

연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의 Simulation of Agricultural Water Supply Considering Yearly Variation of Irrigation Efficiency

송 정 현* / 송 인 홍** / 김 진 택*** / 강 문 성****

Song, Jung Hun / Song, Inhong / Kim, Jin Taek / Kang, Moon Seong

Abstract

The objective of this study was to evaluate simulation of agricultural water supply considering yearly variation of irrigation efficiency. The water supply data of the Idong reservoir from 2001 through 2009 was collected and used for this study. Total 6 parameters including irrigation efficiency (E_s), drainage outlet height, and infiltration, were used for sensitivity analysis, calibration, and validation. Among the parameters, the E_s appeared to be the most sensitivity parameter. The E_s was calibrated on a yearly basis considering sensitivity and time-varying characteristic, while other parameters were set to fixed values. The statistics of percent bias ($PBIAS$), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and root means square error to the standard deviation of measured data (RSR) for a monthly step were 2.7%, 0.93, and 0.26 for the calibration, and 3.9%, 0.89, and 0.32 for the validation, correspondently. The results showed a good agreement with the observations. This implies that the modeling only with appropriate parameter values, apart from modeling approaches, can simulate the real supply operation reasonably well. However, the simulations with uncalibrated parameters from previous studies produced poor results. Thus, it is important to use calibrated values, and especially, we suggest the E_s 's yearly calibration for simulating agricultural water supply.

Keywords : agricultural water supply; irrigation water requirement, irrigation efficiency, sensitivity analysis, model evaluation

요 지

본 연구에서는 관개효율의 연별 변화와 필요수량을 고려하여 추정된 관개지구 용수 공급량이 현장에서 실제 공급되는 수량을 잘 모의하는지를 평가하였다. 대상지구로 이동저수지 지구를 선정하여, 2001~2009년 기간에 대한 실측 공급량 자료를 구축하였다. 관개효율, 물꼬 높이, 침투량 등 총 6개의 매개변수에 대해 민감도 분석, 보정 및 검정을 수행하였다. 민감도 분석 결과, 관개효율이 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 관개효율은 가장 민감하게 나타난 점과 연마다 값이 달라지는 특징을 반영하여 연별로 보정하였다. 통계적 지표 산정 결과 월단위에 대한 $PBIAS$, NSE , 그리고 RSR 은 보정기간 동안 각각 2.7%, 0.93, 0.26로, 검정기간 동안 각각 3.9%, 0.89, 0.32로 매우 우수하게 나타났다. 따라서 비록 농업용수 공급량은 인위적 요소이나, 적절한 매개변수 값을 사용하여 모의한다면 모의치가 실측치와 유사하게 모의될 수 있을 것이다. 하지만 대상지구의 실측 자료가 확보되지 않아 보정되지 않은 매개변수를 사용하는 경우 결과가 매우 안 좋을 수 있을 가능성이 나타났다. 따라서 농업용수 공급량의 모의 시 적절한 매개변수의 선정은 매우 중요할 것으로 사료되며, 특히 관개효율은 연별로 보정하는 것을 제안한다.

핵심용어 : 농업용수 공급량, 필요수량, 관개효율, 민감도 분석, 모형의 평가

* 서울대학교 지역시스템공학전공 연구원 (e-mail: songjh65@gmail.com)

Researcher, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

** 서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수 (e-mail: inhongs@gmail.com)

Research Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원 수석연구원 (e-mail: jtkim@ekr.or.kr)

Chief Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Gyeonggi-do, Korea

**** 교신저자, 서울대학교 지역시스템공학전공 부교수, 농업생명과학연구원, 그린바이오과학기술연구원 (e-mail: mshkang@snu.ac.kr, Tel: 82-2-880-4582)

Corresponding Author, Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Seoul, Korea

1. 서론

농업용수 공급량(agricultural water supply)은 관리자가 수리시설물에서 관개지구로 실제로 공급하는 용수량을 의미하며 농경지에서 작물재배를 위해 이용되는 필요수량(irrigation water requirement), 수로에서 손실되는 송수 손실 수량(conveyance loss), 그리고 포장으로 유입되지 않고 하천으로 직접 회귀하는 배분관리 용수량(delivery management water requirement)을 포함한다(Song, 2013; Song et al., 2015).

우리나라의 농업용수 이용량은 하천유지용수를 제외한 물 사용량의 약 62%인 159억 m^3 로 수자원 이용의 많은 부분을 차지하고 있다(MOLTM, 2011). 2013년 기준 논 면적의 80.6%는 수리시설물로부터 용수를 공급받고 있으며, 이 중 58.4%의 면적을 저수지가 공급하고 있다(MAFRA, 2014). 농업용 저수지는 관개 후 수위가 내려가고, 상류유역의 유출량이 유입되어 다시 수위가 상승한다. 저수지 하류 관개지구로 공급된 용수량은 전량 작물에 의해 소비되는 것이 아니며, 약 32~86%가 포장에서 소비되지 않고 하천으로 회귀되어 하천유량을 구성하는 중요 성분이 된다(Song et al., 2015). 이와 같이 농업용수 공급은 관개지구의 수문 순환과 비관개지구의 수문 순환, 그리고 수리시설물의 저수량 등과 복합적으로 연계되어 상·하류의 하천 유행에 영향을 미친다.

농업용수 공급량과 관련된 연구는 농업용 저수지의 용수공급능력과 수요량을 고려하여 저수지의 물 공급 취약성을 평가하는 연구(Nam et al., 2012)가 수행된 바 있다. Yoo et al. (2013)은 기후변화와 이에 따른 토지이용 및 생육시기 변화를 고려하여 미래 농업용 저수지 수요량을 산정하였다. 여기서, 관개효율은 지역별 특성을 고려하여 저수지별로 80~90%가 적용되었으며 시간에 따른 변화는 고려되지 않았다. 또한, Song et al. (2013)은 농업용수 공급량 모형과 논 광역 배수량 모형을 연계하여 복합영농 관개지구의 배수량을 모의하였으며, 여기서 송수 효율은 95%, 그리고 배분 효율은 현장의 실측치를 반영하여 73%가 적용된 바 있다. 이상의 연구들은 농업용수 공급량에 대한 정확한 추정이 기반되어야 하며, 이는 장래 용수수요 추정, 용수수급 계획, 관개조직의 운영 등 수자원 관리 계획 수립에 있어 중요한 요소로 작용한다.

농업용수 공급량 조사를 위한 가장 정확한 방법은 용수로의 시점부에 장비를 설치하여 연속 측정하는 것이다. 최근에는 농촌수자원 스마트 물관리를 위하여 첨단 센서 네트워크를 이용하여 실시간으로 농업용수 공급량을 측

정하는 지역이 있으나(Park et al., 2012; Nam et al., 2013), 모니터링 방법은 우리나라 수리시설물의 수, 이용범위의 광범위성, 여러 곳에 산재되어 있는 특성을 고려하면 현실적으로 불가능하다(Im et al., 2000a).

일반적인 용수 공급량 조사 방법은 필요수량을 모의 후 관개효율을 고려하여 산정하는 것이다. 하지만 실제 공급량은 수리시설물 관리자가 주민의 요구 및 관행적인 경험을 고려하여 운영하는 것이지(Nam et al., 2011), 필요수량을 모의 후 용수 공급을 결정하는 것이 아니다. 따라서 필요수량 기반으로 추정되는 용수 공급량이 실측 공급량을 반영하는지에 대한 평가 및 연구가 필요하다.

