

최적선형보정을 이용한 앙상블 유량예측 시스템의 개선 Improvement of the Ensemble Streamflow Prediction System Using Optimal Linear Correction

정 대 일* / 이 재 경** / 김 영 오***

Jeong, Dae-Il / Lee, Jae-Kyoung / Kim, Young-Oh

Abstract

A monthly Ensemble Streamflow Prediction (ESP) system was developed by applying a daily rainfall-runoff model known as the Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR) model to the Han, Nakdong, and Seomjin River basins in Korea. This study first assesses the accuracy of the averaged monthly runoff levels simulated by SSARR for the 3 basins and proposes some improvements. The study found that the SSARR modeling of the Han and Nakdong River basins tended to significantly underestimate the actual runoff levels and the modeling of the Seomjin River basin showed a large error variance. However, by implementing optimal linear correction (OLC), the accuracy of the SSARR model was considerably improved in predicting averaged monthly runoff levels of the Han and Nakdong River basins. This improvement was not seen in the modeling of the Seomjin River basin. In addition, the ESP system was applied to forecast probabilistic runoff forecasts one month in advance for the 3 river basins from 1998 to 2003. Considerable improvement was also achieved with OLC in probabilistic forecasting accuracy for the Han and Nakdong River basins, but not in that of the Seomjin River basin.

keywords : ensemble streamflow prediction, optimal linear correction, probabilistic forecast, SSARR model

요 지

일단위 강우-유출모형인 SSARR모형을 이용하여 한강, 낙동강, 섬진강유역에 월 앙상블 유량예측 시스템을 구축하였다. 우선 SSARR모형의 월 평균 유출량에 대한 모의정확성을 평가한 결과 한강과 낙동강유역에서는 과소추정하는 경향이 뚜렷하였으며, 섬진강유역에서는 모의오차의 분산이 커 정확성 개선이 필요하였다. 최적선형 보정기법을 적용하여 SSARR모형의 모의유량을 보정한 결과, 섬진강을 제외한 한강과 낙동강유역의 검증지점에서는 모의 정확성이 크게 개선되었다. 또한 1998년부터 2003년까지 월 앙상블 유량예측을 실시하여 예측 정확성을 평가하였다. 한강과 낙동강유역에서 최적선형 보정기법을 이용할 경우 앙상블 유량예측 정확성이 크게 개선되었으나, 섬진강유역은 개선효과가 미비하였다.

핵심용어 : 앙상블 유량예측, 최적선형보정, 확률론적 예측, SSARR모형

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정
Ph.D. Course, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ. Seoul, Korea
(e-mail: jung922@snu.ac.kr)

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정
Master's Course, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ. Seoul, Korea
(e-mail: myroom1@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수
Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)

1. 서론

양상불 유량예측은 미국을 중심으로 가장 활발히 이용되고 있는 유량 확률예측 기법으로서 예측결과를 단일값으로 제시하는 확정론적 예측기법과는 달리 예측의 불확실성을 확률로서 표현하는 예측기법이다. 따라서 양상불 유량예측은 단기예측 보다는 불확실성이 큰 중장기예측에 유리하여 2000년도 국내에 도입될 당시부터 중장기 유량예측에 초점을 맞추어 적용되고 있다(정대일과 김영오, 2002).

양상불 유량예측의 연구방향은 크게 예측의 정확성을 향상시키기 위한 이론적 연구와 수자원 계획과 관리에 활용될 수 있도록 GUI를 포함한 유량예측시스템을 구축하는 등의 실무적 연구로 나눌 수 있다. 이론적 측면으로는 양상불 유량예측에서 가장 중요한 강우-유출 모형의 모의능력을 통계적인 기법을 이용하여 개선하기 위한 연구가 수행되었다(Kim et al., 2004). 강우-유출 모형의 모의정확성을 근본적으로 개선하기 위해서는 모형 자체에 대한 연구와 개선은 물론 최적의 매개변수 추정에 장기적인 노력을 기울여야 한다. 그러나 유전자 알고리즘과 같은 최신기법을 이용하여 매개변수를 추정하여도 모의능력을 획기적으로 향상시키지 못하고 있는 실정이므로 후처리과정(post processing) 개념의 통계적 기법들을 적용하여 강우-유출모형의 모의정확성을 개선하려는 노력이 시도되었다. Kim et al.(2004)의 연구 결과 강우-유출모형의 모의결과를 보정하는 보정기법(correction method), 두 개 이상의 모형을 결합하는 결합기법(combining method)을 이용하여 모의능력을 개선한다면, 건기(봄, 가을, 겨울)를 중심으로 양상불 유량예측 정확성을 향상시킬 수 있음을 증명하였다.

실무적 측면에서는 '21세기 프론티어연구개발사업'인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 '실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발(과학기술부, 2004)'의 1단계 과업을 통해 SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation)모형을 기반으로 금강유역의 주요지점(용담댐, 대청댐, 공주지점)에 양상불 유량예측 시스템을 구축하였다. 특히 방대한 입출력 자료를 다루어야 하는 양상불 유량예측의 단점을 보완할 수 있는 사용자 인터페이스(interface)를 구축하여 실무에서의 활용성을 극대화 하였으며, 이론적 연구를 가속화 할 수 있는 기틀을 마련하였다.

금강유역에 구축된 예측시스템은 성공적인 실무 적용 사례로 평가 받았으나, 두가지 중요한 문제점이 지적되었다. 첫 번째 문제는 양상불 유량예측에 이용된 SSARR모형의 정확성이 그다지 높지 않으며 이로 인해

양상불 유량예측의 예측정확성마저도 신뢰하기 힘들다는 점이며, 두 번째는 유역 전반에 걸친 유량예측 정보를 제공하기 위해서는 예측지점을 다목적댐 상류 뿐 아니라 전 유역으로 확대해야 한다는 지적이었다.

최근 '유역통합물관리를 위한 하천유출량 예측방안 연구(건설교통부, 2004)'에서는 금강유역의 예측시스템에서 지적되었던 두 가지 문제점을 해결하고 한강, 낙동강, 섬진강유역에 이를 확대 적용하였다. 먼저, SSARR모형의 모의정확성을 근본적으로 개선하기 위해서는 Kim et al.(2004)의 이론적 연구를 통해 적용 가능성이 입증된 최적선형 보정기법을 활용하여 해결하였다. 최적선형 보정기법은 비록 모의능력이 우수한 모형이라 할지라도 정확성을 더욱 향상시키기 위해 필요한 후처리 과정이라 할 수 있다. 두 번째로 각 유역의 다목적댐은 물론 SSARR모형에 포함되어있는 전 소유역에서 양상불 유량예측이 가능하도록 시스템을 구축하였다. 따라서 한강, 낙동강, 금강, 섬진강유역의 중장기 예측시스템이 양상불 유량예측을 기초로 완성되어 영산강 유역을 제외한 국내 대부분 유역에 대한 유량 확률예측이 가능하게 되었으며, 불확실성을 고려한 중장기 수자원관리를 위해 그 활용성이 매우 클 것으로 기대되고 있다.

본 연구는 한강, 낙동강, 섬진강유역의 양상불 유량예측시스템 구축 과정에서 수행된 연구를 바탕으로, 한국 수자원공사를 통해 이미 구축되어 사용 중인 3대강 유역의 SSARR모형의 월 모의정확성을 평가하였으며, 이를 최적선형 보정기법을 이용하여 보정함으로써 신뢰할 만한 실측유량이 존재하는 다목적댐 유입량의 모의정확성을 개선할 수 있음을 확인하였다. 나아가, 최적선형보정에 의한 SSARR모형의 모의정확성 개선이 양상불 유량예측의 예측정확성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

2. 기본이론

2.1 양상불 유량예측

양상불 유량예측은 예측시점의 유역 적설량, 토양함수, 하천의 수위, 습도 등 유역상태를 나타내는 초기조건과 미래에 재현 가능한 과거 기상자료를 결합함으로써 예측이 이루어지는 확률론적 예측모형의 가장 대표적인 방법이다. 즉, 확정론적 강우유출모형에 미래에 일어날 가능성이 있는 모든 강우 시나리오(즉, 강우 양상불)를 입력하여 그 결과물로 다수의 유량 시나리오(즉, 유량 양상불)를 얻는 것이 양상불 유량예측의 기본개념이다. 따라서 양상불 유량예측은 확정론과 확률론의 복합기법이라고 할 수 있다(Day, 1985).

