

관정연계이용 기술 적용을 위한 상습가뭄지역 지하수 수요-공급량 평가

이병선¹ · 정찬덕¹ · 이규상¹ · 하규철² · 이종화³ · 송성호^{1*}

¹한국농어촌공사 농어촌연구원

²한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부

³쥬지오그린21

Estimation on an Amount of the Groundwater Demand and Supply for Applying the Well-network System (WNS) to a Frequent-drought Area

Byung Sun Lee¹ · Chanduck Jeong¹ · Gysang Lee¹ · Kyoochul Ha²

Jong-Hwa Lee³ · Sung-Ho Song^{1*}

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

²Climate Change Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³GeoGreen21 Co., Ltd.

ABSTRACT

This study was conducted to estimate groundwater demand and supply for agricultural activities in a frequent-drought area that requires implementation of optimal distribution plan utilizing the well-network system (WNS). The WNS has been considered as a viable strategic way of supplying groundwater to farmlands by connecting groundwater wells physically or virtually. The study area heavily relied on groundwater resources for irrigation up to 53% due to a lack of surface water resources. Two kinds of methods, HOMWRS software and FAO approach, were used for estimating irrigation water requirements for paddy and upland fields, respectively. During the latest 10 years (2010~2019), the water requirements was estimated to be 1,106 m³/day. The requirements notably increased to 1,121~4,004 m³/day during active farming season (May to September), which exceeded the total yield capacity of pre-existing groundwater wells (2,356 m³/day) in the area. Detailed and definite determination for groundwater demand and supply helped to determine optimal scale parameters of WNS. The WNS has achieved more balanced distribution of groundwater resources for irrigation over the study area.

Key words : Well-network system, Groundwater, Irrigation water requirement, Optimal distribution

1. 서 언

기후변화는 가뭄, 홍수 등 극한 기후사상과 이에 따른 물 문제를 유발하는데, 2021년 여름에 발생한 서유럽의 폭우, 알래스카의 이상 고온, 북미 서부의 가뭄(폭염) 등

이병선 : 한국농어촌공사 농어촌연구원, 책임연구원
정찬덕 : 한국농어촌공사 농어촌연구원, 수석연구원
이규상 : 한국농어촌공사 농어촌연구원, 연구위원
하규철 : 한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부, 책임연구원
이종화 : 쥬지오그린21, 팀장
송성호 : 한국농어촌공사 농어촌연구원, 연구소장
E-mail: shsong@ekr.or.kr

Received : 2022. 02. 10 Reviewed : 2022. 02. 28

Accepted : 2022. 03. 30 Discussion until : 2022. 06. 30

은 대표적인 사례이다(JA, 2021). 기후변화는 농어촌지역 수자원의 가용성에도 차질을 일으키며, 이로 인해 작황의 감소, 농가소득 불안정 및 농산물 수급 불균형에 따른 식량 안보 문제 등으로 이어질 수 있다(Lim et al., 2015). 우리나라도 기후변화로 인한 극사상(severe event)이 빈번하게 발생하고 있으며, 서남부지역(경기도, 충청남도 및 전라북도)은 2010년 이후 강수의 지역적 편차 확대와 더불어 논농사에 영향을 미치는 봄 가뭄 빈도가 증가하고 있다(MOE and NDIAC, 2018).

지하수는 가뭄 발생 시 농업용수 공급에 적합한 수자원이다. 이와 관련하여 가뭄 수요에 대응한 지하수 공급기술로, 인공함양(KIGAM, 2011; KRC, 2014, 2017a; Moon et al., 2016; MSIT and KIGAM, 2013), 지하댐(KRC,

2017b, 2020, 2021; Sokcho-si, 1988, 2019; Yong et al., 2017), 방사상 집수정(Hong et al., 2016), 관정연계이용 (KIGAM et al., 2021) 등의 기술이 실용화되고 있다. 이

중 관정연계이용(WNS; well-network system) 기술은 소유역 내 관정들의 연계를 통한 취수 효율 극대화로, 물이 부족한 구역과 풍부한 구역 간의 지하수를 효율적으로 배

