

## 이수기 저수지 운영을 위한 앙상블 유량예측의 효용성

### Value of Ensemble Streamflow Forecasts for Reservoir Operations during the Drawdown Period

음형일\* / 김영오\*\* / 고익환\*\*\*

Eum, Hyung-il / Kim, Young-Oh / Ko, Ick Hwan

#### Abstract

Korea Water Resources Corporation(KOWACO) has developed the Integrated Real-time Water Management System(IRWMS) that calculates monthly optimal ending target storages by using Sampling Stochastic Dynamic Programming(SSDP) with Ensemble Streamflow Prediction(ESP) running on the 1<sup>st</sup> day of each month. This system, however, has a shortcoming: it cannot reflect the hydrometeorologic variations in the middle of the month. To overcome this drawback, in this study updated ESP forecasts three times each month by using the observed precipitation series from the 1<sup>st</sup> day of the month to the forecast day and the historical precipitation ensemble for the remaining days. The improved accuracy and its effect on the reservoir operations were quantified as a result. SSDP/ESP21 that reflects within-a-month hydrometeorologic states saves  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  in water shortage on average than SSDP/ESP01. In addition, the simulation result demonstrated that the effect of ESP accuracy on the reduction of water shortage became more important when the total runoff was low during the drawdown period.

**keywords** : Ensemble streamflow prediction, Sampling Stochastic Dynamic Programming, Forecast accuracy, Operational effect

#### 요 지

한국수자원공사에서는 매월 1일 생성한 월 앙상블 유량예측(Ensemble Streamflow Prediction, ESP)을 근거로 월 최적운영 모형인 SSDP 모형을 통해 월말목표저수량을 산정할 수 있는 실시간 물관리 시스템을 구축하였다. 그러나 월 중간에 발생하는 수문기상학적 변화를 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있어 이를 보완하자는 필요성이 제기되었다. 이를 위해 본 연구에서는 1일부터 예측시점까지는 그 동안 발생한 강우 관측자료를 이용하고 이후 기간에는 발생 가능한 모든 과거 강수시나리오를 이용하는 기법을 통해 매월 10일 간격으로 3차례 앙상블예측을 갱신하여 예측정확도를 향상시켰으며, 예측정확도에 따른 저수지 운영효과의 개선여부를 정량적으로 분석하였다. 그 결과 월중 수문상황을 반영한 SSDP/ESP21모형이 그렇지 못한 SSDP/ESP01모형에 비해 연평균  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 용수부족 감소효과를

- \* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사수료  
Ph.D Candidate, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea  
(e-mail: eum01@snu.ac.kr)
- \*\* 교신저자, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수  
Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea  
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)
- \*\*\* 한국수자원공사 수자원연구원 수자원시스템연구소 연구소장  
Director, Hydrosystem Engineering Center, Korea Institute of Water & Environment, Jeonmin-dong, Useong-gu, Daejeon, 305-790, Korea (e-mail: ihko@kowaco.or.kr)

가졌으며 전반적으로 이수기에 총 유량이 적으면서 예측정확도가 향상된 경우 상당한 용수부족 감소효과를 나타냄을 또한 알 수 있었다.

**핵심용어** : 앙상블예측, 표본추계학적 동적계획법, 예측정확도, 운영효과

## 1. 서 론

수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 21세기 프론티어 연구개발사업(이하 프론티어) 중 하나인 '실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발'(한국수자원공사, 2004a)의 1단계에서는 금강수계 물수지 및 하천의 수질 유지 유량을 고려한 월간 및 일간 운영을 위해 실시간 물관리 시스템(Integrated Real-time Water Management System)을 구축하였다. 실시간 물관리 시스템 내에서 월 최적운영 모형인 Sampling Stochastic Dynamic Programming(Kelman et al., 1990) 모형은 매월 1일 생성한 월 앙상블 유량예측(Ensemble Stream-flow Prediction, ESP)을 근거로 월말목표저수량을 산정하고 이 결과를 일 댐군 최적연계운영으로 전달하도록 구성되어 있다. 그러므로 월말목표저수량의 설정이 실시간 물관리 시스템의 효과를 상당 부분 좌우할 정도로 중요하다고 할 수 있다.

그러나 프론티어 1단계에서 구축된 SSDP모형은 매월 1일 한 달에 한번 월말목표저수량을 계산하므로 월 중간에 발생한 수문기상학적 변화를 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있어 이를 보완하자는 필요성이 제기되었다. 월 중간의 수문상황을 반영하기 위해서는 월단위 모형이 아닌 1주일 또는 10일 단위의 모형을 재구성하여야 하나 모형 개발을 위해 많은 시간과 노력이 필요하고 단위시간의 감소로 인해 해를 연기까지의 모형 수행시간이 길어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 지금의 시스템을 그대로 유지한 채 월중 수문상황을 반영하여 앙상블 유량예측의 정확도를 높이고 이를 월모형에 적용하여 월말목표저수량을 갱신하는 전략을 강구하였다.

본 연구에서는 매월 1일을 시점으로 10일 단위로 매월 3번씩 월중 수문상황을 반영한 앙상블 유량예측을 실시하였으며 이를 통한 앙상블 유량예측의 정확도 개선여부는 물론 SSDP모형에 적용할 경우 예측정확도에 따른 저수지 운영효과의 개선여부를 정량적으로 분석하였다.

효과적인 저수지 운영을 위해 실시한 유량예측의 가치평가는 수자원 분야 연구자들의 오랜 관심사 중 하나이며 예측정확도에 따른 저수지 운영효과를 분석하여 현 시스템이 예측정확도에 얼마나 민감한지 파악하는

것은 저수지 운영에 있어 매우 중요하다 할 수 있다. Yeh et al.(1982), Mishalani and Palmer(1988), 그리고 김영오(1998)는 예측의 표준편차를 0에서 1까지 다양하게 변화시켜 예측의 불확실성이 저수지 운영에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 Faber and Stedinger(2001)는 최신기법인 SSDP와 ESP를 결합한 모형을 제시하여 저수지 운영에서 ESP의 효용성을 제시한 바 있으며 Yao and Georgakakos(2001)는 과거 시나리오를 이용한 Analog ESP와 예측시점의 초기조건에 대한 앙상블예측, GCM (General Circulation Model) 시나리오에 따른 앙상블예측 등 다양한 앙상블예측에 따른 저수지 운영의 결과를 비교하는 연구를 수행한 바 있다.

