

제주 한천 및 강정천 유역에 적합한 보완관계법 기반 증발산량 산정 모형

Complementary Relationship Based Evapotranspiration Estimation Model Suitable for the Hancheon and Kangjeongcheon Watersheds in Jeju Island

김 남 원* / 나 한 나** / 이 정 우*** / 이 정 은****

Kim, Nam Won / Nah, Hanna / Lee, Jeongwoo / Lee, Jeong Eun

Abstract

The complementary relationship-based evapotranspiration models, namely, AA model of Brutsaert and Stricker (1979) and the CRAE model of Morton (1983) was applied to two permanent stream watersheds Jeju island for the first time, and their major optimal parameters were suggested in this study. The representative watersheds for model calibration and validation were selected as the Hancheon watershed located in the northern part of the Jeju island and the Kangjeongcheon watershed in southern Jeju island, respectively. The estimated actual evapotranspiration for the Hancheon watershed was compared with the result by the hydrological model, and the major parameters of the AA and CRAE models were calibrated until their results match the hydrological simulations. Through the iterative estimations, the optimal parameters were determined as $\alpha = 1.00$, $M = 30.0 \text{ Wm}^{-2}$ of the AA model, and $b_1 = 33.0 \text{ Wm}^{-2}$, $b_2 = 1.02$ of the CRAE model. The calibrated AA and CRAE models were applied to the Kangjeongcheon watershed for model validation, and it was found out that both models can accurately produce the actual evaporation on annual and semiannual bases.

keywords : potential evapotranspiration, actual evapotranspiration, complementary relationship, AA model, CRAE model

요 지

본 연구에서는 잠재증발산량과 실제증발산량간의 보완관계 기반의 증발산량 산정 모형인 Brutsaert and Stricker (1979)의 AA 모형과 Morton (1983)의 CRAE 모형을 제주도내 두 개의 상시하천 유역에 처음으로 적용하고 이 지역에 적합한 모형의 매개변수를 제안하였다. AA 모형과 CRAE 모형의 매개변수 검정과 모형의 검증을 위한 대표유역으로 각각 북제주에 위치한 한천 유역과 남제주에 위치한 강정천 유역을 선정하였다. 한천 유역에 대해 AA 모형의 경험상수 α 와 이류에너지항 M , CRAE 모형의 경험상수 b_1 과 b_2 를 바꾸어가면서 실제증발산량을 산정하고 이를 유역수문모델링 결과와의 비교를 통해 매개변수 검정을 수행하였다. 그 결과 AA 모형은 $\alpha = 1.00$, $M = 30.0 \text{ Wm}^{-2}$, CRAE 모형은 $b_1 = 33.0 \text{ Wm}^{-2}$, $b_2 = 1.02$ 이 최적의 값으로 산정되었다. 동일한 매개변수를 사용하여 AA 모형과 CRAE 모형의 검증 대상유역인 강정천 유역에 적용한 결과, 두 모형 모두 식생의 성장기 및 비성장기에 유역수문모델링 결과와 유사한 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 잠재증발산량, 실제증발산량, 보완관계, AA 모형, CRAE 모형

* 한국건설기술연구원 수자원연구실, 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)
Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Civil and Building Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원연구실, 석사후연구원 (e-mail: nhn99@nate.com)
Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Civil and Building Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

***교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구원 (e-mail: ljw2961@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0529)

Corresponding Author, Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Civil and Building Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

**** 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구원 (e-mail: jeus22@kict.re.kr)
Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Civil and Building Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

1. 서 론

제주도 하천은 홍수시에만 물이 흐르는 간헐하천이 대부분이며 도내에 9개만이 상시하천이다. 더욱이 하천은 남북으로 편중되어 발달해 있고, 특히 서부와 동부지역은 하천밀도가 낮아 수자원 관리의 기본이 되는 물수지 분석을 위한 하천유량 자료 확보가 어렵다. 이처럼 하천유량 자료 기반의 물수지 분석 가능 지역이 제한적이기 때문에 증발산량, 용출수량, 함양량 등 다른 수문요소들을 측정 혹은 추정하여 물수지 분석의 신뢰도를 높이려는 노력들이 진행되어왔다. 증발산계를 제작하고 제주 중산간 지역에 설치하여 고도 및 기상요소와 증발산량간의 관계를 분석한 연구(Lee et al., 2012), 제주 권역별 농업용수 수요량을 추정하기 위해서 증발산량을 산정한 연구(Choi et al., 2013), 유역수문모델링을 제주 한천 유역에 적용하여 증발산량의 변동 특성을 고찰한 연구(Kim and Lee, 2013), 지하수위 변동자료와 수문모델링을 결합하여 함양량을 추정한 연구(Kim et al., 2013; Kim et al., 2014) 등이 그러한 노력의 일환이다.

제주도는 지하수에 절대적으로 의존하는 특수한 조건을 가지기 때문에 여러 수문성분 중 지하수 함양량을 정교하게 산정하는 것이 제주 수자원 관리의 핵심이라 할 수 있다. 제주도는 다우지역이지만 직접유출량은 작고 강수량의 대부분이 땅 속으로 침투되어 증발산 과정을 통해 다시 대기로 환원되거나 함양과정을 통해 지하수계로 유입되는 연직 상, 하향으로의 물 이동 성분이 지배적인 구조를 갖는다. 따라서 제주도에서는 증발산량을 보다 정확하게 산정할수록 함양량 산정 결과의 신뢰도가 높아진다고 할 수 있다.

