운동파이론 기반 지형기후학적 순간단위도를 이용한 도시유역 유출 분석

A Urban Catchment Runoff Analysis Using Geomorphology-Climatic Instantaneous Unit Hydrograph Based Kinematic Wave Theory

박재범* · 강두기** · 신현석***

Park, Jae Beom · Kang, Doo Ki · Shin, Hyun Suk

Abstract

Although urban area is composed of street, pipes and channels, hydraulic elements is included by hydraulic routing at downstream subcatchment in urban stormwater model but the hydraulic elements is ignored and frequently greatly simplified at upstream headwater subcatchment. In this study, we construct a UGMciUH(Urban Grid based geoMorpho-Climatic Instantaneous Unit Hydrograph), which defines the IUH as the probability density function of the travel time including hydraulic elements in a urban area and evaluate the application for Onchun River. Flow paths are extracted from a spatially processed digital elevation model that incorporates hillslopes, pipes and channels, and travel times are computed in each grid using the average wave celerity from kinematic wave theory. Hydraulic elements in urban catchments has a significant role in determining the travel times and hydrologic response of the watershed.

Key words : Urban catchment, UGMciUH, Kinematic Wave theory, Grid based travel times

요 지

도시유역은 거리, 관망, 하천 등으로 구성되어 있지만 우수유출모형에서 하류 소유역은 하도추적을 통해 관망, 하천과 같은 수리학적 요소를 고려하고 있으나 상류 수역은 수리학적 요소를 고려하지 않고 단순하게 모의하고 있다. 본 연구에서는 도시유역내 수리학적 요소를 고려한 유하시간의 확률밀도함수로 순간단위도를 정의하는 UGMciUH(Urban Grid geoMorpho-Climatic Instantaneous Unit Hydrograph)모형을 구축하고 온천천유역을 대상으로 적용성을 검토하였다. 사면, 거리, 관망, 하천 등을 통합한 지형표고모형을 이용하여 흐름경로를 산정하였고 홍수파(Kinematic Wave)이론을 적용하여 산정한 평균 홍수파의 유속을 이용하여 격자별 유하시간을 산정하였다. 도시유역내 수리요소는 유하시간과 수문학적응답특성 산정시 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 도시유역, 도시지형기후학적순간단위도, 운동파이론, 격자기반 유하시간

1. 서 론

우수유출모형은 유량예측, 토지이용변화에 따른 하류영향 분석, 우수시스템의 설계와 관리, 도시계획 등에 적용하는 중요한 도구이다. 우수유출모형에서 관망 등의 수리특성은 상세히 구성하고 있으나 상류 유량 및 수질 형성 등의 과정은 단순하게 표현하고 있다. 유역을 소유역으로 구분하고 단위도법, 선형 및 비선형 저수지법 등의 해석기법을 이용하여 수리구조물로 유입하는 유량을 산정한다. 이를 위해 소유역은

유역내 거리, 관망, 하천 등의 실제 공간적 구성을 고려하지 않은 단순한 기하학적 형태 또는 저수로지로 개념화한다.

Rodriguez et al.(2003,2005), Lhomme et al.(2004)은 수리학적 요소들은 유역내 흐름방향의 결정에 영향을 미치고 기존모형을 사용시 유역의 유출특성에 중요한 영향을 미치는 것으로 분석하였다.

자연유역의 지형특성을 이용하여 단위도를 산정하기 위한 연구로 Maidment et al.(1996)은 자연유역에서 경사, 하천망 등의 지형특성 자료를 이용하여 공간분포된 유속과 단위도를

*정회원. 부산대학교, 사회환경시스템공학부 박사과정(E-mail: jbpark72@hanmail.net)
Member. Ph.D Candidate, Civil and Environmental Engineering, Busan University

**정회원. (주)웹스 대표이사
Member. CEO, Water & Environmental Management System Corporation

***교신저자. 정회원 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수(Tel: +82-51-510-2348, Fax: +82-51-513-9596, E-mail: hsshin@pusan.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Civil and Environmental Engineering, Busan University

