

## 기후변화에 따른 저유량 전망 및 불확실성 분석

이 문 환·배 덕 효<sup>†</sup>

세종대학교 건설환경공학과

### Future Projection and Uncertainty Analysis of Low Flow on Climate Change in Dam Basins

Lee, Moon Hwan and Bae, Deg Hyo<sup>†</sup>

*Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sejong University*

#### ABSTRACT

The low flow is the necessary and important index to establish national water planning, however there are lots of uncertainty in the low flow estimation. Therefore, the objectives of this study are to assess the climate change uncertainty and the effects of hydrological models on low flow estimation. The 5 RCMs (HadGEM3-RA, RegCM4, MM5, WRF, and RSM), 5 statistical post-processing methods and 2 hydrological models were applied for evaluation. The study area were selected as Chungju dam and Soyang river dam basin, and the 30 days minimum flow is used for the low flow evaluation. The results of the uncertainty analysis showed that the hydrological model was the largest source of uncertainty about 41.5% in the low flow projection. The uncertainty of hydrological model is higher than the other steps (RCM, statistical post-processing). Also, VIC model is more sensitive for climate change compared to SWAT model. Therefore, the hydrological model should be thoroughly reviewed for the climate change impact assessment on low flow.

*Key words: Climate Change, Uncertainty Assessment, Low Flow, Water Resources, Variance Analysis*

#### 1. 서 론

우리나라는 보통 2~3년을 주기로 국지적인 가뭄이 발생하며, 5~7년을 주기로 극심한 가뭄이 발생한다. 특히, 2014~2015년에는 발생한 가뭄으로 인해 농업용수 및 생활용수 부족으로 많은 피해가 발생하였다. 최근 전지구적으로 발생하고 있는 기후변화는 수자원의 시공간적 변화를 야기하며, 높은 인구밀도 및 경제성장은 미래의 용수 수요량의 변동을 초래할 것이다. 이는 미래 용수의 수요와 공급이 현재와는 다르게 변화될 수 있으며, 이를 고려한 수자원 계획의 지속적인 보완 및 개선이 필요하다. 수자원 계획 특히 가뭄 방지를 위한 이수부문 계획수립을 위해 가장 중요한 것 중 하나는 정확한 공급량 산정이다. 그 중 저유량(low flow)은 이수측면에서 하천수의 공급능력을 평가하여 취수량을 설정하는 기준유량이며,

수공구조물의 설계, 하천환경의 보전 및 최소 유량의 보장, 오염물의 배치 등 수량과 수질의 관리에 매우 중요한 인자이다. 하지만, 저유량 산정 시 여러 가지 요인의 한계로 인해 많은 오차가 발생한다. 특히 불확실성을 내포하고 있는 기후변화를 고려한다면, 미래 저유량 전망 시 불확실성은 매우 크게 증대될 것이다.

기후변화와 수문해석에 대한 불확실성 연구는 최근 대두되고 있으며, 다양한 연구결과가 제시되고 있다. Bae *et al.*(2011)은 GCM 시나리오와 유출모델의 불확실성을 평가하였는데, GCM 시나리오가 가장 큰 불확실성을 보이지만, 갈수기에서는 유출모델의 불확실성이 가장 클 수 있음을 보여주었다. Prudhomme and Davies(2009)는 미래 하천유량 변화 전망의 불확실성 평가를 위해 Block re-sampling 기법을 이용하였으며, 모형의 구조 및 매개변수에 따른 불확실성을 평가하였다.

<sup>†</sup> Corresponding author: [dhbae@sejong.ac.kr](mailto:dhbae@sejong.ac.kr)

Received August 3, 2016 / Revised September 5, 2016(1st), October 25, 2016(2nd) / Accepted November 2, 2016

Najafi *et al.*(2011)은 기후변화 영향평가 관련 연구에서 수문 모형 선정에 따라 발생하는 불확실성을 BMA(Bayesian Model Averaging) 기법을 이용하여 평가하였으며, 수문모형은 SAC-SMA(the Sacramento Soil Moisture Accounting), HyMod(Conceptual HYdrologic MODel), TM(Thornthwaite-Mather model), PRMS(Precipitation Runoff Modelling System)를 이용하였다. 평가 결과, 수문모형은 건조한 계절을 제외하고 GCM에 비해 전반적으로 불확실성이 낮게 나타났으며, 건조한 계절에 대한 기후변화에 따른 수문영향 분석 시 수문모형의 조합이 필요하다고 제시하였다. 기존 불확실성 관련 연구동향을 분석한 결과, GCM의 불확실성이 모든 단계에서 가장 크다는 결과들과 건조기간에는 수문모형의 불확실성이 크게 발생한다는 논문이 제시되고 있다.

기후변화에 따른 저유량 전망 시 불확실성을 고려한다면 다수의 수문모형의 활용이 필수적이다. 하지만 수문모형에 따른 불확실성이 다르게 나타날 수 있으며, 기후변화 시나리오 생산 과정이 수문모형에 따라 변화하는 정도를 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 기후변화에 따른 저유량을 전망하고, 평가 시 발생하는 불확실성을 분석하고자 한다. 특히 수문모형과 기후변화 시나리오 상세화 기법의 불확실성을 복합적으로 고려하여 불확실성을 정량적으로 평가하고 저감할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 연구수행방법

기후변화를 고려한 저유량 산정 및 전망의 불확실성 분석을 위해 Fig. 1과 같이 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 우선 관측 기상자료 및 지형자료를 이용하여 수문모형의 입력 자료를 구축하고, 매개변수를 검보정한다. 구축된 수문모형을 통해 모의된 과거기간의 유출량 자료와 관측 댐유입량 자료를 통해 30일 지속시간의 최저유량을 각각 산정하고, 이를 비교하여 저유량 산정의 수문모형의 모의 능력을 평가하고자 한다. 또한 기후변화에 따른 저유량 산정 및 전망의 불확실성을 분석하기 위해 온실가스 배출시나리오와 전기기후모형을 통해 생산된 전지구 기후변화 시나리오를 이용한다. 전지구 기후변화 시나리오는 해상도가 낮아, 이를 유역 스케일에 적합한 해상도로 일치시켜주는 기법을 상세화 기법이라 한다. 상세화 기법은 크게 역학적 상세화 기법과 통계적 상세화 기법이 존재하는데, 본 연구에서는 역학적 상세화 기법을 활용하고자 한다. 기후변화 시나리오는 일반적으로 편이가 존재하며, 편이를 보정하여 수문모형에 적용하기 위한 통계적 후처리 기법(statistical post-processing method, SPP)이 이용된다. 따라

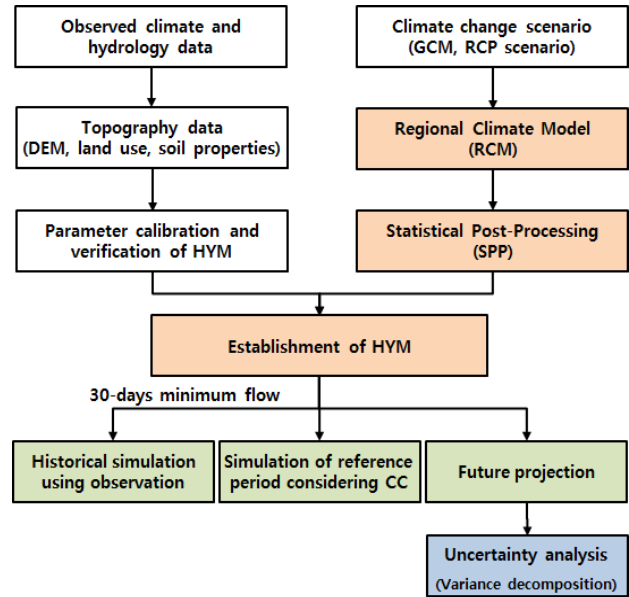


Fig. 1. Methodology of uncertainty analysis in low flow projection.

