

위성영상과 SEBAL 모형을 이용한 충주댐 유역의 공간증발산량 산정 및 평가

Estimation and Evaluation of Spatial Evapotranspiration Using satellite images and SEBAL Model in Chungju dam watershed

하림*, 신형진**, 박민지***, 김성준****

Rim HA, Hyung-Jin SHIN, Min-Gi Park, Seong-Joon KIM

Abstract

증발산량을 산정하는 것은 자연현상과 인문현상을 이해하는 것의 기초가 된다. 이에, 최근 증발산량을 추정하는 많은 연구가 진행되고 있는 가운데 원격탐사 기법을 이용하는 것이 효과적인 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서 소개할 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen, 1995) 모형은 Landsat이나 NOAA 또는 MODIS 같은 원격탐사 위성으로부터 획득한 디지털 이미지 데이터(위성영상)를 이용하여, 지표에서 일어나는 증발산과 기타의 에너지 교환을 계산하는 이미지-프로세싱 모델이다. 우리나라 대상 유역에 위성영상을 사용하여 증발산량을 추정하는 SEBAL 모형의 적용 가능성을 검토하여, 유역 내 증발산량 분포의 시공간적 특성을 분석하고자 하였다. 연구 대상 지역은 유역 면적 약 6661.1 km²의 충주댐 유역으로, Terra MODIS 위성영상을 이용하였다. SEBAL 증발산량의 평가를 위해 Penman-Monteith 공식에 의해 계산된 증발산량을 이용하여 비교하였으며, 그 결과 오차가 허용 가능한 10% 이내로 나타났다.

Key words: SEBAL, 증발산량, Terra MODIS, Penman-Monteith

1. 서론

본 연구에서 소개할 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen, 1995) 모형은 Landsat이나 NOAA 또는 MODIS 같은 원격탐사 위성으로부터 획득한 디지털 이미지 데이터(위성영상)를 이용하여, 지표에서 일어나는 증발산과 기타의 에너지 교환을 계산하는 이미지-프로세싱 모델이다. SEBAL 모형은 1995년 Bastiaanssen에 의해 처음 제안되었고, 미국의 Idaho 주립대학과 Idaho Department of Water Resources에서 NASA와 기업의 지원을 받아 활발히 연구 되었다.

이에, 본 연구에서는 우리나라 대상 유역에 SEBAL 모형의 적용성을 평가하기 위하여 ERDAS

* 정회원-건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정-E-mail : rim486@konkuk.ac.kr
** 정회원-건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료-E-mail : shjin@konkuk.ac.kr
*** 정회원-건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료-E-mail : iamg@konkuk.ac.kr
**** 정회원-건국대학교 사회환경시스템공학과 교수-E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

프로그램 내 Model Maker Tool을 이용하여 모형을 구현하였으며, 충주댐 유역에 적용하였다. 연구 자료로는 Terra MODIS 위성영상을 이용하여 유역 내 증발산량 분포의 시공간적 특성을 분석하였다(2001~2004년 특정 일 증발산량).

2. 연구 내용

본 연구에서는 2001년에서 2004년까지 충주댐 유역의 시계열 공간 증발산량 추정을 위해 SEBAL Model을 사용하였다. SEBAL 모형의 입력 자료로는 MODIS 위성영상과 함께, DEM 및 기상자료를 추가 입력하여 모형을 구동하였다. 끝으로, 모형 구동 결과를 이용하여 토지피복과 지형에 따른 공간 증발산량을 분석하였다.

SEBAL 모형에서는 증발산량 계산을 위한 과정이 크게 세부분으로 나뉘며, 순방사량(R_n), 토양 열 이동(G), 현열 이동(H) 순서로 계산하게 된다(Fig. 1).