이러한 증발산량은 수자원 부존량 평가, 경작지의 용수 수요량 산정, 수리시설물의 설계와 운영 등에 있어서 필수적으로 고려해야 할 인자이며, 특히 수자원 계획 및 관리를 위해서는 유역단위의 실제증발산량을 평가하는 것이 매우 중요하다. 유역의 실제증발산량을 산정하는 가장 용이한 방법은 강우-유출 자료 기반의 물수지식을 이용하는 것이다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 제주도는 평상시 건천이 많고 동부 및 서부 지역과 같이 하천 발달이 미약한 지역에서는 하천유량 관측이 어렵기 때문에 물수지식에 기반한 유역 증발산량 산정 방법은 적용하기 용이하지 않다. 유역수문모델링을 이용하거나 위성영상자료와 에너지수지법을 이용하여 광역적인 실제증발산량을 정밀하게 산정하는 방법이 이상적일 수 있으나, 제주도의 복잡한 수문지질구조와 내륙과는 상이한 수문 특성을 반

영하기 위해서 고비용의 고도의 모델링 절차를 거쳐야 한다. 이와 같이 내륙지역에서는 보편적으로 사용하는 실제증발산량 산정 방법들이 제주지역에서는 적용되기 어렵다. 반면, 잠재증발산량과 실제증발산량간의 보완관계(complementary relationship)를 이용하는 방법(Bouchet, 1963)은 복잡한 유역수문모델링 과정을 거치지 않고 기상자료만으로 유역의 증발산량을 산정할 수 있어 제주지역과 같이 기상자료에 비해 하천유량 관측치가 부족하고 유역수문모델링 또한 쉽지 않은 지역에서 효율적인 방법이라 할 수 있다.

보완관계법으로 유역의 증발산량을 산정한 대표적인 연구로 Shin et al. (1995), Shin (1996a; 1996b), Shin et al. (2006), Kim and Lee (2014) 등을 들 수 있다. 그러나 이러한 연구들은 한강, 금강, 북한천 등 육지부 유역에 대해 적용한 것으로 내륙과는 수문특성이 상이한 제주지역에 보완관계법을 적용한 연구는 수행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 보완관계법을 제주 지역에 최초로 적용하여 실제증발산량을 산정하고 그 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위해서 보완관계를 모형화한 대표적인 실제증발산량 산정 모형으로 AA (Advection-Aridity) 모형(Brutsaert and Stricker, 1979)과 CRAE (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration) 모형(Morton, 1983)을 제주 북부에 위치한 한천 유역과 남부에 위치한 강정천 유역에 각각 적용하여 실제증발산량을 산정하고 유역수문모델링에 의한 실제증발산량 산정 결과와의 비교를 통해서 각 모형의 매개변수를 보정한 제주형 보완관계 모형을 제시하였다.

2. 보완관계법에 의한 실제증발산량 산정 방법

2.1 잠재증발산량과 실제증발산량간 보완관계

잠재증발산량(potential evapotranspiration, E_p)과 실제증발산량(actual evapotranspiration, E_A)간의 보완관계(complementary relationship)는 Bouchet(1963)에 의해 제안된 것으로 유역과 같이 넓은 지역의 실제증발산량을 추정하기 위해 사용되고 있는 개념이다. 이 보완관계는 지역이 건조해질수록 증발산에 필요한 가용수분량이 감소하여 실제증발산량이 줄어들고, 대신 증발력이 덜 소모되어 그 감소한 양 만큼 잠재증발산량이 늘어난다는 것으로 이를 식으로 표현하면 Eq. (1)과 같다.

$$\Delta E_p + \Delta E_A = 0 \quad (1)$$

여기서, ΔE_p 와 ΔE_A 는 각각 잠재증발산량의 변화량과 실

제증발산량 변화량이다. Eq. (1)을 완전 건조상태인 조건 Eq. (2)와 완전 포화상태인 조건 Eq. (3)을 경계조건으로 하여 적분하면, Eq. (4)와 같이 잠재증발산량과 실제증발산량간의 합은 습윤조건에서의 증발산량의 2배와 같다는 관계식으로 표현된다.

$$E_p = E_{p,max} \quad \text{for} \quad E_A = 0 \quad (2)$$

$$E_p = E_{p,min} \quad \text{for} \quad E_A = E_{A,max} \quad (3)$$

$$E_p + E_A = 2 E_W \quad (4)$$

여기서, $E_{p,max}$ 와 $E_{p,min}$ 는 각각 잠재증발산량의 최대치와 최소치, $E_{A,max}$ 는 실제증발산량의 최대치, 그리고 E_W 는 습윤조건에서의 증발산량이다. Eq. (4)가 보완관계법의 기본식이며, 잠재증발산량과 습윤증발산량을 기상자료를 이용하여 계산하면 실제증발산량을 산정할 수 있다.

2.2 AA 모형

Brutsaert and Stricker (1979)가 제안한 보완관계식 기반의 AA (Advection-Arid) 모형에서는 Eq. (5)와 같은 Penman (1948) 식으로 잠재증발산량이 계산되고, Eq. (6)과 같은 Priestley-Taylor (1972) 식으로 습윤증발산량이 계산된다.

$$E_p = \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s - e_a) \quad (5)$$

$$E_W = \alpha \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \quad (6)$$

여기서, R_n 은 순복사량($J/m^2/d$), G 는 지열플럭스($J/m^2/d$), Δ 는 포화증기압과 온도곡선의 기울기($mb/^\circ C$), γ 는 건습계상수($mb/^\circ C$), $f(u)$ 는 풍속함수, e_s 는 공기의 포화증기압(mb), e_a 는 공기의 실제증기압(mb), 그리고 α 는 최소의 이류조건을 고려하기 위해 복사에너지항에 곱해진 경험적 상수(=1.26)이다.

