대규모 농업용저수지의 농업용수 공급 운영 관리에 따른 이수안전도 평가

Evaluation of Irrigation Safety by Operation Management of Water Supply from Large Scale Agricultural Reservoirs

정민혁* · 범진아** · 성무홍*** · 이재남**** · 유승환***** · 윤광식*****

Jeung, Minhyuk*, Beom, Jina**, Sung, Mu-hong***, Lee, Jaenam****, Yoo, Seung-hwan*****,
and Yoon, Kwang-sik*****

Abstract

Due to recent climate change, droughts occur frequently, thereby causing a shortage of agricultural water. However, supplies to most agricultural reservoirs have been designed assuming that droughts occur at a frequency of 10 years. Therefore, continuous drought has led to low storage rates. Thus, in this study, a water balance analysis was performed on the Naju reservoir, and the changes in the water shortage according to the minimum storage rate restriction management to cope with drought were evaluated. As a result, a higher management storage rate level results in a higher initial storage rate in the next year, thereby decreasing the annual average shortage. In addition, it shows that a decrease in the frequency of drought and its intensity can be reduced according to the minimum storage management during wet years.

Key words : CAT Model, Reservoir Operation, Agricultural Water, Supply Area, Drought Relief

요 지

최근 기후변화로 인하여 가뭄이 빈번하게 발생하고 이에 따른 농업용수 부족을 겪고 있다. 하지만 대부분 농업용 저수지는 10년 빈도 한발시의 공급량을 기준으로 설계되어 있어, 최근 연속적인 가뭄으로 낮은 저수율을 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 가뭄에 대응할 수 있는 최저 관리 저수율을 설정하기 위해 나주호를 대상으로 물수지 분석을 수행하고 평년 운영 관리에 따른 부족수량 변화를 평가하고자 한다. 그 결과, 평년 운영 관리 저수율이 높아질수록 영농기 초기 저수율이 증가하였고, 연평균 농업용수 부족수량이 감소하였다. 또한, 평년 저수율 관리에 따라 가뭄 년도 헛수와 그 심도를 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : CAT 모형, 저수지 운영, 농업용수, 수혜면적, 가뭄완화

*정회원, 전남대학교 지역바이오시스템공학과 박사과정(E-mail: jeung9506@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University

**전남대학교 지역바이오시스템공학과 박사수료(E-mail: bca0641@gmail.com)

Ph.D., Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University

***한국농어촌공사 영산강사업단 공무부 차장(E-mail: 2070158@ekr.or.kr)

Deputy Director, Yeongsan River Project Group, Korea Rural Community Corporation (KRC)

****정회원, 한국농어촌공사, 농어촌연구원 수자원연구부 주임연구원(E-mail: jnlee@ekr.or.kr)

Member, Chief Researcher, Rural research institute, Korea Rural Community Corporation (KRC)

*****전남대학교 지역바이오시스템공학과 부교수(E-mail: yoosh15@jnu.ac.kr)

Associate Professor, Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University

*****교신저자, 정회원, 전남대학교 지역바이오시스템공학과 교수(Tel: +82-62-530-0156, Fax: +82-62-530-2158, E-mail: ksyoon@jnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University

1. 서 론

최근 한반도는 전 지구적인 온난화 현상 및 장기적 기후 변동성에 직접적인 영향을 받고 있으며, 한반도의 기온은 거의 모든 지역에서 상승하는 것으로 나타나 기온과 강수의 극한현상이 빈번하게 나타나고 있다(KMA, 2020). 강수의 극한현상이 발생함에 따라 가뭄과 홍수가 빈번하게 발생하고 평균 기온이 상승하는 등의 변화가 나타나고 있는 추세이다.

