

다중 위성 자료를 이용한 한반도에서의 실제 증발산량 산출에 관한 연구

Estimation of Actual Evapotranspiration using Multi-Satellite Data over Korea Peninsula

이민지* · 한경수** · 김인환***
Lee, Min Ji · Han, Kyung Soo · Kim, In Hwan

要 旨

증발산(Evapotranspiration)은 생태학·수문학적으로 지표 특성을 표현하는 변수로서 지구 물 순환과 에너지 수지에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 높은 지표거칠기를 고려하여 에너지 수지식을 기반으로 실제 증발산량을 산출하였다. 2009년 한반도를 대상으로 다양한 위성 자료와 관측 자료를 이용하여 연구를 수행하였다. 실제 증발산량 산출에 있어 중요한 변수인 현열은 다양한 입력 변수가 사용되어 계산 과정이 복잡하므로 본 연구에서는 경험적 계수인 B를 사용하여 현열 산출을 단순화하였다. 또한 본 연구에서는 현열 산출 시 중요한 변수인 공기역학적 저항을 고려하여 높은 지표거칠기를 반영한 실제 증발산량 모델을 제시하였다. 산출된 실제 증발산량은 Priestley-Taylor 가능 증발산량을 통한 검증(RMSE 1.0179mm/day, BIAS 0.4516mm/day)을 수행하였으며 높은 지표거칠기를 고려한 실제 증발산량이 전반적으로 잘 산출되었음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 실제증발산, 지표거칠기, 에너지수지식, B 계수

Abstract

Evapotranspiration (ET) is an important process across a wide range of disciplines, including ecology, hydrology and meteorology. In this study, daily actual evapotranspiration (ETA) is based on energy balance equation and considering high surface roughness length to estimate. This study was used a variety of satellite data and ground observation data in Korea Peninsula from 1 January to 31 December 2009. In this study, sensible heat flux is one of the important parameters of ETA. Measurements of sensible heat flux are, however, complex and can't be easily obtained. So this study was used an empirical coefficient B to simplify estimate of sensible heat flux. The coefficient B in the ETA model requires a careful definition of aerodynamic resistance. So this study proposed ETA model considering aerodynamic resistance and high surface roughness length. This study was conducted validation in comparison of the proposed daily ETA results with Priestley-Taylor ETp.

Keywords : Actual Evapotranspiration, Surface Roughness Length, Energy Balance Equation, B Coefficient

1. 서 론

증발산은 전지구적인 기후 시스템에 있어서 지표와 대기의 에너지 교환을 담당하며 물 순환 과정의 주요인자이다(Han et al., 2010). 이는 지표 식생의 광합성과 CO₂ 교환에 중요한 역할을 한다. 증발산은 에디 공분

산법을 이용한 플릭스 타워 관측, 증발산량계를 이용한 산출과 Penman(1948), Monteith(1965), Priestley and Taylor(1972) 등 경험적 방법에 의한 추정이 대부분이지만 이는 지상 관측에 의존한 지점관측이므로 지점에 대한 해당 값만을 얻을 수 있다는 한계점이 있다. 또한 관측 값의 시·공간적 대표성이 부족하며 조밀한 관측

2011년 11월 11일 접수, 2011년 12월 9일 채택

* 학생회원 · 부경대학교 대학원 공간정보시스템공학과 석사과정(lee.minji87@gmail.com)

