大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第30卷 第3B號 · 2010年 5月
pp. 233 ~ 242

위성영상과 SEBAL 모형을 이용한 공간증발산량 산정 연구

Estimation of Spatial Evapotranspiration Using satellite images and SEBAL Model

하 림* · 신형진** · 이미선*** · 김성준****
HA, Rim · Shin, Hyung-Jin · Lee, Mi-Seon · Kim, Seong-Joon

Abstract

SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) developed by Bastiaanssen (1995) is an image-processing model comprised of twenty-five sub models that calculates spatial evapotranspiration (ET) and other energy exchanges at the surface. SEBAL uses image data from Landsat or other satellites measuring thermal infrared radiation, visible and near infrared. In this study, the model was applied to Gyeongancheon watershed, the main tributary of Han river Basin. ET was computed on a pixel-by-pixel basis from an energy balance using 4 years (2001-2004) Landsat and MODIS images. The scale effect between Landsat (30 m) and MODIS (1 km) was evaluated. The results both from Landsat and MODIS were compared with FAO Penman-Monteith ET. The absolute errors between satellite ETs and Penman-Monteith ET were within 12%. The spatial and temporal characteristics of ET distribution within the watershed were also analyzed.

Keywords : *evapotranspiration, SEBAL, landsat, MODIS, FAO penman monteith*

요 지

Bastiaanssen(1995)에 의해 개발된 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land) 모형은 25개의 sub model들을 이용하여 지표의 증발산량과 기타 여러 에너지 교환을 계산하는 이미지-프로세싱 모형이다. SEBAL 모형은 Landsat 또는 기타 여러 위성영상을 통해 얻을 수 있는 열적외선 방사, 표시 및 근적외선 측정 자료 등을 사용한다. 본 연구에서는 한강유역의 주 지류인 경안천 유역에 모형을 적용시켰다. 증발산량(ET)은 4개년의(2001년-2004년) Landsat과 MODIS 위성영상을 입력자료로 사용하여, 에너지 균형원리를 통해 pixel-by-pixel을 기준으로 계산되었다. Landsat(30 m)과 MODIS(1 km) 사이의 비교 결과도 평가되었으며, Landsat과 MODIS 결과들은 FAO Penman-Monteith 증발산량과 비교하였다. 위성영상 ET들과 FAO Penman-Monteith ET 간의 절대 오차는 12% 이내로 확인되었으며, 유역 분포 증발산량의 시공간분포 특성 또한 분석하였다.

핵심용어 : 증발산량, SEBAL, Landsat, MODIS, FAO Penman-Monteith

1. 서 론

증발산량의 산정은 자연현상과 인문현상을 이해하는데 매우 중요한 요소이다. 현재 이용되고 있는 증발산량 산정 방법은 원격탐사 자료를 이용하는 방법을 제외하면, 점 추정 자료로 내삽법을 이용하여 유역 전체에 적용시키고 있다. 증발산량 산정 방법에 있어, 기상학 분야에서는 증발접시(Evaporation Pan)를 이용하여 직접 측정하는 방법과 기상인자와의 관계로부터 추정하는 방법, 증기압과 증발 사이의 관계를 이용한 질량 이동법(mass transfer method) 등을 이용한다. 수문 · 수공학 분야에서는 수 년 간의 강수량과 유출량 자료를 이용한 물수지 분석법, 에너지 보전법칙에 의한 근거를 둔 에너지 수지법(energy budget method) 등을 이용하고 있다. 최근 들어서는 원격탐사 자료를 이용한 에너지 수지법과 GIS 기법을 이용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 농업 기상 분야에서는 증발산량계(lysimeter)를 이용하여 작물의 생육에 소요된 증발산량을 필요에 따라 간헐적으로 측정하고 있다.

현재 이용하고 있는 증발산량 산정 방법은 원격탐사 자료를 이용하는 방법을 제외하고는 점추정에 의한 방법이다. 점 추정 자료를 유역에 적용시키기 위해서는 내삽법을 이용하는 것이 일반적이다. 하지만 자연 상태에서 증발산에 영향을 주는 요인이 매우 다양하기 때문에 점 추정 자료를 통해 유역면 전체에 대한 증발산량을 추정하는 것은 많은 오차를

*정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사 (E-mail : rim486@konkuk.ac.kr)
**정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (E-mail : shjin@konkuk.ac.kr)
***정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사 (E-mail : misun03@konkuk.ac.kr)
****정회원 · 교신저자 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr)

Table 1. References of evapotranspiration study by remote sensed images

제안자	연구 내용
Heilman 등 (1977)	원격탐사 이용 복사수지 계산, Priestly and Taylor 식에 의해 ET 산정
Brakke and Kanemasu (1981), Tarply (1979), Gautier 등 (1980)	지표면에 입사하는 태양 복사에너지 계산을 위해 원격탐사 자료 이용 ET 산정
Carson and Boland (1978), Soer (1980)	열적외선 영역자료 및 기상자료 이용 ET 산정
Gurney and Hall (1983)	위성영상으로부터 추정 된 지표 알베도, 온도, 기상자료를 이용. 열수지 성분 보정 후 일 ET 산정
Price (1982)	열수지식을 통한 일별 증발산량 계산을 위해 지표면 온도와 반사도를 기상자료와 결합하는 방법 제안
Jackson 등 (1985)	위성영상을 이용하여 열수지요소, 태양복사에너지, 대기 온도, 풍속 및 수증기압 등 자료를 이용하여 ET 산정
Pinker 등 (1995), Taconet 등 (1986)	HCMM, NOAA, GOES 위성자료 이용 일 ET 산정
Kustas (1995), Mac-Farland 등 (1990), Norman and Becker (1995), Sellers 등 (1995), Sugita and Brutsaert (1991)	위성영상을 이용하여 열수지 요소를 추출하기 위한 연구
Bastiaanssen (1998)	원격탐사를 이용하여 증발산량을 산정하는 알고리즘의 한계 제시. 지형이나 지표면 상태가 불균일한 유역 및 하천 유역에서 비료적 적은양의 자료를 이용하여 실증발산량을 산정하는 알고리즘 개발 → SEBAL Model

