

APEC기후센터

계절예측정보 및 원격상관을 활용한 갈수기 다목적댐 유입량 예측 기술 개발

정일원 기후변화연구팀

APEC기후센터
연구보고서

계절예측정보 및 원격상관을 활용한 갈수기 다목적댐 유입량 예측 기술 개발

Developing Dry Seasonal Dam Inflow Prediction Methods Using a Hybrid
Approach Based on Seasonal Climate Prediction and Teleconnection

정일원 기후변화연구팀

연구보고서 2015-11

발간사

증가하는 기후관련 재난은 기후변화가 더 이상 먼 미래의 문제가 아니라 현실의 문제라는 사회적 인식의 변화를 이끌고 있습니다. IPCC 5차보고서는 기후변화가 수자원의 시공간 변화에 영향을 미칠 가능성이 매우 크다고 전망하고 있는데 이는 수자원 관리가 지금까지와는 다른 형태로 적응해나가야 함을 시사하고 있습니다.

빈번해진 봄가뭄과 이례적인 2014년의 여름가뭄은 지역적인 제한급수, 농작물 피해 및 가격상승을 유발하여 사회경제적으로 막대한 피해를 야기했습니다. 과거와 달라지는 기후조건에서 안정적인 수자원 확보와 공급을 위해서는 장기유출량 예측이 필요합니다. 장기유출량 예측은 다목적댐 및 용수전용댐에서 발생할 수 있는 피해를 예측하고 대응하기 위한 준비시간을 제공함으로써 기후변화 위험을 최소화하는 실질적인 대응책이 될 것입니다.

이에 본 연구에서는 APEC 기후센터에서 생산 및 제공하고 있는 장기기후 예측정보를 이용하여 갈수기의 다목적댐 유입량을 수개월 전에 예측하고 댐운영에 활용할 수 있는 방안을 제안하는 연구를 수행하였습니다. 이와 더불어 기후지수를 이용한 통계적 유량예측기법을 개발하고 역학적 댐유입량 예측과 결합하여 활용도를 높이는 연구 또한 수행하였습니다.

본 연구는 과거자료에 의존하는 전통적 수자원 운영방식에서 최신 기후과학을 활용하는 수자원 관리로의 패러다임 전환에 기여할 것입니다. 또한, 개발된 기술은 댐 및 저수지 운영뿐 아니라 장기 수자원 부존량 예측 등에 적용되어 안정적인 수자원 공급과 관리에 활용될 것입니다.

연구결과가 나오기까지 본 연구를 수행한 정일원 박사의 노고에 감사드립니다. 아울러 유진호 박사, 음형일 박사를 포함한 센터 연구진의 건설적인 조언에 감사드립니다. 또한, 기후지수를 활용한 통계적 댐유입량 예측에 큰 도움을 준 조재필 박사와 APCC 계절예측정보 활용에 도움을 준 김형진 박사, 오상명 연구원에도 깊이 감사드립니다.

2015. 3월
APEC 기후센터 소장
정진승

ABSTRACT

In South Korea multi-purpose dam serve important roles in contributing approximately 58 percent of annual water supply. Recent Korean dam operators are facing challenges in using traditional dam operation methods based on historical dam inflow data because of occurring more severe spring droughts in a changing climate. In 2014 longer-lasting drought from spring to early summer broke records in the lowest dam storage levels in several multi-purpose dams, inducing a restriction of water supply in some areas. To reduce the negative climate change and variability impacts on dam operation one of best options is that dam operators utilize long-range climate prediction information to have enough longer time to prepare for potential threat such as spring droughts.

This study developed two dry seasonal dam inflow prediction methods based on APEC Climate Center (APCC)'s seasonal climate prediction and teleconneciton between global climatic indices and historical dam inflow. To do this, we first evaluated the predictability of dry seasonal dam inflow forecast according to 10 climate models, 3 lead-times (i.e. 1-month, 2-month, and 3-month), five hydrological models with three different parameters' set, and three domain areas that are used to consider the effect of using different grid number of climate prediction (i.e. 1-point, 4-point, and 9-point). Second, teleconnection between observed dam inflow and climatic indices obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Prediction Center (CPC) was analyzed to develop statistical seasonal streamflow prediction models. Finally, we proposed the hybrid approach that uses the combination of dynamical and statistical prediction information based on their predictability to improve the reliability of dry seasonal dam inflow forecasts. In addition, this study suggested to employ risk matrix to efficiently utilize uncertain seasonal dam inflow prediction into managing real dam operation and developing long-term dam management strategies.

The following results were drawn from our analysis.

1) Dam inflow forecast using APCC's climate prediction (i.e. the dynamical approach) showed a significant predictability in every months with three different lead-times (0.05 confidence level). Especially, the predictability in January, March, and April with 1-month lead time showed best performance. However, the predictability were generally reduced as lead-time increases.

2) Using multi-model ensemble (MME) in the dynamical approach generally showed the better predictability compared to using the products by an individual model. MME showed the best performances or similar with the predictability of the best individual model when most of individual models showed positive correlation with observed value. However, the predictability of MME showed very low when some prediction showed positive correlation but the others had negative correlation.

3) The predictability of dam inflow was dependent on evaluation criteria (i.e. Pearson vs. Spearman rank correlation coefficients). Especially, the performance of using individual model product showed big difference by the selection of evaluation criteria. MME showed relatively less sensitive to the selection of criteria than using a individual model.

4) The performance of the dynamical approach was also highly affected by a combination of a climate model and hydrologic model selection. However, the predictability according to the prediction domain showed relatively small differences compared to the choice of climate model or hydrologic model.

5) Our results showed that the uncertainty in the dynamical seasonal prediction was mainly attributed to climate model prediction and hydrologic modeling. In the hydrologic modeling, the uncertainty caused by the different model structures was larger than those by model parameters. This finding indicates that the dynamical approach will be needed to seek optimal combination of climate models and runoff models to improve the predictability of seasonal dam inflow at a certain region.

6) Statistical approach using teleconnection between global climatic indices and dam inflow observation showed significant predictability in forecasting a dry seasonal dam inflow at the different lead-times (0.05 confidence level). In particular, March, April, and May showed a significant high predictability in the Soyang dam.

7) The verification of the statistical approach showed overall good performance for 2006-2011 which period was not used in developing the statistical models. This results indicated that statistical model has potential to apply for a real prediction, although further verification process using a longer observation will be needed to identify the availability of the statistical approach.

8) This study developed the hybrid approach for seasonal dam inflow forecast based on the dynamical and statistical prediction information. The statistical prediction can cover the wider range of lead times up to 12 months compared to those of dynamical approach (up to 3 months). For example, if a dam operator wants to predict March dam inflow in February, the dam operator can have the three dynamical forecasts (i.e. 1-month lead in February, 2-month lead in January, and 3-month lead in December) and eight statistical forecasts (i.e. 3-month lead to 12-month lead except 10-month & 11-month due to no significant forecast). Using 11 prediction the dam operator can understand mean March inflow and its uncertainty.

9) Finally, this study proposed a risk matrix to utilize seasonal dam inflow forecast in making decision on dam operation. This approach use a two-dimensional risk matrix that is consisted of 3 potential available water capacity (PAWC) and 3 likelihood ranges (i.e. low, medium, and high). PAWC is estimated by the function of current available dam storage, expected dam inflow (20yr low flow), and scheduled water supplies. The likelihood is defined in terms of probability of possible dam inflow based on dynamical and statistical prediction. The benefit of using the risk matrix is that it can easily identify the risk and allow for specified implementation of mitigation measures.

목차

한반도 여름철 기온 예측을 위한 경험적 모델 연구

발간사	i
ABSTRACT	iii
1. 연구의 개요	1
1.1 연구의 배경 및 필요성	1
1.2 연구의 목적 및 범위	3
1.3 연구방법 및 추진체계	4
2. 계절예측정보 국외 수자원관리 활용 사례	4
2.1 미국	4
2.2 호주	9
2.3 유럽	12
2.4 기타 계절유량예측 연구 사례	14
2.4.1 역학적(dynamical) 접근방법	14
2.4.2 통계적(statistical) 접근방법	17
2.5 시사점	20
3. 국내 다목적댐 운영	21
3.1 다목적댐 현황	21
3.2 홍수기와 갈수기 다목적댐 운영	23
3.3 봄가뭄시 다목적댐 운영 방안	24
3.4 기후예측정보 활용과 댐운영	27
3.5 시사점	33
4. 국내 유역 평균 강수량과 댐유입량의 변동 특성 분석	34
4.1 유역 평균 강수량의 변화 경향	34
4.2 댐유입량의 변화 경향	42
4.3 시사점	47

5. 계절예측정보를 활용한 갈수기 댐유입량 예측기술 개발	48
5.1 대상유역 및 자료	48
5.2 계절예측정보 및 편이(bias)보정	49
5.3 수문모델을 이용한 유입량 예측	51
5.4 원격상관기법을 이용한 통계적 예측모델 개발	53
6. 갈수기 댐유입량 예측성 평가	56
6.1 APCC MME를 활용한 갈수기 댐유입량 예측	56
6.2 원격상관을 이용한 갈수기 댐유입량 예측	71
7. 계절예측정보를 활용한 효율적 갈수기 댐운영 방안	81
7.1 Hybrid 계절예측정보를 활용한 댐운영 방안	81
7.2 Risk matrix 기반의 계절예측정보 댐운영 활용 방안	85
8. 결론	87
8.1 주요 결과	87
8.1.1 국내외 기후예측정보의 수자원활용 사례 분석	87
8.1.2 국내외 기후예측정보의 수자원활용 사례 분석	88
8.1.3 계절예측정보를 활용한 갈수기 댐유입량 예측기술 개발 및 평가	89
8.1.4 갈수기 댐운영 계절예측정보를 활용 방안	91
8.2 연구의 기대효과	92
8.3 향후과제	92
REFERENCES	94

1. 연구의 개요

우리나라의 연강수량은 증가추세에 있으나 계절적으로 봄철 강수량은 감소하고 여름철 강수량은 증가하는 경향을 보이고 있다(Jung et al., 2011). 이러한 강수량의 계절적인 편중의 심화는 유출량의 계절적 패턴의 변화를 야기해 안정적인 물공급에 어려움을 가중시키고 있다(Bae et al., 2008). 국내 연간 용수수요량의 약 65%(122억 m^3 /188억 m^3)가 다목적댐과 용수공급전용댐에 의해 공급되고 있는 현실에서 신뢰성 있는 댐유입량의 예측은 기후변화에 대비한 안정적인 수자원공급이라는 측면에서 현실적인 기후변화적응 기술이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 APEC 기후센터(APCC)에서 생산되는 역학적(dynamical) 기반의 계절예측정보와 원격상관 기반의 통계적(statistical) 예측정보를 활용하여 국내 다목적댐의 유입량을 예측하는 기술을 개발하고, 기후예측정보를 효율적으로 댐운영에 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

1.1 연구의 배경 및 필요성

우리나라는 연평균 강수량이 1,277.4mm로 세계 평균 강수량 807mm에 비해 약 1.6배가 많은 다우지역에 속한다(수자원장기종합계획, 2006). 그러나 연강수량의 50~60%가 여름(6월~9월)에 집중되어 내리는 강수량의 편중현상으로 인해 봄철 가뭄과 여름철 홍수가 반복적으로 발생하는 문제점을 지니고 있다. 수문지형학적 측면에서도 국내 유역은 토양층이 얇고 하천의 경사가 급하다. 이로 인해 실제 이용 가능한 수자원량은 전체의 26% (333억 m^3 /1,297억 m^3) 정도로 이용률이 매우 낮고, 나머지는 바다로 유실되거나 증발 또는 침투된다. 이러한 문제를 해결하고 제한된 수자원의 효율적인 활용을 위해 댐, 저수지 등의 용수공급시설이 건설되어 왔다.

국내 주요 용수공급시설로 K-water(수자원공사)에서 운영하는 다목적댐이 있다. 다목적댐은 1965년 섬진강댐 건설을 시작으로 2014년 현재 16개소가 운영되고 있다. 다목적댐은 약 58%(109억 m^3 /188억 m^3)의 용수공급과 약 42%(22억 m^3 /52억 m^3)의 홍수조절을 담당하고 있다. K-water는 다목적댐의 안정적 운영을 위해 홍수기에는 홍수제한수위 이하로 댐을 운영하면서 댐하류의 홍수를 방지하고, 갈수기에는 저류된 물을 공급하면서 가뭄피해를 저감하는데 기여하고 있다.

K-water는 갈수기동안 관측 20년 갈수빈도 크기의 유량이 댐으로 유입될 것이라는 가정하에 댐을 운영하고 있다. 그러나 최근 기후변화에 기인한 국내 기후의 연변동성의 증가는 다목적댐 운영에 불확실성을 증가시켜 안정적인 용수공급에 어려움을 가중시키고 있다(Jung et al. 2011, 2013). 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 금년(2014년)에는 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 수자원공사는 댐운영에 큰 어려움을 겪었다.

최근 기후변동으로 인해 기후특성이 과거와는 다른 양상을 보이고 있으며, 예상되는 기후변화는 기후의 변동성을 증대시킬 것으로 전망되고 있다(Milly et al., 2008). 이러한 상황에서 과거 관측자료에 기반한 현재의 다목적댐운영계획 수립은 신뢰성과 활용도가 낮아질 가능성이 크다. 따라서 기후변화에 대비한 안정적인 물공급 및 관리를 위해서는 과학적인 계절기후예측정보를 댐운영에 적극 활용하는 방향으로의 개선이 필요하다.

수개월(1-6개월)의 선행시간(lead time)을 가진 계절기후예측정보는 갈수기 다목적댐 운영에 필수적인 중장기적 댐유입량 예측정보를 제공하여 발생 가능한 위험(예, 용수수급부족)을 사전에 회피하도록 한다는 측면에서 활용가능성이 점차 증대되고 있다(e.g., Koster et al. 2010). 국내에서는 기상청 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System) 10일 예측정보를 이용하여 중기 유량예측에 대한 연구는 수행되었으나(이재경 등, 2006), 계절기후예측정보를 다목적댐 운영에 활용한 사례는 드물다. 이는 계절기후예측정보가 가지는 신뢰성에 대한 인식의 부족과 계절기후예측정보를 댐운영에 활용하기 위한 가이드라인의 부재 등이 가장 큰 요인인 것으로 판단된다.

신뢰성 있는 수자원계절예측 기술을 개발하기 위해서는 계절기후예측정보의 정확도가 확보되어야 한다. 기후과학의 발전과 더불어 계절예측기술은 지속적으로 개선되고 있다. 그러나 현재 기술수준에서 댐운영자들이 원하는 신뢰도를 가진 기후예측정보를 제공하는 수준에는 아직까지 미치지 못하고 있다(Shukla and Lettenmaier, 2013). 이는 기후예측정보의

신뢰도가 지역적으로 차이가 있는 것과 기후모델 결과의 해상도가 유역스케일과 차이가 크기 때문이다. 일반적으로 중위도지역의 기후내부의 변동성(internal chaotic variability)이 상대적으로 열대지방에 비해 크기 때문에 기후예측정보의 예측성이 낮은 것으로 알려져 있다(Palmer and Anderson, 1994). 또한, 기후모델에서 생산되는 저해상도의 기후예측정보는 우리나라와 같이 좁고 복잡한 지형으로 인해 국지적 기후특성이 강한 지역에서 예측성이 상대적으로 낮을 수 있다(정일원, 2013).

따라서 이러한 지역 기후예측의 불확실성을 극복하고 역학적 기후예측정보의 활용성을 높이기 위한 부가적인 예측기술이 필요하다. 이러한 노력의 일환으로 최근 기후예측정보와 경험적 원격상관(teleconnection) 정보를 조합한 Hybrid 접근방법은 기후응용분야에서 예측정보의 신뢰성을 향상시키기 위한 방법으로 주목받고 있다(e.g., Robertson and Wang, 2012; Schepen et al., 2012). 현재 호주에서는 유역별 특화된 수자원계절 예측정보를 생산하기 위해 Hybrid 기법이 이용되고 있다(www.bom.gov.au). 국내에서도 원격상관을 활용한 수자원예측연구는 꾸준히 진행되어 왔으며, 적용 가능성이 여러 연구들에 의해 검증되었다(e.g., Kim et al., 2007; 김연희 등, 2008; 김지영과 박혜진, 2010). 따라서 기후모델링 예측정보와 통계적 원격상관의 장점을 활용할 수 있는 Hybrid 담유입량 예측기법의 개발을 통해 국내에서 APCC 계절예측정보의 수문학적 활용 가치를 제고하는 기법을 제안하고자 한다.

1.2 연구의 목적 및 범위

본 연구의 목적은 APCC 계절예측정보와 원격상관기법을 이용한 갈수기 담유입량 예측기술을 개발하고, 이를 다목적댐 운영에 효율적으로 활용하기 위한 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 APCC 계절예측정보를 이용하여 역학적 기반의 갈수기 담유입량 예측성을 평가하고, 글로벌 기후인자와 담유입량의 원격상관을 분석하여 통계적 기반의 예측기법을 개발한다. 마지막으로 이 두 가지 예측정보를 조합하여 갈수기 다목적댐의 유입량 예측의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법을 제안한다.

연구의 공간적 범위는 국내에 위치한 주요 다목적댐 중에서 관측자료 기간이 길고, 유입량에 인위적인 영향이 적고, 유역면적이 큰 소양강댐 유역을 대상으로 한다. 시간적인 범위는 댐별 가용한 유입량 자료기간과 APCC 계절예측정보 hindcast(1983–2005) 기간을 활

용한다. 갈수기의 정의는 다양하나 본 연구에서는 평균적으로 댐유입량 보다 공급계획량이 많은 1월부터 6월까지로 정한다.

1.3 연구방법 및 추진체계

본 연구에서는 문헌 및 인터넷 조사를 통해 계절예측정보를 수자원관리에 활용한 국내외 사례를 조사하고 외국 사례의 시사점을 도출한다. 국내 다목적댐의 운영 및 현황을 조사하고, 봄가뭄시 다목적댐 운영 방안을 분석한다. 기후정보를 활용한 댐운영의 중요성을 2008-2009년 광동댐 사례를 중심으로 살펴보고 개선점을 도출한다. 국내 댐유입량과 댐유역 강수량의 과거 변동특성을 분석해 기후 변동과 기후변화가 국내 댐운영에 미칠 수 있는 영향을 분석하고, 계절예측정보의 댐운영 활용이 직면한 기후변화로 인한 부정적인 영향을 줄이는데 기여할 수 있는 방안을 모색한다.

계절예측정보와 원격상관을 활용한 갈수기 다목적댐 유입량 예측기술을 개발하기 위해 APCC 현업 예보에 이용되는 10개 기후모델 결과에 대한 유입량 예측성을 소양강댐을 대상으로 평가하고, 글로벌 기후인자와 댐유입량의 통계적 상관성을 분석하여 다변량 통계예측 모델을 개발한다. 이러한 기후예측정보를 조합하여 갈수기 최적 댐유입량 예측방안을 모색한다. 마지막으로 본 연구에서 도출된 예측정보를 갈수기 댐운영에 효율적으로 연계하기 위한 활용방안을 제시하고 연구의 미비점과 향후 개선점을 도출한다.

2. 계절예측정보 국외 수자원관리 활용 사례

2.1 미국

미국은 기후모델에서 생산되는 계절예측정보를 가뭄 예측 및 관리에 주로 활용하고 있다. 계절예측정보는 국립해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 생산되는 기후예측정보를 4개의 지표수문해석모델(Land Surface Model)인 Noah, VIC, Mosaic, SAC에 입력하여 유출량과 토양수분을 산정하고 이 정보를 가뭄지수로 환산하여 제공하고 있다. 가뭄 예측과 별개로 미국의 가뭄 모니터링(Fig. 1)은 1999년에 설립된 USDM(United States Drought Monitor)에서 매주 목요일 아침(동부시간 기준) 미전역

의 350개 이상 기관에서 관측되는 기후, 수문, 토양 관측정보를 기반으로 제공하고 있다. 미국은 2006년 국립해양대기청을 중심으로 국가 통합 가뭄 정보 시스템(National Integrated Drought Information System, NIDIS)을 구축하고 부처간 산재해 있는 가뭄 모니터링, 예측, 조기 경보 시스템을 통합하여 미국가뭄포털(U.S. Drought Portal) (www.drought.gov)을 통해 제공하고 있다.

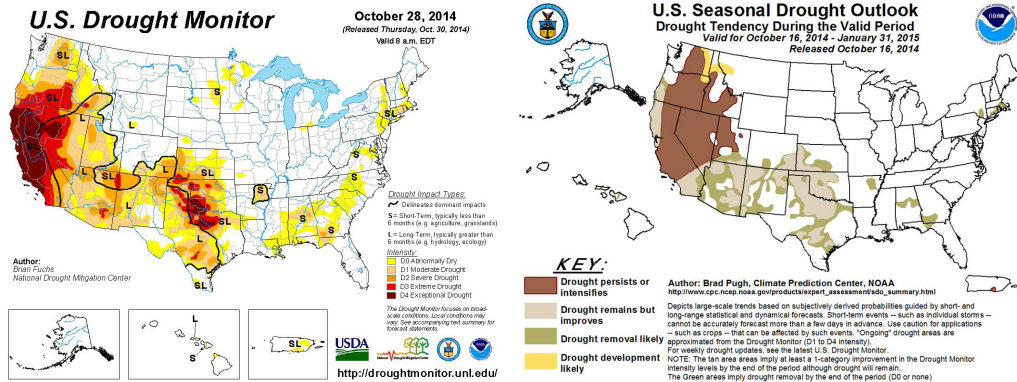


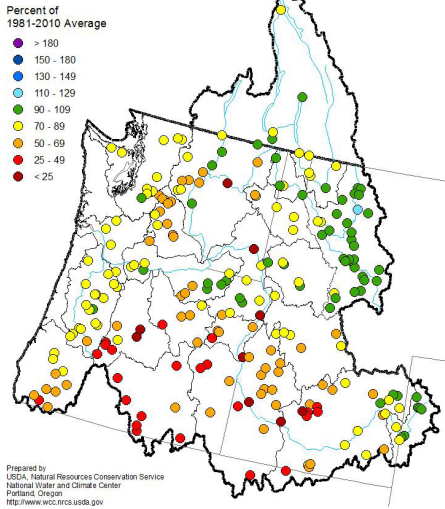
Figure 1. U.S. drought monitor (<http://droughtmonitor.unl.edu/>, left) and U.S. seasonal drought outlook (www.cpc.ncep.noaa.gov/, right)

미국가뭄포털에서는 NRCS(Natural Resources Conservation Service), 미기상청(National Weather Service), 워싱턴대에 위치한 Climate Impacts Group(CIG)에서 제공하는 계절유량예측 정보도 서비스하고 있다.

NRCS는 계절유량과 적설, 강수, 이전 시점의 유출량과의 통계적 관계를 이용하여 물공급가능유량을 예측하고 30년 평균유량에 대한 백분율과 예상되는 유량의 확률정보를 제공하고 있다(http://www.wcc.nrcs.usda.gov/factpub/wsf_primer.html) (Fig. 2). NRCS는 물공급가능량 예측의 정확도를 향상시키기 위해 통계모델 기법과 관측정보수집 기술을 지속적으로 개선하고 있다. 예로, 적설(snowpack)이 봄과 여름철 유량의 80% 이상에 기여하는 미서부 고지대 유역에 대한 예측성을 향상시키기 위해 시단위 적설 및 기후정보를 수집하고 있다. 최근에는 글로벌 및 지역 규모의 기후인자인 ENSO(El Niño Southern Oscillation)와

PDO(Pacific Decadal Oscillation) 등이 적설과 유출량에 미치는 영향에 대한 이해가 증진됨에 따라 이 정보를 이용하여 유량예측의 정확성을 향상시키기 위한 연구를 추진하고 있다.

**Columbia River and Pacific Coastal Basins
Spring and Summer Streamflow Forecasts
as of January 1, 2014**



**Colorado, Rio Grande, and Arkansas River Basins
Spring and Summer Streamflow Forecasts
as of January 1, 2014**

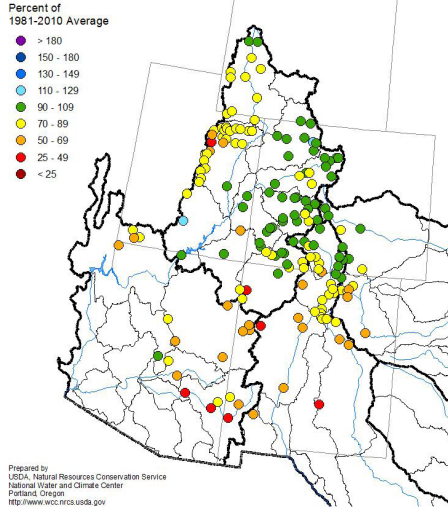


Figure 2. NRCS's spring & summer streamflow forecast maps for the Columbia River (left) and the Colorado River (right)

미기상청은 미국지질조사국(USGS)에서 제공하는 하천 모니터링 정보를 기반으로 AHPS(Advanced Hydrologic Prediction Service) 시스템을 통해 홍수와 갈수기 하천수위에 대한 모니터링 및 예측정보를 제공하고 있다. Fig. 3은 2,280개 지점에서 하천유량이 향후 3개월 동안 홍수위를 초과할 확률을 7단계(5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95%)로 구분하여 나타내고 있다. 이 예측정보는 앙상블유량예측(ensemble streamflow forecast) 기법을 이용하여 생산된다. 앙상블유량예측은 과거 기후가 미래에도 재현된다는 정상성의 가정하에 유출모형을 이용하여 현재의 유출상태를 재현하고, 발생 가능한 과거 관측기후자료를 예측정보로 가정하여 미래의 유량을 예측하는 기법이다. Fig. 4는 미기상청과 국립해양대

기청이 공동으로 구축한 미 북서부지역의 하천유량 10일 및 120일 예측정보 제공 시스템이다. 이 시스템에서는 하천유량 예측정보를 생산하기 위해 기후예측센터(Climatic Prediction Center, CPC)에서 생산되는 중장기 강수, 최고기온 및 최저기온 예측정보를 이용한다.

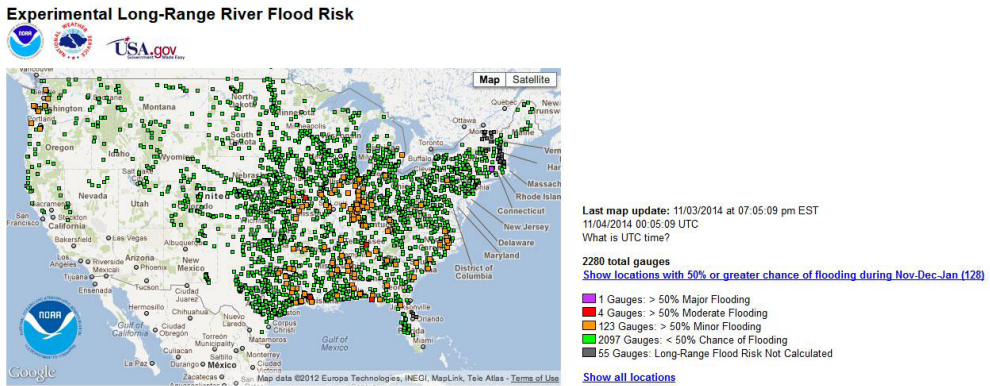


Figure 3. NOAA's experimental long-range river flood risk (<http://water.weather.gov/ahps/long-range.php>)

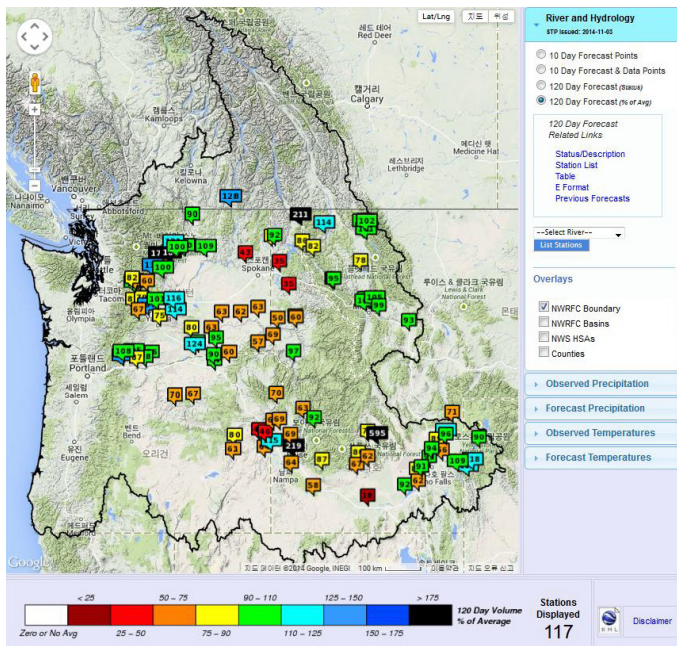


Figure 4. Northwest river forecast (www.nwrfc.noaa.gov/rfc/)

워싱턴대 CIG에서는 프린스턴대와 공동으로 미서부지역에 대한 6개월 계절유량예측 정보를 제공하고 있다(Fig. 5). 유량예측을 위해 세가지 방법이 이용되는데, 1) 통계적기반의 앙상블유량예측(ESP-based approach), 2) 기후모델(NCEP Coupled Forecast System, NCEP CFS, NASA/GMAO Seasonal-to-Interannual prediction project Tier 2 forecast)에서 생산되는 예측정보를 이용한 앙상블 예측(NSIPP/NCEP-CFS based approach), 3) CPC의 계절예측정보를 통계적으로 상세화한 예측정보를 이용하는 방법(CPC outlook-based approach)이 있다. ESP-based approach는 1960-1999년 관측기후정보를 기반으로 ENSO와 PDO 조건에 따른 과거 관측기후의 유사성을 이용하여 유출량을 예측하고 있다. NSIPP/NCEP-CFS based approach는 기후모델에서 생산되는 강수와 기온 예측정보를 편의보정, 1/8° 격자스케일로 공간적 상세화, 월자료를 일자료로 시간적 상세화 과정을 거쳐 VIC(Variable Infiltration Capacity) 수문모델을 통해 정보를 생산한다(Wood et al., 2002). CPC outlook-based approach는 CPC에서 제공하는 102개 기후지역의 월 기온과 강수 초과 확률(Probability of exceedence) 예측정보를 기반으로 통계적기법을 적용하여 30개의 강수와 기온 앙상블 멤버로 변환한 다음 VIC 모델을 통해 30개의 유량예측앙상블을 생산한다.

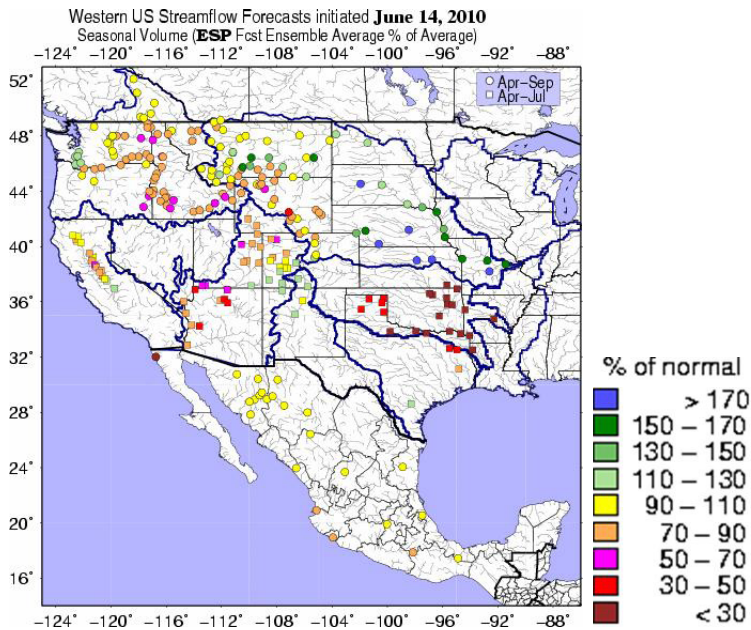


Figure 5. ESP forecast ensemble average of Western U.S. streamflow forecast generated by University of Washington and Princeton University (www.hydro.washington.edu/forecast/westwide/sflow)

2.2 호주

호주기상청 (Bureau of Meteorology, BoM)은 하천유량 모니터링, 홍수에경보, 계절유량 예측 등의 정보를 실시간으로 제공하고 있다. 호주에서 계절유량예측은 댐운영, 하천유지유량, 물분배 (water allocations), 제한급수 (water restrictions), 농업관련 의사결정을 위해 활용되고 있다. 현재 호주기상청에서는 86개 주요하천지점에 대한 3개월 계절예측정보를 매월 제공하고 있으며, 예측정보의 활용성을 높이기 위해 예측결과에 대한 신뢰도, ENSO 등의 기후인자와 연계한 분석 정보, 교육용 비디오 등을 서비스하고 있다 (Fig. 6). 호주기상청은 2015년까지 계절 유량예측 서비스를 현 86개소에서 200개 지점까지 확대할 예정이다.