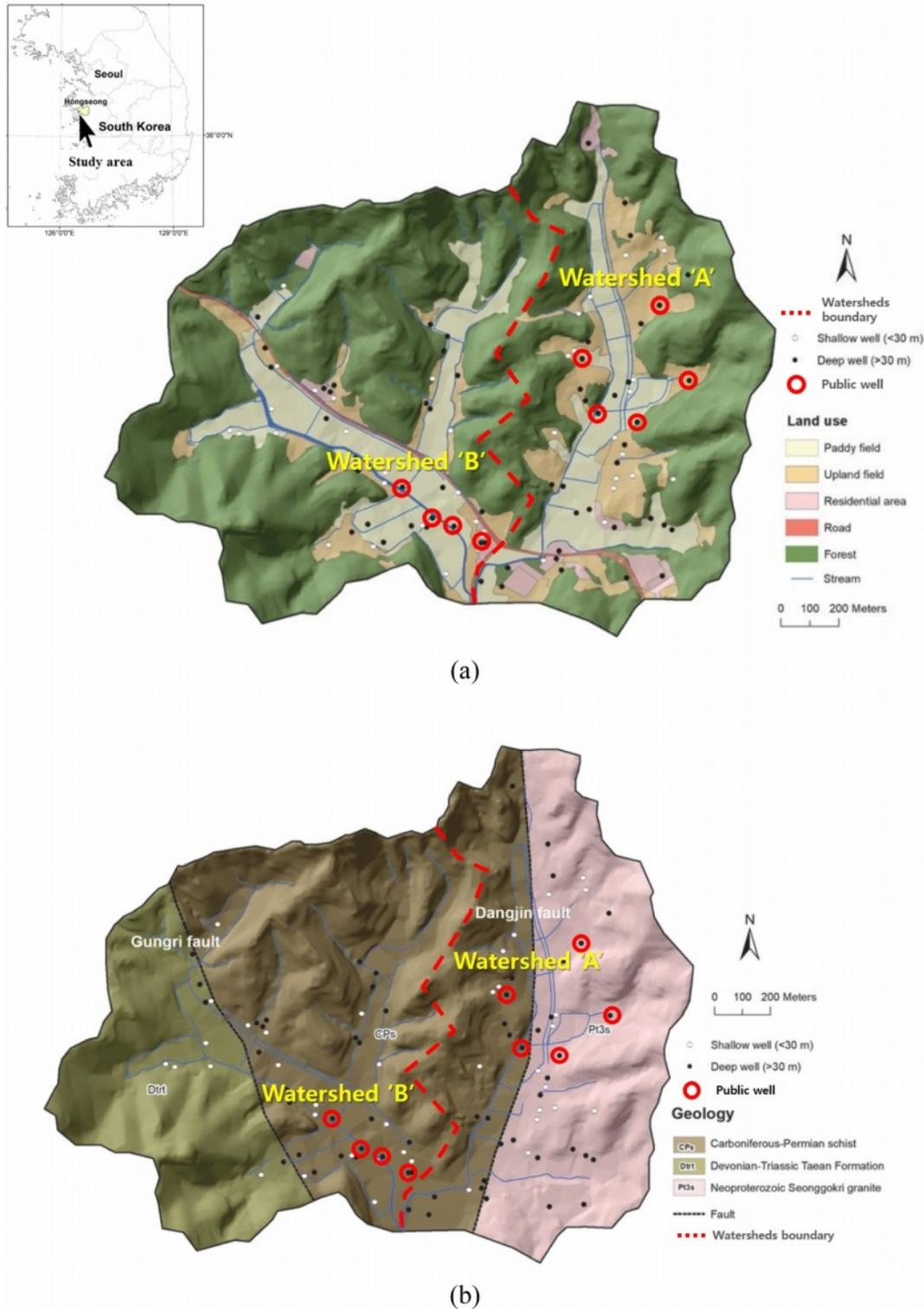


Fig. 1. Study area with (a) a distribution of pre-existing groundwater wells and (b) geological map (modified after Ha et al., 2021).

분하는 기술이다. 이때 관정들에 자동 양수제어장치(스마트 인버터)를 설치하고, 무선통신 네트워크로 연결하여, 물이 풍부한 지역의 지하수를 물이 부족한 지역으로 최적 배분을 실현한다(KIGAM et al., 2021). 특히 관정연계이용 기술은 관정 간 동시 양수에 따른 우물간섭 현상을 센싱 기술로 차단하므로, 개별 관정의 양수 효율을 극대화 할 수 있다. 따라서 소유역 내의 지하수 수량을 최대한 확보할 수 있어, 가뭄에 의한 농작물 피해 예방을 통한 농민의 소득 보전이 가능하다(Ha et al., 2021).

이러한 관정연계이용 시설의 규모를 설계하기 위해서는, 해당 소유역의 지하수 수요량과 기존 관정으로부터의 지하수 공급 가능량 분석이 선행되어야 한다. 지하수 수요량에는 소유역 내 농경지의 재배작물별 관개용수 필요수량, 생활용수 원단위 수요량 및 비농업시설(공장, 물류창고 등)의 수요량이 포함된다. 반면, 지하수 공급량은 각 관정에서 최대 공급가능한 지하수 수량 및 신규 관정개발이 요구되는 수량 등이 종합적으로 검토되어야 한다. 이후, 상대적으로 지하수 공급 가능량이 풍부한 지역에서 부족한 지역으로 공급 가능한 지하수 수량을 결정하고, 이를 토대로 가장 경제적인 방법으로 관정연계이용 시설을 설계하여야 한다.

이 연구는 2010년 이후 상습적인 봄 가뭄이 발생하고 있는 충청남도 홍성군 소재 소유역에 대하여, 관개용수 필요수량과 기설관정의 지하수 공급 가능량 분석을 통한 관정연계이용 시스템 최적화 설계 자료 제공을 목적으로 수행되었다.

2. 연구지역

연구지역은 충청남도 홍성군 서부면에 위치하며, 해발고도 100 m 이하의 구릉성 산지와 평탄한 농경지로 구성되어 있다(Fig. 1a). 지질은 선캠브리아기의 결정편암계와 편마암, 이를 신생대 제4기 충적층이 부정합으로 덮고 있다(Lee and Kim, 1963; Fig. 1b). 또한 연구지역 좌우로 궁리단층과 당진단층이 신원생대 성곡리 화강암, 석탄기-페름기 편암, 대본기-트라이아스기 태안층을 서로 구분하고 있다. 신원생대 성곡리 화강암은 우백질 화강암으로 주로 구성되며, 괴상 혹은 미약한 엽리를 보이고, 석탄기-페름기 편암은 흑운모-석영 편암과 변성사암으로 구성된다. 연구지역의 서쪽에 분포하는 대본기-트라이아스기 태안층은 변성사암 및 천매암으로 구성되며, 괴상 혹은 점이층리를 보이는 석영질 변성사암이 우세하게 발달한다(Kim et al., 2014). 시추조사 결과 지표로부터 토양층, 풍화대,

기반암(편암 내지 편마암)으로 구성되며, 토양층과 풍화대의 두께는 각각 6.0~7.5 m 및 2.0~2.3 m로 나타났다(Ha et al., 2021).

기설 관정으로부터 지하수 공급이 농경지에 원활하게 이루어지는지 여부를 토대로, 상대적으로 원활하지 못한 동쪽의 A수계와 상대적으로 원활한 서쪽의 B수계로 구분된다(Fig. 1). 또한 이 지역은 하천수 발달이 빈약하여 관개용수 대부분을 지하수에 의존하는데, 공공관정에 대한 관개용수 의존도는 53%이다(KIGAM et al., 2021).

VELAS(Vegetation, landcover, and soil water dynamics) 모형을 이용한 과거 18년(2001-2018)간 물수지 분석 결과, 평균 강수량은 1210.7 mm/yr, 지하수 함양량은 196.9 mm/yr(강수량의 약 14.9%), 차단량은 150.6 mm/yr(12.7%), 지표유출량은 272.9 mm/yr(21.7%), 증발산량은 mm/yr 591.6(51.1%)로 나타났다(Ha et al., 2021). 총 18년 기간 중의 연간 강수량의 편차(799.1~1750.8 mm/yr)가 매우 크게 나타남에 따라, 지하수 함양률 변동폭(3.6~28.2%)도 크게 분석되었다. VELAS 모형은 완전분포형 지표수-지하수 통합 유동 모델로, 식물 성장을 고려한 토지피복의 변화와 그에 따른 일단위 토양 수분 변화의 정량적인 모사를 통하여 토양 수분의 변화가 다른 물수지 요소들에 미치는 영향을 계산한다. 따라서, 식물의 생장에 따른 지표환경 및 증발산의 변화도 고려가 가능하므로, 지표유출량, 증발산량 및 함양량을 보다 정밀하게 계산할 수 있다(Ha et al., 2021).

