



# 농업용 저수지의 이·치수 기능을 고려한 홍수기 제한수위 설정 기법 개발

## Determination of Flood-limited Water Levels of Agricultural Reservoirs Considering Irrigation and Flood Control

김지혜<sup>a</sup> · 곽지혜<sup>b</sup> · 전상민<sup>c</sup> · 이성학<sup>d</sup> · 강문성<sup>e,†</sup>

Kim, Jihye · Kwak, Jihye · Jun, Sang Min · Lee, Sunghack · Kang, Moon Seong

### ABSTRACT

In this study, we developed a method to determine the flood-limited water levels of agricultural reservoirs, considering both their irrigation and flood control functions. Irrigation safety and flood safety indices were defined to be applied to various reservoirs, allowing for a comprehensive assessment of the irrigation and flood control properties. Seasonal flood-limited water level scenarios were established to represent the temporal characteristics of rainfall and agricultural water supply and the safety indices were analyzed according to these scenarios. The optimal scenarios were derived using a schematic solution based on Pareto front analysis. The method was applied to Obong, Yedang, and Myogok reservoirs, and the results showed that the characteristics of each reservoir were well represented in the safety indices. The irrigation safety of Obong reservoir was found to be significantly influenced by the late-stage flood-limited water level, while those of Yedang and Myogok reservoir were primarily affected by the early and mid-stage flood-limited water levels. The values of irrigation safety and flood safety indices for each scenario were plotted as points on the coordinate plane, and the optimal flood-limited water levels were selected from the Pareto front. The storage ratio of the optimal flood-limited water levels for the early, mid, and late stages were 65-70%, 70%, and 75% for Obong reservoir, 75%, 70-75%, and 65-70% for Yedang reservoir, and 75-80%, 70%, and 50% for Myogok reservoir. We expect that the method developed in this study will facilitate efficient reservoir operations.

**Keywords:** Agricultural reservoir; flood-limited water level; irrigation; flood control; multi-objective optimization; pareto front

### 1. 서론

농업용 저수지는 대부분의 농촌유역 상류에 설치되어 있어서 농촌유역의 홍수조절에 중요한 역할을 한다. 최근 시설의 노후화 및 기후변화로 인해 홍수 피해가 점차 증가함에 따라 농업용 저수지의 치수 기능을 강화하기 위한 대책이 시행되

고 있다 (MAFRA, 2020). 그러나 농업용 저수지의 기본적인 기능은 이수 기능이므로 농업용수 수량을 충분하게 확보하면서 동시에 홍수에도 대비할 수 있도록 저수지를 운영하는 것이 중요하다 (ME, 2021; Jang et al., 2007). 저수지 운영에 있어서 이·치수 기능을 균형 있게 고려하는 것은 쉽지 않은 일이며, 농업용수 확보를 위하여 방류를 충분하게 하지 않았다가 홍수 피해를 입거나, 홍수 시에 과도한 수량을 방류하였다가 농업용수를 확보하지 못하는 문제가 발생할 수 있다.

홍수기 제한수위는 농업용 저수지에서 농업용수와 홍수조절용량을 모두 적절하게 확보하기 위한 이·치수 기능의 균형점으로서, 「농업생산기반시설 관리규정 (개정 2022. 2. 3)」에서는 홍수기인 6월 21일부터 9월 20일까지 제한수위에 따라 저수지를 운영하도록 정하고 있다. 그러나 현행 제한수위는 저수지의 특성이나 시기별 강우 및 농업용수 공급 특성을 고려하지 않고 70-80% 정도의 저수율 기준을 적용한 경우가 대부분이기 때문에 저수지 운영에 대한 합리적인 기준으로 보기 어려우며, 저수지마다 관리자의 경험에 따른 판단으로 운영이 이루어지는 경우가 많은 실정이다.

농업용 저수지의 합리적인 운영을 위해 이·치수 기능을

<sup>a</sup> Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>b</sup> Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>c</sup> Research Scientist, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences

<sup>d</sup> Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>e</sup> Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: [mskang@snu.ac.kr](mailto:mskang@snu.ac.kr)

Received: July 19, 2023

Revised: September 26, 2023

Accepted: October 16, 2023

모두 고려하여 홍수기 제한수위를 설정할 필요가 있으나, 그동안 저수지 또는 댐의 제한수위 설정과 관련된 많은 연구가 이수 또는 치수 측면만을 고려하여 이루어졌다. 이수 기능과 관련된 연구로는, Jung et al. (2021)이 홍수기 제한수위의 값 또는 운영 기간에 따른 저수율의 변화를 분석하였고, Park et al. (2013)이 농업용수 공급량을 고려하여 하천유지용수의 방류제한수위를 분석한 바 있다. 치수 기능과 관련된 연구로는, Mo et al. (2022)이 Fractal 기법으로 홍수기를 구분한 후 시기별 최적의 제한수위를 제안하였고, Yang et al. (2021)이 제한수위에 따른 성주댐의 홍수 규모별 홍수조절 효과를 분석하였으며, Ryu et al. (2017), Jun et al. (2019) 등이 제한수위에 따른 농업용 저수지의 치수 안전성을 분석한 바 있다.

제한수위의 설정에 이·치수 기능을 모두 고려한 연구로, Pan et al. (2022)이 저수지의 이·치수 기능을 고려하여 홍수기 제한수위의 범위를 제안한 바 있으나 시기별 특성을 고려한 가변 제한수위가 아니라는 한계가 있다. Gabriel-Martin et al. (2020)은 시기별 제한수위 시나리오에 따라 이수 및 치수 관련 지표를 산정하고 Pareto front로부터 최적의 제한수위 범위를 제시한 바 있으나, 지표의 범용성이 확보되지 않아 다양한 저수지로의 확대 적용이 어렵다. Liu et al. (2015)은 이·치수 관련 5개 지표를 이용하여 GA (genetic algorithm) 기법으로 최적의 제한수위를 도출하였고, Kwon and Shim (1997)은 대청댐의 이·치수 기능을 고려하여 가변 제한수위를 제안하였으나, 지표에 평균값이 일부 포함되어 있어서 이·치수와 관련된 극한값이 충분히 반영되지 않는다.

저수지의 이·치수 기능을 정량적으로 분석하기 위해서는 앞선 연구들과 같이 이수 및 치수 기능과 관련된 지표를 도입하되, 강우 및 용수 공급의 시기적 변화를 고려할 수 있고, 다양한 저수지에 적용이 가능하며, 빈도 기반의 극한값으로 구성되는 지표를 정의할 필요가 있다. 이수 기능과 관련된 지표로는 Hashimoto et al. (1982a; 1982b)의 신뢰도/회복도/취약도 방법이 다양하게 변형되어 많은 연구에 적용되고 있다 (Sung et al., 2022; Lee, 2014; Choi et al., 2014). 그러나 이 방법은 특정 기준에 대한 실패 또는 초과 사상만을 대상으로 하기 때문에, 하나의 기준이 다른 대상에는 전혀 해당되지 않아 무의미한 값이 도출될 수 있어서 다양한 저수지 및 시나리오로의 확대 적용에 한계가 있다. 치수 기능과 관련된 지표로는 취약성 (vulnerability) 평가 지표가 다수 연구에서 적용된 바 있으나 (Heo et al., 2022; Jun et al., 2020; Park et al., 2015; Lee et al., 2013) 빈도별 홍수에 대한 수문분석을 포함하지 못하는 한계가 있으며, 수문곡선 또는 침투유량의 감쇠 (attenuation)와 관련된 지표는 저수지의 홍수 저류에 따른 하류의 안전에 초점이 맞춰져 있어서 저수지의 치수 기능을 대

표하기에 부적절하다 (Kim et al., 2021). 따라서 저수지의 이·치수 기능을 나타내는 지표로 기존의 지표를 그대로 적용하기보다는 이들을 토대로 하며 앞서 언급한 조건을 만족하는 지표를 새롭게 정의할 필요가 있다.

저수지의 최적 운영을 위해서는 이수 또는 치수의 상반된 기능이 모두 최대로 발휘되어야 하므로 각 관련 지표에 대한 다중 목적 최적화 (multi-objective optimization)가 필요하다. Pareto front는 다중 목적함수에 대한 최적해 집합 (Pareto optimal set)을 좌표계에 도시한 경계로서 (Deb et al., 2002; Deb, 2011), Pareto front를 이루는 점들 중에서 최종적인 해를 결정할 수 있다. Pareto front를 도출함으로써 다양한 시나리오에 따른 목적함수들의 값 분포 및 최적해의 위치를 가시적으로 확인하고 직관적으로 최종해를 결정할 수 있으며, 이는 Chung et al. (2016), Gabriel-Martin et al. (2020) 등에 의해 저수지 운영 관련 연구에 적용된 바 있다.

