

수요의 불확실성을 고려한 한강수계 댐 연계 운영 최적화

Optimization of Multi-reservoir Operation considering Water Demand Uncertainty in the Han River Basin

정건희* · 류관형** · 김종훈***

Chung, Gunhui · Ryu, Gwanhyeong · Kim, Joong Hoon

Abstract

Future uncertainty on water demand caused by future climate condition and water consumption leads a difficulty to determine the reservoir operation rule for supplying sufficient water to users. It is, thus, important to operate reservoirs not only for distributing enough water to users using the limited water resources but also for preventing floods and drought under the unknown future condition. In this study, the reservoir storage is determined in the first stage when future condition is unknown, and then, water distribution to users and river stream is optimized using the available water resources from the first stage decision using 2-stage stochastic linear programming (2-SLP). The objective function is to minimize the difference between target and actual water storage in reservoirs and the water shortage in users and river stream. Hedging rule defined by a precaution against severe drought by restricting outflow when reservoir storage decreases below a target, is also applied in the reservoir operation rule for improving the model applicability to the real system. The developed model is applied in a system with five reservoirs in the Han River basin, Korea to optimize the multi-reservoir system under various future water demand scenarios. Three multi-purposed dams - Chungju, Hoengseong, and Soyonggang - are considered in the model. Gwangdong and Hwacheon dams are also considered in the system due to the large capacity of the reservoirs, but they are primarily for water supply and power generation, respectively. As a result, the water demand of users and river stream are satisfied in most cases. The reservoirs are operated successfully to store enough water during the wet season for preparing the coming drought and also for reducing downstream flood risk. The developed model can provide an effective guideline of multi-reservoir operation rules in the basin.

Key words: 2-stage Stochastic Linear Programming, Multi-Reservoir Operation, Dry-Season Water Supply, Water Demand Uncertainty, Hedging-Rule

요 지

미래의 기후조건과 생활패턴의 불확실성으로 인해 미래용수수요 또한 불확실성을 가지며, 이는 충분한 용수공급을 목적으로 하는 댐 운영에 어려움을 초래한다. 따라서 가용 수자원을 최대한 활용하여 충분한 용수분배를 하는 동시에, 홍수와 가뭄에 대한 대비까지 가능한 댐의 운영은 매우 중요하다. 본 연구에서는 미래의 불확실한 용수수요량을 정확히 알지 못하는 상태에서 저수지의 운영을 통한 저류량을 1단계에서 결정하고, 2단계에서 용수수요에 따른 용수공급량과 하천유지유량을 결정하기 위한 최적화 모형을 2단계 추계학적 선형계획법을 이용하여 구축하고, 목표저류량과 실제 저류량의 차이, 용수공급과 하천유지유량의 부족량을 최소화하기 위한 저수지 운영 규칙을 최적화하였다. 또한 가뭄시 보다 현실적이고 효율적인 저수지 운영을 위해 댐 저류량에 따라 댐 계획방류량을 일정비율 줄여주는 Hedging Rule을 사용하여 모형의 적절성과 적용성을 향상시켰다. 제안된 모형은 한강수계의 댐들 중 다목적댐인 충주, 횡성, 소양강 댐과 용수전용댐인 광동 댐, 그리고 발전용 댐이지만 비교적 큰 저류용량을 가진 화천 댐을 연계 운영 대상으로 하여, 미래 용수수요량 시나리오를 고려한 최적화를 실시하였다. 그 결과 모든 시나리오에서 생공용수, 농업용수, 하천유지용수 공급량을 대부분 만족시킬 수 있었고, 댐의 저류량 역시 갈수기 용수공급에 대비하여 홍수기인 6월 말에서 9월 중순에 저류량을 확보하면서도 홍수피해저감까지 고려하는 운영이 가능하였다. 이는 다목적 댐들의 연계운영을 위한 저수지 운영규칙결정에 매우 중요한 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 2단계 추계학적 선형계획법, 댐 연계 운영, 갈수기 용수공급, 용수수요 불확실성, Hedging Rule

*고려대학교 방재과학기술연구소 연구교수(E-mail: gunhui@korea.ac.kr)

**고려대학교 건축 사회환경공학부 석사과정

***고려대학교 건축 사회환경공학부 교수(교신저자)

1. 서 론

인간이 사용가능한 담수량에 절대적인 영향을 미치는 강수량의 시·공간적인 불균형으로 인해 치수와 이수는 역사적으로 인류의 중요한 관심사가 되어왔다. 특히, 우리나라에서는 연중 강수량의 50~60%가 홍수기인 6월말에서 9월초에 집중되어 내리고, 수자원 부족량이 지역적으로 편중되어 있어 치수와 이수 계획은 더욱 강조되고 있다. 이러한 수자원의 시·공간적인 불균형을 어느 정도 보완해주는 시설물이 바로 댐이다. 댐을 이용해 홍수기의 침투유량을 조절하기도 하고, 홍수기의 잉여수자원을 저류하여 미래 갈수기의 용수부족을 보완할 수 있다. 따라서 댐 저류량과 미래의 수자원 부족량, 용수수요량을 고려하고, 홍수기의 댐 운영을 적절히 하여 불필요하게 낭비되는 수자원이 없도록 하는 것이 중요하다.

그러나 미래의 유역 유입량이나 용수수요량을 정확하게 예측하는 것은 불가능하므로, 현재의 댐 운영은 홍수기가 끝나는 9월 말까지 폭우에 대비하여 저수지의 수위를 최대한 낮추어 놓았다가 홍수기 이후 저수지의 저류량을 확보하여 갈수기에 용수를 공급하도록 하고 있다 (국토해양부, 2009). 그러나 미래의 용수수요량을 정확히 알 수 없는 상황에서 홍수기에 물을 방류하는 것은 갈수기 유입량의 감소 등으로 인해 용수수요량이 증가할 경우 극심한 가뭄을 유발할 수 있다. 그러므로 갈수기의 용수부족량을 최소화하고 댐 저류량을 최대화할 수 있는 댐 운영 계획이 필요하다.

따라서, 적절한 댐 운영을 통하여 연중 수자원 부족량을 적절히 분배하고 갈수시 용수공급과 홍수시 저류효과를 최대화하기 위해 저류량을 조절하는 방법에 대한 많은 선행 연구가 있었다. Karamouz and Houck(1982)은 댐의 적절한 운영 규칙 모형을 제안하였고, Loganathan and Bhattacharya (1990), Mohan and Kesakar(1991)는 다목적 댐의 여러 목적을 고려한 댐 운영의 기준을 제안하였다. Can and Houck (1984), Tejada-Guibert et al.(1995), Oliveira and Loucks (1997) 등에 의해 다양한 최적화 기법을 이용한 다수 댐 연계 운영에 관한 연구가 수행되었고, Randall et al.(1997), 김승권과 박영준(1998)은 다목적함수에 대한 가중치를 부여해 댐 최적의 운영 방법을 제안되었다. Masse(1946)은 자연 경제분야로부터 Hedging rule을 도입하였고, Maass et al.(1962), Bower et al.(1962)는 Hedging rule을 수자원시스템 운영에 적용방안을 제시하였다. Klemes(1977), Stedinger (1978), Loucks et al.(1981), Hashimoto et al.(1982)는 다양한 계획 및 관리 목적에 맞게 Hedging rule을 적용하고 저수지 운영계획에서의 Hedging rule의 타당성을 제시하였고, Bayazit and Unal(1990), Srinivasan and Philipose(1996; 1998), Cancelliere et al.(1998)은 Hedging rule과 댐 운영 상태 지표사이의 상관관계를 연구하였으며, Simonovic(1992), Gate et al.(1992), Gate and Alshaiikh(1993), Alshaiikh and Taher (1995)는 Hedging rule을 이용한 댐 운영 모의와 최적상태를 동시에 고려하기 시작하였다. Shih and ReVelle (1994; 1995)는 Hedging rule을 이용하여 갈수기 용수 배분을 최적화하기 위한 용수 배분 단계를 결정하였고, Draper