가져올 수 있다. 따라서, 에너지 수지 모델에서 원격탐사 자료와 지상 기상자료를 이용하여 증발산량을 추정하는 방법이 효과적인 것으로 평가되었다(Kustas and Norman, 1996; Moran *et al.*, 1989). 국내에서는 신사철 등(2004; 2007)이 꾸준히 위성영상을 활용한 증발산량 추정 연구를 발표하여 국내 증발산량 추정의 어려움을 극복하고자 하였다. 또한 김주훈 등(2005)은 Landsat TM 및 ETM+ 영상과 DEM 및 토지피복도 등의 공간자료를 이용하여 지표면의 에너지수지 요소를 공간 분포형으로 추출하였고, 잠재증발산량의 분포는 Penman-Monteith 식을 이용하여 유역을 일일 잠재증발산량을 분포형으로 산정하였다. 국외 연구 사례(Table 1)를 보면 증발산량 직접추정 한계를 극복하기 위한 방법으로 에너지 수지 모델에서 원격탐사 자료와 기상자료를 이용하여 추정하는 방법이 효과적인 것으로 평가되고 있다.

본 연구에서 소개할 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land)(Bastiaanssen, 1995) 모형은 Landsat 이나 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 프로그램 내 Model Maker Tool을 이용하여 모형을 구현하였으며, 경안천 유역에 적용하였다. 연구 대상 지역은 유역 면적 약 561.1 km^2의 경기도 광주군 일원의 경안천 유역으로, Landsat TM, ETM+, 그리고 Terra MODIS 위성영상을 이용하여 유역 내 증발산량 분포의 시공간적 특성을 분석하였다(2001-2004년).

2. 연구 절차

본 연구에서는 2001년에서 2004년까지 경안천 유역의 시계열 공간 증발산량 추정 및 비교 분석을 위해 이미지-프로세싱 모형인 SEBAL Model을 사용하였다. SEBAL 모형은 ERDAS IMAGINE 8.6 프로그램의 Model Maker Tool을 이용하여 구축하였다. 모형의 입력 자료로는 Lansdat TM, ETM+ 및 Terra MODIS(Raw data) 위성영상을 사용하였으며, DEM 및 형의 입력 추가 입력하여 모형을 구동하였다. 끝er, 모형 구동 결과를 이용하여 토지피복과 지형에 따른 공간 증발산량을 분석하였다.

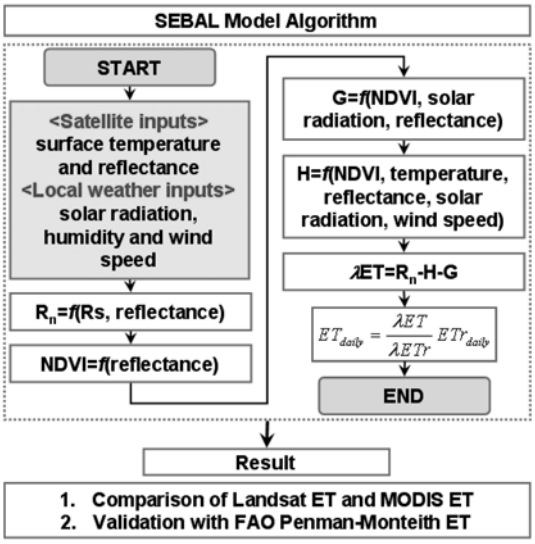

Fig. 1 Flow chart of this study

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

3. 대상 유역

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 경안천의 경안수위관측소를 기준으로 동경 127°, 북위 37°에 위치한 경기도 광주군 일원의 경안천 유역을 연구 대상지역으로 하였으며, 유역면적은 약 561.1 km^2이다. 대상유역은 경기도 용인시 호동에서

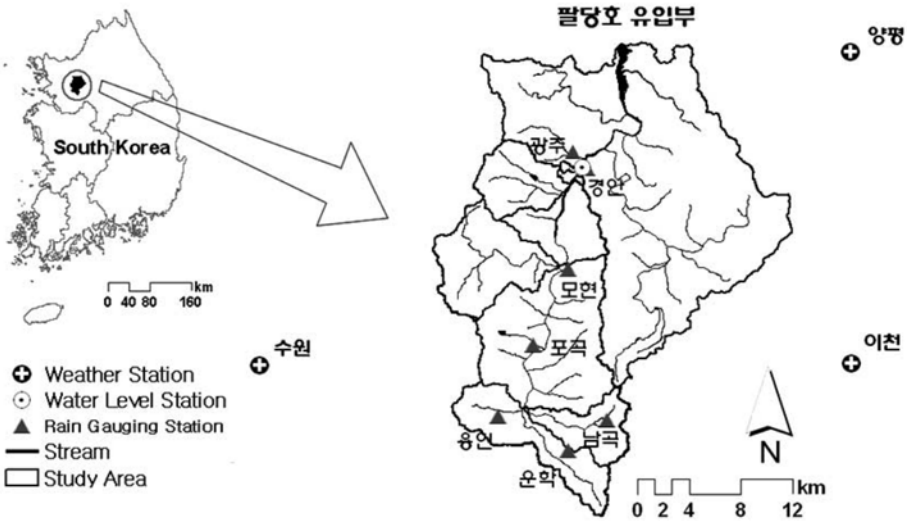

Fig. 2 Study area

Fig. 3 Landuse of the study watershed

Table 2. Area of each Landuse

항목	면적(km^2)	비율(%)
시가지/나지	74.4	13.3
논	45.1	8.0
밭	47.8	9.5
활엽수	192.9	34.4
침엽수	136.3	24.3
혼효림	34.9	6.2
초지	17.1	3.1
습지/수역	12.5	2.2
총계	561.1	100.0

