

부족분 공급방식의 한강수계 저수지 시스템 용수공급능력 평가

최영제* · 이은경** · 지정원*** · 이재응****

Choi, Youngje*, Lee, Eunkyung**, Ji, Jungwon***, Yi, Jaeung****

Water Yield Evaluation of a Reservoir System Based on a Deficit Supply in the Han River Basin

ABSTRACT

Reservoir operation affects the sustainability of a water supply. However, the increase in the temporal and spatial variability of rainfall, attributed to climate change, has led to severe droughts and increased difficulty in maintaining a sustainable discharge at certain locations in a reservoir system operation. In this study, water yield was evaluated using reservoir simulation with varied water supply. Three reservoir system models were simulated for nine reservoirs in the Han River basin. The time-based reliability, volumetric reliability, and resiliency were used to evaluate the results. Each case was simulated by applying firm supply, deficit supply, and deficit supply with historical power release of the Hwacheon Reservoir. As a result of the simulation, all indexes were increased when the deficit supply was applied. In particular, the time-based reliability increased by more than 30%, and the supply reliability increased by about 4%. The result showed that the water supply of the entire water system could be increased when all reservoirs in the water system were operated to supply water and maintain sustainable discharge at the same downstream point. The deficit supply was an efficient reservoir operation method for responding to climate change, especially increased rainfall variability.

Key words : Deficit supply, Reservoir system, Reservoir simulation, Water scarcity

초 록

우리나라의 용수공급은 대부분 저수지 운영에 의존하고 있어 저수지 운영은 안정적인 용수공급에 직접적인 영향을 미치게 된다. 하지만 최근 강우의 시공간적 변동성이 증가함에 따라 심도 깊은 가뭄의 발생이 잦아지고 있으며 동일 유역 내에서도 강우의 공간적 편차가 커지고 있다. 이러한 기후의 변화는 하류 지점의 안정적인 유량을 유지하기 위한 저수지 시스템의 운영에도 어려움을 증가시키고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 부족분 공급방식의 저수지 운영을 적용하여 저수지 시스템의 용수공급능력을 평가하고자 하였다. 이를 위해 한강유역에 위치한 9개 댐을 대상으로 저수지 모의운영을 실시하고, 분석결과와 평가지표로는 기간신뢰도, 양적신뢰도, 회복도 등을 활용하였다. 저수지 모의운영 모형은 일정량 공급방식 적용, 부족분 공급방식 적용, 부족분 공급 및 화전댐 실측방류량 적용 케이스 등 총 3개 케이스의 모형을 구축하였다. 그 결과 부족분 공급방식을 적용하였을 때 신뢰도와 회복도 등 모든 지표에서 저수지 시스템의 용수공급능력이 증가하는 것으로 분석되었다. 특히 기간신뢰도는 30% 이상 증가하고 양적신뢰도는 약 4% 증가하는 효과를 거둘 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 수계 내의 모든 저수지가 각각 부여받은 용수공급량 충족이라는 목적과 동시에 하류 동일 지점의 안정적 유량유지를 목적으로 운영될 경우 수계전체의 용수공급능력 증대라는 효과를 얻을 수 있는 것으로 판단되었다. 또한 본 연구를 통해 부족분 공급방식의 저수지 운영이 강우의 공간적 변동성 증가와 같은 기후변화에 대응 가능한 효율적인 저수지 운영방안임을 확인할 수 있었다.

검색어 : 부족분 공급방식, 저수지 시스템, 저수지 모의운영, 용수부족

* 종신회원 · 이주대학교 건설시스템공학과 박사과정 (Ajou University · dhfodhs@ajou.ac.kr)

** 종신회원 · 이주대학교 건설시스템공학과 박사과정 (Ajou University · oplk100@ajou.ac.kr)

*** 종신회원 · 이주대학교 건설시스템공학과 연구교수 (Ajou University · log58@ajou.ac.kr)

**** 종신회원 · 교신저자 · 이주대학교 건설시스템공학과 교수 (Corresponding Author · Ajou University · jeyi@ajou.ac.kr)

Received June 18, 2020/ revised July 2, 2020/ accepted July 6, 2020

1. 서론

우리나라는 연 강우량의 60~70 %가 여름철에 집중되어 있어 대부분의 유역에서 저수지를 활용한 수자원 관리를 하고 있다. 국내 저수지의 기본 운영 방향은 홍수기에 발생한 많은 양의 물을 저수지에 저장한 후 이를 연중 활용하는 것이다. 하지만 최근 기후변화로 인해 여름철의 강우부족 현상이 빈번히 발생하고 있어 저수지 운영에 어려움이 증가하고 있다. 2014년부터 2017년까지 지속된 중북부지역의 강우 부족은 한강권역 및 금강권역 수자원 관리에 큰 피해를 발생시켰다. 2014년, 2015년 서울 기상관측소에서 관측된 연 강우량은 각각 809 mm, 792 mm로 기록되었다. 또한 여름철(6~9월)의 강우량은 각각 567 mm, 424 mm로 평년대비 53 %, 40 %에 해당하는 양 밖에는 발생하지 않았다. 기후변화는 강우부족과 같은 총 강우량의 변화 뿐만 아니라 강우의 공간적 변동성도 증가시키고 있어 동일 유역 내에서도 강우의 편차가 증가하는 추세를 보이고있다. 이에 따라 유역단위의 물 관리를 지향하고 있는 국내의 수자원 시스템 운영에 어려움이 증가하고 있다.

