



RCP 시나리오 기반 비관개기 강수량을 고려한 농업용 저수지의 용수공급 확률 분석

Analysis of Water Supply Probability for Agricultural Reservoirs Considering Non-irrigation Period Precipitation using RCP Scenarios

방재홍* · 최진용**,† · 이상현***

Bang, Jehong · Choi, Jin-Yong · Lee, Sang-Hyun

Abstract

The main function of an agricultural reservoir is to supply irrigation water to paddy rice fields in South Korea. Therefore, the operation of a reservoir is significantly affected by the phenology of paddy rice. For example, the early stage of irrigation season, a lot of irrigation water is required for transplanting rice. Therefore, water storage in the reservoir before irrigation season can be a key factor for sustainable irrigation, and it becomes more important under climate change situation. In this study, we analyzed the climate change impacts on reservoir storage rate at the beginning of irrigation period and simulated the reservoir storage, runoff, and irrigation water requirement under RCP scenarios. Frequency analysis was conducted with simulation results to analyze water supply probabilities of reservoirs. Water supply probability was lower in RCP 8.5 scenario than in RCP 4.5 scenario because of low precipitation in the non-irrigation period. Study reservoirs are classified into 5 groups by water supply probability. Reservoirs in group 5 showed more than 85 percentage probabilities to be filled up from half-filled condition during the non-irrigation period, whereas group 1 showed less than 5 percentages. In conclusion, reservoir capacity to catchment area ratio mainly affected water supply probability. If the ratio was high, reservoirs tended to have a low possibility to supply enough irrigation water amount.

Keywords: Agricultural reservoirs; climate change; RCP scenarios; water supply probability; non-irrigation period

1. 서 론

우리나라는 논관개기 대부분을 차지하며 논벼 생육기간인 4월~9월에 대부분의 관개가 이루어진다. 또한 4월~9월 동안 약 1,400mm의 강수 중의 대부분이 6월~9월에 집중되며 이는 우리나라 관개 계획에 매우 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나이다. 특히 논인 경우 대부분의 관개용수를 농업용 저수지로부터 공급받고 있는데 현재 우리나라 농업용 저수지는 약 17,427개소이며 한국농어촌공사에서 3,377개, 지방자치단체에서 14,050개소를 관리하고 있다 (MAFRA, 2014).

논벼의 관개기 (4월~9월) 중 가장 많은 물이 필요한 시기는 이앙용수를 공급하는 이앙기이며 이는 관개 시작 후

약 한 달 동안이다. 이앙기에는 전년도로부터 이월된 저수량으로부터 이앙용수를 공급하며, 만약 이월 저수량이 충분하지 않다면 충분한 물을 공급하지 못하여 원활한 관개가 이루어지지 않을 가능성이 크다. 이에 우리나라의 농업용 저수지에서는 하절기 강우를 효율적으로 사용하여 최대한 저수하는 것이 중요하다. 특히 10년 빈도 한발 또는 그 이상이 오면 효율적 용수 사용이 이루어져도 관개에 필요한 충분한 수자원을 확보하기 어렵다. 이에 가뭄에 대비한 농업용 저수지의 효율적인 운영에 관련된 연구는 지속적으로 진행되어 왔다.

저수지의 가뭄 대응 능력 및 저수지 운영에 관한 연구는 주로 모의 용수량 산정 및 관개효율에 초점을 두고 있다. 그러나 선제적인 가뭄 대응을 위해서는 당해 연도와 이듬해의 용수공급 가능성을 동시에 고려할 필요가 있다. 특히 농업용 저수지의 경우 비관개기동안 충분한 강수를 저수하지 못하여 이월저수량이 충분하지 않을 때 이듬해의 용수 공급에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 경우 비관개기에 최대한의 수자원을 확보하는 것이 상대적으로 중요할 것이다.

농업용 저수지의 운영에 관련된 연구는 1940년대부터 꾸준히 진행되어왔다. Little (1955), Buras (1963)는 실측 유입량 자료를 적용한 동적 프로그램을 통해 수자원 관리 정책 결정

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Professor, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

*** Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, Japan

† **Corresponding author**

Tel.: 02-880-4583 Fax: 02-873-2087

E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

Received: December 27, 2017

Revised: June 8, 2018

Accepted: June 14, 2018

에 기여하였다. Leonard et al. (1974)은 동적 프로그램을 이용한 최적화 기법을 통해 실시간 다중 저수지 시스템에 대한 최적 저수지 용량을 설정하였다. Daniel et al. (1975)은 선형 계획법에 따른 최적 저수지 용량 결정 과정에 확률제약 모형을 적용하였으며 Slobodan et al. (1980)은 다목적 저수지에 대해 신뢰도 프로그램을 통한 최적화를 진행하였다. 초기 저수지 운영에 관련된 연구는 저수지 용량 최적화에 초점이 맞추어져 있다 (Jery, 1984; Thanos, 1987). 2000년대에는 유입량 혹은 방류량에 대해 추계학적 접근을 시도하여 미래 저수지 운영을 모의하였다 (Abbas, 2001; Mahdi, 2007). 국외 연구는 농업용 저수지 등 특수한 목적을 가진 저수지보다는 다목적 저수지의 운영에 관한 연구가 주를 이뤘다. 국내 저수지 운영과 관련된 연구는 1980년대에 관심을 얻기 시작하여 1990년 이후에 본격적으로 연구되었다. Yoon et al. (1993)은 기존 물수지 분석에 공간적 분포를 고려한 방법론을 제시 및 동진강과 만경강 유역에 적용하였다. 이광만 et al. (1997)은 한강 유역의 물수지 분석에 HEC-5 (U.S Army Corps of Engineers, 1989)와 IDP (incremental dynamic programming)를 적용해 대규모 저수지 시스템을 해석하여 우리나라에 수문 모형을 적절히 이용할 수 있음을 입증하였다. 2000년대에는 다양한 유역유출 모형을 적용한 연구와 기후변화가 유역에 미치는 영향에 관한 연구가 시작되었다 (Shin et al., 2007; Hwang et al., 2007; Choi et al., 2008). 이후로 기후변화가 사회적으로 큰 영향을 미치게 되었으며 기후변화가 농업용 저수지에 대해 미치는 영향을 다양한 관점에서 평가 분석하기 위한 연구가 진행되었다. Nam et al. (2014a)은 기상청의 기후변화 시나리오를 이용해 우리나라 농업용 저수지의 용수공급 지속가능성을 전망해 농업용 저수지의 관점에서 농업가뭄을 분석하고자 하였다. Park et al. (2013)은 CanESM2 GCM 기반 기후변화 시나리오 (RCP 4.5, 8.5)를 이용해 농업용 저수지의 미래 내한능력을 평가하였으며 Nam et al. (2013)은 스마트 물관리 체계를 활용한 동진강 유역의 주요 9개 용수 지선을 대상으로 농업용수 관개효율성을 평가하였다. Lee et al. (2013)은 독농이기 농업용 저수지 운영기준에 따른 환경용수 방류가능량 및 방류 패턴에 대해 분석하였으며 Yoo et al. (2012)은 독농이기 농업용 저수지의 환경용수 방류기준을 설정하고자 하였다. Nam et al. (2014b)은 기후변화에 따른 농업용수 공급량 및 수요량을 산정해 저수지 물수지를 통해 농업용 저수지의 용수공급 불확실성을 분석하였다. 저수지 운영과 관련된 연구는 동적 계획법을 시작으로 계산의 최소화와 합리적 전망을 위한 다양한 방법론이 적용되어왔으며 최근에는 기후변화와 관련하여 미래 용수공급 안정성을 전망하는 연구가 진행되고 있다. 대부분의 연구는 동적 프로그램에 기인한 최적화 기법 혹은 관

