

## 국내 다목적댐 운영계획에 적합한 목적함수에 관한 연구

### A Study on Objective Functions for the Multi-purpose Dam Operation Plan in Korea

음형일\* / 김영오\*\* / 윤지현\*\*\* / 고익환\*\*\*\*

Eum, Hyung-Il / Kim, Young-Oh / Yun, Ji Hyun / Ko, Ick Hwan

#### Abstract

Optimization is a process that searches an optimal solution to obtain maximum or minimum value of an objective function. Many researchers have focused on effective search algorithms for the optimum but few researches were interested in establishing the objective function. This study compares two approaches for the objective function: one allows a tradeoff among the objectives and the other does not allow a tradeoff by assigning weights for the absolute priority between the objectives. An optimization model using sampling stochastic dynamic programming was applied to these two objective functions and the resulting optimal policies were compared. As a result, the objective function with no tradeoff provides a decision making process that matches practical reservoir operations than that with a tradeoff allowed. Therefore, it is more reasonable to establish the objective function with no a tradeoff among the objectives for multi-purpose dam operation plan in Korea.

*keywords* : Objective function, Priority, Sampling stochastic dynamic programming, Dam operation plan

#### 요 지

최적화란 목적함수가 최대 또는 최소가 되도록 하는 결정변수를 찾아가는 절차이다. 기존의 많은 연구자들은 최적화의 효율적인 탐색과정에 집중한 반면 최적화의 시작점이라 할 수 있는 목적함수 구성을 위한 연구는 상대적으로 미진한 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 국내외에서 빈번히 사용되고 있는 가중평균법을 사용하여 tradeoff를 고려한 목적함수와 절대우선순위를 위한 가중값을 적용한 목적함수를 구성하여 표본추계학적 동적계획법을 통해 산정한 최적운영률을 비교하였다. 그 결과 절대우선순위를 위한 가중값을 적용한 경우가 보다 실제 저수지운영과 부합하는 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 국내 다목적댐 운영계획에 보다 적합한 목적함수를 구성하기 위해서는 절대우선순위를 위한 가중값을 부여하여 목적함수를 구성하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 목적함수, 우선순위, 표본추계학적 동적계획법, 댐 운영계획

- \* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사수료  
Ph.D Candidate, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea  
(e-mail: eum01@snu.ac.kr)
- \*\* 교신저자, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수  
Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea  
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)
- \*\*\* 한국수자원공사 물관리센터 과장  
Chief, Department of Water Supply Operation & Maintenance, Korea Water Resources Corporation, San 6-2  
Yeonchuk-dong, Daedeok-gu, Daejeon, 306-711, Korea (e-mail: ykimo@kowaco.or.kr)
- \*\*\*\* 한국수자원공사 수자원연구원 수자원시스템연구소 연구소장  
Director, Hydrosystem Engineering Center, Korea Institute of Water & Environment, Jeonmin-dong, Useong-gu, Daejeon,  
305-790, Korea (e-mail: ihko@kowaco.or.kr)

## 1. 서론

최적화(optimization)란 현재 처한 상황에서 가장 좋은 결과를 나타낼 수 있는 일련의 행위를 찾는 과정이다. 즉, 고려하고 있는 시스템의 제약조건을 만족하는 동시에 이득을 최대로 하거나 피해를 최소로 하는 과정이다 (Rao, 1996). 이를 위해 시스템의 이득 또는 피해를 결정변수의 함수로 표현하여 함수값이 최대 또는 최소가 되도록 하는 결정변수를 찾는 과정을 수학적으로 해결한다. 이러한 최적값을 찾는 수학적 방법으로는 Linear Programming (Nash and Sofer, 1996; Needham et al, 2000), Non-linear Programming (Barros et al., 2003; Martin, 1983; Tejada-Guibert et al., 1990), Integer Programming (Trezos, 1991), Dynamic Programming (Kim and Palmer, 1997; Stedinger et al., 1984), Genetic Algorithm (Huang et al., 2002), Neural Network (Hasebe and Nagayama, 2003; Sharma et al., 2004) 등이 있다.

그러므로 최적화란 어떠한 목적함수를 구성하는가에 따라 상이한 결과를 도출하게 되며 적합한 목적함수를 구성하는 것은 최적화의 기본이 되는 시발점이다. 그러나 앞서 언급한 대다수 논문의 많은 연구자들은 최적화의 효율적인 탐색알고리즘(search algorithms)에 집중하고 있는 반면, 적합한 목적함수 구성을 위해서는 그다지 많은 노력을 투자하지 않은 것이 사실이며 특히 수자원분야에서는 극소수(Ginn and Houck, 1989; Hobbs and Hopenstal, 1989)에 불과하다.

행위의 결과로 성취하고자 하는 목적을 정량화하기 위해 수학적인 함수로 표현한 것을 목적함수라 한다. Keeney(1992)는 다양한 목적을 고려하여 구성된 목적함수가 가져야 할 특성으로 아래와 같은 요구사항을 제시하였다.

- 필수성: 의사결정시 각 대안은 필수적으로 목적함수값에 영향을 줘야 한다.
- 제어가능성: 구성된 목적함수는 고려할 수 있는 모든 대안을 포함하고 제어하여야 한다.
- 완전성: 각 목적에 대해 가능성 있는 결과에 대한 선지식을 바탕으로 의사결정에 따른 결과는 의미를 완전히 제공할 수 있어야 한다.
- 측정가능성: 목적은 정량적인 지표로 나타낼 수 있어야 한다.
- 중복의 불허: 목적간의 중복을 피해 목적의 개수를 최대한 줄여야 한다.