and Lund(2004)는 Hedging rule을 사용하지 않았을 때 받을 피해를 고려하여 용수 사용 이익 개념으로 Hedging rule의 효과를 나타내었다. Neelakantan and Pundarikanthan(1999), You and Cai(2008)은 댐의 저류량에 따라 방류량을 조정하기 위해 제안된 Hedging rule을 이용한 댐 운영에 관한 연구를 하였고, Shih and ReVelle(1994; 1995), Tu et al. (2003), Barros et al.(2008)은 Hedging rule을 이용한 댐 연계 운영과 관리에 대한 연구를 수행하였으며, 음형일과 김영오(2007)는 Hedging Rule에 적용되는 최적의 방류량 감소 계수 산정법에 대한 연구를 수행하였다. 한편, 확정론적인 모형은 미래의 불확실성에 대한 고려가 미흡하여 추계학적 모형을 이용한 연구가 이어졌다. Kelman et al.(1990), Faber and Stedinger(2001), 이용대 등(2004) 등은 과거 유입량자료를 시나리오로 적용한 표본 추계학적 계획 기법을 연구하였고, 이용대 등(2005)은 미래 유입량의 불확실성을 고려한 추계학적 선형계획 모형을 제안하였다. Karamouz and Vasiliadis (1992)와 Vasiliadis and Karamouz(1994)는 용수수요를 고려한 Bayesian 추계학적 계획 모형을 제안하였고, Karamouz and Mousavi(2003), Butcher(2007)은 추계학적 동적 계획법으로 저수지 운영을 고려하였다. 또한 2단계 혹은 다단계 최적화를 통해 저수지운영을 시도한 연구들이 있었다. Watkins and McKinney(1997)는 1단계에서 연간 용수 계약량을 결정한 후, 2단계에서 실제 사용량에 따라 추가로 현물시장에서 구입하여야하는 용수량을 결정하는 2단계 SLP 모형을 구성하여 최적 댐 운영을 제안하였고, Kracman et al.(2006)은 Texas, USA의 단일 저수지에 대한 쌀 생산 이익, 호수 사용 관련 이익, 수력발전 이익을 최대화 하는 목적함수를 구성한 후, 1단계에서는 향후 1년, 2단계에서는 향후 1년에서 2년, 3단계에서는 향후 3년에서 5년의 결정변수를 정하는 다단계 SLP 모형을 제안하였으며, Lee et al.(2008)은 향후 30일 유입량을 3단계 시나리오 트리로 구성한 후, 실행불가능성을 최소화, 하천유지용수 부족분 최소화, 용수수요 부족량 최소화, 최종목표저류량과의 편차 최소화, 유역 출구에서 방류 최소화, 저류량 최대화, 발전량 최대화를 목적함수로 구성하여 1단계에서는 현시간으로부터 2일 후까지의 결정변수를, 2단계에서 2일 후에서 10일후까지의 결정변수를, 3단계에서 10일후에서 30일 후까지의 결정변수를 정하는 다단계 SLP 모형을 제안하였다.

그러나 기존의 2단계 혹은 다단계 최적화에서는 현재 저수지 운영에 대한 미래의 용수공급영향을 나타내는데 한계가 있었다. 실제 홍수기의 저수지 운영은 미래의 용수수요량을 알지 못하는 상태에서 결정되고, 그 결과인 저수량을 이용하여 갈수기 용수공급을 하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 저수지의 저류량 결정을 통한 댐운영을 1단계 결정변수로 하고, 결정된 저수지 저류량에 따른 잉여수자원을 이용하여 수요자에게 용수를 공급하는 것을 2단계 결정으로 한 2단계 추계학적 선형계획법 (2-SLP, Two-Stage Stochastic Linear Programming with Fixed Recourse)을 이용한 한강수계 다목적댐들의 연계운영을 최적화하였다. 이때, 댐의 저수량에 따라 방류량을 조절하여 수자원이 부족할 때, 제한된 수자원

부존량을 배분하고 미래의 극심한 갈수기에 대비하기 위한 Hedging Rule을 적용하여 보다 효율적인 운영을 시도하였다.

2. 배경 이론

2.1 2단계 추계학적 선형계획법

목적함수와 제약조건식이 모두 선형일 때, 선형계획법을 이용하여 시스템을 구성할 수 있다. 이때, 선형계획법의 제약조건 계수가 불확실성을 가진다고 가정하면, 정확한 제약조건을 알 수 없으므로, 평균값을 이용한 하나의 해가 어떤 경우에든 시스템을 만족시킨다고 할 수 없게 된다. 이러한 경우에는 계수의 불확실성을 고려하여 추계학적 선형계획법을 이용하는데, 목적함수나 제약조건에 따라 다양한 형태의 추계학적 모형으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 2단계 추계학적 선형계획법(2-SLP; Two-stage Stochastic Linear Programming with Fixed Recourse)을 사용하였다. 설명을 위해 다음과 같은 선형계획법으로 표현된 시스템을 살펴보자.

$$\begin{aligned} \min c^T x \\ \text{s.t. } Ax = b \\ Tx = h \\ x \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x 는 결정변수이고, c^T 는 목적함수의 계수를 나타낸다. 여기서 두 가지의 제약조건들 중 두 번째 제약조건 계수인 T 와 h 가 결정변수인 x 에 독립적인 결합 확률 분포를 가지는 확률 변수라고 가정하자. x 의 결정은 확률 변수의 참값이 알려지기 전에 취해져야 한다. 그러므로 시스템을 만족시키도록 선택된 결정변수 x 는 제약조건 $Ax = b$, $x \geq 0$, 는 늘 만족시키지만, 확률 변수가 변한다면, $Tx \neq h$ 으로 제약조건을 만족시키지 않을 수도 있다. 따라서 확률변수와 결정변수 x 와의 관계를 설정하기 위해 W 라는 변수를 가정하고 q^T 와 같은 선형적으로 주어진 Recourse function을 고려하여 새로운 제약조건 $Wy = h - Tx, y \geq 0$ 을 정의함으로써, 아래 Eq. (2)와 같은 Recourse 문제를 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} Q(x; T, h) = \min q^T y \\ \text{s.t. } Wy = h - Tx \\ y \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

1단계 제약조건을 만족시키는 결정변수 x 와 2단계의 Recourse 함수는 확률변수 T 와 h 에 종속되게 된다. 따라서 최적해는 1단계값 $c^T x$ 와 Recourse 기댓값 $E[Q(x; T, h)]$ 의 합을 최소화함으로써 구할 수 있다. 그러므로 Eq. (1)을 다시 정리하면 아래와 같은 2단계 추계학적 선형 계획법(2-SLP with recourse) 문제를 얻을 수 있다.

$$\min [c^T x + E[Q(x; T, h)]]$$

수요의 불확실성을 고려한 한강수계 댐 연계 운영 최적화

$$\begin{aligned} \text{s.t. } Ax = b \\ x \geq 0 \\ \text{where, } Q(x; T, h) = \min q^T y \\ \text{s.t. } Wy = h - Tx \\ y \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

만약, 확률변수인 T 와 h 가 이산확률분포를 따른다면, 확률 변수는 확률 p_j , $j = 1, \dots, S$, $p_j > 0$, $\sum_{j=1}^S p_j = 1$ 을 가지는 T^j , h^j 로 표현함으로써 정의된다. 여기서 두 확률변수는 서로 독립이라고 가정하며, S 는 확률변수의 T 와 h 가 확률질량함수에서 가질 수 있는 모든 경우의 수이다. 따라서 Eq. (3)는 알려진 이산확률질량함수를 가지는 2단계 추계학적 선형 계획법(2-SLP with Fixed recourse) 문제로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \min c^T x + \sum_{j=1}^S p_j q^T y^j \\ \text{s.t. } Ax = b \\ T^j x + W y^j = h^j, j = 1, \dots, S \\ x \geq 0 \\ y^j \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 Hedging rule을 적용한 댐 연계운영 모형

본 연구의 목적은 Hedging rule을 적용한 저수지 연계운영을 통하여 유역 내 존재하는 댐의 저류량을 목표저류량에 최대한 근사하게 유지하면서도 용수수요에 대한 공급율을 최대화하고, 하천유지유량을 최대로 공급하기 위한 연계운영계획을 제안하는데 있다. 앞에서 설명한 것과 같이 목적함수는 두 단계로 나누어지는데, 첫 번째 단계에서는 댐의 상시만수위(홍수기제한수위)에 해당하는 저류량을 목표저류량으로 하여 목표저류량과 실제 저류량의 차를 최소화하는 것이 목적이며, 두 번째 단계에서는 각 수요처의 용수공급 부족량과 하천유지유량 부족량의 합을 최소화하였다. 이는 홍수기 저수지운영을 할 때 갈수기에 수자원부존량을 예측할 수 없으므로, 1단계 결정변수로 댐 별 저류량을 결정하고, 2단계에서 확률변수인 용수수요량의 이산확률분포를 고려하여 각 용수수요처로 공급되는 용수공급량과 하천유지용수를 결정하였다. 이렇게 구성된 2-SLP 모형은 다음과 같다.

