다목적댐 가뭄 대응 단계별 해제기준 개발 및 효과 분석

Development and Effective Analysis of Termination Criteria at Each Drought Response Stage in a Multipurpose Dam

김정민* · 박진혁** · 장수형*** · 강현웅****

Kim, Jung Min*, Park, Jin Hyeog**, Jang, Su Hyung***, and Kang, Hyun Woong****

Abstract

In this study, the standard flow index (SFI) and reservoir storage proposed for stable water supply were used to develop the termination criteria at each drought response stage. The SFI of the drought stage was divided into 11 classes, from wet to drought, and scenarios were selected using the SFI, storage capacity, and maintenance period. These were applied to the Hapcheon Dam in the Nakdong River to analyze the time period reliability, supply reliability, resiliency, and vulnerability according to the scenarios. The analysis indicated that in the SFI, storage, and SFI - storage mix scenarios, the term and supply reliability were not significantly different, but the resiliency aid and vulnerability were improved according to the maintenance days. Additionally, for past typical drought periods (1994, 2009-2010), the additional supply volume and additional supply days were analyzed for each number of maintenance days (5, 10, 15, 30 days). It was found that the additional supply volume could be obtained up to 7.67 million m³ to 0.95 million m³, resulting in an increase in the number of additional days of supply from 5.4 days to 0.7 days for the additional life or service. In particular, these were shown to differ vastly by up to 1.82 million m³ and 1.3 days, in the scenarios of 15 and 30 days. It was evaluated that the difference between the 15-day and 30-day scenarios is 10,284.2 m³ in cumulative additional supply after completion until 2015. Based on these results, the SFI wet class (0.5 or higher) and the number of maintenance days (15 days) of retaining the upper drought stage with a low water capacity were presented as criteria for releasing optimal drought phases of the multipurpose dam. It is deemed that the use of the termination criteria at each drought response stage for the operation of multipurpose dams in the future can contribute to reducing the damage caused by the restriction on water supply.

Key words : Multi-purpose Dam, SFI, Maintenance day, Termination Criteria at Each Drought Response Stage

요 지

본 연구에서는 가뭄발생시 다목적댐의 안정적 용수공급을 위해 제안된 Standard Flow Index (SFI)와 댐 저수량을 이용하여 가뭄단계별 해제기준을 제안하고 이를 다목적댐에 적용하여 그 효과를 분석하였다. 가뭄단계별 SFI의 범위를 wet에서 drought까지 총 11등급으로 분류하고 SFI, 저수량과 유지일수를 이용하여 시나리오를 선정하였다. 이를 낙동강 내 합천댐에 적용하여 시나리오에 따른 기간신뢰도, 공급신뢰도, 회복도 그리고 취약도를 분석하였다. SFI, 저수량 그리고 SFI와 저수량 혼합시나리오에서 모두 기간·공급 신뢰도는 별 차이를 보이지 않았지만 유지일수에 따라 회복도와 취약도는 향상되는 것으로 분석되었다. 또한, 과거 대표적인 가뭄기간(1994년, 2009-2010년)에 대하여 유지기간 시나리오별(5일, 10일, 15일, 30일) 추가공급량 및 추가공급 가능일 수를 분석한 결과 시나리오에 따라 0.95 백만m³에서 7.67 백만m³을 추가 공급 가능한 것으로 분석되었고 이에 따른 생·공용수의 추가 공급가능 일수는 0.7일에서 5.4일 증가하는 것으로 분석되었다. 특히, 15일과 30일 시나리오에서 추가공급량은 최대 1.82 백만m³, 추가 공급가능일 수는 1.3일로 크게 차이가 나는 것으로 나타났다. 준공 이후 2015년까지 누적 추가공급량의 경우에도 15일과 30일 시나리오의 차이가 10,284.2 백만m³ 나는 것으로 분석되었다. 이러한 결과들을 바탕으로 다목적댐 최적 가뭄단계별 해제기준으로 SFI wet등급(0.5 이상)과 저수량의 상위 가뭄단계 유지일수 15일을 제시하였다. 향후 가뭄시 다목적댐 운영에 단계별 해제기준을 적용함으로써 용수공급 제한으로 인한 피해를 줄이는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 다목적댐, SFI, 저수량, 유지일수, 가뭄단계별 해제기준

