韓國水資源學會論文集
第48卷 第11號·2015年 11月
pp. 915~923

J. Korea Water Resour. Assoc.
Vol. 48, No. 11:915-923, November 2015
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.11.915
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

제주도 지역의 고도에 따른 증발산량 및 용수량 특성 평가

Altitudinal Pattern of Evapotranspiration and Water Need for Upland Crops in Jeju Island

김 철 겸* / 김 남 원**

Kim, Chul Gyum / Kim, Nam Won

Abstract

A method of estimating irrigation water need based on water balance and net water consumption concept is proposed, and applied to four watersheds in order to assess the regional and altitudinal characteristics of evapotranspiration and water need for upland crops in Jeju Island. Potential and actual evapotranspiration, and net water need were calculated during the period 1992 to 2013 using SWAT-K watershed model. The annual potential evapotranspiration decreased linearly with increasing elevation, while actual evapotranspiration showed increase with elevation to 400 m around and gradual decrease at higher elevation due to vegetation species, water availability, and cold limitation. Altitudinal pattern of net water need showed linear decrease with increasing elevation for three watersheds (Han-cheon, Cheonmi-cheon, and Oedo-cheon), and annual values of net water need for upland areas (below 200 m in elevation) were 559~680 mm/yr. The comparison between actual pumping rate from wells and net water need for irrigation area showed that the amount of pumping water significantly increased during summer season (June to August), while net water need for crop cultivation relatively decreased during this period. To ensure these results, more water use data from pumping wells and additional watersheds should be investigated in the next study.

Keywords : Jeju Island, water need, evapotranspiration, water balance, altitudinal pattern

요 지

본 연구에서는 유역 물수지 방법을 기반으로 제주도 지역에 적합한 용수량 산정방법을 제안하고, 이를 기반으로 4개 하천유역에 대해 지역 및 고도에 따른 증발산량, 용수량 특성을 평가하였다. SWAT-K 유역모형을 적용하여 1992~2013년 기간에 대해 잠재증발산량과 실제증발산량을 산정하고, 이로부터 유역의 순물소모량을 추정하였다. 고도증가에 따라 잠재증발산량은 선형으로 감소하는 반면, 실제증발산량은 강수량에 의한 토양내 가용수분의 증가로 인해 약 400 m 고도까지는 증가하다가 이후 고도에서는 식생, 가용수분의 감소, 저온현상 등으로 인해 감소하는 것으로 나타났다. 고도에 따른 순물소모량은 강정천유역을 제외한 3개 유역에서 고도증가에 따라 순물소모량이 선형적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 고도 200 m 이하 작물경작지에서의 순물소모량은 연간 559~680 mm로 분석되었다. 추정된 용수량을 실제 관정 이용량과 비교한 결과, 여름철(6~8월) 양수량은 급수관행으로 인해 크게 증가하는데 비해, 작물경작에 따른 순물소모량은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 이에 대해서는 향후 더 많은 관정 이용량과 추가적인 대상지역을 반영하여 분석이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 제주도, 용수량, 증발산량, 물수지, 고도영향

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 연구위원 (e-mail: cgkim@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0545)
Corresponding Author, Research Fellow, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)
Senior Research Fellow, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

1. 서 론

제주도는 중심에 위치한 한라산(해발고도 1,950 m)의 영향으로 지역별·고도별 다양한 식생형태 및 기후특성을 가지고 있다. 해안지역에 위치한 4개 기상대(제주, 서귀포, 성산, 고산)의 연평균 강수량은 1,143 mm(고산)~1,967 mm(성산)의 범위를 보이며, 연평균 강수량을 기준으로 동부지역이 서부지역보다 1.7배 많고, 고도에 따라서도 표고 100 m 당 69~235 mm씩 크게 증가하는 특성을 보이고 있다(JSSGP, 2013b). Kim et al. (2012)이 PRISM 기법으로 제주도 전역에 대해 미계측 강수자료를 보완하여 산정한 연평균 강수량도 1,042 mm(상대)~5,245 mm(윗세오름)로서 지역에 따라 고도에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 기온의 경우 국립기상연구소·제주지방기상청의 보고서(NIMR and JRMA, 2010)에 의하면 약 -0.6℃/100 m의 고도에 따른 기온감소를 나타내고 있으며, Choi (2011)의 연구에서는 사면별 계절별로 약간의 차이는 있으나 평균 -0.61℃/100 m의 기온감률을 보이는 것으로 분석된 바 있다.

고도 및 지역에 따른 기상의 상이성은 경작지에서의 증발산과 용수량에 크게 영향을 주게 된다. 증발산량은 제주도 수자원의 절대적인 비중을 차지하는 지하수 함양량의 공간적인 분포를 추정하는 데 매우 중요하며, 특히 지역별 고도별 강수량이 큰 편차를 보이는 제주도에서는 지역 및 고도에 따른 증발산의 차이가 크게 나타날 수 있기 때문에 수자원의 평가 및 관리를 위해서는 이에 대한 정확한 이해가 선행되어야 한다.

