



A study on estimation of optimal reserves for multi-purpose reservoirs considering climate change

Chae, Heechan^a · Ji, Jungwon^a · Yi, Jaeung^{a*}

^aDepartment of Civil Systems Engineering, Ajou University

Paper number: 18-082

Received: 31 August 2018; Revised: 15 October 2018; Accepted: 15 October 2018

Abstract

According to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), climate change increases the frequency of abnormal weather phenomenon. As the frequency of abnormal weather phenomenon increases, frequency of disasters related to water resources such as floods and droughts also increases. Drought is the main factor that directly affects water supply. Recently, the intensity of drought and the frequency of drought occurrence have increased in Korea. So, there is a need for water resource securing technology for stable water supply. Korean Water Plan mentioned that water reserves concept is necessary for stable water supply. Most multi-purpose reservoirs in Korea have emergency storage in addition to conservation storage used for water supply. However, there is no clear use standard for emergency storage. This study investigated the use of reservoir reserves for stable water supply. In order to consider the climate change impact, the AR5-based hydrological scenario was used as inflow data for the reservoir simulation model. Reservoir simulations were carried out in accordance with the utilization conditions of emergency storage and water supply adjustment standard. The optimal reserves for each multi-purpose reservoirs was estimated using simulation results.

Keywords: Multi-purpose reservoir, Emergency storage, Reservoir reserves, Climate change scenario

기후변화를 고려한 다목적댐의 적정 예비율 산정 연구

채희찬^a · 지정원^a · 이재웅^{a*}

^a아주대학교 건설시스템공학과

요 지

기후변화에 관한 정부 간 협의체의 5차 평가보고서에 기술된 바와 같이 기후변화로 인해 이상기후 현상의 발생빈도가 증가하고 있다. 이에 홍수, 가뭄 등 수자원과 관련된 재해의 발생빈도 또한 증가하고 있다. 이 중 가뭄은 용수공급에 가장 큰 영향을 미치는 재해이다. 최근 우리나라의 가뭄피해 사례를 보면 가뭄의 강도와 발생빈도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 안정적인 용수공급을 위한 수자원 확보 기술이 필요한 시점이다. 수자원장기종합계획에서는 수자원에도 예비율 개념의 대책 도입이 필요하다고 언급한 바 있다. 현재 국내 대부분의 다목적댐들은 평상시 용수공급에 이용되는 이수용량 외에 비상시 활용 가능한 비상용량을 확보하고 있지만 명확한 활용 기준이 없어 이를 활용하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 안정적인 용수공급을 위해 비상용량을 예비량으로 활용하는 방안에 대해 연구하였다. 기후변화의 영향을 고려하기 위해 AR5 기반 수문시나리오를 저수지 모의운영 모형의 유입량 자료로 이용하였다. 비상용량과 용수공급 조정기준의 활용 조건에 따라 저수지 모의 운영을 실시하였고 모의 결과를 이용하여 다목적댐별 적정 예비율을 산정하였다.

핵심용어: 다목적댐, 비상용량, 예비율, 기후변화 시나리오

*Corresponding Author. Tel: +82-31-219-2507
E-mail: jeyi@ajou.ac.kr (J. Yi)

1. 서론

우리나라 연강수량의 60~70%는 여름철 홍수기에 집중되며 국토의 대부분이 산지로 이루어져 있어 강수가 조기에 바다로 유출된다. 이러한 특성 때문에 우리나라는 댐을 건설하여 홍수기에 유출되는 강수량을 저류하여 이를 비홍수기에 활용하는 시스템을 갖추고 있다. 최근 우리나라는 기후변화에 의한 강수패턴의 변화로 가뭄의 발생빈도와 강도가 증가하여 안정적인 수자원 관리에 어려움을 겪고 있다. 따라서 안정적인 수자원 관리를 위한 추가적인 용수확보방안이 필요한 시점이다.

수자원장기종합계획(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011)에서는 용수확보 방안 중 하나로 용수공급 예비율 개념의 도입이 필요하다고 언급한 바 있다. 석유, 전력 등 국내의 타 주요 자원은 비상시 활용 가능한 예비자원을 확보하고 비상시 이를 사용하는 예비율 개념의 대책을 시행하고 있다. 현재 국내 대부분의 다목적댐들은 평상시 용수공급에 이용되는 이수용량 외에 비상시 활용 가능한 비상용량을 확보하고 있다. 비상용량을 예비량으로 활용한다면 안정적인 용수공급에 기여할 수 있을 것으로 기대되지만 비상용량을 활용하기 위한 법적 제도 및 활용 기준이 미비하여 이를 활용하지 못하고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 안정적인 용수공급을 위해 다목적댐의 비상용량을 예비량으로 활용하는 용수공급 예비율 개념을 도입하고, 낙동강유역의 다목적댐을 대상으로 저수지 모의운영을 실시하였다. 또한 저수지 모의운영 결과로부터 적정 예비율을 산정하여 예비율 확보에 따른 용수공급능력의 향상 정도를 분석하였다.