** 교신저자 · 부경대학교 환경해양대학 공간정보시스템공학과 부교수(kyung-soo.han@pknu.ac.kr)

*** 부경대학교 대학원 공간정보시스템공학과 박사과정(kim.inhwan82@gmail.com)

망의 구축에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 증발산량 산출을 위한 기본변수들(Land Surface Temperature, Net Radiation, Surface Albedo)과 보조 변수들(Normalized Difference Vegetation Index, Land cover map)에 대해 위성 자료를 사용하여 지점 관측의 한계점을 극복하였다. 또한 기존의 연구(Seguín and Itier 1983; Vidal and Perrier, 1989)는 복잡한 지형이 아닌 wheat, cropland, pasture 등 낮은 지표거칠기에 대한지역적인 증발산량 산출이 대부분이며 이는 높은 지표거칠기에 해당하는 증발산량 산출 시 공기역학적 저항과 풍속 등 다양한 요소에 의해 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 높은 지표거칠기와 지표 형태를 고려한 일 실제 증발산량을 산출을 수행하고자 한다. 실제 증발산량은 어떤 지역에서 실제 일어난 증발산량으로서 본 연구에서는 Jackson et al.(1977)에 의해 제시된 에너지 수지식(식 (1))을 기반으로 실제 증발산량을 산출하였다.

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

여기서 R_n 은 순태양 복사(W/m^2), LE 와 H 는 각각 증발에 의한 잠열(W/m^2)과 현열(W/m^2), G 는 지열(W/m^2)을 나타내며, 지열 추정 시 일 단위를 사용하였던 이전 연구(Jackson et al., 1977; Seguin and Itier 1983)에서 하루 동안의 지열 값은 거의 0으로 무시 가능하므로 본 연구에서도 지열 값을 무시하였다.

2. 연구자료 및 연구영역

본 연구는 한반도(경도 124.49°E~130.00°E, 위도 32.51°N~40.00°N)영역(그림 1)의 2009년 1월부터 12월을 대상으로 연구를 수행하였으며 실제 증발산량 산출을 위해 SPOT VEGETATION(VGT), Terra/Aqua MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MTSAT-1R, ECOCLIMAP-1 자료를 사용하였다. 또한 실제 증발산량 산출과 검증에 위한 보조자료로서 지상관측 자료를 사용하였다.

본 연구에서는 10일 합성자료인 SPOT VGT의 NDVI S10 MVC(Maximum Value Composite)자료를 사용하였다. MVC 자료는 전처리 과정을 수행하였지만 제거되지 못한 불특정 요소에 의해 오차가 발생하여 NDVI가 급격히 낮아지므로 본 연구에서는 다중다항회귀식(염종민, 2006)을 통한 NDVI 보정 자료를 사용하였다. MODIS는 Terra/Aqua 위성에 탑재된 다중분광

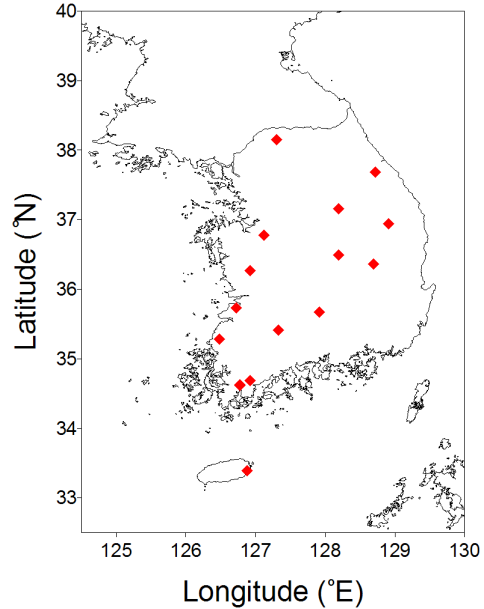


그림 1. 연구 영역(경도 124.49°E~130.00°E, 위도 32.51°N~40.00°N)과 검증 수행을 위한 16개 지점

채널 센서로서 본 연구에서는 LST(Land surface Temperature), LandCover 1km 자료를 사용하였다. MTSAT-1R은 일본 기상청에서 운영하고 있는 다목적 위성으로서 증발산량 산출을 위하여 Clear sky와 Cloudy sky 두 조건의 지면도달일사량 산출을 위해 채널 자료를 사용하였다. ECOCLIMAP-1은 1km 해상도를 가지는 지표산출물을 제공하며 본 연구에서는 지표 거칠기(surface roughness length)를 사용하였다.

