



레질리언스 지표를 이용한 저수지 수혜구역의 전작농지 용수공급 안정성 평가

Evaluation of Water Supply Stability for Upland Crop in Reservoir Irrigation Districts Using Resilience Indexes

박진석^a · 장성주^b · 이혁진^c · 신형진^d · 정수^{e,†} · 송인홍^{f,††}

Park, Jinseok · Jang, Seongju · Lee, Hyeokjin · Shin, Hyungjin · Chung, Soo · Song, Inhong

ABSTRACT

As the agricultural land use shifts from paddy to upland, ensuring reservoir water supply stability for upland crop irrigation becomes essential. The objectives of this study were to estimate the irrigation water requirements considering the upland irrigation scenario and to evaluate the reliability of the water supply from the agricultural reservoir using resilience indexes. Two study sites, Sinheung and Hwajeong, were selected, and soybean and red peppers, the most water-intensive crops, were selected as study crops, respectively. For the irrigation scenario, two irrigation methods of traditional scheduling (which irrigates all sites at once) and rotational scheduling (which distributes irrigation by districts), along with the upland conversion rate, were considered. The net irrigation requirement was estimated through a water balance analysis. The stability of the reservoir was evaluated using resilience indexes based on the simulated 10-years reservoir water levels and drought criterion. Overall, the water supply of the reservoir was evaluated as stable during the simulated 10 years, except for the one year. Compared to the two irrigation methods, rotational scheduling resulted in lower irrigation water usage in both sites, with reductions of 1.6%, and 0.3%, respectively. As the upland conversion rate increases, the water deficit could be intensified in Hwajeong with a conversion rate exceeding 50%, showing the number of deficit(ND) over the one and a rapid increase in the deficit ratio(DR). It was confirmed that the reservoir operation criteria can be enhanced by incorporating resilience indicators along with crop growth information, thus, this will be a further study.

Keywords: Resilience; reservoir stability; upland crop; irrigation; evapotranspiration

1. 서론

한국 국민의 1인당 연간 쌀 소비량은 2021년 56.9 kg 으로 2011년 71.2 kg 대비 20.1% 감소하였다 (KOSTAT, 2022). 쌀 수요가 줄어들어 따라 발생한 쌀 공급과잉 문제에 대응하고자 정부는 2003년부터 쌀 생산조정제, 논 타작물 재배 지원사업 등 벼 재배 면적을 줄이는 정책을 시행하고 있다 (Lee, 2018). 따라서 논 면적은 지속적으로 감소하여 2021년 논 면적은 전체 국토면적 기준으로 전년 대비 5.3% 감소하였고, 저수지 수혜구역 기준으로 2007년 대비 17.8% 감소하여 논에서 발작물 재배가 증가하는 추세이다 (KOSTAT, 2022; Kwon et al., 2021). 특히, 기존 저수지 수혜구역에서 논외 전작면적 증가는 발작물 재배를 위한 용수공급 방안의 마련을 요구하고 있다.

지금까지 농업 용수공급은 주로 논 관개에 집중되었다. 이는 논외 수리답 비율이 2015년 기준 80.6%인 반면 밭관개 전 비율이 18.5%로 논에 비해 용수공급 시설이 부족한데서 확인할 수 있다 (Chae et al., 2016). 특히, 밭 용수의 공급은 주로 지하수를 이용하는 관정에 의존하고 있어 지하수위 저하 등으로 가뭄 등 극한 기상 상황에 취약하다. 따라서 전작화

^a Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

^b Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

^c MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

^d Associate Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

^e Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Integrated Major in Global Smart Farm, and Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

^f Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4606, Fax: +82-2-873-2049

E-mail: soochung@snu.ac.kr

^{††} Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4581, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: inhongs@snu.ac.kr

Received: June 30, 2023

Revised: November 01, 2023

Accepted: November 20, 2023

된 발에 안정적으로 용수를 공급하기 위해 저수지 등 지표수를 추가 수원을 고려하는 연구가 증가하고 있다 (Kim et al., 2005; Parsons et al., 2010; Jang et al., 2020).

밭 용수공급은 주로 관수로를 이용한 스프링클러나, 점적 관개를 통해 이뤄지기 때문에 논 용수에 비해 부유물질 등 수질 관리가 필요하다. 이에 저수지 물을 포함하여 지표수를 추가 수원으로 이용하기 위해 관개용수의 안정적 분배가 가능하도록 하는 저류조 시스템 연구가 다수 수행되었다. Kim et al. (2017)과 Han and Lee (2010)은 지표수와 빗물을 용수원으로 하는 저류조 시스템의 수질 개선에 대한 연구를 수행하였다. Kwon et al. (2021)은 농어촌공사가 관리하는 수혜면적이 200 ha 이상인 605 개 저수지를 대상으로 전작화 현황과 집단화정도에 대한 분석을 수행한 바 있고, Hong et al. (2022)은 전작 전환된 농지의 용수공급을 위해 저류조의 위치를 최적화 하는 연구를 수행한 바 있다. 저수지 용수구역은 논 용수공급을 목적으로 조성되었으나 일부 수혜구역은 전작화가 많이 이뤄져 지표수를 밭 용수로 활용하는 방안을 고려할 단계에 이르렀다. 따라서 저수지의 수자원을 저류조 시스템을 통해 밭용수에 공급하기 위해서는 기존 논 용수공급을 고려하여 이수 용량의 안정성을 평가할 필요가 있다.

저수지의 이수 안정성 평가는 주로 통계적 방법을 이용해 불확실성을 정량화하거나 특정 가뭄에서 용수공급의 신뢰도를 이용하는 방법으로 수행되었다 (Kim and Park, 2000; Park, 2004; Kwon et al., 2020). 기존의 신뢰도 기반의 지표는 서로 다른 용수공급 부족 상황들을 동일한 척도로 평가하는 한계

가 있다 (McMahon, 2006). 이를 보완하는 방안으로 외부 변화에도 시스템을 유지하는 능력을 레질리언스라 정의하고 (Holling, 1973), 이를 정량화하여 저수지의 이수 안정성 평가에 적용되고 있다. Hashimoto et al. (1982)는 신뢰도 (Reliability), 회복도 (Resiliency), 취약도 (Vulnerability)의 레질리언스 지표를 제안하였고, 이를 이용해 Park et al. (2013)은 득높임 저수지의 이수 안정성을 평가하였다. Simonovic and Arunkumar (2016) 및 Hwang et al. (2020)은 강건성 (robustness), 여분성 (redundancy), 자원효율성 (resourcefulness), 신속성 (rapidity)를 지표로 다목적 저수지 및 호소의 동적 레질리언스를 평가한 바 있다. 일련의 연구는 저수지의 이수 안정성 평가에서 레질리언스 지표의 적용성을 보였으나, 밭용수 추가 공급을 고려한 저수지의 이수 안정성 평가 연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 저수지 수혜구역에서 전작화된 농지에 지표수를 관개용수로 공급하는 경우 레질리언스 지표를 이용해 저수지의 이수 안정성을 평가하는데 목적이 있다. 이에, 상대적으로 전작화가 많이 진행된 신흥과 화정 저수지 수혜구역을 기존 논 용수공급에 더해 전작지에 밭 용수를 추가 공급하는 시나리오를 구성하여 저수지의 이수 안정성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지역 선정

