

농업용 독높임저수지의 다중 용수공급을 위한 이수운영기준곡선 개발

박종윤* · 정인균** · 이광야*** · 김성준****

Park, Jong-Yoon*, Jung, In-Kyun**, Lee, Kwang-Ya***, Kim, Seong-Joon****

Development of Operating Rule Curve for Multipurpose Water Supply in Heightened Agricultural Reservoir

ABSTRACT

This study developed an operating rule curve (ORC) for multipurpose water supply (irrigation and environmental water) in heightened agricultural reservoir. Among the 20 reservoirs in improvement project of agricultural reservoir dam heightening, the 4 representative reservoirs (Ungyang, Gungchon, Yongam and Unam) were selected for the study according to the analysis of statistical characteristics. Available environmental water supply amounts during irrigation and non-irrigation periods, which is the range from release restricted water level to high water level were estimated by water balance analysis using reservoir operation model. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water system performance were used to assess the multiple water supply capacity. The ORC was presented as the percentile rank for the daily reservoir water level from the results of reservoir operation using the past couple of decades weather data. The water levels for each percentile were divided into 3 buffer sections representing drought (5~25%), normal (25~75%), and flood (75~95%) year to operate the heightened agricultural reservoir with ORC.

Key words : Heightened agricultural reservoir, Operating rule curve, Irrigation water, Environmental water

초 록

본 연구에서는 농업용 독높임저수지의 다중용수공급능력(관개 및 하천유지용수) 평가에 따른 이수운영기준곡선을 개발하였다. 20개 독높이기 사업지구를 대상으로 특성분석에 따른 4개(웅양, 궁촌, 용암, 운암)의 대표 저수지를 선정하고, 이수운영모형을 이용한 물수지분석을 통해 하천 유지용수 공급 가능량을 산정하였다. 이수운영기준은 관개기와 비관개기에 대해 방류제한수위(사업전 만수위)에서 상시만수위까지의 저수위구간을 하천유지용수공급 가능 수위로 설정하고 신뢰도, 회복도 및 취약도 지수를 이용하여 각 독높임저수지 특성별 물공급 능력을 평가하였다. 이수운영기준 적용에 따른 독높임저수지의 이수운영기준곡선은 과거 이수운영모의결과로부터 일별 저수위를 백분위(Percentile Rank)로 표현하였다. 각 분위별 저수위 구간을 3개의 완충구간(Buffer)으로 나누어 갈수년(5~25%), 평수년(25~75%) 및 풍수년(75~95%)에 해당하는 저수지 운영이 가능하도록 하였다.

검색어 : 농업용 독높임저수지, 이수운영기준곡선, 관개용수, 하천유지용수

* 정회원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사수료 (bellyon@konkuk.ac.kr)

** 정회원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사 (nemoik@konkuk.ac.kr)

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원 책임연구원 (kylee@ekr.or.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수 (Corresponding Author · Konkuk University · kimsj@konkuk.ac.kr)

Received August 31 2012, Revised February 12 2013, Accepted April 24 2013

1. 서론

우리나라 용수사용의 48%를 차지하고 있는 농업용수는 저수지와 양수장, 보 등을 이용하여 농경지에 용수를 공급하고 있다. 이중 농업용저수지는 2008년 통계연보기준으로 17,649개가 있으며(박중윤 등, 2010), 전국에 산재되어 하천의 중상류부에서 농경지에 용수를 공급하는 역할을 수행하고 있다. 유역의 중상류부에 위치한 농업용저수지의 용량을 증대시키는 사업인 농업용저수지 독높이기 사업은 아치수측면에서 농업지역 관개용수의 공급과 함께 하천유지용수 공급, 더불어 재해측면에서 취약한 농업용저수지를 보강하는 것이다. 즉, 저수지 증고에 의해 늘어난 저수용량을 대상으로, 영농기간의 필요수량을 충족함은 물론 관개기 및 비관개기동안에 이수용량 확보에 따른 하천유지용량의 공급기능이 포함되었다. 이는 독높이기사업 이전의 저수지 기능인 관개용수 공급의 주목적과 더불어 저수지 하류하천의 하천유지용량 공급, 궁극적으로는 본류의 수질 개선 추가목적을 포함하고 있다(농림수산식품부, 2011).

독높이기사업 이전의 저수지 운영은 못자리용수가 들어가는 시기인 4월 중순부터 5월 중순경의 모내기 시기에 가장 신경을 쓰면서 관개용수의 원활한 공급을 위한 운영을 해 왔으나, 독높임저수지는 영농기간이 종료되는 시기인 9월 중하순을 기준으로, 하류하천의 하천유지용량 확보를 위한 저수지 운영이 필요하게 되었다. 즉, 독높임저수지는 영농이 종료되는 시점을 기준으로 저수용량을 최대한 확보한 후, 차년도 못자리용수 공급시점의 저수지 수위를 고려하면서, 영농기간 중에는 관개수량의 만족과 더불어 요구되는 하천유지용량도 동시에 만족하는 형태의 저수지 이수운영기준이 필요하다. 하지만, 대부분의 농업용저수지는 하천의 상류에 위치해 있기 때문에 하천유지용수공급 효과를 극대화하기 위해서는 복잡한 하천 지류분류 등 유역지역시설 등의 특성을 고려한 운영기준 방안이 도출되어야 한다. 또한, 수자원의 이상적인 관리방법은 유역단위의 운영이며, 이를 실현하기 위해서는 우선적으로 유역특성을 고려한 개별 운영표준안이 마련되어야 한다. 기존의 운영체계는 농민이 수혜자이며 농업용수 공급의 단일 목적으로 운영되었기 때문에 사업 후 달라지는 공급체계를 고려한 새로운 운영기준이 필요한 실정이다(농림수산식품부, 2011).

우리나라 농업용저수지의 이수운영기준에 관한 연구는 주로 관개기 동안의 농업용수공급을 위한 단일목적의 이수운영곡선이었다(김태철 등, 1992; 김태철 등, 2003). 최근, 하천유지용수와 같은 다중용수공급을 목적으로 하는 이수운영기준 개발에 관한 연구들이 수행되었다(노재경, 2010a, 2010b; 이재남과 노재경, 2010). 이에 본 연구에서는 4대강 수계 독높이기 사업지구 20개소를 선정하여, 특성분석을 통해 분류된 4개 군집의 각 대표 저수지(용양, 궁촌, 용암, 운암)에 대해 이수운영 평가기준

(한발기준 10년 빈도)을 만족하는 관개용수 및 하천유지용수 공급을 위한 이수운영기준곡선을 도출하고자 하였다. 이를 위해, HOMWRS (Hydrological Operation Model for Water Resources System)모형을 이용하여 저수지 유입량 및 필요수량 산정을 통해 물수지 계산을 수행하고, 관개기와 비관개기 동안의 독높임저수지의 다중용수공급을 위한 방류기준수위 설정에 따른 각 기준수위별 하천유지용수 방류 가능량을 산정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역 선정

본 연구에서는 전국 독높이기사업 대상 저수지 총 113개 중 20개 사업지구를 연구 대상지역으로 선정하였다. Fig. 1은 본 연구에서 선정한 독높임저수지의 분포를 나타낸 것으로 2011년 준공을 목표로 설계되었다. Table 1은 20개 저수지에 대한 사업추진 현황을 나타낸 것으로 수계별 분포 현황을 보면, 한강 5개소, 금강 8개소, 낙동강 5개소, 영산강에 2개소가 위치해 있으며, 지역별로 충북, 충남에 각각 4개소, 경북에 3개소, 경기, 강원, 전남, 경남에 각각 2개소, 전북에 1개소가 분포해 있다. 이들 저수지는 독높이기 사업 후, 평균 $1,344 \times 10^3 m^3$, 총 $2,6870 \times 10^3 m^3$ 의 추가저수량을 확보하게 되며, 관개용수와 더불어 하류하천에 하천유지용수를 공급하게 된다. 20개 독높임저수지의

