

제주도 공공 농업용 지하수의 효율적 누수량 산정 연구

김민철 · 박원배* · 강봉래 · 김지명

제주연구원

Efficient Leakage Estimation of Public Agriculture Groundwater in Jeju Island

Kim MinChul · Park WonBae* · Kang BongRae · Kim JiMyung

Jeju Research Institute, Jeju Island 63147, Korea

ABSTRACT

In this study, leakage ratios of Jeju Island's public agricultural groundwater were calculated by utilizing field measurements of groundwater level and surface reservoir water level. The average leakage ratios were 75.6% at groundwater well A and 57.5% at well B, with the ratio inversely proportional to agricultural water usage. The level of agricultural reservoirs varied at constant intervals at night, and the amount of water leakage associated with the variation was estimated as 0.1 - 16.3 m³/h. The leakage ratio was also influenced by pipeline length, average slope, and number of farmhouses. Currently, the estimation of agricultural water leakage on Jeju Island is based upon field inspection which is very labor- and cost intensive. The leakage ratio estimated by monitoring the reservoirs associated with the well A and B were 73.3 and 54.7%, respectively, consistent with the values obtained by field measurements.

Key words : Jeju Island, Agricultural water, Leakage ratio, Reservoir water level monitoring

1. 서 론

제주도는 전체 수자원 중 90% 이상을 지하수에 의존하고 있으며, 농업용수의 경우에도 96% 이상이 지하수로 이용되고 있다(JSSGP, 2018). 2018년 12월 기준 제주도 내에는 4,757공(1,600천 m³/일)의 지하수가 개발되어 있으며, 이중 3,102공(890천 m³/일)이 농업용수로 개발되었다. 특히, 공공 농업용 지하수 관정은 919공으로 사설 지하수 2,183공의 절반 수준이지만, 지하수 취수허가량은 706천 m³/일로 사설 관정 184천 m³/일보다 3.8배 많다.

공공 농업용 지하수 관정은 1970년 이후 제주지하수개발사업, 원예지하수개발사업, 밭기반정비개발사업, 농촌농업·생활용수 지하수개발사업, 가뭄대비 지하수개발사업 등에 의해 개발되었으며(JSSGP, 2013), 개발된 지 약 20년

이상 경과된 관정은 562공으로 전체 61%를 차지하고 있다. 또한, 농업용 지하수가 개발됨에 따라 농업용수를 공급하기 위한 공급관로를 설치하게 되며, 지하수 개발 시기를 고려할 경우, 대부분 20년 이상 경과된 관로가 매설되어 있다. 농업용수 공급관로는 대부분 PE, PVC관을 사용하고, 시공불량에 의해 지상으로 노출되는 경우가 많아 노후화 및 파손에 의한 누수량이 많을 것으로 예상하고 있다. 특히, 제주도 농업용수는 지하수를 취수하여 저수조로 공급하고, 저수조에서는 자연유하방법으로 농가에 농업용수를 공급하고 있어 농업용수 이용이 적은 시기에는 관로 내의 농업용수가 지속적으로 누수 될 수 있으며, 공공 농업용 지하수 1공 당 공급되는 농가수는 2~200 농가로 공급농가수가 많아질수록 관로길이가 길어지게 되어 누수량 증가 우려가 높다(Park et al., 2019). 그러나 제주도 농업용수와 관련된 연구로는 농업용수 수요량 추정(Choi et al., 2013; Song et al., 2013; An et al., 2015; Kim and Kim, 2017; Song et al., 2018), 대체수자원 확보(Kang et al., 2003; Lee et al., 2007; Sung et al., 2009; Son et al., 2015; Park et al., 2018) 등이 대부분으로 농업용수 취수량 및 이용량에 대한 조사와 효율적인 공급방안에 대한 연구는 전무한 실정이다.

주저자: 김민철, 위촉연구위원

공저자: 박원배, 선임연구위원; 강봉래, 위촉연구위원; 김지명, 연구원

*교신저자: 박원배, 선임연구위원

E-mail: gwaterpark@jri.re.kr

Received : 2020. 2. 12 Reviewed : 2020. 3. 2 Accepted : 2020. 8. 21
Discussion until : 2020. 12. 31

제주도에서는 최근 증가되는 농업용수 수요를 충족시키고, 원활한 농업용수 공급을 위해 ‘제주특별자치도 농업용수 통합 광역화사업’을 추진하고 있으나 이 사업에서도 기존 관정의 공급효율에 대한 평가 보다는 추가적인 농업용수 개발을 통한 용수공급방안을 계획하고 있다. 따라서 본 연구에서는 공공 농업용 지하수를 대상으로 지하수 취수량 및 농업용수 이용량을 현장실측하고, 농업용 저수조의 수위를 모니터링하여 정량적인 누수량을 산정하였다. 또한 농업용수 관로길이 및 농가수, 경사도 등 농업용수의 시설특성과 누수율간의 관계를 분석하였으며, 공공 농업용 지하수의 효율적인 누수량 조사 방안을 제안하였다.

2. 연구방법

2.1. 현장실측에 따른 누수량 산정 방법

공공 농업용 지하수 관정의 누수량을 파악하기 위해 860공의 연간 취수량과 월 최대 취수량을 분석하고, 지하수 관정 개발연도, 농업용수 공급 농가 수, 농업용수 계량기 설치 현황 등을 고려하여 연구대상 관정 2공을 선정하였다. 누수량은 연구대상 지하수 관정 2공의 지하수 취수량과 농가에서 이용된 농업용수량을 비교하여 산정하였다. 조사기간은 2019년 3~8월이며, 월 단위로 조사하였다.

2.1.1. A지하수 현황

A지하수는 1998년 성산읍 지역에 개발된 관정으로 취

수허가량은 15.5천 m^3 /월이다. 5년 평균(2013~2017년) 연간 취수량은 186.1천 m^3 /년이며, 월 평균 취수량은 17.9천 m^3 로 월 취수허가량을 115.6% 초과하여 취수하고 있다. 특히, 1, 2월과 7~12월에는 월 취수허가량을 106.0~142.2%, 3~6월에는 취수허가량의 91.8~100.0% 수준으로 취수하고 있다(Table 1).