$$\min f = \sum_{t \in T} \left[\sum_{r \in R} ST_{r,t} W_{r(r,t)} \right] + E[f(D_{a(d,t)}, Q_{(i,j)}^o)] \quad (5)$$

$$\text{s.t. } ST_{r,t} \geq S_{lar(r,t)} - S_{a(r,t)} \quad (6)$$

$$ST_{r,t} \geq -(S_{lar(r,t)} - S_{a(r,t)}) \quad (7)$$

$$\sum_{h \in H} B_{h,r,t} = 1, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (8)$$

$$B_{h_1,r,t} S_{mop(r,t)} + B_{h_3,r,t} S_{low(r,t)} + B_{h_2,r,t} S_{fil(r,t)} + B_{h_1,r,t} S_{tar(r,t)} + B_{h_1,r,t} S_{tar(r,t)} \leq S, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (9)$$

$$S_{a(r,t)} \leq B_{h_1,r,t} S_{mop(r,t)} + B_{h_3,r,t} S_{low(r,t)} + B_{h_2,r,t} S_{fil(r,t)} + B_{h_1,r,t} S_{tar(r,t)} + B_{h_1,r,t} S_{tar(r,t)} \leq S, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (10)$$

$$\text{where, } E[f(D_{a(d,t)}^{\omega}, Z_{(i,j)}^{\omega})] = \min \sum_{w \in W} \left[p^{\omega} \sum_{i \in I} \left[d_i \left[\sum_{d \in D} (D_{p(d,t)}^{\omega} - D_{a(d,t)}^{\omega}) \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. W_{d(d,t)} + \sum_{i \in R \cup J} Z_{(i,j),t}^{\omega} W_{o(i,j),t} \right] \right] \right] \quad (11)$$

$$Z_{(i,j),t}^{\omega} \geq O U T_{p(i,j),t}^{\omega} - Q_{(i,j),t}^{\omega} \quad (12)$$

$$Z_{(i,j),t}^{\omega} \geq 0 \quad (13)$$

$$Q_{r,t}^{\omega} = S_{a(r,t-1)} - S_{a(r,t)} + I N_{r,t} + \sum_{j \in J} Q_{(j,r),t}^{\omega}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (14)$$

$$Q_{0(r,t)}^{\omega} \leq \sum_{h \in H} B_{h,r,t} \alpha_{h,r} S_{up0(r,t)}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (15)$$

$$Q_{1(r,t)}^{\omega} \leq \sum_{h \in H} B_{h,r,t} \alpha_{h,r} S_{up1(r,t)}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (16)$$

$$Q_{2(r,t)}^{\omega} \leq \sum_{h \in H} B_{h,r,t} \alpha_{h,r} S_{up2(r,t)}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (17)$$

$$Q_{f(r,t)}^{\omega} = O_{r,t}^{\omega} - O_{0(r,t)}^{\omega} - O_{1(r,t)}^{\omega} - O_{2(r,t)}^{\omega}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (18)$$

$$Q_{r,t}^{\omega} \geq R_{G(r,t)} \times Q_{G-MAX(r,t)}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (19)$$

$$0 \leq D_{a(d,t)}^{\omega} \leq D_{p(d,t)}^{\omega}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in D \quad (20)$$

$$O_{r,t}^{\omega} = \sum_{n \in N} Q_{(r,n),t}^{\omega}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (21)$$

$$O_{0(r,t)}^{\omega} = \sum_{dm \in DM} Q_{(r,dm),t}^{\omega}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (22)$$

$$O_{1(r,t)}^{\omega} = \sum_{da \in DA} Q_{(r,da),t}^{\omega}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (23)$$

$$O_{2(r,t)}^{\omega} + O_{f(r,t)}^{\omega} = \sum_{j \in J \cup S} Q_{(r,j),t}^{\omega}, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (24)$$

$$\sum_{n \in N} Q_{(n,d),t}^{\omega} = D_{a(d,t)}^{\omega}, \quad \forall t \in T, \quad \forall d \in D \quad (25)$$

$$\sum_{n \in N} Q_{(n,j),t}^{\omega} + I N_{j,t} - \sum_{n \in N} Q_{(j,n),t}^{\omega} = 0, \quad \forall t \in T, \quad \forall j \in J \quad (26)$$

각 변수들에 대한 설명은 부록에 수록하였다.

목표저류량과의 차이나 용수수요와 하천유지유량 부족량이 커지면 목적함수값이 커지므로 최소화하려고하는 시스템의 목적에 반하게 되어 목적함수가 작아지는 방향으로 최적해를 찾아나 가게 된다. 그러나 저수지의 저류량은 목표저류량보다 커질 수도 있고 작아질 수도 있으므로, 단순히 차이의 합을 할 경우 커지는 경우와 작아지는 경우가 서로 상쇄되어 목적함수 값이 작아지게 하므로 시스템의 목적과 맞지 않아 목표저류량과 차이의 절대값을 최소화시키는 것을 목적함수에 삽입하였다 (Eq. (5)). 두 번째로 각 수요처로 공급되는 수량은 Eq. (20)에 의해 용수수요량을 초과할 수 없으므로, 수요처로 공급되는 물의 양이 용수수요량보다 작을 때만 그 차이를 목적함수에 삽입하였다. 마지막으로 하천유지유량은 역시 제안된 수량보다 작게 혹은 많게 공급될 수 있다. 그러나 제안된 수량보다 많은 유량이 공급될 경우는 문제가 되지 않으므로, 제안된 수량보다 하천의 수량이 작을 경우에만 그 차이를 목적함수에 삽입하였다. 그러므로 하천유지유량보다 많은 수량이 하천으로 공급될 때의 목적함수항은 0을 가진다 (Eq. (11)). 그 결과 목적함수의 항 중 저류량과 하천유지유량에 대한 항이 비선형성을 가지므로 새로운 결정변수 $S T_{r,b}$, $Z_{(i,j),t}^{\omega}$ 를 도입하고 제약조건 Eqs. (6), (7), (12), (13)을 포함하여 선형화하였다.

앞에서 언급한 것과 같이 저수지의 저류량이 감소할 경우, 극심한 용수부족을 피하기 위한 운영기법인 Hedging Rule을 적용하였고, 댐의 저류량에 따라 Eq. (8)에 의해 하나의 방류량 감소계수가 선택되고, Eqs. (9), (10)에 의해 Hedging Rule에 의한 최소저류량과 최대저류량을 제한한다. 2단계의 Recourse 함수가 가지는 제약조건인 Eq. (14)는 댐에서의 연속방정식을 나타내며, Eqs. (15)-(19)는 Hedging rule에 의한 방류량 제한을 의미한다. Eqs. (21)-(24)는 댐 방류량과 각 노드 공급량과의 관계를 나타내며, Eqs. (25), (26)는 각 수요노드와 분기점에서의 연속방정식을 나타낸다.

2.3 분지절단법 (Branch and Cut Algorithm)

본 연구에서 2단계 추계학적 선형계획법으로 구성된 모형의 최적해를 찾기 위해 GAMS/CPLEX를 사용하였다. GAMS/CPLEX는 분지절단법(branch and cut algorithm)을 이용하는 방법으로, 이는 분지한계법(branch and bound algorithm)을 기반으로 하여 절단평면 (cutting plane)을 첨가하는 방법이다. 이러한 방법을 통하여 쌍대한계 (dual bound)를 강화시킨다. 푸는 방법을 살펴보기 위해 다음의 정

수계획법 문제를 고려해보자.

$$\begin{aligned} \max c^T x \\ \text{s.t. } Ax \leq b \\ x_i = \text{정수 or 실수 } \forall i \end{aligned} \quad (27)$$

분지절단법을 풀기 위해서는 식 (27)의 문제를 이완하여 풀이한다. 여기서의 문제의 이완 (relaxation)은 해당 시스템을 선형계획법으로 이완시키는 것을 의미한다. 예를 들어, 여기서 $S = \{x: Ax \leq b, x_i = \text{정수 or 실수}\}$ 라고 하면 S의 선형계획법 이완은 $P = \{x: Ax \leq b, x \in R^n\}$ 이다.

식(27)의 선형계획법 이완문제를 푼 결과 최적해 $\bar{x} \in S$ 이면, 식 (27)의 최적해를 구한 것이며, 만약 $\bar{x} \notin S$ 이면 \bar{x} 를 제거할 수 있는 절단 제약식을 도입하게 된다. 절단제약식을 만들 수 없을 때까지 이 과정을 반복한다.

3. 한강 권역에 대한 적용

3.1 유역 네트워크 / 입력자료

제안된 모형을 한강 권역(안성천, 한강서해, 한강동해를 제외)에 적용하여 그 적용성을 확인하였다. 한강권역은 수자원 장기종합계획(2006-2020) (건설교통부, 2006)에서 사용한 수자원단위지도의 중권역을 이용하여 유역번호 1001에서 1024까지 총 24개 소유역으로 나누어 적용하였으며, 총유역면적은 34,415.73 km²로서, 3개의 다목적댐 (충주, 황성, 소양강 댐)과 1개의 용수전용댐 (광동댐), 6개의 발전용댐 (화천, 춘천, 의암, 청평, 팔당, 괴산)으로 구성되어 있다(북한지역 댐 및 평화의 댐 제외). 10개의 댐 중 다목적댐인 충주, 황성, 소양강 댐과 용수전용댐인 광동 댐, 그리고 발전용 댐이지만 비교적 큰 저류용량을 가진 화천 댐을 연계 운영 대상으로 설정하였다(그림 1a). 각 소유역은 생공용수 수요처와 농업용수 수요처를 가지며, 해당 소유역의 취수지점에서 공급된다.

