ORIGINAL ARTICLE

제주 한천유역의 실제 증발산량 평가

김남원 · 이정은*

한국건설기술연구원 수자원연구실

Assessment of Actual Evapotranspiration in the Hancheon Watershed, Jeju Island

Nam Won Kim, Jeong Eun Lee*

Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do,
411-712, Korea

Abstract

In this study, estimation methods for actual evapotranspiration have been studied using the concept of potential and actual evapotranspiration. Among the diverse estimation methods, SWAT-K application is chosen for hydrological modeling. For Jeju island we have characterized annual and monthly evapotranspiration using SWAT-K. In the results, simulated potential evapotranspiration reached to the 91% of small pan evaporation. With respect to the temperature lapse rate(-6 °C/km) depending on the altitude of Halla mountain, evapotranspiration rate decreased by 7.5% compared to the status when the temperature data from the Jeju weather station were applied to the watershed. As the average of annual rainfall increased, potential evapotranspiration was increased, actual evapotranspiration was, however, decreased.

Key words : Actual and potential evapotranspiration, SWAT-K, Jeju island

1. 서 론

유역의 수문순환 해석과 한정된 수자원 관리 기반 구축 시 수문학적 물손실의 관점에서 증발산은 매우 중요한 요소이다. 제주도 유역은 우리나라 최대 다우 지역임과 동시에 내륙과는 상이한 수문학적, 지형학적, 지질학적 특성을 지니고 있어 강우량, 유출량, 증발산량, 지하수 함양량 등 각각의 수문성분에 대한 체계적인 연구는 미흡한 상황이다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012). 특히 수문성분 중에서 증발산은 물이 유역으로부터 제거되는 주

요기작이며, 강우량과 증발산량의 차이는 유역에서 유출, 함양되는 양으로 수자원 측면에서 이용, 관리할 수 있는 수량이 된다(Neitsch 등, 2011).

국내의 증발산량에 관련된 연구로는 Kim과 Kim (2004)이 유역 증발산 추정을 위해 Penman-Monteith 방법과 Morton CRAE 방법의 적용성을 평가한 바 있으며, Rim 등(2011)이 5개 댐유역에 대하여 유역 물 수지를 이용하여 연 실제 증발산량에 영향을 미치는 기후영향을 분석하였다. Lee 등(2012)은 제주유역의 고도에 따른 증발산 효과와 팬증발량과 라이시메타 관측값과 증발산량을 비교한 바 있으나, 제주유역을

Received 12 November, 2012; Revised 8 April, 2013;

Accepted 10 May, 2013

*Corresponding author: Jeong Eun Lee, Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do, 411-712, Korea
Phone: +82-31-910-0275
E-mail: jeus22@kict.re.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대상으로 유역 수문모델링을 적용하여 증발산량을 추정하는 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 잠재 및 실제증발산의 개념을 정리한 후, 유역의 실제 증발산량을 추정하는 방법에 대하여 검토하였다. 여러 추정방법 중 SWAT-K 모형(Kim과 Lee, 2008; 2010)이 구조적 개선을 통하여 정도 높은 각종 수문성분량을 산정할 수 있어 유역 수문모델링 방법으로 채택하였다. 정확한 증발산 추정의 중요성을 이해하고, 지표면에 도달한 물이 수증기로 변환되는 증발산의 모든 기작을 실제 제수도 유역에 적용하여 그간 상대적으로 다루기 쉽지 않았던 증발산량의 연, 월별 특성을 분석하였다. 또한, 증발산에 영향을 미치는 주요인자 중 하나인 온도에 대한 민감도를 분석하였으며, 유역 전체의 강수량과 잠재 및 실제 증발산량 간의 관계를 파악하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 잠재증발산 및 기준작물증발산

잠재증발산(Potential evapotranspiration)이란 용어는 Thornthwaite(1948)에 의해 처음으로 도입되었으며, 습윤지대, 건조지대 등과 같은 기후구분을 위해 사용되었다. 이후, Penman(1956)은 물이 부족하지 않은 상태에서 키가 작은 녹색작물(잔디)이 일정한 높이로 덮여 있을 때 단위시간 당 증발산하는 물의 양으로 정의하였다. Penman식(식 (1))은 처음에는 잠재증발산 개념으로 정의되었으나, 이후 기준작물 증발산(Reference crop evapotranspiration) 개념으로 바뀌게 된다.