## 2. 앙상블예측

### 2.1 기본개념

월별 예측과 같은 중장기 예측은 입력자료(강수, 온도 등)의 불확실성이 단기 예측에 비해 매우 크기 때문에 확률론적 예측보다는 확률론적 예측을 실시하는 것이 바람직하다. 앙상블예측은 이러한 확률론적 예측기법의 가장 대표적인 방법으로 과거 수문사상은 미래의 수문사상을 대표할 수 있다는 가정에서 출발한다. 즉, 확률론적 강우-유출 모형에 예측시점의 습도, 온도, 토양함수비와 같은 초기조건을 설정한 후 미래에 일어날 가능성이 있는 모든 강우 시나리오를 입력하여 다수의 유량 시나리오를 얻는다(Day, 1985). 다수의 유량 시나리오를 얻은 후 확률예보를 실시하기 위해서는 통계분석이 수행되며 그 결과 저수, 평수, 풍수와 같이 몇 개의 예측유량 구간에 대한 각 구간의 발생확률을 제시할 수 있다. 자세한 사항은 실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발 보고서(한국수자원공사, 2004a)를 참조하기 바란다.

앙상블예측은 미국 기상청(NWS, National Weather Service)에서 수문학적 예측시스템의 현대화 작업의 핵심사항으로 선정되어 그 연구가 활발한 분야이다(Fread, 1988). 국내에서는 Kim et al.(2001)이 건설교통부 하천계획과와 한국건설기술연구원에서 매 월초 발간하고 있는 '물공급전망'의 개선을 위해 앙상블예측이 소개되었으며 금강유역(한국수자원공사, 2004a)과 한강, 낙동강, 섬진강유역(한국수자원공사, 2004b)에

양상블 유량예측 시스템이 구축되었다. 본 연구에서는 프론티어 1단계 과업을 통하여 금강수계에 구축된 실시간 물관리 운영시스템의 강우-유출모형인 SSARR (Streamflow Synthesis And Reservoir Regulation)를 사용하여 12개 소유역에 대한 양상블예측을 실시하였으며 이를 추계학적 최적화모형의 입력자료로 사용하였다.

## 2.2 월중 수문상황을 반영한 양상블 유량예측

월중 수문상황을 반영하기 위해 본 연구에서는 매월 두 번 더 새로운 양상블을 생성하였다. 즉, 매월 1일에 실시하는 양상블예측(ESP01)은 물론 10일과 20일 경과 후 즉 매월 11일과 21일에 ESP11과 ESP21이라는 새로운 양상블을 생성하였다. ESP11은 1일부터 10일까지는 관측된 단일의 강우자료를 사용하고 나머지 기간 즉 11일부터 월말까지는 발생 가능한 과거 강수 양상블자료를 사용한 예측이며 ESP21은 1일부터 20일까지는 관측된 단일 강우자료를 사용하고 나머지 기간은 과거 강수 양상블자료를 사용하여 실시하는 예측을 말한다(Table 1). Fig. 1은 ESP21의 입력자료를 그림으로 보여주고

있다. 이렇게 이미 지나간 과거 사상을 월 중간에 반영하여 월 양상블예측의 정확도를 개선할 수 있으며 이를 최적화모형의 입력자료로 사용함으로써 보다 효율적인 월말목표저수량을 기대할 수 있다.

## 3. 최적화 모형

매월 3번 실시하는 양상블예측을 사용하여 최적은 영률을 산정하기 위해 21세기 프론티어사업을 통해 구축된 실시간 물관리 운영시스템의 월 최적화모형인 SSDP모형(한국수자원공사, 2004a)을 사용하였다. SSDP모형은 유량시나리오를 최적화식에 직접 사용할 수 있어 시나리오에 내재되어 있는 다양한 시·공간적 특성을 표현할 수 있는 장점이 있다(Kelman et al., 1990).

본 연구에서 주로 사용하고 있는 월 양상블예측을 사용한 SSDP/ESP모형의 최적화식은 Eq. (1)과 같다.

$$\max_{S_{t+1}^k} \sum_{j=1}^N \Pr(j) [B_t(R_t, Q_t(j), S_t^k) + E_t\{f_{t+1}(S_{t+1}^k, i)\}] \quad (1)$$

Table 1. Description of ESP01, ESP11, and ESP21

ESP types	Forecasting date within a month	Input precipitation data selections		
		The first ten days of a month	The second ten days of a month	The remaining days of a month
ESP01	1st	Historical ensemble	Historical ensemble	Historical ensemble
ESP11	11th	Observed series	Historical ensemble	Historical ensemble
ESP21	21st	Observed series	Observed series	Historical ensemble

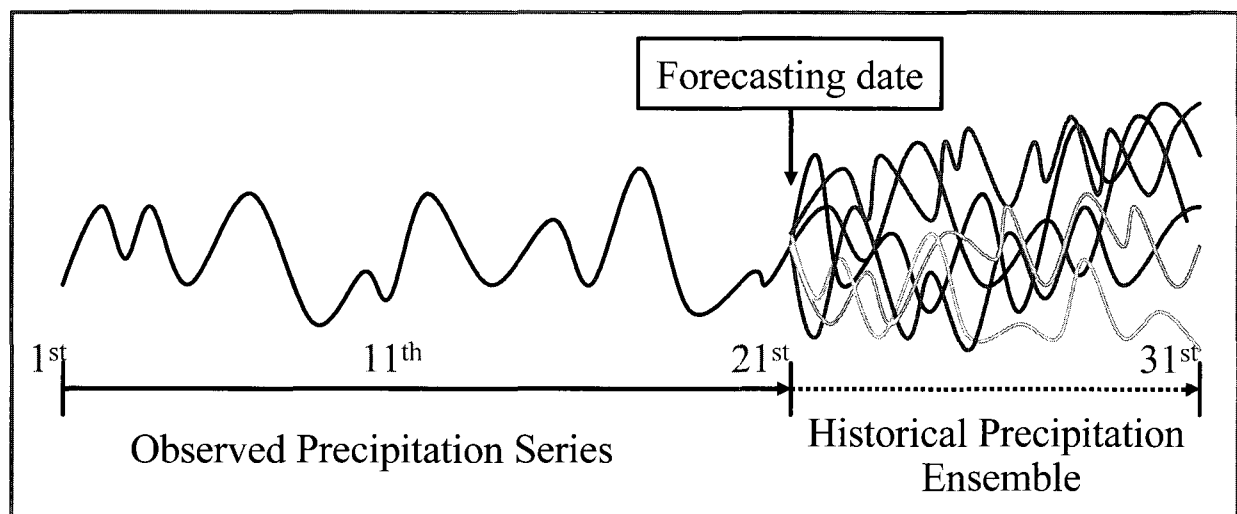


Fig. 1. Input data of ESP21

여기서  $i$ 는 과거 시나리오 번호,  $j$ 는 앙상블 시나리오 번호,  $R_{t,i}$ 는  $t$ 월의 방류량,  $S_{t,i}^*$ 는 결정변수로서  $t$ 월의 월 말목표저수량,  $Q_{t,j}$ 는  $t$ 월의  $j$ 번째 시나리오의 유량,  $S_{t,k}^k$ 는  $t$ 월의  $k$ 번째 월초저수량상태변수를 의미한다. 또한  $\Pr(j)$ 는 시나리오  $j$ 가 발생할 확률로 본 연구에서는 동일 발생확률로 설정하였으며  $B_t(\cdot)$ 는 이번 달에 발생한 이득 또는 손실의 의미하며  $f_t$ 는  $t$ 월부터 운영의 마지막 시점  $T$ 까지의 잔여최적편익함수(optimal future value function)를 나타내고  $E_i\{\cdot\}$ 는  $t+1$ 월부터 운영의 마지막 시점  $T$ 월까지의 잔여최적편익함수의 시나리오  $i$ 에 대한 기대값을 의미한다.

