

갈수기 댐유입량 예측성 개선을 통한 다목적댐 계절예측정보 활용 가이드라인 개발

Developing guidelines for supporting dry-seasonal dam operation
based on improved predictability of seasonal dam-inflow prediction

정일원

갈수기 댐유입량 예측성 개선을 통한 다목적댐 계절예측정보 활용 가이드라인 개발

Developing guidelines for supporting dry-seasonal dam operation
based on improved predictability of seasonal dam-inflow prediction

정일원

발간사

최근 우리는 ‘기록적인’ 또는 ‘관측 개시 이래 최고’라는 단어를 자주 접하며 살아가고 있습니다. 지난 2015년은 극심한 가뭄으로 국가적으로 어려움을 겪기도 했습니다. 우려스러운 점은 기후관련 재해가 지구온난화가 지속됨에 따라 더욱 증가될 수밖에 없다는 것으로 이제는 이러한 기후변화영향을 감소한 효율적인 물 이용·관리 대책이 필요한 시대가 되었습니다.

이례적 또는 기록적인 가뭄에 대비하기 위해서는 무엇보다 미리 위험을 판단하고 대비하는 것이 중요하므로 우리 센터에서 생산되는 장기예측정보는 기후와 밀접한 물관리 분야의 사전위험 진단 및 조기대응에 효과적으로 활용될 수 있습니다. 즉, 현재의 물관리 체계에 장기예측정보를 접목하여 유연한 의사결정 체계를 구축하는 전략은 기후변화에 대비하는 가장 효율적인 방법 중의 하나입니다. 지혜로운 토끼는 구멍을 세 개 파 놓는다(교토삼굴)고 합니다. 장기예측 정보 활용은 안정적인 지속가능한 물공급을 위한 또 하나의 대비책이 될 것으로 생각됩니다.

이에 본 센터에서는 APCC의 장기예측정보를 활용하여 갈수기 다목적댐 유입량을 예측하고, 이 정보를 댐운영에 활용할 수 있는 가이드라인을 개발하는 연구를 수행하였습니다. 국내 주요 수자원 공급시설물인 다목적댐의 안정적인 운영은 국가적으로도 중요한 일입니다. 본 연구결과가 향후 국내 다목적댐 운영 계획에 반영되어 가뭄피해를 크게 저감하는 데 활용되기를 기대합니다.

연구결과가 나오기까지 본 연구를 맡아 수행한 정일원 박사의 노고에 감사드립니다. 아울러 연구수행에 자문과 조언을 해주신 K-water 이동희 과장과 물관리센터 실무자 분들, K-water 연구원 분들께도 감사의 말씀을 전합니다. 또한, 연구결과의 개선을 위해 훌륭한 자문을 해주신 세종대 배덕효 교수, 부산대 신현석 교수에게도 진심으로 감사를 표합니다.

2016년 1월
APEC 기후센터
소장 정진승

ABSTRACT

In 2015, South Korea suffered one of the worst droughts in recent years. Seoul and Gyeonggi and Gangwon provinces experienced severe drought conditions, receiving less than 43 percent of the annual precipitation average of the past 30 years. Additionally, the 2015 summer precipitation was less than half of the average. The lack of summer precipitation induced serious shortages in dam storages, which are important supplies for the dry season. K-water, a public company managing South Korea's public water supply system, is fighting to secure public water supply and minimize potential damage that may occur before the subsequent wet season.

To date, K-water has been putting in a lot of efforts into developing a sustainable water supply based on conservative perspective, one that expects a 20-year low-flow frequency dam inflow. However, recent droughts threaten current dam operation rules and water supply systems. In addition, climate change and climate variability are increasing drought risk in South Korea. Therefore, it is urgently necessary to incorporate long-term dam inflow forecasts into their decision-making for more flexible dam operation plans and drought management strategies.

The purpose of this study is to make a guideline to fully utilize the long-term dam inflow forecasts for the dry seasonal multi-purpose dam operation. To this end, we first conducted a literature review on best practices for climate information use among water managers. Next, we developed a method that produces probabilistic dam inflow forecasts based on ensemble streamflow prediction (ESP) and APEC Climate Center's dynamic climate forecasts (i.e. Drip). In addition, we seek to improve the predictability of the future areal averaged precipitation over Soyang dam basin.

Finally, we looked at the current dry seasonal dam operation of K-water and proposed a guideline that probabilistic dam inflow forecasts can be to support the dam operation's decision-making process.

The following results were drawn from our analysis.

1) Based on the literature review, we concluded some insights on enhancing the use of long-term dam inflow forecasts for dam operation. First, the effective integration of seasonal forecast in dam operation decision requires long-term collaborative research between information providers and practitioners. Second, forecast providers are needed to enhance the mutual understanding of the intrinsic process of dam operation decision-making and the process of the dam inflow forecast. Third, long-term research-based relationships between forecast provides and dam operators must be adequately funded and supported to develop effective decision-support systems. Finally, governments should provide incentives for innovation that facilitate the use of long-term dam inflow forecast in decisions.

2) This study detected significant decreasing trends (95% confidence interval) in dry-seasonal runoff rates (=dam inflow / precipitation) in three dams basins (Soyang, Chungju, and Andong). Changes in potential evapotranspiration (PET) and precipitation indices were examined to investigate potential causes of decreasing runoff rates trends. However, there were no clear relations among changes in runoff rates, PET, and precipitation indices. Runoff rate reduction in the three dams may increase the risk of dam operational management and long-term water resource planning. Therefore, it will be necessary to perform a multilateral analysis to better understand decreasing runoff rates.

3) To develop reliable dry-seasonal dam inflow forecast models this study evaluated the performance of three different hydrological models (i.e. GR4J, SAC-SMA, and PRMS). Because GR4J and SAC-SMA do not have snow and PET simulation, this study added a simple temperature-based snowmelt module and Oudin's potential

evapotranspiration method to these two models. Micro genetic algorithm (μ -GA) was employed to optimize the parameters of each hydrological model. We used five statistics based on Nash-Sutcliffe efficiency as the objective function. The results showed that three hydrological models using the square root Nash-Sutcliffe efficiency can simulate dam inflow during both the dry season and the full year period.

4) In order to select the best hydrological model we used two performance matrices, correlation coefficient and the root mean square error. SAC-SMA and PRMS showed better performances than GR4J for simulating dry-seasonal dam inflow of Soyang dam basin. Finally SAC-SMA was selected for the dam inflow forecast model based on three criteria: calculation time, number of parameters, and simplicity of model structure. To determine the warm-up period of SAC-SMA, we tested the conversion period of simulated flows using 300 randomly generated states variables in SAC-SMA. In conclusion, a three year period was enough to avoid the initial condition problem of SAC-SMA model simulation.

5) This study developed probabilistic dam inflow forecast methods, ESP and dynamic reservoir inflow prediction (DRIP). To evaluate the performance of ESP and DRIP we employed ranked probability skill score (RPSS) and probability of detection (or hit rate). ESP showed good predictability with high RPSS ($\rightarrow 0.5$) for every month and every lead times (1-month, 2-month, and 3-month). DRIP also showed good performance in predicting dam inflow for every month except June.

6) To improve the predictability of June precipitation forecast, we tried to estimate the predictability of climate variables forecasts including SLP, PREC, T2M, T850, U850, V850, and Z500. A five-fold cross validation method was used to identify reliable predictability of climate variables for forecasting Soyang' June precipitation. The highest predictive regions for June precipitation were located near the Gulf of Mexico. Therefore, developing statistical models between predictive regions and

observed rainfall will be necessary to improve the predictability of Soyang dam June precipitation.

7) Finally, this study proposed a guideline to utilize dam inflow forecasts in decision-making on dam operation regarding droughts. We suggested several scenarios that guide how long-term forecasts can be used in dam operation decisions in terms of each response stage and according to dam storage levels.

The probabilistic dam inflow forecasting technique developed in this study can contribute to the dry-seasonal multi-purpose dam operation decision-making by supporting useable information of long-term forecasts and its reliability. In addition, probabilistic dam inflow forecast will be useful to establish K-water's monthly and annual dam operation plans, manage efficiently water supply and demand, and maintain dam storage level against drought.

목 차

1. 연구의 개요	1
1.1 연구의 배경 및 필요성	1
1.2 연구의 목적 및 범위	3
1.3 연구 추진 체계	3
2. 기후예측정보의 수자원관리 의사결정 활용사례 분석	5
2.1 수자원 의사결정과 기후정보 활용	5
2.2 캘리포니아 INFORM 프로젝트	10
2.3 기타 연구사례	16
2.4 시사점	17
3. 갈수기 댐유입량 변화 고찰	19
3.1 대상유역 및 분석방법	19
3.2 갈수기 댐유입량 변화 분석	20
3.3 잠재증발산량 및 강수지표 변동성 분석	27
3.4 요약 및 시사점	36

4. 갈수기 댐유입량 예측모델 개선	37
4.1 댐유입량 예측모델 구축	37
4.1.1 수문모델 선정	37
4.1.2 갈수기 수문특성을 고려한 매개변수 추정	41
4.1.3 최적 수문모델 선정	51
4.1.4 유출모델 초기치 영향 분석	56
4.2 확률론적 댐유입량 예측모델 구축	57
4.2.1 일단위 강수 및 기온자료 생성	57
4.2.2 Ensemble Streamflow Prediction (ESP) 개발	60
4.2.3 Dynamic Reservoir Inflow Prediction (Drip) 개발	62
4.3 ESP와 Drip 예측성 평가	66
5. 기후예측모델의 댐유역강수량 예측성 개선방안	71
5.1 교차검증을 이용한 강수예측성 평가	71
5.2 유역강수량 예측성 평가 및 개선방안	73
6. 갈수기 댐운영 지원을 위한 기후정보활용 가이드라인 개발	86
6.1 국내 다목적댐 갈수기 운영체계 분석	86
6.1.1 기상 및 기후예측정보 활용 현황	86
6.1.2 갈수기 및 가뭄시 댐운영	88
6.2 대응단계별 댐운영방식을 고려한 기후정보 활용방안	93
6.3 기후정보 댐운영 활용성 제고를 위한 제언	97
7. 결론	99

7.1 주요 결과-----	99
7.1.1 기후예측정보의 수자원관리 의사결정 활용사례 분석-----	99
7.1.2 갈수기 댐유입량 변화 고찰-----	100
7.1.3 갈수기 댐유입량 예측모델 개선-----	101
7.1.4 기후예측모델의 댐유역강수량 예측성 개선방안----	102
7.1.5 갈수기 댐운영 지원을 위한 기후정보활용 가이드라인 개발-----	103
7.2 연구의 기대효과-----	105
7.3 향후과제-----	106
 ■ 참고 문헌-----	 107
 ■ 부록-----	 114
부록 1. 10월-5월 갈수기의 강수, 댐유입량, 유출율 변화--	114
부록 2. 기후예측변수별 선행예측시간별 소양강댐 강수량 예측성능 분석 결과-----	120

1. 연구의 개요

2014년부터 시작된 가뭄은 ‘물 쓰듯 한다’라는 표현이 무색할 정도로 물의 소중함을 느끼게 한다. 1960년대 이후 구축된 물공급 시설물(다목적댐, 용수공급전용댐, 농업용저수지, 하천취수시설 등)의 확충과 물관련 국가부처 및 공공기관(K-water 등)의 보수적 용수관리로 인해 일부 제한급수 지역을 제외하고는 가뭄의 심각성에 대한 국민들의 인식은 매우 낮은 수준이다. 그러나 최근의 가뭄 발생빈도와 피해의 증가는 지금까지의 국내 물공급관리에 대한 전반적인 점검과 선제적 가뭄관리라는 패러다임의 도입을 요구하고 있다.

선제적 댐운영을 통한 가뭄 및 용수수급관리를 위해서는 장기예측정보가 댐운영 의사결정과정에 도입되어야 한다. 현행 댐운영 의사결정은 20년 빈도의 갈수유입량을 기준으로 연간 및 월간 댐운영계획을 수립하고 있다. 현행 댐운영관리에 변화되는 기후조건을 고려하여 안정적이고 탄력적으로 댐을 운영하기 위해서는 장기예측정보를 활용하여 댐운영계획의 유연성을 사전에 확보하는 개선된 의사결정 방안 마련이 필요하다. 본 연구에서는 APCC에서 생산되는 계절예측정보를 이용하여 확률론적 댐 유입량을 예측할 수 있는 기술을 개발하고, 이를 실제 댐운영 의사결정에 활용할 수 있는 방안을 고찰하였다.

1.1 연구의 배경 및 필요성

국내 다목적댐 유입량은 최근 10년(2003-2012) 동안 강수량의 변동 폭이 확대됨으로써 최소 84억 톤에서 최대 293억 톤으로 연도별 편차가 커지고 있으며(최대 3.4배), 봄가뭄도 2-3년 주기로 빈발하고, 극한가뭄 주기도 과거 14년 정도에서 7년 주기로 짧아지고 있다(국토교통부, 2011). 특히 2014년과 2015년에는 봄가뭄에 이은 7월초까지의 마른 장마의 영향으로 일부지역에 제한급수 및 농업용수공급 차질을 야기하였으며, 전국 다목적댐 평균 저수율이 35.9%(평년의 68% 수준)로 국내 용수공급의 65%를 담당하고 있는 K-water는 댐운영에 어려움을 겪었다.

K-water는 20년 빈도의 갈수량이 유입된다는 가정하에 보수적인 관점에서 다목적댐을 운영하고 있으나 봄가뭄이 초여름까지 지속될 경우 공급량을 줄이고 병물지

원, 지하관정을 개발하는 사후적인 방안 외에는 구체적인 사전 대응체계는 부재한 실정이다. 이러한 측면에서 중장기 기후예측정보에 기반한 댐유입량의 사전예측은 갈수기 안정적 용수공급과 탄력적인 댐운영을 통해 발생 가능한 사회경제적 피해를 저감하는데 기여할 수 있다.

국내 생공농업용수 이용량은 연간 약 195.4억 m^3 이며, 이중 생활용수가 39.2%, 공업용수가 12.0%, 농업용수가 48.8%를 차지한다(국토교통부, 2013). 주요 물공급시설인 다목적댐과 발전전용댐 등의 용수공급능력은 약 189억 m^3 으로 양적인 측면에서는 대부분의 생공농업용수 이용량을 공급할 수 있는 수준이다. 그러나 용수공급능력의 지역적인 편차로 인해 가뭄은 반복적으로 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위한 방안으로 광역상수도망 확충, 댐보저수지연계운영이 수행되고 있다. 물이 풍부한 지역에서 부족한 지역으로 직접 물을 이동하는 방안은 효과적이나 이를 시행하기 위해서는 지역간 이해당사자의 의견을 조율하는 과정이 사전에 필요하다. 장기에측정보는 이러한 물배분 의사결정과정에서도 중요한 참조자료가 될 수 있다.

계절예측정보를 활용한 수자원관리에 대한 연구는 선진국(미국, 유럽, 호주 등)을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 미국에서는 계절예측정보를 활용한 실시간 가뭄예측정보(www.cpc.ncep.noaa.gov/)를 전미지역에 대해 서비스하고 있으며, 지역별로 수자원계절예측 정보의 활용성을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다(e.g., Obeysekera et al., 2007; Gong et al., 2010; Bastola et al., 2013). 유럽에서는 2012–2017년 동안 EUPORIAS(European Provision of Regional Impacts Assessments on Seasonal and Decadal Timescales)를 중심으로 수력발전 기업에 제공할 수 있는 신뢰성 높은 계절유량예측 기술 개발을 목표로 연구를 수행하고 있다(www.euporias.eu). 호주에서는 호주기상청(BOM)에서 제공하는 약 200여 개의 주요 수문지점에 대한 계절예측정보를 이용하여 댐운영, 하천유지유량, 물분배, 제한급수, 농업관련 의사결정 등에 이용하고 있다(정일원, 2015). 이들 연구에서는 수문학적 예측성을 향상하기 위해 역학적 다운스케일링 기법 개발, 계절예측정보의 편의(bias)보정 기법 개발, 유출예측결과의 후처리(post-processing) 기법 개발 등 다양한 시도들을 통해 수자원관리 활용성 제고를 위해 노력하고 있다(e.g., Luo and Wood, 2008; Wood and Schaake, 2008; Wu et al., 2011; Shukla and Lettenmaier, 2013).

장기예측정보는 미래를 예측한다는 측면에서 필연적으로 불확실성(uncertainty)이 포함한다. 보수적으로 운영되는 국내 다목적댐의 운영특성상 불확실성이 포함된 장기예측정보를 의사결정과정에 녹여 넣기 위해서는, 실질적인 활용성 제고에 관한 연구가 필요하다. 지금까지 국내에서는 장기수문예측의 불확실성을 줄이기 위해 원격상관(teleconnection) 기반의 통계적 예측정보와 APCC의 역학적 예측정보를 결합하여 예측성을 높이는 연구들이 주로 진행되었다(e.g., 조재필, 2015; 정일원, 2015). 그러나 아직까지 장기 수문-기후예측정보가 수자원관리 의사결정에 어떻게 융합될 수 있을지에 대한 연구는 미미한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 장기예측정보가 수자원관리 의사결정에 활용된 주요 선진국 사례를 고찰하고 이를 통해 국내 다목적댐 운영에 장기수문예측정보를 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

1.2 연구의 목적 및 범위

본 연구의 목적은 장기 댐유입량 예측정보를 갈수기 다목적댐 운영에 활용할 수 있는 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 먼저 선진국의 기후정보 수자원관리활용 성공사례를 조사하고, 국내 상황을 고려한 시사점을 도출하고자 하였다. 그 다음 댐유입량 예측기술을 개선하기 위해 확률론적 예측정보를 생산할 수 있는 기술을 개발하고, 예측성을 검증하였다. 이 과정에서 갈수기 관측 댐유입량 자료에서 나타나는 경향성을 분석하였으며, 수자원분야의 전통적인 예측기법인 ESP(Ensemble streamflow prediction)와 APCC 기후예측정보를 활용한 Drip(Dynamic reservoir inflow prediction)기법을 개발하였다. 또한, APCC 기후예측정보의 댐강수량 예측성 교차 검증분석을 통해 향후 예측성 개선방향을 모색하였다. 마지막으로 K-water의 갈수기 댐운영방안을 살펴보고, 장기댐유입량예측정보가 댐운영 의사결정과정에 활용될 수 있는 방안을 제안하였다.

1.3 연구 추진 체계

본 연구의 추진 체계는 문헌조사를 통한 장기예측정보의 수자원분야 활용현황 및 성공사례 분석(2장), 국내 다목적댐 갈수기 유입량 자료의 변동성 분석(3장), 확률론

적 갈수기 댐유입량 예측기술 개발 및 검증(4장), 예측성 개선을 위한 기후예측인자별 예측성 검증(5장), 장기예측정보 갈수기 댐운영활용을 위한 가이드라인 개발(6장), 주요결과 요약 및 제언(7장)으로 구성하였다.

2장에서는 미국 국가연구위원회에서 발간한 ‘계절 및 격년 예측과 관측정보를 이용한 수자원분야의 의사결정 지원 사례 및 평가’라는 보고서, 미국 캘리포니아주의 물관리사례 등을 중심으로 장기예측정보의 수자원의사결정 활용성 제고 방안에 대해 분석하였다. 3장에서는 국내 주요 다목적댐인 한강유역의 소양강댐, 충주댐과 낙동강유역의 안동댐 자료에서 나타나는 갈수기(10월-6월) 유출특성을 분석하고 시사점을 도출하였다. 4장에서는 장기 댐유입량 예측성 개선을 위해 수문모델별 1월-6월 예측성 검증을 통한 최적 수문모델 선정, 확률예측정보 생산 및 예측성 검증을 다루었다. 5장에서는 APCC 기후모델에서 제공하는 기후예측인자를 이용하여 댐유역의 강수량을 예측할 수 있는 방안을 분석하고 개선방향을 제안하였다. 6장에서는 현행 다목적댐 운영 의사결정과정을 분석하고 이 과정에 본 연구에서 개발된 장기예측정보가 활용될 수 있는 방안을 고찰하였다. 마지막으로 7장에서는 본 연구에서 도출된 주요결과를 요약하고, 연구의 미비점과 향후 개선점을 제시하였다.

2. 기후예측정보의 수자원관리 의사결정 활용사례 분석

2.1 수자원 의사결정과 기후정보 활용

수문기후예측정보는 수자원 의사결정자가 의사결정을 내리는데 요구되는 시공간 규모에 따라 다르게 활용될 수 있다(Fig. 1). 활용도는 시간규모에 따라서는 Fig. 1에 서와 같이 크게 네 개 규모로 구분된다. 십년 규모(decadal)의 예측정보는 인프라 구축(댐 및 저수지, 제방, 에너지발전설비, 폐수처리시설, 상하수도, 지하관정, 관측망 신설 등)에 대한 정책결정뿐 아니라 지자체간 공유하천이용, 토지개발, 유역환경관리를 포함하는 규정, 제도, 정책들에 이용될 수 있다. 경년 및 계절 규모의 정보는 저수지 및 댐의 물공급계획, 가뭄비상계획, 농업관리계획 수립에 활용될 수 있다. 이 단계에서는 수문기후예측정보뿐 아니라 대상분야별 수요예측(물공급, 에너지, 농업생산량 등)이 중요한 의사결정의 요소로 작용한다. 단기 및 중기예측정보는 실무자의 운영관리 측면에서 이용 되는데, 주로 홍수기 댐방류 및 여수로 운영, 생공농업용수 및 하천유지유량 공급 결정시 유용하다. 초단기 정보는 실시간 운영과 연계되어 있다. 이 단계의 의사결정에서는 시간적인 문제로 이해당사자가 참여하는 것은 매우 어려우며, 대부분의 결정은 정부기관이나 공공기관에 의해 이루어진다.

미국 국가연구위원회(National Research Council)에서는 USCCSP(U.S. Climate Change Science Program)의 일환으로 ‘계절 및 격년 예측과 관측정보를 이용한 수자원분야의 의사결정 지원 사례 및 평가’라는 보고서를 출간하였다(NRC, 2008). 이 보고서에서는 방대한 문헌조사를 바탕으로 기후예측정보를 수자원 관리 의사결정에 효과적으로 통합시키기 위한 방안에 대해 모색하였다.

이 보고서에서는 먼저 장기기후예측정보가 수자원 관리 의사결정에 통합되지 못하는 주요원인을 네 가지로 정리하였다. 첫 번째는 수자원 의사결정과정의 범위 및 복잡성이다. 이것은 다양한 물관련 정부부처 및 기관들이 의사결정 및 실행에 관한 책임을 특정 기관이 아니라 서로 공유(shared responsibility)함으로써 발생하는 문제점이다. 두 번째는 유연하지 못한 정책과 변화를 저해하는 조직의 규칙이다. 이것은 정부기관이 전통적으로 위험회피경향과 권한을 독점 또는 유지하려는 특성으로 인해 기존의 관행을 변경하는 것을 꺼려하는 데서 기인하는 문제점이다. 세 번째는 상황별

의사결정에 따라 고려되는 시공간 스케일이 상이하다는 것이다. 의사결정의 공간규모는 지자체, 시군단위, 도단위, 국가차원뿐 아니라 하천, 소유역, 중유역, 대권역 등에 따라 변한다. 또한, 시간규모도 실시간운영, 운영계획수립, 관리방안수립, 정책수립에 따라 수 시간에서 수십 년까지 변하게 된다. 마지막 네 번째는 기후영향에 대한 분야별 잠재적 취약성 정도의 정량적 평가 부족이다. 이는 동일한 기후정보에 대해 과학분야, 정책분야, 사회분야에서 각각 중시하는 측면에 따라 인지하는 기후위험의 정도가 상이함으로 인해 발생하는 문제점이다.

NRC(2008) 보고서에서는 기존연구사례를 분석한 결과 기후정보의 수자원분야 활용이 제한되는 이유가 기후정보의 예측성의 문제뿐 아니라 수자원 의사결정과정에 대한 정보제공자의 이해부족 및 의사결정자가 필요로 하는 형태의 정보제공 부재에 기인한다고 지적하였다(e.g., Jacobs et al., 2004; Sarewitz and Pielke, 2007; Rayner et al., 2005). 이러한 문제를 해결하기 위해서는 예측정보에 대한 의사결정자의 이해력 향상, 수요기반(user-driven)정보 제공을 위해 과학자와 의사결정자의 공동연구개발 및 정보제공자의 사용 가능하고, 신뢰성이 평가된 정보전달 등이 중요하다고 제시하였다.

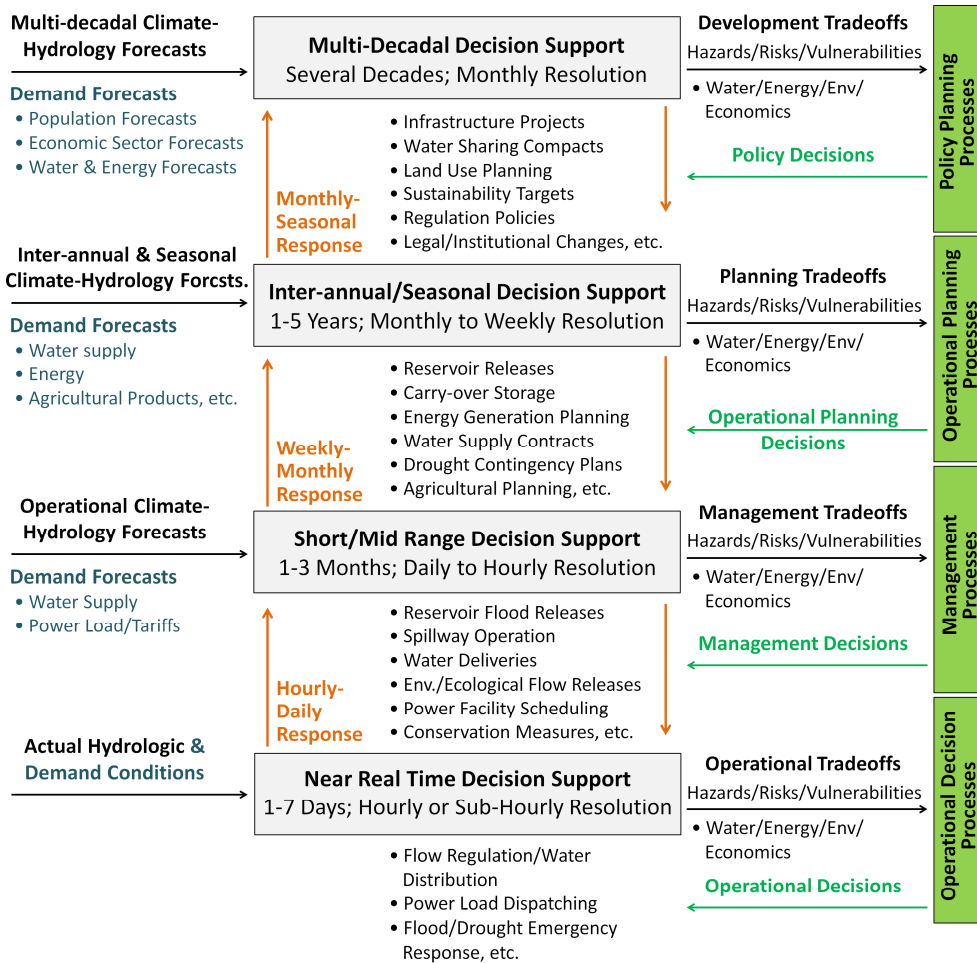


Figure 1 Water resources decisions: Range and attributes (HRC-GWRI, 2006; NRC, 2008)

의사결정자의 예측정보에 대한 이해력 향상을 위해서는 예측결과의 검증정보가 예측정보와 동시에 전달되어야 한다. 대부분의 정보제공자는 실시간 예측정보 생산에만 초점을 맞추어 예측정보가 얼마나 신뢰할 수 있는지에 대한 정보제공은 충분히 전달되지 않고 있다(Welles et al., 2007). Fig. 2는 미국의 NRCS(Natural Resources Conservation Service)와 미기상청(National Weather Service, NWS)에서 1996년부터 2005년까지 제공한 Gunnison 강의 여름철 하천유량예측정보의 예보정확도를 검증한 것이다. 이러한 정보는 실무자가 양 기관에서 제공되는 예측정보를 통합하여 의사결정을 할 때 유용한 참고자료로 이용될 수 있다.

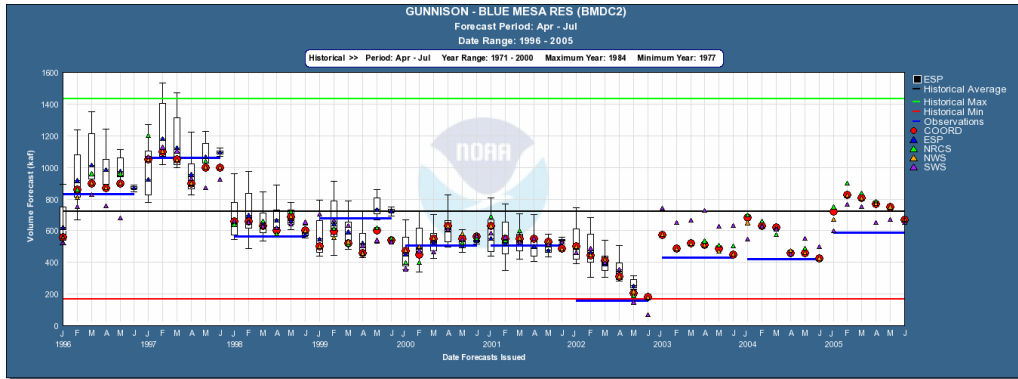


Figure 2 Comparing ESP and statistical forecasts from the NRCS and NWS for a recent 10-year period. The forecasts are for summer (April—July) period streamflow on the Gunnison River, Colorado (quoted from NRC (2008))

미기상청에서는 2005년에 ‘River Forecast Verification Plan’을 수행하였는데, 주요 내용은 수문예측 검증절차 및 검증기법 개발, 하천예측센터(River Forecast Centers)로의 예측 및 검증결과 배포 프로세스 개발이다(Fig. 3). 이 프로그램을 통해 지금까지 약 10년의 계절예측에 대한 검증결과를 관리하고 있으며, 통계적으로 유의한 자료기간이 확보되면 향후 예측정보가 가지는 구조적인 편의(systematic bias)에 대한 후처리(post-processing) 또는 보정(calibration)을 수행할 예정이다. 이미 몇몇 연구에서는 앙상블 수문예측정보가 가지는 편의를 제거하기 위한 후처리기법을 제안하기도 하였다(e.g., Seo et al., 2006; Wood and Schaake, 2008).

미래 예측정보는 본질적으로 불확실성을 포함하고 있다. 이 불확실성은 일반적으로 예측기간이 늘어날수록 증가될 수 있다. 따라서 장기예측정보는 단일 값이 아니라 발생 가능한 특정 값의 확률로서 제공된다. 확률값으로 제공되는 정보는 기존의 수자원관리 의사결정에 도입하는 과정에서 주요 장벽으로 작용하기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 정보제공자와 의사결정자의 지속적인 대화를 통해 의사결정자의 이해수준을 향상시키는 것이 필요하다.

GLERL(Great Lakes Environmental Research Laboratory)는 미국 내에서 최초로 확률 기후예측정보를 수자원 관리에 필요한 수문변수를 예측하는데 도입한 공공기관이다. GLERL은 국립해양대기청(NOAA) 산하기관으로 Great Lakes와 연안의 해양환경관리를 담당하고 있다. 이들은 기후예측센터(Climate Prediction Center,

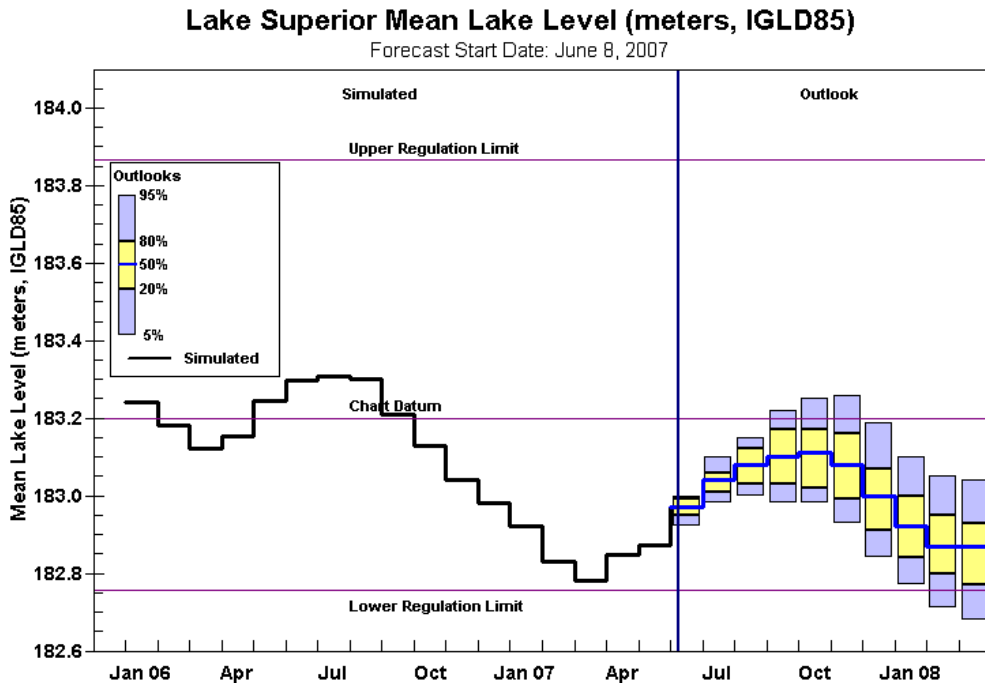


Figure 4 Probabilistic forecasts of future lake levels disseminated by Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL), <http://www.glerl.noaa.gov/wr/ahps/curfcst/>

2.2 캘리포니아 INFORM 프로젝트

캘리포니아는 미국 내에서 가장 많은 인구(약 3,800만 명)와 경제규모(2.2조\$)를 지닌 주이며, 동시에 세계 9위 규모의 농산물 생산지이다. 캘리포니아의 연간 물수요량은 2005년에서 2010년 평균기준 약 530억 m^3 이며, 이중 80%가 농업용수, 나머지 20%는 생공용수로 이용된다. 연평균 강수량은 584mm로 이중 약 2/3가 북부캘리포니아 지역에 편중되며, 겨울철(12월-2월)에 연강수량의 50%가 집중된다. 반면 주 전체 물사용량의 2/3은 남부지역에서 소비된다. 캘리포니아는 이러한 시공간적인 수자원부존량의 불균형을 해소하기 위해 약 14,000여 개의 댐 및 저수지를 운영 및 관리하고 있으며(Fig. 5), 대형수로를 통해 북부에서 남부로 물수송, 지하수이용(전체 물이용량의 38%) 등을 활용하고 있다(K-water 물관리센터, 2015). 캘리포니아에서는 효과적인 북부지역 수자원관리 및 물배분 의사결정 지원을 위한 다양한 연구프로젝트가 수행되었다. 2015년 현재 캘리포니아는 2012년부터 계속된 강수량 부족으로 인한 1,200년 만의 가뭄을 겪고 있지만 그동안의 투자로 인해 물공급중단이라는 최

악의 상황은 막아내고 있다(Fig. 5).

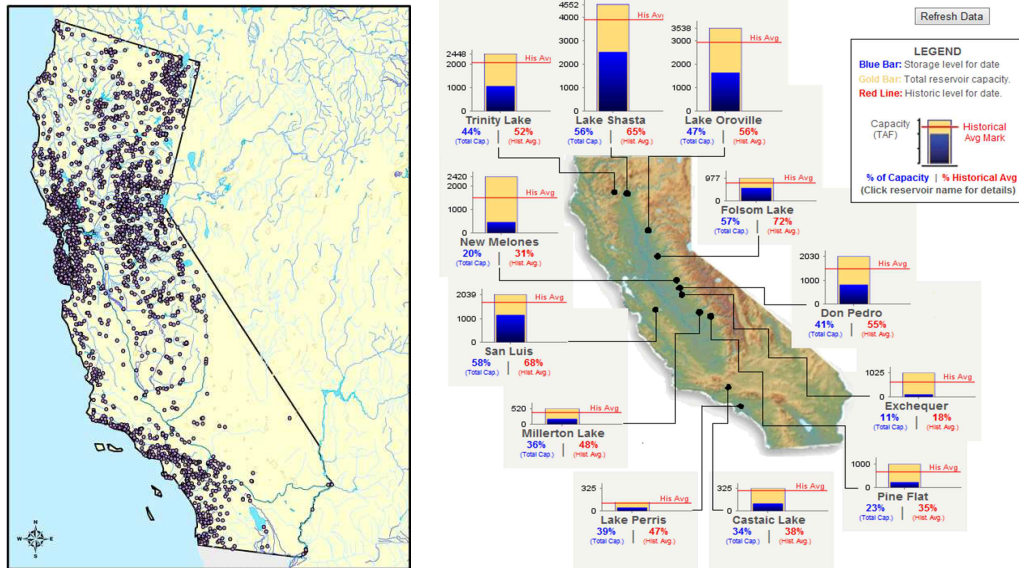


Figure 5 Dams and reservoirs in California (left) and Major reservoirs' capacity, historical level, and current storage level in May 2015 (California Department of Water Resources, www.water.ca.gov)

INFORM은 국립해양대기청(NOAA), CALFED, CEC(California Energy Commission)가 공동으로 연구를 지원하고 HRC(Hydrologic Research Center)와 GWRI(Georgia Water Resources Institute)가 2002년부터 수행하고 있는 장기 프로젝트이다. 이 프로젝트에는 미기상청 산하 CNRFC(California-Nevada River Forecast Center), 캘리포니아 수자원국, 미개척국산하 중부 Central Valley 운영국, Sacramento 관할 미공병단, 지역 기관 및 이해당사자 등이 참여하는 워크숍 개최를 통해 INFORM 개발 및 개선에 대한 정보를 지속적으로 공유하고 있다.

이 프로젝트의 핵심목표는 두 가지인데, 하나는 북부캘리포니아 지역의 하천과 저수지시스템 관리를 위한 통합예측관리시스템 개발이고(Fig. 6), 다른 하나는 다양한 시공간 스케일의 기상 및 기후, 수문예측정보를 이용한 준실시간(near-real-time) 수자원시스템 운영 및 검증을 통해 물공급, 홍수조절, 수력발전, 환경보호 측면에서 예측정보의 활용성과 가치를 평가하는데 있다(Fig. 7).

INFORM은 앙상블 기후예측정보를 생산하는 NCEP과 하천예측정보를 생산하는 CNRFC의 운영모델을 결합하였다. INFORM의 예측시스템은 정기적으로 NCEP(National Center for Environmental Predictions)에서 제공하는 GFS(Global Forecast System) 앙상블 중관예측과 기후예측정보를 수집한다. GFS 앙상블 중관예측정보는 실시간 단기예측(0-41일)에, 장기 기후예측정보는 장기예측(1-9개월)에 활용된다. INFORM에서는 두 가지 기후예측정보를 이용하는데, 하나는 GFS 기반 예측정보이며, 다른 하나는 과거 관측자료가 미래에 재현된다는 가정을 이용하는 ESP(Ensemble Streamflow Prediction)기반 정보이다. ESP는 미기상청에서 수자원예측을 위해 전통적으로 이용해 온 기법이다. 기후예측정보는 통계적 상세화 또는 보정을 거쳐 강우유출모델에 입력되고, 최종적으로 앙상블수문예측자료를 생산하게 된다.

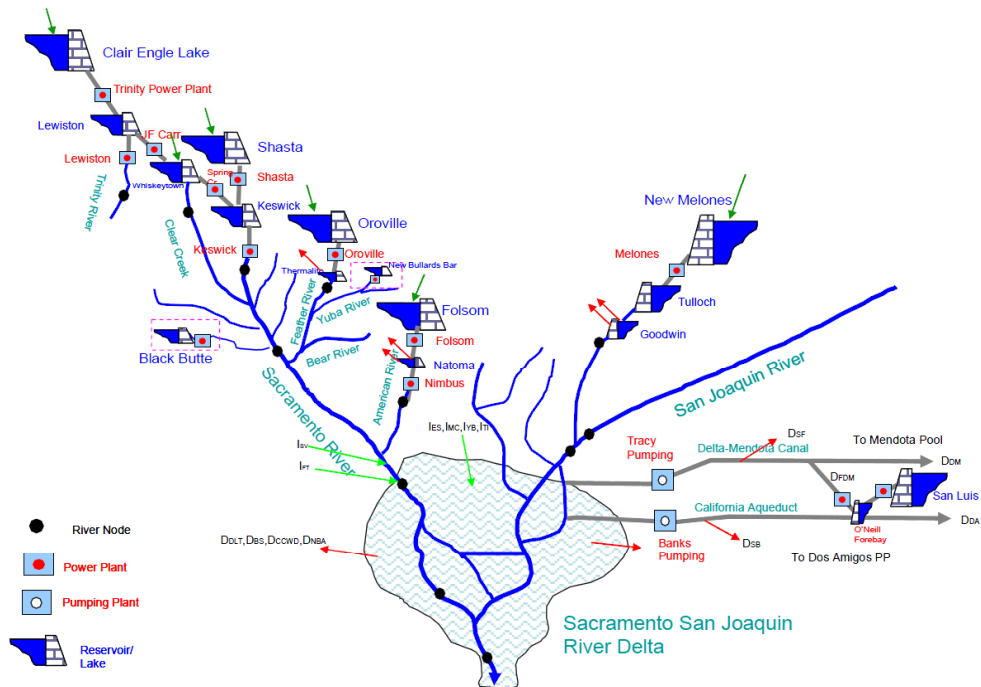


Figure 6 A schematic of INFORM Reservoir and River system (quoted from HRC-GWRI, 2006)

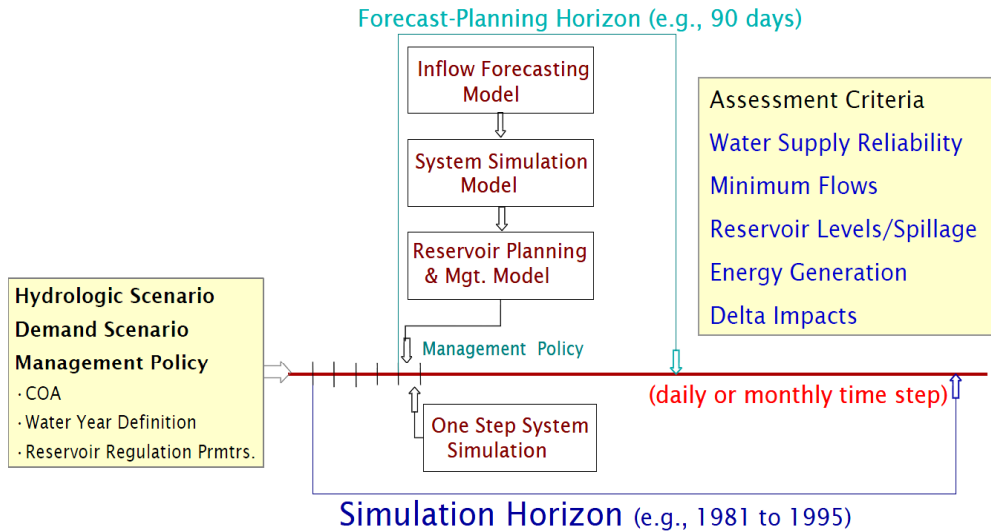


Figure 7 Scenario and policy assessment models (quoted from HRC-GWRI, 2006)

기후예측결과와 시공간해상도를 수문모델 및 수자원시스템모델에 필요한 규모의 정보로 가공하기 위해 INFORM에서는 확률론적 기후예측 상세화(Probabilistic Climate Forecast Downscaling)(Carpenter and Georgakakos, 2001)를 적용하였다. 이 방법은 공간적으로 유역의 중심과 가까운 CFS hindcast(1981–2003)의 표준아노말리(standardized anomaly)를 계산하고 관측자료의 평균과 표준편차를 적용하여 기후모델의 편이(bias)를 보정한다. 시간적으로는 보정된 월별 CFS 앙상블 예측정보와 근접한 월별 관측강수량을 추출하고 이에 해당하는 6시간단위의 강수 및 기온정보를 수문모델의 입력자료를 생산한다. Fig. 8은 기후예측정보의 강수예측치와 유역평균강수량의 발생빈도를 일치시키는 과정을 보여준다.

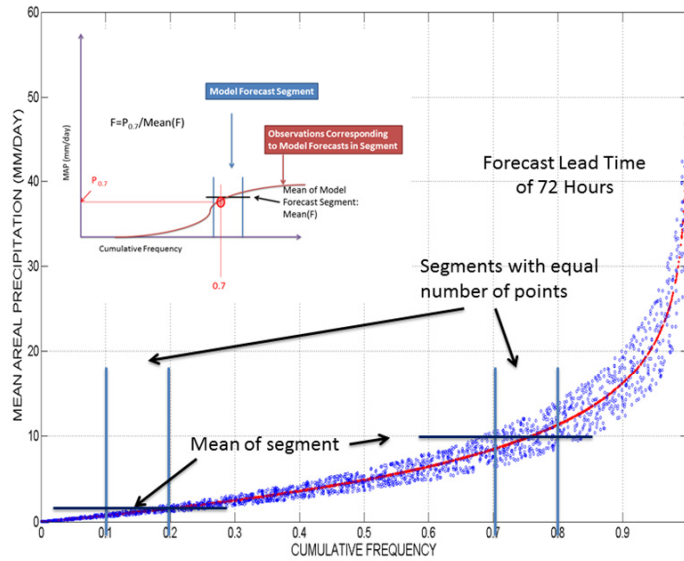


Figure 8 Probabilistic bias adjustment of mean areal precipitation (quoted from HRC-GWRI, 2006)

INFORM은 예측과 의사결정지원(DSS)이 통합된 시스템이다. INFORM 의사결정 지원시스템은 다양한 시간스케일(매시간, 매일, 계절, 경년, 수 십년)에서 저수지 및 댐 운영관리 및 계획 의사결정을 지원하도록 설계되었다. INFORM DSS에는 주요 수 자원시설물에 대한 계획 및 관리 전략을 현실적으로 도출하기 위해 주요 저수지 및 댐, 물공급시설 및 네트워크, 하천취수장 등이 구현되어 있으며(Fig. 6), 양상블예측(Fig. 9)을 사용하여 최적의사결정을 수행할 수 있는 기능도 탑재되어 있다.

