

폭함수 단위도법을 이용한 청미천 수문곡선 산정

서용원* · 박준형** · 이동섭*** · 김영오****

Seo, Yongwon*, Park, Junehyeong**, Rhee, Dong Sop***, Kim, Young-Oh****

Application of the Width Function Instantaneous Unit Hydrograph: A Case Study of Cheongmi River

ABSTRACT

This paper examines the applicability of the Width Function Instantaneous Unit Hydrograph (WFIUH) with a case study of Cheongmi River in South Korea. The parameter values of WFIUH can be physically determined compared to the lumped hydrologic models, which are typically accompanied by parameter estimation procedures with gage records. Assuming uniformly distributed rainfall, the hydrographs obtained with the WFIUH show good agreement with observed data and also the results from HEC-1. A simple investigation of the effect from the rainstorm movement with the WFIUH demonstrates the ability of the proposed model and the need to consider the rainstorm movement effect on the resulting hydrographs for prediction purposes.

Key words : Instantaneous unit hydrograph, Rainstorm movement, Width function

초 록

본 연구에서는 폭함수(width function)에 기초한 단위도법(WFIUH)을 이용하는 수문곡선 산정방법에 대하여 소개하고 실제 유역(청미천)에 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 기존 집중형 모형과 비교하여 WFIUH는 매개변수를 물리적으로 결정할 수 있는 특징이 있으며 준분포형 모형으로 유역특성 및 강우의 시공간적 변동성을 수문곡선 산정에 반영할 수 있는 장점이 있다. 공간적으로 균등한 강우를 가정하여 청미천 유역에 적용한 결과 관측치와 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며 범용 모형인 HEC-1와 비교하여 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 이동강우에 대한 간단한 검토사례를 통해 WFIUH를 이용하여 강우이동이 수문곡선의 모양과 첨두유량에 미치는 영향을 평가할 수 있는 것을 보였다.

검색어 : 단위도법, 이동강우, 폭함수

1. 서론

지금까지 많은 연구자들이 하천망 연결구조(topology)를 기반으로 한 수문응답(hydrologic response)에 대한 연구를 해왔음에도 불구하고 국내 적용사례는 드문 것이 현실이다. 이와 관련하여 유역의 구조적 특성에 대한 유역의 반응을 연구한 첫 번째 사례로서 GIUH(Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph)(Rodriquez-Iturbe and Valdes, 1979; Gupta et al., 1980)를 들 수 있다. GIUH는 순간단위강우가 유역에 주입되었을 때 유역 출구에서 도달시간의 분포가 하천 연결구조와 같은 유역의 지형학적 특성과 조도계수와 같은 흐름의 수리학적 특성을 반영함을 보여준다(Franchini와 O'Connell, 1996).

* 교신저자 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사후연구원 (Corresponding Author · Seoul National University · potbel@snu.ac.kr)

** 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사과정 (sai0259@snu.ac.kr)

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 (dsrhee@kict.re.kr)

**** 정희원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 (yokim05@snu.ac.kr)

Received February 14 2013, Revised March 20 2013, Accepted April 30 2013

GIUH 방법은 하천의 차수와 지형학적 분산을 고려하는데, 이는 상류 하천의 개수로 각 하천들의 차수를 매겨 이들을 분류하는 것이다(Strahler, 1957). 이와 대조적으로 하천망으로부터 직접 얻을 수 있는 폭합수(width function)를 이용, 하천망의 위상학적 특성을 거리의 간략한 함수형태로 나타내어(Moussa, 2008a, b) 이를 유출 계산에 이용하는 방법도 있다. 유역의 수문반응은 폭합수와 밀접하게 관련이 있으나(Gupta와 Waymire, 1983), 이러한 반응에 대한 정보는 각 지류들을 그룹으로 묶을 경우, 즉 GIUH와 같은 방법을 이용할 경우 상실할 수 있다(Troutman과 Karlinger, 1985). 따라서 폭합수를 단위유량도 개념에 적용한 WFIUH(the Width Function Instantaneous Unit Hydrograph)의 경우, 하천망 연결구조의 특성을 차수로 나타내기보다 폭합수의 형태로 그대로 이용함으로써 GIUH보다 상당히 간략해진다(Di Lazzaro, 2009). Mesa와 Mifflin(1986)과 Naden(1992)는 폭합수와 홍수파의 이송확산방정식을 결합하여 유역반응에 대한 수리적인 분산을 홍수파 전파속도와 증방향 확산계수로 나타내었다. 이때 해의 매개변수들은 별도의 추정절차 없이 하천경사, 단면형상 등으로부터 물리적으로 결정된다(Franchini와 O'Connell, 1996). 집중형 수문모형(Lumped hydrologic model)과 비교하여 WFIUH는 준분포형 모형(Semi-distributed model)이라고 할 수 있다. 준분포형 모형의 특성상 레이더 강우와 같은 강우의 시공간적 분포를 고려할 수 있으며 침투량 등의 계산 또한 격자단위로 수행이 가능하다. 집중형 수문모형의 계수들이 모형을 구성할 때마다 계수추정의 과정이 필요한 것과 비교하여 WFIUH의 계수들은 물리적으로 결정된다는 장점이 있다. 또한 그 필요자료의 측면에서 완전분포형 모형(Fully-distributed model)에 비하여 적용성이 뛰어난 강점이 있다.