위에서 언급한 필수성과 제어가능성은 목적함수를

구성하는데 있어 상호보완하는 관계를 나타내고 있다. 예를 들어, 넓은 범위로 수자원확보라는 목적을 고려한다면 의사결정자는 확보된 수자원을 수질개선을 위해 사용할 수 있다고 자신있게 말할 수 있다. 그러나 수질개선을 위한 모든 대안이 수자원확보를 위한 목적에 영향을 주진 않는다. 이 경우에는 필수성은 만족하고 있지만 제어가능성을 만족하지 못하는 경우이다. 반대로 너무 협소한 범위로 목적을 선택한다면 제어가능성은 만족하지만 필수성은 만족하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 적합한 목적을 선택하기 위해서는 필수성과 제어가능성을 모두 만족하는 범위에 해당하는 목적을 고려해야 한다. Keeney(1992)는 또한 목적함수를 구성하기 위해 다음의 절차를 차례대로 고려해 나갈 것을 제안하였다.

- 요구 항목(wish list)
- 대안(alternatives)
- 문제점 및 단점(problem and shortcoming)
- 결과의 중요성(consequences)
- 이러한 목적에 대한 목표, 제약조건 및 지침서 (goals, constraints, and guidelines)
- 다른 집단에서 본 관점(different perspectives)
- 특정집단이 설정한 목적(strategic objectives)
- 모든 참여자가 생각하는 목적(generic objectives)
- 목적의 구성(structuring objectives)
- 목적의 정량화(quantifying objectives)

위와 같은 절차로 목적함수를 구성하기 위해서는 최적화 이론을 전공한 전문가와 댐운영을 실제로 담당하고 있는 실무자들의 지속적인 토의과정이 필수적이다. 왜냐하면 다목적댐과 같은 다중목적을 고려해야 하는 경우 전문가와 실무자가 생각하는 주요 목적간에 차이를 보일 수 있을 뿐 아니라 이에 대한 명확한 판단을 내릴 절대권한의 결정자도 없고 목적함수를 결정하는 명확한 절차도 없는 실정이기 때문이다. 따라서 더욱 복잡한 시스템의 다양한 목적을 고려한 목적함수를 구성하는 것은 매우 중요한 일인 동시에 어렵고 까다로운 것이 사실이다.

본 연구에서는 앞서 Keeney(1992)가 제시한 목적함수 구성절차를 고려하여 최적화이론의 전문가인 학계 연구진과 실제 댐운영을 담당하고 있는 한국수자원공사 물관리센터의 실무진이 댐운영계획시 고려할 수 있는 항목들을 최대한 점검한 후 각 목적간의 우선순위와 정량화 방안 그리고 제약조건들을 구성하였다. 이와 같이 최적화문제의 시작인 목적함수를 현실성 있게 구성

하고 실무에서도 사용가능한 현실적인 운영률을 도출함으로써 개발된 모형이 사장되지 않도록 하는데 본 연구의 궁극적인 목적이 있다.

최적화모형에서는 각 목적들을 정량화하고 결정변수의 수학적 함수로 표현하여 사용한다. 저수지운영에서 현재의 방류로 인한 이득이나 손해를 계산하는 것은 가능하나 미래의 손익을 나타내는 댐 저수량의 가치를 표현하는 것은 매우 까다로운 것이 사실이다. 따라서 이러한 방류량과 저수량의 가치를 잘 표현하기 위해서는 실제 댐운영 상황을 현실적으로 반영하는 것이 중요하다. 우리나라의 수자원관리는 수문학적 특성상 이수기와 홍수기를 명확하게 구분하여 실시되고 있다. 우선, 이수기 수자원관리의 최우선적인 목적은 안정적인 용수 공급에 있다. 이를 위해 한국수자원공사에서는 20년 빈도의 유입량에 대비할 수 있는 댐운영 기준수위를 설정해 오고 있다. 즉, 20년 빈도의 유입이 매월 발생하더라도 안정적인 용수공급이 가능하도록 댐운영을 실시하고 있다. 이와 반대로, 홍수기에는 하류의 홍수피해를 최소화하는 것이 최우선적 목적이기 때문에 이를 위해 저수량을 감소시켜 미래의 홍수에 대비해야 하는 상황에 처하게 된다. 특히, 이수기가 종료되고 홍수기가 시작되는 6월에는 이수기와 홍수기의 목적을 동시에 고려해야 하는 어려움에 처하게 된다. 이와 같이 어느 목적을 달성하고자 하면 다른 목적의 달성이 늦춰지거나 희생되는 상황을 tradeoff라 한다(Ekelund and Tollison, 1988). 이러한 다중목적간의 tradeoff 문제를 해결하기 위해 각 목적에 설정된 의사결정자의 선호도를 바탕으로 다중목적간 tradeoff를 고려하여 의사결정을 실시해 나가며 이러한 목적별 선호도를 정량적으로 나타내기 위해 각 목적별로 가중값을 부여한다. 가중값은 각 목적별 선호도를 표현하기 위한 것으로 의미가 명확하고 사용하기 편리하기 때문에 이를 이용하여 최적화문제를 해결해 나가는 가중평균법(weighting method)이 국내외에서 주로 사용되고 있다. 그러나 가중값은 목적의 직접적인 손익뿐 아니라 간접적인 손익까지 고려하여 결정해야 하기 때문에 현실적인 값을 설정하기가 매우 까다로운 뿐만 아니라 가중값을 결정하기 위해 많은 노력과 시간이 소요되는 것이 사실이다. 또한 가중값이 결정되었다 하더라도 시스템의 현실을 적절하게 반영하고 있는지 그 누구도 확신할 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 이수기 동안의 금강수계 다목적댐군 연계운영의 다중목적간에 가중평균법을 사용하여 tradeoff를 고려한 목적 함수와 이를 고려하지 않기 위해 목적별로 큰 가중값을 부여한 절대우선순위를 위한 가중값 부여방식을 통해 목적함수를 구성하여 어느 것이 더 국내 다목적댐 운영

계획의 목적에 부합되는지 비교하였다. 이를 통해 우리나라의 이수기 수자원관리의 특성상 각 목적간의 우선 순위만을 고려한 절대우선순위 방식을 사용함으로써 보다 현실적인 목적함수를 구성할 수 있는 것을 확인하고자 하였다.

