韓國水資源學會論文集
第42卷 第8號 · 2009年 8月
pp. 643~657

DOI: 10.3741/JKWRA.2009.42.8.643

Hedging Rule을 이용한 댐 연계 운영 최적화: 한강수계 사례연구

Optimization of Multi-reservoir Operation with a Hedging Rule: Case Study of the Han River Basin

류 관 형* / 정 건 희** / 이 정 호*** / 김 중 훈****

Ryu, Gwanhyeong / Chung, Gunhui / Lee, Jung Ho / Kim, Joong Hoon

Abstract

The major reason to construct large dams is to store surplus water during rainy seasons and utilize it for water supply in dry seasons. Reservoir storage has to meet a pre-defined target to satisfy water demands and cope with a dry season when the availability of water resources are limited temporally as well as spatially. In this study, a Hedging rule that reduces total reservoir outflow as drought starts is applied to alleviate severe water shortages. Five stages for reducing outflow based on the current reservoir storage are proposed as the Hedging rule. The objective function is to minimize the total discrepancies between the target and actual reservoir storage, water supply and demand, and required minimum river discharge and actual river flow. Mixed Integer Linear Programming (MILP) is used to develop a multi-reservoir operation system with the Hedging rule. The developed system is applied for the Han River basin that includes four multi-purpose dams and one water supplying reservoir. One of the fours dams is primarily for power generation. Ten-day-based runoff from subbasins and water demand in 2003 and water supply plan to water users from the reservoirs are used from "Long Term Comprehensive Plan for Water Resources in Korea" and "Practical Handbook of Dam Operation in Korea", respectively. The model was optimized by GAMS/CPLEX which is LP/MIP solver using a branch-and-cut algorithm. As results, 99.99% of municipal demand, 99.91% of agricultural demand and 100.00% of minimum river discharge were satisfied and, at the same time, dam storage compared to the storage efficiency increased 10.04% which is a real operation data in 2003.

keywords : Hedging Rule, Multi-reservoir Operation, GAMS/CPLEX, MILP, Dry-Season Water Supply

요 지

홍수기에 집중되는 유출량을 갈수기에 적절히 활용하기 위한 대표적인 구조물이 댐이다. 제한된 용수공급량을 적

* 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정
Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., Seoul, Korea
** 고려대학교 방재과학기술연구센터 연구교수
Research Prof., Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea Univ., Seoul, Korea
*** 고려대학교 방재과학기술연구센터 연구교수
Research Prof., Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea Univ., Seoul, Korea
**** 교신저자, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수
Corresponding Author, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., Seoul, Korea
(e-mail: jaykim@korea.ac.kr)

절히 분배해 용수수요량을 만족시키면서 미래 갈수기시 용수공급을 대비하여 댐 저류량을 조절하는 것이 댐 운영의 중요한 목적 중 하나이다. 본 연구에서는 갈수 시 댐 저류량에 따라 댐 계획방류량을 일정비율 줄여주는 Hedging Rule을 5단계로 적용하여 댐의 상시만수위 저류량에 대한 실제 저류량의 편차, 수요에 대한 용수공급 부족량, 그리고 하천유지용수 부족량을 목적함수로 하여 혼합정수 선형계획법(MILP, Mixed Integer Linear Programming)으로 저수지 연계운영모형을 구성하였다. 한강수계의 다목적댐인 충주, 횡성, 소양강 댐과 용수전용댐인 광동 댐, 그리고 발전용 댐이지만 비교적 큰 저류용량을 가진 화천 댐을 연계 운영 대상으로 하여, 수자원장기종합계획에 사용된 2003년 유출량 및 수요량 자료와 댐 운영 실무편람의 댐 계획방류량 자료를 10일 단위로 입력하여 GAMS/CPLEX를 이용해 최적화하였다. 그 결과 생공용수 수요량 99.99%, 농업용수 수요량 99.91%, 그리고 하천유지용수 수요량 100.00%를 충족시키면서도, 실제 2003년 운영자료에 비교하여 댐 저류효율이 10.04% 개선된 결과를 도출하였다.

핵심용어 : Hedging Rule, 댐 연계 운영, GAMS/CPLEX, MILP, 갈수기 용수공급

1. 서 론

지구상의 생명체가 생명을 영위하는 데 필수적인 요소 중 하나가 물이다. 지구상에 분포하는 물은 총 13억 km^3 에 달하지만, 실질적으로 인간이 사용가능한 담수는 전체의 0.79% 정도인 10.9백만 km^3 에 불과하다(Shiklomanov and Sokolov, 1983). 게다가 연중 강수량의 50~60%가 홍수기에 집중되는 우리나라는 수자원총량 1,240억 m^3/년 중 27% 정도인 337억 m^3/년만을 사용하는 실정이다(건설교통부, 2006).

이렇게 시간이나 공간적으로 편중된 수자원을 적절히 운영하지 못하면 그 결과가 가뭄으로 이어져 실제용수공급량이 계획수요량에 비해 부족한 지역이 발생하고, 생활, 농업을 포함한 산업전반에 걸쳐 악영향을 미치게 된다. 실제로 1994~1995년에 충청도 지역, 2001년에 한강유역을 중심으로 가뭄이 발생하여 전국적으로 확대되었고(건설교통부와 한국수자원공사, 2005), 최근에도 2008년 겨울을 시작으로 전국적인 가뭄이 계속되고 있다.

따라서, 제한된 수자원 부존량을 시공간적으로 균등하게 공급하여 가뭄에 의한 피해를 줄이는 것은 많은 연구자와 기술자들의 관심사라 할 수 있다. 특히, 전체 수자원 부존량 중 댐을 통한 이용량이 177억 m^3/년으로 총 이용량의 50%가 넘으므로, 적절한 댐 운영을 통하여 연중 수자원 부존량을 적절히 분배해 미래 갈수기시 용수공급을 대비하고 홍수시 저류효과를 최대화하기 위해 저류량을 조절하는 방법에 대한 많은 선행 연구가 있었다. 초기에는 단일 댐의 최적 월별 방류량을 산정하는 것으로 시작하여(Bhaskar and Whitlatch, 1980), 댐의 적절한 운영 규칙 모형을 제안하게 되었고(Karamouz and Houck, 1982), 다목적 댐의 여러 목적을 고려하여 댐 운영의 기준에 대해 생각하게 되었다(Loganathan and Bhattacharya, 1990; Mohan and Kesakar, 1991). 점차 연구의 범위를 확대함에 따라 다수 댐의 연계 운영에 초점이 맞추어져 병렬 저수지 최적 운영에 대한 연구를 시작으로(Sand, 1984), 여러 최적화 기법을 이용한 다수 댐 연계 운영에 관한 연구가 이어졌고(Can and Houck, 1984; Tejada-Guibert *et al*, 1995; Oliveira and Loucks, 1997), 다목적함수에 대한 가중치를 부여해 최적의 운영을 도출하는 방법들이 제안되었다(Randall *et al*, 1997; 김승권과 박영준, 1998). 최근에는 댐의 저류량에 따라 방류량을 조정하기 위해 제안된 Hedging rule을(Maass *et al*., 1962; Shih and ReVelle, 1994; 1995) 이용한 댐 운영 및 다수 댐 연계 운영과 관리에 대한 연구와(Neelakantan and Pundarikanthan, 1999; Tu *et al*., 2003; Barros *et al*., 2008, You and Cai, 2008) Hedging Rule에 적용되는 최적의 방류량 감소계수 산정법에 대한 연구가 이루어지고 있다(음형일과 김영오, 2007).

본 연구에서는 제한된 수자원 부존량을 효율적으로 사용하기 위해 댐 저류량에 따라 댐 계획방류량을 일정비율 줄여주는 Hedging Rule을 한강수계에 적용하여 각 댐의 목표저류량에 대한 저류량, 수요에 대한 용수공급량 및 하천유지용수를 최대화하기 위해 혼합정수선형계획법(MILP, Mixed Integer Linear Programming)을 사용하여 시스템을 구축하고 최적화를 수행하였다.