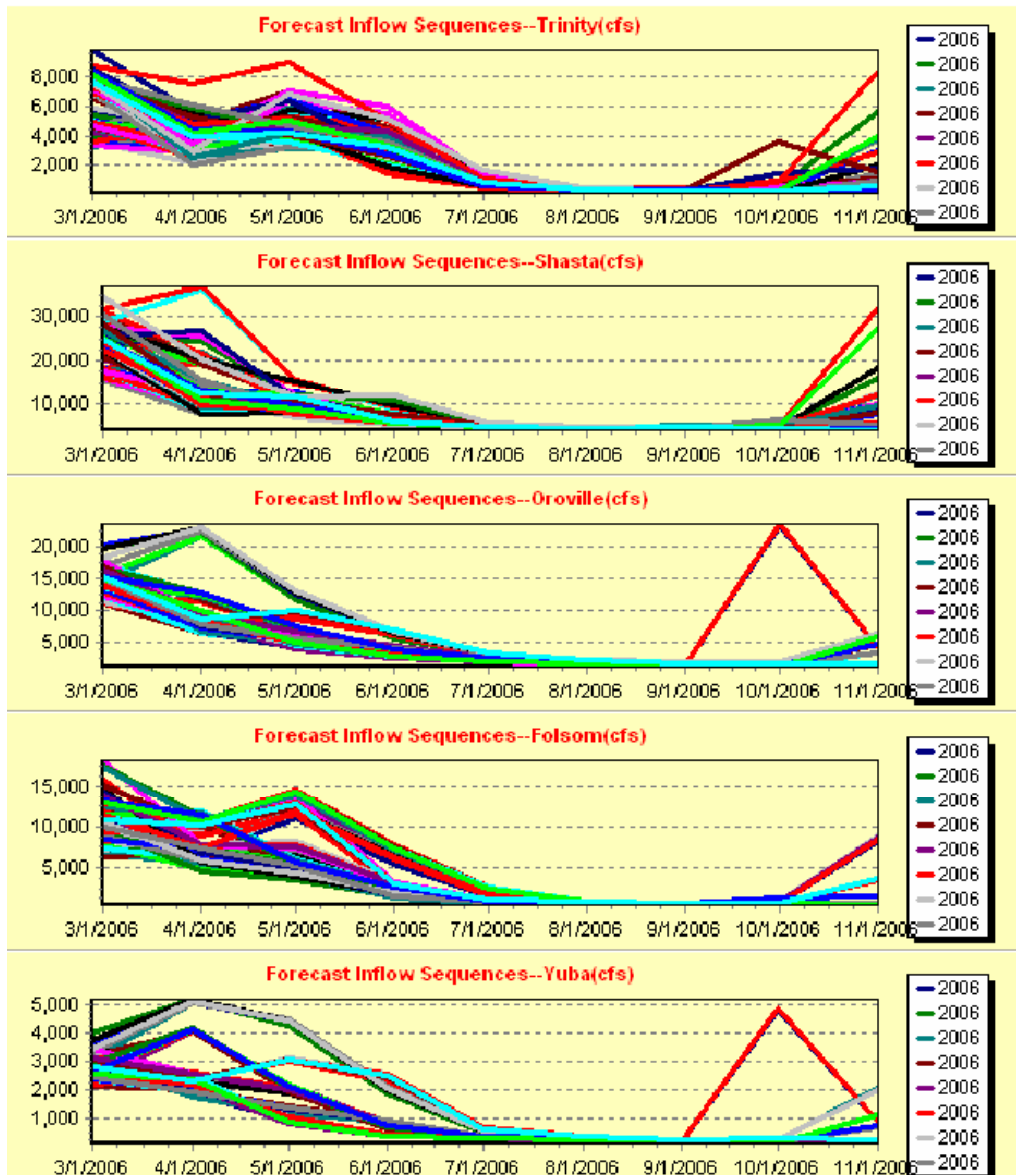


Figure 9 Long range inflow forecast from March 1, 2006 (quoted from HRC-GWRI, 2006)

2.3 기타 연구사례

INFORM외에도 선진국을 중심으로 기존의 댐 및 물공급관리 운영시스템에 장기예측정보를 통합하여 용수공급 및 가뭄관리에 활용하기 위한 연구가 2005년 이후 활발히 진행되고 있다(e.g., Obeysekera et al., 2007).

SPUD(Seattle Public Utility District)는 저수지 운영계획에 CPC에서 제공하는 계절예측정보와 적설(snowpack) 및 해수면온도자료(sea surface temperature)를 결합한 유입량 예측정보를 활용하고 있다. SPUD는 2005년 시애틀에서 발생한 이상가뭄시 예측정보를 기반으로 저수지 운영계획을 조정함으로써 사전 위험 저감에 실질적인 효과가 있었다고 보고하였다(Basketfield, 2005). 미북동부 Delaware River에서도 확률 계절유량예측정보를 활용한 경우와 기존 운영방식을 비교 평가한 결과 가뭄상황에서 유량예측정보를 활용한 경우가 뉴욕시 물공급의 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 보였다(Gong et al., 2010). Guihan (2014)은 Salt Lake시 Parley's drinking water system에 장기유입량 예측정보를 활용한 연구를 수행하였으며, Ficci et al. (2015)는 프랑스 센강의 다중 저수지 연계운영에 앙상블예측정보의 활용가능성을 제시하였다. Fig. 10은 미국 내에서 기후예측정보를 수자원관리에 활용한 지역과 관련 연구를 제시한 것이다.

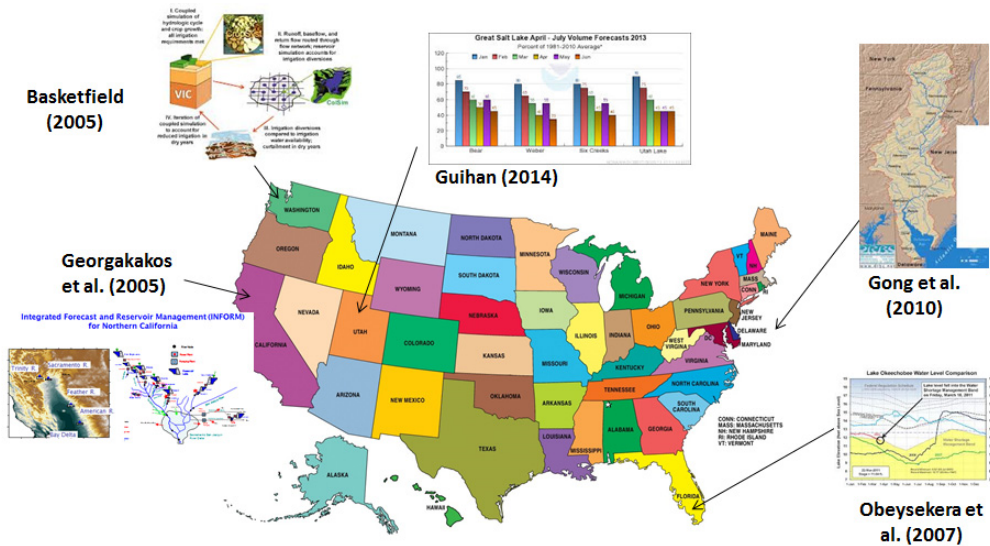


Figure 10 Case studies of using seasonal climate forecast for regional water management in U.S.

2.4 시사점

본 연구에서는 계절 또는 장기기후예측정보를 활용하여 저수지 관리 및 물공급관리를 수행한 사례를 분석하였다. 아래는 국외 사례분석을 통해 국내 수자원관리에 장기 기후예측정보를 효과적으로 융합시킬 수 있는 방안에 대해 정리한 것이다.

첫째, 정보제공자와 의사결정자의 융합연구가 필요하다. 본질적으로 기후예측정보의 수자원 의사결정 활용연구는 기후학자, 수문학자, 수자원시스템 전문가, 이해당사자가 참여하는 다학제간 성격을 지니고 있기 때문이다. INFORM은 시스템 개발시점부터 다양한 수자원관리 이해당사자를 참여시켰다. 이러한 접근방법은 이해당사자가 각자 분야에서 수자원관련 의사결정을 위해 INFORM을 어떤 식으로 활용할 수 있을지를 고민하게 했으며, 결과적으로 활용성을 높이는 데 기여했다.

둘째, 의사결정자나 실무자의 장기예측정보에 대한 이해도 향상이 필요하다. 이를 위해서는 정기적인 교육프로그램을 운영하는 것도 하나의 방안이 될 수 있다. 또한, 기후분야에서와 같이 실시간검증시스템을 구축하여 수문예측정보와 예측성을 동시에 제공하는 것이 필요하다. 이러한 접근방법은 장기예측정보가 지닌 예보의 구조적 편이를 파악하고, 이를 보정하는 방법을 모색함으로써 궁극적으로 예측성을 개선하는데 도움이 될 것이다. 검증 방법이나 기준을 결정할 때도 과학자뿐 아니라 정보이용자의 의견을 반영하여 수자원관리 의사결정에 직접 활용될 수 있도록 하는 것이 중요하다.

셋째, 정보제공자의 수자원관리 의사결정과정에 대한 이해가 필요하다. 수자원관리 의사결정은 단일목적 또는 선형적이지 않으며, 다양한 이해당사자의 협의과정을 통해 이루어진다. 따라서 정보제공자는 정보수요자와 지속적인 대화를 통해 의사결정과정에서 기후정보가 어떤 식으로 융합될 수 있는지를 고민하는 것이 필요하다. 현재 운영되고 있는 시스템에 대한 이해를 통해 예측정보가 어떠한 형식으로 제공되어야 의사결정과정에 포함될 수 있는지에 대한 사전파악이 필요하다.

넷째, 계절예측정보 수자원활용에 대한 장기적인 연구투자가 필요하다. NRC(2008) 보고서에서 언급한 바와 같이 수자원관리자나 의사결정자가 기후정보 활용을 꺼려하는 주요 원인의 하나가 의사결정의 실행에 대한 책임소재이다. 이 문제는 국가별 제도적, 정책적, 국가기관의 담당업무 등과 복잡하게 연관되어 있어 단기적으

로 해결이 어려운 부분이다. 장기적인 연구프로젝트 발굴 및 제도개선을 통해 예측정보 활용이나 새로운 물관리기술 도입에 대한 인센티브를 제공하고 활용성을 제고하는 방안마련이 필요하다. 이것은 장기적으로 기후변화로 인한 물공급 위험도를 저감하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 갈수기 댐유입량 변화 고찰

국내 수자원관리 및 운영, 정책수립 등은 대부분 관측자료를 기반으로 수행된다. 따라서 관측치의 변화를 분석하는 것은 향후 수자원관리 방향설정 및 수자원구조물 운영에 중요한 정보가 될 수 있다. 특히 지구온난화로 인한 기후변화가 수자원에 어떠한 영향을 미치는 지를 파악하기 위해서도 관측자료의 변화분석은 중요한 의미를 가진다. 본 연구의 목적은 갈수기 댐운영에 계절예측정보를 활용하는 방안을 모색하는 것으로, 본 장에서는 다목적댐의 갈수기 유입량 변화에 초점을 맞춰 연구를 수행하였다.

3.1 대상유역 및 분석방법

분석 대상으로는 한강과 낙동강 상류에 위치한 세 개 다목적댐 유역(소양강댐, 충주댐, 안동댐)을 선정하였다. 이들 댐유역은 댐상류에 유역변경이나 대형 취수시설이 없고, 하천유량에 인위적인 영향이 적어 댐유입량 자료의 신뢰성이 다른 유역이나 하류지역에 비해 높다고 알려져 있다. 분석기간은 자료보유현황을 고려하여 소양강댐 1974년-2014년, 충주댐 1986년-2014년, 안동댐 1977년-2014년으로 선정하였다.

분석방법은 갈수기(10월-6월) 동안의 댐유입량과 면적평균강수량을 산정하고 경향성분석(trend analysis)과 변화탐지분석(change detection analysis)을 수행하였다. 댐별 유입량자료와 면적평균강수량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 수집하였다. 국가수자원관리종합정보시스템에서는 두 종류의 면적평균강수량 정보를 제공한다. 하나는 K-water(수자원공사)에서 제공하는 실시간 강수정보이며, 다른 하나는 기상청, 국토교통부 등의 관측강수자료를 이용하여 계산된 자료(WAMIS, 1966년-2012년)이다. 본 연구에서는 두 자료를 모두 분석에 이용하였다. 국가수자원관리종합정보시스템에서는 WAMIS 강수량을 입력으로 유출모델을 이용하여 유역별 자연유량을 산정하고 제시하고 있다. 이 자료를 이용하여 관측유량과 모의된 유량에서 나타나는 차이도 분석하였다.

경향성분석을 위해 본 연구에서는 Mann-Kendall trend analysis (Mann, 1945; Kendall, 1975)분석을 이용하였으며, 통계적 유의수준은 95% 신뢰구간을 적용하여 유의한 경향성이 있는지 판단하였다. Mann-Kendall trend analysis는 비모수

(non-parametric) 방법으로 자료의 정상성(normality) 가정이 필요 없고, 극치값에 덜 민감하여 기후 및 수문자료 경향성분석에 많이 적용되고 있다. 통계적으로 유의한 변화점(step change)이 발생하는지를 분석하기 위해 본 연구에서는 student t-test를 이용하였다. 방법은 자료를 임의로 두 기간으로 구분하여 각각의 평균이 통계적으로 유의한 차이를 보이는지를 t검증을 통해 반복적으로 평가하는 것이다.

3.2 갈수기 댐유입량 변화 분석

Table 1은 경향성과 변화탐지분석 결과를 보여준다. 세 유역에서 갈수기간의 유역평균강수량은 모두 증가경향을 보였으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 댐유입량은 강수와 달리 감소경향을 보였으나 역시 통계적으로 유의하지는 않았다. 특이한 점은 강수량이 증가경향을 보이는데 반해 댐유입량은 감소경향을 나타낸 것이다. 이로 인해 강수량대비 댐유입량의 비율로 산정되는 유출율(runoff rate)은 통계적으로 유의한 감소경향을 나타내었다. 갈수기간선정에 따른 결과의 차이를 분석하기 위해 10월-5월, 11월-5월에 대해서도 분석을 수행하였는데, 동일한 결과를 확인하였다. 이 결과는 부록 1에 제시하였다. 변화탐지분석결과도 유출율에서만 통계적으로 유의한 년도가 탐지되었다. 본 연구에서 이용된 댐별 관측자료의 기간이 상이함에도 탐지된 년도는 세 유역에서 유사하게 나타났다. 특히 1993년은 모든 유역에서 탐지되었다(Table 1).

분석에 이용된 WAMIS와 K-water 강수량 자료의 일관성 분석을 위해 이중누가우량분석(double mass analysis)을 수행한 결과 소양강댐에서 1985년을 전후로 두 자료의 선형상관이 변화된 것을 확인하였다. 또한 각각의 누적강수량과 댐유입량을 비교한 결과 1993년을 전후로 강수와 유입의 선형관계가 변화된 것을 확인하였다(부록 1 참조). 두 강수량에 대한 댐유입량의 변화가 유사한 결과를 보여주고 있어 1985년 전후의 두 강수량의 일관적이지 않은 부분과는 연관성이 낮은 것으로 판단된다. WAMIS 강수량은 기간에 따라 다른 개수의 강수자료를 이용하여 산정되는데, 이것이 두 강수량의 일관성에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 안동댐과 충주댐의 경우 두 강수량이 이중누가우량분석에서 일관성을 보여주었으며, 1993년을 전후로 강수와 유입량 관계에서 기울기의 변화가 있는 것을 도시적으로 확인할 수 있다(부록 1 참조).

Table 1 The results of trend analysis and change point detection analysis for precipitation, inflow, and runoff rate during dry season (October through June)

Dam name	Variables	Trend analysis (Mann-Kendall test)	Change point detection (t-test)
Soyang	Precipitation	Increase	Not significant
	Dam inflow	Decrease	Not significant
	Runoff rate	Decrease (95%)	1993
Chungju	Precipitation	Increase	Not significant
	Dam inflow	Decrease	Not significant
	Runoff rate	Decrease (95%)	1992, 1993
Andong	Precipitation	Increase	Not significant
	Dam inflow	Decrease	Not significant
	Runoff rate	Decrease (95%)	1992, 1993

Figs. 11–13은 세 유역의 강수량, 댐유입량, 유출율을 시계열로 도시한 것이다. 본 연구에서 이용한 K-water 강수량과 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 강수량은 연도에 따라 약간의 차이는 있으나 경향성에서는 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 댐유입량의 경향성에서는 관측자료와 모의자료가 불일치하였다. 그림에서 보는 바와 같이 유출모델링을 통한 모의자료에서는 강수량과 동일하게 증가경향을 나타낸 반면 관측유입량에서는 감소경향을 보였다.

유출율에서는 관측치와 모의치가 모두 감소경향을 보였는데, 이는 강수량의 증가에 비해 유출량의 감소가 크다는 것을 의미한다. 또한, 유출율에서는 1993년을 중심으로 양 기간에서의 값의 차이가 눈에 띄게 나타났는데, 소양강댐의 경우 1993년 이전에는 평균 62%의 유출율을 보인 반면, 1993년 이후에는 49%로 유출율이 감소하였다. 이 결과는 일례로 1993년 이전에 강수량이 600mm가 내리면 약 372mm가 댐으로 유입되었는데, 최근에는 294mm 정도만 유입된다는 것을 의미한다. 연별로 계산한 결과 1993년 이후에는 이전보다 평균 37mm가 덜 유입된 것으로 분석되었다. 소양강댐 3월의 평년강수량이 약 39mm(1974–2013년)인 것을 고려하면, 3월 강수량만큼 유입이 덜되고 있다고 생각할 수 있다. 이러한 현상은 세 개 다목적댐 유역에서 값의 차이는 있으나 유사하게 관측되고 있다.

강수량이 감소하지 않는 상황에서 유출율이 감소하는 것은 여러 가지 요인이 있을 수 있다. 크게 인위적인 요인과 자연적인 요인으로 나눌 수 있는데, 인위적인 요인으로는 토지이용의 변화나 지하수이용량의 증가 등이 있을 수 있다. 국내에서 지하수이용량은 꾸준히 증가되고 있으나, 지하수조사연보에 따르면 세 개 유역이 위치한 시군에서는 경기도, 충청도, 전라도를 포함하는 서쪽지역에 비해 지하수 개발밀도가 낮고, 지하수이용량이 다른지역에 비해 상대적으로 적은 편이다(Fig. 14). 또한, 2013년 기준 소양강댐의 연간 지하수이용량은 20.13백 만 m^3 이고, 충주댐은 106.52백 만 m^3 , 안동댐은 27.12백 만 m^3 정도로 유출고(mm/month)로 환산하면 각각 1.31, 0.59, 1.37 정도로 적은 양이다(Fig. 15). 국가지하수정보센터(GIMS, <https://www.gims.go.kr/>)에서는 유역별 지하수 이용정보를 연별로 제공하고 있는데 1996년부터 제공되고 있어 1993년 이전과 이후의 차이를 비교하는데 한계가 있었다.

자연적인 요인으로는 증발산량의 증가로 인한 손실증가 또는 강수패턴의 변화로 인한 유출특성의 변화 등을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 갈수기 유출률 감소의 원인을 파악하기 위해 증발산량의 변화와 강수패턴의 변화에 대한 분석을 수행하였다. 실제증발산량(actual evapotranspiration)은 플릭스타워나 대형증발접시를 이용하여 측정될 수 있으나 국지적인 지역에서 측정된 이러한 정보는 유역규모의 실제증발산량(actual evapotranspiration)을 대표할 수 없다. 따라서 현실적으로 이용 가능한 실제증발산량 관측자료는 거의 없다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 잠재증발산량(potential evapotranspiration) 산정방법을 이용하여 간접적으로 실제증발산의 변화를 추정하였다. 또한, 강수량의 패턴 변화를 분석하기 위해 강수지표들(강수강도, 무강수일수 등)의 변동성에 대해서도 평가하였다.

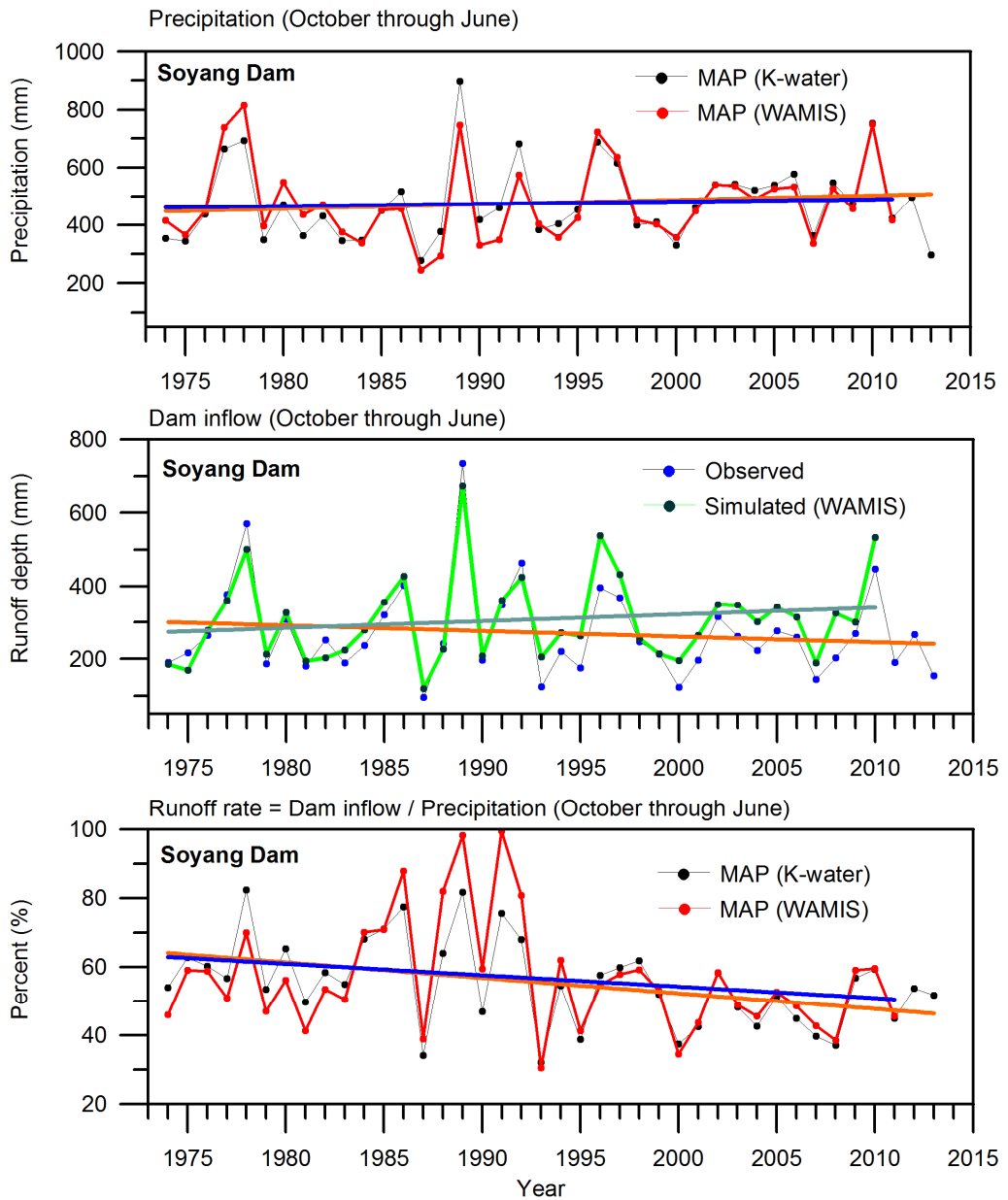


Figure 11 The time series of areal averaged precipitation, dam inflow, and runoff rate during dry season in the Soyang dam

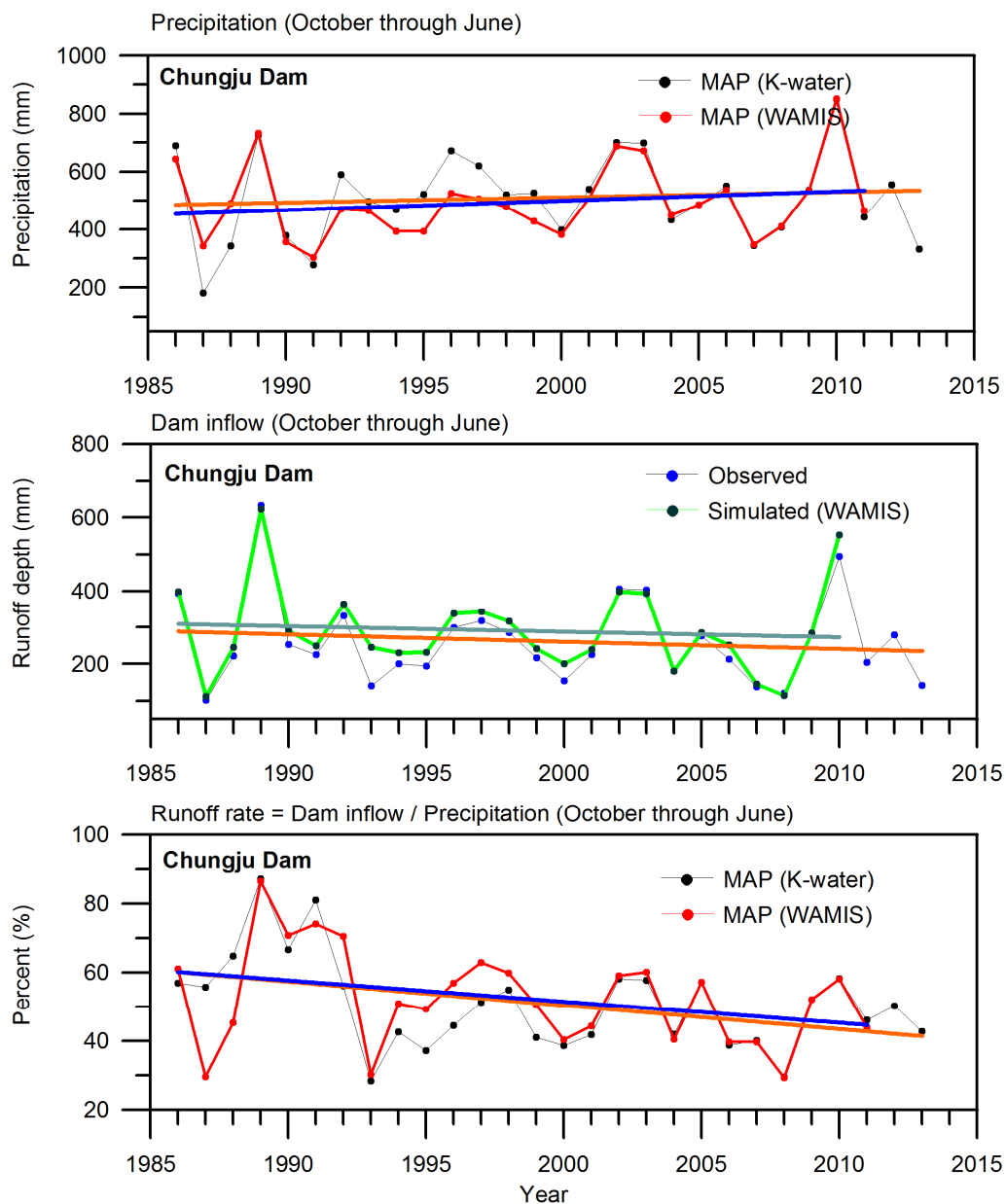


Figure 12 The time series of areal averaged precipitation, dam inflow, and runoff rate during dry season in the Chungju dam

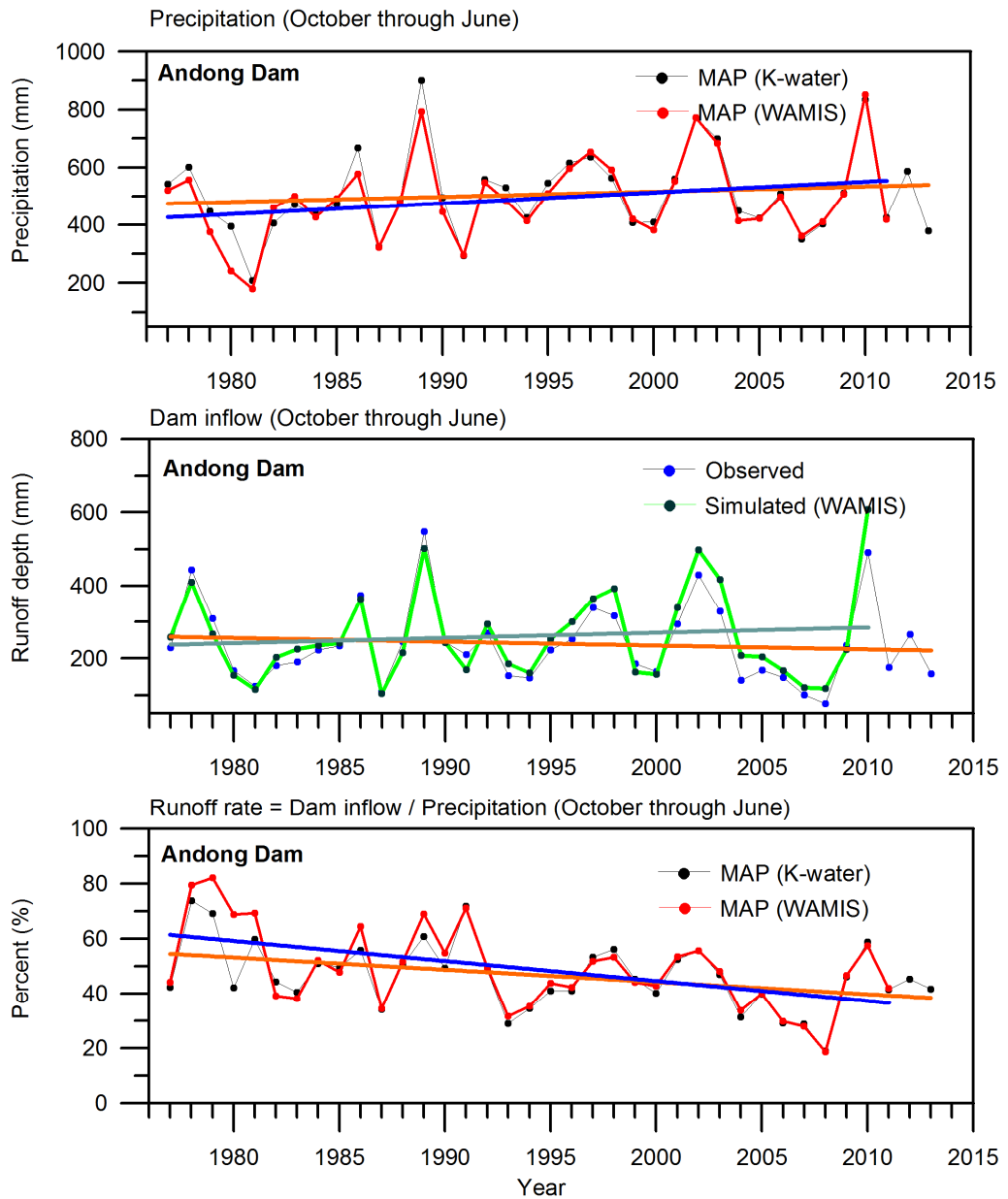
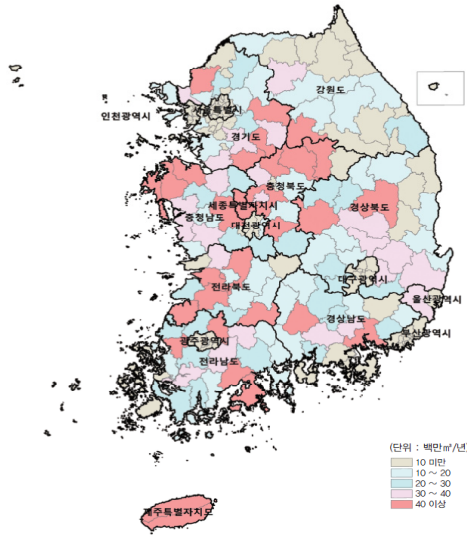


Figure 13 The time series of areal averaged precipitation, dam inflow, and runoff rate during dry season in the Andong dam

시·군·구별 지하수 이용량



시·군·구별 지하수 개발가능량 대비 이용량

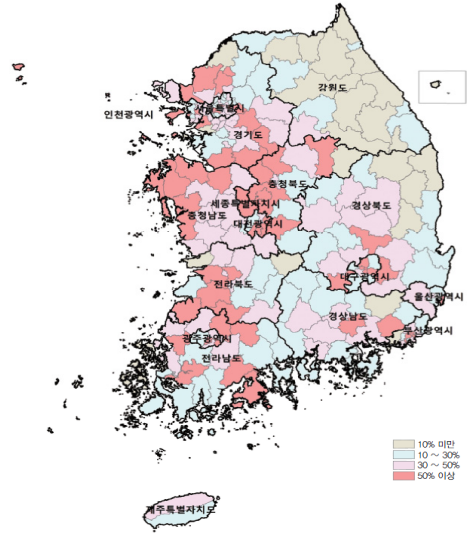
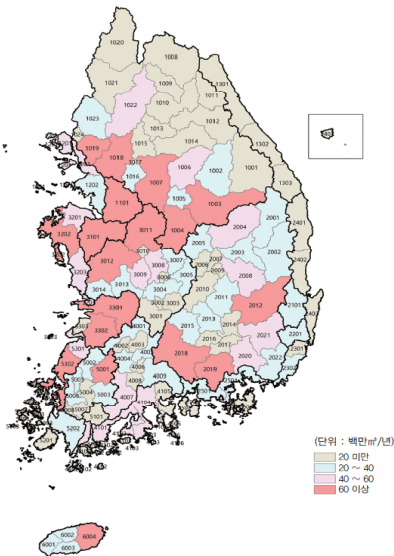


Figure 14 Groundwater usage (left) and the percent(%) of groundwater usage compared to available amount of groundwater (국토교통부, K-water, 2014)

유역별 지하수 이용량



유역별 단위면적당 지하수 이용량

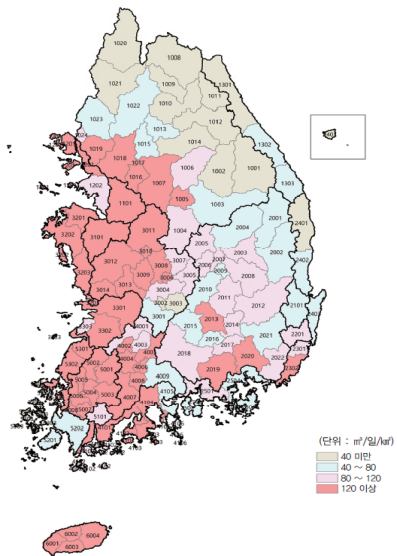


Figure 15 Groundwater usage (left) and groundwater usage per unit area for each mid-size watershed (국토교통부, K-water, 2014)

3.3 잠재증발산량 및 강수지표 변동성 분석

유역에서의 증발은 저수지 수면에서 발생하는 증발과는 다르게 유역의 토지피복조건과 공간적인 토양수분상태에 따라 영향을 받기 때문에 정량적으로 계산하기 어렵다(Xu and Singh, 2002). 따라서 일반적으로 강수량에서 유출량을 뺀 값을 이용하거나 간접적으로 유출모형을 이용하여 잠재증발산량을 산정한 다음 토양내 수분상태 등을 고려하여 실제증발산량을 추정한다. 그러나 잠재증발산량 산정방법들 역시 국지적인 관측자료를 이용하여 경험적으로 만들어진 것으로, 유역규모의 증발산량 추정시 하나의 특정 방법이 다른 방법들에 비해 우수하다고 판단할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 문헌조사를 통해 다양한 유역유출모델링에 적용되고 있는 17가지의 잠재증발산량 방법을 적용하였다(Table 2).

Table 2 Potential evapotranspiration (PET) calculation methods

PET method	Equation	Reference
Penman	$PET = \frac{\Delta R_n + \gamma(e_a - e_d) W}{\lambda \rho (\Delta + \gamma)}$ with $W = 2.6(1 + 0.536 U)$	Penman (1948)
Penman-Monteith	$PET = \frac{\Delta R_n + \gamma(e_a - e_d) W}{\lambda \rho \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$ with $W = (1500/r_a)$, $r_a = (208/U)$	Monteith (1965)
Priestley-Taylor	$PET = \frac{\alpha_{pt} \Delta R_n}{\lambda \rho (\Delta + \gamma)}$ with $\alpha_{pt} = 1.26$	Priestley and Taylor (1972)
Kimberly-Penman	$PET = \frac{\Delta R_n + \gamma(e_a - e_d) W}{\lambda \rho (\Delta + \gamma)}$ with $W = \left[0.4 + 0.14 \exp \left(- \left(\frac{J_D - 173}{58} \right)^2 \right) \right] + \left[0.605 + 0.345 \exp \left(- \left(\frac{J_D - 343}{80} \right)^2 \right) \right] U$	Wright (1982)
Thom- Oliver	$PET = \frac{\Delta R_n + 2.5\gamma(e_a - e_d) W}{\lambda \rho \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$ with $W = 2.6(1 + 0.536 U)$	Thom and Oliver (1977)
CRAE	$PET = 0.0353 \left(14 + \frac{1.2 \Delta_p R_{np}}{\Delta_p + \gamma} \right)$ where R_{np} is net radiation, Δ_p is slope of saturation vapor pressure curve	Morton (1983)

PET method	Equation	Reference
Hamon	$PET = \left(\frac{DL}{12} \right)^2 \exp \left(\frac{T_a}{16} \right)$	Hamon (1961)
Romanenko	$PET = 4.5 \left(1 + \frac{T_a}{25} \right)^2 \left(1 - \frac{e_d}{e_a} \right)$	Romanenko (1961)
Linacre	$PET = \frac{500 T_h}{(100 - A) + 15(T_a - T_d)}$ where $A = \text{latitude of station}$, $T_h = T_a + 0.006h$, $h = \text{altitude}(m)$	Linacre (1977)
Turc	$PET = 0.027 \left(\frac{T_a}{T_a + 15} \right) (R_g(1 - \alpha) + 24)$	Turc (1961)
Jensen-Haise	$PET = \left(\frac{R_e}{\lambda \rho} \right) \left(\frac{T_a}{40} \right)$	Jensen and Haise (1963)
McGuinness	$PET = \left(\frac{R_e}{\lambda \rho} \right) \left(\frac{T_a + 5}{68} \right)$	McGuinness and Bordne (1972)
Hargreaves	$PET = 0.0023 \frac{R_e}{\lambda \rho} (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} (T_a + 17.8)$	Hargreaves and Samani (1975)
FAO-24	$PET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_g}{\lambda \rho} (1 - \alpha) W$, $W = 1.066 - 0.13 \frac{RH}{100} + 0.045 U - 0.02 \frac{RH}{100} U - 3.15 \left(\frac{RH}{100} \right)^2 - 0.0011 U$	Doorenbos and Pruitt (1977)
Abtew	$PET = 0.53 \left(\frac{R_e}{\lambda \rho} \right) (1 - \alpha)$	Abtew (1996)
Makkink	$PET = \frac{1}{\lambda \rho} \left(\frac{0.63 R_g \Delta}{\Delta + \gamma} + 14 \right)$	Makkink (1957)
Oudin	$PET = \left(\frac{R_e}{\lambda \rho} \right) \left(\frac{T_a + 5}{100} \right)$ if $T_a + 5 > 0$, otherwise $PET = 0$	Oudin et al. (2005)

Δ is slope of vapor pressure curve(kPa°C-1), λ is latent heat of vaporization (MJkg-1),

ρ is water density, λ is psychrometric constant (kPa°C-1),

e_s is saturation vapour pressure(kPa), e_a is actual vapour pressure(kPa),

r_a is aerodynamic resistance, r_s is surface resistance of reference crop,

U is wind speed 2m above soil surface, T_a is air temperature, T_d is dew point temperature, R_e is extraterrestrial radiation(MJm-2day-1), R_g is global short-wave radiation(MJm-2day-1), R_n is net solar radiation(MJm-2day-1), DL is day length, D is bright sunshine hours,

α is surface albedo, J_D is Julian day

잠재증발산량 산정을 위해 소양강댐유역 내에 위치한 기상청 인제관측소(211)의 1973–2012년 자료를 사용하였다. 자료는 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>)에서 제공되는 일별 자료를 이용하였다. Table 1에서 제시된 바와 같이 각 잠재증발산 산정방법의 입력 기후관측요소는 상이하다. 본 연구에서 이용한 기후요소는 평균기온, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 일조시간, 풍속, 이슬점온도이다. 일조시간, 풍속, 상대습도의 일부자료는 결측치가 포함되어 있어, 월별 평균값으로 보완하여 분석을 수행하였다. 일반적으로 기상청 풍속자료는 지상 10m에서 관측된다. 그러나 대부분의 잠재증발산 산정방법은 지상 2m 자료를 이용하여 개발되었다. 따라서 본 연구에서는 Allen et al. (1998)에서 제시된 Eq. (1)을 이용하여 풍속의 고도를 보정하였다. Eq. (1)에서 U_2 는 2m 높이의 풍속, U_z 는 z 관측높이에서의 풍속을 나타낸다.

$$U_2 = U_z [4.87 / (\ln(67.8z - 5.42))] \quad (1)$$

잠재증발산량 산정방법에 따른 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 Table 3와 같이 그룹을 구분하였다. 일반적으로 잠재증발산량 산정방법은 입력 기후요소에 따라 분류(temperature-based, radiation-based, etc.)될 수 있다(e.g., Lu et al, 2005). 그러나 기후요소별로 분류할 경우 너무 많은 세분류가 생기므로, 본 연구에서는 크게 조합(6개), 기온기반(3개), 태양복사량기반(8개) 세 가지로 구분하였다. 이러한 분류는 증발산량 산정공식을 개발할 때 개발자가 중요하게 고려된 부분을 반영하여 Seiller and Anctil (2014)이 구분한 기준을 따른 것이다.

Table 3 Classification of seventeen potential evapotranspiration (PET) calculations based on the development philosophy

PET Type	PET Calculation	Required data
Combinational	Penman	RH, T, U, Rs
	Penman-Monteith	RH, T, U, Rs
	Priestley-Taylor	T, Rs
	Kimberly-Penman	RH, T, U, Rs
	Thom-Oliver	RH, T, U, Rs
	CRAE	T, Rs

PET Type	PET Calculation	Required data
Temperature-based	Hamon	T, Rs
	Romanenko	RH, T
	Linacre	RH, T
Radiation-based	Turc	RH, T, Rs
	Jensen-Haise	T
	McGuinness	T
	Hargreaves	T
	Doorenbos-Pruitt (FAO-24)	RH, T, U, Rs
	Abtew	RH, T, Rs
	Makkink	T
	Oudin	T

계산된 잠재증발산량은 방법에 따라 큰 차이를 보였다(Fig. 16). 평균값기준 Abtew 방법이 가장 큰 값을 보였으며, Priestley-Taylor 방법이 가장 작은 값을 나타내었다. 경향성측면에서는 기온기반의 잠재증발산량 산정방법(Hamon, Romanenko, Linacre)은 모두 증가경향을 보였다. 이들 방법은 Fig. 16에서 보는 바와 같이 1995년 근처에서 모두 뚜렷한 변환점(step change)을 관측되었다. 이러한 1995년 이후의 잠재증발산량의 증가는 Fig. 17에서 보는 바와 같이 기온의 증가에 따른 것으로 판단된다. 인제관측소의 평균기온, 최고 및 최저기온은 모두 증가경향을 보이고 있으며, 잠재증발산량 변화와 시계열적으로 유사하였다(Figs. 16 & 17).

태양복사량기반의 방법들은 증발산량의 경향성에서 차이를 보였는데, Turc, Jensen-Haise, McGuinness, Makkink, Oudin의 잠재증발산량은 증가하였고, Hargreaves, FAO-24는 감소경향을 보였다. Abtew 결과는 2012년에 급격한 감소를 보였는데, 이를 제외할 경우 증가경향을 보인다고 할 수 있다(Fig. 16).

조합방법들은 Thom-Oliver와 CRAE 방법을 제외하고는 감소경향을 보였다. Thom-Oliver는 증가경향을 보였으며, CRAE는 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다. 이와 같이 방법에 따라 다른 결과를 보이는 것은 증발산량 산정에 이용되는 기후요소의 상이한 경향성에 기인한 것으로 판단된다. 일반적으로 증발산은 기온이 높고, 태양복사량이 많고, 풍속이 빠르고, 상대습도가 낮을수록 증가한다. 인제관측소의 경우 기

온은 증가한 반면, 풍속, 상대습도는 감소했다. 또한, 일조시간도 감소하였는데, 이로 인한 태양복사량이 감소했을 것으로 추정할 수 있다. 결과적으로 기온증가와 상대습도 감소는 증발산량 증가요인으로 작용한 반면, 풍속과 일조시간 감소는 잠재증발산량의 감소를 야기했다.

결론적으로 본 연구에서 분석한 잠재증발산량 결과만으로는 갈수기 댐유입량의 변화가 ‘증발산량의 증가 때문이다’라는 증거를 도출하지 못했다. 다만 WAMIS 댐유입량 모의결과(유출율 감소)에서도 나타난 것처럼 최근의 기후변화가 강수량 대비 유입량 감소에 영향을 미칠 수 있다는 점은 확인하였다. 명확한 것은 갈수기 댐유입량의 감소는 댐저수량을 충분히 확보하지 못한 상황에서 발생하는 봄가뭄 피해를 심화시킬 수 있다는 점이다. 따라서 추가적인 연구를 통해 원인을 규명하도 대응책을 마련하는 것이 필요하다. 최근 위성영상을 이용한 증발산량 산정방법이 대두되고 있는데, 이 방법의 장점은 넓은 범위에 대해 일관성 있는 결과를 제시할 수 있다는 점이다. 아직까지 정량적인 측면에서 자료의 신뢰성에 대한 의문이 남아있지만 경향성 분석 측면에서는 활용해볼 가치가 있다고 사료된다.

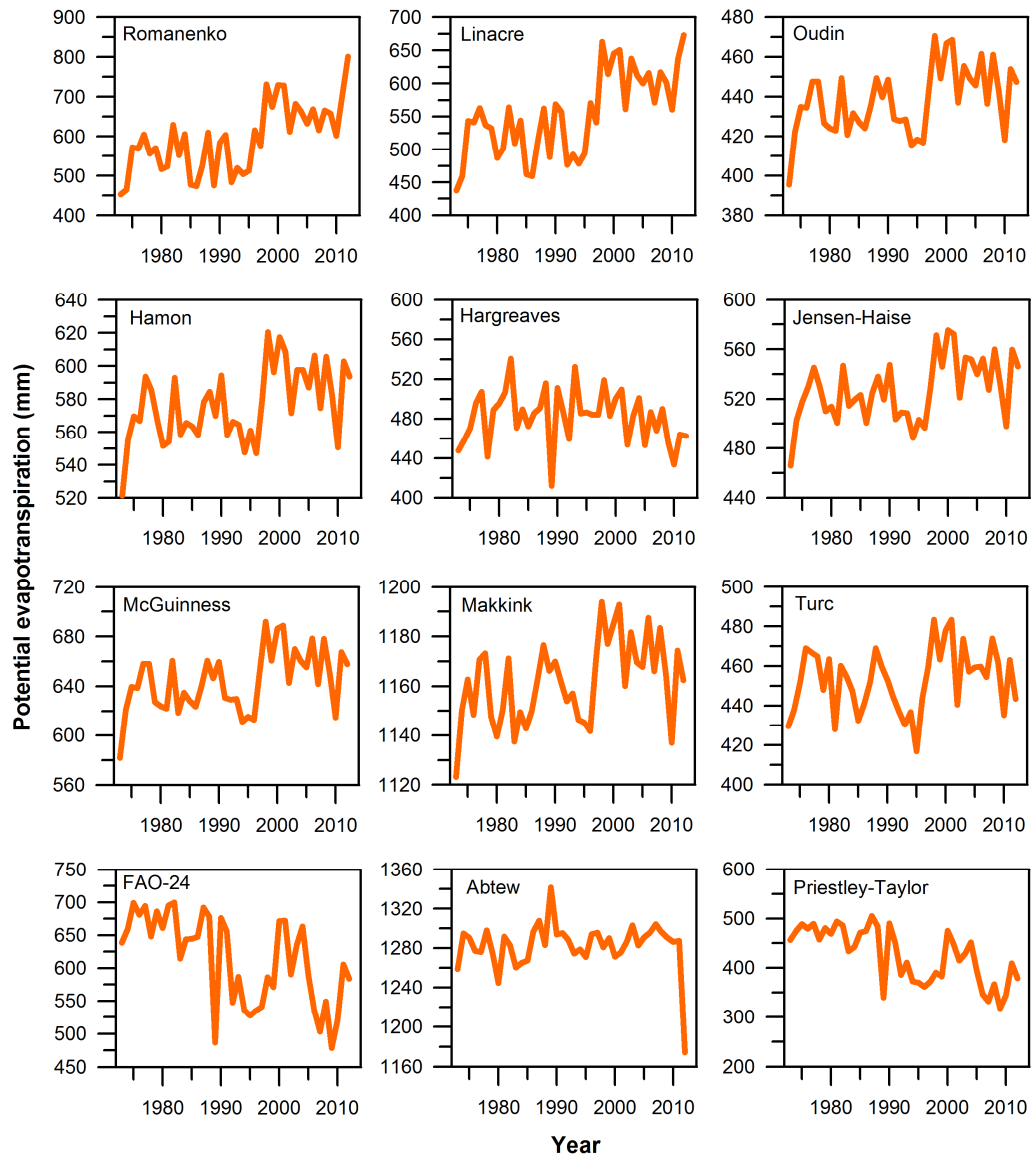


Figure 16 Dry seasonal potential evapotranspiration (PET) by calculating seventeen PET methods (Table 2)

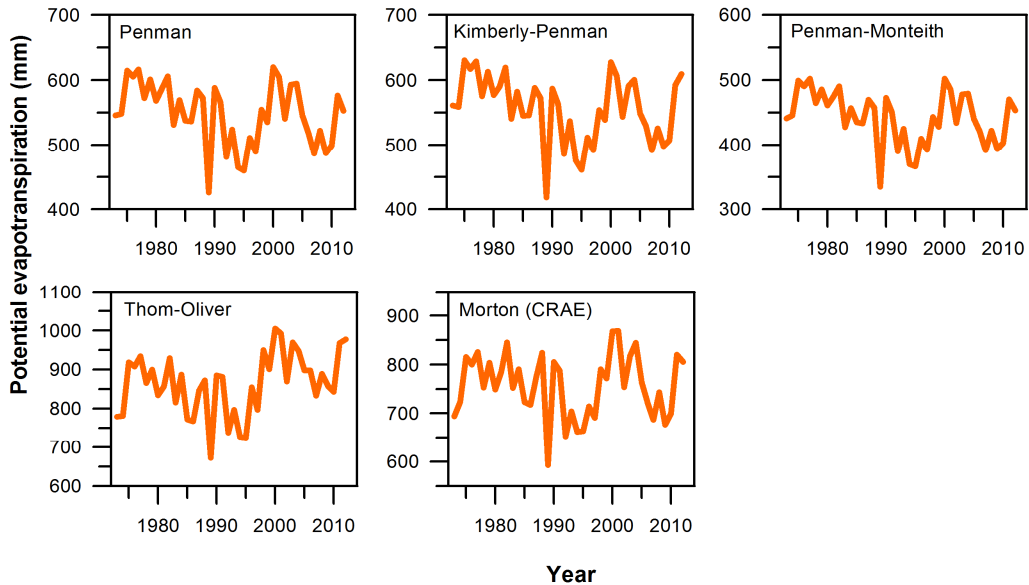


Figure 16 (continued)

일반적으로 댐유입량에 가장 큰 영향을 미치는 것은 강수량이다. 따라서 강수량의 시공간 변화는 유출량의 변화를 야기한다. 본 연구에서는 강수량의 변화가 갈수기 댐유입량의 감소와 연관되어 있는지에 대해 분석해 보고자 하였다. 이를 위해 강수의 특성을 정량화한 6개의 강수지표를 이용하였다. 이들 지표는 호우크기별 빈도, 무강수일수, 강우강도, 총강수량의 중심점 이동지수(center of timing)를 표현한다. 호우크기는 갈수기임을 감안하여 일강수 50mm 이상, 30mm 이상, 10mm 이상에 대해 분석하였다. 무강수일수는 0.5mm 이하의 강수가 발생한 날짜이다. 강우강도는 0.5mm 초과 강수일수에 대한 총강수량의 비로 표현된다. 총강수량의 중심점 이동지수는 갈수기 시점에서 총강수량의 1/2이 발생하는 날짜로 계산된다. 이 지수는 강수량이나 유출량의 시간적인 전이(shift)를 평가하는 데 주로 이용된다(e.g., Hidalgo et al., 2009).

