

에너지 수지에 의한 인공위성 데이터 기반 공간 증발산량 산정 Spatial Estimation of Satellite-based Evapotranspiration by Energy Balance

황교택*, 최민하**

Kyotaek Hwang, Minha Choi

요 지

토양으로부터 발생하는 증발과 식물에서 일어나는 증산을 모두 포함하는 증발산은 일반적으로 연구된 물리식과 경험식 등을 이용하여 산정하고 lysimeter 실측 자료를 이용하여 지역 특성에 맞게 검증하는 방법을 쓰고 있다. 하지만 이와 같은 방법은 어느 한 점에만 국한되어 적용되기 때문에 공간적인 제약이 있으며 외부환경의 영향을 크게 받는 증발산의 특성상 이를 일반화하는 데에도 어려움이 따른다. 따라서 이러한 점들을 보완하고 해결하기 위해 원격탐사 (Remote Sensing)를 이용하여 넓은 지역에 분포되어 있는 증발산량을 공간적으로 산정하고자 한다. 증발산량은 크게 물수지, 에너지수지 방법을 이용하여 구할 수 있으며, 본 연구에서는 에너지수지 방법을 기반으로 한 원격 이미지 처리 모형을 이용하여 에너지 수지식의 각 항을 이루는 순복사 에너지, 토양열 플럭스, 현열 플럭스와 함께 증발산을 나타내는 잠열 플럭스를 통합적으로 처리하여 산정, 이를 지도로 나타내고 기본적인 통계분석을 실시하였다. 작성된 지도는 구역 내 토지 피복, 식생 분포, 고도 등 외부 인자들의 변화에 따라 증발산량이 공간적으로 어떻게 변화하는지를 알아볼 때 유용하게 쓰일 것이며, 다른 증발산 지도와의 비교를 통해 연구지역에서의 시간 변동성을 파악하는 데에도 도움이 될 것이다.

핵심용어 : 증발산, 원격탐사, 에너지수지, 잠열 플럭스, METRIC

1. 서 론

토양으로부터 발생하는 증발 과정과 식생으로부터 일어나는 증산 과정을 통칭하여 부르는 증발산은 수문학은 물론 기상학, 기후학, 생태학, 농학 등 관련 학문의 연구에 큰 영향을 주기 때문에 이를 이해하는 것이 중요하다. 현재 국내에서는 이에 대한 연구 및 활용을 목적으로 여러 종류의 측정 장비를 이용하여 실측하거나 Eddy covariance technique, Bowen ratio method 등을 이용하여 경험적으로 산정하고 있다. 그러나 이러한 방법은 한 특정 지점에 대한 증발산 값만을 얻을 수 있기 때문에 외부환경에 의해 큰 폭으로 변화하는 증발산 특성상 인근 지역에 대해 적용하는 데 큰 어려움이 따르며, 이 한계를 극복하기 위해 인공위성 이미지를 이용하여 공간적인 증발산을 산정하여 지도로 나타내고자 하였다.

Mapping EvapoTranspiration at high Resolution using Internalized Calibration (METRIC) 모형은 30 m by 30 m에 달하는 고해상도의 Landsat Thematic Mapper (TM) 위성 이미지를 처리하기 위한 에너지 수지 모형으로 Allen et al. (2007)에 의해 소개되었으며 미국에 대한 높은 적용성을 보이고 있다. 본 연구에서는 이 모형을 경기도 경안천 유역에 적용함으로써 우리나라에 대한 적용성 및 증발산의 공간적 분포에 대해 검토하였다.

* 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 · E-mail : khwang@hanyang.ac.kr

** 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 조교수 · E-mail : mchoi@hanyang.ac.kr

2. 연구지역 및 관측자료

우리나라의 평균적인 기후특성을 나타내는 대표적인 중규모 하천인 경안천은 한강의 지류 중 하나로 경기도 용인시와 광주시를 거쳐 팔당호로 흘러들어가고 있으며 현재 수도권의 상수원으로 쓰이고 있다. 하천의 유역은 북위 37°09'40"와 37°29'27" 사이에, 동경 127°08'06"와 127°26'50" 사이에 위치해 있으며 유역의 넓이는 561 km²에 달하고 평균 고도는 154 m, 평균 경사는 28.8%이다 (그림 1). 이 유역의 연 평균 기온은 10.9°C이고 연 평균 강우량은 1,200.5 mm이며 (박종윤 등, 2008), 유역의 약 60%가 산지, 약 20%가 경작지로 이용되고 있다 (그림 2).

