인공위성 데이터 기반의 공간 증발산 산정 및 에디 공분산 기법에 의한 플럭스 타워 자료 검증

서찬양* · 한승재* · 이정훈** · 최민하*†

*한양대학교 건설환경공학과, **유량조사사업단

Estimation of Satellite-based Spatial Evapotranspiration and Validation of Fluxtower Measurements by Eddy Covariance Method

Chanyang Sur*, Seungjae Han*, Junghoon Lee** and Minha Choi*†

*Department of Civil engineering, Hanyang University, **Hydrological Survey Center

Abstract : Evapotranspiration (ET) including evaporation from a land surface and transpiration from photosynthesis of vegetation is a sensitive hydrological factor with outer circumstances. Though both direct measurements with an evaporation pan and a lysimeter, and empirical methods using eddy covariance technique and the Bowen ratio have been widely used to observe ET accurately, they have a limitation that the observation can stand for the exact site, not for an area. In this study, remote sensing technique is adopted to compensate the limitation of ground observation using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) multispectral sensor mounted on Terra satellite. We improved to evapotranspiration model based on remote sensing (Mu *et al.*, 2007) and estimated Penman-Monteith evapotranspiration considering regional characteristics of Korea that was using only MODIS product. We validated evapotranspiration of Sulma (SMK)/Cheongmi (CFK) flux tower observation and calculation. The results showed high correlation coefficient as 0.69 and 0.74.

Key Words : Evapotranspiration, Eddy covariance technique, MODIS, Penman-Monteith algorithm, RS-PM, Remote Sensing

요약 : 증발산은 토양 표면에서 일어나는 증발 과정과 식물의 광합성 작용으로 인해 일어나는 증산 작용을 포함하는 수문기상인자로 외부 환경에 민감하게 작용한다. 현재 국내외에서는 이를 정확하게 관측하여 활용하기 위해 증발접시(evaporation pan), 침루계(lysimeter) 등을 이용하여 실측하거나 Eddy covariance technique, Bowen ratio method 등을 이용하여 경험적으로 산정하고 있으나 공간적인 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 Terra 인공위성에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 다중분광 센서를 이용, 원격탐사 기술을 적용함으로써 이러한 지상 관측의 단점을 보완하고자 하였다. 이전 연구들에서 소개가 되었던 원격탐사 기반 증발산 산정 모형을 개선하여 별도의 외부 입력자료 없이 MODIS 위성 이미지 자료만을 이용, 우리나라의 지역적 특성을 반영한 Penman-Monteith 기반 증발산을 산정하였다. 유량조사사업단에서 운영 및 관리하고 있는 설마천/청미천 플럭스 타

위의 증발산 관측치와 MODIS 기반 증발산 산정값과의 비교를 통해 각각 0.69, 0.74의 높은 상관계수를 보여 산정 방법의 적용성을 검증하였다.

1. 서론

전 지구적인 기후변화로 인해 세계 각지에서 태풍, 가뭄 및 집중호우 등 극단적인 이상기상현상이 심화되고 있다(IPCC, 2007). 이러한 이상기상 현상으로 인해 전 세계적으로 물 순환 불균형현상이 심화되고 있으며, 우리나라의 경우 우기인 여름철에 강우가 집중되는 강우의 계절적 편중 현상이 가속화 되고 있다. 이와 더불어 한반도는 국토의 절반 이상이 산림으로 구성되어 있는 지형적 특성으로 인해 수자원의 효율적인 이용이 불가피하며, 이를 위해서는 수문 현상의 정량적인 해석이 필요하다.

특히, 수문 순환에 관련된 여러 인자 중 증발산은 전 지구적 관점에서 대규모의 물을 이동시키는 중요한 요소로 지표, 수면의 물이 공기 중으로 기화하는 증발과 식생의 기공을 통해 개체로 방출되는 증산과정을 통칭하는 인자이다. 이 증발산은 시간적으로 식물의 성장 상태와 기후 등에 따라 달라지며, 공간적으로는 강우의 공간 분포, 토질, 토지피복 등에 민감하게 반응한다. 또한, 지역에 서식하는 식물의 종류와 분포 밀도 등은 증산에 큰 영향을 주며, 이로 인해 총 증발산량에 큰 변화를 준다.

이러한 증발산을 추정하기 위한 대표적인 방법으로 크게 물수지 방법과 에너지 수지 방법이 있다(권효정 외, 2009). 물수지 방법은 강우량과 증발산량, 유출 및 침투 등의 모든 가능한 방향의 수문 성분의 이동에 대한 균형을 이용하는 방법으로 년 단위의 장기간의 증발산량 산정에 적합하다. 이에 반하여 에너지 수지 방법은 유입 및 유출되는 단파복사량(Shortwave radiation, RS)과 장파복사량(Longwave radiation, RL)과의 균형을 이용하여 증발산을 산정하는 방식으로 각 인자에 대한 계산이 가능할 경우 단기간의 증발량 산정에도 적합하다.

에너지 수지 방법을 통하여 증발산을 산정하는 방식으로는 플렉스 타워(Flux tower)를 통한 관측과 인공위성 데이터를 기반으로 한 원격탐사 산정 방법이 있다(정승택 외, 2009). 플렉스 타워를 이용하는 방법으로는 에

디 공분산(eddy covariance) 방법을 기반으로 한 기상학적 인자를 이용함으로써 대기와 지표와의 에너지 및 물질의 교환을 직접적으로 측정하는 방식으로 증발산을 산정한다(이희춘 외, 2004). 국내의 경우 현재 광릉(GDK), 해남(HFK), 설마천(SMK), 청미천(CFK) 유역의 네 개의 플렉스 타워가 설치되어, 광릉, 해남의 플렉스 타워는 2004년부터 2008년까지(정승택 외, 2009), 설마천 플렉스 타워는 2007년부터, 청미천에 위치한 플렉스 타워는 2008년부터 현재까지 관측이 이루어지고 있다. 정승택 외(2009)는 이 중 해남과 광릉의 플렉스 타워를 포함하여 동아시아 9곳의 플렉스 타워 관측 자료로 산정된 증발산을 이용하여 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 다중분광센서 기반의 증발산 추정 알고리즘을 검증하였다. 권효정 외(2009)는 설마천 플렉스 타워를 이용하여 에디 공분산 방법으로 증발산을 정량화 하였으며, 계절적 변동성을 분석하였다. 홍진규 외(2003)는 증발산 산정의 주요 인자인 현열 플렉스의 경우 타워플렉스 관측, 대류 경계층 수지 방법, MM5 중규모 모형, NCAR/NCEP분석 등을 통해 산출하였다. 다만, 플렉스 타워를 이용하여 증발산을 산정하는 경우 설치되어 있는 지점의 기후, 지형적 특성에 큰 변동성을 지니고 있으므로 넓은 지역에 대한 대표성을 가질 수 없다.

