



---

# PREFACE

It is our pleasure to present this report on the APEC Climate Center (APCC)'s research activities in 2013, which has been a very productive year for our Center.

APCC has expanded its research scope, in response to regional societal and scientific needs. While building expertise in climate prediction remains a priority, we are extending our reach to include policy-relevant climate applications and value-added climate information products.

APCC has accelerated efforts to better our service to the region. As one of the main services provided by APCC, the MME 3-month prediction information has been productively applied by scientists in developing countries that are unable to produce their own prediction information. Furthermore, in order to better prepare for climate-related hazards in a timely manner, APCC launched its 6-month MME prediction service in September 2013. We also began to release forecasts of the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), starting from July 2013, as the world's first operational BSISO forecast service. Our researchers also achieved great success in publishing their papers in noted academic journals. Dr. Ok-Yeon Kim, for example, published a paper in *Climate Dynamics* and her research was later selected as one of the Research Highlights by another distinguished journal, *Nature Climate Change*. The following research report provides more information about our research outcomes from 2013.

We will continue to promote the best use of our research outcomes in various scientific and application areas. Our successes and achievements would not have been possible without the support of our valued partners. In this regard, I extend my thanks to you and I hope you enjoy this 2013 Research Report.

Chin-Seung Chung  
Director, APEC Climate Center

# CONTENTS

## 위성강수를 활용한 미계측 유역 유출량 예측을 위한 분포형 수문모형 매개변수 지역화

■ 김종필, 기후변화연구팀

1. 서론	130
2. 연구 자료 및 방법	132
2.1 대상 유역	132
2.2 연구 자료	133
2.3 장기유출해석	138
2.4 매개변수 지역화	147
3. 모형 적용 및 검증	151
3.1 유출모의 및 매개변수 최적화	151
3.2 매개변수 지역화식 추정	152
3.3 지역화식 적용 및 검증	163
4. 요약 및 결론	171



APCC  
RESEARCH REPORT 2013-04

---

# 위성강수를 활용한 미계측 유역 유출량 예측을 위한 분포형 수문모형 매개변수 지역화

---

김종필 | 기후변화연구팀

**ABSTRACT**

Estimation of long-term streamflow from watersheds is very important to manage water resources effectively and to cope with water-related disasters, including flooding and drought. Long-term streamflow prediction is generally achieved through hydrological modeling, which includes preparation of input datasets, an implementation of a hydrological model, and model calibration. For the watershed of interest, the hydrological model simulates streamflow and an optimal parameter set is estimated by comparing the output data with measurements. This parameter set can be applied to predict another runoff event within the same watershed.

However, daily hydrometeorological observations, including streamflow, air temperature, relative humidity, sunshine, and wind speed are insufficient for hydrological modeling in many watersheds, even though precipitation records are relatively abundant. This lack of appropriate data interferes with the accurate and reliable prediction of streamflow. Moreover, complex nonlinear equations are added to recently developed hydrological models to simulate more accurate watershed responses. Thus, many parameters in the models may require estimation through model calibration because of the deficit of measurements.

Model parameters can be transferred by using different regionalization methods, which transfer a parameter set from the nearest watershed to the watershed of interest, consider the streamflow from a different watershed with the most similar properties, and use the mean values of the parameters from the neighboring watersheds.

This study employed linear regression equations between the model parameters and physiographic attributes of watersheds, such as drainage area, elevation, slope, land cover, and soil type, which is the most widely used regionalization method. A distributed hydrological model, the Coupled Routing and Excess Storage (CREST) model, was employed for streamflow simulation in the study areas, namely the Chunju Dam basin (CJDB), the Soyanggang Dam basin (SYDB), the Andong Dam basin (ADDB), the Imha Dam basin (IHDB), the Namgang Dam basin (NGDB), the Miryanggang Dam basin (MRDB), the Yongdam Dam basin (YDDB), and the Juam Dam basin (JADB). Two of these basins, MRDB and JADB, were considered ungauged basins for validation.

The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42v6 from the National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the Potential Evapotranspiration (PET) from the Famine Early Warning System Network (FEWSNET) were applied to the CREST model as two meteorological input forcings. Topographic parameters were estimated from the Digital Elevation Model (DEM) of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Streamflow simulations were implemented by the CREST model from 01 Jan 2004 to 31 Dec 2009 at a daily time-step and the optimal parameter sets were found using the Adaptive Random Search (ARS) method. The relationships between the model parameters and the basin properties, including drainage area, elevation, slope, longest path, river length, elongation ratio, impervious area, forest area, paddy field, and crop land, were computed using the multiple linear regression method for the six gauged basins. Then, new parameter sets were generated by the regression equations and the physiographic properties of the six gauged basins and the two ungauged basins.



Finally, the new parameters were validated for all the study basins and assessed by four indices, namely the Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSCE), Percent Bias (PBIAS), Root Mean Squared Error – Observation Standard Deviation Ratio (RSR), and the Pearson's Correlation Coefficient (PCC).

The results showed that the CREST hydrological model and the proposed regression equations can acceptably simulate streamflow, considering NSCE, RSR, and PCC in both the six gauged and the two ungauged basins. However, they provided somewhat biased streamflow simulations for all the study basins. In further studies, these biases should be reduced by adding other basins and by finding basin properties that are highly related with the model parameters.

## 1. 서론

수문해석을 통한 장기유출량 산정은 대상 유역에 대한 효율적인 수자원 관리 및 홍수나 가뭄 등과 같은 자연재해로부터 효과적이고 안정적으로 대처하기 위한 필수적인 요소이다. 일반적으로 장기유출량 산정은 수문모형을 활용하여 모의되고 있다. 먼저 관심 유역에 대하여 유출모의를 수행하고, 유출량 관측자료를 이용하여 최적 매개변수를 추정한다. 이렇게 추정된 매개변수와 유출량을 예측하고자 하는 기간의 기상관측자료를 입력하여 유출량을 예측하게 된다. 그러나 현재 대부분의 국가에서는 강수량 관측은 시공간적으로 비교적 고해상도로 이루어지고 있는 반면 장기유출해석에서 고려되어야 할 기온, 습도, 일사량, 풍속 등의 기상인자에 대한 관측은 매우 부족한 실정이다. 또한 수문모형의 검증에 필요한 유출량 관측자료도 매우 부족하기 때문에 댐, 저수지 등의 수공구조물 설계나 운영을 위한 정확한 유출모의가 어렵다.

최근에는 컴퓨터 기술의 발달과 함께 수문모형에서는 보다 현실적인 유출현상을 모의하기 위하여 과거에 비해 더욱 복잡한 비선형방정식을 적용하고 있다(Kang et al., 2013). 그러나 이러한 수문모형의 복잡성에 비해서 상대적으로 매개변수를 추정하기 위한 관측자료는 부족하기 때문에 많은 부분의 매개변수들이 적절한 보정방법을 통해서 추정되어야 하는 문제점을 가지고 있다.

선행연구들은 다양한 지역화 방법을 이용하여 미계측유역에서 모형 매개변수를 결정하고자 시도하였다. 일반적인 매개변수 지역화 방법으로는 유출량 전이 방법, 산술평균을 이용한 방법, 매개변수 전이 방법, 그리고 회귀식을 이용한 방법 등이 있다. 유출량 전이

방법은 유역특성이 유사한 지역의 유출량으로부터 면적비를 고려하여 대상 유역의 유출량으로 환산하는 방법이다. 산술평균을 이용한 방법은 인접 지역이나 특정 거리 내에 위치한 유역들로부터 매개변수를 추정하고 이를 평균하여 매개변수를 결정하는 방법이다. 매개변수 전이 방법은 유역특성이 유사하거나 공간적으로 근접한 유역의 매개변수를 적용하는 방법(e.g. Kay et al., 2007; Perrin et al., 2007)과 기후특성이 유사한 지역별로 매개변수를 구분하여 적용하는 방법(e.g. Xie et al., 2007; Son et al., 2010) 등이다. 마지막으로 회귀식을 이용한 방법은 표고, 경사, 토지피복, 토지이용, 토양 등 유역특성을 나타내는 인자와 모형 매개변수 사이의 상관관계를 이용하여 회귀식을 결정하고 이를 미계측 유역으로 확장하는 방법(e.g. Cho, 2004; Young, 2006; Lee and Kang, 2007)이다. 그 밖에도 다변량 통계기법인 주성분분석과 계층적 군집분석을 연계한 매개변수 지역화 방법(Lee et al., 2009), Artificial Neural Networks(ANNs)를 활용한 지역화 방법(Besaw et al., 2010) 등 다양한 연구가 수행되어 왔다.

수문모델링에 있어서 최적 매개변수의 추정은 수문모형에 따라서 그리고 모형의 성능을 측정하는 목적함수에 따라서 좌우된다(Gupta et al., 1998; Madsen, 2003; Bardossy, 2007). 모형 매개변수는 그 자체로도 불확성을 가지고 있으며(Kuczera and Mroczkowski, 1998), 비슷한 모형의 정확도를 가지는 매개변수가 무수히 많기 때문에 유일한 값을 가지지도 않는다(Beven and Freer, 2001; Bardossy, 2007). 따라서 하나의 유역으로부터 추정된 최적 매개변수를 이용하여 미계측 유역으로 확장하는 방법은 바람직하지 못하다고 판단된다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 유역특성인자와 모형 매개변수와의 상관관계를 이용한 방법을 이용하여 수문모형 매개변수 지역화를 수행하였다.

장기유출모의를 위한 수문모형으로 미국 Oklahoma 대학과 National Aeronautics and Space Administration(NASA)의 공동연구로 개발된 분포형 수문모형인 Coupled Routing and Excess Storage(CREST) 모형(Wang et al., 2011)을 선정하였다. 또한 향후 강수량, 기온, 습도, 풍속, 일사량 등 기상자료가 없거나 부족한 지역으로 확장할 것을 고려하여 Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM) 3B42v6, Famine Early Warning System Network(FEWSNET) / Potential Evapotranspiration(PET), Shuttle Radar Topography Mission(SRTM) / Digital Elevation Model(DEM) 등 원격탐사자료를 연구에 활용하여 유출분석을 수행하였다.

## 2. 연구 자료 및 방법

### 2.1 대상 유역

본 연구에서는 분포형 수문모형을 이용한 장기유출분석을 위해서 지상관측자료 및 원격탐사자료가 가용한 2002년부터 2009년까지를 대상기간으로 설정하였다. 또한 대상 기간에 대하여 댐 유입량 자료가 구축되어 있는 충주댐 유역(CJDB), 소양강댐 유역(SYDB), 안동댐 유역(ADDB), 임하댐 유역(IHDB), 남강댐 유역(NGDB), 밀양강댐 유역(MRDB), 용담댐 유역(YDDB), 주암댐 유역(JADB) 등 8개 다목적댐 유역을 연구대상지역으로 선정하였다. 이 유역들은 모두 하천 상류부에 위치하고 있고 주변 유역으로부터의 유입이 없으며, 대부분이 산지로 이루어져 있어서 수공구조물이나 건물, 도로 등 인위적인 영향이 적기 때문에 수문해석에 적합한 것으로 판단된다. Figure 1은 본 연구에서 선정된 8개의 다목적 댐 유역의 위치와 지형정보를 간략하게 나타낸 것이며, Table 1은 각 다목적 댐 유역의 토지피복분포를 보여주고 있다(국가수자원관리종합정보시스템, Water Management Information System, WAMIS).

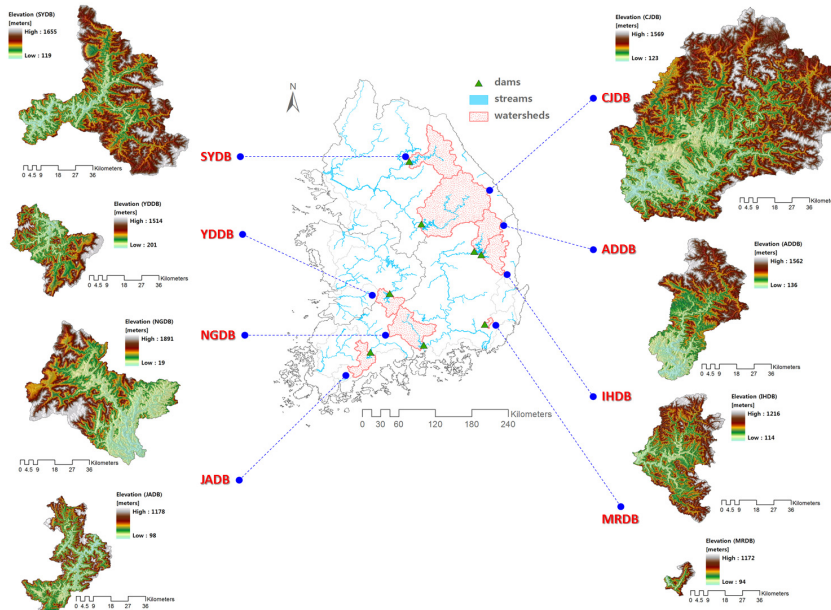


Figure 1 Study basins

**Table 1** Percent areas of land cover distribution (unit: %)

Value	Cover Type	CJDB	SYDB	ADDB	IHDB	NGDB	MRDB	YDDB	JADB
1	Water	1.0	1.3	1.5	1.0	0.8	0.1	0.3	2.6
2	Urbanization	0.5	0.7	0.0	0.9	0.3	0.2	2.7	1.5
3	Eroded Area	1.0	0.6	1.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.1
4	Marsh	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	Grassland	2.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	2.0
6	Forest	83.3	90.9	85.4	82.1	75.3	88.5	79.9	73.7
7	Paddy Field	10.4	2.8	6.3	9.6	16.5	6.2	8.4	12.8
8	Crop Land	1.6	3.2	5.8	6.3	7.0	4.9	6.1	7.2

## 2.2 연구 자료

### 2.2.1 TRMM 3B42v6 강수량

NASA의 Goddard Space Flight Center(GSFC)에서는 3시간 간격으로 공간해상도  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 TRMM 3B42v6 강수량자료를 생산하여 제공하고 있다. 이 자료는 여러 위성의 센서들로부터 관측된 자료를 이용하여 생산된 강수량자료들을 조합한 결과이다. TRMM 3B42v6 자료는 수동형 마이크로파 자료와 정지궤도위성과 저궤도위성의 적외채널 자료를 이용하고 있다. 이 자료에서 사용된 수동형 마이크로 자료는 TRMM Microwave Imager(TMI), Defense Meteorological Satellite Program(DMSP) 위성의 AQUA 위성의 Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth observing system(AMSR-E), 그리고 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA) 위성에 장착된 Advanced Microwave Scanning Unit-B(AMSU-B) 자료이다. 적외채널 자료는 Geostationary Meteorological Satellite(GMS), Geostationary Operational Environmental Satellite(GOES), Meteosat-5/-7 등과 NOAA 위성군 자료를 이용하고 있다(Huffman et al., 2007).

TRMM 3B42v6는 전 지구 강수량자료로서 Universal Time Coordinate(UTC) 체계로 구성되어 있다. UTC 체계는 우리나라 지방표준시(Local Standard Time, LST)와 9시간의 차이가 있기 때문에, LST로 구성된 지상관측자료와 비교할 때 시간적 불일치로 인한



오차가 발생될 수 있다(Kim, 2013). 따라서 본 연구에서는 일 단위 자료가 아닌 3시간 간격으로 제공되는 TRMM 3B42v6 자료를 이용하여 우리나라 LST와 일치하는 일 단위 강수자료로 변환하는 과정을 수행을 하였다. 예를 들어, 우리나라 LST로 2005년 1월 1일의 일 단위 강수자료를 생산하기 위해서는 2004년 12월 31일 15:00UTC로부터 2005년 1월 1일 12:00UTC까지의 TRMM 3B42v6 자료를 합산함으로써 일 단위 강수자료로 변환하였다.

## 2.2.2 FEWSNET 잠재증발산량

FEWSNET에서는 전 지구 규모에서 공간해상도  $1^\circ \times 1^\circ$ 의 일 단위 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration, PET)을 계산하여 제공하고 있다. PET의 계산은 다음과 같이 Food and Agriculture Organization(FAO)의 기술보고서에서 제시된 수정 Penman-Monteith 방정식(Allen et al., 1998)을 이용하고 있다.