우리나라의 유역 중 34,428 km²로 가장 넓은 유역면적을 차지하고 있는 한강유역에는 유역 내에 3개의 다목적댐과 9개의 발전용댐, 3개의 홍수조절댐이 위치하고 있다. 이 중 팔당댐은 수계 내 최하류에 위치하고 있으며, 발전용댐이지만 하류로 연중 124 m³/s 이상의 방류를 목표로 운영되고 있다. 또한 연중 약 50 m³/s의 물을 저수지 내에서 취수하여 주변 지역으로 공급하고 있다. 팔당댐으로의 유입량은 상류에 위치한 댐 군의 운영에 따라 크게 변동하게 되며 팔당댐에서 공급, 취수되는 물은 국내 최대인구가 밀집되어 있는 수도권 전역으로 공급된다. 이에 따라 팔당댐 상류에 위치한 저수지의 유입량 감소 등 저수지 운영에 문제가 생길 시 팔당댐의 수도권 용수공급에 차질이 생겨 극심한 사회경제적 문제를 야기할 수 있다. 하지만 최근 한강수계 저수지의 공간적인 강우편차와 댐별 유형에 따라 각 저수지의 수자원 보존량이 차이를 보이고 있어 상류 저수지의 안정적인 운영에도 댐별로 차이가 발생하고 있다.

국내외적으로 기후가 변화하고, 다양한 수자원 시스템이 건설됨에 따라 댐의 용수공급능력평가와 관련된 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 국내에서는 사회의 발전에 따른 용수수요량 증가로 저수지의 추가 용수공급가능량 산정을 위해 낙동강 유역의 안동댐 및 임하댐을 대상으로 용수공급능력을 재평가한 연구가 있다(Lee et al., 2012). 또한 4대강 사업 이후 다기능보를 포함한 낙동강 수계 다목적댐 모의운영을 통해 저수지의 용수공급능력을 재평가한 연구가 수행된바 있다(Jang and Kim, 2016). 부족분 공급방식의 저수지 운영과 관련해서는 Lee et al.(2014)이 전국 16개 다목적댐을 대상으로 댐 별 물 공급안정성 평가를 위해 K-WEAP을 활용하여

저수지 모의를 수행하고 평가했으며, Ki(2018)는 낙동강 수계의 운문댐에 부족분 공급방식의 저수지 운영방법을 적용해 이수능력 증대 효과를 분석하였다. 국외에서는 저수지의 용수공급 능력을 평가하기 위해 선형계획법 같은 최적화기법을 적용한 연구(Moy et al., 1986), 기후 및 사회, 자연환경 변화에 따른 저수지의 용수공급능력을 재평가한 연구(Jowitt and Hay-Smith, 2002) 등이 수행된 사례가 있다. 현재까지 부족분 공급방식을 적용한 저수지 시스템 분석 관련 국내논문은 살펴보면 대부분 용수공급을 목적으로 하는 다목적댐에만 부족분 공급방식이 적용된 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 현재까지 진행된 연구와는 달리 부족분 공급방식을 적용하여 3개의 다목적댐과 6개의 발전용댐 등 총 9개의 저수지로 구성된 한강수계 저수지 시스템 모의운영을 실시하였다. 이를 위해 다목적댐과 화천댐에 부족분 공급방식을 적용한 모형을 구축하였으며 이 모형에 화천댐의 실적방류량을 추가로 적용한 모형도 구축하였다. 부족분 공급방식의 운영효과 평가를 위해 일정량 공급방식의 모의운영 모형도 함께 구축하여 결과 비교에 활용하였다. 저수지 모의운영의 결과를 평가하기 위한 지표로는 기간신뢰도, 공급신뢰도, 회복도 등의 용수공급능력 지표를 이용하였다.

2. 기본이론

2.1 부족분 공급방식(Deficit supply)의 저수지 운영

일반적으로 우리나라의 댐은 건설 당시 댐 지점의 유입량과 하류 지역의 용수수요량을 고려하여 댐 별 기본계획공급량을 설정한다. 이후 기본계획공급량 내에서 댐과 댐 하류의 용수수요처 사이에 계약된 만큼의 용수수요량을 일정하게 공급하는 것을 목표로 운영되고 있다. 이렇듯 댐 하류지역의 용수수요 또는 용수부족 상황을 고려하지 않고 각 시기에 맞춰 일정량을 공급해주는 운영방식을 일정량 공급방식(Firm supply)라 한다. 댐의 상하류에 수량이 충분한 상황에서는 이 방식을 적용하여 안정적인 저수지의 용수공급이라는 목적을 달성할 수 있다. 하지만 하류 지점에 강우부족으로 자연유출이 감소한 상황에서는 하류 지점의 용수부족 및 용수수요 증가라는 상황을 고려할 수 없다는 단점이 있다.

