

다목적댐군의 실제 연계운영 효과 평가

Evaluation of Effects of Real Joint-Operation of Multi-purpose Dams

강민구* / 이광만** / 차형선***

Kang, Min Goo / Lee, Gwang Man / Cha, Hyung Sun

Abstract

In this study, a methodology was developed to evaluate the effects produced in the event of joint-operation of dams from the viewpoint of water use. It was applied to evaluating the actual results of dam operation in the Han River basin. In order to evaluate the effects of real joint-operation in terms of water supply and flow conditions, the methodology used the satisfaction rate of water requirement and the stability of flow conditions at the evaluation site as indicator. In order to evaluate the effects of joint-operation in terms of power generation, the total power generation produced by dams was used as evaluation indicator. Actual operation results were evaluated by comparison of evaluation indicators relating to single dam operation by which the notified amount of water was supplied, as well as to optimization models. Results of actual joint-operation of the Han River basin, from 2001 to 2004, were compared yearly with results from single operation and optimization model; in terms of water supply, the satisfaction ratio of water requirement stood at 94.36~99.68 % for single operation, 97.16~99.90 % for actual joint-operation, and 100.0 % for optimization model for all four years. The stability of flow condition was evaluated by the coefficient of river regime and coefficient of flow conditions definitely, indicating that flow conditions were more stable in case of actual operation and optimization models than in case of single operation. The actual total power generation was compared with that generated by other operation rules, indicating that the optimization model increased the power generation by -3.47~6.54 % compared with the actual total power generation, and that the single operation decreased the power generation amount by 12.68~38.94 % compared with the actual total power generation.

keywords : Effects of joint-operation, Evaluation index, Dam operation rule, The Han River Basin

요 지

본 연구에서는 댐군을 연계운영할 경우 발생하는 효과를 이수측면에서 평가할 수 있는 방법을 개발하여 한강수계 댐군 운영 실적의 평가에 적용하였다. 개발된 평가방법에서는 용수공급과 유황개선 부분에서 연계운영의 효과를 평가하기 위하여 평가지점에서 필요수량에 대한 충족률과 유황안정도를 평가지표로 사용하였다. 발전 부분에서 연계운영의 효과는 댐군에 의해 생산된 총발전량을 평가지표로 사용하였다. 실제 운영실적은 공칭공급량을 공급하는 단독운영과 최적화 모형에 의한 평가지표들과 비교하여 평가되었다. 한강수계의 2001년부터 2004년까지의 실제 연계운영 실적을 단독운영과 최적화 모형의 결과와 각 연도별로 비교해 보면, 용수공급 측면에서 필요수량

* University of Illinois at Urbana-Champaign, Visiting Scholar
 Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA
 (e-mail: kmg901@hanmail.net)

** 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원
 Head Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(KOWACO), Daejeon, Korea, 305-730

*** 한국수자원공사 강원지역본부 한강유역관리팀 부장
 Department Head, Korea Water Resources Corporation(KOWACO), Chuncheon, Korea, 200-811

충족률은 단독운영은 94.36~99.68 %, 실제운영은 97.16~99.90 %, 최적화 모형은 4개년 모두 100.0 %를 나타냈다. 댐 운영 방법별로 하상계수와 유황계수를 사용하여 유황안정도를 평가해 보면, 유황이 단독운영 보다 실제운영과 최적화 모형이 더 안정적인 결과를 나타냈다. 실제 총발전량을 다른 운영방법의 결과와 비교해 보면, 최적화 모형은 실제 총발전량 보다 -3.47~6.54 % 증가된 결과를 나타냈으며, 단독운영은 실제 총발전량 보다 12.68~38.94 % 감소된 결과를 나타냈다.

핵심용어 : 연계운영 효과, 한강수계, 평가지수, 댐운영률

1. 서론

인구가 증가하고, 사회가 도시화되고 산업화되면서 물사용량은 증가하는 경향을 나타낸다. 도시화와 산업화는 오염물질 배출량을 증가시켜 하천의 수질이 악화되고, 친수기능이 떨어지면 이를 방지하기 위한 용수의 수요도 증가하게 된다(건설교통부와 한국수자원공사, 2000). 이와 같이 늘어나는 용수수요를 충족시키기 위한 구조적인 방법 중의 하나는 댐을 건설하는 것이다. 그러나 최근에는 개발적지가 부족하고 환경문제로 인해 댐건설에 의한 수자원 확보는 사회적 저항을 받고 있다. 따라서 지속가능한 개발 개념에 근거한 비구조적인 방법으로 수자원 이용의 효율성을 높이는 방안에 대한 검토가 필요하다(강민구와 박승우, 2005; 고익환, 2004).

최근 일반 국민들은 물과 관련된 환경을 개선하여 보다 풍부하고 양질의 물을 공급받기를 원한다. 또한, 수자원에 대한 국민의 관심이 높고 민간주도의 감시기능도 강화되고 있으며, 물이용에 대한 많은 의견들이 제시되고 있다(건설교통부와 한국수자원공사, 2003). 이는 경제발전에 따라 국민소득이 향상되어 수자원 이용의 편리성 증대와 양질의 물 사용을 원하기 때문이다. 이와 같은 물에 대한 국민들의 요구를 해결하기 위해서는 수자원을 이용하고 관리할 때 수량뿐만 아니라 수질과 생태도 고려해야 한다. 이를 위해서 세계적으로 수자원의 통합 운영에 대한 관심이 집중되고 있다. 국내·외에서도 수계 내 댐군의 연계운영을 통해서 이수와 치수 측면에서 수자원 이용의 효율성과 지속가능성을 향상시키려는 많은 연구가 진행되고 있다(Cai and Lasdon, 2002; Fowler et al., 2003; 이재웅과 송재우, 2002; 고익환, 2004; 이재웅, 2005; 음형일 등, 2005; Lee, 2005).

수자원 시설물들을 독립적으로 운영하는 것 보다 연계운영하면 더 많은 양의 편익이 발생한다. 직렬이나 병렬 형태로 구성된 댐군을 인접한 댐들의 수문상황과 용량, 제어지점들의 수문상황을 고려하면서 운영하면 무효 방류량을 저감시킬 수 있어서 시너지 효과(synergistic gain)를 얻을 수 있다(김승권 등, 2005). 수

자원시스템을 연계운영하는 방법에는 수계 내 댐들의 연계운영, 주댐과 보조댐의 연계운영, 댐군과 펌핑시스템과 같이 상이한 수자원 시설물들의 연계운영으로 구분할 수 있다(정창삼 등, 2001; 김태순과 허준행, 2001; 이재웅과 송재우, 2002; 이재웅, 2005; 음형일 등, 2005; 이광만 등, 2005; Lee, 2005). 국내에서는 실제로 한강수계의 댐들을 1999년부터 통합운영하여 홍수기에 하류의 홍수피해를 저감시키고 이수기에 안정적인 용수공급을 하고 있다. 그러나 실제 댐 연계운영에 의한 효과가 아직까지 정량적으로 산정되어 있지 않은 상태이다. 따라서 댐군 연계운영의 효율을 향상시키기 위해서는 실제 운영되고 있는 댐군의 운영실적을 분석하여 연계운영에 의해 발생하는 효과들을 정량화하고 효과의 달성정도를 다른 운영 방법과 비교하여 평가할 필요가 있다.

