

한강수계 저수지군의 갈수대응 운영을 위한 Hedging Rule의 개발과 적용성 평가

Development and Assessment of Hedging Rule for Han River Reservoir System Operation against Severe Drought

김 정 업* / 박 명 기** / 이 기 하*** / 정 관 수****

Kim, Jeong Yup / Park, Myung Ky / Lee, Gi Ha / Jung, Kwan Sue

Abstract

This study suggests the hedging rule of MIP (Mixed Integer Programing) in counting the risk evaluation criteria of the objective function and constraints in order to provide the optimum operating rule in reservoir system as constraining water shortage as much as possible which may happen in the downstream control point of water supply in the aspect of water system management. The proposed model is applied to the Han-river reservoir system for two testing periods (Case I: Jan. 1993~Dec. 1997, Case II: Jan. 1999~Dec. 2003). The model based on the hedging rule with trigger volume, estimated in this study shows that in Case I, the monthly minimum discharge was $310.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ in the single operation, $56.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ in the joint operation, and $317.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ in the hedging rule and also, in Case II, the monthly minimum discharge was found to be $204.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ in the single operation, $111.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ in the joint operation, and $243.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ in the hedging rule. In conclusion, the hedging rule, proposed in this study can decrease vulnerability while guarantees reliability and resiliency.

keywords : reservoir operation, hedging rule, MIP, water shortage

요 지

본 연구는 수계관리 측면에서 물 공급의 기준이 되는 하류 제어지점에서 발생할 수 있는 물 부족을 최소 허용하면서 저수지군 최적 운영방안을 제공할 수 있도록 위험도 평가기준을 목적함수 및 제약조건에 반영한 hedging rule을 혼합정수계획법(MIP, Mixed Integer Programing)으로 구성하고 이에 대한 이행도를 분석함으로써 기존의 용수공급 신뢰도에 중점을 두었던 저수지군 최적 운영 분석기법을 개선하고자 하였다. 이를 위해 한강수계 5개 저수지(소양강댐, 충주댐, 화천댐, 청평댐, 팔당댐)군을 대상으로 수계관리를 위한 모형을 구축하였으며, 한강수계 내에 총 8개의 가상 제어지점을 구성하여 댐 하류 제어지점에서의 물 부족에 대해 위험도를 평가하였으며, 개발된 hedging rule의 적용성을 검증하기 위하여 2개의 유입량 계열('93. 1월~'97. 12월, '99. 1월~'03. 12월)에 대하여 적용 검토하였다. 팔당댐 하류 제어지점의 월별 최소유량을 비교하면 '93. 1월~'97. 12월의 모의기간에서는 hedging rule 적용 시 $317.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 단독운영의 $310.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, 연계운영의 $56.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 보다 많은 유량을 보였으며, '99. 1월~'03. 12월의 모의기간에서도 hedging rule 적용 시 $243.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 단독운영의 $204.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 연계운영의 $111.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에 비해 최소유량이 많은 것을 확인하였으며, 이는 제안한 hedging rule에 의해 하류 제어지점에서의 최대 물 부족량이 감소하는 결과를 보여주고 있다.

핵심용어 : 저수지 운영, hedging rule, 혼합정수계획법, 물 부족

* 금강홍수통제소 시설연구소 (e-mail: jykim@molit.go.kr)

Researcher, Geum River Flood Control Office, Gongju 314-802, Korea

** 한국수자원공사 동남아사업단 부장 (e-mail: mkpark@kwat.or.kr)

Director, Southeast Asia Dept., Korea Water Resources Corporation, Huai Kwang Bangkok 10310, Thailand

*** 교신저자, 경북대학교 건설방재공학부 조교수 (e-mail: leegiha@knu.ac.kr, Tel: 82-54-530-1259)

Corresponding Author, Assistant Professor, Dept. of Construction and Disaster Prevention Eng., Kyungpook National University, Sangju, Korea

**** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

1. 서 론

저수지로부터의 물 공급은 국가의 주요 도시 및 산업시설을 대상으로 운영되므로 가뭄발생 시 자연하천에서의 취수장애보다 그 피해규모와 파급효과가 상당하다. 즉, 저수지의 용수공급 장애로 인한 피해는 사회·경제 전반에 걸쳐 광범위하게 발생하고, 장기화될수록 그 피해는 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 효율적인 물 관리를 위해서는 용수공급 장애에 따른 물 부족(water shortage)이 발생할 경우 이를 분석·평가할 수 있는 명확한 기준(이하 '위험도 평가기준')의 도입과 이를 고려한 저수지군 연계 운영모형 개발이 필요하다.

단일 저수지의 용수공급을 모의할 경우, 대표적인 저수지 운영방안인 SOP (standard operating policy, Maass et al., 1962; Loucks et al., 1981; Stedinger, 1984)는 목적함수가 총 물 부족만을 감소시키기 위한 가정 하에 최적값을 제공해 줄 수 있다. 하지만 이 운영 방안은 저수지 실시간 연계운영 등 실제의 현장 조건을 반영하기 어려우며, 또한 임박한 가뭄이나 가뭄의 시작단계에서 더 큰 물 부족이 발생하지 않도록 공급을 줄여주는 알고리즘을 반영하지 못하는 단점이 있다.

Water Science and Technology Board (1986)에 따르면, 물 공급 관리자들은 장래에 사용하기 위해 저수량을 확보하고 일시적으로 수요 수준에 미치지 못하지만 공급량을 한정하거나 제한공급을 실시한다고 분석하였으며, Lund and Reed (1995)는 실제 또는 임박한 가뭄 시 물 공급 관리자들은 아주 심각한 물 부족을 한번 겪는 것보다는 소규모의 물 부족을 여러 번 겪는 것을 선호한다는 점을 기술한 바 있다.

다시 말하자면, 현실적인 물 수요관리 운영기법은 현재의 저수지 상태가 가뭄에 대비하여 용수 수요를 충족시킬 수 있는 공급을 할 수 있을 지라도 향후 운영기간 동안의 물 부족을 방지하기 위해 공급 감소를 반영해야 하며, 이런 측면을 고려한 대표적인 운영기법이 hedging rule (Maass et al., 1962)이다.

Hedging rule과 관련된 국외연구를 살펴보면, Shih and Revelle (1994)는 단일 저수지에 대상으로 혼합정수계획기법(Mixed Integer Programming, MIP)을 사용하여 단계별 hedging rule을 개발하였으며 모형의 목적함수 구성은 저수지에서의 용수공급 충족 횟수를 최대화하면서 제한공급 시점인 단계별 trigger volume을 최소화하고자 하였다. Srinivasan et al. (1998)은 용수 불만족상황(failure)으로부터 정상상황(success)까지의 회복단계들을 추적하는 정수

형 변수를 도입하여 평균 회복을 개념의 복원도(resiliency)를 고려할 수 있는 방안을 제시하였다. Neelakantan and Pundarikanthan (1999)은 생활용수를 공급하는 저수지에 대해 운영의 효율성을 개선시키기 위해 신경망 모형(neural network model)과 단계별 hedging rule을 사용한 simulation-optimization방법론을 제시하였다. Tu et al. (2003)은 네트워크 모형에 혼합정수계획기법과 hedging rule을 적용한 바 있으며, 후속 연구를 통해 hedging rule을 적용할 경우 언제 공급 감량을 시작해야 하며 얼마만큼을 감량해야 하는지를 동시에 고려할 필요가 있다고 제안하였으며 최종적으로 trigger volume과 감량계수를 찾는 동시에 물 공급을 최적화하는 수학적 모형을 개발한 바 있다 (Tu et al., 2008).

국내에서는 Park (2001)이 대청댐을 대상으로 월별 최적 방류량 결정을 위하여 갈수 대응 운영률 제안을 위해 hedging rule을 적용하였으며 비선형형인 hedging 매개변수 해석에 축차선형계획기법(Successive Linear Programming)을 적용하여 선형화하였으며, 월별 hedging 매개변수를 통해 물 공급의 감소시점인 trigger volume을 제시하였다. 또한, 기존의 댐별 용수공급 충족상황으로 물 부족에 대한 평가를 수행하던 방식을 하류 제어지점까지 확장하여 물 공급의 신뢰도(reliability), 복원도(resiliency), 부족심도(vulnerability) 등의 세 가지 위험도 평가기준을 도입하여 저수지 운영모형의 제약조건식을 개선하였고, 동시에 생산된 수력발전량을 발전시간 기준 3단계로 구분하여 편익가중치를 적용할 수 있도록 하여 가능한 1차 에너지에 치중된 발전 패턴을 유도할 수 있는 모형을 제안하였다 (Park et al., 2002). Eum and Kim (2007)은 표본 추계학적 동적계획기법과 hedging rule을 결합하여 최적의 방류량 감소계수를 산정할 수 있는 비상운영률을 제시하였다. Ryu et al. (2009)은 한강수계를 대상으로 hedging rule을 이용한 댐 연계운영 최적화 방안을 제시한 바 있다. 이 연구는 대규모 수계를 대상으로 하였으나 hedging rule 적용시점은 한국수자원공사의 댐별 가뭄대비 단계별 운영기준을 적용한 것으로 이는 각 저수지별로 가뭄을 상정한 기준이며 댐에서의 가뭄단계가 명확하지 못한 점이 있으며 hedging을 하는 단계별 수위 기준이 연계운영적 특성을 고려되지 못하고 있다.

위와 같이 hedging의 개념을 실제 물 관리에 도입하기 위해서는 대상 수계(水界)내의 저수지군 연계운영을 고려한 목표공급량의 설정이 반드시 필요하나, hedging rule을 적용한 기존의 연구들은 단일 저수지의 운영차원에서 목표공급량의 감량을 추진하는 방식이었다. 따라서 본 연

구에서는 수계관리 측면에서 물 공급의 기준이 되는 하류 제어지점에서 발생할 수 있는 물 부족을 줄여주면서 저수지군 최적 운영방안을 제공할 수 있도록 위험도 평가기준을 목적함수 및 제약조건에 반영한 hedging rule을 제안하여 연계운영 방안을 제시함과 동시에 기존의 용수공급 신뢰도에만 중점을 두었던 저수지군 최적 운영 분석기법을 개선하고자 하였다.