일정량 공급방식과 달리 부족분 공급방식(Deficit supply)은 댐 하류 지점의 상황을 고려하여 일정량 이상의 유량을 유지시켜 주기 위해 댐을 운영하는 방식이다(Lee et al., 2014). 저수지에서 연중 동일한 양을 하류로 공급한다고 해도 하류 수량을 고려하지 않고 연중 일정량을 공급하는 경우(Fig. 1(a)) 보다 하류의 상황을 고려하여 공급량을 조절할 경우(Fig. 1(b)) 하류지점의 유량을 안정적으로 유지할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이러한 저수지 운영방식은 2개 이상의 저수지가 병렬로 연결되어 하류 동일 지점의 유량을 일정하게 유지하기 위해 운영되는 경우 각 댐의 공급량을

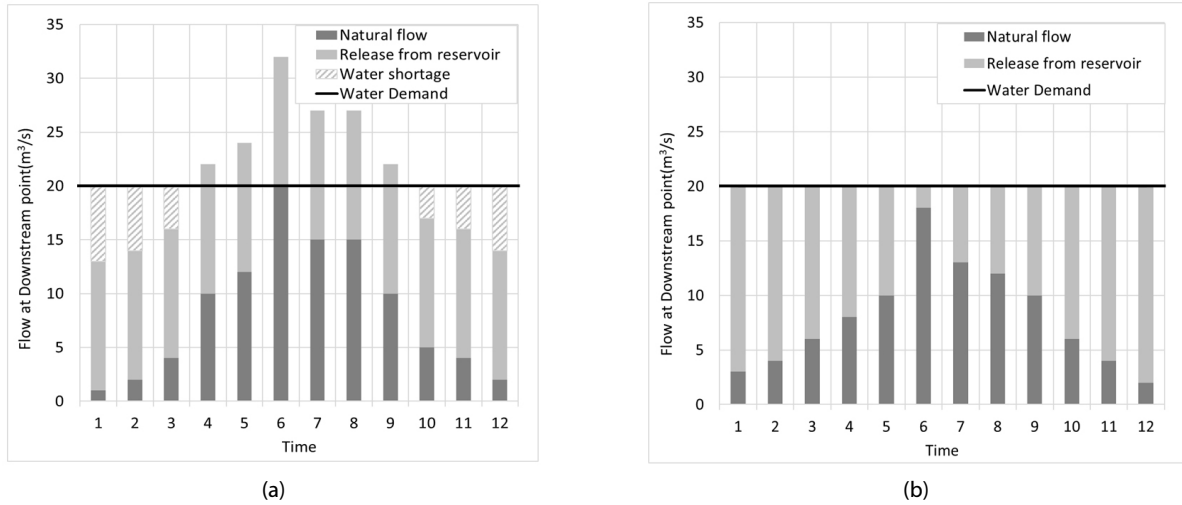


Fig. 1. Examples of Reservoir Operation Result Using Firm Supply and Deficit Supply

결정하기 위해서도 활용될 수 있다. 본 연구에서는 팔당댐 지점의 유량을 기준으로 충주댐, 소양강댐, 횡성댐, 화천댐에 부족분 공급 방식의 운영을 적용한 저수지 모의운영을 통해 팔당댐의 용수공급 능력을 평가하였다.

2.2 저수지 모의운영 평가지표

본 연구에서는 저수지 모의운영 결과를 평가하기 위해 신뢰도, 회복도, 화천댐의 발전방류량을 활용하였다. 이 중 신뢰도와 회복도는 Hashimoto et al.(1982)이 제안한 용수공급 능력지표로 저수지 모의운영 결과 평가를 위해 많이 사용되고 있다. 우선 신뢰도에는 분석기간 중 용수공급을 달성한 기간의 비율을 나타내는 기간신뢰도(Eq. (1))와 분석기간 중 공급해야 하는 공급량 대비 실제 공급량의 비율을 나타내는 양적신뢰도(Eq. (2)) 등이 있다. 이 때 기간신뢰도는 일, 월, 년 등 평가단위에 따라 다른 결과를 나타낸다.

$$TR(\%) = \left[1 - \frac{T_s}{T_t} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$VR(\%) = \left[1 - \frac{Q_s}{Q_p} \right] \times 100\% \quad (2)$$

Eqs. (1) and (2)에서 TR은 기간신뢰도, T_s 은 용수공급 실패기간, T_t 는 전체 분석기간을 의미하며, VR은 양적신뢰도, Q_s 는 공급부족량, Q_p 는 분석기간 동안의 계획공급량을 의미한다. 본 연구에서는 저수지 별 일 유입량 자료를 이용하여 일 단위 모의를 실시한 후 일 기간신뢰도와 양적신뢰도를 산정하여 결과를 용수공급능력을 평가하였다.

