

보완관계법에 의한 증발산량 산정 모형의 평가 - 북하천 중상류 유역을 중심으로 - Assessment of Complementary Relationship Evapotranspiration Models for the Bokahcheon Upper-middle Watershed

김 남 원* / 이 정 우**

Kim, Nam Won / Lee, Jeongwoo

Abstract

The objective of this study is to evaluate the performance of the complementary relationship-based evapotranspiration models, namely, advection-aridity (AA) model of Brutsaert and Stricker and the CRAE model of Morton for estimating actual evapotranspiration. Both models were applied to the Bokhacheon middle-upper watershed, and their estimates were evaluated against the water balance estimate. The calculation was made on a daily basis and comparison was made on monthly and annual bases. For comparison, the water balance estimates were not obtained from the observed precipitation and streamflow data but were based on the simulated data by using integrated watershed model, SWAT-K which is the revised version of SWAT. The reason not to directly use the observed data for water balance estimate is that the credible record period is not sufficient and the streamflow has been altered due to water use and release. Overall, the results showed that both AA model and CRAE model with their original parameters overestimate annual and monthly evapotranspiration, and the large difference between the complementary relationship-based approach and the water balance approach occurs especially for the dry season from Nov. to Mar. It was found out that the parameters, particularly for the advection related parameter, must be recalibrated to accurately produce monthly and annual regional evapotranspiration for this study area.

Keywords : actual evapotranspiration, complementary relationship, AA model, CRAE model, SWAT-K

요 지

본 연구에서는 잠재증발산량과 실제증발산량간의 보완관계식을 이용한 대표적인 증발산량 산정 모형인 Brutsaert and Stricker (1979)의 AA 모형과 Morton (1983)의 CRAE 모형의 적용성을 평가하였다. 이를 위해서 두 모형을 북하천 중상류 유역에 적용하여 유역평균 실제증발산량을 산정하고, 유역 물수지 결과와의 비교를 수행하였다. 연구 대상유역은 양질의 하천유량 자료 확보 기간이 짧고, 하천유량 자료 또한 인위적 물 이용, 배출로 인해 교란되었기에 강수량, 유출량 등의 관측치 기반의 유역 물수지 결과보다는 검보정이 잘 된 유역수문 모형 SWAT-K로 모의한 실제증발산량과의 비교를 통하여 AA 모형과 CRAE 모형으로 산정한 실제증발산량의 적정성을 평가하였다. AA 모형과 CRAE 모형의 의한 실제증발산량 모두 식생 성장기에 과다하게 산정되는 경향을 나타내었고, 특히 AA 모형은 건조기간동안 실제증발산량이 과소하게 산정되었다. AA 모형과 CRAE 모형의 정도를 높이기 위해서 매개변수 보정을 수행한 결과, AA 모형의 경우는 건조기간동안의 적합성을 높이기 위해서 이류항을 추가로 고려하고 Brutsaert and Stricker (1979)의 제안 값 $\alpha = 1.26$ 보다는 작은 $\alpha = 1.08$ 을 사용했을 때, 그리고 CRAE 모형의 경우에는 Morton (1983)이 제안한 값 $b_1 = 14 Wm^{-2}$, $b_2 = 1.12$ 보다는 각각 다소 크고 작은 값인 $b_1 = 16 Wm^{-2}$, $b_2 = 1.04$ 를 사용하였을 때에 연단위, 월단위, 그리고 월별 모두 가장 양호한 실제증발산량값이 산정되었다.

핵심용어 : 실제증발산량, 보완관계, AA 모형, CRAE 모형, SWAT-K

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

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구위원 (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 Construction Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

1. 서 론

효율적인 수자원 계획 및 이용·관리를 위해서는 강수, 증발산, 함양, 유출 등 일련의 수문순환 과정의 이해와 각 수문성분량의 시공간적 분포 특성 파악이 선행되어야 하며, 이러한 수문성분량 중에서 증발산량은 유역의 물수지 분석, 관개 수량 산정, 저수지 설계, 장기 하천유량 예측, 생태계 관리 등을 위해 필수적으로 산정해야 할 중요한 요소이다. 따라서 기상학, 수문학, 토양학, 산림학 등 여러 학문 분야에서 증발산 현상을 규명하고 그 양을 정교하게 측정, 산정하려는 노력들이 진행되어 왔으며, 특히 수문학 분야에서는 유역의 물관리를 위해서 유역단위의 실제증발산량을 산정하는 것이 주된 관심사였다.

유역과 같이 넓은 지역의 실제증발산량을 산정하는 방법으로서 물수지 방정식의 강수량, 유출량 등 다른 성분들을 관측하여 그 나머지를 증발산으로 추정하는 유역 물수지법, SWAT (Arnold, 1993; Neitsch et al., 2005)과 같은 유역수문모델링을 이용하여 잠재증발산량으로부터 토양수분부족량(soil moisture deficit) 조건을 고려하여 토지피복별로 실제증발산량을 계산하고 면적가중하여 유역 평균 실제증발산량을 산정하는 방법, Bouchet (1963)가 제안한 잠재증발산량과 실제증발산량간 보완관계(complementary relationship)를 이용하는 방법, 그리고 인공 위성정보를 이용한 광역 공간증발산량을 추정하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 실제증발산량 산정 방법 중 국내에서 상대적으로 충분한 연구가 수행되고 있지 않은 잠재증발산량과 실제증발산량간 보완관계식에 의한 방법을 중심으로 그 적용성을 고찰하고자 하였다.

잠재증발산량과 실제증발산량간 보완관계식을 이용하여 실제증발산량을 산정하는 대표적인 모형은 Priestly and Taylor (1973)의 AA (Advection-Aridity) 모형, Morton (1976, 1983)의 CRAE (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration) 모형을 들 수 있다. Lemeur and Zhang (1990)은 이러한 AA 모형과 CRAE 모형을 건조지역에 적용하여 실제증발산량을 산정하고 관측 강우-유출량 자료를 이용한 유역 물수지법으로 산정한 실제증발산량과의 비교를 통해 적용성이 우수함을 보였다. Liu et al. (2006)은 AA 모형, CRAE 모형, 그리고 또 다른 보완관계식 기반 모형인 GG (Granger, 1991) 모형을 중국 황하강에 각각 적용하고 역시 유역 물수지법에 의한 실제증발산량과의 비교를 통해 그 적용성을 평가했으며 각 모형이 가지고 있는 경험적인 매개변수 검보정 과정이 반드시 필요함을 강조하였다. Hobbins et al. (2001a)은 미국내 120개 유

역에 대해 CRAE 및 AA 모형에 의해 산정된 증발산량을 장기 물수지 자료로부터 추정된 증발산량과의 비교를 통해서 연 단위 증발산량은 CRAE 방법은 약간 과다, AA 방법은 과소 산정, 그리고 월 단위 증발산량은 CRAE 방법이 더 우수한 결과를 나타냄을 보여주었다. 특히 AA 방법을 건조지역에 적용하기 위해서는 매개변수 검보정이 필요하다 하였다. Hobbins et al. (2001b)은 AA 방법에 의한 증발산량이 과소 산정되는 문제를 해결하기 위해서 Penman 식으로 잠재증발산량을 계산할 때 풍속함수 습윤증발산량을 계산할 때 Priestley-Taylor (1972)의 부분 평형식의 매개변수를 수정하여 기존의 AA 방법을 개선하고 그 효과를 입증하였다.

