

홍수공급을 고려한 홍수기 저수지 운영방안

Flood Season Reservoir Operations Considering Water Supply Objective

이 승 현* / 김 영 오**
Lee, Seung-Hyeon / Kim, Young-Oh

Abstract

Reservoir operations during the flood season should consider both the flood control and water supply objectives. This study proposed Set Control Algorithm (SCA) as a reservoir operation method, which guarantees both objectives. The concept behind SCA is to provide operators with a set of actions that guarantee feasibility, given a set of operational constraints, and to let them select decisions within a set that satisfies other considerations. The inflow sets used in this study included; observed data, synthetic data, and ESP(Ensemble Streamflow Prediction) scenarios. Applied to the Chungju Dam operations, SCA was compared to the variable flood restricted elevation, as well as the current flood restricted elevation. A 5-year simulation analysis showed that SCA performed better than the other operation methods, and that SCA coupled with ESP performed best among the SCA cases.

Keywords : reservoir operations, flood control, set control algorithm

요 지

홍수기 동안의 저수지 운영은 효율적인 홍수조절과 갈수기를 대비한 용수량 확보를 모두 고려해야만 한다. 본 연구에서는 이러한 목적을 위하여 세트 컨트롤 알고리즘(SCA)을 홍수기 저수지 운영방안으로 적용하였다. SCA의 개념은 유입량이 일정한 범위 안에서 주어질 경우에 저수지의 상태가 허용범위 내에서 유지되도록 하는 저수량과 방류량의 조절 세트(Control Set)를 저수지 운영자에게 제공해주는 것이다. 본 연구에서 사용된 유입량 세트는 과거자료를 이용하는 경우와 합성된 자료를 이용하는 경우, 그리고 앙상블 예측(ESP) 시나리오를 이용하는 경우로 구분하였다. SCA의 우수성을 검증하기 위하여 기존의 현행제한수위와 가변제한수위를 이용한 방안과 비교하였다. 이를 충주댐에 적용하여 총 5년(1996~2000) 동안의 모의운영을 실시한 결과, SCA를 이용하는 운영방안이 현행 제한수위나 가변제한수위를 이용하는 운영방안보다 우수하였고 SCA 중에서는 앙상블 예측기법(ESP)을 이용한 경우가 가장 우수하였다.

핵심용어 : 저수지 운영방안, 홍수조절, 세트 컨트롤 알고리즘

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사 졸업

Former Graduate Student, School of Civil Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(E-mail : winlee96@empal.com)

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수, 교신저자

Assistant Prof., School of Civil Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea

1. 서론

수계내 수자원의 효율적인 이용과 관리를 위하여 건설된 다목적 댐의 주된 기능은 맑고 깨끗한 물을 넉넉하게 공급하는 용수공급과 하류의 인명 및 재산에 대한 홍수피해를 줄이기 위한 홍수조절이다. 다목적 댐의 홍수조절과 용수공급은 서로 독립적인 목적처럼 보이지만, 홍수기에 홍수피해를 줄이기 위하여 지나치게 저수지의 수위를 낮추게 되면 갈수기의 원활한 용수공급이 어렵게 되는 반면에, 갈수기의 충분한 용수공급을 위하여 홍수기에 저수지의 수위를 높게 유지한다면 저수지의 홍수조절능력이 떨어지게 된다. 따라서, 홍수기에는 홍수피해를 최소화하여 억제하면서 홍수기말의 저수량을 최대한으로 확보해야하는 모순된 상황에 처하게 된다. 그러나, 홍수기 동안의 저수지 운영은 불확실한 유입량의 특성과 하류의 다양한 상황에 대한 여러 가지 제약 조건들 때문에 급격한 유입량에 대비하기 위하여 저수지를 충분히 비워놓는 간단한 안전위주의 운영이 되는 경우가 많다. 이러한 저수지 운영방안은 저수지가 충분히 홍수조절능력을 발휘할 수 있게 할 수는 있지만, 만일 홍수기말에 충분한 유입량이 발생하지 않을 경우에는 홍수기말 저수위가 상대적으로 낮아지게 되기 때문에, 갈수기 용수공급에 어려움을 겪게 된다. 따라서, 홍수기 유입량의 불확실성과 시간적·공간적·사회적인 제약조건들을 충분히 고려한 홍수조절능력과 갈수기의 원활한 용수공급을 위하여 충분한 저수량을 확보할 수 있는 능력을 모두 갖춘 홍수기 저수지 운영방안에 대한 연구가 필요하다. 하지만, 홍수기의 저수지 운영방

안에 대한 기존의 연구들은 주로 단일 홍수사상에 대한 연구만이 이루어졌을 뿐, 효율적인 홍수조절과 홍수기말의 충분한 저수량 확보를 함께 만족시킬 수 있는 홍수기 전반에 대한 연구는 아직 미비한 편이다.

홍수기 전반에 대한 저수지 운영방안으로 빈도분석 기법을 이용한 홍수기 가변제한수위가 제시된 바 있으나(이길성과 강부식, 1992; 심명필 등, 1995), 홍수기와 같은 비상시에는 단일한 최적의 가변제한수위를 설정하기보다는 저수지의 안전을 보장할 수 있는 저수지 제한수위의 범위를 제시하는 방안이 오히려 효율적일 수 있다. 이러한 목적을 충족시키기 위하여 Georgakakos and Yao(1993)과 Yao and Georgakakos(1993)은 빈도분석기법의 대안으로서 세트 컨트롤 알고리즘(Set Control Algorithm, 이하 SCA)을 제안하였다.