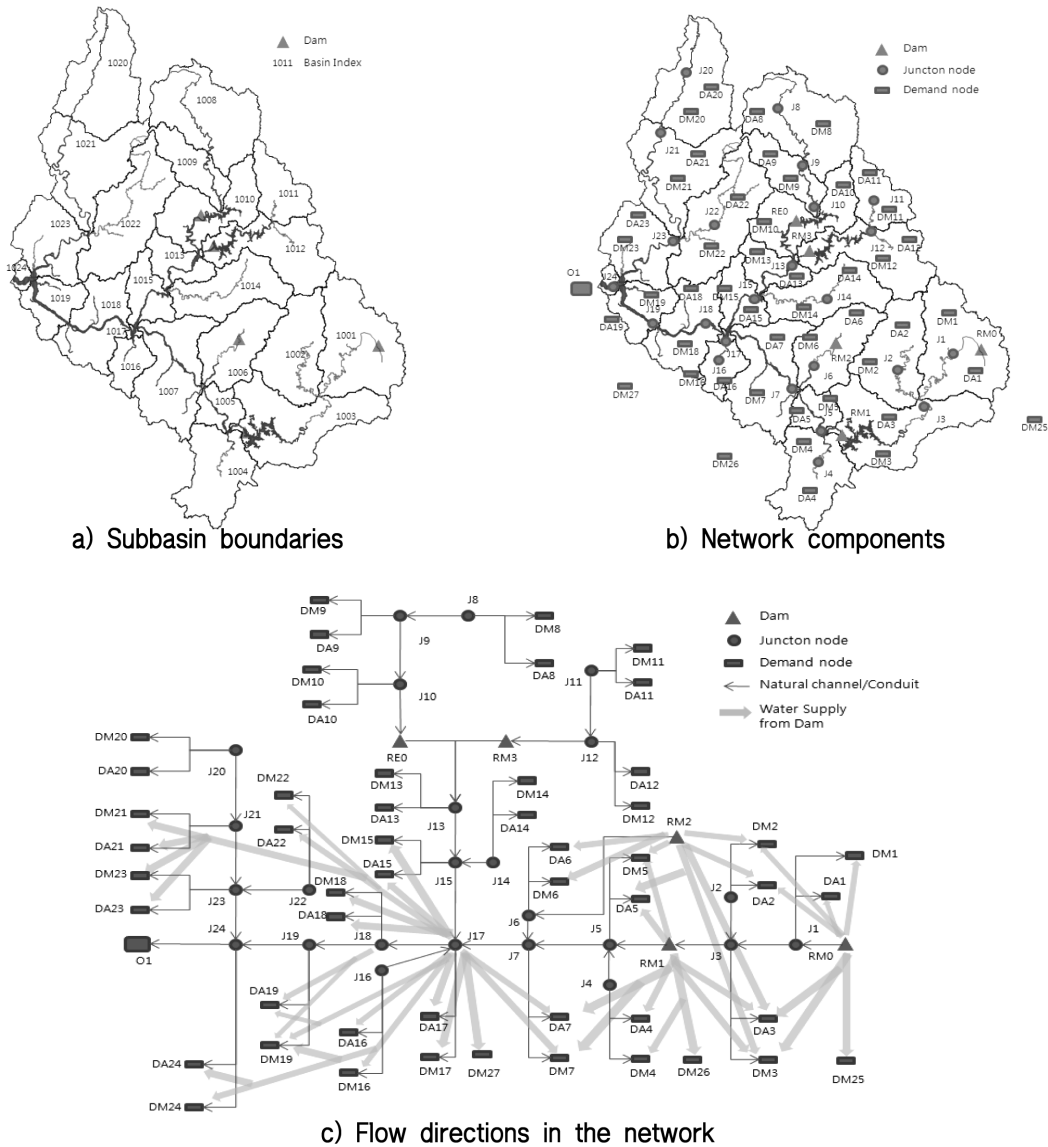


Fig. 1 Water Supply System with Five Reservoirs in the Han River Basin (류관형 등, 2009)

반대로 다목적댐 및 용수전용댐은 별도의 취수점을 가지는데, 광역상수도 등을 통해 해당 댐이 속해있는 소유역 이외로도 도수가 가능하다. 그림 1b와 같이 대상 유역의 네트워크를 나타내었다. 모든 취수점과 5개의 대상댐을 제외한 대상유역 내의 기타댐 (팔당댐 등)도 노드라고 정의하고, 연속방정식에 의해 유입량과 유출량이 계산되도록 하였다. 네트워크 요소들의 관계는 그림 1c와 같다. 유역내 물공급을 제외한 각 댐에서 도수되는 광역물 이동량은 아래 표 1과 같다.(류관형 등, 2009)

본 연구에서 적용한 Hedging Rule은 수자원공사의 “재난 및 안전관리기본법 제23조(집행계획)”에 설정되어 있는 비상시 저수지 운영계획을 위한 방류기준 4단계와 평상시 운영을 추가로 포함한 총 5단계로 설정하여 각각을 가뭄 1~4단계, 평상시라고 칭하였다(표 2). 각 댐의 계획 홍수위를 최대수위로, 상시만수위를 저수지 운영의 목표수위로 설정하였으며, 홍수기제한수위가 설정되어 있는 댐에 한해서는 홍수기에 홍수기 제한수위를 목표수위로 설정하였다. 해당 목표수위는 운영시점의 가뭄 1단계 상한수위가 된다. 즉, 저수위가 목표수위보다 높으며 평상시 운영규칙으로 저수지를 운영하고, 목표수위보다 저수위가 낮아지면 가뭄 1단계 운영규칙(표 2)을 적용하여 방류하도록 한다. 또한, 댐의 유효저수용량의 하한선이 되는 저수위시의 저류량을 안정저류량이라고 칭하고, 목표수위와 저수위의 평균에 해당되는 수위를 가뭄 2단계 운영규칙의 상한선으로, 저수위를 가뭄 3단계 운영규칙의 상한선으로 설정하였다. 마지막으로 용수공급가능수위시의 저류량을 최소 운영저류량으로 설정하였으며, 이는 가뭄 4단계 운영규칙의 상

한선이 된다. 각각 가뭄 시 운영규칙의 방류량 감소계수는 표 2에 제시된 방류량 감소범위의 평균값을 사용하여 평상시는 1, 가뭄 1단계는 0.85, 가뭄 2단계는 0.7, 가뭄 3단계는 0.55, 가뭄 4단계는 0.25로 결정하여 적용하였다. 단, 발전용 댐인 화천댐의 경우 관리주체를 고려하여 방류량 감소계수를 평상시는 1, 가뭄 1단계는 0.8, 가뭄 2단계는 0.35, 가뭄 3단계는 0.1, 가뭄 4단계는 0으로 결정하여, 발전용수공급을 어느 정도 확보하며 운영되도록 전제하였다. 이러한 가뭄 시 운영규칙을 위한 Hedging Rule 곡선은 아래 그림 2와 같다(류관형 등, 2009).

본 연구에서는 수자원장기종합계획(2006~2020)에 명시된 한강유역의 2003년 소유역별 유출량 자료를 이용하여 유역별 유출률을 계산하여 미래의 저수지 연계운영에 기본자료로 사용하였다. 댐운영 실무편람(2008) (한국수자원공사, 2008)과 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr)의 댐 제원 및 댐 계획방류량 자료 (표 3~4)를 사용했다. 화천댐은 발전용 댐이므로 계획된 용수공급량이 존재하지 않으며, 농업용수를 공급하기 위한 방류량은 농번기에만 계획되어 있다. 각 수유처별 용수 수요는 미래의 불확실성을 고려하기 위해 수자원장기종합계획(2006~2020)에 2011년의 수요량으로 예측되어 있는 3가지 시나리오(최저·기준·최고수유)에 최저수유와 기준수유, 기준수유와 최고수유의 중앙값을 사용한 2가지 시나리오(저수유, 고수유)를 추가하여 5가지 시나리오를 설정하였다(표 5~6). 표 7은 한강 하류부의 하천유지용수 수요량을 나타낸다. 이는 하천법에 의해 공시되는 양이므로 재고시가 되지 않는다는 가정 하에서 불확실성이 존재하지 않는다고 예측하였다.