본 연구에서 한국농어촌공사가 관리하고 있는 저수지 수혜

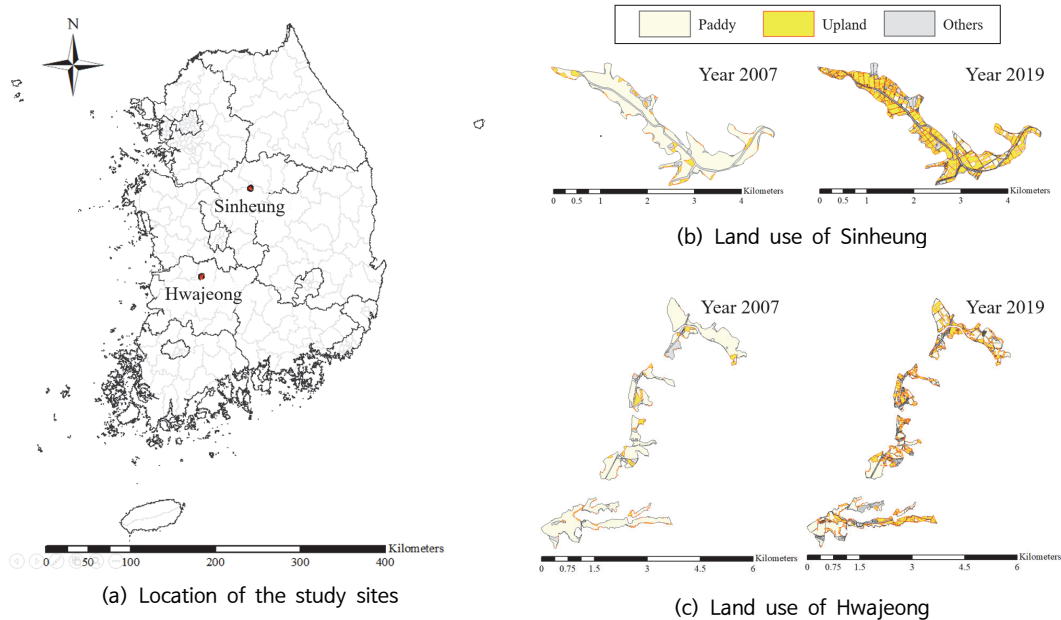


Fig. 1 Study sites (a) and land use changes from 2007 to 2019 (b)&(c)

구역 가운데 수혜면적이 200 ha 이상이고 전작화가 많이 진행된 신흥과 화정 저수지 지구를 대상지역으로 선정하였다. 신흥과 화정지구는 각각 충청북도 괴산군 불정면과 전라북도 완주군 용진읍에 위치한 지구로, Fig. 1에서 대상지구의 위치와 2007년과 2019년 사이 전작화 진행 상황을 토지피복의 변화도로 제시하였다. 환경부 토지피복지도를 이용해 2007년과 2019년의 대상지구의 농경지 변화 추이를 Table 1에 정리하였다. 두 대상지구 모두 논 면적은 절반 이상으로 감소하고 밭은 3 배 이상 증가하여 전작화가 활발히 진행되는 것으로 나타났다 (Kwon et al., 2021; Hong et al., 2022).

2. 대상 발작물 선정

발작물은 농민의 의사에 따라 다양하고 생육시기와 작물이 용수분량도 다르다. 따라서 밭 용수공급에서 적합한 작물의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 대상 수혜구역을 포함하는 지역에서 재배하는 발작물의 재배면적과 생육주기별 증발산량을 고려하여 발작물 이용수량이 가장 큰 작물을 대상 발작물로 선정하였다. 작물 재배면적은 대상 저수지가 위치한 시군의 농업면적조사 자료를 이용하였고 (KOSTAT, 2019), 작

물의 생육주기별 증발산량은 농촌진흥청의 발작물 물 사용 기술 자료를 활용하였다 (NAAS, 2018).

대상지역별 작물 현황은 Table 2와 같다. 신흥 저수지가 위치한 충청북도 괴산군은 콩의 재배면적이 전체의 27.0%로 가장 크게 차지하였고, 증발산량을 고려한 이용수량도 콩이 가장 커 신흥 저수지 구역의 대상작물로 선정하였다. 화정 저수지가 위치한 전라북도 완주군은 뚜렷한 대표작물 없이 다양한 작물이 재배되는 것으로 나타나 재배면적과 작물의 증발산량이 가장 큰 고추를 대상작물로 선정하였다.

3. 관개 필요수량 산정

가. 밭 토양수분 물수지 분석

발작물 관개에 필요한 순용수량은 Nam et al. (2015)이 제안한 밭 토양수분 물수지 모형을 이용해 토양수분함량을 산정하고 (식 (1)), 밭 관개 시나리오 적용하여 관개량을 산정하였다. 토양수분 함량은 모세관력에 의한 수분 상승량을 무시하고 작물소비수량, 유효수량, 관개량 항으로 정리하면 식 (2)와 같다.

Table 1 Cultivation area conversion trend of paddy to upland

Study site		Cultivation area (ha)			Areal change (%)	
		Paddy	Upland	Sum	Paddy	Upland
Sinheung	2007	170.8	12.7	184.7	-87.2	809
	2019	21.8	115.5	137.3		
Hwajeong	2007	309.1	21.1	331.8	-52.0	379
	2019	148.5	101.0	249.5		

Table 2 Statistics of cultivation area and water use for upland crops of the study area (KOSTAT, 2019; NAAS, 2018)

Study area (Location)	Upland crop	Cultivate area (ha)	Annual evapotranspiration (mm)	Annual crop water use (ha · mm)	Remarks
Sinheung (Goesan-gun, Chungcheong buk-do, Korea)	Soybean	1,462 (27.0%)	458	670,080	Study crop
	Corn	1,321 (24.4%)	492	650,525	
	Others	2,633 (48.6%)	-	-	
Hwajeong (Wanju-gun, Jeollabuk-do, Korea)	Red pepper	315 (9.7%)	520	163,696	Study crop
	Soybean	282 (8.6%)	417	117,509	
	Onion	281 (8.6%)	566	159,102	
	Others	2,382 (73.1%)	-	-	

$$\Delta D = (P - RO) + IR + CR - ET_c - DP \quad (1)$$

이때, ΔD 는 토양내의 토양수분 변화량 (Root zone depletion) (mm), P 는 강수량 (mm), RO 는 지표유출량 (mm), IR 은 관개량 (mm), CR 은 모관력에 의한 수분상승량 (mm), ET_c 는 작물증발산량 (mm), DP 는 지하배수량 (mm)이다.

$$D_{t+1} = D_t - CU_{t+1} + ER_{t+1} + IR_{t+1} \quad (2)$$

이때, D_t 는 t 일의 토양수분함량 (mm), CU 는 작물소비수량 (mm), ER 은 유효수량 (mm), IR 은 관개량 (mm)을 의미한다.

나. 작물소비수량 산정

본 연구에서 작물소비수량은 기준작물증발산량에 작물계수를 고려한 작물증발산량으로 산정하였다 (식 (3)). 기준작물증발산량은 Allen et al. (1998)에 의해 제안되어 증발산량의 표준으로 이용되고 있는 FAO Penman-Monteith (FAO PM)법을 이용해 산정되었다 (식 (4)). 그리고 작물계수는 신흥, 화정 각 대상지역의 대표 작물에 기초하여 NAAS (2017)의 작물계수를 적용하였다 (Fig. 2).

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (3)$$

여기서, ET_c 는 작물증발산량 (mm/day), ET_o 는 기준작물증발산량 (mm/day), K_c 는 작물계수이다.

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

여기서, ET_o 는 기준작물증발산량 (mm/day), Δ 는 증기압곡선기울기 ($kPa/^\circ C$), R_n 은 순일사량 ($MJ/m^2/day$), G 는 토영 열 유속 밀도 ($MJ/m^2/day$), γ 는 건습계 상수 ($kPa/^\circ C$), T 는 평균기온 ($^\circ C$), u_2 는 2m 높이의 풍속 (m/s), e_s 는 포화증기압 (kPa), e_a 는 실제증기압 (kPa)이다.