본 연구에서는 농업용 저수지의 이·치수 관련 지표 및 다중 목적 최적화 기법을 기반으로, 이·치수의 상반된 기능을 모두 고려한 홍수기 제한수위 설정 방법을 개발하고자 한다. 이·치수 관련 지표로는 다양한 저수지에 적용이 가능하며 빈도 개념을 포함하는 이수안전도 및 치수안전도를 정의함으로써 저수지의 이·치수 특성을 정량적으로 분석하고, 시기별 제한수위 시나리오를 적용하여 강우 및 농업용수 공급의 시기적 특성을 반영하며, Pareto front를 이용한 도식적 해법으로 최적의 제한수위를 도출하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

농업용 저수지의 이수안전도 및 치수안전도를 기반으로 이·치수 기능을 모두 고려한 홍수기 제한수위 설정 기법을 개발하였으며, 연구의 전체 흐름도는 Fig. 1과 같다. 시기별 농업용수 공급 및 강우 특성의 변화를 고려하여 제한수위를 시기별로 달리 적용하였고, 안전도를 기반으로 하는 정량적/도식적 분석을 통해 최적의 제한수위 조합을 도출하였다.

### 1. 연구대상지

연구대상지로는 오봉저수지, 예당저수지, 묘곡저수지를 선정하였다. 오봉저수지와 예당저수지는 수문을 통한 홍수조절 기능을 갖추고 있고 최근 개보수 사업으로 자료 취득이 용이하다는 점이 있으며, 묘곡저수지는 비상수문이 설치되어 있으나 2019년에 농업용수 확보를 위해 비상 방류를 충분히 하지 않았다가 태풍 피해를 키운 사례가 있어 연구대상지로 선정하였다. Fig. 2는 각 저수지의 위치와 유역도를, Table 1은

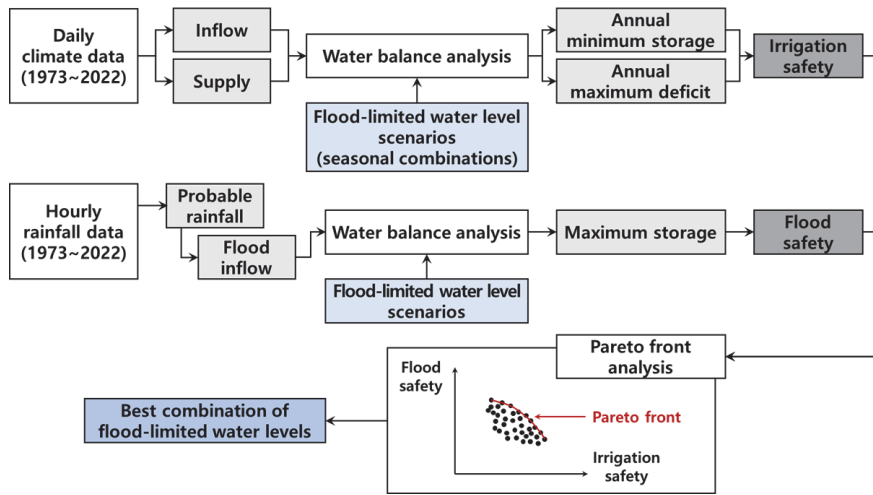


Fig. 1 Flow chart of the study method

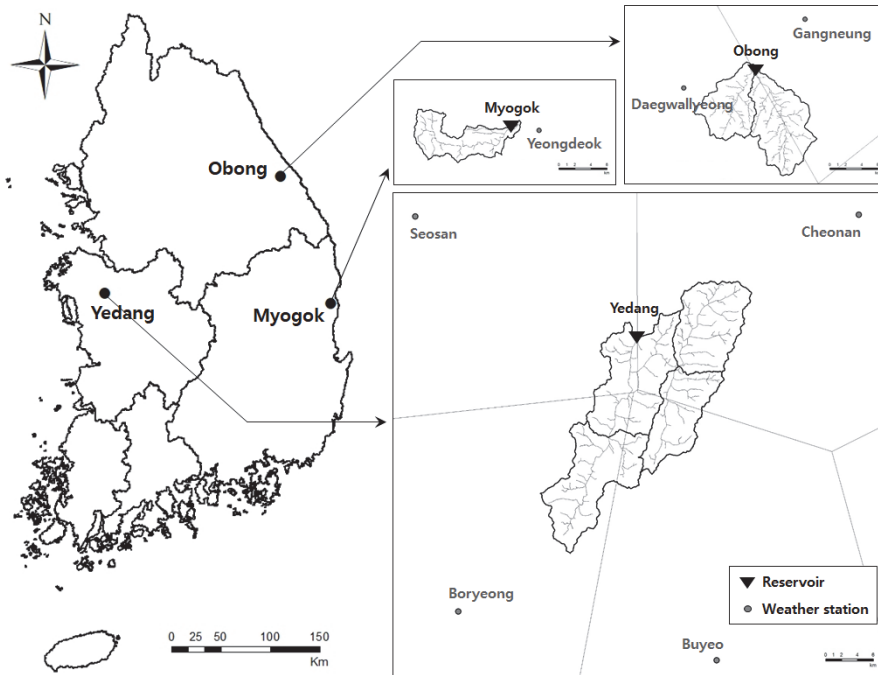


Fig. 2 Location and watershed delineation of the study reservoirs

저수지 특성 중 이수 및 치수 기능과 관련된 제원 및 지표를 나타낸다. Table 1의 유역배율 (유역면적 대비 수혜면적)은 저수지의 이수 능력을 나타내는 대표적인 지표로서 (Noh and Lee, 2011), 값이 클수록 유입량에 비해 농업용수 공급량이 적기 때문에 이수안전도가 높을 것으로 추정할 수 있다. 저수지의 치수 능력을 나타내는 지표로는 유역비홍수량 (홍수조절용량 대비 유역면적)이 대표적이거나 이는 저수지의 방류능력을 반영하지 못하므로 실제 치수 능력과 차이가 있다고 판단하였으며, 본 연구에서는 평균 방류능 대비 유역면적 (이하

방류능/유역면적) 값을 산정하여 제시하였다. 이 값이 클수록 유입량에 비해 방류능이 크기 때문에 치수안전도가 높을 것으로 추정할 수 있다.

오봉저수지, 예당저수지, 묘곡저수지의 이·치수 관련 특징은 다음과 같다.

오봉저수지는 농업용 저수지이지만 강릉시에 생활용수를 공급한다. 수혜면적이 작고 유역배율이 커서 관개기 (4-9월)에는 농업용수 공급이 안정적인 편이나, 100,000 m<sup>3</sup>/일의 생활용수를 연중 공급하기 때문에 관개기 뿐만 아니라 강우량이

**Table 1** Characteristics of the study reservoirs

Characteristics	Unit	Obong	Yedang	Myogok
River	-	Han	Geum	Nakdong
Watershed area	km <sup>2</sup>	109.0	373.6	35.3
Irrigation area	km <sup>2</sup>	3.8	69.2	10.5
Effective storage	1,000 m <sup>3</sup>	14,329	46,070	8,441
Design flood	m <sup>3</sup> /s	2,735 (PMF*)	5,202 (PMF)	375 (200-year frequency)
Gate	-	(B)9.2 m× (H)10 m×4	(B)15 m× (H)6.5 m×11	(B)5 m× (H)2.5 m×1 (emergency gate)
Domestic water supply	m <sup>3</sup> /day	100,000	18,000	0
Watershed area /irrigation area	-	28.7	5.4	3.4
Discharge capacity** /watershed area	m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup>	15.8 (0.1-29.0)	14.0 (5.5-19.0)	8.3 (0.0-47.2)

\* Probable maximum flood

\*\* average from the level with a storage rate 50% to the top of the dam (value at the level with a storage rate 50% - value at the top of the dam)

적은 비관개기 (10-3월)에도 충분한 수량을 확보할 필요가 있다. 수문을 통해 홍수조절이 가능한 저수지로, 2021년 수리시설개보수사업으로 제당고를 높이고 수문을 확장하여 기존 500년 빈도에서 PMF (probable maximum flood) 기준으로 치수 능력을 보강한 바 있다. 그 결과 방류능력이 크게 개선되어서, 방류능/유역면적 값이 연구대상지 중 가장 크다.

