

ORIGINAL ARTICLE

## 분포형 강우-유출 모형에서 토양도 격자크기 효과가 Green-Ampt 모형의 매개변수와 모의된 강우손실에 미치는 영향

황지형 · 이길하\*

대구대학교 일반대학원 토목공학과

### Impact of Different Green-Ampt Model Parameters on the Distributed Rainfall-Runoff Model FLO-2D owing to Scale Heterogeneity

Hwang, Ji-hyeong, Lee, Khil-Ha\*

Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

#### Abstract

The determination of soil characteristics is important in the simulation of rainfall runoff using a distributed FLO-2D model in catchment analysis. Digital maps acquired using remote sensing techniques have been widely used in modern hydrology. However, the determination of a representative parameter with spatial scaling mismatch is difficult. In this investigation, the FLO-2D rainfall-runoff model is utilized in the Yongdam catchment to test sensitivity based on three different methods (mosaic, arithmetic, and predominant) that describe soil surface characteristics in real systems. The results show that the mosaic method is costly, but provides a reasonably realistic description and exhibits superior performance compared to other methods in terms of both the amount and time to peak flow.

**Key words** : Green-Ampt, Scaling effect, FLO-2D, Yongdam catchment infiltration

#### 1. 서론

물의 순환에서 강수의 일정량이 토양으로 침투한 후 초과강수가 지표면을 가로질러 하천, 강, 호수 또는 저수지 같은 지표유출로 전환되는 과정에는 여러 요소들이 복잡하게 연결되어있다(Maidment, 1993). 강수량으로부터 지표 유출로 전환되는 양은 시간과 위치에 따라 다르며 일반적으로 강수량의 약 30%가 유출로 이어지고

나머지 70%는 땅속으로 침투되거나 증발, 증산으로 인하여 대기로 유실된다(Perlman, 2016). 지표수 유출량 중 일정량이 통제되어 하천시스템으로 흘러들어가고 나머지 초과강수량(excess precipitation)이 바다로 돌아가는 것은 물의 순환에서 균형(water balance)을 유지하는데 중요하다. 지표 유출수가 하천에 도달하면 기저유출(baseflow)과 합쳐져 하천수를 형성한다. 기저유출은 강우가 없을 때 직접유출이 발생하지 않음에도 하천에

Received 31 July, 2019; Revised 22 August, 2019;

Accepted 29 August, 2019

\*Corresponding author: Lee, Khil-Ha, Department of Civil, Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea,  
Phone: +82-53-850-6522  
E-mail: khil\_ha@yahoo.com

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

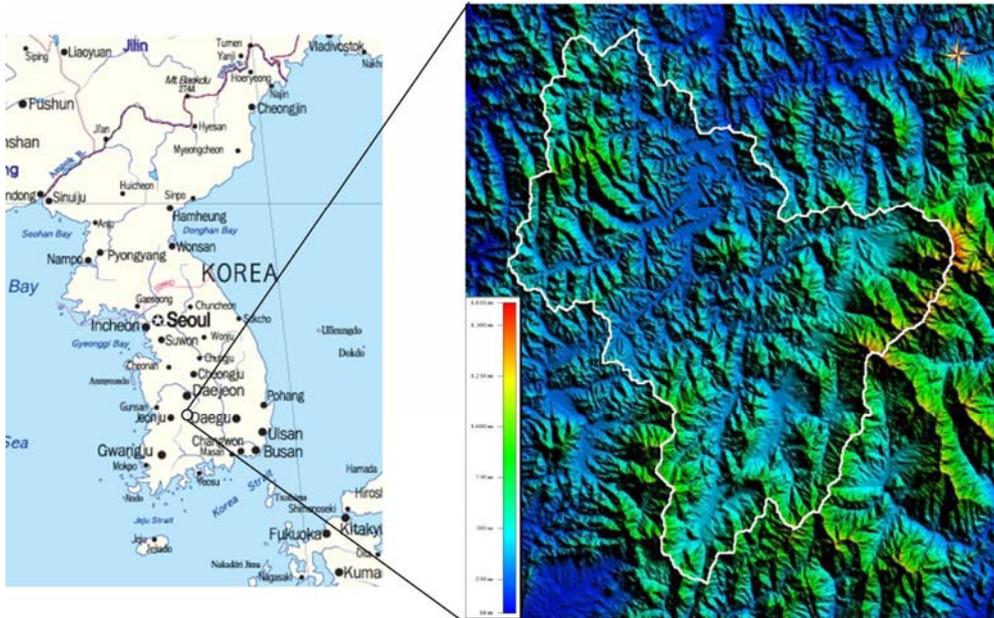


Fig. 1. Location of Yongdam catchment, re-edited from [http://www.khoa.go.kr/eastsea/images/map\\_01.gif](http://www.khoa.go.kr/eastsea/images/map_01.gif).