직접적인 증발산량 측정치와의 비교를 통해서 보완관계 모형을 평가한 연구들도 수행되었다. Haque (2003)는 CRAE 모형과 AA 모형을 미국, 남아메리카, 인도 지역에 적용하여 Pan 증발량 관측치와의 비교를 통해서 두 방법의 적용성을 평가하였다. Wanchang et al. (1999)은 알파인 툰드라 지역에 대해 CRAE 모형에 의한 증발산량과 라이시미터(lysimeter)로 측정된 값과의 비교를 통하여 여름철에는 양호한 결과를 나타냄을 보였다. Granger and Gray (1990)는 라이시미터 측정 원리와 유사하게 측정된 강수량과 토양수분변화량을 더해서 증발산량을 산정하고 CRAE 모형의 결과와 비교하였다.

Xu and Singh (2005)는 한랭 습윤지역, 아열대 습윤지역, 반건조지역에 CRAE, AA, GG 모형을 적용하여 월유출 모형 NOPEX-6 (Xu et al., 1996)로 모의한 실제증발산량과 비교한 결과 습윤지역에서는 적용성이 양호하나 건조지역인 경우에는 오차가 커져 매개변수의 조정이 필요함을 나타내었다. Doyle (1990)는 CRAE 모형을 토양수분 중심의 수문모형(soil moisture accounting model)에 탑재하여 실제증발산량을 계산하고 관측 강우-유출량 자료 기반의 유역 물수지 결과와의 비교를 통해서 모형을 검보정하였다. Barr et al. (1997)은 CRAE 방법을 포함한 여러 증발산량 산정 모듈을 가지고 있는 총괄형 장기유출모형 SLURP으로 하천유량을 모의하고 관측유량과의 비교를 통해 증발산량 산정 모듈의 적용성을 평가하였다.

이상과 같이 해외 연구에서는 보완관계 모형을 평가할 때에는 주로 관측 강우-유출량 자료 기반의 유역 물수지법을 이용하고 있으며, 직접 측정된 증발산량 또는 유역수문모델링에 의한 모의 증발산량과의 비교를 통해서도 보완관계 모형의 적용성을 평가하였다. 또한 특히 보완관계 모형의 적용성을 높이기 위해서는 유역 특성에 따라 모형의 매개변수 검보정 과정이 필요함을 역설하고 있다.

보완관계식을 이용한 실제증발산량 산정에 관한 국내 연구로 Shin et al. (1995)은 식생의 량과 활성도를 정량적으로 표현할 수 있는 지표로서 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)와 보완관계식으로부터 구한 증발산량과의 상관관계로부터 한강유역의 공간적인 증발산 분포를 산정하였고, 이와 동일한 방법으로 Shin (1996a, 1996b)은 한반도 전역에 대한 월별 증발산 분포를 구하였다. Kim and Kim (2004)은 보청천 유역에 대해서 CRAE 모형에 의한 유역 증발산량 산정결과를 Penman-Monteith 방법과 가용 토양수분량을 고려하여 실제증발산량을 산정한 결과를 비교하고 유역 물수지 분석을 통해 그 적용성을 검토하였다. Shin et al. (2006)은 증발산량 산정의 정확도를 높이기 위해서 위성자료로부터 산출한 NDVI 지수와 기상요소 중 기온자료를 조합하여 보완관계식에 의한 증발산량과 상관관계를 맺어 금강권역의 월별 공간증발산량을 산정하였다. 이처럼 국내의 보완관계식을 이용한 실제증발산량 산정과 관련된 연구는 보완관계법과 인공위성정보와의 결합을 수행한 연구가 대부분이며, 보완관계식을 이용한 실제증발산량 산정 방법의 적용성을 평가한 연구는 매우 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 보완관계식을 이용한 실제증발산량 산정 방법의 국내 유역에 대한 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위해서 국토교통부의 홍천 수위관측소를 유역 출구로 하는 북한천 증산류 유역을 연구 대상유역으로 선정하고, 잠재증발산량과 실제증발산량간의 보완관계식 기반의 증발산량 모형인 AA 및 CRAE 모형으로 유역의 실제증발산량을 산정하였다. 보완관계식 기반의 실제증발산량 산정 결과를 검증하기 위해서 유역의 저류변화를 무시하고 연단위 이상의 장기간 강수량 관측값에서 하천유출량 관측값을 감하여 실제증발산량을 간접적으로 추정하는 유역 물수지 분석 결과를 이용하는 것이 보편적이다. 이러한 검증 방법을 이용하기 위해서는 관측 자료의 품질이 우수하고 교란되지 않은 장기간의 하천유출량 자료가 필요하다. 그러나 대부분의 하천은 댐, 저수지 등 인위적 구조물의 영향을 받고 있고, 취수 및 방류 등의 행위로 교란되어 장기간의 비교관 하천유출량 자료를 확보하는 것이 쉽지 않다. 이러한 자료의 제약으로 인해 관측치를 이용한 유역 물수지법으로 증발산량을 추정하는 데에는 한계가 따른다. 특히 본 연구의 대상유역인 북한천 유역은 저유량 부분의 품질이 양호한 관측 기간이 짧고(Kim et al., 2013), 하천수 취수 및 하수처리수 방류, 지하수 양수 등의 영향으로 하천 유량 자료가 교란되어 있다. 따라서 유역수문모형 SWAT-K로 모의한 실제증발산량을 관측치에 준하는 것으로 간주

하고 이 값과의 비교를 통하여 보완관계식 기반의 실제증발산량 산정 방법의 적용성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 보완관계법에 의한 실제증발산량 산정 방법

2.1.1 잠재증발산량과 실제증발산량간 보완관계

Bouchet (1963)는 대상지역이 건조해지면 가용수분량이 줄어 실제증발산량이 감소하고, 그 감소한 양 만큼 잠재증발산량은 증가한다는 보완관계(complementary relationship)를 처음으로 제안하고 Eq. (1)과 같이 나타내었다.

$$\Delta ET_p + \Delta ET_A = 0 \quad (1)$$

여기서, ET_p 는 잠재증발산량, ET_A 는 실제증발산량, ΔET_p 는 잠재증발산량 변화량, ΔET_A 는 실제증발산량 변화량이다.

토양-식생 표면이 건조하여 증발산을 위한 가용수분이 없으면 실제증발산은 없고($ET_A = 0$) 잠재증발산은 최대($ET_p = ET_{pmax}$)가 된다. 반면에 완전히 습한 조건이 되면 토양-식생 표면과 접해있는 공기층이 완전 포화되어 이류조건이 없는 상태가 되면 실제증발산은 최대($ET_A = ET_{Amax}$), 잠재증발산은 최소($ET_p = ET_{pmin}$)가 되고 실제 및 잠재증발산량 모두 습윤상태의 증발산량(ET_w)이 된다($ET_A = ET_p = ET_w$). 이러한 건조 및 습윤상태 두 개의 경계조건하에 Eq. (1)을 적분하면 Eq. (2)와 같이 잠재증발산량과 실제증발산량간의 합은 습윤조건의 증발산량의 2배와 같다는 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$ET_p + ET_A = 2ET_w \quad (2)$$

Fig. 1은 잠재증발산량과 실제증발산량간의 보완관계를 나타낸 개념도로서 건조상태로 가면서 실제증발산량은 감소하고 잠재증발산량은 증가하며, 습윤상태로 가면서 실제증발산량과 잠재증발산량은 점차 같아지게 된다. 보완관계 개념은 잠재증발산량이 기온과 습도의 함수로 온도의 증가에 따라 잠재증발산량이 증가하고 습도에 따라 감소한다는 사실에 기초하고 있으며, 실제증발산량이 많을수록 온도가 낮아지고 습도가 높아지기 때문에 결국 잠재증발산량의 감소를 초래하게 된다는 것이다. 즉, 실제증발산량 또는 잠재증발산량을 추정하는데 있어서 서로 영향을 주게 된다는 개념이다(Kim and Kim, 2004).