*정회원, K-water융합연구원 위촉선임연구원(E-mail: kimjm82@kwater.or.kr)

Member, Researcher, Water Resources Research Center, K-water Convergence Institute

**교신저자, 정회원, K-water융합연구원 수석연구원(Tel: +82-42-870-7434, Fax: +82-42-780-7344, E-mail: park5103@kwater.or.kr)

Corresponding Author, Member, Researcher, Water Resources Research Center, K-water Convergence Institute

***정회원, K-water융합연구원 책임연구원(E-mail: kwaterjang@kwater.or.kr)

Member, Principal Researcher, Water Resources Research Center, K-water Convergence Institute

****K-water융합연구원 위촉연구원(E-mail: kanghw1013@kwater.or.kr)

Researcher, Water Resources Research Center, K-water Convergence Institute

1. 서 론

지구온난화로 인한 기후변화는 미래 강수량 및 유출량의 시·공간적 패턴의 변화를 가져와 이에 대한 불확실성이 증가되고 있으며, 이러한 불확실성은 안정적 용수공급에 큰 어려움을 초래한다. 특히, 21세기에 들어와서는 가뭄과 홍수 발생이 더욱 빈번해지고 있고, 필요한 신규 수자원 개발의 어려움과 공급 증가에 따라 비용발생이 증가하고 한정된 수자원에 대한 이해당사자간, 지역 간 갈등 등 물로 인한 문제가 증가하고 있다(Ko, 2003). 우리나라의 경우 연 강우량의 대부분이 여름철에 발생하고 있으며 강우의 발생형태 또한 장마와 태풍에 의한 쌍봉 형태에서 단봉 형태로 변하고 있다. 그리고 발생빈도 역시 불규칙하고 예측하기 어려워 안정적 용수공급을 위한 다목적댐 관리가 어려워지고 있다(Choo et al., 2015).

우리나라는 용수공급의 상당부분을 다목적댐에 의존하고 있으며 미래 댐 유역의 강수량이 부족해도 생활에 미치는 영향을 최소화 할 수 있도록 “댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준”이 시행되었으며 전국 15개 다목적댐을 대상으로 2년간 시범운영 한 후 ‘16년 6월에 개선(안)이 시행되었다. 시행된 개선(안)은 단계적 가뭄 대응을 위해 기준저수량을 사전 설정하였고 댐 저수량이 가뭄 단계별 기준저수량 이하로 저하될 경우 가뭄단계 발령 및 용수제한공급이 시행된다(K-water, 2016).

미국 등 해외의 경우 가뭄대응 단계 발령 및 해제기준은 기상 및 수문조건 그리고 저수지 수위의 유지 일수 등 다양한 조건에 의해 시행된다. 미국 텍사스 Guadalupe River에 위치한 Canyon Dam은 가뭄 대응을 위해 Guadalupe-Blanco River Authority를 조직하여 운영하고 있으며 댐의 저수량에 따라 가뭄 단계별 위기 경보를 발령하며 일정 이상의 저수량 유지 일수로 위기경보를 종료한다(GBRA, 2014). 또한, 텍사스 주 Corpus Christi시는 상류의 Choke Canyon 저수지와 Corpus Christi 호수 및 Texana 호수의 저수용량에 의해 가뭄 단계를 발령하며 단계별 저수량의 유지일수에 따라 단계를 종료한다(SPMWD, 2013). 단계별로 가뭄 해제기준을 설정함으로써 탄력적 운영으로 부정적 영향을 최소화하고 있다. 이처럼 효율적인 댐운영을 통한 용수공급 제한에 따른 피해를 최소화하기 위해서 새로운 다목적댐 운영 기준이 필요하다.