양상불 유량예측의 최종 결과로 생성된 예측유량 양상불만으로는 예측의 결과를 이해하기 어려우며 수자원 관리의 정보로서 활용하기 힘들기 때문에 확률예보를 실시하기 위해서는 통계적 분석이 필요하다. 몇 개의 예측유량 구간을 나눈 후, 각 구간의 발생확률을 제시하는 방법 또는 예측변수의 확률분포를 직접 제시하여 사용자의 용도에 맞는 대표 통계값으로 표현하는 것이 일반적인 추세이다. 그림 1은 양상불 유량예측 과정을 그린 것이다.

2.2 확률론적 예측의 정확성 평가방법

기상예측 분야에서는 1990년대 초부터 이미 미국의 NCEP(National Center for Environmental Prediction)과 유럽의 ECMWF(European Center for Midium-range Weather Forecasts)에서 양상불 기법을 이용한 확률론적 예측을 공식적으로 실시하였으며, 예측의 정확성을 효율적으로 평가할 수 있는 다양한 형태의 평가 기법들을 사용하고 있다(Atger, 2003; Murphy et al., 1989; Wilks, 1995).

확률론적 예측의 정확성은 크게 신뢰도(reliability)와 해상도(resolution)라는 두가지 측면으로 나누어 평가할 수 있다. 신뢰도는 예측사건에 대한 예측확률과 관측빈도의 일치성을 의미하며, 해상도는 예측확률의 변화에 따른 관측빈도의 변화성을 나타낸다. 이 두 성분은 Reliability Diagram을 그려 평가할 수 있으며 이에 대한 자세한 내용은 Wilks(1995)의 책을 참조하기 바란다.

확률론적 예측을 평가하기 위한 스칼라 지표로서 이분(dichotomous, 발생 또는 미발생) 사건의 확률예측에 자주 사용하는 Brier Score(BS)와 연속변수의 확률예측에서 주로 사용하는 Ranked Probability Score(RPS)를

들 수 있다. BS는 확률론적 예측에서의 평균제곱오차(MSE)와 유사한 개념으로서 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2 \quad (1)$$

여기서 N은 예측횟수, p_i 는 예측확률, o_i 는 사건이 발생하면 1을, 발생하지 않으면 0의 값을 갖는다. 연속변수를 J개의 구간(category)으로 나누어 확률예측을 실시하였을 경우 식 (2)를 이용하여 RPS를 계산할 수 있다.

$$RPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J (P_i - O_j)^2 \quad (2)$$

여기서 $P_i = \sum_{j=1}^k p_{ij}$, $O_j = \sum_{i=1}^k o_{ij}$ 이며, $k = 1, \dots, J$ 이다.

BS와 RPS에 대한 좀더 자세한 내용은 역시 Wilks(1995)의 책을 참조하기 바란다.

Kim et al.(2001)은 구간 확률예측을 검증하기 위한 방법으로 평균예측점수(Average Hit Score, AHS)를 제안하였다. 예측점수는 간단히 정의하자면 실측유출이 발생한 구간의 예측확률을 의미한다. N번의 구간확률예측을 실시하였다면, 각 예측에서 실측유출량이 발생한 구간의 예측점수를 각각 구할 수 있다. 이와 같이 예측을 수행한 후 일정한 검증기간 N에 대하여 예측점수를 평균한 값을 평균예측점수라고 하며, 만약 평균예측점수가 100/J %보다 크다면 전체적인 양상불 유량예측은 다음에 설명될 초보(naive)예측보다 정확하여 예측정보로 유효하다고 할 수 있다.

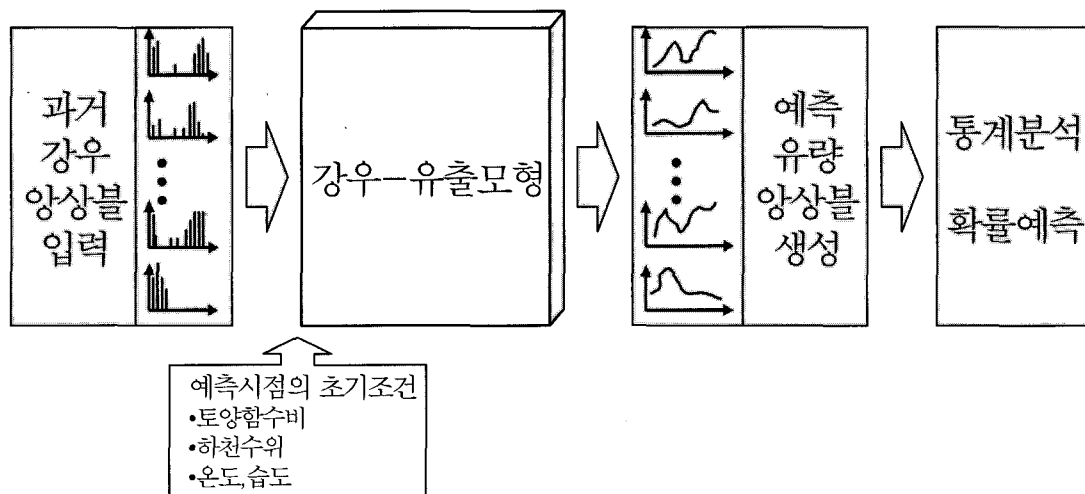


그림 1. 양상불 유량예측 과정

2.3 구간확률예측

앙상블 유량예측의 결과로 생성된 유량 앙상블은 많은 양의 예측정보를 포괄적으로 내포하고 있다. 따라서 이 예측유량 앙상블을 어떠한 통계분석 과정을 거쳐 어떤 형태로 예측할 것인가에 대해서는 예측결과를 이용하는 실무자들의 의견을 적극 반영할 필요가 있다.

본 연구에서는 앙상블 유량예측의 정확성을 평가하기 위해 전 유량의 범위를 3 개의 구간으로 나누어 구간확률예측(categorical probabilistic forecast)을 실시하였다. 구간확률예측을 실시하기 위해 먼저 예측하고자 하는 지점의 과거 실측유량 자료를 이용하여 동일한 확률을 갖도록 유출량의 범위를 3 개로 분할하였으며 이를 초보예보라 칭하였다. 누기확률 33.3 %와 66.7 %에 해당하는 유출량($Q_{33.3}$, $Q_{66.7}$)을 기준으로, $\sim Q_{33.3}$ 을 저수, $Q_{33.3} \sim Q_{66.7}$ 을 중수, $Q_{66.7} \sim$ 을 풍수구간으로 나누었다.

앙상블 유량예측의 결과로 얻어진 예측유량 앙상블의 경험적 분포함수(empirical distribution function)를 이용하여 $Q_{33.3}$ 과 $Q_{66.7}$ 의 누기확률($\text{Pr}[Q_{33.3}]$, $\text{Pr}[Q_{66.7}]$)을 계산하여 저수, 중수, 풍수의 발생확률(각각 P_{low} , P_{medium} , P_{high})을 식 (3)을 이용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} P_{\text{low}} &= \text{Pr}[Q_{33.3}] \\ P_{\text{medium}} &= \text{Pr}[Q_{66.7}] - \text{Pr}[Q_{33.3}] \\ P_{\text{high}} &= 1 - \text{Pr}[Q_{66.7}] \end{aligned} \quad (3)$$

본 연구에서는 이와 같은 구간확률예측을 평가하기 위해 평균예측점수를 이용하였다. 평균예측점수를 확률론적 예측의 평가방법으로 선정한 이유는 계산과정이 BS나 RPS에 비해 단순하여 확률예측에 생소한 수자원 전문가들도 쉽게 예측결과를 이해할 수 있기 때문이다. 3개의 구간에 대해 BS를 이용하여 확률예측결과를 평가하였으나 본 논문에는 수록하지 않았으므로 '유역통합 물관리를 위한 하천유출량 예측방안 연구(건설교통부, 2004)' 보고서에 수록된 내용을 참조하기 바란다.

2.4 최적선형 보정기법

앙상블 유량예측을 충주댐 월 유입량 예측에 적용한 후 예측오차의 원인을 분석해 본 결과 유출량이 적은 겨울과 봄 등 건기의 예측오차는 일반적으로 예측에 사용된 강우-유출모형의 모의능력에 따라 크게 차이가 있음이 확인되었다(정대일과 김영오, 2002). 이러한 문제점을 해결하기 위한 궁극적인 방법은 앙상블 유량예측의 핵심

인 강우-유출모형을 근본적으로 개선하는 것이다. 그러나 강우-유출모형은 복잡한 매개변수 추정과 입력자료 구성 등의 어려움으로 인하여 정확성을 향상시키는 것은 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 만약 강우-유출모형의 모의지점에 신뢰할만한 실측유량이 존재한다면 통계적인 방법을 이용하여, 모형은 다르나 모의지점이 같은 2 개 이상의 강우-유출모형의 모의유량과 결합(combining)하거나, 과거의 물리적 모형의 모의오차를 근거로 모의유량을 보정(correction)하는 방법을 이용하면 복잡한 매개변수를 추정하지 않고도 효과적으로 강우-유출모형의 정확성을 개선할 수 있다(Kim et al., 2004).

