

다목적댐의 연계운영을 위한 최적 운영률 개발

Development of Optimal Operation Rule for Multipurpose Reservoirs System

이재응*

Yi, Jaeung

Abstract

Adding important new projects such as reservoirs which regulate a river discharge to a river system, existing operation methods should be changed considering these conditions. Since an original operation rule used for an existing system has been designed to be compatible to inputs and outputs of the existing system, the operation rule should be changed to consider the new projects. In this study, the technique of constructing new operation rules considering objectives of both old and new projects is suggested when new project is added to the river system. Reservoir operation rule using both stochastic inflow and optimization technique is developed. As a result of applying the technique to Geum river basin, the efficiency of the technique is verified.

Keywords : operation rule, river system, reservoirs operation, optimization technique

요 지

하천을 구성하는 수공시스템의 구성요소 중에서 댐과 같이 하천유량 조절에 중요한 역할을 하는 시설이 신규건설을 통해 시스템에 추가되면, 기존 시스템의 운영방식은 이를 고려하여 변화되어야 된다. 기존댐에서 사용되던 운영률은 기왕의 시스템의 입력과 출력에 적합하도록 설계되었으므로, 신규댐이 하천에 추가되면 운영률 또한 이를 고려하여 변화되어야 한다. 본 연구에서는 하천에 신규댐 건설로 인하여 기존댐 운영률의 변화가 필요할 때, 기존댐과 신규댐의 운영목적들을 동시에 고려하여 새로운 운영률을 작성하기 위한 기법을 제시하였다. 이를 위하여 추계학적 기법을 통해 발생된 유입량과 최적기법을 사용한 댐 연계운영을 실시하여 저수지 운영률을 개발하였다. 본 연구에서 제안된 기법의 검증을 위해 금강유역을 선정해 적용한 결과 새로운 운영률의 적합성을 확인하였다.

핵심용어 : 운영률, 하천 시스템, 저수지 운영, 최적화 기법

1. 서 론

신규 저수지의 건설이 어려워짐에 따라 기존 저수지의 운영 효율화에 더 큰 관심이 집중되고 있다. 한정된 수자원을 효율적으로 이용한다는 측면에서 공급과 수요 사이에서 발생하는 갈등을 최소화하기 위해 공학적 기법을 사용할 수 있다. 이수과 치수라는 다목적 저수지

의 두 가지 주요 목적은 사실 상호 대립하는 개념으로, 이를 모두 만족시키는 저수지 운영은 쉬운 일이 아니다. 저수지 운영률이란 불확실한 저수지 유입량을 고려하여 저수지의 이수, 치수뿐만 아니라 친수 목적까지 최대한 만족시킬 수 있도록 공학적 기법을 사용하여 미리 수립하여 놓은 운영규칙으로, 저수지 운영의 기준이 되는 지침이다. 기존의 저수지가 위치한 하천에 신규

* 아주대학교 공과대학 건설시스템공학과 부교수
Associate Prof., Dep. of Const., Ajou Univ., Suwon 442-749, Korea
(E-mail : jeyi@madang.ajou.ac.kr)

저수지가 추가로 건설되어 운영되면 유역의 수문, 수자원 상황이 대폭 변화하게 되므로, 기존의 저수지에서 사용하던 운영률은 더 이상 사용할 수 없게 된다. 변화된 수문, 수자원 상황을 반영하여 신규 저수지뿐만 아니라 기존의 저수지도 신규 운영률을 작성해야 한다. 본 연구에서는 하천에 신규댐 건설로 인하여 기존댐 운영률의 변화가 필요할 때, 기존댐과 신규댐의 운영 목적을 동시에 고려하여 새로운 운영률을 작성하기 위한 기법을 제시하였다.

오랫동안 저수지 운영률을 개발하기 위하여 많은 연구들이 수행되어 왔다. 이러한 연구들에서는 대개 최적화 기법이 많이 사용되었는데, 선형계획법, 비선형계획법, 동적계획법 등과 같이 사용된 최적화 기법의 종류, 또는 유량을 확정론적으로 취급할 것인지, 추계학적으로 취급할 것인지, 또는 운영률의 형태가 표, 그림, 또는 공식의 형태로 나타나는지 등에 따라 주로 분류되어 왔다. Yakowitz(1982), Yeh(1985) 등은 저수지 운영에 사용되는 각종 최적화기법들을 형태별로 상세히 분류하였다. 일반적으로 두 가지 기법이 저수지 운영률을 작성하기 위해 주로 사용되어 왔다. 첫 번째는 양해 추계학적 최적기법(Tejada-Guibert et al., 1993; Loucks et al. 1981)이고, 두 번째는 음해 추계학적 최적기법(Jettmar and Young, 1975)이다. 양해 추계학적 기법은 추계학적 요소인 유입량 시계열을 이산화된 천이확률로 처리하는 기법이고, 음해 추계학적 최적기법은 추계학적 기법을 통해 장기 수문자료를 획득하여 최적모형에 사용한 결과를 통계 분석하여 운영률을 도출하는 기법이다. 또한 Little(1955)은 변수계산법에 기초한 추계학적 동적계획법을 제안했다. 추계학적 동적계획법을 이용한 저수지 운영률 결정의 실제 적용 예를 살펴보면 우리나라의 경우 과거의 유입량 자료와 모의발생된 유입량 자료를 토대로 확률수준에 따른 최적 저수위구간을 양해 추계학적 동적계획법으로 산정하고 이때 회귀분석을 통하여 유도된 식을 월별 저수지 운영률로 제시한 연구가 있다(고석구 등, 1997). 또한 이재응 등(2001)은 선형결정규칙과 양해 추계학적 동적계획법을 이용하여 저수지의 용량을 결정하고 운영률을 제시하였다.

