



## 물수지 기반 농업용 저수지 내한능력 및 이수안전도 평가

### Evaluation of Water Supply Reliability in Agricultural Reservoirs Using Water Balance Analysis

양미혜<sup>a</sup> · 남원호<sup>b,†</sup> · 신지현<sup>c</sup> · 윤동현<sup>d</sup> · 양희충<sup>e</sup>

Yang, Mi-Hye · Nam, Won-Ho · Shin, Ji-Hyeon · Yoon, Dong-Hyun · Yang, Hee-Chung

#### ABSTRACT

Most agricultural reservoirs were built between the 1940s and 1970s. Therefore, it is necessary to evaluate the current water supply safety, considering changes in water capacity, the water management, and environment in relation to the passage of time.. The design frequency of drought, the number of years a reservoir needs to be able to withstand a drought phenomenon, for agricultural water resources in Korea is the 10-year drought. As the water supply system and water supply patterns change, it is necessary to establish a concept of water supply reliability, which refers to the stability of water supply. This study evaluated the water supply reliability of agricultural reservoirs based on the designed frequency. The previously designed frequency and water balance analysis were used to calculate and analyze reservoir storage capacity, water supply turnover, water supply amount, water supply potential, water utilization safety, and water supply reliability. As a result, Yongmyeon Reservoir was found to be stable in terms of water supply reliability, whereas Seongho and Yongpung Reservoirs were found to be unstable using all methods. In particular, when converting the water utilization safety and the water supply reliability to the frequency of drought, Seongho and Yongpung Reservoir were in the lowest class, with a frequency of drought less than four years. Thus, we recommend that the consideration of water supply reliability be included in the preparation of adaptive measures and water supply strategies as changes in environmental conditions continue to develop.

**Keywords:** Agricultural reservoir; watershed; water supply reliability; water balance analysis; frequency of drought

#### 1. 서론

2022년 농업생산기반장비통계연보에 따르면 농업용 저수지는 전체 수리답 면적 중 63.7%에 농업용수를 공급하고 있고, 작물의 수확, 생산성 및 관개용수 외 공급량의 증가로 안

정적인 물 공급이 요구된다 (Kang et al., 2019; MAFRA, 2022). 안정적인 물공급 상황을 판단하고, 기존 댐 설계 시 용수의 공급과 수요에 따른 댐의 규모를 결정하기 위하여 이수안전도 지표를 사용한다 (Sung et al., 2022). 농업용 저수지는 현재 이수안전도 기준의 부재로 설계기준에 의한 물수지법에 따른 10년에 1회 정도의 갈수를 기준으로 하는 10년 한발빈도를 이수안전도 기준으로 대체 사용하고 있다 (Nam et al., 2018). 국내 농업용 저수지의 약 86%가 1940-1970년대에 축조되어 50년 이상 경과하였으며, 이 중 공사관리 저수지의 약 80%는 10년 한발빈도로 설계되었고, 시군관리 저수지의 약 63%는 평년 (약 2.3년) 한발빈도로 설계되었다 (MAFRA, 1998; Nam et al., 2018). 설계한발빈도 10년 미만의 소규모 농업용 저수지는 약한 가뭄 발생에도 원활한 용수공급이 어려울 수 있으며, 최근 발생하고 있는 가을부터 이듬해 영농기까지 정례적인 이상가뭄과 극한 강우사상 변화로 인한 유효우량 감소로 가뭄에 대한 재해위험도가 상대적으로 증가하고 있다 (Nam and Choi, 2014; Kwon et al., 2020). 따라서 기후변화에 따른 내한능력, 용수관리, 수요량, 설계한발빈도 등 다양한 요소의 변화로 현시점의 이수안전도 분석이 필요한 실정이다.

안정적인 농업용수 공급을 위해 농업용 저수지의 공급능력 및 취약성을 평가한 연구들은 다양하게 이루어져 왔다. Ahn

<sup>a</sup> Ph.D. Student, Department of Convergence of Information and Communication Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea

<sup>b</sup> Associate Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, Institute of Agricultural Environmental Science, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea

<sup>c</sup> Ph.D. Student, Department of Convergence of Information and Communication Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea

<sup>d</sup> Ph.D. Candidate, Department of Convergence of Information and Communication Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea

<sup>e</sup> Director, Water Resources Management Office, Water Resources Planning Department, Korea Rural Community Corporation (KRC), Naju, Republic of Korea

† Corresponding author

Tel.: +82-31-670-5137, Fax: +82-31-670-5139

E-mail: wonho.nam@hknu.ac.kr

Received: June 13, 2024

Revised: July 11, 2024

Accepted: July 22, 2024

et al. (2009)은 가뭄 발생 시 용수공급 가능정도를 평가하기 위해 물수지 네트워크 모형인 MODSIM (Modified SIMYLD)을 활용해 농업용수 용수계통을 구성하고 농업용수 공급 측면의 물수지 분석을 수행해 농업용수공급 가능성을 평가하였다. Nam et al. (2012b)은 유역 공급계획량과 수혜구역 수요에 측량 관계를 활용해 관계취약시기를 정의하여 농업용수 관계 취약성의 접근법을 제시하였다. Park et al. (2013a)은 농업용 저수지의 다목적 운영을 고려하여 다중용수공급 능력 평가 및 이수운영기준곡선을 도출하였다.

또한 한국농촌경제연구원에서는 농업가뭄 피해에 대해 피해액을 정량적으로 산출하기 위한 방법 중 하나로 농업용 저수지 설계한발빈도에 따른 쌀 생산성 변화를 분석하여, 설계한발빈도 비율이 높을수록 쌀 생산성이 높아지고 가뭄대응능력이 높아지는 것을 확인하였다 (KREI, 2016). Mun et al. (2020)은 농업용수 기반 가뭄취약지도 작성을 위해 기상, 농업용수, 가뭄대응능력을 고려하여 시군단위의 가뭄 취약 평가 방법론을 정립하여 제시하였다. Shin et al. (2020)은 SWMM (Storm Water Management Model) 기반 농업용수 분배 모의를 통해 농업용수 공급 취약성과 용수공급 효율을 분석하여 관계효율을 분석한 바 있다.

기존 연구들은 주로 단일 또는 제한된 평가 지표를 사용하여 분석되었으며, 이수안전도 기준이 부재한 현 시점에서 다양한 평가 지표를 활용한 종합적인 평가가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 농업용 저수지의 용수공급능력을 분석하기 위해 평균연회전율, 용수공급회전율, 농업용수잠재능, 단위공급량, 이수안전율, 공급신뢰율 지표들을 활용하였으며, K-HAS 기반 물수지 분석을 통해 농업용 저수지의 이수안전도를 재평가하고자 한다.

## II. 연구 재료 및 방법

### 1. 연구 대상 지역

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 경기도 이천에 위치한 공사관리 저수지인 용면, 성호, 용풍 저수지를 대상 저수지로 선정하였다. 경기도 이천 지역은 30년 (1991-2020년) 평균 강수량이 1,308 mm이며, Fig. 2과 같이 2009-2013년에는 평균 강수량을 초과하였으나 2014년 이후에는 평균 이하의 강수가 지속적으로 발생한 지역이다. 환경부 (2018)에서 발표한 2013~2018 장기가뭄 분석평가 보고서에 따르면, 경기도 이천 기상관측소의 가뭄 시작 시기는 2014년 3월로 50개월 동안 지속되어, 100년 빈도의 심각한 수준의 가뭄이 발생하였다 (KRC, 2020). 가뭄 사상 동안 강수 부족량의 총합인 가뭄 심도를 분석한 결과, 이천 관측소는 1,706 mm로 전체 관측소 중 3번째로 강

수가 부족한 것으로 나타났다. 이천 관측소의 일별 강수량을 분석하였을 때, 여름철 (6-8월)을 제외한 기간에는 평년에 가까운 강수가 내렸지만 영농기가 포함된 여름철 강수가 매우 적어 가뭄이 심각하게 발생한 것으로 보인다.

