

물수지 분석법을 이용한 제주도 권역별 미래 농업용 지하수 공급 가능량 추정

송성호^{1*} · 이규상¹ · 명우호¹ · 안중기² · 백진희³ · 정차연³

¹한국농어촌공사 농어촌연구원

²중명기술사 사무소

³한국농어촌공사 제주지역본부

Estimation of Regional Future Agricultural Available Groundwater Supply in Jeju Island Using Water Balance Method

Sung-Ho Song^{1*} · Gyu-Sang Lee¹ · Woo-Ho Myoung¹ · Jung-Gi An² · Jin-Hee Baek³ · Cha-Youn Jung³

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

²Jungmyung Engineering

³Jeju Special Self-government Province Branch, Korea Rural Community Corporation

ABSTRACT

To evaluate the available groundwater supply to the agricultural water demand in the future with the climate change scenarios for 40 sub-regions in Jeju Island, groundwater recharge and the available groundwater supply were estimated using water balance analysis method. Groundwater recharge was calculated by subtracting the actual evapotranspiration and direct runoff from the total amount of water resources and available groundwater supply was set at 43.6% from the ratio of the sustainable groundwater capacity to the groundwater recharge. According to the RCP 4.5 scenario, the available groundwater supply to the agricultural water demand is estimated to be insufficient in 2020 and 2025, especially in the western and eastern regions of the island. However, such a water shortage problem is alleviated in 2030. When applying the RCP 8.5 scenario, available groundwater supply can't meet the water demand over the entire decade.

Key words : Available groundwater supply, Agriculture water demand, Groundwater recharge, Climate change scenario, Jeju island

1. 서 론

일반적으로 농작물의 재배 면적 변화는 기후변화에 따른 수문환경 변화, 농산물의 수요-공급 변화, 소비자의 생활수준 변화와 함께 국가의 농업정책 변화 등의 요인들에 의해 복합적인 영향을 받는다. 이러한 영향에 따라 최근 쌀 생산 과잉 억제를 위한 국가 차원의 논 면적 축소 정책과 함께 생산성이 상대적으로 높은 밭 농업이 확대되는 추세로 농업환경이 변화하고 있다.

우리나라의 전체 농지면적은 2014년 169.1만 ha로 1990년의 210.9만 ha에 비해 연평균 2.8만 ha씩 감소하고 있으며, 이 중 논과 밭의 면적 비율은 1990년 6.4 대 3.6에

서 2014년 5.5 대 4.5로 밭 면적의 비중이 상대적으로 증가하는 추세이다(KOSIS, 2019). 또한 농업 생산성이 상대적으로 높은 시설원예의 경우 1990년 원예시설 현대화 사업 이후 농업 생산액이 1990년의 8,000억원에서 2013년 5.7조원으로 약 7배 증가함에 따라, 재배면적도 약 44,613 ha에서 약 86,795 ha로 급격하게 증가한 것으로 나타났다(KOSIS, 2019).

이러한 농업환경 변화는 농지면적의 재편과 더불어 용수 이용 측면에서의 변화를 수반하게 되는데, 농업용수의 경우 기존의 논 농업 위주의 지표수 중심에서 밭 농업에 필요한 지하수의 효율적인 공급 방식으로의 변화가 필요하다.

*Corresponding author : shsong@ekr.or.kr

Received : 2019. 2. 22 Reviewed : 2019. 4. 4 Accepted : 2019. 4. 19

Discussion until : 2019. 6. 29

이러한 측면에서의 농업용수의 수요에 따른 지하수 공급 형태의 변화를 평가하기 위하여, Song and Choi(2012)은 농업용수 중 지하수 비중이 약 98%를 차지하고 있는 제주도를 대상으로 농작물 재배 형태별 면적변화 추세를 분석한 후 농작물 재배 형태별로 농업용수 이용량 변화를 분석한 바 있다. 또한 Song et al.(2012)은 농작물 재배 형태에 따른 토지이용 면적 변화 분석을 통하여, 시설재배 면적의 지속적인 증가 원인으로 단위재배 면적에 대한 용수 이용량 감소 및 상대적인 고소득 발생을 제시한 바 있다. 따라서 단위 재배면적에 대한 소득을 고려하는 경우 향후 시설재배작물 면적은 지속적으로 상승할 것으로 예측되며, 이러한 농작물 재배 형태 변화는 용수 이용량의 변화가 반드시 수반될 것으로 판단된다.

이 연구대상 지역인 제주도는 농업용수 공급 측면에서 수자원의 98% 이상을 지하수에 의존함에 따라 다양한 기후변화 인자의 변동성에 매우 취약한 특징이 있다(Song and Choi, 2012). 따라서 지하수 함양량 변동폭이 증가됨에 따른 지하수 이용에 취약성이 커짐에 따라, 가뭄 발생 시 최대 취수 가능량을 이용한 적절한 공급 방안 수립이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 제주도의 40개 세부권역을 대상으로 수립한 기후변화 시나리오 자료로 수문 분석에서 추정된 지하수 함양량 변동 분석 결과를 기초로, Song et al.(2018)이 각 세부권역별로 제시한 2030년의 권역별 농업용수 수요량 추정치와 비교를 통한 적정 지하수 공급 가능량 평가를 수행하였다.

2. 분석 방법

이 연구에서의 수문 분석은 물수지 분석 방법(water balance method)을 이용하였으며, 수문총량에서 실제 증발산량과 직접 유출량을 뺀 값으로 지하수 함양량을 산출하였다. Song et al.(2017)은 가뭄이 발생하는 일시적인 기

간(3~4개월)에 공급 가능한 최대 취수 가능량으로 지하수 공급 가능량을 정의한 바 있으나 별도의 분석 결과가 제시되지 않음에 따라, 이 연구에서는 제주도 수자원관리종합계획(JSSGP, 2013)에서 제시된 함양량 대비 지속이용 가능량 비율인 43.6%를 적용하여 지하수 공급 가능량으로 이용하였다.

지하수 함양량은 중분류 토지피복도가 발간된 2007년, 2014년, 2016년을 대상으로(MOE EGIS, 2017) 40개 세부권역에 대하여 물수지 방법을 이용하여 계산하였으며, 각 연도별 계산 결과는 기존 제주특별자치도 수자원관리종합계획(JSSGP, 2013)의 평균값과 비교하였다. 다음 단계에서는 미래(2020년, 2025년, 2030년) 기후변화 시나리오(RCP 4.5와 RCP 8.5) 자료를 토대로 세부권역별 지하수 함양량과 이를 이용한 지하수 공급 가능량을 추정하였다. 이때 기후변화 시나리오의 기상요소는 강수량 및 기온(최대, 최소, 평균)으로, 이를 이용하여 12개 행정구역별로 계산된 순별 잠재 증발산량값을 각 세부권역별 면적비로 조정하여 40개 세부권역에 대한 수문 분석을 수행하였다. 최종적으로는 Song et al.(2018)이 제시한 40개 세부권역별로 미래 기후변화 시나리오에 따른 농업용수 수요량에 대하여 지하수 공급 가능량의 확보 여부를 평가하여, 현재 각 세부권역별로 수행되고 있는 제주도 농업용수 통합 광역화 사업의 기본설계 자료로 활용토록 결과를 제시하였다(Fig. 1).

2.1. 수문총량

수문 총량의 계산은 대상지역의 전체면적 중 각 강수량 측정 지점이 포함된 지역의 면적 비율을 계산하는 Thiessen망(Thiessen polygon) 방식(Thiessen, 1911)을 이용하였는데, 이 연구에서는 과거 기간의 경우 총 34곳의 기상관측 지점을 대상으로 Thiessen망을 구축한 후 40개 세부권역을 구성하는 각 AWS별로 Thiessen 면적비

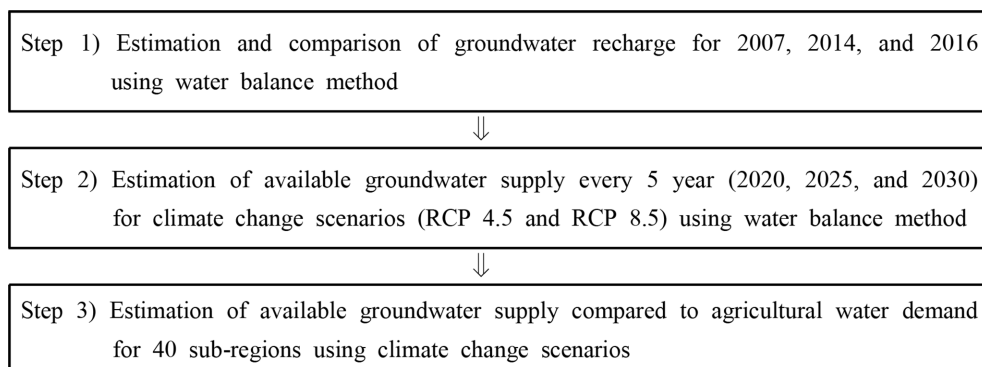


Fig. 1. Procedure of the estimation of available groundwater supply for 2020, 2025, and 2030.

