

# 인공 위성과 기상 모형을 이용한 증발산 추정

## Estimation of Evapotranspiration using Satellite data and Meteorological Model

장근창<sup>1</sup>, 강신규<sup>1,\*</sup>, 김재철<sup>1</sup>, 김준<sup>2</sup>

Keunchang Jang<sup>1</sup>, Sinkyu Kang<sup>1,\*</sup>, Jeachul Kim<sup>1</sup>, Joon Kim<sup>2</sup>

xjvmguy@kangwon.ac.kr, kangsk@kangwon.ac.kr

<sup>1</sup>강원대학교 환경과학과, <sup>2</sup>연세대학교 대기과학과

**요약:** 에너지 전달 과정과 밀접한 관계가 있는 증발산(Evapotranspiration)은 기후 변화나 육상 생태계 생산성에서 매우 중요한 요소이며, 수문학적 순환과 지역적 물 관리 측면에서 매우 중요하다. 최근 인공위성을 이용하여 증발산을 추정하기 위한 노력이 많이 진행되고 있으며, 특히 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)는 증발산을 추정하기 위한 좋은 정보를 제공하고 있다. 하지만, 구름 등에 의한 증발산 입력 자료 결측은 전체 자료의 획득률을 낮추고, 연속적인 증발산 모니터링을 제한한다. 따라서 본 연구에서는 MODIS 기반의 증발산 입력 자료의 개선하여 서로 다른 식생과 지형 구조를 갖는 플럭스 연구지에 대한 증발산의 추정 및 평가하고, 남한에 대한 MODIS 기반의 증발산 지도 작성하였다. 또한 구름에 의해 결측된 날에 대해서는 MODIS-MM5 4차원 자료동화 기법을 이용한 증발산의 연속적인 모니터링 기법을 개발하였다. MODIS 기반의 증발산을 추정하기 위해 Revised RS-PM 알고리즘을 사용하였다. 증발산을 평가하기 위해 4 곳의 플럭스 연구지(광릉, 해남 이상 대한민국, 타카야마, 토마코야미 이상 일본) 자료와 비교하였고, 매우 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다. MODIS 입력 자료의 개선으로 획득률은 2배 가량 증가하였다. 남한에 대한 연간 증발산은 평균적으로 약 35%의 획득률 (365일 중 약 120일)과 함께 산출되었고, 시·공간적인 분포를 잘 나타내었다. 구름 낀 날에 대한 MODIS-MM5 자료 동화 기법의 적용은 증발산의 연속적인 모니터링을 가능하게 하였다.

### 1. 서론

증발산(ET, evapotranspiration)은 액체나 고체 상태의 물 또는 지표면에서 물이 대기의 수증기로 변하는 모든 과정을

총칭하는 말로써, 식생에서 발생하는 증산(transpiration)과 토양에서 발생하는 증발(evaporation)의 합을 말한다. 증발산의 기작과 그 양을 정확하게 이해하는 것

은 강우, 유출, 하천 유량, 토양 수분 등과 같은 수문학적 순환(hydrologic cycle)뿐만 아니라 어떠한 지역에 대한 효과적인 물 관리(water management) 관점에서도 매우 중요하다. 또한 증발산은 기후 변화, 생태계 생산성, 홍수, 가뭄과 같은 기작을 이해하기 위한 필수적 요소로 사용되는데, 그것은 증발산이 에너지 전달 과정과 밀접한 관계가 있기 때문이다(Nishida et al., 2003).

증발산을 추정하기 위한 많은 연구가 진행되었고, 오늘날에는 어느 한 지점에 대한 신뢰성 있는 지상 관측 기반의 증발산량 추정이 가능하게 되었다. 최근의 많은 연구에서는 지역 또는 전구 규모에서의 증발산의 공간 분포를 추정하기 위해 지상 관측 기반의 자료를 최소화(Nishida et al., 2003)하고, 인공 위성 자료를 이용하여 동 시간대의 넓은 지역을 한꺼번에 포괄하도록 하는 연구가 활발하게 진행중이다(Nishida et al., 2003; Cleugh et al., 2007; Mu et al., 2007).

2000년대에 들어서는 NASA의 Earth Observing System (EOS) Project의 일환으로 발사된 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)라는 새로운 개념의 다중분광센서의 등장으로 위성 기반의 기상 자료(기온, 수증기압, 기압 등) 획득뿐만 아니라 증발산 추정에 영향을 미치는 복사 요소에 대한 직접적인 추정이 가능하게 되었다(Bisht et al., 2005; Cleugh et al., 2007; Mu et al., 2007). 즉, 순수한 의미에서 위성 기반의 증발산 추정이 가능하게 되었다.