개 시기의 용수량 변화에 초점이 맞추어져 있으며 비관개기의 이월저수량 혹은 저수지 운영 방식과 관련된 연구는 많지 않은 상황이다.

따라서 본 연구에서는 RCP 시나리오를 기반으로 장기유출 모형인 Tank 모형을 적용해 관개 종점의 저수율에 따라 이듬해 관개 시점에 농업용 저수지가 90 % 이상의 저수율을 가질 확률에 대해 과거 자료와 미래 시나리오의 경우를 비교해 농업용 저수지의 미래 용수공급 확률을 분석하였으며 그 결과를 활용하여 미래 농업용 저수지 운영 계획 수립에 참고할 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 RCP 시나리오를 기반으로 비관개기 강수량을 고려한 농업용 저수지의 미래 용수공급 확률을 분석하였다. 기상자료는 대상 저수지 지배측후소 자료를 사용하였다. 기초선 자료 (1986년 - 2015년)와 RCP 4.5/8.5 자료 (2011년 - 2100년) 비관개기 기간의 강수량 자료를 입력자료로 구축하였으며, 기초선 자료는 baseline, RCP 자료는 30년 간격으로 구분하여 2025s, 2055s, 2085s라 명명하였다. 기초선 자료는 최근 30년 기상자료를 사용하였기 때문에 기후변화 자료와 시기가 중첩되었다. 대상 저수지 유역별 특성자료를 이용해 Tank 모형 매개변수를 구축 후 연도별 비관개기 유출량을 모의하였다. 관개 종료 시점의 저수율을 초기저수율이라 명명하고 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %로 가정, 비관개기 동안 저수지 유입량이 Tank 모형 모의 유출량과 같다는 전제로 초기저수율과 모의 유출량을 합하여 이듬해 관개 시작 시점의 저수량 (이월저수량)을 모의하였다. 이후 시나리오별, 기간별로 모의된 이월저수량 자료의 확률분석을 시행하였다. 이월저수량이 유효저수량의 90 % 이상이 될 확률을 목표확률이라 명명하였으며, 기간별, 시나리오별로 비교 분석하였다. Fig. 1은 연구 흐름도를 나타낸 것이다.

1. 대상 저수지 및 지배측후소

본 연구의 대상 저수지로는 한국농어촌공사 관리 경기도 소재의 독농이기 저수지를 제외한 농업용 저수지 34개소를 선정하였다. 한국농어촌공사에서 관리하는 경기도 소재 농업용 저수지는 총 93개소이며, 경기도 농업용 저수지 특성을 일부 대표할 수 있도록 34개소의 저수지를 선택하였다. 저수지별 지배측후소는 GIS 상에서 티센망을 적용하여 선정하였으며 Fig. 2에 나타내었다.

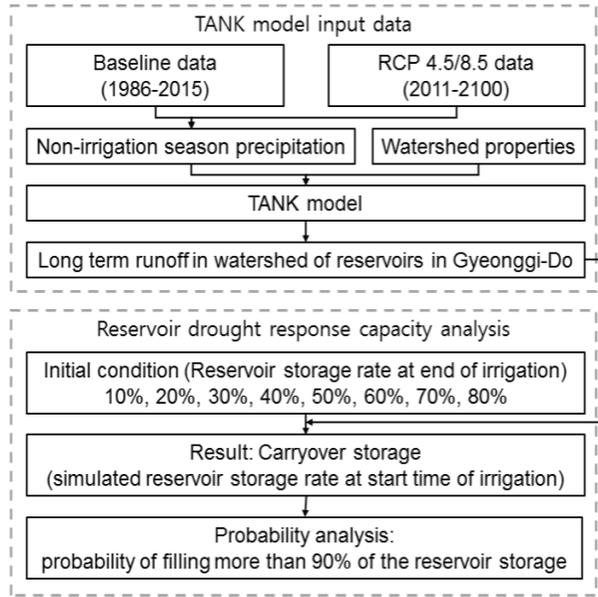


Fig. 1 Flow chart of the study

34개 대상 저수지의 지배측후소는 서울, 수원, 양평, 원주, 이천, 인천, 천안, 춘천의 8개 측후소로 선정되었으며, 기상 측후소 제원은 Table 1, 저수지 제원은 Table 2에 나타내었다. 기상인자 측정 기간 및 장치의 통일성을 위해 기상청 관할 기상관측소 자료만을 이용하였다.