## 2. 연구동향

다목적댐과 같이 몇 가지의 상충되는 목적을 가지고 운영되는 시스템에서는 Eq. (1)과 같은 p차원의 목적함수를 구성할 수 있다.

$$F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})] \quad (1)$$

위와 같은 다중목적함수에서는 Eq. (2)에 의해 정의되는 파레토 최적해(pareto optimum 또는 non-dominated solution)를 구하여 최적화문제를 해결한다(Goicoechea et al., 1982).

$$S = \{ \mathbf{x} : \mathbf{x} \in X \mid \text{there exists no other } \mathbf{x}' \in X \text{ such that } f_q(\mathbf{x}') > f_q(\mathbf{x}) \text{ for some } q \in \{1, 2, 3, \dots, p\} \text{ and } f_k(\mathbf{x}') \geq f_k(\mathbf{x}) \text{ for all } k \neq q \} \quad (2)$$

Eq. (2)는 다중목적함수 중 하나의 목적함수값은 향상되나 동시에 하나 이상의 다른 목적함수값은 악화되는 해들의 집합을 의미한다. 이러한 다중목적함수의 파레토 최적해를 구하는 방법으로 주로 사용되는 것에  $\epsilon$ -constraint method(Marglin, 1967)와 가중평균법(Zadeh, 1963)이 있다. 이 방법들은 다중목적함수를 단일목적함수의 형태로 변환시키는 방법으로 이 과정에서 매개변수를 사용하게 된다.  $\epsilon$ -constraint method는 Eq. (3)과 같이 목적함수의 최대값 또는 최소값과 같은 매개변수( $\epsilon$ )를 설정하여 목적함수에 포함되어야 할 목적을 경계조건으로 변환시켜 단일목적함수의 최적화문제로 변환시키는 방법으로 Cohon and Marks(1973), Haimes and Hall(1974) 등이 수자원분야에 적용한 바 있다.

$$\max z_l(\mathbf{x}) \quad (3-a)$$

$$z_k(\mathbf{x}) \geq \epsilon_k \quad k = 1, 2, \dots, l-1, l+1, \dots, p \quad (3-b)$$

여기서  $z_k$ 는 k번째 목적을 위한 목적함수를 의미하고

$\alpha_k$ 는  $k$ 번째 목적이 달성해야 할 최소값을 나타낸다. 또한 가중평균법은 국내외 전 분야에 걸쳐 가장 빈번하게 사용되는 방법으로 각 목적간의 상대적 중요도를 나타내기 위해 다중목적간에 Eq. (4)와 같이 가중값( $w_i$ )을 도입하여 단일목적함수의 형태로 변환시키는 방법이다.

$$F(\mathbf{x}) = w_1 f_1(\mathbf{x}) + w_2 f_2(\mathbf{x}) + \dots + w_p f_p(\mathbf{x}) \quad (4)$$

가중평균법은 각 목적간의 중요도를 나타내는 가중값으로 가중평균한 목적함수값을 바탕으로 최적해를 산정해 나가기 때문에 각 목적값의 단위가 현저히 다를 경우 적용하기 까다로운 점이 있어 이를 극복하기 위해 무차원화 하여 적용하기도 한다. Keeney and Wood(1977)는 헝가리의 Tisza River 유역을 대상으로 수자원개발을 위한 5가지 대안에 대해 경제적, 환경적, 사회적, 기술적 목적으로 구성된 12가지의 목적으로 구성된 목적함수를 각 목적별로 0~1사이의 값으로 설정된 효용함수와 각 목적별 중요도를 의미하는 scaling factor를 이용한 다중효용함수법(multiattribute utility theory)을 적용하여 수자원개발 계획시 이의 활용성을 제시한 바 있다. 또한 가중평균법의 매개변수인 가중값은 각 목적간의 상대적 중요도를 수치적으로 나타낸 것으로 많은 실무경험을 가지고 있고 그 분야에 대해 많은 지식을 소유하고 있다고 하더라도 이를 결정하기는 쉽지 않다. Hobbs and Heppenstal(1989)은 목적함수에 매개변수를 도입함으로써 편의(bias)가 발생하는 것을 증명하였으며 이로 인해 도출된 최적운영률은 현 시스템을 과대평가하게 됨을 지적하였다. 또한 Ginn and Houck(1989)는 시스템의 급변하는 실제 상황과 실무자의 의사를 적극적으로 반영하기 위해 과거 저수지 운영 데이터를 최적모형의 해로 간주하여 매개변수를 추정하였다. 즉, 과거 실적운영과 가장 유사한 운영을 유도하는 목적함수의 매개변수를 선택하여 저수지운영에 적용한 바 있다.

그러나 구성된 목적함수와 매개변수인 가중값은 여전히 불명확하며 연구진과 실무자간의 충분한 의견교환과 지속적인 개선을 요구하고 있다. 또한 같은 시스템

에 적용했을 경우에도 매번 다른 매개변수 추정으로 인해 상이한 결과를 산출하는 오류를 범할 수 있으며 적절한 매개변수 추정을 위해 많은 시간과 노력이 요구되는 것이 사실이다.