이에 반해 인공위성을 사용할 경우 동일한 관측 장비를 통해 넓은 지역에 대하여 균질한 수준의 관측값을 산정할 수 있으므로 공간적인 경향성 분포를 산정하기 용이하다(Choi *et al.*, 2009). 원격탐사를 이용한 방법은 동역학적 저항을 이용한 에너지 수지 방법 이외에도 Penman-Monteith 방법을 이용한 기준 증발산 산정 방법의 두 가지 방법으로 나뉜다. 에너지 수지 방법은 가시광선과 근적외선 영역에서의 지표면 반사율과 열대역에서의 지표면 온도를 이용하여 공기동역학적 저항과 에너지 수지를 통해 증발산을 산정하는 방법이며, Penman-Monteith 모형으로 대표되는 기준 증발산 산정 모형은 원격탐사를 이용하여 얻어진 식생 정보를 이용하여 임관 전도도를 산정, 이를 이용하여 기준 증발산을 산정하는 방법이다(Kalma *et al.*, 2008; Choi *et*

al., 2009).

최민하 외(2011)는 Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus(ETM+)와 Landsat 5 Thematic Mapper(TM) 위성이미지를 이용하여 Mapping EvapoTranspiration with Internalized Calibration (METRIC) 모형을 적용, 경안천 유역의 증발산 지도를 제작하여 계절과 토지피복에 따른 증발산 분포의 특성에 대해 분석하였다.

특히, 36개의 다중 분광 센서를 이용한 MODIS는 장파, 단파 및 순 복사량을 추정하기 위한 각종 기상 인자를 관측함으로써 증발산을 산정하기에 적합하며, 이와 관련된 여러 연구가 진행되었다. Penman-Monteith 모형은 이론적인 물리식을 기반으로 한 방법으로, 특정한 입력변수에 대한 의존성이 낮고 외부 환경 요인에 의한 오차 발생이 적어 널리 쓰인다(Cleugh *et al.* 2007; Mu *et al.* 2007). Cleugh *et al.*(2007)은 MODIS 원격탐사를 기반으로 호주의 상록수림(evergreen forest)과 열대 초원(tropical savanna) 지역에 대한 Penman - Monteith 기준 증발산 산정 방법 적용을 통해 정확한 결과를 얻은 바 있다. Mu *et al.*(2007)은 Cleugh *et al.*(2007)의 MODIS 위성 이미지 기반 증발산 산정 방법을 개선하여 시간 해상도 8일, 공간 해상도 1 km²의 전 지구 규모 공간 증발산을 산정한 바 있다. Mu *et al.*(2007)에 의해 산정된 MODIS 16 Global ET Product는 일정 수준 이상의 신뢰도를 유지하는 증발산 지도를 전지구 규모로 제공한다는 장점이 있지만, 지역 규모 연구 및 적용에 있어서는 각 지역의 다양한 외부 환경 조건을 모두 반영하기 힘들어 정확도가 떨어질 수 있다. 더욱이 모형의 입력 자료로써 활용하는 Global Modeling and Assimilation Office(GMAO) 전 지구 기후 데이터는 지상 관측치보다 낮은 정확도를 가지고 있기 때문에 우리나라의 지형 및 기후 조건에 맞는 증발산 모형을 독자적으로 개발하고 검증하는 것이 무엇보다 중요하다. 또한, 이러한 궁극적인 목적인 원격탐사기반에 의해 산출된 인자를 적용한 증발산의 공간적인 분포를 시행함에 있어서도 역시 검증된 지표 자료의 이용이 선행되어야 한다. 특히, 한반도와 같이 다양한 지형적 특성과 위도별 식생분포를 갖는 지역에서는 각각의 특성에 맞는 적용성 검토 과정이 필수적이며, 지점 자료와 위성 자료의 상호 보완이 요구된다. 하지만, 국내의

플럭스 타워 관측 현황은 이러한 다양한 지형적 특성을 대표하기 부족하며, 이를 이용한 연구 역시 아직 활발하지 못하다. 따라서 본 연구는 설마천과 청미천에서 관측된 기상인자를 이용하여 산정된 증발산(잠열 플럭스) 값과 MODIS 다중분광 센서 기반으로 산정해 낸 증발산을 비교 및 검증할 것이다.

2. 연구 지역 및 관측 자료

1) 연구 지역 및 관측 데이터

본 연구에서는 경기도 파주시 적성면에 위치한 설마천 유역(SMK)과 이천시 장호원읍에 위치한 청미천 유역(CFK)을 대상 유역으로 선정하였다(Fig. 1). 설마천은 북위 37° 55' 6", 동경 126° 57' 25"에 위치하며, 임진강 하구에서 약 46 km 상류에 위치하고 있으며 임진강 제1지류의 지방 2급 하천이다. 설마천 시험 유역의 유역면적은 8.5 km²로 임진강 전체 유역면적의 약 0.2%를 차지하고 있으며, 유로연장 5.8 km, 유로경사 2%, 해발고도 420 m의 전형적인 산지 하천으로 대체로 수지상의 모양을 나타내며, 유역형상은 수엽상이다(Korea Institute of Construction Technology, 2006). 이 유역의 90% 이상이 20~40년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되어 있으며, 얕은 표토로 인해 수분 함양능력이 낮으며, 산지 사면에는 돌과 자갈이 산재해 있다. 설마천 유역은 KoFlux 연구지역인 광릉 지점과 유사한 토지 피복을 갖고며 연평균 온도는 11.5 °C, 연 평균 강우량은 1332 mm로 서로 비슷한 값을 갖는다(Table 1)(권효정 외, 2009).