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

여기서,  $PET$ 는 잠재증발산량으로 단위는 [mm/day]이다;  $R_n$ 은 작물 표면에서의 순복사량(net radiation)이며, 단위는 [ $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ ];  $G$ 는 토양의 열전속밀도(heat flux density)이며, 단위는 [ $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ ];  $T$ 는 지표면으로부터 2 m 높이에서의 일평균기온 [ $^\circ\text{C}$ ];  $u_2$ 는 지표면으로부터 2 m 높이에서의 풍속[m/sec];  $e_s$ 는 포화증기압 [kPa];  $e_a$ 는 실제증기압 [kPa];  $(e_s - e_a)$ , 포화증기압 부족량 [kPa];  $\Delta$ 는 증기압력곡선의 기울기 [ $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ]; 그리고  $\gamma$ 는 건습계 상수(psychrometric constant)로 단위는 [ $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ]이다. 각 변수들에 대한 계산방법은 Allen et al.(1998)을 참조하기 바란다.

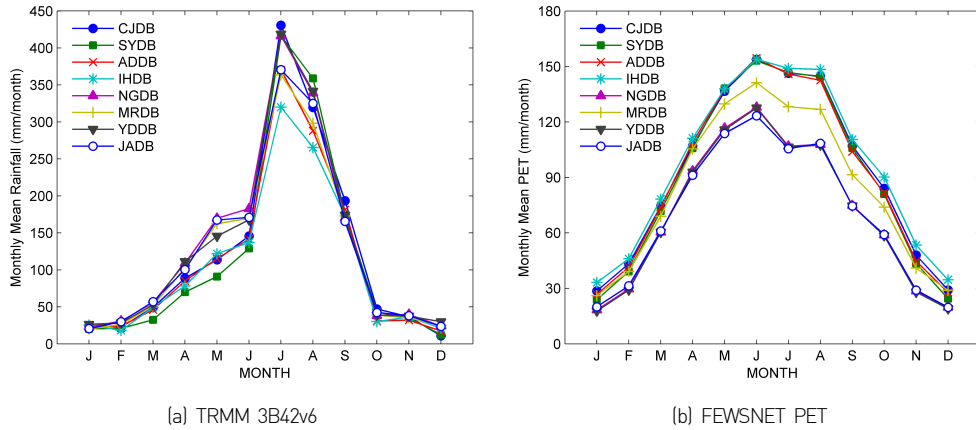


Figure 2 Comparison of monthly mean of (a) precipitation from TRMM 3B42v6 and (b) potential evapotranspiration from FEWSNET in the study basins

수정 Penman-Monteith 방정식을 이용해서 일 단위 잠재증발산량을 계산하기 위해서는 일최고기온, 일최저기온, 상대습도, 풍속, 일조시간 등의 기후변수가 필요하다. FEWSNET에서는 이러한 기후변수를 Global Data Assimilation System(GDAS)로부터 제공받는다. GDAS는 NOAA에서 운영되고 있으며, 매 6시간마다 자료가 생산된다. 이 자료를 이용하여 매 6시간마다 PET를 계산하고 이를 합산하여 일 단위 PET를 추정한다. 하루에 대한 시간 정의는 Greenwich Mean Time(GMT) 0시를 시작으로 한다.

### 2.2.3 댐 유입량

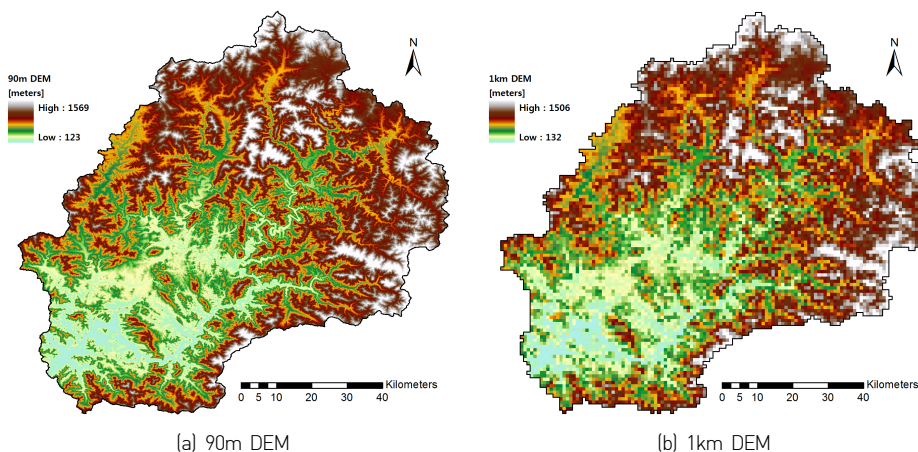
장기유출 모의결과를 검증하기 위하여 2002년부터 2009년까지 분석기간에 대하여 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)으로부터 댐 유입량 자료를 수집하였다. 본 연구의 대상 유역은 모두 유역 출구지점에 다목적댐이 설치되어 있으며, 이러한 댐 유입량을 댐 상류지역에 대한 자연 유출량으로 가정하였다.

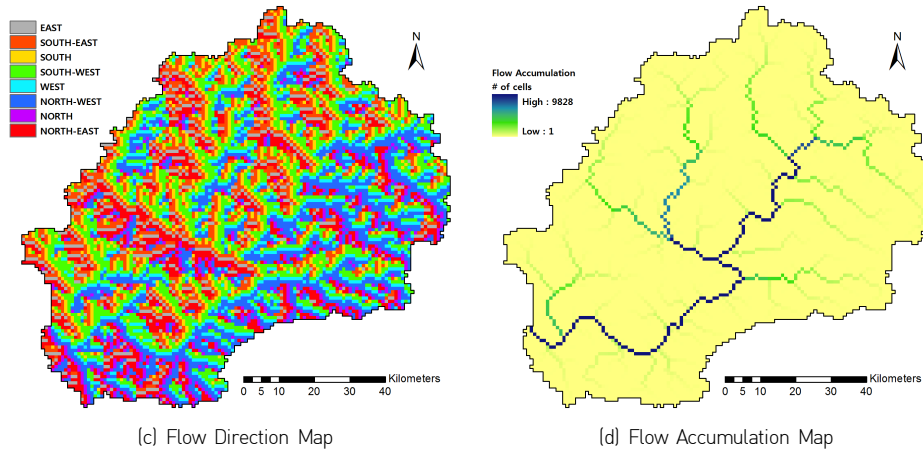
## 2.2.4 지리정보자료

### 2.2.4.1 SRTM DEM

SRTM은 2000년 2월 NASA, National Imagery and Mapping Agency(NIMA), German Aerospace Center(DLR), 그리고 Italian Space Agency(ASI) 등의 공동연구로 수행되었다. SRTM은 남위 50°부터 북위 60°까지(전 지구 지표면 면적의 약 80%)의 영역에 대하여 공간해상도 3" × 3"(적도기준 약 90m)의 수치표고자료(DEM)이며, 일부 지역에 대해서는 1" × 1"자료도 제공되고 있다.

본 연구에서는 University of Maryland(UMD)의 Global Land Cover Facility(GLCF)를 통하여 SRTM 90m DEM 자료를 수집하였다. GLCF에서는 DEM 자료의 용량을 고려하여 1° × 1° 단위로 자료를 제공하고 있으며, 여기에서는 33°N ~ 44°N, 126°E ~ 131°E까지의 자료를 수집한 후 합성하였다. 합성된 DEM 자료(Figure 3(a))는 다시 분포형 수문모형의 모의시간을 고려하여 1 km(Figure 3(b))로 변환하였다. 이렇게 변환된 1 km DEM을 기준으로 흐름방향, 누적흐름수 등 분포형 수문모형에 필요한 매개변수를 추정하였다. 흐름방향(Figure 3(c))은 각 격자점과 주변 격자점 사이의 표고값을 이용하여 경사도를 구하고 그 중 최급구배방향으로 정의하였으며, 누적흐름수(Figure 3(d))는 임의의 격자점에서 그 격자의 상류지역에 해당하는 격자의 수로 정의하였다.





**Figure 3** Sample figures of (a) SRTM DEM, (b) regridDED DEM, and physical parameters including (c) flow direction map and flow accumulation map computed from the regridDED DEM raster in the Chungju Dam basin

#### 2.2.4.2 토지피복

2002년부터 2009년까지 분석기간에 대한 토지피복 정보는 국가수자원관리종합정보 시스템으로부터 2005년도 토지피복자료를 활용하였다. 원격탐사자료를 기반으로 제작된 토지피복자료로는 1981년부터 1994년까지의 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 자료를 이용한 전 지구 1 km 토지피복자료(Hansen et al., 2000)와 Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 전 지구 250 m 토지피복자료를 제공하고 있다. 그러나 WAMIS 토지피복자료에 비해서 공간해상도가 상대적으로 낮기 때문에 상당한 차이를 보이고 있어서 본 연구에서는 WAMIS 자료를 이용하였다. 예를 들면, 용담 댐 유역의 경우 WAMIS 자료(공간해상도 1 km)에서는 약 0.32%가 수역으로 구성되어 있는데 AVHRR 자료(공간해상도 1 km)에서는 수역이 존재하지 않는 것으로 나타난다.

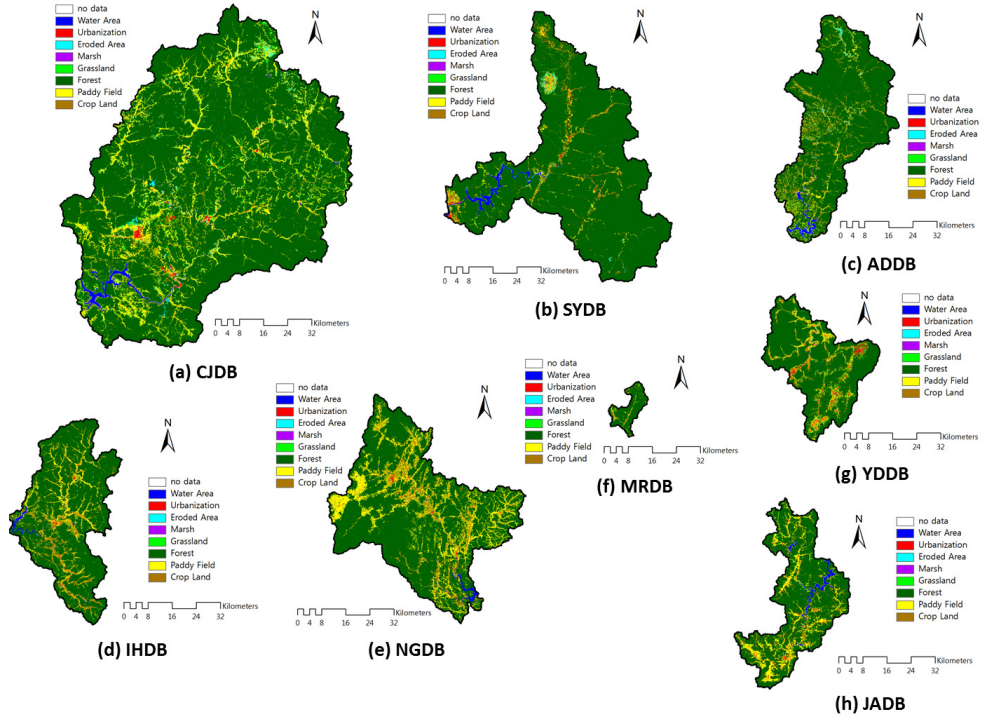


Figure 4 Land cover classification in the study basins

## 2.3 장기유출해석

### 2.3.1 CREST 모형

대상 유역에 대한 장기유출분석을 위하여 분포형 수문모형인 CREST 모형을 적용하였다. 미국 Oklahoma 대학과 NASA의 SERVIR(www.servir.net) 연구팀은 처음에 TRMM 3B42RT 강수량자료를 이용하여  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , 3시간 간격으로 전 지구의 실시간 유출분석을 목적으로 CREST 모형을 개발하였으나, 비교적 규모가 작은 단일 유역에 대한 유출해석에도 적용이 가능하다(Wang et al., 2011).

CREST 모형은 식생에 의한 차단을 비롯하여 지표하 3가지 토양층을 묘사하기 위한 4개 가상 저수지와 지표면 유출 및 지표하 유출을 모의하기 위한 2개의 선형 저수지로

구성되어 있다. 또한 강수로부터 유출과 침투를 분리하기 위하여 Zhao et al.(1980)이 제안했던 가변침투곡선(variable infiltration curve)을 이용하였다. CREST 모형에서 표현된 각 수문과정에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

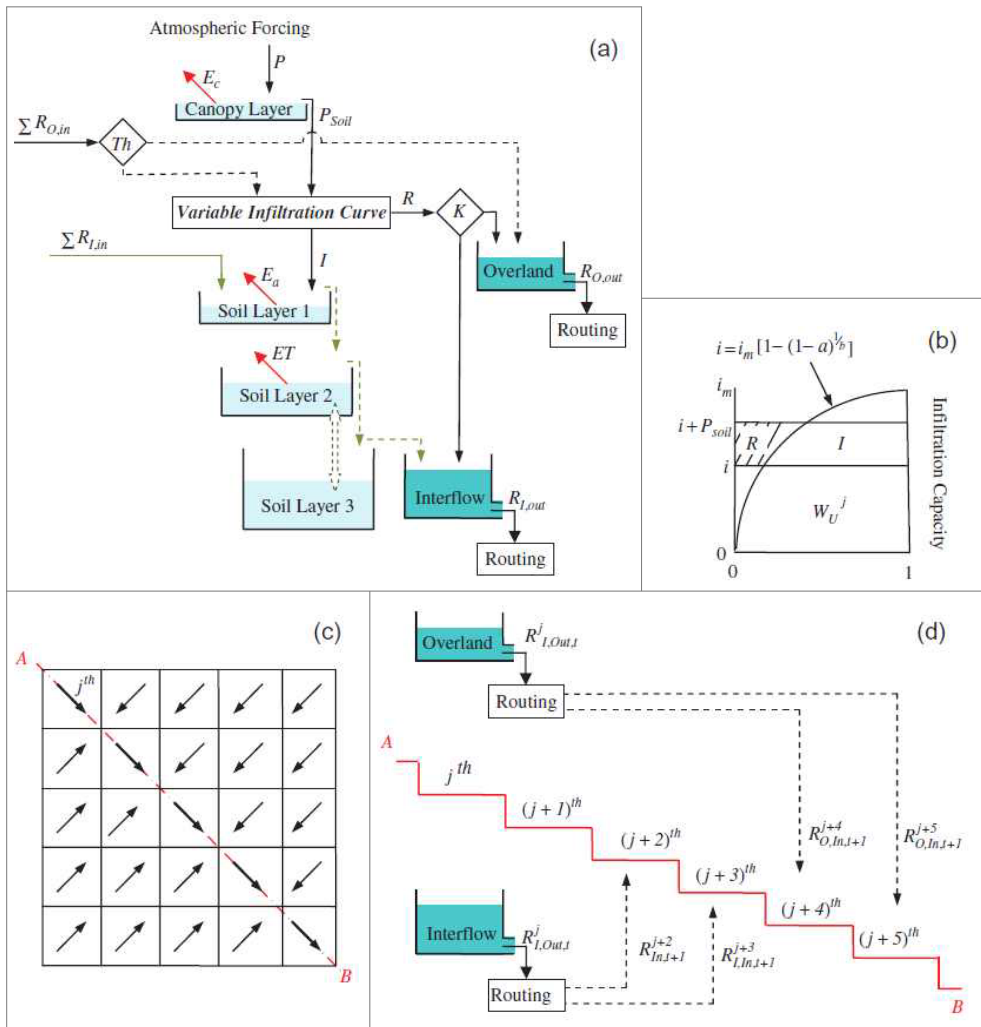


Figure 5 Hydrological processes in the CREST model (Wang et al., 2011)



### 2.3.1.1 차단

차단은 강수의 일부가 식생피복에 의해 손실되는 양으로 정의되며, CREST 모형에서는 이러한 차단현상을 표현하기 위하여 저수지 개념을 적용하였다. 피복층 저수지의 최대 저류용량은 다음과 같이 식생의 차단용량(canopy interception capacity,  $CIC$ )(단위:  $mm$ )으로 정의된다.

$$CIC = k_c \times d \times LAI \quad (2)$$

여기서,  $k_c$ 는 토지피복의 차단용적계수이며,  $d$ 는 피도(식물체 지상부가 지표를 차지하는 비율)를, 그리고  $LAI$ 는 엽면적지수(leaf area index,  $m^2/m^2$ )를 나타낸다. 관측자료나 보조자료를 통하여  $CIC$ 의 참값을 정확히 추정할 수 있을 경우  $k_c$ 는 1로 설정되며, 그 밖의 경우 모형 검·보정을 통하여 최적화된다. 저류지가 포화되면 저류지 용적을 초과한 강수는 지표면에 도달하게 된다.

$$P_{soil} = P - (CIC - CI) \quad (3)$$

여기서,  $P_{soil}$ 은 지표면에 도달된 강수량( $mm/hour$ )을,  $CI$ 는 식생에 의해 차단된 강수량( $mm$ )을 나타낸다.