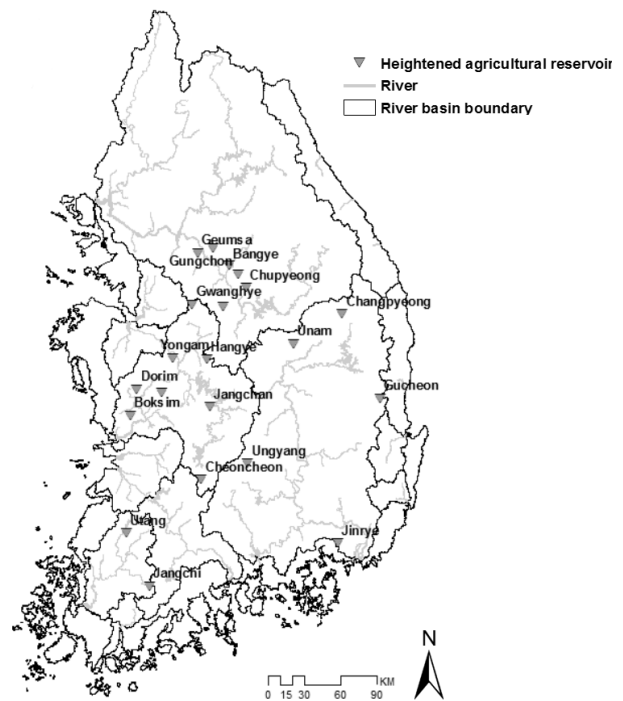


Fig. 1. Distribution of the heightened agricultural reservoirs used in this study.

Table 1. Physical characteristics of heightened agricultural reservoirs

Basin	Reservoir	Watershed area, WA (ha)	Irrigated area, IA (ha)	Ratio (WA/IA)	Added height (m)	Effective storage (10 ³ m ³)		
						Before heightened	After heightened	Difference
Han River	Geumsa	837	179	4.7	2.9	2,983	3,680	697
	Daepyeong	694	150	4.6	3.0	667	1,139	473
	Gungchon	2,066	220	9.4	2.0	624	1,159	535
	Bangye	2,500	179	14.0	3.6	1,730	2,839	1,110
	Chupyeong	1,610	694	2.3	2.5	4,223	4,929	706
Geum River	Gwanghye	1,040	446	2.3	1.8	3,113	5,920	2,807
	Jangchan	513	474	1.1	2.5	3,177	4,364	1,187
	Gyeryong	1,574	675	2.3	2.6	3,412	4,776	1,364
	Dorim	650	607	1.1	2.8	3,250	3,776	526
	Boksim	1,761	480	3.7	1.9	2,489	4,715	2,226
	Yongam	1,620	762	2.1	0.9	4,146	5,285	1,139
	Cheoncheon	1,350	213	6.3	5.0	1,028	1,918	891
	Hangye	545	223	2.4	2.3	1,012	1,567	555
Nakdong River	Gucheon	1,692	167	10.1	9.1	1,236	3,455	2,220
	Unam	1,320	212	6.2	10.1	738	2,663	1,925
	Changpyeong	1,850	235	7.9	13.2	554	2,739	2,184
	Ungyang	1,160	537	2.2	3.9	2,281	3,289	1,009
	Jinrye	472	242	1.9	5.0	1,074	2,102	1,028
Yeongsan River	Utang	909	180	5.0	7.0	1,538	2,175	638
	Jangchi	1,871	383	4.9	9.2	1,726	5,376	3,650
Average		1,302	363	4.7	4.6	2,050	3,393	1,344
Total		26,033	7,257	-	91.2	41,001	67,866	26,870

평균 유역면적은 1,302 ha이며, 수혜면적은 363 ha로 유역배율이 4.7에 해당한다.

2.2 독높임저수지의 통계적 특성 분석

본 연구에서는 독높임저수지 중 대표성을 갖는 저수지를 대상으로 이수운영기준곡선의 적용에 따른 하천유지용수공급 능력을 평가하기 위하여, Table 1의 20개 저수지에 대한 다변량 통계분석(Multivariate Statistical Analysis)을 실시하였다. 다변량 분석을 간단하게 정의하는 것은 쉽지 않으나 일반적으로 두 개 이상의 변수를 동시에 분석하는 통계방법을 의미한다. 통계분석을 단일변량분석과 다변량으로 나누는 분류는 분석대상에 대해 고려되고 있는 반응변수들의 개수에 따른 구분이다. 여기에서 반응변수라 함은 확실적인 반응을 가지는 변수를 의미한다. 다변량 분석은 대응표본 T-test, 회귀분석, 다변량 분산분석 등과 같이 일변량 분석의 기본적인 틀을 바꾸지 않고 단순히 반응변수들의 개수를 늘려 차원을 확장시킨 분야와, 다변량 자료의 속성상 일변량 분석의 범주에서는 고려될 수 없는 다변량

고유의 영역으로 나눌 수 있는데 다변량 고유의 영역에 속하는 분석기법으로는 요인분석, 판별분석, 군집분석, 정준상관분석, 다차원척도, 구조방정식 모형 등이 있다(김해도 등, 2011).

본 연구에서는 다변량 통계분석방법 중 요인분석(Factor Analysis)과 군집분석(Cluster Analysis)을 실시하여 통계적으로 대표성을 갖는 독높임저수지를 선정하여 분석을 수행하였다. 여기서, 요인 분석은 주성분 분석을 통해 변수와 요인 사이의 관계를 해석할 수 있는 Varimax법(Kaiser, 1958)을 이용하였으며, 군집분석은 요인분석 결과로 산정된 요인의 주성분 점수로부터 20개 저수지를 squared Euclidean distance법과 Ward법을 이용하여 계층적 군집분석을 실시하였다(Kaufman and Rousseeuw, 1990; Everitt et al., 2001).

2.3 저수지 이수운영모형

독높임저수지의 물수지 분석은 HOMWRS모형을 이용하였다. 본 모형은 농업용저수지에서 농업용수 공급계획을 수립하기 위한 유역 유입량, 관개필요수량, 물수지 분석 및 단위용수량

산정이 일련의 통합된 시스템 내에서 구현되도록 한 프로그램으로 유역유입량, 필요수량, 단위용수량 및 물수지 산정을 위한 4개의 세부모형으로 구성되어 있다(이태호, 2011).

독높임저수지의 이수운영을 위한 물수지 분석은 각 대상지구별 기상관측소의 일별 강우량 및 제반 기상자료 등 이용가능한 일별 기상자료를 이용하여 유역에서의 유입량과 필요수량을 산정에 따른 일단위 물수지 분석을 수행하였다. 물수지 분석에서의 일별 유출량 산정은 4단 TANK모형(Sugawara, 1984)을 이용하였으며, 필요수량 계산시 관개용수의 작물소비수량은 Penman 식(Doorenbos and Pruitt, 1977)으로 추정하였다. 이때 필요한 작물계수는 농림부(1998)에서 제시한 값을 적용하였다. 본 연구에서는 수위조건별 하천유지용수의 공급을 위해 HOMWRS의 기본 물수지 구성을 다음 Eq. (1)과 같이 수정하였다.

$$S(t) = S(t-1) + I(t) + P(t) - E(t) - O(t) - IRR(t) - EF(t) \quad (1)$$

여기서, S 는 저수용량(m^3), I 는 유입량(m^3), P 는 수면강수량(m^3), E 는 수면증발량(m^3), O 는 여수로 월류량(m^3), IRR 는 관개용수 공급량(m^3), EF 는 하천유지용수 공급량(m^3), t 는 모의 일(day)이다. 즉, $S(t)$ 는 t 일의 총 유입량과 방류량 차이에 의한 최종 저수용량이다. 따라서, 저수지 운영은 만수위를 초과하는 유입량을 월류 시키며, 관개용수는 관개기 동안 필요수량에 따라 방류되고 하천유지용수는 관개기와 비관개기 동안에 방류기준 수위 조건별 공급량만큼 방류하게 된다. 이때, 저수위가 사수위 이하일 경우 관개용수 및 하천유지용수 공급량은 0이 된다.

