



## 관개지구 물관리기법에 따른 농업용 저수지 공급량 평가

### Impact of Water Management Techniques on Agricultural Reservoir Water Supply

류정훈\* · 송정현\*\* · 강석만\*\*\* · 장중석\*\*\* · 강문성\*\*\*\*,†

Ryu, Jeong Hoon · Song, Jung Hun · Kang, Seok Man · Jang, Jung Seok · Kang, Moon Seong

#### Abstract

Along with climate change, it is reported that the extreme climate events such as severe drought could cause difficulties of agricultural water supply. To minimize such damages, it is necessary to secure the agricultural water resources by using or saving the amount of irrigation water efficiently. The objectives of this study were to develop paddy water management scenarios and to evaluate their effectiveness on water saving. Three water management scenarios (a) deep irrigation with ponding depth of 20~80 mm (control, CT), (b) no/intermittent irrigation until paddy cracks (water management A, WM-A), and (c) intermittent irrigation with ponding depth under 20 mm (water management B, WM-B) were developed. Water saving effects were analyzed using monitored data from experimental paddy fields, and agricultural water supply was analyzed on a reservoir-scale using MASA model. The observed irrigation amounts were reduced by 21 % and 17 % for WM-A and WM-B compared to CT, respectively, and mainly occurred by the increase of effective rainfall. The simulation results showed that water management scenarios could reduce irrigation by 21~51 % and total inflow by 10~24 % compared to CT. The long-term simulated water level change of agricultural reservoir resulted in the decrease of dead level occurrence for WM-A and WM-B. The study results showed that WM-A and WM-B have more benefit than CT in the aspect of agricultural reservoir water supply.

**Keywords:** Agricultural water saving; ponding depth; water management techniques; water balance

## 1. 서론

우리나라의 농업용수 이용량은 하천유지용수를 제외한 물 사용량의 약 61 %인 152억 m<sup>3</sup>로 수자원 이용의 많은 부분을 차지하고 있다(MOLTM, 2016). 2014년 기준 논 면적의 80.8 %는 수리시설물로부터 용수를 공급받고 있으며, 이 중 59.9 %의 면적을 저수지가 공급하고 있다(MAFRA, 2016).

최근 들어 기후변화에 의한 가뭄과 같은 극한 수문사상의 영향으로 일부 농업용 저수지는 본연의 기능인 관개용수 공급에 어려움이 발생하여 안정적인 농업생산에 어려움을 초래하고 있다(Choi, 2015). 하지만, 용수 수요가 지속적으로 증가하는 사회적인 변화 여건 변화 속에서 최근 들어 농업용 저

수지는 관개용수 공급 목적 이외에 환경용수 공급 또한 요구되고 있으며(Yoo et al., 2012; Lee et al., 2013), 상수도 보급이 미흡한 농어촌 지역에 대한 생활용수 공급 또한 검토되고 있는 실정이다(Yoon et al., 2017). 이에 농업용수의 효율적 이용 및 용수 절약을 통한 전체 수자원의 안정적 공급이 요구되며, 이를 위한 실증적 관개지구 물관리기법의 개발이 필요하다(Lee et al., 2006).

국내·외에서는 농업용수 이용효율 개선을 위해 모니터링 및 모델링 기법을 이용하여 논 포장에서의 물관리에 따른 관개량 절감 효과를 분석하는 연구가 이루어진 바 있다. 국내에서 Sohn et al. (2004)은 담수심 관리방법으로 극천수관개(물꼬높이 2 cm, 관리담수심 0 cm) 천수관개(물꼬높이 4 cm, 관리담수심 1 cm), 심수관개(물꼬높이 10 cm, 관리담수심 4 cm)를 선택하여 시험포를 구축하고 관개량을 측정하였으며, 그 결과 극천수관개와 천수관개가 전통적인 심수관개에 비하여 17.7~46.6 %의 관개량이 절감되는 것으로 보고하였다. Sohn and Chung (2004)은 Sohn et al. (2004)의 연구를 확장하여 물수지 모형을 통해 관리담수심에 따른 관개량 절감 효과를 분석하였으며, 관리담수심이 낮아질수록 유효용량이 증가하여 관개량을 절감할 수 있으나, 담수심 관리를 위한 노동력이 증가하기에 자동 관개물꼬의 실용화가 선행되어야 한다고 보고하였다. Kim et al. (2003)은 논벼의 이앙재배, 직파재배 방식별 물관리 형태를 고려하여 홍수기 논의 저류량을 산정하

\* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

\*\* Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

\*\*\* Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

\*\*\*\* Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

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

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: January 12, 2018

Revised: February 26, 2018

Accepted: February 26, 2018

는 일별 물수지 모형을 개발하였으며, 6~9월 영농기 강우량 679.2 mm 조건에서 논·밭의 저류율은 답수직파 55.1 %, 건답직파 53.1 %, 이앙재배 43.6 %로 모의되었다.

국외에서 Ashouri (2012)는 이란 논에서 연속, 5일 간격, 8일 간격, 11일 간격으로 관개하는 4가지의 관개방법을 적용하여 관개량 절감 효과를 분석하였다. 수확량은 처리구별로 유의한 차이가 발생하지 않았으며, 8일 간격으로 관개를 할 경우 관개 논에 비해 18 %의 관개량이 저감된다고 하였다. Belder et al. (2004)은 필리핀의 논을 대상으로 연속 또는 불연속적으로 관개하여 수확량 및 관개량에 미치는 영향을 조사하였으며, 불연속 관개구에서 15~18 %의 관개량 저감효과가 있는 반면 수확량은 유의한 차이가 없는 것으로 보고하였다. 또한 Bouman and Thong (2001)은 필리핀, 일본, 인도에서 수행된 31건의 연구를 종합하여 분석한 결과 토양의 포화도를 유지하며 관리답수심을 극히 낮춘 경우가 관행에 비해 평균적으로 23 %의 관개량이 절감된다고 보고한 바 있다.

이상과 같이 국내·외에서는 물관리기법에 따른 관개량 절감 효과에 관한 많은 연구가 수행되어왔으나, 이는 관개지구 단위에 국한되어 있었다. 하지만, 기후변화에 따른 극한 수문사상의 영향이 변화하고 용수수요는 증대되는 여건 변화속에서 효율적 농업용수 이용을 위해 관개지구의 물관리기법 적용에 따른 관개량 절감 효과뿐만 아니라 공급원인 농업용 저수지의 용수공급능력 개선 효과까지 평가하는 연구가 필요할 것이다.

한편, 농업용수의 직접적 수요자인 농민은 기존 물관리 관행에 따라 농업용수를 무상으로 제공되는 자연재라는 인식이 강하며 (Cho, 2010), 일부 가뭄시기에는 용수를 절약하여 이용하나 (Kim et al., 2005), 일반적·관행적으로 평시 답수심을 높이는 영농활동을 수행하기에 유효우량이 낮고 용수 이용 효율이 낮아질 수 있다 (Choi et al., 2017). Song et al. (2015a)은 국내의 관개회귀수량 선행연구 결과를 종합하여 분석한 결과, 농업용수 회귀율은 32~86 %로 2건의 연구를 제외한 6건의 연구에서는 수자원장기종합계획에서 제시되는 35 %를 상회하는 값으로 기록되고 있으며, 이는 현장의 물이용 효율이 낮은 한 근거로 사료된다. 따라서, 물관리기법을 실제 농업 현장에 도입할 경우 이에 대한 농민의 실질적 적용 가능성 또한 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 관개지구 물관리기법 적용을 위한 물관리 시나리오를 구성하고 수문 모니터링 계측망을 구성하여 논·밭 물수지 분석을 통해 관개량 절감 효과를 분석하고자 한다. 또한 농업용 저수지 및 저수지 상·하류 연계 수문 모델링을 통해 논 및 저수지에서 물수지 요소 변화를 분석하고 물관리 시나리오 적용에 따른 농업용 저수지의 공급량 변화를 분석하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 논 포장 모니터링