### 3. 목적함수의 구성

21세기 프론티어 연구개발 사업(이하 프론티어) 1단계 연구과제 중 실시간 물관리 운영시스템 구축기술 개발(한국수자원공사, 2004)에서는 금강수계를 대상으로 이수기(10월~6월) 동안의 월간 최적운영률을 산정하고자 목적함수를 구성하였다. 따라서 이수기에 대한 목적, 즉 용수공급부족의 최소화와 발전의 최대화를 고려하였다. 그 외에 6월말 기준수위와의 격차의 최소화도 목적으로 고려하였다. 기준수위를 설정하기 위해 한국수자원공사에서는 1월부터 12월의 누가유입량을 대상으로 20년 빈도의 유입량을 산정한 후 1년 후 6월말의 저수량을 홍수방어에 가장 유리한 저수량인 최저저수량으로 가정하고 20년 빈도 유입량과 기본계획방류량을 가감하여 1년 후 6월부터 현재의 6월까지 역으로 매월 기준수위를 산정해 나간다. 이러한 기준수위는 1년 동안 매월 20년 빈도 유입이 발생하더라도 안정적인 용수공급이 가능한 수위를 의미한다. 그러나 6월말에 이 기준수위보다 낮아지면 미래의 안정적인 용수공급을 확신할 수 없는 반면에 홍수기 수자원관리 측면에서 보면 기준수위보다 높은 수위를 유지하면 다가올 홍수기에 그 피해가 가중될 수 있는 상황에 처하게 된다. 이러한 이유로 인해 6월말 기준수위와의 격차를 최소화하는 목적을 고려하였다. 본 연구에서는 프론티어 1단계 연구성과를 바탕으로 더욱 현실적인 목적함수를 구성하고자 프론티어 2단계 연구기간동안 한국수자원공사 물관리센터의 실무자와 많은 의견을 교환하였으며 위의 3가지 목적을 기반으로 목적간 tradeoff를 고려한 경우와 고려하지 않은 두 가지의 목적함수를 구성하여 비교하였다.

#### 3.1 목적간 tradeoff를 고려한 목적함수 구성

앞서 언급한 3가지 목적의 tradeoff를 고려한 경우 목적함수는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\min_{S_{t,n}} \sum_{t=1}^T \left\{ w_1 \left( \sum_{m=1}^M \max [(Q_{\text{req},m} - Q_{t,m}), 0] + \sum_{n=1}^N \max [(D_{\text{req},n} - D_{t,n}), 0] \right) + w_2 \sum_{n=1}^N (S_{\text{firm},n} - S_{6,n}) - \sum_{n=1}^N w_{3,n} (BP_{t,n}) \right\} \quad (5)$$

subject to

$$\min [(S_{t,n} - S_{\min,n} + I_{t,n}), R_{\min,n}] \leq R_{t,n} \leq R_{\max,n}$$

$$S_{\min,n} \leq S_{t,n} \leq S_{\max,n} \quad S_{\min,n} \leq S_{6,n} \leq S_{\text{firm},n}$$

여기서,  $w_i$ 는 목적  $i$ 에 대한 가중값,  $m$ 은 제어지점번호, 그리고  $n$ 은 댐 번호를 의미한다. 또한  $M$ 과  $N$ 은 각각 제어지점과 댐의 총 개수이다. 또한  $Q_{\text{req},m}$ 은 각 제어지점  $m$ 에서의 하천유지유량,  $Q_{t,m}$ 은  $t$ 월의 제어지점  $m$ 에서의 하천유량,  $D_{\text{req},n}$ 은 댐  $n$ 에서의 생공용수 취수요구량,  $D_{t,n}$ 은 댐  $n$ 의  $t$ 월의 생공용수 취수량,  $S_{\text{firm},n}$ 은 각 댐의 6월말 기준수위에 해당하는 저수량,  $S_{6,n}$ 은 6월말 저수량,  $BP_{t,n}$ 은  $t$ 월의 댐  $n$ 의 발전생산량(GWh)을 나타낸다. 그리고 제약조건식에서  $R_{t,n}$ 은 댐  $n$ 에서의  $t$ 월의 방류량,  $S_{t,n}$ 은 댐  $n$ 에서의  $t$ 월초 저수량,  $I_{t,n}$ 은 댐  $n$ 에서의  $t$ 월 동안의 유입량,  $S_{\min,n}$ 은 댐  $n$ 에서의 최저저수량,  $S_{\max,n}$ 은 댐  $n$ 에서의 상시만수위에 해당하는 저수량,  $R_{\min,n}$ 은 댐 최소요구방류량,  $R_{\max,n}$ 은 댐 최대방류량을 의미한다. 여기서  $R_{\min,n}$ 은 댐  $n$ 의 생공용수 취수량 ( $D_{\text{req},n}$ ; 용담댐: 4.2 m<sup>3</sup>/sec, 대청댐: 12.8 m<sup>3</sup>/sec)과 댐하류의 최소요구방류량(용담댐: 하천유지용수(5.0 m<sup>3</sup>/sec), 대청댐: 생공용수계약량(20.3 m<sup>3</sup>/sec))의 합으로 설정하였으며 댐에서의 생공용수 취수량과 댐하류의 최소요구방류량 중 용담댐은 댐하류의 최소요구방류량, 대청댐은 생공용수 취수량이 우선권을 가지고 있다. 그리고 6월의 경우, 월말 목표저수량을 6월말 기준수위( $S_{\text{firm},n}$ )로 설정하여 이 수위를 넘지 못하도록 설정하였다. 또한 각 목적에 대한 가중값을 부여하기 위해 발전에 대한 가중값 ( $w_3$ )은 현재 전력판매단가(용담댐: 50.02 원/kWh, 대청댐: 62.07 원/kWh)를 적용하였으며 미래의 용수공급을

대비한 6월말기준수위와의 격차에 대한 가중값( $w_2$ )은 현재 고려하고 있는 운영기간(9개월)내에 발생하는 용수 공급부족량에 대한 가치를 더욱 중요시하여  $w_1/2$ 로 가정하였다. 용수공급부족량에 대한 가중값( $w_1$ )은 시행착오법(trial and error method)을 통해 검증기간동안 가장 좋은 모의운영 결과를 나타내는 가중값을 선택하였다. 즉, 확정론적 동적계획법(Deterministic Dynamic Programming, DDP)으로 저수지 운영률을 산정한 후 이를 1983년 10월부터 2002년 6월까지의 유입량을 이용하여 모의운영을 실시하였다. Fig. 1과 같이  $w_1$ 의 값을 변화시켜가며 비교한 결과 모든 경우에 있어 용수부족이 발생하지 않았기 때문에 가장 많은 전력생산량을 나타내는 운영률을 산정한  $w_1 = 20$  원/m<sup>3</sup>을 가중값으로 최종적으로 결정하였다.

