

Landsat TM 자료를 이용한 광역 증발산량 추정

An Assessment of Areal Evapotranspiration Using Landsat TM Data

채 호 석* / 송 영 수** / 박 재 영***
 Chae, Hyo Sok / Song, Young Soo / Park, Jae Young

Abstract

Surface energy balance components were evaluated by Landsat TM data and GIS with meteorological data. Calibration and validation for the applicability of this methodology were made through the estimating of the large-scale evapotranspiration (ET). In addition, sensitivity and error analysis was conducted to see the effects of the surface energy balance components on ET and the accuracy of each components. Bocheon-chon located on the upper part of Guem River basin was selected as the case study area. Spatial distribution map of ET were produced for five dates, Jan. 1, Apr. 3, May. 10, and Nov. 27, 1995

The study results showed that ET was greatly varied with the aspect and the land use type on the surface. In the case of having northeast and southeast in the aspect, ET was linearly increased depending on growing net radiation. While surface temperature has a high value, *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) has a low value in the vegetated area. Therefore, ground heat flux was increased but ET was relatively decreased. The results of sensitivity and error analysis showed that net radiation is most sensitive and effective, ranging from 12.5 % to 23.6% of sensitivity. Furthermore, the surface temperature, air temperature, and wind speed have the significant effects on ET estimation using remotely sensed data.

keyword : Evapotranspiration, Landsat TM, energy balance, GIS

요 지

본 연구에서는 Landsat TM 자료와 GIS 기법을 이용하여 지표면 에너지 수지 요소를 공간적으로 추출하고, 추출된 에너지 수지 요소의 적용성을 검토하기 위해서 광역 증발산량을 추정하였다. 추정결과에 대한 정확도 및 열수지 요소가 증발산량에 미치는 영향을 분석하기 위해서 민감도분석과 오차분석을 실시하였다. 연구 대상지역은 금강 상류의 보청천이며, 1995년도 1월 11일, 4월 1일, 5월 3일, 10월 10일 및 11월 27일 등에 획득된 5개의 Landsat TM 자료를 이용하였다.

연구결과 지표면의 경사 방향과 토지피복 형태에 따라 증발산량의 변화가 크게 나타났으며, 경사 방향이 북동이나 남동 방향일 경우 순방사량이 증가하게 되어 증발산량이 선형적으로 증가하였다. 또한, 산림지역에서는 지표면 온도가 낮은 반면 식생지수(*NDVI*; *Normalized Difference Vegetation Index*) 값이 증가함으로써 지표면 열전도량이 증가하게 되어 상대적으로 증발산량이 감소하는 것으로 나타났다. 민감도 및 오차분석 결과, 순방사량이 12.5% 내지 23.6%의 민감도로서 지표면 온도와 대기온도 및 풍속 등도 다른 인자에 비해 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 증발산, Landsat TM, 에너지 수지, GIS

- 한국수자원공사 수지원연구소 연구원
 Researcher, Water Resources Research Institute KOWACO Taejon, 305-390, Korea
 chaehs@kowaco.or.kr
- ** 전북대학교 공과대학 자원공학과 교수
 Professor, Dept. of Mining & Min Res Eng., Chonbuk Nat'l Univ., Chonju, 560-756 Korea
- *** 한국수자원공사 연수원 교수
 Professor, Education & Training Institute, KOWACO, Taejon, 305-390, Korea

1. 서 론

토양이나 식물 혹은 자유수면으로부터 발생하는 증발산은 이론적으로 혹은 실질적인 측면에서 지표면 열수지의 중요한 요소이다. 또한, 증발산은 대기 순환모델의 구성요소로서 뿐만 아니라 전지구적 규모의 기후 변화에 많은 영향을 주고 있으며, 수자원의 순환과정에 있어서도 중요한 부분을 차지하고 있다.

증발산량을 정확히 측정하는 것은 현실적으로 불가능하며, 더욱이 증발산량의 변화가 시·공간적인 요소에 크게 의존하기 때문에 하나의 관측값을 이용하여 유역 전체에 대한 값을 추정하는 것은 매우 부정확한 결과를 초래할 수 있다. 광역 증발산량을 추정할 경우 대부분 물리적인 개념을 가지는 경험적(empirical) 방법이 이용되고 있다. 그러나, 추정 결과를 일반화시키는 것은 매우 어렵고, 증발산량을 관측하는 지역에 대해서만 제한적으로 이용되고 있다(Engman과 Gurney, 1991) 따라서, 넓은 지역에 대한 증발산량을 추정하기 위해서는 원격탐사 자료와 지상에서 관측된 기상자료를 이용하여 에너지 수지 모델에 의한 분석 방법이 가장 효과적이며, 관측 지역의 여러 곳에서 실측된 기상자료를 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다(Kustas와 Norman, 1996; Moran 등, 1989)

1970년대 이후 각종 인공위성의 성공적인 발사를 계기로 지구에 대한 광역적인 정보 획득과 주기적인 관측이 가능해짐으로써 증발산량을 추정하기 위한 다양한 연구가 시도되었다. 1990년대 이후에는 Landsat TM과 같은 고해상도 자료와 NOAA와 같은 시간해상도가 뛰어난 자료를 이용하여 순방사량 및 지중열전도량 등 열수지 요소를 정확히 추출하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Kustas, 1995; Norman과 Becker, 1995; Sugita와 Brutsaert, 1991). 이러한 연구는 주로 회귀식을 이용하여 인공위성 자료와 지표면에서 관측된 열수지 요소와의 상관관계를 분석하여 추출된 열수지 요소의 정확도를 향상시켰다. 또한, 지표면에 입사하는 태양 복사에너지의 정량적 평가를 위해서 원격탐사 자료를 이용하고자 하는 연구도 있었다(Brakke와 Kanemasu, 1981; Tarply, 1979; Gautier 등, 1980).

그러나, 이러한 연구는 지표면에서 측정된 복사량과 원격탐사 자료에 의해 분석된 복사량의 선형적 관계식을 구하거나, 대기중에서 손실되는 복사량에 대한 정량적 분석을 위해 복사전달모델(RTM; radiative

transfer model)을 이용하여 원격탐사 자료에 대한 대기보정을 실시하기 때문에 현실적으로 적용하는 데에는 한계가 있다.