회복도란 한번 시스템이 불만족 상태로 들어온 후 얼마나 빨리 만족상태로 돌아오는가를 평가하기 위한 지표로 저수지의 용수공급능력 평가에서는 용수공급 실패 이후 얼마나 빨리 정상적인 용수공급 상태로 돌아오는가를 평가하기 위해 사용되며 Eq. (3)을 이용하여 산정 가능하다.

$$\gamma = \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right]^{-1} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 γ 는 평균회복도, M 은 용수공급 실패사상의 수, $d(j)$ 는 용수부족 지속기간을 의미한다.

마지막으로 화천댐의 월 평균 방류량을 산정하고 이를 실적방류량 자료와 비교하였다. 부족분 공급방식을 적용하였을 때 팔당댐의 유입량이 용수공급을 충족시킬 만큼 충분하여 화천댐의 용수를 필요로 하지않을 경우 화천댐의 방류량은 감소하게 될 것이다. 하지만 이 경우 화천댐의 기본 운영목적인 발전을 제대로 수행할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 팔당댐의 용수부족 저감 및 화천댐의 발전을 모두 만족시킬 수 있는 케이스에 대해 분석하기 위해 화천댐 모의방류량을 실적방류량과 비교하였다.

3. 저수지 모의운영 모형 구축

3.1 대상 유역 및 댐

한강수계의 저수지 중 군남홍수조절지, 한탄강홍수조절지 등 임진강 수계의 홍수조절댐과 평화의댐 및 도암댐을 제외한 9개 댐을 활용하여 저수지 모의운영을 실시하였다(Fig. 2). 9개 댐에는 충주댐, 소양강댐, 횡성댐 등 다목적댐 3개와 화천댐, 춘천댐,

Table 1. Physical Characteristics of Reservoirs in the Han River Basin

Reservoir	Type	Total storage (MCM)	Effective storage (MCM)	Low water level (EL.m)	Normal high water level (EL.m)
Chungju	Multipurpose reservoir	2,750.0	1,789.0	110.0	141.0
Soyanggang		2,900.0	1,900.0	150.0	193.5
Heongseong		86.9	73.4	160.0	180.0
Hwacheon	Hydropower reservoir	1,018.4	658.0	156.8	181.0
Chuncheon		150.0	61.0	98.0	103.0
Uiam		80.0	57.5	66.3	71.5
Cheongpyeong		185.5	82.6	46.0	51.0
Geosan		15.3	5.7	131.7	135.7
Paldang		244.0	18.0	25.0	25.5

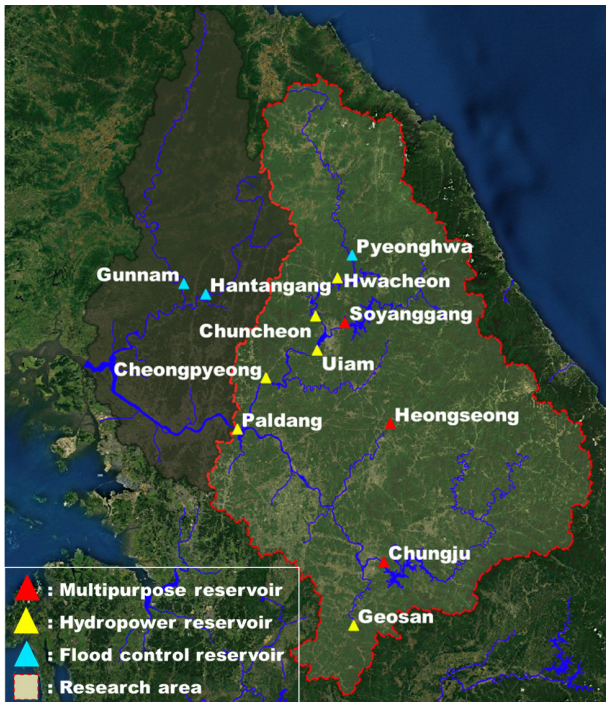


Fig. 2. Reservoirs in the Han River Basin

의암댐, 청평댐, 괴산댐, 팔당댐 등 6개의 발전용댐이 포함되며 각 저수지 별 제원은 Table 1과 같다. 부족분 공급을 위해서는 3개의 다목적댐과 화천댐을 포함시켰다. 화천댐의 유효저수용량은 658 MCM (Million Cubic Meter)이며 다목적댐인 횡성댐과 비교하여도 매우 큰 양이기 때문에 부족분 공급방식을 적용하였다. 하지만 화천댐과 달리 유효저수용량이 작은 기타 발전용댐은 부족분 공급방식을 적용할 경우 수위가 저수위까지 감소하여 발전용댐 고유의 목적인 발전을 제대로 수행할 수 없다고 판단하여 제외하였다.