### 3.2 절대우선순위를 위한 가중값을 적용한 목적함수 구성

목적간 tradeoff를 고려한 목적함수를 구성하기 위해 시행착오법을 적용하여 가중값을 결정하였다. 그러나 이렇게 산정된 가중값은 유입량을 알고 있다는 가정을 통해 산정된 값이므로 월운영과 같이 정확한 유입예측이 불가능한 상황에서는 앞서 결정된 가중값이 시스템의 상황과 의사결정자의 선호도를 정확히 반영하고 있다고 보기 어렵다.

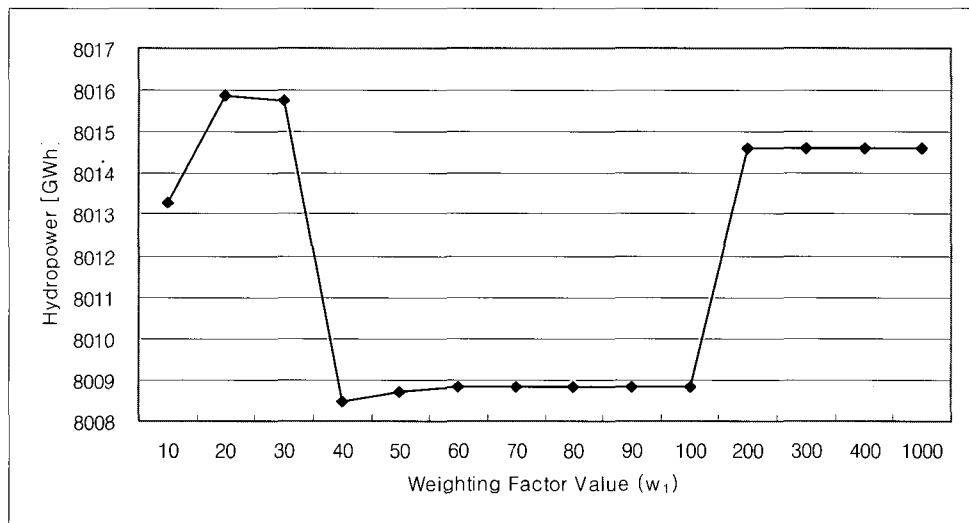


Fig. 1. Total Hydropower Generation Corresponding to the Weighting Factor Value

본 연구에서는 현실적인 목적함수를 구성하고자 실제 댐운영을 담당하고 있는 한국수자원공사 물관리센터와 수차례에 걸쳐 회의를 실시하여 많은 의견교환을 실시하였다. 그 결과 현재 실무에서는 저수지 운영 수립시 고려되는 안정적인 용수공급에 거의 모든 관심이 집중되어 있었고 발전이익은 부수적인 것으로 간주하고 있는 것으로 나타났다. 다시 말해서, 발전량이 아무리 많아도 용수부족이 소량이라도 발생하는 운영률보다는 발전량이 다소 적더라도 용수부족이 발생하지 않는다면 이 운영률을 선호하고 있다는 뜻이다. 따라서 목적간의 tradeoff는 우리나라의 경우 실제 댐운영 계획시 거의 고려되고 있지 않고 있다는 것이다.

또한 실무자와의 회의결과 목적별 우선순위를 다음과 같이 설정하였다. 우선, 댐에서 제공하는 생공용수 공급량과 하류 제어지점에서의 하천유지유량에 대한 부족량의 최소화를 최우선순위로 설정하고 그 다음으로 6월말 기준수위와 실제 수위와의 격차의 최소화, 그리고 발전이익의 최대화 순으로 우선순위를 결정하였다. 이러한 사실을 목적함수에 표현하기 위해 본 연구에서는 식 (5)의 함수형태는 동일하게 적용하지만 각 목적의 우선순위만을 고려하기 위해 각 목적간 가중값의 크기를 매우 크게 하여 우선순위가 서로 침범될 수 없도록 설정하였다. 즉, 목적함수에 고려된 3가지 목적의 최대발생크기를 고려하여  $w_1 = 10^8$ ,  $w_2 = 10^4$ , 그리고  $w_3 =$  각 댐의 발전단가(억원)와 같은 가중값을 부여함으로써 각 목적별 우선순위가 서로 침범될 수 없도록 하였으며 이를 절대우선순위 방식이라 칭하였다. 이와 같이 절대우선순위 방식을 사용할 경우 각 단계의 상태별로

표시된 최적편익함수만으로도 각 시나리오에서 발생하는 목적별 기대값을 알 수 있는 특징이 있다. 예를 들어 10월의 상시만수위에서 편익함수값이 111122220333이면 용수부족량이  $1111 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 6월말 기준수위와의 격차가  $2222 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이 발생하고 발전이익은 333억원으로 기대할 수 있다. 이와 같은 절대우선순위 방식의 최적운영률을 선정하는 절차를 도식화하면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2가 의미하는 것은 다음과 같다. 임의의 월 초기저수량에 대해 용수부족이 발생하지 않는 월말저수량의 set을 설정한 후 이 set 중에서 그 다음 우선순위인 6월말 기준수위를 잘 지키는 월말저수량을 다시 선택한다. 그 후 용수공급과 6월말 기준수위를 모두 만족시키는 월말저수량 set 중에서 발전이익이 가장 큰 하나의 월말저수량을 선택한다. 따라서 이는 목적간에 tradeoff를 고려하지 않고 우선순위만으로 최적해를 선정해 나가는 사례를 의미한다.