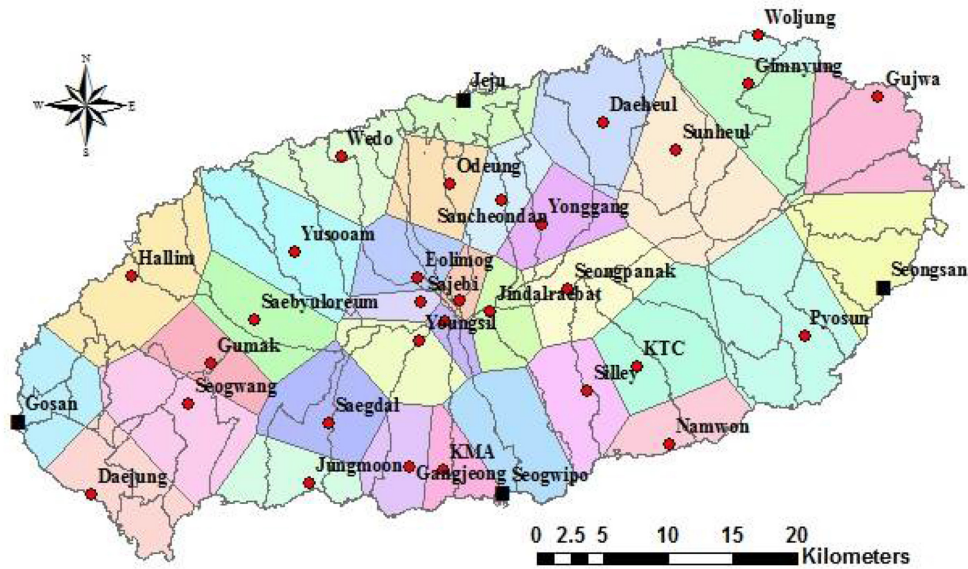


Fig. 2. Thiessen polygons over Jeju Island.

(Thiessen 계수)와 각 관측지점의 강수량으로 계산한 면적 강수량과 각 세부권역별 면적을 곱하는 방식으로 산출하였다(Fig. 2). 미래 기후변화 시나리오에 따른 수문 총량은 RCP 4.5와 RCP 8.5에 대한 1×1 km 격자망에 대한 일 강수량을 이용하여, 40개 세부권역별 면적 강수량과 면적을 곱하여 산정하였다.

2.2. 실제 증발산량

일반적으로 실제 증발산량은 식생의 서식 밀도, 엽면적 지수 등 식생 자체의 성질 뿐만 아니라 분포 지역의 기온 및 토양 특성 등에 따라 영향을 받기 때문에, 물리적 개념으로 이들 인자들의 복합적인 작용으로 발생되는 실제 증발산량 산정은 어렵다(Choudhury and Blanchard,

1983). 그러나 실제 증발산량에 영향을 미치는 인자들은 잠재 증발산량 추정에 영향을 미치지 않기 때문에, 경험적인 방법에 따라 잠재 증발산량과 실제 증발산량의 관계식들이 다양하게 제시되고 있다.

대표적인 실제 증발산량 산정식은 Penman-Monteith가 제안한 방법으로, 식 (1)과 같이 잠재 증발산량과 작물의 수분 스트레스 지수를 이용하여 계산한다(Allen et al., 1998).

$$AET_i = K_s \cdot PET_i \quad (1)$$

여기서 AET_i 는 실제 증발산량(mm), K_s 는 작물의 수분 스트레스 지수, PET_i 는 i 일의 잠재 증발산량(mm)이다.

이 연구에서 이용된 작물계수(crop coefficient)는 토지

Table 1. Monthly crop coefficients for each soil characteristic

Month	Farmland	Orchard	Grassland	Forest	River and reservoir	The rest
January	0.70	0.80	0.80	0.80	1.05	0.80
February	0.70	0.80	0.80	0.80	1.05	0.80
March	0.70	0.80	0.80	0.80	1.05	0.80
April	0.70	0.80	0.85	0.85	1.05	0.80
May	1.05	0.80	0.85	0.85	1.05	0.80
June	0.95	0.80	0.85	0.90	1.05	0.80
July	0.95	0.80	0.85	0.90	1.05	0.80
August	0.95	0.80	0.85	0.90	1.05	0.80
September	0.95	0.80	0.85	0.90	1.05	0.80
October	0.95	0.80	0.85	0.85	1.05	0.80
November	0.70	0.80	0.85	0.85	1.05	0.80
December	0.70	0.80	0.80	0.80	1.05	0.80

피복 특성을 6가지로 유형화한 월별 작물계수로 적용하였으며(Table 1), 수분 스트레스 지수 산정에 필요한 신속 토양수분 이용량(readily available water, RAW), 토양수분 보유능(total available water, TAW), 작물의 뿌리 깊이(Z_r), 토양수분 감소율(depletion fraction, p), 임시 토양수분 함량(SW_{im}) 등을 계산하기 위하여 FAO-56에서 제시한 값을 이용하였다(Table 2).

실제 증발산량 산정을 위한 입력자료 중 TAW는 미국 농무부(USDA) 토양분류기준에 의한 대표 토양별 포장 용수량(field capacity)과 영구 위조점(wilting point)의 수분

함량 차($\theta_{FC} - \theta_{WTP}$)의 중간값과 6가지 토지피복 특성별(경작지, 과수원, 초지, 산림, 하천 및 저수지, 기타)로 최대 뿌리 깊이의 중앙값(Z_r)의 곱으로 계산하였다(Table 3).

대표 토양별 포장 용수량과 영구 위조점의 수분함량 차이가 같은 3가지 값(0.16, 0.13, 0.09)과 토지피복 특성 6가지를 조합하면 총 14개 유형으로 분류된다. 여기서 각 유형별로 실제 증발량 계산을 위한 유형별 면적비 계산을 위하여, 14개 토지피복 유형별로 TAW와 토양수분 감소율(p)을 정리하였다(Table 4).

이때 TAW와 RAW는 식 (2)와 같이 토양의 보수력 및

Table 2. Root depth and depletion fraction for each representative crop

Crops	Soil characteristics	Root depth (Z_r , m)	Median of Z_r (m)	Depletion fraction (p)
Broccoli	Farmland	0.4~0.6	0.50	0.45
Brussel sprout		0.4~0.6	0.50	0.45
Cabbage		0.5~0.8	0.65	0.45
Carrot		0.5~1.0	0.75	0.35
Cauliflower		0.4~0.7	0.55	0.45
Celery		0.3~0.5	0.40	0.2
Garlic		0.3~0.5	0.40	0.3
Lettuce		0.3~0.5	0.40	0.3
Onion		0.3~0.6	0.45	0.3
Spinach		0.3~0.5	0.40	0.2
Radish		0.3~0.5	0.40	0.3
Turf grass	Grassland	0.5~1.0	0.75	0.5
Citrus (50% canopy)	Orchard	1.1~1.5	1.30	0.5

Table 3. Total available water (TAW) with soil characteristics for representative soil types

(unit: m)

Classification			$(\theta_{FC} - \theta_{WTP})$ (unit: m^3/m^3)					
			0.16	0.16	0.13	0.09	0.16	0.16
			Silty clay loam	Silt loam	Sandy loam	Loamy sand	loam	The rest
Median of root depth (Z_r , m)	0.48	Farmland	0.0768	0.0768	0.0624	0.0432	0.0768	0.0768
	1.30	Orchard	0.2080	0.2080	0.1690	0.1170	0.2080	0.2080
	0.75	Grassland	0.1200	0.1200	0.0975	0.0675	0.1200	0.1200
	1.30	Forest	0.2080	0.2080	0.1690	0.1170	0.2080	0.2080
	1.30	River and reservoir	0.2080	0.2080	0.1690	0.1170	0.2080	0.2080
	0.48	The rest	0.0768	0.0768	0.0624	0.0432	0.0768	0.0768

Table 4. Total available water (TAW) and depletion fraction (p) with soil characteristics

Classification	Farmland 016	Farmland 013	Farmland 009	Orchard 016	Orchard 013	Orchard 009	Grassland 016
TAW (mm)	76.8	62.4	43.2	208	169	117	120
1- p	0.66	0.66	0.66	0.5	0.5	0.5	0.5
Classification	Grassland 013	Grassland 009	Forest 016	Forest 13	Forest 009	River and reservoir	The rest
TAW (mm)	97.5	67.5	208	169	117	208	76.80
1- p	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.66

수분 스트레스가 없는 상태의 수분 감소율(p)과 관계가 있다.

$$RAW = p \cdot TAW = p \cdot Z_r (\theta_{FC} - \theta_{WTP}) \quad (2)$$

여기서, θ_{FC} 는 포장용수량에서의 수분함량(V/V), θ_{WTP} 는 위조점에서의 수분함량 (V/V), Z_r 은 최대 뿌리 깊이의 중앙값(mm) 이다.

2.3. 직접 유출량

이 연구에서 직접 유출량은 NRCS-CN 방식을 이용하여 계산하였는데, 이 방법은 1일 단위의 강수량과 유출량을 평가할 수 있는 대표적인 경험식이다(USDA/NRC, 1986). 이때 토양도와 토지 피복도를 이용하면 강수 시 차단, 지표 저류 및 토양 저류 등에 의한 유출곡선 지수 (curve number, CN)를 계산할 수 있으므로, 토지 피복도의 중분류기준 토지이용 특성별로 토양분류 기준(A, B, C, D)에 따른 면적을 이용하였다.