본 연구에서 사용한 SSDP/ESP모형의 큰 특징은 최적해를 전진(forward)방향으로 찾아 나아간다는 점이며 이를 위해 잔여최적편익함수( $f_{t,i}$ )로 과거 시나리오만을 사용한 SSDP/Hist 모형에서 산정한 값을 사용한다는 점이다. SSDP/Hist 모형은 앙상블 예측자료 대신 과거자료를 유량시나리오로 사용하였다(한국수자원공사, 2004a).

이수기, 즉 10월에서 6월까지 9개월 동안 잔여편익이 최대가 되도록 하는 운영률을 산정하였으며 목적함수 및 제약조건은 다음 Eq. (2)와 같다.

여기서,  $w_i$ 는 목적  $i$ 에 대한 가중값,  $m$ 은 제어지점번호, 그리고  $n$ 은 댐 번호를 의미한다. 또한  $M$ 과  $N$ 은 각각 제어지점과 댐의 총 개수이다. 또한  $Q_{req,m}$ 은 각 제어지점  $m$ 에서의 하천유지유량,  $Q_{t,m}$ 은  $t$ 월의 제어지점  $m$ 에서의 하천유량,  $D_{req,n}$ 은 댐  $n$ 에서의 생공용수 취수요구량,  $D_{t,n}$ 은 댐  $n$ 의  $t$ 월의 생공용수 취수량,  $BP_{t,n}$ 은  $t$ 월의 댐  $n$ 의 발전이익(역원),  $S_{6,n}$ 은 6월말 저수량,  $S_{firm,n}^{\max}$ 는 댐  $n$ 의 6월 PMP 대응수위에 해당하는 저수량,  $S_{firm,n}^{\min}$ 는 댐  $n$ 의 최저확보수위라고도 하며 이는 20년빈도 유입량에 대해 1년 동안 정상적인 용수공급이 가능한 수위에 해당하는 저수량을 나타낸다. 그리고 제약조건식에서  $R_{t,n}$ 은 댐  $n$ 에서의  $t$ 월의 방류량,

$S_{t,n}$ 는 댐  $n$ 에서의  $t$ 월초 저수량,  $I_{t,n}$ 는 댐  $n$ 에서의  $t$ 월 동안의 유입량,  $S_{\min,n}$ 은 댐  $n$ 에서의 최저저수량,  $S_{\max,n}$ 은 댐  $n$ 에서의 상시만수위에 해당하는 저수량,  $R_{\min,n}$ 은 댐 최소요구방류량,  $R_{\max,n}$ 은 댐 최대방류량을 의미한다. 여기서  $R_{\min,n}$ 은 댐  $n$ 의 생공용수 취수량( $D_{req,n}$ ; 용담댐: 4.2 m<sup>3</sup>/sec, 대청댐: 12.8 m<sup>3</sup>/sec)과 댐하류의 최소요구방류량(용담댐: 하천유지용수(5.0 m<sup>3</sup>/sec), 대청댐: 생공용수계약량(20.3 m<sup>3</sup>/sec))의 합으로 설정하였으며 댐에서의 생공용수 취수량과 댐하류의 최소요구방류량 중 용담댐은 댐하류의 최소요구방류량, 대청댐은 생공용수 취수량이 우선권을 가지고 있다.

또한 주어진 시나리오에 대해 최대이익을 얻을 수 있는 상한선을 설정하기 위해 확정론적 동적계획법(Deterministic Dynamic Programming, DDP)을 개발하여 유입량을 알고 있는 상태에서 최적화를 수행한다고 가정하고 DDP/Perf은 물론 평균유입량을 DDP에 사용한 DDP/Ave까지 총 6개의 최적화모형에 대한 결과를 비교·분석하였다.

## 4. 연구결과

### 4.1 앙상블예측

앙상블예측과 같은 확률론적 예측의 정확성을 평가하기 위한 지표로는 평균예측점수(Average Hit Score, AHS), Half Brier Score(HBS), Ranked Probability Score(RPS)를 들 수 있다. Kim et al.(2001)은 구간 확률예측을 검증하기 위한 AHS를 제시하였으며 이는 구간예측을 실시한 후 실측유량이 발생한 구간의 예측점수를 가져가는 형태로 확률론적 예측의 정확성을 평가하는 지표이다. 또한 HBS는 사건이 발생하고 발생하지 않을 확률과 같은 이분예측(dichotomous predictand)의 평가를 위해 자주 사용되며 RPS는 예측구간의 누가확률을 사용하여 연속변수의 확률예측 평가에서 주로 사용되는데 Eqs. (3), (4)와 같이 계산된다(Wilks, 1995).

$$\min_{S_{t,i,n}} \sum_{t=1}^T \left\{ w_1 \left( \sum_{m=1}^M \max [(Q_{req,m} - Q_{t,m}), 0] \right) + w_2 \left( \sum_{n=1}^N \max [(D_{req,n} - D_{t,n}), 0] \right) + w_3 \sum_{n=1}^N \max [0, (S_{6,n} - S_{firm,n}^{\max}), (S_{firm,n}^{\min} - S_{6,n})] - \sum_{n=1}^N w_{4,n} (BP_{t,n}) \right\} \quad (2)$$

subject to

$$\min [(S_{t,n} - S_{\min,n} + I_{t,n}), R_{\min,n}] \leq R_{t,n} \leq R_{\max,n}$$

$$S_{\min,n} \leq S_{t,n} \leq S_{\max,n}$$

$$HBS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J (p_{ij} - o_{ij})^2 \quad (3)$$