3.2 저수지 모의운영 기본사항

일반적으로 저수지 운영을 분석하기 위해서는 저수지의 실제 제원 및 운영상황을 바탕으로 하는 모의운영기법과 공급량의 최대화, 부족량의 최소화 등 특정 목적을 달성하기 위해 수학적 모델에 기반하여 저수지를 운영하는 최적화 운영기법이 활용된다(Yeh, 1985; Wurbs, 1993; Simonovic, 2000; Ranjithan, 2005; Rani and Moreita, 2010; Fayaed et al., 2013). 본 연구에서는 실제 각 댐의 제원과 기본계획공급량 등 운영조건을 반영하기 위해 저수지 모의운영기법을 이용하였다. 저수지 모의운영을 위해서는 미 육군 공병단(USACE)의 HEC-ResSim 모델을 이용하였다. 이 모델은 저수지 시스템의 직렬 또는 병렬연결 등 다양한 수계상황 및 조건에 기반한 공급량 결정 등 저수지 시스템의 복잡한 모의가 가능하고, 결과를 직관적으로 판단할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 30년 이상의 자료를 사용하여 저수지 모의운영을 수행하기 위해 충주댐의 운영실적 자료가 관측된 1987년부터 2019년까지 총 33년 동안의 댐 별 유입량 자료를 활용하였다. 9개의 댐 중 횡성댐의 경우 2000년 6월부터 유입량 데이터가 관측되었기 때문에 이전의 자료는 횡성댐 직하류에 위치한 횡성교 유량자료를 유역면적비법에 따라 보정하여 이용하였다.

3.3 저수지 모의운영 케이스

본 연구에서는 부족분 공급방식의 저수지 모의운영을 위해 총 3개의 모형을 구성하였다. Case 1은 부족분 공급방식을 적용하지 않은 모형으로 다목적댐은 기본계획공급량을 일정하게 방류하고, 나머지 모든 발전용댐은 상시만수위를 유지하면서 유입된 양을 전량 방류하여 발전하는 운영방법을 적용하였다. Case 2는 팔당댐을 기준으로 충주댐, 소양강댐, 횡성댐, 화천댐에 부족분 공급방식을 적용하였으며 기타 발전용댐은 Case 1과 같이 상시만수위를 유지하면서 유입량을 전량 방류하도록 모형을 구축하였다. 마지막 Case 3는 Case 2와 같이 충주댐, 소양강댐, 횡성댐, 화천댐에

부족분 공급방식을 적용함과 동시에 화천댐에는 월 평균 실적방류량 값을 적용하여 실제 화천댐 운영이 반영될 수 있도록 모형을 구축하고 기타 발전용댐에는 앞선 케이스와 동일한 운영방법을 적용하였다. Case 2와 Case 3에 적용된 부족분 공급방식을 위해서는 팔당댐의 연중 책임방류량인 124 m³/s (묘대이양기(5월 27일-6월 10일)의 경우 138 m³/s)와 팔당 취수장의 평균 취수량인 50 m³/s을 합하여 적용하였다.

4. 저수지 모의운영 결과

4.1 용수공급능력 평가지표 비교

본 연구에서는 부족분 공급방식의 저수지 모의운영을 적용하여 한강수계 저수지 시스템의 용수공급능력을 분석하고자 하였다. 이를 위해 총 3개 케이스의 저수지 모의운영을 실시하고 일 기간신뢰도, 양적신뢰도, 회복도 등의 평가지표를 활용하여 결과를 분석하였다. 신뢰도와 회복도는 기본적으로 계획공급량이 적용되어 그 양을 충족시키지 못하는 경우를 대상으로 산정되는 지표이다. 따라서 저수지 모의운영에 이용된 총 9개의 댐 중 계획공급량이

적용되는 충주댐, 소양강댐, 횡성댐, 팔당댐을 대상으로 평가지표를 Table 2 및 Fig. 3과 같이 산정하고, 각 케이스를 지표에 따라 비교, 분석하였다.

우선 총 운영기간 중 정해진 용수공급량을 공급한 기간의 비율을 나타내는 일 기간신뢰도 산정 결과 충주댐, 소양강댐, 횡성댐 등 모든 다목적댐은 Case 1에서 가장 높은 기간신뢰도가 산정되었고, 팔당댐은 Case 3에서 가장 높은 기간신뢰도가 산정되었다. Case 1은 부족분 공급방식을 적용하지 않고 각 댐에 정해진 기본계획공급량을 일정하게 공급하는 케이스이다. 이 때문에 팔당댐에서 용수부족이 발생하더라도 상류의 다목적댐에서는 추가적인 용수공급을 하지 않았고, 이렇게 비축한 물을 각 댐에서 유입량이 감소한 시기에 용수공급을 위해 활용하였기 때문에 다목적댐의 기간신뢰도가 가장 크게 산정된 것으로 분석되었다. 동일한 이유로 Case 1에서 팔당댐의 일 기간신뢰도는 62.1 %로 3개의 케이스 중 가장 낮은 값을 보였다. 부족분 공급방식을 적용한 Case 2에서는 3개 다목적댐의 기간신뢰도가 평균적으로 1.5 % 감소한 것으로 분석된 반면 팔당댐의 기간신뢰도는 약 32.7 % 증가하여 용수부족 기간 측면에서는 부족분 공급방식이 팔당댐의 운영에 더 효율적인 것으로