청미천은 북위 37° 02' 09", 동경 127° 39' 26"에 위치하고 있으며, 여주군에서 남한강으로 유입하는 지방2급 하천으로 유역면적 596.6 km², 유역 평균경사 17.01%, 약 83%의 면적이 산지이며, 해발고도는 310 m인 산지 하천이다. 청미천 유역은 KoFlux 연구지역인 해남 지점과 같은 논 경작지로 구성이 되어 있으며 토성은 사양토가 주를 이루며(허유미와 최민하, 2011), 연 평균 온도는 11.5 °C, 연 평균 강우량은 1107 mm 이다(Table 1).

지표와 대기 사이의 상호작용에 의해 생기는 에너지 플럭스를 직접적으로 관측하기 위해 에디 공분산 기법을 적용하였다. 에디 플럭스는 질량 보존식의 일부로써

Fig. 1. Geographical location at study sites. (a) Seolmacheon b) Cheongmicheon).

Table 1. Site description

Site ID	SMK	CFK
Site name	Seolmacheon Site	Cheongmicheon Farmland Site
Longitude	126° 57' 17"E	127° 39' 10"E
Latitude	37° 56' 20"E	37° 9' 35"N
Altitude	293 m	141 m
Annual temperature	11.5 °C	11.5 °C
Annual precipitation	1332 mm	1107 mm
Landuse	Mixed forest	Rice paddy
Dominant Species	Q. variaabilis, Q. mongolica, Q. serrata, P. koraiensis	Oryza sativa
Soil type	Sandy loam	Silty loam to loam

식생 임관과 대기 사이에서 일어나는 Net Ecosystem Exchange(NEE)를 산정하는 데 쓰인다(Kim *et al.*, 2006). 본 연구에서는 각 플렉스 타워(Fig. 1의 별 표시 지점)에서 2010년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간 30 분 단위로 관측한 플렉스 데이터를 이용하였다.

2) MODIS 다중 분광 센서

본 연구에서는 증발산의 시공간적인 분포를 정확히 파악하기 위해 미 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 및 미 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 제공하

는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 위성 관측 영상을 이용하였다. MODIS 위성 관측 센서는 1일의 시간해상도를 가지며, 인자별로 육상 자료 1 km × 1 km, 대기자료 5 km × 5 km의 안정적인 해상도 정보를 제공함으로써 대기, 해양, 육지에 대한 구름, 에어로졸, 수증기 등의 특성 분석, 대기권의 태양/지구 복사에너지 관측을 통한 지구 온난화 및 기후 변화 감시, 해상과 육상에서의 생물 간의 상호관계 관측 등 다양한 분야에서 유용하게 활용되고 있다(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Table 2. MODIS products (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)

Product Type	Product ID	Dataset
Atmosphere	MOD07_L2	Atmospheric Profiles
Land	MOD11A1	Land Surface Temperature (LST) & Emissivity
	MCD12Q1	Land Cover Type
	MOD13A2	Gridded Vegetation Indices
	MOD15A2	Leaf Area Index (LAI) & Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)
	MCD43B3	Broad-band Surface Reflectance (Surface Albedo)

MODIS 위성 관측 센서는 NASA Earth Observing System(EOS)에 의해 발사된 Terra(1999. 12. 18 발사)와 Aqua(2002. 5. 4 발사) 인공위성에 탑재되어 있으며, 각각 매일 오전 10시 30분경(Descending), 오후 1시 30분경(Ascending)에 적도를 통과한다(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). 705 km 상공에서 태양과 같은 주기를 가지는 MODIS는 36개 밴드를 이용하여 매 1~2일마다 지구 전체 표면을 관측한다. 모든 MODIS Product는 Hierarchical Data Format(HDF) 파일 형태로 이루어져 있으며 필요한 인자를 해당되는 시간에 관측된 HDF 파일로부터 추출하여 이용할 수 있다. 연구에 이용된 MODIS Product를 Table 2에 나타내었다.

3. 연구 방법

1) 이론적 배경

지표면에서의 순복사 에너지는 다음 식을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$R_N = (1 - \alpha) R_{sd} + R_{ld} - R_{lu} \quad (1)$$

여기서, R_N 은 순복사 에너지(W m^{-2}), α 는 알베도, R_{sd} 는 유입 단파 복사 에너지(W m^{-2}), R_{ld} 는 유입 장파 복사 에너지(W m^{-2}), R_{lu} 는 유출 장파 복사 에너지(W m^{-2})이다. 이 중 α 는 미국 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 제공하는 MODIS 육상 자료중 하나인 MCD43 Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF)/Albedo 자료로부터 추출하여 이용할 수 있다. 본 연구에서는 MCD43B3 알베도 자료로부터 Black sky albedo 10번 밴드를 추출하여 반사된 태양 복사 에너지를 계산하였다.