제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022) (JSSGP, 2013b)에 따르면, 2011년 기준 제주도의 연간 수자원 총 이용량은 180백만㎥이며, 이 중 지하수 이용량이 전체의 83.9%인 151백만㎥/년이다. 또한 지하수 중 농업용 관정의 시설용량은 319백만㎥/년으로서 전체의 60%를 차지하고 있다. 즉, 제주도의 경우 내륙지역에 비해 지하수 의존도가 매우 높고 농업용 관정에 의한 수자원 이용이 큰 비중을 차지하고 있다. 농업용수는 작물을 주 대상으로 하기 때문에 기상 및 토양에 의한 생육환경에 의해 크게 좌우되는 특성이 있어 정확한 추정이 쉽지 않다. 따라서, 농업용수 수요량의 정확하고 합리적인 추정이 제주도 전체 수자원관리에 있어 매우 중요하다고 볼 수 있다.

농업용수 수요량을 산정하는 방법으로서는 사용수량을 직접 계측하는 방법, 대표작물의 단위수량으로 추정하는 방법, 증발산 이론을 이용하여 추정하는 방법 등이 있다. 우리나라에서는 현실적으로 농업지역에서의 계측자료가 충분하지 못하고, 자연조건에 따라 크게 좌우되는 농업용수의 특성상 증발산 이론에 의한 수요량 추정기법이 주로 적용되고 있으며, 그 중에서도 필요수량 개념의 접근법이 과거로부터 많이 활용되어 왔다(KOWACO and KRC, 2009). 이 방법은 경작지 내 작물의 생육에 필요한 수량을 공급하기 위한 목적으로 저수지나 관정 등의 시설용량 결정 및 계획 수립을 위해 활용되는 방법으로서, 1965년도에 처음 수립된 수자원장기종합계획에서부터 현재까지 우리나라 농업용수 수요량 추정에 적용되어 왔으며, 제주도 수자원관리종합계획(JSSGP, 2013b)에서도 적용되었다.

그러나 유역 수자원 관리의 관점에서, 경작지에서 필요한 수량은 경작지에서의 작물생산을 극대화하기 위해 공급해야 할 수량으로 볼 수 있으며, 이는 작물 경작상태의 최대증발산량(즉, 잠재증발산량)에서 경작이전상태의 실제증발산량을 감한 수량으로 추정할 수 있다(Pidwirny, 2006). 이를 순물소모량이라 정의하며(MOC, 1977), 유역규모의 수자원 부존량 해석 및 장래 용수 이용에 따른 수자원의 과부족 해석, 수자원관리계획 수립을 위해서는 유역 물수지 방법에 의한 순물소모량 개념의 접근방법이 필요하다. 우리나라에서는 1977년 처음으로 낙동강유역하구조사 기술보고서(MOC, 1977)에서 순물소모량 개념에 의해 유역단위의 농업용수 수요량을 추정한 바 있으며, 이후 제3차 수자원장기종합계획(1991-2000)(KOWACO, 1990), 21세기를 바라보는 수자원전망(KOWACO, 1993), 수자원개발 가능 지점 및 광역배분계획 기본조사(MOCT and KOWACO, 1996) 등에서 이 방법을 활용하여 미래의 용수수급 전망을 분석한 바 있다.

본 연구에서는 제주도 지역에 적합한 용수량 산정방법을 제안하고, 이를 기반으로 지역 및 고도에 따른 증발산량, 용수량 특성을 평가하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 제주도 농업지역에 적합한 용수량 산정방법

「낙동강유역하구조사 기술보고서」(MOC, 1977)에 의하면, 농업용수 순물소모량은 '물사용으로 인하여 증가된 물소모량'으로 정의하고 있다. 농지개발 후 하류하천의 유량은 농지내 경작된 식생의 증발산과 침투량만큼 상류에서 공급한 후에 이루어진 유량이기 때문에 순물소모량은 자연상태에서의 하천유량과 농지개발 후의 하천유량 간의 차이라고 설명할 수 있다. 즉, 농업용수의 순물소모량은 농경지 이전의 초원상태를 자연상태로 가정할 때 농경지 물소모량에서 초원상태의 물소모량을 감하여 산정할 수 있다.

Fig. 1과 같은 유역에서 전체 유역면적을 A_n, 강우량을

R, 자연상태하의 증발산량과 침투량을 각각 E_n과 L_n, 상류지점의 유입량을 q라고 정의하면, 자연상태하의 하류지점의 유출량 Q_n은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_n = q + (R - E_n - L_n) \cdot A_n \quad (1)$$

만약, 위의 유역에서 A_i의 면적만큼 농지로 변환되어 관개가 이루어진다고 가정한다면, 이 때 하류지점의 유출량 Q_i는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_i = q + (R - E_n - L_n) \cdot (A_n - A_i) + (R - CU - L_i) \cdot A_i \quad (2)$$

여기서, CU는 농경지에서의 소비수량, L_i은 농경지에서의 침투량이다. 따라서, 농지에서의 관개로 인하여 발생되는 순물소모량은, 다음과 같이 자연상태하의 유량 Q_n과 농경지 변환 후의 유량 Q_i의 차이로서 나타낼 수 있다.

