

ORIGINAL ARTICLE

용담댐 유역에서 식생 이질성이 FLO-2D 유량 산정에 미치는 영향

송호준 · 이길하*

대구대학교 공과대학 토목공학과

Impact of Vegetation Heterogeneity on Rainfall Excess in FLO-2D Model : Yongdam Catchment

Hojun Song, Khil-Ha Lee*

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

Abstract

Two main sources of data, meteorological data and land surface characteristics, are essential to effectively run a distributed rainfall-runoff model. The specification and averaging of the land surface characteristics in a suitable way is crucial to obtaining accurate runoff output. Recent advances in remote sensing techniques are often being used to derive better representations of these land surface characteristics. Due to the mismatch in scale between digital land cover maps and numerical grid sizes, issues related to upscaling or downscaling occur regularly. A specific method is typically selected to average and represent the land surface characteristics. This paper examines the amount of flooding by applying the FLO-2D routing model, where vegetation heterogeneity is manipulated using the Manning's roughness coefficient. Three different upscaling methods, arithmetic, dominant, and aggregation, were tested. To investigate further, the rainfall-runoff model with FLO-2D was facilitated in Yongdam catchment and heavy rainfall events during wet season were selected. The results show aggregation method provides better results, in terms of the amount of peak flow and the relative time taken to achieve it. These results suggest that the aggregation method, which is a reasonably realistic description of area-averaged vegetation nature and characteristics, is more likely to occur in reality.

Key words : Rainfall-runoff, Land cover, FLO-2D, Aggregation

1. 서론

성공적인 수자원 관리는 변화하는 기후와 환경에 대응하여 하천의 수량과 수질의 변화를 분석하고 대비하는 것이다. 기후와 환경에 따라 변동성이 큰 수자원 관리는

수학적 모형을 바탕으로 한 수치모형을 통하여 분석하고 그 영향을 사전에 예측하여 준비 하는 것이 일반적이다. 강우가 발생하면 지표상에 떨어진 강우는 여러 경로를 통해 하천이나 지하로 침투하게 된다(Maidment, 1993). 유역의 식생에 의해 차단되고 남은 물은 토양을 통해

Received 21 January, 2019; Revised 15 February, 2019;
Accepted 21 February, 2019

*Corresponding author : Khil-Ha Lee, 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.

침투되고 토양의 침투능을 초과하면 지표면 흐름이 발생한다. 이러한 흐름은 식생과 지표 토양에 의해 흐름이 조절된다. 많은 수치모형은 일련의 물리적인 수문과정을 직간접적으로 포함하고 있으며, 이러한 과정은 매개변수를 이용하여 정량화한다. 특정한 유역에서 강우-유출 모형(rainfall-runoff model)을 효과적으로 수행하기 위해서는 일반적으로 두 가지의 입력자료를 필요로 한다. 첫째는 강우, 온도, 습도, 풍속, 압력, 태양에너지 등의 기상 자료인데 흔히 지상에 설치된 레이더, 지상관측소, 또는 인공위성 관측치를 활용한다. 둘째는 유역의 지표면에서 차단, 침투, 흐름을 특성을 나타내기 위하여 필요한 지표면 특성자료이다. 유역의 지표면 특성자료는 토양도, 식생피복도, 수치고도지도(DEM) 등이다.