### 2.3.1.2 침투

지표면에 도달한 강수량은 다시 초과 강수량과 침투수량으로 구분된다. 이 모형에서는 토양으로의 침투수량을 결정하기 위하여 미국 Washington 대학의 Variable Infiltration Capacity (VIC) 모형(Liang et al., 1996)에 적용되었던 가변침투곡선을 적용하고 있다.

$$i = i_m \left[ 1 - (1 - A)^{1/b_i} \right] \quad (4)$$

여기서,  $i$ 와  $i_m$ 은 각각 임의의 격자점에서의 침투용적과 최대 침투용적을( $mm$ ),  $A$ 는 단위격자의 면적( $km^2$ ), 그리고  $b_i$ 는 침투곡선의 지수를 나타낸다. CREST 모형은 또한 3개의 토양층으로 구분되어 있으며,  $i_m$ 은 다음과 같이 3개 토양층에서의 최대 저류용적( $W_m$ )의 함수로 정의된다.

$$i_m = W_m(1 + b_i) \quad (5)$$

$$W_m = W_{m1} + W_{m2} + W_{m3} \quad (6)$$

여기서,  $W_{m1}$ ,  $W_{m2}$ ,  $W_{m3}$ 은 각각 지표면으로부터 상부 토양층, 중간 토양층과 하부 토양층에서의 토양 공극률과 관련된 변수( $mm$ )이다. Eq.(4)는 다시 각 토양층의 저류수량의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = i_m \left[ 1 - \left( 1 - \frac{W}{W_m} \right)^{\frac{1}{1+b_i}} \right] \quad (7)$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (8)$$

여기서,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ 은 각 토양층에서의 저류수량( $mm$ )을 나타낸다. 그리고 침투 수량은 다음과 같이 계산된다.

$$I = \begin{cases} (W_m - W), & \text{if } i + P_{soil} \geq i_m \\ (W_m - W) + W_m \left[ 1 - \frac{i + P_{soil}}{i_m} \right]^{1+b_i}, & \text{if } i + P_{soil} < i_m \end{cases} \quad (9)$$

또한 각 토양층을 표현하기 위하여 저류지 개념을 이용하고 있다. 침투수는 상부 토양층에 해당하는 저류지가 포화될 때까지 유입되며, 그런 다음 중간층, 하부층 순으로 채워진다.



### 2.3.1.3 유출

다음과 같이 강수에서 차단과 침투에 의해 손실된 일부를 제외한 나머지를 유효 우량 또는 초과 강우량( $mm/hour$ )이라 하고, 이 초과 강우량( $R$ )에 의해 유출이 발생한다.

$$R = P_{soil} - I \quad (10)$$

초과 강우량( $R$ )은 다시 상부 토양층의 침투율과 지표면에 도달한 강우량( $P_{soil}$ )에 따라 지표면 유출( $R_O$ )( $mm/hour$ )과 중간 유출( $R_I$ )( $mm/hour$ )로 나뉜다.

$$R_I = \begin{cases} K \frac{R}{P_{soil}}, & \text{if } P_{soil} > K \\ R, & \text{if } P_{soil} \leq K \end{cases} \quad (11)$$

$$R_O = \begin{cases} R - R_I, & \text{if } P_{soil} > K \\ 0, & \text{if } P_{soil} \leq K \end{cases} \quad (12)$$

여기서,  $K$ 는 토양의 포화 투수계수와 관련된 변수이다.

### 2.3.1.4 증발산

실제 증발산량은 잠재증발산량에 의해 결정된다. 잠재증발산량은 지표로부터 수분이 무한대로 공급될 때의 증발산량을 의미하며, 풍속, 태양복사량 등 대기의 열역학적 상태에 따라 달라진다.

실제 증발산에 대한 계산은 식생피복층에서부터 시작하며, 이 저수지의 수분이 완전히 소진되면 다음 토양층으로부터 증발산이 이루어진다.

$$E_c = \begin{cases} E_p, & \text{if } CI > E_p \\ CI, & \text{if } CI \leq E_p \end{cases} \quad (13)$$

여기서,  $E_c$ 는 피복층 저수지로부터 증발산량에 의해 감소된 수분량( $mm/hour$ )을 의미한다.

다음으로 토양 상부층에서의 잠재증발량( $mm/hour$ )은 다음 식과 같이 정의한다.

$$E_{p1} = E_p - E_c \quad (14)$$

피복층 저수지로부터 증발산이 이루지는 과정에서,  $E_{p1}$ 는 초기에 영(0)이며, 피복층 저수지의 수분이 완전히 소진될 때  $E_p$ 가 된다. 피복층 저수지에서와 마찬가지로 토양 상부층에서의 증발율은 다음과 같이 정의된다.

$$E_{s1} = \begin{cases} E_{p1}, & \text{if } W_1 > E_{p1} \\ W_1, & \text{if } W_1 \leq E_{p1} \end{cases} \quad (15)$$

여기서,  $W_1$ 는 토양 상부층 저수지의 수심( $mm$ )이다. 토양 중간층 저수지에서의 잠재 증발량( $mm/hour$ )은 다음과 같다.

$$E_{p2} = (E_{p1} - E_{s1}) \sqrt{\frac{W_2}{W_{m2}}} \quad (16)$$

또한 토양 중간층에서의 실제 증발량( $mm/hour$ )은 다음과 같이 계산된다.

$$E_{s2} = \begin{cases} E_{p2}, & \text{if } W_2 > E_{p2} \\ W_2, & \text{if } W_2 \leq E_{p2} \end{cases} \quad (17)$$

여기서,  $W_2$ 는 토양 중간층 저수지의 수심( $mm$ )을 의미한다. 마지막으로 토양 하부층 저수지에서의 잠재증발량은 다음과 같이 계산된다.

$$E_{p3} = (E_{p2} - E_{s2}) \frac{W_3}{W_{m3}} \quad (18)$$



토양 하부층에서의 실제 증발량( $mm/hour$ )은 다음과 같이 계산된다.

$$E_{s3} = \begin{cases} E_{p3}, & \text{if } W_3 > E_{p3} \\ W_3, & \text{if } W_3 \leq E_{p3} \end{cases} \quad (19)$$

전체 증발산량( $mm/hour$ )은 다음 식과 같이 각 피복층 및 토양층에서 발생하는 증발산량의 총합으로 표현된다.

$$E_a = E_c + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} \quad (20)$$

증발산은 위에서 아래의 방향으로 발생되며, 증발산 작용에 의해 대기로 소멸된 수분은 이후 모형 내 물수지 계산에서 제외된다.

### 2.3.1.5 홍수 추적

CREST 모형에서는 지표면 및 지표하 흐름을 모의하기 위하여 다음과 같은 2가지 선형 저수지를 가정한다.

$$S_{O,t+1} = S_{O,t} + R_{O,t} \quad (21)$$

$$S_{I,t+1} = S_{I,t} + R_{I,t} \quad (22)$$

여기서, 아래첨자  $t$ 는 시간 간격을,  $S_O$ ,  $S_I$ 는 각각 지표면 및 지표하 저수지의 저류량( $mm$ )을 나타낸다. 또, 각 저수지에서의 유출량( $mm/hour$ )은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$R_{O,out} = k_O \cdot S_O \quad (23)$$

$$R_{I,out} = k_I \cdot S_I \quad (24)$$

여기서,  $k_o$ 와  $k_I$ 는 각각 지표면 및 지표하 저수지의 유출계수를 의미하며, 유역 면적이나 경사 등 유역 특성과 계산 격자의 크기에 관한 함수이다.

지표면 저수지 및 지표하 저수지로부터의 유출량을 결정하기 위한 집중시간은 다음과 같이 정의된다.

$$T^j = \frac{l^j}{K_X \sqrt{S^j}} \quad (25)$$

여기서, 위첨자  $j$ 는 공간적 위치를 나타내는 지표이며,  $T^j$ 는  $j$ 번째 격자로부터 다음 하류 격자까지의 집중시간(hour)을 나타낸다.  $l^j$ ,  $S^j$ 는 각각  $j$ 번째 격자에서 하류 격자까지의 거리와 경사를 나타낸다.  $K_X$ 는 유출속도계수로서, 지표하 흐름 계산에서는 토양의 포화투수계수를, 지표면 흐름에서는 지표면 조도계수를 이용한다. 또한 하도 흐름 계산에서는 하도 유속계수로서, 조도계수 및 수리반경으로 결정된다.

강수량, 증발산량, 지표면 및 지표하 유출량 등이 결정되면 다음과 같이 각 계산 격자에서 물수지가 계산된다.

$$\frac{dSto}{dt} = P - E_a + \sum R_{O,in} - R_{O,out} + \sum R_{I,in} - R_{I,out} \quad (26)$$

여기서,  $Sto$ 는 계산 격자 내 전체 저류량(mm)으로서, 식생피복, 3개의 토양층 그리고 2개의 선형 저수지의 저류량을 포함하고 있다.

임의의 계산 격자는 그 격자 내의 강우-유출과정과 상류 격자로부터의 유입의 영향을 받고 있기 때문에 다음과 같은 3가지 사항이 추가적으로 고려되어야 한다. 첫 번째로 상류 격자로부터의 지표면 유입량은 다음 식과 같이 해당 격자에서 직접 발생한 강수량으로 가정하여, 지표면에 도달한 강수량( $P_{soil}$ )은 다음과 같이 수정된다.

$$\hat{P}_{soil} = P_{soil} + \sum R_{O,in} \quad (27)$$



두 번째로 상류 격자로부터 유입된 지표하 유출량은 해당 격자에서의 토양수분을 증가시킨다. 따라서 침투량( $I$ )은 다음과 같이 수정된다.

$$\hat{I} = I + \sum R_{L,in} \quad (28)$$

마지막으로 상류 격자로부터 유입된 지표면 유출량은 해당 격자에서의 지표면 저수지 수심을 증가시키며, 지표면 저수지의 저류량( $S_O$ )는 다음과 같이 수정된다.

$$\hat{S}_{O,t+1} = S_{O,t} + R_{O,t} + \sum R_{O,in} \quad (29)$$

### 2.3.2 모형 매개변수 보정

CREST 모형은 전역 최적화 방법 중 하나인 Adaptive Random Search(ARS) 방법 (Brooks, 1958)을 이용한 모형 매개변수 보정 모듈을 제공하고 있다. Table 2는 본 연구에서 모형 보정에 사용된 CREST 모형 매개변수와 각 매개변수의 변화범위를 나타내고 있다. 최적화를 위한 목적함수로는 다음 식과 같이 Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSCE)와 Percent Bias(PBIAS)가 적용되었다.

$$NSCE = 1 - \frac{\sum (Q_s - Q_o)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (30)$$

$$PBIAS = \frac{\sum Q_s - \sum Q_o}{\sum Q_o} \times 100 (\%) \quad (31)$$

여기서,  $Q_s$ 와  $Q_o$ 는 각각 유출량 모의치와 관측치를 의미한다. NSCE는 음(-)의 무한대로부터 1까지의 범위를 가지며, NSCE가 1일 때 최적의 결과를 나타낸다. PBIAS는 모의치와 관측치 사이의 계통오차(systematic error)를 평가하는 척도로서 양(+)의 값을 가질 때 과소 추정을, 음(-)의 값을 가질 때 과대 추정을 의미한다.

**Table 2** Parameters requiring optimization in the CREST model (Wang et al., 2011)

Parameter	Description	Range
coeM	Slope flow speed multiplier	1.0-150.0
expM	Slope flow speed exponent	0.2-0.9
River	Multiplier used to convert slope flow speed to channel flow speed	0.1-3.0
Under	Multiplier used to convert slope flow speed to interflow speed	0.01-1.0
LeakO	Overland reservoir discharge multiplier	0.1-1.0
LeakI	Interflow reservoir discharge multiplier	0.01-0.5
Th	Flow accumulation needed for a cell to be marked as a channel cell	10.0-100.0
GM	Change in DEM used for calculating the slope when the DEM for the downstream cell is higher than the upstream or the downstream cell is a nodata/outside region cell	0.5-2.0
pWm	Maximum soil water capacity of three soil layers	10.0-500.0
pB	Exponent of the variable infiltration curve	0.05-1.5
pIM	Impervious area ratio	0.0-100.0
pKE	Multiplier to convert between input PET and local actual ET	0.1-3.0
pFc	Soil saturated hydraulic conductivity	1.0-10.0
iWU	Initial value of soil water	1.0-100.0
iSO	Initial value of overland reservoir	1.0-10.0
iSU	Initial value of interflow reservoir	1.0-50.0
AreaC	Multiplier that modifies the area of grid cells	0.5-1.5

## 2.4 매개변수 지역화

### 2.4.1 유역특성인자 추정

본 연구에서는 CREST 모형 매개변수와의 상관성 분석을 위하여 유역면적, 평균표고, 평균경사, 최원유로연장, 주하천길이, 형상계수, 세장비, 불투수면적, 산림면적, 논경작지, 경지면적 등의 유역특성인자를 조사하였다.

국가수자원관리종합정보시스템에서는 각 유역특성인자의 정의와 특성인자를 추정하는 방법을 제시하고 있으며, 다음과 같이 정리할 수 있다.

유역면적(drainage area)은 유역의 평면상 면적을 말하며 보통 유역분수계로 이루어지는 폐곡선 내의 평면적을 의미한다. 평균표고(mean elevation)는 DEM 자료로부터 각 격자점의 표고값을 합산하여 격자의 수로 나눈 값이며, 평균경사(mean slope)는 DEM으



로부터 계산된 경사도를 평균표고와 마찬가지로 평균하여 백분율로 나타낸 것이다. 최원유로연장(longest path)은 하천 또는 흐름의 방향을 따라서 유역 출구점으로부터 유역 분수계까지 거리 중 가장 먼 거리를 의미하며, 주하천길이(river length)는 도면 상으로 나타난 하천을 따라서 유역 출구점으로부터 본류 하천의 시작점까지를 의미한다.

유역의 형상계수(shape factor,  $R_s$ )는 그 유역의 면적과 동일한 면적을 갖는 원의 직경( $D_c$ )에 대한 주하천길이( $L_r$ )의 비로 정의된다.

$$R_s = \frac{L_r}{D_c} \quad (32)$$

세장비(elongation ratio,  $R_e$ )는 최원유로연장( $L_b$ )에 대하여 유역면적과 동일한 면적을 갖는 원의 직경( $D_c$ )의 비로 정의된다.

$$R_e = \frac{D_c}{L_b} \quad (33)$$

Table 3은 8개 대상 유역에 대하여 추정된 유역특성인자를 정리한 것이다. 제시된 표는 분포형 수문모형 입력자료와 동일한 공간해상도로 계산된 것으로서 WAMIS나 다른 문헌들에서 제시된 값과 차이가 있다.

**Table 3** Physiographic attributes of the eight basins

Basin	Drainage Area (km <sup>2</sup> )	Mean Elevation (m)	Mean Slope (%)	Longest Path (km)	River Length (km)	Shape Factor	Elongation Ratio	Impervious Area (%)	Forest Area (%)	Paddy Field (%)	Crop Land (%)
CJDB	6651.4	615.6	32.4	300.0	232.6	2.528	0.307	1.7	83.1	10.4	1.6
SYDB	2783.5	643.2	33.3	164.1	142.1	2.387	0.363	2.3	90.8	2.7	2.8
ADDB	1590.3	562.5	29.1	164.1	109.2	2.428	0.274	1.3	85.7	5.9	6.1
IHDB	1363.6	400.1	26.5	99.1	121.5	2.916	0.421	2.3	82.0	10.1	5.5
NGDB	2288.2	430.8	27.1	111.8	86.7	1.605	0.483	0.9	75.2	16.8	7.0
MRDB	103.1	549.8	38.7	28.6	20.2	1.762	0.401	0.0	92.0	4.0	4.0
YDDB	931.5	514.8	27.4	64.6	60.6	1.761	0.533	2.1	80.2	9.2	5.9
JADB	1024.9	274.4	23.4	96.6	77.5	2.146	0.374	4.5	72.2	12.3	8.7

## 2.4.2 다중선형회귀분석

회귀분석의 응용에서는 하나의 독립변수를 가지는 단순회귀분석모형보다는 다중선형 회귀분석(multiple linear regression analysis)을 사용한다. 이는 실제 응용에서는 하나의 독립변수로 설명되는 경우가 거의 없고, 대부분의 종속변수는 둘 이상의 독립변수들과 관계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서도 유역특성인자와 분포형 수문모형 매개변수 사이의 관계를 파악하기 위하여 다중선형회귀분석을 수행하였다.