산정하였다. 도시구역의 지형특성을 이용하여 단위도를 산정한 연구로 Zhang et al.(2001)와 Smith et al.(2005)은 유역을 동일한 유속을 가지는 사면 및 하천 격자로 구분하여 단위도를 산정하였다. Smith et al.(2005)은 사면과 하천 관련 격자유속을 이용하여 산정한 단위도가 Rodriguez-Iturbe and Valdes(1979)가 제안한 지형학적순간단위도와 동일함을 제안하였다. Melesse and Graham(2004)은 사면과 하천 관련 격자에 대한 유속을 이용하여 공간분포된 유하시간을 산정하였으며 단위도를 직접 산정하지 않고 동일한 유하시간을 가지는 유량을 합산하여 불투수 시나리오에 따른 영향평가를 수행하였다. Rodriguez et al.(2003, 2005)은 지형특성을 이용하여 산정한 유하시간을 기반으로 단위유효우량에 따른 순간단위도를 산정하였으며 이를 이용하여 유출수문곡선을 산정하였다. 벡터형식으로 표현된 거리, 관망 관련 흐름경로자료와 Manning공식을 이용하여 유속자료를 산정하였으며 지표면에 대한 유속은 일정한 것으로 가정하였다. Choi et al.(2010)은 배수경로 이질성에 의한 격자기반 지형학적순간단위도 이론으로부터 Nash모형 매개변수를 동정하여 국제수문개발계획(IHP)유역을 대상으로 적용성을 검토하였다. Kim et al.(2011)은 유역의 격자 중심점에서 유역출구까지의 유하거리분포도와 동수역학적 매개변수에 의한 유하시간분포도를 이용하여 합성단위도 산정기법을 제시하였다. Ryu et al.(2010)은 격자기반 지표면 유출 및 도시구역 우수관거 유출해석모형을 개발하여 가상 및 실제 유역에 대한 유출모의를 수행함으로써 모형의 적용성을 평가하였다.

분포형특성을 결정하기 위한 이상의 방법들은 다음과 같은 단점을 가지고 있다. 단위도의 선형이론에 따르면 유역의 순간단위도는 특성적이고 응답특성은 비례가정과 중첩특성을 이용하여 산정하나 자연 및 도시구역에서 강우-유출은 비선형적이고 중소규모 도시구역에서의 수리특성의 단순화는 중요한 영향을 미친다. 또한 사면에서의 유속은 격자로 유입하는 유량에 독립된 일정한 값으로 가정하고 있다. Maidment et al.(1996)은 자연유역 하류에서의 유속증가를 고려하기 위해 상류배수면적의 함수로 격자유속을 정의하였으며, Lhomme et al.(2004)은 도시구역에서의 격자 유속을 산정하기 위한 경험식에 상류배수면적을 포함하였다. Rodriguez et al.(2003, 2005)은 Maidment와 Lhomme의 연구결과를 반영하여 유속 산정식을 개선하기 위해 벡터형식으로 거리, 도관 등의 정보를 고려하였으나 유역의 응답특성 산정시 불필요한 복잡한 기법을 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 Gironas et al.(2009)이 제안한 이론을 기반으로 도시구역에 적용 가능한 지형기후학적순간단위도(Urban Grid GeoMorpho-Climate Instantaneous Unit Hydrograph, UGMCIUH)를 개발하였다. 유효우량의 의존성을 반영하여 강우-유출과정의 비선형성과 유역내 하천, 관망에 대한 공간특성을 효율적으로 구성하였으며 사면 격자의 상류유입량을 고려하여 유하시간을 산정하였다. 유역내 지형은 도시구역의 인공구조물과 지형특성을 통합하여 사면, 도관, 하천 관련 격자로 표현하였다. 격자로부터 유역출구까지의 유하거리와 운동파(kine matic wave)이론을 이용하여 격자유형과 유효강우강

도에 대한 기후학적 의존성을 고려한 유하시간을 산정하였다. 흐름경로에 따른 유역출구까지의 격자별 유하시간을 합산하여 총유하시간을 산정하였으며 순간단위도를 유하시간의 확률밀도함수로 정의하였다. 모형은 유효강도에 따른 순간단위도를 산정하고 회선적분을 수행하여 유역출구의 유출수문곡선을 산정한다.

2. 도시 지형기후학적순간단위도 이론

Rodriguez-Iturbe and Valdes(1979)와 Gupta et al.(1980)은 유역의 지형학적 특성을 이용하는 지형학적순간단위도 이론을 개발하였으며 순간단위도는 유역내 임의지점의 강우가 유역출구에 도달하는 유하시간의 함수로 정의하였다. 순간단위도는 음해법 또는 양해법을 이용하여 해석할 수 있으며 음해법은 흐름경로를 해석하기 위해 Horton의 법칙을 이용하고 양해법은 유역내 임의지점의 유역출구까지의 흐름경로를 수치표고모델(DEM)을 이용하여 정의한다. Rodriguez et al.(2003)은 복잡한 흐름경로를 가지고 있으며 Horton의 법칙에 오차가 있는 도시구역의 경우 유역내 인공구조물에서 공간변동성 속도를 고려할 수 있는 양해법이 적당함을 제안하였다.