Table 1. Water Supplies to Water Distribution System in Large Cities (류관형 등, 2009)

Supply node	Demand node with water distribution system
rm0(Gwangdong)	dm 1, dm2, dm3, dm25, da1, da2, da3
rm1(Chungju)	dm3, dm4, dm5, dm7, dm26, da3, da4, da5, da7
rm2(Hoengseong)	dm2, dm3, dm5, dm6, da2, da3, da5, da6
rm3(Soyanggang)	-
re0(Hwacheon)	-
j17(Paldang)	dm 7, dm15, dm16, dm17, dm18, dm19, dm21, dm22, dm23, dm24, dm27, da7, da15, da16, da17, da18, da19, da21, da22, da23, da24
j18(Han River)	dm 19, da19

※ rm: multipurpose or water supply dam, re: dam for power generation, j: junction node, dm: municipal demand node, da: agricultural demand node

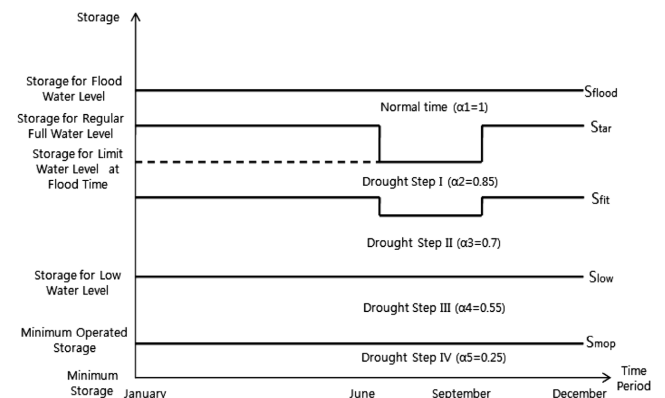


Fig. 2 Applied Hedging Rule in the Han River Basin(류관형 등, 2009)

Table 2. Reservoir Operating Policies with a Hedging Rule in Dry Seasons (안창진, 2008)

Stages	Operating rules	Remark
Normal time	supply 100% of planned water supply	Effective Storage
Drought Step I	supply 80 ~ 90% of total planned water supply or decrease municipal water demand	
Drought Step II	supply 60 ~ 80% of total planned water supply or decrease outflow for river discharge	
Drought Step III	supply 50~60% of total planned water supply or decrease agricultural water demand or water distribution system in large cities	Emergency Water Supply
Drought Step IV	supply below 50% of total planned water supply or decrease municipal water demand	Water located below reservoir outlet

Table 3. Reservoir Properties in the Han River Basin

Dam	S_{flood}	S_{tar}		S_{fit}		S_{low}	S_{mop}
		Dry season	Rainy season	Dry season	Rainy season		
rm0(Gwandong)	13.13	11		7		3	0.7
rm1(Chungju)	2,750	2,385	2,134	1,490.5	1,365	596	100
rm2(Hoengseong)	86.9	83.6	77.4	46.9	45.45	13.5	3.3
rm3(Soyanggang)	2,900	2,543.8	2,130	1,596.9	1,390	650	280
re0(Hwacheon)	1,018.41	1,018.4	805.41	689.4	582.91	360.41	226.94

※ S_{flood} : Storage for flood water level

S_{tar} : Storage for regular full water level or Storage for limit water level at flood time

S_{fit} : Average storage of and

S_{low} : Storage for low water level

S_{mop} : Minimum operated storage

Table 4. Pre-Defined Discharge to Users from the Reservoirs

Unti : $10^6\text{m}^3/\text{yr}$

Dam	Municipal	Agricultural	River discharge	Remark
rm0(Gwandong)	25.55	0.81	-	
rm1(Chungju)	2,731	315	334	agricultural water supply : April ~ October
rm2(Hoengseong)	72.3	15.8	31.4	agricultural water supply : April ~ November
rm3(Soyanggang)	1,200	13	255.4	agricultural water supply : March ~ October
re0(Hwacheon)	-	-	-	for electricity

Table 5. Municipal Demand

Unti : $10^6\text{m}^3/\text{yr}$

Node	Lowest Demand	Low Demand	Standard Demand	High Demand	Highest Demand
dm1	14.643	14.929	15.180	15.295	15.402
dm2	15.001	15.331	15.660	15.810	15.953
dm3	51.901	52.889	53.870	54.636	55.373
dm4	129.740	132.421	135.066	137.105	139.072
dm5	7.121	7.264	7.371	7.450	7.522
dm6	89.096	90.885	92.639	93.405	94.170
dm7	192.541	194.981	197.386	199.727	202.067
dm8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dm9	0.107	0.107	0.107	0.107	0.107
dm10	17.048	17.262	17.441	17.556	17.663
dm11	7.772	7.844	7.915	7.958	7.994
dm12	17.448	17.627	17.806	17.921	18.000
dm13	56.060	56.647	57.198	57.555	57.884
dm14	17.992	18.321	18.615	18.758	18.865
dm15	20.075	20.182	20.254	20.333	20.404
dm16	92.453	94.171	95.888	97.606	99.323
dm17	0.480	0.508	0.508	0.508	0.508
dm18	2,023.016	2,062.801	2,102.550	2,133.396	2,164.235
dm19	608.777	619.913	631.013	639.888	648.756
dm20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dm21	2.226	2.261	2.261	2.262	2.262
dm22	96.718	97.928	99.130	100.225	101.291
dm23	42.812	43.177	43.506	43.836	44.165
dm24	2.555	2.591	2.626	2.662	2.670
dm25	19.381	19.381	19.381	19.381	19.381
dm26	29.529	29.529	29.529	29.529	29.529
dm27	1,120.585	1,120.585	1,120.585	1,120.585	1,120.585

Table 6. Agricultural Demand

Unit: $10^6\text{m}^3/\text{yr}$

Node	Lowest Demand	Low Demand	Standard Demand	High Demand	Highest Demand
da1	24.303	24.669	25.017	25.164	25.308
da2	58.689	59.970	61.233	61.818	62.403
da3	93.222	95.307	97.374	98.361	99.330
da4	339.845	347.491	355.101	358.922	362.725
da5	55.900	57.196	58.488	59.220	59.952
da6	110.752	113.268	115.780	117.196	118.612
da7	354.174	361.018	367.845	372.318	376.770
da8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
da9	3.999	4.104	4.192	4.255	4.301
da10	45.473	46.438	47.399	47.957	48.515
da11	17.485	17.850	18.211	18.446	18.681
da12	33.921	34.672	35.419	35.738	36.040
da13	40.014	40.786	41.541	41.902	42.263
da14	76.847	78.622	80.376	81.383	82.369
da15	29.771	30.346	30.900	31.244	31.567
da16	28.269	28.697	29.104	29.339	29.557
da17	24.396	24.740	25.084	25.277	25.466
da18	110.021	111.322	112.606	113.097	113.567
da19	183.012	186.461	189.906	191.962	194.014
da20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
da21	40.513	41.386	42.242	42.821	43.379
da22	202.486	206.745	211.004	213.811	216.614
da23	112.799	114.985	117.167	118.623	120.075
da24	10.465	10.679	10.893	11.061	11.212

Table 7. Minimum River Discharge Requirement

Unit: $10^6\text{m}^3/\text{yr}$

Arc	Demand	Arc	Demand	Arc	Demand	Arc	Demand
j18 → j19	3,373.989	j19 → j24	3,373.989	j23 → j24	589.991	j24 → o1	3,844.544

본 연구에서는 저수지의 운영에만 초점을 맞추고 있으므로, 수자원장기종합계획(2006~2020)에서 예측한 용수수요량 중 지하수 이용량을 제외하여 지표수 이용량만을 이용한 각 사용자별 용수수요량을 재 산정하였고, 한강 유역 내에 존재하는 소유역 중 권역 외인 대청댐으로부터 도수 받는 소유역의 경우, 실제 용수수요에서 대청댐으로부터의 광역물 이동량을 제외하여 용수수요를 재 산정하였다. 저수지 운영모형은 2011년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간을 순단위(10일)로 구분하여 구축되었으며, 가뭄 시 모든 용수수요를 충족시킬 수 없을 경우 용수공급 우선순위는 실제 저수지 운영규칙을 참고하여 생공용수, 농업용수, 하천유지용수 순으로 결정하였다. 또한 가뭄 시 저수지의 수위를 목표수위까지 확보하지 못하는 경우, 저수지 수위 확보보다는 용수공급을 우선으로 한다.

3.2 적용 결과

2011년의 시나리오별 용수수요량 자료를 이용하여 저수지 운영모형에 적용한 결과, 시나리오별 생공용수 수요량

99.972~99.975%, 농업용수 수요량 99.944~99.961%, 하천유지용수 99.411~100.000%를 공급할 수 있었고(표 8), 댐의 목표저류량 별 저류량 비율인 댐 저류율은 모의시간별(순별)로 39.148~107.524%의 분포를 보였다.

미래의 용수수요량을 알지 못하는 상태에서 Hedging Rule에 의해 결정된 저수지의 방류량이 모든 용수공급 시나리오를 만족시켜야 하므로, 용수수요량이 증가할수록 일부 모의시간에 생공용수 수요처 2~3개소, 농업용수 수요처 1~2개소, 하천 1~3개 구간에서 약간의 부족현상이 나타났는데, 주로 봄과 가을 갈수기임을 알 수 있다(표 9). 그러나 수요가 낮은 시나리오에서 수요가 높은 시나리오로 바뀔 때, 용수수요량 증가분(100.17~340.27 백만 $\text{m}^3/\text{년}$)에 비해 각 시나리오에서의 전체 용수부족량(0.83~39.54 백만 $\text{m}^3/\text{년}$)은 상대적으로 소폭의 증가를 보이므로, 용수수요량 증가에 따른 시스템 내의 충격이 효율적인 용수분배를 통해 대폭 완화되었음을 알 수 있다(표 10).

