

미계측 유역의 유출량 산정을 위한 합성단위도 개발

최용준 · 김주철* · 정동국**†

충남대학교 토목공학과
*한국수자원공사 수자원연구원
**한남대학교 건설시스템공학과

Development of Synthetic Unit Hydrograph for Estimation of Runoff in Ungauged Watershed

Yong Joon Choi · Joo Cheol Kim* · Dong Kug Jeong**†

Department of Civil Engrg., Chungnam National University
*Korea Institute of Water and Environment
**Department of Civil and Environmental Engrg., Hannam University
(Received 24 March 2010, Revised 19 April 2010, Accepted 21 April 2010)

Abstract

The synthetic unit hydrograph is developed and verified using Nash model and characteristic velocities considering geomorphological dispersion in this present study. Application watersheds are selected 5 subwatersheds of Bocheong basin. The mean and variance of hillslope and stream path length are estimated in each watershed with GIS. Characteristic velocities are calculated using estimated path lengths and moment characteristics of rainfall-runoff data. Characteristic velocities of random devised 7 ungauged watersheds are estimated through regional analysis of characteristic velocities in gauged watershed. And Nash model parameters and IUH are derived using characteristic velocities and path length in the gauged and ungauged watershed. The result to compare of IUH about gauged watershed and random devised ungauged watershed in application watershed presents coherently hydrologic response characteristics that peak discharge is reduced and peak time is extended. In conclusion, Developed synthetic unit hydrograph in this study expects that it is useful method to estimate runoff discharge for managing of water pollution in ungauged watershed

keywords : Characteristic velocity, Geomorphological dispersion, GIUH, Nash model, Synthetic UH

1. 서론

임의의 유역에서의 유출량 산정은 수질환경, 이수 및 치수 등 유역의 수질·수자원관리 측면에서 매우 중요하다. 특히 하천의 오염 부하량 산정을 위해서는 이러한 유출량 자료는 필수적이다. 그러나 유량이 관측되지 않는 유역에서는 이러한 유출량 자료의 획득은 불가능하다. 이러한 미계측 유역의 유출량 산정 등의 수문모형들은 과거 수문학적 관점에서 많이 이용되어 왔으나 최근에는 수질총량제의 시행과 비점오염원의 중요성이 대두되면서 수질학적 측면의 해석에 많이 이용되고 있는 실정이다(전지홍 등, 2009). 초기의 미계측 유역에서의 유출량 산정을 위한 수문모형은 주로 경험식에 의존하였으나, 지나친 구조의 단순화로 인하여 사용상 많은 제약이 있었다. 이후 단위도의 개발에 따라 배수유역의 지형특성인자를 변수로 한 완전한 형태의 유출수문곡선을 산정하는 합성단위도 기법이 제시되었다.

그러나 이러한 방법들도 주로 도해적인 방법이나 경험적인 방법에 의해 수문곡선을 결정하였을 뿐 수학적으로 완벽하게 해석하지는 못하였다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고자 Nash 모형(Nash, 1957)을 이용한 미계측 유역의 합성단위도 기법을 제시하고자 하였다. Nash 모형은 유역을 개념적인 선형저수지군으로 구성된 모형으로, 비교적 간단한 방법에 의해 매개변수의 추정이 가능하며 수학적으로 완벽한 해석적 구조를 가지고 있어 현재까지도 가장 널리 쓰이는 개념적 모형 중 하나이다. 이러한 Nash 모형과 지형특성인자와의 결합에 의한 합성단위도의 개발을 가능하게 한 열쇠는 지형학적 순간단위도(GIUH)에서의 특성유속(characteristic velocity)에 있다.

Rodriguez-Iturbe and Valdes(1979)에 의해 제시된 GIUH 모형의 분산은 순간단위도의 통계적 분산(variance)를 발생시키는 물리적 효과로 정의되며, 특성유속은 GIUH 모형에서 유역의 수리학적 특성을 대표하는 인자로 홍수 유출이 발생하는 동안 유역 전반에 걸쳐 일정하게 가정되는 유속으로 정의된다. GIUH 모형에서 분산효과는 물입자의 동수역학적 효과에 기인하는 동수역학적 분산, 배수경로의 이질

† To whom correspondence should be addressed.
dkjeong@hnu.kr

성에 의한 지형학적 분산 및 유역 내에서 특성유속의 공간적 분포의 이질성에 기인하는 운동학적 분산으로 구분된다. 동수역학적 분산과 지형학적 분산은 Rinaldo 등(1991)에 의해 정의되었으며 운동학적 분산은 Saco and Kumar(2002)에 의해 정의되었다. 이후 Botter and Rinaldo(2003)는 수치 실험을 통해 운동학적 분산과 동수역학적 분산이 총 수문 응답에 기여하는 영향이 지형학적 분산에 비해 미소하기 때문에 이를 무시할 수 있음을 제시하였다. 그러나 이러한 일련의 연구과정은 커다란 한계점을 가지고 있다. 유역의 수문응답 중 하천망 유동만을 고려하였다는 점이다. 즉, 유역의 수문응답에서 커다란 비중을 차지하는 지표면 유동을 고려하지 않았다는 점이다(최용준 등, 2009; Van der Tak and Bras, 1990). 이후 D'odorico and Rigon(2003)은 지리정보체계(GIS)에 의해 격자 형태로 분할된 유역에 대해 지표면의 특성유속의 개념을 도입하였으며, 이를 통해 이상의 두 수문응답성분을 고려한 분산효과를 유도하였다. Di Lazzaro(2009)는 이러한 D'odorico and Rigon(2003)과 Botter and Rinaldo(2003)의 연구결과를 바탕으로 격자 형태의 지형학적 분산과 수문사상자료의 모멘트 특성으로부터 지표면과 하천의 특성유속을 산정하는 방법을 제시하였다. 이후 최용준 등(2010)은 모멘트법을 기반으로 Di Lazzaro(2009)의 관계식으로부터 Nash 모형의 두 매개변수를 추정하는 식을 유도하였다.