가뭄은 장기간에 걸쳐 강우량 감소 또는 무강우가 지속되어 발생하는 기상학적 가뭄, 이에 따라 토양수분 부족으로 작물에 피해가 생기는 농업적 가뭄, 댐, 하천 등 수자원이 기간별 평균치에 모자라 피해가 생기는 수문학적 가뭄으로 진행되며 이러한 물 부족이 사회적 피해로 발전하게 되는 사회경제학적 가뭄으로 분류된다(Gang, 2015). 가뭄은 물 부족과 같은 개념으로 단순히 사용되는 경우가 많지만, 가뭄은 자연재해이며, 물 부족은 수자원 시스템의 운영 실패로 인한 것이다(Van Loon and Van Lanen, 2012). 용수부족은 주로 용수 공급 및 수요의 변화에 의한 것이며 수자원 시스템 내의 유입과 유출의 균형이 무너질 때 발생한다. 수자원 시스템의 안정적인 운영을 위해 용수공급의 안정성 또는 확실성 정도를 나타내는 이수안전도는 수자원 개발시설 공급의 확실성을 평가하는 데에 사용하고 있다(Kim and Yu, 2016).

이수안전도는 우리나라에서 『수자원장기종합계획(2006~2020)』(MOCT, 2006)에서 처음 도입되었고 『댐설계기준』(MLTM, 2011) 등에서 용수공급시설의 규모 설정 및 운영 기준 수립 등을 위한 기준으로 적용되고 있다. 우리나라의 용수공급능력 평가 지표는 주로 보장공급량과 신뢰도 방식으로 사용되며 각각 갈수 발생빈도와 물 부족 발생빈도를 기준으로 하는 지표이다(Kim and Yu, 2016; Yu et al., 2017). 우리나라는 치수와 관련된 수자원시설의 운영 및 설계 기준은 명확하게 제시되어 있는 반면, 이수에 대한 안전도 평가는 표준화된 방법이 명확하게 정립되지 않아(Yu et al., 2017) 저수지 설계시 사용된 자료기간과 평가기준이 다르다.

농업분야에서의 이수안전도는 일반적으로 농업생산기반 정비사업 계획설계 기준을 따라 농업용 저수지의 이수목적의 필요저수량은 일반적으로 10년 빈도 한발시의 공급량을 기준으로 설계되고 있다(KRC, 2012). 실제 과거의 10년 한발빈도로 설계된 저수지들은 최근 연속적인 가뭄으로 낮은 저수율을 나타내고 있으며(Nam et al., 2018), 농업수자원 시스템의 운영 방안 수립에 기후변화로 인한 수문사상 변화 및 농업용수 수요의 다변화에 따른 이수안전도의 평가가 요구된다(Kim and Lee, 2002; Ahn et al., 2009). 특히, 농업용 저수지는 영농기 이후 확보된 용수가 다음해의 농업용수를 결정하는 carryover형식으로 운영하고 있어 영농기 이후 중기 저수율이 너무 낮거나, 비영농기 시기에 충분한 용수를 확보하지 못할 경우 다음 해는 물 부족을 겪을 수밖에

없는 구조이다.

Kim (2020)은 21세기 후반기에는 연강수량의 변동경향과 강수강도가 전반기 대비 증가할 것으로 장기변동성을 분석하였으며, 기후변화에 따른 집중호우 및 돌발성 호우 등 기후변화에 따른 강수 변동성은 커질 것으로 분석하였다. 이러한 미래 전망 분석결과는 가뭄뿐만 아니라 풍수해로 인한 피해 최소화 및 수자원 관리를 위한 계획수립 필요성을 제기하였으며, Choi et al. (2017)은 기후변화에 의해 발생가능한 물 부족 해소 및 논벼 작부체계의 변화에 맞춰 안정적인 용수공급을 위해 기후변화에 따른 논 용수의 이용패턴 변화를 지속적으로 모니터링하고 용수공급 체계 구축 및 적절한 수자원 시설물 운영지침을 설정해야 한다고 하였다. Park and Lee (2004)는 가뭄시간의 저수용량의 최적 활용에 따른 최적 운영기준에 대한 연구는 지속적으로 필요하다고 하였으며, Jin et al. (2017)은 가뭄으로 인한 피해를 저감시키기 위해 용수 감량공급 운영 기법이 있으며, 저수지 운영에 도입하기 위해 우리나라 가뭄 대응 단계에 부합하는 용수 감량공급 기준 곡선을 제시하였다.

