



## Development and application of integrated indicators for assessing the water resources performance of multi-purpose and water supply dams

Sung, Jiyoung<sup>a</sup> · Kang, Boosik<sup>b\*</sup> · Kim, Bomi<sup>c</sup> · Noh, Seongjin<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Ph.D Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

<sup>b</sup>Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

<sup>c</sup>Master Student, Department of Civil & Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

<sup>d</sup>Professor, Department of Civil & Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

Paper number: 22-045

Received: 14 July 2022; Revised: 16 August 2022; Accepted: 2 September 2022

### Abstract

For comprehensively assessment the water resources performance of multi-purpose dams and water supply dams in South Korea, a methodology was proposed to utilize the durational reliability along with the integrated auxiliary indicators including resiliency, dimensionless vulnerability, water resource efficiency, specific inflow, and specific water supply. In addition, for the purpose of sustainable dam operation in the future, a plan to grade the water resources performance was presented to periodically evaluate the performance and determine the priority of each dam's structural or non-structural planning according to the evaluation results. As major results, in the case of Sumjingang Dam, the durational reliability was 99.0%, but the integrated auxiliary index was the lowest of 44 points, which was 5th grade. This means that despite the current high reliability, hydrological changes due to future climate change or regional change of water demand-supply balance can have significant impacts on the water resources performances. In contrast, the Chungju Dam with a durational reliability of 93.0%, which is below the average among all multi-purpose dams, shows the 76 points of the integrated auxiliary index, which is 3<sup>rd</sup> highest following the Soyanggang Dam and the Namgang Dam. Nevertheless, due to the size of the basin, the specific inflow is sufficiently high as 185%, so the actual performance could be evaluated relatively high. The water supply dams designed for a single purpose tend to be evaluated relatively high because they have a high proportion of industrial and municipal water supply and have enough room for the supply capacity.

**Keywords:** Stability of dam reservoir yield, Reliability, Resilience, Vulnerability, Integrated indicator

## 댐 용수공급능력 안정성 평가를 위한 통합지표 개발 및 적용

성지영<sup>a</sup> · 강부식<sup>b\*</sup> · 김보미<sup>c</sup> · 노성진<sup>d</sup>

<sup>a</sup>단국대학교 토목환경공학과 박사과정, <sup>b</sup>단국대학교 토목환경공학과 교수, <sup>c</sup>금오공과대학교 토목공학과 석사과정, <sup>d</sup>금오공과대학교 토목공학과 교수

### 요 지

우리나라 다목적댐과 용수댐에서의 이수능력을 종합적으로 평가하기 위하여 기간신뢰도의 주 지표와 함께 회복도, 무차원 취약도를 포함한 수자원이용률, 비 유입량, 비 공급량을 활용한 통합보조지표를 이수안전도 평가지표로 활용하는 방법론을 제시하였다. 또한 향후 지속가능한 댐 운영 목적에서 이수안전도를 주기적으로 평가하고 평가 결과에 따른 구조적 혹은 비구조적 계획수립을 위한 댐별 우선순위 판단을 위해 이수안전도의 등급화 방안을 함께 제시하였다. 주요 결과로서, 섬진강댐의 경우 기간신뢰도는 99.0%로 1등급이었으나, 통합보조지표는 44점으로 최하인 5등급으로 나타났다. 이는 현재의 높은 신뢰도에도 불구하고, 장래의 기후나 지역적 용수수급의 변화가 이수안전도에 큰 영향을 미칠 수 있음을 의미하는 것이다. 충주댐의 경우는 대조적인 사례로서, 기간신뢰도가 93.0%로 국내 최대 규모의 다목적댐의 위상과는 다르게 전체 다목적댐 중 평균 이하의 성적을 보이는 반면 통합보조지표는 76점으로서 다목적댐 중에서는 소양강댐과 남강댐에 이은 높은 등급을 보인다. 하지만 그럼에도 불구하고 유역 규모상 비 유입량이 185%로서 충분한 유입량이 들어오기 때문에 실제 안정성은 높다는 평가를 할 수 있었다. 단일목적으로 설계된 용수댐은 생·공용수의 비중이 높고 댐의 공급량에 여유가 있기 때문에 이수안전도가 상대적으로 높게 산정되는 경향으로 나타났다.

**핵심용어:** 댐 이수안전도, 신뢰도, 회복도, 취약도, 통합지표

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-8005-3484  
E-mail: bskang@dankook.ac.kr (Kang, Boosik)

## 1. 서론

댐 이수안전도 지표는 댐 설계 시 용수공급수요에 따른 댐의 규모를 산정하기 위해 개발되었지만, 댐 준공 이후에는 유역의 기상·수문 현황과 물이용 환경변화 등에 따른 댐 운영·관리 여건 변화를 고려하여 댐 용수공급 안정성을 현재 시점에서 재평가하는 목적으로 활용되기도 한다. 그간 국내 실무에서는 댐 용수공급 안정성을 재평가하기 위해 Hashimoto *et al.* (1982)가 제안한 신뢰도, 회복도, 취약도가 주로 사용되어왔다. 이수안전도 평가 관련하여 수자원 계획의 최적화 연구(MOCT *et al.*, 1999)를 시작으로 기존 댐의 용량 배분 현황을 검토하고, 저수용량을 재배분하여 기존댐을 효율적으로 이용하기 위한 목적으로 기존 댐 재평가 및 최적용량배분 기본계획(MLTM and K-water, 2010)이 진행되었다. 이후 Lee *et al.* (2012)는 신뢰도 방법을 이용하여 다목적댐의 용수공급 능력을 재평가하였고, 국내·외 용수공급 평가지표의 한계점을 파악하여 정략적인 지표를 개발하고 설계기준 등에 반영하여 지침 화할 수 있는 방안을 제시한 갈수빈도 표준화 및 물 부족지표 개발을 통한 용수공급 평가방법 개선 연구(K-water, 2014), 기존 수자원 효율적 활용방안(K-water, 2019) 등 댐 설계 시와 현재 시점에서 댐의 기능을 비교, 평가하는 용수공급안정성(이수안전도) 연구가 지속되어 왔다. Choi *et al.* (2020)는 이수안전도 평가지표인 기간, 양적신뢰도를 이용하여 부족분 공급방식의 한강수계 저수지 시스템 용수공급 능력을 평가하였다. 해외에서는 Jain and Bhunya (2008)이 기간신뢰도와 회복도를 이용하여 인도의 다목적댐의 이수안전도를 평가한 바 있으며, Zhang *et al.* (2017)은 신뢰도, 회복도, 취약도를 이용하여 빌리우 강댐의 용수공급 능력을 평가하고 지표들의 상충관계를 연구한 바 있다. 이수안전도 평가를 위해서 국내·외적으로 Hashimoto *et al.* (1982)의 지표가 보편적으로 사용되고 있지만 그간 진행되었던 연구에서 용수공급을 판단할 수 있는 이수안전도 지표의 단위 설정이나 이수안전도 기준에 대한 문제점이 지속적으로 제기되고 있다. 이수안전도 지표의 분석단위 설정에서 댐 설계기준(MLTM, 2011)에 의하면 저수지 모의운영 시 유입량 자료는 일단위 기준으로 하며, 유역 및 수문특성 등을 고려하여 필요시에는 일, 반순(5일), 순(10일) 단위로 분석 가능하다고 명시되어 있지만 분석단위에 따라 회복도 산정 결과의 편차가 큰 것이 문제점으로 지적되었다. 또한 회복도는 Hashimoto *et al.* (1982)와 Moy *et al.* (1986)가 제안한 두 가지가 있으며 그간 진행되었던 연구에서 혼용되어왔다. 평가단위는 설계 당시와 기후변화 등을 고려한 보수적인 평가를 준용하여 연단위 평가를 실시해 왔지만 실제 이수측면에서 과소평가

될 여지가 충분하다는 사실이 기존 연구에서 지적되어 왔다. Choi *et al.* (2014) 이수안전도 평가에 있어 신뢰도 지표의 평가 단위 기준설정은 매우 중요하며 댐의 이수안전도 평가를 위해서는 이수안전도 평가지표 뿐만 아니라 추가적인 댐들의 용수 공급능력 평가에 대한 다양한 정보를 동시에 제공해야 할 필요가 있다고 주장하였다. 또한 평가 지표인 신뢰도를 회복도, 취약도와 어떻게 조합하여 사용해야 하는지에 대한 논의도 지속해서 진행되고 있다. Cha and Park (2004)는 일반적으로 신뢰도 평가만으로 물 부족에 대한 심도를 평가할 수 없으며 추가로 회복도 및 취약도의 평가기준이 필요하다고 시사하였으며, Lee and Yi (2014)은 평가단위 별 신뢰도 값의 편차가 크고, 신뢰도를 기본지표로 사용할 경우 회복도와 취약도는 절대적 판단기준보다는 상대적 판단기준으로 적용하는 것이 적절하다는 연구 결과가 있었다.