$$Q_n - Q_i = (CU + L_i - E_n - L_n) \cdot A_i \quad (3)$$

관개시설이 없는 자연상태의 손실에 해당하는 L_n은 결국 하천으로 회귀하기 때문에 이를 무시한다고 가정하고, 위 식을 단위면적당 소모량으로 나타내면 다음과 같이 정리할 수 있다(MOC, 1977).

$$\Delta_i = CU + L_i - E_n \quad (4)$$

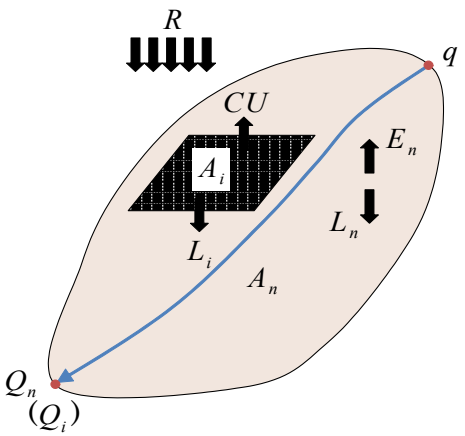


Fig. 1. Conceptual Diagram of Water Balance in a Watershed

제주도는 경지면적 중 밭의 비율이 99.9% 이상이며(JSSGP, 2011), 대부분 관정에 의한 지하수를 이용하여 스프링클러 또는 점적관개에 의해 용수량을 공급하고 있다. 또한, 제주도 밭작물은 관개특성상 침투에 의한 손실량이 거의 미미하고 일부 침투되는 양도 결국에는 수원인 지하수로 회귀된다고 볼 수 있으므로, Eq. (4)는 다음과 같이 간단히 정리될 수 있다.

$$\Delta_i = CU - E_n \quad (5)$$

즉, 제주도 지역에서의 농업용수 수요량은 작물 경작에 따른 최대소비수량(잠재증발산량)에서 자연식생상태의 소비수량(실제증발산량)의 차이로 계산될 수 있다(Pidwirny, 2006).

2.2 대상유역 및 입력자료

실제증발산량은 작물의 생육과정, 기상조건, 토양의 수분상태 등에 따라 달라지기 때문에 이에 대한 정확한 산정을 위하여 SWAT-K 유역모형(KICT, 2007)을 적용하였다. SWAT-K 모형은 미국 USDA-ARS에서 개발한 유역모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1993)을 기반으로, 복잡하고 다양한 국내 유역조건에 대한 적용성을 개선하고 모의 신뢰성을 제고시킨 모형이다. 이미 「제주형 지표수-지하수 통합수문해석 기술개발」(KICT, 2011) 연구를 비롯한 Chung et al. (2011)과 Kim et al. (2013)의 연구를 통해, 제주도 지역의 독특한 지질조건 및 기상조건 등에 따른 하천의 유출 특성과 수문성분에 대한 해석을 위해 SWAT-K 모형 구조를 개선하고 그 적용성을 검증한 바 있다.

본 연구에서는 SWAT-K 적용성이 검토된 한천, 외도천, 강정천, 천미천을 대상으로 모형을 구축하였다(Fig. 2). 모형 내 각 매개변수는 기존 연구(Chung et al., 2011; KICT, 2011; Kim et al., 2013)에서 제시하고 있는 각 유역별 보정된 값을 적용하였으며, GIS 자료를 통해 분석한 각 유역의 면적 및 토지이용, 고도, 평균경사 등의 현황은 Table 1과 같다.

각 대상유역별 하천형태 및 고도에 따른 지형적 특성을

Table 1. Geomorphological Characteristics of Study Watersheds

Watershed	Area (㎢)	% of landuse type						Altitude (EL. m)			Slope (m/m)
		Forest	Pasture	Cropland	Orchard	Urban	Others	Min	Max.	Avg.	
Han-cheon	85.60	45.3	11.7	15.9	9.1	18.0	0.0	2	1913	455	0.12
Cheonmi-cheon	230.81	32.2	35.6	17.1	12.6	2.3	0.2	1	1298	287	0.06
Gangjeong-cheon	101.21	55.1	6.4	6.9	26.2	5.1	0.3	2	1704	507	0.12
Oedo-cheon	87.03	47.2	25.0	10.5	13.3	3.9	0.1	1	1786	596	0.13

