

# 위성기반 증발산 자료를 활용한 유역모델 성능 평가

Water  
for future  
학술/기술 기사  
01



**이상철**

서울시립대학교  
환경공학부 조교수  
slee2020@uos.ac.kr

## 1. 연구배경

유역단위 물순환 과정은 기후, 토지이용, 토양, 지표면 특성 등 다양한 요소의 상호작용으로 결정된다(Edwards et al., 2015). 농지가 많은 유역의 경우 관개배수, 작물재배 활동을 포함한 인위적 요소가 물순환에 중요한 영향을 미친다. 복잡한 물순환 과정을 이해하기 위해 유역모델이 중요한 도구로 활용되어 왔다. 물순환 과정 분석에 사용되는 모델은 크게 기작기반(process-based)과 자료기반(data-driven)으로 분류된다. 기작기반 모델은 물순환 시스템의 이해를 바탕으로 관련된 물리화학적, 생물학적, 생태학적 기작을 수치화 시킨 수식으로 표현한 모델이다. 자료기반 모델은 기계학습을 포함한 통계기법을 자료에 적용하여 특정한 경향성이나 요소간의 관계를 예측한다(Cha et al., 2020).

기작기반 모델은 시스템 내 측정치를 잘 모사하는 최적의 매개변수(parameter) 값을 도출하는 검·보정(calibration and validation) 과정이 필수적이다(Yen et al., 2016). 일반적으로 측정치의 부족으로 대다수의 매개변수 값은 유역 유출부(watershed outlet)에서만 모니터링된 측정치로 결정된다. 유역 내 모든 물리적 기작을 유역 유출부 값 하나로 검·보정하는 방법은 유역모델의 불확실성(uncertainty)의 대표적인 원인으로 인식되고 있다(Yen et al., 2016). 기작기반 모델을 구성하는 물순환 시스템을 표현하는 수식들 또한 시스템의 흐름을 완벽히 모의하기에 부족하다. 이런 불완전함 또한 모델 결과의 불확실성

을 증가시키는 원인으로 인식되고 있다. 기작 모델의 알고리즘 개선으로 모델 불확실성 감소를 위한 많은 노력이 기울여지고 있지만, 알고리즘 개선으로 고도화된 모델 예측력 향상에 도움 되었는지 정량 평가하기 위한 실측값이 부족하다(Lee et al., 2021). 측정 자료의 결핍으로 발생하는 문제 해결은 측정자료를 증가시키면 해결될 수 있다고 단순하게 생각할 수 있다. 그러나 검보정 과정에 필요한 실측자료는 장기간 모니터링 된 자료가 필요하기 때문에 시간과 예산이 많이 요구된다.

최근 시공간 제약없이 지표현상을 모니터링한 위성기반 증발산 자료(remotely sensed evapotranspiration)가 기작기반 모델에 적용되고 있다(Becker et al., 2019; Herman et al., 2018). 증발산(evapotranspiration)은 증산(evaporation)과 발산(transpiration)의 합계로 대기와 지표 사이의 열과 에너지 교환을 나타내는 중요한 인자다. 따라서, 증발산 자료는 유역 내 물순환 관련된 매개변수의 최적값을 선정하는데 중요한 지표가 될 수 있다. 본 기고에서는 위성기반 증발산 자료를 사용하여 기작기반 모델 알고리즘 개선 효과를 평가하려고 한다.

## 2. 위성기반 증발산 자료

본 기고에 사용된 위성기반 증발산 자료는 Atmosphere-Land Exchange Inverse(ALEXI) 모델(Anderson et al., 1997 and 2007)과 flux spatial-temporal disaggregation scheme(DisALEXI)(Anderson et al., 2004)으로 생성된 자료이다. ALEXI/DisALEXI로 만든 30-m 해상도의 증발산 자료는 미국 동부지역 플릭스 타워에서 측정된 실측자료와 비교하여 평균 10% 에

러를 나타내며 검증되었다. 본 기고에서는 유역과 소유역단위로 구분된 위성기반 증발산의 면적 평균자료(areal average)를 유역 유출부에서 측정된 유량자료와 함께 모델의 검·보정 실측 자료로 활용하였다.