2. 갈수상황을 고려한 저수지 운영방안

2.1 저수지 수행성 평가 및 갈수대응을 위한 hedging rule 활용 사례

저수지의 수행성은 몇 가지 방법에 의해 평가될 수 있다. 만일 공급-수요의 관계가 저수지 운영의 수행성 평가에 적용된다면 물 부족의 특성치가 평가의 주요 기준이 된다. 물 부족은 물 공급이 기준수요 또는 제시된 수요를 만족시키기 불충분할 때라고 정의할 수 있으나, 물 부족의 복잡성 때문에 몇 가지의 물 부족 지수들이 물 부족의 특성을 설명하기 위해 개발되었다.

Hashimoto et al. (1982)은 수자원 시스템의 수행성 척도로 신뢰도, 복원도, 부족심도를 위험도 평가기준으로 제시하였다. Xu et al. (1998)은 Fukuoka 수자원 시스템의 수행성 평가를 위해 가뭄 위험도와 가뭄 피해 지수를 제안하였고, Cancelliere et al. (1998)은 저수지의 수행성 평가를 위해 수정된 beard index와 물 부족, 물 부족 빈도, 물 부족의 평균 지속기간, 월에 대한 최대 물 부족 등을 사용하였다.

Shih and Revelle (1994)는 Fig. 1과 같은 hedging rule을 작성하고 이로부터 혼합정수계획기법을 통하여 갈수 대응 저수지 운영률을 산정하였다. 이 연구는 기존의 모의운영 방식이 아닌 최적화 모형내에 물 부족항을 포함시

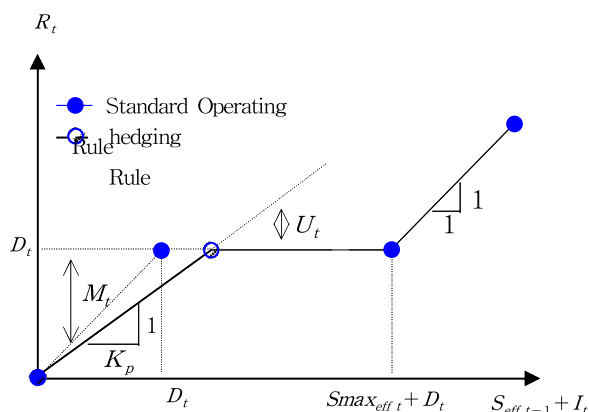


Fig. 1. Continuous Hedging Rule (Shih and Revelle, 1994)

키면서 기간별 hedging 매개변수를 산정하였다는데 큰 의미가 있다. 그러나 위 연구는 hedging 매개변수를 고려하기 위한 hedging 항에 대한 비선형성 해석기법의 문제와 위험도 평가기준 중에서 부족심도(월 최대 물 부족량)만을 고려한다는 문제점을 가지고 있다.

Shih and Revelle (1995)의 후속연구에서는 최적화 기법을 이용하여 감량시점을 나타내는 가용수량 개념인 trigger volume을 결정하였다. 여기서 물 공급 가능량은 현재의 저수지 저수량과 예측 유입량의 합으로 정의하였고, 공급 방식은 이산화되어 제안된 trigger volume에 따라 단계별로 감량할 수 있도록 정식화되었다. Fig. 2는 제시된 단계별 hedging rule을 나타내고 있다.

Shih and Revelle (1995)는 hedging을 고려한 저수지 운영 방안을 도출하기 위해 trigger volume을 최소화하면서 저수지로부터 용수공급을 만족시킨 용수공급 충족 횟수를 최대화하는 문제로 정의하여 목적함수는 Eq. (1)과 같이 구성하였고, 그에 따른 용수공급 감량 제약식들은 Eqs. (2)~(5)로 정식화하여 혼합정수계획기법을 제시한 바 있다.

$$\max \left[\sum_{t=1}^T y_{1,t} - \omega \sum_{p=1}^{12} (V_{1,p} + V_{2,p} + V_{3,p}) \right] \quad (1)$$

Eq. (13)에서 ω 는 목적함수의 가중치로 매우 작은 값이며, $y_{1,t}$ 는 t 기간 공급가능량과 $V_{1,p}$ 와의 관계를 나타내는 정수형 변수이다. 그리고 $V_{1,p}$ 는 p 월 저수지의 정상 공급을 위한 감량시점 저수용적(trigger volume)이고, $V_{2,p}$ 는 p 월 저수지의 1차 감량 수요 공급을 위한 감량시점 저수용적, $V_{3,p}$ 는 p 월 저수지의 2차 감량 수요 공급을 위한 감량시점 저수용적이다.

$$y_{1,t} \geq \frac{(S_{t-1} + \hat{I}_t) - (V_{1,p} - \epsilon)}{B} \quad (2)$$

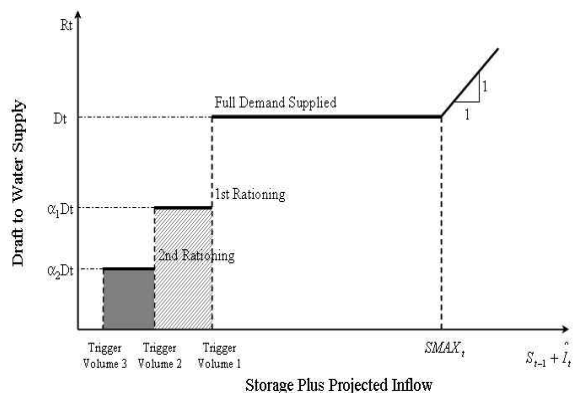


Fig. 2. Schematic Diagram of Discrete Hedging Rule (Shih and Revelle, 1995)

$$y_{1,t} \leq 1 - \frac{V_{1,p} - (S_{t-1} + \hat{I}_t)}{B} \quad (3)$$

$$y_{2,t} \geq \frac{(S_{t-1} + \hat{I}_t) - (V_{2,p} - \epsilon)}{B} \quad (4)$$

$$y_{2,t} \leq 1 - \frac{V_{2,p} - (S_{t-1} + \hat{I}_t)}{B} \quad (5)$$

여기서, $y_{2,t}$ 는 t 기간 공급가능량과 감량공급 저수용적(trigger volume) $V_{2,p}$ 와의 관계를 나타내는 정수형 변수이고, \hat{I}_t 는 t 기간의 저수지 예측 유입량, S_t 는 t 기간 말기에서의 유효 저수량, ϵ 는 매우 작은 값이고, B 은 매우 큰 값을 나타낸다.

제약조건의 Eq. (2)는 용수공급 가능량 $S_{t-1} + \hat{I}_t$ 가 감량 시점 저수용적(trigger volume) $V_{1,p}$ 보다 크다면 $y_{1,t}$ 는 정수형 변수로 “1”을 갖게 되며, 저수지에서 감량 공급이 필요하지 않다는 것을 의미한다. Eq. (3)에서도 용수공급 가능량이 $V_{1,p}$ 보다 크다면 $y_{1,t}$ 는 정수형 변수로 “0”과 “1”이라는 값을 가지게 되므로 두 식에 의해서 $y_{1,t}$ 는 결국 “1”이 되도록 구성되어 있다. 이와 반대의 경우에는 $y_{1,t}$ 는 결국 “0”을 갖게 된다. Eqs. (4) and (5)는 이와 같은 개념으로 $y_{2,t}$ 가 “0” 또는 “1”이 되도록 식이 구성되어 있다.

2.2 문제점 및 개선방향

기존 물 부족 위험도 평가기준에 대한 연구는 Hashimoto et al. (1982)에 의하여 그 개념이 소개된 이후 지속적으로 발전되었다. Moy et al. (1986)과 Srinivasan et al. (1996)는 혼합정수계획기법을 적용하여 물 부족에 대한 제어 및 이행도 분석을 시도하였지만, 이들이 제안한 연구성과는 용수공급 전용의 소규모 단일 저수지를 대상으로 수행되었으며, 물 부족 평가 대상을 댐 방류량으로 설정하여 용수공급의 충족상황에 대한 평가나 이수안전도에 대한 검토가 주로 이루어졌으며 이수 목적의 저수지 장기운영 관점에서 극심한 가뭄 상황이거나 가뭄의 도래가 예측될 때 어느 시점에 저수지가 방류량을 목표공급량 이하로 감량하여야 하는지 적절한 기준을 제시하지 못하였다. 그리고 수력발전함수가 가지는 비선형 요소에 대한 해석이 필요하다.

전술한 바와 같이 기존의 저수지군 운영기법의 대부분은 물 공급의 신뢰도만을 최대화하는 형태로 물 부족 부족심도 및 복원도 특성을 반영할 수 없는 조건이었다. 그러나 본 연구에서는 목적함수 및 제약조건에 신뢰도뿐만 아니라 부족심도 및 복원도 특성을 도입함으로써 물 부족을 보다 계량화된 여건에서 평가함수 내에 포함시켜 모형의 정식화를 시도하였다. 본 연구의 주요 연구내용은 다

음과 같이 두 가지로 구분된다.

첫째, 기존의 용수공급 단일 저수지에 대한 갈수 대응 정식화 연구성과로부터 수계관리 차원으로 확장을 시도하였으며, 물 부족 평가의 대상을 하류 제어지점으로 확장 적용하여 댐들의 연계운영을 유도하는 정식화를 구성하고 운영 평가기준간의 이행도(trade-off)를 분석한다.

둘째, 목적함수에 수력발전을 고려한 에너지항을 추가하고 이와 관련된 발전량 산정에 추가로 정수형 변수를 도입한 정식화를 구성하여 다목적(수력발전 포함) 저수지들에 대한 수요관리 차원의 갈수 대응 운영 방안을 평가하고, 운영 평가기준과 수력에너지간의 관계를 분석하고 이에 대한 결과를 제시하도록 한다.

이를 위해 저수지 유효저수용량 범위 내에서 이전 기간말의 저수량과 이번 기간의 예측 유입량의 항으로 표시되는 가용수량으로 어느 단계에서 감량공급을 해야 하는지를 결정할 수 있도록 trigger volume을 목적함수에 포함하여 모형의 정식화를 시도하였다. 또한, 모형의 최적해를 도출하기 위해 혼합정수계획기법을 적용하였고, 수력발전에너지의 최대화 부분을 산정하기 위해 정수형 변수를 도입하여 비선형항인 수력발전 산정을 선형화하도록 식을 구성하고 이를 제안하였다.