2.1 도시구역 표현

도시구역의 응답특성을 결정하기 위해서는 흐름경로를 상세하게 표현하는 것이 중요하다. 이를 위해 지형분석 도구를 이용하여 하천과 관망 등이 위치한 격자에 대한 전처리 작업을 수행 후 모형의 입력자료인 경사, 흐름방향과 흐름누적수 등의 자료를 생성한다. 격자는 특성에 따라 사면(HillSlope), 하천(Channel), 관망(Pipe s)으로 분류하고 격자의 위치정보를 이용하여 수문해석을 위해 필요한 경사, 흐름길이, 하폭 등의 기하학적 특성이 연계된다.

2.2 유효강우

UGMCIUH 모형은 총강우량을 유효강우량과 초기손실과 침투에 해당하는 손실량으로 구분하고 초기손실(I_A)과 침투(f_o)는 유역에 대해 일정하다고 가정한다. 침투는 토양형과 선행 토양함수에 의존하는 매개변수로 다음과 같다.

$$f_o = f_c / C \quad (1)$$

여기서 f_c 는 중기침투능, C 는 매개변수를 의미한다.

격자내 투수면적과 불투수면적을 고려하여 격자내 유효우량을 산정하며 격자 j 에서 시간 t 에서의 유효우량($E_{j,i}$)은 다음과 같다.

$$E_{j,i} = \begin{cases} I_i H_j & \text{if } I_i \leq f_c / C \\ (1 - H_j) \left(I_i - \frac{f_c}{C} \right) + I_i H_j & \text{if } I_i > f_c / C \end{cases} \quad (2)$$

여기서 I_i 는 강우강도, H_j 는 불투수율을 의미한다.

2.3 지표흐름

지표유출은 중소규모의 도시구역의 유하시간 산정을 위해

적용성이 검증된 운동파이론을 이용하여 산정한다. 사면 격자는 상하류 격자가 연계되어 있고 이 연결성은 유효강우량과 상류유입량을 이용한 평행시간 관련 수식을 이용하여 표현할 수 있고 Wong(1995)는 유효강우강도(E)와 단위폭당 상류유입량(q_u)을 이용하여 홍수파유하시간(τ) 관련 수식을 제안하였다.

$$\tau = \left(\frac{LE^{1-\beta_h}}{\alpha_h} \right)^{1/\beta_h} [(\lambda+1)^{1/\beta_h} - \lambda^{1/\beta_h}] \quad (3)$$

여기서 L 는 흐름길이, $\lambda (=q_u/(EL))$ 는 무차원유입량, α_h 와 β_h 는 단위폭당유량($q=EL+q_u$)과 흐름수심(y)을 연계하는 매개변수로 다음과 같다.

$$q = \alpha_h y^{\beta_h} \quad (4)$$

Manning공식을 이용하면 $\alpha_h = S^{0.5}/n$, $\beta_h = 5/3$ 이고 홍수파의 유하시간을 사면격자 단위로 일반화하면 다음과 같다.

$$\tau_{j,i} = 6.99 \left(\frac{n_j l_j}{\sqrt{S_j}} \right)^{0.5} E_{j,i}^{-0.4} [(\lambda_j+1)^{0.6} - \lambda_j^{0.6}] \quad (5)$$

여기서 n 는 분, S 는 m/m , l 은 m , E 는 mm/h 의 단위를 가지며 τ 는 시간, j 는 격자 관련 인덱스를 의미한다.

상류유입량이 없다고 가정하면($q_u=\lambda=0$), 길이 l , 경사 S 인 평면에 대한 홍수파의 유하시간은 다음과 같다.

$$\tau_{j,i} = 6.99 \left(\frac{n_j l_j}{\sqrt{S_j}} \right)^{0.6} E_{j,i}^{-0.4} \quad (6)$$

유효우량($E_{j,i}$)은 시간적 변동성을 고려하고 있으며 격자 경사(S_j), 흐름길이(l_j)는 도시 지형정보를 이용하여 산정할 수 있다. 유역내 강우가 일정하고 투수지역에서 유출이 작다고 가정하면 상류유입량의 기여율은 불투수면적 관련 무차원계수(λ_j)로 단순화 할 수 있다.

$$\lambda_j = \frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} \quad (7)$$

여기서 $A_{u,j}$ 는 상류배수면적, $H_{u,j}$ 는 상류불투수율, A_j 는 격자면적, H_j 는 격자 불투수율을 의미한다.

