

## 댐하류하천정비사업의 댐 운영개선 효과 경제성 분석 (I) -용수공급 및 발전생산 회복편익

### Economic Analysis of Dam Operation Improvement by Dam Downstream River Improvement Works (I)-Recovered Benefits of Water Supply and Hydropower Generation

이 광 만\* / 이 을 래\*\* / 유 승 훈\*\*\*

Lee, Gwangman / Lee, Eul Rae / Yoo, Seung-Hoon

#### Abstract

Allocated water storage of dam at the planning and design stage does not seem to be maintained well at the operation stage because of unexpected critical reasons. A dam is likely to be subject to negative effects caused by changes of dam operation conditions and it is hardly avoidable. Therefore, it must be timely improved to recover its original functions and looked for better alternatives to keep its original roles. Specifically the improper management of river condition degrades flood control capability in a dam and river eco-system. The dam downstream river improvement work is needed for normalizing dam functions and its valuations. This study focuses on estimating water use benefits from recovering its own effective storage buffer restricted for flood control. As the results, the water supply and the hydropower benefits in Imha, Daechung and Youngdam Dam are recovered totally by 19.9 million m<sup>3</sup>/year and 20.8 GWh/year respectively. Also those results are used for the basic information of the economic analysis in the dam downstream river improvement work.

**Keywords** : dam downstream river improvement work, economic benefit, flood control

#### 요 지

댐의 계획과 설계단계에서 설정된 유효저수용량은 여러 가지 이유로 운영단계에서 잘 지켜지지 못하는 경우가 있다. 어떤 댐은 운영과정에서 내 외적인 주변여건의 변화로 본연의 운영목적을 달성하는데 어려움이 있을 수 있다. 따라서 이를 개선하기 위해서는 시설물의 목표 달성을 위한 기능회복이 적절히 이루어져야 하며, 관련 대안들이 마련되어야 한다. 특히 댐 하류하천의 부적절한 관리는 댐의 홍수조절기능과 하천환경에 부정적인 영향을 미친다. 결국 댐의 다목적 기능을 정상화 시키고, 댐의 경제적 가치를 높이기 위한 댐하류하천정비사업이 댐사업자에 의해 진행되고 있다. 본 연구는 댐하류하천정비의 미흡으로 홍수조절을 위해 제약되었던 댐의 유효저수용량의 회복에 의한 이수편익을 분석하였다. 분석결과 임하, 대청 및 용담댐 등 3개댐에서 용수공급량은 19.9백만m<sup>3</sup>/년 그리고 발전량은 20.8GWh/년이 증대되는 것으로 나타났다. 아울러 본 연구를 통해 얻어진 이수효과 정보는 댐직하류하천정비사업의 전체 경제성 평가 및 비용배분의 기초자료로

\*\*\* 교신저자, K-water연구원, 수석연구원, 공학박사 (e-mail: lkm@kwater.or.kr)

Corresponding Author, Head Researcher, Kwater Institute, Daejeon 306-711 Korea

\*\* K-water연구원, 책임연구원, 공학박사 (e-mail: erlee@kwater.or.kr)

Principal Researcher, Kwater Institute, Daejeon 306-711 Korea

\*\*\* 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 교수 (e-mail: shyoo@seoultech.ac.kr)

Professor, Graduate School of Energy and Environment, Seoul National Univ. of Science and Technology, 172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

활용되었다.

**핵심용어** : 담지하류하천정비사업, 경제편익, 홍수조절

## 1. 서론

댐이 건설된 이후 운영편익은 수문이나 운영조건이 변하지 않는다 하여도 여러 가지 이유로 원래의 목적이나 목표를 달성하기 어려운 상황이 발생하는 것이 일반적이다. 이는 댐 자체의 구조적인 문제라기보다는 계획 당시 예상하지 못했던 외부환경의 변화로 인해 여러 가지 제약조건이 발생하기 때문이다. 어떤 경우는 원래의 목표를 초과하는 편익이 발생하는 경우도 있으나 대부분 수문량의 증가나 댐의 구조자체의 변경, 운영방법의 개선 등에 의한다. 일례로 국가수자원장기종합계획(건설교통부/한국수자원공사, 2001)에서는 다목적댐간 연계운영을 통해 시너지적 용수공급 증가량을 추정하여 반영한바 있는데 이는 경우는 댐간 연계운영을 통한 운영개선 편익증대라 할 수 있다(김승권 등, 2005; 강민구 등, 2007).

다목적댐은 계획단계나 건설완료 후에 저수용량을 여러 목적별로 사용범위를 배분하고 이를 적절히 유지하기 위하여 댐 운영규정이나 방법을 정하고 있다. 이후 댐 운영초기에 설정된 운영규정이나 방법은 원래 목적을 지속적으로 충족시키거나 보다 효과적인 편익추구를 위하여 재조정하는 사례가 있다. 경우에 따라서는 새로운 목적의 추가도 가능하며 이럴 경우 기존용량을 목적별로 재배분하는 작업이 필요하다(McMahon and Farmer, 2004). 그러나 저수용량의 재배분은 편익의 확실한 증가를 신뢰할 수 있을 때, 운영환경이 변했을 때, 그리고 목적별 우선순위의 조정이 필요할 때 등이나 특별한 경우가 아니면 잘 시행하지 않는다(Wurbs and Carriere, 1988). 실제 댐의 유효저수용량이나 운영방법은 댐이 건설되기 전에 결정되어지는 것이 일반적이다. 하지만 시간이 지날수록 보다 효과적인 운영을 위하여 운영목적이나 저수용량의 재설정 필요할 경우도 발생한다. 결국 댐 운영은 이렇게 작용하는 여러 가지 변화요인에 대처하면서 날로 새롭게 발전해 가는 과정이라 할 수 있다.

그러나 대부분의 다목적댐 운영의 경우 홍수기에는 댐 하류 하천의 환경변화로 인해 계획홍수량 수준까지 방류하지 못하고 있다. 이로 인해 유효저수용량의 이용이 제약을 받아 이수측면에서 용수공급과 수력발전 편익이 감소하는 사례가 발생하고 있다(Valdes and Marco, 1995). 이때 댐 하류 하천의 환경변화라는 것은 주로 홍수통수능의 저하이다(Van Duivendijk, 1999). 이는 하천이 댐에서 조

절된 홍수량을 안전하게 하류로 배수시키는데 필요한 통수단면이 충분히 확보되지 못한 피해발생의 우려 때문이다. 어떤 경우는 댐과 하천의 설계기준이 다르거나 하천정비사업이 이루어 지지 못한 경우 근본적인 문제가 존재한다. 이는 댐 운영자 측면에서는 큰 손실이라 할 수 있으며, 이를 해소하여 정상화시키는 것이 홍수피해를 줄이고 용수공급을 원활히 할 수 있는 방안이다(Votrubá and Breza, 1989).