발원하여 북서류 하다 용인시를 관류하면서 방향을 북으로 바꾸어 광주시를 관류하고 경안천의 최대 지류인 곤지암천이 합류한 후 수도권의 상수원인 팔당호로 합류하는 하천으로 하천 형태학적으로 수지상의 형상을 이루고 있다. 유역 평균 표고는 180.81 m, 유역 평균 경사는 27.01%, 유로 연장은 47.38 km에 달한다. 특히 산림이 65%를 차지하고 그 외 여러 토지피복항목이 고루 분포하고 있어, 위성영상으로부터 토지이용도를 얻기가 용이한 지역이며, 식생정보 추출 및 증발산량 추정 연구에 적절한 지역으로 판단되어 연구 대상지역으로 선정하였다. 경안천 유역은 전체적으로 유역 부근에 농경지가 넓게 분포하고 있으며(22.2%), 주변으로 많은 산림이 형성되어 있다. 이 지역의 산림은 3차 임상도를 기준으로 활엽수 62%, 침엽수 33%, 그리고 목초지와 과수원이 5%를 차지하고 있다.

4. SEBAL 모형의 개요

4.1 SEBAL 모형의 기본이론

위성영상을 이용하여 증발산량을 추정 하는 모형 가운데 SEBAL 모형(Surface Energy Balance Algorithm for Land Model. Bastiaanssen, 1995)은 기존 증발산량 추정 모형에 비해 기상자료를 적게 필요로 하며, 정확도가 높은 것으로 알려지고 있다(Bastiaanssen, 1998a; Bastiaanssen *et al.*, 1998b, 1998c; Bastiaanssen, 2000). 또한 모형 구성 측면에서 볼 때, SEBAL 모형은 에너지 수지 방정식의 항마다 개별적으로 계산하여 총합하는 독립적인 모듈 방식으로 구성되어 있기 때문에, 각 항에 대한 개선된 연구가 이루어지면 모형의 성능을 쉽게 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 더욱이 미국 Idaho주의 공동 연구에 의한 연구보고서에는 이 모형의 세부적인 내용까지 공개함으로써, 모델 개선의 가능성을 높이고 있다(유진웅, 2003).

위성영상은 촬영시점에 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,

R_n : 지표 순복사량(net radiation, [W/m^2])
G : 토양의 열 유동(soil heat flux, [W/m^2])
H : 대기로 향하는 현열 유동(sensible heat flux, [W/m^2])
ET : 잠열 이동(물의 증발에 사용된 에너지, [W/m^2])
λ : $\{2.501-0.002361\times(T_0-273)\}\times10^6$
T_0 : 증발이 일어나는 물의 온도(지표면의 온도 이용)

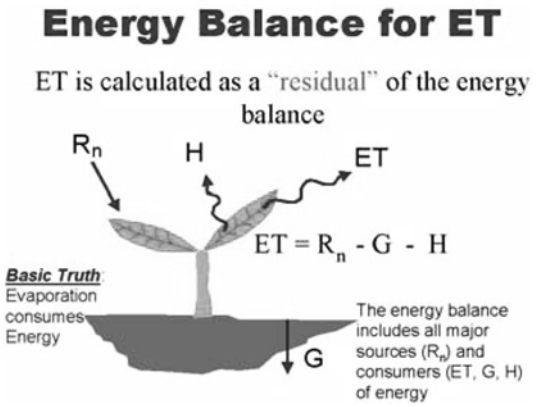

Fig. 4 Surface Energy Balance

식 (1)에서 우변의 λET만 남기고 이항한 후 정리하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\lambda ET = R_n - G - H \tag{2}$$

지표의 순복사량(R_n)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.

$$R_n = R_{S\downarrow} - aR_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow} \tag{3}$$

여기서,

$R_{S\downarrow}$	: 지표로 들어오는 단파 복사 에너지 [W/m^2]
a	: 지표면 알베도
$aR_{S\downarrow}$	: 지표에서 나가는 단파 복사 에너지 [W/m^2]
$R_{L\downarrow}$	: 지표로 들어오는 장파 복사 에너지 [W/m^2]
$R_{L\uparrow}$	: 지표에서 나가는 장파 복사 에너지 [W/m^2]
ε_0	: 지표 열복사율(surface thermal emissivity)
$(1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow}$	: 대기에서 들어온 장파 복사 에서지의 지표 반사량

위 식을 같은 항끼리 묶어 정리하면, 다음 식 (4)와 같다.

$$R_n = (1-a)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow} \tag{4}$$

식 (4)에서 지표가 받아들이는 단파 복사 에너지($R_{S\downarrow}$)는 알베도(albedo)에 의해 결정된다. 알베도는 위성영상의 각 밴드에서 얻을 수 있다. 지표로 들어오는 단파 복사 에너지는 태양상수, 태양 입사각, 지구와 태양 사이의 상대적 거리, 그리고 대기 투과율을 이용하여 계산한다.

한편, 지표로 들어오는 장파 복사 에너지는 스테판 볼츠만(Stefan-Boltzmann) 법칙과 대기 투과율, 그리고 지표 참조점의 지표온도를 이용하여 계산한다. 지표에서 나가는 장파 복사 에너지는 스테판 볼츠만 법칙과 지표 복사율(surface emissivity), 그리고 지표온도를 이용하여 계산한다. 여기서, 지표온도는 인공위성의 열밴드를 통해 들어온 정보를 이용하여 계산할 수 있다. SEBAL 모형에서는 복사율을 구하기 위해 NDVI를 이용한다.