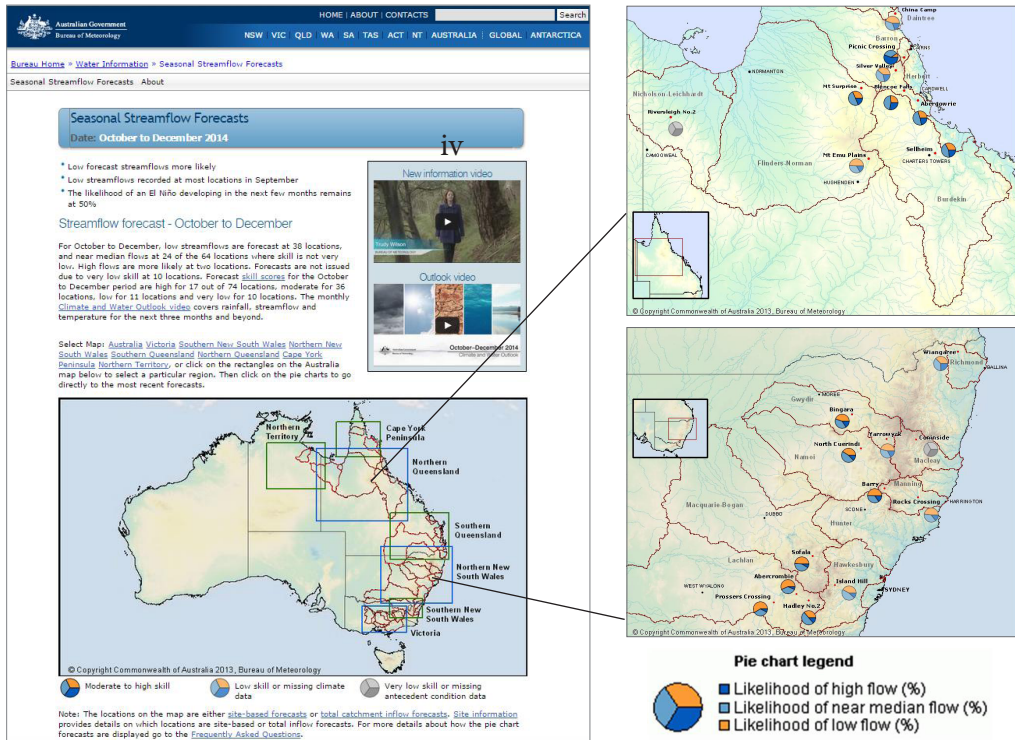


Figure 6. Australia's seasonal streamflow forecasts (www.bom.gov.au/water/ssf/)

호주의 계절유량예측은 호주기상청의 POAMA(Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia) 기후모델의 결과를 이용하여 생산되는 역학적 예측정보와 글로벌 기후인자를 이용한 통계적 예측정보를 결합하는 방법으로 생산된다(Fig. 7).

역학적 예측은 먼저 Analogue 상세화 기법(Timbal et al., 2008; Shao and Li, 2013)을 이용하여 POAMA에서 생산된 기후예측정보(~270km)의 편이(bias)를 보정하고 5km 해상도로 상세화된 155개의 앙상블 정보를 생산한다. 그 다음 이 상세화된 기후정보를 GR4J 유출모델에 입력하여 유출 앙상블 자료를 생산하는데, 유출모형 매개변수(parameter)의 불확실성을 고려하기 위해 각 기후예측 앙상블 멤버에 대해 40번의 유출모의가 수행된다. 결과적으로 총 6200개(=155×40)의 유량예측 앙상블 멤버가 생성되고, 이를 기반으로 유량예측 확률분포를 산정한다(Kuczera et al., 2006).

통계적 예측은 기후모델이나 유출모델을 이용하지 않고, ENSO 등의 글로벌 기후인자와 하천유량과의 원격상관에 기반한 통계예측모델을 이용한다. 호주기상청에서 이용하는 통계모델은 호주연방과학원(CSIRO)에서 개발되었다(Wang et al., 2009). 이 통계모델은 예측시점 이전의 하천유량 상태와 기후인자를 이용하여 향후 3개월의 하천유량을 확률적으로 예측한다.

역학적 예측정보와 통계적 예측정보를 결합하기 위해 각 정보의 확률밀도함수의 누적확률밀도함수를 계산하고, 관측자료의 누적확률밀도와 비교하여 각각의 누적확률에 대한 경험적인 가중치(weight)를 산정한다(Fig. 8). 여기서 가중치는 역학적 예측정보와 통계적 예측정보의 관측유량예측에 대한 정확도에 근거하여 결정된다.

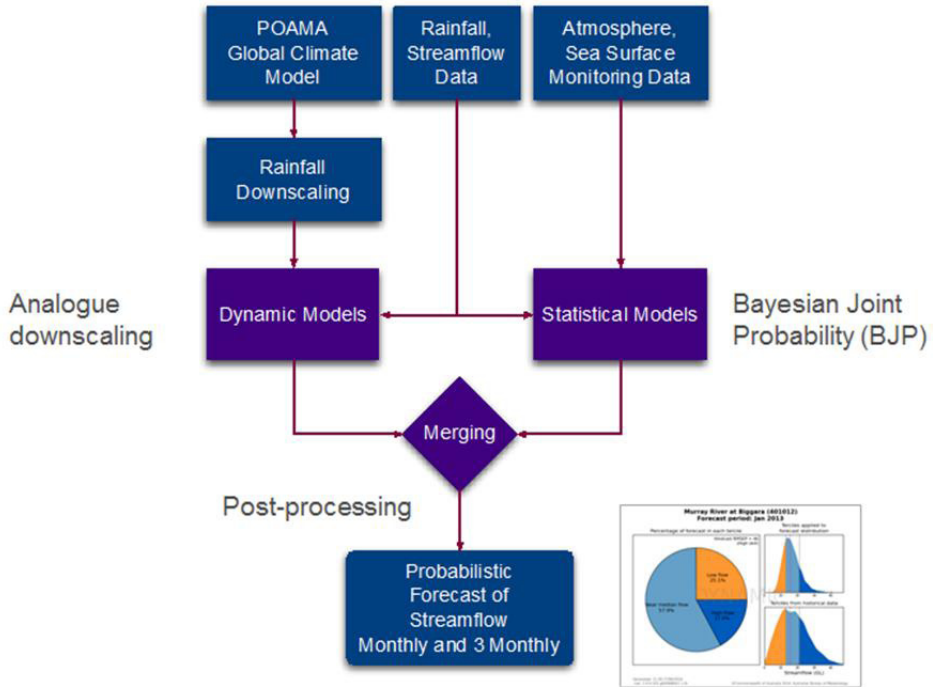


Figure 7. Generation process of seasonal streamflow forecasts (www.bom.gov.au/)

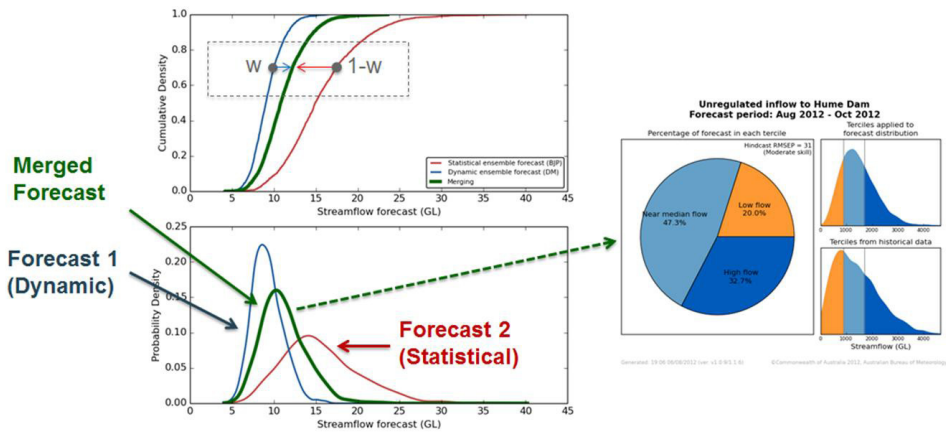


Figure 8. Merging method of dynamic forecasts and statistical forecasts (www.bom.gov.au/)

2.3 유럽

유럽에서는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)와 영국기상청(Met office)을 중심으로 기후예측정보를 제공하고 있다. 영국기상청은 대기해양접합모델인 GloSea5 기후모델을 이용하여 전구에 대해 6개월 선행예측정보를 생산하고 있다. 1975년 설립된 유럽중기예보센터는 15일 단기예측, 30일 월간예측, 12개월의 계절예측정보를 유럽지역에 대해 제공한다. Fig. 9는 유럽중기예보센터에서 제공하는 열대지역의 강수와 기온에 대한 계절예측정보를 보여주고 있다. 유럽중기예보센터는 열대지역 이외에도 동아시아, 아프리카, 남아메리카 지역에 대해 1-4개월의 예측정보를 제공하고 있다. 유럽중기예보센터는 엘니뇨관련 NINO 3, NINO 3.4, NINO 4와 열대사이클론 장기 예측정보도 제공하고 있다.

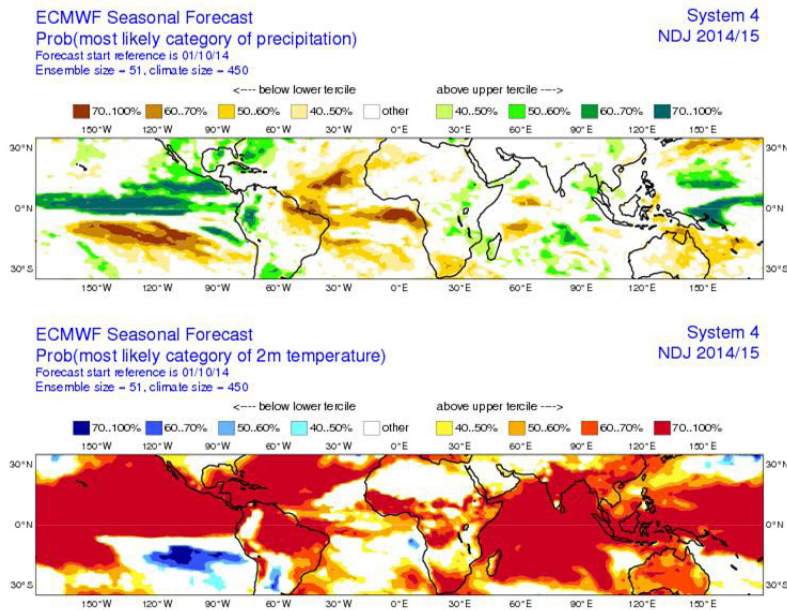


Figure 9. ECMWF's probabilistic seasonal forecasts for precipitation (upper) and 2m temperature (lower) (<http://www.ecmwf.int/en/forecasts/>)

유럽중기예보센터에서는 현재 계절유량예측 정보를 제공하고 있지 않다. 다만 연구프로젝트로 유럽전지역에 대해 15일 이전에 홍수발생확률을 제공하기 위한 홍수감지시스템(Flood Awareness System, 2011-2016년) 개발, 아프리카 지역에 중기 및 계절예측정보를 이용한 가뭄 조기경보와 예측정보 제공 시스템(2011-2013) 개발 등을 수행하고 있다.

수자원계절예측과 관련해서 유럽에서는 EUPORIAS(European Provision of Regional Impacts Assessments on Seasonal to Decadal Timescales) 프로그램을 운영중에 있다(Fig. 10). 이 연구는 유럽위원회(European Commission)의 지원 하에 2012년부터 2017년까지 수행되는 과제로 기후예측정보를 이용하여 기후변화와 기후변동에 대비하고 사회적 이익을 극대화 할 수 있는 능력을 향상시키기 위한 프로토타입(prototype)을 개발하기 위해 기획되었다.

EUPORIAS는 다섯 개의 자체과제와 외부지원으로 추진하는 한 개 과제를 포함해 총 여섯 개의 프로토타입 개발을 진행하고 있다. 다섯 개 프로토타입 연구는 1) 겨울기후 조건이 영국의 교통 네트워크에 미치는 영향, 2) 계절예측정보를 이용한 에티오피아의 식량안보 조기경보시스템 개발, 3) 영국 남서부지역의 농업 생산량과 토지 관리 기술 개발, 4) 기후정보를 활용한 유럽 풍력에너지 생산 네트워크 강화사업, 5) 프랑스 두 개 유역에 대한 하천관리 기술 개발 사업을 포함한다. 다른 하나의 사업은 스웨덴 기상수문연구소(SMHI)가 지원하는 사업으로 계절예측정보를 이용하여 스웨덴의 수력발전댐의 유입량을 예측하는 기술을 개발하는 것이다. EUPORIAS는 기후정보가 다양한 응용분야의 의사결정자에게 직접적으로 활용될 수 있는 방법을 제시함으로써 기후변화에 대한 유럽 사회의 탄력성을 증가시키는데 기여할 것으로 예상되고 있다.



Figure 10. EUPORIAS homepage (www.euporias.eu)

2.4 기타 계절유량예측 연구 사례

계절유량예측의 접근방법은 크게 기후모델(GCM) 결과를 이용하여 유량을 예측하는 역학적 방법과 기후인자와의 통계적 상관성을 이용하여 예측하는 통계적 방법으로 구분된다.

2.4.1 역학적(dynamical) 접근방법

역학적 방법은 유출모델링에 필요한 기후변수를 기후모델로부터 직접적으로 제공받을 수 있는 장점이 있다. 반면 유역규모의 수문모델링에서 요구되는 시공간 규모의 기후정보에 비해 기후모델에서 생산되는 정보의 해상도가 낮아 이를 극복하기 위한 역학적 또는 통계적 상세화(downscaling) 기법이 추가적으로 요구되는 단점이 있다(Table 1).

기존 연구들에서는 기후모델의 결과와 관측 기후요소와의 경험적 관계를 이용하는 통

계적 상세화 기법(e.g., Wood et al., 2005)을 주로 이용하였다. 대표적인 통계적 상세화 기법으로는 다중회귀분석(e.g., Sankarasubramanian et al., 2008), 정준상관분석(CCA)(e.g., Landman et al., 2001), BCSD(e.g., Wood et al., 2005) 등이 있다. 최근에는 기후예측모델의 계절예측정보와 관측 기후인자의 최적 관계를 확률적으로 찾아주는 베이지안 상세화 기법이 많이 적용되고 있다(e.g., Coelho et al., 2006; Luo et al., 2007). 일부 연구들은 기후예측 정보를 베이지안 기법으로 상세화한 접근방법이 전통적인 앙상블 유량예측기법에 비해 우수한 예측성능을 보인다고 제시하였다(e.g., Luo and Wood, 2008).

통계적 상세화에 비해 지역기후모델(Regional climate model, RCM)을 이용한 역학적 상세화 방법을 적용한 연구사례(e.g., Leung et al., 1999; Kim et al., 2000; Block et al., 2009)는 많지 않다. 주원인은 역학적 방법이 통계적 방법에 비해 시간과 비용이 많이 필요하고 기후모델링에 대한 전문성이 요구되기 때문이다. 또한, 지역기후모델에서 생산되는 고해상도의 지역 기후예측정보도 편이(bias)를 포함하고 있기 때문에 수문모델에 적용하기 위해서는 통계적인 편이보정 등의 추가적인 작업이 요구된다. 그러나 지역기후모델링의 신뢰성을 높이기 위한 연구가 기후전문가그룹을 중심으로 꾸준히 진행되고 있어 향후 지역규모 수자원 예측에 대한 활용성이 확대될 것으로 기대된다. 일례로, 미국 콜롬비아강 유역을 대상으로 한 연구에서 역학적으로 상세화된 결과를 활용한 경우가 기후모델(GCM) 결과를 직접 이용하는 것보다 수자원 예측에서 좋은 성능을 보였다(Leung et al., 1999).

Table 1. Previous studies on the dynamical approaches used for seasonal streamflow prediction (modified from Lavers (2010))

Study region	Climate models	Downscaling approach	Reference
USA (California)	UCLA GCM	Regional climate system model (RCSM)	Kim et al., 2000
USA (Northwest/ Columbia basin)	NCEP MRF model T40	PNNL RCM	Leung et al., 1999
USA (Eastern/ Ohio basin)	CFS/DEMETER	Bayesian approach	Luo et al., 2007 Luo and Wood, 2008
USA (Eastern)	NCEP GSM	Bias correction and statistical downscaling (BCSD)	Wood et al., 2002
USA (Western)	NCEP GSM	BCSD	Wood et al., 2005
USA (West)	NASA NSIPP and NOAA/NCEP	BCSD	Wood and Lettenmaier, 2006
France	DEMETER	Two-step method	Ceron et al., 2010
Global	JMA GSM	None used	Nakaegawa et al., 2007
Philippines	ECHAM4.5	Principal components regression	Sankarasubramanian et al., 2008
South Africa	COLA Studies T30	CCA-based perfect prognosis approach	Landman et al., 2001
Brazil	ECHAM4.5/ NCEP MRF 9	RCM	Block et al., 2009
South America (Parana/ Tocantins basins)	DEMETER	Bayesian approach	Coelho et al., 2006

2.4.2 통계적(statistical) 접근방법

통계적 예측방법은 대상변수(예, 유출량, 강수량)와 예측변수(예, 해수면온도) 사이의 시간적으로 지체된(lagged) 경험적 관계를 이용한다(Table 2). 일반적으로 통계적 방법은 역학적 방법에 비해 비용이 저렴하고 예측성능도 유사한 수준을 보여 수자원예측에 많이 적용되고 있다(e.g., Barnston et al., 2005; Wood and Lettenmaier, 2006). 최근 원격탐사(Remote sensing)와 관측기술의 발전으로 지표, 대기, 해양의 상태를 정밀하게 관측할 수 있게 되었고, 이들 대규모의 기후패턴이나 해양의 상태가 지역적인 수문순환에 미치는 영향이 과학적으로 일부 규명됨에 따라 활용성이 증대되고 있다. 그러나 통계적 방법은 관측자료에 기반하기 때문에 기후 및 수문 자료의 품질, 자료기간 등에 민감하고 관측자료가 없거나 짧은 지역에서는 적용이 어려운 단점이 있다.

기상이변의 주요 원인 중 하나로 꼽히는 대표적인 대기-해양 순환 패턴인 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)는 다양한 지역에서 하천유량의 장기 변동성을 예측하는데 유용한 인자로 활용되고 있다(Table 2). Dracup and Kahya (1994)는 미국 4개 지역인 멕시코 만, 북동부, 북중부, 북서태평양에서 ENSO의 역상관관계 지수인 SOI(Southern Oscillation Index)가 유용한 하천유량 예측인자로 사용될 수 있음을 보였다. Gutiérrez and Dracup (2001)도 ENSO를 이용한 통계적 방법이 미국 콜롬비아강 유역의 댐유입량 예측에서 ENSO를 고려하지 않은 전통적인 유량예측방법에 비해 우수하다고 주장하였다.

ENSO가 하천유량에 미치는 영향은 지역별로 다르다. 기존 연구들에 따르면 엘리뇨(El Niño)는 남아메리카(Tootle et al., 2008), 열대 중앙아메리카, 북아메리카 북서부 와 동부, 유럽의 하천에서 저유량(low flow)과 연관성이 있다. 반면 북아메리카의 남서부(Barlow et al., 2001), 남아메리카 아열대 및 유럽 지역(Dettinger and Diaz, 2000)에서는 하천의 고유량(high flow)과 엘리뇨(El Niño)가 상관성이 있다고 보고되었다. 엘리뇨의 상반되는 현상인 라니냐(La Niña)가 발생할 경우에는 위에서 언급한 대부분의 지역에서 엘리뇨와 하천유량의 상관관계가 반대로 나타난다(Dettinger and Diaz, 2000).

ENSO 등의 기후인자가 하천유량예측에 유용하게 활용될 수 있음이 여러 연구들에 의해 증명되면서 ENSO 관련 지표(e.g., NINO 3.4, NINO 4, SOI)에 대한 연구와 더불어 다른 기후 지표(e.g., NAO, OLR, SLP)을 이용한 연구들도 활발히 진행되고 있다. Wilby (2001)는 1월

과 2월의 NAO (North Atlantic Oscillation)가 영국의 주요 세 유역에서 8월 유출량 변동성의 40%를 설명한다고 제시하였다. Kiem and Franks (2001)는 하나의 기후지표보다는 여러 지표들을 이용하는 것이 하천유량예측을 개선할 수 있다고 제안하였다. Wilby et al. (2004)은 겨울철 SST, 해양얼음면적, 대기순환패턴 세 개를 이용하여 영국 템즈강의 여름철 유출량을 예측하였다. Xu et al. (2007)은 OLR(outgoing longwave radiation), 적설면적, SLP(sea level pressure)를 이용하여 중국 양자강 유역에 위치한 삼협댐의 계절유량 변화를 설명하였다.

기후인자와 하천유량을 연결하는 통계적 기법은 연구자에 따라 다양하다. 선형회귀는 가장 대표적인 기법으로 다양한 사례연구에 활용되었다(e.g., Wilby, 2001; Svensson and Prudhomme, 2005; Ruiz et al., 2007). Bierkens and Van Beek (2009)는 SVD (singular value decomposition) 방법을 이용하여 유럽지역의 계절유량예측을 수행하였다. Chandimala and Zubair(2007)은 스리랑카의 주요 하천인 Kelani 강을 대상으로 농업시즌인 Yala(4-9월)과 Maha(10-3월) 기간의 유량예측을 위해 주성분분석(PCA) 기반의 회귀모델을 적용하였다. Kuo et al. (2010)는 해수면온도(SSTs)를 이용하여 계절강수량을 예측하기 위해 wavelet-based 인공신경망(ANN) 기법을 활용하였다. Kalra et al. (2013)은 인공지능타입의 data-driven 모델인 SVM(Support Vector Machine) 기법을 적용하여 미국의 North Platte 강의 유출량을 예측하였다.

Table 2. Previous studies on the statistical approaches used for seasonal streamflow prediction (modified from Lavers (2010))

Study region	Statistical method	Predictor	Reference
Africa (Nile)	Linear regression	ENSO	Eldaw et al., 2003
Africa (upper Blue Nile)	ANN-GA/ Wavelet analysis	Sea surface temperatures (SSTs)	Elsanabary and Gan, 2014
Asia	Correlation/CCA	SSTs	Barlow and Tippett, 2008
Australia	Serial streamflow correlation	ENSO	Chiew et al., 2003
Australia	Combination of three statistical models	ENSO	Chowdhury and Sharma, 2009
Australia	Classification approach	ENSO	Kiem and Franks, 2001

Study region	Statistical method	Predictor	Reference
Australia	Linear regression	ENSO	Ruiz et al., 2007
Australia	Correlation	ENSO	Kirono et al., 2010
Australia	Bayesian approach	ENSO	Wang et al., 2009
Bangladesh/India (Ganges)	Linear regression	ENSO	Whitaker et al., 2001
Europe	Lagged SVD	NAO	Bierkens and Van Beek, 2009
Europe	ARMA/Linear regression	SSTs	Gámiz-Fortis et al., 2010
Europe (River Elbe)	Correlation	Global Temperature and Precipitation	Ionita et al., 2008
New Zealand	Classification approach	ENSO	Mckerchar et al., 1998
New Zealand	Linear regression	ENSO	Purdie and Bardsley, 2010
Pakistan	Linear regression	Temperature and precipitation	Archer and Fowler, 2008
South America (Parana basin)	Linear regression	ENSO	Cardoso and Silva Dias, 2006
South America (Colombia)	Correlation	ENSO	Gutiérrez and Dracup, 2001
South America	Correlation/linear regression	ENSO	Hastenrath, 1990
Sri Lanka	Principal component regression	SSTs, ENSO	Chandimala and Zubair, 2007
Sri Lanka	Correlation	SSTs, ENSO	Zubair, 2003
Taiwan	Wavelet-based ANN-GM	SSTs	Kuo et al., 2010
UK	Correlation	NAO, POL, SSTs	Wedgbrow et al., 2002
UK	Expert systems	NAO, POL, SSTs	Wedgbrow et al., 2005
UK	Linear regression	SSTs, Temperature, airflow	Svensson and Prudhomme, 2005
USA (Eastern)	Regression approach	SSTs, ENSO	Devineni et al., 2008
USA (Western)	KNN LWP regression	500hPa geopotential height, SSTs, Zonal Wind, SWE	Bracken et al., 2010
USA (NPRB)	SVM	NAO	Kalra et al., 2013

2.5 시사점

국의 계절예측정보를 수자원관리에 활용한 사례조사를 통해 국내 계절예측정보의 활용 및 서비스 측면에서 고려해야 할 시사점을 아래와 같이 도출하였다.

첫째, 실효성 있는 계절예측정보 수자원 활용을 위해 선진국은 역학적인 접근방법과 통계적인 접근방법을 동시에 고려하고 있다. 기후모델에서 생산되는 기후예측정보가 현실적인 수자원관리에 직접 활용하기에는 아직까지 예측정확도 측면에서 수자원관리자가 요구하는 수준에는 미흡하므로, 이를 보완하기 위해 원격상관을 이용한 통계적 예측 기법을 병행하여 이용하고 있다. 역학적인 예측정보와 통계적 예측정보를 결합하는 기술적인 측면에서는 호주가 가장 앞서 있는 것으로 분석되었다.

둘째, 기후예측정보의 상세화는 수자원 활용성 증대를 위해 가장 시급히 개발되어야 하는 기술로 분석되었다. 다양한 역학적 및 통계적 상세화 기법들이 기존 연구들을 통해 시도되어 왔으나, 아직까지 세계적으로 통용되는 체계화된 상세화 가이드라인이나 일반적인 방법론은 부재한 실정이다. 미국, 호주에서 수자원계절예측 서비스에 이용하는 통계적 상세화 기법은 연구기관별로 상이하였다. 이들 사례는 상세화 기법이 지역적인 여건과 상세화 목적에 부합되도록 개발되고 평가되어야 함을 시사하였다.

셋째, 계절예측정보를 활용한 수자원관련 수요가 다변화되고 있다. 기존의 전통적인 하천유량관리를 위한 장기예측 뿐만 아니라 가뭄관리, 댐운영, 수력발전 등으로 수요가 확대되고 있다. 이는 기후예측정보의 신뢰성과 활용성이 개선됨에 따른 것으로 판단되며, 장기적인 예측정보가 기후변화에 따른 영향을 저감하기 위한 탄력적인 의사결정에 중요한 정보로 이용될 수 있다는 사회적 공감대가 형성되었기 때문이다. 선진국을 중심으로 기후예측기간을 수개월 단위에서 일 년 또는 십년 단위까지 늘리는 연구가 진행되고 있어, 향후 이러한 장기예측정보를 활용한 연구가 증대될 것으로 사료된다.

넷째, 계절예측정보가 지니는 불확실성을 최종수요자에게 효과적으로 전달하기 위한 노력이 필요하다. 예측정보가 가지는 불확실성을 표현하고 효과적으로 최종수요자에게 정보를 전달하기 위해 호주에서는 세 가지 범주(above normal, normal, below normal)의 확률로, 미국에서는 평년유량 대비 백분율로 정보를 제공하고 있다. 호주의 경우 서비스 개발 단계부터 최종수요자를 참여시켜 예측정보제공을 위한 그래픽 종류, 색상 등 세세한 부분까지 수요

자의 입맛을 고려한 맞춤형 정보를 제공하기 위해 노력하고 있다.

3. 국내 다목적댐 운영

3.1 다목적댐 현황

댐은 다목적댐, 용수전용댐, 수력발전용댐으로 구분된다. 이중 다목적댐은 용수공급, 수력발전, 홍수조절 등의 다양한 기능을 수행한다. 국내 다목적댐은 1965년 섬진강댐이 건설된 이래 16개의 다목적댐(부항댐과 주암조절지댐 제외)이 수자원공사(K-water) 관리 하에 운영되고 있다(Table 3). 이들 댐의 총 저수용량은 약 124억 m^3 /년이며, 연간 용수공급능력은 약 112억 m^3 /년 규모이다. 저수용량은 소양강댐이 29억 m^3 /년으로 가장 많고, 연간용수공급능력은 충주댐이 약 34억 m^3 /년으로 가장 크다. 유역별로는 낙동강유역에 6개, 한강유역에 3개, 금강유역에 2개, 섬진영산강유역에 5개가 위치해 있다.

Table 3. Specification of multi-purpose dams (WAMIS, 2014)

댐명		유역 면적 (km ²)	총저수 용량 (백만m ³)	용수공급계획량(백만m ³ /년)			
				연간총용 수공급량	생공용수 공급량	관개용수 공급량	하천유지 유량
소양강댐	SY	2,703.0	2,900.0	1,213.0	1,200.0	13.0	0.0
충주댐	CJ	6,648.0	2,750.0	3,380.0	2,731.0	315.0	334.0
횡성댐	HS	209.0	86.9	119.5	15.8	72.3	31.4
안동댐	AD	1,584.0	1,248.0	926.0	450.0	300.0	176.0
임하댐	IH	1,361.0	595.0	591.6	13.0	363.6	215.0
합천댐	HC	925.0	790.0	599.0	520.0	32.0	47.0
남강댐	NG	2,285.0	309.2	573.3	224.4	226.8	122.1
밀양댐	MY	95.4	73.6	73.0	50.8	13.1	9.1
군위댐	GW	87.5	48.7	38.3	-	-	-
용담댐	YD	930.0	815.0	1,143.2	492.8	492.7	157.7
대청댐	DC	3,204.0	1,490.0	1,649.0	1,300.0	349.0	0.0
섬진강댐	SJ	763.0	466.0	350.0	0.0	350.0	0.0
주암댐	JA	1,010.0	457.0	270.1	0.0	233.6	36.5
부안댐	BA	59.0	50.3	35.1	28.5	6.6	0.0
보령댐	BR	163.6	116.9	106.6	4.7	90.6	11.3
장흥댐	JH	193.0	191.0	127.8	100.6	7.7	19.5
합계		12,387.6		11,195.5			

3.2 홍수기와 갈수기 다목적댐 운영

다목적댐은 홍수기(6월 중순~10월 중순)와 갈수기(또는 이수기)에 따라 운영방식이 다르다. K-water는 홍수기에는 홍수기제한수위 이하로 저수위를 유지하면서 홍수를 조절하고, 갈수기 시작 전에는 상시만수위까지 최대한 저수위를 높여서 이듬해 장마 이전까지 유량을 안정적으로 공급한다. Fig. 11은 1975년에서 2007년까지의 평균 소양강댐의 월별 유입량과 방류량, 댐의 저수위를 보여준다. 자연적인 유입량은 8월에 가장 많고 1월에 가장 적은데, 댐운영을 통해 홍수기에 집중된 국내 수자원을 갈수기에도 사용할 수 있도록 하고 있다.

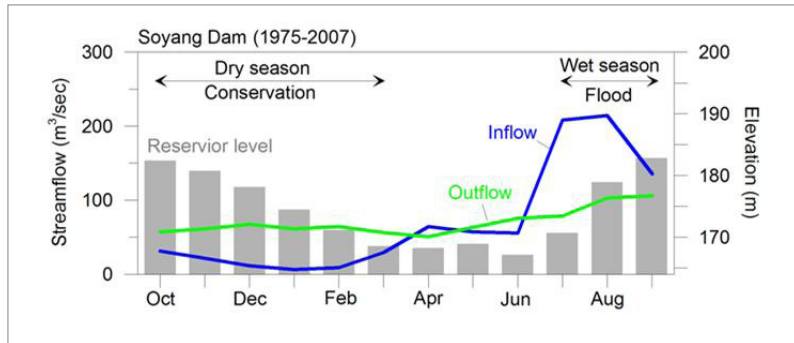


Figure 11. Monthly dam inflow, outflow, and reservoir level in the Soyang Dam (Jung et al., 2013)

홍수기 다목적댐의 홍수조절은 K-water 물관리센터와 5대강 유역의 홍수통제소를 통해 수행된다. 먼저 물관리센터가 수문방류에 대한 기술적인 분석을 하면, 이를 근거로 홍수통제소가 종합적인 검토 후 방류를 승인하게 된다. 물관리센터는 자체 기상관측시설, 국토해양부, 기상청, 각 지방자치단체에서 운영 중인 실시간 수문기상정보를 활용한다. 댐유역의 기상 분석과 예측을 위해 자체 전문기상예보관을 보유하고 있으며, 평상시 1회, 홍수시 4회 이상까지 기상예보를 시행하고 있다(정구열, 2008). 이 예보와 관측기상정보를 바탕으로 댐유입량을 예측하고 현재의 댐저수위 등을 고려하여 저수지 모의운명을 통해 최적 댐방류량의 크기와 시기를 도출한다. 최적 댐방류량과 시기는 댐간 홍수조절 연계운영과 홍수조절방류로 인한 하류지점의 수위변화 등을 종합적으로 판단하여 결정된다. 이 정보를 바탕으로 물관리센터가 홍수통제소에 승인을 요청하고, 홍수통제소가 승인을 하면 관계기관에 통보 후 수

문조작을 통해 홍수조절 방류를 수행하게 된다(정구열, 2008).