하지만 인공위성은 구름 등의 영향은

자료 결측을 야기하게 되고, 이러한 이유로 많은 연구자들은 기상 모형이나 복사 전달 모형을 인공 위성 자료를 함께 사용하여 인공 위성 자료의 한계를 극복하고자 하는 노력을 하고 있다. 특히 중규모 기상 모형(MM5, 5th Generation Meso-scale Meteorological Model)은 모형 구동 시 지상 관측 기반의 자료나 위성 기반의 자료를 이용한 4차원 자료 동화(4-dimensional data assimilation, FDDA) 기법을 통해 보다 향상된 모형 결과를 제공해 줄 수 있을 뿐만 아니라, 인공 위성 자료의 약점으로 지적되었던 구름의 영향을 최소화할 수 있는 장점을 갖고 있기 때문이다(Yamazaki and Orgaz, 2005; Zavier et al., 2006). 그럼에도 불구하고 FDDA를 통해 개선된 결과를 이용하여 증발산량을 추정하는 연구에 대한 보고는 거의 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 MODIS를 이용하여 위에서 제시한 문제점들을 해결하기 위한 방안을 제시하여 효과적으로 증발산을 추정하고, FDDA를 통해 시·공간적으로 지속적인 모니터링을 위한 기법을 제안하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 증발산 알고리즘

본 연구에 사용된 증발산 알고리즘은 식물의 증산작용에 의한 부분( $\lambda E_p$ )과 토양으로부터의 증발 작용에 의한 부분( $\lambda E_s$ )으로 나누어 증발산을 추정하는 Mu et al. (2007)의 방법을 따랐다. 이 방법은 Revised RS-PM 방법이라고 불리며, 위성 원격 탐사 자료와 에너지 수지법

에 입각하여 증발산을 추정하는 최신의 알고리즘이다. 증발산 알고리즘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda E = \lambda E_p + \lambda E_s$$

$$\lambda E_p = \frac{\Delta R_n + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \times (r_s / r_a)}$$

$$\lambda E_s = \frac{\Delta R_{n,soil} + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \times (r_{tot} / r_a)} \times \left( \frac{RH}{100} \right)^{\frac{(e_s - e_a)}{100}}$$

각 입력 자료에 대한 설명은 Mu et al. (2007)에 자세히 제시되어 있다.

위성 기반으로 산출된 순간 증발산을 하루 단위의 증발산으로 확장하기 위해 Bisht et al. (2005)이 제안한 Sinusoidal model을 적용하였다. Sinusoidal model에 대한 자세한 내용은 Bisht et al. (2005)에 제시되어 있다.

## 2.2 복사요소 산출

순복사량( $R_n$ , net radiation)은 지표면에서의 단파복사량( $R_s$ , shortwave radiation)과 장파복사량( $R_L$ , longwave radiation)의 입사량과 방출량의 차이로서 정의된다. 순복사량은 지표에너지 수지 추정에 있어서 매우 중요한 요소이고, 기후 모니터링, 날씨 예측, 그리고 농업 기상과 같은 다양한 분야에 적용된다. 대부분의 증발산 모형은 중요한 입력 자료로서 순복사량을 필요로 하고(Nishida et al., 2003; Bisht et al., 2005; Cleugh et al., 2007; Mu et al., 2007), 순복사량의 정확한 추정 및 모니터링은 지표 에너지와 수문학 분야에서 매우 중요한 과정이다.

Bisht et al. (2005)은 MODIS로부터 순복사량을 추정하는 방법론을 제시하였고, 본 연구에서는 그들의 방법을 따라 순복사량을 추정하고자 하였다. 순복사량은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$R_n = R_s \downarrow - R_s \uparrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow$$

여기서,  $R_n$ 은 순복사량( $W m^{-2}$ ),  $R_s \downarrow$ 와  $R_s \uparrow$ 는 각각 입사 및 방출 단파복사량( $W m^{-2}$ ), 그리고  $R_L \downarrow$ 과  $R_L \uparrow$ 는 입사와 방출 장파복사량( $W m^{-2}$ )을 의미한다.

## 2.3 연구지역

Revise RM-PM 알고리즘을 이용하여 추정된 증발산 결과와 입력 자료를 평가하기 위해 에디 공분산법을 이용하여 증발산과 미기상학적 요소를 관측하는 네 곳의 플럭스 연구지를 선정하였다.