2. 기본이론

저수지 운영은 유역내에 발생한 강우로부터 유입되는 유입량과 저수지로부터의 방류량 결정에 의해 좌우된다. 이들 중 유입량의 주요 요소인 강우는 예측이 어렵고 제어가 불가능한 추계학적 요소이므로, 이에 의해 결정되는 저수지의 운영 또한 추계학적 특성이 포함될 수밖에 없다. 효율적인 저수지 운영을 통해 최대의 편

익을 얻기 위해서는 유입량의 특성을 분석, 예측하여 이를 이용한 저수지의 운영방안을 제시하고 이용함으로써 잠재적인 편익의 기대치를 최대화해야 한다. 본 연구에서는 추계학적 모의발생기법과 음해 추계학적 최적기법을 사용한 결과를 이용하여 운영률을 개발하였다.

2.1 유량 자료 발생

저수지의 운영률을 개발하기 위해서 장기간의 유입량 자료가 필요하다. 유량의 최대 혹은 최소의 극한치로 나타나는 극심한 홍수나 가뭄시의 저수지 운영을 분석하기 위한 저수지 유입량 자료가 부족할 경우, 해당 유역의 특성과 지점별 유입량 자료의 통계적 특성을 반영할 수 있는 시계열 자료의 추가적 발생이 필요하다.

시계열 모형에는 여러 가지 모형이 있지만 본 연구에서는 식의 형태가 간단하면서도 우리나라에서 유량자료의 발생을 위해 널리 사용되고 있는 AR(1) 모형을 사용하여 추가 시계열 자료들을 발생시켰다. 주기성을 갖는 다변량 시계열 모형의 기본방정식은 식 (1)과 같은 형태를 가지고 있다.

$$y_{v,\tau}^{(i)} = \mu_{\tau}^{(i)} + \sigma_{\tau}^{(i)} \cdot z_{v,\tau}^{(i)} \quad (1)$$

여기서 $y_{v,\tau}^{(i)}$ 는 간격 τ 의 주기성을 가지고 있는 정규화된 원 자료이고, (v : 해당년도, i : 지점) μ 와 σ 는 각각 정규화된 원 자료의 평균과 표준편차를 나타낸다. 위의 식을 행렬식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} Y_{v,\tau} &= \underline{\mu}_{\tau} + \underline{\sigma}_{\tau} \cdot Z_{v,\tau} \\ Z_{v,\tau} &= A_1 \cdot Z_{v,\tau-1} + B_{\tau} \cdot \underline{\varepsilon}_{v,\tau} \end{aligned} \quad (2)$$

N년 동안의 연간 수문자료 x_1, x_2, \dots, x_N 과 정규화된 자료 y_1, y_2, \dots, y_N 을 사용하여 매개변수(μ, σ^2, A_1, B , 등)를 추정한다. 매개변수의 추정방법으로는 모멘트법과 최우추정법 등이 있으며 모멘트법에 의한 결과가 상대적으로 우월한 것으로 보고되고 있다. 모멘트법에 의해 추정된 매개변수는 다음과 같다.

$$\mu_{\tau}^{(i)} = (1/N) \sum_{j=1}^N y_{v,\tau}^{(i)}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau}^{(i)} &= \left((1/N-1) \sum_{j=1}^N [y_{v,\tau}^{(i)} - \mu_{\tau}^{(i)}]^2 \right)^{0.5} \\ &, \quad i=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

AR 모형의 매개변수들이 결정되고 난 후, 적합도 검정을 통해 모형의 적합성이 인정되면 합성자료를 발생시키거나 미지의 값들을 예측할 수 있다.

$$y_{v,\tau} = \mu + Z_{v,\tau}$$

$$Z_{v,\tau} = A_1 \cdot Z_{\tau-1} + B \cdot \varepsilon_t \quad (5)$$

합성 자료의 발생은 추정된 매개변수를 식 (5)에 대입하고 역전환을 통해 구할 수 있다. 즉, 발생된 모형은 식 (6)과 같은 형태로 나타난다.

$$x_{v,\tau}^i = g_{\tau}^{-1(i)}(y_{v,\tau}^i), \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

N년 동안의 합성자료를 발생시키기 위해서 표준정규 난수를 발생시켜야 한다. 식(5)의 두 번째 식에서 $Z_{1,1} \dots Z_{1,1}^n$ 을 결정하며 이때 $Z_{1,0} \dots Z_{1,0}^n$ 은 0으로 가정한다. 이와 같은 방법으로 계열 $Z_{1,1} \dots Z_{n,n}^n$ 까지를 결정하게 되며, 이를 원하는 발생 년도 기간으로 나타내기 위해 처음의 값들을 소거하는 과정을 거치게 된다. 최종적으로 식(5)와 (6)에서 제시한 방법과 동일한 역전환 과정을 거쳐 새로운 장기 시계열 자료를 발생시키게 된다.

2.2 최적화 기법

본 연구에서는 앞에서 발생된 유량자료를 기본으로 동적계획법(DP: Dynamic Programming)을 사용하여 최적 저수지 운영을 실시하였다. 동적계획법은 다단계적으로 발생하는 의사결정 문제의 해결에 큰 장점을 가지고 있으므로 저수지 운영 문제에 널리 사용되고 있다. 특히 본 연구에서는 다차원 문제를 풀기 위하여 증분동적계획법 (IDP: Incremental Dynamic Programming)을 사용하였다. 증분동적계획법은 보다 향상된 목적값을 향해 궤적을 변화시키면서 반복계산을 통해 최적값을 찾아가는 동적계획법의 한 종류이다. 이 방법은 전영역 최적해(global optimum)로의 수렴을 보장할 수 없으나 초기궤적이나 제약조건의 조정을 통해 국부최적해(local optimum)로의 수렴을 최소화 할 수 있다.