대상 저수지의 축조 연도를 살펴보면, 용면 저수지는 1959년, 성호 저수지는 1958년, 용풍 저수지는 1946년에 축조되었으며, 저수지 모두 60년 이상 경과한 상태이다. 저수지에 대한 제원은 Table 1과 같다. 대상 저수지의 수리적 제원을 살펴보면 용면 저수지의 경우 유역면적이 272.0 ha, 수혜면적이 54.7 ha로 유역배율이 5.0, 성호 저수지의 경우 유역면적이 616.0 ha, 수혜면적이 339.8 ha로 유역배율이 1.81, 용풍 저수지의 경우 유역면적이 500.0 ha, 수혜면적이 200.0 ha로 유역배율이 2.5이다. 유역배율은 유역면적과 수혜면적의 비율로 농업용 저수지는 유역배율이 3 이상일 때 용수공급의 효율이 있다고 판단하며 (Noh and Lee, 2011), 대상 저수지 중 용면 저수지만 유역배율이 5.0으로 유역배율이 높은 저수지이다. 대상 저수지의 설계한발빈도는 10년 빈도의 갈수에 견딜 수 있는 한발빈도로 설계되었다.

### 2. 저수지 물수지 분석

농업용 수리시설물에 대한 용수공급안전도를 평가하고 정립하는 데 있어 공급량과 수요량을 비교하는 물수지 분석이 반드시 필요하다 (Yoo, 2005). 농업용 저수지 물수지 분석 프로그램으로 한국농어촌공사의 수리·수문설계시스템 (KRC Hydraulics & Hydrology Analysis System, K-HAS)이 있으며, 해당 모형은 HOMWRS (Hydrological Operation Model for Water Resources System)를 기반으로 개발된 모형이다. HOMWRS는 수리시설물 모의조작 시스템으로 농업용 저수지 설계실무에서 일반적으로 가장 널리 쓰였던 모형으로 (Yun et al., 2011; Jun et al., 2014), HOMWRS에서는 농업용 저수지 유입량 추정을 위해 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model)을 사용한다 (MAFRA, 2015; KRC, 2016; Hong et al., 2021).

물수지 분석은 저수지 및 유역에서 일정 기간 유입량과 유출량을 통해 저류량의 시간적 변화를 계산하는 것으로 정의된다. 물수지 분석을 통해 수리시설물의 거동을 분석하고, 해당 시설물이 적정하게 운영되는지 파악이 가능하다 (Yun et al., 2011). 일반적으로 유역 내 이수안전도 평가 지표는 공급량과 수요량의 확률분포를 통해 물 공급 시스템의 취약성을 파악할 수 있는 신뢰도 기준 (Nam et al., 2012a), 갈수기 동안 용수공급을 보장하는 보장공급량 기준, 일정비율로 물 부족을 허용하는 안전도 (Reliability), 통계적 지표인 회복도 (Resilience), 취약도 (Vulnerability) 등 다양하게 정의될 수 있

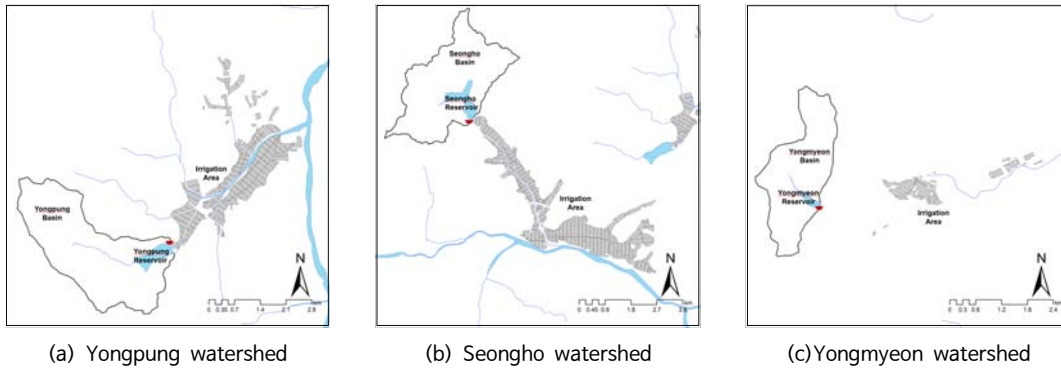


Fig. 1 Location of watersheds, reservoirs, and irrigation areas

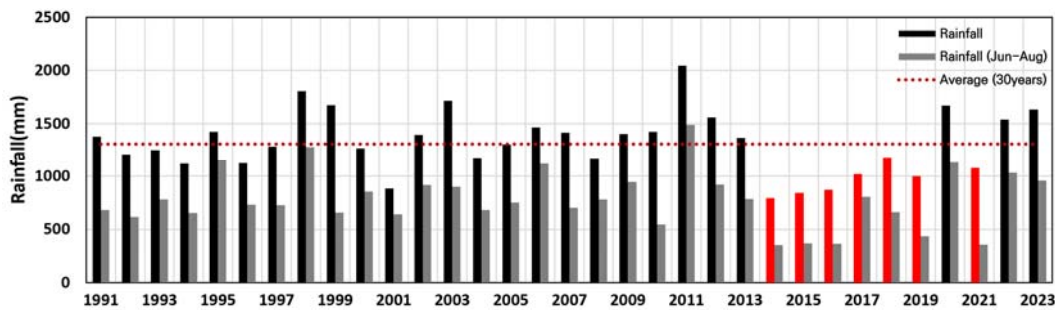


Fig. 2 Annual precipitation in Incheon from 1991 to 2023

Table 1 Characteristics for agricultural reservoirs

Reservoir name	Effective storage (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	Watershed area (ha)	Irrigated area (ha)	Average watershed ratio	Area of full water (ha)	Design frequency of drought (year)
Seongho	85.8	616.0	339.8	1.81	34.7	10
Yongmyeon	27.6	272.0	54.7	4.97	6.1	10
Yongpung	71.5	500.0	200.0	2.50	24.7	10

다 (Hashimoto et al., 1982; Moon et al., 2012; Choi et al., 2014; Lee, 2014; Lee and Yi, 2014; Kwon et al., 2020). 내한능력과 이수안전도 산정에 있어 물 수요에 대한 공급 부족으로 발생하는 물 부족 평가는 핵심적으로 물수지 분석을 통해 확인할 수 있다 (Jang et al., 2021).