광릉(GDK)과 해남(HFK) 연구지는 Korea Flux Network (KoFlux)에 등록되어 있는 연구지로, 각각 냉온대 활엽수림을 갖는 복잡 산악 지형과 비균질한 피복형을 갖는 농경지이다. Takayama (TKY) 연구지는 냉온대 활엽수림을 갖는 복잡 산악 지형이고, 일본의 홋카이도에 위치한 Tomakomai (TMK) 플럭스 연구지는 2000년부터 플럭스 관측을 실시하고 있는 일본식 낙엽송 지역이다.

증발산 지도 작성은 남한 전역을 대상으로 실시하였고, MODIS-MM5 FDDA를 이용하여 지속적인 증발산 모니터링을 시

도하기 위해 남한의 중서부에 위치한 금강 유역을 선정하였다. 지도 작성은 모두 2006년에 대해서 실시하였다.

#### 2.4 인공위성 자료

본 연구에서는 증발산 추정을 위해 다양한 MODIS 자료를 이용하였고, 입력자료로 사용된 MODIS Products는 다음과 같다: MODIS04, 07, 11, 13, 43. 본 연구에서는 증발산의 획득률 개선과 증발산 예측력을 향상시키기 위해 gap-filling 방법(MODIS04, 43)과 smoothing 방법(MODIS 13)을 적용하였다.

#### 2.5 MODIS-MM5 증발산 추정

본 연구에서는 4차원 자료동화(FDDA)를 위해 MM5 Version 3 Release 7을 사용하였다. 기상 모형은 위성 원격 탐사에서 가장 큰 약점으로 지적되고 있는 구름의 영향을 최소화할 수 있고, 연속적인 모니터링이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 위성 자료 또는 지상 실측 자료와의 자료동화방법은 MM5의 향상된 기상 정보를 제공할 수 있다(Yamazaki and Orgaz, 2005; Xavier et al., 2006).

MM5에서 산출된 미기상 자료, 그리고 MODIS 식생지수와 알베도 자료를 Modified RS-PM 모형(Mu 모형)에 적용해 금강 유역에 대한 증발산량을 추정하였다.

### 3. 결과

MODIS 기반의 증발산 기상 입력자료와 지상 관측 기반의 자료를 비교한 결과 두 자료간의 일치도가 매우 높은 것을 확

인할 수 있었다(표 1). 또한 다양한 MODIS 입력자료로부터 산출한 복사요소역시 높은 일치도를 보였다.

Table 1 Error statistics for Aqua MODIS-derived meteorological variables and radiation components at four flux measurement sites. Each variable compared under the clear sky condition ( $T_a$ : air temperature, VP: vapor pressure, VPD: vapor pressure deficit,  $R_s \downarrow$  and  $R_s \uparrow$ : down- and upward shortwave radiation,  $R_g \downarrow$  and  $R_g \uparrow$ : down- and upward longwave radiation, and  $R_n$ : net radiation)

Site	Year	ME										RMSE									
		$T_a$ (°C)	VP (Pa)	VPD (Pa)	$R_s \downarrow$ (Wm <sup>-2</sup> )	$R_s \uparrow$ (Wm <sup>-2</sup> )	$R_g \downarrow$ (Wm <sup>-2</sup> )	$R_g \uparrow$ (Wm <sup>-2</sup> )	$R_n$ (Wm <sup>-2</sup> )	$T_a$ (°C)	VP (Pa)	VPD (Pa)	$R_s \downarrow$ (Wm <sup>-2</sup> )	$R_s \uparrow$ (Wm <sup>-2</sup> )	$R_g \downarrow$ (Wm <sup>-2</sup> )	$R_g \uparrow$ (Wm <sup>-2</sup> )	$R_n$ (Wm <sup>-2</sup> )				
GDK	2004	+1.34	+33.15	+35.13	-50.93	-	-	-	-54.68	2.80	175.42	50.36	58.03	-	-	-	60.92				
	2005	-0.61	+44.44	-149.03	-23.43	-	-	-39.43	3.40	255.90	309.76	87.19	-	-	-	83.53					
	total	-1.49	+0.90	-291.88	-2.483	-	-	-48.46	3.59	235.50	417.22	50.23	-	-	-	58.51					
HFK	2004	+0.32	+137.28	-306.31	-33.40	-	-	+34.03	2.89	279.05	420.49	44.46	-	-	-	90.52					
	2005	-0.11	+111.47	-176.71	-51.57	-	-	+28.85	3.22	246.01	344.88	60.84	-	-	-	45.40					
	total	+0.80	+4.34	-96.65	-30.60	-	-	+32.78	1.93	253.63	362.78	58.85	-	-	-	47.06					
TKY	2004	-0.25	+92.24	-205.82	-38.09	-	-	+22.10	2.51	259.77	397.68	54.11	-	-	-	44.09					
	2005	+0.69	-287.14	+397.14	-48.28	-35.61	-15.50	-18.52	-6.97	2.27	368.02	534.04	59.51	37.39	31.57	26.45	41.91				
	total	-1.67	-226.77	+90.61	-65.92	-29.63	-46.53	-29.55	-53.24	2.83	321.04	293.23	71.64	33.75	48.94	31.69	68.75				
TMK	2004	-0.91	-202.83	+130.11	-31.95	-23.27	-39.59	-25.53	-22.01	2.14	353.40	379.65	81.80	19.64	46.84	30.42	63.79				
	2005	-0.74	-223.13	+187.98	-46.40	-27.79	-37.31	-35.66	-29.33	2.39	347.9	187.98	74.50	32.63	45.26	30.93	62.08				
	total	-1.32	-158.80	+56.40	-9.86	-6.16	-25.01	-7.88	-17.01	3.82	236.25	317.76	85.64	14.41	27.65	11.22	60.39				
total	2004	-1.54	-144.80	-9.47	-19.13	-11.12	-25.66	-8.73	-16.49	2.78	246.59	264.81	85.57	20.11	28.07	16.35	70.95				
	2005	-1.49	-148.30	+7.00	-11.99	-10.68	-29.54	-8.58	-16.60	2.84	243.28	293.39	85.59	19.23	27.89	14.83	76.37				
	total	-1.51	-146.55	+1.50	-15.56	-10.93	-22.60	-17.71	-16.54	2.81	245.94	279.10	85.58	19.67	27.98	15.59	73.66				