다중선형회귀분석은 종속변수가 둘 이상일 경우로 정의하고 있지만, 실제 응용에서는 독립변수가 하나일 경우가 있다. 그러나 이러한 경우에도 작은 영향을 미칠 수 있는 나머지 독립변수들을 고려하는 것이 그렇지 않은 경우에 비해서 오차를 줄일 수 있으며, 유역특성 인자가 모형 매개변수에 미치는 영향을 수치적으로 설명할 수 있을 뿐만 아니라 그 상대적인 영향력을 비교할 수 있다는 점에서 매우 유용하다고 할 수 있다(Cho, 2004).

계측유역에서의 종속변수인  $i$  번째 수문모형 매개변수( $\psi_i, i = 1, 2, \dots, p$ )와 이를 결정짓는 독립변수 즉, 유역특성인자( $\phi_j, j = 1, 2, \dots, q$ ) 사이의 관계는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_i = \beta_{i,0} + \beta_{i,1}\phi_1 + \beta_{i,2}\phi_2 + \dots + \beta_{i,j}\phi_j + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (34)$$

여기서,  $\beta_{i,0}$ 은  $\psi_i$ 의 절편,  $\beta_{i,j}$ 는  $\psi_i$ 와  $\phi_j$  사이의 기울기로 각각의 유역특성인자( $\phi_j$ )가 고정되어 있을 경우  $\psi_i$ 에 미치는 영향을 나타낸다.  $\epsilon_i$ 는 오차항으로서 회귀직선을 중심으로부터 흩어진 정도를 나타내며, 서로 독립이라 가정한다.

종속변수에 영향을 미치는 독립변수가 많은 경우 모든 독립변수를 고려하여 회귀식을 산정하게 되면 실제로 종속변수에 영향을 미치는 않는 독립변수들이 선택될 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 종속변수와 각각의 독립변수 사이의 영향력을 계산하고 이를 근거로 독립변수를 선택하게 된다. 일반적으로 독립변수를 선택하는 방법은 크게 전진선택법(forward selection), 후진제거법(backward elimination), 그리고 단계선택법(stepwise selection) 등이 있다. 전진선택법은 독립변수를 하나씩 추가해나가면서 회귀식의 적합도

가 향상되면 변수를 선택하고 그렇지 않으면 다른 변수를 고려하는 방법으로 최적 회귀식을 산정한다. 후진제거법은 모든 독립변수를 포함한 회귀식으로부터 영향력이 가장 작은 변수부터 차례로 제거해나가면서 최적 회귀식을 산정한다. 전진선택법과 후진제거법의 경우 한번 선택된 변수나 한번 제외된 변수를 다시 추가되거나 제외시키지 않기 때문에, 어떤 독립변수가 다른 독립변수들에 의해서 영향력이 변화하는 것을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 단계선택법은 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 독립변수의 추가와 제거를 적절히 조합하여 최적 회귀식을 추정한다. 따라서, 본 연구에서는 유역특성인자의 선택을 위하여 단계선택법을 이용하였다.

추정된 회귀식은 다시 타당성을 조사하여야 한다. 회귀분석에서 타당성 조사는 주로 결정계수(coefficient of determination)가 사용된다. 결정계수는 종속변수(모형 매개변수)가 가지는 총 변동량과 이러한 변동량 중에서 독립변수(유역특성인자)로서 설명된 변동량의 비로 정의되며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (35)$$

여기서,

$$SST = \sum_{i=1}^n (\psi_i - \bar{\psi})^2 \quad (36)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{\psi}_i - \bar{\psi})^2 \quad (37)$$

여기서,  $SST$ 는 모형 매개변수가 가지는 총 변동량을 나타내는 제곱합이며,  $SSR$ 은 모형 매개변수의 총 변동량 중에서 유역특성인자들로 설명된 변동량을 나타낸다.

다중선형회귀분석에서는 독립변수를 추가적으로 포함시키면 종속변수의 변동성을 더욱 잘 설명할 수 있기 때문에 설명력을 높이려면 무수한 많은 독립변수를 추가하면 된다. 그러나 독립변수가 많아지면 각 변수 사이의 관계를 명확하게 설명하기가 어려워진다.

따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 다음 식과 같이 수정 결정계수( $R_{adj}^2$ )를 이용하여 모형 선택의 기준으로 사용하게 된다.

$$R_{adj}^2 = \left( R^2 - \frac{k}{n-1} \right) \left( \frac{n-1}{n-k-1} \right) \quad (38)$$

여기서,  $n$ 은 사례의 개수이며,  $k$ 는 독립변수의 개수를 의미한다.

### 3. 모형 적용 및 검증

#### 3.1 유출모의 및 매개변수 최적화

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 분포형 수문모형인 CREST 모형을 이용하여 2002년부터 2009년까지 대상 유역에 대한 장기유출분석을 수행하였다. 또한 충주댐 유역(CJDB), 소양강댐 유역(SYDB), 안동댐 유역(ADDB), 임하댐 유역(IHDB), 남강댐 유역(NGDB), 용담댐 유역(YDDB) 등 6개 유역에 대하여 모형 매개변수를 최적화한 다음 다중 선형회귀식을 추정하고, 검증을 위하여 이 회귀식으로부터 계산된 모형 매개변수를 이용하여 밀양강댐 유역(MRDB)과 주암댐 유역(JADB)에 대하여 유출모의를 수행하였다. 모의의 안정화를 위하여 전체 분석기간 중 2002년부터 2003년을 준비기간으로 설정하였으며, 2004년부터 2009년까지에 대해서 Eq.(30)과 Eq.(31)에서 제시된 바와 같이 유출분석결과와 댐 유입량 관측자료 사이의 목적함수를 검토하면서 최적화를 수행하였다.

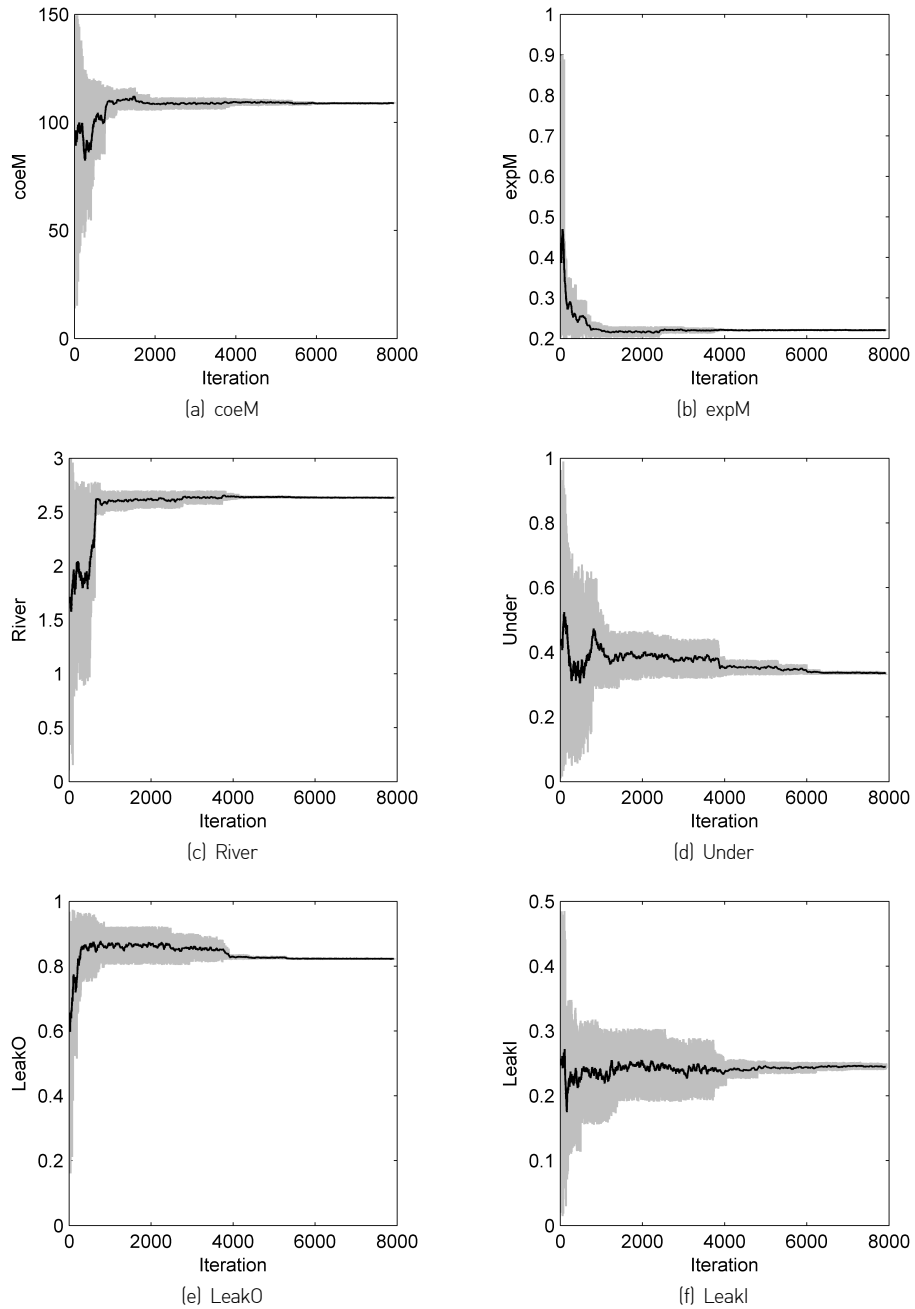
Figure 6은 충주댐 유역에 대하여 17개 모형 매개변수 보정을 통한 수렴과정을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이  $GM$ ,  $iWU$ ,  $iSO$ ,  $iSU$  등 4가지 매개변수를 제외하고는 모두 비교적 잘 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한 4가지 매개변수의 경우도 보정과정 동안 일정한 범위 내에서 변화하고 있으며 그 변화범위가 크지 않고, 목적함수를 만족하기 때문에 더 이상의 보정과정을 반복 수행하지 않았다. Figure 7은 각 유역에 대한 최적화된 매개변수를 보여주고 있다.



### 3.2 매개변수 지역화식 추정

모형 매개변수 보정과정을 통하여 추정된 최적 매개변수와 Table 3에서 제시한 유역면적, 평균고도, 평균경사, 최원유로연장, 하천연장, 형상계수, 세장비, 불투수면적률, 산림면적, 논면적, 밭면적 등의 유역특성인자를 이용하여 단순선형회귀분석을 수행하였다.

Figure 9는 모형 매개변수와 유역특성인자 사이의 선형관계식으로 95% 신뢰구간을 만족하는 경우를 나타낸 것이다. 유역면적은  $LeakO$ ,  $pB$  등의 모형 매개변수에 영향을 주고 있으며, 평균고도는  $pWm$ , 평균경사는  $coeM$ , 최원유로연장은  $expM$ ,  $pB$ , 하천연장은  $expM$ ,  $LeakO$ ,  $pB$ , 세장비는  $pIM$ , 산림면적은  $coeM$ ,  $Th$ ,  $GM$ , 그리고 논면적은  $Th$ 에 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 유역면적, 평균고도, 평균경사, 하천연장, 세장비, 산림면적, 논면적 등의 유역특성인자와 각 특성인자와 관련이 있는 모형 매개변수를 이용하여 다중선형회귀분석을 수행하였다.



**Figure 6** Changes of the CREST model parameters during optimization in the Chungju Dam basin (Grey lines are the model parameters and black lines are the 50-iteration averages)