#### 4. 연구결과

##### 4.1 최적운영률 선정

본 연구에서는 앞에서 언급한 2가지의 목적함수에 대한 최적운영률을 선정하기 위해 추계학적 모형인 표본추계학적 동적계획법(Sampling Stochastic Dynamic Programming, 이하 SSDP)을 사용하였다. SSDP (Kelman et al., 1990)는 과거 유량시나리오를 최적화식에 직접적으로 입력하여 시나리오에 내재되어 있는 다양한 시·공간적 상관관계를 표현하고자 하였다. 본 연구에서 사용한 SSDP의 최적화식은 Eq. (6)과 같다.

$$\max_{S_{t+1}^*} \left[ \Pr(i) \sum_{i=1}^M [B_t(R_t, Q_t(i), S_t^k) + f_{t+1}(S_{t+1}^l, i)] \right] \quad (6)$$

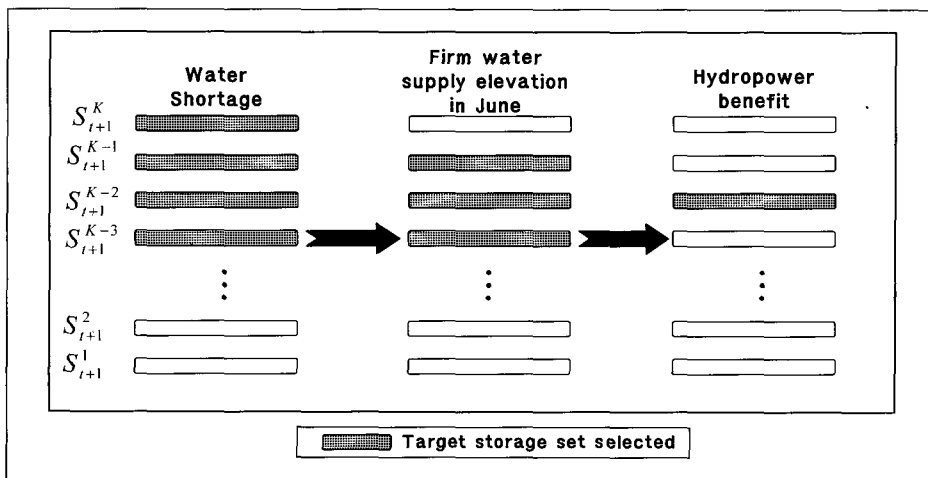


Fig. 2. The Procedure of the Optimal Policy Selection in the Absolute Priority

여기서  $i$ 는 과거 시나리오 번호,  $R_t$ 는  $t$ 월의 방류량,  $S_{t+1}^*$ 는 결정변수로서  $t$ 월의 월말목표저수량,  $Q_t(i)$ 는  $t$ 월의  $i$ 번째 과거 시나리오의 유량,  $S_t^k$ 는  $t$ 월의  $k$ 번째 월초저수상태변수를 의미한다. 또한  $f_t$ 는  $t$ 월부터 운영의 마지막 시점  $T$ 까지의 잔여최적편익함수(optimal future value function)를 나타낸다. 각 시나리오의 발생확률값  $Pr(i)$ 를 부여하기 위해 각 시나리오가 발생할 확률은 동일한 것으로 가정하였다.

이러한 SSDP 최적화기법의 최대 장점은 앞서 언급한 바와 같이 실제 과거자료를 직접 이용함으로써 자료에 존재하는 다양하고 미묘한 특성들을 그대로 반영할 수 있다는 점이며, 특히 연계운영에 SSDP를 적용할 경우 전 수계내의 소유역별 유입량에 존재하는 시·공간적 상관관계를 그대로 재현할 수 있는 장점을 가지고 있다. SSDP의 또 다른 특징은 후진방향으로 각 단계에서 Eq. (6)을 이용하여 목표저수량( $S_{t+1}^*$ )을 결정한 후 이 목표저수량에 대한 각 시나리오의 가치평가를 Eq. (7)과 같은 별도의 함수로 갱신해 가는 과정에 있다.

$$f_t(S_t^k, i) = B_t(R_t, Q_t(i), S_t^k) + f_{t+1}(S_{t+1}^l, i) \quad (7)$$

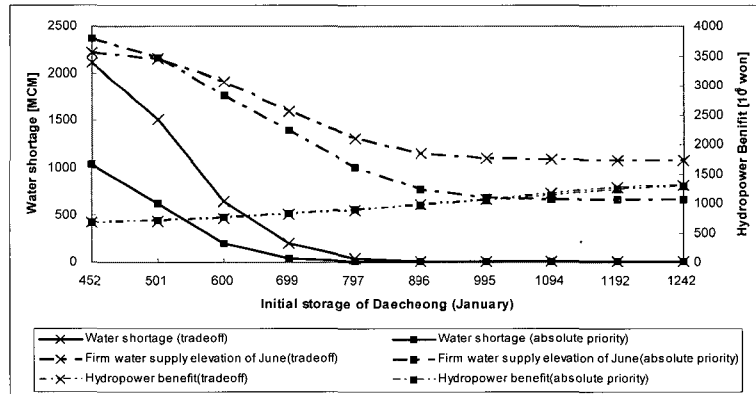
여기서  $f_t$ 는  $t$ 월부터 운영의 마지막 시점  $T$ 까지의 잔

여최적편익함수를 나타낸다.

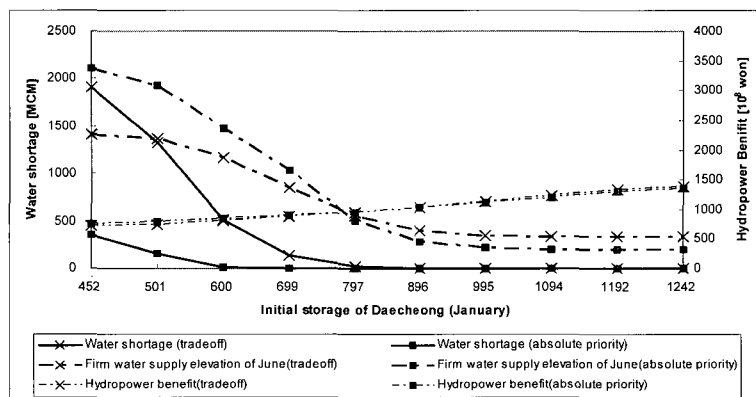
본 연구에서는 Eqs. (6) and (7)로 정의된 SSDP 모형을 사용하여 앞서 서술한 2종류의 목적함수에 적용하여 비교하였다. 또한 6월말 기준수위는 용담댐과 대청댐 각각 EL. 247.4 m 와 EL. 64.2 m에 해당하는  $321.07 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과  $645.72 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 각각 설정하였다. 또한 저수상태변수의 이산화 개수는 연평균유입량과 저수량의 비율을 고려하여 용담댐과 대청댐 15개와 10개로 정하였고 1983년~2002년까지의 12개 소유역별 자연유출량 자료를 통해 최적운영률을 산정하였다. 최적화모형에 대한 자세한 내용은 실시간 물관리 운영시스템 구축기술 개발 보고서(한국수자원공사, 2004)를 참조하기 바란다.