현재 운영되고 있는 댐 운영 방법의 적절성을 평가하기 위해서는 실제운영에서 발생하는 효과를 다른 운영방법과 비교하여 평가해야 한다. 이를 위해서는 현재 적용되고 있는 운영방법에 의해서 발생하는 편익들을 선정하고 이들을 수치적으로 정량화할 수 있는 방법의 개발이 선행되어야 한다. 댐 운영의 편익은 주로 수문 조건에 영향을 받는다. 따라서 운영방법에 따라 발생하는 편익의 차이를 평가하기 위해서는 동일한 수문조건 하에서 운영 방법에 따라 발생하는 편익들을 산정해야 한다. 댐군 운영 방법으로는 단독운영, 최적연계운영, 실제운영으로 구분할 수 있다. 댐군의 최적 연계운영은 최적화 모형을 사용하여 댐군을 운영하는 방법이며, 실제 운영조건과 동일한 조건에서 운영될 경우 가장 이상적인 편익을 생산하는 운영 방법이다. 단독운영은 수자원 시스템의 요소들이 상호 독립적이라는 조건에서 개별 운영하는 방법이며, 댐의 건설 목적을 달성하기 위하여 운영하는 방법이다. 실제 운영되고 있는 댐군의 운영결과를 평가하기 위해서는 이와 같은 운영 방법에 의해 발생하는 편익들을 산정하여 실제운영의 효과를 종합적으로 비교할 필요가 있다.

본 연구에서는 댐군을 연계운영할 경우 발생하는 시너지 효과를 평가할 수 있는 방법을 개발하여 한강수계 댐군의 실제 운영 실적 평가에 적용하였다. 이수측면에

서 댐군을 연계운영하여 발생하는 효과는 용수공급, 수력발전, 유헴개선으로 구분하였다. 용수공급과 유헴개선 부분에서 댐군 연계운영에 의해 효과를 평가하기 위하여 댐군의 하류에 평가지점을 선정하고 필요수량에 대한 충족률과 유헴 안정도를 산정하였다. 발전 부분에서 실제 연계운영의 효과를 평가하기 위하여 수계 내 댐군에 의해 생산된 총발전량을 산정하였다. 이와 같은 방법으로 산정된 실제 운영의 효과는 공칭공급량을 공급하는 단독운영과 최적화 모형에 의한 것들과 비교하여 평가하였다.

2. 댐 운영 평가 지표 및 산정 방법

댐군 연계운영에 의한 효과를 분석하기 위해서는 다른 운영방법과 비교하여 연계운영에 의한 효과를 평가할 수 있는 지표들이 필요하다. 댐 운영에 의해서 발생하는 편익으로는 용수공급, 발전, 홍수조절, 유헴개선, 수질개선 및 레크레이션 등이 있다. 이러한 편익들을 수계 내에 있는 댐들을 연계운영하여 단독운영에 의해 발생하는 것들보다 증가시키는 것이 댐군을 연계운영하는 목적이다. 이수측면에서 댐군의 연계운영에 의한 편익으로는 용수공급, 수력발전, 유헴개선이 있다. 이는 댐군 연계운영의 효과가 단독운영보다 안정적이고 효율적으로 용수를 공급하고 단독운영보다 많은 양의 전력을 생산하며, 단독운영보다 안정적으로 하천의 유량을 유지하는 것을 의미한다. 이와 같은 연계운영의 효과를 정량적으로 평가하기 위해서는 지표(indicator)가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 3가지 효과를 평가할 수 있는 지표로 필요수량 충족률, 총발전량, 유헴안정도를 개발하여 사용하였다.

2.1 평가 지표

2.1.1 필요수량 충족률

댐에 의한 용수공급 편익은 수요지점의 수요량을 얼마나 충족시켰는가로 평가할 수 있다. 단독운영은 수요처의 필요수량을 각 댐의 상황을 고려하여 공급하는 것이다. 댐군의 연계운영에서는 제어지점(control point)의 필요유량을 추가적으로 고려해야 한다. 용수공급측면에서 댐군의 연계운영 효과를 평가하기 위하여 Eq. (1)과 같은 필요수량 충족률을 사용하였다.

$$\text{필요수량 충족률(\%)} = \frac{WS}{WR} \times 100 \quad (1)$$

여기서 WR은 제어지점의 필요수량, WS는 용수공급량을 나타낸다.

2.2.2 총발전량

댐에서 생산되는 발전량은 댐 운영 실적을 직접적으로 평가할 수 있는 지표 중의 하나이다. 발전량은 댐군의 운영 방법에 따라 각 댐에서 상이하게 나타난다. 따라서 댐군에 의해서 생산되는 발전량은 각 댐들의 발전량의 총합으로 평가해야 한다. 발전측면에서 댐군 연계운영 효과를 평가하기 위하여 Eq. (2)와 같은 총발전량을 지표로 사용하였다.

$$\text{총발전량} = \sum_{i=1}^n HE_i \quad (2)$$

여기서 HE_i는 i댐의 발전량, n은 댐의 개수를 나타낸다.

2.2.3 유헴안정도

댐이 건설되면 하천 유출량이 다소 감소하나 발전방류와 수문방류를 통해서 평활화(smoothing)된 유량이 하류 하천으로 공급되며, 이에 따라 자연 상태의 갈수량보다 많은 유량이 흐르게 된다. 댐에 의한 유헴개선 효과는 홍수시 유출량을 감소시키고 갈수량을 많이 하여 자연 상태보다 유량 변동폭을 작게 하여 하천의 유헴을 안정화시키는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 댐 운영 방법에 따른 하천 유헴개선 효과를 비교하기 위하여 유헴안정도를 평가지표로 사용하였다. 하천의 유헴을 나타내는 물리적인 계수로는 이진원 등(1993)이 댐건설로 인한 유헴 분석에 사용한 하상계수와 유헴계수가 있다. 또한, 박상덕(2003)은 자연하천의 유헴분석에 평수량에 대한 저수량과 갈수량의 비율 유량 변동계수라 정의하여 사용하였다. 본 연구에서는 유헴안정도를 Eq. (3)~(5)와 같은 하상계수, 유헴계수, 유량변동률을 사용하여 산정하였다.

$$\text{하상계수} = Q_{\max}/Q_{\min} \quad (3)$$

$$\text{유헴계수} = Q_{10}/Q_{355} \quad (4)$$

$$\text{유량변동률} = Q_{95}/Q_{355} \quad (5)$$

여기서 Q_{max}는 연최대 유량, Q_{min}은 연최소 유량을 나타내며, Q₁₀은 연유량 중 10위에 해당하는 유량, Q₉₅는 연유량 중 95위에 해당하는 유량, Q₃₅₅는 연유량 중 355위에 해당하는 유량을 나타낸다. 하상계수와 유헴계수는 연최대 유량이나 이에 근접한 유량과 연최소유량이나 이에 근접한 유량을 사용하므로 홍수시나 고유량시 하천의 유량 변화를 비교할 수 있으며, 유량변동률은 평수량에 대한 갈수량의 비율을 나타내므로 홍수시나 갈수시 보다는 평수시의 하천의 유량 변화를 비

교할 수 있다.