A지하수 관정에서 취수된 농업용수는 관정 옆에 위치한 100 m^3 규모의 농업용 저수조로 송수된다. 저수조에서 배수되는 배수관로는 100 mm 구경의 PE재질로 총 길이는 9.92 km이다. 배수관에서 농가로 연결된 지선은 총 211개이며, 대부분 25 mm의 PE관으로 연결되었으나 4개의 농가는 50 mm PE관으로 연결되었다. 해당 관정에서 농업용수로 공급하는 총 농가 수는 209농가이며, 209농가 중 2농가를 제외한 207농가에 설치된 유량계는 정상 작동하는 것으로 조사되었다. 농업용수 이용량을 확인할 수 없는 2개 농가는 동일한 작물을 재배하는 농가의 단위면적당 이용량을 적용하여 이용량을 추정하였다(Fig. 1).

2.1.2. B지하수 현황

B지하수는 1997년 제주시 동지역에 개발된 관정으로 취수허가량은 23.6천 m^3 /월로 A지하수 관정보다 약 1.5배 많다. 월 평균 취수량은 19.6천 m^3 으로 월 취수허가량 대비 82.9%를 취수하고 있다. 특히, 5~9월에는 연간 사용량의 49.6%를 취수하고 있으며, 이 시기에는 월 취수허가량의 96.4~124.9% 취수하는 것으로 조사되었다(Table 2).

Table 1. Monthly average groundwater pumping of groundwater well A (2013~2017)

Classification	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul
Pumping quantity ($10^3 m^3$ /month)	17.0	17.7	15.0	15.5	14.2	15.1	16.4
Permission volume ($10^3 m^3$ /month)				15.5			
Pumping ratio (%)	109.6	114.1	96.4	100.0	91.8	97.1	106.0
Classification	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total	Ave.
Pumping quantity ($10^3 m^3$ /month)	21.0	20.1	22.0	22.1	19.1	215.1	17.9
Permission volume ($10^3 m^3$ /month)				15.5			
Pumping ratio (%)	135.4	129.4	141.9	142.2	123.3	-	115.6

Table 2. Monthly average groundwater pumping of groundwater well B (2013~2017)

Classification	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul
Pumping quantity ($10^3 m^3$ /month)	6.5	7.6	13.0	15.6	29.6	27.7	22.8
Permission volume ($10^3 m^3$ /month)				23.7			
Pumping ratio (%)	27.3	32.3	55.0	66.1	124.9	117.1	96.4
Classification	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total	Ave.
Pumping quantity ($10^3 m^3$ /month)	28.5	27.6	19.8	19.2	17.6	235.6	19.6
Permission volume ($10^3 m^3$ /month)				23.7			
Pumping ratio (%)	120.6	116.4	83.7	81.2	74.5	-	82.9

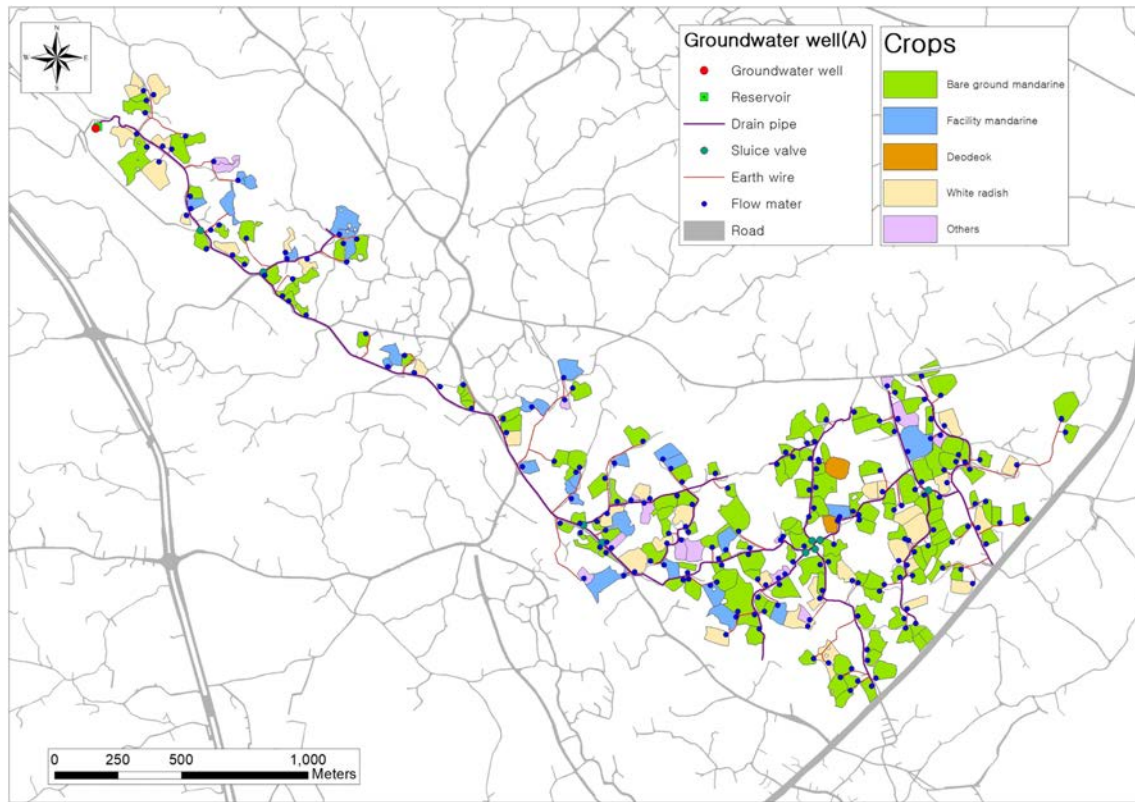


Fig. 1. Agricultural water supply system of groundwater well A.

B지하수 관정의 저수조는 지하수 관정과 약 1.36 km 떨어진 상류에 설치되어 있어 지하수 취수 후 송수관을 통해 100 m³ 규모의 저수조로 송수된다. 저수조에서 배수되는 배수관로는 100 mm 구경의 PE 재질이며, 총 길이는 6.52 km이다. 배수관에서 농가로 연결된 지선은 131개 소이며, 25 mm의 PE관으로 연결되었다. 해당관정에서 농업용수로 공급하는 총 농가수는 127농가이며, 127농가 중 125개 농가에 설치된 유량계가 정상 작동하는 것으로 조사되었다. 농업용수 이용량을 확인할 수 없는 2개 농가는 동일한 작물을 재배하는 농가의 단위면적당 이용량을 적용하여 이용량을 추정하였다(Fig. 2).