(1) 유입 단파 복사 에너지(Downward Shortwave Radiation)

본 연구에서는 순복사량을 산정하는 산정식의 각 인자를 신뢰성 있는 방법으로 유도함으로써 최종 결과물의 지역적 정확성 및 적용성을 높이고자 하였다. 유입 단파 복사 에너지는 Allen *et al.*(2007a; 2007b)에서 제안된 방법을 이용하여 산정하였다(식 2).

$$R_{sd} = G_{sc} \cos \theta \, d_r \, \tau_{sw} \quad (2)$$

여기서 G_{sc} 는 태양상수(1367 W m^{-2}), θ 는 태양 천정각, d_r 은 지구와 태양 사이의 상대 거리의 제곱의 역수, τ_{sw} 는 광대역 대기 투과율이다. τ_{sw} 는 Allen *et al.*(2005)에 의해 제안된 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\tau_{sw} = 0.35 + 0.627 \exp \left[\frac{-0.00146 P_a}{K_r \cos \theta} - 0.075 \left(\frac{W}{\cos \theta} \right)^{0.4} \right] \quad (3)$$

P_a 는 대기압(kPa), W 는 가능강수량(mm), K_r 는 대기의 투과도를 나타내는 계수이다. K_r 는 일반적으로 구름이나 대기오염 등으로 인해 투과가 잘 되지 않는 경우 0.5를, 맑은 하늘에는 최대값인 1.0을 적용한다.

d_r 는 day of year(DOY)를 이용하여 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos (\text{DOY}(2\pi/365)) \quad (4)$$

(2) 유입 장파 복사 에너지(Downward Longwave Radiation)

신뢰성 있는 유입 장파 복사 에너지(R_{ld})를 산정하면 보다 정확한 R_N 를 산정하는 데 기여할 수 있으며, 궁극적으로 보다 정확한 증발산을 산정할 수 있게 된다(Choi *et al.*, 2008).

R_{ld} 는 일반적으로 Stefan-Boltzmann 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$R_{ld} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (5)$$

여기서 ε_a 는 대기 에너지 방사율, 는 Stefan-Boltzmann 상수($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T_a 는 대기 온도(K)이다. 대기 에너지 방사율은 일반적으로 기온과 실제 증기압(e_a)의 함수로써 구하며, 본 연구에서는 Brutsaert (1975)로부터 제안된 방법을 이용하였다(식 6).

$$\varepsilon_a = 1.24(e_a/T_a)^{0.14} \quad (6)$$

(3) 유출 장파 복사 에너지(Upward Longwave Radiation)

유출 장파 복사량은 지표면에서 반사하여 방출하는 장파 복사량을 의미하며, Stefan-Boltzmann 식을 이용하여 구할 수 있다(식 7).

$$R_{lu} = \varepsilon_s T_s^4 \quad (7)$$

여기서 ε_s 는 광대역 지표 방사율(Broad-band surface emissivity), T_s 는 지표면 온도(K)이다.

2) Eddy Covariance Method

에디 공분산 방법(Eddy Covariance Method)은 직접적으로 생태계와 대기 사이의 에너지와 물, 탄소 등의 연직 방향의 물리적인 이동을 정량화하여 측정하는 방법이다(권효정 외, 2009). 특히, 기존의 방법에 비해 관측지에 영향을 끼치지 않으며, 비교적 넓은 지역에 대한 플럭스를 구할 수 있다. 이 방법은 보존 방정식에 근거하여 연직 방향의 풍속과 측정 대상의 농도의 순간 편차의 공분산을 평균하여 플럭스를 산정한다(박성빈, 2009). 이러한 증발산 산정 플럭스로는 먼저 관측높이 아래 저장된 수증기량인 저류항과 연직 풍속과 수증기 농도의 공분산으로 계산되는 난류 수증기 플럭스, 연직 및 수평적으로 발생하는 농도 차에 대한 이류항으로 이들을 통해 직접적으로 증발산을 산정할 수 있다(김형수, 2010).

3) MODIS 순간 증발산 산정

본 연구에서는 앞선 과정에서 연산된 R_N 분포를 이용하여 Mu *et al.*(2007)에서 소개된 바 있는 MODIS 16 전지구 증발산 산정 모형인 revised RS-PM을 적용, 증발산을 구함으로써 지역 스케일의 증발산 분포를 구하고자 하였다. $1.00^\circ \times 1.25^\circ$ 의 공간 해상도로 이루어져 있는 Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) 전지구 기후 데이터를 적용한 MODIS 16 증발산 산정 모형의 지역 적용성을 향상시키기 위해 0.05°

$\times 0.05^\circ$ 의 공간 해상도를 가지는 MODIS 07 대기 자료를 연구에 적용하였다.

식생의 기공 전도도는 포화 증기압과 실제 증기압의 차인 증기압 부족분(vapor pressure deficit, VPD)이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며, 낮은 온도와 높은 온도에 의해서도 제약을 받는다(Dang *et al.*, 1997; Jarvis, 1976; Kawamitsu *et al.*, 1993; Leuning, 1995; Marsden *et al.*, 1996; Misson *et al.*, 2004; Oren *et al.*, 1999, 2001; Sandford and Jarvis, 1986; Schulze *et al.*, 1994; Xu and Baldocchi, 2002). 일반적으로 높은 온도는 높은 VPD에 반영되기 때문에 최저 온도와 VPD에 의한 제한 요소를 기공 전도도 산정에 반영하여 식(8)과 같이 나타냄으로써 Cleugh *et al.*(2007)로부터 발표된 기존 Remote Sensing based Penman-Monteith(RS-PM) 모형을 개선하고자 하였다.

$$C_s = c_L \times m(T_{min}) \times m(VPD) \quad (8)$$

여기서 C_s 는 기공 전도도, c_L 는 단위 엽면적당 평균 잠재 기공 전도도, $m(T_{min})$ 은 최저 온도에 따른 잠재 기공 전도도를 제한하기 위한 계수, $m(VPD)$ 는 광합성을 억제할 만큼 높은 VPD를 가질 때 잠재 기공 전도도를 제한하기 위한 계수이다. $m(T_{min})$ 과 $m(VPD)$ 는 다음 식을 이용하여 산정되었다.

$$\text{if } T_{min} \geq T_{min,open}, m(T_{min}) = 1.0$$

$$\text{if } T_{min,close} < T_{min} < T_{min,open}, m(T_{min}) = \frac{T_{min} - T_{min,close}}{T_{min,open} - T_{min,close}} \quad (9)$$

$$\text{if } T_{min} \leq T_{min,close}, m(T_{min}) = 0.1$$

$$\text{if } VPD \leq VPD_{open}, m(VPD) = 1.0$$

$$\text{if } VPD_{open} < VPD < VPD_{close}, m(VPD) = \frac{VPD_{close} - VPD}{VPD_{close} - VPD_{open}} \quad (10)$$

$$\text{if } VPD \geq VPD_{close}, m(VPD) = 0.1$$

이렇게 산정된 C_s 에 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)를 곱함으로써 기공 전도도를 임관 전도도(C_C)로 변환할 수 있다(Landsberg and Gower, 1997).