2.2 평가지표의 선정 방법

용수공급과 하천유황개선 측면에서 실제 댐군의 연계운영 실적을 평가하기 위해서는 평가지점을 먼저 선정해야 한다. 평가지점은 댐군을 운영할 때 사용하는 제어지점이다. Eq. (1)과 Eq. (3)~(5)를 사용하여 필요수량 충족률과 유황안정도를 평가하기 위해서는 평가지점에서 물수지 분석이 필요하다. 물수지 방정식은 일반적으로 Eq. (6)과 같이 상류 유입량, 중간 취수량, 하류 방류량, 저류량의 변화 등으로 구성된다.

$$D_R = U_I - I_D - \Delta S_I \quad (6)$$

여기서 D_R 은 하류 방류량, U_I 는 상류 유입량, I_D 는 중간 취수량, ΔS_I 는 저류량의 변화를 나타낸다.

Eq. (1)을 사용하여 필요수량 충족률을 평가하기 위해서는 평가지점의 필요수량을 산정해야 한다. 평가지점의 필요수량은 Eq. (7)과 같다.

$$WR = I_D + RD_R \quad (7)$$

여기서 RD_R 은 평가지점 하류의 최소요구량을 나타낸다.

유황개선효과를 나타내는 유황안정도는 물수지 분석 결과인 하류 방류량(D_R)에서 Q_{max} , Q_{min} , Q_{10} , Q_{95} , Q_{365} 를 추출하여 Eq. (3)~(5)와 같은 지표들을 산정한다.

2.3 댐 운영 방법

실제 댐군의 연계운영 효과는 실제운영에 의해 발생하는 편익들의 평가지표를 선정하고 다른 운영방법과 비교하여 평가할 수 있다. 비교대상이 되는 운영방법은 Fig. 1과 같이 각 해의 동일한 수문조건을 사용하여 단독운영으로 공칭공급량을 공급하는 방법과 최적화 모형을 사용한 최적연계운영이다. 최적연계운영은 최적화 모형을 사용하여 댐군을 연계운영하는 것으로, 이 때 발생하는 편익들로 어떤 시스템이 생산할 수 있는 가장 큰 값에 해당된다. Fig. 1과 같이 실제운영에 의해서 얻어진 편익은 단독운영과 최적연계운영사이에 놓이게 되며, 단독운영과의 편익의 차는 연계운영에 의한 시너지 효과라고 할 수 있다. 용수공급과 하천유황개선 측면에서 실제 댐군의 연계운영 효과를 찾기 위해서는 적절한 평가지점을 선정하여 운영방법별로 필요수량 충족률과 유황안정도를 산정한다. 댐군을 연계운영하여 얻어진

실제 수력발전 측면의 효과는 댐들을 단독운영하거나 최적화 모형에 의한 발전량을 실제 운영결과와 비교하여 평가한다.

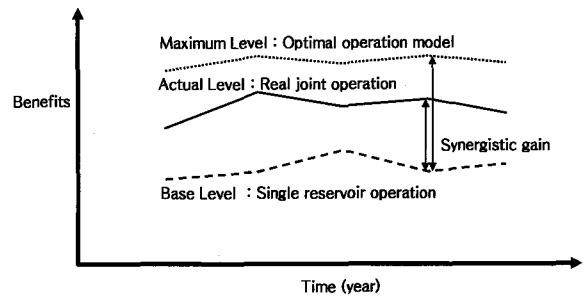


Fig. 1. Conceptual comparison of benefits attained by real joint-operation, single dam operation, and optimal operation model

3. 대상 수계 및 평가지점

3.1 대상수계

본 연구에서 개발된 댐군 연계운영 실적 평가 기법을 적용하여 이수측면에서 한강수계 다목적댐군의 연계운영 실적을 평가하였다. 한강 수계 내에 있는 댐들은 용수공급, 홍수조절, 발전, 다목적 등과 같은 목적으로 총 13개가 건설되어 운영되고 있다. 이들 댐들은 북한강 수계에 6개소, 남한강수계에 6개소, 한강 본류에 1개소가 위치하고 있다. 이들 댐 중 관리기관이 상이하기 때문에 운영이 이원화되어 있었으나 1999년 5월부터 건설교통부 훈령에 의해서 기술적으로 통합운영되고 있다. 충주댐과 소양강댐의 연계운영에 대해서는 충주댐이 1986년에 건설되어 운영되어 온 이후 많은 연구가 진행되어 왔다(한국수자원공사, 1992; 한국전력공사, 1998; 정창삼 등, 2001; 김태순과 허준행, 2001; 이광만 등, 2005). 그러나 이들 연구는 최적화 모형의 결과에 근거를 두고 있으며, 실제 연계운영 실적을 분석한 연구는 미진한 실정이다.

3.2 평가지점 선정

남한강에 위치한 충주댐과 북한강에 위치한 소양강댐의 방류량은 팔당댐 상류의 양수장과 취수장에 의해 일부 취수되고 대다수는 팔당댐으로 유입되어 하류로 방류된다. 충주댐과 소양강댐은 병렬저수지군 형태이다. 따라서 댐군 연계운영 실적을 분석하기 위해서는 한강 수계의 하류에 위치한 지점을 평가지점으로 선정해야 한다. 한강 하류에서 댐군 운영의 제어지점으로 사용되고 있는 지점은 한강대교(인도교)와 팔당댐 지점이 있

다. 한강대교 지점은 이수분석의 기준지점으로 사용되며(이광만과 이재웅, 1997), 홍수시 상류에 위치한 댐군의 연계운영에 의해 홍수조절을 하기 위한 제어지점으로 사용되고 홍수조절의 효과를 평가하기 위한 평가지점으로 사용되기도 한다(건설교통부와 한국수자원공사, 2005). 팔당댐 지점은 이수기 한강 수계의 댐군 연계운영을 위한 제어지점으로 여러 연구에서 사용된 바가 있다(정창삼 등, 2001). 한강대교지점을 이수 측면에서 평가지점으로 선정하기 위해서는 이곳의 상류 유입량, 중간 유입량, 중간 이수량, 하천유지유량을 산정해야 한다. 그러나 한강대교 지점의 하천유지유량은 다양한 계획과 연구에서 상이하게 산정되어 있다(건설교통부와 한국수자원공사, 1998). 이와 같이 한강대교 지점은 한강 하류에 위치한 중요한 제어지점이지만 하천유지유량이 결정이 되어 있지 않아 이수측면의 평가지점으로 사용하기 어렵다. 이에 비하여 팔당댐 지점에서는 하류에 방류해야 할 최소유량이 정해져 있다. 팔당댐의 책임방류량은 묘대이양기(5. 27~6. 10)에 138 m³/s, 기타 시기에는 124 m³/s를 하회하지 않는 유량으로 설정되어 있다(건설교통부, 1966). 이와 같이 팔당댐 지점에서는 시기별로 의무방류량이 설정되어 있기 때문에 용수공급량을 평가하여 연계운영의 효과를 평가할 수 있는 지점으로 사용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 소양강댐과 충주댐의 연계운영 실적을 평가하기 위한 지점으로 팔당댐 지점을 선정하였다.