본 연구에서는 세트 컨트롤 알고리즘을 이용하여 홍수기의 불확실한 유입량 특성을 고려한 효율적인 홍수조절 공간을 마련하고 나아가 갈수기를 대비하여 충분한 저수량을 확보할 수 있는 간결하면서 효율적이고 체계적인 홍수기 저수지 운영방안에 대한 연구를 수행하였다.

2. 세트 컨트롤 알고리즘

일반적으로 수자원 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(k+1) = A(k)S(k) + B(k)u(k) + G(k)w(k) \quad (1)$$

$$k=0, 1, \dots, N-1$$

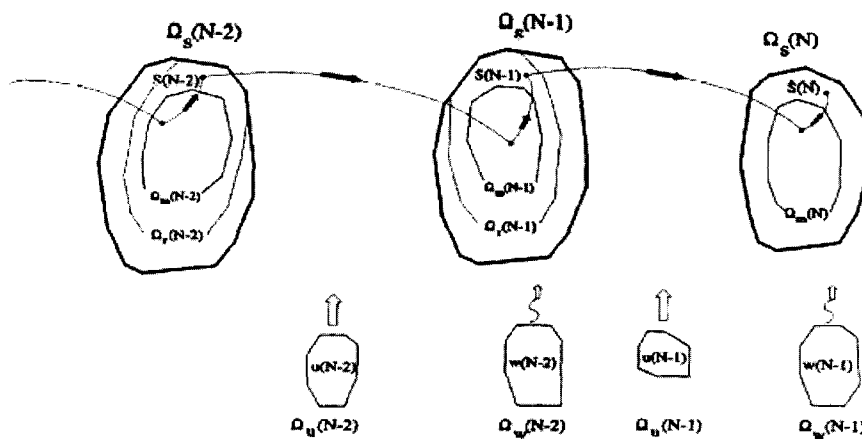


그림 1. 세트 컨트롤 알고리즘의 개념도(Georgakakos and Yao, 1993)

여기에서 $S(k)$ 와 $u(k)$, $w(k)$ 는 각각 시간 k 에 서의 저수지의 상태, 방류량, 유입량을 나타내는 벡터이 고, $A(k)$, $B(k)$, $G(k)$ 는 각 항의 연결관계를 설명해 주는 행렬계수이다. 각 벡터 및 행렬계수의 차원은 각각 n_s , n_u , n_w , $(n_s \times n_s)$, $(n_s \times n_u)$, $(n_s \times n_w)$ 이다.

저수지의 저수량과 방류량은 다음과 같이 특정한 허용 범위를 그 제약조건으로 가진다.

$$S^{\min}(k) \leq S(k) \leq S^{\max}(k), \quad k=0, 1, \dots, N \quad (2)$$

$$u^{\min}(k) \leq u(k) \leq u^{\max}(k), \quad (3)$$

$$k=0, 1, \dots, N-1$$

Georgakakos and Yao(1993)가 제안한 SCA는 그림 1과 같은 과정을 거치며 이를 요약하면 다음과 같다. SCA의 기본 가정은 식 (1), (2), (3)과 같은 저수 지의 상태 하에서, 유입량이 여전히 불확실하기는 하지만 일정한 범위 안에서만 변한다는 것이다. 즉 유입량 이 일정한 범위 안에서 변화할 때, 저수지의 상태가 허용범위 안에서 유지되도록 하는 조절 세트(Control Set; 여기서는 저수량과 방류량)를 결정하는 방법이 SCA이며 구체적인 알고리즘을 설명하면 다음과 같다.

허용저류량 세트와 허용방류량 세트, 유입량 세트를 각각 $\{Q_s(k), k=0, 1, \dots, N\}$, $\{Q_u(k), k=0, 1, \dots, N-1\}$, $\{Q_w(k), k=0, 1, \dots, N-1\}$ 라고 하자. 그리고 수정상태 세트(Modified State Set), $Q_m(N)$ 을 다음과 같이 정의하자.

$$Q_m(N) = \{S \in R^n \mid [S + G(N-1)w(N-1)] \in Q_s(N), \forall w(N-1) \in Q_w(N-1)\} \quad (4)$$

즉, 시간 $k = N$ 에서 수정상태 세트 $Q_m(N)$ 는 $Q_w(N-1)$ 에 속하는 임의의 유입량에 대하여 $S + G(N-1)w(N-1)$ 가 $Q_s(N)$ 에 속하도록 하는 저류량 세트이다.

다음으로, 시간 N 에서 감소상태 세트(Reduced State Set) $Q_r(N)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$Q_r(N-1) = \{S \in Q_s(N-1) \mid \exists u(N-1) \in Q_u(N-1), [A(N-1)S + B(N-1)u(N-1)] \in Q_m(N)\} \quad (5)$$

즉, 유입량 $u(N-1)$ 가 유입량 세트 $Q_u(N)$ 에 속하는 임의의 값일 경우에 $Q_m(N)$ 에 $[A(N-1)S + B(N-1)u(N-1)]$ 가 속하도록 해주는 조절 세트 $u_c(N-1)$ 가 존재하게 되고, 이러한 $u_c(N-1)$ 가 존재하는 경우의 저류량의 세트가 감소상태 세트 $Q_r(N)$ 이다. 이렇게 정의된 감소상태 세트는 조절 저류량의 세트가 된다. 다시 말해서 시간 $N-1$ 에서 의 저류량 $S(N-1)$ 이 시간 $N-1$ 에서의 감소상태 세트 $Q_r(N-1)$ 에 속하는 경우에 시간 N 에서의 유 입량 세트 $Q_u(N)$ 에 속하는 어떠한 유입량이 저수지 에 유입되더라도 시간 N 에서의 저류량 $S(N)$ 이 시간 N 에서의 허용저류량 세트 $Q_s(N)$ 내에서 유지할 수 있게 된다.