다목적법들의 연계운영으로 인한 용수공급 효율의 변화를 검토하기 위하여 다음과 같은 연계운영 모형을 구성하였다. 목적함수는 용수공급량의 과잉 및 부족을 최소화하고 그와 상충되는 요소인 발전량은 최대화하는 방향으로 최적화될 수 있도록 구성하였다. 이와 관련된 후진형 순환방정식(backward DP recursive equation)은 식 (7)에, 목적함수와 제약조건들은 식 (8) - (16)에

제시하였다.

$$F_i(S_{1,i}, S_{2,i}) = \min$$

$$[f_i(S_{1,i}, S_{2,i}, S_{1,i+1}, S_{2,i+1}, U_{1,i}, U_{2,i}) + F_{i+1}(S_{1,i+1}, S_{2,i+1})] \quad (7)$$

여기서 F_i 는 월 i 에서의 return 함수, $S_{1,i}$ 는 상류댐의 i 월 저류량, $U_{1,i}$ 는 상류댐의 i 월 방류량, $S_{2,i}$ 는 하류댐의 i 월 저류량, $U_{2,i}$ 는 하류댐의 i 월 방류량이다.

$$MIN F = \sum_{i=1}^T$$

$$\{W_1|U_{1,i} - D_{1,i}| + W_2|U_{2,i} - D_{2,i}| - W_3(E_{1,i} + E_{2,i})\} \quad (8)$$

여기서, F 는 목적함수, $D_{1,i}$ 는 상류댐의 용수수요, $D_{2,i}$ 는 하류댐의 용수수요, $E_{1,i}$ 는 상류댐의 발전량, $E_{2,i}$ 는 하류댐의 발전량으로 각각 식 (9), (10)으로 나타낼 수 있다. W_1, W_2, W_3 는 가중치, T 는 총 운영기간을 나타낸다.

$$E_{1,i} = \rho g U_{1,i} h_{1,i} \eta_1 t_1 \quad (9)$$

$$E_{2,i} = \rho g U_{2,i} h_{2,i} \eta_2 t_2 \quad (10)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, $h_{1,i}, h_{2,i}$ 는 상, 하류 저수지 상, 하의 순낙차로 저수지의 저류량으로부터 구할 수 있다. η_1, η_2 는 상, 하류 발전소의 효율, t_1, t_2 는 상, 하류 발전소의 총 발전시간을 나타낸다.

상태방정식은 각 댐별 유입량과 저수지내 도수량을 포함하는 형태로 구성하며 하천유지를 위한 댐하류 방류량도 고려하도록 구성하였다. 댐의 연계운영시 상류댐과 하류댐 사이의 측방유입량은 하류댐으로 유입되는 것으로 고려하였다.

$$S_{1,i+1} = S_{1,i} + I_{1,i} - U_{1,i} - EV_{1,i} - DD_{1,i} \quad (11)$$

$$S_{2,i+1} = S_{2,i} + U_{1,i} + I_{2,i} - U_{2,i} - EV_{2,i} - DD_{2,i} \quad (12)$$

여기서, $I_{1,i}$ 는 상류댐의 유입량, $EV_{1,i}$ 는 상류댐의 증발량, $I_{2,i}$ 는 상류댐과 하류댐 사이의 측방유입량, $EV_{2,i}$ 는 하류댐의 증발량을 나타낸다. $DD_{1,i}, DD_{2,i}$ 는 각각 상, 하류 댐내 취수 혹은 도수량으로 상수로 고

려하였다.

또한 다음과 같은 저류량, 방류량 제약조건이 사용되었다.

$$S_{1,i} \min \leq S_{1,i} \leq S_{1,i} \max \quad (13)$$

$$S_{2,i} \min \leq S_{2,i} \leq S_{2,i} \max \quad (14)$$

$$U_{1,i} \min \leq U_{1,i} \leq U_{1,i} \max \quad (15)$$

$$U_{2,i} \min \leq U_{2,i} \leq U_{2,i} \max \quad (16)$$

3. 최적화 모형 적용

3.1 시범유역 선정

본 연구의 시범유역으로는 금강 유역을 선정하였다. 2001년 용담 다목적댐이 완공되어 금강 유역에는 기존의 대청 다목적댐을 포함하여 두 개의 다목적댐이 위치하게 되었다. 이제 대청 다목적댐 단독으로 유역의 수자원을 관리하던 방안과는 달리 유역 내 두 개의 다목적댐이 위치하게 되어 보다 효율적인 수자원 관리를 위한 두 댐의 연계운영 방안이 필요하다.

즉, 기존의 대청댐 단독운영시에 저수지의 운영방안으로 이용되었던 저수지 운영률은 용담댐이 추가로 상류에 건설됨으로서 용담댐을 고려하여 새로이 구성될 필요가 있다. 상류에 위치하는 용담 다목적댐의 저수지 운영은 하류에 위치하는 대청 다목적댐의 운영에 절대적인 영향을 주게되며 두 댐들의 특성과 목적을 반영하는 용담, 대청댐의 연계 저수지 운영방안을 수립함으로써 수계 내의 한정된 수자원의 효율적 이용과 더불어 최대의 편익을 얻을 수 있을 것이다.

금강유역은 동경 126°41' ~ 128°25', 북위 35°35' ~ 37°05'에 걸쳐 남한의 중앙 북서측에 위치하며 유역면적이 9,835.3km², 본류의 유로연장은 395.9km, 유역평균폭 24.8km, 유역형상계수 0.063인 남한 제3의 유역으로 남한면적의 약 1/10을 차지한다. 지류로는 규모가 큰 초강천, 보청천, 감천, 미호천, 논산천 등을 포함하고 있다. 용담댐과 대청댐을 운영함에 있어 중요하게 고려되는 제어지점으로 지류가 유입되는 지점인 용담댐 하류의 무주, 봉황, 송천, 청성과 대청댐 하류의 회덕, 석화, 정안, 우성, 구룡을 선정하였으며, 중요지점인 대청댐 하류의 공주와 규암을 포함하여 11곳의 중요 지점을 선정하였다. 그리고 보다 편리한 모형구성을 위하여 대청댐 하류의 광역수가 취수되는 지점을 가상 제어지점으로 포함하였다. 용담과 대청댐 사이에 위치하는 무주, 봉황, 송천, 청성 지점들은 지류 유입량 자료들을 최적화모형의 입력자료로 사용하였다. 대청댐 하류에 위치

한 지점들은 최적화 모형에서 직접 사용되지는 않지만, 각각의 하천유지유량을 검토하고, 우성과 구룡 사이의 광역수 취수량을 만족하는지를 검토하기 위한 지점으로 사용되었다.