과거 국내에서 다목적댐 운영에 대한 연구는 모의 운영이나 최적 운영 등과 같은 댐운영(Na et al., 2010; Kang and Lee, 2015; Lee et al., 2015; Shim et al., 2002; Shin et al., 2000)과 저수지의 용수공급능력을 평가하는 연구(Lee and Song, 2002; Kang and Park, 2005; Lee and Kang, 2006)들이 많이 이루어져왔다. 특히, 용수공급과 관련하여 이수에 대한 안전도 평가에 대한 표준화된 방법이 정립되지 않은 상태이며 가뭄을 평가할 경우에도 물 부족 총량만을 산정하였고,

가뭄 지속기간에 대한 고려는 없었다(Yu et al., 2017). 미래에 안정적 물공급을 위협하는 물 부족의 위험도를 경감하기 위해 가뭄계획을 세우며 이 중 시공간적인 가뭄상황을 표현하기 위해 가뭄의 정도를 정량화한 가뭄지수들을 이용하고 있다(Moon et al., 2008). 그리고 댐의 관리를 위하여 물의 공급과 수요를 고려하거나(Lee et al., 2006), 다른 수문조건들을 반영한 지수들을 개발하여 댐 운영에 적용한 연구들이 있다(Seo et al., 2008; Lee, 2014).

본 연구에서는 수문학적 요소를 포함하는 실시간유입량 지수(Standard Flow Index, SFI)의 유지일수와 저수량 유지일수를 조건으로 하는 가뭄 단계별 해제기준 시나리오를 구성하여 용수공급능력 지표 산정을 통해 탄력적 운영이 가능한 가뭄 단계별 해제기준을 개발하고 용수공급능력 지표를 활용하여 효과를 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 타 지역에 비해 평균 강수량이 부족한 낙동강 유역 중에서 가뭄 피해가 자주 발생하고 과거 댐 운영 자료가 충분한 합천댐을 선정하였다. 합천댐은 낙동강 제 1지류인 황강에 위치하고 있으며 높이 95 m, 길이 472 m, 체적 891 천 m^3 , 유역면적은 925 km^2 이고 연평균 강우량 및 유입량은 1,370.4 mm, 28.9 m^3/s 인 다목적댐이다. Fig. 1은 본 연구의 대상유역을 나타내고 있으며 Table 1은 합천댐의 저수현황을 나타낸 것이다.

Table 1. Storage Information of Hapcheon Dam (K-water, 2016)

Storage	Value	Unit
Design Flood level	179.0	m
Normal High Water Level	176.0	m
Ruling Water Level	176.0	m
Low Water Level	140.0	m
Water Supply Water Level	114.4	m
Total Storage Capacity	790.0	$10^6 m^3$
Emergency Capacity	130.0	$10^6 m^3$
Annual Water Supply	599.0	$10^6 m^3$
Domestic, Industrial Water Supply	520.0	$10^6 m^3$
Agriculture Water Supply	32.0	$10^6 m^3$
River Maintenance Flow Supply	47.0	$10^6 m^3$

2.2 현 가뭄 대응 단계별 해제기준

장래에 다목적댐에서의 용수부족을 선제적으로 대응하기 위해 “댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준”을 제시하였다. 제시된 기준에서는 다목적댐에서 가뭄 대응 단계를 4단계(관심, 주의, 경계, 심각)로 구분하였고 각 단계별 필요감축

Fig. 1. Location of Target Watershed in Hapcheon Dam

량 및 용수공급 환원을 위한 기준저수량을 사전에 설정하였다. 저수량 감소로 인한 미래의 용수공급의 어려움이 예상될 때 선제적 용수비축의 일환으로 단계별로 용수공급 감량이 시행된다. 그러나 가뭄 대응 단계의 해제는 댐 저수량이 정상 용수공급 환원기준 이상일 때 수계별 댐-보 연계운영협의회에서 용수공급의 정상 환원 여부를 결정하고 시행한다 (K-water, 2016). 이러한 보수적 해제기준으로 인해 댐 저수량을 충분히 확보되었음에도 불구하고 정상 용수공급 환원 기준 전까지 용수공급 감량이라는 불편을 감수하여야 한다. Table 2는 다목적댐의 기존 가뭄대응 단계별 감축량과 개선된 감축량을 비교한 것이고 Fig. 2는 합천댐의 가뭄대응

단계별 기준저수량을 표현한 것이다.