농업용수 수요량은 논용수, 밭용수, 축산용수로 구성된다. 이중 논용수는 수리답과 수리불안전답으로 구분되며, 재배형태에 따라 이양재배, 답수직파, 건답직파 형태로 구분된다. 또한, 이양재배는 묘대정지기, 순수묘대기, 묘대이양기, 이양·본답기 및 본답기로 작부시기를 구분할 수 있으며, 각 생육기간별 소비수량을 계산하게 된다. 수리답에서의 필요수량은 다음 Eq. (2)와 같다.

$$Req(t) = ET(t) + I - Re(t) \quad (2)$$

여기서, Req 는 t 일의 답 필요수량(mm/day), ET 는 증발산량(mm/day), I 는 침투량(mm/day), Re 는 유효우량(mm/day)이다. 본 연구에서 적용한 이수운영모형은 답 관개에 대한 농업용수 수요량만을 고려한 것으로, 순전히 경작지 안에서 소모되는 Eq. (2)의 순용수량(Net Duty of Water)으로부터 물을 끌어오는 동안 손실되는 수량인 수로 및 조작손실량을 고려한 조용수량(Gross Duty of Water)에 의해 계산된다.

2.4 저수지 이수운영 평가기준 및 분석방법

저수지 이수운영기준의 현장운영을 위해서는 운영기준이 현실적이어야 한다. 운영자가 판단 가능한 명료한 기준(저수위, 저수율)으로 결과를 산정해야 하며, 관개기동안의 안정적 농업용수확보를 위해서는 비관개기 동안의 하천유지용수공급을 제한할 필요가 있다. 저수지의 용수관리는 한발시에도 관개용수, 하천유지용수대환 기간별 저수관리 계획을 수립하여 체계적으로 용수공급을 할 수 있도록 하여야 한다.

일반적으로 농업용저수지의 규모결정은 10년 한발빈도를 기준으로 필요저수량을 결정하므로, 이수운영곡선 또한 이에 맞추어 적절한 용수공급량을 산정해야 한다. 이러한 적정 용수공급량의 산정은 장기 이수운영모의를 통해 저수지의 물공급 능력을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 Hashimoto et al. (1982a, 1982b)이 제시한 RRV: 신뢰도(Reliability), 회복도(Resiliency), 취약도(Vulnerability) 지표를 이용하여 독높임저수지의 하천유지용수 공급 전후의 이수운영 평가에 따른 물공급 능력을 검토하였다. 각각의 지표는 운영기간별 목표 공급량(관개필요수량)에 미치지 못하였을 때를 실패로 규정하고 물공급 시스템의 실패 빈도, 실패발생시 회복 속도, 실패의 규모에 대해 다음과 같이 정의하였다.

$$C_R = \frac{\sum_{t=1}^T Z_t}{T} \quad (3)$$

$$W_t = \begin{cases} 1, & \text{if } X_t \in U \text{ and } X_{t+1} \in S \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_{RS} = \frac{\sum_{t=1}^T W_t}{T - \sum_{t=1}^T Z_t} \quad (5)$$

$$C_V = \max \left\{ \sum_{t \in J} C_t - X_t, i = 1, \dots, N \right\} \quad (6)$$

여기서, C_R 는 신뢰도(%), C_{RS} 는 회복도(%)를 나타내며, 총 모의기간 T 일 동안 어느 t 일의 저수위가 사수위보다 크면 만족상태(S)로 $Z=1$, 작으면 불만족상태(U)로 $Z=0$ 이 된다. W_t 는 t 일의 U 에서 $t+1$ 일에 S 로 회복되면 1, 그렇지 않으면 0이 된다. 취약도(m^3) C_V 는 각각의 불만족상태 J 에서 수요량(C_t)과 실제공급량(X_t) 차이에 의한 관개용수공급 부족량 중 가장 큰 값을 나타낸다.

하천유지용수공급에 따른 독높임저수지의 이수운영은 비관

개기의 집중적이고 효율적인 하천유지용수의 방류를 도모하고자 하였다. 이를 위해, 과거 수십년간의 기상자료를 이용하여 저수지 물수지분석을 통해 하천유지용수 공급 가능량을 산정하였다. 이때, 하천유지용수 공급 기준은 각 독높임저수지별 증고높이의 편차가 있어 독높이기 이후의 만수위(신규만수위)부터 독높이기 이전의 만수위(기존만수위)까지 2m 간격으로 방류기준수위 구간을 구분하고, 각 기준수위별 하천유지공급 가능량을 산정하도록 한다. 이후, 물수지분석 전기간을 대상으로 10년 한발빈도(신뢰도 90% 이상)의 저수지 운영이 될 수 있도록, 영농기간에는 관개용수를 충족하면서 비관개기에는 하천유지용수를 최적으로 공급할 수 있는 이수운영곡선을 시행오차법에 의하여 도출하는 방법을 적용하였다.

이때, 저수지 이수운영기준 마련을 위한 전제사항은 다음과 같다. 첫째, 저수지 이수운영 기준은 무엇보다 영농에 지장이

없도록 하는 것이며(관개기 농업용수 우선 공급), 여유가 있는 경우 하천유지용수를 공급할 수 있다. 둘째, 방류제한수위(농업용수공급 기준수위) 이상의 저수량에 대한 하천유지용수 공급이 가능하다. 셋째, 10년빈도 이하 한발시 농업용수를 우선공급(하천법 공급기준) 한다. Fig. 2는 이수운영곡선도출을 위한 과정을 나타낸 것이다. 이렇게 도출된 이수운영곡선을 이용한 독높임저수지의 운영은 관개기준일(4월1일)의 목표수위를 농업용수공급 기준수위라 정의하고, 기존만수위를 방류제한수위로 설정하여 관개기와 비관개기로 구분하여 운영하도록 한다. 여기서, 방류제한수위 이하의 저수량에 대한 하천유지용수 공급은 제한된다.

비관개기동안에 저수지 운영자는 이수운영기준에 따라 현재 수위 또는 예상되는 강우에 대한 예측 수위로부터 각 방류기준수위별 방류량을 결정한다. 비관개기 동안의 이수운영은 빈도개념이 아닌 과거 모의치의 평균에 완충구간(Buffer)을 주어 탄력적 수위조절이 가능하도록 한다. 관개기에는 대규모 농업단지의 용수공급에 따른 회귀수량 및 우기에 의한 무효방류가 발생하고 또한 우기이므로 본류역시 수량이 풍부할 것으로 예상됨으로 비관개기 집중방류를 위하여 관개기 동안의 하천유지용수의 방류는 최소화한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 독높임저수지 통계분석 결과 및 대표 저수지 선정

20개 독높임저수지에 대하여 Table 2와 같이 9개 변수를 조합하여 요인분석을 실시하였다. 그 결과, 93%의 설명력을 갖는 3개의 주성분을 추출하였다. 여기서, 요인1(Factor1)은 고유값이 4.899로 전체분산의 약 54%의 설명력을 나타내며, 저수량차, 증고높이, 수위차를 설명하는 변수들로 결합, 요인2(Factor2)는 고유값이 2.106으로 전체분산의 약23%의 설명력을 나타내며, 만수면적과 수해면적을 설명하는 변수들로 결합, 요인3(Factor3)은 고유값이 1.396으로 전체분산의 약16%의 설명력을 나타내며, 유역배율과 유역면적을 설명하는 변수들로 결합한 것을 의미한다. 여기서, 설명력은 각 요인의 고유값이 전체분산(변수)을 얼마나 표현하고 있는가를 의미한다.