물을 공급하여 강우사상에 서서히 반응하는 수생 생물의 서식지를 유지시키는 기능을 한다. 하천은 강수로부터 실시간 유입되는 물, 직접 유출수, 기저유출수의 조합으로 이루어지며 하천에 미치는 대부분의 해로운 영향은 지표면 유출로 인한 것이다. 따라서 직접유출량을 정확하게 모델링하는 것은 수량뿐만 아니라 하천의 피해를 관리하거나 사전에 건전한 수질과 수생태를 유지하는 데에 중요한 역할을 한다(Jensen, 1996).

일반적으로 실무현장에서는 하천 유량을 추정하고 관리하기 위하여 강우-유출 수치 모형에 의존한다. 강우-유출 모형은 지표면 특성과 기상조건에 따른 지표면 유출량을 결과물로 보여주며 모형의 일반 구성 요소에는 입력 자료, 지배 방정식, 경계 조건 또는 매개 변수, 모형 과정 및 출력 결과물 등이 있다(Singh et al., 1995). 지표수 유출을 모델링함으로써 유역에서 모이는 수량과 유역의 반응을 간접적으로 이해하고 가용 수자원을 예측하며 아울러 시간 경과에 대응하는 변화 및 예측을 가시화할 수 있다(Vaze et al., 2012). 하지만 지표면 유출을 모델링하는 것은 상호작용하는 변수들에 대한 변수 값을 사전에 결정해야 하므로 복잡하고 어렵다. 따라서 강우-유출 모의에서 하천의 유량을 실제 관측치와 가장 유사하

게 산정하는 것이 가장 중요하다. 강우-유출 모형에서는 토양의 특성, 토지 이용도, 지표면 경사, 식생과 같은 지표면 특성을 나타내기 위하여 DEM (Digital Elevation Model), 토지 피복도, 토양도를 활용하고 강우 지속 시간, 강우량 및 강도, 폭풍 속성과 같은 기상 조건을 나타내기 위하여 기상자료를 기본 입력 자료로 활용한다. 최근 위성 자료의 발달로 토양도, DEM, 토지 피복도는 수치 지도의 형태로 쉽게 표현이 가능해졌으며 수치모형과 위성자료의 연동으로 인하여 격자크기의 이슈가 부각되어 왔다. 토지피복도, DEM 분야에서는 격자크기와 관련하여 연구가 있었으나(McNaughton, 1993; Raupach, 1995; Arain et al., 1996; Schaake et al., 1996; Shuttleworth, 1998) 토양도 해상도에 대한 분석은 미미한 상황이다(Kabat et al., 1997). 이 연구에서는 정밀도(해상도 5 m)를 바탕으로 Green-Ampt 방법에서 세 가지의 서로 다른 대푯값을 산정하여 모의 결과를 관측치와 상대 비교하였다. 이 연구는 분포형 모형인 FLO-2D를 활용하여 국내 수자원 분석에서 많이 이용되고 있는 집중형 모형의 침투 손실 정확도에 대하여 간접적으로 파악하는 것이다.