연구지역 주변의 기상 관측소는 유역으로부터 약 10 km 떨어진 수원 기상대가 유일하여 모형의 입력자료로써 활용한 기상 데이터는 이 관측소의 데이터를 활용하였다. 위성 이미지를 촬영한 날인 2006년 9월 16일에 대한 기상 관측 데이터를 사용하였으며, 이 날의 대형증발접시 측정량은 4.4 mm이고 여기에 증발접시계수 0.75를 곱하여 3.3 mm를 연구 지역의 증발산 값으로 사용하였다 (Allen et al., 1998).

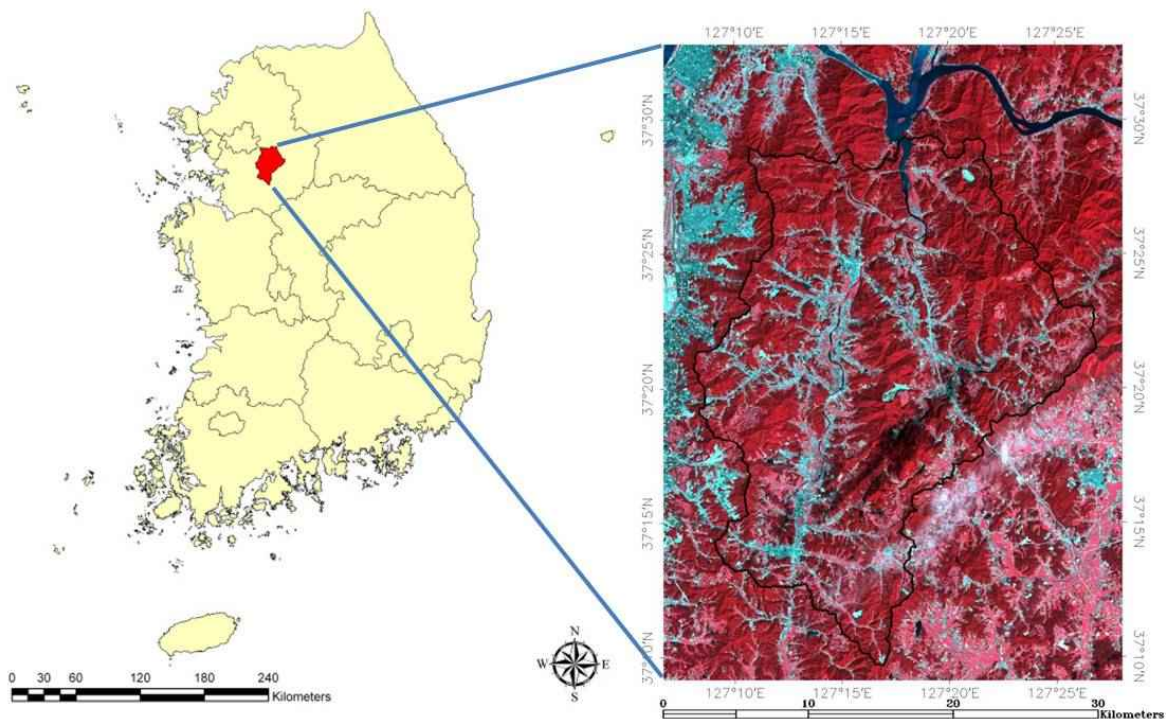


그림 1. 경안천 유역의 위치와 유역의 False Color Composite

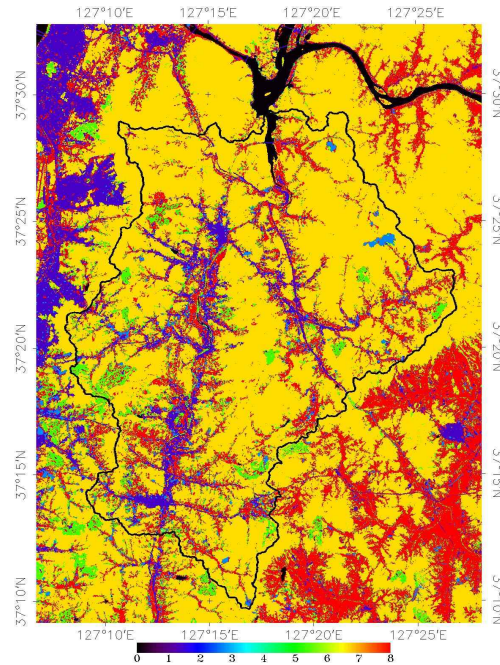


그림 2. 경안천 유역의 토지이용도
(0-하천, 1-시가지, 2-나지, 3-습지, 4-초지, 5-산지, 6-농지, 7-경작지)

