

Hedging Rule을 이용한 댐 연계 운영 최적화: 한강수계 사례연구

Optimization of Multi-reservoir Operation with Hedging Rules: Case Study of Han River Basin

류관형*, 정건희**, 김종훈***

Gwanhyeong Ryu, Gunhui Chung, Joong Hoon Kim

요 지

홍수기에 집중되는 하천유출량을 갈수기에 적절히 활용하기 위한 대표적인 시설이 댐이다. 제한된 용수공급량을 적절히 분배해 용수수요량을 만족시키면서 미래 갈수기시 용수공급을 위한 댐 저류량을 조절하는 것이 댐 운영의 중요한 목적 중 하나이다. 본 연구에서는 댐 저류량에 따라 댐 계획방류량을 일정비율 줄여주는 Hedging Rule을 5단계로 적용하여 댐의 상시만수위 저류량에 대한 실제 저류량의 편차 절대치 합, 수요에 대한 용수공급 부족량의 합, 그리고 하천유지유량에 대한 하천유량 부족량의 합을 목적함수로 하여 혼합정수 선형계획법(MILP, Mixed Integer Linear Programming)으로 식을 구성하였다. 한강수계의 다목적댐인 충주, 황성, 소양강 댐과 용수전용댐인 광동 댐, 그리고 발전용 댐이지만 비교적 큰 저류용량을 가진 화천 댐을 댐 연계 운영 대상으로 하여 수자원장기종합계획의 2003년 유출량 및 수요량 자료와 댐운영실무편람의 댐 계획방류량 자료를 10일 단위로 입력하여 GAMS/CPLEX를 이용해 최적화하였다. 그 결과 생공용수 수요량 99.99%, 농업용수 수요량 99.91%, 그리고 하천유지용수 수요량 99.24%를 충족시키면서, 댐 저류율이 66.54%에서 86.39%로 증가하였다.

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

1. 서 론

제한된 수자원 부존량을 시·공간적으로 균등하게 공급하여 가뭄에 의한 피해를 줄이기 위해서는, 적절한 댐 운영을 통하여 연중 수자원 부존량을 적절히 분배해 미래 갈수기시 용수공급을 대비하고 홍수시 저류효과를 최대화하기 위한 저류량 조절이 필요하다. 따라서, 댐의 효율적인 운영을 목적으로 한 많은 선행연구가 있었다. 다수 댐 연계 최적 운영에 관한 연구(Oliveira and Loucks, 1997), 다목적함수에 대한 가중치를 부여해 최적의 운영을 도출하는 연구(Randall et al., 1997; 김승권과 박영준, 1998)가 있었고, 최근에는 댐의 저류량에 따라 방류량을 조정하기 위해 제안된 Hedging rule을(Shih and ReVelle, 1994) 이용한 다수 댐 연계 운영과 관리에 대한 연구와(Tu et al., 2003; Barros et al., 2008) 최적의 방류량 감소계수 산정법에 대한 연구가 있었다(음형일과 김영오, 2007).

본 연구에서는 Hedging Rule을 한강수계에 적용하여 각 댐의 목표저류량에 대한 저류량, 수요

* 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 · E-mail : rk11010@korea.ac.kr
** 정회원 · 고려대학교 방재과학기술연구소 연구교수 · E-mail : gunhui@korea.ac.kr
*** 정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 · E-mail : jaykim@korea.ac.kr

에 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. 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 물부족을 대비할 수 있을 것이다. 오른쪽 Fig. 1의 경우, Hedging Rule 곡선의 예로서, 댐의 저류량을 부분선형(Piecewise-linear)함수에 의해 총 3구간으로 나누고, 댐의 실제 저류량에 따라 댐 방류량을 제한한다. 구분된 구간에 아래와 Eq. (1)과 같이 방류량 감소계수가 적용되어 댐 방류량을 제어한다.

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

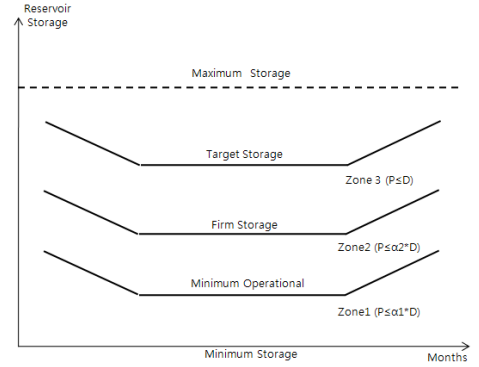


Fig. 1 Hypothetical Reservoir Operation Policy with a Hedging Rule (Barros et al., 2008)

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.