그림 1은 용담댐과 대청댐을 운영함에 있어 운영조건에 필수적인 금강유역 주요지점을 포함한 시스템 구성도로서 용담댐 지점으로부터 대청댐 하류 주요지점중의 하나인 규암 지점까지를 포괄하는 금강유역 모형을 모식화한 것이다.

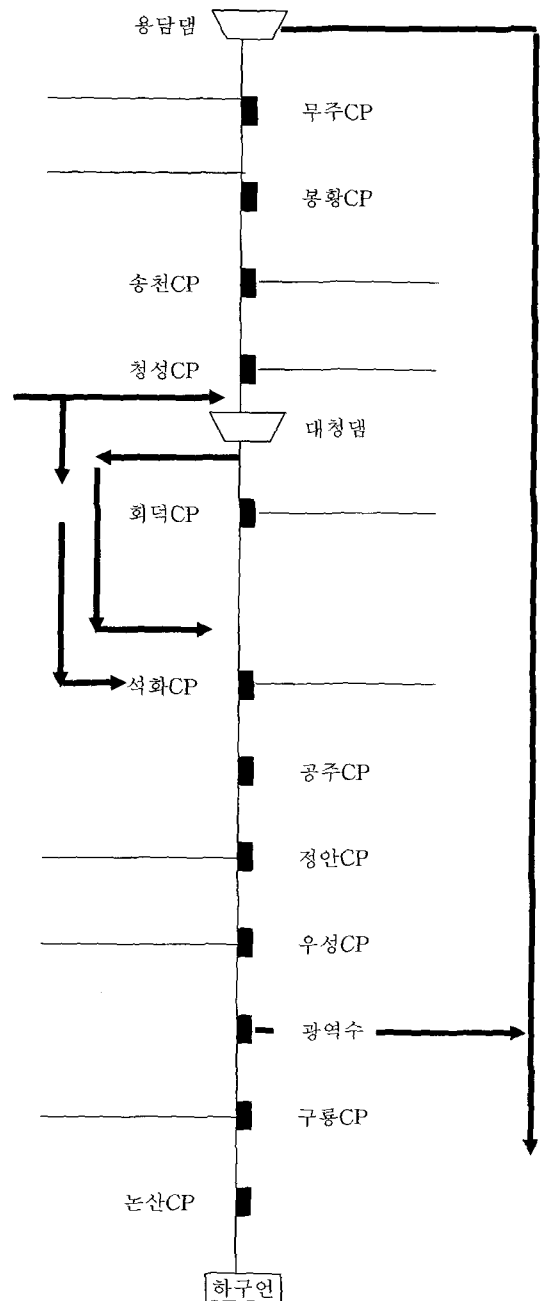


그림 1. 금강 유역 시스템 모식도

3.2 대청댐 지점 유입량 자료 발생

용담, 대청 다목적댐의 연계 운영을 개발을 위해 필요한 금강유역의 유역특성 자료로는 각 수위표 지점의 수위자료가 있으며 각 지점 별로 1963년부터 1997년까지 35년간의 자료를 사용하였다. 저수지의 운영률을 개발하기 위해서는 장기간의 유입량 자료가 필요한데, 35년이라는 짧은 기간의 자료로는 유입량의 최대 혹은 최소의 극한치로 나타나는 극심한 홍수나 가뭄을 분석하기 위한 자료로서의 이용이 어렵다. 따라서 해당 유역의 특성과 지점별 유입량 자료의 통계적 특성을 반영할 수 있는 시계열 자료를 2.1절에 제시한 AR(1)모형을 사용하여 추가적으로 발생시켰다.

금강유역에 구성된 12개소의 주요 지점 중 새로운 장기 시계열 자료의 발생이 필요한 대청댐 상류의 5개 지점과 대청댐 하류로 들어오는 유입량을 하나로 통합한 1개 지점을 포함한 6개 지점을 설정하고 35년간의

관측자료를 기준으로 150년간의 장기 시계열 자료를 다변량 AR(1)모형을 사용하여 발생시켰다.

3.3 저수지 최적 연계운영

금강수계내의 기존 다목적댐인 대청댐의 용수공급계획은 연간 1,649백만 m^3 이며 표 1에 월별, 수요별 용수공급계획을 제시하였다. 생·공용수는 연중 일정량을 방류하고 농업용수는 4월부터 9월까지의 농번기에 편중되어 공급되도록 계획되어 있다. 생·공용수 공급 계획 중 저수지내 취수량은 20.9 m^3/sec , 댐 하류로의 방류량은 20.3 m^3/sec 로 연중 일정하고 이에 농업용수의 월간 공급계획량을 합하여 매일 공급계획량을 산정한다. 용담댐의 용수공급은 목표년도 2021년을 기준으로 전주권으로 월평균 15.63 m^3/sec 의 생·공용수를 탄력적으로 공급하고, 하류로는 최소한 5 m^3/sec 를 방류하도록 계획되어 있다.