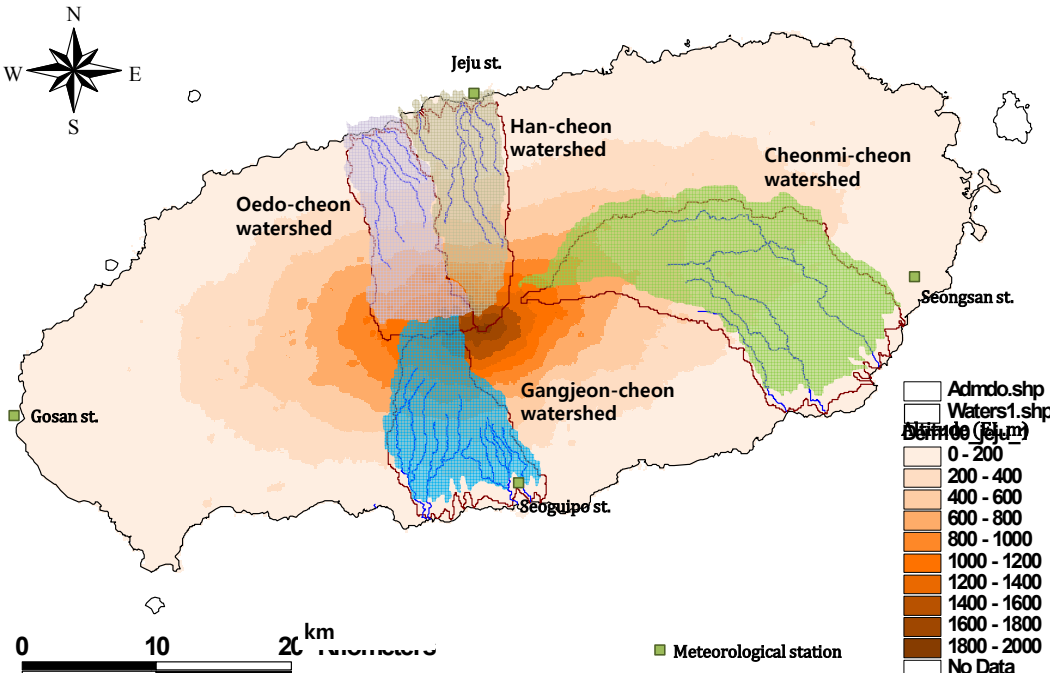


Fig. 2. Study Watersheds

고려하여 한천 37개, 천미천 39개, 강정천 40개, 외도천 28개의 소유역으로 구분하여 모델링을 수행하였다.

잠재증발산량은 모형 내에 포함된 FAO 56에서 제시하는 Penman-Monteith 방법을 이용하였다. 제주도 4개 기상대의 일 관측자료(기온, 풍속, 상대습도)를 활용하였으며, 기온은 기존의 Choi (2011)의 연구결과를 참조하여 고도에 따른 기온감률 -0.6℃/100 m를 적용하였다. 또한, 잠재증발산량 산정을 위해 필요한 태양복사량은 관측 일조시간으로부터 Angstrom 공식(Allen et al., 1998)을 이용하여 환산하여 적용하였다. 모델링에 필요한 강수자료는 Kim et al. (2012)이 적용한 PRISM 기법에 의해 생산된 격자별 강수량을 대상유역의 소유역 구분에 따라 소유역별로 평균 강수량을 재생산하여 적용하였다.

모델링을 통한 분석기간은 Kim et al. (2012)에서 활용한 1992~2010년의 기간에 최근의 3년을 추가하여 전체 22년(1992~2013년)을 대상으로 하였다.

3. 연구결과

3.1 고도에 따른 증발산량 변화

기존 제주도 지역의 증발산 관련 연구 결과를 보면, 고도증가에 따라 잠재증발산량이 감소한다는 것에는 일치된 의견을 보이고 있으나, 실제증발산량에 대해서는 연구자에 따라 의견이 분분하다. 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)(JSSGP, 2013b)에서는 FAO의 Penman-Monteith 방법에 의해 산정된 잠재증발산량으로부터 식생별 작물계수와 토양수분조건, 강우조건, 작물별 뿌리심도 등을 고려하여 실제증발산량을 산정하여 분석한 결과 고지대 산림과 초지의 영향으로 인해 실제증발산량이 증가하는 경향을 보인다고 제시하고 있다. 그러나, 같은 보고서에서 비교한 MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)에서 산정한 증발산량은 고도증가에 따라 감소하는 것으로 나타나 상반된 결과를 나타내고 있다. Lee et al. (2012)은 고도가 다른 제주기상청 노장(해발고도 20 m)과 한국공항 부지(해발고도 356 m)의 두 지점에 대해, 잠재증발산량과 소형증발계 증발량 값이 높은 상관성이 있으므로 고도가 낮고 소형증발계 증발량이 높은 제주기상청의 실제증발산량이 해발고도가 높은 곳에 위치한 한국공항보다 많다는 결과를 도출한 바 있다.

그러나, Zhang et al. (2007)이 비교적 자연상태의 티벳 고원 지역에 대해 분석한 연도별(1966~2001년) 증발산 경향에 대한 연구에서는 기온이 크게 증가했음에도 기준증발산량과 접시증발량이 감소하고, 또한 모든 소유역에서의 실제증발산량이 증가하는 경향을 보인다고 제시하고 있다. 이는 Lee et al. (2012)의 연구결과와 달리 잠재증발산량과 증발계 증발량이 높은 상관성이 있지만, 반드시 실제증발산량과 비례적 관계에 있지 않음을 알 수 있다. 작물생장이 이루어지는 경작지에서의 실제증발산량은 토

양의 가용수분, 즉 강수량의 영향을 지배적으로 받기 때문에, 제주도와 같이 고도에 따라 강수량의 차이가 크거나 식생의 영향이 지배적인 경우에는 지역별 고도별 식생 및 강수량의 영향에 대한 정확한 평가가 함께 수반되어야 할 것이다.