예당저수지는 농어촌공사 관리 저수지 중 다섯 번째로 유효저수량이 크고 유역배율이 상위 30% 수준으로 농업용수 공급이 비교적 안정적이다. 예산군에 생활용수를 공급하고 있으나 매일 일정량을 공급하는 것이 아니라 필요 시 일부 수량만을 담당하고 있으며, 주로 비관개기인 11월부터 다음해 5월까지 공급이 이루어지고 공급량은 18,000 m<sup>3</sup>/일 (2019년-2023년 7월 일평균)로 오봉저수지의 18% 수준이다. 수문을 통해 홍수조절이 가능하다는 특징이 있으며, 최초 건설 당시 PMF 기준으로 설계되었고 2019년 치수능력증대사업으로 수문을 확장하여 치수 능력을 보강한 바 있다.

묘곡저수지는 경상북도 영덕·울진 지역에서 유효저수량이 가장 크지만 유역배율이 작은 편이어서 농업용수 공급에 주의가 필요하다. 대부분의 농업용 저수지와 같이 수문 없이 자연월류식 여수로로 홍수를 배제하며, 여수로에 비상수문이 설치되어 있어서 제한수위 운영에 활용이 가능하나 방류능력이 자연월류량의 8.5% 수준에 불과하여 홍수 시 비상 방류에 효율적으로 기능하기 어렵다.

연구대상지에 대해 1973-2023년의 기상자료를 이용하여 이·치수 기능을 모의하고 이수안전도 및 치수안전도를 산정하였다.

## 2. 제한수위 시나리오 설정

농업용 저수지 관리규정에서는 저수지의 수위 확보 및 홍수조절을 위해 홍수기인 6월 21일부터 9월 20일까지 제한수위에 따라 수문을 운영하도록 정하고 있으며, 초기 (6월 21일-7월 20일), 중기 (7월 21일-8월 20일), 후기 (8월 21일-9월 20일) 기간마다 제한수위를 각각 설정하도록 정하고 있다. 연구대상지 중 수문이 있는 오봉저수지의 경우 초기, 중기, 후기 전 기간에 대해 119.0 EL.m (저수율 84.4%)로 제한수위가 운영되고 있으며 (KRC, 2021), 예당저수지의 경우 초기 21.0 EL.m, 중기 21.3 EL.m, 후기 21.5 EL.m (저수율 67.5-77.8%)로 제한수위가 운영되고 있다 (KRC, 2020b).

본 연구에서는 초기/중기/후기의 제한수위를 저수율 기준 50%부터 100%까지 5% 간격으로 각각 변화시켜서 이들의 조합인 11<sup>3</sup>=1,331개 제한수위 조합을 시나리오로 설정하였다. 현행 제한수위가 저수율 기준 70-80% 선에서 운영되는 것이 보통이고 50% 또는 100% 수준으로 관리할 경우 가뭄 또는 홍수의 위험이 있을 수 있으나, 다양한 제한수위 조합에 따른 영향을 분석하고 그 안에서 최적의 조합을 찾기 위해 이와 같이 범위를 설정하였다.

## 3. 이수안전도 산정

이수안전도 산정 방법으로는, 다양한 저수지에 적용할 수 있고, 매년 다른 기상 환경의 영향을 반영할 수 있으며, 시나리오별 결과가 연속적인 값으로 산출되어 합리적으로 최적의 값을 선별할 수 있는 방법을 설정하였다. 기존의 이수안전도



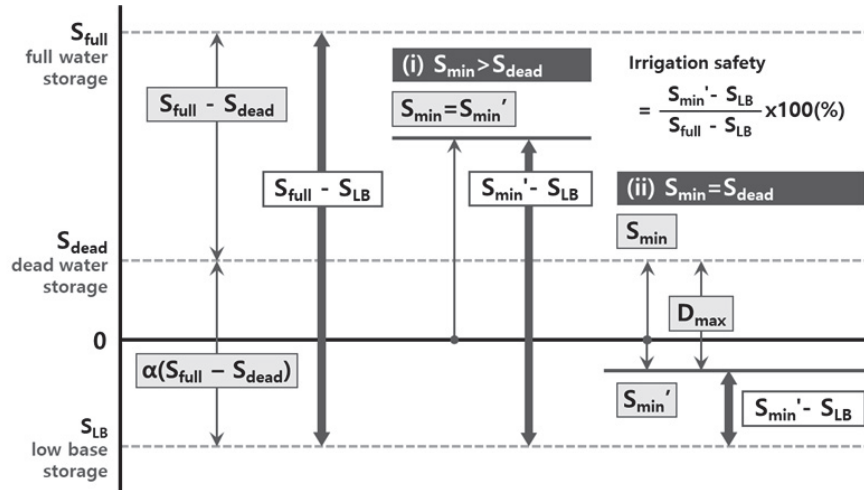


Fig. 3 Calculation of irrigation safety

관련 연구에서는 특정 기준에 대한 신뢰도/회복도/취약도를 이용하는 방법 (Hashimoto et al., 1982a; 1982b)이 주로 적용되어 왔으나, 이 방법은 기준에 도달하지 않는 저수지의 경우 모든 시나리오에 대해 이수안전도가 1 또는 0으로 동일하게 나올 수 있으며, 부족 사상 외에 다양한 양상을 나타낼 수 없어서 시나리오별 결과가 경직되게 나타나는 한계를 지닌다. 이에 본 연구에서는 이수안전도의 산정에 특정 기준을 초과하는 값만이 아닌 매년 발생하는 최소저수량 또는 최대부족량을 모두 적용함으로써 다양한 상황에 따른 다양한 결과를 반영하고자 하였다.

제한수위 시나리오에 따른 이수안전도를 평가하기 위해 매년 6월 21일부터 익년 6월 20일까지를 1년으로 정하여 1973년 6월 21일부터 2023년 6월 20일까지 50개년을 분석하였다. 저수지 유입량 및 공급량의 모의에는 한국농어촌공사에서 개발한 ‘수리수문설계시스템 (K-HAS)’의 이수 분석 모듈을 이용하였다. K-HAS 이수 분석 모듈에서 일별 유입량과 공급량의 모의에는 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model) 모형과 Penman 모형이 각각 적용되며, 작부시기 및 작물계수 등의 정보는 시스템 데이터베이스의 기본값을 적용하였다 (KRC, 2020a). 유입량 및 공급량 모의 결과에 제한수위 시나리오별로 물수지 분석을 수행하여 일별 저수량을 산정하였다. 저수량은 사수위와 제한수위 (비홍수기에는 만수위)의 범위에서만 나타났고, 제한수위 이상의 저수량은 무효방류량으로, 사수위 이하의 공급량은 부족량으로 산정하였다.

저수지에 따라 저수량이 항상 사수량을 상회하는 경우도 있지만 수차례 사수량에 도달하며 매년 다른 부족량이 나타나기도 하므로, 단순히 사수량과 만수량 사이의 최소저수량으로는 이수안전도를 충분히 나타낼 수 없다고 판단하였다.

이에 Eq. 1 및 Fig. 3과 같이 사수량 아래 가상의 하한선 ( $S_{LB}$ )을 설정하여서, 연간 최소저수량 ( $S_{min}$ )이 사수량인 경우 해당 시점의 부족량을 반영한, 사수량 이하의 가상의 저수량 ( $S'_{min}$ )을 적용하였다 (Eq. 2). 하한선은 사수량에서 유효저수량의 일정 비율 ( $\alpha$ )을 뺀 값으로, 본 연구에서는  $\alpha = 0.3$ 으로 설정하였다. 이수안전도는 Eq. 3와 같이 하한선과 만수량의 범위에서  $S'_{min}$ 가 차지하는 비율 (%)로 정의하였다.

$$S_{LB} = S_{dead} - (S_{full} - S_{dead}) \times \alpha \quad (1)$$

$$S'_{min} = \begin{cases} S_{min} & (S_{min} > S_{dead}) \\ \max(S_{min} - D_{max}, S_{LB}) & (S_{min} = S_{dead}) \end{cases} \quad (2)$$

$$f_1 = \frac{S'_{min} - S_{LB}}{S_{full} - S_{LB}} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서,  $S_{LB}$ 는 가상의 저수량 하한선,  $S_{dead}$ 는 사수량,  $S_{full}$ 는 만수량,  $\alpha$ 는 하한선 설정을 위한 유효저수량에 대한 비율,  $S_{min}$ 는 연간 최소저수량,  $S'_{min}$ 는 하한선에 따라  $S_{min}$ 을 환산한 값,  $D_{max}$ 는 연간 최대부족량,  $f_1$ 은 이수안전도를 의미한다.