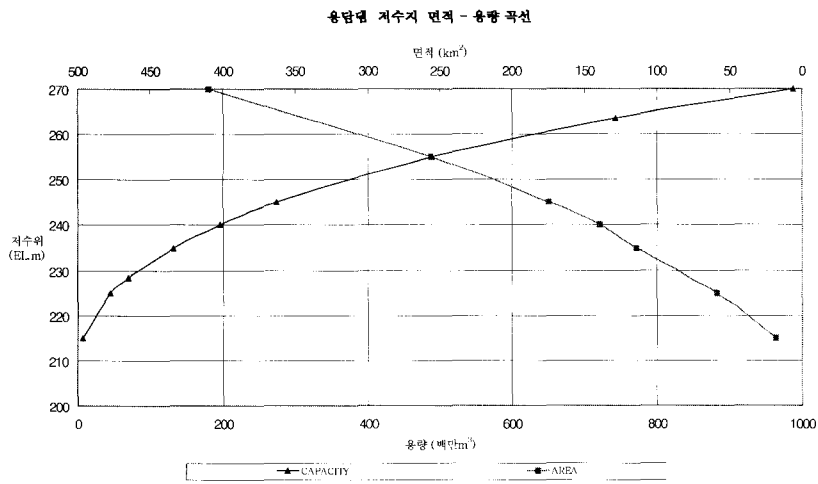


그림 2. 용담댐의 수위-저류량-면적 관계곡선

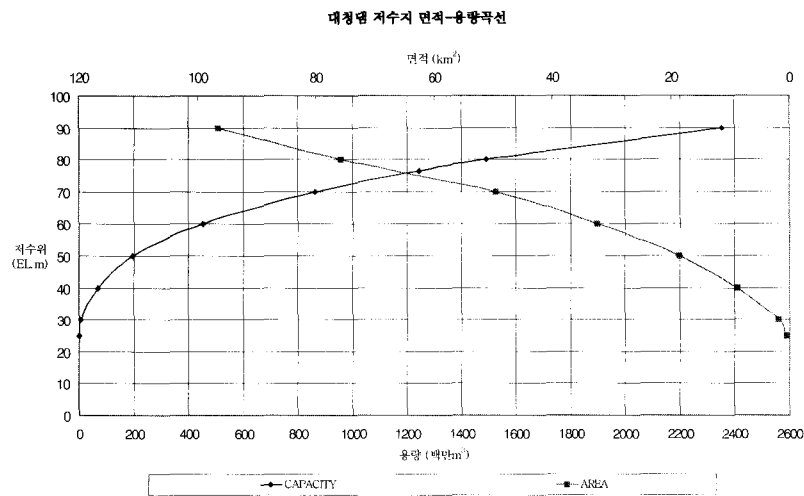


그림 3. 대청댐의 수위-저류량-면적 관계곡선

표 1. 대청댐 월별 용수공급 계획

연월	구분	대청댐			계
		저수지용수	댐하류용수	하천유지용수	
1월	저수지내	20.9	0.0	0.0	20.9
	댐 하류	20.3	0.0	0.0	20.3
	계	41.2	0.0	0.0	41.2
2월	저수지내	20.9	0.0	0.0	20.9
	댐 하류	20.3	0.0	0.0	20.3
	계	41.2	0.0	0.0	41.2
3월	저수지내	20.9	0.0	0.0	20.9
	댐 하류	20.3	0.0	0.0	20.3
	계	41.2	0.0	0.0	41.2
4월	저수지내	20.9	0.2	0.0	21.1
	댐 하류	20.3	0.9	0.0	21.2
	계	41.2	1.1	0.0	42.3
5월	저수지내	20.9	0.9	0.0	21.8
	댐 하류	20.3	3.9	0.0	24.2
	계	41.2	4.8	0.0	46.0
6월	저수지내	20.9	9.5	0.0	30.4
	댐 하류	20.3	38.1	0.0	58.4
	계	41.2	47.6	0.0	88.8
7월	저수지내	20.9	6.1	0.0	27.0
	댐 하류	20.3	24.3	0.0	44.6
	계	41.2	30.4	0.0	71.6
8월	저수지내	20.9	5.3	0.0	26.2
	댐 하류	20.3	21.2	0.0	41.5
	계	41.2	26.5	0.0	67.7
9월	저수지내	20.9	4.5	0.0	25.4
	댐 하류	20.3	18.1	0.0	38.4
	계	41.2	22.6	0.0	63.8
10월	저수지내	20.9	0.0	0.0	20.9
	댐 하류	20.3	0.0	0.0	20.3
	계	41.2	0.0	0.0	41.2
11월	저수지내	20.9	0.0	0.0	20.9
	댐 하류	20.3	0.0	0.0	20.3
	계	41.2	0.0	0.0	41.2
12월	저수지내	20.9	0.0	0.0	20.9
	댐 하류	20.3	0.0	0.0	20.3
	계	41.2	0.0	0.0	41.2
계	저수지내(m ³ /sec) (백만m ³)	20.9 660.0	2.2 70.0	0.0 0.0	23.1 730.0
	댐하류(m ³ /sec) (백만m ³)	20.3 640.0	8.8 279.0	0.0 0.0	29.1 919.0
	총계(m ³ /sec) (백만m ³)	41.2 1,300.0	11.0 349.0	0.0 0.0	52.3 1,649.0

표 2. 용담-대청댐 저류량, 방류량 제약조건

단위 : 백만m³

제약조건	용담댐		대청댐	
	최소값	최대값	최소값	최대값
저류량	68.7	742.6	451.7	1241.7
방류량	13.4	월별변동	월별변동	월별변동

저수지의 수위에 따른 저류량과 표면적의 관계는 일반적으로 다차함수를 사용하여 완만한 곡선형태로 표현하여 사용하고 있다. 이는 모의운영, 최적화 기법 등 저수지 운영기법을 이용할 때 비교적 저수지의 수위-저류량-면적의 관계를 근사적으로 표현할 수 있기 때문이다. 관계곡선으로부터 저수지의 수위를 측정하면 그에 따른 저류량과 표면적의 산출이 가능하고 이는 모의운영에 있어서는 수위별 방류량의 기준, 저류량별 증발량의 산출에 사용되며 최적화모형에 있어서는 발전량 산정시 낙차계산, 증발에 의한 손실량 산정에 사용하게 된다. 그림 2와 그림 3에 각각 용담댐과 대청댐의 수위-저류량-면적 관계곡선을 제시하였다.