이러한 Nash 모형과 GIUH 모형과의 상관성은 Rosso(1984)에 의해 최초로 연구되었으며, 개념적 순간단위도인 Nash 모형의 매개변수를 GIUH 이론을 기반으로 추정하였다. 동일한 유역에 대해 두 모형은 서로 합동의 관계에 있음을 가정하고, 이를 순간단위도의 특성매개변수 해석에 적용하였다. 국내에서는 조홍제(1987)에 의해 GIUH 이론이 소개 되었으며 이를 기반으로 Nash 모형과의 결합을 시도하였다. 홍일표와 고재웅(1999)은 하천의 프랙탈 특성을 Rosso(1984)의 모형에 응용하여 프랙탈 GIUH를 제시한 바 있다. 이상의 연구결과 중 Rosso(1984)와 최용준 등(2010)의 연구결과는 Nash 모형의 매개변수를 유역의 지형특성과 특성유속으로 표현하고자 하는 기본 개념은 동일하다. 그러나 두 모형 간에는 차이점을 가지고 있다. 전자의 경우 Nash 모형의 매개변수 중 형상 매개변수인 선형저수지의 개수를 지형인자만의 함수로 구성하였지만, 후자의 경우 Nash 모형의 두 매개변수 모두 지형인자와 특성유속의 함수로 구성하였다. 이는 순간단위도의 형상 역시 규모 매개변수와 마찬가지로 유역의 수리학적 특성에 의해 변동될 수 있음을 제시한 점에 의미가 있다. 본 연구에서는 이러한 이론적 배경을 바탕으로 최용준 등(2010)에 의해 개발된 모형을 기반으로 미계측 유역의 새로운 합성단위도법을 제시하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. Nash 모형과 격자 기반 지형학적 분산

Nash(1957)는 직렬로 연결된 n 개의 동등한 선형 저수지

로 구성된 배수유역을 제안함으로써 개념적 순간단위도 모형을 식 (1)과 같이 공식화 하였다.

$$f(t) = \frac{1}{K} \frac{1}{\Gamma(n)} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} e^{-t/K} \quad (1)$$

여기에서 $f(t)$ 은 순간단위도를, $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma함수를 나타낸다. 식 (1)은 배수유역의 순간단위도에 대한 일반식으로서 n 과 K 는 각각 순간단위도의 형상과 규모매개변수로 선형저수지의 개수와 저류상수로 정의되는 Gamma분포 확률밀도함수와 일치한다. 식 (1)의 평균 및 분산은 모멘트법에 의해 각각 다음과 같이 정의된다.

$$E[t] = nK \quad (2)$$

$$Var[t] = nK^2 \quad (3)$$

D'odorico and Rigon(2003)은 Rinaldo 등(1991)에 의해 정의된 Strahler의 차수법칙을 기반으로 한 GIUH 모형에서의 지형학적 분산의 개념을 다음과 같이 보다 일반적인 형태로 확장하였다. 만약 유역 내부에서 발생 가능한 모든 배수경로들 중에서 임의로 선택한 i 번째 배수경로의 지표면 및 하천유하거리를 각각 L_h, L_c , 모든 배수경로의 개수를 n 이라 할 경우 유역 전반에 걸친 유하시간(T)의 평균 및 분산은 식 (4), (5)와 같다.

$$E[T] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = \frac{E[L_h]}{u_h} + \frac{E[L_c]}{u_c} \quad (4)$$

$$Var[T] = E[(T - E[T])^2] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - E[T])^2 = \frac{Var[L_h]}{u_h^2} + \frac{Var[L_c]}{u_c^2} + 2 \frac{Cov[L_h, L_c]}{u_h u_c} \quad (5)$$

여기서 u_h, u_c 는 각각 지표면 및 하천의 특성유속, $E[\cdot], Var[\cdot], Cov[\cdot, \cdot]$ 는 각각 기대치, 분산 및 공분산 연산자이다. 대상유역에 대한 강우-유출 관측자료 및 지형자료가 주어질 경우 유역의 수리학적 특성을 대표하는 지표면 및 하천 특성유속 u_h, u_c 는 식 (4)와 (5)를 연립하여 다음과 같이 유도된다(Di Lazzaro, 2009).

$$u_{c1,2} = \frac{a \pm b}{c} \quad (6)$$

$$u_{h1,2} = \frac{u_{c1,2} E[L_h]}{u_{c1,2} E[T] - E[L_c]} \quad (7)$$

식 (6)의 a, b, c 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$a = E[L_c] \{-cov[L_h, L_c] E[L_h] E[T] + E[L_c] Var[L_h] E[T]\} \quad (8)$$

$$b = E[L_h]E[L_c] \left\{ E^2[T] \left(Cov^2[L_h, L_c] - Var[L_h]Var[L_c] \right) + Var[T] \left(-2Cov[L_h, L_c]E[L_h]E[L_c] + E^2[L_c]Var[L_h] + E^2[L_h]Var[L_c] \right) \right\}^{0.5} \quad (9)$$

$$c = E[L_c] \left\{ Var[L_h]E^2[T] - E^2[L_h]Var[T] \right\} \quad (10)$$

식 (6)과 (7)로부터 한 개의 유역에 대하여 두 쌍의 지표면 및 하천유속이 산정됨을 알 수 있다. Di Lazzaro(2009)는 이러한 두 쌍의 특성유속 중 음의 값을 갖거나 지표면과 하천유속이 미소한 차이를 갖는 경우에는 산정값에서 제외 할 것을 제안하였다.