3. 연구방법

본 연구에서는 Seguin and Itier(1983)의 알고리즘(식 (2))을 기본으로 실제 증발산량을 산출하였다.

$$ET_a - R_n + G = -B \cdot (T_s - T_a) \quad (2)$$

여기서 ET_a 는 실제 증발산량(mm/day), R_n 은 순태양 복사(mm/day), T_s 는 지표 온도(K), T_a 는 기온(K), B 는 경험적 계수(mm/day·K)를 나타낸다. 지표 온도는 MODIS LST를 사용하였으며 기온은 지상관측 자료를 사용하였다.

실제 증발산량 산출 요소 중의 하나인 순태양 복사의 산출은 식 (3)과 같다. 식 (3)의 R_n 은 순태양 복사

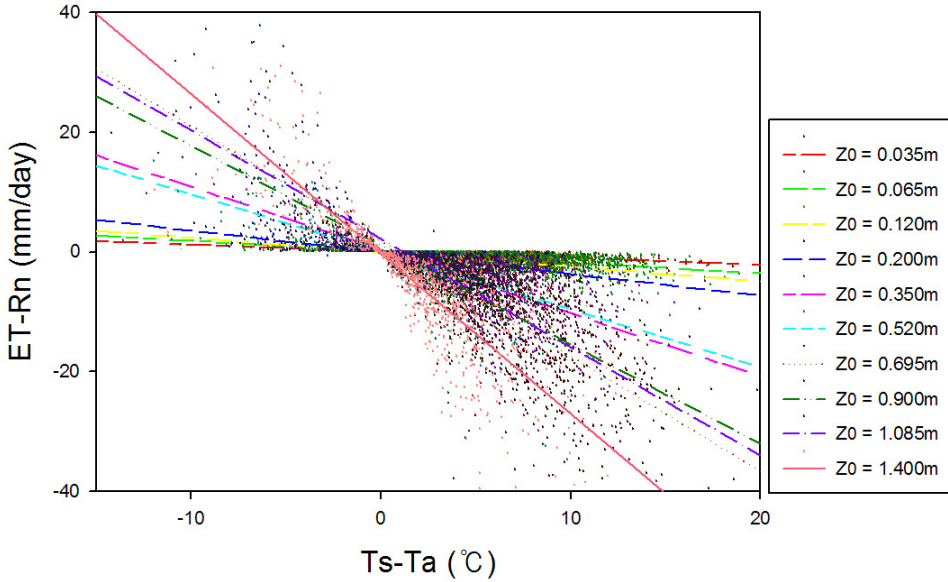


그림 2. 각 지표거칠기(z_0)에 따른 ‘ $ET_a - R_n$ ’와 ‘ $T_s - T_a$ ’ 사이의 선형관계를 통한 B 계수 산정

(mm/day), R_s 는 일사량(mm/day), α 는 반사도, R_{nl} 은 순 장파복사(mm/day)이다.

$$R_n = R_s \cdot (1 - \alpha) + R_{nl} \quad (3)$$

순태양 복사는 순 단파복사와 순 장파복사로 이루어지며 이는 지표면으로 들어오는 단파복사와 지표면에 도달한 후 나가게 되는 반사도를 고려하여 산출된다. 순 장파복사는 순태양 복사를 산출함에 있어 그 에너지가 작고 영향력이 미비하여 본 연구에서는 간단한 Bulk 식(Jensen et al., 1974)을 사용하여 순 장파복사를 산출하였다. 반사도는 SPOT VGT의 b2, b3 채널을 사용하였으며 산출된 각 요소들은 서로 다른 단위와 시·공간 해상도를 가지므로 이를 일치시킨 후 순태양 복사를 산출하였다.

