

저수지 최적 운영 모형을 이용한 추가 용수 공급 능력 평가

Assessment of Additional Water Supply Capacity Using a Reservoir Optimal Operation Model

강민구* / 박승우**

Kang, Min Goo / Park, Seung Woo

Abstract

The objective of the study is to develop a reservoir optimal operation model and to suggest the appropriate amount of additional water supply and optimal operation rule. The model uses multiple objective function and a global search method, SCE-UA method. The objective function is set up to maintain the storage at target level, to satisfy the water demand, and to maximize the hydropower product. To evaluate the model's applicability, the model was applied for allocating the optimal water depending on storage level changes of Seomjin dam. The results comparing optimal operation and historical data showed that hydropower product increased from -2.29 % to 14.61 %, -5.94 % to 3.98 %, and -0.43 % to 6.35 % with varying target levels in wet, dry, and normal period, respectively. Also, The model was applied for assessing water supply capacity of Seomjin dam to satisfy increasing water demand. The dam was operated by the model on consideration of downstream flow as 0.17, 0.50, 0.70, 1.0, 1.5, and 3.0 m³/sec. The results showed that in case of operating the dam with downstream flow less than 0.70 m³/sec and with target water level lower than 194.0 m, hydropower product was more than the historical operation data and existing amount of water supply was less influenced.

keywords : Optimal water allocation, Global search method, Seomjin dam, Water supply capacity, Multiple objective function

요 지

본 연구에서는 저수지의 용수수요 증가에 따른 용수공급능력 평가를 실시하여 추가 공급 가능량과 이를 위한 저수지 운영방법을 제안하였다. 이를 위하여 전역 최적해를 탐색하는 SCE-UA법과 다중 목적함수를 적용한 최적화 모형과 저수지의 유입량, 수요량, 발전량을 추정하는 저수지 운영 모형을 결합한 저수지 최적운영 모형을 개발하였다. 개발된 모형의 적용성은 섬진강댐의 최적운영에 모형을 적용하여 평가하였다. 모형의 적용기간은 유입량을 고려하여 풍수기, 평수기, 갈수기로 구분하였다. 풍수기에는 목표 운영수위별로 발전량이 실측발전량 보다 -2.29~14.61 %, 갈수기에는 실측발전량 보다 -5.94~3.98 % 증가된 결과를 나타냈다. 평수기에는 실측발전량 보다 -0.43~6.35 % 증가된 결과를 나타냈다. 섬진강댐의 하류 용수 증가에 따른 용수공급 가능량을 산정하기 위하여 댐하류 방류량을 0.17, 0.50, 0.70, 1.0, 1.5, 3.0 m³/sec로 구분하여 최적 운영한 결과, 하류 방류량을 0.70 m³/sec 이하, 목표 저수위를 194.0

* 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원
Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(KOWACO),
Daejeon, Korea, 305-730.(e-mail: kmg90@kowaco.or.kr)

** 서울대학교 농업생명과학대학 교수
Professor, Department of Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, 151-921.

m 이하로 할 경우 실적 운영 결과 보다 향상된 결과를 나타냈다.

핵심용어 : 최적 용수 배분, 전역 최적화 기법, 섬진강댐, 용수공급능력, 다중목적함수

1. 서론

우리나라의 연평균 강우량은 1,283 mm로 세계 평균인 970 mm 보다 1.3배 정도 많은 양이다. 그러나 이를 1인당 강우량으로 환산하면 약 3,000 톤 정도로서 세계 평균의 10 % 정도에 불과하다(국토개발연구원, 2001). 강우량은 2/3가 여름철에 집중되고, 지역적으로 편중되는 경향을 나타낸다. 또한, 국토의 65 %가 산악지형이고 하천경사가 급해 홍수방어에 취약하다는 특성을 나타내고 있다. 이러한 지리적, 수문학적 특성 때문에 발생하는 문제를 해결하기 위하여 수자원 개발이 추진되어 왔다.

최근 인구가 증가하고, 사회가 도시화되고 산업화됨에 따라 물사용량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 오염물질 배출량이 증가하고 하천의 친수기능이 떨어짐에 따라 하천의 수질오염과 건천화를 방지하기 위한 용수 수요가 증가하고 있다(건설교통부, 한국수자원공사, 2000). 그리고 농업용수도 농촌용수로 범위가 확대되어 기존의 관개용수뿐만 아니라 생활용수, 하천유지용수를 포함하고 있어 수요가 증가하고 있다(농림부, 1999).

늘어나는 용수 수요를 충족시키기 위한 가장 확실한 방법은 댐건설이다. 그러나 최근에는 개발적지가 부족하고 환경문제로 인해 댐건설에 의한 수자원 확보가 어려운 상태이다. 따라서 지속가능한 개발 개념을 바탕으로 댐건설 이외의 구조적이거나 비구조적인 방법으로 수자원을 확보해야 한다. 구조적인 방법으로는 여수토의 승상, 저수위(L.W.L.) 이하의 저류량 사용, 준설에 의한 저수지 용량 증대와 같은 방법이 있다. 추가적인 수자원 확보를 위한 비구조적인 방법에는 최적 운영률에 의한 댐운영, 댐군의 연계 및 통합운영 등과 같은 방법이 있다. 또한, 최근에는 노후관 교체, 절수기기 보급 등과 같은 수요관리를 통한 용수 수요의 절감을 유도하려는 정책이나 하수의 재이용, 우수나 해수의 이용 등과 같은 대체 수자원 개발이 시도되고 있다(국토개발연구원, 2001).