최종적으로 격자 기반 지형학적 분산의 모멘트특성인 식 (4), (5)와 Nash 모형의 모멘트특성인 식 (2), (3)을 연립하면 다음과 같이 Nash 모형의 두 매개변수가 유도된다(최용준 등, 2010).

$$n = \frac{\langle L_h \rangle^2 u_c^2 + 2 \langle L_c \rangle \langle L_h \rangle u_c u_h + \langle L_c \rangle^2 u_h^2}{Var[L_h]u_c^2 + 2Cov(L_c, L_h)u_c u_h + Var[L_c]u_h^2} \quad (11)$$

$$K = \frac{Var[L_h]u_c^2 + 2Cov(L_c, L_h)u_c u_h + Var[L_c]u_h^2}{u_c u_h (\langle L_h \rangle u_c + \langle L_c \rangle u_h)} \quad (12)$$

2.2. 대상유역의 선정 및 적용방법

2.2.1. 수문분석 및 지형분석

대상유역은 비교적 장기간 동안 수문자료가 축적된 국제 수문개발계획(IHP) 대표유역의 금강수계 보청천유역의 5개 소유역을 선정하였다. Fig. 1은 대상유역의 배수유역도이고, B1~B6은 합성된 단위도의 검증용 위하여 임의로 선정된



Fig. 1. Drainage basin map of Bocheong Basin.

미계측 유역의 출구점을 나타낸다. 본 연구에 사용된 수문사상은 Table 1과 같으며, 소유역별 면적 평균 강우량은 티센법을 적용하여 추정하였다. 직접유출 수문곡선의 작성을 위한 기저유출분리에는 경사급변점법을 적용하였으며, 유효우량은 NRCS방법을 적용하였다. 하천망은 하천망생성기법에 대한 오차를 줄이고 하천망에 대한 지형자료의 객관성이 부여 될 수 있도록 1/25,000 수치 지형도의 하천선을 그대로 사용하였다(Di Lazzaro, 2009). 유역경계는 각 수위 관측소를 유역 출구점으로 하여 분할하였으며 각 유역은 20 m × 20 m의 격자망으로 구성하였다. 분할된 유역에 대해 Arc view의 Hydro extension을 이용하여 DEM 전처리 작업을 수행하였으며 흐름방향도와 흐름길이도를 생성하였다. 생성된 Grid를 연산하여 대상유역의 각 격자 중심에서

Table 1. Outline of storm events

Watershed	Year	Month-day	Total rainfall (mm)	Peak discharge (m ³ /s)	Peak time (hr)	Rate of flow	Lag time (hr)		Variance (hr ²)		
							Event	Mean	Event	Mean	
Main	Sanseong	1986	07-09	69.8	73.03	5	0.63	5.60	6.76	22.50	24.60
		1992	07-13	24.5	7.86	4	0.22	8.74		32.41	
		1993	08-08	89.6	69.76	8	0.39	6.50		18.88	
		1995	08-30	136.5	61.94	15	0.26	6.19		24.61	
	Ipyeong	1993	08-08	68.6	106.87	6	0.59	6.87	8.64	32.38	39.45
			09-17	98.2	34.72	13	0.22	6.91		33.56	
		1999	09-23	63.0	53.98	13	0.46	13.10		44.67	
		2000	06-26	114.9	69.64	14	0.29	7.68		47.19	
	Gidae	1984	07-12	46.2	145.25	10	0.54	15.64	14.08	153.06	118.84
			07-17	63.4	192.44	18	0.55	13.47		131.59	
			08-25	61.0	85.46	9	0.23	13.13		71.88	
	Sangye	1990	07-14	58.4	303.62	18	0.57	13.14	15.30	59.98	120.93
09-10			83.0	386.47	12	0.44	15.29	173.37			
09-23			100.3	443.29	17	0.47	17.46	129.44			
Branch	Tanbu	1983	06-20	114.9	69.64	14	0.29	10.04	9.98	56.05	40.15
		1992	07-13	115.5	55.52	8	0.23	10.54		28.63	
		1997	07-16	25.8	20.45	9	0.26	9.63		23.54	
		1999	09-10	42.3	49.50	8	0.65	9.71		52.39	

유역 출구점까지의 지표면 유하거리와 하천 유하거리를 산정하였다.