요인분석을 통해 추출된 3개 인자를 이용하여 20개 저수지를 대상으로 계층적 군집분석방법인 Ward법을 이용하여 총4개의 군집으로 저수지 특성을 분류하였다. Table 3은 군집분석결과를 나타낸 것으로, 군집별 특성분석 결과를 요약하면 다음과 같다. 군집1(Cluster1)은 평균값에 근접한 요인1의 증고높이, 홍수위 및 만수위 증가분, 요인3의 유역배율의 4개 변수를 제외하고 나머지 5개 변수의 평균이 전체평균 이하의 값을 나타내는 특성을 나타내어 요인점수를 이용한 특성분석결과와 유사한 특성을 보인다. 군집2는 유역배율과 유역면적을 설명하는 요인3의 두

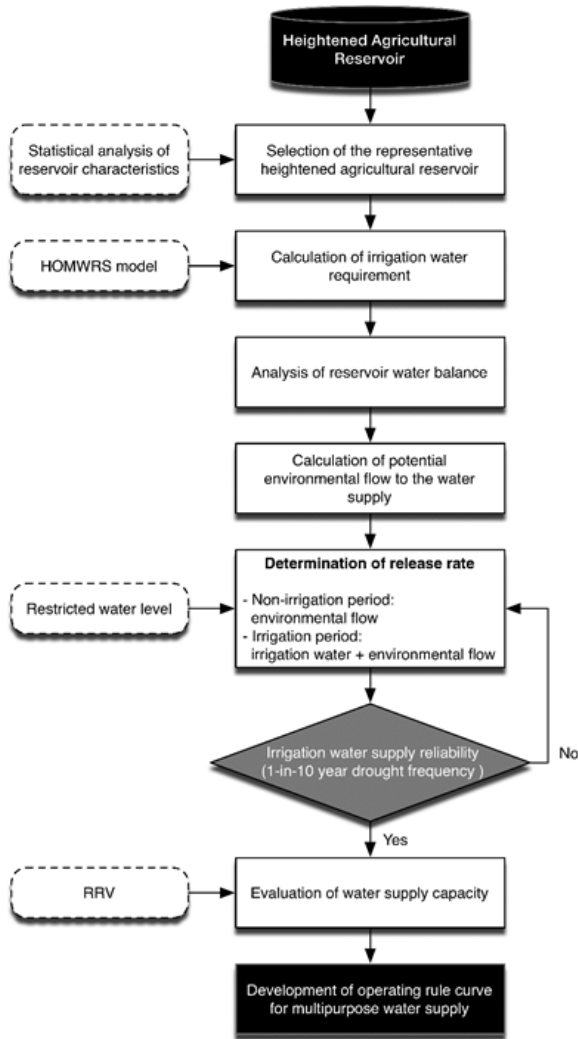


Fig. 2. Schematic outline of the study design.

Table 2. Results of the factor analysis using principal component analysis (PCA) method

Variable name		Unit	Factor1 ^a	Factor2 ^b	Factor3 ^c
V1	Added height	m	0.928	-0.289	0.129
V2	Increased FWL	m	0.919	-0.324	0.104
V3	Added effective storage	10 ³ m ³	0.917	0.190	0.215
V4	Increased HWL	m	0.907	-0.353	0.111
V5	Added gross storage	10 ³ m ³	0.898	0.305	0.217
V6	Area of full water	ha	0.019	0.928	0.236
V7	Irrigated area, IA	ha	-0.244	0.821	-0.298
V8	Ratio (WA/IA)	-	0.198	-0.380	0.894
V9	Watershed area, WA	ha	0.187	0.315	0.890
Eigen value		-	4.899	2.106	1.396
Variance		%	54.429	23.399	15.513
Cumulative variance		%	54.429	77.829	93.341

^aFactor1: V1, V2, V3, V4, V5

^bFactor2: V6, V7

^cFactor3: V8, V9

Table 3. Results of the cluster analysis for the heightened agricultural reservoirs

Variable	Average for each cluster (standard deviation)				
	Cluster1 ^a	Cluster2 ^b	Cluster3 ^c	Cluster4 ^d	Total
V1	4.2 (1.6)	2.8 (1.1)	2.1 (0.7)	10.4 (1.9)	4.6 (3.4)
V2	4.4 (1.8)	3.1 (0.1)	2.2 (0.7)	10.2 (1.7)	4.7 (3.3)
V3	880.0 (333.9)	787.9 (352.1)	911.1 (423.1)	2566.9 (766.0)	1219.0 (818.7)
V4	4.6 (1.6)	3.1 (0.1)	2.1 (0.6)	10.1 (1.9)	4.7 (3.2)
V5	917.7 (356.8)	723.7 (476.1)	1054.3 (429.1)	2585.6 (802.6)	1279.7 (818.9)
V6	19.5 (3.8)	30.1 (13.3)	57.1 (25.4)	39.4 (16.1)	37.7 (23.0)
V7	246.2 (132.0)	199.4 (29.5)	591.1 (125.3)	249.3 (93.5)	362.9 (204.0)
V8	3.9 (1.7)	11.7 (3.3)	2.1 (0.9)	7.3 (2.3)	4.7 (3.4)
V9	852.3 (318.9)	2283.0 (306.9)	1252.6 (513.1)	1683.1 (254.9)	1301.6 (581.2)

^aCluster1: 7 reservoirs (Ungyang, Hangye, Geumsa, Jincheon, Daepyeong, Utang, Jinrye)

^bCluster2: 2 reservoirs (Gungchon, Bangye)

^cCluster3: 7 reservoirs (Boksim, Yongam, Gyeryong, Gwanghye, Chupyeong, Dorim, Jangchan)

^dCluster4: 4 reservoirs (Unam, Jangpyeong, Gucheon, Jangchi)

개 변수 평균값이 전체평균보다 상대적으로 큰 값을 보이므로 군집2(Cluster2)는 유역배율과 유역면적이 큰 특성을 나타낸다. 또한 유역면적에 비해 증고높이가 작아 추가저수량이 작은 것을 알 수 있다. 군집3(Cluster3)은 만수면적과 수해면적을 설명하는 요인2의 두 개 변수 평균값이 전체평균보다 상대적으로 큰 값을 보이므로 군집3은 만수면적과 수해면적이 큰 특성을 나타낸다. 군집4는 저수량차, 증고높이, 수위차를 의미하는 요인1의 5개 변수의 평균값이 전체평균보다 상대적으로 큰 값을 보이고 있을 뿐만 아니라 유역배율과 유역면적을 설명하는 요인3의 2개 변수

의 평균값이 전체평균보다 큰 값을 보이고 있다. 따라서 군집4(Cluster4)는 증고높이가 커 추가용수량이 다른 저수지에 비해 많으며 유역면적은 사업전과 변화가 없으므로 유역배율이 큰 저수지임을 알 수 있다. 최종적으로, 군집분석에 따른 대표 저수지는 군집1의 웅양저수지, 군집2의 궁촌저수지, 군집3의 용암저수지, 군집4의 운암저수지를 각각 선정하여 이수운영기준곡선 도출에 따른 하천유지용수 공급능력 및 적용성을 평가하였다. 다음 Table 4는 군집분석에 따른 선정된 대표 독높임저수지의 주요 제원을 정리한 것이다.