3. METRIC 모형

네덜란드에서 개발된 위성 이미지 처리 모형인 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 모형을 개선하여 미국 내 적용성을 높이기 위한 목적으로 개발된 METRIC 모형은 단 파장과 열정보를 포함한 Landsat TM 이미지를 이용하여 에너지 수지를 이용, 지표면에서의 증발산 분포를 공간적으로 산정한다 (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007). 이 모형은 식생의 종에 제한받지 않는 장점을 가지고 있는 에너지 수지를 이용하며, 이에 따라 증발산 산정 과정과 절차가 간소화되어 대상 지역의 증발산을 산정하는 데 드는 자원과 노력을 크게 줄일 수 있는 장점이 있으며, 이는 원격탐사가 가지는 가장 큰 이점이기도 하다.

METRIC 모형은 지표 순 복사 에너지 (R_N)와 토양열 플럭스 (G), 대기로 이동하는 현열 플럭스 (H)를 통합적으로 계산하여 증발산을 산정한다. 지표 순 복사 에너지에서 토양열 플럭스와 현열 플럭스를 빼면 잔여 플럭스를 구할 수 있으며, 이는 곧 증발산으로 소비된 에너지의 흐름을 의미한다. 따라서 에너지 수지 방법을 이용할 때에는 계산되는 항들의 정확도가 증발산의 정확도를 좌우하며, 이 모형에서는 이로 인해 야기될 가능성이 있는 오차와 편차를 줄이기 위해 잠열 플럭스 (LE)가 아닌 현열 플럭스에 관한 내부 보정을 하였다. hot anchor pixel과 cold anchor pixel을 이용하여 반복 연산을 통해 현열 플럭스를 내부적으로 보정하는 방법은 METRIC 모형만이 가지는 현열 플럭스 산정 방법이다.

METRIC 모형은 Alfalfa 기준 증발산량 (ET_r)에 standardized ASCE Penman-Monteith 식을 적용하여 에너지 수지 함수를 내부적으로 보정한다 (Allen et al., 2005; Allen et al., 2007). 일반적으로 잔디 기준 증발산량 (ET_0)보다 20 - 30% 큰 값을 보이는 ET_r 은 식생의 종류에 관계없이 적용될 수 있는 모형 특성상 증발산 근사값을 구하는 데 쓰인다. 이 점은 METRIC 모형이 SEBAL

모형과 비교하여 보이는 가장 큰 차이점이며 모형의 내부 보정에 쓰이는 ET_r 에 대한 신뢰도가 높기 때문에 지상 관측 자료의 정확도가 모형 결과물의 품질에 큰 영향을 미친다.

4. 결과 및 고찰

그림 3은 Landsat-5 TM 위성 이미지에 METRIC 모형을 적용하여 최종 산정된 일증발량의 분포를 나타낸 그림이며, 모형을 이용하여 최종 산정된 에너지 수지 주요 인자와 일증발량 분포에 대한 기본적인 통계분석을 수행하여 표 1에 나타내었다. 표에서의 플럭스값은 위성이 해당 지역을 스캔하는 동안 (한국시간 오전 11시 4분 35초 - 5분 2초) 얻어진 이미지를 이용하여 산정한 순간 플럭스값으로, 이를 모형 알고리즘을 통해 하루 단위값으로 산정한 것이 일증발산값이다.

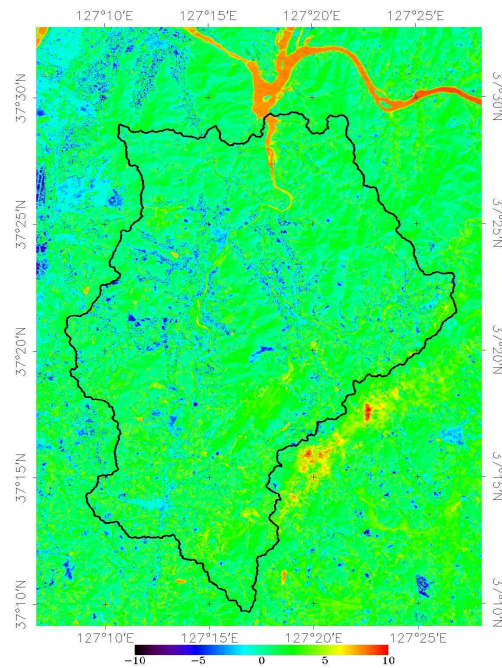


그림 3. METRIC 모형을 이용하여 산정한 증발산 분포 (mm d^{-1})