사면에서의 유하시간은 무차원계수를 고려하여 표시하면 다음과 같다.

$$\tau_{j,i} = 6.99 \left(\frac{n_j l_j}{\sqrt{S_j}} \right)^{0.6} E_{j,i}^{-0.4} \times \left[\left(\frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} + 1 \right)^{0.6} - \left(\frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} \right)^{0.6} \right] \quad (8)$$

2.4 하도 및 관로 흐름

Wong(2003)은 운동파이론을 이용하여 하천, 관망과 같은 하도 격자에서의 홍수와 관련 유속을 제안하였다.

$$t_L = \left(\frac{L}{\alpha_c q_L^{\beta_c-1}} \right)^{1/\beta_c} [(\lambda_c+1)^{1/\beta_c} - \lambda_c^{1/\beta_c}] \quad (9)$$

여기서 α_c 와 β_c 는 유량관련 매개변수, λ_c 는 상류유입량(Q_u)에 대한 측면유량(q_L)의 비를 의미한다.

운동파이론 기반 지형기후학적 순간단위도를 이용한 도시유역 유출 분석

$$\lambda_c = \frac{Q_u}{q_L L} \quad (10)$$

홍수와 유하시간을 산정하기 위해 흐름길이를 격자간격으로 정의하였다. 흐름이 직선 또는 대각선 방향이 아닌 여러 격자를 횡단하여 유하할 경우 흐름길이(L)를 격자길이(l_j)로 가정하면 오차가 발생하므로 실제 하도의 길이에 대한 격자로 표현한 하도의 길이 비를 이용하여 보정하였다.

$$\varnothing = \frac{L_{T,L}}{L_{T,L}} \quad (11)$$

여기서 $L_{T,L}$ 은 격자로 표현한 하도 총길이, $L_{T,L}$ 은 실제 하도 총길이를 의미하고 흐름길이는 $l_j/\varnothing$ 이다.

측면유량을 격자에서의 유효강우량($E_{j,i} A_j$)에 대한 흐름길이($l_j/\varnothing$) 비로 정의하고 사면 격자에서의 동일한 불투수면적비를 도입하면 수리구조물에서의 유하시간은 다음과 같다.

$$t_L = \frac{l_j}{\varnothing} \left(\frac{1}{\alpha_c (E_{j,i} A_j)^{\beta_{c,j}}} \right)^{1/\beta_{c,j}} \times \left[\left(\frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} + 1 \right)^{1/\beta_{c,j}} - \left(\frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} \right)^{1/\beta_{c,j}} \right] \quad (12)$$

하천을 폭이 넓은 사각형 단면으로 가정하였을 경우 홍수와 관련 매개변수를 이용하여 산정한 유하시간은 다음과 같다.

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{S}}{n B^{2/3}} \quad (13)$$

$$\beta_c = 5/3 \quad (14)$$

$$\tau_{j,i} = \frac{6.99}{\varnothing} l_j \left(\frac{n_j}{\sqrt{S_j}} \right)^{3/5} \left(\frac{B_j}{E_{j,i} A_j} \right)^{2/5} \times \left[\left(\frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} + 1 \right)^{3/5} - \left(\frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} \right)^{3/5} \right] \quad (15)$$

관망을 원형단면으로 가정하였을 경우의 홍수와 관련 매개변수를 이용하여 산정한 유하시간은 다음과 같다.

$$\alpha_c = 0.501 \frac{D^{1/6} \sqrt{S}}{n} \quad (16)$$

$$\beta_c = 5/4 \quad (17)$$

$$\tau_{j,i} = \frac{0.59}{\varnothing} \left(\frac{n_j}{\sqrt{S_j}} \right)^{4/5} \left(\frac{l_j}{(E_{j,i} A_j)^{1/5} D_j^{2/15}} \right) \times \left[\left(\frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} + 1 \right)^{4/5} - \left(\frac{H_{u,j} A_{u,j}}{H_j A_j} \right)^{4/5} \right] \quad (18)$$

2.5 순간단위도와 회선적분

임의 격자에서 유역출구까지의 유하시간은 경로상에 위치한 모든 격자들의 유하시간을 합산하여 다음과 같이 산정한다.

$$T_j = \sum_{r \in R_j} \tau_r \quad (19)$$

순간단위도는 유하시간의 확률밀도함수로 단위시간동안의 단위도 종거는 다음과 같다.

