

확산파에 기초한 분포형 유출모형의 개발 및 적용

Development and Application of Diffusion Wave-based Distributed Runoff Model

이 민 호* / 유 동 훈**

Lee, Min Ho / Yoo, Dong Hoon

Abstract

According to the improvement of computer's performance, the development of Geographic Information System (GIS), and the activation of offering information, a distributed model for analyzing runoff has been studied a lot in recently years. The distribution model is a theoretical and physical model computing runoff as making target basin subdivided parted. In the distributed model developed by this study, the volume of runoff at the surface flow is calculated on the basis of the parameter determined by landcover data and a two-dimensional diffusion wave equation. Most of existing runoff models compute velocity and discharge of flow by applying Manning-Strickler's mean velocity equation and Manning's roughness coefficient. Manning's roughness coefficient is not matched with dimension and ambiguous at computation; Nevertheless, it is widely used in because of its convenience for use. In order to improve those problems, this study developed the runoff model by applying not only Manning-Strickler's equation but also Chezy's mean velocity equation. Furthermore, this study introduced a power law of exponential friction factor expressed by the function of roughness height. The distributed model developed in this study is applied to 6 events of fan-shape basin, oblong shape test basin and Anseongcheon basin as real field conditions. As a result the model is found to be excellent in comparison with the exiting runoff models using for practical engineering application.

Keywords : Distributed runoff model, Diffusion wave equation, Friction factor equation, Roughness coefficient

요 지

분포형 유출모형에 대하여는 컴퓨터의 발달과 지리정보시스템의 구축 및 관련정보의 제공이 활성화되면서 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 분포형 유출모형은 대상유역을 보다 세분·요소화하여 계산하는 이론적이고 물리적인 기반의 모형이다. 본 연구에서는 토지피복 상태에 따라 결정되는 매개변수와 2차원 확산파 방정식에 기초하여 지표면에서의 유출량을 계산하는 모형을 개발하였다. 기존에 연구되었거나 개발 중인 유출모형은 대부분 Manning-Strickler의 평균 유속공식과 Manning 조도계수를 이용하여 유속과 유량을 산정하고 있다. Manning 조도계수는 사용상의 편의성 때문에 보편적으로 사용하고 있으나, 차원이 일치하지 않고 추정 시 모호한 문제점이 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 본 연구에서는 Manning-Strickler식뿐만 아니라 차원이 일치하는 Chezy의 평균유속공식을 적용하여 유출모형을 개발하였다. 또한, Chezy의 마찰계수를 적용하기 위하여 조도의 함수로 표현되는 지수형 마찰계수 산정식을 도입하였다. 따라서 모호한 조도계수의 개념을 이용하지 않고 거친 정도를 수치화하여 물리적인 의미를 가진 마찰계수를 산정하고 적용 가능성을 검토하였다. 본 연구에서는 개발된 모형을 부채꼴 실험유역과 장방형 실험유역 및 실제유역인 안성천유역을 대상으로

* 교신저자, 한강홍수통제소 하천정보센터 시설연구사 (e-mail: leeminho@korea.kr)

Corresponding Author, Researcher, River Information Center, Han River Flood Control Office, Seocho-gu, Seoul 137-049, Korea

** 전 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 (e-mail: dhyoo@ajou.ac.kr)

Prof., Division of Environmental, Civil & Transportation, Ajou Univ., Suwon 443-749, Korea

로 6개의 사상을 적용하여 그 적용성을 확인하였다.

핵심용어 : 분포형 유출모형, 확산파 방정식, 지수형 마찰계수 산정식, 조도계수

1. 서론

컴퓨터의 성능이 좋지 않았던 과거에는 계산시간을 단축하기 위하여 대상유역을 여러 개의 유역으로 분할하고 각 분할유역에는 동일한 수문조건 및 유역특성으로 가정하여 강우에 대한 유출을 분석하는 집중형 유출모형을 활용했다. 이러한 집중형 유출모형과 달리 대상유역을 격자로 나누어 각 격자를 대상으로 강우에 대한 유출을 분석하는 분포형 유출모형이 제안되었고 컴퓨터의 발달과 공간자료의 보편화로 인해 분포형 유출모형이 관심을 받고 있다.

최근 Vieux (2004)는 운동파방정식을 기반으로 VflowTM 모형을 개발하여 상용화하였으며, 김문모 등 (2007)은 도시유역을 대상으로 격자기반 지표면 유출모형을 개발하여 가상유역과 군자배수구역에 적용한 바 있다. 최윤석 등 (2008)은 지표면유출, 하도유출 침투 및 지표하유출 등의 모의가 가능한 GRM (Grid based Rainfall-runoff Model) 을 개발하여 가상유역과 중량천유역에 적용한 바 있으며, 댐 하류지점에 대한 적용성을 평가하였고 (최윤석 등, 2009), 미계측 중소유역의 유량을 추정하였다 (최윤석 등, 2010). 박진혁과 허영택 (2008; 2009)은 교토대학 방재연구소의 분포형 장기유출모형인 Hydro-BEAM의 수문매개변수를 GIS와 연계하고 Green-Ampt 모듈 등을 추가하여 홍수유출해석이 가능한 H-DRUM (Hydrologic & Hydraulic Distributed flood Runoff Model)을 개발하였으며, 남강유역과 임진강유역에 적용한 바 있다. 김병식 등 (2010)은 증발산량 계산모듈을 추가한 S-RAT (Spatial Runoff Assessment Tool)모형을 개발하여 중량천유역과 내린천유역에 적용한 바 있다. 이들 모형은 1차원 운동파방정식을 적용하여 지표면흐름을 해석하고 있다. 한편, Julien and Saghafian (1991)은 지표면유출을 2차원 흐름으로 해석하고, 유사이동 등을 분석할 수 있는 CASC2D를 개발하였으나, 국내에서는 이 모형을 적용한 사례가 없는 것으로 조사되었다.

지표면흐름 해석을 위한 이론으로 Manning-Strickler의 유속공식과 Manning의 조도계수를 활용하고 있다. Manning-Strickler의 유속공식은 전난류 흐름조건으로 가정하고 있으며, Manning의 조도계수는 차원이 일치하지 않은 불합리한 점을 내포하고 있다. 반면 Chezy의 유속공식은 마찰계수 산정식을 도입하여 차원이 일치하지 않는

문제점을 해결할 수 있으며, 완난류 흐름조건을 반영할 수 있어 보다 합리적이고 물리적인 기반에서 흐름을 해석할 수 있다.