Table 4. Summary of the parameter informations for the representative heightened agricultural reservoirs by cluster analysis

Parameter		Ungyang (Cluster1)	Gungchon (Cluster2)	Yongam (Cluster3)	Unam (Cluster4)
Location	River basin	Nakdong	Han	Geum	Nakdong
Weather	Station	Geochang	Wonju	Cheongju	Mungyeong
	Data	1986-2010	1986-2010	1967-2010	1973-2010
Area	Watershed area, WA (ha)	1,160	2,066	1,620	1,320
	Irrigated area, IA (ha)	537	220	762	212
	Ratio (WA/IA)	2.2	9.4	2.1	6.2
	Paddy (%)	2.8	4.7	4.4	9.8
	Upland crop (%)	7.2	8.0	16.4	11.7
	Forest (%)	87.4	87.3	69.3	76.1
Storage	Effective storage ($10^3 m^3$)	2,281	624	4,146	738
	Added storage ($10^3 m^3$)	1,009	535	1,139	1,925
	Dead storage ($10^3 m^3$)	107	1	416	15
	Added height (m)	3.9	2.0	0.9	10.1
Cultivation	Transplanting area (ha)	537	220	1,620	212
	Nursery period	05/01-06/10	04/21-05/31	04/21-05/31	04/21-05/31
	Transplanting period	06/01-06/20	05/21-06/10	05/21-06/10	05/21-06/10
	Main farming period	06/21-09/21	06/11-09/11	06/11-09/11	06/11-09/11
	Infiltration (mm/day)	4.5	6.0	5.0	5.7
	Water conveyance loss (%)	10.0	15.0	10.0	10.0

3.2 독높임저수지 용량배분

독높임저수지 공간의 목적별 배분 방안은 기존 농업용수 필요 저수량에 해당하는 농업용수 수위를 기준으로 아래와 위를 구분하여 공간의 활용 목적을 달리하는 방식이다(농림수산식품부, 2011). 따라서, 신규만수위(독높이기사업 이후의 상시 만수위, HWL)에서부터 방류제한수위(농업용수공급 기준수위, RWL)까지의 추가확보저수량에 대한 이수용량을 결정하고, 방류제한수위 이상을 하천유지용수공급 제한수위로 설정하여 비관개기준일(10월1일)부터 관개기준일(4월1일)까지 유효저수량 중 비관개 하천유지용수공급을 위한 이수용량을 확보하게 된다. 여기서, 홍수기 제한수위는 이수운영만을 위한 것으로 본 연구에서는 고려하지 않았다. Fig. 3은 각 군집별 대표 독높임저수지의 용량배분 결과를 나타낸 것이다.

3.3 이수운영 모의결과

이수운영모형을 이용하여 각 대표 독높임저수지에 대한 이수운영모의를 실시하였다. Table 4의 유역 및 저수지 제원 정보로부터 모의조건을 설정하였으며, 모의기간은 기상관측자료의 기간과 같다. 하천유지용수 공급 가능여부를 판단하기 위해, 하천유지용수공급 없이 저수지 유입량 및 수리안전답 이양제배 면적의 관개 필요수량 산정을 통해 일별 물수지분석을 실시하였다. 모형

구동을 위한 모의조건은 초기수위를 방류제한수위로 설정하고 작부시기, 침투량, 수로손실률은 농림수산식품부(2011)에서 독높임저수지별로 제시한 값을 적용하였으며(Table 5), 간단관개 및 중간낙수는 모형구동에 고려되지 않았다. 한편, 본 연구에서는 저수지 유입량, 저수위 및 방류량 자료와 같이 모형의 적용성 평가를 위한 실측자료의 부재로 인해 검·보정은 고려하지 않았다.

Fig. 4는 기존 단일목적의 관개용수공급에 따른 독높임저수지 이수운영 모의결과로서, 월별 방류량 및 저수위 변화를 나타낸 것이다. 먼저 월별 방류량 변화를 살펴보면, 4개 저수지 모두 연중 무효방류가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 상시만수위에 가까운 저수위를 유지하기 때문에 유역 유출량의 규모가 작은 겨울철에도 무효방류가 발생하였다. 특히, 홍수기(6-9월) 동안의 무효방류량 규모가 큰 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 홍수관리수위를 고려하지 않았기 때문에 홍수기 무효방류량이 과대 추정되었다. 특히, 궁촌저수지의 경우 7, 8월 유입량의 90% 이상을, 운암저수지는 80% 이상을 무효방류시키는 것으로 나타났다. 월별 저수위 변화를 보면, 관개기와 비관개기 모두 방류제한수위 이하로 떨어지지 않는 것으로 나타났는데, 관개기가 끝나는 9월부터 저수위가 상승하면서 관개기가 시작되는 4월에 100%에 가까운 저수위를 보였다.

Table 5는 년평균 물수지모의 결과를 정리한 것으로, 물수지는

저수지 유입량과 유출량(관개용수량)의 관계를 나타낸 것으로 유역배율이 가장 큰 공촌저수지가 $16,715 \times 10^3 \text{m}^3$ 으로 가장 크고, 웅양저수지가 $6,680 \times 10^3 \text{m}^3$ 으로 가장 작은 것으로 분석되었다. 관개용수의 회귀율은 지역 및 시기별, 조사자와 연구방법에 따라 매우 심한 편차를 보이고 있다(추태호, 2004). 농림수산식품부(2008) 농업용수 회귀수량 조사에 따르면 지형적 특성, 수원공의 종류, 구획 형태 등에 따라 회귀율은 달리 적용되며, 저수지의 경우 24.4~51.7%의 분포를 보이고 있으나 일반적으로 35%

정도의 회귀율을 적용한다고 조사한 바 있다. 본 연구에서는 관개용수공급량에 35%가 하천으로 회귀되는 것으로 간주하고 하천방류량을 산정하였다. 추가저수량 확보에 따른 관개용수공급에 대한 물부족이 발생하지 않으면서 신뢰되는 4개 저수지 모두 100%로 분석되었다. 이는 관개용수의 공급능력이 당초 설계기준(10년 한발빈도)보다 향상된 것으로 비관개기 동안의 하천유지용수 공급이 가능할 것이며, 효과적인 이수운영으로 홍수기 무효방류량을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

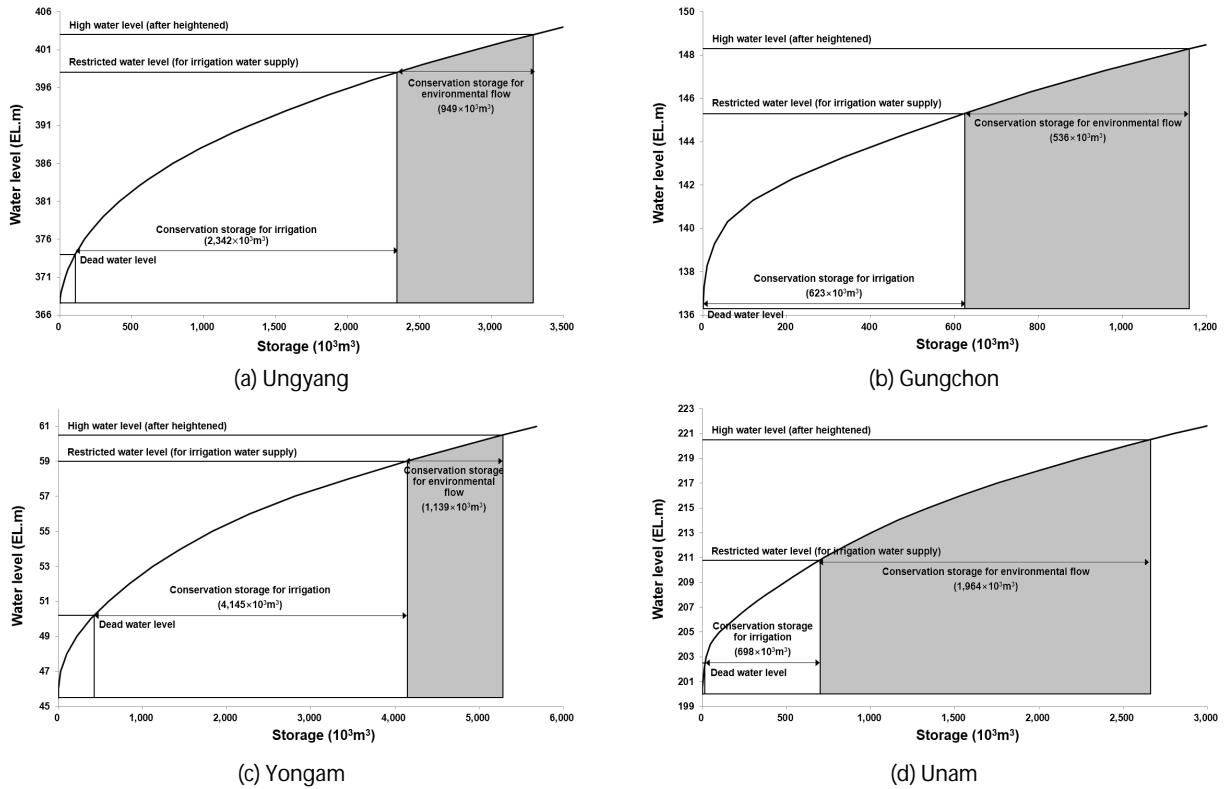


Fig. 3. Reservoir storage allocation for multipurpose water supply

Table 5. Summary of the annual water balance for each representative heightened agricultural reservoir