2. 배경 이론

2.1 Hedging Rule

댐에는 각각의 용수 사용목적별 계획방류량이 정해져 있다. 여름철에 집중된 수자원을 연중 효율적으로 분배하기 위해 계획방류량과 실제방류량과의 편차를 최소화하면서도 댐의 저류량을 상시만수위에 가깝도록 확

보하여 갈수기를 대비하는 것이 댐 운영의 기본 목적이다. 하지만 미래는 근본적으로 불확실성을 가지고 있으므로, 정확히 홍수조절과 용수공급을 모두 만족시키는 최적운영을 하는 것은 불가능하다. 따라서 자칫 잘못하면 상대적으로 인명이나 재산피해가 큰 홍수방어를 중심으로 저수지 운영을 하여 가뭄대비에 소홀한 경우가 발생할 수 있다. 하지만 가뭄 시 용수공급능력 역시 홍수조절 못지않게 댐의 중요한 역할이며, 가뭄 발생 시 더욱 효율적인 댐의 운영을 위해 댐의 저류량에 따라 방류량을 조절하는 Hedging Rule(Shih and ReVelle, 1994; Tu *et al.*, 2003)을 적용하면 심각한 물 부족을 대비할 수 있을 것이다. 아래 Fig. 1의 경우, Hedging Rule 곡선의 예로서, 댐의 저류량을 부분선형(Piecewise-linear)함수에 의해 총 3구간으로 나누고, 댐의 실제 저류량에 따라 댐 방류량을 제한한다. 3개의 부분선형함수 중 최상단의 함수는 목표저류량을, 중간함수는 안정저류량을, 최하단 함수는 최소운영저류량을 나타낸다. 각각의 구분된 구간에 절적한 감소계수를 설정하여, 댐 저류량 감소 시 댐의 방류량을 줄임으로써 더욱 극심한 가뭄에 대비하는 것이 Hedging Rule의 기본목적이다. 즉, 댐 저류량이 안정저류량 이상인 경우는 Hedging Rule을 적용하지 않고 계획된 방류량을 방류한다. 하지만 댐 저류량이 안정저류량과 최소운영저류량 사이에 있을 경우는 감소계수 α_2를 적용하고, 최소운영저류량 이하로 댐 저류량이 감소할 경우에는 감소계수 α_1을 적용하여 댐 방류량을 줄인다. 이때 적용되는 감소계소인 α_1, α_2는 0과 1사이의 값을 가지며, 저류량이 감소할수록 극심한 가뭄에 대비해야 하기 때문에 다음과 같은 관계를 가지도록 결정한다.

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < 1 \qquad (1)$$

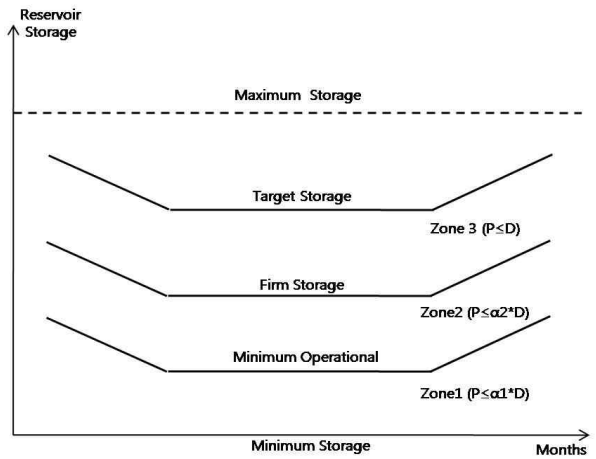


Fig. 1. Hypothetical Reservoir Operation Policy with a Hedging Rule (Barros *et al.*, 2008)

우리나라의 경우 평상시에는 댐 저류량이 안정저류량 이상이므로 Hedging Rule 적용을 거의 받지 않지만, 겨울과 봄에 걸친 갈수기가 되면 자주 댐 저류량이 안정저류량 미만으로 떨어지게 되므로, Hedging Rule 적용을 받아 계획방류량을 줄이게 된다.

2.2 댐 연계운영 모형

용수공급을 목적으로 수계의 댐을 연계운영하기 위해서는 유역 내 존재하는 사용처들과 저수지 등 수원의 위치와 네트워크 정보를 파악하여 모형을 구축하여야 한다. 일반적인 댐 연계운영을 목적으로 하는 용수공급 모형의 예를 도시하기 위해 Fig. 2에서와 같이 간략한 네트워크를 구성하였다. 네트워크의 기본요소는 유역으로부터의 강우로 인한 유출량 (Natural inflow), 댐 (Dam), 분기점 (Junction), 생공용수 (Municipal demand), 농업용수 (Agricultural demand)로 이루어진 수요처, 그리고 유역출구점에서 하류로의 배출량 (Sink)이다. 두 개 이상의 댐이 연계 운영되는 유역을 다시 유출량 계산을 위한 소유역으로 구분하며, 각 소유역에는 유출량, 생공용수 수요처, 농업용수 수요처가 하나씩 존재하는 것으로 가정되었다. 분기점은 소유역들 또는 전체 유역 출구점을 서로 연결하는 지점으로 유역내 수요처에 대한 취수가 일어나는 지점이기도 하다. 광역상수도 시설과 같이 소유역 구분이 분명하지 않은 대량 취수의 경우는 댐에서 일어나 해당 수요처로 공급되는 것으로 가정하였다. 각각의 요소들은 Fig. 2에서 보이는 것과 같이 다른 형태로 표시하여 구분토록 하였으며, 아크에 의해 연결된다. 모든 아크는 수원에서 사용처로, 상류에서 하류로 수자원을 수송하는 역할을 한다. 이 중에서 상류의 소유역과 하류의 소유역을 연결하거나 소유역과 전체 유역 출구점을 연결하는 아크는 하천을 표현한다.

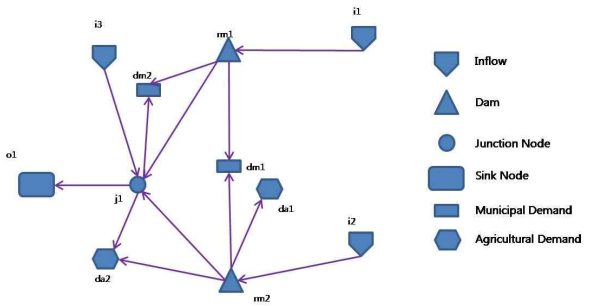


Fig. 2. Schematic Diagram of a Water Supply Network

저수지 연계운영을 통하여 유역 내 존재하는 댐의 저류량을 목표저류량에 최대한 근사하게 유지하면서도

용수수요에 대한 공급율을 최대화하고, 하천유지유량을 최대로 공급하기 위한 운영계획을 제안하였다. 목적함수를 자세히 설명하면, 댐의 상시만수위(홍수기제한수위) 발생 시 저류량을 목표저류량으로 하여 목표저류량과 실제 저류량의 차를 최소화하였다. 두 번째로, 각 수요처의 수요에 대한 용수공급 부족량의 합을 최소화하였으며, 마지막으로, 하천유지유량에 대한 유량 부족량을 최소화하였다. 그 결과 첫째항과 세 번째 항이 비선형임을 알 수 있다. 즉, 목적함수의 첫 번째 항은 목표저류량을 기준으로 실저류량의 초과 또는 부족분을 절대값으로 표현한 것이며, 마지막 항인 하천유지용수 항은 하천유지유량을 기준으로 실제 하천유량이 하천유지용수를 초과하면 0으로, 부족하면 그 부족량을 양의 값으로 표현한 것이다. 따라서 구성된 목적함수식은 다음과 같다.

$$\min f = \sum_{t\in T}[\sum_{r\in R}|S_{tar(r,t)} - S_{a(r,t)}|W_{r(r,t)} + d_t\{\sum_{d\in D}(D_{p(d,t)} - D_{a(d,t)})W_{d(d,t)} + \sum_{i\in R\cup J}(OUT_{p(i,j),t} - Q_{(i,j),t})^{+}W_{o(i,j),t}\}] \quad (2)$$