특성유속의 지역화 분석을 위한 경사분석은 유역과 하천으로 나누어 산정하였다. 유역은 평균경사, 평균국부경사 및 자기상관계수에 의한 국부경사의 이동평균(moving window average, MWA)경사를 산정하였다. 여기에서 이동평균은 중심격자의 값을 임의의 반경 내 셀들의 평균값으로 산정하는 기법을 의미한다. 하천에 대해서는 평균경사, 평균국부경사 및 E.L. 경사를 산정하였다. 이 중 평균경사(①)는 fill-sink된 수지도고도모형으로부터 유역 내 각 격자와 유출구의 표고차와 총 유하거리에 의해 산정된 경사를 의미한다. 국부경사(②)는 임의의 셀에서의 8방향에 대한 식 (13)의 최급하향경사로 정의되며, Arc Info의 FLOWDIRECTION 함수의 Optional output을 이용하여 산정하였다.

$$S_{\max} = \max[(Z_0 - Z_i)/l] \quad (13)$$

여기에서, S_{\max} 은 최급하향경사를, Z_0 과 $Z_i(i=1,2,3,\dots,8)$ 는 각각 중앙에 위치한 셀의 표고값과 이웃한 셀의 표고값을 나타내며, l 은 중앙에서부터 이웃한 셀까지의 중심간 거리를 나타낸다.

국부경사에 의한 이동평균경사(③)는 국부경사의 자기상관분석을 통해 공간상관거리(spatial correlation distance)를 산정하여, 이를 반경으로 한 이동평균경사를 산정한 것이다. 여기에서 이동평균경사는 GIS의 FOCALMEAN 함수를 사용하였으며, 자기상관분석은 범용통계 S/W인 Minitab을 사용하였다. 보청천 유역의 공간상관거리는 7.14 km로 나타났다. E.L.경사(④)는 하천망의 최상류지점의 셀에서 유출구와의 표고차를 하천 유하거리로 나누어 준 경사를 의미한다.

2.2.2. 특성유속의 지역화 분석

일반적으로 유속은 Manning 공식에 의해 경사와 동수반경의 함수로 표현 된다. 여기에서 동수반경은 수심과 비례 관계를 나타내며, 수심은 다시 하천 단면을 통과하는 유량과 비례하게 된다. 따라서 통계물리학적 접근법에 있어서 유량은 유역면적으로 나타낼 수 있게 된다. 마찬가지로 이러한 접근법에 의한 평균유속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{1}{n} S^{1/2} R^{2/3} \approx \alpha S^\beta A^\gamma \quad (14)$$

여기에서 R , S , A 는 각각 동수반경, 평균경사 및 유역면적, α , β , γ 는 지역화 분석식의 상수를 나타낸다.

α , β , γ 에 대한 제약조건은 다음과 같다. 특성유속은 물리적으로 항상 양의 값이므로 α 는 항상 (+)이다. 지표면 특성유속의 경우 경사가 흐름의 주된 원인이므로 유역경사와 비례관계를 나타내며, 이러한 유역경사는 일반적으로 유역면적과 반비례 관계를 갖는다. 반면 하천에서의 흐름은 유량이 흐름의 지배적인 역할을 하므로 하천 특성유속은

유량과 비례 관계를 갖는다. 여기에서 유량은 전술하였듯이 유역면적으로 표현할 수 있으며, 이러한 유역면적은 하천 경사와 반비례 하게 된다. 즉, 각각의 특성유속과 경사, 면적의 관계는 다음 식 (15), (16)과 같다. β 의 경우 지표면 특성유속은 (+)를 하천 특성유속의 경우 (-)의 부호를 갖게 되며, γ 는 이와 반대의 부호를 갖는다.

$$u_h \propto S_w \propto \frac{1}{A} \quad (15)$$

$$u_c \propto A \propto \frac{1}{S_c} \quad (16)$$

여기에서 S_w , S_c 는 각각 유역경사와 하천경사를 나타낸다.

이상의 제약조건을 바탕으로 α 는 0~50, β 와 γ 는 결정된 부호에 따라 0~10 또는 -10~0의 범위에서 0.001의 간격으로 각각의 경사에 대한 지역화 분석을 실시하였다. 이러한 지역화 분석식 중 잔차제곱의 합이 최소가 되는 값들 중 독립변수인 유역 면적과 경사가 물리적으로 동시에 영향을 미칠 수 있는 식을 선정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지형학적 분산을 고려한 Nash 모형 매개변수 산정

지리정보체계에 의해 분석된 유하거리에 대한 평균, 분산 및 공분산은 Table 2와 같고, 추출된 경사 결과는 다음 Table 3과 같다. 식 (6)~(10)과 Table 1에 의해 계산된 각 유역별 특성유속은 Table 4와 같다. 하천 특성유속 계산 결과 0.707~1.750 m/s의 범위로 평균 1.153 m/s로 나타났으며, 지표면 특성유속은 0.010~0.026 m/s의 범위로 평균 0.015 m/s로 산정되었다. 이러한 결과는 D'odorico and Rigon (2003)이 제시한 u_c 와 u_h 의 범위(u_c : 0.5~4.0 m/s, u_h : 0.001~0.1 m/s)를 만족함으로 적합한 범위 내에서 추정되었음을 알 수 있었다. 또한 산정된 특성유속과 Table 2의 유하거리 값들을 식 (11)과 (12)에 적용하여 추정된 Nash 모형의 매개변수 및 특성치들은 Table 4의 (5)~(8)란에 수록하였다.