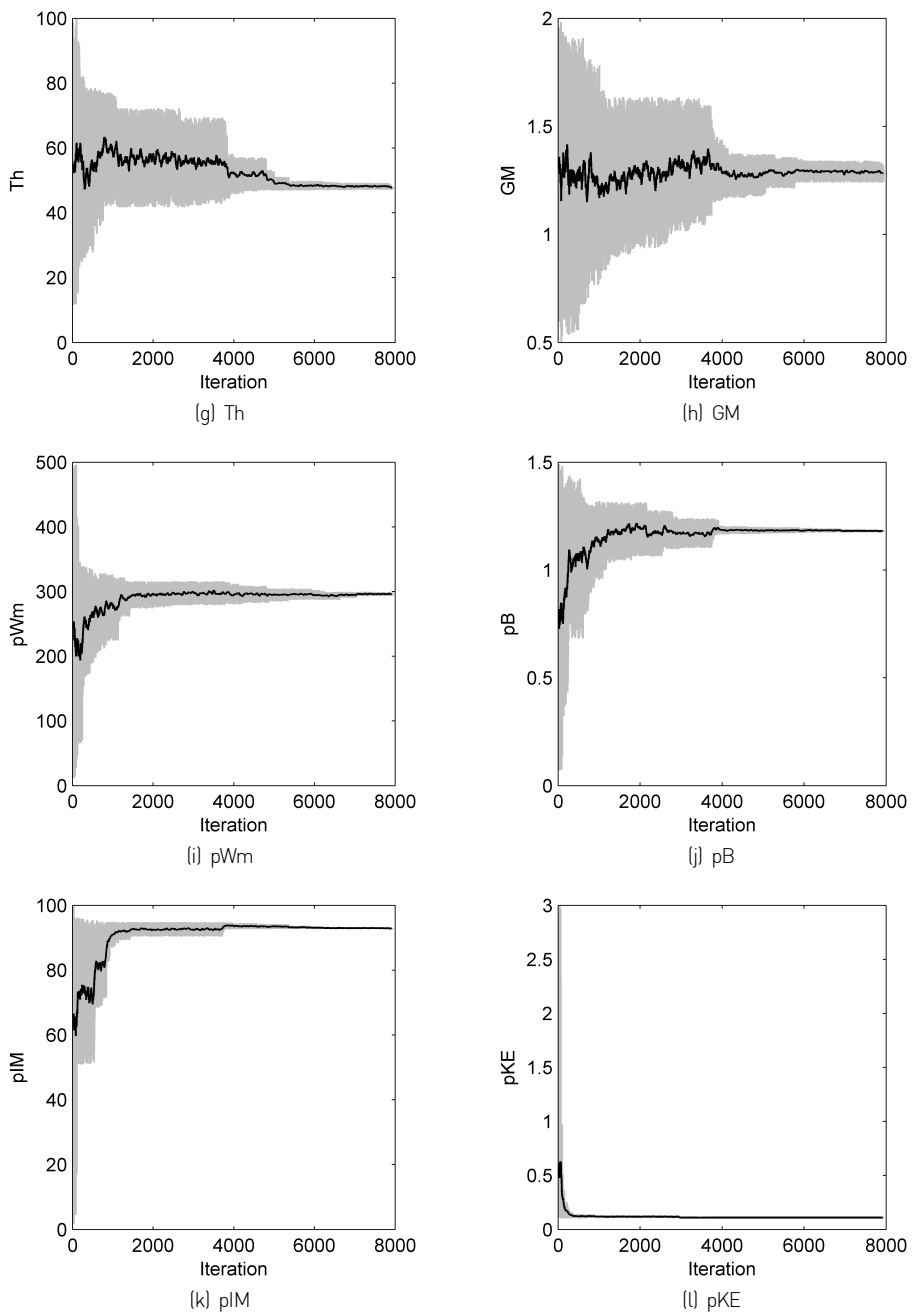


Figure 6 Continued

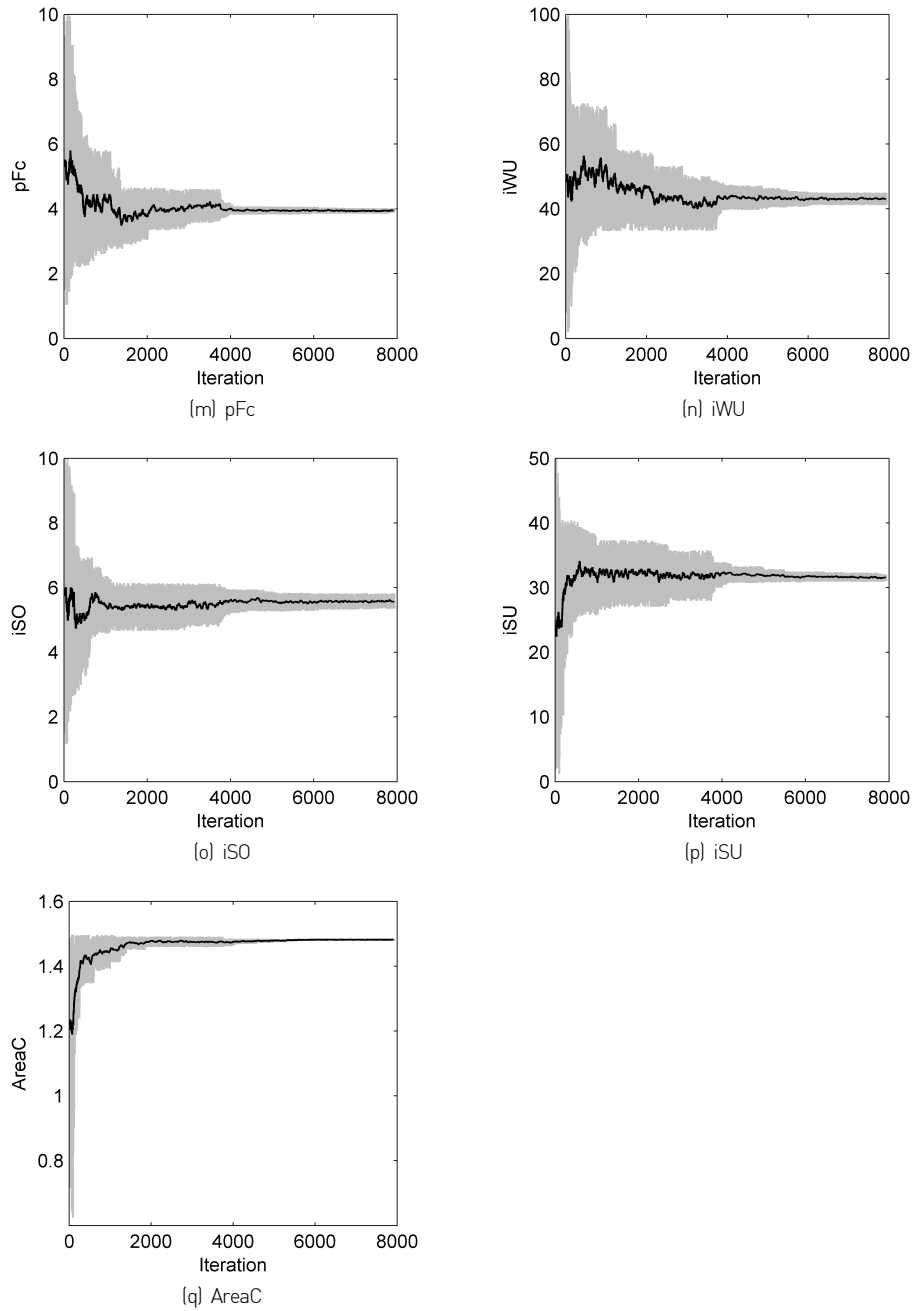
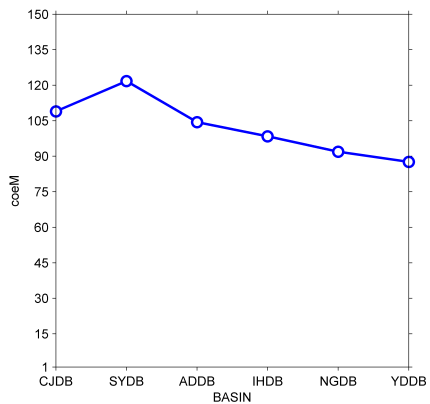
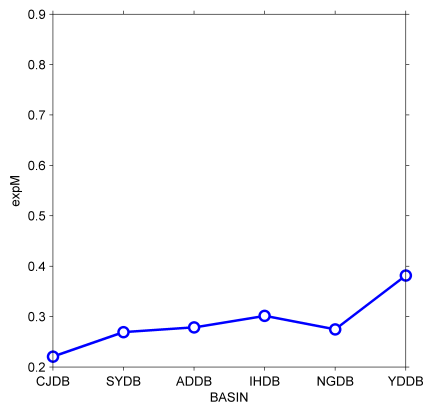


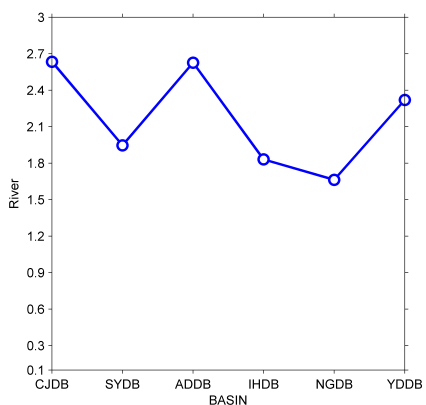
Figure 6 Continued



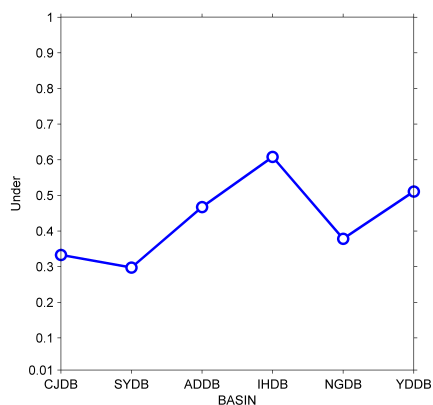
(a) coeM



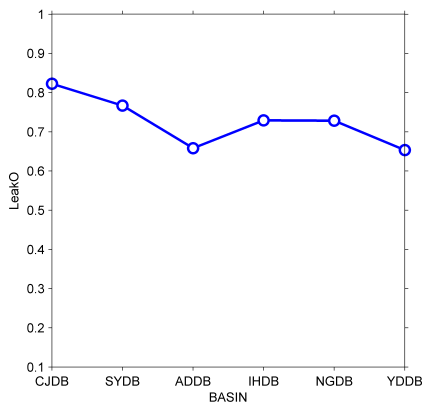
(b) expM



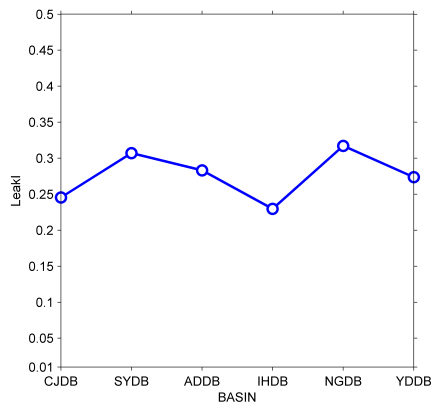
(c) River



(d) Under



(e) LeakO



(f) LeakI

Figure 7 Optimized model parameters in the study basins

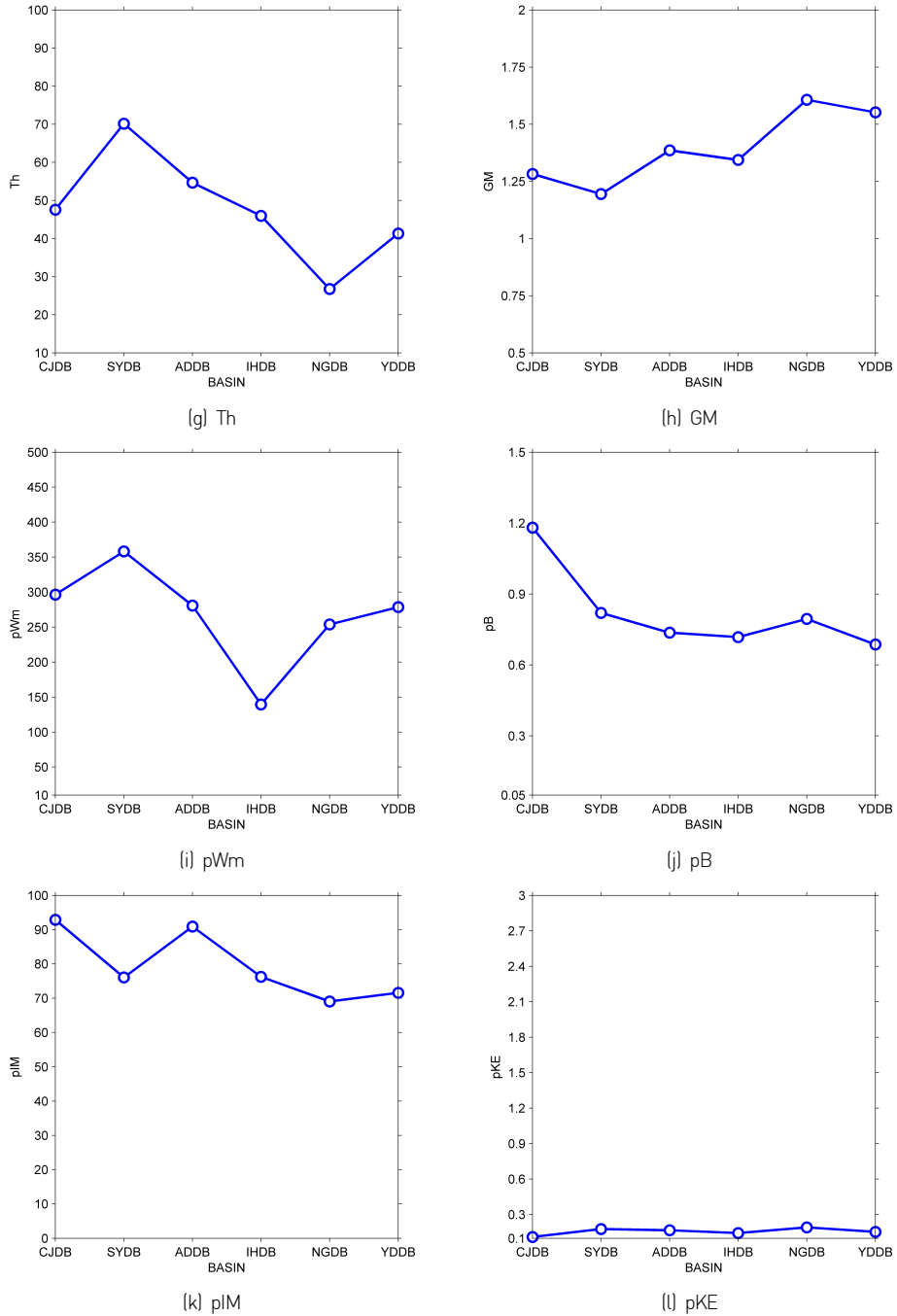
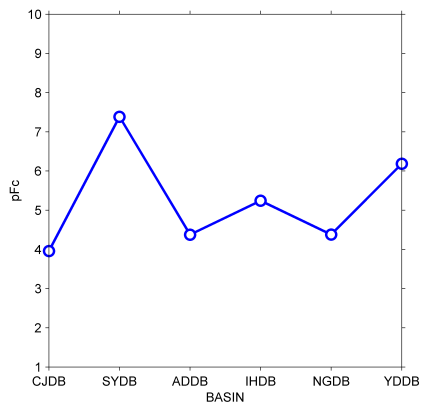
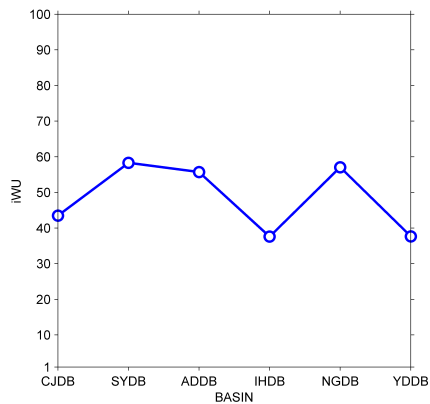