Component	Reservoir (cluster)			
	Unyang (1)	Gungchon (2)	Yongam (3)	Unam (4)
Number of simulation years	25	25	44	38
Precipitation (mm)	1,325	1,364	1,230	1,242
Inflow (10^3m^3)	10,246	18,838	13,497	9,815
Irrigation water (10^3m^3)	3,565	2,122	6,269	1,756
Water balance (10^3m^3)	6,680	16,715	7,228	8,059
Irrigation return flow (10^3m^3)	1,248	743	2,194	615
Release water from spillway (10^3m^3)	6,781	16,840	7,580	8,146
Number of water shortage years	0	0	0	0
Reliability (%)	100	100	100	100

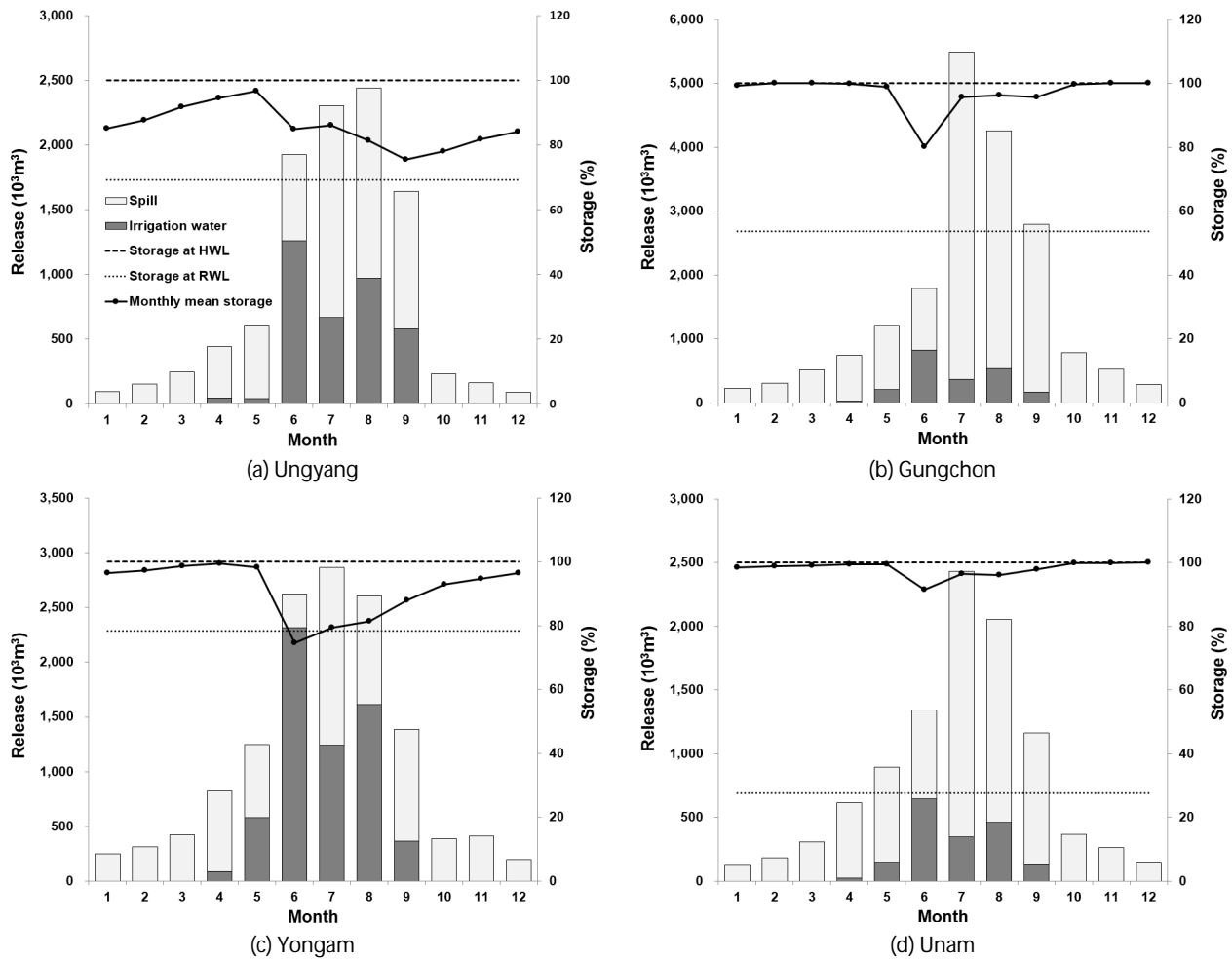


Fig. 4. Monthly release and storage rate for each representative heightened agricultural reservoir

3.4 다중용수공급능력 평가

독립저수지의 다중용수공급능력 평가를 위해 Fig. 2의 절차에 따라 관개용수 및 하천유지용수 공급을 위한 이수운영기준을 마련하고, 관개기와 비관개기 동안의 각 방류기준수위별 용수공급을 통한 이수운영모의를 수행하였다. 모의조건은 앞서 기술한 물수지분석 방법과 동일하며, 이수안전도 90% 이상의 조건을 수렴하는 하천유지용수 공급량을 산정하고, 다중용수공급에 따른 신뢰도, 회복도, 취약도를 평가하였다.

먼저, 하천유지용수 공급에 따른 월별 방류량 및 저수율의 변화를 살펴보면, Fig. 5에서 알 수 있듯이 비관개기에 집중적으로 하천유지용수의 공급이 가능한 것으로 분석되었다. Fig. 4의 관개용수만을 공급했을 때의 월별 변화와 비교해보면, 비관개기에 발생한 무효방류가 대부분 하천유지용수로 방류된 것으로 분석되었다. 한편, 유역배율이 큰 공촌저수지의 경우, 홍수기 유입량의 규모가 크기 때문에 관개기 하천유지용수의 최소방류

기준에 따라 여전히 무효방류의 규모가 큰 것으로 나타났다. 용암과 운암저수지의 경우, 효과적인 이수운영으로 무효방류량이 크게 감소하는 것으로 분석되었다. 그로 인해, 용양, 공촌, 용암, 운암 저수지 각각의 월평균 저수율이 8.8, 16.7, 11.5, 55.8% 감소하였다.

이수운영기준 적용에 따른 년평균 하천유지용수 산정결과와 그에 따른 관개용수공급 능력 평가 결과를 Table 6에 정리하였다. 용양저수지는 20개 저수지(Table 1) 특성분석에 따라 평균수준의 군집1에 해당하는 대표저수지로서 $1,009 \times 10^3 \text{m}^3$ 의 추가저수량에 대해 2.1배에 하천유지용수를 공급할 수 있는 것으로 분석되었다. 유역배율이 높은 특징을 나타내는 군집2의 공촌저수지는 $535 \times 10^3 \text{m}^3$ 의 추가저수량에 대해 7.5배에 해당하는 하천유지용수를 공급할 수 있는 것으로 분석되었다. 하지만, 군집2의 저수지들은 홍수기 무효방류량의 규모가 클 것으로 예상되기 때문에 안정적인 이수 및 치수 운영을 위해 홍수조절수위를 고려하여