본 연구에서는 농업용 저수지의 이수안전도 분석을 위한 물수지 분석 모형으로 한국농어촌공사의 K-HAS를 활용하였다. K-HAS는 농업용 저수지 설계를 위한 수문량 분석 및 수리해석이 가능하도록 개발된 모형으로 저수지 유입량은 수정 3단 Tank 모형을 이용한다. 수정 3단 Tank 모형의 매개변수는 미계측 유역 적용을 위해 Kim and Park (1988)이 개발한 매개변수 추정 회귀식을 통해 논, 밭, 산림면적 비율과 유역면적을

통해 추정한다. 물수지 분석을 위해 K-HAS 모형에서 유역-저수지-논으로 구성하여 Table 2와 같이 필요한 입력 자료를 구축하였다. 각 인자에 대한 입력 자료는 한국농어촌공사에서 운영 중에 있는 농촌용수종합정보시스템 (<https://rawris.ekr.or.kr>) 및 농업생산기반정비통계연보에서 수집하여 사용하였다. 논에 필요한 작부시기, 작물계수, 단위용수량 등은 모형에 입력되어 있는 기본 값을 활용하였으며, 수로손실 15%, 일침투량 4 mm/day, 최대 담수심 80 mm, 최소 담수심 20 mm로 적용하여 물수지 분석을 수행하였다 (MAFRA, 1998; Kim et al., 2022). 물수지 분석을 위한 자료 수집 및 분석 기간을 1991-2023년으로 설정하였다.

**Table 2** Input data of watershed, reservoir and paddy for K-HAS

Reservoir name	Upstream watershed of reservoir				Dead water level (EL.m)	High water level (EL.m)	Irrigated area (ha)
	Area (ha)	Paddy (%)	Upland (%)	Forest (%)			
Seongho	581.3	10.5	9.6	61.6	83.44	86.94	339.8
Yongmyeon	272.0	10.5	9.6	61.6	105.00	120.40	54.7
Yongpung	500.0	10.5	9.6	61.6	68.20	71.40	200.0

### 3. 이수안전도 산정

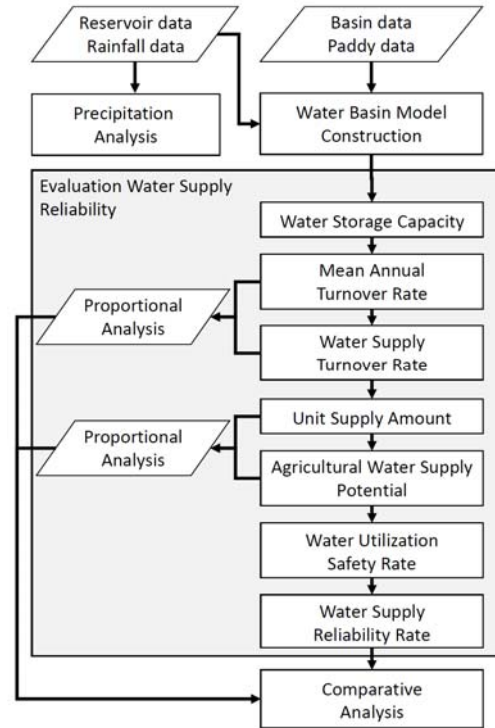
이수안전도는 댐설계기준 (Noh and Lee, 2011)에 따르면 수자원시스템이 수요를 충족시킬 수 있는 물 공급의 안정성 정도를 나타내는 지표로 농업용 저수지 등 수리시설물의 용수수요 능력을 평가할 수 있다. 일반적으로 수리시설물의 설계빈도와 용수공급부족 발생빈도를 활용하여 이수안전도를 산정할 수 있다. 농업용 저수지는 농업생산기반정비사업계획 설계기준 (MAFRA, 1982)에 따라 이수목적의 필요저수량은 10년 한발빈도 공급량을 기준으로 설계되었으며, 농업용 저수지 이수안전도는 기준의 부재로 설계기준인 10년 한발빈도로 대체 사용하고 있다 (Nam et al., 2012a; Park et al., 2013b).

본 연구에서는 대상 저수지에 대해 물수지 분석을 바탕으로 이수안전도를 평가하고자 한다. 물수지 분석 결과 중 Fig. 3과 같이 대상 저수지에 대해 해당 저수지가 위치한 지역의 강수량 분석 후, 물수지 분석을 수행하여 이수안전도를 산정하였다. 단위저수량에 따른 설계빈도 검토 후, 물수지 모형을 기반으로 평균 연회전율과 용수공급회전율, 농업용수잠재능과 단위공급량, 이수안전율, 공급신뢰율을 산정하여 비교·분석하고자 한다. 단위 저수량은 1970년대 이전 설치된 농업용 저수지의 내한능력 평가의 기준으로 활용되었으며, 수해면적 기준 저수용량과의 비로 정의된다 (Kwon et al., 2020). 단위 저수량 결과는 Table 3과 같이 한발빈도로 환산가능하다 (MAFRA, 1984).

Kim et al. (2016)은 농업용 저수지 이수안전도 평가를 위해 농업용수잠재능이라는 개념을 도입하여 저수지의 평균 연회전율과 단위저수량의 특성을 검토하고, 평균 연회전율-용수공급회전율의 관계도 제시를 통해 이수안전도 평가 방법을 제시한 바 있다. 평균 연회전율 (단위: 회)은 공급량 기준 유입량과의 비로 정의되며, 용수공급회전율 (단위: m)은 유효 저수용량 기준 공급량과의 비로 정의된다.

$$T = \frac{I}{S} \tag{1}$$

$$S_p = \frac{S}{I} \tag{2}$$



**Fig. 3** Flow chart for evaluating water supply reliability

**Table 3** Standard for unit storage quantity

Frequency of drought	Unit storage capacity (mm)
10 years	520
7 years	480
5 years	440
3 years	380
2.33 years	330

식 (1)에서 T는 평균 연회전율, I는 평균 연저수지유입량, S는 평균 연농업용수공급량을 의미하며 평균 연저수지유입량과 평균 연농업용수공급량과의 비로 산정한다. 식 (2)에서 S<sub>p</sub>는 용수공급 회전율, S는 평균 연농업용수공급량, I는 평균 연저수지유입량을 의미하며 평균 연저수지유입량과 평균 연농업용수공급량과의 비로 산정한다.

농업용수잠재능 (단위: m)은 수혜면적 기준 유입량과의 비로 정의되며, 이는 평균 연회전율과 단위저수량으로 산정한다. 단위공급량 (단위: m)은 수혜면적 기준 공급량과의 비로 정의되며, 수혜면적과 평균 연농업용수공급량과 수혜면적으로 산정한다.

$$W_p = \frac{I}{A_c} = TU \quad (3)$$

$$S_u = \frac{S}{A_c} \quad (4)$$

식 (3)에서  $W_p$ 는 농업용수잠재능,  $I$ 는 평균 연저수지유입량,  $A_c$ 는 수혜면적,  $T$ 는 평균 연회전율,  $U$ 는 단위저수량으로 평균 연회전율과 단위저수량의 곱으로 산정한다. 식 (4)에서  $S_u$ 는 단위공급량,  $S$ 는 평균 연농업용수공급량,  $A_c$ 는 수혜면적으로 평균 연농업용수공급량과 수혜면적의 비로 산정한다.