앞서 기술한 바와 같이 현재까지 비상용량을 활용한 기록이 전무하고 비상용량에 대한 명확한 활용방안이 없어 비상용량 활용에 관한 연구는 부족한 실정이다. Moon *et al.* (2008)은 국내 11개의 다목적댐에 대해 댐별로 설정된 월별 용수공급 계획량을 근거로 Water Supply Capacity Index를 활용하여 각 댐의 물 공급 능력을 검토하고 비상용수 공급량을 추가로 고려하였을 때 용수공급능력이 얼마나 개선되는가를 분석하였으며 비상용수를 고려하였을 때 모든 댐에서 물 공급 안정성이 뚜렷하게 개선되는 것을 확인한 바 있다. Yoon *et al.* (2008)은 댐의 비상용량이 사용될 때의 갈수빈도와 갈수피해액의 관계를 설정하고 피해경감액을 추정함으로써 연평균 편익을 산출하는 방안을 제안한 바 있다. Lee *et al.* (2012)은 경험적 용수공급 부족지표를 이용하여 이상가뭄 시 다목적댐의 비상용량을 활용하는 경우에 대한 용수공급능력을 평가하였다. 평가결과 몇몇 댐의 경우 극한가뭄에 매우 취약한 것으로

나타났으며 각 댐의 비상용수를 활용할 경우 개선효과가 나타나므로 가뭄으로 인한 사회적, 경제적 피해를 최소화하기 위해 비상용수를 확보해야 한다고 제시하였다. Ahn *et al.* (2016)은 댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015)과 다목적댐의 비상용량을 활용하였을 때 댐의 용수공급능력 향상 정도를 신뢰도, 회복도, 취약도 등의 용수공급능력 평가지표를 이용해 분석하였다. 분석 결과 용수공급 조정기준 및 비상용량 활용에 따라 용수공급능력 평가지표가 향상되는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 기후변화의 영향을 고려하기 위해 AR5 기반 수문시나리오 자료를 유입량 자료로 이용하였으며 용수공급 조정기준의 단계별 감축량을 비상용량과 연계하여 설정하여 더욱 효과적인 운영 방안을 제시하였다.

2. 기본 이론

2.1 다목적댐의 비상용량

다목적댐의 용량은 일반적으로 그 목적과 기능에 따라 구분된다. 다목적댐의 총저수용량은 크게 활용용량과 비활용용량으로 구분할 수 있으며 이는 각각 이수용량과 홍수조절용량, 사수용량과 비상용량으로 구분된다. 여기서 비활용용량은 댐 바닥에서부터 저수위(LWL)까지의 용량으로 정상적인 용수공급계획에는 포함되지 않는 용량이다. 비상방류구 아랫부분의 사수용량은 정상적인 이용이 불가능하다. 하지만 비상방류구 윗부분의 비상용량은 평상시에는 용수공급 목적으로 쓰이지 않지만 가뭄과 같은 비상시에는 용수공급에 기여

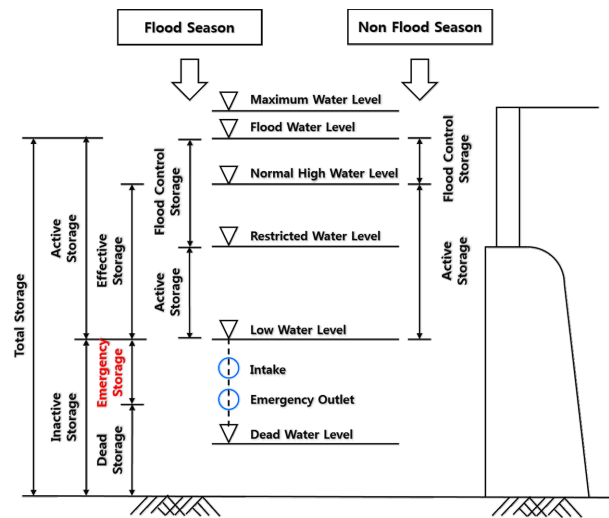


Fig. 1. Description of water level and capacity in reservoir

할 수 있는 비상용수로 사용 가능하다. Fig. 1는 일반적인 다목적댐의 용량 배분을 나타내고 있다.