$$ET_p = \frac{\Delta (H_{net} - G) + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

여기서, ET_p 는 Penman식을 이용한 잠재증발산(mm/d), H_{net} 은 순복사량(MJ/m²/d), G 는 지열 플럭스(MJ/m²/d), γ 는 습도상수(kPa/°C), E_a 는 공기동역학적 수증기 전도도(mm/d)이다. 이후, Priestley and Taylor(1972)(식 (2)), Jensen(1974), World Meteorological Organization(1974) 등 여러 연구들에 의해 정의가 내려졌다.

$$ET_p = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta (H_{net} - G)}{\Delta + \gamma} \quad (2)$$

여기서, ET_p 는 Priestly-Taylor식을 이용한 잠재증발산(mm/d)으로 주위환경이 습할 경우, 공기동역학적 요소는 제거하고, 에너지 요소로서 계수 α_{pet} 을 곱하였다. 따라서 Priestley-Taylor 식은 낮은 이류조건에서의 잠재증발산 추정에 적용될 수 있다. 그러나 Cuenca and Nicholson(1982)은 여러 잠재증발산의 개념이 실제응용에 있어 명쾌하지 못한 이유로 기준작물증발산 개념을 도입하였다. 기준작물증발산은 증발산 추정 시 어느 특정작물에 대한 증발산을 계산한 후, 다른 작물의 증발산을 추정할 때 기준으로 사용하는 개념이다. 이러한 잠재 증발산량에 대한 연구는 계속 진행 중에 있으며, 현재 Penman-Monteith식이 잠재증발산을 추정하는 표준방법으로 채택되어 널리 사용되고 있다(Allen 등, 1998).

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^o - e_z]/r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c/r_a)} \quad (3)$$

$$r_c = r_l / (0.5 \cdot LAI) \quad (4)$$

$$r_a = \frac{\ln[(z_w - d)/z_{om}] \ln[(z_p - d)/z_{ov}]}{k^2 u_z} \quad (5)$$

여기서, λ 는 잠열강도(MJ/m²/d), E 는 잠재 증발산량(mm/d), Δ 는 포화수증기압-온도 곡선의 기울기(kPa/°C), H_{net} 은 순복사량(MJ/m²/d), G 는 지열 플럭스(MJ/m²/d), ρ_{air} 는 공기밀도(kg/m³), c_p 는 일정 압력에서의 비열(MJ/kg/°C), e_z^o 는 높이 z 에서의 포화수증기압(kPa), e_z 는 높이 z 에서의 수증기압(kPa), γ 는 습도상수(kPa/°C), r_c 는 식생피복저항(s/m), r_a 는 공기역학적저항(s/m)이다. 또한, r_l 은 단엽의 최소유효 기공저항(s/m), LAI 는 피복에 대한 엽면적 지수이며, z_w 는 풍속 측정높이(cm), z_p 는 습도와 온도 측정의 높이(cm), d 는 풍속 단면의 영점 위치(cm), z_{om} 은 운동량 변환에 대한 조도길이(cm), z_{ov} 는 수증기 변환에 대한 조도길이(cm), k 는 von Karman 상수, u_z 는 높이 z_w

에서의 풍속(m/s)이다.

2.2. 잠재증발산과 실제증발산의 개념 및 관계

잠재증발산을 추정하는 대부분의 방법은 토양에 물이 충분히 공급될 경우이다. 그러나 실제증발산은 식생이 서식하는 곳의 물공급 상태, 기온조건, 토양의 성질에 따라 변화한다. 또한, 기준작물증발산을 이용할 경우, 실제증발산은 식생의 서식밀도, 엽면적 지수 등 식생학적 인자에도 매우 큰 영향을 받는다. 이러한 인자들로 인하여 물리적 개념으로 실제증발산을 규명하지 못하고 있는 실정이다(Choudhury와 Blanchard, 1983). 하지만 잠재증발산을 추정하는 데 있어 실제증발산에 영향을 미치는 인자들은 증발산에 거의 영향을 주지 않기 때문에 증발산 과정을 물리적으로 규명하여 정립할 수 있다. 따라서 경험적 혹은 실험적 방법에 따라 잠재증발산과 실제증발산과의 관계를 제시하고 있다. 일반적으로 기준작물증발산과 식생에 따른 잠재증발산의 관계는 식 (6)과 같다.

