유역의 동수역학적 특성을 고려한 직접유출수문곡선 산정

Calculation of Direct Runoff Hydrograph considering Hydrodynamic Characteristics of a Basin

최윤호* · 최용준** · 김주철*** · 정관수****

Choi, Yun Ho · Choi, Yong Joon · Kim, Joo Cheol · Jung, Kwan Sue

Abstract

In this study, after the target basin was divided into both overland and channel grids, the travel time from center of each grid cell to watershed's outlet was calculated based on the manning equation. Through this process, volumetric discharge was calculated according to the isochrones and finally, the direct runoff hydrograph was estimated considering watershed's hydrodynamic characteristics. Sanseong subwatershed located in main stream of Bocheong basin was selected as a target basin. The model parameters are only two: area threshold and channel velocity correction factor; the optimized values were estimated at 3,800 and 3.3, respectively. The developed model based on the tuned parameters led to well-matching results between observed and calculated hydrographs (mean of absolute error of peak discharge: 3.41%, mean of absolute error of peak time: 0.67 hr). Moreover, the analysis results regarding histogram of travel time-contribution area demonstrates that the proposed model characterizes relatively well hydrodynamic characteristics of the catchment due to effective rainfall.

Key words : Travel Time Distribution Map, Distributed Model, Flow Accumulation Value

요 지

본 연구에서는 대상유역을 지표면과 하천 격자로 분할한 후, Manning 식을 기반으로 각 격자 중심에서 유역 출구점까지의 유하시간을 계산하여 등시간별 체적유량을 산정하였으며, 이로부터 유역의 동수역학적 특성인 특성유속을 고려한 직접유출수문곡선을 도출하였다. 대상유역은 보청천유역의 산성유역을 선정하였다. 대상유역에 대한 매개변수 산정 결과 흐름누적값은 3800, K는 3.3으로 결정되었다. 보정된 매개변수를 실제사상에 대해 적용하여 검증한 결과 첨두유량과 첨두시간의 평균 절대오차는 각각 3.41%, 0.67 hr로 비교적 양호한 모의결과를 나타냈다. 또한 유효유량에 따른 유하시간별 기여면적 주상도를 분석한 결과 본 연구에서 적용된 모형은 강우강도에 따른 유역의 수리학적 특성을 잘 표현하고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 유하시간 분포도, 분포형 모형, 흐름누적값

1. 서 론

전 세계적으로 홍수에 의한 피해는 지구환경 변화에 따른 기후변화와 기상이변으로 인해 증가하고 있는 실정이다. 이러한 현상은 인간의 노력 여하에 따라 변화의 정도는 개선되겠지만 기후변화는 지속적으로 발생할 것으로 예상되고 있다. 결국 이러한 기후변화는 수문 시계열(time series) 자료의 정상성(stationary)을 잃게 만들어 비정상성(non-stationary)을 초래하게 되어 기존 시계열 자료를 기반으로 하는 전통적인 수자원 관리기법만으로는 수문학적 문제해결이 어렵게 될 것으로 전망되고 있다. 이와 더불어 최근에는 컴퓨터의 계산 처

리능력 및 디지털 지형자료 구축의 급속한 발달로 격자연산을 기반으로 하는 모형들이 수문학 분야에 많이 도입되고 있는 실정이다. 즉, 이러한 이유들로부터 수문학의 강우-유출 해석 분야는 선형계로 대표되는 집중형, 시불변성의 기존 강우-유출 모형들과 더불어 분포형·시변동성의 모형들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

분포형 모형은 공간분포된 유역특성변수와 강우량자료 등을 이용하여 유역에서 발생하는 물리적인 거동을 해석하기 위한 모형으로, 격자로 분할된 모든 지점에 대한 분석결과와 파악이 가능하며 시간변화에 따른 공간적인 분포를 파악할 수 있는 장점이 있다. 반면 이를 실제 적용하기 위해서는 다

*충남대학교 공과대학 토목공학과 석사 (E-mail : jong0464@nate.com)