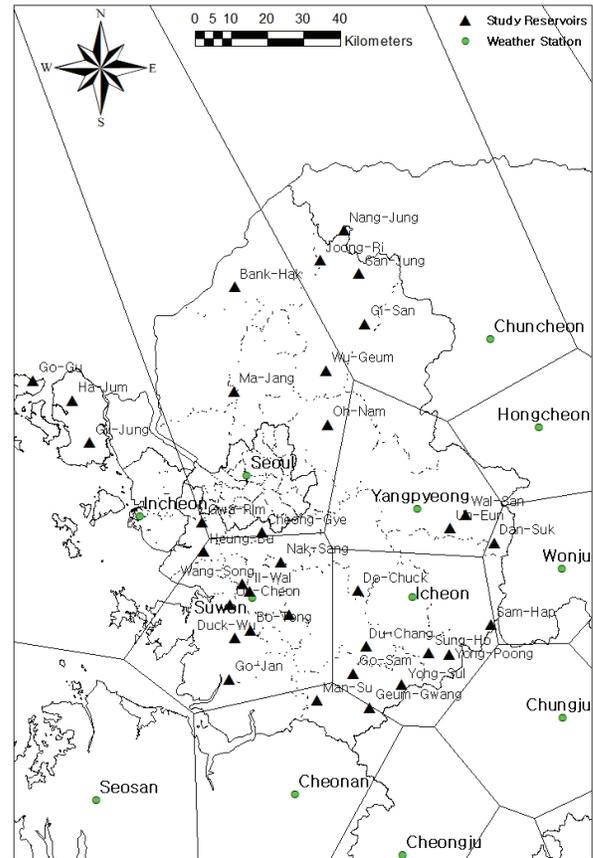


Fig. 2 Study reservoirs and Thiessen network

Table 1 Properties of weather stations

Station No.	Name	Lat. (°)	Long. (°)	Obs. (m)	Station No.	Name	Lat. (°)	Long. (°)	Obs. (m)
101	Chuncheon	37.54	127.44	76.8	119	Suwon	37.16	126.59	33.6
108	Seoul	37.34	126.58	85.5	202	Yangpyeong	37.29	127.30	47.0
112	Incheon	37.28	126.38	68.9	203	Icheon	37.16	127.29	77.8
114	Wonju	37.20	127.57	149.8	232	Cheonan	36.47	127.07	24.9

Table 2 Properties of study reservoirs

Reservoir (Station No.)	Latitude	Longitude	Capacity (1,000m ³)	Catchment Area (ha)	Irrigated Area (ha)
Go-Gu(112)	37° 47' 44"	126° 17' 34"	2,648	2,816	769
Go-Sam(203)	37° 04' 56"	127° 16' 55"	15,217	7,100	2,970
Go-Jan(119)	37° 04' 03"	126° 54' 32"	409	450	83
Gwa-Rim(112)	37° 27' 07"	126° 49' 28"	366	360	82
Geum-Gwang(232)	36° 59' 52"	127° 20' 10"	12,047	4,830	1,906
Gi-San(101)	37° 46' 40"	126° 57' 15"	1,162	872	105
Gi-Heung(119)	37° 14' 12"	127° 05' 46"	11,630	5,300	1,226
Gil-Jung(112)	37° 39' 15"	126° 28' 17"	4,180	1,511	724
Nak-Sang(119)	37° 21' 09"	127° 04' 28"	856	1,950	37

Nang-Jung(101)	38° 10' 30"	127° 16' 26"	775	5	334
Dan-Suk(114)	37° 24' 10"	127° 44' 14"	128	1,230	65
Duck-Wu(119)	37° 10' 09"	126° 55' 39"	3,547	2,270	573
Do-Chuck(203)	37° 17' 10"	127° 18' 33"	701	980	149
Du-Chang(203)	37° 08' 51"	127° 20' 04"	1,223	287	192
Ma-Jang(108)	37° 46' 33"	126° 55' 35"	2,637	1,138	179
Man-Su(232)	37° 01' 08"	127° 11' 08"	614	375	140
Back-Hak(108)	38° 01' 52"	126° 55' 34"	1,746	995	136
Bo-Tong(119)	37° 11' 35"	126° 58' 29"	1,071	716	364
San-Jung(101)	37° 05' 10"	127° 12' 12"	1,922	1,537	376
Sam-Hap(203)	37° 11' 56"	127° 43' 35"	145	170	42
Sung-Ho(203)	37° 08' 15"	127° 31' 56"	858	616	340
Uh-Eun(202)	37° 26' 25"	127° 36' 03"	288	180	70
Uh-Cheon(119)	37° 15' 17"	126° 55' 36"	894	380	198
Oh-Nam(108)	37° 41' 46"	127° 13' 18"	2,435	1,552	277
Wang-Song(119)	37° 18' 24"	126° 56' 50"	2,077	1,555	534
Yong-Sul(203)	37° 03' 27"	127° 26' 41"	2,932	790	402
Yong-Poong(203)	37° 07' 29"	127° 35' 30"	715	500	200
Wu-Geum(108)	37° 49' 40"	127° 12' 40"	1,009	515	199
Wal-San(202)	37° 28' 20"	127° 39' 03"	201	837	101
Il-Wal(119)	37° 17' 17"	126° 58' 20"	299	277	126
Joong-Ri(101)	37° 06' 00"	127° 11' 56"	532	900	147
Cheong-Gye(108)	37° 56' 27"	127° 20' 23"	1,093	790	100
Ha-Jum(112)	37° 45' 31"	126° 25' 41"	1,009	160	462
Heung-Bu(119)	37° 22' 55"	126° 50' 08"	1,840	1,320	865

2. 기상자료 구축

농업용 저수지의 미래시기 용수공급 확률을 분석하기 위해서는 기상자료가 필수적이며, 본 연구에서는 기초선 자료와 미래 기상자료를 구축 활용하였다. 기초선 자료란 현재 상황을 나타내는 자료로 본 연구에서는 미래 기후변화 자료를 이용한 결과와 비교 평가할 수 있는 자료를 의미한다.