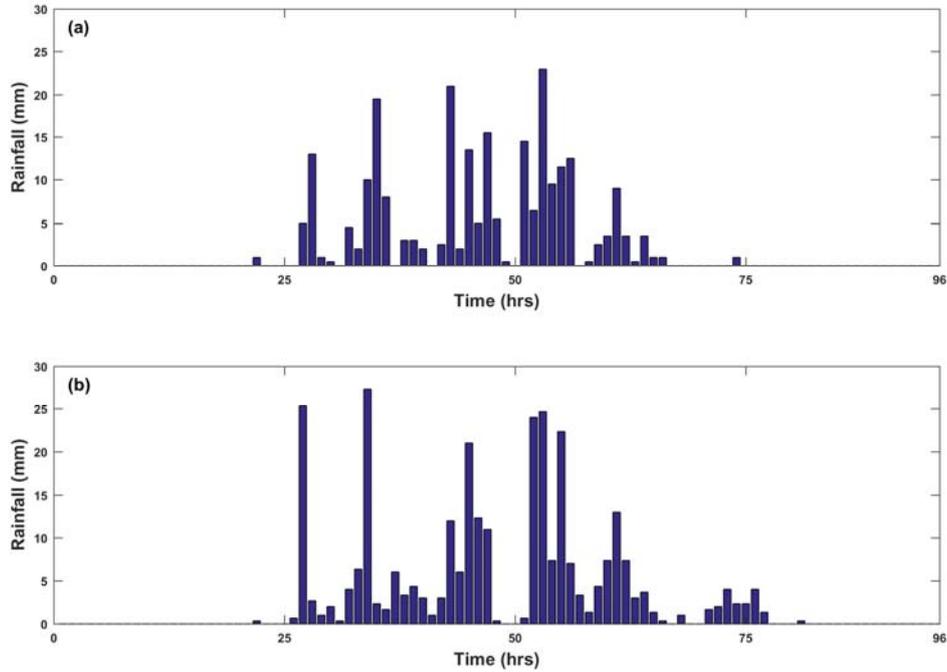


Fig. 2. Time series of rainfall; (a)Donghyang (b)Cheoncheon.

2. 연구대상 및 자료

용담댐 유역은 북위 36° 00'~35° 35', 동경 127° 20'~127° 45'에 위치하며 유역의 면적은 약 930 km<sup>2</sup>이다 (Fig. 1). 행정구역으로 장수군, 진안군, 무주군을 포함하고 있으며 유역의 대부분은 임야지역으로 분류된다. 용담댐 유역은 동측으로 국립공원 덕유산 향적봉에서 동북으로 향하는 남대천 유역이고 그 동측으로 낙동강의 지류인 황강유역과 경계를 이룬다. 용담댐 유역은 금강유역의 최상류 지역에 해당하므로 인위적인 간섭과 교란이 상대적으로 적어 연구목적으로 이용하기에 적합하다 (K-water Institute, 2013). 용담댐 유역 내에는 6개의 수위관측소가 있으며 동향과 천천 관측소에서 신뢰성 있는 유량이 측정되고 있다. 본 연구에서는 동향 수위관측소와 천천 수위관측소를 기준으로 구성된 소유역을 연구대상지로 선정하였다.

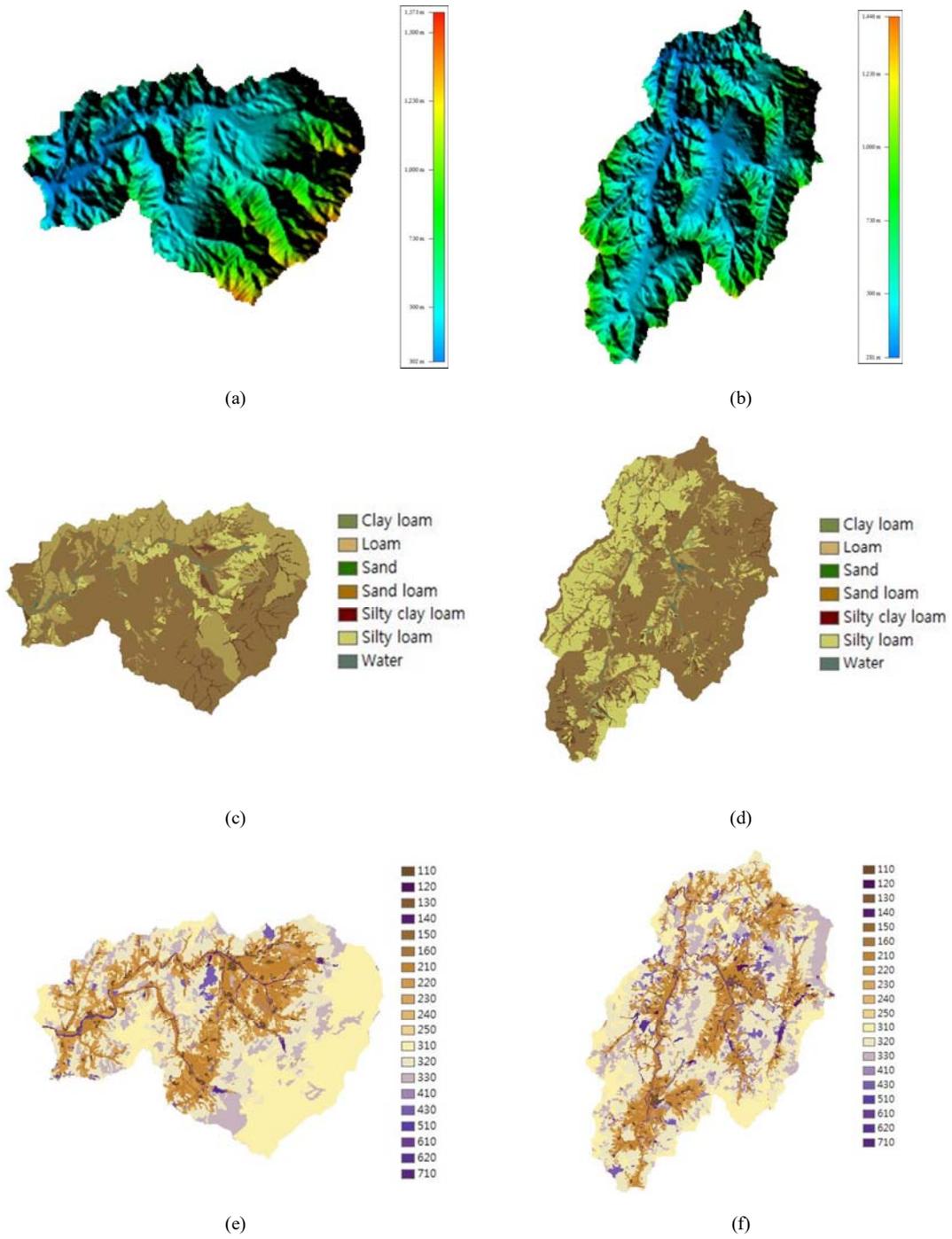
용담댐 유역 내에 위치한 13개 강우관측소 중 동향 소유역에는 2개(계북2, 무주군(안성초교)), 천천 소유역에는 3개(장계, 천천2, 장수군(장수초교))의 관측소가 위치