이수안전율과 공급신뢰율은 국가물관리기본계획에 의거 물수급 평가를 위해 용수 수요를 충족시킬 수 있는 용수 공급의 안정성 정도를 나타내는 이수안전도 관련 지표이다 (Jo et al., 2021). 2018년 물관리 일원화에 따라 물관련 법정계획이 유역종합치수계획의 치수, 이수, 하천환경관리계획을 포함하는 넓은 범위의 실행계획인 하천유역수자원관리계획으로 개편되었다 (Ahn and Han, 2019). 하천유역수자원관리계획의 수립 및 시행을 규정하고 있는 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」 제6조 규정의 하천유역조사로 2022년 제·개정되었으며, 해당 계획에서 이수안전도 평가 방법으로 이수안전율과 공급신뢰율이 제시되었다 (Yeo and Kang, 2022). 이수안전율 (단위: %)은 연간 물수요량 대비 물부족량에 대한 양적기준 신뢰도로 정의되며, 공급신뢰율 (단위: %)은 물부족 발생기간에 대한 신뢰율로 시간기준 신뢰도로 정의된다.

$$U_s = \left(1 - \frac{W_s}{W_d}\right) \times 100 \quad (5)$$

$$S_r = \left(1 - \frac{S}{A_y}\right) \times 100 \quad (6)$$

식 (5)에서  $U_s$ 는 이수안전율,  $W_s$ 는 연간 물부족량,  $W_d$ 는 연간 물수요량을 의미하며, 식 (6)에서  $S_r$ 는 공급신뢰율,  $S$ 는 물부족 발생년 수,  $A_y$ 는 분석대상년 수를 의미한다. 이수안전율과 공급신뢰율의 산정 결과에 따른 등급 및 등급기준은 Table 4와 같다. 이수안전율 산정을 위한 물수요량과 물부족량은 물수지 분석을 통한 모의 결과를 활용하였다. 공급신뢰

**Table 4** Standard for water utilization safety rate and water supply reliability rate (River Basin Water Resources Management Plan)

Class	Water utilization safety	Water supply reliability
I	95 < $U_s$ ≤ 100	95 < $S_r$ ≤ 100
II	90 < $U_s$ ≤ 95	90 < $S_r$ ≤ 95
III	85 < $U_s$ ≤ 90	85 < $S_r$ ≤ 90
IV	80 < $U_s$ ≤ 85	80 < $S_r$ ≤ 85
V	$U_s$ ≤ 80	$S_r$ ≤ 80

**Table 5** Operational standard for drought using reservoir water level

Class	Drought warning criteria
Weak drought	70% of average reservoir storage
Normal drought	60% of average reservoir storage
Heavy drought	50% of average reservoir storage
Severe drought	40% of average reservoir storage

율 산정을 위해 물부족 발생년 수가 필요하며, 이를 위해 행정안전부의 가뭄 예·경보 기준을 적용하였다. 가뭄 예·경보 기준은 Table 5와 같이 가뭄 상황에 따라 4단계로 구분하여 정의된다 (Choi, 2021; Mun et al., 2022). 가뭄 예·경보 기준 중 농업용수는 논과 밭으로 구분되며, 논은 Table 5와 같이 영농기 평균 저수율을 기준으로 발령된다. 공급신뢰율 산정을 위해 물 부족 발생기간은 경계, 심각 단계가 발령된 시기로 정의하였다. 경계 단계 (Heavy drought) 기준은 영농기 평년 저수율 50% 이하인 경우와 더불어 가뭄 피해가 발생하였거나 예상되는 경우로 정의되어 해당 단계와 심각 단계 (Severe drought)를 물 부족 발생기간 기준으로 설정하였다.

### III. 적용 및 고찰

#### 1. 단위저수량에 따른 이수안전도 산정

대상 저수지로 선정한 경기도 이천에 위치하고 있는 용면, 성호, 용풍 저수지의 이수안전도 평가를 위해 단위저수량을 활용해 설계빈도를 검토하였다. 각 대상 저수지는 설계 당시 10년 빈도로 설계되었다. 단위저수량을 산정한 결과, 용면 저수지는 단위저수량 505 mm로 10년 빈도의 근거인 520 mm보다 작고 7년 빈도인 480 mm보다 많아 7년 빈도로 산정하였다. 성호 저수지는 253 mm로, 평년 빈도 (2.33년) 기준인 330 mm보다 적어 가장 낮은 빈도인 평년 빈도로 산정하였다. 용풍 저수지는 356 mm로 3년 빈도의 근거인 380 mm보다 적고, 평년 빈도 기준인 330 mm보다 많아 평년 빈도로 산정하였다.

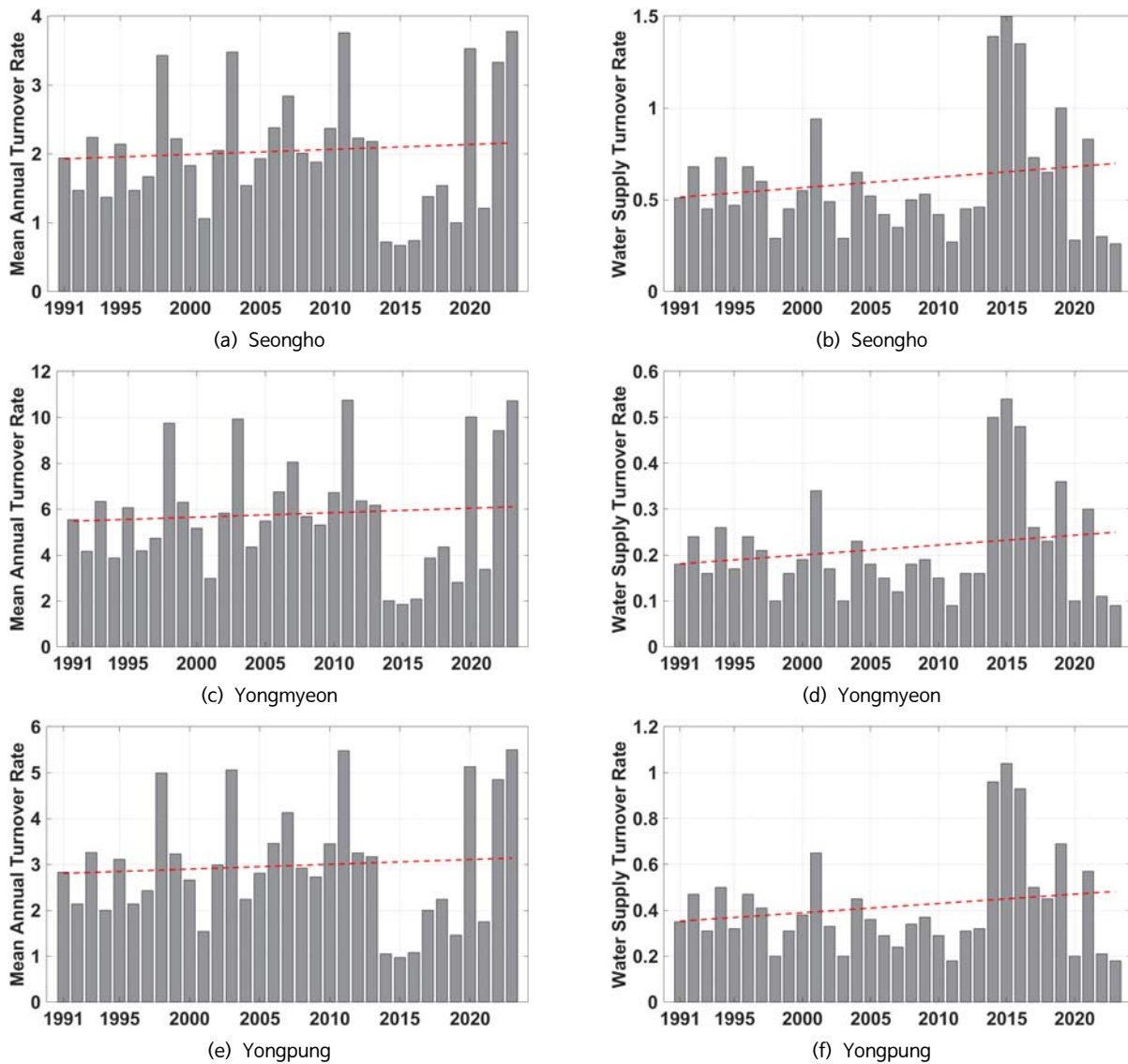
세 저수지 모두 설계 당시 대비 한발빈도가 감소한 것을 확인할 수 있었으며 특히 성호와 용풍 저수지는 평년 빈도로 나타나 이수안전도가 불안정한 것으로 분석되었다.