## 3. Soil and Water Assessment Tool(SWAT) 유역모델

본 기고에서 사용된 유역모델은 SWAT으로, 미국 농무성 농업연구소(USDA-ARS)에서 개발되었다. 복잡한 유역에서 장기간에 걸쳐 토지피복, 토양특성, 기후변화, 인간활동에 따라 변화되는 수문과 수질 및 점·비점오염원에서 유출되는 오염물질의 거동을 모의하기 위하여 개발되었다(Neitsch et al., 2009). SWAT은 대상지를 유역에서 소유역 그리고 수문반응단위(Hydrological Response Unit)로 구분하여 HRU단위에서 물순환을 모의한다. SWAT은 경험적(empirical) 수식으로 토양수분을 계산하지만, 이 방법은 토양층 물수지 변화를 예측하는데 한계가 있다. 이 단점을 극복하기 위해 Richards수식에 기반하여 물리적 수식으로 토양수분을 계산한 RSWAT이 개발되었다(Qi et al., 2018). SWAT과 RSWAT은 성능은 토양수분측정 지점에서 비교는 되었지만, 유역단위에서는 실측자료의 부족으로 정량적 비교가 어려웠다. 본 기고에서는 위성기반 증발산 자료가 SWAT과 RSWAT의 성능을 비교하는데 사용되었다. 유량과 증발산 예측의 모델의 성능평가는 Kling-Gupta Efficiency(KGE)를 사용했고, 공식은 아래와 같다(Gupta et al., 2009).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\sigma_s/\sigma_o - 1)^2 + (\mu_s/\mu_o - 1)^2}$$

여기서,  $r$ 은 피어슨 적률 상관계수,  $\sigma_s/\sigma_o$ 과  $\mu_s/\mu_o$ 는 각각 실측과 예측의 변이정도와 편향을 나타낸다. 아래첨자  $s$ 와  $o$ 는 각각 모의된 값과 실측값을 나타낸다.

#### 4. 연구결과

5년 동안 SWAT과 RSWAT은 실측 유량과 위성 기반 증발산량으로 검·보정 실시하였다 (Fig. 1). 유역단위 검·보정 결과 SWAT와 RSWAT 모두 통계적으로 만족스러운(acceptable)한 결과를 나타냈다. SWAT으로 모의된 일단위 유량과 증발산과 실측값과의 비교로 계산된 KGE 값은 각각 0.47과 0.48을 나타냈다. RSWAT으로 모의된 일단위 유량과 증발산은 각각 0.49와 0.52를 나타냈다. RSWAT이 SWAT보다 향상된 모델 결과를 나타냈지만, 유역단위에서 미미한 차이를 도출했다.

소유역으로 구분된 위성기반 증발산은 소유역 단위로 모의된 모델의 결과 정확도 평가에 적용할 수 있다. 유역 단위에서 유량과 증발산으로 검·보정된 모델 결과를 이용하여 소유역단위에서 모의된 증발산량의 결과를 비교했다(그림 2와 3). 각 소유역 단위로 예측된 SWAT의 KGE의 값은 0.38 - 0.58의 범위를 나타냈고, RSWAT은 0.37 - 0.68의 범위를 나타냈다. 중앙값은 RSWAT이 0.06 높은 KGE 값을 보였고, 이 결과는 유역단위 결과보다 더 명확한 SWAT과 RSWAT의 차이를 나타냈다(그림 2). 또한 그림 3은 RSWAT 결과가 더 많은 수의 높은 KGE 값을 가진 소유역이 예측했다는 결과이다. 본 결과는 위성기반 증발산 자료가 소유역 단위에서 SWAT과 RSWAT의 모의결과를 검증할 수 있게 하였음을 나타낸다. 따라서 고도화된 모델의 예측이 향상되었다는 것을 정량적으로 평가할 수 있게 하였다.