소유역의 면적은 약 290 ha이며, 지적도에 제시된 농경지는 총 1,164개 필지이다. 과거 10년(2010~2019)간 경지면적(약 52 ha, 341필지)은 총면적의 약 18% 내외로, 논과 밭이 각각 약 11%(약 33 ha, 172필지)와 약 7%(약 19 ha, 169필지)에 해당된다(Table 1). 수계별로 살펴보면, A수계 경지면적은 약 27 ha(177필지)로 총면적의 약 9% 내외이고, 논과 밭이 각각 약 5%(약 14 ha, 75필지)와 약 5%(약 13 ha, 102필지)에 해당된다. B수계 경지면적은 약 25 ha(164필지)로 총면적의 약 9% 내외이고, 논과 밭이 각각 약 6%(약 19 ha, 97필지)와 약 2%(약 6 ha, 67필지)에 해당된다. 소유역 전반에 걸쳐 최근 10년간 벼 재배면적은 전체 농경지의 60~64%(약 32~33 ha)로 가장 넓다. 밭 작물은 콩(6~15%; 3~8 ha), 깨(8~11%; 4~6 ha), 고추(3~9%; 2~5 ha), 고추/깨 윤작(2%; <1 ha), 수수(2~3%; 1 ha) 등으로 구성되며, 최근 들어 단호박, 마늘, 살구, 파, 표고버섯, 호박 등 종류가 다양해지는 추세이다(Table 2).

Table 1. Change of farmland area in the study area from 2010 to 2019(unit : m²)

Year	Average	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Total	518,591	518,624	518,624	516,426	518,624	516,426	518,624	516,426	516,946	516,426	528,767
Paddy fields	326,888	331,392	331,392	331,392	331,392	331,392	331,392	323,487	319,015	319,015	319,015
Uplands	191,703	187,233	187,233	185,035	187,233	185,035	187,233	192,940	197,931	197,411	209,752

Table 2. Change of farmland area per each crop in the study area from 2010 to 2019(unit : m²)

Crop	Crop rotation	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Paddy fields		331,392	331,392	331,392	331,392	331,392	331,392	323,487	319,015	319,015	319,015
Apricot										1,194	1,194
Bean		79,394	47,000	78,482	45,300	77,196	43,034	75,038	35,154	69,274	33,563
Bean and grape	Yes									803	
Bean and sesame	Yes	7,199	7,199	7,199	6,411	6,411	6,411	6,411	6,411	6,411	6,411
Bean and sweet potato	Yes									2,106	
Corn		3,756	3,756	3,756	3,756	3,756	3,756	3,756	3,756	3,756	3,756
Corn and sesame	Yes	4,463	4,463	4,463	4,463	4,463	4,463	4,463	4,463	4,463	4,463
Garlic											1,034
Jujube					33	33	33	33	33	33	33
Millet		13,017	13,017	13,017	13,017	13,017	13,017	13,017	13,017	13,017	13,017
Oak mushroom								7,905	7,905	7,905	7,905
Persimmon and apricot	Yes								645	645	645
Pumpkin							2,086	2,086	3,483	3,483	3,483
Uplands											
Red pepper		16,177	47,170	17,333	45,035	18,279	42,297	16,177	44,604	16,978	46,856
Red pepper and sesame	Yes	8,327	8,327	8,327	8,327	8,327	8,327	8,327	8,327	8,327	8,327
Red pepper and sweet potato	Yes								2,106		3,137
Red pepper, bean, and sesame	Yes	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376
Seasoned aster		992	992	992	3,480	3,480	8,807	8,807	8,807	8,807	7,355
Sesame		52,454	58,892	52,947	57,129	52,484	57,655	47,202	52,733	40,766	52,390
Sesame and grape	Yes										803
Sesame and sweet potato	Yes	2,208	2,208	2,208	2,208	2,208	2,208	2,208	2,208	2,208	3,464
Sweet potato		595		595		595		945	6,734	8,183	7,253
Sweet pumpkin											5,339
Welsh onion			256		256		256		6,238	5,982	6,238

3. 연구방법

연구지역 관개용수 필요수량은 연구지역 논과 밭의 필요수량을 각각 산출한 후 합산하였다. 논에서의 관개용수 필요수량은 한국농어촌공사의 HOMWRS(Hydrological operation model for water resources system, ver. 2.11)

프로그램(KRC, 2019)을 이용하여 산출하였다. HOMWRS는 관개용수 실무에서 널리 쓰이는 모형으로, 관개용수 공급계획을 수립하기 위하여 저수지로부터 유역 유입량, 관개용수 필요수량, 물수지 분석 및 단위용수량 산정 등을 구현하도록 제작된 프로그램이다. 밭에 대한 관개용수 필요수량은 국제연합식량기구(Food and agriculture organi-

zation of the united nations, FAO)에서 제시한 발작물별 원단위 수요량 계산방법을 이용하여 산출하였다(Allen et al., 1998).

3.1. 논외 관개용수 필요수량

논에 대한 관개용수 필요수량은 증발산량과 삼투량을 더한 후 유효우량을 빼는 방법으로 산출된다(KRC, 2019). 여기서 증발산량은 수체나 토양에서 수증기 형태로 대기 중으로 방출되는 증발량과 식물 표면을 통해 방출되는 증산량의 합이다. 삼투량은 논 토양 아래 지하수 대수층으로 침투되는 수량이며, 유효우량은 논에 내린 강수가 관개기간 중 논에 남아 이용되는 수량이다. HOMWRS는 Penman(1948)의 잠재증발산량(potential evapotranspiration) 산출 방법(식 (1))을 이용하여 당일의 기상상태에 따라 대상 유역의 잠재증발산량을 산출하고, 벼의 생육기별 잠재증발산량과 실제증발산량의 비율인 작물계수(crop coefficient, K_c)를 이용하여 실제증발산량(actual evapotranspiration)을 산출한다. 아래의 식 (1)에서 E_{mass} 는 증발산량(mm/day), m 은 포화증기압곡선의 기울기(kPa/K), R_n 은 순복사조도량(MJ/m²day), γ 는 습도상수(kPa/K), U_2 는 풍속(m/sec), δe 는 증기압 부족량(kPa), λ_v 는 증발잠재열(MJ/kg)이다.

$$E_{mass} = \frac{mR_n + 6.43\gamma(1 + 0.536U_2)\delta e}{\lambda_v(m + \gamma)} \quad (1)$$

삼투량은 벼의 생육기별 논 토양의 함수조건에 따라 산출된다. HOMWRS에서의 유효우량은 60 mm 담수심법에 의해 산출된다(KRC, 2019). 벼의 생육기별(묘대정지기, 묘대기, 묘대·이앙기, 이앙·본답기 및 본답기) 관개용수 필요수량은 해당 시기별 물 관리 방식을 고려하여 각기 다른 방정식으로 산출한다(Table 3). 여기서 묘대·정지기(seeding bed preparation periods)는 논물 가두기를 실시하는 기간, 묘대기(seeding periods)는 볍씨를 못자리에 파종하여 모를 키우는 기간, 묘대·이앙기(seeding and transplanting periods)는 못자리에서 자란 모를 논에 옮겨

심는 시기, 그리고 이앙·본답기(transplanting and growing periods)는 이앙 후 논에서 벼를 생육하는 기간, 본답기(growing periods)는 논에서 벼가 안정적으로 성장하는 기간을 의미한다.