본 연구에서는 Julien and Saghafian (1991)과 유사한 확산파에 기초한 분포형 유출모형을 개발하여 Manning의 조도계수와 지수형 마찰계수 산정식 (이민호, 1999; 유동훈과 이민호, 2000)의 조고를 활용할 수 있으며, 부채꼴 및 장방형의 실험유역과 안성천유역을 대상으로 개발모형을 적용하였다.

2. 모형의 개발

본 연구에서 개발한 모형은 자연현상을 일반화시킨 Fig. 1의 모식도로부터 유출과정을 3개의 모듈로 나누어 구성하였다. 입력자료인 강우로부터 격자강우량을 산정하는 부분과 해당격자에서 유출에 기여하는 유효우량 산정부분 및 산정된 우량으로부터 각 격자간의 흐름을 계산하는 지표면흐름해석 부분으로 구성되어 있다.

2.1 격자강우량 산정모듈

강우-유출모형의 입력자료는 기본적으로 우량관측소에서 관측된 지점강우량이다. 집중형 유출모형은 분할유역의 평균강우량만을 필요로 한다. 평균강우량 산정방법은 티센가중치를 이용하는 방법이 널리 사용되고 있으나, 분할유역 내 강우의 시·공간분포를 동일하게 가정하므로 분할유역의 규모가 적정하게 분할되어야 한다.

분포형 유출모형은 격자강우량을 필요로 하며 일반적으로 지점강우량을 격자강우로 변환하여 이용하고 있다.

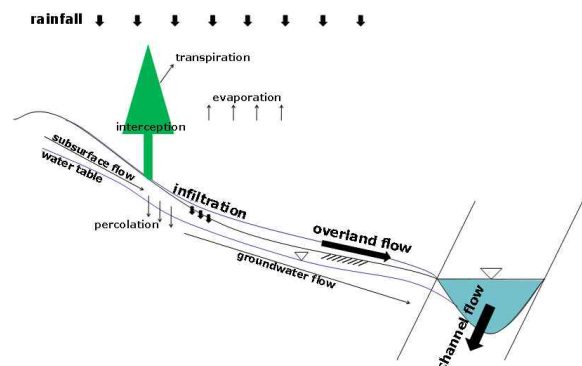


Fig. 1. Diagram of Water Cycle

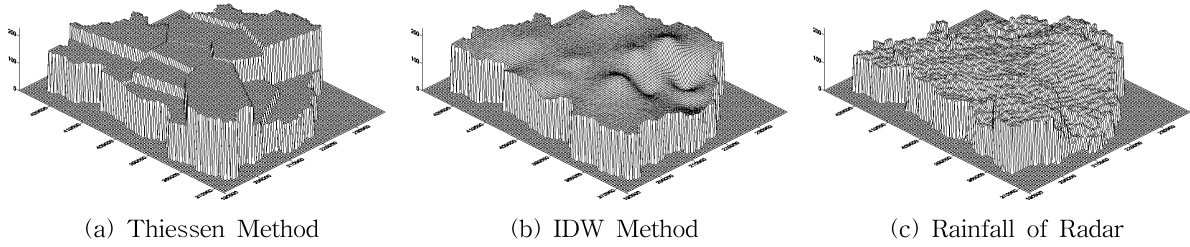


Fig. 2. Estimation of Grid Based Rainfall (Anseongcheon, 2008.7.24-27)

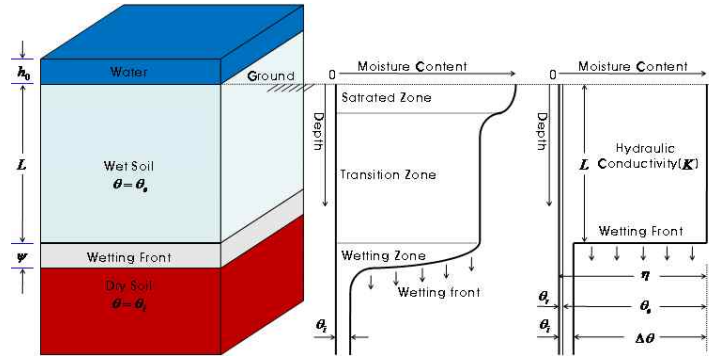


Fig. 3. Concept of Soil Structure

격자강우량은 지상에서 관측된 지점강우량으로부터 Fig. 2(a)에 제시된 바와 같이 티센가중치를 이용하거나 Fig. 2(b)에 제시된 바와 같이 역거리법을 이용하여 산정할 수 있다. 최근에는 Fig. 2(c)에 제시된 바와 같이 강우레이더로부터 해당 격자에서 관측된 강우량을 직접 입력할 수 있는데 이는 관측강우의 시·공간분포를 이용할 수 있는 장점이 있다.

2.2 유효우량 산정모델

ϕ -지수법, 유출률-포화우량산정법 등의 개념적인 유효우량 산정법은 과거 홍수사상으로부터 관련변수를 최적화하거나 유역의 물리적 특성을 평균하여 사용하고 있다. 그러나 분포형 유출모형에서는 해당격자의 물리적 토양특성을 반영하여 모형에 입력한다. 본 연구에서는 Green-Ampt 모형을 이용하여 침투량을 산정하고 이를 손실로 처리하여 유효우량을 계산하였다. Green-Ampt 모형은 간단하면서도 Darcy법칙(1856)에 이론적인 근거를 두고 있다. 매개변수는 흙의 성질로부터 계산될 수 있는 물리적인 의미를 나타내며 다양한 토양조건에서 좋은 결과를 제공한다는 장점이 있다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 초기에 균일한 함수비 θ_i 를 갖고 깊이가 무한하고 균질한 격자의 토양기둥을 고려하면 습윤전선이 하향 진행함에 따라 함수비는 θ_i 에서 포화 함수비 θ_s 또는 공극률 η 로 증가한다. 습윤전선은 습윤토양과 건조토양을 구분하는 경계로 정의되며 지면에 고인

물의 수심인 h_0 는 $t=0$ 에서부터 유지되는 것으로 가정하였고, 습윤영역의 깊이는 침투가 진행함에 따라 증가한다. Darcy 법칙을 적용한 Green-Ampt식은 다음과 같다 (Green and Ampt, 1911).

$$f = \frac{K(h_0 + \psi + L)}{L} \quad (1)$$

여기서, K 는 투수계수 (mm/hr), h_0 는 담심 (mm), ψ 는 습윤전선에서의 모관 흡인수두 (mm), L 은 습윤전선의 깊이 (mm)이다.