예측 또는 모의결과를 보정(correction)하거나 결합(combining)하는 방법은 경제분야의 예측에서는 매우 보편화된 방법이다(정대일 등, 2003). 최근에는 기상예측 분야에서도 여러 개의 기후모형을 이용하여 예측한 후 이를 산술평균하는 Multi-model 앙상블과 가중 평균하는 Multi-model Super 앙상블 기법 등의 결합기법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 수문학 분야에는 Georgakakos et al.(2004)에 의해 7개의 분포형과 집중형 강우-유출모형을 이용한 Multi-model 앙상블 기법을 수문예측에 적용하기 위한 기초적인 연구가 진행되었다. 보정기법에 대한 기상예측 분야의 대표적인 연구로, Wood et al.(2002)은 GCM모형의 강우량에 포함된 Bias를 보정하기 위해 과거 관측강우 CDF(Cumulative Distribution Function)와, 같은 기간의 GCM에 의한 모의강우 CDF를 구한 후, 예측강우 앙상블이 생성되면 이를 모의강우 CDF에서 관측강우 CDF로 Mapping 시켜서 Bias를 보정하는 Probability Mapping 기법을 제안하였다. Atger(2003)은 ECMWF의 EPS(Ensemble Prediction System)을 개선하기 위해 선형회귀식을 이용한 보정기법을 적용한 바 있다.

최적선형 보정(Optimal Linear Correction, OLC)기법은 Theli (1971)에 의해 처음으로 제안되었으며, 예측 또는 모의결과를 단순선형회귀식을 이용하여 보정할 수 있음을 확인한 바 있다. 또한 Goodwin(2000)은 최적선형 기법을 이용하여 경제분야의 예측모형을 보정하기 위해 적용하고 그 효용성을 입증한 바 있다. Theli는 식 (4)와 같은 단순선형회귀식을 이용하여 예측 또는 모의값의 Bias를 제거할 수 있음을 증명하였다.

$$F_{t,c} = \alpha + \beta F_{t,1} \quad (4)$$

여기서 α 과 β 는 최소제곱법에 의해 추정된 선형회귀식의 절편과 기울기를 나타내는 회귀계수들이며 $F_{t,1}$ 은 t 시점의 보정대상이 되는 예측 또는 모의값, $F_{t,c}$ 는

보정된 예측 또는 모의값을 의미한다. 최적선형보정은 비록 모의능력이 우수한 모형이라 할지라도 정확성을 더욱 향상시키기 위해서는 꼭 필요한 후처리 과정이라 할 수 있다. 만약 예측 또는 모의모형이 완벽하다면 식 (4)에서 $\beta = 1$, $\alpha = 0$ 이 될 것이며, 모형에 오직 Bias만 존재한다면 $\beta = 1$, $\alpha = -\text{Bias}$ 가 되어야 할 것이다. 그러나 일반적인 모형의 경우에는 Bias와 오차의 분산 (variance)이 함께 존재하므로 β 는 1이 아닌 경우가 대부분이며, 이 때에는 모형의 Bias는 물론 오차의 분산까지 보정결과에 영향을 받게 되므로 최적선형 보정기법의 적용시 유의하여야 한다.

3. 대상유역의 강우-유출모형

3.1 SSARR모형

SSARR 모형은 미국 공병단(Corps of Engineers)에서 1956년 처음 개발되어 지속적으로 보정이 이루어지고 있는 모형으로서 저수지조작, 대유역의 실시간 일 유량예측 등의 목적으로 널리 사용되고 있다. 유역추적모형과 하도추적모형, 저수지 조작(reservoir regulation) 모형으로 구성된 이 모형은 미국의 Columbia 강과 베트남의 Mekong 강 등, 대하천에 성공적으로 적용된 바 있으며, 강우 뿐 아니라 강설에 따른 유출모의도 가능하다. 계산시간은 6분에서 24시간까지 중에서 선택할 수 있고, 유효강우량 산정기능과 추적기능이 별도로 마련되어 각각의 수문현상을 간단한 수식으로 표현한 후 그 해를 구할 수 있다. SMI(Soil Moisture Index), ETI (Evapo-Transpiration Index), BII(Baseflow Infiltration Index)와 같은 몇 개의 매개변수가 지표형태로 주어지는 개념적 토양함수량 산정모형이다. 전체 유역을 특성에 따라 여러 개의 소유역으로 나누고 각 소유역의 출구점에서 유량을 계산하는 집중형모형이며, 생공농용수, 댐 방류량 및 회귀수량을 고려한 유역내 물수지 분석이 가능하여 실시간 물관리를 위해서도 활용성이 크다. 그러나 입력 자료의 구성이 매우 복잡하고, 매개변수 개수가 많고 추정도 어려운 단점이 있다(건설교통부, 2004).

국내 적용사례로서, 강주환(1986)이 한강유역에, 안상진과 이용수(1989)가 금강수계인 보청천유역에, 그리고 건설교통부와 한국수자원공사(건설교통부, 1989; 1996; 2001)에서 낙동강유역에 각각 적용한 바 있으며 최근에는 한국수자원공사를 중심으로 적용대상이 꾸준히 확대되고 있다. 유역별로 SSARR모형의 구축상황을 살펴보면, 낙동강 SSARR모형은 '낙동강수계 댐군 최적연계운영 시스템개선 연구보고서(건설교통부, 2001)'에서, 한강

은 '연속유출모형 실용화 및 GUI구축(건설교통부, 2002)'에서 각각 구축되었다. 금강유역의 SSARR모형은 2004년 6월에 마무리된 '21세기 프론티어연구개발사업'인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 '실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발(과학기술부, 2004)'의 1단계 과업을 통하여 구축되었으며 섬진강유역은 '유역통합 물관리를 위한 하천유출량 예측방안 연구(건설교통부, 2004)'를 통해 구축되었다. 이와 같이 한국수자원공사의 지속적인 투자로 한강, 낙동강, 금강, 섬진강에 이르는 국내 4대강 유역의 일 강우-유출모형이 이미 SSARR모형을 이용하여 일관성 있게 구축되어 활발히 사용되고 있다.

본 연구에서는 위에서 언급한 국내 4대강유역의 SSARR모형 중에서 '유역통합 물관리를 위한 하천유출량 예측방안 연구'의 대상유역인 한강, 낙동강, 섬진강 유역에 대해 평가하였다. 이 모형들은 일단위 모형이기는 하나 본 연구에서는 월단위 이상의 장기 유량예측에 사용성을 평가하기 위해 월단위로 평가하였다. 그 후 최적선형 보정기법을 이용하여 SSARR모형의 모의정확성을 개선할 수 있음을 증명하고자 하였다. 즉, 기존의 SSARR모형을 보정하지 않고 앙상블 유량예측에 이용할 경우와, 최적선형보정을 이용하여 SSARR모형의 모의정확성을 개선한 후 앙상블 유량예측에 이용할 경우에 대한 앙상블 유량예측의 정확성을 서로 비교하여 최적선형 보정기법의 유효성을 검증하였다.

3.2 모의정확성 평가

한강, 낙동강, 섬진강유역의 SSARR모형 모의정확성을 평가하기 위해 실측길이가 길고 신뢰성이 비교적 높은 실측유량이 존재하는 다목적댐을 검증지점으로 선정하였으며, 이에 따라 한강유역의 충주댐과 소양강댐, 낙동강유역의 안동댐, 합천댐, 남강댐, 섬진강유역의 섬진강댐이 선정되었다.

SSARR모형의 정확성을 평가하기 위한 지표로 일반적으로 가장 많이 사용하는 Bias, RMSE(Root Mean Square Error)를 이용하였다. Bias는 오차의 평균으로 모형의 계통오차(systemic error)를 나타내는 지표이며 RMSE는 계통오차와 무작위오차(random error)를 종합적으로 나타내는 지표이다. R(Relative)-Bias와 R(Relative)-RMSE는 Bias와 RMSE를 실측유량의 평균으로 나누어 무차원화 한 상대지표이다. 모의 월 $i (= i, \dots, N)$ 에 대한 모의유량을 F_i , 실측유량을 Q_i 라고 한다면, R-Bias와 R-RMSE는 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$R\text{-Bias} = \frac{M_F - M_Q}{M_Q} \quad (5)$$

$$R\text{-RMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F_i - Q_i]^2}}{M_Q}$$

여기서, $M_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i$, $M_Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i$ 이다.