기초선 자료는 대상 측후소의 1986년부터 2015년까지의 30년 강수량 자료를 사용하였으며, 미래 기상자료는 IPCC 5차 보고서 채택 기후변화 시나리오인 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오를 이용하였다. RCP 시나리오를 기반으로 CCCma (Canadian Center for Climate Modeling and Analysis) 제공 전지구모형인 CanESM2 (The 2nd Generation Earth System Model)를 바탕으로 편의 보정 (bias correction) 기법으로 상세화 (downscale)한 기후변화 자료를 사용하였다 (Park, 2014). CanESM2에서는 RCP 2.6, 4.5, 8.5 시나리오 자료를 제공하고 있으며 RCP 2.6 시나리오는 현실에서 실현 불가능한 시나리오이므로 (KMA, 2012) 본 연구에서는 고려하지 않았다. RCP 시나리오는 2011년~2040년,

2041년~2070년, 2071년~2100년 세 기간으로 나누어 각각 2025s, 2055s, 2085s로 표시하였다. Table 3에는 RCP 자료 특성을 나타냈다.

Table 3 Climate change data properties (Arora et al., 2011)

Model name	Vertical grid	Horizontal resolution	Downscaling
CanESM2	z40	1.5° × 1.5°	Bias correction

3. 농업용 저수지 용수공급 확률 분석

본 연구에서는 농업용 저수지의 용수공급 능력을 판단하기 위해 기상자료를 이용해 이월저수량을 모의하였다. 비관개기 동안 유역으로부터 저수지로의 유입량을 추정하기 위해 Tank 모형을 구동하였다. 기상 자료는 기초선 자료 및 RCP 시나리오 자료를 30년 단위로 구분해 적용하였으며, 초기 조건으로 저수율은 10 %부터 80 % 까지 10 % 간격으로 적용하였다. 초기저수율이란 전년도 관개가 끝난 시점의 저수율을 의미하며, 이후 비관개기동안 저수지 방류가 이루어지지 않기 때문

에 Tank 모형으로 구한 유역유출량은 모두 저수지로 유입된다는 전제로 매년 이월저수량을 모의하였다. 모의된 이월저수량은 농림축산식품부 (MAFRA, 1998)에서 제시하였으며, 비대칭분포에 대해 널리 사용되고 있는 방법인 GUMBEL 분포를 적용하여 빈도분석을 시행 후 목표확률을 구하여 이를 시나리오별, 기간별, 초기저수율별로 비교 분석하였다.

가. Tank 모형 입력자료 구축

Tank 모형은 과거부터 오랫동안 국내 수자원 해석 및 계획에 폭넓게 활용되어 오고 있는 수문 모형으로 Sugawara (1972)가 개발하였다. Tank 모형은 유역을 3~4단 저류탱크 형태로 개념화시켜 강우-유출 과정을 모형화한 것으로 1단, 2단 탱크에서 강우, 증발산 및 지표 유출을 모의하고, 하부 탱크에서 지하수 유출, 침투 등의 중간유출 과정을 개념적으로 모의한다 (Kim and Kim, 2012). Sugawara (1972)는 일본의 유역에 대해 4단 혹은 5단 모형이 적합하다고 제안한 바 있으며, 본 연구에서는 Kim & Park (1986)이 제안한 우리나라 중소하천에 적합한 3대 탱크 및 4개 유출공을 사용한 수정모형을 적용하였다.

Tank 모형 구동을 위해서 모형에 필요한 매개변수를 적절히 추정하는 과정이 필요하게 되며 본 연구에서는 Kim & Park (1988)이 제시한 Tank 모형 매개변수 추정 회귀식을 사용하였다. Table 4에는 매개변수별 회귀식을 나타내었다.

나. 확률 분석

농업용 저수지의 관개 초기 용수공급 능력을 판단하기 위해 모의된 이월저수량에 대해 빈도 분석을 시행하였다. 이월저수량 자료의 분포형은 농업용 저수지 설계 실무에 일반적으로 사용되는 GUMBEL 분포를 적합 (fitting) 후 빈도 분석을 통해 목표확률을 구하였다. Table 5에는 시나리오별, 기간별 초기저수율을 나타내었다.

Table 4 Parameters of TANK model (Kim and Park, 1988)

Contents	Regression equation
Runoff coefficient	$A11 = -0.00414 \times Paddy(\%) + 0.169$
	$A12 = -0.00175 \times Forest(\%) + 0.333$
	$A2 = 0.00657 \times Upland(\%) + 0.163$
	$A3 = -0.000267 \times Upland(\%) + 0.00912$
Infiltration coefficient	$B1 = -0.070 \times \ln(Area(km^2)) + 0.470$
	$B2 = 0.00998 \times Paddy(\%) + 0.111$
	$B3 = -0.00618 \times \ln(Area(km^2)) + 0.0351$
Outlet Height	$H11 = 16.68 \times \ln(Area(km^2)) + 24.20$
	$H12 = 5.0$
	$\ln(H2) = -0.0934 \times Upland(\%) + 2.0904$
	$H3 = 0$
Storage amount	$ST3 = 43.686 \times \ln(Area(km^2)) + 37.159$

III. 결과 및 고찰

1. 농업용 저수지 이월저수량에 따른 용수공급 확률 분석

본 연구에서는 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 기반으로 강우유출모형인 Tank 모형을 이용하여 비관개기 강수량이 저수량 증가에 미치는 영향을 확인하였다. 과거 시기 및 미래 시기 비관개기의 강수량 및 유역유출량 산정 결과와 초기저수율 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%를 초기 조건으로 목표확률을 산정하였다.