일반적으로 원격탐사 자료를 이용하여 증발산량을 추정할 경우 열적외선 영역자료와 지상에서 관측되는 기상자료를 1차원 경계층 모델의 입력자료로 이용하여 추정한다(Carlson과 Boland, 1978; Soer, 1980). Gurney와 Hall(1983)은 원격탐사 자료로부터 계산된 지표면 알베도와 온도, 그리고 기상자료를 이용하여 열수지 성분을 보정하여 일별 증발산량을 계산하였다. Price(1982)는 지표면 온도와 반사도를 열수지식을 이용하여 일별 증발산량을 계산하기 위해서 기상자료와 결합하는 해석적 방법을 제안하였다.

Jackson 등(1985)은 원격탐사 자료를 이용하여 지표의 조건에 따라 변화하는 방사량 및 지표면 온도 등과 같은 열수지 요소를 계산하고, 태양 복사에너지, 대기온도, 풍속 및 수증기압 등과 같은 지상에서 관측된 기상자료를 결합하여 증발산량을 추정할 수 있는 기법을 제안하였으며, 실제 적용되어 관측값들과 비교한 결과 약 12% 정도 과소 평가되는 것으로 나타났다(Regmato 등, 1985; Jackson 등, 1987). 한편, 국내에서도 시스템 공학연구소(1993, 1996)에서 팔당호와 수원 지역에 대한 열수지 요소를 추출하고자 하였으나, 열수지식에 필요한 각 인자의 정량적 평가와 추정에 대한 정확도는 검증하지 못하였다.

본 연구에서는 Landsat TM 자료와 GIS 기법을 이용하여 지표면에 대한 열수지 요소를 추출하고, 추출된 열수지 요소의 실제 적용성을 위하여 광역 증발산량을 추정하였다. 열수지 요소를 추정하기 위해 필요한 지표면 알베도와 식생지수와 같은 인자들을 계산하기 위하여 COST 모델(Chavez, 1996)을 이용하여 Landsat TM 자료에 대한 대기보정을 실시하였다. 아울러, Landsat TM 자료에서 추출된 열수지 요소 등 공간자료들은 GIS 자료와 통합하기 위해 격자 크기를 30m로 재배열(resampling)하였으며, Landsat TM 자료로부터 추출된 열수지 요소를 이용하여 실제 증발산량을 추정할 경우 증발산량에 미치는 오차의 범위와 영향을 분석하기 위해 민감도분석과 오차분석을 실시하였다.

2. 증발산량 추정

2.1. 열수지 요소

원격탐사 자료와 지표에서 측정된 기상자료를 이용하여 지표면 열수지를 계산하고자 할 경우 에너지 보존법칙에 의해서 지표면 열수지(surface heat balance)는 다음과 같이 표현된다(Reginato 등, 1985; Jackson 등, 1987).

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

여기서, LE 는 기화열(J/kg)과 증발율($kg/s/m^2$)의 곱으로 표현되는 잠열을 나타내며, Rn 은 지표면에 입사하는 순방사량으로 태양과 대기로부터 입사되는 태양복사에너지($0.154\mu m$)와 지표면으로부터 대기로 방사되는 지구 복사에너지($4\mu m$)의 차이이다. 또한 G 는 지표면으로부터 지중으로 전달되는 에너지이며, H 는 현열로, 단위는 모두 W/m^2 이다. 위식을 잠열 LE 로 표현하면 다음과 같다.

$$LE = Rn - G - H \quad (2)$$

(2) 식은 1차원적인 지표면 열수지식이며, 수평적으로 흐르는 열과 수증기의 흐름은 무시한 것이다.

순방사량(Rn)은 지표면으로부터 입사하는 태양복사에너지 및 지표면으로부터 반사되는 지구복사에너지의 차분으로 나타낼 수 있으며, 다음과 같다(Jackson 등, 1985).

$$Rn = Rns \downarrow - Rns \uparrow + Rnl \downarrow - Rnl \uparrow \quad (3)$$

여기서, $Rns \downarrow$ 은 입사하는 단파복사에너지, $Rns \uparrow$ 은 방출되는 단파복사에너지, $Rnl \downarrow$ 입사하는 장파복사에너지, $Rnl \uparrow$ 는 방출되는 장파복사에너지를 나타내며, $Rns \downarrow$ 과 $Rnl \downarrow$ 는 기상관측에 의해서 관측될 수 있다.

지표면에 입사하는 태양복사에너지는 지표면의 반사 특성에 비례하여 대기중으로 방출되며, 또한 지표면 온도와 비례하여 장파복사에너지를 대기로 방출하게 된다. 따라서, 순방사량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Rn = (1 - \alpha)Rns \downarrow + \epsilon_s \sigma T_s^4 - \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (4)$$

여기서, α 는 지표면 알베도, $Rns \downarrow$ 는 입사하는 단파복사에너지, ϵ_s 는 지표면의 방사율, ϵ_a 는 대기의 방

사율. T_s 는 지표면 온도(K), T_a 는 대기 온도(K). σ 는 Stefan-Boltzman 상수로, $5.57 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$ 이다.

현열(H)은 Ohm의 법칙과 유사한 형태를 가지며, 다음과 같이 나타낼 수 있다(Kustas 등, 1989).

$$H = \rho c_p (T_s - T_a) / \gamma_{ah} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 공기밀도(kg/m^3), c_p 는 공기의 정압비열($J/kg/K$), T_s 는 지표면 온도(K), T_a 는 대기 온도(K)이며, γ_{ah} 는 현열의 흐름에 대한 공기역학적 저항(s/m)이다. 공기역학적 저항은 지표면 온도와 대기 온도 사이의 차이에 의해서 안정적인 경우와 불안정한 경우에 따라 달라지게 되며, 풍속과 조위(roughness height) 및 대기의 안정도에 영향을 받게 된다.