2.2. 저수조 수위 모니터링에 따른 누수량 산정 방법

2.2.1. 모니터링 대상 저수조 현황

제주도 농업용 저수조는 농가가 위치한 지역보다 상류 지역에 설치하여 자연유하방법으로 농업용수를 공급하고, 농가에서 농업용수 이용에 따라 저수조 내부의 수위가 하강하게 된다. Fig. 3은 저수조의 단면도로 저수조 수위가 하단 수위센서 이하로 내려갈 경우, 지하수 관정이 가동되면서 저수조로 지하수가 공급되며, 저수조 내 수위가 상

단 센서까지 도달할 경우 지하수 관정은 작동이 중단된다.

저수조 수위 모니터링 대상 지하수 관정은 지하수 관정과 저수조가 직접 연결된 727공을 대상으로 개발연도, 관로길이, 공급 농가수를 백분위 분석하여 선정하였으며, 현장실측 누수량 조사 대상관정인 A, B지하수 관정을 포함하여 총 9개소의 저수조를 선정하였다.

모니터링 대상 농업용 저수조의 개발연도는 1993~1999년이며, 배수관 길이는 488~9,920 m, 공급농가 수는 11~211 농가이다. 저수조는 사각, 원형, 6각형의 콘크리트 구조물로 설치되어 있으며, 저수조 면적은 32~64 m², 유효용량은 111~327 m³이다. 저수조의 설치 고도는 35.0~337.9 m이며, 저수조와 농가간의 평균경사는 0.78~9.51%이다. 배수관로에서의 주요 분기지점은 1~11지점으로 조사되었다(Table 3).

2.2.2. 누수량 산정 방법

저수조의 수위 변동특성을 측정하기 위해 저수조 내 압력식 수위계를 설치하고, 1분 간격으로 모니터링 하였다. 수위 변동에 의한 누수량은 지하수 관정 가동 시 누수량(식 1)과 미가동 시 누수량(식 2)으로 구분하여 산정하였

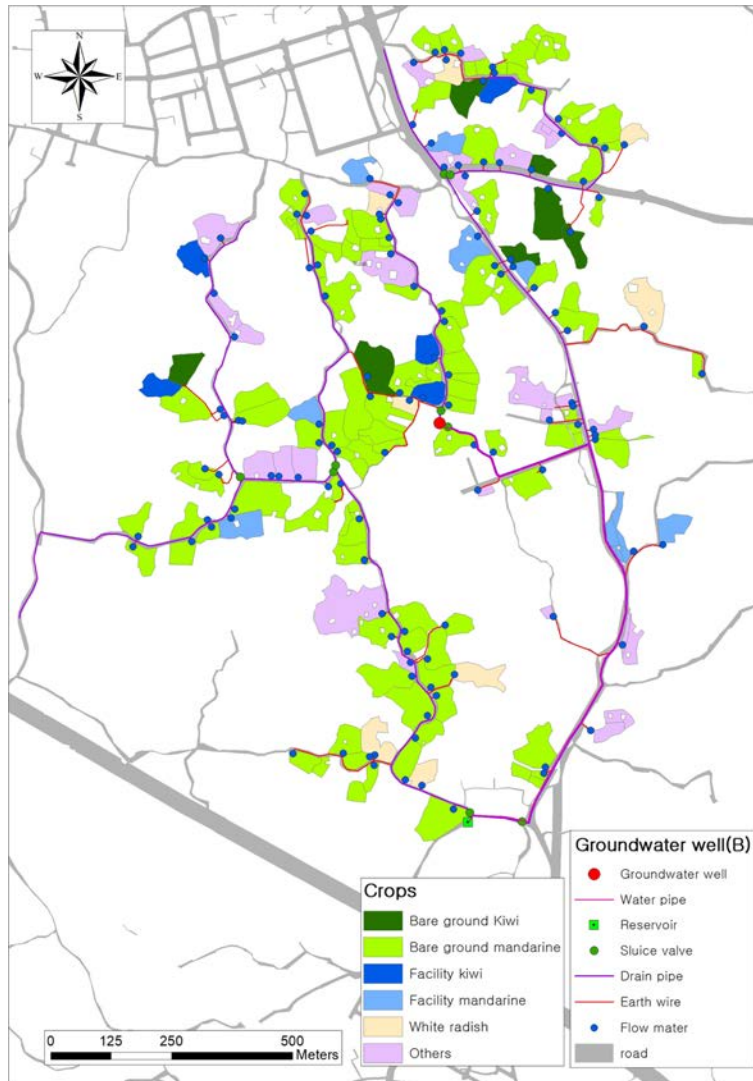


Fig. 2. Agricultural water supply system of groundwater well B.

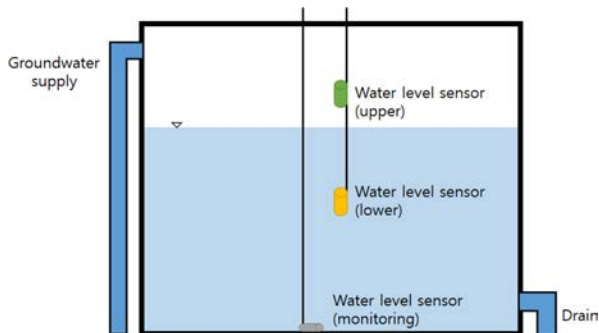


Fig. 3. Sectional view of agricultural reservoir system.

$$Q_{lq1} = A \times (h_1 - h_2) \times 60(\text{min}) \quad (1)$$

$$Q_{lq2} = A \times h_3 \times 60(\text{min}) \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \quad (4)$$

$$Q_{lq3} = (Q_{lp1} \times C_1) + (Q_{lp2} \times C_2) \quad (5)$$

으며, 상·하강 계수(식 3, 4)를 적용하여 시간당 누수량을 산정하였다(식 5).