2.1.2 AA 모형

Brutsaert and Stricker (1979)는 Eq. (2)와 같은 보완관계

식을 이용하여 실제증발산량 산정하기 위한 AA (Advection-Arid) 모형을 개발하였다. AA 모형에서는 잠재증발산량 ET_p 를 산정하기 위해서 Eq. (3)과 같은 Penman (1948)식을, 습윤증발산량 ET_w 를 산정하기 위해서 Eq. (4)와 같은 Priestley-Taylor (1979)식을 이용하였다.

$$ET_p = \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s - e_a) \quad (3)$$

여기서 R_n 은 순복사량($J/m^2/d$), G 는 지열플럭스($J/m^2/d$), Δ 는 포화증기압-온도 곡선의 기울기($mb/^\circ C$), γ 는 건습계상수($mb/^\circ C$), $f(u)$ 는 풍속함수, e_s 는 공기의 포화수증기압(mb), e_a 는 공기의 실제수증기압(mb)이다.

$$ET_w = \alpha \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

여기서, α (=1.26)는 완전한 습윤상태($e_s = e_a$)인 경우는 실제로 발생하기 어려우므로 Eq. (3)의 우변 두 번째 항의 영향에 따른 최소의 이류조건을 고려하기 위해 Eq. (3) 우변 첫 번째 항에 곱해진 경험적 상수이다. Eq. (2)에 Eq. (3)과 Eq. (4)를 대입하고 지열의 영향을 무시하면, Eq. (5)와 같이 실제증발산량 산정식이 된다.

$$ET_A = (2\alpha - 1) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n - \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s - e_a) \quad (5)$$

2.1.3 CRAE 모형

Morton (1969, 1975) 또한 Eq. (2)와 같은 보완관계식을 이용한 실제증발산량 산정 모형을 개발하였다. 잠재증발산량을 추정하기 위해서 풍속함수 대신에 경험적인 수증기 이송계수 f_a 를 사용한 수정 Penman식을 사용하였고, 습윤증발산량을 추정하기 위해서 AA 모형과 마찬가지로

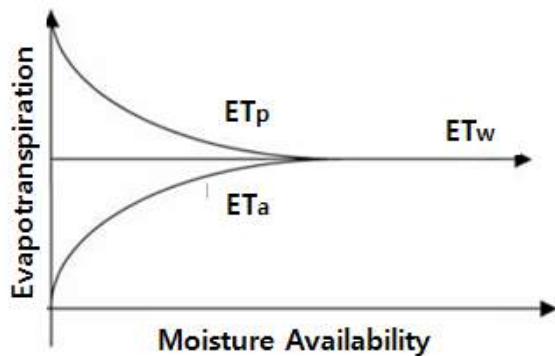


Fig. 1. Conceptual Complementary Relationship Between Potential Evapotranspiration and Actual Evapotranspiration

Eq. (4)와 같은 Priestley와 Taylor식 (1979)을 사용하되 열과 수증기의 이류(advection) 영향을 고려하기 위해서 경험적인 이류에너지항 M 을 순복사량 R_n 에 더하였다.

이 후 Morton (1983)은 지표온도가 복사에너지에 미치는 영향을 고려하기 위해서 평형온도(equilibrium temperature)에서의 잠재증발산량과 습윤증발산량을 계산하는 방식으로 개선된 CRAE (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration) 모형을 발표하였다. Morton CRAE 모형(1983)에서는 잠재증발산량을 각각 Eq. (6)과 Eq. (7)로 표현된 에너지 평형방정식(energy balance equation)과 수증기 이송방정식(vapor transfer equation)로 나타내고, 두 식에 의한 잠재증발산량이 동일한 값을 가질 때의 온도를 평형온도 T_p 로 정의하고 반복법으로 해를 구한다.

$$ET_p = R_T - [\gamma f_T + 4\epsilon\sigma(T_p + 273)^3](T_p - T) \quad (6)$$

$$ET_p = f_T(e_p - e_D) \quad (7)$$

여기서, R_T 은 공기온도 T 에서의 순복사량($J/m^2/d$), γ 는 건습계상수($mb/^\circ C$), ϵ 는 지표발산도, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($Wm^{-2}K^{-4}$), T_p 는 평형온도($^\circ C$), f_T 는 수증기 이송계수, e_p 는 T_p 에서의 포화수증기압(mb), e_D 는 이슬점 온도에서의 포화수증기압(mb)이다.

Morton CRAE 모형(1983)에서는 습윤증발산량을 구할 때 이류 영향을 고려하고, 순복사량과 포화증기압곡선의 경사에 미치는 지표온도의 영향을 설명할 수 있도록 Priestley-Taylor식을 Eq. (8)과 같이 수정하였다.

$$ET_w = b_1 + b_2 \frac{\Delta_p}{\Delta_p + \gamma} R_{TP} \quad (8)$$

$$R_{TP} = ET_p + \gamma f_T (T_p - T) = R_T - 4\epsilon\sigma (T_p + 273)^3 (T_p - T) \quad (9)$$

여기서, $b_1 = 14 Wm^{-2}$ 는 순복사량이 작거나 음의 값을 갖는 기간 동안 대규모 스케일로 발생하는 이류영향을 고려하기 위한 경험상수이고, $b_2 = 1.2$ 는 Priestley-Taylor식의 α 의 의미를 갖는 경험상수이며, Δ_p 는 평형온도 T_p 일 때의 포화증기압곡선의 경사, 그리고 R_{TP} 는 평형온도 T_p 일 때의 순복사량으로 Eq. (9)와 같이 계산된다.

2.2 유역수문모형 SWAT-K에 의한 실제증발산량 산정 방법

미국 농무성에서 개발된 SWAT (Arnold et al., 1993; Neitsch et al., 2005)은 토양 및 토지이용 관리 조건의 변

화에 따른 물, 유사, 오염원, 농업화학물질 등의 장기간 부하량을 모의할 수 있는 유역수문모형이며, 인이나 질소 순환, 작물성장 등을 모의할 수 있기 때문에 일종의 생태수문모형이다. SWAT-K 모형은 국내 유역 특성에 적합하도록 일부 수문, 수질 성분 계산 알고리즘을 개선하고 국내 토양 특성을 D/B화하여 모형에 탑재하였으며, MODFLOW 및 SWMM 등 다른 모형과의 결합(Kim et al., 2008; Kim et al., 2011)을 통해 SWAT의 기능을 향상시킨 모형이다. 이들 모형으로 강수차단, 지표유출 및 침투, 증발 및 증산, 중간유출 및 침투, 함양, 지하수유출 등 일련의 수문성분량을 산정할 수 있으며 인, 질소 등 물질순환 또한 모의 가능하며 유사량, 비점오염 부하량 등도 산정할 수 있다.

SWAT-K 모형은 증산과정의 중점 설정에 관한 매개변수 디폴트 값의 조정, 상록수의 경우 연중 증산이 발생하도록 하는 등 증산 발생 기간 설정을 수정한 점을 제외하고는 SWAT의 증발산량 산정 알고리즘을 대부분 따르고 있다. 이 모형에서는 Penman-Monteith 방법(Monteith, 1981), Priestley-Taylor 방법(Priestley and Taylor, 1972), Hargreaves 방법(Hargreaves et al., 1985) 중 하나를 택하여 잠재증발산량을 계산하고, 여기에 토양수분부족량을 고려하여 실제증발산량을 계산한다. 국내에서는 기온, 풍속, 습도 등의 자료가 모두 가능한 경우에는 일반적으로 Penman-Monteith 방법을 주로 이용하고 있다.

