

천리안 위성 자료와 지표 에너지 수지식을 이용한 위성 일 증발산량 알고리즘 개발 및 검증

Development and validation of daily evapotranspiration based on COMS satellite and surface energy budget equation

박나연*, 김영미, 신진호**, 유상진

Na-Yeon Park, Youngmi Kim, Jinho Shin, Sang Jin Lyu

요 지

육상의 증발산량(evapotranspiration, ET)은 대기 중 수증기의 상변화를 통해 대기과 지표 사이의 물과 에너지 순환에 영향을 미치며, 강수량, 유출량과 함께 수자원에 영향을 미치는 주요 인자이다. 강수량과 유출량은 직접 관측이 가능한 반면, 증발산량은 숨어있는 잠열로서 관측하기 어렵다. 플릭스 타워나 라이지메타(Lysimeter) 등을 이용하여 증발산량을 직접 관측하고 있으나 이들 지상관측은 일부 지점(point)에서 제한적으로 이루어지고 있으며, 관측 지점의 수를 확대하게 되면 관측 기기의 유지 보수 등의 많은 시간과 비용이 든다는 한계가 있다. 이러한 지상관측의 한계를 극복하고 넓은 영역의 증발산량 변화를 관측하기 위해 위성을 이용한 증발산량을 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 기상청 국가기상위성센터(National Meteorological Satellite Center, NMSC)에서는 우리나라 최초의 정지 기상 위성인 천리안 위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS) 자료를 지표 에너지 수지식(Surface Energy Budget Equation)에 적용하여 동아시아 지역의 지면과 식생 특성을 반영한 '일(daily) 증발산량 산출 알고리즘'을 개발하였다. 현열을 계산하기 위해 다양한 입력 변수가 사용되어지고 계산 과정이 복잡하기 때문에, 본 연구에서는 '반 경험적인 계수인 B 계수 모델'을 사용하여 현열 산출 기법을 단순화하였다. 본 알고리즘을 이용하여 2011년 4월부터 현재까지 동아시아(위도 20~50°N, 경도 100~145°E)의 해상도 1km의 일 증발산량을 산출하였고, 위성 증발산량의 검증을 위해 지면 특성이 다른 청미천(농경지), 설마천(혼효림) 지역의 플릭스 타워 증발산량 자료(유량조사사업단 제공)와 비교 분석하였다. 2011년 4월부터 2014년 12월까지 청미천 지역에서의 플릭스 타워 관측과 비교한 결과, 총 665개 자료에 대하여 RMSE는 2.82 mm/day, Bias는 2.56 mm/day의 결과를 보였다. 동일한 기간에 대하여 설마천 지역에서의 플릭스 타워 관측과 비교한 결과, 총 582개 자료에 대하여 RMSE는 1.92 mm/day, Bias는 1.45 mm/day의 결과를 보였다. 기상청 국가기상위성센터의 위성증발산량이 봄과 가을철에 다소 높게 산출되는 경향이 있었으나, 증발산량의 변화경향은 유사하게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 동아시아 지역 위성 증발산량 변화를 감시하고 있으며 향후, 수문 및 기후 분야에서 가뭄 모니터링 등의 연구에도 활용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 위성 증발산량, 동아시아, 플릭스 타워, 천리안 위성, 에너지 수지

* 정회원 · 국가기상위성센터 위성분석과 연구원 · E-mail : superengine@korea.kr

** 정회원 · 국가기상위성센터 위성분석과 연구관 · E-mail : jshin0@korea.kr

1. 서론

증발산은 지면 또는 수면(바다, 호수, 강, 젖은 표면 등)으로부터의 증발(Evaporation) 작용과 식생으로부터의 증산(Transpiration) 작용에 의해 발생하며, 액체에서 기체 상태로 대기 중으로 방출되는 잠열 플럭스(Latent heat flux)를 말한다. 이러한 증발산은 강수량, 하천 및 지하수 유출량과 함께 수자원에 직접 영향을 미치는 주요 인자이다. 따라서, 최근, 수문 및 기후 분야에서는 강수량, 유출량, 증발산량, 지하수 및 토양 수분 함량을 정량적으로 측정하여 물수지 및 순환을 이해하고 모니터링을 할 필요성이 증가하고 있다.