순간 증발산은 HFK (RMSE=73-89 W m<sup>-2</sup>), TKY(RMSE=56-152 W m<sup>-2</sup>), TMK(RMSE=88-102 W m<sup>-2</sup>)에서 전반적으로 과소평가의 경향을 보였지만,

GDK에 대해서는 과대평가(RMSE=64-85  $W m^{-2}$ ) 경향을 보였다. 일단위 증발산에서 GDK는 과대평가 (RMSE=0.19-0.82  $mm day^{-1}$ )의 경향을 보였고, 나머지 지점에서는 과소평가하였다.

네 곳의 플럭스 연구지에서 평가된 증발산 알고리즘을 남한 전역에 대해 확대 적용하였다. 그 결과 평균 35%의 획득률과 함께 남한의 증발산 분포를 확인할 수 있었다.

구름 낀 날에 대해 MODIS-MM5 FDDA 방법으로 증발산 자료 결측을 보완하여 2006년에 대한 누적 증발산 지도를 산출하였다(그림 1).

#### 4. 논의 및 결론

위성 기반의 신뢰성 있는 증발산을 추정하고 남한과 같은 지역 규모의 증발산을 추정하기 위해 서로 다른 식생과 지형적 구조를 갖는 네 곳의 플럭스 연구지

(GDK, HFK, TKY, 그리고 TMK)에 대해 다양한 MODIS 증발산 입력 자료의 신뢰도 평가를 진행한 결과, MODIS로부터 산출된 자료의 신뢰성이 매우 높다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 증발산 입력자료의 개선으로 획득률이 약 2배 향상하는 결과를 확인할 수 있었다.

하지만 증발산의 입력자료의 신뢰도가 매우 높음에도 불구하고, 증발산의 오차가 발생하였고, 본 연구에서는 오차의 원인을 밝히기 위해 다양한 입력자료를 평가하였다. 그 결과 증발산 알고리즘 중 지표 저항( $r_s$ )의 차이가 증발산의 오차를 야기한 것을 알 수 있었다. 그림 2는 타워 관측기반의  $r_s$ 와 MODIS  $r_s$ 의 차이를 증발산의 오차와 비교한 것이다.