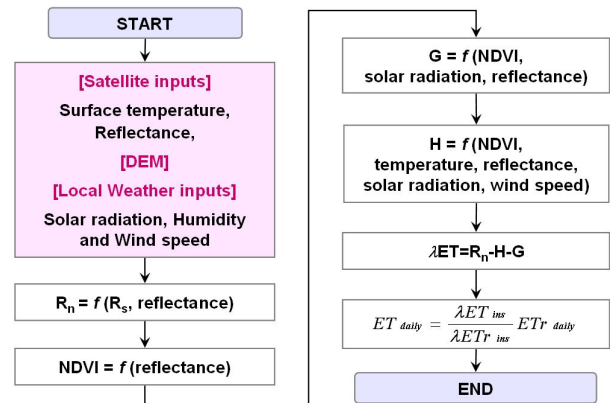


Fig. 1. Flow chart of this study

3. 연구대상지역

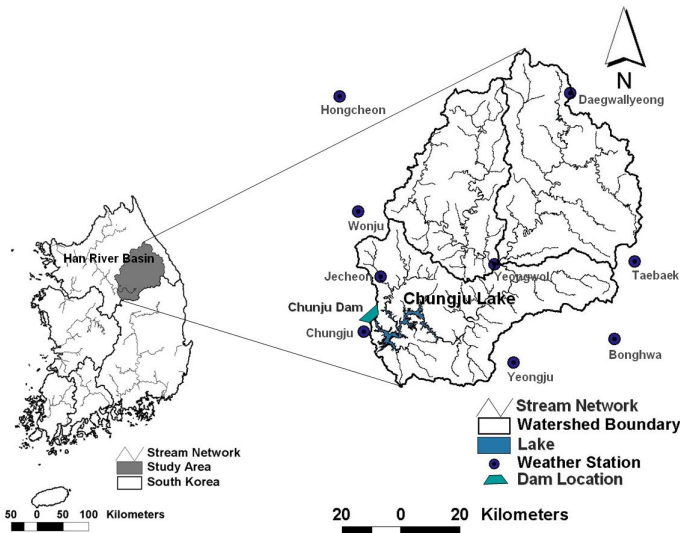


Fig. 2. The study watershed and weather stations.

4. SEBAL 모형의 개요

SEBAL 모형은 ERDAS IMAGINE 8.6 프로그램의 Model Maker Tool을 이용하여 구축하였다. 위성영상은 지나가는 시간에 대한 정보만을 제공하므로, SEBAL 모형에서는 위성영상 획득 순간의 증발산량(ET)을 계산한다. 증발산량 계산식은 다음 식 (1)과 같다.

$$R_n = G - H - \lambda ET \quad (1)$$

여기서,

Rn : 지표 순복사량(net radiation, [W/m²])

G : 토양의 열 이동(soil heat flux, [W/m²])

H : 대기로 향하는 현열 이동(sensible heat flux, [W/m²])

λET : 잠열 이동(물의 증발에 사용된 에너지, [W/m²])

λ : $\{2.501 - 0.002361 \times (T_0 - 273)\} \times 10^6$

T₀ : 증발이 일어나는 물의 온도(지표면의 온도 이용)

지표의 순복사량(Rn)은 지표에 실질적으로 주어진 에너지라 할 수 있다. 이 값은 지표에 들어온 복사에너지에서 지표에 빠져나간 복사에너지를 빼줌으로써 얻을 수 있으며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_n = (1 - \alpha)RS_{\downarrow} + RL_{\downarrow} - RL_{\uparrow} - (1 - \epsilon_0)RL_{\downarrow} \quad (2)$$

여기서,

RS_↓ : 지표로 들어오는 단파 복사 에너지 [W/m²]

α : 지표면 알베도

αRS_{\downarrow} : 지표에서 나가는 단파 복사 에너지 [W/m²]

RL_↓ : 지표로 들어오는 장파 복사 에너지 [W/m²]

RL_↑ : 지표에서 나가는 장파 복사 에너지 [W/m²]

ϵ_0 : 지표 열복사율(surface thermal emissivity)