갈수기 다목적댐의 운영 목표는 공급계획량에 대한 안정적인 용수공급이다. 공급계획량은 댐건설시 산정된 하천유지유량과 수자원공사가 매년 지자체 및 공업단지 등과 체결하는 생공용수와 환경용수로 구성된다. 하천유지유량은 하천주변의 생태계 보호 및 하천의 자연적인 기능을 보전하기 위해 반드시 흘러주어야 하는 양으로 보통 인공적인 저수시설 등이 없는 상태에서 갈수기에 하천에 자연적으로 흐르던 최소유량으로 산정된다. 일반적으로 갈수량 자료를 빈도분석하여 산정하는 10년 빈도 기준 갈수량이 이용된다. 생공용수와 환경용수는 K-water의 광역상수도 운영을 위한 수요(약 32억 m^3 /년)를 제외하고는 서울시(약 9억 m^3 /년) 공급량이 가장 많고, 부산시(약 4억 m^3 /년), 대전시(약 3억 m^3 /년), 대구시(약 2.6억 m^3 /년) 순이다(2012년 기준). 환경용수는 서울시 청계천(약 0.47억 m^3 /년), 부산시 삼락천(약 0.31억 m^3 /년), 인천시 굴포천(약 0.27억 m^3 /년), 청주시 무심천(약 0.11억 m^3 /년) 순으로 공급량이 많다(수자원공사, 2013).

3.3 봄가뭄시 다목적댐 운영 방안

수자원측면의 가뭄은 물 공급량이 수요량에 비해 부족할 때 발생하는 것으로 대부분 댐 유입량이 기대 유입량에 비해 적기 때문에 발생된다. K-water는 갈수기동안 20년 빈도의 가뭄이 발생하더라도 용수공급에 차질이 없도록 월별로 댐운영 기준 수위를 설정하여 다목적댐을 운영하고 있다(Fig. 12). 최소 20년 빈도의 갈수량이 유입된다는 가정 하에 수립되는 K-water의 중장기 댐운영계획은 안정적인 용수공급측면에서 유용하며, 봄가뭄의 피해를 경감시킬 수 있는 현실적인 대응책 중의 하나이다.

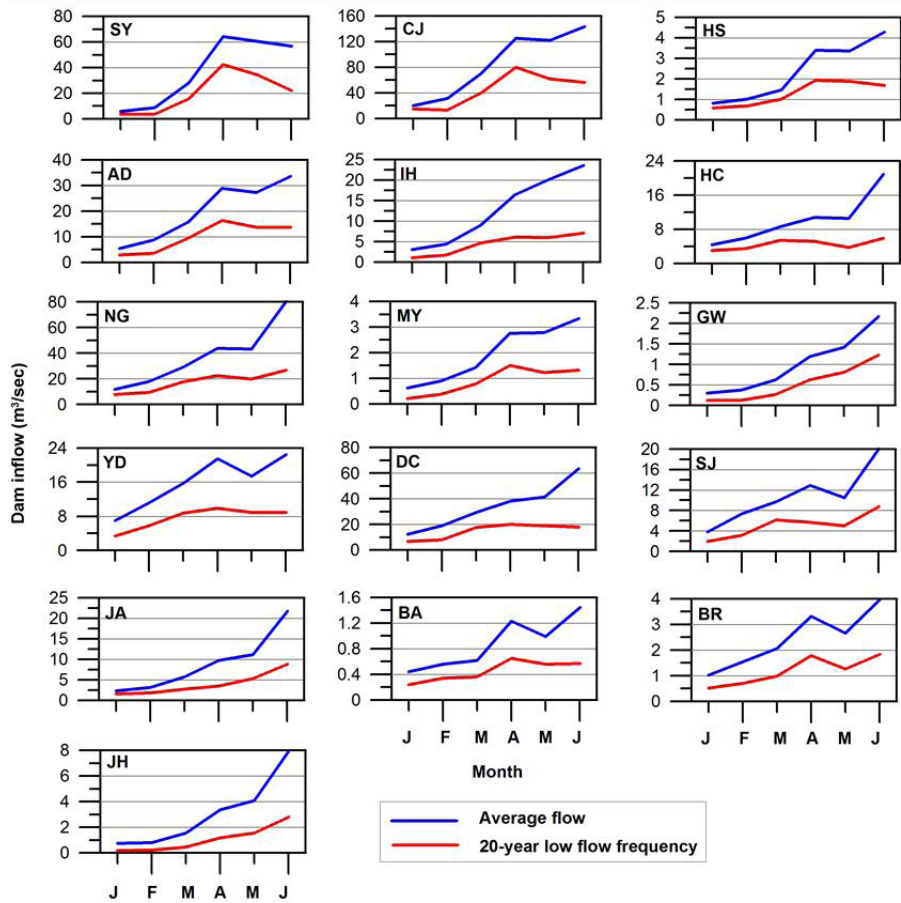


Figure 12. Multi-purpose dams' monthly average flow and low flow with 20-year frequency

가뭄에 대응한 K-water 다목적댐 운영은 크게 가뭄 발생 전 준비단계와 가뭄 진행시의 대응단계로 구분된다.

가뭄피해 사전 대비를 위해 K-water는 확보수위개념을 이용하고 있다. 확보수위란 다음해 여름 전까지 20년 빈도의 가뭄이 발생하더라도 안정적인 물공급이 가능한 댐 수위를 말한다(차기욱, 2009). K-water가 상시만수위 대신 확보수위를 이용하는 이유는 낮은 장마 및 태풍 등의 영향으로 갈수기 전 댐수위를 상시만수위까지 채우는 것은 현실적으로 어렵기 때문이다. K-water는 가뭄대비 댐운영 시 해당시기에 설정된 확보수위를 충족하는 방향으

로 댐방류량을 조절한다. 이를 위해서는 가뭄 모니터링 및 예측정보가 필요하다.

K-water는 가뭄정보시스템, 실시간 수문자료 관리시스템, 실시간 저수지 운영시스템 등을 구축하고 운영 중에 있다. 가뭄정보시스템은 갈수기 안정적 용수공급에 지장을 초래하는 가뭄을 조기에 감지하기 위해 구축된 것으로, 가뭄평가지수인 물공급가뭄지수(WADI), 파머지수(PDSI), 표준강수지수(SPI), 수정 지표수공급지수(MSWSI), 토양수분지수(SMI) 등의 정보를 실시간으로 제공함으로써 가뭄의 시공간적 전개과정을 도시적으로 보여준다. 실시간 수문자료 관리시스템(HDAPS)은 전국 161개 댐유역 강우관측소와 126개 댐상하류 지점의 수위관측소 정보를 실시간으로 모니터링하고 있다(차기욱, 2009). 이 시스템은 기상청 예보자료를 이용하여 하천수량 및 용수공급 가능량을 예측하고, 이를 바탕으로 하천과 저수지의 수질을 고려한 최적의 물 공급계획을 도출한다.



Figure 13. K-water drought information system (<http://203.237.1.38/index.aspx>)

가뭄이 발생하게 되면 K-water는 홍수기 전까지의 물공급 가능량을 평가하고 공급계획량 대비 부족량이 발생할 경우 「다목적댐 관리규정」에 근거하여 물 공급을 단계적으로 조정하고 있다. 「다목적댐 관리규정」에서는 공급우선순위를 생활용수, 공업용수, 농업용수, 그 밖의 용수(하천유지용수 등) 순으로 정하고 있다. 실무적인 댐운영에서는 Table 4와 같이 댐건설시 정한 생공용수 기본계획공급량 중에서 실 사용량을 공제한 잔여량을 최우선으로 조정하고 하천유지용수, 농업용수 순으로 조정한다. 가뭄이 심화되고 댐수위가 저수위 이하로 낮아지면 비활용용량(저수위와 사수위 사이) 중 별도의 시설 추가 없이 공급 가능한 방류설비까지의 비상용량을 공급한다(차기욱, 2009).

Table 4. K-water's drought response action plan according to drought severity

Drought severity classification	Drought response action plan
1st stage	Control the surplus of domestic, industrial, & agricultural water supply
2nd stage	Control the surplus of domestic, industrial, & agricultural water supply Control environmental water supply
3rd stage	Control the surplus of domestic, industrial, & agricultural water supply Control environmental water supply & agricultural water supply
4th stage	Control environmental, agricultural, industrial & domestic water supply

3.4 기후예측정보 활용과 댐운영 - 2008~2009년 광동댐 사례

본 절에서는 2008년 9월~2009년 4월에 걸쳐 태백시 인근에서 발생한 가뭄사례를 분석함으로써 가뭄재해관리를 위한 기후예측정보의 댐운영 활용 방안을 고찰하고자 한다. 이 사례는 박종윤과 신영섭(2010)이 분석한 태백시 가뭄과 광동댐 운영 자료를 기반으로 하였다.

2008-2009년 가뭄으로 태백지역 주민들은 87일 동안이나 하루 평균 3시간만 수도물을 공급받는 제한급수 상황이 발생하였고, 일부지역에서는 단수를 겪었다. 가뭄피해의 가장 큰 원인은 2008년 홍수기와 2008-2009년 갈수기 동안의 강수량의 부족

이었다. 2008년 홍수기(6-9월) 강수량은 30년(1981-2010년) 평균 강수량 대비 약 82%(687mm/837mm) 수준이었고, 2008년 10월에서 12월 동안의 강수량은 30년 평균 강수량의 약 58%(73mm/125mm) 정도였다. 이로 인해 2009년 3월 13일까지 제한급수가 지속되다가 3월 13일 14.6mm 강수 이후 48.5mm(3월 13~31일)의 강수가 내려 용수공급이 정상화되었다. 박종윤과 신영섭(2010)은 이러한 태백지역의 기록적인 가뭄피해는 K-water 태백권관리단에서 운영하는 광동댐의 용수관리 실패와 기후예측정보의 낮은 예측성과 연관되어 있다고 분석하였다.

태백지역에 광역상수도를 제공하는 광동댐(125.0km²)은 상류 유역이 적고 하도가 짧아 집중호우시 유입량이 급격히 댐으로 유입된다. 이러한 수문학적 특성으로 인해 광동댐의 댐 관리 메뉴얼은 홍수기 운영수위를 강우초기에 EL. 672.0m 이하(계획홍수위 675.3m)로 유지하도록 하고 있다. 2008년 홍수기에 기상청에서는 여러 차례 강수를 예상하였으나 실제로 내린 강수량은 적었다. 일례로, 2008년 7월 태풍 ‘갈매기’의 북상이 예보되어 예비방류를 하였으나 태풍은 군산 서쪽 170km 지점에서 소멸하였으며, 태풍 ‘풍왕’도 북상이 예상되었으나 중국 상하이 남서쪽에서 소멸하였다(Fig. 14). 또한, 9월 1일 30~80mm의 강우가 예보됨에 따라 사전예비 방류를 실시하였으나 실제 3.9mm의 강수량만 기록하였다. 이러한 영향으로 광동댐 운영자는 이상가뭄에 대비한 충분한 댐 저수량을 확보하지 못하였다.

기상청의 3개월 예측과 월간예보는 강수량의 감소를 신뢰성 있게 예측하지 못하였다. 2008년 11월에 발표된 기상청 3개월 예보에서는 12월 상순은 강수량이 평년보다 적다고 예측하였으나 중순과 하순은 강수량이 평년과 비슷할 것으로 전망하였다(Table 5). 1월에는 강수량이 평년과 비슷할 것으로, 2월에는 강원도 영동 산간지방에는 지형적인 영향으로 많은 눈이 올 것을 예보하였다. 그러나 2008년 9월 이후부터 2009년 1월 말까지 강수량은 평년대비 41%(147mm/355mm) 수준에 불과하여 기상청 예보와 다른 양상을 보였다.

Table 5. KMA's 3-month climate prediction in November 24, 2008

Month	3-month climate prediction
December	<p>상순에는 이동성고기압의 영향을 주로 받아 기온이 평년보다 높겠고 강수량은 평년보다 적겠음. 중순과 하순에는 대륙고기압과 기압골의 영향을 주기적으로 받겠고 일시적으로 찬 대륙고기압이 확장하면서 전반적인 기온과 강수량은 평년과 비슷하겠음. 서해안과 강원도 영동 및 동해안 지방에서는 지형적인 영향으로 다소 많은 눈이 올 때가 있겠음.</p>
January	<p>대륙고기압의 약화로 기온은 평년보다 다소 높은 경향을 보이겠으나 일시적으로 찬 대륙고기압이 확장하면서 기온이 큰 폭으로 떨어질 때가 있겠음. 기압골의 영향 및 지형적인 영향으로 지역에 따라 많은 눈이 오는 곳이 있겠으나 강수량은 평년과 비슷하겠음.</p>
February	<p>대륙고기압과 이동성고기압의 영향을 주기적으로 받아 기온 변화가 크겠으나 대체로 평년보다 기온이 높겠음. 찬 대륙고기압 확장에 따른 한기 남하로 기온이 다소 큰 폭으로 떨어질 때가 있겠으며 서해안 및 강원도 영동 산간지방에는 지형적인 영향으로 많은 눈이 오는 곳이 있겠음.</p>

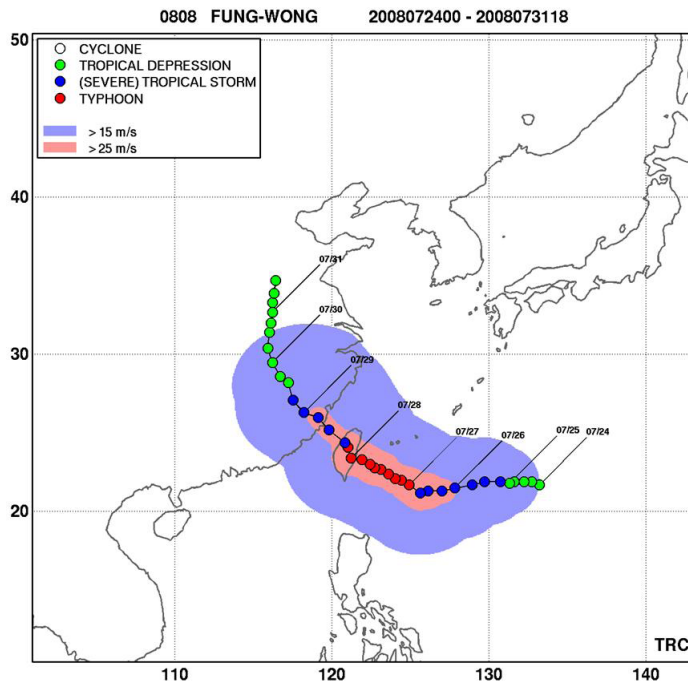
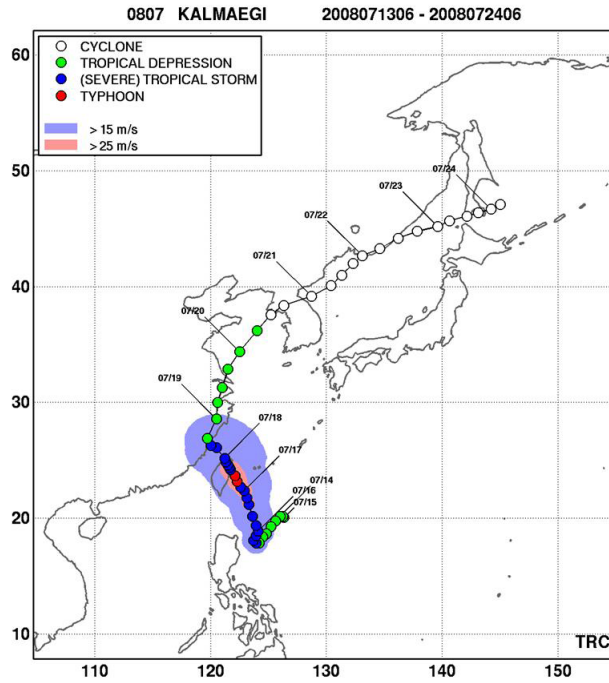


Figure 14. Track of Typhoon Kalmaegi and Typhoon Fung-wong (www.typhoon.or.kr)

기상청 월간예보는 11월 상순을 제외한 나머지 기간에서 강수량이 평년과 비슷하거나 많겠다고 예보하였는데, 10-12월 동안 평년대비 76%(49mm/65mm) 수준의 강수량만 내려 댐수위를 저수위에 근접하게 만들었다(Fig. 15). 이로 인해 수위가 감소함에 따라 광역상수도 공급량을 단계적으로 감량(1단계 5% 감축, 2단계 30% 감축, 3단계 50% 감축)하는 제한급수가 시행되었다(Table 6).

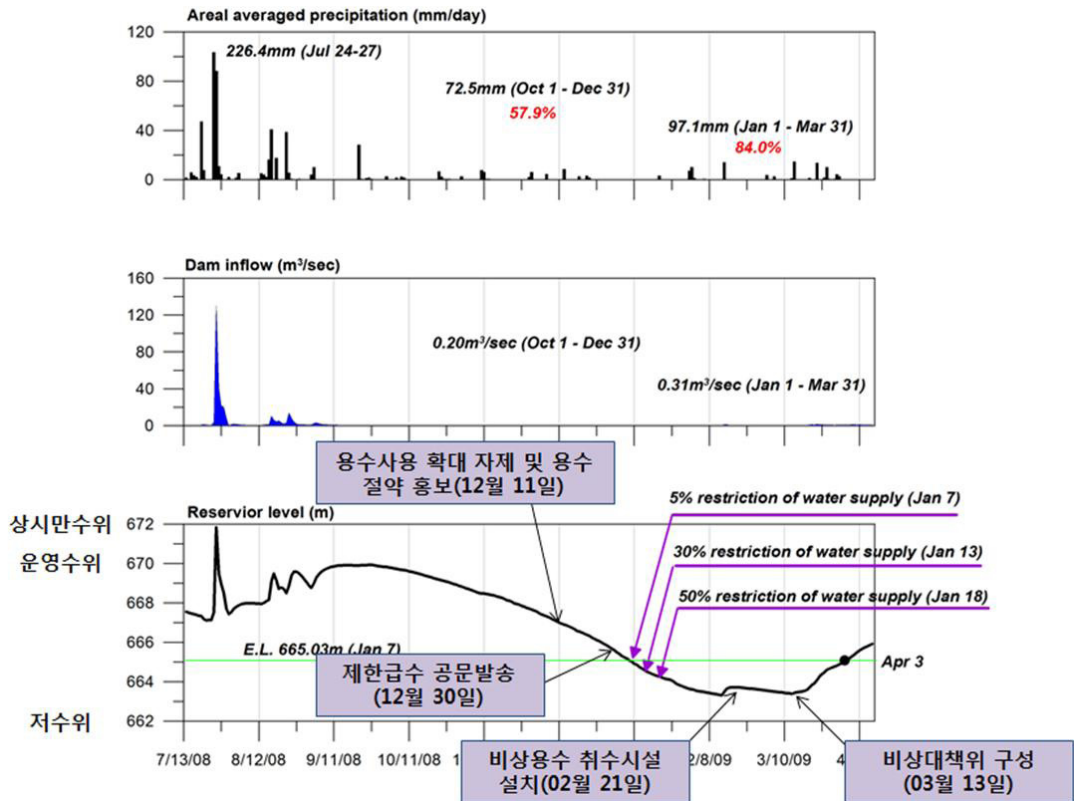


Figure 15. Daily areal averaged precipitation (top), dam inflow (middle), and reservoir level (bottom) of Gwangdong dam from July 2008 to April 2009

Table 6. Gwangdong dam operation for August, 2008 through April, 2009 and drought damage over Taebak region (박종윤과 신영섭, 2010)

Time	Reservoir level at dam (m)	Dam storage (1000 m ³)	Available days for water supply	Progress of drought damage
08년 10월 1주	669.78	7,381.2	74.2	광동댐 유역 강수량 63.5mm (예년대비 42% 수준)
08년 10월 2주	669.61	7,231.9	72.0	
08년 10월 3주	669.37	7,024.0	69.1	
08년 10월 4주	669.12	6,810.9	66.0	
08년 11월 1주	668.83	6,568.2	62.6	광동댐 유역 강수량 22.5mm (예년대비 39% 수준) 광동댐 수위 점차 줄어들음
08년 11월 2주	668.53	6,322.2	59.0	
08년 11월 3주	668.34	6,169.0	56.9	
08년 11월 4주	668.01	5,907.8	53.1	
08년 11월 5주	667.62	5,607.0	48.8	
08년 12월 1주	667.26	5,337.0	45.0	지자체 용수사용 확대자제와 물절약 홍보 등 가뭄대책 요청 (12월 11일)
08년 12월 2주	666.85	5,038.4	40.7	
08년 12월 3주	666.44	4,749.3	36.6	댐수위 부족으로 제한급수 공문 발송(12월 30일)
08년 12월 4주	665.99	4,442.9	32.2	
09년 1월 1주	665.26	3,969.9	25.4	1단계 제한급수시행(5% 감축) (1월 7일) 비상급수실시
09년 1월 2주	664.68	3,615.3	20.4	
09년 1월 3주	664.26	3,370.3	16.9	2단계 제한급수시행 (30% 감축)(1월 13일)
09년 1월 4주	663.91	3,173.6	14.1	3단계 제한급수시행 (50% 감축)(1월 18일)
09년 1월 5주	663.58	2,994.4	11.5	
09년 2월 1주	663.41	2,904.5	10.2	비상급수 대비 지원인력 및 전국 지자체 생수공급 태백시 특별재난 지역 선포 요청 (2월 6일) 광동댐 비상용수 취수시설설치 (2월 21일)
09년 2월 2주	663.61	3,010.5	11.7	
09년 2월 3주	663.67	3,042.7	12.2	
09년 2월 4주	663.57	2,989.1	11.4	

Time	Reservoir level at dam (m)	Dam storage (1000 m ³)	Available days for water supply	Progress of drought damage
09년 3월 1주	663.45	2,925.5	10.5	비상급수 대비 지원인력 및 전국지자체 생수공급 급수대란극복 비상대책위 구성 (3월 13일)
09년 3월 2주	663.49	2,946.6	10.8	
09년 3월 3주	664.09	3,273.9	15.5	
09년 3월 4주	664.77	3,669.1	21.1	
09년 4월 1주	665.29	3,988.7	25.7	광역상수도 정상공급(4월 3일)

※ 용수공급가능일수 (Available days for water supply)=저수량/70,000m³ (광동댐 설계 당시 일평균량)

3.5 시사점

앞에서 살펴본 현재 다목적댐 운영방안과 태백시 가뭄사례의 검토를 통하여 향후 APCC 기후예측정보를 활용한 댐운영시 고려할 시사점을 다음과 같이 도출하였다.

첫째, 효율적이고 안정적인 갈수기 댐운영을 위해서는 신뢰성 있는 장기 기후예측정보 가 필요하다. 광동댐의 댐관리메뉴얼은 갈수기 안정적인 용수공급을 위해 10월초 댐저수위를 EL. 669.0m 이상 확보하도록 하고 있다. 광동댐의 경우 2008년 10월초의 평균 수위는 EL. 669.7m로 운영규정은 만족하였으나 이는 2007년에 비해 2m나 낮은 수위로 약 1,556천m³ 적게 저류되었다. 이처럼 갈수기 시점에 저류량이 충분하지 못할 경우 장기에측정보는 의사결정의 중요 판단기준이 될 수 있다. 만일 기후예측정보가 강수량의 감소를 예측하였다면 조기에 가뭄관리를 시행하여 태백지역의 50% 제한급수라는 최악의 시나리오는 방지할 수 있었을 것이다.

둘째, 적절한 공간규모의 지역적인 기후예측이 필요하다. 기상청의 3개월 예보와 별도로 지방기상청에서도 계절예보를 하고 있으나 유역단위의 국지적인 기후특성은 반영되지 못하고 있다. 2008년~2009년 강수량의 부족은 태백시 일원과 남부지역에 국한되어 발생하였다. 비록 가뭄이 홍수에 비해 넓은 지역에 걸쳐 발생하지만 기후예측정보를 댐운영에 직접 활용하기에는 공간적인 규모에서 불일치가 발생한다. 따라서 기후정보가 현실적인 댐운영에 도움을 주고 활용되기 위해서는 지역적인 규모의 세분화된 기후예측정보를 제공하는 방

안이 필요하다.

셋째, 댐운영 의사결정 과정에 효과적으로 사용될 수 있는 확률적 기반의 예측정보 제공이 필요하다. 광동댐 운영자는 평년과 비슷한 강수량이 올 것이라는 예보에 근거하여 용수공급에 차질이 없을 것으로 판단하였을 수 있다. 그러나 장기 기후예측은 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실성을 이해하지 못하고 단순히 강수의 많고 적음으로 예측정보를 이해한다면 댐운영에 실패할 가능성이 크다. 최근 기상청은 3개월 확률예보를 시행하고 있는데, 이러한 예보방법은 강수량이 평년에 비해 많을 확률, 유사할 확률, 적을 확률을 동시에 제시함으로써 기후정보가 지니는 불확실성을 효과적으로 최종수요자에게 전달하여 유연한 의사결정을 가능케 한다. 만약 2008년 태백시 경우에서도 강수량이 평년과 비슷할 확률과 더불어 적을 확률도 동시에 제공하였다면 댐운영자가 가뭄발생도 고려한 용수관리 방안을 모색하였을 것이다.

넷째, 댐운영에 기후정보가 활용되기 위해서는 강수의 많고 적음이 아닌 유입량으로 변환된 정보제공이 필요하다. 댐운영 실무자가 직관적으로 영향을 파악할 수 있도록 실무가 원하는 맞춤형 정보를 제공하는 전략이 필요하다.

4. 국내 유역 평균 강수량과 댐유입량의 변동 특성 분석

4.1 유역 평균 강수량의 변화 경향

강수량은 댐유입량의 가장 중요한 원천이다. 본 절에서는 유역 평균 강수량(Areal averaged precipitation)의 변화 경향을 분석함으로써 강수량의 변화가 향후 댐운영에 미칠 수 있는 영향을 평가하였다. 유역 평균 강수량은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, 2014)에서 제공하는 113개 중권역(제주도 제외)의 자료를 이용하였다. 분석기간은 1973년에서 2012년까지로 40년이며, 갈수기인 1월부터 6월까지의 유역 평균 강수량에 대해 연구를 수행하였다. 계절강수량의 변화를 분석하기 위해 1월~3월, 4월~6월, 1월~6월까지의 누적 강수량에 대해서도 동일한 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 경향성 분석을 위해 Mann-Kendall trend analysis 방법(Mann, 1945; Kendall, 1975)을 이용하였으며, 통계적으로 유의한 경향성의 판단기준으로 95% 신뢰구간을 적용하였다.

1월 유역 평균 강수량은 일부 유역을 제외하고는 전반적으로 감소 경향을 보였다(Fig. 16). 이에 비해 2월 강수량은 증가경향이 지배적이었는데, 특히 금강유역과 남부지방에서 집중되어 나타났다. 3월 강수량은 1월과 유사하게 감소경향을 보였으나, 서해안 유역과 태백산맥 근처 유역에서 증가경향을 보였다. 그러나 1월, 2월, 3월 유역 평균 강수량의 경향성은 통계적으로 유의하지는 않았다. 4월 강수량은 전체유역에서 감소경향을 보였으며, 영산강유역, 섬진강유역, 낙동강유역의 남쪽 유역에서 유의한 감소경향을 나타내었다. 5월과 6월 강수량은 전반적으로 증가경향을 보였는데, 일부 낙동강유역(안동댐유역)에서 유의하게 증가하였다.

계절별 누적강수량은 1월에서 3월 사이에는 강수량의 감소경향이 지배적인 반면 4월부터 6월까지의 강수량은 증가경향이 지배적이었다. 1월과 3월 사이의 강수량은 단지 한강동해안 한 개 유역에서 유의한 감소경향을 보였다. 4월과 6월 사이의 강수량은 남쪽지역에서 감소, 북쪽지역에서는 증가경향을 보였다. 1월에서 6월까지의 누적강수량의 변화는 동일 대권역(예, 한강 및 낙동강 권역) 내에서도 지역적으로 상이한 증가와 감소 경향을 보였다.

4월 강수량을 제외하고는 강수량의 경향성이 지역적으로 차이를 보였으며, 대부분의 경향성이 통계적으로 유의하지 않았다. 기존 지점 강수량을 분석한 여러 연구들(e.g., Jung et al., 2011)에서는 강수량의 유의한 경향성을 지적하였으나 수자원측면에서 중요한 유역 평균 강수량에서는 뚜렷한 유의성이 나타나지 않았다.

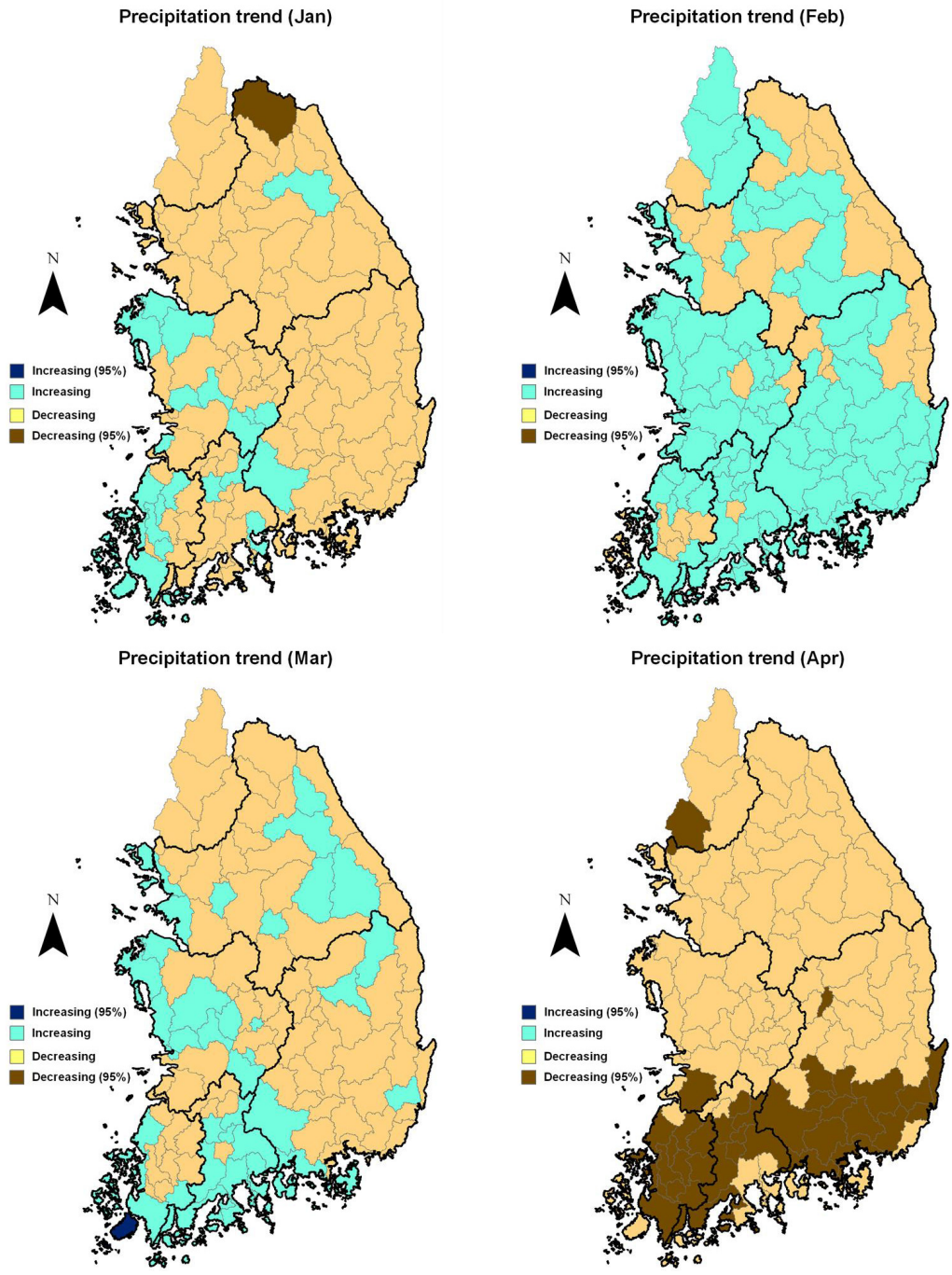


Figure 16. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of monthly areal averaged precipitation

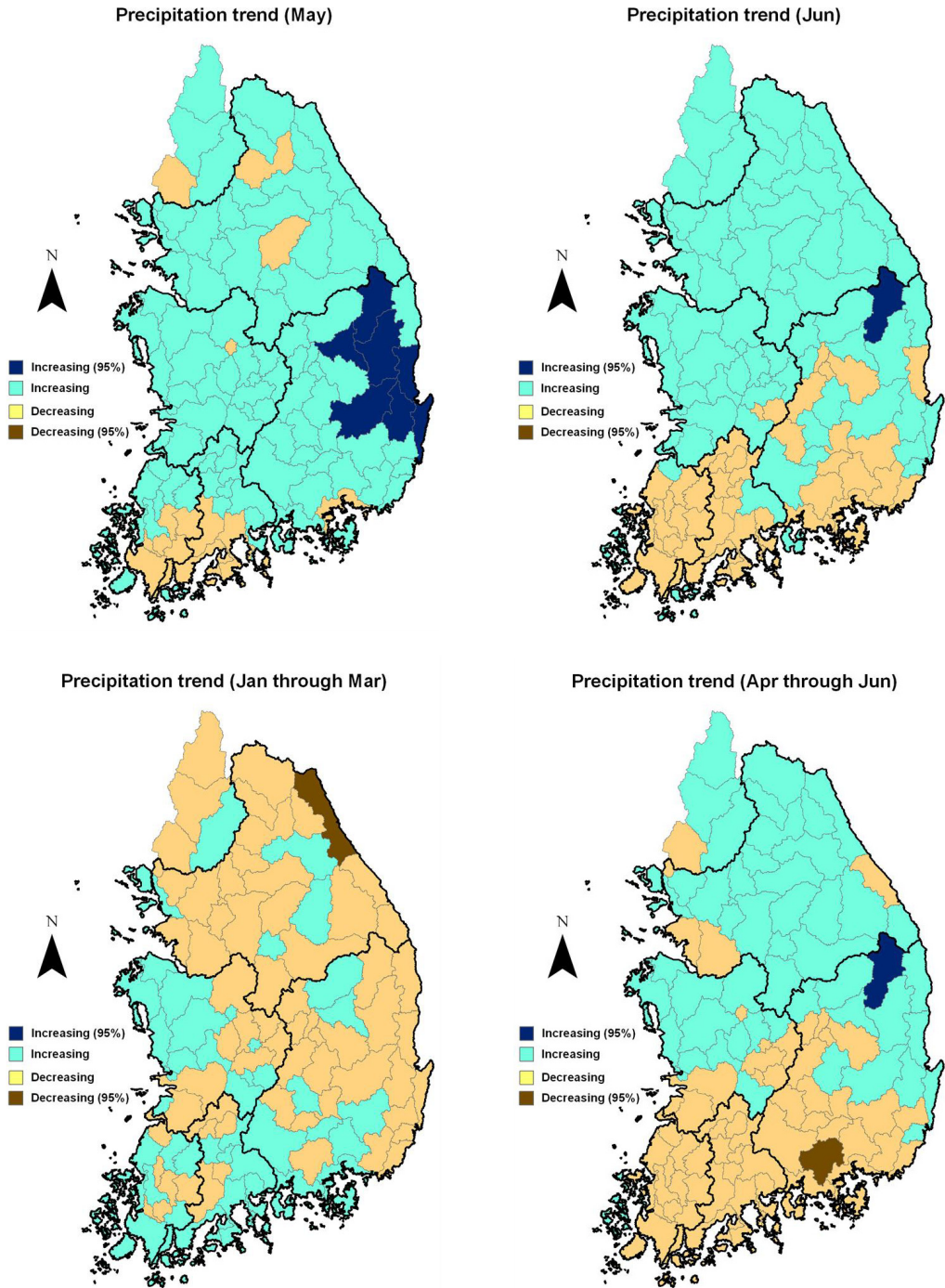


Figure 16. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of monthly areal averaged precipitation
(Continued)

Precipitation trend (Jan through Jun)

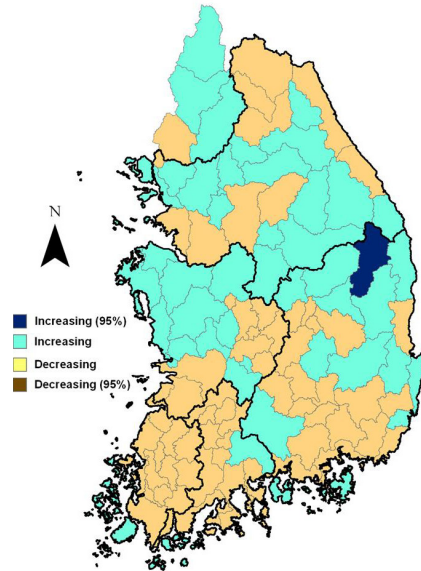


Figure 16. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of monthly areal averaged precipitation
(Continued)

지역 강수량의 연간변동성(interannual variation)은 강수량 예측의 신뢰도와 연관된다. 강수량의 연간변동이 적은 지역에서는 상대적으로 변동성이 큰 지역에 비해 강수량 예측의 신뢰성이 높을 가능성이 크다. 실제 기후모델의 성능을 평가하는데 있어 기후의 연간변동성을 현실적으로 모의하는 것은 중요한 요소이다. IPCC 4차 보고서(Randall et al., 2007)에 의하면 강수량의 연간변동성이 지구온난화의 영향으로 북반구 지역에서 증가될 것으로 예상되고 있다.