Fig. 18은 강수지표의 경향성을 보여준다. 50mm 이상 강수는 연별 최대 4회 정도 발생하였으며, 39년 중에서 15년 동안 한 번도 발생하지 않았다. 30mm 이상과 10mm 이상 강수는 증가경향을 보이고는 있으나 통계적으로 유의하지 않았다. 무강수일수는 증가경향을 보였으며, 1995년 이전에 비해 변동성이 감소되었다. 강우강도와 중심점 이동지수는 뚜렷한 경향성이 없는 것으로 나타났다. 강수지표분석결과에서도 갈수기 댐유입량 감소와는 뚜렷한 상관관계를 도출하지 못하였다.

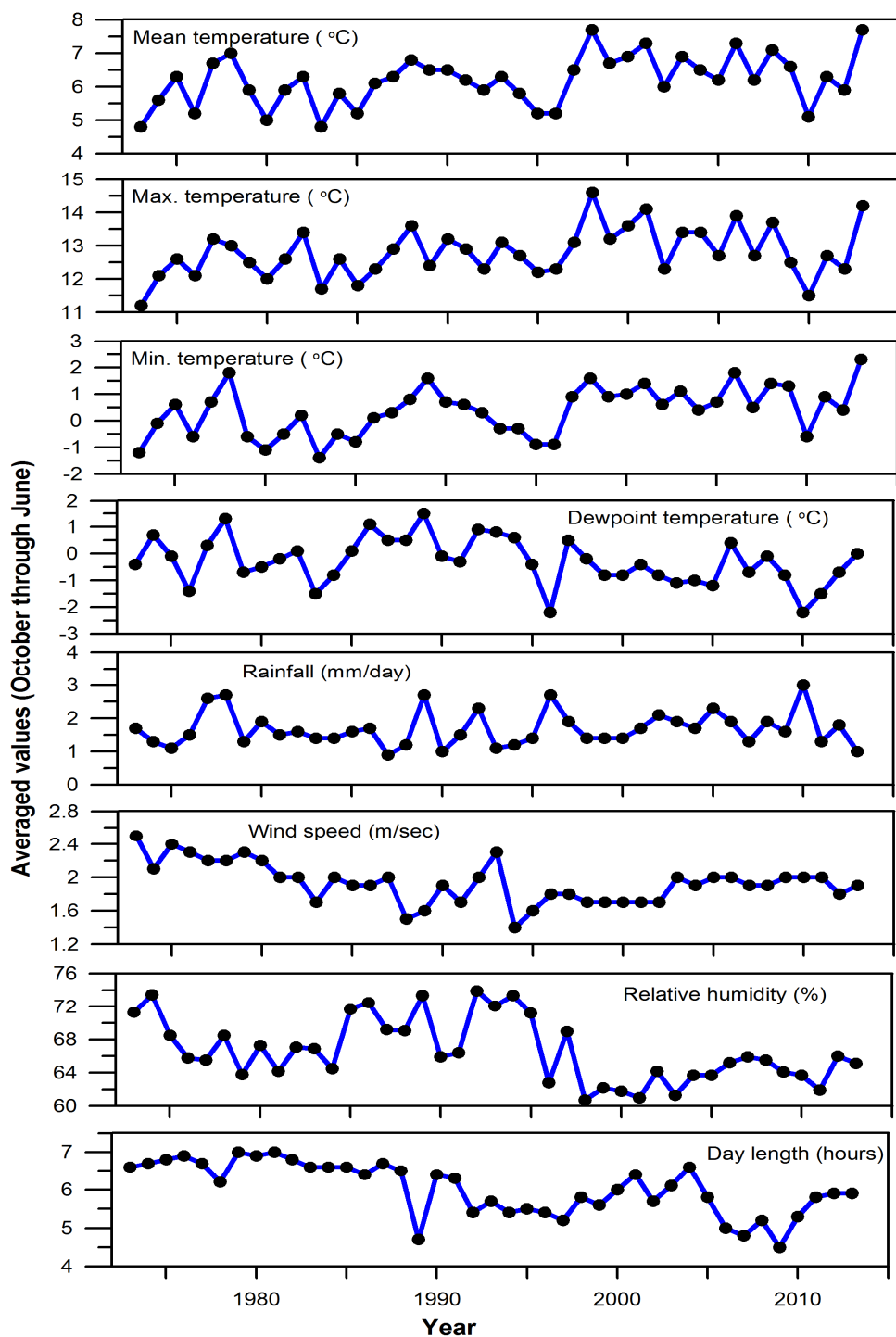


Figure 17 Change in mean, maximum & minimum temperatures, dew point temperature, rainfall, wind speed, relative humidity, and day length from 1973 to 2012

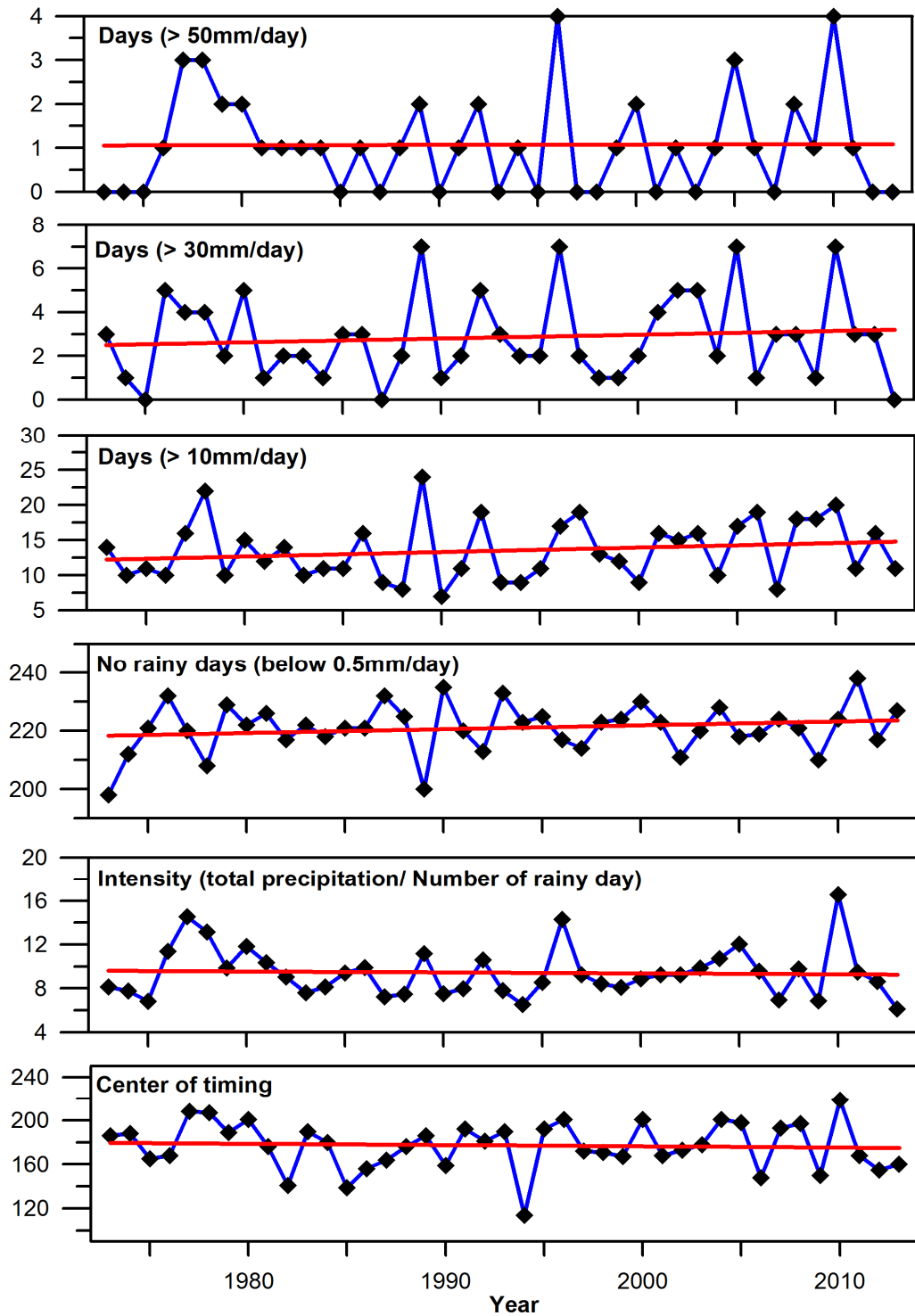


Figure 18 Trends in seven precipitation indices from 1973 to 2012

3.4 요약 및 시사점

첫째, 갈수기 댐유역의 유출율(=댐유입량/강수)이 감소하였다. 소양강댐, 충주댐, 안동댐의 갈수기 유출율의 감소경향이 유의한 수준에서 탐지되었다. t-검증을 통해 분석한 결과 1993년을 기준으로 이전과 이후의 유출율이 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다.

둘째, 잠재증발산량 변화, 강수지표변화를 분석하였으나 명확한 연관성을 검증하지는 못하였다. 기온기반 잠재증발산량 산정방법은 유출율 변화에서 나타난 시계열 패턴을 잘 반영하였으나, 적용된 17개의 잠재증발산량 방법에서 일관성 있는 결과를 도출하지는 못하였다.

셋째, 유입량감소는 수자원관리 및 정책수립시 문제를 야기할 수 있다. 댐운영계획수립시 댐운영자는 상시보장유량인 20년 빈도의 유입량이 댐으로 유입될 것으로 가정하고 연간 및 월간 댐운영계획을 수립한다. 20년 빈도 유입량은 갈수빈도해석을 통해 산정되는데, 댐유입량 자료에서 나타난 비균질성(inhomogeneity)은 빈도해석의 신뢰성을 저하시킬 수 있다. 향후 유출율 감소경향이 지속된다면 갈수기 댐운영에 20년빈도가 아닌 100년이나 500년 빈도를 이용해야 하는 상황에 처할 수도 있을 것이다. 현재 K-water에서는 500년 빈도 갈수유입량 적용을 고려하고 있다.

넷째, 장기유출분석의 신뢰도도 저하시킬 수 있다. 장기수자원종합계획수립시 이용되는 수자원부존량 산정시 만일 1993년 이전의 자료를 가지고 보정된 유출모델을 이용할 경우 갈수기 유입량이 과다추정 될 수 있으며, 반대로 1993년 이후의 자료를 이용한 경우 과소 추정될 가능성이 있다(Figs. 11-13 참조). 따라서 본 연구에서 제시한 관측 댐유입량의 변화특성을 고려하여 장기유출해석기법의 신뢰성을 높일 수 있는 기술 개발 연구가 필요할 것이다.

다섯째, 명확한 원인규명이 필요하다. 본 연구에서는 갈수기 댐유입량의 유출율 감소에 대한 명확한 증거를 발견하지는 못했다. 본 연구에서는 수행하지 못했지만 토지피복변화에 대한 영향, 관측의 오차 등에 대한 검토가 필요하다. 또한, 갈수기 관측치의 신뢰도를 제고하기 위해 플럭스(flux)관측을 이용한 실제증발산량 모니터링, 주요 지하수 취수량 및 지하수위의 실시간 모니터링 등의 대책마련이 필요하다.

4. 갈수기 댐유입량 예측모델 개선

APCC에서는 2013년부터 계절기후예측정보를 수자원분야에 활용하기 위해 일환으로 유출예측정보를 생산할 수 있는 기술을 개발하고 예측성 개선을 위해 노력해 왔다(정일원, 2013, 2014). 기존 연구에서는 월단위로 생산되는 APCC 계절예측정보에 적합한 월단위 물수지모형(water balance) 기반의 수문예측모델이 개발되었다. 그러나 월단위 물수지모형은 기후예측자료의 직접 활용 및 모형구조의 간편성에서는 장점이 있으나 갈수기간의 저수량 모의에서 신뢰성이 낮은 문제점이 제기되었다. 본 과제에서는 이 문제점을 개선하기 위해 물리적 기반의 일단위 유출모델을 적용한 댐유입량 예측기술을 개발하고자 하였다.

4.1 댐유입량 예측모델 구축

수자원관리를 위한 장기 수자원예측성능은 크게 수문순환의 계절예측성, 대규모 기후의 원격상관 예측성, 수문모델의 초기 조건 및 예측성능에 영향을 받는다(Devineni et al, 2008). 이중 계절예측성과 원격상관 예측성은 기후모델의 성능에 주로 기인하며, 수문모델의 초기 조건 및 예측성능은 목적에 적합한 수문모델의 선정 및 신뢰성 있는 매개변수 추정과정을 통해 향상될 수 있다. 본 절에서는 갈수기 댐유입량 예측모델 개발을 위한 수문모델선정, 갈수기 유출특성을 고려한 매개변수 추정, 장기수자원예측모델 개발에 대해 기술하였다.

4.1.1 수문모델 선정

수문모델은 유역에서 발생하는 수문순환을 모의하는데, 기후조건이 변화거나 인위적인 영향으로 인해 유출특성이 어떠한 반응을 보이는지를 평가하는데 이용된다. 수문모델은 유역 내에서 일어나는 수문순환과정인 강수, 강설, 차단, 융설, 적설, 침투, 침류, 직접유출, 중간유출, 지하수유출, 하천유출 등의 수문현상을 연속방정식(continuity equation)에 근간하여 해석한다. 각 수문현상을 모형으로 구현할 때 모델개발의 목적이나 개발자의 철학에 따라 유출모형의 구조는 다양하게 구성될 수 있다(Beven and Freer,

2001). 수문모델은 시간규모에 따라서는 이벤트(수분-수시간)모형, 일(daily) 유출모형, 월(monthly) 물수지모형 등으로 구분될 수 있으며, 공간적으로는 유역을 상세히 표현하는 정도에 따라 일체형(lumped) 모형, 준분포형(semi-distributed) 모형, 분포형(distributed) 모형으로 구분된다(Moradkhani and Sorooshian, 2008).

세계적으로 지금까지 많은 수문모델이 개발되었고, 지금도 많은 연구자들이 기존 모델을 개선하거나 최신 과학적 근거나 기술을 토대로 새로운 모델을 개발하고 있다. 국내에서도 다양한 수문모델들이 개발 또는 활용되었는데, 홍수유출모의 목적으로 저류함수모형, HEC-HMS, SWMM 등이, 장기유출해석을 위해 Tank, PRMS, SWAT, SLURP 등이 적용되어 왔다(손태석 등, 2010; 신현석 등, 2007; 정일원 등, 2007; 배덕효와 김진훈, 2005; 정일원과 배덕효, 2005; 김남원 등, 2009; 강태욱과 이상호, 2014). 본 연구에서는 기존연구들을 참고하여 갈수기 장기 댐유입량예측 목적에 적합한 모형으로 GR4J, SAC-SMA, PRMS 모형을 선정하고 이들의 성능을 다각적으로 평가하였다.

GR4J(Génie Rural à 4 paramètres Journalier)는 프랑스에서 개발된 모형으로 4개의 매개변수(A, B, C, D)를 가지는 일유출모형이다(Fig. 19). 이 모형은 구조가 간단하지만 다양한 기후 및 지형조건을 가진 유역(유럽, 미국, 호주 등)의 수문예측에서 우수한 모의능성을 보이는 것으로 평가되었다(Perrin et al., 2001; Perrin et al., 2003). 현재 GR4J는 호주에서 실시간 하천유량예측모델로 활용되고 있다.

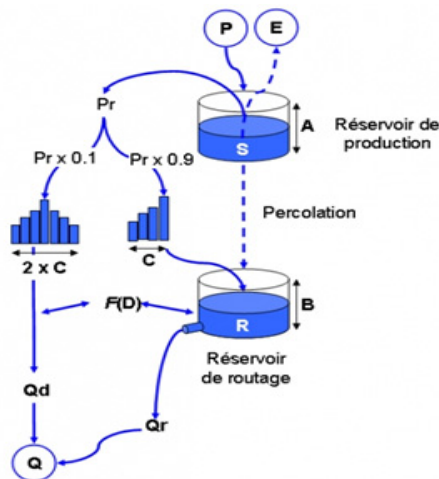


Figure 19 GR4J model's schematic (Perrin et al., 2003)

SAC-SMA(SACramento Soil Moisture Accounting)(Peck, 1976; Sorooshian et al., 1993)는 시단위부터 일단위까지 모의가 가능한 모델로 미기상청(NWS)의 홍수 및 장기유출예측모형으로 이용되고 있다. SAC-SMA는 토양층의 물리적 물이동을 장력수(tension water)와 자유수(free water) 개념을 이용하여 표현한다. 장력수는 토양분자가 가질 수 있는 최대 수분량으로 증발이나 증산으로만 손실된다. 자유수는 토양 입자사이의 공간을 채우는 것으로 측면으로 이동하여 중간유출(interflow)에 기여하거나 깊은 토양층으로 이동하여 지하수에 기여한다. SAC-SMA는 토양층을 가상의 상부층(upper zone)과 하부층(lower zone)으로 구분하여 토양내 물의 이동과 유역내 이동을 모사하는데, 상부층에서는 불투수면적을 고려할 수 있다. 하부층에서는 Darcy 법칙에 따른 물의 이동을 모델개발당시 고려하였는데, 이것은 유역에서 발생하는 하천유량의 감소(recession)를 현실적으로 고려하지 못하는 문제점이 있었다. 이를 극복하기 위해 하부층을 주영역(Primary zone)과 보조영역(Supplemental zone)으로 세분화하였다. 주영역은 장기적인 기저유출의 흐름을 반영하고, 보조영역은 짧은 시간내의 강수에 따른 영향을 반영하도록 설계되었다. 본 연구에서 이용한 SAC-SMA는 13개의 매개변수를 가진다.

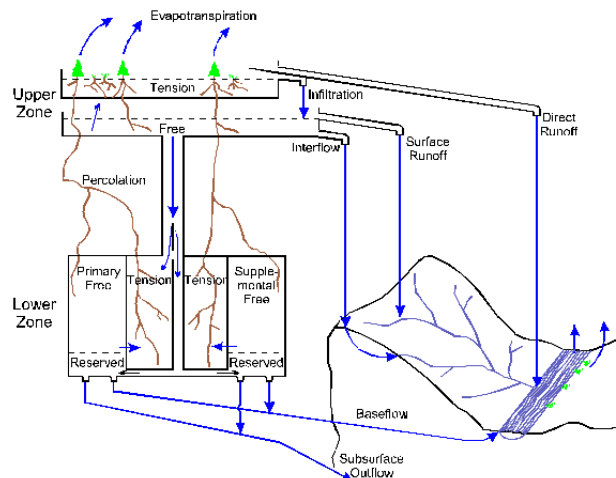


Figure 20 SAC-SMA model's schematic (NWS, www.nws.noaa.gov/)

PRMS(Precipitation Runoff Modeling System)(Leavesley et al., 1983)는 GR4J, SAC-SMA가 전체 유역을 하나의 강우유출 반응단위로 표현하는 것(일체형)과 달리 유역내 토양특성, 토지피복, 경사 및 고도 등이 유사한 소유역에 대해 각각

유출을 모의하고 유역출구에서 합하여 하천유량을 산정한다(준분포형). PRMS는 유역을 HRU(Hydrologic Response Unit)라는 불리는 소유역으로 구분하고, 각 HRU 내에서 에너지수지와 물수지를 모의한다.

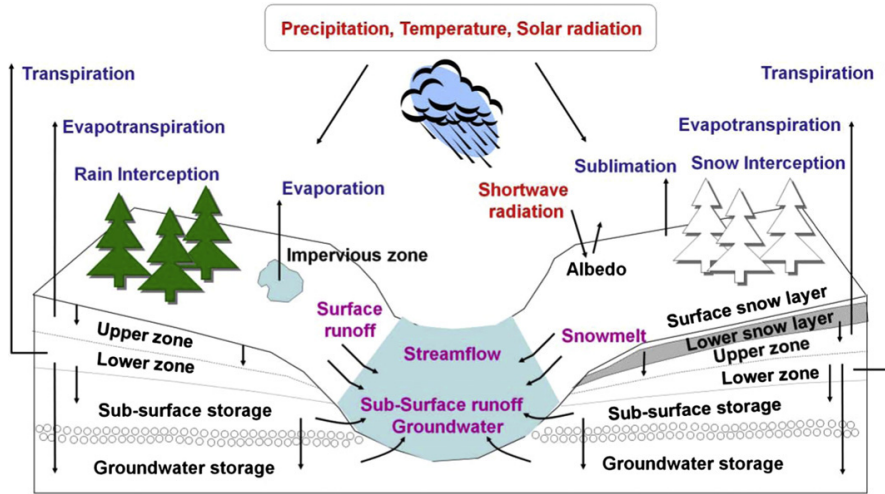


Figure 21 PRMS's schematic (Jung et al., 2012)

GR4J와 SAC-SMA는 입력자료로 강수와 잠재증발산량이 필요하다. 본 연구에서는 Oudin et al. (2005)이 제시한 잠재증발산량 산정방법을 이용하였다(Table 2 참조). Oudin et al. (2005)는 27개의 잠재증발산량 산정방법을 호주, 프랑스, 미국 등에 위치한 308개 유역에 적용하여 각 방법의 수문학적 적용성을 평가하였다. 연구결과 Jensen-Haise, McGuinness, Kimberly-Penman, Penman-Monteith 방법 등이 유출모델링에서 우수한 성능을 보였는데, 요구되는 입력기후변수의 수가 적은 Jensen-Haise (평균기온만 필요)와 McGuinness 방법(외기복사량 자료만 필요)을 기반으로 Table 2에 제시된 새로운 잠재증발산량 산정방법을 제안하였다. PRMS 모형에서는 Hamon과 Jensen-Haise 잠재증발산량 산정방법을 내부에 탑재하고 있다. 그러나 모델 간의 성능비교를 위해서는 동일한 입력자료를 이용하는 것이 필요하므로, 본 연구에서는 Oudin et al. (2005) 방법을 이용하여 HRU별 잠재증발산량을 산정하고 PRMS의 입력자료로 사용하였다.

GR4J와 SAC-SMA에서는 용설을 모의하는 모듈이 없으므로 본 연구에서는 Eq.

(2)와 같이 기온을 이용한 간단한 용설모의 알고리즘을 두 모델에 추가하였다. Eq. (2)에서 S_{melt} 는 용설량(mm/day), DF 는 용설량을 결정하는 매개변수, T_c 는 용설이 발생할 수 있는 기준이 되는 온도매개변수이다. 본 연구에서는 일평균기온이 0°C 이 아니면 강우가 강설의 형태로 내린다고 가정하였다.

$$S_{melt} = DF \times (T - T_c) \quad (2)$$

4.1.2 갈수기 수문특성을 고려한 매개변수 추정

수문모델의 궁극적인 목적은 실제 유역에서 발생하는 관측유량을 정확하게 모의하는 것이다. 수문모델은 유역의 수문순환을 개념적으로 표현하는 과정에서 불가피하게 매개변수를 지니게 된다. 이러한 매개변수를 신뢰성 있게 추정하는 것은 유출분석 결과의 신뢰성을 확보하는 중요한 과정이다. 본 연구의 목적은 갈수기의 댐유입량을 예측하는데 있으며, 이를 위해서는 갈수기간의 관측유량을 근사하게 모의할 수 있는 매개변수 추정기법이 필요하다.

최적 매개변수 추정과정은 관측치와 모의치의 오차를 최소화하는 매개변수셋을 찾는 것이다. 이 과정에서 목적함수(objective function), 즉 관측치와 모의치의 오차를 어떻게 표현하는가에 따라 추정되는 매개변수는 변화게 된다. 일반적으로 모형 효율성 계수(Nash and Sutcliffe, 1970), 상관계수, 평균제곱근오차(RMSE) 등이 주로 목적함수로 이용되고 있다(e.g., Beven and Free, 2001; Singh and Bardossy, 2012; Shen et al., 2012). 그러나 이러한 목적함수들은 큰 유량값에 민감하게 반응하여 여름철 홍수기에는 관측치를 잘 모의하나 갈수기의 적은 유량값에 대해서는 신뢰성 있는 매개변수를 추정하지 못하는 것으로 알려져 있다(e.g., Legates and McCabe, 1999; Razavi and Tolson, 2013).

본 연구에서는 갈수기 유출특성을 잘 모의하는 매개변수를 추정하기 위해 다섯 개의 상이한 지표(Eqs. 3-7)를 목적함수로 이용하여 어떤 목적함수가 가장 적합한 매개변수를 추정할 수 있는지 평가하였다.

첫 번째 목적함수는 수문모델 매개변수 추정에서 가장 많이 적용되고 있는 지표인 Nash and Sutcliffe 모형 효율성 계수이다(Eq. (3)). 두 번째와 세 번째 목적함수는

로그(log) 모형 효율성계수(Eq. (4))와 제곱근(root) 모형 효율성 계수(Eq. (5))이다 (Krause et al., 2005). 관측치와 모의치에 로그나 제곱근을 취하게 되면 큰 값과 작은 값의 상대적 차이가 줄어든다. 일례로, 1000과 10의 값을 가진 유량을 제곱근(로그)을 취할 경우 각각 31.6(3)과 3.16(1)으로 값의 차이가 줄어들게 되어 목적함수값을 산정하는 과정에서 적은 값을 갖는 유량의 비중을 높여주게 된다. Eq. (6)는 상대적 모형 효율성 계수로, 이것도 두 번째와 세 번째 목적함수와 비슷하게 오차를 관측값으로 나눠줌으로써 큰 값과 작은 값의 차이를 줄이는 효과를 야기한다.

최근의 연구로 Demirel et al (2013)은 저수량을 잘 모의하는 매개변수를 추정하기 위해 Eq. (7)과 같이 hybrid 형태의 새로운 목적함수를 제시하였다. 이 방법은 저수량만을 이용한 모형 효율성계수(E_a)와 모의치와 관측치에 역수를 취해 계산된 모형 효율성계수(E_b)를 결합한 것이다. 본 연구에서는 75% 분위에 해당하는 유량을 기준으로 이보다 작은 값을 저수량으로 가정하여 E_a 를 산정하였다. E_b 에서 δ 는 관측치나 모의치가 0일 경우를 대비한 것으로 평균유량의 0.01%를 적용하였다. Hybrid 모형 효율성계수를 계산하기 위한 가중치 α , β 는 Demirel et al (2013)의 연구에서 적용한 0.3과 0.7을 각각 적용하였다.

Tables 4-6은 본 연구에서 보정(calibration)에 이용된 각 유출모형별 매개변수를 나타낸다. GR4J는 용설관련 매개변수 2개를 포함하여 총 6개, SAC-SMA는 15개, PRMS는 21개의 매개변수를 보정하였다.

$$E = 1 - \left(\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right) \quad (3)$$

$$E_{\log} = 1 - \left(\sum_{i=1}^n (\log O_i - \log S_i)^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n (\log O_i - \log \bar{O})^2 \right) \quad (4)$$

$$E_{root} = 1 - \left(\sum_{i=1}^n (\sqrt{O_i} - \sqrt{S_i})^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n (\sqrt{O_i} - \sqrt{\bar{O}})^2 \right) \quad (5)$$

$$E_{rel} = 1 - \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - S_i}{O_i} \right)^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\bar{O}} \right)^2 \right) \quad (6)$$

$$E_{hybrid} = \alpha \left(\frac{E_a}{2 - E_a} \right) + \beta \left(\frac{E_b}{2 - E_b} \right) \quad (7)$$

$$E_a = 1 - \left(\sum_{i=1}^m (O_i - S_i)^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^m (O_i - \bar{O})^2 \right)$$

$$E_b = 1 - \left(\sum_{i=1}^n (1/(O_i + \delta) - 1/(S_i + \delta))^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n (1/(O_i + \delta) - 1/(\bar{O} + \delta))^2 \right)$$

Table 4 Description of GR4J model parameters for optimization

Parameter	Description	Range
A (X1)	Maximum capacity of the production store	-10 ~ 2000
B (X2)	Groundwater exchange coefficient	-8 ~ 6
C (X3)	1 day ahead capacity of the routing store	10 ~ 500
D (X4)	Time base of the unit hydrograph	0.5 ~ 4
DF	Degree-day factor	1.0 ~ 9.0
Tc	Temperature criteria at which snow begin to melt	-3.0 ~ 5.0

Table 5 Description of SAC-SMA model parameters for optimization

Parameter	Description	Range
UZW	Upper zone tension water maximum storage	1.0 ~ 150
UZF	Upper zone free water maximum storage	1.0 ~ 150
UZK	Upper zone free water lateral depletion rate	0.1 ~ 0.5
ADIMP	Additional impervious area	0.0 ~ 0.4
ZPERC	Maximum percolation rate	1.0 ~ 250
REXP	Exponent of the percolation equation	0.0 ~ 5.0
LZW	Lower zone tension water maximum storage	1.0 ~ 500
LZFSM	Lower zone free water supplemental maximum storage	1.0 ~ 1000
LZFPM	Lower zone free water primary maximum storage	1.0 ~ 1000
LZSK	Lower zone supplemental free water depletion rate	0.01 ~ 0.25
LZPK	Lower zone primary free water depletion rate	0.0001 ~ 0.025
PFREE	Fraction percolating from upper to lower zone free water storage	0.0 ~ 0.1
KQ	Storage constant	0.0 ~ 1.0
DF	Degree-day factor	1.0 ~ 9.0
Tc	Temperature criteria at which snow begin to melt	-3.0 ~ 5.0

Table 6 Description of PRMS model parameters for optimization

Parameter	Description	Range
adjmix_rain	Monthly factor to adjust rain proportion in a mixed rain/snow event	0.0001 ~ 3.0
cecn_coef	Monthly convection condensation energy coefficient	0.0001 ~ 20.0
emis_noppt	Average emissivity of air on days without precipitation	0.757 ~ 1.0
freeh2o_cap	Free-water holding capacity of snowpack	0.01 ~ 0.2
potet_sublim	Fraction of potential ET that is sublimated from snow in the canopy and snowpack	0.1 ~ 0.75
tmax_allrain	Monthly maximum air temperature when precipitation is assumed to be rain	20.0 ~ 50.0
tmax_allsnow	Monthly maximum air temperature when precipitation is assumed to be snow	20.0 ~ 40.0
snowinfil_max	Maximum snow infiltration per day	1.0 ~ 20.0
soil_moist_max	Maximum available water holding capacity	3.0 ~ 10.0
soil2gw_max	Maximum amount of the capillary reservoir excess	0.0001 ~ 5.0
sat_threshold	Water holding capacity of the gravity and preferential flow reservoirs	1.0 ~ 20.0
smidx_coef	Fraction percolating from upper to lower zone free water storage	0.0001 ~ 1.0
smidx_exp	Exponent in non-linear contributing area	0.2 ~ 0.8
fastcoef_lin	Degree-day factor	0.0001 ~1.0
fastcoef_sq	Temperature criteria at which snow begin to melt	0.0001 ~ 1.0
slowcoef_lin	Linear coefficient in equation to route preferential flow storage	0.0001 ~ 1.0
slowcoef_sq	Non-linear coefficient in equation to route gravity reservoir storage	0.0001 ~ 1.0
ssr2gw_exp	Non-linear coefficient in equation used to route water from the gravity reservoirs to the groundwater reservoir	0.8 ~ 1.2
ssr2gw_rate	Linear coefficient in equation used to route water from the gravity reservoir to the groundwater reservoir	0.0001 ~1.0
pref_flow_den	Fraction of the soil zone in which preferential flow occurs	0.1 ~ 1.0
gwflow_coef	Linear coefficient in the equation to compute groundwater discharge	0.0001 ~1.0

앞에서 정의한 목적함수의 최소값을 찾는 방법으로 수동보정법과 자동보정법이 있다. 수동보정법은 전문가의 경험을 토대로 최적 매개변수를 추정하는 것인데 시간이 오래 걸리고, 전문가에 따라 결과가 상이할 수 있다. 자동보정법은 수학적 알고리즘을 통해 최적해를 찾는 방법으로 크게 지역최적화와 전역최적화 방법으로 나뉜다. 지역최적화방법은 매개변수 추정에 시간이 짧게 걸리나 전역해(global optimum)를

찾지 못하고 지역해(local optimum)에 빠질 수 있는 문제점을 지니고 있다. 이로 인해 1990년대 이후 전역최적화 방법을 적용한 수문모델의 매개변수 추정이 활발히 진행되고 있다(e.g. Duan et al., 1993).

본 연구에서는 전역최적화 방법 중의 하나인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm) 기법을 이용하였다. 유전자 알고리즘은 자연의 진화과정에 기반한 최적화 기법으로 1975년에 개발된 이래 다양한 분야의 최적화에 활용되어 왔다. 유전자 알고리즘은 목적함수에 기반하여 유전자를 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 등의 과정을 통해 최적값을 찾아간다. 선택은 최적 목적함수를 가진 매개변수셀을 보존하고 성능이 저조한 매개변수셀은 제외하는 것이다. 교배는 두 매개변수셀을 임의로 선택하여 새로운 매개변수셀을 만드는 과정이고, 돌연변이는 랜덤하게 새로운 매개변수셀을 추가적으로 고려하는 것이다.

유전자 알고리즘은 지속적으로 개선되어 왔으며, 최근에는 마이크로 유전자 알고리즘(Micro-GA)이라는 기법(Fig. 22)이 활발히 적용되고 있다(Coello and Pulido, 2001; Zimmer et al., 2015). 기존의 유전자 알고리즘이 보통 50-100개 정도의 모집단을 가지는 반면, Micro-GA는 4-10개 정도로 최적값을 찾는 시간이 크게 줄어들었다. 또한, 기존의 유전자 알고리즘이 최적화를 시작할 때 생성된 모집단을 유지하면서 선택, 교배, 돌연변이 과정을 진행하는 데 반해, Micro-GA는 유전알고리즘 사이클 시작마다 일부 엘리트 유전자만을 유지하고 모집단을 새로 생성함으로써 지역해에 빠질 확률을 크게 낮추었다. 이러한 장점을 근거로 본 연구에서는 Micro-GA를 최적화기법으로 선정하였다.

Fig. 23은 Micro-GA를 이용하여 SAC-SMA의 매개변수가 추정되는 과정을 보여준다. 이것은 각 단계에서 최적 목적함수를 가진 매개변수만을 선택하여 도시한 것이다. 그림에서와 같이 Micro-GA는 각 매개변수의 물리적 범위를 전방위로 탐색하는 것을 확인할 수 있다. 최적값을 찾는데 필요한 시행횟수는 매개변수에 따라 차이를 보였다. LZTWM, LZFPM, KQ는 빠르게 수렴한 반면 ZPERC, REXP, LZPK는 상대적으로 느리게 수렴하였다.

Figs. 24-26은 각 수문모델별 목적함수의 변화를 도시한 것이다. GR4J는 시행횟수가 200번 이내에서 빠르게 수렴하는 것을 볼 수 있는데(Fig. 24), 이것은 매개변수

의 수가 상대적으로 적기 때문으로 판단된다. PRMS도 목적함수에 따라 다소 차이는 있으나 200번 이내에서 빠르게 수렴되었는데, 이것은 PRMS의 보정하지 않고 고정된 매개변수의 영향이 크기 때문으로 사료된다. PRMS는 GIS 자료(토양도, DEM, 토지 피복도 등)를 이용하여 산정된 매개변수는 고정하고 최적화를 수행하였다. 반면 SAC-SMA는 목적함수에 따라 수렴속도가 큰 차이를 보였다. 상대적 모형 효율성 계수를 이용한 경우 가장 빠르게 수렴하였으며, 모형효율성계수를 이용한 경우에는 800번 이상의 수행에서 안정화되는 것으로 나타났다.

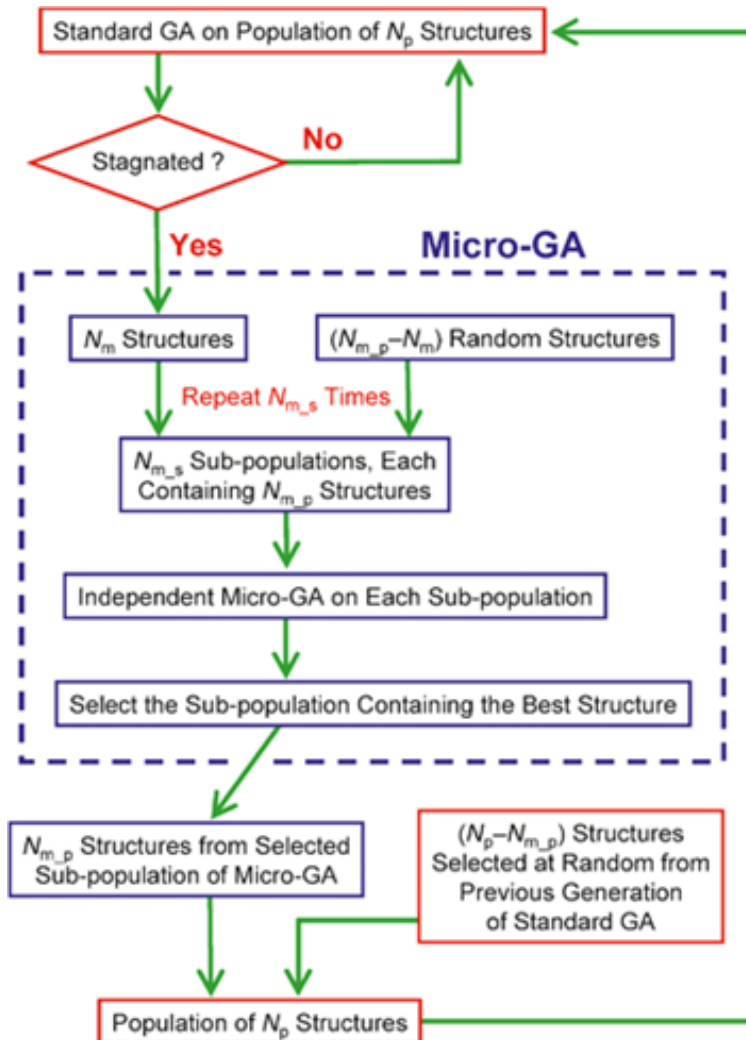


Figure 22 Optimization process in Micro Genetic Algorithm (quoted from Zhou and Harris, 2008)

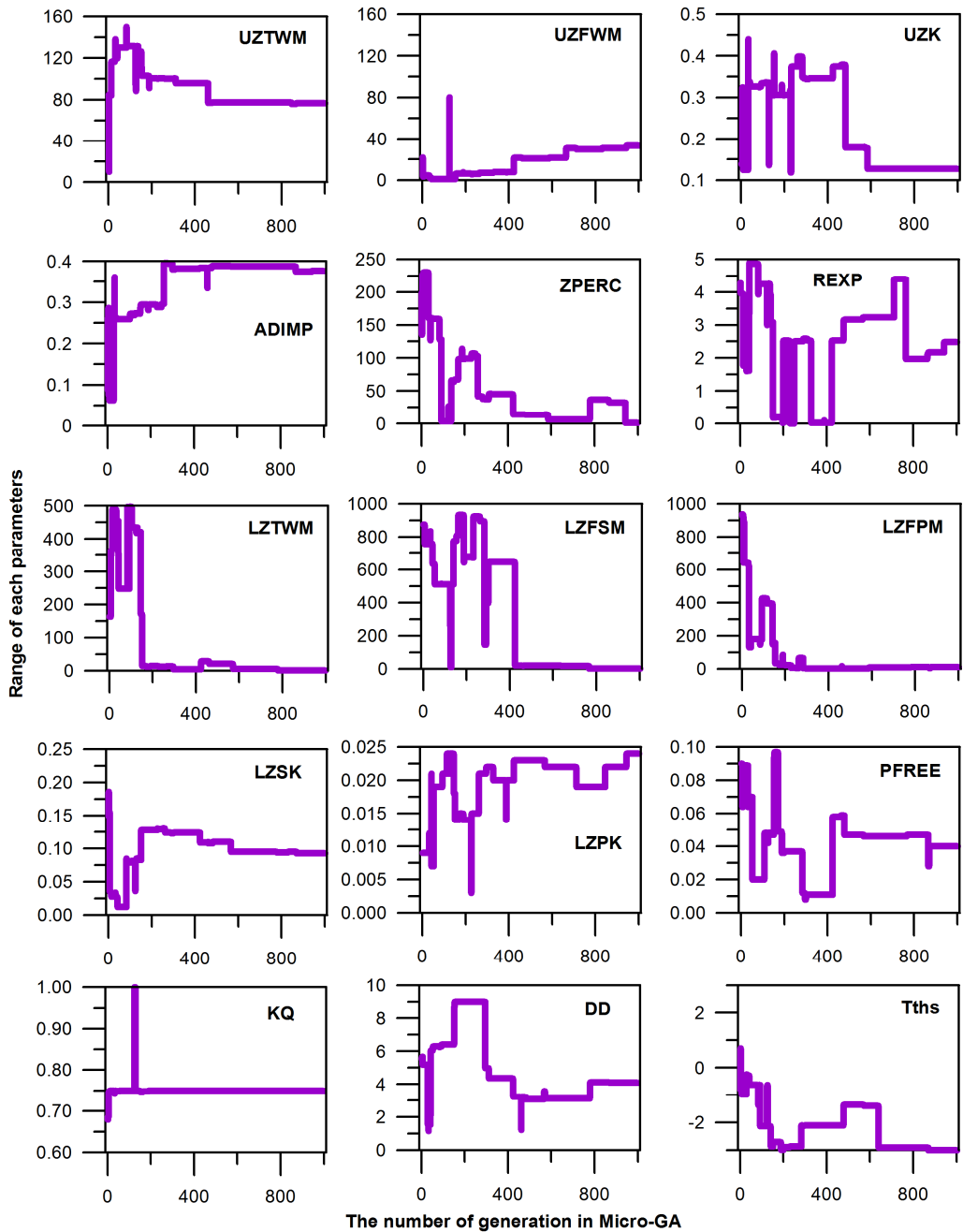


Figure 23 SAC-SMA's parameters estimation process in Micro-GA

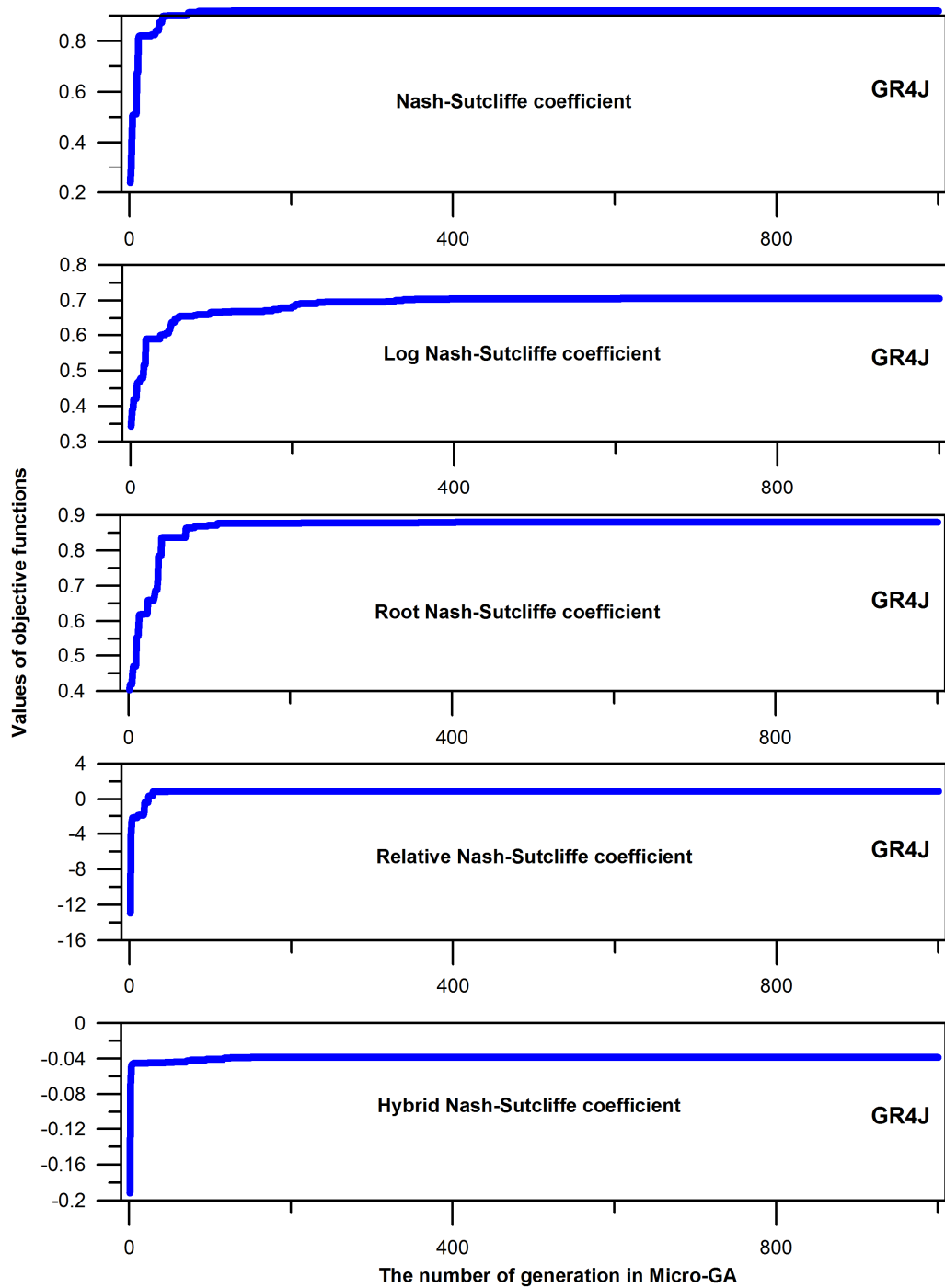


Figure 24 The performance of GR4J for calibration and verification periods using five different objective functions