여기서, $S_{tar(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 목표 저류량
$S_{a(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 실제 저류량
$D_{p(d,t)}$: 수요 노드 "d"의 시간 "t"에서의 계획수요량
$D_{a(d,t)}$: 수요 노드 "d"의 시간 "t"에서의 실제공급량
$OUT_{p(i,j),t}$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 하천유지유량
$Q_{(i,j),t}$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 실제유량
$W_{r(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 가중치
$W_{d(d,t)}$: 수요 노드 "d"의 시간 "t"에서의 가중치
$W_{o(i,j),t}$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 가중치
d_t : 모의시간 간격

위 목적함수를 최소화하기 위해 Hedging Rule을 고려한 댐 연계운영의 제약조건은 다음과 같다.

$$\text{s.t.} \sum_{h\in H} B_{h,r,t} = 1, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (3)$$

$$B_{h_4,r,t}S_{mop(r,t)} + B_{h_3,r,t}S_{low(r,t)} + B_{h_2,r,t}S_{fit(r,t)} + B_{h_1,r,t}S_{tar(r,t)} \le S_{a(r,t)}, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (4)$$

$$S_{a(r,t)} \le B_{h_5,r,t}S_{mop(r,t)} + B_{h_4,r,t}S_{low(r,t)} + B_{h_3,r,t}S_{fit(r,t)} + B_{h_2,r,t}S_{tar(r,t)} + B_{h_1,r,t}S_{flood(r,t)}, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (5)$$

여기서, 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, $B_{h,r,t}\in\{0, 1\}$
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)

첫째, Hedging Rule 적용 시 댐의 저류량에 따라 하나의 구간만 선택되어야 하고(Eq. (3)), 해당 구간에 따라 최소저류량(Eq. (4))과 최대저류량 (Eq. (5))을 제한한다.

$$O_{r,t} = S_{a(r,t-1)} - S_{a(r,t)} + IN_{r,t} + \sum_{j\in J}Q_{(j,r),t}, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (6)$$

$$O_{0(r,t)} \le \sum_{h\in H} B_{h,r,t}\alpha_{h,r}Sup_{p0(r,t)}, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (7)$$

$$O_{1(r,t)} \le \sum_{h\in H} B_{h,r,t}\alpha_{h,r}Sup_{p1(r,t)}, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (8)$$

$$O_{2(r,t)} \le \sum_{h\in H} B_{h,r,t}\alpha_{h,r}Sup_{p2(r,t)}, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (9)$$

$$O_{f(r,t)} = O_{r,t} - O_{0(r,t)} - O_{1(r,t)} - O_{2(r,t)}, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (10)$$

$$O_{r,t} \ge R_{G(r,t)} \times Q_{G-MAX(r,t)}, \ \forall t\in T, \ \forall r\in R \quad (11)$$

여기서, $O_{r,t}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 총 방류량
$O_{0(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 생공용수 방류량
$O_{1(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 농업용수 방류량
$O_{2(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 하천유지용수 방류량
$O_{f(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 초과용수 방류량
$IN_{r,t}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 유입량
$\alpha_{h,r}$: 댐 "r"의 Hedging 구간 "h"일 때의 감소계수
$Sup_{p0(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 생공용수 계획방

류량

$Sup_{p1(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 농업용수 계획방류량

$Sup_{p(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 하천유지용수 계획방류량

$R_{G(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 발전기 가동시간비

$Q_{G-MAX(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 발전최대수량

둘째, 댐 운영 관련 제약 조건으로, Eq. (6)은 시간 "$t-1$"와 "t"사이에서 댐의 연속방정식을 댐 방류량에 관해 정리한 식이다. 갈수시 댐 계획방류량은 Hedging Rule에 의해 결정되므로, 생공용수, 농업용수, 하천유지용수로 구분해 각각 Eqs. (7) ~ (9)로 제한한다. 단, 홍수기에 댐이 계획홍수위에 도달한 상태 이후에는 댐 월류를 방지하기 위해 Eq. (10)과 같이 초과방류량을 통해 계획방류량 이상을 방류하여 댐 수위를 계획홍수위 이하로 유지하도록 한다. 즉, 홍수기에 생공용수와 농업용수는 Hedging Rule에 의해 계획방류량을 방류하지만, 하천으로 방류되는 양은 계획된 하천유지용수 이상으로 방류가 가능해진다. 그리고, 다목적 댐과 발전용 댐의 경우 발전용수를 고려하여야 한다. 홍수기처럼 방류량이 큰 시기는 문제가 없으나 비홍수기에 수력발전을 위한 방류량이 필요하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 비홍수기에 하루 2시간 발전을 가정하여 발전기 가동시간비를 0.083으로 결정하여 발전최대수량과 곱하여 발전을 위한 최소방류량으로 Eq. (11)과 같이 제약조건을 추가하였다.

$$0 \le D_{a(d,t)} \le D_{p(d,t)}, \quad \forall t \in T,\ \forall d \in D \tag{12}$$

$$O_{r,t} = \sum_{n \in N} Q_{(r,n),t},\ \forall r \in R \tag{13}$$

$$O_{0(r,t)} = \sum_{dm \in DM} Q_{(r,dm),t},\ \forall r \in R \tag{14}$$

$$O_{1(r,t)} = \sum_{da \in DA} Q_{(r,da),t},\ \forall r \in R \tag{15}$$

$$O_{2(r,t)} + O_{f(r,t)} = \sum_{j \in J \cup S} Q_{(r,j),t},\ \forall r \in R \tag{16}$$

$$\sum_{n \in N} Q_{(n,d),t} = D_{a(d,t)},\ \forall t \in T,\ \forall d \in D \tag{17}$$

$$\sum_{n \in N} Q_{(n,j),t} + IN_{j,t} - \sum_{n \in N} Q_{(j,n),t} = 0, \quad \forall t \in T,\ \forall j \in J \tag{18}$$

여기서. $\sum_{n \in N} Q_{(r,n),t}$: 댐 "r"에서 노드 "n"으로 공급되는 시간 "t"에서의 유량의 합

$\sum_{dm \in DM} Q_{(r,dm),t}$: 댐 "r"에서 생공용수 노드 "dm"으로 공급되는 시간 "t"에서의 유량의 합

$\sum_{da \in DA} Q_{(r,da),t}$: 댐 "r"에서 농업용수 노드 "da"으로 공급되는 시간 "t"에서의 유량의 합

$\sum_{j \in J \cup S} Q_{(r,j),t}$: 댐 "r"에서 분기점 노드 또는 하구노드 "j"으로 공급되는 시간 "t"에서의 유량

$\sum_{n \in N} Q_{(n,d),t}$: 노드 "n"에서 수요노드 "d"로 공급되는 시간 "t"에서의 유량의 합

마지막으로 결정변수의 범위와 댐 방류량과 용수공급량의 관계에 대한 제약조건으로, Eq. (12)는 각 수요에 대한 용수공급 범위를 설정하고, Eqs. (13) ~ (16)에서 댐에서 방류는 총량과 각 수요처로의 공급량과의 관계를 나타낸다. 또한 Eqs. (17), (18)에서는 각 수요노드와 분기점에서의 연속방정식을 나타낸다.