4. 한강 수계 댐군 연계운영 실적 분석

4.1 팔당댐 지점의 물수지 분석

팔당댐 지점의 물수지 분석은 Eq. (8)과 같이 일반적인 물수지 방정식을 수정하여 사용하였다. 팔당댐은 상류의 유입량을 터빈발전과 수문방류를 통해서 방류하는 유로댐(flow-through) 형식으로 운영되고 있다. 따라서 댐의 저류효과가 적으므로 팔당댐을 하천의 임의 지점과 같이 처리하여 물수지 분석을 실시하였다.

$$D_{PR} = D_W + L_I - I_D \quad (8)$$

여기서 D_{PR} 하류 유량, D_W 는 상류 댐 방류량, L_I 는 팔당댐 자체유입량(형유입량), I_D 는 중간 취수량(팔당취수장)을 나타낸다. 상류 댐 방류량(D_W)은 Eq. (9)와 같이 소양강댐과 충주댐의 방류량 중에서 두 댐과 팔당댐 사이에서 취수나 양수한 양과 회귀수량을 고려한 값이다.

$$D_W = DR_S + DR_C - D_D - D_P + R_D + R_P \quad (9)$$

여기서 DR_S 는 소양강댐 방류량, DR_C 는 충주댐 방류량, D_D 는 취수량, D_P 는 양수량, R_D 는 취수량의 회귀수량, R_P 는 양수량의 회귀수량을 나타낸다.

4.2 실제 댐 운영

소양강댐과 충주댐은 Fig. 2와 같이 한강수계의 상류에 위치한 두수공(headwater)으로서 용수를 공급하고 전력을 생산하며 홍수조절을 실시하고 있다. 용수공급 측면에서 소양강댐과 충주댐의 운영은 두 댐을 연계운영하여 하류에 위치한 용수수요처에 용수를 공급하고 팔당댐 지점의 의무방류량을 충족시키기 위하여 운영된다. 전력생산 측면에서 두 댐의 운영은 공급용수를 발전용수로 사용하여 발전을 하므로 발전량을 최대화시키기 위하여 용수공급과 상충되므로 질충(trade-off)하여 운영되기도 한다. 예를 들어, 발전량을 최대화시키기 위하여 저수위가 낮을 경우에는 방류량을 줄이고 저수위를 높여 발전을 하도록 운영된다. 홍수조절 측면에서 두 댐의 운영은 홍수기에 홍수제한 수위를 설정하고 소양강댐은 770x10⁶ m³, 충주댐은 616x10⁶ m³의 홍수조절 용량으로 홍수조절을 실시하고 있다. 홍수기에는 저수위가 높아 발전량이 증가하므로 홍수기에 저수량을 높여 발전을 위한 저수위를 확보하고 다음 이수기의 용수수요에 대처하도록 운영된다. 또한, 홍수시 소양강댐은 유입량을 최대한 저류하고 충주댐은 하류 상황에 따라 방류를 하면서 홍수조절을 실시하고 한다. 두 댐의 주요 제원은 Table 1과 같다.

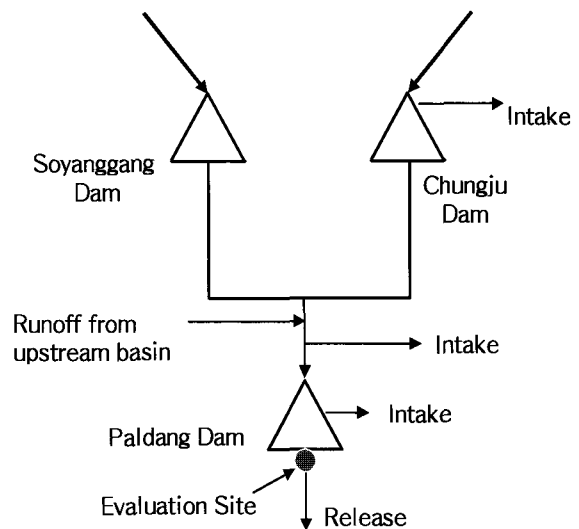


Fig. 2. Configuration of system for operation of multiple reservoir system in the Han River Basin

Table 1. Characteristics of selected dams in the Han River Basin

Dam	Watershed Area (km ²)	Full storage (x10 ⁶ m ³)	Effective Storage (x10 ⁶ m ³)	Flood control capacity (x10 ⁶ m ³)	Full water level (m)	Limited water level in flood season (m)
Soyanggang	2,703.0	2,900.0	1,900.0	770.0	193.5	185.5
Chungju	6,648.0	2,750.0	1,789.0	616.0	141.0	138.0

4.3 비교 대상 운영방법의 선정

4.3.1 공칭공급량을 공급하는 단독운영

현재 운영 중인 한강수계 댐군의 연계운영 실적을 평가하기 위하여 각 댐들이 단독운영될 경우의 결과와 비교하였다. 용수공급 측면에서 연계운영실적을 평가하기 위하여 단독운영시 팔당댐 지점에서 필요수량 충족률을 산정하여 실제운영의 결과와 비교하였다. 발전 측면에서 연계운영실적을 평가하기 위하여 단독운영에 의해 생산된 소양강댐과 충주댐의 발전량을 실제 발전량과 비교하였다. 유황개선 측면에서 연계운영 실적을 평가하기 위하여 단독운영과 실제운영에 의해 형성된 팔당댐 지점 하류의 유량을 사용하여 유황안정도를 산정하여 두 가지 방법의 운영결과를 비교하였다.

단독운영은 소양강댐과 충주댐에서 공칭공급량을 공급하는 운영방법이다. 공칭공급량은 댐을 설계할 때 수문자료와 예상되는 용수수요량, 댐의 제원을 사용하여 댐이 공급가능한 양을 미리 설정해 놓은 양이다. 소양강댐과 충주댐의 공칭공급량은 댐이 단독 운영할 때 공급이 가능한 양이며, 이는 필요 수량 공급(Firm supply) 방식으로 공급할 때 산정된 것이다. 소양강댐의 공칭공급량은 생·공용수 1,200x10⁶ m³, 농업용수 13x10⁶ m³으로 총 1,213x10⁶ m³이다. 충주댐의 공칭공급량은 생·공용수 2,731x10⁶ m³, 농업용수 315x10⁶ m³, 하천유지용수 334x10⁶ m³으로 총 3,380x10⁶ m³이다. 이 댐들의 공칭공급량 중 생활 및 공업용수, 하천 유지유량은 연중 일정한 양이 공급되도록 했으며, 농업용수는 공칭공급량이 설정된 것과 같이 월별로 각기 다른 양이 공급되도록 하였다. 또한, 댐에서 공칭공급량이 공급되고 팔당댐 상류의 취수장과 양수장에서 취수한 양 중 생활용수와 공업용수는 65%, 농업용수는 35%가 회귀되는 것으로 하였다. 그리고 공칭공급량이 모의 기간 동안 전량 공급되는 것으로 하였다. 단독운영에 의한 편익은 두 댐을 단독으로 운영할 경우 Fig. 2와 같이 팔당댐 지점에서 필요수량 충족률, 충주댐과 소양강댐의 발전량, 하류의 유황안정도를 사용하여 평가하였다. 단독운영을 모의할 때 연초 저수량은 실적자료를 사용하고 만수량과 사수량 사이의 저류량을 이용하여 공칭공급량을

공급하도록 하였다. 또한, 각 댐은 6월 21일부터 9월 20일 까지 홍수기 제한수위를 설정하고 이를 초과한 양은 여수로를 통하여 전량 방류되는 것으로 하였다.