이런 측면에서 댐사업자 입장에서 댐하류하천정비는 홍수방어 및 하천환경 등 하천의 기능을 정상화시키면서 댐의 운영목적을 달성하기 위해 필요한 사업이라 할 수 있다. 또한 댐 운영 영향권 내 하류하천의 정비를 통해 하천 및 댐의 정상적 기능의 확보가 필요하다. 거시적으로는 유역통합관리, 하천관리체계 합리화, 수자원시설물 기능개선 향상 및 기대편익 증진을 추구할 수 있다. 본 연구는 댐사업자가 시행하는 댐하류하천정비를 통해 발생하는 효과를 평가하기 위한 방법론을 개발하고자 하였다. 방법론은 낙동강수계 임하댐과 금강수계 대청 및 용담댐의 하천정비사업과의 연계에 따른 이수편익에 적용되었다. 즉 홍수기 무피해 방류 능력 증대 정도와 이를 기준으로 댐의 용량배분 개선을 유도할 수 있다. 평가방법은 댐하류하천의 홍수방어수준 향상 및 하천정비 미흡으로 야기된 안전홍수통수능을 유지하기 위해 제약된 댐의 유효저수용량의 회복효과를 대상으로 하였다. 따라서 편익은 유효저수용량의 회복정도에 따른 추가적 용수공급과 이로 인한 발전량 증가를 평가하였다. 아울러 얻어진 정보는 댐하류하천정비사업의 경제성 평가의 기초자료로 활용하였다.

## 2. 댐 운영과 하천관리

### 2.1 댐과 하천의 연관성

대부분의 다목적댐은 용수공급, 홍수조절, 수력발전 그리고 하천유지용수 공급을 목적으로 하고 있으며, 용수공급 등 개별 목적만을 목표로 하는 단일 목적댐도 많이 건설되어 운영되고 있다. 다목적댐의 경우 각각의 목적을 충분히 달성하면서 다른 목적을 훼손하지 않는 범위에서 추가적 편익을 기대할 수 있다. 다만 개별 목적의 편익을 초과하는 성과를 내기 위해서는 저수용량 배분기준이나 외적 고려사항이 보다 유연하게 적용되어야 한다. 또한 직접적인 구조적 시설개선이나 시스템 개량을 통하지 않고 유역이나 하천관리 측면에서 일부 기능을 보완함에 따

라 댐 운영 기능도 같이 향상시킬 수 있다. 이를 통해 얻어지는 효과는 새로운 편익의 발생이라기보다는 기능회복에 의해 발생하는 댐 운영가치의 증대이다. 이와 같은 관점에서 댐사업자의 댐하류하천정비를 통한 댐 기능의 정상화는 새로운 편익을 발생시키는 것은 아니지만 현재 여건에 비하여 시설물 운영의 자산적 가치를 증대시키는 경제적 효과를 기대할 수 있다.

위와 같은 논리는 댐 관리영역을 댐 체를 기준으로 한 상류 담수가능구역에서 댐 운영에 의해 영향을 받는 하류 구간을 포함할 경우 댐 운영은 근본적으로 새롭게 정의할 필요가 있다. 이는 원활한 댐 운영과 댐 관리영역의 개선을 통하여 편익의 극대화 추구를 목적으로 한 하천정비사업에 여러 가지 의의를 부여할 수 있기 때문이다. 우선 지금까지의 댐 운영을 살펴보면 댐체 혹은 상 하류 설비에 의해 제공되는 서비스로부터 발생하는 편익, 즉 용수공급이나 수력발전 그리고 홍수조절 등이다. 하천유지유량을 제공하는 댐에서는 이의 편익을 추가할 수 있다. 그러나 댐하류하천정비는 실제 댐 시설물과 구조적으로 직 간접적인 연계가 있다고 볼 수 있으며 시스템적인 연계가 가능하다. 즉 댐하류하천정비는 댐 운영에 직 간접적으로 영향을 미치고 댐과 저수지, 상 하류를 포함하는 유역개념의 접근방법이 필요하다. 따라서 댐사업자의 댐 영향권 내 하천정비사업은 하천이용관리 편익을 증대시키는 것으로 이들 관계는 Fig. 1과 같은 연관성을 고려하여 하나의 시스템으로 해석할 수 있다.

한편 댐에서의 홍수조절 기능은 홍수피의 감소와 홍수의 체류시간 증대 등으로 하류 홍수관리에 도움을 주고 있다. 댐의 유효저수용량은 때때로 물이 차지 않은 상태에서 홍수가 겹 경우 홍수조절에 더 큰 기여를 할 수 있다 (Halcrow, 2000). 그래서 홍수조절 목적이 포함되어 있는 대부분의 다목적댐에서는 하절기 제한수위를 두어 더 많

은 홍수조절용량을 확보하고 있다. 경우에 따라서는 유효저수용량의 잉여용량은 홍수조절에 기여하고 반대로 홍수조절용량에 저류된 물은 수력발전 등 이차목적에 기여할 수 있게 된다. 그러나 이와 같은 상호 보완적 역할이 있음에도 댐 운영의 기본은 두 목적간 배분된 용량을 엄격히 제약조건으로 준수한다 (Ford, 1990). 이유는 용수공급의 중요도와 댐의 홍수조절 기능을 가능한 지킴으로써 하는 의도이다. 홍수조절과 용수공급 목적의 저류량은 가능한 지켜할 기준이나 전체적인 편익의 증대를 위해 재배분이 주장되기도 한다. 예로 이재웅과 권용익 (2004)은 대청댐을 대상으로 용량 재배분이 가능할 경우 기대편익을 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