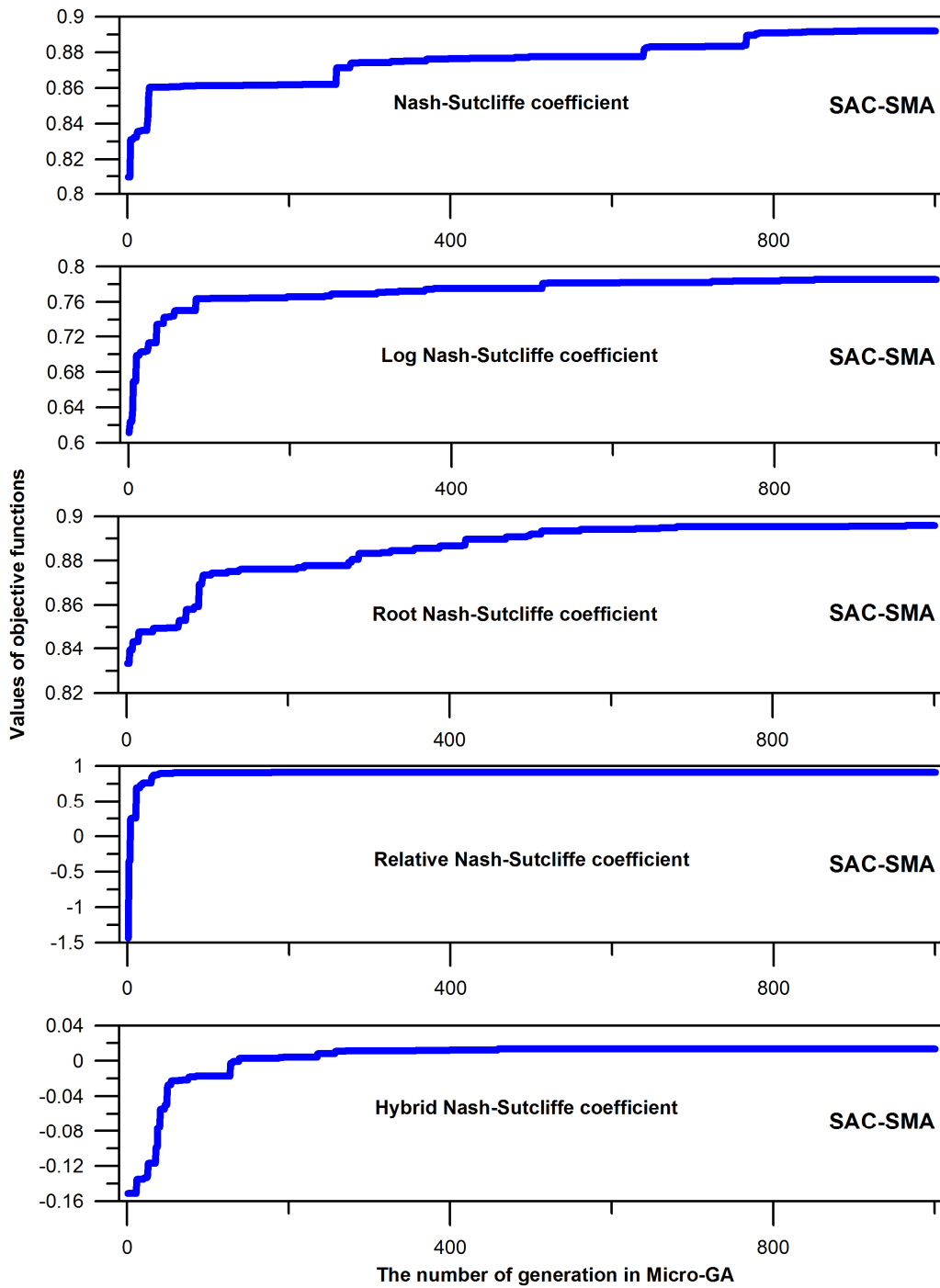


Figure 25 The performance of SAC-SMA for calibration and verification periods using five different objective functions

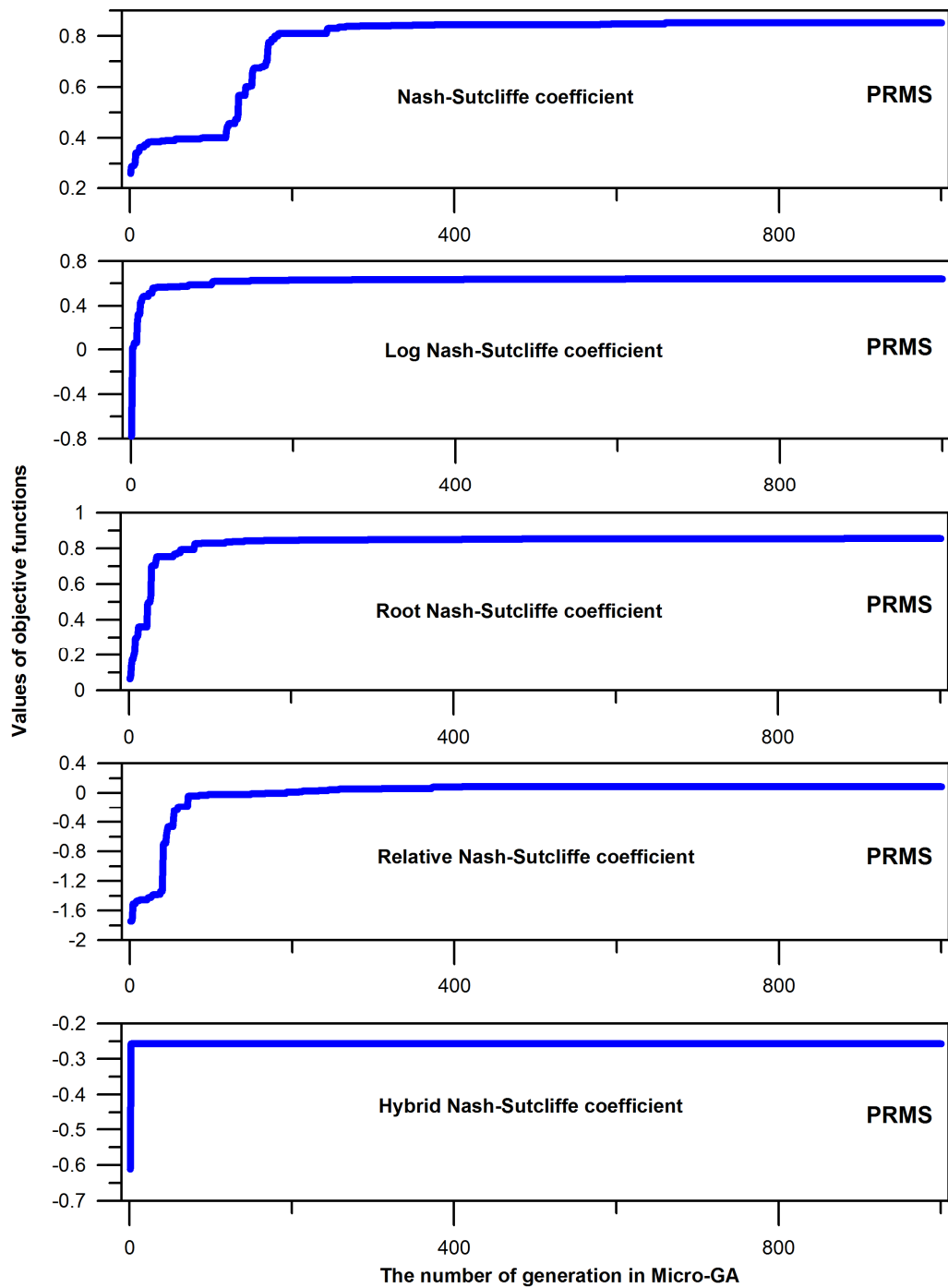


Figure 26 The performance of PRMS for calibration and verification periods using five different objective functions

4.1.3 최적 수문모델 선정

본 연구에서는 소양강댐 유역의 관측자료를 이용하여 2001년-2010년 기간에 대해 수문모델의 매개변수를 보정하고, 1991년-2000년 기간에서 보정된 매개변수의 모의성능을 검증하였다. 2001년-2010년의 보정기간은 3장에서 언급한 최근 갈수기 댐유입량 자료의 유출을 감소 현상을 매개변수 추정과정에서 반영시키기 위해 선정하였다. 본 연구의 목적이 향후 기후예측정보를 활용하여 댐유입량예측정보를 생산하는 것이므로 최근 자료의 특성을 반영한 매개변수 추정이 필요할 것으로 판단하였다.

Tables 7-9는 전체기간과 예측목표 갈수기간(1월-6월)에 대한 모델별 목적함수별 성능을 통계적으로 평가한 것이다. 수문모델의 성능평가 기준으로는 수문모델 성능평가에 주로 이용되는 평균절대오차(MAE), 평균제곱근오차(RMSE), 상관계수(CORR), 결정계수(R^2), 일치성지표(Index of agreement, d)(Willmott, 1982), 용적오차(Percent bias, PB)를 이용하였다. 일치성지표는 상관계수가 극치값에 민감하게 반응함으로써 유출모형의 정확성을 일관성있게 제시하지 못하는 문제를 해결하기 위해 Willmott(1982)가 제안하였다.

전체기간에 대한 모형성능은 Tables 7-9에서와 같이 모형효율성계수(E), 제공근 모형효율성계수(E_{root})를 목적함수로 이용한 경우가 검정과 보정 기간에서 가장 우수한 성능을 보였다. 반면 상대적 모형효율성계수(E_{rel})와 Hybrid 모형효율성계수(E_{hybrid})를 이용하여 보정된 매개변수는 성능이 가장 낮은 것으로 나타났다. 로그 모형효율성계수(E_{log})를 이용한 경우는 중간정도의 모의성능을 나타내었다.

갈수기간에 대해서는 제공근 모형효율성계수(E_{root})를 이용한 경우가 가장 우수한 성능을 보였다. 반면 전체기간에서는 우수한 성능을 보였던 모형효율성계수(E)를 이용한 매개변수 추정은 예측성능이 낮은 것으로 나타났다. 로그 모형효율성계수(E_{log})를 이용한 경우도 갈수기간에 대해서는 좋은 성능을 보여주었다.

갈수기 유출예측모델 구축을 위한 최적모형을 선정하기 위해 Fig. 27에서와 같이 모형별 갈수기간의 상관계수와 표준제곱근오차를 지표로 이용하였다. 본 연구에서는 상관계수가 높으면서 표준제곱근오차가 적은 모델을 최적(best) 모델로 선정하고자 하였다. 1월에서는 제공근 모형효율성계수(E_{root})를 이용한 SAC-SMA와 로그 모형효율성계수(E_{log})를 이용한 SAC-SMA가 가장 우수한 성능을 보였다(Fig. 27). PRMS도 월별로

차이를 보였지만 전반적으로 갈수기간에 대해 우수한 모의성능을 나타내었다. GR4J는 유출량이 많아지는 4월, 5월, 6월에는 다른 모델과 유사한 성능을 보였으나 나머지 월에서는 모의 성능이 낮았다. 결과적으로 본 연구에서는 전체기간과 갈수기간 모두에서 우수한 모의성능을 보인 SAC-SMA를 선정하였으며, 제공된 모형효율성계수(E_{root})를 이용하여 추정된 매개변수를 이용하여 예측모델을 개발하고자 하였다.

Table 7 The performance of GR4J for calibration and verification periods using five different objective functions

Time	Used data	Statistics	Calibration period [2001-2010]					Verification period [1991-2000]				
			NS	Log	Root	Rel.	Hyb.	NS	Log	Root	Rel.	Hyb.
Annual (Jan - Dec)	Daily	MAE	25.6	24.8	23.5	64.5	57.3	23.1	23.7	22.5	58.4	55.7
		RMSE	70.6	82.1	71.8	212.9	185.9	60.6	66.7	59.7	194.3	176.0
		CORR	0.96	0.94	0.96	0.52	0.74	0.96	0.96	0.96	0.53	0.80
		R ²	0.92	0.88	0.92	0.27	0.54	0.92	0.91	0.93	0.28	0.65
		d	0.98	0.97	0.98	0.64	0.69	0.98	0.97	0.98	0.64	0.64
		PB (%)	9.7	-8.1	1.5	-63.3	-72.6	-1.2	-18.8	-8.9	-70.9	-79.0
	Monthly	MAE	13.7	12.3	10.9	47.0	53.9	12.5	15.7	12.7	48.2	53.6
		RMSE	18.1	17.8	15.5	72.6	98.5	18.0	24.1	18.9	72.5	96.8
		CORR	0.99	0.99	0.99	0.97	0.95	0.99	0.99	0.99	0.96	0.94
		R ²	0.98	0.98	0.98	0.93	0.90	0.97	0.97	0.97	0.91	0.88
		d	0.99	0.99	1.00	0.85	0.66	0.99	0.99	0.99	0.82	0.59
		PB (%)	9.8	-8.1	1.6	-63.4	-72.6	-1.2	-18.8	-8.9	-71.1	-79.0
Dry season (Jan - Jun)	Daily	MAE	17.8	15.6	15.6	28.7	25.9	17.4	17.5	16.9	33.1	30.9
		RMSE	32.2	32.9	32.4	58.9	53.4	38.7	41.1	37.9	68.6	67.3
		CORR	0.82	0.81	0.82	0.33	0.59	0.82	0.82	0.83	0.43	0.57
		R ²	0.67	0.65	0.68	0.11	0.34	0.67	0.67	0.70	0.18	0.33
		d	0.90	0.88	0.90	0.46	0.51	0.88	0.86	0.89	0.45	0.40
		PB (%)	10.9	-17.5	-4.2	-88.5	-80.4	-14.8	-35.9	-26.3	-91.0	-85.5
	Monthly	MAE	12.7	11.6	11.4	27.1	24.8	13.0	14.9	13.2	32.4	30.4
		RMSE	16.5	16.2	15.8	35.9	34.7	19.9	23.2	21.2	44.6	45.4
		CORR	0.82	0.82	0.82	0.64	0.76	0.86	0.86	0.86	0.83	0.81
		R ²	0.67	0.68	0.68	0.40	0.58	0.74	0.74	0.74	0.69	0.65
		d	0.90	0.88	0.90	0.52	0.50	0.91	0.88	0.91	0.51	0.46
		PB (%)	11.3	-17.3	-4.0	-88.5	-80.3	-14.6	-35.8	-26.2	-91.1	-85.4

Table 8 The performance of SAC-SMA for calibration and verification periods using five different objective functions

Time	Used data	Statistics	Calibration period (2001-2010)					Verification period (1991-2000)				
			NS	Log	Root	Rel.	Hyb.	NS	Log	Root	Rel.	Hyb.
Annual (Jan – Dec)	Daily	MAE	24.6	29.5	23.9	36.0	56.4	25.3	27.6	23.7	34.6	52.6
		RMSE	78.2	105.5	83.7	115.3	172.4	73.2	99.0	78.2	105.2	151.1
		CORR	0.95	0.90	0.94	0.88	0.83	0.95	0.90	0.94	0.88	0.81
		R ²	0.89	0.81	0.88	0.77	0.68	0.89	0.82	0.89	0.78	0.65
		d	0.97	0.94	0.96	0.93	0.89	0.97	0.93	0.96	0.93	0.89
		PB (%)	-1.4	1.3	-0.2	-7.9	-5.2	-10.4	-7.4	-9.1	-17.5	-14.1
	Monthly	MAE	9.9	8.8	9.2	12.3	15.2	13.2	12.9	11.7	15.3	17.6
		RMSE	15.2	15.7	14.1	16.3	23.4	18.8	19.8	18.5	21.1	25.2
		CORR	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98
		R ²	0.98	0.98	0.99	0.98	0.97	0.97	0.97	0.98	0.97	0.95
		d	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
		PB (%)	-1.4	1.3	-0.2	-8.0	-5.3	-10.4	-7.4	-9.1	-17.7	-14.2
Dry season (Jan – Jun)	Daily	MAE	15.9	14.3	12.9	17.7	29.9	19.2	16.5	15.6	23.0	33.5
		RMSE	31.2	37.0	29.7	35.0	90.8	39.3	39.6	36.5	43.4	87.4
		CORR	0.84	0.84	0.86	0.82	0.59	0.82	0.81	0.84	0.79	0.54
		R ²	0.71	0.71	0.74	0.67	0.35	0.68	0.65	0.71	0.63	0.29
		d	0.91	0.90	0.93	0.90	0.65	0.88	0.89	0.90	0.86	0.67
		PB (%)	-10.0	7.5	3.6	-29.5	-22.8	-29.1	-14.6	-17.1	-45.1	-31.9
	Monthly	MAE	11.3	8.1	8.3	13.8	14.0	14.4	12.0	10.8	17.0	16.5
		RMSE	16.0	13.9	12.3	18.5	19.3	21.2	18.3	17.4	24.2	24.2
		CORR	0.83	0.89	0.90	0.84	0.80	0.87	0.89	0.90	0.88	0.83
		R ²	0.69	0.79	0.81	0.71	0.64	0.76	0.78	0.81	0.77	0.69
		d	0.90	0.94	0.95	0.89	0.88	0.91	0.94	0.94	0.89	0.89
		PB (%)	-9.7	7.6	3.7	-29.5	-22.7	-28.9	-14.6	-17.0	-45.2	-32.0

Table 9 The performance of PRMS for calibration and verification periods using five different objective functions

Time	Used data	Statistics	Calibration period (2001-2010)					Verification period (1991-2000)				
			NS	Log	Root	Rel.	Hyb.	NS	Log	Root	Rel.	Hyb.
Annual (Jan - Dec)	Daily	MAE	28.0	36.8	28.1	33.0	56.4	28.3	32.7	27.3	33.7	49.9
		RMSE	91.7	147.8	94.2	104.9	210.2	85.4	122.8	86.6	101.7	171.7
		CORR	0.92	0.82	0.92	0.90	0.75	0.93	0.83	0.93	0.89	0.75
		R ²	0.85	0.67	0.85	0.81	0.57	0.86	0.70	0.86	0.80	0.57
		d	0.96	0.90	0.95	0.94	0.84	0.95	0.91	0.95	0.93	0.85
		PB (%)	1.9	1.0	2.2	0.3	0.9	-7.3	-8.0	-6.8	-9.0	-8.2
	Monthly	MAE	9.1	9.9	9.1	10.5	13.3	13.1	12.6	12.0	14.3	15.7
		RMSE	14.4	17.2	14.0	15.1	22.1	18.8	19.0	17.7	20.3	22.2
		CORR	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
		R ²	0.99	0.98	0.99	0.98	0.97	0.97	0.98	0.98	0.97	0.96
		d	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
		PB (%)	1.9	1.0	2.3	0.3	0.9	-7.4	-8.0	-6.8	-9.0	-8.2
Dry season (Jan - Jun)	Daily	MAE	16.8	16.7	15.7	16.9	25.5	20.9	18.5	19.0	22.7	29.7
		RMSE	35.3	45.6	33.2	35.2	90.6	42.6	48.0	41.6	43.8	83.8
		CORR	0.82	0.70	0.82	0.83	0.57	0.78	0.71	0.78	0.77	0.52
		R ²	0.67	0.49	0.67	0.69	0.32	0.61	0.50	0.61	0.60	0.27
		d	0.90	0.82	0.90	0.90	0.63	0.87	0.82	0.87	0.87	0.66
		PB (%)	3.9	3.5	4.4	4.3	5.4	-15.9	-17.8	-16.4	-15.4	-14.8
	Monthly	MAE	9.7	8.7	9.1	10.0	11.3	13.9	11.9	12.5	14.6	14.6
		RMSE	14.0	13.2	13.3	14.4	16.0	20.4	18.2	19.0	21.2	20.9
		CORR	0.88	0.88	0.88	0.88	0.85	0.86	0.89	0.88	0.86	0.85
		R ²	0.77	0.78	0.78	0.78	0.72	0.74	0.79	0.77	0.73	0.72
		d	0.93	0.94	0.94	0.94	0.92	0.92	0.93	0.93	0.92	0.92
		PB (%)	4.1	3.6	4.5	4.2	5.8	-15.9	-17.9	-16.4	-15.6	-14.7

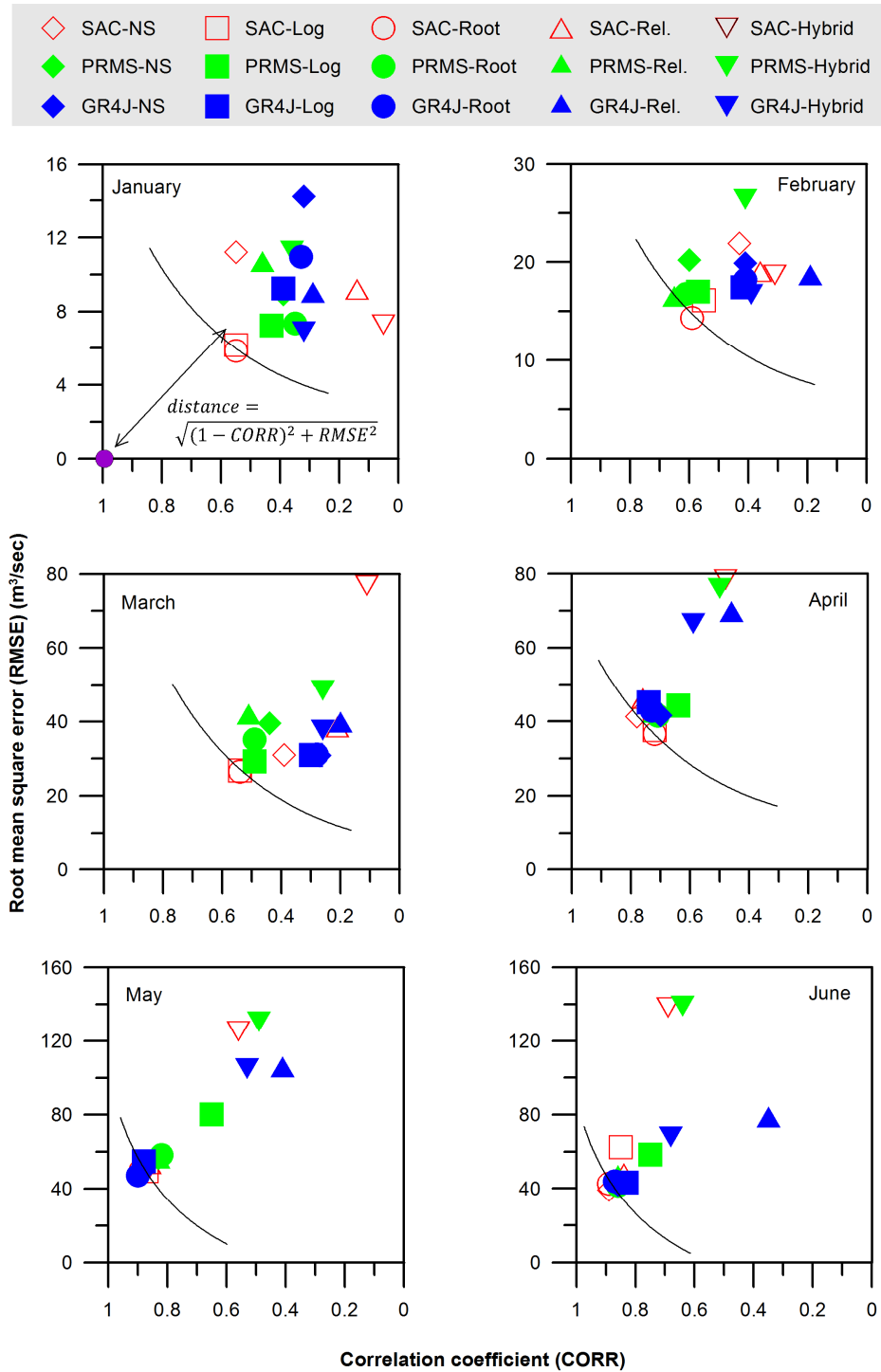


Figure 27 The performance matrix using correlation coefficient and root mena square error for each month

4.1.4 유출모델 초기치 영향 분석

수문모델 상태변수의 초기치의 부정확성에서 발생하는 불확실성은 갈수량 예측의 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다(Demirel et al., 2013). SAC-SMA 모델에서는 예측시점에서 상부층(upper level)과 하부층(lower level)에 관련된 다섯 개의 상태변수(UZTWC, UZFWC, LZTWC, LZFSC, LZFPC)의 초기치를 결정하는 것이 요구된다. 이러한 상태변수들은 예측시점에서 토양층이 건조한 상태인지 습윤한지 여부에 따라 기후예측정보에 다르게 반응할 수 있다. 그러나 유역의 토양층 상태를 관측하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 일반적인 장기유출해석에서는 초기치를 결정하기 위해 몇 년간의 사전모의(initial run) 과정을 수행한다. 본 연구에서는 적정 사전모의 기간을 평가하기 위해 동일 기후조건과 상이한 초기조건하에서 유출모의결과가 어느 시점에서 수렴하는지를 평가하였다.

Fig. 28은 1973년에서 1977년 기간에 대해 다양한 초기조건하에서 유출분석을 수행한 결과이다. 다섯 개 상태변수의 물리적 범위 내에서 300개의 조합을 추출하여 유출분석을 수행한 결과 그림에서와 같이 2년 이내에서 대부분 수렴이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 일부 조합에서는 2년 이상의 수렴기간이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 최종적으로 3년을 사전모의 기간으로 선정하였다.

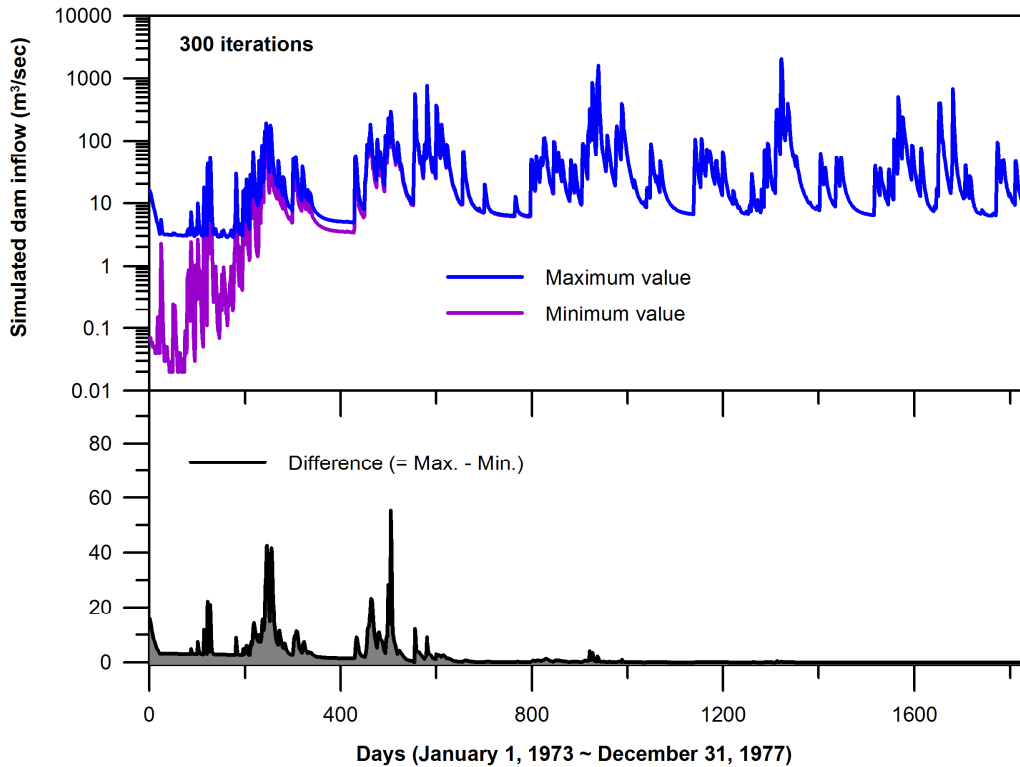


Figure 28 Impact on simulated dam inflow by different initial states variables of SAC-SMA model

4.2 확률론적 댐유입량 예측모델 구축

본 연구에서는 앞 절에서 구축된 수문모델(SAC-SMA)을 이용하여 댐유입량을 예측하고 이를 확률값으로 제공할 수 있는 기술을 개발하였다. 여기서는 장기 댐유입량 확률예측에 필요한 전처리과정인 기후예측정보 상세화방법과 본 연구에서 개발된 ESP(Ensemble Streamflow Prediction) 및 Drip(Dynamic Reservoir Inflow Prediction)의 예측정보 생산과정 및 예측성능 검증결과를 기술하였다.

4.2.1 일단위 강수 및 기온자료 생성

기후예측정보를 이용하여 일단위 강수 및 기온자료를 생성하기 위해 본 연구에서는 기후예측정보에 근사한 관측 일기후자료를 선택하는 방법을 이용하였다. 이 방법은 일단위 강수와 기온 예측정보와 일단위 관측자료를 비교하여 통계적으로 유사한

과거년도의 일자료를 선택하고, 이를 수문유출모델의 입력치로 이용하는 방법이다 (e.g., Luo and Wood, 2008). 월자료를 이용하여 일단위 정보를 생산하기 위한 연구로 KNN re-sampling, 일기발생기(weather generator), 베이지안 기법 등을 적용한 사례가 있으나 적용방법의 복잡성에 비해 수자원 예측성에서는 큰 개선이 없는 것으로 나타났다(e.g., Gobena and Gan, 2010). 따라서 본 연구에서는 조재필 (2015)이 적용한 Mahalanobis distance (Mahalanobis, 1936)를 이용하여 관측치와 예측치의 유사성을 평가하고 유사성이 높은 과거기후자료를 이용하는 방법을 적용하였다. Mahalanobis distance는 변수가 두 개 이상인 자료간의 유사성을 판단하기 위해 각 변수의 평균과 표준편차 그리고 두 변수사이의 공분산(covariance, S)을 고려한다(Eq. (8)).

$$d(\bar{x}, \bar{y}) = \sqrt{(\bar{x} - \bar{y})^T S^{-1} (\bar{x} - \bar{y})} \quad (8)$$

Fig. 29는 월 기온 및 강수량 자료를 이용하여 월별 Mahalanobis distance를 도시한 것이다. 그림에서와 같이 각 연별 강수량의 Mahalanobis distance가 공간적으로 균일하게 분포하지 않고 강수량이 평균에 비해 적은 년도들이 가깝게 몰려있는 것을 볼 수 있다. 이것은 만약 Mahalanobis distance에 근거하여 하나의 관측년도만을 선정할 경우 선정된 연도와 유사한 거리에 위치한 다른 연도를 누락하여 월단위 예측정보가 일단위로 상세화할 때 발생하는 불확실성이 과소평가될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 Mahalanobis distance에 근거하여 상위 5개의 년도를 선정하여 유출정보를 생산하였다.

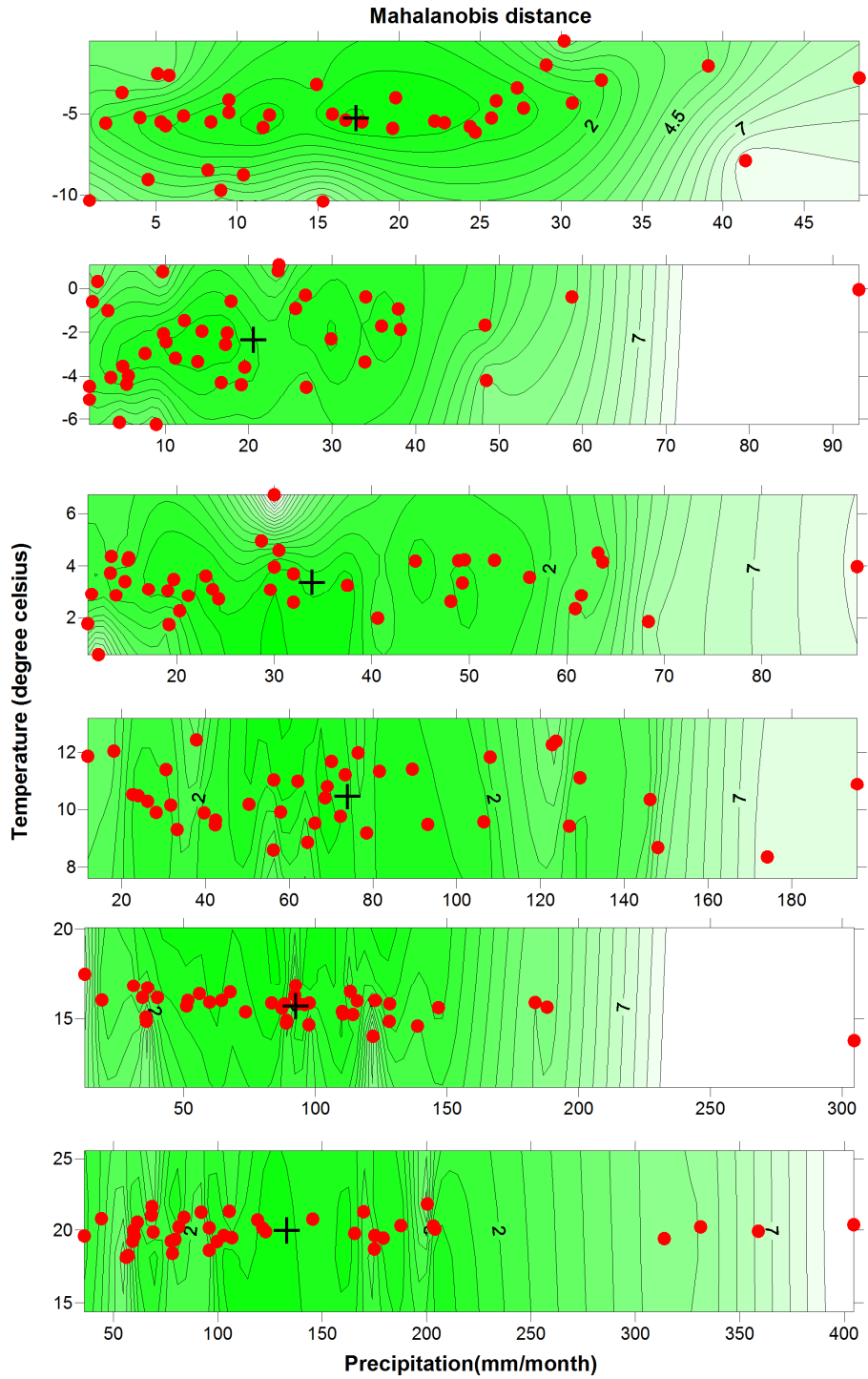


Figure 29 Mahalanobis distances of monthly precipitation and surface air temperature for each month. Red dots indicate observation from 1973 to 2012 and cross symbols indicate mean values

4.2.2 Ensemble Streamflow Prediction (ESP) 개발

양상블유량예측(ESP)은 과거 관측자료가 미래에 재현된다는 정상성(stationarity) 가정에 근거한 수자원분야에서 전통적으로 이용되는 예측기법이다. 본 연구에서는 소양강댐의 ESP예측을 위해 기온자료로는 기상청 인제관측소(211)의 1973년에서 2012년까지 총 40년 자료를 이용하였으며, 강수량 자료는 동일기간의 K-water 유역 평균강수량 자료를 적용하였다. Fig. 30에서와 같이 예측유입량 생산절차는 인제관측소의 강수와 기온 관측치를 이용하여 40개의 양상블 기후예측정보를 생산한다. 예측시점 이전의 3년의 관측기상자료를 이용하여 SAC-SMA 모형의 초기상태를 보정한다. 최종적으로 40개의 기후예측양상블을 SAC-SMA 모형에 입력하여 40개의 양상블 유량예측정보를 생산하고 이를 통계적으로 분석하여 초과확률로써 제공한다.

본 연구에서는 양상블 예측정보의 초과확률을 산정하기 위해 Stedinger et al. (1993)이 제시한 unbiased exceedance probability (Eq. (9))를 이용하였다. Eq. (9)에서 i 는 순위, n 은 자료의 개수이다.

$$prob_{exceedance} = (i - 0.4) / (n + 0.2) \quad (9)$$

Fig. 31은 본 연구에서 개발한 ESP를 이용하여 소양강댐 1983년 1월부터 3월까지 3개월 댐유입량 예측을 수행한 결과이다. Fig. 32는 ESP 예측결과를 초과확률로 도시한 것이다. 그림에서와 같이 초과확률 10%, 25%, 50%, 75%, 90%에 해당하는 예측유량정보를 나타낸다. 여기서 90%에 해당하는 유입량의 의미는 이 값을 초과할 댐 유입량이 들어올 확률이 90%에 해당한다는 것이다. 반대로 이 값보다 적게 유입될 확률이 10% 정도라는 것을 의미한다.

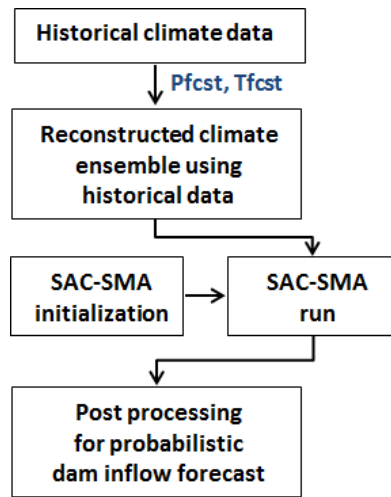


Figure 30 Framework to generate ensemble streamflow prediction (ESP)

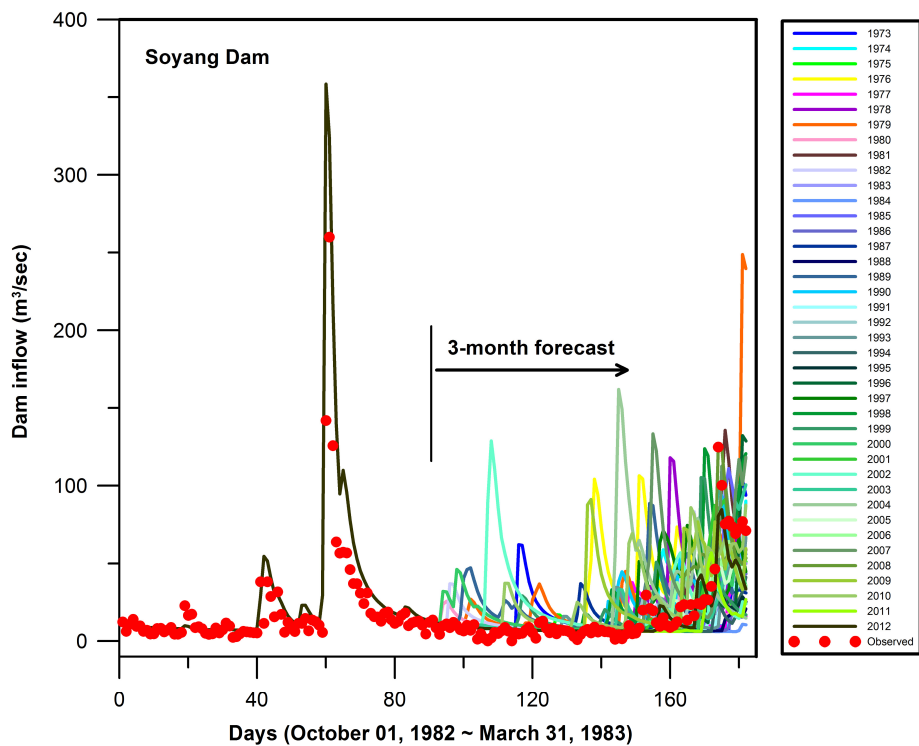


Figure 31 Forecasting 3-month dam inflow using ESP at starting March 1, 1983

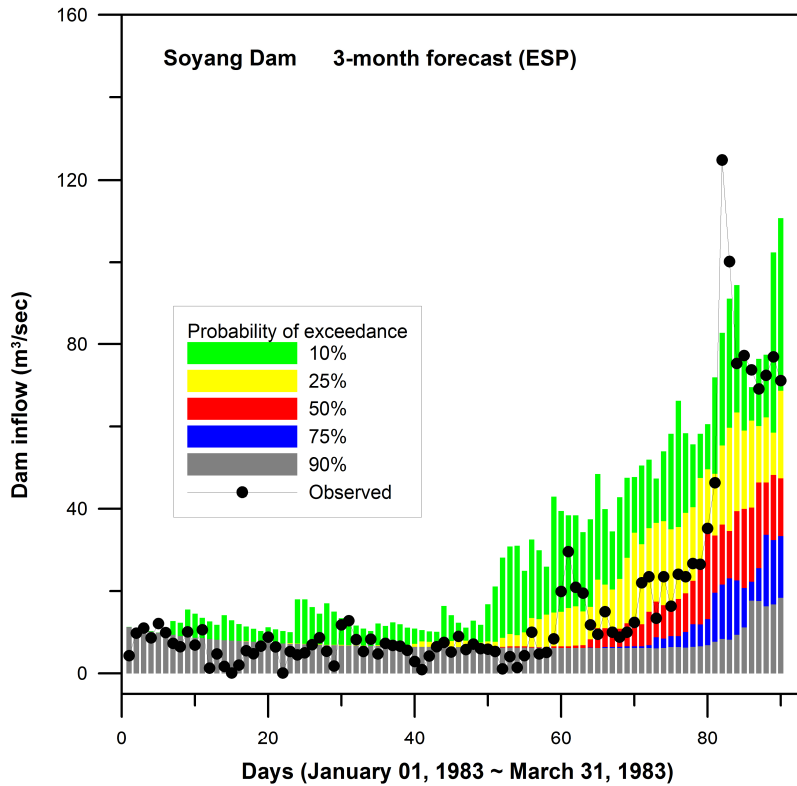


Figure 32 Forecasting probabilistic 3-month dam inflow using ESP at starting March 1, 1983

4.2.3 Dynamic Reservoir Inflow Prediction (Drip) 개발

Fig. 33은 APCC 기후예측정보를 활용한 확률수문예측정보 생산절차이다. 수문예측정보 생산과 예측성 검증에 위해 본 연구에서는 APCC 기후예측정보로는 3개월 예측 hindcast 자료를 이용하였다. APCC는 자체 기후모델을 이용한 기후예측정보뿐 아니라 10개국 16개 기후예측기관으로부터 매달 예측정보를 제공받아 기후정보서비스를 수행하고 있다(총 11개국 17개 기관). 수집된 예측정보는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 공간규모로 재격자화(re-grid)하고, Multi-model ensemble (MME) 기법을 이용하여 후처리(post-processing)한 다음 APEC 회원국과 개도국에 제공하고 있다. 본 연구에서는 hindcast 기간(1983-2005년)이 일치하는 10개 기후모델을 선정하였다(Table 10). 각 기후모델은 초기조건 등을 달리하여 5개(JMA)에서 33개(POAMA)의 앙상블예측을 수행하는데, 본 연구에서는 각 개별 기후모델의 앙상블 평균값을 이용하였다.

기후모델에서 예측된 기후자료는 관측자료와의 공간규모의 불일치와 기후모델이 가지는 구조적인 불완전성으로 인해 편이(bias)를 포함하게 된다. 이러한 기후모델 결과의 편이를 보정하기 위해 본 연구에서는 simple anomaly bias correction(SABC)를 이용하였다(정일원, 2015). SABC 방법은 먼저 각 기후모델 hindcast의 평균과 표준편차를 계산한다. 그 다음 hindcast에서 평균을 제거하고 표준편차로 나누어 hindcast의 아노말리(anomaly)를 산정한다. 이렇게 산정된 아노말리에 관측자료의 평균을 더하고 표준편차를 곱함으로써 기후모델의 편이를 보정한다. 편이보정된 월예측정보는 Mahalanobis distance를 이용하여 가장 가까운 일관측년도를 찾고, 마지막으로 가장 가까운 관측년도의 월관측값과 월수문예측정보의 차이(difference)를 일관측값에 보정한다. 나머지 유량예측의 생산과정은 ESP와 동일하다.

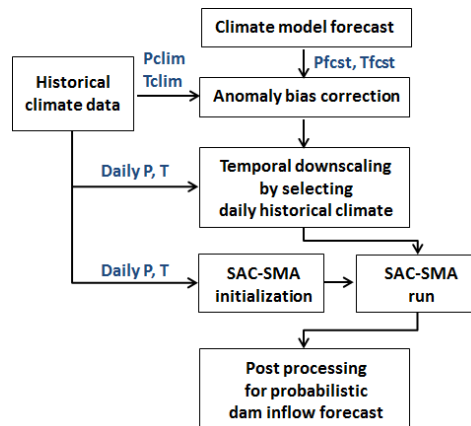


Figure 33 Framework of dynamic reservoir inflow prediction (Drip) to generate probabilistic dam inflow forecast using APCC climate forecast

Table 10 Description of the GCMs used for APCC Multi-model Ensemble (MME)

Model; acronym	Institution (country)	Resolution	Forecast range	Reference
HMC	Hydrometeorological Centre of Russia (Russia)	1.40625° ×1.125°	4 months	Tolstykh et al. (2010)
GDAPS_F	Korea Meteorological Administration (Korea)	1.0° × 1.0°	3 months	Park et al. (2002)
MSC_ CANCM3	Meteorological Service of Canada [Canada]	2.5° × 2.5°	12 months	Kim et al. (2002)
MSC_ CANCM4	Meteorological Service of Canada [Canada]	2.5° × 2.5°	12 months	Simmons et al. (2004)
NCEP	Climate Prediction Center / NCEP / NWS / NOAA (USA)	1.0° × 1.0°	9 months	Saha et al. (2010)
POAMA	Centre for Australian Weather and Climate Research /Bureau of Meteorology (Australia)	2.5° × 2.5°	9 months	Zhong et al. (2005)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)	-	3 months	Molod et al. 2012
PNU	Pusan National University (PNU)	T42 L18	6 months	Sun and Ahn (2011)
CWB	Central Weather Bureau (Taipei)	T42 L18	3 months	Liou et al. (1997)
JMA	Japan Meteorological Agency (Japan)	-	3 months	-

Figs. 34 & 35는 소양강댐유역에 대한 Drip 예측결과를 도시한 것이다. 소양강댐의 기후예측정보 추출을 위해 본 연구에서는 소양강댐 인근의 4개 격자점(동경 125.0°~132.5°, 북위 35.5°~42.5°)정보를 이용하였다. 정일원(2015)은 격자점 수(1, 4, 9개)에 따른 예측성의 민감도를 분석하였는데, 월별 예측성은 격자점 수에 따라 큰 차이를 보이지는 않았지만 4개 격자점을 이용할 경우가 상대적으로 안정적인 예측결과를 보인다고 제시하였다. Figs. 34 & 35는 ESP 예측(Figs. 31 & 32)에 비해 전반적으로 양상불 범위가 넓었는데, 이것은 확률예측구간에서 10%, 20% 초과확률 유입량 값의 차이가 큰 것이 원인이었다. ESP는 과거 관측기후자료의 중요도가 동일한 비중으로 고려되는데 반해, Drip도 관측기후자료를 이용하지만 기후모델 예측에 따라 비중이 달라지기 때문에 사료된다.