현열의 계산은 복잡하고 산출이 쉽지 않으므로(Allen et al., 1998) 본 연구에서는 현열을 경험적 계수 B로 단순화하여 산출하였다. B 계수는 ‘ $ET_a - R_n$ ’과 정오에 관측한 ‘ $T_s - T_a$ ’의 순간 값 사이에 대한 선형관계를 기본으로 정의된다(Jackson et al., 1977).

B계수 산출 시 사용되는 변수 중 공기역학적 저항 ra(aerodynamic resistance)는 현열 자료 구축에 중요한 변수(Seguín and Itier, 1983)로서 식생의 높이와 바람에 많은 영향을 받게 된다. 풍속계 높이가 고정되어 있는 경우 높은 지표거칠기에서 ra 값에 대해 오차가 발생하며, 바람도 ra의 값에 상당한 영향을 미친다. 이는

표 1. 각 지표거칠기(z_0) 별 대표하는 B 계수

Z0(m)	Estimated B coefficient
0.035	-0.3161
0.065	-0.3185
0.120	-0.3545
0.200	-0.4748
0.350	-0.6383
0.520	-0.7120
0.695	-0.9523
0.900	-1.6997
1.085	-1.6794
1.400	-2.9418

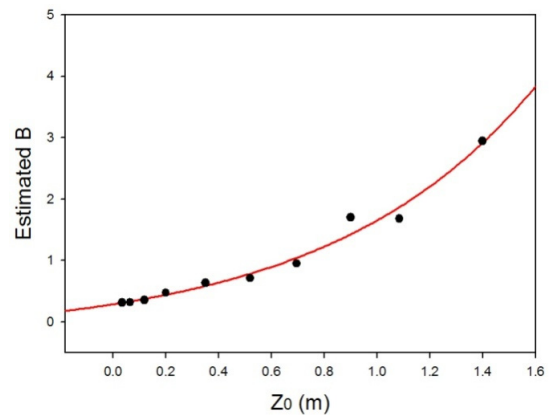


그림 3. 산출된 B 모델을 통하여 각 지표거칠기(z_0)별 산정된 B 계수

민감도 분석을 통해 알 수 있으며 만약 식생의 높이가 풍속계 높이보다 클 경우에는 ra 값에 오차가 발생하며 그 값은 신뢰하지 못하게 된다. 따라서 본연구에서는 Nathalie Sauret et al.(2009)에 의해 제시된 ra*를 사용하였으며 이는 높은 지표거칠기에 맞는 ra를 계산할 수 있다. ra*를 사용하여 다양한 지표거칠기 별 B 계수를 산정할 수 있으며 이를 바탕으로 B 모델을 산출하였다.

4. 결과 및 분석

B 계수는 'ET_a - R_n'와 'T_s - T_a'의 기울기 값으로 산출 가능하며 그 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림 2를 통해 지표거칠기가 높아질수록 B 계수의 편차가 더욱 커짐을 알 수 있으며 각각의 지표거칠기 별 B 계수

를 산출한 표 1을 통해서도 지표거칠기가 커질수록 B 계수가 더 작아짐을 알 수 있다. 지표거칠기는 0.035m(0.012m~0.049m), 0.065m(0.050m~0.096m), 0.120m(0.098m~0.146m), 0.200m(0.149m~0.295m), 0.350m(0.301m~0.440m), 0.520m(0.449m~0.594m),

표 2. Choudhury et al.(1994)에 의해 제안된 Land type 별 Priestley and Taylor 계수 α

Land Type	α
Needleaf forest	1.0
Broadleaf forest	1.08
Shrubland	1.26
Croplands	1.24
Grassland	1.25
Barren land	1.26

표 3. 검증 수행 조건에 맞는 한반도의 16개 지점에 대한 31개 point 자료의 정보와 산출된 실제 증발산량(ETa)과 검증을 위한 Priestley-Taylor 가능 증발산량(ETp)