Eq. (1)로부터 Eq. (2)와 같이 누가침투량에 대한 Green-Ampt식을 유도할 수 있으며 차분화하면 Eq. (3)과 같다.

$$F(t) = Kt + \Delta\theta\psi \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}\right) \quad (2)$$

$$f^{n+1} = \frac{1}{2\Delta t} \left[\frac{(K\Delta t - 2F^n) + \sqrt{(K\Delta t - 2F^n)^2 + 8\Delta t(KF^n + K\psi\Delta\theta)}}{2} \right]$$

여기서, F 는 누가침투량 (mm), $\Delta\theta$ 는 토양수분 부족분, f^{n+1} 은 $n+1$ 시각에서 침투능 (mm/hr), F^n 은 n 시각에서 누가침투량 (mm), Δt 는 계산시간 간격이다.

일반적인 사상모형은 유효우량 산정시 증발산을 무시하며, 지표면의 물수지 방정식에 따라 유출에 기여하는 유효우량은 다음과 같다.

$$R_d = i\Delta t - \Delta F \quad (5)$$

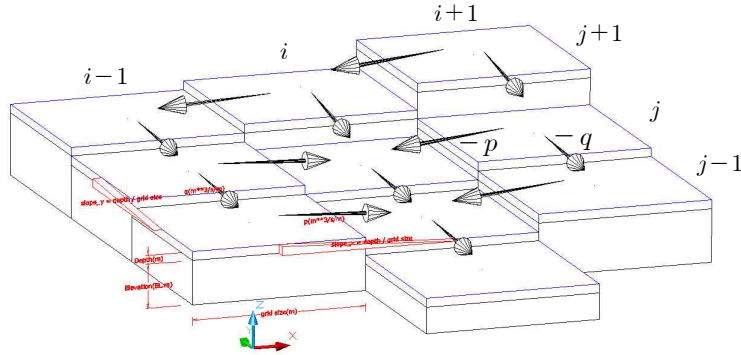


Fig. 4. Basic Structure of the Model

여기서, R_d 는 직접유출에 기여하는 유효우량(mm), i 는 Δt 동안의 강우량(mm), ΔF 는 Eq. (2)에 의해 계산된 Δt 동안의 누가침투량의 변화량(mm)이다.

2.3 지표면흐름계산 모듈

격자간의 흐름은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 2차원으로 x -방향과 y -방향으로만 존재하며, i 번 격자에서 $i+1$ 번 격자로 흐름이 발생할 경우(x -방향) 단위폭당 유량을 p , 반대방향으로 흐름이 발생할 경우 단위폭당 유량을 $-p$ 로 계산하였다. j 번 격자에서 $j+1$ 번 격자로 흐름이 발생할 경우(y -방향) 단위폭당 유량을 q , 반대방향으로 흐름이 발생할 경우 단위폭당 유량을 $-q$ 로 계산하였다. 강우와 침투는 z -방향으로 존재하며, 각 격자에서는 침투량을 제외한 나머지가 직접 유출된다.

유출을 계산하기 위한 보존형 2차원 천수방정식의 연속방정식은 Eq. (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

이 천수방정식의 운동방정식을 각각 수평방향(x -방향, y -방향)에 대하여 나타내면 Eq. (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} + g \frac{\partial h^2}{\partial x} &= gh(S_{0x} - S_{fx}), \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + g \frac{\partial h^2}{\partial y} &= gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, t 는 시간(sec), x, y 는 좌표, h 는 수심(m), u 는 x -방향 유속(m/s), v 는 y -방향 유속(m/s), g 는 중력가속도(m/s^2), S_{0x} 와 S_{0y} 는 각각 x -방향과 y -방향의 바닥경사(m/m), S_{fx} 와 S_{fy} 는 각각 x -방향과 y -방향의 수면경사(m/m)이다.

운동방정식에 연속방정식을 적용하고 각 방향의 수면경사에 대하여 정리하면 Eq. (7)과 같다.

$$\begin{aligned} S_{fx} &= S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t}, \\ S_{fy} &= S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned} \quad (7)$$

Henderson (1966)은 바닥경사가 $S_0 > 10$ ft/mi 또는 1.9m/km 정도로 급한 충적하천에서 Eq. (7)의 각 항의 상대적인 크기는 바닥경사를 1로 가정하면 수면경사는 바닥경사의 1/50, 이송가속도항은 1/100~1/250, 국지가속도항은 1/500 정도인 것으로 비교하였다. 이로부터 급경사에서 운동과 방정식이면 홍수파를 모의하는데 충분하고, 완경사에서도 확산과 방정식이면 홍수파를 모의하는데 충분하다고 설명하였다. 바닥경사가 0.0019m/m보다 작거나 평지가 발달한 곳에서는 수면경사의 영향이 커지고 확산과 방정식을 도입하여 해석할 필요가 있다. 따라서 확산과 방정식을 고려한 x -방향, y -방향 운동방정식은 Eq. (8)과 같이 단순화할 수 있다.

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x}, \quad S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} \quad (8)$$

Eq. (8)을 이용하여 각 격자에서 x -방향과 y -방향에 대한 흐름을 계산하여 1개 시간 간격에 대한 계산을 수행하고, 격자간 유량 p 와 q 를 각각 산정한다. 격자간 흐름을 계산하기 위한 수심산정은 Eq. (9)과 같다.

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + R_{di,j}^n - \frac{p_{i,j}^n - p_{i-1,j}^n + q_{i,j}^n - q_{i,j-1}^n}{\Delta s} \Delta t \quad (9)$$

여기서, $h_{i,j}$ 는 i, j 격자에서의 수심(m)이고, 첨자 n 은 현재시간 $n+1$ 은 다음시간을 나타내며, $R_{di,j}$ 는 직접유출고(m)이며, Δs 는 격자크기(m)이다.

본 연구에서 개발한 모형은 일반적으로 알려진 Manning-Strickler식과 Manning 조도계수뿐만 아니라 Chezy식과 지수형 마찰계수 산정식(이민호, 1999; 유동훈과 이민호, 2000)을 이용하여 유량을 산정할 수 있도록 하였다.