따라서, 위와 같은 문제를 해결하기 위해 평년에도 적절한 관리 수위를 지정함으로써 다음 해의 초기저수율을 높이는 방안이 우선적으로 이루어져야 한다. 하지만, 대부분 농업용 저수지는 가뭄을 예방하기 위한 최저 저수위 제한은 지정되어 있지 않고 홍수기 제한수위만 저수지 관리규정으로 지정되어 있어 갈수년도에 물을 적게 사용하고 평년에는 물을 비교적 많이 사용하여 농업용수 필요수량과 반비례하는 추세를 보이고 있기 때문에 농업용 저수지의 수자원 시스템 위험도와 용수공급능력을 평가할 필요성이 있다(Lee et al., 2015; Yu et al., 2017; Nam et al., 2018; Kwon et al., 2020). 수자원시스템 구축 및 운영 목표는 불확실한 기상 조건 아래 최대한 안정적인 용수공급을 달성하는 것이며, 그럼에도 불구하고 안전한 용수공급을 위한 목표 이수안전도 관련 제도 및 가이드라인 부재한 실정이다(KEI, 2019).

본 연구는 기후변화에 대응 가능한 농업용수 최저관리 저수율을 설정하기 위해 Catchment hydrologic cycle Assessment Tool (CAT) 프로그램을 이용하여 나주호 수혜 구역을 대상으로 물수지 분석을 수행하고 가뭄을 대비할 수 있는 평년 운영 관리에 따른 부족수량 변화를 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상저수지

영산강 4개 댐 중 최남단에 위치하는 나주호는 영산강의 지류인 지석천의 지류인 대초천에 설치된 저수지로 국내 최대의 농업용 저수지이다(Table 1). 나주호는 관개면적에 비하여 유역면적이 적기 때문에 저수량 확보에 어려움을 겪고 있는 저수지 중 하나이며, 탐진강 유역인 영암군 금정면에 보를 설치하여 간접유역 2,010 ha의 유출량을 비관개기

Table 1. Specification of the Naju Reservoir

Characteristics	Value
Total storage capacity (10^3 m^3)	107,810
Effective storage capacity (10^3 m^3)	106,540
Basin area (ha)	10,470
Beneficiary area (ha)	9,267

Fig. 1. Watershed and Beneficiary Area of Naju Reservoir

및 홍수기에 도수터널을 통해 공급받고 있다. 나주호는 유역 면적은 8,460 ha로 간접유역을 포함하여 10,470 ha로 수혜구역은 9,267 ha이다(Fig. 1). 봉황간선을 주요간선으로 금천간선, 신천간선, 산정산정, 신북간선, 공산간선, 운곡간선으로 농업용수가 분기된다.

2.2 이수안전도 평가를 위한 저수지 물수지 분석

2.2.1 연구의 흐름

본 연구에서는 나주호 저수율 및 공급량 자료의 품질관리가 이루어진 2009년부터 2018년까지 나주호 공급량을 통해 Hydrological Operation Model for Water Resources System (HOMWRS)을 활용하여 필요수량을 분석하였으며, 표준강수지수(Standard Precipitation Index, SPI)를 이용하여 평년과 가뭄시기를 분류하였다. 평년은 저수지 운영관리 시나리오에 따라 관리 저수율 미만으로 저수율이 내려가지 못하도록 그 해의 공급량을 조절하였으며, 가뭄일 때는 그 해의 필요수량만큼 공급량을 적용하였다. 설정한 시나리오는 3가지로, 평년 관리 저수율에 따른 이수안전도 평가 및 부족수량을 파악하였다(Fig. 2).

