

확률론적 예측의 결합을 통한 댐 유입량 ESP 예측의 개선

○ 유승오¹, 김영오², 고익환³

1. 서론

ESP(Ensemble Streamflow Prediction)는 현재 유역의 상태와 재현 가능한 과거의 강우를 결합함으로써 확률론적 예측을 가능하게 하는 예측기법이다. 미국 기상청의 수문학적 예측기법인 ESP는 Kim et al. (2001)에 의해 물공급전망의 개선 방안으로 국내에 소개된 이후 월 또는 계절 유량예측기법으로 꾸준한 연구가 지속되고 있다. ESP 예측의 정확도는 강우의 예측정보를 사용하거나 강우유출모형을 개선함으로써 향상될 수 있다(정대일과 김영오, 2002). 본 연구에서는 다양한 확률예측을 결합하는 방법을 통해 ESP 예측의 정확도를 향상시키는 새로운 시도를 실시하였다. 즉 초보예측과 지속성을 고려한 예측으로 불리우는 간단한 확률예측을 실시하고 이를 최적선형결합이라는 기법을 통해 ESP 확률예측과 결합하였다. 이들 기법은 충주댐 월 유입량 예측에 적용되어 1986년부터 2001년까지 16년의 검증기간 동안 구간별 발생확률이 제시되었고, 정확도 검증을 위하여 실측 유입량과 비교하였다. 확률예측의 정확도 평가는 average hit score와 half-brier score가 사용되었다. 이와 더불어 본 연구에서는 확률예측의 정확도 개선이 수자원시스템 운영에 미치는 영향을 평가하였다. 즉, 확률예측을 사용할 수 있는 추계학적 동적계획법을 개발하여 충주댐의 최적운영률을 제시하였으며, 모의운영을 실시하여 예측개선의 효용성을 평가하였다.

2. 확률예측의 결합

2.1 ESP 예측

ESP는 예측시점의 초기조건 하에서 과거 강우 시나리오를 강우유출모형에 다수 입력하여 같은 수의 유량 시나리오를 발생시키는 기법이다. 발생된 유량 시나리오에 적절한 확률분포를 선택하면 이를 이용하여 확률예측이 가능하다. 본 연구에서는 충주댐 유입량을 저수, 중수, 풍수의 세 구간으로 나누어, 각 구간별 유입량의 발생확률을 선택된 확률분포로부터 계산하였다.

2.2 지속성을 고려한 예측 (Persistence Forecast)

지하수 저류효과로 인하여 우리나라의 갈수기 유입량의 자기상관관계는 일반적으로 높으며, 자기상관관계 (autocorrelation)를 이용한 대표적인 확정론적 예측모형이 ARMA 시계열모형이다. 본 연구에서는 확률예측에서 이러한 자기상관관계를 이용할 수 있는 기법을 소개하고자 한다. 즉, 유입량이 정규분포를 따른다고 가정한 후 각 구간의 이번달(t) 발생확률을 지난달($t-1$) 유입량의 조건부확률로 표현하여 확률예측을 실시하였다. 유입량의 1차(lag-1) 자기상관계수를 이용한 구간별 조건부확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pr^{Ai} &= \int_{q_i^A}^{\infty} f_{Q_i|Q_{i-1}}(Q_i) dQ_i = 1 - \Phi \left[\frac{q_i^A - \mu_{Q_i|Q_{i-1}}^i}{\sigma_{Q_i|Q_{i-1}}} \right] \\ \Pr^{Mi} &= \int_{q_i^A}^{q_i^B} f_{Q_i|Q_{i-1}}(Q_i) dQ_i = \Phi \left[\frac{q_i^A - \mu_{Q_i|Q_{i-1}}^i}{\sigma_{Q_i|Q_{i-1}}} \right] - \Phi \left[\frac{q_i^B - \mu_{Q_i|Q_{i-1}}^i}{\sigma_{Q_i|Q_{i-1}}} \right] \\ \Pr^{Bi} &= \int_{-\infty}^{q_i^B} f_{Q_i|Q_{i-1}}(Q_i) dQ_i = \Phi \left[\frac{q_i^B - \mu_{Q_i|Q_{i-1}}^i}{\sigma_{Q_i|Q_{i-1}}} \right] \end{aligned}$$