Fig. 3은 소유역별로 산정된 강수량, 잠재증발산량, 실제증발산량과 평균고도와의 관계를 도시한 것이다. 고도증가에 따라 강수량이 급격하게 증가하는 반면, 잠재증발산량은 선형으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, Table 2와 같이 강수량의 증가율은 +1.02~+1.75 mm/m (평균 +1.43 mm/m), 잠재증발산량의 감소율은 -0.32~-0.28 mm/m (평균 -0.30 mm/m)로 나타났다.

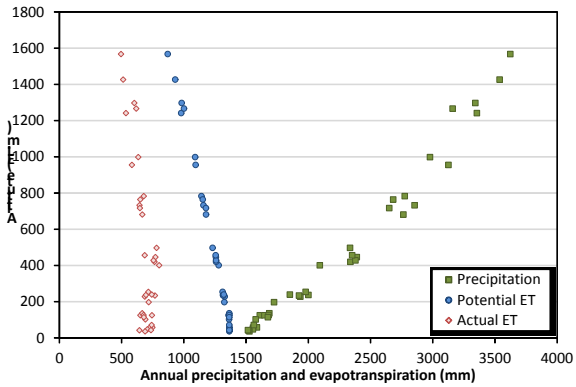
실제증발산량은 강수량에 의한 토양수분 증가로 인해 잠재증발산량과는 반대로 약 200~400 m 고도까지는 증가하는 경향을 보이고, 이후 고도에서는 식생, 가용수분의 감소, 기상조건에 의한 잠재증발산량의 영향 등으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Goulden et al. (2012)의 연구에서도 유사하게 나타나고 있는데, 캘리포니아주의 남부 Sierra Nevada 산악지대에서 저지대에서는 강수량이 작기 때문에 증발산량이 낮게 나타나고, 고도증가에 따라 일정 고도까지는 증발산량이 증가하다가 고지대에서는 저온현상으로 인하여 다시 감소하는 것으로 나타났다.

3.2 고도에 따른 용수량 변화

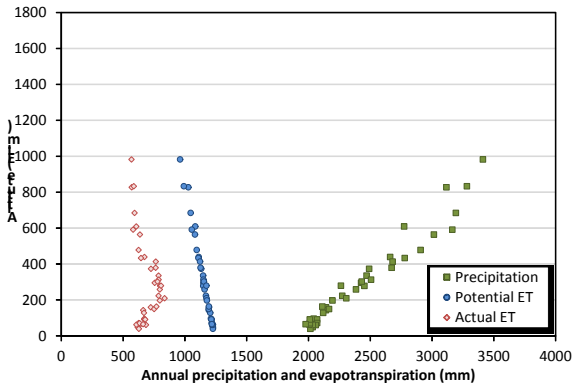
순물소모량을 산정하는 Eq. (5)에서 자연상태의 실제증발산량은 초원을 가정하기도 하는데(MOC, 1977), 본 연구에서는 잔디를 가정하여 적용하였다. 소비수량 및 순물소모량 산정을 위한 대표작물로서는 2010년을 기준(JSSGP, 2013b)으로 제주도 내 약 36%의 재배면적을 차지하고 있는 감귤을 선정하였다. 단, 대표작물로 선정된 감귤은 연중 물사용량이 가장 많은 작물을 가정한 것으로 수자원 관리 및 계획의 입장에서 경작지에서의 최대의 물소모를 의미한다.

Table 2. Lapse Rate of Precipitation and Potential ET with Elevation

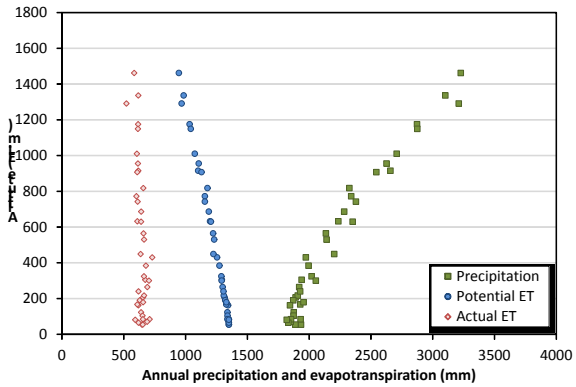
Watershed	Lapse rate (mm/m)	
	Precipitation	Potential ET
Han-cheon	+1.51	-0.32
Cheonmi-cheon	+1.75	-0.28
Gangjeong-cheon	+1.02	-0.29
Oedo-cheon	+1.43	-0.31