여기서, Q_{lq1} 은 지하수 관정 가동시 누수량, Q_{lq2} 는 지하수 관정 미가동 시 누수량, C_1 은 상승계수, C_2 는 하강계수, Q_{lq3} 는 단위시간당 누수량, A 는 저수조 면적,

Table 3. Status of monitoring agricultural reservoirs

Reservoirs	Year	Location	Elevation (m)	Pipe length (m)	Junction (point)	Mean slope (%)	Farmhouse (point)	Area (m ²)	Hight (m)	Effective capacity (m ³)
A	1998	Seongsan	87.9	9,920	11	1.75	211	32.3	3.6	114.5
B	1997	Jeju city	122.9	6,520	5	3.76	131	33.1	3.4	112.5
C	1999	Seogwi city	60.7	488	1	2.04	11	33.4	3.5	115.9
D	1998	Deageong	35.0	1,979	4	0.78	35	32.3	3.5	112.9
E	1993	Andeok	38.3	2,617	2	1.94	43	44.2	5.4	238.8
F	1993	Andeok	147.0	3,013	2	3.11	53	64.1	5.1	326.8
G	1999	Seogwipo city	337.9	4,996	5	9.51	88	33.4	3.5	113.8
H	1999	Seogwipo city	225.4	7,668	6	4.88	107	32.7	3.5	115.6
I	1997	Pyoseon	61.0	8,494	7	3.27	123	32.5	3.5	112.5

h_1 은 지하수 관정 가동 시 양수능력에 따라 이론상 상승되는 높이, h_2 는 지하수 관정 가동 시 실제 상승되는 높이, h_3 은 지하수 관정 미 가동 시 하강하는 높이, t_1 은 수위 상승 시간, t_2 는 수위 하강 시간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 현장실측에 따른 농업용수 누수량

3.1.1. A지하수 관정

A지하수 관정의 월 평균 취수량은 18,319 m³이며, 4월이 21,470 m³으로 가장 많고, 5월이 15,617 m³으로 가장 적었다. 취수허가량 대비 취수율은 100.7~138.4%로 전체 조사 시기에 걸쳐 월 취수허가량을 초과하여 취수하는 것으로 분석되었다.

A지하수 관정의 농업용수 이용량은 3,482~6,112 m³/월로 월 평균 4,465 m³/월을 이용하였으며, 취수허가량 대비 이용률은 20.0~28.5%로 분석되었다. 현장조사에 의하면, A지하수와 연결된 총 211농가 중 61농가의 유량계와 수도꼭지에서 장기간 누수가 발생 되었으며, 배수관과 연결된 지선은 도로위로 노출되어 파손위험성이 크고, 일부 지선에서는 누수되고 있었다. 특히, 농가에서의 실 이용량을 제외한 나머지 수량은 불법으로 이용되거나 누수량으로 판단할 수 있으며, 현장조사 시 불법사용 사례는 확인되지 않아 전량 누수된 것으로 계산하였다. 이 결과, 월평균

누수량은 13,854 m³/월이며, 지하수 취수량대비 누수율은 75.6%이며, 8월에는 최대 80.0%가 누수된 것으로 분석되었다(Table 4, Fig. 4).

3.1.2. B지하수 관정

B지하수 관정의 월 평균 취수량은 14,736 m³이며, 4월이 20,769 m³으로 가장 많고, 7월이 8,267 m³으로 가장 적었다. 취수허가량 대비 취수율은 34.9~87.7%로 월 취수허가량 이하로 분석되었다.

농가에서의 농업용수 이용량은 2,236~11,088 m³/월로 월 평균 6,279 m³/월을 이용하였으며, 지하수 취수량 대비 농업용수 이용률은 27.0~53.4%로 분석되었다. 농업용수 관로와 연결하여 불법으로 이용하는 사례는 확인되지 않아 전량 누수된 것으로 계산하였다. B지하수의 월 평균 누수량은 8,457 m³/월로 지하수 취수량 대비 평균 57.4%가 누수되는 것으로 분석되었다. 특히, 3월과 7월에는 주 배수관로의 분기지점에서 많은 양의 농업용수가 누수되어 민원이 발생되었으며, 다른 월보다 누수율이 10~20% 증가된 것으로 분석되었다(Table 5).

3.1.3. 농업용수 이용량과 누수율 간의 관계

월별 조사된 A, B지하수 공급지역의 농업용수 이용량과 누수율은 음의 상관관계를 보이며, A지하수의 R²는 0.8881, B지하수는 0.8433으로 농업용수를 적게 이용하는

Table 4. Groundwater pumping quantity and agricultural water usage (groundwater well A)

Classification	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Average
Groundwater pumping quantity (m ³ /month)	19,065	21,470	15,617	17,997	18,350	17,415	18,319
Agricultural water usage (m ³ /month)	4,673	6,112	3,528	3,879	5,117	3,482	4,465
Agricultural water usage ratio (%)	24.5	28.5	22.6	21.6	27.9	20.0	24.4
Leakage (m ³ /month)	14,392	15,358	12,089	14,118	13,233	13,933	13,854
Leakage ratio (%)	75.5	71.5	77.4	78.4	72.1	80.0	75.6

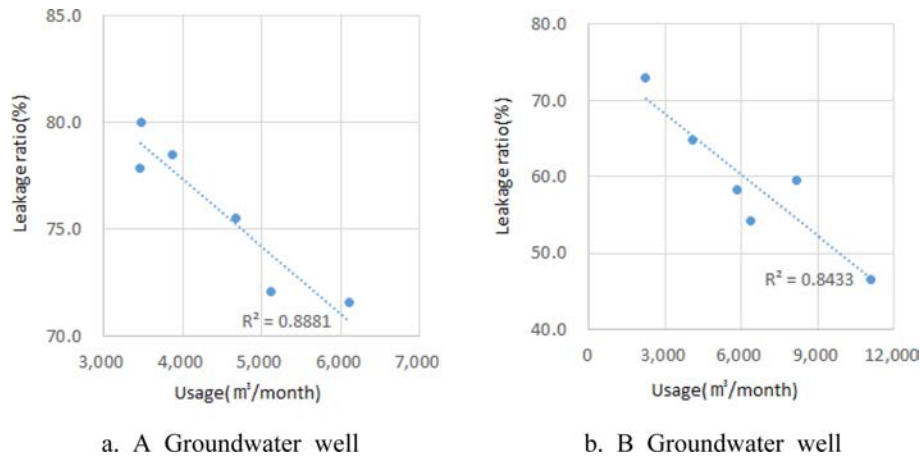


Fig. 4. Analysis of correlation between monthly agricultural water usage and water leakage ratio.