$\alpha$  값을 너무 작게 설정하면 하한선을 초과하는 부족량을 고려하지 못하고, 너무 크게 설정하면 이수안전도의 분포 범위가 좁아져서 도식적인 해법에 한계가 생길 수 있다. 이에 적절한  $\alpha$  값의 설정이 필요하며, 본 연구에서는 연구대상지의 최대부족량 모의 결과를 고려하여 이수안전도가 적절한 범위에서 산출되도록  $\alpha$ 를 0.3으로 설정하였다.

연간 최소저수량 및 최대부족량으로부터 연간 이수안전도를 산정한 후, 10년 빈도에 해당하는 값을 최종적인 이수안전도로 산정하였다. 또한, 이수안전도의 보조지표로서 매년 관계 시작 시점의 저수율에 대해 10년 빈도 값을 산출하여, 최저 기준 (60%)을 만족하지 못하는 제한수위 조합을 분석에서 제외하였다.

#### 4. 치수안전도 산정

치수안전도 산정 방법은 이수안전도와 마찬가지로 다양한 저수지에 적용할 수 있고 시나리오별 결과가 연속적인 값으로 산출되어 합리적으로 최적의 값을 선별할 수 있는 방법을 설정하였다.

1973년부터 2022년까지 50개년의 강우 자료를 이용하여 지속시간 1-48시간 확률강우량을 산정하고 제한수위 (초기수위)를 저수율 기준 50%부터 100%까지 5% 간격으로 변화시키며 홍수 유입에 따른 저수지 운영을 모의하였다. 저수지별 설계빈도에 맞추어 오봉저수지와 예당저수지에는 PMF (probable maximum flood)를 적용하였고, 모곡저수지에는 200년 빈도에 안전율 20%를 적용하였다. 모의에는 자체 구축한 Clark 단위도 모듈과 미 육군 공병단에서 개발한 HEC-5 모형을 연계 적용하였다. 제한수위 이상의 유입량은 저수지의 방류능력 안에서 전량 방류하고, 수위가 제당고에 도달하면 모의를 중지하도록 설정하였다.

지속시간별 모의 결과 중 최대저수량 ( $S_{max}$ )을 산출하고, Eq. 4와 같이 만수량과 제당고 저수량 범위에서 최대저수량이 차지하는 비율 (%)로 치수안전도를 정의하였다. 제한수위 시나리오마다 초기/중기/후기의 치수안전도를 산정한 후 이들의 평균값을 각 시나리오에 대한 최종적인 치수안전도로 산정하였다.

$$f_2 = \frac{S_{top} - S_{max}}{S_{top} - S_{full}} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서,  $f_2$ 는 치수안전도,  $S_{max}$ 는 최대저수량,  $S_{full}$ 은 만수량,  $S_{top}$ 는 제당고 저수량을 의미한다.

본 연구에서 정의한 이수안전도 (Eq. 3)와 치수안전도 (Eq. 4)는 각각의 의미를 반영하여 정의한 것이므로 단위는 같으나 절대적인 안전도를 나타내는 것은 아니다. 따라서 하나의 저수지에 대해 두 안전도를 서로 비교하는 것은 무의미하며, 여러 개의 저수지를 대상으로 이수 또는 치수 능력을 비교하는데 이수안전도와 치수안전도를 각각 적용할 수 있다. 또한,

제한수위 시나리오에 따른 값을 비교하여 더 나은 시나리오를 선별하는 기준으로 활용할 수 있다.

#### 5. 최적의 제한수위 결정

제한수위 시나리오에 따라 이수안전도와 치수안전도가 다양하게 산출될 수 있으며, 두 안전도가 모두 높게 나오는 시나리오를 선별하여 최적의 초기/중기/후기 제한수위 조합을 결정할 수 있다. 이를 도식적으로 분석하기 위해 각 시나리오별 (이수안전도, 치수안전도)를 좌표평면에 점으로 도시하고 군집의 우상단 경계로부터 Pareto front를 도출하였다.

Pareto front는 다중 목적 최적화에서 모든 목적함수에 대해 최적인 해 (Pareto optimal set 또는 non-dominated solutions)로 이루어진 경계로서 (Deb et al., 2002; Deb, 2011), 목적함수가 2개인 경우에는 곡선으로, 3개인 경우에는 곡면으로, 4개 이상인 경우에는 초곡면 (hypersurface)으로 나타난다. 본 연구에서는 좌표평면의 군집에서 이수안전도와 치수안전도가 모두 높은 점들이 위치하는 경계선을 의미한다. 상충관계 (trade-off)인 2개의 목적함수에 대해 두 함수 모두 최대화하고자 하는 경우, Pareto front는 좌표평면에서 군집의 우상단에 위치하며 우하향 곡선 (downward sloping curve)으로 나타난다 (Fig. 4). 제한수위가 증가할수록 이수안전도는 증가하는 반면 치수안전도는 감소하기 때문에 이수안전도와 치수안전도는 상충관계이며, 두 안전도 모두 최대화하는 것이 목적이므로 Pareto front가 군집의 우상단에 우하향 곡선으로 나타나게 된다.

Pareto front 상에서 최종적인 해를 결정하는 방법으로 가중합 방법 (weighted sum method), 가중 최소-최대 방법 (weighted min-max method 또는 weighted Tchebycheff method), 가중 메트릭 방법 (weighted metric method), 사전식 방법 (lexicographic method) 등이 있다 (Chang, 2015; Marler and Arora, 2004). 가중합 방법은 Eq. 5와 같이 다중 목적함수를 스칼라화 (scalarization)하는 방법으로, 수식이 단순하여 적용이 쉽지만 가중치의 조합이나 Pareto front의 형태에 따라 최종해가 Pareto front 상에 나타나지 않을 수 있는 한계가 있다. 가중 최소-최대 방법은 Eq. 6과 같이 목표 지점 (ideal point)으로부터 체비셰프 거리 (Tchebycheff distance; 벡터 성분별 차이 중 최댓값)가 최소인 점을 찾는 방법으로, 항상 Pareto front 상에서 최종해를 찾을 수 있으며 목표 지점의 값을 명확히 알고 있을 때 유용하다. 가중 메트릭 방법은 Eq. 7과 같이 목표 지점으로부터 거리 (metric)가 최소인 점을 찾는 방법으로,  $p=1$ 이면 가중합 방법과 유사하고,  $p=2$ 이면 유클리디안 거리 (Euclidean distance)가 최소인 점을 찾으며,  $p=\infty$ 이면 가중 최소-최대 방법과 동일하다.  $p$  값이 작을수록 계산은 간단하지만 최종해가 Pareto front 상에 나타나지 않을 수 있는 한계