**K-water 연구원 연구원

***K-water 연구원 연구원 (교신저자)

****충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

수의 물리적인 공간자료가 요구되며 처리되는 자료의 양이 많다는 단점이 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 지리정보체계(GIS, Geographic Information System)의 발달에 따라 수문학 분야에도 이에 대한 적용이 활발해졌다. Rinaldo et al.(1991)에 의해 제시된 Strahler의 차수법칙 기반의 지형학적 분산(geomorphological dispersion)에 대한 개념과 Maidment(1993)의 격자 기반 방법론을 이용하여 D'odorico and Rigon(2003)은 GIS에 의한 격자 기반의 형태로 확장한 바 있으며, Di Lazzaro(2009)는 실제 수문사상의 모멘트 특성으로부터 역으로 특성유속(특성 속도)을 산정하는 식을 유도한 바 있다. 그러나 이러한 일련의 연구과정은 기존의 종이지형도를 수치지형도로 대체하여 GIS tool을 이용함으로써 격자 기반의 지형분석 틀은 이루었으나, 유역의 동수역학적 특성인 특성유속은 기존의 연구와 마찬가지로 호우사상 기간 중 전 유역에 걸쳐 하나(하천) 또는 두개(하천/지표면)로 적용하였다. 반면 Saco and Kumar (2002)는 유역전반에 걸쳐 동일한 유속을 가정한 기존의 연구들을 반박하여 차수별 개별 특성유속을 제안하였으며, 이러한 원인에 의한 분산을 운동학적 분산으로 정의하고 정량화하였다. 또한 Lee and Yen(1997)은 Strahler 차수법칙을 기반으로 한 유역구조에 운동과 이론을 이용하여 하천과 지표면의 유하시간을 산정 한 바 있으며, Melesse and Graham (2004)은 각 격자중심에서 유역 출구점까지의 유하시간 산정에 수리학적 방정식을 도입하여 시·공간적으로 분포된 특성 유속 산정 방법을 도입하였다. 지표면 유하시간은 Manning방정식과 정류상태의 운동과방정식의 근사해를 결합하여 추정하였으며 하도 유하시간은 정류상태의 연속방정식과 Manning 방정식을 이용하여 추정하였다. Shen et al.(2004) 또한 이러한 접근방법과 유사하게 GIS의 흐름누적값(FAV, Flow Accumulation Value)을 이용한 분포형 순간단위도를 제시한 바 있다. 여기서 흐름누적값은 흐름누적은 흐름방향에 따라 대상 격자로 흘러 들어오는 격자들의 총 개수를 의미한다. 그러나 이러한 연구는 하천과 지표면 유속 산정에 있어 대해 동일한 격자 폭을 사용함으로써 수리학적 방정식의 사용에 모순을 포함하고 있다. 이러한 모순에 대해 Du et al.(2009)은 Melesse and Graham (2004)에 의해 개발된 모형에 있어서 하도 유속 산정시 삼각형으로 가정된 유효 하폭을 고려함으로써 이를 보완하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 Du et al.(2009)의 이론을 바탕으로 유효유량에 따른 유역의 동적 특성을 고려한 직접유출수문곡선 산정 모형을 구축하고 적용성을 검증하였다.

2. 유하시간 및 직접유출 산정

유역 내 각 격자 중심에서 유역 출구점까지의 유하시간 산정을 위해서는 모든 격자 중심에서 이웃한 격자까지의 유하 거리 및 유속을 산정하여야 한다. 유하거리는 GIS tool에 의해 표준화 되어 있어 비교적 쉽게 산정 되지만, 유속은 다양한 방법에 의해 산정할 수 있다. 따라서 본 장에서는 본 연구에 적용된 유속 산정방법을 설명하였다.

본 연구에서 지표면과 하도의 수리학적 특성(즉, 각각의 특성유속)은 실제 지형학적 하천과 지표면의 구분보다는 물리적으로 유역 내 흐름의 지배적인 요소(즉, 경사 또는 유량)를 구분하는 것으로 GIS상의 흐름누적값이 모형 내에서 지표면과 하천을 구분하는 주요 매개변수가 된다.

2.1 지표면 유하시간

지표류에 대해서 연속방정식과 운동량방정식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\text{연속방정식} : \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial l} = i_e \quad (1)$$

$$\text{운동량방정식} : S_f = S_o \quad (2)$$

여기서, h 는 수심(m), q 는 단위폭당 유량(m^2/s), i_e 는 유효강우강도(m/s), l 은 격자 사이의 유하거리(m)로서 격자가 수평 또는 수직의 흐름 방향들을 가질 경우 격자 크기와 같다. 또한, 격자가 대각선의 흐름 방향들을 가질 경우 $\sqrt{2}l$ 과 같다. 그리고 t 는 유하시간(s)이며 S_f 는 마찰경사, S_o 는 수면 경사를 나타낸다.