#### 가. 대상지구 및 계측망 구성

관개지구 물관리기법 실증 적용 연구를 위하여 경기도 화성시 장안면 석포리에 위치한 버들저수지 관개지구에 시험포장을 조성하고 수문 모니터링을 수행하였다. 시험포장은 단일 용수간선 및 용수지거로부터 관개를 실시하는 총 6개 포장 (P1~P6)으로 조성하였다. 각 시험포장에서 채취한 토양 시료를 USDA 삼각좌표분류법에 따라 분류한 결과, P1, P2, P5, P6의 토성은 미사질 양토, P3, P4의 토성은 사양토로 판별되었다. 본 연구에서는 P1과 P2를 대조구, P3과 P4는 물관리구 A, P5와 P6은 물관리구 B로 총 6개 포장을 2개 포장씩 묶어 2반복으로 조성하였다. 대조구 및 물관리구 (A, B)에 대한 물관리기법은 3절에 자세히 설명되어있다.

Fig. 1은 시험포장 물수지 분석을 위해 구성된 수문 계측망을 나타내고 있다. 강우량을 포함한 기상자료 분석을 위해 석포리에 위치한 농가의 옥상에 강우계 및 자동기상관측장비 (Automatic Weather System, AWS)를 설치하였다. 답수심은 초음파 수위계 및 부자식 수위계를 동시에 운영, 상호·보완하여 10분 간격으로 연속 측정하였으며, 관개량과 배수량은 위와 부자식 수위계를 이용하여 10분 간격으로 측정된 수위와 수위·유량 관계식을 토대로 유량으로 환산하여 측정하였다. 배수물꼬높이는 강우를 무효방류하지 않는 현장 상황을 반영하여 중간낙수기를 제외하고 80 mm로 유지하도록 하였다. 침투량은 부자식 수위계를 설치하여 연속 측정하였다. 또한, Sohn and Chung (2004)에서 제시된 바와 같이 최적 답수심 관리를 위한 노동력을 절감하기 위해서 지균 작업과 자동 관개물꼬 도입이 필요하다는 점을 반영하여, 영농활동이 시작하기 전에 물지균 작업을 수행하였으며, 4개 포장 (P1, P2, P5, P6)에 대해 자동 관개물꼬를 설치하였다. 나머지 2개 포장 (P3, P4)의 경우 펌프를 통해 용수간선의 물을 끌어올려 관개용수를 공급하고 있어 유량계를 설치하여 관개량을 측정하였다. 강우, 관개량, 답수심, 배수량 등 시험포장 수문 모니터링은 2017년 관개시작 및 씨레질 이전부터 수행하였으며, 본고에서는 관개시작일자 (2017년 4월 30일)부터 추수일자 (2017년 9월 25일~28일)까지의 수문 모니터링 결과를 제시하였다.

한편 시험포장에서의 영농활동을 파악하기 위하여 관개시작일자, 이앙기, 본답기, 중간낙수기 등 물관리 인자와 시비량, 시비시기 (기비 및 추비), 씨레질, 추수일자 등 영농활동 인자를 조사하였다. 관개시작일자는 6개 시험포장에서 2017년 4월 30일로 동일하였으며 씨레질 (필지 평탄화), 시비 (기

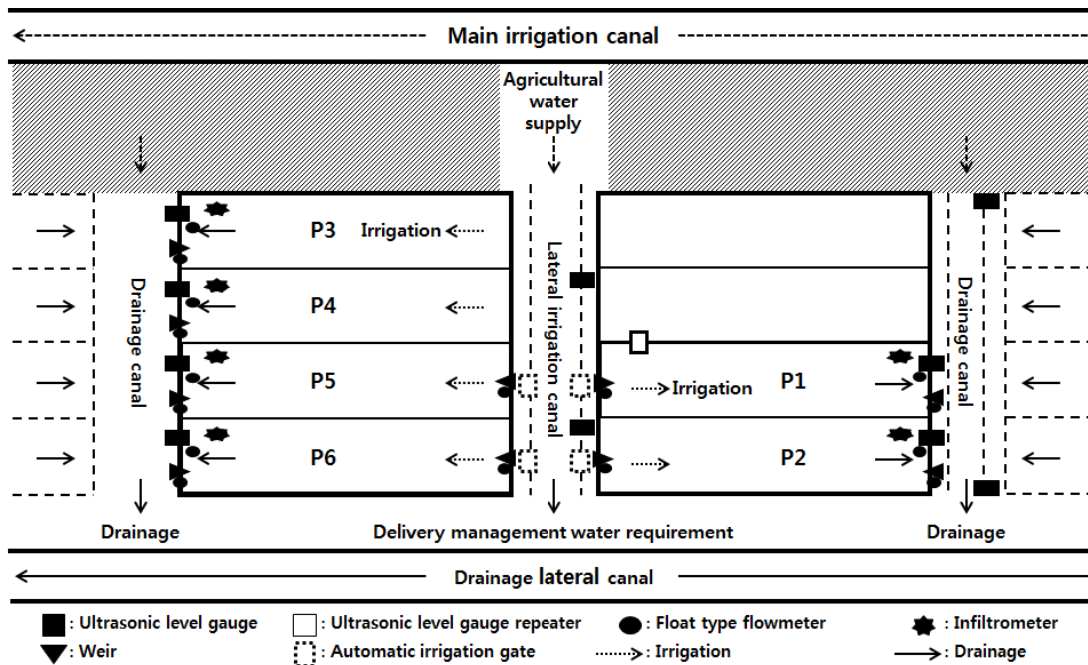


Fig. 1 Design of the hydrologic network (P1&P2: control fields, P3&P4: water management A fields, P5&P6: water management B fields)

비), 모내기, 본답기, 중간낙수기는 만 하루정도의 차이를 보였다. 추수는 9월 25일 (P3, P4)부터 9월 28일 (P1, P2) 사이에 진행되었다.

또한 물관리기법에 따라 담수심 관리가 실제적으로 이루어질 수 있도록 농민 간담회를 두 차례 개최하여 시험포장별 담수심 관리방법, 자동 관개물꼬 사용방법, 배수물꼬 사용방법 등 물관리기법 운영에 대한 교육을 실시하였다.

#### 나. 물수지 분석

논에서의 물수지는 Fig. 2와 같이 강우량, 관개량, 담수심, 침투량, 증발산량, 배수량으로 구성되며 Eq. (1)과 같이 계산된다.

$$WD_t = WD_{t-1} + RAIN_t + IR_t - INF_t - ET_t - DR_t \quad (1)$$

여기서,  $WD_t$ 는  $t$ 일에 논에 담수된 수량(mm),  $RAIN$ 은 강우량(mm),  $IR$ 은 관개량(mm),  $INF$ 는 침투량(mm),  $ET$ 는 증발산량(mm),  $DR$ 은 논외의 지표배수량(mm)이다. 논 물수지 분석을 위해 관개량, 침투량, 그리고 배수량은 수문 계측망에서 측정된 자료를 이용하였고, 증발산량은 Penman-Monteith 식(Allen et al., 1998)으로 추정된 기준증발산량과 논벼 생육기별 작물계수(Yoo et al., 2006)를 통해 산정하였다.