**Table 6** Result of unit storage quantity

Reservoir name	Unit storage capacity (mm)	Frequency of drought (year)
Seongho	253	2.33
Yongmyeon	505	7
Yongpung	356	2.33

## 2. 연회전율과 용수공급회전율에 따른 이수안전도 분석

연회전율은 공급량 기준 유입량과의 비로 평균 회전율이 높을수록 저수지로 유입되는 수량이 농업용수로 공급되는 수량보다 많다고 해석 가능하며, 이수안전도가 높은 것으로 판단 할 수 있다. Kim et al. (2016)에 따르면 평균 연회전율이 2.0회 미만인 저수지는 이수 불안전을 보인다. Fig. 4의 (a), (c), (e)와 같이 평균 연회전율을 산정하여 분석기간 평균을 산정한 결과, 단위저수량이 가장 낮은 성호 저수지는 2.0회, 단위저수량이 가장 높은 용면 저수지는 5.8회, 용풍 저수지는 3.0회로 나타났다. 성호 저수지는 이수 불안전 기준인 2.0회로 나타나 공급량에 비해 유입량이 부족함으로, 강우 부족 시 용수 공급에 있어 안정적인 용수관리가 어려웠을 것으로 판단



**Fig. 4** Result of mean annual turnover rate ((a), (c), (e)) and water supply turn over rate ((b), (d), (f))

된다. 이천의 최근 강수 부족 시기인 2014-2019년에 2.0 m 미만 또는 전년도 대비 크게 감소하는 경향을 보여 해당 시기에는 안정적인 용수관리가 어려웠을 것으로 분석된다. 분석기간 동안 모든 대상 저수지의 평균 연회전율을 추세를 큰 변동이 없었다.

### 3. 농업용수잠재능과 단위공급량에 따른 이수안전도 분석

농업용수잠재능은 수해면적 기준 평균 연유입량과의 비로 Kim et al.(2016)은 농업용수잠재능이 2.0 m 미만인 경우 이수불안전 저수지로 정의하였다. Fig. 5의 (a), (c), (e)와 같이 농업용수잠재능 산정 결과에 따르면 성호 저수지의 분석기간 내

농업용수잠재능 평균이 0.52로, 분석기간 내 지속적으로 2.0 m미만의 값을 보여 이수불안전 저수지로 분석된다. 용면 저수지는 분석기간 평균 2.9 m로 나타나 이수안전 저수지로 판단된다. 그러나 2014-2019년에 2.0 m 미만으로 나타나 강수부족 시기에는 주의가 필요할 것으로 판단된다. 용풍 저수지는 분석기간 평균 1.1 m로 이수불안전 저수지로 분석된다. 분석기간 기준 전체적인 추세에 따르면 전체 대상 저수지에서 증가하고 있으나 그 변화가 크지 않다. 그러나 성호 및 용풍 저수지는 분석기간 내 지속적으로 2.0 m 미만의 값을 보여 수해면적당 유입량이 감소하고 있음을 확인하였다.

단위공급량은 수해면적 기준 공급량과의 비로 단위공급량이 클수록 일정 수해면적에 공급되는 농업용수 수량이 증가

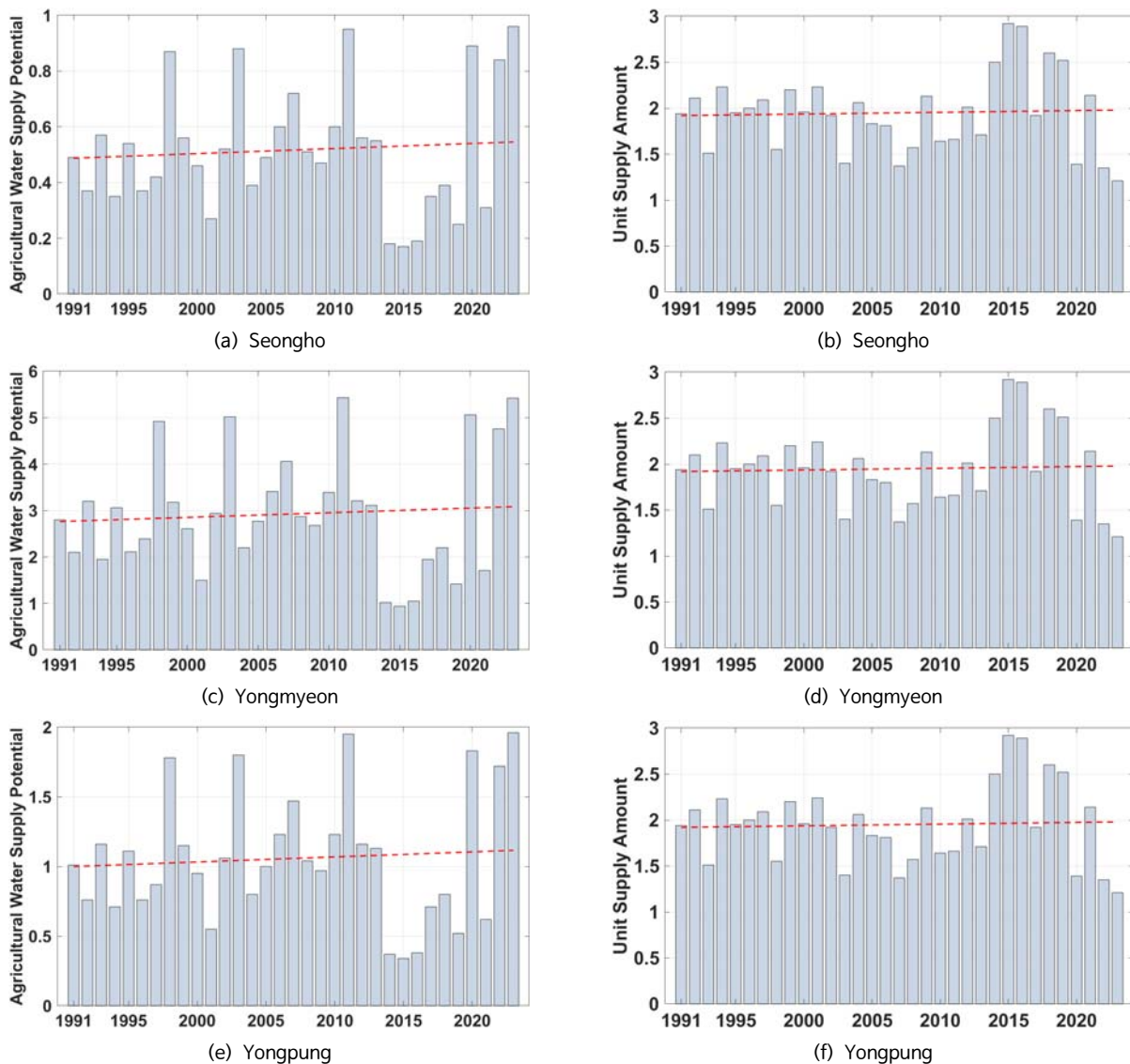
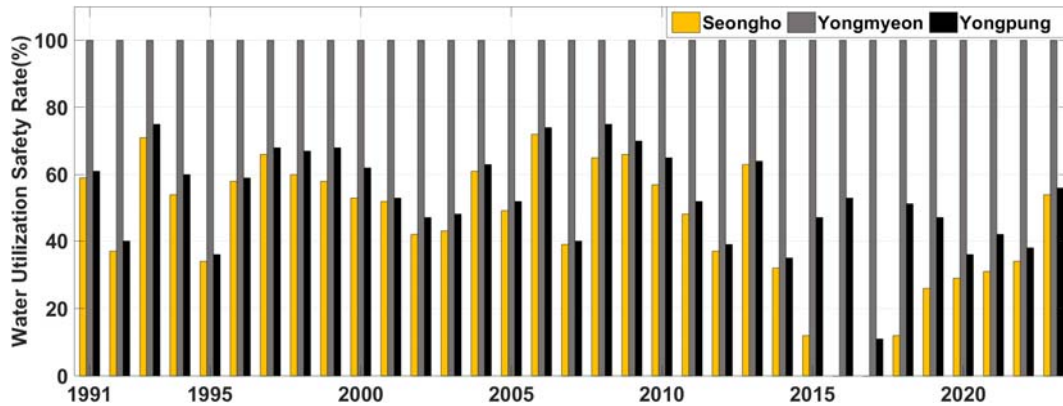