세부권역별 평균 CN을 구하기 위하여 우선적으로 GIS를 이용하여 40개 세부권역에 대하여 각각 중분류기준의 토지이용 특성별로 토양분류 기준(A, B, C, D)에 따른 면적을 분석하였다. 이 후 제주특별자치도의 수자원관리 종합계획(JSSGP, 2013)에서 행정구역별로 제시한 토지이용 특성별 CN 대표값을, 각 세부권역별 토지이용 특성 면적에 대입하여 총 92개의 CN을 이용하였다(Table 5).

3. 연구결과

3.1. 수문 총량

수문 총량은 4곳의 기상대(제주, 고산, 성산, 서귀포)와 30개소의 AWS 위치를 이용하여 세부권역별 Thiessen망의 면적비(Thiessen 계수)를 구한 후, 세부권역별로 계산

된 면적 강수량을 40개 세부권역별 면적에 곱하여 계산하였다. 계산 결과 2007년, 2014년, 2016년의 연도별 수문 총량은 각각 4,554백만 m^3 /년, 4,448백만 m^3 /년 및 4,271백만 m^3 /년으로 분석되었다(Table 6). 이는 제주특별자치도의 수자원관리종합계획(JSSGP, 2013)에서 제시된 연평균 수문 총량 3,769백만 m^3 /년에 대해 13~21% 증가한 결과로, 앞선 3개년의 면적 강수량 산정을 위한 Thiessen 망 구성 시 2002년 진달래밭(해발고도 1,489.37 m)과 윗새오름(해발고도 1,668.26 m) 및 2015년 영실(해발고도 1,260.20 m), 사제비(해발고도 1,434.00 m), 삼각봉(해발고도 1,528.00 m) 등 수자원장기종합계획 수립 시 고려되지 않았던 해발고도가 높은 지점의 강수량이 반영되어 나타난 결과로 판단된다.

미래 기간(2020, 2025, 2030년)의 수문 총량은 제주도의 총 12개 행정구역별로 RCP 4.5와 RCP 8.5 기후변화 시나리오에서 제공되는 일별 강수량을 대상으로, 각 행정구역에 해당되는 세부권역별 면적비를 고려하여 계산하였다(Table 7). RCP 4.5 시나리오에 의한 연도별 수문 총량은 각각 3,485백만 m^3 /년, 3,375백만 m^3 /년 및 4,399백만 m^3 /년으로 분석되었다. 이 중 2020년과 2025년의 수문 총량은 앞서 계산된 과거 2016년에 비해 약 79~82%로 감소된 결과가 나타남에 따라 제주도 전체적으로 가뭄의 영향이 나타나는 것으로 분석되었다.

RCP 8.5 시나리오에 의한 연도별 수문 총량은 각각 3,265백만 m^3 /년, 3,092백만 m^3 /년 및 3,515백만 m^3 /년으로 미래 모든 기간에 대해 예측된 강수총량이 2016년의 수문총량에 비해 약 72~82%로 감소된 결과가 나타남에 따라, RCP 8.5 시나리오에 의한 예측 결과와 비교하여도 제주도 전체적으로 가뭄의 영향이 극심하게 나타나는 것으로 분석되었다.

Table 5. Curve number with land use (code of soil cover) based on middle category

Code	Land use	A	B	C	D	Code	Land use	A	B	C	D
110	Residential area	58	73	82	86	320	Coniferous forest	46	68	79	86
120	Industrial area	81	88	91	93	330	Mixed forest	47	68	79	86
130	Commercial area	95	96	97	97	510	Inland wetland	98	98	98	98
140	Recreation area	95	96	97	97	520	Coastal wetland	98	98	98	98
150	Trafficked area	87	91	93	94	410	Natural grassland	30	58	71	78
160	Public facilities	81	88	91	93	420	Artificial grassland	52	70	80	85
210	Rice paddy	78	78	78	78	430	The rest	52	70	80	85
220	Dry field	64	75	82	86	610	Natural barren	77	86	91	94
230	Green house	98	98	98	98	620	Artificial barren	77	86	91	94
240	Orchard	44	66	77	83	710	Fresh water	100	100	100	100
250	The rest	59	74	82	86	720	Sea water	100	100	100	100
310	Broadleaf forest	47	67	78	85						

Table 6. Total amount of water resources and areal precipitation for 40 sub-regions using Thiessen networks

Sub-region	2007		2014		2016		Sub-region	2007		2014		2016	
	P* (mm)	T** (10 ⁶ m ³ / year)	P (mm)	T (10 ⁶ m ³ / year)	P (mm)	T (10 ⁶ m ³ / year)		P (mm)	T (10 ⁶ m ³ / year)	P (mm)	T (10 ⁶ m ³ / year)	P (mm)	T (10 ⁶ m ³ / year)
Gujwa1	2,143.0	115	1,702.3	91	1,966.3	105	Seongsan1	2,271.1	55	2,411.0	58	2,348.8	56
Gujwa2	2,657.3	206	2,161.3	168	2,097.3	163	Seongsan2	2,576.4	87	2,244.3	76	2,257.7	77
Gujwa3	2,991.0	168	2,461.2	139	2,039.1	115	Seongsan3	2,411.7	122	2,034.2	103	2,143.5	109
Namwon1	3,711.7	202	3,765.4	205	3,560.7	194	Anduk1	1,572.5	56	1,845.4	66	1,954.8	70
Namwon2	3,343.9	226	3,258.7	220	2,979.1	201	Anduk2	1,726.9	122	1,977.1	139	2,225.1	157
Namwon3	3,230.2	216	3,217.2	215	2,991.1	200	Aewol1	3,184.0	189	3,426.5	204	2,874.7	171
Daejung1	1,271.2	48	1,617.0	62	1,624.4	62	Aewol2	2,441.2	117	2,204.8	105	2,079.8	99
Daejung2	1,520.5	23	1,758.0	27	1,753.0	27	Aewol3	2,407.8	42	2,163.3	38	2,182.3	38
Daejung3	1,552.8	38	1,812.3	45	1,877.9	46	Aewol4	2,346.0	182	2,099.1	163	2,195.6	170
Seogwipo1	1,934.7	73	2,241.2	84	2,401.2	90	Jocheon1	2,543.7	132	2,389.3	124	2,397.9	124
Seogwipo2	2,496.8	141	3,064.4	174	2,901.0	164	Jocheon2	2,970.0	142	2,502.3	120	2,331.9	112
Seogwipo3	2,962.2	188	3,063.5	195	2,973.2	189	Pyosun1	3,220.7	181	3,099.9	174	2,937.7	165
Seogwipo4	2,569.3	102	2,805.9	112	2,625.1	104	Pyosun2	2,156.5	41	2,473.5	47	2,383.0	46
Seogwipo5	2,816.3	159	3,002.1	169	2,791.4	157	Pyosun3	2,243.2	136	2,467.5	150	2,373.2	144
Jeju1	3,347.5	130	3,424.7	133	2,492.7	97	Hankyung1	1,428.4	35	1,285.5	32	1,389.8	34
Jeju2	2,766.9	61	2,500.0	55	2,184.5	48	Hankyung2	1,296.0	12	1,271.6	12	1,293.1	12
Jeju3	3,349.7	129	3,286.9	127	2,731.0	105	Hankyung3	1,410.2	24	1,358.1	23	1,436.6	25
Jeju4	3,728.5	173	3,669.2	170	3,304.7	153	Hankyung4	1,581.7	44	1,810.7	51	1,934.8	54
Jeju5	3,299.4	98	2,763.6	82	2,569.1	76	Hallim1	1,681.5	46	1,312.0	36	1,598.0	44
Jeju6	3,218.1	184	2,796.6	160	2,641.4	151	Hallim2	1,650.4	104	1,504.0	95	1,794.7	114
Total								4,554		4,448		4,271	

P*: precipitation, T**: total amount of water resources

Table 7. Total amount of water resources for 40 sub-regions under climate change scenarios(RCP 4.5 and RCP 8.5) (unit: 106 m3/year)

Sub-region	2020		2025		2030		Sub-region	2020		2025		2030	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Gujwa1	97	100	90	87	129	105	Seongsan1	43	47	42	44	61	50
Gujwa2	140	145	130	127	187	152	Seongsan2	61	67	60	62	87	71
Gujwa3	101	105	94	92	135	110	Seongsan3	90	99	89	93	129	106
Namwon1	141	138	139	127	173	149	Anduk1	66	56	65	60	81	60
Namwon2	175	172	172	158	215	185	Anduk2	130	110	128	118	159	117
Namwon3	173	170	170	156	213	183	Aewol1	122	108	121	103	144	112
Daejung1	54	45	48	48	73	50	Aewol2	98	86	97	83	115	90
Daejung2	22	18	19	19	30	20	Aewol3	36	32	36	30	42	33
Daejung3	35	29	31	31	48	33	Aewol4	159	140	158	134	187	146
Seogwipo1	84	74	85	76	100	85	Jocheon1	115	110	107	95	147	116
Seogwipo2	126	111	128	115	151	128	Jocheon2	107	102	99	88	136	107
Seogwipo3	142	125	144	129	169	144	Pyosun1	121	128	117	116	162	138
Seogwipo4	89	78	90	80	106	90	Pyosun2	41	44	40	39	55	47
Seogwipo5	126	111	128	114	150	127	Pyosun3	130	138	127	125	175	149
Jeju1	69	62	65	55	85	65	Hankyung1	35	29	32	30	47	32
Jeju2	39	35	37	31	48	37	Hankyung2	13	11	12	12	18	12
Jeju3	68	62	65	55	85	64	Hankyung3	24	20	22	21	33	22
Jeju4	82	74	78	66	102	77	Hankyung4	40	33	37	34	53	36
Jeju5	52	48	50	42	65	49	Hallim1	41	34	39	35	54	37
Jeju6	101	92	96	81	125	95	Hallim2	94	79	89	81	124	86
Total							3,485	3,265	3,375	3,092	4,399	3,515	

3.2. 실제 증발산량

실제 증발산량은 Allen et al.(1998)이 제시한 바와 같이 작물의 수분 스트레스 지수와 잠재 증발산량의 곱으로 계산되는데, 이때 수분 스트레스 지수(K_s)는 시간에 따라 변화하는 토양수분 함량(soil water content, SW)과 신속 토양수분 이용량의 관계에 따라 식 (3)과 같이 계산된다.