Table 8. Total Water Supply to Users in the Multi-Reservoir operation System

Demand Type	Scenario	Demand (10 ⁶ m ³ /year)	Supply (10 ⁶ m ³ /year)	Supply ratio (%)
Municipal demand	Lowest	4,609.00	4,607.83	99.975
	Low	4,672.15	4,670.95	99.974
	Standard	4,734.81	4,733.60	99.974
	High	4,783.91	4,782.69	99.974
	Highest	4,832.73	4,831.38	99.972
Agricultural demand	Lowest	1,844.45	1,843.72	99.961
	Low	1,881.47	1,880.67	99.957
	Standard	1,918.28	1,917.37	99.953
	High	1,939.74	1,938.77	99.950
	Highest	1,960.99	1,959.88	99.944
Minimum river discharge	Lowest	11,301.98	11,301.98	100.000
	Low		11,301.25	99.994
	Standard		11,294.00	99.929
	High		11,274.72	99.758
	Highest		11,235.45	99.411

Table 9. Water Shortage Ratio

Node \ Scenario	Period	Lowest	Low	Standard	High	Highest
dm1	30(Oct. 3rd)		-	-	-	0.65%
dm12	12(Apr. 3rd)		-	-	-	5.68%
	16(Jun. 1st)	100%				
	17(Jun. 2nd)	93.72%	100%			
dm25	3(Jan. 3rd)	7.71%				
	4(Feb. 1st)	7.72%				
	5(Feb. 2nd)	7.72%				
	6(Feb. 3rd)	7.76%				
	7(Mar. 1st)	7.72%				
	8(Mar. 2nd)	7.72%				
	12(Apr. 3rd)	-	-	-	-	8.85%
13(May. 1st)	-	-	-	-	8.85%	
da10	12(Apr. 3rd)	-	-	-	-	1.37%
	13(May. 1st)	-	-	-	-	1.37%
da12	13(May. 1st)	-	-	-	-	1.67%
	16(Jun. 1st)	45.68%	48.03%	50.27%	51.44%	52.55%
	17(Jun. 2nd)	-	1.48%	4.71%	6.29%	7.78%
j19-j24	1(Jan. 1st)	-	0.79%	2.60%	4.01%	5.42%
	2(Jan. 2nd)	-	-	1.44%	2.85%	4.25%
	3(Jan. 3rd)	-	-	1.21%	2.63%	4.03%
	4(Feb. 1st)	-	-	-	-	2.90%
	5(Feb. 2nd)	-	-	1.81%	3.22%	4.63%
	6(Feb. 3rd)	-	-	1.81%	3.23%	4.63%
	7(Mar. 1st)	-	-	-	1.41%	2.82%
	8(Mar. 2nd)	-	-	-	1.41%	2.82%
	9(Mar. 3rd)	-	-	-	1.42%	2.82%
	10(Apr. 1st)	-	-	-	2.43%	4.84%
	11(Apr. 2nd)	-	-	-	2.43%	4.84%
	14(May. 2nd)	-	-	-	2.25%	4.49%
	15(May. 3rd)	-	-	-	-	2.24%
	16(Jun. 1st)	-	-	-	-	2.21%
29(Oct. 2nd)	-	-	-	-	2.14%	

Table 9. Water Shortage Ratio (Continued...)

Node \ Scenario	Period	Lowest	Low	Standard	High	Highest
j19-j24	31(Nov. 1st)	-	-	-	-	1.50%
	32(Nov. 2nd)	-	-	-	-	1.50%
	33(Nov. 3rd)	-	-	-	-	1.50%
	34(Dec. 1st)	-	-	-	-	1.41%
j23-j24	4(Feb. 1st)	-	-	-	8.31%	-
	16(Jun. 1st)	-	-	-	-	14.25%
	30(Oct. 3rd)	-	-	-	-	6.31%
j24-o1	2(Jan. 2nd)	-	-	-	-	1.23%
	3(Jan. 3rd)	-	-	-	-	1.23%
	4(Feb. 1st)	-	-	-	0.84%	2.07%
	16(Jun. 1st)	-	-	-	-	1.57%

Table 10. Comparing Demand Increment with Shortage Increment

Scenario	Total Demand (10 ⁶ m ³ /year)	Demand Increment (10 ⁶ m ³ /year)	Total Shortage (10 ⁶ m ³ /year)	Shortage Increment (10 ⁶ m ³ /year)
Lowest	17,755.43	-	1.90	-
Low	17,855.60	100.17	2.73	0.83
Standard	17,955.07	199.64	10.10	7.37
High	18,025.63	270.20	29.45	19.35
Highest	18,095.70	340.27	68.99	39.54

그림 3은 대상 댐인 5개 댐에 대한 연중 저류량 변화를 나타낸다. 총 저류율은 시간별로 최소 39.15%, 최대 107.52%를 나타내었다. 연초에는 갈수기이므로 유입량이 적

어 용수공급 후 저류량이 감소하거나 유지되는 양상을 보이다가, 홍수기에 증가하는 유입량을 갈수기를 대비하여 저수지에 저류한다. 이때 광동댐, 충주댐, 소양강댐에서는 홍수기때

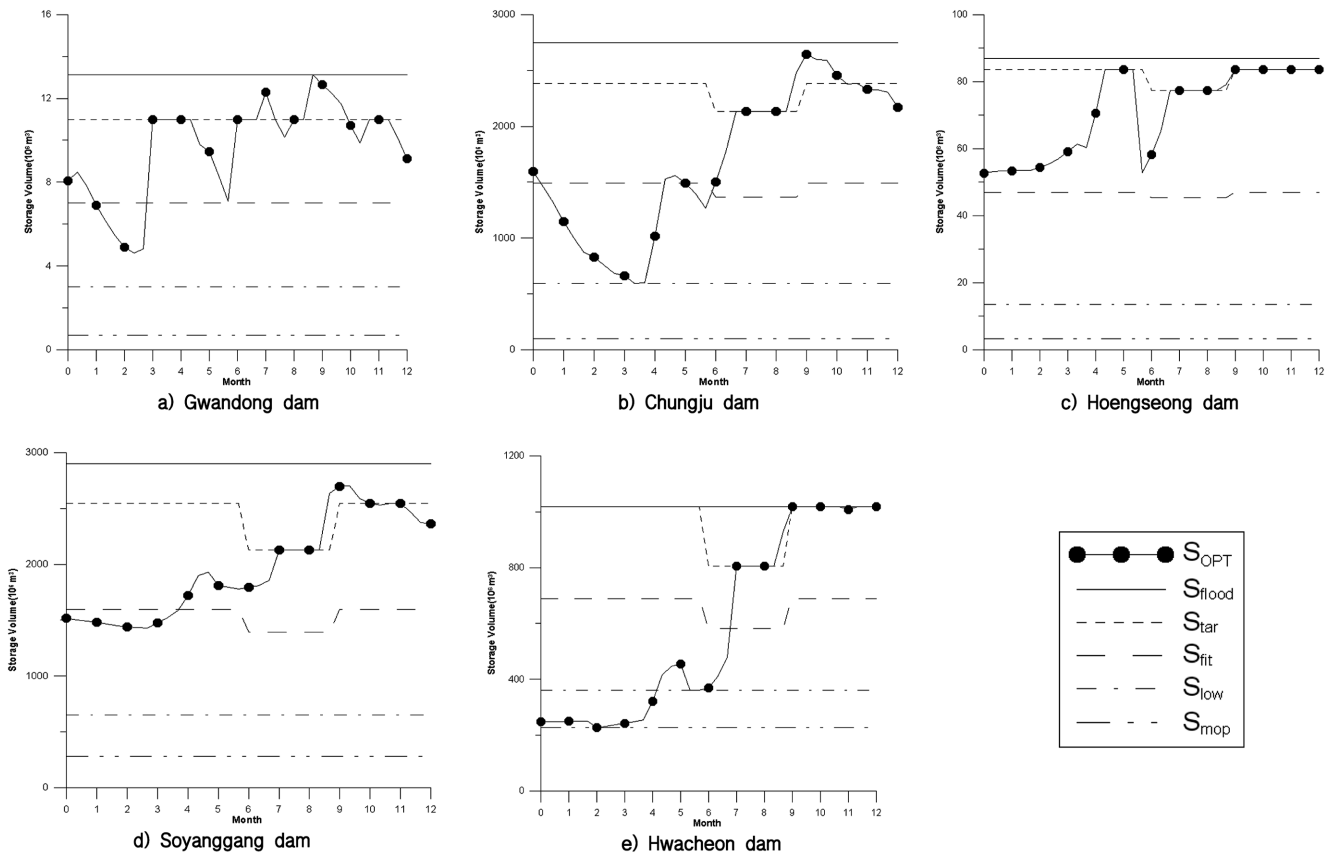


Fig. 3 Reservoir Storage

일시적으로 상시만수위나 홍수기 제한수위를 넘어 계획 홍수위에 근접하는 결과를 나타내지만, 홍수도 대비해야 하므로 유입량 증가량에 비하여 저류량의 증가는 작은 양이다. 이러한 결과로 인해 갈수기 용수공급대비 뿐 아니라 저수지의 저류효과로 인해 하류의 홍수피해저감효과도 동시에 획득하게 된다. 홍수기 이후에는 다시 유입량이 감소하므로 용수수요를 충족시키는 가운데 목표저류량인 상시만수위에 가깝게 저류량을 유지하려는 양상을 보인다. 본 결과의 초기저류량은 실제 2003년 댐별 저류량 자료를 이용하였다.