본 연구에서는 국내 유역 강수량의 월별 연간변동성 변화 추세를 분석하였다. 월별 강수량의 연간변동성의 변화를 분석하기 위해 먼저 변동성을 평균에 대한 표준편차의 비인 변동계수(coefficient of variation, CV)로 정량화하였다. 그 다음 경향성을 분석하기 위해 11년간의 이동구간(moving window)을 설정하였으며, 각 구간별 변동계수 계산하여 시계열자료를 생성하였다.

강수량의 경향성에 비해 연간변동성의 변화는 많은 유역에서 유의한 경향성을 보여주었

다(Fig. 17). 1월의 연간변동성 변화는 지역별로 차이를 보였으나, 낙동강 유역에 대해서는 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다. 2월은 일부 유역을 제외하고는 감소할 것으로 나타났다. 특히 대부분의 금강유역에서 유의한 감소 경향을 보였다. 3월의 강수량의 연간변동성은 한강일부 유역을 제외한 대부분의 유역에서 증가한 것으로 나타났다. 4월은 남부지역에서는 증가, 북쪽지역에서는 감소하는 패턴을 보였다. 5월은 감소경향이 지배적이었는데, 섬진강, 영산강, 낙동강에서 유의한 감소를 보였다. 6월은 3월과 상반되게 대부분의 유역에서 감소경향을 보였다. 계절별 누적강수량의 변동성에서는 1월에서 3월, 4월에서 6월 모두 전반적으로 감소경향을 보였다. 1월부터 6월까지의 누적강수량의 변화도 감소경향을 나타내었다.

유역별 강수량과 연간변동성의 경향성은 월별로 다른 경향을 보였다. 본 연구의 대상유역인 소양강댐 유역은 세 개의 중권역이 포함되어 있는데, 1월과 2월의 강수량의 경우 2개 중권역에서는 감소, 나머지 하나에서는 증가 경향을 보였다. 그리고 모든 중권역에서 3월, 5월, 6월 강수량은 증가, 4월은 감소를 보였다. 그러나 이러한 경향성이 통계적으로 유의하지는 않았다. 연간변동성에서도 6월 감소를 제외한 1월에서 5월까지의 유의한 경향성을 보이지 않았다. 4월은 강수량과 연간변동성이 동시에 감소한 반면 6월은 강수량은 증가하고 연간변동성은 감소하였다.

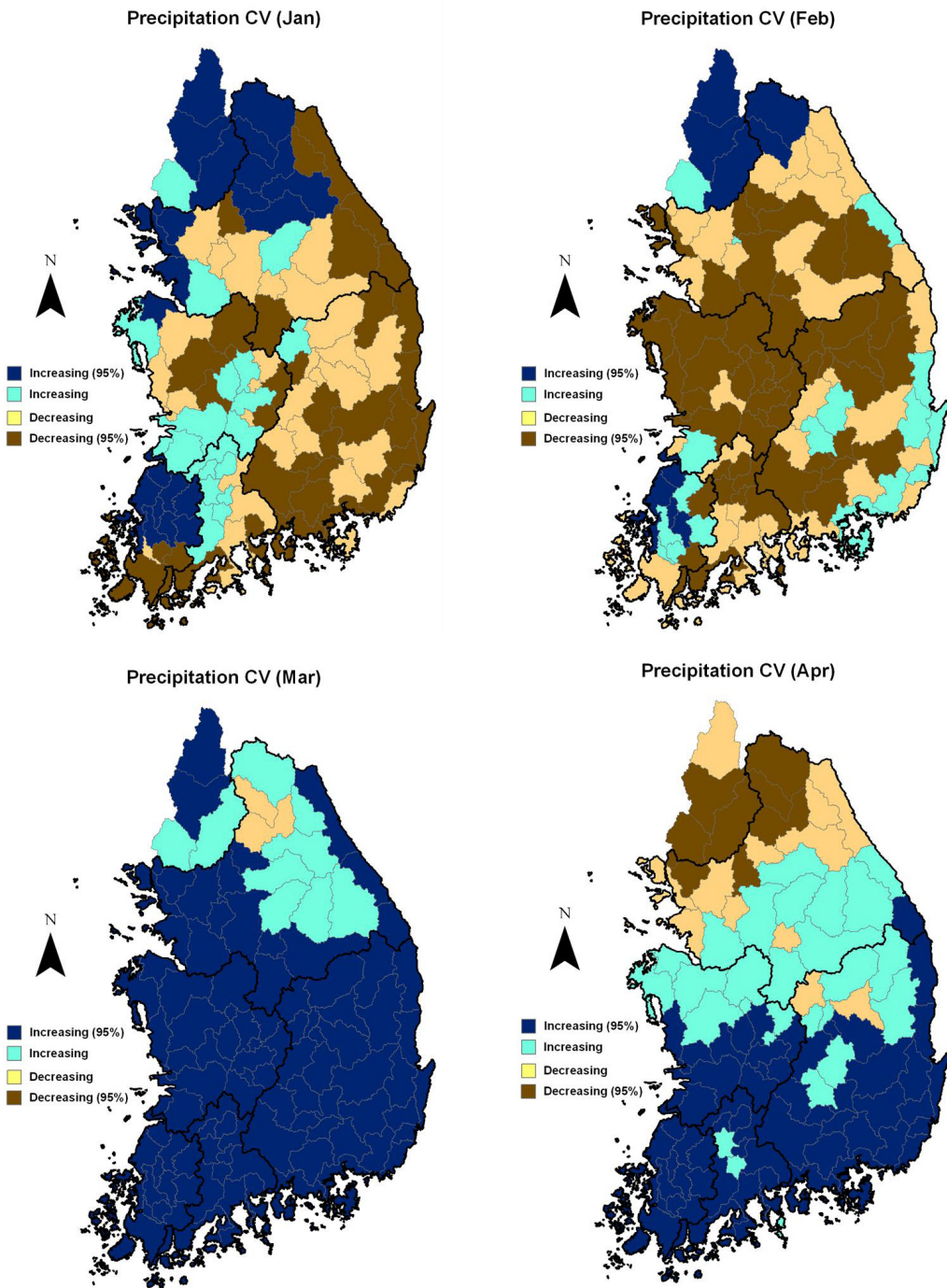


Figure 17. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of coefficient of variation (CV) of monthly areal averaged precipitation

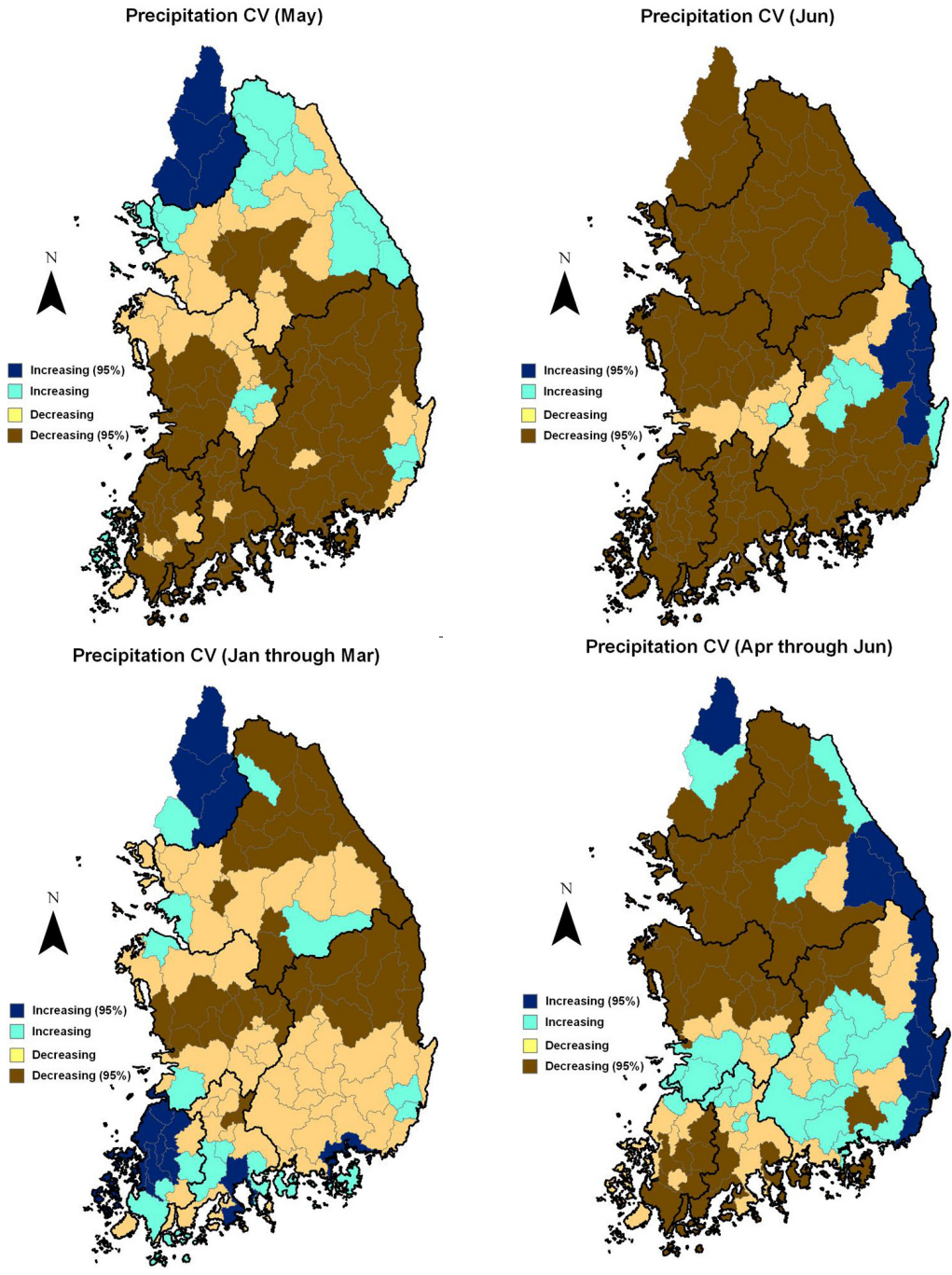


Figure 17. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of coefficient of variation (CV) of monthly areal averaged precipitation (continued)

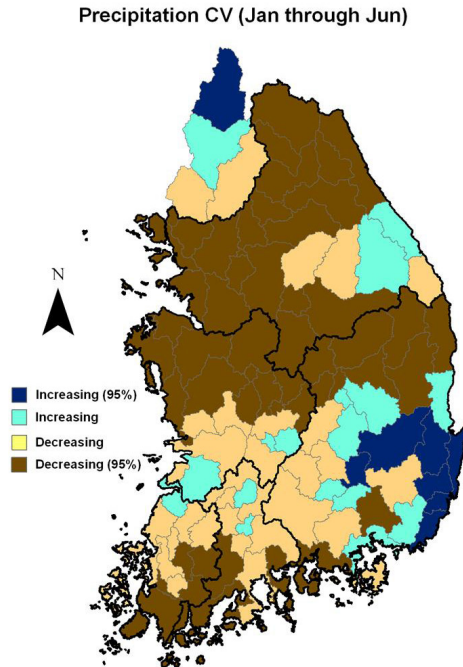


Figure 17. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of coefficient of variation (CV) of monthly areal averaged precipitation (continued)

4.2 댐유입량의 변화 경향

본 연구에서는 소양강댐뿐 아니라 인근의 충주댐과 안동댐의 경향성을 비교함으로써 댐 유입량에서 유사한 경향성이 나타나는지 분석하였다. 소양강댐은 1974-2013년까지의 자료를 이용하였으며, 충주댐은 1986-2013년, 안동댐은 1977-2013년의 자료에 대해 분석하였다. 댐유입량의 편차(deviation)를 산정하기 위해 1988년부터 2013년까지 25년의 평균을 평년값으로 이용하였다. 각 월의 평년값은 그림에 제시하였다.

소양강댐의 경우 1월, 2월은 증가, 3월부터 6월까지의 감소 경향을 보였다(Fig. 18). 그러나 4월의 유출량에서만 유의한 감소경향(90% 신뢰구간)을 보였다. 1월에서 3월까지의 유입량은 증가경향을, 4월에서 6월까지의 감소 경향을 보였다. 전체 갈수기간에 대해서는 감소하는 경향을 보였다. 충주댐은 1월에서 3월까지의 유입량에서는 감소를, 4월에서 6월

까지의 유입량에서는 증가경향을 보였다(Fig. 19). 유입량이 많은 4월에서 6월까지의 유입량의 증가경향으로 인해 갈수기간 전체에 대해서는 증가경향을 나타내었다. 안동댐의 경우 1월에서 4월까지의 댐유입량이 감소경향을, 5월과 6월에 대해서는 증가경향을 보였다(Fig. 20). 충주댐과 안동댐 유역에서는 1월 댐유입량만 유의한 감소경향을 나타내었다.

소양강댐의 경우 3월 강수량은 증가경향을 보이는데 반해 댐유입량은 감소경향을 보였다. 5월과 6월에서도 강수량은 증가한 반면 댐유입량은 감소하였다. 이는 두 자료의 분석기간이 다르고, 갈수기의 댐유입량이 홍수기에 비해 강수에 덜 민감하게 반응하기 때문일 것으로 사료된다. 갈수기에 강설이 발생하게 되면 천천히 녹아 다른 월의 유출량에 기여하기도 하며, 지하로 침투 및 침투하여 시간지체를 가지고 하천유출에 도달한다. 충주댐도 4월 강수량과 유입량의 경향성이 반대로 나타났다. 그러나 5월과 6월의 경향성은 일치하였다. 안동댐의 경우 2월과 3월에서 반대 경향을 보였고 나머지 월에서는 일치하는 결과를 보였다. 갈수기 유량은 강수량뿐 아니라 기온과 토양의 수분 보유능 및 지하수유출에 민감하게 반응한다. 이러한 지역적인 수문특성의 영향으로 강수량의 경향성이 댐유입량에 미치는 영향이 유역별로 차이가 있는 것으로 판단된다.

댐유입량의 연간변동성은 세 유역 모두에서 1월, 4월, 5월에서는 증가, 2월, 3월에서는 감소하는 경향을 보였다(Table 6). 6월의 경우 충주댐은 증가, 소양강댐과 안동댐은 감소경향을 보였다. 세 유역의 1월, 4월, 5월의 댐유입량의 변동성이 유의하게 증가하고 있는 것으로 나타났는데(소양강 4월 제외), 이는 갈수기 댐운영 측면에서 유입량 예측에 불확실성을 증가시킬 수 있다. 따라서 지속적인 모니터링과 분석을 통해 발생 가능한 변화를 사전에 예측하고 대비하는 전략이 필요할 것이다.

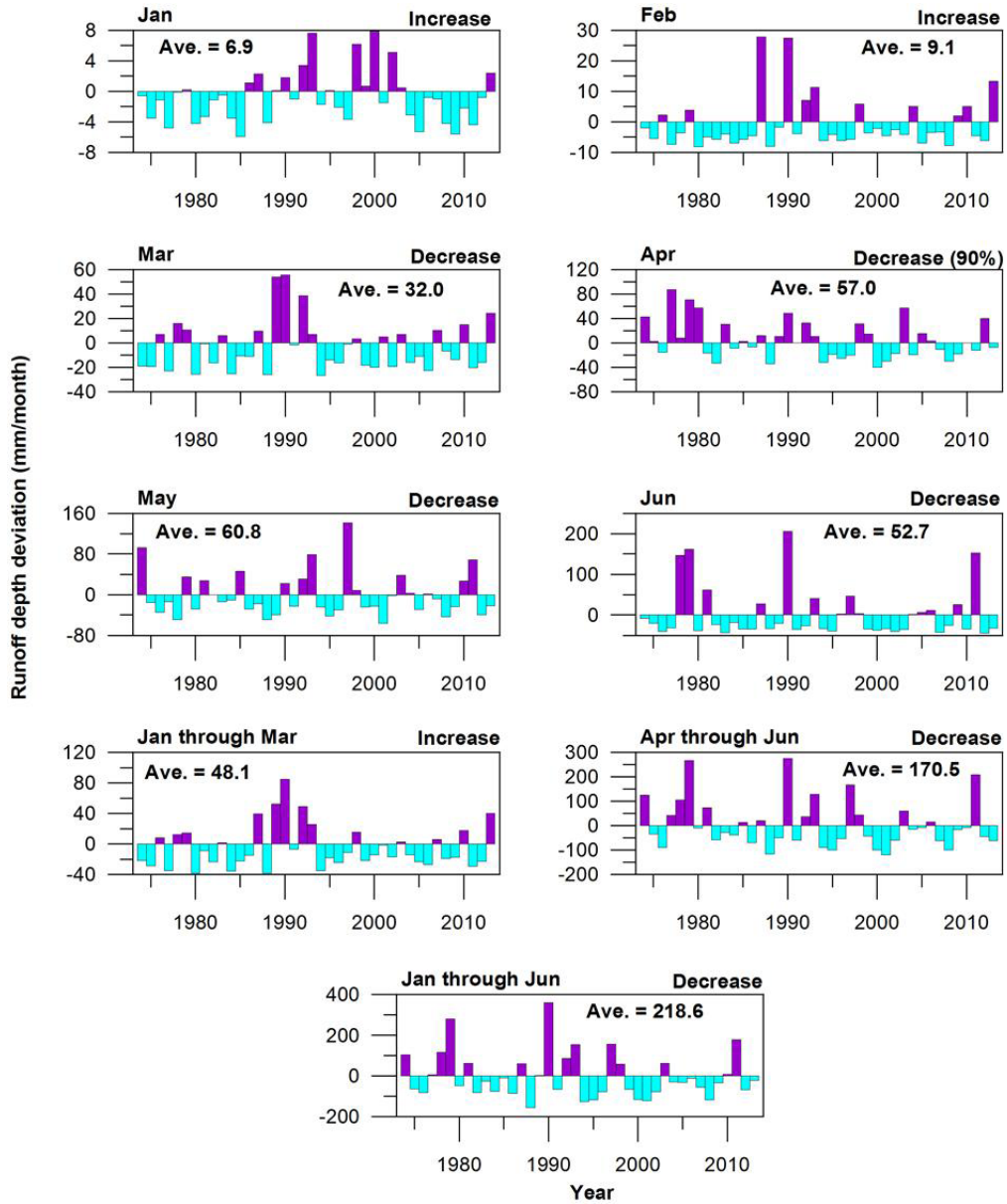


Figure 18. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of monthly dam inflow of Soyang dam

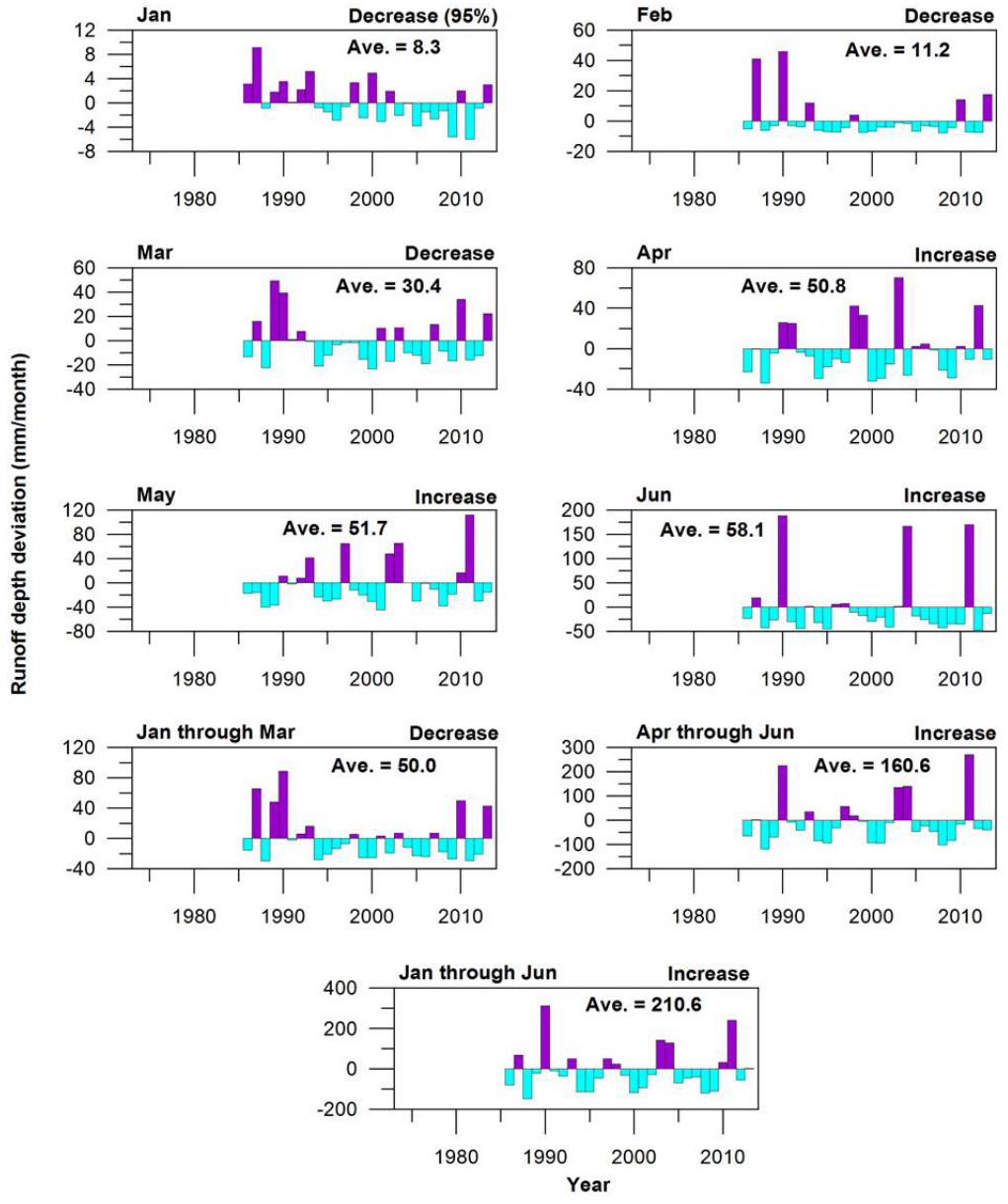


Figure 19. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of monthly dam inflow of Chungju dam

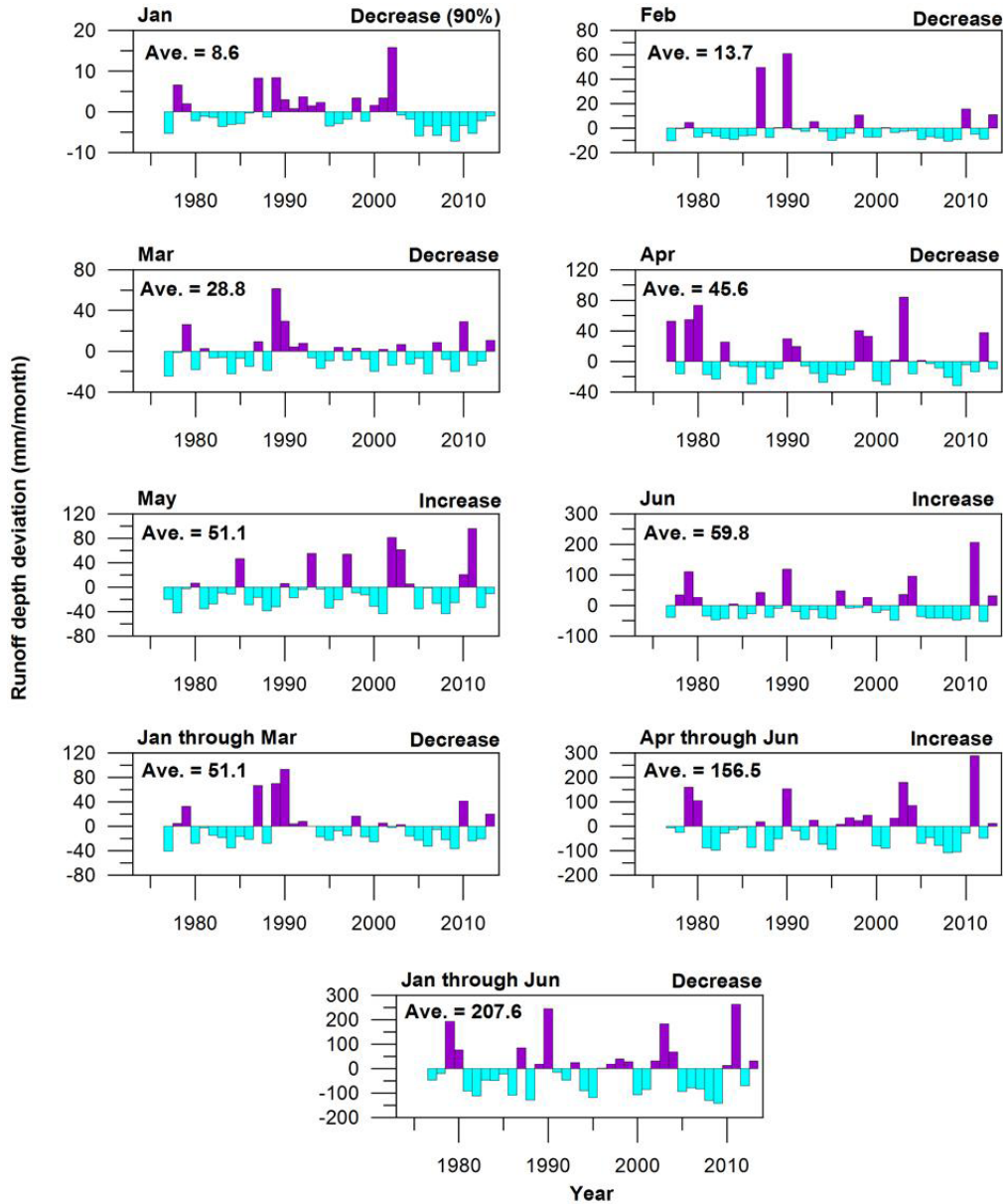


Figure 20. Results of the Mann-Kendall's trend analysis of monthly dam inflow of Andong dam

Table 7. Mann-Kendall statistics and significance level of coefficient of variation (CV) of monthly dam inflow

Month	Soyang		Chungju		Andong	
	MK statistics	Sig. level	MK statistics	Sig. level	MK statistics	Sig. level
January	3.518	0.0004	3.737	0.0002	2.965	0.0030
February	-4.624	0.0000	-2.610	0.0091	-3.996	0.0001
March	-2.913	0.0036	-0.041	0.9671	-2.960	0.0031
April	1.578	0.1145	2.608	0.0091	2.744	0.0061
May	2.049	0.0405	2.481	0.0131	4.403	0.0000
June	-3.645	0.0003	1.114	0.2652	-0.044	0.9648
January - March	-3.645	0.0003	-1.363	0.1729	-3.751	0.0002
April - June	-0.959	0.3376	0.330	0.7411	-0.730	0.4656
January to June	-2.124	0.0337	-0.826	0.4088	-0.088	0.9296

4.3 시사점

첫째, 유역평균강수량은 대부분의 유역에서 유효한 변화경향을 보이지 않았다. 이는 기존 연구(e.g., Jung et al., 2011)에서 제시된 봄철 강수량의 유의한 감소 경향과 다른 결과이다. 그러나 강수량의 연변동성은 유의한 증가 또는 감소를 보였다. 특히 3월과 4월의 변동성의 유의한 증가는 강수량이 감소하면서 변동성은 증가하는 경향을 보여 이러한 경향성이 지속된다면 갈수기 댐운영에 부담이 될 것으로 판단된다.

둘째, 대부분의 갈수기 댐유입량에서도 유의한 경향성이 나타나지 않았다. 일부 월에서는 강수와 유출량의 경향성이 상반되게 나타났다. 이는 갈수기 유출량이 유역특성의 영향을 많이 받기 때문으로 사료된다. 특히 1월, 4월, 5월의 유입량의 변동성이 유의하게 증가하고 있는데(3월은 감소), 이는 갈수기 유입량 예측의 불확실성을 증가시킬 수 있다.

셋째, 경향성이 유의하지 않으면서 변동성만 증가할 경우 예측의 불확실성을 증가시킬 수 있으며 기존의 관측자료 기반 댐운영에 부담이 될 수 있다. 따라서 기후변동의 영향을 물

리적으로 고려할 수 있는 역학적 기반의 계절예측정보를 활용한 댐운영 및 수자원 관리방안의 모색이 필요할 것이다.

5. 계절예측정보를 활용한 갈수기 댐유입량 예측기술 개발

5.1 대상유역 및 자료

소양강댐은 한강동해안과 서울을 비롯한 수도권 지역에 연간 12억 m^3 의 생공농업용수를 공급하고 있으며, 5.5억 m^3 의 홍수조절 능력도 갖춘 다목적댐이다. 소양강댐 유역은 1974년부터 현재까지의 댐유입량 자료를 보유하고 있으며, 상류유역에 하천의 유량을 인위적으로 조절하는 시설이 거의 없어 다양한 유출분석 연구에 많이 활용되고 있다. 본 연구에서는 소양강댐의 유입량, 유역평균강수량은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 수집하였으며, 기온자료는 기상청 측후소인 춘천과 인제 자료(www.kma.go.kr)를 이용하였다.

소양강댐의 연평균강수량은 약 1,100mm이고 유입량은 약 1,750백만 m^3 이다. 연강수량의 약 70%가 6월에서 9월 사이에 집중된다. Fig. 21은 3개월 평균 댐유입량의 연변화를 보여주고 있다. 그림에 표시된 바와 같이 소양강댐 운영자인 수자원공사는 20년 빈도의 갈수 유입량(red line)을 예상하고 댐을 운영하고 있다. 그러나 4월에서 6월까지의 유입량을 살펴보면 1990년대 이후 20년 빈도 이하의 유입량이 자주 발생하는 것을 볼 수 있다.