Eq. (2)에서와 같이 절대값 또는 양의 값을 가지고 있는 비선형의 목적함수를 선형화하기 위해 목적함수를 변형하고, 원래 함수와 같은 특성을 가지도록 하기 위한 제약조건들을 추가하였다. 그 결과 최종적으로 선형화된 목적함수(Eq. (19))는 $ST_{r,t}$, $Z_{(i,j),t}$ 를 새로운 결정변수로 포함하고, Eqs. (20) ~ (23)과 같은 새로운 제약조건들을 추가로 필요로 한다.

$$\min f = \sum_{t \in T} [\sum_{r \in R} ST_{r,t} W_{r(r,t)} + d_t \{ \sum_{d \in D} (D_{p(d,t)} - D_{a(d,t)}) W_{d(d,t)} + \sum_{i \in R \cup J} Z_{(i,j),t} W_{o(i,j),t} \}] \tag{19}$$

$$ST_{r,t} = |S_{tar(r,t)} - S_{a(r,t)}| \tag{20}$$

$$ST_{r,t} \ge S_{tar(r,t)} - S_{a(r,t)} \tag{21}$$

$$ST_{r,t} \ge -(S_{tar(r,t)} - S_{a(r,t)}) \tag{22}$$

$$Z_{(i,j),t} = (OUT_{p(i,j),t} - Q_{(i,j),t})^+ \tag{23}$$

$$Z_{(i,j),t} \ge OUT_{p(i,j),t} - Q_{(i,j),t} \tag{24}$$

$$Z_{(i,j),t} \ge 0 \tag{25}$$

따라서, 위 모형의 결정변수는 $S_{a(r,t)}$, $D_{a(d,t)}$, $Q_{(i,j),t}$, $B_{h,r,t}$, $O_{r,t}$, $O_{0(r,t)}$, $O_{1(r,t)}$, $O_{2(r,t)}$, $O_{f(r,t)}$, $ST_{r,t}$, $Z_{(i,j),t}$ 가 된다.

3. 한강 권역에 대한 적용

3.1 유역 네트워크 / 입력자료

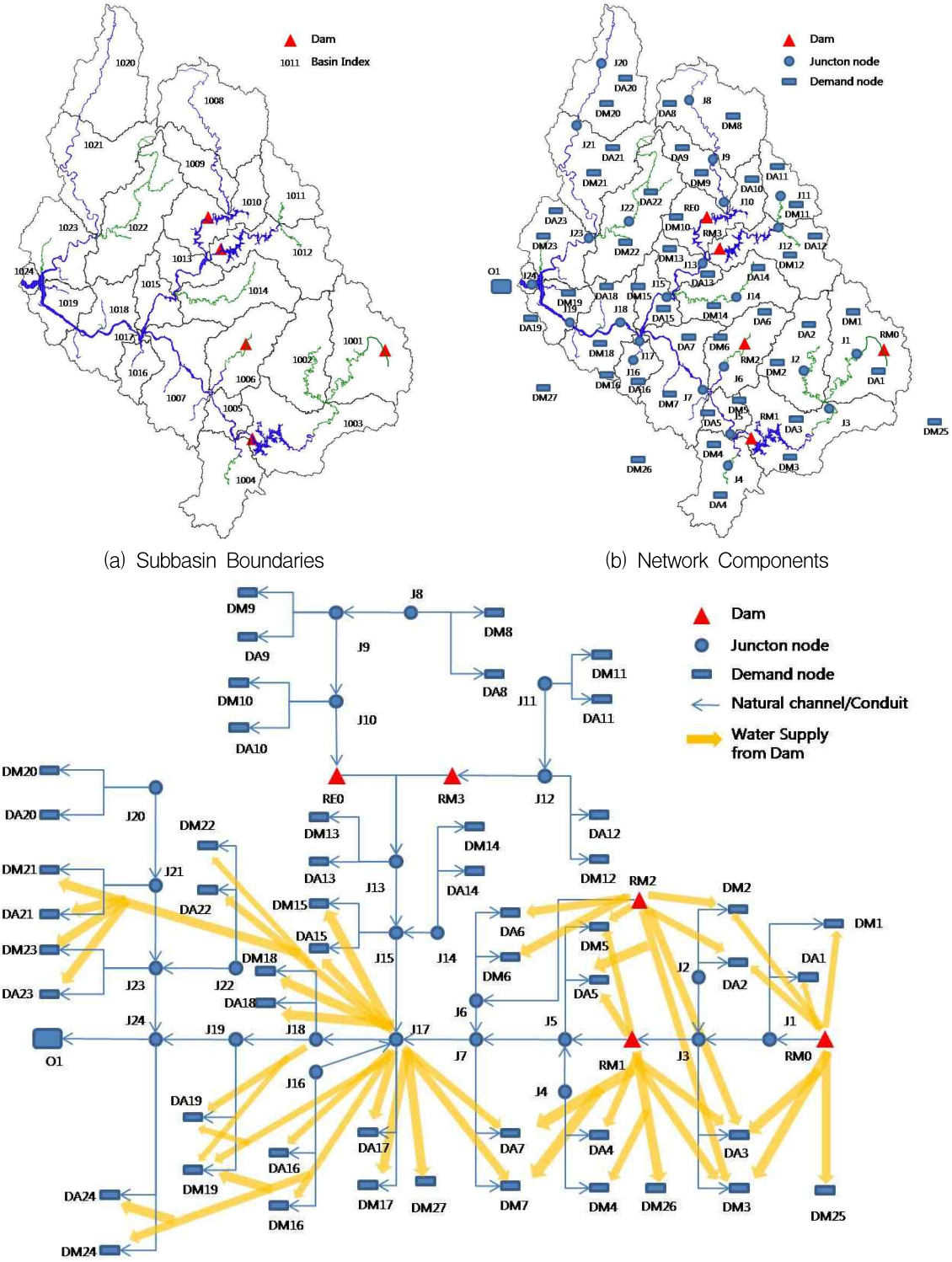
본 모형을 안성천, 한강서해, 한강동해를 제외한 한강 권역에 수자원단위지도의 중권역에 적용하였다. 유역번호 1001에서 1024까지 총 24개 소유역이 대상이며, 총유역면적은 34,415.73 km²로서, 3개의 다목적댐 (충주, 횡성, 소양강댐)과 1개의 용수전용댐 (광동댐), 6개의 발전용댐 (화천, 춘천, 의암, 청평, 팔당, 괴산)으로 구성되어 있다(북한지역 댐 및 평화의 댐 제외). 홍수기에 수자원을 댐의 저류량으로 확보하여 갈수기에 용수수요량에 대해 최대한 부족이 발생하지 않도록 공급하는 것을 목적으로 하는 본 연구의 목적상, 저류용량이 작아 용수공급효과가 크지 않은 발전용댐은 용수공급에 큰 효과가 없으므로 연구대상에서 제외하였다. 그러므로 다목적댐인 충주, 횡성, 소양강 댐과 용수전용댐인 광동 댐, 그리고 발전용 댐이지만 비교적 큰 저류용량을 가진 화천 댐을 연계 운영 대상으로 설정하였다(Fig. 3(a)). 각 소유역은 생공용수 수요처와 농업용수 수요처를 가지며, 해당 소유역의 취수지점에서 공급된다. 반대로 다목적댐 및 용수전용댐은 별도의 취수점을 가지는데, 광역상수도 등을 통해 해당 댐이 속해있는 소유역 이외로도 도수가 가능하다. 이러한 광역상수도로 인해, 대상유역인 한강유역에서 인근 타 유역으로 물이 도수되는 경우가 발생하는데, 이를 고려하기 위해 가상의 수요처들 (Fig. 3(b)의 dm25, dm26, dm27)을 추가하여 한강권역에서 물이 도수되도록 하였다. Fig. 3(b)에 대상 유역의 네트워크를 나타내었다. 모든 취수점과 5개의 대상댐을 제외한 대상유역 내의 기타댐 (팔당댐 등)도 노드라고 정의하고, 연속방정식에 의해 유입량과 유출량이 계산되도록 하였다. 유역내 물공급을 제외한 각 댐에서 도수되는 광역물이동망은 아래 Table 1과 같다.