댐과 하천의 홍수관리는 유역개념의 치수종합계획이나 하천제방관리, 수자원의 적절한 이용과 매우 밀접한 관련이 있다. 댐 건설에 직접 영향을 받는 댐 상류부 하천은 댐 건설에 따라 만들어진 저수지에 홍수시 유량이 저류되면서 발생하는 배수위 영향이 미치는 상류 하천구간까지 재해발생을 방지하거나 줄이는데 필요한 제방 등 시설을 하고 있다. 댐 하류부 하천은 댐 계획시 홍수량을 방류시키는 여수로 방류시의 영향이 미치는 구간 정도를 한계로 하여 댐 하류제방보강 등의 시설을 댐 사업비에 포함하여 시행하여 왔다. 최근에는 댐 사업비에 댐 하류하천 환경정비사업 등을 포함하는 추세이나 하천관리상 문제로 댐 하류 하천에 국한되어 시행하고 있다. 이에 따라 댐과 하천은 하도 및 저수로부터 지형변화나 인위적인 개발 등에 의해 유수 통수능의 저하 등 여러 가지 하천기능의 문제점이 야기되었다. 결국 유역의 홍수 경감계획에서 가장 기본적인 수단은 Fig. 2와 같이 댐에 의한 홍수조절과 제방에 의한 보호로 이들 관계의 비용최소화 (Duijvendijk, 1999) 혹은 사업의 타성성 여부에 따른 균형유지가 댐하류하천정비의 근간이 된다.

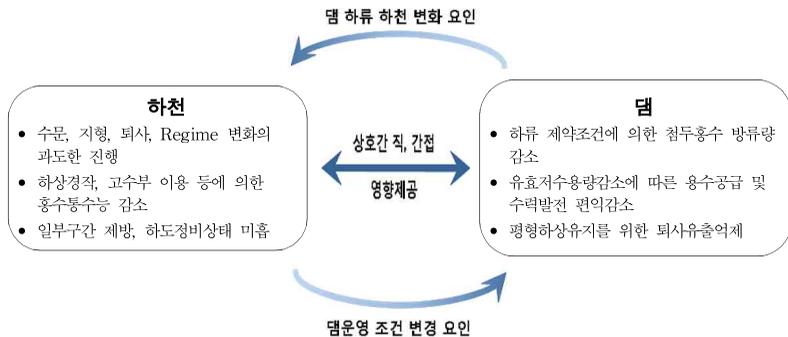


Fig. 1. Reciprocal Effective Relation between Dam and Downstream River

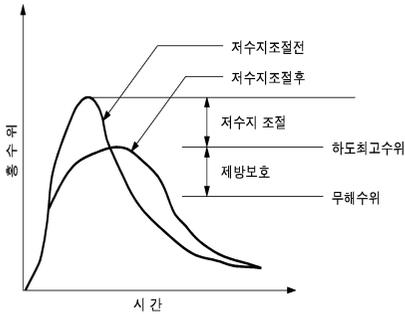


Fig. 2. Concept of Flood Protection by Dam and Levee

## 2.2 사업효과 분석 절차

다목적댐의 경우 통상적으로 운영목적이 2가지 이상이다. 대부분 운영목적간에는 상충관계가 존재하게 되는데, 이는 어느 한 목적의 편익을 증가시키면 다른 목적의 편익이 감소함을 의미한다. 편익은 저류량이나 방류량 혹은 유효수두 등으로 계산되기 때문에 비선형관계를 이루며, 각각의 편익 역시 기준값이 달라 단순 상대비교는 의미가 없다. 따라서 각각의 목적간 변화정도를 Tradeoff (타협적 해결) 해석을 통해 전체 편익을 추정하게 된다. 그러나 용수공급과 같은 운영목적은 수요량만 만족시키면 되나 발전량의 경우 많이 생산하면 할수록 좋다. 홍수조절의 경우도 하류에 피해를 주지 않는 범위 내에서 방류량을 걸

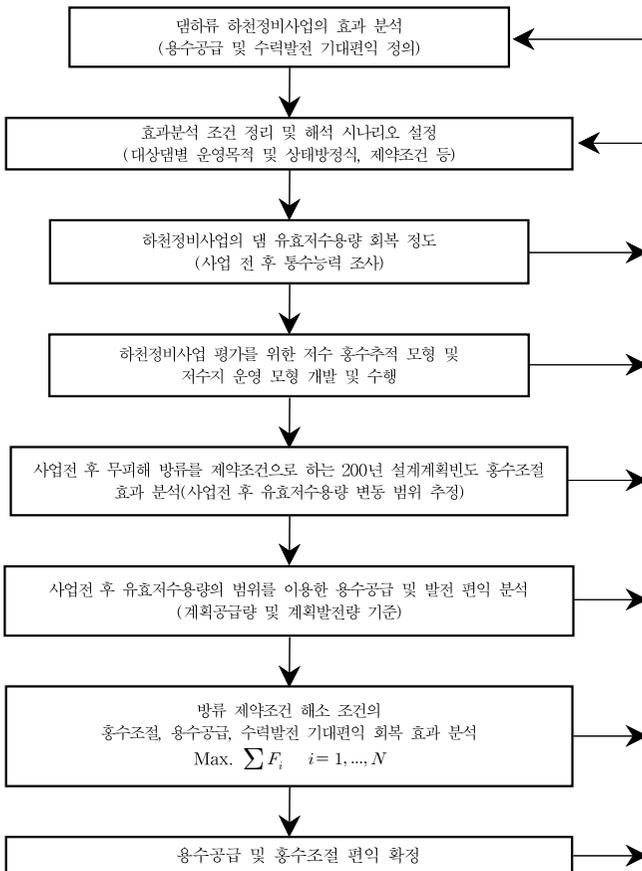


Fig. 3. Process of Effectiveness Analysis in Dam Downstream River Improvement Works

정하고 무효방류를 최소화시켜 유효저수용량을 가능한 많이 확보하여 용수공급이나 발전편익을 증대시키는 전략이 유효하다. 따라서 댐하류 지역의 홍수피해 방지를 위한 무피해 방류조건인 홍수조절 용량과 이에 근거한 유효저수용량을 활용한 이수편익 추정을 위한 연계 분석방법은 Fig. 3과 같다.

결국 홍수조절의 안전성을 높이려면 댐의 홍수조절용량을 더 확보하는 것이 좋으나 이는 곧 저수위를 낮추고 유효저수용량을 감소시켜 용수공급과 발전량의 감소를 초래할 수 있다. 홍수조절은 침투유입량이나 유입홍수 총량을 가능한 평활화시키며 경우에 따라서는 방류시간도 중요하다. 댐을 통한 가장 이상적인 홍수량 방류방법은 댐의 홍수시 운영조건을 준수하면서 하류에 피해가 발생하지 않게 하는 것인데 이는 수문사상의 불확실성이나 하천의 제방 수준 등 여러 가지 제약조건에 의해 쉽지 않다. 댐사업자 입장에서 댐하류하천정비는 댐의 홍수조절기능을 정상화할 수 있어 운영편익의 회복효과 (recovery effect)를 기대할 수 있다. 따라서 각각의 운영목적간 상충관계로 해석하기 보다는 기존의 운영목적을 최적화하면서 하천정비사업의 효과를 극대화할 수 있는 전략이 요구된다. 즉, 하천정비사업을 통해 개별목적의 편익을 최대화하면서 전체적인 효과를 극대화하는 개념이다.