## 2. 저수지 물수지 모델링

관개지구의 물관리 시나리오 적용에 따른 논 및 저수지에서의

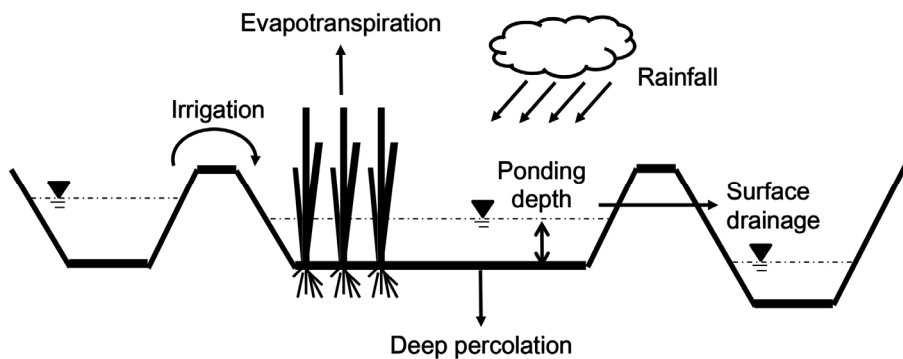


Fig. 2 Water balance components in a paddy field (Song et al., 2016a)

물수지 요소 변화를 분석하기 위하여 Module-based hydrologic Analysis System for Agricultural watersheds (MASA) (Song, 2017)를 이용하여 모델링을 수행하였다. MASA는 농업유역의 수문요소를 각각의 모듈로 구성하여 다수의 모듈을 조합하여 맞춤형 모형을 구축하고 수문해석을 수행하는 시스템으로 Kang et al. (2016)이 개발한 COmponent-based Modeling Framework for Agricultural water-Resources Management (COMFARM)의 기본개념과 유사하다. MASA에서는 독립된 모듈들을 플러그 앤 플레이 방식으로 사용자가 조합, 분해, 추가, 제거, 교체하여 연구 목적 및 지역 특성에 따른 맞춤형 모형을 구축할 수 있다. MASA는 유역 유출량 모듈, 유역 증발산량 모듈, 관개지구 해석 모듈, 저수지 물수지 해석 모듈, 그리고 다중목적 최적화 모듈 등으로 구성된다.

유역 유출량 해석을 위해서 MASA는 4개의 집중형 모형 중 선택·이용할 수 있도록 구성되어 있으며, 본 연구에서는 국내 농업용 저수지 설계와 운영에 널리 이용되고 있는 3-Tank 모형과 Kim and Park (1988)의 매개변수 추정 회귀식을 이용하였다.

농업용수 공급량은 필요수량 산정 방식을 기반으로 관개 효율을 고려하여 모의한다. 필요수량 산정을 위해 실제증발산량은 Penman-Monteith 식 (Allen et al., 1988)과 논벼 생육 기별 작물계수 (Yoo et al., 2006)를 이용하여 산정하였고, 침투량은 수문 계측망에서 측정된 자료를 이용하였다. 물꼬높이와 관리담수심은 물관리 시나리오를 토대로 영농기간에 따라 변화도록 구성하였으며, 중간낙수기에는 용수공급이 중단되도록 구성하였다.

저수지 물수지 모듈은 유역 유출량 모형에서 모의된 유입량과 관개지구 해석 모듈에서 모의된 농업용수 공급량을 입력받아 물수지식 기반으로 저수량을 추정한다. MASA에서는 홍수기 제한수위 운영에 따른 강제 방류량과 환경용수 방류량 또한 모의할 수 있으나, 버들저수지에서는 운영하지 않기에 본 기작을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 이상과 같이 MASA 내 4개 모듈을 연결·조합하여 대상지구에 대한 맞춤형 모형을 구축하고 물관리기법 적용에 따른 농업용 저수지의 공급량 변화를 분석하였다. 본 연구에서 적용한 3-Tank 모형, 농업용수 공급량, 그리고 저수지 물수지에 관한 기작은 각각 Song et al. (2017), Song et al.

(2015b), 그리고 Song et al. (2016b)에 보다 상세히 서술되어 있다.

저수지 물수지 모델링 결과를 토대로 물관리 시나리오 적용에 따른 버들저수지의 공급량 변화를 분석하였으며, 버들저수지 유효저수량, 만수위, 사수위, 상류유역 특성, 관개지구 면적 등은 Table 1과 같다.

### 3. 관개지구 물관리 시나리오 구성

관개지구 물관리기법 실증 적용 연구를 위한 시험구 설계를 위하여 국내·외 선행연구 문헌을 조사한 결과, 관행적인 심수관개보다 관리담수심을 낮추며 간단관개를 수행하는 것이 관개량을 줄일 수 있고, 벼의 생육과 수확량에도 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다 (Bouman and Thong, 2001; Kim et al., 2003; Sohn et al., 2004; Sohn and Chung, 2004; Belder et al., 2004; Ashouri, 2012; Song et al., 2016a). 본 연구에서는 물관리 시나리오로 간단관개를 수행하되 논바닥에 금이 가면 용수로에서 물을 공급하는 물관리 A (WM-A, Water Management A) 시나리오, 그리고 간단관개를 수행하되 관리담수심 20 mm를 유지하는 물관리 B (WM-B, Water Management B) 시나리오를 구성하였다. 대조구 (CT, Control)로는 연구 대상지인 석포리 인근에서 관행적으로 수행하는 영농방법을 적용하여 관리담수심 20~80 mm의 심수관개를 시행하였다. 물관리 (A, B) 시나리오의 경우 모내기 후 어린 모의 뿌리 활착을 돕기 위하여 논바닥이 마르기 전에 관개용수를 공급하도록 하였다. 모든 시나리오에서 중간낙수 후 유수형성기와 수잉기에는 추비를 통한 영양물질이 원활히 벼에 공급될 수 있도록 담수심을 20~80 mm 유지하도록 하였다. Fig. 3은 물관리 시나리오별로 영농기간에 따른 관리담수심을 보여주고 있다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 물관리기법 적용에 따른 논 포장 모니터링 결과

#### 가. 월별 논 물수지 요소 분석 결과

Table 2~Table 4는 논 포장 모니터링 자료를 토대로 월별 물수지 분석을 수행한 결과를 보여주고 있으며, Fig. 4는 시험

Table 1 Characteristics of Beodeul Reservoir, the upstream watershed, and the irrigation districts

Effective storage (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	Normal pool level (El., m)	Dead level (El., m)	Upstream watershed of reservoir				Irrigated area (ha)
			Area (ha)	Paddy (%)	Upland (%)	Forest (%)	
240.5	7.53	4.50	296.0	13.8	24.6	35.7	85.5