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(Table 2). 각 댐의 계획 홍수위를 최대수위로, 상시만수위를 저수지 운영의 목표수위로 설정하였으며, 홍수기제한수위가 설정되어 있는 댐에 한해서는 홍수기에 홍수기 제한수위를 목표수위로 설정하였다. 해당 목표수위는 운영시점의 가뭄1단계 상한수위가 된다. 즉, 저수위가 목표수위보다 높으며 평상시 운영규칙으로 저수지를 운영하고, 목표수위보다 저수위가 낮아지면 가뭄 1단계 운영규칙(Table 2)을 적용하여 방류하도록 한다. 또한, 댐의 유효저수용량의 하한선이 되는 저수위시의 저류량을 안정저류량이라고 칭하고, 목표수위와 저수위의 평균에 해당되는 수위를 가뭄2단계 운영규칙의 상한선으로, 저수위를 가뭄3단계 운영규칙의 상한선으로 설정하였다. 마지막으로 용수공급가능수위시의 저류량을 최소운영저류량으로 설정하였으며, 이는 가뭄4단계 운영규칙의 상한선이 된다. 각각 가뭄 시 운영규칙의 방류량 감소계수는 Table 2에 제시된 방류량 감소범위의 평균값을 사용하여 평상시는 1, 가뭄1단계는 0.85, 가뭄2단계는 0.7, 가뭄3단계는 0.55, 가뭄4단계는 0.25로 결정하여 적용하였다. 단, 발전용 댐인 화천댐의 경우 상시 전력 생산을 고려해 방류량 감소계수를 평상시는 1, 가뭄1단계는 0.8, 가뭄2단계는 0.35, 가뭄3단계는 0.05, 가뭄4단계는 0으로 결정하여, 전력생산에 차질이 빚어지는 것을 최소화하도록 하였다. 이러한 가뭄 시 운영규칙을 위한 Hedging Rule 곡선은 아래 Fig. 4와 같다.

Table 1. Water Supplies to Water Distribution System in Large Cities

Supply node	Demand node with water distribution system
rm0(Gwandong)	dm1, 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)	dm7, dm15, dm16, dm17, dm18, dm19, dm21, dm22, dm23, dm24, dm27 da7, da15, da16, da17, da18, da19, da21, da22, da23, da24
j18(Han River)	dm19, da19

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



(a) Subbasin Boundaries

(b) Network Components

(c) Flow Directions in the Network

Fig. 3. Water Supply System with Five Reservoirs in the Han River Basin

본 연구에서는 수자원장기종합계획(2006~2020)에 명시된 한강유역의 2003년 소유역별 유출량(Table 3), 각 사용자별 용수 수요(Tables 4~5), 지하수이용량 자료, 하천유지유량(Table 6)을 사용했고, 댐운영실무편람(한국수자원학회, 2008)과 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr)의 댐 제원 및 댐 계획방류량 자료(Tables 7~8)를 사용했다.

본 연구에서는 저수지의 운영에만 초점을 맞추고 있

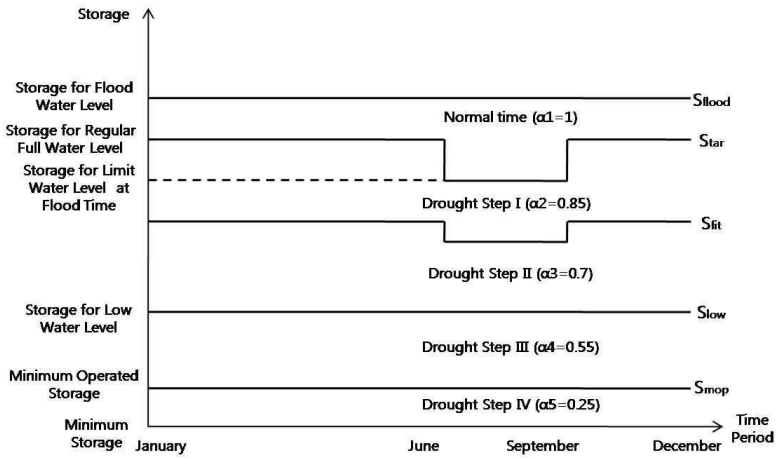


Fig. 4. Applied Hedging Rule in the Han River Basin

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. Natural Inflow into the Dams and Subbasins (Unit : $10^6 m^3/yr$)

Dam	Inflow	Subbasin	Inflow	Subbasin	Inflow	Subbasin	Inflow
Gwangdong	188.272	1001	0	1009	0	1017	68.767
Chungju	3,062.272	1002	2187.006	1010	1,155.371	1018	1,710.719
Hoengseong	284.905	1003	2829.653	1011	1,158.431	1019	0
Soyanggang	2303.926	1004	1,447.717	1012	0	1020	3,151.288
Hwacheon	1,762.318	1005	0	1013	0	1021	0
		1006	1,231.208	1014	1,637.301	1022	3,159.525
		1007	580.51	1015	797.419	1023	3,072.467
		1008	2,503.921	1016	534.848	1024	1,76.337

Table 4. Municipal Demand (Unit : $10^6 m^3/yr$)

Node	Demand	Node	Demand	Node	Demand	Node	Demand
dm1	20.075	dm8	0	dm15	18.143	dm22	81.173
dm2	15.001	dm9	0.107	dm16	87.6	dm23	28.942
dm3	50.191	dm10	16.718	dm17	0.508	dm24	1.789
dm4	60.039	dm11	7.808	dm18	2013.741	dm25	19.381
dm5	6.57	dm12	17.084	dm19	537.903	dm26	29.529
dm6	77.745	dm13	52.739	dm20	0	dm27	1086.814
dm7	183.595	dm14	18.393	dm21	2.233		

Table 5. Agricultural Demand (Unit : $10^6 m^3/yr$)

Node	Demand	Node	Demand	Node	Demand	Node	Demand
da1	19.563	da7	392.111	da13	40.509	da19	187.103
da2	59.637	da8	0	da14	83.309	da20	0
da3	100.98	da9	4.364	da15	31.072	da21	44.638
da4	227.159	da10	49.543	da16	27.606	da22	221.511
da5	62.22	da11	18.811	da17	24.673	da23	120.205
da6	122.708	da12	35.075	da18	99.682	da24	11.342

Table 6. Minimum River Discharge Requirement (Unit : $10^6 m^3/yr$)

Arc	Demand	Arc	Demand	Arc	Demand	Arc	Demand
j18→j19	3373.989	j19→j24	3373.989	j23→j24	589.991	j24→o1	3844.544

Table 7. Reservoir Properties in the Han River Basin (Unit : $10^6 m^3$)

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

Table 8. Pre-Defined Discharge to Users from the Reservoirs (Unit : $10^6 m^3/yr$)

Dam	Municipal	Agricultural	River discharge	Remark
rm0(Gwandong)	25.55	0.81	-	
rm1(Chungju)	2,731	315	334	agricultural water supply : 4.1~10.31
rm2(Hoengseong)	72.3	15.8	31.4	agricultural water supply : 4.1~11.31
rm3(Soyanggang)	1,200	13	255.4	agricultural water supply : 3.1~10.31
re0(Hwacheon)	-	-	-	for electricity

으므로, 2003년 실제 용수수요량 중 지하수 이용량을 제하여 지표수 이용량만을 이용하여 각 사용자별 용수수요량을 재 산정하였고, 한강 유역내에 존재하는 소유역 중 권역 외인 대청댐으로부터 도수 받는 소유역의 경우, 실제 용수수요에서 대청댐으로부터의 광역물이동량을 제하여 용수수요를 재 산정하였다. 저수지 운영모형은 2003년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간을 순 단위(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. 이를 위해 목적함수 중 생공용수 수요에 50, 농업용수 수요에 50, 하천유지용수 수요에 21의 가중치를 부여하였다. 그리고, 상대적으로 저류용량이 작은 광동, 횡성댐은 1.1의 가중치를 부여하여 급격히 댐 저류량이 방류되는 것을 방지하였다.

본 연구에서 혼합정수 선형계획법(MILP, Mixed Integer Linear Programming)을 이용하여 구축된 모형

의 최적해를 찾기 위해 GAMS/CPLEX를 사용하였다. GAMS/CPLEX는 분지절단법(branch and cut algorithm)을 이용하여 반복되어야 할 수학적 계산을 줄일 수 있어 혼합정수 선형계획법을 풀 때 효과적이다.

3.2 적용 결과

2003년의 유출량, 용수수요량 자료를 이용하여 저수지 운영모형에 적용한 결과, 2003년 용수수요대비 생공용수 99.99%, 농업용수 99.91%, 하천유지용수 100.00%를 공급할 수 있었다(Table 9). 댐의 저류효율은 각 시간별 목표저류량과 실제저류량 편차의 합을 사용하여 본 모형과 Hedging rule을 적용하지 않은 선형계획법으로 모의한 결과와 비교하였다. 비교한 결과 본 모형은 57,157.806으로써, Hedging rule을 적용하지 않은 선형계획법의 결과인 57,161.440에 비해 3.634($10^6 m^3$) 효과적인 것으로 나타났다. 2003년 실제 운영기록 63,534.43에 비해서는 6,376.624($10^6 m^3$), 약 10.04% 효과적인 것으로 나타났다.