Table 5. Groundwater pumping quantity and agricultural water usage (groundwater well B)

Classification	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Average
Groundwater pumping quantity ($m^3/month$)	11,487	20,769	20,072	13,960	8,267	13,861	14,736
Agricultural water usage ($m^3/month$)	4,046	11,088	8,143	5,816	2,236	6,345	6,279
Agricultural water usage ratio (%)	35.2	53.4	40.6	41.7	27.0	45.8	42.6
Leakage ($m^3/month$)	7,441	9,681	11,929	8,144	6,031	7,516	8,457
Leakage ratio (%)	64.8	46.6	59.4	58.3	73.0	54.2	57.4

월에는 누수율이 증가하는 것으로 분석되었다(Fig. 4).

제주도는 고가 저수조를 이용하여 자연유하방법으로 농업용수를 공급하고 있으나 지형 및 경사가 급하기 때문에 상·하류 지역의 수압 차이는 크게 나타나고, 이러한 특성에 따라 농업용수 이용이 적은 시기에는 누수량이 많아 질 수밖에 없다(Cha, 2012). 즉, 농업용수 이용이 적은 시기에도 배수관 내 농업용수가 가득 차 있고, 배수관 및 급수전 파손 구간에서는 지속적으로 누수가 발생되어 농가에서 농업용수를 이용하지 않음에도 지하수 관정에서의 취수량은 많아지게 되어 누수율은 증가된다. 특히, 농업생산기반정비사업계획 설계기준(MFAFF, 2009)에서는 농업용 관수로 시설 설계 시 농업용수 관망해석을 통한 유속 및 수압 등 수리설계를 권장하고 있다. 이에 제주도 농업용수 공급 계획 시에는 관망해석을 실시하고, 유속이 빠르면서도 수압이 강한 지역은 감압밸브 등을 설치하여 누수를 저감방안을 마련하여야 할 것으로 판단된다.

3.2. 저수조 수위 모니터링을 통한 누수량 산정

Fig. 5는 12시부터 다음날 12시까지 A-I저수조의 수위 변동 그래프이며, 저수조 내부 상·하부 센서 위치에 따라 0.2~2.0 m 간격으로 수위가 변동하였다. A저수조는 17시

부터 19시까지 지하수 관정이 가동됨에 따라 저수조 수위가 상승되고 있으나, 농가에서 농업용수를 이용하고 있어 완만한 수위상승을 보여준다. G저수조는 14시 30분부터 15시 30분까지 완만한 수위하강특성을 보이다가 15시 30분부터 16시까지 농업용수 이용량이 급격하게 많아져 저수조 수위가 급격하게 하강하는 특성을 보였다. 이처럼 D저수조를 제외한 8개 저수조에서는 12시부터 20시까지와 다음날 7시부터 12시까지 농업용수 이용특성에 따라 불규칙적인 수위 변동이 발생되었다. 그러나 20시부터 다음날 6시까지의 지하수 관정 가동 여부에 따라 수위 상승·하강이 일정한 것으로 확인되었다. D저수조는 모니터링 기간 동안 농가에서의 농업용수 이용이 없어 지하수 가동으로 인한 수위 상승은 확인할 수 없었으며, 일정하게 하강하는 것으로 조사되었다. 특히, A-I모니터링 저수조의 관리자(수리계장)와 재배작물에 따른 농업용수 이용시간을 면담한 결과, 야간시간인 22시부터 다음날 4시까지는 농업용수를 이용하지 않는 것으로 확인하였다.

이에 따라 본 연구에서는 22시부터 다음날 4시까지는 농업활동 중단으로 농업용수 이용이 없는 것으로 판단하였으며, 누수량은 농업용 지하수 가동에 따른 이론적 상승수위와 실제 상승수위, 지하수 가동 중지에 따른 하강