본 연구에서 e_s 값을 산정하기 위해서 Murray (1967)가 제안한 기온의 함수인 Eq. (7)을 이용하였고 여기에 상대습도를 곱해 e_a 를 구하였으며, Eq. (7)을 미분하여 Eq. (8)과 같이 Δ 를 구하였다.

$$e_s = 6.1078 \exp \left[\frac{17.2693 \bar{T}_{av}}{\bar{T}_{av} + 237.3} \right] \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(\bar{T}_{av} + 237.2)^2} \quad (8)$$

여기서, \bar{T}_{av} 는 일평균 기온($^\circ C$)이다. 건습계 상수 γ 는 Eq.

(9)를 이용하여 계산하였다.

$$\gamma = \frac{c_p P}{0.622 \lambda} \quad (9)$$

여기서, c_p 는 습윤공기의 비열($1.013 \times 10^{-3} MJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$), P 는 대기압(mb)이며, λ 는 일정한 온도와 기압에서 단위 질량의 물을 기체화시키는데 필요한 에너지인 증발잠열($MJ kg^{-1}$)로서 Eq. (10)과 같이 Harrison (1963)이 제안한 식을 이용하였다.

$$\lambda = 2.501 - 2.361 \times 10^{-3} \bar{T}_{av} \quad (10)$$

Eq. (6)으로 계산한 습윤증발산량이 건조기간동안 작게 산정되는 되는 점을 보완하고자 본 연구에서는 Morton (1973)이 제시한 Eq. (11)과 같은 경험적인 이류에너지항 M 을 추가로 고려하였다.

$$E'_W = M + \alpha \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \quad (11)$$

2.3 CRAE 모형

Morton (1983)이 제안한 보완관계식 기반의 CRAE (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration) 모형에서는 Eq. (12)와 같은 에너지 평형방정식(energy balance equation)과 Eq. (13)과 같은 수증기 이송방정식(vapor transfer equation)을 연립하여 잠재증발산량이 계산된다.

$$E_p = R_T - [\gamma f_T + 4\epsilon\sigma(T_p + 273)^3](T_p - T) \quad (12)$$

$$= R_T - \lambda_p f_T (T_p - T)$$

$$E_p = f_T (e_p - e_D) \quad (13)$$

여기서, R_T 은 공기온도 T 에서의 순복사량($J/m^2/d$), γ 는 건습계상수($mb/^\circ C$), f_T 는 수증기 이송계수, ϵ 는 지표발산도, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($Wm^{-2}K^{-4}$), T_p 는 Eqs. (12) and (13)에 의한 잠재증발산량 계산 값이 같을 때의 온도로 정의된 평형온도($^\circ C$), e_p 는 T_p 에서의 포화수증기압(mb), 그리고 e_D 는 이슬점 온도에서의 포화수증기압(mb)이다.

Eqs. (12) and (13)에서 평형온도 T_p 는 시행값(trial value) T_p' 와 수정값 δT_p 의 합으로 나타내고 반복법을 통해서 구할 수 있으며, 본 연구에서는 Newton-Raphson 방법을 이용하였다. Eqs. (12) and (13)을 같게 놓아 함수 F 로 나타내고, $\delta e_p = \Delta_p'(\delta T_p)$ 조건하에 T_p 의 도함수 F' 를 구하여 δT_p 를 Eq. (14)와 같이 나타내었으며, δT_p 가 허용오차 이내로 들어올 때까지 반복법으로 계산하였다.

$$\delta T_p = -F/F' = [R_T/f_T + e_D - e_p' - \lambda_p(T_p - T)] / (\Delta_p' + \lambda_p) \quad (14)$$

여기서, e_p' 와 Δ_p' 은 각각 T_p' 일 때의 포화증기압과 포화증기압-온도 곡선의 기울기이다.

한편, CRAE 모형에서의 습윤증발산량은 Priestley-Taylor 식에 이류항을 추가하고 평형온도일 때의 복사량의 함수로 나타낸 Eq. (15)와 같은 수정 Priestley-Taylor 식으로 계산된다.

$$E_W = b_1 + b_2 \frac{\Delta_p}{\Delta_p + \gamma} R_{TP} \quad (15)$$

$$R_{TP} = E_p + \gamma f_T (T_p - T) = R_T - 4\epsilon\sigma(T_p + 273)^3(T_p - T) \quad (16)$$

여기서, $b_1 = 14.0 \text{ Wm}^{-2}$ 는 이류영향을 고려하기 위한 경험상수, $b_2 = 1.2$ 는 복사에너지 항에 곱해진 경험상수, Δ_p 는 평형온도 T_p 일 때의 포화증기압곡선의 경사, 그리고 R_{TP} 는 평형온도 T_p 일 때의 순복사량이다.

3. 연구 대상구역 및 입력자료 구축

3.1 연구 대상 구역

제주도에 위치한 상시하천 중 북제주를 대표하는 한천 유역과 남제주를 대표하는 강정천 유역을 본 연구의 대상 유역으로 선정하였다. 한천 유역과 강정천 유역 하류부에 각각 제주 기상대와 서귀포 기상대가 위치해 있다. Fig. 1은 제주도의 하천망과 연구 대상유역 및 기상관측소 위치를 나타낸 것이다.