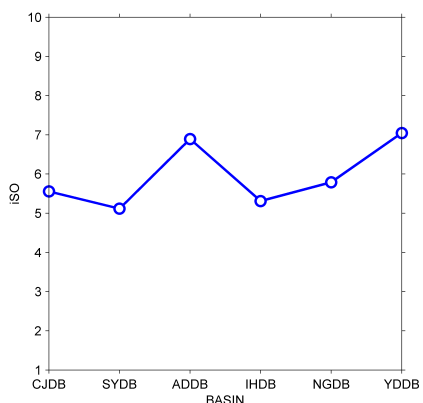
Figure 7 Continued



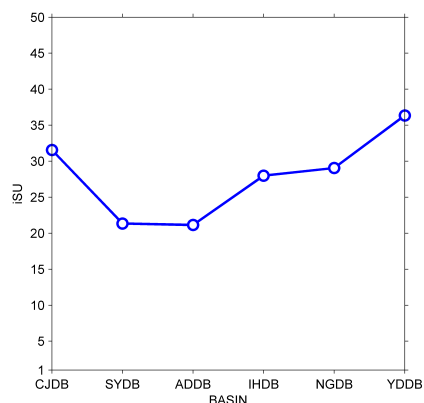
(m) pFc



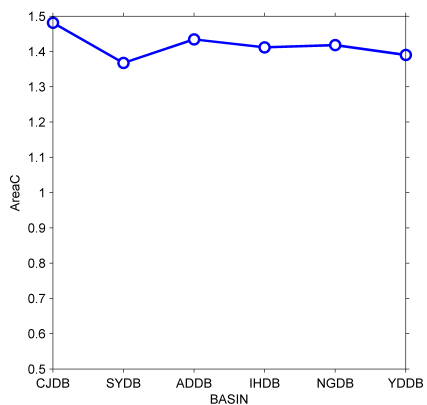
(n) iWU



(o) iSO

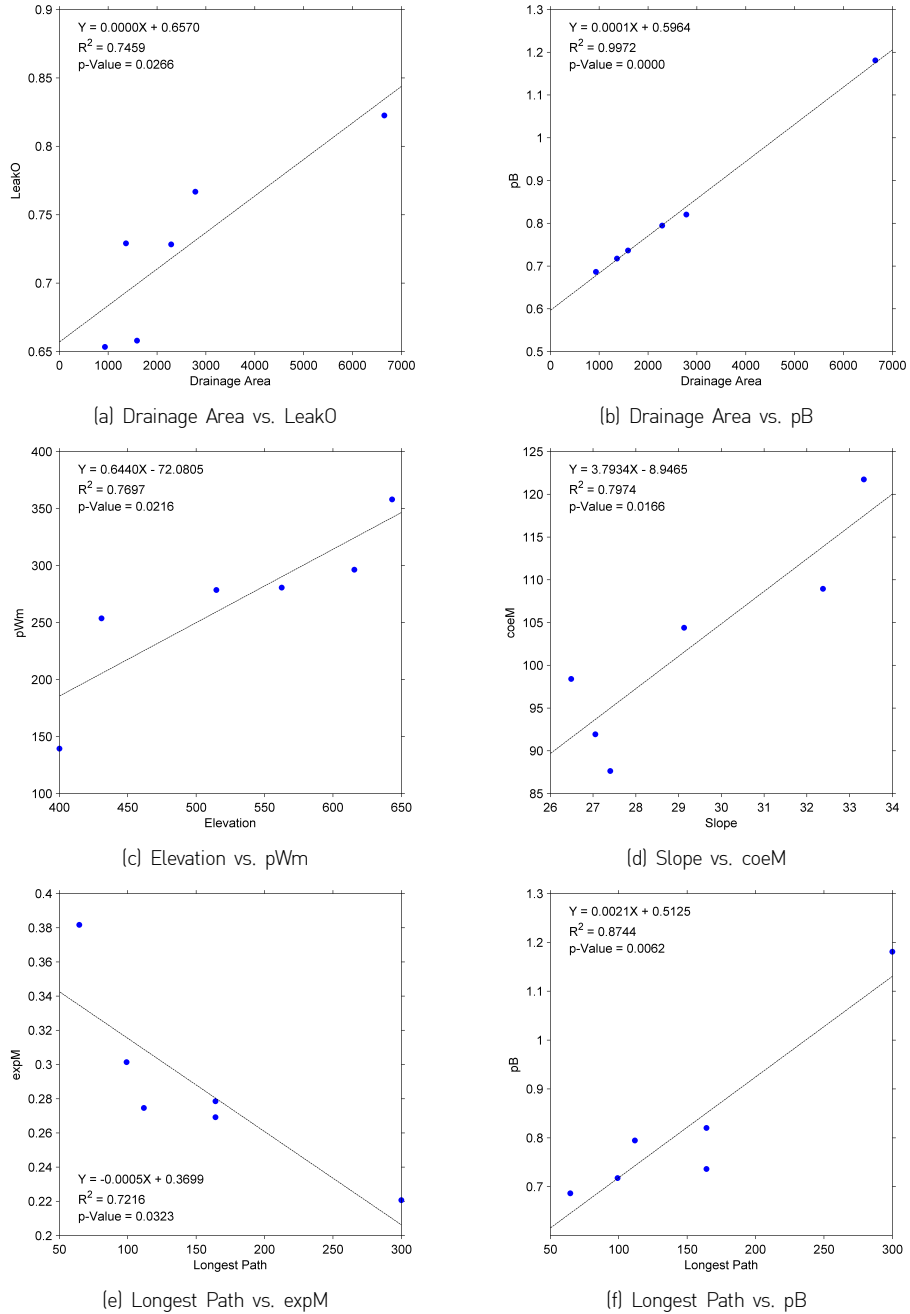


(p) iSU

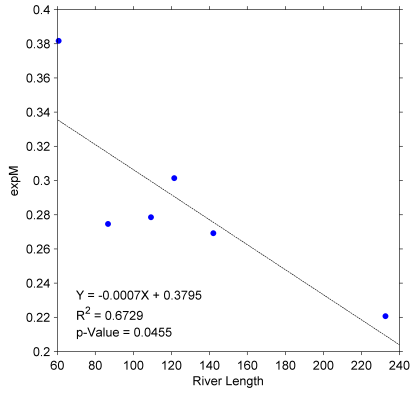


(q) AreaC

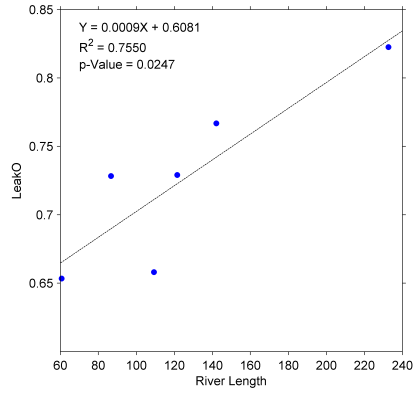
Figure 7 Continued



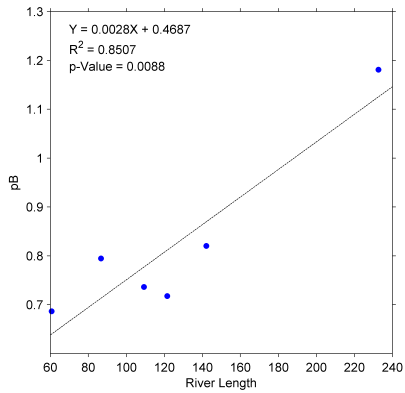
**Figure 8** Scatter plots and regression lines between model parameters and physiographic attributes of the study basins



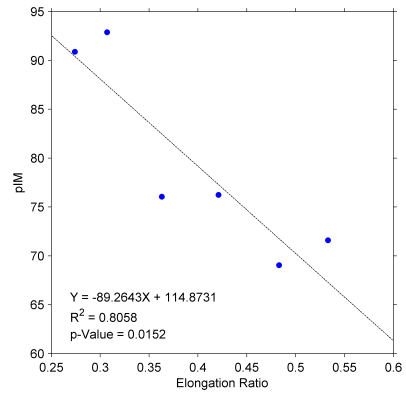
(g) River Length vs. expM



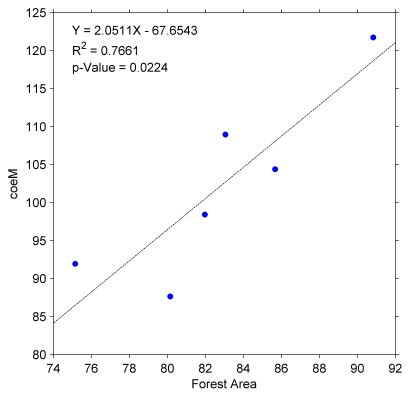
(h) River Length vs. LeakO



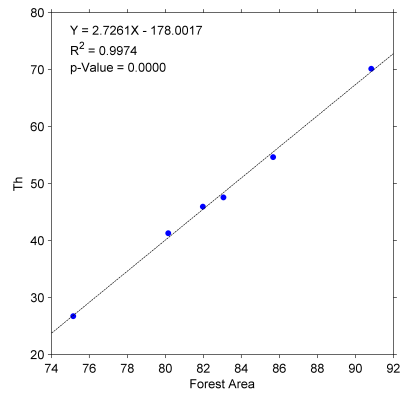
(i) River Length vs. pB



(j) Elongation Ratio vs. pM



(k) Forest Area vs. coeM



(l) Forest Area vs. Th

Figure 8 Continued

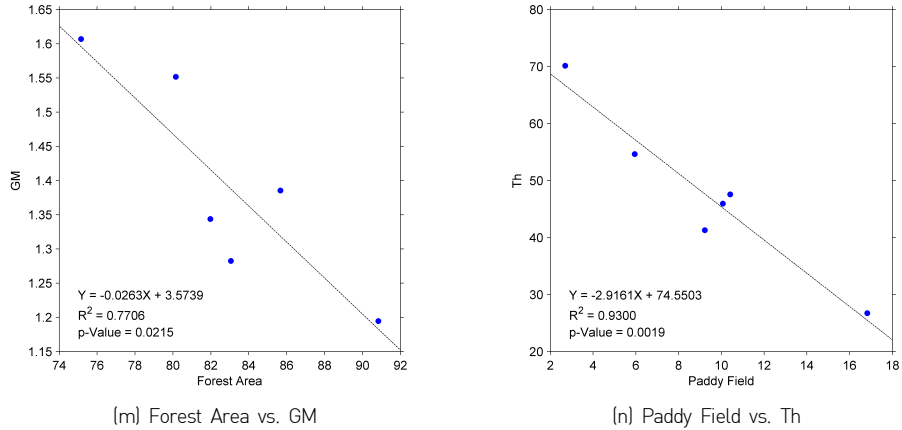


Figure 8 Continued

Eq. (39)~Eq. (55)는 다중선형회귀분석을 통하여 제시된 유역특성인자와 CREST 모형 매개변수 사이의 관계식이다. 전체 17개 매개변수 중 관계식에서 제시된 8개 매개변수를 제외한 나머지 9개 매개변수들에서는 유역특성인자와의 선형적 관계를 발견할 수 없었다. 따라서 이러한 매개변수들에 대해서는 6개 유역에 대한 평균값으로 대체하였다. 그러나 모형 매개변수는 모두 유역에서의 유출량에 직간접적으로 영향을 미치고 있기 때문에 유역특성과 전혀 무관할 수 없으며, 향후 대상 유역을 추가하거나 다른 매개변수와 관련이 있는 유역특성인자가 추가되어야 할 것이다.

$$coeM = -56.6501 + 2.2989S + 1.1048LC_6 \quad (39)$$

$$expM = 0.3732 - 0.0005L_b - 0.0002L_r \quad (40)$$

$$River = 2.1703 \quad (41)$$

$$Under = 0.4325 \quad (42)$$

$$LeakO = 0.6271 + 0.0005L_r \quad (43)$$

$$LeakI = 0.2760 \quad (44)$$



$$Th = -158.7041 + 2.5195LC_6 - 0.2385LC_7 \quad (45)$$

$$GM = 3.5739 + 0.0263LC_6 \quad (46)$$

$$pWm = -72.0805 + 0.6440H \quad (47)$$

$$pB = 0.6033 + 0.0001A_d \quad (48)$$

$$pIM = 114.8731 - 89.2643R_e \quad (49)$$

$$pKE = 0.1576 \quad (50)$$

$$pFc = 5.2542 \quad (51)$$

$$iWU = 48.2910 \quad (52)$$

$$iSO = 5.9519 \quad (53)$$

$$iSU = 27.9100 \quad (54)$$

$$AreaC = 1.4173 \quad (55)$$

여기서,  $A_d$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>),  $H$ 는 유역평균표고(m),  $S$ 는 유역평균경사(%),  $L_b$ 는 최원유로연장(km),  $L_r$ 은 하천연장(km),  $R_e$ 는 세장비,  $LC_6$ 은 산림면적(%),  $LC_7$ 은 논면적(%)을 의미한다.

Table 4는 앞에서 제시된 회귀식에 대한 결정계수와 수정 결정계수를 나타내고 있다. 앞에서도 언급한 바와 같이 수정 결정계수는 회귀식을 추정 타당성을 뒷받침할 수 있는 근거로 사용되지만 절대적인 기준은 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 표에서 제시된 수정 결정계수는 0.6555 이상으로 비교적 높은 것으로 판단되며, 본 연구에서 제시하고 있는 유역특성인자와 모형 매개변수 사이의 회귀관계식은 어느 정도 타당한 것으로 생각된다.

**Table 4** Original and adjusted coefficients of determination for regression

Parameter	R squared	Adjusted R squared	Selected Attribute
coeM	0.8959	0.8699	$S, LC_6$
expM	0.7244	0.6555	$L_b, L_r$
Leak0	0.7783	0.7229	$L_r$
Th	0.9979	0.9974	$LC_6, LC_7$
GM	0.7706	0.7132	$LC_6$
pWm	0.7697	0.7122	$H$
pB	0.9974	0.9968	$A_d$
pIM	0.8058	0.7573	$R_e$

### 3.3 지역화식 적용 및 검증

앞 절에서 제시된 관계식을 이용하여 충주댐 유역(CJDB), 소양강댐 유역(SYDB), 안동댐 유역(ADDB), 임하댐 유역(IHDB), 남강댐 유역(NGDB), 용담댐 유역(YDDB) 등 6개 유역에 대한 유역특성인자들로부터 모형 매개변수를 추정하였다. 추정된 매개변수는 다시 CREST 모형에 적용하여 회귀식 산정에 사용된 6개 유역(Figure 9)뿐만 아니라 검증을 위하여 밀양강댐 유역(MRDB), 주암댐 유역(JADB)에서의 유출량을 모의하는데 활용하였다(Figure 10). 분석결과에의 검증을 위하여 Eq.(30)과 Eq.(31)에서 제시된 NSCE와 PBIAS를 이용하였으며, 이 외에도 Eq.(47)에서 보는 바와 같이 Singh et al.(2005)이 제안한 Root Mean Squared Error - Observation Standard Deviation Ratio(RSR)과 Eq.(48)의 Pearson's Correlation Coefficient(PCC)를 이용하였다.

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum(Q_o - Q_s)^2}}{\sqrt{\sum(Q_o - \bar{Q}_s)^2}} \quad (47)$$

$$PCC = \frac{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2} \sqrt{\sum(Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \quad (48)$$



여기서,  $Q_o$ 는 관측유량을,  $Q_s$ 은 모의유량을 나타낸다. RSR의 경우 영(0)일 때 최적의 성능을 의미하며 양(+)의 값을 가진다. PCC는 (-)1에서 (+)1까지의 값을 가지며, 1일 때 최적의 성능을 타나냄을 의미한다.

Moriasi et al.(2007)은 선행연구들에서 제시된 장기유출 분석결과를 토대로 Table 5에서 보는 바와 같이 보다 객관적인 수문모형 평가기준을 마련하여 제안하였다. 본 연구에서는 표에서 제시된 기준을 토대로 모의성능을 평가하였다.

**Table 5** General performance ratings for streamflow simulation in a monthly time-step (Moriasi et al., 2007)

Performance Rating	NSCE	PBIAS	RSR
Very Good	$0.75 < NSCE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10\%$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
Good	$0.65 < NSCE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15\%$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactory	$0.50 < NSCE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25\%$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
Unsatisfactory	$NSCE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25\%$	$RSR > 0.70$

Table 6은 충주댐 유역(CJDB), 소양강댐 유역(SYDB), 안동댐 유역(ADDB), 임하댐 유역(IHDB), 남강댐 유역(NGDB), 용담댐 유역(YDDB) 등 6개 유역에서의 유출모의결과에 대한 평가지수를 나타내고 있다. 분석결과, 충주댐 유역의 경우 NSCE는 약 0.67로 “Good”, PBIAS는 약 29.83%로 “Unsatisfactory”, RSR은 약 0.58로 “Good”으로 나타나 PBIAS를 제외하면 나머지 평가지수에서 모두 우수한 결과를 보여주었다. 소양강댐 유역의 경우는 NSCE가 약 0.62로 “Satisfactory”, PBIAS가 약 40.34%로 “Unsatisfactory”, RSR이 약 0.62로 “Satisfactory”로 나타나 충주댐 유역과 마찬가지로 PBIAS를 제외한 나머지 평가지수는 비교적 만족스러운 결과를 보여주었다. 그 밖에도 안동댐 유역에서는 NSCE가 “Very Good”, PBIAS가 “Unsatisfactory”, RSR이 “Very Good”으로 나타났으며, 임하댐 유역은 NSCE가 “Good”, PBIAS가 “Very Good”, RSR이 “Good”으로 나타났다. 남강댐 유역의 경우에는 NSCE가 “Good”, PBIAS가 “Unsatisfactory”, RSR이 “Good”으로 역시 PBIAS를 제외하면 비교적 우수한 결과를 보여주었다. 마지막으로 용담댐 유역의 경우는 NSCE, PBIAS, RSR에서 모두 “Unsatisfactory”를 나타내 가장 낮은 모의성능을 보여주었다.