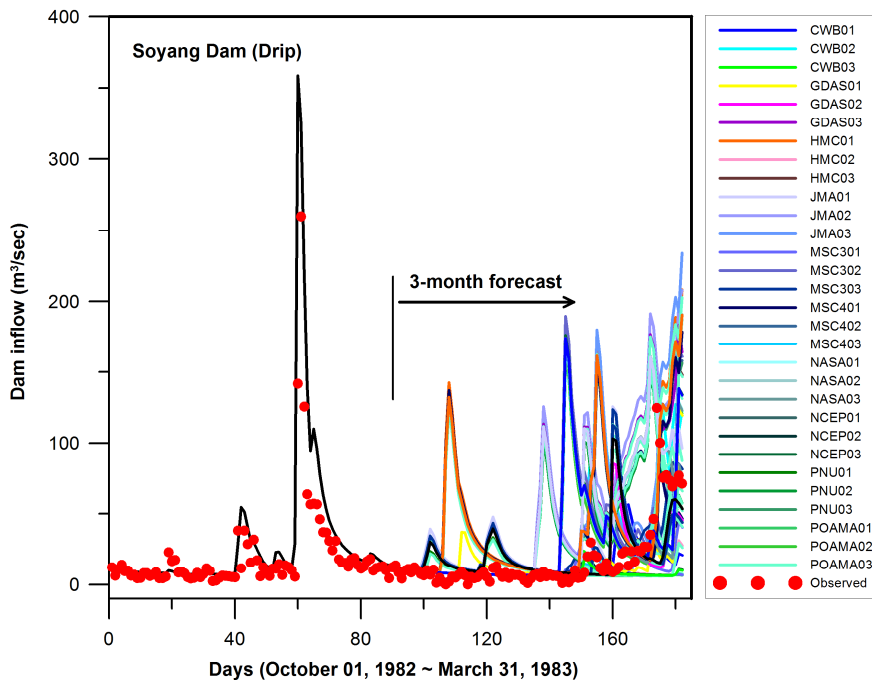


Figure 34 Forecasting 3-month dam inflow using Drip at starting March 1, 1983

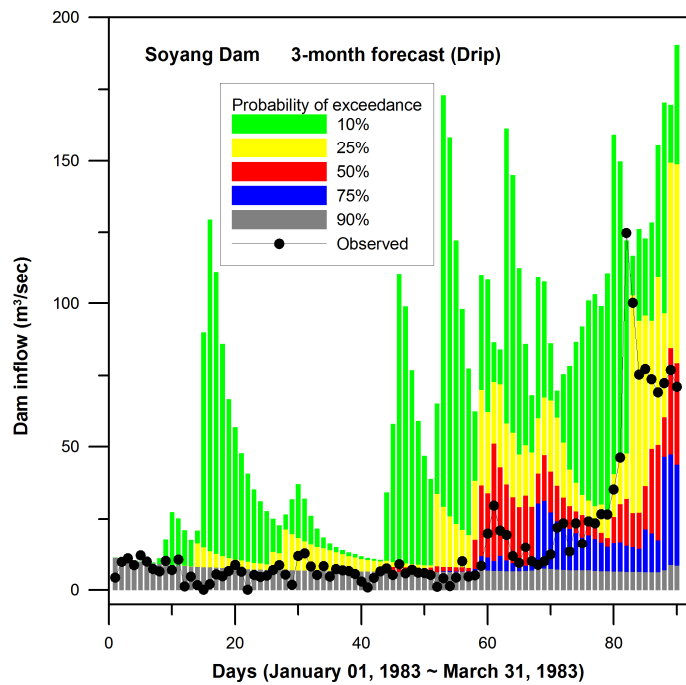


Figure 35 Forecasting probabilistic 3-month dam inflow using Drip at starting March 1, 1983

4.3 ESP와 Drip 예측성 평가

예측정보의 예측성능을 평가하기 위해 다양한 기법들이 개발되어 왔다(e.g., Epstein, 1969; Murphy, 1971; Wilks, 1995; Anderson, 1996; Mason, 1982). 예측성 평가기법은 크게 결정론적인 기법과 범주형 기법으로 나눌 수 있다. 상관계수(correlation coefficient), 결정계수(coefficient of determination), 평균제곱근오차(root mean square error) 등은 결정론적(deterministic)평가 지표이다. 반면 HSS(Heidke skill scores), RPSS(ranked probability skill scores), Hit rate 등은 범주형 평가기법이다. 예측성평가 지표의 선정은 목적에 따라 달라질 수 있다. 예로, 예측정보가 관측치에 대해 맞을 것이다(hitting), 적을 것이다(missing)가 중요할 경우 범주형 평가기법이 의사결정에 유용한 정보를 제공할 수 있다. 반면 연구자가 예측양상들의 평균과 관측값의 상관여부에 관심이 있다면 상관계수 등의 결정론적 평가지표가 이용될 수 있다. 본 연구에서는 확률예측정보의 신뢰성 평가지표로 많이 적용되고 있는 RPSS와 Hit rate(probability of detection)를 이용하여 ESP와 Drip의 예측성을 평가하였다.

RPSS는 Eq. (10)에서 보는 바와 같이 예측정보를 이용한 $RPS_{forecast}$ (ranked probability score of forecasts)와 기후관측값을 이용한 $RPS_{climatology}$ (ranked probability score of climatology)의 비율로 표현된다. Eq. (10)에서 K 는 예측범위를 구분한 개수(categories)이며, Y_k 는 k 번째 범주의 예측값의 누적확률(cumulative forecast)이며, O_k 는 k 번째 범주의 관측 누적확률, P_k 는 관측평균(climatology)을 이용할 경우의 k 번째 범주의 예측값의 누적확률을 나타낸다. RPS 는 완벽한(perfect) 예측의 경우 0의 값을 가지고 예측성이 떨어지면 값이 증가한다. 따라서 RPSS는 관측평균(climatology)을 이용한 예측에 대한 예측값의 상대적 기여도로 이해할 수 있다. 완벽한 예측의 경우 RPSS는 1의 값을 가지게 되고, 관측평균(climatology)을 이용할 경우와 예측정보를 이용한 경우의 예측성이 같으면 0의 값을 가지며, 관측평균(climatology)을 이용할 경우보다 예측정보의 예측성이 낮으면 음수가 된다.

$$RPSS = \frac{RPS_{climatology} - RPS_{forecast}}{RPS_{climatology}} = 1 - \frac{RPS_{forecast}}{RPS_{climatology}} \quad (10)$$

$$RPS_{forecast} = \sum_{k=1}^K (Y_k - O_k)^2, \quad RPS_{climatology} = \sum_{k=1}^K (P_k - O_k)^2$$

RPSS와 같이 연속확률을 이용하여 예측성을 평가하는 방법과 달리 비가 온다/안온다 또는 비가 많다/적다 등의 두 가지 경우(binary)에 대한 평가방법으로는 평가할 때는 분할표(contingency table)을 이용한 방법이 효과적이다(Fig. 36). Fig. 36과 같이 평균 이상의 유량에 대한 예측성을 검증할 경우, 관측유출이 평균이상일 때 예측유량도 평균이상을 예측한 경우를 a, 관측유출은 평균이상이 아닌데 예측유량이 평균이상이라고 예측한 경우를 b, 관측은 평균이상인 반면 예측은 평균이상이 아닌 경우를 c, 관측과 예측 모두 평균이상이 아닌 경우를 d라고 하자. 탐지확률(Hit rate)은 $a/(a+c)$ 로 계산되는데, 0과 1사이의 값을 가지고, 1이면 예측이 완벽히 적중했음을 의미한다.

	Observed flow above normal	Observed flow below normal	
Predicted flow above normal	a (hit)	b (false alarm)	$FBI = \frac{a+b}{a+c}$
Predicted flow below normal	c (miss)	d (correct rejection)	$FAR = \frac{b}{a+b}$
			$POD = \frac{a}{a+c}$
			$CSI = \frac{a}{a+b+c}$

Figure 36 Contingency tables used to define categorical measures for observed flow condition and predicted flow condition comparisons (quoted from 정일원 (2013)).

본 연구에서는 ESP와 Drip의 일단위 댐유입량 예측정보를 월자료로 변환하여 RPSS를 산정하였다. Fig. 37은 소양강댐 유입량에 대한 월별 ESP와 Drip의 RPSS 결과를 보여준다. 모든 값이 양(+)으로 ESP와 Drip의 예측성능이 관측평균(climatology)을 이용한 것보다 우수한 것으로 나타났다. ESP의 경우 모든 월과 예측선행시간(lead time)에 대해 RPSS 0.5 이상의 값을 보였다. 이에 반해 Drip은 1, 2, 3, 5월에서는 ESP와 유사한 예측성능을 보여주었지만 4월과 6월의 경우 예측성이 상대적으로 낮았다.

ESP의 예측성능이 우수한 것은 예측시점에 관측정보가 포함되었기 때문으로 판단되며, 정확한 예측성 평가를 위해서는 ESP에 포함되지 않은 2013년 이후의 자료를 이용해서 평가되어야 할 것이다. 갈수기간의 유입량은 지하수와 같은 기저유출성분

의 비중이 홍수기간에 비해 높은데, 이로 인해 갈수기 댐유입량의 예측성은 기후정보의 정확성과 수문모델의 초기상태 추정 및 수문모의능력의 조합으로 결정된다. 허나 6월의 유출량은 6월 강수량에 크게 영향을 받는 기간으로, 강수량에 대한 예측성이 낮을 경우 댐유입량의 예측성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 Fig. 37의 결과는 본 연구에서 이용된 기후모델의 6월 강수예측성이 낮아서 발생한 것으로 판단된다. 결론적으로 Drip의 예측성이 낮은 6월의 경우 유입량예측성 향상을 위해 강수 예측성을 높이는 것이 필요할 것이다. 이에 대한 하나의 방안은 기후모델에서 모의되는 강수량을 직접적으로 이용하는 것이 아니라 예측성이 높은 기후인자를 이용하여 강수량을 간접적으로 추정하고 통계적예측모델을 개발하여 강수량을 예측하는 것이다. 이에 대한 자세한 방법은 5장에서 다루어 질 것이다.

수자원계절예측의 예측성능은 기후정보와 수문초기상태의 정확성에 기인한다.

Fig. 38은 소양강댐 유입량의 각 월의 중앙값(median)에 해당하는 유입량과 20년 빈도유입량을 기준으로 관측값이 이 기준값보다 클 때 크다고 예측한 경우와 관측값이 기준값보다 작을 때 작다고 예측한 경우의 탐지확률(Hit rate)을 계산한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 ESP와 Drip 모두 기준값에 보다 크다고 예측한 경우가 예측성능이 우수한 것으로 나타났다. ESP의 경우 관측값을 모두 이용한 것으로 Drip에 비해 안정적인 값을 보였으나 엄밀히 말하면 이것은 실제 예측값이라고 할 수 없고 단지 유출모형의 초기조건만 변경한 것이다. 이에 비해 Drip의 예측성능은 각 월가 선행예측시간에 따라 큰 차이를 보였다. 따라서 이러한 예측성능을 잘 이해하고 댐운영 의사결정에 활용할 수 있는 방안 마련이 필요할 것이다.

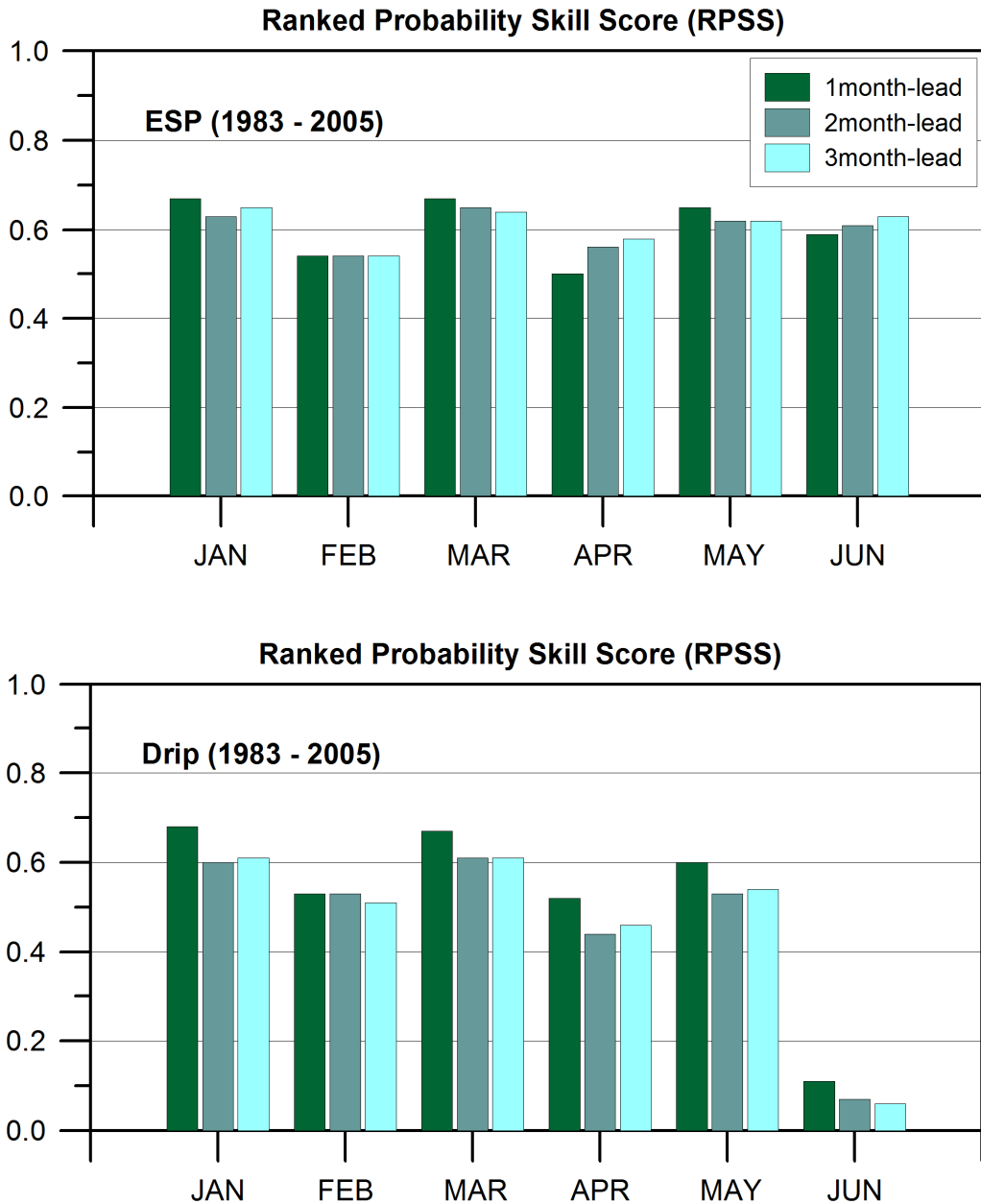


Figure 37 Ranked probability skill score (RPSS) of ESP (upper panel) and Drip (lower panel) for each month with three lead times

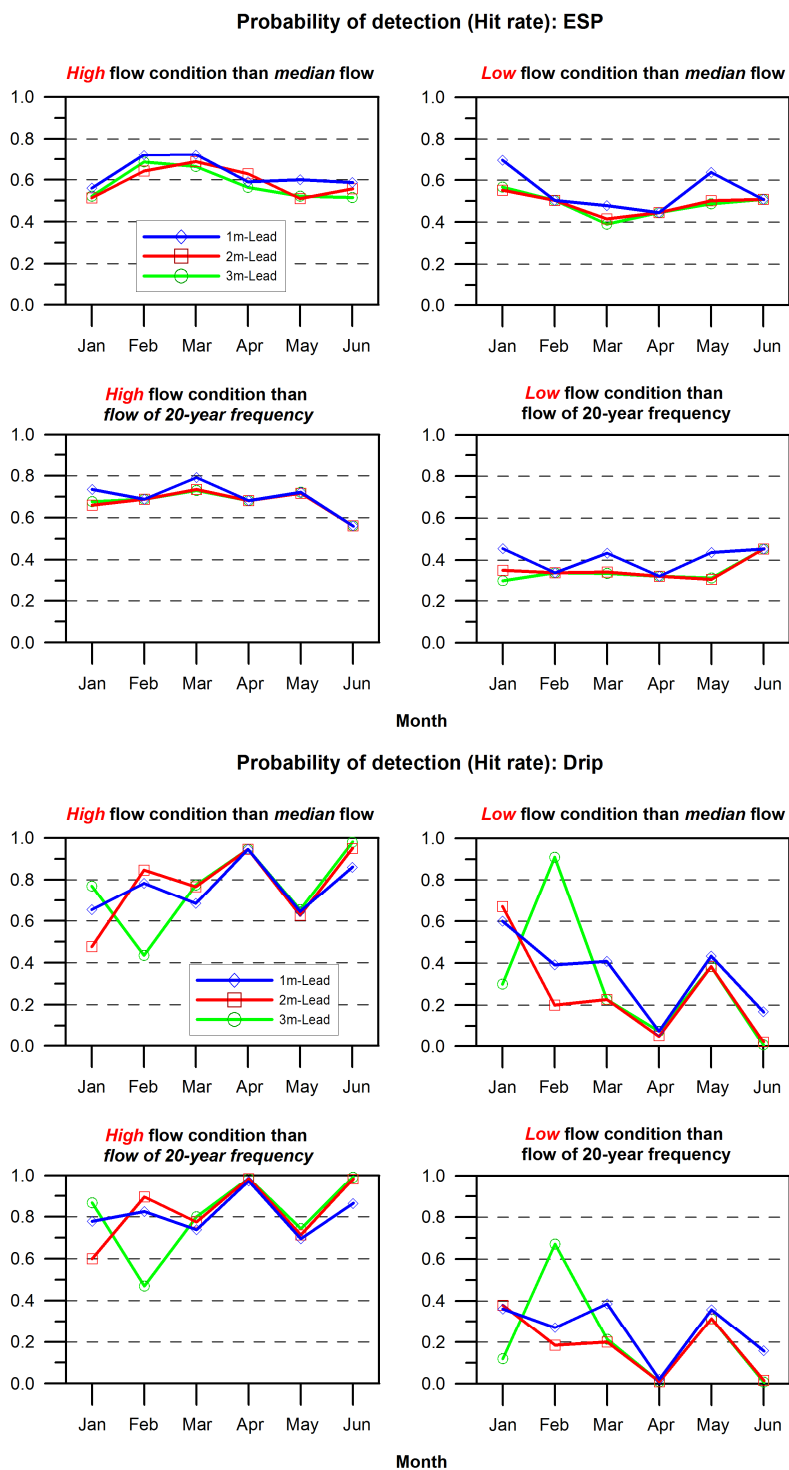


Figure 38 Probability of detection (Hit rate) of ESP and Drip for each month with three lead times

5. 기후예측모델의 댐유역강수량 예측성 개선방안

4장에서 Drip의 6월 예측성이 낮은 원인은 6월 강수량 예측의 신뢰성이 낮기 때문이다. 이는 저해상도의 기후모델이 복잡한 국내 유역의 지역적 강수특성을 반영하지 못하는 점과 기후가 해수면온도에 직접적인 영향을 받는 적도지방에 비해 다양한 기후특성에 영향을 받는 중위도 지역은 상대적으로 계절예측의 정확성이 낮기 때문이다. 이를 극복하기 위한 하나의 방안으로 소양강댐유역의 관측강수량에 대한 기후모델의 예측성이 높은 예측지역과 기후예측변수를 찾고 이를 통계모델로 구축하여 이용하는 방안이 있다(e.g., 조재필, 2015).

5.1 교차검증을 이용한 강수예측성 평가

본 연구에서는 기후모델에서 생산되는 기후예측변수가 소양강댐의 유역평균강수량을 신뢰성 있게 추정하는 공간영역을 hindcast(1983-2005년)를 이용하여 탐색하였다. 이를 위해 관측강수량과 기후예측변수의 각 격자정보를 이용하여 선형회귀모델을 구축하고, 회귀모델의 예측성을 교차검증(cross-validation)을 이용하여 평가하였다. 총 23(1983-2005년) 자료 중에서 18개를 임의로(random) 선택하여 선형회귀모델을 구축하고, 구축된 선형회귀모델을 이용하여 나머지 5개를 예측하는 방법을 적용하였다. 예측성 검증기준으로는 Schüürmann et al.(2008)이 제안한 PSCC(predictive squared correlation coefficient, Eq. (11))를 이용하였다. PSCC는 $-\infty \sim +1$ (perfect)의 범위를 갖는데, 0보다 적으면 관측의 평균을 이용하는 것이 예측치보다 낫다는 것을 의미한다. Eq. (11)에서 S_i 는 예측값, O_i 는 관측값, N 는 총자료의 수, K 는 검증자료의 수이다.

$$PSCC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i^{N-K} - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}^{N-K})^2} \quad (11)$$

교차검증을 위해 격자당 총 33,649(=23C5)번의 예측성 검증을 수행하였으며, PSCC 값의 평균이 0보다 큰 값을 갖는 경우 예측성이 있다고 판단하였다. PSCC가 $-\infty$ 에서 1의 범위를 가지므로 33,649번의 검증 중에서 예측성이 나쁜 경우가 포함되

면평균값이 0을 넘을 가능성이 높지 않기 때문이다.

기후변수는 APCC의 장기기후예측에 이용되는 기후모델의 예측변수 중에서 강수(Prec), 지상 2m 기온(T2m), 850hpa의 기온(T850), zonal wind(U850), 850 hPa meridional wind(V850), 500 hPa Geopotential height (Z500), 해수면기압(SLP)을 이용하였다.

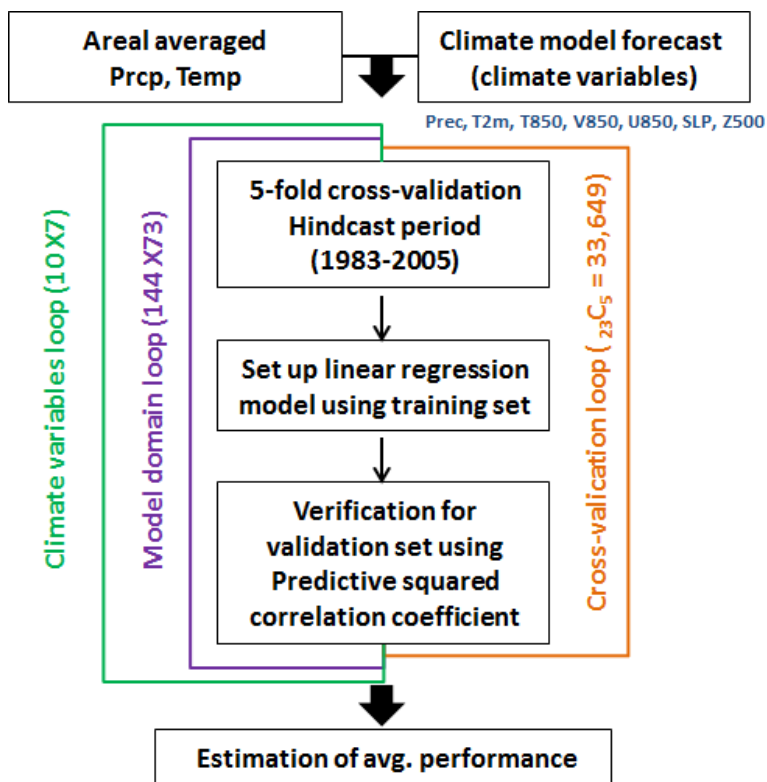


Figure 39 Cross validation process for detecting domains that have significant predictability to Soyang dam's precipitation forecast

5.2 유역강수량 예측성 평가 및 개선방안

Figs. 40-45는 소양강댐 월강수량에 대한 10개 기후모델의 예측강수(Prec)의 1개월 선행예측에 대한 예측성을 검증한 결과이다. 강수예측정보를 이용한 소양강댐 6월 강수량 예측에서는 예측성이 있는 격자가 산재되어 나타났으며, 모델간에서도 일치성이 낮았다(부록 참조). 이에 비해 다른 변수들은 예측성이 있는 격자들이 그룹지어 나타났다. 이것은 강수량은 지역별 편차가 심한 반면 상대적으로 다른 기후변수들은 지역별 편차가 적고 대규모 기후패턴에 영향을 크게 받기 때문으로 사료된다.

Table 11은 소양강댐유역 인근의 9개 격자점에 대해 월강수량 예측 가능 기후예측 변수를 나타낸 것이다. 괄호안의 숫자는 9개 격자점에서 예측성이 나타난 격자점 수를 나타낸 것이다. 기후모델간 차이는 있지만 3월과 6월에서 가장 많은 기후변수들이 탐지되었다. 이에 비해 2월과 4월의 경우는 예측인자로 활용될 수 있는 기후변수가 거의 탐지되지 않았다. 선행예측시간(lead time)에 대해서는 선택된 변수들의 개수에서는 큰 차이가 없었다.

Figs. 46은 예측성이 있는 강수와 기온 예측변수의 격자별 기후모델개수를 나타낸 것이다. 그림에서 회색은 2개 이상의 기후모델이 예측성이 있다고 평가된 격자이고, 5개 이상의 기후모델이 예측성이 있다고 평가된 경우에는 검은색으로 표시되어 있다. 강수예측정보의 경우 5개 이상의 기후모델에서 예측성이 있다고 나타나는 지역이 멕시코만 근처에서 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 예측성은 소양강댐 6월강수량을 1개월, 2개월, 3개월 전에 예측했을 때도 동일하게 나타났다. 특히 기온을 이용한 강수량예측의 경우에도 동일지역에서 시그널이 잡히는 것을 볼 수 있다. 그러나 남한지역에서는 소양강댐 6월강수량 예측에 대해 유의한 예측성을 보이는 모델이 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 Drip의 6월 댐유입량 예측성능이 낮은 원인으로 판단된다. 왜냐하면 6월 댐유입량은 6월 강수량에 직접적으로 영향을 받기 때문이다.

Fig. 47은 기온예측정보를 이용한 소양강댐 4월 강수량예측과 5월 강수량 예측에 대해 여러 모델들이 예측성이 있다고 평가된 지역을 보여준다. Fig. 46과 같이 선행예측시간에 상관없이 유사한 지역에서 예측성이 나타나고 있다. 이러한 결과는 6월 뿐 아니라 다른 월의 강수량예측성도 개선될 수 있음을 시사한다. 다른 월에 대한 결과는 부록으로 수록하였다.

본 연구에서 분석한 정보를 이용하여 댐강수량 예측정보를 생산하기 위해서는 먼저 기후과학측면에서 예측성을 보이는 기후모델의 도메인이 한반도 기후에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 기후학적 분석이 필요하다. 또한, 적정크기의 예측지역 선정과 적합한 통계모델 구축, forecast(2005-2015) 자료를 이용한 예측성 검증 등이 후속연구로 추진되어야 할 것으로 사료된다. 강수예측성은 기후모델에 따라 큰 차이가 있는데 hindcast 자료를 이용하여 소양강댐 유역에 대해 예측성이 높은 모델들을 선별하여 이용하는 것도 예측성을 높이기 위한 하나의 방안이 될 수 있다. 이러한 접근 방법도 forecast 자료를 이용하여 예측성을 검증하는 것이 요구된다.

본 연구에서 제안한 방법은 기후예측정보의 예측성이 저위도에 비해 상대적으로 낮은 중위도 지역에서 강수 예측성을 향상시키고 댐운영을 포함한 수자원관리에 필요한 수준의 신뢰성 있는 예측정보 제공에 기여할 것으로 판단된다.

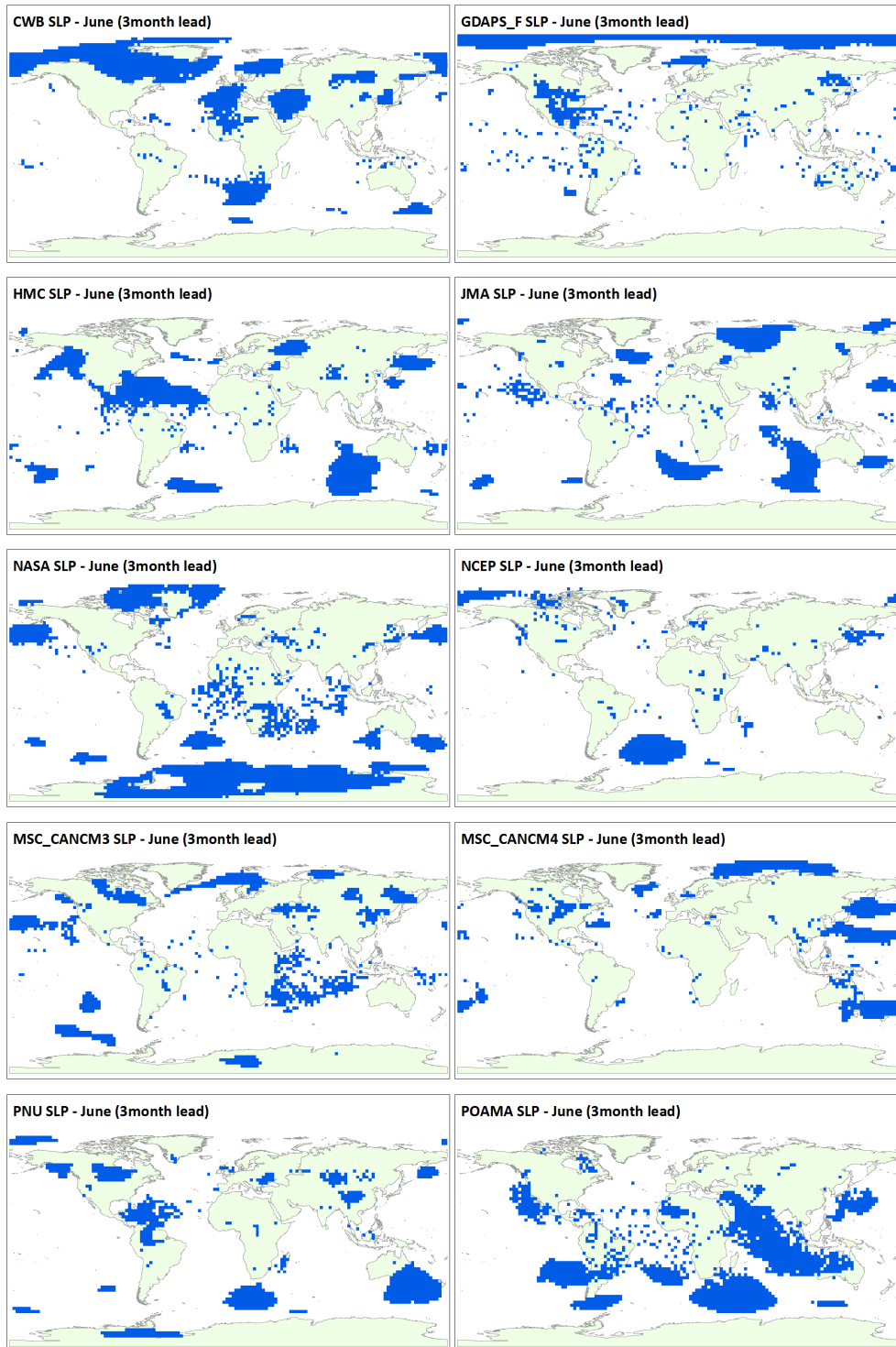


Figure 40 Selected domains for forecasting Soyang dam's precipitation using SLP

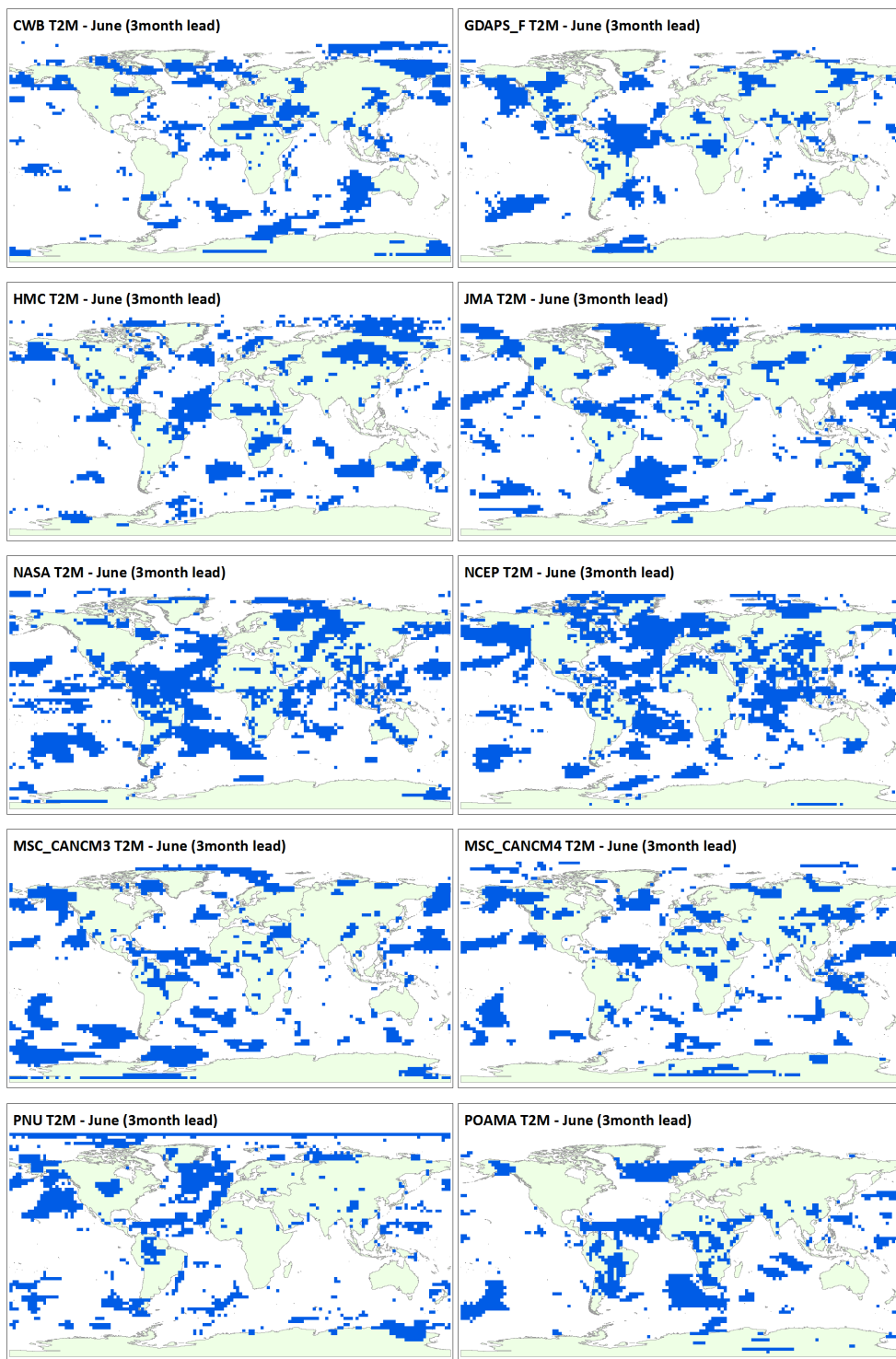


Figure 41 Selected domains for forecasting Soyang dam's precipitation using T2M

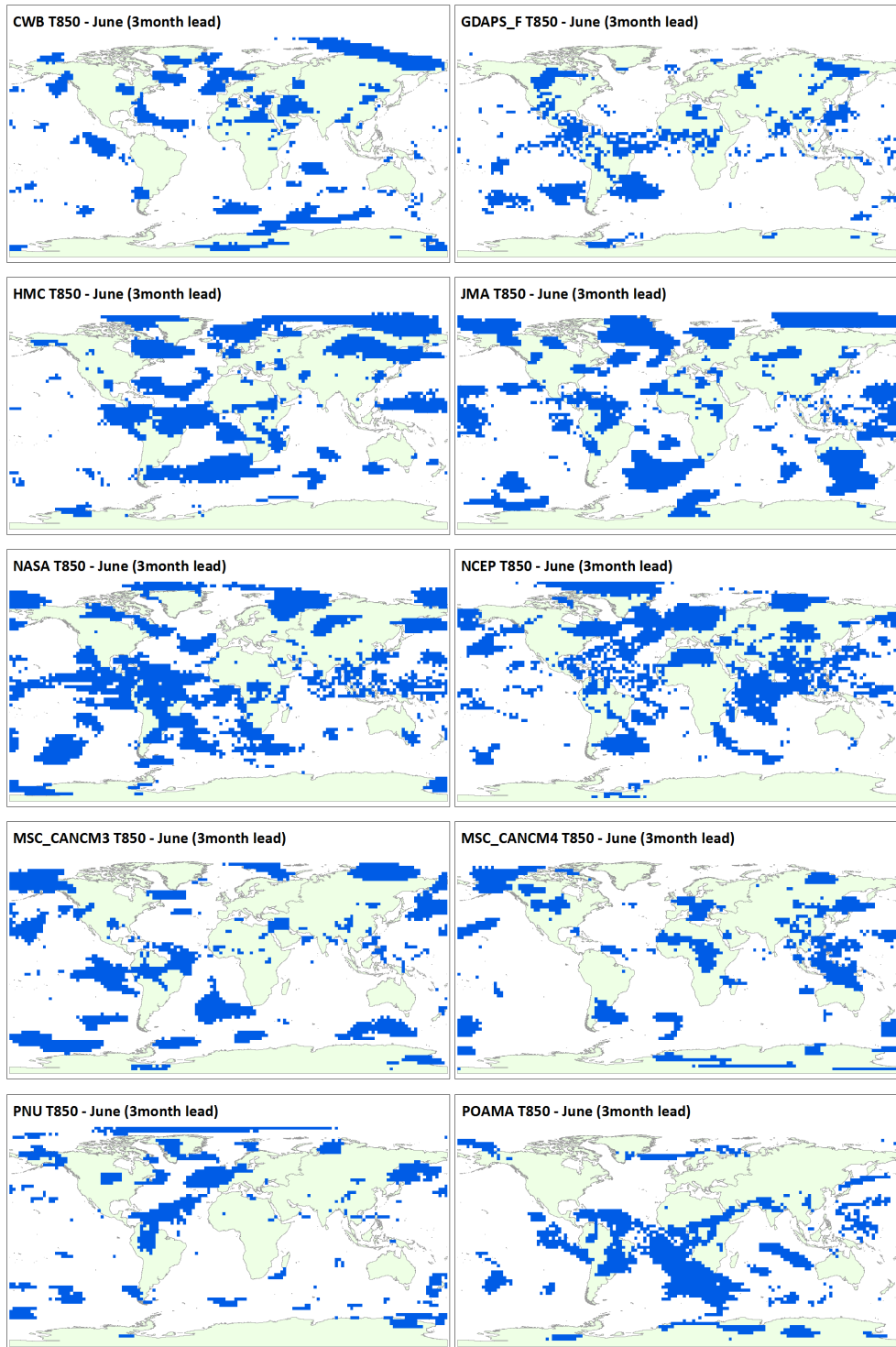


Figure 42 Selected domains for forecasting Soyang dam's precipitation using T850

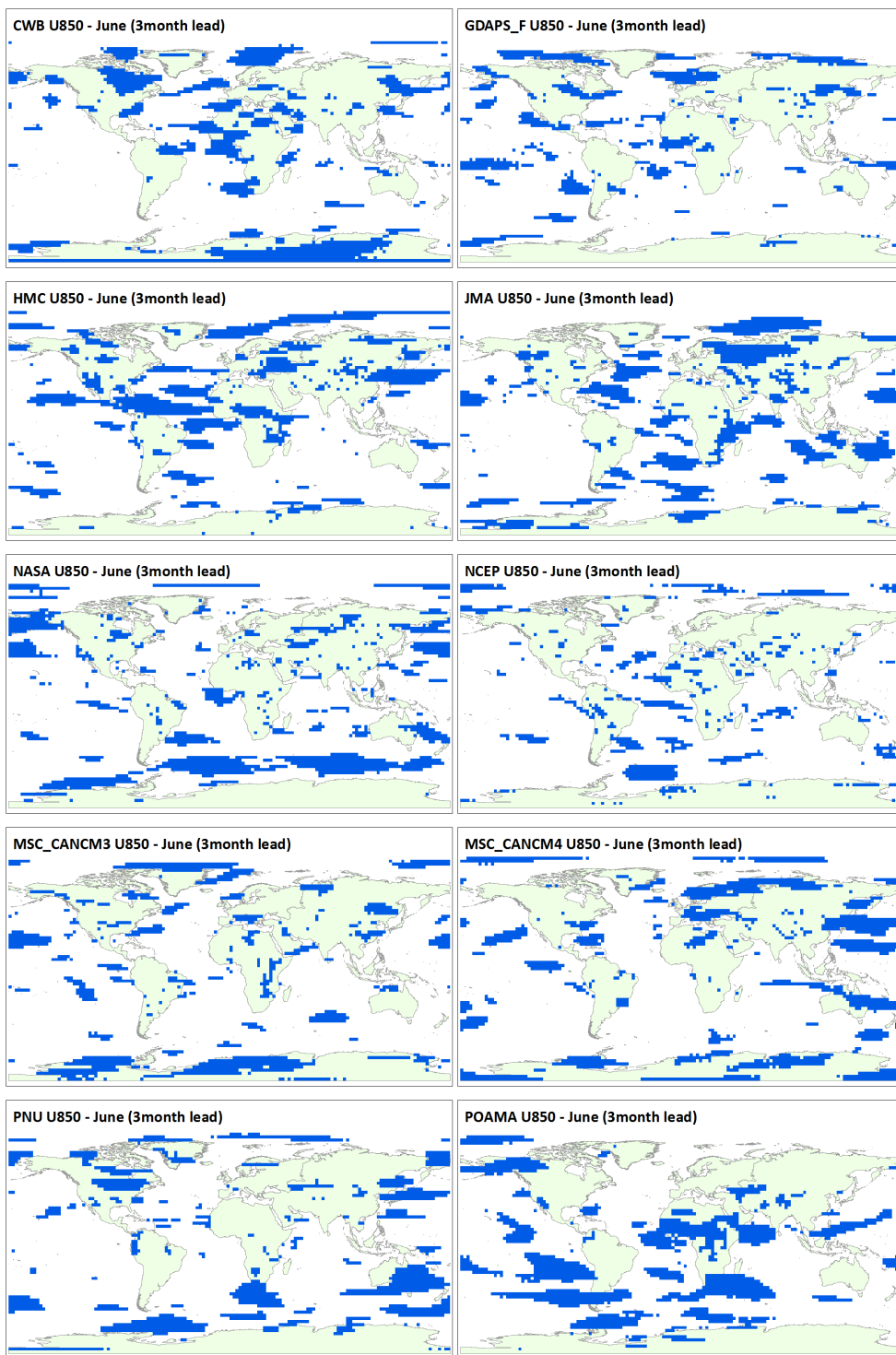


Figure 43 Selected domains for forecasting Soyang dam's precipitation using U850

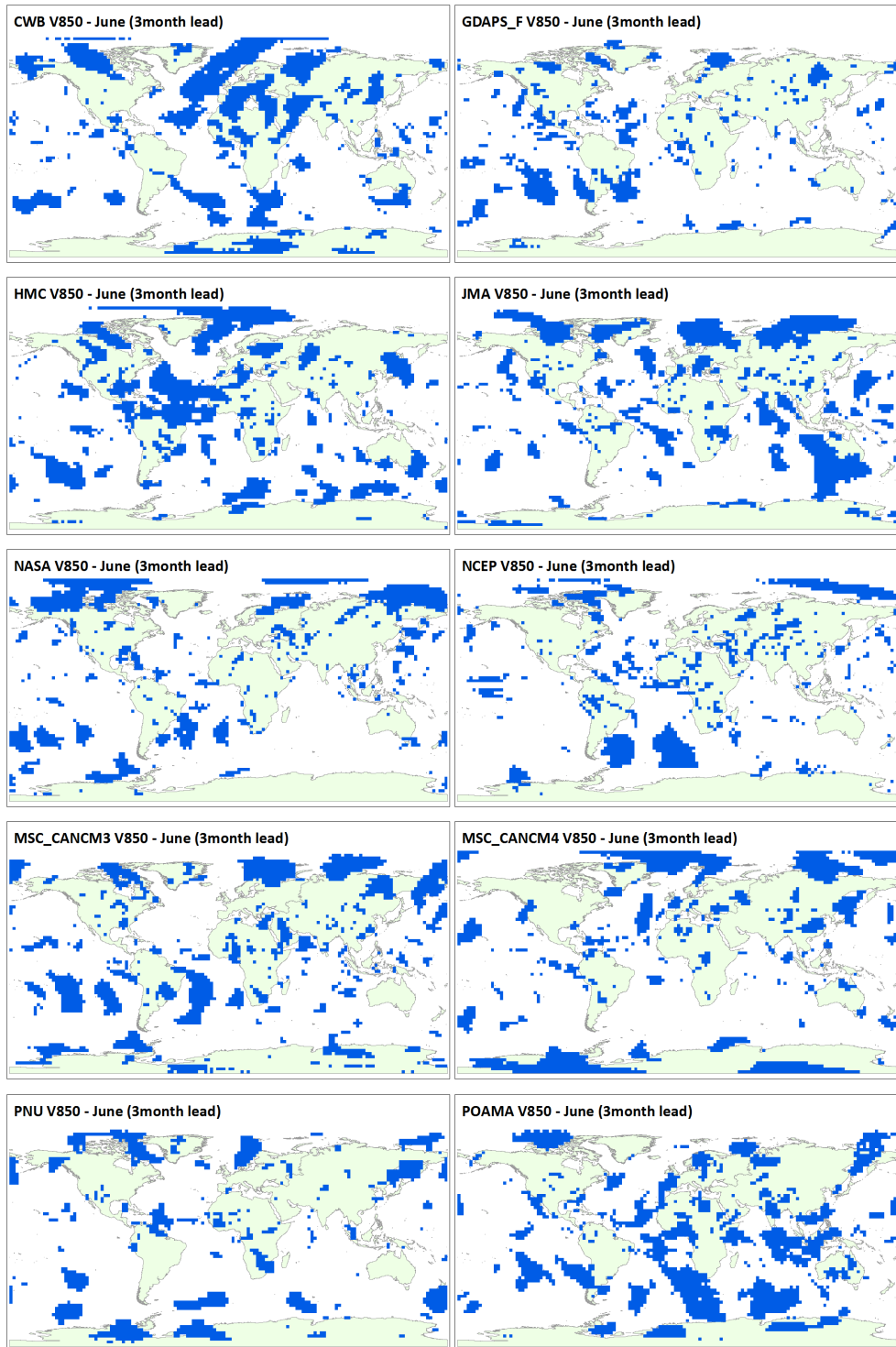


Figure 44 Selected domains for forecasting Soyang dam's precipitation using V850

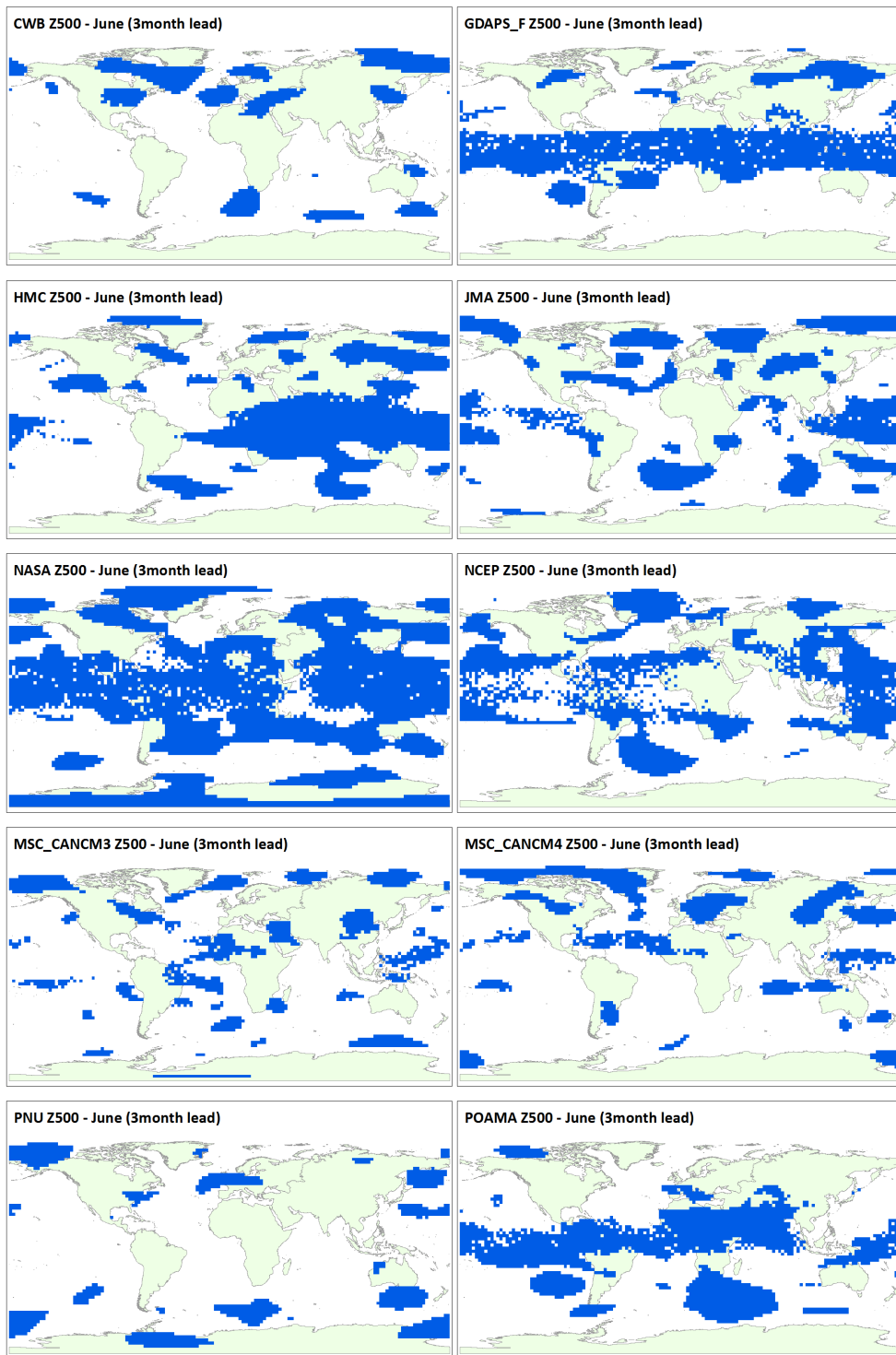


Figure 45 Selected domains for forecasting Soyang dam's precipitation using Z500

Table 11 Selected climate variables with predictability that are located near Soyang dam basin