이제, 이전 운영시점에 대한 수정상태 세트 $Q_m(N-1)$ 와 감소상태 세트 $Q_r(N-2)$ 를 비슷하 게 정의할 수 있다.

$$Q_m(N-1) = \{S \in R^n \mid [S + G(N-2)w(N-2)] \in Q_s(N-1), \forall w(N-2) \in Q_w(N-2)\} \quad (6)$$

여기에서 유의할 점은 $Q_m(N-1)$ 은 $Q_s(N-1)$ 가 아니라 $Q_r(N-1)$ 에 대하여 정의된다는 점이다.

$$Q_r(N-2) = \{S \in Q_s(N-2) \mid \exists u(N-2) \in Q_u(N-2),$$

$$[A(N-2)S + B(N-2)u(N-2)] \in Q_m(N-1)\} \quad (7)$$

그러므로 저류량이 시간 $N-2$ 에서의 감소상태 세 트 $Q_r(N-2)$ 에 속해 있다면 유입량 세트 내에 속하

는 유입량 $\{w(N-2), w(N-2)\}$ 에 대하여 저류량이 허용저류량 세트 내의 값인 $S(N-1), S(N-2)$ 가 되도록 하는 조절 세트 $u(N-2), u(N-1)$ 이 존재하게 된다.

위의 과정을 시간의 역순, $k = N-3, N-4, \dots, 0$ 에 대하여 반복해서 계산한다. 만일 초기 저류량 $S(0)$ 이 계산된 초기 감소상태 세트 $Q_r(0)$ 에 속하고, 모든 시간에 대하여 감소상태 세트가 공집합을 갖지 않는다면 저수지의 상태를 계산된 감소상태 세트 내의 값으로 유지시킬 수 있는 조절 세트가 존재하게 된다.

3. 적용사례

3.1 SCA 및 가변제한수위의 설정

본 연구에서는 SCA를 충주댐의 홍수기 운영방안에 적용하였다. 충주댐에 대한 상태방정식은

$$S(k+1) = S(k) + w(k) - u(k) \quad (8)$$

으로 설정할 수 있으며, 시간간격 k 는 일(Daily)이다.

허용방류량 세트는 댐에서 하류에 피해를 미치지 않는 방류량의 범위를 설정하는 것으로, 충주댐의 경우 하한값은 기본계획방류량(6월: 125.2 m³/s, 7월: 115.2 m³/s, 8월: 120.9 m³/s, 9월: 107.8 m³/s)으로 설정하였고, 상한값은 최대발전방류량(828m³/s)으로 설정하였다(한국수자원공사, 2001).

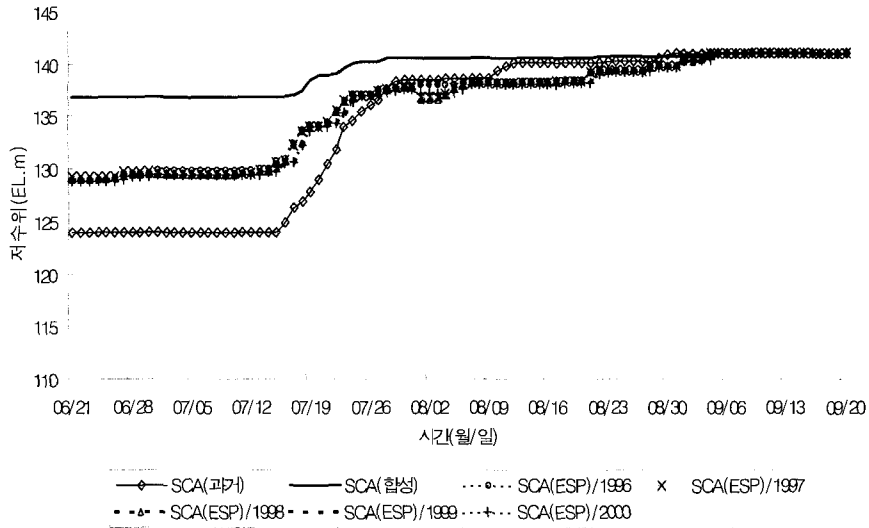
허용저류량 세트는 댐의 안전상 혹은 효율적인 관리를 위하여 댐의 저수위가 유지해야하는 제한수위의 범위이다. 충주댐의 경우 허용저류량 세트의 상한값은 홍수기말(9/20)을 제외하고는 충주댐의 상시만수위(141 EL.m)와 최저수위(110 EL.m)로 설정하였고, 홍수기말 범위는 상시만수위와 홍수기 제한수위(138 EL.m) 사이로 설정하였다. 이렇게 홍수기말의 허용 저류량 범위를 다른 시점과 다르게 설정한 이유는 상시만수위와 홍수기 제한수위 사이의 차이인 3 m를 효율적으로 사용하기 위함이다.