$$ET_p = K_c \cdot ET_o \quad (6)$$

여기서, ET_p 는 잠재 증발산량, K_c 는 작물계수(식생 종류, 발달과정, 성장기간, 성장률, 기후조건에 영향을 받음), ET_o 는 기준작물증발산량이다. 이들 관계에 토양조건에 따른 실제 증발산량과의 관계를 정립하면 식 (7)과 같다.

$$ET_a = K_s \cdot ET_p \approx K_s \cdot K_c \cdot ET_o \quad (7)$$

여기서, ET_a 는 실제 증발산량, K_s 는 저항계수(토양 수분, 성질, 기상학적 조건에 영향을 받음)이다. 마지막으로 토양증발의 효과를 고려한 것이 식 (8)과 같다.

$$ET_a = K_s \cdot K_c \cdot ET_o + E_v \quad (8)$$

여기서, E_v 는 토양에서의 증발량에 강우직후 발생할 수 있는 토양증발의 증가를 고려한 것이다. 이상은 기준작물증발산을 이용하여 특정작물의 실제증발산을 추정하는 일반적인 과정이다.

2.3. 유역의 실제증발산 추정방법

유역 스케일의 실제 증발산량을 추정하는 방법은

잠재 증발산량과 실제 증발산량 간 보완관계식을 이용하는 방법(Complementary relationship method), 물수지법(Water balance method), 증발력과 토양수분량의 변화량을 고려한 유역 수문모델링(Soil moisture accounting method)으로 크게 3가지 방법으로 구분할 수 있다.

잠재 증발산량과 실제 증발산량 간 보완관계식을 이용하는 방법은 Bouchet(1963)가 개념을 제시하였으며, Morton(1983)이 그 개념을 이용하여 증발산 추정모형(CRAE)을 제시하였다. 이 방법은 토양이나 식물 등의 지표면 조건에 대한 정보를 필요로 하지 않으며 단지 기상자료만을 이용하는 방법으로 적용하기 쉽다는 장점이 있으나 잠재 및 실제 증발산량 간의 보완피드백 메커니즘이 존재한다는 가정이 수반되어 있어 적용 시 이를 입증해야 하는 어려움이 있으며, 짧은 시간간격에 대해서는 적용이 곤란한 단점을 가지고 있다.

물수지법은 관측 강우량과 유출량의 관계로부터 증발산량을 추정하는 것으로 관측치를 기반으로 한다는 점에서 신뢰도가 높다고 할 수 있으나, 기본적으로 유역 저류량의 변화를 무시하기 때문에 연 단위와 같이 긴 시간 스케일에 적용 가능하고 작은 시간 스케일에는 적용성이 떨어진다. 국내에서는 Rim 등(2011)이 유역 물수지를 이용하여 연 실제 증발산량에 영향을 미치는 수문기후에 관해 연구를 수행한 바 있다. 그러나 제주도 유역의 경우 독특한 수문지질학적 특성으로 함양량이 미지수로 남아있으며, 1년의 주기를 가지는 것 또한 불명확하기 때문에 물수지를 이용한 방법으로는 해석이 불가능하다.

유역 수문모델링을 이용하는 방법은 기상, 토양 및 식물 조건을 모두 고려하는 방법으로 유역의 불균질성을 반영할 수 있고 일 단위 등의 비교적 작은 시간 스케일에 대해서도 증발산량을 추정할 수 있는 장점이 있으나, 많은 입력 자료가 필요하며 모형의 정확한 검증과 상당한 숙련도가 뒷받침되어야 한다.

2.4. 유역의 실제증발산 추정절차

SWAT-K는 이 방법을 따라 국내 여러 유역에서 그 결과를 검증하였다(Kim과 Kim, 2004; Korea Institute of Construction Technology, 2007). 모형에서 증발산

Fig. 1. Process of actual evapotranspiration estimation.