가. 초기저수율 기반 용수공급 확률 분석

초기저수율별로 목표확률이 어떻게 변하는지 확인하기 위해 기초선 자료, RCP 4.5/8.5를 적용하여 구한 목표확률을 평균하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다. 초기저수율이 증가할

Table 5 Initial conditions of reservoir storage by scenarios

Contents	Scenarios						
	Baseline	RCP 4.5			RCP 8.5		
	1986-2015	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Initial condition	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %
	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %
	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %
	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %
	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %
	70 %	70 %	70 %	70 %	70 %	70 %	70 %
	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %

수목 목표확률이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 초기저수율 70 %에서 80 %로 증가하는 경우 목표확률 또한 가장 큰 폭으로 증가하였다. 즉, 관개시기가 끝난 시점의 저수율이 증가할수록 다음연도 관개시작 시점의 저수율이 90 % 이상이 될 확률이 증가할 것으로 확인되었다.

Table 6 Average target probability by initial condition

Initial condition	50 %	60 %	70 %	80 %
Target probability	77 %	83 %	89 %	97 %

나. 시나리오 기반 용수공급 확률 분석

동일 초기저수율에서 시나리오에 따른 목표확률을 Fig. 3

에 나타내었다. 기초선 자료를 기준으로 RCP 4.5 2025s에서 확률은 약 1 % 정도 감소하였고, 다른 시나리오에서는 높은 확률을 보였다. RCP 4.5 2055s에서 확률은 2025s보다 3 %에서 5 %정도 증가하였으며, 2085s에는 2055s보다 약 1 % 증가하였다. RCP 8.5 2025s 목표확률은 RCP 4.5 2025s보다 약 3 % 증가한 것으로 나타났으나, 2055s, 2085s에서는 RCP 8.5 목표확률이 RCP 4.5 목표확률보다 낮게 나타났다. Table 7과 같이 2025s 시기와 달리 2055s와 2085s 시기에 RCP 8.5 시나리오 강수량이 RCP 4.5 시나리오 강수량보다 낮아 유역유출량이 적게 모의된 것이 원인으로 판단되었다 (Bang et al., 2016).

Table 7 Precipitation of weather stations in non-irrigation period (9/30 to 4/1) (unit: mm)

Station No.	Baseline	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
101	195.7	194.8	220.3	225.2	209.5	204.5	205.7
108	218.8	216.4	245.5	252.8	231.9	226.8	229.5
112	205.5	200.9	227.1	235.3	213.9	209.9	211.7
114	217.6	225.0	244.6	254.7	235.7	231.2	235.0
119	219.1	222.9	247.0	257.6	234.6	230.1	234.8
202	204.0	204.3	230.8	239.0	217.6	214.3	214.7
203	214.0	218.5	244.3	252.8	231.2	227.2	229.3
232	224.9	244.4	266.6	275.8	256.8	252.2	254.6
Average	212.5	215.9	240.8	249.1	228.9	224.5	226.9

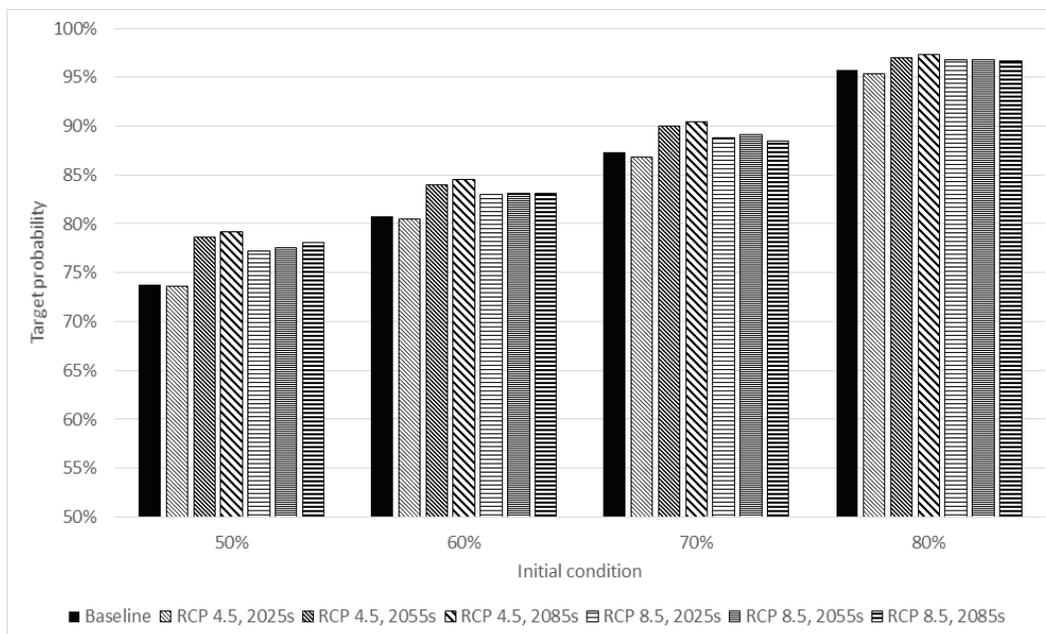


Fig. 3 Target probabilities by scenarios

다. 농업용 저수지 용수공급 확률 군집 분석

농업용 저수지별 용수공급 확률 분석을 위해 초기저수율 50 %의 경우 목표확률 범위에 따라 저수지군을 그룹 1, 2, 3, 4, 5로 나누었다. 그룹 1은 목표확률이 5 % 미만인 저수지, 그룹 2는 목표확률이 5 % 이상 20 % 미만인 저수지, 그룹 3은 목표확률 20 % 이상 60 % 미만인 저수지, 그룹 4는 목표확률 60 % 이상 85 % 미만의 저수지, 그룹 5는 목표확률 85 % 이상의 저수지로 분류하였으며 Table 8에 나타내었다. 용수공급 확률이 상대적으로 낮은 것으로 보이는 저수지인 그룹 1, 2, 3, 4에 속한 대상 저수지 분석 결과를 Table 9에 음영으로 표시해 나타내었다.

저수지별 시기별 이월저수량 확률 분석 결과는 다음과 같다. 과거시기 (Baseline) 모든 대상 저수지에서 초기저수율이 커질수록 이월저수량이 9할 이상 채울 확률은 증가하였으며, 이는 미래시기의 결과에서도 같은 경향성을 가졌다. 이월저수량의 9할을 채울 확률이 85 % 이상인 대상 저수지 (그룹 5)는 34개 저수지 중 23개로 약 68 %를 차지했다. 이는 관개 종점의 저수율이 50 %만 되어도 이듬해 관개 시점의 저수율이 9할 이상이 될 확률이 85 %가 넘는다는 것을 의미하며 내한 능력 있는 저수지로 사료되었다.