4.3.2 최적화 모형을 사용한 최적연계운영

한강수계 댐군의 연계 운영 실적을 비교하기 위한 운영방법 중의 하나로 최적화 모형에 의한 연계운영을 선정하였다. 최적화 모형에 의한 댐군의 운영결과는 동일한 조건에서 모의운영 방법 보다 우수한 결과를 나타낸다. 그러나 시스템의 운영조건이 실제운영과 동일하지 않는 경우에는 이와 다른 결과를 나타낼 수 있다. 예를 들어, 홍수기에 댐의 저류량을 제한 수위이상으로 하여 저류량을 확보하여 운영할 경우에는 실제운영결과가 최적운영결과 보다 많은 편익을 발생할 수도 있다.

한강수계의 댐군 최적연계운영을 위한 시스템은 Fig. 2와 같이 구성하였다. 이 시스템의 목적은 소양강댐과 충주댐을 연계 운영하여 팔당댐 지점의 필요수량을 충족시키고 두 댐에서 생산되는 발전량이 최대가 되도록 하는 것이다. 한강수계에 위치한 화천댐과 횡성댐의 방류량은 팔당댐 자체유역의 유출량에 포함시켰다. 또한, 춘천댐, 의암댐 및 청평댐은 유로댐으로 처리하였다. 소양강댐과 충주댐 방류량의 중간 취수량, 팔당댐의 취수량은 실적 자료를 사용하였으며, 팔당댐 지점의 필요수량은 팔당댐의 의무방류량과 팔당취수장의 취수량을 합한 양을 사용하였다. 댐군의 최적운영은 2001년부터 2004년의 4개년에 대하여 매년 일별로 운영되는 것으로 하였다.

이수측면에서 한강수계의 댐군 운영은 용수수요처의 용수수요량을 공급하고 하천 임의지점의 필요수량을 충족시키며, 발전을 최대화시키는 방향으로 운영된다. 한강수계의 댐운영은 댐의 용수수요처에 용수량을 공급하는 것 이외에도 하천에 유지용수를 공급하기 때문에 하천의 유황을 고려하여 운영된다. 따라서 본 연구에서 적용한 최적연계운영 모형은 팔당댐 지점의 의무방류량과 팔당지점의 취수량을 충족시키고 발전을 최대화시키도록 댐군을 운영하는 것이다. 이를 위하여 Eq. (10)과 같이 필요수량과 공급량 사이의 편차를 최소화하고 발전량을 최대화하는 목적함수를 사용하였다.

$$\text{Max } F = [w_1 \times \sum_{t=1}^{NS} Pe_t - w_2 \times \sum_{t=1}^{NS} (Re_t - De_t)^2] \quad (10)$$

$$Pe_t = \sum_{i=1}^n f(Q_{i,t}, X_{i,t}, \eta_{i,t}) \quad (11)$$

$$Re_t = \sum_{i=1}^n [Q_{i,t} + QO_{i,t}] - Q_{u,t} + Q_{r,t} + QI_t \quad (12)$$

$$De_t = IQ_t + RD_t \quad (13)$$

여기서 F는 목적함수, t는 운영단계를 나타내며, NS는 최종단계, Pe_t 는 발전량, Re_t 는 팔당댐 지점의 유입 유량, De_t 는 팔당댐 지점의 필요수량, n은 저수지 수를 나타낸다. 발전량(Pe_t)는 댐 방류량($Q_{i,t}$), 저수량($X_{i,t}$)과 발전효율($\eta_{i,t}$)의 함수이다. 팔당댐 지점의 유입유량(Re_t)은 Eq. (12)와 같이 댐 방류량($Q_{i,t}$), 댐월류량($QO_{i,t}$), 자체유역유입량(QI_t), 중간취수량($Q_{u,t}$), 회귀수량($Q_{r,t}$)을 고려하여 산정된다. 팔당댐 지점의 필요수량(De_t)은 Eq. (13)과 같이 팔당댐의 의무방류량(RD_t)과 팔당취수량(IQ_t)을 합한 것이다. w_1 과 w_2 는 목적함수를 구성하는 각 항의 가중치를 나타낸다.

선정된 목적함수에 부합되도록 댐을 운영하기 위해서는 상태변수의 변화를 시간에 따라 추적해야 한다. 이는 전 단계의 운영 결과에 따라 변하는 시스템의 상태를 파악해야 다음 단계의 운영을 할 수 있기 때문이다. 본 연구에서 적용한 상태방정식은 저류량을 상태변수로 하여 Eq. (14)와 같이 정의하였다.

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + I_{i,t} - E_{i,t}(X_{i,t}, X_{i,t+1}) - Q_{i,t} \quad (14)$$

여기서 X는 저류량, I는 유입량, E는 증발손실량, Q는 방류량을 나타낸다. t+1과 t는 운영단계를 나타내며, i는 댐을 나타낸다. 댐의 손실량은 수면증발량이나 댐체의 누수량 등이 있다. 댐체의 누수량은 다른 양보다 미소하므로 제외하고 손실량으로 수면증발량만을 고려하였다. 수면증발량은 운영기간 t 동안의 초기 저류량과 말기 저류량에 해당하는 수면적을 평균한 값을 사용하여 계산하였다.

최적화 모형에 의한 소양강댐과 충주댐의 최적 연계 운영에 필요한 제약조건은 Eq. (15)~(17)과 같다.

$$X_{i,t}^{\min} \leq X_{i,t} \leq X_{i,t}^{\max} \quad (15)$$

$$Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad (16)$$

$$Q_{i,t} \geq 0, X_{i,t} \geq 0 \quad (17)$$

여기서 $X_{i,t}$ 는 운영단계 t에서 i댐의 저류량을 나타내며, $X_{i,t}^{\min}$ 과 $X_{i,t}^{\max}$ 는 운영단계 t에서 i 댐 저류량의 하한값과 상한값을 나타낸다. $Q_{i,t}$ 는 운영단계 t에서 i 댐의 방류량을 나타내며, $Q_{i,t}^{\min}$ 과 $Q_{i,t}^{\max}$ 는 운영단계 t에서 i댐 방류량의 하한값과 상한값을 나타낸다. Eq. (17)은 저류량과 방류량의 비음 조건(non-zero)을 나타낸다.

소양강댐과 충주댐의 최적 연계운영에서 운영단계별 방류량은 동적계획법을 사용하여 결정되었다. 동적계획법은 많은 수의 결정변수를 갖는 연속적인 의사결정 문제나 다단계의사결정 체계에서 하나 혹은 소수의 결정변수 및 상태변수를 갖는 단단계(single stage) 문제로 변환하여 해를 얻을 수 있다는 장점이 있어 저수지 운영처럼 연속적인 의사결정 문제에 많이 이용되고 있다 (Labadie, 1988; 한국수자원공사, 1992). 동적계획법은 계산량과 계산시간을 단축하기 위하여 많은 기법들이 개발되어 왔으나, 전역 최적해를 탐색하기 어렵다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 시행착오법으로 목적함수가 최대가 되는 초기 궤적을 찾아서 사용하였다. 본 연구의 최적화 모형에서는 초기 간격(initial interval)은 1000, 최종 간격(final interval)은 125, 수렴조건(order of accuracy)은 0.0001을 사용하였다.