2.3.1 Manning-Strickler식과 Manning의 조도 계수

Manning (1891)은 여러 유량측정 자료와 각종 공식들을 조사하여 Chezy식과 유사한 경험식을 제안하였다. 또한 Manning은 동수반경의 지수승이 0.6351에서 0.8395까지 증가하는 것으로 추정하였으며, 이미 Hagen (1876)이 수로형태에 따라 지수승을 3/4 또는 2/3로 선택하였음을 밝혔고, Strickler (1923)는 총괄적으로 2/3를 채택하여 유속산정식을 단순화해도 정밀도를 유지할 수 있다고 주장하였다. 따라서 Manning식은 Manning-Hagen식 또는 Manning-Strickler식이라 칭하는 것이 타당하며, 본 연구에서는 Manning-Strickler식이라 칭하였다. Manning-Strickler식을 이용하여 격자간의 유량을 산정할 경우 Eq. (10)과 같다.

$$V = \frac{1}{n} H^{2/3} S_f^{1/2} \quad (10)$$

여기서, V 는 평균유속 (m/s)이고, n 은 Manning 조도계수 ($\text{s/m}^{1/3}$), H 는 동수반경 (m)이며, S_f 는 수면경사 (m/m)이다.

Manning-Strickler식으로부터 동수반경을 수심으로 가정하면 단위폭당 유량은 다음과 같다.

$$p = \frac{1}{n} h^{5/3} S_{fx}^{1/2}, \quad q = \frac{1}{n} h^{5/3} S_{fy}^{1/2} \quad (11)$$

격자의 유량을 Manning-Strickler식을 사용할 경우 Eq. (11)은 Eq. (12)로 차분할 수 있으며, $S_{fx,y}$ 가 0보다 크면 순방향 (+) 흐름이고, $S_{fx,y}$ 가 0보다 작으면 역방향 (-) 흐름이다.

$$p_{i,j} = \frac{h_{i,j}^{5/3}}{n_{i,j}} \left[\frac{z_{i,j} - z_{i+1,j} + h_{i,j} - h_{i+1,j}}{\Delta s} \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$q_{i,j} = \frac{h_{i,j}^{5/3}}{n_{i,j}} \left[\frac{z_{i,j} - z_{i,j+1} + h_{i,j} - h_{i,j+1}}{\Delta s} \right]^{1/2}$$

여기서, $p_{i,j}$ 는 x -방향, $q_{i,j}$ 는 y -방향 단위폭당 유량 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)이고, $n_{i,j}$ 는 지표면에서의 조도계수이다.

2.3.2 Chezy식과 지수형 마찰계수 산정식

Chezy는 마찰의 개념을 도입하여 Eq. (12)의 평균유속 공식을 유도하였다.

$$V = \sqrt{\frac{gHS_f}{C}} \quad (13)$$

여기서, C 는 마찰계수이다.

Chezy식을 적용하기 위해서 마찰계수 산정하여야 하는데 이민호 (1999), 유동훈과 이민호 (2000)는 Bazin (1865)

과 Varwick (1945)의 실험자료를 분석하여 개수로에서 전난류흐름이 발생하기 어렵고, Reynolds 수가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 완난류흐름이 나타남을 확인하였다. 이로부터 지표면흐름을 완난류로 가정된 지수형 마찰계수 산정식을 제안하였으며 다음과 같다.

$$C = \alpha R_H^\beta \quad (14)$$

여기서, α 는 조도와 수로형상에 따라 결정되는 계수, β 는 흐름특성에 따라 결정되는 계수이며, R_H 는 동수반경 Reynolds 수 ($= VH/\nu$)이고 V 는 유속 (m/s), H 는 동수반경 (m), ν 는 물의 점성계수 (m^2/s)이다.

지수형 마찰계수 산정식은 수로설계 등의 개수로 흐름 해석에 있어 간편성으로 인해 기존 경험식이나 대수형 마찰계수 산정식보다 유리하다. 그러나 동수반경 Reynolds 수 산정에 있어 유속이 필요하기 때문에 반복하여 마찰계수를 산정해야 하는 단점이 있다. 유동훈 (2006)은 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 동수반경 Reynolds 수와 경사 Froude 수를 조합하여 조합무차원수 N 을 도입하여 유속을 소거하였다.

$$N = \frac{R_H}{F_s} = \frac{H\sqrt{gHS}}{\nu} \quad (15)$$

여기서, F_s 는 경사 Froude 수 ($= V/\sqrt{gHS}$)이다.

Eq. (15)를 Eq. (14)의 지수형 마찰계수 산정식과 Eq. (12)의 Chezy식에 대입하여 동수반경 Reynolds 수에 대하여 정리하면 Eq. (16)과 같다.

$$R_H = \alpha^{\frac{-1}{2+\beta}} N^{\frac{2}{2+\beta}} = \gamma N^\delta \quad (16)$$

여기서, $\gamma = \alpha^{\frac{-1}{2+\beta}}$, $\delta = \frac{2}{2+\beta}$ 이다.

단위폭당 유량은 Eq. (13)에 Eq. (15)의 동수반경 Reynolds 수 산정식과 Eq. (14)의 지수형 마찰계수 산정식을 대입하여 산정할 수 있다.

$$p = \sqrt{\frac{g}{C}} h^{3/2} S_{fx}^{1/2}, \quad q = \sqrt{\frac{g}{C}} h^{3/2} S_{fy}^{1/2} \quad (17)$$

지수형 마찰계수 산정식과 Chezy식을 이용하여 격자간의 유량을 산정하기 위한 차분식은 Eq. (18)과 같다.

$$p_{i,j} = \frac{gh_{i,j}^{3/2}}{C_{i,j}} \left[\frac{z_{i,j} - z_{i+1,j} + h_{i,j} - h_{i+1,j}}{\Delta s} \right]^{1/2}, \quad (18)$$

$$q_{i,j} = \frac{gh_{i,j}^{3/2}}{C_{i,j}} \left[\frac{z_{i,j} - z_{i,j+1} + h_{i,j} - h_{i,j+1}}{\Delta s} \right]^{1/2}$$

여기서, $C_{i,j}$ 는 지표면에서의 마찰계수이다.

2.4 매개변수 설정

모형입력 매개변수는 유효우량산정을 위한 침투계수와 지표면흐름에서 유량을 산정하기 위한 조도계수 또는 마찰계수이다. Green-Ampt 모형을 적용하기 위한 침투계수는 투수계수 K , 습윤전선 흡인수두 ψ , 포화함수비 θ_s (공극률 η), 초기함수비 θ_i 를 결정해야 한다. 침투량 산정을 위한 토양구분은 실험유역의 재질을 고려하여 침투가 발생하지 않는 것으로 가정하였고, 안성천유역의 경우 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 토양분류는 사양질, 식질, 식양질 등으로 구분하였으나, Green-Ampt 모형에서 토양분류는 모래와 점토, 양토, 이토 등으로 구분하였다. 따라서 침투계수 θ_s , ψ , K 의 값은 Rawls et al. (1983)이 제시한 값을 이용하였고 초기함수비 θ_i 는 0.3으로 가정하였다.