$SW_t \geq RAW$ 이면 $K_s = 1$,

$$SW_t < RAW \text{ 이면 } K_s = \frac{SW_t}{(TAW - RAW)} \quad (3)$$

수분 스트레스가 없는 상태의 수분 감소율(p)은 FAO-56에 제시된 값(Allen et al., 1998)을 이용하였는데, 농경지의 경우는 작은 채소류(small vegetables)의 대꽃값을 사용하였다. 포장 용수량과 위조점의 토양수분 함량은 FAO-56에 제시된 토양 특성별 수분함량의 중앙값을 이용하였으며, 작물의 유효 뿌리깊이는 최대뿌리 깊이의 중앙값을 사용하였다. 14개 토지피복 유형별로 초기 토양수분 함량(SW_t , mm)은 식 (4)를 이용하여 계산하였는데, 이때 실제 증발량(ET_t , mm)은 앞서 Table 4에서 제시된 TAW와 (1-p)의 곱으로 적용하였다(Table 8).

$$SW_t = ET_t + (TAW - ET_t) \times 0.25 \quad (4)$$

잠재 증발산량(ET_o)은 우선적으로 세부권역별로 중분류 기준 토지피복도가 발간된 2007년, 2014년, 2016년에 대하여, 일별 기온(최고, 최저, 평균), 상대습도, 이슬점 온도, 평균 풍속 자료가 있는 4개 기상대의 관측자료를 대상으로 식 (5)를 이용하여 계산하였다. 이때 토지피복 유형별 작물 잠재 증발산량의 계산은 4곳 기상대가 속해있는 지역의 과거 일별 기상자료와 작물계수(Table 1 참조)를 이용하였다.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

여기서, ET_o 는 잠재 증발산량(mm/일), R_n 는 작물표면의 순 일사량(MJ/m²/일), G 는 토양 열속 밀도(MJ/m²/일), T 는 지표 상부 2m 높이 일평균기온(°C), u_2 는 지표 상부 2m 높이의 풍속(m/초), e_s 는 포화수증기압(kPa), e_a 는 실제수증기압(kPa), Δ 는 수증기압 곡선 기울기(kPa/°C), γ 는 습도상수(kPa/°C)이다.

이를 토대로 앞서 계산된 4가지 지역의 14개 토지피복 유형별 초기 토양수분 함량(SW_t), 신속 토양수분 이용량(RAW), 토양수분 보유능(TAW)을 식 (3)에 적용한 결과와 식 (5)를 이용하여 계산된 일별 잠재 증발산량을 식 (1)에 대입하여 세부권역별 토지피복 유형별로 연간 실제 증발산량을 계산하였다. 이때 세부권역별 실제 증발산량을 계산하기 위하여, 각각 14개 토지피복 유형별 면적비를 계산한 후, 토지피복 유형별 실제 증발산량과 면적비를 곱하여 과거 기간(2007, 2014, 2016년)에 대하여 40개 세부권역별로 연간 실제 증발산량(mm/년)을 계산하였다(Table 9).

미래 잠재 증발산량(ET_o)은 2020년, 2025년, 2030년에 대하여 기후변화 시나리오(RCP 4.5와 RCP 8.5)에서 제공되는 일단위 일별 기온(최고, 최저, 평균) 자료를 대상으로, Penman-Monteith 식을 이용하여 12개 행정구역에 해당되는 격자망 자료의 평균값을 계산한 후 각 시나리오별로 순단위로 계산하였다. 이때 계산과정은 RCP 4.5와 RCP 8.5에 대해 과거 기간에 적용한 방법과 동일하게 세부권역별 년평균 실제 증발산량(mm/년)을 계산하였다(Table 10).

Table 8. Calculated values of initial soil water contents with soil characteristics

Classification	Farmland 016	Farmland 013	Farmland 009	Orchard 016	Orchard 013	Orchard 009	Grassland 016
Curve Number (CN)	76	81	74	69	71	75	74
TAW (mm)	76.8	62.4	43.2	208.0	169.0	117.0	120.0
Initial soil water content (mm)	57.2	46.5	32.2	130.0	105.6	73.1	75.0
Actual evaporation (mm)	50.7	41.2	28.5	104.0	84.5	58.5	60.0
Classification	Grassland 013	Grassland 009	Forest 016	Forest 13	Forest 009	River and reservoir	The rest
CN	73	74	76	75	71	68	74
TAW (mm)	97.5	67.5	208.0	169.0	117.0	208.0	76.8
Initial soil water content (mm)	61.0	42.2	130.0	105.6	73.1	130.0	57.2
Actual evaporation (mm)	48.8	33.8	104.0	84.5	58.5	104.0	50.7

Table 9. Calculated actual evapotranspiration for sub-regions during the past

(unit: mm/year)

Sub-region	2007	2014	2016	Sub-region	2007	2014	2016
Gujwa1	852.0	898.4	853.7	Seongsan1	914.2	890.6	858.1
Gujwa2	900.6	900.9	848.4	Seongsan2	919.2	890.8	840.5
Gujwa3	926.4	902.7	863.9	Seongsan3	907.0	893.7	848.1
Namwon1	1,008.4	910.8	798.6	Anduk1	958.4	902.2	779.1
Namwon2	995.4	901.9	790.4	Anduk2	978.7	910.5	793.8
Namwon3	992.7	902.5	789.9	Aewol1	1,046.4	924.1	940.7
Daejung1	817.5	869.9	840.7	Aewol2	1,020.7	912.3	932.2
Daejung2	859.5	867.2	852.4	Aewol3	1,001.1	904.4	920.1
Daejung3	940.4	884.4	874.2	Aewol4	1,007.3	916.0	938.4
Seogwipo1	987.9	905.2	790.3	Jocheon1	1,013.0	905.4	933.5
Seogwipo2	1,006.2	909.7	797.9	Jocheon2	1,026.8	922.7	936.9
Seogwipo3	1,003.4	908.7	796.2	Pyosun1	931.0	892.5	886.8
Seogwipo4	995.4	900.9	791.2	Pyosun2	898.8	868.8	860.8
Seogwipo5	996.6	902.2	791.6	Pyosun3	921.0	890.1	870.5
Jeju1	1,041.4	921.0	931.2	Hankyung1	842.8	858.2	842.0
Jeju2	1,028.5	919.1	930.9	Hankyung2	821.3	839.3	786.3
Jeju3	1,052.1	926.6	953.9	Hankyung3	866.9	862.4	836.4
Jeju4	1,050.4	926.8	959.6	Hankyung4	962.3	897.0	884.5
Jeju5	1,033.5	916.6	944.1	Hallim1	858.4	866.6	873.4
Jeju6	1,036.5	917.4	945.5	Hallim2	919.2	895.5	894.5

Table 10. Calculated actual evapotranspiration for sub-regions for the future

(unit: mm/year)

Sub-region	2020		2025		2030		Sub-region	2020		2025		2030	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Gujwa1	859.2	810.0	909.1	842.6	770.9	839.3	Seongsan1	825.0	778.0	863.7	787.9	752.6	819.4
Gujwa2	859.2	809.6	909.3	844.2	770.8	843.1	Seongsan2	828.2	782.1	865.8	787.6	755.4	819.0
Gujwa3	863.0	812.1	915.1	856.3	774.4	863.8	Seongsan3	830.5	783.9	868.9	791.2	757.6	822.8
Namwon1	796.8	745.7	835.4	790.0	724.5	811.9	Anduk1	809.7	766.6	854.2	792.0	743.2	813.3
Namwon2	789.6	739.5	828.1	783.1	718.5	804.9	Anduk2	813.8	770.3	858.5	796.0	746.9	817.8
Namwon3	790.0	740.2	828.7	783.6	718.8	805.4	Aewol1	821.1	774.8	872.9	820.8	738.8	840.4
Daejung1	797.7	775.4	803.9	744.0	757.0	722.4	Aewol2	818.9	773.7	871.3	817.1	736.3	836.9
Daejung2	794.9	775.0	798.4	738.2	756.9	716.5	Aewol3	815.2	771.6	868.4	810.6	731.7	830.5
Daejung3	808.7	773.4	838.2	781.7	757.9	780.0	Aewol4	823.6	779.3	877.4	819.2	739.0	839.2
Seogwipo1	811.6	761.4	850.0	798.2	740.8	827.4	Jocheon1	818.9	770.3	867.4	823.5	734.0	833.8
Seogwipo2	815.3	763.5	855.0	804.0	744.3	831.4	Jocheon2	830.8	780.9	879.7	835.4	743.9	846.0
Seogwipo3	813.8	762.5	853.1	802.1	742.9	829.7	Pyosun1	819.6	768.7	860.4	805.1	744.4	829.5
Seogwipo4	808.8	757.8	847.9	797.4	738.6	824.8	Pyosun2	801.8	752.4	841.5	787.5	729.1	811.4
Seogwipo5	808.5	757.5	848.0	797.5	738.7	824.8	Pyosun3	817.5	767.3	857.2	800.7	742.6	825.0
Jeju1	849.7	802.8	903.5	845.3	763.9	846.8	Hankyung1	834.0	803.7	892.9	782.3	768.9	757.2
Jeju2	848.2	801.2	901.9	844.1	762.7	846.1	Hankyung2	829.7	803.7	882.4	754.9	764.9	720.9
Jeju3	854.2	805.8	907.8	854.3	769.2	859.1	Hankyung3	828.8	798.8	886.0	778.5	764.0	752.8
Jeju4	854.8	805.5	907.7	855.5	769.1	862.5	Hankyung4	841.6	804.8	904.3	824.0	773.4	812.1
Jeju5	846.3	798.2	899.3	847.4	762.9	853.1	Hallim1	830.9	803.8	895.1	767.6	763.8	758.1
Jeju6	845.6	798.5	899.1	843.7	761.6	847.0	Hallim2	835.7	805.4	901.9	799.1	769.0	794.7