현재 운영되고 있는 관개용 저수지나 다목적댐의 운영방식 및 용수 공급량은 계획당시의 환경을 토대로 하여 설정이 되어 있다. 현재의 운영은 건설당시와 다른 물관리 환경을 반영하면서 운영되고 있으며, 설계 당시

와 다른 용수 공급량을 요구받고 있다. 또한, 댐 건설 후 장시간이 경과하여 시설용량이 변하고, 상류유역이 변화하였다. 따라서 현재 물관리 환경과 수요에 맞게 운영 방식을 재설정해야 하며, 공급 가능량에 대한 재평가도 필요하다. 용수 공급능력평가는 저수지나 댐뿐만 아니라 이들을 포함하는 수자원시스템의 효율적인 운영을 위해서도 필요하다(윤용남 등, 1995; 이재응 등, 2002). 용수공급능력을 평가하는 방법에는 물수지 분석과 모의 모형, 최적화 모형, 모의 모형과 최적화 모형을 혼용한 모형 등과 같은 모형을 사용하는 방법이 있다. 이들 방법들은 각각 장단점들을 가지고 있으며, 공급능력은 신뢰도(reliability), 복원도(resilience), 부족심도(vulnerability)와 같은 지표로 나타내고 있다(고익환 등, 2004).

본 연구에서는 저수지의 용수공급능력을 평가할 수 있는 모의-최적화 모형을 개발하였다. 개발된 모형에서는 용수배분의 최적화를 위해서 전역 최적해 탐색법의 하나인 SCE-UA법과 다중목적함수를 사용하였다. 모형의 적용성은 개발된 모형을 섬진강댐의 최적운영에 적용하여 평가하였다. 모형의 적용기간을 풍수기, 평수기, 갈수기로 구분하여 유입량 변화에 따른 최적운영결과를 실적운영과 비교하였다. 또한, 하류 용수 수요 증가에 대한 가능 공급량을 추정하기 위하여 운영방법별로 섬진강댐의 용수공급능력을 평가하였다.

2. 저수지 최적 운영 모형

저수지의 용수 공급능력을 평가하는 방법에는 모의 모형을 이용하는 방법, 최적화 모형을 이용하는 방법, 모의 모형과 최적화 모형을 혼용하는 방법이 있다(Dandy et al., 1997). 이 중 모의 모형을 이용하는 방법은 미리 설정된 저수지 운영률을 기초로 하여 저수지 운영을 모의하는 방법이다. 최적화 모형을 이용하는 방법은 목적함수와 제약조건을 이용하여 용수 공급량의 과잉과 과소를 최소화하고 기타 목적을 최대화하도록 저수지를 운영하는 방법이다(Yeh, 1985). 모의 모형과 최적화 모형을 혼용한 방법은 저수지 운영을 모의하면서 각 단계의 용수 배분을 최적화 모형을 사용하여 결정하는 방법이다. 본 연구에서 개발한 저수지 최적 운영 모형은 저수지의 용수 공급능력을 평가하기 위하여 모의 모형과 최적화 모형을 혼용한 형태이다.

Fig. 1은 저수지 운영 최적화 모형의 흐름도를 나타낸 것이다. 개발된 모형은 저수지의 운영을 모의하면서 각 단계의 용수 배분은 설정된 목적함수와 제약조건을 만족하는 최적해를 탐색하는 최적화 기법을 사용하여 결정되도록 하였다. 본 모형은 유입량 및 수요량 추정과 저수량, 발전량을 산정하기 위한 저수지 운영 모형과 최적 용수 배분량을 추정하기 위한 최적화 모형으로 구성되어 있다. 개발된 모형은 단기간의 저수지 최적 운영이나, 장기간의 모의를 통하여 대상 저수지의 용수 공급능력을 평가하도록 하였다.

2.1 저수지 운영 모형

저수지 최적 운영 모형의 부모형인 저수지 운영 모형은 저수지 유입량과 용수 수요량을 예측하며 저수지 유입량, 방류량, 월류량 등을 고려하여 기간별로 댐의 저수량, 발전량을 산정한다. 저수지 유입량은 자료의 양이 많고 질이 확보된 경우에는 실측자료를 사용하였으며, 자료의 양이 적은 경우에는 결정론적 강우-유출 모형인 SSARR 모형을 이용하여 생성한다.

저수지의 용수별 방류량은 생활 및 공업용수, 하천유지용수의 경우 미리 정해진 양을 공급하는 것으로 하였으며, 농업용수는 포장에서의 필요수량과 이를 용수로

로 방류할 때 용수로의 흐름을 유지하기 위한 최저 방류량, 수로 손실을 고려하여 Eq. (1)과 같이 계산하였다 (김과 박, 1994; 김과 박, 1988).

$$R_t = 100 \times CR_t [REQ_t + MR_t + TR_t] \left(1 + \frac{CL}{100}\right) \times IA \quad (1)$$

여기서, R_t 는 농업용수 방류량(m^3), CR_t 는 방류계수, REQ_t 는 필요수량(m^3), MR_t 는 최저 방류량, TR_t 는 이양용수량(m^3), CL 은 수로손실률(%), IA 는 관개면적이다.

일반적으로 발전량은 발전사용수량, 방류시점 저수위, 발전시간, 터빈효율 등에 의해 영향을 받는다. 본 모형에서는 실제 발전량을 산정하기 위하여 발전효율(E_g), 수두손실률(H_L), 가동손실률(O_L)을 고려한 Eq. (2)를 사용하였다.

$$GE_{actual}(t) = 9.8 \cdot E_g \cdot O_L \cdot E_t \cdot Q_t \cdot (H_t \cdot H_L) \cdot T_t \quad (2)$$

여기서, $GE_{actual}(t)$ 는 실제 발전량(kWh), E_t 는 터빈효율, Q_t 는 발전유량(m^3/sec), H_t 는 유효낙차(m), T_t 는 발전시간(hr)을 나타낸다.