서 본 연구에서는 기후변화에 따른 저유량 평가 시 발생하는 불확실성을 분산분해기법을 이용하여 정량적으로 분석하고자 한다. 특히 수문모형에서 발생하는 불확실성과 기후변화 시나리오 상세화 과정에서의 불확실성을 복합적으로 고려하여 불확실성을 정량적으로 평가하고 저감할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

### 2.1 저유량 산정방법

일반적으로 저유량에 대한 평가는 장기간 관측유량이 존재하는 경우, 부분적으로 존재하는 경우, 존재하지 않는 경우로 구분하여 분석한다. 하지만 기후변화를 고려한 미래 저유량은 현재 관측되지 않기 때문에 미계측된 부분이며, 특히 변화되는 기후특성을 반영해야 하기 때문에 저유량 산정은 수문모형을 이용하는 것이 일반적이다. Rahman *et al.*(2010)은 캐나다 Ruscom 강 유역에 SWAT 모형을 적용하여 5년 빈도의 저유량을 평가한 바 있으며, Staudinger *et al.*(2014)은 HBV를 이용하여 스위스의 21개 소유역의 저유량을 평가하였다. 이외에도 PRMS(Bae *et al.* 2008), CATCHMOD(Wilby and Harris, 2006), GR4J (Puspalatha *et al.*, 2011), PREVAH(Fundel *et al.*, 2013), HSPF(Schultz *et al.*, 2014), SWAT(Park *et al.*, 2011; Jeong *et al.*, 2013) 등의 모형이 적용되고 있다. 본 연구에서 저유량 산정을 위해 SWAT 모형과 VIC 모형을 선정하였다.

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural

Research Service; ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 유역모형이다. SWAT 모형은 물리적 이론에 근거하여 유역내의 기상, 토양특성, 지형, 식생 등에 대한 구체적인 정보가 필요하며, 물의 거동을 모의한다. SWAT 모형은 전체 유역을 소유역으로 구분하고, 각 소유역에 대해서도 동일한 토양형과 토지 피복을 갖는 면적별로 구분하여 동일한 유출현상을 갖는 단위(수문학적 반응단위, HRU)로 구분한다. 따라서 SWAT 모형은 모든 수문성분에 대해서 각 HRU별로 모의를 하며, 모의 결과 값은 해당 소유역의 주하도 유입량이 된다. 이렇게 각 소유역에 대해서 계산단위시간( $\Delta t$ )동안 해당 HRU들로부터 산정된 유입량은 소유역 주하도의 하도추적을 통해 각 소유역 유출량이 된다. 하나의 HRU에서 강수로 인한 지표수, 토양수 또는 측방흐름, 침투량, 지하수 함양량, 지하수, 증발산량 등이 산정되어 유출해석을 수행한다[Fig. 2(a)]. SWAT의 지표수 산정방법은 SCS 유효우량 산정 방법을 이용하며, 강수량에서 지표수를 뺀 나머지 양은 토양표면 아래로 침투된다

(Sloan and Moore, 1984). 이 양은 기존 토양수분량에 추가되고, 포장용수량(field capacity)을 초과하는 토양수분량은 중력수로 정의되어 측방흐름과 침투량으로 이동하게 된다. 나머지 토양수분량은 식생과 기상조건에 따라 영구위조점(permanent wilting point)에 도달할 때까지 모관수로 정의되어 증발산으로 토양층 내에서 제거된다. 마지막 토양층에서의 침투량은 지하수함양량으로 얇은 대수층(shallow aquifer)에 저장되어 있는 지하수에 추가된다. 이 양중 일정부분은 하천으로 회귀하는 지하수로, 또는 깊은 대수층(deep aquifer) 및 토양층으로 이동한다. 여기서, 지표수와 측방흐름, 지하수가 본 연구에서 제시하는 유출량에 해당된다.

VIC 모형은 1994년 미국 University of Washington의 Dennis Lettenmaier 박사 연구팀에 의해 개발되었으며, 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 Water 및 Energy Flux를 모의하는 분포형 모형이다(Liang *et al.*, 1994). VIC 모형은 크게 차단층(canopy)과 3개의 토양층(soil layer)으로 구분되며, 한 격자 내에서도 다양한 지형조건과 토양의 물리적 특성을 고려한다. 차단층에서는 동일 피복종류별 면적비를 고려하여 각 피복특성이 반영된 차단 및 증발을 모의하며, 보통 식생지대 및 나대지로 구분된다(Fig. 2b). 토양층의 경우, 깊이에 따라 최상부토층(top thin layer), 상부토층(upper layer), 하부토층(lower layer)으로 구분된다. 최상부토층은 침투에 직접적인 영향을 받는 지역이며, 토양수분의 변화에 가장 민감하다. 또한 중력식 배수를 통해 상부토층으로 침투량을 모의하며, 식생 및 나대지 지역의 여부에 따라 증산 및 증발모의가 결정된다. 상부토층에서는 최상부 토층과 더불어 강우시작 후 토양층의 포화여부에 따라 지표유출이 모의되며, 증산 및 하부토층에 대한 침투량이 계산된다. 하부토층에서는 상부토층에서 유입된 침투량으로부터 증산과 기저유출이 모의된다(Liang, 1996).

저유량 평가를 위해 수자원 측면에서 1일 단위보다는 가뭄의 지속성을 고려할 수 있도록 지속시간을 고려할 필요가 있다. 일반적으로 저유량 평가 시 7Q10 등을 많이 이용하여 7일 단위의 유량을 평가하지만, 미래를 전망하는데 있어 7일의 경우, 유출량의 단위가 매우 작기 때문에 유효한 변화를 평가하기 위해 본 연구에서는 30일을 기준으로 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 SWAT 모형은 준분포형 모형이며, VIC 모형은 분포형 모형이기 때문에 모형의 구조, 매개변수 구성 등이 다르다. 특히 지속시간 30일의 최저유출량을 평가하기 위해서는 지표수보다는 기저유출을 담당하는 지표하유출, 지하수 흐름 등이 더욱 영향이 크게 미칠 것으로 판단되며, 특히 증발산량 산정방법에서도 많은 영향이 나타날 것으로 판단되기

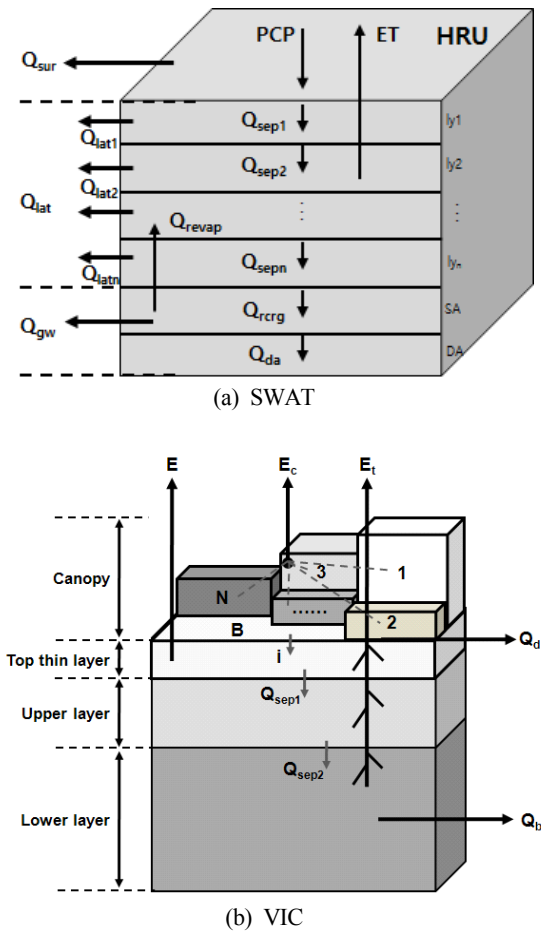


Fig. 2. Flowcharts of hydrological models.

때문에 잠재증발산 산정방법은 Penman-Monteith 방법을 동일하게 적용하였다.