국내에서는 GIUH가 Lee와 Park(1987)에 의해 소개된 이후, 다양하게 적용되어오고 있다(Ahn 등, 2002; Heo와 Lee, 2002; Kim 등, 2003; Choi 등, 2006; Ham 등, 2008; Choi 등, 2010; Joo 등, 2011). 이에 반해 그 장점 및 이론적인 단순성에도 불구하고 WFIUH에 대해서는 국내에서 연구가 진행된 사례가 적다. Choi 등(2010)과 Kim 등(2011)은 미계측 유역에의 적용을 위하여 폭합수를 이용한 합성단위도 기법을 제시하였으나 모두 Di Lazzaro(2009)의 접근방식을 따라 유역응답의 동수역학적 분산(hydrodynamic dispersion)을 고려하지 않았으며 특히 균등 강우를 가정한 단위도의 생성에 중점을 두었다. 따라서 본 연구에서는 동수역학적 분산을 고려한 WFIUH를 실제 유역인 청미천 유역에 적용하고, 그 결과를 관측치와 비교하여 모형의 적용성을 검토하였으며, 강우의 이동 및 시공간분포를 고려할 수 있는 준분포 모형으로서의 활용가능성에 중점을 두고자 하였다.

2. WFIUH (Instantaneous Unit Hydrograph based on the Width Function)

유속이 일정하다고 가정했을 때, 거리를 시간으로 변환함으로써 WF는 이산화된 단위도로 쉽게 변환할 수 있다. 그러나 여기서 하천의 저수용량과 도달시간의 변동성은 무시된다. 실제 하천망은 길이 Δx 의 각개 독립적인 단위하천들의 연결로 볼 수 있으며, 각각은 측면 유입이 있을 것이고, 거리 x 에 위치한 유역 출구로 연결된다. Van de Nes(1973)은 질량-운동량 보존 방정식을 기반으로 하여 아래의 홍수파의 이송확산 방정식을 제안하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - c \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (1)$$

여기서 경계조건은 $Q(0,t) = \delta(t)$, $Q(x,0) = 0$, 그리고 $Q(\infty,t) = 0$ 이며, Q 는 유출량(m^3/s), D 는 확산계수(m^2/s), c 는 운동파 전파속도(m/s), t 는 시간(s), 그리고 x 는 하도상단으로부터의 거리(m)이다. Franchini와 O'Connell(1996)은 WFIUH의 적용을 위해 자연하천에 대하여 광폭 직사각형 하천단면을 가정, 확산계수 D 와 운동파 전파속도 c 를 아래와 같이 제시하였다.

$$c = kv, \quad k \approx 1.5 \quad (2)$$

$$D \approx \frac{Q}{2BS_0} = \frac{By_0v}{2BS_0} = \frac{vy_0}{2S_0} = \frac{cy_0}{3S_0} \quad (3)$$

여기서 v 는 유속(m/s), Q 는 유량(m^3/s), S_0 는 하천경사(mm^{-1}), y_0 는 하천단면의 깊이(m), B 는 하천단면의 너비(m)이다.

계수로 적용되는 D 와 c 를 상수로 두고, 식 (1)과 상류 임펄스 경계조건으로부터 아래와 같은 해를 얻을 수 있다(Van de Nes, 1973; Naden, 1992; Franchini와 O'Connell, 1996; Da Ros와 Borga, 1997).

$$u(x,t) = \frac{x}{\sqrt{4\pi Dt^3}} \exp \left[-\frac{(\Delta x - ct)^2}{4Dt} \right] \quad (4)$$

여기서 $u(x,t)$ 는 홍수파에 대한 이송확산 방정식의 단위 임펄스 반응(unit impulse response)이다. 따라서 폭합수를 기반으로 하는 유역의 단위도(WFIUH)를 다음과 같이 나타낼 수 있다(Da Ros and Borga, 1997).

$$h(t) = \int_0^\infty W(x)u(x,t)dx \quad (5)$$

여기서 $W(x)$ 는 정규화한 폭합수이다. 이 정규화한 폭합수의 값은 유역반응의 입력치로서 강우가 유역출구로부터 x 와 $x+dx$ 사이의 구간에 떨어질 확률과 같다고 할 수 있다. 식 5를 이산화한 형태로 표현하면 다음식과 같다.

$$h(t) = \sum_{i=1}^n \frac{i\Delta x}{\sqrt{4\pi Dt^3}} W(i\Delta x) \exp\left[-\frac{(i\Delta x - ct)^2}{4Dt}\right] \Delta x \quad (6)$$

여기서 W 는 폭합수로서 다음과 같이 정의된다.

$$W(x) = N\{d(x)\} \quad (7)$$

여기서 폭합수 W 는 주어진 거리 x 에 대해 그와 일치하는 격자의 수와 같다. 유역에 균등한 강우가 아닌 시간별 강우의 공간 분포를 고려할 경우 식 (6)은 단위도(IUH)가 아닌 각 시간단위별 반응함수(response function)으로 정의된다.

$$r(\tau, t) = \sum_{i=1}^n \frac{i\Delta x}{\sqrt{4\pi D\tau^3}} W_R(i\Delta x, t) \exp\left[-\frac{(i\Delta x - c\tau)^2}{4D\tau}\right] \Delta x \quad (8)$$