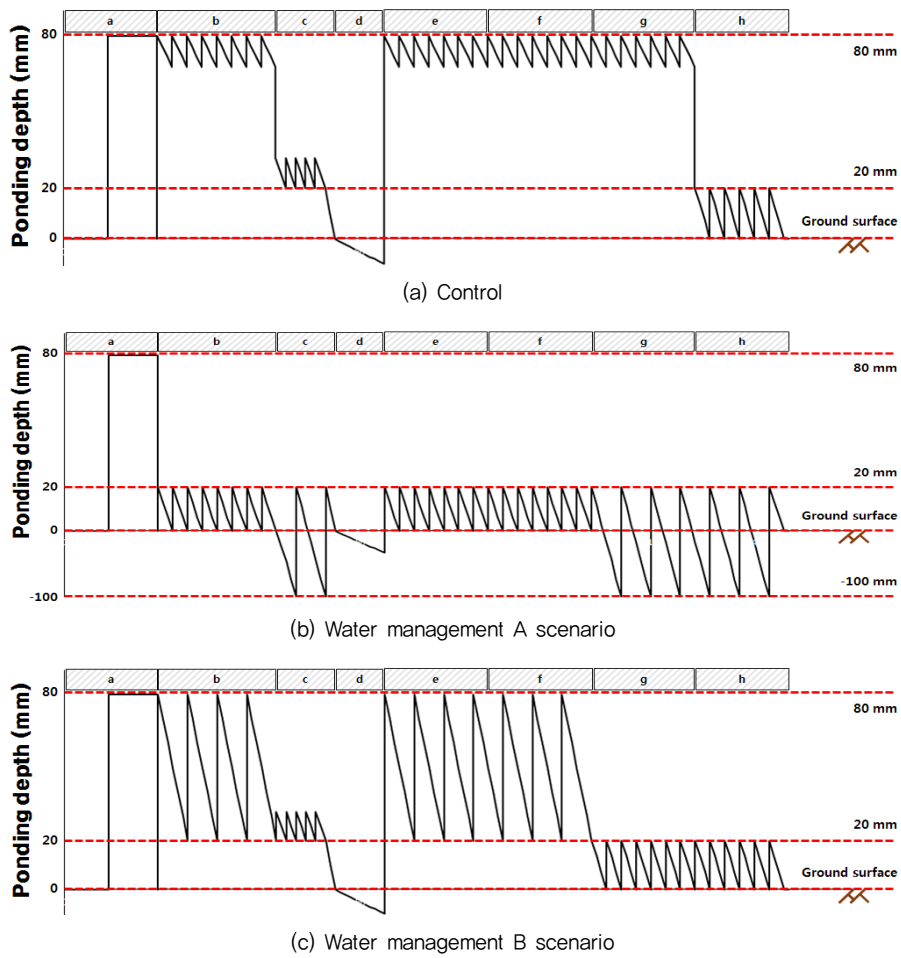


Fig. 3 Pondering depth management methods for control and water management scenarios (a: harrowing, b: rooting, c: tillering, d: mid-summer drainage, e: panicle formation, f: booting, g: flowering, h: yellow ripening)

Table 2 Water balance components for control fields (Unit: mm)

Month	Rainfall	Irrigation	Drainage	Infiltration	Evapotranspiration
May.	30.0	255.8	96.7	41.1	108.2
Jun.	14.5	170.5	68.5	49.1	146.9
Jul.	434.0	2.5	196.0	31.5	143.0
Aug.	331.5	8.1	239.3	13.9	131.6
Sep.	18.0	0.3	0.5	0.5	81.2
Sum.	828.0	437.2	600.9	136.0	611.0

Table 3 Water balance components for water management A fields (Unit: mm)

Month	Rainfall	Irrigation	Drainage	Infiltration	Evapotranspiration
May.	30.0	245.1	37.9	55.6	112.3
Jun.	14.5	102.1	13.4	54.2	146.9
Jul.	434.0	2.6	174.6	36.7	143.0
Aug.	331.5	1.7	208.3	32.5	131.6
Sep.	18.0	0.0	0.0	0.9	73.0
Sum.	828.0	351.4	434.2	179.9	606.8

Table 4 Water balance components for water management B fields (Unit: mm)

Month	Rainfall	Irrigation	Drainage	Infiltration	Evapotranspiration
May.	30,0	231,8	70,5	42,3	112,1
Jun.	14,5	113,0	40,5	45,9	146,9
Jul.	434,0	2,9	161,0	24,0	143,0
Aug.	331,5	15,4	213,1	12,7	131,6
Sep.	18,0	0,1	0,1	0,0	75,9
Sum.	828,0	363,2	485,2	124,9	609,6

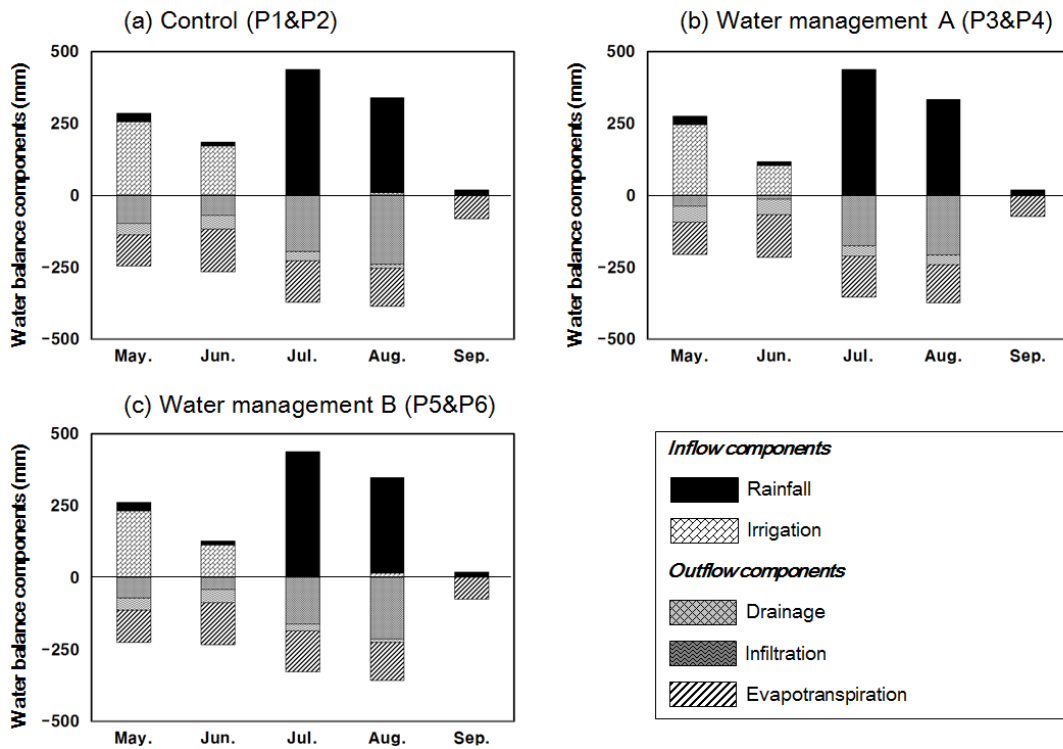


Fig. 4 Water balance components for each experimental paddy fields

구별 영농기(5~9월) 물수지 요소를 나타낸 것이다. 전체 관개기간 중 강우량은 828.0 mm로 대상지구와 가장 인접한 곳에 위치한 수원 기상관측소의 최근 30년 강우량과 유사한 정도로 나타났다. 반면 5~6월 강우량은 44.5 mm로, 수원 기상관측소 자료를 토대로 강우빈도해석을 수행한 결과 약 35.7년 빈도에 해당하며 수원 기상관측소에서 강우 관측을 시작한 이후 5~6월 강우량이 가장 적었던 것으로 분석되었다.

관개량을 살펴보면 대조구에서 437.2 mm의 가장 많은 관개용수가 공급되었고, 물관리구 A와 물관리구 B의 관개량은 각각 351.4 mm와 363.2 mm로 나타났다. 물관리기법을 적용하는 경우 대조구 평균 대비 17~21% 가량의 관개량을 절감한 것으로 분석되었다. 5월과 6월에는 강우가 적어 시험구별로 유입량 중 89~91% 가량을 관개용수 공급에 의존한 반면,

중간낙수 이후 7~8월에는 총 765.5 mm의 강우가 2~3일 간격으로 연이어 잦게 발생하여 모든 시험구에서 관개를 거의 시행하지 않은 것으로 나타났다.