식 (1) $R_n = G - H - \lambda ET$의 우변항의 변수에 관하여, 토양열의 이동(G)은 경험적으로 NDVI와 지표온도, 그리고 지표면 반사율을 이용하여 계산한다(식 (5)). 대기로 향하는 현열의 이동(H)은 지표면에서의 풍속, 지표의 거칠기(surface roughness), 그리고 지표와 대기의 온도차를 이용하여 계산한다(식 (6)). SEBAL 모형에서는 지표 가열로 인해 발생하는 대기 불안정 상태를 고려해 반복 순환 계산을 함으로써 대기 부양효과를 반영한다.

$$G_0 = 0.30(1-0.98\times NDVI^4)R_n \tag{5}$$

$$H = \rho \times C_p \times (T_s - T_a)/\gamma_{ah} \tag{6}$$

여기서,

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

여기서 지표온도(T_s)는 model F07(SEBAL 내 모듈)에서 계산되는데,

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB}K_1}{R_C} + 1\right)}$$

식을 통해 계산된다. 여기서, Rc는 model F01에서 L6으로부터 계산된 값이며, K_1과 K_2는 Landsat images의 상수이다.

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.

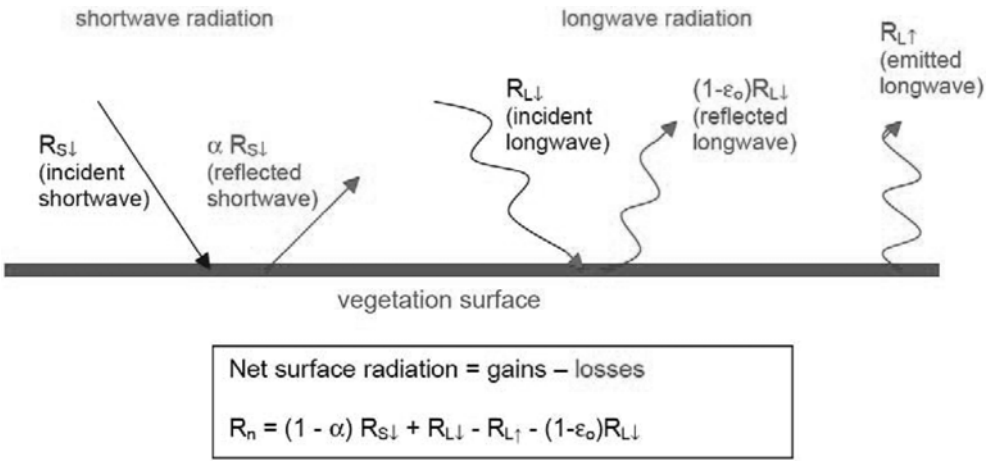

Fig. 5 Surface Radiation Balance

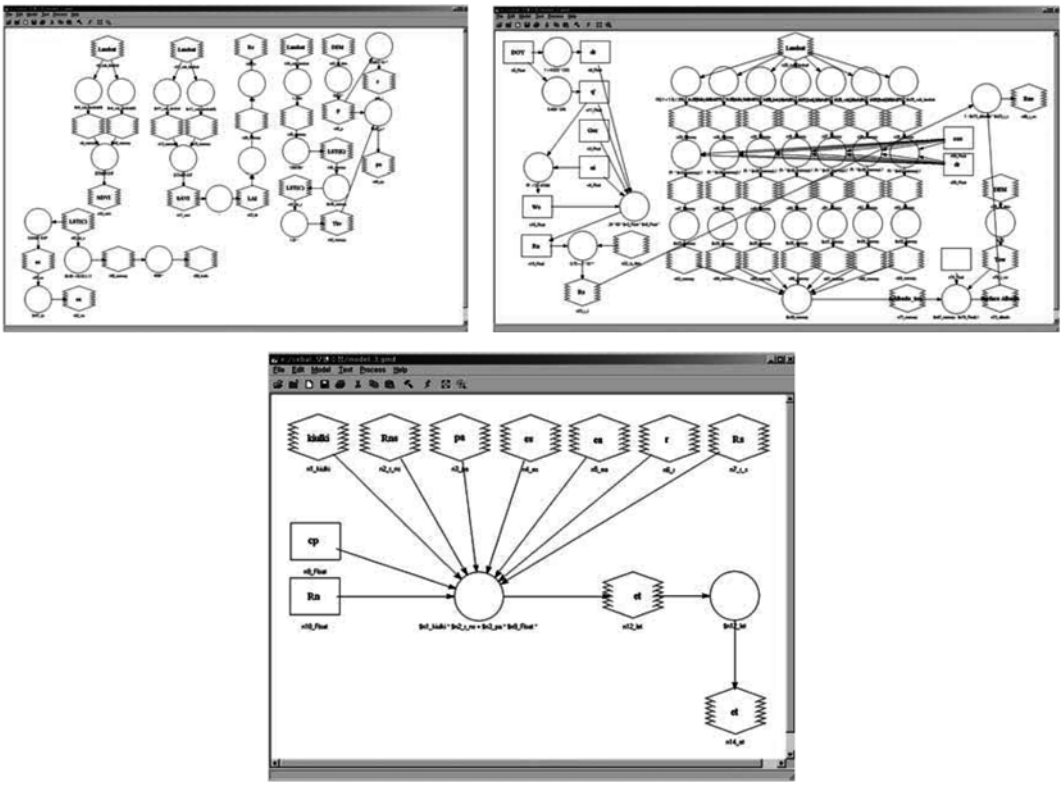

Fig. 6 SEBAL model

4.2 SEBAL 모형의 구현

SEBAL 모형은 ERDAS IMAGINE 8.6의 Model Maker Tool을 이용하여 구축할 수 있다. 알고리듬의 구성은 Anthony Morse 등(2000)의 보고서 내용을 참고하였으며, 여기에는 SEBAL 모형의 알고리듬이 상세하게 기술되어 있다. 이 중, 유진웅(2003)에 의하면 지표 경사를 반영하는 부분이 우리나라 현실에 맞도록 수정된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 지표 경사를 반영하는 부분 및 기타 수정을 통하여 적절한 알고리듬을 적용하여 모형을 구축하였다(Fig. 6).