2.3 가뭄 대응 단계별 해제기준 개발

가뭄 단계별 해제기준 시나리오는 SFI, 저수량 그리고 SFI와 저수량을 연계하는 경우, 그리고 유지일수 5일, 10일, 15일 그리고 30일 등을 조합하여 시나리오를 선정하였으며 그에 따른 용수공급능력을 평가하였다. 용수공급능력 평가는 시나리오 별 기간·양적 신뢰도, 회복도, 취약도를 산정하고 대표적인 가뭄기간에 적용하여 추가 공급가능일 수 및 추가 공급량을 계산하였다. 가뭄 단계별 해제기준 시나리오는 Table 3에 정리하였다.

Table 2. Comparison of Triggering Criteria for Water Supply from Multi-purpose Dams by Drought Response Stages

Drought Response Stage	Triggering Criteria for Water Supply from Multi-purpose Dam		
	Original (2014)	Revised (2015)	Revised (2016)
Attention	Domestic and industrial water (Design-Contract)	Domestic and industrial water (Design-Contract)	Domestic and industrial water (Design-Contract)
Caution	Attention + Ecological water(100%)	Attention + Ecological water(100%)	Attention + Surplus water (domestic, industrial, irrigation)
Alert	Caution + Irrigation water(100%)	Caution + Irrigation water(100%)	Caution + Irrigation water (2~6:20%, 7~9:30%, other:100%)
Serious	Alert + Partial reduction of water service contract of domestic & industrial water (Qualitative reduction)	Alert + 10% of water service contract (Domestic & industrial water)	Alert + 20% of water service contract (Domestic & industrial water)

Fig. 2. Standard Water Volume Lines by Five Drought Response Stages

Table 3. Scenario of Termination Criteria at Each Drought Response Stage

Item	Scenarios			
	SFI	Standard Reservoir Storage	SFI & Standard Reservoir Storage	
Maintenance period	5 days	10 days	15 days	30 days

Fig. 3. Simulation Flowchart of Termination Criteria at Each Drought Response Stage Scenario

가뭄단계의 진입은 현재의 기준을 적용하고 저수량이 가뭄 대응 단계별 기준저수량에 도달하면 Table 3에 정리한 시나리오에 따라 용수공급능력을 분석하였다. Fig. 3은 가뭄 대응 단계별 해제기준 시나리오 모의 흐름도이다.

2.4 용수공급능력 평가방법

일반적으로 수자원 시스템의 이수안전도를 평가하는 지표는 Hashimoto et al. (1982)이 제안한 신뢰도, 회복도, 취약

도 지수가 있다. 신뢰도는 해당 수자원 시스템의 상태가 운영 기간 동안 얼마나 정상적으로 운영되었는가의 확률이라고 정의하고 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$Rel = Prob[X_t \in S] \quad (1)$$

여기서, Rel 는 신뢰도, S 는 용수수요의 충족상태이다. 신뢰도의 분석기준은 빈도기준, 시간기준, 양적기준으로 구분

되며, 본 연구에서는 총 용수공급기간 중 용수공급 제한이 시행된 기간의 비율로 용수공급능력을 평가하는 기간신뢰도와 전체 운영기간의 계획 공급량에서 부족한 공급량의 비율로 나타내는 양적신뢰도를 사용하였다. 기간신뢰도 및 양적신뢰도를 산정하는 식은 Eqs. (2), (3)과 같다.

$$Re_t = [1 - \frac{T_s}{T_n}] \times 100\% \quad (2)$$

$$Re_s(\%) = [1 - \frac{Q_s}{Q_n}] \times 100\% \quad (3)$$

Rel_t는 기간신뢰도, T_n는 총 분석기간, T_s는 용수부족기간, Rel_s는 공급신뢰도, Q_n는 총 계획공급량, Q_s는 공급부족량을 나타낸다.