기존의 용수수요량 추정방법은 MAF (1997)에서 제시하는 방법을 이용하는데, Lee et al. (2006)에 따르면 기존 작부시기가 현장의 물관리를 반영하지 않아 4~5월의 실측 공급량이 모의 공급량에 비해 5배 이상 차이가 나타나는 것으로 보고하였다. 이를 개선하기 위해 KRC (2005)와 Ju et al. (2006)은 기존에 적용되던 작부시기(MAF, 1997)에서 논물가두기 시기를 추가하여 담수가 4월부터 시작되도록 수정하였으며, 이 시기에 증발 및 침투에 의한 필요수량이 모의가 되도록 개선하였다. 또한 중간낙수 시기에 용수 공급이 중단되는 기작을 추가하였다. Song et al. (2013)과 Kang et al. (2014)은 이와 같은 개선된 방식(KRC, 2005; Ju et al., 2006)을 이용하여 공급량을 모의한 결과, 영농초기와 중간낙수기의 모의치가 기존 방식에 비해 실측치를 더 잘 반영하는 것으로 보고하였다. Im et al. (2000a)은 수정 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model)의 저수율 모의 결과와 실측 저수율이 일치되도록 조정하는 방류계수 매개변수를 도입하여 농업용수 공급량을 산정하는 방법을 개발하였으나, 논물가두기와 중간낙수 시기를 고려하지는 않았다. 이상과 같이 농업용수 공급량은 수리시설물 관리자의 운영에 의해 결정되는 인위적 요소이나, 필요수량 기반으로 모의하기 위하여 작부시기를 개선하거나 새로운 매개변수를 도입하는 연구가 이루어져 왔다. 하지만 기존의 연구에서는 공급량 모의 관련 주요 매개변수에 대한 민감도 분석, 보정 및 검증에 관한 연구는 미흡했다. 즉, 물꼬 높이, 침투량, 최소 담수심, 그리고 관개효율 매개변수를 어떠한 값을 선정하느냐에 따라 모의 결과는 크게 달라질 수 있으나 이에 대한 고려 및 정량적 평가가 부족했다. 특히, 관개효율 매개변수는 기상, 저수지 관리자의 조작방식, 그리고 농민의 물관리 방식 등의 영향을 받아 해마다 달라지는 것으로 보고되고 있으며 적절한 값의 선택이 모의 결과에 크게 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 고려가 필요하다(Im et al., 2000c; Kim

et al., 2005). 따라서 주요 매개변수에 대한 민감도 분석과 보정된 매개변수가 실측치를 잘 반영하는지에 대한 정량적 평가를 수행할 필요가 있다. 또한, 공급량 실측치가 확보되지 않은 경우 보정 및 검정을 수행할 수 없기 때문에 문헌에 제시되는 매개변수 값을 이용하게 되는데, 이에 따른 모의 결과가 실측치를 잘 반영하는지에 대한 평가 또한 필요할 것이다.

본 연구에서는 필요수량 기반으로 추정된 용수 공급량이 실제 공급량의 경향을 잘 반영하여 모의될 수 있도록 민감도 분석을 수행하여 주요 매개변수를 도출하고, 주요 매개변수 중 시간에 따라 변하는 매개변수의 경우 이를 고려하여 보정 및 검정 후 정확도를 평가하고자 한다. 그리고 보정하지 않고 문헌에서 제시된 매개변수를 이용하여 모의한 결과를 실측 결과 및 최적 모의 결과와 비교하여 최적 매개변수 선정의 중요성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 농업용수 공급량 모의기법

농업용수 공급량은 필요수량과 관계효율(irrigation efficiency)을 고려하여 Eqs. (1a)~(1b)와 같이 계산한다.

$$AWS_i = \frac{A_{rice}}{Es} \frac{IR_i}{1000} \text{ for } AWS_i \leq AWS_{max} \quad (1a)$$

$$AWS_i = AWS_{max} \text{ for } AWS_i > AWS_{max} \quad (1b)$$

여기서, AWS 는 농업용수 공급량(m^3), A_{rice} 는 관개면적(m^2), IR 는 필요수량(mm), Es 는 관계효율(%), AWS_{max} 는 일 최대 공급량(m^3), 그리고 i 는 시간 간격(day)이다.

본 연구에서의 관계효율은(1-시설관리 손실률)을 의미하며, 송수효율과 배분효율의 곱으로부터 산정할 수 있고, 반복이용수량은 고려하지 않았다. 송수효율은 송수 손실 수량과, 그리고 배분효율은 배분관리 용수량과 관계된다. 배분관리 용수량이란 용수의 원활한 배분관리를 위하여 여분으로 공급하는 수량으로, 포장으로 유입되지 않고 하천으로 직접 회귀되는 수량으로 용수로 배수량이라고도 한다(Chung et al., 2006; Song et al., 2013). 관계효율은 기상, 지형, 수리시설물 운영자의 조작방식, 그리고 농민의 물관리 방식 등에 따라 달라지며 우리나라의 경우 약 46~93%의 범위를 보이는 것으로 보고되고 있다(Bos and Nugteren, 1990; Kim et al., 2005). 일 최대 공급량은 수리 시설물의 체원 및 운영자의 조작방식에 따라 결정된다.

필요수량은 KRC (2005)와 Ju et al. (2006)에서 제시한 변경된 필요수량 산정방식에 따라 논벼의 생육기를 논물

가두기, 묘대기, 이앙기, 본답기, 그리고 중간낙수기 등과 같이 구분하여 산정하였다. 논물가두기, 묘대기, 그리고 이앙기의 필요수량 모의 방식은 Kang et al. (2014)에 상세히 서술되어 있다. 본 연구에서는 묘대 용수량(NWR) 및 이앙 용수량(TWR) 매개변수를 입력받도록 구성하였고, 중간낙수기에는 용수공급이 중단되도록 구성하였다. 본답기의 필요수량은 Eq. (2)와 같이 논에서의 물수지식을 기반으로 추정한다.

$$PD_i = PD_{i-1} + IR_i + ERAIN_i - (DR_i + ET_i + DP_i) \quad (2)$$

여기서, PD 는 담수심(mm), IR 는 필요수량(mm), $ERAIN$ 는 유효우량(mm), DR 는 포장 배수량(mm), ET 는 실제 증발산량(mm), 그리고 DP 는 침투량(mm)이다. 실제증발산량은 FAO Penman-Monteith 식(Allen et al., 1998)으로부터 추정된 잠재증발산량과 Yoo et al. (2006)에 의한 논벼의 작물계수를 곱하여 산정하였다. 논에서의 침투량은 토양 특성에 따라 1~8.8 mm/day 의 범위로 보고되고 있으며(Im et al., 2000b; Song et al., 2013), 산정방법은 Darcy's Law 및 연속방정식 등을 이용하여 물리적으로 계산하는 방법(Khepar et al., 2000)과 일 침투량을 상수로 입력받아 모의하는 방법(MAF, 1997)이 있으며, 본 연구에서는 후자를 이용하였다. 포장 배수량은 Eqs. (3a)~(3b)와 같이 일별 담수심과 물꼬 높이의 차가 전량 당일에 배수되도록 구성하였다.

$$DR_i = PD_i - PD_{max} \text{ for } PD_i > PD_{max} \quad (3a)$$

$$DR_i = 0 \text{ for } PD_i \leq PD_{max} \quad (3b)$$

여기서, PD_{max} 는 물꼬 높이(mm)이다. 물꼬 높이 매개변수는 순별로 변화하도록 구성하는 방법(Kang et al., 2006; Kim et al., 2009)과 일정하게 유지되도록 구성하는 방법(MAF, 1997) 등이 있으며, 본 연구에서는 후자를 이용하였다. 유효우량은 Eqs. (4a)~(4c)와 같이 강우량과 당일의 배수량을 고려하여 산정하였다.

$$ERAIN_i = 0 \text{ for } RAIN \leq 5 \quad (4a)$$

$$ERAIN_i = RAIN_i \text{ for } DR_i = 0 \quad (4b)$$

$$ERAIN_i = RAIN_i - DR_i \text{ for } DR_i \geq 0 \quad (4c)$$

여기서, $RAIN$ 은 강우량(mm)이다. Eq. (4a)에서 강우량 5 mm 이하에서 유효우량이 0 mm 인 이유는 벼잎에 의한 차단을 고려했기 때문이다(MAF, 1997). 담수기간의 필요수량 모의방법은 물수지식으로 계산된 당일의 담수심이

최소담수심 이하로 내려가는 경우 당일의 담수심과 최소담수심의 차를 필요수량으로 간주하여 최소담수심을 유지하는 방법을 이용하였다(Eqs. (5a)~(5b))(Huh et al., 1993).

$$IR_i = PD_{min} - PD_i \text{ for } PD_i < PD_{min} \quad (5a)$$

$$IR_i = 0 \text{ for } PD_i \geq PD_{min} \quad (5b)$$

여기서, PD_{min} 은 최소담수심(mm)으로 농민이 논벼의 생육을 위해 최소로 유지하고자 하는 담수심이다. 최소담수심 매개변수의 입력은 순별로 변화도록 구성하는 방법(Huh et al., 1993; Yoo et al., 2013)과 일정하게 유지되도록 구성하는 방법(MAF, 1997) 등이 있으며, 본 연구에서는 후자를 이용하였다.