4.3 실제 운영실적의 평가

한강수계의 댐군은 연계운영되고 있으나, 보다 효율적인 운영전략을 수립하기 위해서는 각 해마다 운영실적을 평가해야 한다. 본 연구에서는 실제 연계운영에 의해 발생한 효과를 3가지 지표를 사용하여 산정하고 공칭공급 단독운영과 최적화 모형에 의해 발생하는 것과 비교하여 평가하였다.

4.3.1 필요수량 충족률

한강수계 댐군을 연계운영하여 발생한 용수공급 편익을 필요수량 충족률을 사용하여 평가하였다. 필요수량 충족률은 2001년부터 2004년 까지 각해마다 실시하였다. Table 2와 Table 3은 실제 운영시 팔당댐 지점의 필요수량 충족률을 단독운영과 최적연계운영 결과와 비교한 것이다. 필요수량에 대한 자체유역 유출량과 댐용수의 기여율은 자체유역의 유출량으로 필요수량을 우선적으로 충족시키고 나머지를 댐용수로 충족시키는 것으로 가정하여 산정하였다. 필요수량에 대한 댐 공급용수의 기여율을 비교해 보면 최적운영은 28.34~42.28 %, 단독운영은 28.02~36.64 %, 실적운영은 28.24~41.00 %를 나타냈다. 이들 값을 비교해 보면, 자체유역 유출

Table 2. Comparison of the rate of contribution on water requirement of runoff from upstream basin and dam water supply, varying with dam operation rules

Year	Rate of contribution on water requirement (%)			
	Runoff from upstream basin	Dam water supply		
		Single dam operation	Real operation	Optimal operation model
2001	57.72	36.64	41.00	42.28
2002	63.31	32.34	33.85	36.69
2003	67.24	32.29	32.53	32.76
2004	71.66	28.02	28.24	28.34

Table 3. Comparison of deficient amount in water requirement and the rate of satisfaction at water requirement at downstream of Paldang dam, varying with dam operation rules

Year	Deficient amount in water requirement (x10 ⁶ m ³)			Rate of satisfaction at water requirement (%)		
	Single dam operation	Real operation	Optimal operation model	Single dam operation	Real operation	Optimal operation model
2001	289.91	65.84	0.00	94.36	98.72	100.00
2002	224.07	146.16	0.00	95.65	97.16	100.00
2003	24.26	11.82	0.00	99.53	99.77	100.00
2004	16.53	5.15	0.00	99.68	99.90	100.00

량에 의한 기여율이 다른 해 보다 높은 해인 2003년과 2004년에는 실제운영과 최적운영, 단독운영에 의해 공급된 댐 공급용수의 기여율이 모두 비슷한 값을 나타내고 있다. 그러나 한강수계에 가뭄이 발생한 2001년과 2002년에는 자체유역의 유출량의 기여율이 다른 해 보다 상대적으로 낮아 단독운영에 의해 공급된 유량보다 최적운영과 실제운영에 의해 공급된 유량의 기여율이 높은 결과를 나타냈다. 이는 이시기에 자체유역의 유출량에 의해 충족되지 못한 양이 많았으며, 부족분을 댐 용수로 충족시켜야 했기 때문으로 판단된다. 팔당댐 지점에서 필요수량 충족률을 운영방법별로 비교해 보면, 실적운영은 97.16~99.90 %를 나타냈으며, 단독운영은 94.36~99.68 %를 나타냈고 최적화 모형은 매년 100.00 %를 나타냈다. 이들 운영방법별 필요수량 충족률을 비교해 보면, 최적연계운영, 실적운영 및 단독운영 순이었다. Fig. 3은 소양강댐과 충주댐의 실제 운영, 단독운영, 최적연계운영의 결과를 사용하여 팔당댐 지점에서 각 운영방법별 필요수량 충족률을 일별로 나타낸 것이다. 필요수량은 팔당 취수장의 취수량과 팔당댐의 의무방류량을 합한 것으로 했으며, 이를 초과한 양은 잉여유량으로 구분하였다. 2002년은 한강수계에 가뭄이 발생했던 해였으며 운영방법별 필요수량 충족률을 살펴보면 최적연계운영에서는 필요수량을 전량 공급하여 부족수량이 발생하지 않았다. 이와 달리 단독운영과 실제운영

에서는 부족수량이 발생했으며, 실제 운영시에는 단독 운영보다 적은 부족수량이 발생했다.

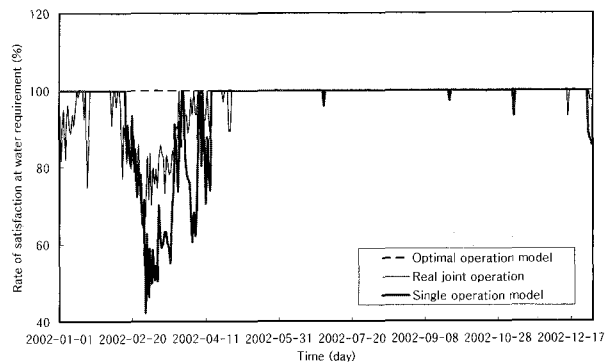


Fig. 3. Comparison of the rate of satisfaction of water requirement in 2002, varying with dam

4.3.2 발전량

소양강댐과 충주댐의 연계운영에 의한 편익 중 하나인 발전 편익을 운영 방법별로 비교하였다. Table 4와 Fig. 4는 실제 댐군 운영에 의해 생산된 소양강댐과 충주댐의 발전량을 단독운영, 최적연계운영 결과와 비교한 것이다. 소양강댐의 발전량을 비교해 보면, 실적운영은 340.69~700.04 GWh, 최적운영은 370.15~667.02 GWh, 단독운영은 282.61~384.92 GWh로 2003년을 제외하고 최적연계운영의 발전량이 실적운영과 단독운영

Table 4. Comparison of hydropower products and rate of simulated result to real result, varying with operation rules

Year	Soyanggang dam (GWh)			Chungju dam (GWh)			Rate of simulated result to real result (%)	
	Single dam operation	Real joint operation	Optimal operation	Single dam operation	Real joint operation	Optimal operation	Single dam operation	Optimal operation
2001	282.61	340.69	370.15	312.38	340.72	355.84	- 12.68	+ 6.54
2002	304.47	454.11	476.29	501.61	619.34	633.52	- 24.90	+ 3.39
2003	384.92	700.04	667.02	851.76	1,078.28	1,049.63	- 30.46	- 3.47
2004	372.74	622.23	651.29	750.23	938.04	969.65	- 38.94	+ 3.89