## 2.2 기후변화 시나리오

본 연구에서 활용한 기후변화 시나리오는 CORDEX(Coordinated Regional climate Downscaling EXperiment) - East Asia 프로젝트에서 수행된 결과를 활용하였다. CORDEX는 지역기후모형을 통해 생산된 지역기후 시나리오의 비교·검증하기 위한 실험으로 현재 전세계적으로 생산되는 지역기후시나리오를 구축 및 검증을 수행하고 있다. 본 연구에서는 동아시아 영역의 기후시나리오 자료를 수집하였다. CORDEX East Asia에 구축된 자료의 종류를 살펴보면, 기상청에서 생산한 RCP8.5, RCP4.5의 HadGEM2-AO으로 모의된 전지구 기후변화 시나리오를 토대로 HadGEM3-RA, RegCM4, SNU-MM5, SNU-WRF, YSU-RSM으로 역학적으로 상세화된 자료가 가능하며, 이를 활용하였다.

RCM에서 생산된 기후모의 결과는 기후모형의 구조적, 모수화 과정 등의 한계로 인하여 편이가 발생한다. 따라서 통계적 후처리기법이란 편이가 있는 기후모의 결과를 관측자료의 특성을 고려하여 현재 관측되고 있는 기후조건으로 보정시켜주는 방법이다. 통계적 후처리기법에는 선형보정기법, 분산보정법, 분위사상법, 단계적 스케일링기법, 변화율법을 이용하였다. 선형보정기법은 기후변화 시나리오에서 가장 많이 쓰이는 보편적인 방법이다. 이 기법은 기준기간의 관측치와 모의치의 월별 편차를 산정하여 미래기간에도 같은 편차가 발생한다고 가정하여 미래기간의 모의치에 적용하는 방법이다. 모의된 기후시나리오 모의치와 관측치의 차이를 월별로 산정하여 모의된 미래 기간의 자료에 적용하는데, 기온은 그 차이를 강수량은 비율을 적용한다. 분산보정법은 월별 평균 및 표준편차를 보정하는 방법으로 관측치와 모의치의 변동계수를 보정하고, 평균을 보정하여 평균과 분산이 동일할 수 있도록 보정해 주는 기법이다. 비초과확률을 기반으로 한 기후모형의 일 단위 기상정보의 편이보정기법이다. 모의된 일 단위 기후자료와 관측자료의 일 단위 기후자료를 이용하여 확률분포의 누가 밀도함수(CDF)를 추정하고, 동일 비초과확률을 갖는 관측 기상정보로 전이하는 기법이다. 변화율법은 기준기간과 미래기간의 월별 변화율 및 변화량(Change factor)을 산정하여 과거 기간 관측자료에 그 변화율만큼 적용해서 시나리오를 생산하는 방법이다. 모의된 기후시나리오 기준기간과 미래기간의 차이를 월별로 산정하여 과거 관측 자료에 적용한다. 단계적 스케일링 기법은 기후모형으로 모의된 강수량을 총 3구간(극치호우사상, 무강수일수, 강수량의 평균과 표준편차)으로 나

누어 각 구간에 따라 각기 다른 방법을 적용하여 보정하는 기법이다. 극치호우사상은 회귀식을 이용한 보정기법, 무강수일수는 분위사상법의 비초과확률을 이용한 보정기법, 나머지 부분에 대해서는 평균 및 분산보정 기법을 적용하는 방법이다 (Lee and Bae, 2013). 5가지 통계적 후처리기법에 대한 내용은 Lee *et al.*(2016)과 Lee(2016)을 참조하기 바란다.

## 2.3 미래 전망 및 불확실성 분석

기후변화에 따른 미래 저유량 전망을 위해 저유량의 단위를 가뭄의 지속성을 고려할 수 있도록 30일을 기준으로 하였다. 미래 저유량 전망은 미래 기후시나리오로 산정된 미래 저유량( $Q_{fut}$ )에서 과거 기후시나리오로 산정된 저유량( $Q_{ct}$ )의 차이로 정의하였으며, 식 (1)과 같다. 여기서  $i$ 는 다양한 RCM(regional climate model), SPP(statistical post-processing method), HYM (hydrological model)에 따른 앙상블 멤버를 의미한다.

$$C_{fut,i} = Q_{fut,i} - Q_{ct,i} \quad (1)$$

기후변화에 따른 저유량 전망 결과의 불확실성 분석을 위해 기후변화 시나리오와 GCM을 이용한 전지구 기후시나리오를 고정하고, 평가단계는 지역기후모의(RCM), 통계적 후처리과정(SPP), 수문모형(HYM)으로 총 3단계로 구성하였다. 기후변화 전망 결과의 불확실성을 평가할 수 있는 방법은 다양한 방법이 있지만, 정량적으로 불확실성을 단계적으로 분해할 수 있는 기법을 이용하였다. Lee *et al.*(2016)은 분산기법을 이용한 정량적으로 불확실성을 단계별로 구분할 수 있는 기법을 개발하였으며, 본 연구에서는 해당 기법을 이용하였다. 미래기간의 저유량 전망의 총 불확실성(total uncertainty)을  $C_{fut}$ 의 분산( $U_{total}$ )으로 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$U_{total} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (C_{fut,i} - \overline{C_{fut}})^2 \quad (2)$$

Lee *et al.*(2016)은 5개의 지역기후모형, 통계적 후처리과정을 활용하지만, 수문모형의 경우 2가지 모형을 사용하기 때문에 표본 수에 의한 오차(샘플링 오차)가 발생할 수 있으므로 각 단계별로 이단추출법을 이용하여 평가하였다. 이단추출법을 고려할 경우, 총 불확실성은 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$U_{total} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{ig=1}^2 \sum_{is=1}^2 \sum_{ih=1}^2 (C_{i,ig,is,ih}^{fut} - C_{i,*,*,*}^{fut})^2 \right] \quad (3)$$

여기서,  $i$ 는 이중샘플링을 통한 반복회수를 의미하며,  $I$ 는 총 반복회수인 100회를 의미한다.

주효과( $U_{RCM}$ ,  $U_{SPP}$ ,  $U_{HYM}$ )는 RCM, SPP, HYM 인자의 개별 요소들의 평균값의 분산은 각 집단의 효과를 나타내며, 식 (4)는 수문모형에 따른 영향을 산정할 수 있는 방법으로 RCM 과 SPP도 동일한 방법으로 산정할 수 있다.

$$U_{HYM} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left[ 2 \times 2 \times \sum_{ir=1}^2 (C_{i,*,*,ih}^{fut} - C_{i,*,*,*}^{fut})^2 \right] \quad (4)$$

상호작용효과( $U_{INT}$ )는 RCM, SPP, HYM의 공동적으로 발생하는 효과를 의미하며, 식 (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$U_{INT} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{ir=1}^2 \sum_{is=1}^2 \sum_{ih=1}^2 (C_{i,ir, is, ih}^{fut} - C_{i,ir,*,*}^{fut} - C_{i,*, is, *}^{fut} - C_{i,*, *, ih}^{fut} + 2C_{i,*,*,*}^{fut})^2 \right] \quad (5)$$

또한, 각 영향( $\eta^2$ )들은 아래 식 (6)~(7)과 같이 산정할 수

있으며, 전체 불확실성의 각 단계별 기여도를 의미하여 0~1의 값을 가진다. 분산의 형태로 표현되기 때문에 항상 양의 값을 가지며, 모든 영향의 총합은 1이다.

$$\eta_{HYM}^2 = \frac{U_{HYM}}{U_{total}} \quad (6)$$

$$\eta_{INT}^2 = \frac{U_{INT}}{U_{total}} \quad (7)$$

### 3. 대상유역 및 자료구축

본 연구에서는 기후변화에 따른 저유량의 영향을 평가하고, 불확실성을 정량적으로 분석하기 위해 한강유역 내 최상류의 다목적댐 유역인 소양강댐과 충주댐 유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig 3). 충주댐은 남한강 수계에 위치하고 있는 다목적댐으로 유역면적은 6,648 km<sup>2</sup>, 고도는 70~1,569 m이다. 유역연평균유입량은 154.6 m<sup>3</sup>/s, 유효저수용량은 1,789백만