2.2 댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준

댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015)은 다목적댐의 용수부족을 사전에 대비하기 위한 전략적 운영기법이다. 댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준은 다목적댐의 용수 부족에 대비하기 위해 댐의 용수공급량을 단계별로 조정하여 최대한 용수공급에 지장이 발생하지 않도록 용수공급능력을 유지하여 가뭄으로 인한 피해를 사전에 예방하는 것을 목표로 하고 있으며 전국 17개의 다목적댐 중 섬진강댐과 남강댐을 제외한 15개 다목적댐을 대상으로 하고 있다. 용수공급 조정기준에서는 4단계(관심, 주의, 경계, 심각)의 기준 저수량을 설정하고 댐 내 저수량이 단계별 기준저수량에 도달하게 되면 사전에 산정된 필요감축량을 기준으로 용수공급량을 감축한다. 필요 시 관계기관과의 협의를 통해 추가적인 감량이 가능하며 이후 댐 저수량이 일정수준에 도달하는 경우 정상 용수공급 기준으로 환원된다. 단계별 용수공급 감축량은 Fig. 2와 같다.

2.3 용수공급능력 평가지표

일반적으로 다목적댐의 용수공급능력은 Hashimoto *et al.* (1982)이 제안한 신뢰도, 회복도, 취약도를 이용하여 평가하며 각 지표별 정의는 다음과 같다.

2.3.1 신뢰도(Reliability)

신뢰도는 주어진 계획 기간 동안 정상적으로 용수공급을 수행할 수 있는 확률로 정의되며 Eq. (1)과 같다.

$$\alpha = \text{Pr}ob[X_t \in S] \tag{1}$$

여기서, α 는 신뢰도, S 는 용수수요의 충족상태를 나타낸다. 신뢰도는 운영 및 평가 단위의 선택에 따라 발생신뢰도(HR), 기간신뢰도(TR), 양적신뢰도(SR)로 구분할 수 있으며 이중 양적신뢰도는 계획 기간 중 댐의 기본 계획공급량 대비 용수공급량의 비율로써 Eq. (2)와 같이 정의된다.

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

여기서, Q_p 는 기본 계획공급량, Q_s 는 공급부족량이다.

2.3.2 회복도(Resiliency)

동일한 신뢰도 값을 가지더라도 용수공급 실패가 오랜 기간 지속되면 용수부족으로 인한 피해는 매우 커질 수 있다. 회복도는 용수공급실패로부터 얼마나 빠른 기간 내 회복하는지를 나타내는 지표이며 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, γ 는 지속기간 평균 회복도, M 는 용수공급 실패사상의 수, $d(j)$ 는 용수부족 지속기간을 나타낸다. 한편, Moy *et al.* (1986)은 용수부족 사상 중 최대 용수부족기간이 저수지 운영 방법을 비교하는데 보다 합리적인 기준이 될 수 있다고 판단하고 최대용수부족기간을 고려한 회복도를 Eq. (4)와 같이 제시하였다.

$$\gamma_{\max} = \max\{d(j)\}^{-1} \tag{4}$$

여기서, γ_{\max} 는 최대회복도이며, $d(j)$ 는 용수부족 지속기간을 의미한다.

2.3.3 취약도(Vulnerability)

동일한 신뢰도와 회복도를 가지더라도 용수공급 부족량에 따라 피해의 규모는 달라질 수 있다. 취약도는 용수공급에 실패했을 때 부족량의 심도를 나타내는 지표이며 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{M} \left\{ \sum_{j=1}^M v(j) \right\} \tag{5}$$

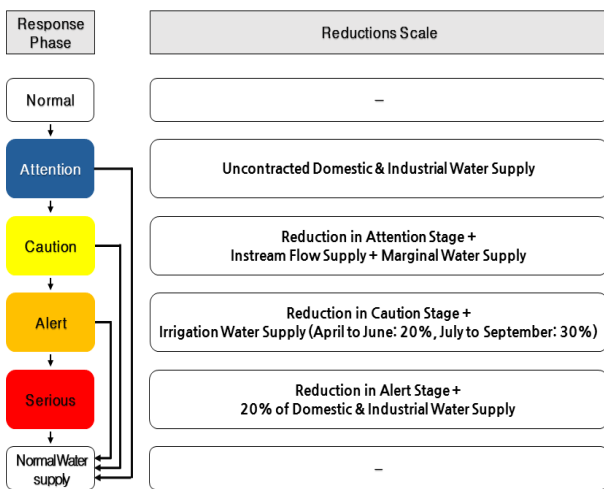


Fig. 2. Reductions scale of adjustment standard

여기서, δ 는 취약도, M 은 용수공급 실패사상의 수, $v(j)$ 는 용수공급 부족량을 나타낸다. 한편, Moy *et al.* (1986)은 용수부족 사상 중 최대부족량이 저수지 운영 방법을 비교하는데 보다 합리적인 기준이 될 수 있다고 판단하고 최대부족량을 고려한 취약도를 Eq. (6)과 같이 제시하였다.