이상과 같이 농업용수 공급량 모의를 위해서는 모대용수량, 이양용수량, 물꼬 높이, 최소담수심, 침투량, 그리고 관개효율 등의 매개변수가 입력 또는 모형의 보정 과정에서 이용되나, 이들 매개변수는 지역적 특성에 따라 그 범위가 다양하고 또한 정확한 정보를 얻기 어려운 특징을 가진다. 본 연구에서는 선행연구의 조사 결과를 바탕으로 공급량 모의 관련 대표 매개변수의 물리적 범위를 정리하였으며 Table 1과 같다.

2.2 민감도 분석 방법

매개변수 민감도 분석은 모형의 입력 매개변수의 변화에 따른 모의 결과의 변화 정도를 정량적으로 산정하는 과정으로, 주요 입력 매개변수를 파악함으로써 보정과정의 효율성을 높일 수 있고, 또한 모의 결과의 범위를 파악할 수 있다(Moriasi et al., 2007). 본 연구에서는 농업용수 공급량 모의에 주요하게 영향을 미치는 매개변수를 파악하기 위해 민감도 분석을 수행하였다.

민감도 분석을 수행하기 위해 상대 민감도(relative

sensitivity)(James and Burges, 1982)와 민감도 지수(sensitivity index)(Cho and Mostaghimi, 2009)를 이용하였으며, 각각 Eqs. (6) and (7)과 같다.

$$S_r = \frac{\Delta O/O_b}{\Delta P/P_b} = \frac{(O - O_b)/O_b}{(P - P_b)/P_b} \quad (6)$$

$$SI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_r(i) \quad (7)$$

여기서, S_r 은 상대 민감도로 입력 매개변수 값의 변화에 따른 모의 결과의 변화를 나타내는 인자이며, P_b 는 기준 매개변수 값(base parameter value), P 는 입력 매개변수 값, ΔP 는 입력 매개변수 값과 기준 매개변수 값의 차, O_b 는 기준 매개변수 값에 의한 모의 결과, O 는 입력 매개변수 값에 의한 모의결과, ΔO 는 입력 및 기준 값에 따른 모의 결과의 차, SI 는 민감도 지수로 상대 민감도 절댓값의 평균이며, 그리고 N 은 입력 매개변수 값의 개수이다.

본 연구에서는 기준 매개변수 값으로 Table 1에서 제시된 물리적 범위의 중간값을 선정하였다. 또한, 입력 매개변수 값으로는 기준 매개변수의 -50%, -25%, -10%, +10%, +25%, +50%를 선정하여 상대 민감도 및 민감도 지수를 산정하였다. Storm et al. (1988)과 Jesiek and Wolfe (2005)는 상대 민감도 및 민감도 지수를 평가하기 위하여, $|SI| < 0.01$ 의 경우 'insensitive', $0.01 \leq |SI| < 0.1$ 의 경우 'slightly sensitive', $0.1 \leq |SI| < 1.0$ 의 경우 'moderately sensitive', $1.0 \leq |SI| < 2.0$ 의 경우 'sensitive', 그리고 $|SI| \geq 2.0$ 의 경우 'extremely sensitive'와 같은 기준을 제시하였으며 본 연구에서도 이를 준용하였다.

2.3 모형의 보정 및 평가방법

2.3.1 모형의 보정방법

모형의 보정 방법은 시행착오법을 이용한 수동 보정과

Table 1. List of Calibration Parameters for Agricultural Water Supply Simulation

Parameters	Description	Range	References
PD_{max}	Drainage outlet height in paddy fields (mm)	34.6~123.7	Kang et al. (2006)
PD_{min}	Minimum ponding depth for rice cultivation (mm)	3.0~60.0	Huh et al., (1993), Anan et al. (2004)
DP	Deep percolation in paddy fields (mm)	1.0~8.8	Im et al. (2000b), Song et al. (2013)
Es	Irrigation efficiency (%)	46~93	Bos and Nugteren (1990), Kim et al. (2005)
NWR	Water requirement during the nursery period (mm)	80~250	Chung et al. (2006)
TWR	Water requirement during the transplanting period (mm)	80~250	Chung et al. (2006)

최적화 기법을 이용한 자동 보정으로 구분되며, 과거에는 모형에 대한 풍부한 지식과 경험이 요구되는 시행착오법이 주로 이용되었으나, 최근에는 컴퓨터 속도의 발전과 함께 많은 노동력과 시간을 절감해주고 사용자가 다르더라도 동일하고 객관적인 매개변수 추정이 가능한 자동 보정 기법이 주로 이용되고 있다(Moriasi et al., 2007; Kim et al., 2009). 본 연구에서는 최적화 기법으로 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 모형의 보정을 수행하였고, 보정 후 최적화된 매개변수의 적절 여부를 수동으로 검토하였다. 유전자 알고리즘에 관한 이론 및 적용방법 등과 관련된 자세한 설명은 Park et al. (1997), 그리고 Kim and Kim (2007) 등에 상세히 서술되어 있다. 최적화 기법의 목적함수로는 오차 제곱의 합(sum of squared residuals, *SSR*)을 선정하였고, 제약 조건은 Table 1로 설정하여 매개변수가 물리적 범위를 벗어나지 않도록 구성하였다.

2.3.2 모형의 평가방법

농업용수 공급량 모의 결과에 대한 평가를 위해서 통계적 지표를 이용한 정량적 기법과 산포도와 같은 그래프를 통한 정성적 기법을 동시에 이용하였다. 본 연구에서는 정량적 통계적 지표로 *NSE* (Nash-Sutcliffe Efficiency) (Nash and Sutcliffe, 1970), *RSR* (root mean square error (RMSE)-observations standard deviation ratio) (Moriasi et al., 2007), 그리고 *PBIAS*(percent bias)(Gupta et al., 1999)를 선정하였으며 각각의 식은 Eqs. (8)~(10)과 같다.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (8)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right]} \quad (9)$$

$$PBIAS = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \times 100 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i) \right]} \quad (10)$$

여기서, *O*는 실측치, *P*는 모의치, \bar{O} 는 실측치의 평균, *RMSE*는 평균 제곱근 오차, 그리고 *STDEV_{obs}*는 실측치의 표준편차이다. *NSE*는 $-\infty \sim 1.0$ 의 범위로 나타나고 1.0의 값에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것을 의미하며, 만약 음수 값이 나타나면 모의 결과를 이용하는 것보다 실측치의 평균을 이용하는 것이 더 좋을 의미한다(Legates and McCabe, 1999; Kang et al., 2006). *RSR*은 *RMSE*가 낮을수록 좋은 사실은 많이 연구되어 왔지만 이에 관한 평가 기준이 없는 점을 보완하기 위해 *RMSE*를 실측치의 표준편차로 나누어 표준화한 지표로 0.0에 가까울수록 모의 결과가 좋을 의미를 의미한다(Moriasi et al., 2007). *PBIAS*는 0.0이 최적 값이고, 양수 값 및 음수 값은 각각 과소 및 과대 모의되었음을 의미한다(Gupta et al., 1999). 이상의 통계적 지표에 대한 평가 분류 기준은 Moriasi et al. (2007)이 월단위에 대해 제시한 기준을 이용하였으며, 이는 Table 2와 같다.

정성적 방법으로는 실측치 및 모의치의 시간에 따른 변화 그래프와 산포도를 도시하여 평가하는 방법을 이용하였다. 산포도에서는 실측치와 모의치 사이의 추세선 기울기, *y* 절편, 그리고 *R*² 또한 평가에 이용하였다.

2.4 대상지구 및 자료수집

매개변수 민감도 분석 및 적용성 평가를 위한 대상 지구는 실측 자료가 장기간 누적되었고, 자료의 품질이 우수한 곳이 적절하다. 본 연구의 대상 지구로는 경기도 용인시와 평택시 일대에 위치한 이동저수지 지구를 선정하였으며, 해당 지구는 구획정리 및 용·배수호가 체계적으로 정비되어 있다. (Fig. 1(a))(Song et al., 2013; Song et al., 2014). 이동저수지는 4~9월에 취수탑을 통해 1,789.7 ha의 면적에 대해 농업용수를 공급하고 있으며, 홍수기에는 농업용수 공급의 지장이 없는 범위 내에서 radial gate를

Table 2. Performance Ratings for Based on the Statistics of Monthly Data (Moriasi et al., 2007)

Performance Rating	<i>RSR</i>	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i> (%)
Very good	$0.00 < RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Good	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < RSR \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactory	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < RSR \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq 25$

통해 제한수위 방식과 예비방류방식을 모두 취하여 방류하고 있다(Song, 2013).