$$C_C = C_s \times LAI \quad (11)$$

Revised RS-PM 알고리즘에서 개선된 또 다른 점은 식생 피복률 산정 방법의 개선이다. 식생의 공간적 분포를 나타내는 지수인 정규식생지수(Normalized

Difference Vegetation Index, NDVI)와 개량식생지수(Enhanced Vegetation Index, EVI)는 식물의 광합성 작용이 시공간적으로 어떻게 이루어지는지를 모니터링하기 위해 개발되었으며, 식(12)와 (13)을 이용하여 산정된다.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (12)$$

$$EVI = G \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue} + L} \quad (13)$$

여기서 ρ_{NIR} , ρ_{red} , ρ_{blue} 는 각각 근적외선 영역(841~876 nm), 적색 영역(620~670 nm), 청색 영역(459~479 nm) 파장대에서의 반사율을 나타내며 G 는 gain factor로써 2.5의 값을 가지는 계수로 이용하였다. C_1 와 C_2 는 청색 밴드를 이용하여 적색 밴드 내부의 에어로졸 영향을 고려하기 위한 보정 계수이다(Huete *et al.*, 2002, 2006).

임관 fraction(F_c)은 최대 범위의 임관으로 이루어져 있는 조건으로 정의되며 0과 1 사이의 값을 가진다. Revised RS-PM 알고리즘에서는 NDVI를 이용한 기존 알고리즘인 Cleugh *et al.* (2007)에 대해 NDVI 대신 EVI를 이용함으로써 개선하고자 하였으며, 개선된 식은 다음과 같다.

$$F_c = \frac{EVI - EVI_{min}}{EVI_{max} - EVI_{min}} \quad (14)$$

여기서 EVI_{min} 과 EVI_{max} 는 각각 LAI가 0과 매우 큰 값을 가질 때의 EVI 값으로, 본 연구에서는 계절, 지형학적 인자를 고려하여 0.05, 0.95의 값을 가지는 계수로써 적용하였다.

앞서 산정된 순복사량은 임관과 토양 표면에 도달하는 양이 각각 다르며, 이를 임관 fraction을 이용하여 선형적으로 두 부분으로 나눌 수 있다.

$$A_c = F_c \times A \quad (15)$$

$$A_{SOIL} = (1 - F_c) \times A \quad (16)$$

A 는 유입된 순복사량, A_c 와 A_{SOIL} 은 각각 임관과 토양 표면에 유입된 순복사량이다.

Revised RS-PM 알고리즘이 선행 알고리즘에 대해 보이는 두드러진 개선점 중 하나가 토양에서 일어나는 증발 또한 고려했다는 점이다(Mu *et al.*, 2007). 기존 RS-PM 알고리즘에 증발량 산정 부분을 추가함으로써

임관 올폐도(canopy cover)가 낮은 지역에서의 증발산을 보다 정확하게 산정하고자 하였다. 증기 운송에 대한 총 동역학적 저항(r_{tot})은 지표면 저항(r_s)과 동역학적 저항(r_v)의 합으로써 구할 수 있다(Van de Griend, 1994).

$$r_{tot} = r_v + r_s \quad (17)$$

r_{tot} 는 아프리카 니제르의 남서부 지역에 위치해 있는 tiger-bush에서 관측된 값(r_{totc})을 기준으로 하여 기온과 기압을 이용하여 보정한다(Wallace and Holwill, 1997; Jones, 1992). r_{totc} 는 107 s m^{-1} 의 값을 가지는 상수로써 모형에 적용되었다.

$$r_{tot} = r_{totc} \times r_{corr} \quad (18)$$

$$r_{corr} = \frac{1.0}{\left(\frac{273.15 + T}{293.15}\right)^{1.75} \times \frac{101300}{P}} \quad 0 \quad (19)$$

r_v 는 식(21)의 r_a 와 유사한 값을 보이기 때문에 r_a 와 같다고 가정하여 적용하고(Van de Griend, 1994), r_a 는 전도열과 복사열에 의한 저항(각각 r_c , r_r)과 병행하여 나타내기 때문에 다음 식을 이용하여 산정한다. 또한 계산된 r_a 값을 이용하여 Penman-Monteith 식(식 24)을 적용, 토양에서 일어난 증발량을 계산할 수 있으며(식 22, 23), 그 결과를 식(24)의 결과에 더함으로써 최종적으로 잠열 플럭스를 계산할 수 있다(Mu *et al.*, 2007).

$$r_r = \frac{\rho \times C_p}{4.0 \times \sigma \times T^3} \quad (20)$$

$$r_a = \frac{r_c \times r_r}{r_c + r_r} \quad (21)$$

$$\lambda E_{SOIL.POT} = \frac{\lambda A_{SOIL} + \rho C_p (e_{sat} - e)/r_a}{s + \gamma \times \frac{r_{tot}}{r_a}} \quad (22)$$

$$\lambda E_{SOIL} = \lambda E_{SOIL.POT} \times \left(\frac{RH}{100}\right)^{(e_{sat} - e)/100} \quad (23)$$

$$\lambda E = \frac{\Delta A_c + \rho C_p (e_{sat} - e)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} \quad (24)$$

여기서 λ 는 잠재 기화열(J kg^{-1}), λE 는 잠열 플럭스(W m^{-2}), e_{sat} 는 포화증기압(Pa), e 는 실제증기압(Pa), ρ 는 공기의 밀도(kg m^{-3}), C_p 는 공기의 비열($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), r_a 는 공기동역학적 저항(s m^{-1}), γ 는 습도계 상수(Pa K^{-1}), s 는 온도에 따른 포화 증기압 곡선의 기울기(Pa K^{-1})이다. 산정된 잠열 플럭스 값은 MODIS 12 Land cover

Product에서 International Global Biosphere Programme(IGBP)로 분류한 17가지의 토지 피복 분류 값으로 세분화하여 산정할 수 있다.