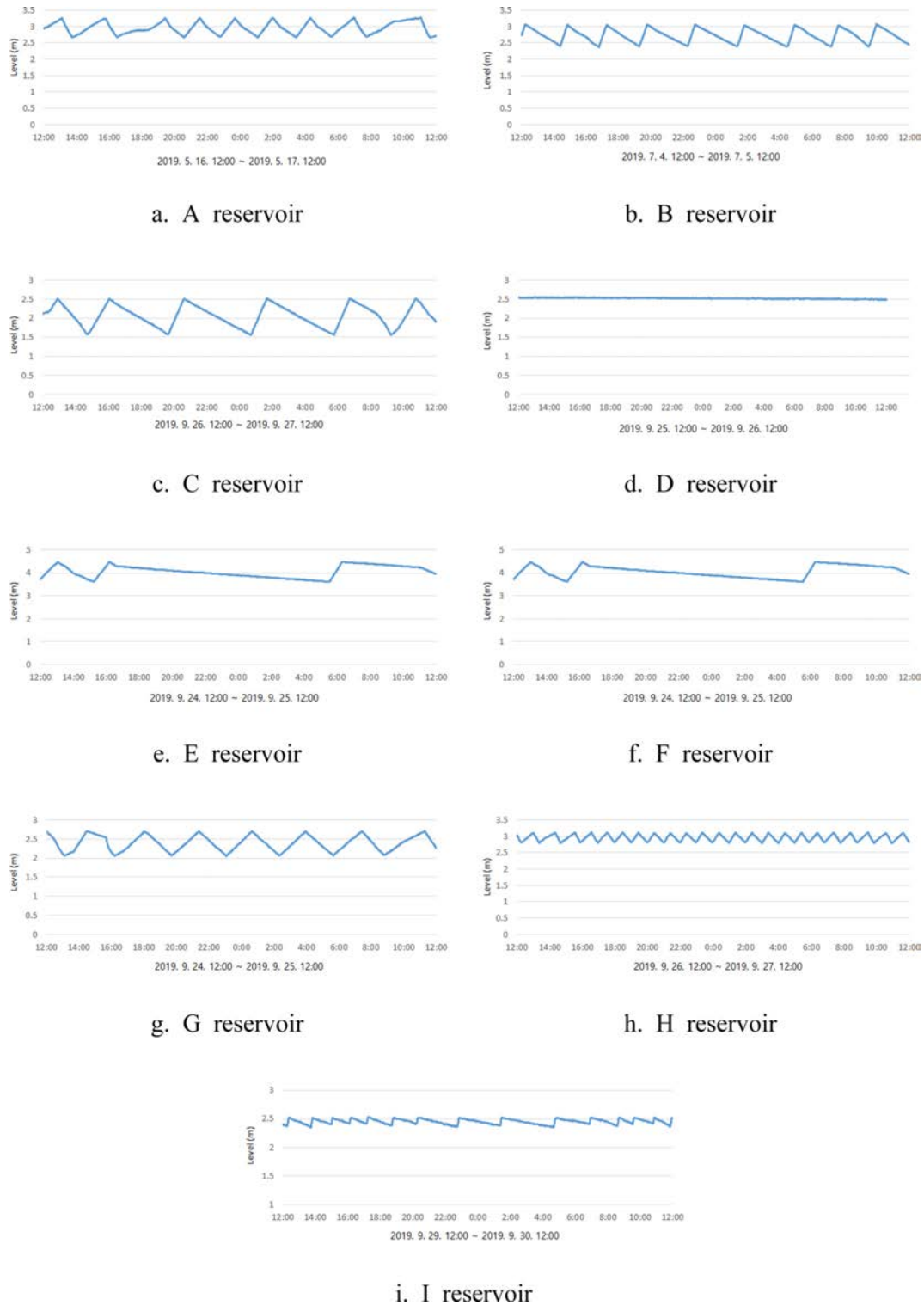


Fig. 5. Characteristics of water level variation in agricultural water reservoirs (A~I).

수위, 상승·하강 시간을 고려하여 단위시간에 따른 누수량을 산정하였다. 특히, 저수조 주변에서 누수는 발생되지

않아 누수량 산정 인자에는 포함하지 않았다.

단위시간에 따른 누수량은 $0.1 \sim 16.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 으로 분석되었

Table 6. Water level variation characteristics and water leakage in the A~I reservoirs

Reservoir	Pumping ability (m ³ /day)	Rising water level (m/h)		Falling water level (m/h)	Rise factor	Descent factor	Leakage (m ³ /h)
		Theory	Actuality				
A	878.4	1.135	0.660	-0.465	0.367	0.633	15.1
B	1,483.2	1.868	1.462	-0.255	0.150	0.850	9.2
C	983.5	1.227	0.988	-0.233	0.191	0.809	7.8
D	1,224.0	1.581	-	-0.002	-	1.000	0.1
E	1,166.4	1.099	-	-0.053	-	1.000	2.3
F	146.9	0.096	-	-0.102	-	1.000	6.5
G	610.6	0.762	0.414	-0.376	0.440	0.560	12.1
H	1,029.6	1.314	0.821	-0.500	0.383	0.617	16.3
I	1,792.8	2.298	1.183	-0.057	0.055	0.945	3.7

다. H저수조는 16.3 m³/h로 가장 많았으며, A저수조는 15.1 m³/h, G저수조는 12.1 m³/h로 분석되었다(Table 6). 누수량이 많은 A, B, C, G, H저수조는 급격한 수위 하강 특성이 나타나고, 지하수 가동에 따른 상승·하강의 빈도가 높은 것으로 분석되었다. I저수조는 상·하단 수위 센서의 거리가 0.2 m로 매우 좁아 수위 상승·하강 빈도가 높은 것으로 보이지만, 야간시간의 수위는 완만하게 하강하는 특성을 보이고 있다.

3.3. 농업용수 시설특성과 누수율간의 상관검토

본 연구에서는 누수발생에 영향을 미치는 요인을 검토하기 위해 관로길이, 공급 농가수, 개발연도, 분기지점, 평균경사 등의 농업용수 시설특성과 누수율간의 상관관계를 검토하였다. 누수율은 각 저수조로 공급되는 지하수 관정의 2019년 월평균 취수량과 저수조 수위 모니터링을 통해 산정된 누수량을 월단위로 환산하여 산정하였다. 각 저수조별 누수량은 38~12,725 m³/월이며, 누수율은 2.6~88.0%로 분석되었다(Table 7).

누수율과 각각의 요인간의 상관성을 검토한 결과, 관로길이나 농가 수, 평균경사의 상관계수(Correlation, R)는 각 0.7230, 0.6461, 0.6620이며, 결정계수(Coefficient of Determination, R²)는 각 0.5227, 0.4174, 0.4382로 분석되어 약간의 상관성이 나타나는 것으로 분석되었다. 개발연도 및 분기지점과의 결과에서는 R이 0.2085와 0.5360, R²는 0.0435와 0.2873으로 상관성은 다소 낮은 것으로 분석되었다(Won and Lee, 2007)(Fig. 6). 특히, G와 H저수조는 A와 I저수조보다 관로길이가 짧고, 공급농가 수도 적지만 표고 200 m 이상 지역에 설치되어 있고, 저수조에서 농가까지의 평균경사가 4.88~9.51%로 비교적 급한 특성을 보이고 있어 누수율이 79.9~81.1%로 가장 높게 분석되었다. 이러한 결과에 의하면, 농업용수 누수율은

Table 7. Groundwater pumping quantity and leakage ratio in the A~I reservoir

Reservoirs	Groundwater pumping quantity (m ³ /month)	Leakage (m ³ /month)	Leakage ratio (%)
A	14,832	10,885	73.3
B	12,607	6,603	54.7
C	16,128	5,635	34.8
D	2,734	38	2.6
E	5,395	1,676	30.7
F	7,800	4,694	60.0
G	10,906	8,738	79.9
H	14,476	12,725	88.0
I	4,080	2,681	65.3
Average	9,884	5,964	60.3

관로길이가 길어질수록, 평균경사가 급할수록, 농업용수 공급 농가수가 많을수록 누수율이 증가되고 있다. 따라서 공공 농업용 지하수 관정을 이용하여 농가에 공급할 경우, 관로길이, 평균경사, 공급 농가수 등은 필수적으로 고려하여야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 경우, 전체 약 700여개소의 농업용수 저수조 중 9개소를 대상으로 한 결과로써 전체 저수조의 수위 변동특성을 모니터링하여 누수발생요인에 대한 구체적인 검토가 필요하다고 판단된다.