Fig. 5 Result of agricultural water supply potential ((a), (c), (e)) and unit supply amount ((b), (d), (f))

**Table 7** Result of water utilization safety rate

Reservoir name	Annual water shortage (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Annual water demand (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Water utilization safety (%)	Class	Frequency of drought (year)
Seongho	1,468.6	2,419.5	39	V	under 4
Yongmyeon	0	389.4	100	I	10 years
Yongpung	670.7	1,424.1	53	V	under 4



**Fig. 6** Result of water utilization safety rate

함을 의미한다. Fig. 5의 (b), (d), (f)와 같이 단위공급량 산정 결과에 따르면 세 대상 저수지 모두 분석기간 평균 1.9 m로 동일하게 산정되었다. 전체 대상 저수지 모두 2014-2019년에 단위공급량이 가장 높게 나타났으며, 이는 2014-2019년까지 경기도 이천 지역의 강수량이 평년대비 적어 수혜면적당 공급량이 증가한 것으로 판단된다. 세 대상 저수지의 단위공급량 추세는 농업용수 잠재능과 같이 증가를 보이고 있으나 그 변화가 크지 않아 수혜면적당 공급량에 큰 변화가 없으며, 강수가 부족한 경우 단위공급량이 전년 대비 크게 증가할 것으로 분석된다.

**4. 이수안전율과 공급신뢰율에 따른 이수안전도 분석**

이수안전율과 공급신뢰율은 분석 기간 내 물부족량에 대한 양적기준, 물부족 발생기간에 대한 시간기준 신뢰도로 정의된다. 이수안전율을 산정하기 위해 K-HAS를 활용한 물수지 분석을 수행하여 물부족량, 물수요량을 산정하였으며, 공급신뢰율을 산정하기 위해 행정안전부의 가뭄 예·경보 기준을 활용하여 경계, 심각 단계인 시기를 물부족 시기로 산정하였다. K-HAS를 활용하여 Table 8과 같이 1991-2023년 물수지 분석을 통해 물부족량, 물수요량을 산정하여 이수안전율을 분석하였다. 이수안전율 산정 결과, 성호 저수지는 이수안전율이 39%로 나타나 80%보다 적어 가장 낮은 등급인 V로 분

석되었다. 용면 저수지는 물부족량이 존재하지 않아 이수안전율 100%, 이수안전도 I 등급으로 산정되었다. 용풍 저수지는 이수안전율 53%로 성호 저수지와 같이 이수안전도 등급이 V로 나타났다. 특히, 성호 저수지는 Fig. 6과 같이 2016년, 2017년에 이수안전율이 0%로 산정되었다.

공급신뢰율 산정을 위해 물부족 발생년수는 행정안전부의 가뭄 예·경보 기준을 적용하여 Fig. 7과 같이 산정하였다. 물부족 발생년수는 가뭄 예·경보 기준 중 경계, 심각 단계가 발생한 연도를 적용하였다. 성호 저수지는 1999-2001년, 2011-2012년, 2016-2017년, 2019년에 물부족이 발생하였으며, 특히 2010년 이후 경계 및 심각 단계 발생 빈도가 높아졌다. 용면 저수지는 1992년, 1998년에 경계 및 심각 단계가 존재하였다. 용풍 저수지는 2000년, 2012년, 2015년, 2017-2020년에 물부족이 발생하였으며, 2011년 이후 저수율 경계, 심각 단계 발생 빈도가 높아졌으며, 2017년부터 2020년까지 지속적으로 물부족이 발생한 것으로 나타났다. 공급신뢰율 결과에 따르면 성호 저수지 75.76%, 용면 저수지는 93.94%, 용풍 저수지 78.79%로 산정되어, 용면 저수지는 I 등급, 성호와 용풍 저수지는 V등급으로 분류되었다. 특히, 성호와 용풍 저수지는 2010년 이후 경계 및 심각 단계가 발생하고 있어 용수공급관리에 주의가 필요한 것으로 판단된다.