Point number	Date	Station information	ETa(mm/day)	ETp(mm/day)
1	2009022	longitude 35.73° latitude 126.72°	1.67	1.88
2	2009026	longitude 35.28° latitude 126.48°	2.49	1.31
3	2009055	longitude 37.68° latitude 128.72°	3.27	2.18
4	2009065	longitude 38.15° latitude 127.30°	3.76	2.85
5	2009084	longitude 35.41° latitude 127.33°	6.21	4.58
6	2009117	longitude 36.94° latitude 128.91°	5.78	4.60
7	2009118	longitude 36.49° latitude 128.19°	6.44	6.41
8	2009125	longitude 36.78° latitude 127.12°	6.74	6.81
9	2009126	longitude 35.41° latitude 127.33°	5.75	7.05
10	2009162	longitude 36.78° latitude 126.49°	9.66	9.11
11	2009162	longitude 37.16° latitude 128.19°	9.52	9.01
12	2009162	longitude 35.41° latitude 127.88°	8.86	9.15
13	2009167	longitude 36.36° latitude 128.69°	7.71	7.95
14	2009169	longitude 36.94° latitude 128.91°	10.48	9.23
15	2009182	longitude 35.67° latitude 127.91°	6.27	7.50
16	2009191	longitude 36.94° latitude 128.91°	7.30	7.22
17	2009235	longitude 35.73° latitude 126.72°	4.98	6.19
18	2009235	longitude 36.94° latitude 128.91°	9.56	8.34
19	2009258	longitude 35.41° latitude 127.88°	8.76	6.36
20	2009287	longitude 35.28° latitude 126.48°	4.24	4.86
21	2009293	longitude 36.78° latitude 126.49°	3.59	4.22
22	2009319	longitude 37.68° latitude 128.72°	2.95	2.06
23	2009325	longitude 36.27° latitude 126.92°	2.95	2.29
24	2009325	longitude 35.28° latitude 126.48°	2.22	2.14
25	2009325	longitude 34.63° latitude 126.77°	2.61	2.40
26	2009325	longitude 34.63° latitude 126.77°	2.47	2.04
27	2009353	longitude 35.67° latitude 127.91°	2.24	1.71
28	2009358	longitude 33.39° latitude 126.88°	9.87	1.72
29	2009360	longitude 37.16° latitude 128.19°	3.12	1.55
30	2009362	longitude 34.62° latitude 126.77°	3.30	1.79
31	2009362	longitude 34.69° latitude 126.92°	3.41	1.94

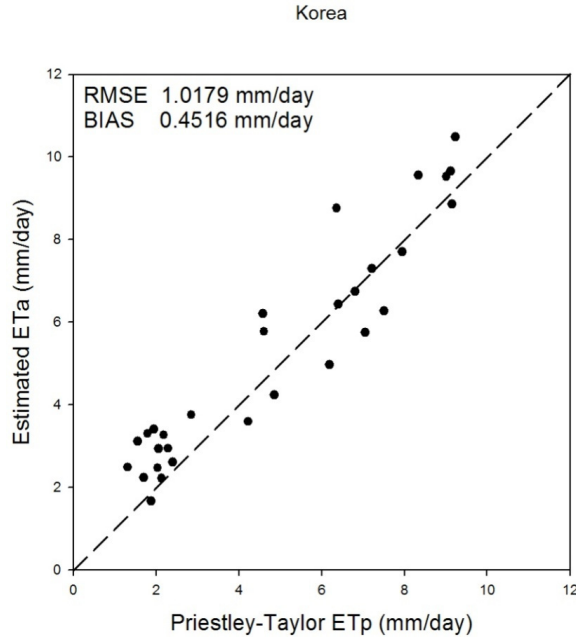


그림 4. 산출된 실제 증발산량 (Estimated ETa)과 Priestley-Taylor 가능 증발산량의 검증

0.695m(0.606m~0.786m), 0.900m(0.802m~0.980m), 1.085m(1.020m~1.197m), 1.400m(1.221m~1.648m)로 서 각 지표거칠기 별 대표하는 B 계수를 바탕으로 B 모델을 산출하였다(식 (4)).