다. 유효수량 산정

유효수량은 강우로부터 직접 토양에 공급되어 이용되는 수량으로, 총 강우량에서 지표유출량과 토양수분함량을 고려하여 침투량을 산정하였다. 직접 유출량은 미국자연자원보호청 (NRCS, Natural Resources Conservation Service)에서 제시하는 식 (5)를 이용하여 산정하였다. 토지피복이나 토양특성에 따라 결정되는 CN (Curve Number) 값은 대상지역이 농경지임을 고려해 National Engineering Handbook (SCS, 1972)의 수문학적 토양군 B에 해당하는 CN값인 75를 적용하였다 (Hong et al., 2010; Moon et al., 2014).

토양이 보유할 수 있는 수분은 한계가 있기 때문에 초과강우는 지표로 직접 유출하게 된다. 따라서 포장용수량 (FC, Field Capacity)과 위조점 (WP, Wilting Point) 사이의 수분함량이 작물이 이용할 수 있는 수량이고 작물의 뿌리 깊이를 고려해 토양수분함량의 상·하한계 제한조건으로 적용하였다 (식 (6), (7)). 지표유출량 중 토양에 저장되는 수분량은 잔존 토양수분함량과 포장용수량의 차이로, 총용이 유효수량 (TRAM, Total Readily Available Moisture)을 이용해 유효수량의 상한값을 결정하였다 (식 (8), (9)). 이때, 작물이 성장함에 따라 근근역이 깊어지지만 본 연구에서는 작물별 뿌리 깊이를 뿌리의 70%가 분포하는 깊이로 보고, 콩은 0.56 m, 고추는 0.74 m를 전체 작물 재배기간에 적용하였다 (Table 3) (Zhang et al., 2017). 최종적으로 유효수량은 토양수분함량의 상한계와 비교하여, t+1일의 토양수분 모의치 (D)가 낮을 경우 식

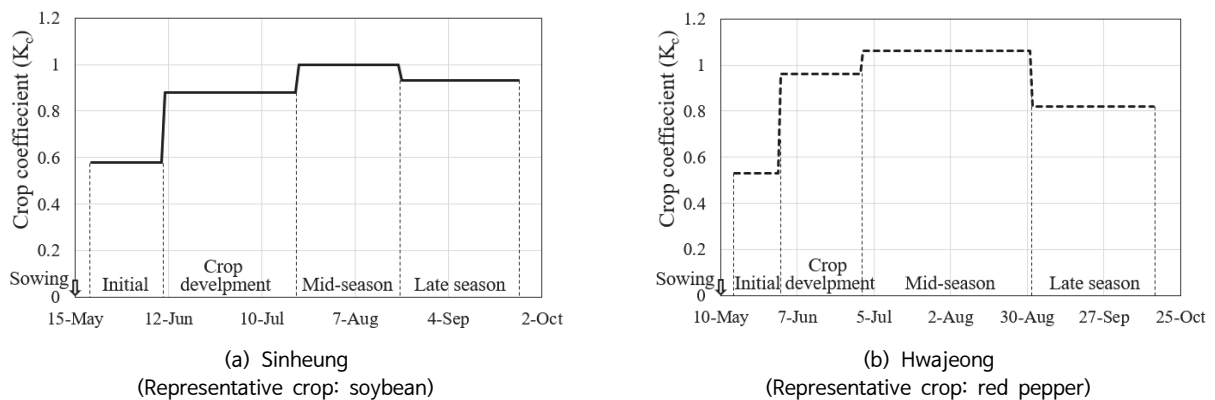


Fig. 2 Crop coefficient of study area (NAAS, 2017)

(10)을, 높을 경우 식 (11)을 적용해 결정되었다. 강우량이 5 mm 이하인 경우는 무효우량으로 설정하였다.

$$Q = \frac{(P - 0.2(\frac{25400}{CN} - 254))^2}{P + 0.8(\frac{25400}{CN} - 254)} \quad (5)$$

여기서, Q 는 직접유출량 (mm), P 는 강우량 (mm), CN 은 유출곡선지수이다.

$$D_{max} = \theta_{FC} \times Z \quad (6)$$

$$D_{min} = \theta_{WP} \times Z \quad (7)$$

$$TRAM = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times Z \quad (8)$$

$$R_0 = TRAM - (D - D_{min}) = D_{max} - D \quad (9)$$

여기서, D 는 잔존 토양수분함량, D_{max} 는 토양수분함량 상한계, D_{min} 는 토양수분함량 하한계, θ_{FC} 는 포장용수량의 수분함수량, θ_{WP} 는 위조점의 수분함수량, Z 는 작물 뿌리깊이 (mm), R_0 는 유효우량의 상한값이다.

$$D_{max} > D (= D_t + Q_{t+1} - CU_{t+1}), \quad (10 a)$$

$$ER_{t+1} = Q_{t+1} - CU_{t+1} \quad (10 b)$$

$$D_{max} \leq D (= D_t + Q_{t+1} - CU_{t+1}), \quad (11 a)$$

$$ER_{t+1} = D_{max} - D_t \quad (11 b)$$

여기서, ER_t 는 t 일의 유효우량이다.

라. 밭 용수공급 시나리오 구성 및 조용수량 산정

밭작물 용수공급은 10년 빈도의 한발을 기준으로 필요수량의 평균값인 계획 일필요수량을 산정하고, 총용이 유효수분량을 계획 일필요수량으로 나누어 관개 주기인 간단일수를 설정해 1회 용수량을 계획한다. 본 연구에서는 한발 상황뿐만 아니라 평수년에 저수지 수원을 기존 논 용수공급에 더하여 밭 용수공급에 추가할 경우 용수원의 이수 안정성을 평가하고자 하였다. 밭 작물 관개 방법은 관행관개, 윤번관개 두 가지 시나리오를 구성해 작물의 필요수량을 산정하였다.

먼저 관행관개 시나리오는 수해구역 내 전작지 전체에 한꺼번에 용수를 공급하는 방법이다. 잔존 토양수분함량이 토양수분량 하한계보다 낮을 경우, 토양수분의 상한계까지 관개용수를 공급하였고 이를 순용수량으로 산정하였다 (식 (12)). 단, 잔존 토양수분함량이 토양수분량 하한계보다 높은 경우, 별도의 관개를 수행하지 않았다 (식 (13)). 윤번관개 시나리오는 전체 관개지구를 관개일수를 고려하여 복수의 지구로 구획화하여, 순차적으로 관개하는 시나리오이다. 각 구획의 용수공급은 관행관개 시나리오와 같이 잔존 토양수분함량이 토양수분량 하한계 아래로 내려갈 때 수행하였다. 관행에 비해 윤번관개를 적용할 경우 총 용수공급을 구획별로 분산할 수 있어서 일시에 소요되는 관개량을 줄일 수 있을 것으로 생각하여 시나리오로 구성하였다. 시나리오별 관개량으로 산정된 순용수량은 밭관개가 주로 스프링클러를 이용한 관개임을 고려해 적용효율과 송수효율을 고려한 스프링클러의 관개효율 70%를 적용해 조용수량 산정을 수행하였다 (Chung et al., 1999).