Penman-Monteith 공식은 실제증발산량을 산정하기 위해 개발되었지만, Jensen et al. (1990)이 Penman-Monteith 공식을 수분공급이 충분한 조건에 대한 최대증산량 산정식으로 수정하여 잠재증발산량을 산정할 수 있게 변형하였고, SWAT 모형은 Jensen et al. (1990)의 방법론을 따

르고 있다. SWAT 모형의 작물성장 모의 모듈에서는 작물성장량이 온도상승과 비례관계가 있다는 가정하에 기준 온도를 초과하는 일 평균기온의 합인 온도량(heat unit)의 합수로 수관 높이, 뿌리, 엽면적 등의 생장을 일단위로 모의하며, 엽면적지수 변화에 따라 식생피복저항을 수관고 변화에 따라 공기역학적저항이 계산되어 Penman-Monteith 공식에 자동 입력된다. 모형에서는 HRU (Hydrologic Response Unit)별로 최대증산량을 구하고 이를 뿌리대(root zone) 내에서 깊이에 따라 분포시켜 토양층별로 잠재수분흡수량을 할당하고 각 토양층별 토양수분부족분을 고려하여 실제수분흡수량을 산정하고 모두 더하여 실제증산량을 산정하고 있다. 식생의 높이가 40 cm, 최소유효 기공저항이 100 s/m 인 알파과(alfalfa)에 대해 최대증산량을 구하고 이를 기준작물 잠재증발산량으로 하여 식생차단증발 및 최대 승화/토양증발량을 계산할 때의 기준값으로 사용된다. 기준작물 잠재증발산량에서 식생피복에 의해 차단된 강우로부터 증발량을 감하고 차광에 따른 토양피복조건을 고려하여 최대 승화/토양증발량을 구한 후에 식생증산량, 토양수분부족분 등을 고려하여 실제 승화/토양증발량을 산정하고 있다. 수식을 포함한 자세한 증발산 산정 과정은 Neitsch et al. (2005) 및 Kim and Lee (2014)를 참조할 수 있다.

3. 연구 대상유역 및 자료구축

3.1 연구 대상 유역

본 연구에서는 복하천 출구인 한강과의 합류점으로부터 상류쪽으로 약 4.98 km에 위치한 흥천수위관측소를 유역 출구로 하는 복하천 중상류 유역을 연구의 대상유역으

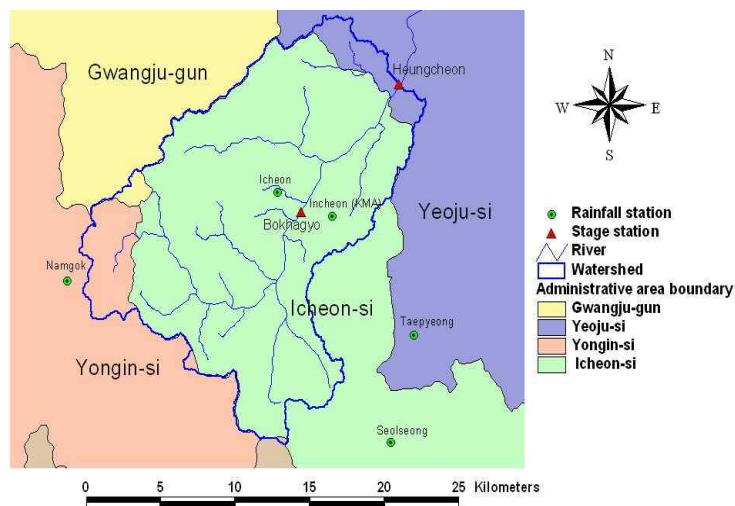


Fig. 2. Study Watershed (Kim et al., 2013)

로 설정하였다(Fig. 2). 대상구역의 면적은 약 294.4 km²로서 북한천 전체 구역면적의 약 95%를 차지하고 있다 (Kim et al., 2013).

3.2 보완관계식 기반 AA 및 CRAE 모형의 입력자료

보완관계 모형을 이용하여 실제증발산량을 산정하기 위해서는 기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등의 기상자료가 필요하다. 이를 위해서 대상구역의 중심부에 위치하는 이천기상대 자료를 이용하여 1995년부터 2012년까지의 18년간 기온, 습도, 일조시간 등의 일 자료를 구축하였고, 일사량 자료는 이천 기상대에서는 직접 관측되지 않아 Angstrom 공식(Allen et al., 1998)을 활용하여 일조시간으로부터 일사량을 환산하여 적용하였다. Table 1은 모의 기간동안의 기온, 습도, 풍속, 일조시간의 월별 평균값을 정리하여 나타낸 것이다.

3.3 SWAT-K 모형의 입력자료

SWAT-K 모형의 공간정보 입력자료로서 30 m 격자의 DEM (Digital Elevation Model), 환경부에서 제공하는 1:25,000의 토지피복도, 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 정밀토양도를 이용하였다. 강수량 자료는 1995년부터 2012년까지 국토교통부의 상품, 여주, 이천, 남곡, 태평, 설성, 삼죽 강우관측소 자료, 기상청의 이천기상대 자료를 바탕으로 티센망을 구축하여 소유역별 평균강우량을 산정하여 모형에 입력하였다. 최고/최저 기온, 상대습도, 풍속, 일조시간 등의 기상자료는 AA 모형 및 CRAE 모형에서와 마찬가지로 이천기상대 자료를 이용하였다. 물이용 및 배출 자료로서 지하수 이용량은 지자체 지역행정개발자료에 기재된 허가 및 신고 관정의 일 이용량 자료를 수집하여 모형에 입력하였고, 하천취수량은 진리정수장과 진로(주) 취수장 자료를, 그리고 하수처리수 방류량은 이천, 단월 등 총 35개의 하수처리방류장 자료를 이용하였다(Kim et al., 2013).

4. 결과 및 고찰

4.1 보완관계법 및 수문모델링에 의한 실제증발산량 산정 결과의 비교

Gao and Long (2008)은 원격탐사자료 기반의 에너지수지 모형을 이용하여 구역의 실제증발산량을 산정하고 SWAT 모델링 결과와의 비교를 통해서 산정 결과의 정확도를 평가하였다. Sun et al. (2010)은 원격탐사자료로부터 추출한 실제증발산량을 SWAT 모델링 결과가 서로 잘 일치하는 것을 보여주었고 두 방법을 혼용하는 방법을 제시하였다. Fang et al. (2012)은 MODIS 위성 영상자료와 에너지수지 및 수정 Priestly-Taylor 식을 이용하여 공간적인 실제증발산량을 추정하고 XAJ 모형(Zhao, 1992) 및 SWAT 모형으로 산정한 값을 기준으로 모형의 검증을 수행하여 서로 잘 일치함을 보였다. 또한 Immerzeel and Droogers (2008)과 Githui et al. (2012)의 연구처럼 역으로 위성 영상자료 기반의 증발산량 산정 결과를 기준으로 SWAT 모델링의 검보정 수단으로 사용하기도 하는 등 서로 다른 증발산량 산정 방법을 이용하여 각 방법을 평가하고 서로 보완하기도 한다. 따라서 본 연구에서도 검보정이 잘 수행된 SWAT-K 모델링을 통해 계산된 증발산량을 관측치로 간주하여 두 모형의 성능 평가의 기준으로 사용하였다.