3.2 보완관계 모형의 입력자료 구축

보완관계기반의 AA 모형과 CRAE 모형을 이용하여

실제증발산량을 산정하기 위해서는 기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등의 기상자료가 필요하다. 제주 한천 유역에 위치한 제주 기상대와 강정천 유역에 위치한 서귀포 기상대의 기상자료를 모형의 입력자료로 활용하였다. 2002년부터 2010년까지 제주 기상관측소의 기온은 3.6~29.2°C, 상대습도는 49.7~84.5%, 풍속은 1.6~2.9m/s, 그리고 일사량은 5.8~23.5MJ/m²/d의 범위를 나타내었으며, 서귀포 기상관측소의 경우에는 기온 6.2~28.6°C, 상대습도 50.2~88.9%, 풍속 1.6~2.9m/s, 그리고 일사량은 7.9~21.8MJ/m²/d로 기록되었다. 제주와 서귀포 기상자료의 평균값을 비교해 보면, 기온은 제주와 서귀포가 각각 15.9°C, 17.1°C, 습도는 65.0%, 68.1%, 풍속은 3.2m/s, 3.0m/s, 그리고 일사량은 13.2MJ/m²/d, 14.4MJ/m²/d이다. 두 관측소 간 습도와 풍속의 차이가 크지 않아 동역학적 에너지에 의한 증발산량 발생 조건은 유사하며, 반면에 기온과 일사량은 서귀포 지점이 더 커서 복사에너지 측면에서는 증발산을 일으키는데 상대적으로 더 유리한 조건이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 한천 유역의 보완관계법에 의한 실제증발산량 산정

연구 대상유역에 대해 검토정이 잘 완료된 SWAT-K 모형으로 산정한 증발산량값(Chung et al., 2011, KAIA, 2013)을 기준으로 AA 모형과 CRAE 모형의 핵심 매개변수를 검토정하였다. AA 모형에서는 Eq. (7)의 경험상수 α 와 이류에너지항 M , CRAE 모형에서는 Eq. (9)의 경험상수 b_1 과 b_2 를 바꾸어가면서 반복적으로 실제증발산량을 계산하였으며, SWAT-K 모형에 의한 실제증발산량을 참값으로 간주하고 AA 모형과 CRAE 모형으로 산정한 실제증발산량의 평균제곱근오차(RMSE)를 Figs. 2~5에 도시하였다.

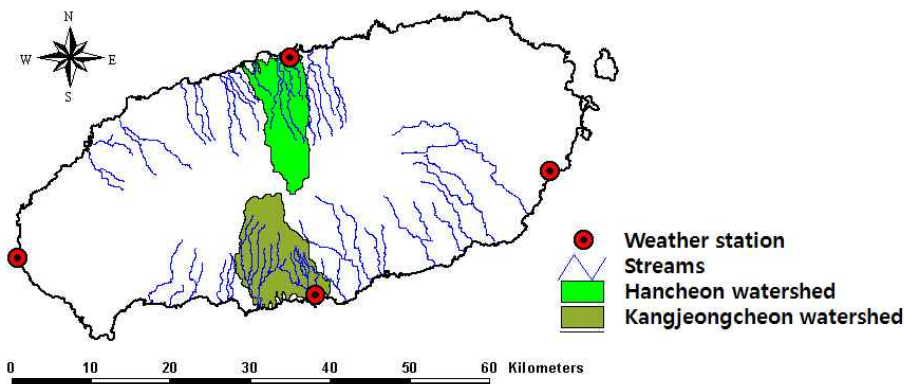


Fig. 1. Study Watersheds

Fig. 2는 AA 모형과 CRAE 모형으로 산정한 증발산량을 연단위로 누적한 값의 RMSE를 각각 M 과 α 및 b_1 과 b_2 의 공간평면에 나타낸 그림으로 α (b_2)가 작고 M (b_1)이 크거나 α (b_2)가 크고 M (b_1)이 작아질수록 오차가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 모형의 기본값인 $\alpha=1.26$, $M=0.0$

과 $b_1=14$, $b_2=1.2$ 에 가까운 경우 연간 200~250 mm의 오차가 발생하고 있어 모형의 매개변수 보정이 필요함을 알 수 있다.

