라 수문응답곡선의 감수부에서 긴 꼬리(long tail) 현상이 나타났다. 따라서 본 연구에서의 제약조건(Fischer et al., 1979)에서는 이에 대한 영향을 무시할 수 없음을 확인 할 수 있었다.



(c) Channel Diffusion Coefficient (D_c)　　(a) Channel Velocity (u_c)

(d) Hillslope Diffusion Coefficient (D_h)　　(b) Hillslope Velocity (u_h)

Fig. 4 Validation of 1-Hr Unit Hydrograph as Each Parameter

Table 4 Validations of Q_p and t_p as Each Parameter

Parameter	Value		Q_p (m³/s)	t_p (hr)	Parameter	Value		Q_p (m³/s)	t_p (hr)
u_c (m/s)	①	0.5	14.81	5	D_c (m²/s)	①	0.76	16.32	4
	②	1	22.22	3		②	10	16.33	4
	③	2	30.62	2		③	100	16.41	4
	④	3	36.27	1		④	300	16.57	4
	⑤	4	40.55	1		⑤	670	16.83	4
u_h (m/s)	①	0.001	3.53	12	D_h (m²/s)	①	0.76	16.62	4
	②	0.005	8.63	7		②	10	20.35	2
	③	0.01	12.01	5		③	100	39.85	1
	④	0.05	21.74	3		④	300	32.01	1
	⑤	0.1	25.01	2		⑤	670	23.67	1

4. 결 론

본 연구에서는 유역의 배수구조를 지표면과 하천으로 구분하여 확산-유추 지형학적 순간단위도의 최적 매개변수를 산정하고자 하였다. 산정될 매개변수는 총 4개(지표면과 하천 각각의 유속 및 확산계수)로 이러한 매개변수들에 대한 해석해가 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 최적화 기법을 적용하였다. 적용된 최적화 기법은 최근 수문학 분야에 널리 이용되고 있는 SCE-UA 방법을 적용하였다. 대상유역의 확산-유추 지형학적 순간단위도의 최적 매개변수는 하천과 지표면 유속을 각각 0.589 m/s, 0.021 m/s로, 하천 및 지표면 확산계수를 각각 34.469 m^2/s, 0.1333 m^2/s로 제시하였다. 추정된 매개변수의 검증결과 평균 첨두유량 오차는 약 12 %, 첨두시간 오차는 0.3 hr로 비교적 양호하게 나타났다. 또한 매개변수들의 변동성을 살펴본 결과 하천확산계수는 수문응답함수에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었으며 향후 이러한 결과들을 고려함으로서 모형을 좀 더 간략화 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 강민구, 박승우, “저수지 최적 운영 모형을 이용한 추가 용수 공급 능력 평가”, 한국수자원학회논문집, 제38권, 제11호, pp. 937-946, 2005.
2. 이도훈, “LH-OAT 민감도 분석과 SCE-UA 최적화 방법을 이용한 SWAT 모형의 자동보정”, 한국수자원학회 논문집, 제39권, 제8호, pp. 677-690, 2006.
3. 최용준, 김주철, 황만하, “지형학적 분산을 고려한 특성유속이 순간단위도 형상에 미치는 영향”, 한국수자원학회논문집, 제43권, 제4호, pp. 399-408, 2010.
4. Botter, G. and Rinaldo, A., "Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion", *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 10, 1286. doi:10.1029/2003WR002154, 2003.
5. D'odorico, P., and Rigon, R., "Hillslope and channel contributions to the hydrologic response", *Water Resources Research*, Vol. 39, NO. 5, 1113. doi:10.1029/2002WR001708, 2003.
6. Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. K., “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models”, *Water Resources Research*, Vol. 284, 1015-1031, 1992.
7. Eckhardt K., and Arnold J., "Automatic calibration of a distributed catchment model", *Journal of Hydrology*, Vol. 251, pp. 103-109, 2001.
8. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brools, N.H., *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, 1979.
9. Gupta, V.K., Waymire, E., and Wang, C.T., "A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology", *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 5, pp. 855-862, 1980.
10. Henderson, F. M., *Open Channel Flow*, Macmillan, New York, 1996.
11. Paik, K., and Kumar, P., "Hydraulic geometry and the nonlinearity of the network instantaneous response", *Water Resources Research*, Vol. 40, W03602, doi:10.1029/2003WR002821, 2004
12. Rodríguez-Iturbe, I., and Valdes, J. B., "The geomorphologic structure of hydrologic response", *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420, 1979.
13. Rinaldo, A., Rigon, R., and Marani, M., "Geomorphological dispersion", *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 4, pp.

513-525, 1991.

14. Saco, P.M., and Kumar, P., "Kinematic dispersion in stream networks -1.Coupling hydraulics and network geometry", *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 11, pp. 26~1-26~14, 2002.
15. Strahler, A. N., "Quantitative analysis of watershed geomorphology", *American Geophysical Union Transactions*, Vol. 38, No. 6, pp. 913-920, 1957.
16. van der Tak, L.D., and Bras, R.L., "Incorporating hillslope effects into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph", *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2393-2400, 1990.

○ 논문접수일 : 2011년 05월 09일
○ 심사의뢰일 : 2011년 05월 10일
○ 심사완료일 : 2011년 08월 29일