4) 증발산 보정 기법

MODIS 기반의 증발산과 플럭스 타워에서 관측된 증발산을 비교 검증하는 과정에서 발생할 수 있는 위성 기반 증발산의 과다/과소 추정되는 현상을 보정하기 위해 본 연구에서는 Bowen ratio와 residual 보정 기법을 적용하였다.

에너지 보존 법칙에 의해 표현되는 지표근처의 에너지 수지에 관한 식은 다음과 같다.

$$R_N - G = H + LE \quad (25)$$

여기에서 R_n 은 순 복사에너지, G 는 토양열 플럭스(Soil heat flux), LE 는 잠열 플럭스(Latent heat

flux), H 는 현열 플럭스(Sensible heat flux)이다.

Bowen ratio란 잠열플럭스와 현열 플럭스간의 비($\frac{H}{LE}$)로 정의되며 이를 식(25)에 도입하여 잠열 플럭스(LE)를 새롭게 유도할 수 있다.

$$LE = \frac{R_N - G}{1 + B} \quad (26)$$

이론적으로는 식(25)의 양변의 변수의 합이 같아야 균형적인 에너지 수지를 이루지만 플럭스 타워의 관측 값은 좌변 항의 값($R_N - G$)이 과다 산정되는 경향을 보인다. 이에 식(26)을 활용하여 잠열 플럭스를 새롭게 보정하는 방법을 적용한다(Twin *et al.*, 2000).

residual 보정 기법은 식(25)에서 우변의 잠열 플럭스만 남기고 다른 항들을 좌변으로 이항시켜 계산하는 방법으로 단순히 잠열 플럭스 값과 나머지 순 복사에너지, 현열, 토양열 플럭스의 차이를 비교하여 보정하는

(a) SMK

(b) CFK

Fig. 2. Time series of Latent Heat Flux(LE_Est: Estimated LE, LE_BR: corrected by Bowen ratio, LE_res: corrected by residual method).

Fig. 3. Spatial distribution of evapotranspiration (a) 2010. 01. 14 11:00, b) 2010. 08. 23 11:50).

방법이다.

4. 결과 및 토의

2010년 1월 1일부터 12월 31일에 해당하는 설마천/청미천 플럭스 타워에서 관측된 기상인자들을 이용하여 잠열 플럭스를 산정하였고, 이를 시계열로 표현하여 시간에 따른 변동성을 파악하였다(Fig. 2). Fig. 2는 플럭스 타워에서 측정된 잠열 플럭스 및 Bowen ratio 기법

과 Residual 방법을 써서 보정한 잠열 플럭스에 대한 2010년에 해당하는 결과로써 시간에 따른 변동성을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 2010년 1월 1일부터 12월 31일에 해당하는 MODIS 육상 및 대기 자료를 이용하여 공간해상도 1 km 중발산 분포를 산정하여 공간적인 분포를 확인하고 변동성을 파악하였다. 잠열 플럭스의 공간 분포는 겨울에는 $100\sim200 \text{ W m}^{-2}$, 여름에는 $400\sim700 \text{ W m}^{-2}$ 의 범위를 가진다.

Fig. 4와 5는 설마천과 청미천 플럭스 타워에서 측정

Fig. 4. Relationship between MODIS-based evapotranspiration(Latent Heat Flux) and fluxtower measurement evapotranspiration (SMK) (a) Latent Heat Flux, (b) Bowen ratio correction, (c) residual correction).

Fig. 4. Continued

Fig. 5. Relationship between MODIS-based Evapotranspiration(Latent Heat Flux) and fluxtower measurement Evapotranspiration CFK (a) Latent heat flux, (b) Bowen ratio correction, (c) residual correction).

Table 3. Statistics comparing observed and estimated evapotranspiration

		Min. Value (W m ⁻²)	Max. Value (W m ⁻²)	Mean Value (W m ⁻²)	σ	CV	Bias (MODIS-Fluxtower LE)	RMSE
SMK	MODIS LE	0.27	529.66	167.88	151.02	0.90	70.67	148.25
	Fluxtower LE	0.78	334.97	97.21	80.47	0.83		
	Fluxtower BR	10.03	627.39	242.68	134.28	0.55		
	Fluxtower res	84.46	564.23	330.98	134.60	0.41		
CFK	MODIS LE	2.81	468.94	108.09	116.71	1.16	-125.36	155.10
	Fluxtower LE	7.36	409.38	157.47	106.10	0.67		
	Fluxtower BR	53.48	439.41	215.24	120.60	0.56		
	Fluxtower res	37.44	529.45	271.75	132.71	0.49		

된 잠열 플럭스(증발산)와 MODIS에서 산정된 증발산의 상관 관계를 나타내는 그래프이다. 첫 번째 상관 그래프는 기본적인 에너지 수지 기반 식($R_N - G = H + LE$)으로 산정된 증발산으로써 설마천에서는 MODIS에 의한 결과값이 과다 산정, 청미천에서는 과소 산정되는 경향을 보이고, 상관 계수는 설마천은 0.49, 청미천은 0.65의 결과값을 갖는다. 연구 결과의 검증에 위한 기본 통계 분석을 통해 증발산 산정치의 오차를 확인하였다. 연구지역 관측치에 대한 추정치의 bias와 Root Mean Square Error(RMSE)는 70.67, 148.25 W m⁻²(설마천), -125.36, 155.10 W m⁻²(청미천)이다(Table 3). 오차의 원인은 Twine *et al.*, (2000)에 의해 논의되었던 관측치의 에너지 수지식 적용에 따르는 문제에서 기인한다. 여러 선행 연구(Goulden *et al.*, 1998; Twine *et al.*, 2000)에서 언급된 바로는 에디 공분산 기법을 이용하여 에너지 플럭스를 관측할 때 에너지 수지식($R_N - G = H + LE$)의 좌향이 되는 순복사 에너지 플럭스(R_N)와 토양열 에너지 플럭스(G)의 차와 우향이 되는 현열 에너지 플럭스(H)와 잠열 에너지 플럭스(LE)의 합이 서로 일치하지 않는다. 일반적으로 좌향이 우향보다 큰 값을 가지기 때문에 이에 대한 보정이 필요하다(Sumner and Jacobs, 2005). 이러한 과다/과소 추정되는 증발산을 보정하기 위하여 Bowen ratio 기법을 적용하여 증발산 값을 재산정하였고, 이에 대한 검증 결과는 Fig. 4와 5의(b)이다. 또 다른 보정기법으로써 Residual 방법을 적용하였고, 이는 Fig. 4와 5의(c)에서 확인 할 수 있다. 이처럼 다양한 방법으로 산정된 증발산을 비교 검증해 보았을 때, 플럭스의 흐름을 유연하게 파악하기 용이한 청미천 유역에서는 이전 연구들에서와 마찬가지로