2003년의 유출량을 기준으로 전체 한강 권역에 용수수요는 대부분 만족시켰으나, 생공용수 수요처 1개소, 농업용수 수요처 1개소에서 약간의 부족현상이 나타났다(Table 10). 용수부족이 발생한 생공용수 수요처 "dm25"의 경우는 본 연구에 포함되지 않은 "한강동해" 권역에서도 용수공급을 받는 한강권역의 최상류 유역이므로, 부족분은 주로 "한강동해" 권역에 의해 보충되는 것이 타당할 것으로 보이므로 큰 문제가 되지 않을 것으로 보인다. 또한, 농업용수 수요처 "da12"의 경우 광역상수도 공급지역이 아니므로 유역 내 유출이 부족할 경우 용수공급 부족현상이 나타날 수 밖에 없는 지역이다. 그러므로 이 지역에는 광역상수도 보급이나 용수공급을 위한 저수지의 확충을 고려해야 할 것으로 보인다. 용수가 부족한 지역의 용수공급 부족 시간대는 Table 11과 같이 나타났다.

Fig. 5는 대상 댐인 5개 댐에 대한 연중 저류량과 댐 유입량과 방류량의 변화를 나타낸다. 저류량의 경우는 Hedging rule을 적용하지 않은 선형계획법과 비교하여 나타내었다. Hedging rule을 적용하지 않은 선형계획법에 비해 목표저류량에 근접한 양상을 볼 수 있다. 전체적으로 갈수기인 1순(1월초)에서 9순(3월말)에는 댐에 저류된 용수를 사용하여 저류량이 감소하는 경향을 보이나, 이후 홍수기에 저류량을 늘려 목표저류량에 가까워지는 경향을 보인다. Fig. 6과 같이 최적화된 댐 방류량을 2003년 실제 운영자료와 비교했을 때 최적화된 방류량은 갈수기에 방류량을 실제보다 억제하는 경향을 나타내었지만, 홍수기에는 발전용 댐인 화천댐을 제외하고는 실제와 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

Table 9. Total Water Supply to Users in the Multi-Reservoir Operation System

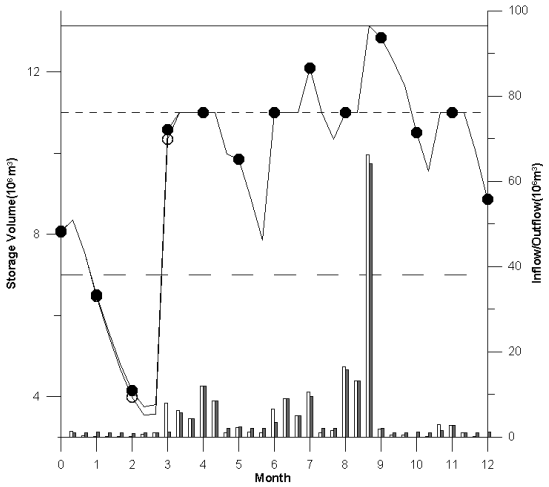
Division	Demand ($10^6 m^3$/year)	Supply ($10^6 m^3$/year)	Supply ratio (%)
Municipal demand	4,467.59	4,467.35	99.99
Agricultural demand	1,983.82	1981.96	99.91
Minimum river discharge	11,302.00	11,302.00	100.00

Table 10. Network Components with Water Shortage in the Han River Basin

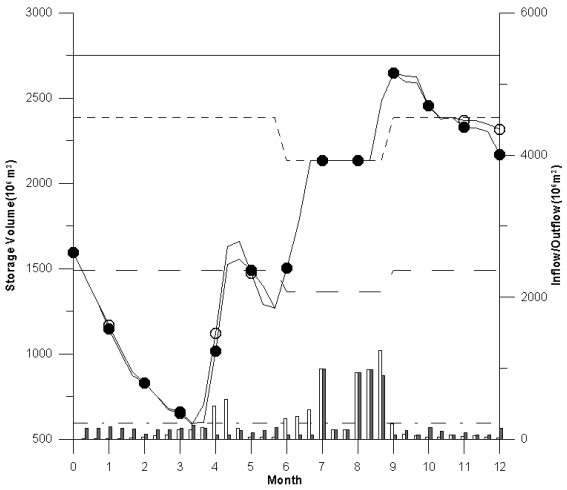
Division	Demand ($10^6 m^3$/year)	Supply ($10^6 m^3$/year)	Supply ratio (%)	Remark
dm25	19.381	19.139	98.75	Municipal demand
da12	35.075	33.211	94.69	Agricultural demand

Table 11. Time Periods of Water Shortage in the Han River Basin

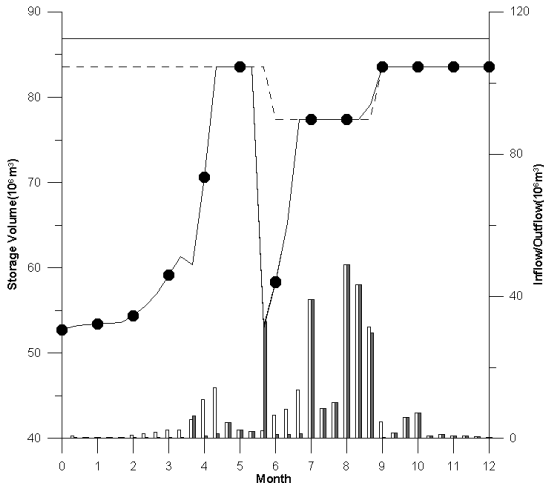
Division	Time period	Demand ($10^6 m^3$/year)	Supply ($10^6 m^3$/year)	Supply ratio (%)
Municipal demand	3(1.21~31)	134.639	134.594	99.97
	4(2.1~10)	122.4	122.359	99.97
	5(2.11~20)	122.4	122.359	99.97
	6(2.21~28)	97.919	97.886	99.97
	7(3.1~10)	122.4	122.359	99.97
	8(3.11~20)	122.4	122.359	99.97
Agricultural demand	16(6.1~10)	93.066	91.757	98.59
	17(6.11~20)	93.066	92.511	99.40