본 연구에 적용된 SCA는 유입량 세트 설정방법에 따라 SCA(과거), SCA(합성), SCA(ESP) 등의 총 3가지로 구분하였다. 우선, 충주댐의 과거 유입량 자료를 이용하여 유입량 세트를 설정하였다. 충주댐의 경우 과거 유입량 자료는 1985년~2000년의 총 16년 간 존

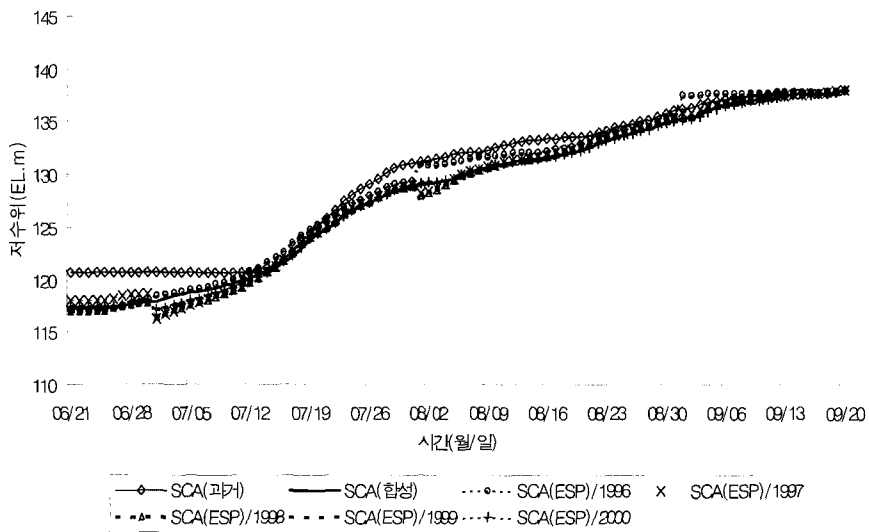
재한다. 이 중에서 1985년~1995년의 총 11년 간 과거 유입량 자료 중에서 2.4순위 최대값과 평균값을 이용하여 유입량 세트를 설정한 경우를 “SCA(과거)”라고 하였다. 이렇게 유입량 세트의 상한값을 2.4순위 최대값으로 설정한 이유는 1순위 최대값이나 2순위 최대값을 유입량 세트의 상한값으로 설정하여 SCA를 적용한 결과 충주댐의 기존 저류용량으로는 홍수조절이 불가능하여 조금 더 작은 값으로 설정해야 했기 때문이다. 그러나 이용된 자료의 수가 적어 2순위 최대값과 3순위 최대값의 차이가 매우 컸고, 이 때문에 3순위 최대값은 너무 작아 이용하기에 적합하지 않았다. 그러므로 2순위 최대값과 3순위 최대값의 사이에 존재하는 가상의 값 중 시행착오법에 의한 모의운영 결과 중에서 가장 우수한 결과를 보여준 2.4순위 최대값을 유입량 세트의 상한값으로 설정하였다. 유입량 세트의 하한값은 홍수기 동안의 일반적인 유입량 성향을 반영하기 위하여 평균값을 이용하여 설정하였다.

그러나, 관측 유입량 자료는 총 16년의 자료만 존재하므로 자료의 수가 불충분하다고 판단되어 이를 보충하기 위하여 강우-유출 모형으로 재현한 자료를 추가로 이용하였다. 충주댐의 유입량 자료는 총 16년 동안만 존재하지만, 충주댐 유역의 강우량 자료는 1966~2000년의 총 35년 간 관측자료가 존재한다. 유입량 자료가 존재하지 않는 1966~1984년의 총 19년 간의 자료는 강우량 자료를 강우-유출 모형에 입력하여 유입량을 재현하였다. 이용된 강우-유출 모형과 매개변수는 강경석 등(2001)이 이용한 4단 탱크모형과 매개변수를 그대로 이용하였다. 이를 과거 유입량 자료가 존재하는 기간과 합하여 1966년~1985년의 총 30년의 합성자료를 구성하였으며 이 중에서 5순위 최대값과 평균값을 이용하여 유입량 세트를 설정한 경우를 “SCA(합성)”이라고 하였다. SCA(합성)의 경우도 SCA(과거)와 마찬가지로 주어진 자료에서 충주댐이 홍수조절 가능한 최대값을 설정하기 위하여 5순위 최대값을 SCA(합성)의 유입량 세트의 상한값으로 이용하였고, 홍수기 동안의 일반적인 유입량 성향을 반영하기 위하여 평균값을 SCA(합성)의 하한값으로 이용하였다.

마지막으로, 예측기법을 이용하여 얻어진 유입량 시나리오를 이용하여 SCA를 설정할 수도 있다. 본 연구에서는 미국 기상청인 NWS(National Weather Service)에서 개발한 앙상블 예측기법(Ensemble Streamflow Prediction, 이하 ESP)을 사용하였는데 이는 강우-유출모형에 미래에 일어날 가능성이 있는 모



(a) SCA의 감소상태 세트 중 상한값 비교결과



(b) SCA의 감소상태 세트 중 하한값 비교결과

그림 2. SCA의 감소상태 세트 비교결과

든 강우 시나리오를 입력하여 그 결과물로 다수의 유출 시나리오를 얻는 기법이다(김영오 등, 2001). 본 연구에서는 1966~1995년 동안의 총 30년 간 강우 시나리오를 매월 초 탱크(Tank) 모형에 입력하여 유입량 시나리오를 생성하였고, 이로부터 계산된 감소상태 세트도 매월 갱신(Update)하였다. 이렇게 ESP 기법으로