유량산정을 위한 Manning 조도계수는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 토지피복도와 Huggins and Monke (1966)가 제안한 조도계수로부터 추정하고, 지수형 마찰계수 산정식을 적용하기 위해서는 Eq. (14)의 계수 α 를 산정하여야 한다. 이민호 등 (2006)과 유동훈 등 (2009)은 α 를 조고와 형상에 관한 계수로서 지표면흐름인 경우에는 물입자가 중력보다 물입자간의 영향을 많이 받음을 확인하였다. 이민호 등 (2006)은 조고와 중력의 관계를 나타내는 조합 무차원 수 X 와 조고와 표면장력의 관계를 나타내는 조합 무차원 수 Y 를 도입하였으며, Eq. (19)와 같다.

$$X = k_w \sqrt{\rho g / \sigma}, Y = \sqrt{k_w h} \sqrt{\rho g S / \sigma} \quad (19)$$

여기서, h 는 수심(m), k_w 는 조고(mm), S 는 유역경사(m/m)이다.

흐름조건은 동수반경 Reynolds 수에 따라 층류와 난류로 구분하였으며, 흐름특성은 중력흐름과 표면장력흐름으로 구분하여 각 흐름에 대한 계수 α 를 Table 1에 제시하였다.

3. 적용 및 결과

본 연구에서 개발된 분포형 유출모형의 적정성을 검토하기 위하여 Dickinson et al. (1967)이 제작하여 실험한

부채꼴 실험유역과 Schaake (1965)가 주차장에서 실험한 장방향 실험유역 및 안성천유역 공도지점 상류유역에 적용하였다.

Dickinson et al. (1967)은 부틸(butyl)로 피복된 중심각이 120°인 경사면에서 실험을 수행하였다. 또한, Schaake (1965)는 Johns Hopkins University Parking Lot에서의 장방향 실험유역에서 지표면유출을 관측하였다. Schaake (1965)는 Dickinson et al. (1967)의 실험유역보다 실제유역에 가까운 주차장을 선정하여 우량계를 설치하여 강우량 측정하였고, 출구에 기록계를 설치하여 유출량을 측정하였다. 이러한 부채꼴 경사면과 주차장에서 측정된 유출량 자료와 안성천유역 공도지점을 중심으로 모형의 적정성을 검토하였다. 실험유역 수치자료는 Julien and Saghafian (1991)의 CASC2D의 사용자 매뉴얼에 수록된 자료로부터 독취하였으며, 안성천유역에 대한 자료는 한강홍수통제소(www.hrfco.go.kr)에서 제공하는 수문자료와 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 지형정보를 이용하였다.

3.1 지형조건 검토

Dickinson et al. (1967)의 실험유역은 Fig. 5(a)에 도시된 반지름이 33.5 m (110 ft)이고 중심각이 120°인 부채꼴 모양으로 유역면적은 1,171.1 m²이며, 부채꼴 중심으로 향하는 경사는 0.05, 표면은 부틸로서 매끄러운 재질이다. 모의를 위한 격자크기는 1.86 m로 구성하였다. Schaake (1965)의 실험유역은 Fig. 5(b)에 도시된 길이 100 m, 폭 30 m의 장방향 모양으로 유출에 기여하는 면적은 1,600 m²이며, 표면은 주차장으로 아스팔트 재질이다. 격자크기는 3.05 m (10 ft)로 구성하였다. 실제유역으로는 Fig. 5(c)에 도시된 안성천유역 중 공도지점 상류를 대상으로 하였으며, 유출에 기여하는 면적은 368.6 km²이다. 토양은 사양질 내지 식양질 또는 식양질 내지 식질로 구성되었으며, 토지피복은 산림, 논과 밭이 대부분이며 일부 시가지가 있다. 지형, 토양도 및 토지피복도의 격자크기는 500 m로 구성하였다.

3.2 강우조건 비교

Dickinson et al. (1967)은 2가지 강우조건에 대하여 출구에서의 유량을 측정하였으며, Case-I은 지속시간 80초

Table 1. α Factor for Flow Condition

Factor	Description	Laminar Flow($\beta = -1.0$)	Smooth Turbulent Flow($\beta = -0.25$)
ag	Gravity flow	2.0 + 8.8X	0.028 + 0.150X
at	Surface tension flow	2.0 + 2.9Y	0.028 + 0.013Y

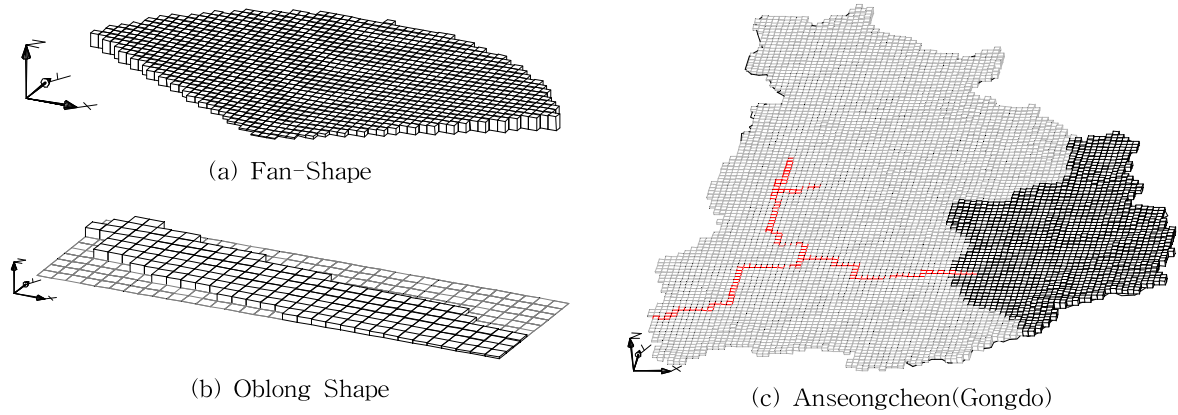


Fig. 5. Grid Based Simulation Areas

Table 2. Compare of Rainfall Conditions

Description	Fan-Shape		Oblong Shape		Anseongcheon(Gongdo)	
	Case-I	Case-II	Case-III	Case-IV	Case-V	Case-VI
Rainfall conditions	Lab.	Lab.	Field	Field	2006.7.28	2008.7.24
Duration (min)	1.33	1.25	30	13	1,380	360
Rainfall intensity (mm/hr)	26.42	60.71	27.09	32.86	13.74	27.33
Accu. rainfall (mm)	0.59	1.26	13.55	7.12	316.0	164.5
Peak time (min)	2.7	2.0	16.9	11.8	1,200	330
Peak discharge (m ³ /s)	0.00357	0.01090	0.94	0.75	2,172.4	1,474.2