¹ 서울대학교 지구환경시스템 공학부 석사과정, e-mail: skull1@snu.ac.kr

² 서울대학교 지구환경시스템 공학부 조교수, e-mail: yokim05@snu.ac.kr

³ 한국수자원공사 수자원연구부장, e-mail: ihko@kowaco.or.kr

여기서, $f_{Q_t|Q_{t-1}}$ 는 Q_{t-1} 의 유입량 조건하의 Q_t 의 유입량 발생의 정규분포 확률밀도함수이고, $\Phi[\cdot]$ 는 표준정규분포의 누적분포함수이다. $Pr^{A/i}$, $Pr^{N/i}$, $Pr^{B/i}$ 는 각각 직전달에 i 번째 유량이 발생했을 경우의 풍수(above normal flow), 중수(normal flow), 저수(below normal flow)의 발생 확률이다. $\sigma_{Q_t|Q_{t-1}}$ 은 직전달에 주어진 유입량에 대한 이번달 유입량의 표준편차를 나타내고, q_i^A, q_i^B 는 유입량 분포의 삼분위수(tercile)을 나타낸다.

2.3 초보예측 (Naive Forecast)

과거 유입량 자료를 분석한 결과 각 구간에 해당하는 확률이 1/3이었다고 가정할 경우, 만일 별다른 수문학적 예측이 존재하지 않는다면 과거자료와 동일하게 각 구간에 1/3의 예측확률을 부여하는 것이 가장 일반적인 것이다. 본 연구에서는 이를 초보예측이라 정의하였다.

2.4 최적선형결합 (Optimal Linear Combination)

예측의 정확도를 개선하기 위하여 앞서 설명한 ESP 예측, 지속성을 고려한 예측, 초보예측에 가중치 a, b, c 를 부여하여, 확률예측의 선형결합을 실시하였다. 본 연구에서는 이후에 설명할 예측 평가지표를 기준으로 가장 좋은 값을 발생시키는 가중치를 0.01씩 증가시키며 시행착오법으로 찾아, 각각의 예측에 부여하였다. 선형결합의 식은 다음과 같다.

$$Pr_{OLC} = aPr_N + bPr_E + cPr_P$$

여기서 Pr_N, Pr_E, Pr_P 은 각각 초보예측, ESP 예측, 지속성을 고려한 예측의 발생확률이고, a, b, c 는 가중치이다.

2.5 확률론적 예측의 평가

확률론적 예측의 정확도는 bias나 mean square error 등으로 간단히 평가할 수 있으나 확률예측의 정확도는 이와는 다른 평가지표가 필요하다. 본 연구에서는 Average Hit Score(AHS)와 Half-Brier Score(HBS)를 사용하였다. Kim et al.(2001)에서 forecast score로 제안된 AHS는 실측유량이 발생한 구간의 예측확률(%)을 검증기간 동안 평균한 값이며, 초보예측의 경우 33.3%를 갖는다. 한편 HBS는 다음의 식으로 정의 된다.

$$B = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^N (\delta_{ij} - \phi_{ij})^2$$

HBS는 0과 2 사이의 값을 가지고 그 값이 작을수록 정확한 예측을 의미하며 초보예측의 HBS는 0.667이다.

3. 추계학적 동적계획법을 이용한 저수지 최적운영률 산정

3.1 추계학적 동적계획법 (Stochastic Dynamic Programming, 이하 SDP)

추계학적 동적계획법은 아래의 순환식을 연속적으로 풀어가는 기법을 통해 결정변수인 방류량을 결정한다.

$$\begin{aligned} f_t(S_t^t, X_t) &= \max_{R_t} E_{Q_t|X_t} \{ B_t(S_t^t, Q_t, R_t) + E_{X_{t+1}|Q_t, X_t} [f_{t+1}(S_{t+1}, X_{t+1})] \} \\ S_{t+1} &= S_t^t + Q_t - R_t \\ R_t &= \min \{ \max [R_t^*, S_t + Q_t - S_{\max}], S_t + Q_t - S_{\min} \} \end{aligned}$$