저수지 연계운영을 통하여 유역 내 존재하는 댐의 저류량을 목표저류량에 최대한 근사하게 유지하면서도 용수수요에 대한 공급율을 최대화하고, 하천유지유량을 최대로 공급하기 위한 운영계획을 제안하였다. 구성된 목적함수식은 다음과 같다.

$$\min f = \sum_{t \in T} \left[\sum_{r \in R} |S_{tar}(r,t) - S_a(r,t)| \cdot W_r(r,t) + d_t \left\{ \sum_{d \in D} (D_p(d,t) - D_a(d,t)) \cdot W_d(d,t) + \sum_{i \in R \cup J} (OUT_{p(i,j),t} - Q_{(i,j),t})^+ \cdot W_o(i,j,t) \right\} \right] \quad (2)$$

위 목적함수를 최소화하기 위한 제약조건은 다음과 같다.

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

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

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

먼저, Hedging Rule 관련 제약조건으로 댐의 저류량에 따라 하나의 구간만 선택하고(Eq. (3)), 해당 구간에 따라 최소저류량(Eq. (4))과 최대저류량 (Eq. (5))을 제한한다.

$$O_{r,t} = S_a(r,t-1) - S_a(r,t) + IN_{r,t} + \sum_{j \in J} Q_{(j,r),t} \quad (6)$$

$$O_{rm,t} \geq \sum_{h \in H} B_{h,rm,t} \alpha_{h,rm} Sup_p(rm,t) \quad (9)$$

$$O_{0(rm,t)} \leq \sum_{h \in H} B_{h,rm,t} \alpha_{h,rm} Sup_{p0}(rm,t) \quad (7) \quad O_{re,t} \geq \sum_{h \in H} B_{h,re,t} \alpha_{1(h,re)} Sup_p(re,t) \quad (10)$$

$$O_{1(rm,t)} \leq \sum_{h \in H} B_{h,rm,t} \alpha_{h,rm} Sup_{p1(rm,t)} \quad (8) \quad O_{2(r,t)} = O_{r,t} - O_{0(r,t)} - O_{1(r,t)} \quad (11)$$

둘째, 댐 운영 관련 제약 조건으로, Eq. (6)은 시간 “ $t-1$ ”와 “ t ” 사이에서 댐의 연속방정식이 다. 갈수 시 댐 계획방류량은 Hedging Rule에 의해 생공용수, 농업용수로 구분해 각각 Eqs. (7), (8)와 같이 제한된다. 단, 홍수기에 댐이 계획홍수위에 도달한 상태 이후에는 댐 월류를 방지하기 위해 계획방류량 이상을 방류하기 위해 다목적 댐의 전체 방류량은 Eq. (9)에 의해 결정된다. 발전용 댐과 같이 별도의 용수공급계획을 가지고 있지 않은 댐의 경우는 전체 방류량이 곧 하천유지용수 공급을 위한 방류라고 가정하여 다목적댐과는 별도로 감소계수를 선정하여 Eq. (10)과 같이 표현하였다. 홍수기의 총 방류량은 다목적댐과 같이 초과유입량을 포함하여 방류하게 된다. 하천유지용수는 전체 방류량에서 생공용수 및 농업용수 수요처로 공급되는 물을 제외한 나머지 수량으로 계산되며, Eq. (11)로 나타낼 수 있다.

$$0 \leq D_{a(d,t)} \leq D_{p(d,t)}, \quad \forall t \in T, \quad \forall d \in D \quad (12) \quad O_{1(rm,t)} = \sum_{da \in DA} Q_{(rm,da),t}, \quad \forall rm \in RM \quad (15)$$

$$O_{r,t} = \sum_{n \in N} Q_{(r,n),t}, \quad \forall r \in R \quad (13) \quad O_{2(r,t)} = \sum_{j \in J \cup S} Q_{(r,j),t}, \quad \forall r \in R \quad (16)$$

$$O_{0(rm,t)} = \sum_{dm \in DM} Q_{(rm,dm),t}, \quad \forall rm \in RM \quad (14) \quad \sum_{n \in N} Q_{(n,d),t} = D_{a(d,t)}, \quad \forall t \in T, \quad \forall d \in D \quad (17)$$