2.2.2 수문모의 모형

농업용 저수지의 물수지분석은 HOMWRS가 주로 활용되고 있다. HOMWRS는 농업용수 공급계획을 수립하기 위한 유역 유입량, 관개 필요수량, 저수지 물수지 분석 및 단위용수량 산정이 통합된 시스템 내에서 구현되도록 한 프로그램이다(Lee, 2011). 효율적인 시스템 운영 및 사용자 편의성을 위한 기상자료 등, 수문분석에 필요한 기초자료를 DB화함으로써 사용자로부터 최소의 입력자료를 통하여 분석결과를 신속히 제시할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서는 나주 및 다도 기상관측소 자료를 통해 HOMWRS를 활용하여 필요수량을 산정하고, 유입량 및 저수지 물수지 분석은 HOMWRS가 아닌 Catchment hydrologic cycle Assessment Tool (CAT) 모형을 이용하였다.

이는 필요수량 계산을 통해 공급량을 적용하는 HOMWRS에 반해 CAT 모형은 일 공급량과 Gate 방류량 값을 일별로 설정할 수 있어 공급량 조절 모의가 매우 용이하다.

CAT 모형은 기존의 개념적 매개변수 기반의 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장단점을 보완하여 유역 물 순환의 변화 특성을 평가하기 위해 한국건설기술연구원에서 개발된 모형으로(Kim et al., 2012) 토양특성,

Fig. 2. Flow Chart of the Study Process

토지이용, 유역면적, 기상자료 등이 모델을 구축하는데 필요하며, 매개변수는 보정작업을 통해 결정할 수 있다. CAT 모형은 링크노드 방식의 모형으로 공간 단위별 침투, 증발 및 지하수 흐름을 모의할 수 있으며, 물의 순환과정에서 투수역과 불투수역으로 구분한다(Park et al., 2019).

본 연구에서는 나주호 유역의 유입량을 계산하기 위해 선행 연구에서 많이 사용된 TANK4 모형을 적용하였다(Bae et al., 2003; Surya et al., 2014; Ahmad, 2017; Suryoputro et al., 2017). TANK4 모형은 Sugawara (1961)에 의하여 제안된 유출모형으로서, 유역을 여러 개의 저류형 탱크로 가정하여 강우-유출과정을 재현한다. 강우는 첫 번째 탱크로 유입되어 유출공의 높이에 따라서 유출이 발생하며, 나머지는 2번째 탱크로 침투된다. 이러한 과정을 거쳐 마지막 탱크로 유입된다. Table 2는 모형구축에 사용된 입력 자료를 나타내었다.

2.2.3 나주호 수해면적 분류 및 필요수량 산정

나주호 필요수량 산정을 위해 나주호 직접공급 수해면적

을 총 5개의 급수방식으로 분류하여 용수공급 면적을 추정하고 나주호에 의해 공급받는 직접 면적에 대해서만 필요수량을 산정하였다. 나주호 수해면적으로 분류시킨 공급 방식은 1) 나주호에 직접급수 수해면적, 2) 나주호로부터 공급받는 보조수원공 저수지의 수해면적이며 나주호 수해면적으로 포함시키지 않은 공급방식은 3) 나주호와 관계없는 하천에 설치된 양수장의 수해면적, 4) 독립수원 저수지의 수해면적이 있다. 또한, 정확한 회귀율 산정이 어려워 수해면적 내 위치하고 있는 하천(만봉천, 삼포천, 봉황천 등)의 회귀수를 이용하는 양수장의 수해면적은 나주호 수해면적에 제외시켰다. 필요수량은 HOMWRS 프로그램을 이용하여 2009년부터 2018년까지 연도별 나주호 수해구역 필요수량을 산정하였다. HOMWRS 프로그램은 수정 FAO Penman-Monteith 식을 이용하여 잠재 증발산량을 산정하며 Table 3과 같은 담수심 및 작부시기와 같은 입력 자료를 통해 조용수량이 산정된다(Lee, 2011).