강수량과 하천 및 지하수 유출량 등은 직접 관측이 가능한 반면에, 증발산량은 숨어있는 열플럭스로서 관측하기가 어렵다. 라이지메타, 플럭스 타워(Flux-Tower) 등을 이용하여 증발산량을 직접 관측하고 있으나, 이들 지상 관측은 일부 지점(point)에서 제한적으로 이루어지고 있으며, 관측 지점 확대시, 관측 기기 설치비용 및 유지 보수 등 많은 시간과 비용이 든다는 한계가 있다. 이러한 지상 관측의 한계를 극복하고 넓은 영역의 증발산량 변화를 관측하기 위하여 원격 탐사(특히, 위성)를 이용한 증발산량을 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

위성을 이용한 증발산량 관측의 국외 동향은 MSG(Meteosat Second Geostationary) 위성을 이용하여 30분 간격, 1일 자료를 산출 및 검증, 유럽기상위성센터(Europe Meteorological Satellite Center; EUMETSAT)에서 수행하고 있으며, Aqua·Terra 위성을 이용하여 8일, 월, 연 누적 증발산량 자료를 산출 및 검증, 배포를 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)에서 수행하고 있다. 본 연구에서는 우리나라 최초의 정지 기상위성인 천리안 위성 자료를 이용하여 복잡하고 다양한 토지 피복으로 구성된 동아시아 지역의 지표별(Land Cover Type) 지면 특성(Surface Roughness)과 식생 특성을 반영하여 천리안 일 증발산량 산출 알고리즘을 개발하였다. 또한, 천리안 일 증발산량의 정확도를 평가하기 위하여, 지상 관측 자료인 플럭스 타워 관측 자료를 이용한 비교 검증을 수행하였다.

2. 자료

천리안 일 증발산량을 산출하기 위하여 천리안 위성의 주요 산출물(채널 자료, 지면 온도, 일사량), 대기와 지표의 수분 상태, 식생의 활력도를 고려한 천리안 위성 지면 온도를 기반으로 하여 산출한 기온 및 SPOT/VEGETATION(VGT) 위성의 정규식생지수(NDVI), 정규수분지수(NDWI), 알베도와 지형을 고려한 토지피복지도 등의 보조 자료까지 위성 관측 자료만을 입력 자료로 사용하였다.

천리안 위성은 2010년 6월 27일에 발사되어, 지구 적도 상공 36,000 km 고도에서 동경 128.2도에 위치하여 기상과 해양 관측, 통신 서비스를 목적으로 기상 영상기(Meteorological Imager; MI), 해양 영상기(GOCI), 통신 탑재체(Ka-band Transponders)가 탑재되어 운영중이다. 천리안 위성 자료는 2011년 4월부터 정상 운영되어 현재까지 생산되고 있다. 천리안 위성의 기상 센서는 4 km 공간 해상도의 적외 채널(단파 적외(3.7 μ m), 수증기(6.7 μ m), 적외1(10.8 μ m), 적외2(12.0 μ m))과 1 km 공간 해상도의 가시 채널(0.67 μ m)로 구성되어 있다. 또한, SPOT/VEGETATION은 식생 관측을 목적으로 유럽에서 발사된 위성으로서 1 km 공간 해상도의 가시(Blue(0.43~0.47 μ m), Red(0.61~0.68 μ m), 근적외(0.78~0.89 μ m), 단파 적외(1.58~1.75 μ m))로 구성되어 있다.

3. 천리안 증발산량 알고리즘 개발 원리

천리안 증발산량은 지표에 입사하는 에너지와 방출되는 에너지의 양이 동일하다는 가정인 지표 에너지 수지식(Surface Energy Balance Equation)(1)에 기반하여 산출한다.

$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

여기서, R_n 은 순 복사 (Net radiation, W/m^2), LE 는 잠열 플럭스 (Latent heatflux, W/m^2), H 는 현열 플럭스 (Sensible heatflux, W/m^2), G 는 지열 플럭스 (Ground heatflux, W/m^2)이다. 지표 속으로 입사하고 방출되는 열인 지열은 낮 동안 태양 복사 에너지를 흡수하고 밤 동안 흡수한 에너지를 방출하여 하루 또는 10일 단위의 에너지의 값이 거의 0에 가깝게 된다. 따라서, 일 단위 증발산량 산출시 지열을 고려하지 않고 산출한다(Allen, R.G., 1998). 즉, 지표 에너지 수지에서 순복사와 현열만을 고려하게 되면 증발, 증산에 의한 잠열, 즉 증발산을 계산할 수 있다.

먼저, 순복사는 태양에너지로부터 지구에 입사한 에너지인 순 단파복사와 지구에서 방출하는 순 장파복사의 합으로 산출되며, 위성 관측 자료만으로 산출이 가능하다(2,3). 순 단파복사는 지표면으로 입사하는 태양 에너지로부터 지면의 반사도(알베도)를 고려하여 산출되며, 순 장파복사는 bulk식을 기반으로 산출된다.

$$Rn_d = Rs \cdot (1 - \alpha) + Rnl \quad (2)$$

$$Rnl = \epsilon_{bulk} \cdot \sigma \cdot (Ta^4) \quad (3)$$

여기서, Rn_d 는 일 순 복사(W/m^2), Rs 는 단파복사(표면도달일사량, W/m^2), α 는 지면 반사도, Rnl 은 순 장파복사 (W/m^2), ϵ_{bulk} 는 bulk식 기반의 방출율, σ 는 슈테판-볼츠만 상수($4.7 \cdot 10^{-9} MJ/m^2K^4$), e_a 는 대기의 수증기압 (kPa), Ta 는 대기 온도 (K) 이다.