3.3. 직접 유출량

직접 유출량 계산을 위한 유출곡선 지수(CN)는 토지이용 특성에 따라 (Table 5)에서 산출된 92개 CN을 이용하여, 세부권역별 토지피복 코드별 면적을 구한 후 해당 코드의 CN을 면적에 곱하였다. 최종적으로 이 결과를 세부권역의 면적으로 나누어 각 세부권역에 대한 평균 CN으로 결정하였다(Table 11).

세부권역별로 최대 저류량(S)을 계산하기 위하여, 세부권역별 토지이용 특성에 대하여 식 (6)을 이용하여 각각의 토양형(A, B, C, D)에 해당하는 S를 산출하였다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254(mm) \quad (6)$$

이때 최대 저류량(S) 값은 일별로 선행 강수량이 ≥ 53 인 경우에는 $\frac{25,400}{CN3} - 254$, 선행 강수량이 ≤ 35 인 경우에는 $\frac{25,400}{CN1} - 254$, 그렇지 않으면 $\frac{25,400}{CN} - 254$ 으로 각각 계산하였다.

결과적으로 앞서 세부권역별로 계산된 일별 직접 유출량 자료를 기초로, 과거 기간(2007, 2014, 2016년)에 대하여 연간 직접 유출량(mm/년)을 계산하였다(Table 12).

미래 직접 유출량은 2020년, 2025년, 2030년에 대하여

기후변화 시나리오(RCP 4.5와 RCP 8.5)의 일단위 일별 강수량 자료를 대상으로, 12개 행정구역에 해당되는 격자망 자료의 평균값을 계산한 후 각 시나리오별로 순단위로 계산하였다. 이 후 2020년, 2025년, 2030년에 대하여 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오별로 과거 기간에 적용한 방법과 동일하게 세부권역별 연간 직접 유출량(mm/년)을 계산하였다(Table 13).

3.4. 지하수 함양량

앞서 계산된 세부권역별 연간 수문 총량, 실제 증발산량 및 직접 유출량을 해당 세부권역별 면적으로 각각 곱한 후, 수문 총량에서 실제 증발산량과 직접 유출량을 뺀 값으로 과거 기간의 세부권역별 지하수 함양량을 산출하였다(Table 14). 또한 동일한 방법을 이용하여 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 이용한 미래 기간에 대하여 세부권역별 지하수 함양량을 산출하였다.

2007년의 경우 지하수 함양율은 32.9%로 제주도의 평균값(JSSGP, 2013)인 44.5%에 비해 11.6%가 적은 매우 낮은 결과가 나타났으며, 특히 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍, 안덕면과 동부지역의 구좌읍, 성산면이 평균보다 낮은 15.9~28.0%로 분석되었다. 한편 이들 지역의 실제 증발산량 비율은 51.0~64.3%로 평균값인 37.5%에 비해 매우 높은 것으로 분석됨에 따라, 대표적인 농업지역인 이

Table 11. Annual mean curve numbers for sub-regions

Sub-region	2007	2014	2016	Sub-region	2007	2014	2016
Gujwa1	75	77	77	Seongsan1	80	82	82
Gujwa2	77	78	78	Seongsan2	79	81	81
Gujwa3	80	80	80	Seongsan3	81	81	81
Namwon1	66	66	66	Anduk1	71	72	72
Namwon2	69	69	69	Anduk2	70	70	70
Namwon3	70	69	69	Aewol1	66	67	67
Daejung1	70	70	70	Aewol2	66	68	68
Daejung2	79	69	69	Aewol3	70	72	72
Daejung3	71	70	70	Aewol4	68	67	67
Seogwipo1	69	70	70	Jocheon1	72	73	73
Seogwipo2	66	66	66	Jocheon2	76	77	77
Seogwipo3	70	71	71	Pyosun1	76	74	74
Seogwipo4	69	70	70	Pyosun2	71	72	72
Seogwipo5	73	74	74	Pyosun3	75	74	74
Jeju1	66	65	65	Hankyung1	81	72	72
Jeju2	68	71	71	Hankyung2	77	76	76
Jeju3	72	73	73	Hankyung3	75	76	76
Jeju4	71	73	73	Hankyung4	67	68	68
Jeju5	70	72	72	Hallim1	72	74	74
Jeju6	67	67	67	Hallim2	76	76	76

Table 12. Estimated direct runoff for sub-regions in the past

(unit: mm/year)

Sub-region	2007	2014	2016	Sub-region	2007	2014	2016
Gujwa1	690.6	218.1	261.4	Seongsan1	725.6	683.5	510.6
Gujwa2	1016.1	330.8	354.8	Seongsan2	1,032.1	530.1	438.7
Gujwa3	1,344.7	538.9	382.8	Seongsan3	982.7	410.0	391.5
Namwon1	992.2	859.6	829.7	Anduk1	308.1	277.9	189.4
Namwon2	932.6	759.1	540.6	Anduk2	348.7	290.3	277.2
Namwon3	897.8	744.7	551.6	Aewol1	899.7	1,026.1	622.9
Daejung1	190.2	217.7	88.3	Aewol2	607.6	308.9	249.4
Daejung2	401.4	251.6	109.9	Aewol3	658.2	349.9	418.3
Daejung3	293.6	258.5	139.7	Aewol4	583.6	261.9	287.1
Seogwipo1	404.8	415.6	319.5	Jocheon1	801.7	532.2	433.1
Seogwipo2	587.3	601.3	433.7	Jocheon2	1,131.7	479.9	465.0
Seogwipo3	761.2	692.3	637.7	Pyosun1	1,076.9	744.6	616.6
Seogwipo4	568.5	631.5	540.2	Pyosun2	443.5	482.3	291.0
Seogwipo5	780.9	790.6	659.5	Pyosun3	581.7	496.9	328.6
Jeju1	1,016.6	946.6	401.3	Hankyung1	359.1	133.7	19.4
Jeju2	829.9	573.4	287.0	Hankyung2	253.9	137.3	28.1
Jeju3	1,189.2	1,067.8	537.0	Hankyung3	281.9	169.2	45.5
Jeju4	1,364.6	1,240.4	899.5	Hankyung4	285.0	224.8	135.6
Jeju5	1,160.2	659.7	516.4	Hallim1	392.5	102.2	98.8
Jeju6	963.0	511.6	476.1	Hallim2	398.6	162.9	168.7

Table 13. Calculated direct runoff for sub-regions for the future

(unit: mm/year)

Sub-region	2020		2025		2030		Sub-region	2020		2025		2030	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Gujwa1	300.6	373.2	246.2	240.8	580.5	509.7	Seongsan1	420.8	517.1	391.3	478.7	834.1	714.3
Gujwa2	323.5	395.7	263.7	259.5	609.6	533.1	Seongsan2	392.2	488.8	365.1	448.4	794.7	684.3
Gujwa3	374.1	444.2	301.9	301.4	672.8	582.5	Seongsan3	392.2	488.8	365.1	448.4	794.7	684.3
Namwon1	319.0	336.7	272.0	241.7	573.9	532.2	Anduk1	291.2	147.6	205.6	155.1	485.5	289.6
Namwon2	392.6	402.1	334.7	297.0	665.8	603.0	Anduk2	254.5	125.8	176.1	129.4	442.5	261.5
Namwon3	392.6	402.1	334.7	297.0	665.8	603.0	Aewol1	234.4	132.6	171.6	119.5	388.2	302.0
Daejung1	123.7	62.9	74.8	74.8	347.5	190.8	Aewol2	251.5	144.2	186.2	130.8	410.0	316.3
Daejung2	114.5	56.6	68.0	68.0	331.0	181.1	Aewol3	328.4	197.7	252.5	183.9	505.7	379.0
Daejung3	123.7	62.9	74.8	74.8	347.5	190.8	Aewol4	234.4	132.6	171.6	119.5	388.2	302.0
Seogwipo1	359.6	232.1	316.7	199.0	542.2	568.3	Jocheon1	335.4	341.2	263.2	202.4	666.5	470.0
Seogwipo2	273.6	172.1	241.0	141.3	446.2	491.0	Jocheon2	440.1	435.2	348.8	276.5	802.1	566.2
Seogwipo3	383.5	248.9	337.8	215.8	568.3	589.0	Pyosun1	358.2	444.8	305.8	346.3	706.0	654.0
Seogwipo4	359.6	232.1	316.7	199.0	542.2	568.3	Pyosun2	311.9	399.4	265.2	302.7	641.4	602.4
Seogwipo5	461.3	305.6	407.8	277.2	652.5	655.2	Pyosun3	358.2	444.8	305.8	346.3	706.0	654.0
Jeju1	101.7	87.2	70.8	52.3	262.5	152.5	Hankyung1	162.9	77.9	60.7	75.7	364.5	203.2
Jeju2	175.0	151.3	127.0	95.9	374.6	223.3	Hankyung2	215.5	112.9	93.6	114.3	438.9	251.4
Jeju3	205.9	177.6	151.9	116.1	418.2	254.6	Hankyung3	215.5	112.9	93.6	114.3	438.9	251.4
Jeju4	205.9	177.6	151.9	116.1	418.2	254.6	Hankyung4	121.7	50.9	37.9	48.9	299.9	163.8
Jeju5	189.9	164.1	138.7	105.5	395.9	237.2	Hallim1	236.1	114.4	102.8	101.4	421.9	244.9
Jeju6	123.3	106.2	87.1	64.6	297.0	173.8	Hallim2	268.6	135.0	125.6	123.4	463.8	269.9