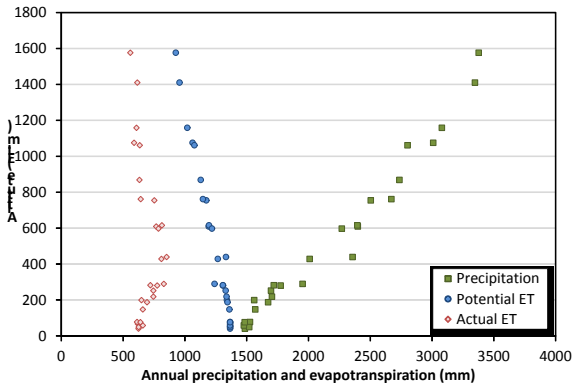
(a) Han-cheon watershed



(b) Cheonmi-cheon watershed



(c) Gangjeong-cheon watershed



(d) Oedo-cheon watershed

Fig. 3. Altitudinal Precipitation and Evapotranspiration for Study Watersheds

1992~2013년 기간에 대해 분석한 각 유역별 자연상태 증발산량, 최대소비수량, 연평균 순물소모량은 Table 3과 같다. 상대적으로 연평균 강수량이 적은 외도천유역의 순물소모량이 큰 것으로 분석되었으며, 반면에 강수량이 많은 천미천유역의 순물소모량이 가장 작게 나타났다. 이는 Fig. 3의 고도에 따른 강수량과 잠재증발산량의 반비례관계와 같이 강수량이 많은 천미천유역의 잠재증발산량(최대소비수량)이 가장 작은 반면 자연상태의 실제증발산량은 유역간 차이가 크지 않기 때문인 것으로 분석된다.

Fig. 4는 유역별로 고도에 따른 순물소모량의 변화를 도시한 것이다. 인접하여 위치한 한천유역과 외도천유역의 순물소모량 경향이 유사하게 나타나고 있으며, 강정천유역을 제외한 나머지 3개 하천유역의 순물소모량이 고도가 증가함에 따라 선형에 가깝게 감소하는 경향을 보이고 있다. 강정천유역의 경우 고도 300 m까지는 큰 변화가 없으나 이후 고도부터는 나머지 유역과 마찬가지로 감소하는 것으로 나타났다. 강정천유역을 제외한 3개 하천유역의 순물소모량에 대한 고도별 감소율은 한천유역 -0.45 mm/m, 천미천유역 -0.49 mm/m, 외도천유역 -0.52 mm/m로 분석되었다.

제주도의 경우 밭작물의 90.4%가 고도 200 m 이하의 저고도 해안지대에서 경작되고 있기 때문에(JSSGP, 2013a), 작물경작지에서의 순물소모량은 Table 4와 같이 연간 559 ~ 680 mm로 정리할 수 있다.

3.3 실제 관정이용량과의 비교

본 연구로부터 산정된 용수량이 경작지에서의 용수이용 특성을 잘 반영할 수 있는지 여부를 판단하기 위하여 실제 관정이용량 자료를 활용하여 해당지역의 용수량과 비교하였다.

본 연구에서는 수자원 관리 및 계획의 입장에서 연간 물 사용량이 가장 많은 작물을 가정하여 용수량을 산정하였기 때문에, 이 조건과 유사한 시설재배(하우스감귤) 급수를 위한 관정을 선정하여 비교하였다.

Fig. 5는 제주특별자치도 농업용수 관리계획(2013-2022)

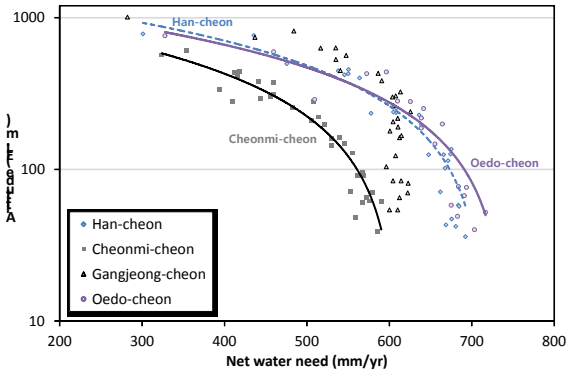


Fig. 4. Altitudinal Pattern of Net Water Need for Each Watershed

Table 3. Annual Consumptive Water Use and Net Water Need of Citrus

Watershed	P [1]		E_n [2]		CU [3]		Δ_i [4]	
	Min.~Max.	Avg.	Min.~Max.	Avg.	Min.~Max.	Avg.	Min.~Max.	Avg.
Han-cheon	1,160~2,740	1,824	614~759	696	1,173~1,507	1,328	493~770	631
Cheonmi-cheon	1,516~2,951	2,103	549~764	647	966~1,405	1,199	411~688	552
Gangjeong-cheon	1,340~2,871	1,917	640~748	691	1,158~1,434	1,298	502~693	607
Oedo-cheon	1,029~2,397	1,600	590~747	680	1,186~1,524	1,342	509~813	662

[1] P: Precipitation (mm)
[2] E_n: Actual evapotranspiration of grass cultivated area (mm)
[3] CU: Maximum consumptive water use of citrus cultivated area (mm)
[4] Δ_i: Net water need of citrus ($CU - E_n$)

Table 4. Annual Net Water Need Below 200 m in Altitude for Each Watershed

Watershed	Annual net water need (mm/yr)			
	Min	Max.	Avg.	Standard deviation
Han-cheon	639	692	671	13.7
Cheonmi-cheon	521	590	559	19.7
Gangjeong-cheon	596	623	610	7.7
Oedo-cheon	639	717	680	21.9

보고서(JSSGP, 2013a)에 제시된 관정 중 강정천유역 내에 위치한 토평, 서호 2개소에 대해 실제 양수량과 순물소모량을 월별로 비교한 것이다. 관정의 실제 양수량은 무선통신망을 통해 수신된 수중모터펌프 가동시간에 관정별 단위시간당 출수량을 곱함으로써 산정되고 있다(Park et al., 2007).