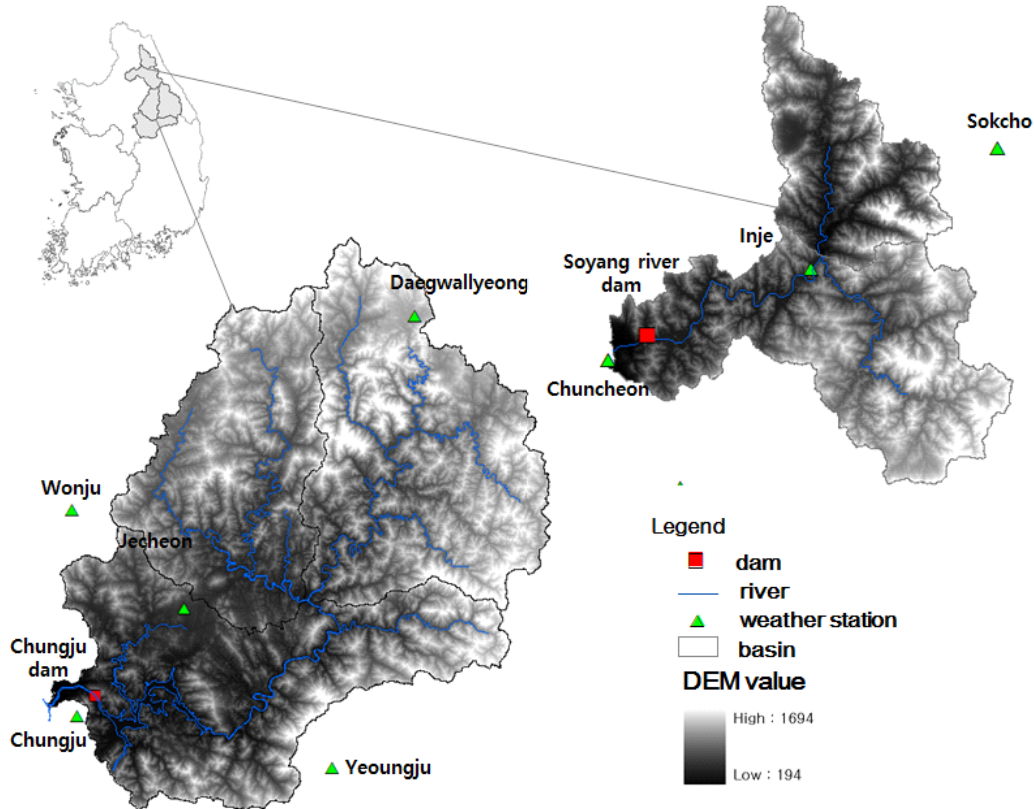


Fig. 3. Study area (Chungju dam and Soyang river dam basins).

m<sup>3</sup>, 연간용수공급계획량은 3,380백만 m<sup>3</sup>이다. 소양강댐은 북한강 수계에 위치하고 있는 다목적댐으로, 유역면적은 2,703 km<sup>2</sup>, 고도는 194~1,694 m이다. 유역 연평균 유입량은 55.5 m<sup>3</sup>/s, 유효저수용량은 1,900백만 m<sup>3</sup>, 연간 용수공급계획량은 1,213백만 m<sup>3</sup>으로 생·공용수 및 관개용수에 공급하고 있다.

강수량 자료는 신뢰성 있는 유출모의를 수행하는데 필수자료이며, 기후변화와 수문해석을 위해서는 장기간의 고품질자료가 요구된다. 본 연구에서는 기상청 관할 기상관측소 및 국토교통부 산하 한강홍수통제소의 강우관측소 자료를 이용하였다. SWAT 모형과 VIC 모형의 모의를 위해서는 일단위 최고기온, 최저기온, 상대습도, 일조시간 및 평균풍속 자료가 요구된다. 현재 우리나라에서는 기상청에서 일 기상자료를 제공하고 있으며, 본 연구에서는 1981년 전부터 관측이 되고 있는 기상관측소를 선정하였다. 충주댐유역에 사용된 기상관측소는 제천, 충주, 원주, 대관령 관측소이다. 수문모형을 구축하기 위해서는 유역의 지형특성을 산정할 수 있는 지형자료 수집이 필요하고, GIS 분석을 통해 입력자료 형태로 변환이 필요하다. SWAT 모형과 VIC 모형 적용을 위해서는 유역의 DEM, 토지피복도, 토양도 자료가 기초정보로 필요하다. 본 연구에서는 국립지리정보원의 수치지형도를 이용하여 구축된 해상도 100 m × 100 m DEM을 가공하여 활용하였다. 토지피복도는 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr> 이하 WAMIS)에서 제공하는 자료를 이용하였으며, 토양도는 농업과학기술원에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 활용하였다. 사용한 수문모형은 기존에 구축된 SWAT(Bae *et al.*, 2011), VIC(Son, 2015)의 결과를 이용하였다. 구축된 자료를 이용하여 충주댐의 기존 매개변수 평가를 수행하였으며, 이에 활용한 자료기간은 1986~2005년까지이다. 두 모형에 대한 통계분석 결과의 상관계수는 0.89~0.92, 0.83~0.89, RMSE는

3.04~3.05, 3.36~3.90, 모형효율성계수(ME)는 0.80~0.82, 0.69~0.79, 유출용적오차는 -0.1~-19.1%, -6.6~3.3%의 범위로 나타나 활용성이 높은 것으로 확인되었다. 저유량 평가를 위해 모형효율성계수를 유량의 역수를 통해 산정해 보았으며, 0.12~0.22로 나타났다. 또한, 저유량의 적절한 모의능력 평가를 위해 Fig. 4와 같이 2001년부터 2005년까지의 수문곡선을 로그축으로 도시하였다. SWAT 모형과 VIC 모형 모두 매개변수 검토정 시 기본적으로 RMSE 및 CC의 잘 모의하기 위해서는 기본적인 패턴과 고유량을 적절히 모의하는 것이 유리하다. 따라서 저유량 모의능력의 경우 매개변수 검토정 시 사용하는 CC, RMSE, ME, VE와의 큰 연관관계가 나타나지 않았으며, 저유량을 적절히 평가하기 위해서는 이를 보완할 평가지표가 필요할 것으로 판단된다.

CORDEX East Asia(<https://cordex-ea.climate.go.kr/>)에서는 RCP8.5, RCP4.5의 HadGEM2-AO 자료를 RCM을 이용하여 상세화된 기후시나리오를 생산하고 있다. 사용된 RCM의 종류는 기상청(HadGEM3-RA), 공주대(RegCM4), 서울대(MM5, WRF), 연세대(YSU-RSM)로 총 4개 기관, 5개 모형 결과를 활용하였다. RCP8.5 기반의 기후시나리오를 이용하였으며, 평가는 과거기간(1981~2005년)과 미래기간(2011~2035년)으로 구분하여 분석하였다.

## 4. 적용 및 분석

### 4.1 과거기간 수문모형의 저유량 모의능력 분석

과거 댐 유입량 자료와 관측자료를 통해 SWAT 모형과 VIC 모형으로 모의된 시계열 유출량 자료를 이용하여 30일 단위로 이동평균된 유출량을 산정하고, 그에 따른 연도별 최저 유량

Table 1. Statistical analysis of hydrological models for each basin

Hydrological model	Basin	CC (-)	RMSE (mm/d)	ME (-)	VE (%)
SWAT	Chungju dam	0.89	3.05	0.80	-0.07
	Soyang river dam	0.92	3.04	0.82	-19.12
VIC	Chungju dam	0.83	3.90	0.69	3.31
	Soyang river dam	0.89	3.36	0.79	-6.65

Correlation coefficient (CC) =  $SS_{os} / \sqrt{SS_o \times SS_s}$ ,  $SS_{os} = \sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})$ ,  $SS_o = \sum (O_i - \bar{O})^2$ ,  $SS_s = \sum (S_i - \bar{S})^2$ .

Root mean square error (RMSE) =  $\sqrt{\sum (O_i - S_i)^2 / n}$ , where  $n$  is a number of data.

Nash-Sutcliffe efficiency (ME) =  $[\sum (O_i - \bar{O})^2 - \sum (O_i - S_i)^2] / \sum (O_i - \bar{O})^2$ .

Percent error in volume (VE) =  $100 \times (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i$ .