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

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, 제약조건들을 추가하였다. 선형화된 목적함수(Eq. (19))는 $ST_{r,t}$, $Z_{(i,j),t}$ 를 새로운 결정변수로 포함하고, Eqs. (20) ~ (25)와 같은 새로운 제약조건들을 추가로 필요로 한다.

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

$$ST_{r,t} = S_{tar(r,t)} - S_{a(r,t)} \quad (20) \quad Z_{(i,j),t} = OUT_{p(i,j),t} - Q_{(i,j),t} \quad (23)$$

$$ST_{r,t} \geq S_{tar(r,t)} - S_{a(r,t)} \quad (21) \quad Z_{(i,j),t} \geq OUT_{p(i,j),t} - Q_{(i,j),t} \quad (24)$$

$$ST_{r,t} \geq -(S_{tar(r,t)} - S_{a(r,t)}) \quad (22) \quad Z_{(i,j),t} \geq 0 \quad (25)$$

3. 한강 권역에 대한 적용

3.1 유역 네트워크 / 입력자료

본 연구에서는 한강유역을 중권역 단위로 분할하여 네트워크를 구성하였고, 수자원장기종합계획(2006~2020)에 명시된 한강유역의 2003년 소유역별 유출량, 각 사용자별 용수 수요, 지하수 이용량 자료, 하천유지유량을 사용했고, 댐운영 실무편람(2008)과 국가수자원관리 종합정보시스템

(www.wamis.go.kr)의 댐 제원 및 댐 계획방류량 자료를 사용했다. 한편, Hedging Rule은 수자원공사의 “재난 및 안전관리기본법 제23조(집행계획)”에 설정되어 있는 비상시 저수지 운영계획을 위한 방류기준 4단계와 평상시 운영을 추가로 포함한 총 5단계로 설정하였다. 각 댐의 계획 홍수위를 최대수위로, 상시만수위 또는 홍수기 제한수위를 저수지 운영의 목표수위로 설정하였고, 이것은 가뭄1단계 상한선이 된다. 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 평상시는 1, 가뭄1단계는 0.85, 가뭄2단계는 0.7, 가뭄3단계는 0.55, 가뭄4단계는 0.25로 결정하여 적용하였다. 단, 발전용 댐인 화천댐의 경우 상시 전력생산을 고려해 방류량 감소계수를 평상시는 1, 가뭄1단계는 0.8, 가뭄2단계는 0.35, 가뭄3단계는 0.05, 가뭄4단계는 0으로 결정하여, 전력생산에 차질이 빚어지는 것을 최소화하도록 하였다.

3.2 적용 결과

수자원 장기종합계획에 명시된 2003년의 유출량, 용수수요량 자료를 이용하여 저수지 운영모형에 적용한 결과, 2003년 용수수요대비 생공용수 99.99%, 농업용수 99.91%, 하천유지용수 99.24%를 공급할 수 있었고, 댐의 목표저류량 별 실제저류량 비율이 2003년 실제 운영기록인 66.54%에서 86.39%로 총 18억 m³증가하였다. 댐 연계운영의 결과 상류댐에서의 방류량이 증가하여, 댐 유입량은 140.7억 m³에서 172.6억 m³으로 약 31.9 m³증가했고, 댐 방류량 역시 136.2억 m³에서 154.6억 m³으로 18.4억 m³증가해 보다 효율적인 운영이 가능했음을 보여준다. 광역상수도망을 통한 공급량도 29.8억 m³에서 35.2억 m³으로 5.4억 m³증가하였다.

4. 결론

2003년의 유출량과 용수수요량 등의 자료를 이용하여 한강권역의 다목적 댐과 용수조절능력이 있는 발전용 댐을 대상으로 제안된 Hedging Rule을 이용하여 대규모 용수배분에 대해 모의한 결과, 실제 운영 결과에 비해 상당히 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 광역물이동망 확충 등의 대안이 제시될 수 있었다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

건설교통부 (2006). 수자원장기종합계획.
 김승권, 박영준 (1998). “댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형.” 한국수자원학회논문집, 제31권, 제6호, pp. 779-793.