한편, 네트워크의 최상류에 있는 광동댐과 황성댐은 상류댐이나 유역에서의 유입이 없으므로 수요의 변동성에 따른 영향을 받지 않아 유입량과 방류량이 시나리오에 상관없이 일정하다. 반면, 충주댐, 소양강댐, 화천댐은 댐의 자연유입량외에 상류에서 유입되는 유량이 있어 유입량과 방류량이 수요의 변동성에 따른 영향을 받는다. 충주댐의 유입량은 0~25.72%, 방류량은 0~13.27%, 소양강댐의 유입량은 0~2.04%, 방류량은 0~0.98%, 화천댐의 유입량은 0.01~1.54%, 방류량은 0.01~1.43%의 범위에서 변동하였다. 다른 댐들에 비해 충주댐의 상류유역이 광동댐과 황성댐으로부터 용수공급을 받는 수요처가 많고 취수점이 되는 분기점이 많아 변동성이 크게 나타난 것으로 판단된다.

그림 4는 용수부족이 나타나는 지역을 나타낸다. 생공용수가 부족한 지역이 3개소, 농업용수가 부족한 지역이 2개소로 나타났다. 이 중에서 “da10”, “dm12”, “da12”는 유역의 최상류지역이면서 광역상수도 시설이 운영되지 않는 곳이므로, 자연유입량에 따른 하천유량에 영향을 많이 받아서 용수부족의 가능성이 클 것으로 판단된다. 또한 “dm1”은 영서 산간지역으로 자연유입량이 적고, 광동댐의 규모가 작아 용수공급에 어려움을 겪는 지역으로 판단되며, “dm25”는 일부 광동댐으

로부터의 용수공급이 이루어지고 있으나 유역 외부의 수계에서 주로 용수수급을 하는 지역이므로 한강수계의 운영결과만으로 용수공급부족을 논하기는 어렵다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수요의 불확실성을 고려한 가뭄 시 최적의 용수공급을 목적으로 수계의 댐을 연계운영하기 위해 2단계 추계학적 선형계획법(2-SLP with Fixed Recourse)을 사용하였다. 1단계 미래의 용수수요량을 알지 못하는 상태에서 댐 저류량을 결정하고, 2단계에서 용수수요량 시나리오를 고려한 댐 방류량, 용수공급량, 하천유량을 결정함으로써, 댐 저류량을 최대화하고 용수수요, 하천유지유량을 만족시킬 수 있는 모형을 구축하였다. 또한 본 모형에는 우리나라와 같이 강우가 시·공간적으로 집중되어 있고, 수자원 보존량이 부족한 경우, 가뭄 발생 시 우선순위를 가지는 용수 수요처에 먼저 용수를 공급하고, 더욱 극심한 가뭄을 대비하기 위해 매우 효과적인 방법인 Hedging Rule이 적용되어 있어 다목적 댐 연계운영을 위한 매우 활용성이 뛰어난 모형이다. 본 모형의 최적해는 GAMS/CPLEX를 이용하여 산출되었다. 수자원장기 종합계획(2006-2020)에 명시된 2011년의 용수수요량 등의 자료를 이용하여 한강권역의 다목적 댐과 용수조절능력이 있는 발전용 댐을 대상으로 대규모 용수배분에 대해 모의한 결과, 합리적인 댐 저류량과 방류량을 결정할 수 있었고, 용수가 고르게 수요처로 배분되었다. 이러한 연구결과는 일부에서 나타난 시간과 공간적인 용수공급의 불균형을 극복하기 위해 권역 외에서의 용수공급이나 광역물 이동망 확충, 방류량 감소 계수 조정 등의 대안 도출을 위한 길잡이가 될 수 있었다. 또한 본 연구에서는 용수수요의 불확실성을 통하여 간접적으

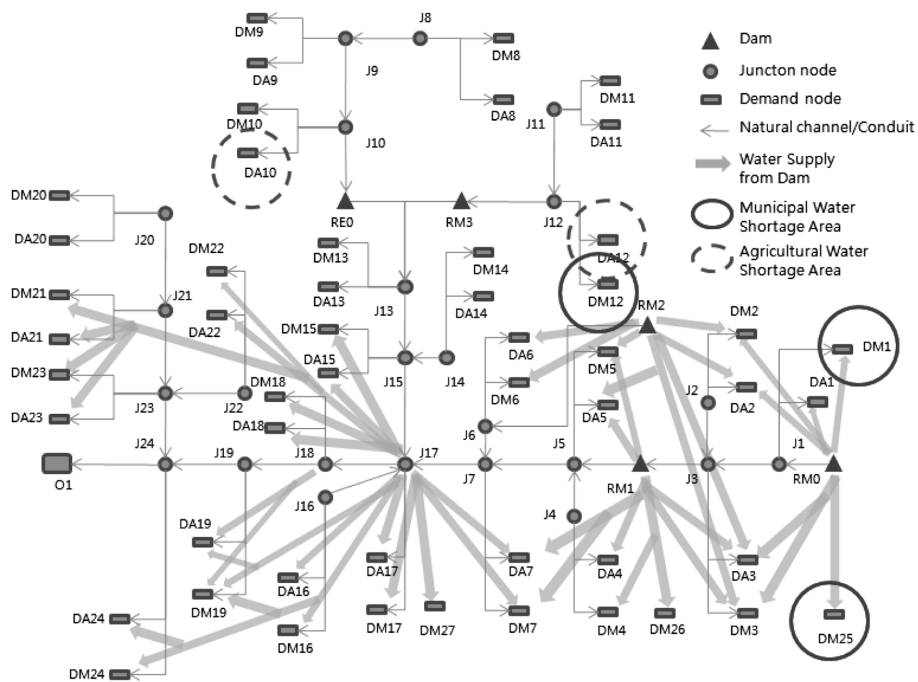


Fig. 4 Water Shortage Area

로 고려된 유입량의 불확실성을 직접 고려하고, 용수수요와의 상관관계를 밝힘으로써 더욱 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에 이어 향후에는 유입량의 불확실성이나 모의 시점에서의 저수지별 저류량의 불확실성까지 고려하여 더욱 효과적인 모형을 구축하고, 실제 운영자료와 비교하여 그 효율성을 평가하는 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 사업인 자연과 함께하는 하천복원 기술개발 연구 (ECORIVER21)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다

부 록

$ST_{r,t}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 목표저류량과 저류량의 편차 절대치를 선형화하는 변수
$S_{tar(r,t)}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 목표 저류량
$S_{a(r,t)}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 저류량
$W_{r(r,t)}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 가중치
$D_a^w(d,t)$: 수요 노드 “d”의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 실제공급량
$Q_{(i,j)t}^w$: 노드 “i”와 노드 “j”사이 구간의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 실제유량
H	: Hedging Rule을 적용한 댐 운영 구획의 집합, $h \in \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$
$B_{h,r,t}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 Hedging Rule 결정변수,
S_{flood}	: 계획홍수위시 저류량
$S_{low(r,t)}$: 저수위시 저류량
$S_{fit(r,t)}$: $S_{tar(r,t)}$ 와 $S_{low(r,t)}$ 의 평균값
$S_{mop(r,t)}$: 용수공급가능 수위시 저류량(사수위시 저류량)
P^w	: 시나리오 “w” 발생 확률 ($\sum_{w \in W} p^w = 1$)
d_t	: 모의시간 간격
$D_p^w(d,t)$: 수요 노드 “d”의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 계획수요량
$W_d(d,t)$: 수요 노드 “d”의 시간 “t”에서의 가중치
$Z_{(i,j)t}^w$: 노드 “i”와 노드 “j”사이 구간의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 하천유지유량에 미달하는 실제하천유량에 대한 편차를 선형화하는 변수
$OUT_{p(i,j)t}^w$: 노드 “i”와 노드 “j”사이 구간의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 하천유지유량
$Q_{(i,j)t}^w$: 노드 “i”와 노드 “j”사이 구간의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 실제하천유량
$W_{o(i,j)t}$: 노드 “i”와 노드 “j”사이 구간의 시간 “t”에서의 가중치