이수안전도 지표의 분석단위, 평가단위의 결정과 각 지표들의 조합을 통한 통합지표의 구성, 두 가지의 회복도 혼용 등은 댐 이수안전도를 평가하고 기준을 마련하기 위해 해결해야 할 문제점으로 판단된다. 국내 실무에서 주로 사용되어 왔던 연단위 평가가 월단위 혹은 순단위 평가에 비하여 이수안전도가 과소산정되는 경향이 있어 이를 현실화할 필요가 있다는 주장이 지속적으로 제기되어 왔다. 연단위 평가에서는 1년에 하루 실패가 발생해도 1년을 실패한 것으로 간주하게 되므로 실제보다 실패사상이 과장되어 보일 수 있다. 이러한 주장은 타당한 부분도 있으나 문제는 평가기간 설정에 따라 이수안전도값이 달라지는 것은 당연한 결과이지만, 이값이 높은지 낮은지를 평가하는 기준이 평가기간별로 부재하다는 것이 혼란을 초래하는 보다 근본적 원인이다. 본 연구에서는 수계별 다목적댐 14개소와 용수댐 9개소를 대상으로 댐 용수공급 지표인 신뢰도, 회복도, 취약도의 분석단위 및 평가단위에 따른 지표들을 분석하여 댐 건설 당시와 현재의 이수안전도 변화를 비교하였다. 이를 통해 이수안전도 평가의 최적 분석단위와 평가단위와 그간 사용되었던 Hashimoto *et al.* (1982)와 Moy *et al.* (1986)가 주장하는 회복도를 비교하여 댐 용수공급 평가에 용이성과 타당성 높은 댐 용수공급 평가지표의 개선 및 통합표준지표를 제시하였다.

## 2. 연구지역 및 자료

본 연구에서는 댐 이수안전도를 평가하기 위해 댐 준공 이후 20년 이상 경과된 수계별 다목적댐 14개소와 용수댐 9개소를 대상 댐으로 선정하였다. 수계별로 보면 한강수계가 다목적

**Table 1.** Objective dams for water supply performance assessment

Section	Han River basin (5 Dams)	Nakdong River basin (10 Dams)	Geum River basin (2 Dams)	Yeongsan & Seomjin River basin (3 Dams)	Other basin (2 Dams)
Multi-Purpose Dams (14 Dams)	Soyang, Chungju, Hoengseong	Andong, Imha, Hapcheon, Namgang, Miryang	Daecheong, Yongdam	Seomjingang, Juam	Buan, Boryeong
Water Supply Dams (9 Dams)	Guangdong, Dalbang	Yeongcheon, Unmun, Daeam, Yeoncho, Gucheon	-	Sueo	-

**Table 2.** Main configurations of multi-purpose dams and water supply dams

	Dam	Area (km <sup>2</sup> )	Average annual inflow		Annual Basic Plan Supply (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )			
			(cms)	(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Municipal and industrial water use	Agricultural water use	In-Stream water use	Total water use
Multi-Purpose Dams	Soyang	2703.0	69.0	2175.0	1200.0	13.0	225.4	1468.4
	Chungju	6648.0	161.5	5093.7	2731.0	315.0	334.0	3380.0
	Hoengseong	209.0	5.1	160.8	72.3	15.8	31.4	119.5
	Namgang	2285.0	68.5	2160.2	224.4	226.8	122.1	573.3
	Hapcheon	925.0	20.5	647.8	520.0	32.0	47.0	599.0
	Miryang	95.4	2.9	91.5	50.7	13.1	9.1	73.0
	Andong	1584.0	31.4	990.2	450.0	300.0	176.0	926.0
	Imha	1361.0	20.5	646.5	269.0	13.0	215.0	497.0
	Daecheong	3204.0	82.1	2589.1	1300.0	349.0	0.0	1649.0
	Yongdam	930.0	24.4	769.5	492.7	0.0	157.7	650.4
	Seomjingang	763.0	17.7	558.2	65.0	370.0	0.0	435.0
	Juam	1010.0	21.1	665.4	233.6	0.0	36.5	270.1
	Buan	59.0	1.5	47.3	28.5	6.6	0.0	35.1
Boryeong	163.6	4.1	128.7	90.6	4.7	11.3	106.6	
Water Supply Dams	Guangdong	125.0	2.7	85.1	25.6	0.8	0.0	26.4
	Dalbang	29.4	0.8	25.2	13.1	0.3	1.2	14.6
	Yeongcheon	235.0	4.5	141.9	80.3	12.4	14.6	107.3
	Unmun	301.3	6.9	217.6	137.2	2.8	22.4	162.4
	Daeam	77.0	2.0	63.1	18.3	0.0	0.0	18.3
	Yeoncho	11.7	0.3	10.7	5.8	0.4	0.0	6.3
	Gucheon	12.7	0.5	14.2	7.3	0.3	0.0	7.6
	Sueo	49.0	2.0	63.1	27.4	2.3	0.0	29.7

댐인 소양강댐, 충주댐, 횡성댐, 용수댐인 광동댐 달방댐 등 5개소, 낙동강 수계가 다목적댐인 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 밀양댐, 용수댐인 영천댐, 운문댐, 연초댐, 구천댐 등 11개소, 금강수계는 다목적댐인 대청댐, 용담댐 등 2개소, 영섬수계는 다목적댐인 섬진강댐, 주암댐, 용수댐인 수어댐 등 3개소, 마지막으로 다목적댐인 부안댐, 보령댐이다. 이 중 대곡사연댐은 반구대암각화의 문화재 보전과 관련하여 상시만수위 변경 등 댐 운영 경과조치를 시행 중에 있어 평가에서 제외하였다. 시간적 범위는 각 댐별 설계 당시 적용하였던 자료 기간 및 댐 준공 후부터 현재(20년) 시점까지 일 단위 유입량을

사용하였다. 수계별 대상 댐과 주요 제원은 Tables 1 and 2에 제시하였다.

### 3. 연구방법

#### 3.1 이수안전도 평가 지표 및 문제점

과거 이수안전도를 평가하기 위해 우리나라에서 주로 적용된 이론은 보장공급량(firm supply) 기준을 제외하면 대부분 Hashimoto *et al.* (1982)가 제안한 신뢰도 지표를 사용하였다

(Lee and Yi, 2014). 신뢰도(reliability)는 운영단위 및 평가단위의 선택에 따라 발생신뢰도(occurent reliability), 기간신뢰도(durational reliability), 양적신뢰도(quantitative reliability)로 구분할 수 있다. 발생신뢰도는 연단위 평가로 계산되며 물 부족이 발생하지 않은 연을 전체 연의 비로 계산하는 방법으로 연단위 기간신뢰도와 같다. 기간신뢰도는 전체 평가기간의 분석단위(일/반순/순/월) 총 기간 수 동안 댐의 기본계획공급량 또는 계약량을 공급할 수 있는 기간수로 표현된다. 따라서 본 연구에서 이수안전도를 평가하기 위해 사용한 신뢰도 지표는 Eq. (1)과 같이 표현하였다. 여기서,  $Rel_T$ 는 기간 신뢰도(%),  $T_j$ 는 댐에서 계획공급량 또는 계약량을 공급하지 못한 기간 수(일/반순/순/월/년),  $T_t$ 는 전체 계획기간 수(일/반순/순/월/년)이다.

$$Rel_T = \left(1 - \frac{\sum T_f}{T_t}\right) \times 100 (\%) \quad (1)$$

양적신뢰도는 평가단위 설정과 관계없이 전체 평가기간에 대한 분석기간 동안 댐으로부터 공급해야 할 계획공급량 대비 실제 용수공급량 비율로, 부족기간 동안에는 댐 유입량을 그대로 공급한다고 가정하여 댐 유입량을 실제 공급량으로 대체하여 계산하는 방법이다. 댐에서 공급하지 못한 계획공급 부족량(=실제 기간 중 총 계획공급량-실제공급량) 또는 계약부족량(=실제 기간 중 총 계약량-실제 공급량) 대비 전체 평가기간 동안 총기본계획공급량 또는 총계약량의 비로 계산된다. 여기서,  $Rel_{QP}$ 는 양적신뢰도(%),  $QP_f$ 는 댐에서 공급하지 못한 계획공급부족량 또는 계약부족량,  $QP_t$ 는 전체계획기간동안 총 계획공급량 또는 총 계약량이다.

$$Rel_{QP} = \left(1 - \frac{\sum QP_f}{QP_t}\right) \times 100 (\%) \quad (2)$$

이와 같은 신뢰도 지표는 댐에서의 수요-공급간 균형관계(이수안전도)를 판단하는 데 있어 주 지표로 사용된다.