금강 유역에 위치한 두 개의 다목적댐, 대청, 용담 다목적댐을 위한 동적계획법은 앞에서 제시한 식 (8) - (16)을 이용하여 구성하였다. 특히, 최적화문제의 제약조건에 사용된 저류량 및 방류량 제약조건은 표 2와 같다.

3.4 저수지 운영률 결정

본 논문에서는 운영률을 결정하기 위하여 다음과 같이 3단계의 과정을 수행하였다. 첫 번째 단계로서 저수지 운영곡선식을 결정하고 운영곡선식을 구성하는 종속변수와 독립변수를 구성하는 인자들간의 상관분석을 실시하였다. 운영곡선식은 아래에 제시된 것과 같은 식의 형태로 구성되며 각 인자들의 상관분석을 통해 가장 우수한 상관성을 갖는 인자를 독립변수로 선택하였다. 본 연구에서는 상대적으로 식의 형태가 간단하고, 매개변수 추정이 용이

한 선형관계식을 저수지 운영곡선식으로 사용하였다. 식 (17)은 대청 다목적댐의 운영곡선식을 나타낸다.

$$S_{\text{대청}, t+1} = a_{\text{대청}, t} X_{\text{대청}, t} + b_{\text{대청}, t} \quad (17)$$

여기서 $S_{\text{대청}, t+1}$ 는 대청댐의 익월 저류량, $X_{\text{대청}, t}$ 는 대청댐 운영곡선식의 독립변수, $a_{\text{대청}, t}$, $b_{\text{대청}, t}$ 는 회귀상수이다.

대청댐 운영곡선식의 독립변수 $X_{\text{대청}, t}$ 로는 다음과 같은 인자들을 고려할 수 있다. 즉, $S_{\text{대청}, t}$, $I_{\text{대청}, t}$, $S_{\text{대청}, t} + I_{\text{대청}, t}$, $S_{\text{대청}, t} + S_{\text{용담}, t} + I_{\text{대청}, t}$, $S_{\text{대청}, t} + S_{\text{용담}, t} + I_{\text{대청}, t} + I_{\text{용담}, t}$ 등을 고려할 수 있다. 독립변수들 중 $S_{\text{대청}, t} + I_{\text{대청}, t}$ 를 각각 용담댐과 대청댐에서의 방류량 결정을 위한 독립변수로 선택할 때의 상관성이 가장 양호했으므로, 이들을 독립변수로 선택하였다. 여기서, $S_{\text{용담}, t}$, $S_{\text{대청}, t}$ 는 각각 금월 용담댐과 대청댐의 저류량이고, $I_{\text{용담}, t}$, $I_{\text{대청}, t}$ 는 각각 금월에 용담댐과 대청댐으로 유입되는 유량을 나타낸다.

두 번째 단계로서 위에서 제시된 운영곡선 회귀식의 매개변수를 결정한다. 이를 위하여 전 절에서 발생시킨 150년간의 자료를 이용한 최적 저수지 연계운영 결과를 사용하여 매개변수를 산정한다.

세 번째 단계로서 위에서 결정된 대청댐의 운영률 곡선을 월별로 도표화하여 월별 목표저류량에 따른 방류량을 결정할 수 있는 지침을 제시한다.