#### 4.2 목적함수에 따른 결과비교

각 월의 각 저수상태별 최적운영률로 산정한 목적함수의 기대값을 각 목적별로 구분하여 산정하였다. 모든 월의 모든 저수상태 조합에 대한 결과가 방대하여 이를 모두 제시하는 것이 불가능하므로 이 중 1월의 용담댐  $94.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,  $250.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,  $353.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과 대청댐 10개 월초 저수량에 대하여 각 목적별 기대값(Table 1, Fig. 3)을 살펴보았다.



(a) Initial Storage of Yongdam: 250.3 (MCM)



(b) Initial Storage of Yongdam: 353.9 (MCM)

Fig. 3. The Expected Values of the Objective Function Corresponding to Initial Storages in January

Table 1. The Expected Values of the Objective Function Corresponding to Initial Storages in January

Initial storage (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		Water shortage (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		Firm water supply elevation in June (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		Hydropower benefit (100 million won)	
Yong -dam	Dae -cheong	Tradeoff	Absolute priority	Tradeoff	Absolute priority	Tradeoff	Absolute priority
94.9	451.7	2694.5	<b>2554.0</b>	3945.8	4315.5	555.6	<b>556.1</b>
	501.1	2067.0	<b>1982.2</b>	3860.6	4192.3	572.3	<b>577.1</b>
	599.8	1058.9	<b>1046.0</b>	3629.8	3785.5	628.6	<b>633.2</b>
	698.6	527.4	<b>523.6</b>	3325.5	3379.7	696.1	694.5
	797.3	309.9	<b>309.3</b>	3280.1	3040.7	770.5	761.8
	896.1	258.4	<b>257.9</b>	2848.3	2854.9	852.4	842.0
	994.8	252.5	<b>252.2</b>	2779.5	2785.3	942.0	928.3
	1093.6	252.2	<b>252.0</b>	2764.6	2765.1	1040.3	1017.2
	1192.3	252.0	252.0	2762.3	<b>2760.5</b>	1141.6	1112.4
	1241.7	252.0	252.0	2761.3	<b>2760.2</b>	1190.8	1162.1
250.3	451.7	2121.0	<b>1036.7</b>	2227.2	3797.8	671.4	<b>672.9</b>
	501.1	1516.6	<b>624.9</b>	2157.2	3474.8	689.0	<b>711.7</b>
	599.8	641.8	<b>197.7</b>	1916.6	2825.2	745.3	<b>767.0</b>
	698.6	197.8	<b>47.2</b>	1604.3	2236.0	812.6	<b>833.6</b>
	797.3	39.8	<b>10.6</b>	1312.9	1607.8	889.3	<b>891.8</b>
	896.1	9.3	<b>6.0</b>	1156.5	1236.8	976.6	962.6
	994.8	6.1	<b>5.8</b>	1106.1	<b>1104.7</b>	1068.7	1047.0
	1093.6	5.9	<b>5.8</b>	1091.3	<b>1076.1</b>	1165.1	1138.7
	1192.3	5.8	5.8	1084.7	<b>1072.9</b>	1263.7	1236.1
	1241.7	5.8	5.8	1078.7	<b>1072.7</b>	1309.6	1291.8
353.9	451.7	1906.9	<b>363.1</b>	1413.9	3369.4	726.5	<b>765.1</b>
	501.1	1331.2	<b>157.0</b>	1374.5	3089.1	749.5	<b>792.0</b>
	599.8	517.3	<b>14.3</b>	1175.0	2365.1	808.0	<b>848.0</b>
	698.6	141.7	<b>0.5</b>	858.6	1649.5	876.4	<b>898.4</b>
	797.3	22.2	<b>0.0</b>	562.8	803.3	951.2	<b>953.1</b>
	896.1	2.5	<b>0.0</b>	399.6	461.8	1036.8	1021.2
	994.8	0.3	<b>0.0</b>	346.3	349.5	1130.1	1105.7
	1093.6	0.1	<b>0.0</b>	336.8	<b>326.6</b>	1229.6	1195.6
	1192.3	0.0	0.0	335.7	<b>324.0</b>	1331.5	1294.0
	1241.7	0.0	0.0	335.7	<b>323.8</b>	1378.6	1349.6

Note: The better results in bold

Table 1과 Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 가장 낮은 우선순위인 발전이익에 있어서는 대체로 tradeoff를 고려한 경우보다 절대우선순위 방식이 작은 값을 나타내고 있지만 가장 높은 우선순위가 부여된 용수부족에 대한 측면에서는 절대우선순위 방식의 경우가 목적간의 tradeoff를 고려한 경우보다 적은 용수부족량을 나타내도록 운영률을 산정하고 있으며 용담댐의 초기저수량이 증가함에 따라 두 함수값이 더욱 큰 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3(b)에 명확하게 나타나듯이 최우선순위인 용수부족량이 동일하게 되면 tradeoff를 고려한 경우보다 그 다음 우선순위인

6월말 기준수위와의 격차가 더 작게 되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 tradeoff를 고려하여 목적함수를 구성하는 것보다는 절대우선순위 방식이 실무자의 의사 결정과정과 보다 부합하는 것으로 판단된다.