이동저수지에서는 한국농어촌공사 농어촌연구원이 간선수로 시점부에 초음파 수위계를 설치하여 수위를 연속 측정하고 있다(Fig. 1(b)). 본 연구에서는 2001~2009년 기간의 연속 수위 자료를 확보하였으며, 수위에 대한 예리 검정을 수행하였다. 검정된 수위는 Fig. 1(c)와 같은 수위-유량 관계식을 이용하여 유량으로 환산 후 일별 농업용수 공급량으로 정리하였으며, 이를 이용하여 모의 결과를 평가하였다. 모형의 보정 기간은 2001~2007년, 그리고 검정 기간은 2008~2009년으로 구성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 민감도 분석 결과

Fig. 2(a)는 관개효율(E_s), 침투량(DP), 최소담수심(PD_{min}), 물꼬 높이(PD_{max}), 이양용수량(TWR), 그리고 묘대용수량(NWR) 기준 값의 -50%, -25%, -10%, +10%, +25%, +50%를 입력하였을 경우 모의 농업용수 공급량의 변화율을 나타낸 것이다. 여기서, (공급량 모의 값 변화율 ÷ 입력 값 변화율)은 상대 민감도(S_r)를 의미한다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)를 통해 계산된 상대 민감도를 평균하여 민감도 지수(SI)를 산정한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 2(b)에서 민감도 지수가 양수이면 매개변수 값이

증가함에 따라 공급량 모의 결과 또한 증가함을 의미하고, 음수로 나타나면 매개변수가 증가함에 따라 공급량은 감소함을 의미한다. 즉, 농업용수 공급량은 관개효율과 물꼬 높이가 증가함에 따라 감소하였고, 침투량, 최소담수심, 이양용수량, 그리고 묘대용수량이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 물꼬 높이의 경우, 값이 증가하면 배수량이 감소하고 유효유량이 증가하여 농업용수 공급을 절약할 수 있기 때문이다(Song et al., 2012). 최소담수심의 증가는 논벼의 생육 및 생산량 확보를 위해 최소한으로 유지해야 하는 담수심의 상승을 의미하며(Anbumozhi et al., 1998), 동일한 경우에 대해 유효유량이 감소하여 농업용수 공급량은 늘어나게 된다. 일 침투율은 토양 특성과 관련된 매개변수로, 침투율이 증가하면 작물의 생육 스트레스를 피하기 위하여 필요수량 또한 증가하게 된다(Song et al., 2013). 관개효율의 증가는 송수 중 손실되는 수량이 줄어들거나 농민의 물이용 효율이 증가하여 농업용수 공급량이 줄어도 같은 양의 필요수량이 포장으로 유입될 수 있음을 의미한다(Howell, 2001).

Fig. 2(b)로부터 농업용수 공급량은 관개효율, 침투량, 물꼬 높이, 최소담수심, 이양용수량, 그리고 묘대용수량의 순으로 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. Storm et al. (1988)과 Jesiek and Wolfe (2005)의 기준에 따르면 매개변수의 민감 정도는 관개효율의 경우 'sensitive' ($1.0 \leq SI < 2.0$)로, 침투량과 물꼬 높이, 그리고 최소담

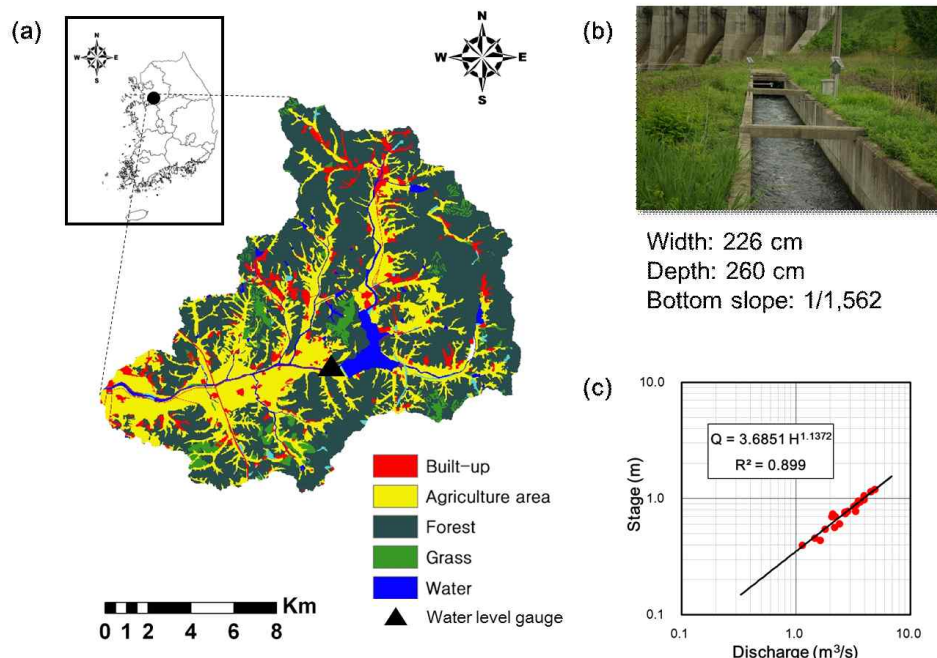


Fig. 1. (a) Location of the Idong Reservoir Irrigated District, (b) the Photo of the Main Irrigation Canal, and (c) the Stage-discharge Relationship Curve

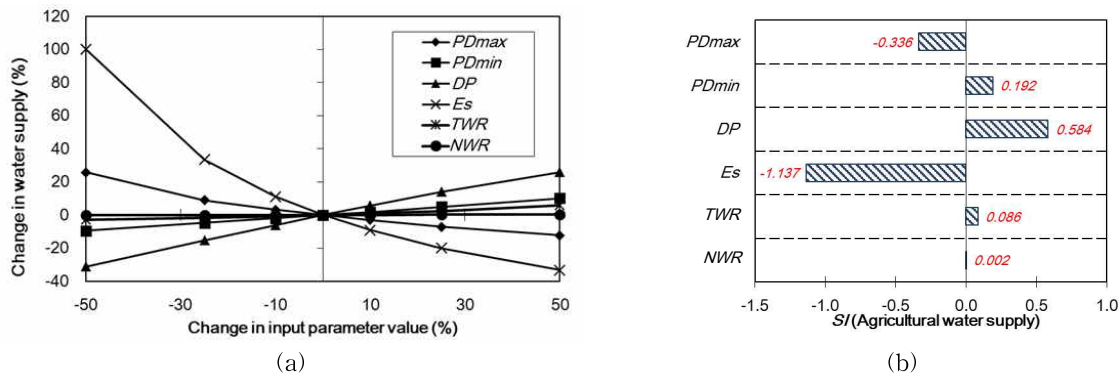


Fig. 2. Sensitivity of Agricultural Water Supply-related Parameters: (a) Calculation Procedure of Relative Sensitivity, and (b) Sensitivity Index

수심의 경우 ‘moderately sensitive’로, 이양용수량의 경우 ‘slightly sensitive’로($0.1 \leq SI < 1.0$), 그리고 묘대 용수량은 ‘insensitive’로 분류되었다($SI < 0.01$).

본 연구 결과를 통해 관개효율의 민감도 지수는 -1.137로 농업용수 공급량 모의에 있어 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 모델링에서 가장 민감한 매개변수는 다른 매개변수보다 신중하게 이용 또는 보정될 필요가 있다. 관개효율은 기상, 관개조직의 특성, 저수지 관리자의 운영방식, 그리고 농민의 물이용 방식 등 물리적 요소 및 인위적 요소의 영향을 동시에 받는 매개변수로 연별로 값이 달라지는 특징을 가진다(Kim et al., 2005; Howell, 2003). 일반적으로 가뭄인 해의 경우 농민이 물을 최대한 이용하려는 특성상 관개효율이 증가하는 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2005). Wu and Chen (2012)에 따르면, 인위적 요소의 영향을 받아 시간에 따라 값이 변하는 특징을 가지는 매개변수의 경우 고정된 값을 이용하는 것보다 시간에 따라 값이 변하도록 보정하는 것을 추천하고 있다. 본 연구에서는 이를 반영하여 관개효율 매개변수를 연마다 값이 변하도록 보정하였다.

한편, 묘대 용수량 매개변수의 민감도 지수는 0.002로 가장 민감하지 않은 것으로 나타났다. 이는 최근의 조사에 따르면 묘대 용수량의 공급 면적이 전체 본답면적 대비 1/20에서 1/50으로 감소한 점이 모형에 반영하였기 때문으로 사료된다(Ju et al., 2006). 이와 같이 묘대 용수량은 전체 공급량에 비해 그 양이 상당히 적으므로 모형의 복잡성을 해소하고자 하는 경우 고려하지 않아도 무방할 것으로 사료된다.