대기가 안정적인 경우($T_s > T_a$)에는 (6)식으로 대기가 불안정한 경우($T_s < T_a$)에는 (7) 식과 같이 나타낼 수 있다(Marht와 Ek, 1984).

$$\gamma_{ah} = \{ \ln[h_m - d - z_0] / z_0 \} / k^2 \times (1 + 15R_i)(1 + 5R_i)^{1/2} / u \quad (6)$$

$$\gamma_{ah} = \{ \ln[h_m - d - z_0] / z_0 \} / k^2 \times \{ 1 - 15R_i / [1 + C(-R_i)^{1/2}] \}^{-1} / u \quad (7)$$

여기서, h_m 은 풍속과 대기 온도를 측정하는 높이(m), u 는 풍속(m/sec), k 는 von Karman 상수(0.4), R_i 는 Richardson수로 $R_i = 9.8(T_a - T_s)(z-d) / T_a u^2$ 이다. 한편 d 는 제로번 변위(m)이고 z_0 는 조위(m)로, 지표면의 파복상태에 따라 달라지게 된다(Kraus, 1972).

지중열 전도량(G)은 지표면 아래에 설치된 열 이동 센서와 토양 온도계에 의해서 측정되며, 토양의 수분 상태 등에 따라 크게 달라지기 때문에 넓은 지역에 대한 측정은 대단히 어렵다. 일별 지중열 전도량은 현열이나 순방사량에 비해 상대적으로 작기 때문에 일반적으로 무시되기도 한다(Hatfield 등, 1984). 원격탐사 자료를 이용하여 지중열 전도량을 추정할 경우 G/Rn 과 식생지수의 선형적인 관계를 이용하며, 토지피복 상태에 따른 G/Rn 을 계산하는 방법이 제안되었다(Clothier 등, 1986; Kustas와 Daughy, 1990). 원격탐사 자료를 이용하여 G 를 추정하기 위해서는 식생

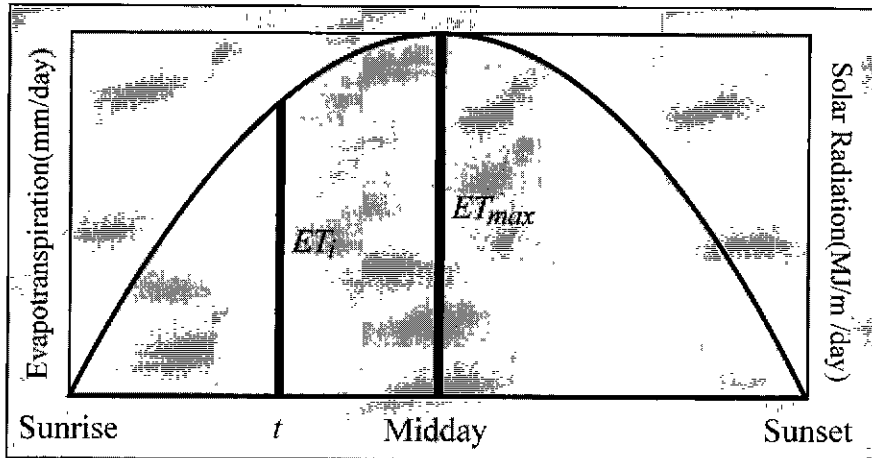


Fig. 1. Distribution of Evapotranspiration and Solar Radiation during Daytime

지수와 순방사량으로부터 다음과 같이 Kustas와 Daughtry(1990) 식을 이용하여 계산하였다.

$$G = (0.325 - 0.208NDVI) \cdot R_n \quad (8)$$

2.2. 일증발산량 추정

Landsat TM 자료를 이용하여 추출된 열수지 요소를 이용하여 증발산량을 추정할 경우, Landsat TM 자료를 획득하는 순간에 대해서 추정된 값이다. 따라서, 하루 동안의 일 증발산량으로 추정하기 위해서는 증발에 필요한 기회열을 고려해야 하며, 열수지를 고려한 평역 증발산량 ET_t 는 다음과 같이 추정된다.

$$ET_t = 3600 \frac{R_n - H - G}{(2.501 - 0.002361T_s)} \quad (9)$$

여기서, ET_t 는 Landsat TM 자료가 획득된 순간에 추정되는 증발산량(mm/h)이며, 열의 수직적인 흐름만을 고려하고 있다. 공기동력학적 표면온도(T)가 실질적인 현열의 이동을 나타내는 높이에서의 온도이지만 지표면 온도 T_s 경우 대략적으로 대기의 중립적인 조건에서는 Landsat TM 자료를 이용하여 계산된 지표면 온도와 거의 유사한 값을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 공기동력학적 지표면 온도 대신에 Landsat TM 자료의 밴드 6 자료로부터 계산된 지표면 온도를 이용하였다.

Landsat TM 자료가 획득되는 시점에서 계산된 열

수지 요소를 이용하여 일별 증발산량을 추정할 경우에 하루동안의 태양 복사에너지와 증발산량이 Fig. 1과 같은 시인형태를 가진다는 가정하에 다음과 같이 구할 수 있다(Jackson 등, 1983).

$$ET_d = \frac{2N ET_t}{\pi \sin(\pi t/N)} \quad (10)$$

여기서, N 은 일조시간(h), t 는 위성관측시간(h), ET_t 는 위성 관측시간에 대해 추정된 증발산량(mm/h)이며, ET_d 는 Landsat TM 자료로부터 추정되는 일 증발산량($mm \cdot day$)이다

3. 연구방법 및 자료

Landsat TM 자료와 GIS 기법을 이용하여 지표면 열수지 요소를 추출하기 위해서 1995년도 보정철 유역에 대한 1월 11일, 4월 1일, 5월 3일, 10월 10일 및 11월 27일 등 5개의 Landsat TM 자료를 분석하였다. Landsat TM 자료는 일본의 RESTEC (Remote Sensing Technology of Japan)에서 구입하였으며, WRS (World Reference System)의 Path 115 - Row 35에 해당하는 subscene B이다. 또한, 대기온도, 풍속 및 일조시간 등 기상자료는 1995년도 Landsat TM 자료가 획득된 시점에서 관측된 보은기상관측소의 기상자료를 이용하였다(Table 1)