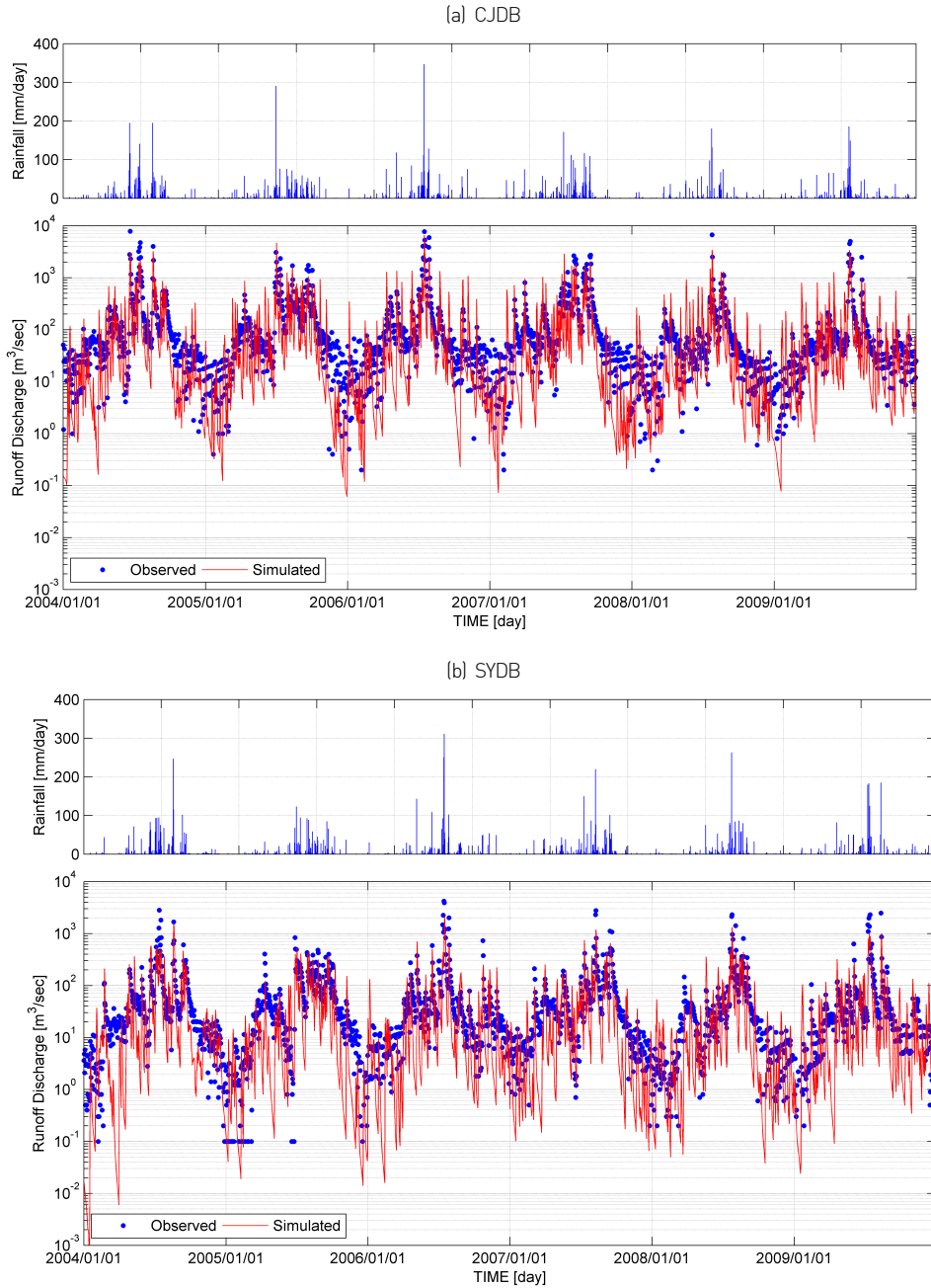


Figure 9 Comparison between the simulated and observed runoff discharges using model parameters estimated from regression equations in the sample basins

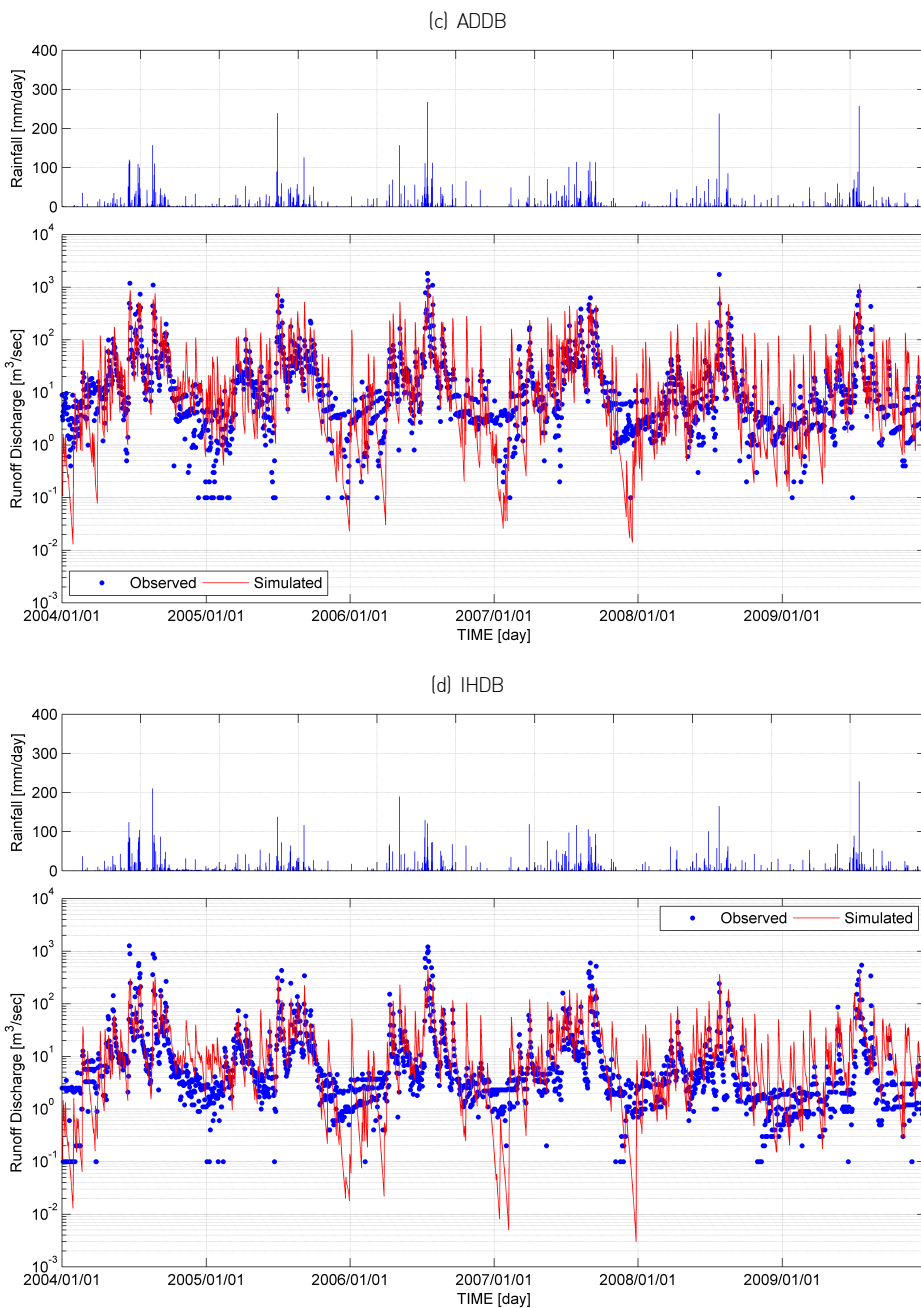


Figure 9 Continued

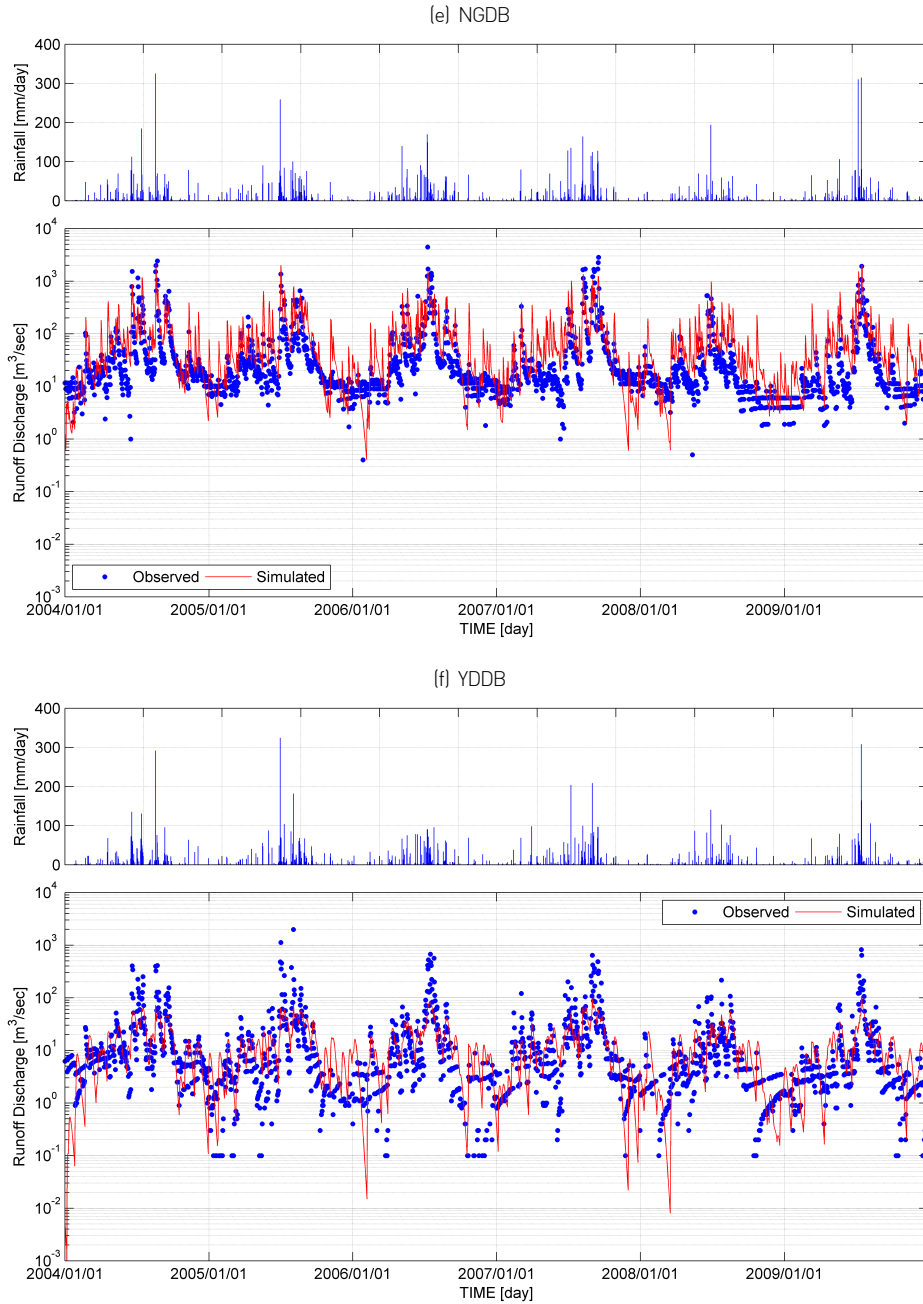
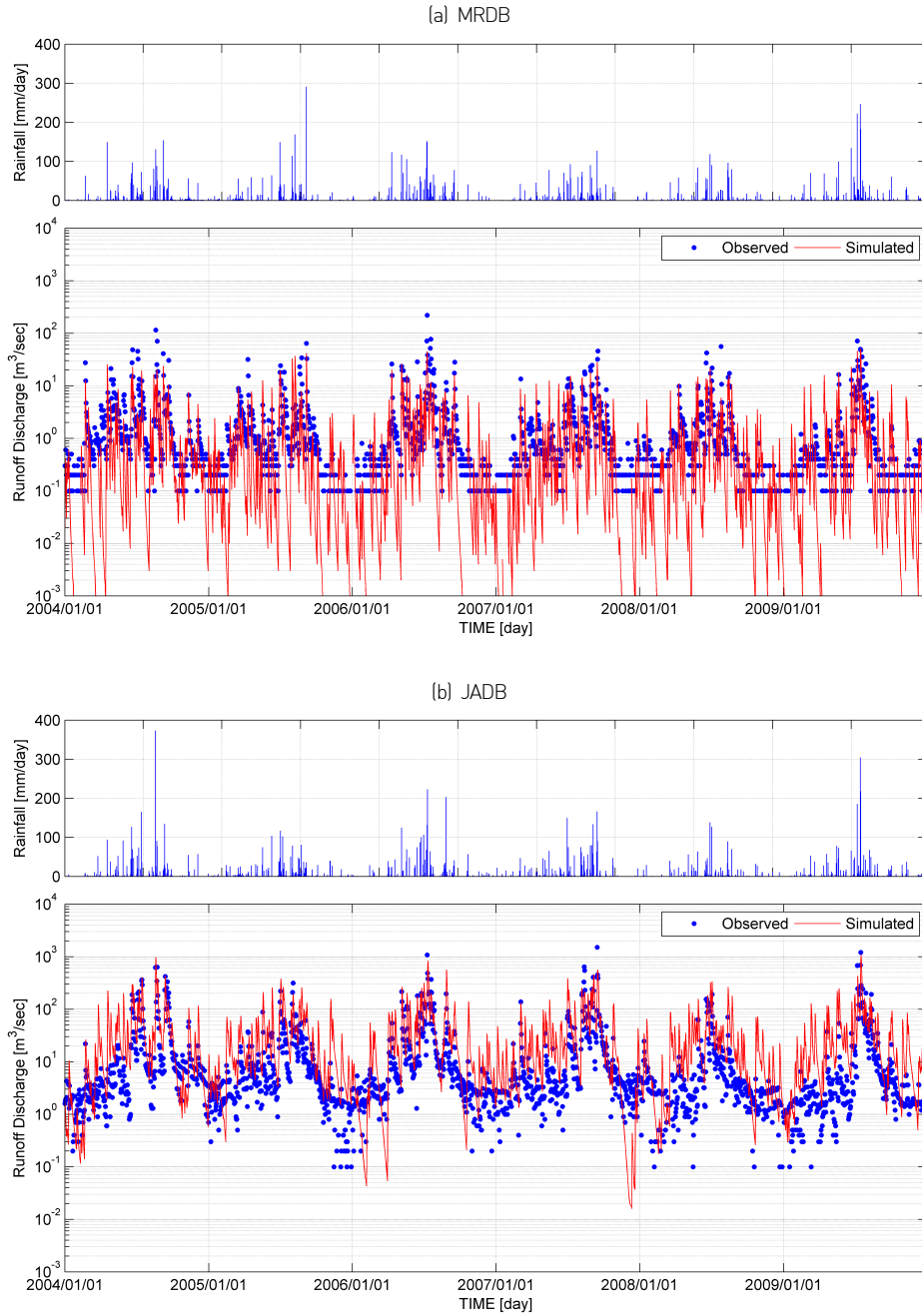


Figure 9 Continued

**Table 6** Performance statistics in a monthly time-step

Basin	NSCE	PBIAS	RSR	PCC
CJDB	0.6692	29.8257	0.5751	0.9471
SYDB	0.6155	40.3421	0.6201	0.9498
ADDB	0.8687	-29.8735	0.3623	0.9493
IHDB	0.7128	-1.4921	0.5359	0.9095
NGDB	0.7375	-40.4192	0.5123	0.8878
YDDB	0.4510	31.1503	0.7409	0.8821

Table 7은 매개변수 지역화식의 검증을 위하여 회귀분석에 사용되지 않은 밀양강댐 유역(MRDB)와 주암댐 유역(JADB)에서의 유출모의결과에 대한 평가지수를 나타내고 있다. 밀양강댐 유역에서는 NSCE가 약 0.53으로 “Satisfactory”, PBIAS가 약 39.90%로 “Unsatisfactory”, RSR이 약 0.69로 “Satisfactory”로 나타났다. 주암댐 유역의 경우 NSCE가 약 0.68로 “Good”, PBIAS가 약 (-)75.44%로 “Unsatisfactory”, RSR이 약 0.56으로 “Good”으로 나타났다. 회귀분석에 적용된 6개 유역에 대한 유출모의결과와 마찬가지로 밀양강댐 유역과 주암댐 유역에서도 역시 PBIAS에서 상당한 차이를 보였으며, PBIAS를 제외한 나머지 평가지수들에서는 만족스러운 결과를 보여주었다. 괄호 내에 제시된 값들은 매개변수 지역화를 하지 않고 각 매개변수의 중앙값을 이용하였을 경우에 대한 평가지수를 보여주고 있으며, 상관계수를 제외한 나머지 평가지수들에서 상당히 개선된 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.



**Figure 10** Comparison between the simulated and observed runoff discharges for validation of the regression equations

**Table 7** Performance statistics in a monthly time-step

Basin	NSCE	PBIAS	RSR	PCC
MRDB	0.5283 (-0.0312)	39.8910 (82.9846)	0.6868 (1.0155)	0.8979 (0.9124)
JADB	0.6829 (-15.3397)	-75.4435 (-481.2475)	0.5631 (4.0422)	0.9318 (0.9365)

※ The values in the parentheses indicate the performance statistics for the simulation of the CREST model using the medians of the model parameters without parameter regionalization

이상의 결과를 종합해보면, 용담댐 유역을 제외한 나머지 유역들에서 제시된 결과는 PBIAS를 제외한 나머지 평가지수에서 모두 비교적 만족스러운 결과를 보여주었으며, 특히 PCC의 경우 매우 높은 결과를 보여주고 있어 모의유량이 관측유량의 변동성을 잘 묘사하는 것을 알 수 있었다. 그러나 PBIAS에서 상당한 차이를 보이고 있어 이에 대한 보완이 필요할 것으로 보인다. PBIAS에서 나타난 차이는 모의유량과 관측유량 사이의 편의(bias)를 평가하는 지수로서, 본 연구에서 제시된 유역특성인자들 중 물수지(water balance) 관련 매개변수와의 설명력이 높지 않아 발생한 것으로 생각되며, 향후 지속적인 연구를 통하여 이와 관련된 유역특성인자를 추가함으로써 어느 정도 개선될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이러한 편의는 TRMM 3B42v6과 FEWSNET PET 등 원격탐사자료를 이용함으로써 발생될 수 있다. 이는 2015년에 발사되는 Global Precipitation Measurement (GPM) 핵심위성의 자료가 가용해지고, 새로운 강수 추정 알고리즘을 이용한 보다 정확한 강수자료를 활용한다면 훨씬 향상된 결과를 기대할 수 있을 것이다.