$$RPS = \sum_{j=1}^J (P_j - O_j)^2 \quad (4)$$

여기서  $N$ 은 총 예측횟수,  $J$ 는 총 예측유량 구간수,  $i$ 는  $i$ 번째 예측,  $j$ 는  $j$ 번째 예측유량 구간,  $p_{ij}$ 는  $i$ 번째 예측횟수의  $j$ 번째 유량구간의 예측확률,  $o_{ij}$ 는  $i$ 번째 예측횟수의  $j$ 번째 유량구간의 관측확률로서 사건이 발생하면 1, 발생하지 않으면 0의 값을 갖는다. 또한  $P_i = \sum_{j=1}^J p_{ij}$ ,

$$O_i = \sum_{k=1}^k o_{ik} \text{이며 } k = 1, 2, \dots, J \text{이다.}$$

본 연구에서는 1983년부터 2004년까지 총 21년간 앙상블 유량예측을 실시하여 앞서 언급한 AHS, HBS, RPS의 3가지 평가지표를 통해 ESP01, ESP11, ESP21의 3가지 앙상블 유량예측의 정확도를 평가하였다. 우선 현재 사용하고 있는 강우유출모형인 SSARR의 소유역별, 월별 앙상블 유량예측 정확도를 파악하고자 하였다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 ESP01에 대해 RPS를 기준으로 각 소유역별로 총 189개월 동안 앙상블 유량예측 정확도를 파악하고자 하였다. 이와 더불어 각 소유역별로 189개월 동안 실시한 ESP01의 RPS를 대상으