표 1은 검증지점의 월별과 연간에 대한 SSARR모형의 모의평균(M_F), 실측평균(M_Q), R-Bias, R-RMSE를 정리한 것이다. 평가지점의 실측유량은 '다목적댐 운영 실무편람(한국수자원공사, 2004)'에 제시된 값을 사용하였으나, 평가지점의 유량을 실측하기 시작한 시점이 각각 다르므로 실측이 시작된 시점부터 2003년 12월까지의 자료가 이용되었다. 먼저 한강유역의 충주댐과 소양강댐에 대해 살펴보면, R-Bias가 1월, 2월, 12월에는 양수를, 나머지 월에는 모두 음수를 나타내어, 겨울

철을 제외한 모든 월에서 SSARR모형이 과소추정하는 경향이 뚜렷함을 확인하였다. 충주댐의 월 R-Bias와 R-RMSE를 살펴보면 겨울철인 1월, 2월, 12월이 다른 월에 비해 큰 값을 보였으며 특히 1월의 RMSE는 평균의 약 1.5배에 해당하는 346 CMS로 모의 정확성이 가장 좋지 않았다. 소양강댐은 모든 월의 R-RMSE가 0.5 이상의 높은 값을 나타내 전반적인 모의 정확성이 충주댐보다 더 좋지 않았다. 연간 지표를 보면, 충주댐과 소양강댐의 R-Bias는 모두 음수를 나타내어 전반적으로 과소추정하는 경향을 확인하였으며, 월간 지표와 마찬가지로 소양강댐의 R-RMSE가 충주댐보다 커 소양강댐의 모의정확성이 더 좋지 않음을 확인하였다.

낙동강유역의 안동, 합천, 남강댐을 살펴보면, 월 R-Bias에서 남강댐의 11월과 12월을 제외한 모든 월에서 음수를 나타내어 전반적으로 과소추정 경향이 매우 뚜렷하였다. 안동댐의 2월~9월, 합천댐의 2월~6월, 남강댐의 3월~5월 R-Bias가 -0.5보다 작아 봄과 여름을 중심으로 과소추정의 정도가 매우 큼을 알 수 있었다.

표 1. 각 유역의 SSARR모형 모의정확성 평가

유역	지점(기간)	구분 ¹⁾	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	연간
한강유역	충주댐 (86~03)	SSARR평균	48.35	65.92	62.21	63.80	75.43	91.19	350.84	323.04	240.33	77.70	62.22	52.80	126.15
		실측평균	23.44	35.98	75.57	126.48	118.93	128.26	490.46	458.61	344.11	82.25	49.51	33.96	163.96
		R-Bias	1.06	0.83	-0.18	-0.50	-0.37	-0.29	-0.28	-0.30	-0.30	-0.06	0.26	0.55	-0.23
		R-RMSE	1.47	1.01	0.47	0.58	0.49	0.45	0.33	0.42	0.47	0.26	0.46	0.71	0.58
	소양강댐 (80~03)	SSARR평균	10.90	13.13	12.13	12.06	16.96	20.40	89.90	96.50	68.48	21.38	16.42	14.53	32.73
		실측평균	7.14	9.53	30.20	60.17	60.55	47.35	190.51	208.47	152.01	33.01	21.95	12.31	69.43
R-Bias		0.53	0.38	-0.60	-0.80	-0.72	-0.57	-0.53	-0.54	-0.55	-0.35	-0.25	0.18	-0.53	
		R-RMSE	1.21	0.82	0.83	0.89	0.88	0.93	0.61	0.65	0.79	0.75	0.64	0.56	0.98
낙동강유역	안동댐 (77~03)	SSARR평균	4.67	3.60	2.89	3.79	6.01	7.47	29.26	36.60	33.14	11.44	7.96	6.08	12.74
		실측평균	5.72	8.72	16.52	29.01	28.43	32.99	85.27	86.61	67.80	15.99	9.56	7.15	32.81
		R-Bias	-0.18	-0.59	-0.83	-0.87	-0.79	-0.77	-0.66	-0.58	-0.51	-0.28	-0.17	-0.15	-0.61
		R-RMSE	0.63	1.27	1.04	1.04	0.94	1.00	0.73	0.69	0.75	0.77	0.77	0.74	1.02
	합천댐 (89~03)	SSARR평균	3.98	3.18	3.39	3.50	4.78	11.26	33.04	37.22	29.57	11.18	6.82	5.48	12.78
		실측평균	4.64	6.60	9.77	12.03	11.49	25.53	59.52	64.89	46.36	11.31	6.87	5.76	22.06
		R-Bias	-0.14	-0.52	-0.65	-0.71	-0.58	-0.56	-0.44	-0.43	-0.36	-0.01	-0.01	-0.05	-0.42
		R-RMSE	0.41	0.74	0.75	0.89	0.92	0.81	0.62	0.60	0.52	0.35	0.27	0.25	0.85
	남강댐 (76~03)	SSARR평균	11.37	9.88	11.51	16.26	19.70	46.47	126.72	145.41	101.85	31.17	19.48	15.52	46.28
		실측평균	12.48	18.08	30.72	48.26	43.24	79.95	189.35	212.46	138.37	32.32	19.05	15.29	69.97
		R-Bias	-0.09	-0.45	-0.63	-0.66	-0.54	-0.42	-0.33	-0.32	-0.26	-0.04	0.02	0.01	-0.34
		R-RMSE	0.52	0.78	0.71	0.80	0.82	0.64	0.43	0.49	0.48	0.34	0.27	0.42	0.69
섬진강유역 (80~03)	SSARR평균	5.29	3.50	3.08	3.38	3.21	28.27	61.70	53.54	36.10	13.74	11.89	8.28	19.33	
	실측평균	4.55	7.41	10.79	13.78	9.93	21.38	57.52	45.68	30.01	5.04	4.39	4.65	17.93	
	R-Bias	0.16	-0.53	-0.71	-0.75	-0.68	0.32	0.07	0.17	0.20	1.72	1.71	0.78	0.08	
	R-RMSE	0.53	1.04	0.90	1.07	0.93	0.72	0.59	0.73	0.52	2.08	1.94	1.05	0.94	

1) SSARR평균과 실측평균의 단위는 m³/sec(CMS)이며, R-Bias와 R-RMSE는 무차원 값

R-RMSE는 안동댐에서는 모든 월에서 0.5 이상의 높은 값을 나타내었으며, 합천댐에서는 2월~9월, 남강댐은 1월~6월에 0.5 이상의 높은 값을 나타내 모의 정확성이 높지 않았다. 연간 R-RMSE 역시 안동댐은 1.02로서 평균유입량의 약 100%에 달하는 RMSE가 존재하는 것으로 나타나 모의 정확성을 개선할 필요가 있음을 확인할 수 있었으며, 합천댐 0.85, 남강댐 0.69의 연간 R-RMSE를 나타내었다.

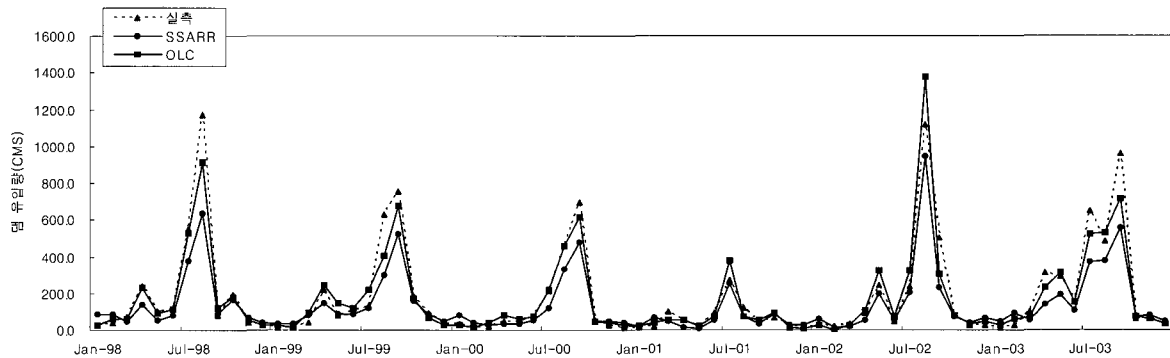
섬진강유역의 섬진강댐을 살펴보면, R-Bias는 2월~5월 사이에는 -0.5보다 작은 음수값을, 나머지 월에는 모두 양수였으며, 2월, 3월 4월, 5월, 10월, 11월, 12월의 R-Bias의 절대값이 모두 0.5보다 커 좋지 않은 결과를 나타내었으나, 연간 R-Bias는 0.08로서 Bias가 거의 없는 것으로 나타났다. R-RMSE는 모든 월에서 0.5 이상의 높은 값을 나타내었으며, 특히 10월과 11월은 2에 가까워 RMSE가 각 월 평균유량의 약 200%에 달하는 좋지 않은 결과를 나타내었다. 특히 섬진강유역의 SSARR모형은 한강이나 낙동강과 달리 일관된 모의경향을 나타내지는 않았다.