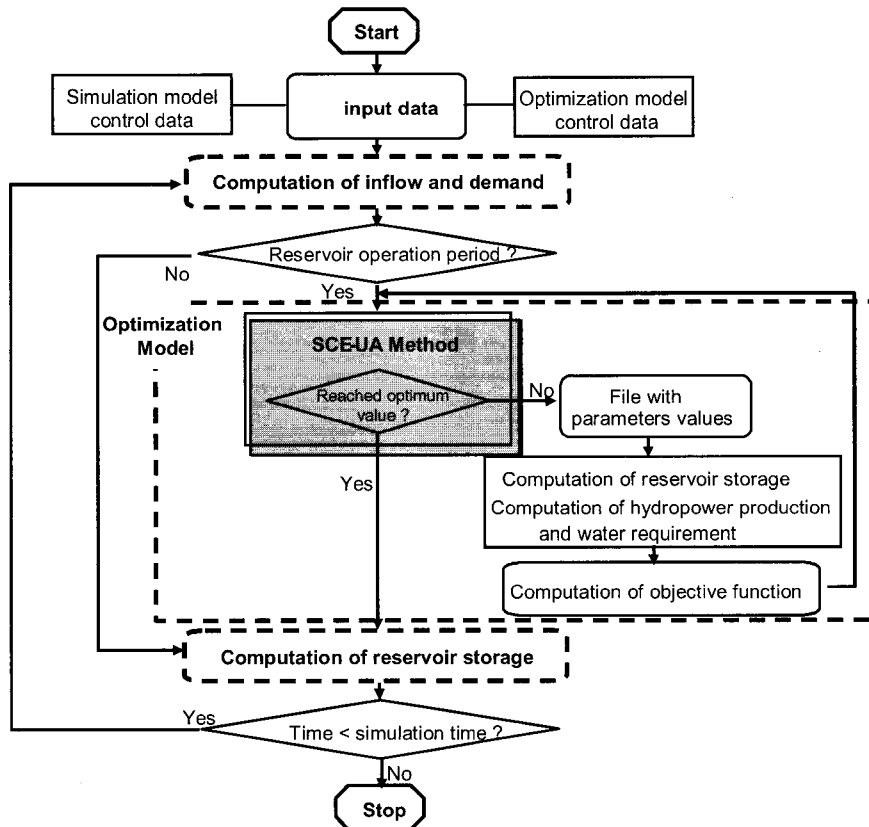


Fig. 1 Flowchart of reservoir optimization model

2.2 최적화 모형

2.2.1 목적함수 및 제약 조건

최적화 모형의 목적함수는 용수수요를 만족시키거나 발전량을 최대화하는 단일 목적함수를 사용해 왔으나 최근에는 용수수요 만족과 최대 발전 생산을 모두 고려한 다중 목적함수를 사용하고 있다(이재웅과 송재우, 2002; 정창삼 등, 2001). 본 연구에서 개발된 저수지 방류량 최적 배분 모형에 적용된 목적함수는 Eq. (3)과 같이 용수수요를 만족시키고, 발전량을 최대화시키면서 목표 저수량을 확보하기 위해서 다중목적함수를 사용하였다. 농업용수를 주로 공급하는 댐은 관개기와 비관개기에 용수수요가 구별되므로 목적함수는 관개기와 비관개기로 구분하여 적용하였다. 관개기에는 발전으로 인한 편익을 최대화하면서 용수수요량을 만족시키는 방향으로 용수를 공급하도록 하며, 비관개기에는 발전으로 인한 편익을 최대화하면서 목표 저수량을 확보하는 방향으로 저수지가 운영되도록 하였다. Eq. (3)에서 가중치는 관개기와 비관개기를 구분하여 적용하였다.

$$\text{Max } z_t = W_1 \times \geq (t) + W_2 \times [ST(t) - OST(t)]^2 + W_3 \times [REQ(t) - REL(t)]^2 \quad (3)$$

여기서, GE(t)는 발전소에 의한 발전량, ST(t)는 댐운영 후 순별 저수량, OST(t)는 목표 저수량으로 목표 운영수위에 해당된 저수량, REQ(t)는 해당 기간의 필요수량, REL(t)는 해당 기간의 방류량, W_1 , W_2 , W_3 는 가중치를 나타낸다.

최적화 모형을 구성하기 위한 연속방정식과 제약조건은 Eq. (4) and Eq. (5)와 같다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_1(t) - R_2(t) - R_3(t) - LO(t) \quad (4)$$

$$S_{LS} \leq S_t \leq S_{\max}, \quad R_n^{\min} \leq R_n(t) \leq R_n^{\max}, \quad R_n(t) \geq 0 \quad (5)$$

여기서, S_t 는 해당기간의 저수량, S_{t-1} 은 전단계의 저수량, I_t 는 유입량, $R_1(t)$ 는 발전소 발전유량, $R_2(t)$ 는 농업용수 방류량, $R_3(t)$ 는 댐하류 방류량, $LO(t)$ 는 저수지 손실량, S_{\max} 는 상시만수위의 저수량, S_{LS} 는 방류 제한 수위에 대한 한계저수량, $R_n(t)$ 는 각각의 방류량을 나타내며, R_n^{\min} 는 각 용수에 대한 최소 방류량, R_n^{\max} 는 각 용수에 대한 최대 방류량

을 나타낸다.

2.2.2 최적해 탐색기법

본 연구에서 선정한 목적함수는 수학적으로 비선형 함수이다. 비선형 목적함수를 사용하여 최적해를 탐색하기 위해서는 비선형계획법이나 동적계획법이 적용된다. 동적계획법은 저수지 운영이 시간과 공간적으로 다단계일 경우 최적 의사결정을 하기 위하여 적용되는 기법이다. 이 기법은 주로 월 단위 저수지 최적운영에 적용되어 왔다. 동적계획법은 계산량과 계산시간을 단축하기 위하여 많은 기법들이 개발되어 왔으나, 전역 최적해를 탐색하기 어렵다는 단점이 있다. 비선형 계획법은 컴퓨터 용량과 계산시간이 많이 소요되며 전역 최적해를 구하기 쉽지 않다는 단점이 있으나, 최근에는 컴퓨터의 용량이나 처리속도가 과거에 비하여 월등히 향상되고 있으며, 전역 최적해를 탐색하는 기법들이 개발되고 있어 비선형계획법의 적용이 가능해지고 있다.