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t f(T_j) dT = \frac{F(t) - F(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (20)$$

여기서 $f(T_j)$ 는 순간단위도, Δt 는 단위시간, $F(t)$ 는 유하시간관련 누가확률밀도함수, $h(t)$ 는 단위도 종거를 의미한다.

누가함수의 차이 $F(t) - F(t-\Delta t)$ 는 유하시간이 $P(t-\Delta t \leq T \leq t)$ 일 확률로서 총 격자수(N_t)와 유역출구까지 유하시간이 구간 $[t-\Delta t, t]$ 내에 있는 격자수(n_t)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \frac{n_t}{N_t} \quad (21)$$

임의 시간에서 유량은 유효유량과 해당 순간단위도를 이용하여 산정한다.

$$Q_v = A \sum_{i=1}^v \bar{E}_i h_{v-i+1} \quad (22)$$

여기서 A 는 유역면적, h 는 i 번째 유효강우에 해당하는 단위도 종거, $\bar{E}_i$ 는 공간평균강우를 의미하고 다음과 같이 산정한다.

$$\bar{E}_i = \frac{\Delta t}{N_{tj} \sum E_{j,i}} \quad (23)$$

3. 도시 지형기후적순간단위도 적용

3.1 개요

본 연구에서는 유역, 하천 및 관망 관련 자료를 수집 후 지형전처리 도구를 이용하여 격자기반 자료로 전환하였다. 이를 이용하여 상류 유입량 기여율, 격자별 유하시간, 불투수면 적비 등의 UGMCIUH 모형 관련 매개변수를 산정하여 유출해석을 수행하였다. UGMCIUH 모형 적용절차는 Fig. 1과 같다.

3.2 대상유역

부산시광역시 도심지에 위치한 대표 도시하천 유역인 온천

Fig. 1. Schematic Diagram for UGMCIUH Construction

천을 대상으로 UGMCIUH 모형의 적용성을 검토하였다. 온천천 유역은 수영강의 제1지류로서 수영강 하구로부터 약 3.1 km 상류지점에서 수영강의 우측으로 유입하는 지방하천 유역이다. 유역면적은 56.28 km², 유로연장은 14.85 km로서 수영강 전체 유역면적의 약 28.2%를 차지하고 있으며 유역의 형상은 협장한 수지상으로서 그 폭이 동서로 약 4~6 km, 남북으로 15 km 정도이다.

Fig. 2. Onchun River Catchment

3.3 수문자료 구축

유역내 세병교 지점의 유량자료와 부산기상대 강우자료를 이용하여 모형의 수문자료를 구축하였다. 세병교 유량관측 기간인 7개년(2006년~2012년) 동안의 부산기상대 강우자료를 대상으로 강우분리시간 6시간, 총강우량 50 mm이상인 강우-유출관계가 유의한 15개의 호우사상을 Table 1과 같이 선정하였다. 대상 호우사상의 최대강우강도는 7.0~34.5 mm/h, 총강우량은 51~117.5 mm, 호우지속시간은 16~48 hr을 나타내고 있는 것으로 분석되었다. 온천천 유역은 사면, 관망, 하천 관련 격자로 구성되어 있으며 도시유역의 기저유량은 미량으로 존재하기 때문에 직선분리법을 이용하여 직접유출 수문곡선을 산정하였다.

3.4 모형 구축

온천천유역의 지형자료와 분석도구(ArcHydro Tool)를 이용하여 30 m 간격의 흐름방향, 흐름누적, 경사 관련 격자를 산정하였다. 이를 이용하여 흐름길이, 불투수면적비, 하폭, 관경 등의 UGMCIUH모형 관련 입력 자료를 산정하였다. Sakong et al.(2003)이 제안한 기법을 적용하여 토지이용별 불투수율을 산정하였으며 이 분류법은 레이더 강우자료를 이용하는 Vflo모형에서도 불투수율을 산정할 때 이용하고 있는 방법이다.