관개방법에 따른 시나리오에 추가하여 논외 전작화가 지속되는 점을 고려하여 미래의 밭 면적의 증가를 시나리오로 반영하였고, 이에 따른 조용수량 산정을 수행하였다. 2019년의 밭 면적을 기준으로, 밭 면적의 비중을 10%p 단위로 증가시켜서 전체 경지가 전작화되는 경우까지를 시나리오로 구성하였다. 이때, 밭의 단위면적당 조용수량은 일정함을 고려하여 밭 면적의 증가에 따라 조용수량의 증가는 선형적으로 비례하도록 산정하였다.

Table 3 Soil types of study site and 70% of root depth for study crops (Zhang et al., 2017)

Study site	Soil type		Study crop	70% of root depth (m)
Sinheung	Sandy loam (SL)		Soybean	0.56
	Field capacity (FC) (%)	Wilting point (WP) (%)		
	22.3	6.3		
Hwajeong	Clay loam (CL)		Red pepper	0.74
	Field capacity (FC) (%)	Wilting point (WP) (%)		
	33.0	12.8		

$$D_{\min} > D(= D_t + ER_{t+1} - CU_{t+1}), \quad (12 \text{ a})$$

$$IR_{t+1} = D_{\max} - D \quad (12 \text{ b})$$

$$D_{\min} \leq D(= D_t + ER_{t+1} - CU_{t+1}), \quad (13 \text{ a})$$

$$IR_{t+1} = 0 \quad (13 \text{ b})$$

이때, IR_t 는 t 일의 관개량이다.

4. 저수지 수위 모의 및 안정성 평가

가. 저수지 수위 모의

기존의 저수지 용수공급 시스템은 수해구역의 논에 개수로를 통해 관개하는 방식으로 설계되었다. 개수로 시스템은 논 관개면적이 감소해도 말단까지 용수를 배분하는데 일정량 이상의 용수공급이 필요해 저수지 취수량을 줄이기 어려운 구조이다. 이점을 고려하여 본 연구에서는 논 면적 감소에 상관없이 논 관개량은 관행수준으로 유지된다고 가정하고, 여기에 밭 용수를 추가할 경우 저수지 수위를 모의하여 용수 안정성을 평가하였다.

저수지 수위는 2012년에서 2021년까지 10년에 대해 모의하였다. 각 대상 저수지에 대한 10년간의 저수지 수위와 내용적 곡선은 농촌용수종합정보시스템 (RAWRIS, Rural Agricultural Water Resource Information System)의 자료를 이용하였다. 기존 저수위는 논 용수공급에 따른 수위 변화로 가정하고 저수지 증발이나 손실수량은 별도로 고려하지 않았다. 기존 논 용수공급에 밭 관개를 추가할 경우의 일 단위 저수위를 모의하기 위해서는 먼저 일 단위 논 용수량을 산정하고 여기에 밭 관개수량을 합산할 필요가 있다. 이는 벼와 밭작물의 재배기간이 겹치는 경우 저수지 수위에 따라 취수량에 반응하는 수위변화가 다르기 때문이다.

기존 논 관개 용수량은 저수지의 일 유입량과 취수량을 고려해 산정하였다. 즉, 대상 저수지의 내용적 곡선과 일별 수위 자료를 바탕으로 양단면 평균법을 이용해 논관개에 이용된 저수지의 취수량을 추정하였다 (식 (14)). 밭 관개 필요수량에 관개효율을 적용한 조용수량을 밭 관개 용수량으로 산정하고, 논 관개 용수량에 합산하여 총 저수지 취수량을 산정하였다. 여기에 저수지의 내용적 곡선을 이용해, 총 저수지 취수량을 저수지의 수위변화로 환산하여 밭 용수 추가 관개를 고려한 저수지 수위를 모의하였다.

$$V = \frac{f(h_{i+1}) + f(h_i)}{2} \times (h_{i+1} - h_i) \quad (14)$$

여기서, V 는 방류량 (m^3), $f(h_i)$ 는 i 번째 수심 h_i (m)에서 수표면적 (m^2)이다.

나. 용수공급 안정성 평가

밭작물 공급원으로서 대상 저수지의 이수적 안정성평가는 Hashimoto et al. (1973)이 제안한 신뢰도 (Reliability), 회복도 (Resiliency), 취약도 (Vulnerability) 개념을 기반으로, Hsu (1995)가 제안한 레질리언스 지표를 이용하였다. 이 레질리언스 지표는 저수지의 실제 용수공급량보다 용수공급량이 작은 시기를 용수부족시기로 간주하고 용수부족의 심도와 함께 부족 시간을 주요 인자로 한다. 본 연구에서는 국내 농업용 저수지의 가뭄판단 기준 (MOIS, 2021)을 준용해 평년 수위의 70%를 이수 안정성 평가의 기준으로 설정하고, 용수 부족의 심도와 지속성을 DR (Deficit ratio), ND (Number of deficit), ACD (Average continuous deficit), MCD (Maximum continuous deficit), MD (Maximum deficit) 다섯 개의 지표로 저수지의 이수 안정성을 평가하였다 (식 (15)-(19)).

저수지의 용수공급 신뢰도는 안정성 평가 기간 중 용수부족이 발생한 시간적 비율 (DR) 및 횟수 (ND)를 이용해 평가되었고, 용수부족이 발생했을 경우 다시 이수적 안정성을 갖는데 걸리는 비용 및 시간 등을 평가하는 회복도는 연속적 용수부족의 평균심도 (ACD) 및 지속일수 (MCD)를 이용해 평가되었다. 저수지의 수위가 사수위에 도달할 경우 용수공급이 불가능할 수 있어, 용수부족의 최대심도 (MD)를 이용해 취약도를 확인하였다.

$$DR(\%) = \frac{\text{Deficit period}}{\text{Total period}} \times 100\% \quad (15)$$