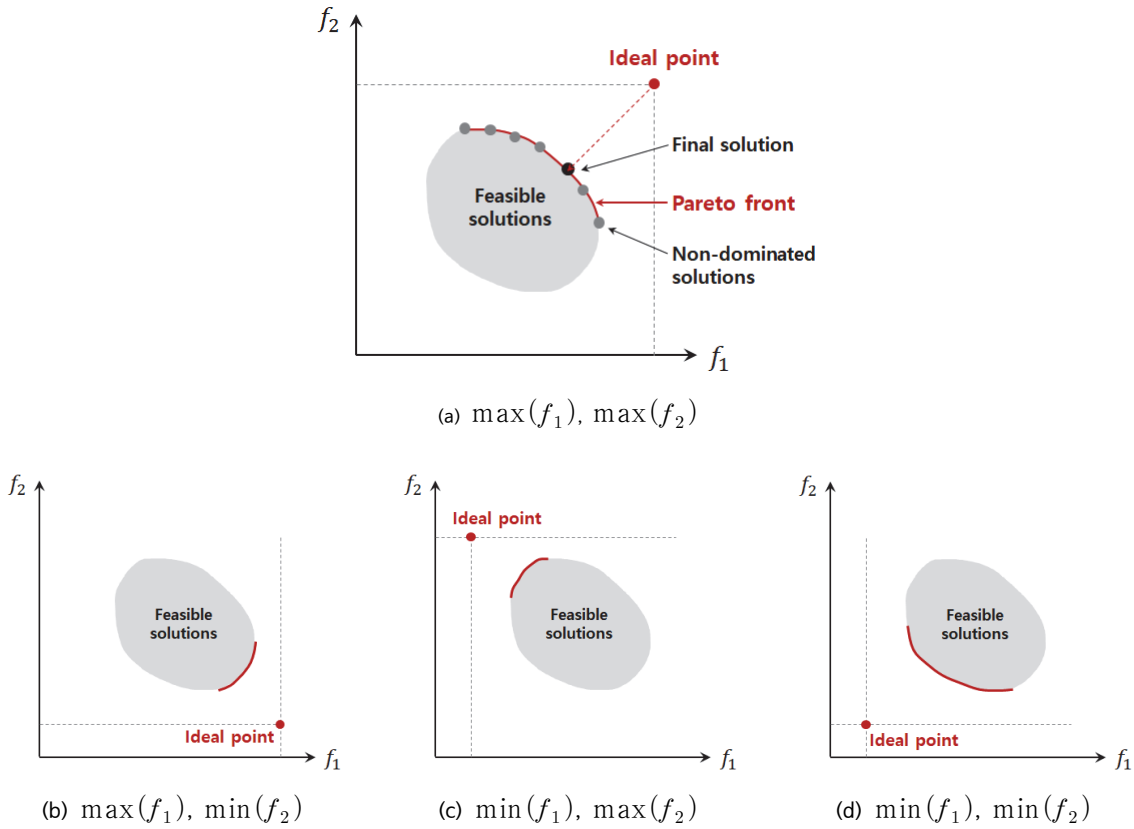


Fig. 4 Pareto front for possible cases in a two-dimensional space

가 있다. 사전식 방법은 목적함수를 중요도에 따라 순차적으로 적용하는 방법으로, 최종해가 반드시 Pareto front 상에 나타난다는 장점이 있으나 추가적인 제약조건을 설정해야 하는 한계가 있다. 본 연구에서는 다양한 저수지에서 Pareto front 형태와 무관하게 최종해를 찾을 수 있도록 가중 최소-최대 방법 (또는 가중 메트릭 방법의  $p = \infty$ )을 적용하였다.

$$\text{Minimize } u(x) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (5)$$

$$\text{Minimize } u(x) = \max_i \{w_i |f_i(x) - f_i^o|\} \quad (6)$$

$$\text{Minimize } u(x) = \left\{ \sum_{i=1}^k w_i |f_i(x) - f_i^o|^p \right\}^{1/p} \quad (7)$$

여기서,  $x$ 는 목적함수의 변수 벡터,  $S$ 는  $x$ 의 분포 공간,  $u$ 는 다중 목적함수의 최적화를 위한 새로운 목적함수,  $k$ 는 목적함수의 개수,  $i$ 는  $1 \leq i \leq k$ 인 정수,  $f_i$ 는  $i$ 번째 목적함

수,  $f_i^o$ 는  $i$ 번째 목적함수의 목표값,  $w_i$ 는  $i$ 번째 목적함수에 대한 가중치,  $p$ 는 새로운 목적함수의 지수를 의미한다. 본 연구에서  $x$ 는 초기/중기/후기 제한수위의 조합을,  $f_1$ 는 이수안전도 ( $f_1$ )와 치수안전도 ( $f_2$ )를 의미한다.

이수안전도와 치수안전도가 절대적인 값이 아니므로 Pareto front를 이루는 두 안전도를 각각 0-100% 범위로 표준화하여 점 (0, 100)에서부터 점 (100, 0)으로 이어지는 우하향 곡선을 도출하였다. 이때, 두 안전도 모두 최대화하는 것이 목표이므로 목표 지점은 (100, 100)이 된다. 표준화된 Pareto front 위의 점들에 대해 Eq. 6을 적용하여 최종해를 산정함으로써 이수안전도와 치수안전도가 골고루 높은 최적의 제한수위 조합을 결정하였다. 저수지에 따라 이수안전도와 치수안전도의 중요도가 다른 경우에는 가중치를 서로 다르게 부여할 수 있으며, 본 연구에서는 두 안전도의 가중치가 동일하다고 설정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 이수안전도 및 치수안전도 산정

연구대상지에 제한수위 시나리오를 적용한 결과, 평균 이수안전도는 오봉저수지 58.2%, 예당저수지 55.9%, 묘곡저수지 28.6%이고, 평균 치수안전도는 오봉저수지 96.2%, 예당저수지 91.6%, 묘곡저수지 68.3%로 묘곡저수지의 이수 및 치수 기능이 비교적 취약한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 평균 이수안전도와 치수안전도를 Table 1에서 제시한 지표와 비교한 것으로, 유역배율이 클수록 이수안전도가 크고 방류능/유역면적 값이 클수록 치수안전도가 커서 저수지별 특성이 안전도에 잘 반영된 것으로 나타났다. 다만, 오봉저수지의 경우 유역배율이 예당저수지의 5.3배 수준이지만 평균 이수안전도는 큰 차이가 나지 않는 것으로 나타났으며, 이는 오봉저수지가 관개기에 농업용수 공급량이 적은 대신 연중 생활용수 공급량이 많기 때문으로 분석된다.

초기/중기/후기 제한수위가 각각 이수안전도에 미치는 영향을 분석한 결과 (Fig. 6), 오봉저수지의 이수안전도는 후기 제한수위의 영향이 큰 반면, 예당저수지와 묘곡저수지의 이수안전도는 초기/중기 제한수위의 영향이 큰 것으로 나타났다. Fig. 7은 이를 설명하기 위해 모든 제한수위 시나리오에 대한 저수율 모의 결과를 날짜별 평균 및 최대/최소 범위로 나타낸 것이다.

오봉저수지의 경우 다른 두 저수지와 달리 저수율의 감소가 관개기에 집중되지 않고 연중 발생하는 것으로 나타났다. 관개기 (4-9월)에 농업용수 공급량이 비교적 적기 때문에 초기/중기 제한수위에 따른 영향이 크지 않으나, 강우량이 적은 비관개기 (10-3월)에 지속적으로 생활용수를 공급하기 때문에 연간 최소저수량이 주로 비관개기에 나타남에 따라 이수안전도 역시 후기 제한수위에 크게 영향을 받는 것으로 분석된다.