논외 관개용수 필요수량은 HOMWRS 프로그램을 이용하여 5개 생육기별(묘대정지기(4월 초순), 묘대기(4월 중순~5월 중순), 묘대·이앙기(5월 중순~5월 하순), 이앙·본답기(6월 초순), 및 본답기(6월 중순~9월 중순))별로 산출공식을 이용하여 산출하였다(Table 3). 여기서 $Req(t)$ 는 각 시기별 필요수량(m³), I 는 일 침투량(mm/day), WR_n 는 못자리 정지용수량(mm), D_n 은 못자리 정지일수(day), A_n 은 묘대면적(ha), $ET_n(t)$ 는 증발산량(mm), WR 는 이앙용수량(mm), A_t 는 이앙재배 면적(ha), D_t 는 이앙일수(day)이다. 이후, 벼가 자라는 4월 중순부터 9월 중순까지는 각 생육기의 벼 작물계수를 생육기별 요구수량에 곱하여 각 생육기의 논 수요량을 산출하고 이를 최종 합산하였다(Table 4). 잠재증발산량 산출에 사용된 기상자료는 연구지역에서 가장 가까운 서산관측소의 기온, 강수, 습도, 일사량, 증발량, 풍속이다.

3.2. 밭외 관개용수 필요수량

밭작물 성장에 영향을 미치는 수분량은 증발산량, 침투량, 모관상승량, 유효우량 등이지만, 밭관개 계획 시에는 편의상 증발산량만을 계산하여 밭외 관개용수 필요수량과 동일한 것으로 산정한다(Chung et al., 2007; Song et al., 2018).

밭외 관개용수 필요수량 산출을 위하여 FAO에서 표준으로 선정한 FAO Penman-Monteith(Allen et al., 1998) 공식을 이용하여 해당지역의 기준작물 증발산량(reference crop evapotranspiration, ET_0)을 산출하였다(식 (2)). 여기서 기준작물은 잔디(grass)이다.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

Table 3. Equations provided from HOMWRS software to determine agricultural water requirements on paddy fields for each rice-growing periods (modified after KRC (2019))

Period	Equations
Seeding bed preparation	$Req(t) = (I + WR_n / D_n) \times A_n$
Seeding	$Req(t) = (I + ET_n(t)) \times A_n$
Seeding and transplanting	$Req(t) = (I + ET_n(t)) \times A_n + (WR_t / D_t / 2) \times A_t$
Transplanting and growing	$Req(t) = [I + ET_n(t) + (WR_t / D_t / 2)] \times A_t$
Growing	$Req(t) = (I + ET_n(t)) \times A_t$

Table 4. Crop coefficients of paddy provided from HOMWRS software per every 10-day sequential period (modified after KRC (2019))

Period	April		May			June			July			August			September	
	Mid*	Late	Early	Mid*	Late	Early	Mid*	Late	Early	Mid*	Late	Early	Mid*	Late	Early	Mid*
Crop coefficient	0.56	0.56	0.56	0.56	0.75	0.95	1.06	1.09	1.17	1.39	1.53	1.58	1.47	1.42	1.32	1.32

* Mid: Middle

Table 5. Crop coefficients of upland crops provided from FAO (modified after Allen et al. (1998))

Crop	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Bean					0.58	0.88	0.88	1.00	0.93			
Corn					0.68	1.09	1.20	0.75				
Garlic	1.00	0.70	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	0.70	0.70	0.70	1.00	1.00
Grape				0.30	0.30	0.85	0.85	0.45	0.45			
Millet					0.70	1.00	1.00	0.55				
Oak mushroom				0.35	1.10	1.10	0.25	0.25				
Pumpkin				0.50	1.00	0.80	0.50	1.00	0.80			
Red pepper					0.53	0.96	1.06	1.06	0.82			
Seasoned aster					0.70	1.00	1.00	0.95				
Sesame				0.35	1.10	0.25	0.35	1.10	0.25			
Sweet potato					0.67	1.08	0.99	0.82	0.82			
Sweet pumpkin					0.50	1.00	0.80	0.50	1.00	0.80		
Welsh onion	1.00	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00		0.70	1.00	1.00	0.70	

여기서 ET_0 는 기준작물 증발산량(mm/day), R_n 은 작물표면의 순일사량(MJ/m²/day), G 는 지중열류량(MJ/m²/day), T 는 지표 상부 2 m 높이의 일평균기온(°C), U_2 는 지표 상부 2 m 높이의 평균풍속(m/sec), e_s 는 포화수증기압(kPa), Δ 는 수증기압 곡선 기울기(kPa/°C), γ 는 건습계상수(kPa/°C), P 는 대기압(kPa), λ 는 잠열(MJ/kg)이다.

이 후, 기준작물 증발산량(ET_0)에 각 발작물의 작물계수(K_c) 및 재배면적(A)을 곱하여 각 작물별 증발산량(ET_c)을 산출하였다(식 (3)).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \times A \quad (3)$$

각 발작물의 증발산량을 합치면 연구지역 모든 발작물의 증발산량(ΔET_c)이 되고, 이를 실제 밭의 관개용수 필요수량과 동일한 것으로 고려하였다(Allen et al., 1998; Song et al., 2018). 이때 작물계수란 기준작물인 잔디의 증발산량을 1.0으로 지정했을 때, 이에 대한 각 발작물의 생육기간(생육초기, 신장기, 중기, 후기 등)동안 증발산량의 비율을 의미한다. 작물별 작물계수는 FAO(Allen et al., 1998)의 자료를 이용하였으며, 기상자료는 서산기상대의 관측자료(평균기온, 평균풍속, 평균습도, 일조시간)를 활용하였다. 그리고 밭 관개용수 필요수량의 최근 10년간 변화 분석을 위하여, 연구지역 과거 10년(2010~2019)간

발작물 별 재배면적과 재배기간 자료를 활용하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. 관개용수 필요수량 산출 결과

연구지역 전체 농경지(총 1,164필지)의 관개용수 필요수량은 최근 10년(2010~2019) 평균 1,106 m³/day로, 논과 밭의 필요수량은 각각 878 m³/day와 227 m³/day로 산출되었다(Table 6). 최근 10년(2010~2019) 동안 논과 밭의 평균 면적비율이 1.7:1.0인 반면 관개용수 필요수량은 3.9:1.0로 나타남에 따라, 결과적으로 논에서의 관개용수 필요수량이 밭에 비해 약 2.3배 높은 것으로 나타났다.