## 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 유역특성인자와 분포형 수문모형인 CREST 모형의 매개변수 사이의 연관성을 이용하여 미계측 유역에서의 장기유출모의를 위한 수문모형 매개변수 지역화를 수행하였다. 또한 강수량, 기온, 습도, 풍속, 일사량 등 기상자료가 없거나 부족한 지역에 대해서도 유출모의가 가능하도록 TRMM 3B42v6, FEWSNET PET, SRTM DEM 등 원격 탐사자료를 연구에 활용하였으며, 본 연구를 통하여 제시된 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 충주댐 유역, 소양강댐 유역, 안동댐 유역, 임하댐 유역, 남강댐 유역, 밀양강댐 유역, 용담댐 유역, 주암댐 유역 등 8개 대상 유역에 대해서 TRMM 3B42v6, FEWSNET PET, 그리고 SRTM DEM을 이용한 CREST 모형을 구축하였다. 또한 ARS 전역최적화기법을 이용하여 대상 유역에서의 최적 매개변수를 추정하였다.
- (2) DEM과 WAMIS GIS자료를 기반으로 8개 대상 유역에 대한 유역면적, 평균표고, 평균경사, 최원유로연장, 하천연장, 형상계수, 세장비, 불투수면적률, 산림면적률, 논면적률, 밭면적률 등 11가지 유역특성인자를 추정하였다.
- (3) 충주댐 유역, 소양강댐 유역, 안동댐 유역, 임하댐 유역, 남강댐 유역, 용담댐 유역 등 6개 댐 유역에 대하여 추정된 11가지 유역특성인자와 CREST 모형의 17개 매개변수와의 단순선형회귀분석을 통하여 상관성을 분석하고, 95% 신뢰구간을 만족하는 유역특성인자와 모형 매개변수를 선택하고 다중선형회귀분석을 이용하여 관계식을 추정하고 타당성 조사를 수행하였다.
- (4) 유역특성인자와 추정된 관계식을 이용하여 전체 대상 유역에 대한 모형 매개변수를 추정하고 장기유출모의를 수행하였으며, 모의결과는 댐 유입량 자료와 비교검토하였다.
- (5) 회귀분석에 적용된 6개 유역 즉, 계측유역인 충주댐 유역, 소양강댐 유역, 안동댐 유역, 임하댐 유역, 남강댐 유역, 용담댐 유역 등의 유출모의결과는 대부분 PBIAS가 상당히 크게 나타났으나, 용담댐 유역을 제외하고는 NSCE, RSR, 그리고 PCC에서 모두 만족스러운 결과를 보여주었다.
- (6) 제시된 모의결과는 대체로 관측유량의 변동성을 비교적 잘 묘사하고는 있으나,



언급한 바와 같이 PBIAS에서 상당한 차이를 보이고 있어 이에 대한 보완이 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서 제시된 결과로 보면 원격탐사자료를 활용한 장기유출분석뿐만 아니라 유역특성인자와 모형 매개변수 사이의 상관성을 이용한 매개변수 지역화 방법은 어느 정도 활용 가능성이 있음을 보여주고 있다. 그러나 앞에서도 언급한 바와 같이 여전히 모의결과에서 보여주는 편차는 비교적 크며, 이는 지속적인 연구를 통하여 대상 유역을 확장, 가용한 관측자료를 추가하여 전체 매개변수를 설명할 수 있는 유역특성인자를 추정하는 등의 방법으로 제거되어야 한다. 현재에는 장기간에 따른 유출량 관측자료가 구축되어 있는 유역의 개수가 상당히 부족한 실정이며, 향후 보다 장기간의 관측자료가 구축된다면 더욱 개선된 매개변수 지역화가 가능할 것으로 생각된다. 또한 GPM 핵심위성의 자료를 활용하거나 새로운 강수 추정 알고리즘을 이용하여 보다 정확한 강수자료를 활용한다면 향후 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 2013년도 국토교통부 “해외건설 추진계획”에 따르면 2000년대 중반 이후 우리나라 기업들의 적극적인 해외진출과 정부의 지원 등으로 해외건설 수주가 지속적으로 상승 추세를 보이고 있으며, 특히 Engineering News-Record (ENR) 분석결과 우리나라의 해외건설시장 점유율이 2003년도 12위(3.9%)에서 2011년도에는 7위(5.7%)로 대폭 향상되었다고 한다. 또한 향후 해외건설시장은 고유가에 기반한 중동 플랜트(plant) 건설과 개발도상국가들의 인프라(infrastructure), 주택건설 등으로 안정적으로 성장할 것으로 예상되고 이와 함께 우리 기업들의 해외 진출기회는 지속될 것으로 전망하고 있다. 따라서 향후 원격탐사자료를 활용한 유출해석과 관련된 연구나 수문모형 매개변수 지역화와 관련된 연구를 통하여 지상관측자료가 부족한 개발도상국가로 진출하고자 하는 수자원 관련 기관이나 건설기업 등에 기초자료를 제공해줄 수 있을 것으로 기대된다.

**APPENDIX**

**1. Comparison of the area-averaged daily precipitation data from between TRMM 3B42v6 and the grounded records**

**A1.1 정성적 평가**

TRMM 3B42v6 강수자료의 정성적 평가를 위하여 Eq.(A1.1)~Eq.(A1.4)과 같이 Frequency Bias(FBS), Probability of Detection(POD), False Alarm Ratio(FAR), Heidke Skill Score(HSS) 등 6개 평가지수를 이용하여 분석을 수행하였다.

**Table A1.1** Contingency table for comparison of satellite-based precipitation with gauged measurements

	Gauge $\geq$ 1 mm/day	Gauge $<$ 1 mm/day
Satellite $\geq$ 1 mm/day	<i>a</i>	<i>b</i>
Satellite $<$ 1 mm/day	<i>c</i>	<i>d</i>

$$FBS = (a + b) / (a + c) \tag{A1.1}$$

$$POD = a / (a + c) \tag{A1.2}$$

$$FAR = b / (a + b) \tag{A1.3}$$

$$HSS = 2(ad - bc) / \{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)\} \tag{A1.4}$$

**A1.2 정량적 평가**

TRMM 3B42v6 강수자료의 정량적 평가를 위해서는 Eq.(A1.5)~Eq.(A1.8)에서 제시된 것과 같이 Mean Absolute Error(MAE), Mean Error(ME), Bias(BIAS), Efficiency (EFF) 등의 평가지수를 이용하여 분석을 수행하였다.



$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - G_i| \quad (A1.5)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i) \quad (A1.6)$$

$$BIAS = \sum_{i=1}^n S_i / \sum_{i=1}^n G_i \quad (A1.7)$$

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \quad (A1.8)$$

여기서,  $S_i$ 와  $G_i$ 는 각각  $i$ 번째 일에 대한 TRMM 3B42v6 강수량과 지상관측 강수량을 나타내며,  $n$ 은 전체 분석기간(일)을 나타낸다.

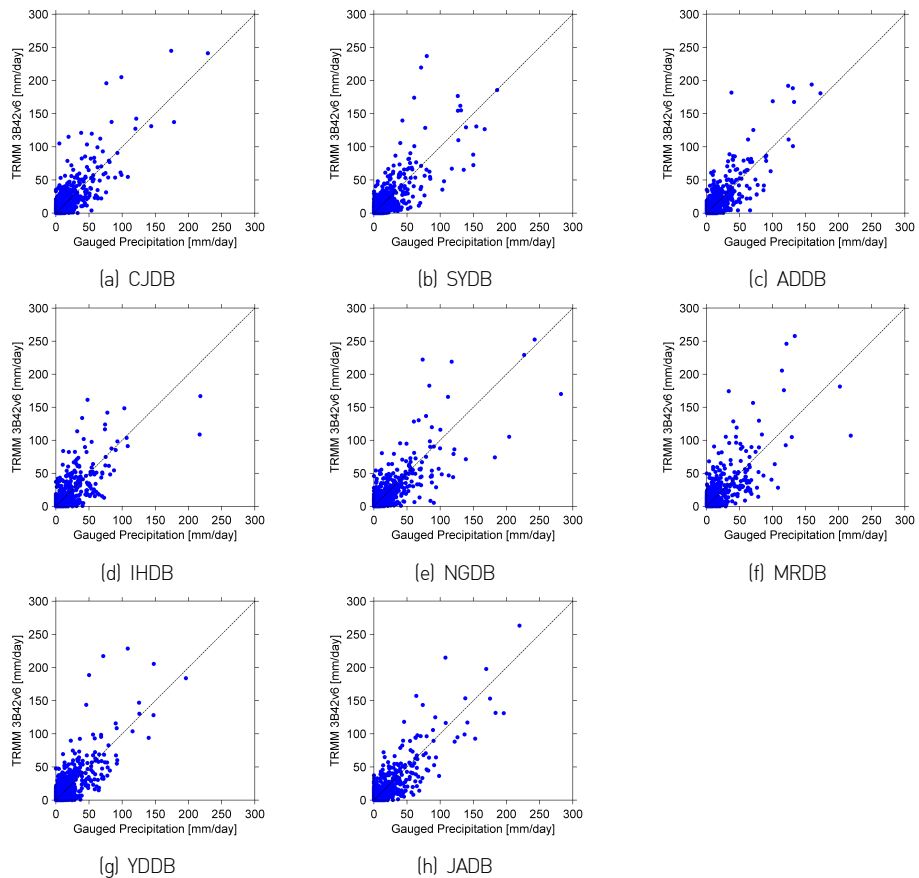
각 대상 유역에 대한 분석결과는 Table A1.2와 Table A1.3에 나타내었으며, Figure A1.1은 TRMM 3B42v6와 지상관측자료로부터 계산된 유역면적 평균강수량을 비교한 그림이다.

**Table A1.2** Scores of the qualitative performance of the TRMM 3B42v6 precipitation at daily steps from 2002 to 2009

	FBS	POD	FAR	HSS
CJDB	0.8684	0.6570	0.2434	0.6036
SYDB	0.8421	0.5977	0.2902	0.5322
ADDB	0.9247	0.6466	0.3007	0.5682
IHDB	0.8913	0.6277	0.2957	0.5591
NGDB	0.9761	0.7145	0.2680	0.6355
MRDB	1.0000	0.7297	0.2703	0.6423
YDDB	1.0756	0.7138	0.3363	0.5995
JADB	0.8618	0.6326	0.2659	0.5703

**Table A1.3** Scores of the quantitative performance of the TRMM 3B42v6 precipitation at daily steps from 2002 to 2009

	MAE	ME	BIAS	EFF
CJDB	2.5797	0.2453	1.0643	0.6132
SYDB	2.6984	-0.1520	0.9620	0.5915
ADDB	2.4542	0.1246	1.0348	0.6136
IHDB	2.6151	-0.0226	0.9936	0.5380
NGDB	2.8147	0.2327	1.0570	0.5917
MRDB	2.8023	-0.1483	0.9672	0.6684
YDDB	2.8842	0.5076	1.1448	0.4278
JADB	2.9299	0.3112	1.0779	0.5402



**Figure A1.1** Comparison of the daily precipitation from between the grounded gauges and TRMM 3B42v6 from 2002 to 2009

**REFERENCES**

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and M. Smith, M., 1998: *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN92-5-104219-5.
- Bardossy, A., 2007: Calibration of hydrological model parameters for ungaged catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 703-710.
- Besaw, L.E., Rizzo, D.M., Bierman, R.P., and W.R. Hackett, 2010: Advances in ungaged streamflow prediction using artificial neural networks. *J. Hydrol.*, 286, 27-37.
- Beven, K. and J. Freer, 2001: Equifinality, data assimilation, and data uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *J. Hydrol.*, 249, 11-29.
- Brooks, S.H., 1958: A discussion of random methods for seeking maxima. *Oper. Res.*, 6, 244-254.
- Cho, B.H., 2004: *A study on regionalization of long-term runoff model parameters*. M.S. Thesis, Sejong University, Korea, 86 p.
- Gupta, H.V. and S. Sorooshian, 1998: Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resour. Res.*, 34(4), 751-763.
- Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J.R.G., and R. Sohlberg, 2000: Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier. *Int. J. Remote Sens.*, 21, 1331-1365.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., and D.B. Wolff, 2007: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeo.*, 8, 38-55.
- Kang, M.G., Lee, J.H., and K.W. Park, 2013: Parameter regionalization of a Tank model for simulating runoff from ungaged watersheds. *J. Korea Water Resour. As.*, 46(5), 519-530.
- Kay, A.L., Jones, D.A., Crooks, S.M., Kjeldsen, T.R., and C.F. Fung, 2007: An investigation of site-similarity approaches to generalisation of a rainfallrunoff model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 500-515.
- Kim, J.P., 2013: Application of multi-satellite precipitation estimates for daily runoff simulation of the watersheds in South Korea, Ph.D. Dissertation, Kyungpook National University, Korea, 140 p.
- Kuczera, G. and M. Mroczkowski, 1998: Assessment of hydrologic parameters uncertainty and the worth of data. *Water Resour. Res.*, 34(6), 1481-1489.
- Lee, B.J., Jung, I.W., and D.H. Bae, 2009: Parameter regionalization of semi-distributed runoff model using multivariate statistical analysis. *J. Korea Water Resour. As.*, 42(2), 149-160.
- Lee, S.H. and S.U. Kang, 2007: A parameter regionalization study of a modified Tank model using characteristic factors of watersheds. *KSCE J. Civ. Eng.*, 27(4B), 379-385.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., and E.F. Wood, 1996: One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model. *J. Geophys. Res.*, 101(D16), 21403-21422.

- Madsen, H., 2003: Parameter estimation in distributed hydrological catchment modeling using automatic calibration with multiple objectives, *Adv. Water Resour.*, **26**, 205-216.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and T.L. Veith, 2007: Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transaction of the ASABE*, **50**(3), 885-900.
- Perrin, C., Oudin, L., Andreassian, V., Rojas-Serna, C., Michel, C., and T. Mathevet, 2007: Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. *Hydrolog. Sci. J.*, **52**, 131-151.
- Singh, J.H., Knapp, V., Arnold, G., and M. Demissie, 2005: Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. *J. Am. Water Resour. As.*, **41**(2), 361-375.
- Son, K.H., Lee, M.H., and D.H. Bae, 2012: Runoff analysis and assessment using land surface model on East Asia. *J. Korea Water Resour. As.*, **45**(2), 165-178.
- Wang, J., Hong, Y., Li, L., Gourley, J.J., Khan, S.I. Yilmaz, K.K., Adler, R.F., Policeli, F.S. Habib, S., Irwin, D., Limaye, A.S. Korme, T., and L. Okello, 2011: The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model, *Hydrolog. Sci. J.*, **56**(1), 84-98.
- Xie, Z., Yuan, F., Duan, Q., Zheng, J., Liang, M., and F. Chen, 2007: Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in China. *J. Hydromet.*, **8**(3), 447-468.
- Young, A.R., 2006: Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *J. Hydrol.*, **320**, 155-172.
- Zhao, R.J., Zhang, Y.L., Fang, L.R., Liu, X.R., and Q.S. Zhang, 1980: The Xinanjiang model, in: *Hydrological Forecasting. Proceedings of the Symposium on the Application of Recent Developments in Hydrological Forecasting to the Operation of Water Resource Systems, Oxford*, IAHS No. 129, 351-356.



## APCC RESEARCH REPORT 2013-04

- Development of a Seasonal Hydrologic Forecast Technique Based on APCC Multi-Model Ensemble Forecasts
- Remote Sensing of Hydrological Drought Based on Precipitation and Evapotranspiration Estimates
- Assessment of High Resolution Satellite-Based Rainfall Estimates for Hydrologic Modeling of Ungauged Basins
- Regionalization of Distributed Hydrologic-Model Parameters for Runoff Prediction using Satellite-Derived Precipitation for Ungauged Basins in South Korea

### APEC Climate Center

12, Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan 612-020,  
Republic of Korea  
Tel: +82-51-745-3900 Fax: +82-51-745-3949  
[www.apcc21.org](http://www.apcc21.org)

비매품



9 788973 333967  
ISBN 978-89-97333-96-7  
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)