3.2 모형의 보정 및 검증

본 연구에서는 이동저수지를 대상으로 농업용수 공급량을 모의하였으며, 대상 저수지의 실제 공급량과 비교하

여 모형의 보정 및 검증을 수행하였다. 모형의 보정은 2001~2007년 기간에 대해 수행하였으며, 유전자 알고리즘을 이용하여 목적함수인 *SSR*이 최소가 되는 시점에 자동으로 알고리즘이 종료가 되도록 구성하였다. 특히, 관개효율은 민감도 분석 결과에서 가장 민감하게 나타난 점과 연마다 값이 달라지는 특징을 반영하여 연별로 보정하였다. Table 3은 모형의 보정 과정을 통해 선정된 최적 매개변수를 나타내고 있다. 모형의 검증은 2008~2009년의 자료 기간을 대상으로 보정 매개변수를 적용하여 수행하였다. 다만, 관개효율 매개변수는 2001~2007년 보정치의 평균값인 60.2%를 적용하였다.

Figs. 3~5와 Table 4는 모형의 보정-검정기간에 대한 정량적 및 정성적 평가 결과를 보여주고 있다. 농업용수 공급량은 수리시설물 운영의 인위성이 고려되어야 하는 모의 요소로, 이와 같은 경우 일별로 평가하는 것 보다 순별 또는 월별로 정리 후 평가하는 것이 일반적으로, 본 연구에서도 이를 준용하였다(Song, 2013; Song et al., 2013).

Table 3. The Calibrated Parameter Values

Parameters	Calibrated value	
<i>PDmax</i> (mm)	50.0	
<i>PDmin</i> (mm)	28.4	
<i>DP</i> (mm)	5.4	
<i>TWR</i> (mm)	250.0	
<i>Es</i> (%)	2001	60.1
	2002	69.8
	2003	49.7
	2004	56.8
	2005	59.3
	2006	52.9
	2007	73.0

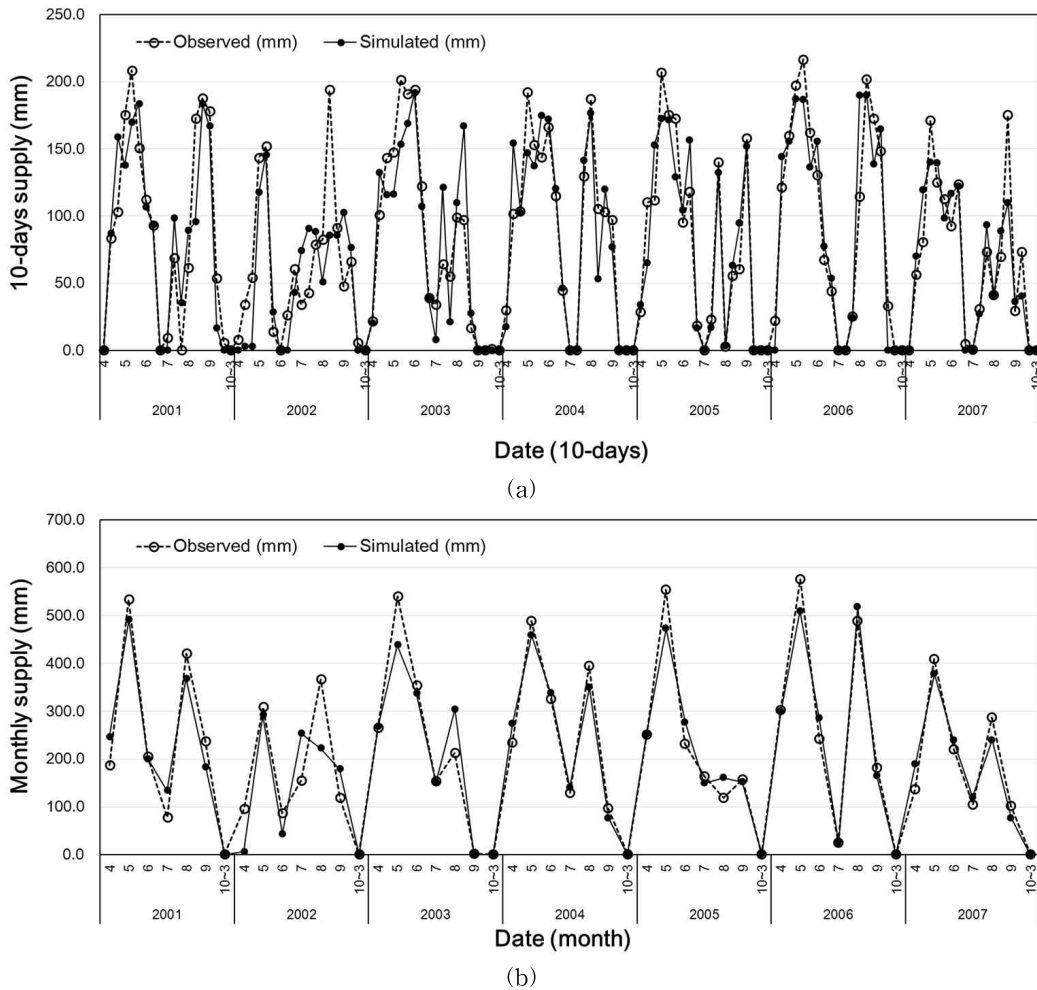


Fig. 3. Observed and Simulated Agricultural Water Supply for the Calibration Period of the Idong Reservoir: (a) 10-days Time Step, and (b) Monthly Time Step

모형의 보정기간에 대한 통계적 지표는 *PBIAS*의 경우 2.7%, *NSE*의 경우 순별 0.87 및 월별 0.93, 그리고 *RSR*의 경우 순별 0.37 및 월별 0.26의 값을 보였으며, Moriasi et al. (2007)에 따르면 'very good'으로 나타났다(Table 4). 정성적으로도 농업용수 공급량의 모의치는 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 보이고(Fig. 3), 산포도 분석 결과 또한 추세선의 기울기가 0.90으로 상당히 높게 나타났으며 (Legates and McCabe, 1999), R^2 또한 순별 및 월별 각각 0.87과 0.93으로 0.50 이상의 높은 값을 보였다(Moriasi et al., 2007)(Fig. 4). 특히 4~5월의 공급량이 크게 나타나는 특징과, 중간낙수기의 용수 공급이 중단되는 특징이 잘 반영된 것으로 사료된다.

모형의 검정기간에 대한 통계적 지표는 *PBIAS*의 경우 3.9%, *NSE*의 경우 순별 0.74 및 월별 0.89, 그리고 *RSR*은 순별 0.51 및 월별 0.32로 보정기간에 비해 결과가 좋지

않았으나 Moriasi et al. (2007)의 기준으로부터는 'very good'으로 평가되었다(Table 4). 정성적으로도 검정기간의 순별 모의 결과는 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났고, 실측치와 모의치의 추세선 기울기 및 R^2 또한 좋게 평가되었다(Fig. 5). 이상의 결과와 같이 보정된 최적매개변수는 대상지구의 물리적 및 인위적 특성이 잘 반영된 것으로 사료된다. 그리고 비록 실측 공급량은 농민의 요구 및 관행적 요소를 고려하여 관계되는 요소이나, 필요수량과 관계효율을 이용하여 모의하여도 적절한 매개변수 값을 사용하면 실측값의 경향을 잘 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 최적매개변수와 문헌 제시 매개변수의 모의 결과 비교 및 고찰