$$\delta_{\max} = \max\{v(j)\} \quad (6)$$

여기서 δ_{\max} 는 최대취약도, $v(j)$ 는 용수공급 부족량을 나타낸다.

3. 저수지 모의운영 모형 구축

3.1 대상 유역 및 댐 선정

본 연구에서는 낙동강 유역을 대상 유역으로 선정하여 적정 예비율을 평가하였다. 낙동강 유역은 최근 30년간 연평균 강수량이 1,215.3 mm로 같은 기간 우리나라의 연평균 강수량 1,294.6 mm에 비해 6.1% 적은 강수량을 기록하였다. 또한 2014~2015년에 발생한 가뭄으로 인해 심각한 용수부족을 겪은 바 있어 추가적인 용수 확보 방안이 필수적이다. 본 연구에서는 낙동강 유역 내 9개의 다목적댐 중 남강댐, 성덕댐, 보현산댐을 제외한 6개의 다목적댐(안동댐, 임하댐, 합천댐, 밀

양댐, 군위댐, 김천부항댐)을 대상댐으로 선정하였다. 6개 다목적댐의 비상용량 보유현황은 Table 1과 같다. 각 댐별 비상용량은 안동댐 130.0백만 m³, 임하댐 84.0백만 m³, 합천댐 130.0백만 m³, 밀양댐 3.6백만 m³, 군위댐 1.3백만 m³, 김천부항댐 1.6백만 m³이고 이를 각 댐별 이수용량에 대한 비율로 나타내면 안동댐 13.0%, 임하댐 19.8%, 합천댐 23.2%, 밀양댐 5.2%, 군위댐 3.2%, 김천부항댐 3.8%이다. 각 댐별 비상용량을 용수공급에 활용한다면 일 기본계획공급량을 기준으로 안동댐 52일, 임하댐 53일, 합천댐 81일, 밀양댐 18일, 군위댐 13일, 김천부항댐 16일의 추가 용수공급이 가능하다.

3.2 모형 구축

본 연구에서는 낙동강 유역 내 6개의 다목적댐에 대해 HEC-ResSim (USACE, 2007) 모형을 구축하여 저수지 모의 운영을 실시하였다. 6개의 다목적댐 중 안동댐과 임하댐은 안동-임하 연결도수로 통해 양 댐을 연결하여 하나의 댐처럼 운영되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 반영하여 안동댐과 임하댐의 저수량을 통합하여 저수지 모의운영을 실시하였다. 안동-임하댐과 합천댐, 밀양댐, 군위댐, 김천부항댐 등 총 5개의 저수지 모의운영 모형의 운영 및 평가의 단위는 일 (Day)로 설정하고 모의운영 기간은 2011년부터 2100년까지로 설정하였다.

적정 예비율 산정을 위한 다목적댐별 저수지 모의운영 모

Table 1. Emergency storage status of multi-purpose reservoirs in nakdong river basin

Division	Andong Reservoir	Imha Reservoir	Hapcheon Reservoir	Milyang Reservoir	Gunwi Reservoir	Boohang Reservoir
Conservation Storage (million m ³)	1,000.0	424.0	560.0	69.8	40.1	42.6
Emergency Storage (million m ³)	130.0	84.0	130.0	3.6	1.3	1.6
Average Daily Planned Supply (million m ³)	2.5	1.6	1.6	0.2	0.1	0.1
Emergency Storage / Conservation Storage (%)	13.0	19.8	23.2	5.2	3.2	3.8
Emergency Storage / Daily Planned Supply (Day)	52	53	81	18	13	16

Table 2. Case of reservoir simulation operation model

CASE	Operation Method
Case 1	Do not use Emergency storage & Do not use Water supply adjustment standard
Case 2	Use Emergency storage & Use Water supply adjustment standard
Case 3	Use Emergency storage & Use Water supply adjustment standard (Do not reduce 20% of domestic industrial water supply in serious phase)