Fig. 2는 산정된 Table 4의 Nash 모형 매개변수에 의한 순간단위도를 유도한 것이다. 보청천 유역의 5개 소유역에 대해 본류는 실선으로 지류는 점선으로 표시하였다. 탄부 지점을 제외한 4개 지점이 본류에 위치하고 있으며, 지류인 탄부 지점을 제외한 모든 유역에서 유역규모에 따라 첨두유량은 작아지고 첨두시간은 길어지는 일관성 있는 유역 응답 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 탄부 유역의 경우 비슷한 유역 면적의 이평 유역에 비해 첨두시간이 길게 나타났다. 이러한 결과는 탄부 유역의 하천 특성유속(0.070 m/s)이 이평 유역의 지표면 특성유속(0.903 m/s) 보다 작기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

3.2. 지역화 분석 및 적용성 검증

지역화분석식 산정 결과는 Table 5와 같다. 지역화 분석식 산정결과 결정계수는 0.94~0.99의 범위로 우수하게 나타났다.

Table 2. Travel length of watersheds

Watershed	Area (km ²)	Stream		Hillslope		Covariance (m ²)	
		Mean (m)	Variance (m ²)	Mean (m)	Variance (m ²)		
Main	B1	30.99	7,156	11,036,016	251	72,156	195,071
	Sanseong	49.10	8,372	20,001,100	258	70,389	115,221
	B2	54.00	8,986	23,658,496	252	67,095	144,627
	Ipyeong	76.30	9,314	30,567,600	288	95,789	-159,826
	B3	148.69	12,059	29,004,903	293	87,678	-126,149
	Gidae	354.14	17,104	62,831,300	375	152,181	-339,719
	B4	398.72	21,863	87,661,275	374	147,128	-249,419
	B5	459.68	26,463	128,210,329	376	152,283	-279,449
Branch	Sangye	485.21	30,027	158,953,000	373	148,836	-190,788
	B6	33.94	5,301	4,061,474	581	371,506	221,603
	Tanbu	77.51	11,437	36,914,100	509	259,422	511,887

Table 3. Slopes of basin and stream network

Watershed	Area (km ²)	Basin			Stram network			
		Mean ①	Local ②	MWA ③	Mean ①	Local ②	E.L. ④	
Main	B1	30.99	0.0238	0.3799	0.3076	0.0145	0.1081	0.0180
	Sanseong	49.10	0.0188	0.3575	0.2973	0.0118	0.1055	0.0166
	B2	54.00	0.0153	0.3412	0.2942	0.0095	0.1007	0.0154
	Ipyeong	76.30	0.0136	0.3085	0.2789	0.0084	0.0922	0.0139
	B3	148.69	0.0099	0.2796	0.2601	0.0064	0.0835	0.0118
	Gidae	354.14	0.0095	0.2912	0.2878	0.0049	0.0783	0.0113
	B4	398.72	0.0091	0.2991	0.2905	0.0049	0.0810	0.0099
	B5	459.68	0.0072	0.3009	0.2904	0.0042	0.0820	0.0086
Branch	Sangye	485.21	0.0064	0.2965	0.2881	0.0039	0.0814	0.0080
	B6	33.94	0.0391	0.4653	0.4439	0.0190	0.1250	0.0291
	Tanbu	77.51	0.0194	0.3884	0.3604	0.0107	0.0839	0.0173

Table 4. Estimations of u_c , u_h and nash model from storm events

Watershed	Area (km ²)	u_c (m/s)	u_h (m/s)	Nash model			
				n	K (hr)	Q_p (mm/hr)	t_p (hr)
Sanseong	49.10	1.068	0.016	1.86	3.64	0.108	3.116
Ipyeong	76.30	0.903	0.014	1.89	4.57	0.085	4.075
Gidae	354.14	1.339	0.010	1.67	8.44	0.051	5.645
Sangye	485.21	1.750	0.010	1.94	7.90	0.048	7.393
Tanbu	77.51	0.707	0.026	2.48	4.02	0.077	5.957

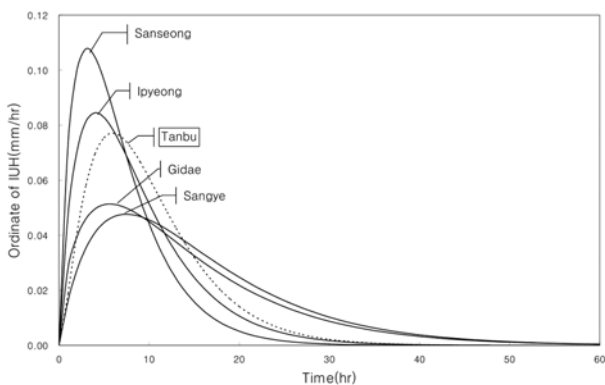


Fig. 2. IUH of Bocheong Basin.

개발된 합성단위도의 검증은 다음과 같이 실시하였다. Table 3의 모든 경사에 대해 Table 5의 지역화 분석식을

Table 5. Result of regional analysis for u_c , u_h

Slope		Regional Analysis	Determination coefficient
u_h	Mean	$u_h = 0.459S_M^{0.684} A^{-0.108}$	0.95
	Local	$u_h = 0.151S_L^{0.783} A^{-0.308}$	0.94
	MWA	$u_h = 0.211S_F^{0.989} A^{-0.312}$	0.96
u_c	Mean	$u_c = 0.115S_M^{-0.298} A^{0.161}$	0.98
	Local	$u_c = 0.164S_L^{-0.197} A^{0.288}$	0.98
	E.L.	$u_c = 0.108S_E^{-0.286} A^{0.210}$	0.99

적용하여 지표면 특성유속과 하천특성유속을 조합하였다. 대상유역에 대해 총 9개의 쌍을 조합하였다. 조합된 특성 유속으로부터 Nash 모형의 매개변수를 산정하였으며, 산정된 매개변수에 의해 순간단위도를 유도하였다. 유도된 미계