산정은 물리적으로 규명된 현상을 수식으로 정립하여 해석하고 있다. 그 과정은 Fig. 1에서와 같이 SWAT-K을 이용하여 Penman-Monteith방법으로 기준작물 잠재 증발산량을 추정한 후, 유역 내 식생 및 토지피복과 가용토양수분을 고려하여 실제 증발산량을 추정한다. 즉, 식생피복에 의해 차단되는 강우로부터 증발을 계산한 후, 최대증산량, 최대승화/토양증발량을 추정한 후, 이에 따라 실제 승화량과 토양에서의 실제 증발량 및 증산량을 계산한다(Neitsch 등, 2011). 모형에서 실제 증발산량을 추정하기 위해서는 토양의 수분함량이 고려되어야 한다. 이를 위해 모형에서는 각 토양통(soil series) 별로 여러 개의 토양층으로 구분하였다. 먼저, 최대토양증발량을 추정하기 위한 토양깊이에 따른 분포는 식 (9)와 같다. Fig. 2는 총 토양수분증발량을 100 mm로 가정하고, 1 mm 단위의 층으로 분할된 토양에 대해, 증발요구량의 깊이 분포를 나타낸 것이다.

$$E_{soil,z} = E''_s \cdot \frac{z}{z + \exp(2.374 - 0.00713 \cdot z)} \quad (9)$$

여기서, $E_{soil,z}$ 는 깊이 z 에서의 증발요구량(mm), E''_s 는 최대 토양증발량(mm), z 는 지면에서부터의 깊이이다. 하나의 토양층에 대한 증발요구량은 토양층 상하부 경계에서의 증발요구량 사이의 차이로서 식 (10)과 같다.

Max. soil evaporation (mm)

Fig. 2. Soil evaporative demand distribution with soil depth.

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \quad (10)$$

여기서, $E_{soil,ly}$ 는 토양층에 대한 증발요구량(mm), $E_{soil,zu}$, $E_{soil,zl}$ 는 각각 토양층 상부와 하부 경계에서의 증발요구량(mm)이다. 최종적으로 토양층의 수분함량이 포장용수량(field capacity)보다 낮은 경우, 증발요구량은 식 (11)에 따라 감소한다.

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \cdot \exp\left(\frac{2.5 \cdot (SW_{ly} - FC_{ly})}{FC_{ly} - WP_{ly}}\right) \quad (11)$$

여기서, $E'_{soil,ly}$ 는 수분함량에 따라 조정된 토양층에 대한 증발요구량(mm), $E_{soil,ly}$ 는 토양층에 대한 증발요구량(mm), SW_{ly} 는 토양층에 대한 수분함량(mm), FC_{ly} 는 토양층에 대한 포장용수량에서의 수분함량(mm), WP_{ly} 는 토양층에 대한 위조점에서의 수분함량(mm)이다. 마찬가지로, 식생의 최대증산량을 추정하기 위해 뿌리대가 위치하는 임의의 깊이에서 토양표면까지의 잠재 수분흡수량은 식 (12)와 같다.

$$w_{up,z} = \frac{E_t}{[1 - \exp(-\beta_w)]} \cdot \left[1 - \exp\left(-\beta_w \cdot \frac{z}{z_{root}}\right)\right] \quad (12)$$

여기서, $w_{up,z}$ 는 지정한 깊이에서 토양표면까지의 잠재 수분흡수량(mm), E_t 는 식생의 최대증산량(mm), β_w 는 수분사용 분포 매개변수, z_{root} 는 뿌리의 성장깊

여기서, ET_a 는 실제 증발산량, Rainfall은 강수량, Runoff는 직접유출량, GW는 지하수함양량이다. 따라서 관측기반의 강수량, 유출량과 함양량의 검증을 통하여 모의 증발산량의 신뢰성을 부여할 수 있었다. 또한, 모의된 증발산량은 유역 내 위치하고 있는 소형 접시 증발량의 관측값을 통해 다시 한 번 그 신뢰성을 평가하였다.

$$w''_{up,ly} = w'_{up,ly} \cdot \exp \left[5 \cdot \left(\frac{SW_{ly}}{0.25 \cdot AWC_{ly}} - 1 \right) \right] \quad (13)$$

여기서, $w''_{up,ly}$ 는 토양수분함량에 대해 보정된 잠재 수분흡수량(mm), $w'_{up,ly}$ 는 토양층별 잠재 수분흡수량(mm), AWC'_{ly} 는 토양층의 이용가능수분량(mm), SW_{ly} 는 토양층의 수분함량(mm)이다.