3. 갈수대응을 고려한 한강수계 저수지군 최적 운영시스템 정식화

3.1 저수지 연계운영 시스템의 구성

한강수계는 유역면적이 26,218 km²(임진강 포함 34,473 km²), 유로연장 481.7 km이며, 하천 현황의 경우, 한강은 남한강과 북한강으로 구성되어 있으며 이 두 개의 국가하천은 팔당댐에 유입되어 서울시를 통과하여 임진강과 합류되어 서해로 유하한다.

본 연구에서는 한강수계내에 위치한 발전전용 단일목적댐 7개소(화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐, 괴산댐, 도암댐), 용수전용 단일목적댐 1개소(광동댐), 다목적댐 3개소(소양강댐, 충주댐, 황성댐)를 대상으로 유효저수량이 크고 용수공급에 중요한 5개 댐 지점(소양강댐, 화천댐, 청평댐, 충주댐, 팔당댐)을 고려하여 Fig. 3과 같이 시스템을 구성하였으며, 대상 댐의 선정 이유는 아래와 같다.

Table 1에 정리한 바와 같이 각 댐별 유효저수용량을 검토한 결과, 남한강 수계의 도암댐 및 광동댐은 유효저수용량이 각각 $39.7 \times 10^6 \text{ m}^3$, $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 소양강댐 유효저수용량 $1,900 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 2.09%와 0.42%에 불과하여 충주댐 월간 최소방류량으로 설정한 최소 저수운영단위 260

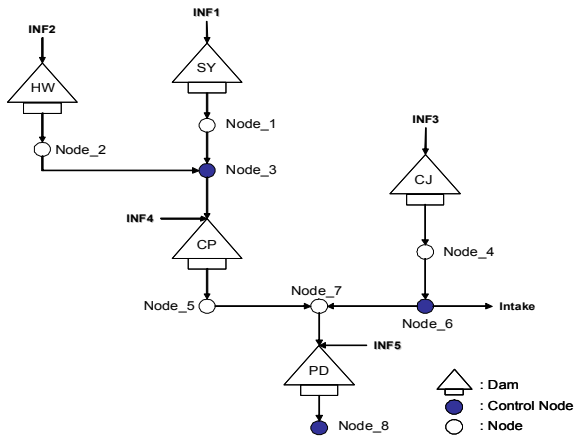


Fig. 3. Reservoir System of Han-river Basin

$\times 10^6 \text{ m}^3$ 의 20% 정도에도 못 미치는 적은 양이므로 이수 측면에서 용수조절효과가 미미하며, 모형운영 측면에서도 위의 댐을 포함하여 분석할 경우 레코드 수 및 계산량의 증가에 비하여 얻는 효과가 미미할 것으로 판단되어 제외하였다.

또한 북한강 수계의 춘천댐과 의암댐도 유효저수용량이 각각 $61.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, $57.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로서 소양강댐의 유효저수용량 $1,900 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 약 3.2% 및 3.0%이고 남한강 유역에 위치한 충주댐의 유효저수용량 $1,789 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 3.4%, 3.2%에 불과하여 유입된 양을 거의 그대로 방류하는 소규모 유하식 댐이고, 팔당댐 하류의 월간 수요량과 북한강 수계 제어지점의 월간 목표수량으로 설정한 최소 저수운영단위 $208.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 반에도 못 미치는 적은 양이며, 이수 측면에서 용수조절에 미치는 효과가 미미하다고 판단되어 효율적인 분석을 위하여 제외시켰다.

다만, 청평댐의 경우는 상기한 소규모 댐들 중에서는 가장 규모가 크고 북한강과 소양강 합류점인 의암댐 하류에 위치하여 연계운영 시 조절점의 효과를 얻기 위한 위치상의 특성을 고려하여 분석대상에 포함시켰으며, 특히 팔당댐의 경우는 북한강과 남한강을 통합 조정하는 중요한 조절지의 역할을 수행하므로 시스템 구성에 포함하였다.

3.2 목적함수 구성

다목적댐을 포함한 수계관리를 위해서는 전체 댐에 의한 하류 물 수급 상황 고려가 필요하게 되는데, 이럴 경우 목적함수항의 과다로 인한 적정 이행도 분석이 곤란해지며, 각 목적별 경향을 파악하기가 어렵게 된다. 그러나 한강수계는 주요 용수수급이 팔당댐 지점에서 이루어지므로 물 부족에 대한 검토는 팔당댐 하류 지점으로 한정하여 고려할 수 있다.

본 연구에서는 유효저수용량이 충분한 3개 댐에 대하여 월별 감량시점인 단계별 trigger volume ($V_{1,p}^k, V_{2,p}^k, V_{3,p}^k$)을 구하고, 하류 물 부족을 최소화하도록 저수지 연계운영 특성을 반영하여 수력발전 에너지를 최대화하도록 다중 목적의 형태로 목적함수를 Eq. (6)과 같이 구성하였다.

$$\text{Minimize } Z = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T w_1 \cdot M_t^l + \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^{12} w_2 \cdot (V_{1,p}^k + V_{2,p}^k + V_{3,p}^k) + \sum_{l=1}^L w_3 \cdot Dmax^l - \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T w_4 \cdot S_t^j - \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T w_5^j \cdot E_t^j \quad (6)$$

여기서, M_t^l 은 t 월 제어지점 l 의 물 부족량, $Dmax^l$ 는 제어지점 l 의 운영기간 중 최대 물 부족량이다. 그리고 S_t^j 는 t 월 j 저수지의 말기 유효저수량, $V_{1,p}^k$ 는 k 저수지 p 월의 1차 감량공급 시점의 유효저수량 상한, $V_{2,p}^k$ 는 k 저수지 p 월의 2차 감량공급 시점의 유효저수량 상한, $V_{3,p}^k$ 는 k 저수지 p 월의 2차 감량공급 시점의 유효저수량 하한이다. J 는 시스템의 총 저수지 갯수이고, T 는 총 운영기간 수이며 p 는 월(1, 2, ..., 12)을 나타낸다. 그리고 w 는 각 항목별 가중계수, L 은 시스템 주요 제어지점의 총 갯수이고 K 는 hedging rule을 적용하는 저수지 개수이다.

Eq. (6)에서 우변 첫째항은 하류 주요 제어지점의 운영기간동안의 총 물 부족량, 둘째항은 hedging rule이 고려되는 3개 저수지(소양강댐, 화천댐, 충주댐)에서의 각 단계별 trigger volume, 셋째항은 제어지점의 운영기간 중의 최대 물 부족심도, 넷째항은 각 운영시간별 댐의 저수량을 의미한다. 그리고 마지막항은 전체 운영기간에 대해 댐별 수력에너지를 생산량을 의미한다. 용수공급 목적의 최적화 모형에서는 수력발전항인 마지막항을 제외한 앞의 4개항으로 목적함수가 구성되며 수력발전을 포함할 경우에는 5개항이 모두 포함되도록 정식화하였다.

만일 목적함수에 물 부족의 특성만을 부여하게 되면 전

Table 1. Ratio of Dam Effective Storage to Soyanggang Dam

| | Effective Storage (10^6 m^3) | Ratio (%) |
|----------------------|--|-----------|
| Soyanggang dam (SY) | 1900.0 | 100.0 |
| Chungju dam (CJ) | 1789.0 | 94.2 |
| Hoengseong dam (HS) | 73.4 | 3.9 |
| Hwacheon dam (HW) | 658.0 | 34.6 |
| Chuncheon dam (CC) | 61.0 | 3.2 |
| Euiam dam (EA) | 57.5 | 3.0 |
| Chungpyeong dam (CP) | 82.6 | 4.4 |
| Doam dam (DA) | 39.7 | 2.1 |
| Gwangdong dam (GD) | 8.0 | 0.4 |
| Goesan dam (GS) | 5.7 | 0.3 |
| Paldang dam (PD) | 18.0 | 1.0 |

반적으로 저수지의 저수 수준이 하향되면서 용수공급에 주력하는 경향을 나타내게 되므로 네 번째 항은 최소한의 가중치를 부여하여 목적함수에 포함시킴으로써 하류 물 부족량을 최소화하는 경우라 하더라도 저수지에서 적절한 저수수준을 유지시킬 수 있도록 하였다. 가중치는 Kim et al. (2008)이 적용하였던 방법으로 선취적 우선순위가 반영 되도록 기본 가중치의 크기에 차이를 두어 구성하였다.

3.3 제약조건의 구성

다음 Eqs. (7)~(10)은 앞의 2.1절에서 단일 저수지에서 trigger volume을 도출할 수 있도록 한 제약식인 Eqs. (2)~(5)를 수계 저수지군으로 확장한 제약조건식이다.

$$y_{1,t}^k \geq \frac{(S_{t-1}^k + \hat{I}_t^k) - (V_{1,p}^k - \epsilon)}{B} \quad (7)$$

$$y_{1,t}^k \leq 1 - \frac{V_{1,p}^k - (S_{t-1}^k + \hat{I}_t^k)}{B} \quad (8)$$

$$y_{2,t}^k \geq \frac{(S_{t-1}^k + \hat{I}_t^k) - (V_{2,p}^k - \epsilon)}{B} \quad (9)$$

$$y_{2,t}^k \leq 1 - \frac{V_{2,p}^k - (S_{t-1}^k + \hat{I}_t^k)}{B} \quad (10)$$

여기서, $y_{1,t}^k$ 는 t 월 k 저수지의 공급가능량과 $V_{1,p}^k$ 와의 관계를 나타내는 정수형 변수(0, 1), $y_{2,t}^k$ 는 t 월 k 저수지의 공급가능량과 $V_{2,p}^k$ 와의 관계를 나타내는 정수형 변수(0, 1)이다.

$$S_t^k = S_{t-1}^k + I_t^k - R_t^k - W_t^k - DV_t^k + Q_t^u \quad (11)$$

Eq. (11)은 저수지의 연속방정식을 나타낸 식으로 하류에 위치한 저수지들(청평댐, 팔당댐)은 상류 저수지들로부터 방류된 제어지점별 유량이 합산되도록 식을 구성하였다. 즉, 청평댐의 경우는 노드 3의 유량 Q_t^3 이 포함되고 팔당댐의 경우는 Q_t^7 이 포함되도록 구성하였으며 소양강댐, 화천댐 및 충주댐의 경우는 Q_t^u 값은 "0"이 된다.

$$S_0^j \leq S_T^j \quad (12)$$

$$S_t^j \leq Capa_p^j \quad (13)$$

Eq. (12)는 운영기간 말기의 저수량을 확보하도록 초기 저수량보다 같거나 많게 유지하도록 설정한 제약조건이다. 이 제약조건식이 없으면 때때로 운영기간 말기에 저수지들의 저수량이 너무 적은 상태인 경우가 발생되어 실제 저수지 운영상황과 많은 차이를 보이게 된다. 또한, 수문년을 기준으로 이수운영 목적의 모형을 구성할 시 상시 만수위나 홍수기 제한수위로 초기수위를 설정한 경우 중

기수위가 최소한 초기수위보다 같거나 크도록 해준다. Eq. (13)은 각 댐별로 저수량이 댐별 최대저수량을 초과하지 못하도록 설정한 제약조건이다.