선행 논문 Kim et al. (2013)에서는 본 연구와 동일한 연구 대상구역인 북한천 중상류 유역에 대해서 유출량 자료의 신뢰성이 양호한 기간을 택하여 SWAT-K 모형의 검보정을 수행하였고, 모의 기간을 확장하여 하천수 취수 및 지하수 이용, 하수처리수 방류량 영향을 배제한 하천의 자연유량을 산정하였다. 따라서 본 연구에서는 북한천 중상류 유역에 대해 검보정이 완료된 SWAT-K 모형을 이용하여 지표유출량, 중간유출량, 지하수유출량, 증발산량, 침투 및 함양량 등의 수문성분량을 산정하였고, 특히 증발산량은 보완관계 기반의 AA 모형과 CRAE 모형의 비교, 검증 대

Table 1. Monthly Average Weather Data at the Icheon Weather Station

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Mean
Temperature (°C)	-3.4	-0.4	5.1	11.8	17.4	21.8	24.7	24.8	19.7	12.9	5.6	-1.4	11.5
Relative Humidity	64.0	60.0	58.0	56.0	62.0	68.0	75.0	77.0	74.0	70.0	67.0	66.0	66.0
Wind Speed (m/s)	1.2	1.4	1.8	1.8	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	1.1	1.1	1.3
Sunshine Hours (hr)	169.2	171.1	194.0	210.5	222.4	189.7	140.3	148.8	156.4	182.5	152.4	161.4	174.9

상으로 사용하였다. 모형의 검보정을 통해서 일 단위 유출량이 관측치에 잘 적합하였기 때문에 각 수문성분량, 특히 증발산량도 관측치를 잘 모사한다고 간주할 수 있다.

AA 모형과 CRAE 모형으로부터의 증발산량 추정치는 SWAT-K 모형내 증발산량 산정 모듈을 이용하여 HRU 단위로 계산하고 면적 가중하여 유역평균 증발산량을 산정하였다. 이를 위해서 SWAT-K 모형내 잠재증발산량 산정 서브루틴 'etpot.f'에 보완관계식 Eq. (2), AA 모형의 잠재증발산량 산정식 Eq. (3), 그리고 CRAE 모형에 의한 잠재 및 습윤증발산량 산정식 Eqs. (6)~(9)을 추가하였다. AA 모형의 습윤증발산량 산정식은 SWAT-K 모형내 Priestly-Taylor식이 포함되어 있으므로 별도로 추가하지 않았다. CRAE 모형에 의한 잠재증발산량은 Eqs. (6) and (7)을 연립하여 Newton-Raphson 방법으로 평형온도 T_p 및 잠재증발산량 ET_p 를 반복 계산하도록 하고, 계산된 평형온도와 잠재증발산량을 Eq. (9)에 대입하여 평형온도에서의 순복사량을 계산하고 이를 Eq. (8)에 대입하여 습윤증발산량이 되도록 프로그램하였다. 또한 AA 모형과 CRAE 모형의 기상입력자료는 SWAT-K 모형 구축시 입

력한 기상자료가 동일하게 입력되게 하였다.

Fig. 3(a)는 Brutsaert and Stricker (1979)가 제안한 AA 모형과 SWAT-K 모형으로 산정한 유역평균 연간 강수량에 따른 연간 실제증발산량을 도시한 것으로 AA 모형으로 산정한 증발산량이 SWAT-K 모형으로 산정한 값에 비해 약 25~37% 이상 크게 산정되었다. AA 모형에 의한 실제증발산량은 연간 약 600 mm를 전후로 발생하는데 반해 관측값으로 간주된 SWAT-K 모의치는 연간 약 430 mm의 평균치를 보이고 있다. Fig. 3(b)는 AA 모형과 SWAT-K 모형으로 산정한 유역평균 월단위 강수량에 대한 월단위 실제증발산량을 도시한 것으로 강수량이 약 600 mm/월보다 큰 경우에는 두 방법 간 큰 차이를 보이고 있지 않으나 전반적으로 AA 모형이 SWAT-K 모형 보다 실제증발산량을 과다하게 산정하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 SWAT-K에 의한 실제증발산량은 강수량 증가에 따라 증가하다가 점차 일정한 값으로 점근해 가는 양상이 분명하게 나타나는 반면에 AA 모형의 결과는 그 양상이 뚜렷하지 않고 산포도 또한 크게 발생하였다. 계절별 양상을 파악하기 위해서 분석대상기간동안 평균한 월별 실제증발산량 산정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 기온이 낮고 건조한 겨울철과 초봄(11~3월)에는 AA 모형에 의한 실제증발산량이 과소 추정되고 있어 Xua and Singh (2005)의 연구에서 밝힌 바와 같이 이류에 의한 영향을 고려할 수 있도록 모형 수정이 필요하다. 반면에 식생 성장이 본격적으로 이루어지는 4월부터는 AA 모형에 의한 실제증발산량이 과다하게 산정되고 있다. 연간, 월간 산정 결과로 볼 때 AA 모형의 매개변수 보정이 필요한 것을 알 수 있다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 각각 Morton (1983)의 CRAE 모형으로 산정한 유역평균 연간, 월간 실제증발산량을 SWAT-K 모의치와 함께 나타낸 것으로 AA 모형과 마

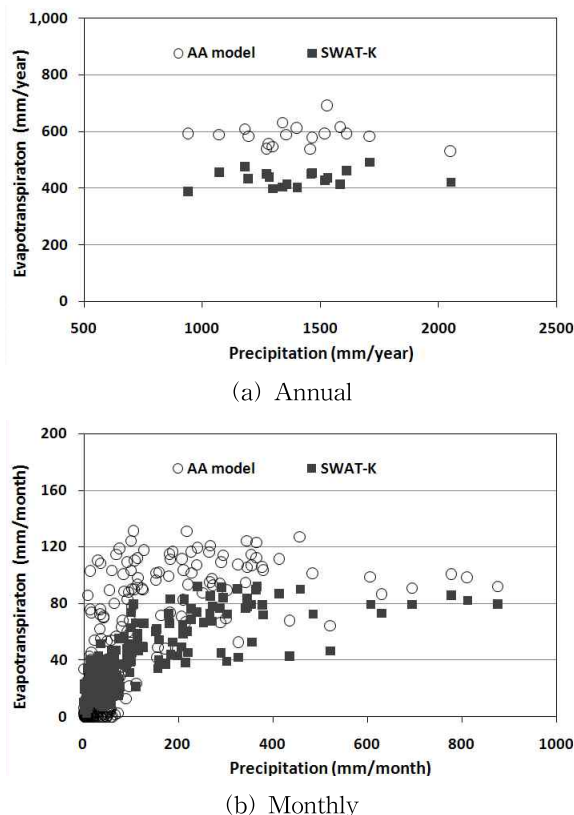


Fig. 3. Comparison of the Actual Evapotranspiration Calculated by the SWAT-K Model and the AA Model using Original Parameter Value

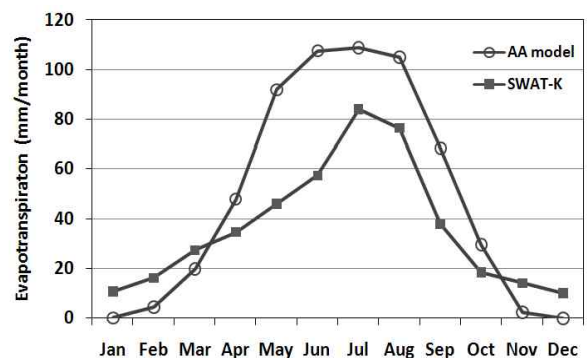


Fig. 4. Comparison of the Mean Monthly Actual Evapotranspiration Calculated by the SWAT-K Model and the AA Model using Original Parameter Value

찬가지로 CRAE 모형이 SWAT-K보다 실제증발산량을 크게 산정하고 있다. Fig. 5(a)에서와 같이 연간 실제증발산량은 두 방법간에 작게는 18%에서 최대 41%만큼 차이를 나타내었으며, 평균적으로 연간 약 160mm 만큼 CRAE 방법이 크게 산정되었다. 따라서 CRAE 모형으로 복하천 유역의 실제증발산량을 산정하기 위해서는 AA 모형과 마찬가지로 매개변수 보정이 필요하다. 유역평균 월간 실제증발산량도 Fig. 5(b)에서 보이는 바와 같이 CRAE 방법에 의한 실제증발산량이 SWAT-K 모의치보다 과다하게 산정되었으며, 강수량 증가에 따른 실제증발산량 변화 양상도 AA 모형의 결과와 유사한 것을 알 수 있다. Fig. 6은 월별 실제증발산량 평균치를 나타낸 것으로 4월부터 10월까지의 CRAE 모형에 의한 결과가 SWAT-K보다 크게 산정되고 있으며, AA 모형과는 달리 CRAE 모형에서는 Eq. (8)의 b_1 과 같이 이류항을 고려하였기 때문에 11월부터 3월까지 건기동안 CRAE 모형이 실제증발산량을 잘 모사하는 것으로 나타났다.