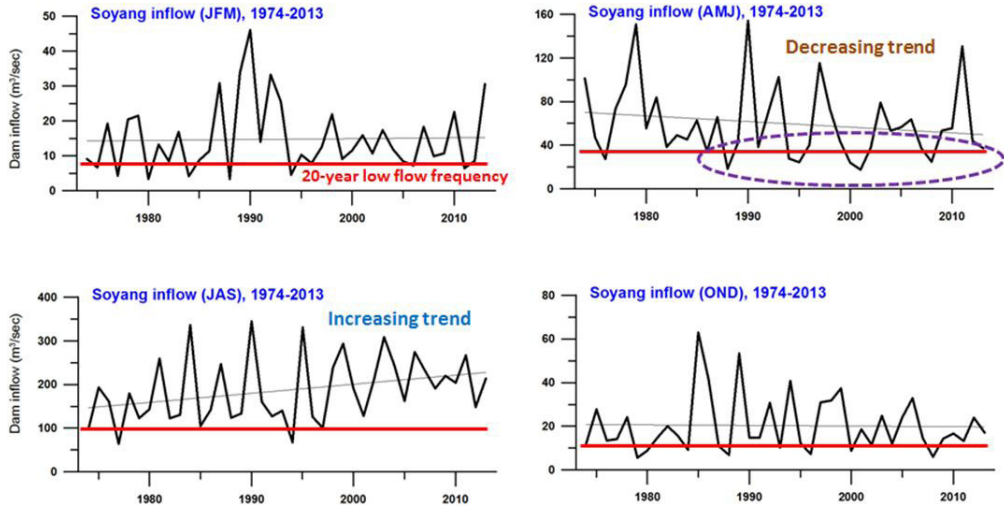


Figure 21. Seasonal Soyang dam's inflow for 1974-2012

5.2 계절예측정보 및 편이(bias)보정

본 연구에서는 10개 기후모델의 23년(1983-2005년)의 3개월 예측 hindcast 자료를 이용하였다. APCC는 2014년 현재 10개국 16개 연구기관의 기후예측정보를 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 공간 규모로 재격자화(re-grid)하고 Multi-model ensemble (MME) 기법을 이용하여 후처리한 다음 APEC 회원국과 개도국에 고품질의 신뢰성 높은 예측정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 이중에서 hindcast 기간이 일치하는 10개 기후모델을 선정하였다(Table 8). 각 기후모델은 5개(JMA)에서 33개(POAMA)의 앙상블을 제공하는데, 본 연구에서는 각 개별 기후모델의 앙상블 평균값을 이용하였다.

Table 8. 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°	-	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)	-	-	Molod et al. 2012
PNU	Pusan National University (PNU)	T42 L18	6 months	Sun and Ahn (2011)
CWB	Central Weather Bureau (Taipei)	T42 L18	-	Liou et al. (1997)
JMA	Japan Meteorological Agency (Japan)	-	3	-

기후모델에서 모의된 기후자료는 유역규모의 기후자료와 차이가 있다. 이는 공간규모의 차이와 기후모델이 가지는 구조적인 불완전성에서 기인한다. 본 연구에서는 기후모델 결과의 편이를 보정하기 위해 simple anomaly approach를 이용하였다. 이 방법은 먼저 각 기후모델 hindcast의 평균과 표준편차를 계산한다. 그 다음 hindcast에서 평균을 제거하고 표준편차로 나누어 hindcast의 아노말리(anomaly)를 산정한다. 산정된 아노말리에 관측기후자료의 평균을 더하고 관측자료의 표준편차를 곱하여 기후모델의 편이를 보정한다.

소양강댐 유역에 가장 적합한 예측정보를 제공하는 예측영역을 평가하기 위해 본 연구에서는 3개의 도메인을 설정하였다(Fig. 22). 이용된 도메인의 위경도는 Fig. 22에 제시된 바와 같다. 첫 번째 도메인은 소양강댐유역에 가장 가까운 하나의 격자점의 정보를 이용하고, 두 번째 도메인은 인근 4개의 격자점을, 세 번째 도메인은 인근 9개의 격자점 정보를 활용하였다. 두 번째와 세 번째 도메인의 격자점에 대해서는 편이 보정후 4개점과 9개점의 정보를 평균하여 이용하였다.

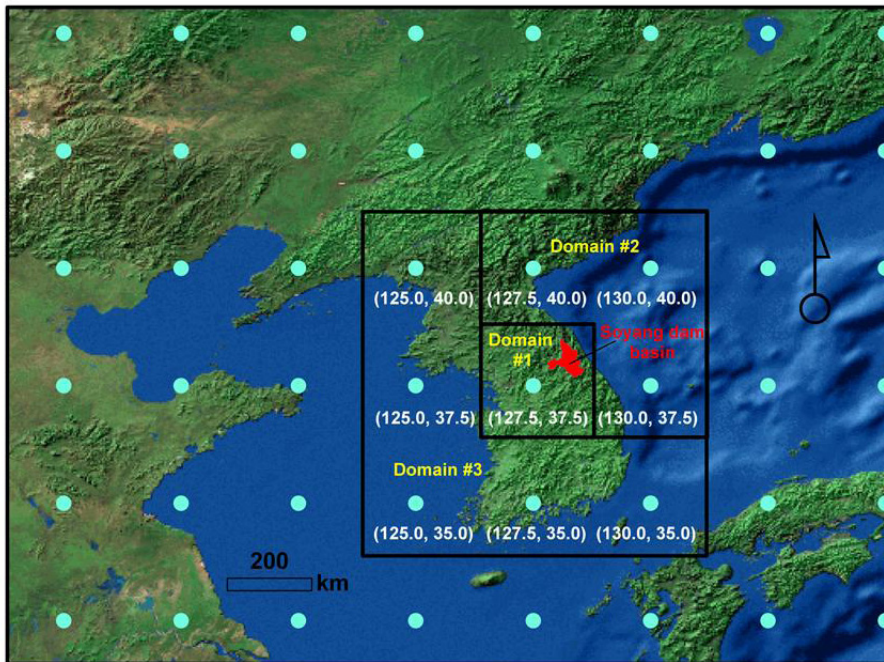


Figure 22. Location of Soyang Dam and three domains for selecting climate forecast information from ten climate models

5.3 수문모델을 이용한 유입량 예측

편이보정된 기후모델 결과를 이용하여 댐유입량을 예측하기 위해 5개 월물수지(monthly water balance model) 모형(Fig. 23)을 이용하였다. 본 연구에서 이용된 월물수지모형은 정일원(2013)이 기존의 모형에 Hamon 잠재증발산량 산정 알고리즘(Hamon, 1961)과 융설

(snowmelt) 모듈을 결합한 것이다. 이들 5개 월물수지 모형은 국내 8개 댐유역에 적용되어 모의 성능이 평가되었다(정일원, 2013). 정일원(2013)에서는 유출모형의 매개변수에 따른 불확실성도 평가하기 위해 각 모형별로 세 개의 매개변수셋을 이용하였다. 각 매개변수셋은 고유량, 저유량, 평균유량을 잘 모사하도록 목적함수를 Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), log–NSE, percent bias로 각각 설정하고 SCE–UA 방법(Duan et al., 1993)을 통해 추정되었다. 소양강댐에 대해 5개 월물수지 모형결과를 Kling–Gupta efficiency (KGE)(Gupta et al., 2009)를 이용하여 검정한 결과 고유량의 경우 0.80 이상, 저유량 0.65 이상, 평균유량 0.76 이상의 값을 보여, 관측치를 근사하게 모의하는 것으로 나타났다. 월물수지모형의 자세한 내용은 정일원(2013)을 참고하기 바란다.

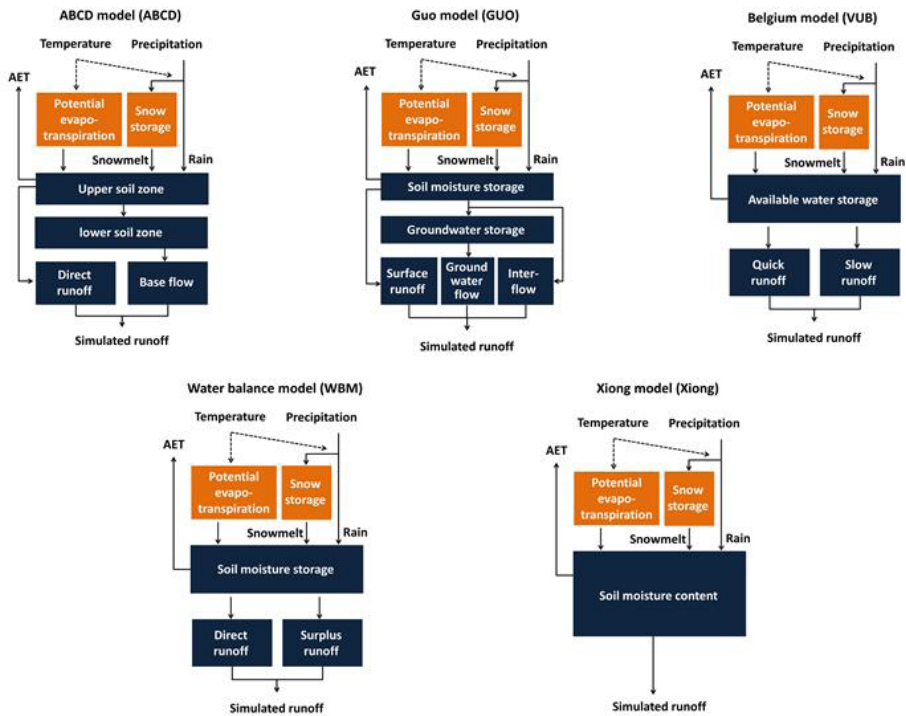


Figure 23. Conceptual structure of hydrological processes in each water balance model. Here AET is actual evapotranspiration (정일원, 2013)

5.4 원격상관기법을 이용한 통계적 예측모델 개발

지구시스템 내에서 대기와 해양은 서로 피드백을 주고 있으며, 이러한 상호작용 하에 특정 해양이나 대기의 패턴이 멀리 떨어져 있는 지역의 기후에 영향을 미친다. 이러한 관계를 원격상관(teleconnection)이라고 한다. 따라서 대규모 기후나 해양의 상태가 지역기후에 미치는 영향을 파악하는 것은 지역 기후의 변화를 예측하는데 유용하다. 특히 대규모 기후나 해양의 특정 상태가 멀리 떨어져 있는 지역에 영향을 미치기 위해서는 시간이 필요하다. 이 시간의 지체효과를 파악하는 것은 우리가 어느 정도의 선행시간(lead time)을 가지고 대규모 기후 및 해양 조건을 이용하여 지역의 기후를 예측할 수 있는지를 이해하는데 필요하다.

본 연구에서는 대규모 해양 및 대기 조건으로 미국 NOAA CPC(climate prediction center) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>)에서 제공하는 기후인자(climate indices)를 이용하여 소양강댐의 유입량과의 상관성을 분석하였다. NOAA CPC에서는 약 40개의 기후인자에 대한 시계열 자료를 제공하고 있다(Table 9). 40개의 기후인자는 해수면 온도(SST), ENSO 지수, 북극진동(AO) 등을 포함하고 있다. CPC에서는 50년 이상의 월자료를 기후인자에 대해 제공하고 있다.

기후인자와 소양강댐 유입량의 관계를 분석하기 위해 먼저 상관계수를 이용하여 두 자료간의 선형 상관성을 분석하였다. 기후인자가 시간지체(time lag)를 가지고 영향을 미칠 것으로 가정하고, 0~12개월까지 지체효과를 고려하여 분석을 수행하였다. 그 다음 소양강댐 유입량(종속변수)과 유의한 상관성을 가지는 기후인자들(독립변수)을 이용하여 다중선형 회귀(multiple linear regression)모형을 개발하였다. 회귀모형 구축시 APCC MME 결과와 예측성능을 비교하기 위해 분석기간을 23년(1983-2005년)으로 동일하게 설정하였다.

적은 데이터 개수(본 연구에서는 23개)로 통계예측모형을 구축할 경우 모델성능에 대한 신뢰도 평가가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 대표적인 resampling 방법인 K-fold 교차검정(cross validation)을 이용하여 예측성능을 검정하였다. K-fold 교차검정은 N개의 샘플에서 하나를 빼고(leave-one-out) 나머지 샘플(N-1개)만을 이용해서 회귀모형을 추정한다. 그 다음 추정된 회귀모형을 이용해 제외된 하나에 대한 예측을 수행하고 예측성능을 테스트하는 방법이다. 이것을 N번 반복해서 예측된 값과 관측값의 비교를 통해 정확도를 평가하는 방법이다.

Table 9. Climate indices: Monthly atmospheric and ocean time series (CPC, 2014)

Climate index	Abb.	Description
Pacific North American Index	PNA	One of the most prominent modes of low-frequency variability in the Northern Hemisphere extratropics
East Pacific/ North Pacific Oscillation	EP/NP	A Spring-Summer-Fall pattern with three main anomaly centers
Western Pacific Index	WPO	A primary mode of low-frequency variability over the North Pacific in all months
Eastern Asia/Western Russia	EA/WR	Second prominent mode of low-frequency variability over the North Atlantic, and appears as a leading mode in all months
North Atlantic Oscillation	NAO	One of the most prominent teleconnection patterns in all seasons is the North Atlantic Oscillation
Southern Oscillation Index	SOI	The development and intensity of El Niño or La Niña events in the Pacific Ocean, calculated using the pressure differences between Tahiti and Darwin
Eastern Tropical Pacific SST	Nino3	The average of sea surface temperature anomalies over the region from 5N to 5S and 150W to 90W
Bivariate ENSO Timeseries	BEST	Calculated from combining a standardized SOI and a standardized Nino3.4 sea surface temperature (SST) time series
Tropical Northern Atlantic Index	TNA	Anomaly of the average of the monthly SST from 5.5N to 23.5N and 15W to 57.5W
Tropical Southern Atlantic Index	TSA	Anomaly of the average of the monthly SST from Eq-20S and 10E-30W
Western Hemisphere warm pool	WHWP	Monthly anomaly of the ocean surface area warmer than 28.5°C in the Atlantic and eastern North Pacific
Oceanic Nino Index	ONI	Three month running mean of NOAA ERSST.v2 SST anomalies in the Nino 3.4 region (5N-5S, 120-170W), based on the 1971-2000 base period
Multivariate ENSO Index	MEI	Time series is bimonthly so the Jan value represents the Dec-Jan value and is centered between the months
Extreme Eastern Tropical Pacific SST	Nino 1+2	The average of sea surface temperature anomalies over the region from 0 to 10S and 90W to 80W
Central Tropical Pacific SST	Nino 4	The average of sea surface temperature anomalies over the region from 5N to 5S and 160E to 150W
East Central Tropical Pacific SST	Nino 3.4	The average of sea surface temperature anomalies over the region from 5N to 5S and 170W to 120W
Pacific Decadal Oscillation	PDO	The leading principal component of monthly SST anomalies in the North Pacific Ocean
Northern Oscillation Index	NOI	Climate variability based on the difference in sea level pressure anomalies at the North Pacific High and near Darwin Australia
North Pacific pattern	NP	Area-weighted sea level pressure over the region 30N-65N, 160E-140W
Trans-Niño Index	TNI	El Niño evolution

Table 9. Climate indices: Monthly atmospheric and ocean time series (CPC, 2014) (Continued)

Climate index	Abb.	Description
Arctic Oscillation	AO	The first leading mode from the EOF analysis of monthly mean height anomalies at 1000-hPa (NH)
Antarctic Oscillation	AAO	The first leading mode from the EOF analysis of monthly mean height anomalies at 700-hPa (SH)
Pacific Warmpool	PW	1st EOF of SST (60e-170E, 15S-15N) SST EOF,
Tropical Pacific SST EOF	TPSE	1st EOF of SST 20N-20S, 120E-60W
Atlantic Tripole SST EOF	ATLTRI	1st EOF of SST 10N-70N, 0-80W
Atlantic Multidecadal Oscillation	AMO	The patterns of SST variability in the North Atlantic
Atlantic Meridional Mode	AMM	Meridional modes of atmosphere-ocean variability in the tropical Pacific and tropical Atlantic
North Tropical Atlantic SST Index	NTA	timeseries of SST anomalies averaged over 60W to 20W, 6N to 18N and 20W to 10W, 6N to 10N
Caribbean SST Index	CAR	Time series of SST anomalies averaged over the Caribbean
Atlantic Multidecadal Oscillation, smoothed	AMOSM	Smoothed AMO with a 121 month smoother
Quasi-Biennial Oscillation	QBO	Zonal average of the 30mb zonal wind at the equator
Globally Integrated Angular Momentum	GIAM	Globally Integrated Angular Momentum
ENSO precipitation index	ESPI	Time series of rainfall data in the Tropical Pacific
Central Indian Precipitation	CIP	Core monsoon India rainfall
Sahel Standardized Rainfall	SahelRain	average June through September African rainfall within 20-8N, 20W-10E
SahelArea averaged precipitation for Arizona and New Mexico	SWM	Averaged monthly precipitation in Arizona and New Mexico
Northeast Brazil Rainfall Anomaly	NBRA	The northeast Brazil rainfall index is calculated from data for Fortaleza (3.7S, 38.5W) and Quixeramobim (5.3S, 39.3W) Brazil
Solar Flux	Solar	10.7cm Solar Flux Data
Global Mean Land/cean Temperature Index	GMLOT	Anomaly of the mean of global land and ocean temperature
Equatorial Eastern Pacific SLP	ESLP	Sea level pressure anomalies in the equatorial eastern Pacific

6. 갈수기 댐유입량 예측성 평가

기후모델 결과를 이용한 역학적 댐유입량 예측방법과 원격상관을 이용한 통계적 댐유입량 예측방법의 성능을 비교평가하고 다각도로 분석하였다.

6.1 APCC MME를 활용한 갈수기 댐유입량 예측

APCC MME에 이용되는 10개 기후모델의 hindcast를 이용하여 소양강댐유역의 월별, 선형예측시간(lead time) 별, 기후모델별, 도메인별, 물수지모형별 예측성능을 평가하였다. 또한, 총 150개 예측결과(=10개 기후모델 × 5 물수지모형 × 3개 매개변수)를 다중모델상불(MME)한 결과도 같이 비교하였다. 여기서 MME는 각 예측결과의 아노말리를 단순평균하였다.

예측결과의 정확도 평가 기준으로 Spearman 순위 상관계수(Wilks, 2006)와 Pearson 상관계수를 이용하였다. Spearman 순위 상관계수는 두 변수의 관계가 비선형이거나 두 변수가 정규분포를 따르지 않을 경우에도 적용할 수 있는 장점이 있다. 특히 Spearman 순위 상관계수는 두 변수의 값을 이용하지 않고 순위를 이용하기 때문에 Pearson 상관계수가 가지는 단점인 큰 값에 민감하게 반응하는 부분을 보완할 수 있는 계수이다.

세 개의 도메인(1-point, 4-point, 9-point)에 대한 유출모형과 매개변수별 예측결과의 Spearman 순위 상관계수(Figs. 24-26)와 Pearson 상관계수(Figs. 27-29)를 도시하였다. x축은 세 개의 도메인에 대해 각 15개(5 물수지모형 × 3개 매개변수) 결과를 보여주며 (총 45개), y축은 각 도메인의 기후모델 결과를 물수지모형에 입력하여 예측한 결과와 MME(filled circle)의 상관계수를 나타낸다. 예측정보의 통계적 유의성을 판단하기 위한 기준으로 0.05 신뢰수준을 이용하였다.

먼저 Spearman 순위 상관계수에 근거하여 예측성을 분석하였다. 소양강댐 댐유입량의 예측성은 기후모델에 따라 큰 차이를 보였다(Figs. 24-26). 또한, 1월, 2월, 3월에서는 동일 기후모델 예측정보를 이용한 경우에도 월물수지모형에 따라 예측성에서 차이를 나타내었다(Fig. 24). 이것은 1월, 2월, 3월 댐유입량의 예측성능이 기후모델과 월물수지모형의 조합에 의해 크게 영향을 받음을 의미한다. 그러나 도메인에 따른 예측성은 기후모델이나 월물수지모형의 선정에 비해 상대적으로 작은 차이를 보였다. MME는 1월에서 3월의 유입량 예측에

서 전반적으로 개별모델에 비해 우수한 성능을 보여주었다.

4월 댐유입량의 한 달 선행 예측성능은 기후모델에 따라서는 큰 차이를 보였으나 상대적으로 월물수지모델이 미치는 영향은 1월, 2월, 3월에 비해 적게 나타났다(Fig. 24). 도메인이 미치는 영향은 기후모델에 따라 다르게 나타났다. 4월 댐유입량 예측에서도 MME를 적용한 결과가 가장 우수한 예측성능을 나타내었다. 5월과 6월의 댐유입량 예측에서는 기후모델들의 예측성능이 대부분 유의하지 않았으며, 몇몇 기후모델 결과를 이용한 예측은 관측 댐유입량과 음의 상관을 보여주었다. 이러한 기후모델간의 상관성의 차이로 인해 MME 결과가 개별 기후모델의 예측성능에 비해서도 낮게 나타났다. 일반적으로 MME는 각 예측결과의 상관계수를 평균한 값과 예측결과 사이의 내부상관(inter-correlation)의 비로 표현된다. 따라서 평균 상관계수가 크고, 내부상관계수가 작을수록 MME의 예측성은 증가된다. 1월에서 4월의 경우 평균적인 상관계수가 5월과 6월에 비해 크기 때문에 MME의 예측성이 높게 나타난 것으로 판단된다. 5월과 6월의 한 달 선행 댐유입량 예측에서는 MME를 이용한 결과보다는 예측성이 상대적으로 다른 기후모델에 비해 우수한 단일 기후모델의 결과를 이용하는 전략이 필요한 것으로 분석되었다(Table 10). 도메인에 따른 영향은 기후모델과 유출모델에 따라 차이를 보였으나 기후모델에 따른 영향보다는 적었다.

2개월 선행예측의 경우 1개월 선행예측에 비해 정확도가 전반적으로 낮았으며, 대부분의 예측결과가 유의하지 않은 것으로 나타났다(Fig. 25). 모델에 따라 상반된 상관성을 보인 1월과 6월의 경우에는 MME 기법 적용시 예측성이 거의 없는 것으로 나타났다. 다만 2월, 3월, 4월, 5월에서는 MME가 유의한 예측성을 보였으며, 대부분 최고 예측성능을 보인 개별모델의 예측정확도 수준에 근접하였다. 그러나 2개월 선행 댐유입량 예측에서는 MME를 적용한 결과보다 개별 기후모델 결과를 이용한 예측이 우수한 성능을 보였다. 2개월 선행예측에서도 전반적으로 도메인에 따른 예측성능의 변화보다는 유출모델에 따른 예측성의 변화가 크게 나타났다.

3개월 선행예측에서는 4월과 5월의 MME 적용 결과가 댐유입량 예측에서 우수한 예측성능을 보였다. 나머지 월에서는 개별모델을 이용한 예측성이 MME 결과에 비해 높게 나타났다. 1월과 2월의 경우 NCEP 모델결과를 이용한 예측이 다른 기후모델 결과를 이용한 경우에 비해 높은 예측성을 보였다. 이 예측성은 유출모델에 따라 차이를 보였다. 또한, 도메인에 따라서도 영향을 받았으며, 9-point 도메인 정보를 이용한 결과에서 가장 우수한 예측성을

보였다. 3개월 선형예측에서도 이러한 월별 예측성에 근거하여 개별 기후모델 결과나 MME 예측결과를 이용하는 방안이 필요할 것이다.

Table 10은 각 월의 선형예측시간별 가장 우수한 예측성능을 보인 기후모델, 도메인, 월 물수지모형의 조합을 제시하였다.

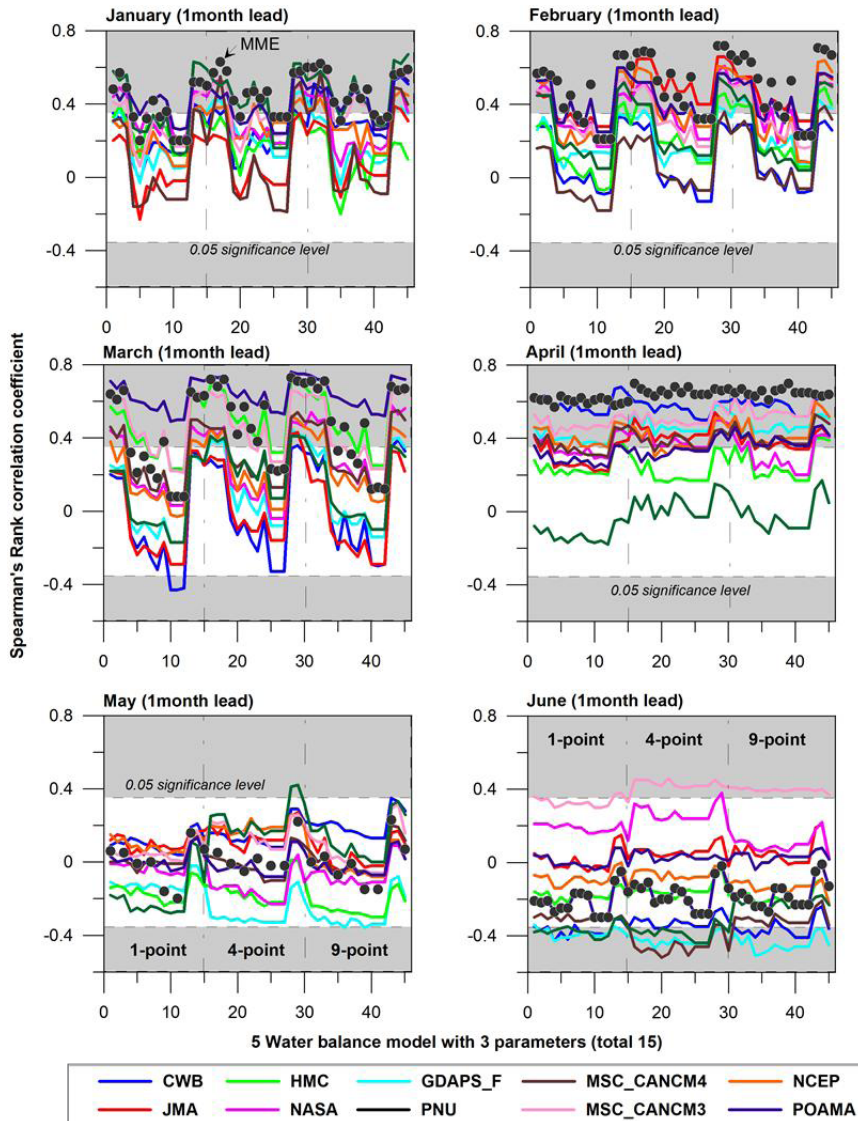


Figure 24. Spearman's rank correlation coefficient of the combination of climate models, domains, water balance models, and parameters for 1 month lead prediction

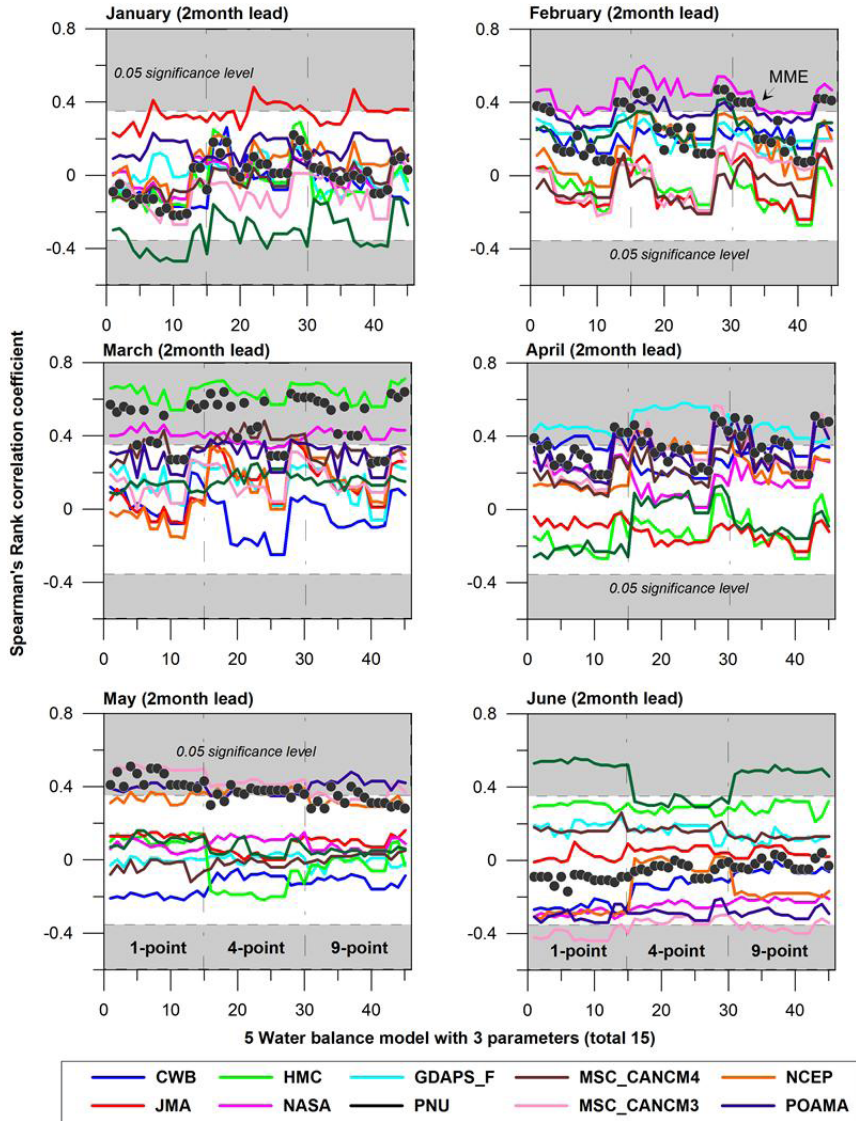


Figure 25. Spearman's rank correlation coefficient of the combination of climate models, domains, water balance models, and parameters for 2 month lead

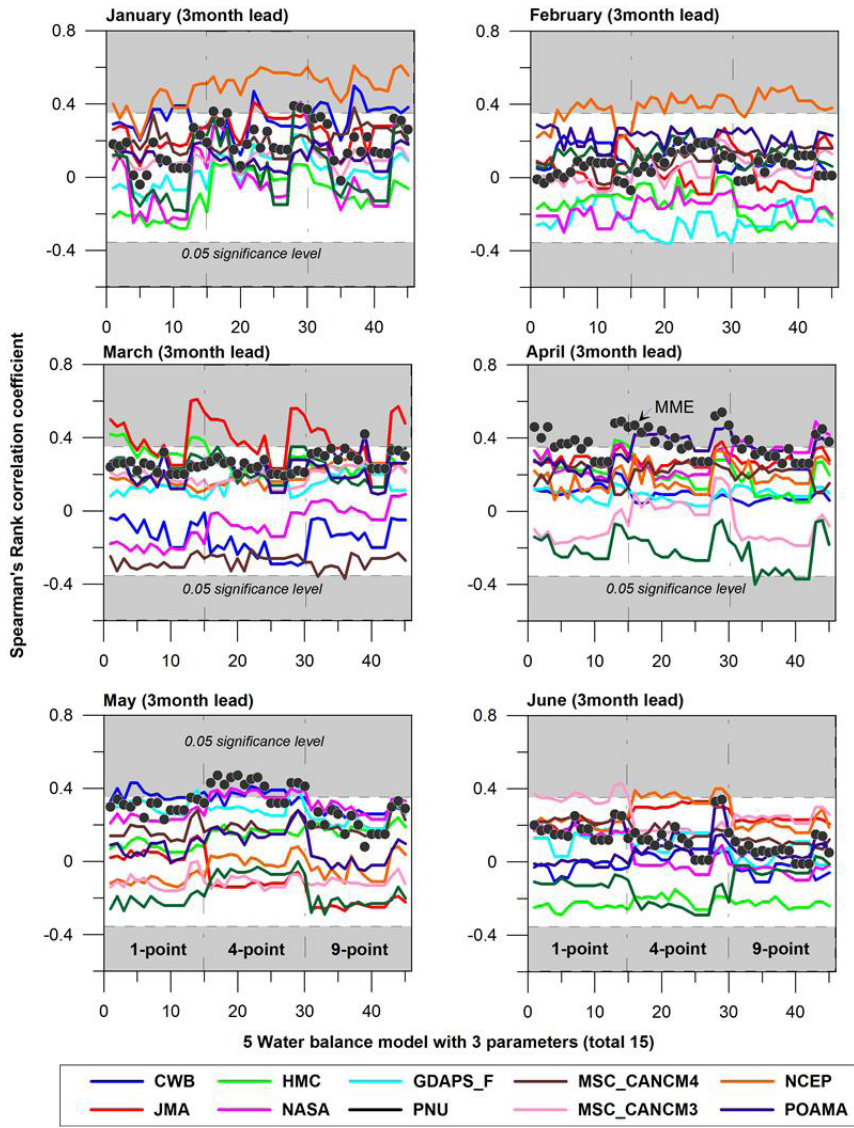


Figure 26. Spearman's rank correlation coefficient of the combination of climate models, domains, water balance models, and parameters for 3 month lead prediction

Table 10. Best prediction for each month and lead time depending on climate model, domain, and water balance model based on Spearman's rank correlation

Month	Lead time	Best prediction			¹ Corr.
		Climate model	Domain	Water balance model	
January	1-month	MME	4-point	ABCD	0.63**
	2-month	JMA	4-point	VUB	0.48*
	3-month	MME	4-point	Xiong	0.39*
February	1-month	MME	4-point	Xiong	0.72**
	2-month	MME	4-point	Xiong	0.47*
	3-month	NCEP	9-point	VUB	0.50**
March	1-month	MME	4-point	Xiong	0.73**
	2-month	MME	4-point	ABCD	0.64**
	3-month	MME	9-point	VUB	0.42*
April	1-month	MME	4-point	ABCD	0.70**
	2-month	MME	4-point	Xiong	0.51**
	3-month	MME	4-point	Xiong	0.54**
May	1-month	HMC	4-point	Xiong	0.42*
	2-month	MME	1-point	GUO	0.51**
	3-month	MME	4-point	ABCD	0.47*
June	1-month	MSC_CANCM3	4-point	ABCD	0.47*
	2-month	PNU	1-point	VUB	0.56**
	3-month	MSC_CANCM3	1-point	Xiong	0.43*

¹ Corr = 1 - [(6×Σd²)/(n³-n)]. Here d is the difference in rank between simulated and observed values.

n is the number of data

* 0.05 significance level ** 0.01 significance level

예측성은 평가기준에 따라서도 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. Pearson 상관계수와 Spearman 순위 상관계수를 비교한 결과 개별 기후모델을 이용한 예측성에서 큰 차이를 보였다. 1월의 경우 Spearman 순위 상관계수에서는 HMC 결과가 개별모델 결과중 가장 우수(Fig. 24)한 것으로 나타났으나 Pearson 상관계수에서는 NASA 결과가 가장 우수하였다(Fig. 27). MME에 대해서는 2월의 예측성이 가장 큰 차이를 보였으며, 나머지 월에서는 비슷한 예측정확도를 나타내었다. 이는 MME가 상대적으로 개별모델을 이용하는 것보다 예측성 평가기준에 덜 민감한 것을 시사한다.