### 2.3 편익 해석 모형

댐하류하천정비사업에서 치수사업의 기본목표는 댐 직하류 하천에서 유수의 제약사항을 해소하여 하천 홍수 소통능력을 확보하는 것이다. 이를 통해 댐 본연의 홍수 조절기능을 회복시켜 댐 운영의 효율을 극대화하는 전략이다. 따라서 댐하류하천의 홍수소통능력을 고려하여 홍수기 댐의 적정 재천수위를 모의하기 위한 저수지홍수 추적 모형과 이를 기준으로 이수편익을 계산할 수 있는 저수지 운영모형이 필요하며 다음과 같다.

#### 2.3.1 저수지 홍수 추적 모형

댐하류하천정비사업에 따른 초기 운영수위 저감효과를 분석할 수 있는 댐 운영모형을 적용하였다. 설계시의 유입량 및 방류량자료를 이용하여 무피해방류량 및 하천 계획홍수량을 적용하였다. 실질적으로 유입량 및 방류량 자료를 이용하여 무피해 방류량의 유효량이 가능하였을 경우 운영을 해야만 했던 수위가 하천정비사업을 수행하게 됨으로서 하천계획홍수량수준까지 하류하천으로 방류하는 것이 가능하게 되고, 이를 통하여 댐 운영수위가 상승하게 된다. 이러한 양은 하천의 이 치수효과에 직접적인 편익이 될 수 있다. 통상적으로 홍수시 댐운영은 댐수위를 홍수기 말에 상시만수위 부근에서 유지될 수 있도록 홍수

조절을 하는 것이 가장 최적의 운영조건이다. 따라서 과거의 홍수조절 현황을 파악하고, 이러한 운영의 개선이 필요한 지 분석하게 된다. 이러한 절차들을 수행한 후 하천정비사업 전 후의 수위저감효과를 분석하고 이에 따른 비용편익의 자료로 제공할 수 있다.

저수지의 홍수추적은 질량보존에 근거한 저류개념을 이용하게 된다(윤태훈, 1997). 하도구간의 유입량과 유출량과의 차이는 다음식과 같이 저류량의 변화율과 같다.

$$\bar{I} - \bar{Q} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1)$$

$\Delta S$ 는  $\Delta t$  동안의 저류량의 변화량이다. Eq. (1)을  $\Delta t (= t_2 - t_1)$ 의 시작되는 시간  $t_1$ 과 끝나는 시간  $t_2$ 에서의 값들로 표시하면 Eq. (2)와 같다.

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t = S_2 - S_1 \quad (2)$$

Eq. (2)는 저수지의 추적방정식이고  $I_1, I_2, Q_1$  및  $S_1$ 은 시간  $t_1$ 에서 알려진 값이며, 시간  $t_2$ 에서의 값인  $Q_2$ 와  $S_2$ 는 미지값이다. Eq. (2)에서의 저류량-유량함수는 표고-저류량곡선과 표고-유량곡선을 이용해서 유도된다. 표고-저류량곡선은 표고에 대한 저류량을 나타내는 곡선으로 지형도의 등고선을 이용해서 작성된다. 표고  $h_i$ 에 해당하는 등고선으로 둘러싸인 면적  $A_i$ 를 구적으로 구하고 같은 방법으로 표고  $h_{i+1}$ 에 해당하는 면적  $A_{i+1}$ 을 구하면 표고  $h_i$ 와  $h_{i+1}$  사이의 저류량  $\Delta S$ 는 Eq. (3)과 같다.

$$\Delta S = \frac{1}{2} (A_i + A_{i+1}) \Delta h \quad (3)$$

여기서,  $\Delta h (= h_{i+1} - h_i)$ 는 등고선 간격이다. 따라서 표고  $h_n$ 에 대한 저류량  $S_n$ 은 Eq. (4)와 같고  $h_n$ 과  $S_n$ 을 도시하여 표고-저류량곡선을 얻는다.

$$S_n = \frac{h}{2} (A_1 + 2 \sum_{i=2}^{n-1} A_i + A_n) \quad (4)$$

저수지 추적식인 Eq. (2)에서  $I_1$ 와  $I_2$ 는 주어지고  $Q_1$ 과  $S_1$ 는 초기치로 주어지거나 전단계 계산에서 알려진다. 따라서 Eq. (2)는  $Q_2$ 와  $S_2$ 의 2개의 미지값을 갖는다. 기지의 값들이 좌변에 오도록 Eq. (2)를 정리하면 Eq. (5)와 같으며, 양변에  $2/\Delta t$ 를 곱하면 Eq. (6)과 같다.

$$\frac{1}{2} (I_1 + I_2) \Delta t + (S_1 - \frac{1}{2} Q_1 \Delta t) = S_2 + \frac{1}{2} Q_2 \Delta t \quad (5)$$

$$I_1 + I_2 + (2S_1/\Delta t - Q_1) = 2S_2/\Delta t + Q_2 \quad (6)$$

Eq. (6)에서 나타난 바와 같이,  $Q$ 와  $(2S/\Delta t + Q)$  곡선

이 필요하고 저류량의 단위가 아니라 유량의 단위에서 추적계산이 수행된다. 저수지추적곡선인  $Q$ 와  $(2S/\Delta t + Q)$  곡선은 상이한 표고에 대한 유량  $Q$ 와 저류량  $S$ 를 이용하여  $(2S/\Delta t + Q)$ 를 계산하여 이를 횡축에,  $Q$ 를 종축에 도시하여 작성된다. 추적계산은 Eq. (6)의 좌변의 각항이 기지이므로 우변의  $(2S_t/\Delta t + Q_t)$  값이 계산되고, 이에 대응하는  $Q_t$ 는 저수지 추적곡선상에서 또는 내삽법을 활용하여 구할 수 있다. 다음 시간단계의 계산을 위해  $2S_{t+1}/\Delta t - Q_t$ 의 값이 필요하고 이는 직접 계산하거나 또는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$(2\frac{S_{t+1}}{\Delta t} - Q_{t+1}) = (2\frac{S_t}{\Delta t} + Q_t) - 2Q_t \quad (7)$$