배수량은 대조구에서 600.9 mm로 가장 많았으며, 물관리구 A에서 424.2 mm로 가장 적었다. 배수는 시험구별로 72~88% 가량이 중간낙수 이후인 7~8월에 집중적으로 이루어졌다.

침투량은 사양토인 물관리구 A (P3, P4)에서 평균 179.9 mm로 가장 많았으며, 미사질 양토인 나머지 시험구에서는 43.9~55.0 mm 가량 적게 나타났다.

Table 5는 시험구별 유효수량 산정 결과를 보여주고 있다. 유효수량은 강우량 중 담수심 증가에 기여하지 못하고 배수 물꼬를 통해 배수된 양을 제외한 나머지로써 산정하였다. 5월 상순부터 9월 하순까지의 영농기간 강우량 828.0 mm 중 유

**Table 5** Effective rainfall for experimental paddy fields (Unit: mm)

Month	Rainfall	Effective rainfall		
		CT fields	WM-A fields	WM-B fields
May.	30.0	8.9	28.9	26.0
Jun.	14.5	0.0	10.1	5.8
Jul.	434.0	244.7	260.4	274.3
Aug.	331.5	141.0	153.6	144.7
Sep.	18.0	17.5	18.0	18.0
Sum.	828.0	412.2	471.0	468.8

\* CT: control, WM-A: Water Management A, WM-B: Water Management B

효우량은 대조구에서 412.2 mm로 가장 낮았고, 물관리구 A와 물관리구 B에서는 각각 471.0 mm, 468.8 mm로 유사하게 나타났다. 물관리기법을 적용하는 경우 유효우량의 비율이 대조구보다 높은 점이 시험구별 관개량 절감 효과를 가져온 것으로 사료된다.

**나. 총 유입량 및 유출량 분석 결과**

Table 6은 시험구별 총 유입량 및 유출량, 그리고 추수일자의 담수심을 보여주고 있다.

총 유입량을 살펴보면 대조구에서 1,265.2 mm로 가장 많았다. 물관리구 A에서는 총 유입량 1,179.4 mm로 대조구 대비 약 7% 저감되었으며, 물관리구 B에서는 총 유입량 1,191.2 mm로 대조구 대비 약 6% 저감되었다.

총 유출량 또한 대조구에서 1,347.9 mm로 가장 많았다. 물관리구 A의 총 유출량은 1,221.0 mm, 물관리구 B의 총 유출량은 1,219.6 mm로, 총 유입량과는 달리 물관리구 A보다 물관리구 B에서 총 유출량이 다소 작게 산정되었는데, 이는 물

관리구 A에서 농민이 담수심 관리를 위해 강우의 무효방류를 수행한 것에서 기인한 것으로 사료된다.

앞선 Table 2~Table 4의 논 물수지 요소 분석 결과에서 모든 시험구에서 유입량의 합보다 유출량의 합이 큰 것은 영농 기간 마지막 일자에 대한 담수심이 반영되지 않은 것이며, 한편 마지막 일자의 담수심이 음수를 보이는 것은 등숙기부터 관개용수 공급이 없고 논바닥이 갈라지도록 유지한 상태임을 의미한다. Table 6과 같이 마지막 일자, 즉 추수일자의 담수심을 고려하는 경우 시험포장 수문 모니터링을 토대로 물수지 분석을 통해 산정한 논 저류량의 변화값 ( $\Delta S$ )은 시험구별로 -25.5~29.4 mm의 범위를 나타내었다.

**2. 물관리 시나리오에 따른 논 포장 및 저수지 모델링 결과**

**가. 논 모델링 결과**

본 연구에서는 물관리 시나리오 적용에 따른 논 물수지 요소 모의를 위하여 농업용저수지 및 저수지 상·하류 연계 수문 모형인 MASA를 통해 논 물수지 모델링을 수행하였다.

Table 7은 물관리 시나리오별 관개량 및 총 유입량 모의 결과를 보여주고 있다. 대조구의 경우, 관개량 606.8 mm, 총 유입량 1,434.8 mm로 모의되었다. 물관리 A 시나리오의 경우, 관개량 300.1 mm, 총 유입량 1,128.1 mm로 모의되어, 관개량은 약 51%, 총 유입량은 약 24% 저감효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 물관리 B 시나리오의 경우, 관개량 464.0 mm, 총 유입량 1,292.0 mm로 모의되어, 관개량은 약 21%, 총 유입량은 약 10% 저감효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 모델링에 따른 시험구별 담수심을 논 포장 모니터링 결과와 비교하여 도시한 것이다. 대조구의 경우, 씨레질기와 활착기에 걸쳐 담수심 모델링 결과와 모니터링 결과가 관

**Table 6** Total inflow and outflow for experimental paddy fields (Unit: mm)

Scenario	Total inflow (a)	Total outflow (b)	Ponding depth of harvest date (c)	Change of storage ( $\Delta S$ ; a-b-c)
CT	1,265.2	1,347.9	-57.2	-25.5
WM-A	1,179.4	1,221.0	-55.1	+13.5
WM-B	1,191.2	1,219.6	-57.8	+29.4

\* CT: control, WM-A: Water Management A, WM-B: Water Management B

**Table 7** Simulated irrigation and total inflow for each scenario (Unit: mm)

	CT	WM-A scenario	WM-B scenario
Irrigation	606.8	300.1	464.0
Total inflow	1,434.8	1,128.1	1,292.0

\* CT: control, WM-A: Water Management A, WM-B: Water Management B

리담수심 80 mm에서 유사한 양상을 보였다. 6월 중에는 강우가 적어 실질적으로 농업용수 공급이 원활히 이루어지지 못했으며, 이에 농민이 충분한 담수 상태를 유지하고자 인위적으로 자동 관개물꼬와 배수물꼬높이를 조작함에 따라 대조구 담수심 모니터링 결과가 모델링 결과보다 상대적으로 높은 경향을 보이는 것으로 나타났다. 중간낙수 이후 시기에는 모니터링 결과는 2017년 7~9월 강우가 2~3일 간격으로 지속적으로 발생한 탓에 농민이 별도의 관개를 통한 담수심 관리를 수행하지 않고 천수관개를 진행하였음을 보여주는 반면, 모델링 결과에서는 시나리오에 따라 관리담수심 80 mm를 유지하기 위하여 관개가 진행됨에 따라 모니터링 결과보다 높은 담수심 결과가 도출되었다. 물관리 시나리오의 경우, 두 가지

시나리오 모두에서 활착기까지는 담수심이 낮게 관리되었으나, 분얼기 중반부부터 대조구와 마찬가지로 담수심 확보를 위한 배수물꼬높이 조작에 따라 모니터링 결과가 모델링 결과보다 상대적으로 높은 경향을 보였다. 중간낙수 이후 시기 또한 대조구와 마찬가지로 담수심 관리를 강우에 의존하는 경향을 보였으며, 7~9월 강우가 2~3일 간격으로 발생하여 전반적으로 관개가 필요한 시기에 적절히 강우로 대체된 형태의 결과가 나타났다.