따라서 본 연구에서는 SWAT-K를 이용한 유역 수문모델링을 통하여 잠재 및 실제 증발산량을 추정하여 연, 월별 변화를 분석하였다. 기존연구(Korea Institute of Construction Technology, 2007, 2011; Kim과 Kim, 2004)들에서 토양수분의 변화를 중심으로 추정된 증발산량의 신뢰도가 충분히 검증된 바 있어, 제주유역에서도 식 (8)의 개념에 기초한 증발산량 추정을 시도하고자 하였다. 또한, 추정된 증발산량의 검증을 위해 식 (14)와 같은 물수지 개념에 입각

2.5. 대상유역 및 모형구축 현황

본 연구의 대상유역으로 제주 중북부에 위치한 한천이 포함된 수자원 단위지도 표준권역을 선정하였다. 한천유역은 유역면적 86.2km^2 이며, 유역 내에는 기상관측을 위한 제주 기상대가 위치하고 있다(Fig. 3). 증발산량 추정을 위해 SWAT-K를 이용하였으며, 강우는 PRISM 기법을 이용하여 공간분포된 자료(Kim 등, 2012)를 활용하였으며, 기상(온도, 습도, 풍속, 일사량)자료는 제주 기상대의 관측값을 이용하여 모형에 적용하였다. 식생 분포는 환경부에서 제공하는 토지피복 중분류를 이용하였다. 활엽수림 25.9%, 침엽수림 17.9%, 밭 13.9%, 초지 12.0%, 과수원 9.4% 등의 분포를 나타내었다. 토양의 공간분포는 농업진흥청 국

Fig. 3. Study area(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012).

립농업과학원에서 제공하는 정밀토양도를 이용하였으며, 토양속성은 Korea Institute of Construction Technology(2007)의 결과를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 잠재증발산량 모의결과 검증

분석기간은 2002-2010년으로 하였으며, SWAT-K를 이용하여 지표수 유출의 검증을 위해 제주 유출특성에 부합하는 유출모의기법으로 보정을 수행하였다(Chung 등, 2011). 또한, 지하수 함양량의 검증을 위해 모의 지하수 함양량과 관측지하수위의 시계열을 최적화하였다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012). 따라서 유역전체의 통합물수지 측면에서 강수량과 지표수 유출과 지하수 함양량이 검증되어 증발산량에 대한 신뢰를 부여할 수 있다. 증발산량 추정에는 Penman-Monteith식이 활용되었으며, 잠재증발산량 모의값 검증을 위해 제주기상대의 소형접시 증발량과의 비교검증을 수행하였다. 증발접시에 의한 증발산량은 여러 학자들에 의해 작물의 증발산을 추정하기 수단으로 사용되고 있으며, 10일 이상의 기간에 대한 기준작물증발산을 추정할 경우, 그 정확도가 높은 것으로 알려졌다(Jensen, 1974; Doorenbos와 Pruitt, 1984). Fig. 4는 소형접시 증발량과 잠재증발산량의 월별값을 비교한 것으로 결정계수는 0.94로 높은 적합도를 보여 모의된 증발산량의 타당성을 부여하고 있다. 소형접시 증발량에 비해 모의된 잠재증발산이 높은 이유는 물수지 개념에서 타당성을 평가하였다. 제주기상대의 경우, 연평균강수량이 1,530 mm이며, 소형접시 증발량은 강수량의 78%에 해당하는 1,192 mm이다. 하지만 유역전체 연평균강수량은 2,243 mm이며, 모의된 잠재 증발산량은 강수량의 71%에 해당하는 1,442 mm로 강수량을 기준으로 보았을 경우, 모의된 잠재 증발산량은 소형접시 증발량보다 약 7% 정도 적게 해석되었다. 또한, Fig. 5는 소형접시 증발량과 잠재 증발산량의 연별값을 도시한 것으로, 경향이 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 4. Comparison of monthly observed small pan evaporation and simulated potential evapotranspiration (2002-2010).

Fig. 5. Comparison of annual observed small pan evaporation and simulated potential evapotranspiration (2002-2010).