### 2.3.2 이수부분 평가 모형

댐적하류하천정비사업에 의해 발생 가능한 편익의 추정을 위해서는 평가지표의 기준설정이 중요하다. 기존 시설물이 운영되고 있거나 기존 시설물의 성능개선 효과의 차이를 대상으로 하는 경우 또는 시스템적으로 연계되어 있는 경우 등은 기준을 정하기가 쉽지 않다. 댐적하류하천정비사업에 의거 기존 제방이 보강될 경우 기존 시설이 제공할 수 있는 편익에서 새로 추가된 사업이 제공하는 유 무형의 편익을 가려내야 한다. 용수공급편익은 수력발전 편익과는 달리 목표공급량 (혹은 수요량)만 달성하면 되는 구조이다. 따라서 기준지점 (control point) 혹은 댐에서의 목표방류량을 충족시키면 된다. 수요량이나 목표량 이상 방류된 유량은 실질적으로 용수공급 기여도가 없으므로 계획공급량 기준의 평가가 타당하다. 또한 추가적 편익의 발생조건이 하천정비사업에 의한 유효저수용량 가능회복에 의한 것이므로 공급량을 확대하는 측면의 보장방류량 증대조건 등은 논리적으로 적용하기 어렵다. 이의 개념을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_t (\text{계획방류량 부족 최소화}) = \text{Min} \sum_{i=1}^T (WS_i + 5)^2$$

if  $WR_t < WD_t$  then  $WS_t = WR_t - WD_t$  (8)

otherwise  $WS_t = 0$

여기서,  $WS_t$ 는  $t$ 단계에서 계획공급량을 달성하지 못한 경우의 용수부족량을 의미하며, 반면 용수공급이 충족되었을 경우  $WS_t$ 는 0이다. 이때  $WR_t$ 는 댐에서의 방류량, 그리고  $WD_t$ 는 용수수요량을 의미한다. 이때 부족량이 1보다 적을 경우 민감도를 높이기 위해 상수값을 더하여 제공하도록 하였다.

한편 댐에서 생산되는 발전량은 댐 운영 실적을 직접적

으로 평가할 수 있는 지표 중의 하나이다. 일반적으로 다목적댐에서의 발전편익은 용수공급과 대응관계에 있는데 우리나라에서는 용수공급 목적의 우선순위가 발전보다 앞서서 것이 원칙으로 받아들여지고 있다. 즉, 용수공급을 충족시킨 조건에서 발전생산의 극대화를 추구하는 개념이다. 또한 수력발전은 침투부하를 담당하거나 출력조절 용으로 활용되기 때문에 보장출력 혹은 전체 생산 전력을 대상으로 평가할 수 있다. 여기서는 사업으로 인한 발전편익을 검토하므로 일정기간 생산된 전력의 총합으로 평가할 수 있어 Eq. (9)와 같은 지표를 적용할 수 있다.

$$F_2 (\text{총발전량}) = \text{Max} \sum_{t=1}^T HP_t \quad (9)$$

$$HP_t = 9.8 \cdot Q_t \cdot H_t \cdot \eta$$

여기서,  $HP_t$ 는  $t$ 기간의 발전생산량,  $T$ 는 발전량 평가를 위한 댐 운영 기간,  $Q_t$ 는 댐에서의 방류량 중 수차를 통과하는 유량,  $H_t$ 는 유효수두,  $\eta$ 는 터빈과 발전기의 합성효율을 나타낸다.

본 연구에서는 용수공급과 수력발전을 평가하기 위해 Eqs. (8)~(9)를 결합한 다목적 함수로 해석하기 위해 아래의 Eq. (10)과 같이 구성하였다. 이때 목적간의 우선순위를 절대적으로 고려하기 위해 가중치를 적용하였는데, 수력발전 목적함수의 값이 용수공급의 목적함수값보다 월등히 적게 계산되도록 하여 두 목적함수간의 순위를 명확히 하였다.

$$\text{목적함수} = \text{Min} \sum_{i=1}^T (W_1 F_1 + W_2 F_2) \quad (10)$$

여기서,  $W_1$  및  $W_2$ 는 가중치이다.

용수공급과 하천유량개선 측면에서 실제 댐의 운영 실적을 평가하기 위해서는 평가지점을 먼저 선정해야 한다. 평가지점은 댐을 운영할 때 용수공급의 기준지점의 물수지 분석이 필요하다. 물수지 방정식은 일반적으로 상류 유입량, 중간 취수량, 하류 방류량, 저류량의 변화 등으로 구성된다. 이중 저수지를 기준으로 한 물수지방정식은 Eq. (11)과 같다.

$$X_{t+1} = X_t + R_t - WR_t - E_t - D_t \quad (11)$$

여기서  $X_t$ 와  $X_{t+1}$ 는 운영기간  $t$ 의 초기 및 말저류량,  $R_t$ 는 운영기간  $t$ 의 유입량,  $WR_t$ 는 운영기간  $t$ 의 댐 방류량 및 직접공급량,  $E_t$ 는 운영기간  $t$ 의 댐내 증발량,  $D_t$ 는 운영기간  $t$ 의 댐내 취수량을 나타낸다. 본 연구에서는 이상의 이수부분 평가를 위해 동적계획기법 (Dynamic Programming)모형을 개발하여 적용하였으며, 수치해석부분의 엔진은 CSU DP (Labadie, 1988)을 이용하였다.

### 3. 댐 운영 제약 요인

댐의 홍수조절 기능은 저수지로 유입되는 홍수량이 저수지를 통과할 때 저류기능에 의해 첨두홍수량이 감소되면서 지체되는 현상을 이용하는 것으로, 댐 건설전 홍수량이 하천을 통과하는 시간보다 건설 후 홍수량이 하천을 통과하는 시간이 더 길어지게 된다. 이러한 유출변화는 유사차단으로 인한 하천의 장갑화 현상과 사주와 식생의 변화를 유발하며, 제방과 취수장 및 교량 등 하천시설물에도 영향을 미친다. 특히 하천부지내 경작은 통수능 저하뿐만 아니라 하천수질에도 나쁜 영향을 미치고 있어 이의 구체적인 조사와 개선이 필요하다.