$(1 - \epsilon_0)RL_{\downarrow}$: 대기에서 들어온 장파 복사 에너지의 지표 반사량

식 (1) $R_n = G - H - \lambda ET$ 의 우변량의 변수에 관하여, 토양열의 이동(G)는 경험적으로 NDVI와 지표온도, 그리고 지표면 반사율을 이용하여 계산한다(식 (3)). 대기로 향하는 현열의 이동(H)는 지표면에서의 풍속, 지표의 거칠기(surface roughness), 그리고 지표와 대기의 온도차를 이용하여 계산한다(식 (4)). SEBAL 모형에서는 지표 가열로 인해 발생하는 대기 불안정 상태를 고려해 반복 순환 계산을 함으로써 대기 부양효과를 반영한다.

$$G_0 = 0.30(1 - 0.98 \times NDVI^4)R_n \quad (3)$$

$$H = \rho \times C_p \times (T_s - T_a) / \gamma_{ah} \quad (4)$$

여기서, ρ : 공기밀도, C_p : 공기의 정압비열, $T_s - T_a$: 지표온도와 대기온도의 차, γ_{ah} : 열의 흐름에 대한 공기역학적 저항.

지금까지의 계산을 통해 각각의 픽셀에 대한 잠열 이동을 구하게 되며, 이를 물을 증발시키는데 필요한 잠열(λ)로 나누어 위성영상을 촬영한 시점의 증발산량(ET, [mm/hr])을 구할 수 있다.

5. SEBAL 모형의 적용 결과 및 고찰

SEBAL 모형의 적용을 위해서는 연구 대상지역의 위성영상과 위성영상 Header file information, land use map, DEM (Digital Elevation Model), 연구 지역의 기상자료(cloudy conditions, weather data), 연구 지역 내 수목의 높이 자료 등이 필요하다. 기상자료는 기상청에서 제공하는 일 자료 중에서 2001년부터 2004년까지의 충주댐 유역에 위치하고 있는 9개(대관령, 홍

천, 원주, 영월, 태백, 제천, 영주, 봉화, 충주) 관측소의 기상 자료를 획득하였다(Fig. 1). SEBAL 모형에는 MODIS 위성영상을 입력하여 모형 구동 후 얻을 수 있는 증발산량 영상 이 외에도 식생관련지수 영상 (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index, SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index, LAI : Leaf Area Index)과 Rs (단파복사에너지), 지표 온도, 알베도 등이다. 증발산량을 도출한 결과 각각 1.05~4.68 범위의 값을 보였다. 월별 값을 정리해 본 결과 연증발산량은 2001년 가장 적었고, 2004년이 가장 많은 것으로 추정되었다. 토지피복도는 2000년 4월 29일 Landsat ETM+ 영상을 이용하여 최대우도 감독분류(Maximum Likelihood Supervised Classification)를 실시하여 총 9개(1.시가지, 2.논, 3.밭, 4.활엽수, 5.침엽수, 6.혼효림, 7.초지, 8.나지, 9.수역)의 항목으로 분류하였으며, 각 토지피복 항목별로 증발산량을 분석한 결과는 Table 2와 같다.

Table 1. Summary of land use class.

Land use	Area	
	km2	%
Urban	112.4	1.7
Paddy	186.3	2.8
Upland Crop	590.7	8.8
Deciduous Forest	1668.9	25.0
Coniferous Forest	2501.9	37.6
Mixed Forest	1386.9	20.8
Grassland	29.4	0.4
Bare Ground	178.5	1.0
Water	66.1	1.8
Total	6661.3	100.0

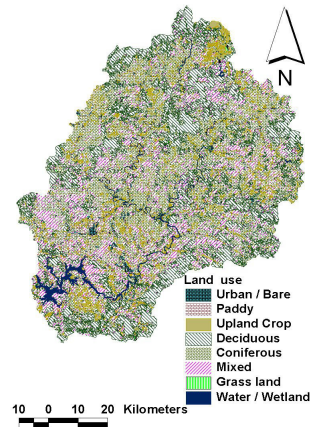


Fig. 3. Land use of the study watershed.