회복도는 정상적으로 용수가 공급되지 못하는 상태에서 얼마나 빨리 정상적으로 용수공급이 가능한 상태로 돌아가는가를 평가하는 지표이다. 운영기간과 용수공급 제한 기간이 동일하더라도 용수공급 제한이 장기간 유지되는 것이 짧은 시간 자주 발생하는 것보다 더 큰 피해를 야기할 수 있다(Ahn et al., 2016). 회복도를 산정하는 식은 Eq. (4)와 같이 표현된다.

$$Res_H = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (4)$$

여기서, Res_H는 지속기간 평균 회복도, M은 용수공급 제한사상의 수, d(j)는 용수공급 제한 지속기간을 나타낸다.

신뢰도, 회복도와 더불어 물 공급 안정성 평가에 일반적으로 쓰이는 취약도는 용수공급 제한으로 인한 용수부족량의 크기를 말하며 운영기간과 용수공급에 실패한 기간이 동일하더라도 실패기간 동안 공급하지 못한 용수공급 부족량은 다를 수 있다. 이에 Hashimoto et al. (1982)은 용수공급이 실패한 기간 동안 평균 용수공급 부족량으로 취약도를 제시하였다.

$$Vul_H = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \quad (5)$$

여기서, Vul_H는 평균 용수공급 부족량, M은 용수공급 실패 사상의 수, d(j)는 용수공급 부족량, Vul_M은 최대 용수공급 부족량을 나타낸다.

3. 결 과

3.1 해제기준 적용을 위한 SFI 분류

본 연구에서 “댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준” 중

가뭄 단계별 해제기준을 개발하기 위하여 시나리오를 선정하였다. 가뭄단계별 해제기준시나리오를 선정하기 앞서 저수량뿐만 아니라 유역의 수문학적 요소를 고려하기 위하여 댐 유입량을 입력자료로 하는 실시간유입량지수(Standard Flow Index, SFI)를 제시하였고(Kim et al., 2017) Standard Precipitation Index(SPI)의 누적확률을 참조하여 11개 등급을 분류하여 적용하였다(Table 4). 11개의 등급 중 저수위 회복에 의한 해제기준의 적용을 위해 wet 등급을 선택하였으며 관심(Attention) 이상, 주의(Caution) 이상, 단계별로 관심(Attention), 주의(Caution), 경계(Alert), 심각(Serious) 등급에 적용하여 모의한 결과 관심(Attention) 이상 조건에서 가장 많이 용수를 추가 공급할 수 있는 것으로 분석되었으나 각 조건에서 모의 결과가 큰 차이를 보이지 않아 용수제한공급에 의한 피해 최소화라는 연구목표를 감안하여 최종 조건은 관심(Attention) 이상을 선정하였다.

Table 4. Classification of Standard Flow Index (SFI)

Classification	SFI
Extremely wet	2.5 ~
Serious wet	2.0 ~ 2.5
Alert wet	1.5 ~ 2.0
Caution wet	1.0 ~ 1.5
Attention wet	0.5 ~ 1.0
Near normal	-0.5 ~ 0.5
Attention drought	-0.5 ~ -1.0
Caution drought	-1.0 ~ -1.5
Alert drought	-1.5 ~ -2.0
Serious drought	-2.0 ~ -2.5
Extremely drought	-2.5 ~

3.2 해제기준 시나리오별 용수공급능력 평가

우선 시나리오의 범위를 좁히기 위하여 SFI, 저수량, SFI + 저수량에 따른 유지일수 별 시나리오 모의를 수행한 후 하나의 시나리오를 선택하였다.

SFI, 저수량 그리고 SFI와 저수량의 혼합 시나리오 모의를 수행했을 때 기간신뢰도(Time Reliability)는 기존해제기준과 5일, 10일, 15일, 30일의 유지일수 별 시나리오간의 결과는 82.9%에서 82.7%으로 큰 차이가 나지 않는 것으로 분석되었다. 양적신뢰도(Supply Reliability)는 저수량 유지일수 5일과 15일 시나리오에서 0.1 백만m³ 증가하는 것을 제외하면 모두 91.2 백만m³로 동일하게 분석되었다. 회복도(Resiliency)의 경우, SFI 시나리오는 기존해제기준과 비교했을 경우 5일과 10일 유지기간에서 최대 8.6일, 최소 3.1일 증가하였고 저수량 및 SFI와 저수량의 혼합 시나리오는 5일 유지기간에서 최대 9.3일, 최소 4.3일의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 각 시나리오별 취약도 결과를 살펴보면 기존의 해제기준