전통적으로 지표면 자료를 얻기에는 많은 시간과 노동을 필요로 하였다. 잘 알다시피 최근 발달된 원격탐사 기법은 활용성, 정확성, 편리성에 있어 획기적인 발전을 이루어 분포형 수문모형(distributed hydrologic model)의 새로운 장을 열었다. 특히 유역에서 식생의 존재, 양, 상태 등을 정량화하여 표현해내는데 효율적인 도구로 나타났다. 지표면 특성자료, 특히 식생자료(land cover data)는 본질적으로 지표면 흐름 시스템을 제어한다(Maidment, 1993). 격자기반의 분포형 강우-유출모형에서 흐름의 양과 속도를 계산할 때 매닝공식(Manning equation)을 사용한다면 저항을 직접적으로 표현하는 조도계수(hydraulic roughness coefficient)는 계산결과에 가장 민감한 매개변수 중의 하나가 된다. 유출반응에 가장 민감한 매개변수인 조도계수를 어떻게 결정하는가는 하는 선택은 수치모형의 결과값에 직접적인 영향을 준다. 일반적으로 지표면 원격탐사자료의 해상도는 높으나(수 십 cm ~ 수 m) 수치모형의 해상도는 낮다(수 십 m ~ 수 백 m). 따라서 하나의 수치모형 격자(grid) 안에는 수 십에서 수백 개의 식생자료 격자(grid)가 포함되어야 하는데, 이 때 많은 수의 식생격자를 대표하여 하나의 값으로 전환하여 수치모형에 입력하여야 하는 스케일링 문제가 발생한다. 원격탐사자료의 매개변수의 시공간적 스케일링이 수치모형의 결과에 크게 영향을 받는다. 원격탐사자료의 시공간 스케일에 따른 강우-유출 모형에 결과에 대한 반응은 원격탐사자료의 출현과 동시에 많은 연구가 이루어져 왔다(McNaughton, 1993; Raupach, 1995; Shuttleworth, 1998; Lee, 2008).

하나의 강우-유출 모형 격자에 많은 식생자료를 대표 처리할 때 흔히 주관적이고 직관적인 방법으로 처리하며 이를 조정 하기는 매우 어렵다(Vieux, 1994). 하나의 수치모형격자 안에서 많은 식생 매개 변수를 통합하는 가장 쉬운 방법은 산술평균법이다. 또 다른 방법은 격자 안에서 최다 빈도 식생(most frequently occurred vegetation)을 대표로 하여 처리하는 방법이다. 이러한 방법은 물리적 배경이나 근거나 빈약하고 빈도수가 적은 식생의 경우에는 전혀 고려되지 않는 약점을 안고 있어 식생상태를 효과적으로 수치모형에 적용하기가 어렵다(Koster and Suarez, 1992).

이 연구에서는 하나의 강우-유출 모형 격자에 고해상도의 많은 식생자료를 대표 처리할 때 식생관련 매개변수를 결정하는 방법과 관련하여 식생의 이질성이 강우-유출모형의 어떻게 영향을 미치는 지를 살펴보았다. 우선 용담댐 유역에 2차원 수문모형인 FLO-2D를 장착하고, 세 개의 다른 방법(산술평균법, 대표식생법, 통합평균법)을 사용하여 시간에 따른 유량의 모의결과를 상대비교해 보았다. 이 연구에서 다루어 지는 기술은 자연에서 발견되는 자연상황은 아니며 단지 수치모형에서만 나타나는 인위적인(model artifact) 문제이다. 그러나 수문모형과 원격탐사자료를 접목하는 기술을 향상시킴으로써 수자원 관리 기술에 필요한 수문모형을 개발하는데 일조할 것이다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상지역

본 연구에서는 유역 면적은 약 930에 이르며, 총면적은 1,164이고, 북위 36° 00' ~ 35° 55', 동경 127° 20' ~ 127° 45'에 해당하는 금강유역의 최상류 지역인 용담댐 유역에 강우-유출 모형을 전개 하였으며, 미국 콜로라도 주립 대학에서 개발한 격자 기반의 물리적 모델로써 지표면과 하도 내의 홍수-수문곡선과 강우-유출을 추적할 수 있는 FLO-2D 모델을 이용하였다. 강우-유출 모형의 실행에는 기상자료 및 지형데이터를 필요로 하게 된다. 지표면데이터의 경우 DEM, 토지피복도, 토양도의 세 가지 자료를 사용하였다. DEM은 국토교통부 국토지리정보원에서 제작한 해상도 5m의 자료를 사용하였다. 토지피복도의 경우 환경부에서 제작한 1:25000의 중분류