여기서 W_R 은 단위유효강우가 아닌 임의의 공간분포를 가진 강우와 결합하여 정의되는 폭합수로서 각 시간 t 마다 다음과 같이 정의된다.

$$W_R(x, t) = \sum_{i,j} R_{ij}(x, t) \quad (9)$$

여기서 $R_{ij}(x, t)$ 는 dt 의 시간간격동안 격자(i, j)에 떨어진 강우량이다. 식 9는 결과적으로 배수망을 따라 유역출구로부터의 거리에 따라 정의된 유역 낙하 강우량의 합을 의미한다. 유역출구에서의 수문곡선은 시간별로 산정된 반응함수(식 8)의 누적합과 같다. 이때 반응함수의 매개변수 c 와 D 는 강우강도에 독립적이라 가정한다.

3. 적용유역

WFIUH의 적용유역으로 한강 제1지류인 국가하천 청미천을 대상유역으로 하였다(Figure 1). 청미천의 유역면적은 595.13 km², 유로연장은 60.69km으로 북동방향으로 유하한다. 유역의 평균고도는 EL. 142.23m, 평균유역경사는 15.46%와 같다. 앞서 언급한 바와 같이 준분포모형인 WFIUH의 모든 계산은 격자단위로 이루어진다. 흐름의 방향은 동서남북의 네 방향으로 설정하였다. Figure 2은 청미천의 하천망을 16×21의 격자망(격자크기 2km)에 재구성

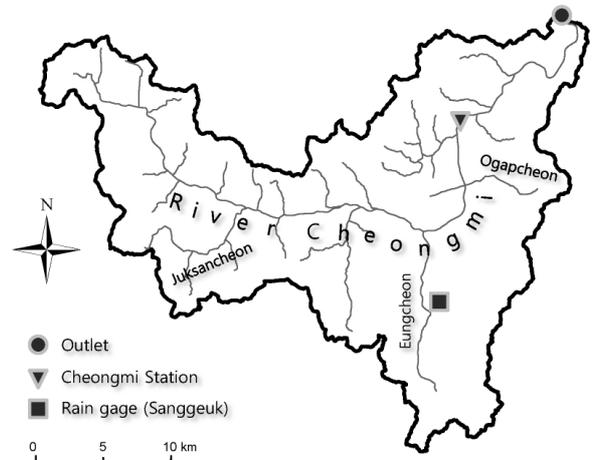


Fig. 1. The Cheongmi River Basin

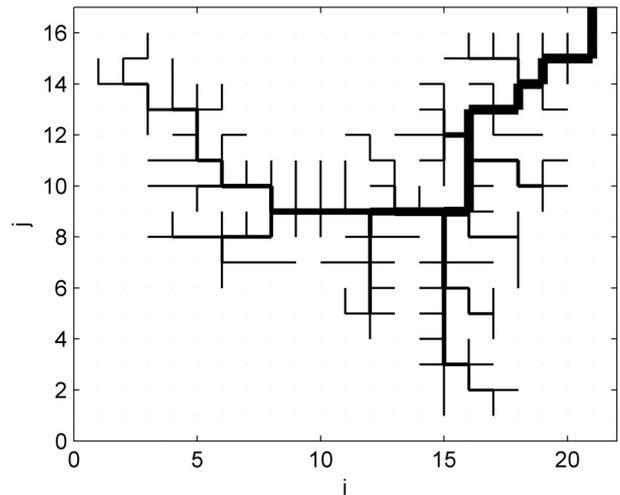


Fig. 2. Reconstructed river networks of River Cheongmi with a grid size of 2 km

한 것이다. Figure 3은 Figure 2와 같이 재구성된 청미천의 하천망 도로로부터 추출된 폭합수를 나타낸 것이다. 여기서 폭합수의 값은 주어진 거리에 해당하는 격자수와 같다. 이번 연구에서의 폭합수는 기존 폭합수에 대한 정의와 다소 차이가 있을 수 있다(Lashermes와 Foufoula-Georgiou, 2007). 그러나 기본적으로 폭합수는 거리-면적 합수를 나타내므로(Lee와 Delleur, 1976; Moussa, 2008a) 본 연구에서 사용한 폭합수는 개념적으로 타당하다고 할 수 있다. 유출곡선을 도달시간의 확률함수라고 할 경우, 출구지점으로부터의 거리를 나타내는 폭합수는 유출곡선에 대한 직접적인 해석이라 할 수 있다. 즉, 동일한 유속을 가정하였을 때 폭합수는 바로 수문곡선으로 치환될 수 있다. Figure 4는 격자단위로 산정한 유출곡선지수(Curve Number)이다. 유효우량은 SCS 유출곡선지수법(AMC-III)을 이용하여 Figure 4의 유출곡선 지수를 이용하여 격자단위로