Eq. (14)는 전술한 Eqs. (7)~(10)에 의해서 소양강댐, 화천댐 및 충주댐에서 계산된 trigger volume에 의해서 hedging rule이 적용되도록 구성한 제약식이다. Eqs. (15) and (16)은 하류 물 부족 발생 시 저수지의 용수 공급가능 상태를 파악하여 trigger volume의 상한보다 더 높다면 추가로 물 공급을 수행할 수 있도록 정수형 변수를 적용하여 구성한 제약식이다. Eqs. (19)~(21)은 여수로 방류가 발생하지 않았을 경우에 저수지의 하류 방류량에 대한 하한과 상한에 대한 제약식이다.

$$X_t^k = (1 - \alpha_1) \cdot D_p^k \cdot y_{1,t}^k + (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot D_p^k \cdot y_{2,t}^k + \alpha_2 \cdot D_p^k \quad (14)$$

$$R_t^k = X_t^k + XP_t^k \quad (15)$$

$$XP_t^k \leq B \cdot y_{1,t}^k \quad (16)$$

$$b_t^j \leq S_t^j / Capa_p^j \quad (17)$$

$$W_t^j \leq B \cdot b_t^j \quad (18)$$

$$R_t^k \geq RL_t^k \quad (19)$$

$$R_t^k \leq RU^k \quad (20)$$

$$R_t^j \geq RU^j \cdot b_t^j \quad (21)$$

여기서, R_t^j 는 t 기간 j 저수지의 하류방류량(여수로 방류량 제외), X_t^k 는 t 기간 k 저수지의 용수공급량, RL_t^k 은 t 기간 k 저수지의 방류 하한, RU^j 은 저수지 j 의 방류 상한(최대 사용수량 적용), W_t^j 는 t 기간 j 저수지의 여수로 방류량, b_t^j 는 t 기간 j 저수지의 여수로 방류 여부를 판단하는 정수형 변수(0, 1)이다.

그리고 $Capa_p^j$ 는 j 저수지의 p 월 최대 저수용량, D_p^k 는 k 저수지 p 월의 용수 수요량, XP_t^k 는 t 기간 k 저수지의 하류방류량으로 계획된 용수공급량보다 추가로 방류되는 수량을 의미한다.

$$DV_t^6 \leq DVX_p^6 \quad (22)$$

$$DV_t^6 \leq DVX_p^6 \cdot IV_t^6 \quad (23)$$

$$R_t^6 \leq B \cdot IV_t^6 \quad (24)$$

Eqs. (22)~(24)는 팔당댐에서의 취수량을 우선적으로 공급하도록 설정하기 위한 제약식으로 취수량이 월별 목표 취수량에 도달하지 못했다면 정수형 변수에 의해서 하류 방류량이 발생되지 못하도록 제약하였다.

$$V_{1,p}^k \geq (1 + \beta_1) \cdot V_{2,p}^k \quad (25)$$

$$V_{2,p}^k \geq (1 + \beta_2) \cdot V_{3,p}^k \quad (26)$$

$$V_{3,p}^k \geq \alpha_2 \cdot D_t^k \quad (27)$$

$$S_{i-1}^k + \hat{I}_t^k \geq V_{3,p}^k + \epsilon \quad (28)$$

$$y_{1,t}^k \leq y_{2,t+1}^k \quad (29)$$

여기서, DV_t^p 는 t 기간 팔당댐의 댐내 취수량, DVX_p^p 는 팔당댐 p 월의 댐내 최대취수량, IV_t^p 는 t 기간 팔당댐의 취수 만족여부를 나타내는 정수형 변수(0, 1), \hat{I}_t^k 는 t 기간 k 저수지의 예측 유입량이다.

본 연구는 물 공급에 대한 수행성 검토대상을 댐 하류 주요 제어지점의 유량으로서 고려하였다. 따라서 Eqs. (30)~(37)의 등호제약조건은 하류 주요 제어지점의 연속방정식으로서 작성되었다. 댐 직하류에 위치한 제어지점 노드(1, 2, 4, 5, 8)는 댐에서 방류되는 하류방류량에 의해서 산정되며, 기타 노드(3, 6, 7)는 상류에서 유입되거나 취수되는 수량이 포함되도록 구성하였다.

$$Q_t^1 = R_t^1 + W_t^1 \quad (30)$$

$$Q_t^2 = R_t^2 + W_t^2 \quad (31)$$

$$Q_t^3 = Q_t^1 + Q_t^2 \quad (32)$$

$$Q_t^4 = R_t^3 + W_t^3 \quad (33)$$

$$Q_t^5 = R_t^4 + W_t^4 \quad (34)$$

$$Q_t^6 = Q_t^4 - DIV_p^6 \quad (35)$$

$$Q_t^7 = Q_t^5 + Q_t^6 \quad (36)$$

$$Q_t^8 = R_t^5 + W_t^5 \quad (37)$$

여기서, DIV_p^6 는 6번 노드 p 월에서의 하천 취수목표량이다.

Eq. (38)에 의하여 제어지점의 각 운영기간별 물 부족량이 산정되고 Eq. (39)에 의해 물 부족의 발생 여부를 정수형 변수인 Y_t^l 를 통하여 표현되도록 구성하였다. 이 경우 운영기간 동안의 최대 물 부족량은 Eq. (40)을 통해서 산정되며, 이 때 우변항은 목적함수인 Eq. (6)에 의해 최소화하도록 운영된다.

$$Q_t^l + M_t^l - QP_t^l = \widehat{Q}_p^l \quad (38)$$

$$M_t^l \leq B \cdot Y_t^l \quad (39)$$

$$M_t^l \leq Dmax^l \quad (40)$$

여기서, Q_t^l 는 t 기간 제어지점 l 의 하천유량, \widehat{Q}_p^l 는 p 월 제어지점 l 의 목표유량, Y_t^l 는 t 기간 제어지점 l 의 물 부족 발생을 나타내는 정수형변수(0, 1)이다.

Eq. (40)을 통해서 물 부족에 대한 부족심도를 제약할 수 있으며, 나머지 위험도 평가기준인 신뢰도와 복원도에 대한 특성은 Eqs. (41) and (42)를 통해서 입력 상한값으로 제약한다.

$$\sum_{t=1}^T Y_t^l \leq p_m \quad (41)$$

$$\sum_{i=1}^{i+N_c} Y_t^i \leq N_c \quad i=1, 2, 3, \dots, (T-N_c) \quad (42)$$

여기서, p_m^l 는 제어지점 l 의 총 물 부족 발생횟수(입력상한), N_c 는 제어지점 l 의 최대 연속 물 부족 발생횟수(입력상한)이다.

3.4 수력발전을 고려한 제약조건 구성

하류 물 부족을 고려하는 동시에 수력발전량을 최대화하는 목적으로 한강수계 저수지군에 적용한 목적함수는 전술한 Eq. (6)와 같으며, 수력발전을 고려한 모형에서는 용수공급 최적화 모형에 Eqs. (43)~(49)의 제약조건을 추가하여 구성하였다.

$$\sum_n^N YS_{n,t}^j = 1 \quad (43)$$

$$\sum_n BR_n^j \cdot YS_{n,t}^j \leq \frac{S_{t-1}^j + S_t^j}{2} \leq \sum_n BR_{n+1}^j \cdot YS_{n,t}^j \quad (44)$$

$$MW_{n,t}^j = 2.72 \cdot \eta \cdot MDQ_t^j \cdot EH_n^j \quad (45)$$

$$R_t^j - MDQ_t^j \cdot PHR_t^j \leq 0 \quad (46)$$

$$EG_{n,t}^j - MW_n^j \cdot PHR_t^j = 0 \quad (47)$$

$$EG_{n,t}^j - B \cdot YS_{n,t}^j \leq 0 \quad (48)$$

$$E_t^j = \sum_n EG_{n,t}^j \quad (49)$$

여기서, E_t^j 는 j 댐 t 기간의 발전량(MWh), $YS_{n,t}^j$ 는 평균저수량의 해당구간을 나타내는 정수형 변수(0, 1), BR_n^j 는 j 댐 각 저수구간 n 에서의 저수량, PHR_t^j 는 j 댐 t 기간의 발전시간(hr), $EG_{n,t}^j$ 는 j 댐 t 기간 저수구간 n 에서의 해당 발전량(MW), MDQ_t^j 는 j 댐 t 기간의 최대사용수량, η 는 발전효율 상수이다.

Fig. 4와 같이 만약 평균저수량이 저수구간 BR_3 과 BR_4 사이에 위치하게 된다면 이 경우에 해당하는 정수형 변수

는 YS_3 만이 Eqs. (43) and (44)에 의해 정수형 변수 “1”을 갖게 된다. 그리고 이 값에 의해서 미리 저수량 구간별로 설정된 평균 유효낙차와 최대사용수량을 이용하여 Eq. (45)에 의해 구간별 발전량을 산정한다. 또한, Eq. (46)에 의해 최대사용수량에 따른 발전시간을 산정하고, Eq. (47)에 의해 댐별로 t 기간에서의 수력발전량을 각각 산정하게 된다. 마지막으로, 각 구간별 발전량 중 정수형 변수가 “1”인 구간만의 발전량이 Eqs. (48) and (49)에 의해 선정된다. 즉, 기간 t 에서 선정되는 발전량은 각 수량 구간별로 설정된 정수형 변수 중 YS_3 만을 가진 해당 저수구간의 발전량만이 “0”이 아닌 값을 갖게 된다.