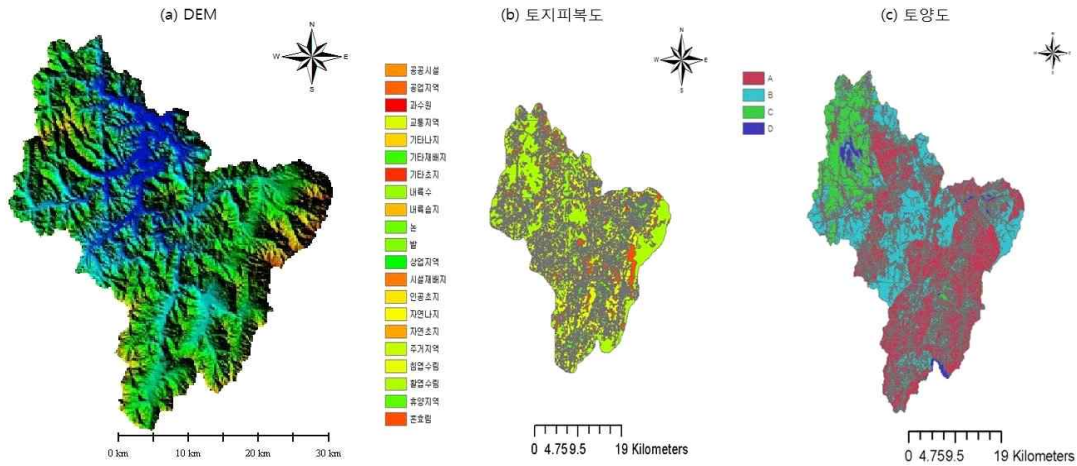


Fig. 1. Surface characteristics of study site.

토지피복도(해상도 5 m급)를 사용하였으며, 토양도는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제작한 1:25000축척의 정밀토양도(해상도 5 m급)의 자료를 사용 하였다.

강우-유출모형의 실행에 필요한 기상자료로는 강우자료이나 실행 후 결과값을 비교검증하기 위해서 현장 관측 유량자료를 필요로 한다. 강우자료는 2012. 1. 1 ~ 2013. 12. 31까지 총 2년간 10분 단위 강우자료를 기반으로 강수량이 많은 7, 8 월의 강우자료를 이용하였다. 유량자료는 강우자료와 마찬가지로 각각의 수위관측소에서 2012. 1. 1 ~ 2013. 12. 31까지 총 2년간 10분 단위로 관측된 유량자료를 이용하였다. 그 중 강우기간과 선행 강우가 적절하고 자료가 신뢰도가 높다고 판단하여 2013년 7월 2일~7월 5일까지의 강우자료를 모형의 입력자료로 채택하였다. 대상 유역은 Fig. 1에서 보여준다.

2.2. 연구방법

매닝공식(Manning equation)에서 조도계수는 흐름의 양과 속도에 중요한 역할을 한다. 토지피복도의 각 셀마다 조도계수가 하나씩 배정이 되고 흐름모형의 해상도가 토지피복도보다 낮다면 조도계수를 통합평균 처리한다. 강우-유출 모형인 FLO-2D에서 격자의 크기는 50 m로 2700의 면적을 가진 맵을 구축 하였다. 구축된 FLO-2D의 1개 격자에는 5m 해상도의 토지피복도 자료가 셀 당 100개 씩 포함한다(Fig. 2.). 지표면 특성 자료 100개를 FLO-2D 격자 1개에 대입시키고 매개변수

의 대푯값을 결정하는 방법으로 용담댐 유역에서 산술평균법(arithmetic method), 대표식생법(predominant method), 통합평균법(aggregation method)을 적용하여 유량을 추정한 후 관측값과 상대비교 검토하였다. 산술 평균법은 100 개의 셀에서 지표 특성값 모두 합한 후 총 셀의 갯수를 나눈 것으로 모형의 대표조도계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{m} \tag{1}$$

여기에서 \bar{n} 는 통합된 평균조도계수, m 는 셀 개수, n 는 토지피복도 각 셀의 조도계수를 나타낸다.

대표식생법은 하나의 격자 내에 출현하는 여러 가지 식생들 중에서 출현빈도가 가장 높은 식생을 하나 선택하여 그 격자의 대표식생으로 정의하고 소수(minor)의 식생은 무시하는 것이다. 산술평균법과 대표식생법은 물리적 이론배경이 빈약하고 주관적인 판단이 개입될 수 있다. 매개변수를 평균하여 대푯값을 결정할 때에는 흐름의 성질과 물리적 배경이 녹아 들면 장점이 아주 많다. 이를 위하여 매닝(Manning) 공식을 연결고리로 하여 흐름의 질량보존법칙을 바탕으로 유도한 통합평균법(Lee, 2008)은 상대적으로 더 정확하고 현실적이라 할 수 있다. 통합평균법은 다음과 같이 표현될 수 있다.