한편으로, 회복도(resiliency)는 용수공급을 할 수 없는 상황이 발생했을 때 실패한 상황으로부터 얼마나 빨리 회복되는지 판단하는 지표로, 동일한 신뢰도를 갖더라도 실패가 지속되거나 회복속도가 느린지의 여부를 판단하기 위하여 사용한다. 회복도는 Hashimoto et al. (1982)와 Moy et al. (1986)가 제안한 두 가지가 있다. 먼저 Hashimoto et al. (1982)가 제안한 회복도는 전체 평가기간동안 용수공급을 실패한 사상의 평균 실패 기간의 역수로서 Eq. (3)로 표현할 수 있다. 여기서,

$M$ 은 전체 용수부족사상,  $d(j)$ 는 사상 별 실패 기간이다.

$$Res_1 = \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j)\right)^{-1} \quad (3)$$

Moy et al. (1986)이 제안한 회복도는 전체 평가기간동안 용수공급을 실패한 사상의 최댓값의 역수로, Eq. (4)와 같다. 여기서,  $d(j)$ 는 사상 별 실패 기간이다.

$$Res_2 = \max_j d(j)^{-1} \quad (4)$$

본 연구에서는 Hashimoto et al. (1982)와 Moy et al. (1986)가 제안한 회복도를 계산하였고, 이수안전도를 평가하기에 적합한 회복도와 평가단위를 4장에서 평가하고자 한다. 기간 신뢰도가 연단위, 월단위, 순단위, 반순단위 등 평가단위에 따라 산정 결과 값이 달라지는 반면, 회복도는 일단위 실패일수의 역수로 산정된다.

동일한 기간신뢰도와 회복도를 가지더라도 용수공급 부족량에 따라 피해가 달라질 수 있는바, 이를 표현하기 위하여 취약도(vulnerability)를 정상적인 용수공급이 불가능한(실패한) 상황에서의 부족량의 심도를 의미하는 지표로 정의하고 있다. 실제로는 실패기간 중 단계별 감량을 통해 공급이 이루어지지만, 이수안전도가 수자원 계획에서의 활용을 위하여 개발된 지표이기 때문에 취약도를 산정할 때는 운영상황에서의 단계별 감량은 고려하지 않는다. 저수위가 취수가능수위이므로 저수위 이하에서는 공급량이 없어야 하지만 이렇게 할 경우 실패사상별 용수공급누적부족량이 실패 기간 중의 기본계획공급량의 누적 값과 같으므로 항상 1로 산정되게 된다. 따라서 취약도는 저수위 이하에서도 댐 유입량만큼은 항상 공급한다는 가정 하에 Eq. (5)로 정의한다. 여기서  $v'$ 는 평균취약도,  $D$ 는 용수공급 실패기간동안 기본계획공급량,  $\max v(j)$ 는 용수공급 실패기간 중 최대부족량,  $M$ 은 용수공급 실패 사상의 수이다.

$$Vul = \frac{v'}{D} \quad v' = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \max v(j) \quad (5)$$

Hashimoto et al. (1982)가 제안한 세가지 이수안전도 지표는 지표간 본질적인 유사성이 있다. 회복도는 평균적 실패기간의 함수라는 점에서 기간신뢰도와 유사성이 있고, 취약도는 실패사상 내 부족량의 함수라는 점에서 양적신뢰도와 유사성이 있다. 국내 실무에서는 회복도와 취약도를 제외한 기간

신뢰도만으로 이수안전도를 평가해 왔는데, 이는 이러한 지표간 유사성과도 무관하지 않은 것으로 보여진다. 그러나, 신뢰도, 특히 기간신뢰도에는 실제 부족량이 반영되지 않아 부족량의 정량적 평가가 어렵기때문에, 댐의 용수공급능력을 종합적·객관적으로 평가하기 위해서는 단순한 유입량과 공급량의 절대 값이 아닌 저수용량대비 유입량 혹은 저수용량대비 공급량, 그리고 유입량 대비 공급량 등으로 객관화 시킬 수 있는 추가적인 보조지표가 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 Hashimoto의 평가지표와 기존 국내 이수안전도 평가실무에서 고려되지 않았던 댐 용수공급능력의 평가를 위해 수자원이용률(Water resources efficiency), 비 유입량(Specific inflow), 비 공급량(Specific water supply)을 다음과 같이 제안하였다 (Eqs.(6)~(8)). 여기서,  $wu$ 는 수자원 이용률로 하천이용률을 의미하며, 연평균 유입량 대비 연간용수공급량의 비율을 나타낸다. 여기서,  $QP$ 는 연평균 기본계획공급량( $10^6\text{m}^3$ ),  $\overline{Q_{in}}$ 은 연평균 유입량( $10^6\text{m}^3$ )이다.  $q_{in}$ 은 비 유입량으로 총 저수용량 대비 연평균유입량의 비율을 나타내는 지표이며,  $S$ 는 총 저수용량(만수위기준) ( $10^6\text{m}^3$ )이다. 마지막으로  $q_{sup}$ 은 비 공급량으로 총 저수용량 대비 기본계획공급량의 비율을 나타낸다. 새로 제안한 지표의 분석 결과에 대한 자세한 논의는 4장에서 제시하고자 한다.

$$w_{eff} = \frac{QP}{Q_{in}} \times 100 (\%) \quad (6)$$

$$q_{in} = \frac{\overline{Q_{in}}}{S} \times 100 (\%) \quad (7)$$

$$q_{sup} = \frac{QP}{S} \times 100 (\%) \quad (8)$$

### 3.2 통합지표 개발 및 등급화 방안

본 연구에서는 댐 이수안전도 평가를 위해 기간신뢰도와 양적신뢰도를 주 지표로 설정하였고, 회복도, 수자원이용률, 비 유입량, 비 공급량, 취약도 등의 보조지표들을 대상으로 통합보조지표를 설정하였다. 그다음 댐의 주지표인 기간신뢰도를 토대로 5단계 이수안전도 등급을 산정하였고, 통합보조지표를 활용해 댐의 관리 상태를 등급화하였다. 주지표의 기간신뢰도 목표값 달성을 위한 이행과정의 관리 및 피드백에 활용할 수 있을 것으로 사료되며 현재 댐의 이수안전도 상태를 모니터링하고 향후 목표 등급으로서의 상향을 위한 효과적인 관리 방향을 모색할 수 있을 것으로 판단된다. 먼저 다목적 댐, 용수댐을 구분하여 각 보조지표들을 계산하고 정규분포를 이용하여 평가구간을 5구간 100점 척도로 나누어 다음과 같이 설정하였다(Table 3). 회복도, 비 유입량은 값이 클수록, 수자원 이용률과 비 공급량, 무차원취약도는 값이 작을수록 댐 이수안전도의 신뢰도를 증가시킨다. 신뢰도 구간 설정은 통합보조지표와 마찬가지로 정규분포를 이용하여 5등급으로 나누었다(Table 4).

댐 이수안전도 등급 부여는 주지표인 기간신뢰도와 나머지 양적신뢰도, 취약도, 수자원이용률, 비 유입량, 비 공급량 등을 통합보조지표를 대상으로 이루어졌다. 주 지표와 보조 지표를 평균하는 방식은 결과적으로 단일 값으로 등급이 산정되

**Table 4.** The grading criteria for the total water supply performance index

Durational Reliability (%)	Quantitative Reliability (%)	Integrated Auxiliary Indicator (Points)	Grade
More than 99	More than 99	More than 90	#1
97~99	97~99	80~90	#2
95~97	95~97	65~80	#3
90~95	90~95	50~65	#4
Under 90	Under 90	Under 50	#5

**Table 3.** The criteria of the assessing interval for the integrated auxiliary indices

Section	Average			Very Good (20 points)	Good (16 points)	Normal (12 points)	Poor (8 points)	Very Poor (4 points)
	Multi-Purpose Dams	Water Supply Dams	Total					
Resiliency	0.15	0.14	0.15	More than 0.20	0.17~0.20	0.13~0.17	0.10~0.13	Under 0.10
Vulnerability	0.013	0.009	0.012	Under 0.003	0.003~0.006	0.006~0.015	0.015~0.03	More than 0.03
Water resources efficiency (%)	72.6	53.3	65.6	Under 60	60~70	70~80	80~90	More than 90
Specific inflow (%)	162.6	286.1	207.5	More than 200	170~200	130~170	100~130	Under 100
Specific water supply (%)	96.3	127.6	107.7	Under 80	80~95	95~110	110~130	More than 130