전역 탐색기법은 시작점에 관계없이 효율적으로 전역해를 탐색하는 방법으로 목적함수가 불룩하지 않거나 미분이 불가능한 함수에 적용이 가능하다. 전역 탐색법은 확정론적 방법, 추계학적 방법, 두 방법을 조합한 방법으로 분류가 된다. 확정론적 방법은 목적함수가 연속적이고 미분식이 필요하며, 추계학적 방법과 조합법은 가능해 공간에서 무작위로 추출한 점들의 목적함수를 평가하여 최적해를 탐색한다. 전역탐색기법으로는 Uniform Random Search(URS), Adaptive Random Search(ARS), Multiple Start Simplex(MSX), Genetic Algorithm(GA), Simulated Annealing법, SCE-UA (Shuffled Complex Evolution- University of Arizona) 법 등이 있으며, 본 연구에서는 다른 방법보다 효율적이고 지속적인 결과를 나타낸다고 알려진 SCE-UA법을 사용하였다. SCE-UA법은 Simplex법, 무작위 탐색법, 경쟁적 진화, 집합체의 혼합 등과 같은 개념을 조합한 탐색기법으로 정보의 공유와 생물학적인 진화개념에 바탕을 두고 있다(Duan et al., 1994; Gan and Biftu, 1996; 강민구 등, 2002).

3. 모형의 적용

3.1 섬진강댐

저수지 최적운영 모형의 적용성을 평가하기 위하여 섬진강댐을 선정하였다. 우리나라 5대강 유역의 하나인 섬진강은 유로연장이 212.3 km, 유역면적은 4,896.5 km²에 달하며 상류에 위치한 섬진강댐은 하구로부터 136.1 km 지점인 전라북도 임실군 강진면 옥정리 부근의 계

쪽에 위치하고 있다. 섬진강댐은 동진강 유역의 농경지에 관개용수 공급, 발전과 홍수조절, 생활용수 공급 등의 역할을 수행하고 있다.

섬진강댐의 계획용수공급량은 385.3 백만 m^3 /년이며, 이중 동진강 유역의 농업용수로 350 백만 m^3 /년을 공급하고 있다. 또한, 섬진강 광역상수도 용수로 27.4 백만 m^3 /년을 공급하고 있으며, 댐하류 유지용수로 7.9백만 m^3 /년을 공급하고 있다. 섬진강댐은 14,500 kW 용량의 1, 2호기와 6,230 kW 용량의 3호기 등 3대의 수차를 사용하여 총 35,230 kW의 용량으로 수력발전을 하고 있으며, 최대발전유량은 26.50 m^3 /sec이다.

3.2 최적화 모형의 적용

3.2.1 발전량 산정

섬진강댐의 발전량을 산정하기 위해서는 발전터빈의 효율, 발전효율, 수두손실율, 가동손실율 등을 고려해야 한다. 섬진강댐의 발전터빈은 최대발전유량 11.0 m^3 /sec 인 2대의 터빈과 최대발전유량이 4.5 m^3 /sec인 1대의 터빈으로 총 3개의 터빈으로 구성되어 있으며, 발전유량에 따라 3개의 터빈을 어떻게 조합하여 운영하느냐에 따라서 발전 터빈의 효율(E_t)이 달라진다. 본 연구에서는 발전유량에 따른 터빈효율을 기준으로 하여 3 개 터빈을 하나의 터빈이 운영되는 것으로 가정하였다. 섬진강댐 수력발전의 발전효율(E_g), 수두손실율(H_L), 가동손실율(O_L)을 산정하기 위하여 순별 발전량 실적치를 실적값으로 하여 E_g , H_L , O_L 의 값을 보정하고, 다른 기간의 자료를 이용하여 예측결과를 검증하였다.

Table 1은 3개년의 발전유량, 저수위자료에 복합효율표를 적용하여 순별로 산정한 발전량과 실적 발전량을 비교한 것이다. E_g , H_L , O_L 의 값은 실적 발전량과 계산 발전량간의 차이를 최소화하는 값을 시행착오법으로 선정하였다. 실적 발전량과 계산 발전량 간의 차이가 최소화되는 발전효율은 0.966, 수두손실율은 10.0 %, 가동손실율은 1 %로 선정되었으며, 이를 사용하여 산정한 계산 발전량과 실적 발전량간의 상대오차는 -2.0 ~2.0 %의 범위를 나타냈다. 발전량 산정 모형의 검증

은 3개년의 발전유량과 저수위자료에 추정된 발전효율, 수두손실율, 가동손실율을 적용하여 순별로 산정한 발전량과 실적 발전량을 비교하였다. 실적 발전량과 계산 발전량간의 상대오차는 -1.73~-0.23 %의 범위를 나타냈으며, 계산 발전량이 실적 발전량에 근사한 값을 나타냈다.

3.2.2 저수지 최적 운영

모형의 적용성은 적용시기를 갈수기, 평수기, 풍수기로 구분하여 평가하였다. 이는 모형의 목적함수에 사용된 가중치로 수문상황과 관계없이 일관된 값을 사용하기 위한 것이다. 갈수기, 평수기, 풍수기의 구분은 연유입량을 빈도분석하여 실시하였으며 본 연구에서는 해당 연을 포함해서 3개년을 대상기간으로 하여 최적 운영한 결과를 분석하였다. 각 기간별 연평균 유입량은 갈수기에 383 백만 m^3 이며, 평수기에 504 백만 m^3 , 풍수기에 643 백만 m^3 이었다.

모형 적용시 상시만수위는 196.50 m로 하고, 목적함수에 사용되는 목표 저수량은 목표 운영수위를 188.68 m, 191.50 m, 194.00 m, 196.50 m로 구분하여 해당되는 저수량으로 설정하였다. 목표 운영수위는 섬진강댐의 관개기전 확보 저수위와 상시만수위를 고려하여 4가지로 구분하였다. 댐의 방류를 제한하는 저수위는 각 용수를 공급하는 취수구의 위치를 고려하여 설정하였다. 발전용수는 175.0 m 이하로 저수위가 내려갈 경우에는 공급하지 않고 발전을 중단하는 것으로 하였으며, 댐하류 방류량은 저수위가 164.0 m 이하로 내려갈 경우에는 공급되지 않는 것으로 하였다. 운암수갱을 통한 농업용수와 섬진강 광역상수도 용수는 154.54 m 이하로 저수위가 내려갈 경우 용수공급을 중단하도록 하였다.