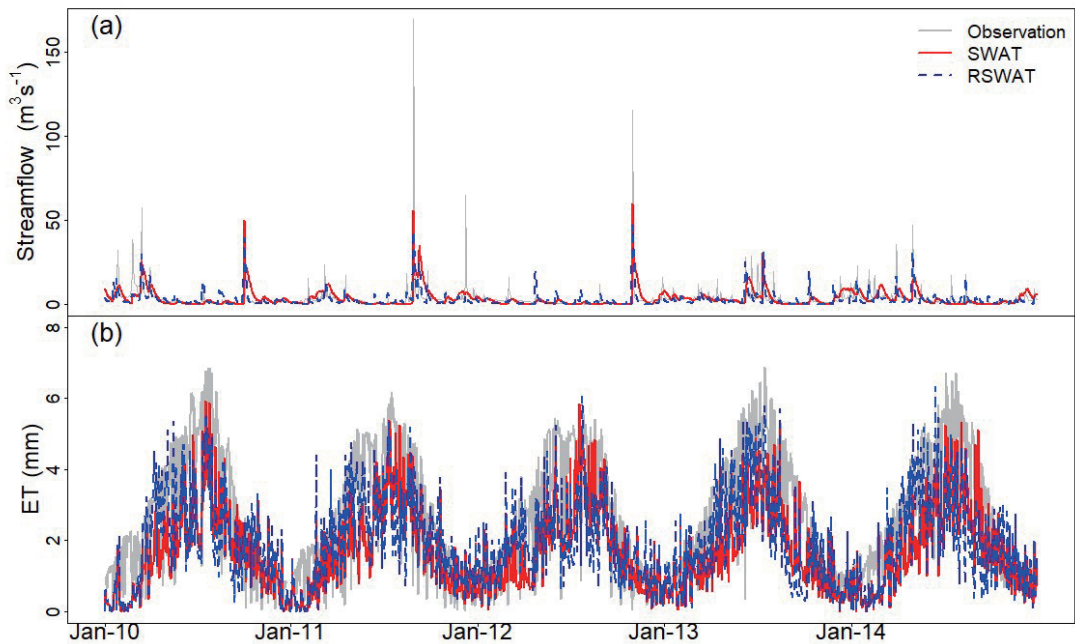


Fig. 1. Comparisons of observations and simulations: (a) streamflow and (b) ET. Observed ET in (b) indicates RS-ET. (adapted from Lee et al., 2021).

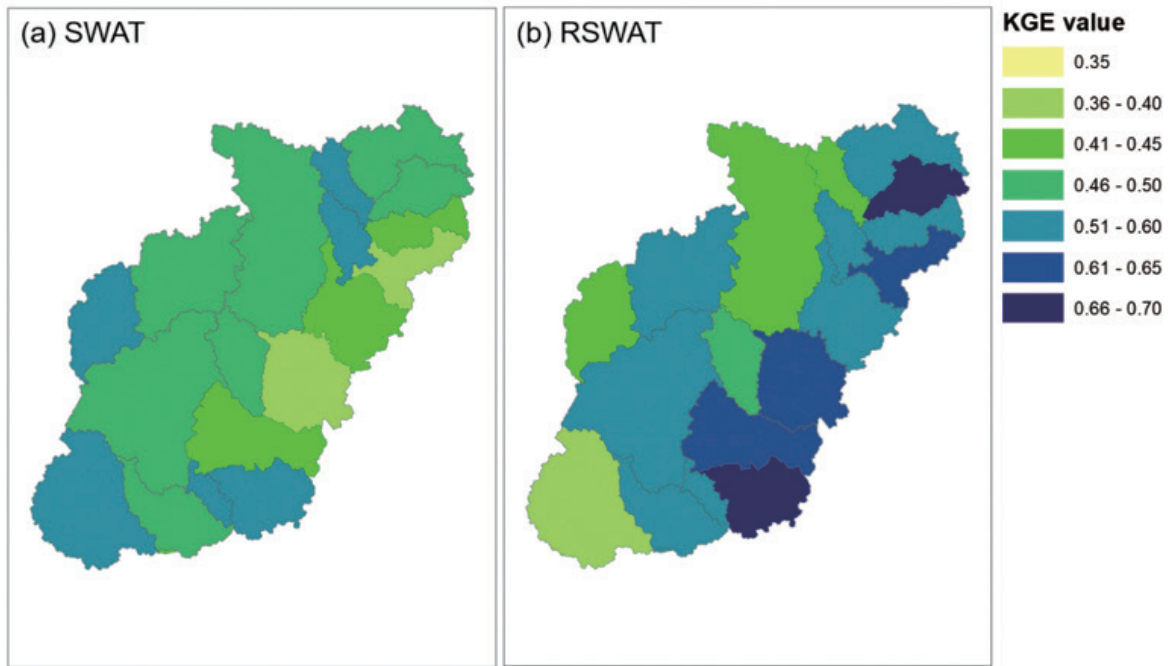


그림 2. The spatial distribution of subwatershed-level KGE values for ET simulations: (a) SWAT and (b) RSWAT (adapted from Lee et al., 2021).