어 적용하기 편리한 장점이 있지만, 각 개별지표의 물리적 의미가 선명하게 드러나지 않아 등급에 대한 물리적 설명이 어려워지는 단점이 있다. 대표적인 예로 충주댐을 들 수 있다, 충주댐은 국내 최대규모 댐임에도 불구하고 기간신뢰도, 특히 일단위 분석 결과의 반순단위 평가 신뢰도는 67.6%에 머무르고 있어 이수안전도가 불안한 것으로 평가되고 있다(Table 5). 그러나 실제로 보조지표들 값을 보면 비 유입량이 185.2%로서 전체 다목적댐 평균 162.6%를 크게 상회하고 있어 충주댐의 용수공급 능력이 우려할 만한 수준이라고 보기는 어렵다. 즉, 충주댐은 수도권에서의 용수 수요가 많은 대신 넓은 유역면적으로부터 충분한 유량이 유입되고 있다. 신뢰도 등급과 통합보조지표 등급의 편차가 큰 댐의 경우 높은 신뢰도 등급이 어도 낮은 통합보조지표로 인해 댐 이수안전도 등급이 과소평가 될 가능성이 단점으로 지적될 수 있다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 이수안전도 지표 산정

본 연구에서는 기본계획공급량을 기준으로 기간신뢰도, 양적신뢰도를 평가하였다. 발생신뢰도와 기간신뢰도의 차이는 평가단위로서 발생신뢰도는 연단위 평가, 기간신뢰도는 일, 반순, 순, 월 평가로 계산된다. 따라서 Tables 5~8에 다양한 분석 단위별 5일 평가와 연단위 평가 결과를 정리하였다. 다목적댐과 용수댐은 다른 목적으로 설계되었기 때문에 신뢰도 평균과 표준편차 계산 시 분리하였다. 먼저 분석단위 별 기간신뢰도 평가의 결과이다(Tables 5 and 6). 일단위 분석-연단위 평가의 평균 기간신뢰도는 다목적댐 78.4%, 용수댐 76%, 전체 77.5%이고, 5일단위 분석-연단위 평가의 평균 기간신뢰도는 다목적댐 79.4%, 용수댐 76.3%, 전체 78.2%로 유사하게 나타났다. 이는 일단위 분석, 반순단위 분석 중 어느 것을 활용해도 문제가 없는 것으로 판단되나 실제 댐 운영 시 점검 등의 사유로 일단위 평균 유입량 값이 0 또는 -값이 존재하는 경우가 발생한다. 이로 인해 일단위는 불확실성이 내포되어 있으며 보정해주는 작업이 필요하다. 또한 Fig. 1에서와 같이 전체기간에 대하여 분석단위 5일 기준으로 평가 단위별 신뢰도를 확인한 결과, 다목적댐에서는 홍성댐, 임하댐, 대청댐, 용수댐에서는 구천댐, 대암댐 등 일부 댐에서 평가단위 5일과 1년의 기간신뢰도 차이가 25% 이상인 것으로 나타났다. 더불어 수자원장기종합계획 및 국가물관리기본계획, 하천유역수자원관리계획 물수지 분석 등 국가계획에서는 5일단위 분석을 준용하고 있다. 따라서 기존 국가계획 분석단위의 연계성을 토대로 분석단위에 대한 기준 마련이 필요하다. Tables 5~8의 결과를 보면 다목적댐에

대한 기간신뢰도 평가에서 연단위 평가의 경우 일단위 분석과 5일단위 분석은 각각 평균 78.4%와 79.4%로 1.0%의 차이를 보이며, 5일단위 평가의 경우 각각 평균 94.1%와 93.5%로 0.6%의 차이를 보인다. 용수댐에 대한 기간신뢰도 평가에서는 연단위 평가의 경우 일단위 분석과 5일단위 분석은 각각 평균 79.3%와 79.9%로 0.6%의 차이를 보이며, 5일단위 평가의 경우 각각 평균 96.6%와 96.2%로 0.4%의 차이를 보인다. 따라

**Table 5.** The durational reliability for the multipurpose dams by temporal interval unit for analysis (temporal interval unit for evaluation: 1 year)

Evaluation unit	1 year (Unit: %)			
	1 day	5 days	10 days	1 month
Soyang	100.0	100.0	100.0	100.0
Chungju	64.7	67.6	70.6	60.7
Hoengseong	45	45	55	45
Namgang	97.7	100	100	100
Hapcheon	71	71	74.2	71
Miryang	89.5	89.5	89.5	89.5
Andong	79.1	81.4	86	81.4
Imha	60.7	60.7	60.7	60.7
Daecheong	82.1	79.5	82.1	76.9
Yongdam	73.7	73.7	73.7	73.7
Seomjingang	93.3	93.3	93.3	88.9
Juam	86.2	89.7	86.2	89.7
Buan	87	87	91.3	87
Boryeong	68.2	72.7	72.7	72.7
Average	78.4	79.4	81.1	78.4
Standard Deviation	14.9	14.9	13.3	15.2

**Table 6.** The durational reliability for the water supply dams by temporal interval unit for analysis (temporal interval unit for evaluation: 1 year)

Evaluation unit	1 year (Unit: %)			
	1 day	5 days	10 days	1 month
Guangdong	100	100	100	100
Dalbang	100	100	100	100
Yeongcheon	90	92.5	92.5	92.5
Unmun	58.1	58.1	61.3	64.5
Daeam	76.9	76.9	76	76.9
Yeoncho	76.7	76.7	76.7	80
Gucheon	67.5	70	70	75
Sueo	65	65	65	65
Average	79.3	79.9	80.2	81.7
Standard Deviation	14.9	14.9	14.4	13.4

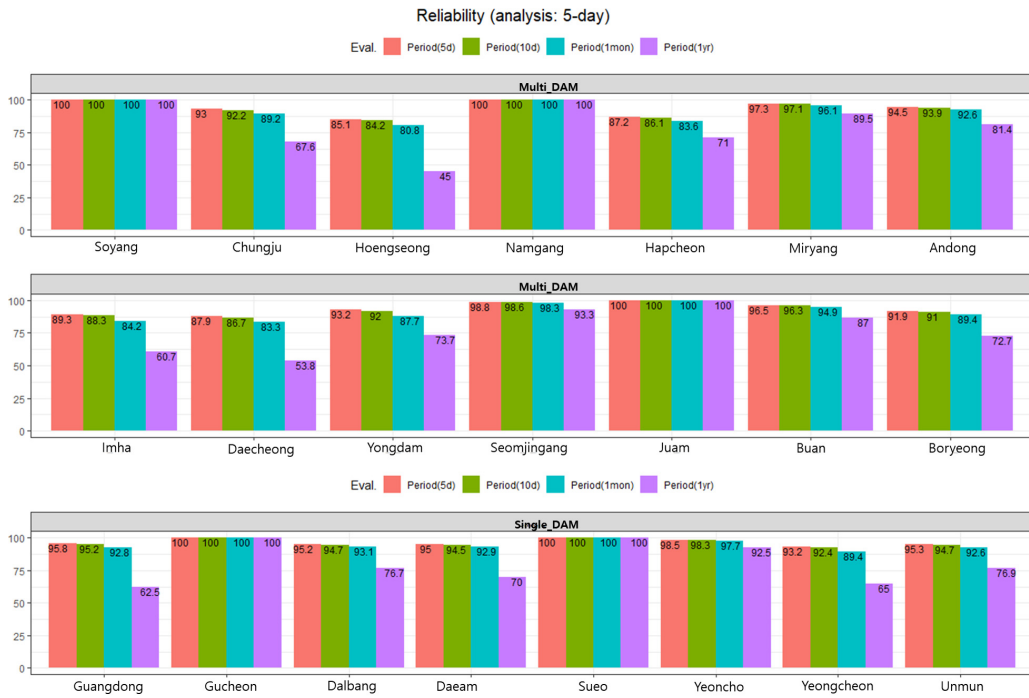


Fig. 1. The durational reliability index by temporal interval unit for evaluation

Table 7. The durational reliability for the multipurpose dams by temporal interval unit for analysis (temporal interval unit for evaluation: 5 days)

Analysis unit	5 days (Unit: %)			
	5 days	10 days	1 month	1 year
Soyang	100.0	100.0	100.0	100.0
Chungju	93.0	92.2	89.2	67.6
Hoengseong	85.1	84.2	80.8	45.0
Namgang	100.0	100.0	100.0	100.0
Hapcheon	87.2	86.1	83.6	71.0
Miryang	97.3	97.1	96.1	89.5
Andong	94.5	93.9	92.6	81.4
Imha	89.3	88.3	84.2	60.7
Daechong	92.4	91.1	89.3	71.8
Yongdam	93.2	92.0	87.7	73.7
Seomjingang	98.6	98.5	98.1	93.3
Juam	98.7	98.5	98.3	96.6
Buan	96.6	96.3	94.9	87.0
Boryeong	91.9	91.0	89.4	72.7
Average	94.13	93.47	91.73	79.31
Standard Deviation	4.54	4.93	6.13	15.54

Table 8. The durational reliability for the water supply dams by temporal interval unit for analysis (temporal interval unit for evaluation: 5 days)

Analysis unit	5 days (Unit: %)			
	5 days	10 days	1 month	1 year
Guangdong	100	100	100	100
Dalbang	100	100	100	100
Yeongcheon	98.5	98.3	97.7	92.5
Unmun	95.4	94.8	92.2	58.1
Daeam	95.3	94.7	92.6	76.9
Yeoncho	95.1	94.6	93.1	76.7
Gucheon	95	94.5	92.9	70
Sueo	93.2	92.4	89.4	65
Average	96.6	96.2	96.7	79.9
Standard Deviation	2.4	2.7	3.7	14.9

서 평가단위의 차이에 비하여 분석단위의 차이는 기간신뢰도 평가에 있어 유의미한 차이를 보이지 않는다.