$$ND(\text{times}) = \sum \text{Deficit counts} \quad (16)$$

$$ACD(m) = \text{Average}(\text{Continuous deficit}) \quad (17)$$

$$MCD(\text{days}) = \text{Max}(\text{Continuous deficit period}) \quad (18)$$

$$MD(m) = \text{Max}(\text{Amount of deficit}) \quad (19)$$

III. 결과 및 고찰

1. 밭 관개량 산정

Fig. 3과 4에서는 대상저수지 신흥과 화정지구의 대표작물인 콩과 고추의 용수공급에 따른 평균 토양수분 모의결과를

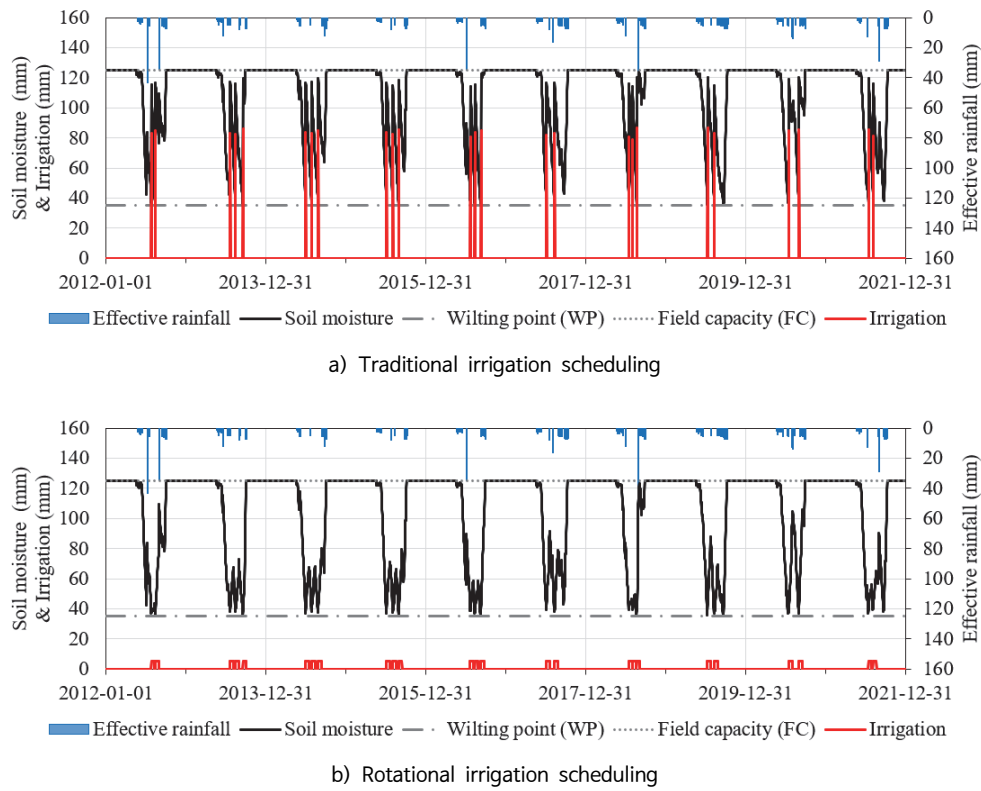


Fig. 3 Simulated soil moisture based on irrigation methods in Sinheung

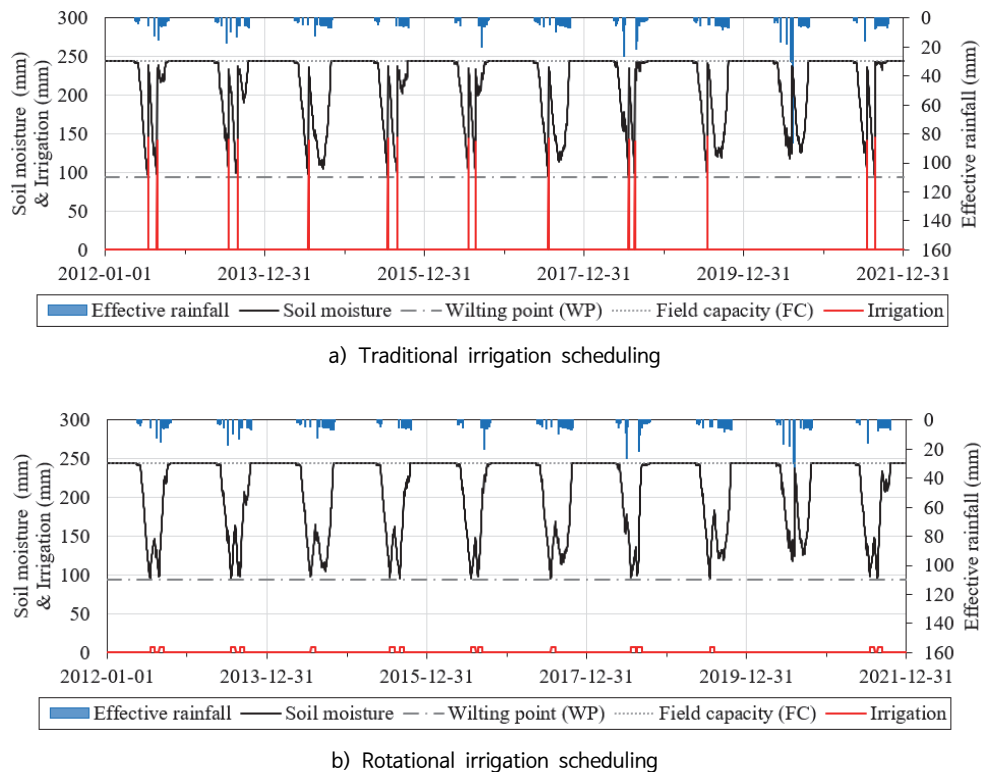


Fig. 4 Simulated soil moisture based on irrigation methods in Hwajeong

도시하였다. 윤번관개를 위한 관개 구획 개수는 대상작물에 대한 1 회 최대 관개수량과 토양 총용이수분함량을 고려하여 결정하였다. 2012-2021의 10 년 모의기간 중 1 회 최대 관개수량은 콩이 5.8 mm, 고추는 7.2 mm로 산정되었고 이를 계획 관개수량으로 설정하였다. 총용이유효수분량은 신흥지구가 89.6 mm, 화정지구는 149.5 mm로, 이를 각 작물의 계획 관개량으로 나누어 각 16, 21 개의 구획으로 구분하였다.

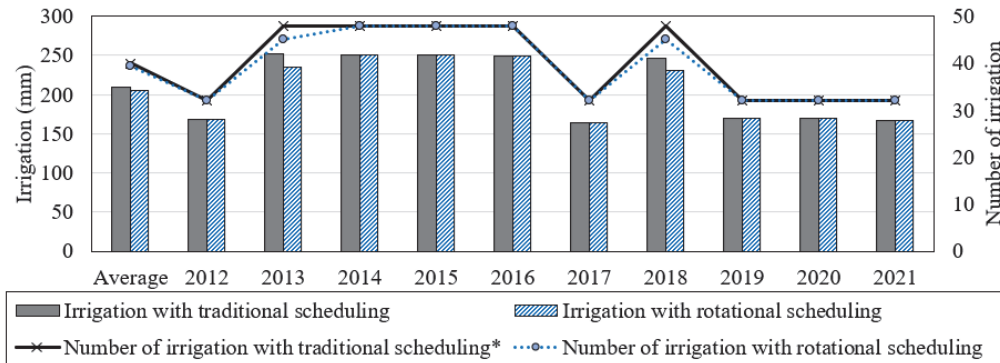
1회 밭 용수 공급량은 신흥지구의 경우 전 필지에 한번에 용수를 공급하는 관행 관개수량이 평균 83.7 mm, 윤번관개는 구획단위로 5.2 mm씩 16 회 반복하고, 화정지구는 관행 관개수량이 129.2 mm, 윤번관개는 6.2 mm씩 21 회 공급되는 것으로 모의되었다. 밭 관개 시나리오와 관계없이 신흥과 화정지구의 연평균 관개횟수는 각각 2.5회, 1.5회로 신흥지구에서 상대적으로 빈번한 관개가 필요한 것으로 나타났다. 이는 콩에 비해 고추의 근근역이 깊고, 사양토인 신흥지구에 비해 식양토인 화정지구가 총용이수분량도 컸기 때문으로 생각된다 (Table 3).

Fig. 5는 대상 저수지인 신흥과 화정지구의 대표작물인 콩

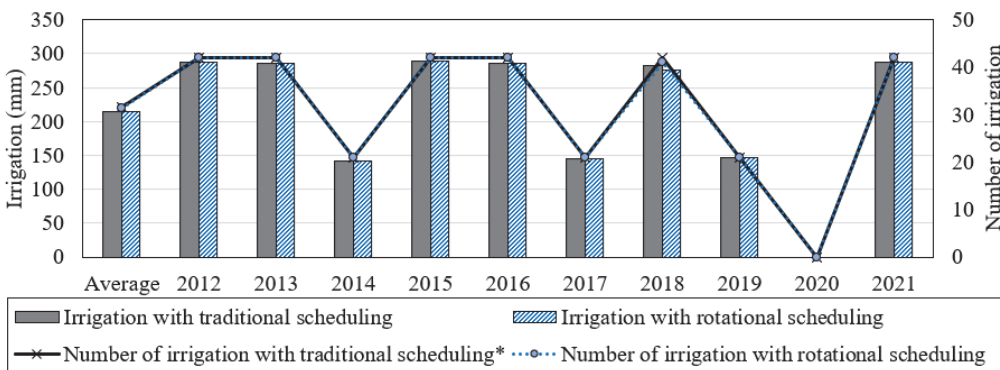
과 고추 재배에 공급된 연도별 조용수량을 보여주고 있다. 이 때, 관개횟수 산정에서 같은 용수량으로 관개할 때, 윤번관개 횟수는 관행관개와 비교하여 구획 수만큼 가중되어 산정된다. 이에 관행관개 횟수는 윤번관개의 구획수만큼 곱해주어 정량적 비교가 가능하도록 도시하였다. 연평균 조용수량은 신흥지구에서 관행관개 208.96 mm, 윤번관개 205.72 mm, 화정지구에서 관행관개 215.14 mm, 윤번관개 214.47 mm로 산정되어 두 대상지구에서 모두 관행관개 방법에 따른 용수량은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 윤번관개에서 미미하게 용수량이 작게 나타난 것은 관행관개에 비해 상대적으로 관개 기간이 길어 강우에 의한 유효수량 공급이 일부 있었기 때문으로 보인다.