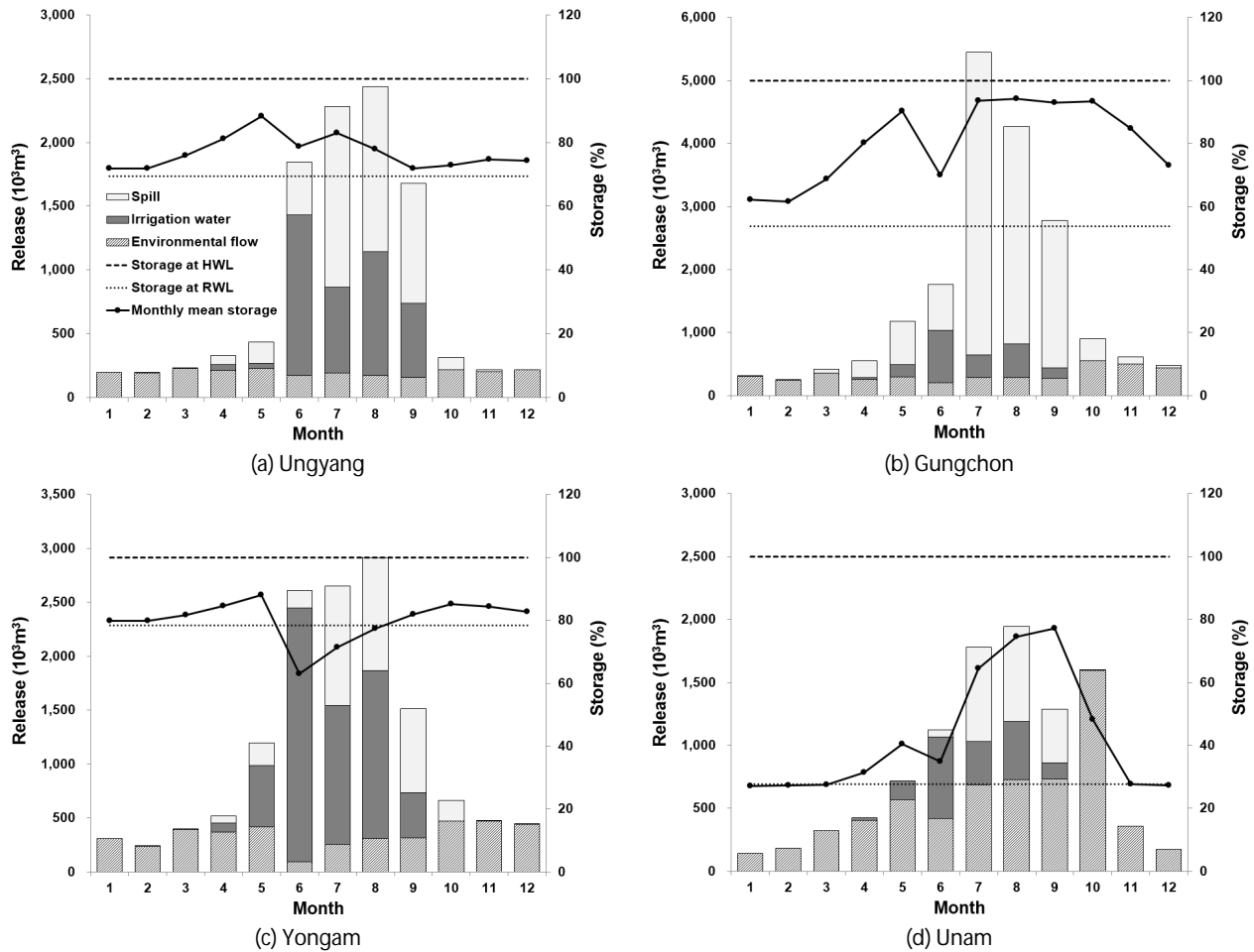


Fig. 5. Changes in the monthly release and storage rate by multipurpose water supply for each representative heightened agricultural reservoir

Table 6. Changes in the reliability, resilience, and vulnerability by multipurpose water supply for each representative heightened agricultural reservoir

Reservoir (Cluster)	Release (10^3 m^3) ^a			Water supply reliability ^b (%)	Performance indicator		
	IRF	Spill	ENVF		Reliability (%)	Resiliency (%)	Vulnerability (10^3 m^3)
Unyang(1)	1,248	4,419	2,403	92.0	98.5	4.4	336
Gungchon(2)	743	12,891	3,994	92.0	99.7	15.4	224
Yongam(3)	2,194	3,570	4,093	93.2	99.5	7.0	1,457
Unam(4)	615	1,991	6,306	92.1	99.7	13.6	342

^aIRF, Spill, and ENVF: irrigation return flow, release water from spillway, and environmental flow.

^bThe values were calculated by number of water shortage years during simulation period.

방류기준수위의 조정이 필요할 것으로 판단된다. 수해면적이 큰 특징을 나타내는 군집3의 용암저수지는 관개용수에 대한 회귀수량이 상대적으로 많은 것을 알 수 있으며, $1,139 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 추가저수량에 대해 3.6배 해당하는 하천유지용수를 공급할 수 있는 것으로 분석되었다. 마지막으로, 증고높이가 큰 특징을 나타내는

군집4의 운암저수지는 $1,925 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 추가저수량에 대해 3.3배에 해당하는 하천유지용수를 공급할 수 있는 것으로 분석되었다.

한편, 다중용수공급능력 평가를 위해 일단위 모의결과로부터 Eqs. (3), (5) and (6)에 의해 신뢰도, 회복도 및 취약도를 각각 산정하였다. 4개의 대표저수지 모두 98% 이상의 높은 신뢰도를

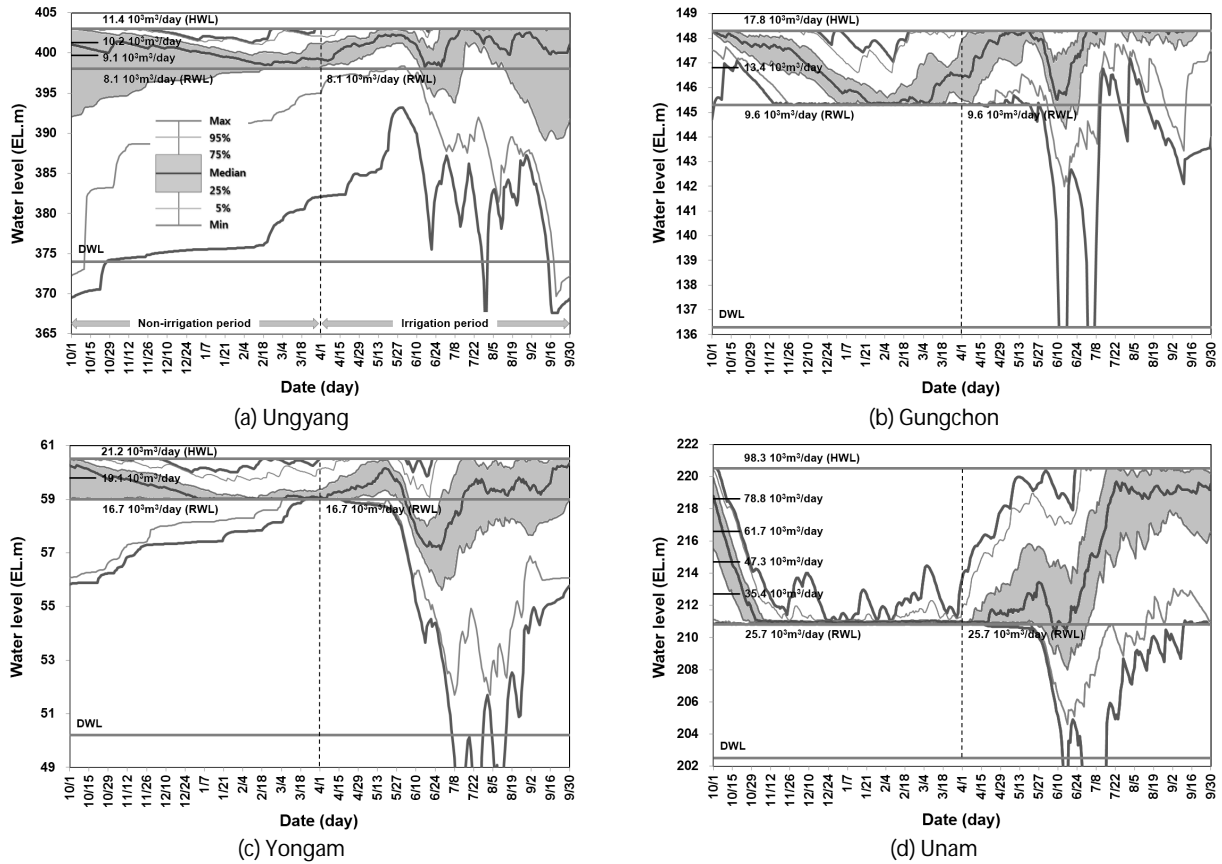


Fig. 6. Operating rule curve of heightened agricultural reservoir for multipurpose water supply.