Fig. 3. Gis Data Construction for Onchun River

Table 1. Flood Event

Event	Starting Date (YY/MM/DD)	Starting Hour (HH)	Total Rainfall (mm)	Duration (hr)	Max Rainfall Intensity (mm/hr)
1	2006/05/09	23	51.0	25	12.5
2	2006/05/18	21	74.3	27	14.5
3	2006/07/04	06	61.0	30	15.0
4	2006/09/15	16	61.0	24	10.0
5	2006/09/17	03	52.5	37	7.0
6	2007/07/01	04	88.5	31	21.0
7	2007/10/07	15	96.0	16	34.5
8	2009/09/05	15	73.9	48	12.0
9	2009/05/21	03	90.5	21	19.0
10	2009/06/22	00	98.0	35	18.0
11	2009/07/23	22	68.0	37	21.5
12	2009/07/28	16	52.5	32	12.0
13	2010/07/13	06	74.6	24	13.0
14	2010/09/06	18	65.5	30	22.0
15	2012/04/21	06	117.5	42	14.0

Rossman(2010)이 도시 우수유출해석 모형인 SWMM 구축 시 제안한 25.4 mm/h의 침투능을 종기침투능(f_c)의 초기값으로 설정하였으며 사면 격자의 조도계수는 투수면적과 불투수면적에 대한 조도계수를 면적가중 평균하여 산정하였다.

$$n_j = n_l H_j + n_p (1 - H_j) \quad (24)$$

Gironas et al.(2009)이 도시구역의 우수해석시 적용한 투수지역($n_p=0.2$), 불투수지역($n_l=0.015$), 관망($n=0.0152$), 하천($n=0.15$) 관련 격자의 조도계수를 초기값으로 설정하였다. 관경(D), 하폭(B) 관련 셀의 수치는 1:5,000 수치지도와 부산광역시 하수도정비 기본계획(변경)(Busan, 2010) 자료를 이용하여 벡터형 자료를 생성 후 격자 유형으로 변환하였으며 흐름길이 보정계수(O)는 실제하천길이를 이용하여 2.571로 설정하였다.

3.4 모형 적용

모형 매개변수 검보증을 위함 목적함수로 효율성계수(Nash-

Sutcliffe Coefficient, NSC)를 선정하여 투수지역, 관망 관련 격자의 조도계수 보정을 수행하였다. 또한 Table 2와 같이 모형의 침투유량, 유출체적, 경향성 검토를 위해 상대침투치 오차, 제곱근평균제곱오차, 상관계수를 산정하여 모형의 성능을 분석하였다.

최적매개변수 선정을 위해 10개 호우사상(호우사상1~호우사상10)을 이용하여 매개변수를 보정하였고 5개 호우사상(호우사상11~호우사상15)을 이용하여 매개변수에 대한 검증을 수행하였다. 선정한 호우사상에 대한 검보정결과는 Table 3과 같고 투수지역 조도계수로 0.21, 하천관련 조도계수로 0.15, 관망조도계수로 0.0245를 선정하였다. 해당 값은 Bedient and Huber(2002)의 연구결과와 비교하였을 때 상대적으로 높은 값에 해당하며 대상구역의 측구 또는 관거 유입구 부근에 토사, 유송잡물과 같은 장애물이 있음을 의미한다.

UGMcIUH는 호우사상 모형으로 강우시작시 토양의 수분상태를 반영하는 초기손실(I_A)과 침투관련 매개변수(C)를 사상별로 산정하였다. I_A 는 0.18~2.87 mm로 평균 1.06 mm, C

Table 2. Validation Statistics

Name	Equation	Definition
Relative Peak Error	$RPEs = \frac{[\hat{R}_p - R_p]}{R_p} \times 100$	N = Number of Data $\hat{R}_p$ = Simulated Peak R_p = Observed Peak $\hat{R}(t)$ = Simulation $R(t)$ = Observation $\bar{R}(t)$ = Mean Observation $\bar{\hat{R}}(t)$ = Mean Simulation
Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [\hat{R}(t) - R(t)]^2}$	
Correlation Coefficient	$CC = \frac{\sum_{t=1}^N [R(t) - \bar{R}(t)][\hat{R}(t) - \bar{\hat{R}}(t)]}{\sqrt{\sum_{t=1}^N [R(t) - \bar{R}(t)]^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^N [\hat{R}(t) - \bar{\hat{R}}(t)]^2}}$	
Nash-Sutcliffe Coefficient	$NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N [R(t) - \hat{R}(t)]^2}{\sum_{t=1}^N [R(t) - \bar{R}(t)]^2}$	