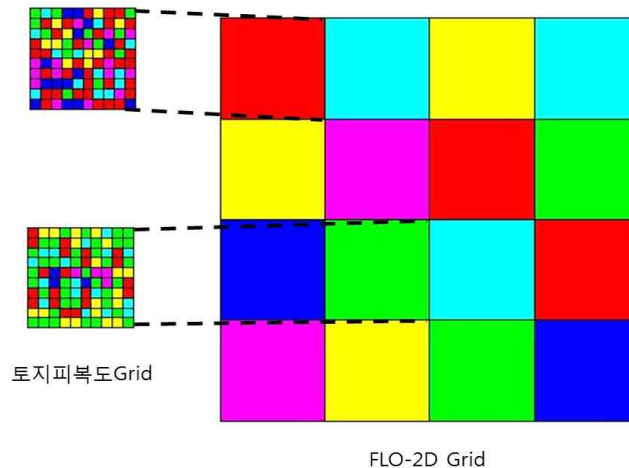


Fig. 2. Grid of Numerical model and land cover data.

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{m} \quad (2)$$

본 연구에서는 세 개의 다른 방법을 통하여 계산한 지표면 특성을 이용하여 식생관련 조도계수를 결정 하였다. 이를 위에서 언급한 대상지역과 기간에 대하여 흐름모형인 FLO-2D에 대입하여 유량을 산정하였다. 결과는 모형 유량과 관측 유량을 상대비교 하였으며 정확도를 파악하기 위하여 NSC (Nash-Sutcliffe coefficient of Efficiency, Nash and Sutcliffe, 1970) 값과 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 계산하여 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저 산술평균법을 적용하여 유량을 산정한 결과는 Fig. 3, Fig. 4와 같다. 전체적으로 흐름의 상승부와 하강부 흐름의 패턴은 잘 재생해내는 것으로 나타났다. 침투 유량에 도달하는 시간은 관측값과 비교하여 정확도에서 우수하다고 볼 수 있으나 그 크기에서는 정확도가 다소 떨어진다. 동향지점에서는 NSC, RMSE, 결정계수 (coefficient of determination)는 각각 0.915, 15,869 m³/sec, 0.837으로 나타났으며, 천천지점에서는 0.919, 37.44 m³/sec, 0.822로 나타났다. 전반적으로 운영초기

에서 약 75 hr까지에서 유량이 낮은 시점에서는 다소 정확도가 떨어진다. 이는 아마 FLO-2D가 장기 물수지분석보다는 단기의 홍수량 산정에 강점을 가진 모형이므로 이런 현상이 나타났다고 추정된다.

대표식생법을 적용하여 유량을 산정한 결과는 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 동향지점에서는 NSC, RMSE, 결정계수는 각각 0.914, 14,275 m³/sec, 0.767으로 나타났으며, 천천지점에서는 0.890, 42.84 m³/sec, 0.751로 나타났다. 산술평균법과 같이 흐름의 상승부와 하강부와 같은 흐름의 패턴과 침투유량 발생 시점은 잘 재생해내는 반면 관측값과 비교하여 크기에서 산술평균법보다 정확도가 많이 떨어진다. 특히 산술평균법보다 결정계수에서 정확도가 많이 떨어진다.

통합평균법을 적용하여 유량을 산정한 결과는 Fig. 7-8과 같다. 동향지점에서는 NSC, RMSE, 결정계수는 각각 0.949, 11,045 m³/sec, 0.882로 나타났으며, 천천지점에서는 0.937, 29.08 m³/sec, 0.899로 나타났다. 통합평균법의 유출곡선은 앞선 두 가지 방법과 마찬가지로 유량이 증가하였다가 감소한 후 최대로 증가하여 침투유량을 나타내고 다시 감소하는 패턴을 잘 재생한다. 유량의 크기와 발생시간의 측면에서 약간의 차이를 보이나 앞선 두 가지의 방법보다 훨씬 안정적인 모습을 보이며 실제유량과 가장 유사한 것을 알 수 있다. 앞선 두 방법과는 달리 관측값과 비교하여 유량의 크기에서 정확도가