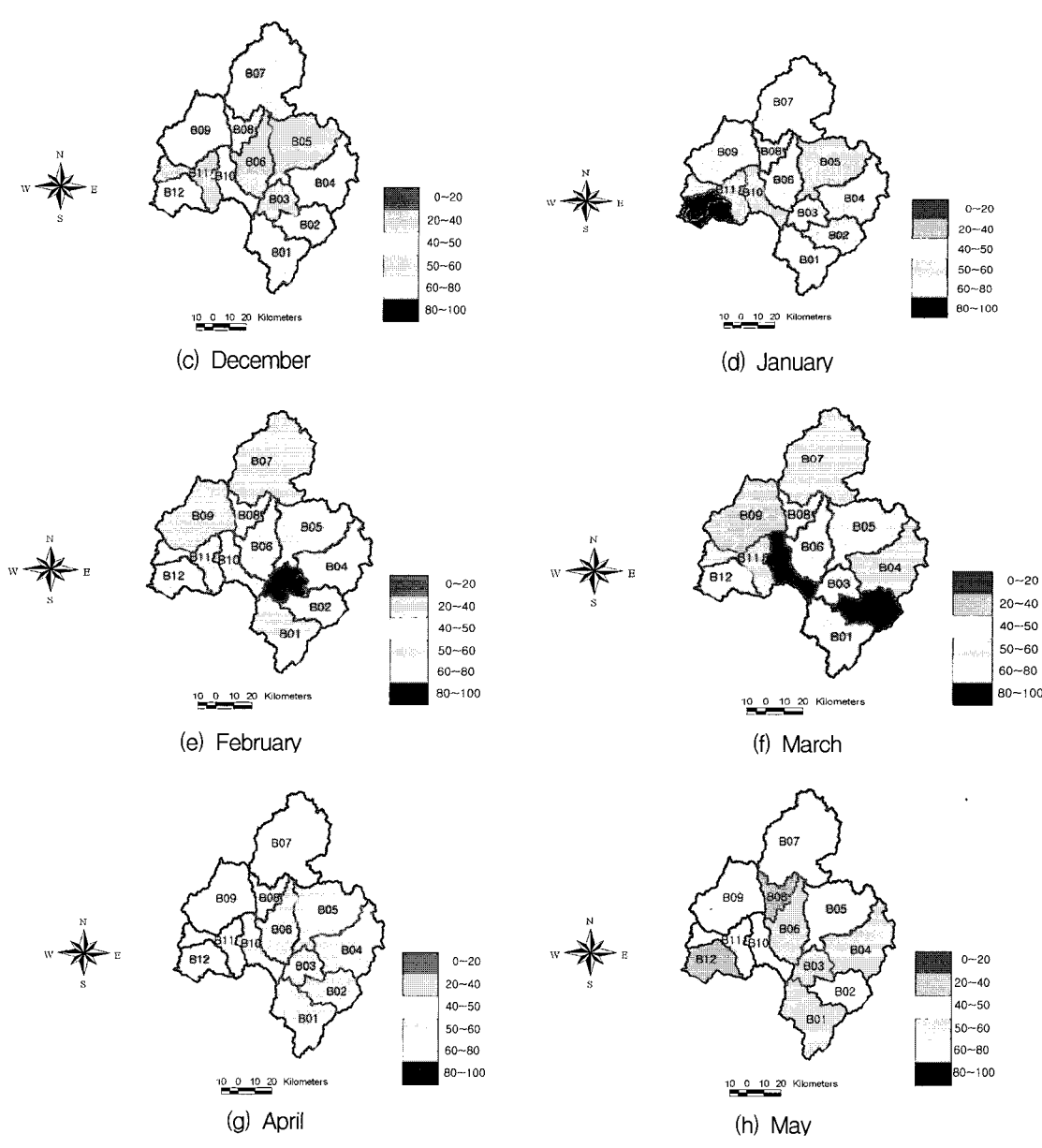


Fig. 2. RPSs of ESP01 by sub-basin

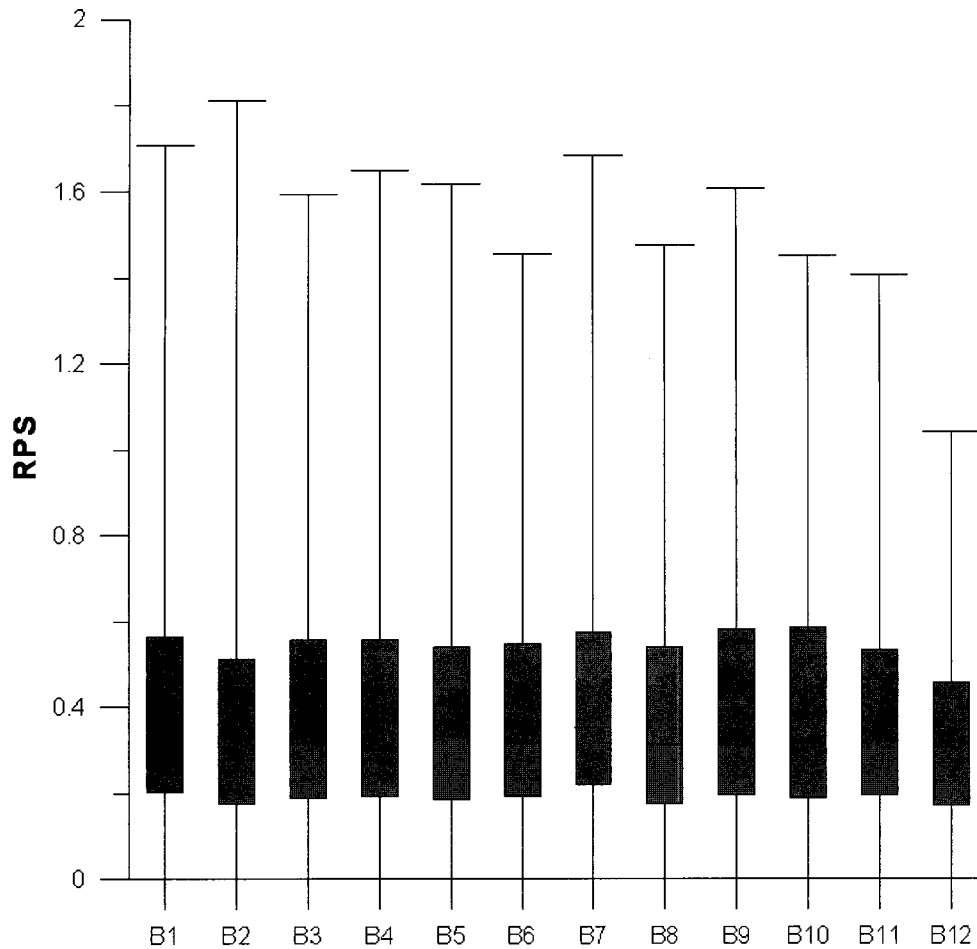


Fig. 3. Boxplot for RPSs of ESP01 by sub-basin

로 그린 Boxplot (Fig. 3)을 통해 소유역별 ESP01의 정확성을 파악하고자 하였다.

Fig. 2를 보면 4월의 경우, 소유역 1번~소유역 6번과 소유역 10번의 신뢰도가 20 %~40 %로 다른 월에 비해 현저하게 낮은 정확도를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 소유역별 정확도는 그다지 큰 차이는 없지만 12번 소유역이 가장 작은 분산을 가지고 있고 50 percentile에 해당하는 RPS가 가장 낮게 나타나므로 12개 소유역 중 가장 좋은 정확도를 나타내는 것으로 파악되었다. 이와 같은 맥락에서 보면 50 percentile의 RPS가 높게 나타나고 분산이 큰 7번 소유역의 정확도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

월중 수문상황을 반영하여 예측정확도를 높이고자 실시한 ESP01, ESP11, ESP21에서 얼마나 정확도가 향상되었는지 파악하기 위해 3가지 앙상블 유량예측의 정확도를 위의 3가지 평가지표를 통해 평가하였다. 각 평가지표에 대해 한 달의 정확도를 대표하는 값으로 각 평가지표를 12개 소유역의 평균값을 취하였으며 모든 예측유량 구간의 확률이 동일하다고 가정하는 초

보예측(naive forecast)보다 우수한 결과를 나타내면 well-forecasted month로 그렇지 않으면 poorly-forecasted month로 구분하여 총 189개월에 대한 well-forecasted month의 비율을 신뢰도로 정의하였다. 그 결과 매월 초 실시한 ESP01의 신뢰도에 비해 매월 21일에 실시하여 월중 수문상황을 가장 잘 반영한 ESP21의 신뢰도가 평균 24 % 상승하였다(Table 2). 이는 월 예측에서 과거 20일 동안의 강우자료를 알고 있다면 한 달 내내 강우자료를 모르고 있는 경우보다 앙상블 유량예측이 초보예측보다 우수한 앙상블 유량예측을 실시할 수 있는 확률이 평균적으로 24 % 향상될 수 있다는 것을 의미한다.

또한 월초에 실시한 ESP01에서 타월에 비해 정확도가 낮게 나타난 4월의 경우, 월중 수문상황을 반영한 ESP11과 ESP21에서는 Fig. 4에서 보듯이 4월의 예측 정확도가 개선되어 ESP21의 앙상블예측 신뢰도가 평균적으로 35 %로 전체 기간에 대한 신뢰도 향상률인 24 %보다 높게 나타나 4월의 앙상블 예측정확도 개선효과가 큰 것으로 나타났다.

Table 2. The accuracies of ESP01, ESP11, and ESP21

Type	Average Hit Score		Half Brier Score		Ranked Probability Score	
	Number of well-forecasted months	Reliability	Number of well-forecasted months	Reliability	Number of well-forecasted months	Reliability
ESP01	142/189*	75	127/189	67	125/189	66
ESP11	160/189	85 (10)	150/189	79 (12)	151/189	80 (14)
ESP21	178/189	94 (19)	173/189	92 (25)	174/189	92 (26)