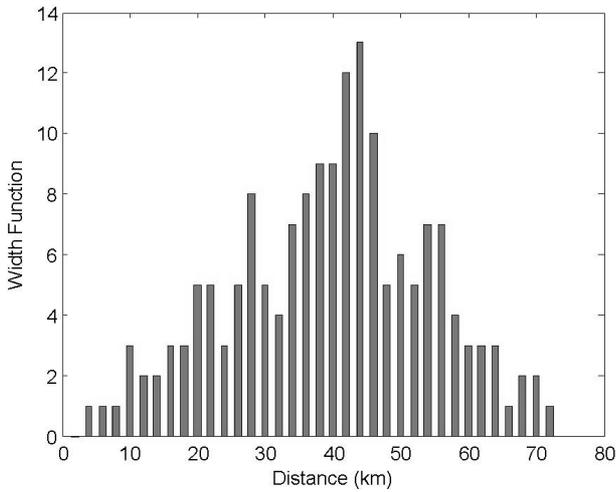


Fig. 3. The width function of River Cheongmi obtained from the reconstructed river networks on a lattice

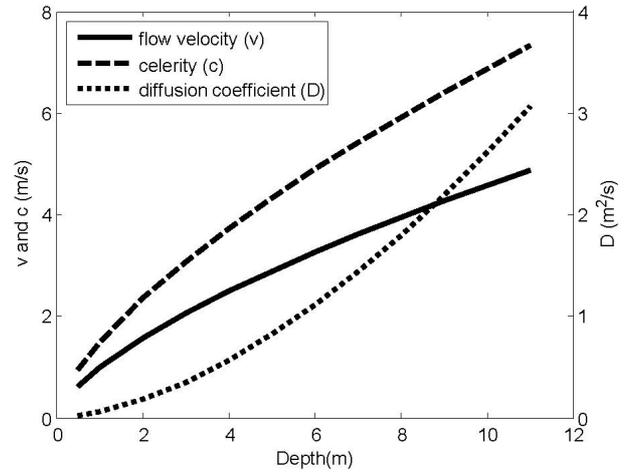


Fig. 5. The flood celerity and the diffusion coefficient as functions of water depths

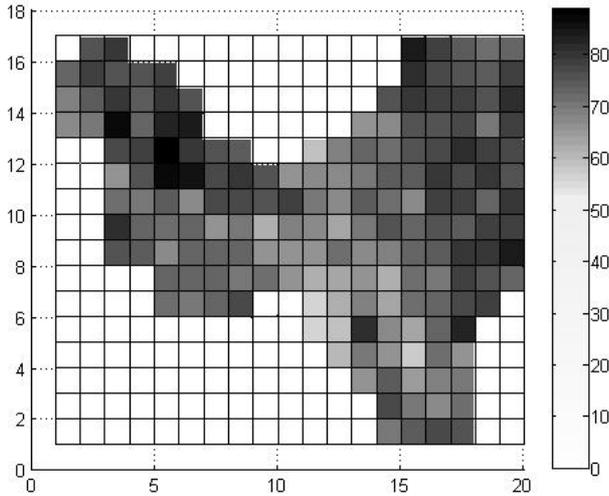


Fig. 4. Curve number (CN) obtained on a lattice for each grid

산정하였으며 단위시간별로 산정된 공간분포를 가진 유효우량을 이용 새로이 정의된 폭합수(식 9) 및 반응함수(식 8)를 산정하였다.

광폭직사각형 단면을 가정할 경우 하도경사가 매개변수 산정에 가장 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 청미천 전구간 하도의 평균경사(1/1140)를 이용하였으며 이에 따른 유속 및 홍수파 전파속도 그리고 확산계수를 수심에 대한 함수로 나타낸 결과는 Figure

5와 같다. 청미천 유역에 대한 WFIUH의 계수추정결과 초기수심을 1.0m 내외로 가정할 경우, 홍수파의 전파속도 c 는 1.25m/s, 확산계수 D 는 $4.5 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 결정할 수 있다(Figure 5). 이는 Franchini와 O'Connell(1996)이 제시한 자연하천의 홍수파 전파속도(10^0) 및 확산계수(10^3)의 범위와 일치하는 결과이다. 격자크기에 대한 모형의 민감도 분석은 본 연구의 대상에서 제외하였다.

4. 관측치 및 기존 모형(HEC-1)과의 비교

WFIUH의 적용성을 검토하기 위하여 청미 수위관측소의 실측 홍수량을 검정에 사용하였다(Table 1). WFIUH에 대한 비교검정을 위한 자료로 범용모형인 HEC-1을 이용한 집중형 모형의 결과도 이용하였다.

Figure 6과 7은 각각 2009년 7월 12일, 2010년 9월 10일의 두 강우사상에 대한 수문곡선을 산정한 것이다. 이 경우 강우는 유역에 공간적으로 균등(uniform)하게 분포되어 내리는 것으로 가정하였다. 그림에 나타난 바와 같이 WFIUH를 이용하여 산정한 수문곡선이 관측치 및 기존 집중형 모형(HEC-1)을 이용한 결과(Ministry of Construction and Maritime Affairs(이하 MCMA), 2011)와 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 수문곡선에 있어 첨두유량의 크기와 첨두유량의 발생시간에 있어 기존 HEC-1모형과 비교할만

Table 1. Information of the Cheongmi gage station

River	Station	Location			Observation Started	Reference(EL.m)
		Location	Longitude	Latitude		
Cheongmi	Cheongmi (T/M)	Wonbu-ri, Jeomdong-myun, Yeosu-gun	129-18-41	35-32-59	Jan 1, 1985	51.066 (51.146)*