Pearson 상관계수를 이용한 분석에서도 담유입량의 예측성은 기후모델에 따라 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났다(Figs. 27-29). 그 다음으로 월물수지모델에 따른 영향이 크고, 도메인의 영향이 가장 작았다. 또한, Spearman 상관계수를 이용한 분석과 동일하게 MME는 1월에서 4월의 유입량 예측에서 유의한 예측성을 보여주었다.

2개월 선행예측의 경우에는 3월과 4월 MME가 유의한 예측성능을 보였다. 반면 나머지 월에서는 예측성의 개선이 나타나지 않았다. 3월의 2개월 선행예측에서는 NASA 모델 결과를 이용한 예측성이 다른 모델결과를 이용한 것에 비해 확연히 우수하였다. 특이하게 4월의 2개월 선행예측에서 GDAPS_F는 음의 유의한 예측성을 나타내었다. 3개월 선행예측에서는 일부 개별모델 결과와 4월의 MME 적용 결과를 제외하고는 유의한 예측성을 보이지 않았다. 4월을 제외한 나머지 월에서는 개별모델을 이용한 예측성이 MME 결과에 비해 높게 나타났다. 2월의 경우 MSC_CANCM3 모델 결과를 이용한 경우가 높은 예측성능을 보여주었는데, 월물수지모델에 따라 예측성에 영향을 받는 것으로 나타났다. Table 11은 Pearson 상관계수에 근거하여 각 월의 선행예측시간별 가장 우수한 예측성능을 보인 기후모델, 도메인, 월물수지모형의 조합을 나타낸 것이다. MME가 가장 많이 선정되었으며, 도메인으로는 4-point 정보를 이용하는 방법이 그리고 유출모델로는 Xiong 모델을 이용한 경우가 예측성이 높은 것으로 나타났다.

Fig. 30에서 Fig. 32는 월물수지모델과 모델의 세 개 매개변수셀에 따른 예측성의 차이를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 관측 기후정보를 이용한 유출분석(좌측그림)에서 모든 모형들은 매우 유사한 모의결과를 보여주었다. 그러나 기후예측정보를 이용한 분석(우측그림)에서는 유출량 패턴은 유사하였으나 모델별로 첨두유량(peak flow)이나 저유량 모의에서 차이를 나타내었다(Figs. 30-32). 세 개의 다른 매개변수셀은 유출모델간 결과 차이에

비해서는 상대적으로 영향이 적은 것으로 나타났다. 이 결과는 댐유입량 예측에서 동일한 기후모델의 예측정보에 대해서도 유출모델에 따라 예측성능이 달라 질 수 있음을 시사하며, 유출모델의 구조적 차이에서 기인하는 불확실성이 매개변수에 따른 불확실성에 비해 큰 것을 보여준다. 따라서 APCC MME 기후모델 결과를 이용하여 댐유입량의 예측성을 향상시키기 위해서는 기후모델과 유출모델의 최적조합을 찾는 노력이 병행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 예측성이 낮은 조합을 MME 계산시 제외하는 방안에 대한 분석도 필요할 것이다.

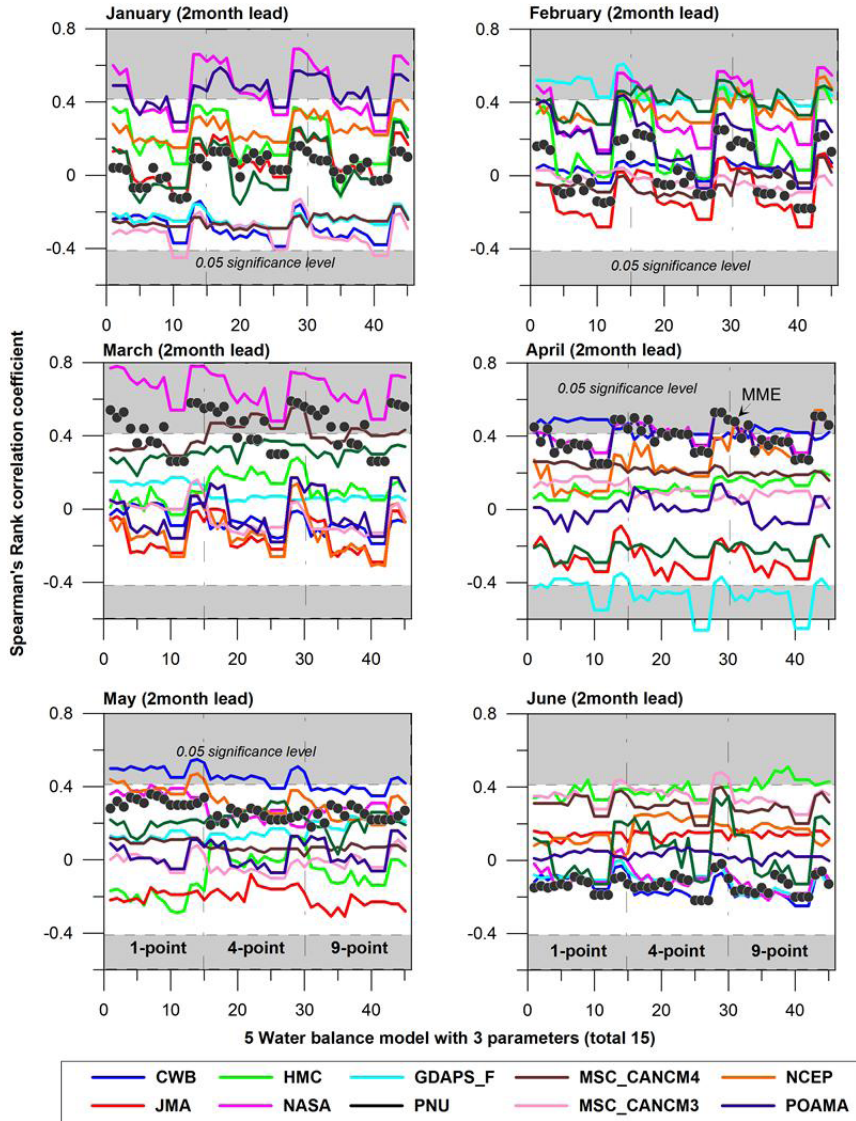


Figure 28. Pearson's correlation coefficient of the combination of climate models, domains, water balance models, and parameters for 2 month lead prediction

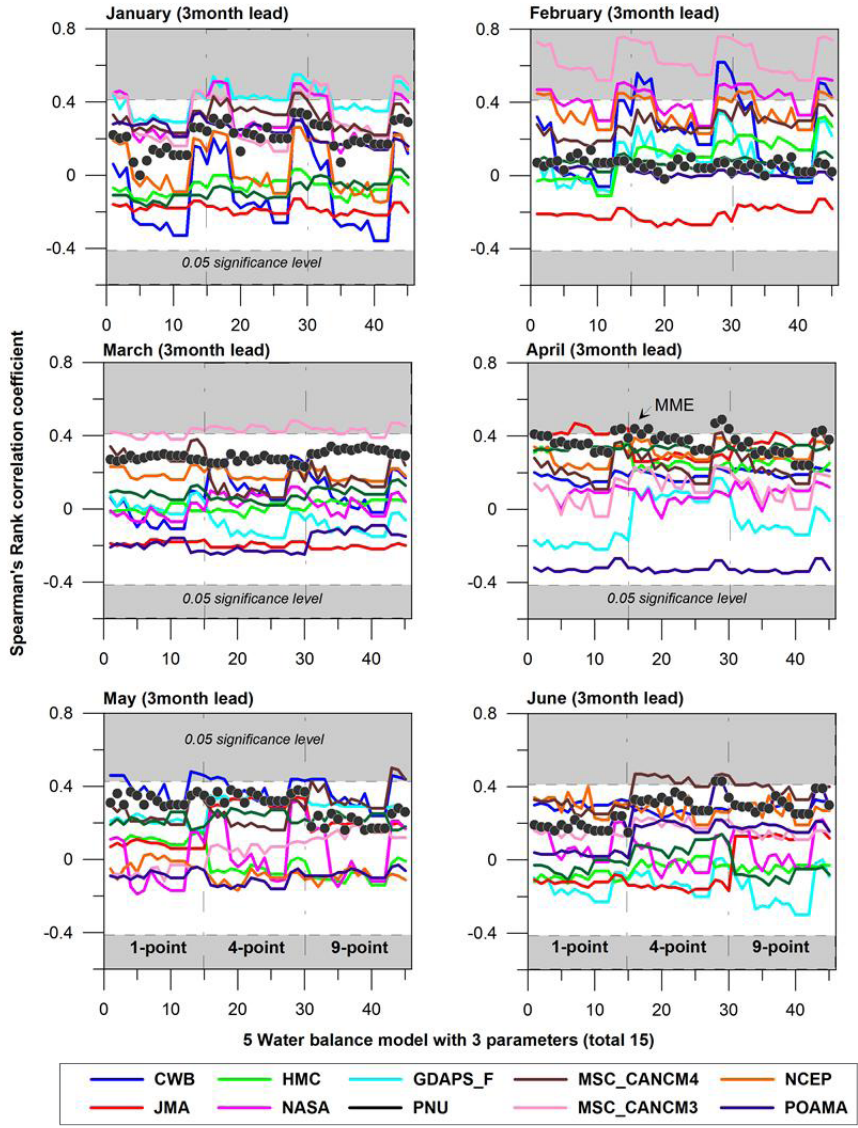


Figure 29. Pearson's correlation coefficient of the combination of climate models, domains, water balance models, and parameters for 3 month lead prediction

Table 11. Best prediction for each month and lead time depending on climate model, domain, and water balance model based on Pearson's correlation

Month	Lead time	Best prediction			¹ Corr.
		Climate model	Domain	Water balance model	
January	1-month	MME	4-point	ABCD	0.63**
	2-month	NASA	4-point	Xiong	0.69**
	3-month	GDAPS_F	4-point	Xiong	0.55**
February	1-month	MME	4-point	ABCD	0.48*
	2-month	NASA	4-point	Xiong	0.59**
	3-month	MSC_CANCM3	4-point	Xiong	0.76**
March	1-month	MME	4-point	Xiong	0.70**
	2-month	MME	4-point	Xiong	0.59**
	3-month	MSC_CANCM3	4-point	Xiong	0.48*
April	1-month	MME	4-point	ABCD	0.70**
	2-month	MME	4-point	Xiong	0.53**
	3-month	MME	4-point	Xiong	0.49*
May	1-month	NASA	4-point	GUO	0.40
	2-month	CWB	1-point	Xiong	0.55**
	3-month	MSC_CANCM4	9-point	Xiong	0.50*
June	1-month	NCEP	4-point	Xiong	0.54**
	2-month	HMC	9-point	VUB	0.51*
	3-month	MME	4-point	Xiong	0.43*

$${}^1 \text{Corr} = SS_{OS} / \sqrt{SS_O \times SS_S}, \quad SS_{os} = \sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S}), \quad SS_O = \sum (O_i - \bar{O})^2,$$

Here O is observed and S is simulated

* 0.05 significance level ** 0.01 significance level

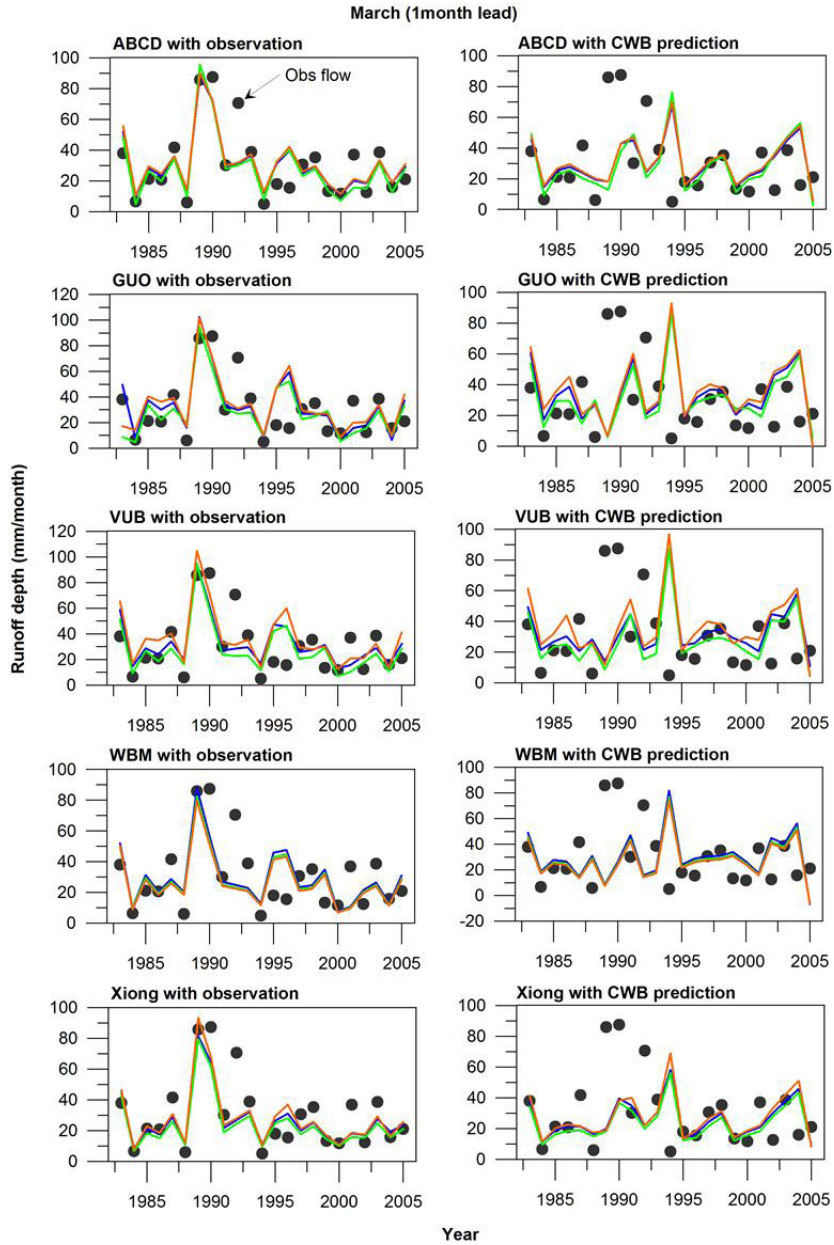


Figure 30. Performance of water balance models according to three different parameter set using CWB 1-month lead prediction. Three lines indicates the simulated flow with three different parameter set

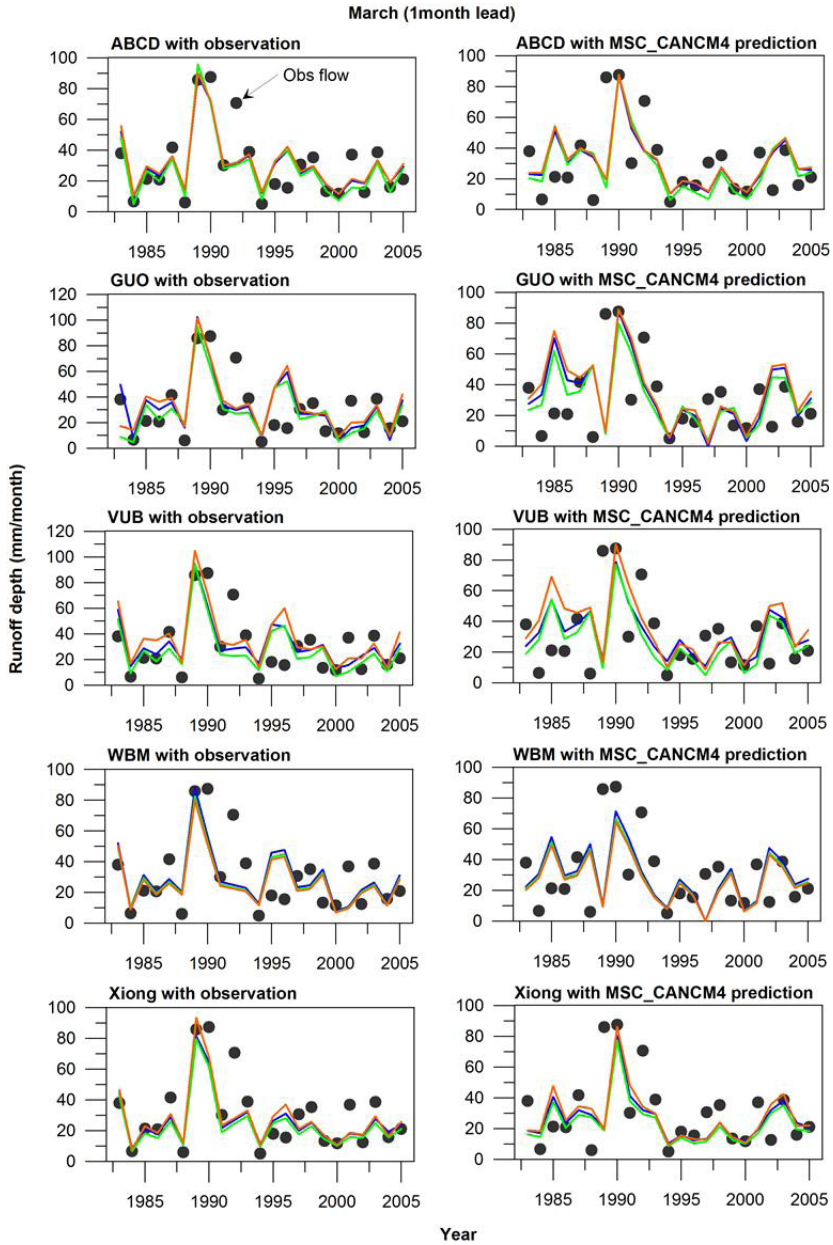


Figure 31. Performance of water balance models according to three different parameter set using MSC_CANCM4 1-month lead prediction, Three lines indicates the simulated flow with three different parameter set

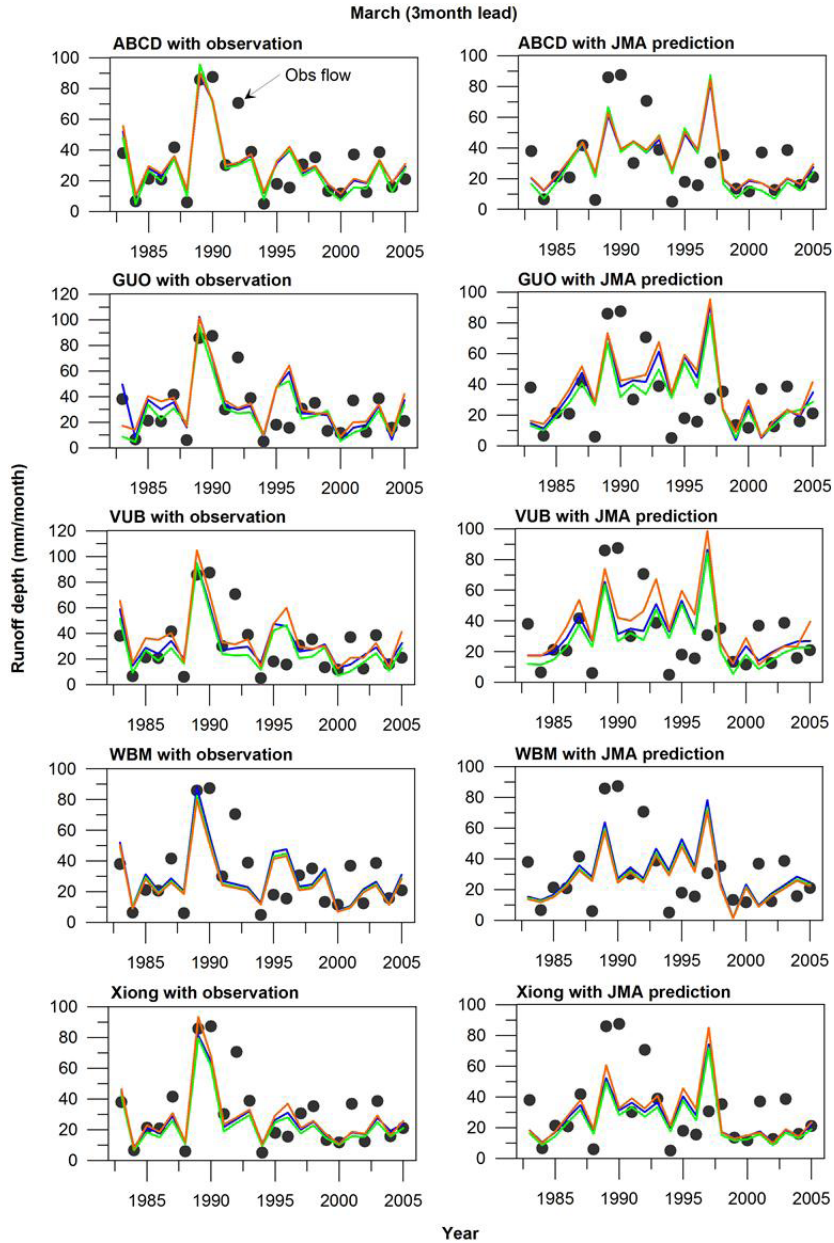


Figure 32. Performance of water balance models according to three different parameter set using JMA 3-month lead prediction. Three lines indicates the simulated flow with three different parameter set

6.2 원격상관을 이용한 갈수기 댐유입량 예측

소양강댐 유역의 갈수기 월유출량과 NOAA CPC에서 제공하는 기후지수와의 상관성을 분석하기 위해 K-fold 교차상관을 수행하였다(조재필, 2014). Fig. 33은 K-fold 교차상관을 이용한 소양강댐 유역의 댐유입량 예측모델의 예측성능 평가 예를 보여준다. N번의 교차상관을 거치는 동안 TSA, Solar, EA의 회귀계수가 N개 추정되고 각 모델은 회귀모델 산정에 이용되지 않은 값을 예측함으로써 교차상관 오차를 산정한다. 그림과 같이 다중선형회귀모델의 독립변수로 선택된 TSA와 EA의 회귀계수에 따라 모델의 성능이 크게 변화됨을 알 수 있다. 그러나 Solar의 회귀계수에 대해서는 예측성능이 민감하게 반응하지 않았다. 이것은 TSA와 EA의 회귀계수의 선정이 Solar의 회귀계수 선정에 비해 예측성에 지대한 영향을 미치는 것을 시사한다. 본 연구에서는 최적 변수와 모델을 추정하기 위해 Akaike's Information Criterion(AIC)가 최소화되는 회귀모델을 선정하였다(조재필, 2014).

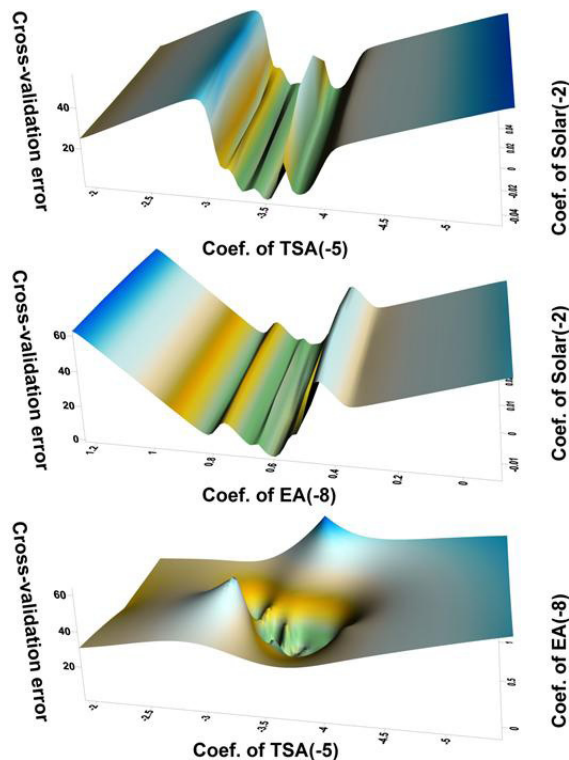


Figure 33. K-fold cross validation error of January streamflow prediction according to coefficients of climatic indices

월별 댐유입량에 대해 예측성이 우수한 회귀모델을 구축하였다(Table 12). 기후인자의 시간지체를 고려하기 위해 0에서 12개월의 지체를 고려하였다. 각 기후인자의 시간지체는 괄호안에 표시하였다. -2는 2개월 시간지체 즉 2개월 선행예측이 가능함을 나타낸다. 1월의 경우 Solar, EA/WR, TSA, TNA가 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 시간지체는 기후인자에 따라 2개월에서 12개월까지 변화되었다. 2월은 TNA, AMM, CAR 등이 주요 인자로 도출되었으며, 모든 기후인자의 선행시간이 10개월 이상이였다. AAO는 3월과 4월에서 주요한 기후인자로 선정되었으며, 지체시간은 5개월에서 7개월까지로 나타났다. 5월의 경우 WPO, AO가 각각 12개월, 10개월의 지체를 통해 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 6월은 AO, SOI, AMM 등이 주요예측인자로 선정되었다.

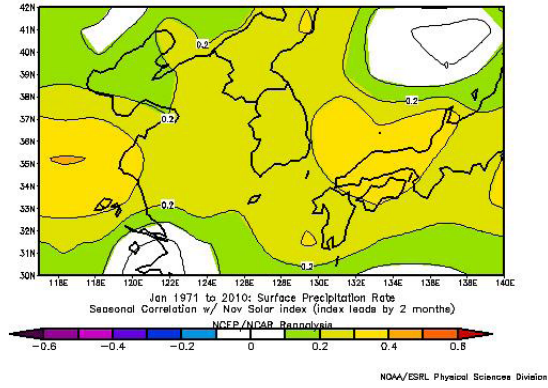
소양강댐의 통계적 댐유입량 예측모델을 개발하기 위해 선정된 기후변수들이 물리적으로 의미있게 채택되었는지 분석하기 위해 회귀모델에 이용된 기후변수들과 NCEP 재분석 자료의 강수량과의 상관계수를 산정하였다. 분석기간은 1971년에서 2010년까지로 40년이고, 상관성분석을 위해 Pearson 상관계수를 이용하였다. Table 12에 있는 변수를 대상으로 분석을 수행하였으며, 일부 결과를 Figs. 34-35에 제시하였다.

1월 댐유입량 예측 모델의 독립변수인 Solar 지수는 한반도 전체에서 1월 강수량과 유의한 양의 상관성을 보였다(Fig. 34). 본 보고서에 제시하지는 않았으나 열대남부대서양지수인 TSA는 한반도 중부지역에 대해서만 양의 상관성을 나타내었다. 2월 댐유입량 예측 모델에 선정된 TNA는 한반도 지역에서 2월 강수량과 음의 상관성을 보였으며, 특히 소양강댐 유역에서 높은 상관성을 나타내었다(Fig. 34). AMM은 한반도에 걸쳐 2월 강수량과 음의 상관성을 보였다. PNA는 3월 강수량과 한반도 전체에 대해 음의 상관을 보이고 있다(Fig. 34). Fig. 34에서 보는 바와 같이 특히 남서쪽 지역에서 통계적 상관성이 높게 나타났다. 3월 강수량과 AAO는 중부지역에 대해 음의 상관을 나타내었다. 4월의 경우 SOI와 AAO가 4월 강수량과 음의 상관성을 보였다(Fig. 35). 5월의 경우 강수량도 4월과 유사한 경향을 보였다. 5월 강수량은 AO와 WPO에 대해 약한 음의 상관을 나타내었다. 6월 강수량은 AO와 중부지역에 대해 유의한 양의 상관성을 보이고 있다. 이 결과는 비록 기후지수가 넓은 범위에서 한반도 강수에 영향을 미치고 있지만 지역별로 상관성에서 차이가 있어 특정유역에서만 유의한 영향이 나타날 수 있음을 보여준다. 즉, 한반도와 같이 좁은 지역에서도 유역에 따라 다른 기후지수가 예측인자로 선정될 수 있음을 시사한다.

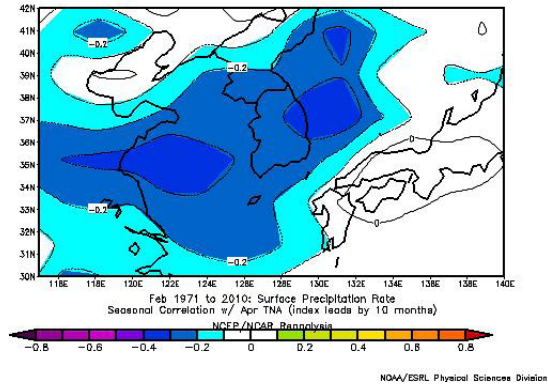
본 연구에서는 각 월별 기후지수에 국한하여 월강수량에 미치는 영향만을 분석하였다. 그러나 Fig. 36와 Fig. 37에서 보는 것처럼 3개월 평균 기후지수도 국내 강수량 계절예측에 활용될 수 있다. Fig. 36에서와 같이 1월에서 3월까지의 강수량 예측시 이전년도의 10월에서 12월 평균 기후지수가 유용한 예측인자가 될 수 있음을 보여준다. Fig. 37에서는 4월에서 6월의 강수량에 대해 유의한 상관성을 보이는 1월에서 3월 평균된 기후지수를 보여주고 있다. 본 연구에서는 이에 대해 구체적인 연구를 수행하지는 않았는데 향후 통계예측모델의 예측성능을 향상시키고 통계예측모델을 다양화하는 방안으로 활용할 수 있을 것이다.