하고 있다. 금강홍수통제소에 공개된 2018년 8월 25일~8월 28일 기간의 10분 단위 강우자료를 1시간단위 강우자료로 변환하여 사용하였으며 각 관측소의 강우자료는 산술평균하여 입력 자료로 활용하였다(Fig. 2).

유역의 지표면특성을 나타내기 위하여 DEM, 토지피복도, 토양도를 활용하였다. DEM자료는 국토교통부 국토지리정보원에서 제작한 해상도 5 m DEM자료를 바탕으로 하여 수문모형 격자 해상도에 맞춰 50 m로 평균 조정하였다(Fig. 3.(a)(b)). 토지피복도는 환경부에서 제작한 1:25000의 중분류(해상도 5 m)급을 바탕으로 하여 유역에서의 매닝조도계수를 산정해 주었다(Fig. 3.(e)(f)). 토양도는 건설교통부 농업과학 기술원에서 제작한 1:25000의 정밀토양도(해상도 5 m) 자료를 사용하였으며 토양도를 바탕으로 침투 매개변수를 산정하였다(Fig. 3.(c)(d)).

3. 분포형 강우-유출 모형

FLO-2D모형은 미국 연방방재청(FEMA)에서 질량



**Fig. 3.** Surface characteristics of study site; (a), (c) and (e) is DEM, soil texture and land cover respectively in Donghyang, while (b), (d) and (f) is DEM, soil texture and land cover respectively in Cheoncheon.

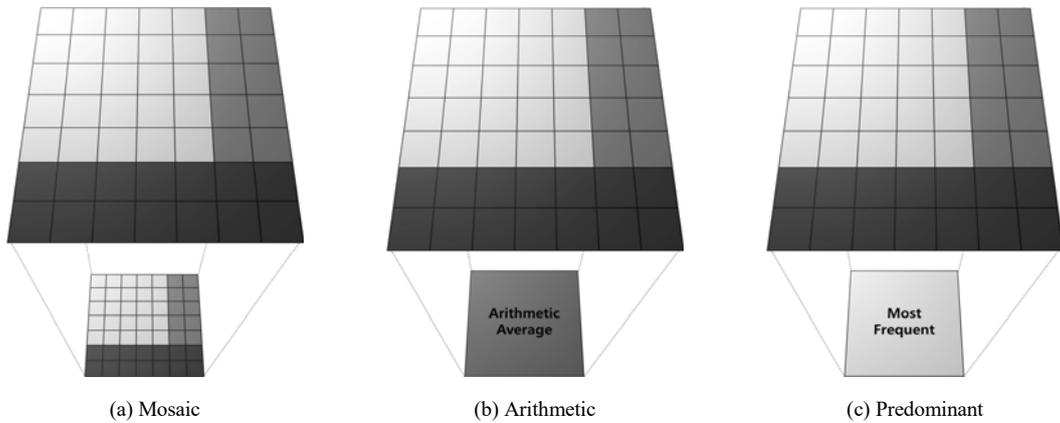


Fig. 4. The bright area in (c) is determined as a representative of the entire catchment.