3.2. 잠재 및 실제 증발산량 모의결과 분석

앞서 검증된 잠재 증발산량과 기상, 토양수분 및 식생의 기작을 통해 추정된 실제 증발산량을 비교하였다(Fig. 6). 연별 결과를 보면, 잠재 증발산량은 연별 변화를 보이고 있으나, 실제 증발산량은 일정한 값을 유지하였다. 월별 결과의 경우, 계절별 산포도가 크게 나타나 잠재 및 실제 증발산량의 상관성이 약한 것으로 판단된다.

기온이 증발산량에 미치는 영향을 파악하기 위해 제주기상대 지점의 기온이 전체유역에 고려된 경우와 고도상승에 따른 기온감소효과가 고려되었을 경우에

Fig. 6. Comparison of potential and actual evapotranspiration.

대하여 각각 추정된 증발산량을 비교하였다. 기온의 경우, 증발산량에 영향을 미치는 인자 중 하나로 제주의 산악효과를 반영하기 위해 $-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 의 기온감소율 (National Institute of Meteorological Research, 2010)을 대상유역에 적용하여 결과를 분석하였다. 제주기상대 지점의 기온이 전체유역에 고려된 경우에 비해

고도상승에 따른 기온감소효과가 고려된 경우, 연별 잠재 증발산량 결과는 7.1-7.8%의 분포를 가지며 평균 7.5% 감소하였다. 월별 잠재 증발산량의 경우, 최소 5.5%(여름철)에서 최대 14.7%(겨울철)의 분포를 보이며 평균 8.0% 감소되는 것으로 파악되었다(Fig. 7).

Fig. 7. The effect of temperature on potential evapotranspiration.

Mandeville과 Batchelor(1990)는 유역물수지의 관점에서 강수량과 실제 증발산량, 물발생량 간의 관계를 제시한 바 있다. 또한 Rim 등(2011)은 연평균 강수량이 증가함에 따라 잠재 증발산량은 감소, 실제 증발산량은 증가함을 밝힌 바 있다. 본 연구에서는 연별, 월별 강수량의 증가에 따른 잠재 및 실제 증발산량, 물발생량의 변화를 분석하였다. 연별값의 경우, 강수량이 증가함에 따라 잠재 증발산량은 감소하나, 실제 증발산량은 미미하게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 8). Fig. 9에서 월별자료에 근거하여 계절별로 분석한 결과, 연별값의 경우와 마찬가지로 계절별 강수량이 증가함에 따라 실제 증발산량은 증가, 잠재 증발산량은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

Fig. 8. Comparison of actual and potential evapotranspiration according to the annual rainfall.

Fig. 9. Comparison of actual and potential evapotranspiration according to the monthly rainfall.

4. 결론

본 연구에서는 복제주의 한천유역을 대상으로 SWAT-K를 이용하여 잠재 및 실제 증발산량을 추정하여, 그 결과를 고찰하였다. 하지만 해안 저지대에 위치한 제주 기상대의 기상자료만 고려되었으며, 중간 산 및 고지대의 자료는 미계측이라는 한계를 지니고 있다. 또한 SWAT-K의 적용에 있어서 국내유역에 적합한 식생의 LAI와 같은 주요인자에 대한 특성치의 연구가 미흡한 관계로 이로 인한 모의결과의 오차를 내포하고 있다. 그러나 SWAT-K의 구조적 개선을 통하여 정도 높은 수문성분을 해석할 수 있다는 점을 이용하여 국내에서 연구가 미흡한 유역 증발산량의 특성을 분석하였으며, 그 결과를 정리하였다.

(1) 제주 기상대의 소형접시 증발량과 모의 잠재 증발산량의 월별값을 비교한 결과, 결정계수는 0.94로 높은 적합도를 보여 SWAT-K 모델링을 통한 잠재 증발산량의 신뢰도는 매우 높은 것으로 분석되었다. 연평균 강수량을 기준으로 분석하면 유역전체의 모의된 잠재 증발산량은 소형접시 증발량의 91%로 해석되었다.

(2) 모의된 잠재 및 실제 증발산량을 비교해보면, 연별 결과의 경우 잠재 증발산량은 연별로 변화를 보이고 있으나, 실제 증발산량은 일정한 값을 나타내었다. 월별 결과의 경우, 계절별 산포도가 크게 나타나 상관성이 약한 것으로 판단된다.

(3) 제주의 산악효과를 반영하기 위해 증발산에 영향을 미치는 온도에 대하여 분석한 결과, $-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 의 기온감소를 적용 시 제주기상대 지점의 기온이 전체 유역에 고려된 경우에 비해 잠재 증발산량이 연별 평균 7.5% 감소되는 것으로 파악되었다.