*Reference for 1998-2000

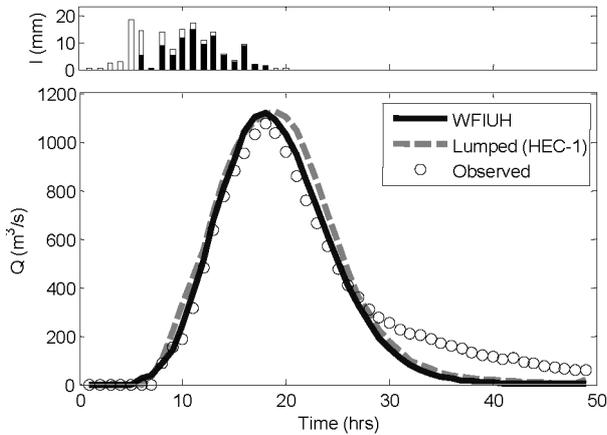


Fig. 6. The hydrograph obtained from the WFIUH compared with the observation for a rainstorm event (12 Jan 2009)

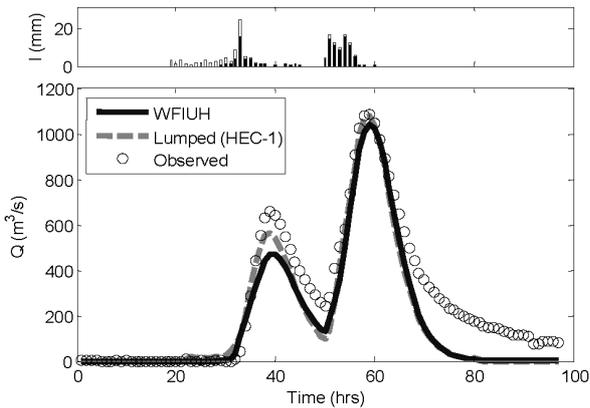


Fig. 7. The hydrograph obtained from the WFIUH compared with the observation for a rainstorm event (10 Sep 2010)

하며 기저유량을 분리(수평직선분리법)한 관측유량과 비교해서도 좋은 결과를 보여주고 있다. 여기서 기존 HEC-1 모형은 모두 13개의 소유역으로 구성되어 있으며 유역추적법으로는 Clark 단위도법을 하도추적기법으로는 Muskingum 방법을 이용한 결과이다 (MCMA, 2011). 2000년 7월 22일, 2002년 8월 6일, 2004년 7월 15일, 2006년 7월 28일 등 기왕 4개 관측유량 및 강우사상을 이용하여 각 소유역 별로 최적화된 HEC-1 모형 Clark 단위도법의 매개변수(저류상수 및 도달시간)는 Table 2와 같다.

5. 강우이동의 영향평가

강우이동의 수문곡선에 대한 영향은 많은 연구로 밝혀진바 있다 (Singh, 1997; Seo, 2012). 일반적으로 하류방향으로 이동하는 경우 유역에 공간적으로 균등한 강우와 비교하여 수문곡선은 늦게 나타나는 급격한 수문곡선의 상승과 첨두유량의 증가를 특징으로 한다. 반대로 강우가 상류방향으로 이동하는 경우 수문곡선의 상승이 일찍 나타나 그 기울기는 완만하며 첨두유량도 작게 나타난다. 이와 같이 강우이동에 따른 강우의 시공간적 변동은 수문곡선의 형상에 많은 영향을 미치므로 예측의 목적으로 수문곡선을 산정할 경우 이에 대한 고려가 반드시 필요하다. 준분포모형으로서 WFIUH의 특징 중 하나는 강우의 시공간적 변동성에 대한 수문곡선을 산정할 수 있다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 유역에 내린 총강우량이 일정할 경우 이동강우의 길이규모와 이동속도에 따른 영향을 검토하도록 하였다. Figure 8은 이동강우의 방향에 따라 정의되는 이동강우의 길이규모(L_s)와 이동속도(v_s)를 보여주고 있다. 여기서 강우의 길이규모(L_s)는 강우진행방향으로 이동 강우의 길이로 정의

Table 2. Parameter estimation of the Clark IUH (MCMA, 2011)

Subbasin	Area (km ²)	tc(hour)		k(hour)	
		Initial	Optimized	Initial	Optimized
Outlet	27.32	1.55	2.05	2.44	2.97
Geumgok	17.03	1.13	1.63	1.72	2.24
Geumgok (before)	34.17	1.43	1.93	1.90	2.42
Seolsung	37.79	1.23	1.73	1.43	1.95
Seolsung (before)	11.81	0.73	1.23	1.07	1.60
Ogap	30.54	0.85	1.35	1.14	1.66
Ogap (before)	37.04	1.44	1.94	2.03	2.56
Eung	103.02	2.09	2.89	2.47	3.49
Eung (before)	33.48	1.38	1.88	1.56	2.09
Seokwon	51.60	1.57	2.07	1.73	2.26
Seokwon (before)	40.64	1.42	1.92	1.72	2.24
Juksan	54.20	1.57	2.07	1.88	2.40
Juksan (before)	116.48	2.66	3.31	2.98	4.50