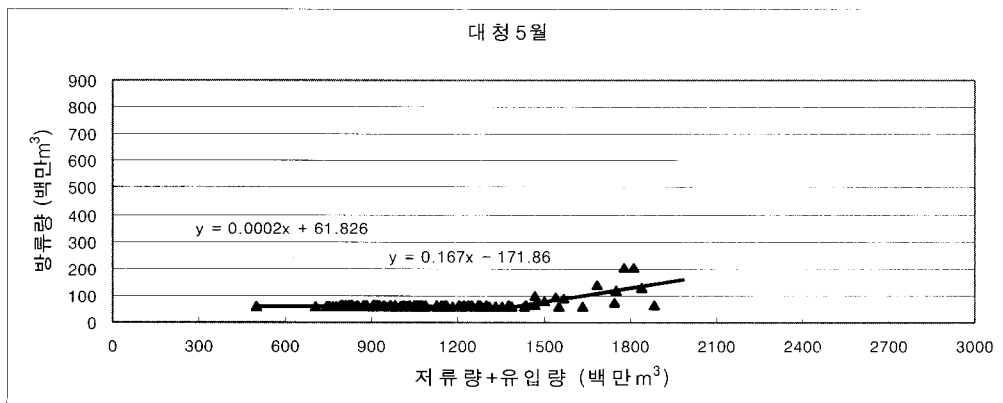


그림 4. 대청댐 5월 저수지 운영률 곡선

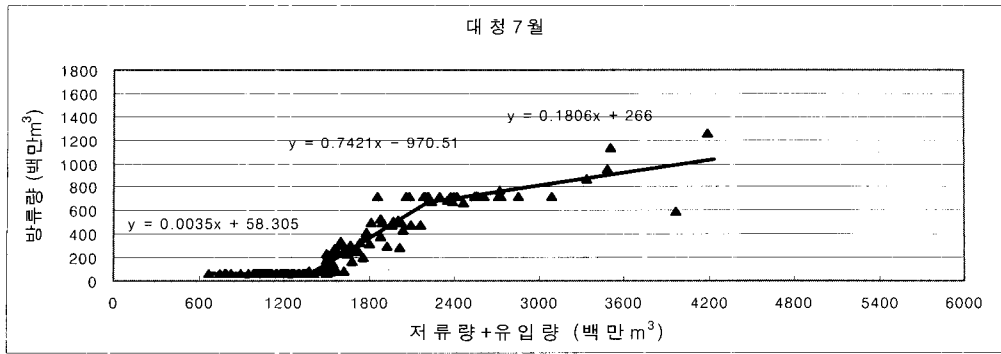


그림 5. 대청댐 7월 저수지 운영률 곡선

표 3. 대청댐 연계운영률

단위 : 백만³

월	운영률	적용범위
1월	$Y=0.0009X + 60.984$	
2월	$Y=0.0017X + 59.864$	
3월	$Y=0.0011X + 60.785$	
4월	$Y=0.0165X + 45.567$	
5월	$Y=0.0002X + 61.826$	$X < 1401.0$
	$Y=0.1670X - 171.86$	$X \geq 1401.0$
6월	$Y=0.0002X + 61.781$	$X < 1557.6$
	$Y=0.5245X - 754.85$	$X \geq 1557.6$
7월	$Y=0.0035X + 58.305$	$X < 1392.9$
	$Y=0.7421X - 970.51$	$X \geq 1392.9$ $X < 2202.2$
	$Y=0.1806X + 266.00$	$X \geq 2202.2$
8월	$Y=0.0029X + 59.108$	$X < 1267.6$
	$Y=0.6567X - 887.88$	$X \geq 1267.6$ $X < 2380.1$
	$Y=0.2959X - 29.147$	$X \geq 2380.1$
9월	$Y=0.0015X + 60.516$	$X < 1349.1$
	$Y=0.6888X - 866.71$	$X \geq 1349.1$ $X < 1881.3$
	$Y=0.4009X - 325.08$	$X \geq 1881.3$
10월	$Y=0.0002X + 61.528$	$X < 1467.7$
	$Y=0.2128X - 250.50$	$X \geq 1467.7$
11월	$Y=0.0001X + 61.962$	$X < 1597.7$
	$Y=0.1760X - 219.08$	$X \geq 1597.7$
12월	$Y=0.0020X + 60.137$	$X < 1006.3$
	$Y=0.9173X - 860.95$	$X \geq 1006.3$ $X < 1207.4$
	$Y=0.1986X + 6.7927$	$X \geq 1207.4$

주) X : 유입량과 저류량의 합, Y : 방류량

이러한 단계를 거쳐 대청댐의 선형 저수지 운영곡선식을 구하였으며, 곡선식의 형태 중 5월과 7월의 형태를 그림 4와 그림 5에 제시하였고 대청댐의 월별 곡선

식과 적용범위는 표 3에 제시하였다. 각 월별 운영곡선과 구간별 적용범위는 다음과 같다.

첫째, 각 월을 순별로 구분하여 월초에 예측되는 월

간 저수지 유입량과 월 초기 저류량의 합에 대응하는 방류량을 월별 저수지 운영곡선에서 구하여, 이를 목표로 저수지를 운영한다. 저수지 유입량의 예측으로는 기왕의 자료로부터 산정한 월평균 유입량을 사용하거나, 기상상황 등을 고려한 예측강우로부터 유출을 산정하는 모형을 사용한다.

둘째, 첫째 주가 끝나면, 첫 주 동안 유입된 유량을 계산하여 한 달 동안의 유입량을 재예측한다. 이 유입량과 저수지 저류량의 합에 대응하는 방류량을 월별 저수지 운영곡선에서 다시 구하여 필요시 저수지 방류 계획을 수정한다.

셋째, 매 주마다 위의 방법을 반복하여 월 방류계획을 세우고, 이를 지침으로 활용한다.

넷째, 단, 저수지 운영률을 따라 저수지 운영을 할 경우 주말의 저수지 수위가 사수위보다 아래에 위치할 것으로 예측된다면 방류를 중단하거나 운영자의 판단에 따른다.

3.5 운영률에 따른 저수지 운영 결과

용담댐과 대청댐의 저수지 운영률에 따른 운영을 평가하기 위해 갈수년인 1994년 용담댐 실측 유입량 값을 적용하여 운영한 결과를 HEC-5를 사용한 모의연계운영의 결과와 비교, 검토하였다. 이수기 HEC-5 모의연계운영은 다음과 같은 기준으로 수행하였다. 첫째, 각 저수지에 대한 제한조건을 만족시키고 하류 조절점에서의 지정유량을 유지시켜야 한다. 둘째, 저수지의 수위가 상시만수위와 계획홍수위 중간일 경우 저수지의 방류설비용량 및 하류조절점의 하도 통수능을 초과하지 않는

범위내에서 수위가 상시만수위로 저하될 때까지 방류한다. 셋째, 수위가 저수위 이상일 경우 하류 지역의 최소 만족유량(Minimum Desired Flow) 이상을 방류해야 하며, 수위가 저수위와 사수위 중간에서는 최소요구유량(Minimum Required Flow)만 방류하고 사수위 이하일 경우 방류를 중단한다. 한편 표4의 경우는 용담댐의 최적운영률을 적용한 결과로부터 얻은 용담댐의 방류량과 용담댐과 대청댐 사이의 지류 유입량을 대청댐의 유입량으로 사용했고, 표 5의 경우는 HEC-5 모의연계운영 모형의 결과로 얻은 결과를 대청댐의 유입량을 사용했기 때문에 표 4와 5에서 유입량이 상이하다.

운영률을 따른 운영과 모의연계운영을 비교하면, 대청댐의 경우, 모의운영은 하류의 수요량 중 일부를 만족시키지 못한 반면에, 운영률에 따른 운영은 모의운영에서 만족시키지 못한 10월, 11월, 12월의 하류 수요량도 모두 만족시킬 수 있었다(표 4, 5). 이는 저수지 운영률에 따른 연계운영이 하류에 비해 풍부한 상류의 물을 효율적으로 용담댐에서 방류시켜 대청댐에서의 물 부족을 해소하는 효과를 가져왔기 때문이다.