4. 최적선형 보정기법 적용

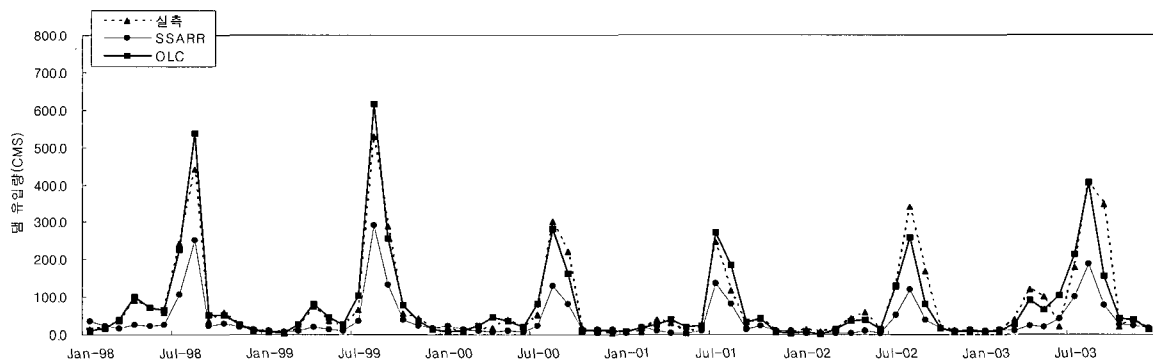
최적선형 보정기법을 이용하여 검증지점의 모의 정확성을 개선하였다. 각 선정지점의 보정식을 구하고, 보

정된 유량의 모의 정확성을 평가하기 위해 각 지점의 자료기간을 검정(calibration)기간과 검증(verification)기간으로 나누었다. 각 지점의 자료의 길이가 서로 다르므로 검정기간은 서로 다르나 검증기간은 1998년부터 2003년까지 6년간으로 고정하였다. 보정식은 계절성이 강한 우리나라의 유출특성을 감안하여 1월부터 12월까지 각 월마다 각각 다르게 구성하였다. 그림 2는 각 지점에 대한 검정기간의 SSARR모형과 최적선형 보정(OLC)기법의 월 모의유량을 비교한 것이며, 표 2는 검증기간의 SSARR와 OLC 대한 월별과 연간 R-Bias와 R-RMSE를 정리한 것이다.

각 유역별로 살펴보면, 한강유역의 검증지점인 충주댐과 소양강댐의 실측, SSARR, OLC의 모의유량을 비교한 그림 2(a)와 2(b)에서 과소추정하는 경향이 뚜렷한 SSARR보다 OLC가 실측유량에 훨씬 근접한 유량을 모의하고 있음을 확인하였다. 표 2의 충주댐과 소양강댐의 R-Bias와 R-RMSE에서도 SSARR보다 OLC가 훨씬 0에 가까운 값을 나타내었다. 충주댐의 월별 R-Bias와 R-RMSE에서 SSARR보다 OLC가 좋지 않은 경우는 한번도 발생하지 않았다. 소양강댐의 6월 R-Bias와 4월, 6월, 7월 R-RMSE에서 OLC가 SSARR보다 다소 좋지 않았으나 이를 제외한 모든 월의 R-Bias와 R-RMSE는 OLC가 우수하였다.

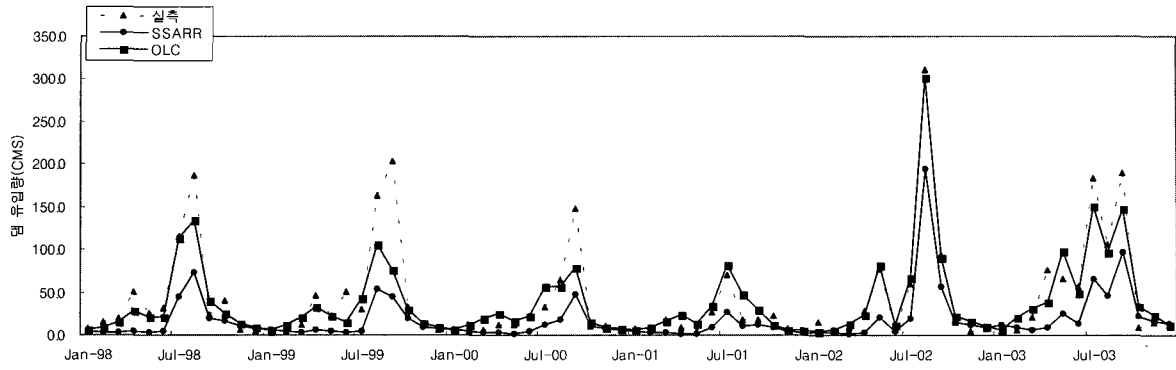


(a) 충주댐

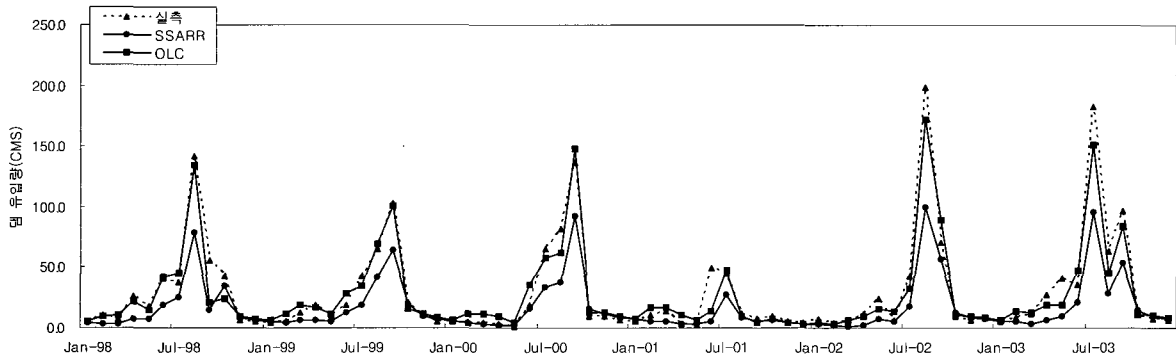


(b) 소양강댐

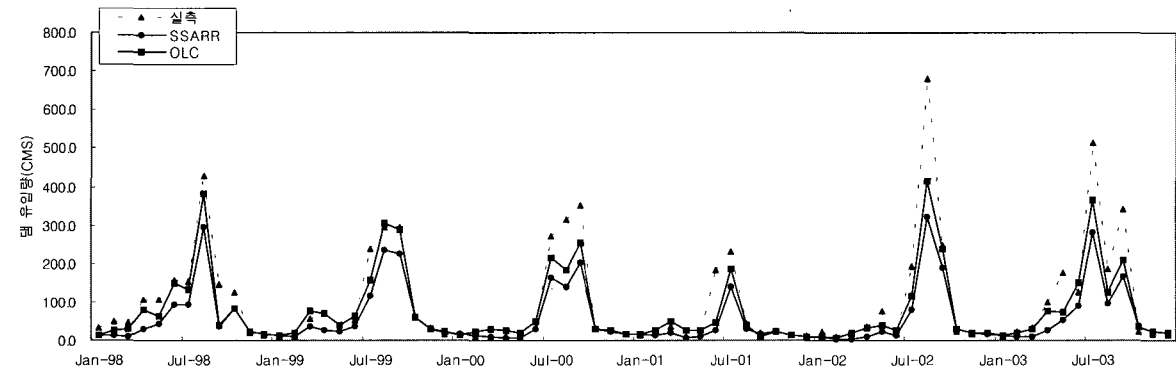
그림 2. 실측, SSARR, OLC의 월 유량 비교(1998년~2003년)(계속)