고구, 길정, 냉정, 덕우, 두창, 마장, 산정, 어은, 오남, 용설, 하점 저수지는 그룹 5에 속한 23개 저수지에 비해 용수공급 확률이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이 중 고구, 길정, 냉정, 하점 저수지 (그룹 1)는 초기저수율 50 %의 경우 목표확률이 5 % 이하였으며 두창, 마장 저수지 (그룹 2)는 20 % 이하의 확률을 가졌다. 용설 저수지 (그룹 3)는 37.4 %의 확률로 90 % 이월저수량을 달성할 수 있었으며 덕우, 산정, 어은, 어천 저수지 (그룹 4)는 60 % 이상 85 % 미만의 확률을 가지는 것을 알 수 있었다.

용수공급 확률이 상대적으로 낮은 저수지 그룹별 분석 결과는 다음과 같다. 그룹 1 에서는 초기저수율이 50 %에서 80 %로 증가함에 따라 서로 다른 크기로 확률이 증가하였다. 고구 저수지는 80 %의 초기저수율에서 49 %의 확률이 증가하였으며, 길정 저수지와 냉정 저수지는 약 67 %의 확률이 증가하였다. 하점 저수지는 79 %로 가장 큰 폭으로 확률이 증가하였다. 그룹 2 에서는 두창 저수지와 마장 저수지가 초기저수율이 50 %에서 80 %로 증가함에 따라 약 15 %에서 95 %까지 80 %의 확률이 증가하였다. 그룹 3의 저수지인 용설 저수지는 같은 경우에 약 37 %에서 100 %까지 53 %의 확률이 증가하였다. 그룹 4의 저수지는 초기저수율 80 %에서의 확률이 100 %에 가까웠다.

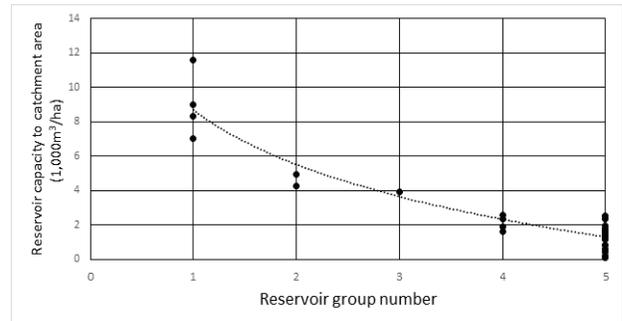


Fig. 4 Ratio of reservoir storage to catchment area by reservoir groups

Fig. 4에는 그룹별 저수지의 유역대비 저수량을 그래프로 나타내었다. 그룹 1에서 그룹 5로 갈수록 유역대비 저수량이 작아지는 군집별 경향성을 확인할 수 있었다. 즉 유역대비 저수량이 큰 그룹 1은 유역유출에 따른 저수량 변화가 다른 그룹에 비교해 상대적으로 높아서 이월저수량이 90 % 이상이

Table 8 Number of study reservoirs in each group

X: object probability	The number of reservoirs	Reservoirs
X < 5 % Group 1	4	Go-Gu, Gil-Jung, Nang-Jung, Ha-Jum
5 % ≤ X < 20 % Group 2	2	Du-Chang, Ma-Jang
20 % ≤ X < 60 % Group 3	1	Yong-Sul
60 % ≤ X < 85 % Group 4	4	Duck-Wu, San-Jung, Uh-Eun, Uh-Cheon
85 % ≤ X Group 5	23	Go-Sam, Go-Jan, Gwa-Rim, Geum-Gwang, Gi-San, Gi-Heung, Nak-Sang, Dan-Suk, Do-Chuck, Man-Su, Back-Hak, Bo-Tong, Sam-Hap, Sung-Ho, Oh-Nam, Wang-Song, Yong-Poong, Wu-Geum, Wal-San, Il-Wal, Joong-Ri, Gheong-Gye, Heung-Bu

될 확률이 낮게 나타난 것으로 사료되었다. 반면 그룹 5의 저수지의 경우 유역대비 저수량이 0~2 (1,000m³/ha)의 범위로 나타났으며, 유역 크기에 비해 유효 저수량이 작기 때문에 유역유출이 저수량 상승에 크게 기여하는 것으로 판단되었다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 RCP 시나리오를 기반으로 관개 종료 시점 저수율과 비관개기 강수량을 이용해 산정한 이월저수량을 통

해 농업용 저수지의 용수공급 확률을 분석하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 초기저수율 기반 용수공급 확률분석 결과 관개시기가 끝난 시점의 저수율이 높을수록 다음연도 관개시작 시점 저수지 저수율 90 % 이상을 회복할 확률이 높아질 것으로 판단되었다.

2. 시나리오 기반 용수공급 확률분석 결과 대상 저수지는 평균적으로 기초선 자료를 기준으로 RCP 4.5 2025s에서는 90 % 이상의 이월저수량을 가질 확률이 1 % 정도 낮은 것

Table 9 Probability of filling 90 % of reservoir storage until irrigation starting time (average)