Table 12. Explanatory variables (predictors) used this study for each month with different lead times

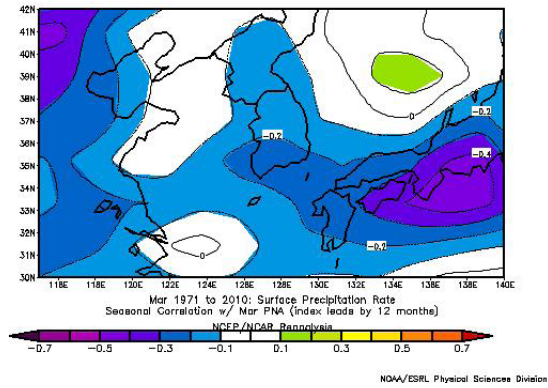
Lead time	Month					
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
0 month	Solar(-2) EA/WR(-8) TSA(-11)	TNA(-10) AMM(-10)	AAO(-5) EA/WR(-2) PNA(-12)	SOI(-2) AAO(-6)	TSA(0) WPO(-12) GIAM(0)	AO(-2) PNA(-4) NAO(-2)
1 month	Solar(-2) EA/WR(-8) TSA(-11)	TNA(-10) AMM(-10)	AAO(-5) EA/WR(-2) PNA(-12)	SOI(-2) AAO(-6)	WPO(-12) AO(-10) NAO(-5)	AO(-2) PNA(-4) NAO(-2)
2 month	Solar(-2) EA/WR(-8) TSA(-11)	TNA(-10) AMM(-10)	AAO(-5) EA/WR(-2) PNA(-12)	SOI(-2) AAO(-6)	WPO(-12) AO(-10) NAO(-5)	AO(-2) PNA(-4) NAO(-2)
3 month	EA/WR(-8) TSA(-11) Solar(-3)	TNA(-10) AMM(-10)	AAO(-5) PNA(-12) Solar(-3)	AAO(-6) ESLP(-3)	WPO(-12) AO(-10) NAO(-5)	PNA(-4) AO(-11) SOI(-11)
4 month	EA/WR(-8) TSA(-11) Solar(-4)	TNA(-10) AMM(-10)	AAO(-5) PNA(-12) Solar(-9)	AAO(-6) SOI(-4) NINA1(-4)	WPO(-12) AO(-10) NAO(-5)	PNA(-4) AO(-11) SOI(-11)
5 month	EA/WR(-8) Solar(-11)	TNA(-10) CAR(-12)	AAO(-5) PNA(-12) Solar(-9)	AAO(-6) SOI(-5)	WPO(-12) AO(-10) NAO(-5)	AO(-11) SOI(-11) AMM(-11)
6 month	EA/WR(-8) Solar(-11)	TNA(-10) CAR(-12)	AAO(-7) PNA(-12) Solar(-9)	AAO(-6) ESLP(-7) Solar(-8)	WPO(-12) AO(-10)	AO(-11) SOI(-11) AMM(-11)
7 month	EA/WR(-8) Solar(-11)	TNA(-10) CAR(-12)	AAO(-7) PNA(-12) Solar(-9)	ESLP(-7) Solar(-8)	WPO(-12) AO(-10)	AO(-11) SOI(-11) AMM(-11)
8 month	EA/WR(-8) Solar(-11)	TNA(-10) CAR(-12)	PNA(-12) Solar(-9) WHWP(-11)	Solar(-8) PNA(-12) NAO(-9)	WPO(-12) AO(-10)	AO(-11) SOI(-11) AMM(-11)
9 month	TSA(-11) TNA(-9)	TNA(-10) CAR(-12)	PNA(-12) Solar(-9) WHWP(-11)	Solar(-12) NAO(-9)	WPO(-12) AO(-10)	AO(-11) SOI(-11) AMM(-11)
10 month	TSA(-11) Solar(-11) TNA(-10)	TNA(-10) CAR(-12)	PNA(-12) WHWP(-11)	Solar(-12) PNA(-12) ESLP(-11)	WPO(-12) AO(-10)	AO(-11) SOI(-11) AMM(-11)
11 month	TSA(-11) Solar(-11)	TNA(-11) CAR(-12) EP/NP(-12)	PNA(-12) WHWP(-11)	Solar(-12) PNA(-12) ESLP(-11)	WPO(-12) EP/NP(-12) QBO(-12)	AO(-11) SOI(-11) AMM(-11)
12 month	TSA(-12) Solar(-12)	TNA(-12) CAR(-12) EP/NP(-12)	PNA(-12) NINA3(-12) Solar(-12)	Solar(-12) PNA(-12) TSA(-12)	WPO(-12) EP/NP(-12) QBO(-12)	AAO(-12) ESLP(-12) SOI(-12)



<Solar Index (-2) vs. dam inflow in January>

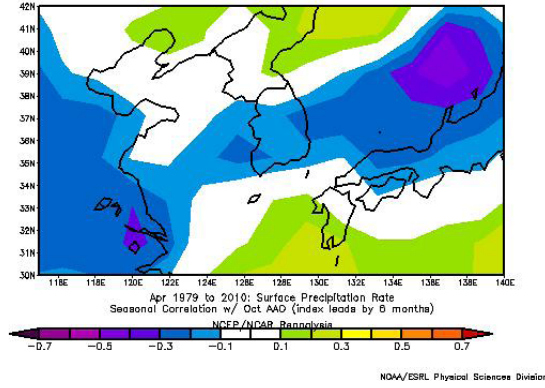


<TNA (-10) vs. dam inflow in February>

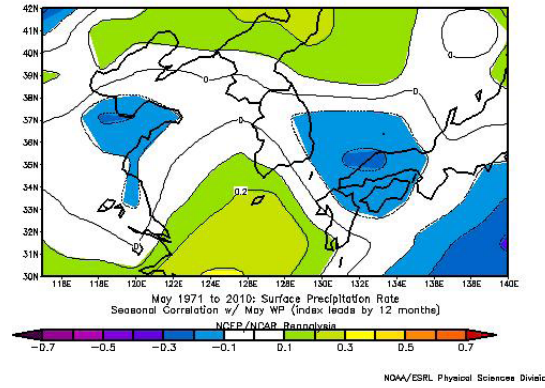


<PNA (-12) vs. dam inflow in March>

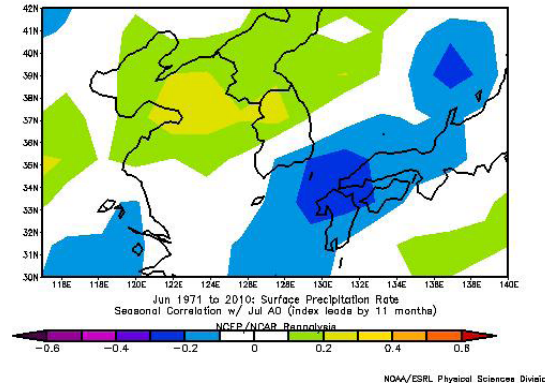
Figure 34. Pearson's correlation coefficient between climatic indices and NCEP reanalysis precipitation in January, February, and March



<AAO (-6) vs. dam inflow in April>



<WPO (-12) vs. dam inflow in May>



<AO (-11) vs. dam inflow in June>

Figure 35. Pearson's correlation coefficient between climatic indices and NCEP reanalysis precipitation in April, May, and June

Precipitation in JFM vs. Index in OND

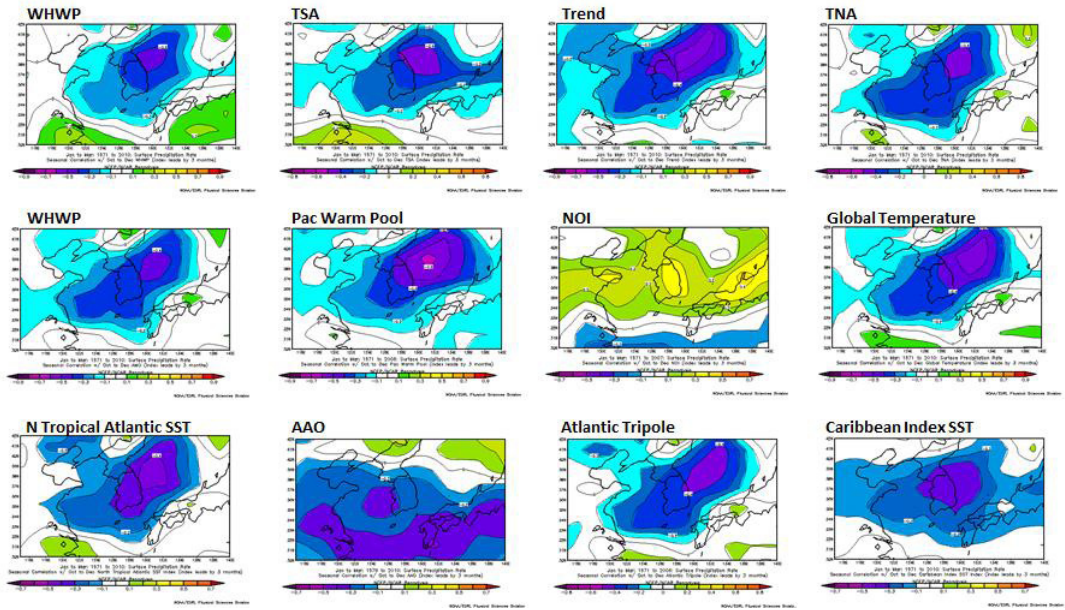


Figure 36. Pearson's correlation coefficient between seasonal climatic indices (January through March) and seasonal NCEP reanalysis precipitation (October through December)

Precipitation in AMJ vs. Index in JFM

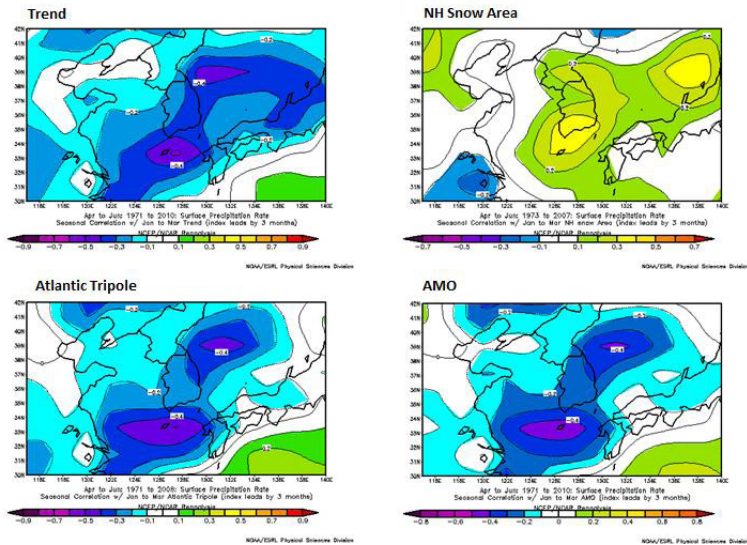


Figure 37. Pearson's correlation coefficient between seasonal climatic indices (April through June) and seasonal NCEP reanalysis precipitation (January through March)

원격상관기반의 통계적 예측모델의 성능을 Pearson과 Spearman 상관계수를 이용하여 평가하였다(Fig. 38). 1월 댐유입량 예측에서는 예측성이 높지는 않으나 4개월 선행예측까지 두 상관계수 모두 유의한 결과를 보였다. 2월의 경우 11개월 선행예측에서 Pearson 상관계수만 유의하였고, 나머지 예측은 95% 신뢰구간에서 유의하지 않았다. 3월 예측에서는 10개월과 11개월 선행예측의 Pearson 상관계수를 제외하고는 대부분 유의한 결과를 보였다. Spearman 상관계수는 전반적으로 예측선행시간에 따라 예측성이 감소하는 경향을 보였으나, Pearson 상관계수는 6개월과 7개월 선행예측에서 다른 예측성보다 우수한 결과를 나타내었다. 4월의 경우 6개월 선행예측까지 높은 예측성을 보였으나 8개월 이후의 예측은 유의하지 않았다. 5월의 예측성은 모든 경우에 대해 유의한 결과를 보였다. 6월 댐유입량 예측에서는 상관계수에 따라 상이한 예측성을 보였다. Spearman 상관계수를 이용한 경우 모든 선행예측시간에 대해 유의하지 않은 것으로 나타난 반면, Pearson 상관계수에서는 3개월에서 11개월 선행예측이 유의하였다. 결론적으로 본 연구에서 구축된 통계적 예측모델은 3월, 4월, 5월 댐유입량 예측에서 활용성이 클 것으로 나타났으며, 2월 유입량 예측에서는 활용성이 낮은 것으로 나타났다. 6월의 경우 상관계수에 따라 예측성에서 큰 차이를 보여 사용 시 주의가 필요하고 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

선행시간별 예측유입량과 관측유입량을 시계열로 비교하였다(Fig. 39). 그림에서와 같이 통계예측모델 구축시 적용되지 않은 기간인 2006년에서 2011년에 대해 예측결과와 관측자료를 비교하였다. 1월의 경우 예측모델이 2006년, 2007년, 2010년, 2011년에 대해서는 관측값에 근접한 예측성을 보였으나 2008년과 2009년에는 과대모의하였다. 2월의 경우에는 전반적으로 관측값에 근사한 모의를 수행하였으며, 3월, 4월, 5월, 6월에서도 관측값의 연변동을 비교적 근사하게 예측하는 것으로 나타났다. 자료기간을 확장하여 예측성에 대한 면밀한 분석이 추가적으로 필요하지만 전반적으로 1월을 제외한 나머지 월의 댐유입량 예측성에서 활용가능성이 큰 것으로 판단된다.

현재 NOAA CPC 홈페이지에서는 기후지수를 꾸준히 업데이트하고 있으나 몇몇 기후지수는 실시간 업데이트가 안되고 몇 개월 또는 몇 년의 시간이 소요된다. 이러한 이유로 본 연구에서는 2011년까지에 대해서만 예측성을 검증하였다. 향후 통계예측모델을 실무에 활용하기 위해서는 실시간 관측자료(기후요소, 해수면온도)를 이용하여 기후지수를 APCC에서 자체적으로 산정하는 접근방법을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

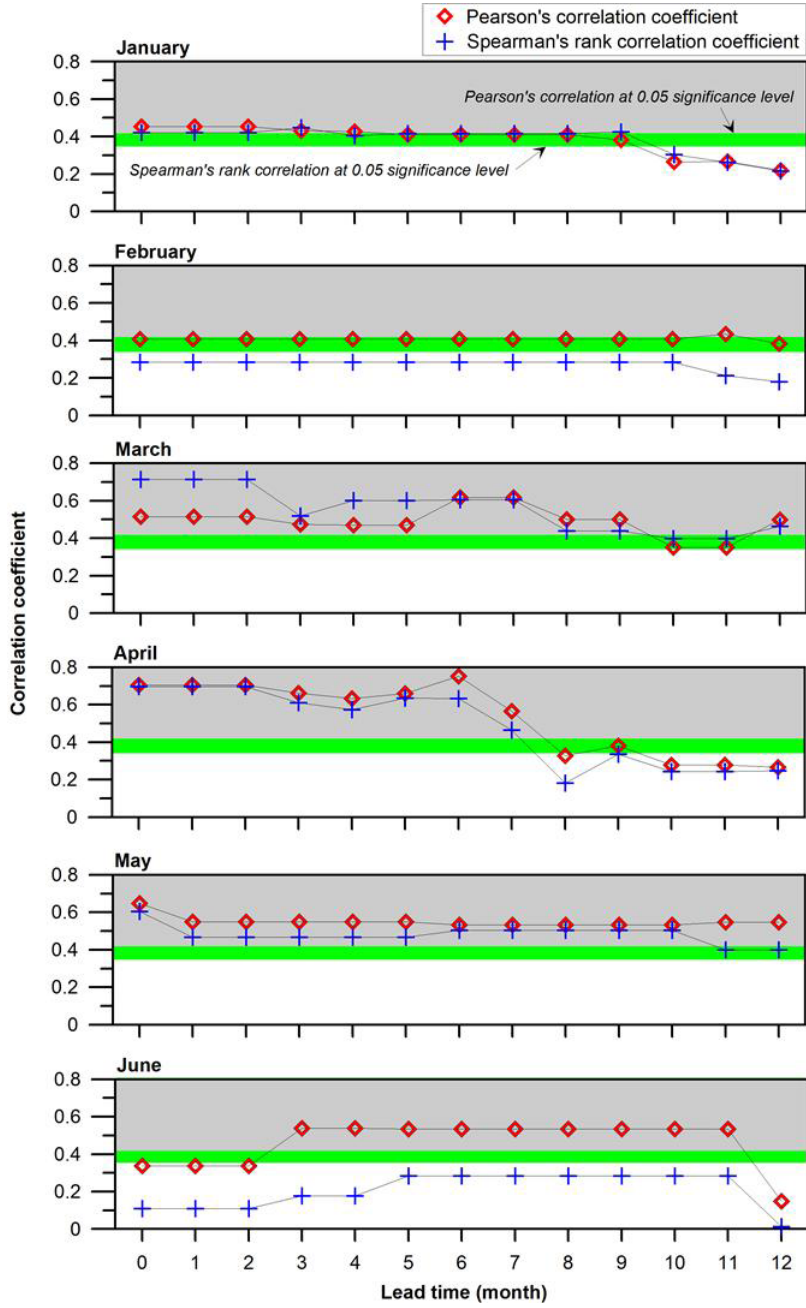


Figure 38. Pearson's correlation and Spearman's rank correlation between observed flow and simulated flow by statistical streamflow prediction models with different lead time

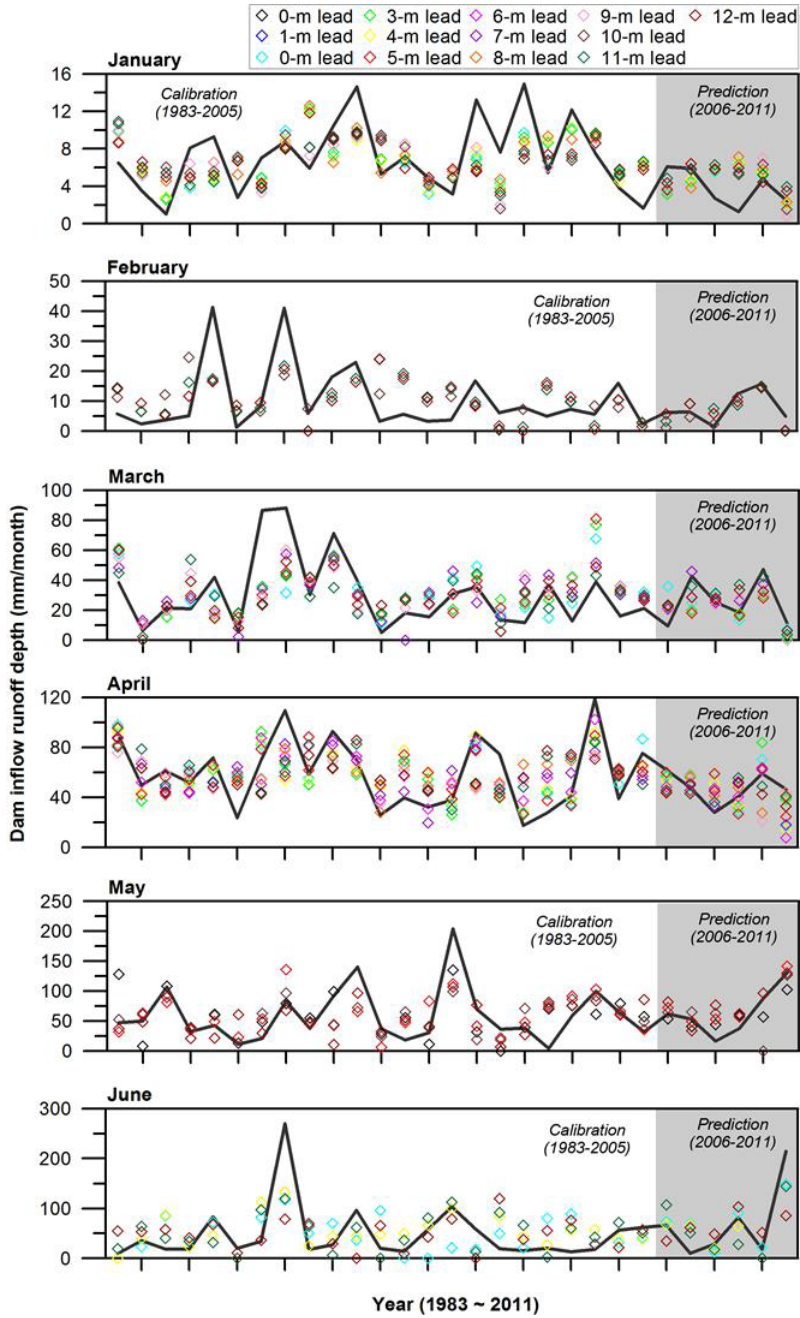


Figure 39. Comparison between observed flow and simulated flow by statistical streamflow prediction model

7. 계절예측정보를 활용한 효율적 갈수기 댐운영 방안

본 연구에서는 APCC MME에 활용되는 10개 기후모델의 3개월 예측 hindcast (2003-2005)를 이용하여 역학적 기반의 갈수기 소양강댐 유입량의 예측성을 평가하였다. 분석결과 역학적 기반의 댐유입량 예측은 95% 신뢰구간에서 유의한 예측성을 보이는 것으로 나타났다(5월 유입량 1개월 선행예측 제외). 특히 1월, 3월, 4월 유입량의 1개월 선행예측에서 우수한 예측성을 보였다. 그러나 예측선행시간이 2개월, 3개월로 길어짐에 따라 예측성이 전반적으로 감소하였다(1월, 3월, 4월).

개별 기후모델의 결과가 대부분 양의 상관성을 보일 경우 다중모델앙상블(MME) 결과는 개별 기후모델 결과를 이용한 경우에 비해 우수하거나 또는 최고 예측성능을 보인 개별모델 결과에 근접하였다. 개별 기후모델을 이용한 예측성은 두 가지 예측성 평가 기준(Pearson 상관계수, Spearman 순위 상관계수)에 대해 민감하게 반응한 반면, 상대적으로 MME는 크게 영향을 받지 않았다. 따라서 MME를 활용하는 방법이 안정적인 예측성 확보측면에서 유리한 것으로 분석되었다. 다만 MME 결과가 유의하지 않은 경우 개별 기후모델을 이용하는 대안이 고려되어야 할 것으로 판단되었다(Tables 10 & 11).

원격상관에 기반한 통계적 예측모델은 소양강댐의 갈수기 유입량을 신뢰성 있게 예측하는 것으로 나타났다(Fig. 39). 특히 3월, 4월, 5월 댐유입량 예측에서 다양한 선행예측시간에 대해 활용성이 높은 것으로 분석되었다. 2월 유입량 예측에서는 유의하지 않은 예측성을 보였는데, 이러한 통계적 예측모델의 예측성의 한계를 극복하기 위해 역학적 기반의 수자원 예측결과와 병행하여 활용하는 Hybrid 전략이 필요하다. 통계적 예측모델의 장점은 다양한 선행예측시간에 대해 쉽게 모델을 구축할 수 있다는 점으로, 6개월 이상의 장기 유량예측에도 활용성이 클 것으로 판단되었다.

7.1 Hybrid 계절예측정보를 활용한 댐운영 방안

역학적 기반의 예측정보와 통계적 기반의 예측정보를 이용하여 갈수기 다목적댐 유입량 예측성을 개선하고 활용성을 높이기 위한 방안을 다음과 같이 제안하였다.

본 연구에서 개발된 원격상관 기반의 통계적 예측모델은 APCC MME 기후모델을 이용한 역학적 예측(3개월)에 비해 예측선행 시간의 활용범위가 넓다(12개월). 예로, 3월 댐유

입량을 1개월 전(2월)에 예측할 경우 우리가 가질 수 있는 유의한 예측정보는 APCC MME를 이용한 세 개의 역학적 예측정보, 즉 이전 12월에 예측한 3개월 선행예측과 1월에 예측한 2개월 선행예측, 현시점인 2월에 예측한 1개월 선행예측이 있다(squares & circles in Fig. 40). 또한, 통계적 예측에서는 예측성이 유의한 3개월 선행예측부터 9개월 선행예측, 12개월 선행예측정보를 합하여 8개의 예측정보(diamonds & crosses in Fig. 40)를 활용할 수 있다. 따라서 댐운영자는 총 11개의 예측정보를 가지고 3월 유입량을 예측할 수 있다.

이 경우 Fig. 40에서와 같이 역학적 기반의 1개월 선행예측이 가장 예측성이 높고, 역학적 기반의 3개월 선행예측정보가 가장 예측성이 낮은 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 정보를 활용하여 의사결정을 수행할 때 예측정확도가 절대적 판단기준으로 이용되는 것은 위험하다. 왜냐하면 모든 예측정보는 상당한 불확실성을 내포하고 있기 때문이다. 따라서 각 예측정보의 예측정확도에 근거하여 확률적으로 해석하는 방안을 고려하는 것이 필요하다. 이때 예측정확도에 따른 정보의 가중치를 고려하는 것도 하나의 방안이다. 결과적으로 불확실성이 포함된 예측정보를 확률적으로 해석하고 현재의 댐저류량과 향후 공급량을 고려하여 유연한 의사결정을 수행하는 접근방법이 필요하다. 본 연구에서는 Risk Matrix를 이용한 방법을 제안하였다. 이에 대해서는 다음절에 자세히 기술하였다.

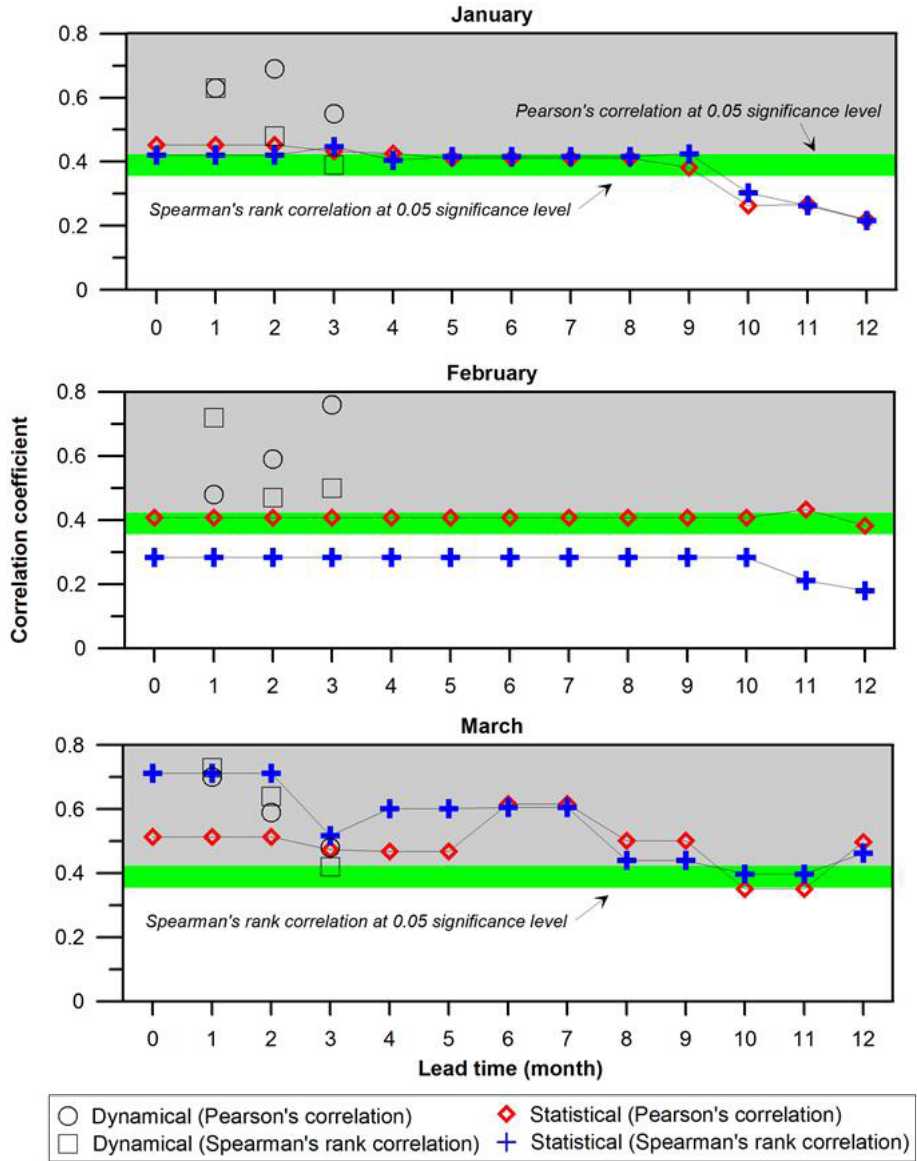


Figure 40. Forecast time (yellow filled circle) and range (bar) of dynamical and statistical prediction developed this study

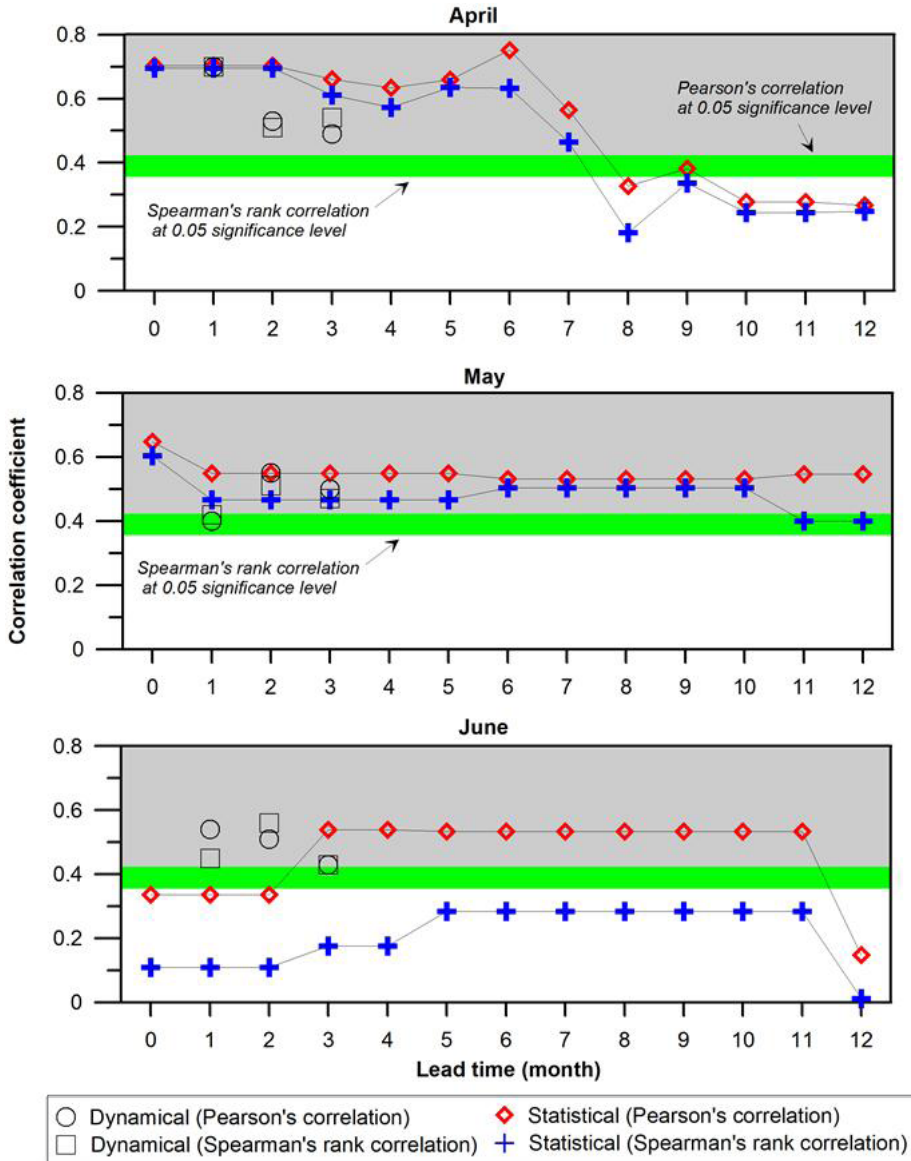


Figure 41. Forecast time (yellow filled circle) and range (bar) of dynamical and statistical prediction developed this study

7.2 Risk matrix 기반의 계절예측정보 댐운영 활용 방안

본 절에서는 불확실성이 포함된 계절예측정보를 댐운영에 효과적으로 활용하기 위한 방안으로 Risk matrix를 이용하여 댐운영 관련 의사결정을 수행하는 방안을 제안하고자 한다(Fig. 42). Risk matrix는 재난재해분야에서 많이 적용되는 방법(e.g., Krausmann et al., 2011; Tseng et al., 2011)으로 불확실성이 포함된 예측정보와 현재의 상황을 동시에 고려하여 효과적인 재난재해 저감전략을 수립하고 우선순위 결정 등의 의사결정에 도움을 준다.

Riskmatrix를 구성하는 일반적인 방법은 먼저가능성(likelihood)과결과(Consequences)의 심각성을 서너 단계로 구분(예, minor, moderate, major, catastrophic)하고, 가능성과 결과의 조합(matrix)에 따른 위험의 정도(degree of risk)를 규정한다. 그 다음 위험의 정도에 따라 최적의 대응책들을 도출하고, 대응책의 우선순위를 결정한다. 이렇게 구성된 Risk matrix는 예측정보 등을 통해 결정되는 가능성과 이로 인한 결과의 심각성에 근거하여 준비된 대응책을 수행함으로써 위험을 회피하거나 발생 가능한 피해를 줄이게 된다.

앞에서 언급한 바와 같이 위험(risk)은 발생 가능성과 피해의 심각성에 따라 분류할 수 있다. 갈수기 다목적댐 운영의 경우에 대해 살펴보면 다음과 같다. 계절예측을 통해 유입량이 평년에 비해 크게 감소할 가능성이 높게 예측하였다고 가정하자. 이때 현재의 물공급용량이 충분하여 예측유입량의 감소를 감안하더라도 계획된 용수공급량을 제공하는데 문제가 없다면, 이 경우는 댐운영 실패의 위험성이 매우 낮다(minor). 그러나 물공급용량의 여유가 충분치 못한 상황(major)에서는 예측정보가 내포한 불확실성을 감안하더라도 발생 가능한 위험에 대한 단계별 준비가 필요하다. 일례로, 예측정보의 불확실성을 감안하여 우선적으로는 언론매체나 전광판 등을 통한 물절약 교육 및 홍보강화 등을 통해 용수수요량을 줄이는 간접적인 절수방안을 고려할 수 있다. 다음 단계로 실제 댐유입량이 감소하고 예측정보가 유입량의 감소를 지속적으로 경고한다면, 미활용 관정의 활용 및 신규 지하관정 개발 등을 통한 용수공급능력 확대 등을 추진하고, 긴급 식수원개발 및 중장기 용수확보대책 수립 등을 단계별로 추진하여야 할 것이다. 이와 병행해 「다목적댐 관리규정」에 근거하여 물 공급을 단계적으로 조정하는 것도 고려되어야 할 것이다.