또한 연구지역의 관개용수 필요수량은 매년 증가 추세(1,001 → 1,246 m³/day)로 분석되었다(Table 6). 연도별로는 1,001 m³/day(2010년), 976 m³/day(2011년), 1,086 m³/day(2012년), 1,105 m³/day(2013년), 1,036 m³/day(2014년), 1,150 m³/day(2015년), 1,206 m³/day(2016년), 1,001 m³/day(2017년), 1,250 m³/day(2018년) 및 1,246 m³/day(2019년)으로 산출되었다(Fig. 2).

논의 경우 면적은 미약하게 감소(331천 → 319천 m²)되는 반면 필요수량은 증가 추세(795 → 955 m³/day)로 나타나는데, 이는 기후변화에 따른 가뭄 심화로 증발산량 비

Table 6. Change of agricultural water requirement for paddy and uplands fields, respectively, in accordance with change of farmland areas since 2010

Year	Agri-water requirements (m ³ /day)			Areas (m ²)		
	Total	Paddy fields	Uplands	Total	Paddy fields	Uplands
2010	1,001	795	206	518,624	331,392	187,233
2011	976	779	197	518,624	331,392	187,233
2012	1,086	868	218	516,426	331,392	185,035
2013	1,105	892	213	518,624	331,392	187,233
2014	1,036	828	207	516,426	331,392	185,035
2015	1,150	931	219	518,624	331,392	187,233
2016	1,206	977	229	516,426	323,487	192,940
2017	1,001	770	231	516,946	319,015	197,931
2018	1,250	989	261	516,426	319,015	197,411
2019	1,246	955	291	528,767	319,015	209,752
Average	1,106	878	227	518,591	326,888	191,703

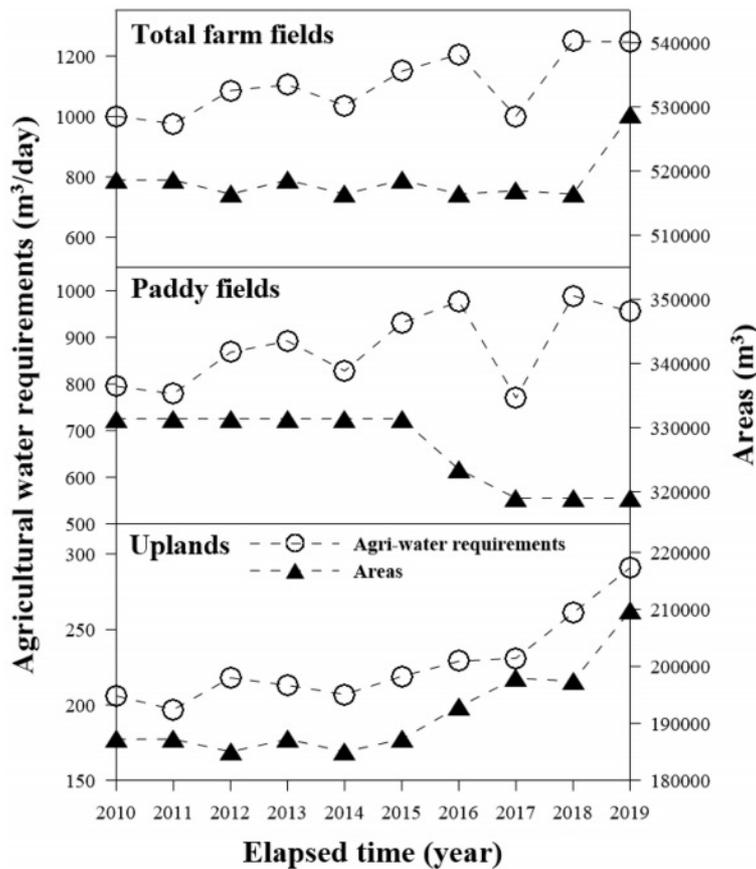


Fig. 2. Change of agricultural water requirements since 2010; Open circles represent for annually agricultural water requirements and closed triangles represent for annual farmland-area, respectively.

율(%)이 증가되었기 때문으로 판단된다(Lim et al., 2015; Moon, 2018; Sohn et al., 2014). VELAS 모델을 이용한 연구지역의 물수지 분석 결과에서도 증발산량 비율(%)은 증가추세를 보였다(Ha et al., 2021). 논의 관개용수

수요량을 연도별로 살펴보면, 795 m³/day(2010년), 779 m³/day(2011년), 868 m³/day(2012년), 892 m³/day(2013년), 828 m³/day(2014년), 931 m³/day(2015년), 977 m³/day(2016년), 770 m³/day(2017년), 989 m³/day(2018년) 및 955 m³/day

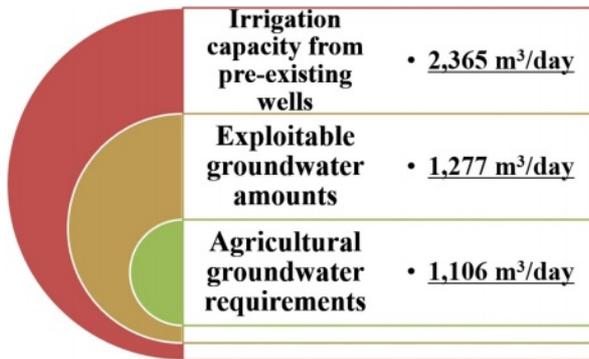


Fig. 3. Aquifer capacity of the study area keeping up with agricultural groundwater requirements.

(2019년)으로 산출되었다.

밭의 경우 재배면적이 꾸준히 증가(187천 → 210천 m²)하면서, 관개용수 필요수량도 해마다 지속적으로 증가 추세(206 → 291 m³/day)가 나타났다. 연도별로는 206 m³/day(2010년), 197 m³/day(2011년), 218 m³/day(2012년), 213 m³/day(2013년), 207 m³/day(2014년), 219 m³/day(2015년), 229 m³/day(2016년), 231 m³/day(2017년), 261 m³/day(2018년) 및 291 m³/day(2019년)으로 산출되었다.

4.2. 관개용수 부족 원인 분석

연구지역의 관개용수 필요수량은 평균 약 1,106 m³/day (논 878 m³/day, 밭 227 m³/day)으로, 지하수 개발가능량 (1,277 m³/day; Ha et al., 2021)보다 적은 수량이다. 또한 기존에 설치된 42개 관정의 지하수 허가·신고량은 2,356 m³/day(농업용 30개소, 1,938 m³/day; 생활용 12개소, 418 m³/day)로, 기설 관정의 지하수 공급량으로 관개용수 필요수량에 충분히 대응 가능한 것으로 분석된다 (Fig. 3).