Table 2. Input Data of CAT Model for Analyzing Water Balance of Naju Reservoir

Parameters	Value
Weather station	Dado
Meteorological parameters	Rainfall, average wind speed, total evaporation, average temperature, average relative humidity
Simulated date	01/01/2009 ~ 12/31/2018
Amount of water supply	Reference the daily water supply log
Initial storage rate	65.7% (01/01/2009)

Table 3. Input Data to Calculate Irrigation Water Requirement

Parameters	Value
Weather station	Naju
Meteorological parameters	Rainfall, average wind speed, total evaporation, average temperature, average relative humidity
Simulated date	01/01/2009 ~ 12/31/2018
Infiltration volume	5.5 mm/day
Conveyance loss	15%
Submerged depth	Minimum: 20 mm, Maximum: 80 mm
Farming period	5/10 ~ 9/21

2.2.4 표준강수지수(Standard Precipitation Index, SPI)를 이용한 가뭄년도 및 비가뭄년도 분류

운영관리 방안을 도출하기 위해서 SPI 개념을 적용하여 가뭄년도와 평년을 구분하였다. SPI는 Mckee et al. (1993, 1995)이 가뭄은 강수량의 부족에 의해 시작된다는 것에 착안하여 개발하였으며 같은 기간을 대상으로 각각 기간별로 현재의 SPI를 계산하고 지도형태의 분포로 해석할 수 있게 고안되었으며, 시간 단위별로 강수부족량을 산정하여 각각의 용수 공급원이 가뭄에 미치는 영향을 판단하는 지수이다. 가뭄년도 및 평년을 구분하기 위해서 12개월 단위로 분석을 해야 하지만, 농업용 저수지의 특성상 영농기 동안의 강수량이 필요수량에 큰 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 나주지역의 영농 기간(5월~9월)동안의 강우량을 이용하여 SPI를 산정하였다. 산정된 SPI는 Table 4에 따라 평가된다.

2.3 평년 운영관리에 따른 농업용저수지 이수안전도 평가

2.3.1 시나리오별 운영관리 방안

평년 운영관리에 따른 농업용저수지 이수안전도 평가를 위해 총 3가지 시나리오를 기준으로 10년간 나주호 이수안전도를 산정하였다. 본 연구에서는 나주호 유역의 SPI 계산 결과를 바탕으로, 평년으로 분류된 경우 실제 공급량에서 시나리오별 관리 제한저수율 밑으로 내려가지 않도록 공급량을 조절하였으며, 가뭄년도로 분류된 경우 계산된 필요수량만큼 공급하는 것으로 가정하였다. 첫 번째 시나리오는

평년 관리저수율을 30%로 가정하여 구동하였으며, 두 번째 시나리오는 관리저수율 35%, 세 번째 시나리오는 관리저수율 40%로 적용하였다(Fig. 2).

3. 결과 및 고찰

3.1 가뭄년도 및 평년 구분

나주호 유역 영농기 강수량과 SPI 지수는 Fig. 3과 같다. 나주호 운영관리 방안을 도출하기 위해서 영농기간 SPI 지수를 바탕으로 가뭄해와 평년해를 구분하였다. SPI 지수가 -1 이하 값을 나타낸 경우 가뭄년도로 가정하였으며, 그 결과는 Table 5에 나타나있다. 그 결과, 2015년~2017년의 경우 SPI 지수가 -1 이하로 가뭄년도로 분류되어 필요수량만큼 공급량을 적용하였으며, 그 외 년도는 시나리오별 관리 제한 저수율 밑으로 내려가지 않도록 조절하였다. 2016년도의 경우 2011년도 강우량과 거의 차이가 없는 연 강수량을 보였으나 본 연구에서는 영농기에 한해 SPI 지수를 산정하였기 때문에 영농기동안 비가 적게 온 2016년도의 SPI 값이 낮게 산정되었다.

3.2 나주호 수혜면적 및 필요수량 산정

나주호 농업용수 공급방식에 따라 나주호 직접공급 수혜면적을 분리해 HOMWRS를 구동하여 필요수량을 산정하였으며, 나주호 수혜구역 필요수량 계산결과, 가뭄이 발생하였던 2015년~2018년 기간 동안 필요수량이 가장 많이 필요했으며 평균 889.4 mm의 필요수량을 나타냈다(Table 6).