Figs. 3 and 4는 각각 본격적인 식생 성장기인 4월부터 9월까지와 그 나머지 기간 동안의 6개월 단위로 산정한 증

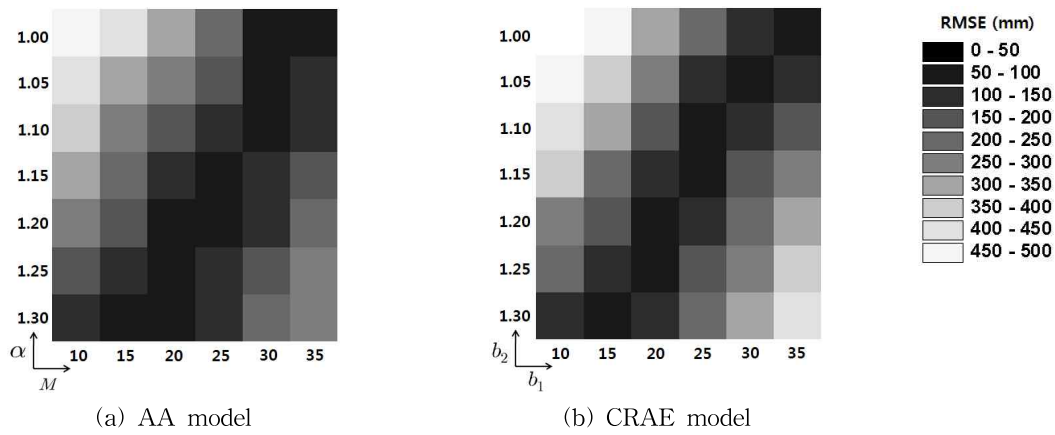


Fig. 2. RMSE of the Estimated Annual Actual Evapotranspiration

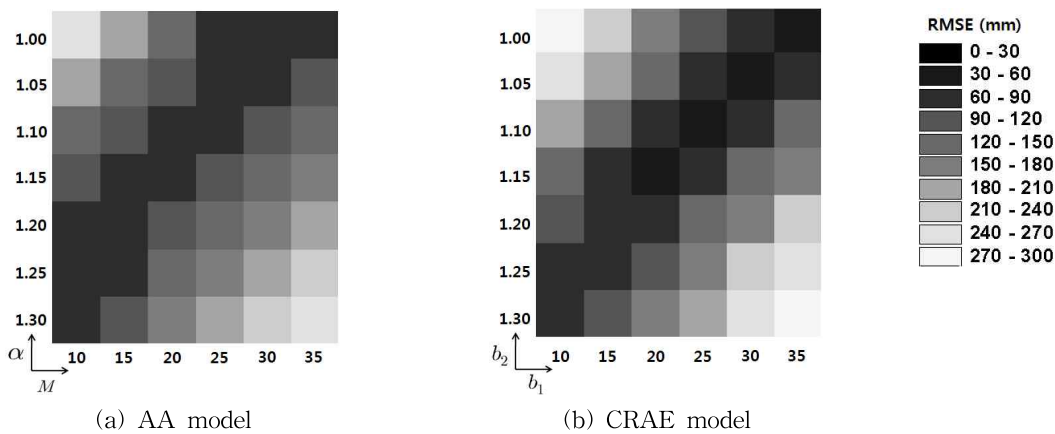


Fig. 3. RMSE of the Estimated 6 Months Actual Evapotranspiration (Apr to Sep)

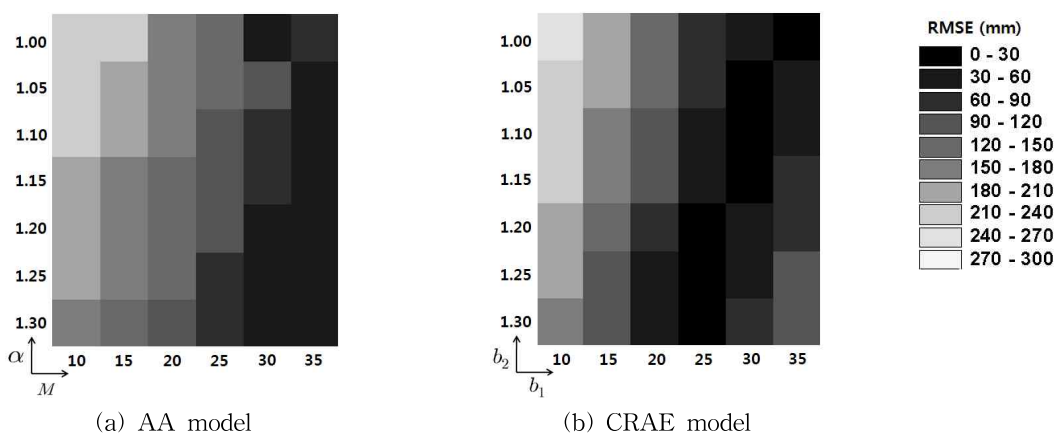


Fig. 4. RMSE of the Estimated 6 Months Actual Evapotranspiration (Jan to Mar, Oct to Dec)

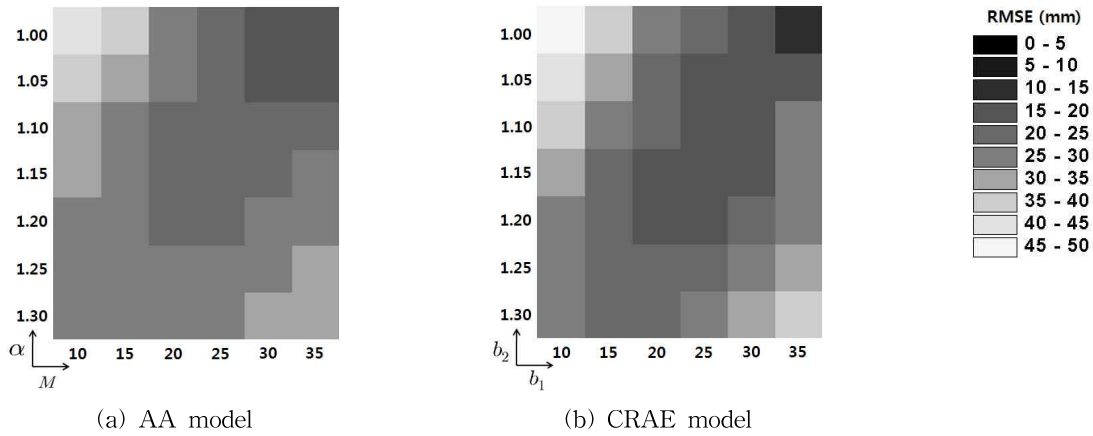


Fig. 5. RMSE of the Estimated Monthly Actual Evapotranspiration

발산량의 RMSE를 나타낸 것이다. Fig. 3은 연단위 결과인 Fig. 2와 유사한 양상을 보이고 있으나, Fig. 4는 M 과 b_1 이 큰 경우 오차가 작아지고 있다. 따라서 건조기간에 이류 영향을 고려하기 위해서는 M 과 b_1 를 큰 값을 사용해야 함을 알 수 있다.

Fig. 5는 월별로 산정한 증발산량의 RMSE를 나타낸 것으로 α (b_2)가 작고 M (b_1)이 커질수록 오차가 작게 산정되었으며, 기본값을 사용한 경우 약 30mm의 오차가 발생하였다. Figs. 2~5를 종합하면 α (b_2)가 1.0~1.05일 때 그리고 M (b_1)이 30~35의 범위의 값을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

오차분석을 통해 얻어진 AA 모형과 CRAE 모형의 적정 매개변수 범위 내에서 반복 모의를 통해 최적의 매개변수를 도출하였고, 이 때의 결과를 모형의 기본값을 사용했을 때의 결과와 함께 Figs. 6~11에 나타내었다.