Fig 2는 본 연구에 대한 흐름도를 나타낸 것으로, 1초 간격의 수치표고자료로부터 경사도와 경사방향도

Table 1. Meteorological Data Used for This Study

Date	Air Temperature (°C)			Wind Speed (m/sec)		Day Length (h)	Atmospheric Pressure(mb)
	Min.	Max.	Aver.	Max.	Aver.		
Jan. 11	-12.2	-0.2	-5.5	5.0	2.2	9.69	1025.0
Apr. 1	-3.0	11.1	4.8	6.2	2.3	12.43	1011.5
May. 3	4.3	17.6	12.8	7.0	3.1	13.58	1015.3
Oct. 10	3.3	22.6	12.1	2.7	0.7	11.37	1023.9
Nov. 27	-8.1	7.5	-1.3	4.8	2.8	9.80	1023.5

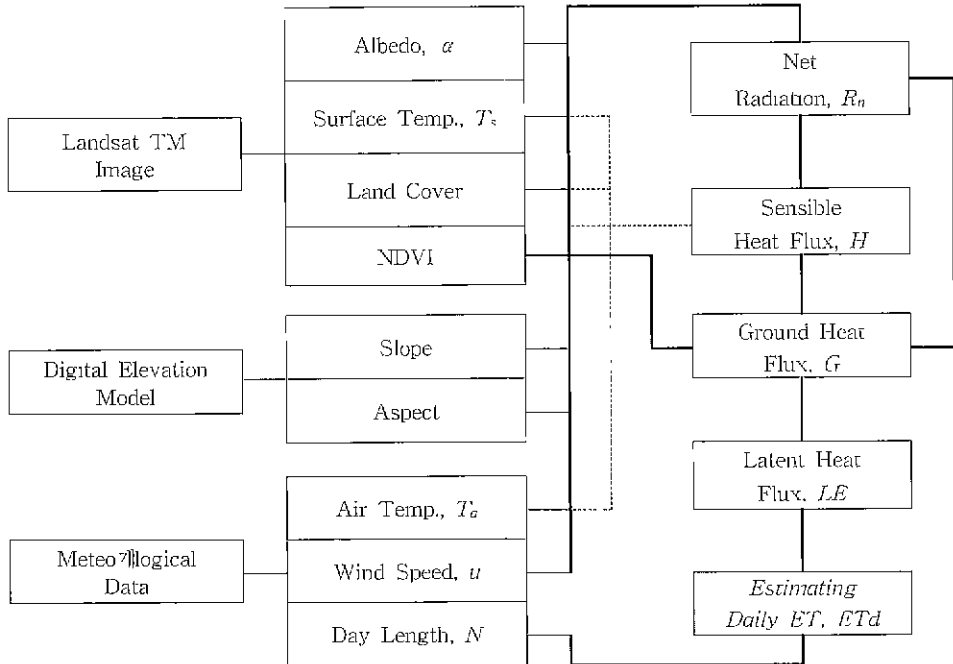


Fig. 2. Scheme for Estimating Areal Evapotranspiration Using Landsat TM Data

를 작성하였다. 또한 Landsat TM 자료로부터 토지 피복도를 추출하고, 기하학적 보정과 대기보정을 실시한 후 지표면 알베도, 지표면 온도 및 식생지수 등에 대한 정보를 추출하였다. 이러한 자료들과 Table 1과 같은 기상자료를 이용하여 잠열을 계산하고, 계산된 잠열을 이용하여 보정된 유역에 대한 일 증발산량을 추정하였다. 아울러, 민감도분석과 오차분석을 실시하여 추정된 열수지 요소가 증발산량에 미치는 영향을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 일증발산량 추정

본 연구에서 개발된 기법의 적용성을 검토하기 위해 서 지표면 열수지를 이용한 광역 증발산량을 추정하였다. 광역 증발산량을 추정하기 위해서 Landsat TM 자료를 이용하여 열수지 요소를 추출한 후, 기화열과 증발율의 곱으로 표현되는 잠열을 계산하였다. 계산된 잠열은 증발에 필요한 기화열로 나누어 증발산량을 추정하였으며, 추정된 증발산량은 Landsat TM자료가 획득되는 순간에 대한 값이다. 따라서, 이 값을 (10)