Table 6. Estimations of u_c , u_h and nash model of ungauged watershed

Watershed	Area (km ²)	u_c (m/s)	u_h (m/s)	Nash model			
				n	K (hr)	Q_p (mm/hr)	t_p (hr)
B1	30.99	0.701	0.025	2.53	2.24	0.137	3.412
B2	54.00	0.824	0.017	2.31	3.09	0.106	4.037
B3	148.69	1.098	0.011	1.98	5.16	0.072	5.050
B4	398.72	1.420	0.010	1.90	7.66	0.050	6.883
B5	459.68	1.527	0.010	1.97	7.71	0.048	7.457
B6	33.94	0.623	0.034	1.86	3.80	0.103	3.286

측 유역의 순간단위도는 Fig. 3과 같이 계측유역과 미계측 유역의 순간단위도와 형상 비교를 실시하였다. 하류방향에 대해 첨두유량은 작아지고 첨두시간은 길어지는 일관된 수문응답 특성을 나타내는 최적의 지역화 분석식을 최종 선정하였다(정성원 등, 2000). 최종적으로 지표면 특성유속에 대해 평균경사와 유역면적, 하천 특성유속은 E.L.경사와 유역면적의 지역화 분석식이 선정되었다. Table 6은 최종 선정된 지역화 분석식에 의해 산정된 각각의 특성유속 및 Nash 모형 매개변수이다.

Fig. 3의 굵은 실선은 계측지점을 나타내며 점선은 미계측 지점을 나타낸다. Fig. 3에서 (a)~(c)는 본류구간이며 (d)는 지류구간을 나타낸 것이다. Table 7은 유역규모에 따른 순간단위도의 첨두유량과 첨두시간에 대한 증감을 나타낸 것으로, 대부분의 유역에서 유역규모에 따라 첨두유량은 작아지고 첨두시간은 길어지는 일관성 있는 유역 응답 특성

Table 7. Comparison of Q_p and t_p between gauged and ungauged watershed

Watershed	Q_p (mm/hr)	t_p (hr)	ΔQ_p	Δt_p
B1	0.137	3.412	-0.0292	-0.2958
Sanseong	0.108	3.116	-0.0017	0.9209
B2	0.106	4.037	-0.0216	0.0379
Ipyeong	0.085	4.075	-0.0126	0.9748
B3	0.072	5.050	-0.0206	0.5952
Gidae	0.051	5.645	-0.0011	1.2378
B4	0.050	6.883	-0.0018	0.5745
B5	0.048	7.457	-0.0007	0.0128
Sangye	0.048	7.470	-	-
B6	0.103	3.286	-0.0257	2.6711
Tanbu	0.077	5.957	-	-