Table 1과 같이 2006년 조사된 32개 댐 직하류 하천구간내 댐운영 제약사항(건설교통부/한국수자원공사, 2007)은 총 124건이었으나, 2007년도에는 156건으로 32건이 증가하였다. 댐 운영 제약사항 중 공사현장 및 지장물이 2006년 59건, 2007년 47건으로 가장 많았고, 경작지역도 2006년 30건, 2007년 34건으로 상당히 높은 비중을 차지하였다. 결과적으로 이와 같은 하천상태는 댐 운영의 제약사항으로 작용하며, 이는 댐에 부여된 목적을 달성하는데 장애요소가 된다. 이들 제약사항 중 어느 하나만을 해결해서는 댐 운영이나 하천의 홍수저감효과를 기대하기 어려워 전체적인 해결방안 수립이 요구되었다.

댐 건설로 인한 현상 중 하나는 유출이 안정되면서 하천부지 이용의 증가이다. 댐을 통해 홍수조절이 되므로 하천구역의 침수빈도가 낮아지고 하천구역의 불법점용이 증가하였다. 또한 댐 건설이후 하상내 사주가 점차 감소하고 그 자리에 식생이 자리 잡으면서 하천의 통수능을 저해하는 사주 식생문제가 새로운 하천환경문제를 야기하고 있다. 사주 식생의 변화는 새로운 하천생태경관과

생물서식지를 제공한다는 긍정적인 측면도 있지만 하천의 통수능을 감소시키고 하도의 육상화가 지속되면서 하천의 수생태계를 변화시키는 부정적인 측면도 있다. 특히 일부 하천구역은 접근이 불가능할 정도로 수림화 되어가고 있다. 사주는 36% 감소한 반면, 식생면적은 4.5배 증가한 것으로 분석되었다(건설교통부/한국수자원공사, 2007). 각 댐별로 살펴보면 한강권역의 소양강댐이 위치한 소양강은 사주와 식생 모두 증가하였고, 충주댐의 한강은 사주가 67% 감소한 반면, 식생은 1.4배 증가하였다. 금강, 섬진강, 영산강 및 낙동강의 사주면적은 13~53% 감소하고, 식생면적은 1.0~6.8배 증가하였다.

### 4. 댐하류하천정비사업 효과 분석

#### 4.1 적용 조건

댐직하류하천정비사업은 기존의 하천사업이 갖고 있던 제방 위주의 홍수방어개념의 치수계획에서 벗어나, 댐의 홍수조절 기능 회복, 댐 하류 하천 상태에 따른 댐 운영 제약사항의 해소 및 하천의 홍수소통능력 향상을 위한 치수개념의 도입이다. 17개 다목적 댐의 경우 경작지 34건 등 156건의 댐 운영 제약사항을 해소함에 따른 무피해 방류량 증대 및 댐의 홍수조절 기능 회복에 의한 효과를 정량적으로 검토할 수 있게 되었다. 사업시행 전 무피해 방류량이 여수로 설계방류량 대비 현재 약 16.3%에서 70.8%, 하천계획홍수량 대비 90.6%의 증가가 예상되었다(건설교통부/한국수자원공사, 2007). 따라서 댐직하류하천정비사업에 의한 치수효과와 댐운영관리 개선효과는 상당할 것으로 예상된다. 댐직하류하천정비사업 기본계획 조사와 댐운영실무편람(한국수자원공사, 2007)에 의한 시범 적용 대상 댐인 입하, 대청 및 용담댐의 홍수관련 제원은

Table 1. Cases of Subjective Factors Affecting Dam Operation

권역	조사년도	공사현황	지장물	주거지역	민원지역	경작지역	수질오염	취수장	기타사항	계
계	'06년	35	24	1	-	30	-	-	34	124
	'07년	17	30	16	12	34	12	9	26	156
한강권역	'06년	1	3	1	-	7	-	-	14	26
	'07년	4	7	-	1	2	1	2	18	35
금강권역	'06년	1	3	-	-	8	-	-	5	17
	'07년	1	2	1	-	2	1	-	4	11
섬진강·영산강권역	'06년	4	16	-	-	15	-	-	4	39
	'07년	5	17	1	5	19	-	1	2	50
낙동강권역	'06년	29	2	-	-	-	-	-	11	42
	'07년	7	4	14	6	11	10	6	1	60

**Table 2. Design Floods and Restricted Releases for Flood Safety in Dam Downstream River**

댐별	무피해 방류량 (m <sup>3</sup> /s)	여수로 설계방류량 (m <sup>3</sup> /s)	하천계획 홍수량 (m <sup>3</sup> /s)	목표 홍수량 (m <sup>3</sup> /s)	계획 홍수위 (EL.m)	상시 만수위 (EL.m)	홍수기 제한수위 (EL.m)
입하댐	500	2,500	1,885	1,710	164.7	163.0	161.7(154)*
대청댐	1,000	6,000	5,900	5,350	80.0	76.5	-
용담댐	300	3,211	2,730	2,730	263.5	263.5	261.5

(주)\*: '04년 5월부터 잠정운영 (2007, 댐운영실무편람)

**Table 3. Current and New Possible Releases without Flood Damages**

댐	구 분	홍수량 (m <sup>3</sup> /sec)	방류량 (m <sup>3</sup> /sec)	초기운영수위 (EL.m)
입하댐	설계제원	4,600	2,500	161.7
	무피해방류량	4,600	500	156.4
	하천계획홍수량	4,600	1,885	160.8
대청댐	설계제원	7,539	6,000	76.5
	무피해방류량	7,539	1,000	74.6
	하천계획홍수량	7,539	5,900	76.5
용담댐	설계제원	5,500	2,730	263.5
	방류가능량	5,500	700	260.1
	하천계획홍수량	5,500	2,730	263.5

Table 2와 같고, 이들 댐의 직하류 하천에서 200년 홍수량 기준 무피해 방류량과 하천정비사업 후 통수가능 목표홍수량은 Table 3과 같이 제시되었다.

#### 4.2 효과 분석

많은 댐에서 댐 직하류 하천에서의 제약사항으로 인하여 여수로 설계방류량에 훨씬 못 미치는 방류가 이루어지고 있다. 이로 인해 댐의 유효저수용량을 공용량으로 배분된 하절기 제한수위 아래를 홍수조절용량으로 활용하는 상황이다. 결국 하천의 치수사업을 통해 이를 해소하고 댐의 기능을 정상화시켜 댐과 하천의 관리효과를 극대화하는 것이 필요하였다. 이와 관련 본 연구에서는 댐직하류하천정비사업 대상 댐 중 입하, 대청 및 용담댐을 시범적으로 분석하였다. 이들 사업의 효과는 하천관리의 법적 주체(국토해양부)와 사업의 주체(K-water)를 고려하여 사업 자측면에서의 투자비 회수 등을 고려하여 계산이 가능한 부분의 편익을 중심으로 추정하였다. 하천에서의 홍수조절 효과는 공공편익으로 보아 경제적 분석에서만 적용하였고 수질개선효과나 환경생태개선효과는 제외하였다.