현열은 풍속, 공기역학적 저항, 지표 거칠기, 지표면 온도, 대기 온도 등 다양한 변수가 요구되며 계산이 복잡하다(Allen, R.G., 1998). 이에 현열을 ‘지면과 대기의 온도차’와 ‘잠열과 순복사 차’의 상관 분석을 통하여 동아시아 지역 특성을 반영한 시·공간에 따라 변화하는 동적 계수 모델을 산출하였다 (4,5,6)(Jackson et al., 1977). 이 때, 동아시아 지역의 천리안 위성 자료(가시·적외 채널, 지표면 온도, 일사량)와 GTS(Global Telecommunication System, 687개)와 우리나라 및 북한 지역의 기상청 유인관측소 (126개)의 지상 기상 관측 자료(기온, 풍속, 습도, 기압)을 이용하여 Matchup Data Base(MDB)를 구축하여 이를 이용하여 상관 분석을 수행하였다.

$$ET_d - Rn_d = -B_d \cdot (Ts_d - Ta_d) \quad (4)$$

$$B_d \approx \frac{\rho \cdot C_p}{r_a} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

$$B_d = a_1 \cdot (1 - \exp(-a_2 \cdot Z_0)) + a_3 \quad (6)$$

여기서, ET_d 는 일 증발산량(mm/day), Rn_d 는 일 순복사 (mm/day), Ts_d 는 일 지면 온도(K), Ta_d 는 일 기온 (K). B_d 는 반경험적 계수 (mm/day · K), Z_0 는 지표 거칠기 (m), a_1 , a_2 , a_3 는 계수이다. ρ 는 습한 공기의 밀도 (kg/m^3), C_p 는 정압 비열 ($kJ/kg \cdot K$), r_a 는 공기 역학적 저항(s/m), λ 는 증

발열로서, 액체에서 수증기로 물의 단위 질량을 변경하기 위하여 사용된다.

4. 천리안 증발산량 결과 및 검증

4.1. 천리안 증발산량 산출 결과

천리안 일 증발산량 알고리즘을 이용하여 동아시아 지역 (20~50°N, 100~145°E)에 대하여 1 일 /1 km 시·공간 해상도의 천리안 일 증발산량을 산출하였다. 천리안 증발산량은 사막 지역과 증발산 산출에 인위적인 영향을 미치는 도시 지역을 제외하고, 청천일 때 산출된다. 산출 기간은 2011년 4월 1일부터 현재까지 준 실시간으로 산출되고 있다. 천리안 일 증발산량 산출 알고리즘 개발로 동아시아 지역 증발산량의 시·공간적인 변화를 모니터링 할 수 있게 되었다. 또, 동아시아 지역의 토지피복별 식생 변화와 지면의 지역적인 특성을 반영한다는 특징이 있다. 천리안 증발산량은 위성자료만을 사용하여 광범위한 영역을 관측한다는 장점이 있지만 적외 채널의 한계로 구름역에서는 산출이 불가하며 위성자료의 오차가 증발산량에 포함된다는 한계가 있다.

4.2. 천리안 증발산량 검증

천리안 증발산량의 정확도를 확인하기 위하여 경기도 파주시 혼효림에 위치한 설마천 유역과 경기도 여주시 논지에 위치한 청미천 유역의 지상 플럭스 타워 관측을 이용하여 비교 검증을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 지상 플럭스 타워 관측 자료는 국토교통부 유량조사사업단의 관측 결과이다. 플럭스 타워 관측 자료는 에디 공분산법에 의해 30분 간격으로 관측한 잠열 플럭스를 증발열(기화의 엔탈피, λ)을 고려하고, Gap-filling 방법을 이용하여 보정한 일 증발산량으로 변환한 자료이다.

그림 1은 혼효림에 위치한 설마천 지점에서의 2011년 4월부터 2014년 12월까지의 천리안 일 증발산량과 플럭스 타워 일 증발산량을 시간에 따라 비교한 결과이다. 총 582개의 자료가 매치되었고, RMSE는 1.92 mm/day, Bias는 1.45 mm/day의 결과를 보였다. 플럭스 타워 일 증발산량과 천리안 일 증발산량은 식생이 성장하는 시기인 봄철에는 증가하고, 식생의 발달이 끝나고 쇠퇴하는 시기인 가을철에 감소하였다. 특히, 봄철과 가을철에 천리안 일 증발산량이 과다 추정하는 경향을 보였다. 이는 천리안 일 증발산량 산출시 10일 동안의 최대 정규식생지수 자료를 사용함으로써 급격히 변하는 식생의 상태를 반영하지 못한 것으로 사료된다. 또한, 봄과 가을철은 일교차가 큰 시기로서, 지면 온도와 기온차의 오차도 포함된 것으로 사료된다.