3.4. 효율적 누수량 조사 방안

제주도의 농업용수 수요량은 1일 약 1,848천 m³로 추정되고 있으며, 2020년과 2025년에는 -141 ~ -42천 m³/일이 부족할 것으로 예상되고 있다(Song et al., 2019). 그러나 본 연구결과에 의하면 농업용수의 공급과정에서 상당량의 농업용수가 누수되고 있음을 확인하였으며, 부족한 용수를 충족시키고, 효율적으로 농업용수를 공급하기 위해서는 누수율을 낮추는 것이 우선되어야 할 것으로 사

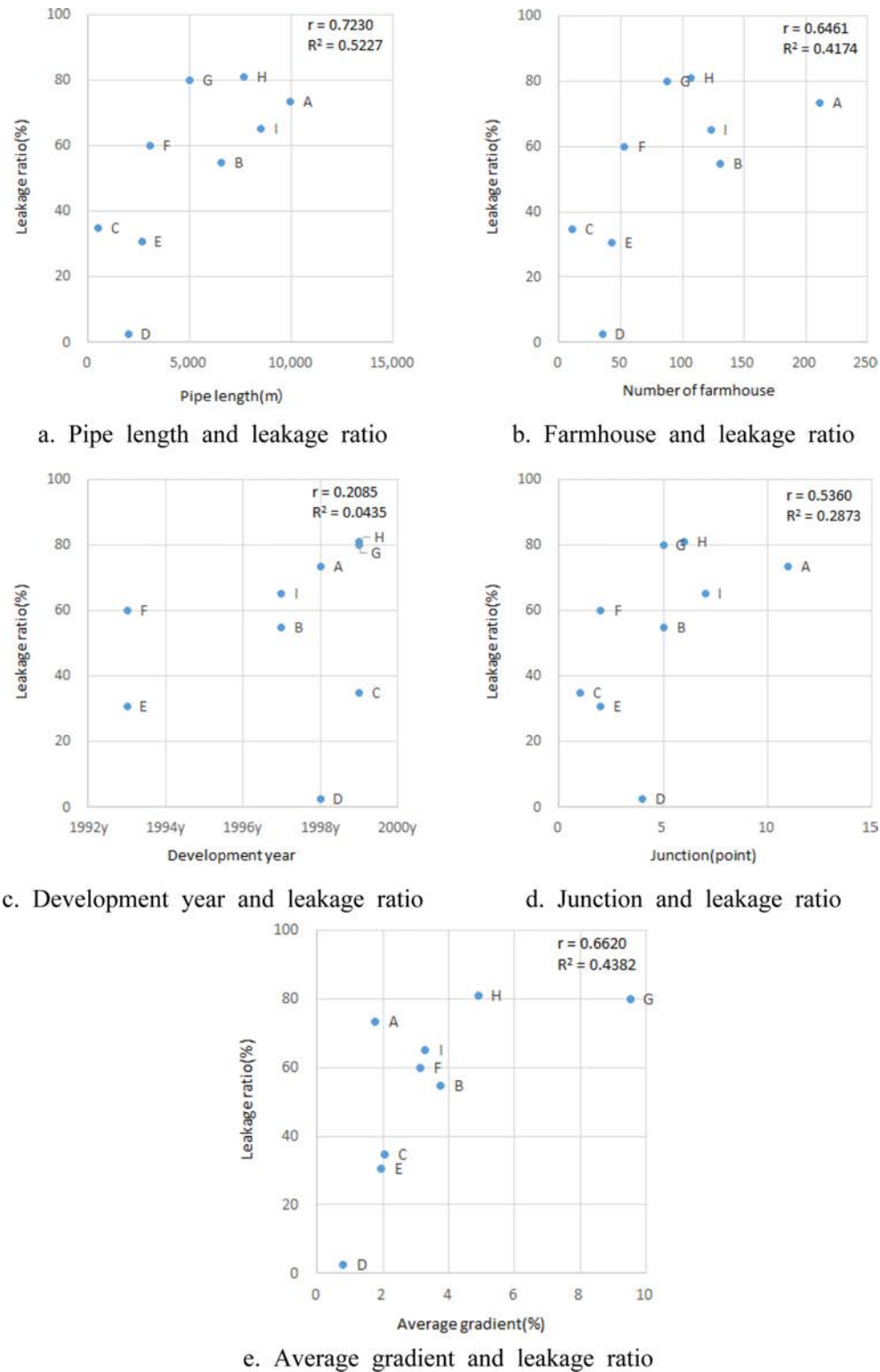


Fig. 6. Correlation between leakage factors and water leakage ratio.

료된다. 특히, 제주도 농업용 관로에는 상수도 시설과 같이 주요 분기지점에 유량계가 설치되어 있지 않아 구간별

누수량 조사가 어렵고(Ministry of Environment, 2017), 농업용수 관로는 상수도, 하수도 등의 관로와 같이 매설

되어 있어 누수탐사도 어렵기 때문에 농업용수의 효율적인 누수량 조사 방법이 요구된다(Choe and Kim, 2001; Oh et al., 2003; Park et al., 2019).

본 연구에서는 공공 농업용 지하수의 누수량을 산정하기 위해 현장실측 방법과 저수조 수위 모니터링방법을 적용하였다. 현장실측을 통한 누수량 산정은 지하수 취수량과 농업용수 이용량 조사를 통해 산정하는 방법으로 현장에서 직접 누수를 확인할 수 있다는 장점이 있으나 시간과 인력이 많이 필요하기 때문에 경비가 많이 소요된다는 단점이 있다. 저수조 수위 모니터링을 통한 누수량 산정은 저수조 내 수위 변동 결과를 측정하여 누수량을 산정하는 방법으로 단시간 내 다수의 저수조 누수량을 파악할 수 있으며, 현장실측 방법보다 경비가 적게 소요된다는 장점이 있다. 특히, A와 B지하수의 현장실측에 의한 평균 누수율은 75.6%와 57.4%이며, 저수조 수위 모니터링에 따른 누수율은 73.3%와 54.7%로 조사방법에 대한 누수율 차이를 보이지만, 유사한 결과가 도출되었다.