$O_{r,t}^w$: 댐 “r”의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 총 방류량
$O_{0(r,t)}^w$: 댐 “r”의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 생공용수 방류량
$O_{1(r,t)}^w$: 댐 “r”의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 농업용수 방류량
$O_{2(r,t)}^w$: 댐 “r”의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 하천유지용수 방류량
$O_{f(r,t)}^w$: 댐 “r”의 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 초과 방류량
$IN_{r,t}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 유입량
$\alpha_{h,r}$: 댐 “r”의 Hedging 구간 “h”일 때의 감소 계수
$S_{upp0(r,t)}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 생공용수 계획방류량
$S_{upp1(r,t)}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 생공용수 계획방류량
$S_{upp2(r,t)}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 생공용수 계획방류량
$R_{G(r,t)}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 발전기 가동시간 비
$Q_{G-MAX(r,t)}$: 댐 “r”의 시간 “t”에서의 발전최대수량
$\sum_{n \in N} Q_{(r,n,t)}^w$: 댐 “r”에서 노드 “n”으로 공급되는 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 유량의 합
$\sum_{dm \in DM} Q_{(r,dm,t)}^w$: 댐 “r”에서 생공용수 노드 “dm”으로 공급되는 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 유량의 합
$\sum_{da \in DA} Q_{(r,da,t)}^w$: 댐 “r”에서 농업용수 노드 “da”으로 공급되는 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 유량의 합
$\sum_{j \in J \cup S} Q_{(r,j,t)}^w$: 댐 “r”에서 분기점 노드 또는 하구노드 “j”으로 공급되는 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 유량
$\sum_{n \in N} Q_{(n,d,t)}^w$: 노드 “n”에서 수요노드 “d”로 공급되는 시나리오 “w”, 시간 “t”에서의 유량의 합

참고문헌

건설교통부 (2006). 수자원장기종합계획.
 국토해양부 (2009). 작년수준 가뭄에도 댐 용수공급 문제없다. 보도자료, 2009년 10월 5일
 김승권, 박영준 (1998). 댐군의 연계운명을 위한 수학적 모형. 한국수자원학회논문집, 제31권, 제6호, pp. 779-793.
 류관형, 정건희, 이정호, 김중훈 (2009). Hedging Rule을 이용한 댐 연계 운영 최적화: 한강수계 사례연구. 한국수자원학회논문집, 제42권, 제8호, pp. 643-657.
 음형일, 김영오 (2007). iSampling SDP와 Hedging Rule을 결합한 가뭄대비 최적운영률. 2007 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 1368-1371.
 이용대, 김승권, 고익환 (2005). 저수지군 연계운명을 위한 추계학적 선형 계획 모형. 2005 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 262-265.
 이용대, 김승권, 김재희 (2004). 저수지군 연계운명을 위한 표본

- 추계학적 선형 계획 모형. 2004 대한산업공학회/한국경영과학회 춘계학술대회 논문집, 대한산업공학회/한국경영과학회, SB6, pp. 10-13
- 한국수자원공사 (2008). **댐운영실무편람**.
- Alshaiikh, A. A. and Taher, S. (1995). Optimal design of irrigation canal network under uncertainty using response surface method, *Water International* 20, IWWA, pp. 155-162.
- Barros, M.T., Zambon, R.C., Delgado, D.M., Barbosa, P.S.F., and Yeh, W. W.-G. (2008). Planning and operation of large-scale water distribution systems with preemptive priorities, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 134, No. 3, pp. 247-256.
- Bayazit, M. and Unal, E. (1990). Effects of hedging on reservoir performance, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 4, pp. 713-719.
- Bower, B. T., M. M. Hufschmidt, and W. W. Reedy (1962), Operating procedures: Their role in the design of water-resources systems by simulation analyses, in *Design of Water-Resource Systems*, edited by A. Maass et al., Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., pp. 443-458.
- Butcher, William S. (2007). Stochastic dynamic programming for optimum reservoir operation, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 7 No. 1, pp. 115 -123.
- Can, E.K., and Houck, M.H. (1984). Real-time reservoir operations by goal programming, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 110, No. 3, pp. 297-309.
- Cancelliere, A., Ancarani, A. and Rossi, G. (1998). Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 3, No. 2, pp. 140-148.
- Draper, A. J., and J. R. Lund (2004). Optimal hedging and carry-over storage value, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 1, pp. 83-87.
- Faber, B. A., and Stedinger, J.R. (2001). Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts, *Journal of Hydrology*, Vol. 249, No. 1-4, pp. 113-133.
- Gate, T. K. and Alshaiikh, A. A. (1993). Stochastic design of hydraulic structures in irrigation canal networks, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 346-363.
- Gate, T. K., Alshaiikh, A. A., Ahmed, S. I. and Molden, D. J. (1992). Optimal irrigation delivery system design under uncertainty, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 118, No. 3, pp. 433-449.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R. and Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation, *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Karamouz, M., and Houck, M.H. (1982). Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization, *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 1337-1344.
- Karamouz, Mohammad and Mousavi, Seyed Jamshid (2007). Uncertainty based operation of large scale reservoir systems: Dezand Karoon experience, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 39, No. 4, pp. 961-975.
- Karamouz, M., and Vasiliadis, H. V. (1992). Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts, *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 1221-1232.
- Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A., Hsu, E. and Yuan S. Q. (1990), Sampling Stochastic Dynamic programming Applied to Reservoir Operation, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 447-454.
- Klemes, V. (1977). Value of information in reservoir optimization, *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 5, pp. 850-857.
- Kracman, D. R., McKinney, D. C., Watkins, D.W. Jr and Lasdon, L. S. (2006). Stochastic optimization of the Highland Lakes System in Texas, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 132, No. 2, pp. 62-70.
- Lee, Yongdae, Kim, Sheung-Kown and Ko, Ick Hwan (2008). Multistage stochastic linear programming model for daily coordinated multi-reservoir operation, *Journal of Hydroinformatics*, IWA Publishing 2008, pp. 23-41.
- Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water Resources Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Loganathan, G.V., and Bhattacharya, D. (1990). Goal-Programming techniques for optimal reservoir operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 6, pp. 820-838.
- Masse, P. (1946). *Les Reserves et la Regulation de l'Avenir Dans la vie Economique*, vol I, Avenir Determine (in French), Hermann and Cie, Paris.
- Maass, A., Hufschmidt, M. M., Dorfman, R., Thomas Jr., H. A., Marglin, S. A. and Fair, G. M. (1962). *Design of Water Resources Systems*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., U.S.A.
- Mohan, S., and Keskar, J.B. (1991) Optimization of multipurpose reservoir system operation. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 27, No. 4, pp. 621-629.
- Neelakantan, T. R. and Pundarikanthan, N. V. (1999). Hedging Rule Optimisation for Water Supply Reservoirs System. *Water Resources Management* Vol. 13, No. 6 pp. 409-426.
- Oliveira, R., and Loucks, D.P. (1997) Operating rules for multireservoir systems, *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 839-852.
- Randall, D., Cleland, L., Kuehne, C.S., Link, G.W., and Sheer, D.P. (1997) Water supply planning simulation model using mixed-integer linear programming 'Engine', *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 2, pp. 116-124.
- Shih, J.-S., and ReVelle, C. (1994). Water-supply operations during drought: Continuous hedging rules, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, No. 5, pp. 613-629.
- Shih, J.-S., and ReVelle, C. (1995). Water-supply operations during drought: A discrete hedging rule. *European Journal of Operational Research*, Vol. 82, No. 1, pp. 163-175.
- Simonovic, S. P. (1992). Reservoir system analysis: Closing gap between theory and practice, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 118, No. 3, pp. 262-280.
- Srinivasan, K. and Philipose, M. C. (1996). Evaluation and selection of hedging policies using stochastic reservoir simulation, *Water Resources Management*, Vol. 10, No. 3, pp. 163-188.
- Srinivasan, K. and Philipose, M. C. (1998). Effect of hedging on over-year reservoir performance, *Water Resources Management*, Vol. 12, No. 2, pp. 95-120.
- Stedinger, J. R. (1978). Comment on value of information in reservoir optimization, *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 5, pp. 984-986.
- Tejada-Guibert, J.A., Johnson, S.A. and Stedinger, J.R. (1995) The value of hydrologic information in stochastic dynamic programming models of a multireservoir system, *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 2571-2579.
- 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*, Vol. 129, No. 2, pp. 86-97.
- Vasiliadis, Haralambos V. and Karamouz, Mohammad (1994).

Demand-driven Operation of Reservoirs Using Uncertainty-based Optimal Operating Policies, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, No. 1, pp. 101-114.

Watkins, D. W., and McKinney, D. C., (1997). Finding robust solutions to water resources problems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 1, pp. 49-58.

You, Jiing-Yun and Cai, Ximing (2008). Hedging rule for reservoir

operations: 1. A theoretical analysis, *Water Resources Research*, VOL. 44, W01415, doi:10.1029/2006WR005481.

© 논문접수일 : 10년 1월 11일
© 심사의뢰일 : 10년 1월 12일
© 심사완료일 : 10년 1월 26일