2. 밭관개방법에 따른 저수지 이수 안정성 평가

Fig. 6과 7은 기존 논 관개용수 공급에 의한 저수지의 수위 (black line)와 밭 관개용수 추가 공급에 따른 저수지의 수위 (red line)를 모의한 결과를 보여주고 있다. 대상 저수지의 10 년 평균 저수위의 70%를 기준으로 관심, 주의, 경고, 심각한



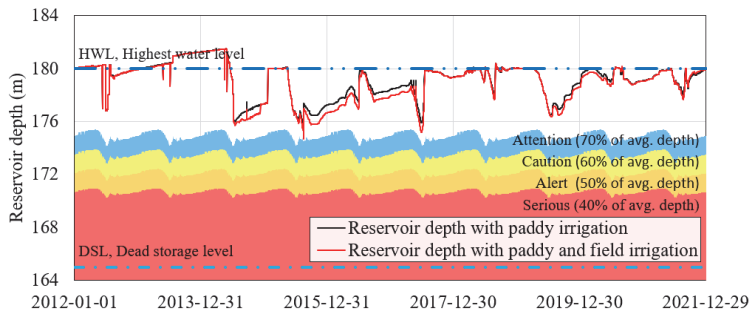
(a) Sinheung (soybean)



(b) Hwajeong (red pepper)

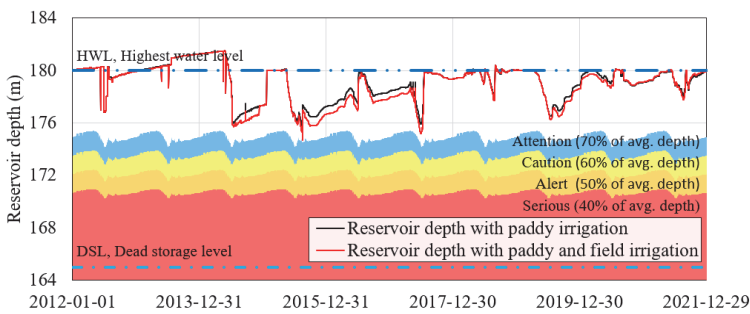
* Irrigation frequency of traditional scheduling was presented by weighting the number of irrigation districts

Fig. 5 Estimated amount of irrigation water and irrigation frequency



(a) Traditional scheduling

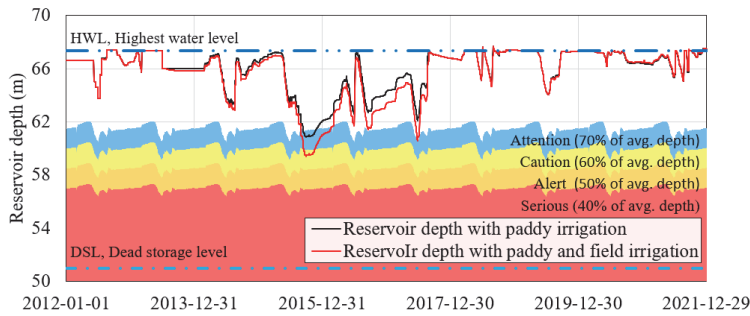
Index		Value
Reliability	DR (%)	0.00
	ND (times)	0
Resiliency	ACD (m)	0.000
	MCD (day)	0
Vulnerability	MD (m)	0.00



(b) Rotational scheduling

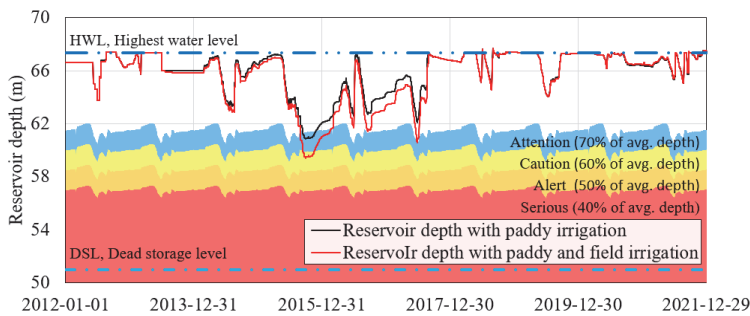
Index		Value
Reliability	DR (%)	0.00
	ND (times)	0
Resiliency	ACD (m)	0.000
	MCD (day)	0
Vulnerability	MD (m)	0.00

Fig. 6 Simulated reservoir depth and resilience indexes in Sinheung



(a) Traditional scheduling

Index		Value
Reliability	DR (%)	4.79
	ND (times)	1
Resiliency	ACD (m)	1.061
	MCD (day)	175
Vulnerability	MD (m)	1.96



(b) Rotational scheduling

Index		Value
Reliability	DR (%)	4.79
	ND (times)	1
Resiliency	ACD (m)	1.048
	MCD (day)	175
Vulnerability	MD (m)	1.95

Fig. 7 Simulated reservoir depth and resilience indexes in Hwajeong

단계로 저수지의 이수 안정성을 평가하였다. 전반적 저수지 수위는 두 대상지구 모두에서 연강수량이 적었던 2013-2017년에 낮게 나타났다.

밭 관개용수를 추가 공급할 경우 저수지의 이수 안정성은 대상 저수지 구역의 특성에 따라 다르게 나타났다. 신흥 저수지 지구는 모든 기간에 대해 저수위가 10년 평균수위의 70%보다 높게 유지되어 추가 밭 용수공급에도 안정적이었다. 반면, 화정 저수지는 모의된 10년 기간 중 가장 강수량이 적었던 2015년에 한해 저수지가 기준수위 아래로 내려갔으나, 나머지 기간에는 기준수위 이상으로 모의되었다. 화정 저수지의 경우 2015년에 가뭄이 심해 기존 논 관개용수만으로 관심단계에 진입하였고, 밭 용수를 추가로 공급하는 경우 주의단계로 저수위가 추가로 내려가는 것으로 나타났다. 화정지구는 2017년에도 밭 용수를 추가로 공급할 경우 저수위가 관심단계에 접근하는 것으로 모의되어 가뭄 시기에 밭 용수공급에 대한 관리가 필요할 것으로 나타났다.

신흥지구는 10년 모의기간에 대해 밭 용수공급에도 이수적으로 안정하여 레질리언스 지표가 모두 0이었다. 레질리언스 지표값은 두 관개 방법에 대해 유사하게 나타났다. 화정지구의 경우 신뢰도 평가에서 DR, ND 값이 4.79%, 1 회로 두

관개방법에 동일하게 나타났다. 회복도와 취약도 평가에서 ACD와 MD는 윤번관개시 관행관개에 비해 미미하게 작게 산정되었다.