Table 4. Classification Criteria of SPI Value to Determine the Wet or Drought Condition

SPI value	Condition	Probability (%)
≥ 2.0	Extreme wet	2.3
1.50 to 1.99	Severe wet	4.4
1.00 to 1.49	Moderate wet	9.2
0.99 to -0.99	Normal	68.2
-1.00 to -1.49	Moderate drought	9.2
-1.50 to -1.99	Severe drought	4.4
≤ -2.00	Extreme drought	2.3

Fig. 3. SPI Value and Farming Period Rainfall in Naju Watershed

Table 5. Annual and Farming Period Rainfall and SPI Value of Naju Reservoir Watershed

Year	Annual Rainfall (mm)	Farming period rainfall (mm) (May to Sep)	SPI value (May to Sep)
2009	1,615	1,276	0.89
2010	1,552	1,053	0.19
2011	1,352	979	-0.06
2012	1,790	1,262	0.85
2013	1,392	1,027	0.10
2014	1,535	1,090	0.31
2015	1,077	541	-1.93
2016	1,347	703	-1.15
2017	794	538	-1.94
2018	1,728	1,004	0.02

Table 6. Calculated Irrigation Water Requirement of Naju Reservoir Beneficiary Area

Year	Amount of water requirement	
	(10^3 m^3)	(mm)
2009	36,544	757.7
2010	34,295	711.1
2011	42,279	876.6
2012	37,923	786.3
2013	38,933	807.2
2014	36,044	747.3
2015	48,865	1,013.2
2016	55,128	1,143.0
2017	46,532	964.8
2018	52,417	1,086.8
Average	42,896	889.4

3.3 CAT 모형 구축 결과 및 검증

CAT 모형의 나주호 물수지 분석 결과를 검증하기 위해 본 연구에서는 한국농어촌공사 RIMS에 등록되어있는 2009년 1월 1일 ~ 2018년 12월 31일 저수율 자료와 CAT 모형

물수지 분석을 통한 나주호 저수율을 비교하였다. 실측값과 모의값의 R^2 와 NSE 값이 모두 0.5 이상으로 분석된 경우 모델의 결과가 타당하다고 판단하였으며(Santhi et al., 2001; Van Liew et al., 2003; Moriasi et al., 2007), 비교 결과,

$R^2 = 0.925$, $NSE = 0.905$, $RMSE = 2.91$ 로 CAT 모형 물수지 분석 적용성을 검증하였다(Fig. 4).

Fig. 4. Comparison of Observed and Simulated Storage Rate of Naju Reservoir

3.4 평년 운영관리에 따른 농업용수 공급량 변화

기후변화에 대응하기 위한 관리 제한 저수율에 따른 농업용수 공급량 및 저수율 변화를 살펴보기 위해 관리 제한 저수율 30%, 35%, 40%로 시나리오를 설정하고 이에 따른 공급량을 결정하였다. 2009년부터 2015년까지는 산정된 필요수량에 비해 실제 공급량이 더 많았으며 2016년부터 2018년까지는 필요수량에 비해 적게 공급되어 농업용수가 부족했을 것으로 판단된다. 실제로, SPI 지수를 통해 가뭄으로 나타난 2015~2017을 제외한 해의 관측된 저수율을 살펴보면 40% 이하로 저수율을 공급한 연도가 2009년, 2012년, 2013년, 2014년으로 4번 발생하였다(Fig. 5). 실 공급량과 시나리오별 공급량, 앞서 산정한 필요수량을 연간 비교해본