Lead time	Model	Month					
		January	February	March	April	May	June
1m	CWB			u850(3) slp(1)			prec(4)
	GDAPS_F			slp(8) u850(3)		z500(3) t850(2)	prec(6) u850(6) v850(2)
	HMC	u850(3) slp(2)		prec(1)		prec(5) u850(2) v850(1)	v850(2)
	JMA			u850(5)		prec(3) v850(2)	
	NASA			u850(9) slp(3) prec(3) z500(2)			
	NCEP			slp(8) prec(3)	prec(4) v850(3)	prec(1)	t850(3) u850(2) prec(1)
	MSC_ CANCM3	slp(1)		t2m(1) prec(1)	t850(2)		t2m(2) t850(2)
	MSC_ CANCM4			t850(6) u850(5) slp(3) t2m(1)		v850(2)	v850(3) z500(3) prec(1) u850(1)
	PNU			slp(9) z500(8) prec(6) u850(3) t850(1)			t850(2) prec(1)
2m	POAMA			u850(6) prec(1)		u850(8) t2m(4)	v850(7)
	CWB	u850(5)		slp(3) t2m(2) v850(1)			z500(9) u850(6) slp(5) v850(3) t2m(2)

Lead time	Model	Month					
		January	February	March	April	May	June
	GDAPS_F			u850(8) z500(5) slp(3)	slp(1)		v850(4) prec(1)
	HMC	u850(2)		prec(1) u850(1)		u850(5) t2m(1) v850(1)	u850(9) slp(4) t850(2) v850(2) z500(2) t2m(1)
	JMA			prec(5) t2m(3) u850(1)		prec(3)	t850(9) z500(8) t2m(5) u850(3) prec(1)
	NASA			z500(7) slp(3) prec(2) t2m(1)		v850(6) slp(4)	prec(6) slp(1) u850(1) v850(1)
	NCEP	prec(2)		prec(2)		prec(1) slp(1)	
	MSC_ CANCM3	prec(1)		v850(4) prec(3)			u850(8) t2m(7) t850(7) prec(1) v850(1)
	MSC_ CANCM4	u850(8) prec(1)		t850(6) u850(2)			u850(9) z500(3)
	PNU	slp(6) z500(6)		u850(5) slp(4) v850(3) t2m(1) t850(1)		t850(3) t2m(1)	v850(4) prec(2) slp(2)
	POAMA	u850(3)		prec(4)	prec(1)		prec(1)
3m	CWB			t850(2)			slp(9) prec(6) z500(6) t2m(3)

Lead time	Model	Month					
		January	February	March	April	May	June
							u850(3) v850(1)
	GDAPS_F			v850(6) slp(2) u850(2) t850(1)	v850(3) u850(1)		t2m(1)
	HMC			prec(2)		prec(1)	u850(9) t850(3) v850(2) z500(2) t2m(1)
	JMA	u850(2) v850(1)		t2m(3) prec(1) z500(1)			t2m(9) t850(7) z500(2)
	NASA	z500(9) u850(4) t2m(4) slp(2) t850(1)		prec(2) slp(2)		prec(2) slp(1) u850(1)	z500(3) slp(2)
	NCEP	slp(5)		prec(7) u850(6) v850(4) slp(1)		slp(1)	prec(5) u850(3) z500(3) v850(1)
	MSC_ CANCM3			prec(4) v850(2)		v850(6) prec(3) u850(2) slp(1) t850(1)	slp(2) t2m(1)
	MSC_ CANCM4	t2m(5) v850(3) prec(2)		slp(7) prec(2)		t850(6) slp(2)	u850(9) prec(4)
	PNU			v850(7) t2m(5) t850(3)			u850(6)
	POAMA			v850(7) prec(4) slp(2)	u850(7) prec(1)		v850(4) u850(2) t2m(1)

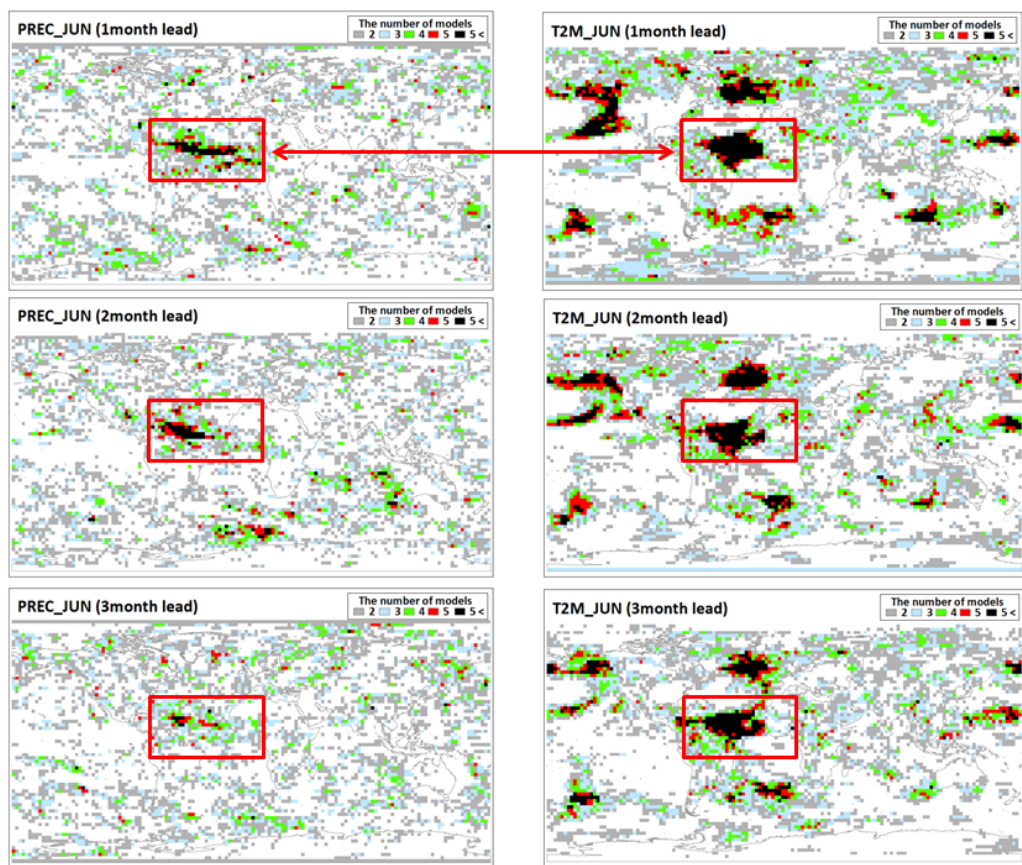


Figure 46 The number of selected models that have predictability to Soyang dam's June precipitation with 3-month lead using Prec (left) and T2m (right)

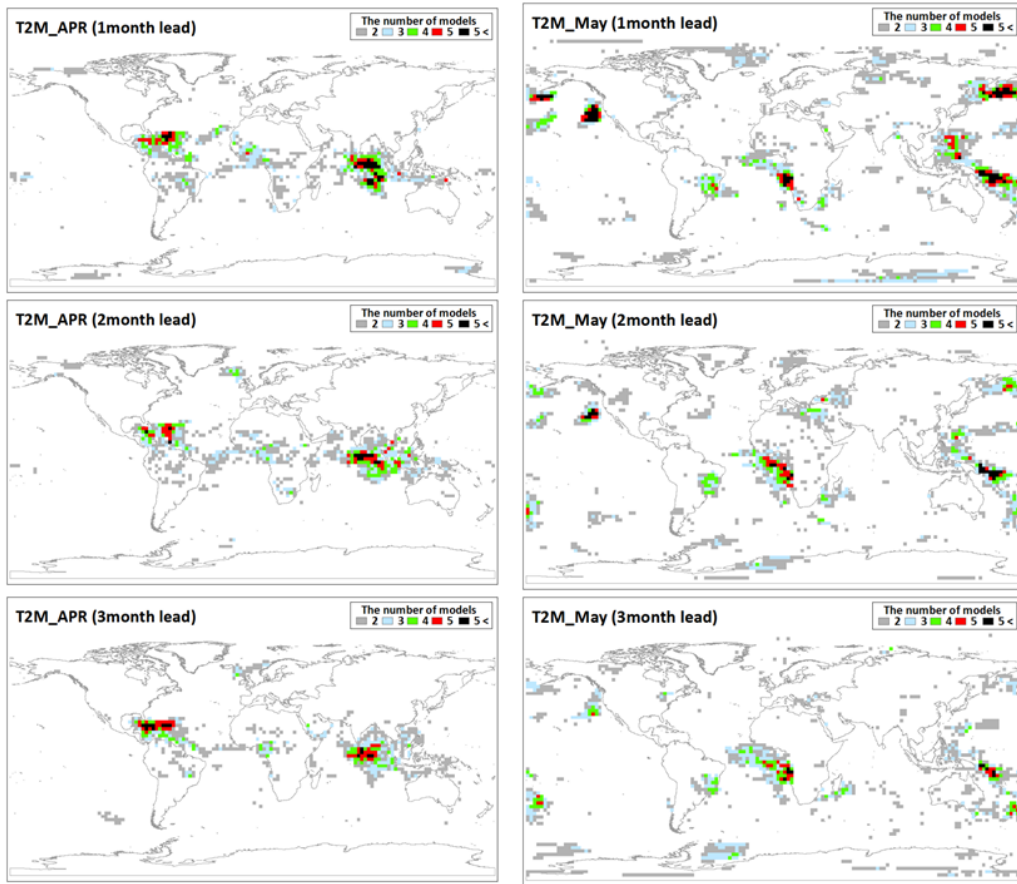


Figure 47 The number of selected models that have predictability to Soyang dam's April and May precipitation with 3-month lead using T2m

6. 갈수기 댐운영 지원을 위한 기후정보활용 가이드라인 개발

본 연구에서는 국내 다목적댐 운영관련 의사결정과정을 이해하고, 댐운영 의사결정에 장기예측정보가 효과적으로 활용될 수 있는 방안을 모색하였다.

6.1 국내 다목적댐 갈수기 운영체계 분석

국내 다목적댐을 운영하는 K-water는 효율적인 댐운영을 위해 연간 및 월간 댐운영계획을 수립하고 있다. 운영계획은 20년 빈도의 갈수량이 유입될 것을 가정하고 용수공급과 현재의 댐저수량을 고려하여 결정된다. 연간 댐운영계획은 매년 10월까지, 월간 댐운영계획은 매월 시작일 전일까지 수립한다. 댐관리자는 저수 현황에 따라 사전에 정해진 우선순위에 따라 용수를 공급한다. 홍수기에는 홍수조절이 다른 용도에 우선하며, 갈수기 또는 가뭄 시에는 생활용수, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수, 환경개선용수, 발전용수의 순으로 우선 공급한다(K-water, 2014).

6.1.1 기상 및 기후예측정보 활용 현황

K-water가 기상 및 기후예측정보를 현업에 어떻게 이용하는 가를 파악하는 것은 향후 확률수문예측정보의 실질적인 활용부분 파악 및 어떤 정보 형태로 제공되어야 하는지를 결정하는데 중요하다. 현재 댐유역의 강우와 기온 예측정보를 생산하기 위해 K-water 물관리센터에서는 자체적으로 기상분석 및 예보 업무를 수행하고 있으며, 기상청 및 선진국의 기상예측정보도 종합적으로 활용하고 있다. 생산 또는 수집된 예측정보는 댐통합정보시스템을 통해 제공하고 있다(Fig. 48).

K-water에서 수행하는 예보는 단기유역강우예보, 단·중기예보, 장기예보, 태풍예보가 있다. 단기유역강우예보는 평상시는 하루에 한번, 호우시는 하루에 두 번 수행되며, 주로 발전발류량, 무피해 수문방류 등 홍수대비 수위조절을 위한 예비방류 시행에 활용된다. 단·중기예보는 발전방류량 증감 결정, 예비방류 필요성 사전검토를 위해 이용된다. 장기예보(Table 12)는 월간 저수지 공용량 확보대책 수립을 위한 댐수위운영계획 및 홍수기 운영목표 수위 설정시 개략적인 수위운영방향 설정에 이용되고 있다(K-water, 2014).



Figure 48 K-water 댐통합정보시스템(<http://watopia.kwater.or.kr>)

Table 12 K-water 장기예보 주기 및 이용자료 (K-water, 2014)

예보구분	예보주기	예보기간 (구역)	분석자료
1개월	3회/월	순 단위 ↔ 1개월간 (전국 단일권역)	- 전지구 GDAPS 앙상블 예측자료 - 전지구 해수면 온도(SST), 장파복사(OLR) - 전지구 각종 실험 및 분석자료 - 대기표준고도별 고도 및 온도편차 - 통계적 유사년 분석 - 미국, 일본, 유럽의 앙상블 예상도
계절	4회/년	월 단위 ↔ 3개월간 (전국 단일권역)	- 전지구 GDAPS 앙상블 예측자료 - 전지구 해수면 온도(SST), 장파복사(OLR) - 통계적 유사년 분석, 다중회귀모델자료 - ARIMA 통계자료 - 미국, 일본, 유럽의 앙상블 예상도
반기	2회/년	계절단위 ↔ 6개월간 (전국 단일권역)	- 통계적 유사년 분석, 다중회귀모델자료 - ARIMA 통계자료 - 미국, 일본, 유럽의 앙상블 예상도

6.1.2 갈수기 및 가뭄시 댐운영

국토교통부는 최근 빈번해지는 가뭄에 대비하여 신속한 댐운영 의사결정을 위한 방안으로 「댐용수 부족 대비 용수공급조정기준(2015년 2월)」을 마련하고 2015년 3월부터 시행중에 있다. 용수공급조정기준은 강수량 부족으로 인한 댐 용수 부족에 대비하여 신속히 댐의 용수공급량을 조정하고, 비축 가능한 대응기준을 마련하여 국가 재난예방을 위한 댐의 적정 용수공급능력을 확보하는 데 목적이 있다. 현재 전국 15개 다목적댐을 대상으로 적용중이며 2년 동안의 시범운영을 통해 성과를 검토하고 필요할 경우 보완할 예정이다. 용수공급조정기준안에는 댐 별 기준저수량을 특정 시점별·대응단계별(관심, 주의, 경계, 심각)로 설정하고, 댐 용수 부족시 선제적 용수공급량을 조정하게 된다(국토교통부, 2015).

「댐용수 부족 대비 용수공급조정기준(2015년 2월)」의 기본방향은 평상시에는 수계 내 다목적댐, 수력발전댐, 보, 독높임 농업용저수지, 물사용시설(10만 m^3 /일 이상 취수시설)간 연계운영을 통해 용수공급능력 부족이 발생하지 않도록 균형을 맞추는 것이다. 그러다 연계운영을 통해서도 수요량 공급이 어려울 경우에는 단계별로 공급량을 감량하여 생·공용수 공급에 차질이 발생하지 않도록 하는 것을 목표로 삼고 있다. 댐 용수부족 시 대응은 각 단계별(관심, 주의, 경계, 심각) 기준저수량 및 용수공급 환원량을 기준으로, 댐저수량이 단계별 기준저수량에 도달할 경우에는 사전에 산정된 필요 감축량을 기준으로 용수공급 감량을 실시한다(Table 13). Table 13에서 보는 바와 같이 대응단계는 기존지침(K-water, 2013)과 동일하나 단계별 필요감축량을 결정하는 데서 보다 명확한 기준으로 변경된 것을 확인할 수 있다.

Table 13 대응단계별 필요 감축량

대응단계	필요 감축량 (K-water, 2013)	필요 감축량 (국토부, 2015)
관심단계	간이상수도의 제한급수 및 댐 기본계획 공급량의 80-90% 공급	생공용수 여유량 감량 (생·공용수 기본계획량 - 생·공용수 계약량)
주의단계	지방상수도의 제한급수 및 댐 기본계획 공급량의 60-80% 공급	하천유지용수 100% 감량
경계단계	광역상수도의 제한급수 및 댐 기본계획 공급량의 50-60% 공급	하천유지용수 100% + 농업용수 100% 감량
심각단계	댐 기본계획 공급량의 50% 이하 공급	하천유지용수 100% + 농업용수 100% + 생공용수 10% 감량 (생공용수 추가 감량여부는 관계기관 협의를 거쳐 조정)

공급량 감량을 위한 의사결정은 댐·보연계운영협의회를 통해 결정된다. 댐·보연계 운영협의회는 중앙 협의회와 수계별 협의회가 있으며, 물관리 관련 정부기관 담당자, 지자체 담당관, 시설관리자, 외부 민간전문가로 구성된다. 통상 수계별 댐·보연계운영협의회는 15일전에 관계기관과 협의하여 개최된다. 협의회 결정을 통해 용수공급 감량이 결정되면, 정부 및 관련기관은 비상용수공급 대응체제로 전환된다.

감량조정 후에는 댐 저수량, 대응단계, 용수공급가능기한, 용수공급 환원기준을 일단위로 모니터링하여 관계기관과 공유하고 해당 내용을 K-water, 홍수통제소 홈페이지에 공시하게 된다(Fig. 49). 댐 저수량이 용수공급 환원기준 이상으로 비축될 경우에는 관계기관에 통보하고, 실수요량 이상으로 용수공급을 정상 환원하게 된다.



Figure 49 15개 다목적댐 용수공급기한 실시간 공시 (Kwater, 홍수통제소)

K-water는 재난유형별 위기관리 대응체계 구축 및 시설물 관리를 강화하고, 재난에 능동적으로 대처하기 위해 「국가안전관리 세부집행계획 (2013년 2월)」을 수립하였다. 이 보고서는 재난관리체계와 유형별 재난관리대책을 포함하고 있으며, 관리시설물 현황 및 점검계획, 풍수해, 가뭄, 지진에 대한 단계별(예방, 대비, 대응, 복구)대책을 제시하고 있다.

가뭄대책의 경우 예방차원에서는 수계별 댐군 연계운전을 통한 용수공급능력 증대 및 광역상수도 연계를 통한 광역급수체계 구축, 지하수개발, 신규수자원 확보 등이 포함된다. 대비차원에서는 근무조 편성 및 상황실 운영 등을 포함한 비상대응체계 구축, 가뭄대책 연구개발 및 조사 활성화, 가뭄발생 예상지역 관리, 가뭄 우려 및 확산 단계조치사항이 명시되어 있다. 대응 및 복구차원에서는 다목적댐 및 용수전용댐, 광역상수도의 대응단계(관심, 주의, 경계, 심각)별 용수공급 조정계획 수립 및 시행을 포함한다. Table 14는 가뭄 대응단계별 K-water의 대처방법을 정리한 것이다.

Table 14 가뭄 대응단계별 대처방법 (K-water, 2013)

대응단계	실행사항
관심 (Level 1)	- 가뭄극복 현수막 설치 및 절수홍보, 가뭄현황 모니터링 - 가뭄장비 점검 및 비상급수 지원 - 댐 용수공급능력 및 용수공급방안 검토 - 사무실에서 가뭄담당자 비상근무 - 생공용수 실수요량 + 농업용수 + 하천유지용수 공급 ⇒ 생공용수 여유량 감량
주의 (Level 2)	- 가뭄재난대책상황실 운영 - 가뭄지역 병물, 비상급수 및 가뭄장비 지원 확대 - 다목적댐의 생공용수 공급위주의 운영 - 수도시설을 이용한 물부족 해소방안 검토 - 긴급 지하수 찾기 전담팀 운영 개시 - 가뭄극복 예산 확보 협의, 유관기관 협조체제 점검, 상황실 가뭄담당자 비상근무 - 필요시 광역-지방간 비상관로 연결 - 생공용수실수요량 + 농업용수 공급 ⇒ 생공용수여유량 + 하천유지용수 감량 - 병물공급, 물차지원 및 광역-지방간 비상연결관로를 이용, 가뭄지역 용수공급 확대
경계 (Level 3)	- 유관기관 협조체제 강화 - 댐수혜지역 및 광역상수도 수수지자체에 제한급수 요청 - 각 지자체별 대체 수원 확보 요청 - 댐 상류 지자체 취수장에 대한 취수대책 수립요청 - 다목적댐 사수용량 활용방안 검토, 지하수등 비상취수원 가동. 가뭄담당자 비상근무 - 생공용수 실수요량 공급⇒ 생공용수 여유량 + 하천유지용수 + 농업용수 감량 - 병물공급, 물차지원 확대, 광역상수도 취수지역 가뭄시 공급대상 지자체의 취수원 여건을 감안하여 수돗물 증량생산 유도 및 비상 취수원 가동
심각 (Level 4)	- 다목적댐의 사수용량 활용 공급 - 상황실에서 가뭄담당자 비상근무 실시(10명 내외) - 댐의 사수용량 활용 공급 ⇒ 생공용수 실수요량 + 하천유지용수 + 농업용수 감량 - 광역상수도 광역간 연계운전을 통한 대체공급 및 추가운영 가능 - 취수원 개발

Fig. 50는 소양강댐의 저수량, 용수공급 환원기준, 대응단계 발생시종을 도시한 것이다. 소양강댐의 저수량은 2006년 10월 퇴수량 조사를 반영한 수위-저수량 곡선식을 이용하여 산정하였다(K-water, 2014). 대응단계발생시점을 기준으로 보면 가뭄이 심각했던 년도는 1975년, 1977-78년, 1994년, 2015년이며, 2007년, 2008년, 2010년, 2014년에도 가뭄이 발생하였다. 주의단계(level2)이상의 가뭄발생은 1984-1999년 동안 4차례 발생한 반면, 2000년-2015년 동안에는 7차례 발생하여 가뭄의 빈도가 증가한 것을 알 수 있다. 2014년부터 시작된 가뭄은 그림에서와 같이

2014년 7월 26일 이후 현재(2015년 11월 9일)까지 댐 저수량이 용수공급 환원기준을 넘지 못하고 있으며, 1977-78년 이후 가장 심각한 수준에 해당한다.

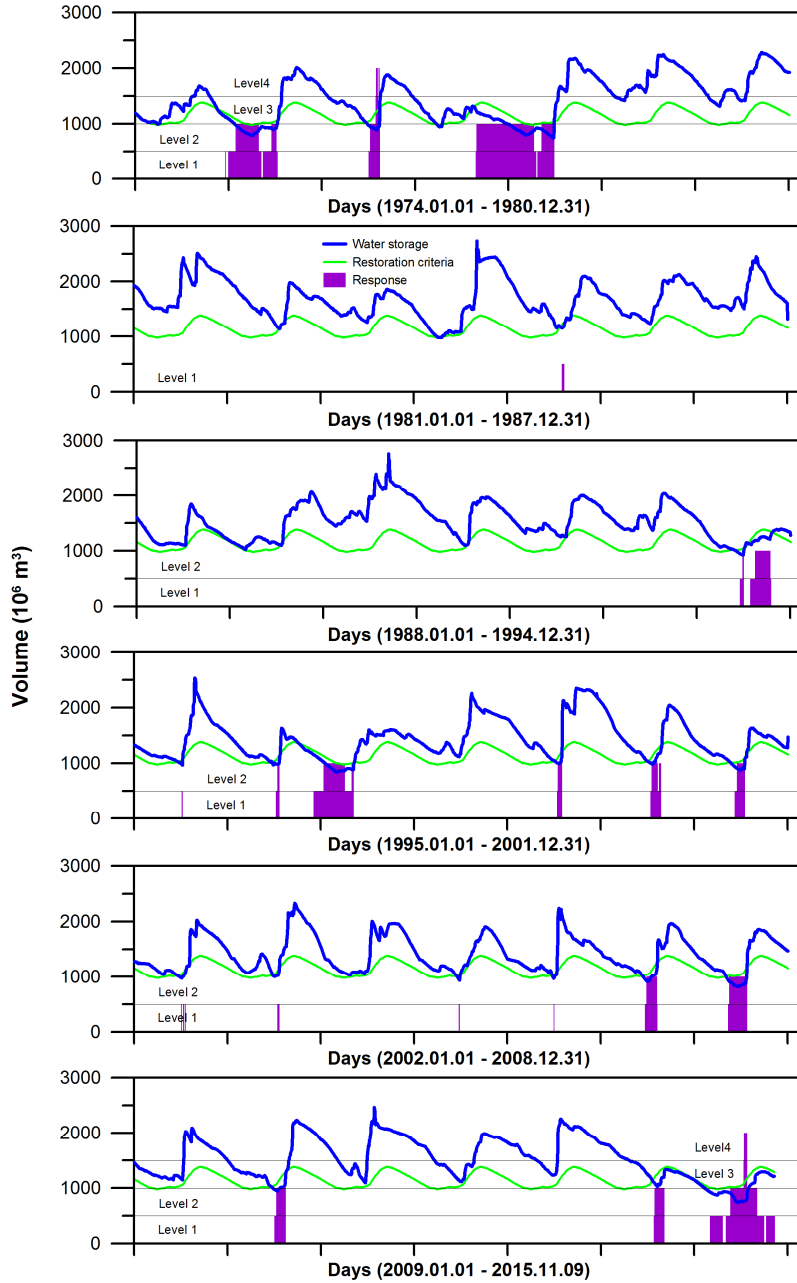


Figure 50 소양강댐 일별 저수량(blue), 용수공급 환원기준(green), 대응단계(purple)

6.2 대응단계별 댐운영방식을 고려한 기후정보 활용방안

앞 절에서 살펴본 바와 같이 K-water의 장기예측정보는 댐수위운영계획 및 홍수기 운영목표 수위 설정시 제한적으로 이용되고 있으며, 「댐용수 부족 대비 용수공급 조정기준」에서 제시한 가뭄 대응단계별 댐운영 의사결정에는 이용되지 못하고 있다. 본 연구에서는 본 과제를 통해 생산될 확률수문예측정보가 대응단계별 의사결정에 효과적으로 활용될 수 있는 방안을 고찰하였다.

월간 또는 연간 댐수위 운영계획 수립을 위해 댐운영자는 검토시점의 댐유효저수량, 사전 계약된 공급계획량 정보를 이용하여 앞으로 20년 빈도 예상 유입량(또는 500년 빈도 유입량)이 발생할 것을 가정하여 물공급 가능기한을 산정하게 된다. 이때 홍수기 이전까지 용수공급가능량을 검토하여 충족여부를 판단하고 가뭄상황 단계를 결정하게 된다. 만약 안정적인 물공급이 가능하다면 확률수문예측정보를 참조하여 정상적인 댐운영을 수행하면 된다. 반면 앞으로 대응단계에 들어갈 가능성이 감지될 경우에는 댐보저수지 등의 확률수문예측정보가 연계운영위원회 의사결정에 중요하게 작용될 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 51과 같은 절차를 통해 확률수문예측정보가 각 대응단계와 연계하는 방안을 제안하였다. 이 방안은 댐운영 의사결정과정에서 매달 생산되는 APCC 예측정보 스케줄을 고려하여 ESP와 Drip의 1개월 선행 예측정보를 활용하는 것이다.

〈시나리오 1: 빈도 예상 유입량 기준 관심단계 진입시〉

20년 빈도 유입량을 이용한 공급능력계산에서 관심단계 진입이 예상될 경우에는 댐운영자는 대응방안 시행여부 결정을 위해 추가적인 댐유입량 예측정보가 필요하다. 즉, 20년 빈도 유입량보다 많이 들어 올 것인지 적게 들어 올 것인지가 중요한 의사결정 기준이 된다. 확률수문예측정보를 통해 20년 빈도 유입량보다 적게 들어올 가능성이 큰 경우(정상공급환원 가능성이 낮은 경우)에는 관심단계 대응방안(Table 14 참조)을 준비하면 된다.

이때 4장에서 제시된 해당 월의 예측성 검증을 참고하여 확률수문예측정보의 신뢰도를 동시에 고려하는 것이 필요하다. 만약 신뢰도가 낮은 경우에는 보수적 관점에서 20년 빈도 유입량이 들어올 것으로 판단하고 가뭄현황 모니터링, 가뭄장비 점검, 용

수공급방안 검토 등을 수행한다. 반면에 예측정보의 신뢰도가 높은 월에는 보다 적극적인 대책인 절수홍보, 비상급수 지원방안, 생공용수 여유량 감량 등을 추가적으로 고려한다. 20년 빈도 유입량보다 많이 들어올 가능성이 큰 경우 또는 정상공급환원 가능성이 높은 경우에는 추가적인 정보(예측 및 관측정보)가 확보될 때까지 가뭄현황 모니터링, 가뭄장비 점검, 용수공급방안 검토 등을 수행한다.

〈시나리오 2: 관심단계에 진입한 경우〉

현재 관심단계이고, 20년 빈도 유입량을 이용한 공급능력계산에서 관심지속 또는 주의단계로 악화가 예상될 경우에는 생공용수 여유량을 감량하고 관심단계의 대응책을 추진 한다. 이때는 특히 주의단계로 악화될지에 대한 정보가 중요한데, 확률수문 예측정보를 이용하여 상황을 검토하는 것이 필요하다. 만약 확률예측이 주의단계로 발전할 가능성이 크다고 예측할 경우에는 주의단계 진입에 대비하여 가뭄재난대책상황실, 가뭄지역 병물, 비상급수 및 가뭄장비 확보, 긴급 지하수 찾기 전담팀 운영 등을 사전에 준비하여야 한다. 확률예측이 관심 또는 정상환원으로 발전할 가능성이 크다고 예측할 경우에는 관심단계 대응책을 시행을 유지하면서 추가적인 예측 및 관측 정보를 통해 의사결정을 진행해 나간다.

〈시나리오 3: 주의단계에 진입한 경우〉

검토시점이 주의단계일 경우, 하천유지용수를 100% 감량하도록 「댐용수 부족 대비 용수공급조정기준(2015년 2월)」에 명시되어 있다. 그러나 하천유지용수감량은 하류하천의 수질 악화 및 하천생태계, 하천취수시설물 운영에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 발생 가능한 악영향을 최소화하면서 안정적인 물확보를 할 수 있는 적정 하천 유지용수 감량을 산정하는 것이 필요하다. 여기서 확률수문예측정보는 하천유지용수의 감량 범위를 결정하는데 활용될 수 있다. 확률수문예측정보를 입력으로 댐-보-저수지 연계모의운영을 통해 용수확보 및 수질관리 위험을 최소화하는 방향으로 최적의 감량범위를 결정하는 것이다. 또한, 확률수문예측이 경계단계로 발전할 가능성이 크다고 예측할 경우에는 유관기관 협조체제를 강화하고, 댐수혜지역 및 광역상수도

수수지자체 제한급수 준비, 지자체별 대체 수자원 확보 요청, 댐 상류 지자체 취수장에 대한 취수대책 수립요청 등을 사전에 수행한다.

〈시나리오 4: 경계 또는 심각단계에 진입한 경우〉

검토시점이 경계단계일 경우에는 농업용수를 감량하고, 심각단계에서는 생공용수 실수요량 감량 및 댐의 사수용량 활용까지 고려하게 된다. 위에서 언급한 바와 같이 용수감량은 다양한 이해당사자가 복잡하게 얽혀 있는 문제로 발생 가능한 위험을 저감하는 방향으로 감량이 결정되어야 한다. 확률수문예측정보가 경계단계 유지 또는 심각단계 진입될 가능성이 높다고 예측한 경우에는 농업용수를 최대한 감량하여 생공용수 공급에 차질이 없도록 대비하여야 할 것이다.

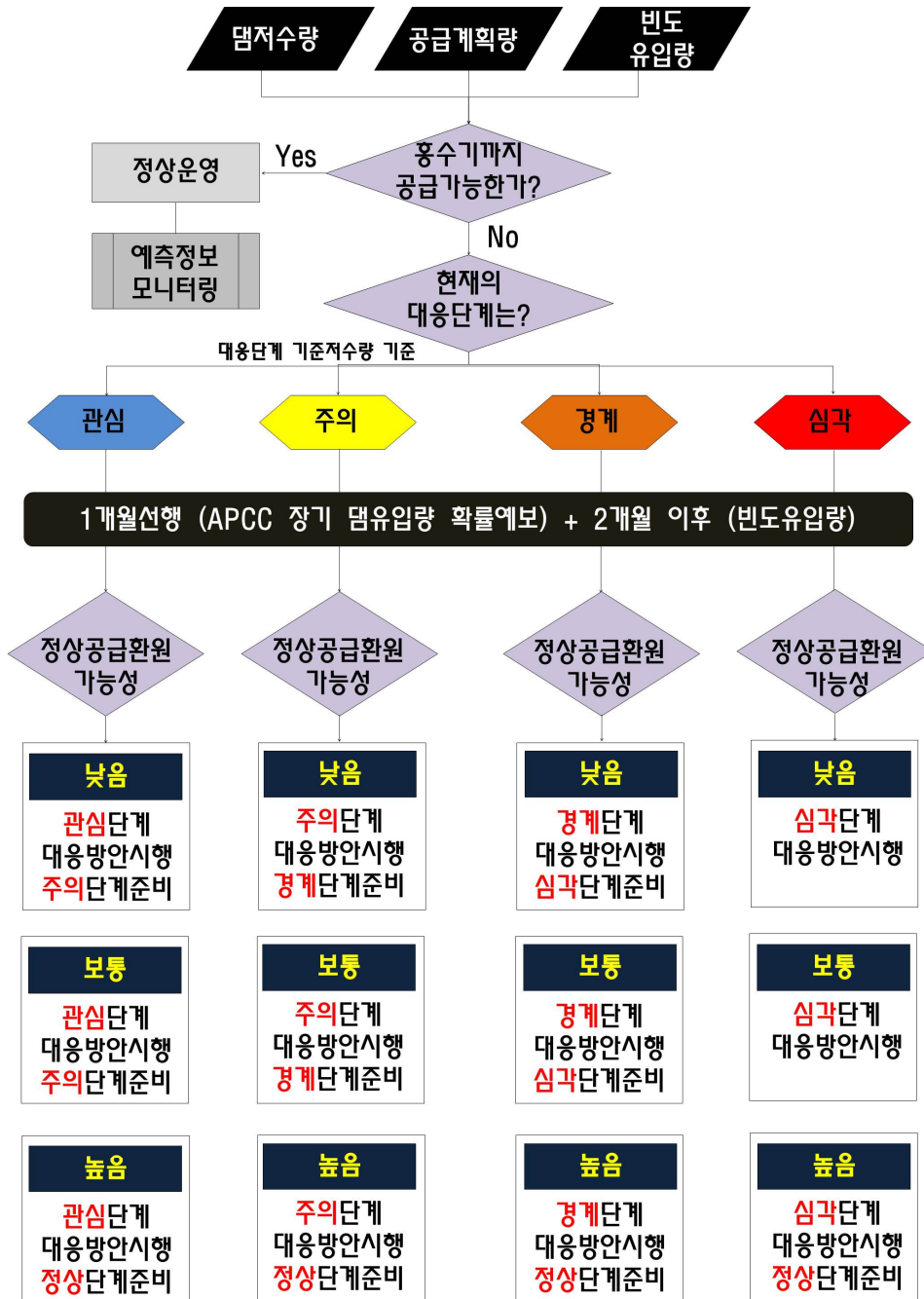


Figure 51 「댐유수 부족 대비 용수공급조정기준」 가뭄 대응단계별 장기수문예측정보 활용 방안

6.3 기후정보 댐운영 활용성 제고를 위한 제언

2015년 소양강댐과 보령댐은 극심한 강수부족으로 댐 저수율이 각각 26%, 20% 까지 떨어졌으며, 보령댐은 2015년 11월 현재 역대 최저치 기록을 갱신하고 있다. 이에 따라 보령광역 생활용수 감량공급, 금강 도수로건설공사, 지방상수도 유수율 제고 등 댐 용수 확보를 위하여 여러 가지 조치를 시행중에 있다.

금년 다목적댐의 수문학적 가뭄사례는 빈도별 유입량을 이용한 수자원관리 방법이 기후변화로 인한 한반도의 수문기상현상을 반영하는데 한계가 있다는 것을 단적으로 보여주는 사례라 할 수 있다. 이러한 현상은 기후변화가 심화됨에 따라 더욱 빈번해질 것으로 예상되므로, 현재의 댐운영 의사결정과정에 이용되는 정보를 다양화할 필요성이 있다. 장기예측정보는 현재의 기후특성을 반영해 몇 개월 선행 기후를 예측하는 기술로 현행 댐운영 의사결정에 추가적인 정보를 제공하여 기후상황에 대비한 탄력적인 댐운영계획 수립을 지원할 수 있다. 일례로, 갈수나 가뭄이 예측될 경우 사전에 댐별 계약(실수요)공급량을 추가적으로 확보함으로써 발생 가능한 위험을 경감시킬 수 있을 것이다.

댐운영의 의사결정은 관리 및 운영을 담당하고 있는 K-water뿐 아니라 국토교통부, 환경부, 농식품부, 지방자치단체, 한국수력원자력, 한국농어촌공사 등의 이해당사자간의 협의가 필요한 복잡한 과정이다. 이것은 본 연구의 2장에서 언급한 바와 같이 댐운영에 대한 책임을 여러 부처와 기관들이 공동으로 나누어 가지고 있는 상황이라 할 수 있다. 이로 인해 장기예측정보를 이용하여 탄력적인 댐운영을 하려고 하기보다는 빈도 유입량을 이용하는 기존의 방식을 고수함으로써 책임을 회피하려고 할 가능성이 크다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 「댐과 보 등의 연계운영규정(국토교통부훈령 제90호)」에 연계운영의사결정시 장기예측정보를 고려하도록 하는 방안들의 정책입안이 필요하다. 또한, 기후변화에 대비하여 신기술의 도입을 적극 고려할 수 있도록 물관리기관에 인센티브를 제공하는 방안도 적극 고려되어야 할 것이다. 이러한 정책은 기후변화에 대비한 안정적인 국내 용수수급관리 방안과 연계되어 수립되어야 할 것이다.

기술적으로는 APCC 측면에서는 기후예측정보를 활용한 댐유입량 예측성을 향상시키기 위한 기술 개발과 장기예측정보가 가지는 경제적 가치를 평가하여 예측정보

의 활용성을 제고하는 것이 요구된다. 정보수요자인 K-water 측면에서는 물관리센터 실무운영시스템을 이용하여 예측정보를 이용한 경우와 빈도유입량을 이용한 경우의 댐운영을 비교할 수 있는 시스템을 구축하고, 실시간 검증시스템을 통해 예측성을 지속적으로 평가하여 의사결정과정에 활용성을 높여나가야 할 것이다.

7. 결론

7.1 주요 결과

7.1.1 기후예측정보의 수자원관리 의사결정 활용사례 분석

본 연구에서는 미국 국가연구위원회(NRC, 2008) 보고서를 중심으로 장기 기후예측정보를 수자원관리 의사결정에 활용한 사례를 분석하고 시사점을 도출하였다.

1) 기후예측정보가 수자원 의사결정에 활용되기 위해서는 정보제공자와 의사결정자의 융합연구가 필요하다. 왜냐하면 기후예측정보의 수자원 의사결정 활용연구는 기후학자, 수문학자, 수자원시스템 전문가, 물관리관련 이해당사자가 참여하는 다학제적 성격을 지니고 있기 때문이다. 캘리포니아 북부의 INFORM 프로젝트는 시스템 개발시점부터 다양한 수자원관리 이해당사자를 참여시켜 기후예측정보의 활용성을 높였다.

2) 장기에측정보에 대한 의사결정자나 수자원관리 실무자의 이해도 향상이 필요하다. 이를 위해서는 정기적인 교육프로그램 운영과 실시간검증시스템을 구축하여 수문예측정보와 신뢰성에 대한 정보를 동시에 제공하는 것이 필요하다. 이러한 접근방법은 장기에측정보가 지닌 예측의 구조적 편이를 파악하고, 이를 보정하는 방법을 모색함으로써 궁극적으로 예측성을 개선하는데 도움이 될 것이다.

3) 정보제공자의 수자원관리 의사결정과정에서 이해가 선행되어야 한다. 수자원관리 의사결정은 단일목적 또는 선형적이지 않으며, 다양한 이해당사자의 협의과정을 통해 이루어진다. 따라서 정보제공자는 정보수요자와 지속적인 대화를 통해 의사결정과정에서 기후정보가 어떤 식으로 융합될 수 있는지를 같이 고민하는 것이 필요하다.

4) 장기적인 관점에서 계절예측정보 수자원활용에 대한 연구투자가 필요하다. 수자원관리자나 의사결정자가 기후정보 활용을 꺼려하는 주요 원인의 하나가 의사결정의 실행에 대한 책임소재이다(NRC, 2008). 이 문제는 국가별 제도적, 정책적, 국가기관의 담당업무와 복잡하게 얽혀 있어 단기적으로는 해결이 힘든 부분이다. 따라서 장기적인 연구프로젝트 발굴 및 제도개선을 통해 예측정보 활용이나 새로운 물관리 기술 도입에 대한 인센티브를 제공하고 활용성을 제고하는 방안 마련이 필요하다.

7.1.2 갈수기 댐유입량 변화 고찰

본 연구에서는 소양강댐, 충주댐, 안동댐을 대상으로 다목적댐의 갈수기 유입량 변화에 대해 분석하고 원인에 대해 고찰하였다.

1) 본 연구에서 분석한 결과 세 개 댐유역의 갈수기 유출율(=댐유입량/강수)이 감소하는 경향이 탐지되었다. 통계적으로 분석한 결과 1993년을 기준으로 이전과 이후의 유출율이 유의한 차이를 나타내었다.

2) 유출율 감소원인을 파악하기 위해 잠재증발산량 변화, 강수지표변화를 분석하였으나 명확한 연관성을 도출하지는 못하였다. 다만 기온기반 잠재증발산량 산정방법에서는 유출율 변화에서 나타난 시계열패턴을 잘 반영하였다. 그러나 적용된 17개의 잠재증발산량 방법에서 일관성 있는 결과를 도출하지는 못하였다.

3) 유출율 감소로 인한 댐유입량의 감량은 댐운영 관리에 불확실성을 증대시킬 수 있다. 댐운영계획수립시 이용되는 20년 빈도의 유입량은 갈수빈도해석을 통해 산정되는데, 댐유입량 자료에서 나타난 비균질성(inhomogeneity)은 빈도해석의 신뢰성을 저하시킬 수 있다. 또한 향후 유출율 감소경향이 지속된다면 갈수기 댐운영에 20년빈도가 아닌 100년이나 500년 빈도를 이용해야 하는 상황에 처할 수도 있다. 실제 K-water에서는 500년 빈도 갈수유입량을 적용을 모색하고 있다.

4) 수자원계획수립에 필요한 장기유출분석의 신뢰도에도 영향을 미칠 수 있다. 또한, 수자원장기종합계획 수립시 갈수기 유입량이 과다 또는 과소 추정 될 수 있으며, 이로 인해 정책수립의 신뢰성에 문제를 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 관측 댐유입량의 변화특성을 고려하여 장기유출해석기법의 신뢰성을 높일 수 있는 기술 개발 연구가 필요하다.

5) 유출율 감소에 대한 원인규명이 필요하다. 본 연구에서는 검토하지 못한 토지피복 변화에 대한 영향, 관측의 오차 등에 대한 추가적인 분석이 필요하다. 또한, 향후 대책으로 위성을 이용한 유역증발산량 모니터링, 주요 지하수 취수량 및 지하수위의 실시간 모니터링 등을 통해 갈수기 유량관리 및 정확한 수자원부존량 평가가 필요하다.

7.1.3 갈수기 댐유입량 예측모델 개선

갈수기 댐유입량 예측기술을 개선하고 확률론적 장기수문예측정보생산 체계를 구축하였다.

1) 갈수기 댐유입량 예측성을 개선하기 위해 기존 연구에서 개발된 월단위 물수지모델을 물리적 기반의 일단위 수문모형으로 대체하였다. 이를 위해 GR4J, SAC-SMA, PRMS 모델을 선정하고 소양강댐 유역에 대해 유출모의성능을 분석하였다. 적설 및 융설 모의 기능과 잠재증발산량 산정기능을 GR4J와 SAC-SMA에 추가하였다.

2) 수문모델의 매개변수를 추정하기 위해 전역최적화(global optimization)방법인 Micro 유전자 알고리즘을 적용하였으며, 갈수기모의 최적 매개변수 결정을 위해 Nash-Sutcliffe 모형 효율성계수 기반의 다섯 개 목적함수를 이용하였다. 결과적으로 제곱근(root) 모형 효율성계수를 목적함수로 이용하여 추정한 매개변수를 이용한 경우가 전체 기간의 유출량뿐 아니라 갈수기에서의 유출량도 신뢰성 높게 모의할 수 있는 것으로 나타났다.

3) 최적 수문모델을 선정하기 위해 갈수기 1월-6월에 대한 모형별 예측성을 상관계수와 평균제곱근오차를 이용하여 분석한 결과 SAC-SMA와 PRMS가 우수한 것으로 나타났으며, 향후 예측에 활용성을 높이기 위해 계산시간이 빠르고 모델의 구조도 상대적으로 단순한 SAC-SMA 모형을 선정하였다.

4) 수문모델의 상태변수(가상저수지의 초기수위 등)의 부정확성은 갈수기유출모의의 신뢰도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 SAC-SMA의 상태변수를 물리적 범위 내에서 무작위로 300번 생성하고 동일한 강수조건하에서 상태변수가 수렴하는 기간을 분석하였다. 결과적으로 3년의 초기모의(warm-up period)를 수행하면 상태변수 추정의 불확실성을 줄일 수 있는 것으로 평가되었다.

5) 확률론적 댐유입량 예측기법으로 본 연구에서는 통계적 기반의 ESP와 APCC 역학모델 예측정보 기반의 Drip을 개발하였다. ESP는 초기모의를 수행한 SAC-SMA 모델에 예측월의 40개 관측양상블(1973년-2012년)을 입력하여 유출양상블을 생산한다. Drip은 APCC 기후예측모델의 월단위 예측정보를 편의보정을 거친 후 Mahalanobis distance를 이용하여 가장 근사한 과거 특정 년도를 선택하고 그 해의

일관측자료를 SAC-SMA 모델 입력치로 이용한다.

6) 개발된 ESP와 Drip의 확률수문예측정보를 RPSS(ranked probability skill score)와 탐지확률(hit rate)를 이용하여 평가한 결과 모든 값이 양(+)으로 두 예측모델의 성능이 관측치의 평균(climatology)을 이용한 것보다 우수한 것으로 나타났다. ESP는 모든 월과 예측선행시간(lead time)에 대해 RPSS 0.5 이상의 값을 보였으나 Drip은 1, 2, 3, 5월에서는 ESP와 유사한 예측성능을, 4월과 6월에는 상대적으로 예측성이 낮았다. 특히 6월 예측에서 향후 개선이 필요할 것으로 나타났다.