보였으나, 회복도는 15% 이하의 낮은 수준으로 나타났다. 궁촌과 운암저수지와 같이 유역배율이 큰 저수지에서 상대적으로 회복 속도가 빠르며, 용암저수지와 같이 수해면적이 큰 저수지에서는 한발 시 관개용수 부족량의 규모가 크기 때문에 취약도가 큰 것으로 분석되었다.

3.5 이수운영기준곡선 도출

다중용수공급능력 평가결과를 토대로 이수운영기준 적용에 따른 독높임저수지의 이수운영기준곡선은 과거 이수운영모의결과로부터 일별 저수위를 백분위(Percentile Rank)로 표현하였다. 이는 향후 저수지 운영에 필요한 이수운영기준으로, 운영자의 의사결정을 지원하기 위해 풍수년, 평수년, 갈수년으로 구분하여 하천유지용수 방류량을 결정할 수 있도록 하였다. 먼저, 상위 75%이상의 저수위를 유지할 때를 풍수년으로 보고, 방류기준수위 이상의 탄력적 하천유지용수 공급이 가능하며, 중간값(Median)을 기준으로 상하위 25%에 해당하는 완충구간을 평수년으로, 방류기준을 따르도록 한다. 갈수년은 중간값 완충구간 이하(25% 이하)의 저수위를 유지할 때로 제한적 방류를 하도록 한다. 5%이

하의 저수위 구간은 한발년으로 하천유지용수의 공급을 제한하며, 관개용수만을 우선 공급한다.

Fig. 6은 이수운영기준 적용에 따른 도출된 각 독높임저수지별 이수운영기준곡선으로, 각 방류기준수위별 방류량과 일별 최소 및 최대 저수위의 범위를 알 수 있으며 저수위 변화폭이 작을수록 이수운영에 유리할 것으로 예상된다. 비관개기에 비해 관개기의 저수위 변화폭이 큰 것은 4~5월의 봄 가뭄과 본답기가 시작되는 6월부터 관개용수 사용량이 많아지기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

농업용 독높임저수지는 관개용수의 공급과 더불어 하천유지용수를 공급해야하는 다목적 운영이 요구됨에 따라 기존과는 다른 이수운영기준을 필요로 하게 되었다. 이에 본 연구에서는 20개 독높임저수지를 대상으로 특성분석에 따라 4개의 군집으로 분류하여 웅양, 궁촌, 용암, 운암 저수지에 대한 다중용수공급능력 평가 및 이수운영기준곡선을 도출하였다.

그 결과, 4개의 대표 저수지 모두 10년 한발의 설계빈도를

만족하는 이수안전도를 보이며, 관개용수공급에 대한 98% 이상의 높은 신뢰도를 나타냈다. 특성분석에 따른 평균수준의 저수지군(군집1)은 추가저수량의 약 2배 이상의 하천유지용수를 공급할 수 있을 것으로 기대된다. 유역배율이 높은 저수지군(군집2)은 유입량의 규모가 상대적으로 크며, 비교적 많은 양의 하천유지용수를 공급할 수 있으나 홍수기 무효방류량의 규모가 크기 때문에 관개기 방류기준수위의 조정이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 수혜면적이 큰 저수지군(군집3)은 관개용수에 대한 회귀수량이 상대적으로 많기 때문에 연중 안정적인 하천유지용수의 공급이 가능할 것이며, 증고높이가 큰 저수지군(군집4)은 저수지 수변공간을 고려한 경관수위 도입에 따른 이수운영기준곡선이 필요할 것으로 사료된다.

실제 저수지 운영을 위해서는 지속적인 모니터링으로부터 제측자료와의 비교를 통한 이수운영기준곡선의 보정이 이루어져야 할 것이다. 또한, 운영곡선의 용이성 확보를 위해서는 경관수위, 홍수조절수위, 설계특성, 취수시설 형태 등을 고려한 저수지 특성별 이수운영곡선이 마련되어야 할 것이다.

본 연구는 농업용저수지의 다중용수공급에 따른 운영 및 가이드라인 설정을 위해 관개용수의 안정적인 공급과 저수지 하류하천의 하천유지용수 공급을 위한 이수운영기준곡선을 도출한 것으로, 향후 예상되는 기상조건에서의 주단위, 월단위 용수공급계획수립이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0008716).

References

Choo, T. H. (2004). "Return flow analysis of Irrigation for a paddy field neighboring the downstream of Weolgok reservoir in the Nakdong River Basin." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 2B, pp. 123-129 (in Korean).

Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*, Irrigation and Drainage Paper No. 24 (rev.), FAO, Rome.

Everitt, B. S., Landau, S. and Leese, M. (2001). *Cluster analysis*. Edward Arnold, London.

Hashimoto, T., Loucks, D. P. and Stedinger, J. R. (1982a). "Robustness of water resources systems." *Water Resources Research*, Vol. 18, pp. 21-26.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R. and Loucks, D. P. (1982b). "Reliability,

resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, pp. 14-20.

Kaiser, H. F. (1958). "The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis." *Psychometrika*, Vol. 23, pp. 187-200.

Kaufman, L. and Rousseeuw, P. J. (1990). *Finding groups in data: An Introduction to Cluster Analysis*, John Wiley and Sons, New York, N.Y.

Kim, T. C., Noh, J. K. and Park, S. K. (1992). "Operating rule of irrigation reservoir." *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 34, No. 1, pp. 33-40 (in Korean).

Kim, T. C., Lee, J. M. and Lee, D. J. (2003). "A rotational irrigation scheduling for an irrigated paddy blocks with operation rule curve." *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 45, No. 5, pp. 67-76 (in Korean).

Kim, H. D., Lee, K. Y., Jung, I. K., Jung, K. W. and Kwon, J. W. (2011). "The classification of dam heightening reservoir using factor and cluster analysis." *Irrigation and Drainage*, Vol. 18, No. 2, pp. 66-75 (in Korean).

Lee, J. N. and Noh, J. K. (2010). "Evaluating of supplying instream flow by operation rule curve for heightening irrigation reservoir." *Journal of Agricultural Science*, Vol. 27, No. 3, pp. 481-490 (in Korean).

Lee, T. H. (2011). *Introduce of the hydrological operation model for water resources system*, Water for Future, KWRA, Vol. 44, No. 7, pp. 88-91 (in Korean).

MAF (1998). *The standard design for agricultural structures: Estimation standard of irrigation water requirement*, Ministry of Agriculture and Forestry (in Korean).

MFAFF (2008). *A study on the investigation measure of using water in the rural area*, Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (in Korean).

MFAFF (2011). *Development of operation and management techniques for heightened agricultural reservoir*, Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (in Korean).

Noh, J. K. (2010a). "Evaluating water securing of geumbong reservoir followed by new reservoir construction." *Irrigation and Drainage*, Vol. 17, No. 1, pp. 43-53 (in Korean).

Noh, J. K. (2010b). "Affecting water supply capacity followed by allocating flood control volume in heightening reservoir." *Irrigation and Drainage*, Vol. 17, No. 2, pp. 57-70 (in Korean).

Park, J. Y., Joh, H. K., Jung, I. K., Jung, K. S., Lee, J. H., Kang, B. S., Yoon, C. J. and Kim, S. J. (2010). "Modeling downstream flood damage prediction followed by dam-break of small agricultural reservoir." *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 6, pp. 63-73 (in Korean).

Sugawara, M. (1984). *Tank model with snow component*, National Research Center for Disaster Prevention, Research Notes No. 65, Japan.