앞서 선정된 최적매개변수는 본 연구 대상지의 실측 공

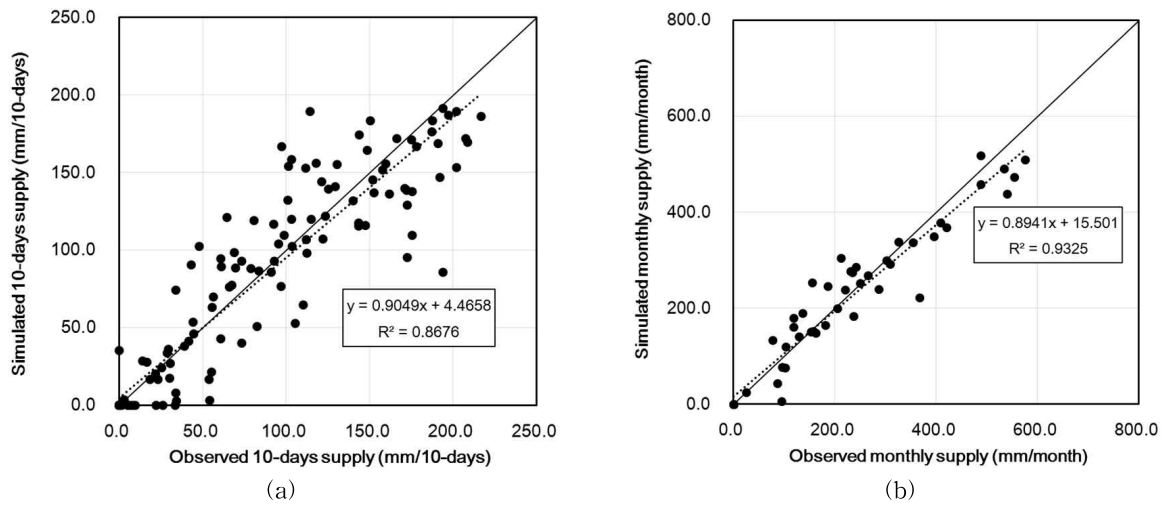


Fig. 4. Scatter-plots of the Observed against the Simulated Agricultural Water Supply for the Calibration Period of the Idong Reservoir: (a) 10-days Time Step, and (b) Monthly Time Step

Table 4. Summary of the Calibration and Validation of Agricultural Water Supply

Run type	Time	Observed mean precipitation (mm)	Observed total supply (mm)	Simulated total supply (mm)	<i>PBIAS</i> (%)	<i>NSE</i>		<i>RSR</i>	
						10-days	Monthly	10-days	Monthly
Calibration	2001	875.5	1,661.5	1,622.0	2.7	0.87	0.93	0.37	0.26
	2002	1,057.8	1,132.6	995.6					
	2003	1,333.6	1,526.8	1,498.1					
	2004	1,047.5	1,670.6	1,638.6					
	2005	1,260.4	1,476.4	1,463.3					
	2006	1,192.8	1,815.4	1,802.6					
Validation	2008	1,193.2	1,475.3	1,280.5	3.9	0.74	0.89	0.51	0.32
	2009	1,295.6	1,697.2	1,768.9					

* All data were calculated from April through September

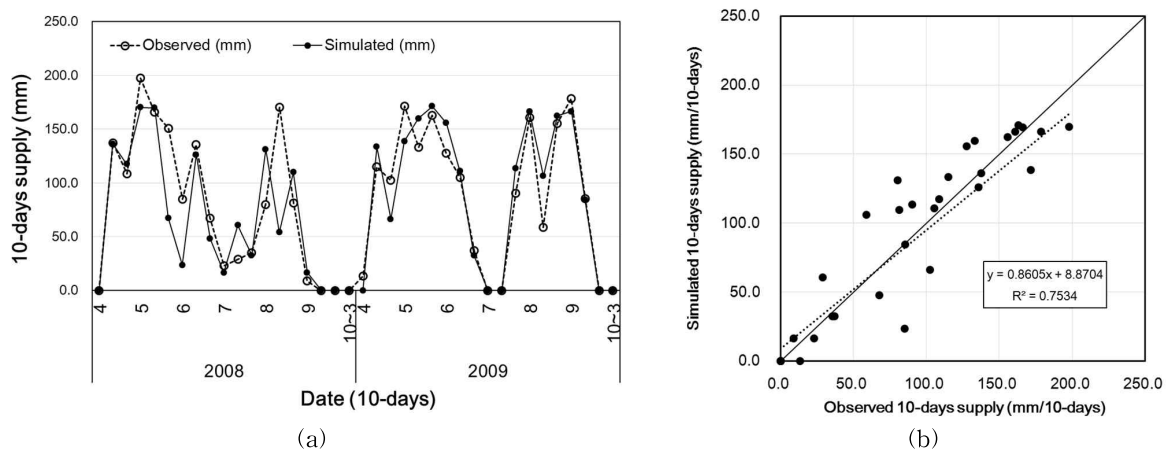


Fig. 5. Observed and Simulated Monthly Agricultural Water Supply for the Validation Period of the Idong Reservoir: (a) Time-series, and (b) Scatter-plot

급량 자료가 비교적 장기간 구축되어있기에 모형의 보정 및 검정을 거쳐 도출이 가능했다. 그러나 일반적인 경우는 해당 대상지구의 실측 공급량 자료가 확보되지 않은 경우가 대부분이기 때문에 보정 및 검정 과정을 거칠 수가 없게 된다. 이러한 경우의 매개변수 선정은 보고서 및 선행연구 논문에서 제시되는 값을 이용하는 것이 일반적이다. 하지만 Fig. 2의 결과와 같이 공급량 관련 매개변수는 모의 결과에 민감하게 영향을 미치기 때문에 적절한 매개변수 값의 선정이 중요하며, 문헌에서 제시된 매개변수를 이용한 결과가 실측치와 유사한지에 대한 평가할 필요가 있다.

Table 5는 문헌을 통해 확보된 매개변수 값을 보여주고 있다. 물꼬 높이는 Yoo et al. (2008)에서 사용한 수치인 80.0 mm를 이용하였고, 최소담수심은 Huh et al. (1993)에서 제시하는 0~60 mm의 중간값인 30.0 mm를 이용하였다. 침투량은 RRI (2012)에서 이동저수지 지구에 대해 보고한 4.6 mm/day를 이용하였으며, 이양 및 묘대용수량은

Table 5. The Uncalibrated Parameters from Previous Studies

Parameters	Reported value	Reference
<i>PD_{max}</i> (mm)	80.0	Yoo et al. (2008)
<i>PD_{min}</i> (mm)	30.0	Huh et al., (1993)
<i>DP</i> (mm/day)	4.6	RRI (2012)
<i>TWR</i> (mm)	140.0	MAF (1997)
<i>NWR</i> (mm)	140.0	MAF (1997)
<i>Es</i> (%)	75	MAF (1998)
	55	KRC (2005)

MAF (1997)에서 보고한 우리나라 평균 값인 140.0 mm를 이용하였다. 관개효율은 KRC (2005)에서 대상 지구에 대한 값으로 55%를 제시하고 있어 이를 이용할 수 있으나, 만약 해당 관개지구에 대한 정보가 없는 경우 농업생산기반정비사업설계기준 관개편(MAF, 1998)에서 제시하는 75%를 사용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 관개효율 매개변수를 75% 및 55%를 사용하는 경우에 대해 각각 Type A와 Type B로 구분하였고, 나머지 매개변수는 Table 5에 제시된 값을 이용하여 공급량을 모의하였으며, 이를 실측치와 비교하였다.

Fig. 6은 Type A와 Type B 매개변수를 이용하여 모의한 결과를 최적 매개변수 모의 결과 및 실측치와 비교하여 보여주고 있다. Table 6은 통계적 지표 산정 결과를 나타내고 있다. Type A 매개변수를 이용하여 모의된 결과는 상당히 과소 모의된 것으로 나타났으며(Fig. 6), 통계적 지표인 *PBIAS*, *NSE*, 그리고 *RSR*의 월별 값은 43.1%, 0.03, 그리고 0.98로 나타나 “unsatisfactory”로 평가되었으며(Moriasi et al., 2007), 그 경계 값인 25%, 0.50, 그리고 0.70으로부터도 상당히 떨어져 있음이 확인되었다(Table 6). 이는 최적 매개변수의 평균 관개효율은 60.3%이었는데 비해 Type A에서는 75%가 적용되었기 때문에 사료된다. 또한, 최적 매개변수 모의 결과에서는 관개효율이 연별로 달리 적용되는데 비해 Type A에서는 일정한 값이 적용 점도 크게 영향을 미쳤을 것이다. Type B의 경우 Type A에 비해 통계적 지표가 더 좋은 결과로 나타났고, 순별 단위에 대해서 “satisfactory”로 평가되었다(Moriasi et al., 2007). 하지만 최적 모의 결과가 “very good”으로 평가된 점과 비교하면 Type B의 결과 또한 상당히 안 좋은