Fig. 6은 식생 성장이 본격적으로 이루어지는 4월부터 9월까지 6개월간의 결과로 AA 모형이 SWAT-K에 의한 실제증발산량 보다 다소 작게 산정되지만 큰 차이를 보이고 있지는 않다. Fig. 7은 11월부터 3월까지 6개월간의 결과를 도시한 것으로 보정 전 AA 모형은 SWAT-K 모형에 비해 과소 산정하고 있는 것을 알 수 있다. AA 모형에서 습윤증발산량 산정과 관련된 매개변수인 α 와 M 을 동시에 바꾸어 가면서 SWAT-K에 의한 실제증발산값에 가까워 질 때까지 반복적으로 계산한 결과 $\alpha = 1.00$, $M = 30.0 Wm^{-2}$ 을 사용하였을 때의 AA 모형이 식생 성장기 및 비성장기 모두 SWAT-K 모의치에 가장 잘 근접하였다.

Figs. 8 and 9는 CRAE 모형으로 산정한 6개월 단위 실제증발산량을 SWAT-K 결과와 함께 도시한 것으로 앞선 AA 모형의 결과 양상과 유사한 것을 알 수 있다. 보정 전 증발산량은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 본격적인 식생

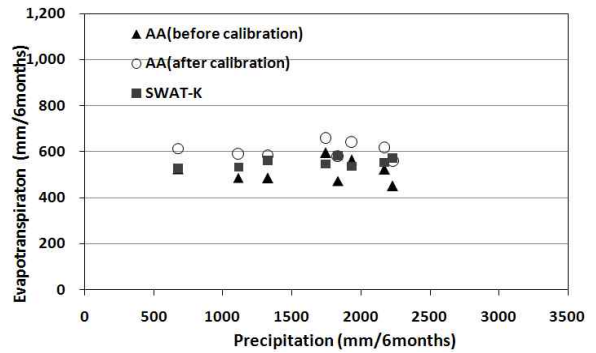


Fig. 6. Comparison of the Estimated Actual Evapotranspiration during April to September by AA Model and that by SWAT-K Model for Hancheon Watershed

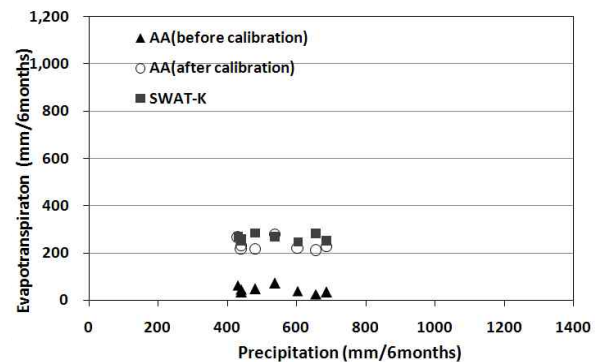


Fig. 7. Comparison of the Estimated Actual Evapotranspiration during October to March by AA Model and that by SWAT-K Model for Hancheon Watershed

성장기인 4~9월에는 두 모형간 결과가 유사하지만, Fig. 9에서 보이듯이 10~3월까지는 CRAE 모형 결과가 작게 산정되고 있다. CRAE 모형에서 습윤증발산량 산정과 관련된 매개변수로 경험상수 b_1 과 b_2 를 동시에 바꾸어 가면서 SWAT-K에 의한 실제증발산값에 가까워 질 때까지 반

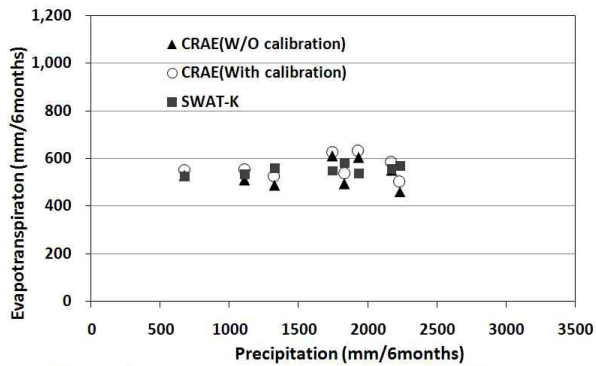


Fig. 8. Comparison of the Estimated Actual Evapotranspiration during April to September by CRAE Model and that by SWAT-K Model for Hancheon Watershed

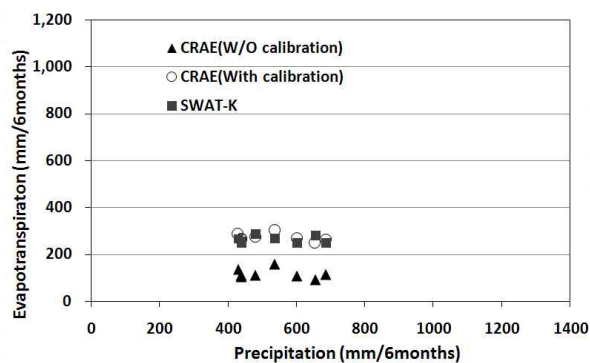


Fig. 9. Comparison of the Estimated Actual Evapotranspiration during October to March by CRAE Model and that by SWAT-K Model for Hancheon Watershed

복적으로 계산한 결과 $b_1 = 33.0 \text{ Wm}^{-2}$, $b_2 = 1.02$ 를 사용하였을 때의 CRAE 모형이 SWAT-K 모의치에 가장 잘 근접하였다.

4.2 강정천 유역의 보완관계법에 의한 실제증발산량 산정

AA 모형과 CRAE 모형을 강정천 유역에 적용하여 그 결과를 Figs. 10~13에 나타내었다. 증발산량을 산정하였다. 모형의 검증 차원에서 강정천 유역에 대한 보완관계 모형의 매개변수 보정 값은 한천 유역에 대해 보정된 매개변수 값과 동일한 값을 사용하였다.