Table 2는 갈수기인 1993년부터 1995년의 유입량을 사용하여 최적 운영한 결과와 실적 운영 자료를 비교한 것이다. 이 기간 동안의 연평균 유입량은 383 백만 m^3 이며, 실적 발전량은 253.68 GWh, 총방류량은 1,119 백만 m^3 이다. 목표 저수위별 최적 운영 발전량은 실적 발전량 보다 -5.94~3.98 % 향상된 결과를 나타냈다. 목표

Table 1. Validation results of hydroproduct computation model

Section	Calibration			Verification		
	1	2	3	4	5	6
Year						
Obs. (GWh)	85.33	131.85	98.85	12.25	91.84	122.01
Sim. (GWh)	87.06	128.26	96.09	12.22	90.76	119.90
RE (%)	2.0	-2.0	-2.0	-0.23	-1.19	-1.74

Table 2. Comparison of operation results observed and simulated in dry period (1993~1995)

Operation results		Target water level(m)			
		188.68	191.50	194.00	196.50
Hydroproduct (GWh)	Sim.	245.05	243.29	228.44	221.69
	Obs.	235.68	235.68	235.68	235.68
	RE (%)	3.98	3.23	-3.07	-5.94
Total release (10 ⁶ m ³)	Sim.	1,209.18	1,212.40	1,212.38	1,207.97
	Obs.	1,119.00	1,119.00	1,119.00	1,119.00
	RE (%)	8.06	8.35	8.34	7.95

저수위별 발전량을 비교해 보면, 목표저수위가 188.68 m 인 경우에 245.0 GWh로 가장 큰 발전량을 보였으며, 이는 실적발전량 보다 약 4 % 향상된 결과이다.

Table 3은 풍수기인 1996년부터 1998년의 유입량을 사용하여 최적 운영한 결과와 실적 운영 자료를 비교한 것이다. 이 기간 동안의 연평균 유입량은 643 백만 m³이며, 실적 발전량은 370.41 GWh, 총방류량은 1,783.36 백만 m³이다. 목표 저수위별 최적 운영 발전량은 실적 발전량 보다 -2.29~14.61 % 향상된 결과를 나타냈다. 목표 저수위별 발전량을 비교해 보면, 목표저수위가 188.68 m인 경우에 424.5 GWh로 가장 큰 발전량을 보였으며, 이는 실적발전량 보다 약 15 % 향상된 결과이다.

Table 4는 평수기인 1999년부터 2001년의 유입량을 사용하여 최적 운영한 결과와 실적 운영 자료를 비교한 것이다. 이 기간 동안의 연평균 유입량은 504 백만

m³이며, 실적 발전량은 394.14 GWh, 총방류량은 1,676.8 백만 m³이다. 목표 저수위별 최적 운영 발전량은 실적 발전량 보다 4.53~10.37 % 향상된 결과를 나타냈다. 목표 저수위별 발전량을 비교해 보면, 목표 저수위가 196.50 m인 경우에 435.0 GWh로 가장 큰 발전량을 보였으며, 이는 실적발전량 보다 약 10.4 % 향상된 결과이다.

Fig. 2 and Fig. 3은 갈수기와 풍수기에 최적화 모형을 이용하여 저수지를 운영할 경우 목표 운영 수위별 저수위 변화와 실적 저수위를 비교한 것이다. 갈수기의 최적운영 결과와 실적 저수위를 비교해 보면 목표운영 수위별 저수위와 실적 저수위 간에 큰 차이를 나타내지 않는다. 이는 이 기간 동안 유입량이 작아 발전 가능 저수위 보다 낮은 저수위가 발생하여 발전방류가 없는 기간이 생겼기 때문이다. 이와 달리 풍수기의 최적 운영

Table 3. Comparison of operation results observed and simulated in wet period (1996~1998)

Operation results		Target water level(m)			
		188.68	191.50	194.00	196.50
Hydroproduct (GWh)	Sim.	424.54	409.06	380.73	361.92
	Obs.	370.41	370.41	370.41	370.41
	RE (%)	14.61	10.43	2.79	-2.29
Total release (10 ⁶ m ³)	Sim.	1,831.33	1,810.97	1,792.51	1,768.61
	Obs.	1,783.36	1,783.36	1,783.36	1,783.36
	RE (%)	2.69	1.55	0.51	-0.83

Table 4. Comparison of operation results observed and simulated in normal period (1999~2001)

Operation results		Target water level(m)			
		188.68	191.50	194.00	196.50
Hydroproduct (GWh)	Sim.	412.01	434.00	435.00	419.32
	Obs.	394.14	394.14	394.14	394.14
	RE (%)	4.53	10.11	10.37	6.39
Total release (10 ⁶ m ³)	Sim.	1,783.14	1,757.23	1,713.05	1,669.62
	Obs.	1,676.75	1,676.75	1,676.75	1,676.75
	RE (%)	6.35	4.80	2.16	-0.43