생성된 총 30년 시나리오 중에서 SCA(과거)나 SCA(합성)과 같은 이유로 4순위 최대값과 평균값을 이용하여 유입량 세트를 설정하는 방법을 “SCA(ESP)”라고 하였다. 그림 2는 3가지 SCA의 감소상태 세트의 모습을 보여주고 있는데, 그림 2(a)에서 SCA(ESP)의 감소상태 세트의 상한값이 매년 달라지는 이유는 앞서 설

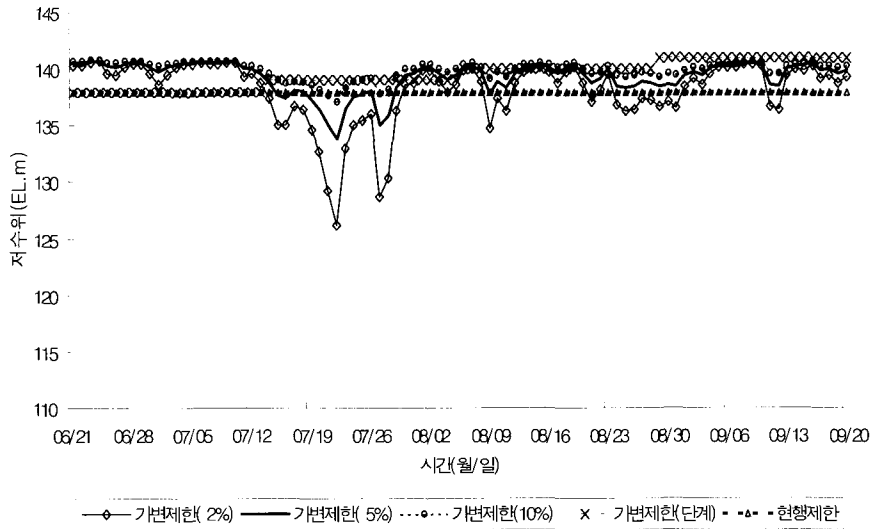


그림 3. 가변제한수위 및 현행제한수위

명한 데로 SCA(ESP)는 ESP 기법으로 매년 매월 유입량 세트를 갱신하기 때문이다.

SCA의 비교대상으로는 현행 제한수위를 이용한 방법, 가변제한수위를 단계적으로 상승시키는 방법, 기존의 빈도분석을 이용하여 3가지의 초과확률의 제한수위를 이용하는 방법 등의 5가지 방법을 사용하였고(그림 3), 과거 실제운영 결과와도 비교하였다. 빈도분석에서는 일 유입량의 초과확률이 2%, 5%, 10%인 경우의 유입량에 대한 제한수위를 설정하였고, 모집단의 분포는 대수정규분포로 가정하였다. 위와 같이 각각 설정된 가변제한수위를 평가하기 위하여 1996~2000년 동안의 홍수기 실제 유입량을 이용하여 모의운영을 실시하였다.

모의운영에 적용된 저수지 운영률을 요약하면 SCA의 경우 저수위가 감소상태 세트 내의 값일 경우에는 운영시점의 저수위가 감소상태 세트 내에 위치한 비율만큼의 양을 방류하였고, 저수위가 감소상태 세트 아래의 값일 경우에는 기본계획방류량만을 방류하였다. 가변제한수위와 현행제한수위를 이용하는 경우에는 저수위가 제한수위보다 낮을 경우에는 기본계획공급량만을 방류하였다. 만일 저수위가 제한수위보다 높은 경우에는 매회 타당성 조사에서 많이 사용되는 Rigid ROM을 이용하여 홍수조절을 하였다. Rigid ROM은 일정률-일정량 방류방식으로 홍수수문곡선이 침투시간에 도달하기 전까지는 일정률로 방류하다가 침투시간 이후부터는 침투시간의 방류량으로 일정하게 방류하는

방식으로 홍수수문곡선에 대한 정확한 예측을 필요로 하지 않기 때문에 모의운영에 쉽게 적용할 수 있었다. 본 연구에서의 일정률은 과거의 방류 기록자료로부터 계산된 70%를 이용하였다.

3.2 모의운영 결과 및 분석

모의운영 결과에 대한 평가는 홍수기말의 최종수위, 모의운영 중의 최고수위와 최대방류량, 여수로방류의 신뢰도(Reliability)와 회복도(Resiliency), 취약도(Vulnerability) 등을 이용하였다. 여수로방류에 대한 신뢰도는 여수로방류가 발생하지 않는 비율을 나타내고, 여수로방류의 회복도는 여수로방류가 얼마나 빨리 중단되는가를 평균적으로 나타내는 지표이며, 여수로방류의 취약도는 여수로방류의 평균적인 크기이다. 홍수기말의 최종수위와 여수로방류의 신뢰도, 회복도는 그 값이 클수록 우수한 결과를 나타내는 것이고, 모의운영 중의 최고수위와 최대방류량, 여수로방류의 취약도는 그 값이 작을수록 더 우수한 운영방안임을 의미한다.