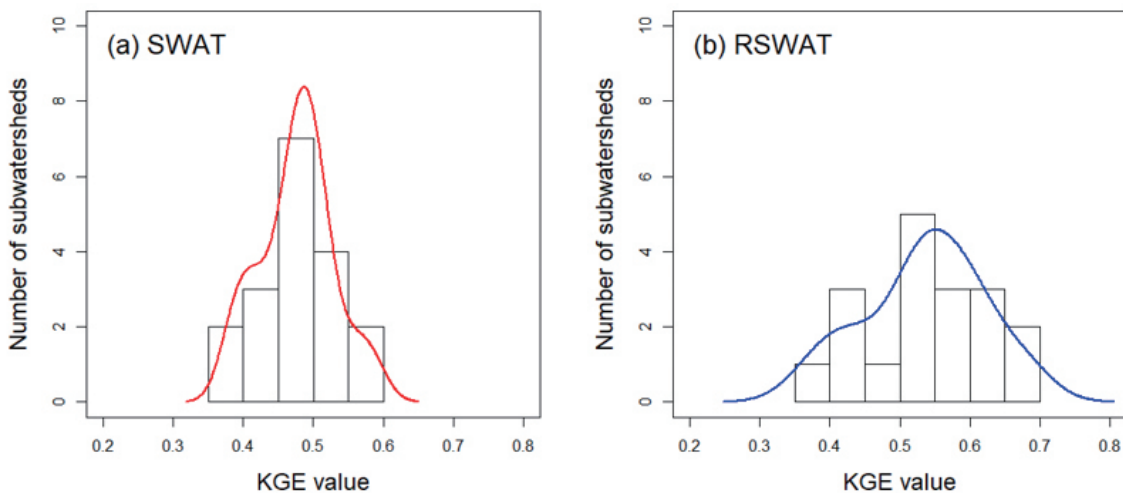


그림 3. Density plots for subwatershed-level KGE values with an interval of 0.05: (a) SWAT and (b) RSWAT (adapted from Lee et al., 2021).

## 5. 맺음말

본 기고는 위성기반 증발산 자료를 실측 유량 자료와 함께 유역 모델의 검·보정 자료로 활용하

여 유역모델의 성능을 평가하였다. 고도화된 유역 모델과 기존 모델의 예측력 비교를 위해 유량자료와 위성기반 증발산 자료를 사용하였다. 두 모델의 증발산과 유량 예측결과를 유역단위에서 평가

했을 때 고도화된 모델의 예측력 향상이 크지 않다는 결과를 나타냈다. 그러나 소유역 단위로 구분된 위성기반 증발산 자료를 이용하였을 때, 모델 고도화를 통한 예측력 향상을 뚜렷이 나타냈다. 본 기고의 결과는 위성기반 증발산 자료가 유역 모델의 검·보정 자료로 이용될 수 있음과 함께 모델의 고도화 평가에 중요한 자료임을 나타냈다. 따라서, 유역 모델 연구에 위성기반 증발산 자료

가 많이 활용되면 물환경을 이해하고 의사결정에 도움이 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 성과는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1C1C1006030).

### 참고문헌

- Anderson, M.C., Norman, J.M., Diak, G.R., Kustas, W.P., Mecikalski, J.R., A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 1997, 60, 195-216, doi:10.1016/S0034-4257(96)00215-5.
- Anderson, M.C., Norman, J.M., Mecikalski, J.R., Torn, R.D., Kustas, W.P., Basara, J.B., 2004. A multiscale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales. *J. Hydrometeorol.* 5, 343-363. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0343:AMRSMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0343:AMRSMF>2.0.CO;2)
- Anderson, M.C., Norman, J.M., Mecikalski, J.R., Otkin, J.A., Kustas, W.P., A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2007, 112, D10117, doi:10.1029/2006JD007506.
- Becker, R., Koppa, A., Schulz, S., Usman, M., aus der Beek, T., Schüth, C., 2019. Spatially distributed model calibration of a highly managed hydrological system using remote sensing-derived ET data. *J. Hydrol.* 577, 123944. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123944>
- Cha, Y., Shin, J., Kim, Y., 2020. Data-Driven Modeling of Freshwater Aquatic Systems: Status and Prospects. *J. Korean Soc. Water Environ.* 36(6), 611-620. <https://doi.org/10.15681/KSWE.2020.36.6.611>
- Edwards, P.J., Williard, K.W.J., Schoonover, J.E., 2015. Fundamentals of Watershed Hydrology. *J. Contemp. Water Res. Educ.* 154, 3-20. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2015.03185.x>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377, 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Herman, M.R., Nejadhashemi, A.P., Abouali, M., Hernandez-Suarez, J.S., Daneshvar, F., Zhang, Z., Anderson, M.C., Sadeghi, A.M., Hain, C.R., Sharifi, A., 2018. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. *J. Hydrol.* 556, 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.009>

---

Lee, S., Qi, J., Kim, H., McCarty, G.W., Moglen, G.E., Anderson, M., Zhang, X., Du, L., 2021. Utility of remotely sensed evapotranspiration products to assess an improved model structure. *Sustain.* 13, 2375. <https://doi.org/10.3390/su13042375>

Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., 2011. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, Texas Water Resources Institute. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>

Qi, J., Zhang, X., McCarty, G.W., Sadeghi, A.M., Cosh, M.H., Zeng, X., Gao, F., Daughtry, C.S.T., Huang, C., Lang, M.W., Arnold, J.G., 2018. Assessing the performance of a physically-based soil moisture module integrated within the Soil and Water Assessment Tool. *Environ. Model. Softw.* 109, 329-341. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.024>

Yen, H., White, M.J., Ascough, J.C., Smith, D.R., Arnold, J.G., 2016. Augmenting Watershed Model Calibration with Incorporation of Ancillary Data Sources and Qualitative Soft Data Sources. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 52, 788-798. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12428>

---