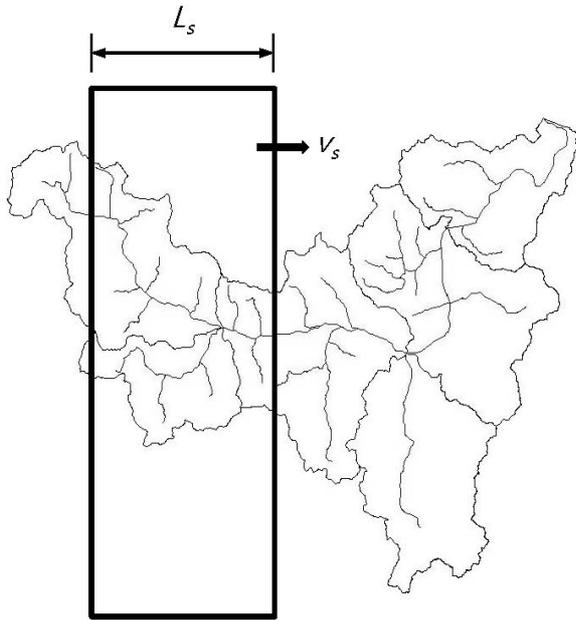


Fig. 8. The length scale (L_s) and the speed (v_s) depending on the direction of rainstorm movements

되며, 이 때 강우의 진행방향에 직각방향, 즉, 횡방향 길이규모는 유역의 길이규모보다 항상 크거나 같은 것으로 가정한다. 이동강우의 범위 내에서 강우의 강우강도는 일정하며, 따라서 지점에 내린 강우량은 지점 강우 지속시간에 비례한다.

동서남북 4개의 방향으로 움직이는 이동강우를 가정하여 WFIUH를 이용하여 유역출구에서의 수문곡선을 산정하였다. Figure 9은 지점단위 강우강도(1mm/hr)를 가정하였을 경우 강우이동에 따른 청미천 유역 출구에서의 수문곡선의 변화를 도시한 것이다. 앞서 언급한 대로 이 때 유역에 내리는 총강우량 및 지점 강우지속시간은 일정하도록 하였다. 따라서 강우의 길이규모(L_s)와 이동속도(v_s)는 서로 비례한다. 예를 들어 2km의 폭을 갖는 긴 띠모양(band)의 형태일 경우, 비교적 느린 속도(0.55m/sec)로 시간단위로 한 단위격자를 이동하는 것으로 가정한다. 만약 강우 길이규모가 4km일 경우 이동속도는 이에 비례하여 1.1m/sec로 정의된다. 앞서 언급한 바와 같이 청미천 유역은 북동방향으로 하천이 유하하는 지형학적 특성을 가지고 있다. 따라서 강우의 이동방향이 유역출구를 향할 경우(eastward, northward) Figure 9의 결과에 나타난 바와 같이 유역에 공간적으로 균등한 강우 및 다른 방향으로 이동하는 경우와 비교하여 첨두유량에 큰 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 하류방향(Eastward)로 이동하는 강우일 경우 그로 인해 유역 출구에서 발생하는 수문곡선의 첨두유량이 상류방향(Westward)와 비교하여 약 2.1배 큰 것을 알 수 있다(Figure 9). 즉 같은 길이규모와 총량의 강우가 발생하여도 그 이동방향에 따라 2배 이상의 큰

차이가 발생한다는 것을 알 수 있다. 이 경우 유역에 강하한 강우의 총량 및 유역의 입의 지점에서의 강우지속시간은 일정하다. 그러나, 강우이동으로 시공간적 변동성으로 인하여 출구에서의 수문곡선의 형상에 큰 영향이 있다는 것을 알 수 있다.

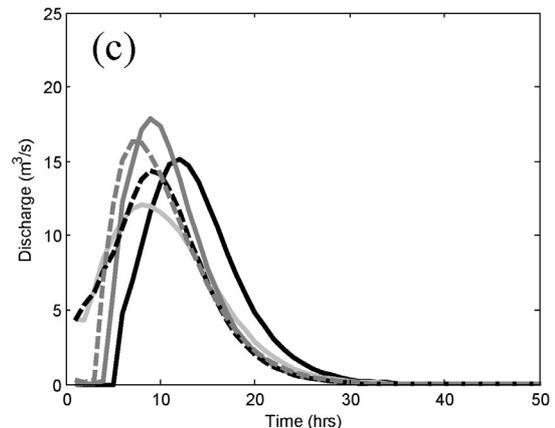
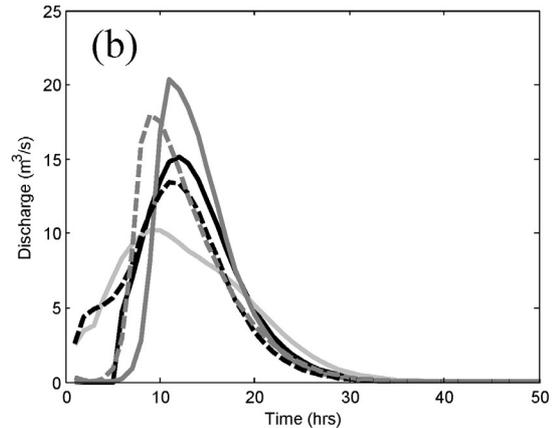
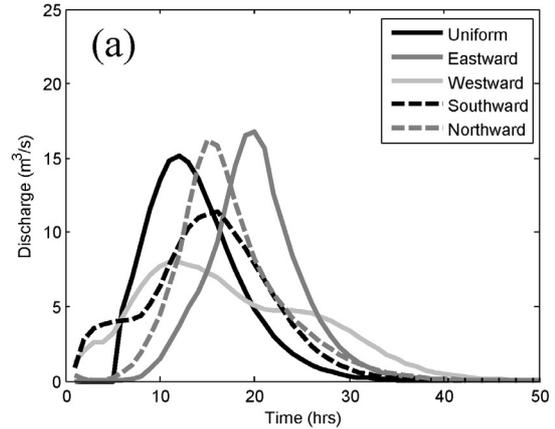