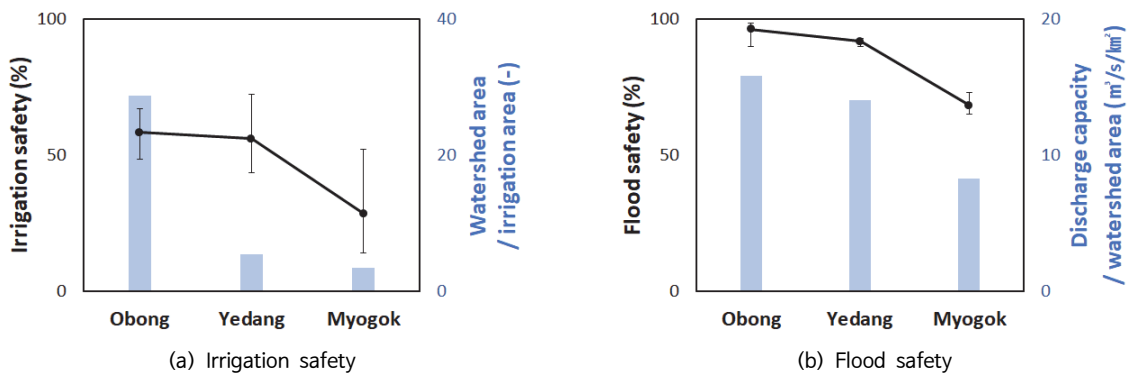


Fig. 5 Comparison of reservoir characteristics and irrigation/flood safety

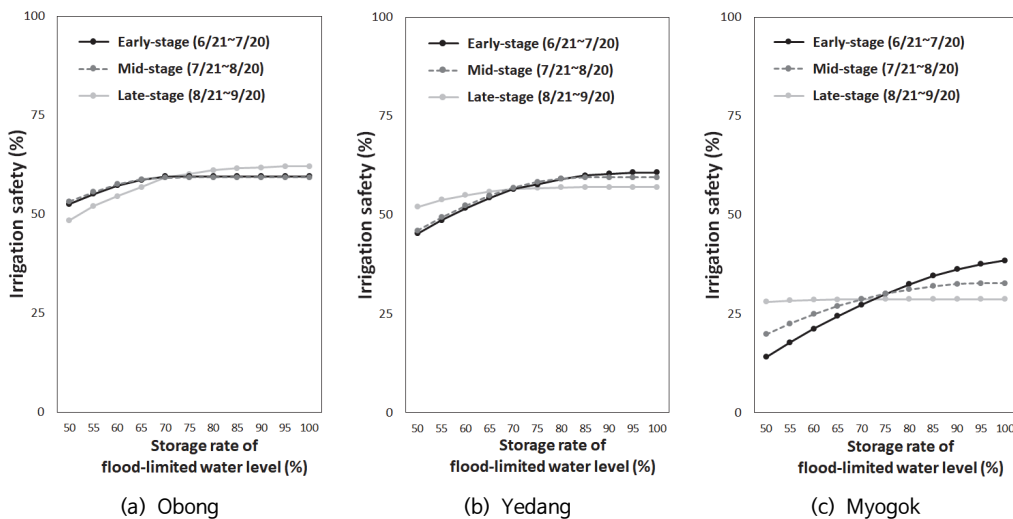
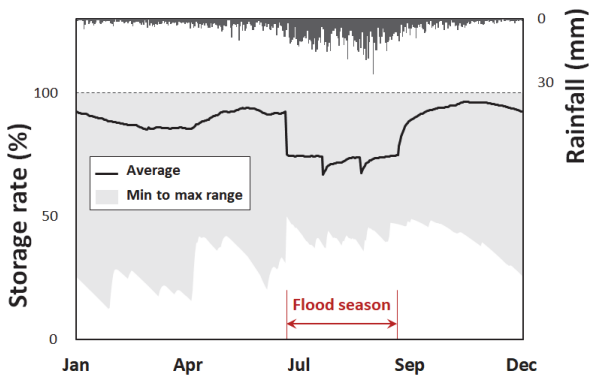


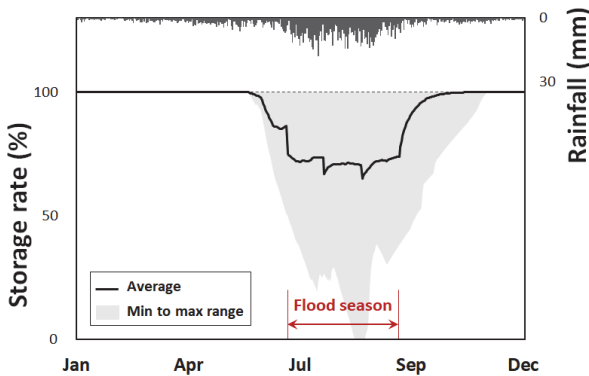
Fig. 6 Effect of seasonal flood-limited water level on irrigation safety



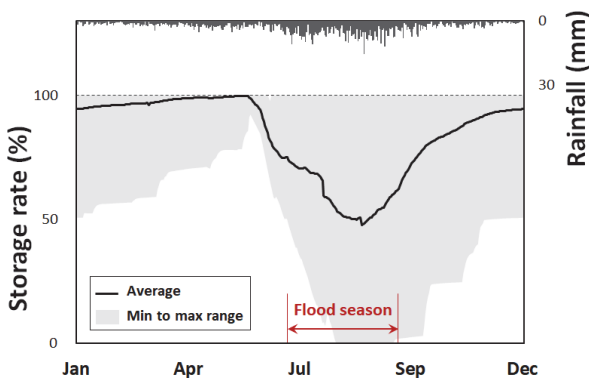
예당저수지와 묘곡저수지는 관개기 농업용수 공급으로 인해 8월 중에 연간 최소저수량이 나타남에 따라 초기/중기 제한수위에 크게 영향을 받는 것으로 분석된다. 이 중 유역배율이 더 작은 묘곡저수지의 경우 초기/중기 제한수위 운영으로 저수율이 하강한 이후 이를 회복하기까지 예당저수지보다 더 많은 기간이 소요되는 것으로 나타났다.



(a) Obong



(b) Yedang



(c) Myogok

Fig. 7 Simulated daily storage rate (average, minimum, and maximum) from all flood-limited water level scenarios

## 2. 최적의 제한수위 결정

이수안전도 및 치수안전도의 산정 결과로부터 좌표평면에 (이수안전도, 치수안전도)를 점으로 도시한 결과, Fig. 8과 같이 세 개 저수지가 각각 특정 위치에서 군집을 이루는 것으로 나타났다. 오봉저수지와 예당저수지의 군집은 좌표평면의 우상단에 위치하고, 묘곡저수지의 군집은 좌상단에 위치하였다. 앞서 언급한 바와 같이 두 안전도 사이의 직접적 비교는 불가능하지만 여러 저수지에 대한 상대적 비교는 가능하다고 볼 때, 오봉저수지와 예당저수지는 이수안전도와 치수안전도가 모두 높은 편이고, 묘곡저수지는 다른 저수지들보다 군집의 중심이 왼쪽으로 약간 치우쳐져 있어서 이수 기능이 치수 기능보다 다소 취약한 것으로 해석된다.

군집의 모양을 비교할 때, 오봉저수지의 군집은 가로가 짧아서 이수안전도의 분포가 좁고, 예당저수지의 군집은 세로가 짧아서 치수안전도의 분포가 좁은 것으로 나타났다. 오봉저수지는 다른 두 저수지와 달리 용수 공급이 제한수위 운영 시기(홍수기)에 집중되지 않고 이수안전도가 대부분 후기 제한수위에 영향을 받기 때문에 제한수위에 따른 이수안전도의 변화 폭이 작은 것으로 분석된다. 예당저수지는 Table 1의 방류능/유역면적 값이 평균으로는 오봉저수지보다 작으나 낮은 수위에서는 다른 두 저수지보다 크기 때문에, 홍수 시 초기 유입량이 전량 방류되어 수위 상승 시점이 늦춰짐에 따라 제한수위(초기수위)의 영향이 줄어든 것으로 분석된다.

이수안전도와 치수안전도에 대한 Pareto front는 Fig. 8과 같이 모든 연구대상지에서 군집의 우상단에 우하향 곡선으로 나타났다. Pareto front의 형태는 오봉저수지와 예당저수지에서는 위로 볼록한 곡선으로, 묘곡저수지에서는 선형에 가까운 곡선으로 나타났다. 이는 수문으로 홍수를 배제하는 경우 방류능력은 크지만 수위 상승에 따른 수위-방류능 곡선의 증가율이 점차 둔화되기 때문에 Pareto front에서 이수안전도 증가(제한수위 증가)에 따른 치수안전도의 감소율이 점차 커지기 때문으로 분석된다.

Pareto front를 구성하는 이수안전도와 치수안전도를 각각 0-100% 범위로 표준화한 결과는 Fig. 9와 같으며, 이 중에서 Eq. 6을 만족시키는 점 상위 2개를 선별하여 최적의 제한수위를 도출하였다. 오봉저수지의 최적의 제한수위는 초기 65-70% (115.34-116.32 EL.m), 중기 70% (116.32 EL.m), 후기 75% (117.26 EL.m)이고, 예당저수지는 초기 75% (21.36 EL.m), 중기 70-75% (21.12-21.36 EL.m), 후기 65-70% (20.87-21.12 EL.m)로, 이에 맞추어 시기별 수문 운영이 필요한 것으로 나타났다. 묘곡저수지의 경우 초기 75-80% (48.58-49.22 EL.m), 중기 70% (47.92 EL.m), 후기 50% (45.05 EL.m)로 비상수문 또는 취수 구조물을 통한 저수율 관리가 필요한 것으로 나타났다.