### 5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 다중목적함수의 목적간 tradeoff를 고려한 경우와 절대우선순위를 위한 가중값을 적용하여 목적간 tradeoff를 고려하지 않은 두 가지의 목적함수를 구성하였다. 구성된 두개의 목적함수를 이용하여 과거



유입시나리오에 내재되어 있는 다양한 시공간적 상관관계를 반영할 수 있는 표본추계학적 동적계획법을 사용하여 최적운영률 산정시 각 목적함수값을 면밀히 분석하였다.

그 결과 절대우선순위를 위한 가중값을 적용한 방식이 tradeoff를 고려한 방식보다 보다 적은 용수부족량이 기대되는 운영률을 산정하였으며 용수부족량이 동일할 경우에는 우선순위에 따라 6월말 기준순위와의 격차가 더 작게 발생하는 운영률을 산정하는 것을 알 수 있었다. 이는 실제 댐운영 계획시 용수부족량 최소화를 최우선시하며 미래의 용수부족에 대비한 6월말 기준순위를 유지하려는 실무자의 의사결정과정과 유사한 절차를 나타내고 있으므로 본 연구에서 제시한 절대우선순위 가중값을 적용한 경우가 국내 댐운영 계획시 더욱 적합한 목적함수 형태를 제시하고 있는 것을 알 수 있으며 수자원분야에서 주로 사용되고 있는 tradeoff를 고려한 목적함수는 국내 실무에서 적용하는 의사결정과정을 반영하기에는 적절치 못함을 확인할 수 있었다.

본 연구결과를 바탕으로 실제 시스템에 적용할 때는 용담댐과 대청댐의 유효저수량을 각각 30개와 20개로 이산화하는 동시에 결정변수인 월말 목표저수량을 결정할 때에는 이산화된 저수량의 중간을 한번 더 이산화하여 모형의 정밀도를 높였다. 또한 본 연구에서는 학계 연구진과 실무자간 의사교환 과정을 통해 최적화모형을 구축하였고 한국수자원공사 물관리센터에서는 보다 신뢰를 가지고 본 모형의 적용가능성을 지속적으로 타진하고 체계적으로 모형을 개선해 나갈 계획이다. 이와 같이 수년동안 많은 노력과 시간을 소비하여 개발된 최적화모형이 사장되지 않고 실무에서 사용될 수 있도록 더욱 면밀한 산학 협동체계를 갖추는 것이 앞으로도 절실히 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 유역 물관리 운영기술 개발 과제(과제번호 1-6-2)와 서울대학교 공과대학 공학연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

한국수자원공사 (2004). **실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발**, 과학기술부, 연구보고서.

Barros, M., Tsai, F., Yang, S.L., Lopes, J., and Yeh, W. (2003). "Optimization of large-scale hydropower system operations." *Journal of Water*

*Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 129, No. 3, pp. 178-188.

Cohon, J.L., and Marks, D.H. (1973). "Multiobjective screening models and water resources investment." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 9, No. 4, pp. 826-836.

Ekelund, R.B., and Tollison, R.D. (1988). *Economics*, Scott, Foresman and Company, Illinois, pp. 521-522.

Ginn, T.R., and Houck, M.H. (1989). "Calibration of an objective function for the optimization of real-time reservoir operations." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 25, No. 4, pp. 591-603.

Goicoechea, A., Hansen, D.R., and Duckstein, L. (1982). *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*. John Wiley & Sons, New York., pp. 19-23.

Haimes, Y.Y., and Hall W.A. (1974). "Multiobjectives in water resources systems analysis: the surrogate worth trade-off method." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 10, No. 4, pp. 615-624.

Hasebe, M., and Nagayama, Y. (2002). "Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and operation support." *Advances in Engineering Software*, ELSEVIER, Vol. 33, pp. 245-260.

Hobbs, B.F., and Heppenstal A. (1989). "Is optimization optimistically biased?" *Water Resources Research*, AGU, Vol. 25, No. 2, pp. 152-160.

Huang, W.C., Yuan, L.C., and Lee, C.M. (2002). "Linking genetic algorithm with stochastic dynamic programming to the long-term operation of a multireservoir system." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 38, No. 12, pp. 40-1-40-9.

Keeney, R.L. (1992). *Value-focused Thinking: A Path to Creative Decisionmaking*. Harvard University Press, Cambridge.

Keeney, R.L., and Wood, E.F. (1977). "An illustrative example of the use of multiattribute utility theory for water resource planning." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 13, No.4, pp. 705-712.

Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A., Hsu, E., and Yuan S.Q. (1990). "Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir

- operation." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 26, No. 2, pp. 447-454.
- Kim, Y.-O., and Palmer, R.N. (1997). "Value of seasonal flow forecasts in Bayesian stochastic programming." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 327-335.
- Marglin, S.A. (1967). *Public Investment Criteria*. MIT Press, Cambridge.
- Martin, Q. (1983). "Optimal operation of multiple reservoir systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 58-74.
- Nash, S., and Sofer, A. (1996). *Linear and nonlinear programming*, McGraw-Hill, New York.
- Needham, J., Watkins, D., Lund, J., and Nanda, K. (2000). "Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 126, No. 3, pp. 118-127.
- Rao, S.S. (1996). *Engineering optimization*, John Wiley & Sons, New York.
- Sharma, V., Jha, R., and Naresh R. (2004). "Optimal multi-reservoir network control by two-phase neural network." *Electric Power Systems Research*, ELSEVIER, Vol. 68, pp. 221-228.
- Stedinger, J.R., Sule, B.F., and Loucks, D.P. (1984). "Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 20, No. 11, pp. 1499-1505.
- Tejada-Guibert, J., Stedinger, J.R., and Staschus, K. (1990). "Optimization of the value of CVP's hydropower production." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 52-70.
- Trezos, T. (1991). "Integer programming application for planning of hydropower production." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 340-351.
- Zadeh, L. (1963). "Optimality and non-scalar-valued performance criteria." *IEEE Transactions on Automatic Control*, IEEE, Vol. 8, No. 1, pp. 59-60.

(논문번호:04-12/접수:2004.02.23/심사완료:2005.06.24)