Fig. 9. The variation of hydrographs at the outlet of the watershed depending on the storm movement: (a) $L_s = 2\text{ km}$, $v_s = 0.55\text{ m/sec}$; (b) $L_s = 4\text{ km}$, $v_s = 1.1\text{ m/sec}$; (c) $L_s = 8\text{ km}$, $v_s = 2.2\text{ m/sec}$

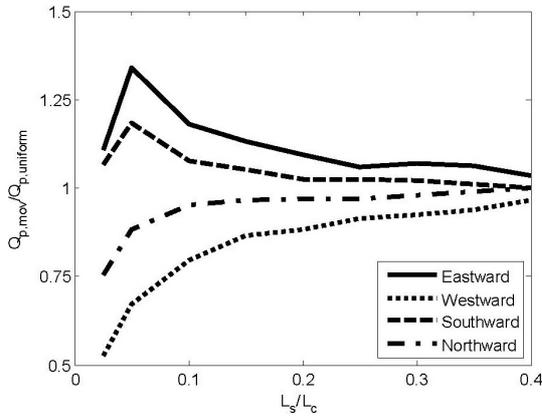


Fig. 10. The peak discharge ratio compared with the uniform rainfall as a function of the ratio of the catchment and the rainstorm length scales(L_s/L_c)

Figure 10에서는 이동강우의 길이규모(L_s)에 따라 이동강우로 인한 유역출구에서의 첨두 홍수량을 유역 균등 강우를 가정하였을 경우 첨두 홍수량에 대한 비로 나타낸 것이다. Figure 10의 결과에 나타난 바와 같이 이동강우의 길이규모가 증가할수록 강우 이동으로 인한 첨두유량에의 영향이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 이동강우의 길이규모가 유역의 길이규모와 가까워질 경우, 유역에 공간적으로 균등한 강우와 비교하여 첨두유량이 일치하는 것을 알 수 있으며 이는 이동강우의 길이규모가 커질 경우 유출수문곡선을 기준으로 그 효과가 정지상태(stationary)의 균등(uniform)한 강우와 같아진다는 Seo 등(2012)의 결과와 상응하는 것이다. Figure 10의 결과에서 또한 주목해야할 점은 유역 하류방향(Eastward와 Northward)으로 강우가 이동할 경우 특정 강우 길이 규모에서 첨두유량이 최대가 된다는 점이다. 이는 유역마다 강우이동에 따른 최대유량이 나타나는 고유한 이동강우의 길이규모를 정의할 수 있다는 것을 의미하므로 향후 방재적 측면에서 특히 고려할 사항이라 할 수 있다. 반대로 이동강우의 진행 방향이 상류방향(Westward와 Southward)일 경우 그 효과는 이동강우의 크기에 따라 단일하게(monotonically) 증가 혹은 감소하는 것을 알 수 있다(Figure 10). 또한 Figure 10에 나타난 바와 같이 청미천 유역이 동서 방향으로 긴 장방형의 유역이므로 남북 방향으로 움직이는 강우보다 동서 방향으로 움직이는 강우에 첨두유량의 측면에서 더 민감한 것을 알 수 있다. 이러한 연구결과는 Kim 등(2003)의 연구결과와도 일치하는 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 하천망의 지형학적인 연결성을 유역의 수문학적 반응과 연계하는 접근방법의 하나로 WFIUH를 소개하였으며 실제