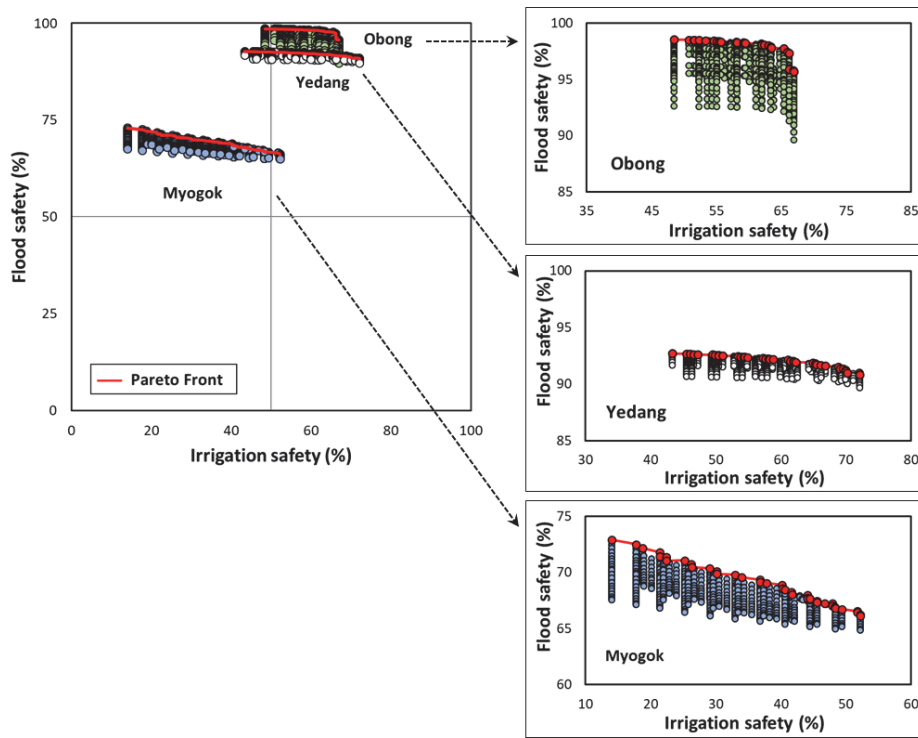


Fig. 8 Pareto front between irrigation safety and flood safety

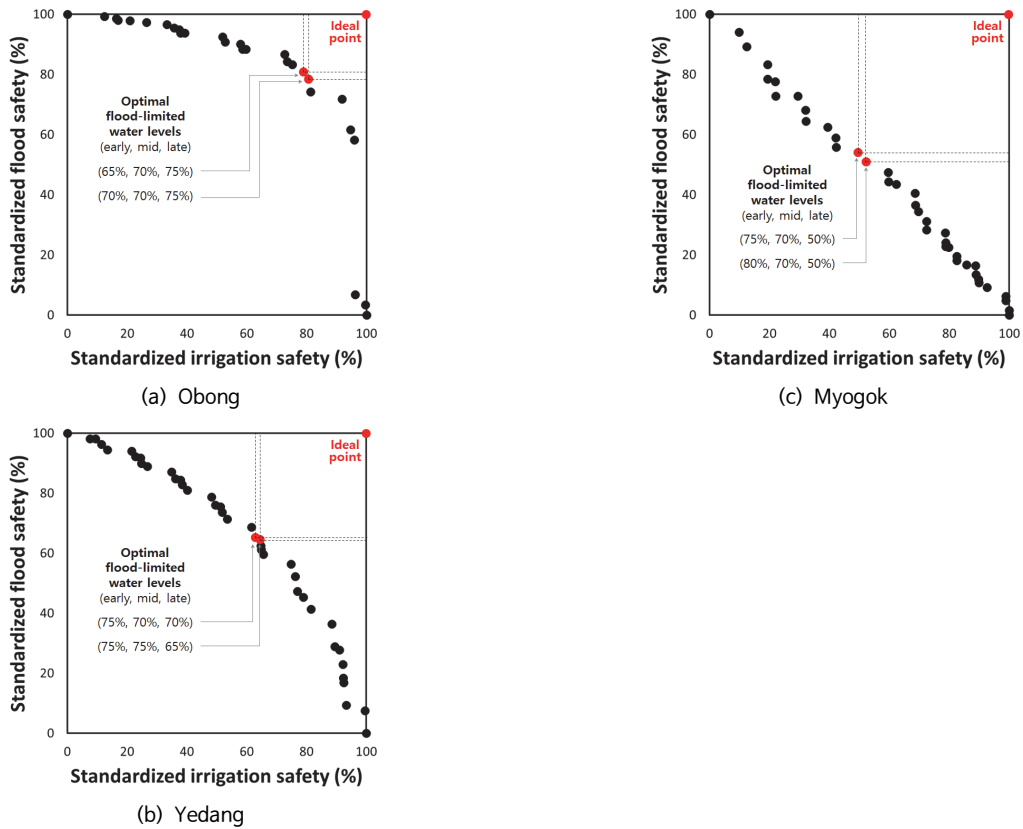


Fig. 9 Determination of optimal flood-limited water levels

오봉저수지는 최적의 제한수위가 초기에서 후기로 갈수록 증가하고 예당저수지와 묘곡저수지는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 이수안전도가 각각 후기 또는 초기/중기 제한수위에 크게 영향을 받기 때문인 것으로 분석된다. 묘곡저수지에서 후기 제한수위로 저수율 50%의 매우 낮은 값이 도출된 것은, 후기 제한수위가 이수안전도에 거의 영향을 주지 않기 때문에 치수안전도가 최대한 높은 지점에서 제한수위가 결정되었기 때문으로 분석된다. 다만, 후기에 묘곡저수지의 평균 저수율이 54.6% 수준이라는 것과 (Fig 7 (c)), 이 정도 수준이라도 이듬해 관개기 전까지 만수위가 채워지는 데에는 문제가 없는 것으로 미루어 볼 때, 저수율 50%는 현실적인 값으로 판단된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업용 저수지의 이·치수 기능을 모두 고려한 시기별 홍수기 제한수위 설정 방법을 개발하였다. 이·치수 측면에서 다양한 특성을 가진 저수지를 분석하기 위하여 오봉저수지, 예당저수지, 묘곡저수지를 연구대상지로 선정하였고, 저수지의 이·치수 특성을 정량적으로 분석하기 위해 이수안전도와 치수안전도를 정의하였고, 강우 및 농업용수 공급의 시기적 특성을 반영하여 시기별 제한수위 시나리오를 설정하였으며, 다중 목적 최적화를 위한 Pareto front 기반의 도식적 해법으로 시기별 최적의 제한수위 조합을 도출하였다. 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이수안전도와 치수안전도를 분석한 결과, 연구 대상지 중 묘곡저수지의 이수 및 치수 기능이 비교적 취약하였으며, 오봉저수지의 이수안전도는 후기 제한수위에, 예당저수지와 묘곡저수지의 이수안전도는 초기/중기 제한수위에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 2) 좌표평면에 제한수위 시나리오별 (이수안전도, 치수안전도)를 점으로 도시하여 군집을 비교한 결과, 묘곡저수지는 군집의 중심이 비교적 왼쪽으로 치우쳐져서 이수 기능이 다소 취약하며, 오봉저수지는 군집의 가로 길이가 짧아서 제한수위에 따른 이수안전도의 변화 폭이 작고, 예당저수지는 군집의 세로 길이가 짧아서 제한수위에 따른 치수안전도의 변화 폭이 작은 것으로 나타났다.
- 3) 군집의 우상단 경계로부터 Pareto front를 도출하고 이수안전도와 치수안전도가 모두 높은 점을 선별하여 최적의 제한수위를 결정된 결과, 저수율 기준으로 오봉저수지는 초기 65-70%, 중기 70%, 후기 75%, 예당저수지는 초기 75%, 중기 70-75%, 후기 65-70%, 묘곡저수지는 초기 75-80%, 중

기 70%, 후기 50%로 나타났다.

본 연구에서 정의한 이수안전도와 치수안전도는 개별 저수지의 이수 또는 치수 능력을 기준으로 안전한 정도를 나타낸 것이므로 저수지의 용량이나 지역별 특성과 무관하게 적용이 가능하다. 다만, 애초에 과소/과대 설계가 되었거나 기존의 유역/기상/용수공급 조건을 벗어나는 큰 변화가 발생한 경우에는 모든 시나리오에 대해 안전도가 0% 또는 100%로 산정되는 등 무의미한 값이 도출될 수 있어 주의가 필요하다. 또한 두 안전도는 절대적인 값을 나타내는 것이 아니므로 하나의 저수지에 대해 두 안전도의 대소를 비교하고 이·치수 기능의 우열을 판단하는 것은 부적절하며, 시나리오 비교 및 선별을 위한 기준 또는 여러 저수지의 기능을 비교하는 용도로 활용이 가능하다.