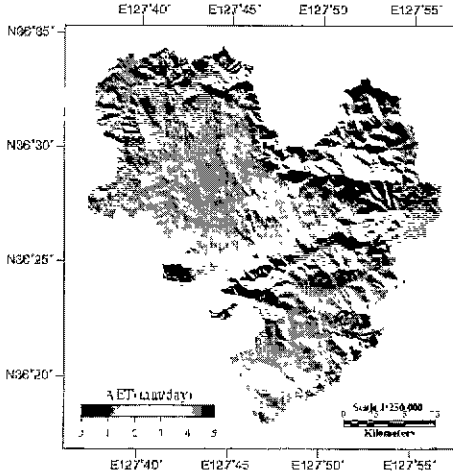


Fig. 3. Estimated AET Distribution Map in Jan. 11, 1995

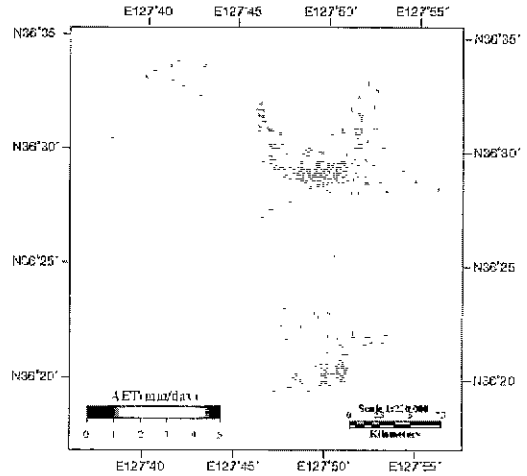


Fig. 4. Estimated AET Distribution Map in Apr 1, 1995

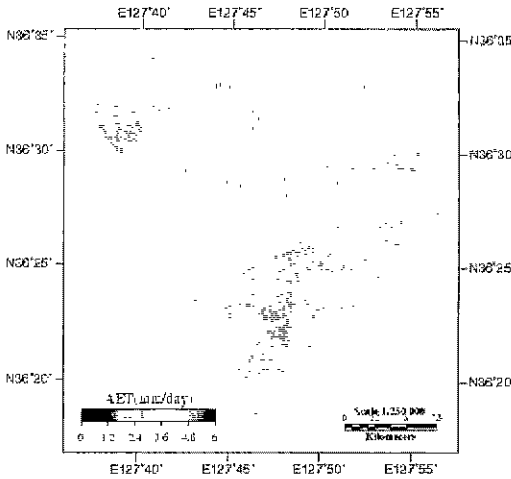


Fig. 5. Estimated AET Distribution Map in May 3, 1995

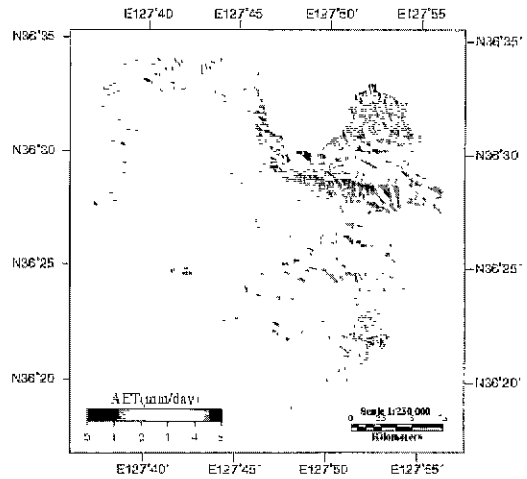


Fig. 6. Estimated AET Distribution Map in Oct. 10, 1995

식을 이용하였으며, 그 결과는 Fig. 3~7에 나타났다.

Fig. 3은 1월 11일의 분포 양상을 나타낸 그림으로, 전체적으로 산림지역을 제외하면 $1.8mm/day$ 이하의 값들이 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 산림지역의 경우도 경사 방향에 따라 차이가 뚜렷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있는 데, 이는 경사 방향에 따

른 순방사량의 차이로 인해 나타나고 있다 즉, 경사 방향이 북동이나 남동 방향을 가질 경우 북서나 남서 방향에 비해서 순방사량은 상대적으로 커지며, 따라서 증발산량이 크게 나타나고 있다. 또한, 태양 고도각이 작아짐으로 인해 경사 방향에 따른 차이가 더욱 증가하고 있다. Fig. 4는 4월 1일의 계산 결과에 대한 공

간 분포도르써, 산림지역에서 경사 방향에 따라 증발산량에 미치는 영향이 매우 커지고 있으며, 경사방향에 북동이나 남동 방향일 경우 약 $3.8mm/day$ 정도인 반면, 순방사량이 작아지는 북서나 남서방향에서는 $1.9mm/day$ 정도로 매우 낮은 값을 보이고 있다. 중앙부의 논이나 밭 지역에서는 $2.6mm/day$ 내지 $2.8mm/day$ 의 증발산량이 추정되었다.

Fig. 5는 5월 3일의 계산 결과를 보이고 있는 그림으로, 전반적으로 추정된 증발산량이 4월 1일에 비해 다소 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 중앙부에서는 $3.1mm/day$ 정도의 증발산량이 넓게 분포하고 있다. 산림지역에서는 북동이나 남동 경사 방향을 가지고 있는 지역의 경우 $4.6mm/day$ 내지 $4.7mm/day$ 정도의 높은 값이 분포하고 있지만 북서나 남서 경사 방향을 가지는 경사면에서는 $1.7mm/day$ 내지 $2.0mm/day$ 정도의 낮은 값이 분포하고 있다. 따라서 경사 방향에 의해서 증발산량 차이가 하루에 $1.9mm/day$ 내지 $2.7mm/day$ 정도 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

10월 10일 결과는 Fig 6에 나타나 있는 데, 5월 3일의 결과에 비해 증발산량 값이 다소 작아지고 있는 것을 알 수 있지만, 5월 3일의 결과와 비슷한 공간분포를 보이고 있다. 즉, 북동이나 남동 경사 방향을 가지고 있는 산림지역에서 $3.2mm/day$ 이상의 높은 값이 분포하고 있는 반면, 북서나 남서 경사 방향을 가진 경사면에서는 $1.8mm/day$ 이하의 낮은 값을 보이고 있다. 그러나, 경사방향에 따른 값의 차이는 5월 3일의 결과보다는 다소 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 11월 27일에 대해 추정된 증발산량의 공간분포를 보이는 그림으로, 유역 중앙부의 논지역에서 증발산량의 차이가 일정한 분포를 보이고 있으며, 토지피복별 증발산량의 차이가 거의 나타나지 않고 있다.

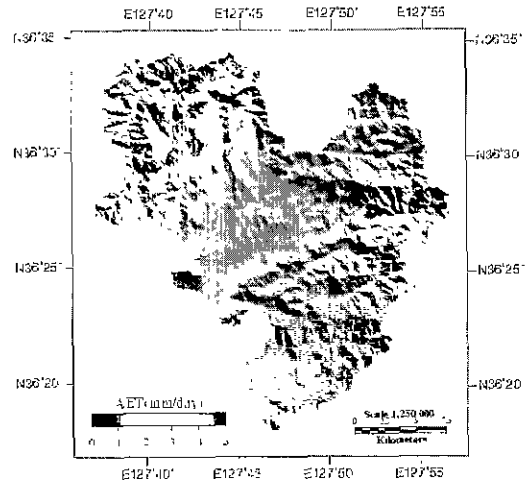


Fig. 7. Estimated AET Distribution Map in Nov. 27, 1995

그러나, 산림지역의 경우 경사 방향에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 북서나 남서 방향의 경사면을 가지는 지역에서는 $0.3mm/day$ 이하의 낮은 값이 분포하고 있지만, 북동이나 남동 방향의 경사면을 가지는 곳에서는 $3.2mm/day$ 의 높은 값이 나타나고 있다.