여기서 B_t 는 t 시간의 초기저류량(S), 유입량(Q), 실제 방류량(R)에 의해 결정되는 이익을 나타내고, f_t 는 잔여최적편익함수를 나타낸다. 본 연구에서는 수문학적 상태변수(X)를 고려하지 않은 SDP모형(이하 SDP-N)을 사용하였으며, 상태변수뿐만 아니라 유입량과 확률분포함수를 이산화한 다음의 식을 사용하였다.

$$f_t(S_t^t) = \max_{R_t} \sum_{i=1}^I Pr(Q_i^t) \{ B_t(S_t^t, Q_i^t, R_t) + [f_{t+1}(S_{t+1})] \}$$

SDP-N에서 사용된 유입량 확률 $Pr(Q)$ 는 단순히 과거자료의 적합 확률분포로부터 구한 구간별 발생확률이며, 여기에는 어떠한 예측도 사용되지 않았으므로 초보예측에 근거한 최적화모형을 의미한다. SDP-N은 DP의 일반적인 해법인 후진계산에 의해 최적방류량을 결정한다.

3.2 최적선형결합 확률을 이용한 추계학적 동적계획법

본 연구에서는 SDP-N에서 사용된 $Pr(Q)$ 을 최적선형결합 확률인 Pr_{opt} 로 갱신한 최적화 모형을 SDP-E라고 정의한 후 예측의 정확도 향상에 대한 효과를 살펴보았다. Pr_{opt} 는 예측하는 달마다 새로운 예측확률을 계산한다는 장점이 있으나 후진방향의 일반적인 SDP에 적용될 수 없다는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 전진방향으로 SDP 순환식을 풀되 미래 잔여최적편익함수 f_{t+1} 은 SDP-N에서 계산된 결과를 사용하였다. 이러한 과정은 통상 reoptimization이라고 불리며 선형보간에 의해 후진계산으로 결정된 최적방류량을 다시 한번 더 전진방향으로 정확하게 산정할 수 있다는 장점 또한 가지고 있다(Tejada-Guilbert et al., 1993).

4. 적용사례 및 결과

검증기간 1986~2001년에 대하여 충주댐 유입량의 구간별 발생확률에 대한 예측을 실시하였다. 이를 위해서 증발량, 강우량 자료를 기존 강우유출모형인 Tank모형에 입력하여 ESP 예측을 실시하였다. 또한 지속성을 고려한 예측을 수행한 후 AHS와 HBS를 이용하여 최적선형결합을 실시하였고, 예측의 정확도 역시 AHS와 HBS로 평가하였다. 그림1은 최적선형결합 후 ESP 예측의 정확도 향상을 보여주고 있으며, 지속성을 고려한 예측의 포함으로 인하여 자기상관계수가 높은 겨울철에 큰 향상이 있음을 알 수 있다.