그림 2는 농경지에 위치한 혼효림 지점의 2011년 4월부터 2014년 12월까지의 천리안 일 증발산량과 플럭스 타워 일 증발산량을 시간에 따라 비교한 결과이다. 총 665개의 자료가 매치되었고, RMSE는 2.82 m/day, Bias는 2.56 mm/day의 결과를 보였다. 천리안 일 증발산량은 계절의 변화에 따라 변동하였고, 특히, 모내기 시작하는 3월부터 증가하기 시작하여 추수가 끝나는 시점인 9월 말부터 급격히 감소하는 패턴을 보였다. 전반적으로 천리안 일 증발산량은 과대 추정하고 있었다. 설마천의 경우와 동일하게 봄철의 식생 변화를 반영하지 못한 것으로 사료되며, 추수 후 물 공급이 제한된 상황을 반영하지 못한 것으로 사료된다.

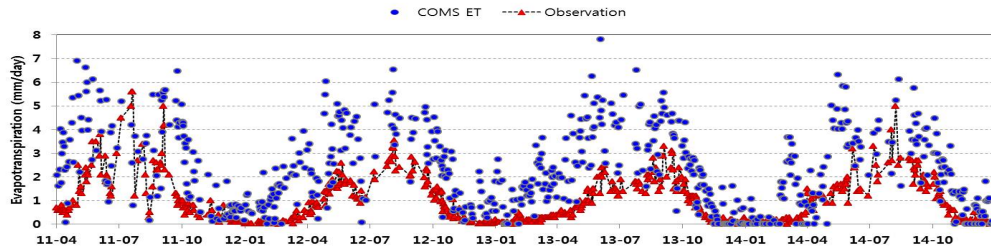


그림 1. 설마천(훈효림) 지점에서의 2011년 4월부터 2014년 12월까지의 천리안 일 증발산량(파란색)과 플럭스 타워 관측 일 증발산량(빨간색)의 시계열 그래프

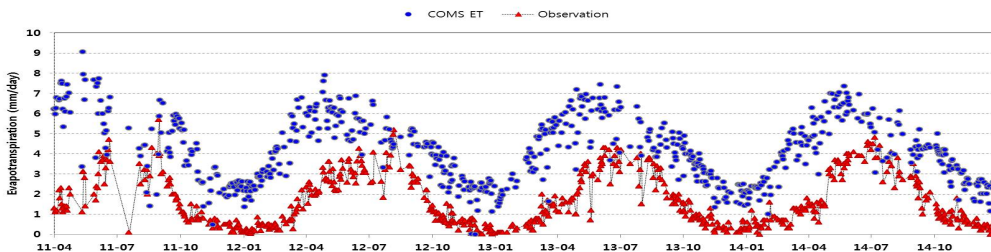


그림 2. 청미천(농경지) 지점에서의 2011년 4월부터 2014년 12월까지의 천리안 일 증발산량(파란색)과 플럭스 타워 관측 일 증발산량(빨간색)의 시계열 그래프

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라 최초의 정지기상위성인 천리안 위성을 이용하여 동아시아 지역의 식생 및 지면 특성을 반영한 천리안 일 증발산량을 개발하였고, 검증하였다. 천리안 일 증발산량의 정확도를 검증하기 위하여 우리나라에서 대표적으로 차지하고 있는 두 개의 다른 지표 특성을 가진 훈효림(산지)과 농경지에서의 플럭스 타워 관측지점에서 플럭스 타워 일 증발산량과 비교하였다. 천리안 위성 일 증발산량이 플럭스 타워 관측 자료에 비해 다소 과대 추정하는 것을 확인하였다.

천리안 위성 증발산량은 다년간의 공간 분포를 통하여 동아시아 지역의 기후변화에 대한 이해를 도울 뿐 아니라, 지면모델(Land Surface Model, LSM), 수치 모델, 수문 모델의 입력 자료 및 검증에 유용하게 활용될 것이다. 또한, 농업 분야에 있어 관개량 추정 및 유역별 수자원관리에 있어 도움이 될 것이며, 가뭄의 지역적인 평가지표로도 활용 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국가기상위성센터 “기상위성자료 현업지원 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에서 사용한 플럭스타워 관측 자료는 국토교통부 유량조사사업단에서 제공한 자료입니다.

참고 문헌

1. 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 No. 56, FAO Rome (Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations).
2. Jackson, R. D., Reginato, R. J., and Idso, S. B., (1977) Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements, Water Resources Research, 13, 651-656.