위와 같이 하류 최대 물 부족량과 총 물 부족량을 최소

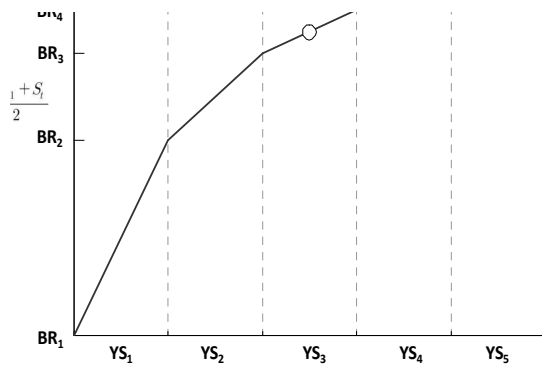


Fig. 4. Decision of Integer Value within Reservoir Storage Extent

Table 2. Dam Properties

| Item | | unit | Soyangang Dam | Chungju Dam | Hwacheon Dam | Chungpyeong Dam | Paldang Dam |
|----------------------|----------------|--------------------------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|
| Area | | km ² | 2,703 | 6,648 | 3,901 | 9,921 | 23,800 |
| Dam | Type | - | R.F | C.G | C.G | C.G | C.G |
| | Elevation | EL.m | 203.0 | 147.5 | 184.5 | 53.0 | 32.0 |
| | Height | m | 123.0 | 97.5 | 81.5 | 31.0 | 29.0 |
| | Length | m | 530.0 | 447.0 | 435 | 407 | 575 |
| | Volume | 10 ³ m ³ | 9,591 | 902 | 885 | 250 | 250 |
| Water level | Design flood | EL.m | 198.0 | 145.0 | 183.0 | 52.0 | 27.0 |
| | Normal | EL.m | 193.5 | 141.0 | 181.0 | 51.0 | 25.5 |
| | Flood control | EL.m | 185.5 | 138.0 | 175.0 | 50.0 | - |
| | Low | EL.m | 150.0 | 110.0 | 156.8 | 46.0 | 25.0 |
| | Dead | EL.m | 130.0 | 86.0 | 156.8 | 46.0 | 25.0 |
| Storage | Total | 10 ⁶ m ³ | 2,900 | 2,750 | 1,018 | 185.5 | 244 |
| | Flood control | 10 ⁶ m ³ | 770 | 616 | 213 | 19 | - |
| | Effective | 10 ⁶ m ³ | 1,900 | 1,789 | 658 | 82.6 | 18 |
| Hydro-electric power | Facility | MW | 200 | 412 | 108 | 79.6 | 120 |
| | Annual power | GWh | 353 | 844.1 | 326 | 271.5 | 378 |
| | Effective head | m | 90.0 | 57.5 | 74.5 | 26.2 | 14.2 |
| | Max. Water use | m ³ /s | 251 | 828 | 185 | 372.6 | 800 |

화하면서 저수지의 trigger volume을 찾도록 정식화한 목적함수와 제약조건으로 하여 혼합정수계획법(MIP, Mixed Integer Programming)으로 저수지군 연계운영 모형을 구성하였다.

4. 제안한 최적화 모형을 통한 Hedging Rule의 개발

4.1 입력자료의 설정

현재 각 지점별로 운영 중인 하천 유지용수는 팔당댐 지점을 기준으로 하류 보장수량 124.0m³/s가 적용 중이나 ‘한강수계 댐통합운영협의회’에서는 팔당댐의 목표 방류량을 더 상향시키도록 제안한 바 있다. 본 연구에서는 최소 방류량에 대한 제약으로서 소양강댐과 충주댐은 월별 기본계획공급량을 Table 3과 같이 적용하였고, 화천댐은 23.7 m³/s, 청평댐은 69.9 m³/s, 팔당댐은 124.0 m³/s를 최소방류량으로 Table 4와 같이 설정하였다.

그리고 댐 하류 주요 지점의 목표 유량은 증가되는 환경보존용수 수요 및 수계 운영 실적을 고려하여 북한강 수계의 소양강댐과 화천댐의 합류점 노드에 78.0m³/s (MOLIT, 2008), 남한강 충주댐 하류 노드에 89.0m³/s, 그리고 팔당댐 직하류 노드에 대해서는 240.0m³/s로 설정하였고, 팔당댐 상류 취수량은 약 41.1m³/s로 설정하였다.

본 연구에서 사용된 댐의 유입량 자료로 소양강댐, 충주댐, 화천댐은 실적 자료를 사용하였고, 청평댐과 팔당댐

의 유입량 자료는 실적 자료로부터 상류 댐들의 방류 영향을 고려하여 자체 유입량을 산정하여 적용하였다. 팔당 댐은 남한강 수계에 위치하고 있는 황성댐, 충주조절지댐, 괴산댐의 자체 유입량을 팔당댐의 자체 유입량에 포함하여 각 댐의 월별 유입량 자료를 산정하였다. 산정된 자료 기간은 1991년부터 2003년까지의 총 13개년에 대해 월별 자료로 작성하였고 이중 가뭄이 도래하였던 '94~'95년을 포함한 '93~'97년, '02년이 포함된 '99~'03년의 2개의 유입량 시계열을 본 연구의 기초 입력자료로 사용하였다.

Table 5는 댐별 발전량을 산정하기 위한 기본 자료로서 발전효율과 방수위 자료는 댐별 발전기 설계 제원을 기초로 하여 1986년 1월부터 2002년 12월까지의 댐별 운영실적치를 근거로 산정하였으며, 이 기간 동안의 모의된 발전량과 실적 발전량과의 차이를 최소화하는 발전효율과 방수위를 적용하였다. 다만, 팔당댐은 1995년 3월~1999년 6월 사이에 발전설비용량을(20 MW×4대)에서(30 MW×4대)으로 증대하였으므로 1998~2002년 동안의 발전량 실적자료로부터 방수위 및 발전효율을 도출하였다.

4.2 용수공급 최적화 모형을 통한 Hedging Rule 개발

'93. 1월부터 '97년 12월까지의 60개월에 대하여 초기 저수량(유효저수용량 개념)은 5개 댐의 12월말 과거 실적 평균수위를 적용하여 저수지군의 최적 연계 운영모형을 구축하고

이에 대한 최적화 모의를 위해 CPLEX 9.0 (ILOG, 2002)를 이용해 수행하였다. ILOG사에서 개발한 CPLEX는 분지절단법(branch and cut algorithm)을 이용하여 혼합정수계획법을 해석할 때 사용할 수 있는 훌륭한 해석 엔진이다.

모형 수행 절차는 초기 검토과정에서 기간내 임의로 제한한 총 물 부족 발생횟수를 부여한 후 1차 분석 결과에서 나온 총 물 부족 횟수(p_m)인 10회를 최대값으로 하여 연속 최대 물 부족 횟수(N_c)는 이보다 같거나 작은 값으로 부여하여 위험도 평가기준에 적합하게 값을 도출하는지를 검토하였다. 총 물 부족 발생횟수를 10회부터 시작하여 점차로 줄여가는 형태로 모의하였고 총 물 부족 발생횟수가 2회 이하인 실행불가능(infeasible) 상황으로서 해를 도출할 수 없었다.

최대 물 부족량에 대한 총 물 부족 발생횟수와 최대 연속 물 부족 발생횟수의 이행도 분석을 한 결과는 Fig. 5와 같다. 최대 물 부족량은 총 물 부족횟수 3회, 최대 연속 물 부족 횟수 1회에서 $182.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$ 로 나타났고, 최대 연속 물부족 횟수와 총 물 부족 횟수가 커지면 최대 물 부족량은 감소하는 경향이 나타났다. 즉, Hashimoto et al. (1982)이 제시했던 것처럼 부족심도는 신뢰도와 복원도의 특성기준과는 반대로 변동된다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 이행도 평가를 위해 총 52가지의 경우에 대해 최적화를 수행한 후, 총 물 부족 발생횟수(p_m)는 5, 최대 연속 물 부족 발생횟수(N_c)가 1인 경우를 갈수 대응

Table 3. Monthly Water Supply of Soyanggang Dam & Chungju Dam (unit : m³/s)

| Month | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Water supply (SY) | 46.2 | 46.2 | 46.8 | 47.2 | 47.2 | 47.2 |
| Water supply (CJ) | 97.2 | 97.2 | 97.2 | 106.3 | 119.0 | 125.2 |
| Month | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Water supply (SY) | 47.2 | 47.2 | 47.2 | 46.8 | 46.2 | 46.2 |
| Water supply (CJ) | 115.2 | 120.9 | 107.8 | 105.2 | 97.2 | 97.2 |

Table 4. Minimum Water Release of each Dam (unit : m³/s)

| | Soyanggang Dam | Hwacheon Dam | Chungju Dam | Chungpyeong Dam | Paldang Dam |
|-----------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|-------------|
| Minimum release | 46.2 | 23.7 | 92.2 | 69.9 | 124.0 |
| Target supply | 46.6 | - | 107.2 | - | - |

Table 5. Hydropower-related Characteristics of each Dam

| | unit | Soyanggang Dam | Hwacheon Dam | Chungju Dam | Chungpyeong Dam | Paldang Dam |
|-------------------------------|-------------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|-------------|
| Max. turbine discharge | m ³ /s | 251 | 185 | 828 | 373 | 880 |
| Generation efficiency | - | 0.925 | 0.904 | 0.947 | 0.840 | 0.967 |
| Tail water level | EL.m | 87.0 | 110.13 | 68.76 | 25.996 | 9.45 |
| Peak time of power generation | hr | 5.0 | - | 2.6 | - | - |

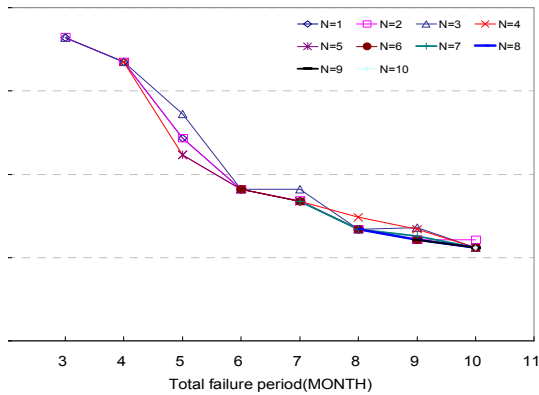


Fig. 5. Model Performance for Maximum Water Deficit (optimization only for water supply)

운영방안으로 선정하였다. 이 경우의 소양강댐, 화천댐 및 충주댐의 trigger volume을 환산한 trigger water level을 Table 6에 정리하였다.