MODIS 기반의 증발산 지도는 성공적으로 추정하였고, 평균적으로 약 35%의 획득률을 나타내는 것은 매우 의미가 있다고 할 수 있다. MODIS-MM5 FDDA를

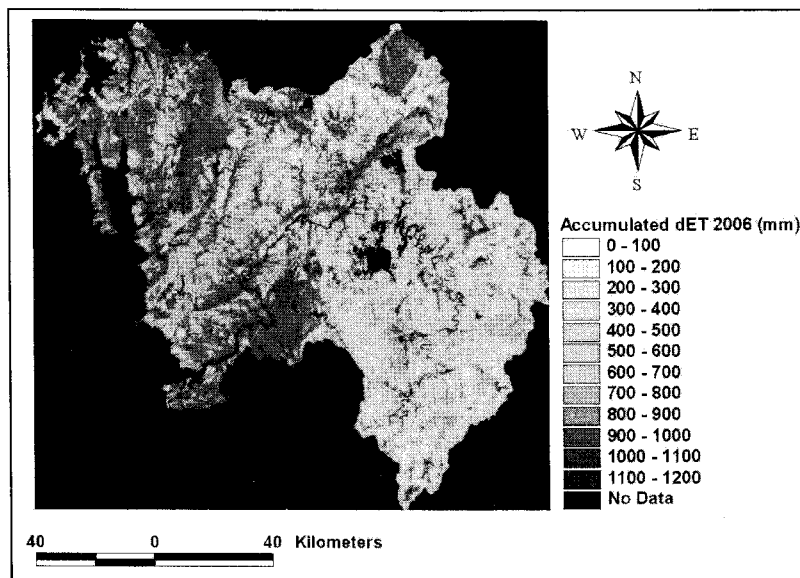


Figure 1. Annual accumulated ET (mm) map derived by using the merge technique between MODIS and FDDA dataset under the cloudy sky condition over Geum river basin in 2006.

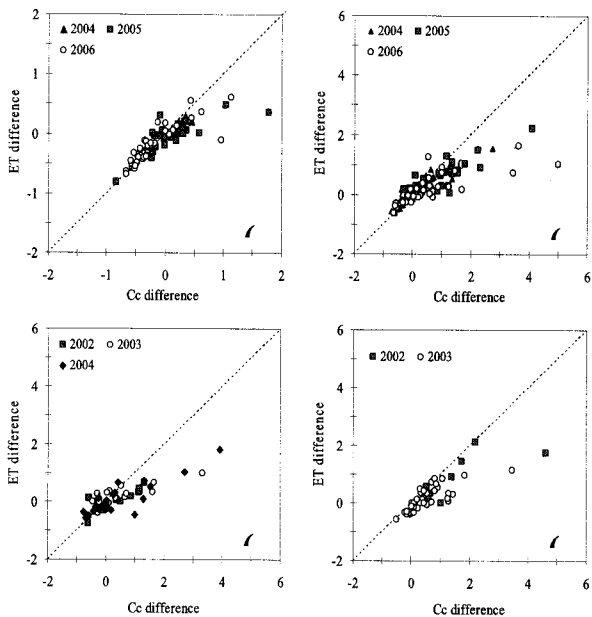


Figure 2. Comparison of the difference between measured and MODIS instantaneous ET ( $W m^{-2}$ ) and difference between measured and MODIS canopy conductance ( $C_c$ ) at GKD (a), HFK (b), TKY (c), and TMK (d).

통해 산출된 연속적인 증발산 모니터링이 가능하게 되었고, 이 방법은 위성 기반 증발산의 연속적인 모니터링의 가능성을 제시하는 한가지 방안이라고 할 수 있다.

본 연구의 결과, MODIS는 지표 에너지 수지(land surface balance)를 이해하거나 수문학적 순환(hydrologic cycle)을 이해하기 위한 좋은 매체로 활용될 수 있음을 확인하였고, 나아가 MODIS 정보를 지역적 물 관리를 위한 모니터링 도구로서 사용할 수 있을 것이다. 하지만 MODIS 기반의 더욱 신뢰성 있는 증발산을 추정하기 위해서 추가적인 알고리즘의 개선과 다양한 모수들에 대한 최적의 모수화, 그리고 이를 다양한 식생형과 기후,

그리고 지형적 특징을 갖는 연구지에 대해 알고리즘을 적용, 평가하는 일련의 후속 연구가 필요할 것이다.

#### 참고문헌

- Bisht, G., et al. (2005). Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *RSE*, 97, 52–67.
- Cleugh, H. A., et al. (2007). Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *RSE*, 106, 285–304.
- Mu, Q., et al. (2007). Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *RSE*, 111, 519–536.
- Nishida, K., et al. (2003a). An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research*, 108, D9, 4270, doi:10.1029/2002JD002062.
- Xavier, V., et al. (2006). The impact of assimilation of MODIS data for the prediction of a tropical low-pressure system over India using a mesoscale model. *Int'l J. RS*, 27(20), 4655–4676.
- Yamazaki, Y., & Orgaz, M. (2005). Forecasting mesoscale precipitation using the MM5 model with the Four-Dimensional Data Assimilation (FDDA) technique. *Global NEST Journal*, 7(3), 258–263.