Where,  $O$  is observed flow and  $S$  is simulated flow.



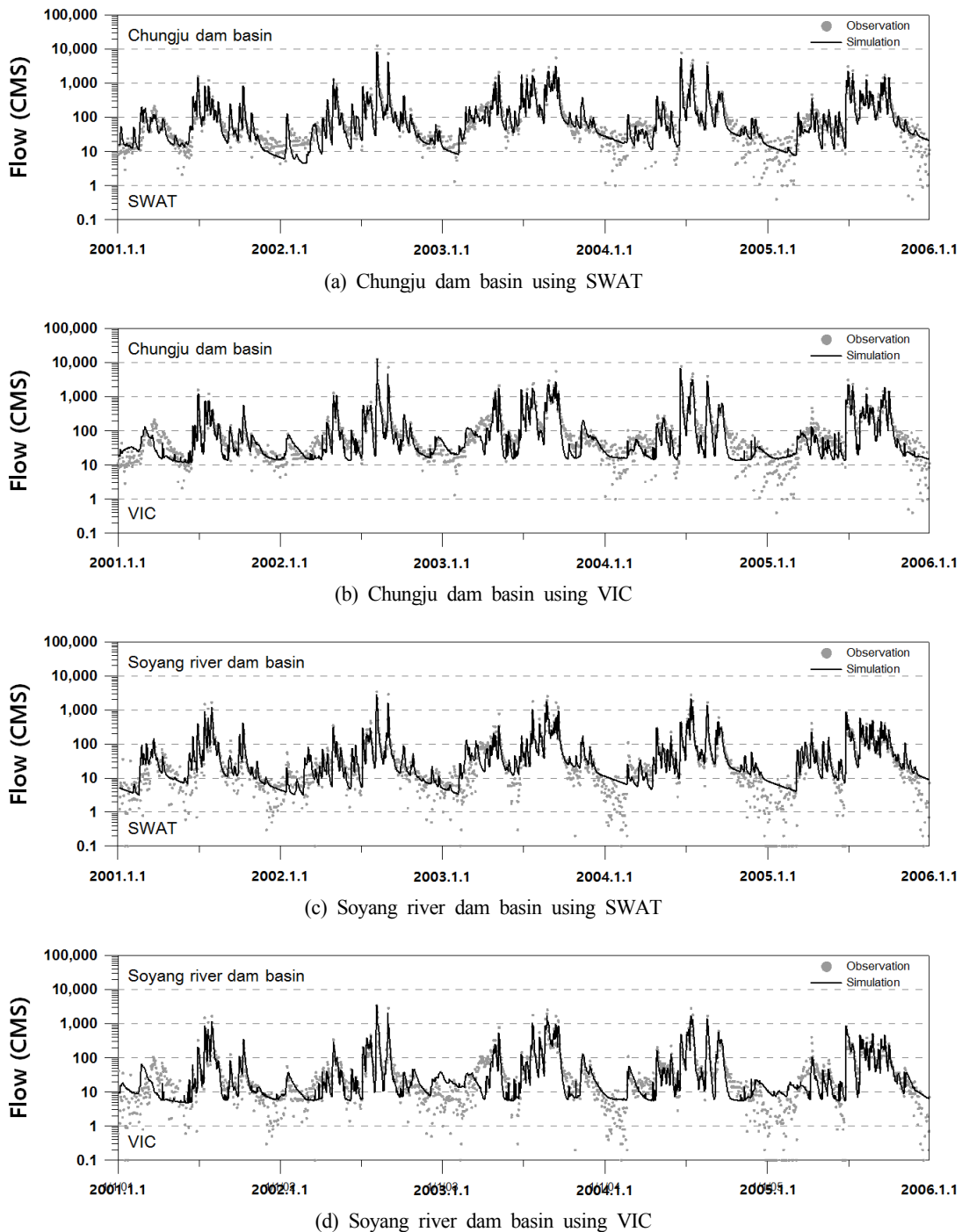


Fig. 4. Hydrograph in study area.

을 추출하였다. Table 2는 관측 댐유입량과 SWAT 모형 및 VIC 모형으로 모의된 결과를 기반으로 30일 단위의 최저 유량의 특성을 평가한 것이다. 관측 댐유입량 자료를 통해 산정된 30일 최저유량의 평균값은 충주댐 6.5 mm, 소양강댐 4.8

mm 정도이다. SWAT 모형의 경우, 충주댐은 6.2 mm로 거의 관측자료에 유사하게 모의하고 있으며, 소양강댐은 1.6 mm 정도 과소 모의하는 것으로 나타났다. 반면, VIC 모형은 관측 자료에 비해 충주댐, 소양강댐 각각 2.2 mm, 4.4 mm 정도 과

Table 2. Comparison of observed and simulated 30 days minimum runoff of 2 dam basins (Unit : mm/day)

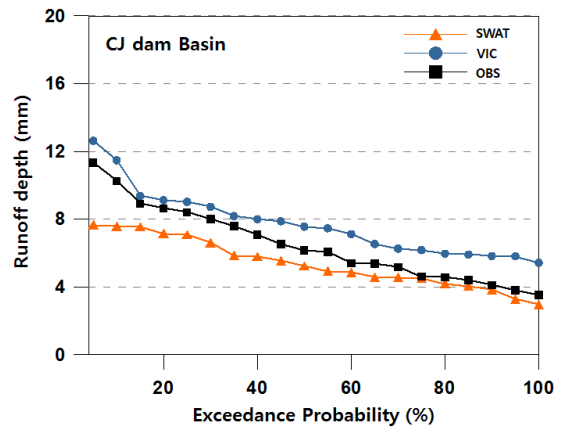
Type	Chungju dam			Soyang river dam		
	OBS	SWAT	VIC	OBS	SWAT	VIC
Mean	6.5	6.2	8.7	4.8	3.2	9.2
Standard deviation	2.2	2.1	3.2	2.3	1.3	3.1
Maximum value	11.3	11.4	18.1	9.9	6.3	16.3
Minimum value	3.5	3.3	5.3	1.0	1.5	5.4

대 모의되는 것으로 나타났다. 표준편차의 경우, SWAT 모형은 과소 모의되며, VIC 모형은 과대 모의되는 것으로 나타났다.

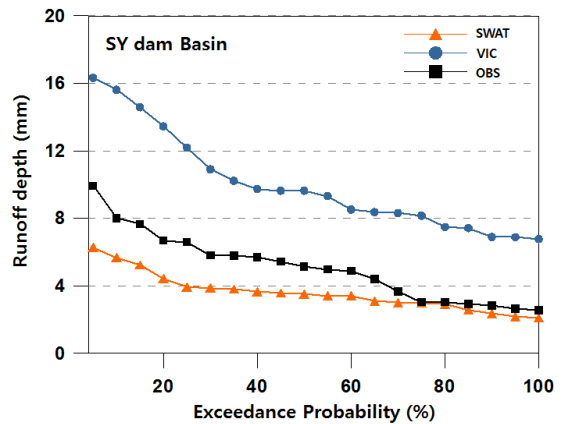
Fig 5는 충주댐과 소양강댐 유역의 연도별 30일 최저유량의 초과 확률 별 유량크기 별로 제시하였다. 충주댐의 경우, SWAT 모형이 관측자료의 분포와 거의 유사한 형태를 보이거나, 8~100%의 초과확률을 가지는 저유량은 거의 유사하게 모의하지만, 초과확률이 낮아질수록 과소산정되어 편차가 커지는 것으로 나타났다. VIC 모형의 충주댐 모의능력은 전반적으로 관측자료에 비해 2~3 mm 정도 크게 나타났다. 소양강댐의 경우, SWAT 모형은 충주댐과 유사한 결과를 보이지만 편차가 더욱 크게 나타났으며, VIC 모형은 약 7~8 mm 정도 크게 산정되었다. 충주댐에 비해 소양강댐의 모의능력이 떨어지는 것으로 분석된다.