Table 5는 2개 관정에 대한 급수면적 및 2004~2010년 기간에 대해 관측된 양수량을 기준으로 한 이용량 특성을 정리한 것이다.

Fig. 5를 보면 대체적으로 여름철(6~8월)에 양수량이 증가하는데 반해 순물소모량은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 순물소모량의 정의에 따라 이미 경작이전에도 여름철 자연상태(초지)에서의 물소모량이 크기 때문에 실질적으로 경작으로 인해 증가된 물소모량이 상대적으로 크지 않다고 해석할 수 있다.

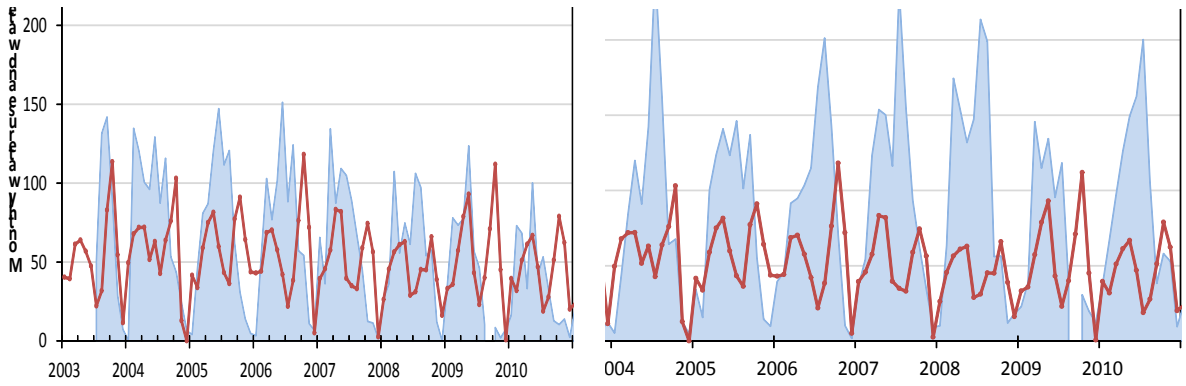
한편으로 Table 5에서도 알 수 있듯이, 관정별 1일 최대 물사용량(양수량)을 단위면적당 깊이로 환산하면 토평 33.2 mm, 서호 28.5 mm로 농경지에서의 최대증발산량과 침투량을 감안하여도 매우 큰 수치이다. 이러한 원인으로는 관행상 현장에서 양수시에 작물이 필요한 수량 외에 추가적인 급수를 실시하는 경우가 많기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 실제 용수량 계획시에 과도하게 급수되는 양을 추가적으로 고려하거나 또는 반대로 무분별한 급수나 불필요한 급수를 절제함으로써 물 사용량을 절감할 수 있는 기준으로 활용될 수도 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 유역 물수지 방법을 기반으로 제주도 지역에 적합한 순물소모량 개념의 농업용수 수요량 추정방법을 제안하였으며, 수요량 추정에 있어 가장 핵심적인 수문요소인 증발산량의 지역적 특성을 함께 분석하였다.

고도에 따른 증발산량의 변화를 분석한 결과, 고도증가에 따라 잠재증발산량은 선형으로 감소하는 경향을 보이는 반면, 실제증발산량은 강수량에 의한 토양내 가용수분의 증가로 인해 약 200~400 m 고도까지는 증가하다가 이후 고도에서는 식생, 가용수분의 감소, 저온현상 등으로 인해 감소하는 것으로 나타났다. 대상유역에 대해 고도에 따른 잠재증발산량의 감소율은 -0.32 mm/m~-0.28 mm/m로 나타났다.

대표작물을 가정하여 산정한 순물소모량은 연평균 강수량이 적은 외도천유역이 가장 많은 것으로 분석되었으며, 상대적으로 강수량이 많은 천미천유역의 순물소모량이 가장 적게 나타났다. 고도에 따른 순물소모량을 분석한 결과, 4개 대상유역 모두 고도가 증가할수록 순물소모량이 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 강정천유역을 제외한 3



(a) Topyeong (b) Seoho

Fig. 5. Monthly Pattern of Actual Water Use and Net Water Need for Irrigated Areas

Table 5. Irrigated Area and Water Use Characteristics of Selected Wells

Well station	Location	Altitude (EL.m)	Irrigated area (ha)	Maximum water use (㎥/day/ha)	Average water use (㎥/day/ha)
Topyeong	Seoguipo-si Topyeong-dong	94	1.1	332	22
Seoho	Seoguipo-si Seohodong	74	0.7	285	31

*Source : Jeju Special Self-Governing Province (2013a)

개 하천유역은 순물소모량이 고도와 선형으로 반비례하는 것으로 분석되었다. 각 유역별 고도에 따른 순물소모량 감소율은 한천유역 -0.45 mm/m, 천미천유역 -0.49 mm/m, 외도천유역 -0.52 mm/m이며, 작물경작이 주로 이루어지는 고도 200 m 이하 지역에서의 순물소모량은 연간 559~680 mm로 나타났다.