총 물 부족 발생횟수(p_m) 5, 최대 연속 물 부족 발생횟수(N_c)가 1인 경우의 소양강댐, 화천댐 및 충주댐의 운영 결과는 홍수기 제한수위로부터 저수위까지의 유효저수용량을 최대한 활용하는 용수공급에 적합하였고, 팔당댐 하류 제어지점에서는 운영기간내 최대 물 부족량이 월평균 $47.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 발생했고 목표 유량에 만족한 공급 신뢰도는 92% 정도로 나타났다. 가장 제약을 크게 부여한 총 물 부족 발생횟수(p_m)가 3, 최대 연속 물 부족 발생횟수(N_c)가 1인 경우에는 팔당댐 하류 제어지점에서의 최대 물 부족량은 월평균 $68.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 이 발생했다.

전술한 바와 같이 신뢰도 특성인 총 물 부족 발생횟수에 의해 최대 물 부족량이 변동되는 특성을 보이고 있으며 이는 최적 운영모형이 물 부족을 허용하는 hedging rule을

적용한 결과로 적정한 물 공급 신뢰도를 확보하면서 부족 심도인 최대 물 부족량을 감소시켜 줄 수 있는 대응방안을 제공해 줄 수 있다고 판단되었다.

4.3 용수공급 및 수력발전 최적화 모형을 통한 Hedging Rule 개발

갈수 대응을 위한 용수공급 최적 운영모형에 수력발전항을 추가한 최적 운영모형에 대해서도 4.2절에서 기술한 동일한 방법으로 검토하였다. 모형 검토과정에서 이행도 분석을 위해서 총 물 부족 횟수(p_m)를 6회부터 시작하여 이 때 최대 연속 물 부족 횟수(N_c)도 동일한 값으로부터 최소 1회까지 감소시켜 가면서 위험도 평가기간 제약화 기법에 의해서 도출된 물 부족에 대한 발생 특성과 연간 수력발전량에 대한 결과를 분석하였다.

실제 용수공급 계획이나 월단위 운영 상황에서 2개월 이상 연속으로 물 부족이 지속되는 것은 그 심각성이 매우 크다고 볼 수 있어 최대 연속 물 부족 횟수(N_c)가 2회 이하인 상태에서의 총 물 부족 횟수(p_m)와 최대 물 부족량 및 수력발전량 사이의 관계를 기초로 하여 이행도를 평가하였다. 그 결과, 물 부족심도는 수력발전량의 증가보다는 신뢰도 개념인 총 물 부족 횟수의 제약에 의해 커지는 경향이 보이며, 이러한 물 부족심도의 증가는 시스템의 총 물 부족 횟수가 많은 경우, 또는 최대 연속 물 부족 횟수를 작게 주는 경우에 더욱 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 팔당댐 하류 제어지점인 노드에서 발생된 총 물 부족 발생횟수와 최대 연속 물 부족 발생횟수에 대한 최대 물 부족량에 대해 이행도 분석을 한 결과는 Fig. 6과 같다.

제약된 총 물 부족횟수 “3”, 최대 연속 물 부족횟수 “1”에서 최대 물 부족량은 $287.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$ 로 나타났으

Table 6. Monthly Trigger Water Level of Three Dams ($p_m=5$, $N_c=1$)

| Soyanggang dam | Water Level (EL.m) | | | Hwacheon dam | Water Level (EL.m) | | | Chungju dam | Water Level (EL.m) | | |
|----------------|--------------------|--------|--------|--------------|--------------------|--------|--------|-------------|--------------------|--------|--------|
| | Month | TV1 | TV2 | | TV3 | Month | TV1 | | TV2 | TV3 | Month |
| 1 | 153.58 | 153.42 | 153.26 | 1 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 1 | 116.00 | 115.51 | 115.06 |
| 2 | 157.96 | 153.10 | 152.96 | 2 | 159.26 | 159.16 | 159.06 | 2 | 115.48 | 115.03 | 114.61 |
| 3 | 156.72 | 156.43 | 153.53 | 3 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 3 | 120.22 | 115.51 | 115.06 |
| 4 | 166.00 | 153.38 | 153.23 | 4 | 159.42 | 159.31 | 159.20 | 4 | 129.31 | 115.80 | 115.32 |
| 5 | 167.37 | 155.12 | 154.59 | 5 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 5 | 134.86 | 119.59 | 117.39 |
| 6 | 172.23 | 171.39 | 153.25 | 6 | 159.42 | 159.31 | 159.20 | 6 | 136.47 | 123.78 | 116.17 |
| 7 | 184.92 | 183.72 | 160.44 | 7 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 7 | 136.67 | 134.96 | 131.79 |
| 8 | 185.49 | 184.27 | 162.68 | 8 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 8 | 138.00 | 136.22 | 134.54 |
| 9 | 182.92 | 181.78 | 162.11 | 9 | 159.42 | 159.31 | 159.20 | 9 | 138.00 | 134.99 | 133.37 |
| 10 | 165.88 | 165.24 | 164.62 | 10 | 180.21 | 159.38 | 159.27 | 10 | 140.22 | 138.34 | 133.38 |
| 11 | 177.57 | 153.31 | 153.16 | 11 | 159.42 | 159.31 | 159.20 | 11 | 115.83 | 115.35 | 114.91 |
| 12 | 178.90 | 177.86 | 163.55 | 12 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 12 | 116.00 | 115.51 | 115.06 |

며 이 때 5개 댐의 연간 수력발전에너지는 2,096.5 GWh를 생산하는 것으로 분석되었다.

최대 연속 물부족 횟수와 총 물 부족 횟수가 감소하면 최대 물 부족량은 증가하는 경향을 나타냈으며, 총 물 부족 발생횟수에 따른 최대 물 부족량과 연간 수력발전량의 결과에서는 연간 수력발전량을 어느 정도 확보하면서 최대 물부족량이 변동되는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 총 물 부족 발생횟수 5회, 최대 연속 물 부족 발생횟수 1회의 경우가 연간 수력발전량도 보장하면서 부족심도 개념인 최대 물 부족량을 적정하게 조정해주는 것으로 검토되었으며, 이 때의 갈수대용 저수지군의 최적 연계운영의 지표로 제공되는 trigger volume과 이를 저수지 수위로 환산한 trigger water level은 Table 7과 같다.

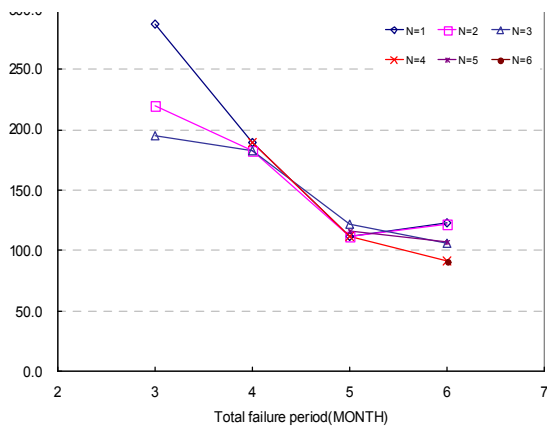


Fig. 6. Model Performance for Maximum Water Deficit (optimization for water supply and hydropower)

총 물 부족 발생횟수(p_m)가 5, 최대 연속 물 부족 발생 횟수(N_c)가 1인 경우의 소양강댐, 화천댐 및 충주댐의 모의결과도 홍수기 제한수위로부터 저수위까지의 유효저수 용량을 최대한 활용을 하며 용수공급 최적화 모형과 유사한 형태로 나타났다. 다만, 화천댐의 경우 용수공급보다 수위를 높게 유지하는 경향이 다소 나타나는 것으로 검토되었고 이는 댐이 하류 물 공급만 고려하는 것이 아니라 목적함수에 포함한 수력발전 에너지항에 의해서 수력발전에 대한 에너지 생산을 동시에 고려한 운영 결과에서 기인한 것이라 판단된다. 팔당댐 하류 제어지점에서는 운영기간내 최대 물 부족량이 월평균 47.0m³ 발생했고 목표 유량에 만족한 공급 신뢰도는 약 92%로 나타났다.

5. 개발된 Hedging Rule의 효과 검증

본 연구에서는 저수지 모의운영에 의한 이수능력평가를 위하여 대상 저수지군의 용수공급 연계운영을 고려한 모의운영 프로그램을 구축하여 본 연구에서 제안한 hedging rule과의 비교·검증에 이용하였다. 2개의 유입량 시계열('93. 1월~'97. 12월, '99. 1월~'03. 12월)에 대하여 한강수계 저수지군에 대해 단독운영 및 연계운영 방안과 전술한 4.3절에서 제시한 hedging rule을 적용한 갈수대용 방안으로 Table 8과 같이 모의운영을 수행하여 총 6개 Case별로 팔당댐 하류 제어지점의 최대 물 부족량 등 물 부족 특성 결과를 분석·비교하고 갈수대용 방안을 검증하였다.