보존의 법칙에 기초하여 재해관리를 위하여 개발된 하천 연구 및 홍수 분석을 위한 수리학적 모형이다. FLO-2D는 기본적으로 지표면자료와 강우자료가 필요하며 지표면 특성을 나타내는 자료를 활용하여 흐름, 손실 등 여러 매개변수를 추가적으로 사용하여 모의 할 수 있다. 또한 FLO-2D는 MAPPER PRO, MAPPER ++ 등을 통해 모의된 침수지역을 2차원 격자(grid) 형태로 디지털화된 지도형태로 출력할 수 있으며 침수지역의 면적, 시간별 침수 범위와 수위, 유속, 최대 침수높이, 시간별 유속 변화량 등의 결과를 출력할 수 있어 비정상류 흐름 분석에 적합하다(FLO-2D software, 2017).

FLO-2D에서 침투 손실을 모의하는 방법으로는 SCS (Soil Conservation Service), Green Ampt, Horton방법이 있으며 사용자의 선택에 따라 지정하여 사용할 수 있다. SCS방법은 초기손실과 일정손실이 경험과 실험에 의해 정립되었으며 유역의 토양피복 상태와 토양특성만으로 매개변수를 계산한다. Green Ampt방법은 Darcy 법칙에 근거하여 유도된 침투모형으로 흙의 성질로부터 계산되는 매개변수는 물리적인 의미를 갖고 깊이에 따라 투수계수가 변하는 토양에 적용이 가능하다. Horton방법은 처음에는 초기 침투능의 비율로 시작하다가 이후 지수적으로 감소한다는 개념의 경험공식이다.

#### 4. 연구방법

강우손실 추정방법으로는 FLO-2D에서 침투 손실을

모의하는 방법 중 Green-Ampt방법을 사용하였다. Green-Ampt방법에서 필요한 매개변수는 토양 특성에 따라 분류되며 정밀토양도를 바탕으로 투수계수(hydraulic conductivity), 흡입수두(soil suction), 체적 수분부족분(volumetric moisture deficiency)을 산정해 주었다(Hopmans and Simunek, 1999). 산정된 매개변수는 세 가지 서로 다른 방법으로 유역에서의 대푯값을 결정해주었다. 대푯값 산정 방법으로는 각 격자별로 매개변수를 배정하는 모자이크법(Fig. 4.(a)), 전체 유역에서 토양도 매개변수를 단순 산술평균한 산술평균법(Fig. 4.(b)), 전체 유역에서 가장 높은 비율로 구성된 토양을 대푯값으로 하는 대표토양법(Fig. 4.(c))을 사용하였다. 연구대상 지역의 토양분포는 Fig. 3.(c),(d)를 통해 가지적으로 확인할 수 있으며 각 유역의 토양분포로는 동향 유역의 경우 sandy loam 48.86%, loam 36.2%, silty loam 11.5%, etc 3.44%, 천천유역의 경우 sandy loam 66.38%, silty loam 19.28%, loam 10.14%, etc 4.2%로 이루어져 있다. 토양도를 바탕으로 결정한 유역의 각 매개변수 대푯값은 Table 1과 같다.

#### 5. 수치모의 결과

모자이크법, 산술평균법, 대표토양법을 적용하여 동향과 천천유역을 대상으로 FLO-2D 모의 유량을 산정한 결과 전반적으로 흐름의 상승과 하강 추세를 잘 재현하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 침투 유량에 도달하는 시간도

Table 1. Representative parameters value

Parameter	Donghyang			Cheoncheon		
	Mosaic	Arithmetic	Predominant	Mosaic	Arithmetic	Predominant
Conductivity (mm/hr)	1.016 ~ 30.48	7.75	10.16	1.016 ~ 30.48	8.267	10.16
Soil suction (mm)	60.96 ~ 274.32	111.26	109.22	60.96 ~ 274.32	123.127	109.22
Volumetric Moisture Deficiency	0.15 ~ 0.3	0.25	0.24	0.15 ~ 0.3	0.25	0.24