Reservoir	Initial Condition (Reservoir storage rate at irrigation ending time)							
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
Go-Gu	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.2 %	1.2 %	9.1 %	56.3 %
Go-Sam	38.8 %	51.8 %	66.5 %	80.8 %	91.7 %	97.6 %	99.5 %	99.9 %
Go-Jan	89.7 %	93.5 %	96.2 %	98.0 %	99.1 %	99.6 %	99.9 %	100.0 %
Gwa-Rim	68.1 %	76.6 %	84.2 %	90.4 %	94.9 %	97.6 %	99.1 %	99.7 %
Geum-Gwang	41.1 %	54.1 %	68.4 %	82.0 %	92.2 %	97.7 %	99.6 %	100.0 %
Gi-San	70.4 %	79.7 %	87.6 %	93.5 %	97.2 %	99.0 %	99.7 %	99.9 %
Gi-Heung	39.6 %	52.6 %	67.1 %	81.0 %	91.6 %	97.5 %	99.5 %	99.9 %
Gil-Jung	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.2 %	0.9 %	4.5 %	21.7 %	75.4 %
Nak-Sang	99.4 %	99.6 %	99.8 %	99.8 %	99.9 %	99.9 %	100.0 %	100.0 %
Nang-Jung	0.0 %	0.0 %	0.1 %	0.2 %	1.0 %	4.5 %	20.8 %	74.4 %
Dan-Suk	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %
Duck-Wu	18.6 %	28.1 %	41.2 %	57.9 %	75.8 %	90.3 %	97.8 %	99.8 %
Do-Chuck	62.1 %	72.3 %	81.7 %	89.5 %	94.9 %	98.0 %	99.4 %	99.8 %
Du-Chang	1.4 %	3.0 %	6.2 %	13.0 %	26.7 %	50.9 %	81.4 %	98.1 %
Ma-Jang	0.5 %	1.3 %	3.0 %	7.3 %	17.3 %	38.3 %	71.6 %	96.4 %
Man-Su	52.2 %	63.9 %	75.5 %	85.8 %	93.4 %	97.7 %	99.4 %	99.9 %
Back-Hak	47.8 %	59.4 %	71.5 %	82.7 %	91.3 %	96.7 %	99.1 %	99.8 %
Bo-Tong	56.7 %	67.9 %	78.7 %	87.8 %	94.3 %	97.9 %	99.4 %	99.9 %
San-Jung	26.8 %	37.9 %	52.0 %	68.1 %	83.4 %	94.1 %	98.8 %	99.9 %
Sam-Hap	93.3 %	95.7 %	97.5 %	98.6 %	99.3 %	99.7 %	99.8 %	99.9 %
Sung-Ho	58.9 %	69.7 %	80.0 %	88.6 %	94.6 %	98.0 %	99.4 %	99.9 %
Uh-Eun	45.5 %	56.4 %	68.1 %	79.3 %	88.7 %	95.0 %	98.3 %	99.5 %
Uh-Cheon	18.0 %	27.0 %	39.6 %	55.8 %	73.7 %	88.8 %	97.1 %	99.6 %
Oh-Nam	63.1 %	73.5 %	83.0 %	90.6 %	95.7 %	98.4 %	99.6 %	99.9 %
Wang-Song	74.3 %	82.8 %	89.7 %	94.7 %	97.7 %	99.2 %	99.8 %	99.9 %
Yong-Sul	5.3 %	9.4 %	16.7 %	29.0 %	48.0 %	72.1 %	92.0 %	99.2 %
Yong-Poong	67.7 %	77.0 %	85.3 %	91.8 %	96.1 %	98.4 %	99.5 %	99.9 %
Wu-Geum	35.3 %	45.5 %	57.2 %	69.4 %	81.0 %	90.3 %	96.2 %	99.0 %
Wal-San	99.8 %	99.9 %	99.9 %	99.9 %	99.9 %	99.9 %	100.0 %	100.0 %
Il-Wal	64.7 %	75.2 %	84.4 %	91.6 %	96.3 %	98.7 %	99.7 %	99.9 %
Joong-Ri	97.8 %	98.6 %	99.1 %	99.5 %	99.7 %	99.8 %	99.9 %	100.0 %
Cheong-Gye	67.3 %	76.8 %	85.2 %	91.8 %	96.1 %	98.5 %	99.5 %	99.9 %
Ha-Jum	0.0 %	0.1 %	0.4 %	1.3 %	4.1 %	13.4 %	40.5 %	86.4 %
Heung-Bu	70.6 %	79.7 %	87.5 %	93.3 %	97.0 %	98.9 %	99.7 %	99.9 %

로 나타났으나, RCP 4.5 2055s와 2085s에서는 약 6 % 정도 높을 것으로 나타났다.

3. RCP 8.5 시나리오에서는 RCP 4.5 시나리오보다 90 % 이상의 이월저수량을 가질 확률이 전반적으로 낮은 것으로 나타났으며 적은 강수량으로 인해 유역유출량이 적게 모의된 것이 원인으로 판단되었다. 또한, RCP 8.5 시나리오에서는 기간별 용수공급 확률에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

4. 대상 저수지별 RCP 기상자료 기반 이월저수량 확률 분석 결과 저수지에서 초기저수율이 커질수록 이월저수량이 9 할 이상일 확률은 증가하였으며 확률 범위에 따라 5개 그룹으로 나누어 분석한 결과 유역대비 저수량이 적을수록 저수량 회복이 쉽게 이루어지며, 용수공급 확률이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

5. RCP 시나리오를 기반으로 비관개기 TANK 모형 적용을 통해 살펴본 저수지별 이월저수량 확률분석 결과 34개 대상 저수지 중 유역대비 저수량 값이 작은 23개 저수지는 다른 11개 저수지 대비 미래 용수공급 확률이 높을 것으로 예상하였다. 용수공급 확률이 상대적으로 적은 11개 저수지에서 미래 가뭄을 극복하기 위해 관개기에 보다 효율적인 용수 공급이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

연구결과 관개 종료시점의 저수율이 다음 해의 농업용수 공급 가능성에 주요한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 유역대비 저수량이 저수지 용수공급 능력을 결정할 수 있는 인자로 판단되었다. 유역대비 저수량이 작은 저수지는 저수량이 높은 확률로 회복되었으며 그렇지 않은 저수지에 비해 용수공급 가능성이 높은 것으로 나타났다. 하지만 본 연구에서는 경기도 지역에 한정된 농업용 저수지에 관하여 연구를 진행하였고, 극한 사상과 관개 시기는 지역적 차이가 크기 때문에 본 연구결과가 우리나라 농업용 저수지 전체를 대표하지는 못할 것으로 판단되며, 향후 이를 고려한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구결과는 비관개기 저수지 운영 및 물관리의 기초자료가 될 수 있을 것이며, 기후변화로 인한 가뭄에 대비한 농업용 저수지의 효율적 운영방안 계획에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (316022).