각각의 결과는 표 1과 같다. 여기에서, “SCA(과거)”는 과거 관측자료만을 이용한 SCA, “SCA(합성)”은 탱크모형에 의해서 재현된 자료를 추가로 이용한 SCA, “SCA(ESP)”는 ESP 기법으로 예측된 유입량 시나리오를 이용한 SCA, “가변제한(단계)”는 제한수위를 단계적으로 상승시키는 간단한 방법, “가변제한(p%)”는 초과확률 p%에 대한 빈도분석기법으로 설정된 가변제

표 1. 모의운영 결과에 대한 평가

(a) 1996년

	최종수위	최고수위	최대방류량	신뢰도	회복도	취약도
	(EL.m)	(EL.m)	(m ³ /sec)	(%)	(%)	(m ³ /sec)
SCA(과거)	130.7	132.4	125.2	100.0	-	0.0
SCA(합성)	130.7	132.4	125.2	100.0	-	0.0
SCA(ESP)	130.7	132.4	125.2	100.0	-	0.0
가변제한(2%)	130.3	132.0	384.2	100.0	-	0.0
가변제한(5%)	130.7	132.4	125.2	100.0	-	0.0
가변제한(10%)	130.7	132.4	125.2	100.0	-	0.0
가변제한(단계)	130.7	132.4	125.2	100.0	-	0.0
현행제한	130.7	132.4	125.2	100.0	-	0.0
과거운영	123.9	123.9	616.7	100.0	-	0.0

(b) 1997년

	최종수위	최고수위	최대방류량	신뢰도	회복도	취약도
	(EL.m)	(EL.m)	(m ³ /sec)	(%)	(%)	(m ³ /sec)
SCA(과거)	137.3	140.9	926.7	94.6	20.0	98.7
SCA(합성)	138.9	141.0	1323.3	90.2	33.3	304.4
SCA(ESP)	137.6	141.2	926.7	94.6	20.0	98.7
가변제한(2%)	136.6	140.0	1098.9	92.4	14.3	270.9
가변제한(5%)	136.4	140.7	1098.9	88.0	18.2	208.3
가변제한(10%)	137.5	140.7	1098.9	89.1	20.0	202.0
가변제한(단계)	137.6	141.2	1323.3	87.0	25.0	255.2
현행제한	136.5	139.6	1796.6	89.1	30.0	547.5
과거운영	130.6	134.9	657.2	100.0	..	0.0

(c) 1998년

	최종수위	최고수위	최대방류량	신뢰도	회복도	취약도
	(EL.m)	(EL.m)	(m ³ /sec)	(%)	(%)	(m ³ /sec)
SCA(과거)	138.3	143.2	4128.0	89.1	20.0	2138.3
SCA(합성)	139.3	143.7	4128.0	83.7	13.3	1331.5
SCA(ESP)	139.4	142.5	4128.0	83.7	13.3	1331.5
가변제한(2%)	135.6	143.3	4128.0	84.8	21.4	1647.3
가변제한(5%)	137.8	143.6	4128.0	85.9	23.1	1660.9
가변제한(10%)	137.6	143.0	4128.0	82.6	12.5	1340.2
가변제한(단계)	138.2	143.1	4128.0	84.8	14.3	1602.8
현행제한	136.5	142.0	4128.0	82.6	12.5	1340.2
과거운영	132.8	141.0	3857.3	88.0	9.1	1505.1

표 1. 모의운영 결과에 대한 평가

(d) 1999년

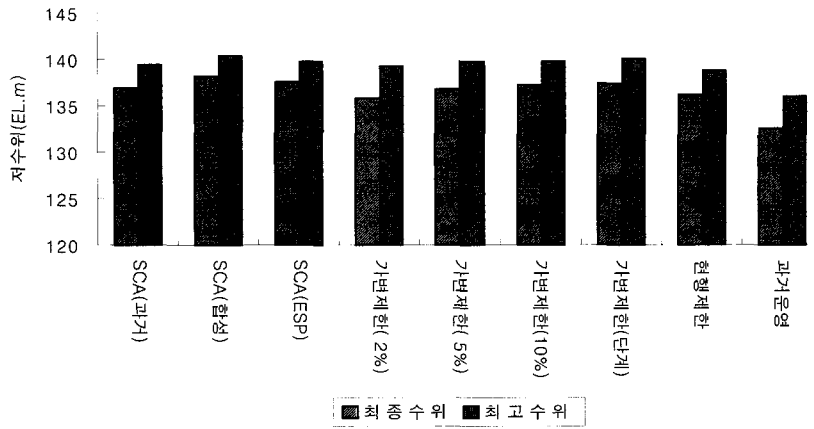
	최종수위	최고수위	최대방류량	신뢰도	회복도	취약도
	(EL.m)	(EL.m)	(m ³ /sec)	(%)	(%)	(m ³ /sec)
SCA(과거)	139.7	139.7	1510.6	96.7	33.3	39.0
SCA(합성)	141.4	141.4	1510.6	98.9	0.0	59.0
SCA(ESP)	141.1	141.1	646.2	100.0	0.0	0.0
가변제한(2%)	139.8	139.8	1510.6	96.7	33.3	451.3
가변제한(5%)	139.9	139.9	1510.6	96.7	33.3	451.3
가변제한(10%)	140.2	140.2	1510.6	97.8	50.0	509.1
가변제한(단계)	140.7	140.7	1510.6	96.7	33.3	39.0
현행제한	138.7	139.3	1510.6	95.7	25.0	422.4
과거운영	133.6	137.8	615.0	100.0	-	0.0