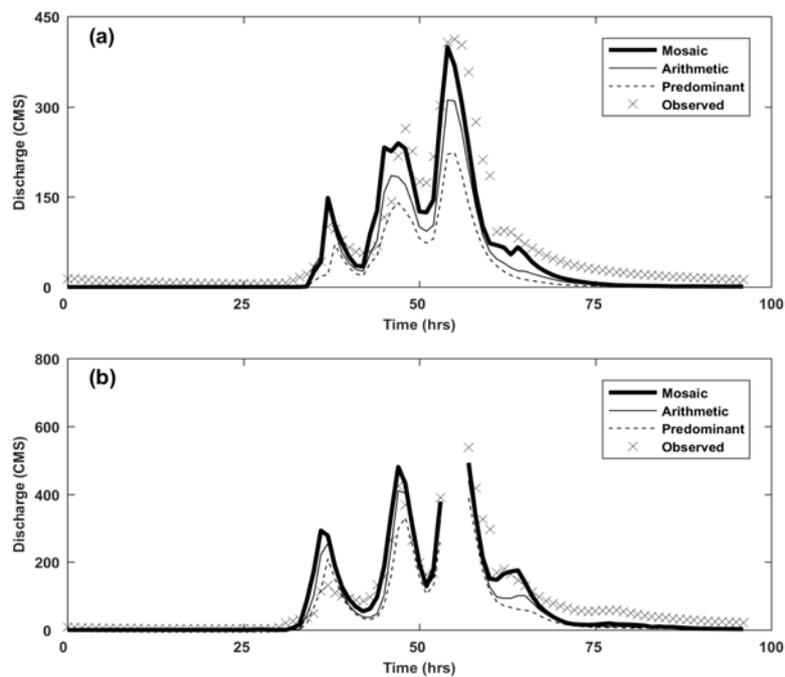


Fig. 5. Estimated vs. observed as a function of at site; (a)Donghyang (b)Cheoncheon.

비교적 정확하게 모의하는 것으로 나타났으나, 침투 유량의 크기에서는 방법에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다.

모자이크법을 적용하여 유량을 산정한 결과 동향지점에서의 NSC (Nash-Sutcliffe coefficient of Efficiency), RMSE (Root Mean Square Error), 결정계수(coefficient of determination)는 각각 0.725, 50.701 m<sup>3</sup>/sec, 0.819로 나타났으며, 천천지점에서는 0.644, 71.719 m<sup>3</sup>/sec, 0.728로 나타났다. Fig. 5의 유출곡선을 보면 두 지역 모

두 유량이 증가하였다가 감소한 후 최대로 증가하여 침투유량을 나타내고 다시 감소하는 패턴을 잘 재현해 냈으나 침투유량의 크기와 발생시간의 측면에서는 약간의 오차를 보인다. 하지만 다른 두 가지의 방법보다 정확도가 높고 실제유량과 가장 근접하다는 것을 알 수 있다. 산술평균법을 적용한 모의결과 동향지점에서의 NSC, RMSE, 결정계수는 각각 0.595, 61.513 m<sup>3</sup>/sec, 0.807으로 나타났으며, 천천지점에서는 NSC, RMSE, 결정계수는 0.549, 80.715 m<sup>3</sup>/sec, 0.694로 나타났다. 대표