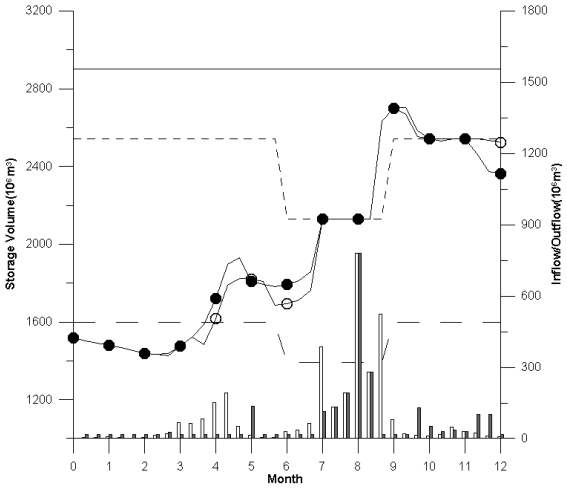
(a) Gwandong dam



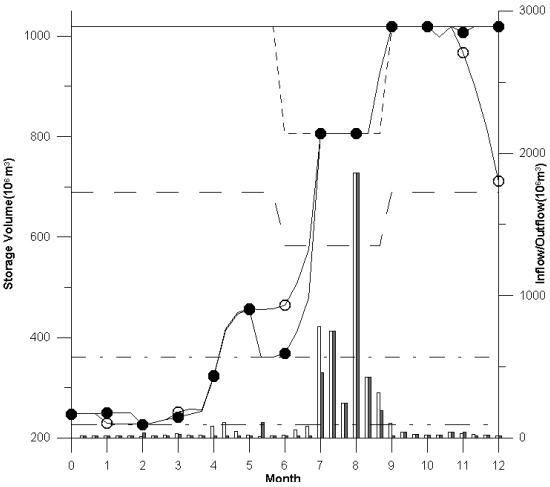
(b) Chungju dam



(c) Hoengseong dam



(d) Soyanggang dam



(e) Hwacheon dam

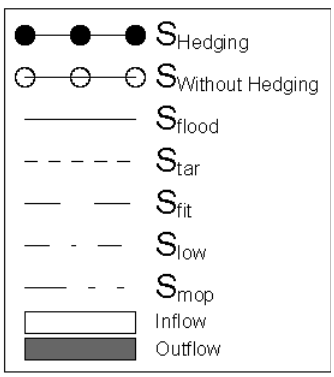
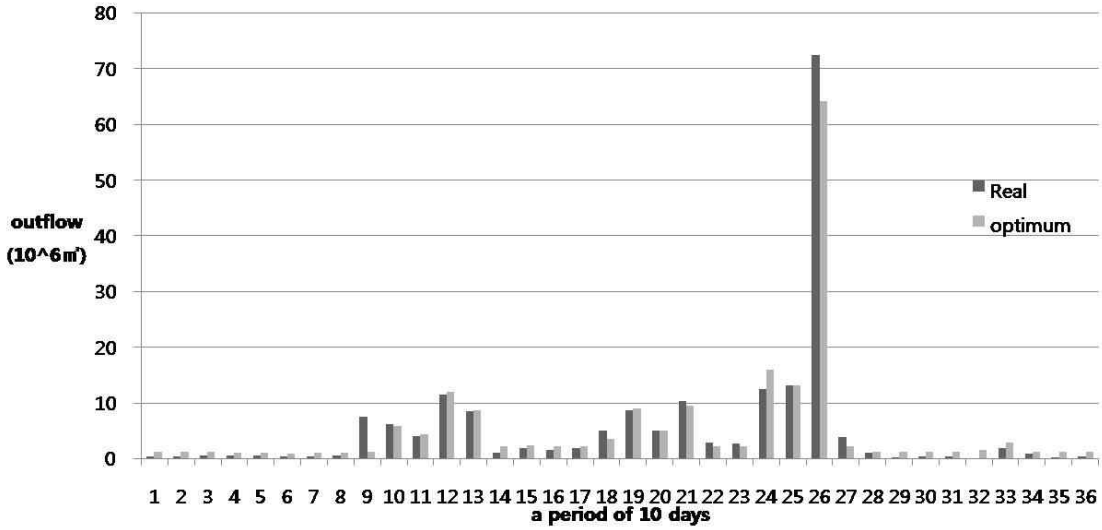
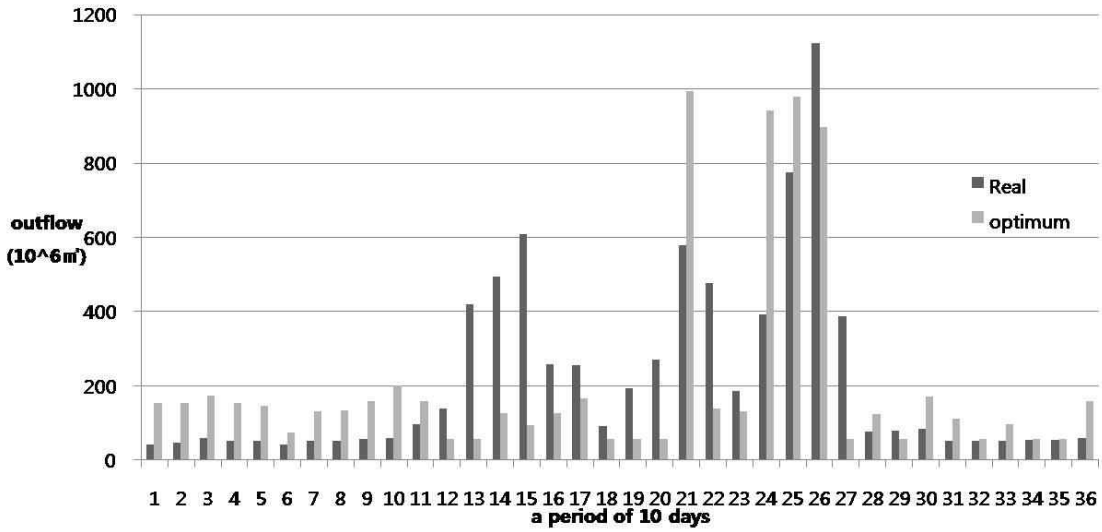


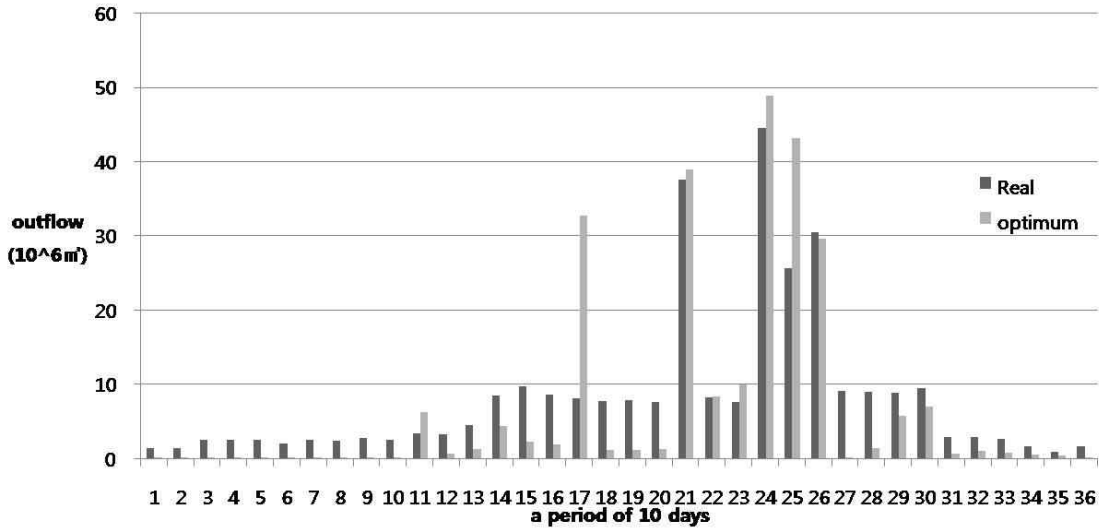
Fig. 5. Reservoir Inflow, Outflow and Storages