의 발전량보다 많은 결과를 나타냈다. 이는 2003년이 풍수기였으며, 홍수기에 실제 댐을 운영할 때에 홍수기 제한수위 이상으로 저수량을 확보하여 발전을 했기 때문으로 판단된다. 단독운영과 실제운영의 발전량을 비교해 보면, 단독운영에 의한 발전량 보다 실제운영에 의한 발전량이 월등히 많은 결과를 나타냈다. 충주댐의 발전량을 비교해 보면, 실적운영은 340.72~1,078.28 GWh, 최적운영은 355.84~1,049.63 GWh, 단독운영은 312.38~851.76 GWh로 2003년을 제외하고 최적연계운영의 발전량이 실적운영과 단독운영의 발전량보다 많은 결과를 나타냈다. 이는 소양강댐과 같이, 2003년이 풍수기였으며, 홍수기에 실제로 댐을 운영할 때에 홍수기 제한수위 이상으로 저수량을 확보하여 발전을 했기 때문으로 판단된다. 단독운영과 실제운영의 발전량을 비교해 보면, 단독운영에 의한 발전량보다 실제운영에 의한 발전량이 월등히 많은 결과를 나타냈다. 이러한 경향은 소양강댐과 충주댐에서 똑같이 나타났으며, 단독운영은 용수공급에 초점이 맞춰진 운영이기 때문에 발전량이 다른 운영 방식 보다 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 소양강댐과 충주댐에서 생산되는 실제 발전량을 최적화 모형과 단독운영에 의한 발전량을 비교해 보면, 최적화 모형은 실제 발전량 보다 -3.47~6.54 % 증가된 결과를 나타냈으며, 단독운영은 실제 발전량 보다 12.68~38.94 % 감소된 결과를 나타냈다. 최적화 모형에 의한 발전량은 실제운영 보다 항상 큰 값을 나타내야 하나, 2003년과 같이 실제운영 실적이 최적화 모형에 의한 값보다 큰 값을 나타내는 경우도 있다. 이는 실제 운영에서는 홍수기에 홍수기 제한수위를 상회하는 저수위로 댐이 운영되었기 때문으로 판단된다.

4.3.3 유허안정도

소양강댐과 충주댐의 연계운영에 의한 편의 중 유허 개선 효과를 유허안정도를 사용하여 운영방법별로 평가하였다. Table 5와 Fig. 5는 운영방법별로 산정된 댐공

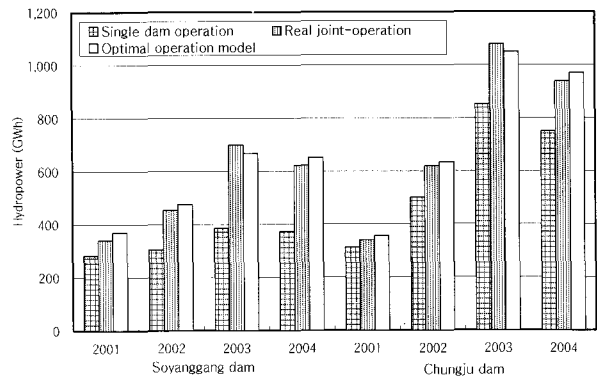


Fig. 4. Comparison of hydropower products in 2001 to 2004, varying with operation rules

급량, 자체유역 유출량을 사용하여 산정된 팔당댐 지점의 유허을 분석한 결과이다. 유허안정도를 평가하기 위한 지표로는 하상계수, 유허계수, 유량변동률을 사용하였다. 하상계수는 최적화 모형은 44.5~140.1, 단독운영은 110.8~499.9, 실적운영은 62.1~210.9를 나타냈다. 댐 운영 방법별로 하상계수를 비교해 보면, 최적화 모형은 하상계수가 가장 작아 다른 운영 방법들보다 안정적인 유허을 나타냈다. 유허계수는 최적화 모형은 9.3~35.1, 단독운영은 34.7~62.9, 실제 운영은 13.3~33.3을 나타냈다. 댐 운영방법별로 유허계수를 비교해 보면, 실적운영과 최적화 모형에 의한 유허계수가 단독운영보다 작아 보다 안정적인 유허을 나타냈다. 유량변동률은 최적화 모형 1.7~5.8, 단독운영 3.4~10.9, 실제 운영 1.9~6.2를 나타냈다. 댐 운영방법별로 유량변동률을 비교해 보면, 유량이 풍부한 해에는 비슷한 값을 나타냈으나 유량이 작은 해에는 실적운영과 최적화 모형이 단독운영보다 안정적인 유허을 나타냈다. Fig. 6은 2002년의 댐 운영 방법별로 산정된 팔당댐 하류 유량 자료를 사용하여 유허곡선을 나타낸 것이다. 2002년은 한강 수계에서 가뭄이 발생하였으며, 이에 따라 단독운영과 실제 연계운영에서는 필요수량을 전량 공급하지 못하는 결과

Table 5. Comparison of the stability of flow condition at downstream of Paldang dam, varying with operation rules

Year	Q_{max}/Q_{min}			Q_{10}/Q_{355}			Q_{95}/Q_{355}		
	Single dam operation	Real joint operation	Optimal operation	Single dam operation	Real joint operation	Optimal operation	Single dam operation	Real joint operation	Optimal operation
2001	499.9	62.1	44.5	62.9	13.3	9.3	10.9	1.9	1.7
2002	452.1	210.9	140.1	34.7	25.4	16.2	5.2	3.6	2.3
2003	110.8	80.4	64.8	42.3	33.3	35.1	4.1	6.2	5.8
2004	146.0	114.50	101.9	35.1	26.8	29.2	3.4	3.8	4.7

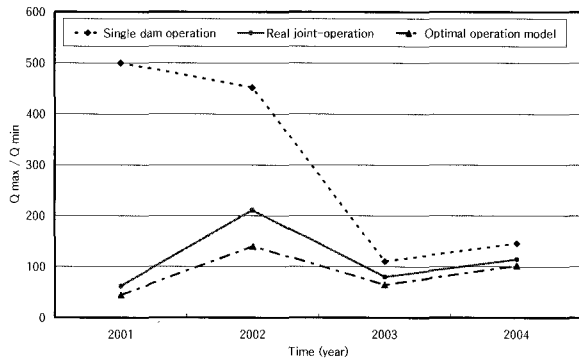


Fig. 5. Comparison of ratio between maximum flow and minimum flow in 2001 to 2004, varying with operation rules

를 나타냈다. 이러한 이유 때문에 세 가지 운영 방법별로 갈수량 부근에서 뚜렷한 차이를 나타냈다. 최적화 모형에 의한 갈수량이 다른 두 가지 운영방법 보다 큰 값을 나타냈으며, 실제 연계운영이 단독운영보다 큰 값을 나타냈다. 따라서 유황도 갈수량이 많은 순인 최적화 모형, 실제 연계운영, 단독운영 순으로 안정적인 값을 나타냈다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 댐군 연계 운영시 발생하는 효과를 평가할 수 있는 방법을 개발하여 한강수계 다목적 댐군의 실제 운영 실적 평가에 적용하였다. 이 평가 기법에서는 이수측면에서 댐군을 연계운영하여 발생하는 편익을 용수공급, 발전, 유황개선으로 구분하였다. 용수공급과 유황개선 부분에서 댐군의 연계운영에 의한 효과는 평가지점에서 필요수량 충족률과 유황안정도를 평가지표로 사용하여 평가하였다. 발전 부분의 효과는 댐군에 의해 생산된 총발전량을 평가지표로 사용하여 평가하였다. 세 가지 평가지표를 사용하여 한강수계의 실제 댐군 운영실적을 평가하였다. 실제 운영실적을 평가지표를 사용하여 공칭공급량을 공급하

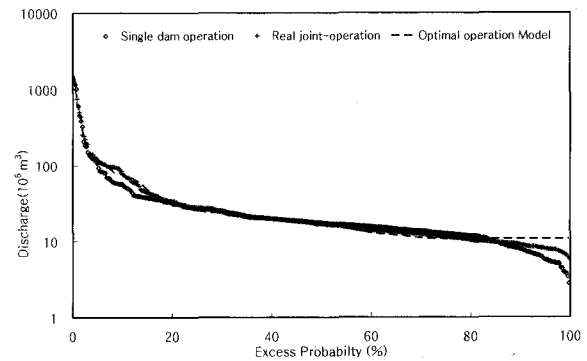


Fig. 6. Comparison of flow duration curve in 2002, varying with operation rules

는 단독운영과 최적화 모형을 사용한 최적 연계운영에 의한 결과와 비교하였다.