( ): Improvement against ESP01 by %

\*: 21 years × 9 months = 189 months

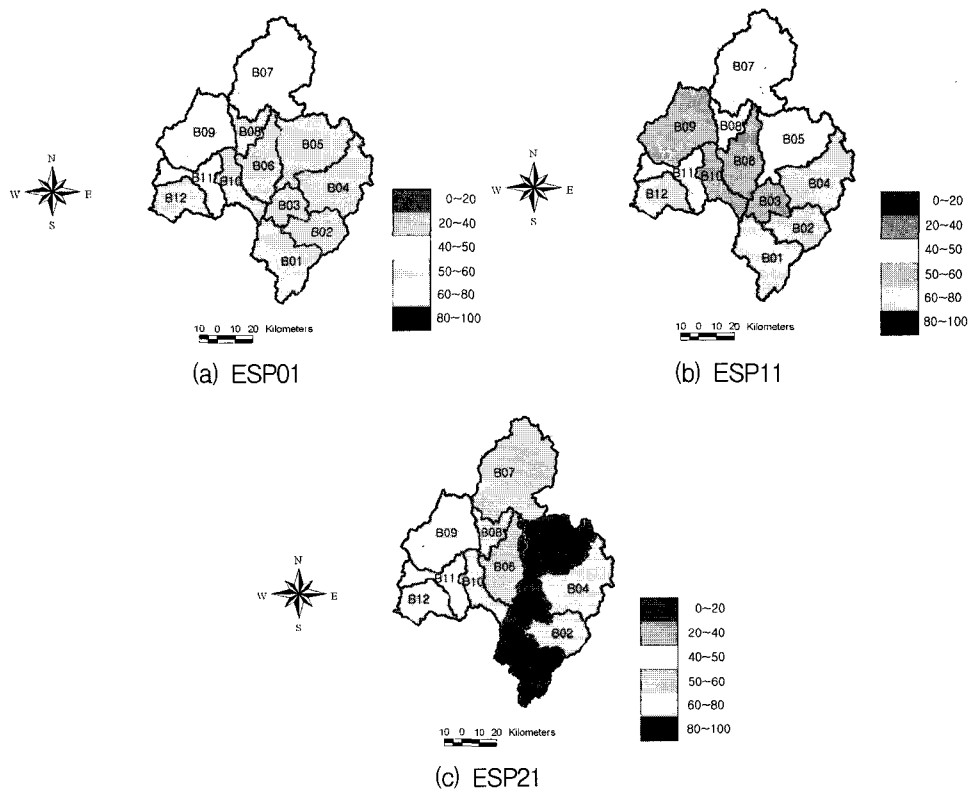


Fig. 4. The accuracies of ESP01, ESP11, and ESP21 in April

#### 4.2 저수지 운영효과 개선

정확도가 다른 앙상블 유량예측 결과가 저수지 운영에서 어느 정도 효용성이 있는지 파악하기 위하여 1983년 10월부터 2004년 6월까지 총 21년 동안의 유량 자료를 이용하여 모의운명을 실시하였다. 본 연구에서는 짧은 기간의 관측자료에 대한 단점을 극복하고자 1개년의 자료를 배제하고 나머지 기간의 자료를 통해 최적운영률을 산정한 후 배제한 1년에 대해 모의운명을 실시하는 cross validation 기법을 적용하여 총 21년 동안 모의운명을 실시하였다. 이와 동시에 10월초

댐내 저수용량에 대한 민감도를 파악하기 위해 용담댐과 대청댐의 유효저수량을 10개의 동일간격으로 구분하여 총 2,100개(21년 × 10 × 10)의 모의운영 set를 구성하였다. 유입량을 알고 있는 상태에서 최적화를 수행하는 DDP/Perf와 평균유입량을 사용하는 DDP/Ave, 과거 시나리오를 사용하는 SSDP/Hist, 그리고 정확도가 다른 3가지 앙상블 유량예측을 사용하는 SSDP/ESP01, SSDP/ESP11, SSDP/ESP21 등 총 6가지의 최적화모형에 대해 2,100개의 모의운영 set을 적용한 결과는 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Summary of 2,100 simulation results for 6 models

Optimization models	Water shortage					The firm water supply elevation in June ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	Hydro-power (GWh/year)
	In required release ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	In required diversion ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	At control points ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	Total amount ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	Number of violations		
DDP/Perf	7.70	2.80	9.88	20.4	1.1	12.2	210.9
DDP/Ave	12.86	4.14	16.44	33.4	1.8	39.3	201.9
SSDP/Hist	8.22	2.95	10.74	21.9	1.2	16.7	192.6
SSDP/ESP01	8.02	2.95	10.35	21.3	1.2	16.4	189.1
SSDP/ESP11	7.97	2.96	10.22	21.1	1.2	16.3	188.6
SSDP/ESP21	7.82	3.00	10.06	20.9	1.2	16.1	187.1

Table 4. Simulation results of SSDP/ESP01 for representative two years

Years	Total runoff ( $10^6 \text{ m}^3$ )	ESP accuracies			Water shortage					The firm water supply elevation in June ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	Hydro-power (GWh/year)
		AHS	HBS	RPS	In required release ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	In required diversion ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	At control points ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	Total amount ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ )	Number of violations		
1987-1988*	595.22	0.445	0.577	0.349	18.09	4.81	34.67	57.57	2.45	0.59	152.30
1994-1995**	617.55	0.365	0.695	0.475	24.90	7.18	39.91	71.99	3.10	72.97	148.91

\* : Well-forecasted year

\*\* : Poorly-forecasted year

예상한 바와 같이 비현실적이지만 모의운영 결과의 상한선을 제시하는 DDP/Perf가 가장 좋은 결과를 나타냈으며 평균유입량을 사용한 확정론적 모형인 DDP/Ave모형보다 추계학적 모형인 SSDP/Hist모형을 사용했을 때 연평균  $11.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 용수부족 감소효과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 미래에 발생할 유입량을 모르는 경우 단순히 평균유입량을 사용한 모형을 미래 유입량의 불확실성을 고려한 추계학적 모형으로 개선한 효과로 볼 수 있다. 또한 앙상블예측의 정확도가 가장 높은 SSDP/ESP21모형의 모의운영 결과는 매월 1일에 실시하는 SSDP/ESP01의 결과보다 연평균  $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 과거 시나리오만을 사용한 SSDP/Hist 모형에 대해서는 연평균  $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 용수부족 감소효

과를 나타내고 있다. 따라서 확정론적 모형에서 추계학적 모형으로 모형을 개선했을 때 연평균  $11.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 용수 확보 효과가 있는 반면에 ESP 정확도 개선에 의한 효과는 연평균  $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 볼 수 있다.

또한 앙상블예측의 정확도에 따른 저수지 운영의 민감도를 파악하기 위해 총 유출량은 비슷하지만 예측정확도가 다른 상징적인 두 해를 선정하였으며 앞서 언급한 방법과 동일하게 100개의 초기저수량에 대해 SSDP/ESP01모형 결과를 비교하였다(Table 4).

Table 4를 통해 알 수 있듯이 두 해의 총 유출량의 차이는  $22.33 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 큰 차이를 보이고 있지 않지만 앙상블 예측의 정확도가 낮은 1994-1995에서 총 유출량이 더 많이 발생했음에도 불구하고 용수부족량은



Table 5. The performance differences between two representative years

Optimization models	Water shortage (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )			The firm water supply elevation in June (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )			Hydropower (GWh)		
	1987-1988	1994-1995	Difference	1987-1988	1994-1995	Difference	1987-1988	1994-1995	Difference
DDP/Perf	55.5	67.0	11.5	56.7	63.1	6.4	161.4	151.9	-9.5
DDP/Ave	103.6	84.8	-18.7	96.7	100.0	3.3	163.7	156.4	-7.3
SSDP/Hist	60.7	71.5	10.8	69.7	75.7	6.0	153.8	146.9	-6.8
SSDP/ESP01	57.6	72.0	14.4	73.4	73.0	-0.4	152.3	148.9	-3.4
SSDP/ESP11	57.0	71.9	14.9	73.3	73.6	0.3	152.2	149.5	-2.6
SSDP/ESP21	57.1	70.6	13.6	73.7	72.3	-1.5	151.4	147.2	-4.1

Difference = (1994-1995 result) - (1987-1988 result)

14.42 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이 더 발생하는 결과를 나타냈다. 이와 더불어 두 해의 예측정확도에 따른 저수지 운영효과를 정량적으로 파악하고자 6개 최적화모형의 모의운영 결과를 비교하였다(Table 5).