에선 65.7 백만 m^3 의 부족량을 보였다. 시나리오 별로 SFI 시나리오에선 30일 유지기간에서 최대 3.6 백만 m^3 이 증가한 69.3 백만 m^3 , 저수위 시나리오에는 15일 유지기간에서 최대 6.4 백만 m^3 이 증가한 72.1 백만 m^3 , SFI와 저수위 혼합시나리오에는 5일과 15일 시나리오에서 최대 6.7 백만 m^3 증가한 72.4 백만 m^3 로 분석되었다(Fig. 4).

저수량과 SFI와 저수량의 혼합 시나리오의 기간신뢰도, 양적신뢰도, 회복도 및 취약도의 결과가 유사하게 도출되었다. 하지만 저수량은 댐 수문의 인위적인 조작에 의해 조정이 가능하기 때문에 저수지로 유입되는 유입량의 고려가 필수적이며 단기간 및 장기간의 유출의 추세뿐만 아니라 기저유출, 토양수분 등의 수문요소들을 고려해야 되기 때문에 가뭄 단계별 해제 기준으로 저수량과 SFI의 혼합 시나리오를 선택하였다.

위에서 분석된 결과들을 바탕으로 SFI와 저수량 혼합시나리오를 이용하여 과거 대표적 가뭄년도인 1994년, 2009년~2010년에 대해 가뭄 단계별 해제기준 시나리오에 따른 추가 공급량과 생·공·농업용수 및 생·공·농·하천유지용수의 추가 공급가능일 수를 분석하였다.

기준 해제기준을 적용한 해당 년도의 총 저수량과 해제기준 시나리오를 적용하여 산출된 총 저수량의 차이를 비교하였다. 1994년에는 최대 7.67 백만 m^3 에서 5.44 백만 m^3 , 2009년에는 최대 0.95 백만 m^3 에서 0.29 백만 m^3 그리고 2010년에는 최대 3.51 백만 m^3 을 추가로 공급 가능한 것으로 분석되었다. 또한, 유지일수가 짧아질수록 추가공급량이 늘어나는 것으로 분석되었다(Table 5).

Table 5. Comparison of Additional Supply by Scenario
(unit: million m^3)

	5 days	10 days	15 days	30 days
'94	▲7.67	▲7.41	▲7.26	▲5.44
'09	▲0.95	▲0.13	▲0.29	▲0.29
'10	▲3.51	▲2.77	▲1.90	0.00

추가공급량에 따른 추가 공급일 수는 Fig. 5와 같다. 2015년 기준 합천댐의 생·공·농·하천유지용수 공급량은 16.5 m^3/s 이며 생·공·농·하천유지용수 공급량은 18.0 m^3/s 이다. 이를 저수량으로 환산하여 추가공급량에 따른 추가공급일 수를 산정하였다.

추가 공급량에 따라 1994년에 생·공·농·하천유지용수는 최대 5.4일, 생·공·농·하천유지용수는 최대 4.9일, 2009년에 생·공·농·하천유지용수는 최대 0.7일, 생·공·농·하천유지용수는 최대 0.6일, 2010년에는 생·공·농·하천유지용수 최대 2.5일, 생·공·농·하천유지용수 최대 2.3일을 추가로 공급할 수 있는 것으로 분석되었다.

최적 유지기간의 선정에 위해 댐 준공 이 후 과거 기간 (1989년~2015년)동안 총 누가추가공급량을 유지일수 시나리오 별로 분석하였다(Table 6).