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

한국수자원공사 (2008). **댐운영실무편람**.

Barros, M.T., Zamboni, 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.

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.

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.

<p>Nomenclature</p> <p>$S_{tar(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 목표 저류량</p> <p>$S_{a(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 실제 저류량</p> <p>$D_p(d,t)$: 수요 노드 "d"의 시간 "t"에서의 계획수요량</p> <p>$D_a(d,t)$: 수요 노드 "d"의 시간 "t"에서의 실제공급량</p> <p>$OUT_p(i,j,t)$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 하천유지유량</p> <p>$Q(i,j,t)$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 실제유량</p> <p>$W_r(r,t)$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 가중치</p> <p>$W_d(d,t)$: 수요 노드 "d"의 시간 "t"에서의 가중치</p> <p>$W_o(i,j,t)$: 노드 "i"와 노드 "j"사이 구간의 시간 "t"에서의 가중치</p> <p>d_t : 모의시간 간격</p> <p>H : Hedging Rule을 적용한 댐 운영 구획의 집합, $h \in \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$</p> <p>$B_{h,r,t}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 Hedging Rule 결정변수, $B_{h,r,t} \in \{0, 1\}$</p> <p>S_{flood} : 계획홍수위시 저류량</p> <p>$S_{low(r,t)}$: 저수위시 저류량</p> <p>$S_{fit(r,t)}$: $S_{tar(r,t)}$와 $S_{low(r,t)}$의 평균값</p> <p>$S_{mop(r,t)}$: 용수공급가능 수위시 저류량(사수위시 저류량)</p> <p>$O_{r,t}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 총 방류량</p> <p>$O_{rm,t}$: 다목적(용수)댐 "rm"의 시간 "t"에서의 총 방류량</p> <p>$O_{re,t}$: 발전용댐 "re"의 시간 "t"에서의 총 방류량</p> <p>$O_{0(rm,t)}$: 다목적(용수)댐 "rm"의 시간 "t"에서의 생공용수 방류량</p>	<p>$O_{1(rm,t)}$: 다목적(용수)댐 "rm"의 시간 "t"에서의 농업용수 방류량</p> <p>$O_{2(r,t)}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 하천유지용수 방류량</p> <p>$IN_{r,t}$: 댐 "r"의 시간 "t"에서의 유입량</p> <p>$\alpha_{h,rm}$: 다목적(용수)댐 "rm"의 Hedging 구간 "h"일 때의 감소계수</p> <p>$\alpha_{1(h,re)}$: 발전용댐 "re"의 Hedging 구간 "h"일 때의 감소계수</p> <p>$Sup_{p0(rm,t)}$: 다목적(용수)댐 "rm"의 시간 "t"에서의 생공용수 계획방류량,</p> <p>$Sup_{p1(rm,t)}$: 다목적(용수)댐 "rm"의 시간 "t"에서의 농업용수 계획방류량</p> <p>$Sup_p(r,t)$: 다목적(용수)댐 "rm"의 시간 "t"에서의 총 계획방류량</p> <p>$\sum_{n \in N} Q_{(r,n),t}$: 댐 "r"에서 노드 "n"으로 공급되는 시간 "t"에서의 유량의 합</p> <p>$\sum_{dm \in DM} Q_{(rm,dm),t}$: 다목적(용수)댐 "rm"에서 생공용수 노드 "dm"으로 공급되는 시간 "t"에서의 유량의 합</p> <p>$\sum_{da \in DA} Q_{(rm,da),t}$: 다목적(용수)댐 "rm"에서 농업용수 노드 "da"으로 공급되는 시간 "t"에서의 유량의 합</p> <p>$\sum_{j \in J \cup S} Q_{(r,j),t}$: 댐 "r"에서 분기점 노드 또는 하구노드 "j"으로 공급되는 시간 "t"에서의 유량</p> <p>$\sum_{n \in N} Q_{(n,d),t}$: 노드 "n"에서 수요노드 "d"로 공급되는 시간 "t"에서의 유량의 합</p>
--	---