본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 댐군의 연계운영 효과를 평가하기 위하여 세 가지 평가지표를 개발하였다. 용수공급측면에서 연계운영에 의해 발생하는 효과는 물수지 분석을 통하여 산정된 필요수량 충족률을 평가지표로 사용하여 평가한다. 유황개선 측면에서 연계운영에 의해 발생하는 효과는 유황안정도를 평가지표로 사용하여 평가한다. 발전 측면에서 연계운영에 의해 발생하는 효과는 총발전량을 평가지표로 사용하여 평가한다.
- 2) 한강수계 댐군의 연계운영 실적을 이수측면에서 평가하기 위하여 용수공급의 과부족과 하천 유황변동을 평가할 수 있는 평가지점으로 팔당댐 지점을 선정하였다. 평가지점에서 2001년부터 2004년의 필요수량 충족률을 비교한 결과, 각 연도별로 97.16~99.90%를 나타냈으며, 한강수계에 가뭄이 발생했던 2001년과 2002년에는 필요수량 충족률이 다른 해 보다 작은 결과를 나타냈다. 팔당댐 하류의 유황을 각 해 마다의 하상계수(Q_{max}/Q_{min})

를 사용하여 분석한 결과, 하상계수는 62.1~210.9의 값을 나타냈으며 필요수량 충족률이 가장 낮은 2002년에 하상계수가 가장 큰 값을 나타냈다.

- 3) 한강수계의 댐군 연계운영 실적을 평가하기 위해 댐운영을 단독운영, 최적화 모형, 실제 운영으로 구분하고 필요수량 충족률, 유황안정도, 총발전량을 평가지표로 사용하였다. 한강수계의 실제운영을 단독운영과 최적화 모형의 결과와 비교해 보면, 용수공급 측면에서 필요수량 충족률은 단독운영의 경우 94.36~99.68 %, 실제운영의 경우 97.16~99.90 %, 최적화 모형의 경우 매년 100.0 %를 나타냈다.
- 4) 한강수계 댐군 연계 운영에 의한 유황안정도를 평가해 보면, 하상계수는 실제운영의 경우 62.1~210.9, 단독운영의 경우 110.8~499.9, 최적화 모형의 경우 44.5~140.1로 최적화 모형과 실제운영에 의한 하류의 유황이 단독운영 보다 안정적이라는 것을 나타낸다. 유황계수는 실제운영의 경우 13.3~33.3, 단독운영의 경우 34.7~62.9, 최적화 모형은 9.3~35.1을 나타냈으며, 이는 최적화 모형은 실제운영이 단독운영 보다 안정적인 유황을 나타내고 있다는 것을 나타낸다.
- 5) 한강수계 다목적댐군의 운영에 의해서 생산된 총발전량을 비교해 보면, 최적화 모형은 실제 총발전량 보다 -3.47~6.54 % 증가된 결과를 나타냈으며, 단독운영은 실제 총발전량 보다 12.68~38.94 % 감소된 결과를 나타냈다. 평가결과를 살펴보면, 실제운영에 의한 발전량이 최적화 모형에 의한 발전량보다 큰 값을 나타내는 경우도 있다. 이는 실제 운영에서는 홍수기에 홍수기 제한수위를 상회하는 저수위로 댐을 운영하는 경우도 있기 때문으로 판단된다.

참 고 문 헌

강민구, 박승우 (2005). "저수지 최적 운영 모형을 이용한 추가 용수 공급 능력 평가." **한국수자원학회논문집**, 제38권 제11호, 한국수자원학회, pp. 937-946.

건설교통부, 한국수자원공사 (2005). **물과 미래**.

건설교통부, 한국수자원공사 (2003). **물에 관한 국민 여론조사**.

건설교통부, 한국수자원공사 (2000). **수자원장기종합계획(Water Vision 2020)**.

건설교통부, 한국수자원공사 (1998). **한강수계 하천수**

사용실태 조사 및 하천유지유량 산정 보고서-하천 유지유량 산정.

건설교통부, 한국수자원공사 (1997). **기존댐 용수공급 능력조사(한강수계)**.

건설교통부 (1966). **건수이지 419.13-151호**.

고익환 (2004). "유역통합 수자원관리 기술개발." **한국수자원학회지**, 제37권 제3호, 한국수자원학회, pp. 10-15.

김태순, 허준행 (2001). "유입량 예측을 이용한 한강수계 댐군 최적 연계 운영에 관한 연구." **대한토목학회 논문집**, 제21권 제5-B호, 대한토목학회, pp. 511-520.

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

박상덕 (2003). "자연하천의 무차원 유황곡선." **한국수자원학회 논문집**, 제36권 제1호, 한국수자원학회, pp. 33-44.

음형일, 김영오, 윤지현, 고익환 (2005). "국내 다목적댐 운영 계획에 적합한 목적함수에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 제38권 제9호, 한국수자원학회, pp. 737-749.

이광만, 강민구, 강신욱 (2005). "대규모 유역변경에 의한 수자원 편익의 변동성 추정." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.

이광만, 이재웅 (1997). "물수지 분석을 위한 대규모 저수지 시스템 해석." **한국수자원학회논문집**, 제30권 제6호, 한국수자원학회, pp. 629-639.

이재웅, 송재우 (2002). "최적화 기법과 모의기법을 이용한 다목적댐의 용수공급능력 평가." **대한토목학회 논문집**, 제22권 제6-B호, 대한토목학회, pp. 811-818.

이재웅 (2005). "다목적댐의 연계운영을 위한 최적 운영률 개발." **한국수자원학회논문집**, 제37권 제6호, 한국수자원학회, pp. 487-497.

이진원, 김형섭, 우효섭 (1993). "댐 건설로 인한 5대 수계 본류의 유황변화 분석." **대한토목학회논문집**, 제13권 제3호, 대한토목학회, pp. 79-91.

정창삼, 허준행, 이재웅 (2001). "팔당댐 저수위변경에 따른 한강수계 저수지군의 최적연계운영." **대한토목학회논문집**, 제21권 제2-B호, 대한토목학회, pp. 101-109.

한국수자원공사 (1992). **충주댐 및 소양강댐 연계운영 Hydro-Scheduling 모형 개발**.

한국전력공사 (1998). **발전용 댐의 수자원이용 최적화 방안(한강수계) 최종보고서**.

Cai X. and Lasdon L. S. (2002). A framework for

- sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin, *Water Resour. Res.*, Vol. 39, No. 8, pp. 1085-1098.
- Fowler H. J., Kilsby, C. G., and OConnell P. E. (2003). Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resour. Res.*, Vol. 39, No. 8, pp. 1222-1232.
- Labadie, J. W. (1988). *Dynamic programming with the microcomputer program CSUDP*, Civil Engineering Department, CSU, Fort Collins, Co.
- Lee, J. H. (2005). *Basin-wide multi-reservoir operation using reinforcement learning*, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Colorado State University.

(논문번호:06-53/접수:2006.05.10/심사완료:2006.12.26)