유지일수 시나리오 별로 과거기간 동안 누적추가공급량은 5일 유지시에 11,214.5 백만 m^3 으로 가장 많았고 30일 유지시 85.6 백만 m^3 으로 가장 적게 분석되었다. 특히, 15일 유지와 30일 유지 시나리오에서 가장 많은 추가공급량의

Fig. 4. Analysis of Termination Criteria at Each Drought Response Stage Scenario

Fig. 5. Comparison of Additional Supply Period by Scenario

Table 6. Assessment of Additional Supply on Past Period (1989-2015)

(unit: million m³)

	5 days	10 days	15 days	30 days
Additional Supply	11,214.5	10,867.5	10,369.8	85,6

차이를 보였는데 15일유지 시나리오에서는 10,369.8 백만m³으로 가장 많은 추가공급량을 확보할 수 있는 5일유지 시나리오와 844.7 백만m³의 차이가 발생하였지만 30일유지 시나리오의 추가공급량은 85.6 백만m³으로 가장 많은 차이를 보이는 5일유지 시나리오, 또는 가장 적은 차이를 보이는 15일유지 시나리오와 각각 11,128.9 백만m³과 10,284.2 백만m³ 차이를 보이는 걸로 분석되었다.

본 연구의 결과를 종합하면 다음과 같다. SFI, 저수위, 그리고 SFI와 저수위를 혼합 고려하여 유지일 수에 따른 시나리오를 적용하여 기존해제기준에 비해 기간신뢰도, 공급신뢰도, 회복도 및 취약도를 분석한 결과, 저수위와 SFI와 저수위 혼합 시나리오의 기간신뢰도, 공급신뢰도, 회복도 및 취약도는 유사하게 분석되었고 회복도의 경우 유지일수 별로 10일과 15일 시나리오는 4.4일의 큰 차이를 보였다. 그리고 과거기간 동안 유지일수 시나리오에 따른 누적추가 공급량은 15일과 30일에서 가장 큰 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 결과들을 종합하고 용수공급 안정성을 고려하여 회복도가 짧고 추가용수공급량을 확보 할 수 있는 SFI wet 등급(0.5 이상) 및 가뭄단계 상위등급 저수량이 15일 유지시 상위 가뭄단계로 전환되는 최적 해제기준으로 제시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 가뭄시 다목적댐에서 안정적 용수공급을 위해 추가용수공급량을 확보하기 위한 비구조적 대책의 일환으로 현재 보수적 기준으로 설정되어 있는 가뭄단계별 해제기준을 실시간유입량지수(Standard Flow Index, SFI)와 저수위를 이용한 시나리오를 모의하여 최적의 다목적댐 가뭄대응 단계별 해제기준을 제시하였다. 본 연구를 통해 도출한 주 결론은 다음과 같다.

- (1) 가뭄 단계별 해제기준을 산정하기 위해 실시간유입량 지수(Standard Flow Index, SFI)의 가뭄등급을 SPI의 누적확률을 참조하여 wet 부분과 dry 부분으로 총 11등급으로 분류하였다.
- (2) SFI, 저수위 그리고 SFI와 저수위 혼합시나리오와 해당 기준 유지일 수 5일, 10일, 15일 그리고 30일에 따른 효과를 기간신뢰도, 공급신뢰도, 회복도, 취약도를 이용하여 분석하였다. 또한, 과거 대표적인 가뭄년도에 시나리오를 적용하여 해제기준 시나리오에 따른 추가용수공급량 및 추가공급일 수(생·공용수, 생·공·농업·하천유지용수)를 산정하였다.

- (3) 기간신뢰도, 공급신뢰도, 회복도 그리고 취약도를 분석한 결과, 기간 및 공급신뢰도는 SFI, 저수량 시나리오와 유지일수별 시나리오 모두 거의 유사하게 나타났으며 회복도는 저수량과 SFI · 저수량 혼합시나리오에서 유지기간 10일과 15일 사이에 최대 4.5일의 차이가 나는 것으로 분석되었다. 이러한 결과들을 고려하여 SFI · 저수량 혼합 시나리오를 대표 시나리오로 선정하였다.
- (4) 유지일수 선정을 위하여 과거 대표적 가뭄기간을 대상으로 시나리오 적용 추가용수공급량과 추가공급 일수를 산정하였고 합천댐 준공 이 후 시나리오 적용시 산출된 누가 추가용수공급량을 분석한 결과 SFI는 Attention wet 등급(0.5 이상), 저수량은 상위 가뭄단계 15일 유지시를 최적가뭄단계로 제시하였다.
- (5) 본 연구에서 제시된 다목적댐 가뭄 단계별 해제기준 적용을 통해 용수제한공급으로 인한 피해를 최소화하고 향후 가뭄시 수문학적 안정성을 고려한 다목적댐 운영이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