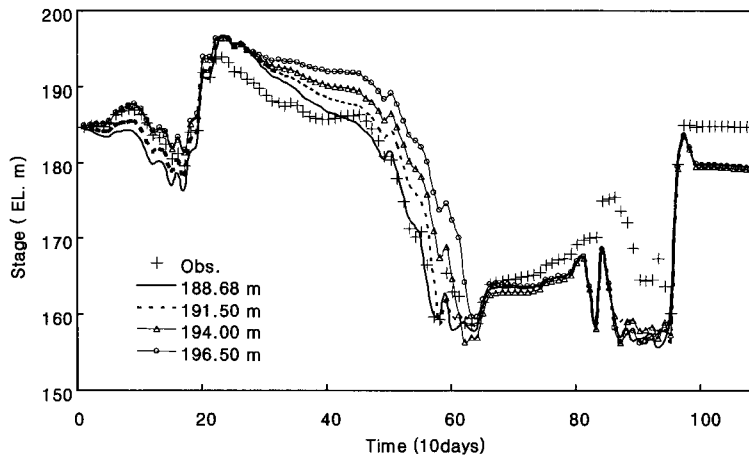


Fig. 2. Observed and simulated storage level in dry period

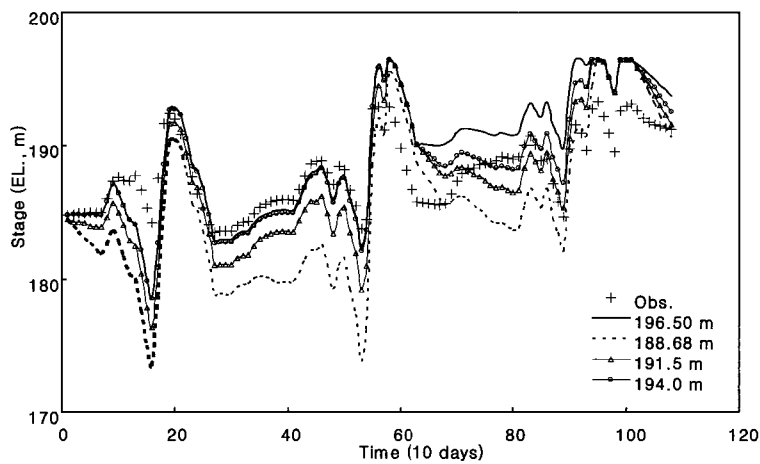


Fig. 3. Observed and simulated storage level in wet period

저수위는 목표 운영 수위별로 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 발전가능 저수위 이하로 저수위가 하강하는 경우가 없어서 목표 운영저수위가 낮을수록 더 많은 발전방류를 하기 때문이다. 목표 운영 저수위별 저수위를 비교해 보면, 목표 운영 저수위가 188.68 m인 경우 가장 낮은 궤적을 보였으며, 목표 운영 저수위가 194.00 m 인 경우 실측 저수위와 비슷한 경향을 나타냈다.

Fig. 4는 대상 기간별 최적 발전량을 실적 발전량과 비교한 것이다. 갈수기의 발전량은 목표 저수량별로 실적 발전량에 비해서 -5.94~3.98 %의 향상된 결과를 나타냈다. 풍수기의 발전량은 목표 저수량별로 실적발전량에 비해서 -2.29~14.61 %의 향상된 결과를 나타냈다. 평수기의 발전량은 목표 저수량별로 실적발전량에 비해서 4.53~10.37 %의 향상된 결과를 나타냈다. 각 기간별 발전량을 비교해 보면 풍수기에 실적 발전량 보다 가장 크게 향상된 결과를 나타냈으며, 갈수기에 가장 작은 향상결과를 나타냈다. 또한, 목표 운영 수위를 191.5 m로 할 경우 기간에 관계없이 실적 발전량 보다

향상된 결과를 나타냈다.

4. 하류 방류량별 용수 공급능력 평가

섬진강댐의 설계시 운영수위는 상시만수위인 EL. 196.50 m로 계획되었으나 섬진강댐 상류유역의 수물문제 때문에 EL. 191.50 m 이상으로 수위를 상승하여 운영하기 어려운 실정이다. 그러나, 운영수위를 상시만수위인 196.50 m로 상향조정할 경우 농업용수 공급 및 섬진강 광역상수도의 생·공용수를 공급하고 추가적인 용수를 하류로 공급할 수 있어 섬진강댐의 운영수위 상승의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 댐 하류로 추가적인 용수를 공급할 경우 기존 공급량에 영향을 미치지 않는 운영방법에 대하여 고찰하였다.

4.1 댐운영실적

댐 하류 방류량에 따른 최적운영 결과와 과거자료를 비교하기 위하여 섬진강댐의 수문 및 운영 자료를 분석하였다. 과거 발전방류량은 39.22~660.44 백만 m³의 범

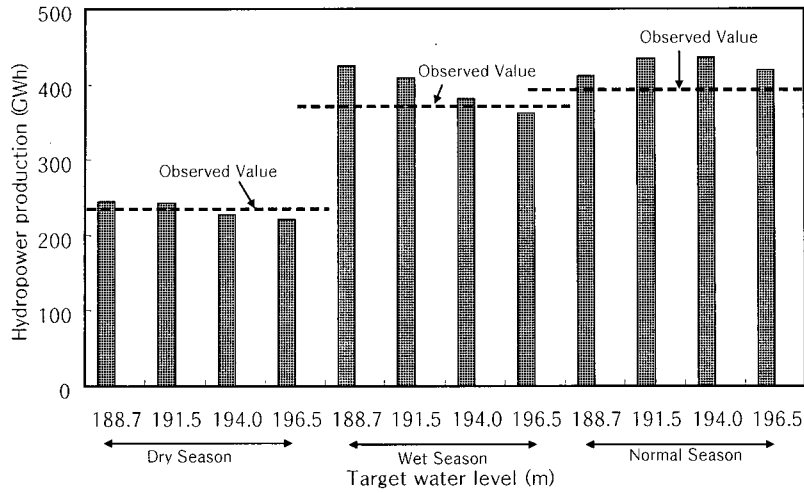


Fig. 4. Observed and simulated hydropower product varying hydrologic condition and target water level

위를 나타내며, 평균 발전방류량은 364.35 백만 m^3 이다. 발전량은 11.23~162.93 GWh의 범위를 나타내며, 평균 발전량은 109.90 GWh이다. 운암수개를 통한 방류량은 7.54~201.10 백만 m^3 의 범위를 나타내며, 평균방류량은 81.68 백만 m^3 이었으며, 댐하류 방류량은 0.35~ 22.08 백만 m^3 의 범위를 나타내며, 평균 공급량은 5.34 백만 m^3 이었다. 총방류량은 131.60~889.95 백만 m^3 의 범위를 나타내며, 총방류량의 평균은 505.06 백만 m^3 이었다.