본 연구에서는 방법론의 개발을 목적으로 하여 3개 농업용 저수지만을 대상으로 분석을 수행하였으나, 방법론의 범용성을 확보하기 위해서는 대상지의 확대 분석이 필요하다. 추후 연구를 통해 연구대상지를 다양하게 확장한다면 저수지별 이·치수 특성에 따른 안전도의 군집 및 Pareto front의 위치와 형태가 다양하게 나타남에 따라 다채로운 도식적 해석이 가능할 것으로 기대된다. 향후 본 방법론을 통해 저수지별 특성과 시기별 강우 및 농업용수 공급 특성을 고려하여 홍수기 제한수위를 설정한다면 효율적인 저수지 운영이 가능할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반및재해대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(320046-5).

#### REFERENCES

1. Brea, F., and V. D. Fachinotti, 2017. A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwelling. *Energy Build* 154: 283-294. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.002.
2. Chang, K. H., 2015. Multiobjective optimization and advanced topics, Ch. 5. *Design Theory and Methods Using CAD/CAE*. Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-398512-5.00005-0.
3. Choi, S., D. Lee, and J. Moon, 2014. Comparison of water supply reliability by dam operation methods. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(6): 523-536 (in Korean). doi: 10.3741/JKWR.2014.47.6.523.

4. Chung, I. C., S. K. Kim, and J. Kim, 2016. Multi-objective reservoir operation by using a multiple objective programming model. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 16(4): 239-245 (in Korean). doi: 10.9798/KOSHAM.2016.16.4.239.
5. Deb, K., 2011. Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: An introduction. *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*, 3-34. doi: 10.1007/978-0-85729-652-8\_1.
6. Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6(2): 182-197. doi: 10.1109/4235.996017.
7. Gabriel-Martin, I., A. Sordo-Ward, D. Santillán, and L. Garrote, 2020. Flood control versus water conservation in reservoirs: A new policy to allocate available storage. *Water* 12(4): 994. doi: 10.3390/w12040994.
8. Hashimoto, T., D. P. Loucks, and J. R. Stedinger, 1982a. Robustness of water resources systems. *Water Resources Research* 18: 21-26. doi: 10.1029/WR018i001p00021.
9. Hashimoto, T., J. R. Stedinger, and D. P. Loucks, 1982b. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18: 14-20. doi: 10.1029/WR018i001p00014.
10. Heo, J., T. H. Bong, S. P. Kim, and S. M. Jun, 2022. Assessment of flood vulnerability for small reservoir according to climate change scenario - reservoir in Gyeonggi-do. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 64(5): 53-65 (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2022.64.5.053.
11. Hwang, S., 2012. Impacts of reservoir dam heightening on downstream flood alleviation. Master diss., Seoul National University (in Korean).
12. Jang, I. G., J. Y. Lee, J. B. Lee, and J. S. Kim, 2014. Evaluation of flood control capacity of agricultural reservoirs during flood season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(4): 69-75 (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2014.56.4.069.
13. Jang, S. H., J. Y. Yoon, S. D. Kim, and Y. N. Yoon, 2007. An establishment of operation and management system for flood control and conservation in reservoir with gate: II. Establishment of efficient reservoir management and operation system. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 27(2): 141-150 (in Korean).
14. Jun, S. M., M. S. Kang, S. Hwang, J. Park, and J. H. Song, 2020. Flood vulnerability assessment for prioritizing and evaluating rehabilitation of ungauged reservoirs considering climate change. *Water* 12(7): 1901. doi: 10.3390/w12071901.
15. Jun, S. M., S. H. Hwang, K. Kim, H. J. Lee, S. Choi, M. S. Kang, and D. G. Lee, 2019. Inundation analysis of downstream farmlands according to the operation rule of agricultural reservoir. In *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference 2019* (in Korean).
16. Jung, H. M., S. H. Lee, K. Kim, Y. C. Kwak, E. Choi, S. Yoon, R. Na, D. Joo, S. H. Yoo, and G. S. Yoon, 2021. Evaluation of agricultural reservoirs operation guideline using K-HAS and ratio correction factor during flood season. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 63(4): 97-104 (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2021.63.4.097.
17. Kim, J., J. Kwak, S. Hwang, S. M. Jun, S. Lee, J. N. Lee, and M. S. Kang, 2021. Analysis of flood control capacity of agricultural reservoir based on SSP climate change scenario. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 63(5): 49-62 (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2021.63.5.049.
18. Korea Rural Community (KRC), 2020a, K-HAS user's manual.
19. Korea Rural Community (KRC), 2020b, Yedang reservoir (dam) management regulations (amended on Oct. 28, 2020) (in Korean).
20. Korea Rural Community (KRC), 2021, Obong reservoir (dam) management regulations (amended on Sep. 27, 2021) (in Korean).
21. Kwon, O. I. and M. P. Shim, 1997. Determination scheme of variable restricted water level during flood period of multipurpose dam. *Journal of Korea Water Resources Association* 30(6): 709-720 (in Korean).
22. Lee, G. M., 2014. Water supply performance assessment of multipurpose dams using sustainability index. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(5): 411-420 (in Korean). doi: 10.3741/JKWRA.2014.47.5.411.
23. Lee, M. W., T. W. Kim, and G. W. Moon, 2013. Assessment of flood damage vulnerability considering regional flood damage characteristics in South Korea. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 13(4): 245-256 (in Korean). doi: 10.9798/KOSHAM.2013.13.4.245.
24. Liu, P., L. Li, S. Guo, L. Xiong, W. Zhang, J. Zhang, and C. Y. Xu, 2015. Optimal design of seasonal flood limited

- water levels and its application for the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology* 527: 1045-1053. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.055.
25. Marler, R. T., and J. S. Arora, 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26: 369-395. doi: 10.1007/s00158-003-0368-6.
  26. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2020. 1st Agricultural reservoir management plan (in Korean).
  27. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2022. Agricultural infrastructure management regulations (amended on Feb. 3, 2022) (in Korean).
  28. Ministry of Environment (ME), 2021. 1st National Water Management Basic Plan (2021-2030) (in Korean).
  29. Mo, C., J. Deng, X. Lei, Y. Ruan, S. Lai, G. Sun, and Z. Xing, 2022. Flood season staging and adjustment of limited water level for a multi-purpose reservoir. *Water* 14(5): 775. doi: 10.3390/w14050775.
  30. Noh, J. K., and J. N. Lee, 2011. Variation of water supply for instream flow from reservoirs with various magnifications of paddy irrigation area to watershed area. *Korean Journal of Agricultural Science* 38(2): 331-341 (in Korean).
  31. Pan, J., Y. Xie, M. Liu, Z. Gao, Z. Gao, and B. Xue, 2022. Dynamic control of water level in flood limited reservoir based on intelligent calculation. *Mathematical Problems in Engineering* 2022. doi: 10.1155/2022/3683122.
  32. Park, J., M. S. Kang, and I. Song, 2015. Assessment of flood vulnerability based on CMIP5 climate projections in South Korea. *Journal of the American Water Resources Association* 51(3): 859-876. doi: 10.1111/jawr.12283.
  33. Park, J. Y., I. K. Jung, K. Y. Lee, and S. J. Kim, 2013. Development of operating rule curve for multipurpose water supply in heightened agricultural reservoir. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(4): 1389-1400 (in Korean). doi: 10.12652/KSCE.2013.33.4.1389.
  34. Ryu, J. H., J. H. Song, and M. S. Kang, 2017. Analysis of flood control effect by applying variable restricted water level on rehabilitated agricultural reservoir. *In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2017*: 369 (in Korean).
  35. Sung, J., B. Kang, B. Kim, and S. 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 (in Korean). doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.9.687.
  36. Villamil, H. C., H. E. Espitia, and L. A. Bejarano, 2023. Multiobjective optimization of Fuzzy system for cardiovascular risk classification. *Computation* 11(7): 147. doi: 10.3390/computation11070147.
  37. Yang, J. S., S. S. Ahn, and K. B. Park, 2021. Development of reservoir operation rule and establishment of flood limited level in agriculture reservoir. *Crisisonomy* 17(12): 61-69 (in Korean). doi: 10.14251/crisisonomy.2021.17.12.61.