5. 모형 입력자료 구축

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.

연구에 사용되는 위성영상은 기존 연구를 비롯하여 SEBAL 모형의 개발 당시, Landsat 위성영상을 이용하여 연구를 진행할 수 있도록 구성되어 있다. 최근에는 Landsat 영상 이 외에도 시계열 분석이 보다 쉬운 NOAA 또는 MODIS 영상을 이용한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 본 연구에 사용된 Landsat TM과 ETM+영상의 기하학적인 왜곡을 보정하기 위하여 IDRISI 프로그램을 사용하였으며, 지상기준점 보정 방법인 Image to Image 방법을 이용하여 기하보정을 실시하였다. 1991년 5월 31일 Landsat TM 영상을 기준영상으로 사용하여 Spheroid Bessel, Datum Tokyo (Korea), Projection TM으로 투영하였으며, 보정 된 Landsat, 그리고 MODIS 위성영상(Fig. 7, 8)을 이용하여 모형에 적용하였다.

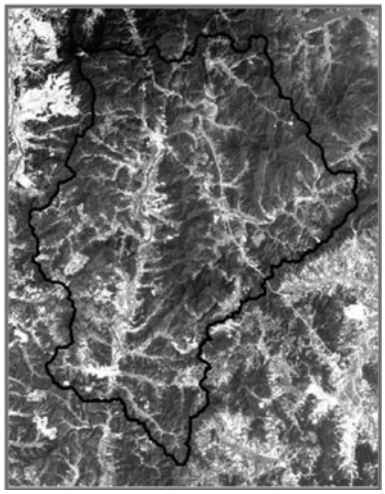

Fig. 7 Landsat TM image (2001.06.03)

대상 지역 위성영상과 함께 모형에 입력되는 주요한 지형자료인 DEM(Digital Elevation Model) 자료 구축을 위하여 1:5000 수치지도로부터 지형관련 레이어를 추출하고 ARC/INFO를 이용하여 Coverage, TIN(Triangulated irregular network), Lattice 변환과정을 통해 격자간격 30 m의 DEM을 생성하였다(Fig. 9). 또한 SEBAL 모형에 입력되는 기온 및 풍속자료는 국가수자원관리 종합 정보 시스템(WAMIS) 자료를 바탕으로 수원, 양평, 이천의 기상관측지점 자료를 이용하였다.

경안천 유역의 토지피복별 ET 분석을 위해 환경부에서 제공하는 2000년 중분류 토지피복도를 8가지 항목으로 재분류하였다(Fig. 3). 여기서, 산림의 경우는 침엽수, 활엽수와 혼효림으로 세분화 하였고, 그 외에는 논, 밭과 초지로 구분하였다. 비식생지역은 시가지/나지와 습지/수역으로 분류하여 사용하였다.

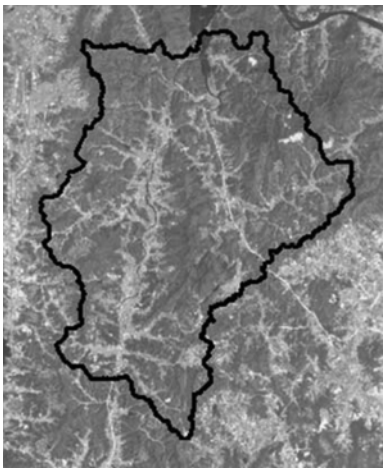

Fig. 8 Terra MODIS image (2001.06.05)

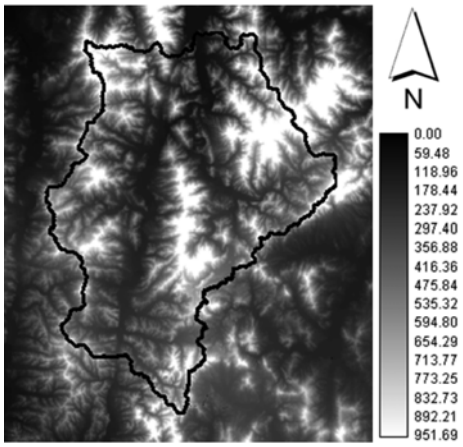

Fig. 9 Elevation of the study watershed

6. SEBAL 모형의 적용 결과 및 평가

6.1 적용 결과

SEBAL 모형에는 Landsat 위성영상을 입력하여 모형 구동 후 얻을 수 있는 증발산량 영상 이 외에도 Fig. 10과 같이 식생관련지수 영상(NDVI : Normalized Difference Vegetation Index, SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index, LAI : Leaf Area Index)과 Rs(단파복사에너지), 지표 온도, 알베도 등이다. SEBAL 모형으로 15개의 Landsat TM, ETM+, 그리고 MODIS 영상을 통해 증발산량을 도출한 결과 각각 1.62~4.83 범위의 값을 보였다. MODIS 영상을 이용하여 추정된 값은 일별 0.2~6.2 범위로 매우 다양한 값을 가지며,

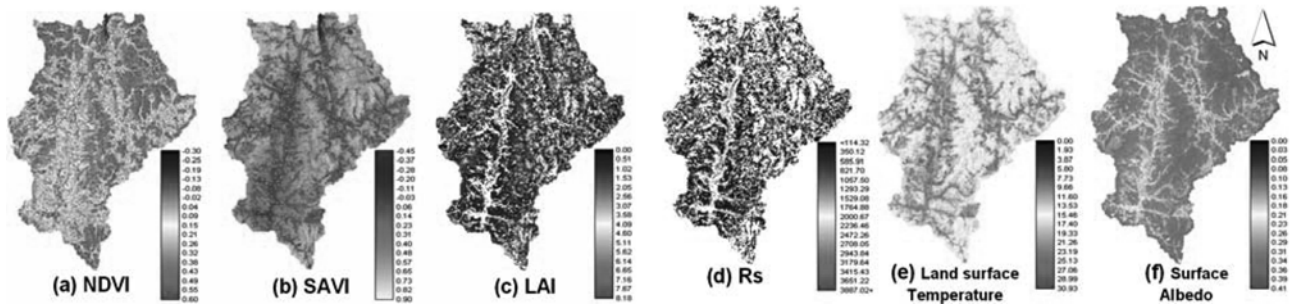

Fig. 10 Example of SEBAL model output, (a) NDVI, (b) SAVI, (c) LAI, (d) Rs, (e) land surface tempereture, (f) surface albedo (2000.05.07)