다음은 다목적댐, 용수댐의 5일(반순)분석 단위-평가단위 별 기간신뢰도 결과이다(Tables 7 and 8). 5일 분석단위에 대해 5일, 10일, 월, 년단위 기간신뢰도 산정 결과 100%인 소양강댐, 남강댐, 구천댐, 수어댐을 제외하고 5일, 10일, 월단위 평가에 비해 연단위 평가 신뢰도에서 감소하는 형태를 보이며 특히 충주댐(67.6%), 황성댐(45%), 임하댐(60.7%), 광동댐(58.1%), 영천댐(65%) 등이 비현실적인 저평가를 보였다. 이는 연단위 평가시 1년(365일) 중 하루만 부족해도 해당연도

1년을 부족하다고 보기 때문에 사료되며 비현실적인 저평가를 보인 댐들은 1년 중 특정 기간(겨울철 결빙 등)의 부족의 주기적 패턴으로 인한 것으로 판단된다. 대체로 월단위-10일 단위-5일단위까지 평가 기간에 따라 비례적인 신뢰도 증가 패턴을 형성하고 있고, 일단위는 앞서 말했듯이 일 평균유입량의 불확실성을 내포하고 있어 추가적으로 보정작업이 필요하다. 현재 추진 중인 하천유역수자원관리계획(수립중)에서 권역별 이수안전도 분석을 5일단위 분석과 5일단위 평가를 기준으로 하고 있으며, 5일단위 분석-5일단위 평가의 조합은 국가물관리 계획(\*21), 수자원 장기 종합계획(\*16) 등 국가계획의 물수지분석 작업과의 일관성 고려 측면에서 의미 있는 설정으로 판단되지만 댐 설계 시 용수공급 능력과의 비교를 위해 용수공급 능력 검토 시에는 5일 단위 평가를 실시하되, 연간 단위를 참고하여 검토할 필요가 있다고 판단된다.

최근 수문 변화에 따른 이수안전도 변화 추이를 살펴보기 위하여 분석단위 5일, 평가단위 5일 기준으로 각 댐의 준공 후 자료계측 시작 연도부터 2021년까지 전체기간과 최근 20년 기간에 대하여 기간신뢰도를 분석하였다(Fig. 2). Fig. 2 그래프 중 적색은 전체기간, 청색은 최근 20년 기간에 대한 기간신뢰도이며 첫 번째 그래프는 다목적댐, 두 번째 그래프는 용수댐에 대한 결과이다. 다목적댐의 경우, 전체기간에 대한 기간신뢰도 평균은 93.85%, 최근 20년 기간신뢰도 평균은 93.61%이며, 용수댐의 경우, 전체기간에 대한 기간신뢰도 평균은 96.63%, 최근 20년 기간신뢰도 평균은 97.06%이다. 분석 기간 변화에 따른 기간신뢰도 평가 결과의 큰 차이는 없

으나, 최근 20년 기간 분석 시 기간신뢰도가 전체 기간신뢰도에 비해 일부 낮아진 댐들(충주댐: -2.4%, 안동댐: -3.1%, 대청댐: -2.1%, 부안댐: -0.5%, 보령댐: -0.9%)이 있는 반면, 용수댐은 전체 기간신뢰도보다 최근 20년 기간신뢰도가 일부 높아진 결과(달방댐: 2%, 대암댐: 0.1%, 연초댐: 1.1%, 운문댐: 0.8%)를 보인다. 댐 유형에 따라 분석 기간에 대한 기간신뢰도의 변화양상이 작지만 차이를 보이고 있으나 유의미한 차이는 아닌 것으로 판단되며, 또한 이는 수문 변화 및 용수 사용패턴의 변화 등 여러 요인이 복합적으로 작용한 결과이나 현재로서는 이를 명확히 구분하여 요인별 영향을 설명하기는 어렵다.

회복도는 앞서 언급하였듯이 용수공급을 할 수 없는 상황이 발생했을 때 실패한 상황으로부터 얼마나 빨리 회복되는지 판단하는 지표이다. 각 댐이 동일한 신뢰도를 갖더라도 실패가 지속되거나 회복 속도가 느린지의 여부를 판단하기 위하여 사용하며 본 연구에서는 회복도는 Hashimoto et al. (1982)와 Moy et al. (1986)가 제안한 두 가지의 회복도를 계산하였다. 먼저 Moy et al. (1986)이 제안한 회복도는 용수공급 실패한 상황일 때, 각 댐에서의 전체사상에 대한 최대 실패 일수의 역수로 산정된다. 하지만 최대 일수로만 계산되기 때문에 과소 평가 될 수 있다. 예를 들어 섬진강 댐의 경우 다목적댐 회복도 산정 결과표를 보면 회복도가 가장 낮은 것으로 나타나는데, 이는 평가기간 37개년 동안 4번의 실패가 발생(기간신뢰도 98.6%)하였고, 실패한 4개 사상 중 1개 사상이 186일의 장기 간 실패가 지속되었기 때문이다. 기간신뢰도가 100%인 소양

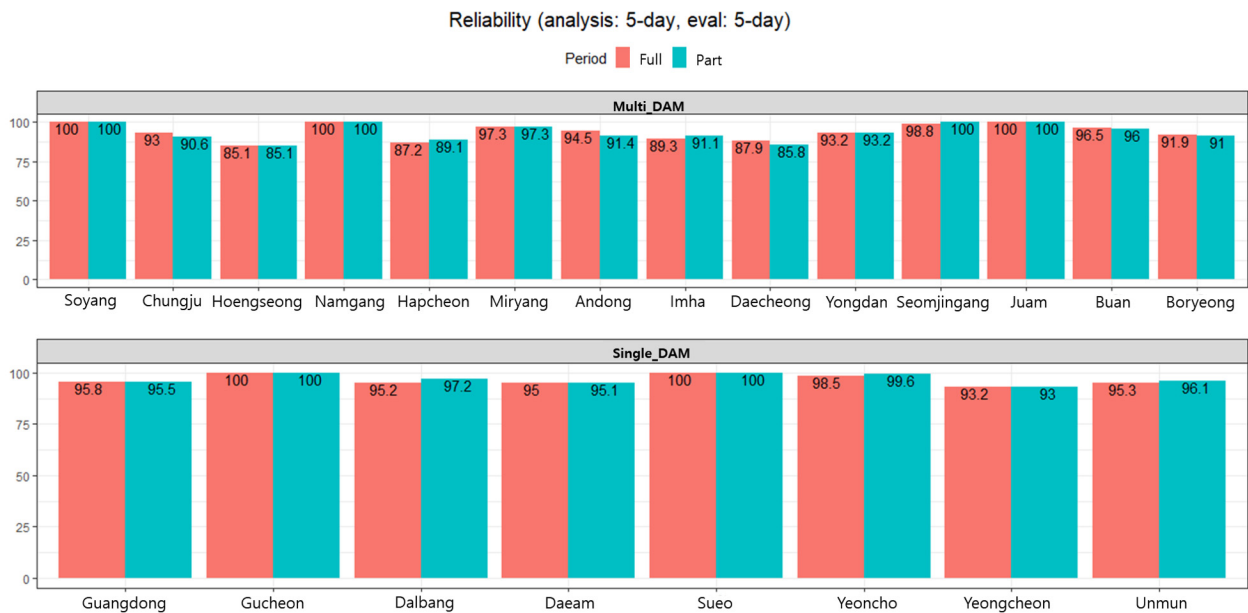


Fig. 2. Comparison of durational reliability between the entire period and the recent 20-year period



강댐, 남강댐을 제외하고 가장 실패 사상이 적지만 최대 실패 일수가 가장 크기 때문에 회복도는 가장 낮게 나타났다. 다른 댐도 마찬가지로 평가기간 중 실패 사상이 적고, 사상별 실패 일수가 작더라도 최대 실패기간으로 표현되기 때문에 회복도가 과소평가 될 수 있다. 뿐만 아니라 최대실패 일수는 극한가뭄 사상의 영향을 크게 받은 결과로 나타나게 되므로 댐의 평균적 이수안전도를 평가하기에는 대표성이 떨어진다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 사상별 평균 실패일수의 역수로 표현되는 Hashimoto *et al.* (1982)가 제안한 회복도가 댐의 회복속도여부를 판단하기에 적합하다고 사료되어 Hashimoto *et al.* (1982)가 제안한 회복도를 사용하였다. 다목적댐, 용수댐 별 회복도 산정 결과는 Tables 9 and 10에 제시하였다.