형은 Table 2와 같이 용수공급 조정기준 적용 및 비상용량의 활용 조건에 따라 3개의 Case로 구분하였다. Case 1은 비상용량과 용수공급 조정기준을 모두 적용하지 않은 일반운영 Case로 비상용량과 용수공급 조정기준을 모두 적용하는 Case 2, 3과 비교하기 위한 Case이다. Case 1에서는 댐 내 수위가 저수위에 도달하여 계획공급량을 정상적으로 공급하지 못하는 경우 용수공급에 실패한 것으로 산정하였다. Case 2는 비상용량과 용수공급 조정기준을 모두 활용하는 Case이다. Case 2에서는 댐 내 수위가 저수위에 도달하는 시점부터 비상용량을 활용한다. 비상용량을 활용함으로써 Case 1에 비해 더 많은 양의 용수를 공급할 수 있으며 용수공급 조정기준에 따라 댐 내 저수량이 용수공급 조정기준의 단계별 기준 저수량에 도달하게 되면 미리 산정된 감축량만큼을 감량하기 때문에 용수를 더 효율적으로 공급할 수 있는 Case이다. Case 2에서는 댐 내 수위가 용수공급 가능수위에 도달하여 심각단계의 제한공급량도 공급하지 못하는 경우 용수공급에 실패한 것으로 산정하였다. 마지막으로 Case 3은 비상용량을 사용한다는 가정 하에 용수공급 조정기준의 단계별 감축량을 변경한 Case이다. 용수공급 조정기준에 따라 댐 내 저수량이 심각단계에 도달하게 되면 생·공용수 실사용량의 20%를 감축하게 된다. 생·공용수는 농업용수, 하천유지용수와 비교하였을 때 감축으로 인한 피해가 매우 크다. Case 3에서는 비상용량을 활용한다면 생·공용수 실사용량의 20%를 감축하지 않아도 용수공급 실패가 발생하지 않을 것이라고 가정하고 용수공급 조정기준의 감량 기준을 완화시켜 댐 내 저수량이 심각단계에 도달하더라도 생·공용수 실사용량의 20%를 감축하지 않고 실사용량의 100%를 계속 공급할 수 있도록 하였다. Case 3에서도 Case 2와 동일하게 댐 내 수위가 저수위에 도달하는 시점부터 비상용량을 활용하였다. Case 3에서는 생·공용수 실사용량의 100%를 공급하지 못하는 경우 용수공급에 실패한 것으로 산정하였다.

3.3 대표 수문시나리오 선정

일반적으로 저수지 모의운영 모형 구축을 위해서는 댐의 제원, 운영률 외에도 댐의 유입량 자료가 필요하다. 본 연구에서는 기후변화의 영향을 고려한 예비물 산정을 위해 AR5 기반 일단위 수문시나리오 자료(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018)를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 수문시나리오는 RCP 4.5 기반 10개 GCM, RCP 8.5 기반 9개 GCM, 총 19개이며 Table 3과 같다.

본 연구에서는 19개의 수문시나리오 중 최대 가뭄사상을 대표할 수 있는 수문시나리오 하나를 선정하여 저수지 모의운

Table 3. Climate change scenarios used in the study

No	RCP 4.5	RCP 8.5
1	CanESM2	CESM1-CAM5
2	CESM1-BGC	CMCC-CMS
3	CMCC-CMS	GFDL-ESM2G
4	FGOALS-s2	HadGEM2-ES
5	GFDL-ESM2G	INM-CM4
6	HadGEM2-ES	IPSL-CM5A-LR
7	INM-CM4	IPSL-CM5A-MR
8	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-LR
9	IPSL-CM5A-MR	MRI-CGCM3
10	MPI-ESM-LR	-

Table 4. Water supply shortage in Hapcheon reservoir by climate change scenarios

No	Scenario	Shortage Volume (million m ³)
1	RCP 4.5 MPI-ESM-LR	161.1
2	RCP 8.5 MRI-CGCM3	168.7
3	RCP 4.5 CanESM2	283.8
4	RCP 8.5 CESM1-CAM5	285.6
5	RCP 4.5 CESM1-BGC	562.0
6	RCP 8.5 MPI-ESM-LR	810.5
7	RCP 8.5 CMCC-CMS	1024.5
8	RCP 4.5 GFDL-ESM2G	1115.6
9	RCP 4.5 FGOALS-s2	1403.3
10	RCP 8.5 GFDL-ESM2G	1578.8
11	RCP 8.5 HadGEM2-ES	1596.5
12	RCP 4.5 IPSL-CM5A-LR	1840.0
13	RCP 4.5 INM-CM4	1879.6
14	RCP 4.5 IPSL-CM5A-MR	2157.8
15	RCP 4.5 HadGEM2-ES	2246.1
16	RCP 8.5 IPSL-CM5A-LR	2559.6
17	RCP 8.5 INM-CM4	3257.3
18	RCP 8.5 IPSL-CM5A-MR	4394.3
19	RCP 4.5 CMCC-CMS	11045.4