동안 26.4 mm/hr의 강도, Case-II는 지속시간 75초 동안 60.7 mm/hr의 강도로 균등하게 강우를 발생시켜 실험하였다. Schaake (1965)는 실험유역에서 다수의 강우사상을 관측하였으며, Julien and Saghafian (1991)이 분석한 강우사상 2개를 선택하였다. Case-III은 지속시간 30분, 누가우량 13.55 mm, Case-IV는 지속시간 13분, 누가우량 7.12 mm의 강우사상이다. Case-V는 실제유역인 안성천유역 공도수위표에서 관측한 2006년 7월 홍수, Case-VI은 2008년 7월 홍수를 선정하였다. 각각의 강우조건은 Table 2에 비교하여 제시하였다.

3.3 조도계수 및 마찰계수의 적용

3개의 지형자료와 6개의 강우사상에 대하여 Manning-Strickler식과 Manning 조도계수를 적용하였고, Chezy식과 지수형 마찰계수 산정식을 적용하였다. 부채꼴 및 장방형 실험유역에의 Manning 조도계수는 Julien and Saghafian (1991)이 적용한 0.015, 지수형 마찰계수 산정식의 조고는 각각 0.08mm와 0.15mm를 적용하였다. 안성천유역의 Manning 조도계수는 토지피복도로부터 추정하였고, 지수형 마찰계수 산정식의 조고는 완난류 흐름조건과 표면장력의 영향을 고려한 계수 α_t 로부터 조고 k_W 를

추정하였으며, Manning의 조도계수와 관계를 도출하면 다음과 같다.

$$k_W = \sqrt{gn^2/0.02} \quad (20)$$

여기서, k_W 는 조고 (mm), g 는 중력가속도이고 n 은 Manning의 조도계수이다. 지표면의 조도계수가 약 0.04인 경우 조고는 1 mm, 조도계수가 약 0.25인 경우 조고는 5 mm, 조도계수가 약 0.45인 경우 조고는 약 10.0 mm이다.

3.4 적용결과 분석

부채꼴 및 장방형 실험유역과 안성천유역에 대하여 유역별로 2개의 강우조건을 적용하였으며, 지수형 마찰계수 산정식 (Y-L Eq.)과 Manning의 조도계수 (M-S Eq.)를 적용하여 모의한 결과는 Fig. 6에 도시하였다. 또한 관측 시간과 계산종료시간까지 유출률을 비교하여 Table 3에 제시하였으며, 총 유출량, 침투시간 및 침투유량과 각각의 상대오차를 분석하여 Table 4에 제시하였다.

Figs. 6(a)~6(b)에 도시된 부채꼴 실험유역에서의 수문곡선 상승부는 관측값보다 계산값이 먼저 상승하는 경향을 보이고 있다. 이는 실험유역이 건조한 상태에서 강우를 발생시켜 표면이 습윤상태로 바뀌는 과정을 반영하지

못하고 있는 것으로 판단된다. 또한 수문곡선 하강부 300 초 이후에는 관측값이 계산값보다 천천히 하강하는 현상을 보이고 있다. 이는 강우로 인한 유출이 발생한 후 유역에 일부 저류되었던 물이 2차로 유출하면서 발생하는 현상으로 추정된다. Figs. 6(c)~6(d)에 도시된 장방향 실험 유역의 결과를 비교하면 강우초기 모의결과가 실측보다 크게 나타나는데 이는 지표면(아스팔트)에서 침투가 발생하지 않기 때문이며, 지표면이 젖은 후에 유출이 발생하도록 강우초기 차단손실을 고려하였다. 모의결과 수문곡선은 이중 침투와 단일 침투 모두 잘 반영하고 있으며 양호한 결과를 보이고 있다. Figs. 6(e)~6(f)에 도시된 실제유역인 안성천 공도지점의 결과를 비교하면 동수반경

Reynolds 수에 따라 산정된 마찰계수를 적용한 경우가 일정한 Manning의 조도계수를 적용한 경우보다 우수한 결과를 보이고 있다.

관측자료 유출결과는 Table 3에 제시된 바와 같이 부채꼴 실험유역의 Case-I과 Case-II에 대하여 발생한 총 강우량은 0.69m^3 와 1.48m^3 이며, 관측된 총 유출량은 0.65m^3 와 1.46m^3 이고, 유출률은 94%와 98%이다. 장방향 실험유역의 Case-III와 Case-IV에 대하여 발생한 총 강우량은 21.68m^3 와 11.39m^3 이며, 관측된 총 유출량은 20.88m^3 와 10.96m^3 이고, 유출률은 각각 96%이다. 안성천유역 공도지점의 Case-V와 Case-VI의 경우는 유출률은 각각 76%와 84%로 나타났다. 지수형 마찰계수 산정식과 Manning