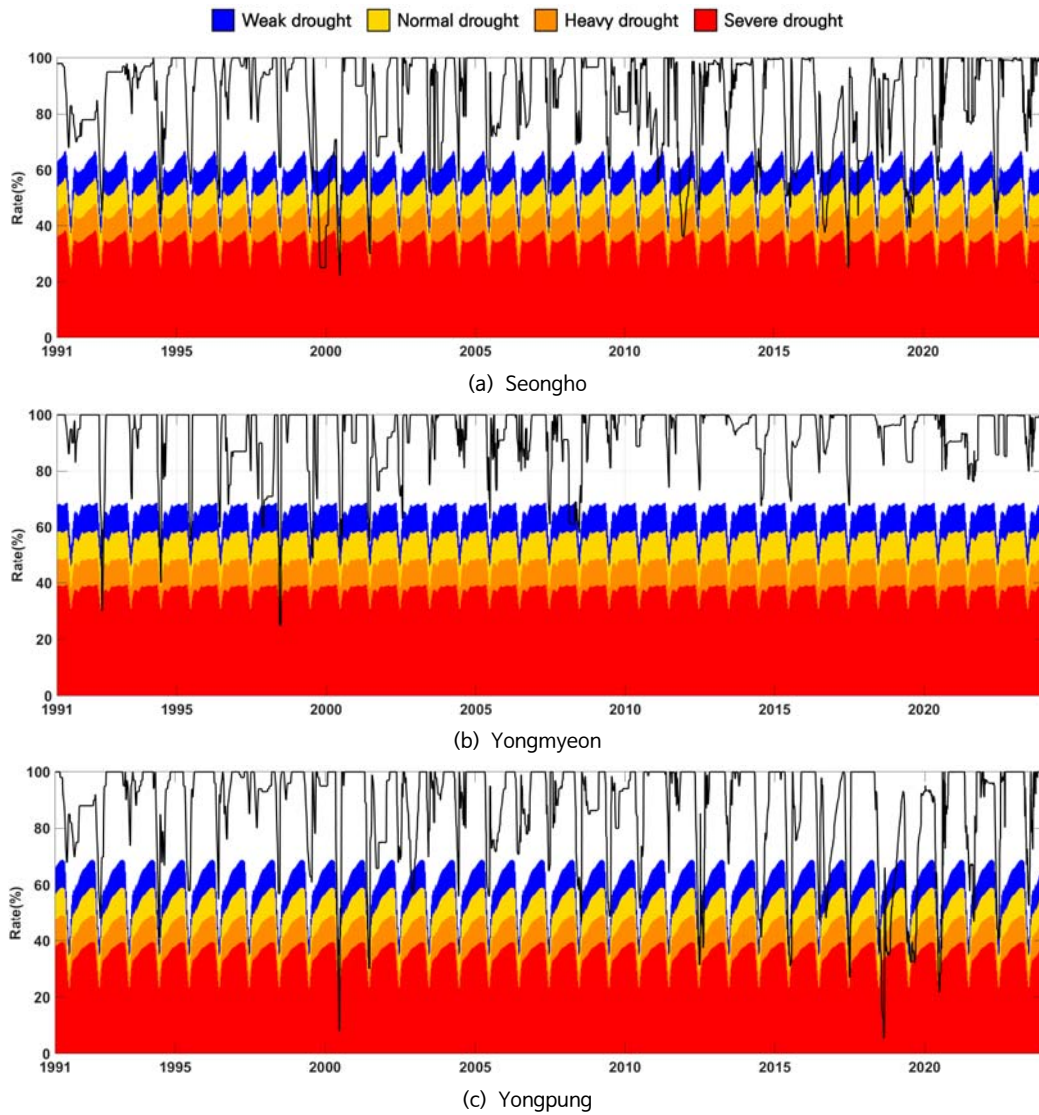


Fig. 7 Reservoir rate with operational standard for drought

Table 8 Result of water supply reliability rate

Reservoir name	Number of years of water shortage	Number of analysis years	Supply reliability	Class
Seongho	8	33	75.76	V
Yongmyeon	2	33	93.94	I
Yongpung	7	33	78.79	V

#### IV. 결론

본 연구에서는 경기도 이천에 위치한 성호, 용면, 용풍 저수지를 대상으로 농업용 저수지 이수안전도 평가를 위해 설계 한발빈도를 기준으로 물수지 분석을 수행하여 단위저수량, 연회전율, 용수공급회전율, 단위공급량, 농업용수잠재능, 이

수안전율, 공급신뢰율을 산정하고 분석하였다. 대상 저수지 모두 10년 한발빈도로 설계되었으나, 단위저수량을 환산하여 한발빈도를 산출한 결과, 용면 저수지만 10년 빈도로 분석되었고, 성호 저수지와 용풍 저수지는 평년 빈도 (2.33년)로 나타나 설계 당시 빈도보다 감소하여 이수안전도에 취약할 것

으로 분석되었다.

연회전율과 용수공급회전율은 서로 반비례 관계를 가지며, 평균 연회전율이 클수록 유입량 증가보다 공급량이 상대적으로 적어 안정적인 것을 의미한다. 성호 저수지는 분석 기간 동안 평균 연회전율 2.0회, 용수공급회전율 0.61회로 나타났으며, 용면 저수지는 평균 연회전율 5.8회, 용수공급회전율 0.21회, 용풍 저수지는 평균 연회전율 3.0회, 용수공급회전율 0.42회로 나타나, 대상 저수지 모두 용수공급에 있어 안정적인 것으로 분석되었다. 그러나 강수 부족 시기에는 연회전율과 용수공급회전율의 변동이 커 용수공급 관리에 주의가 필요할 것으로 판단된다.

농업용수 잠재능과 단위공급량은 반비례 관계를 가지며, 농업용수 잠재능이 클수록 단위 수혜면적당 유입량 증가보다 공급량이 상대적으로 적어 안정적인 것을 의미한다. 성호 저수지는 분석 기간 동안 농업용수 잠재능 0.52 m, 단위공급량 1.9 m로 나타났으며, 용면 저수지는 농업용수 잠재능 2.9 m, 단위공급량 1.9 m, 용풍 저수지는 농업용수 잠재능 1.1 m, 단위공급량 1.9 m로 나타나, 성호와 용풍 저수지는 단위 수혜면적당 유입량 증가보다 공급량이 더 많아 이수 불안정 저수지로 분석되었다. 특히 농업용수 잠재능의 경우, 성호와 용풍 저수지가 선행연구에서 제시한 이수불안전 저수지 기준인 2.0 m 보다 작아 수혜면적 기준 유입량이 적어 이수 불안정으로 판단되었다. 이수안전도와 공급신뢰율을 분석한 결과, 용면 저수지는 모두 I 등급으로 나타났고, 성호와 용풍 저수지는 모두 V 등급으로 나타나 물 부족량과 물 부족 발생 기간에 대해 불안정한 것으로 분석되었다.

본 연구에서 활용한 이수안전도 산정 방법을 통해 대상 저수지를 분석한 결과, 용면 저수지는 이수안전도가 안정적인 것으로 나타났으며, 성호와 용풍 저수지는 이수안전도가 불안정한 것으로 나타났다. 성호와 용풍 저수지는 유역배출, 농업용수 잠재능, 단위공급량, 이수안전도 및 공급신뢰율 등 다양한 지표에서 불안정성을 나타낸 것으로 분석되었다. 그러나 물수지 분석 및 이수안전도 산정 시 저수지만 반영한 한계가 있으므로, 향후 저수지 유역 및 평야부를 고려한 이수관리 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2023-00230286). 본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 한국농어촌공사의 2022년 용역연구사업의 지원을 받아 연구되었음.

## REFERENCES

- Ahn, J. H., and D. H. Han, 2019. A study on national planning frameworks for integrated water management in basin. Sejong: Korea Environment Institute.
- Ahn, S. R., G. E. Park, Y. H. Shin, and S. J. Kim, 2009. Assessment of the potential water supply rate of agricultural irrigation facilities using MODSIM -For Geum river basin-. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(10): 825-843. doi: 10.3741/JKWRA.2009.42.10.825. (in Korean).
- Korea Rural Economic Institute (KREI), 2016. A study on the measurement of agricultural damage due to drought, 50-56. Naju, Jeollanam-do: Korea Rural Economic Institute.
- Choi, S. J., D. R. Lee, and J. W. Moon, 2014. Comparison of water supply reliability by dam operation methods. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(6): 523-536. doi: 10.3741/JKWRA.2014.47.6.523. (in Korean).
- Choi, S. B., 2021. 2019 National drought information statistics collection. Ministry of Public Administration and Security.
- Hashimoto, T., J. R. Stedinger, and D. P. Loucks, 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1): 14-20. doi: 10.1029/WR018i001p00014.
- Hong, J. H., Y. J. Choi, and J. E. Yi, 2021. Parameter optimization of agricultural reservoir long-term runoff model based on historical data. *Journal of Korea Water Resources Association* 54(2): 93-104. doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.2.93. (in Korean).
- Jang, O. J., Y. I. Moon, and H. T. Moon, 2021. Methodology for assessment and forecast of drought severity based on the water balance analysis. *Journal of Korea Water Resources Association* 54(4): 241-254. doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.4.241. (in Korean).
- Jo, Y. S., J. H. Kim, J. B. Shin, and S. H. Lee, 2021. Overview of the water supply and demand evaluation model in the river basin, water resources management plan. *Water for Future* 54(10): 32-38. (in Korean).
- Jun, S. M., M. S. Kang, I. H. Song, J. H. Song, J. H. Park, and W. S. Kee, 2014. Development of agricultural reservoir water supply simulation system. *Journal of the Korean Society of Rural Planning* 20(2): 103-114. doi: 10.7851/ksrp.2014.20.2.103. (in Korean).