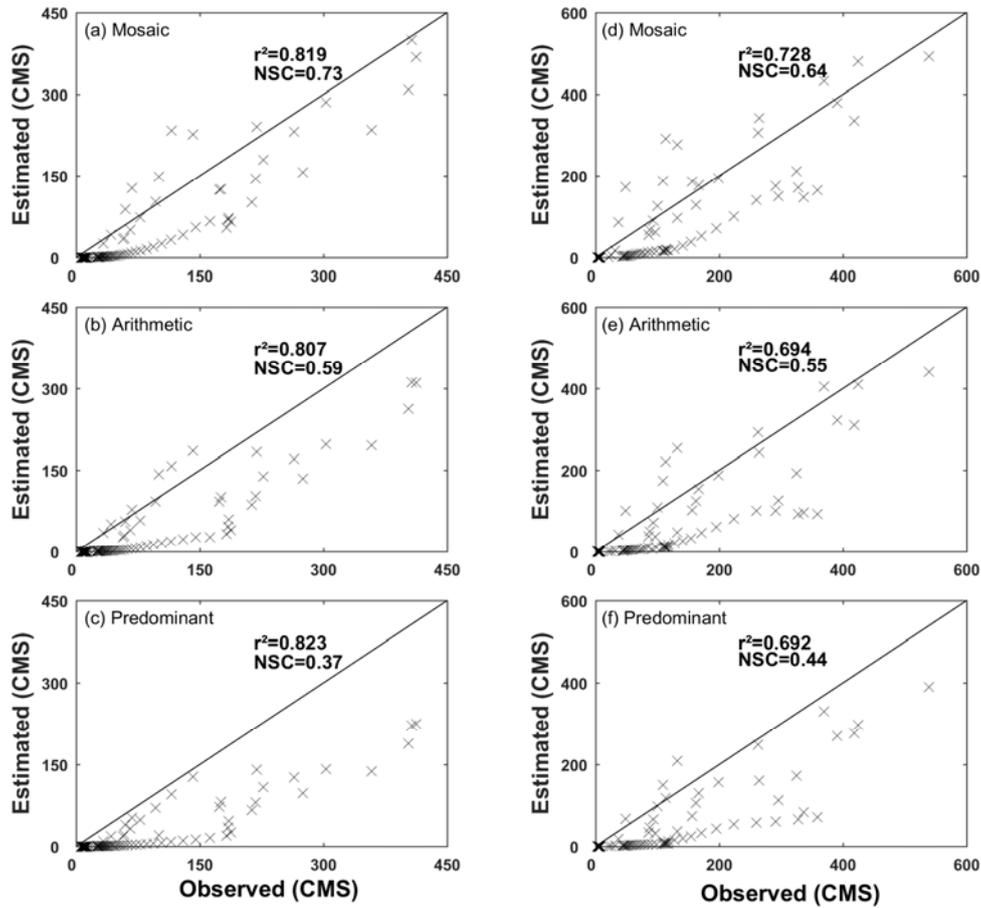


Fig. 6. A Scatter plot of estimated vs. observed; (a) mosaic/Donghyang (b) arithmetic/Donghyang (c) predominant/Donghyang (d) mosaic/Cheoncheon (e) arithmetic/Cheoncheon (f) predominant/Cheoncheon, RMSE(m<sup>3</sup>/sec) of Donghyang (Cheoncheon) station is 50.70(71.72), 61.51(80.72), 76.73(90.11) for mosaic, arithmetic, predominant respectively.

토양법을 적용하여 유량을 산정한 결과 동향지점에서의 NSC, RMSE, 결정계수는 각각 0.37, 76.731 m<sup>3</sup>/sec, 0.823이었고, 천천지점에서는 0.438, 90.105 m<sup>3</sup>/sec, 0.692으로 앞선 두 방법과 같이 흐름의 상승과 하강 흐름추세는 잘 재현해내는 반면 유량 관측 값은 정확도가 가장 떨어지는 것으로 나타났다. Table 1은 동향, 천천구역의 침투 매개변수에 대한 대푯값으로 산술평균법과 대표토양도법에서의 투수계수 대푯값은 동향구역에서 각 7.75 mm/hr, 10.16 mm/hr이고 천천구역에서는 각 8.267 mm/hr, 10.16 mm/hr이다. 두 지역에서 모두 대

표토양도법의 투수계수 대푯값이 더 크다는 것을 알 수 있다. 대표토양도 법에서의 침투성이 산술평균법과 비교하여 높기 때문에 유출률이 저조하여 유량을 과소평가한 것으로 판단된다. 그러나 지역에 따라 대표 토양분류가 상이하여 정확성은 토양 분포비율에 따라 산술평균과 역전될 수도 있다. 산정된 유량의 크기와 타이밍에서 가시적으로 평가하더라도 모자이크법이 가장 우수할 뿐 아니라 기본 통계에서도 더 정확하다는 것을 알 수 있다. 모자이크법이 동향구역의 경우 RMSE에서 산술평균법과 비교하여 17.58%, 대표토양법과 비교하여 33.92% 오차가

작고, 천천유역에서는 RMSE에서 산술평균법과 비교하여 12.54%, 대표토양법과 비교하여 20.41% 오차가 작음을 알 수 있다.

이를 근거로 모자이크법을 사용하여 매개변수를 지정해 주는 것이 나머지 두 방법에 비해 복잡하고 시간이 많이 걸리더라도 더 현실에 가깝게 재현된다고 생각된다. 물론 구체적인 결과와 정확도는 지역의 특성을 반영한 토양의 종류와 토양을 분류하는 방법, 수치 모형의 종류와 선택 등에 따라 달라질 수 있다. 그러나 일반적인 개념과 과정은 모형이 집중형(lumped), 반분포형(semi-distributed), 분포형(distributed)과는 상관없이 적용할 수 있으며 모의결과의 경향도 비슷할 것으로 생각되므로 향후 지역특성을 반영한 추가 연구로 이어지는 것을 추천한다.