결과, 시나리오 I 은 2009년부터 관리제한 저수율을 30%로 농업용수를 공급할 때 2009년 공급량을 약 9백만 톤 감소시킴에 따라 2016년도와 2017년도에 추가 공급이 가능하였으며, 2018년도의 경우, 공급할 수 있는 물이 부족하게 되며 실 공급량과 차이가 없다. 시나리오II(관리제한 저수율 35%)와 시나리오III(관리제한 저수율 40%)에서는 관리제한 저수율을 지키면서 2016년도와 2017년도의 필요수량까지 공급이 가능한 것으로 모의되었다. 2018년은 지속된 가뭄에 의하여 필요수량에 맞춰 물을 공급할 수 는 없지만, 실 공급량보다 더 많은 물을 공급할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 6). 시나리오별 나주호 저수율을 살펴본 결과, 평년 관리제한 저수율을 30%로 지정할 경우 2009년 공급량을 약 9백만 톤 감소시킴에 따라 가뭄이 2년째 지속되었던 2016년까지 물 공급이 가능하였으며, 관리제한 저수율을 35%~40%까지 증가시킬 경우 가뭄이 3년 연속 발생한 2015~2017년도 모두 필요수량을 충족시킬 수 있었으며, 관측된 2018 부족량 13.9백만 톤을 5.8백만 톤까지 저감시킬 수 있는 것으로 추정되었다. 하지만, 관리제한 저수율을 40% 까지 적용할 경우 2009년과 같이 초기저수율이 충분히 확보 되지 못한 경우 용수공급 자체에 어려움이 발생할 수 있다(Table 7). 따라서, 보다 장기적인 자료를 바탕으로 관리 저수율을 평가할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 기후변화에 대응할 수 있는 농업용수 최저 관리 저수율을 설정하기 위해 Catchment hydrologic cycle Assessment Tool (CAT) 프로그램을 이용하여 나주호 수혜 구역을 대상으로 물수지 분석을 수행하고 가뭄을 대비할 수 있는 평년 운영 관리에 따른 부족수량 변화를 평가하였다. 그 결과, 평년 운영 관리 저수율이 높아질수록 영농기 초기

Fig. 5. Observed and Simulated Storage Rate of Naju Reservoir

Fig. 6. Comparison of Observed and Simulated Supply Amount from Naju Reservoir

Table 7. Annual Shortage Amount of Water Supply Based on Storage Rate Management Scenarios

Year	Shortage amount of water supply (10^3 m^3)			
	Observed	Scenario I	Scenario II	Scenario III
2009	-	-	1,723	6,800
2010	-	-	-	-
2011	-	-	-	-
2012	-	-	-	-
2013	-	-	-	-
2014	-	-	-	-
2015	-	-	-	-
2016	5,520	-	-	-
2017	5,479	2,111	-	-
2018	13,946	13,946	12,448	5,759

저수율이 증가하였고, 연평균 농업용수 부족수량이 감소하였다. 또한, 평년 저수율 관리에 따라 가뭄 년도 헛수와 그 심도를 저감시킬 수 있는 것으로 확인되어 이수안전도를 높이기 위해서는 저수지별 적절한 최저관리 저수율이 분석되어야 한다고 판단된다. 하지만, 본 연구에서는 10년 자료만을 이용하여 이수안전도를 평가하였기 때문에 향후 더욱 장기적인 자료를 바탕으로 신뢰성 높은 연구가 추가적으로 이루어져야 하며, 다양한 유역에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 기후변화의 극한 현상 중 가뭄만에 대응할 수 있는 저수지 운영방안을 제시하였지만, 국지성 기상현상에 따라 각 지역의 특성에 맞는 적절한 저수지 운영관리 방안에 대한 연구가 지속적으로 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국농어촌공사농어촌연구원의 지원을 받아 수행된 “광역관개지구 용수공급 모니터링 및 실태분석 연구 용역”의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Ahmad, S.W. (2017). Tank model application for runoff and infiltration analysis on sub-watersheds in lalindu river in South East Sulawesi Indonesia. *Journal of Physics*, Vol. 846, No. 1, 012019. doi:10.1088/1742-6596/846/1/012019
- Ahn, B.I., Jo, Y.D., Kim, T.H., and Kwon, Y.D. (2009). Analysis on the shortage of agricultural water supply under climate change: Application to daega reservoir in Goseong Gun. *Journal of Agricultural Economics*, Vol. 50, No. 2, pp. 45-67.
- Bae, D.H., Jeong, I.W., Kang, T.H., and Noh, J.W. (2003). Automatic parameter estimation considering runoff components on tank model. *Journal of Korea Water Resources Association*. Vol. 36, No. 3, pp. 423-436.
- Choi, S., Kang, S., Lee, D., Choi, J., and Lee, S. (2017). Analysis of impact on future water supply considering