용담댐 건설전의 대청댐 단독운영과 비교하여 용담-대청댐이 연계운영될 경우 용수공급능력이 향상되고 편익이 증가되는 효과를 얻을 수 있다. 대청댐에서 용수공급능력의 결정은 35년간의 연간 용수공급량을 95% 신뢰도로 평가하였다. 대청댐의 95% 신뢰도 기준으로 평가한 용수공급능력은 1,717.9 백만 m^3 으로 나타났으며, 이는 대청댐 설계 당시의 용수공급량 1649.0백만 m^3 과 비교하면 약 4.2% 증가된 결과이다.

표 4. 운영률을 이용한 1994년 대청댐 운영

단위 : 백만 m^3

연월	월유입량	방류량	도수량
1월	1191.0	82.6	62.13
2월	1155.5	88.7	61.98
3월	1126.2	107.3	62.14
4월	1115.4	89.7	65.45
5월	1083.2	90.3	62.06
6월	1053.0	67.0	62.00
7월	976.5	79.2	62.00
8월	921.5	115.0	62.11
9월	904.2	73.7	61.98
10월	847.9	60.3	61.71
11월	790.5	55.3	61.75
12월	728.1	44.4	61.68

표 5. 모의운영에 의한 1994년 대청댐 운영

단위 : 백만³

대청댐	월초저류량	월유입량	방류량	도수량
1월	1191.0	64.5	59.6	37.3
2월	1157.2	78.2	66.6	41.8
3월	1128.3	104.2	56.9	39.1
4월	1133.6	85.4	68.4	41.0
5월	1105.7	83.6	73.8	43.7
6월	1071.1	49.8	134.0	62.0
7월	924.6	76.3	136.0	56.7
8월	804.4	111.7	154.1	62.5
9월	695.4	71.3	25.3	59.8
10월	679.0	53.8	3.5	48.1
11월	679.0	49.6	7.8	40.4
12월	679.0	40.4	2.0	37.3

4. 결 론

금강수계내의 대청댐과 더불어 용담댐의 건설로 수자원의 효율적 관리를 위한 용담댐과 대청댐의 합리적인 연계운영이 필요하게 되었다. 대청댐과 용담댐의 연계운영은 유역 상류로부터 유입량의 일부를 용담댐에서 조절하여 이수기에는 금강 유역의 효율적인 수자원관리에 도움이 될 수 있으며, 홍수기에는 홍수에 보다 효율적으로 대처할 수 있도록 지원한다.

본 연구에서 제시된 저수지 운영률은 수시로 변화하는 수문환경에 따른 세부적인 운영지침을 주는 구체적인 최적 운영방안이라기 보다는 금강수계내의 단기 수문조건, 대청댐과 용담댐의 저수상황을 고려한 후 각 댐의 현 상황에서 저수를 해야 하는지 아니면 방류를 해야 하는지를 통계적으로 가늠할 수 있는 정도의 포괄적인 지침이라고 판단하는 것이 타당하다. 즉, 제시된 월별 목표 방류량은 각 댐들이 추구해야 할 하나의 지향점을 제시할 뿐이므로 발전방류와 용수수요 요구 등, 현 상황의 필요에 따른 인위적인 판단과 돌발적인 상황에 대처할 수 있는 긴급 운영방안을 저해하는 것은 아니다.

따라서 수계내 수문조건과 인접한 댐들의 수문상황에 따라 제시되는 각 댐의 월별 목표방류량을 만족시키기 위하여 저수지운영을 실시하면 되지만, 상황에 따라서 제시된 목표방류량을 유지할 수 없는 상황이 발생할 수도 있으며, 또는 월초에 예상한 유입량보다 실제 유입량이 훨씬 커서 목표방류량을 초과시킬 수 밖에 없는

상황이 발생할 수도 있을 것이다. 이러한 상황이 발생하더라도 매월 초에 제시되는 목표방류량은 저수지운영의 목표로서 유효하며 저수지운영을 위한 기준이 될 수 있다. 물론 이 같이 운영률을 사용한 결과가 실제 운영 실적에 비하여 항상 양호할 것이라고 단정할 수는 없지만, 포괄적이고 장기적인 저수지 운영 지침을 제공한다.

참 고 문 헌

- 고석구, 이광만, 이한구(1997). 양해 추계학적 동적계획법에 의한 저수지 운영률 개발, 한국수자원학회 논문집, 제30권, 제3호, pp. 269-278.
- 이재웅, 위희상(2001). 선형결정규칙과 추계학적 동적계획법을 이용한 저수지 규모결정 및 운영에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제21권 제2-B호, pp. 93-100.
- Jettmar, R. U., and Young, G. K. (1975). "Hydrologic estimation and economic regret." *Water Resources Research*, 11(5), pp. 648-656.
- Little, J. D. C. (1955) "The Use of Storage Water in Hydroelectric System." *Operation Research* 3, pp. 187-197.
- Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water resources systems planning and analysis*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Tejada-Guibert, J. A., Johnson, S. A., and Stedinger, J. R. (1993). "Comparison of two approaches for

- implementing multireservoir operating policies derived using dynamic programming." *Water Resources Research*, 29(12), pp. 3969-3980.
- Yakowitz, S. (1982). "Dynamic programming applications in water resources." *Water Resources Research*, 18(4), pp. 673-696.
- Yeh, W. W-G. (1985). "Reservoir management and operations models: A state of the art review." *Water Resources Research* 21(12), pp. 1797-1818.
- (논문번호:03-89/접수:2004.10.17/심사완료:2004.05.20)