또한 Manning 방정식에 의해 지표면 유속 V_o 는 다음과 같이 정의된다.

$$V_o = S_f^{1/2} h^{2/3} / n \quad (3)$$

여기서, n 은 Manning 조도계수이며, q 의 정상상태조건과 연속방정식에 의해 수심 $h = i_e l / V_o$ 로 나타낼 수 있으며, 이를 식 (3)에 대입할 경우 지표면 유속은 다음과 같이 표현 된다.

$$V_o = S_o^{3/10} l^{2/5} i_e^{2/5} n^{-3/5} \quad (4)$$

최종적으로 각 지표면 격자에 대한 유하시간 t_o 는 다음과 같다.

$$t_o = l / V_o \quad (5)$$

2.2 하천 유하시간

유역 출구에서 하천 격자에 대한 유하시간의 계산은 지표면과 마찬가지로 인접격자와의 거리 및 유속에 의해 결정되며, 폭이 넓은 하천에 대하여 하천 유속 V_c 는 Manning 방정식과 연속방정식을 이용하여 다음과 같이 계산된다(Muzik, 1996a,b; Melesse, 2002; Du et al., 2009).

하천에 대한 연속방정식은 다음과 같다(Chow et al., 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

여기서, A 는 하천의 흐름 단면적(m^2)이고, Q 는 누적 유량(m^3/s)으로 유효유량에 기여한 격자와 상류에 기여한 격자의 합에 의해 결정된다.

정상류조건에서 하천 유속 V_c 는 Manning 방정식에 의해 다음과 같다.

$$V_c = S_f^{1/2} R^{2/3} / n \quad (7)$$

여기서, R 은 동수반경이다. 광폭수로에 대한 운동과 근사해와 Manning 방정식을 이용한 식은 다음과 같다(Muzik, 1996a,b; Melesse, 2002; Melesse and Graham, 2004).

$$V_c = S_o^{3/10} Q^{2/5} B^{-2/5} n^{-3/5} \quad (8)$$

여기서, B 는 하천 유효 폭(m), S_o 는 수치표고모형(DEM, Digital Elevation Model)으로부터 얻어진 국부경사로 나타낼 수 있다. 하도격자에 대한 실제 하천 폭을 구하는데 어려움이 따르기 때문에 Kouwen et al.(1993)과 Arora et al.(2001)은 Eq. (8)에서 B 를 제거한 근사식을 다음과 같이 제시하였다.

$$V_c = S_f^{1/2} A^{1/3} / n \quad (9)$$

$S_f = S_o$ 이며 유량 A 를 Q 에 대해 정리하여 최종적으로 V_c 는 다음과 같다.

$$V_c = S_o^{3/8} Q^{1/4} n^{-3/4} \quad (10)$$

Eq. (10)에 모형의 매개변수인 K 를 고려하면 다음과 같다.

$$V_c = K S_o^{3/8} Q^{1/4} n^{-3/4} \quad (11)$$

Eq. (11)에서 매개변수 K 는 Manning 조도계수(n)의 추정 오차, 하상경사 및 유속공식으로부터 유도된 오차를 포함한다 (즉, 운동파방정식의 근사해, 광폭수로 가정 및 하천 형상의 가정에 의한 Manning 공식 근사해에 대한 오차를 포함한다). 따라서 각 하천 격자에 대한 유하시간 t_c 는 지표면 유하시간과 마찬가지로 유속과 유하거리로부터 계산되며 다음과 같다.

$$t_c = l / V_c \quad (12)$$

2.3 직접유출 산정

각 격자에서 유역 출구점까지의 유하시간 $\sum t_i$ 는 임의의 각 격자에서 이웃한 격자로의 유하시간에 대해 GIS에 의해 계산된 흐름방향도를 따라 누가하여 산정되며, 이로부터 각 격자에서의 유효우량과 격자면적의 곱에 의한 체적유량이 유역 출구점까지 유하하는 시간이 결정된다. 따라서 계산하고자 하는 시간 간격(즉, 유효우량의 관측시간 간격) Δt 에 대한 체적유량은 유역 출구점까지의 도달시간 t_a (Eq. (13))에 의해 결정된다. 최종적으로 직접유출량은 대상유역 내 모든 격자가 유하하는 총 시간 구간들에 대해 동일한 도달시간을 가지는 총 체적유량에 의해 계산된다.