4.2 댐 공급능력 평가

본 연구에서는 섬진강댐을 단독으로 최적 운영할 경

우 실측유입량 자료가 있는 1982년~2001년에 대하여 댐의 공급능력을 평가하였다. 이를 위하여 동진강 수계로 방류되는 농업용수는 관계지구의 필요수량을 고려한 모의결과를 사용하였으며, 섬진강광역상수도 용수는 75,000 m^3 /일가 공급되는 것으로 하였으며, 댐하류 방류량은 0.17, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 3.0 m^3 /sec로 5가지로 구분하였다.

Fig. 5는 섬진강댐의 하류 방류량에 따른 최적 농업용수 방류량과 실적 평균 농업용수 방류량을 비교한 것이다. 섬진강댐의 하류 방류량 증가에 따른 농업용수 방류량을 비교해보면 하류 방류량을 1.0 CMS 이하, 목

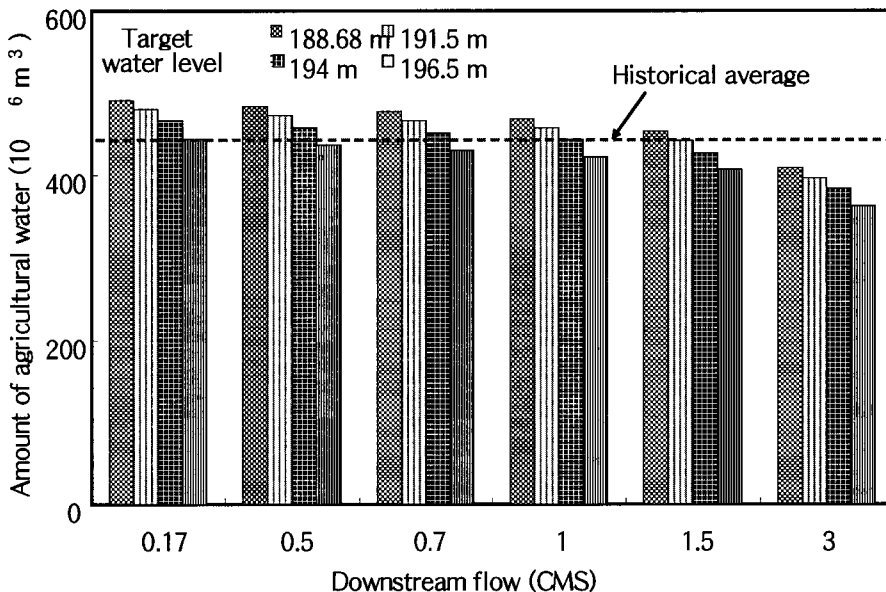


Fig. 5. Agricultural water observed and simulated varying downstream flow and target water level

표 저수위를 194.0 m 이하로 할 경우에 실적 평균 방류량을 446.03 백만 m³를 -0.7~10.3 %정도 상회하는 결과를 나타냈다. 또한, 하류 방류량을 1.5 CMS 이상으로 할 경우에는 실적 평균 방류량의 -18.6~1.6 % 정도 증가한 결과를 나타냈다.

Fig. 6은 섬진강댐의 하류 방류량에 따른 최적 발전량을 실적 평균 발전량과 비교한 것이다. 섬진강댐의 하류 방류량 증가에 따른 발전량을 비교해보면 하류 방류량을 0.7 CMS 이하, 목표 저수위를 194.0 m 이하로 할 경우에는 실적 평균 발전량인 109.9 GWh를 0.4~4.8 % 정도 상회하는 결과를 나타냈다. 하류 방류량을 1.0 CMS 이상으로 할 경우에는 실적 평균 발전량 보다 0.5

~21.9 % 정도 감소한 결과를 나타냈다.

Table 5는 하류 방류량과 목표 운영 저수위별 운영 결과를 나타낸 것이다. 발전량을 기준으로 할 경우 하류방류량을 0.70 CMS 이하, 목표 운영 저수위를 194.00 m로 할 경우, 실적 발전량과 비슷하거나 증가된 결과를 나타냈다. 또한, 농업용수 공급량을 기준으로 할 경우, 하류 방류량을 1.0 CMS 이하, 목표 운영 저수위를 191.50 m로 할 경우, 실적 공급량과 비슷하거나 증가된 결과를 나타냈다. Table 5에 나타난 결과를 종합해 보면, 발전량과 용수 공급량을 모두 만족시키는 운영 방법은 하류 방류량을 0.70 CMS 이하, 목표 저수위를 194.0 m 이하로 하는 것임을 알 수 있다.

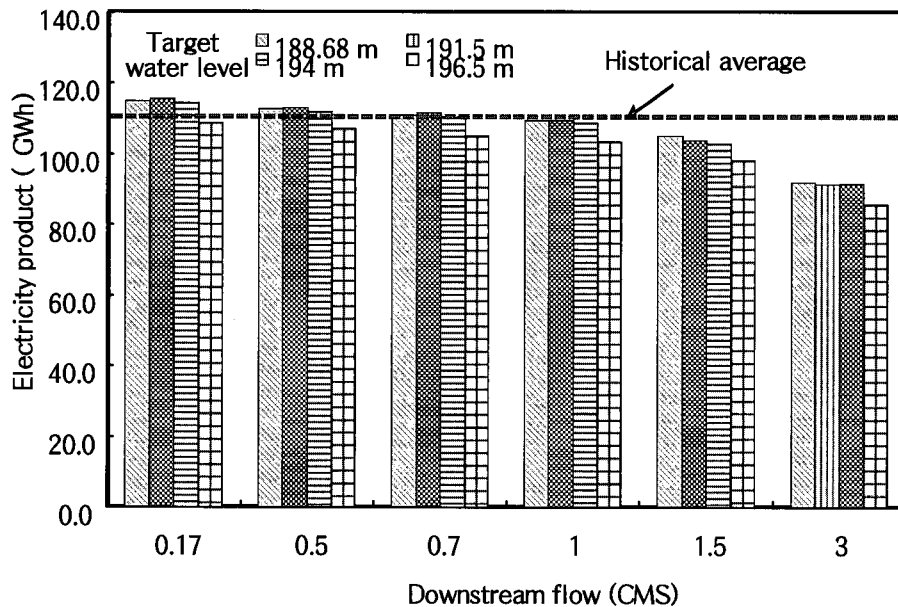


Fig. 6. Hydropower product observed and simulated varying downstream flow and target water level