7) 소양강댐 유입량의 각 월의 중앙값(median)에 해당하는 유입량과 20년 빈도유입량을 기준으로 관측값이 이 기준값보다 클 때 크다고 예측한 경우와 관측값이 기준값보다 작을 때 작다고 예측한 경우의 탐지확률(Hit rate)을 계산하였다. 결과적으로 ESP와 Drip 모두 기준값에 보다 크다고 예측한 경우가 예측성능이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 댐운영자는 이러한 예측정보의 신뢰도를 명확히 이해하고 댐운영 의사결정시 활용해야 할 것이다.

7.1.4 기후예측모델의 담유역강수량 예측성 개선방안

Drip의 6월 예측성을 개선하기 위한 방안으로 소양강댐유역의 관측강수량에 대한 기후모델의 예측성이 높은 예측지역과 기후예측변수를 도출하고 향후 개선방안을 제안하였다.

1) 예측성평가를 위해 기후모델에서 생산되는 기후예측변수와 소양강댐 관측강수량간의 선형회귀모델을 18개 년 자료에 대해 구축하고, 5개년 자료에 대해 검증하였다. 강수예측변수를 이용한 소양강댐 6월 강수량 예측에서는 예측성이 있는 격자가 산재되고, 모델간의 일치성이 낮았다(부록 참조). 이에 비해 다른 변수들은 예측성이 있는 격자들이 그룹지어 나타났다. 이것은 강수량은 지역별 편차가 심한 반면 상대적으로 다른 기후변수들은 지역별 편차가 적고 대규모 기후패턴에 영향을 크게 받기 때문으로 사료된다.

2) 소양강댐유역 인근의 9개 격자점에 대해 월강수량 예측 가능 기후예측변수를 조사한 결과 기후모델간 차이는 있지만 3월과 6월에서 가장 많은 기후변수들이 탐지

되었다. 이에 비해 2월과 4월의 경우는 예측인자로 활용될 수 있는 기후변수가 거의 탐지되지 않았다. 선행예측시간(lead time)에 대해서는 선택된 변수들의 개수에서는 큰 차이가 없었다.

3) 6월 강수예측정보의 경우 5개 이상의 기후모델에서 공통으로 예측성이 있다고 나타나는 지역이 멕시코만 근처에서 나타났다. 이러한 예측성은 소양강댐 6월 강수량을 1개월, 2개월, 3개월 전에 예측했을 때도 동일하게 나타났다. 특히 기온을 이용한 강수량예측의 경우에도 동일지역에서 시그널이 잡히는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 남한지역에서는 소양강댐 6월강수량 예측에 대해 유의한 예측성을 보이는 기후모델이 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 6월예측의 경우 소양강댐 인근의 격자정보를 이용하기 보다는 예측성이 있는 격자점의 정보를 이용하여 예측성을 높일 수 있는 기술 개발이 필요하다.

4) 소양강댐 4월 강수량예측과 5월 강수량 예측에 대해서도 기온예측변수를 이용한 경우 6월 강수량 예측과 유사한 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 6월뿐 아니라 다른 월의 강수량예측성도 개선될 수 있음을 시사하였다.

5) 결과적으로 예측성 높은 댐강수량 예측정보를 생산하기 위해서는 먼저 기후과 학측면의 메커니즘 규명, 적정크기의 예측지역(window) 선정, 적합한 통계모델 구축, forecast(2005-2015) 자료를 이용한 예측성 검증 등이 향후 후속연구로 추진되어야 할 것으로 분석되었다.

6) 본 연구에서 제안한 방법은 기후예측정보의 예측성이 저위도 지방에 비해 상대적으로 낮은 중위도 지역에서 강수 예측성을 향상시키고 댐운영을 포함한 수자원관리에 필요한 수준의 신뢰성 있는 예측정보 제공에 기여할 것으로 판단된다.

7.1.5 갈수기 댐운영 지원을 위한 기후정보활용 가이드라인 개발

본 연구에서는 「댐용수 부족 대비 용수공급조정기준」에서 제시한 가뭄 대응단계별 댐운영 의사결정에 확률수문예측정보가 효과적으로 활용될 수 있는 방안을 시나리오를 중심으로 제시하였다. 이 방안은 댐운영 의사결정과정에서 매달 생산되는 APCC 예측정보 스케줄을 고려하여 ESP와 Drip의 1개월 선행 예측정보를 활용하는 것이다.

1) 평상시: 월간 또는 연간 댐수위 운영계획 수립을 위해 댐운영자는 검토시점의 댐유효저수량, 사전 계약된 공급계획량 정보를 이용 앞으로 20년 빈도 예상 유입량이 발생할 것을 가정하여 물공급 가능기한을 산정한다. 이때 홍수기 이전까지 용수공급가능량을 검토하여 충족여부를 판단하고 부족시 가뭄상황 단계를 결정하게 된다.

2) 평상시에서 관심단계 진입시: 관심단계 진입이 예상될 경우에는 댐운영자는 장기예측정보를 활용하여 20년 빈도 유입량보다 많이 들어 올 것인지 적게 들어 올 것인지를 고려한다. 확률수문예측정보를 통해 20년 빈도 유입량보다 적게 들어올 가능성이 큰 경우(정상공급환원 가능성이 낮은 경우)에는 관심단계 대응방안(Table 14 참조)을 준비하면 된다. 이때 4장에서 제시된 해당 월의 예측성 검증을 참고하여 확률수문예측정보의 신뢰도를 동시에 고려하는 것이 필요하다.

① 기후예측정보의 신뢰도가 낮은 경우에는 보수적 관점에서 20년 빈도 유입량이 들어올 것으로 판단하고 가뭄현황 모니터링, 가뭄장비 점검, 용수공급방안 검토 등을 수행한다.

② 예측정보의 신뢰도가 높은 월일 경우 보다 적극적인 대책인 절수홍보, 비상급수 지원방안, 생공용수 여유량 감량 등을 추가적으로 고려한다.

③ 20년 빈도 유입량보다 많이 들어올 가능성이 큰 경우(정상공급환원 가능성이 높은 경우)에는 추가적인 정보(예측 및 관측정보)가 확보될 때까지 가뭄현황 모니터링, 가뭄장비 점검, 용수공급방안 검토 등을 수행한다.

3) 관심단계에서 주의단계로 진입시: 현재 관심단계이고, 20년 빈도 유입량을 이용한 공급능력계산에서 관심지속 또는 주의단계로 악화가 예상될 경우에는 생공용수 여유량을 감량하고 관심단계의 대응책을 추진 한다. 이때는 특히 주의단계로 악화될 지에 대한 정보가 중요한데, 확률수문예측정보를 이용하여 상황을 검토하는 것이 필요하다.

① 만약 확률예측이 주의단계로 발전할 가능성이 크다고 예측할 경우에는 주의단계 진입에 대비하여 가뭄재난대책상황실, 가뭄지역 병물, 비상급수 및 가뭄장비 확보, 긴급 지하수 찾기 전담팀 운영 등을 사전에 준비하여야 한다.

② 확률예측이 관심 또는 정상환원으로 발전할 가능성이 크다고 예측할 경우에는

관심단계 대응책을 시행을 유지하면서 추가적인 예측 및 관측정보를 통해 의사결정을 진행해 나간다.

4) 검토시점이 주의단계일 경우: 하천유지용수를 100% 감량하도록 「댐용수 부족 대비 용수공급조정기준(2015년 2월)」에 명시되어 있다. 그러나 하천유지용수감량은 하류하천의 수질 악화 및 하천생태계, 하천취수시설물 운영에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 발생 가능한 악영향을 최소화하면서 안정적인 물확보를 할 수 있는 적정 하천유지용수 감량을 산정하는 것이 필요하다.

① 확률수문예측정보를 입력으로 댐-보-저수지 연계모의운행을 통해 용수확보 및 수질관리 위험을 최소화하는 방향으로 하천유지용량의 최적의 감량범위를 결정하는 것이 필요하다.

② 확률수문예측이 경계단계로 발전할 가능성이 크다고 예측할 경우에는 유관기관 협조체제를 강화하고, 댐수해지역 및 광역상수도 수수지자체 제한급수 준비, 지자체 별 대체 수자원 확보 요청, 댐 상류 지자체 취수장에 대한 취수대책 수립요청 등을 사전에 수행한다.

5) 경계 또는 심각단계에 진입시: 검토시점이 경계단계일 경우에는 농업용수를 감량하고, 심각단계에서는 생공용수 실수요량 감량 및 댐의 사수용량 활용까지 고려하게 된다. 위에서 언급한 바와 같이 용수감량은 다양한 이해당사자가 복잡하게 얽혀 있는 문제로 발생 가능한 위험을 저감하는 방향으로 감량이 결정되어야 한다.

① 확률수문예측정보가 경계단계 유지 또는 심각단계 진입될 가능성이 높다고 예측한 경우에는 농업용수를 최대한 감량하여 생공용수 공급에 차질이 없도록 대비하여야 할 것이다.

7.2 연구의 기대효과

본 연구에서 개발된 계절유량예측 기술은 갈수기 다목적댐 운영에 필요한 신뢰성이 평가된 장기에측정보를 제공함으로써 K-water 물관리센터의 다목적댐 연간 및 월간 운영계획수립, 효율적 용수수급관리, 유지유량 및 댐방류량 결정 등의 의사결정

지원 등의 의사결정에 활용될 것이다.

또한, 확률수문예측정보는 「댐용수 부족 대비 용수공급조정기준」에서 제시한 가뭄 대응단계별 댐운영 의사결정 및 댐보저수지 연계운영위원회의 감량결정시 유연한 대책수립을 지원하고 가뭄피해 경감에 활용될 것이다.

본 연구에서 개발된 ESP, Drip 확률수문예측기술은 실시간 예측성 검증을 통해 문제점을 지속적으로 개선해 국내 기타 다목적댐 및 저수지 운영 의사결정 및 물공급 전망 작성 등에 필요한 정보를 제공하는 역할을 수행할 것이다.

7.3 향후과제

본 연구에서 개발된 ESP, Drip 장기 확률수문예측정보를 이용한 댐모의운전을 통해 장기예측정보가 가지는 경제적인 편익분석 연구가 필요하다. 이러한 연구결과는 실제 장기예측이 가지는 경제적 가치를 정량적으로 평가하는 것으로 향후 장기예측 정보의 수자원분야 활용성을 제고하는 데 기여할 것이다.

ESP, Drip 장기 확률수문예측정보의 실시간 검증시스템 구축이 필요하다. 실시간 검증은 예측정보의 신뢰성을 평가함으로써 의사결정시 예측정보가 가지는 불확실성을 고려한 댐운영계획수립을 지원하고 장기적으로는 예측에 내재된 구조적 편이(systematic bias)를 보정하여 예측성을 향상시키는 데 기여할 것이다.

APCC는 6개월까지의 장기기후예측뿐 아니라 계절내 규모(subseasonal to seasonal)의 예측정보도 제공하고 있는데, 이를 활용하여 중장기 수문예측정보를 제공함으로써 다양한 의사결정과정을 지원할 수 있는 이음새 없는(seamless) 예측정보 생산기술 개발이 필요할 것이다.

Drip의 예측성 향상에 대한 장기적인 투자가 필요하다. 본 5장에서 언급한 바와 같이 예측성이 있는 기후예측변수와 도메인을 선정하여 예측정보의 정확도를 향상시키기 위한 후속연구를 통해 수요자의 의사결정과정에 신뢰성 있는 정보를 제공함으로써 활용성을 제고하는 방안이 병행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 강태욱, 이상호. 2014. 유역유출 및 수질모의에 관한 SWMM의 자동 보정 모듈 개발. 한국수자원학회논문집 47(4), 343-356.
- 국가수자원관리종합정보시스템. 2014. www.wamis.go.kr.
- 국토교통부. 2011. 수자원장기종합계획(2011-2020) 보고서.
- 국토교통부. K-water. 2014. 지하수조사연보 2014.
- 김남원, 이정우, 정일문, 원유승. 2009. SWAT-MODFLOW 결합모형의 토양수-지하수 연결성 개선. 한국수자원학회논문집 42(1), 9-19.
- 배덕효, 김진훈. 2005. 준분포형 TOPMODEL 개발. 한국수자원학회논문집 38(10), 895-906.
- 손태석, 이상도, 김상단, 신현석. 2010. 유역기반 모형을 이용한 기후변화에 따른 낙동강 유역의 하천유량 영향 분석. 한국수자원학회논문집 43(10), 865-881.
- 신현석, 강두기, 김상단. 2007. 낙동강 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유황분석. 한국수자원학회논문집 40(3), 251-263.
- 정일원, 구보영, 배덕효. 2007. Tank 모형의 4번째 저류탱크의 유출 불확실성 분석. 한국수자원학회논문집 40(3), 237-249.
- 정일원, 배덕효. 2005. 국내유역에서의 PRMS 모형의 적용성에 관한 연구. 한국수자원학회논문집 38(9), 713-725.
- 정일원. 2013. APCC 계절예측정보 활용을 위한 수자원계절예측 기술 개발. APCC Research Report, 1-46.
- 정일원. 2015. 계절예측정보 및 원격상관을 활용한 갈수기 다목적댐 유입량 예측 기술 개발. APCC 연구보고서, 1-102.
- 조재필. 2015. 계절예측 정보를 활용한 통합 수문·수질 장기 예측 기술 개발. APCC Annual Report.
- K-water 물관리센터. 2015. 미 캘리포니아 가뭄현황과 시사점.
- K-water. 2013. 국가안전관리 세부집행계획.
- K-water. 2014. 댐운영 실무편람 2014.
- Abtew W. 1996. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. Water Resources Bulletin 32 (3), 465-473.
- Allen R, Pereira L, Raes D, and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 56, FAO, Rome, pp. 300.

- Anderson JS. 1996. A method for producing and evaluating probabilistic forecasts from ensemble model integration. *J. Climate* 9, 1518-1530.
- Basketfield DL. 2005. Managing Seattle's water supply in context: Weather and climate. US CCSP Workshop: Climate science in support of decision making, Arlington, Virginia, 14-16 November.
- Bastola S, Misra V, Li Haiqin. 2013. Seasonal hydrological forecasts for watersheds over the Southeastern United States for the boreal summer and fall seasons. *Earth Interactions* 17(25), 1-22
- Beven, K. J., and J. Freer (2001), Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology, *J. Hydrol.*, 249(1-4), 11-29.
- Carpenter TM and KP Georgakakos. 2001. Assessment of Folsom Lake response to historical and potential future climate scenarios: 1. Forecasting. *Journal of Hydrology* 249, 148-175.
- Demirel MC, Booij MJ, Hoekstra AY. 2013. Identification of appropriate lags and temporal resolutions for low flow indicators in the River Rhine to forecast low flows with different lead times, *Hydrological Processes* 27, 2742-2758.
- Devineni N, Sankarasubramanian A and Ghosh S. 2008. Multimodel ensembles of streamflow forecasts: Role of predictor state in developing optimal combinations. *Water Resources Research*, 44, 10.1029/2006wr005855.
- Doorenbos J and WO Pruitt. 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. Food and Agric. Organiz. of the U.N. Rome.
- Doorenbos J, Pruitt WO. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO, Rome.
- Duan Q, Gupta VK, Sorooshian S. 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications* 76, 501-521.
- Epstein ES. 1969. A scoring system for probability forecasts of ranked categories. *J. Appl. Meteor.* 8, 985-987.
- Ficchi A, Raso L, Dorchies D, Pianosi F, Malaterre P, Van Overloop P, Jay-Allemand M. 2015. Optimal operation of the multireservoir system in the Seine River Basin using deterministic and ensemble forecasts." *Journal of Water Resources Planning and Management*, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000571, 05015005
- Goello CACC, Pulido GT. 2001. A micro-genetic algorithm for multiobjective optimization.

- Evolutionary Multi-Criterion Optimization 1993, 126-140
- Gong G, Wang L, Condon L, Sharman A, Lall U. 2010. A simple framework for incorporating seasonal streamflow forecasts into existing water resources management practices, *Journal of the American Water Resources Association* 46(3), 574-585
- Guihan R. 2014. Integrating emerging river forecast center streamflow products into the Salt Lake City Parley's drinking water system, *Environmental & Water Resources Engineering Masters Projects*, 65pp
- Hamon WR. 1961. Estimating potential evaporation, in: Division, J.o.H. (Ed.), *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, pp. 107-120.
- Hargreaves GH, Samani ZA. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Technical note. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 108 (3), 225-230.
- Hargreaves GH, Samani ZA. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Technical note. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 108 (3), 225-230.
- Hidalgo HG, Das T, Dettinger MD, Cayan DR, Pierce DW, Barnett TP, Bala G, Mirin A, Wood AW, Bonfils C, Santer BD, Nozawa T. 2009. Detection and attribution of streamflow timing changes to climate change in the Western United States. *Journal of Climate* 22, 3838-3855.
- HRC-GWRI. 2006. Integrated forecast and reservoir management (INFORM) for Northern California: System development and initial demonstration, HRC-GWRI Technical Report No. 5, pp. 268.
- Jacobs KL and JM Holway. 2004. Managing for sustainability in an arid climate: lessons learned from 20 years of groundwater management in Arizona, USA. *Hydrogeology Journal* 12, 52-65.
- Jensen ME, Haise HR. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE* 89 (LR4), 15-41.
- Kendall MG. 1975. *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin: London. Xu, C. Y., and Singh, V. P. [2002]. "Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland." *Water Resour. Manage.*, 16(3), 197-219.
- Krause P, Boyle DP, Base F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, *Advances in Geosciences* 5, 89-97.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., Saindon, L.G., 1983. *Precipitation Runoff Modeling System: User's Manual*. US Geological Survey Water Resources

- Investigation Report, pp. 83-4238.
- Legates DR and GJ McCabe. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water Resources Research* 35(1), 233-241.
- Linacre ET. 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climate, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology* 18, 409-424.
- Liou CS, Chen JH, Terng CT, Wang FJ, Fong CT, Rosmond TE, Kuo HC, Shiao CH and Cheng MD. 1997. The second generation global forecast system at the central weather bureau in Taiwan, *Weather and Forecasting* 3, 653-663.
- Luo L, Wood EF. 2008. Use of Bayesian merging techniques in a multimodel seasonal hydrologic ensemble prediction system for the Eastern United States. *Journal of Hydrometeorology* 9, 866-884.
- Mahalanobis PC. 1936. "On the generalised distance in statistics" (PDF). *Proceedings of the National Institute of Sciences of India* 2 (1): 49-55. Retrieved 2012-05-03.
- Makkink GF. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers* 11, 277-288.
- Mann HB. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245-259.
- Mason IB. 1982. A model for assessment of weather forecasts. *Aust. Meteor. Mag.* 30, 291-303.
- Molod A, Takacs L, Suarez M, Bacmeister J, Song IS, and Eichmann A. 2012. The GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Mean climate and development from MERRA to Fortuna, Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, NASA/TM-2012-104606, 28, 1-124
- Monteith JL. 1965. *Evaporation and the environment, The state and movement of water in living organisms*, XIXth symposium. Cambridge University Press, Swansea.
- Moradkhani H, Sorooshian S. 2008. General review of rainfall-runoff modeling: Model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. *Hydrological Modelling and the Water Cycle* 63, 1-24.
- Morton FI. 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology* 66 (1-4), 1-76.
- Murphy HA. 1971. Note on the ranked probability skill score. *J. Appl. Meteor.* 10, 155-156.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3), 282-290.

- NRC (National Research Council). 2008. Decision-support experiments and evaluations using seasonal to interannual forecasts and observational data: A focus on Water Resources. USCCSP Synthesis and Assessment Product 5.3, 426pp.
- Obeysekera J, Trimble P, Neidrauer C, Pathak C, VanArman J, Strowd T, Hall C. 2007. Consideration of long-term climatic variability in regional modeling for SFWMD planning and operations. 2007 South Florida Environmental Report, Florida DEPSF Water Management Dustruct, 47p
- Oudin L, Hervieu F, Michel C, Perrin C, Andreassian V, Anctil F, Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part2-Toward a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling, *Journal of Hydrology* 303, 290-306.
- Park H, Park BK, Rah DK, and Cho JY. 2002. An improvement of global model in 2001. KMA/NWPD Technical Report 2002-1.
- Peck, E.L., 1976. Catchment modeling and initial parameter estimation for the national weather service river forecast system, NOAA Technology Memorandrom, NWS HYDRO-31. National Weather Service, Silver Spring, MD.
- Penman HL. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London* 193, 120-145.
- Perrin, C., C. Michel, and V. Andreassian (2003), Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *J. Hydrol.*, 279(1-4), 275-289.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V.: Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, *J. Hydrol.*, 242, 275-301, 2001.
- Priestley CHB, Taylor RJ. 1972. On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100, 81-92.
- Rayner S, Lach D and H Ingram. 2005. Weather Forecasts are for Wimps: Why Water Resource Managers do not Use Climate Forecasts, *Climate Change* 69, 197-227.
- Razavi S and BA Tolson. 2013. An efficient framework for hydrologic model calibration on long data periods, *Water Resour. Res.*, 49, 8418-8431, doi:10.1002/2012WR013442.
- Saha S and co-authors. 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91, 1015-1072.
- Sarewitz D and RA Pielke. 2007. The Neglected Heart of Science Policy: Reconciling Supply of and Demand for Science, *Environmental Science and Policy* 10, 5-16.

- Seo DJ, H Herr, and J Schaake. 2006. A statistical post-processor for accounting of hydrologic uncertainties in short-range ensemble streamflow prediction, *Hydrologic and Earth System Science Discussions* 3, 1987-2035.
- Shen, Z. Y., L. Chen, and T. Chen [2012], Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: A case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(1), 121-132, doi:10.5194/hess-16-121-2012.
- Shukla S, Lettenmaier DP. 2013. Multi-RCM Ensemble Downscaling of NCEP CFS Winter Season Forecasts: Implications for seasonal hydrologic forecast skill. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1002/jgrd.50628.
- Simmons HL, Laurent LS, Jayne S, and Weaver A. 2004. Tidally driven mixing in a numerical model of the ocean general circulation. *Ocean Modelling*, doi:10.1016/S1463-5003(03)00011-8.
- Singh SK and A Bardossy. 2012, Calibration of hydrological models on hydrologically unusual events, *Adv. Water Resour.*, 38, 81-91.
- Sorooshian, S., Duan, Q., Gupta, V.K., 1993. Calibration of rainfallrunoff models: application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting model. *Water Resour. Res.* 29, 1185-1194.
- Stedinger JR, Voel RM, Frequency analysis of extreme events: In Maidment DR(Ed), *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Sun JQ and Ahn JB. 2011. A GCM-based forecasting model for the landfall of tropical cyclones in China. *Advances in Atmospheric Sciences* 28(5), 1049-1055.
- Thom AS, Oliver HR. 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 103, 345-357.
- Tolstykh MA, Kiktev DB, Zaripov RB, Zaichenko MY, and Shashkin WV. 2010. Simulation of the seasonal atmospheric circulation with the new version of the semi-Lagrangian Atmospheric Model – *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics* 46(2), 133-143.
- Turc L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, *Annales Agronomiques*, 12, 13-49.
- Welles E, Sorooshian S, Carter G, and B Olsen. 2007. Hydrologic Verification: A Call for Action and Collaboration. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(4), 503-511.
- Wilks D. 1995. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press Inc., San

- Diego, CA. 467pp.
- Willmott CJ. 1982. Some comments on the evaluation of model performance, *Bulletin of the American Meteorological Society* 63(11), 1309-1313.
- Wood AW and JC Schaake. 2008. Correcting errors in streamflow forecast ensemble mean and spread. *J. Hydrometeorology* 9(1), 132-148.
- Wright JL. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 108 (IR2), 57-74.
- Wu L, Seo DJ, Demargne J, Brown JD, Cong S, Schakke J. 2011. Generation of ensemble precipitation forecast from single-valued quantitative precipitation forecast for hydrologic ensemble prediction. *Journal of Hydrology* 399, 281-298.
- Xu CY, Singh VP. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland, *Water Resour. Manage.* 16(3), 197-219.
- Zhong A, Hendon HH and Alves O. 2005. Indian Ocean variability and its association with ENSO in a global coupled model. *Journal of Climate* 18, 3634-3649.
- Zhou Z, Harris KDM. 2008. Counteracting stagnation in genetic algorithm calculations by implementation of a micro genetic algorithm strategy, *Physical Chemistry Chemical Physics* 10, 7262-7269.
- Zimmer A, Schmidt A, Ostfeld A, Minsker B. 2015. Evolutionary algorithm enhancement for model predictive control and real-time decision support. *Environmental Modelling & Software* 69, 330-341.

부록

부록 1. 10월-5월 갈수기의 강수, 댐유입량, 유출을 변화

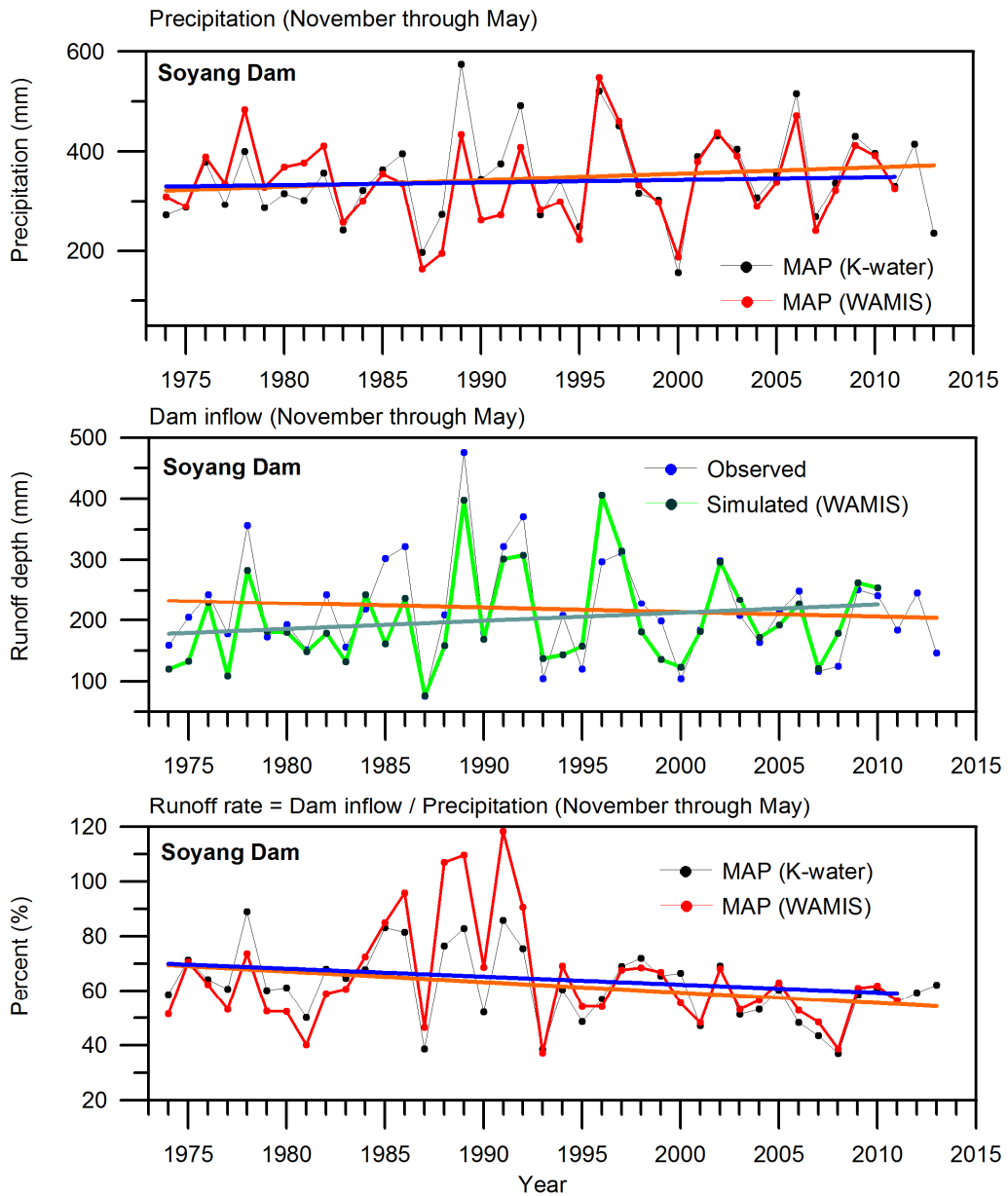


Figure A1 The time series of areal averaged precipitation, dam inflow, and runoff rate during dry season in the Soyang dam

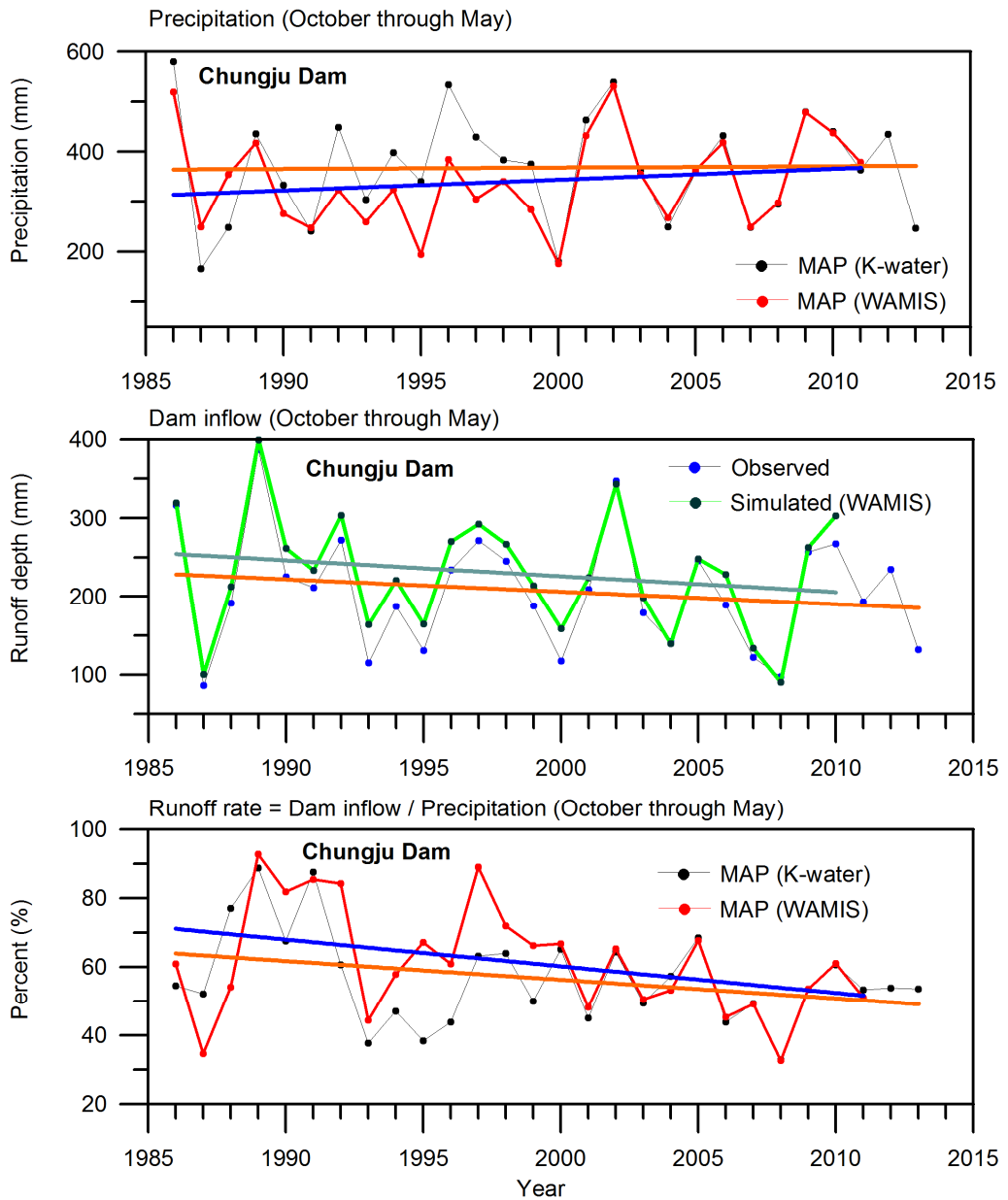


Figure A2 The time series of areal averaged precipitation, dam inflow, and runoff rate during dry season in the Chungju dam

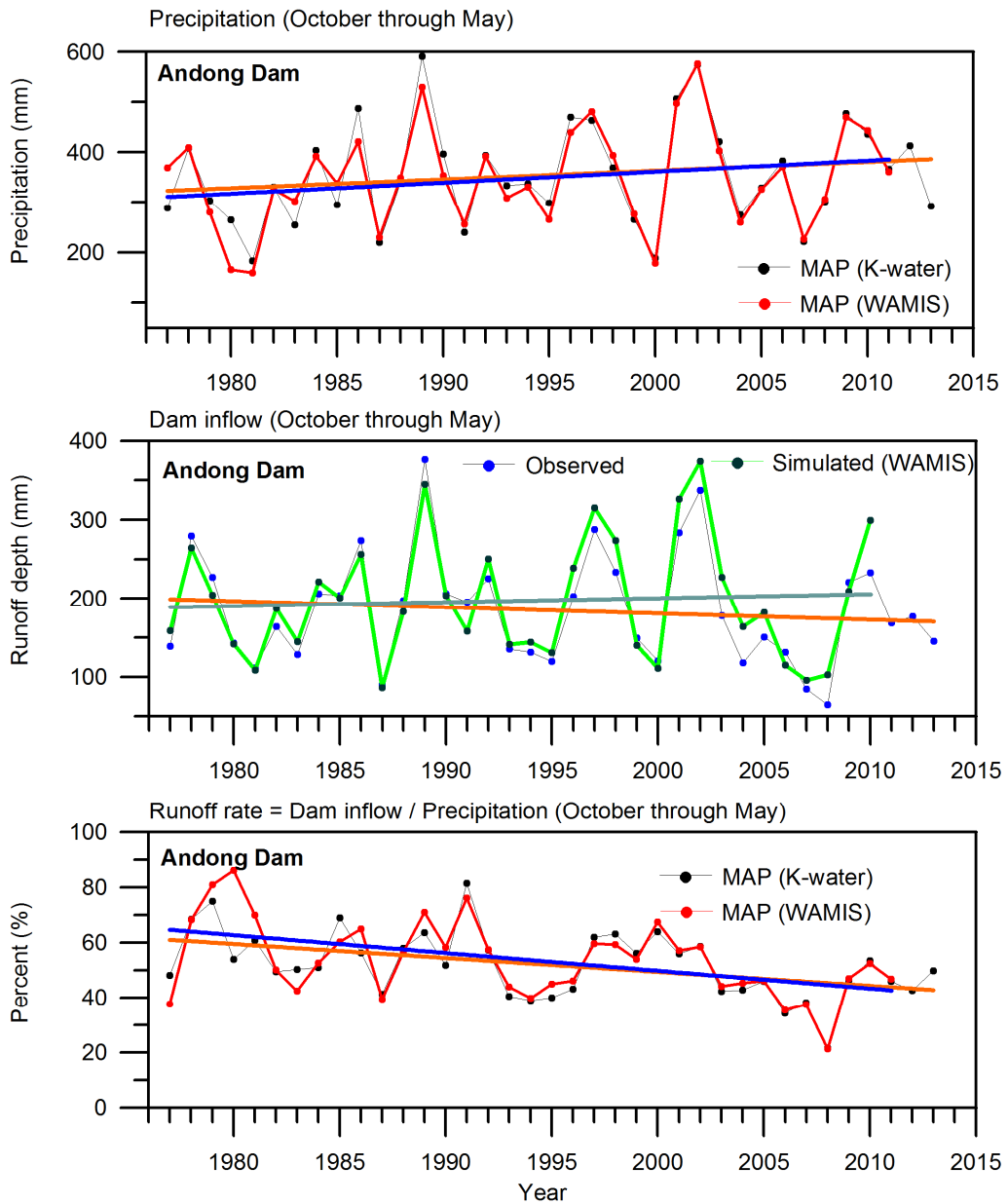


Figure A3 The time series of areal averaged precipitation, dam inflow, and runoff rate during dry season in the Andong dam

이중누가우량분석 및 누적강수량과 누적댐유입량 분석

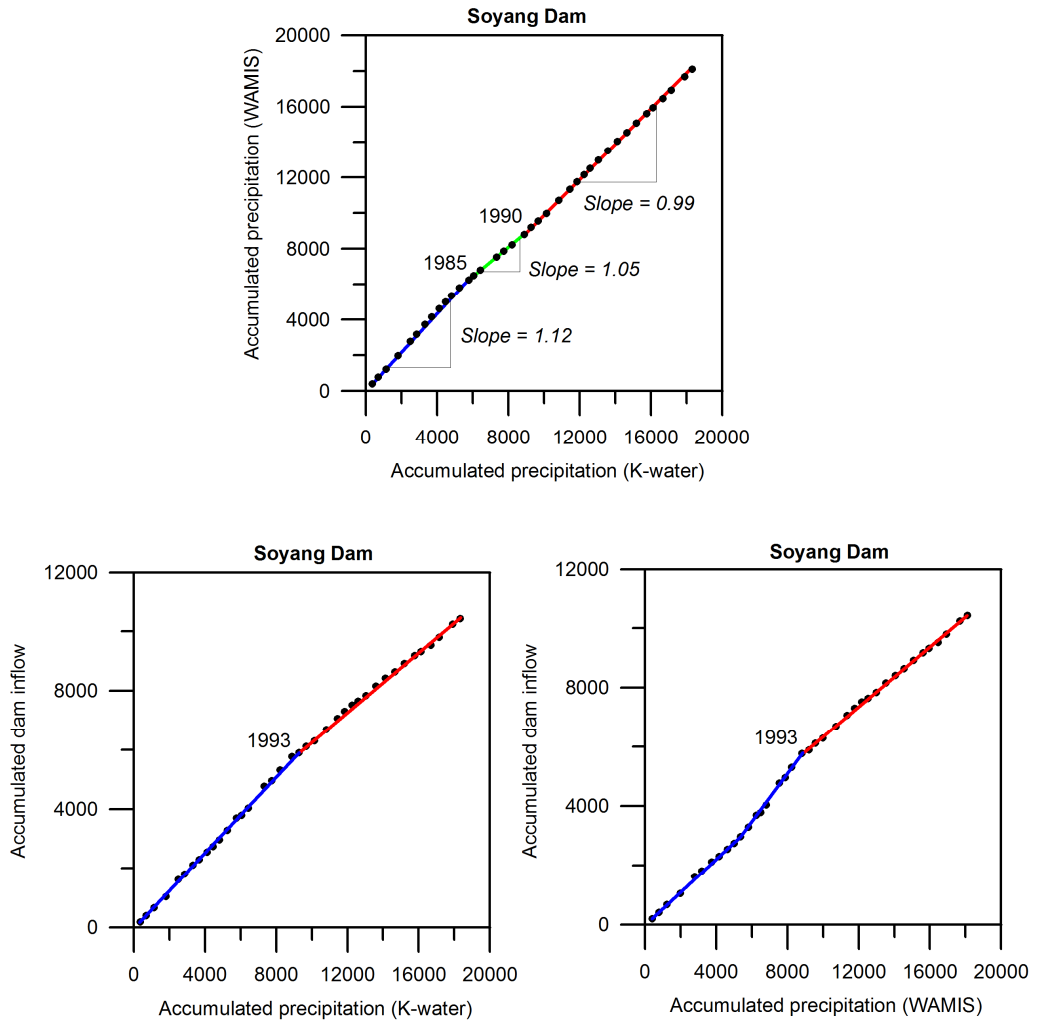


Figure A4 Double mass analysis among accumulated WAMIS precipitation, accumulated K-water precipitation, and accumulated dam inflow during dry season in the Soyang dam

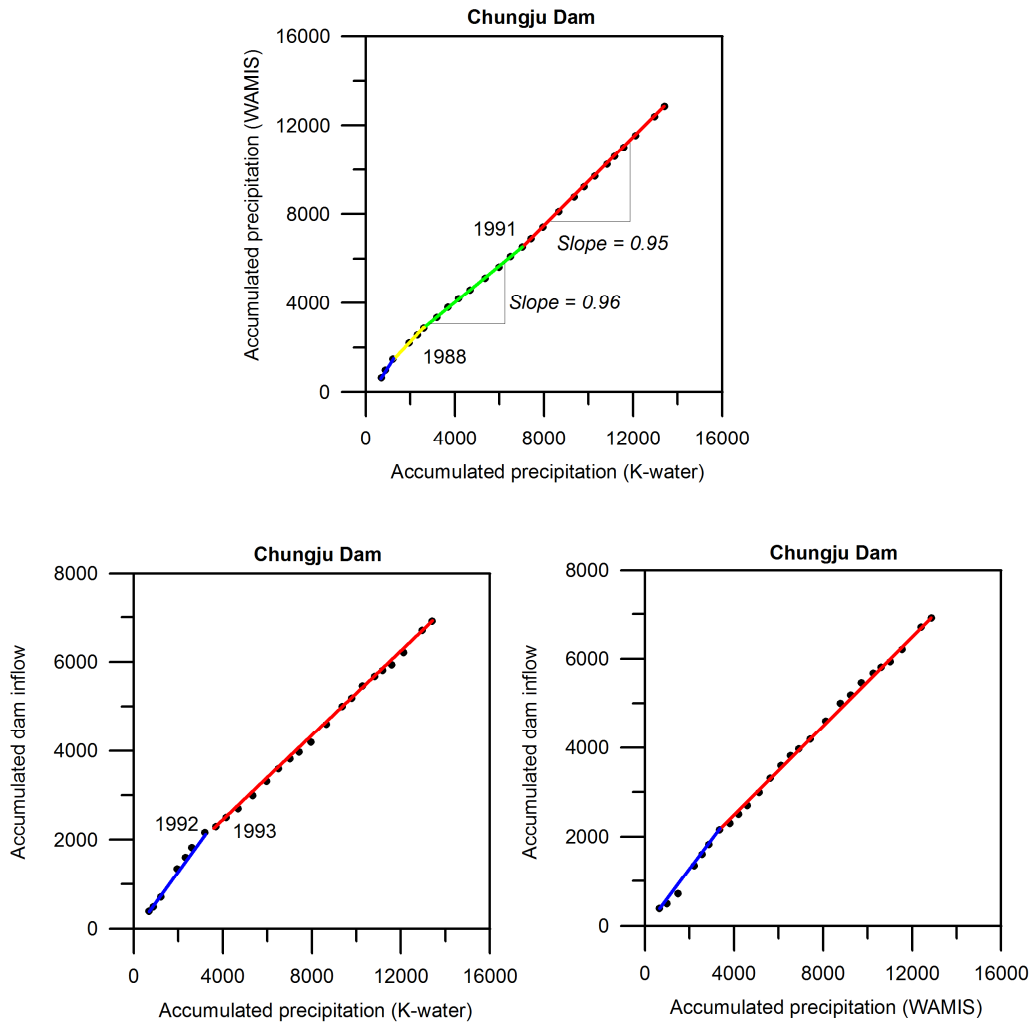


Figure A5 Double mass analysis among accumulated WAMIS precipitation, accumulated K-water precipitation, and accumulated dam inflow during dry season in the Chungju dam