- Ahn, J., Lee, Y., and Yi, J. (2016). Improving the water yield capabilities using reservoir emergency storage and water supply adjustment standard. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 12, pp. 1027-1034.
- Choo, T.H., Ko, H.S., Yoon, H.C., Noh, H.S., and Son, H.S. (2015) The estimation and analysis of Miryang dam inflow based on RCP scenario. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 5, pp. 3469-3476.
- GBRA. (2014). *Drought Contingency Plan for Guadalupe-Blanco river authority*. Guadalupe-Blanco River Authority.
- 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.
- Kang, M.G., and Park, S.W. (2005). Assessment of additional water supply capacity using a reservoir optimal operation model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 11, pp. 937-946.
- Kang, T., and Lee, S. (2015). Improvement of the effect of a reservoir system simulation under floods for the Han River basin by an optimization technique. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 6, pp. 119-127.
- Kim, J.M., Park, J.H., Jang, S.H., Kang, H.W., and Kim, S. (2017). Applicability evaluation of real-time standard flow index to develop termination criteria at each drought response stage on multi-purpose dams. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 411-420.
- Ko, I.H. (2003). *Development of Basic Technique for Integrated Water Resources Management in River Watershed*. Water Management Policy Forum.
- K-water. (2016). *Improvement Report of Water Supply Adjustment Criteria*.
- Lee, D.R., Moon, J.W., Lee, D.H., and Ahn, J.H. (2006). Development of water supply capacity index to monitor droughts in a reservoir. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 3, pp. 199-214.
- Lee, G.M. (2014). Water supply performance assessment of multi-purpose dams using sustainability index. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 5, pp. 411-420.
- Lee, J.E., and Song, J.W. (2002). Evaluation of water supply capacity for multi-purpose dam using optimization and simulation techniques. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 6B, pp. 811-818.
- Lee, S., Kang, T., and Lee, K.S. (2015). An operational model of a reservoir system simulation for real-time flood control in the Han River Basin. *Journal of Flood Risk Management* (online).
- Lee, S.H., and Kang, T.U. (2006). An evaluation method of water supply reliability for dams by firm yield analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 5, pp. 467-478.
- Moon, J.W., Lee, D.R., Choi, S.J., and Kang, S.K. (2008). An assessment on the waer supply stability of multi-purpose dam using water supply capacity index. *Proceedings of KWRA 2008 Convention*, p. 314.
- Na, M., Kim, J., and Kim, S.K. (2010). Development of operating guidelines of a multi-reservoir system using an artificial neural network model. *IE Interfaces*, Vol. 23, No. 4, pp. 311-318.
- Seo, H.D., Jeong, S.M., Kim, S.J., and Lee, J.H. (2008).

- A study on the optimal water supply using virtual drought exercise with hydrological drought index. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 10, pp. 1045-1058.
- Shim, K.C., Fontane, D.G., and Labadie, J.W. (2002). Spatial decision support system for integrated river basin flood control. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, No. 3, pp. 190-201.
- Shin, Y.L., Maeng, S.J., Ko, I.H., and Lee, H.K. (2000). Development of reservoir operation model using simulation technique in flood season (I). *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 6, pp. 745-755.
- SPMWD (San Patricio Municipal Water District). (2013). *Drought contingency plan*. City of Corpus Christi.
- Yu, J.S., Shin, J.Y., Kwon, M., and Kim, T.W. (2017). Bivariate drought frequency analysis to evaluate water supply capacity of multi-purpose dams. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 1, pp. 231-238.

Received	■ April 27, 2018
Revised	■ May 3, 2018
Accepted	■ May 25, 2018