Table 5. Comparison of operation results observed and simulated varying downstream flow and target water level (%)

Downstream flow (CMS)	Operation results	Target water level (m)			
		188.68	191.50	194.00	196.50
0.17	Hydroproduct (GWh)	104.8	105.1	104.1	99.2
	Agricultural water (10 ⁶ m ³)	110.3	107.7	104.5	99.7
0.50	Hydroproduct (GWh)	102.6	102.7	101.8	97.4
	Agricultural water (10 ⁶ m ³)	108.4	105.9	102.8	97.9
0.70	Hydroproduct (GWh)	100.8	101.5	100.5	95.5
	Agricultural water (10 ⁶ m ³)	107.2	104.5	101.2	96.5
1.00	Hydroproduct (GWh)	99.5	99.5	99.0	94.1
	Agricultural water (10 ⁶ m ³)	105.1	102.4	99.3	94.5
1.50	Hydroproduct (GWh)	95.5	94.5	93.6	89.4
	Agricultural water (10 ⁶ m ³)	101.6	99.0	95.6	91.1
3.00	Hydroproduct (GWh)	83.8	83.1	83.3	78.1
	Agricultural water (10 ⁶ m ³)	91.8	89.0	86.0	81.4

5. 요약 및 결론

기존 수자원 시스템에 새로운 수요가 발생하면 수요 관리나 운영방법의 변화를 통하여 수자원 이용의 효율성을 높이거나, 구조적이거나 비구조적 방법을 이용하여 수자원을 확보해야 한다. 그러나 기존 수자원 시스템은 건설 당시 각각의 목적을 바탕으로 설계되고, 운영되어 왔으므로 과거와 동일한 운영 방법으로는 새로운 용수 수요를 충족시키기 어렵다. 따라서 최적 운영이나 연계 운영과 같은 기존 시스템을 최대한 활용하는 방안을 고려해야 하며, 이러한 방법을 통하여 확보할 수 있는 수자원량을 정량화해야 한다. 본 연구에서는 저수지의 공급능력을 평가할 수 있는 모의-최적화 모형을 개발하였다. 개발된 모형에서는 용수배분의 최적화를 위해서 전역 최적해 탐색법의 하나인 SCE-UA법과 다중 목적함수를 사용하였다. 모형의 적용성은 섬진강댐 운영에 개발된 모형을 적용하여 평가하였다. 모형의 적용기간은 유입량을 고려하여 풍수기, 평수기, 갈수기로 구분하였다. 풍수기에는 목표 운영수위별로 발전량이 실측발전량 보다 -2.29~14.61 %, 갈수기에는 실측발전량 보다 -5.94~3.98 % 증가된 결과를 나타냈다. 평수기에는 실측발전량 보다 -0.43~6.35 % 증가된 결과를 나타냈다. 본 모형을 증가된 용수 수요에 대한 댐의 공급능력 평가를 실시하여 공급 가능량과 이에 따른 운영방법을 제안하였다. 섬진강댐의 하류 용수 증가에 따른 용수공급 가능량을 산정하기 위하여 댐하류 방류량을 0.17, 0.50, 0.70, 1.0, 1.5, 3.0 m³/sec로 구분하여 최적 운영 결과를 비교하였다. 하류 방류량을 0.70 m³/sec 이하, 목표 운영 수위를 194.0 m 이하로 할 경우 실적 운영 결과 보다 발전량은 0.8~5.1 %, 농업용수 공급량은 1.2~10.3 % 향상된 결과를 나타냈다.

참 고 문 헌

장민구, 박승우, 임상준, 김현준 (2002). 전역최적화 기법을 이용한 강우-유출모형의 매개변수 자동 보정, **한국수자원학회논문집**, 32(5), pp. 541-552.
건설교통부, 한국수자원공사 (2000). **수자원장기종합계획 Water Vision 2020**.
고익환, 박명기, 김정엽 (2004). **이수관리를 위한 저수지 시스템 모의운영 모형 개발, 2003년 분과위원회 연구과업 보고서**, 한국수자원학회, pp. 55-92.

국토개발연구원 (2001). **환경친화적 국토발전을 위한 전략 연구**.
김병진, 박승우 (1994). 기상예보를 고려한 관개용 저수지의 최적 조작모형(III), **한국농공학회지**, 36(3), pp. 47-59.
김현영, 박승우 (1988). 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의(III), **한국농공학회지**, 30(3), pp. 95-105.
농림부 (1999). **농업·농촌용수 종합이용계획(농촌용수 이용합리화계획)**.
윤용남, 김중훈, 김태균 (1995). 최적화모형을 이용한 수자원의 적정배분, **대한토목학회논문집**, 15(4), pp. 855-864.
이재용, 송재우 (2002). 최적화기법과 모의기법을 이용한 다목적댐의 용수공급능력 평가, **대한토목학회논문집**, 22(6-B), pp. 101-109.
장창삼, 허준행, 이재용 (2001). 팔당댐 저수위변경에 따른 한강수계 저수지군의 최적연계 운영, **대한토목학회논문집**, 21(2-B), pp. 811-818.
Duan Q., Sorooshian S., and Gupta V.K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, 158, pp. 265-284.
Gan T.Y. and Biftu G.F. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *Water Resources Research*, 32(12), pp. 3513-3524.
Dandy G.C., Connarty M.C., and Loucks D.P. (1997). Comparison of methods for yield assessment of multiple reservoir systems, *Journal of Water resources planning and management*, 123(6), pp. 350-358.
Wurbs, R.A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4), pp. 455-472.
Yeh W. W-G. (1985). Reservoir management and operation models: A state-of-art review, *Water Resources Research*, 21(12), pp. 1797-1818.
(논문번호:05-61/접수:2005.04.21/심사완료:2005.09.27)