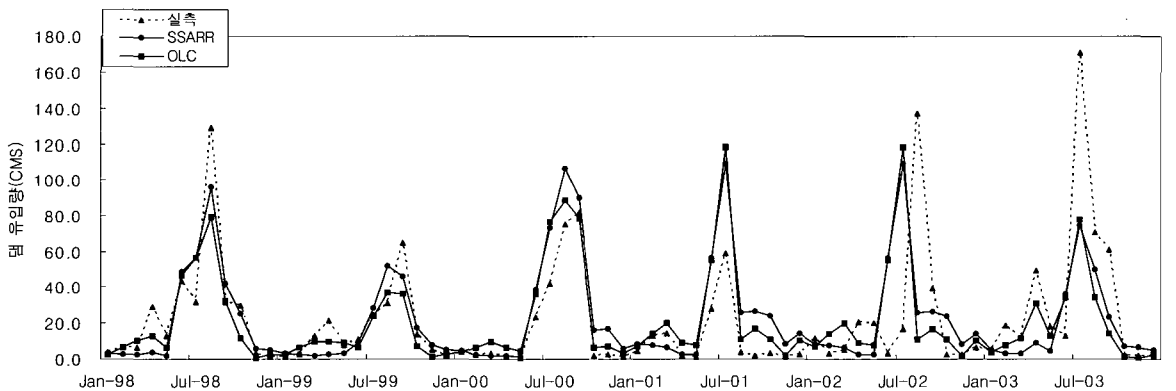
(c) 안동댐



(d) 합천댐



(e) 남강댐



(f) 섬진강댐

그림 2. 실측, SSARR, OLC의 월 유량 비교(1998년~2003년)

표 2. SSARR와 OLC의 모의정확성 비교(기간: 1998년~2003년)

유역	지점	평가지표	방법	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	연간
한강	충주댐	R-Bias	SSARR	1.43	0.92	-0.20	-0.58	-0.30	-0.20	-0.20	-0.48	-0.54	-0.07	0.24	0.53	-0.29
			OLC	0.14	0.23	-0.05	-0.01	0.26	0.02	0.05	-0.08	-0.27	0.01	0.00	-0.03	-0.03
		R-RMSE	SSARR	1.60	1.10	0.48	0.71	0.42	0.25	0.28	0.60	0.69	0.23	0.35	0.63	0.72
			OLC	0.31	0.50	0.45	0.29	0.37	0.13	0.17	0.39	0.40	0.20	0.26	0.34	0.44
	소양강댐	R-Bias	SSARR	0.54	0.46	-0.51	-0.80	-0.65	-0.16	-0.40	-0.85	-0.78	-0.36	-0.24	0.23	-0.53
			OLC	-0.49	0.12	0.01	0.05	-0.09	0.39	0.10	0.13	-0.37	0.13	-0.01	0.02	0.01
		R-RMSE	SSARR	2.60	1.49	0.34	0.28	0.22	0.45	0.45	0.93	0.48	0.76	0.78	1.04	0.85
			OLC	0.63	0.56	0.31	0.29	0.30	0.75	0.15	0.33	0.59	0.41	0.17	0.27	0.48
낙동강	안동댐	R-Bias	SSARR	-0.20	-0.31	-0.65	-1.13	-0.88	-0.78	-0.62	-0.87	-0.98	-0.39	0.05	0.14	-0.70
			OLC	-0.29	0.51	0.32	-0.28	0.27	-0.20	0.05	-0.20	-0.51	0.11	0.50	0.31	-0.10
		R-RMSE	SSARR	0.99	0.61	0.72	1.35	1.09	0.92	0.73	0.99	1.28	0.84	0.38	0.24	1.26
			OLC	0.70	0.92	0.48	0.71	0.50	0.48	0.21	0.39	0.91	0.83	0.72	0.35	0.80
	합천댐	R-Bias	SSARR	-0.08	-0.50	-0.53	-0.87	-0.88	-0.60	-0.56	-0.69	-0.66	0.01	0.19	0.11	-0.52
			OLC	0.04	0.57	0.38	-0.05	-0.35	0.07	-0.14	-0.18	-0.08	-0.31	0.36	0.29	0.06
		R-RMSE	SSARR	0.50	0.60	0.59	1.10	1.31	0.83	0.70	0.83	0.74	0.43	0.28	0.26	0.97
			OLC	0.45	0.78	0.46	0.48	0.86	0.69	0.25	0.25	0.38	0.72	0.43	0.38	0.44
	남강댐	R-Bias	SSARR	-0.23	-0.57	-0.61	-0.77	-1.01	-0.59	-0.64	-0.65	-0.69	-0.15	0.11	0.14	0.65
			OLC	-0.29	-0.02	0.17	-0.06	-0.59	-0.18	-0.38	-0.39	-0.44	-0.15	0.13	0.18	-0.32
		R-RMSE	SSARR	0.79	0.90	0.71	0.98	1.41	0.89	0.70	0.83	0.81	0.56	0.19	0.29	1.18
			OLC	0.75	0.66	0.46	0.37	1.12	0.71	0.43	0.59	0.58	0.57	0.21	0.30	0.82
섬진강	섬진강댐	R-Bias	SSARR	0.08	-0.44	-0.48	-1.23	-0.76	0.96	0.31	-0.33	-0.15	2.03	1.39	1.25	0.04
			OLC	-0.11	0.20	0.44	-0.54	-0.23	0.87	0.37	-0.68	-0.48	-0.20	-0.08	0.62	-0.04
		R-RMSE	SSARR	0.52	0.94	0.63	1.61	1.04	1.27	1.05	1.12	0.71	2.78	1.65	1.40	1.48
			OLC	0.53	0.90	0.70	0.90	0.69	1.22	1.11	1.26	0.84	1.87	0.60	0.81	1.54

낙동강유역의 검증지점인 안동댐, 합천댐, 남강댐의 SSARR, OLC를 비교한 그림 2(c), 2(d), 2(e)를 살펴보면, 한강에서와 마찬가지로 SSARR모형의 모의유량이 과소추정되는 경향이 뚜렷하였으며, OLC의 모의유량이 실측유량에 더 근접해 있음을 쉽게 확인할 수 있었다. 표 2의 월별 R-Bias와 R-RMSE에서 안동댐은 2월, 11월, 12월에, 합천댐은 2월, 10월 11월, 12월을 제외한 모든 월에서 OLC가 SSARR보다 우수한 모의결과를 나타내었다. 남강댐에서는 1월, 11월, 12월의 R-Bias와 2월, 10월, 11월, 12월의 R-RMSE 이외의 모든 월에서 OLC가 SSARR보다 좋은 결과를 나타내었다. 이와 같이, 낙동강 SSARR모형에서는 건기 중 2월, 11월, 12월의 OLC의 모의정확성이 좋지 않은 결과를 보였으며, 3월~10월까지의 전반적으로 OLC가 SSARR모형의 모의정확성을 크게 개선할 수 있음을 확인하였다.

낙동강 및 한강 SSARR모형에서는 선정지점 모두에서 SSARR모형의 모의유량 보다는 최적선형 보정기법을 이용하여 유량을 보정할 경우 정확성이 크게 향상되

었으나, 섬진강 SSARR모형에서는 OLC의 모의정확성이 뚜렷이 향상되지는 않았다. 최적선형 보정기법의 주요 기능은 모의 또는 예측값이 실측값과 Bias가 있는 경우 이 Bias를 제거하는 것이 주된 기능이며 Bias가 제거되면 자연스럽게 RMSE도 같이 감소하여 전반적인 모의오차가 감소하게 된다. 그러나 섬진강 SSARR모형은 표 1에서도 알 수 있듯이 모형의 Bias가 거의 없어 보정식을 이용한 모의정확성 개선이 큰 실효를 거두지 못하였다. 실측유량, SSARR, OLC를 비교한 그림 2(f)를 살펴보면, 섬진강 SSARR모형에서 모의유량이 실측유량보다 크게 과소추정되는 부분이 있으며, 특히 2003년에는 모의유량이 실측유량에 크게 미치지 못하였다. 또한 2002년의 모의유량에서는 모의유량과 실측유량의 침투가 어긋나는 결과를 나타내고 있다. 표 2의 월별 R-Bias와 R-RMSE를 살펴보면 2월, 4월, 5월, 6월, 10월, 11월, 12월에는 OLC의 모의정확성이 SSARR 비해 약간 우수한 것처럼 보이거나 연간으로 비교하면 별 차이가 없음을 확인할 수 있다.

5. 앙상블 유량예측

5.1 적용방법

과거의 강우와 온도 앙상블을 한강, 낙동강, 섬진강 유역의 SSARR모형에 각각 입력하여 1998년에서 2003년까지 72개월의 예측유량 앙상블을 생성하였다. 과거 강우와 온도 앙상블은 각 유역의 자료조건에 따라 한강과 섬진강은 1980년부터 1997년까지 18 개, 낙동강은 1976년부터 1997년까지 22 개의 강우와 온도 앙상블을 사용하였다. 예측시점의 대상유역에 대한 토양함수비, 기온, 하천수위, 적설량 등의 초기조건을 SSARR모형에 구현하기 위해 SSARR모형을 예측시점의 1년 전 1월 1일부터 예측시점까지 Warm-up 기간으로 실측강우와 온도를 이용하여 모의함으로써 초기조건이 반영되도록 하였다. 생성된 예측유량 앙상블을 4절에서 설명한 최적선형보정에 의해 보정함으로써 결과적으로는 SSARR 모형에 의해 생성된 예측유량 앙상블(이하, SSARR 앙상블이라 함)과 이를 최적선형보정에 의해 보정한 예측유량 앙상블(이하, OLC 앙상블이라 함)이 생성되었다.