Table 3. Model Calibration and Validation Result

Strom Eveent	IA (mm)	C	RPE	RMSE	CC	NSC
1	0.73	14.51	1.35	3.46	0.99	0.85
2	0.80	9.04	1.19	6.87	0.94	0.74
3	2.80	7.34	0.86	3.97	0.98	0.82
4	2.87	11.76	1.57	7.06	0.95	0.77
5	0.20	24.90	0.35	3.58	0.95	0.69
6	1.10	16.18	1.73	22.12	0.84	0.58
7	0.18	2.08	1.15	18.81	0.94	0.65
8	0.24	4.02	0.44	2.11	0.99	0.85
9	0.37	12.33	0.51	11.21	0.98	0.85
10	2.81	8.85	1.80	14.19	0.86	0.61
11	2.15	4.05	0.52	8.31	0.96	0.73
12	0.83	5.98	1.35	2.23	0.99	0.79
13	0.26	6.38	0.67	5.72	0.98	0.81
14	0.31	3.51	1.01	6.79	0.97	0.83
15	0.32	16.28	0.99	11.65	0.93	0.59

는 2.08~24.9로 평균 9.81로 분석되었으며 해당 값은 평균침투능 3.97mm/h에 해당한다. 2006년부터 2012년까지의 15개 호우사상에 대한 유출수문곡선은 Fig. 4와 같다.

모의수문곡선은 관측수문곡선을 일관되게 재현하고 있으며 NSC는 0.58~0.85로 호우사상의 반이상이 0.70 이상을 나타내고 있으며 보정시 평균 0.74, 검정시 평균 0.75의 수치를 나타내고 있다. 호우사상 6, 10의 경우 약 0.6의 NSC 값을 나타내고 있으며 침투유량이 과대평가 되었다. 호우사상 10과 같이 강우가 집중된 형태를 나타내는 호우사상의 경우 관망시스템은 월류하고 범람이 발생하나 모형이 범람현상을 반영하지 못하기 때문이다. 쌍봉형태를 나타내는 호우사상 6의 경우 낮은 NSC(0.58)의 값을 나타내고 있으며 첫 번째 침투치를 과소평가하고 있다. 2개의 호우사상을 제외하였을 경우

모형의 NSC는 평균 0.77로 개선되었다.

호우사상 1, 2, 6, 10의 경우 첫 번째 침투치를 과대평가하고 있으며 호우사상 4의 경우에는 두 번째 침투치를 과소평가하고 있다.

이런 차이는 본 연구에서 개발한 모형은 유역내 유수, 저류 효과를 고려하지 못하고 직접유출량 산정시 제거하지 못한 기저유량으로 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 모형의 상대침투비 1.03%, 상관계수 0.95로 유역의 도달시간과 유출강도에 따른 유출특성을 정확하게 예측하고 있다. 침투시간의 경우 15개의 호우사상 모두 모형과 관측치의 침투유량 발생 시기가 일치하였으나 쌍봉형태의 수문곡선일 경우 첫 번째 침투치의 경우 과소평가 되고 두 번째 침투치의 경우 과소평가하는 경향을 보이므로 분단위로 모의하였을 경우 침투시간

Fig. 4. UGMclUH Model Calibration and Validation

오차가 발생할 수 있을 것으로 분석되었다. 본 연구에서 개발한 모형은 유역내 수리적 추적기법을 고려하지 않고도 관측수문곡선을 정확하게 재현하고 있으며 호우사상내 6시간이하의 무강우시간이 발생하는 홍수사상(호우사상 5, 6, 7, 14)의 경우에도 정확하게 수문곡선을 예측하고 있다.

운동파 이론 기반 지형기후학적 순간단위도를 이용한 도시유역 유출 분석

4. 결 론

도시유역은 거리, 관망, 하천 등으로 구성되어 있지만 SWMM과 같은 우수유출모형에서 하류 소유역은 하도추적을 통해 관망, 하천과 같은 수리학적요소를 고려하여 모의하고 있

으나 상류 수원 소유역은 수리학적 요소를 고려하지 않고 단순하게 모의하고 있다. 이에 본 연구에서는 도시유역내 임의지점에서 유역출구까지의 유하시간의 확률밀도함수로 순간단위도를 정의하는 운동과이론을 기반으로 하는 UGMCIUH(Urban Grid GeoMorpho-Climatic Instantaneous Unit Hydrograph)모형을 개발하였다. 사면, 거리, 관망, 하천 등의 특성을 고려하여 구축한 격자 정보를 이용하여 흐름경로를 산정하고 홍수과 이론을 적용하여 산정한 평균 홍수과의 유속을 이용하여 격자별 유하시간을 산정하였다. 유하시간은 상류 유입유량과 유효강우강도를 고려하고 있으므로 순간단위도의 기후학적 의존성과 유효강우강도에 대한 단위도의 의존성을 표현하고 있다. 다양한 강도의 강우는 순간단위도로 변환되고 대상 호우사상에 대한 유량을 산정하기 위해 중첩되어 진다.