Table 3. Summary of Landsat evapotranspiration for each land use class and input data

영상취득일	센서	wind speed (m/s)	DOY	dr	sun angle	cos	ET (mm/day)								일평균 ET (mm/day)
							시가지/나지	논	밭	활엽수	침엽수	혼효림	초지	습지/수역	
2001.01.10	TM	0.8	255	0.99	51.21	0.46	1.18	1.81	1.73	3.02	2.71	2.75	2.36	1.05	2.22
2001.03.31	ETM	1.4	154	0.97	65.21	0.94	1.98	1.99	1.99	1.99	2.00	2.00	1.99	1.97	1.99
2001.06.03	ETM	1.4	154	0.97	65.21	0.94	3.73	3.75	3.76	4.17	4.20	4.15	3.73	3.76	3.93
2001.09.07	ETM	0.8	253	0.99	51.38	0.61	2.48	2.48	2.49	2.49	2.50	2.50	2.49	2.46	2.49
2001.09.23	ETM	0.9	264	0.99	47.47	0.12	3.18	3.16	3.33	4.34	4.07	4.11	3.54	3.14	3.68
2001.12.28	ETM	0.7	154	0.97	65.21	0.94	1.35	1.85	2.14	5.27	4.10	4.68	2.21	2.35	3.09
2002.02.14	TM	0.8	255	0.99	51.21	0.46	1.57	2.41	2.35	4.03	3.61	3.67	3.15	1.40	2.77
2002.09.10	ETM	0.8	253	0.99	51.38	0.61	2.64	2.65	2.65	2.65	2.81	2.97	2.65	2.55	2.70
2003.02.01	ETM	1.4	154	0.97	65.21	0.94	2.08	2.30	2.82	3.30	3.60	1.72	0.99	2.35	2.40
2003.05.08	ETM	0.8	253	0.99	51.38	0.61	2.91	3.31	3.32	3.32	3.40	3.35	3.32	3.28	3.28
2003.09.21	ETM	0.9	264	0.99	47.47	0.12	1.59	1.59	1.59	1.69	1.78	1.59	1.53	1.62	1.62
2004.01.03	ETM	0.9	264	0.99	47.47	0.12	1.98	1.99	1.99	2.04	2.01	1.99	1.97	1.97	1.99
2004.04.24	ETM	0.7	154	0.97	65.21	0.94	3.36	3.47	3.83	4.69	5.51	6.00	2.87	1.65	3.92
2004.06.03	TM	0.7	154	0.97	65.21	0.94	1.45	1.41	2.42	2.17	2.20	1.89	0.84	1.66	1.75
2004.07.29	ETM	0.7	154	0.97	65.21	0.94	4.35	4.21	4.44	5.79	5.43	5.48	4.72	4.19	4.83

DOY : Julian day, dr : 지구-태양거리 관계상수, sun angle : 태양 고도각, cos: 태양입사각의 cos 값.

Table 4. 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

월별 값을 정리해 본 결과 연증발산량은 2001년 가장 적었고, 2004년이 가장 많은 것으로 추정되었다. 토지피복도를 이용하여 각 토지피복 항목별로 증발산량을 분석한 결과는 Table 3, 4와 같다.

6.2 위성영상별 공간증발산량 비교

Landsat은 높은 공간해상도를 가짐에도 불구하고, 16일을 주기로 촬영 되므로, 구름이 없고 맑은 날의 영상을 얻기가 쉽지 않다. 따라서 시계열적으로 일별 영상을 획득할 수 있는 MODIS 위성영상을 사용하는 것은 매우 효과적이다. 그러나 MODIS 증발산량 map은 1000*1000 m의 낮은 공간해상도를 가진다는 단점이 있다. 본 장에서는 2003년 5월 7일에 Landsat ET Map을 이용하여 MODIS ET map과 비교 분석을 하였으며, 비교 방법은 증발 비율 막대 그래프와 지도의 시각의 점검에 의거하였다. Landsat과 MODIS ET map은 dry season의 경우 유사하였나, Landsat에서 보이는 세부적인 부분들을 MODIS에서는 확인하기 힘들었다. 이는 공간 해상도에 기인한 것으로, 예를 들면,Landsat ET map에서 보이는 폭이 좁은 산골짜기는 MODIS에서는 거의 확인하기 힘들다. Landsat의 경우, 높은 증발율을 가진 폭이 좁은 산골짜기는 dry land에 둘러쌓여 낮은 증발율을 보였으며, 이는 Landsat ET map이 높은 공간 해상도를 가짐에 따라 일부 낮은 증발을 보이는 균일한 픽셀들을 많이 가지고 있기 때문에 MODIS ET map(1000 m)의 결과는 부분적으로 높은 증발을 보였다. 이처럼 복잡하고 혼합적인 픽셀들을 많이 가짐에도 불구하고 Landsat과 MODIS ET map은 거의 흡사하게 나타났다.

Landsat와 MODIS ET map 비교를 위해 증발 막대 그래프를 분석해 보았는데, 평균적으로 0.24-0.48의 mm/day의 분포를 보였으며, 표준 편차 0.24로 상당히 비슷한 분포를 보였다.