본 연구에서 이수안전도를 평가하기 위한 주 지표인 기간 신뢰도, 보조지표인 회복도, 수자원이용률, 비 유입량, 비 공급량, 무차원취약도와 추가적으로 양적신뢰도, 생·공용수 비중, 농업용수 비중, 유지용수 비중을 산정한 결과를 정리하면 다음과 같다(Tables 11 and 12).

**4.2 통합지표 등급화**

댐이 건설되어 운영단계에 들어가면 주기적인 유지보수에 대한 수요가 발생하기 시작한다. 댐 유역에서의 강우량 및 유입량의 변화, 그리고 주변 지역의 산업구조변화, 대규모 개발구역의 조성 및 인구변화 등으로 인한 용수수요 및 공급 여건의 변화를 주기적으로 평가하여 유지보수에 반영해주어야 한

**Table 9.** Moy's and Hashimoto's resilience for multipurpose dams

Section	Moy <i>et al.</i> (1986)		Hashimoto <i>et al.</i> (1982)	
	Resiliency	Maximum failure number of days	Resiliency	Maximum failure number of days
Soyang	-	-	-	-
Chungju	-	-	-	-
Hoengseong	0.005	183 days	0.09	62 days
Namgang	0.013	76 days	0.32	13.2 days
Hapcheon	0.011	87 days	0.18	29.2 days
Miryang	0.014	74 days	0.16	26.6 days
Andong	0.006	174 days	0.11	35.4 days
Imha	0.01	96 days	0.14	22.9 days
Daecheong	0.009	116 days	0.21	27.3 days
Yongdam	0.008	123 days	0.11	34.6 days
Seomjingang	0.011	95 days	0.13	38.1 days
Juam	0.008	132 days	0.1	39 days
Buan	0.007	149 days	0.19	40 days
Boryeong	0.007	151 days	0.05	51.3 days
Average	0.009	121.3 days	0.15	35 days

**Table 10.** Moy's and Hashimoto's resilience for water supply dams

Section	Moy <i>et al.</i> (1986)		Hashimoto <i>et al.</i> (1982)	
	Resiliency	Maximum failure number of days	Resiliency	Maximum failure number of days
Guangdong	-	-	-	-
Dalbang	-	-	-	-
Yeongcheon	0.011	87 days	0.16	21 days
Unmun	0.02	49 days	0.08	23 days
Daeam	0.005	192 days	0.22	38.7 days
Yeoncho	0.006	171 days	0.12	33.9 days
Gucheon	0.009	113 days	0.17	19 days
Sueo	0.009	117 days	0.1	21 days
Average	0.01	121.5 days	0.14	26.1 days

**Table 11.** Components of integrated water supply performance indices for multi-purpose dams

Section	Durational reliability (%)	Quantitative Reliability (%)	Resiliency	Vulnerability	Water resource efficiency (%)	Specific inflow (%)	Specific water supply (%)	Ratio of municipal water use (%)	Ratio of Agricultural water use (%)	Ratio of in-stream water use (%)
Soyang	100	100	-	-	67.5	75	50.63	81.7	0.89	17.41
Namgang	100	100	-	-	26.5	698.65	185.14	39.1	39.56	21.34
Seomjingang	99	99	0.09	0.044	77.9	119.78	93.31	14.9	85.06	0.04
Juam	98.7	99.2	0.32	0.029	40.6	145.6	59.12	86.5	0	13.5
Miryang	97.3	98.1	0.18	0.032	79.8	124.26	99.16	69.6	17.95	12.45
Buan	96.6	97.5	0.16	0.016	74.2	94.04	69.78	81.2	18.8	0
Andong	94.5	96.1	0.11	0.006	93.5	79.35	74.19	48.6	32.4	19
Yongdam	93.2	95.5	0.14	0.002	84.5	94.41	79.78	75.8	0	24.2
Chungju	93	95.4	0.21	0.005	66.4	185.23	122.99	80.8	9.32	9.88
Daecheong	92.4	94.8	0.11	0.007	63.7	173.77	110.69	78.8	21.16	0.04
Boryeong	91.9	94.2	0.13	0.006	82.8	110.07	91.13	85	4.41	10.59
Imha	89	91.8	0.1	0.004	91.5	108.65	99.42	61.5	2.2	36.3
Hapcheon	87.2	90.5	0.19	0.003	92.5	81.99	75.84	86.8	5.34	7.86
Hoengseong	85.1	87.8	0.05	0.005	74.3	185.08	137.51	60.5	13.22	26.28
Average	94.14	95.71	0.15	0.013	72.55	162.56	96.34	67.91	17.88	14.21

**Table 12.** Components of integrated water supply performance indices for water supply dams

Section	Durational Reliability (%)	Quantitative Reliability (%)	Resiliency	Vulnerability	Water resource use efficiency (%)	Specific inflow (%)	Specific water supply (%)	Ratio of municipal water use (%)	Ratio of Agricultural water use (%)	Ratio of in-stream water use (%)
Gucheon	100	100	-	-	53.00	140.51	74.47	97.00	2.67	0.33
Sueo	100	100	-	-	47.00	183.88	86.43	92.20	7.74	0.06
Yeoncho	98.50	98.9	0.16	0.023	58.40	198.56	115.96	93.30	6.35	0.35
Guangdong	95.40	97	0.08	0.007	31.00	681.18	211.17	96.90	3.03	0.07
Unmun	95.30	96.7	0.22	0.008	74.60	134.65	100.45	84.50	1.72	13.78
Dalbang	95.10	96.2	0.12	0.007	57.90	315.36	182.59	90.00	2.05	7.95
Daeam	95.00	96.6	0.17	0.006	28.90	492.75	142.40	100.00	0.00	0.00
Yeongcheon	93.20	94.9	0.10	0.005	75.60	142.20	107.50	74.50	11.56	13.94
Average	96.56	96.59	0.14	0.009	53.30	286.14	127.62	91.05	4.39	4.56

다. 이러한 작업은 댐의 건설 시기 및 유지보수 주기, 유지보수의 시급성 등을 반영하여 순차적으로 이루어지게 되며, 이에 대한 판단을 위해서 댐의 이수안전도를 주기적으로 재평가하여 댐 건설 이후 운영단계에서 댐을 계획할 당시에 목표했던 기능을 유지하고 있는지, 또는 이수안전도 목표 수준을 수정할 필요가 있는지, 댐의 기능 자체를 전환할 필요가 있는지 등을 판단해야 한다. 본고에서 제시한 주지표와 보조지표는 각기 고유의 물리적 의미를 갖고 있지만 종합적인 판단과 우선순위의 결정을 위해서는 표준화된 스코어로 변환하여 등급화

하는 과정이 필요하다.

보조지표인 회복도, 수자원이용률, 비 유입량, 비 공급량, 무차원취약도를 5단계 구간으로 설정하여 점수를 산정한 결과와 신뢰도와 통합보조지표를 5등급 구간으로 등급화한 결과가 Tables 13~15에 정리되어 있다.

다목적댐의 등급화 결과가 Table 14에 정리되어 있는데, 기간신뢰도와 양적신뢰도는 비슷한 양상으로 등급이 부여되어 있으나 일부 댐의 경우 신뢰도와 보조지표 간 편차가 크게 나타나는 경우가 있어 주목된다. 예를 들어 섬진강댐의 경

**Table 13.** Converted scores of the auxiliary indices for multi-purpose and water supply dams

	Dam	Resiliency score [20]	Vulnerability score [20]	Water resource use efficiency score (%) [20]	Specific inflow score [20]	Specific water supply score [20]	Total score [100]
Multi-purpose Dams	Namgang	20	20	20	20	4	84
	Soyang	20	20	16	4	20	80
	Juam	20	8	20	12	20	80
	Chungju	20	16	16	16	8	76
	Yongdam	12	20	8	4	20	64
	Daecheong	8	12	16	16	8	60
	Hapcheon	16	16	4	4	20	60
	Buan	12	8	12	4	20	56
	Boryeong	12	12	8	8	16	56
	Miryang	16	4	12	8	12	52
	Hoengseong	4	16	12	16	4	52
	Andong	8	12	4	4	20	48
	Imha	8	16	4	8	12	48
	Seomjingang	4	4	12	8	16	44
	Average of multi-purpose dams	12.9	13.1	11.7	9.4	14.3	61.4
Water Supply Dams	Gucheon	20	20	20	12	20	92
	Sueo	20	20	20	16	16	92
	Daeam	16	12	20	20	4	72
	Yeoncho	20	12	12	12	12	68
	Unmun	12	8	20	16	8	64
	Dalbang	8	12	20	20	4	64
	Guangdong	4	12	20	20	4	60
	Yeongcheon	8	16	12	12	12	60
		Average of water dams	13.5	14	18	16	10
Total	Average	13.1	13.5	14.0	11.8	12.7	65.1