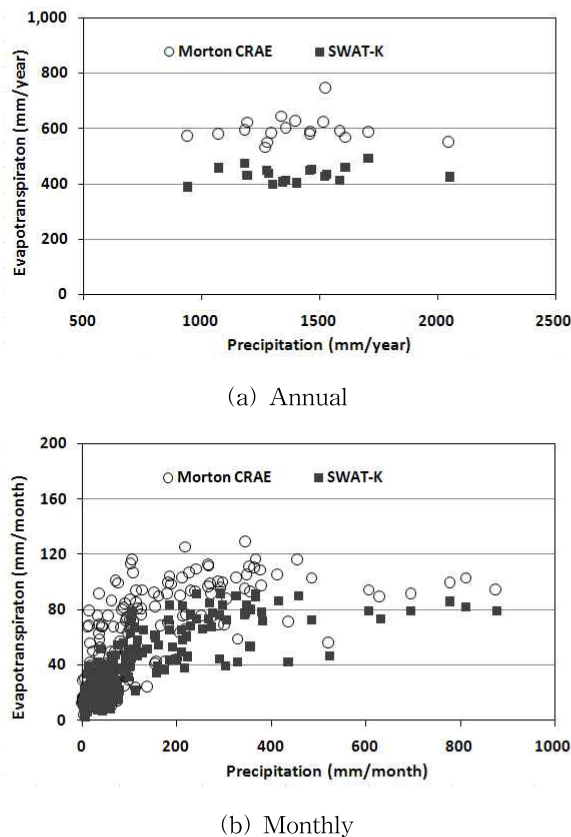


Fig. 5. Comparison of the Actual Evapotranspiration Calculated by the SWAT-K Model and the CRAE Model using Original Parameter Values

4.2 AA 모형 및 CRAE 모형의 매개변수 보정

AA 모형 및 CRAE 모형을 SWAT-K로 모의한 월별 실제증발산량과 근접시키기 위해서 반복모의를 통해 수동으로 모형의 매개변수를 보정하였다. Brutsaert and Stricker (1979)가 제안한 AA 모형에서 습윤증발산량 ET_w 를 산정할 때의 핵심 매개변수인 α 값을 변화시켜 가면서 산정한 실제증발산량이 SWAT-K에 의한 모의치에 적합할 때까지 반복 계산을 하였다. 또한, 건조기간동안 AA 모형에 의한 실제증발산량 값이 작게 산정되는 문제를 해결하고자 Morton (1973)이 제안하였고 Shin (1996)이 보정시 사용했던 경험적인 이류에너지항 M 을 추가로 고려하였다.

$$M = 0.66L_n - 0.44R_n \quad (10)$$

여기서, L_n 은 장파복사량, R_n 은 순복사량이다.

Figs. 7 and 8은 이류항 영향을 반영하기 위해 Eq. (10)을 추가로 고려하고, AA 모형의 원래 매개변수 $\alpha=1.26$ 보다는 작은 $\alpha=1.08$ 을 사용하였을 때의 계산 결과로서 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 수정된 AA 모형이 초봄, 가을에는 약간 작게 산정되고 늦봄, 초여름에는 다소 크게 산정되었지만, 전반적으로 SWAT-K에 의한 실제증발산량값을 잘 따라가는 것을 볼 수 있다.

Morton (1983)의 CRAE 모형에서도 습윤증발산량 ET_w 산정과 관련된 매개변수를 보정하였다. Eq. (6)에 나타난 바와 같이 이류영향을 고려하기 위한 경험상수 b_1 과 Priestley-Taylor식의 α 의 의미를 갖는 경험상수 b_2 를 동시에 바꾸어 가면서 SWAT-K에 의한 실제증발산 값에 가까워 질 때까지 반복적으로 계산하였다. CRAE 모형이 식생 성장기에 크게 산정되는 경향을 줄이고자 원래 매개변수 $b_2 = 1.2$ 보다는 작은 값을 사용토록 하고, Fig. 6과 같이 겨울철 건조기간 때 잘 일치하였지만 b_2 를 줄인 영

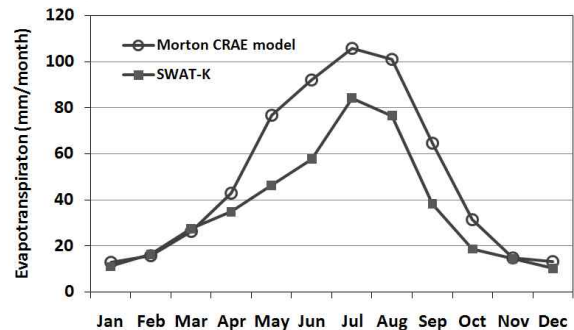


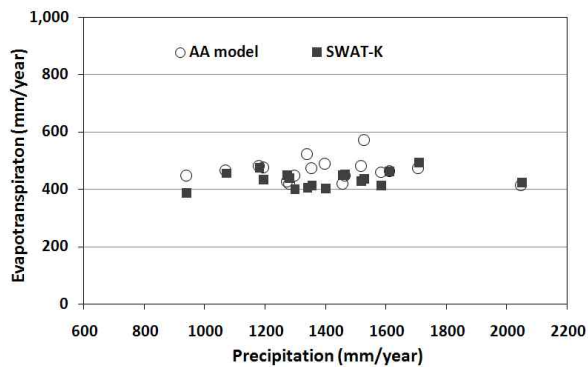
Fig. 6. Comparison of the Mean Monthly Actual Evapotranspiration Calculated by the SWAT-K Model and the CRAE Model using Original Parameter Values

향으로 건기 때 작게 산정되는 것을 보정하고자 b_1 값을 약간 증가시키는 방향으로 모형의 보정을 수행하였다.