유역에 적용하여 그 적용성을 검증하였다. GIUH와 비교하여 WFIUH는 준분포모형의 특징을 가지고 있으며 유역특성의 공간적 분포 및 강우의 시공간적 분포를 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 매개변수 추정과정을 반드시 필요로 하는 기존의 집중형 모형과 비교하여 WFIUH의 매개변수는 물리적으로 결정되므로 수문분석 및 적용의 엄밀함을 보장할 수 있다. 강우의 시공간적 변동성으로 인한 수문곡선의 영향에 대한 관심이 날로 증가하고 있음에 따라 이를 평가하는 방법 중의 하나로 완전분포모형이 주목받고 있으나, 상대적으로 많은 필요자료, 유역특성의 공간적 균질성 등으로 인하여 그 적용성에는 다소 어려움이 있는 것이 사실이다. 이와 비교하여 WFIUH는 완전분포모형과 비교할 경우 그 매개변수의 간략함과 이론의 단순함으로 인해 상대적으로 적용성이 뛰어난 특징을 가지고 있다. 따라서 향후 레이더 강우 등 강우의 시공간적 정보취득 기술의 진보와 더불어 다양한 목적으로 WFIUH의 적용이 크게 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)과 한국건설기술연구원 주요사업(하천·항만시설 홍수재난피해 저감기술 개발)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, S.-S., Kim, D.-H., Heo, C.-H. and Park, J.-K. (2002). "Analysis of GIUH model using river branching characteristic factors." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 5, No. 4, pp. 9-23.
- Choi, Y.-J., Kim, J.-C. and Jeong, D.-K. (2010). "Development of synthetic unit hydrograph for estimation of runoff in ungauged watershed." *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 26, No. 3, pp. 532-539.
- Choi, H.-S., Park, C.-S. and Moon, H.-G. (2006). "A study on rainfall-runoff analysis by geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH)." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 6, No. 1, pp. 49-58.
- Da Ros, D. and Borga, M. (1997). "Use of digital elevation model data for the derivation of the geomorphological instantaneous unit hydrograph." *Hydrological Processes*, Vol. 11, No. 1, pp. 13-33.
- Di Lazzaro, M. (2009). "Regional analysis of storm hydrographs in the rescaled width function framework." *Journal of Hydrology*, Vol. 373, No. 3, pp. 352-365.
- Franchini, M. and O'Connell, P. E. (1996). "An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, No. 1, pp. 407-428.
- Gupta, V. K. and Waymire, E. (1983). "On the formulation of an

- analytical approach to hydrologic response and similarity at the basin scale.” *Journal of Hydrology*, Vol. 65, No. 1, pp. 95-123.
- Gupta, V. K., Waymire, E. and Wang, C. T. (1980). “A representation of an instantaneous unit-hydrograph from geomorphology.” *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 5, pp. 855-862.
- Ham, D.-H., Joo, J.-G., Jun, H.-D. and Kim, J.-H. (2008). “Study on derivation of fourth-order GIUH and revision of initial state probability.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 229-239.
- Heo, C.-H. and Lee, S.-T. (2002). “Analysis of GIUH model by using GIS in river basin.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 3, pp. 321-330.
- Joo, J.-G., Yang, J.-M. and Kim, J.-H. (2011). “GIUH Variation by estimating locations.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 1, pp.85-91.
- Kim, J.-C., Choi, Y.-J. and Jeong, D.-K. (2011). “Suggestion of synthetic unit hydrograph method considering hydrodynamic characteristic on the basin.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 31, No. 1B, pp. 47-55.
- Kim, S.-J., Kwon, H.-J., Jung, I.-K. and Park, G.-A. (2003). “A comparative study on grid-based storm runoff prediction using Thiessen and spatially distributed rainfall.” *Paddy Water Environment*, Vol. 1, No. 3, pp. 149-155.
- Kim, K.-W., Rho, J.-H., Jeon, Y.-W. and Yoo, C. (2003). “Analysis of rainfall effect on the GIUH characteristic velocity.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 4, pp. 533-535.
- Lashermes, B., Foufoula-Georgiou, E. and Dietrich, W. E. (2007). “Channel network extraction from high resolution topography using wavelets.” *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L23S04, doi:10.1029/2007GL031140.
- Lee, M. T. and Delleur, J. W. (1976). “A variable source area model of the rainfall-runoff process based on the watershed stream network.” *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 5, pp. 1029-1036.
- Lee, S.-T. and Park, J.-K. (1987). “GIUH model for river runoff estimation.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 20, No. 4, pp. 267-278.
- Mesa, O. J. and Miffilin, E. R. (1986). “On the relative role of hillslope and network geometry in hydrologic response.” In: V. Gupta, Rodriguez-Iturbe, I, and Wood, E. (Editors), *Scale problems in hydrology*. D. Reidel, Dordrecht.
- Ministry of Construction and Maritime Affairs (2011). *Base development plan of the Cheongmi River Basin (Revised)*, No. 11-1611347-000015-01.
- Moussa, R. (2008a). “Effect of channel network topology, basin segmentation and rainfall spatial distribution on the geomorphologic instantaneous unit hydrograph transfer function.” *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 3, pp. 395-419.
- Moussa, R. (2008b). “What controls the width function shape, and can it be used for channel network comparison and regionalization?” *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 1-19.
- Naden, P. S. (1992). “Spatial variability in flood estimation for large catchments - the exploitation of channel network structure.” *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, Vol. 37, No. 1, pp. 53-71.
- Rodriguez-iturbe, I. and Valdes, J. B. (1979). “Geomorphologic structure of hydrologic response.” *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.
- Seo, Y. (2012) *The effect of rainstorm movement on urban drainage network runoff hydrographs*, Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- Seo, Y., Schmidt, A. R. and Sivapalan, M. (2012). “Effect of storm movement on flood peaks: Analysis framework based on characteristic timescales.” *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 5, W05532, doi:10.1029/2011WR011761
- Singh, V. P. (1997). “Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph.” *Hydrological Processes* 11: 1649-1669.
- Strahler, A. N. (1957). “Quantitative analysis of watershed geomorphology.” *EOS, Transactions AGU*, Vol. 38, pp. 913-920.
- Troutman, B. M. and Karlinger, M. R. (1985). “Unit-hydrograph approximations assuming linear flow through topologically random channel networks.” *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 5, pp. 743-754.
- Van de Nes, T. J. (1973). *Linear analysis of a physically based model of a distributed surface runoff system*, The Netherlands: Wageningen.