$$t_a = \sum t_i + (t-1)\Delta t \quad (13)$$

유역의 동수역학적 특성을 고려한 직접유출수문곡선 산정

여기서, i 는 대상유역 내 임의의 i 번째 격자를 의미하며, t 는 도달시간을 나타낸다. 본 연구에서는 각 시간별 유효우량에 대해 Eqs. (5) and (12)에 의해 계산된 유하시간을 적용함으로써 유역의 동적특성을 고려한 직접유출수문곡선을 산정하고자 하였다.

3. 적용사례

3.1 대상유역

본 연구에서 유역의 기후학적 동적특성을 고려한 직접유출 수문곡선 산정법의 적용성을 검토하기 위해 비교적 장기간 수문사상이 관측된 국제수문개발계획(IHP) 대표유역인 보청천유역의 산성수위국을 출구점으로하는 소유역(이하 산성유역)을 선정하였다. Fig. 1의 산성유역은 보청천유역의 본류로, 최상류지점에 위치한다. 본 연구에서 사용된 DEM은 1/25,000 수치지도로부터 상용 S/W인 Arc Info를 사용하여 추출하였으며 20 m×20 m의 격자망으로 구성하였다. 대상유역에 대해 DEM 전처리 작업을 수행해 흐름방향도와 흐름누적도를 생성하였다.

유속산정을 위한 조도계수는 토지피복도로부터 Vieux(2004)가 제안한 Table 1의 토지 피복별 조도계수 이용해 대상유역 내 조도계수 Grid를 작성하여 적용하였다. Table 2는 본 연구에 사용된 수문사상이다(건설부/건설교통부, 1986~2002). 모형의 적용을 위해 각 수문사상에 대해 면적 평균 강우량은 티센법을, 기저유출분리에는 수평직선분리법을 사용하였다. 유효우량 분리방법은 Ep. (14)의 NRCS(Natural Resources Conservation Service)법을 사용하였다.

Fig. 1. Target Basin

Table 1. Roughness Coefficient by Land Cover

Classify	Land Cover	Roughness Coefficient
1	Water Area	0.030
2	Urbanization	0.015
3	Eroded Land	0.035
4	Marsh	0.050
5	Grassland	0.130
6	Forest	0.100
7	Agricultural Land	0.035

Table 2. Storm Events

Event		Total Rainfall (mm)	Peak Discharge (m ³ /s)	Peak Time (hr)
Year	Month-Day			
1986	07.19.	69.8	73.03	5
1993	08.08.	64.4	69.76	8
1999	06.23.	126.4	54.43	12
2002	08.31.	147.9	93.06	14

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (14)$$

여기서, Q 는 유효우량, P 는 총 우량, I_a 는 초기손실우량을 S 는 초기손실우량을 포함한 토양의 최대 잠재보유수량을 나타낸다.

3.2 매개변수의 보정

매개변수의 보정을 위해 '86. 07. 19 호우사상을 선정하였다. 2장에서 언급하였듯이 Eq. (11)에서 매개변수 K 는 호우사상에 대한 영향보다는 지형특성 및 수리학적 방정식(조도계수, 하상경사 및 운동파방정식의 근사해 등)의 오차 등에 기인하여 결정되기 때문에 선정된 하나의 사상에 대해서 매개변수를 보정하였다.

매개변수 보정결과 대상유역에 있어서 하도와 지표면이 구분되는 한계기준인 흐름누적값은 3000~4000, 하천유속에 대한 매개변수인 K 는 1~10이 적정 범위로 나타났다. 따라서 매개변수를 산정하기 위해 이상의 범위 내에서 흐름누적값은 200, K 는 2.5 간격으로 시행착오법에 의해 적합한 범위를 추

Fig. 2. Parameter Calibration ('86.07.19.)