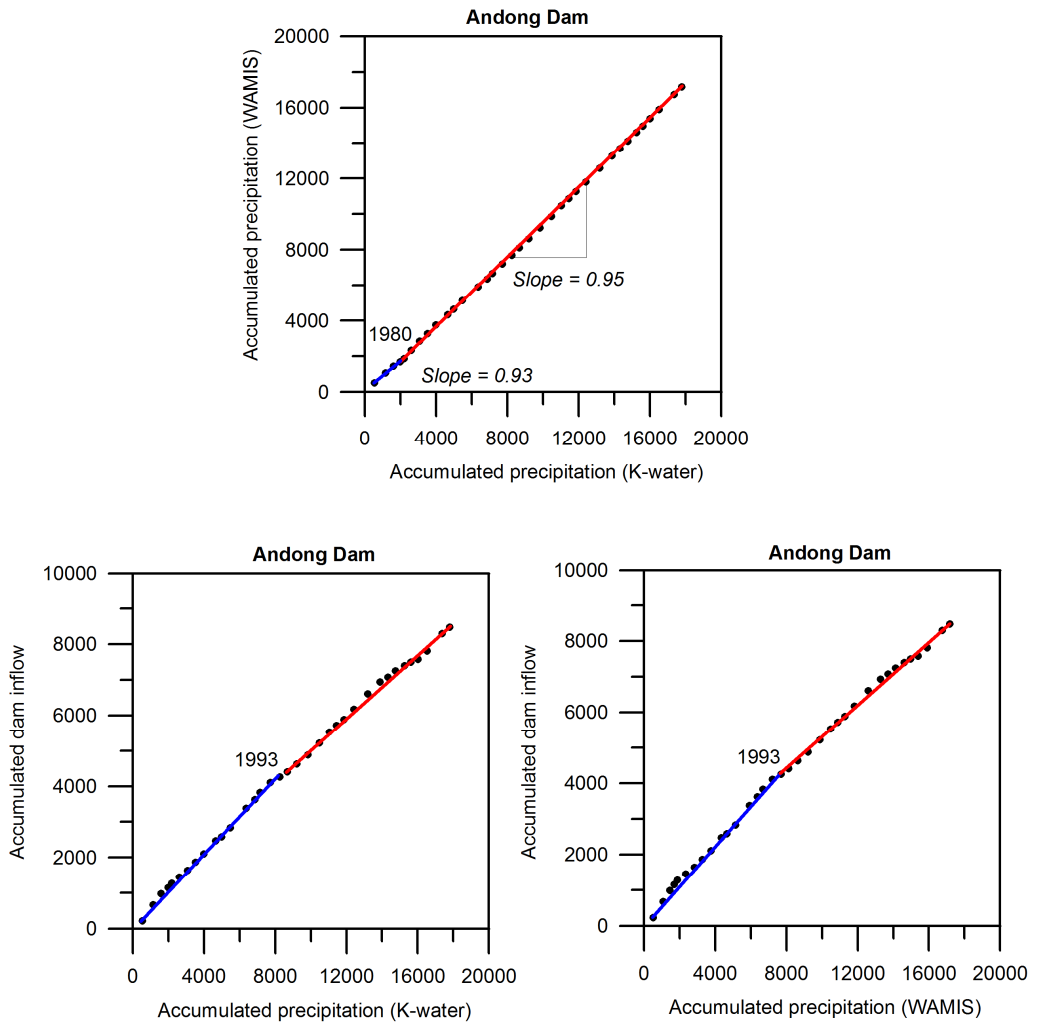
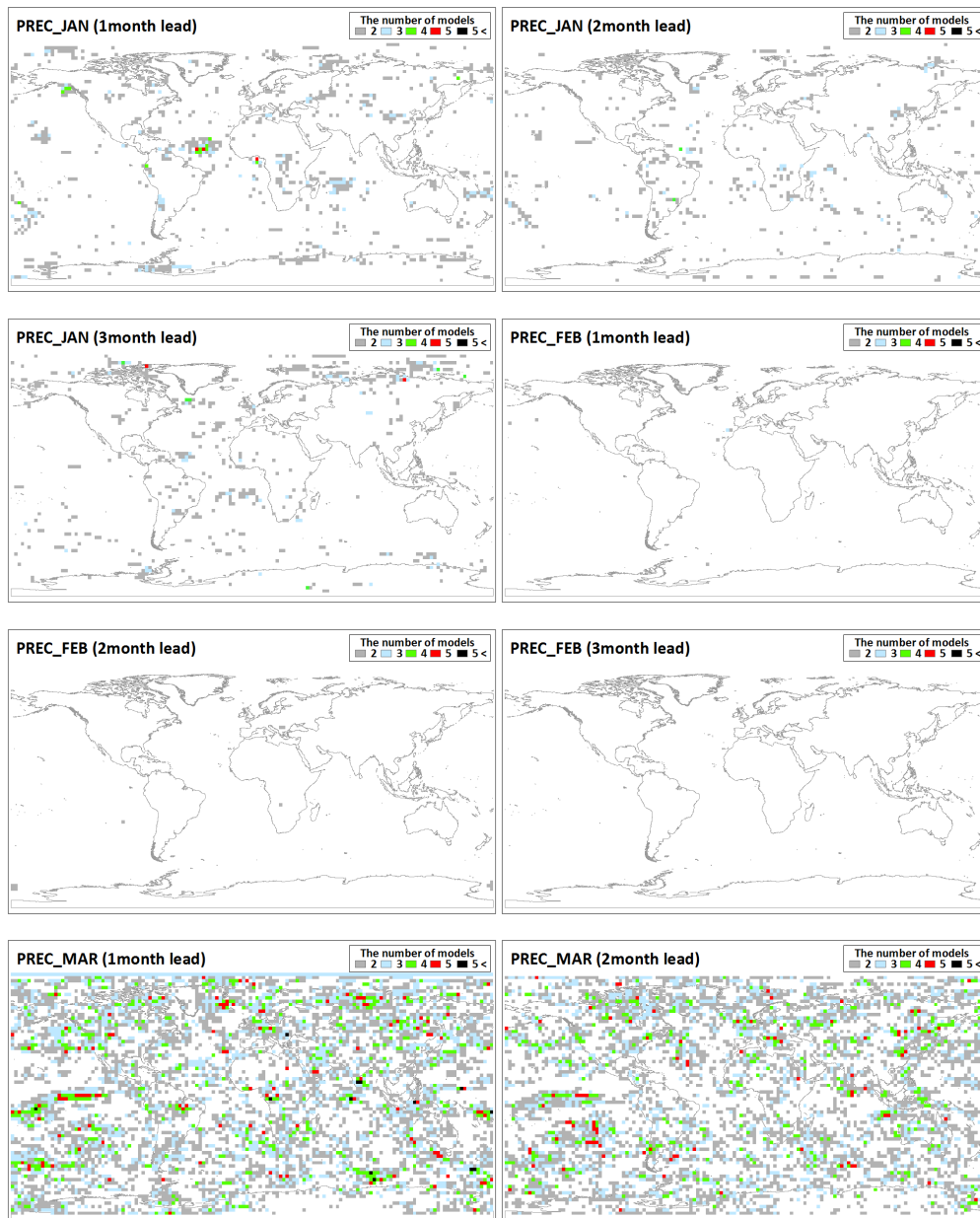
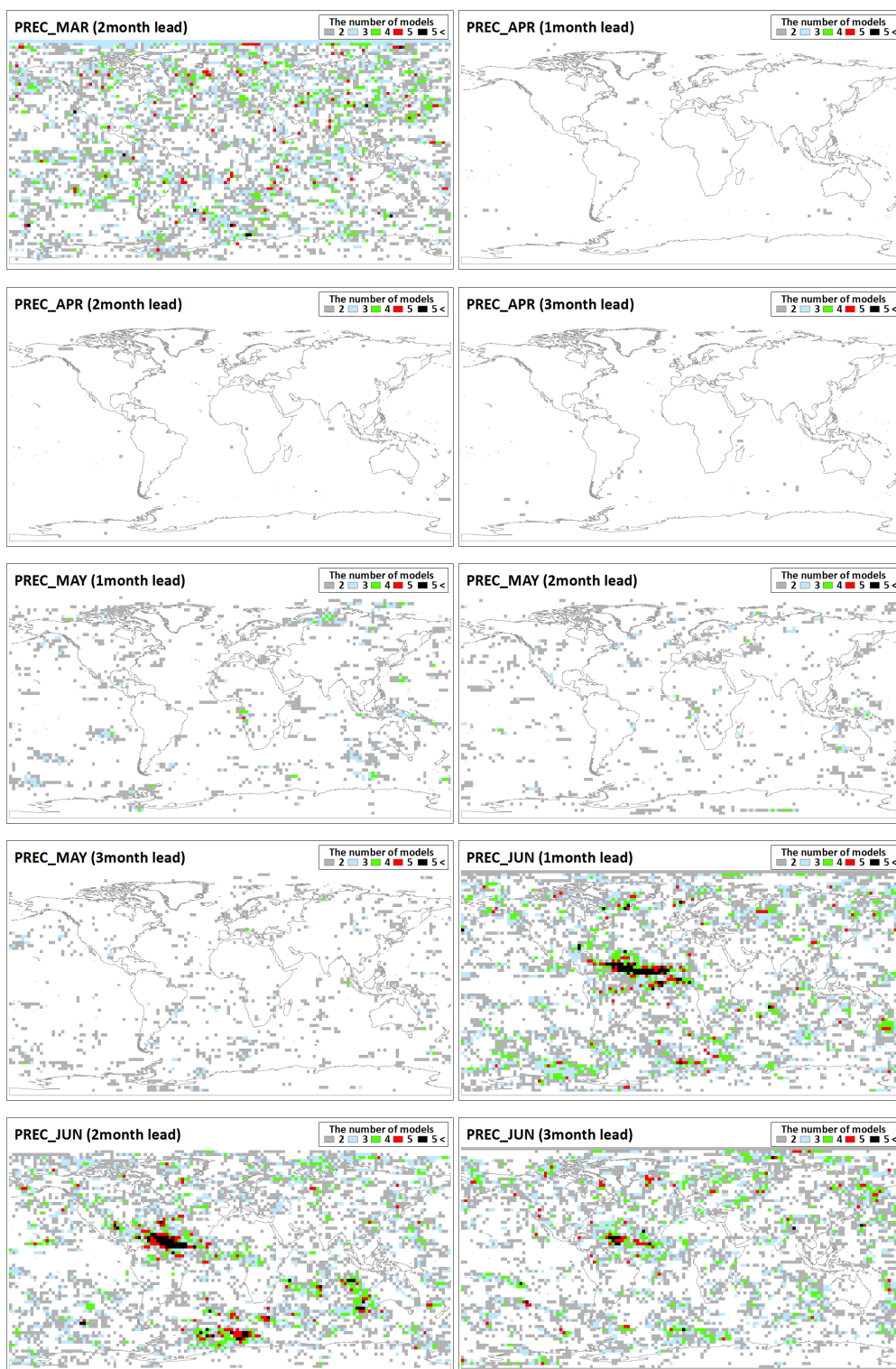
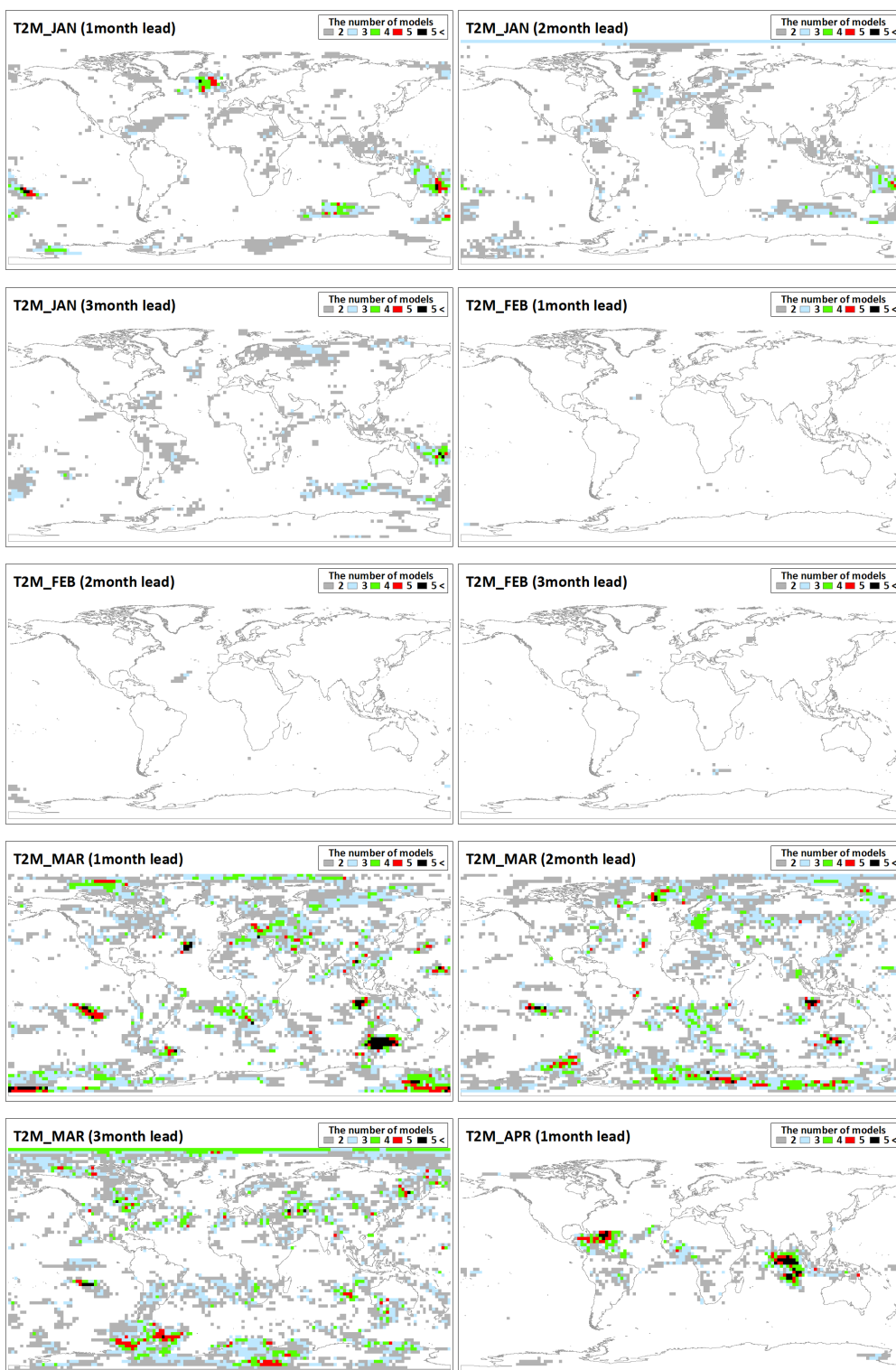


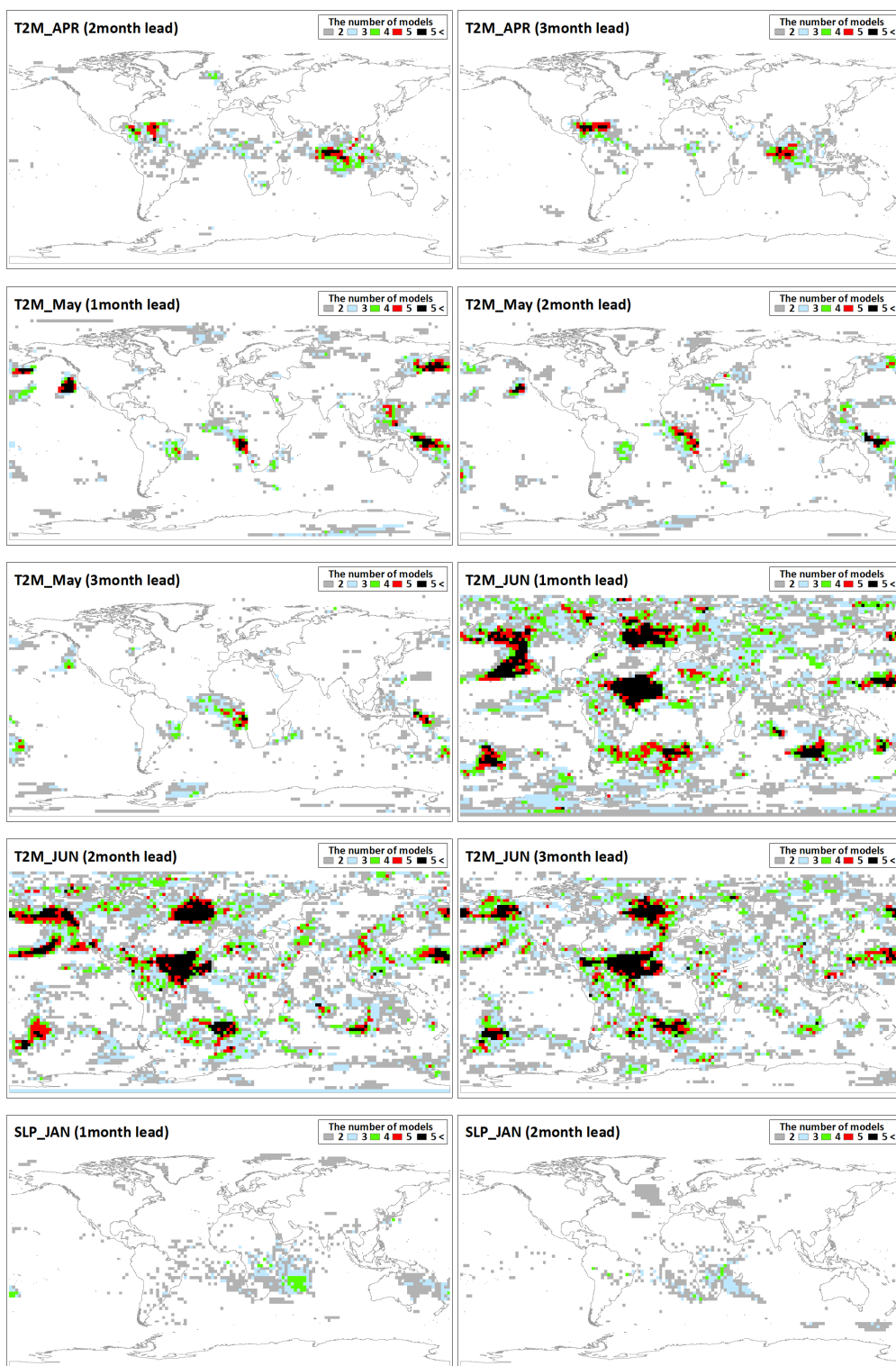
Figure A6 Double mass analysis among accumulated WAMIS precipitation, accumulated K-water precipitation, and accumulated dam inflow during dry season in the Andong dam

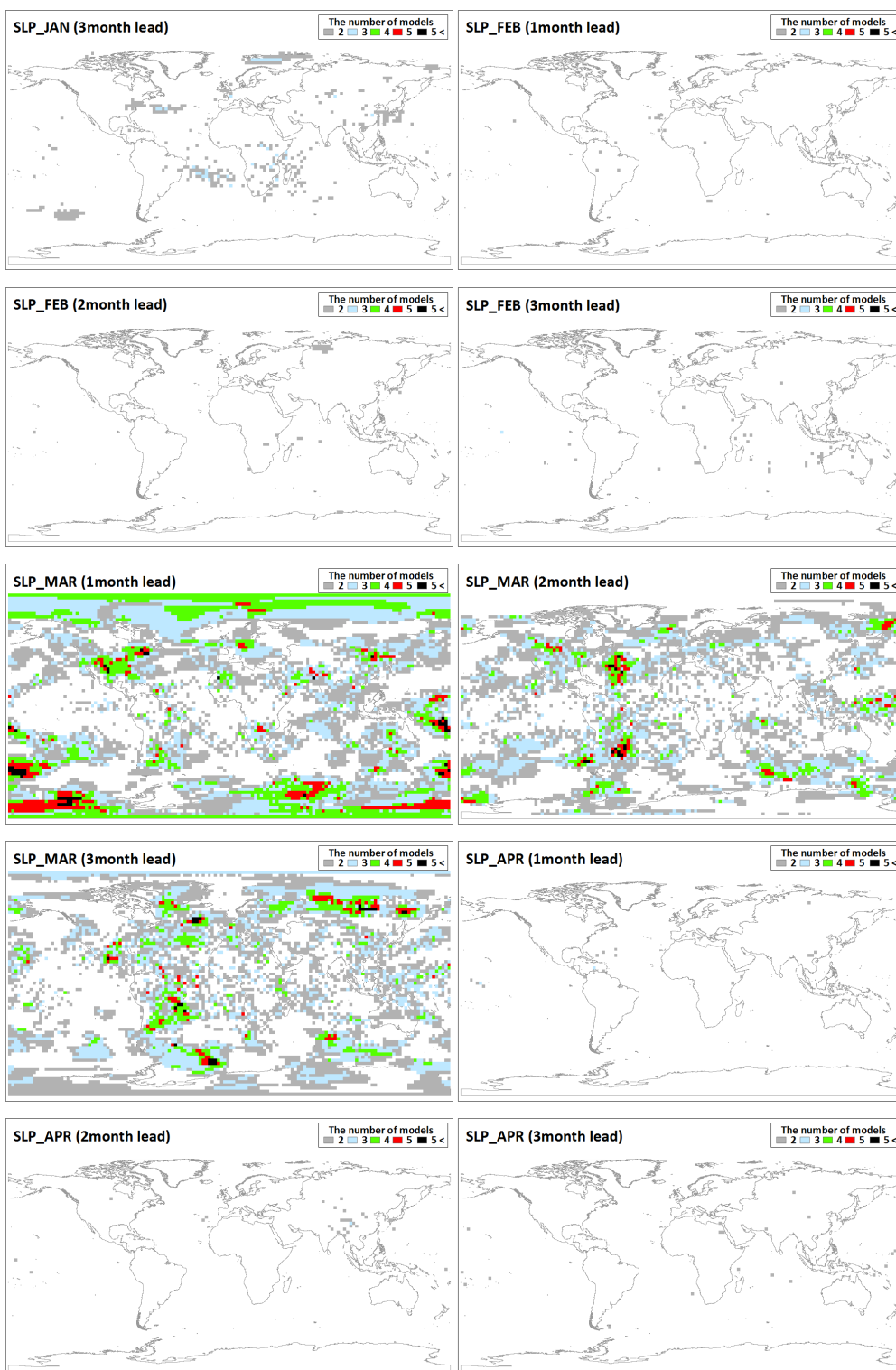
부록 2. 기후예측변수별 선행예측시간별 소양강댐 강수량 예측성능 분석 결과

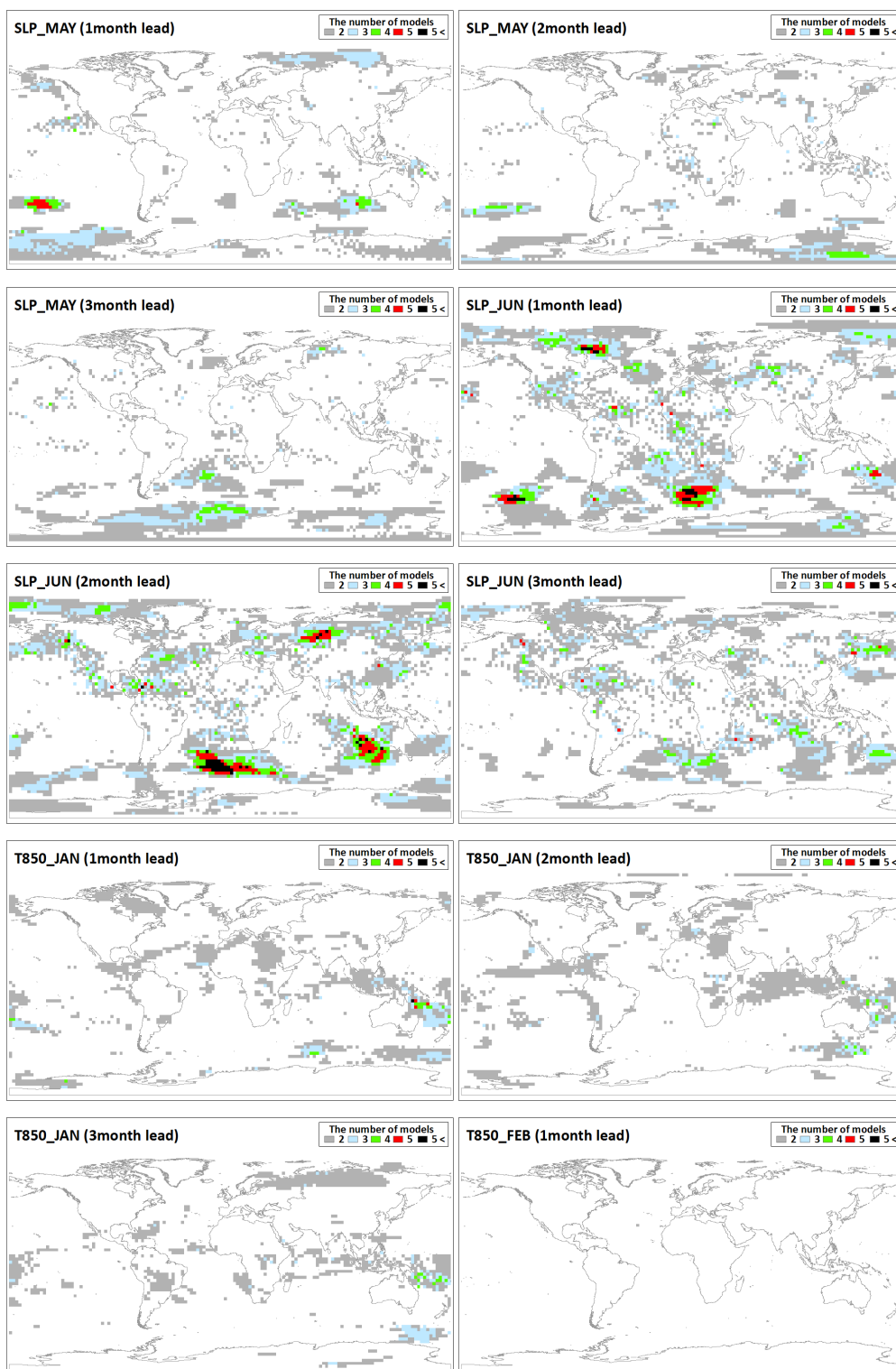


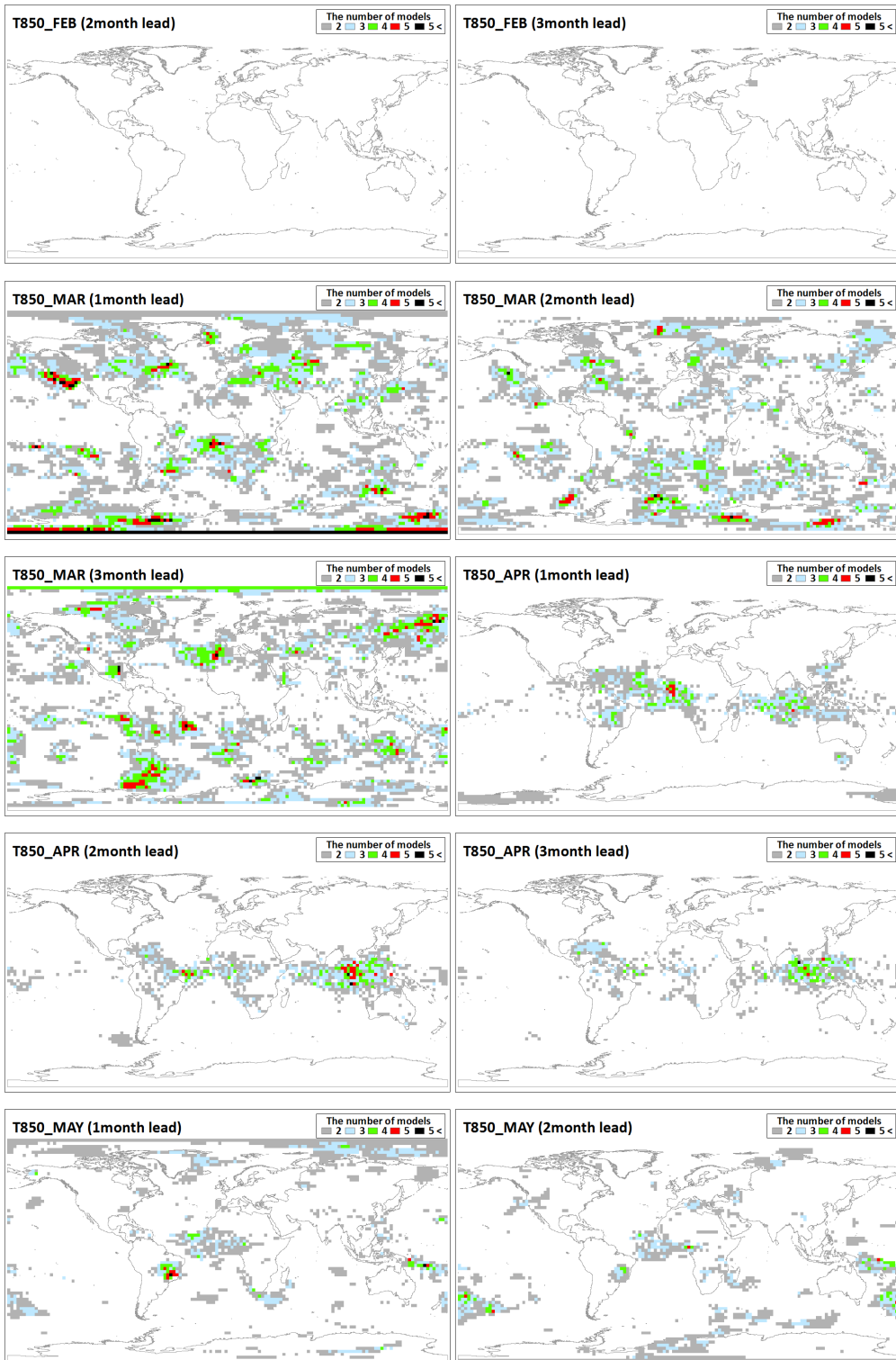


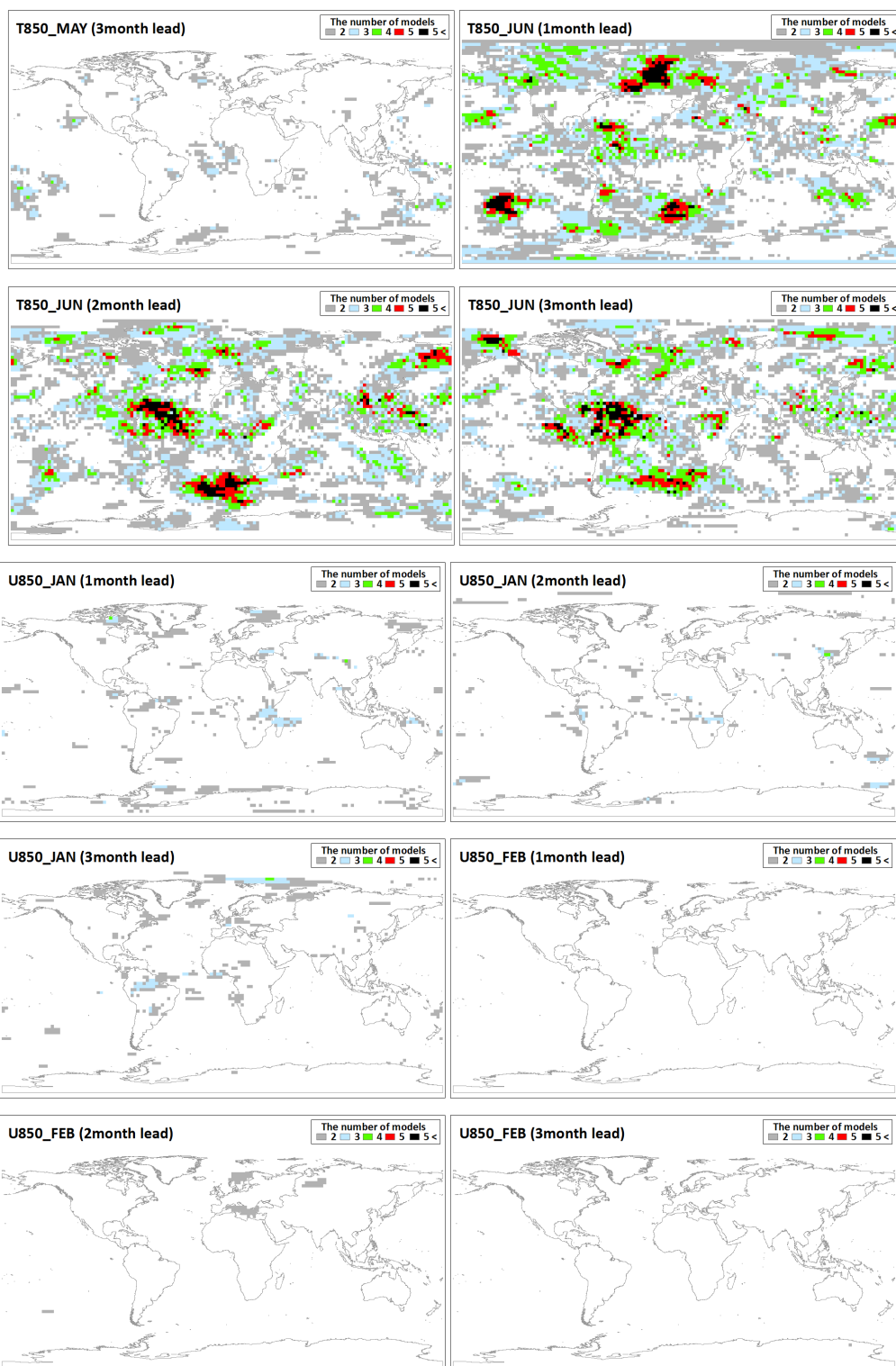


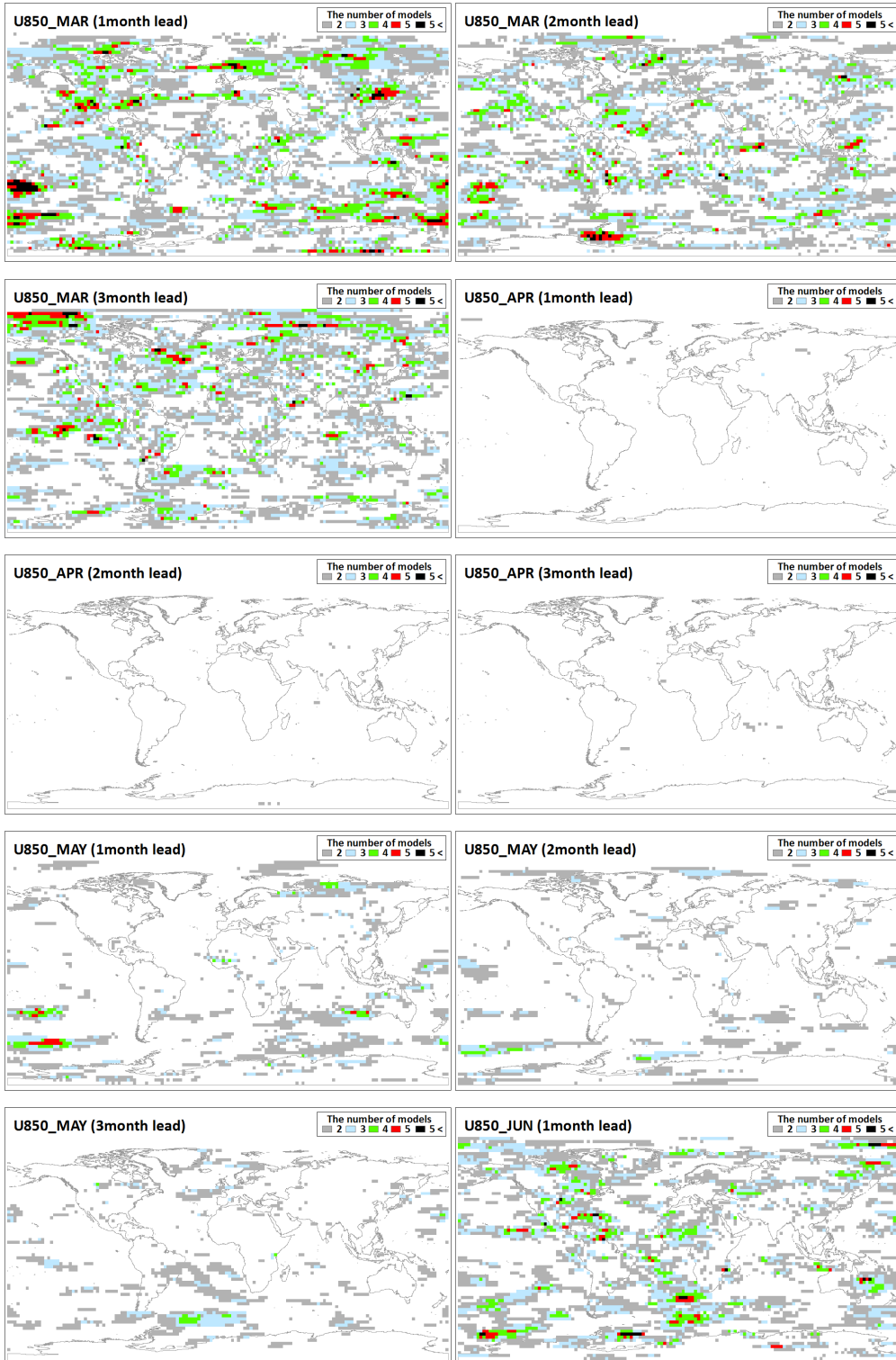


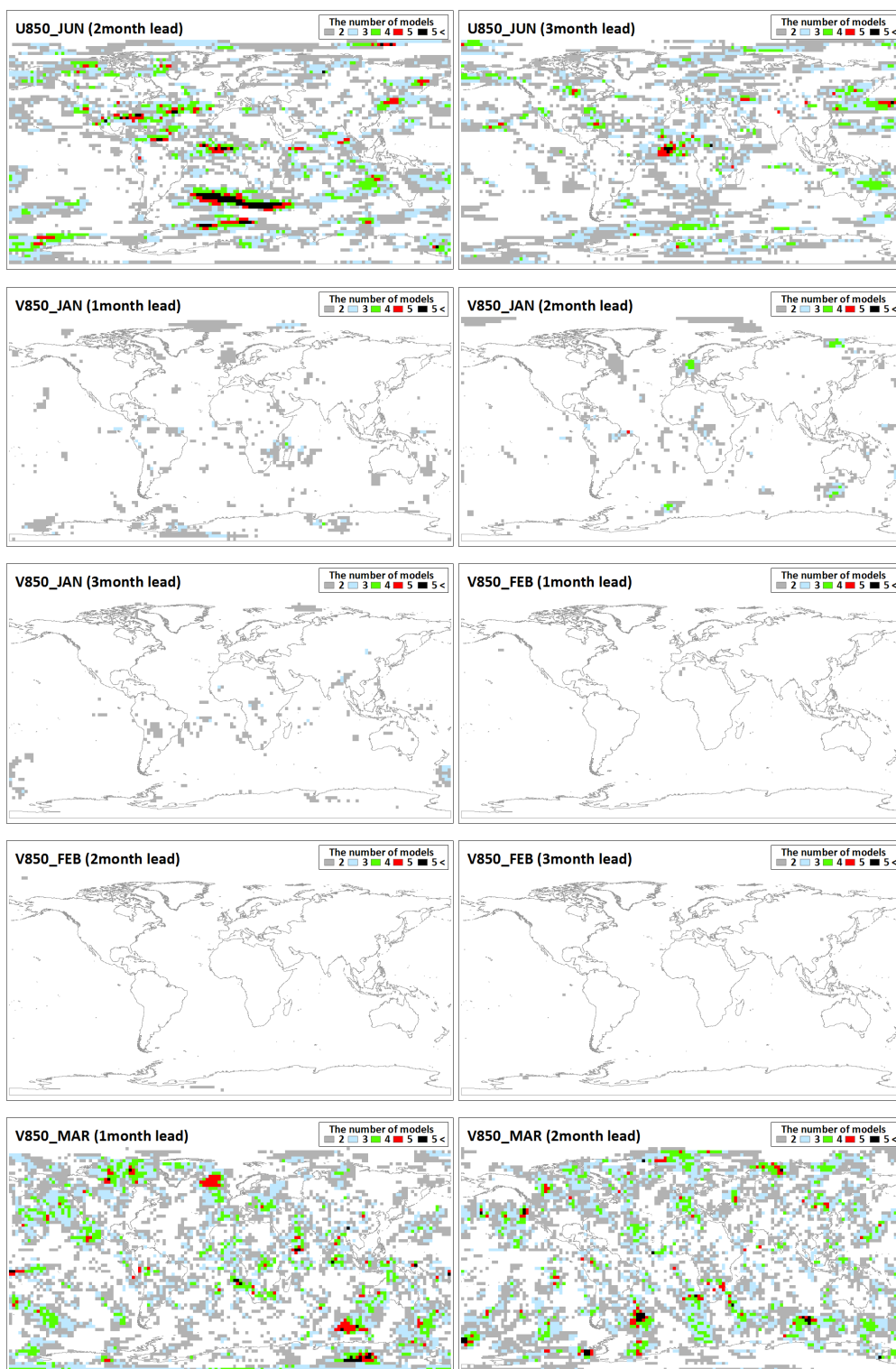


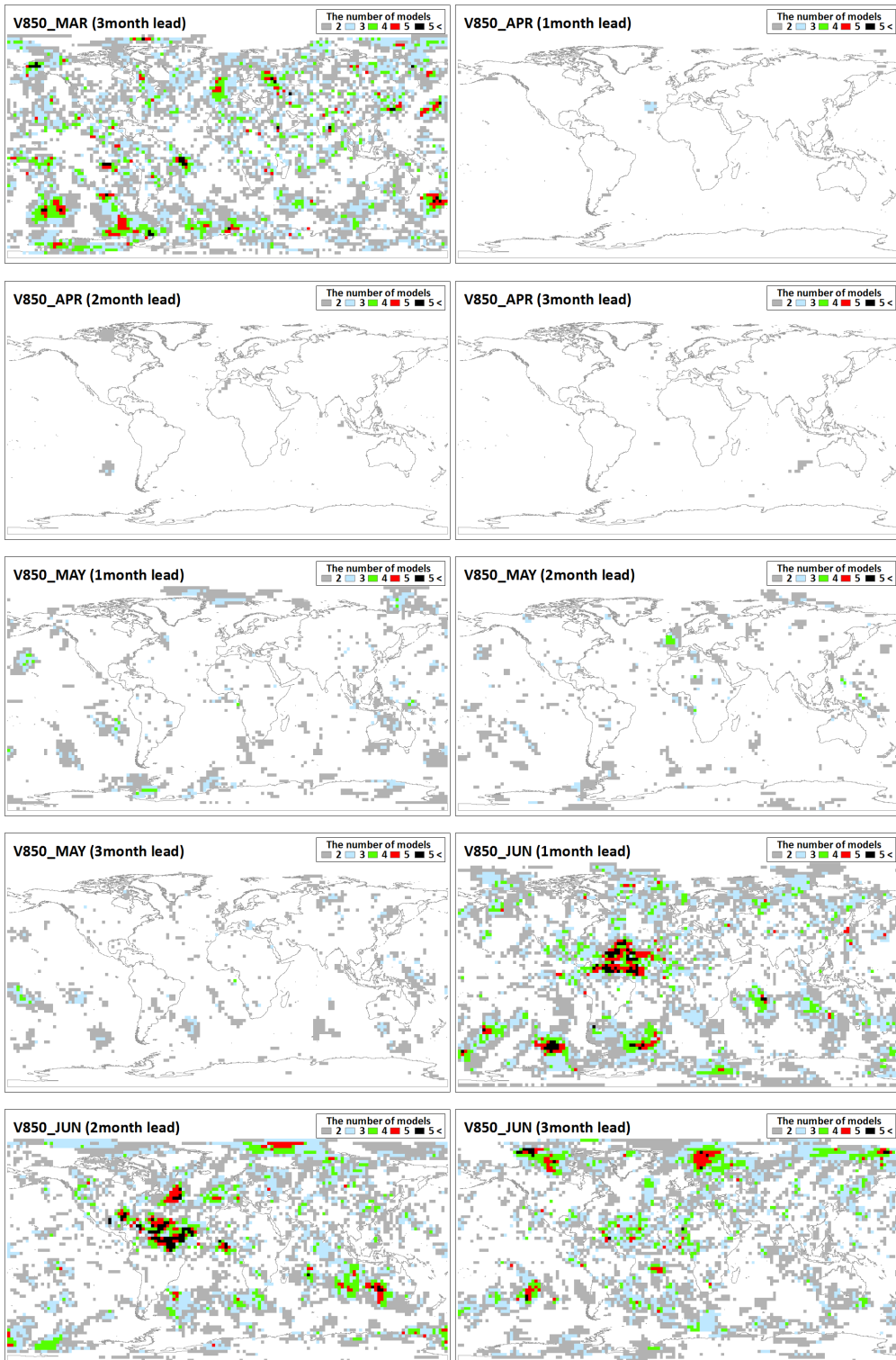


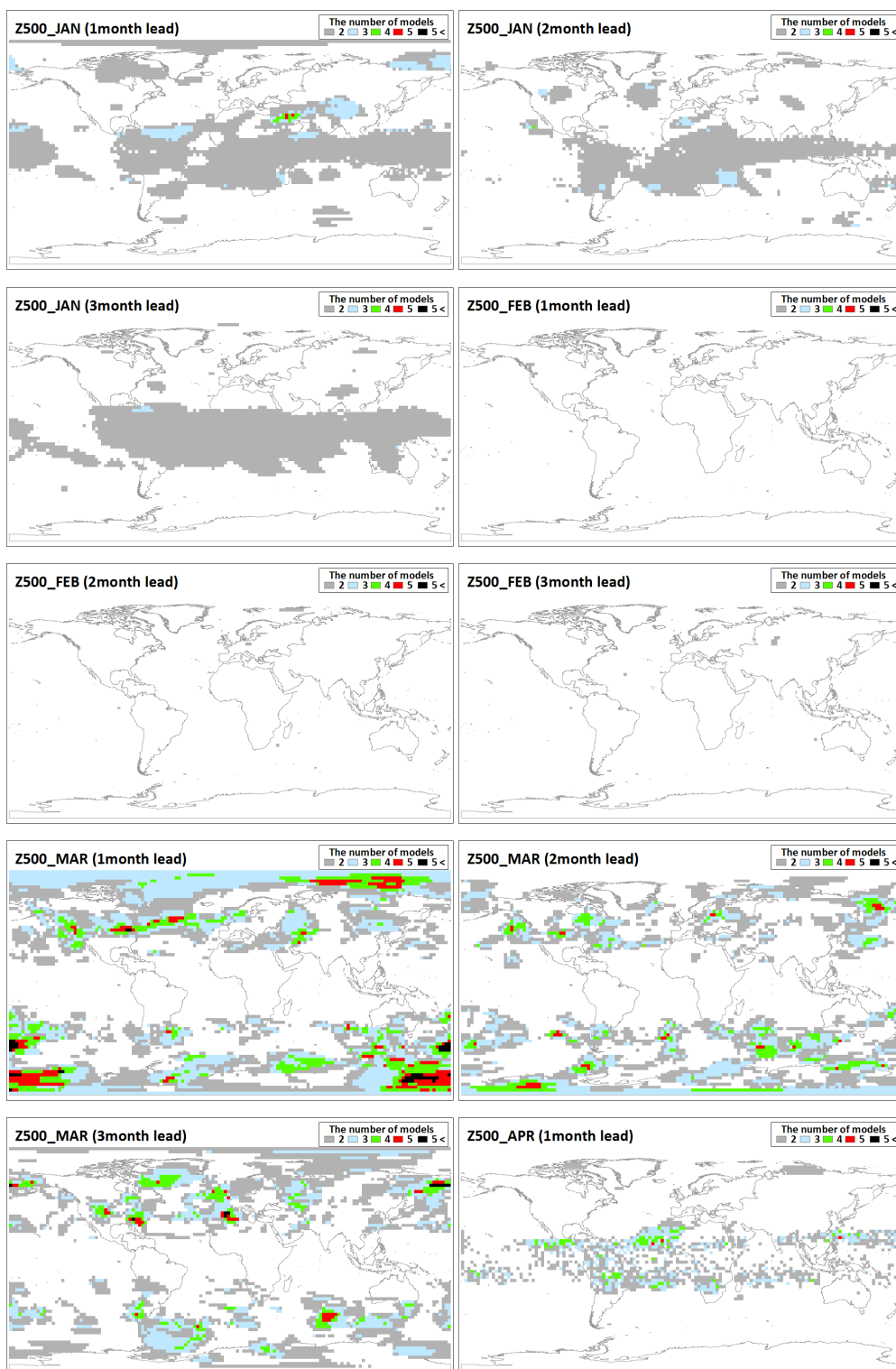


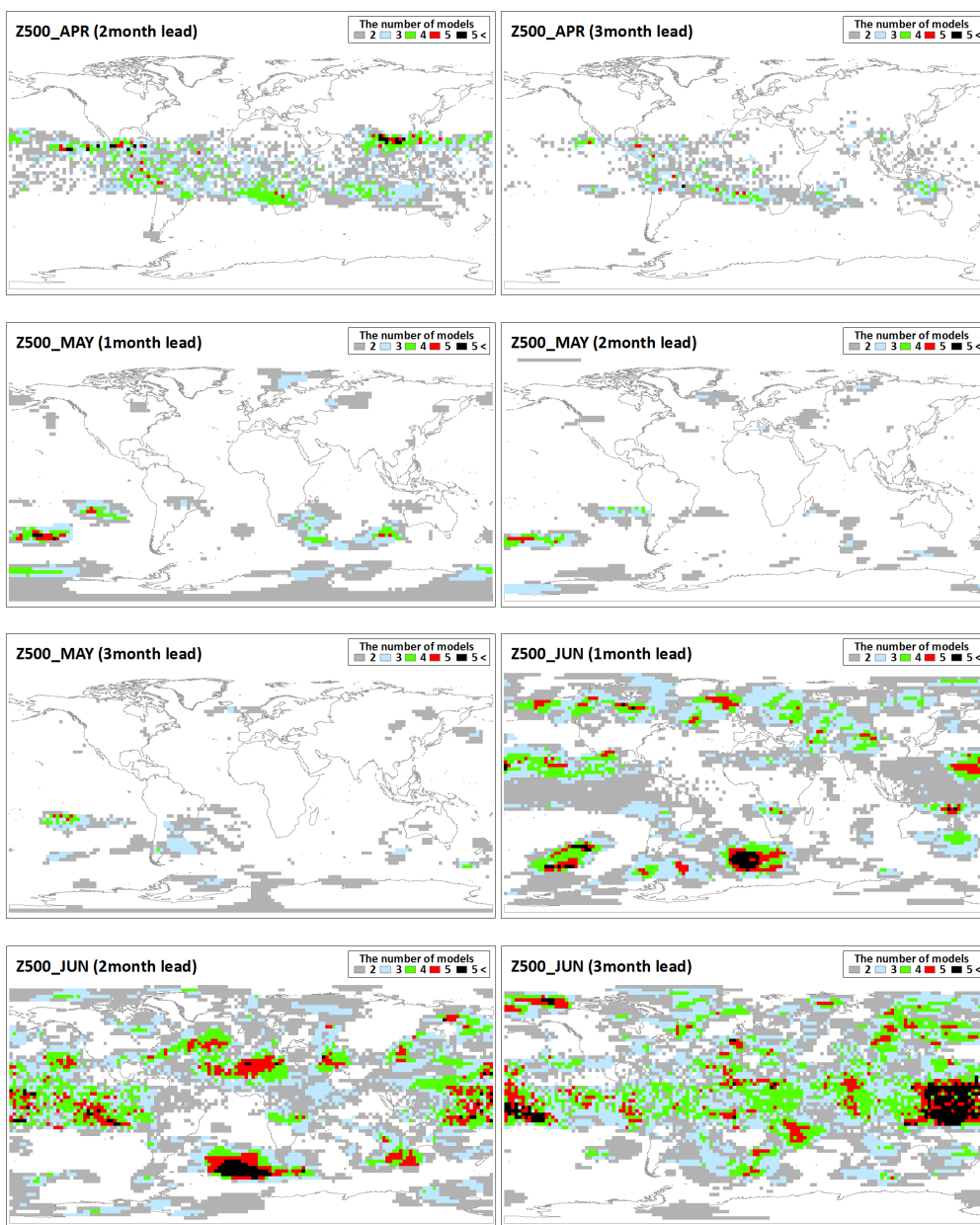












연구보고서 2015-19

**갈수기 댐유입량 예측성 개선을 통한
다목적댐 계절예측정보 활용 가이드라인 개발**

Developing guidelines for supporting dry-seasonal dam operation
based on improved predictability of seasonal dam-inflow prediction

정일원



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-116-9