다음 단계로는 최적선형보정의 검증지점과 동일한 지점에 구간확률예측을 실시하였다. 각 댐별로 1997년 이전까지의 월별 실측 유입량을 이용하여 초보예측을 실시하고 예측구간(저수, 중수, 풍수)을 나누었다. 다음 단계로 SSARR 앙상블과 OLC 앙상블을 이용하여 각 구간의 발생확률을 계산하였다. 초보예측과 각 구간의 발생확률을 계산하기 위해서는 적합분포를 선정하여 구하지 않고 확률도시공식 중 식 (6)과 같은 Cunanne 공식을 사용하여 크기순으로 i 번째 유량 Q_i 의 누적확률 f_i 를 구하였다.

$$f_i = \frac{i-0.4}{n+0.2} \quad (6)$$

여기서, n 은 실측 유입량의 개수 또는 예측유량 앙상블의 개수를 의미한다. 예측 정확성의 평가는 앞에서 설명한 평균예측점수는 물론 앙상블의 평균과 실측유량을 R-Bias, R-RMSE으로도 비교하였다.

5.2 앙상블 유량예측 결과

그림 3은 각 검증지점의 구간확률예측을 평균예측점수를 이용하여 평가한 것이다. 그림의 범례에서 SSARR는 최적선형 보정기법을 적용하지 않은 SSARR 앙상블을 그대로 이용하여 구간확률예측을 실시한 것이며, OLC는 월별로 최적선형기법으로 보정한 OLC 앙상블의 구간확률예측 결과를 의미한다. 월별 유량예측 결과를 건기(9월~5월)와 우기(6월~9월)로 나누어 분석하였다.

먼저 그림 3을 전반적으로 살펴보면, 안동댐의 우기 SSARR를 제외하고 모두 초보예측 33.3 %보다 높은 평균예측점수를 나타냄으로서 SSARR와 OLC 모두 확률예측으로서 적용가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한 OLC를 적용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 전반적으로 높은 예측점수를 나타내었다.

한강유역의 검증지점인 충주댐과 소양강댐 건기 평균예측점수에서 OLC가 SSARR에 비해 더 높아 최적선형 보정기법이 정확성 향상에 큰 도움이 되었음을 알 수 있었다. 그러나 우기에는 SSARR와 OLC의 평균예측점수가 비슷하여 최적선형 보정기법을 적용한다 하여도 예측의 정확성 향상에는 큰 도움이 되지 않는 것으로 밝혀졌다. 낙동강 유역에서는 안동댐 건기의 평균예측점수 만이 SSARR와 OLC가 거의 비슷하며 안동댐

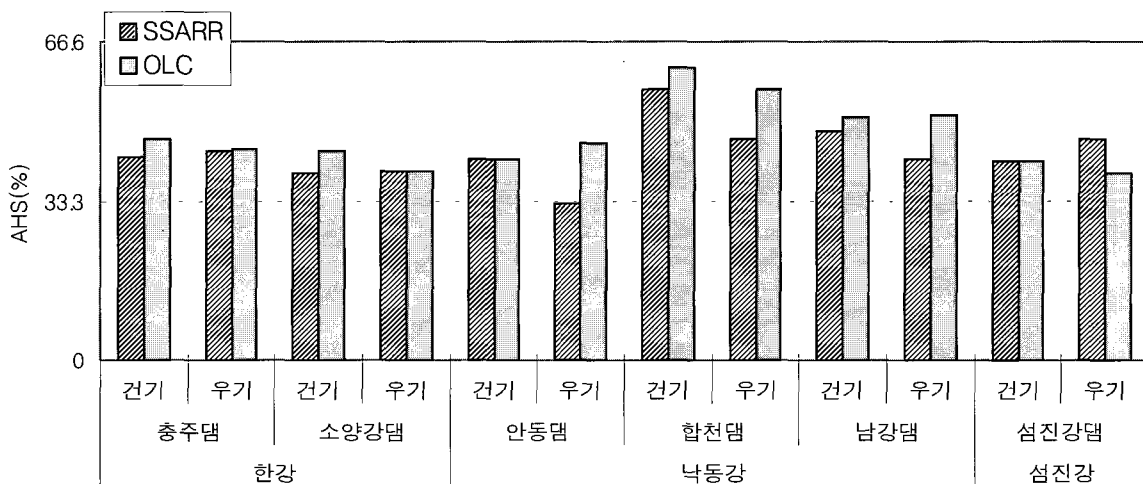


그림 3. 건기와 우기의 평균예측점수

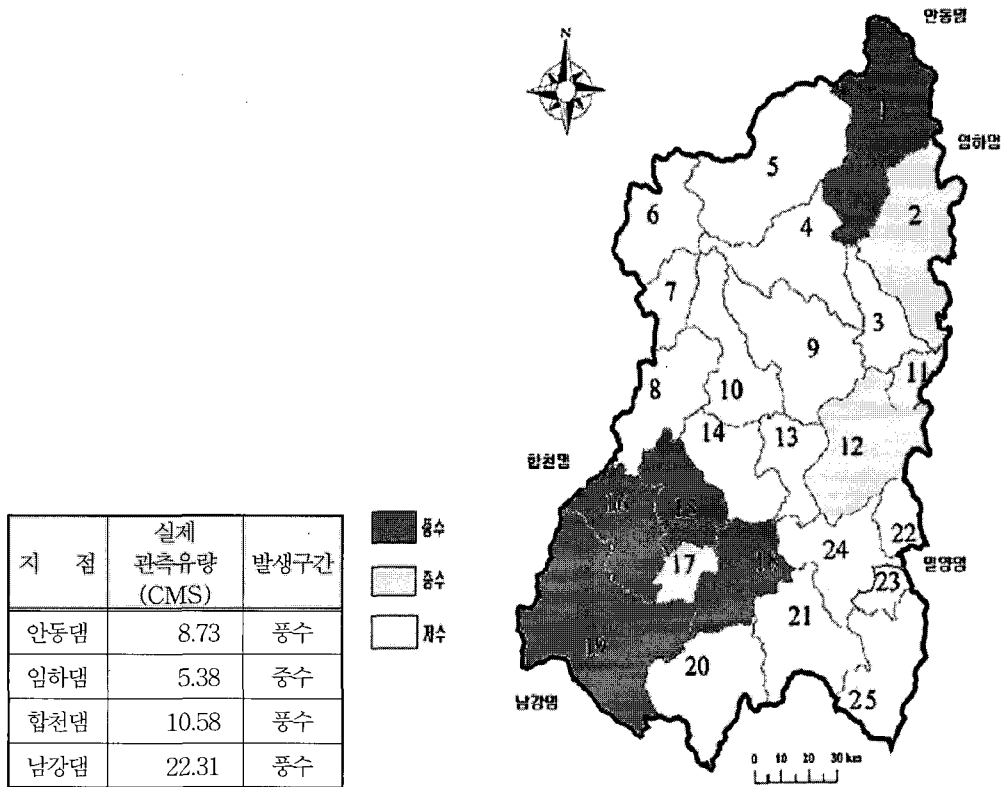


그림 4. 2003년 10월 앙상블 유량예측 사례(낙동강유역)

우기, 합천댐과 남강댐의 건기와 우기 모두 OLC의 평균예측점수가 SSARR모형보다 더 높아 최적선형 보정기법을 적용할 경우 건기와 우기 모든 기간의 예측정확성이 향상되었다. 섬진강유역의 섬진강댐 평균예측점수는 건기에는 OLC와 SSARR가 거의 비슷하였으나 우기에는 오히려 SSARR가 좀더 높은 값을 보임을 확인할 수 있어, 최적선형 보정기법이 그다지 유용하지 않음을 확인하였다.