3. 전작 면적 증가에 따른 저수지 이수 안정성 평가

2019년 기준으로 지구별 밭 면적이 전체 수해구역에서 차지하는 비중은 신흥지구가 84.1%, 화정지구 40.5%이었다. 미래에도 전작화가 지속된다고 가정하고 밭 면적의 비율을 2019년 기준에서 10%P씩 증가시켜 밭 관개 시나리오로 구성하고 저수지 수위 모의를 통해 이수 안정성을 평가하였다. 신흥지구는 이미 80% 이상의 경지가 밭으로 이용되고 있고 밭 면적이 추가로 수해면적 전체 수준으로 증가하더라도 저수지로부터 밭 용수공급이 안정적일 것으로 나타났다.

화정지구는 밭 용수 공급에 따라 10년의 모의기간 중 2015-2017년 동안 저수위가 기준수위 이하로 내려가는 용수 부족이 발생하였고 Fig. 8에 저수지 수위모의 결과를 도시하였다. 전반적으로 밭 전작 면적 증가에 따른 용수공급량의 증가와 이에 따른 저수지 수위의 저하로 용수부족의 기간과 강도가 심화되었다. 이러한 용수부족은 9월에서 12월 사이에 집중되는 경향을 보였고, 2014년 가을부터 전국적으로 시작된

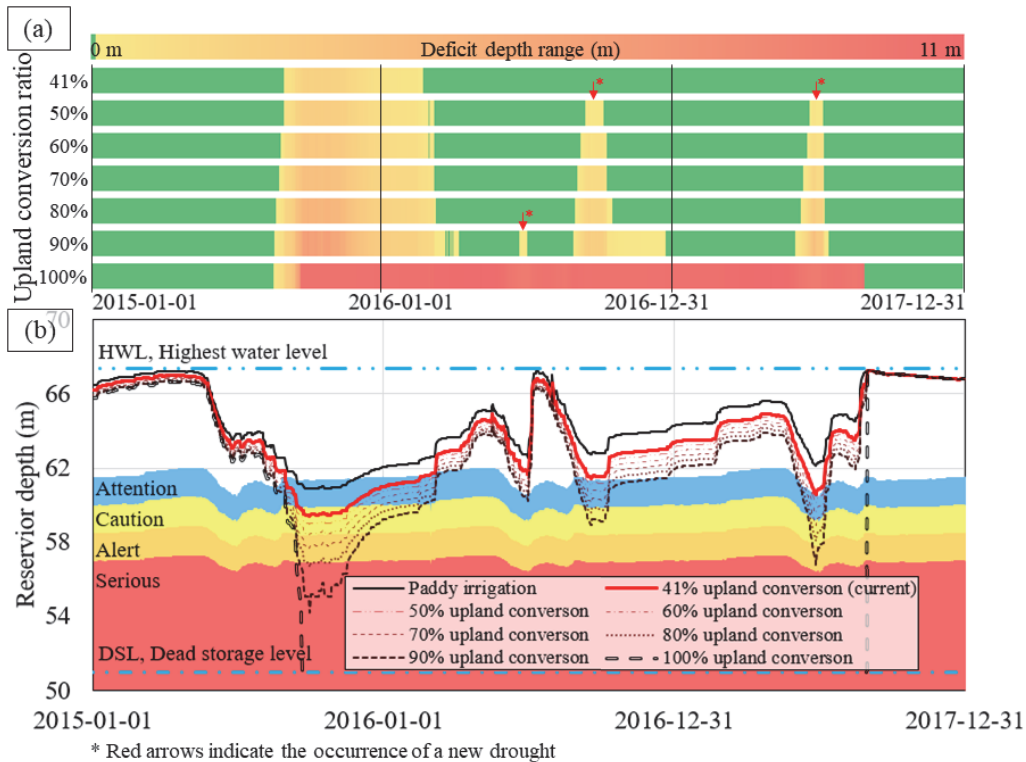


Fig. 8 (a) Deficit duration and depth bar chart and (b) simulated reservoir depth in Hwajeong following the upland conversion ratio

강수량의 부족이 이듬해 봄 가뭄에 더해진 2015년의 경우 특히 심각하게 나타났다. (Nam and Choi, 2014). 특히 2015년의 경우 화정지구 수혜면적이 80% 이상이 전작화될 경우 저수지 수위가 심각단계에 진입하고 전부 전작으로 전환될 경우 저수위가 사수위 이하로 떨어져 관개용수 공급이 불가능할 것으로 나타났다.

화정지구에 대해 전작화 면적 증가에 따른 레질리언스 지표의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 저수지의 이수 신뢰도는 용수부족의 횟수인 ND와 용수부족의 시간적 비율인 DR을 지표로 평가되었다. ND는 화정지구의 2019년 전작전환율 41%에서 1을 보여 10년 한발을 기준으로 현재의 밭 관개용수 공급이 가능한 것으로 확인되었다. 다만 전작전환율이 높아짐에 따라 ND는 1을 초과하여 미래 전작화가 지속될 경우 추가 관개용수 확보 방안 마련이 필요할 수 있었다. DR은 전작전환율이 50%, 90%에서 급격히 증가하는 경향을 보였는데, 이는 기존 용수부족 사상의 심화와 함께 새로운 용수부족 사상이 발생함에 따른 결과였다 (Fig. 8 (a), red arrow).

회복도 평가에서 용수부족의 최대 지속일수인 MCD는 2015년 9월에 발생한 가뭄 사상에 따라 발생한 현상으로 전작 면적 증가에 따라 지속일수도 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 연속적 용수부족의 평균 심도인 ACD는 일부 전작전환율 90%에서 얇은 가뭄 사상의 발생횟수에 증가에 따라 감소하였지만, 전반적으로 전작화가 진행됨에 따라 증가하는 경향을 확인하였다. 화정지구의 경우 MCD의 발생 시기인 5월 중순부터 10월 중순이 대표작물인 고추의 재배기간과 겹쳐 밭 용수공급에 취약한 시기로 평가되었다. 이에 이수 안정성을 회복 가능한 범위 내에서 밭 관개용수 공급이 가능하도록, 용수부족의 평균 심도 (ACD)의 범위를 농업용 저수지 가뭄의 관심단계 범위인 1.49 m내에서 밭 관개용수를 공급하는 등의 방안 마련이 필요할 수 있다.

취약도 평가에서 최대 용수부족의 심도인 MD는 전작전환율이 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 밭 면적의 증가에 따라 관개 용수량은 선형적으로 증가하

여 저수지 수위를 낮추는데, 저수지 수위-내용적 곡선의 특성상 낮은 수위에서 동일 취수량에 대해 수위저하가 크기 때문인 것으로 보인다. 특히, 전작전환율 80%에서 MD는 4.7 m로 산정되었는데, 이는 심각단계에 해당하는 저수위인 4.5 m를 초과하여 80% 이상의 지구가 전작화될 경우 용수공급이 어려울 수 있는 것으로 평가되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 농업용 저수지 수혜지구 중 논·밭의 전작화가 진행될 지구에 대해 기존 논 용수에 추가로 밭 용수를 공급할 경우 저수지 수위를 모의하고 레질리언스 지표를 이용해 이수 안정성을 평가하고자 하였다.

관개와 운반 관개의 두 관개 시나리오에서 2019년 기준 밭 경지에 밭 용수를 추가로 공급할 경우 저수위 저하가 모의되었다. 전반적 저수위는 농업용 저수지의 가뭄 기준인 평균 저수위의 70% 이하로 하강하지 않아 저수지를 용수원으로 이용한 밭 용수공급이 가능한 것으로 평가되었다.