(a) Gwangdong dam

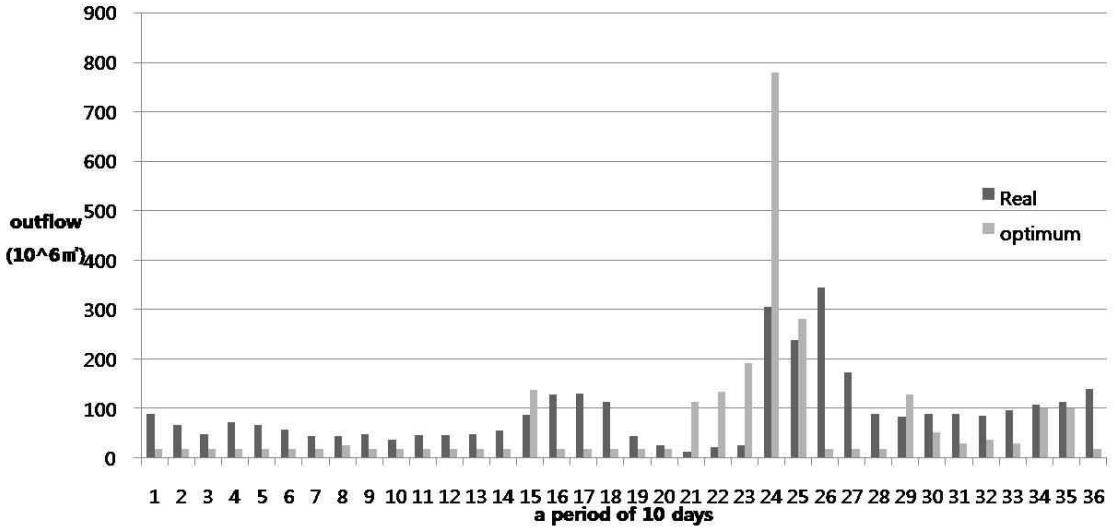


(b) Chungju dam

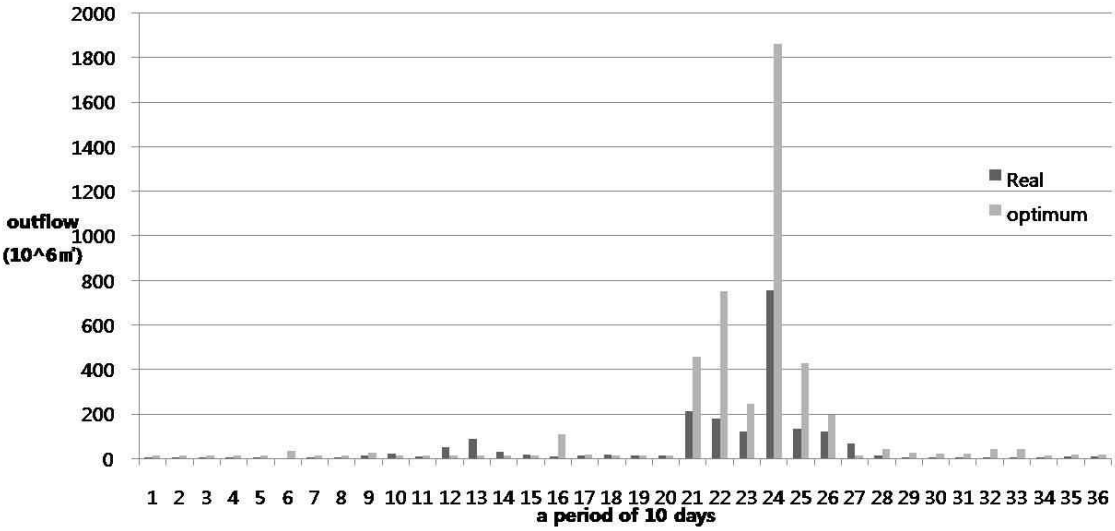


(c) Hoengseong dam

Fig. 6. Total Outflow from the Reservoirs in the Han River Basin



(d) Soyanggang dam



(e) Hwacheon dam

Fig. 6. Total Outflow from the Reservoirs in the Han River Basin(Continued)

4. 결 론

본 연구에서는 가뭄 시 최적의 용수공급을 목적으로 수계의 댐을 연계운영하기 위한 방법으로 Hedging Rule을 제안하였다. 이는 우리나라와 같이 강우가 시간적으로 집중되어 있고, 수자원 부존량이 부족한 경우, 가뭄 발생 시 우선순위를 가지는 용수 수요처에 먼저 용수를 공급하고, 더욱 극심한 가뭄을 대비하기 위해 매우 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 즉, 가뭄이 시작되면 저수지의 수위에 따라 기 제안된 방류량 감소계수를 이용하여 저수지에서 방류되는 전체 수량을 제한한다. 제안된 저수지 운영기법을 포함한 본 저수지 연계운영 모형은 혼합선형계획법 (Mixed Integer Linear Programming)을 이용하여 모형화하였고, GAMS/CPLEX를 이용하여 최적해를 산출하였다. 수자원 장기종합계획에 명시된 2003년의 유출량과 용수수요량 등의 자료를 이용하여 한강권역의 다목적 댐과 용수조절능력이 있는 발전용 댐을 대상으로 제안된 Hedging Rule을 이용하여 대규모 용수배분에 대해 모의한 결과, Hedging Rule을 적용하지 않은 최적화 결과와 실제 운영 결과에 비해 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 즉, Hedging Rule을 이용하여 보다 합리적인 방류량을 결정할 수 있었고, 용수가 고르게 수요처로 배분되었다고 할 수 있다. 또한 보다 객관적인 분석을 통하여 산출된 결과를 통해, 일부에서 나타난 시간과 공간적인 용수수급의 불균형에 대한 권역 외에서의 용수공급이나 광역

물이동망 확충 등의 대안이 제시될 수 있었다.

차후 연구에서는 Hedging Rule을 더 보완하고, 본 연구와 같이 확정된 용수수요가 아닌 용수수요에 대한 불확실성을 고려한다면 더 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 자연과 함께하는 하천복원기술개발 연구단(ECORIVER21)(06건설핵심B01)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2006). **수자원장기종합계획.**

건설교통부, 한국수자원공사 (2005). **가뭄관리모니터링 체계 수립.**

김승권, 박영준 (1998). “댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 779-793.

안창진 (2008). “2009년 가뭄대비 저수지 운영계획.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제41권, 제12호, pp. 66-73.

음형일, 김영오 (2007). “Sampling SDP와 Hedging Rule을 결합한 가뭄대비 최적운영률.” **2007 대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 1368-1371.

한국수자원공사 (2008). **댐운영실무편람.**

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.

Bhaskar, N.R., and Whitlatch, E.E.,Jr. (1980). "Derivation of monthly reservoir release policies." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 987-993.

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.

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.

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.

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). "Optimiztion 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.

Sand, G.M. (1984). *An analytical investigation of operating policies for water-supply reservoirs in parallel.*. Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, NY, USA

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.

Shiklomanov, I.A. and Sokolov, A.A. (1983). "Methodological basis of world water balance investigation and computation." *Proceedings the Hamburg Workshop*, IAHS Publication No. 148, pp. 77-92.

Tejada-Guibert, J.A., Johnson, S.A. and Stedinger, JR (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.

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.

논문번호: 09-035	접수: 2009.03.23
수정일자: 2009.04.29	심사완료: 2009.07.06

Nomenclature

Sets

N : 노드의 집합 (저수지, 수요처, 분기점, 하구)

D : 수요 노드의 집합, $D \subset N$

DM : 생공용수 수요 노드의 집합, $DM \subset D$, $dm_i \in DM$

DA : 농업용수 수요 노드의 집합, $DA \subset D$, $da_i \in DA$

R : 저수지 노드의 집합, $R \subset N$

RM : 다목적/용수전용댐 저수지 노드의 집합, $RM \subset R$, $rm_i \in RM$

RE : 발전용댐 저수지 노드의 집합, $RE \subset R$, $re_i \in RE$

J : 분기점 노드의 집합, $J \subset N$, $j_i \in J$

S : 하구 노드의 집합, $S \subset N$, $o_i \in S$

T : 시간의 집합, $t \in T$

H : Hedging Rule을 적용한 댐 운영 구획의 집합, $h \in \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$

Data

$S_{tar(r,t)}$: 댐"r"의 시간 "t"에서의 목표 저류량($10^6 \mathrm{m}^3$)

$D_{p(d,t)}$: 수요 노드 "d"의 시간 "t"에서의 계획수요량($10^6 \mathrm{m}^3$)

$OUT_{p(i,j),t}$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 하천유지유량($10^6 \mathrm{m}^3$)

$W_{r(r,t)}$: 댐"r"의 시간 "t"에서의 가중치

$W_{d(d,t)}$: 수요 노드"d"의 시간 "t"에서의 가중치

$W_{o(i,j),t}$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 가중치

Decision Variables

$S_{a(r,t)}$: 댐"r"의 시간 "t"에서의 실제 저류량($10^6 \mathrm{m}^3$)

$B_{h,r,t}$: 댐"r"의 시간 "t"에서의 Hedging Rule 결정변수, $B_{h,r,t} \in \{0, 1\}$

$D_{a(d,t)}$: 수요 노드 "d"의 시간 "t"에서의 실제공급량($10^6 \mathrm{m}^3$)

$Q_{(i,j),t}$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 실제유량($10^6 \mathrm{m}^3$)

$ST_{r,t}$: 목적함수 중 저류량항 선형화를 위한 결정변수

$Z_{(i,j),t}$: 목적함수 중 하천유지유량항 선형화를 위한 결정변수