Bowen ratio 기법을 적용하여 산정된 증발산 값이 적용성이 가장 높게 나왔음을 확인할 수 있다. Bowen ratio 기법을 적용하였을 경우 상관 계수는 설마천은 0.44, 청미천은 0.71의 결과값을 갖고, Residual 방법을 적용하였을 때에는 설마천 0.69, 청미천은 0.74의 상관 계수를 갖는다. 이처럼 플럭스 에너지의 흐름을 측정하고 이를 검증하는 연구는 국내외에서 활발히 진행이 되어 왔다. Mu *et al.* (2007)에서는 미국 19개 플럭스 타워 지점을 대상으로 검증한 결과가 본 연구에서의 청미천 지점에서의 결과와 유사한 결과를 보여준다. 19개 지점 중 10개 지점이 0.80 이상의 상관계수를 가졌고 19개 지점의 상관계수 평균값이 0.72으로써 지역적 적용성이 높다고 볼 수 있다. 특히 동일한 연구지역을 대상으로 2004~2006년 MODIS 이미지 데이터를 이용한 Jang *et al.* (2009)의 광릉/해남 관측 지점 플럭스 관측치-MODIS 추정치 상관계수 0.77, 0.64에 대해 개선된 결과를 보여줌으로써 본 연구에 적용된 산정 방법의 높은 정확성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Penman-Monteith 방법에 기초한 원격탐사 기반 증발산 산정 모형인 RS-PM 방법을 개선하여 우리나라의 지역적 특성을 반영한 증발산의 공간 분포를 산정하였다. 별도의 외부 입력자료 없이 MODIS 위성 이미지 자료만을 증발산 산정에 적용함으로써 입력자료의 획득 및 처리 방법을 개선하였고, 이렇게 얻어진 결과를 설마천과 청미천 플럭스 타워에서 관

측한 잠열 에너지 플럭스(증발산)와 비교 검증하였다. 증발산 비교 검증을 통하여 설마천에서는 0.49, 청미천은 0.65의 상관 계수를 가지며, Bowen ratio 기법을 적용하였을 경우 상관 계수는 설마천은 0.44, 청미천은 0.71, Residual 방법을 적용하였을 때에는 설마천 0.69, 청미천은 0.74의 상관 계수를 갖는다. 이를 통해 증발산 산정에 있어 보정 기법에 필요성을 확인할 수 있었으며, 증발산 산정 방법의 지역적 적용성과 정확성을 확인할 수 있다. 다소 과다 산정된 MODIS 증발산과 이에 따른 bias, RMSE는 부분적으로 에너지 수지식을 만족하지 못하는 에디 공분산 관측치에서 기인할 수 있다. 설마천은 광릉 플럭스 타워 지점과 유사한 지형학적 요인 및 토지이용을 나타내어 플럭스 산정에 있어 다소 오차가 발생을 하고 청미천 유역은 해남 플럭스 타워 지점에서의 결과 값과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 에너지 수지 문제의 보완과 증발산 산정 방법의 개선을 통해 보다 정확한 원격탐사 기반 증발산 관측이 이루어질 것이다.

사 사

본 연구는 유량조사사업단의 “인공위성자료를 이용한 증발산 및 토양수분의 공간적 mapping 작성 기반 구축 및 증발산량 산정 품질관리” 과제와 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(0002516)을 받아 수행된 것 입니다.

참고문헌

- MODIS website(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)
- NASA, 1999, The Earth Science Enterprise website (<http://www.earth.nasa.gov/>)
- United States Geological Survey(USGS) website (<http://www.usgs.gov/>)
- 권효정, 이정훈, 이연길, 이진원, 정성원, 김준, 2009. 설마천 유역의 혼효림에서 관측된 증발산의 계절변화, 한국농림기상학회지, 11(1): 39-47.
- 김형수, 2010. 설마천 유역의 증발산량 산정, 인하대학교.
- 박성빈, 2009. 복사 결합된 Penman-Moneith 복합방정식에 근거한 한반도 산림과 농경지의 증발산에 관한 이해. 연세대학교.
- 이희춘, 이방용, 김준, 심재설, 2004. 이어도 해양과학기지에서 에디 공분산 방법을 이용한 플럭스 관측, *Ocean and Polar Research*, 26(2): 145-154.
- 정승택, 장근창, 강신규, 김준, H. Kondo, M. Gamo, J. Asanuma, N. Saigusa, S. Wang, S. Han, 2009. 동아시아 지역의 플럭스 타워 관측지에 대한 MODIS 위성영상 기반의 증발산 평가, 한국농림기상학회지, 11(4): 174-184.
- 최민하, 황교택, 김태웅, 2011. Landsat 인공위성 이미지를 이용한 경안천 유역 증발산의 생장기와 휴면기 분포 특성 분석, 한국토목학회논문집, 31(1B): 29-36.
- 허유미, 최민하, 2011. 해남 플럭스 타워 지점에서의 Advanced Microwave Scanning Radiometer E 토양수분자료의 검증, 대한원격탐사학회지, 27(2): 131-140.
- 홍진규, 이희춘, 김준, 김백조, 조천호, 이성주, 2003. FK KoFlux 관측지에서의 지역 규모 열 플럭스의 추정: 타워 관측에서 MM5 중규모 모형까지, 한국농림기상학회지, 5(2): 138-149.
- Allen, R.G., I.A. Walter, R.L. Elliott, T.A. Howell, D. Itenfis, M.E. Jensen, and R.L. Snyder, 2005. *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation*, American Society of Civil Engineers, Reston, V.A.
- Allen, R.G., M. Tasumi, and R. Trezza, 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers, 133(4): 380-394.
- Allen, R.G., M. Tasumi, A. Morse, R. Trezza, J.L. Wright, W. Bastiaanssen, W. Kramber, I. Lorite, and C.W. Robison, 2007b. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-applications, *Journal of*