을 나타냄을 알 수 있다. 다만 B1~산성 지점간의 첨두시간

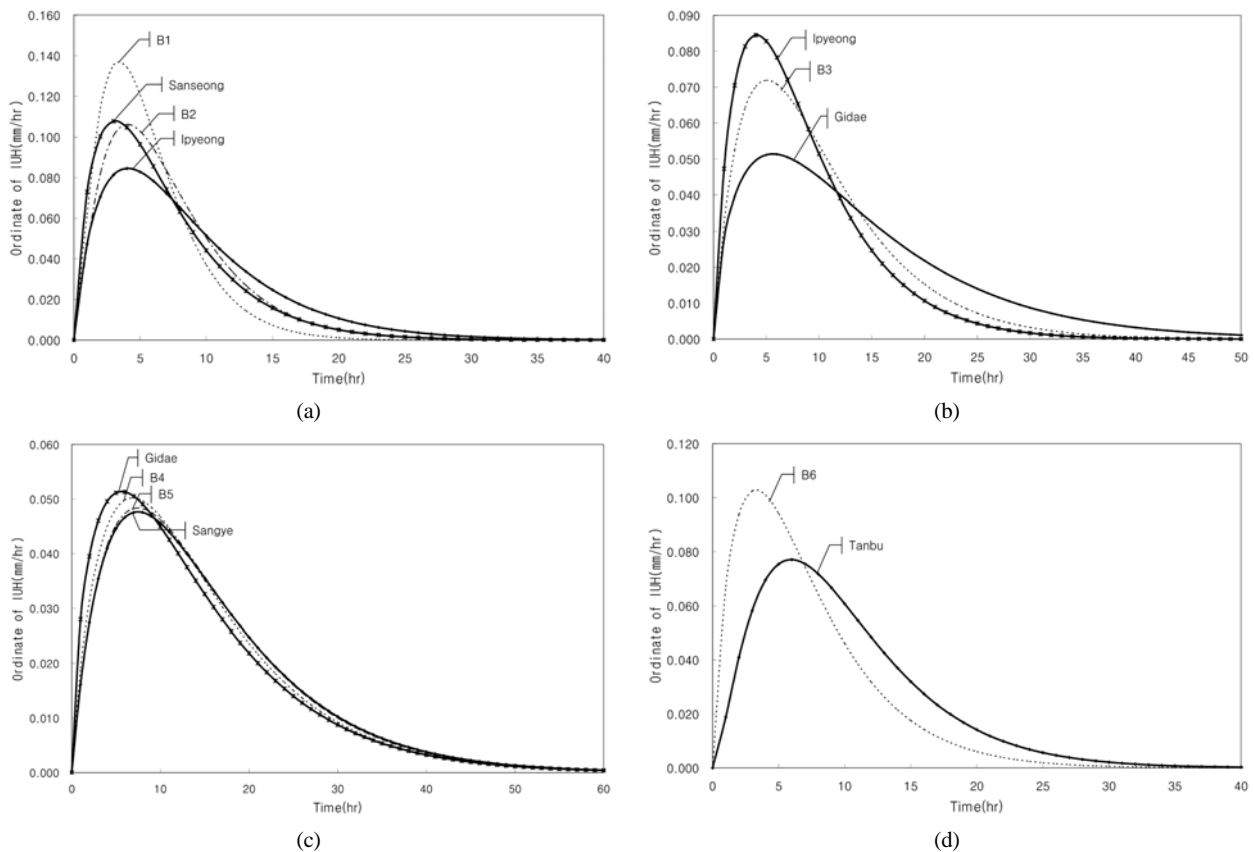


Fig. 3. Comparison of IUH between gauged and ungauged watershed.

이 약 17.7분의 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 지역화 분석식 적용에 따른 계산오차로 인해 발생하는 것으로 판단되며, 일반적으로 홍수사상의 수문응답에 적용되는 단위도의 선형성을 고려하면 만족스러운 값이라 하겠다.

Table 8은 지역화 분석식에 의해 유도된 미계측 유역의 합성단위도에 대한 적합성 검증을 위해 순간단위도의 종거값의 합과 순간단위도로부터 유도된 1시간 단위도의 특성값들을 나타낸 것이다. 순간단위도의 종거값은 소수점 4째 자리에서 반올림해서 0이 되는 지점까지 계산하였으며 이

때의 시간을 기저시간으로 산정하였다. 산정 결과 기저시간은 유역 규모가 커짐에 따라 길어지는 일관된 특성을 나타내었으며, 종거의 합은 0.990~0.997로 1에 가까운 값들을 나타냈다. 이러한 미소한 오차의 결과는 반올림 오차로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 또한 1시간 단위도에서 총 DRV(Direct Runoff Volume)과 1 mm/hr의 유효강우로 인한 총 ERV(Effective Rainfall Volume)의 비를 산정한 결과 모든 유역에서 0.9999~1.000로 유도된 단위도는 질량보존 법칙을 만족함을 확인할 수 있었다.

Table 8. Sum of IUH's ordinates and characteristics of 1-Hr UH at ungauged watershed

Watershed	Area (km ²)	IUH		1-Hr unit hydrograph			
		Base time (hr)	SUM of ordinates	Q _p (m ³ /sec)	t _p (hr)	DRV (m ³)	DRV/ERV
B1	30.99	24	0.997	1.173	4	30,993	0.9999
B2	54.00	30	0.996	1.575	5	53,995	0.9999
B3	148.69	43	0.994	2.956	6	148,685	0.9999
B4	398.72	58	0.994	5.549	7	398,703	1.0000
B5	459.68	60	0.995	6.172	8	459,664	1.0000
B6	33.94	32	0.990	0.965	4	33,934	1.0000

Table 9. Characteristics of derived IUH and 1-Hr UH by regional analysis at gauged watershed

Watershed	IUH						1-Hr unit hydrograph			
	n	K (hr)	Q _p (mm/hr)	t _p (hr)	Base time (hr)	SUM of ordinates	Q _p (m ³ /sec)	t _p (hr)	DRV (m ³)	DRV/ERV
Sanseong	2.41	2.90	0.110	4.08	29	0.997	1.479	5	49,096	0.9999
Ipyeong	2.00	4.01	0.092	3.99	37	0.994	1.930	5	76,294	0.9999
Gidae	1.75	7.21	0.058	5.37	53	0.992	5.658	6	354,128	1.0000
Sangye	1.84	9.21	0.043	7.77	67	0.993	5.773	8	485,130	0.9999
Tanbu	1.91	6.13	0.062	5.58	49	0.994	1.342	6	77,500	0.9999

Table 10. Comparison between observed data and calculated result

Watershed	Year	Month -day	Observation		Calculation		Abs. Error of Q _p (%)	Abs. Error of t _p (hr)		
			Q _p (m ³ /sec)	t _p (hr)	Q _p (m ³ /sec)	t _p (hr)				
Sanseong	1986	07-09	55.42	5	56.24	6	1.48	1		
	1992	07-13	5.86	4	7.68	5	30.97	1		
	1993	08-08	59.15	8	48.47	9	18.06	1		
	1995	08-30	57.12	15	45.59	13	20.19	2		
Ipyeong	1993	08-08	93.38	6	74.35	7	20.37	1		
		09-17	29.56	13	31.08	12	5.14	1		
	1999	09-23	31.12	13	36.13	10	16.09	3		
Gidae	1984	06-26	55.56	15	42.54	18	23.44	3		
		07-12	107.02	10	125.40	11	17.18	1		
	1992	07-17	177.23	18	155.07	19	12.51	1		
Sangye	1990	08-25	81.31	9	77.81	8	4.30	1		
		07-14	278.02	16	175.57	17	36.85	1		
	1999	09-10	372.63	12	195.69	14	47.48	2		
Tanbu	1999	09-23	410.79	18	215.66	19	47.50	1		
		06-20	38.83	8	31.17	9	19.72	1		
	1992	07-13	12.73	9	10.15	7	20.27	2		
	1997	07-16	45.70	8	30.34	7	33.60	1		
			1999	09-10	44.83	12	32.35	12	27.85	0
Mean							22.39	1.33		

본 연구에서 분할된 미계측 유역은 관측된 수문자료가 없기 때문에 직접적인 비교 평가는 불가능하다. 따라서 다음과 같은 간접적인 평가방법을 적용하였다. 첫째 Table 5에서 최종 선정된 지역화 분석식과 Table 3의 지형인자를 이용하여 관측지점의 특성유속을 산정한다. 둘째 산정된 특성유속과 Table 2의 유하거리 자료로부터 Nash 모형의 매개변수를 추정하고, 이로부터 순간단위도와 1시간 단위도를 유도한다. 셋째 이상의 지역화 분석식에 의해 유도된 관측지점의 1시간 단위도를 실제 사상에 적용하여 검증한다.