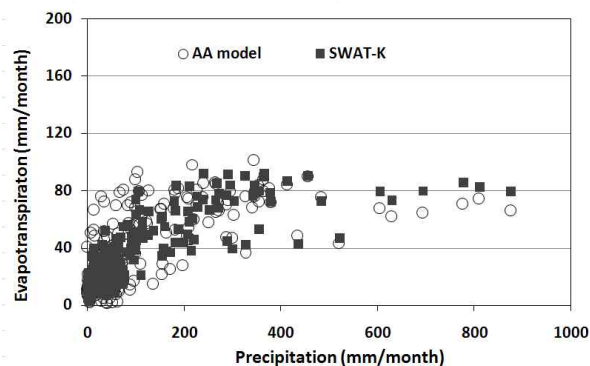
Figs. 9 and 10은 $b_1 = 16 Wm^{-2}$, $b_2 = 1.04$ 를 사용하였을 때의 실제증발산량 산정 결과로서 보정된 CRAE 모형이 연단위, 월단위, 그리고 월별 모두 SWAT-K 모의치에 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 도시적으로 볼 때 AA

모형의 결과인 Fig. 8에 비해 CRAE 모형의 결과인 Fig. 10이 월별 양상을 보다 더 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

방법별로 지역의 연평균 월별 실제증발산량 산정 결과를 종합하여 Table 2에 정리하였다. AA 모형은 매개변수 보정 전에는 SWAT-K 모의치에 비해 6월에 최대 50 mm, 3월에 최소 7.4 mm, 평균적으로 12.7 mm의 편차를 보였으

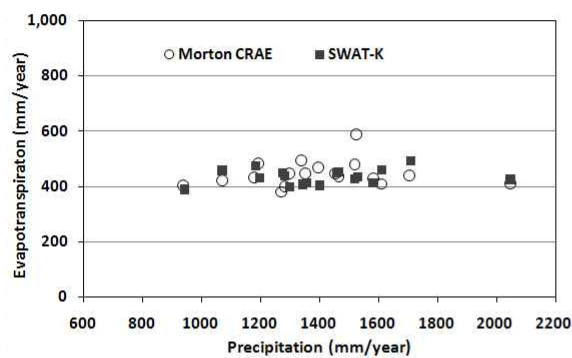


(a) Annual

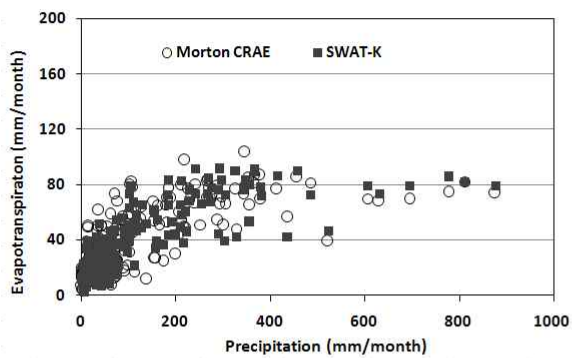


(b) Monthly

Fig. 7. Comparison of the Actual Evapotranspiration Calculated by the SWAT-K Model and the AA Model using Tuned Parameter Value



(a) Annual



(b) Monthly

Fig. 9. Comparison of the Actual Evapotranspiration Calculated by the SWAT-K Model and the CRAE Model using Tuned Parameter Values

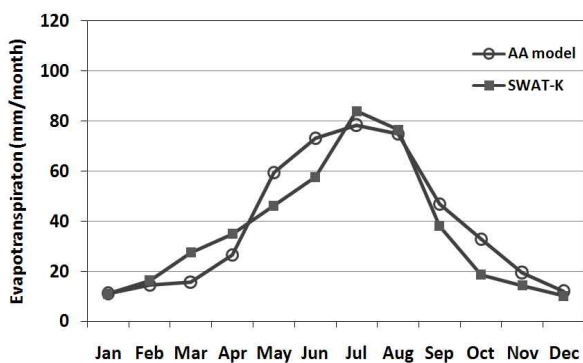


Fig. 8. Comparison of the Mean Monthly Actual Evapotranspiration Calculated by the SWAT-K Model and the AA Model using Tuned Parameter Value

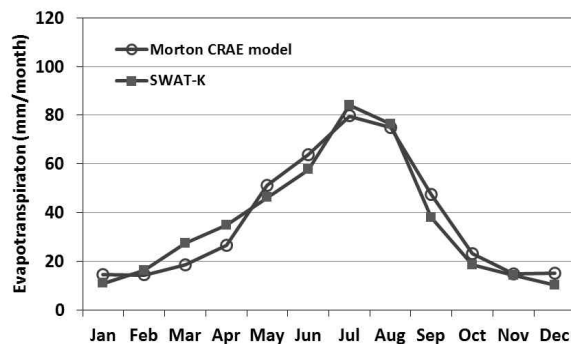


Fig. 10. Comparison of the Mean Monthly Actual Evapotranspiration Calculated by the SWAT-K Model and the CRAE Model using Tuned Parameter Values

Table 2. Summary of the Estimated Mean Monthly Actual Evapotranspiration for the Study Watershed (unit: mm/month)

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
SWAT-K		11.0	16.3	27.5	34.8	46.2	57.6	84.0	76.5	38.1	18.6	14.2	10.1
AA	W/O Calibration	0.2	4.6	20.1	48.1	91.9	107.6	108.9	105.0	68.6	29.9	2.5	0.0
	With Calibration	10.9	14.6	15.7	26.6	59.4	73.2	78.2	74.8	46.9	32.9	19.2	11.8
CRAE	W/O Calibration	13.0	15.7	26.3	42.8	76.7	91.8	105.6	100.6	64.4	31.3	15.0	13.4
	With Calibration	14.4	14.4	18.5	26.6	51.2	63.8	79.7	74.9	47.4	23.0	14.7	15.1

Table 3. Statistics of the Estimated Annually Mean Monthly Actual Evapotranspiration for the Study Watershed

Model		Mean (mm)	Standard deviation (mm)	Coefficient of efficiency	RMSE (mm)
SWAT-K		36.2	24.7		
AA	W/O Calibration	47.9	44.0	-0.28	27.5
	With Calibration	37.8	26.4	0.70	13.3
CRAE	W/O Calibration	48.8	35.4	0.28	20.5
	With Calibration	36.7	24.3	0.94	6.1

나, 보정 후에는 6월에 최대 15.6mm, 1월에 최소 0.1mm, 평균적으로 2.4mm의 편차로 오차가 크게 감소하였다. CRAE 모형은 매개변수 보정 전에는 6월에 최대 34.2mm, 2월에 최소 0.6mm, 평균 13.5mm의 편차를 보였으나, 보정 후에는 9월에 최대 9.3mm, 11월에 최소 0.5mm, 평균 0.7mm의 편차를 나타내 오차가 크게 감소하였음을 알 수 있다.

SWAT-K로 모의한 월단위 실제증발산량을 참값으로 간주하고 이 값과 AA 모형과 CRAE 모형으로 산정한 월단위 실제증발산량과의 보정 전·후의 Nash-Sutcliffe 효율성계수(Coefficient of Efficiency, CE)와 평균제곱근오차(RMSE)를 계산하여 Table 3에 나타내었다. AA 모형은 CE가 보정 전 -0.28에서 보정 후 0.70으로 좋아졌고, RMSE는 보정 전 27.5mm에서 보정 후 13.3mm로 감소하였다. CRAE 모형 역시 매개변수 보정 효과로 인해 CE가 0.28에서 0.94로 모형 효율성이 높아졌고 RMSE가 20.5mm에서 6.1mm로 크게 줄어든 것을 알 수 있으며, AA 모형보다 CRAE 모형에 의한 결과가 조금 더 우수한 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 잠재증발산량과 실제증발산량간의 보완 관계식을 이용한 대표적인 증발산량 산정 모형인 Brutsaert and Stricker (1979)의 AA 모형과 Morton (1983)의 CRAE

모형을 복하천 중상류 유역에 적용하여 1995년부터 2012년까지의 유역평균 실제증발산량을 산정하고, 유역 물수지 결과와의 비교를 통해서 두 모형의 국내 유역 적용성을 평가하였다. 연구 대상유역은 양질의 하천유량 자료 확보 기간이 짧고, 하천유량 자료 또한 인위적 물 이용, 배출로 인해 교란되었기에 강수량, 유출량 등의 관측치 기반의 유역 물수지 결과보다는 검보정이 잘 된 생태수문모형 SWAT-K로 모의한 실제증발산량을 관측치에 준하는 것으로 간주하고 이 값과의 비교를 통하여 AA 모형과 CRAE 모형으로 산정한 실제증발산량의 적정성을 평가하였다.