11. Kang, H. S., A. H. An, W. H. Nam, and K. Y. Lee, 2019. Estimation of agricultural reservoir water storage based on empirical method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(5): 1-10. doi: 10.5389/KSAE.2019.61.5.001. (in Korean).
12. Kim, H. Y., and S. W. Park, 1988. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs (1) -modeling inflow rates by a linear reservoir model-. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 30(1): 50-62. (in Korean).
13. Kim, J. S., J. Y. Lee, J. B. Lee, C. M. Song, and J. S. Park, 2016. Evaluation of agricultural water supply potential in agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(2): 65-71. doi: 10.5389/KSAE.2016.58.2.065. (in Korean).
14. Kim, S. J., S. J. Bae, and M. W. Jang, 2022. Prediction of net irrigation water requirement in paddy field based on machine learning. *Journal of the Korean Society of Rural Planning* 28(4): 105-117. doi: 10.7851/ksrp.2022.28.4.105. (in Korean).
15. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2016. Development of an integrated assessment system for the impact of climate change on agricultural water. Korea Rural Community Corporation, Republic of Korea. (in Korean).
16. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2020. Master plan of permanent drought in Yongin. Korea Rural Community Corporation, Republic of Korea. (in Korean).
17. Kwon, H. J., W. H. Nam, and K. S. Choi, 2020. An irrigation reliability assessment of agricultural reservoirs to establish a response plan for future climate change adaptation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(2): 111-120. doi: 10.5389/KSAE.2020.62.2.111. (in Korean).
18. Lee, G. M., 2014. Water supply performance assessment of multipurpose dams using sustainability index. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(5): 411-420. doi: 10.3741/JKWRA.2014.47.5.411. (in Korean).
19. Lee, G. M., and J. Yi, 2014. Analysis of problems of water supply capacity determination in water resources systems. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(4): 331-342. doi: 10.3741/JKWRA.2014.47.4.331. (in Korean).
20. Ministry of Environment (ME), 2018. 2013~2018 sustained drought analysis & assessment report. National Drought Information-Analysis Center, Republic of Korea. (in Korean).
21. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFRA), 1982. Agricultural production base maintenance project plan design criterias. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea. (in Korean).
22. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFRA), 1984. Report on the water supply reliability for agricultural facilities. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea. (in Korean).
23. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFRA), 1998. Design criteria of land and water development plan for agriculture: Irrigation. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea. (in Korean).
24. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFRA), 2015. Development of a rural water resources assessment tool. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea. (in Korean).
25. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFRA), 2022. Statistical yearbook of land and water development for agriculture 2021. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea. (in Korean).
26. Moon, J. W., S. J. Choi, S. K. Kang, and J. J. Lee, 2012. An evaluation of water supply reliability using AWS data in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(8): 743-753. doi: 10.3741/JKWRA.2012.45.8.743. (in Korean).
27. Mun, Y. S., W. H. Nam, M. G. Jeon, H. J. Kim, K. Kang, J. C. Lee, T. H. Ha, and K. Y. Lee, 2020. Evaluation of regional drought vulnerability assessment based on agricultural water and reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(2): 97-109. doi: 10.5389/KSAE.2020.62.2.97. (in Korean).
28. Mun, Y. S., W. H. Nam, S. B. Woo, H. J. Lee, M. H. Yang, J. S. Lee, and T. H. Ha, 2022. Improvement of drought operation criteria in agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 64(4): 11-20. doi: 10.5389/KSAE.2022.64.4.011. (in Korean).
29. Nam, W. H., T. G. Kim, J. Y. Choi, and J. J. Lee, 2012a. Vulnerability assessment of water supply in agricultural reservoirs utilizing probability distribution and reliability

- analysis methods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 37-46. doi: 10.5389/KSAE.2012.54.2.037. (in Korean).
30. Nam, W. H., T. G. Kim, J. Y. Choi, and H. J. Kim, 2012b. Evaluation of irrigation vulnerability characteristic curves in agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 39-44. doi: 10.5389/KSAE.2012.54.6.039. (in Korean).
31. Nam, W. H., and J. Y. Choi, 2014. Development of an irrigation vulnerability assessment model in agricultural reservoirs utilizing probability theory and reliability analysis. *Agricultural Water Management* 142: 115-126. doi: 10.1016/j.agwat.2014.05.009.
32. Nam, W. H., H. J. Kwon, and K. S. Choi, 2018. Reevaluation of design frequency of drought and water supply safety for agricultural reservoirs under changing climate and farming methods in paddy field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(1): 121-131. doi: 10.5389/KSAE.2018.60.1.121. (in Korean).
33. Noh, J. K., and J. N. Lee, 2011. Variation of water supply for instream flow from reservoirs with various magnification of paddy irrigation area to watershed area. *Korean Journal of Agricultural Science* 38(2): 331-341. doi: 10.7744/cnujas.2011.38.2.331. (in Korean).
34. Park, J. Y., I. K. Jung, K. Y. Lee, and S. J. Kim, 2013a. Development of operating rule curve for multipurpose water supply in heightened agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(4): 1389-1400. doi: 10.12652/Ksce.2013.33.4.1389. (in Korean).
35. Park, N. Y., J. Y. Choi, S. H. Yoo, and S. H. Lee, 2013b. Assessment of anti-drought capacity for agricultural reservoirs using RCP scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 13-24. doi: 10.5389/KSAE.2013.55.3.013. (in Korean).
36. Shin, J. H., W. H. Nam, N. K. Bang, H. J. Kim, H. U. An, and K. Y. Lee, 2020. Assessment of irrigation efficiency and water supply vulnerability using SWMM. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(6): 73-83. doi: 10.5389/KSAE.2020.62.6.073. (in Korean).
37. Sung, J. Y., B. S. Kang, B. M. Kim, and S. J. Noh, 2022. Development and application of integrated indicators for assessing the water resources performance of multi-purpose and water supply dams. *Journal of Korea Water Resources Association* 55(9): 687-700. doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.9.687. (in Korean).
38. Yeo, H. G., and J. G. Kang, 2022. Improvement of river environment management effectiveness. *Journal of Korea Water Resources Association* 55(12): 1155-1163. doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.12.1155. (in Korean).
39. Yoo, J. H., 2005. Suggestion of the water budget analysis method by MODSIM for the assessment of the water supply reliability. *Journal of Civil and Environmental Engineering Research* 25(1B): 9-17. (in Korean).
40. Yun, D. K., S. O. Chung, and S. J. Kim, 2011. Climate change impacts on paddy water requirement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 39-47. doi: 10.5389/KSAE.2011.53.4.037. (in Korean).