두 기간의 유출량을 모두 알고 있다고 가정한 두 해의 DDP/Perf의 용수부족량에 대한 결과가 11.5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>의 차이를 보이고 있다. 이는 두 해의 유입시나리오 차이로 인해 유출량을 모두 알고 있는 최적의 상태에서도 불가피하게 발생하는 용수부족량의 차이로 볼 수 있다. 따라서 월초에 실시한 두 해의 ESP01의 정확도 차이에 의한 용수부족량의 차이는 14.4 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이고 유입시나리오의 차이에 의해 불가피하게 발생하는 용수부족량은 11.5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이므로 순수하게 ESP 예측정확도의 차이에 의해 발생한 용수부족량은 14.4 - 11.5 = 2.9 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>으로 볼 수 있으며 두 해의 ESP 예측정확도 차이가 근접해지는 SSDP/ESP21의 예측정확도 차이에 의한 용수부족 감소효과는 13.6 - 11.5 = 2.1 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>으로 감소하는 것을 알 수 있다.

이와 더불어 총 유출량과 ESP 정확성 개선에 따른 용수부족 감소량에 대한 상관관계를 파악하기 위해 이에 대한 post map(Fig. 5)을 작성하였다.

여기서 ESP 정확성 개선은 ESP01의 AHS를 기준으로 개선된 AHS를 백분율로 산정하였고 용수부족 감소량은 SSDP/ESP01의 결과와 SSDP/ESP11과 SSDP/ESP21의 차이로 설정하였다. Fig. 5에서 총 유출량에 대한 percentile을 나타내는 횡축의 한 점에 두 개의 점이 나타나는데 아래의 점이 ESP11에 대한 결과이고 위

의 점이 ESP21의 결과를 나타낸다. 이를 보면 월중 수문상황을 가장 잘 반영한 ESP21의 용수부족 감소효과가 ESP11의 결과보다 항상 우수함을 알 수 있다. 또한 총 유출량이 0~25 percentile에서 용수부족 감소효과가 크게 나타나는 ▲ 또는 ● 표시가 집중되어 있는 반면에 총 유출량이 커질수록 ESP 정확성이 개선되더라도 용수부족 감소량이 없거나 크게 증가하지 않는 △ 또는 ○ 표시가 많은 것을 알 수 있다. 그러나 50 percentile에서 100 percentile 사이의 결과를 살펴보면 70 percentile에서 주변의 용수부족 감소량보다 다소 큰 용수부족 감소량을 의미하는 ▲ 표시가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 1995년 10월~1996년 6월의 모의운영 결과로 94.3 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>의 용수부족을 나타낸다. 이 해는 총 유출량 3290.7 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>의 58%에 해당하는 1905.8 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이 6월 한 달 동안 발생하였으며 이는 6월 평균유출량인 657.7 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>의 2.9배에 해당하는 큰 유출량이다. 이에 반해 이수기 저수지 운영의 시작점인 1995년 10월부터 1996년 5월까지의 유출량은 월평균 유출량의 0.65배로 절반 정도의 수준을 나타내고 있다(Table 6).

따라서 저수지 운영의 특성인 순차적 과정(sequential process)을 고려해 볼 때 높은 예측정확도를 근거로 이수기 시작점인 10월에 실시한 효율적인 운영은 그 이후의 기간에 긍정적인 영향을 미치며 이 영향은 이수기 종점인 6월에 가까울수록 적어진다. 따라서 1995년 10월부터 1996년 6월까지의 기간은 6월의 큰 유출량으로 인해 총 유출량이 큰 것으로 분류되어 예측정확도 개선에 따른 용수부족 감소효과가 적을 것으로 기

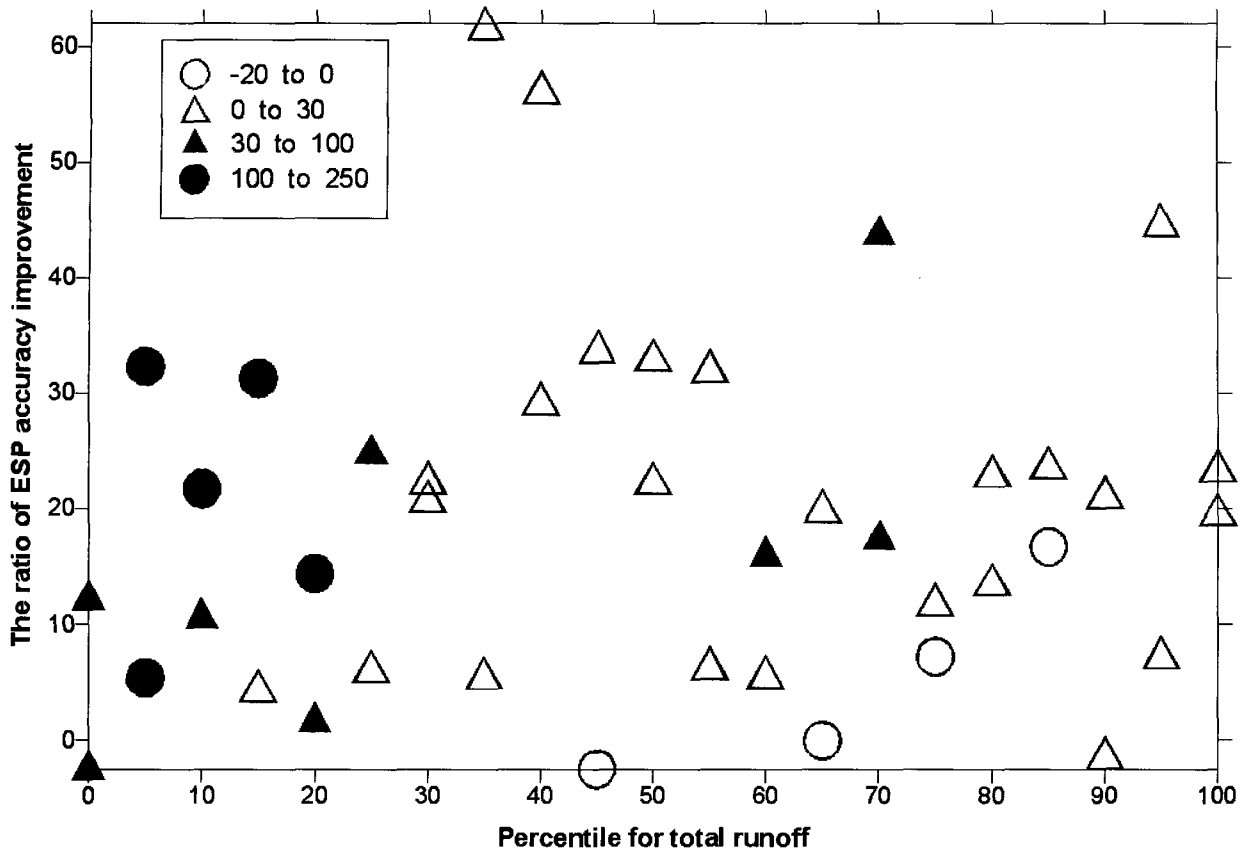


Fig. 5. The relationship of total runoff-ESP accuracy improvement-water shortage decrease