#### 4.2 기후시나리오의 저유량 모의능력 분석

기후변화 시나리오를 이용하여 과거기간의 저유량 산정 시 발생하는 오차를 분석하였다. 일반적으로 기후변화 시나리오의 차이만을 비교분석하기 위해 관측 유출량과 비교하지 않고, 관측자료와 수문모형을 토대로 산정된 결과와 비교 분석한다. Fig. 6은 관측자료와 편의보정된 기후시나리오 기반의 SWAT 모형과 VIC 모형으로 모의된 연별 30일 최저 유량의 확률밀도함수를 도시한 것이다. Fig. 6(a)는 충주댐 유역과 소양강댐 유역의 SWAT 모형으로 모의된 결과를 도시한 것이다. 충주댐 유역의 경우, 평균 PDF는 3~7 mm 지점의 유량 발생횟수는 줄고, 10 mm 이상의 유량 발생 횟수가 더 많이 모의하는 것으로 나타났다. 소양강댐 유역은 관측자료를 이용할 경우, 8 mm 이내로 모의되던 결과가 10~16 mm 정도로 과대 산정하는 것으로 나타났다. 반면, VIC 모형은 관측자료를 이용한 결과에 비해 다소 과소 산정되는 것으로 나타났다. 하지만 RCM, SPP 기법에 따라 저유량의 모의 능력의 차이가 SWAT 모형에 비해 극심하게 크게 나타났다. 이는 VIC 모형이 SWAT 모형에 비해 기후시나리오에 더욱 민감하게 작용하는 것으로 판단된다



(a) Chungju dam



(b) Soyang river dam

Fig. 5. Probability density function of observed runoff and simulated runoff using hydrological models and observed climate data.

다. SWAT 모형은 관측자료 대신 기후변화 시나리오를 이용한 경우, 1.0 mm(충주댐), 1.6 mm(소양강댐) 정도 과대 산정되는 것으로 나타났다. VIC 모형은 -0.6 mm(충주댐), -0.7 mm(소양강댐) 정도 과소 산정되는 것으로 나타났다. 표준편차 역시



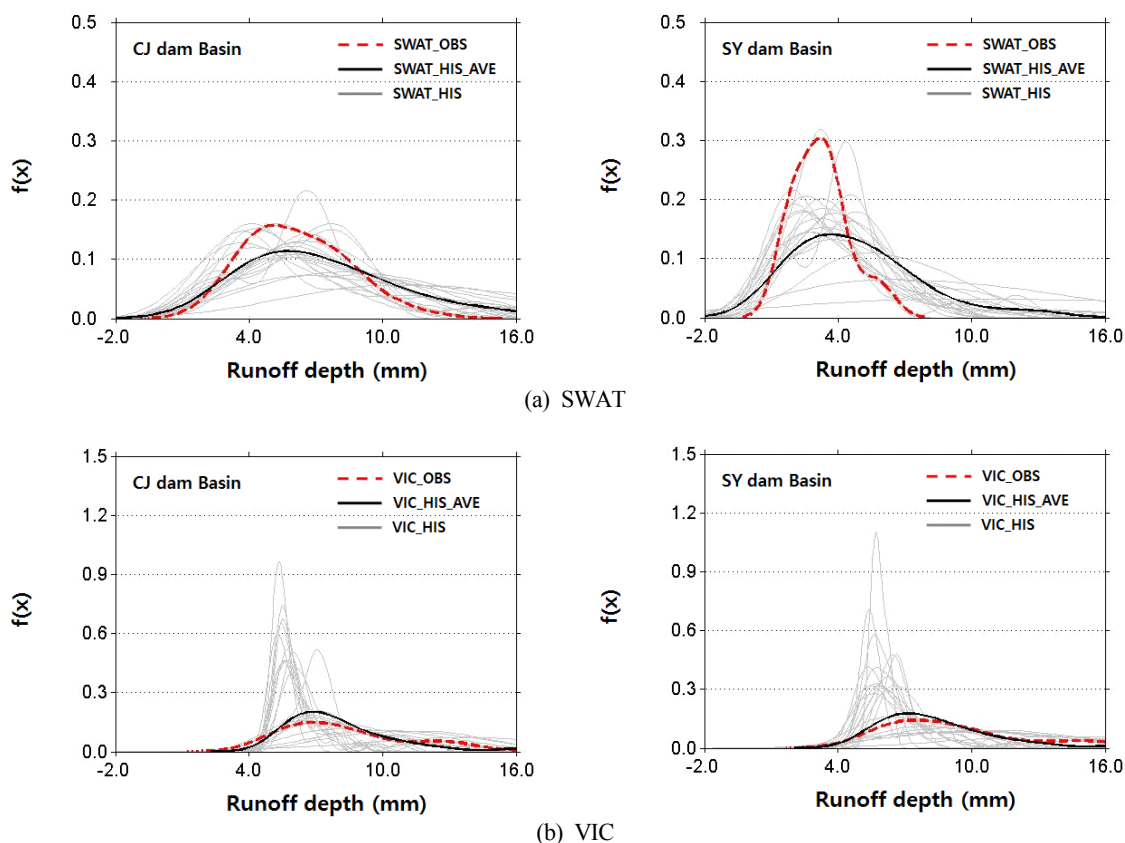


Fig. 6. Probability density functions of 30-days minimum runoff in historical period.

SWAT 모형은 과대 산정, VIC 모형은 과소 산정되어, 기후변화 시나리오에 따른 두 수문모형의 모의능력이 다르게 나타났다.

### 4.3 미래 저유량 전망

30일 최저유량의 전망을 위해 기후시나리오 기반의 수문모형으로 전망된 연 최저 확률밀도함수를 도시하였다(Fig. 7). Fig. 7(a)는 충주댐 유역의 SWAT 모형과 VIC 모형으로 전망한 결과를 도시한 것이다. SWAT 모형의 경우, 평균 3~6 mm 지점의 최저유량 빈도는 감소하는 반면, 9 mm 이상의 유량 발생빈도는 증가하기 때문에 평균적으로 최저유량은 증가될 것으로 전망되었다. 반면, VIC 모형은 6~8 mm의 최저유량 발생빈도는 증가하는 반면, 13 mm 이상의 최저유량의 발생 빈도는 감소하여 최저유량은 감소할 것으로 전망된다. 소양강댐의 경우도 SWAT 모형의 경우, 과거에는 5 mm 이내의 최저유량이 대부분 발생하였는데, 4 mm 이상의 최저유량이 대부분 발생하여 최저유량은 증가할 것으로 전망되었다. 반면, VIC 모형은 충주댐과 동일하게 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 RCM, SPP 기법에 따라 미래 전망 결과 시 VIC 모형

의 불확실성이 SWAT 모형에 비해 극심하게 크게 나타났으며, 특히 4~5 mm 이내의 최저유량이 과도하게 많이 발생하는 이상발 멤버들이 있는 것으로 분석되었다. 이는 VIC 모형이 SWAT 모형에 비해 기후시나리오에 더욱 민감하게 작용하는 것으로 판단된다.

Table 3은 각 기법들로 산정된 30일 최저유량에 대한 평균 및 표준편차, 평균 및 표준편차의 변화를 산정한 결과이다. 평균값의 경우, 충주댐과 소양강댐 모두 SWAT 모형은 평균이 1.0~1.7 mm 정도 증가하고, 표준편차 역시 0.9~1.3 mm 증가하는 것으로 나타났다. 다만, VIC 모형의 경우, 평균값이 -0.7~-0.9 mm 정도 감소하는 경향이 나타났으며, 표준편차 역시 -0.9~1.2 mm 정도 작아지는 것으로 나타났다. 따라서 수문모형에 따른 평가 결과의 차이가 상세화 기법에 따른 차이 보다 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