Table 14. Estimated recharge rate for sub-regions using water balance method from historic period to the future (unit: $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$)

Sub-region	2007		2014		2016		RCP 4.5						RCP 8.5					
							2020		2025		2030		2020		2025		2030	
	Re-charge	Rate	Re-charge	Rate	Re-charge	Rate	Re-charge	Rate	Re-charge	Rate	Re-charge	Rate	Re-charge	Rate	Re-charge	Rate	Re-charge	Rate
Gujwa1	32	28.0	31	34.4	46	43.3	35	35.8	28	31.0	57	44.0	37	36.5	29	33.6	33	31.0
Gujwa2	58	27.9	72	43.0	69	42.6	49	34.6	39	29.9	80	42.8	51	35.4	41	32.4	45	29.7
Gujwa3	41	24.1	57	41.4	45	38.9	32	31.3	25	27.0	54	39.8	34	32.3	26	28.8	28	25.7
Namwon1	93	46.1	108	53.0	105	54.3	81	57.0	78	56.5	102	59.2	79	57.4	71	55.9	76	50.9
Namwon2	96	42.3	108	49.0	111	55.3	96	54.4	94	54.3	121	56.5	94	55.0	85	53.8	90	48.6
Namwon3	89	41.5	105	48.8	110	55.2	94	54.5	92	54.3	120	56.5	93	55.0	84	53.8	89	48.6
Daejung1	10	20.7	20	32.7	26	42.8	19	35.5	15	30.7	31	42.7	13	29.2	17	35.4	15	30.8
Daejung2	4	17.1	10	36.4	12	45.1	8	36.2	6	31.5	13	43.4	5	29.6	7	36.3	6	31.8
Daejung3	8	20.5	16	36.9	21	46.0	12	34.8	9	28.0	20	42.7	9	29.4	10	32.5	9	26.4
Seogwipo1	20	28.0	35	41.1	49	53.8	40	47.5	41	48.4	52	51.8	36	49.3	39	50.7	32	38.1
Seogwipo2	51	36.2	88	50.7	95	57.5	65	51.2	66	51.5	83	55.3	58	52.3	61	53.3	53	41.4
Seogwipo3	76	40.4	93	47.7	98	51.8	66	46.3	68	47.3	86	50.8	60	48.4	64	49.7	53	37.1
Seogwipo4	40	39.1	51	45.4	51	49.3	42	47.6	44	48.5	55	51.9	39	49.5	41	50.8	34	38.2
Seogwipo5	59	36.9	74	43.6	76	48.0	54	43.1	57	44.4	72	47.8	51	45.8	54	46.9	44	34.4
Jeju1	50	38.5	60	45.5	45	46.5	32	46.3	27	42.1	45	53.3	28	44.6	20	36.7	26	40.0
Jeju2	20	32.8	22	40.3	21	44.2	16	42.2	14	38.8	23	48.2	14	40.7	11	33.7	13	35.8
Jeju3	43	33.1	50	39.3	48	45.4	27	40.1	24	37.0	39	45.9	24	38.8	17	31.6	21	33.2
Jeju4	61	35.2	70	40.9	67	43.7	33	40.1	29	37.0	47	46.0	29	38.8	21	31.5	25	33.0
Jeju5	33	33.5	35	43.0	33	43.2	22	41.5	19	38.3	31	47.2	19	40.1	14	32.8	17	34.6
Jeju6	70	37.9	78	48.9	70	46.2	46	45.3	40	41.4	65	51.8	40	43.7	29	35.9	37	38.7
Seongsan1	15	27.8	20	34.7	24	41.7	13	30.4	12	28.7	23	37.9	16	34.0	14	30.9	14	26.9
Seongsan2	21	24.3	28	36.7	33	43.3	19	31.9	18	30.2	34	39.5	24	35.3	20	32.7	20	28.5
Seongsan3	26	21.6	37	35.9	46	42.2	28	31.4	26	29.6	50	39.0	35	34.9	30	32.1	30	27.9
Anduk1	11	19.5	24	36.1	35	50.5	26	40.1	27	41.4	37	45.6	23	41.5	26	43.2	20	33.5
Anduk2	28	23.1	55	39.3	81	51.9	54	41.9	55	42.9	75	47.3	47	42.7	52	44.5	41	35.0
Aewol1	74	38.9	88	43.1	78	45.6	59	48.6	59	48.8	76	53.3	54	49.8	47	45.6	44	39.4
Aewol2	39	33.3	47	44.6	43	43.2	47	47.9	47	48.2	60	52.5	42	49.2	37	45.2	35	38.8
Aewol3	13	31.1	16	42.0	15	38.7	16	44.3	16	45.1	21	48.7	15	46.4	13	42.5	12	35.8
Aewol4	59	32.2	71	43.9	75	44.2	77	48.5	77	48.6	100	53.3	69	49.5	61	45.7	58	39.5
Jochon1	38	28.7	49	39.8	54	43.0	55	48.0	48	45.0	74	50.5	52	47.6	42	44.1	48	41.6
Jochon2	39	27.3	53	43.9	45	39.9	46	42.9	40	40.3	62	45.4	43	42.7	35	39.5	39	36.8
Pyosun1	68	37.7	82	47.2	81	48.8	54	45.0	52	44.0	80	49.5	60	46.7	51	44.0	55	39.5
Pyosun2	16	37.8	22	45.4	24	51.7	20	48.0	19	46.8	29	52.3	22	49.4	18	46.9	20	42.4
Pyosun3	45	33.0	66	43.8	71	49.5	59	45.1	56	44.1	86	49.5	65	46.7	55	44.1	59	39.7
Hankyung1	6	15.9	7	22.8	13	38.0	10	29.5	9	26.6	19	40.3	7	24.2	9	29.4	8	25.1
Hankyung2	2	17.0	3	23.2	5	37.0	4	26.4	3	25.2	7	36.9	2	21.5	3	28.8	3	24.5
Hankyung3	4	18.5	6	24.0	9	38.6	6	26.6	6	25.1	12	37.1	4	22.1	6	27.0	5	22.2
Hankyung4	9	21.1	19	38.0	26	47.3	13	32.3	10	28.0	23	43.8	9	26.9	10	28.7	9	24.4
Hallim1	12	25.6	9	26.2	17	39.2	12	28.4	11	28.9	22	39.7	9	26.3	11	31.9	10	26.1
Hallim2	21	20.2	28	29.6	46	40.8	24	25.9	24	26.8	46	37.3	19	24.5	22	27.8	19	21.6
Total	1,499	32.9	1,914	43.0	2,018	47.3	1,512	43.4	1,428	42.3	2,135	48.5	1,431	43.8	1,304	42.2	1,295	36.8

들 지역에서의 높은 실제 증발산량 비율이 함양을 감소에 영향을 준 것으로 판단된다. 2016년의 경우에는 지하수

함양율이 47.3%로 분석 기간 중 가장 높은 것으로 나타났다. 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역의

성산면이 평균보다 낮은 것으로 분석되었다. 이러한 지역적인 편차의 원인은 2007년에 비해 상대적으로 영향은 작지만 실제 증발산량 비율이 45.7~60.8%(평균 35.7%) 범위에서 상대적으로 높기 때문으로 판단된다.

RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에 따른 세부권역별 2020년, 2025년, 2030년에 대한 수문 총량, 실제 증발산량, 직접 유출량, 지하수 함양량 및 함양율 계산 결과, RCP 4.5 시나리오에 따른 2020년과 2025년의 경우 지하수 함양율은 각각 40.7%와 39.1%로 제주도 평균값 44.5%에 비해 낮은 결과가 나타났으며, 특히 서부지역 대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역 구좌읍, 성산면이 평균보다 낮게 분석되었다. 반면 2030년의 경우에는 지하수 함양율이 46.9%로 제주도 평균값 44.5%에 비해 2.4% 높은 결과가 나타났으며, 앞서 평균 보다 낮은 지역의 경우 여전히 동일하지만 편차가 상대적으로 적어지는 결과로 분석되었다.