Table 2. Reservoirs' Yield Indexes

Division		Chungju Reservoir	Soyanggang Reservoir	Heongseong Reservoir	Paldang Reservoir
Time-based reliability (%)	Case 1	93.3	100.0	86.9	62.1
	Case 2	92.3	97.7	85.8	94.8
	Case 3	92.2	95.5	86.0	96.1
Volumetric reliability (%)	Case 1	95.3	100.0	89.2	93.8
	Case 2	94.6	98.3	88.2	98.6
	Case 3	94.6	97.0	88.4	97.6
Average resiliency	Case 1	0.027	-	0.018	0.030
	Case 2	0.028	0.025	0.018	0.108
	Case 3	0.027	0.030	0.019	0.048

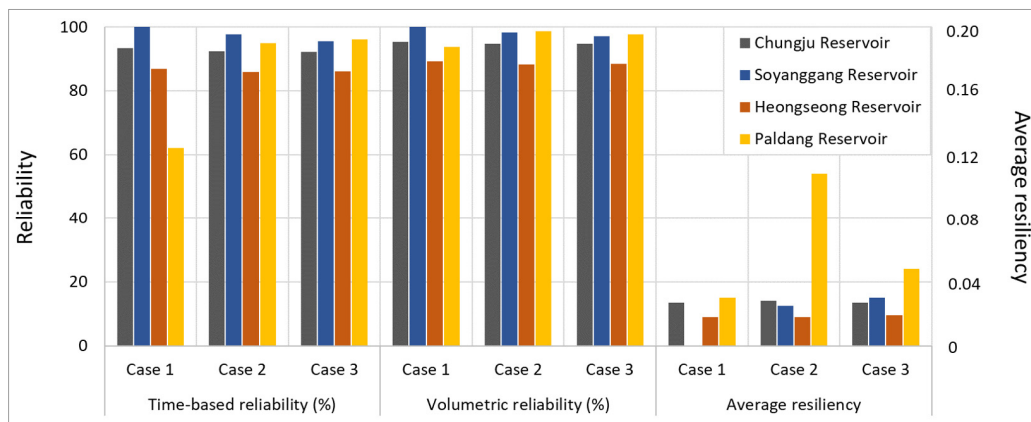


Fig. 3. Reservoirs' Yield Indexes

분석되었다. 부족분 공급방식 이외에 화천댐의 실적 월 평균 방류량을 공급하게 한 Case 3에서 3개 다목적댐의 기간신뢰도는 Case 1과 비교하였을 때 평균 약 2.2 %가 감소하였으나 팔당댐은 약 34 % 증가하였다. 또한 Case 2에 비하여 Case 3에서 팔당댐의 기간신뢰도는 약 1.3 % 증가하였다. 이는 화천댐의 실적 월 평균방류량을 적용함으로써 평상시 충분한 양의 물을 공급함과 동시에 부족분 공급방식에 의해 추가적인 용수를 공급한 결과라 판단된다.

전체 분석기간 중 각 댐별로 공급해야 하는 총 계획공급량 대비 실제 공급량의 비율을 나타내는 양적신뢰도의 경우 기간신뢰도와 마찬가지로 3개 다목적댐은 Case 1에서 가장 큰 결과를 보였다. 이는 기간신뢰도와 마찬가지로 각 댐에서 팔당댐의 운영을 고려하지 않고 댐별 계획공급량을 공급하는 것을 목표로 운영된 결과로 판단된다. 팔당댐의 경우 기간신뢰도와는 달리 Case 2에서 가장 큰 결과를 보였다. 이러한 결과는 Case 3에서 평상시 화천댐의 용수공급을 충분히 하여 팔당댐의 용수부족 발생 시 부족량 만큼의 물을 화천댐에서 충분히 공급하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. Case 2에서는 화천댐의 용수공급이 팔당댐의 용수부족 상황을 고려하고 있기 때문에 더 큰 양적신뢰도가 산정된 것으로 판단된다. 하지만 팔당댐의 양적신뢰도를 Case 1과 비교하였을 때 Case 2와 Case 3에서 각각 4.8 %, 3.8 % 증가한 것으로 분석되어 용수공급량 측면에서도 부족분 공급방식의 댐 운영이 더 효율적인 것으로 판단된다.