위에서 언급한 내용을 바탕으로 risk matrix를 구성하면 다음과 같다. 본 연구에서는 예측정보 기반의 가뭄 가능성과 현재의 물공급능력을 이용하여 3×3 risk matrix를 제안하였

다(Fig. 38).

먼저 본 연구에서 개발한 댐유입량 예측기술을 이용하여 생산된 예측정보를 기반으로 K-water(수자원공사)에서 운영하고 있는 댐별 20년 빈도 갈수유량에 근거하여 가뭄 가능성(likelihood)을 평가한다. 20년 빈도 갈수유량에 비해 적게 유입될 확률이 높을 경우에는 High, 유입량이 갈수유량에 비해 클 가능성이 높을 경우에는 Low로 결정하게 된다. 다음으로 현재의 물공급능력을 정량적으로 평가하기 위해 본 연구에서는 잠재 가능 물공급용량(potential available water supply capacity, PAWSC) 개념을 제시하였다. PAWSC는 Fig. 42에서의 수식과 같이 결정되는데, 현재 저수용량에 예측시점까지 유입되는 20년 빈도의 갈수량을 합산하고 예측시점까지 공급해야 하는 계획용수공급량을 감해서 산정한다.

산정된 PAWSC에 댐별 여건(저수용량, 유역면적 등)을 고려한 가중치(α , β)를 적용하고 PAWSC가 특정치 이상이면 High, 이하이면 Low를 결정하게 된다. 가능성(likelihood)과 PAWSC가 결정되면 각 Matrix에 상응하는 대응단계를 판단하게 되고 각 단계별 대응전략에 맞게 댐운영 및 관련 대책을 시행하면 된다. Fig. 42에서 1은 위험성이 낮은 단계(risk level 1)를 나타내며, 4는 위험성이 매우 높은 단계(risk level 4)를 의미한다. Table 12는 K-water의 물 공급 단계별 조정을 Risk matrix의 대응단계와 비교한 것이다. 앞에서 살펴본 광동댐의 사례의 경우 Risk Matrix를 이용하여 사전에 가뭄에 대해 인지하고 공급량 조절 등을 통해 갈수기 위험을 회피하였다면 피해를 최소화할 수 있었을 것으로 사료된다.

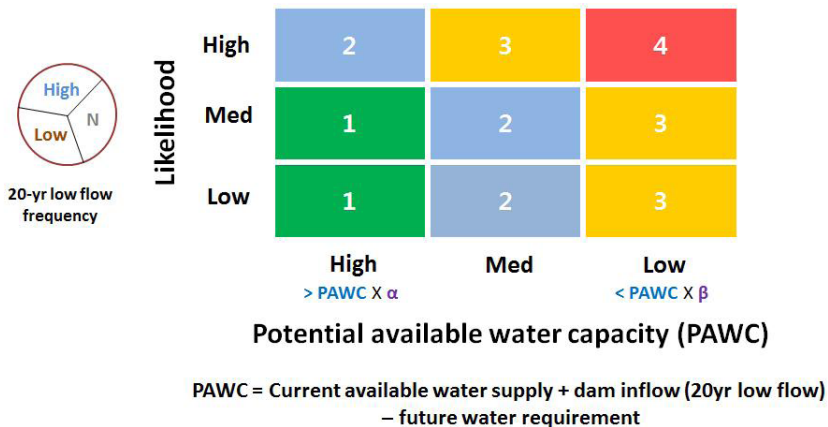


Figure 42. Risk matrix for making decision of dam operation based on probabilistic prediction and potential available water capacity

Table 12. K-water's drought response action plan according to drought severity and relevant rices stage determined by risk matrix

Drought severity classification	Risk classification	Drought response action plan
1st stage	-	Control the surplus of domestic, industrial, & agricultural water supply
2nd stage	1	Control the surplus of domestic, industrial, & agricultural water supply Control environmental water supply
3rd stage	2	Control the surplus of domestic, industrial, & agricultural water supply Control environmental water supply & agricultural water supply
4th stage	3,4	Control environmental, agricultural, industrial & domestic water supply

8. 결론

8.1 주요 결과

8.1.1 국내외 기후예측정보의 수자원활용 사례 분석

본 연구에서는 계절예측정보를 수자원관리에 활용한 국내외 사례를 조사하고 외국 사례의 시사점을 도출하였다.

1) 호주와 미국에서는 계절예측정보의 수자원 활용을 위해 역학적인 접근방법과 통계적인 접근방법을 병행하여 이용하고 있다. 현실적 수자원관리에서 요구되는 예측성을 제공하기 위한 방안의 하나로 기후모델 기반의 기후예측정보에 원격상관을 이용한 통계적 예측성을 결합하여 이용하는 연구를 수행하고 있다.

2) 수자원 분야의 기후예측정보 활용성 증대를 위해서는 유역규모의 예측정보를 생산할 수 있는 상세화 기법이 가장 시급히 개발되어야 하는 기술로 분석되었다. 아직까지 국내에서 표준화된 상세화 방법이 없고 특히 기후예측정보를 상세화하는 연구는 많이 수행되지 않았다. 상세화 기법의 개발은 지역적인 자료나 기후특성 등을 고려하고 상세화 목적에 부합되도록 개발되고 평가되어야 할 것이다.

3) 수자원관련 계절예측정보를 활용이 다변화되고 있다. 하천유량관리를 위한 장기예측정보 활용 뿐만 아니라 가뭄관리, 하천관리, 댐운영, 수력발전 등으로 수요가 증대되고 있다.

4) 예측정보가 가지는 불확실성을 표현하고 효과적으로 최종수요자에게 정보를 전달하기 위해 노력이 필요하다. 호주에서는 확률유량예보정보를, 미국에서는 평년유량 대비 백분율로 정보를 제공하고 있다. 또한, 호주의 경우 계절유량예측서비스 개발 초기부터 최종수요자를 참여시켜고 있다.

8.1.2 국내외 기후예측정보의 수자원활용 사례 분석

국내 다목적댐의 운영 및 현황을 조사하고 과거 가뭄발생시 댐운영 사례를 분석하여 개선점을 도출하였다.

1) 신뢰성 있는 장기 기후예측정보는 효율적이고 안정적인 갈수기 댐운영을 위해 필요하다. 특히 갈수기 시작점에 댐저류량을 충분하지 못할 경우 장기예측정보는 댐운영관련 의사결정의 중요 판단기준이 될 수 있다.

2) 댐유역에 맞는 맞춤형 계절유량예측이 필요하다. 현재 K-water에 제공되고 있는 기상청의 3개월 예보는 유역단위의 국지적인 기후특성을 반영되지 못하고 있으며, 의사결정을 위해 필요한 유입량 정보를 제공하지 않아 활용성이 낮다. 따라서 기후정보가 현실적인 댐운영에 도움을 주고 활용되기 위해서는 댐유역의 맞춤형 계절 댐유입량 유량예측정보를 제공하는 것이 필요하다.

3) 댐운영 의사결정 과정에 효과적으로 사용될 수 있는 확률적 기반의 예측정보 제공이 필요하다. 장기 기후예측은 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실성을 이해하지 못하고 단순히 강수의 많고 적음으로 예측정보를 이해한다면 댐운영에 실패할 가능성이 크다.

8.1.3 계절예측정보를 활용한 갈수기 댐유입량 예측기술 개발 및 평가

계절예측정보와 원격상관을 활용한 갈수기 다목적댐 유입량 예측기술을 개발하기 위해 APCC 현업 예보에 이용되는 10개 기후모델 결과에 대한 유입량 예측성을 평가하고, NOAA CPC에서 제공하는 글로벌 기후인자와 댐유입량의 통계적 상관성을 분석하여 예측모델을 개발하였다. 또한 이러한 정보를 조합하여 최적 댐유입량 예측방안을 제시하고 본 연구에서 도출된 예측정보를 갈수기 댐운영에 효율적으로 연계하기 위한 risk matrix 기반의 활용방안을 제시하였다.

8.1.3.1 계절예측정보를 활용한 역학적 기반의 댐유입량 예측

소양강댐을 대상으로 역학적 기반의 댐유입량 예측기술을 개발하기 위해 APCC MME에 이용되는 10개 기후모델의 23년(1983-2005년)의 3개월 예측 hindcast 자료를 이용하였다. 기후모델 결과의 편이를 보정하기 위해 simple anomaly approach를 적용하였으며, 소양강댐 유역에 적합한 예측정보를 제공영역을 도출하기 3개의 도메인에 대해 비교평가를 수행하였다. 기후예측정보를 이용하여 댐유입량을 예측하기 위해 5개 월물수지(monthly water balance model) 모형을 이용하였다. 각 월물수지 모델의 매개변수에 따른 불확실성을 고려하기 위해 3개의 다른 매개변수셋에 대한 분석도 수행하였다.

주요 결과는 다음과 같다.

1) 기후예측정보를 활용한 역학적 댐유입량 예측은 모든 월과 선행예측시간에 대해 유의한 예측성능을 보여주었다(95% 신뢰구간). 특히 1월, 3월, 4월의 1개월 선행 유입량 예측에서 우수한 예측성을 보였다. 그러나 예측선행시간이 증가함에 따라 예측성이 전반적으로 다소 감소하였다.

2) 다중모델앙상블(MME)은 대부분의 예측에서 개별 기후모델 결과를 이용한 것에 비해 우수하거나 또는 최고 예측성능을 보인 개별모델 결과에 근접한 예측성을 보여주었다. MME는 개별모델의 결과가 대부분 양의 상관성을 보일 경우 우수한 결과를 보였다. 반면 일부는 양의 상관을 그리고 일부는 음의 상관을 보인 경우의 MME는 예측성 개선에 기여도가 매우 낮게 나타났다.

3) 예측성은 평가기준에 따라서도 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. Pearson 상관계수와 Spearman 순위 상관계수를 비교한 결과 개별 기후모델을 이용한 예측성에서 큰 차이를 보였다. MME가 상대적으로 개별모델을 이용하는 것보다 예측성 평가기준에 덜 민감한 것으로 나타났다.

4) 월별 댐유입량의 예측성은 기후모델에 따라 큰 차이를 보였다. 또한, 동일한 기후모델 예측정보를 이용한 경우에도 월물수지모델에 따라 예측성에서 차이를 나타내었다. 이것은 댐유입량의 예측성능이 기후모델과 월물수지모델의 조합에 의해 크게 영향을 받음을 의미한다. 그러나 도메인에 따른 예측성은 기후모델이나 월물수지모델의 선정에 비해 상대적으로 작은 차이를 보였다.

5) 본 연구에서 적용한 계절예측에서는 유출모델의 구조적 차이에서 기인하는 불확실성이 매개변수에 따른 불확실성에 비해 큰 것으로 나타났다. 따라서 APCC MME 기후모델 결과를 이용하여 댐유입량의 예측성을 향상시키기 위해서는 기후모델과 유출모델의 최적조합을 찾는 노력이 병행되어야 할 것으로 나타났다.

8.1.3.2 원격상관을 활용한 통계적 기반의 댐유입량 예측

원격상관 기반의 통계적 계절유량예측 모델을 개발하기 위해 기후인자와 소양강댐 유입량의 상관관계를 분석하고, 기후인자가 시간지체(time lag)를 가지고 영향을 미칠 것을 고려하여 1~12개월까지 지체효과를 고려하여 분석을 수행하였다. K-fold 교차검정(cross validation)을 이용하여 23개(1983-2005년)의 적은 데이터 개수로 인해 발생할 수 있는 예측모형의 성능에 대한 통계적 신뢰도 문제를 평가하였다.

주요 결과는 다음과 같다.

1) 원격상관을 이용한 통계적 예측모델은 갈수기 댐유입량을 신뢰성 있게 예측하는 것으로 나타났다. 특히 3월, 4월, 5월 댐유입량 예측에서 유의한 예측성을 보였으며, 다양한 선행예측시간에 대해서도 적용이 가능해 활용성이 큰 것으로 나타났다.

2) 개발된 통계적 예측모델을 이용하여 2006년에서 2011년까지의 월별 댐유입량을 예측한 결과 전반적으로 1월을 제외한 모든 월의 댐유입량 예측성에서 활용가능성이 우수한 것으로 나타났다.

3) 1월 댐유입량 예측에서는 예측성이 높지는 않으나 4개월 선행예측까지 두 상관계수 모두 유의한 결과를 보였다. 2월의 경우 11개월 선행예측에서 Pearson 상관계수만 유의하였고, 나머지 예측은 95% 신뢰구간에서 유의하지 않았다. 3월 예측에서는 10개월과 11개월 선행예측의 Pearson 상관계수를 제외하고는 대부분 유의한 결과를 보였다. Spearman 상관계수는 전반적으로 예측선행시간에 따라 예측성이 감소하는 경향을 보였으나, Pearson 상관계수는 6개월과 7개월 선행예측에서 다른 예측성보다 우수한 결과를 나타내었다.

4) 4월의 경우 6개월 선행예측까지 높은 예측성을 보였으나 8개월 이후의 예측은 유의하지 않았다. 5월의 예측성은 모든 경우에 대해 유의한 결과를 보였다. 6월 댐유입량 예측에서는 상관계수에 따라 상이한 예측성을 보였다. Spearman 상관계수를 이용한 경우 모든 선행예측시간에 대해 유의하지 않은 것으로 나타난 반면, Pearson 상관계수에서는 3개월에서 11개월 선행예측이 유의하였다.

5) 본 연구에서 구축된 통계적 예측모델은 3월, 4월, 5월 댐유입량 예측에서 활용성이 클 것으로 나타났으며, 2월 유입량 예측에서는 활용성이 낮은 것으로 나타났다. 6월의 경우 상관계수에 따라 예측성에서 큰 차이를 보여 사용 시 주의가 필요하고 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단되었다.

6) 글로벌 기후지수는 넓은 범위에서 한반도에 영향을 미치고 있지만 지역별로 상관성에서 차이가 있었다. 이러한 지역별 유의성의 차이로 인해 한반도와 같이 좁은 지역에서도 유역에 따라 다른 기후지수가 예측인자로 선정될 수 있음을 보여주었다.

8.1.4 갈수기 댐운영 계절예측정보를 활용 방안

역학적 기반의 예측정보와 통계적 기반의 예측정보를 이용하여 갈수기 다목적댐 유입량 예측성을 개선하고 활용성을 높이기 위한 Hybrid 계절 댐유입량 활용방안을 본 연구에서는 제안하였다. 원격상관 기반의 통계적 예측 모델과 APCC MME 기후모델 결과를 활용한 역학적 예측 모델은 예측시점과 예측시간범위가 상이한 점을 고려하여 예측을 수행하는 방안을 제시하였다.

또한 본 연구에서는 불확실성이 포함된 계절예측정보를 댐운영에 효과적으로 활용하기 위한 방안으로 3×3 Risk matrix를 이용하여 댐운영 관련 의사결정을 수행하는 방안을 제안

하였다. 이 방법은 먼저 본 연구에서 개발한 댐유입량 예측기술을 이용하여 생산된 예측정보를 기반으로 댐별 20년 빈도 갈수유량에 근거하여 가뭄 가능성(likelihood)을 평가한다. 20년 빈도 갈수유량에 비해 적게 유입될 확률이 높을 경우에는 High, 유입량이 갈수유량에 비해 클 가능성이 높을 경우에는 Low로 결정하게 된다. 현재의 물공급능력을 정량적으로 평가하기 위해 본 연구에서는 잠재 가능 물공급용량(potential available water supply capacity, PAWSC) 개념을 제시하였다. 산정된 PAWSC에 댐별 여건을 고려한 가중치(α , β)를 적용하고 PAWSC가 특정치 이상이면 High, 이하이면 Low를 결정하게 된다. 가능성(likelihood)과 PAWC가 결정되면 각 Matrix에 상응하는 위험단계를 판단하게 되고 각 단계별 대응전략에 맞게 댐운영 및 관련 대책을 시행하게 된다.

8.2 연구의 기대효과

본 연구에서 개발된 계절유량예측 기술은 갈수기 다목적댐 운영에 필요한 신뢰성이 평가된 예측정보를 제공함으로써 K-water의 다목적댐 운영계획수립, 효율적인 용수배분, 용수수요공급관리, 유지유량 및 댐방류량 결정 등의 의사결정에 활용될 것이다.

Risk matrix 기반의 계절예측정보 활용방안은 불확실성이 포함된 예측정보를 수자원 관리에 쉽고 효과적으로 활용할 수 있는 방안을 제시한 것으로, 관측자료에 기반한 일률적인 댐운영 방식에서 기후변화와 기후변동에 능동적으로 대처할 수 있는 유연한 다목적댐 운영관리 방식으로의 패러다임 전환에 기여할 것이다.

본 연구에서 개발된 Hybrid 예측기술은 역학적 및 통계적 예측이 가진 예측성의 한계를 개선할 수 있는 방안으로 향후 다양한 기후 민감분야의 기후예측정보 활용시도를 활성화하고 기후와 응용분야의 융합연구를 창출하는데 기여할 것이다.

8.3 향후과제

본 연구에서는 10개 모델의 3개월 예측 hindcast 정보를 이용하여 역학적 예측기법의 활용성을 평가하였다. 그러나 실제 현업에 활용되기 위해서는 나머지 6개 모델에 대한 추가적인 평가와 forecast 정보(2006-현재)를 이용한 역학적 예측기법의 성능을 검증하는 과정이 필요하다. 또한, 3개월 예측을 6개월 예측까지 확대하여 역학적 예측정보의 활용성을 높이는 방안도 고려되어야 한다.

본 연구는 소양강댐 유역 하나를 대상으로 수행되었다. 본 연구결과의 확장성을 고려하기 위해 추가적인 유역에 대한 적용이 필요하다. 국내 댐유역뿐 아니라 아시아-태평양지역의 개발도상국에 위치한 주요 댐유역에 대한 적용성 평가 및 문제점을 개선하는 연구가 필요하다.

본 연구에서 제안한 Risk Matrix 기반의 예측정보 활용방안을 극대화하기 위해서는 K-water 실무자와의 긴밀한 협조를 통해 위험단계를 세분화하거나 각 단계에 따라 현실적으로 적용할 수 있는 대응방안을 개발하는 과정이 필요하다.

REFERENCES

- 국가수자원관리종합정보시스템. 2014. www.wamis.go.kr.
- 국토교통부. 2006. 수자원장기종합계획(2006-2020)
- 국토교통부. 2011. 수자원장기종합계획(2011-2020년)
- 김연희, 김맹기, 이우섭. 2008. 한반도 기온 및 강수량 변동에 영향을 미치는 광역규모 기후 지수들에 대한 고찰, *Atmosphere*, 18(2), 83-95.
- 김지영, 박혜진. 2010. 북반구 기후지수를 이용한 우리나라 6월과 12월 강수량의 장기 예측, *한국수자원학회지*, 43(8), 47-51.
- 박종윤, 신영섭. 2010. 기상예보와 재해관리 - 장기예보와 가뭄관리 사례를 중심으로, 정책 초점, 65-81.
- 이재경, 김영오, 정대일. 2006. 중장기 유량예측 향상을 위한 국내 기후정보의 이용, *한국수자원학회논문집*, 39(9), 755-766.
- 정규열. 2008. K-water 홍수관리 (Flood control), *수자원정보*, 128-136.
- 정일원. 2013. APCC 계절예측정보 활용을 위한 수자원계절예측 기술 개발. APCC Research Report, 1-46.
- 차기욱, 2009. 이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안, 정책초점, 78-89.
- 조재필. 2014. 계절예측 정보를 활용한 통합 수문 수질 장기예측 기법 연구. APCC Annual Report.
- Archer DR and Fowler HJ. 2008. Using meteorological data to forecast seasonal runoff on the River Jhelum, Pakistan. *Journal of Hydrology* 361, 10-23.
- Bae DH, Jung IW and Chang H. 2008. Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins, *Hydrological Processes* 22(14), 2644-2656.
- Barlow MA and Tippett MK. 2008. Variability and Predictability of Central Asia River

- Flows: Antecedent Winter Precipitation and Large-Scale Teleconnections. *Journal of Hydrometeorology* 9, 1334-1349.
- Barlow MA, Nigam S and Berbery EH. 2001. ENSO, Pacific Decadal Variability, and U.S. Summertime Precipitation, Drought, and Stream Flow. *Journal of Climate* 14, 2105-2128.
- Barnston AG, Kumar A, Goddard L and Hoerling MP. 2005. Improving seasonal prediction practices through attribution of climate variability. *Bulletin of the American Meteorological Society* 86, 59-72.
- Bierkens MFP and van Beek LPH. 2009. Seasonal Predictability of European Discharge: NAO and Hydrological Response Time. *Journal of Hydrometeorology* 10, 953-968.
- Block PJ, Souza FA, Sun LQ and Kwon HH. 2009. A Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models. *Journal of the American Water Resources Association* 45, 828-843.
- Bracken C, Rajagopalan B and Prairie J. 2010. A multisite seasonal ensemble streamflow forecasting technique. *Water Resources Research* 46, W03532, doi:10.1029/2009WR007965.
- Cardoso AO and Silva Dias PL. 2006. The relationship between ENSO and Paraná River flow. *Advances in Geosciences* 6, 189-193.
- Céron JP, Tanguy G, Franchistéguy L, Martin E, Regimbeau F and Vidal JP. 2010. Hydrological seasonal forecast over France: feasibility and prospects. *Atmospheric Science Letters*, DOI:10.1002/asl.256.
- Chandimala J and Zubair L. 2007. Predictability of stream flow and rainfall based on ENSO for water resources management in Sri Lanka. *Journal of Hydrology* 335, 303-312.
- Charney JG and A Eliassen. 1964. On the growth of the hurricane depression. *Journal of Atmospheric Sciences* 21(3), 68-75.
- Chiew FHS, Zhou SL and McMahon TA. 2003. Use of seasonal streamflow forecasts in water resources management. *Journal of Hydrology* 270, 135-144.

- Chowdhury S and Sharma A. 2009. Multisite seasonal forecast of arid river flows using a dynamic model combination approach. *Water Resources Research* 45, W10428, 10.1029/2008wr007510.
- Climate Prediction Center (CPC), <http://www.esrl.noaa.gov>
- Coelho CAS, Stephenson DB, Doblas-Reyes FJ, Balmaseda M, Guetter A and Van Oldenborgh GJ. 2006. A Bayesian approach for multi-model downscaling: Seasonal forecasting of regional rainfall and river flows in South America. *Meteorological Applications* 13, 73-82.
- Robertson DE and Wang QJ. 2012. A Bayesian Approach to Predictor Selection for Seasonal Streamflow Forecasting. *Journal of Hydrometeorology* 13, 155-171.
- Dettinger MD and Diaz HF. 2000. Global Characteristics of Stream Flow Seasonality and Variability. *Journal of Hydrometeorology* 1, 289-310.
- 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.
- Dracup JA and E Kahya. 1994. The relationships between U.S. streamflow and La Nina events. *Water Resources Research* 30, 2133-2142.
- 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.
- Eldaw AK, Salas JD and Garcia LA. 2003. Long-Range Forecasting of the Nile River Flows Using Climatic Forcing. *Journal of Applied Meteorology* 42, 890-904.
- Elsanabary MH and TY Gan. 2014. Wavelet Analysis of Seasonal Rainfall Variability of the Upper Blue Nile Basin, Its Teleconnection to Global Sea Surface Temperature, and Its Forecasting by an Artificial Neural Network. *Mon. Wea. Rev.* 142, 1771-1791.
- Gámiz-Fortis SR, Esteban-Parra MJ, Trigo RM and Castro-Díez Y. 2010. Potential predictability of an Iberian river flow based on its relationship with previous winter

- global SST. *Journal of Hydrology* 385, 143-149.
- Gupta HV, Kling H, Yilmaz KK, Martinez GF. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377(1-2), 80-91.
- Gutiérrez F and Dracup JA. 2001. An analysis of the feasibility of long-range streamflow forecasting for Columbia using El Niño-Southern Oscillation indicators. *Journal of Hydrology* 246, 181-196.
- Hamon WR. 1961. Estimating potential evapotranspiration. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. *Journal of the Hydraulic Division* 87, 107-120.
- Hastenrath S. 1990. Diagnostics and Prediction of Anomalous River Discharge in Northern South America. *Journal of Climate* 3, 1080-1096.
- Ionita M, Lohmann G and Rimbu N. 2008. Prediction of Elbe discharge based on stable teleconnections with winter global temperature and precipitation. *Journal of Climate* 21, 6215-6226.
- Jung IW, Bae DH and Kim G. 2011. Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea. *International Journal of Climatology* 31, 359-370.
- Jung IW, Bae DH and Lee BJ. 2013. Possible change in Korea streamflow seasonality based on multi-model climate projections. *Hydrological Processes* 27(7), 1033-1045.
- Kalra A, Ahmad S and A Nayak. 2013. Increasing streamflow forecast lead time for snowmelt-driven catchment based on large-scale climate patterns. *Advances in Water Resources* 53, 150-162.
- Kendall MG. 1975. Rank Correlation Methods. Charles Griffin: London.
- Kiem AS and Franks SW. 2001. On the identification of ENSO-induced rainfall and runoff variability: a comparison of methods and indices. *Hydrological Sciences Journal* 46, 715-727.
- Kim SJ, Flato GM, Boer GJ and McFarlane NA. 2002. A coupled climate model simulation

of the last glacial maximum, Part 1: transient multi-decadal response. *Climate Dynamics* 19, 515-537.

Kim J, Miller NL, Farrara JD and Hong SY. 2000. A seasonal precipitation and stream flow hindcast and prediction study in the western United States during the 1997/98 winter season using a dynamic downscaling system. *Journal of Hydrometeorology* 1, 311-329.

Kim MK, YH, Kim and WS Lee. 2007. Seasonal prediction of Korean regional climate from preceding large-scale climate indices. *International Journal of Climatology* 27, 925-934.

Kirono DGC, Chiew FHS and Kent DM. 2010. Identification of best predictors for forecasting seasonal rainfall and runoff in Australia. *Hydrological Processes* 24, 1237-1247.

Koster RD, Mahanama SPP, Livneh B, Lettenmaier DP and Reichle RH. 2010. Skill in streamflow forecasts derived from large-scale estimates of soil moisture and snow. *Nature Geoscience* 3, 613-616.

Krausmann E, Cozzani V, Salzano E and Renni E. 2011. Industrial accidents triggered by natural hazards: an emerging risk issue. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 921-929, doi:10.5194/nhess-11-921-2011.

Kuczera G, D Kavetski, S Franks, M Thyer. 2006. Towards a Bayesian total error analysis of conceptual rainfall-runoff models: Characterizing model error using storm-dependent parameters, *Journal of Hydrology* 331(1-2),161-177.

Kuo CC, Gan TY and Yu PS. 2010. Seasonal streamflow prediction by a combined climate-hydrologic system for river basins of Taiwan. *Journal of Hydrology* 387, 292-303.

Landman WA, Mason SJ, Tyson PD and Tennant WJ. 2001. Statistical downscaling of GCM simulations to Streamflow. *Journal of Hydrology* 252, 221-236.

Lavers DA. 2010. Seasonal hydrological prediction in Great Britain-An assessment (Doctoral dissertation)

- Leung LR, Hamlet AF, Lettenmaier DP and Kumar A. 1999. Simulations of the ENSO Hydroclimate Signals in the Pacific Northwest Columbia River Basin. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80, 2313-2329.
- 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 LF and 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.
- Luo LF, Wood EF and Pan M. 2007. Bayesian merging of multiple climate model forecasts for seasonal hydrological predictions. *Journal of Geophysical Research* 112, D10102, doi:10.1029/2006JD007655.
- Mann HB. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245-259.
- McKerchar AI, Pearson CP and Fitzharris BB. 1998. Dependency of summer lake inflows and precipitation on spring SOI. *Journal of Hydrology* 205, 66-80.
- 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
- Nakaegawa T, Kusunoki S, Sugi M, Kitoh A, Kobayashi C and Takano K. 2007. A study of dynamical seasonal prediction of potential water resources based on an atmospheric GCM experiment with prescribed sea-surface temperature. *Hydrological Sciences Journal* 52, 152-165.
- Palmer TN and Anderson DLT. 1994. The prospects for seasonal forecasting - A review paper. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120, 755-793.
- Park H, Park BK, Rah DK, and Cho JY. 2002. An improvement of global model in 2001. KMA/NWPD Technical Report 2002-1.

- Purdie JM and Bardsley WE. 2010. Seasonal prediction of lake inflows and rainfall in a hydro-electricity catchment, Waitaki river, New Zealand. *International Journal of Climatology* 30, 372-389.
- Randall DA, Wood RA, Bony S, Colman R, Fichet T, Fyfe J, Kattsov V, Pitman A, Shukla J, Srinivasan J, Stouffer RJ, Sumi A and Taylor KE. 2007. Climate models and their evaluation. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds). Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 589-662.
- Ruiz JE, Cordery I and Sharma A. 2007. Forecasting streamflows in Australia using the tropical Indo-Pacific thermocline as predictor. *Journal of Hydrology* 341, 156-164.
- Saha S and co-authors. 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91, 1015-1072.
- Sankarasubramanian A, Lall U and Espinueva S. 2008. Role of Retrospective Forecasts of GCMs Forced with Persisted SST Anomalies in Operational Streamflow Forecasts Development. *Journal of Hydrometeorology* 9, 212-227.
- Schepen A, QJ Wang and DE Robertson. 2012. Combining the strengths of statistical and dynamical modeling approaches for forecasting Australian seasonal rainfall. *J. Geophys. Res.* 117, D20107, doi:10.1029/2012JD018011.
- Shao Q and Li M. 2013. An improved statistical analogue downscaling procedure for seasonal precipitation forecast. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 27(4), 819-830.
- Shukla S, and 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.

- 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.
- Svensson C and Prudhomme C. 2005. Prediction of British summer river flows using winter predictors. *Theoretical and Applied Climatology* 82, 1-15.
- Timbal B, Li Z, and Fernandez E. 2008. The Bureau of meteorology statistical downscaling model graphical user interface: user manual and software documentation. CAWCR Technical Report No.004
- Tolstykh MA, Kiktev DB, Zaripov RB, Zaichenko MY, and Shashkin VV. 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.
- Tootle GA, Piechota TC and Gutiérrez F. 2008. The relationships between Pacific and Atlantic Ocean sea surface temperatures and Colombian streamflow variability. *Journal of Hydrology* 349, 268-276.
- Tseng CP, Chen CW, and Tu YP. 2011. A new viewpoint on risk control decision models for natural disasters. *Natural Hazards* 59(3), 1715-1733.
- Wang QJ, Robertson DE and Chiew FHS. 2009. A Bayesian joint probability modelling approach for seasonal forecasting of streamflows at multiple sites. *Water Resour. Res.* 45, W05407, doi:10.1029/2008WR007355.
- Wedgbrow CS, Wilby RL and Fox HR. 2005. Experimental seasonal forecasts of low summer flows in the River Thames, UK, using Expert Systems. *Climate Research* 28, 133-141.
- Wedgbrow CS, Wilby RL, Fox HR and O'Hare G. 2002. Prospects for seasonal forecasting of summer drought and low river flow anomalies in England and Wales. *International Journal of Climatology* 22, 219-236.
- Whitaker DW, Wasimi SA and Islam S. 2001. The El Niño-Southern Oscillation and long-range forecasting of flows in the Ganges. *International Journal of Climatology*

21,77-87.

- Wilby RL. 2001. Seasonal forecasting of river flows in the British Isles using North Atlantic pressure patterns. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management* 15, 56-63.
- Wilby RL, Wedgbrow CS and Fox HR. 2004. Seasonal predictability of the summer hydrometeorology of the River Thames, UK. *Journal of Hydrology* 295, 1-16.
- Wilks DS. 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences, Academic press, New York.
- Wood AW and Lettenmaier DP. 2006. A test bed for new seasonal hydrologic forecasting approaches in the western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87, 1699-1712.
- Wood AW, Kumar A and Lettenmaier DP. 2005. A retrospective assessment of National Centers for Environmental Prediction climate model-based ensemble hydrologic forecasting in the western United States. *Journal of Geophysical Research* 110, D04105, doi:10.1029/2004JD004508.
- Wood AW, Maurer EP, Kumar A and DP Lettenmaier. 2002. Long range experimental hydrologic forecasting for the Eastern U.S. *Journal of Geophysical Research*, 107(D20)
- Xu K, Brown C, Kwon HH, Lall U, Zhang J, Hayashi S and Chen Z. 2007. Climate teleconnections to Yangtze river seasonal streamflow at the Three Gorges Dam, China. *International Journal of Climatology* 27, 771-780.
- 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.
- Zubair L. 2003. Sensitivity of Kelani streamflow in Sri Lanka to ENSO. *Hydrological Processes* 17, 2439-2448.

연구보고서 2015-11

계절예측정보 및 원격상관을 활용한 갈수기 다목적댐 유입량 예측 기술 개발

Developing dry seasonal dam inflow prediction methods using a hybrid approach based on seasonal climate prediction and teleconnection

정일원 기후변화연구팀



APEC 기후센터

612-020 부산광역시 해운대구 센텀7로 12

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

www.apcc21.org

 www.facebook.com/apcc21

 www.youtube.com/APECClimateCenter21

 www.twitter.com/apcc21

 www.plus.google.com/+APECClimateCenter21

 www.flickr.com/apcc21