Table 6. The runoff characteristics from October 1995 to June 1996

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Total runoff from Oct to May
Runoff (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	145.87	118.01	101.38	152.96	90.76	492.43	148.23	135.29	1905.81	1384.91
Average (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	380.89	237.90	212.34	243.41	240.81	259.59	241.00	314.14	657.56	2130.08
Runoff /Average	0.38	0.50	0.48	0.63	0.38	1.90	0.62	0.43	2.90	0.65

대되었지만 실제로 이 기간의 10월부터 5월까지의 평균 유출량의 절반에 해당하는 적은 유출량이 발생하여 주변의 총 유출량에 대한 용수부족 감소효과가 크게 나타났다. 따라서 총 유출량이 적을 때 ESP 정확성이 개선되면 큰 용수부족 감소효과가 나타나는 반면에 총 유출량이 많을 경우 용수부족 자체가 발생하지 않거나 소량만 발생하기 때문에 용수부족 감소효과가 크지 않은 경향을 따르는 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 월중 수문상황을 반영한 앙상블예측을 실시하여 예측 정확성 향상에 따른 저수지 운영의 개선효과를 분석하였다. 이를 위해 월을 기준으로 1일부터 예측시점까지는 그 동안 발생한 강우 관측자료의 단일 시나리오를 사용하고 이후 기간에는 발생 가능한 모든 과거 강수시나리오를 적용하여 매월 1일, 11일, 21일 3차례 앙상블 예측을 실시하였다. 그 결과로 월중

수문상황을 가장 길게 반영한 ESP21이 매월 1일에 실시한 ESP01보다 24 %의 정확도 향상을 가져왔으며 ESP01의 경우 4월에 다른 월보다 현저하게 낮은 정확도를 나타내고 있는 것을 파악하였다.

이러한 예측정확도에 따른 양상불 유량예측의 효용성을 파악하기 위해 금강수계를 대상으로 cross validation 기법을 사용하여 21년의 유량자료와 100개의 10월초 저수량의 조합으로 총 2,100개의 모의운영 set을 구성하였다. 모의운영 결과, 추계학적 모형이 확정론적 모형에 비해  $11.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 용수부족 감소효과를 가져왔으며 가장 정확도가 높은 ESP21을 사용한 SSDP/ESP21이 SSDP/ESP01보다 연평균  $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 과거 시나리오만을 사용한 SSDP/Hist 모형과 비교했을 때 연평균  $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 용수부족 감소효과를 나타냈다.

또한 ESP 정확성에 따른 결과를 비교하기 위해 총 유출량은 비슷하지만 ESP 정확도가 다른 두 해의 모의운영 결과를 비교한 결과 SSDP/ESP01에서는  $2.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 용수부족 감소효과가 있는 것으로 파악되었으며 ESP 정확도가 비슷할수록 용수부족량의 차이가 감소하는 것을 확인하였다. 또한 총 유출량과 ESP 정확도 개선에 따른 용수부족 감소량의 상관관계를 파악하기 위해 post map을 작성하였다. 그 결과 총 유출량이 적을수록 ESP 정확도 개선에 따른 용수부족 감소효과가 매우 크며 ESP 정확도가 크게 개선되더라도 총 유출량이 많으면 예측정확도의 향상여부에 관계없이 용수부족량이 발생하지 않거나 소량만이 발생하기 때문에 효과는 크지 않았다.

현재 한국수자원공사의 실시간 물관리 시스템에서 사용하고 있는 강우유출모형인 SSARR를 통한 양상불 예측이 다른 월에 비해 4월에 매우 낮은 정확도를 보였다. 이러한 이유가 강우 입력자료에 기인한 것인지 아니면 매개변수 추정 오류 등 모형오차에 의한 것인지 파악하여 양상불예측의 정확도를 현재보다 개선하는 것이 필요하다. 이를 통해 보다 효과적인 저수지 운영을 산정하여 장래 물부족 최소화에 이바지 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 공과대학 공학연구소를 통해 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 유역 물관리 운영기술개발 과제(과

제번호 1-6-2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- 김영오 (1998). "수문학적 예측의 정확도에 따른 저수지 시스템 운영의 민감도 분석." **한국수자원학회 논문집**, 제 31권, 제 6호, pp. 855-862.
- 한국수자원공사 (2004a). **실시간 물관리 운영시스템 구축기술개발**, 과학기술부, 연구보고서.
- 한국수자원공사 (2004b). **유역통합물관리를 위한 하천 유출량예측방안연구**, 건설교통부, 연구보고서.
- Day, G. N. (1985). "Extended streamflow forecasting using NWSRFS." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 111(WR2), 147-170.
- Faber, B.A., and Stedinger, J.R. (2001). "Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction(ESP) forecasts." *Journal of Hydrology*, ELSEVIER, Vol. 249(1-4), pp. 113-133.
- Fread, D.L. (1998). "A perspective on hydrologic prediction trends." *Special Symposium on Hydrology*, American Meteorological Society, Phoenix, Arizona, pp. J1-J6.
- Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A., Hsu, E., and Yuan S.Q. (1990). "Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 26, No. 2, pp. 447-454.
- Kim, Y.-O., Jeong, D.I., and Kim, H.-S. (2001). "Improving water supply outlook in Korea with ensemble streamflow prediction." *Water International*, IWRA, Vol. 26, No. 4, pp. 563-568.
- Mishalani, N.R. and Palmer, R.N. (1988). "Forecast uncertainty in water supply reservoir operation." *Water Resources Bulletin*, AWRA, Vol. 24, No. 6, pp. 1237-1245.
- Wilks, D.S. (1995). *Forecast verification: Statistical method in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, NY, USA.
- Yao, H., and Georgakakos, A. (2001). "Assessment of Folsom Lake response to historical and potential future climate scenarios." *Journal of Hydrology*, ELSEVIER, Vol. 249, pp. 176-196.

Yeh, W.W.-G., Becker, L. and Zettlemoyer, R.  
(1982). "Worth of inflow forecast for reservoir  
operation." *Journal of Water Resources Planning  
and Management*, ASCE, Vol. 108, No. 3, pp.

257-269.

(논문번호:05-129/접수:2005.10.04/심사완료:2006.01.06)