5.3 앙상블 유량예측 적용사례

본 연구에서 구축된 앙상블 유량예측은 SSARR모형으로 모의 가능한 모든 소유역에서 확률예측으로 이용이 가능하다. 그림 4는 현재의 시점을 2003년 10월 1일로 가정하여 낙동강유역의 2003년 10월을 앙상블 유량예측으로 예측한 후 저수, 중수, 풍수로 구간확률예측을 실시하여 발생확률이 가장 큰 사건(most-probable event)을 유역도에 표시한 것이다. 또한 낙동강유역의 다목적댐 중에서 안동, 임하, 합천, 남강댐의 실제 관측 유입량을 그림 4의 오른쪽 표로 정리 하였는데, 이를 유역도에 표시된 구간확률예측과 비교해 보면 다목적댐 모두에서 일치함을 확인할 수 있었다. 다목적댐 이외의

모든 소유역에도 그림 4와 같이 저수, 중수, 풍수 등의 구간확률예측을 비롯한 앙상블 유량예측 결과를 확인할 수 있어 수자원의 계획과 관리에 유용한 정보로 사용될 것으로 기대한다.

6. 결론 및 향후연구

한강, 낙동강, 섬진강유역에 SSARR모형을 이용하여 일단위 앙상블 유량예측 시스템을 구축하고 각 유역에 검증지점을 선정하여 앙상블 유량예측 정확성을 평가하였다. 앙상블 유량예측 시스템은 대상유역의 주요 다목적댐은 물론 SSARR모형의 모든 소유역에 유량예측이 가능하도록 구축되었다. 구축된 앙상블 유량예측 시스템의 예측 정확성을 검증하기 위해 실측 길이가 길고 신뢰성이 높은 다목적댐 유입량을 예측하고 이를 실측 유량과 비교 제시하였다.

한강, 낙동강, 섬진강유역의 SSARR모형은 일단위 모형이므로, 앙상블 유량예측에 이용하기에 앞서 월 모의유량의 관점에서 정확성을 평가하여 중장기 유량예측을 위한 적용가능성을 검증하였다. 평가결과 한강과 낙동강유역의 SSARR모형은 전반적으로 과소추정하는

경향이 뚜렷하고 모의 정확성이 높지 않음을 알 수 있으며, 섬진강 SSARR모형은 Bias가 거의 없지만 오차의 분산이 커 정확성 개선이 필요하였다(표 1).

SSARR모형의 유출량을 선형회귀를 바탕으로 보정하는 최적선형 보정기법을 이용하여 SSARR모형의 모의능력을 향상시키고 보다 정확한 유량예측 시스템을 구축하였다. 한강과 낙동강 SSARR모형에 최적선형 보정기법을 적용결과 전반적인 모의 정확성이 크게 향상되었음을 확인하였다. 섬진강 SSARR모형에서는 최적선형 보정식을 적용한 유량이 뚜렷이 향상된 값을 나타내지 못하였다. 최적선형 보정기법의 주요 기능은 모의 또는 예측값이 실측값과 Bias가 있는 경우 이 Bias를 제거하는 것이 주된 기능이나, 섬진강 SSARR모형은 Bias가 거의 없어 최적선형 보정기법을 이용한 모의 정확성 개선이 큰 실효를 거두지 못한 것으로 판단된다.

양상불 유량예측의 적용성을 검증하기 위해 대상유역인 한강, 낙동강, 섬진강에 양상불 유량예측을 실시한 후 6 개의 다목적댐(충주댐, 소양강댐, 안동댐, 합천댐, 남강댐, 섬진강댐) 유입량을 이용하여 예측 정확성을 평가하였다. 모든 검증지점에서 최적선형 보정기법을 적용하지 않아도 평균예측점수가 33.3 %보다 높아 확률예측 기법으로서 유효한 방법임을 확인하였다. 한강 유역에서 최적선형 보정기법을 적용한 경우 전반적인 예측의 정확성이 증가하였음을 확인하였다. 충주댐과 소양강댐 모두에서 건기(10월~5월)의 평균예측점수가 최적선형 보정기법을 적용한 경우 더 높았으나, 우기(6월~9월)에는 그다지 도움이 되지 않는 것으로 밝혀졌다. 낙동강유역에서도 최적선형 보정기법을 적용한 경우 예측의 정확성이 증가하였음을 확인하였으며, 특히 안동댐 우기, 합천댐과 남강댐의 건기와 우기 모두 최적선형 보정기법의 평균예측점수가 더 높아 예측정확성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 섬진강댐의 경우, 최적선형 보정기법을 적용하여도 앞서와 마찬가지로 양상불예측의 정확성이 거의 개선되지 않아 최적선형 보정기법이 그다지 유용하지 않음을 확인하였다.

향후 연구로 가장 시급한 것은 강우-유출모형인 SSARR모형의 개선을 들 수 있다. 서론 부분에서도 밝힌바 있으나, 양상불 유량예측의 오차를 줄이기 위해서는 강우-유출모형 자체의 근본적인 개선이 장기적으로 수행되어야 하겠다. SSARR모형 하나에만 의존하지 않고 여러 개의 강우-유출모형을 이용하는 Multi-model 양상불 개념의 도입 또한 필요하다. Multi-model 양상불 개념은 이미 기상예측 분야에서는 일반화된 방법이며 미국 기상청(National Weather Service)에 의해 유량예측 분야에도 적용가능성에 대한 연구가 진행 중이

다(Gogekokas et al., 2004). 또한 Kim et al.(2004)이 제안한 두 개 이상의 강우-유출모형에서 생성된 양상불을 가중값을 이용하여 결합하는 방법에 대해서도 그 적용 가능성이 검증된 만큼 실용화 단계가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사와 서울대학교 공학연구소 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 강주환 (1986). “강우-유출모형에 의한 가지야마 공식의 한계성 검토.” 석사학위논문, 서울대학교.
- 건설교통부 (1989). **낙동강수계 다목적댐 연계운영방안 연구 (1차) 보고서.**
- 건설교통부 (1996). **낙동강 수계 실시간 최적 저수관리 시스템 개발.**
- 건설교통부 (2001). **낙동강수계 댐군 최적연계운영 시스템개선 연구 보고서.**
- 건설교통부 (2002). **연속유출모형 실용화 및 GUI구축.**
- 건설교통부 (2004). **유역통합 물관리를 위한 하천유출량 예측방안 연구.**
- 과학기술부 (2004). **실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발.**
- 안상진, 이용수 (1989). “SSARR 모형에 의한 유역유출 해석.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제 22권, 제 1호, pp. 109-116.
- 정대일, 김영오 (2002). “양상불 예측을 이용한 충주댐 월 유입량 예측.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제 22권, 제 3-B호, pp. 321-331.
- 정대일, 김영오, 고익환 (2003). “양상불 유량예측의 정확도 향상을 위한 강우-유출모형에 대한 연구: 2. 강우-유출모형의 결합.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제 23권, 제 6-B호, pp. 531-540.
- 한국수자원공사 (2004). **다목적댐 운영실무 편람.**
- Atger, F. (2003). “Spatial and interannual variability of reliability of ensemble-based probabilistic forecasts; Consequences for calibration.” *Monthly Weather Review*, Vol. 131, pp. 1509-1523.
- Croley II, T.E. (2000). “Using meteorology probability forecasts in operational hydrology”, ASCE Press, VA, USA.
- Day, G.N. (1985). “Extended streamflow forecasting using NWSRFS.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 111(WR2), pp.

- 147-170.
- Georgakakos, K.P., Seo, D.J., Gupta, H. Schaake, J., and Butts, M.B. (2004). "Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty through multimodel ensembles." *Journal of Hydrology*, Vol. 298, pp. 222-241.
- Goodwin, P. (2000). "Correct or combine? Mechanically integrating judgmental forecasts with statistical methods." *International Journal of Forecasting*, Vol. 16, pp. 261-275.
- Kim, Y.-O., Jeong D.I., and Ko, I.H. (2004). "Combining rainfall runoff model outputs for improving ensemble streamflow prediction." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, (submitted).
- Kim, Y.-O., Jeong, D.I., and Kim, H.S. (2001). "Improving water supply outlooks in Korea with ensemble streamflow prediction." *Water International*, Vol. 26, No. 4, pp. 563-568.
- Murphy, A.H. and Winkler, R.L. (1987) "A general framework for forecast verification." *Monthly Weather Review*, Vol. 115, pp. 1330-1338.
- Stedinger, J.R. and Kim, Y.-O. (2002). "Updating ensemble probabilities based on climate forecasts." *Proceedings Conference on Water Resources Planning and Management and Symposium on Managing the Extremes Floods and Droughts*, EWRI, ASCE, Roanoke, VA. CD.
- Theil, H. (1971). "*Applied economic forecasting*." North Holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands.
- Wilks, D.S. (1995). "*Forecast verification: Statistical methods in the Atmospheric Sciences*", Academic Press, NY, USA.
- Wood, A.W., Maurer, E.P., Kumar, A., and Lettenmaier, D.P. (2002). "Long-range experimental hydrologic forecasting for eastern United States." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. D20, 4429.

(논문번호:05-42/접수:2005.3.8/심사완료:2005.05.23)