Table 2는 Landsat TM 자료를 이용하여 추정된 각 토지피복별 증발산량의 변화량을 요약한 것이다. 1월 11일의 경우 산림에서는 $1.39mm/day$ 로 저수지나 하천을 포함한 수역에서 나타나고 있는 $1.60mm/day$ 보다 약 $0.21mm/day$ 가 작게 나타나고 있다. 또한 논이나 도시지역에서는 거의 비슷한 값을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

4월 1일의 결과에서 논 지역에서 증발산량이 가장 높게 나타나고 있으며, 수역과 산림지역에서 증발산량 차이가 $0.12mm/day$ 로 1월 11일보다 다소 작아지고 있

Table 2. Results of Estimated AET(mm/day) for Each Land Use Type

Date \ Tvp	Forest	Water	Paddy	Urban	Upland	Average
Jan. 11	1.39	1.60	1.48	1.47	1.57	1.37
Apr 1	2.85	2.97	2.99	2.92	2.94	2.90
May 3	3.75	3.81	3.80	3.79	3.96	3.75
Oct. 10	2.42	2.74	2.71	2.69	2.90	2.47
Nov. 27	1.25	1.53	1.48	1.46	1.57	1.30

다. 이러한 결과는 지표면 온도의 상승으로 인해서 나타나고 있으며, 주거지역과 밭에서 증발산량이 각각 2.92mm/day 와 2.94mm/day 로 추정되었다. 또한 유역 전체에 대한 평균 증발산량은 2.90mm/day 로 1월 11일의 결과보다 약 1.53mm/day 정도가 증가하였다.

5월 3일의 계산결과를 보면, 밭에서 증발산량이 3.96mm/day 로 가장 크게 나타나고 있으며, 산림에서는 3.75mm/day 로 가장 작게 추정되었다. 밭에서 증발산량이 높게 나타나고 있는 것은 대부분 밭이 주로 남동 방향의 경사를 가지고 있어 순방사량이 증가하기 때문이다. 그리고 물, 논 및 주거지역에서 각각 3.81mm/day , 3.80mm/day 및 3.79mm/day 로 계산되었으며, 유역 평균 증발산량은 3.75mm/day 로써 가장 높은 값을 나타내고 있다.

10월 10일의 경우에도, 값의 차이는 있지만 5월 3일의 계산 결과와 비슷한 양상을 보이고 있다. 즉, 밭 지역에서 2.90mm/day 로 가장 높은 증발산량이 추정되었으며, 산림에서는 2.42mm/day 로 가장 낮은 값이 추정되었다. 물과 논 및 주거지역에서는 각각 2.74mm/day , 2.71mm/day 및 2.69mm/day 정도의 계산 결과를 얻었다. 10월 10일의 유역 평균 증발산량은 2.47mm/day 이다. 11월 27일의 계산결과를 살펴보면, 밭에서 증발산량이 1.57mm/day 로 가장 높게 추정되었으며, 산림지역에서 1.25mm/day 로 가장 낮은 값을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이때, 유역의 평균 증발산량은 1.30mm/day 로 추정되었으며, 이 값은 본 연

구에서 이용한 자료 중에서 가장 낮은 값이다.

전체적으로 산림지역에서는 순방사량이 큰 반면 지표면 온도가 상대적으로 다른 토지피복 형태보다 작고 식생지수가 커지므로 인해 지중열 전도량에 영향을 주어 증발산량이 가장 낮게 추정되고 있음을 알 수 있다. 또한, 산림지역에서는 주로 경사 방향에 따라 증발산량의 변화가 크게 나타나며, 증발산량의 최소값과 최대값의 차이가 다른 토지피복 형태보다 상대적으로 크게 나타나기 때문에 평균 증발산량이 작게 나타나고 있다.

특히, 물이나 밭 지역에서 식생지수가 낮게 계산되고 (-) 값을 가지는 경우 지중열 전도량은 크게 달라지게 된다. 만약, 식생이 없는 경우와 식생의 활성도가 좋은 경우를 가정하여 식생지수를 1과 -1로 고려할 경우, 지중열 전도량값의 차이는 약 4.5배 정도가 발생하게 된다. 또한, 1월 11과 4월 11일을 제외하면, 밭에서 증발산량이 상대적으로 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있는 데, 이는 식생지수에 의한 지중열 전도량의 변화와 경사방향에 따라 순방사량이 증가하기 때문이다.

4.2. 민감도 분석

본 연구에서 추정된 열수지 요소에 대한 정밀도와 증발산량에 미치는 영향을 분석하기 위해서 민감도를 실시하였다. 민감도분석을 위해서 Landsat TM 자료로부터 계산된 현열 및 지중열 전도량과 같은 열수지 요소를 이용하였으며, 현열을 추정하기 위해서 이용된

Table 3. Parameters or Variables Used in the Sensitivity Analysis

Parameter	Unit	Reference Value				
		Jan. 11	Apr. 1	May. 3	Oct. 10	Nov. 27
R_n	W/m^2	151.8	325.0	404.8	275.0	141.7
G	W/m^2	35.8	75.0	78.3	43.2	29.7
T_s	$^{\circ}C$	38.2	8.66	16.58	14.65	1.20
T_g	$^{\circ}C$	-5.5	4.8	12.8	12.1	-1.3
u	m/sec	2.2	2.3	3.1	0.7	2.8
h	m	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
z	m	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
P_i	kPa	102.5	101.8	101.5	102.4	102.4
LE	W/m^2	88.1	185.8	247.9	219.1	60.0

Table 4. Sensitivity Analysis Results with $\pm 10\%$ Range of Variation in the Parameters or Variables from Reference Values

Parameter		Date				
		Jan. 11	Apr. 1	May 3	Oct. 10	Nov. 27
Rn	error(W/m^2)	± 15.8	∓ 32.5	∓ 40.8	∓ 27.5	∓ 14.2
	sensitivity(%)	± 17.2	17.5	∓ 16.5	∓ 12.5	∓ 23.6
G	error(W/m^2)	± 3.6	± 7.5	∓ 7.8	± 4.3	± 3.0
	sensitivity(%)	± 4.1	± 4.0	∓ 3.2	± 2.0	± 5.0
T_s	error(W/m^2)	∓ 7.1	± 14.4	± 36.5	± 7.3	± 2.5
	sensitivity(%)	∓ 6.4	± 7.8	± 14.5	∓ 3.3	± 4.2
T_a	error(W/m^2)	± 9.2	∓ 8.0	∓ 27.8	∓ 6.0	± 2.7
	sensitivity(%)	± 10.4	∓ 4.3	∓ 11.2	∓ 2.7	± 4.5
u	error(W/m^2)	± 2.8	± 6.4	± 8.2	± 1.3	± 5.2
	sensitivity(%)	± 3.2	∓ 3.5	± 3.3	∓ 0.6	± 8.7
h	error(W/m^2)	1.4	2.4	3.1	± 0.5	1.9
	sensitivity(%)	± 1.2	∓ 1.3	± 1.2	∓ 0.2	3.2
z	error(W/m^2)	-1.0	-2.3	-2.9	-0.4	-1.8
	sensitivity(%)	-1.1	-1.2	-1.2	∓ 0.2	-3.1

풍속과 지표면 온도 및 대기압 등은 기상관측에 의해서 얻어진 자료를 이용하였다.