나. 저수지 모델링 결과

Fig. 6은 물관리 시나리오 적용에 따른 1980년~2017년(총 38년) 벼들저수지 수위 모의 결과를 보여주고 있다. 대조구의

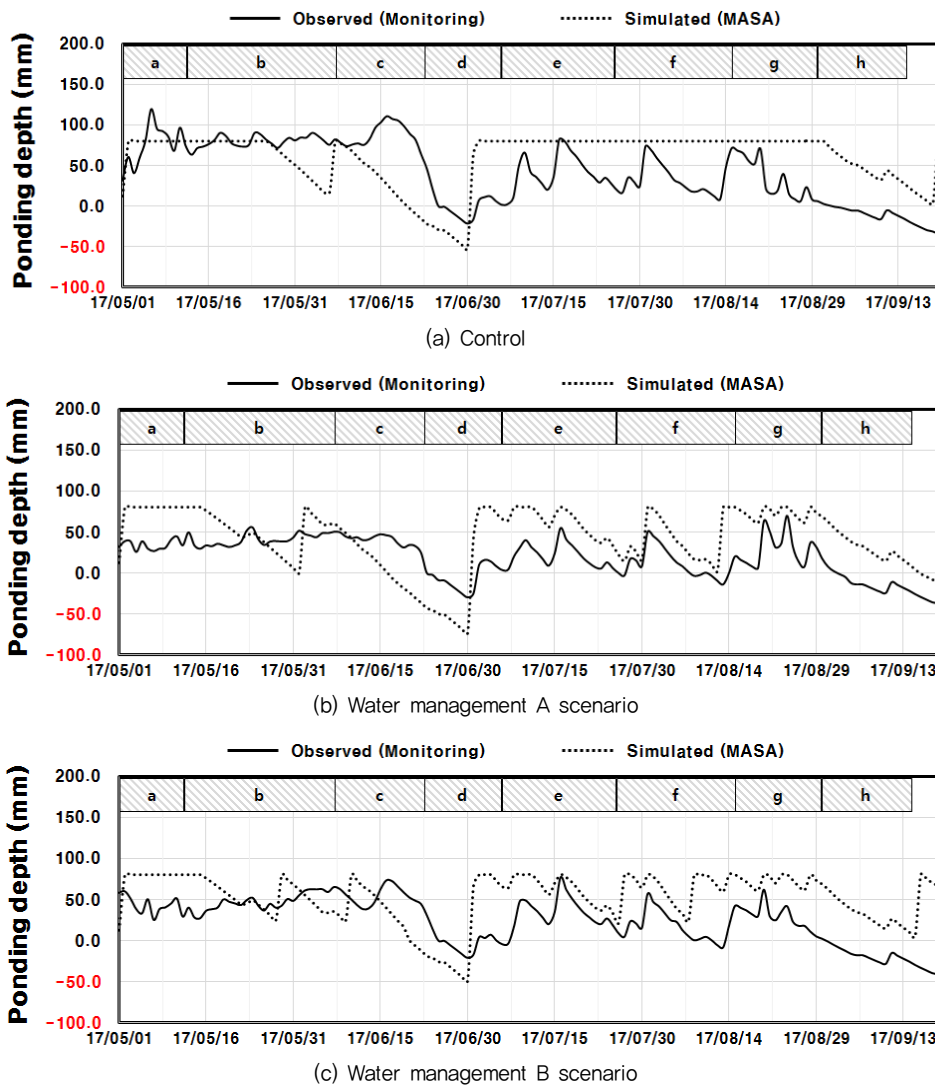


Fig. 5 Monitored and simulated ponding depth for each scenario (a: harrowing, b: rooting, c: tillering, d: mid-summer drainage, e: panicle formation, f: booting, g: flowering, h: yellow ripening)



경우, 모의기간에 걸쳐 총 13개 년도에서 237회 사수위를 보이는 것으로 나타났으며, 물관리 A 시나리오와 물관리 B 시나리오에서는 각각 8개와 11개 년도에서 107회와 152회 사수위를 보이는 것으로 나타났다.

Table 8은 물관리 시나리오 적용에 따른 버들저수지 수위 모

의 결과를 토대로 저수율 구간별 초과확률을 산정한 결과를 보여주고 있다. 물관리 시나리오(A, B) 적용 시, 대조구 대비 유효 저수량에 대한 초과확률은 증가하고(각각 16.5 %, 5.3 %), 사수위 유량이 발생할 확률은 감소하는 것으로 분석되었다.