(e) 2000년

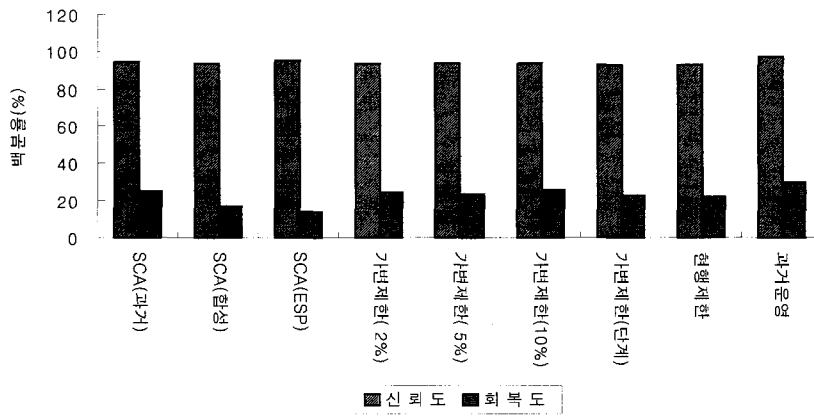
	최종수위	최고수위	최대방류량	신뢰도	회복도	취약도
	(EL.m)	(EL.m)	(m ³ /sec)	(%)	(%)	(m ³ /sec)
SCA(과거)	138.8	141.6	3231.1	94.6	20.0	2062.0
SCA(합성)	140.7	143.3	3231.1	94.6	20.0	2062.0
SCA(ESP)	138.8	141.6	3231.1	94.6	20.0	2062.0
가변제한(2%)	138.3	141.1	3231.1	92.4	28.6	1694.6
가변제한(5%)	139.1	141.9	3231.1	94.6	20.0	2062.0
가변제한(10%)	139.4	142.5	3231.1	94.6	20.0	2062.0
가변제한(단계)	139.9	142.7	3231.1	94.6	20.0	2062.0
현행제한	137.9	140.7	3231.1	94.6	20.0	2062.0
과거운영	141.7	141.9	1831.3	97.8	50.0	697.1

(f) 평균값(1996~2000년)

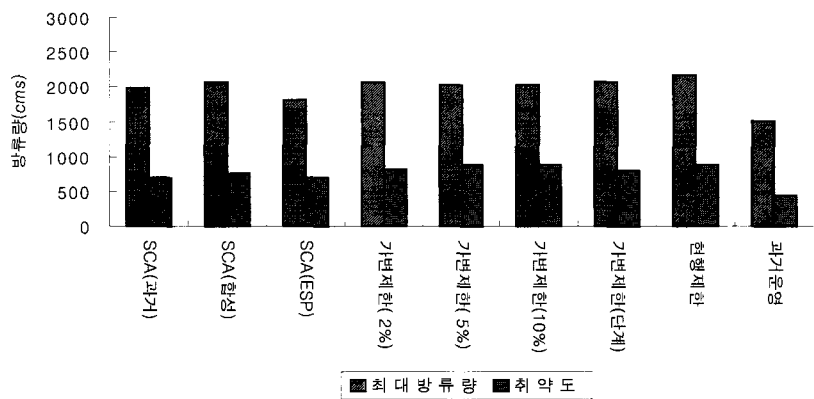
	최종수위	최고수위	최대방류량	신뢰도	회복도	취약도
	(EL.m)	(EL.m)	(m ³ /sec)	(%)	(%)	(m ³ /sec)
SCA(과거)	136.9	139.4	1988.4	93.9	25.0	688.0
SCA(합성)	138.2	140.4	2063.6	93.5	16.7	751.4
SCA(ESP)	137.5	139.8	1811.4	94.6	13.3	698.5
가변제한(2%)	135.7	139.2	2070.6	93.0	24.0	810.5
가변제한(5%)	136.8	139.7	2018.8	93.0	23.6	876.5
가변제한(10%)	137.2	139.7	2018.8	93.3	26.1	875.2
가변제한(단계)	137.4	140.0	2063.6	92.6	23.2	791.8
현행제한	136.0	138.8	2158.3	92.4	21.9	874.4
과거운영	132.5	135.9	1515.5	97.2	29.5	440.4



(a) 홍수기말 최종수위 및 모의운영 중 최고수위의 비교



(b) 여수로방류의 신뢰도 및 회복도의 비교



(c) 모의운영 중 최대방류량 및 여수로방류 취약도의 비교

그림 4. 모의운영 결과에 대한 평가(평균)

한수위를 이용한 방법, “현행제한”은 현재의 제한수위를 이용한 방법, “과거운영”은 과거 실제운영 결과를 뜻한다.