REFERENCES

1. Abbas, S., and W. H. Keith, 2001. Interior-Point method for reservoir operation with stochastic inflows. *Journal of Water Resources Planning and Management* 126(1): 48-57. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:1(48).
2. Alvaro, C., K. Rehdanz, R. B. Betts, P. Falloon, A. Wiltshire, and R. S. J. Tol, 2010. Climate change impacts on global agriculture, Kiel institute for the world economy, Hindenburgufer 66, 24105 Kiel, Germany. doi:10.1007/s10584-013-0822-4.
3. Arora, V. K., J. F. Scinocca, G. J. Boer, J. R. Christian, K. L. Denman, G. M. Flato, V. V. Kharin, W. G. Lee, and W. J. Merryfield, 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters* 38(5): L05805.
4. Bang, J., S. H. Lee, J. Y. Choi, and S. H. Lee, 2017. Evaluation of reservoir drought response capability considering precipitation of non-irrigation period using RCP scenario. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(1): 31-43 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2017.59.1.031.
5. Buras N., 1963. Conjunctive operation of dams and aquifers. *Journal of the Hydraulics Division* 89(6): 111-131. doi:10.1029/2010GL046270.
6. Choi, Y. S., K. T. Kim, and J. H. Lee, 2008. Development of grid based distributed Rainfall-Runoff Model with finite volume method. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(9): 895-905 (in Korean).
7. Daniel P. L., and J. D. Philp, 1975. An Evaluation of some linear decision rules in chance constrained Models for reservoir planning and operation. *Water Resources Research* 11(6): 777-782. doi:10.1029/WR011i006p00777.
8. Hwang, J. S., D. I. Jeong, J. K. Lee, and Y. O. Kim, 2007. Application of monthly water balance models for the climate change impact assessment. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(2): 147-158 (in Korean).
9. Jerry R. S., F. S. Bola, and P. L. Daniel, 1984. Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization. *Water Resources Research* 20(11): 1499-1505. doi:10.1029/WR020i011p01499.
10. Kim, H. Y., and S. W. Park, 1986. An Evaluation of parameter variations for a linear reservoir (TANK) model with watershed characteristics. *Journal of the Korean*

- Society of Agricultural Engineers* 28(2): 42-52 (in Korean).
11. 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).
 12. Kim, C. G., and N. W. Kim, 2012. Comparison of natural flow estimates for the Han River basin using TANK and SWAT models. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(3): 301-316 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2012.45.3.301.
 13. Korea Meteorological Administration (KMA), 2012. Web System Tutorials for Climate Change Scenario (in Korean).
 14. Lee, G. M., and J. E. Yi, 1997. Large-Scale multi-reservoirs system analysis for water budget evaluation. *Journal of Korea Water Resources Association* 30(6): 629-639 (in Korean).
 15. Lee, S. H., S. H. Yoo, N. Y. Park, and J. Y. Choi, 2013. An Analysis of environmental water release patterns considering operation rules in enlarged agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 51-62 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.3.051.
 16. Leonard, B., and W. W-G. Yeh, 1974. Optimization of real time operation of a multiple-reservoir system. *Water Resources Research* 10(6): 1107-1112. doi:10.1029/WR010i006p01107.
 17. Little, J. D. C., 1955. The Use of storage water in a hydroelectric system. *Journal of the Operation Research Society of America* 3(2): 187-197. doi:10.1287/opre.3.2.187.
 18. Mahdi M. J., O. B. Haddad, B. W. Karney, and M. A. Marino, 2007. Reservoir operation in assigning optimal multi-crop irrigation areas. *Agricultural Water Management* 90: 149-159. doi:10.1016/j.agwat.2007.02.013.
 19. MAFRA, 1998. Code structure for agricultural infrastructure design standards, Seoul: Korea Rural Community Corporation (in Korean).
 20. MAFRA, 2014. Statistical yearbook of land and water development for agriculture, Seoul: Korea Rural Community Corporation (in Korean).
 21. Nam, W. H., J. Y. Choi, E. M. Hong, and J. T. Kim, 2013. Assessment of irrigation efficiencies using smarter water management. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 45-53 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.4.045.
 22. Nam, W. H., E. M. Hong, and J. Y. Choi, 2014a. Uncertainty of water supply in agricultural reservoirs considering the climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 11-23 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2014.56.2.011.
 23. Nam, W. H., E. M. Hong, M. W. Jang, and J. Y. Choi, 2014b. Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 77-87 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2014.56.5.077.
 24. Park, N. Y., J. Y. Choi, S. H. Yoo, and S. H. Lee, 2013. 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.
 25. Park, N. Y., 2014. Analysis of drought response ability for agricultural reservoirs using GCM ensembles of RCP scenarios, Seoul National University Press (in Korean).
 26. Shin, H. S., D. K. Kang, and S. D. Kim, 2007. Analysis of the effect of water budget elements on flow duration characteristics using SWAT-Nak Dong. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(3): 251-263 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2007.40.3.251.
 27. Slobodan P. S., and M. A. Marino, 1980. Reliability programming in reservoir management 1. Single multipurpose reservoir. *Water Resources Research* 16(5): 844-848. doi:10.1029/WR016i005p00844.
 28. Sugawara, M., 1972. Method of rainfall-runoff analysis, Kyouritsu Shuppan Co., Ltd., Tokyo, Japan (in Japanese).
 29. Thanos T., and W. W-G. Yeh, 1987. Use of stochastic dynamic programming for reservoir management. *Water Resources Research* 23(6): 983-996. doi:10.1029/WR023i006p00983.
 30. Yoo, S. H., S. H. Lee, J. Y. Choi, and T. S. Park, 2012. Optimizing rules for releasing environmental water in enlarged agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 17-24 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2012.54.5.017.
 31. Yoon, Y. N., and T. G. Kim, 1993. A Water budget analysis with Inter-basin water transfer taken spatially into considerations. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 13(1): 89-96 (in Korean).