따라서 농업용수의 누수량 조사를 위해서는 저수조 모니터링 방법과 현장실측 방법을 병행하여 조사되어야 할 것으로 판단된다. 우선 누수율과 관련성이 높은 관로길이와 경사도, 농가수를 고려하여 농업용수 저수조의 수위 모니터링을 실시하고, 누수량이 많은 경우, 현장실측을 통해 시설개선이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 특히, 저수조 수위 모니터링을 통한 누수량 조사는 도 전역 농업용 저수조에 확대하여 지속적인 모니터링을 통해 누수발생 시 즉각적으로 대응해 나가는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 연구에서는 제주도 공공 농업용 지하수를 대상으로 현장실측과 저수조 수위 모니터링을 통해 누수율을 산정하고, 누수요인을 검토하였으며, 제주도 공공 농업용 지하수의 누수량을 효율적으로 조사할 수 있는 방안을 다음과 같이 제안하였다.

현장실측에 따른 A, B지하수의 평균 누수율은 각각 75.6%, 57.46%로 분석되었으며, 월별 이용특성과 누수율 간의 관계는 음의 상관성을 보이고 있어 농가에서 농업용수 이용이 적을수록 누수율은 증가하였다. 농업용 저수조의 수위 모니터링 결과, 야간시간에는 일정한 간격으로 수위가 변동하였으며, 야간시간 수위 변동에 따른 누수량은 0.1~16.3 m³/h로 분석되었다. 특히, 농업용수의 월평균 누수율은 60.3%로 많은 양의 농업용수가 공급과정에서 누수되는 것으로 확인되었으며, 농업용수의 누수율은 관로

길이 및 평균경사, 공급농가수와 관련이 있는 것으로 분석되었다.

현재 제주도의 농업용수 누수량은 농업용 지하수 취수량과 실제 이용량을 비교하여 추정하고 있으나, 현장실측에 대한 인력 및 시간, 경비 등이 많이 소요된다는 단점이 있다. 그러나 저수조 수위 모니터링을 통해 누수율을 산정할 경우, 단시간 내에 광범위한 조사가 가능하므로 효율적인 농업용수 누수율 조사가 가능할 것으로 판단된다. 특히, A, B저수조의 월 평균 누수율은 각각 73.3%와 54.7%로 현장실측에 의한 누수율과 유사한 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제시한 누수량 조사 방법은 농업용수 개선 사업에서 유용하게 활용될 것으로 기대되며, 이 연구를 기점으로 농업용수 누수량 조사가 확대되고, 향후 발전된 연구를 통해 정확한 누수원인 규명과 농업용수 유수율 제고 사업 등이 추진되어야 할 것으로 판단된다.

References

- An, J.G., Song, S.H., and Lee, D.R., 2015, Development of agricultural groundwater usage model considering multipurpose water in Jeju Island, *J. Environmental Sciences*, **22**(4), 515-524.
- Cha, J.H., 2012, An analysis on leakage reduction effect by block system establishment of doryun area in Jeju city, M. S. Jeju National University. Korea, 41-20.
- Choe, J.W. and Kim, S.H., 2001, Management of water supply by the detection of leakage, *Korea Research Council for Industrial Science & Technology*, **15**, 261-273.
- Choi, K.J., Song, S.H., Kim, J.S., and Lim, C.W., 2013, Estimation of regional agricultural water demand over the Jeju Island, *J. Environmental Sciences*, **22**(5), 639-649.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2013, Agricultural water management plan (2013-2022).
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province)2), 2018, Water resources management comprehensive plan (2018-2022).
- Kang, B.R., Kim, G.T., Koh, G.W., and Huh, M., 2003, Analysis of recycling of sewage treatment plant for securing alternative water resources in Jeju Island, *J. Soil Groundwater Environ Fall Conference*, 180-183.
- Kim, C.G. and Kim, N.W., 2017, Estimation and evaluation of irrigation water need using net water consumption concept in Jeju Island, *J. Korea Water Resources*, **50**(7), 503-511.
- Lee, K.Y., Kim, H.D., and Chung, K.K., Applying wastewater reuse as an agricultural water, *J. Korea Society of Agricultural Engineers Conference*, 132-135.

- MFAFF (Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries), 2009, Agricultural production base maintenance business plan design criteria (Pipe channel), 97-165.
- Ministry of Environment, 2017, Water Supply Drainage Design Criteria, 18.
- Oh, H.C., Jo, Y.S., Hyun, S.Y., and Kim, S.Y., 2003, A feasibility study on the detection of water leakage using a ground-penetrating radar, *J. Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, **14**(6), 616-624.
- Park, W.B., Kang, B.R., Kim, M.C., and Shin, Y.K., 2018, A study on the appropriate size estimation of rainwater harvesting facilities, Jeju Research Institute, 2018-05.
- Park, W.B., Kang, B.R., Kim, M.C., and Lee, J.H., 2019, A study on public agricultural groundwater supply efficiency and improvement in Jeju Island, Jeju Research Institute, 2019-19.
- Seong, C.H., Kang, M.S., Jang, T.I., Park, S.W., Lee, K.Y., and Kim, H.D., 2009, Feasibility study of wastewater reuse for the vegetable farming in Jeju, *J. Korea Society of Agricultural Engineers*, **51**(1) 27-32.
- Son, Y.K., Rhee, H.P., Kim, H.D., Choi, S.W., and Kim, J.D., 2015, Safety evaluation of a wastewater reuse for the farmland irrigation in Jeju Island, *J. Korea Society of Agricultural Engineers*, **57**(4), 21-29.
- Song, S.H., Lee, G.S., Myoung, W.H., An, J.G., Baek, J.H., and Jung, C.Y., 2019, Estimation of regional future agricultural available groundwater supply in Jeju Island using water balance method, *J. Soil Groundwater Environ*, **24**(2), 23-37.
- 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 Groundwater Environ*, **23**(1), 92-105.
- Song, S.H., Yoo, S.H., and Bae, S.J., 2013, Regional drought assessment considering climate change and relationship with agricultural water in Jeju Island, *J. Environmental Sciences*, **22**(5), 625-638.
- Won, J.M. and Lee, S.I., 2007, Statistic analysis of learning easily by drawing using SPSS, 55-66.