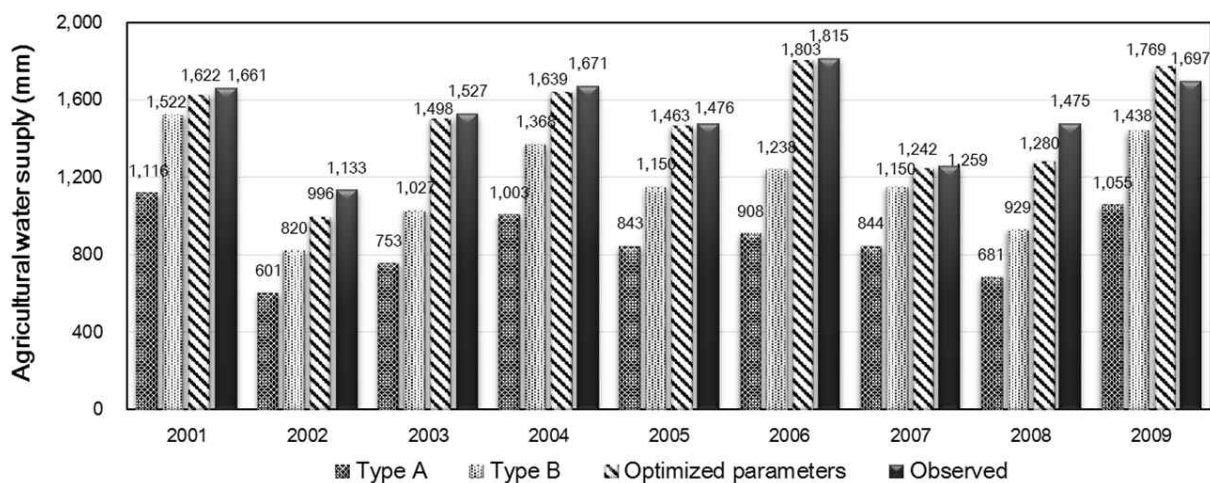


Fig. 6. Comparison of the Annual Agricultural Water Supply of the Idong Reservoir among the Simulations and the Observations

Table 6. Simulation Statistics Using the Type A and the Type B Parameters

Run type	<i>PBIAS</i> (%)	<i>R</i> ²		<i>NSE</i>		<i>RSR</i>	
		10-days	Monthly	10-days	Monthly	10-days	Monthly
Type A	43.1	0.62	0.65	0.29	0.03	0.84	0.98
Type B	22.4	0.62	0.65	0.52	0.49	0.69	0.71

Type A: *PD*_{max} 80.0 mm, *PD*_{min} 30.0 mm, *DP* 4.6 mm/day, *TWR* 140.0 mm, *NWR* 140.0 mm, and *Es* 75%
 Type B: *PD*_{max} 80.0 mm, *PD*_{min} 30.0 mm, *DP* 4.6 mm/day, *TWR* 140.0 mm, *NWR* 140.0 mm, and *Es* 55%,

것으로 사료되며, 이는 관계효율 매개변수뿐만 아니라 다른 매개변수도 최적매개변수 값과 차이가 나기 때문으로 사료된다. 이상의 결과와 같이 농업용수 공급량의 모의 시 적절한 매개변수 값의 이용은 중요하며, 보정 과정 없이 문헌에 제시된 매개변수 값을 이용하여 모의하는 경우 결과가 매우 나쁠 가능성이 있음이 확인되었다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 필요수량 기반으로 추정된 용수 공급량이 실제 공급량의 경향을 잘 반영하여 모의될 수 있도록 주요 매개변수에 대해 민감도 분석을 수행하였고, 보정 및 검정을 통해 최적 매개변수를 도출하였으며, 특히 관계효율은 연별로 보정하였다. 그리고 보정하지 않고 문헌에서 제시된 매개변수를 이용하여 모의한 결과를 실측 결과 및 최적 모의 결과와 비교하여 최적 매개변수 선정의 중요성을 평가하였다. 농업용수 공급량은 필요수량을 산정 후 관계효율을 고려하여 모의하였으며, 필요수량의 산정은 KRC (2005)와 Ju et al. (2006)에 의해 제시된 방식을 이용하였다. 매개변수 민감도 분석은 상대민감도와 민감도 지수를 이용하였으며, Storm et al. (1988)과 Jesiek and Wolfe (2005)의 평가 기준을 준용하여 매개변수의 민감도를 평가하였다. 최적 매개변수 선정을 위한 보정 방법으로 유전자 알고리즘을 이용하였으며, 목적함수로는 *SSR*을 이용하였다. 모형의 평가는 그래프를 이용한 정성적 평가와 *NSE*, *RSR*, *PBIAS*를 이용한 정량적 평가를 동시에 이용하였다. 대상지구로 이동저수지 관계지구 선정하였고, 일별 실측 공급량 자료를 수집하였으며, 보정 및 검정기간은 각각 2001~2007년, 그리고 2008~2009년으로 구성하였다.

민감도 분석 결과 관계효율은 'sensitive'로, 침투량과 물꼬 높이, 그리고 최소담수심의 경우 'moderately sensitive'로, 이양용수량의 경우 'slightly sensitive'로, 그리고 모대용수량은 'insensitive'로 나타났다. 관계효율 매개변수는 가장 민감하게 나타난 점과 연마다 값이 달라지는 특징을

반영하여 연별로 보정하였다. 보정 결과 통계적 지표는 *PBIAS*의 경우 2.7%, *NSE*의 경우 순별 0.87 및 월별 0.93, 그리고 *RSR*의 경우 순별 0.37 및 월별 0.26로 'very good'으로 평가되었고, 정성적으로도 좋은 결과가 나타났다. 검정 결과 또한 *PBIAS*의 경우 3.9%, *NSE*의 경우 순별 0.74 및 월별 0.89, 그리고 *RSR*은 순별 0.51 및 월별 0.32로 'very good'으로 평가되었다. 따라서 비록 실측 공급량은 농민의 요구 및 관행적 요소를 고려하여 관계되는 인위적 요소이나, 필요수량과 관계효율을 이용하여 모의하여도 적절한 매개변수 값을 사용한다면 실측값의 경향을 반영하여 모의가 가능할 것으로 사료된다. 대상지구의 실측 공급량 자료가 확보되지 않아 보정 및 검정 과정을 수행할 수 없는 경우를 가정하여 문헌에서 제시된 매개변수를 조합하여 Type A와 Type B의 시나리오를 구성 후 모의한 결과, Type A의 결과는 *RSR*과 *PBIAS*가 각각 0.70과 25%를 초과하고, *NSE*가 0.50미만으로 나타나 'unsatisfactory'로 평가되기도 했다. 따라서 장래 용수수요 추정, 용수수급 계획 등의 수자원 관리 계획 수립을 위해 관계지구 용수 공급량의 모의 시 적절한 매개변수의 선정은 매우 중요할 것으로 사료되며, 특히 관계효율은 연별로 보정하는 것을 추천하는 바이다.

하지만 본 연구에서는 미계측 지역 적용을 위해 관계효율 매개변수를 기상 등의 특성과 연계하여 수식화하는 방안 등을 고려하지는 못 하였고, 향후 이에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 침투량, 물꼬 높이, 최소담수심 등도 미계측 지역에 대해 적정 값을 선정하는 방법이 제시되지 않았는데 이에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이를 위한 한 방안으로 한국농어촌공사에서는 유효저수량 10만톤 이상 저수지에 대해 수위계측기를 설치하여 저수위, 저수량, 저수율 등의 자료를 농촌용수종합정보 시스템을 통해 공개하고 있는데, 이 실측 자료를 이용하여 주요 매개변수에 대해 보정이 가능할 것으로 사료된다. 즉, 저수지 물수지 모형과 공급량 모의 기법을 연계하여 저수율을 모의 후 실측 저수율과 비교하여 공급량 관련 주요매개변수들을 보정하는 방법이 이용될 수 있을 것

으로 사료되고, 이에 관한 연구가 필요할 것이다.

최근 농업용 저수지의 이용 목적은 단순히 농업용수 공급이외에도 홍수 조절, 환경용수 방류 등과 같은 목적 또한 요구되고 있으며, 이를 반영한 새로운 운영 규정이 필요할 것이다. 이러한 관점에서 본 연구 결과는 최적의 농업용수 공급 운영을 위한 중요한 연구 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 본 연구 결과는 농업용수 공급량의 모의를 위한 전반적인 이해를 도우며, 향후 관계 구역 단위의 합리적인 공급량 산정을 위한 실질적인 방법론 및 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원(첨단생산기술개발사업)의 지원을 받아 연구되었음(No. 112041-3).