직하류하천정비사업을 통해 확보 가능한 유효저수용량을 추정하기 위하여 저수지 홍수추적 모형을 이용하여 홍수기 댐 운영 기준수위를 계산하였다. 각 댐들은 200년 빈

도 홍수조건에서 최고수위가 계획홍수위를 초과하지 않는 범위에서 기준수위를 계산하였다. 입하댐의 경우 현재 무피해 방류 가능량이 500 m<sup>3</sup>/s에서 하천정비 후 1,885 m<sup>3</sup>/s으로 증가하게 된다. 따라서 하절기 상한 기준수위는 Fig. 4와 같이 현재의 EL.156.4m에서 정비 후에는 EL.160.8m로 4.42m 상승하게 된다. 대청댐은 계획홍수위를 EL.80.0m로 적용시 현재의 무피해 방류 가능량이 1,000 m<sup>3</sup>/s에서 5,900 m<sup>3</sup>/s으로 증가함에 따라 유효저수용량 상한 수위는 각각의 조건에 대해 Fig. 5와 같이 EL.74.6m에서 EL.76.5m로 1.9m 상승이 가능하다.

본 연구에서 시범 적용 대상 댐으로 선정한 용담댐은 2008년 실시설계가 완료되었다. 따라서 새로 분석할 경우 결과에 차이가 있을 수 있어 실시설계보고서의 자료를 그대로 적용하였다(국토해양부/한국수자원공사, 2008). 보고서에 의하면 용담댐 하류하천의 제방 방어능력이 증대된 용담댐 방류 가능량이 700 m<sup>3</sup>/s에서 2,730 m<sup>3</sup>/s로 증가하게 된다. 따라서 홍수기 운영수위는 현재의 EL. 260.1m에서 EL. 263.5m로 회복 가능한 것으로 나타났다.

댐직하류 하천정비에 의해 댐에서의 방류 가능량 증가에 따른 유효저수용량의 증대효과를 Eqs. (8)~(12)를 이용하여 이측면에서 추정하였다. 적용대상 3개의 댐에 대하여 하천정비사업에 의한 용수공급 증대는 계획공급

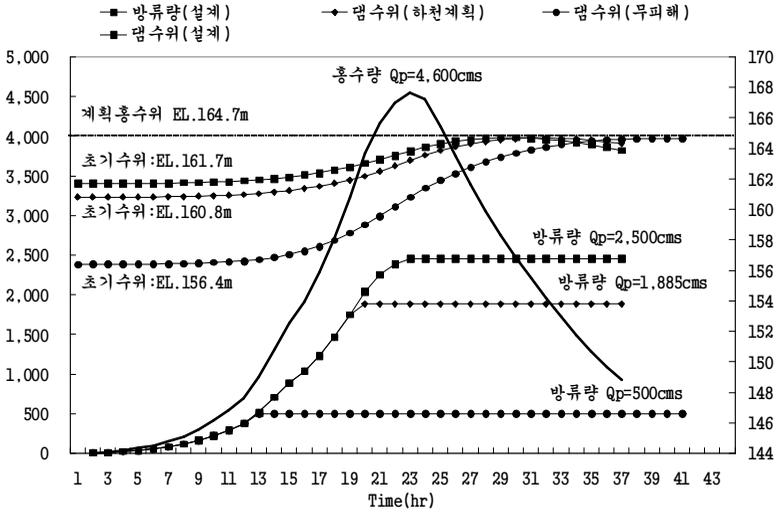


Fig. 4. Hydrograph of Flood Simulation at Imha Dam

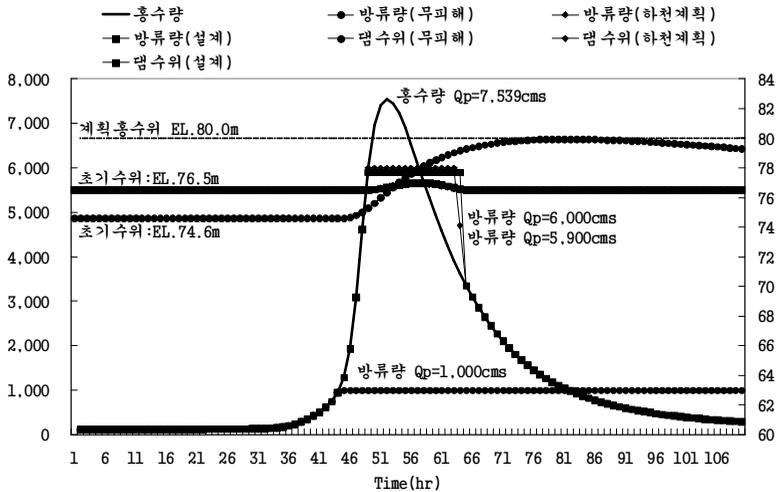


Fig. 5. Hydrograph of Flood Simulation at Daechung Dam

량에 대한 공급부족량으로 산정하였으며, 정비 전 후의 발전량 증가효과도 검토하였다. 계산방법은 앞에서 추정된 운영 가능한 수위를 근거로 이수현의 증대효과를 분석하였는데, 각 댐의 사업 전 후의 용수공급량을 분석하여 차이를 개선효과로 정의하고 부문별 비율로 계산하여 Table

4에 제시하였다. 발전부문의 경우도 사업 전 후의 발전량을 비교하여 차이를 개선효과로 제시하였다.