여기서, MODIS 증발 비율이 더 낮은 표준 편차를 보인 것은 MODIS ET map이 더 큰 픽셀을 가졌기 때문으로 사료된다. 또한 Landsat의 촬영 시간대가 오전 10시 00분, MODIS가 오전 10시 30분 이었던 것을 감안할 때, 작은 오차들은 구름을 포함한 대기 조건의 영향을 받은 영상으로 인해 발생한 것으로 판단된다. 이는 평균 증발 비율을 증가시키는 경향을 보였기 때문에, 증발량은 맑고 청명한 날의 영상을 중점적으로 분석하는 것이 적절하다.

모형의 적용 가능성을 알아보기 위한 가장 좋은 방법은 연구 지역에서 증발산량계를 설치하고, 이를 통해 측정한 증발산량과 SEBAL 모형에 의한 증발산량 추정 결과를 비교하는 것이다. 그러나 실측 자료가 미비하여 본 연구에서는

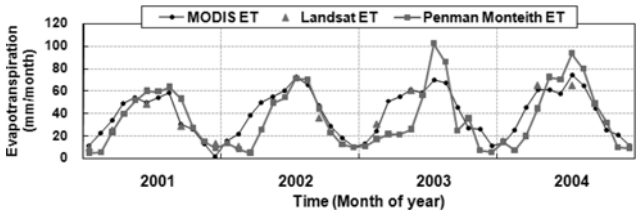

Fig. 11 Monthly evapotranspiration of MODIS, Landsat and Penman Monteith

선행연구에 나타난 위성영상 획득 시점의 기상자료를 FAO Penman-Monteith 공식에 적용하여 추정한 증발산량과 비교함으로써 SEBAL 모형의 적용 가능성을 평가하였다. 비교 및 평가를 위하여 해당 일의 증발산량을 FAO Penman-Monteith 공식으로부터 추정하였으며, 비교 결과는 Table 5와 같다. 여기서 비교된 FAO Penman-Monteith 공식으로부터의 증발산량 추정은 하림 등(2008)의 연구방법을 참고하여, SLURP 모형 내 증발산량 모듈을 이용한 것이다. SLURP 모형에서 기상자료는 일별 강우량, 일 평균기온, 이슬점온도 또는 상대습도, 일조시간 또는 태양복사량 등이 기본적으로 이용된다. 그 외의 일 평균풍속, 구름분포정도, 강설량, 저수지 수위, 일 평균유출량, 연평균강수량 등이 필요에 따라 선택적으로 사용된다. 본 연구에서 기상자료는 기상청에서 제공하는 2001년부터 2004년까지의 경안천 유역에 위치한 3개(수원, 양평, 이천) 관측소의 일 기상자료를 획득하여 사용하였다.

MODIS는 Penman Monteith에 비해 연평균 11.5% 크게 추정되었으며, Landsat은 5.7% 낮게 추정되었다. 여기서, MODIS는 지점 일자료를 이용하여 연자료로 변환하여 비교하였다. 월별 흐름은 MODIS의 경우 완만하였으나, Penman Monteith는 2003년에 월별 증감이 크게 나타났다(Fig. 11).

7. 요약 및 결론

지표수 흐름 및 수문순환과정 해석에 있어 증발산량은 중요한 인자이며, 지속적인 관심을 받고 있지만, 광역적으로 증발산량의 실측은 어렵기 때문에 최근 원격탐사 기법을 이용한 증발산량 추정 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 에너지 수지 모형에서 원격탐사 위성영상 자료와 기상자료를 이용하여 보다 쉽게 증발산량을 추정하는 기법을 연구하기 위해 SEBAL 모형을 구현하였으며, 이를 국내 경안천 유역에 적용하여 증발산량을 추정하였다. 연구에는 Landsat TM, ETM+, MODIS 위성영상을 이용하였으며, 추정된 결과는 다음과 같다.

Table 5. Comparison of Penman Monteith, MODIS and Landsat evapotranspiration

년	월	Penman Monteith			MODIS			Landsat
		월별	연별	계절별	월별	연별	계절별	월별
2001	1	4.5	409.3		11.3	403.2		9.4
	2	5.0			22.6			
	3	23.2			34.0			25.0
	4	39.3			49.0			
	5	51.2		113.8	54.0		137.0	
	6	59.8			50.0			48.5
	7	59.1			54.0			
	8	63.3		182.3	58.1		162.1	
	9	52.9			30.3			28.7
	10	27.1			25.6			
	11	14.6		94.7	13.1		68.9	
	12	9.2		18.6	1.3		35.1	13.0
2002	1	12.9	383.2		15.0	480.8		
	2	7.5			21.7			10.5
	3	4.8			38.3			
	4	25.2			49.9			
	5	49.4		79.3	54.9		143.1	
	6	53.9			59.9			
	7	70.9			72.9			
	8	70.1		194.9	65.7		198.5	
	9	44.1			46.6			35.9
	10	22.7			28.2			
	11	12.4		79.2	17.9		92.7	
	12	9.4		29.8	9.8		46.4	
2003	1	10.6	410.4		12.9	509.6		
	2	17.0			24.5			30.5
	3	21.3			51.0			
	4	20.7			55.0			
	5	25.8		67.9	61.2		167.2	60.8
	6	55.6			58.1			
	7	102.0			70.2			
	8	85.5		243.0	67.6		195.9	
	9	24.6			45.3			
	10	35.3			26.6			
	11	6.9		66.8	26.2		98.1	
	12	5.1		32.7	11.1		48.4	
2004	1	14.3	498.7		13.7	504.3		15.1
	2	7.2			25.0			
	3	19.6			45.4			
	4	44.0			61.4			65.3
	5	71.9		135.5	61.3		168.0	
	6	70.0			57.6			
	7	93.6			74.3			65.1
	8	79.4		243.0	64.6		196.5	
	9	48.5			44.1			
	10	31.2			24.9			
	11	9.8		89.6	20.7		89.8	
	12	9.2		30.7	11.2		50.0	
연평균			425.4			474.5		