미래 전작화가 지속될 경우 이미 80% 이상의 경지가 밭으로 이용되고 있는 신흥지구는 밭 면적이 수혜면적 전체 수준으로 증가하더라도 안정적 밭 관개가 가능하였다. 화정지구는 전작전환율 50% 이상에서 ND 값은 1 이상으로 10년 한발 기준 신뢰도를 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다. 저수지의 이수 안정성은 전작전환율 80% 이상에서 취약도가 급격하게 증가해 밭 용수공급이 어려울 수 있었고, 이수 안정성을 회복 가능한 범위 내에서의 제한적 밭 용수공급 등의 추가적인 대책이 필요할 수 있었다.

본 연구는 최근 저수지 수혜구역에서 활발하게 논·밭의 전작 전환이 이뤄지는 추세를 고려해서 기존 논 용수공급에 밭 용수를 추가 공급할 경우의 농업용 저수지의 이수 안정성을 평가하였다. 농업용 저수지마다 상류 유역면적이나 용수 요구 조건이 달라 수혜지구 특성을 고려하여 밭 용수공급 방안을 마련할 필요가 있고, 추후 연구로 대상 지역별로 다양한 밭작물을 고려하여 저수지 수위 모의 및 이수 안정성 평가가 요구된다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반및재해대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (과제번호: 321070-04).

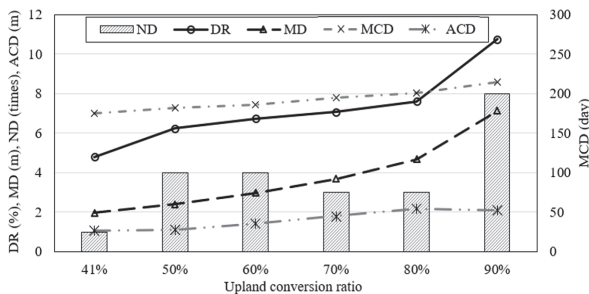


Fig. 9 Resilience indexes based on the upland conversion ratio

REFERENCES

1. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper* 56. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
2. Chae, G., H. Kim, Y. Im, and B. Kim, 2016. Research on agricultural damage measurement caused by drought. *Korea Rural Economic Institute*: 1-78. (in Korean).
3. Chung, H. et al., 1999. Irrigation and Drainage Engineering. Dongmyungsa.
4. Hashimoto, T., J. R. Stedinger, and D. P. Loucks, 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1): 14-20. doi:10.1029/WR018i001p00014.
5. Holling, C. S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4(1): 1-23. doi:10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
6. Hong, S., K. Jung, C. Choi, M. Jang, Y. Kim, Y. Sonn, and S. Ha, 2010. Estimation of SCS runoff curve number and hydrograph by using highly detailed soil map (1: 5,000) in a small watershed, Sosu-myeon, Goesan-gun. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43(3): 363-373. (in Korean).
7. Han, C., and T. Lee, 2010. Seasonal variation and storage period of rainwater quality in Changwon. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 32(5): 461-468. (in Korean).
8. Hong, R., J. Park, S. Jang, H. Lee, and I. Song, 2022. Optimization of storage tank installation locations for pipeline water supply using genetic algorithm. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 64(6): 43-53. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2022.64.6.043.
9. Hsu, S. K., 1995. Shortage indices for water-resources planning in Taiwan. *Journal of Water Resources Planning and Management* 121(2): 119-131.
10. Hwang, S., S. Kim, K. Kim, S. Kim, H. Lee, J. Kwak, and M. Kang, 2020. Development of a framework for evaluating water quality in estuarine reservoir based on a resilience analysis method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(5): 105-119. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2020.62.5.105.
11. Jang, S., J. Park, H. Shin, H. Kim, R. Hong, and I. Song, 2020. Economic Analysis of Upland Crop Irrigation Between Individual and Collective Well Water Supply. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 23(3): 192-207. (in Korean). doi:10.11108/kagis.2020.23.3.192.
12. KOSTAT (Statistics Korea), 2019. Survey of agricultural area.
13. KOSTAT (Statistics Korea), 2022. Food Grain Consumption Survey Report in 2021. (in Korean).
14. KOSTAT (Statistics Korea), 2022. Cultivated area survey results in 2021. (in Korean).
15. Kim, M., and C. Park, 2000. A study on the risk assessment of small reservoirs using reliability analysis methods. *Journal of Korea Water Resources Association* 33(1): 15-30.
16. Kim, S., J. Lee, and P. Kim, 2005. Securement of upland irrigation water in small dams through periodical management of storage level. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(2): 3-12. (in Korean).
17. Kim S., Y. Park, J. Jeong, and H. Lee, 2017. Analysis of effects fro water quality improvement considering volume of stroage facilities and LID techniques. *Journal of Korean Society of Environmental Technology* 18(3): 210-221. (in Korean).
18. Kwon, H., W. Nam, and G. Choi, 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* 62(2): 111-120. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2020.62.2.111.
19. Kwon, C., J. Park, S. Jang, H. Shin, and I. Song, 2021. Analysis of land cover change from paddy to upland for the reservoir irrigation districts. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 63(6): 27-37. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2021.63.6.027.
20. Lee, H., 2018. A new alternative to the 「Paddy and Other Crop Cultivation Support Project」: Focusing on the Generalization of Paddy Fields for the Multilateral Use of Paddy Fields. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(4): 7-15. (in Korean).
21. McMahon, T. A., A. J. Adeloje, and S. L. Zhou, 2006. Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology* 324: 359-382. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.09.030.
22. MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2021. National drought information statistics in 2019.
23. Moon, G., J. Yoo and T. Kim, 2014. Comparing calculation techniques for effective rainfalls using

- NRCS-CN method: focused on introducing weighted average and slope-based CN. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 34(4): 1171-1180. (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2014.34.4.1171.
24. Nam, W. H., and J. Y. Choi, 2014. Development of an irrigation vulnerability assessment model in agricultural reservoirs utilizing probability theory and reliability analysis. *Agricultural Water Management* 142: 115-126. doi:10.1016/j.agwat.2014.05.009.
 25. Nam, W., E. Hong, M. Jang, and J. Choi, 2014. 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.
 26. National Institute of Agricultural Sciences (NAAS), 2017. Estimation of crop factor and standard evapotranspiration calculation method for field crops. (in Korean).
 27. National Institute of Agricultural Sciences (NAAS), 2018. Technology for field crop irrigation (according to soil, crop, and region).
 28. Parsons, L. R., B. Sheikh, R. Holden, and D. W. York, 2010. Reclaimed water as an alternative water source for crop irrigation. *HortScience* 45(11): 1626-1629.
 29. Park, J. Y., I. Jung, K. Lee, and S. Kim, 2013. Development of operating rule curve for multipurpose water supply in heightened agricultural reservoir. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(4): 1389-1400. (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2013.33.4.1389.
 30. Park, K., 2005. A study of reliability index correlation analysis in reservoir water-supply. *Journal of the Environmental Sciences* 14(3): 289-296. (in Korean).
 31. SCS (Soil Conservation Service), 1972. National engineering handbook, Section 4, Hydrology. US 444 Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC.
 32. Simonovic, S. P., and R. Arunkumar, 2016. Comparison of static and dynamic resilience for a multipurpose reservoir operation. *Water Resources Research*, 52(11): 8630-8649. doi:10.1002/2016WR019551.
 33. Zhang, Y., K. Han, K. Jung, H. Cho, M. Seo, and Y. Sonn, 2017. Study on the standards of proper effective rooting depth for upland crops. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 50(1): 21-30. (in Korean). doi:10.7745/KJSSF.2017.50.1.021.