- the cropping system change of rice paddy under climate change. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 439-448.
- Gang, B.M. (2015). Occurrence of agricultural drought and efforts to overcome. *Journal of Disaster Prevention*, Vol. 17, No. 4, pp. 47-57.
- Jin, Y.K., Lee, S.H., and Jung, T.H. (2017). Reservoir operations applying discrete hedging rule curves depending on current storage to cope with droughts. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 1, pp. 107-115.
- Kim, D.Y. (2020). Effect of regional climate change on precipitation in the 21st century. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 205-210.
- Kim, H.J., Jang, C.H., and Noh, S.J. (2012). Development and application of the catchment hydrologic cycle assessment tool considering urbanization (1) -Model development-. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 2, pp. 203-215.
- Kim, T.C., and Lee, S.H. (2002). Evaluation method of drought for irrigation reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 44, No. 2, pp. 75-80.
- Kim, T.W., and Yu, J.S. (2016). A plan for evaluating the safety of drainage using bivariate drought frequency. *Water for Future*, Vol. 49, No. 11, pp. 55-63.
- Korea Environment Institute (KEI). (2019). *Basic research for rational allocation of water resources*.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2020). *Korea climate change assessment report 2020: scientific basis for climate change*.
- Korea Rural Community Corporation (KRC). (2012). *Statistical yearbook of land and water development for agriculture*. Ministry for food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of South Korea
- Kwon, H.J., Nam, W.H., and Choi, G.S. (2020). An irrigation reliability assessment of agricultural reservoir to establish response plan of future climate change adaptation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 2, pp. 111-120.
- Lee, D.R., Choe, S.J., and Beak, S.H. (2015). Development of technology for evaluating water supply capacity of water resource facilities by region according to climate change. *Water for Future*, Vol. 48, No. 5, pp. 17-22.
- Lee, T.H. (2011). Introduction of hydrological operation model for water resources system (HOMWRS) -Agricultural reservoir water balance program-. *Water for Future*, Vol. 44, No. 7, pp. 88-91.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Anaheim, CA, USA, pp. 179-186.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. *Ninth Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Dallas, TX, USA, pp. 233-236.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2006). *Comprehensive long-term water resource plan (2006 ~2020)*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Dam design criteria*.
- Moriassi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASAE*. Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Nam, W.H., Kwon, H.J., and Choi, K.S. (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*, Vol. 60, No. 1, pp. 121-131.
- Park, K.B., and Lee, S.T. (2004). The study of reservoir operation for drought period. *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 13, No. 12, pp. 1041-1048.
- Park, S., Kim, H., and Jang, C. (2019). Analysis of streamflow characteristics of boryeong-dam watershed using global optimization technique by infiltration methods of CAT. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 2, pp. 412-424.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., and Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 37, No. 5, pp. 1169-1188.
- Sugawara, M. (1961). On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers. *Japanese Journal of Geophysics*. Vol. 2, No. 4.
- Surya, R.A., Purwanto, M.Y.J., Sapei, A., and Widiatmaka. (2014). Tank model to see the effect of land use

- changes on runoff, infiltration and groundwater in subwatershed of konaweha south east sulawesi Indonesia. *Journal of Enviornment and Earth Science*, Vol. 4, No. 14, pp. 107-117.
- Suryoputro, N., Suhardjono, Soetopo, W., and Suhartanto, E. (2017). Calibration of Infiltration parameters on hydrological tank model using runoff coefficient of rational method. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1887, 020056. doi:10.1063/1.5003539
- Van Liew, M.W., Arnold, J.G., and Garbrecht, J.D. (2003). Hydrologic simulation on agriculture watersheds: choosing between two models. *Trans. ASAE.*, Vol. 46, No. 6, pp. 1539-1551.
- Van Loon, A.F., and Van Lanen, H.A.J. (2012). A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, pp. 1915-1946.
- Yu, J.S., Shin, J.Y., Kwon, M.S., and Kim, T.W. (2017). Bivariate drought frequency analysis to evaluate water supply capacity of multi-purpose dams. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 1, pp. 231-238.

Received	November 24, 2020
Revised	November 25, 2020
Accepted	December 10, 2020