영 모형의 유입량 자료로 이용하였다. 대표 수문시나리오를 선정하기 위해 합천댐을 대상으로 가장 기본적인 모의운영인 Case 1 (용수공급 조정기준 미적용, 비상용량 미활용)에 따라 모의운영을 실시하였고, 모의운영의 결과를 통해 2011년부터 2100년까지의 용수공급 부족량을 산정하였다. Table 4는 합천댐에서의 용수공급 부족량 산정결과를 나타내고 있다. 합천댐의 용수공급 부족량 산정결과 RCP 4.5 CMCC-CMS 시나리오의 용수공급 부족량이 다른 시나리오에 비해 매우

큰 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 결과가 낙동강 유역의 다른 다목적댐에서도 동일할 것으로 가정하였다. 기후 변화의 영향으로 인해 유입량의 수준이 가장 작게 나타나는 RCP 4.5 CMCC-CMS 시나리오를 이용하여 적정 예비율을 산정하면 다른 모든 시나리오의 결과를 포함할 수 있을 것으로 판단됨에 따라 본 연구에서는 RCP 4.5 CMCC-CMS 시나리오를 이용하여 다목적댐별 적정 예비율을 산정하였다.

4. 저수지 모의운영 및 예비율 산정 결과

각각의 Case에 대한 저수지 모의운영 결과로부터 용수공급량과 용수공급 실패횟수, 용수공급실패의 지속기간을 분석하였고 이를 이용하여 양적신뢰도, 회복도, 취약도 등 용수공급능력 평가지표를 산정하였다.

Case 1의 저수지 모의운영 결과는 Table 5와 같다. 모의운영의 결과를 댐별로 살펴보면, 우선 안동-임하댐의 경우 총 분석기간 32,507일 중 104회 용수공급에 실패하였으며 그 기간은 3,693일이다. 같은 기간 동안의 계획공급량 135,137.3백만 m³ 중 120,467.8백만 m³을 공급하였다. 양적신뢰도는 89.1%, 평균회복도는 0.028, 최대회복도는 0.005, 평균취약도는 141.1백만 m³, 최대 취약도는 879.0백만 m³으로 산정되었다. 합천댐의 경우 총 분석기간 32,507일 중 187회 용수공급에 실패하였으며 그 기간은 7,826일이다. 같은 기간 동안의

계획공급량 53,399.3백만 m³ 중 42,354.0백만 m³을 공급하였다. 양적신뢰도는 79.3%, 평균회복도는 0.024, 최대회복도는 0.004, 평균취약도는 59.1백만 m³, 최대 취약도는 372.5백만 m³으로 산정되었다. 밀양댐의 경우 총 분석기간 32,507일 중 125회 용수공급에 실패하였으며 그 기간은 3,115일이다. 같은 기간 동안의 계획공급량 6,485.1백만 m³ 중 5,974.7백만 m³을 공급하였다. 양적신뢰도는 92.1%, 평균회복도는 0.040, 최대회복도는 0.005, 평균취약도는 4.1백만 m³, 최대 취약도는 28.2백만 m³으로 산정되었다. 군위댐의 경우 총 분석기간 32,507일 중 125회 용수공급에 실패하였으며 그 기간은 6,973일이다. 같은 기간 동안의 계획공급량 3,401.7백만 m³ 중 2,750.5백만 m³을 공급하였다. 양적신뢰도는 80.9%, 평균회복도는 0.018, 최대회복도는 0.004, 평균취약도는 5.2백만 m³, 최대 취약도는 26.3백만 m³으로 산정되었다. 마지막으로 김천부항댐의 경우 총 분석기간 32,507일 중 50회 용수공급에 실패하였으며 그 기간은 1,548일이다. 같은 기간 동안의 계획공급량 3,235.6백만 m³ 중 3,101.3백만 m³을 공급하였다. 양적신뢰도는 95.8%, 평균회복도는 0.032, 최대회복도는 0.006, 평균취약도는 2.7백만 m³, 최대 취약도는 12.7백만 m³으로 산정되었다.