RCP 8.5 시나리오 분석 결과 2020년의 지하수 함양율은 40.3%로 제주도 평균값 44.5%에 비해 4.2% 낮은 결과가 나타났으며, RCP 4.5 시나리오의 결과와 마찬가지로 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역의 구좌읍, 성산면이 평균보다 낮게 분석되었다. 특히 한림읍과 한경면의 경우에는 약 25% 전후의 매우 낮은 함양율이 예측됨에 따라 이에 대한 대책 수립이 필요하다. 2025년의 경우에는 지하수 함양율이 39.3%로 제주도 평균값 44.5%에 비해 5.2% 낮은 것으로 나타났으며, 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역의 구좌읍, 성산면과 더불어 북부지역의 제주동지역 전체적으로 평균보다 낮게 분석되었다. 다만 전체 평균 대비 낮은 지역의 함양율의 편차는 2020년에 비해 상대적으로 적어지는 것으로 분석되었다. 2030년의 경우에는 지하수 함양율이 34.4%로 제주도 평균값 44.5%에 비해 10.1%의 매우 낮게 나타났으며, RCP 4.5 시나리오의 결과와 마찬가지로 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역의 구좌읍, 성산면이 평균보다 낮게 분석되었다. 특히 2025년에 폭넓게 낮은 분포를 나타낸 제주동지역의 경우 평균값에 가깝게 회복되는 것으로 분석되었다.

4. 농업용수 수요량 대비 지하수 공급 가능량 평가

지하수 공급 가능량은 일시적인 가뭄 발생 기간(3~4개월)에 공급 가능한 최대 취수 가능량으로(Song et al., 2017), 이 연구에서는 제주도 수자원관리종합계획(JSSGP,

2013)에서 제시된 지하수 함양량 대비 지속이용 가능량 비율인 43.6%를 적용하였다. 또한 지하수 공급 가능량 산정 결과의 평가를 위한 농업용수 수요량은, Song et al.(2018)이 제주도의 40개 세부권역별로 평가한 결과를 이용하였다.

RCP 4.5 시나리오를 이용하여 평가된 제주도 전체적으로 농업용수 수요량 674,523,687 m³/년(1,848,010 m³/일) 대비 미래 기간의 지하수 공급 가능량은 2020년과 2025년의 경우 -15,344,244 ~ -51,747,320 m³/년 정도 부족한 것으로 분석되었으며, 특히 서부지역인 대정읍, 한경면, 한림읍, 안덕면과 동부지역인 구좌읍, 성산면, 조천 및 표선읍의 일부권역에서 부족한 것으로 나타났다. 다만 2030년의 경우 전반적으로 농업용수 수요량 대비 지하수 함양량 및 지하수 공급 가능량은 상대적으로 여유가 있는 것으로 분석되었다(Table 15)(Fig. 3).

RCP 8.5 시나리오의 경우 농업용수 수요량 대비 미래 기간의 지하수 공급 가능량은 -50,456,902 ~ -110,040,376 m³/년 정도 부족한 것으로 분석되었으며, 특히 서부지역인 대정읍, 한경면, 한림읍, 안덕면, 애월읍 일부권역과 동부지역인 구좌읍, 성산면, 조천 및 표선읍의 일부권역, 북쪽과 남쪽지역인 제주시와 서귀포시의 일부권역에서 부족한 것으로 나타났다. 따라서 RCP 8.5 시나리오의 경우 제주도 전체적으로 농업용수 수요량 대비 지하수 함양량 및 지하수 공급 가능량은 부족한 것으로 분석되었다(Fig. 4).

5. 결 론

이 연구에서는 제주도의 세부권역별로 물수지 분석 방법을 이용하여 지하수 함양량을 산출한 후, 지하수 함양량 대비 지속이용 가능량 비율 43.6%를 적용하여 일시적인 가뭄 발생 기간에 공급 가능한 최대 취수 가능량으로 지하수 공급 가능량을 평가하였다. 이 결과를 토대로 세부권역별 기후변화 시나리오(RCP 4.5와 RCP 8.5)에 따라 Song et al.(2018)이 제시한 농업용수 수요량 평가 결과와 비교하여, 세부권역별로 미래 농업용수 수요·공급의 적절성을 비교하였다.

지하수 함양량 산정은 세부권역별로 수문 총량에서 실제 증발산량과 직접 유출량을 뺀 값으로 계산하였으며, 과거 기간과 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 이용한 미래 기간에 대하여 각각 산출하였다. 2007년의 경우 지하수 함양율은 29.9%로 제주도 평균값인 44.5%에 비해 14.6%가 적은 매우 낮은 결과가 나타났으며, 특히 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍, 안덕면과 동부지역의 구좌

Table 15. Estimation of available groundwater supply versus water demand for sub-regions with RCP 4.5 and 8.5 scenarios (unit: $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$)

Sub-region	Agricul- tural water demand	Available groundwater supply minus agricultural water demand								
		2007	2014	2016	RCP 4.5			RCP 8.5		
					2020	2025	2030	2020	2025	2030
Gujwa1	21	-7	-7	-1	-6	-9	4	-5	-8	-7
Gujwa2	29	-4	3	1	-8	-12	6	-6	-11	-9
Gujwa3	15	3	10	4	-1	-4	8	0	-4	-3
Namwon1	17	24	31	29	18	17	28	18	14	16
Namwon2	31	11	16	18	11	10	22	10	6	8
Namwon3	30	9	15	18	11	10	22	10	6	8
Daejung1	30	-26	-21	-19	-22	-24	-17	-24	-23	-23
Daejung2	13	-11	-8	-7	-9	-10	-7	-10	-10	-10
Daejung3	14	-11	-7	-5	-9	-10	-5	-10	-10	-10
Seogwipo1	14	-5	1	7	3	4	8	2	2	0
Seogwipo2	19	3	19	22	9	10	17	6	7	4
Seogwipo3	28	6	13	15	1	2	10	-1	0	-4
Seogwipo4	20	-3	2	2	-2	-1	4	-3	-2	-5
Seogwipo5	31	-5	1	2	-7	-6	0	-9	-7	-12
Jeju1	12	10	15	8	2	0	8	0	-3	0
Jeju2	7	2	3	3	1	0	4	0	-2	-1
Jeju3	5	14	17	16	7	6	12	6	3	5
Jeju4	12	14	18	17	2	1	8	1	-3	-1
Jeju5	14	0	1	0	-5	-6	-1	-6	-8	-7
Jeju6	25	6	9	6	-5	-7	3	-7	-12	-9
Seongsan1	12	-6	-4	-2	-7	-7	-2	-6	-7	-7
Seongsan2	13	-4	-1	1	-5	-5	2	-3	-4	-4
Seongsan3	15	-3	1	5	-2	-3	7	0	-2	-2
Anduk1	20	-15	-9	-4	-8	-8	-4	-10	-8	-11
Anduk2	27	-14	-3	9	-3	-3	6	-6	-4	-9
Aewol1	14	18	25	20	12	12	20	10	7	6
Aewol2	16	0	4	2	4	4	10	2	0	-1
Aewol3	8	-2	-1	-1	-1	-1	1	-2	-2	-3
Aewol4	15	11	17	18	19	19	29	16	12	11
Jocheon1	28	-12	-7	-5	-4	-7	4	-5	-10	-7
Jocheon2	14	3	9	5	6	3	13	5	1	3
Pyosun1	9	21	27	26	15	13	26	17	13	15
Pyosun2	15	-8	-5	-4	-6	-7	-2	-5	-7	-6
Pyosun3	12	7	16	19	13	12	25	16	12	14
Hankyung1	12	-10	-9	-6	-8	-8	-4	-9	-8	-9
Hankyung2	5	-4	-4	-3	-4	-4	-2	-4	-4	-4
Hankyung3	11	-9	-8	-6	-8	-8	-5	-9	-8	-8
Hankyung4	15	-11	-6	-4	-9	-10	-5	-11	-10	-11
Hallim1	12	-7	-8	-4	-7	-7	-3	-8	-7	-8
Hallim2	16	-7	-4	4	-6	-6	4	-8	-7	-8
Total	675	-21	160	205	-15	-52	256	-50	-106	-110

읍, 성산면이 평균보다 낮은 것으로 분석되었다. 반면 2014년의 경우에는 지하수 함양율이 45.7%로 분석 기간 중 가장 높은 것으로 나타났지만, 서부지역의 대정읍, 한

경면, 한림읍과 동부지역의 성산면이 평균보다 낮은 것으로 분석되었다. 2016년의 경우에는 지하수 함양율이 40.1%로 높아졌지만, 서부지역의 한경면, 한림읍은 지속