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Anan, M., Yuge, K., Nakano, Y., Funakoshi, T., and Haraguchi, T. (2004). "The relationship between water intake rates, paddy ponding depth, and farmers' water management techniques." *Paddy and Water Environment*, Vol. 2, No. 1, pp. 11-18.
- Anbumozhi, V., Yamaji, E., and Tabuchi, T. (1998). "Rice crop growth and yield as influenced by changes in ponding water depth, water regime and fertigation level." *Agricultural Water Management*, Vol. 37, No. 3, pp. 241-253.
- Bos, M.G., and Nugteren, J. (1990). On irrigation efficiencies. Report 19, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, pp. 91.
- Cho, J., and Mostaghimi, S. (2009). "Dynamic agricultural non-point source assessment tool (DANSAT): Model application." *Biosystems Engineering*, Vol. 102, No. 4, pp. 500-515.
- Chung, H.W., Kim, S.J., Kim, J.S., Noh, J.K., Park, K.U., Son, J.K., Yoon, K.S., Lee, K.H., Lee, N.H., Chung, S.O., Choi, J.D., and Choi, J.Y. (2006). *Irrigation and Drainage Engineering*. Dongmyeong Publisher.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. (1999). "Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.
- Howell, T.A. (2003). "Irrigation efficiency." *Encyclopedia of water science*, Marcel Dekker, New York, pp. 467-472.
- Huh, Y.M., Park, C.E., and Park, S.W. (1993). "A stream-flow network model for daily water supply and demands on small watershed (II): model development." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 23-32.
- Im, S.J., Park, S.W., and Kim, H.J. (2000a). "Methodology for estimating agricultural water supply in the Han River basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 6, pp. 765-774.
- Im, S.J., Park, S.W., Chin, Y.M., and Yoon, K.S. (2000b). "Development of CREAMS-PADDY model." *Proceedings 2000 ASAE Annual International Meeting*, Milwaukee, Wisconsin, USA, pp. 1-13.
- Im, S.J., Park, S.W., Kim, S.M., and Kim, H.J. (2000c). "Surveying the daily pumpage for irrigating paddy rice in the Han River basin." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 42, No. 1, pp. 57-65.
- James, L.D., and Burgess, S.J. (1982). "Selection, calibration and testing of hydrologic models." *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, Edited by Haan, C.T., Johnson, H.P., and Brakensiek, D.L., ASAE, St. Joseph, Mich, pp. 437-472.
- Jesiek, J.B., and Wolfe, M.L. (2005). "Sensitivity analysis of the Virginia phosphorus index management tool." *Transactions of the ASAE*, Vol. 48, No. 5, pp. 1773-1781.
- Ju, W.J., Kim, J.T., Park, K.W., and Lee, Y.J. (2006). "Developing of system for estimating water demand considering variation of farming conditions in paddy field." *KCID Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 82-90.
- Kang, M.G., Oh, S.T., and Kim, J.T. (2014). "Estimation of amounts of water release from reservoirs con-

- sidering customary irrigation water management practices in paddy-field districts." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 56, No. 5, pp. 1-9.
- Kang, M.S., Park, S.W., Lee, J.J., and Yoo, K.H. (2006). "Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields." *Agricultural Water Management*, Vol. 79, No. 1, pp. 72-92.
- Khepar, S.D., Yadav, A.K., Sondhi, S.K., and Siag, M. (2000). "Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices." *Irrigation Science*, Vol. 19, No. 4, pp. 199-208.
- Kim, H.K., Jang, T., Im, S.J., and Park, S.W. (2009). "Estimation of irrigation return flow from paddy fields considering the soil moisture." *Agricultural Water Management*, Vol. 96, No. 5, pp. 875-882.
- Kim, H.K., Kang, M.S., Park, S.W., Choi, J.Y., and Yang, H.J. (2009). "Auto-calibration for the SWAT model hydrological parameters using multi-objective optimization method." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 51, No. 1, pp. 1-9.
- Kim, J.S., Oh, S.Y., Oh, K.Y., and Cho, J.W. (2005). "Delivery management water requirement for irrigation ditches associated with large-sized paddy plots in Korea." *Paddy and Water Environment*, Vol. 3, No. 1, pp. 57-62.
- Kim, S., and Kim, H.S. (2007). "Neural networks-Genetic Algorithm model for modeling of nonlinear evaporation and evapotranspiration time series 1. theory and application of the model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 1, pp. 73-88.
- Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (KRIC) (2005). A study on water supply methods considering variation of farming conditions in paddy field.
- Lee, Y.J., Kim, S.J., Kim, P.S., Joo, U.J., and Yang, Y.S. (2006). "Study on the effective calculation method of irrigation water in a paddy fields area." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 48, No. 3, pp. 11-20.
- Legates, D.R., and McCabe, G.J. (1999). "Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 233-241.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF) (1997). A study on the water requirement variation with the farming conditions in the paddy field.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF) (1998). Agricultural Infrastructure Design Standards: Irrigation.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTM) (2011). Long-term Korea national water resources plan. pp. 18.
- Mistry of Agriculture, Food an Rural Affairs (MAFRA) (2014). Statistical yearbook of land and water development for agriculture. pp. 23-27.
- Moriasi, 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." *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Nam, W.H., Choi, J.Y., Choi, S.G., Jang, M.W., Lee, N.H., and Ko, K.D. (2011). "A survey on irrigation timing and water saving strategies of agricultural reservoirs." *KCID Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 81-93.
- Nam, W.H., Choi, J.Y., Hong, E.M., and Kim, J.T. (2013). "Assessment of irrigation efficiencies using smart water management." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55, No. 4, pp. 45-53.
- Nam, W.H., Kim, T., Choi, J.Y., and Lee, J. (2012). "Vulnerability assessment of water supply in agricultural reservoir utilizing probability distribution and reliability analysis methods." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 2, pp. 37-46.
- Nash, J., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles." *Journal of hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Park, B.J., Cha, H.S., and Kim, J.H. (1997). "A study on parameters estimation of storage function model using the Genetic Algorithms." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 30, No. 4, pp. 347-355.
- Park, C.E., Kim, J.T., and Oh, S.T. (2012). "Analysis of stage-discharge relationships in the irrigation canal with auto-measuring system." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 1, pp.

- 109-114.
- Rural Research Institute (RRI) (2012). Research on a test watershed for integrated agricultural water resources. pp. 136-137.
- Song, J.H. (2013). A daily surface drainage simulation model for irrigation districts consisting of paddy and protected cultivation. M.S. thesis, Seoul National University.
- Song, J.H., Kang, M.S., Song, I., and Jang, J.R. (2012). "Comparing farming methods in pollutant runoff loads from paddy fields using the CREAMS-PADDY model." *Korean Journal of Environmental Agriculture*, Vol. 31, No. 4, pp. 318-327.
- Song, J.H., Kang, M.S., Song, I., Hwang, S.H., Park, J., and Ahn, J.H. (2013). "Surface drainage simulation model for irrigation districts composed of paddy and protected cultivation." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55, No. 3, pp. 63-73.
- Song, J.H., Jeong, H.S., Park, J.H., Song, I.H., Kang, M.S., and Park, S.W. (2014). "Analysis of water quality and soil environment in paddy fields partially irrigated with untreated wastewater." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 56, No. 6, pp. 19-29.
- Song, J.H., Song, I., Kim, J.T., and Kang, M.S. (2015). "Characteristics of irrigation return flow in a reservoir irrigated district." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 1, pp. 69-78.
- Storm, D.E., Dillaha, T.A., Mostaghimi, S., and Shanholtz, V.O. (1988). "Modeling phosphorus transport in surface runoff." *American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 31, No. 1, pp. 117-127.
- Wu, Y., and Chen, J. (2012). "An operation-based scheme for a multiyear and multipurpose reservoir to enhance macroscale hydrologic models." *Journal of Hydro-meteorology*, Vol. 13, No. 1, pp. 270-283.
- Yoo, S.H., Choi, J.Y., and Jang, M.W. (2006). "Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman method." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 48, No. 1, pp. 13-23.
- Yoo, S.H., Choi, J.Y., and Jang, M.W. (2008). "Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea." *Agricultural Water Management*, Vol. 95, No. 7, pp. 845-853.
- Yoo, S.H., Choi, J.Y., Lee, S.H., Oh, Y.G., and Yun, D.G. (2013). "Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea." *Agricultural Water Management*, Vol. 117, pp. 43-54.

paper number : 15-023
 Received : 14 March 2015
 Revised : 7 April 2015
 Accepted : 7 April 2015