Case 2의 저수지 모의운영 결과는 Table 6과 같다. Case 2에서는 용수공급 조정기준 적용으로 인해 공급량을 제한하기 때문에 Case 1과 비교하였을 때 모든 댐에서 양적신뢰도가 감소하였다. 안동-임하댐, 밀양댐, 김천부항댐의 경우 용수공

Table 5. Reservoir yield index of case 1

Division	Volume Reliability (%)	Average Resiliency	Max Resiliency	Average Vulnerability (million m ³)	Max Vulnerability (million m ³)
Andong-Imha Reservoir	89.1	0.028	0.005	141.1	879.0
Hapcheon Reservoir	79.3	0.024	0.004	59.1	372.5
Milyang Reservoir	92.1	0.040	0.005	4.1	28.2
Gunwi Reservoir	80.9	0.018	0.004	5.2	26.3
Boohang Reservoir	95.8	0.032	0.006	2.7	12.7

Table 6. Reservoir yield index of case 2

Division	Volume Reliability (%)	Average Resiliency	Max Resiliency	Average Vulnerability (million m ³)	Max Vulnerability (million m ³)	Used Emergency storage (million m ³)
Andong-Imha Reservoir	87.3	-	-	-	-	-
Hapcheon Reservoir	79.0	-	-	-	-	59.2
Milyang Reservoir	89.5	-	-	-	-	-
Gunwi Reservoir	80.8	0.038	0.017	2.5	5.8	1.3
Boohang Reservoir	95.7	-	-	-	-	-

Table 7. Reservoir yield index of case 3

Division	Volume Reliability (%)	Average Resiliency	Max Resiliency	Average Vulnerability (million m ³)	Max Vulnerability (million m ³)	Used Emergency storage (million m ³)
Hapcheon Reservoir	79.1	-	-	-	-	82.5
Gunwi Reservoir	80.8	-	-	-	-	2.9

급 조정기준 적용으로 인한 제한 공급으로 용수부족실패가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한 저수지내 수위가 저수 위 이하로 내려가지 않아 비상용량을 활용하지 않는 것으로 나타났다. 합천댐의 경우 용수공급실패가 발생하지 않지만 분석기간 동안 최대 59.2백만 m³의 비상용량을 활용하는 것으로 분석되었다. 이는 합천댐의 비상용량 130백만 m³의 45.5%에 해당하는 양이다. 군위댐의 경우 용수공급 조정기준을 적용하고 비상용량을 모두 활용하여도 여전히 용수공급 실패가 발생하는 것으로 나타났다. 분석기간 동안 5회, 총 130일 동안 용수공급에 실패했다. 계획공급량 3,401.7백만 m³ 중 2,747.5백만 m³을 공급하였으며 양적신뢰도는 80.8%, 평균 회복도는 0.038, 최대회복도는 0.017, 평균취약도는 2.5백만 m³, 최대 취약도는 5.8백만 m³으로 산정되었다. 군위댐의 경우 추가 비상용량을 확보해야 할 것으로 판단된다.

Case 3은 비상용량과 용수공급 조정기준을 연계한 Case로 용수공급 조정기준의 감량 기준을 완화시켜 댐 내 저수량이 심각단계에 도달하더라도 생·공용수 실사용량의 20%를 감축하지 않고 경계단계의 제한공급량을 계속 공급하는 Case이다. 안동-임하댐, 밀양댐, 김천부항댐의 경우 Case 2에서 분석기간 동안 비상용량을 전혀 활용하지 않았고 저수량이 심각단계 기준저수량보다 높게 유지되기 때문에 Case 3에 대한 분석은 실시하지 않았다. 군위댐의 경우 Case 2에서 비상용량 추가 확보해야 하는 것으로 나타났기 때문에 본 연구에서는 Case 3 모의 운영 시 군위댐의 용수공급 가능수위를 179.0 El.m에서 177.0 El.m로 조정하였다. 이는 약 1.6백만 m³의 비상용량을 추가 확보하는 효과를 가지고 있다. Case 3의 저수지 모의운영 결과는 Table 7과 같다. 합천댐의 경우 Case 2와 비교하였을 때 공급량 측면에서는 큰 효과가 없는 것으로 분석되었다. 분석기간 내 비상용량 활용량을 보면 최대 82.5백만 m³의 비상용량을 활용하는 것으로 분석되었다. 이는 합천댐의 비상용량 130백만 m³의 약 70%에 해당하는 양이다. 따라서 합천댐의 적정 예비율은 현재 합천댐의 비상용량의 70%가 적절하다고 판단된다. 비상용량의 70%를 예비량으로 확보하게 되면 일 생·공용수공급량 기준으로 64일의 추가 공급이 가능하다. 군위댐의 경우도 Case 2와 비교하였을 때 공급량 측면에서는 큰 효과가 없는 것으로 분석되었다. 분석기간