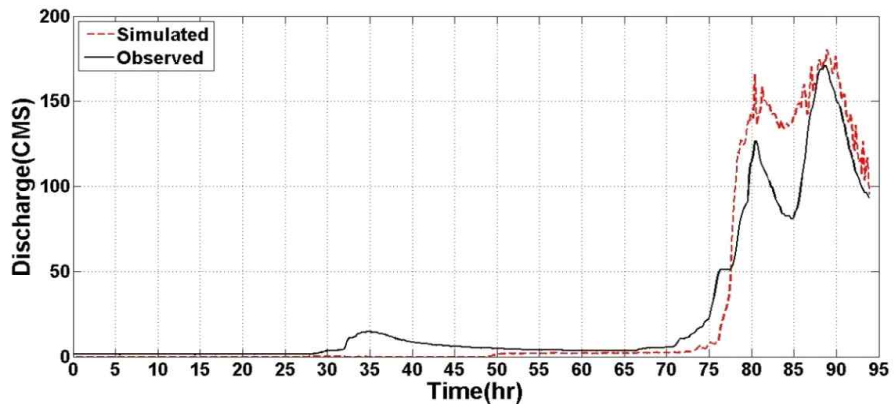


Fig. 3. Flowrate calculated FLO-2D using arithmetic method in Donghyang station .

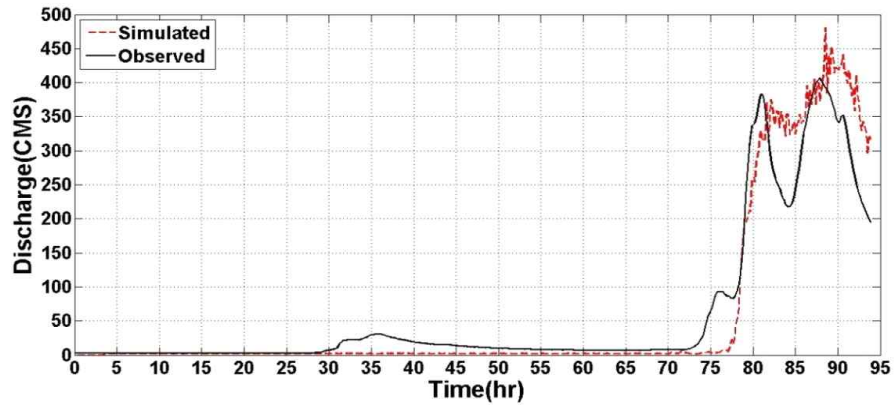


Fig. 4. Flowrate calculated FLO-2D using arithmetic method in Chunchun station.

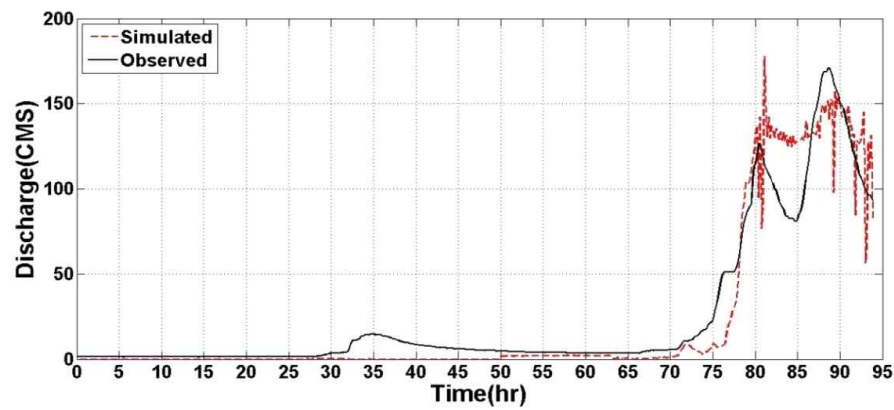


Fig. 5. Flowrate calculated FLO-2D using predominant method in Donghyang station .