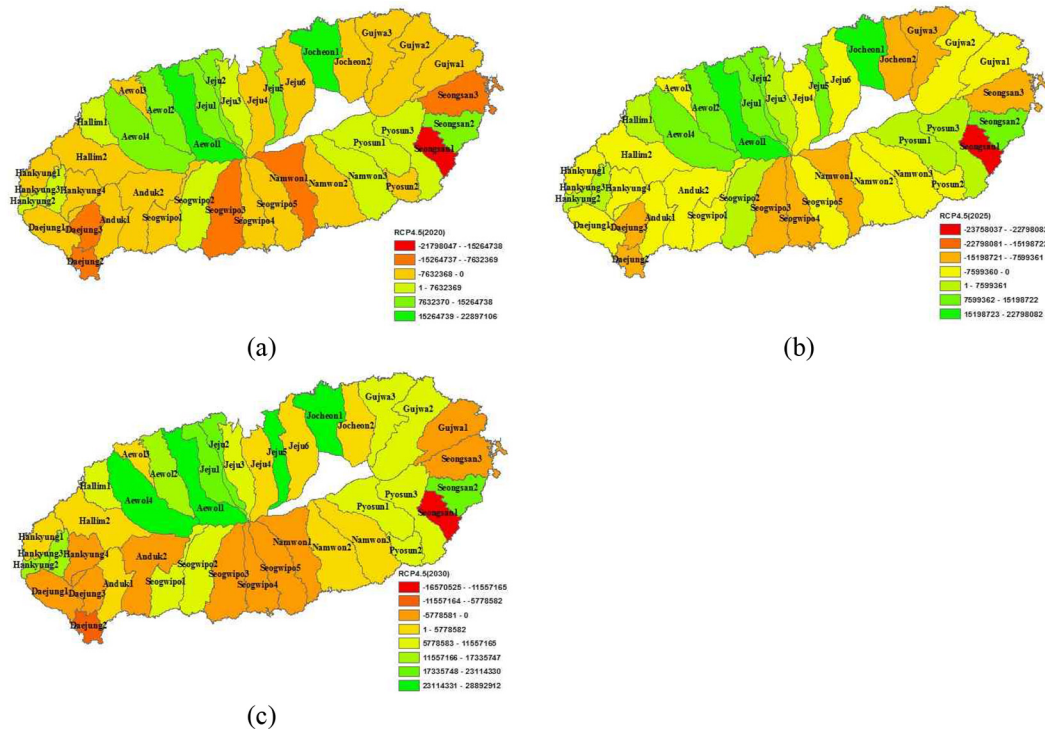


Fig. 3. Distribution map of available groundwater supply versus water demand for sub-regions with RCP 4.5: 2020 (a), 2025 (b), 2030 (c).

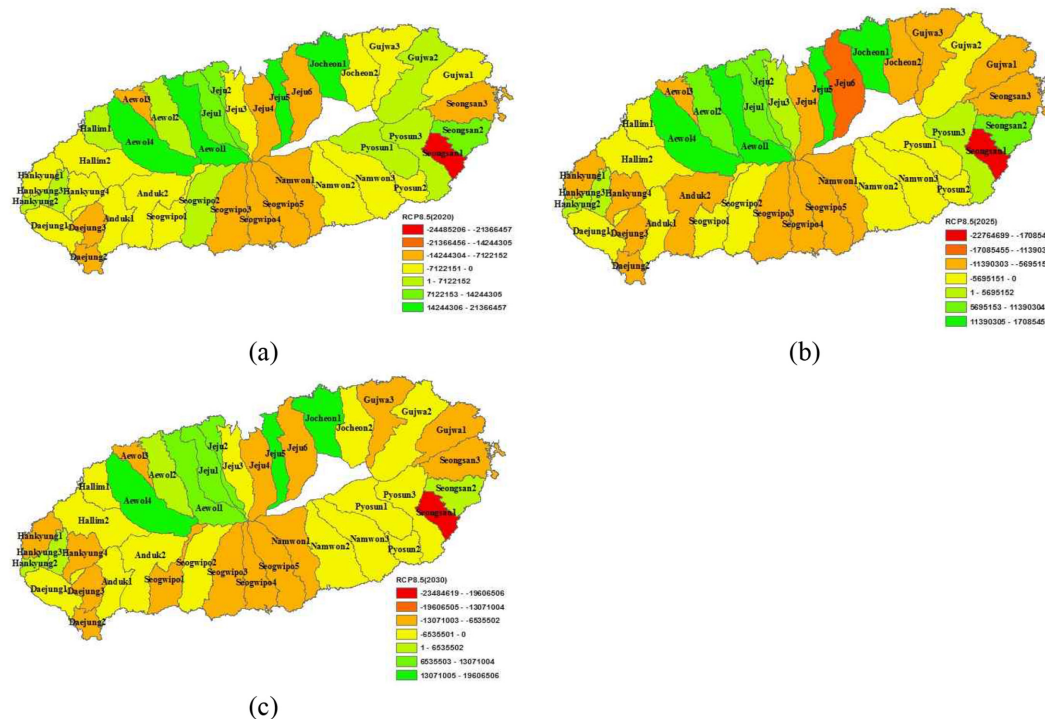


Fig. 4. Distribution map of available groundwater supply versus water demand for sub-regions with RCP 8.5: 2020 (a), 2025 (b), 2030 (c).

적으로 평균보다 낮은 것으로 분석되었다.

RCP 4.5 시나리오에 따른 2020년과 2025년의 경우 지

하수 함양율은 각각 40.7%와 39.1%로 제주도 평균값 44.5%에 비해 낮은 결과가 나타났으며, 특히 서부지역의

대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역의 구좌읍, 성산면이 평균보다 낮게 분석되었다. 반면 2030년의 경우에는 지하수 함양율이 46.9%로 기존의 평균값 44.5%에 비해 2.4% 높은 결과가 나타났으며, 앞서 평균 보다 낮은 지역의 경우 여전히 동일하지만 편차가 상대적으로 적어지는 결과로 분석되었다.

RCP 8.5 시나리오 분석 결과 2020년의 지하수 함양율은 40.3%로 기존의 평균값 44.5%에 비해 4.2% 낮은 결과가 나타났으며, RCP 4.5 시나리오의 결과와 마찬가지로 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역의 구좌읍, 성산면이 평균보다 낮게 분석되었다. 특히 한림읍과 한경면의 경우에는 약 25% 전후의 매우 낮은 함양율이 예측됨에 따라 이에 대한 대책 수립이 필요하다. 2025년의 경우에는 지하수 함양율이 39.3%로, 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역의 구좌읍, 성산면과 더불어 북부지역의 제주동지역 전체적으로 평균보다 낮게 분석되었다. 2030년의 경우에는 지하수 함양율이 34.4%로 가장 낮게 나타났으며, RCP 4.5 시나리오의 결과와 마찬가지로 서부지역의 대정읍, 한경면, 한림읍과 동부지역의 구좌읍, 성산면이 평균보다 낮게 분석되었다.

RCP 4.5 시나리오를 대상으로 연구 결과에 따른 농업용수 수요량 674,523,687 m³/년(1,848,010 m³/일) 대비 미래 기간(2020, 2025, 2030년)의 지하수 공급 가능량은 2020년과 2025년의 경우 -51,747,320 ~ -15,344,244 m³/년 정도 부족한 것으로 분석되었으며, 특히 서부지역인 대정읍, 한경면, 한림읍, 안덕면과 동부지역인 구좌읍, 성산면, 조천 및 표선읍의 일부권역에서 부족한 것으로 나타났다. 이에 비해 2030년은 전반적으로 농업용수 수요량 대비 지하수 공급 가능량은 상대적으로 여유가 있는 것으로 분석되었다.

RCP 8.5 시나리오를 대상으로 연구 결과에 따른 농업용수 수요량 대비 미래 기간의 지하수 공급 가능량은 -110,040,376 ~ -50,456,902 m³/년 정도 부족한 것으로 나타났으며, 특히 서부지역인 대정읍, 한경면, 한림읍, 안덕면, 애월읍 일부권역과 동부지역인 구좌읍, 성산면, 조천 및 표선읍의 일부권역, 북쪽과 남쪽지역인 제주시와 서귀포시의 일부권역에서 부족한 것으로 나타났다. 따라서 RCP 8.5 시나리오의 경우 제주도 전체적으로 농업용수 수요량 대비 지하수 공급 가능량은 부족한 것으로 분석되었다.

사 사

이 연구는 제주도 농업용수 통합 광역화 사업과 환경부

“상시가뭍지역의 지하수 최적 공급관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well Network 기술 개발” 연구과제의 지원에 의해 이루어졌습니다.

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.
- Choudhury, B.J. and Blanchard, B.J., 1983, Simulating Soil Water Recession Coefficients for Agricultural Watershed, *Water Resour. Bull.*, **19**(2), 241-247.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2013, Jeju Special Self-Governing Province Master Plan for Water Resources Management, 7-19 p.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service), 2019, <https://kosis.kr/> [accessed 19.02.11]
- MOE EGIS (Ministry of Environment Environmental Geographic Information Service), 2017, <https://egis.me.go.kr/> [accessed 17.10.15]
- Song, S.-H., An, J.-G., Lee, B.-S., and Koo, M.-H., 2017, Development of Assessment Technology for Agricultural Drought using the Analysis of Real-time Groundwater Data, MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs) and KRC (Korea Rural Community Corporation), 263 p.
- Song, S.-H. and Choi, K.-J., 2012, An appropriate utilization of agricultural water resources of Jeju island with climate change(I), *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(2), 62-70.
- Song, S.-H., Myung, 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.
- Song, S.-H., White, P., and Zemansky, G., 2012, Recent trend for the application of total economic value (TEV) estimation to groundwater resources, *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(2), 1-6.
- Thiessen, A.H., 1911, Precipitation averages for large areas, *Monthly Weather Review*, **39**(7), 1082-1089.
- USDA/NRC (US Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service), 1986, Urban Hydrology of Small Watersheds TR-55. Technical Release 55. Washington DC. 132-139.