적용결과를 분석해 보면, 임하댐은 용수부문에서는 연간 11.5백만 $m^3$ 의 용수공급량의 증대효과가 나타났으며, 발전량도 연간 5.3 GWh의 효과로 분석되었다. 대청댐의

Table 6. Estimated Benefits of Water Supply and Hydropower in Imha, Daechung and Youngdam Dam

댐/부문		항목	권의 추정치
임하댐	용수부문	○ 계획공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	592.00
		- 생활용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	364.0
		- 농업용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	13.0
		- 유지용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	215.0
		○ 사업전 용수공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	493.3
		○ 사업후 용수공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	504.9
	○ 용수공급 개선효과 (백만m <sup>3</sup> /년)	11.54	
	발전부문	○ 계획 발전량 (GWh/년)	96.7
		○ 사업전 발전량 (GWh/년)	75.0
		○ 사업후 발전량 (GWh/년)	80.3
○ 발전량 개선효과 (GWh/년)		5.3	
대청댐	용수부문	○ 계획공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	1,649.0
		- 생활용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	1,300.0
		- 농업용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	349.0
		- 유지용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	-
		○ 사업전 용수공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	1,600.6
		○ 사업후 용수공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	1,604.6
	○ 용수공급 개선효과 (백만m <sup>3</sup> /년)	4.0	
	발전부문	○ 계획 발전량 (GWh/년)	204~196
		○ 사업전 발전량 (GWh/년)	146.5
		○ 사업후 발전량 (GWh/년)	152.4
○ 발전량 개선효과 (GWh/년)		5.9	
용담댐	용수부문	○ 계획공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	656.9
		- 생활용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	492.6
		- 농업용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	7.3
		- 유지용수 (백만m <sup>3</sup> /년)	157.0
		○ 사업전 용수공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	639.9
		○ 사업후 용수공급량 (백만m <sup>3</sup> /년)	644.3
	○ 용수공급 개선효과 (백만m <sup>3</sup> /년)	4.4	
	발전부문	○ 계획 발전량 (GWh/년)	198.5
		○ 사업전 발전량 (GWh/년)	196.4
		○ 사업후 발전량 (GWh/년)	206.0
○ 발전량 개선효과 (GWh/년)		9.6	

경우 용수부문에서는 연간 4백만<sup>3</sup>의 증대효과가 나타났으며, 발전량도 연간 5.9 GWh의 증대 효과가 나타났다. 용담댐은 물수지 분석결과 정비 전 후 용수공급능력은 639.9백만<sup>3</sup>/년에서 644.3백만<sup>3</sup>/년으로 연간 4.4백만<sup>3</sup>

용수공급량이 증가하는 것으로 분석되었다. 용담댐의 발전효과는 제1발전소 (180백만kWh/년)와 제2발전소 (18백만kWh/년)에서 9.6 GWh/년 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 3개댐 전체를 합하면 용수공급량은 19.9백만

m<sup>3</sup>/년 그리고 발전량은 20.8 GWh/년이 증대되는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

댐의 기능은 건설 이후 시간이 지남에 따라 여러 가지 영향을 받는다. 우리나라의 경우 댐 하류하천지역의 홍수 방어기준의 향상과 하천관리의 미흡으로 홍수시 방류 제약조건이 존재해 왔다. 따라서 대부분의 다목적 댐들이 하류하천의 통수제약조건으로 인해 배분된 유효저수용량을 충분히 활용하지 못한 상황이었다. 따라서 댐 영향권 내 하류하천을 댐의 정상적 운영을 위한 관리영역으로 포함시켜 문제를 해결하고자 하는 노력이 필요했다. 이에 댐으로 인해 변화된 하천을 정비하고 기존 생태계를 복원하며 홍수피해를 저감시켜 사회적 안정성을 높여려는 사업이 추진되고 있다. 이에 댐의 정상적 기능을 확보하여 용수공급과 발전편익의 회복정도를 평가할 수 있는 방법을 개발하고 3개댐에 대해서 제시하였다.

본 연구는 이와 관련 하천정비사업에 의한 댐에서의 효과를 추정하고 경제적 분석을 실시하여 그 타당성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 하류의 하천조건을 고려한 댐의 홍수조절 정도에 따른 유효저수용량의 설정과 관련 접근방법을 개발하여 이수편익을 추정하고, 치수와 이수편익을 근거로 하천정비사업과 댐 운영편익에 대한 경제성 평가를 활용하였다. 적용결과 임하댐은 용수부문에서는 연간 11.5백만m<sup>3</sup>, 발전량부문에서 연간 5.3 GWh의 효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 대청댐의 경우는 용수부문에서 연간 4백만m<sup>3</sup>, 발전량부문은 연간 5.9 GWh의 효과가 나타났다. 용담댐은 물수지 분석결과 정비 전 후 용수공급능력은 639.9백만m<sup>3</sup>/년에서 644.3백만m<sup>3</sup>/년으로 연간 4.4백만m<sup>3</sup> 용수공급능력이 증가하고 하천정비 후 발전량은 9.6 GWh/년 증가가 예상되었다.

## 참고문헌

강민구, 이광만, 차형선 (2007), “다목적댐군의 실제연계 운영효과평가”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제2호, pp 100-112.

국도해양부/한국수자원공사 (2008). 용담댐직하류하천정비사업 실시설계보고서.

건설교통부/한국수자원공사 (2007). 댐직하류 하천정비사업 기본계획 보고서.

김승권, 이용대, 박명기 (2005). “낙동강 수계 실시간 댐군 최적연계운영의 시너지 효과.” **2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.

윤태훈 (1997). 응용수문학.

이재용, 권용익 (2004). “다목적댐 용량 재할당에 대한 연구 (II)-이수용량 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp.283-292.

한국수자원공사 (2007). 댐운영 실무편람.

Ford, D.T. (1990). “Reservoir Storage Reallocation Analysis with PC.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 3, pp. 402-416.

Halcrow, P.H. (2000). A Review of the Role of Dams and Flood Management, World Commission on Dams.

Labadie, J.W. (1988). *Dynamic Programming with the Microcomputer Program CSUDP* Civil Engineering Department, CSU, Fort Collins, Co.

McMahon, G.F., and Michael C. Farmer (2004). “Reallocation of Federal Multipurpose Reservoirs: Principles, Policy, and Practice.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 3, pp. 187-197.

Valdes, J.B., and Marco, J.B. (1995). “MANAGING RESERVOIRS FOR FLOOD CONTROL.” *U.S.- Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods Perugia (Italy)*.

Van Duivendijk, J. (1999). Assessment of Flood Management Options, Prepared for Thematic Review IV.4, World Commission on Dams.

Votruba, L., and Breza, V. (1989). *Water Management in Reservoirs. Developments in Water Science*, Vol. 33, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Wurbs, R.A., and Patrick, E. Carriere (1988). *Evaluation of Storage Reallocation and related Strategies for Optimizing Reservoir System Operations*, Texas Water Resources Institute/Texas M&A University.

논문번호: 11-036	접수: 2011.04.04
수정일자: 2011.07.01/08.12	심사완료: 2011.08.12