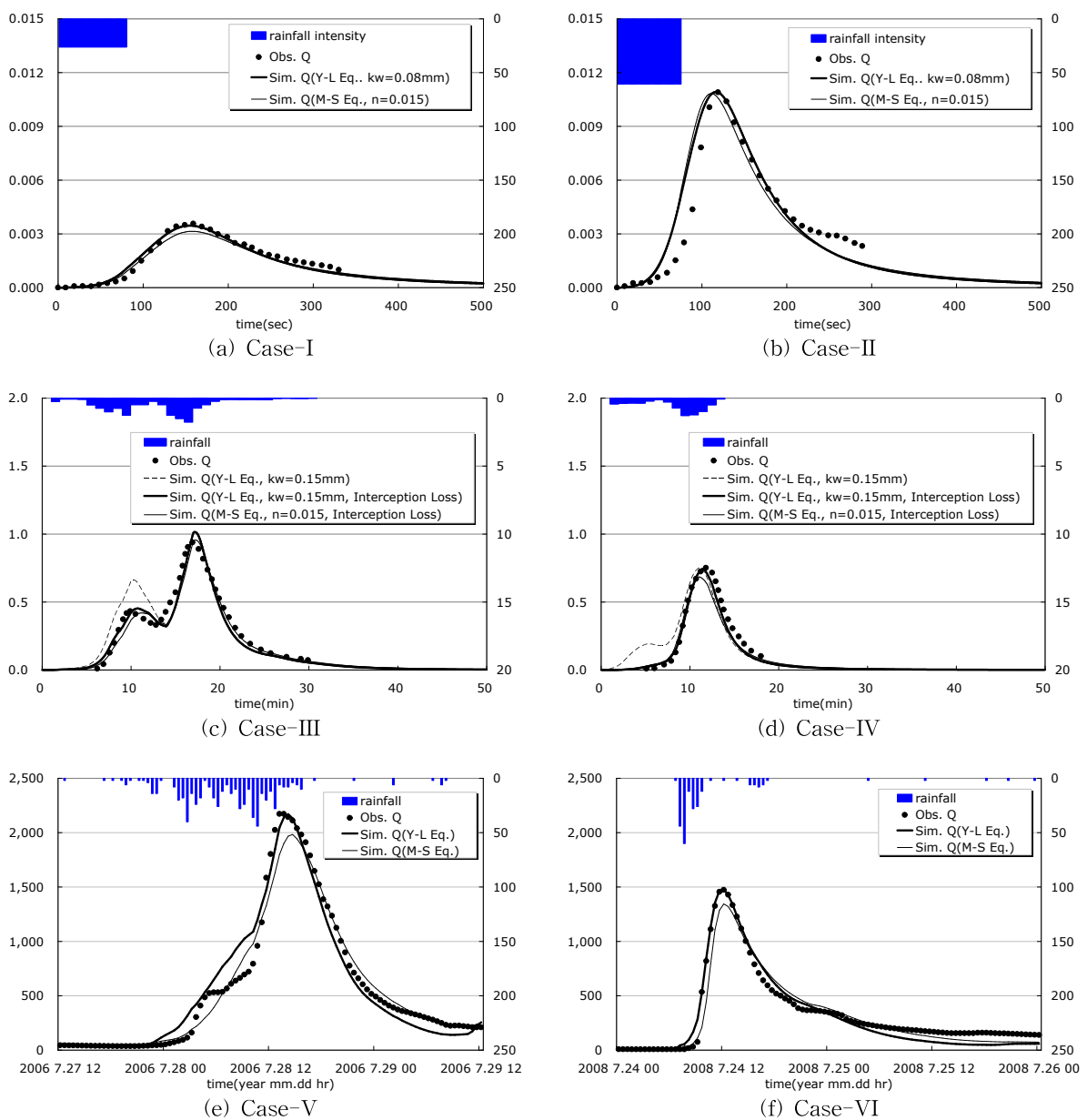


Fig. 6. Results of Model Simulation

Table 3. Compare of Total Discharge and Runoff Ratio

Description		Fan-Shape		Oblong Shape		Anseongcheon (Gongdo)	
		Case-I	Case-II	Case-III	Case-IV	Case-V	Case-VI
Obs.	Total Rainfall (m ³)	0.69	1.48	21.68	11.39	129,489,180	68,006,700
	Total Discharge (m ³)	0.65	1.46	20.88	10.96	99,106,560	56,946,060
	Runoff Ratio (%)	94.20	98.65	96.34	96.19	76.53	83.73
Sim. (Y-L Eq.)	Total Discharge (m ³)	0.62	1.41	19.20	9.27	99,216,068	52,915,518
	Runoff Ratio (%)	90.23	95.27	88.56	81.38	76.62	77.81
Sim. (M-S Eq.)	Total Discharge (m ³)	0.60	1.39	18.95	9.23	98,585,613	53,233,668
	Runoff Ratio (%)	86.90	93.68	87.41	81.02	76.13	78.28

Table 4. Errors and Model Efficiency for Each Case

Description		Fan-Shape		Oblong Shape		Anseongcheon (Gongdo)	
		Case-I	Case-II	Case-III	Case-IV	Case-V	Case-VI
Total Volume [m ³]	Obs.	0.65	1.46	20.88	10.96	99,106,560	56,946,060
	Sim. (Y-L Eq.)	0.62	1.41	19.20	9.27	99,216,068	52,915,518
	Rel. Error (%)	- 4.62	- 3.42	- 8.05	-15.42	+ 0.11	- 7.08
	Sim. (M-S Eq.)	0.60	1.39	18.95	9.23	98,585,613	53,233,668
	Rel. Error (%)	- 7.69	- 4.79	- 9.24	-15.78	- 0.53	- 6.52
Peak Discharge [m ³ /s]	Obs.	0.00357	0.01090	1.71	0.75	2,172.4	1,474.2
	Sim. (Y-L Eq.)	0.00346	0.01092	1.87	0.75	2,169.5	1,478.4
	Rel. Error (%)	- 3.08	+ 0.18	+ 9.36	0.00	- 0.13	+ 0.28
	Sim. (M-S Eq.)	0.00314	0.01083	1.86	0.71	1,968.2	1,344.7
	Rel. Error (%)	-12.04	- 0.64	+ 8.77	- 5.33	- 9.40	- 8.78
Peak Time [min]	Obs.	2.65	1.98	11.4	11.8	1,200	330
	Sim. (Y-L Eq.)	2.55	1.93	11.1	11.2	1,200	330
	Rel. Error (%)	- 3.77	- 2.52	- 2.63	- 5.08	0.00	0.00
	Sim. (M-S Eq.)	2.65	1.85	11.1	11.2	1,260	330
	Rel. Error (%)	0.00	- 6.72	- 2.63	- 5.08	+ 5.00	0.00

조도계수를 적용하여 모의한 결과는 부채꼴 실험유역에서 평균유출률은 각각 93%와 90%이며, 장방향 실험유역에서는 각각 85%와 84%이고, 안성천유역에서는 77%로 나타났다. 이는 이상적인 실험유역보다 실제유역에서 큰 손실이 발생하는 유출현상을 재현한 것으로 판단된다.