1. SEBAL 모형은 Landsat이나 NOAA 또는 MODIS 같은 원격탐사 위성으로부터 획득한 디지털 이미지 데이터(위성영상)를 이용하여 지표에서 일어나는 증발산과 기타의 에너지 교환을 계산하는 이미지-프로세싱 모델로, 1995년 Bastiaanssen에 의해 처음 제안되었다. 이 모형은 본 연구에서 ERDAS 프로그램 내 model maker tool을 이용하여 구현하였으며, 경안천 유역의 4개년(2001-2004) Landsat 위성영상을 이용하여 30 m×30 m 해상도 증발산량 map을 산출하였다.
2. 연구에는 Landsat TM, ETM+, Terra MODIS 위성영상을 이용하였으며, 평균 일증발산량은 1.99~3.93(mm/day)로 산정되었다. 특히 여름철 활엽수림에서의 증발산량이 가장 높은 값을 보였으며, 전체적으로 산림 지역에서의 증발산량이 가장 크게 모의되었다.
3. 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 추정한 증발산량과 SEBAL 증발산량을 비교하였다. 그 결과 연평균 Penman Monteith에 비해 MODIS는 11.5% 크게 추정되었으며, Landsat은 5.7% 낮게 추정되었다. 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. 또한 본 연구에 사용된 Landsat 영상은 높은 공간해상도를 가짐에도 불구하고, 16일을 주기로 촬영 되므로 구름이 없고 맑은 날의 영상을 얻기가 쉽지 않다. 따라서 시계열적으로 일별 영상을 획득할 수 있는 중저해상도 위성영상을 사용하는 것은 매우 효과적일 것이다. 그러나 낮은 공간 해상도를 가진다는 단점이 있기 때문에 여러 방면으로 다양한 방법을 이용하여 자료를 적극 활용해야 할 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

김주훈, 김경탁, 박정술(2005) LAI를 고려한 잠재증발산량 추정. **한국지리정보학회지**. 한국지리정보학회, 제8권 제4호, pp.1-13.

신사철, 안태용(2004) NDVI와 기온자료를 이용한 광역증발산량의 추정. **한국지리정보학회지**. 한국지리정보학회, 제7권 제3호, pp. 79-89.

신사철, 안태용(2007) 인공위성 자료를 활용한 광역증발산량의 산정방법 개발. **한국지리정보학회지**. 한국지리정보학회, 제10권 제2호, pp. 70-80.

유진웅(2003) **SEBAL 모형을 이용한 증발산량의 추정**. 석사학위 논문, 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. (2000) SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin. Turkey, *Journal of Hydrology*, Vol. 229, pp. 87-100.

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.

Brakke, T.W. and Kanemasu, E.T. (1981) Insolation estimation from satellite measurements of reflected radiation. Remote Sensing of Environment, Vol. 11, pp. 157-167.

Gautier, C., Diak, G., and Masse, S. (1980) A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. J. Appl. Meteor., Vol. 19, pp. 1005-1012.

Gurney, R.J. and Hall, D.J. (1983) Satellite-derived surface energy balance estimates in the alaskan sub-arctic. *J. Climate and Applied Met*. Vol. 22, pp. 115-125.

Heilman, J.L., Kanemasu, E.T., Bagley, J.O., and Rasmussen, V.P. (1977) Evaluating soil moisture and yield of winter wheat in the Great Plains using Landsat data. Remote Sensing of Environment, Vol. 6, No. 4, pp. 315-326.

Kustas, W.P. (1995) Recent advances associated with large scale field experiments in hydrology. Rev. of Geophys. Suppl, pp. 959-965.

Kustas, W.P. and Norman, J.M. (1996) Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. Hydrological Sciences Journal, Vol. 41, pp. 495-516.

MacFarland, M.J., Miller, R.I., and Neale, CM. U. (1990) Land surface temperature derived from SSM/I passive microwave brightness temperatures. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 28, pp. 839-845.

Moran, M.S., Jackson, R.D., Raymond, L.H., Gay, L.W., and Slater, P.N. (1989) Mapping surface energy balance components by combining LANDSAT Thematic Mapper and ground-based meteorological data. Remote Sens. Environ. Vol. 30, pp. 77-87.

Norman, J.M., and Becker, F. (1995) Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. Remote Sens. Rev., Vol. 12, pp. 159-173.

Pinker, R.T., Frovin, R., and Li, Z. (1995) A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance. Remote Sens. Environ. Vol. 51, pp. 108-124.

Price, J.T. (1982) The law and management of water resources and supply : A. S. Wisdom and J. L. G. Skeet Shaw and Sons, 275. Advances in Water Resources, Vol. 5, No. 4, pp. 255.

Reginato, R.J., Jackson, R.D., and Pinter Jr, P.J. (1985) Evapotranspiration calculated from remote multispectral and ground station meteorological data. Remote Sensing of Environment, Vol. 18, No. 1, pp. 75-89.

Sellers, P.J., Meeson, B.W., Hall, F.G., Asrar, G., Murphy, R.E., Schiffer, R.A., Bremerton, F.P., Dickinson, R.E., Ellingson, R.G., Field, C.B., Huemmrich, K.F., Justice, C.O., Melack,

J.M., Roulet, N.T., Schimel, D.S., and Try, P.D. (1995) Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models - algorithms - experiments. Remote Sens. Environ., Vol. 51, pp. 1 -17.

Soer, G.J.R. (1980) Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. Remote Sens. Environ., Vol. 9, pp. 27-45.

Sugita, M. and Brutsaert, W. (1991) Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles. Wat. Resour. Res., Vol. 27, pp. 747-752.

Taconet, O., Carlson, T., Bernard, R., and Vidal-Madjar, D. (1986) Evaluation of a surface/vegetation parameterization using satellite measurements of surface temperature. Clim. Appl. Met,. Vol. 25, pp. 1752-1767.

(접수일: 2009.3.25/심사일: 2009.4.28/심사완료일: 2010.3.8)