## 6. 결론 및 고찰

분포형 강우-유출 모형인 FLO-2D에서 Green-Ampt 방법을 사용하여 침투 손실을 계산할 때 세 개의 서로 다른 방법(산술평균법, 대표토양법, 모자이크법)에 따른 대표 매개변수 산정 효과가 유출모의 결과에 미치는 영향을 알아보았다.

모의 결과를 바탕으로 세 가지 방법에 대한 성능과 정확도를 나타내기 위하여 실제 관측 자료와 모의결과에 대한 NSC, RMSE, 결정계수를 사용하여 비교하였다. 그 결과 모자이크법이 동향지점에서 0.752, 50.701 m<sup>3</sup>/sec, 0.819로 나타났고, 천천 지점에서는 0.644, 80.715 m<sup>3</sup>/sec, 0.728로 나타나 다른 두 방법보다 상대적으로 더 정확하다는 것을 알 수 있다.

수자원분석에서 개념적이고 경험적인 방법보다는 물리적 배경만 확보한다면 물리적 방법을 선호하는 게 일반적이다. Green-Ampt방법 사용하여 침투손실을 산정할 시 토양의 상태를 가장 현실적이고 정확하게 표현해주는 모자이크법이 효과적이다.

## 감사의 글

이 논문은 2017년 한국연구재단 이공분야기초연구사업 중견연구자사업의 지원을 받아 수행된 연구임(한국연구재단-2017년도-2017001809).

## REFERENCES

- Arain, M. A., Michaud, J. D., Shuttleworth, W. J., Dolman, A. J., 1996, Testing of vegetation parameter aggregation rules applicable to the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) at the FIFE site, *J. Hydrol.*, 177(1), 1-22.
- FLO-2D software., 2017, FLO-2D reference manual, 17, FLO-2D Software Inc., Arizona, 1-5.
- Hopmans, J. H., Simunek, J., 1999, Review of inverse estimation of soil hydraulic properties, in: M. Th. van Genuchten., F. J. Leij., L. Wu. (eds.), *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*, University of California, Riverside, CA., California, 643-659.
- Jensen, M. E., 1996, Irrigated agriculture at the crossroads, in: L. S. Pereira., R. A. Feddes., J. R. Gilley., B. Lesaffre. (eds.), *Sustainability of Irrigated Agriculture*, Kluwer Academic Publishers., Netherlands, 19-33.
- Kabat, P., Hutjes, R. W. A., Feddes, R. A., 1997, The scaling characteristics of soil parameters: from plot scale heterogeneity to subgrid parameterization, *J. Hydrol.*, 190, 363-396.
- K-water Institute, 2013, Yongdam experimental catchment manage white book, KIWE-WRRC-14-01, K-water., Daejeon.
- Maidment, D. R., 1993, *Handbook of hydrology*, 1st ed., McGraw-Hill., New York, 25-31.
- McNaughton, K. G., 1993, Effective stomatal and boundary layer resistances of heterogeneous surface, *Plant, Cell & Environment.*, 17(1), 1061-1068.
- Perlman, H., 2016, *The Water Cycle- USGS*, <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>.
- Raupach, M. R., 1995, Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy, and regional scales, *Agric. For. Meteorol.*, 73, 151-179.
- Schaake, J. C., Koren, V. I., Duan, Q. Y., Mitchell, K., Chen, F., 1996, Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales, *Journal of Geophysical Research Atmospheres.*, 101(D3), 7461-7475.
- Shuttleworth, W. J., 1998, Combining remotely sensed data using aggregation algorithms, *Hydrology Earth Syst. Sic.*, 2(2-3), 149-158.

Singh, V. P., 1995, Computer models of watershed hydrology, 1st ed., Water Resources Pubns., Colorado.  
Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., Frost, A., Summerell, G., 2012, Guidelines for rainfall-runoff modelling: towards best practice model application, eWater Cooperative Research Centre., Australia.

- 
- Undergraduate. Ji-Hyeong Hwang  
Department of Civil Engineering, Daegu University  
hyeonga456@naver.com
  - Professor. Khil-Ha Lee  
Department of Civil Engineering, Daegu University  
khil\_ha@yahoo.com