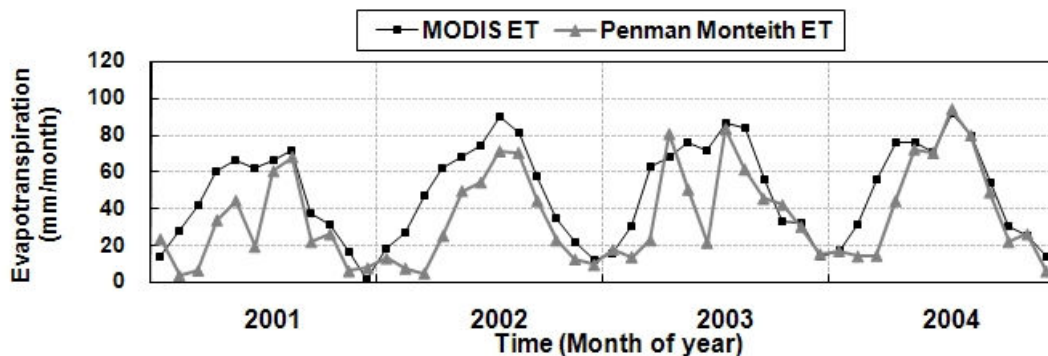


Fig. 4. Monthly evapotranspiration of MODIS and Penman Monteith

Table 2. Summary of MODIS evapotranspiration for each land use class

년도	ET (mm/day)								연 ET (mm/year)
	시가지 /나지	논	밭	활엽수	침엽수	혼효림	초지	습지 /수역	
2001	46.00	46.33	46.33	46.33	50.33	54.33	46.33	43.67	379.67
2002	19.33	40.33	38.67	80.67	70.33	71.67	58.67	15.00	394.67
2003	55.00	55.20	63.40	64.20	63.00	54.60	55.20	58.15	468.75
2004	61.50	59.00	63.25	88.50	81.75	82.75	68.50	58.50	563.75

6. 결론

1 SEBAL 모형을 통해 추정된 평균 일증발산량은 1.05~4.68 (mm/day)로 산정되었다. 토지피복에 따라서는 특히 여름철 활엽수림에서의 증발산량이 가장 높은 값을 보이는 등, 전체적으로 산림 지역에서의 증발산량이 가장 크게 모의되었다.

2. 본 연구에서 시도한 위성영상을 통해 추정된 증발산량 값을 활용하기 위해서는 검증단계가 필수적이다. 검증을 위해서는 실측값과의 비교가 가장 좋은 방법이지만, 자료 획득이 어렵기 때문에 본 연구에서는 위성영상 획득 시점의 기상자료를 FAO Penman-Monteith 공식에 적용하여 추정된 증발산량과 SEBAL 증발산량을 비교하였다. 그 결과 MODIS는 Penman Monteith에 비해 연평균 11.5% 높게 추정되었으며, 가장 큰 차이를 보인 해는 2001년이였다. 전체적으로 SEBAL과의 오차는 수렴할 수 있을 정도로 작다고 판단되었다.

이와 같이 비교 및 검증을 위해 실측자료를 이용하지 못한 점을 보완하여 좀더 나은 검증 과정을 거친다면 SEBAL 모형의 활용도가 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 유진웅(2003) SEBAL 모형을 이용한 증발산량의 추정. 석사학위논문, 서울대학교.
- Anthony, M., Masahiro, T., Richard, G.A., and William J.K. (2000) Final Report ; Application Consumptive Use of Water and Streamflow Depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing. Idaho Department of Water Resources.
- Bastiaanssen, W.G.M. (1995) Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain : A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Wageningen Agricultural University, Wageningen. The Netherlands.
- Bastiaanssen, W.G.M. (1998a) Remote sensing In water resources management : the state of the art. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, pp.118.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M. (1998b) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) : 1. Formulation. Journal of Hydrology, 212-213, pp.198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J. and van der Wal, T. (1998c) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) : 2. Validation. Journal of Hydrology, 212-213, pp.213-229.
- Bastiaanssen, W.G.M. (2000) SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin. Turkey, Journal of Hydrology, Vol. 229, pp.87-100.