### 4.4 불확실성 분석

미래 저유량 전망 시 발생하는 불확실성을 평가 단계별로 기여도를 분석하였으며, 30일 최저 유출량 전망 시 발생하는

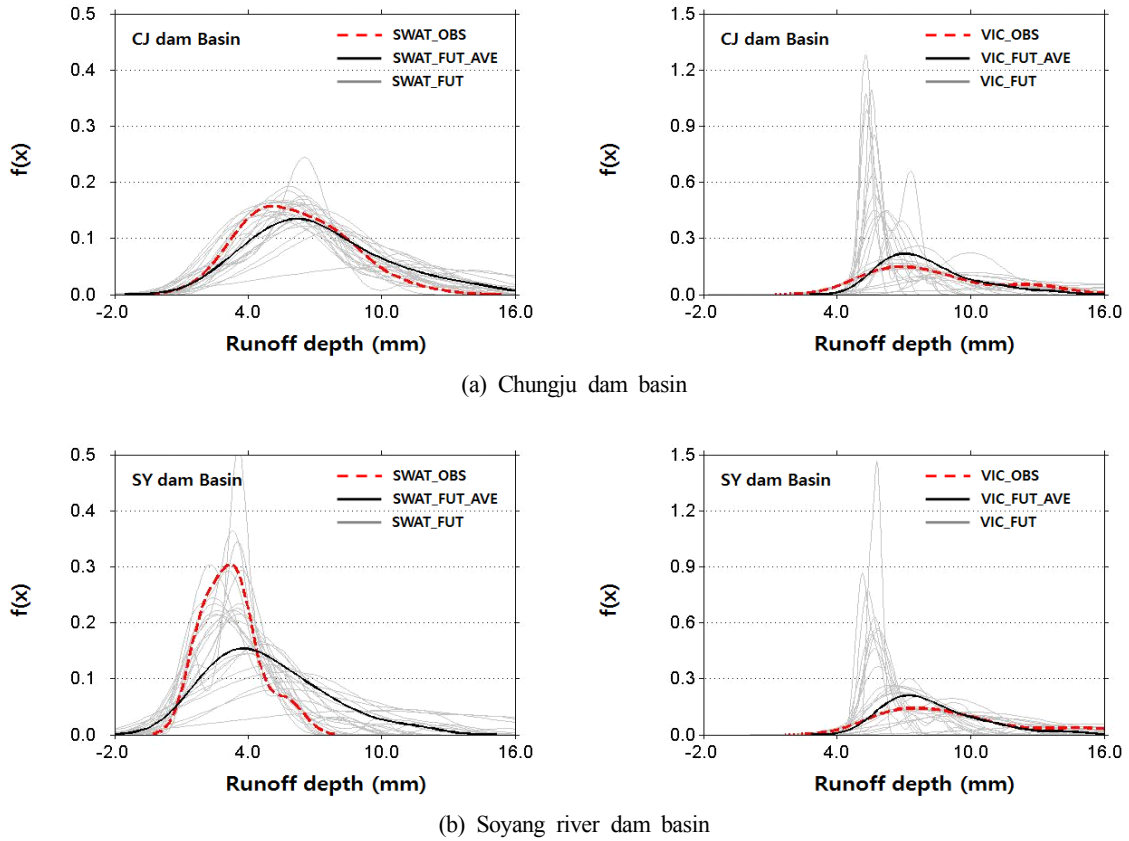


Fig. 7. Probability density functions of 30 days minimum runoff in future period.

Table 3. Changes in 30-days minimum runoff according to RCM, SPP, and HYM (Unit : mm/day)

Basin	HYM	Period	MEAN	STDEV.	Changes in MEAN	Changes in STDEV.
Chungju dam basin	SWAT	Reference period	6.2	2.1	-	-
		Future period	7.2	3.0	1.0	0.9
	VIC	Reference period	8.7	3.2	-	-
		Future period	8.0	2.0	-0.7	-1.2
Soyang river dam basin	SWAT	Reference period	3.2	1.3	-	-
		Future period	4.9	2.6	1.7	1.3
	VIC	Reference period	9.2	3.1	-	-
		Future period	8.3	2.2	-0.9	-0.9

불확실성의 기여도를 분석한 결과는 Table 4와 같다. 충주댐과 소양강댐 유역의 경우, 총 불확실성( $SS_{total}$ )은  $24.8 \text{ mm}^2$ ,  $29.0 \text{ mm}^2$ 이며, 소양강댐의 불확실성이 다소 크게 나타났다. 평균 총 불확실성은  $26.9 \text{ mm}^2$ 로 각 RCM, SPP, HYM, 상호작용효과로 구분한 결과,  $1.6 \text{ mm}^2$ ,  $3.3 \text{ mm}^2$ ,  $11.1 \text{ mm}^2$ ,  $10.8$

$\text{mm}^2$ 로 나타났다. 이를 이용하여 30일 최저 유출량 전망 결과의 불확실성의 기여도를 분석한 결과, 수문모형이 41.5%로 가장 높은 기여도가 나타났다. 그 외에 RCM은 6.0%, SPP는 12.3%, 상호작용효과는 40.1%로 나타났다. 총 불확실성의 단위를 기준 분산의 형태에서 표준편차로 표현하면, 5.0 mm,

Table 4. Uncertainty analysis of future 30 days minimum runoff

Type	Chungju dam		Soyang river dam		Mean	
	$U_{total}$ (mm <sup>2</sup> )	$n$ (%)	$U_{total}$ (mm <sup>2</sup> )	$n$ (%)	$U_{total}$ (mm <sup>2</sup> )	$n$ (%)
RCM	1.3	5.4	1.9	6.7	1.6	6.0
SPP	3.1	12.5	3.5	12.2	3.3	12.3
HYM	10.7	43.3	11.6	39.8	11.1	41.5
INT	9.6	38.8	12.0	41.4	10.8	40.1
Total	24.8	100.0	29.0	100.0	26.9	100

5.4 mm 정도의 불확실성이 존재한다고 할 수 있다. 이는 앞 절에서 제시한 바와 같이, 충주댐과 소양강댐의 저유량은 과거 기간 대비 미래기간에 0.15 mm 증가하지만, 그에 따른 불확실성이 ±5.0~5.4 mm 정도인 것을 의미한다.

30일 최저유량 전망에 대한 RCM과 SPP 기법별 영향을 평가하였다. Fig 8은 각 RCM과 SPP 기법을 하나씩 교차로 제외하면서 5×4×2, 4×5×2 앙상블 체계로 불확실성을 평가하여 각 RCM이나 통계적 후처리기법들이 불확실성에 미치는 영향을 분석한 것이다. 파란색 실선은 기존 5×5×2의 앙상블 체계로 불확실성을 산정한 결과이며, 사각형은 RCM을 제외한 경우, 삼각형은 SPP 기법을 제외한 경우의 불확실성을 평가한 결과이다. 그림의 Y축은 불확실성을 의미하지만, 본 연구에서 활용한 기법은 분산분석으로 불확실성이 분산의 형태를 취하지만, 정량적인 평가를 위해 표준편차의 값( $\sqrt{U_{total}}$ )으로 표현하였다. 충주댐의 경우, 통계적 후처리과정은 분위사상법과 변화율법에서 기존 불확실성보다 감소하는 것으로 나타났으며, 단계적 스케일링기법과 변화율법이 가장 크게 불확실성이 증대되는 것으로 나타났다. RCM의 경우, HadGEM3-RA, SNU-WRF를 제외한 실험에서 불확실성이 증대되는 것으로 나타났으며, SNU-MM5를 제외한 실험에서 불확실성이 감소하는 것으로 나타났다. RegCM4와 SNU-MM5는 충주에서는 불확실성이 증대되는데, 소양강댐의 경우 큰 차이가 나지 않는 것으로 나타났다(Fig 8). 일반적으로 RCM의 경우, 불확실성이 크다는 것은 다른 RCM과 다른 전망 결과를 나타내는 것을 의미하며, SPP 기법의 불확실성이 크다는 것은 기후변화 시나리오에서 제공하는 정보를 가장 많이 왜곡한다는 것을 의미한다. 따라서 미래 저유량 전망 시 불확실성이 저감될 수 있는 RCM과 SPP 기법을 선정하여 활용해야 한다.