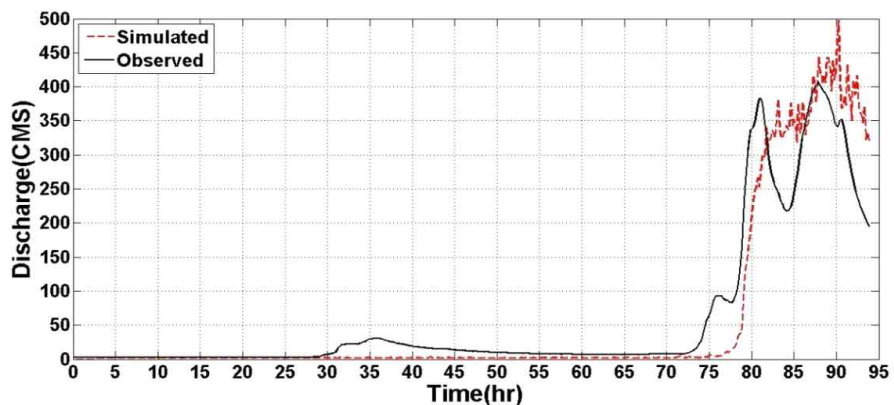


Fig. 6. Flowrate calculated FLO-2D using predominant method in Chunchun station.

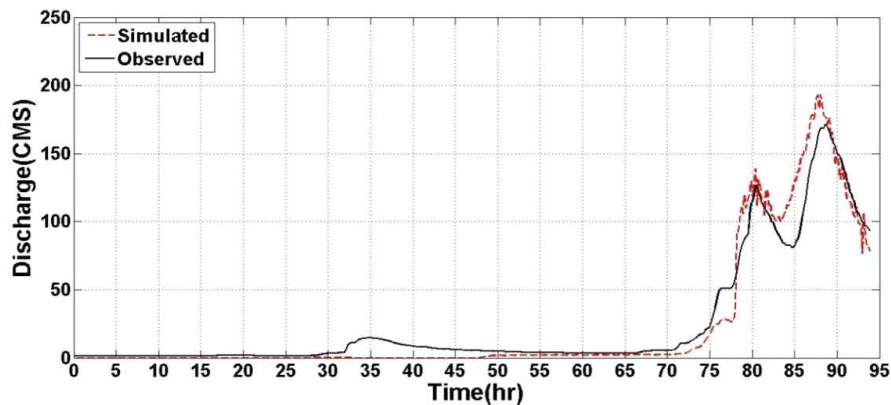


Fig. 7. Flowrate calculated FLO-2D using aggregation method in Donghyang station.

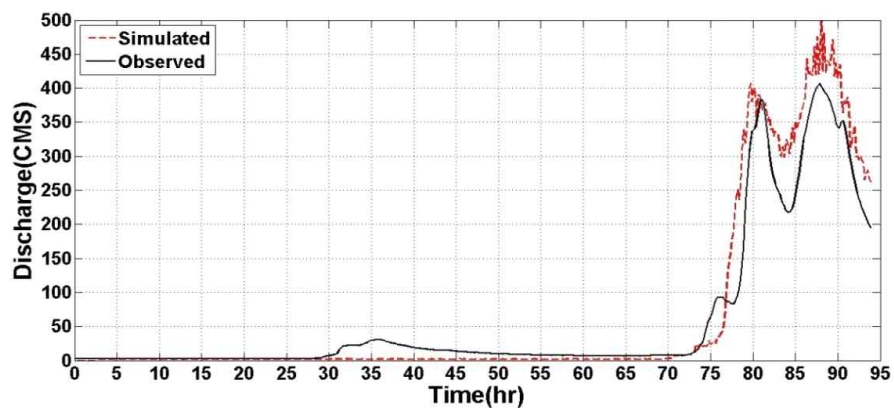


Fig. 8. Flowrate calculated FLO-2D using aggregation method in Chunchun station.

Table 1. Basic statistics of flowrate using three different methods

station	Index	method		
		Predominant	Arithmetic	Aggregation
Donghyang	RMSE	14.275	15.869	11.045
	NSC	0.914	0.915	0.949
	Coefficient of determination	0.767	0.837	0.882
Chunchun	RMSE	42.836	37.436	34.584
	NSC	0.890	0.919	0.937
	Coefficient of determination	0.751	0.822	0.899

많이 향상된 결과를 볼 수 있다.