그럼에도 불구하고 연구지역이 매년 상습적인 관개용수 부족을 겪는 이유는, 농업용수 수요가 영농기(5~9월)에 집중되어 있기 때문으로 판단된다. 앞서 제시된 관개용수 필요수량(1,106 m³/day)은 연간 관개용수 필요수량(404천 m³/yr)을 365일로 나눈 수량으로, 농작물이 성장하는 영농기(5~9월)에 관개용수 필요수량이 집중되는 경우 관개용수 부족현상이 발생할 수 있다.

연구지역 재배작물의 재배기간에 따른 월별 영농기 관개용수 필요수량은 주로 5~9월(1,121~4,004 m³/day)에 집중되어 있다(Table 7). 특히 연구지역 6~8월 관개용수 필요수량(2,963~4,004 m³/day)은 연구지역 농업용 관정 30개소의 최대 공급가능량(1,938 m³/day) 및 42개소 전체 관

정의 최대 공급가능량(2,365 m³/day)을 초과한다. 상세하게는, 농업용 관정 30개소 공급가능량(1,938 m³/day) 기준 6월 평균 -2,066 m³/day, 7월 평균 -1,025 m³/day, 그리고 8월 평균 -1,544 m³/day의 물 부족이 발생한다. 그리고 42개소 전체 관정의 공급가능량(2,365 m³/day) 기준 6월 평균 -1,639 m³/day, 7월 평균 -598 m³/day, 그리고 8월 평균 -1,117 m³/day의 물 부족이 발생한다.

수계별로 살펴보면, A수계 전체 관정의 공급가능량은 1,293 m³/day 인 반면, A수계의 영농기(5~9월) 월별 관개용수 필요수량은 547~1,816 m³/day 로 영농기 물 부족을 보인다, 특히 6~8월 관개용수 필요수량은 1,370~1,816 m³/day로서 공급가능량(1,293 m³/day) 대비 약 -523~-77 m³/day의 물 부족이 발생한다(Table 7). 상세하게는, 6월 평균 -523 m³/day, 7월 평균 -77 m³/day, 그리고 8월 평균 -352 m³/day의 물 부족이 발생한다.

B수계 전체 관정의 공급가능량은 1,072 m³/day 인 반면, B수계의 영농기(5~9월) 월별 관개용수 필요수량은 573~2,188 m³/day 로, B수계도 A수계와 마찬가지로 영농기 물 부족을 보인다, 특히 6~8월 관개용수 필요수량은 1,593~2,188 m³/day로서 공급가능량(1,072 m³/day) 대비 약 -1,116~-521 m³/day의 물 부족이 발생한다(Table 7). 상세하게는, 6월 평균 -1,116 m³/day, 7월 평균 -521 m³/day, 그리고 8월 평균 -765 m³/day의 물 부족이 발생한다.

따라서 지하수에 관개용수를 대부분 의존하는 연구지역은, 벼가 가장 왕성하게 자라나는 이앙기와 본답기에 농업용수 수요를 감당하기 어려워 상습적인 물 부족이 발생하게 된다. 또한 기림 심화에 따른 증발산량 증가 등의 원인으로(Moon, 2018; Ha et al., 2021) 영농기(5~8월) 관개용수 수요량은 매년 증가추세이다(Table 7). 또한 기상이변에 의해, 전국적으로 장마기간(6월 하순~7월 초순) 동안 장마철 평균 강수량(약 350 mm)에 못 미친 '마른 장마'가 대상 연구대상 기간(2010~2019년) 동안 8년 이상 발생함에 따라(KBS, 2020), 연구지역은 장마기간을 포함하는 영농기 물 부족 대응 기술 적용이 시급히 요구되는 실정이다.

4.3. 관정연계이용 기술 적용 방안

농업용수 부족에 대응하기 위한 긴급 대처 방안은 신규 관정 개발이지만, 개발 비용 문제, 난개발에 따른 대수층 환경 관리 문제 및 각종 지하수 관련 민원 발생 가능성 등으로 신규관정 개발은 사실상 쉽지 않은 형편이다. 따라서 이 연구지역에는 신규개발의 효과를 도출할 수 있는 대안 기술로, 기설 관정을 활용하여 지하수 이용효율을 극

Table 7. Change of monthly agricultural water requirement for farmlands since 2010(unit : m³/day)

Agri.water requirement (m ³ /d)		Average	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
January	Study area	2	-	-	-	-	-	-	-	4	5	9	
	Watershed	A	2	-	-	-	-	-	-	4	5	9	
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
February	Study area	2	-	-	-	-	-	-	-	7	7	10	
	Watershed	A	2	-	-	-	-	-	-	7	7	10	
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
March	Study area	3	-	-	-	-	-	-	-	8	8	12	
	Watershed	A	3	-	-	-	-	-	-	8	8	12	
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
April	Study area	175	166	180	171	145	170	154	153	190	191	228	
	Watershed	A	97	83	100	86	84	86	91	83	119	107	135
		B	77	83	79	85	62	84	63	70	71	84	93
May	Study area	1,431	1,145	1,358	1,569	1,320	1,481	1,566	1,397	1,486	1,280	1,706	
	Watershed	A	759	603	728	809	703	764	827	739	802	677	936
		B	672	541	631	760	617	717	740	658	684	603	770
June	Study area	4,004	3,892	3,392	4,454	4,058	3,853	3,845	4,095	4,280	4,023	4,150	
	Watershed	A	1,816	1,793	1,544	2,045	1,838	1,769	1,746	1,838	1,906	1,820	1,860
		B	2,188	2,100	1,848	2,409	2,220	2,084	2,099	2,257	2,374	2,203	2,290
July	Study area	2,963	3,373	2,054	2,960	2,392	2,866	3,071	3,125	2,158	4,265	3,362	
	Watershed	A	1,370	1,575	972	1,400	1,111	1,354	1,419	1,431	985	1,930	1,521
		B	1,593	1,798	1,082	1,559	1,282	1,511	1,652	1,693	1,173	2,335	1,841
August	Study area	3,482	2,591	3,203	2,870	4,052	2,890	3,835	4,407	2,509	3,961	4,499	
	Watershed	A	1,645	1,270	1,510	1,391	1,926	1,383	1,810	2,027	1,206	1,848	2,077
		B	1,837	1,321	1,693	1,479	2,126	1,507	2,025	2,381	1,303	2,113	2,422
September	Study area	1,121	779	1,470	938	1,214	1,100	1,236	1,198	1,308	1,130	832	
	Watershed	A	547	414	693	468	579	547	602	571	616	559	425
		B	573	366	777	470	635	553	634	627	692	571	407
October	Study area	4	-	-	-	-	-	-	-	13	12	18	
	Watershed	A	4	-	-	-	-	-	-	-	13	12	18
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
November	Study area	2	-	-	-	-	-	-	-	5	5	9	
	Watershed	A	2	-	-	-	-	-	-	-	5	5	9
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
December	Study area	<1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
	Watershed	A	<1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	Study area	13,188	11,946	11,658	12,962	13,183	12,359	13,708	14,374	11,968	14,885	14,834	
	Watershed	A	6,247	5,737	5,549	6,200	6,242	5,903	6,495	6,689	5,671	6,976	7,012
		B	6,941	6,209	6,110	6,762	6,942	6,456	7,213	7,686	6,297	7,909	7,823