민감도 분석은 순방사량 등 8개의 변수를 이용하였으며(Table 3), 5개의 Landsat TM 자료에 대해서 실시하였다. 또한, 각 변수에 10%의 오차를 포함시켰으며, 각 변수에 대해서는 일정한 값을 가지고 서로 독립적인 변수로 작용한다고 가정하는 상대적인 민감도 분석 방법을 채택하였다. 아울러 민감도 분석을 위해서 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$LE = Rn - G - \frac{\rho C_p (T_s - T_a) k^2 u}{[\ln(h_m - d + z_0)/z_0]^2} \quad (11)$$

Table 4는 민감도 및 오차분석 결과를 나타낸 것으로, 1월 11일 경우 각 변수를 이용하여 계산되는 잠열은 $88.1W/m^2$ 이다. 가장 큰 영향을 미치는 변수는 순방사량으로 나타났으며, 이때 $15.8W/m^2$ 의 잠열이 변화하여 17.2% 정도의 민감도를 보이는 것을 알 수 있다 또한 지표면 온도와 대기온도가 $7.2W/m^2$ 와 $9.2W/m^2$ 의 변화를 초래하여 각각 6.4%와 10.4%의 민감도를 나타내고 있으며, 그 외의 인자들은 5% 미

만의 민감도를 보이고 있다.

4월 1일의 분석결과에서도 순방사량이 $32.5W/m^2$ 의 높은 오차를 보이고 있으며, 17.5%의 민감도를 나타내고 있다. 또한, 지표면 온도의 경우에는 $14.4W/m^2$ 로 약 7.8%의 민감도를 보이고 있는 반면, 대기온도에 있어서는 $8.0W/m^2$ 의 오차를 나타내어 4.3%의 민감도를 보이고 있다. 5월 3일에 있어서도 거의 비슷한 양상을 보이고 있는 데, 순방사량의 경우 $40.8W/m^2$ 의 오차와 16.5%의 민감도를 각각 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 지표면 온도와 대기온도에 의한 영향이 매우 커지고 있는 데, 지표면 온도의 경우 $36.5W/m^2$ 의 오차를 보여 14.5%의 민감도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 대기온도에 있어서는 $27.8W/m^2$ 정도가 변화하는 것으로 나타나 11.2%의 민감도를 보이고 있으며, 5개의 자료 중에서 가장 큰 민감도를 가지고 있는 것을 알 수 있다.

10월 10일의 분석결과를 보면, 순방사량의 오차가 다소 감소하는 양상을 보이고 있다. 즉, $27.5W/m^2$ 정도의 오차를 가지고 있어 12.5%의 민감도를 나타내고 있으며, 지표면 온도와 대기온도의 민감도가 다소 다른

자료보다도 작은 3.3% 이하를 나타내고 있다. 11월 27일의 경우에는 순방사량의 민감도가 가장 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있으며, 오차는 $14.2W/m^2$ 이다. 또한, 풍속의 민감도가 8.7% 정도로 높게 나타나고 있으며, 이때 잠열에 미치는 양이 $5.2W/m^2$ 이다.

Fig. 8은 민감도분석 및 오차분석에 사용된 각 인자들에 대한 결과를 나타낸 그림으로, 5개의 자료에서 모두 순방사량에 대한 민감도가 가장 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 4월1일과 5월3일의 결과에서는 지표면 온도도 상당한 영향을 미치는 것으로 나타나고 있지만, 1월 11일에서는 대기온도가 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그러나, 11월 27일의 분석 결과에서는 풍속이 더 큰 영향을 주는 것으로 나타나고 있는데, 이는 풍속에 의한 영향은 거의 일정하지만 상대적으로 잠열 성분이 작기 때문에 나타나고 있다.

일반적으로 순방사량의 측정 오차는 10% 정도인 것으로 알려져 있으며, 본 연구결과 이러한 오차는 $14W/m^2$ 내지 $40W/m^2$ 정도의 잠열에 대한 오차를 발생시킨다. Landsat TM 자료를 이용하여 지표면 온도를 추정할 경우 $1^{\circ}C$ 이하로 추정하는 것은 어려우며, 물체의 복사율이 ± 0.01 달라지게 되면 지표면 온도는 $\pm 0.07^{\circ}C$ 의 변화가 나타나게 된다. 또한, 지표면 온도의 경우에는 $\pm 0.2^{\circ}C$ 의 오차를 가지고 측정되며, 풍속의 경우에는 $12.0m/sec$ 보다 큰 경우에는 $\pm 1.0m/sec$ 의 오차를 가진다. Landsat TM 자료를 이용하여 지표면 온도를 추정하는 경우에 정확한 대기

보정을 실시한 후에도 $\pm 1.5^{\circ}C$ 의 오차를 항상 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

따라서 민감도 분석에서 알 수 있듯이 순방사량, 지표면 온도 및 대기온도 그리고 풍속 등이 Landsat TM 자료를 이용하여 증발산량을 산정하는 경우에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

5. 결 론

Landsat TM 자료와 GIS를 이용하여 지표면 열수지 요소를 공간적으로 추출할 수 있는 기법을 개발하고, 개발된 기법의 적용성과 정밀도를 검증하기 위해서 광역 증발산량을 추정하였다. 이를 위해 1995년도 보청천 유역에 대해 획득된 5개의 Landsat TM 자료를 이용하여 열수지 요소와 관련된 인자들을 추출하였다. 또한, 실제 기상 관측자료와 Landsat TM 자료로부터 광역 증발산량을 추정하였다.