Table 7. Monthly Trigger Water Level of Three Dams ($p_m=5, N_c=1$)

| Soyanggang dam | Water Level (EL.m) | | | Hwacheon dam | Water Level (EL.m) | | | Chungju dam | Water Level (EL.m) | | |
|----------------|--------------------|--------|--------|--------------|--------------------|--------|--------|-------------|--------------------|--------|--------|
| | Month | TV1 | TV2 | | TV3 | Month | TV1 | | TV2 | TV3 | Month |
| 1 | 176.84 | 160.33 | 159.89 | 1 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 1 | 132.49 | 115.51 | 115.06 |
| 2 | 158.39 | 158.02 | 157.67 | 2 | 159.26 | 159.16 | 159.06 | 2 | 117.07 | 116.50 | 115.97 |
| 3 | 157.05 | 153.46 | 153.30 | 3 | 167.20 | 159.38 | 159.27 | 3 | 116.00 | 115.51 | 115.06 |
| 4 | 163.57 | 153.38 | 153.23 | 4 | 165.61 | 159.31 | 159.20 | 4 | 122.21 | 115.80 | 115.32 |
| 5 | 168.08 | 167.37 | 154.59 | 5 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 5 | 133.40 | 116.60 | 116.07 |
| 6 | 172.70 | 171.84 | 153.25 | 6 | 159.42 | 159.31 | 159.20 | 6 | 135.07 | 129.80 | 116.17 |
| 7 | 183.58 | 182.41 | 160.44 | 7 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 7 | 136.19 | 134.51 | 131.65 |
| 8 | 184.16 | 182.98 | 162.68 | 8 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 8 | 137.54 | 135.79 | 134.12 |
| 9 | 162.63 | 162.11 | 161.60 | 9 | 159.42 | 159.31 | 159.20 | 9 | 138.00 | 134.90 | 133.27 |
| 10 | 165.88 | 165.24 | 164.62 | 10 | 159.50 | 159.38 | 159.27 | 10 | 140.22 | 138.34 | 132.92 |
| 11 | 153.47 | 153.31 | 153.16 | 11 | 159.42 | 159.31 | 159.20 | 11 | 115.83 | 115.35 | 114.91 |
| 12 | 162.90 | 153.42 | 153.26 | 12 | 173.50 | 159.38 | 159.27 | 12 | 116.00 | 115.51 | 115.06 |

5.1 Case I ('93. 1월 ~ '97.12월)의 결과 분석

본 연구에서는 Moy et al. (1986)이 제안한 취약도 개념을 적용하여 전체 운영기간 중 단위기간 최대 물 부족량을 취약도 지표로 삼았으며, Eqs. (39) and (40)을 이용하여 주요 제어지점별로 최대 물부족량을 산정하였다. Case I의 운영방식별로 수행한 결과 팔당댐 하류 제어지점에서의 물 부족 특성치를 Table 9에 정리하고 Fig. 7에서 물 부족 발생 상황을 비교하였다. 단독운영을 통해서 총 물 부족량이 $4,929.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 최대 물 부족량은 $270 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$, 신뢰도는 43.3%로 나타났다. 5개 댐군에 대해 연계운영을 적용한 경우 총 물 부족량은 $2,086.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, 최대 물 부족량은 $524.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$, 신뢰도는 약 83.3%로 나타났으며 hedging rule을 적용하였을 경우 총 물 부족량은 $2,086.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, 최대 물 부족량은 $304.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$, 신뢰도는 약 70.0%로 나타났다.

각 운영방식별 복원도는 단독운영(Case I-1)에서는 0.26, 연계운영(Case I-2)에서는 0.4, hedging rule 운영(Case I-3)에서는 0.5로 Case I-1 및 Case I-2의 복원도보다 물 부족으로부터 회복되는 복원특성을 높여주고 있다. 본 연구에서 개발한 hedging rule로 운영한 Case I-3에서 확실하게 부족심도 특성인 최대 물 부족량을 감소시키는 동시에 복원특성도 높여주고 있다.

Fig. 8은 Case I의 운영방식별 유량을 규모별 내림차순으로 도시한 것이며, 초과백분율 85% 이하에서는 연계운

영(Case I-2)이 유량이 많으며, 초과백분율 85~95% 구간에서는 hedging rule 운영, 연계운영, 단독운영순으로 유량이 적게 나타났다. 그리고 95% 이상에서는 단독운영, hedging rule, 연계운영순으로 나타나다가 최소유량에서는 다시 hedging rule, 단독운영, 연계운영순으로 나타났다. 단독운영은 초과백분율 45% 이상에서는 상당기간 물 부족

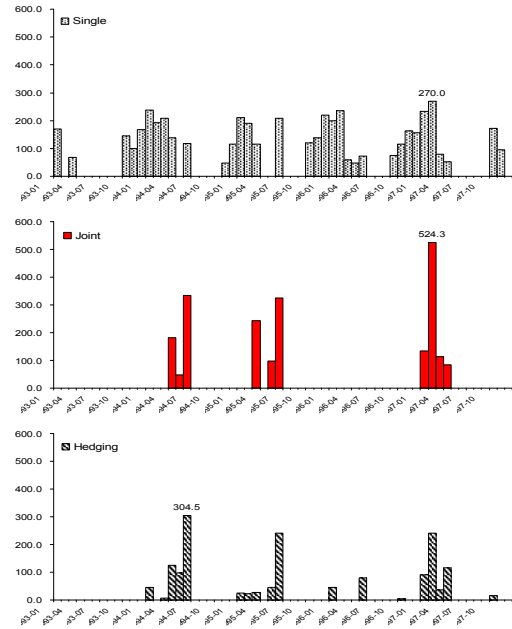


Fig. 7. Comparison of Deficit Based on Reservoir Operation Types (Case I)

Table 8. Dam Reservoir Operation Cases in This Study

| Case | Operation Type | Period | Drought |
|------|----------------|---------------------|-------------------|
| I | 1 | Jan. '93 ~ Dec. '97 | '94 & '95 drought |
| | 2 | | |
| | 3 | | |
| II | 1 | Jan. '99 ~ Dec. '03 | '02 drought |
| | 2 | | |
| | 3 | | |

Table 9. Comparison of Deficit Based on Different Reservoir Operation Types

| Case | Total deficit (10^6 m^3) | Max. deficit ($10^6 \text{ m}^3/\text{month}$) | Reliability (%) | Resiliency |
|------|--------------------------------------|--|-----------------|------------|
| I-1 | 4929.2 | 270.0 | 43.3 | 0.26 |
| I-2 | 2086.5 | 524.3 | 83.3 | 0.40 |
| I-3 | 1573.9 | 304.5 | 70.0 | 0.50 |
| II-1 | 5117.9 | 376.4 | 48.3 | 0.23 |
| II-2 | 1244.9 | 469.4 | 91.7 | 0.40 |
| II-3 | 950.0 | 399.1 | 76.7 | 0.62 |

이 발생하고 있으나 상류에 위치한 댐들이 추가 공급을 제공하지 않고 기본계획공급량만을 공급함에 따라 기본계획공급량 수준의 유량을 유지하고 있다. 그러나 hedging rule 운영과 연계운영은 초과백분율 95%이하까지는 댐군의 연계운영 특성에 의해 물 부족량을 줄여주도록 추가 공급된 양으로 유량을 유지하고 있다. hedging rule 운영은 전술한 바와 같이 댐별로 사전에 확보한 저수량을 유입량이 적은 가뭄상황에서 활용하는 물 배분 특성에 따라 최소유량을 높여주고 있다.

5.2 Case II ('99. 1월~'03.12월)의 결과 분석

Case II의 운영방식별로 수행한 결과에 대해서도 팔당댐 하류 제어지점에서의 물 부족 특성치를 Table 9에 정리하고 Fig. 9에서 물 부족 발생 상황을 비교하였다. 단독운영을 통해서는 총 물 부족량이 $5,117.9 \times 10^6 \text{ m}^3$, 최대 물 부족량은 $376.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$, 신뢰도는 48.3%로 나타났다. 그리고 5개 댐군에 대해 연계운영을 적용한 경우 총 물 부족량은 $1,244.9 \times 10^6 \text{ m}^3$, 최대 물 부족량은 $469.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$, 신뢰도는 약 91.7%로 나타났으며 hedging rule을 적용하였을 경우 총 물 부족량은 $950.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 최대 물 부족량은 $399.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$, 신뢰도는 약 76.7%로 나타났다.

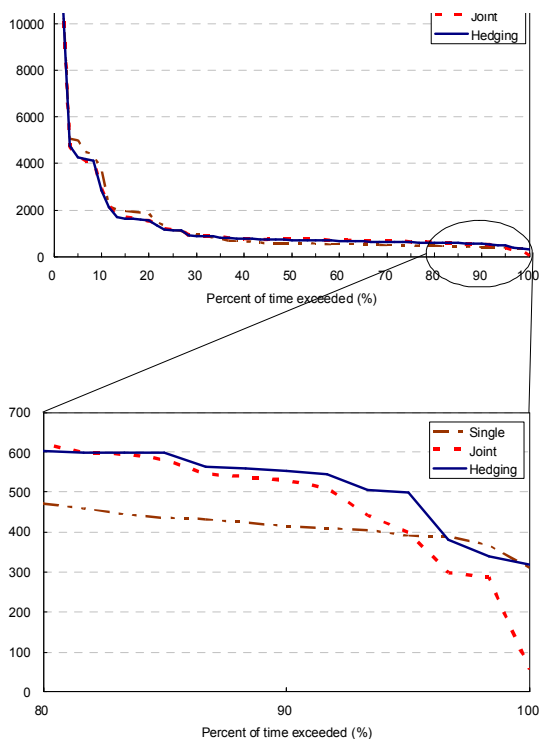


Fig. 8. Comparison of River Flow Regime Based on Reservoir Operation Types (Case I)

각 운영방식별 복원도는 단독운영(Case II-1)에서는 0.23, 연계운영(Case II-2)에서는 0.4, hedging rule 운영(Case II-3)에서는 0.62로 Case II-1 및 Case II-2의 복원도보다는 물 부족으로부터 회복되는 복원특성을 높여주고 있다. 본 연구에서 개발한 hedging rule (Case II-3) 운영 결과가 연계운영(Case II-2)보다 확실하게 부족심도 특성인 최대 물 부족량을 약 15% 정도를 줄여주며 동시에 복원도는 약 1.55배 정도 높여주고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 10은 Case II의 운영방식별 유량을 규모별 내림차순으로 도시한 자료이다. 초과백분율 95% 이하에서는 연계운영이 유량이 많게 나타났으며, 초과백분율 95~98% 구간에서는 hedging rule 운영, 연계운영, 단독운영순으로 유량이 적게 나타났다. 그리고 98% 이상에서는 hedging rule, 단독운영, 연계운영순으로 분석되었다. 단독운영에서는 초과백분율 45% 이상에서는 상당기간 물 부족이 발생하고 있으나 상류에 위치한 댐들이 추가 공급을 제공하지 않고 기본계획공급량만을 공급함에 따라 기본계획공급량 수준의 유량을 유지하고 있다. 그러나 hedging rule 운영과 연계운영은 초과백분율 95% 이하까지는 댐군의 연계운영 특성에 의해 물 부족량을 줄여주도록 추가 공급된 양으로 유량을 유지하고 있다.