모형의 정확도를 비교하기 위하여 적용유역과 강우사상에 대하여 지수형 마찰계수 산정식과 Manning 조도계수를 적용하여 총 유출량과 첨두유량 및 첨두수위와 각 상대오차를 분석하여 Table 4에 제시하였다. 총 유출량의 상대오차를 비교하면 6개 사상 중 5개 사상에서 지수형 마찰계수 산정식을 적용한 경우가 우수한 것으로 나타났으며,

Case-IV를 제외하면 8% 이내로 만족스러운 결과를 나타내고 있다. 첨두유량의 상대오차를 비교하면 Case-III을 제외하면 지수형 마찰계수 산정식을 적용한 경우가 6개 사상 중 5개 사상에서 3% 이내로 Manning의 조도계수를 적용한 경우보다 매우 우수한 것으로 나타났다. 첨두시간의 상대오차는 지수형 마찰계수 산정식을 적용한 경우가 다소 양호한 결과를 보였으며 최대 5% 이내로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 지면경사가 아닌 수면경사로부터 2차원

지표면흐름을 해석할 수 있는 분포형 유출모형을 개발하였다. 강우레이더 또는 관측된 지점강우를 격자강우량으로 산정하는 부분과 Green-Ampt 침투모형을 적용하여 유효우량을 산정하는 부분 및 4방향으로 지표면흐름을 해석하는 부분으로 구성하였다. 또한 Manning-Strickler의 유속공식과 함께 Chezy의 유속공식 및 지수형 마찰계수 산정식을 반영할 수 있도록 모형을 개선하였다. 2개의 실험유역과 1개의 실제유역에 대하여 유출분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 확산과에 기초한 본 모형은 평지가 발달한 곳에서 수문경사의 영향이 커지는 효과를 반영할 수 있다. 또한, 전난류흐름으로 가정한 Manning-Strickler의 유속공식은 완난류흐름을 반영할 수 없으나, Chezy의 유속공식과 지수형 마찰계수 산정식을 도입하면 완난류흐름을 반영할 수 있는 장점이 있다.
- (2) Manning 조도계수는 차원이 일치하지 않으며, 유량변화에 관계없이 일정한 값을 적용하는 불합리한 점을 개선하기 위하여 차원을 일치시킨 지수형 마찰계수 산정식을 도입하여 유량규모에 따라 변화하는 마찰계수를 고려함으로써 모형의 합리성을 확보하였다.
- (3) 지수형 마찰계수 산정식과 Manning 조도계수를 각각 적용하여 실험유역과 실제유역에 적용한 결과 합리성을 확보한 지수형 마찰계수 산정식을 적용한 경우가 Manning의 조도계수를 적용한 경우보다 대부분의 조건에서 우수한 결과를 도출하였다.

참고문헌

- 김문모, 이정우, 이재승 (2007). “격자기반의 도시유역 지표면 유출모형의 개발 및 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제1호, pp. 25-38.
- 김병식, 윤선규, 양동민, 권현한 (2010). “격자기반의 개념적 수문모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제7호, pp. 667-679.
- 박진혁, 허영택 (2008). “홍수유출해석을 위한 운동과기반의 분포형모형 개발 및 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 455-462.
- 박진혁, 허영택 (2009). “물리적기반의 분포형모형을 활용한 임진강유역 홍수유출모의.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제1호, pp. 51-60.
- 유동훈 (2006). **토목 환경 고급수리학**. 새론출판사.
- 유동훈, 이민호 (2000). “지수형 개수로 마찰계수 산정식.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권, 제1-B호, pp. 1-10.
- 유동훈, 이민호, 이태희 (2009). “지표면 유출 마찰계수와 도달시간.” **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1057-1062.
- 이민호 (1999). 개수로의 간편설계. 석사학위논문, 아주대학교. pp. 35-44.
- 이민호, 원유승, 유동훈 (2006). “지표면 유출에서 중력흐름과 표면장력흐름.” **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 307-311.
- 최윤식, 김경탁, 심명필 (2009). “댐 하류 지점에 대한 분포형 모형의 적용성 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제9호, pp. 703-713.
- 최윤식, 김경탁, 심명필 (2010). “분포형 강우-유출 모형을 이용한 미계측 중소유역의 유량 추정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제4호, pp. 353-365.
- 최윤식, 이진희, 김경탁 (2008). “분포형 강우-유출 모의를 위한 격자 네트워크 해석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제11호, pp. 1123-1133.
- 한강홍수통제소 (2010). 홈페이지, www.hrfco.go.kr, 2010년 1월 접속.
- 한강홍수통제소 (2010). 국가수자원관리종합정보시스템, www.wamis.go.kr, 2010년 1월 접속.
- Bazin, H.E. (1865). “Recherches experimentales sur lecoulement de leau dans les canaux decouverts.” *Memoires Presentes Par Divers savants al Academie des Sciences*. Vol. 19.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. V. Dalmont, Paris.
- Dickinson, W.T., Holland, M.E., and Smith, G.L. (1967). *An experimental rainfall-runoff facility*. Hydrology Paper, No. 25, Colorado state University, Fort Collins, Colorado.
- Julien, P.Y., and Saghafian, B. (1991). *CASC2D Users Manual-A Two Dimensional Watershed Rainfall-Runoff Model*. Civil Engr. Report, CER90-91PYJ-BS-12. Colorado State University, Fort Collins.
- Green, W.H., and Ampt, C.A. (1911). “Studies on soil physics, I, Flow of water and air through soils.” *Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 4, pp. 1-24.
- Hagen, G.H.L. (1876). “Untersuchngen über die gleichförmige Bewegung des Wassers (Researches on Uniform Flow of Water).” Berlin.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. MacMillan Pub. Co., Inc., New York.
- Huggins, L.F., and Monke, E.J. (1966). *The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds*.

- Technical Report No. 1 Purdue University Water Resource Research Center, West Lafayette.
- Manning, R. (1891). "On the flow of water in open channels and pipes." *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, Vol. 20, pp. 161-195.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.B., and Miller, N. (1983). "Green-Ampt infiltration parameters from soils data." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, pp. 62-70.
- Schaake, J.C. (1965). *Synthesis of the Inlet hydrograph*. Ph.D. Dissertation, Dept. of Sanitary Engineering and Water Resources, The Johns Hopkins University, Baltimore, MD.
- Strickler, A. (1923). "Beiträge Zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen (Some contributions to the problem of velocity formula and roughness coefficient for rivers, canals, and closed conduits)." *Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft, Bern*, Switzerland, No. 16.
- Varwick, F. (1945). "Zur Fließformel für offene Kunstliche Gerinne." These inédite, Dresden University.
- Vieux, B.E. (2004). *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Kluwer Academic Publishers.

논문번호: 10-090	접수: 2010.10.22
수정일자: 2011.05.12/06.21	심사완료: 2011.06.21