내 비상용량 활용량을 보면 2.9백만 m³의 비상용량을 활용하는 것으로 분석되었다. 이는 군위댐의 비상용량 1.3백만 m³의 약 230%에 해당하는 양이다. 따라서 군위댐의 적정 예비율은 현재 군위댐의 비상용량의 230%가 적절하다고 판단되며 비상용량의 230%를 예비량으로 확보하게 되면 일 생·공용수공급량 기준으로 34일의 추가 용수공급이 가능한 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 가뭄으로 인해 다목적댐의 이수용량만으로는 정상적인 용수공급이 불가능한 상황에 대비하기 위해 다목적댐의 비상용량을 활용하는 방안을 연구하였다. 본 연구는 저수지 모의운영 모형인 HEC-ResSim을 이용하여 낙동강수계의 안동-임하댐, 합천댐, 밀양댐, 군위댐, 김천부항댐을 대상으로 저수지 모의운영을 실시하였으며 기후변화로 인한 극치 가뭄 시나리오의 영향을 고려하기 위해 RCP 4.5 CMCC-CMS 수문시나리오를 이용하였다. 저수지 모의운영 시 비상용량과 용수공급 조정기준의 활용 조건에 따라 3가지 Case로 구분하였다. 저수지 모의운영의 결과를 이용하여 낙동강수계 다목적댐들의 적정 예비율을 산정하였다.

낙동강수계 다목적댐들의 적정 예비율 산정 결과 안동-임하댐, 밀양댐, 김천부항댐의 경우 분석기간 동안 비상용량을 활용하지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 추가 비상용량의 확보는 필요 없을 것으로 판단된다. 합천댐의 적정 예비율은 현재 합천댐 비상용량 130백만 m³의 70%가 적절한 것으로 분석되었다. 확보된 예비량을 이용한다면 일 생·공용수공급량 기준으로 64일의 추가 용수공급이 가능한 것으로 분석되었다. 군위댐의 경우 적정 예비율은 현재 군위댐 비상용량 1.3백만 m³의 230%로 분석되었다. 군위댐은 추가 비상용량 확보가 반드시 필요할 것으로 판단되며 향후 가뭄 발생 시 확보된 예비량을 이용한다면 일 생·공용수공급량 기준으로 34일의 추가 용수공급이 가능한 것으로 분석되었다.

서론에서 언급한 바와 같이 현재 우리나라는 비상용량을 활용하기 위한 법적 제도나 활용 기준이 미비하여 이를 활용

하지 못하고 있는 상황이다. 본 연구에서는 국내 다목적댐을 대상으로 시행중인 용수공급 조정기준과 다목적댐의 비상용량을 연계한 운영방법을 제시하였다. 실제로 낙동강유역에서 가뭄이 매우 심했던 94~95년, 08~09년 등 과거의 실측 자료를 이용하여 본 연구에서 산정한 예비율이 적절한지 검증한다면 신뢰도 높은 가뭄대책을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- 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.
- Hydrologic Engineering Center (2007). HEC-ResSim : Reservoir System Simulation User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- K-water (2016). Practical Manual of Dam Operation.
- Lee, G. M., and Yi, J. E. (2012). "Analysis of emergency water supply effects of multipurpose dams using water shortage index." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 11, pp. 1143-1156.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015). Dam water shortage contrast water supply adjustment standard.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018). Climate Change Adaptation for water Resources: CCAW Technical Report Division2 TR 2018-01.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). Dam design standard.
- Moon, J. W., and Lee, D. R. (2009). "Emergency water supply effect on improvement of water supply capacity in multi-purpose dam." *Korean Society of Civil Engineers*, KSCE 2009 Convention, pp. 3386-3389.
- Moy, W. S., Cohon, J. L., and ReVelle, C. (1986). "A programming model for analysis of the reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir." *Water Resources Research*, Vol. 135, No. 6, pp. 414-425.
- Srivastava, D. K., and Awchi, T. A. (2009). "Storage-Yield evaluation and operation of mula reservoir." *Journal of Water Resources and Management*, Vol. 135, No. 6, pp. 414-425.
- Yoon, S. K., Kim, G. H., Yeo, K. D., and Shim, M. P. (2008). "A study on estimating emergency water supply benefits by dam." *Korea Water Resources Association*, KWRA 2008 Convention, pp. 1540-1544.