$$B \approx a_1 + a_2 \cdot \exp(a_3 \cdot z_0) \quad (4)$$

여기서 각 계수 $a_1 = -0.2371$, $a_2 = 0.5260$, $a_3 = 1.2786$ 이며 z_0 는 지표거칠기(m)이다. ra^* 를 이용하여 각 지표 거칠기 별 대표하는 B 계수를 바탕으로 산출된 B 모델을 통해 다음과 같은 최종 실제 증발산량 모델을 산출 하였다.

$$ET_a = R_n - \{-0.2371 + 0.5260 - \exp(1.2786 \cdot z_0)\} \cdot (T_s - T_a) \quad (5)$$

본 연구에서는 산출된 실제 증발산량의 검증을 위하여 Priestley-Taylor의 가능 증발산량을 통해 간접 검증을 수행하였으며 검증 방법은 다음과 같다. 식물의 잎에 닿자마자 증발되는 증발산, 즉 순간 증발산량이 가능 증발산량보다 클 경우, 가능 증발산량과 실제 증발산량이 같아질 때가 있는데(Stewart, 1977; Stewart and Thom, 1973) 이를 바탕으로 검증을 수행하였다(식 (6), 식 (7)).

$$ET_a = ET_p, \text{ if } ET_p < ET_i \quad (6)$$

$$ET_i = \alpha \cdot ET_p \quad (7)$$

여기서 ET_a 는 실제 증발산량, ET_p 는 가능 증발산량, ET_i 는 순간 증발산량을 나타낸다. Kouwen(2006)의 연구를 통해 강수 직후에 순간 증발산량이 가능 증발산량보다 크다는 것을 알 수 있으므로 이를 바탕으로 NDVI가 높은 값을 가지며 강수 직후 맑은 날의 조건에서 실제 증발산량과 가능 증발산량을 비교하였다. 지상 관측 강수자료를 바탕으로 강수 직후 맑은 날을 선택하여 Priestley and Taylor(1972)에 의해 제안된 가능 증발산량(식 (8))과 실제 증발산량 검증을 수행하였다.

$$ET = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

여기서 Priestley-Taylor 계수인 α 는 Choudhury et al.(1994)에 의해 제시된 α 값을 결정하여 사용하였다(표 2). 검증은 한반도의 16개 지점에 대한 31개 point 자료를 사용하여 수행하였다(그림 1). 산출된 실제 증발산량과 Priestley-Taylor 가능 증발산량의 검증 결과 R^2 는 0.89, RMSE가 1.0179mm/day, BIAS는 0.4516mm/day의 결과를 보였다(그림 4). 본 연구와 같이 경험적 계수 B를 사용한 연구(Park, 2011)에서는 기