우 기간신뢰도와 양적신뢰도는 각각 99.0%로 1등급이 부여되어 있으나, 통합보조지표는 44점으로 최하인 5등급이 부여되어 있다. 이는 현재의 공급능력으로는 용수 수요를 제공하는 데 문제가 없으나, 연간 유입량 대비 용수공급량(수자원 이용률), 저수용량 대비 연평균 유입량(비 유입량), 저수용량 대비 기본계획공급량(비 공급량) 등의 측면에서 매우 취약함을 보여주는 결과이다. 즉, 장래에 주변 지역의 여건 변화로 유출량이 감소하거나 용수 수요가 증가하게 되면 물수지에 차질이 생길 가능성이 매우 크다는 것을 의미한다. 반대로 충주댐의 경우는 기간신뢰도와 양적신뢰도가 각각 93.0%와 95.4%로 4등급과 3등급이 부여되어 있어 국내 최대 규모의 다목적댐으로서 전체 다목적댐 중 평균 이하의 성적을 보인다. 반면 통합보조지표는 76점으로서 다목적댐 중에서는 소

양강댐과 남강댐에 이은 높은 등급을 보인다. 충주댐은 수도권의 높은 용수 수요로 인하여 비 공급량이 123%로 높은 편에 속하지만 유역 규모상 비 유입량이 185%로 충분한 유입량이 들어오기 때문에 신뢰도 지표보다 실제 안정성은 높다고 보아야 한다. 하지만 '01-'02년, '15-'17년에 장기적인 용수공급 실패가 발생했고 기상청에서 제공하는 수문기상가뭄정보시스템의 과거 가뭄 사례를 참고하면 '01년도에는 전국적으로, '15-'16년에는 충청도 지역에, '17년에는 전국적으로 가뭄이 발생한 것이 원인으로 신뢰도에서 저조한 결과를 보인다. 충주댐과 함께 한강수계의 수도권 이·치수를 담당하고 있는 소양강댐의 경우 기간신뢰도 100%, 통합보조지표 2등급으로 다목적댐 중 가장 높은 등급인 1등급이며, 보조지표 중 비 공급량은 50.6%, 비 유입량은 75%로 다른 댐에 비해

**Table 14.** Rating results for the multipurpose dams

Section	Durational Reliability (%)	Quantitative Reliability (%)	Integrated auxiliary indicator
Soyang	100.00 (Grade 1)	100.00 (Grade 1)	80 (Grade 2)
Namgang	100.00 (Grade 1)	100.00 (Grade 1)	84 (Grade 2)
Seomjingang	99.00 (Grade 1)	99.00 (Grade 1)	44 (Grade 5)
Juam	98.70 (Grade 2)	99.20 (Grade 1)	76 (Grade 3)
Miryang	97.30 (Grade 2)	98.10 (Grade 2)	52 (Grade 4)
Buan	96.60 (Grade 3)	97.50 (Grade 2)	56 (Grade 4)
Andong	94.50 (Grade 4)	96.10 (Grade 3)	48 (Grade 5)
Yongdam	93.20 (Grade 4)	95.50 (Grade 3)	64 (Grade 4)
Chungju	93.00 (Grade 4)	95.40 (Grade 3)	76 (Grade 3)
Daecheong	92.40 (Grade 4)	94.80 (Grade 4)	60 (Grade 4)
Boryeong	91.90 (Grade 4)	94.20 (Grade 4)	56 (Grade 4)
Imha	89.00 (Grade 4)	91.80 (Grade 4)	48 (Grade 5)
Hapcheon	87.20 (Grade 5)	90.50 (Grade 4)	60 (Grade 4)
Hoengseong	85.10 (Grade 5)	87.80 (Grade 5)	52 (Grade 4)
Average	94.14 (Grade 3.2)	95.71 (Grade 2.7)	61.14 (Grade 3.8)

**Table 15.** Rating results for the water supply dams

Section	Durational Reliability (%)	Quantitative Reliability (%)	Integrated auxiliary indicator
Gucheon	100.00 (Grade 1)	100.00 (Grade 1)	92 (Grade 1)
Sueo	100.00 (Grade 1)	100.00 (Grade 1)	92 (Grade 1)
Yeoncho	98.50 (Grade 2)	98.90 (Grade 2)	64 (Grade 4)
Guangdong	95.40 (Grade 3)	97.00 (Grade 2)	60 (Grade 4)
Unmun	95.30 (Grade 3)	96.70 (Grade 3)	68 (Grade 3)
Dalbang	95.10 (Grade 3)	96.20 (Grade 3)	64 (Grade 4)
Daeam	95.00 (Grade 3)	96.60 (Grade 3)	72 (Grade 3)
Yeongcheon	93.32 (Grade 4)	94.90 (Grade 4)	60 (Grade 4)
Average	95.16 (Grade 2.5)	97.54 (Grade 2.4)	71.5 (Grade 3.0)

비 공급량과 비 유입량이 낮은 편이지만, 이는 유입량이나 공급량에 비하여 저류용량이 충분함을 보여주는 결과이기 때문에 이것이 100%라는 신뢰도로 나타난 것이다. 남강댐의 경우 비 공급량이 185%로 많은 양의 공급이 이루어짐에도 불구하고 기간신뢰도가 100%로 유지되는 이유는 비 유입량이 700% 가까이 됨으로써 충분한 유입량이 들어오기 때문에 수요량보다 공급량이 매우 커 유지될 수 있다고 판단된다. 남강댐은 저수지 규모에 비해 유역면적이 커서 치수에는 불리한 조건이지만 이수 측면에서는 높은 수준의 신뢰도를 유지할 수 있는 유리한 조건이 될 수 있다. 주암댐의 경우 비 공급량이 59%로 최저 수준이고, 비 유입량은 145%로 수요-공급에 있어 유입량이 많고 이용률이 낮아 높은 신뢰도와 회복도를 유지하는 것으로 판단된다. 합천댐의 경우 충분한 유입량이 들

어오지만 수자원이용률은 92.5%로 높아 낮은 기간신뢰도의 결과가 나타난 것으로 사료된다. 마지막으로 황성댐은 다목적댐 중 가장 낮은 등급인 5등급인 결과가 나타났다. 황성댐의 경우 설계 시 연평균 유입량(1억 6300만 톤)의 규모이며 댐 건설 이후 2001~2018년 기간 연 평균 유입량(1억 6,500만 톤)이 다소 늘었지만 2014~2016년 3년 연속 유입량이 절반 이하인 4,500만 톤에 불과할 정도로 평가 기간에 최소수준의 유입량이 유입된 것이 원인으로 판단된다.

용수댐은 전반적으로 생·공용수 비중이 높지만 수자원이용률은 낮아 높은 신뢰도를 형성하는 요인으로 분석된다. 또한 용수댐 중 구천댐과 수어댐의 기간신뢰도가 100%로 유지되는 것을 미루어 보아 비 유입량이 높고 비 공급량이 낮은 요인으로 분석된다.

## 5. 결론

댐 용수 부족에 대한 정확한 평가와 대처는 댐 이수안전도에 대한 평가 기준 정립이 선행되어야 한다. 국내 실무에서 댐 이수안전도 평가에 주로 사용되었던 신뢰도 방식의 평가는 주로 연 단위 분석법이었다. 일반적으로 신뢰도 지표 중 기간신뢰도의 평가는 평가단위를 일, 반순, 순, 월, 년 단위로 증가시킬 경우 실패일수가 실제보다 과장되어 나타나기 쉬워 신뢰도 수치는 낮아지는 경향이 있다. 실제 실패일수가 같음에도 평가단위의 차이로 인하여 신뢰도가 다르게 나타나는 것이다. 국내 실무에서 댐 계획 수립이나 설계 시 이수안전도를 평가하기 위해 연 단위 분석법을 사용해왔으나 평가단위를 일 단위 수준으로 현실화해야 한다는 지적은 계속되어 왔으며, 동시에 댐 준공 이후 운영기간 중 이수안전도의 평가 기준에 대한 기준 정립의 필요성도 지속해서 제기되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 이수안전도 평가를 위한 지표의 평가 단위를 분석하여 기간신뢰도의 단위를 5일분석단위-5일평가단위로 결정하였고, 용수공급 실패 기간과 부족량을 동시에 평가하기 위하여 회복도, 무차원 취약도 외에 수자원이용률, 비 유입량, 비 공급량 등의 보조지표를 제시하였다.