(4) 연별, 계절별 강우량이 증가함에 따라 잠재 증발산량은 감소하나, 실제 증발산량은 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

향후 추가적인 연구를 위해 최근 일부 제주 중산간 및 고지대에서 관측되고 있는 상대습도, 온도 등을 모형에 고려한다면 보다 정교한 모의가 가능해질 것이다. 또한 추정된 증발산량의 모의값 검증을 위해 현재 제주, 서귀포 기상대에서만 관측되고 있는 증발접시에 의한 관측을 제주유역의 고지대 및 중산간 지역으로 확장될 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(제주수자원 연구단, 10지역기술혁신B02).

참 고 문 헌

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Bouchet, R. J., 1963, Evapotranspiration reele et potentielle, signification climatique, Proc. IAHS, Gen. Assem., Berkeley, IAHS Publ., 62, 134-142.
- Choudhury, B. J., Blanchard, B. J., 1983, Simulating Soil Water Recession Coefficients for Agricultural Watershed, Water Resour. Bull., 19(2), 241-247.
- Chung, I. M., Lee, J., Kim, J. T., Na, H., Kim, N. W., 2011, Development of Threshold Runoff Simulation Method for Runoff Analysis of Jeju Island, J. Environ. Sci., 20(10), 1347-1355.
- Cuenca, R. H., Nicholson, M. T., 1982, Application of Penman Equation Wind Function, Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 108(IR1), 13-23.
- Doorenbos, J., Pruitt, W. O., 1984, Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1-144.
- Jensen, M. E., 1974, Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements, Reported by the Technical Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage, ASCE, New York, N.Y. 10017.
- Kim, N. W., Kim, C. G., 2004, Comparison of Penman-Monteith method and Morton CRAE method for estimating areal evapotranspiration, Annual Conference of Korea Water Resources Association, 1077-1081.
- Kim, N. W., Lee, J., 2008, Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation, Hydrol. Process., 22, 4936-4948.
- Kim, N. W., Lee, J., 2010, Enhancement of the channel routing module in SWAT, Hydrol. Process., 24, 96-107.
- Kim, N. W., Um, M. J., Chung, I. M., Heo, J. H., 2012, Estimating the Total Precipitation Amount with Simulated Precipitation for Ungauged Stations in Jeju Island, Journal of Korea Water Resour. Assoc., 45(9), 875-885.
- Korea Institute of Construction Technology, 2007, Development of Analysing System for Surface Water Hydrological Components, 21st century frontier R&D program.
- Korea Institute of Construction Technology, 2011, Practical Use of Analysing System for Surface Water Hydrological Components, 21st century frontier R&D program.
- Lee, B. Y., Yang, S. K., Kwon, K. H., Kim, J. B., (2012), The Effect of Evapotranspiration by Altitude and Observation of Lysimeter, J. Environ. Sci., 21(6), 749-755.
- Mandeville, A. N., Batchelor, C. H., 1990, Estimation of actual evapotranspiration in Malawi, Report No. 110, Institute of Hydrology.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012, Development of the Integrated Surface- Groundwater Hydrologic Analysis Technique in Jeju Island, Korea Institute of Construction Technology.

- Morton, F. I., 1983, Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology, *J. Hydrol.*, 66, 1-76.
- National Institute of Meteorological Research, 2010, Understanding Climate Change VI - Climate Change of Jeju Island.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., 2011, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2009.
- Penman, H. L., 1956, Evaporation : an Introductory Survey, Netherlands, *J. Agric. Sci.*, 1, 9-29.
- Priestley, C. H. B., Taylor, R. J., 1972, On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Mon. Weather Rev.*, 100(2), 81-92.
- Rim, C. S., Lim, G. H., Yoon, S. E., 2011, A Study on the Hydroclimatic Effects on the Estimation of Annual Actual Evapotranspiration Using Watershed Water Balance, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 44(12), 915-928.
- Thornthwaite, C. W., 1948, An Approach toward a Rational Classification of Climate, *Geogr. Rev.*, 38(1), 55 - 94.
- World Meteorological Organization, 1974, International Glossary of Hydrology, WMO Report, No. 385.