존의 ra 를 통해 실제 증발산량을 산출하였으며 Priestley-Taylor 가능 증발산량과 검증하였을 때 R^2 는 0.63, RMSE는 1.199mm/day의 결과를 보였다. 이를 통해 기존의 ra 를 사용한 경우보다 ra^* 를 사용하였을 때 조금 더 나은 결과를 보임을 알 수 있었으며 본 연구에서는 검증 결과 낮은 RMSE와 0에 가까운 BIAS로 높은 지표거칠기를 잘 고려하여 실제 증발산량이 산출되었음을 알 수 있었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 2009년 한반도를 대상으로 실제 증발산량 산출을 수행하였다. 기존의 지점관측의 한계를 극복하기 위하여 에너지 수지식을 기반으로 한 실제 증발산량 산출에 사용되는 관련 인자를 위성 자료를 사용하여 산출하였다. 또한 본 연구에서는 현열 산출 시 중요한 변수인 공기역학적 저항을 고려하여 높은 지표거칠기에 적합한 B 모델을 개발하였으며 이를 통해 실제 증발산량 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 개발된 모델을 바탕으로 실제 증발산량을 정량적으로 산출하였으며, 한반도를 대상으로 간접 검증을 수행하였다. Priestley and Taylor(1972)가 가능 증발산량을 통한 검증 결과 낮은 RMSE와 0에 가까운 BIAS로 전반적으로 높은 지표거칠기를 고려한 실제 증발산량 산출이 되었음을 알 수 있었다. 증발산량 산출은 많은 연구에서 수행되었지만 지표거칠기가 낮은 지표형태에 대해 제한적이므로 본 연구와 같이 높은 지표거칠기에 해당하는 증발산량 산출에 대한 심도 깊은 연구가 수행되어야 할 것이다. 또한 증발산은 전 지구 기후 시스템, 지표 수분 및 에너지 수지 분포변화 모니터링, 식생 상태 연구, 지표 해석 관련 연구 등 다양한 분야에서 활용 가능하므로 이에 관한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 두 모델을 통한 간접 검증을 수행하였고 직접 검증을 수행하기 위한 자료의 획득이 쉽지 않아 지점 관측 자료를 통한 직접 검증을 수행하지 못하였다. 향후 연구에서는 관측 자료의 획득을 통하여 직접 검증을 수행하여 보다 나은 증발산량 산출에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 “기상지진개발사업(CATER 2006-4016)” 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 염종민, 한경수, 김영섭, 2006, “정규식생지수(NDVI) 산출시 발생하는 노이즈 제거에 관한 연구”, 대한원격탐사학회 2006년도 춘계학술대회 논문집, *대한원격탐사학회*, Vol.9, pp.113-116.
2. Han, K.S., Viau, A.A. and Anctil, F., 2010, “Hourly evapotranspiration derived from NOAA-AVHRR visible and GOES-IMAGER thermal infrared data”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.31, No.11,, pp.2817-2836.
3. Penman, H.L., 1948, “Natural evaporation from open water, bare soil and grass”, *Proc. of the Royal Society of London-Series A*, Vol.193, pp.120-146.
4. Monteith, J.L., 1965, “Evaporation and environment”, *Symposium of the society of experimental biology*, Vol.19, pp.205-224.
5. Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J., 1972, “On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters”, *Monthly weather Review*, Vol.100, pp.81-92.
6. Seguin, B. and Itier, B., 1983, “Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.4, pp.371-383.
7. Vidal, A. and Perrier, A., 1989, “Technical note Analysis of a simplified relation for estimating daily evapotranspiration from satellite thermal IR data”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.10, pp.1327-1337.
8. Jackson, R.D., Reginato, R.J. and IDSO, S.B., 1977, “Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements”, *Water Resources Research*, Vol.13, pp.651-656.
9. Jensen, M.E., 1974, “Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements”, *Irrigation Drain. Div., Am. Soc. Civ. Engineering*, p.227.
10. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998, “Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements”, *FAO Irrigation and Drainage*, p.56.
11. Nathalie, S., Henri, W., Rafal, S., Pierre, H. and Laura, I.N., 2009, “Comparison of annual dry and wet deposition fluxes of selected pesticides in Strasbourg, France”, *Environmental Pollution*, Vol.157, pp.303-312.

12. Kouwen, N., 2006, WATFLOOD/SPL9 User's Manual: Hydrological Model and Flood Forecasting System(Downsview: Environment Canada).
13. Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J. and Daughtry, C.S.T., 1994, "Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations", *Remote Sensing of Environment*, Vol.50, pp.1-17.
14. Stewart, H.B. and Thom, A.S., 1973, "Energy budgets in pine forest", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.99, pp.145-170.
15. Stewart, J. B., 1977, "Evaporation from the wet canopy of a pine forest", *Water Resources Research*, Vol.13, pp.915-921.