신뢰도 방식의 지표 중 하나인 회복도는 실패사상으로부터 얼마나 빠르게 정상상태를 회복하는지를 평가하는 지표이며, 취약도는 정상적인 용수공급이 불가능할 때 부족한 양에 대한 심도를 의미하는 지표로 정의되었지만 실제로 실무에서는 회복도와 취약도를 제외하고 신뢰도, 특히 기간신뢰도만으로 이수안전도를 평가하고 있다. 이는 해당 지표의 속성상 회복도와 취약도가 양적신뢰도와 물리적으로 동일한 속성을 지니기 때문이다. 기간신뢰도만으로 이수안전도를 평가한다는 것은 실제로 용수공급 실패가 발생했을 때의 얼마만큼 지속되었는지 나타낼 수는 있지만, 지속된 기간중 발생한 부족량을 평가하기 어려워지는 결과를 초래한다. 회복도는 Hashimoto et al. (1982)와 Moy et al. (1986)가 제시한 두 가지의 회복도가 혼용되어 왔는데, 본 논문에서는 두 지표의 특성을 비교하여 향후 이용자에게 지침이 될 수 있는 단서를 제공하였다. 기간신뢰도의 주지표와 함께 댐 운영 여건과 유역의 특성을 반영하기 위한 수자원이용률, 비 유입량, 비 공급량, 무차원 취약도를 활용한 통합보조지표를 이수안전도 평가지표로 활용하여 다목적댐과 용수댐의 이수안전도를 종합적으로 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다. 향후 댐 운영 목적에서 이수안전도를 주기적으로 평가하고 평가 결과에 따른 유지 보수를 위한 댐별 우선순위 판단을 위해 이수안전도의 등급화 방안을 함께 제시하였다. 그 결과, 현재 운영되고 있는 댐의 이수안전도 현

황과 댐의 유입량과 저류 능력 등을 종합적으로 고려한 이수능력을 객관적으로 판단할 수 있었다.

평가 결과 섬진강댐의 경우 기간신뢰도는 99.0%로 1등급이었으나, 통합보조지표는 44점으로 최하인 5등급으로 나타났다. 기간신뢰도 기준의 현재 이수안전도는 높은 등급을 유지하고 있지만, 장래의 여건변화로 인해 유출량과 용수수요의 변동이 발생하게 되면 통합보조지표 관점에서는 상당한 리스크가 있다는 것을 의미하므로 구조적/비구조적 적절한 대비가 필요하다는 시사점을 의미한다. 충주댐의 경우는 대조적인 사례로서, 기간신뢰도가 93.0%로 국내 최대 규모의 다목적댐의 위상과는 다르게 전체 다목적댐 중 평균 이하의 성적을 보이고 있는 반면 통합보조지표는 76점으로서 다목적댐 중에서는 소양강댐과 남강댐에 이은 높은 등급을 보인다. 하지만 그럼에도 불구하고 유역 규모상 비 유입량이 185%로써 충분한 유입량이 들어오기 때문에 실제 안정성은 높다고 보아야 한다. 소양강댐의 경우 기간신뢰도 100%, 통합보조지표 2등급으로 전체 다목적댐 중 가장 안정적인 이수능력을 보여주고 있다. 남강댐의 경우 비 공급량이 185%로 많은 양의 공급이 이루어짐에도 불구하고 기간신뢰도가 100%로 유지되는 이유는 비 유입량이 700% 가까이 됨으로써 충분한 유입량이 들어오기 때문에 수요량보다 공급량이 매우 커서, 치수에 불리한 조건임에도 불구하고 이수적으로 매우 안정적인 상태를 유지할 수 있다고 판단된다.

종합적으로 보자면, 특정 댐의 주 지표 등급이 높아도 통합보조지표 등급이 낮으면, 주 지표인 기간신뢰도의 등급이 높은 것이므로 이수안전도 측면에서는 댐 운영에 차질이 없는 것으로 보이지만 통합보조지표를 참고하면 댐 유역 상황이나 용수수요, 공급 여건 등이 변할 경우 장래 이수 측면에서 취약할 수 있다고 판단되었고, 이러한 경우는 장래에 발생할 수 있는 취약한 문제들을 미리 파악하고 주기적으로 용수수요와 공급의 변화를 평가하여 이에 맞는 구조적/비구조적 조치를 통해 이수안전도 등급을 유지 또는 향상시키려는 노력이 필요하다. 반대로 주지표 등급이 낮고 통합보조지표 등급이 높은 경우 현재 댐 운영 유지에는 차질이 없어 통합보조지표 등급은 상위권이지만, 평가기간동안 극심한 가뭄의 발생 등으로 인하여 일시적으로 용수공급의 균형이 깨지는 상황이 발생하나, 유입량의 규모 및 유역과 저수지의 상대적 규모를 고려했을 때 용수공급균형의 회복이 쉽게 이루어질 수 있는 사례로 볼 수 있으며, 이후 이러한 용수수급불균형이 일시적 현상인지 혹은 기후변화나 용수수요증가로 인하여 지속적으로 이어질지를 예측하여 지속가능한 댐관리계획이 필요하다는 신호로 받아들일 수 있다.

이수안전도는 댐 건설 당시 수계, 유역 현황, 시대적 여건 등에 따라 다르게 설정되어 있어 표준화된 기준이 없고, 댐 운영 측면에서도 마찬가지로 지역별 강수량, 유입량의 편차와 수요-공급 여건이 다르기 때문에 전체 댐에 적용되는 방안보다는 각 댐의 유역의 갈수조건과 장래 수요를 고려한 이수안전도를 객관적으로 평가하여 운영상황을 파악하고 사전에 대비할 수 있는 기준이 필요하다고 판단된다. 다만, 다목적댐에 비해 용수댐의 주지표등급이 더 높은 결과를 미루어 보아 단일목적으로 설계된 용수댐은 생·공용수의 비중이 높고 댐의 공급량에 여유가 있기 때문에 이수안전도가 상대적으로 높게 산정되는 경향으로 나타난다.

이수안전도 평가가 개별 댐 단위가 아닌 유역 단위로 이루어지고, 이를 운영단계에서의 평가로 발전시키기 위해서는 계획량이 아닌 실제 공급량에 대한 평가가 이루어져야 하고, 농업용수 사용에 대한 정확한 계량이 이루어져야 하며, 댐의 공급능력이 단순한 저류용량이 아닌 유역의 규모와 유입량, 운영 기간에 퇴사 등에 따른 저류 능력의 변화 등에 대한 평가가 종합적으로 이루어져야 한다. 또한 유역에서의 물 공급은 다목적댐이나 용수댐뿐 아니라 하천에서의 직접 취수도 이루어지고 있기 때문에 하천 취수에 대한 이수안전도까지 포함해서 종합적으로 이루어져야 할 것이다. 본 연구에서는 댐 연계 운영과 상류댐 등에 의한 영향은 고려하지 않고 개별댐의 이수안전도만 평가하였다. 개별댐 이수안전도의 기준이 마련 되면 상류댐 등에 의한 영향과 연계 운영을 고려한 이수안전도의 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 2021년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021K1A3A1A20003375).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Cha, S.H., and Park, K.B. (2004). "A study on estimate of evaluation indices of water supply capacity for multipurpose dam." *Journal of the Environmental Sciences*, KENSS, Vol. 13, No. 3, pp. 197-204.
- Choi, S.J., Lee, D.R., and Moon, J.W. (2014). "Comparison of water supply reliability by dam operation methods." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 523-536.
- Choi, Y.J., Lee, E.K., Ji, J.W., and Yi, J.E. (2020). "Water yield evaluation of a reservoir system based on a deficit supply in the Han River basin." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 40, No. 5, pp. 477-484.
- 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.
- Jain, S.K., and Bhunya, P.K. (2008). "Reliability, resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir/Confiance, résilience et vulnérabilité d'un barrage multi-objectifs." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 53, No. 2, pp. 434-447.
- K-water (2014). *A study on improvement of water supply evaluation method through standardization of drought water frequency and development of water scarcity indicators*.
- K-water (2019). *Efficient use of existing water resources (Geumgang water system, Yeongseom water system multi-purpose dam, water dam)*.
- 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*, Vol. 45, No. 4, pp. 361-371.
- Lee, G.M., and Yi, J.E. (2014). "Analysis of problems of water supply capacity determination in water resources systems" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 4, pp. 331-342.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT), K-water, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (1999). *Water resource planning optimization study (III): Water supply safety evaluation and water supply and demand planning system development*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *Dam design criteria*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) and K-water (2010). *Existing dam reevaluation and optimal capacity allocation basic plan report*.
- 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.
- Zhang, C., Xu, B., Li, Y., and Fu, G. (2017). "Exploring the relationships among reliability, resilience, and vulnerability of water supply using many-objective analysis." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 143, No. 8, 04017044.