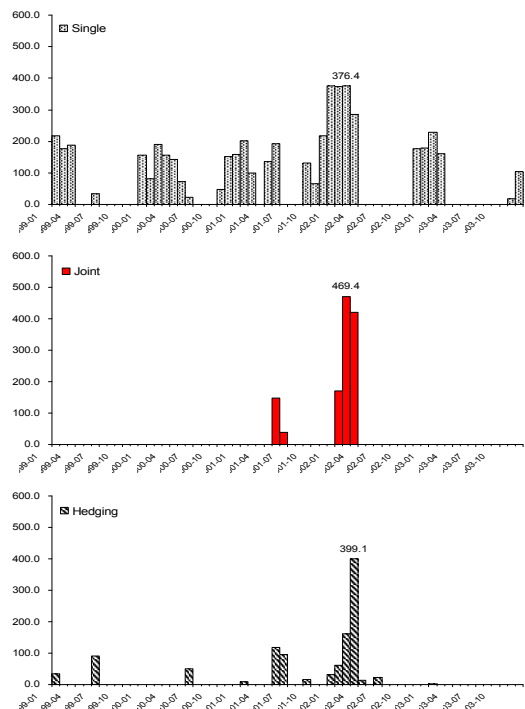


Fig. 9. Comparison of Deficit Based on Reservoir Operation Types (Case II)

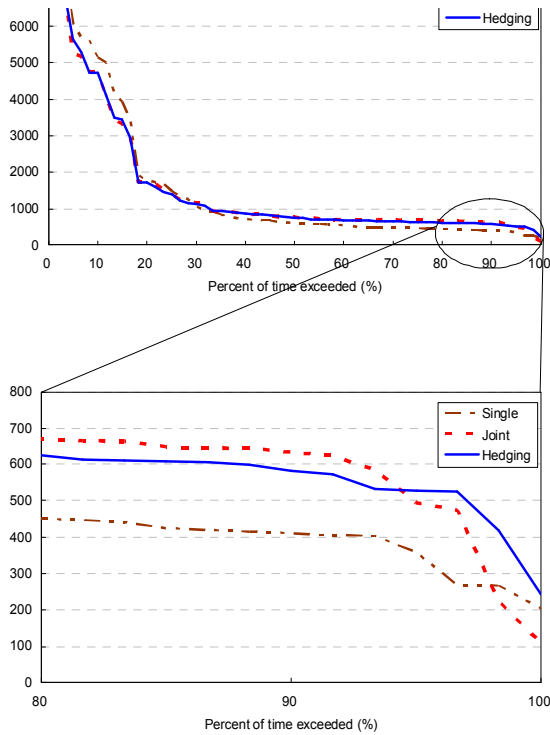


Fig. 10. Comparison of River Flow Regime Based On Reservoir Operation Types (Case II)

6. 결 론

본 연구는 이수목적 측면에서 한강수계 저수지군의 연계운영 방안을 수립하는데 목적을 두고 수행하였다. 이수목적 운영은 목표 용수공급량의 달성을 1차 목적, 수력발전을 2차 목적으로 부여하여 기본방향으로 설정하였으며, 용수공급량은 평상시 보장수량을 최대화하거나 가뭄 시에는 최대 물 부족심도를 최소화하도록 목적함수를 설정하였다. 물 부족의 대상시점은 댐별 단독운영 개념이 아닌 하류 제어지점으로 설정하였으며 갈수대응 방안을 목적함수와 제약조건으로 정식화하고 이를 토대로 한강수계 댐군 연계운영에 적용하여 그 효용성을 검증하였다.

본 연구에서 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 갈수 대응 위험도 평가기준을 도입하여 수계 저수지군을 대상으로 한 월별 갈수대응 최적 방류량 결정 모형을 개발하였다. 이 과정을 통하여 한강수계에 위치한 유효저수용량이 충분한 화천댐, 소양강댐 및 충주댐을 대상으로 갈수에 적절히 대응할 수 있는 hedging rule의 개발하기 위한 최적화 모형을 개발하였다. 최적화 모형을 구성시 실제적 수계관리를 고려하기 위해 한강수계 5개 저수지군을 대상으로

수계관리를 위한 모형을 구축하였으며, 한강수계에 총 8개의 가상 제어지점을 구성하여 최종적으로 팔당댐 하류 제어지점에서의 물 부족에 대해 위험도 평가대상으로 취급하였다. 이는 수계 관리 차원에서 갈수 대응 운영방안을 도출한 것으로 그 의미가 있으며, 이와 함께 수력발전 함수를 목적함수에 포함시켜 갈수 대응 운영방안이 수력발전에 미치는 영향을 함께 평가할 수 있도록 하였다.

- 2) 월별 최적 방류량 결정을 위한 최적화 모형을 개발하고, 그 수행결과에서 얻어진 hedging rule을 적용하기 위한 모의모형을 작성하였다. hedging rule의 적용은 최적화 해석의 결과로서 얻어지는 각 월별 trigger volume의 적용을 통하여 간단히 적용할 수 있었으며, 이는 우리나라와 같이 봄 가뭄과 마른장마가 빈번한 물 관리 현장에서 유용할 것으로 판단된다.

- 3) 개발된 hedging rule의 적정성을 검증하기 위하여 2개의 유입량 계열('93. 1월~'97. 12월, '99. 1월~'03. 12월)에 대하여 적용 검토하였다. 팔당댐 하류 제어지점의 월별 최소유량을 비교하면 '93. 1월~'97. 12월의 모의기간에서는 hedging rule 적용 시에는 $317.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 단독운영의 $310.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, 연계운영의 $56.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 보다 큰 값을 보였으며, '99. 1월~'03. 12월의 모의기간에서도 hedging rule 적용 시 $243.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 단독운영의 $204.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 연계운영의 $111.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에 비해 최소유량이 많은 것을 확인하였으며, 이는 제안한 hedging rule에 의해 최대 물 부족량이 감소하였음을 나타낸다.

본 연구는 갈수 대응의 평가모형으로 하류지점의 물 부족량만을 정량적으로 반영하였으나, 향후에는 실제 운영 상황에서는 물 부족에 대한 사회 경제적인 영향을 고려하여 보다 객관적인 의사결정이 될 수 있도록 물 부족의 영향을 보다 경제적인 지표로서 반영할 수 있는 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- Cancelliere, A., Ancarani, A., and Rossi, G. (1998). "Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 3, No. 2, pp. 140-148.
- Eum, H.I., and Kim, Y.O. (2007). "S An Optimal Operational Policy for Drought Management Using Samp-

- ling SDP Combined with Hedging Rule.” *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 2007, No. 10, pp. 1368–1371.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982). “Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation.” *Water Resources Research*, AGU, Vol. 18, No. 1, pp. 14–20.
- ILOG (2002). *ILOG CPLEX 9.0 User’s Manual*, ILOG Company.
- Kim, M.G., Kim, J.H., and Kim, S.K. (2008). “Determination of Weight Coefficients of Multiple Objective Reservoir Operation Problem Considering Inflow Variation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 1, pp. 1–15.
- Kim, S.K. (1988). “Outline of Reservoir Operation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 21, No. 1, pp. 16–24.
- Kim, S.K., and Park, Y.J. (1998). “A Mathematical Model for Coordinated Multiple Reservoir Operation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 31, No. 6, pp. 779–793.
- K-Water (2010). *Manual for Multi-purpose Dam Management*.
- Kwon, O.H. (1988). “Prevailing Issues on Reservoir Operation in Korea.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 21, No. 1, pp. 25–30.
- Loucks, D.P., Stedinger, J.R., and Haith, D.A. (1981). *Water Resources Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Lund, J.R., and Reed, R.U. (1995). “Drought water rationing and transferable rations.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 121, No. 6, pp. 429–437.
- Maass, A., Hufschmidt, M.M., Dorfman, R., Thomas, Jr., H.A., Marglin, S.A., and Fair, G.M. (1962). *Design of Water Resource System*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Moy, W.S., Cohon, J., and Revelle, C.S. (1986). “A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir.” *Water Resources Research*, AGU, Vol. 22, No. 4, pp. 489–498.
- Neelakantan, T.R., and Pundarikanthan, N.V. (1999). “Hedging Rule Optimisation for Water Supply Reservoirs System.” *Water Resources Management*, Springer, Vol. 13, No. 6, pp. 409–426.
- Park, M.K. (2001). *Optimal Reservoir System Operation Policy Using Risk Evaluation Criteria*, Ph.D. dissertation, Chungnam National University.
- Park, M.K., Kim, J.H., and Jung, K.S. (2002). “Development of Hedging Rule for Drought Management Policy Reflecting Risk Performance Criteria of Single Reservoir System.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 5, pp. 501–510.
- Ryu, K.H., Jung, K.H., Lee, J.H., and Kim, J.H. (2009). “Optimization of Multi-reservoir Operation with a Hedging Rule: Case Study of the Han River Basin.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 8, pp. 643–657.
- Shih, J.S., and Revelle, C.S. (1994). “Water supply operations during drought: continuous hedging rule.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 613–629.
- Shih, J.S., and Revelle, C.S. (1995). “Water supply operations during drought: a discrete hedging rule.” *European Journal of Operational Research*, Vol. 82, pp. 163–175.
- Srinivasan, K., Neelakantan, T.R., Shyam Narayan, P., and Nagarajukumar, C. (1999). “Mixed-Integer programming model for reservoir performance optimization.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 298–301.
- Srinivasan, K., and Phillpote, M.C. (1998). “Effect of hedging on over-year reservoir performance.” *Water Resources Management*, KAP, Vol. 12, No. 2, pp. 95–120.
- Stedinger, J.R. (1984). “The performance of LDR models for preliminary design and reservoir operation.” *Water Resources Research*, AGU, Vol. 20, No. 2, pp. 215–224.
- Tu, M.-Y., Hsu, N.-S., Tsai, F.T.-C., and Yeh W.W.-G. (2008). “Optimization of hedging rules for reservoir operations.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 134, No. 1, pp. 3–13.
- Tu, M.-Y., Hsu, N.-S., and Yeh, W.W.-G. (2003). “Optimization of reservoir management and operation

with hedging rules.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 129, No. 2, pp. 86–97.

Water Science and Technology Board (1986). *Drought Management and Its Impact on Public Water Systems*. National Academy Press, Washington, D.C.

Xu, Z., Jinno, K., Kawamura, A., Takesaki, S., and Ito,

K. (1998). “Performance risk analysis for Fukuoka water supply system.” *Water Resources Management*, KAP, Vol. 12, No. 1, pp. 13–30.

| | |
|------------------------|------------------|
| 논문번호: 14-002 | 접수: 2014.01.01 |
| 수정일자: 2014.08.14/09.22 | 심사완료: 2014.09.22 |