마지막으로 용수공급능력 지표 중 회복도는 용수공급 실패 이후 얼마나 빠르게 정상 용수공급이 가능한 상태로 돌아오는가를 나타내는 지표로 지표의 값이 더 클수록 더 빨리 정상상태로의 회복이 가능함을 나타낸다. 이는 전체 분석기간 중 용수공급 실패사상이 있는 경우에만 산정이 가능함에 따라 Case 1의 소양강댐에서는 산정이 불가하였다. 나머지 다목적댐인 충주댐과 횡성댐에서는

모든 케이스의 회복도가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 분석되었다. 하지만 팔당댐의 경우 부족분 공급방식을 적용함에 따라 회복도가 Case 1에 비하여 Case 2, Case 3에서 증가하는 것으로 나타났다. 특히 충주댐, 소양강댐, 횡성댐, 화천댐에 부족분 공급방식만을 적용한 Case 2에서는 회복도가 Case 1에 비하여 약 3배 이상 증가하였다. 이는 부족분 공급방식을 적용함으로써 팔당댐의 용수 공급 실패 이후 정상상태로 돌아오는 속도가 증가했다는 것을 의미하며 용수공급 실패에 대한 효율적인 대처가 가능함을 의미한다. Case 2와 Case 3의 회복도를 비교하면 Case 3가 약 0.06 작은 것으로 분석되었으며 이는 화천댐에서 부족분 공급방식에 의해 팔당댐의 공급부족량을 보충하기 위해 용수를 공급함과 동시에 추가적인 용수공급을 시행함에 따른 결과이다. 즉 화천댐에서 평상시에도 많은 양의 용수공급을 수행함에 따라 팔당댐 공급량 부족 발생 시 화천댐의 용수공급량이 팔당댐의 용수부족량을 충족시키지 못한 결과로 판단된다.

4.2 화천댐 방류량 비교

화천댐은 기본적인 댐의 운영목적이 발전인 발전용댐이다. 발전용댐의 발전량은 방류량에 의해 결정됨에 따라 본 연구에서는 각 케이스에서 모의된 화천댐의 월 평균 방류량과 화천댐의 실적 월 평균방류량을 비교하여 어떤 케이스가 실제운영에 가장 적합한지에 대해 분석하고자 하였다. 분석결과 Case 1, 2, 3에서의 연 평균 방류량은 각각 23.7 m³/s, 27.3 m³/s, 36.1 m³/s인 것으로 나타났다(Table 3). 실제 화천댐의 연 평균 방류량인 39.3 m³/s과 비교하였을 때 Case 3의 방류량 값이 실제 방류량 값과 가장 유사한 것으로 나타났다. 또한 월 별 방류량의 변화 추세를 보더라도 Case 3의 결과가 실제 운영과 가장 유사한 것으로 나타났다.

Table 3. Hwacheon Reservoir's Monthly Release for Power Generation (m³/s)

Month	Case 1	Case 2	Case 3	Historical data
Jan	3.1	15.1	19.6	24.0
Feb	3.2	20.7	19.5	23.2
Mar	5.6	17.6	20.8	23.5
Apr	12.9	8.9	24.6	27.3
May	22.3	16.0	38.6	46.6
Jun	34.4	33.0	27.3	37.9
Jul	80.1	68.9	72.4	79.2
Aug	81.2	78.0	97.3	94.2
Sep	36.2	41.4	60.1	56.6
Oct	1.0	6.7	24.1	28.1
Nov	2.6	9.8	12.9	14.1
Dec	1.6	11.0	15.4	16.9
Average	23.7	27.3	36.1	39.3

위의 분석지표들을 활용해 팔당댐을 중심으로 종합적 분석 결과 기간신뢰도 측면에서는 Case 3, 양적신뢰도 및 회복도 측면에서는 Case 2의 결과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 3개 다목적댐의 신뢰도 및 회복도는 감소하는 것으로 분석되었으나 3개 댐의 용수공급능력 지표 감소폭에 비하여 팔당댐의 증가폭이 더 큰 것으로 분석되었다. 즉 모든 댐이 각각의 계획공급량에만 초점을 맞춰 운영하는 것보다는 부족분 공급방식을 적용하여 운영하는 것이 수계전체의 용수공급 안정성을 높이는데 더 도움이 된다는 결론을 얻을 수 있었다. 또한 부족분 공급방식을 적용한 Case 2와 Case 3를 비교해보자면 양적신뢰도와 회복도가 Case 3에서 더 작은 것으로 나타났다. 하지만 지표의 차이는 미비하였고, Case 2보다는 Case 3의 월 별 화천댐 방류 양상이 실제 방류 양상과 유사하게 나타났다. 결과적으로 실제 화천댐의 운영상황을 고려함과 동시에 부족분 공급방식의 저수지 시스템 운영한다면 화천댐의 발전과 팔당댐의 용수공급을 모두 증가시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

5. 결론

본 연구에서는 한강수계 저수지 시스템의 물 공급 안정성 분석을 위해 부족분 공급방식을 적용한 저수지 시스템의 용수공급능력 평가를 수행하였다. 이를 위해 한강유역에 위치한 3개의 다목적댐과 6개의 발전용댐을 대상으로 저수지 모의운영을 실시하였다. 이 때 팔당댐 지점을 기준으로 3개의 다목적댐과 1개의 발전용댐 등 총 4개의 저수지에 부족분 공급방식의 운영방법을 적용하여 모의운영 모형을 구축하였다. 또한 저수지 모의운영 모형은 일정량 공급방식을 적용한 케이스, 4개의 저수지에 부족분 공급방식을 적용한 케이스, 4개의 댐에 부족분 공급방식을 적용함과 동시에 화천댐에는 실제 저수지 운영과 유사한 운영을 할 수 있도록 월 평균 실적방류량을 적용한 케이스 등 총 3개 케이스의 모형을 구축하여 분석에 이용하였다. 평가지표로는 일 기간신뢰도, 양적신뢰도, 회복도 등의 지표를 활용하였다.