적하였다. 그 결과 흐름누적값은 3600과 3800을, K 는 2.5~5로 나타났다. 이를 다시 K 에 대해 0.1 간격으로 시행착오한 결과 최종 흐름누적값은 3800, K 는 3.3이 대상유역에 대해 최적의 매개변수로 결정되었다. Fig. 2는 결정된 매개변수 보정값을 호우사상에 적용하여 관측값과 모의값을 비교한 결과이다. 비교결과 첨두시간은 관측치와 모의치 모두 5시간으로 나타났으며, 첨두유량은 관측치 55.42 m³/s, 모의치 55.54 m³/s로 약 0.22%의 오차로 우수하게 모의됨을 보였다.

3.3 유효우량에 따른 직접유출수문곡선의 변화

유효우량에 따른 직접유출수문곡선의 변화를 살펴보기 위해 보정된 매개변수(흐름누적값=3800, K =3.3)에 대해 임의의 유효우량(1 mm/hr, 5 mm/hr, 10 mm/hr, 30 mm/hr, 40 mm/hr)를 적용하여 직접유출수문곡선을 유도하였다. Fig. 3은 각각의 유효우량에 대한 유하시간 분포도와 도달시간-기여면적

Fig. 3. Left : Travel Time Distribution Map, Right : Histogram of Travel Time-Contribution Area

Fig. 3. Continued

Table 3. Change of Paek Time and Contributing Area by Effective Rainfall

Effective Rainfall (mm/hr)	1	5	10	30	40
Peak Time (hr)	4	3	2	1	1
Contributing Area at Peak Time (km^2)	2.3	4.1	5.3	7.6	8.3
Time of Concentration (hr)	56	30	23	15	14

주상도를 나타낸 것이다. Fig. 3과 Table 3에서 보여 지듯이 유효우량이 증가함에 따라 침투시간은 작아지고, 침투 기여면 적은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Eqs. (4) and (11)에 의해 유효우량이 커짐에 따라 지표면 및 하도의 유속이 빨라지기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 현상은 Fig. 3의 유효시간 분포도에서 보여 지듯이 유효우량이 커짐에 따라 초기 시간의 유효시간 분포면적이 넓어짐을 통해 쉽게 확인 할 수 있다. 이로부터 본 모형은 강우강도에 따른 유역의 수리학적

특성을 잘 표현하고 있음을 간접적으로 알 수 있다. 또한 유효우량이 커짐에 따라 도달시간이 역시 56 hr에서 14 hr으로 작아짐을 알 수 있다.

3.4 모형의 검증

모형의 검증을 위해서 보정된 매개변수(흐름누적값=3800, $K=3.3$)를 실제 호우사상에 적용하여 검증하였다. 검증 호우사상은 Table 2의 2~4번째 사상을 적용하였다. 검증결과는 Table 4 및 Figs. 4~6과 같다. 첫 번째 검증사상의 경우 Fig. 4와 같이 침투유량은 관측, 모의값이 각각 $59.15 \text{ m}^3/\text{s}$, $54.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 로, 오차는 8.33%로 나타났으며, 침투유량은 2시간의 오차를 나타냈다. 두 번째 검증사상은 Fig. 5와 같이 관측, 모의값의 침투유량으로 각각 $48.42 \text{ m}^3/\text{s}$, $50.65 \text{ m}^3/\text{s}$ 로, -4.59%의 오차를 보였으며, 침투시간의 관측값과 모의값 모두 12시간으로 나타났다. 세 번째 검증사상은 Fig. 6과 같이 관측값과 모의값 각각 $88.35 \text{ m}^3/\text{s}$, $100.70 \text{ m}^3/\text{s}$ 로, -13.98%

Table 4. Comparison of Observed Data and Calculated Results

호우사상		$Q_p(m^3/s)$			$t_p(hr)$		
연도	시점 (월 일)	관측	모의	오차 (%)	관측	모의	오차 (hr)
1993	08.08.	59.15	54.23	8.33	7	5	2
1999	06.23.	48.42	50.65	-4.59	12	12	0
2002	08.31.	88.35	100.70	-13.98	14	14	0
Abs. Mean		-	-	3.41	-	-	0.67

Fig. 4. Comparison of Observed Data and Calculated Result ('93.08.08)

Fig. 6. Comparison of Observed Data and Calculated Result ('02.08.31)

Fig. 5. Comparison of Observed Data and Calculated Result ('99.06.23)