Table 9는 이러한 방법에 의해 산정된 계측지점의 순간단위도와 1시간 단위도의 특성값들을 나타낸 것이다. 지역화 분석식에 의해 유도된 순간단위도와 1시간 단위도는 침투유량, 침투시간 및 기저시간에 대한 유역규모에 따른 일관된 응답 특성을 나타내며, 총 DRV와 총 ERV에 대한 질량보존 법칙의 성립을 확인할 수 있었다. 즉 전술한 일반적인 단위도의 특성들을 모두 만족함을 알 수 있었다. 또한 Table 10은 유도된 1시간 단위도를 Table 1의 사상에 적용하여 관측값과 모의값을 비교한 것으로 침투유량은 약 22.39%, 침투시간은 약 1.33시간의 오차를 보이며 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 배수경로 이질성에 의한 지형학적 분산을 고려한 특성유속을 이용한 합성단위도 기법을 제시하였다. 제시된 합성단위도의 검증을 위하여 대상유역 내 계측지점과 미계측지점에 대한 순간단위도의 형상을 비교하였다. 이상으로부터의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지형학적 분산을 고려한 특성유속에 의한 Nash 모형의 순간단위도를 계측지점에 적용한 결과 유역규모가 커짐에 따라 침투유량은 작아지고 침투시간은 길어지는 일관성있는 유역 응답 특성을 나타내었다.
- 2) 본 연구의 대상유역인 보청천 유역에서는 지표면 특성유속에 대해 평균경사와 유역면적, 하천 특성유속은 E.L.경사와 유역면적에 높은 상관성 보이며, 이러한 지역화 분석에 의해 산정된 Nash 모형 매개변수를 대상유역 내 미계측지점에 적용한 결과 유역규모가 커짐에 따라 침투유량은 작아지고 침투시간은 길어지는 일관성 있는 유역 응답 특성을 나타내었으며, 총 유효강우와 총 직접유출에 대한 질량보존 법칙이 성립됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 본 연구에서 제시된 합성단위도 기법은 좀 더 많은 대상유역 및 지역화 분석식의 독립변수에 대한 연구를 수행하여야 하겠지만, 향후 미계측 유역의 오염원 관리를 위한 유출량 산정에 유용한 기법이 될 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2010년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

전지홍, 최동혁, 김정진, 김태동(2009). 수질학적 관점에서 의 수문모델 유출량 보정 방법 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(3), pp. 432-440.

정성원, 김동필, 문장원, 이창용, 이대희(2000). 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구-합성단위도 개발을 중심으로. 한국건설기술연구원.

조홍제(1987). 지형학적 수문응답특성에 의한 선형저수지 모델 해석. *한국수자원학회논문집*, **20**(2), pp. 117-126.

최용준, 김주철, 김재한(2009). 배수경로 이질성에 의한 순간단위도 형상의 상대적 기여도 평가. *한국수자원학회논문집*, **42**(11), pp. 897-909.

최용준, 김주철, 정관수(2010). 배수경로 이질성을 기반으로 한 Nash 모형의 매개변수 동정. *한국수자원학회논문집*, **43**(1), pp. 1-13.

홍일표, 고재웅(1999). 하천의 프랙탈 특성을 고려한 지형학적 순간단위도의 개발(I). *한국수자원학회논문집*, **32**(5), pp. 565-577.

Botter, G. and Rinaldo, A. (2003). Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion. *Water Resources Research*, **39**(10), 1286. doi:10.1029/2003WR002154.

Di Lazzaro, M. (2009). Regional analysis of storm hydrographs in the rescaled width function framework. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.04.027.

D'odorico, P. and Rigon, R. (2003). Hillslope and channel contributions to the hydrologic response. *Water Resources Research*, **39**(5), 1113. doi:10.1029/2002WR001708.

Nash, J. E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. *IASH Assemblée Générale de Toronto*, **3**, pp. 114-121.

Rinaldo, A., Rigon, R., and Marani, M. (1991). Geomorphological dispersion. *Water Resources Research*, **27**(4), pp. 513-525.

Rodriguez-Iturbe, I. and Valdes, J. B. (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, **15**(6), pp. 1409-1420.

Rosso, R. (1984). Nash model relation of Horton order ratios. *Water Resources Research*, **20**(7), pp. 914-920.

Saco, P. M. and Kumar, P. (2002). Kinematic dispersion in stream networks - 1. Coupling hydraulics and network geometry. *Water Resources Research*, **38**(11), pp. 26~1-26~14.

Van der Tak, L. D. and Bras, R. L. (1990). Incorporating hillslope effects into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Water Resources Research*, **26**(10), pp. 2393-2400.