대화할 수 있는 관정연계이용 기술이 도입되었다.

연구지역은 농경지에 지하수 공급이 원활하지 못한 동쪽의 A수계, 상대적으로 원활한 서쪽의 B수계로 구분된다. 관정연계이용 대상이 되는 연구지역 농업용 공공관정은 총 9개소(1,248 m³/day)이며, A수계에 5개소(676 m³/

day), B수계에 4개소(572 m³/day)가 위치하고 있다. 공공관정 지하수 산출량 측면에서 A수계의 지하수 산출량(676 m³/day)이 B수계의 산출량(572 m³/day)보다 많아, 상대적으로 A수계가 관개용수 공급에 유리한 것으로 판단될 수 있다. 그러나 공공관정에 의한 급수체계를 살펴보



Fig. 4. Schematic view of the well-network system placed in the study area: a yellow line representing for a pipeline transferring a pumped groundwater from the public wells to the water tank, yellow closed arrows representing for groundwater transferring direction along the yellow line, blue line representing for pipelines distributing groundwater from the water tank to water shortage zones, blue closed arrows representing for groundwater transferring direction along the blue line (modified after KIGAM et al., 2021).

면, A수계 공공관정 5개소는 드문드문 독립적으로 소재하여, 관정 주변 2~3 ha에만 부분적으로 지하수를 공급하는 한계가 있다(KIGAM et al., 2021). 반면, B수계 공공관정 4개소는 약 100 m 내의 간격으로 나란히 위치하고 있다. 따라서 관정 간 수리간섭을 최소화하며 동시 대량 양수가 가능하며, 다량의 지하수를 주변 농지에 넓게 공급할 수 있다(KIGAM et al., 2021). 또한 상류지역의 논에 공급된 다량의 지하수가 물꼬를 통해 하류지역의 논으로 내려와 재이용되는 ‘신속 회귀수’를 기대할 수 있으므로 이용 측면에서도 효율이 높은 장점이 있다. 신속 회귀수는 지역별 용수공급 현황과 물관리 방식에 따라 용수 공급량의 30~80%의 범위로 다양하게 조사되고 있고 (Choo, 2004; Chung and Park, 2004; Kim et al., 2010; Kim et al., 2022; Song et al., 2015), 간단한 계산으로, B수계의 경우 4개소 공공관정 공급가능량(572 m³/day)의 최대 130~180%의 이용효율을 기대할 수 있다.

이에 따라, 연구지역 관정연계이용 기술 적용(안)은 지하

수 이용 효율이 낮은 A수계의 관정과 효율이 높은 B수계의 관정을 상호 연계하도록 구성하였다(Fig. 4; KIGAM et al., 2021). 이는 A수계 지하수 배분의 비효율성을 개선과 함께 B수계의 지하수를 A수계에 공급하여, 지하수 이용효율을 극대화 하는 방안이다. 즉, A수계와 B수계의 공공관정으로부터 지하수를 양수하여 관로를 통해 A수계 최상류부에 설치된 대형 물탱크로 포집한 이후, 배관노선 변경장치를 통해 A수계 및 B수계의 물 부족 농지에 합리적으로 재배분하도록 설계되었다. A, B수계 공공관정의 지하수 양수는 지능형 인버터를 설치하여 각 관정의 지하수위 심도에 따라 수중모터가 스스로 양수 제어할 수 있도록 하였다. 그리고 ICT 기반의 무선통신 네트워크를 이용하여 관정의 양수 순서 및 지하수 이송-배분이 자동으로 이루어지도록 하였다.

ICT 적용을 위한 입력자료로는 각 관정의 재원(토출량, 심도, 관정 간 거리 등), 연계 대상 관정들의 거리, 관정의 양수 순서 등이다. 연구지역 내 관정들을 최적연계하

여 지하수를 배분하는 방법은 ‘최적 운영 알고리즘’에 의해 결정되며, 현재까지 5개 관정연계이용 시나리오(세부적으로 56개 하위 경우의 수)에 대한 검토가 이루어졌다(KIGAM et al., 2021). 시나리오에 의하면, 가뭄 발생 시 관정연계이용 시스템으로 연결된 관정들은 허가·신고량을 초과하여 양수할 경우에도 지하수를 안정적으로 이용할 수 있는 것으로 분석되었다(KIGAM et al., 2021).

5. 결 언

관정연계이용 기술은 상습가뭄으로 인한 농업용수 부족 지역의 관정을 연결하여 지하수 최적 배분을 추구하는 전략적 접근 방법으로, 소유역 기반 지속가능한 관개용수 자급체계 구축을 위한 매우 실용적인 기술로 평가된다. 소유역별로 이 기술을 합리적으로 적용하기 위해서는 대상 지역 재배작물의 관개용수 필요수량 분석이 우선적으로 요구되며, 이를 토대로 지하수가 상대적으로 풍부한 지역에서 부족한 지역으로 체계적인 지하수 배분 시나리오를 구성하여야 한다. 이 연구는 충청남도 홍성군의 상습 가뭄지역을 대상으로 관정연계이용 기술을 최적 구축하기 위해 수행되었으며, 과거 10년(2010~2019) 간 재배작물 변화 통계를 이용하여 관개용수 필요수량을 산출하고, 영농기(5~9월)에 상습적인 농업용수 부족 가능성을 확인하였다. 따라서 관정연계이용 기술을 지하수 배분 최적화 시스템으로 구축할 수 있도록 설계에 반영하였으며, 최소비용으로 영농기(5~9월) 농업용수 부족 현상을 극복하는 방법을 제시하였다.