Landsat TM 자료로부터 추정된 증발산량은 1월 11일의 경우 $137mm/day$, 4월 1일의 경우 $290mm/day$, 5월 3일의 경우 $3.75mm/day$, 10월 10일의 경우 $2.47mm/day$ 및 11월 27일의 경우 $1.39mm/day$ 로 추정되었다. 이러한 증발산량의 변화는 지표면의 경사 방향과 토지피복 형태에 따라 크게 차이가 발생하였다. 즉, 경사 방향이 북동이나 남동 방향일 경우 순방사량이 증가하게 되어 증발산량이 선형적으로 증가하였으며, 산림지역의 증발산량이 지표면 온도가 낮은 반면 식생지수가 증가함으로써 지중열 전도량이 증가하게 되어 상대적으로 증발산량이 감소하

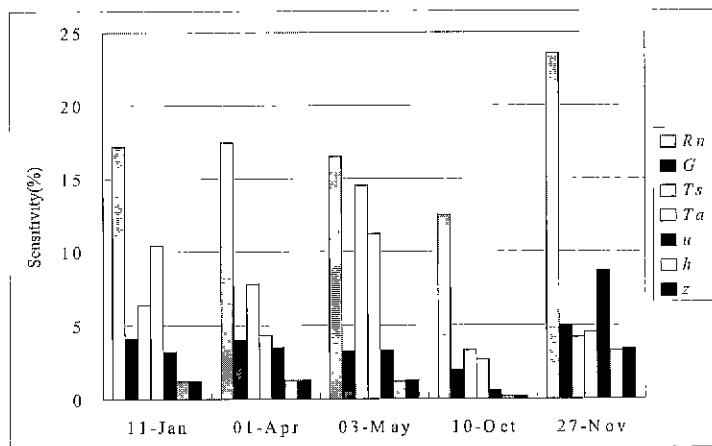


Fig. 8. The Comparison of Sensitivity Analysis Results for Each Parameters

는 것으로 나타났다.

열수지 요소에 대한 정확도와 증발산량에 해당하는 잠열에 미치는 영향을 분석하기 위해 민감도 및 오차 분석을 실시한 결과, 순방사량이 12.5% 내지 23.6%의 민감도로서 지표면 온도와 대기온도 및 풍속 등도 다른 인자에 비해 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서, Landsat TM 자료를 이용하여 지표면 열수지 요소를 정확히 추출하고 이를 이용하여 광역에 대한 증발산량을 추정할 경우 순방사량과 같은 기상적인 요소를 정확히 측정하고 아올러 인공위성 자료에서 추출되는 알베도나 지표면 온도 등에 대한 정확도를 향상시킬 경우 광역 증발산량에 대한 보다 정확한 공간분포를 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 시스템공학연구소 (1993). 원격탐사 및 GIS를 이용한 하천유역의 환경변화 조사기법 연구(II), 과학기술처.
- 시스템공학연구소 (1996) 환경정보관리를 위한 GIS 개발(III), 과학기술처, pp. 367~530.
- Brakke, T.W., and Kanemasu, E.T. (1981). "Isolation estimation from satellite measurement of reflected radiation" *Remote Sens. Environ.*, Vol. 11, pp. 157~167
- Carlson, T.N., and Boland, F.E. (1978). "Analysis of urban-rural canopy using a surface heat flux/temperature model" *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 17, pp. 998~1013
- Chavez, Jr., P.S. (1996). "Image-based atmospheric corrections-Revisited and Improved." *Photo. Engin. Remote Sensing*, Vol. 62, pp. 153~162
- Clothier, B.E., Clawson, K.L., Moran, M.S., Reginato, R.J., and Jackson, R.D. (1986). "Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa." *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 37, pp. 319~329.
- Engman, E. T. and Gurney, R. J. (1991). *Remote sensing in hydrology*, Chapman & Hall, New York.
- Gautier, C., Diak, G., and Masse, S. (1980). "A simple model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 19, pp. 1005~1011.
- Gurney, R.J. and Hall, D.K. (1983). "Satellite-derived surface energy balance estimates in the Alaskan sub-arctic." *J. Climate Meteorol.*, Vol. 22, pp. 115~125.
- Hatfield, J.L., Reginato, R.J., and Idso, S.B., (1984). "Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops" *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 32, pp. 41~53.
- Jackson, R.D., Hatfield, J.L., Reginato, K.J., Idso, S.B., and Pinter, Jr., P.J. (1983). "Estimates of daily evapotranspiration from one time of day measurements." *Agri. Water Mang.*, Vol. 7, pp. 351~362.
- Jackson, R.D., Pinter, P.J. Jr., and Reginato, R.J. (1985). "Net radiation calculated from remote multispectral and ground station meteorological data." *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 35, pp. 153~164.
- Jackson, R.D., Moran, M.S., Gay, L.W., and Raymond, L.H. (1987) "Evaluating evaporation from field crops using airborne radiometry and ground-based meteorological data." *Irrig. Sci.*, Vol. 8, pp. 81~90.
- Kraus, E.B. (1972), *Atmospheric-Ocean interaction*, Clarendon Press, Oxford
- Kustas, W.P., Jackson, R.D., and Asrar, G. (1989). "Estimating surface energy balance components from remotely sensed data." *Theory and Application of Optical Remote Sensing*, edited by G. Asrar, New York, John Wiley and Sons, pp. 604~627.
- Kustas, W.P., and Daughy, C.S.T. (1990). "Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data." *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 49, pp. 205~233
- Kustas, W.P. (1995). "Recent advances associated with large scale field experiments in hydrology." *Rev. Geophys. Suppl.*, pp. 959~965.

- Kustas, W.P. and Norman, J.M. (1996). "Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 41, pp. 495~516.
- Marht, L., and Ek, M. (1984). "The influence of atmospheric stability on potential evaporation." *J Climate Appl Meteorol.*, Vol. 23, pp. 222~234
- Moran, M.S., Jackson, R.D., Raymond, L.H., Gay, L.W, and Slater. P.W. (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.
- Price, J.C (1982). "Estimation of regional scale evaporation through analysis of satellite thermal-infrared data." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-20, 286-292.
- Reginato, R.J., Jackson, R.D., and Pinter, P.J. Jr. (1985). "Evapotranspiration calculated from remote multispectral and ground station meteorological data." *Remote Sens. Environ.*, Vol. 18, pp. 75~89.
- 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" *Water Resources Res.*, Vol. 27, pp. 747~752
- Tarply, J.D. (1979). "Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data." *J. Appl. Meteorol.*, Vol 18, pp. 1172~1181.
- (논문번호 00-019/접수:2000.03.17/심사완료:2000.06.27)