의 오차를 보였으며, 첨두시간의 오차는 나타나지 않았다. 세 사상에 대한 첨두유량의 평균절대 오차는 3.41%로 비교적 양호하게 모의되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 보청천유역의 산성유역을 대상으로 유효우량에 따른 유역의 동적특성을 고려한 직접유출수문곡선 산정 모형을 구축하여 적용성을 검증하였다. 모형을 실제사상에 적용하여 대상유역에 대해 매개변수를 보정하고 보정된 매개변수를 다른 사상에 적용함으로써 모형을 검증하였다. 이상의 연구를 통해 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 대상유역에 대한 적용모형의 매개변수 검 · 보정결과 하천과 지표면을 구분하는 매개변수인 흐름누적값은 3800을, 지형 및 수리학적 오차를 포함하는 K는 3.3을 제시하였다.
- 2) 산정된 매개변수를 실제사상에 대해 적용하여 검증한 결과 첨두유량과 첨두시간의 평균 절대 오차는 각각

3.41%, 0.67 hr로 비교적 양호한 모의결과를 나타냈다.

- 3) 유효우량에 따른 유하시간별 기여면적 주상도를 분석한 결과 유효우량이 커짐에 따라 기여면적 주상도의 첨두시간이 빨라지며, 기여면적이 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 도달시간은 짧아 지는것을 볼 수 있었다. 이로부터 본 모형은 강우강도에 따른 유역의 수리학적 특성을 잘 표현하고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설부/건설교통부 (1986-2002) 국제수문개발계획(IHP)대표유역보고서
- Arora, V., Seglenieks, F., Kouwen, N. and Soulis, E. (2001) Scaling aspects of river flow routing, *Hydrological Processes*, 15, pp. 461-477
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988) *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- Di Lazzaro, M. (2009) Regional analysis of storm hydrographs in the rescaled width function framework. *Journal of Hydrology*, Vol. 373, pp. 352-365.
- 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
- Du, J., Xie, H., Hu, Y., Xu, Y. and Xu, C.Y. (2009) Development and testing of a new storm runoff routing approach based on time variant spatially distributed travel time method, *Journal of*

- Hydrology*, 369, pp. 44-54.
- Kouwen, N., Soulis, E.D., Pietroniro, A., Donald, J. and Harrington, R.A. (1993) Grouping response units for distributed hydrologic modelling, *ASCE, Journal of Water Resources Management and Planning*, 119(3), pp. 289-305.
- Lee, K.T. and Yen, B.C. (1997) Geomorphology and Kinematic-WaveBased Hydrograph Derivation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123, pp. 73-80.
- Maidment, D.R. (1993) GIS and hydrologic modeling, In: Goodchild, M., Parks, B., Steyaert, L. (Eds.), *Environmental Modeling With GIS*, Oxford University Press, New York, USA.
- Melesse, A.M. (2002) *Spatially distributed storm runoff modeling using remote sensing and geographic information systems*, Ph.D. Dissertation, University of Florida.
- Melesse, A.M. and Graham, W.D. (2004) Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS, *Journal of the American Water Resources Association*, 40(4), pp. 863-879.
- Muzik, I. (1996a) Flood modeling with GIS-derived distributed unit hydrographs, *Hydrologic Processes* 10, pp. 1401-1409.
- Muzik, I. (1996b) Lumped modeling and GIS in flood prediction, In: Singh, V.P., Fiorentino, M. (Eds.), *Geographical Information Systems in Hydrology*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 269-301.
- Rinaldo, A., Rigon, R. and Marani, M. (1991) Geomorphological dispersion, *Water Resources Research*, 27(4), pp. 513-525.
- Saco, P.M. and Kumar, P. (2002) Kinematic dispersion in stream networks - 1. Coupling hydraulics and network geometry, *Water Resources Research*, 38(11), pp. 1244-1255.
- Shen, C., Tachikawa, Y. and Takara, K. (2004) Rainfall-runoff simulation by using distributed Instantaneous Unit Hydrograph derived from applying flow accumulation value of DEM, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 48, pp. 1-6.
- Vieux, B.E. (2004) *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*, Kluwer Academic Publishers.

© 논문접수일 : 11년 03월 09일

© 심사의뢰일 : 11년 04월 04일

© 심사완료일 : 11년 05월 11일