Fig. 7은 2017년 영농일지를 토대로 물관리 시나리오 적용

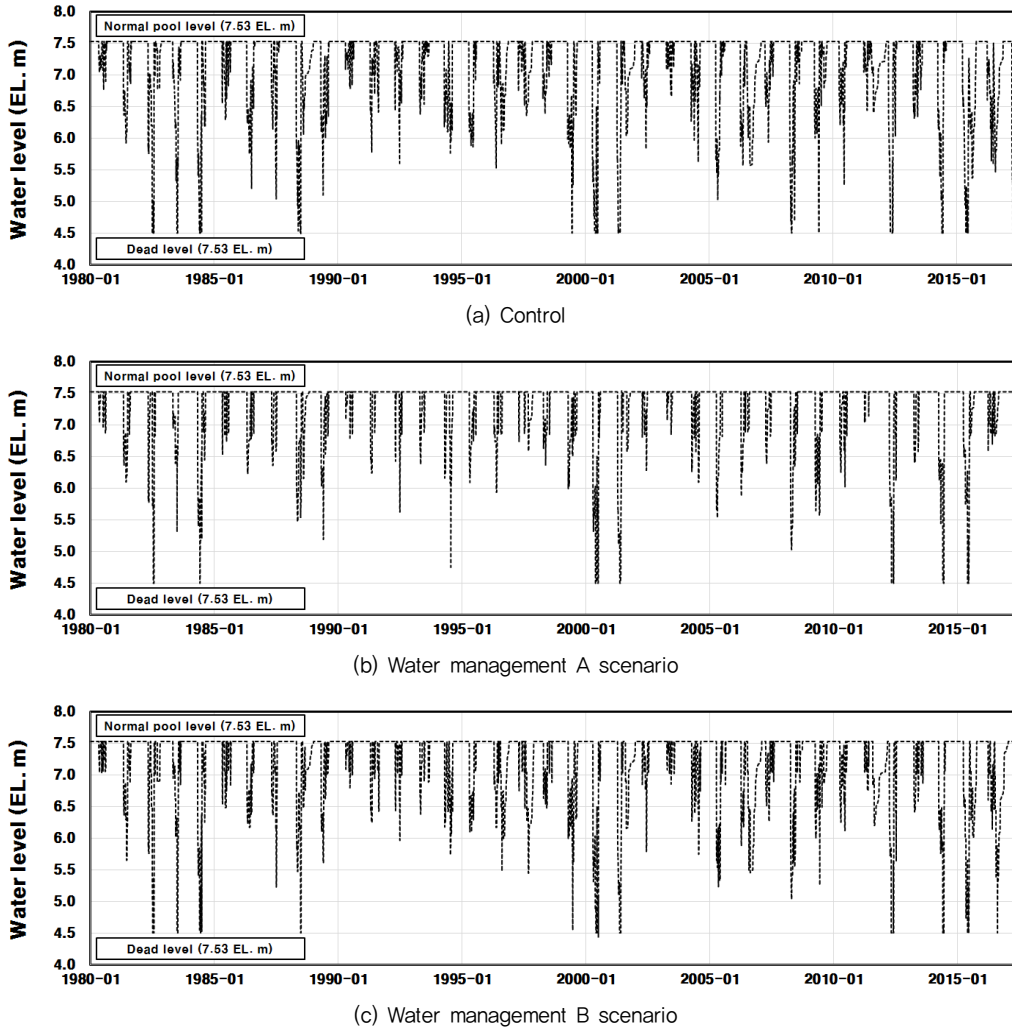


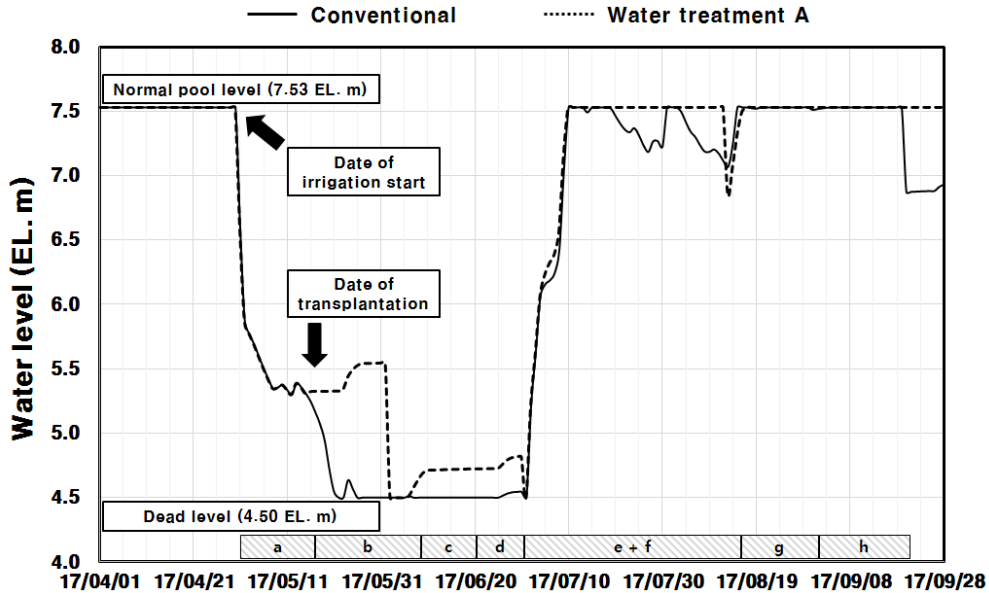
Fig. 6 Water level change of Beodeul Reservoir for each scenario (1980~2017)

Table 8 Exceedance probability by water storage rate ranges for each scenario

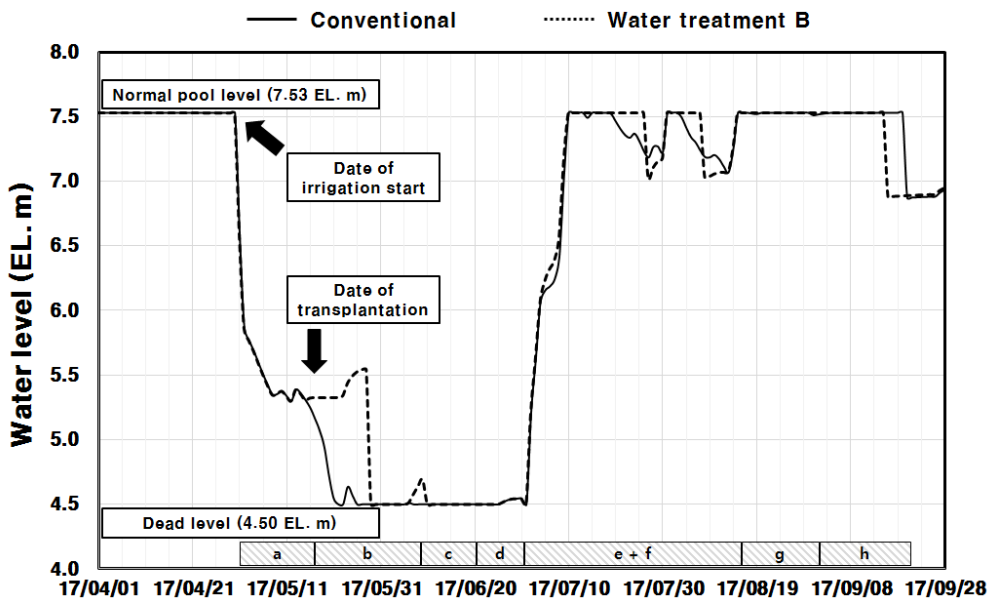
Water storage rate	Exceedance probability		
	Control	Water management A scenario	Water management B scenario
100 % (effective storage)	61.4 %	77.9 %	66.7 %
over 75 %	76.6 %	85.3 %	78.2 %
over 50 %	87.0 %	93.0 %	88.5 %
over 25 %	94.5 %	96.9 %	95.6 %
over 0 %	98.3 %	99.2 %	98.9 %
0 % (dead level)	1.7 %	0.8 %	1.1 %

에 따른 벼들저수지 수위 모의 결과를 나타낸 것이다. 2017년  
 의 경우 벼들저수지 유역의 상반기(1~6월) 강우량이 적어 대  
 조구에서 씨레질 이후 활착기에 접어드는 5월 중순부터 분얼  
 기, 중간낙수기에 걸쳐 사수위를 보이는 것으로 분석되었다.  
 물관리 A 시나리오에서는 활착기가 끝나가는 6월 상순에 일  
 시적으로 사수위를 보이며, 물관리 B 시나리오에서는 물관리  
 A 시나리오에서보다 5일 가량 이른 시기부터 사수위를 보이

기 시작하여 대조구와 마찬가지로 분얼기, 중간낙수기에 걸  
 쳐 사수위를 보이는 것으로 분석되었다. 2017년과 같이 상반  
 기 강우량이 적은 경우, 대조구의 영농방법대로 심수관개하  
 는 경우에는 활착기와 분얼기 등 논벼 생육에 있어 논 담수가  
 반드시 필요한 시기에 농업용수 공급에 차질이 있을 것으로  
 보이는 반면, 물관리 시나리오 (A, B)를 적용하는 경우에는  
 대조구 대비 저수지 수량 확보에 있어 보다 개선될 수 있는 것



(a) Control vs. Water management A scenario



(b) Control vs. Water management B scenario

Fig. 7 Water level change of Beodeul Reservoir for control and water management scenarios (a: harrowing, b: rooting, c: tillering, d: mid-summer drainage, e: panicle formation, f: booting, g: flowering, h: yellow ripening)

으로 나타났으며 특히 물관리 A 시나리오의 경우 전반적으로 영농기간에 걸쳐 농업용수 공급이 원활히 수행될 수 있을 것으로 사료된다.

#### IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 관개지구 물관리기법 적용에 따른 관개량 절감 효과와 농업용 저수지 용수공급능력을 평가하였다. 이를 위해 물관리 시나리오를 구성하고 물관리기법 적용을 위한 수문 모니터링 계측망을 구성하였으며, 논 물수지 분석을 통해 관개량 절감 효과를 분석하였다. 논 및 저수지에서의 물수지 요소 변화를 분석하기 위하여 농업용 저수지 및 저수지 상·하류 연계 수문모형을 통해 모델링을 수행하였고, 물관리기법 적용에 따른 농업용 저수지의 공급량 변화를 분석하였다.

수문 계측망에서 측정된 자료를 토대로 물관리기법에 따른 논 물수지 요소를 분석한 결과, 관개량은 대조구 437.2 mm로 가장 많았고 물관리구 A와 물관리구 B에서 각각 351.4 mm와 363.2 mm로 대조구 대비 17~21 % 관개량이 절감된 것으로 나타났다. 물관리기법을 적용하는 경우 유효우량이 증가함에 따라 관개량 절감 효과를 가져온 것으로 사료된다. 한편 총 유입량은 대조구, 물관리구 B, 물관리구 A 순으로 나타났으며, 물관리구 A와 물관리구 B에서 대조구 대비 각각 7 %와 6 % 저감되었다.

논 물수지 요소 모델링을 수행한 결과, 관개량은 대조구, 물관리 A 시나리오, 물관리 B 시나리오에서 각각 606.8 mm, 300.1 mm, 464.0 mm로, 대조구 대비 물관리 시나리오에서 각각 51 %와 21 %의 절감 효과가 나타났다. 총 유입량은 대조구, 물관리 A 시나리오, 물관리 B 시나리오에서 각각 1,434.8 mm, 1,128.1 mm, 1,292.0 mm로, 대조구 대비 물관리 시나리오에서 각각 24 %와 10 %의 절감 효과가 나타났다.