Figs. 10 and 11은 AA 모형 적용 결과로서 보정 전에는 SWAT-K 모형에 비해 작게 산정되고 있으나, 보정 후 AA 모형의 결과가 전반적으로 SWAT-K 모형의 결과와 유사(RMSE: 52.7mm(성장기 6개월), 65.2mm(비성장기 6개월))한 것으로 나타났다. 연 단위 및 월 단위 도식은 생략하였지만 RMSE 값이 각각 69.7mm, 월 단위 17.0mm로 양호한 것으로 나타났다.

Figs. 12 and 13은 CRAE 모형과 SWAT-K 모형으로 산정한 실제증발산량을 비교한 것으로 앞선 AA 모형의 결과와 마찬가지로 보정 전에는 CRAE 모형에 의한 결과가 SWAT-K 모형에 비해 작게 산정되었고, 보정 후에는

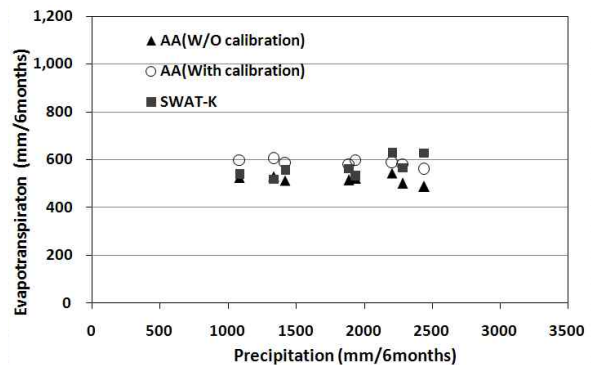


Fig. 10. Comparison of the Estimated Actual Evapotranspiration during April to September by AA Model and that by SWAT-K Model for Kangjeongcheon Watershed

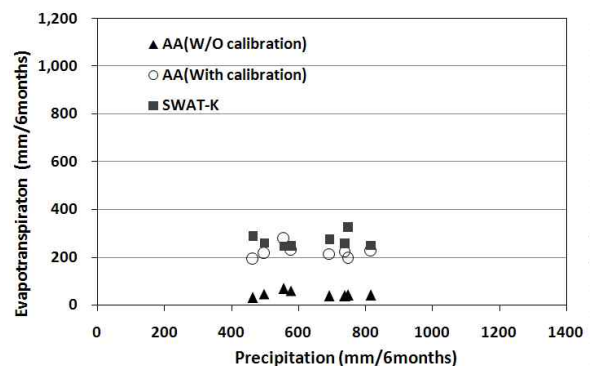


Fig. 11. Comparison of the Estimated Actual Evapotranspiration during October to March by AA Model and that by SWAT-K Model for Kangjeongcheon Watershed

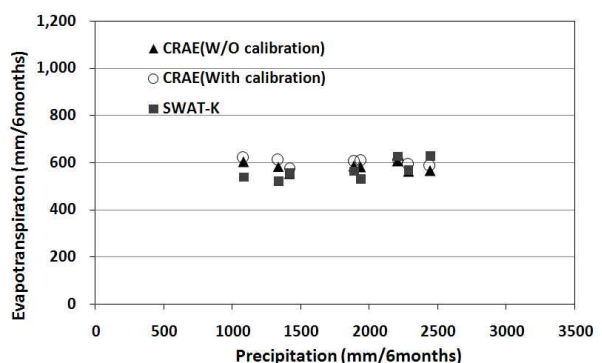


Fig. 12. Comparison of the Estimated Actual Evapotranspiration during April to September by CRAE Model and that by SWAT-K Model for Kangjeongcheon Watershed

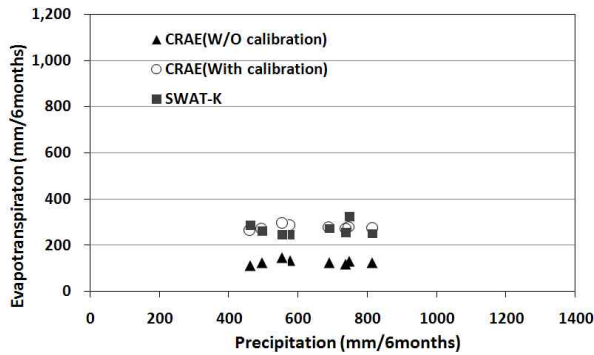


Fig. 13. Comparison of the Estimated Actual Evapotranspiration during October to March by CRAE Model and that by SWAT-K Model for Kangjeongcheon Watershed

CRAE 모형의 의한 실제증발산량 값이 SWAT-K 모형의 결과에 잘 근접하였다(RMSE: 월 단위 80.4mm, 반년 단위(성장기) 56.0mm, 반년 단위(비성장기) 29.7mm, 월 단위 14.6mm).

5. 결 론

본 연구에서는 잠재증발산량과 실제증발산량간의 보완관계(Bouchet, 1963) 기반의 증발산량 산정 모형인 Brutsaert and Stricker (1979)의 AA 모형과 Morton (1983)의 CRAE 모형을 내륙과는 수문특성이 상이한 제주도에 처음으로 적용하고 모형의 검정과 검증을 거쳐 이 지역에 적합한 보완관계 모형을 제안하였다. 북제주에 위치한 한천 유역을 모형의 검정 대상유역으로 남제주에 위치한 강정천 유역을 모형의 검증 대상유역으로 선정하고, 기존의 검보정이 잘 완료된 유역수문모형 SWAT-K로 산정한 실제증발산량을 기준으로 오차분석을 통해서 두 보완관계 모형의 매개변수를 검정하였다.