결론적으로 관정연계이용 기술은 농업용수가 부족한 소유역에 대한 지하수자원 최적 배분 기술로, 안정적인 농업용수 공급을 통한 지하수 자원 이용자의 편의성이 확보될 수 있다. 그러나 관정연계이용 기술 적용 이후에도 물 부족이 발생하는 경우에는, 대수층의 수리지질학적 특성 분석을 토대로 지하댐을 포함한 인공함양시설 설치 등 여러 다양한 지하수 확보 기술을 적용해야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 원고는 환경부 수요대응형 물공급서비스사업 「상습 가뭄지역의 지하수 최적 공급관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well Network 기술 개발」 과제의 연구비 지원에 의해 이루어졌다.

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. Rome, Italy: Food and agriculture organization of the United Nations. ISBN 92-5-104219-5.
- Chung, H.W., Kim, S.J., Kim, J.S., Noh, J.K., Park, K.W., Sohn, J.K., Yoon, K.S., Lee, K.H., Lee, N.H., Chung, S.O., Choi, J.D., and Choi, J.Y., 2007, Irrigation and Drainage Engineering, Dongmyungsa. 424 p.
- Chung, S.-O. and Park, K.-J., 2004, Irrigation return flow measurement and analysis in a small size paddy area, *J. Korea Water Resour. Associ.*, **37**(7), 517-526.
- Choo, T.-H., 2004, A study on return flow ratio of irrigation for a paddy field in pumping station by water balance model, *J. Korea Water Resour. Associ.*, **37**(3), 249-255.
- Ha, K., Park, C., Kim, S., Shin, E., and Lee, E., 2021, Groundwater recharge evaluation on Yangok-ri area of Hongseong using a distributed hydrologic model (VELAS), *Econ. Environ. Geol.*, **54**(2), 161-176.
- Hong, S.-O., Song, S.-H., An, J.-G., and Kim, J.-S., 2016, Agricultural radial collector wells in South Korea and sustainability, *J. Engineer. Geol.*, **26**(3), 331-337.
- JA (The JoongAng daily), 2021, Deadly flooding in western Europe: Developed countries face climate revenges, <https://www.joongang.co.kr/article/24108809#home> [accessed 21.12.01]
- KBS (Korea broadcasting system), 2020, [2020 rainy season] ① Not ‘rainy season’ but ‘wet rainy season’... Even veteran forecasters were afraid, <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=4522041> [accessed 22.03.24]
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2011, Application of analysis technique and modeling for coupled groundwater-surface water flow system, KIGAM, 491 p.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), KRC (Korea Rural Community Corporation), KMU (Kookmin University), and GeoGreen21, 2021, An annual report on development of the well network system technique keeping up with drought, A research group on optimal groundwater uses against water demands during drought periods, Ministry of Environment, 429 p.
- Kim, S.W., Park, S.-I., Ko, K., Lee, H.-J., Kihm, Y.H. and Lee, S.R., 2014, 1:100,000 Tectonostratigraphic map of the Hongseong area, map 1: solid geology interpretation; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, H.-Y., Nam, W.-H., Mun, Y.-S., An, H.-U., Kim, J., Shin, Y., Do, J.-W., and Lee, K.-Y., 2022, Estimation of irrigation

- return flow from paddy fields on agricultural watersheds., *J. Korea Water Resour. Associ.*, **55**(1), 1-10.
- Kim, T.-C., Lee, H.-C., and Moon, J.-P., 2010, Estimation of return flow rate of irrigation water in Daepyeong pumping district, *J. Korean Soc. Agricult. Eng.*, **52**(1), 41-49.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2014, A study on the supply plan of clean groundwater and groundwater heat for facilities in agricultural complex, KRC, Naju, 221 p.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2017a, A report on the artificial recharge and recovery to Danmok greenhouse facilities zone, Jinju, Gyongsangnamdo, Korea, KRC, Naju, 164 p.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2017b, Development of design and assessment technique for subsurface dams for drought management, KRC, Naju, 162 p.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2019, HOMWRS (Hydrological operation model for water resources system) ver. 2.11.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2020, Development of subsurface dam operation and maintenance techniques against drought, KRC, Naju, 71 p.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2021, Development of regional groundwater dam model in east coastal area of South Korea for sustainable supply of agricultural water, KRC, Naju, 189 p.
- Lee, C.H. and Kim, S.S., 1963, Explanatory text of the geological map of Hongseong sheet (1:50,000). Geological survey of Korea, Korea, 33 p.
- Lim, C.-H., Kim, D., Shin Y., and Lee, W.-K., 2015, Assessment of drought severity on cropland in Korea peninsula using normalized precipitation evapotranspiration index (NPEI), *J. Climat. Chang Resear.*, **6**(3), 223-231.
- MOE (Ministry of Environment) and NDIAC (National drought information-analysis center), 2018, 2013~2018 sustainable drought analysis & assessment report (in Korean), MOE and NDIAC, Sejong, 127 p.
- Moon, J.W., 2018, Analysis of reference evapotranspiration change in Korea by climate change impact, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **18**(7), 71-81.
- Moon, S.H., Kim, Y., Jeong, Y.Y., and Hwang, J., 2016, Groundwater-stream water interaction induced by water curtain cultivation activity in Sangdae-ri area of Cheong-ju, Korea, *Econ. Environ. Geol.*, **49**(2), 105-120.
- MSIT (Ministry of Science and ICT) and KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2013, Development of intergrated core technologies in aquifer recharge system for groundwater sustainability, MSIT and KIGAM, Sejong, 261 p.
- Penman, H.L., 1948, Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A*(194), S. 120-145.
- Sohn, K.H., Bae, D.H., Ahn, J.H., 2014, Projection and analysis of drought according to future climate and hydrological information in Korea, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **47**(1), 71-82.
- Sokcho-si, 1998, Hydrogeologic study in accordance with Ssangchon groundwater dam, Sokcho-si, 361 p.
- Sokcho-si, 2019, Geologic survey and review on universal validity for placing Ssangchon 2nd groundwater dam, 330 p.
- Song, J.H., Song, I.H., Kim, J.T., and Kang, M.S., 2015, Characteristics of irrigation return flow in a reservoir irrigated district, *J. Korean Soc. Agricult. Eng.*, **57**(1), 69-78.
- Song, S.-H., Myoung, W.-H., An, J.-G., Jang, J.-S., Baek, J.-H., and Jung, C.-Y., 2018, Estimation of regional future agricultural water demand in Jeju island considering land use change, *J. Soil Groundw. Environ.*, **23**(1), 92-105.
- Yong, H.-H., Song, S.-H., Myoung, W.-H., An, J.-G., and Hong, S.-W., 2017, Current status and application of agricultural subsurface dams in Korea, *J. Soil Groundw. Environ.*, **22**(3), 18-26.