담수심 모니터링 결과와 모델링 결과를 살펴보면, 영농기 초반 5~6월 강우가 적어 농민의 인위적인 배수물꼬높이 조작에 따라 담수심 모니터링 결과가 모델링 결과보다 상대적으로 높은 경향을 보였다. 중간낙수 이후 7~9월의 경우 강우가 2~3일 간격으로 발생함에 따라 전반적으로 모든 시험포장에서 별도의 관개용수 공급 없이 강우에 의존하는 경향을 보였다.

물관리 시나리오 적용에 따른 벼저수지 수위 변화를 모의한 결과, 대조구 대비 물관리 시나리오 (A, B)에서 사수위 발생 횟수와 연도 수가 감소하며, 유효 저수량에 대한 초과확률은 증가하는 것으로 분석되었다. 한편 2017년과 같이 상반기 강우량이 적은 경우, 대조구와 같이 심수관개하는 경우 활착기와 분얼기 등 논벼 생육에 있어 논 담수가 반드시 필요한

시기에 농업용수 공급에 차질이 있을 것으로 보이는 반면 물관리 시나리오 (A, B)를 적용하는 경우 저수지 수량 확보가 개선될 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과에 따르면 담수심과 물꼬높이 관리를 통한 물관리기법을 적용할 경우 관행 영농방법을 시행하는 경우보다 유효우량이 증가됨에 따라 관개량이 절감되었으며, 총 유입량 또한 저감 가능한 것으로 나타났다. 또한 농업용 저수지 관개용수 공급 측면에서도 2017년과 같이 상반기 강우량이 적더라도 물관리 시나리오 적용에 따라 영농기간 전반에 걸쳐 저수지 수량을 보다 확보할 수 있을 것이다.

다만 실제적으로 물관리기법을 적용하기 위해서는 담수심 관리방법 등 물관리기법에 대한 지속적 교육과 감독이 필요하며, 무엇보다도 자동 관개물꼬와 배수물꼬높이를 관리하는데 있어 농민의 협조가 선행되어야 할 것으로 보인다. 또한, 물관리구 A와 같이 논바닥이 갈라지도록 하는 경우 잡초가 자라날 수 있는 문제 등에 대한 대응방안이 필요할 것으로 보인다. 추후 기상조건 등 현장 상황을 고려한 담수심 관리와 더불어 물꼬 관리에 대한 농민 협조가 병행된다면 더 많은 물 절약효과를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 농생명산업기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (316034-3).

#### REFERENCES

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ashouri, M., 2012. The effect of water saving irrigation and nitrogen fertilizer on rice production in paddy fields of Iran. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics* 2(1): 56-59.
- Belder, P., B. A. M. Bouman, R. Cabangon, L. Guoan, E. J. P., Quilang, L. Yuanhua, J. H. J. Spiertz, and T. P. Tuong, 2004. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agricultural Water Management* 65(3): 193-210. doi:10.1016/j.agwat.2003.09.002.
- Bouman, B. A. M., and T. P. Tuong, 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management* 49: 11-30. doi:

- 10.1016/S0378-3774(00)00128-1.
5. Cho, J. H., 2010. Evaluation of environmental values at agricultural water supply system, Sejong: Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (in Korean).
  6. Choi, D. H., J. W. Jung, K. S. Yoon, W. J. Baek, and W. J. Choi, 2016. Farmers' water management practice and effective rainfall and runoff ratio of paddy fields. *Irrigation and Drainage* 65(S1): 66-71. doi:10.1002/ird.1962.
  7. Choi, J. Y., 2015. Agricultural drought and countermeasures for 2015 year. *The Magazine of The Korean Society of hazard Mitigation* 15(6): 56-62 (in Korean).
  8. Kang, M. S., P. Srivastava, J. H. Song, J. Park, Y. Her, S. M. Kim, and I. Song, 2016. Development of a Component-Based Modeling Framework for Agricultural Water-Resource Management. *Water*, 8(8), 351. doi:10.3390/w8080351.
  9. 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 Korea Society of Agricultural Engineers* 30(1): 50-62 (in Korean).
  10. Kim, J. S., S. Y. Oh, K. Y. Oh, and J. W. Cho, 2005. Delivery management water requirement for irrigation ditches associated with large-sized paddy plots in Korea. *Paddy Water Environment* 3: 57-62. doi:10.1007/s10333-005-0072-9.
  11. Kim, S. J., S. J. Kim, C. G. Yoon, H. J. Kwon, and G. A. Park, 2003. Development and application of paddy storage estimation model during storm periods. *Journal of Korea Water Resources Association* 36(6): 901-910 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2003.36.6.901
  12. 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
  13. Lee, Y. J., S. J. Kim, P. S. Kim, W. J. Joo, and Y. S. Yang, 2006. Study on the effective calculation method of irrigation water in a paddy fields area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 48(3): 11-20 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2006.48.3.011.
  14. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2016. Statistical yearbook of land and water development for agriculture, Sejong, Korea (in Korean).
  15. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTM), 2016. Long-term Korea National Water Resources Plan, Sejong, Korea (in Korean).
  16. Sohn, S. H., and S. O. Chung, 2004. Development of water saving irrigation method using water balance model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 46(5): 3-11 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2004.46.5.003.
  17. Sohn, S. H., K. J. Park, and S. O. Chung, 2004. Analysis of water balance for ponding depth treatment in paddy fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 46(4): 13-21 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2004.46.4.013.
  18. Song, J. H., 2017. Hydrologic Analysis System with Multi-Objective Optimization for Agricultural Watersheds. Ph.D. diss., Seoul: Seoul National University (in Korean).
  19. Song, J. H., I. Song, J. T. Kim, and M. S. Kang, 2015a. Characteristics of irrigation return flow in a reservoir irrigated district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 57(1): 69-78 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.1.069.
  20. Song, J. H., I. Song, J. T. Kim, and M. S. Kang, 2015b. Simulation of agricultural water supply considering yearly variation of irrigation efficiency. *Journal of Korea Water Resources Association* 48(6): 425-438 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2015.48.6.425.
  21. Song, J. H., J. H. Ryu, J. Park, S. M. Jun, I. Song, J. Jang, S. M. Kim, and M. S. Kang, 2016a. Paddy field modelling system for water quality management. *Irrigation and Drainage*, 65(S2), 131-142. doi:10.1002/ird.2034.
  22. Song, J. H., M. S. Kang, I. Song, and S. M. Jun, 2016b. Water balance in irrigation reservoirs considering flood control and irrigation efficiency variation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(4): 04016003. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000989.
  23. Song, J. H., Y. Her, J. Park, K. D. Lee, and M. S. Kang, 2017. Simulink implementation of a hydrologic model: A Tank model case study. *Water*, 9(9): 639. doi:10.3390/w9090639.
  24. Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2006. Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO Penman-Monteith and modified Penman method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 48(1): 13-23 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2006.48.1.013.
  25. Yoo, S. H., S. H. Lee, J. Y. Choi, and T. 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.
  26. Yoon, K. S., S. M. Choi, J. H. Yoo, S. H. Yoo, D. H. Choi, S. G. Yoon, C. H. Lee, K. H. Jung, and G. C. Shin, 2017. Assessment of domestic water supply potential of agricultural reservoirs in rural area considering economic index. *Journal Of The Korean Society Of Rural Planning* 23(1): 85-96 (in Korean). doi:10.7851/ksrp.2017.23.1.085.