온천천유역의 15개 호우사상을 대상으로 모형의 적용성을 검토하였다. NSC는 0.58~0.85로 분석되었으며 호우사상의 50% 이상이 0.70 이상을 나타내고 있으며 보정시 평균 0.74, 검정시 평균 0.75의 수치를 나타내고 있다. 모형의 상대첨두비 1.03%, 상관계수 0.95로 유역의 도달시간과 유효강도에 따른 유출특성을 정확하게 예측하고 있다. 또한 모형은 유역내 수리학적 추적기법을 고려하지 않고도 관측수문곡선을 정확하게 재현하고 있으며 6시간이하의 무강우시간이 발생하는 홍수사상의 경우에도 정확하게 수문곡선을 예측하고 있다.

따라서 본 연구에서 개발한 모형은 도시유역의 우수시스템의 설계와 관리, 도시계획수립 등을 위해 이용할 수 있을 것으로 파악되었다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-자연-2011-45] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Busan Metropolitan City (2010) Improvement of Sewage Master Plan(Change).

Bedient, P.B. and Huber, W.C. (2002) Hydrology and Floodplain Analysis, 3rd ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. p. 763.

Choi, Y.J., Kim, J.C., and Jung, K.S. (2010) Identification of Nash Model Parameters Based on Heterogeneity of Drainage Paths, *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 43, No. 1, pp. 1-13

Gironás J., Niemann J.D., Roesner L.A., Rodriguez F. and Andrieu, H. (2009). A morpho-climatic instantaneous unit hydrograph model for urban catchments based on the kinematic wave approximation. *J. Hydrol.*, 377(3-4), pp. 317-334.

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, 855-862.

Kim, J.C., Choi, Y.J., and Jung, D.K. (2011) Suggestion of Synthetic Unit Hydrograph Method Considering Hydrodynamic Characteristic on the Basin, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 31, No. 1B, pp. 47-55

Maidment, D.R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A., and Fraczek, W., (1996) Unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. *Hydrological Processes*, Vol. 10, No. 6, 831-844.

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*, Vol. 40, No. 4, pp. 863-879.

Lhomme, J., Bouvier, C., and Perrin, J.L. (2004) Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. *Journal of Hydrology*, 299 (3-4), pp. 203-216.

Ryu, H.S., Kim, M.M., and Ahn, W.S. (2010) Development of Grid-Based Distributed Runoff Model in Urban Area, *Proceedings of the Korea Water Resource Association Conference*, Korea Water Resources Association, pp. 759-763.

Rodriguez-Iturbe, I. and Valdes, J.B. (1979) The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.

Rodriguez, F., Andrieu, H., and Creutin, J.D. (2003) Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks, *Journal of Hydrology*, 283 (1-4), pp. 146-168.

Rodriguez, F., Cudennec, C., and Andrieu, H., (2005) Application of morphological approaches to determine unit hydrographs of urban catchments. *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 5, pp. 1021-1035

Rossman, L. (2010) Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0. EPA/600/R-05/040 Revised July 2010, U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH.

Sakong, H.S (2003) An Empirical Study on Analysis Method of Impervious Surface Using IKONOS Image, *Journal of The Korean Association of Geographic Information Studies*, The Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 11, No. 4, pp. 509-518.

Smith, J.A., Baack, M.L., Meierdiercks, K.L., Nelson, P.A., Miller, A.J., and Holland, E.J., (2005). Field studies of the storm event hydrologic response in an urbanizing watershed. *Water Resources Research* 41, W10413. doi:10.1029/2004WR003712.

Wong, T.S.W. (1995) Time of concentration formulae for planes with upstream inflow. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 40, No. 5, pp. 663-666.

Wong, T.S.W. (2003) Comparison of celerity-based with velocity-based time-of-concentration of overland plane and time-of-travel in channel with upstream inflow. *Advances in Water Resources* Vol. 26, No. 11, pp. 1171-1175.

Zhang, Y., Smith, J.A., and Baack, M.L. (2001) The hydrology and hydrometeorology of extreme floods in the Great Plains of eastern Nebraska. *Advances in Water Resources* 24 (9-10), 1037-1049.

© Received February 26, 2013

© Revised March 1, 2013

© Accepted March 20, 2013