모의운영 결과를 연도별로 살펴보면, 표 1(a)의 1996년의 경우에는 홍수기 동안 유입량이 예년에 비하여 적은 편으로 특별하게 우수한 운영방안은 없었고, 표 1(b)~(d)의 1997년부터 1999년까지는 홍수기 초반과 중반에 큰 홍수사상이 발생하는 경우로 SCA(ESP)가 가장 우수한 운영방안으로 입증되었으며, 표 1(e)의 2000년의 경우에는 홍수기 후반에 큰 홍수사상이 발생하는 경우로 1996년과 마찬가지로 특별하게 우수한 운영방안은 없었다. 5개년의 모의운영 결과를 종합적으로 비교하기 위하여 표 1(f)와 같이 평균값을 비교한 결과 홍수기말 최종수위는 SCA(합성)과 SCA(ESP)의 결과가 가장 우수하였고, 모의운영 중 최고수위는 8가지 모의운영 결과가 서로 비슷하게 나타났지만 SCA(합성)과 가변제한(단계)의 결과는 좋지 않았으며, 모의운영 중 최대방류량의 경우에는 SCA(과거)와 SCA(ESP)의 결과가 가장 우수하였다. 또한 여수로방류 평가지표에서는 SCA(ESP)의 결과가 신뢰도와 취약도 면에서 가장 우수하였고, 회복도 면에서는 가장 좋지 않은 결과를 보여주었는데, 이것은 여수로방류의 크기와 방류횟수가 적기는 하지만 일단 시작된 여수로방류는 신속하게 중단되지는 않는다는 것을 의미한다. 이렇게 5개년 동안의 각각의 모의운영 결과와 평균적인 결과를 모두 살펴본 결과, 홍수를 조절하는 능력과 홍수기말 저수위를 상시만수위로 복귀시키는 용수량 확보능력이라는 두 가지 측면 모두 SCA에 의한 저수지 운영방안이 가변제한수위를 이용한 운영방안보다 우수하였음을 알 수 있었다. 3가지 SCA를 각각 살펴보면, SCA(과거)는 홍수조절능력이 뛰어난 편이기는 하지만 용수량 확보 능력은 그리 뛰어나지 못하였고, SCA(합성)은 용수량 확보 능력은 가장 뛰어났지만 홍수조절능력은 부족한 편이었다. 그러므로 용수량 확보와 홍수조절에 대한 종합적인 능력이 모두 우수한 저수지 운영방안은 SCA(ESP)라고 판단할 수 있었다. 다만, SCA(ESP)의 결과도 과거운영 결과보다 홍수기말 최종수위를 상승시키는 점에서는 우수하였지만, 모의운영 중 최대방류량과 여수로방류 평가지표에서는 좋지 않은 결과를 보여줘 홍수조절능력 면에서는 SCA(ESP)가 과거운영 결과보다 부족함을 나타내고 있다. 그러나 본 연구의 모의운영에서는 고정된 운영률인 Rigid ROM으로만 저수지를 운영한 반면, 실제 과거운영에서는 홍수예측

을 포함한 다양한 기법으로 운영하였던 점을 고려한다면 홍수조절능력 면에서의 차이는 다소 과장되어졌으리라 예상된다. 따라서, 앙상블 예측기법을 이용하여 매년 감소상태 세트를 갱신한 SCA(ESP)가 다른 대안들 중에서는 가장 우수한 홍수기 저수지 운영방안이라 할 수 있다. 그림 4는 표 1의 결과를 요약하여 보여주고 있다.

4. 결론 및 향후 연구과제

SCA는 유입량이 일정한 범위 안에서 주어질 경우에 저수지의 상태가 허용범위 내에서 유지되도록 하는 저수량과 방류량의 조절범위를 설정하는 방법이다. 실시간 운영에서 SCA를 적용하는 경우에는 현 저수량이 조절범위 내에서 유지되도록 방류량의 범위를 변화시키게 된다. 총 5년(1996년~2000년) 간의 실측 유입량을 이용한 모의운영 결과를 서로 비교하였고 과거 실제운영 결과와도 비교하였다. 그 결과, 홍수를 조절하는 능력과 홍수기말 저수위를 상시만수위로 복귀시키는 용수량 확보능력이라는 두 가지 측면에서 모두 SCA에 의한 저수지 운영방안이 가변제한수위를 이용한 운영방안보다 우수하였음을 알 수 있었고, 3가지 SCA 중에서는 앙상블 예측기법을 이용한 SCA가 용수량 확보와 홍수조절에 대한 종합적인 능력 면에서 가장 우수한 저수지 운영방안이었다.

향후 연구과제로는 우선 3가지 SCA의 유입량 세트가 서로 다른 순위값으로 구성되어 있는 점을 보완하기 위해 일반적인 유입량 세트 결정방법에 대한 연구가 필요하겠다. 더불어 본 연구에서는 허용방류량 세트를 기본계획방류량과 최대발전방류량으로 설정하였지만 하류의 상황을 고려한 현실적인 방류량 세트에 대한 연구가 필요하며, 마지막으로 SCA를 충주댐 이외의 댐 혹은 댐군에 적용시켜 SCA의 일반적인 효용성을 검증하는 연구도 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다. 또한 첫 번째 저자가 한국수자원공사 물관리센터에서 한 달 동안 연구할 수 있도록 배려해 주시고 적절한 조언을 해 주신 물관리센터 관계자에게 감사드립니다.

참고 문헌

강경석, 이동률, 김명립, 차형선 (2001). “탱크모형을 이용한 장기 일 유출량 구축.” 한국수자원학회

- 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, 제1권, pp. 245-250.
- 김영오, 정대일, 김형섭, 이길성 (2001). “양상블 예측을 통한 물공급전망 개선방안.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, 제2권, pp. 304-308.
- 심명필, 권오익, 이환기 (1995). “홍수기중 가변제한 수위에 의한 저수지 운영.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 217-228.
- 이길성, 강부식 (1992). “위협도제약 선형계획법에 의한 홍수기 저수지 운영.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제12권, 제3호, pp. 139-151.
- 한국수자원공사 (2001). **다목적댐 실무편람**.
- Georgakakos, A.P., and Yao, H. (1993). “New Control Concepts for Uncertain Water Resources Systems: 1. Theory.” *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 6, pp. 1505-1516.
- Yao, H., and Georgakakos, A.P. (1993). “New Control Concepts for Uncertain Water Resources Systems: 2. Reservoir Management.” *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 6, pp. 1517-1525.
- (논문번호:02-16/접수:2002.03.22/심사완료:2002.09.27)