표 1. METRIC 모형 산정 결과 및 통계 분석

플럭스 및 일증발산	평균	표준편차	변동계수
R_N (W m^{-2})	743.30	28.14	0.038
G (W m^{-2})	67.83	13.03	0.192
H (W m^{-2})	404.10	72.10	0.178
LE (W m^{-2})	271.67	75.54	0.278
Daily ET (mm d^{-1})	3.65	1.01	0.277

지도를 통해 유역 북쪽에 있는 한강 본류에서의 증발산이 높은 값을 나타내었고 (주황색 지역) 중앙 내부 (청색 지역)에서는 주변 지역 (녹색)에 비해 낮은 증발산 값을 보이고 있으며, 이를 통

해 도시화된 지역에서 보이는 수문학적 변화를 단적으로 확인할 수 있다. 도시화가 진행되면서 포장지역이 늘어나 식생은 줄어들고 불투수면이 넓어지게 되며, 이에 따라 증발산은 감소하고 유출은 증가하게 되며, 이를 위 그림을 통해 확인할 수 있었다.

표를 통해 수원기상청에서 측정한 대형 증발접시를 이용하여 측정한 값 (4.4 mm d^{-1})에 증발접시계수 0.75를 곱하여 얻어진 증발량 3.3 mm d^{-1} 와 유역 증발산 평균값은 11% 정도의 차이를 보여 상당히 근소한 값이 나왔다는 것을 확인할 수 있으며, 관측치 측정 지점인 수원 기상대와의 거리가 10 km 정도 떨어져있다는 것을 감안하면 만족할 만한 결과를 보여준다 (Allen et al., 1998). 변동계수는 표준편차를 평균으로 나뉜 값으로써 평균치에 비해 각 격자값이 어느정도의 변동성을 가지고 있는지 가늠할 수 있도록 하는 지표이다. 잠열 플럭스 및 증발산에 대한 변동계수가 다소 높게 나왔으며, 이는 대기 및 식생, 토지 피복 상태 등 외부 환경 조건에 민감하게 반응하는 증발산의 특성에 기인한 것으로 위의 통계결과를 통해 이를 확인할 수 있었다 (Choi et al., 2009).

4. 정리 및 결론

본 연구에서는 2006년 9월 13일에 관측된 Landsat-5 TM 위성 이미지를 이용하여 에너지 수지를 이용한 진보된 형태의 모형인 METRIC 모형에 적용, 한강의 지류인 경안천에 대한 공간 증발산을 산정하여 이를 지도의 형태로 나타내었다. 높은 공간해상도를 가지고 있는 증발산 지도의 제작을 통해 경안천 유역에서의 증발산 분포를 보다 자세하게 확인할 수 있었고 이를 관측값과 비교하여 기본적인 통계분석을 실시하였다. 통계분석 결과 가장 가까운 관측 지점인 수원 기상대의 증발산 값과 근소한 값을 보여 연구지역에 대한 모형의 적용성을 확인하였다. 또한 증발산 각 격자값이 상대적으로 높은 편차를 보이는 것을 도출하였으며, 이는 외부 환경의 영향을 크게 받는 증발산의 특성을 반영하는 결과이다.

추후 동일한 대상 지역에 대해 스캔한 다른 위성 이미지를 이용하여 증발산 지도를 제작한다면 증발산의 시간적 분포 경향 및 시간 변동성을 확인할 수 있음은 물론 계절에 따른 증발산의 거동을 파악하는 데에도 도움이 될 것이다. 또한 다른 원격 이미지 처리 모형과의 비교 검증을 통해 우리나라에 대한 모형 적용성을 높여 더욱 향상된 질의 결과물을 얻을 수 있을 것이다.

감 사 의 글

본 연구는 유량조사사업단 - “인공위성자료를 이용한 증발산 및 토양수분의 공간적 mapping 작성 기반구축” 과제의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 박종윤, 이미선, 이용준, 김성준(2008). SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문 - 수질에 미치는 영향 분석, 대한토목학회논문집, 제28권 제2B호, pp. 187-197.
2. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M.(1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage, New York, Paper No. 56.
3. Allen, R.G., Tasumi, M., and Trezza, R.(2007). Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model, Journal of Irrigation and

Drainage Engineering, 133(4), pp. 380-394.

4. Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R.L., Howell, T.A., Itenfisu, D., Jensen, M.E., Snyder, R.L.(2005), The ASCE standardized reference evapotranspiration equation, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
5. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., and Holtslag, A.A.M.(1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation, Journal of Hydrology, 212-213, pp. 198-212.
6. Choi, M., Kustas, W.P., Anderson, M.C., Allen, R.G., Li, F., and Kjaersgaard, J.H.(2009). An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX, Agricultural and Forest Meteorology, 149, pp. 2082-2097.