### 5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 기후변화에 따른 저유량의 변화를 전망하

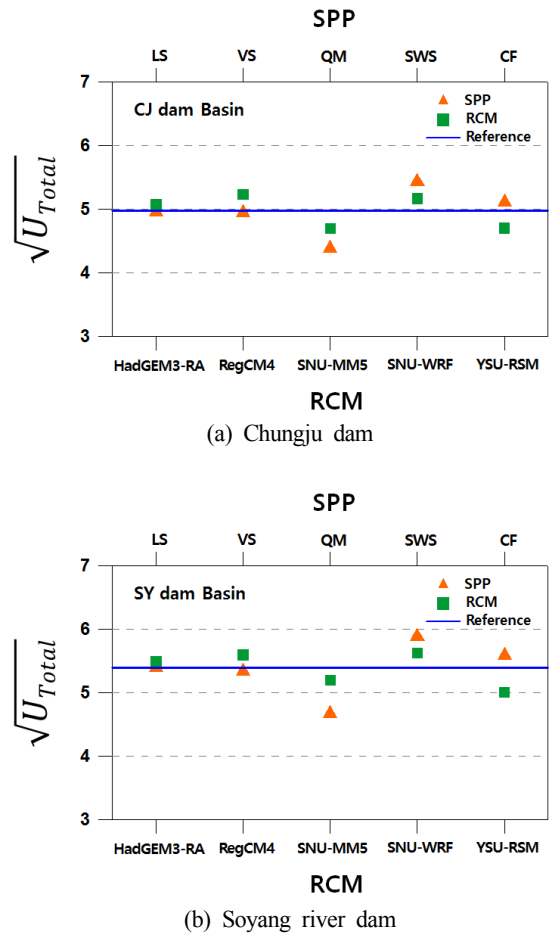


Fig. 8. Uncertainty analysis of future 30 days minimum runoff according to different combination of RCMs and SPPs.

고, 수문모형과 기후변화 시나리오 상세화 기법의 불확실성을 분석하였다. 평가를 위해 5개 RCM, 5개 SPPs, 2개 HYMs를 이용하였으며, 평가지표는 30일 최저유량을 이용하여 충주댐과 소양강댐을 대상으로 평가하였다. 평가를 통해 도출된 주

요 결과는 다음과 같다.

1. 관측자료를 이용한 SWAT 모형과 VIC 모형의 저유량의 모의능력을 평가한 결과, SWAT는 다소 과소 산정되는 것으로 나타났으며, VIC 모형은 과대 산정되는 것으로 나타났다. 동일한 관측자료를 이용하고, 유사한 모의능력을 가지도록 모형 매개변수를 검보정하였음에도 불구하고, 저유량의 경우 관측자료와 비교했을 때 모의능력은 다소 차이가 나는 것으로 나타났다.
2. 기후변화 시나리오를 이용하여 과거기간의 저유량 산정 시 발생하는 오차를 분석한 결과, SWAT 모형은 충주댐 유역의 1.0~1.6 mm 정도로 과대 산정되는 반면, VIC 모형은 0.6~0.7 mm 과소 산정되는 것으로 나타났다. 하지만 VIC 모형이 SWAT 모형에 비해 RCM, SPP 기법에 따라 저유량의 모의 능력의 차이가 극심하게 크게 나타났으며, 이는 VIC 모형이 SWAT 모형에 비해 기후시나리오 적용 시 더욱 민감하게 작용하는 것으로 판단된다.
3. 미래 전망 결과, 충주댐과 소양강댐 모두 SWAT 모형은 평균이 1.0~1.7 mm 정도 증가하고, 표준편차 역시 0.9~1.3 mm 증가하는 것으로 나타났다. 다만, VIC 모형의 경우, 평균값이 -0.7~-0.9 mm 정도 감소하는 경향이 나타났으며, 표준편차 역시 -0.9~-1.2 mm 정도 작아지는 것으로 나타났다. 따라서 수문모형에 따른 평가 결과의 차이가 타 평가단계(RCM, SPP)에 비해 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다.
4. 미래 저유량 전망 시 발생하는 불확실성을 평가 단계별 기여도를 분석한 결과, 30일 최저 유출량 전망 시 수문모형이 41.5%로 가장 높은 기여도가 나타났으며, RCM 6.0%, SPP 12.4%, 상호작용효과는 40.1%로 나타났다. 이는 저유량 모의 시 수문모형에서 발생하는 불확실성이 가장 큰 것을 의미한다. 저유량 모의시 적정 상세화 기법을 분석한 결과, RCM의 경우 HadGEM3-RA, SNU-WRF를 선정하고, SPP 기법은 SWS 기법과 CF 기법을 활용할 경우 불확실성이 가장 적게 발생할 것으로 나타났다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 저유량 평가 시 불확실성 분석을 수행하였으며, 이를 통해 저유량 평가 시 수문모형의 불확실성이 가장 크다는 것을 제시하였다. 저유량 모의능력의 경우, 매개변수 검보정 시 사용하는 CC, RMSE, ME, VE와의 연관관계가 나타나지 않았으며, 저유량을 적절히 평가하기 위해서는 이를 보완할 평가지표가 필요하다고 판단된다. 따라서 현재 사용되고 있는 모형의 활용측면의 기술 개발이 필요하며, 특히 저유량 산정을 위한 매개변수 추정방법에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 수문모형 외에도 상세화 기

법에 따른 불확실성을 평가하여 불확실성을 저감할 수 있는 적정 상세화 기법을 구성할 수 있을 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비 지원(14AWM-PB082564-01)에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Bae DH, Jung IW, Chang H. 2008. Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation. *Climate Research* 35:213-226.
- Bae DH, Jung IW, Lettenmaier DP. 2011. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju basin. *Korea. Journal of Hydrology* 401:90-105.
- Fundel F, Jorg-Hess S, Zappa M. 2013. Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. *Hydrology and Earth System Sciences* 17:395-407.
- Jeong HG, Kim SJ, Ha L. 2013. Assessment of climate change impact on storage behavior of Chungju and the regulation dams using SWAT model. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(12):1235-1247 (in Korean with English abstract).
- KMA. 2010. Assessment of uncertainties in regional climate models and prediction of detailed regional climate change over Korea. RACS 2010-2602.
- Lee MH, Bae DH. 2013. Evaluation of hybrid downscaling method combined regional climate model with step-wise scaling method. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(6):585-596 (in Korean with English abstract).
- Lee MH. 2016. Development and application of climate change uncertainty assessment method on water availability. Ph. D Thesis, Sejong University (in Korean with English abstract).
- Lee MH, So JM, Bae DH. 2016. Development of climate change uncertainty assessment method for projecting the water resources. *Journal of Korea Water Resources Association Submitted* (in Korean with English abstract).
- Liang X, Lettenmaier DP, Wood EF, Burges SJ. 1994. A

- simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research* 99:14415-14428.
- Liang X, Wood EF, Lettenmaier DP. 1996. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modifications. *Global and Planetary Change* 13:195-206.
- Najafi MR, Moradkhani H, Jung IW. 2011. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrologic Processes* 25(18):2814-2826.
- Park JY, Park MJ, Ahn SR, Park GA, Yi JE, Kim GS, Srinivasan R, Kim SJ. 2011 Assessment of future climate change 2. Impacts on water quantity and quality for a mountainous dam watershed using SWAT. *Transactions of the ASABE* 54(5):1725-1737.
- Prudhomme C, Davies H. 2009. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: Future climate. *Climatic Change* 93: 197-222.
- Pushpalatha R, Perrin C, Le Moine N, Andréassian V. 2011. A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology* 411:66-76.
- Rahman M, Bolisetti T, Balachandar R. 2010. Effect of climate change on low-flow conditions in the Ruscom river watershed, Ontario. *Transactions of the ASABE* 53(5): 1521-1532.
- Sloan PG, Moore ID. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research* 20(12):1815-1822.
- Son KH. 2015. Enhancement of hydrological drought outlook accuracy using Bayesian method and their real-time prediction applicability. Ph. D. Thesis, Sejong University (in Korean with English abstract).
- Schultz CL, Ahmed SN, Mandel R, Moltz HLN. 2014. Improvement in HSPF's low flow predictions by implementation of a power law groundwater storage-discharge relationship. *Journal of the American Water Resources Association* 50(4):909-927.
- Staudinger M, Seibert J. 2014. Predictability of low flow - An assessment with simulation experiments. *Journal of Hydrology* 519:1383-1393.
- Wilby RL, Harris I. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, U.K. *Water Resources Research* 42: W02419.