연구대상 유역에 대해서 원래의 매개변수를 사용한 AA 모형과 CRAE 모형으로 산정한 유역평균 연간 실제증발산량은 SWAT-K 모의치에 비해 각각 25~37%, 18~41% 정도 과다하게 산정되었으며, 특히 식생 성장기에 크게 산정되는 경향을 나타내었다. CRAE 모형은 이류 영향을 고려하기 때문에 겨울철 건조기간동안 실제증발산량을 잘 모사하였지만, AA 모형은 건조기간동안 과소 산정되는 경향을 나타내었다. 따라서 AA 모형과 CRAE 모형으로 관측치에 준하는 SWAT-K 모의치에 가깝게 실제증발산량이 산정되도록 습윤증발산량 계산의 핵심 매개변수들의 보정을 수행한 결과, AA 모형의 경우는 Brutsaert and Stricker (1979)의 제안 값 $\alpha = 1.26$ 보다는 작은 $\alpha = 1.08$ 을 사용하고 건조기간동안의 적합성을 높이기 위해서 이류항을 추가로 고려하였을 때가 실제증발산량 값을 잘 나타내

었으며, CRAE 모형의 경우에는 Morton (1983)이 제안한 값 $b_1 = 14 \text{ Wm}^{-2}$, $b_2 = 1.12$ 보다는 각각 다소 크고, 작은 값인 $b_1 = 16 \text{ Wm}^{-2}$, $b_2 = 1.04$ 를 사용하였을 때에 연단위, 월단위, 그리고 월별 모두 가장 양호한 실제증발산량 값이 산출되었다.

본 연구는 북한천 유역에 대해 보완관계모형의 적용성을 평가한 것으로 좀 더 많은 유역에 대한 반복적인 분석을 통해 일반적인 결론을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, L.S., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirement*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 300 p.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Barr, A.G., Kite, G.W., Granger, R., and Smith, C. (1997). "Evaluating three evapotranspiration methods in the slurrp macroscale hydrological model." *Hydrological Processes*, Vol. 11, pp. 1685-1705.
- Bouchet, R.J. (1963). "Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 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.
- Doyle, P. (1990). "Modelling catchment evaporation: An objective comparison of the Penman and Morton approaches." *Journal of Hydrology*, Vol. 121, pp. 257-276.
- Fang, Z., Ren, L., Li, Q., Liu, X., Yuan, F., Zhao, D., and Zhu, Q. (2012). "Estimating and validating basin-scale actual evapotranspiration using MODIS images and hydrologic models." *Hydrology Research*, Vol. 43, pp. 156-166.
- Gao, Y., and Long, D. (2008). "Intercomparison of remote sensing-based models for estimation of evapotranspiration and accuracy assessment based on SWAT." *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 4850-4869.
- Githui, F., Selle, B., and Thayalakumaran, T. (2012). "Recharge estimation using remotely sensed evapotranspiration in an irrigation catchment in southeast Australia." *Hydrological Processes*, Vol. 26, pp. 1379-1389.
- Granger, R.J. (1991). Evaporation from natural non-saturated surfaces. PhD Thesis, Department of Agricultural Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon. 140 pp.
- Granger, R.J., and Gray, D.M. (1990). "Examination of Morton's CRAE model for estimating daily evaporation from field-sized areas." *Journal of Hydrology*, Vol. 120, pp. 309-325.
- Gyeonggi Provincial Government (2006). General planning on Bokha stream maintenance, pp. 1-27.
- Haque, A. (2003). "Estimating actual areal evapotranspiration from potential evapotranspiration using physical models based on complementary relationships and meteorological data." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 62, pp. 57-63.
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., and Riley, J.P. (1985). "Agricultural benefits for Senegal River Basin." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 111, No. 2, pp. 113-124.
- Hobbins, M.T., Ramirez, J.A., and Brown T.C. (2001b). "The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration: An enhanced Advection-Aridity model." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 1389-1403.
- Hobbins, M.T., Ramirez, J.A., Brown, T.C., and Claessens, L. (2001a). "The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration: The Complementary Relationship Areal Evapotranspiration and Advection-Aridity models." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 1367-1387.
- Immerzeel, W.W., and Droogers, P. (2008). "Calibration

- of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration." *Journal of Hydrology*, Vol. 349, pp. 411-424.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. (ed). (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, ASCE, N.Y., 332 pp.
- Kim, N.W., and Kim, C.G. (2004). "Comparison of Penman-Monteith method and Morton CRAE method for estimating areal evapotranspiration." *2004 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 1077-1081.
- Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). "Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model." *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.
- Kim, N.W., Lee, J., and Lee, J.E., (2013). "Estimation of natural streamflow for the Bokhacheon middle-upper watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 12, pp. 1169-1800.
- Kim, N.W., Won, Y.S., Lee, J., Lee, J.E., and Jeong, J.H. (2011). "Hydrologic impacts of urban imperviousness in White Rock Creek watershed." *Transactions of the ASABE*, Vol. 54, No. 4, pp. 1759-1771.
- Lemur, R., and Zhang, L. (1990). "Evaluation of three evapotranspiration models in terms of their applicability for an arid region." *Journal of Hydrology*, Vol. 114, pp. 395-411.
- Liu, S., Sun, R., Sun, Z., Li, X., and Liu, C. (2006). "Evaluation of three complementary relationship approaches for evapotranspiration over the Yellow River basin." *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 2347-2361.
- Monteith, J.L. (1981). "Evaporation and surface temperature." *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* Vol. 107, pp.1-27.
- Morton, F.I. (1975). "Estimating evaporation and transpiration from climatological observations." *J. Appl Meteorol.*, Vol. 14, pp. 488-497.
- Morton, F.I. (1969). "Potential evaporation as a manifestation of regional evaporation." *Water Resources Research*, Vol. 5, pp. 1244-1255.
- Morton, F.I. (1976). "Climatological estimates of evapotranspiration." *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, Vol. 102(HY3), pp. 275-291.
- Morton, F.I. (1978). "Estimating evapotranspiration from potential evaporation: practicality of an iconoclastic approach." *Journal of Hydrology*, Vol. 38, pp. 1-32.
- 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.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005). Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Version 2005. Temple Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil, and grass." *Proceedings of Royal Society of London*, A193, pp. 120-146.
- 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.
- Shim, S.-C. (1996). "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.
- Shim, S.C. (1996). "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.
- Spittlehouse, D.L. (1989). "Estimating evapotranspiration from land surfaces in British Columbia." *Estimation of Areal Evapotranspiration*, IAHS, Publ., 177, pp. 245-253.
- Sun, C., Jiang, D., Wang, J., and Zhu, Y. (2010). "A new

approach to accurate validation of remote sensing retrieval of evapotranspiration based on data fusion.” *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 7, pp. 1745-1784.

Wan Chang, Z.Y., insheng, Z., Ogawa, K., and Yamaguchi, Y. (1999). “Observation and estimation of daily actual evapotranspiration and evaporation on a glacierized watershed at the headwater of the Urumqi River, Tianshan, China.” *Hydrological Processes*, Vol. 13, pp. 1589-1601.

Xu, C.-Y., and Singh, V.P. (2005). “Evaluation of three

complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions.” *Journal of Hydrology*, Vol. 308, pp. 105-121.

Xu, C.-Y., Seibert, J., and Halldin, S. (1996). “Regional water balance modelling in the NOPEX area-development and application of monthly water balance models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 201, pp. 289-310.

논문번호: 14-025	접수: 2014.03.05
수정일자: 2014.04.11/05.13	심사완료: 2014.05.13