분석결과 팔당댐을 기준으로 모든 지표에서 부족분 공급방식을 적용한 결과가 일정량 공급방식을 적용한 경우보다 더 좋은 결과를 나타내었다. 특히 기간신뢰도의 경우 일정량 공급방식을 적용하는 것에 비해 약 30% 이상 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 양적신뢰도는 약 4% 증가하였으며 용수공급 실패 후 정상공급 상태로 돌아오는 속도를 나타내는 회복도 또한 약 3배 가량 증가하였다. 화천댐의 실적 공급량을 적용한 Case 3 분석결과 일정량 공급방식을 적용한 케이스에 비하여 모든 지표가 증가하였고, 실적 공급량을 적용하지 않은 케이스와 비교하였을 때는 기간신뢰도를 제외한 용수공급 지표가 다소 낮게 평가되었다. 하지만 화천댐 방류량 비교결과 Case 3의 결과가 3개의 케이스 중 실적방류량과 가장

유사한 값과 패턴을 보이는 것으로 분석되었다. 즉, 부족분 공급방식과 화천댐의 실적방류량을 적용한 케이스는 수계전체의 용수공급과 화천댐의 발전 측면을 모두 고려하였다는 점에서 의미있는 결과라 판단된다.

우리나라의 경우 대부분의 용수공급이 저수지를 통해 이루어짐에 따라 안정적인 저수지 시스템의 운영은 용수공급에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 하지만 기후변화는 강우의 시공간적 변동성을 증가시켜 기존에는 경험하지 못했던 저수지 시스템 운영에 어려움을 발생시키고 있으며 기후변화 시대에 맞는 새로운 저수지 시스템의 운영방식이 필요한 상황이 되었다. 본 연구에서 적용하였던 부족분 공급방식은 단일 댐의 용수공급 뿐만 아니라 시스템 전체의 용수공급을 관점으로 하는 저수지 운영방식으로 향후 발생할 수 있는 물 부족에 대응하기 위한 하나의 저수지 운영방법이라 판단된다. 또한 본 연구는 향후 부족분 공급방식을 적용하는 다른 유역 및 저수지 시스템의 용수공급능력 평가에 도움이 될 것이라 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었음(320004-01).

References

- Fayaed, S. S., El-Shafie, A. and Jaafar, O. (2013). "Reservoir-system simulation and optimization techniques." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 7. pp. 1751-1772. DOI: 10.1007/s00477-013-0711-4.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R. and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Jang, C. H. and Kim, Y. O. (2016). "Improvement of water supply capability of the Nakdong river basin dams with weirs." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 36, No. 4, pp. 637-644 (in Korean).
- Jowitt, P. W. and Hay-Smith, D. (2002). "Reservoir yield assessment in a changing Scottish environment." *Science of the Total Environment*, Vol. 294, No. 1-3, pp. 185-199. DOI: 10.1016/S0048-9697(02)00067-0.
- Ki, C. S. (2018). *Deficit-supply operation for increasing conservation capability of water supply dam*, Masters Dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea (in Korean).
- Lee, D. H., Choi, C. W., Yu, M. S. and Yi, J. E. (2012). "Reevaluation of multi-purpose reservoir yield." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 4, pp. 361-371 (in Korean).

- Lee, D. R., Moon, J. W. and Choi, S. J. (2014). "Performance evaluation of water supply for a multi-purpose dam by deficit-supply operation." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 2, pp. 195-206. DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.2.195> (in Korean).
- Moy, W. S., Cohon, J. L. and ReVelle, C. S. (1986). "A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir." *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 4, pp. 489-498. DOI: 10.1029/WR022i004p00489.
- Rani, D. and Moreira, M. M. (2010). "Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation." *Water Resources Management*, Vol. 24, No. 6, pp. 1107-1138. DOI: 10.1007/s11269-009-9488-0.
- Ranjithan, S. R. (2005). "Role of evolutionary computation in environmental and water resources systems analysis." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 1, pp. 1-2. DOI: 10.1061/(asce)0733-9496(2005)131:1(1).
- Simonovic, S. P. (2000). "One view of the future." *Water International*, Vol. 25, No. 1, pp. 76-88. DOI: 10.1080/02508060008686799.
- Wurbs, R. A. (1993). "Reservoir system simulation and optimization models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, No. 4, pp. 455-472. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:4(455).
- Yeh, W. W. G. (1985). "Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818. DOI: 10.1029/WR021i012p01797.