Table 1은 세 개의 방법에 따라 FLO-2D를 이용하여 유량을 산정한 후 용담댐 유역의 두 관측지점과의 정확도를 보여주기 위한 기본 통계량을 정리해 놓은 것이다. 산정된 유량의 크기와 타이밍에서 가시적으로 평가하더라도 통합평균법이 더 우수할 뿐 아니라 통계값에서도 더 정확함을 보여준다. 이는 고해상도의 식생 매개변수가 저해상도의 식생 매개변수로 재분배하여 전환하는 과정에서 질량보존법칙을 바탕으로 한 통합평균법에서 유량산정이 더 현실에 가깝게 재현되었다고 사료된다. 구체적인 결과는 식생의 존재와 성질을 분류하는 방법, 모형의 선택, 지표면의 지역 특성 등에 따라 달라질 수 있다. 그러나 일반적인 개념과 과정은 모형이 집중형(lumped)이든 분포형(distributed)이든 같이 적용할 수 있으며 결과의 경향도 달라지지 않으리라 생각된다.

4. 요약 및 결론

강우-유출 모형의 격자 해상도가 모형이 필요로 하는 토지피복도 자료의 해상도보다 낮을 경우 하나의 모형 격자 안에 다수의 토지피복도 자료를 통합하여 평균 처리해 줄 필요가 있다. 매닝공식의 조도계수를 사용할 경우 식생관련 매개변수를 결정하는 방법과 관련하여 식생의 이질성이 강우-유출모형의 어떻게 영향을 미치는지를 살펴보기 위하여 세 개의 서로 다른(산술평균법, 대표식생법, 통합평균법)을 사용하여 FLO-2D에서 시간에 따른 유량의 모의결과를 검토해보았다. 세 가지 방법에서 모형의 성능과 정확도를 나타내는 척도인 NSC, RMSE, 결정계수는 통합평균법이 동향지점에서 0.949, 11.04 m³/sec, 0.882로 나타났으며, 천천 지점에서는

0.937, 29.08 m³/sec, 0.899로 나타나 다른 두 방법보다 상대적으로 더 정확함을 보여준다. 대표식생법과 산술평균법의 결과가 천천 지점과 동향 지점에서 다른 이유는 유역을 지배하는 식생이 달라 산술평균법에서 다른 상쇄 효과를 가져오기 때문인 것으로 사료된다. 통합평균법은 이론적으로 탄탄하며 일단 식생과 관련된 매개변수만 미리 알 수 있다면 쉽게 결정할 수 있다. 수자원분석에서 개념적이고 경험적인 방법보다는 물리적 근거에 대한 지식만 확보한다면 물리적 배경을 가진 방법을 선호하는 게 일반적이다. 식생관련 매개변수를 평균하여 결정할 시 식생의 이질성을 가장 현실적이고 정확하게 표현해주는 통합평균법을 추천하는 바이다.

감사의 글

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

REFERENCES

Koster, R. D., Suarez, M. D., 1992, A Comparative analysis of two land surface heterogeneity representations, *Journal of Climate*, 5, 1379-1390.
 Lee, K., 2008, Integrated remotely sensed data using a simple vegetation parameter aggregation method applicable to a distributed rainfall-runoff model, *Journal of Hydrologic Engineering-ASCE*, 13(4), 236-241.
 Maidment, D. R., 1993, *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill, New York, USA.
 McNaughton, K. G., 1993, *Effective stomatal and*

- boundary layer resistances of heterogeneous surfaces. *Plant, Cell & Environment*, 17(1), 1061-1068.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models part I-A discussions of Principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Raupach, M. R., 1995, Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy, and regional scales, *Agricultural Forest Meteorology*, 73(3), 151-179.
- Shuttleworth, W. J., 1998, Combining remotely sensed data using aggregation algorithms, *Hydrology and Earth System Science*, 2(2-3), 149-158.
- Vieux, B. E., 1994, *Distributed hydrologic modeling using GIS*, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.
-

- 송호준, 대구대학교 토목공학과 석사과정
dung125@naver.com
- 이길하, 대구대학교 토목공학과 교수
khil_ha@yahoo.com