추정된 용수량을 실제 관정 이용량과 비교한 결과, 여름철 양수량은 급수관행으로 인해 크게 증가하는데 비해, 작물경작에 따른 순물소모량은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 이에 대해서는 향후 더 많은 관정 이용량과 추가적인 대상지역을 반영하여 분석이 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서 제시하는 용수량은 실제 경작지에서의 물사용량을 산정한 것이 아니라, 수자원 관리 및 계획의 관점에서 연간 물소모량이 가장 많은 작물을 가정하여 산정한 것이다. 또한, 기존 필요수량 개념의 수요량처럼 관개시설의 용량이나 규모를 결정하기 위한 최대치 개념도 아니다. 따라서, 거시적으로는 과거-현재-미래에 대한 지역별 계절별 수요량을 산정함으로써, 수자원의 과부족 평가, 수자원의 추가확보 및 합리적인 배분계획 수립 등에 활용될 수 있으며, 미시적 관점에서는 추정된 용수량과의 비교를 통해 현장에서 관행적으로 이루어지는 추가 급수량을 반영하거나, 또는 반대로 불필요한 급수 관행을 절제함으로써 농업용수 사용량을 절감할 수 있는 판단 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 제주권 건설교통기술 지역거점센터의 연구비지원(과제번호 : 14RDRP-B076275-01-000000)에 의해 수행되었습니다.

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). Food and Agriculture, Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.

Choi, G. (2011). "Variability of temperature lapse rate with height and aspect over Halla mountain." *Journal of Climate Research*, Vol. 6, No. 3, pp. 171-186.

Chung, I.M., Lee, J., Kim, J.T., Na, H., and Kim, N.W. (2011). "Development of threshold runoff simulation method for runoff analysis of Jeju Island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 10, pp. 1347-1355.

Goulden, M.L., Anderson, R.G., Bales, R.C., Kelly, A.E., Meadows, M., and Winston, G.C. (2012). "Evapotranspiration along an elevation gradient in California's Sierra Nevada." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, G03028, doi:10.1029/2012JG002027.

Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP) (2011). The 51st Jeju statistical yearbook.

Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP) (2013a). The agricultural water management plan for Jeju Special Self-Governing Province (2013-2022).

Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP) (2013b). The water management comprehensive plan for Jeju Special Self-Governing Province (2013-2022).

Kim, N.W., Chung, I.M., and Na, H. (2013). "A method of simulating ephemeral stream runoff characteristics in Cheonmi-cheon watershed, Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 523-531.

Kim, N.W., Um, M.J., Chung, I.M., and Heo, J.H. (2012). "Estimating the total precipitation amount with simulated precipitation for ungauged stations in Jeju Island." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 875-885.

Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2007). Development of analysing system for sustainable water hydrological components. Sustainable Water Resources Research Program of 21st Century Frontier R&D Program, Ministry of Science and Technology.

Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2011). Jeju Water Circulation Interpretation and Water Resource Management Infrastructure Establishment: Development of the integrated surface-groundwater hydrologic analysis technique in Jeju Island. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning.

Korea Water Resources Corporation (KOWACO) (1990). The long-term comprehensive plan for water resources (1991-2000).

Korea Water Resources Corporation (KOWACO) (1993). Outlook for 21st century water resources.

Korea Water Resources Corporation (KOWACO), and Korea Rural Community Corporation (KRC) (2009). Report on estimation of agricultural water demand and assessment of water supply.

Lee, B.Y., Yang, S.K., Kwon, K.H., and Kim, J.B. (2012). "The effect of evapotranspiration by altitude and observation of lysimeter." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 21, No. 6, pp. 749-755.

Ministry of Construction (MOC) (1977). Technical report on the Nakdong-gang estuary.

Ministry of Construction Transportation (MOCT), and Korea Water Resources Corporation (KOWACO) (1996). Basic survey on the exploitable place and regional distribution plan of water resources.

National Institute of Meteorological Research (NIMR), and Jeju Regional Meteorological Administration (JRMA) (2010). Understanding climate change VI: Climate change of Jeju.

Park, W.B., Ko, G.W., Kim, B.S., and Moon, D.C. (2007). "Calculation of pumping rate from agricultural wells and characteristics of groundwater abstraction." Proceedings of the 12th Academic Seminar for World Water Day, pp. 87-118.

Pidwirny, M. (2006). Actual and potential evapotranspiration. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition, Date Viewed, http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8j.html

Zhang, Y., Liu, C., Tang, Y., and Yang, Y. (2007). "Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, D12110, doi:10.1029/2006JD008161.

paper number : 15-067
Received : 31 August 2015
Revised : 18 September 2015
Accepted : 18 September 2015