Brutsaert and Stricker (1979)의 AA 모형에 Morton (1973)이 제시한 경험적인 인류에너지항 M 을 추가로 고려하여 모형을 수정하고 이 값과 모형의 핵심 매개변수인 경험상수 α 를 함께 바꾸어가면서 2002년부터 2010년까지 한천 유역의 실제증발산량을 산정하였다. 유역수문모형링 결과와의 비교를 통해서 년, 반년, 월 단위의 평균제곱근오차(RMSE)를 계산한 결과, 모형에서 제공하는 기본 값보다 α 는 작게 M 은 크게 할수록 오차가 작아졌으며 최종적으로 $\alpha = 1.00$, $M = 30.0 \text{ Wm}^{-2}$ 일 때 가장 정확도가 높은 것으로 분석되었다. CRAE 모형의 경우는 이 모형의 핵심 매개변수인 경험상수 b_1 과 b_2 를 각각 크고 작은 값을 사용할수록 RMSE가 작아졌으며, $b_1 = 33.0 \text{ Wm}^{-2}$, $b_2 = 1.02$ 일 때

가장 우수한 결과를 나타내었다.

매개변수 검정이 완료된 AA와 CRAE 모형의 검증을 위해서 강정천 유역에 대해 2002년부터 2010년까지의 실제증발산량을 산정한 결과 AA 모형의 평균제곱근오차(RMSE)는 연 단위 69.7mm, 반년 단위(성장기) 52.7mm, 반년 단위(비성장기) 65.2mm, 월 단위 17.0mm로 나타났고, CRAE 모형에 의한 결과의 경우 RMSE는 연 단위 80.4mm, 반년 단위(성장기) 56.0mm, 반년 단위(비성장기) 29.7mm, 월 단위 14.6mm로 계산되어 두 모형 모두 적용성이 우수한 것으로 나타났다.

향후 제주도내 다른 여러 유역에 대해서도 적절한 보완관계 모형의 매개변수를 추정하고 이를 토지 및 토양조건, 기상조건 지역화 또는 일반화함으로써 제주지역에 적합한 보완관계 기반의 증발산량 산정이 가능해질 것이다. 이러한 보완관계 기반의 증발산량 산정 기법이 확립되면, 복잡한 유역수문모형링 과정을 거치지 않고 기상자료만으로 유역의 증발산량을 산정할 수 있어 저비용으로 신속한 계산이 가능할 뿐만 아니라, 제주 서부, 동부 지역과 같이 하천 발달이 적고 미계측 유역이면서 강수량의 대부분이 증발산과 함양량으로 이루어지는 지역에 대한 물수지 분석시 효과적으로 이 기법을 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 지역기술혁신사업 제주 수자원 연구단(10지역기술혁신B02)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Bouchet, R.J. (1963). "Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique." *Int. Assoc. Sci. Hydrol., Proc. Berkeley, Calif Symp., Publ. 62*, pp. 134-142.
- Brutsaert, W., and Stricker, H. (1979). "An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vol. 15, pp. 443-450.
- Choi, K.J., Song, S.H., Kim, J.S., and Lim, C.W. (2013). "Estimation of regional agricultural water demand over the Jeju island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 22, No. 5, pp. 639-649.
- Chung, I.M., Lee, J., Kim, J.T., Na, H.N., 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.
- Harrison, L.P. (1963). Fundamental concepts and definitions relating to humidity. In A. Wexler (ed.) Humidity and moisture, Vol. 3, Reinhold Publication Company, N.Y.
- Kim, N.W., and Lee, J. (2014). "Assessment of complementary relationship evapotranspiration models for the Bokahcheon upper-middle watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 6, pp. 547-559.
- Kim, N.W., and Lee, J.E. (2013). "Assessment of actual evapotranspiration in the Hancheon watershed, Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, KESS, Vol. 22, No. 5, pp. 533-542.
- Kim, N.W., Kim, Y.J., and Chung, I.M. (2013). "Development of analyzing model of groundwater table fluctuation (II): characteristics of recharge." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2285-2291.
- Kim, N.W., Kim, Y.J., and Chung, I.M. (2014). "A study on the characteristics of parameters in groundwater table Fluctuation Model." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 4, pp. 615-623.
- Kim, N.W., Na, H.N., Chung, I.M., and Kim, Y.J. (2014). "Empirical formula of delay time for groundwater recharge in the representative watersheds, Jeju island." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 9, pp. 743-752.
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (2013). Development of the integrated surface-groundwater hydrologic analysis technique in Jeju Island.
- 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.
- Morton, F.I. (1983). "Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology." *Journal of Hydrology*, Vol. 66, pp. 1-76.
- Murray, F.W. (1967). "On the computation of saturation vapor pressure." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 6, pp. 203-204
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil, and grass." *Proceedings of Royal Society of London, Series A*, Vol. 193, No. 1032, pp. 120-145.
- Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J.(1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.
- Shin, S.C. (1996a). "Estimation method of evapotranspiration through vegetation monitoring over wide area." *Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography*, Vol. 14, No. 1, pp. 81-88.
- Shin, S.C. (1996b). "Estimation of water balance based on satellite data in the Korean Peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 29, No. 4, pp. 203-214.
- Shin, S.C., Hwang, M.H., Ko, I.H., and Lee, S.J. (2006). "Suggestion of simple method to estimate evapotranspiration using vegetation and temperature information." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 4, pp. 363-372.
- Shin, S.C., Sawamoto M., and Kim, C.H. (1995). "Estimation of evapotranspiration using NOAA-AVHRR data." *Journal of Korea Water Resources Association*, KRWA, Vol. 28, No. 1, pp. 71-79.

paper number : 14-102
 Received : 13 October 2014
 Revised : 5 November 2014
 Accepted : 5 November 2014