- Irrigation and Drainage Engineering, *American Society of Civil Engineers*, 133(4): 395-406.
- Brutsaert, W., 1975. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies, *Water Resources Research*, 11: 742-744.
- Choi, M., J.M. Jacobs, and W.P. Kustas, 2008. Assessment of clear and cloudy sky parameterizations for daily downwelling longwave radiation over different land surfaces in Florida, USA, *Geophysical Research Letters*, 35.
- Choi, M., W.P. Kustas, M.C. Anderson, R.G. Allen, F. Li, and J.H. Kjaersgaard, 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(12): 2082-2097.
- Cleugh, H.A., R. Leuning, Q. Mu, and S.W. Running, 2007. Regional evaporation estimators from flux tower and MODIS satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 106: 285-304.
- Dang, Q.L., H.A. Margolis, M.R. Coyea, M. Sy, and G.J. Collatz, 1997. Regulation of branch-level gas exchange of boreal trees: Roles of shoot water potential and vapor pressure difference, *Tree Physiology*, 17: 521-535.
- Goulden, M.L., S.C. Wofsy, J.W. Harden, S.E. Trumbore, P.M. Crill, S.T. Gower, T. Fries, B.C. Daube, S.M. Fan, D.J. Sutton, A. Bazzaz, and J.W. Munger, 1998. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw, *Science*, 279: 214-217.
- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E.P. Rodriguez, X. Gao, and L.G. Ferreira, 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 83: 195-213.
- Huete, A.R., K. Didan, Y.E. Shimabukuro, P. Ratana, S.R. Saleska, L.R. Huttyra, W. Yang, R.R. Nemani, and R. Myneni, 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season, *Geophysical Research Letters*, 33.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis, Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 996.
- Jang, K., S. Kang, H. Kim, and H. Kwon, 2009. Evaluation of shortwave irradiance and evapotranspiration derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS), *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 45: 233-246.
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos, Trans. R. Soc. London*, 273: 593-610.
- Jones, H.G., 1992. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*.
- Karma, J.D., T.R. McVicar, and M.F. McCabe, 2008. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data, *Surveys in Geophysics*, 29: 421-469.
- Kawamitsu, Y., S. Yoda, and W. Agata, 1993. Humidity pretreatment affects the responses of stomata and CO2 assimilation to vapor pressure difference in C3 and C4 plants, *Plant and Cell Physiology*, 34: 113-119.
- Kim, J., D. Lee, J. Hong, S. Kang, S.J. Kim, S.K. Moon, J.H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, and B.L. Lee, 2006. HydroKorea and CarboKorea: Cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea, *Ecological Research*, 21: 881-889.

- Korea Institute of Construction Technology, 2006. *Operation and research on the hydrological characteristics of the experimental catchment*. Korea Institute of Construction Technology 2006-062, 182.
- Landsberg, J.J. and S.T. Gower, 1997. *Applications of Physiological Ecology to Forest Management*. San Diego, CA: Academic Press.
- Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants, *Plant, Cell and Environment*, 18: 339-355.
- Marsden, B.J., V.J. Liefers, and J.J. Zwiazek, 1996. The effect of humidity on photosynthesis and water relations of white spruce seedlings during the early establishment phase, *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 1015-1021.
- Misson, L., J.A. Panek, and A.H. Goldstein, 2004. A comparison of three approaches to modeling leaf gas exchange in annually drought-stressed ponderosa pine forests, *Tree Physiology*, 24: 529-541.
- Mu, Q., F.A. Heinsch, M. Zaho, and S.W. Running, 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data, *Remote Sensing of Environment*, 111: 519-536.
- Oren, R., J.S. Sperry, G.G. Katul, D.E. Pataki, B.E. Ewers, N. Phillips, and K.V.R. Schafer, 1999. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit, *Plant, Cell and Environment*, 22: 1515-1526.
- Sandford, A.P., and P.G. Jarvis, 1986. Stomatal responses to humidity in selected conifers, *Tree Physiology*, 2: 89-103.
- Schulze, E.D., F.M. Kelliher, C. Korner, J. Lloyd, and R. Leuning, 1994. Relationships among maximum stomatal conductance, ecosystem surface conductance, carbon assimilation rate, and plant nitrogen nutrition: A global ecology scaling exercise, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 25: 629-660.
- Sumner, D.M. and J.M. Jacobs, 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration, *Journal of Hydrology*, 308:81-104.
- Twine, T.E., W.P. Kustas, J.M. Norman, D.R. Cook, P.R. Houser, T.P. Meyers, J.H. Prueger, P.J. Starks, and M.L. Wesely, 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over grassland, *Agricultural Forest and Meteorology*, 103: 279-300.
- Van De Griend, A.A. and M. Owe, 1994. Bare soil surface resistance to evaporation by vapor diffusion under semiarid conditions, *Water Resources Research*, 30: 181-188.
- Wallace J.S. and C.J. Holwill, 1997. Soil evaporation from tiger-bush in south-west Niger, *Journal of Hydrology*, 188-189: 443-452.
- Xu, L. and D. Baldocchi, 2002. Seasonal variations in Carbon, water and energy fluxes in an Oak/Grass Savanna and in Photosynthetic Capacity of Oak Leaf in California, *American Geophysical Union*, Fall Meeting 2002.