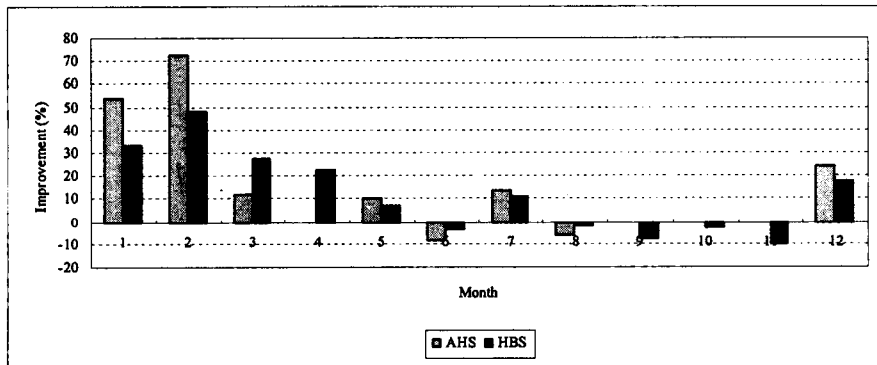


그림. 1 최적선형결합의 개선도

다음으로 HBS를 이용하여 결합한 예측확률을 SDP-E에 적용하여 충주댐 최적운영률을 산정한 후, 1987~2001년까지 15년 동안의 모의운영을 통해 SDP-N은 물론 실적방류량과도 비교하였다. 본 연구에서는 SDP의 상태변수인 저류량은 Savarensky의 방법을 사용하여 30개로 분할하였으며, 홍수기의 경우 홍수기 제한 수위를, 비홍수기의 경우 상시만수위를 저류량의 최대값으로 설정하였다. 최적운영률 산정을 위한 목적함수(objective function)는 가중치를 발전편익을 최대화하고 기본계획방류량에 대한 용수공급 부족피해를 최소화하도록 설정하였다. 목적함수의 전력단가는 53.56원/kWh로 고정시킨 후 용수피해단가를 53.56원/m³, 76.49원/m³, 122.35원/m³로 증가시켜 세가지 목적함수 OBJ1, OBJ2, OBJ3에 대하여 모의운영결과를 표1과 같이 비교하였다. SDP-E를 사용한 결과, 세가지 목적함수에 대한 연평균이익의 증가량은 각각 0.8%, 1.9%, 1.5%로 유입량 확률을 일률적으로 쓰는 SDP-N보다 매달 유입량 예측확률을 갱신하는 SDP-E의 최적운영률이 효용성이 있음을 알 수 있다. 실적방류량의 여수로방류가 상대적으로 적은 이유는 실제 댐운영은 7, 8, 9월의 홍수기 운영이 매우 중요하게 고려되고 있으나, 본 연구의 SDP모형은 이수목적만을 고려하고 있기 때문이다. 그러나 SDP모형의 여수로방류도 홍수기 동안에만 집중되어 있으므로 이수기 동안에는 여수로방류는 거의 전무하였다.

표1. 세가지 목적함수에 대한 SDP-E, SDP-N, 실적방류량의 모의운영 결과

최적화 모형		총전력생산량 (GWh)	보장공급부족량 (MCM)	여수로방류량 (MCM)	순이익 (억원)	연평균이익 (억원)
OBJ1	SDP-E	11852.5	1918.0	12458.2	5320.9	354.7
	SDP-N	11692.6	1834.1	13097.4	5280.2	352.0
	실적방류량	12944.7	9564.5	213.8	1810.4	120.7
OBJ2	SDP-E	11676.2	1713.1	13531.3	4943.5	329.6
	SDP-N	11294.2	1567.8	16049.9	4850.0	323.3
	실적방류량	12944.7	9564.5	213.8	-382.7	-25.5
OBJ3	SDP-E	11584.3	1513.6	14947.4	4352.6	290.2
	SDP-N	11228.9	1411.1	16632.2	4287.7	285.8
	실적방류량	12944.7	9564.5	213.8	-4769.0	-317.9

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

정대일, 김영오(2002). "앙상블 예측을 이용한 충주댐의 월 유입량 예측." 대한토목학회논문집, 22(3-B), 321-331.
 Casey, T. (1995). "Optimal linear combination of seasonal forecasts." *Aust. Meteorol. Mag.*, 44, 219-224.
 Kim, Y. O., Jeong, D. I., and Kim, H. S. (2001). "Improving water supply outlook in Korea with ensemble streamflow prediction." *Water International*, IWRA, 26(4), 563-568.
 Piechota, T. C., Chiew, F. H. S., Dracup, J. A., and McMahon, T. A. (1998). "Seasonal streamflow forecasting in eastern Australia and the El Niño-Southern Oscillation." *Water Resour. Res.*, 34(11), 3035-3044.
 Stedinger, J. R., Sule, B. F., and Loucks, D. P. (1984). "Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization." *Water Resour. Res.*, 20(11), 1499-1505.
 Tejada-Guilbert, J. A., Johnson, S. A., and Stedinger, J. R. (1993). "Comparison of two approaches for implementing multireservoir operating policies derived using stochastic dynamic programming." *Water Resour. Res.*, 29(12), 3969-3980.